



压电与声光

PIEZOELECTRICS & ACOUSTOOPTICS

6

2020年 第42卷

- 微声电子技术与应用
- 微声电子材料技术与应用
- 微声传感器系统与应用
- 微声电子前沿技术
- 惯性技术与应用
- 微波声学技术与应用

ISSN 1004-2474



9 771004 247203

1 2>

目 次

相控阵聚焦超声控制系统的设计	王 欢, 张 清, 周红生, 潘海林, 刘逍逸(735)
静电场对压电薄膜中声表面波传播的影响	刘智荣, 谢立强, 朱 敏, 包文歧(739)
基于扇形基片集成波导的三频带通滤波器设计	张 胜, 刘 硕, 谢振江(743)
声表面波扭矩检测系统的分段环状天线设计	熊志强, 陈智军, 孙 聪, 朱卫俊, 郭佳佳(747)
熔覆层厚度对相控阵表面波聚焦特性的影响	周永立, 周 刚, 胡宏伟, 刘芝平(752)
宽带声光器件声场仿真研究	吴中超, 唐 诗, 吴 畏, 高维松, 朱 吉, 王智林(757)
高基频高机电耦合系数晶体滤波器	彭胜春, 赵瑞星, 阳 皓, 邱泽林, 李亚飞, 温桎茹, 唐 平, 董 姝(761)
基于分布式光纤传感的防热结构损伤识别研究	柳敏静, 夏梓旭, 李建乐, 武湛君, 高东岳(765)
单偏振光纤声光调制器	吴 畏, 唐 诗, 王智林, 令狐梅傲, 朱 吉, 傅礼鹏(769)
压电分流声子晶体杆带隙调控研究	张亚茹, 郭 辉, 袁 涛, 孙 裴, 王岩松, 程 乾(772)
悬臂式压电能量采集器模型修正	郭 丽, 周星德, 杨 菁(777)
基于 Φ -OTDR 的光纤准分布式氢泄漏监测	李树东, 苏 阳, 何光层, 朱珏佩, 彭文英, 宫 贺, 杨永济, 巫涛江, 吴德操(782)
光纤布喇格光栅的低温传感特性研究	李博文, 刘颖刚, 宋小亚, 傅海威, 贾振安, 高 宏(787)
光致发光发热光频利用光纤研究	靳 越, 巫涛江, 李玉洁, 吴德操(791)
基于光纤光栅传感网络的电梯健康状态监测系统	巫涛江, 余晓毅, 张春娟, 尹劲松, 石胜辉(796)
压电惯性驱动器理论分析与应用测试	田晓超, 王海刚, 王 虎, 孙禹泽, 朱金志, 王志聪, 杨志刚(800)
一种新型 Ce:GAGG 闪烁探测器性能研究	王 璐, 王 强, 屈菁菁, 董鸿林, 方承丽, 丁雨潼(806)
SnO_2 压敏陶瓷掺杂 MnO_2 的制备和性能研究	梁温馨, 赵洪峰, 康加爽, 王 昊, 周远翔, 谢清云(810)
$\text{LiF}/\text{Li}_2\text{CO}_3$ 对 PZT 陶瓷低温烧结及压电性能的影响	赵世言, 胡望峰(814)
Nb^{5+} 掺杂对 $(\text{Ca}_{0.97}\text{Ba}_{0.03})\text{Cu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ 陶瓷结构与	胡建东, 钟 鑫, 闵 亮, 刘 勇, 顾钧杰, 胡涛麟, 常想乐, 张 晨(820)
螺旋电极压电扭转驱动器的设计与有限元分析	郭全圆, 刘永刚, 曾奥柯, 闫鹏飞(825)
盆架形压电振子同型模态驱动平面电机研究	王哲逸, 贺红林, 方志敏, 吴兴强(831)
集成铌酸锂光子器件技术的研究进展	张 涛, 何 杰, 胡少勤, 许 昕, 张玉蕾(837)
基于区间二型 T-S 模糊系统的压电迟滞特性建模	陈圣鑫, 赵新龙, 苏 强, 苏良才(843)
基于 SINS/RTK 的动平台起降无人机导航系统研制	李星海, 闫志安, 徐 亮, 许常燕, 李宝林, 龚 巧(848)
基于 LABVIEW 的 MIMU 24 项误差参数的快速标定方法	刘志伟, 崔 敏, 张 鹏, 徐文武(854)
基于非完美声学黑洞的压电能量收集系统	汪 恒, 唐荣江, 郑伟光, 文雁声(859)
基于 LN/LT-POI 多层结构的 SAW 器件发展	何 杰, 马晋毅, 胡少勤, 许 昕(864)
重力场对半球谐振陀螺性能的影响	方仲祺, 方海斌, 雷 霆, 谭品恒, 韩世川(871)
宽温域压电超声换能器研究进展	王国良, 刘学良, 于法鹏, 赵 显(875)
用于精确定向的低噪声半球陀螺设计	方海斌, 韩世川, 彭 凯, 雷 霆, 周 闯(884)

相控阵聚焦超声控制系统的设计

王欢¹, 张清², 周红生¹, 潘海林², 刘逍逸¹

(1. 中国科学院声学研究所东海研究站, 上海 201815; 2. 华东师范大学软件工程学院 国家可信嵌入式软件工程技术研究中心, 上海 200062)

摘要:低强度聚焦超声治疗技术是当前超声治疗领域的研究热点, 应用场景不同对于超声系统的参数和性能要求也具有差异化, 相控阵技术的引入为解决聚焦声场精确控制带来了新的思路。现有相控阵聚焦超声控制系统的输出参数相对固定, 频率和功率可调范围窄, 且支持换能器阵列通道的规模较小。该文设计了一种基于现场可编程逻辑门阵列(FPGA)的256通道的相控阵超声控制系统。实验结果表明, 该系统实现频率1~3 MHz可调, 输出电压峰-峰值 ± 100 V连续可调, 相位延时精度为5 ns, 可驱动不同阵元数的相控阵探头, 从而为超声治疗技术的研究提供多元化激励实施方案。

关键词:256通道; 低强度聚焦超声; 超声控制系统; 相控阵; 超声治疗

中图分类号:TN384 **文献标志码:**A **DOI:**10.11977/j.issn.1004-2474.2020.06.001

Design of Phased Array Focused Ultrasound Control System

WANG Huan¹, ZHANG Qing², ZHOU Hongsheng¹, PAN Hailin², LIU Xiaoyi¹

(1. Shanghai Acoustics Laboratory, Chinese Academy of Science, Shanghai 201815, China; 2. National Trusted Embedded Software Engineering Technology Research Center, Software Engineering Institute, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: The low intensity focused ultrasound treatment technology is a research hotspot in the field of ultrasound treatment. Different application scenarios have different requirements for parameters and performance of the ultrasound system, while the introduction of phased array technology brings new ideas to solve the problem of accurate control of the focused sound field. The output parameters of the existing phased array focused ultrasound control system are relatively fixed, the adjustable range of frequency and power is narrow, and the scale of supporting the transducer array channel is small. This paper presents a 256 channels phased array ultrasound control system based on FPGA. The experimental results show that the frequency of the system can be adjusted from 1 MHz to 3 MHz, the peak to peak value of the voltage is continuously adjustable within ± 100 V, and the control precision of phase controlled delay is 5 ns. It can drive phased array probes with different array elements, so as to provide diversified incentive schemes for the research of ultrasonic therapy technology.

Key words: 256 channels; low intensity focused ultrasound; ultrasound control system; phased array; ultrasound therapy

0 引言

低强度聚焦超声治疗技术是当前超声治疗领域的研究热点, 研究表明, 低强度聚焦超声具有促进血管新生、神经损伤再生、加速骨骼愈合、改善男性勃起功能障碍、突破血脑屏障及治疗脑神经疾病等作用^[1-5]。低强度聚焦超声作用对象不同, 对聚焦超声的要求也不同, 传统的物理聚焦域是以焦点为中心的一个很小的类椭球区域, 焦域模式固定, 聚焦的深度、广度、角度都不能随意调节, 对于神经调控、脑

刺激及血管再生等需要精准控制的应用难以胜任, 相控阵技术的引入为解决聚焦声场精确控制带来了新的思路^[6]。

相控阵相位控制和驱动技术是超声治疗技术得以临床应用的关键技术之一, 不同的应用场景对于超声系统的性能参数有着不同的技术要求。目前, 相控阵相位控制和驱动技术大部分采用分立式电子仪器组合来实现简易的超声激励^[7], 通常实验搭建耗时, 效率低, 无法满足特殊激励序列要求。另一

收稿日期: 2020-11-03

基金项目: 中国科学院声学研究所“青年英才计划”基金资助项目(QNYC201828)

作者简介: 王欢(1984-), 女, 山东菏泽人, 助理研究员, 硕士, 主要从事生物医学超声的研究。通信作者: 刘逍逸(1993-), 男, 工程师, 主要从事相控阵超声的研究。

方面,部分已经应用的相控阵聚焦超声控制系统通常具有输出参数相对固定,频率、功率可调范围窄,且支持换能器阵列通道尚处于一个较小的规模,不利于多元化激励方案的实现^[8-9],在一定程度上阻碍了超声治疗技术在不同领域的深入应用。

本文设计了一种基于现场可编程逻辑门阵列(FPGA)的256通道的相控阵聚焦超声控制系统,实现频率在1~3 MHz可调,输出电压峰-峰值在±100 V连续可调,相位延时精度为5 ns,可驱动不同阵元数的相控阵探头,满足相控阵聚焦超声差异化研究要求。

1 控阵延时聚焦原理

超声相控阵由若干个阵元按照一定的规律组合而成,每个阵元按照预先设定好的发射顺序,间隔一定时间依次发射声波,使各阵元发出的声波能同时到达聚焦位置。根据惠更斯原理,各阵元发射的超声波束在空间各点叠加合成,在聚焦位置处声压达到最大值,从而实现声场聚焦或声束的偏转^[10]。

对于由 N 个阵元组成的超声相控阵,设第 i 个阵元在空间某点处的声压为 p_i ,则该点处的总声压为各阵元在该点处声压的总和^[10],即

$$p = \sum_{i=1}^N p_i \quad (1)$$

图1为二维相控面阵示意图。假定面阵有 N 个阵元,第 i 个阵元中心坐标为 $(x_i, y_i, 0)$,焦点为 $F(x, y, z)$,则阵元 i 到焦点 F 的声波传输时间 t_i 为

$$t_i = \frac{\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + z^2}}{c} \quad (2)$$

$i = 1, 2, 3, \dots, N$

式中 c 为超声在介质中的传播速度。

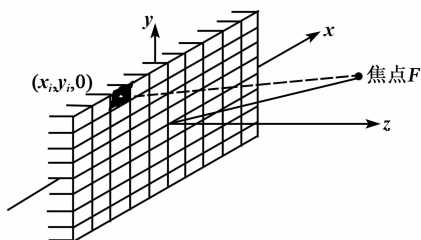


图1 二维相控阵

相控聚焦要求各阵元发射声波的信号同时到达焦点 F 处,因此,各阵元的信号发射延迟时间为

$$\Delta t_i = \max(t_i) - t_i \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (3)$$

时间延迟控制可认为是相控阵技术的核心。通过对单个阵元相对应的通道进行单独的激励控制,使各阵元所激励出的超声波相位存在一定的相位差,然后根据波的叠加和干涉原理,这些超声波将在空间某处形成聚焦。

2 超声控制系统设计

基于FPGA的超声相控阵发射系统的设计思想是:利用FPGA丰富的I/O引脚资源和高速计数功能,实现换能器阵列发射波束的聚焦深度控制和自动偏转角度控制。

本文研制的超声相控阵发射系统由PC机、基于MCU的通讯和控制模块、基于FPGA的发射波束形成模块、电源管理模块和驱动模块组成。其中FPGA作为控制系统的主控单元,承载着相控阵发射的延时控制,用于产生256路不同延时波形信号,波形信号经过功率放大后激励相控聚焦超声换能器。具体过程如下:通过PC机控制软件输入各个阵元的延时控制指令,经通讯控制模块发送至FPGA, FPGA控制I/O端口输出基于基础波形的延时可调($n \times$ 步长,其中 n 为单位延时数量)控制信号,该控制信号控制驱动模块的时序和频率,经功率放大后最终激励相控阵阵列。系统架构如图2所示。

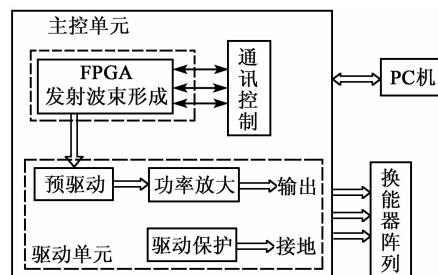


图2 超声相控阵控制系统框图

2.1 FPGA主控模块设计

主控单元采用STM32+FPGA的组合方式,由STM32F4通过串口与上位机通信获得控制指令并将其发送给FPGA, FPGA控制256路驱动信号的频率和相位,可输出频率为1~3 MHz,相位分辨率为5 ns。FPGA采用Alter公司的EP4CE75F23I7器件。其中STM32F4是基于ARM-Cortex™-M4架构的微控制器,内核架构先进、主频可达168 MHz, ART技术使程序零等待执行,执行效率高,具有较高的运算能力和数据处理能力。EP4CE75F23I7具有75408逻辑单元和292个可用I/O引脚。该

系统采样 50 MHz 的系统时钟,通过锁相环将频率升高输出至 200 MHz。200 MHz 频率的信号周期为 5 ns,所以本系统的延时精度为 5 ns。具体步骤如下:

1) 信号相位由相位累加器控制,相位累加器通过控制不同输出信号的启动时间差达到控制相位的目的。

2) 各通道的输出频率由频率控制器控制,频率控制器控制各输出通道的信号周期。

3) 信号发生计数器是将相位累加器和频率控制器的参数相结合,产生所需波形信号,如图 3 所示。

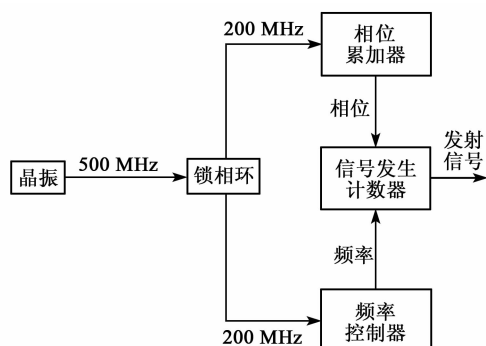


图3 时钟分频延时输出信号图

2.2 驱动系统设计

图4为驱动模块的电路原理图。逻辑单元产生的信号通过隔离器件传输到功率增强电路,使信号功率放大。而后功率放大的信号经过匹配网络输出到目标换能器基元上。同时反馈电路会检测输出信号的电流和电压,并将数据传输至保护电路中,如果系统无安全隐患,保护电路会将这些数据重新反馈到功率增强电路,功率增强电路会根据实际输出情况进行微调。如果存在安全隐患,保护电路将中断功率增强电路的输出,避免系统的损坏。该系统可以实现对16路超声阵元的驱动。16个驱动模块在MCU控制下相互协调工作,构成256路可控驱动输出。

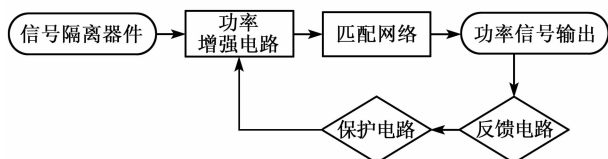


图4 驱动模块示意图

驱动信号的幅度实际上取决于 MOSFET 阵列的正负供电电源,器件 TC6321 可在 ± 100 V 供电下工作,单路驱动信号只要调节内部供电电源的大小就可以实现 ± 100 V 以下驱动输出幅值连续。同

时,电路输出采用 N 型 MOS 管加 P 型 MOS 管串行结构,采用正负供电可实现输出驱动信号为 ± 100 V 可调双极性信号。驱动信号的频率取决于 MD1210K6 的输入控制信号,该控制由 FPGA (EP4CE75F23I7) 产生。

2.3 软件系统设计

为了在 PC 端用户界面上实现实时、可视化的操作,设计了低强度超声相位控制和驱动系统用户界面,如图 5 所示。界面上可实现各阵元延时数据文本档导入/输入,可在用户界面上直接对延时数据进行调整,对各通道相位、激励频率、输入功率、辐照时间、间隙时间、工作次数等参数进行设定及调整。

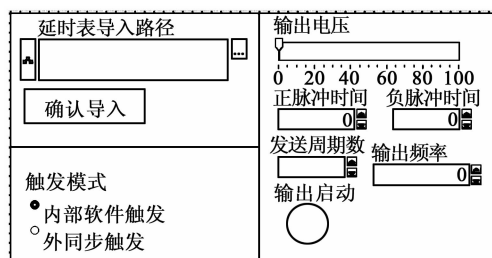


图5 软件操作界面

3 电路实验测试

为了验证以上系统是否满足相控阵激励发射的要求,搭建实验平台对相控阵系统的超声发射信号的相控延时、聚焦效果进行了测试。

3.1 相控阵延时数据测试

通过上位机系统将计算得到的延时值发送给 FPGA 并进行相应的配置,使 256 通道发射具有不同相位差的激励脉冲信号。用示波器测量 256 个通道间的延时值,与理论计算得出的延时值进行对比。图 6 为搭建的时延测试实验系统。



图6 时延测试实验系统

任意 11 通道设置的延时参数和实验测试的聚焦延时数据对比如表 1 所示。由表可看出,实际延时值和理论延时值的相对误差较小。

表 1 任意 11 通道设置的延时参数和实验测试的聚焦延时数据对比

阵元	理论延时/ns	实测延时/ns	绝对误差/ns
1	10.0	10.4	0.4
2	20.0	20.6	0.6
3	30.0	31.2	1.2
4	40.0	38.8	1.2
5	50.0	50.9	0.9
6	60.0	58.2	1.8
7	70.0	71.1	1.1
8	80.0	77.9	2.1
9	90.0	88.0	2.0
10	100.0	101.4	1.4
11	110.0	111.8	1.8

3.2 相控阵聚焦声场测试

采用纹影法(Schlieren 法),结合高速摄像机,对超声针灸相控阵的聚焦声场进行声场测量实验,其实验装置为同济大学的 Schlieren 声场可视化系统,如图 7 所示。实验所用的发射换能器为多普勒超声相控阵换能器(2 MHz 256elts Matrix Phased Array),阵元数为 256,阵元间距为 1.2 mm,中心频率为 2 MHz。

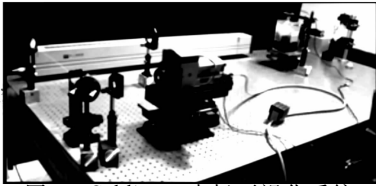


图 7 Schlieren 声场可视化系统

实验中通过在上位机程序中导入预设聚集位置的延时表,控制相控阵单个阵元的激励信号发射不同相位的超声波以形成聚焦声场。图 8、9 为预设焦点(0,0,15 mm)和(0,3 mm,15 mm)时,形成聚焦声场的 Schlieren 像。由图 8、9 可知,超声波较准确地聚焦于系统预设的焦点位置,并且通过对延时表的修改,波束发生了固定的偏转。测试结果表明,本文设计的相控阵聚焦超声控制系统对超声换能器声场具有较好的控制效果。

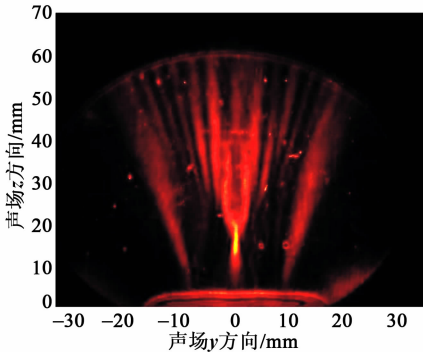


图 8 声场聚焦于(0, 0, 15 mm)的 Schlieren 像

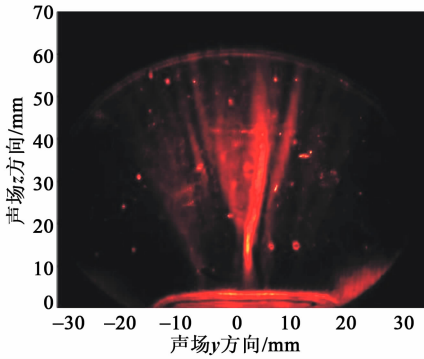


图 9 声场聚焦于(0,3 mm ,15 mm)的 Schlieren 像

4 结束语

基于 FPGA 控制的低能量超声相控阵系统可实现 256 通道的相控阵聚焦控制,实现频率在 1~3 MHz 可调,输出电压峰-峰值在±100 V 连续可调,相位分辨率可达 5 ns。基于 Labview 用户界面可将各阵元延时数据以配置文件形式直接导入,可根据需要匹配不同阵元的相控阵,从而满足相控阵聚焦超声差异化研究要求。

参考文献:

[1] 周红生,王欢,董昌盛,等. 超声模拟中医针刺手法量化技术研究进展[J]. 声学技术,2016,35(1):33-37.

[2] 牛金海. 超声原理及生物医学工程应用:生物医学超声[M]. 上海:上海交通大学出版社,2017.

[3] MASON T J. Therapeutic ultrasound an overview[J]. Ultrason Sonochem,2011,18(4):847-852.

[4] 赵邓超,陈昕,陈思平,等. 超声治疗中枢神经系统疾病的研究进展[J]. 临床超声医学杂志,2020,22(2):133-135.

[5] 杨青松,陶春杰,胡月鹏,等. 经直肠低强度脉冲超声治疗 III 型前列腺炎的临床[J]. 中国性科学,2019,28(4):18-20.

[6] 郑海荣,邱维宝,王丛知,等. 超声成像与治疗技术进展与趋势[J/OL]. 中国科学,2020. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5840.q.20200527.1618.004.html>.

[7] 孙武. 任意波聚焦相控阵超声系统研究及双频溶栓应用[D]. 深圳:中国科学院深圳先进技术研究院,2018.

[8] 孙琪. 超声相控阵任意波形激励应用研究[D]. 西安:西安科技大学,2017.

[9] 赵梦娟,张浩,钱宇晗,等. HIFU 治疗相控换能器相位控制和驱动系统设计[J]. 压电与声光,2018,40(5):690-694.

ZHAO Mengjuan,ZHANG Hao,QIAN Yuhan,et al. Design of phase control and drive system of phased array transducer for HIFU treatment[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics,2018,40(5):690-694.

[10] 陈彦宏. 超声相控阵动态聚焦技术研究[D]. 成都:西南交通大学,2014.

静电场对压电薄膜中声表面波传播的影响

刘智荣, 谢立强, 朱敏, 包文歧

(陆军工程大学 国防工程学院, 江苏 南京 210007)

摘要:该文介绍了声表面波(SAW)在压电薄膜中传播时静电场的影响机理。首先给出了静电场作用下压电薄膜中的初始应力和初始电位移,然后通过求解含有初始应力和初始电位移的压电介质耦合波动方程,得到 SAW 在静电场影响下的相速度变化和频散曲线,最后仿真分析了 ZnO 和 AlN 两种压电薄膜材料中 SAW 的传播特性。结果表明,SAW 的相速度与静电场成正比,与波数成反比。

关键词:静电场;声表面波;压电薄膜;相速度;频散

中图分类号: TN384; TN22; TP212.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11977/j.issn.1004-2474.2020.06.002

Effect of Static Electric Field on SAW Propagation in Piezoelectric Films

LIU Zhirong, XIE Liqiang, ZHU Min, BAO Wenqi

(College of Defense Engineering, Army Engineering University, Nanjing 210007, China)

Abstract: The effect mechanism of static electric field on the propagation of surface acoustic wave(SAW) in piezoelectric film is discussed. Firstly, the initial stress and the initial displacement of piezoelectric film in static electric field are deduced. Secondly, the phase velocity change and the dispersion curve of SAW are obtained by solving the coupling wave equation of piezoelectric medium. Finally, the propagation characteristics of SAW in ZnO and AlN piezoelectric films are simulated and analyzed. The results show that the phase velocity of SAW is proportional to the magnitude of static electric field and inversely proportional to the magnitude of wave number.

Key words: static electric field; SAW; piezoelectric film; phase velocity; dispersion

0 引言

声表面波(SAW)技术发展至今,在传感器和信号处理器上已得到了广泛的应用^[1-3]。当外电场作用到 SAW 传播的压电介质上时,由于逆压电效应,会导致压电介质内部产生应力和形变,进而影响 SAW 的传播特性,因此,SAW 可实现静电场的感测。用 SAW 实现静电场的感测,可有效解决现有电场传感器干扰抑制能力差,不能无失真感测的难题^[4-5]。

要实现 SAW 对静电场的感测,首先必须探寻静电场与 SAW 传播之间的规律。Boris D. Zaitsev 等^[6]最早从压电材料弹性常数变化的角度,研究了外加电场对铌酸锂中瑞利波相速度的影响。Zhang R 等^[7]研究了具有初始应力的磁电弹性半空间中瑞

利波的传播行为,得到了不同电、磁边界条件下波速的解析解。D. Koulova 等^[8]通过实验的方式研究了电场作用下绝缘液-空气界面上波的传播行为,分析了波长和角频率随电场变化的规律。

关于静电场对压电薄膜上 SAW 传播的影响机理,目前国内外的研究较少。为此,本文在静电场导致压电薄膜产生初应力和形变的基础上,利用小幅波动理论建立和求解了波动方程,并通过仿真分析讨论了两种压电薄膜材料 SAW 在静电场影响下的相速度变化和频散曲线。

1 波动方程的建立

1.1 初始条件

图 1 为一静置于静电场(E)中的无限大横观各向同性压电薄膜,其厚为 h ,极化方向沿着 z 轴,坐

收稿日期:2020-08-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51975584)

作者简介:刘智荣(1990-),男,江苏南京人,硕士生,主要从事 MEMS 传感器的研究。通信作者:谢立强,副教授,博士,主要从事 MEMS 传感器的研究。E-mail:xieliq@outlook.com。

标平面 xOy 与压电薄膜的中面重合。 E 方向沿着压电薄膜的极化方向。

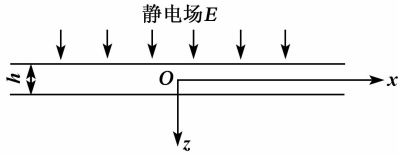


图 1 静电场中的压电薄膜

根据假设条件,可由压电本构方程得到静电场作用下压电薄膜中的初始应力和初始电位移为

$$\begin{cases} \sigma_{11}^0 = \left(\frac{c_{13}e_{33}}{c_{33}} - e_{31} \right) E \\ D_3^0 = \left(\frac{e_{33}^2}{c_{33}} + \epsilon_{33} \right) E \end{cases} \quad (1)$$

式中: c_{13} 、 c_{33} 为压电薄膜的弹性常数; e_{31} 、 e_{33} 为压电系数; ϵ_{33} 为介电常数。

1.2 波动方程

研究了静电场对压电薄膜 SAW 传播行为的影响,即在波动分析中考虑静电场作用下的初始应力和初始电位移。具有初始应力和初始电位移的压电介质小幅波动问题的运动方程^[9-11]为

$$\begin{cases} \sigma_{ij,j} + (u_{i,k} \cdot \sigma_{kj}^0)_{,j} = \rho \cdot \ddot{u}_i \\ D_{i,i} + (u_{i,j} \cdot D_j^0)_{,i} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中:下标 $i, j, k=1, 2, 3$, 分别标识 x, y, z 方向对

$$\begin{cases} \left[c_{11} + \left(\frac{c_{13}e_{33}}{c_{33}} - e_{31} \right) E \right] \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + c_{44} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + (c_{13} + c_{44}) \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial z} + (e_{31} + e_{15}) \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial z} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \\ \left[c_{44} + \left(\frac{c_{13}e_{33}}{c_{33}} - e_{31} \right) E \right] \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + (c_{13} + c_{44}) \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial z} + c_{33} \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + e_{15} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + e_{33} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \\ \left[e_{15} + e_{31} + \left(\frac{e_{33}^2}{c_{33}} + \epsilon_{33} \right) E \right] \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial z} + e_{15} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \left[e_{33} + \left(\frac{e_{33}^2}{c_{33}} + \epsilon_{33} \right) E \right] \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} - \epsilon_{11} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} - \epsilon_{33} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

2 波动方程的建立

设压电薄膜中质点的 u, w 和 φ 的解分别为

$$\begin{cases} u = A_1 e^{iku} e^{ik(x-ct)} \\ w = A_2 e^{iku} e^{ik(x-ct)} \\ \varphi = A_3 e^{iku} e^{ik(x-ct)} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \left[c_{11} - \rho c^2 + c_{44} a^2 + \left(\frac{c_{13}e_{33}}{c_{33}} - e_{31} \right) E \right] A_1 + (c_{13} + c_{44}) a A_2 + (e_{31} + e_{15}) a A_3 = 0 \\ (c_{13} + c_{44}) a A_1 + \left[c_{44} - \rho c^2 + c_{33} a^2 + \left(\frac{c_{13}e_{33}}{c_{33}} - e_{31} \right) E \right] A_2 + (e_{15} + e_{33} a^2) A_3 = 0 \\ \left[e_{15} + e_{31} + \left(\frac{e_{33}^2}{c_{33}} + \epsilon_{33} \right) E \right] a A_1 + \left\{ e_{15} + a^2 \left[\left(\frac{e_{33}^2}{c_{33}} + \epsilon_{33} \right) E + e_{33} \right] \right\} A_2 - (\epsilon_{11} + \epsilon_{33} a^2) A_3 = 0 \end{cases} \quad (7)$$

要使式(7)有非平凡解,须使其系数行列式等于 0,且该行列式可看成是以 c 及 E 为参数、 a 为未知

应的物理量; u_i 为位移; ρ 为压电介质体密度; σ_{kj}^0 为初始应力张量; D_j^0 为初始电位移。

若 SAW 沿 x 方向传播,则压电薄膜中质点的机械位移 $u = u(x, z, t)$ 、 $v = 0$ 、 $w = w(x, z, t)$ 和电势函数 $\varphi = \varphi(x, z, t)$ 。于是式(2)可简化为

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_{11}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{31}}{\partial z} + \sigma_{11}^0 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \\ \frac{\partial \sigma_{31}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{33}}{\partial z} + \sigma_{11}^0 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \\ \frac{\partial D_1}{\partial x} + \frac{\partial D_3}{\partial z} + D_3^0 \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial z} = D_3^0 \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

由于波传播与 y 方向无关,因此,压电薄膜的本构方程为

$$\begin{cases} \sigma_{11} = c_{11} S_{11} + c_{13} S_{33} - e_{31} E_3 \\ \sigma_{33} = c_{13} S_{11} + c_{33} S_{33} - e_{33} E_3 \\ \sigma_{31} = c_{44} S_{13} - e_{15} E_1 \\ D_1 = e_{15} S_{13} + \epsilon_{11} E_1 \\ D_3 = e_{31} S_{11} + e_{33} S_{33} + \epsilon_{33} E_3 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $S_{11} = \frac{\partial u}{\partial x}$ 、 $S_{13} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z}$ 、 $S_{33} = \frac{\partial w}{\partial z}$ 为应变分

量; $E_1 = \frac{\partial \varphi}{\partial x}$ 、 $E_3 = \frac{\partial \varphi}{\partial z}$ 为电场。

将式(1)、(4)代入式(3)中,得到由机械位移分量及电势函数表示的波动微分方程:

式中: c 为 SAW 相速度; $k=2\pi/\lambda$ 为波数, λ 为 SAW 波长; a 为待定系数; A_1 、 A_2 、 A_3 分别为 u 、 w 、 φ 的幅值。

将式(6)代入式(5)中,有

量的 1 个 6 阶代数方程。由于 $z \rightarrow \infty$ 时, SAW 的位移衰减至 0, 因此, a 仅取虚部为正的 3 个根, 记为 $a_n (n=1, 2, 3)$ 。式(7)可表示为

$$f_n = \frac{a_n^2 (c_{13} + c_{44}) (e_{31} + e_{15}) - \left[c_{11} - \rho c^2 + c_{44} a_n^2 + \left(\frac{c_{13} e_{33}}{c_{33}} - e_{31} \right) E \right] (e_{15} + e_{33} a_n^2)}{a_n \left\{ (c_{13} + c_{44}) (e_{15} + e_{33} a_n^2) - \left[c_{44} - \rho c^2 + c_{33} a_n^2 + \left(\frac{c_{13} e_{33}}{c_{33}} - e_{31} \right) E \right] (e_{31} + e_{15}) \right\}} \quad (9)$$

$$g_n = \frac{\left[c_{11} - \rho c^2 + c_{44} a_n^2 + \left(\frac{c_{13} e_{33}}{c_{33}} - e_{31} \right) E \right] \left[c_{44} - \rho c^2 + c_{33} a_n^2 + \left(\frac{c_{13} e_{33}}{c_{33}} - e_{31} \right) E \right] - (c_{13} + c_{44})^2 a_n^2}{a_n \left\{ (c_{13} + c_{44}) \left\{ e_{15} + a_n^2 \left[\left(\frac{e_{33}^2}{c_{33}} + \epsilon_{33} \right) E + e_{33} \right] \right\} - (e_{31} + e_{15}) \left[c_{44} - \rho c^2 + c_{33} a_n^2 + \left(\frac{c_{13} e_{33}}{c_{33}} - e_{31} \right) E \right] \right\}} \quad (10)$$

压电薄膜的上、下表面外力自由, 且可视为电学短路, 因此, 边界条件有

$$\begin{cases} \sigma_{31}(x, \pm h/2) = 0 \\ \sigma_{33}(x, \pm h/2) = 0 \\ \varphi(x, \pm h/2) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

故压电薄膜的位移和电势函数的完整解应为

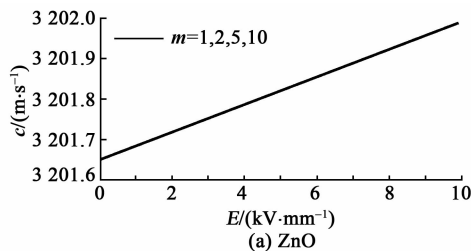
$$\begin{cases} \sum_{n=1}^3 Q_{1n} A_{1n} = 0 \\ \sum_{n=1}^3 Q_{2n} A_{1n} = 0 \\ \sum_{n=1}^3 Q_{3n} A_{1n} = 0 \end{cases} \quad (12)$$

式(12)为关于 A_{11} 、 A_{12} 、 A_{13} 的 3 阶方程组, 即

表 1 压电材料相关参数

材料	$\rho /$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性常数/($10^{11} \text{N} \cdot \text{m}^{-2}$)					压电常数/($\text{C} \cdot \text{m}^{-2}$)			介电常数/ ($10^{11} \text{F} \cdot \text{m}^{-1}$)	
		c_{11}	c_{12}	c_{13}	c_{33}	c_{44}	e_{15}	e_{31}	e_{22}	ϵ_{11}	ϵ_{33}
ZnO	5 680	2.097	1.211	1.051	2.109	0.424 7	-0.48	-0.573	1.32	0.75	0.90
AlN	3 260	3.450	1.250	1.200	3.950	1.180 0	-0.48	-0.580	1.50	0.71	0.84

设定 $E=0 \sim 10 \text{ kV/mm}$ 。设 $m=h/\lambda$ 为压电薄膜厚度与 SAW 波长之比(厚波比), 当 $m=1, 2, 5, 10$ 时, 通过仿真可得 c 与 E 关系如图 2 所示。由图可知, 无论 m 取何值, 两种材料中的 c 都随 E 的增加而线性增加, 其中 ZnO 和 AlN 相速度曲线斜率



$$\begin{cases} A_{2n} = f_n \cdot A_{1n} \\ A_{3n} = g_n \cdot A_{1n} \end{cases} \quad (n=1, 2, 3) \quad (8)$$

其中

$$\begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{13} \\ Q_{21} & Q_{22} & Q_{23} \\ Q_{31} & Q_{32} & Q_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{11} \\ A_{12} \\ A_{13} \end{bmatrix} = 0 \quad (13)$$

其中 Q 为 3 阶方阵, 其元素 $Q_{pn} (p=1, 2, 3; n=1, 2, 3)$ 为

$$Q_{1n} = (c_{13} + c_{33} f_n a_n + e_{33} g_n a_n) e^{\pm i k a_n h/2} \quad (14)$$

$$Q_{2n} = (c_{44} a_n + c_{44} f_n + e_{15} g_n) e^{\pm i k a_n h/2} \quad (15)$$

$$Q_{3n} = g_n e^{\pm i k a_n h/2} \quad (16)$$

为使 A 有非平凡解, 则有

$$|Q| = 0 \quad (17)$$

式(17)即为 SAW 的相速度或频散方程。

3 仿真分析及讨论

本文选用氧化锌(ZnO)和氮化铝(AlN)这两种压电薄膜材料, 分析其 SAW 传播特性。这两种材料的性能参数如表 1 所示。

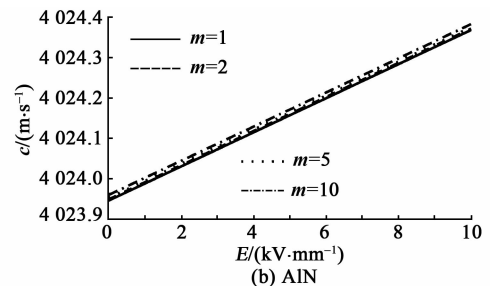


图 2 ZnO、AlN 材料中 c 与 E 的关系

分别为 0.106 和 0.117, 可见 ZnO 和 AlN 材料中 SAW 对 E 的敏感度相当。尽管 m 取值不同, 但曲线几乎重叠, 符合 c 与压电薄膜材料的物理尺寸无

关,但与弹性性质、压电性质及介电特性有关的研究理论^[12]。

图 3 为在不同 E 的作用下, $h=0.1\text{ mm}$ 时 ZnO 和 AlN 所对应的频散曲线。由图可知,在 E 的作用下,SAW 传播的 c 在波数较低($k < 2 \times 10^5/\text{m}$)时变化明显,由 $\lambda = 2\pi/k$ 可得,即当 $\lambda > 31.4\text{ }\mu\text{m}$ 时,SAW 对 E 的变化更敏感。在 $k \rightarrow \infty$,即波频率 $f = kc/2\pi$ 非常高时, c 逐渐平稳并趋向于剪切体波速度,此时 E 对 c 的影响较小。此外还可发现,在同一波数下, E 越大,对应的 c 越小。

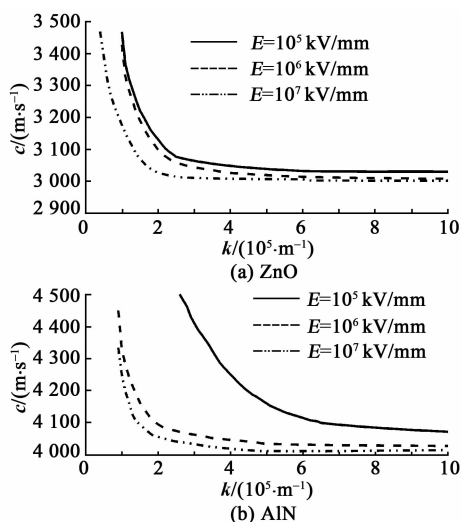


图 3 静电场作用下 ZnO、AlN 材料的频散曲线

这一物理现象本质是静电场作用下,由于逆压电效应,压电薄膜内部产生了应力场和电位移场,使 SAW 的传播行为受到影响。综上可知,只需要测量出 c 的实际值,便可得出对应静电场值,这可以作为测量静电场大小的一种方法。

4 结束语

本文得到了静电场作用下声表面波在压电薄膜中传播的相速度变化及频散曲线。在压电薄膜材料参数给定的情况下,静电场值越大,声表面波的相速度越大。波数越小,声表面波对静电场的变化越敏感;波数越大,即频率越高时,声表面波的相速度越小。因此,通过对声表面波相速度的测量可以确定外加静电场值的大小。

参考文献:

[1] 齐晓琳,刘建生,何世堂,等.基于新型声表面波单端对谐振器的生物传感器[J].压电与声光,2020,42(2):159-162.
QI Xiaolin, LIU Jiansheng, HE Shitang, et al. A staph-

ylococcus aureus biosensor based on novel surface acoustic wave one pore resonator[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2020, 42(2):159-162.

- [2] DAI X, FANG L L, ZHANG C F, et al. An impedance-loaded orthogonal frequency-coded SAW sensor for passive wireless sensor networks[J]. Sensors, 2020, 20(7):1876.
- [3] PARK K S. Nano- and submicro-sized three-dimensional shape measuring system using a SAW-based capacitance sensor[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2018, 32(10):4613-4619.
- [4] MOU Y, YU Z, HUANG K, et al. Research on a novel MEMS sensor for spatial DC electric field measurements in an ion flows field[J]. Sensors, 2018, 18(6):1740.
- [5] KAINZ A, STEINER H, SCHALKO J, et al. Distortion-free measurement of electric field strength with a MEMS sensor[J]. Nature Electronics, 2018, 1(1):68-73.
- [6] ZAITSEV B D, KUZNETSOVA I E. External homogeneous electric field effect on the properties of Rayleigh SAW in lithium niobate[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 1996, 43(4):701-707.
- [7] ZHANG R, PANG Y, FENG W. Propagation of Rayleigh waves in a magneto-electro-elastic half-space with initial stress[J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2014, 21(7):538-543.
- [8] KOULOVA D, ROMAT H, LOUSTE C. Experimental study of wave propagation on liquid/air surfaces under perpendicular electric field[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(5):1716-1722.
- [9] LIU H, WANG T J, WANG Z K, et al. Effect of a biasing electric field on the propagation of symmetric Lamb waves in piezoelectric plates[J]. International Journal of Solids and Structures, 2002, 39(7):2031-2049.
- [10] 刘华,王铁军,王子昆.用广义 Rayleigh 波测量压电薄膜结构的初应力[J].西安交通大学学报,2000,34(1):79-82.
- [11] 吕克朋.广义场作用对电磁弹性结构中弹性波传播的影响[D].郑州:郑州大学,2009.
- [12] 潘峰.声表面波材料与器件[M].北京:科学出版社,2012.

基于扇形基片集成波导的三频带通滤波器设计

张 胜,刘 硕,谢振江

(中国矿业大学 信息与控制工程学院,江苏 徐州 221116)

摘 要:该文提出了一种 60° 扇形基片集成波导谐振器,然后在谐振器中加载一排金属通孔,对其 TM_{110} 、 TM_{210} 和 TM_{120} 模进行扰动,最后利用扰动后的场模式,在 60° 扇形基片集成波导谐振器的基础上设计了一款结构紧凑的三频带通滤波器。通过分别引入互补开口环谐振器和源-负载耦合结构,改善了滤波器的频率选择特性。3 个通带的中心频率分别为 5.61 GHz、7.41 GHz 和 8.77 GHz,3 dB 带宽分别为 148 MHz、298 MHz、347 MHz。滤波器的测试与仿真结果基本吻合。

关键词:基片集成波导;扰动;三通带;互补开口环谐振器;源-负载耦合

中图分类号:TN713 **文献标志码:**A **DOI:**10.11977/j.issn.1004-2474.2020.06.003

Design of Triple-band Bandpass Filter Based on Fan-shaped Substrate Integrated Waveguide

ZHANG Sheng, LIU Shuo, XIE Zhenjiang

(School of Information of and Control Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: In this paper, a 60° fan-shaped substrate integrated waveguide resonator is proposed, and then a row of metal vias are loaded into the structure to perturb its TM_{110} , TM_{210} and TM_{120} modes. Finally, a compact triple-band bandpass filter based on the 60° fan-shaped substrate integrated waveguide resonator is designed by using the disturbed field mode. The frequency selection characteristic of the filter is improved by introducing a complementary split-ring resonators and source-load coupling structure. The center frequencies of the three passbands are 5.61 GHz, 7.41 GHz, and 8.77 GHz respectively, and the 3 dB bandwidths are 148 MHz, 298 MHz, and 347 MHz respectively. The measured results of the filter are in good agreement with that of the simulation.

Key words: substrate integrated waveguide; perturbation; triple-band; complementary split-ring resonators; source-load coupling

0 引言

随着现代无线通信技术的发展,多频带通滤波器微波器件发挥着日益重要的作用。基片集成波导(SIW)因具有低损耗、高品质因数、易集成等优点而广泛应用于微波电路中^[1-3]。因此,在 SIW 腔体中实现多频是目前滤波器领域研究的重点。一般多频 SIW 滤波器是通过多模耦合的方式来实现,原理、结构简单但器件尺寸过大^[4]。采用叠层结构可减小滤波器的平面尺寸,但设计效果不理想^[5]。微扰技术可以改变谐振器的场分布与谐振频率,被应用在多频 SIW 滤波器设计中,但这种方法仅通过两

孔扰动,谐振器的谐振频率改变幅度有限,使带外抑制特性较差^[6]。为兼顾滤波器通带性能和频率选择性,在 60° 扇形基片集成波导谐振器(FSSIWR)中加载一排金属通孔进行扰动,改变其谐振频率。与传统微扰技术不同,这种扰动方法会使谐振频率向高频大幅偏移,称为强扰。在强扰方法的基础上,利用 60° FSSIWR 设计了一款三频带通滤波器。通过分别刻蚀互补开口环谐振器(CSRRs)和加载源-负载耦合结构,在 3 个通带外共产生 9 个传输零点(TZs),提高了滤波器的带外抑制特性^[7-10]。该滤波器 3 个通带的带内回波损耗分别低于 20.85 dB、20.29 dB、20.76 dB,最小插入损耗分别为 2.01 dB、

收稿日期:2020-08-13

基金项目:中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(2019GF12)

作者简介:张胜(1977-),男,安徽宿州人,副教授,硕士生导师,博士,主要从事微波、毫米波技术及其应用的研究。E-mail:zhangsheng@cumt.edu.cn。通信作者:刘硕,江苏徐州人,主要从事微波、毫米波技术及其应用的研究。

1.75 dB、1.69 dB,仿真结果与测试结果基本一致。

1 60°FSSIWR 分析

图 1(a)为 60°FSSIWR 无扰动时的模型结构。采用的介质基片为 Rogers RT/Duroid 6006 (相对介电常数 $\epsilon_r=6.15$,厚度 $h=0.635$ mm,损耗角正切值 $\tan \delta=0.0019$),谐振器的谐振频率由边长 L 决定。传统的微扰结构如图 1(b)所示,在谐振器顶部与底部各加载一个金属通孔,会使其谐振频率向高频小幅偏移,金属通孔间距为 L_1 。与图 1(b)不同,强扰结构是在谐振器中加载一排金属通孔(见图 1(c)),该方法会使谐振器的谐振频率偏移幅度更大。

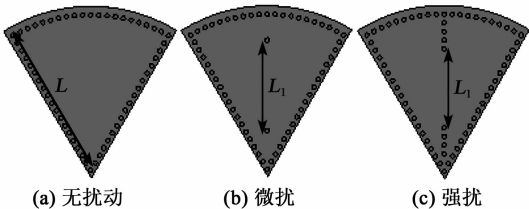


图 1 60°FSSIWR 模型结构

表 1 为微扰与强扰结构在不同 L_1 时的谐振频率($L=18$ mm)。由表可知,两种结构的 TM_{110} 模频率均随着 L_1 的减小而增大,但强扰结构的频率变化幅度明显大于微扰结构; TM_{210} 模频率几乎不随 L_1 变化,且两种结构的 TM_{210} 模谐振频率相差不多。

表 1 L_1 对谐振频率的影响

L_1/mm		5	6	7	8	9
谐振频率 (微扰)/ GHz	TM_{110}	8.60	8.85	8.72	8.29	8.14
	TM_{210}	10.93	10.94	10.94	10.93	10.93
	TM_{120}	12.04	11.51	11.68	12.06	11.76
谐振频率 (强扰)/ GHz	TM'_{110}	10.48	9.78	9.05	8.42	8.25
	TM'_{210}	11.06	11.04	11.01	10.96	10.97
	TM'_{120}	12.75	12.47	12.44	12.41	12.08

图 2(a)为 60°FSSIWR 在本征模时的电场分布。 TM_{120} 模的电场在圆圈标记处较弱,将信号源加在此处,该模式不被激励,能有效抑制寄生通带。为了与无扰动状态区别,这里用 TM'_{mnp} 表示受扰动后的模式(见图 2(b))。由图 2 可知, TM_{210} 与 TM'_{210} 模的电场均呈轴对称分布,所以它们几乎不受扰动影响。与此同时, TM'_{110} 与 TM'_{120} 的电场受强扰动后,均发生较大改变。强扰动下 TM'_{110} 与 TM'_{120} 的谐振频率随着 L_1 的减小向高频处移动(见图 3)。其中, TM'_{110} 的频率变化幅度较大,而 TM'_{120} 的频率变

化幅度较平缓, TM'_{210} 模的谐振频率则几乎保持不变。

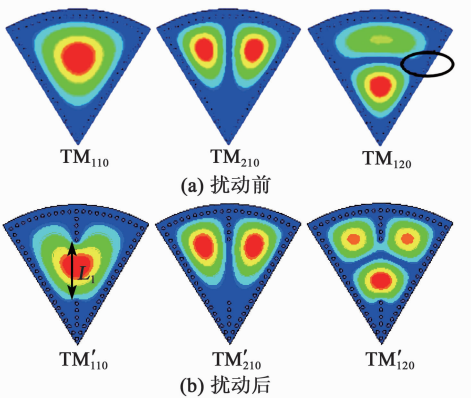


图 2 谐振器电场分布

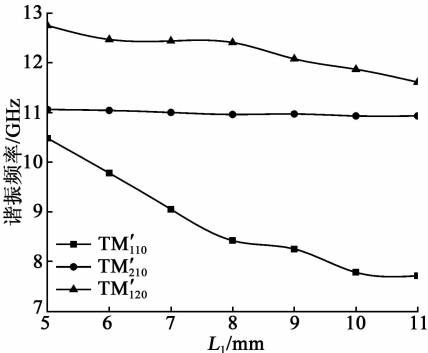


图 3 不同 L_1 参数对谐振器频率的影响

2 滤波器设计

基于 60°FSSIWR,设计了一款三频带通滤波器,如图 4 所示。3 个 60°FSSIWR 通过感性耦合窗直接级联,并在 2 腔体中引入强扰动。改变感性耦合窗 L_2 的大小,可以调节腔体间的耦合强度。

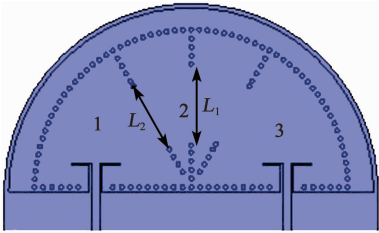


图 4 滤波器原理图

图 5 为电路拓扑结构。由图可知,当信号源接入滤波器时,腔体 1、3 中的 TM_{110} 模与腔体 2 中的 TM'_{110} 模被激励。腔体 1、3 中的 TM_{110} 模频率较低,它们耦合形成 1 个低频通带,即第一通带。腔体 2 中的 TM'_{110} 模受强扰动影响向高频处偏移,形成一个较高频的通带,即第二通带。 TM'_{110} 的谐振频率与 L_1 有关,改变 L_1 的大小可以使第二通带实现可调。图 6 表明 L_1 只对第二通带的中心频率有影响,

且 L_1 越小,第二通带的中心频率越高。与此同时,腔体 2 中的 TM'_{210} 模几乎不受强扰动影响,该模式与腔体 1、3 中的 TM_{210} 模相耦合,形成 1 个中心频率最高的通带,即第三通带。I、O 分别表示输入和输出端口。

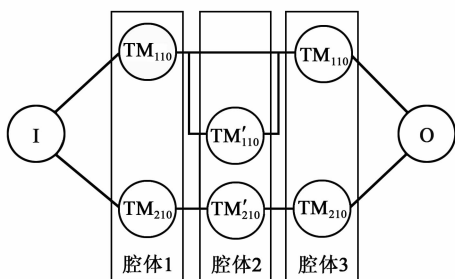
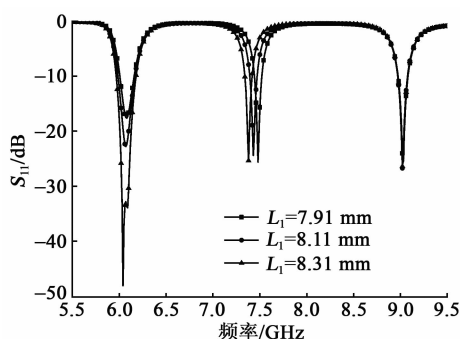
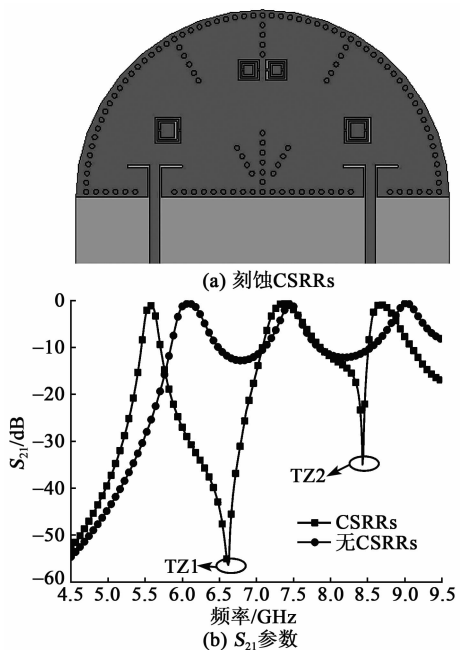


图 5 电路拓扑结构

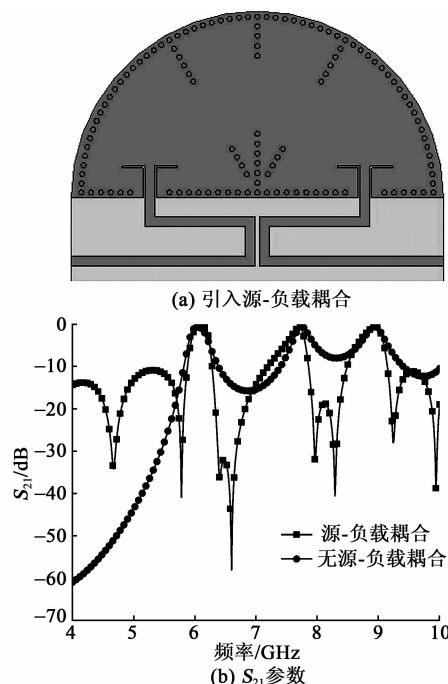
图 6 L_1 对滤波器通带的影响

为了在不改变滤波器原有尺寸的情况下提高带外抑制性能,在其上表面刻蚀两对 CSRRs,如图 7(a)所示。利用 CSRRs 结构的带阻特性,可以在通

图 7 刻蚀两对 CSRRs 前后的 S_{21} 对比

带外产生 TZ,如图 7(b)所示。由图 7(b)可知,由于 CSRRs 的作用,在一、二及二、三通带之间各产生一个 TZ。其中,TZ1 由腔体 1、3 中的一对 CSRRs 产生,TZ2 由腔体 2 中一对尺寸较小的 CSRRs 产生。

为了进一步提高滤波器的频率选择特性,在信号源与负载间引入耦合,如图 8(a)所示。源-负载耦合的引入使信号传输时多出一条路径,从而使传输信号在某些频率点的相位发生反转,产生 TZ。由图 8(b)可知,源-负载耦合结构共产生 8 个 TZs,极大地改善了滤波器的带外抑制性能。

图 8 引入源-负载耦合前后的 S_{21} 对比

3 加工与测试

为使设计的滤波器 3 个通带中心频率分别在 5.6 GHz、7.4 GHz、8.7 GHz 时 3 dB 带宽超过 130 MHz、290 MHz 和 320 MHz,经过仿真与优化,最终确定滤波器结构如图 9 所示,表 2 为其尺寸参数。

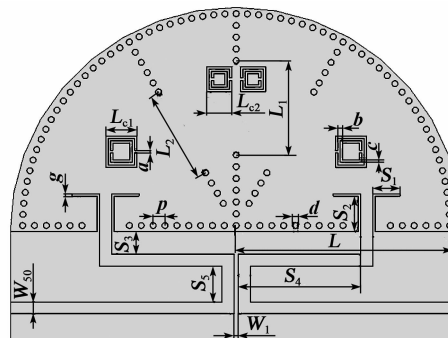


表2 60°FSSIWR 三频带滤波器的尺寸

W_{50}/mm	S_1/mm	S_2/mm	S_3/mm	S_4/mm	S_5/mm
1.02	2.29	3	1.95	10.28	3.01
W_1/mm	L/mm	p/mm	d/mm	g/mm	L_1/mm
0.42	18	1	0.5	0.2	8.01
L_2/mm	L_{c1}/mm	L_{c2}/mm	a/mm	b/mm	
7.93	2.64	2.14	0.2	0.2	

图10为滤波器的加工与测试结果。3个通带的中心频率分别为5.61 GHz、7.41 GHz、8.77 GHz,最小带内插入损耗分别为2.01 dB、1.75 dB、1.69 dB,带内回波损耗均优于20 dB。3个通带的相对带宽分别为2.64%、4.02%和3.96%,达到设计要求。引入的CSRRs与源-负载耦合结构共产生9个TZs,极大地改善了滤波器的频率选择性。图中TZ1、TZ2由刻蚀的CSRRs产生,其余均为源-负载

耦合结构产生。受加工精度与测量误差的影响,测试与仿真结果略有偏差,但在可接受范围内,二者基本吻合。表3为本文设计的滤波器与其他已发表滤波器的性能比较。表中, λ_{g1} 和 λ_{g2} 均为电长度。

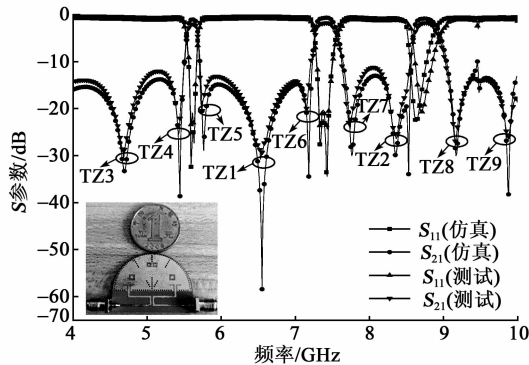


图10 滤波器仿真和测试结果

表3 本文滤波器与其他已发表滤波器的性能比较

文献	$f_1, f_2, f_3/\text{GHz}$	层数	TZs	插入损耗/dB	回波损耗/dB	$\lambda_{g1} \times \lambda_{g2}$
[4]	9.72, 10.76, 11.76	单	6	0.33, 0.45, 0.30	9.63, 9.17, 13.22	2.55×0.90
[5]	2.28, 5.94, 9.50	双	3	0.56, 0.93, 1.64	13.30, 12.00, 10.50	0.14×0.13
[6]	6.47, 9.9, 10.8	单	2	2.47, 2.04, 3.26	14.73, 19.79, 14.76	0.98×0.49
本文	5.61, 7.41, 8.77	单	9	2.01, 1.75, 1.69	20.85, 20.29, 20.76	0.67×0.34

由表3可知,本文设计的滤波器具有损耗小,结构紧凑及带外抑制性能好等优点。

4 结束语

60°FSSIWR 的电场分布具有特殊性,当加载一排金属通孔进行扰动时,它的 TM'_{110} 与 TM'_{120} 模谐振频率会向高频处偏移,而 TM'_{210} 模频率几乎保持不变。利用该扰动技术,设计并加工了一款60°FSSIWR三频带通滤波器。通过刻蚀CSRRs和引入源-负载耦合结构,滤波器的带外抑制特性得到极大提高。该滤波器具有插入损耗小,结构紧凑及频率选择性高的特点,可被广泛应用于微波电路中。

参考文献:

[1] SAHU A, DEVABHAKTUNI V K, MISHRA R K, et al. Recent advances in theory and applications of substrate-integrated waveguides: a review[J]. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2016, 26(2): 129-145.

[2] ZHANG H, KANG W, WU W. Miniaturized dual-band SIW filters using E-shaped slotlines with controllable center frequencies[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2018, 28(4): 311-313.

[3] CHEN X, WU K. Substrate integrated waveguide filter: Basic design rules and fundamental structure features[J]. IEEE Microwave Magazine, 2014, 15(5): 108-116.

[4] ESMAEILI M, BORNEMANN J. Substrate integrated

waveguide triple-passband dual-stopband filter using six cascaded singlets[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2014, 24(7): 439-441.

[5] JI Q, XU Y S, CHEN C, et al. Miniaturized triple-band filter design utilizing composite planar multilayered and substrate integrated waveguide structures[C]//Philadelphia, PA, USA; IEEE/MTT-S International Microwave Symposium-IMS, 2018: 540-543.

[6] WANG H Y, LI G H, WU Y D, et al. A novel triple-band filter based on triple-mode substrate integrated waveguide[J]. Progress In Electromagnetics Research Letters, 2016, 58: 59-65.

[7] MUCHHAL N, SRIVASTAVA S. Design of miniaturized diamond shaped substrate integrated waveguide CSRR band pass filter for X band applications[C]//Noida, India; International Conference on Signal Processing and Communication(ICSC), 2019: 113-116.

[8] DONG Y, WU C T M, ITOH T. Miniaturised multi-band substrate integrated waveguide filters using complementary split-ring resonators[J]. IET Microwaves Antennas & Propagation, 2012, 6(6): 611-620.

[9] 褚庆昕, 欧阳霄, 黎志辉. 源-负载耦合发夹梳双频带通滤波器的设计[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2012, 40(6): 11-15.

[10] ZHU Y Z. A source-load coupled bandpass filter using one-eighth mode substrate integrated waveguide cavity[C]//Beijing, China; General Assembly and Scientific Symposium, 2014: 1-4.

声表面波扭矩检测系统的分段环状天线设计

熊志强¹, 陈智军¹, 孙 聪¹, 朱卫俊², 郭佳佳¹

(1. 南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 211106; 2. 中电科技德清华莹电子有限公司, 浙江 德清 313200)

摘 要: 天线设计是实现无线无源声表面波扭矩检测的重要环节。针对待测扭矩的转轴结构设计了阅读器的分段环状天线, 使用三维电磁仿真软件 HFSS 仿真了天线的中心频率、带宽、输入阻抗和方向图, 在仿真优化的基础上制作了分段环状天线, 并进行了相应的测试。测试结果表明, 天线中心频率为 431.6 MHz、带宽为 424~440 MHz、输入阻抗接近 50 Ω , 且天线所在平面具有较好的全向性。包括该阅读器天线的声表面波扭矩检测系统可实现较准确的扭矩测量, 在 -80~80 N·m 时满量程误差为 2.5%。

关键词: 扭矩检测; 声表面波; 分段环状天线; 三维电磁仿真软件; 全向性

中图分类号: TN820 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11977/j.issn.1004-2474.2020.06.004

Design of Segmented Loop Antenna for Surface Acoustic Wave Torque Measurement System

XIONG Zhiqiang¹, CHEN Zhijun¹, SUN Cong¹, ZHU Weijun², GUO Jiajia¹

(1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;

2. CETC Deqing Huaying Electronics Co., Deqing 313200, China)

Abstract: The antenna design is an important part for realizing wireless and passive surface acoustic wave torque measurement. The segmented loop antenna of the reader is designed for the rotating shaft structure of the torque to be measured, and the three-dimensional electromagnetic simulation software HFSS is used to simulate the center frequency, bandwidth, input impedance, and directivity pattern. On the basis of simulation and optimization, the segmented loop antenna is fabricated and tested. The measurement results show that the center frequency of the antenna is 431.6 MHz, the bandwidth is 424~440 MHz, the input impedance is close to 50 Ω , and the plane where the antenna is located has good omni-directionality. The surface acoustic wave torque measurement system including the reader antenna can realize accurate torque measurement, and the full-scale error is 2.5% from -80 N·m to 80 N·m.

Key words: torque measurement; surface acoustic wave; segmented loop antenna; three-dimensional electromagnetic simulation software; omni-directionality

0 引言

扭矩检测是对各种非旋转或旋转的机械部件上扭转力矩的检测。目前扭矩检测常采用导电滑环、电磁耦合或有源无线等方式供给能量和传输信号, 存在测量精度低、使用寿命短、高温高压条件下易燃易爆等问题^[1-3]。声表面波(SAW)传感技术以其无源本质和无线功能进行扭矩检测, 在阅读器和天线的配合下可以实现能量的可靠供给和信号的有效传输^[4]。阅读器天线是 SAW 扭矩检测系统的关键组成部分。

本文针对转轴结构展开阅读器天线的仿真设计, 设计了一种适用于圆柱转轴结构的水平全向性环状天线。环状天线按辐射体尺寸大小可分为电大环和电小环^[5], 根据 SAW 扭矩检测系统的工作频段和转轴大小选择电大环天线进行设计, 但电大环在环内各处导体的电流幅值和相位差异较大, 天线的全向性将受到影响^[6]。文献[7]设计了一种用于 SAW 扭矩检测的电大环天线, 调谐电容将两段辐射体连接构成圆环, 全向性较差。本文将天线导体分割成若干段, 各段重叠一定角度以代替电容, 这样

收稿日期: 2020-09-05

基金项目: 航空科学基金资助项目(2014ZD52053); 江苏省研究生科研与实践创新计划基金资助项目(SJCX20_0069)

作者简介: 熊志强(1997-), 男, 江西南昌人, 硕士生, 主要从事声波传感与识别技术的研究。通信作者: 陈智军(1976-), 男(侗族), 湖北武汉人, 副教授, 硕士生导师, 主要从事声波传感与识别技术的研究。E-mail: zjchen@nuaa.edu.cn.

可以通过调整重叠角度的方式减小电流相位变动^[8],从而增强天线的全向性。仿真与测试结果均表明,分段环状天线具有较好的全向性,满足无线无源 SAW 扭矩检测系统的需求。

1 声表面波扭矩检测原理

SAW 扭矩传感以 SAW 谐振器作为传感器感应扭矩产生的弹性应变。SAW 谐振器主要由压电基底、叉指换能器(IDT)和反射栅组成,SAW 扭矩检测系统的工作原理如图 1 所示。阅读器产生高频激励信号经阅读器天线、传感器天线传输到 IDT 上,再通过逆压电效应激发出 SAW 沿压电基底表面向两侧传播;SAW 经过多次相干反射叠加,在反射栅和压电基底共同构成的声学谐振腔内形成驻波反射回 IDT,再经压电效应后通过传感器天线将回波信号以电磁波形式发射出去;阅读器收到后进行信号处理,得到与应变相关的谐振频率,进而得到相应扭矩值。

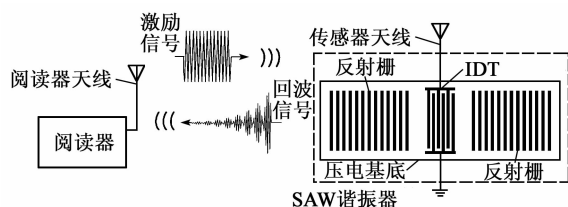


图 1 SAW 扭矩检测系统

当转轴受到扭矩 M 作用时,传感器与转轴的轴向呈 $\pm 45^\circ$ 粘贴,可以将转轴横截面受到的剪应力转换成传感器受到的正应力^[9]。扭矩测量采用差分方案,在转轴的相对位置粘贴两组差分型共 4 个 SAW 传感器,以提高灵敏度并消除弯矩影响^[10]。1[#]、2[#]、3[#]、4[#] 传感器粘贴位置示意图如图 2 所示。由于 SAW 扭矩传感器和传感器天线固定在转轴两侧,为使阅读器能在转轴静态或动态工作条件下有效地接收传感器回波信号,本文拟设计水平全向性分段环状天线作为阅读器天线。

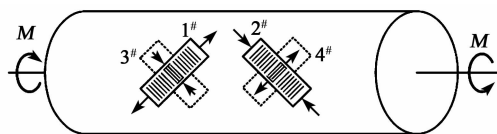


图 2 传感器粘贴方案示意图

2 分段环状天线仿真

根据 SAW 扭矩检测系统需求,4 个传感器中心频率分别为 431 MHz、433 MHz、435 MHz 和 437 MHz,且各占 2 MHz 带宽。本文拟设计中心频率约为 434 MHz 的分段环状天线,带宽能够覆盖 430~438 MHz 频段,输入阻抗约为 50Ω ,天线所在

平面应具有良好的全向性。

使用三维电磁仿真软件 HFSS 对分段环状天线进行仿真优化设计,天线结构及相关参数如图 3 所示。为便于采用 PCB 工艺制作天线,基底材料选用环氧树脂 FR4。系统的转轴直径为 $\varnothing 25$ mm,为与该尺寸相匹配,设置分段环状天线的基底内径(d_1)为 $\varnothing 100$ mm、外径(d_2)为 $\varnothing 160$ mm,厚度(H)为 0.8 mm。天线的辐射体材料选用金属铜,辐射体厚度(h)为 0.035 mm。由于距辐射体馈电点 $1/4$ 波长处电流相位会产生突变^[11],因此每段辐射体长度应小于波长的 $1/4$ 。本文选择把天线辐射体分为 6 段,相邻的辐射体段重叠一定角度,即 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 、 θ_4 、 θ_5 。为使天线工作在特定频率,辐射体周长需要与天线的波长对应。所需设计的天线中心频率为 434 MHz,分别只在自由空间和基底介质中传播,对应的波长约为 691 mm 和 346 mm。因此,天线辐射体的周长应为 346~691 mm,辐射体半径(r)为 55~110 mm,仿真优化前初步设置 $r=62.5$ mm,辐射体宽度 $w=4$ mm。

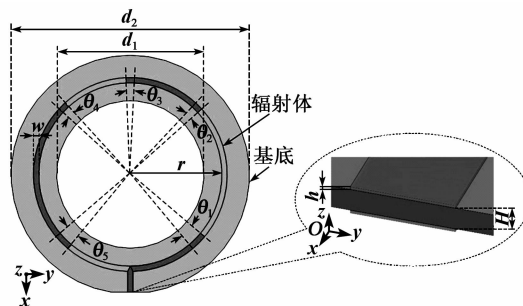


图 3 分段环状天线结构

首先对各段辐射体重叠角度进行仿真以优化天线的全向性能。因为扭矩检测系统中转轴采用金属导体,且处于天线感应场区,天线和转轴将发生相互耦合而产生互阻抗,所以仿真时需加入转轴模型,如图 4 所示。

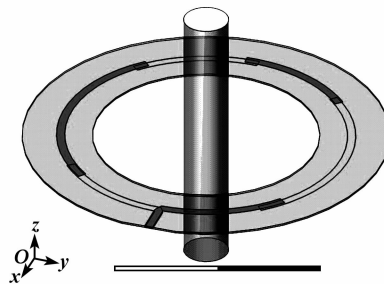


图 4 分段环状天线和转轴模型

分别设置图 3 中重叠角度 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 、 θ_4 、 θ_5 ,在 $0 \sim 20^\circ$ 时每隔 1° 仿真得到 xy 平面的辐射方向图。为提高对称性,设置 θ_1 和 θ_5 、 θ_2 和 θ_4 处的角度相同。仿真过程中几种不同重叠角度对应的 xy 平面(对

应 HFSS 中球坐标系下俯仰面 $\theta=90^\circ$ 、 $0^\circ\leq\varphi\leq360^\circ$ 的平面)辐射方向图如图 5 所示。由图可知,重叠角度不同时,天线的整体增益大小及增益最大值与最小值之差均不相同。当 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 、 θ_4 、 θ_5 分别为 10° 、 5° 、 5° 、 5° 、 10° 时,增益最大值约为 -3.14 dB,最小值约为 -3.79 dB,相差约 0.65 dB,整体增益较高且增益变化最小。因此,最终将分段环状天线的 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 、 θ_4 、 θ_5 设置为 10° 、 5° 、 5° 、 5° 、 10° ,可实现天线在具有高辐射效率的同时具有良好的全向性。

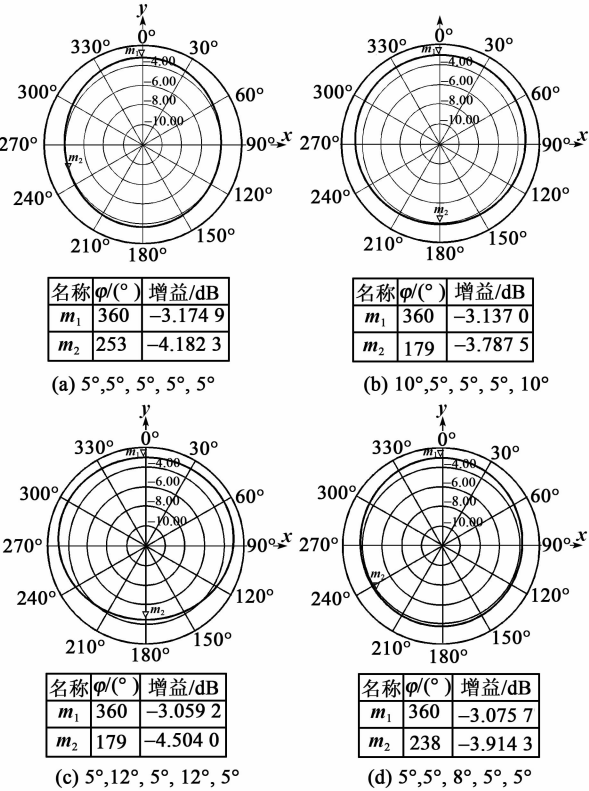


图 5 辐射体段不同重叠角度对应的 xy 平面辐射方向图

天线的中心频率主要由辐射体长度决定,因此需对 r 进行参数化扫描以仿真优化。粗调后将 r 的扫描范围设置为 $60.0\sim64.5$ mm,步长为 0.5 mm,回波损耗仿真结果如图 6 所示。由图可知,天线的中心频率随 r 的增大而减小,当 $r=60.5$ mm 时,天

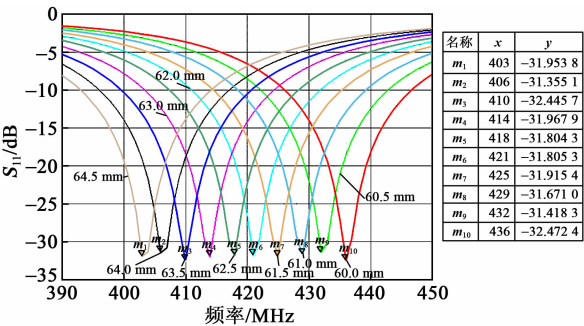


图 6 辐射体半径参数化扫描回波损耗变化

线中心频率为 432 MHz,接近设计指标。

然后对 w 进行参数化扫描,以调节天线的输入阻抗使其实现接近 $50\ \Omega$ 的阻抗匹配要求。设置 r 为 60.5 mm, w 的扫描范围为 $3.0\sim3.9$ mm,步长为 0.1 mm,输入阻抗和回波损耗仿真结果分别如表 1 和图 7 所示。由表 1 可知,天线的输入阻抗随 w 增大而增大。从图 7 可看出,天线中心频率也受到一定程度的影响,随着 w 的增大而减小。当 $w=3.6$ mm 时,天线的输入阻抗为 $(49.51+j1.03)\ \Omega$,接近 $50\ \Omega$,中心频率为 434 MHz,基本满足设计要求。

表 1 辐射体宽度参数化扫描输入阻抗变化

w/mm	输入阻抗/ Ω	w/mm	输入阻抗/ Ω
3.0	$19.67-j30.15$	3.5	$40.74-j4.60$
3.1	$22.42-j25.22$	3.6	$49.51+j1.03$
3.2	$25.82-j19.99$	3.7	$61.03+j5.79$
3.3	$29.26-j15.41$	3.8	$75.41+j8.92$
3.4	$34.84-j9.55$	3.9	$92.31+j8.21$

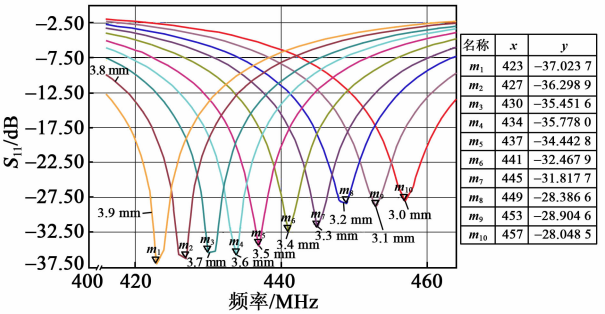


图 7 辐射体宽度参数化扫描回波损耗变化

最终通过仿真优化得到的分段环状天线结构参数如表 2 所示。根据表 2 的天线结构参数仿真得到的优化结果如图 8 所示。由图 8(a)可知,天线的中心频率为 434 MHz,以 -10 dB 为上限可以确定天线带宽为 $424\sim444$ MHz,覆盖了 SAW 扭矩检测系统 $430\sim438$ MHz 的工作频带范围;由图 8(b)、(c)可知,天线的输入阻抗为 $(49.51+j1.03)\ \Omega$,对应的归一化阻抗为 $0.99+j0.02$,基本满足天线输入阻抗的设计要求;由图 8(d)可知,天线在 xy 平面各方向的增益较一致,最大处与最小处相差 0.67 dB,基本符合全向性的设计要求。

表 2 天线结构参数仿真优化结果

d_1/mm	d_2/mm	H/mm	r/mm
100	160	0.8	60.5
$\theta_i/(^\circ)$		w/mm	h/mm
10, 5, 5, 5, 10		3.6	0.035

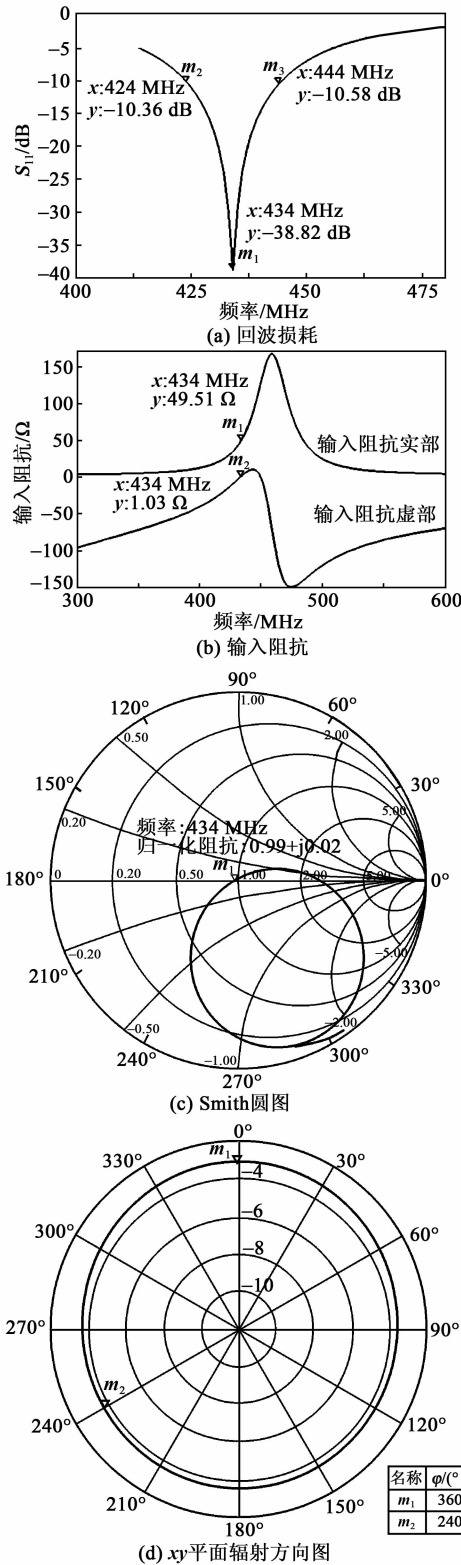


图8 根据优化的天线结构参数得到的仿真结果

3 分段环状天线测试

根据表1的天线结构参数仿真优化结果,使用Altium Designer软件绘制分段环状天线并制作实

物如图9所示。

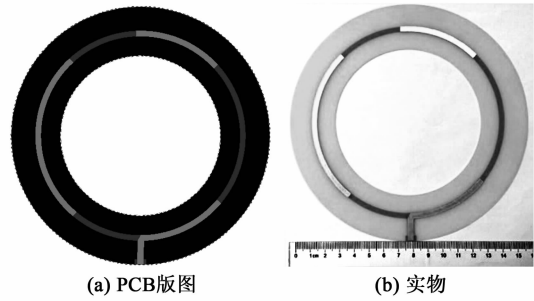


图9 实际制作的分段环状天线

将分段环状天线的馈电端焊上射频头,使用矢量网络分析仪(VNA)测试天线的回波损耗和输入阻抗,测试时将转轴放置到天线内部,结果如图10所示。由图10(a)可知,天线的中心频率为431.6 MHz,带宽为424~440 MHz,虽然与仿真结果相比有差异,但可以覆盖SAW扭矩检测系统430~438 MHz的工作频带,满足带宽要求;由图10(b)可知,天线的输入阻抗为 $(54.31-j2.42)\Omega$,接近 50Ω ,基本满足输入阻抗要求,不需要额外设计包括电容、电感的阻抗匹配电路。

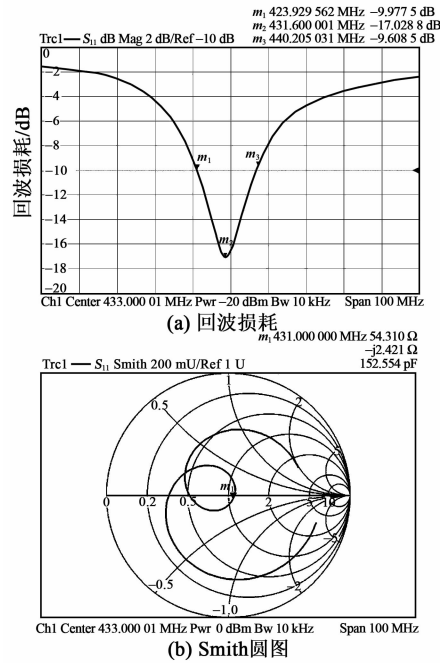


图10 天线测试结果

使用VNA的端口1、2分别连接分段环状天线和SAW传感器所采用的小型棒状天线,将小型棒状天线置于环状天线中心处并保持静止,旋转环状天线改变其馈电端口与初始位置的相对角度,通过测量不同角度下的传输系数来验证天线的全向性。

全向性测试结果如图 11 所示,分段环状天线所在平面传输系数最大为-24.1 dB,最小为-26.0 dB,两者相差 1.9 dB,具有较好的全向性。

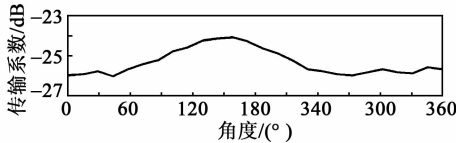


图 11 天线全向性测试结果

4 扭矩检测系统测试

SAW 扭矩检测实验平台如图 12 所示。本系统使用表盘式双向扭矩扳手施加扭矩,其量程为-100~100 N·m,精度±1%。将表盘示值作为转轴扭矩的真值,用于分析扭矩检测的误差。阅读器天线使用本文设计的分段环状天线。无线测试时,阅读器测量每个传感器在加载扭矩下的谐振频率,并换算成相应的扭矩值传输到上位机中显示。扭矩测量结果如表 3 所示。由表可知,在-80~80 N·m 时,实测扭矩与施加扭矩的满量程误差为 2.5%。结果表明,包括该阅读器分段环状天线的 SAW 扭矩检测系统可较准确地测量扭矩。

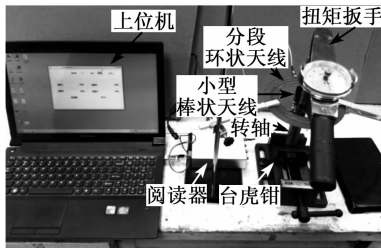


图 12 扭矩检测实验平台

表 3 扭矩测量结果

正向测试		反向测试	
施加扭矩/ (N·m)	实测扭矩/ (N·m)	施加扭矩/ (N·m)	实测扭矩/ (N·m)
0	0	0	0
10	11	-10	-10
20	20	-20	-20
30	30	-30	-30
40	39	-40	-41
50	48	-50	-51
60	58	-60	-60
70	69	-70	-68
80	79	-80	-78

5 结束语

本文针对 SAW 扭矩检测系统设计了一种用于转轴结构的分段环状天线,通过 HFSS 仿真优化了

天线的结构参数,并实际制作与测试了天线实物和 SAW 扭矩检测系统。测试结果表明,天线中心频率为 431.6 MHz,带宽 424~440 MHz,可以覆盖 SAW 扭矩检测系统 430~438 MHz 的工作频带范围;输入阻抗为(54.31-j2.42) Ω,接近 50 Ω,基本满足输入阻抗要求,无需额外设计阻抗匹配电路;天线所在平面的全向性较好,不同角度下传输系数最大值与最小值相差 1.9 dB。包括该分段环状天线的 SAW 扭矩检测系统可实现较好的扭矩测量效果,在-80~80 N·m 时的满量程误差为 2.5%。

参考文献:

[1] 樊尚春,吕俊芳,张庆荣,等. 航空测试系统[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2005.

[2] 张文明. 燃油泵滑动轴承试验台测控系统的研制[D]. 合肥:合肥工业大学,2013.

[3] 齐红丽,李涛,江舒,等. 基于声表面波技术的无线无源扭矩测量系统研究与实现[J]. 船舶工程,2014,36(1): 99-103.

[4] SILVA D,MENDES J C,PEREIRA A B,et al. Measuring torque and temperature in a rotating shaft using commercial SAW sensors[J]. Sensors, 2017, 17(7): 1547.

[5] CARR J J,HIPPISLEY G W. Practical antenna handbook[M]. Fifth Edition. New York: McGraw-Hill/TAB Electronics,2012.

[6] HASSE R,HUNSICKER W,NAISHADHAM K,et al. Analysis and design of a partitioned circular loop antenna for omni-directional radiation[C]//Spokane, USA:IEEE International Symposium on Antennas & Propagation,2011:1379-1382.

[7] 童锐,陈智军,孙聪,等. 用于声表面波扭矩传感的环状天线设计[J]. 声学技术,2015,34(4):149-152.

[8] HASSE R,HUNSICKER W,NAISHADHAM K,et al. Design of a planar segmented circular loop antenna for omnidirectional radiation at 5.8 GHz[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2012, 11: 1402-1405.

[9] JIANG Chao,CHEN Yanqin,CHO C D. A three-dimensional finite element analysis model for SH-SAW torque sensors[J]. Sensors,2019,19(19):4290.

[10] 张晓强,于晓洋,张福军,等. 弯矩对应变式扭矩传感器的影响及消除方法[J]. 传感器世界,2002,8(6): 12-14.

[11] 聂在平. 天线工程手册[M]. 成都:电子科技大学出版社,2014.

熔覆层厚度对相控阵表面波聚焦特性的影响

周永立, 周 刚, 胡宏伟, 刘芝平

(长沙理工大学 汽车与机械工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘 要: 超声表面波是检测激光熔覆层质量的重要手段, 为提高检测分辨率, 采用可达到声束聚焦效果的相控阵表面波对激光熔覆层进行检测。建立了单探头与相控阵表面波传播的有限元模型, 基于 Fermat 原理研究超声波传播路径并分析了阵元延时特性, 实现了相控阵表面波的聚焦和偏转, 研究了熔覆层厚度对相控阵表面波聚焦特性的影响。结果表明, 对于基体材料为铝, 熔覆层材料为 45# 钢时, 熔覆层厚度在 2.5 mm 内, 聚焦点的能量随厚度增加而减小, 如 1 mm 厚相对于 0.2 mm 厚的聚焦点能量减小了 58.8%; 当厚度大于 2 mm 时, 聚焦点处能量变化不明显, 表明超声相控阵表面波对薄的熔覆层具有较好的检测效果。

关键词: 超声相控阵; 表面波; 激光熔覆层; 聚焦特性; 有限元

中图分类号: TN65; TB553 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11977/j.issn.1004-2474.2020.06.005

The Influence of Cladding Layer Thickness on Surface Wave Focusing Characteristics of Phased Array

ZHOU Yongli, ZHOU Gang, HU Hongwei, LIU Zhiping

(School of Automotive and Mechanical Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: The ultrasonic surface wave is an important method to detect the quality of laser cladding layer. In order to improve the detection resolution, the phased array surface wave which can achieve the focusing effect of acoustic beam is used to detect laser cladding layer. Firstly the finite element model of surface wave propagation between single probe and phased array is established. Subsequently, the ultrasonic wave propagation path is studied based on the Fermat principle and the delay characteristics of the array elements. The focusing and deflection of the phased array surface wave are realized, and the influence of the thickness of the cladding layer on the focusing characteristics of the phased array surface wave is studied. The results show that when the base material is aluminum and the cladding layer material is 45# steel, the thickness of the cladding layer is within 2.5 mm, and the energy of the focal point decreases with the increase of thickness. Especially, the energy of the focal point decreases by 58.8% with the thickness of 1 mm compared to 0.2 mm. When the thickness is greater than 2 mm, the energy changes little at the focus point, indicating that the ultrasonic phased array surface wave has a good detection effect on the thin cladding layer.

Key words: ultrasonic phased array; surface wave; laser cladding layer; focus features; finite element

0 引言

激光熔覆是对零件进行表面改性、修复、增材制造等重要手段, 在航空航天、海洋工程、汽车等重要工业中得到了广泛应用。然而熔覆过程中产生的应力及熔池流动性差, 易导致裂纹、气孔和夹杂等缺陷^[1], 严重降低了激光熔覆零件的使用性能, 甚至会导致关键零件失效而引发重大事故, 故对熔覆层进行检测极为重要。

超声无损检测具有检测速度快, 灵敏度高及适应性强的优点, 是常用的检测手段之一^[2], 也是目前激光熔覆层检测的研究热点^[3-4]。由于激光熔覆层厚度一般在 3 mm 以内, 若采用超声纵波和横波对激光熔覆层表面缺陷进行检测, 则难以避免出现熔覆层界面回波和缺陷回波重叠^[5], 且纵波对表面缺陷的灵敏度较低。表面波可以有效避免上述问题, 同时表面波能够探测到表面以下 2 个波长的深度,

收稿日期: 2020-09-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52075049); 湖南省自然科学基金资助项目(2020JJ2028); 湖南省教育厅科学研究重点基金资助项目(18A142)

作者简介: 周永立(1996-), 男, 湖南娄底人, 硕士生, 主要从事无损检测及信号处理的研究。E-mail: ylzhou1996@foxmail.com。通信作者: 胡宏伟(1980-), 男, 安徽旌德人, 教授, 博士, 主要从事无损检测及信号处理、机电装备智能测控技术的研究。

非常适用于厚度较薄的熔覆层的检测^[6]。董世运等^[7]建立了 Fe314 激光熔覆层中单探头表面波的声弹关系公式,且成功检测了激光熔覆层的应力。刘彬等^[8]采用超声单探头表面波对激光熔覆层裂纹深度进行了评价,结果显示表层裂纹信号幅值随裂纹深度的增大而增大。受熔覆层各向异性组织及表面粗糙度等因素的影响,缺陷回波信号的信噪比低,使缺陷检测分辨率低^[9]。与单探头超声表面波检测相比,超声相控阵表面波检测具有检测速度快,灵敏度高及能适应复杂对象的优势。Ohara 等^[6,10]和 Xiang 等^[11]分别采用楔块式相控阵表面波和电磁超声相控阵表面波对表面缺陷进行检测,结果表明相控阵表面波对缺陷有较高的灵敏度。这些研究表明采用相控阵表面波检测激光熔覆层缺陷是可行的,但相控阵表面波的成像效果与缺陷处表面波能量相关且易受厚度的影响^[12]。但是,上述研究均未考虑到厚度对相控阵表面波缺陷检测的影响,且由于实际工业生产的激光熔覆层厚度的变化,为了研究激光熔覆层相控阵表面波成像,有必要研究激光熔覆层厚度对缺陷聚焦能量的影响。

本文开展了超声相控阵表面波检测激光熔覆层的研究,首先采用有限元法建立单探头与阵列式超声表面波的传播模型,随后结合相控阵表面波的延时法则,研究了相控阵表面波的聚焦和偏转特性,最后研究了激光熔覆层的厚度对超声相控阵表面波聚焦特性的影响。

1 相控阵表面波检测原理

超声相控阵由多个独立换能器阵元按一定形状和尺寸排列构成,每个阵元都有自己独立的发射和接收电路,并不受其他阵元的影响。通过在每个阵元施加特定的延时来改变超声波声束的方向,从而达到合成声束偏转、聚焦的效果。对于常用的楔块耦合式相控阵表面波,当楔块角度大于第二临界角时,入射纵波会经楔块发生波形转换后在检测对象表面产生表面波。

以一维线性相控阵(见图1)为例,相控阵主要参数有:阵元个数 N ,阵元宽度 a ,阵元间距 d ,阵元间隙 g ,阵元总长度 $2L$ 。阵元中心距熔覆层的高度为 H ,超声波在楔块和熔覆层内的传播速度分别为 c_1 、 c_2 。激励阵元 i ,接收阵元 j ,入射角 θ ,折射角 θ_s , $S_i(x_i, y_i, z_i)$ 、 $S_j(x_j, y_j, z_j)$ 分别为声束在工件上的入射点和声束从工件反射至 j 阵元的点, $F(x, y, z)$

为缺陷位置。

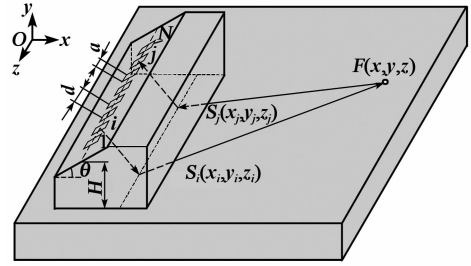


图1 相控阵表面波延时计算原理图

若 N 个阵元(见图1)沿 x 轴对称分布,第一个阵元的中心在 y 轴上的坐标 $y_1 = -L + \frac{a}{2}$,且相邻两阵元中心的间距为 $d = g + a$,故可得出第 i 个阵元中心在 y 轴上的坐标 y_i 为

$$y_i = -L + \frac{a}{2} + d \times (i - 1) \quad (1)$$

根据 N 、 a 和 g 可得 L 为

$$L = \frac{N}{2} \times a + \left(\frac{N}{2} - 1\right) \times g + \frac{g}{2} \quad (2)$$

联立式(1)、(2)可得到第 i 个阵元的中心在 y 轴上的坐标 y_i 为

$$y_i = \left(i - \frac{N+1}{2}\right) \times d \quad (3)$$

第 i 个阵元的三维坐标为 $(x_i, (i - \frac{N+1}{2}) \times d, H)$ 。

通过 Snell 定律:

$$\frac{\sin \theta}{\sin \theta_s} = \frac{c_1}{c_2} \quad (4)$$

当 $\theta_s = 90^\circ$ 时,可得到在熔覆层表面产生表面波所对应的楔块临界角度 $\theta_c = \arcsin \frac{c_1}{c_2}$,故当楔块角度大于 θ_c 时,信号通过压电晶片入射到第二层介质上,在点 S_i 处发生波形转换而产生表面波,再根据 Fermat 原理:声束总是沿着所需时间最短的路径传播至缺陷点 $F(x, y, z)$ 处。图1描述了超声传播的路径,经过几何计算可得到该过程的声传播时间 T_i 为

$$T_i = \frac{H}{c_1 \cos \theta} + \frac{\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}}{c_2} \quad (5)$$

式中: $x_i = \left(\frac{N+1}{2} - i\right) \times d$; $y_i = \frac{H}{\cos \theta}$; $\sin \theta \geq \frac{c_1}{c_2}$ 。

以其中最短传播时间 $\min(T_i)$ 的阵元为基础,从而可得到各个阵元上的时间延时 Δt_i 为

$$\Delta t_i = T_i - \min(T_i) \quad (6)$$

通过设置各阵元上的 Δt_i ,可使声束聚焦到缺陷

点 $F(x, y, z)$ 处。

2 有限元仿真

2.1 表面波有限元理论

根据超声波的性质求解质点运动方程,可得表面波的振动位移在 x, z 方向的位移^[13]分别为

$$u = a(k) \sin[k(x - ct)] \quad (7)$$

$$w = b(k) \cos[k(x - ct)] \quad (8)$$

式中: $a(k)$ 为与纵波分量有关的方程; $b(k)$ 为与横波分量有关的方程; c 为超声传播声速; t 为时间。

由能量守恒定律、动量守恒定律、介质状态方程及小振幅近似,再结合固体弹性介质中声场的线性方程^[14],可得到表面波在 x, z 方向声场的线性方程:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = C \cdot u + F_v \quad (9)$$

$$\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = C \cdot w + F_v \quad (10)$$

式中: ρ 为密度; C 为弹性系数; F_v 为施加的外力。

本次仿真采用的是各向同性且均匀的材料,当引入拉梅常数 λ, μ 时,表面波在均匀各向同性弹性材料中传播的波动方程为

$$(\lambda + 2\mu) \nabla \nabla \mu - \mu \nabla \times \nabla \times u = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (11)$$

$$(\lambda + 2\mu) \nabla \nabla \mu - \mu \nabla \times \nabla \times w = \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \quad (12)$$

根据有限元计算标准步骤,首先将计算区域划分为若干单元和节点,然后构造唯一差值函数,并用节点唯一和位移插值函数表示四求解区域中任意一点位移,再根据伽辽金法并结合节点位移变分任意性,由式(11)、(12)导出系统的运动方程:

$$\mathbf{MA}''(t) + \mathbf{CA}'(t) + \mathbf{KA}(t) = \mathbf{Q}(t) \quad (13)$$

式中: $\mathbf{A}''(t)$ 、 $\mathbf{A}'(t)$ 、 $\mathbf{A}(t)$ 分别为系统的节点加速度向量、节点速度向量、节点位移向量; $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{K}$ 、 $\mathbf{Q}(t)$ 分别为系统的质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵和节点载荷向量。

2.2 有限元仿真模型

使用 COMSOL Multiphysics 软件建立了三维超声相控阵表面波检测模型,模型如图 2 所示。楔块、熔覆层和基体均由线弹性材料组成,材料弹性参数如表 1 所示。其中,楔块材料为丙烯酸有机玻璃,熔覆层材料为 45#钢;基体材料为铝。纵波在楔块的传播速度为 2 077 m/s,表面波在熔覆层中的传播速度为 2 951 m/s,根据式(4)可得产生表面波的临界折射角为 44.7°。由超声波在楔块中的传播距

离 $d_w = \frac{H}{c_1 \cos \theta}$ 可知,当楔块角度越大时,该传播距离越大,能量衰减越大,故楔块角度不应取过大,本次仿真设置的楔块角度为 50°。通过在每个阵元上施加均匀的位移载荷 $y(t)$ 产生超声波信号。这里仿真相控阵选用 $N=32$, $a=0.5$ mm, $d=0.6$ mm, $g=0.1$ mm;采用激励频率 $f=1$ MHz,则可得表面波波长为 2.951 mm,理论上可以探测 5.902 mm 深度的缺陷。故以图 2 坐标系为基准,设置一个 0.5 mm×0.5 mm×1 mm 的裂纹在 $F(30, 5, h)$ 处,保证该缺陷能被表面波检测到, $y(t)$ 为

$$y(t) = A \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi ft}{3}\right) \right] \cos(2\pi ft) \quad (0 \leq t \leq 3T_0) \quad (14)$$

式中 $A=5 \times 10^{-6}$ m 为振动幅值; T_0 为周期。

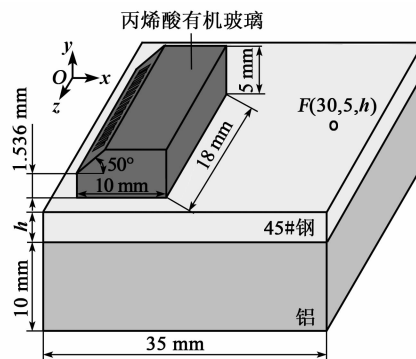


图 2 三维仿真模型示意图

表 1 各材料相关参数

材料	$\rho/$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	杨氏模 量/GPa	泊松比
丙烯酸有机玻璃	1 190	3.2	0.35
45#钢	7 850	200.0	0.30
铝	2 700	70.0	0.33

为了防止表面波在熔覆层传播过程中受边界反射的影响,在丙烯酸有机玻璃、45#钢、铝的外表面设置低边界反射条件,用来保证只有很小部分的能量被反射回来。同时为了保证有限元仿真结果的精确度,最大网格单元尺寸 $h_{\max} \leq \frac{1}{P} \lambda_{\min}$, P 是求解具有一定精度所需的每个单位波长的单元数,一般取 $P=5$ 。时间步长 Δt 和柯朗-弗里德里希斯-列维条件(CFL)有关:

$$\Delta t = \frac{h_{\max} \text{CFL}}{c} = \frac{\text{CFL}}{P f_{\max}} \quad (15)$$

式中: $f_{\max}$ 为超声波的最大频率; $\text{CFL}=0.2$ 。

经过计算可得到楔块中纵波的波长 $\lambda_w =$

2.077 mm,工件中表面波波长 $\lambda_s=2.951$ mm,理论上,楔块与工件最大网格尺寸分别为0.415 4 mm和0.590 2 mm。其余厚度同上处理。

3 仿真结果与讨论

首先对常规的单探头检测进行仿真模拟,即将阵元数量设置为1个,仿真结果如图3所示。由图3(a)可知,在熔覆层表面传播时,超声波在 z 方向的运动轨迹是椭圆,说明采用特定角度的楔块能够在熔覆层表面产生表面波。从图3(b)、(c)可看出,表面波能量较小,缺陷处振动位移幅值为 4.48×10^{-4} mm。

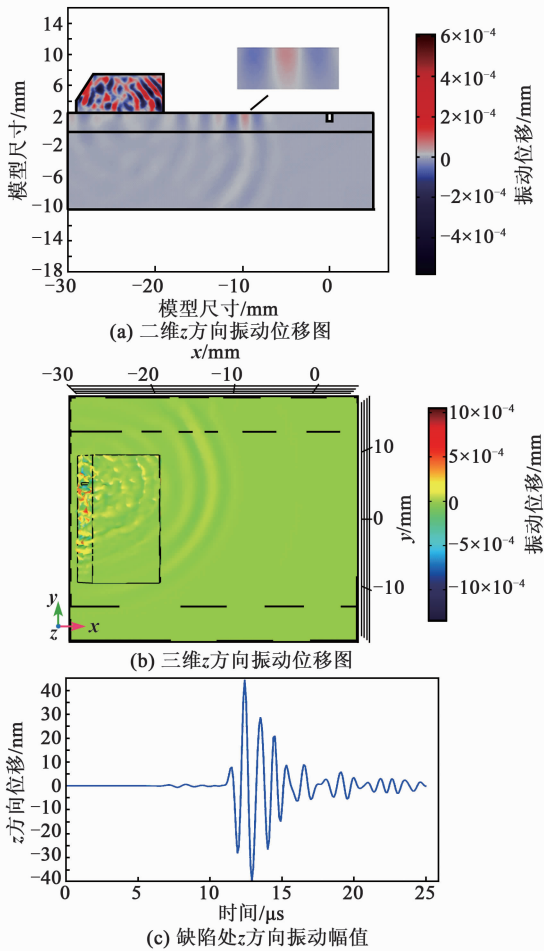


图3 单探头激励仿真结果

随后,对相控阵检测进行仿真模拟。根据相控阵表面波延时原理,由式(6)可计算出各个阵元1~ N (图2中从下至上)施加如图4所示的时间延时,得到熔覆层厚度 h 为2.5 mm的仿真结果如图5所示。由图5(a)可知,无延时处理时,超声表面波声束沿着熔覆层表面扩散,最大振动幅值出现在中心处,其余位置的振动幅值较小,而由图5(b)可知,经过延时处理后,超声表面波声束明显聚焦在缺陷

$F(30,6,2.5)$ 处,且聚焦能量相对于无延时处理的缺陷处能量有所提升,可提高工件任意成像点的分辨率。

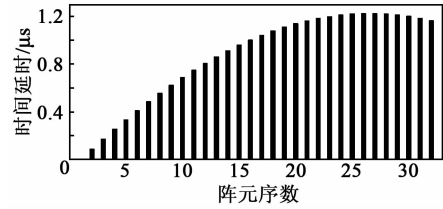


图4 各阵元上的时间延时图

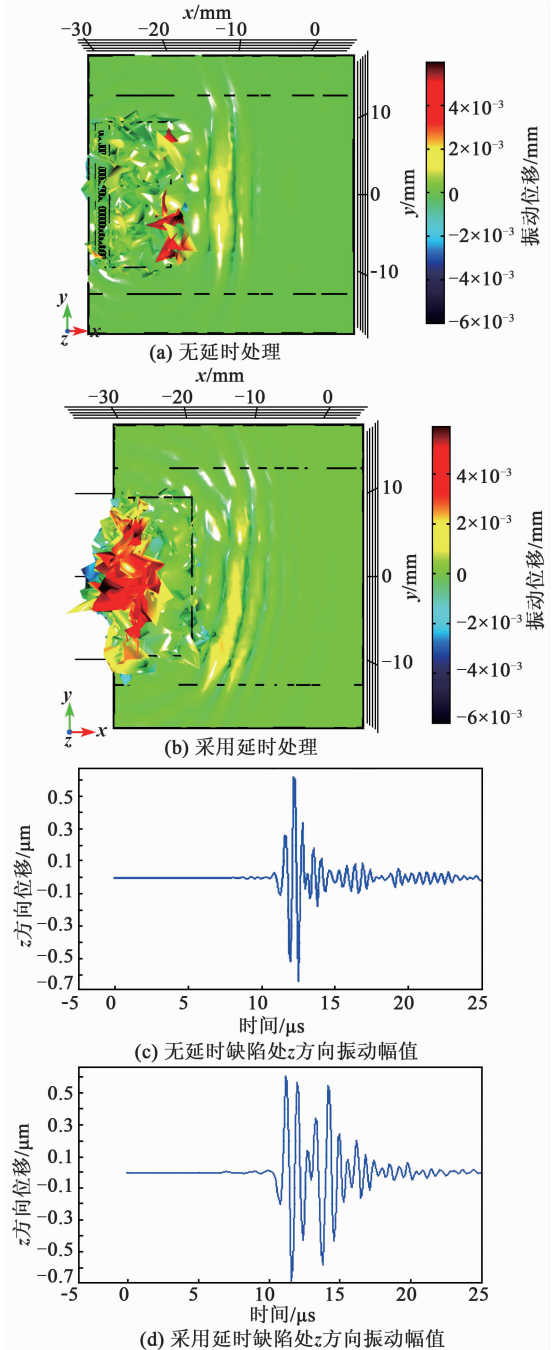


图5 相控阵激励仿真结果

与图 3(b)相比,从图 5(a)、(b)可看出,相控阵激励时,表面波能量明显大于单探头。对比图 3(c)、图 5(c)、(d)的振动幅值,计算可知相控阵表面波在缺陷处的振动幅值约为单探头的 15.64 倍。

考虑到表面波能探测 2 个波长($2\lambda_s=5.9\text{ mm}$)深度内的缺陷,选取 $h=0.2\text{ mm}$ 、 0.3 mm 、 0.5 mm 、 0.6 mm 、 0.8 mm 、 1.0 mm 、 1.1 mm 、 1.3 mm 、 1.5 mm 、 1.6 mm 、 1.8 mm 、 2.0 mm 、 2.5 mm 、 $\dots$ 、 5.0 mm ,并在缺陷处采集到表面波最大振动位移如表 2 所示。

表 2 熔覆层厚度对应缺陷处振动幅值

h/mm	缺陷处最大 振动位移/ μm	h/mm	缺陷处最大 振动位移/ μm
0.2	2.581	1.6	0.797
0.3	2.045	1.8	0.765
0.5	1.686	2.0	0.713
0.6	1.418	2.5	0.688
0.8	1.100	3.0	0.693
1.0	1.099	3.5	0.686
1.1	1.053	4.0	0.676
1.3	0.878	4.5	0.669
1.5	0.883	5.0	0.676

将上述结果进行拟合,得到 h 和缺陷处最大振动位移间的关系如图 6 所示。

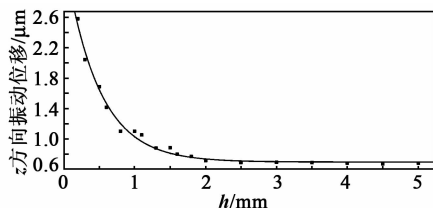


图 6 h 与缺陷处最大振动位移的关系

由图 6 可知,当 $h < 1\text{ mm}$ 时,随着 h 的增加,缺陷处表面波最大振动位移明显减小,当 $h = 1 \sim 2\text{ mm}$ 时,随着 h 的增加,缺陷处表面波最大振动位移缓慢减少,聚焦效果逐渐变差;当 $h > 2\text{ mm}$ 时, h 越大,缺陷处表面波最大振动位移变化不明显,即在此距离区间聚焦效果变化不大。其中 h 增加到 1 mm 时,聚焦点处的能量(即最大振动位移)相对于 $h = 0.2\text{ mm}$ 时减小了 58.8%,由此认为熔覆层越薄,相控阵表面波的聚焦特性越好。因此,相控阵表面波适用于薄的激光熔覆层的检测。

4 结束语

本文提出了采用相控阵超声表面波检测激光熔

覆层缺陷的方法,建立了适用于相控阵表面波聚焦与偏转的延时算法。随后开展了相控阵表面波在熔覆层传播的有限元模拟,分析了熔覆层厚度对缺陷检测影响规律。结果表明,当熔覆层厚度小于 1 mm 时,随着厚度增大,聚焦点能量急剧减小;当厚度增加到 1 mm 时,缺陷处的能量相对于厚度为 0.2 mm 减小了 58.8%;而当厚度达到 2 mm 时,聚焦点能量趋于稳定。仿真表明相控阵表面波对薄的熔覆层具有很好的检测效果。

参考文献:

- [1] BARUN H, SAHA P. Identifying defects and problems in laser cladding and suggestions of some remedies for the same[J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 5(5):13090-13101.
- [2] 胡宏伟,杜剑,李洋,等.基于稀疏矩阵的两层介质超声相控阵全聚焦成像[J].机械工程学报,2017,53(14):128-135.
HU Hongwei, DU Jian, LI Yang, et al. Two-layer medium ultrasonic phased array total focusing method imaging based on sparse matrix[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(14):128-135.
- [3] 徐滨士,董世运,门平,等.激光增材制造成形合金钢件质量特征及其检测评价技术现状(特邀)[J].红外与激光工程,2018,47(4):8-16.
XU Binshi, DONG Shiyun, MEN Ping, et al. Quality characteristics and nondestructive test and evaluation technology for laser additive manufacturing alloy steel components (invited)[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(4):8-16.
- [4] YAN Xiaoling, DONG Shiyun, XU Binshi, et al. Progress and challenges of ultrasonic testing for stress in remanufacturing laser cladding coating[J]. Materials, 2018, 11(2):293.
- [5] JENOT F, FOUREZ S, OUAFTOUH M, et al. Nondestructive testing of thin films using surface acoustic waves and laser ultrasonics[C]//Provo, Utah, USA: AIP Publishing, 2018, 1949(1):230031.
- [6] OHARA Y, OSHIUMI T, NAKAJIMA H, et al. Ultrasonic phased array with surface acoustic wave for imaging cracks[J]. AIP Advances, 2017, 7(6):065214.
- [7] 董世运,闫晓玲,徐滨士.微观组织及残余应力对瑞利波评价激光熔覆层应力的影响[J].机械工程学报, 2015, 51(24):50-56.

宽带声光器件声场仿真研究

吴中超, 唐诗, 吴畏, 高维松, 朱吉, 王智林

(中国电子科技集团公司第二十六研究所, 重庆 400060)

摘要: 该文根据亥姆霍兹-基尔霍夫积分定理, 建立了两片矩形换能器在声光晶体中的声场分布模型, 并利用 MATLAB 数值模拟中心频率为 100 MHz 的矩形换能器在氧化碲晶体中的声场分布, 实现声场可视化。结果表明, 与单片换能器声场分布相比, 两片换能器的结构使声光器件的布喇格带宽增大了 11 MHz。仿真结果为理解声场变化和试验结果提供了理论依据。

关键词: 换能器声场; 模拟; 宽带; 声光器件

中图分类号: TN65; TB552 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11977/j.issn.1004-2474.2020.06.006

Study on Acoustic Field Simulation of Broadband Acousto-optical Devices

WU Zhongchao, TANG Shi, WU Wei, GAO Weisong, ZHU Ji, WANG Zhilin

(The 26th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China)

Abstract: According to the Helmholtz-Kirchoff integration theorem, the acoustic field distribution models of two rectangular transducers in acousto-optic crystal are established in this paper. The acoustic field of rectangular transducers with center frequency of 100 MHz in the tellurium dioxide crystal is simulated numerically and visualized by means of MATLAB. The results show that compared with the acoustic field distribution of the single transducer, the Bragg bandwidth of the acousto-optic device is increased by 11 MHz using the structure of the two transducers. The simulation results can be a theoretical basis for understanding the acoustic field change produced in testing medium and judgment for testing performance.

Key words: transducer acoustic field; simulation; broadband; acousto-optical device

0 引言

声光器件是激光应用中一种基础元器件, 随着雷达、通讯技术的高速发展, 宽带声光布喇格器件具有更高的应用需求^[1]。声光器件由驱动和器件两部分组成, 驱动器输出的载波信号作用在换能器上, 换能器产生超声波传入声光介质, 声场使晶体内产生折射率光栅, 入射光在满足布喇格衍射条件时发生衍射。定义声光衍射效率从最大值下降一半时的频率宽度为声光互作用 3 dB 带宽或简称为布喇格带宽。单片超声换能器结构的超声能量分布在大角度范围内, 每个频率只能利用到某一方向的声场能量, 通过研究超声波换能器组成阵列的指向性^[2], 可以采用多级换能器的方式提高超声能量利用率, 增大声光器件的布喇格带宽。

压电换能器是体波声光器件的重要组成部分,

体波声光器件上所用的压电换能器都是采用厚度驱动模式的薄片换能器, 所激发的超声波可认为是单色平面波。利用亥姆霍兹-基尔霍夫积分定理建立超声换能器在声光晶体中的辐射声场模型, 数值模拟其声场分布, 实现声场可视化^[3]。分析讨论两片换能器同相驱动与反相驱动对超声场的影响, 通过在 90 MHz、100 MHz、120 MHz 的工作频率下, 将两片换能器与单片换能器声场分布对比发现, 两片换能器的设计结构使声光器件拥有更大的布喇格带宽, 对制作宽带声光器件有重要的参考价值。

1 换能器声场分布模型

积分法可以直接计算声场外任意一点观察处的声场, 假设声场到观察点之间的传播介质的声参数(声速、密度等)不变。根据亥姆霍兹-基尔霍夫积分

定理求取矩形换能器的辐射声场^[4]。图 1 为声源叠加示意图,由图可知,设 P 点为换能器辐射区域中的一点,表面积 S 的整个换能器在场点 P 处产生的声压可看成是多个微元在场点 P 处叠加形成的总声压。图中, S_1 、 S_2 分别为换能器上两个不同的微元。

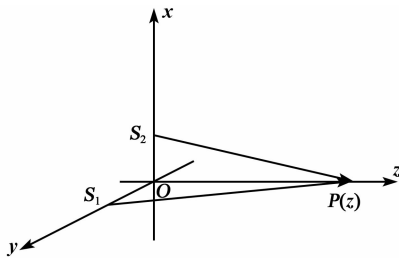


图 1 声源叠加示意图

为了研究矩形换能器在声光介质中的声场分布,对声光晶体建立直角坐标系(见图 2),激光束沿 y 方向入射。 x 、 y 方向分别为换能器的宽度方向和长度方向。

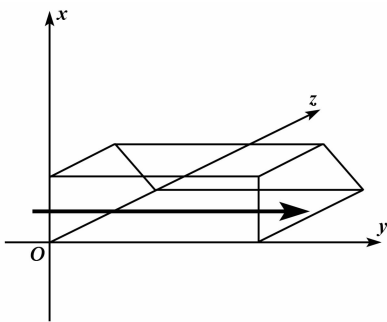


图 2 声光晶体建立直角坐标系示意图

矩形换能器在 P 点处辐射的总声场等于各小面积面元 $(x_1, y_1, 0)$ 在该点处辐射场的总和,由此得到在空间位置 $p(x, y, z)$ 处的声场表达式为

$$p = \frac{j\rho_0 c_0 u_a e^{j\omega t}}{\Lambda} \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \frac{e^{-jkr}}{r} dx_1 dy_1 \quad (1)$$

其中

$$r = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + z^2} \quad (2)$$

式中: ρ_0 为介质密度; c_0 为介质中的声速; u_a 为垂直于换能器平面的质点速度; Λ 为声波的波长; $r(x, y, z)$ 为振动点到 P 的距离; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 为声波数; a 为单片换能器长度; b 为单片换能器宽度。

使用一个驱动电源,将相邻两片换能器并联或串联,可以实现两换能器间不同的相位差。当换能器并联时,无相位差,称为同相驱动;换能器串联时,相位差为 π ,称为反相驱动,示意图如图 3 所示。图

中,RF 为射频信号。

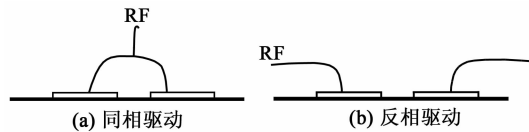


图 3 两片换能器驱动方式

驱动换能器产生超声信号,线性排列的两片换能器安装如图 4 所示,建立直角坐标系,相邻换能器间的中心距为 d 。

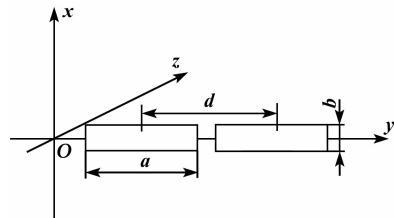


图 4 换能器安装示意图

两片换能器反相驱动时,两换能器存在相位差 π ,将初始相位代入式(1)有:

$$p = \frac{j\rho_0 c_0 u_1}{\Lambda} \int_0^a \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \frac{e^{j(\omega t - kr_1)}}{r} dx_1 dy_1 + \frac{j\rho_0 c_0 u_2}{\Lambda} \int_d^{a+d} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \frac{e^{j(\omega t - kr_1 - \pi)}}{r} dx_1 dy_1 \quad (3)$$

式中 u_1, u_2 分别为两片换能器的表面法向振速。换能器即是波源,它大多采用片状压电体作为声源,声源本身做周期性振动,且其整个表面各个质点具有相同的振幅和相位。声源区域内具有均匀的表面法向速度 $v_z = v_z(x, y) = v_0 e^{-j\omega t}$,其他区域速度恒为 0。其中指数项 $e^{-j\omega t}$ 在所有周期性物理量中都会出现,计算瞬态时可忽略。

2 声场的数值仿真

声光器件通过把外加电信号转换成超声信号在声光介质中传播,如图 5 所示。使满足布喇格衍射条件的激光束产生衍射偏转^[5],衍射角为 2θ ,其中 θ 为布喇格角,可表示为

$$\sin \theta = \frac{\lambda f}{2nv} \quad (4)$$

式中: λ 为入射光波长; f 为换能器激发产生的工作频率; n 为声光晶体的折射率; v 为声波在声光晶体中的传播速度。由式(4)可知,当 f 发生变化时, θ 也将随之改变,偏离超声主方向,超声能量利用率低。如果超声方向能随 f 改变,使超声主方向跟随满足 θ 衍射条件的超声方向,便能提高超声能量利用率,增大声光器件的布喇格带宽。

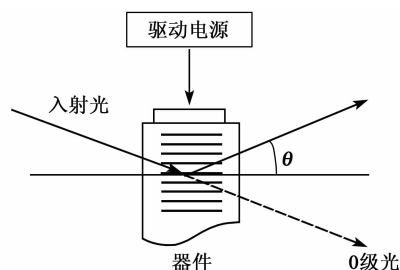


图5 声光器件衍射原理图

声场叠加与声光介质材料、换能器工作频率、换能器尺寸、排列、相位延时等有关,利用 MATLAB 进行数值仿真,认定声场相对于入射光处于稳态状态。设换能器中心频率为 100 MHz,在工作频率 90 MHz、100 MHz、120 MHz 下,根据式(3)分别计算得到在 yOz 平面内同相驱动与反相驱动的声辐射场分布图,如图 6 所示。由图可知,同相驱动存在一个中心叠加的声场,其方向不随换能器工作频率发生变化。

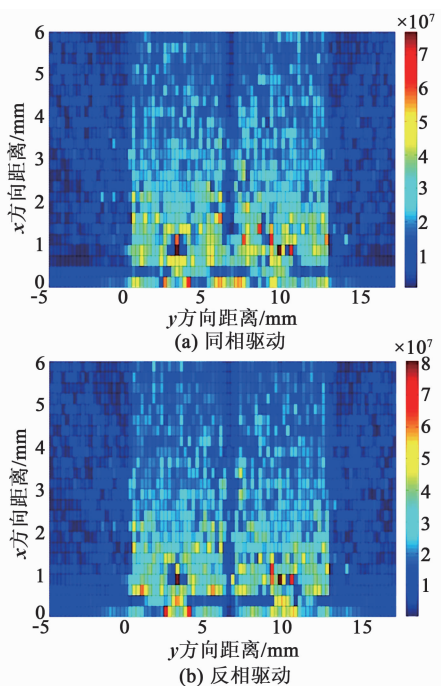


图6 中心频率 100 MHz 下两片换能器声辐射场分布图

选用反相驱动连接换能器的方式抑制中心声场提高布喇格带宽。将两片换能器与单片换能器进行对比,设置数值仿真的相关参数:中心频率 100 MHz,声光介质材料为氧化碲晶体,两片换能器级联的单片长度是特征长度的 1.24 倍,中心距离为单片换能器长度的 1.11 倍,单片换能器使用时,长度为两片换能器长度之和。二者在 yOz 平面内的超声场分布如图 7 所示。

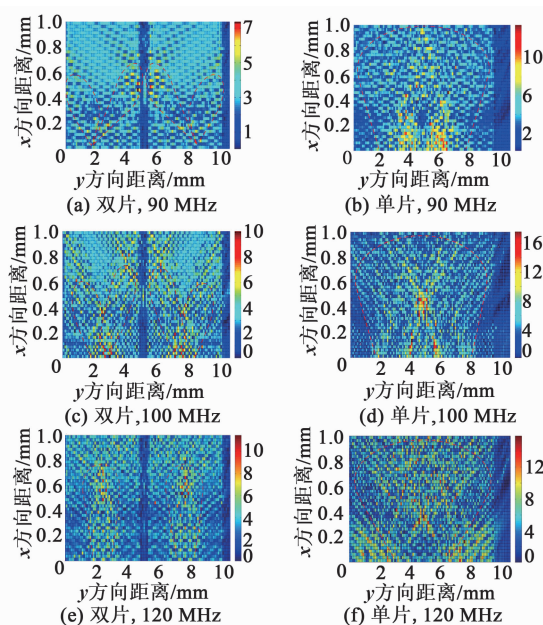


图7 中心频率 100 MHz 辐射声场分布仿真图

3 试验

采用氧化碲晶体作为声光介质,36°Y 切铌酸锂晶体作为换能器材料,制作中心频率 100 MHz 的声光器件,采用入射光波长为 1 550 nm 时,分别记录单片及两片换能器驱动声光器件的衍射效率并做归一化处理,二者具有相同的阻抗匹配带宽,测试器件声光块体的带宽情况如图 8 所示。

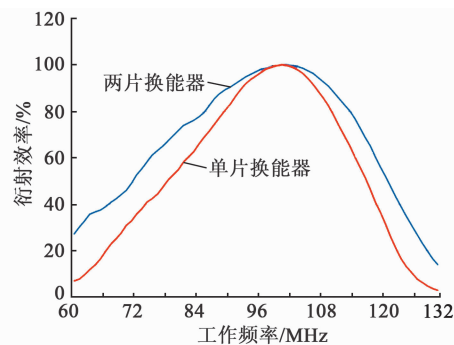


图8 衍射效率归一化

由图 8 可知,单片及双片换能器的带宽分别为 38.5 MHz 和 49.5 MHz,双片换能器结构的器件具有更宽的带宽。试验结果与声场仿真结果吻合,说明声场的数值仿真结果可为实际制作声光器件提供指导。利用 MATLAB 进行数值模拟仿真,将双片换能器拓展到多片换能器级联,可以作为制作高频宽带声光器件的参考依据。

4 结束语

根据 MATLAB 数值仿真结果表明,当换能器

工作频率变化时,基于两片换能器的辐射声场方向也随之发生改变,进而增大了声光器件的布喇格带宽。通过单片换能器与双片换能器的对比试验发现,二者在阻抗匹配带宽相同时,双片换能器结构的声光器件具有更大的布喇格带宽,试验数据与声场仿真情况相符,能够为制作宽带声光器件提供理论参考。

参考文献:

- [1] 刘彪,王晓新,吴冉,等. 宽带声光布拉格器件及应用[J]. 红外与激光工程,2006,35(增刊4):523-527.
LIU Biao, WANG Xiaoxin, WU Ran, et al. Wide band acousto-optic Bragg device and its applications[J]. Infrared and Laser Engineering, 2006,35(Suppl. 4):523-527.
- [2] 邹诚,蔡栋,孙振国,等. 锯齿形超声相控阵声场特性[J]. 清华大学学报(自然科学版),2017(6):46-50.
ZOU Cheng, CAI Dong, SUN Zhenguo, et al. Acoustic field characteristics of serrated ultrasonic phased array transducers[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2017(6):46-50.
- [3] 高世凯,韩冬,安宏庆,等. 相控阵超声换能器声场可视化仿真研究[J]. 航天制造技术,2018,212(6):35-38.
GAO Shikai, HAN Dong, AN Hongqing, et al. Simulation research on sound field visualization of phased array ultrasonic transducer[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2018,212(6):35-38.
- [4] 曹洋,李华,任坤,等. 纵振驱动球面弯曲振动超声聚焦系统的聚焦特性[J]. 应用声学,2018,37(2):273-280.
CAO Yang, LI Hua, REN Kun, et al. Sonic focusing properties of ultrasonic focusing system based on longitudinal vibration driving spherical bending vibration[J]. Applied Acoustics, 2018,37(2):273-280.
- [5] 俞宽新,丁晓红,庞兆广. 声光原理与声光器件[M]. 北京:科学出版社,2011.
- (上接第 756 页)
DONG Shiyun, YAN Xiaoling, XU Binshi. Influence of microstructure and residual stress on surface stress measurement of laser cladding layer by rayleigh wave[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015,51(24):50-56.
- [8] 刘彬,董世运. 检测距离对超声波评价激光熔覆层表层缺陷深度的影响研究[J]. 失效分析与预防,2014,9(3):131-135.
LIU Bin, DONG Shiyun. Influence of detection distance on surface flaw depth evaluation with ultrasonic method[J]. Failure Analysis and Prevention, 2014,9(3):131-135.
- [9] LOPEZ V E, ROBERT S, PRADA C. Ultrasonic imaging of defects in coarse-grained steels with the decomposition of the time reversal operator[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2016,140(1):541-550.
- [10] OHARA Y, NAKAJIMA H, TSUJI T, et al. Nonlinear surface-acoustic-wave phased array with fixed-voltage fundamental wave amplitude difference for imaging closed cracks[J]. NDT and E International, 2019,108:8963-8965.
- [11] XIANG L, GREENSHIELDS D, STEVE D, et al. Phased electromagnetic acoustic transducer array for Rayleigh wave surface defect detection [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, 2020(99):1403-1411.
- [12] 刘彬,董世运. 激光熔覆层厚度对超声表面波评价表层缺陷深度的影响[J]. 无损检测,2015,37(1):7-10.
LIU Bin, DONG Shiyun. Influence of laser cladding coating thickness on surface crack depth evaluation with ultrasonic surface wave[J]. Nondestructive Testing, 2015,37(1):7-10.
- [13] HELMUT H, HERBERT B. Rayleigh wave[M]. Germany: Dictionary Geotechnical Engineering/Wörterbuch GeoTechnik, 2014:36-60.
- [14] 丁辉. 计算超声学[M]. 北京:科学出版社,2010:10-11.

高基频高机电耦合系数晶体滤波器

彭胜春¹,赵瑞星²,阳皓¹,邱泽林¹,李亚飞¹,温桎茹¹,唐平¹,董姝¹

(1. 中国电子科技集团公司第二十六研究所,重庆 400060;

2. 火箭军装备部驻西安地区第三军事代表室,陕西 西安 710100)

摘要:采用离子刻蚀工艺对钽酸锂晶体材料进行刻蚀加工,得到了反台面结构晶片,其厚度约为 $31.3\ \mu\text{m}$,可用于制作高基频晶体谐振器。应用该晶体谐振器,在电路上采用差接桥型电路,设计了一种高频宽带晶体滤波器,其中心频率为 63 MHz,3 dB 带宽为 780 kHz,阻带衰减大于 75 dB,工作温度为 $-55\sim+95\ ^\circ\text{C}$ 。结果表明,采用离子刻蚀工艺能极大地提高晶体滤波器的工作频率上限。

关键词:晶体滤波器;离子刻蚀;钽酸锂;高基频;机电耦合系数

中图分类号:TN713;TM22 **文献标志码:**A **DOI:**10.11977/j.issn.1004-2474.2020.06.007

Crystal Filter with High Fundamental Frequency and High Electromechanical Coupling Coefficient

PENG Shengchun¹, ZHAO Ruixing², YANG Hao¹, QIU Zelin¹, LI Yafei¹,

WEN Zhiru¹, TANG Ping¹, DONG Shu¹

(1. The 26th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China;

2. The Third Military Represent office to Xi'an District, Equipment Department PLA Rocket Force, Xi'an 710100, China)

Abstract: The lithium tantalate crystal material was etched by the ion etching process, and an inverted-mesa structure wafer was obtained, the thickness of which was about $31.3\ \mu\text{m}$, which can be used to fabricate high fundamental frequency crystal resonators. A high frequency broadband crystal filter with a center frequency of 63 MHz, 3 dB bandwidth of 780 kHz, stopband attenuation of greater than 75 dB and the operating temperature of -55 to $+95\ ^\circ\text{C}$ is designed by using the fabricated resonator and the differential bridge circuit in the circuit. The experimental results show that the upper limit of the operating frequency of the crystal filter can be greatly increased by using the ion beam etching process.

Key words: crystal filter; ion beam etching; lithium tantalate; high fundamental frequency; electromechanical coupling coefficient

0 引言

晶体滤波器是采用压电晶体材料制作的一种频率选择器件,具有良好的选择性和温度稳定性,能提高整机通信的抗干扰能力,因而被广泛用于超短波(工作频率为 $30\sim300\ \text{MHz}$)通信频段领域。

随着现代通信技术的发展,在超短波频段需要传输更多的信息和较低的误码率,因此,滤波器需具有较宽的带宽,较小的延时,良好的温度特性,较低的插入损耗和较高的阻带抑制,这些要求促使晶体滤波器朝着高频宽带的方向发展,也促进了一些高机电耦合系数的晶体材料的应用。

1 滤波器的技术指标

中心频率 f_0 : $63\ \text{MHz}\pm 40\ \text{kHz}$

1 dB 带宽: $\geq 400\ \text{kHz}$

3 dB 带宽: $\geq 780\ \text{kHz}$

65 dB 带宽: $\leq 2.8\ \text{MHz}$

群延时波动@ $f_0\pm 200\ \text{kHz}$: $\leq 1\ \mu\text{s}$

插入损耗: $\leq 6\ \text{dB}$

通带波动: $\leq 1\ \text{dB}$

阻带抑制: $\geq 65\ \text{dB}$

阻抗: $50\ \Omega$

工作温度: $-55\sim+95\ ^\circ\text{C}$

收稿日期:2020-08-30

作者简介:彭胜春(1982-),男,湖南邵阳人,高级工程师,硕士,主要从事压电晶体材料和频率器件的研究。

外形尺寸:38 mm×18 mm×12.5 mm

2 滤波器方案设计

2.1 滤波器种类选择

在中频通信频段,常用的滤波器有 LC 滤波器、陶瓷滤波器、声表滤波器和晶体滤波器。

从工作温度和中心频率指标上看,该滤波器的工作温度在 150 ℃内,要求的工作频率稳定度为 $8.45\times10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。该频段的陶瓷滤波器、LC 滤波器温度系数均大于 $\pm10\times10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。

声表滤波器的温度系数为 $-45\times10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,为了提高声表滤波器的温度稳定性,近年来采用温度补偿技术,即在金属叉指型换能器(IDT)结构上另涂覆一层与压电层具有相反温度弹性的涂层(如二氧化硅(SiO_2)),实现一种高温稳定性的温补声表滤波器(TCSAW)。其能够将声表滤波器的温度系数提高到 $-5\times10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,但这种涂层的厚度一般为微米量级,适合进行温度补偿的工作频率 500 MHz 以上的声表滤波器,对于工作在几十兆的中低频滤波器仍难以达到要求的温度稳定性。综合比较可知,只有晶体滤波器能实现要求的温度稳定性^[1-2]。

2.2 晶体材料和工作模式选择

晶体滤波器属于声体波(BAW)器件,振动模式一般均采用剪切波或准剪切波。这种声波传播模式属于横波的一种,在这种模式下,声波沿晶片的法线方向传播,工作频率由晶片厚度决定,厚度越薄,工作频率越高^[3]。

表 1 为几种常用的 BAW 压电晶体材料的性质。其中温度系数和机电耦合系数是压电晶体的重要参数,这些参数取决于晶体材料的类型和切角,进而决定了滤波器的性能。晶体的温度系数决定了滤波器的温度稳定性,而机电耦合系数决定了滤波器可以实现的带宽范围,机电耦合系数越大,则可实现的带宽范围越宽。本文设计的滤波器要求的相对带宽为 1.3%。

表 1 主要晶体压电性质对比

材料	切型	振动模式	机电耦合系数	温度系数/ ($10^{-6}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$)
石英	AT	剪切	0.09	0.2
钽酸锂	X	剪切	0.44	5.0
	Y165°	准剪切	0.41	22.0
铌酸锂	X	剪切	0.68	45.0
	Y163°	准剪切	0.62	52.0

由表 1 可知,石英晶体温度系数最小,用其制作的滤波器也是目前所有滤波器中温度稳定性最好的,但是,石英晶体的机电耦合系数太小,在低频段(低于 30 MHz)可通过电路补偿和调整,以牺牲温度稳定性为代价来实现超过 1% 的相对带宽。然而,随着工作频率的升高,尤其是基频大于 50 MHz 后,晶片装配后受支架电容等因素影响,可实现的相对带宽范围将急剧下降,因此,难以实现高频大带宽的晶体滤波器^[4]。

钽酸锂和铌酸锂晶体是一种优良的晶体材料,具有良好的压电和电光学特性,其在声学器件领域得到广泛应用,主要用于制作传感器、声光调制器和滤波器。

钽酸锂和铌酸锂晶体选择不同的切角都能激发出厚度剪切模式,且在這些工作模式下晶体的机电耦合系数比石英高。钽酸锂晶体能实现 6%~7% 的相对带宽,而铌酸锂能实现 10%~12% 的相对带宽,适合制作宽带晶体滤波器。但是,它们的温度稳定性比石英晶体差,铌酸锂晶体温度系数达 $52\times10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,限制了该晶体在晶体滤波器中的应用。X 切钽酸锂晶体具有零温度切向,通过精确控制切向精度,可将零温度系数点控制在室温范围内,能够用于制作高频大带宽的滤波器。

2.3 高基频晶体谐振器加工工艺

晶体滤波器的工作频率和晶体谐振器晶片的厚度成反比,厚度越薄,则频率越高。工作频率为 63 MHz 基频模式的钽酸锂晶片厚约 $31.3\text{ }\mu\text{m}$,晶片很薄,在高强度的力学振动和温度剧烈变化的环境下,晶片易开裂,可靠性差。因此,该器件的主要工艺难点是在保证器件可靠性的同时实现高基频、大带宽。

为了提高可靠性,通常将晶片结构设计为反台面结构,边缘较厚,能提供高强度的力学支撑,而中间部分薄,可实现高基频频率。整个晶体谐振器的可靠性取决于边缘支撑厚度^[5](见图 1)。图中, h 为晶片的边缘厚度, t 为输出基频的晶片厚度。

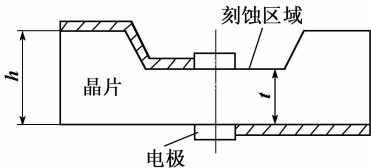


图 1 反台面晶体谐振器结构图

要实现反台面结构的晶体谐振器,国内尚无成熟的工艺。国外采用化学腐蚀法,此法的关键是选取适当浓度的腐蚀液体,同时精确控制腐蚀时间和环境。但是,钽酸锂晶体属于各向异性的晶体,腐蚀液对晶片表面的晶体微颗粒腐蚀速度不一致,导致晶片表面凹凸不平,使成品率降低,且钽酸锂晶体的化学性质十分稳定,对强酸和强碱都有较高的耐腐蚀性,因此,化学腐蚀工艺也未能实现在加工超薄钽酸锂晶片上的应用。

采用离子刻蚀工艺能实现这种反台面结构方案。这种工艺通过形成定向加速运动的氩离子束,高速穿过掩模板向安放有工件(晶片)的离子收集极 IC 冲撞,使在掩模外的晶片部分被刻蚀而减薄,实现表面刻蚀加工。这种用离子束进行表面轰击加工的方法具有分子(或原子)量级的加工精度,它可以获得很精细的尺寸。

通过常规的双面研磨工艺将直径为 $\varnothing 4.5\text{ mm}$ 的晶片加工到 $70\text{ }\mu\text{m}$ 的厚度,设计专门的掩膜夹具,遮住晶片上表面的四周,只露出正中间直径为 $\varnothing 2\text{ mm}$ 的面积作为刻蚀区域,通过离子刻蚀工艺刻蚀出一个深度 $38.7\text{ }\mu\text{m}$ 的台阶,形成反台面结构。控制离子刻蚀机的刻蚀速率是得到高精度加工晶片的关键,刻蚀速率太快易击穿晶片,晶片表面的平行度也不能得到保证,刻蚀速率太慢,离子源需长时间工作,对设备的使用寿命和精度影响较大。综合多次试验结果,将刻蚀速率控制在 $1.5\text{ }\mu\text{m/h}$ 时得到的晶片表面情况较理想^[5-6]。

图 2 为采用离子刻蚀制作的晶体谐振器。采用铝作为电极材料,电极直径为 $\varnothing 0.12\text{ mm}$,镀回频率控制在 1 MHz ,测得晶体谐振器的参数如表 2 所示。



图 2 离子刻蚀工艺加工的晶体谐振器

表 2 晶体谐振器主要参数

串联谐振 频率/MHz	静态 电容/fF	动态 电阻/ Ω	动态 电容/fF	动态 电感/ μH
62.46	788	56	69.2	93

2.4 电路设计

采用分立式设计方案易制作工作在 50 MHz 以上的晶体滤波器。这种电路多以差接桥型电路为基础。为了提高矩形系数和阻带指标,一般将多节进行级联,节数越多,则矩形系数越好,但是每节滤波器会带来一定的延时,从而增加滤波器的通带群延时波动。该滤波器要求的矩形系数(65 dB 带宽和 3 dB 带宽的比值)小于 3.5 , 2 节、 3 节和 4 节滤波器的矩形度分别约为 4.5 , 3.5 和 2.5 。但是,采用 4 节滤波器不仅电路复杂,且因为元件的增多,器件内部空间结构难以容纳。综合比较,采用 3 节滤波器可以实现所需指标要求。滤波器的电路图如图 3 所示。

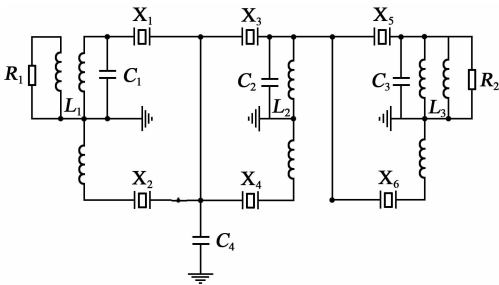


图 3 晶体滤波器电路图

2.5 滤波器试验结果

采用离子刻蚀工艺制作的谐振器,按照图 3 的电路图进行装配,电感采用磁导率为 10 的磁芯,用 $\varnothing 0.15\text{ mm}$ 的漆包线进行双线绕制 12 圈,单线绕制 3 圈,并配合采用调谐电容进行阻抗调谐匹配,得到良好的通带响应(见图 4、5)。将其装配到壳体内,做好内部电路元件的接地和节间屏蔽,以提高阻带抑制水平。

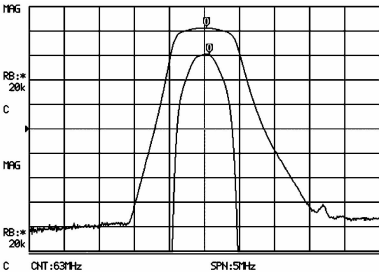


图 4 晶体滤波器通带响应曲线

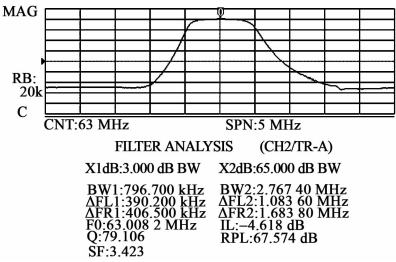


图 5 晶体滤波器实际指标

该产品经过高低温贮存、随机振动、温度冲击、密封和冲击等试验考核均满足要求,交付用户在整机上也进行了相应的考核试验,全部通过,可靠性得到充分验证。表 3 为产品的实际指标。

表 3 产品实际指标

技术指标	产品实际值		
	-55 ℃	25 ℃	95 ℃
中心频率/MHz	62.992	63.008	63.034
1 dB 带宽/kHz	572	577	575
3 dB 带宽/kHz	790	796	812
65 dB 带宽/MHz	2.73	2.76	2.74
群延时波动/ μ s	0.42	0.43	0.42
插入损耗/dB	4.6	4.6	4.4
通带波动/dB	0.2	0.2	0.2
阻带抑制/dB	76	77	77

3 结束语

该晶体滤波器采用高机电耦合系数的晶体材料,通过离子刻蚀工艺加工出高基频晶体谐振器,能显著提升晶体滤波器的工作频率,增加滤波器的带宽,提高了高基频晶体滤波器的可靠性,发挥出了晶体滤波器高温稳定性、低插入损耗和高阻带抑制的优势。

如果能通过离子刻蚀加工出微米甚至纳米量级的单晶石英或钽酸锂晶体薄膜,将频率提升到 2 GHz 以上,就能制作出具有大带宽和良好温度系数的单晶薄膜体声波谐振器,这将扩展晶体滤波器的应用范围,在未来的 5G 通信、制导领域会有更广阔的应用前景^[7]。

参考文献:

[1] 陈湘渝,周哲,彭胜春.小型化宽带钽酸锂晶体滤波器

[J]. 压电与声光, 2011,33(3):386-389.
CHEN Xiangyu, ZHOU Zhe, PENG Shengchun. Development of miniature wide-band filter using lithium tantalite crystal[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2011,33(3):386-389.
[2] 彭胜春,陈湘渝,刘光聪.高频宽带钽酸锂晶体滤波器的研制[J].声学技术,2009,28(4):137-139.
PENG Shengchun, CHEN Xiangyu, LIU Guangcong. Design of high frequency and wide-band lithium tantalite crystal filter[J]. Tecnical Acoutics, 2009, 28(4): 137-139.
[3] 邓辉,罗南英.高频宽带晶体滤波器的研制[J].压电与声光,2011,33(1):9-12.
DENG Hui, LUO Nanyang. Development of high frequency wide band crystal filter[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2011,33(1):9-12.
[4] 邓辉.相对带宽为 1% 的石英晶体滤波器研制[J].电讯技术,2009,49(10):65-69.
DENG Hui. Development of a quartz filter with 1% relative bandwidth[J]. Telecommunication Engineering, 2009,49(10):65-69.
[5] 雷震寰,于小亭.反台晶体及其应用[J].宇航计测技术, 2005,25(1):49-53.
LEI Zhenhuan, YU Xiaoting. Production and application of the inverted mesa crystal resonators[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2005, 25(1):49-53.
[6] 张永川,彭胜春,徐阳.钽酸锂晶体滤波器的离子束刻蚀技术研究[J].压电与声光,2014,36(3):474-475.
ZHANG Yongchuan, PENG Shengchun, XU Yang. Study on ion beam etching technique of lithium tantalate crystal filter[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2014,36(3):474-475.
[7] 彭胜春,阳皓,周哲,等.高可靠、高基频及小延时晶体滤波器[J].压电与声光,2015,37(3):365-367.
PENG Shengchun, YANG Hao, ZHOU Zhe, et al. High reliability and high fundamental frequency small group delay crystal filter[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2015,37(3):365-367.

基于分布式光纤传感的防热结构损伤识别研究

柳敏静¹, 夏梓旭¹, 李建乐¹, 武湛君¹, 高东岳²

(1. 大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116024; 2. 中山大学 航空航天学院, 广东 广州 510006)

摘 要: 防隔热结构已大量应用在工程中, 其健康状态对结构安全至关重要。为了监测隔热层粘接结构的健康状态, 该文提出了一种基于分布式光纤传感器的防热粘接结构的损伤识别和监测方法。利用有限元法对带损伤试件承受弯曲载荷的过程进行了数值模拟, 通过模拟的应变结果确定含有脱粘、裂纹两种损伤试件的应变趋势, 作为判断结构失效的分类依据。通过对带有脱粘和裂纹缺陷的试件进行实验识别并定位损伤位置, 监测试件的健康状况。研究结果表明, 根据结构受载状态下的应变趋势可以判断试件是否发生脱粘或裂纹损伤, 从而实现对结构的健康状态监测。

关键词: 分布式光纤传感器; 防热结构; 应变测量; 脱粘识别; 裂纹识别

中图分类号: TN929; TM23 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11977/j.issn.1004-2474.2020.06.008

Research on Damage Detection of Heat-insulating Structure Based on Distributed Optical Fiber Sensor

LIU Minjing¹, XIA Zixu¹, LI Jianle¹, WU Zhanjun¹, GAO Dongyue²

(1. State Key Lab. of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. School of Aeronautics and Astronautics, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: The anti-thermal insulation structures are widely used in engineering, and their health status is very important to structural safety. In order to monitor the health status of thermal insulation bonded structure, a method for damage identification and monitoring of thermal adhesive structures based on distributed optical fiber sensors is proposed in this paper. First of all, the process of the damaged specimens under bending load is numerical simulated by the finite element method. The strain trend of the de-bonding and cracked specimens is determined by the simulated strain results, which can be used as the classification foundation to determine the structure failure. The experiment on the specimens with de-bonding and crack defects is carried out to identify and locate the damage location. The search results show that the de-bonding and crack damage can be judged according to the strain trend of the structure under loading, so as to realize the structure health monitoring.

Key words: distributed optical fiber sensor; heat-insulating structure; strain measurement; de-bonding detection; crack detection

0 引言

在隔热层粘接结构中, 脱粘和裂纹缺陷是导致结构失效的主要形式, 对结构进行健康状态监测是保证结构安全工作的重中之重^[1]。近年来, 应用背向瑞利散射技术的分布式光纤传感器得到了迅速发展, 其测点连续且数量多, 能够进行高分辨率的应变/温度测量, 同时具有空间尺寸小、柔性好等特点, 适用于结构局部需要进行高密度测量的情况。因

此, 分布式光纤传感器适用于测量高密度连续分布的情况^[2]。

近年来, 监测脱粘的手段越来越多, 超声导波检测^[3]、X线检测^[4]、微波检测^[5]、激光全息照相检测和散斑错位成像^[6]等均可以用来监测脱粘情况。但以上无损检测技术均需要结构处于离线状态, 无法做到实时监测, 且监测时间较长, 成本较高, 面对大型结构的实时健康状态评估工作, 传统无损检测技

收稿日期: 2020-06-28

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目(2018YFA0702800); 国家自然科学基金资助项目(51805068)

作者简介: 柳敏静(1976-), 女, 山东青岛人, 副教授, 博士, 主要从事飞行器结构设计、分析与制造技术的研究。通信作者: 武湛君(1972-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事极端环境特种复合材料与结构健康监测的研究。

术具有一定的局限性。针对大型结构隔热层损伤诊断的需求,单一男等^[7]使用分布式光纤传感器对隔热结构的脱粘进行了承载条件下的健康状态监测,对比了不同尺寸脱粘的应变分布情况,证明了基于分布式光纤传感器的异常检测技术在多层结构脱粘缺陷识别工作中的有效性;Wong 等^[8]将分布式光纤传感器粘贴在碳纤维板表面,进行拉伸试验监测应变变化,证明分布式光纤传感器对监测结构的裂纹扩展方面有广阔的应用前景,且能够增强对局部损伤的检测。

实际应用中,结构的损伤是多样性的,因此,在同一区域内对不同损伤形式的分别定位与区分是结构损伤识别技术迈向实用的关键问题。本文以酚醛树脂板加铝合金板的多层结构试件作为研究对象,在受弯曲载荷的环境中,利用分布式光纤传感器对含有脱粘和裂纹缺陷的多层结构进行损伤识别。利用悬臂梁加载装置,对布设有分布式光纤传感器且含有初始脱粘和裂纹缺陷的酚醛树脂板和铝合金板胶粘结构进行应变测量。利用有限元模拟得到的脱粘、裂纹区域应变规律建立损伤分类的专家系统,识别出该试件的损伤区域。最终,在损伤识别试验中验证了本方法的有效性。

1 测量原理

分布式光纤传感器是基于背向瑞利散射技术的一种新型传感器,它使用光频域反射原理对分布式光纤传感器的光信号进行解调。光纤的测量系统通常包含一个主动监测单元,用来与被动式测量的光纤进行连接,向光纤发射激光信号。光纤中传播激光的某些属性可以处理为光纤上所承受应变/温度的函数。光纤传感器中物理参数的变化会导致内部散射光的可测量变化,当与散射光的参考量进行对比时,可以推得测量时光纤的物理状态。这个物理状态特指作用在光纤上的温度和应变的耦合作用效果。使用光频域反射原理分析背向瑞利散射光时,将其作为光纤上与位置有关的函数。当光纤所处的外界环境的温度或应变发生变化时,光纤局部会在空间上被压缩或拉伸,导致局部光信号的瑞利散射发生变化^[9]。

由应变 ϵ 或温度 T 响应得到光谱漂移,其类似于共振波的漂移 $\Delta\gamma$ 或布喇格光栅的光谱漂移 $\Delta\omega$ ^[10] 为

$$\frac{\Delta\gamma}{\gamma} = -\frac{\Delta\omega}{\omega} = K_T\Delta T + K_\epsilon\epsilon \quad (1)$$

式中: γ, ω 分别为平均光波长和频率; K_T, K_ϵ 分别为温度和应变标准常数; ΔT 为温度变化量。

2 悬臂梁加载时脱粘和裂纹区域的应变规律

根据材料力学应变的计算方法,板粘接结构中,在受悬臂梁弯曲载荷时,层间任意位置的 ϵ 为

$$\epsilon = \frac{FL}{EI_z} \quad (2)$$

式中: F 为悬臂梁加载端载荷力; L 为加载位置和应变位置的距离; E 为材料的弹性模量; I_z 为竖直方向的惯性矩。

若弯曲时平面假设成立,则无缺陷处应变呈连续、线性变化,缺陷处可认为结构的刚度骤减,导致该处的弹性模量减小,故该位置会出现应变重分布的情况。具体分布规律采用有限元模拟进行分析。

建立模拟模型如图 1 所示。模型为铝板(上)+胶层(中)+酚醛树脂板(下)3 层。为了模拟脱粘现象,模拟时将脱粘区域的胶层实体切掉,且在胶层内设置为空白区域 $20\text{ mm} \times 30\text{ mm}$,以模拟脱粘情况,同时在铝板上设置了非贯穿裂纹,裂纹和脱粘缺陷分别布设在夹层和铝合金底板不同侧,避免相互间的影响,采用六面体结构网格划分。

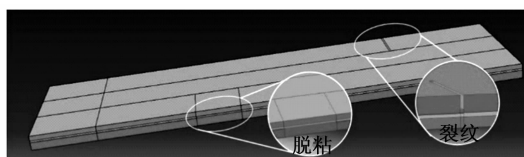


图 1 有限元模型

在复合材料加持端结束部位设置固定约束,在另一自由端设置垂直于平面、大小为 30 N 的分布载荷。

在悬臂加载条件下,复合材料层合板长度方向的应变场如图 2 所示。层间的应变场如图 3 所示。从图 2、3 可看出裂纹与脱粘损伤处应变场的变化,为了进一步研究光纤所测数值趋势的变化,通过损伤区域的应变分布如图 4、5 所示。

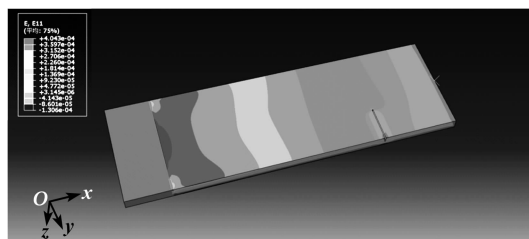


图 2 长度方向应变场

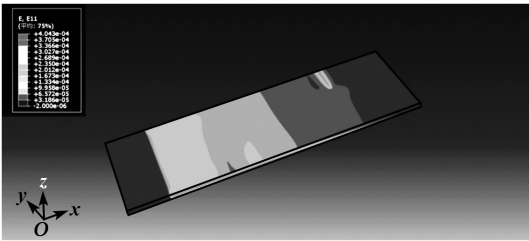


图 3 层间应变场

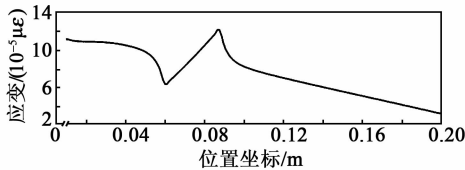


图 4 脱粘路径应变分布

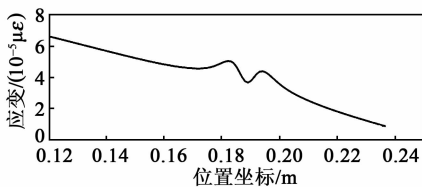


图 5 裂纹路径应变分布

由图 4、5 可知,在悬臂梁加载条件下,脱粘区域的应变规律表现为含有两个突变峰的中心对称分布,裂纹区域应变规律表现为两侧数值增大,中间数值减小的双峰图形。

3 试验及结果分析

3.1 试验准备

采用酚醛树脂板与铝合金粘接结构作为试验对象,布置初始脱粘和裂纹缺陷,以有限元模拟结果为参考,用来测试光纤传感器对脱粘和裂纹损伤位置的应变响应。试验对象模型如图 6 所示。光纤布设方式采取环绕式分布(见图 7),将光纤布设在酚醛树脂板上。布设好光纤后需要以光纤结构为零点,对脱粘和裂纹位置进行标定。



图 6 试验对象模型

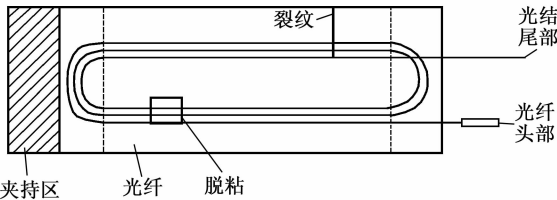


图 7 光纤布设路径

3.2 试验装置

试件置于干净水平桌面上,光纤与设备连接后

进行悬臂梁加载实验。试验数据采集系统采用美国 Luna 公司的 ODiSI 分布式光纤传感系统(见图 8),系统参数如表 1 所示。该系统能在试验过程中对各工况进行应变测量。



图 8 ODiSI-A50 光纤解调仪

表 1 测试系统参数

采样频率/Hz	传感器间距/mm	最小标距长度/mm	应变量程/ $\mu\epsilon$	应变单次扫描重复性/ $\mu\epsilon$
2.5	1	1	$\pm 15\ 000$	± 2

3.3 试验过程

试件的一端固定在悬臂梁固支端,另一端将光纤传感器连接到光纤解调仪上,待试件稳定后进行悬臂梁加载试验。实验过程如图 9 所示。



图 9 实验过程

取未加载状态为初始状态作为试验基准,加载载荷为 30 N,采集加载后试件的应变数据,多次测量保证试验准确性,取其中第 3 次实验数据绘制成的应变曲线如图 10 所示。

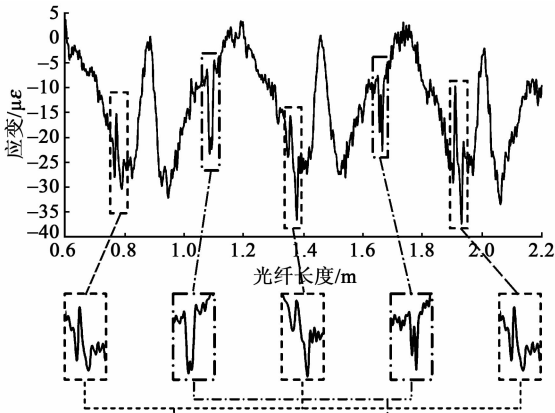


图 10 加载状态下试件应变

图 10 中共有 6 段线性变化,与环绕式布设 3 圈光纤相符。光纤路径穿过损伤区域,参考有限元分析所得的脱粘和裂纹趋势,在图 10 中可观测到相同的趋势,推测该趋势所处位置应为布设损伤的位置,与试验前标定的损伤坐标对比如表 2、3 所示。

表 2 脱粘节点坐标对比

节点	1	2	3	4	5	6
标定坐标/m	0.765	0.795	1.347	1.371	1.901	1.931
测量坐标/m	0.758	0.797	1.346	1.385	1.904	1.937

表 3 裂纹节点坐标对比

节点	1	2
标定坐标/m	1.100	1.650
测量坐标/m	1.088	1.660

由表 2、3 可知,试验后根据模拟趋势确定的脱粘位置与试验前标定的损伤位置基本一致,但试验后位置有 10 mm 内的浮动,推测是脱粘和裂纹扩展导致。

4 结束语

本文针对粘接结构脱粘和裂纹的识别方法展开了研究,并利用有限元模拟分析出损伤区域应变规律,以模拟结果作为损伤分类依据。利用分布式光纤传感器对有初试脱粘和裂纹缺陷的试件进行了悬臂梁加载试验的应变测量,根据应变分布情况识别出脱粘和裂纹区域,且识别出的位置与标定位置一致,验证了脱粘和裂纹区域应变规律的准确性和有效性。

综上所述,根据结构受载状态下的应变趋势可以判断试件是否发生脱粘或裂纹损伤,并对两种损伤进行定位与分类,从而实现对结构的健康状态监测。

参考文献:

[1] 尹晚,渠晓溪,武湛君,等. 火箭贮箱结构健康监测传感器系统设计[J]. 压电与声光,2017,39(1):67-71.
YIN Wan,QU Xiaoxi,WU Zhanjun,et al. Design of the structural health monitoring sensor system for the rocket tank[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2017, 39(1):67-71.

[2] HERNÁNDEZ-MORENO H,COLLOMBET F,DOUCHIN B,et al. Entire life time monitoring of filament wound composite cylinders using Bragg grating sensors: III. in-service external pressure loading[J]. Applied Composite Materials,2009,16(3): 135-147.
[3] 张佳奇,刘明辉,刘科海,等. 基于超声导波的返回舱热防护结构烧蚀层厚度监测方法[J]. 航天器环境工程, 2019,36(5):487-494.
[4] 郑伟,邓安华,刘云峰,等. 固体火箭发动机衬层与药柱脱粘高能 X 射线检测技术[J]. 海军航空工程学院学报,2014,29(4):355-359.
[5] CHEN Guanren,KATAGIRI T,SONG Haicheng,et al. Investigation of the effect of a bend on pipe inspection using microwave NDT[J]. NDT and E International,2020,110:1-3.
[6] 李慧娟,霍雁,蔡良续,等. 不同光学方法对蜂窝结构中脱粘缺陷检测[J]. 激光与光电子学进展,2010,47(11):89-94.
[7] 单一男,武湛君,徐新生,等. 基于分布式光纤传感的隔热层脱粘识别研究[J]. 压电与声光,2020,42(1): 25-28.
SHAN Yinan, WU Zhanjun, XU Xinsheng,et al. Research on de bonding identification of thermal protective coating based on distributed optical fiber sensing technology[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics,2020, 42(1):25-28.
[8] WONG L,CHOWDHURY N,WANG J,et al. Fatigue damage monitoring of a composite step lap joint using distributed optical fiber sensors[J]. Materials, 2016, 9(5):374.
[9] FROGGATT M E, GIFFORD D K. Rayleigh back-scattering signatures of optical fibers—Their properties and applications[C]//Anaheim;2013 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFO-EC), 2013:1-3.
[10] KREGER S T,SANG A K,GIFFORD D K,et al. Distributed strain and temperature sensing in plastic optical fiber using Rayleigh scatter[J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2009,7316(5):73160A-73160A-8.

单偏振光纤声光调制器

吴畏, 唐诗, 王智林, 令狐梅傲, 朱吉, 傅礼鹏

(中国电子科技集团公司第二十六研究所, 重庆 400060)

摘要: 该文介绍了一种全光纤耦合的单偏振声光调制器的设计及应用。理论分析了光纤声光调制器的工作原理, 描述了单偏振光纤声光调制器的关键指标(插入损耗、消光比、光脉冲上升时间)的设计方法和单偏振光纤准直器的耦合工艺方法。设计制作了工作在 $1.06\ \mu\text{m}$ 波长的高速低插损单偏振光纤声光调制器, 其偏振消光比达到 42 dB, 能有效隔离系统偏振噪声。

关键词: 单偏振; 光纤声光调制器; 插入损耗; 消光比; 光脉冲上升时间

中图分类号: TN65; TB552 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11977/j.issn.1004-2474.2020.06.009

Single Polarization Fiber Acousto-Optic Modulator

WU Wei, TANG Shi, WANG Zhilin, LINGHU Mei'ao, ZHU Ji, FU Lipeng

(The 26th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China)

Abstract: The design and application of an all-fiber coupled single polarization acousto-optic modulator is introduced in this paper. The working principle of the fiber acousto-optic modulator is analyzed theoretically, and the design methods of the key indicators including insertion loss, extinction ratio, rise time of light pulse and the coupling process method of single polarization fiber collimators are presented. A single polarization fiber acousto-optic modulator working at a wavelength of $1.06\ \mu\text{m}$ with high speed and low insertion loss is designed and manufactured. The polarization extinction ratio (PER) reaches 42 dB, which effectively isolates the polarization noise of the system.

Key words: single polarization; fiber acousto-optic modulator; insertion loss; extinction ratio; rise time of light pulse

0 引言

光纤声光调制器作为激光应用中一种基础元器件, 主要作用是对激光进行脉冲调制、移频, 获得后端系统所需要的光脉冲波形和激光频率偏移。为满足高偏振隔离度激光系统的要求, 需要高偏振消光比的光纤声光调制器, 普通保偏光纤已无法满足高偏振消光比光纤声光调制器的研制需求。单偏振光纤通过专门设计与制造工艺, 使光纤中构成基模的两个线偏振模之一为导模, 可低损耗传输; 另一个模因截止或产生严重泄漏而衰减, 使这种光纤的输出光始终只有一种单一的偏振模式的光纤^[1], 从而使光纤达到起偏器的作用^[2]。因此, 采用单偏振光纤制作高偏振消光比光纤声光调制器成为必要选择。

本文介绍了一种全光纤耦合的单偏振光纤声光调制器, 同传统光纤声光调制器相比, 光纤声光调制器通过单偏振光纤耦合输入输出, 能够实现高偏振

消光比, 在高偏振隔离度要求的激光系统中具有广泛的应用前景。

1 原理

单偏振光纤声光调制器主要由器件和驱动器两部分组成, 调制器工作原理如图 1 所示。驱动器输出的载波功率信号作用在换能器上, 激发超声波耦合入声光晶体, 在介质中产生折射率光栅, 入射光经过光纤准直器准直后以布喇格角进入声光晶体时发

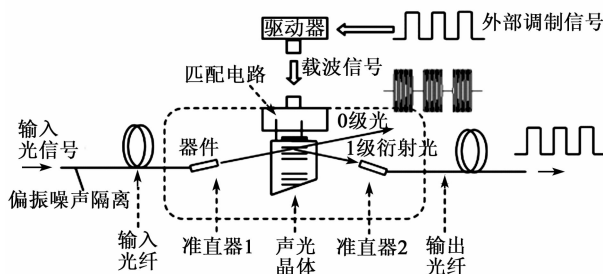


图1 光纤声光调制器原理图

生衍射,衍射光再经过光纤耦合输出。激光噪声不能满足器件的布喇格衍射条件,偏振噪声在单偏振光纤中截止,使衍射光通过输出端光纤准直器耦合进光纤的同时隔离了激光噪声和偏振噪声,从而输出低噪声的光脉冲。

2 设计

光纤声光调制器的关键性指标包括插入损耗、消光比、光脉冲上升时间 t_r ,彼此相互制约,在进行器件参数设计时,优先考虑 t_r ,再根据 t_r 推导其他指标。

2.1 光脉冲上升时间

t_r 由超声波穿过光束的渡越时间 τ 、晶体内光束发散角 $\Delta\varphi_{\text{内}}$ 、声束发散角 $\Delta\theta$ 、声光晶体的声速 v 及驱动器上升时间共同决定。定义:

$$\tau = d/v \quad (1)$$

式中 d 为光束束腰直径。

$$\Delta\theta = v/(Lf) \quad (2)$$

式中: L 为声光互作用长度; f 为工作频率。

光纤声光调制器利用成对的光纤准直器对入射光和衍射光进行耦合,其

$$\Delta\varphi_{\text{内}} = 4 \times \lambda / (n\pi d) \quad (3)$$

式中: λ 为光波长; n 为折射率。

图 2 为 t_r/τ 与声光比发散角 α 的关系^[3]。由图可看出, τ 一定时, α 越小, 则 t_r 越小。同时由式(2)可知, α 和 f 一定时, α 取决于 L , 通过缩小 L 可减小 α , L 减小将导致衍射效率 η 下降, 甚至不能满足进入布喇格衍射区的条件。因此, α 的选取需综合权衡 t_r 和 η , 一般在产品设计中取 $\alpha=1$, 以使用较小的声功率得到最佳的 η 。

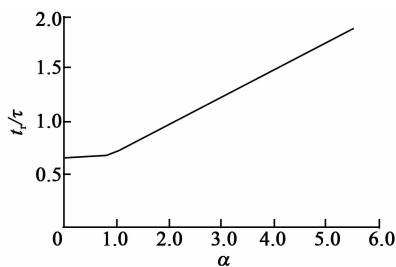


图 2 t_r/τ 随 α 值的变化

光脉冲上升时间为

$$t_r = 0.65\tau \quad (\alpha \leq 1) \quad (4)$$

通过式(1)~(4)可计算出 Lf , 这时在选取 L 和 f 时需考虑:

1) 声光晶体的 1 级衍射光和 0 级光要满足严格可分离条件, 以满足高消光比指标要求。

2) 在工作频率下驱动器上升时间能满足要求。

3) 由于光纤声光调制器工作于布喇格衍射区, L 的选取还应满足 $L \geq 2L_0$ (L_0 为声光介质材料的特征长度), L_0 取决于产品的 λ 、 f 、介质材料的 n 和 v , 即

$$L_0 = nv^2/(\lambda f^2) \quad (5)$$

2.2 插入损耗

光纤声光调制器的插入损耗决定产品所在系统光路的能量利用率, 插入损耗越低, 能量损失越少, 能量利用率就越高。光纤声光调制器的插入损耗由声光晶体材料的光学透过率、光纤耦合损耗和声光晶体的 η 共同决定, 而声光晶体的 η 是影响插入损耗最重要的因素。

产品器件设计为布喇格衍射模式, 将声光晶体 1 级衍射光作为器件的输出光, 布喇格衍射模式的 1 级光衍射效率为

$$\eta = x(\Delta k) \cdot \sin^2 \left[\frac{\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{M_2 L P_a}{2H}} \right] \quad (6)$$

式中: Δk 为动量失配系数; M_2 为晶体材料声光优值; H 为声光互作用宽度; P_a 为声光互作用区域的超声功率。

$\sin^2 \left[\frac{\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{M_2 L P_a}{2H}} \right]$ 是利用单色平面波声光互作用模型在严格动量匹配条件下建立的, 理论 η 可达 100%, 由于实际中光场和声场都存在一定发散角, 在一定程度上出现动量失配, 需通过经验参数 $x(\Delta k)$ 对其进行修正。 P_a 与电功率 P 的关系为

$$P_a = P \cdot 10^{-\frac{TL + \alpha_0 f^2 D}{10}} \quad (7)$$

式中: TL 为换能器损耗; α_0 为声光晶体的声衰减系数; D 为声光互作用区域与换能器间的距离。

H 的选取需要满足大于光纤准直器输出的 d , 以保证声光介质内部光场能完全被声场包围, 提高光能量利用率。根据式(6)可知, H 在满足上述条件下应尽可能小, 以获得更高的 η 。

对于单偏振光纤声光调制器, 光纤耦合损耗是其实现低插入损耗的关键, 这将在光纤耦合工艺中详述。

2.3 通断消光比

器件的通断消光比是指在未加载驱动信号和加载等幅驱动信号状态下输出端的光强之比, 主要由器件 0 级泄露光耦合入输出光纤的光强大小决定。为提高通断消光比, 在设计上我们需要考虑声光晶体的 1 级衍射光和 0 级光要满足严格可分离条件,

使入射光和衍射光的分离角($\Delta\phi$)大于 2 倍输出光束发散角($\Delta\phi_{\text{外}}$),即

$$\Delta\phi \geq 2 \times \Delta\phi_{\text{外}} \tag{8}$$

其中,光纤准直器输入、输出光在声光晶体外的发散角 $\Delta\phi_{\text{外}}$

$$\Delta\phi_{\text{外}} = \frac{4 \times \lambda}{\pi d} \tag{9}$$

声光晶体外的 1 级衍射光和 0 级光分离角 $\Delta\phi$,也为入射光和衍射光的分离角,则有:

$$\Delta\phi = \lambda f / v \tag{10}$$

3 单偏振光纤准直器最佳耦合

光纤耦合工艺是对产品的输入、输出光纤进行耦合,包含光强耦合和偏振耦合两部分。对于普通的保偏光纤声光调制器的耦合,已有一套成熟的方法,在初步对轴后进行光纤耦合。利用偏振测试仪和光功率计进行在线监测,根据监测结果修正准直器位置以达到最大偏振消光比和最小插入损耗指标,达到最佳的光强耦合和偏振耦合。图 3 为保偏光纤器件耦合方法。

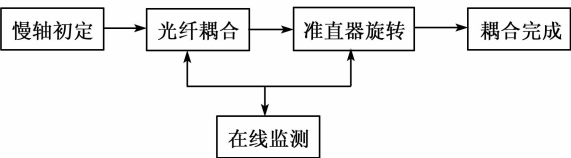


图 3 保偏光纤器件耦合方法

对于单偏振光纤准直器,只有一个线偏振模能传播,不同于保偏光纤对轴精度影响偏振消光比指标,单偏振光纤对轴不准会造成光功率的浪费,最终影响插入损耗指标。因此,实际工艺中需重点解决对轴精度的问题。图 4 为不同对轴误差对应的插入损耗变化。

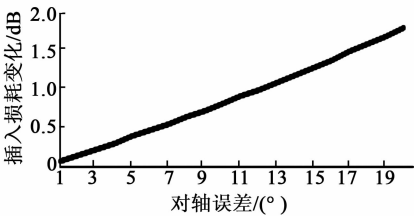


图 4 不同对轴误差对应的插入损耗变化

为解决对轴精度的问题,我们设计了一套调试方法。首先对输入、输出准直器分别在偏振测试仪上进行轴向校准,校准后通过格兰棱镜测试输出光功率,通过轴向旋转对输出光功率进行调节,待 2 个准直器输出光功率调至最大时,进行成对耦合。经过测试,该方法可实现成对耦合损耗小于 0.5 dB。

图 5 为单偏振准直器调试工艺。

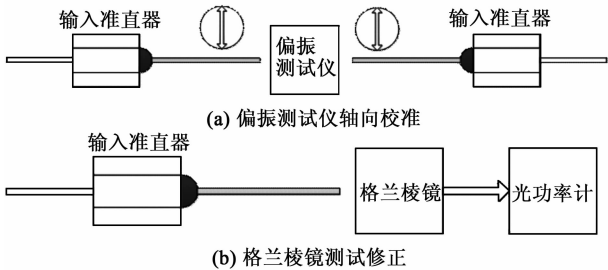


图 5 单偏振准直器调试工艺

4 器件制作与应用

根据上述设计工艺方法,我们设计并制作了工作于 1 064 nm 波段的高速低插损单偏振光纤声光调制器。将其应用于单偏振的超快激光脉冲选择系统,能实现重频 50 MHz 以上的超快脉冲激光选择,并隔离偏振噪声。图 6 为样品实测效果图。表 1 为实测结果。

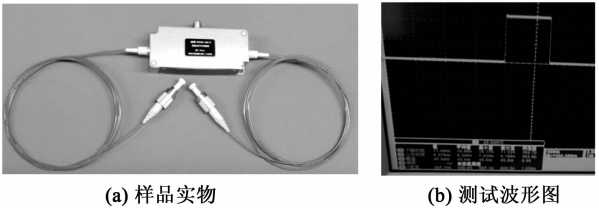


图 6 样品实测效果图

表 1 实测结果

工作频率/MHz	t_r /ns	插入损耗/dB
250	8.4	3.2
消光比/dB	偏振消光比/dB	器件尺寸/mm
52	42	70×29.5×17

5 结束语

本文重点介绍了单偏振光纤声光调制器的原理、设计方法、研制结果和应用。所研制的单偏振光纤声光调制器具有插入损耗低,消光比高,偏振消光比高的特点,是目前光纤声光调制器的重要补充,可广泛应用于有高偏振隔离度要求的超快激光、光纤传感、光纤陀螺^[4]及原子冷却等领域。

参考文献:

[1] 吴国峰.单偏振光纤的结构特点及应用[C]//北京:全国第十三次光纤通信暨第十四届集成光学学术会议,2007.

[2] 高亚明,冯光,刘永建,等.熊猫型单偏振光纤[J].激光与红外,2011,41(11):1244-1247.

[3] 俞宽新、丁晓红,庞兆广.声光原理与声光器件[M].北京:科学出版社,2011.

[4] 李亚岚,宁提纲,温晓东,等.单偏振光纤激光器的研究发展[J].光纤与电缆及其应用技术,2011(5):5-11.

压电分流声子晶体杆带隙调控研究

张亚茹, 郭辉, 袁涛, 孙裴, 王岩松, 程乾

(上海工程技术大学 机械与汽车工程学院, 上海 201620)

摘要:压电型声子晶体具有弹性波带隙特性,可用于噪声与振动控制。该文通过在环氧树脂杆上周期地布置含有负电容的压电分流单元,构造了压电声子晶体杆结构。为拓宽带隙,对此结构设计了3种元胞配置,运用传递矩阵法计算其带隙特性,并采用遗传算法对分流电路参数进行优化。理论与仿真结果表明,改变元胞中不同谐振频率的压电分流单元的个数,可以获得多个局域共振带隙,增强带隙可调谐性;运用算法优化可得到带隙调谐时分流电路参数值的最佳匹配,实现多个带隙的合并进而形成宽带,在不改变原有结构的基础上拓宽带隙。

关键词:声子晶体;压电分流;局域共振;带隙调控;遗传算法

中图分类号:TN384;TM22;TH113;O48 **文献标志码:**A **DOI:**10.11977/j.issn.1004-2474.2020.06.010

Study on Band Gap Regulation of Phononic Crystal Rod with Piezoelectric Shunting

ZHANG Yaru, GUO Hui, YUAN Tao, SUN Pei, WANG Yansong, CHENG Qian

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: Owing to the property of elastic wave band gap, the piezoelectric phononic crystals have been used for noise and vibration control. In this paper, a piezoelectric phononic crystal rod structure is constructed by periodically arranging a piezoelectric shunt unit with negative capacitance on the epoxy resin rod. In order to expand the wide band gap, three cell configurations are designed for this structure, the transfer matrix method is used to calculate the band gap characteristics, and the genetic algorithm is used to optimize the shunt circuit parameters. The theoretical and simulation results show that by changing the number of piezoelectric shunt units with different resonance frequencies in the cell, multiple local resonance band gaps can be obtained, and the band gap tunability can be enhanced. By using the algorithm optimization, the best matching of the shunt circuit parameters can be obtained when the band gap is tuned, and the combination of multiple bandgaps can be realized and the wide band gap can be expanded without changing the original structure.

Key words: phononic crystal; piezoelectric shunting; local resonance; band gap regulation; genetic algorithm

0 引言

声子晶体是一种具有弹性波禁带特性的人工周期结构,在特定频率范围内可以调控弹性波传播^[1]。含分流电路的压电声子晶体^[2]可以通过对分流电路实现带隙调控,结构简单且具有良好的机电耦合特性,使其在可调谐声子晶体方面得到了广泛应用。

自 Thorp 等^[3]首次将纯电阻电路和电阻-电感($R-L$)谐振电路引入周期结构后, Qian 等^[4]和 Chen 等^[5]研究了一维、二维压电声子晶体的带隙可调谐性,即改变压电分流系统的几何或物理参数实现声子晶体频域性能的调控。由于基于谐振分流电路的声子晶体获得的局域共振带隙窄且带隙内衰减量小,因此,研究者们设计出了更复杂的分流电路以获

得宽频带、强衰减的带隙。Wu 等^[6]和 Fleming 等^[7]采用流阻型和流通型多模态谐振分流电路,在一个分流电路上并联多个谐振电路分支进行振动控制,但该种电路连接方式增加了电路的复杂性,实际应用中存在局限性。2004年, Park 等^[8]发现负电容可以抵消压电片固有电容,增大机电耦合系数,从而减小电路损失,并将电阻、电感、负电容串联的负阻抗电路(NIC)应用于梁结构,极大地拓宽了带隙宽度。此后,负电容被广泛应用于压电声子晶体的振动控制^[9-13]。

将压电片及连接的分流电路称为一个压电分流单元,以上研究中均研究了元胞中包含单个压电分流单元的情况。本文在元胞中布置多个压电分流单元,采用 $R-L$ 与负电容并联的分流电路,改变元胞

收稿日期:2020-07-31

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51675324);上海新能源汽车振动与噪声测控技术专业服务平台基金资助项目(18DZ2295900)

作者简介:张亚茹(1996-),女,山西长治人,硕士生,主要从事 NVH 方向的研究。通信作者:郭辉(1981-),男,山东曹县人,教授,硕士生导师。E-mail: hgsues@163.com。

中含有不同电路参数的压电分流单元个数,并运用遗传算法对电路参数进行优化,寻求电感值与负电容值的最佳匹配。

1 压电声子晶体杆模型

压电声子晶体杆由基体杆、压电片和分流电路3个部分构成。长度为 l_p 的压电片周期性地粘贴在基体杆的上下表面,忽略粘贴层对结构的影响。粘贴有压电片的部分为A,长度与压电片长度相同,未粘贴有压电片的部分为B,长度为 l ,两部分相加为元胞的晶格常数 a ,如图1所示。图中, w 为基体杆、压电片宽度, t_r 为基体杆厚度, t_p 为压电片厚度。每个压电片连接独立的分流电路(由电阻 R 、电感 L 及负电容 C_n 并联组成)。本文根据元胞中包含的压电分流单元个数的不同设计了3种元胞配置:配置I、II和III型元胞分别包含1个、2个和4个压电分流单元,且每个压电分流单元中的电路元件参数互不相同。

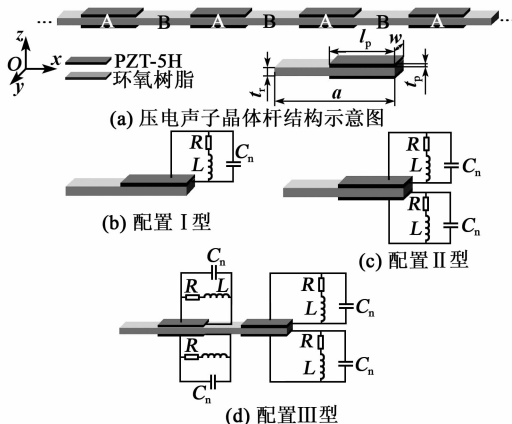


图1 压电声子晶体杆及3种元胞配置示意图

1.1 物理模型

假设压电片沿 z 方向极化,除厚度端面外其余表面均自由,则压电方程为

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11}^E & d_{31} \\ d_{31} & \epsilon_{33}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: S_1 、 T_1 、 D_3 、 E_3 分别为压电片的应变、应力、电位移和电场强度; d_{31} 、 s_{11}^E 、 ϵ_{33}^T 分别为压电片的压电常数、恒定电场强度下的弹性柔顺常数和恒应力下的介电常数。

每个分流电路的阻抗为

$$Z(s) = \frac{R + Ls}{1 + RCs + LCs^2} \quad (2)$$

式中 s 为拉普拉斯算子。假设由正压电效应压电片产生的电场为匀强电场,压电片内应变和电极上电位移相等,分流电路的作用相当于附加弹性模量:

$$E_p = \frac{T_1}{S_1} = \frac{1}{s_{11}^E} \left[1 + \frac{s d_{31}^2 A_s Z}{h_p s_{11}^E (1 + s C_p Z)} \right] \quad (3)$$

式中: h_p 为压电片厚度; A_s 为压电片面积; C_p 为压电片固有电容,其计算式为

$$C_p = \frac{\epsilon_{33}^T A_s}{h_p} \quad (4)$$

1.2 动力学模型

该结构是由每个元胞周期排列而成,因此只需对单个元胞进行动力学建模并结合Floquet定理即可得到整个杆中的波传播特性,杆的振动方程为

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left(E \frac{\partial u}{\partial x} \right) \quad (5)$$

式中: ρ 、 E 为杆的密度和弹性模量; $u(x, t)$ 为杆在 x 处的振动位移。

对于无限周期边界条件,可以使用传递矩阵法和Bloch定理计算带隙,得到特征值方程:

$$\det[T(\omega) - e^{ikx} \mathbf{I}] = 0 \quad (6)$$

式中: T 为传递矩阵; $\mathbf{I}$ 为单位矩阵; $k = \delta + i\epsilon$ 为传播常数,实部 δ 为衰减常数,虚部 ϵ 为相位常数。当 $\delta = 0$ 时,弹性波可以无损的从一个周期传播到下一个周期;当 $\delta \neq 0$ 时,弹性波的传播存在衰减,在这些频率范围内形成带隙。

1.3 负电容的等效计算

负电容与谐振电路连接如图1(b)~(d)所示,其中, LC 电磁振荡回路被用于产生局域共振带隙,并联的负电容可以“抵消”压电片的固有电容,增加机电耦合系数,且负电容分流器中的电阻可以在更大的频率范围内耗散能量。负电容可以通过运算放大电路模拟实现,由1个电容器、2个电阻器和1个运算放大器(OpAmp)组成(见图2),调节合成电路中的电阻可以获得任何负电容值。为保证电路的稳定性,负电容的绝对值应大于压电片固有电容,其等效电容值为

$$C_n = -\frac{R_1}{R_2} C \quad (7)$$

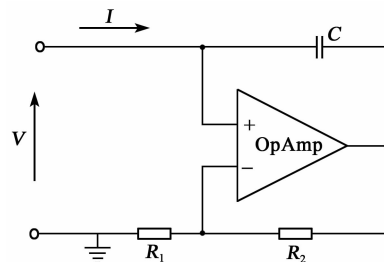


图2 负电容合成电路

2 数值计算与讨论

基于上述压电声子晶体杆数学模型进行带隙结构数值及仿真计算,相关材料及几何参数如表1所示。

表1 基体杆所用几何与材料参数

材料	弹性模量/GPa	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	w_r/m	t_r/m	a/m
环氧树脂	4.35	1 180	0.02	0.01	0.05/0.10
材料	$s_{11}^E/(\text{m}^3 \cdot \text{N}^{-1})$	$d_{31}/(\text{C} \cdot \text{m}^{-2})$	$\epsilon_{33}^T/(\text{F} \cdot \text{m}^{-1})$	w_p/m	t_p/m
PZT-5H	1.65×10^{-11}	-2.74×10^{-10}	3.01×10^{-8}	0.02	0.000 5

配置 I 型压电声子晶体杆带隙结构如图 3 所示,当电路短路时,只存在图中实线部分所示的带隙结构,这是由于压电分流系统与基体杆间的布喇格(Bragg)散射引起的,称为 Bragg 带隙。电路通路时($R=20 \Omega, L=0.06 \text{ H}, C=-3 \times 10^{-9} \text{ F}$),分流电路中的电感与电容产生电磁振荡,形成局域共振带隙(见图 3 中的虚线)。电路参数影响局域共振带隙中心频率位置,但几乎难以改变其频带宽度,且基于压电分流系统的声子晶体获得的局域共振带隙较窄。本文尝试改变元胞中包含的压电分流单元个数(配置 II、III 型),且每个压电分流单元电路参数互不相同,则电路谐振频率不同,即可在多个频段内产生电磁振荡,进而产生多个局域共振带隙,为带隙调控提供更多的实施途径。3 种元胞配置中配置 I、II 型的 a 相同,但配置 II 型中布置了 2 个压电分流单元,则会有 2 个不同的谐振频率,即可产生 2 个局域共振带隙;同理,配置 III 型中包含 4 个压电分流单元,则可产生 4 个局域共振带隙,如图 4 所示。

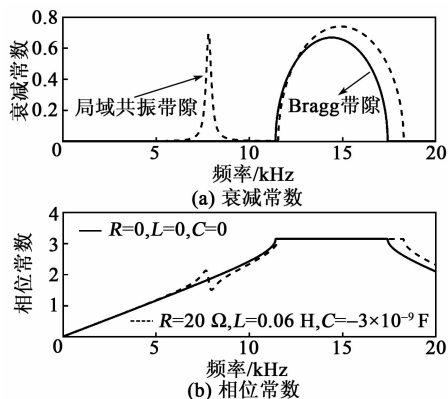


图3 压电声子晶体杆的带隙结构(配置 I)

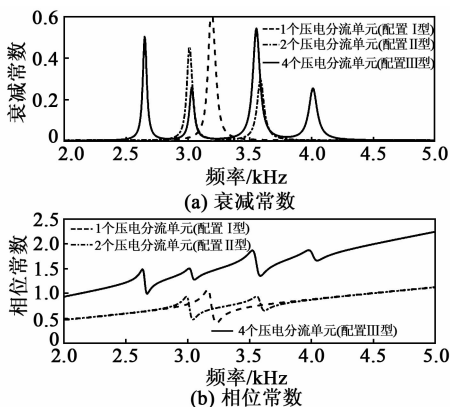


图4 3种元胞配置下压电声子晶体杆的带隙结构

以上压电声子晶体杆局域共振带隙中心频率可由分流电路谐振频率^[14]近似得到,即

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C_p + C_n)}} \quad (8)$$

由式(8)可知, L 与 C_n 均对局域共振带隙有影响,电感值增大带隙向低频移动,但带宽减小; C_n 值增大带隙内衰减增大,但带隙向高频移动。因此,当确定预期目标频段时,仅通过式(8)难以直接计算得到可以使带隙宽度和平面波衰减幅度最大化时的电路参数值。对此,采用遗传算法对电路参数 L, C_n 进行优化,充分利用分流电路实现压电声子晶体的带隙可调谐性。

以上结构中配置 III 型得到的 4 个局域共振带隙,可运用遗传算法将其合并为一个宽带,优化目标函数为

$$\text{Maximize: ObjV} = \frac{\int_l^u \delta df}{|f_4 - f_1 - 3W|} \quad (9)$$

式中: ObjV 为目标函数; W 为单个局域共振带隙宽度; f_1, f_4 分别为从低频到高频第 1、4 个局域共振带隙的中心频率。目标函数的分母为第 1~4 局域共振带隙的宽度与 3 倍单个局域共振带隙宽度的差值,差值尽可能小,从而保证合并带隙的宽度;分子为目标频段内衰减常数的积分,积分尽可能大,从而确保合并带隙的衰减量。确定优化对象 L, C_n 及 ObjV 后,遗传算法模拟自然进化过程,可以高效地进行最优解搜索。随机产生初始种群,根据目标函数评估初始种群染色体的适应度,通过选择、交叉及变异等操作生成子代染色体,为确保带隙不重叠地落在目标频段内,终止准则中添加一项峰值判断语句,最后得到最优参数值。优化结果如图 5(a)所示,一个压电分流单元得到的单个局域共振带隙宽约为 150 Hz,将 4 个带隙合并后可得到一个约 500 Hz (2 900~3 400 Hz) 的宽带;同时也可设置两个目标频段,将 4 个带隙两两合并可得如图 5(c)所示的两个宽带,实现多频带调谐。

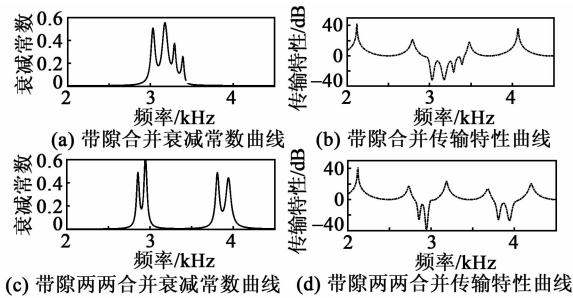


图5 配置Ⅲ型优化后的带隙结构及传输特性曲线

弹性波在结构中的传输特性为

$$H(f) = 20 \log \left(\frac{W_{\text{out}}}{W_{\text{in}}} \right) \quad (10)$$

式中 $W_{\text{in}}, W_{\text{out}}$ 分别为输入和输出端的位移(见图5(b)、(d)), 传输特性曲线与衰减常数曲线具有良好的匹配性。

为了进一步验证上述带隙调控方法,利用多物理场仿真软件 COMSOL 对以上结构进行有限元模拟。为提高计算精度简化计算,取4个含有单个压电分流单元的元胞为1个周期,材料及结构参数如表1所示。在杆左侧,即未粘贴压电片的一端施加沿 x 方向、大小为 $1 \times 10^{-5} \text{ m}$ 的恒定位移,在两端拾取位移响应计算传输特性。图6为 COMSOL 计算传输特性。由图可知,在 $2750 \sim 3890 \text{ Hz}$ 时出现4个局域共振带隙。为了直观地看出不同压电分流单元对弹性波的局域效果,选取带隙外和4个局域共振带隙内的振型图(见图7)。带隙外 $f_0 = 4410 \text{ Hz}$ 时,杆件的激励几乎无损耗地传输到右端,无抑振效果,表面应力最大值为 $1.51 \times 10^9 \text{ N/m}^2$;第1条带隙内 $f_1 = 2930 \text{ Hz}$ 时,杆件的振动局域在两个周期的第1个压电分流单元内,右端几乎无波传播;第2条带隙内 $f_2 = 3150 \text{ Hz}$ 时,杆件的振动局域在两个周期的第2个压电分流单元内;第3条带隙内 $f_3 = 3470 \text{ Hz}$ 及第4条带隙内 $f_4 = 3890 \text{ Hz}$ 时,杆件的振动分别被局域在两个周期的第3、4个压电分流单元内,应力最大值为 $3.49 \times 10^7 \text{ N/m}^2$,对比带隙外

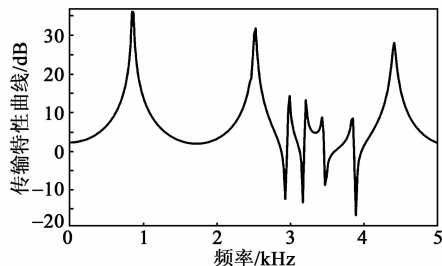


图6 COMSOL 计算传输特性

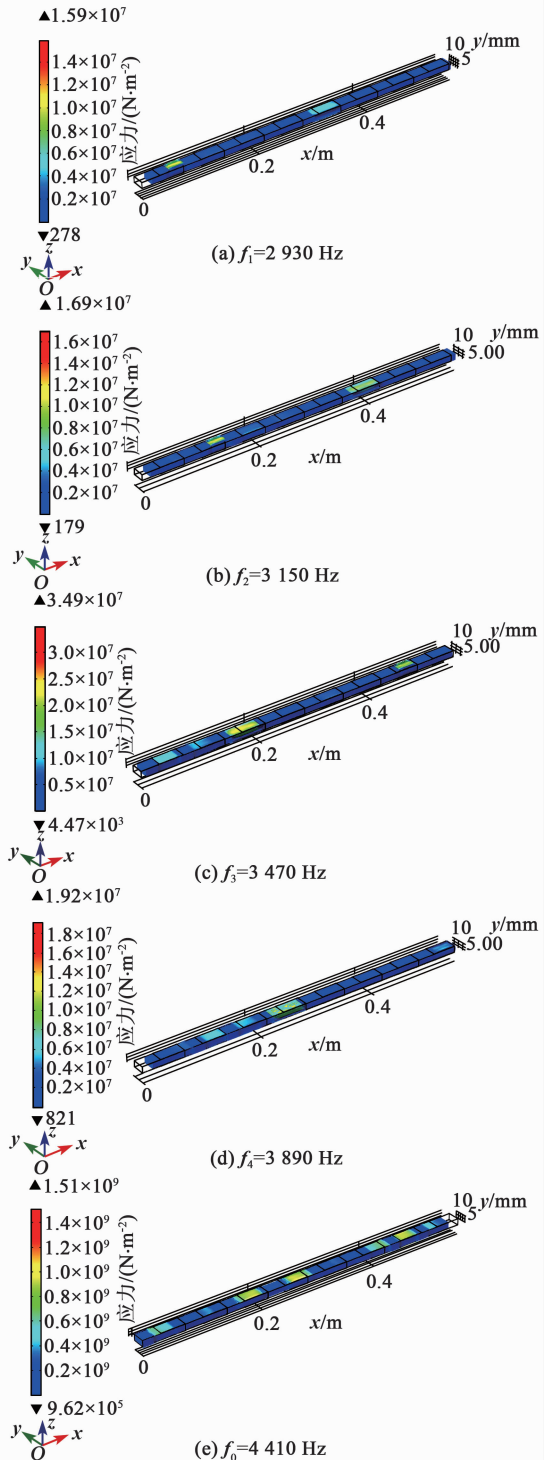


图7 不同频率下压电声子晶体杆的振型图

表面应力,相差2个数量级,达到了很好的抑振效果。以上仿真结果验证了当元胞中含有多个谐振频率不同的分流电路时,可以产生相应数量的局域共振带隙,且带隙内的波被局域在具有相应谐振频率的压电分流单元内,从而阻止波的传播呈现带隙特性。

3 结 论

本文设计了 3 种不同配置、含有负电容谐振分流电路的压电声子晶体杆,并对其进行了理论建模及仿真验证,可以得到如下结论:

1) 针对一维压电声子晶体杆模型,提出了 3 种含有多个压电分流单元的元胞配置,元胞中多个谐振频率不同的压电分流单元可以产生多个局域共振带隙,为带隙调控提供了更多的可能。

2) 分流电路中的电路元件参数均可影响电磁振荡,进而影响局域共振带隙。为使目标频段内带隙宽度和平面波抑制幅度最大化,可以采用算法进行优化,得到电路参数的最佳匹配值,实现带隙合并或多频带调谐,为带隙调控提供了更多的方法。

含压电分流电路的声子晶体杆具有附加质量小,结构简单等优点,且仅通过压电分流单元即可实现带隙调控,无需改变结构。

参考文献:

- [1] 温熙森. 光子/声子晶体理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [2] GRIPP J A B, RADE D A. Vibration and noise control using shunted piezoelectric transducers: A review[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 112: 359-383.
- [3] THORP O, RUZZENE M, BAZ A. Attenuation and localization of wave propagation in rods with periodic shunted piezoelectric patches[J]. Smart Materials and Structures, 2001, 10(5): 979.
- [4] QIAN Denghui. Bandgap properties of a piezoelectric phononic crystal nanobeam based on nonlocal theory [J]. Journal of Materials Science, 2019, 54(5): 4038-4048.
- [5] CHEN Shengbing, WANG Gang, SONG Yubao, et al. Low-frequency vibration isolation in sandwich plates by piezoelectric shunting arrays[J]. Smart Materials and Structures, 2016, 25(12): 125024.
- [6] WU Shuyau. Method for multiple mode piezoelectric shunting with single PZT transducer for vibration control[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 1998, 9(12): 991-998.
- [7] FLEMING A J, MOHEIMANI S O R. Improved current and charge amplifiers for driving piezoelectric loads, and issues in signal processing design for synthesis of shunt damping circuits[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2004, 15(2): 77-92.
- [8] PARK C H, BAZ A. Vibration control of beams with negative capacitive shunting of interdigital electrode piezoceramics [J]. Journal of Vibration and Control, 2005, 11(3): 331-346.
- [9] CASADEI F, BECK S B, CUNEFARE K A, et al. Vibration control of plates through hybrid configurations of periodic piezoelectric shunts[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2012, 23(10): 1169-1177.
- [10] ZHANG Hao, WEN Jihong, CHEN Shengbing, et al. Flexural wave band-gaps in phononic metamaterial beam with hybrid shunting circuits[J]. Chinese Physics B, 2015, 24(3): 036201.
- [11] BERARDENGO M, MANZONI S, THOMASO, et al. Piezoelectric resonant shunt enhancement by negative capacitances: Optimisation, performance and resonance cancellation[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2018, 29(12): 2581-2606.
- [12] 董亚科, 姚宏, 杜军, 等. 负电容声子晶体带隙特性研究 [J]. 压电与声光, 2018, 40(6): 860-863.
DONG Yake, YAO Hong, DU Jun, et al. Research on band gap characteristics of negative capacitance phononic crystals [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2018, 40(6): 860-863.
- [13] BAO B, WANG Q. Elastic wave manipulation in piezoelectric beam meta-structure using electronic negative capacitance dual-adjacent/staggered connections [J]. Composite Structures, 2019, 210: 567-580.
- [14] WANG Gang, CHEN Shengbing, WEN Jihong. Low-frequency locally resonant band gaps induced by arrays of resonant shunts with antoniou's circuit: Experimental investigation on beams[J]. Smart Materials and Structures, 2010, 20(1): 015026.

悬臂式压电能量采集器模型修正

郭丽,周星德,杨菁

(河海大学 土木与交通学院,江苏 南京 210098)

摘要:该文以悬臂式压电能量采集器为研究对象,针对 Erturk 推导的分布参数模型速度频率响应函数(VFF)仿真时发现在 $0\sim 20$ Hz 时存在偏差问题,提出了 VFF 修正方法。首先介绍了含集中质量块的分布参数模型的 VFF 推导过程;然后通过 $0\sim 20$ Hz 内的仿真分析,发现出现较大误差的原因是 VFF 表达式的第一项,因此,引入含参数 α 的正弦函数来减小误差。考虑到正弦函数的引入又将导致第二项产生误差,在第二项中引入含参数 β 的正切函数来减小误差;最后通过误差分析确定参数 α 、 β 的最优取值范围,并进行实例分析。结果表明,修正后分布参数模型下的速度频率响应与实验结果吻合。

关键词:悬臂梁;速度频率响应函数(VFF);压电;模型修正;采集器

中图分类号:TN381;TM22;O326 **文献标志码:**A **DOI:**10.11977/j.issn.1004-2474.2020.06.011

Model Modification for Cantilever Piezoelectric Energy Harvester

GUO Li, ZHOU Xingde, YANG Jing

(College of Civil and Transportation Engineering, Hehai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In this paper, the cantilever piezoelectric energy collector is taken as the research object, aiming at the problem that there existed a deviation of the velocity frequency response function(VFF) of the distributed parameter model derived by Erturk in the range of $0\sim 20$ Hz during the simulation, a VFF modification method is proposed in this paper. First, the derivation of the velocity frequency response function with a tip mass of the distributed parameter model is introduced. Then through the simulation and analysis of VFF in the range of $0\sim 20$ Hz, it is found that the reason for the main error is the first term of VFF expression, thus the sine function with parameter α introduced to reduce the error. Considering that the introduction of the sine function led to the error of the second term of VFF, the tangent function with parameter β was introduced to reduce the error. Finally, the optimal range of α and β was determined by error analysis, and an example is analyzed. The results show that the velocity frequency response of the modified distributed parameter model is consistent with the experimental results.

Key words: cantilever beam; velocity frequency response function(VFF); piezoelectric; model modification; harvester

0 引言

微机电系统(MEMS)工作环境复杂,如在深水中,不方便更换电池,需借助于周围环境的振动提供能量。压电材料是一种智能材料,当材料发生变形时会产生电荷(正压电效应),反之,当施加电场时,压电材料会产生应力或应变(逆压电效应)^[1],压电能量采集器采用的是正压电效应。目前,压电能量采集器建模方法有集总参数模型与分布参数模型两种。集总参数模型是通过能量等效的方式,把悬臂梁简化为单自由度系统,具有简单和误差大的特点;分布参数模型^[2]是根据连续分布梁来构建模型,可

以获得理论解,计算复杂,但可获得精确解。

国内外对悬臂式压电能量采集器展开了广泛的研究。许多学者研究了质量块^[3-5]对压电悬臂梁发电效率的影响。唐礼平等^[6]将常规的悬臂式压电能量采集器进行改进,在压电悬臂梁自由端附加有限尺寸的质量块,在固定端附加动力放大器,动力放大器由有限尺寸的质量块、竖向平移弹性及转动弹性均受到约束的弹簧组成,研究发现改进后的能量采集器的采集效率及采集精度均得到提高。虽然改进的新型动力放大器增加了一个转动弹性约束,但模型忽略了能量采集器的机电耦合效应。杨斌强等^[7]

收稿日期:2020-08-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41977240)

作者简介:郭丽(1996-),女,江苏徐州人,硕士生,主要从事结构振动与控制方向的研究。通信作者:周星德(1964-),男,安徽淮南人,教授、博士生导师,主要从事结构振动与控制方向的研究。

提出了带有弹性支撑与放大的宽频压电振动能量采集器的分布参数机电耦合模型,并考虑了悬臂梁末端质量块的影响。何燕丽等^[8]建立了机电耦合的曲梁式能量采集器 prescott 模型,运用格林函数法推导在其强迫振动下的解析解,探究阻尼、负载电阻及材料弹性模量对响应结果的影响。Erturk 等^[9]针对悬臂式压电能量采集器提出了分布参数型机电耦合模型,推导其在任意频率简谐激励下的电压响应和振动响应解析表达式,从多模态及单模态解中提取电压输出和振动响应关于基座加速度的频响函数。

通过仿真发现,Erturk^[9]文中模型预测与实验测量对比图中,绘制的尖端速度关于基座加速度的频率响应函数在 0~20 Hz 时存在偏差,为此,作者提出了修正方法,具体思路为:首先,振动响应函数借助文献[9]的成果,推导第 r 阶单模态的振动响应;其次,为修正 0~20 Hz 内速度频率响应函数(VFF)引入含参数 α 的正弦函数。 α 的引入会导致较高频率下速度响应产生误差,因此又引入含参数 β 的正切函数。最后利用修正后的速度频响函数进行实例分析,结果表明修正后的模型结果与实验结果几乎一致。

1 悬臂式压电能量采集器分布参数模型

1.1 模态运动方程

图 1 为悬臂式压电振动能量采集器结构简图^[10]。图中, h_s 为基梁厚,基梁上、下表面全覆盖厚为 h_p 的压电材料,沿 y 方向极化;基梁的金属结构作为压电材料的内侧电极,同时在压电材料的外侧布置与基梁同等宽度(b)的电极;梁一端固接于基座处,自由端附有集中质量块。基座受到简谐激励时带动悬臂梁产生变形,机械变形产生极化并通过陶瓷电极输出,为电路负载供电,完成稳定闭环电路的工作。图中, $g(t)$ 为平动激励, $h(t)$ 为转动激励, L 为基梁长度, $v(t)$ 为电阻两端电压; R_l 为负载电阻。

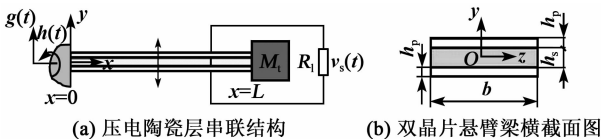


图 1 悬臂式压电振动能量采集器结构简图

假设压电能量采集器为 Euler-Bernoulli 梁^[9],则阻尼受迫振动方程为

$$YI \frac{\partial^4 w_{\text{rel}}(x, t)}{\partial x^4} + cI \frac{\partial^5 w_{\text{rel}}(x, t)}{\partial x^4 \partial t} + m \frac{\partial^2 w_{\text{rel}}(x, t)}{\partial t^2} + \mathcal{D}v(t) \left[\frac{d\delta(x)}{dx} - \frac{d\delta(x-L)}{dx} \right] =$$

$$[m + M_l \delta(x-L)] \frac{\partial^2 w_b(x, t)}{\partial t^2} \quad (1)$$

$$w_b(x, t) = g(t) + xh(t) \quad (2)$$

$$YI = \frac{2b}{3} \left\{ Y_s \frac{h_s^3}{8} + \bar{c}_{11}^E \left[\left(h_p + \frac{h_s}{2} \right)^3 - \frac{h_s^3}{8} \right] \right\} \quad (3)$$

式中: $w_{\text{rel}}(x, t)$ 为关于位置和时间的竖向振动函数; t 为时间; Y_s 为主结构层的杨氏模量; YI 为抗弯刚度; c 为阻尼系数; $\bar{c}_{11}^E$ 为弹性刚度,表示压电陶瓷在恒定电场下的杨氏模量; m, M_l 分别为梁的单位长度质量和自由端质量块质量; $M(x, t)$ 为梁的内弯矩; $w_b(x, t)$ 为基座处位移; $\mathcal{D}$ 为压电耦合项,且:

$$\mathcal{D} = \frac{\bar{e}_{31} b}{2h_p} \left[\frac{h_s^2}{4} - \left(h_p + \frac{h_s}{2} \right)^2 \right] \quad (4)$$

式中 $\bar{e}_{31}$ 为压电常数。

由 Raleigh-Ritz 法可得压电梁的横向弯曲位移为

$$w_{\text{rel}}(x, t) = \sum_{r=1}^{\infty} \varphi_r(x) \eta_r(t) \quad (5)$$

式中: $\varphi_r(x)$ 为第 r 阶模态质量归一化特征函数; $\eta_r(t)$ 为第 r 阶模态函数。无阻尼自由振动情况下的特征函数为

$$\varphi_r(x) = C_r [\cos \gamma x - \cosh \gamma x + \zeta_r (\sin \gamma x - \sinh \gamma x)] \quad (6)$$

其中

$$\zeta_r = \frac{mL (\sin \lambda_r - \sinh \lambda_r) + \lambda_r M_l (\cos \lambda_r - \cosh \lambda_r)}{mL (\cos \lambda_r + \cosh \lambda_r) - \lambda_r M_l (\sin \lambda_r - \sinh \lambda_r)} \quad (7)$$

式中: C_r 为模态振幅常数由模态正交性条件得到; $\gamma = \lambda_r / L$; ζ_r 为阻尼比。其中,梁的第 r 阶模态无阻尼自由振动下固有频率为

$$\omega_r = \lambda_r^2 \sqrt{\frac{YI}{mL^4}} \quad (8)$$

第 r 阶振动模态的特征值由下式计算得到:

$$1 + \cos \lambda \cosh \lambda + \lambda \frac{M_l}{mL} (\cos \lambda \sinh \lambda - \sin \lambda \cosh \lambda) - \frac{\lambda^3 I_t}{mL^3} (\cosh \lambda \sin \lambda + \sinh \lambda \cos \lambda) + \frac{\lambda^4 M_l I_t}{m^2 L^4} (1 - \cos \lambda \cosh \lambda) = 0 \quad (9)$$

将式(5)代入式(1)中,利用模态正交性条件得到模态坐标下的运动方程为

$$\frac{d^2 \eta_r(t)}{dt^2} + 2\zeta_r \omega_r \frac{d\eta_r(t)}{dt} + \omega_r^2 \eta_r(t) + \chi_r v(t) = f_r(t) \quad (10)$$

式中: $\zeta_r = c\omega_r/2E^{[11-12]}$; χ_r 为模态机电耦合项,且:

$$\chi_r = \vartheta \left. \frac{d\varphi_r(x)}{dx} \right|_{x=L} \quad (11)$$

模态力函数为

$$f_r(t) = -m \left[\frac{d^2 g(t)}{dt^2} \int_0^L \varphi_r(x) dx + \frac{d^2 h(t)}{dt^2} \cdot \int_0^L x \varphi_r(x) dx \right] - M_t \varphi_r(L) \left[\frac{d^2 g(t)}{dt^2} + L \frac{d^2 h(t)}{dt^2} \right] \quad (12)$$

1.2 电路方程

图1中,串联连接的双晶片压电陶瓷可表示为两个电流源及其内部电容串联的电路图。因此,图1的简化电路图如图2所示。

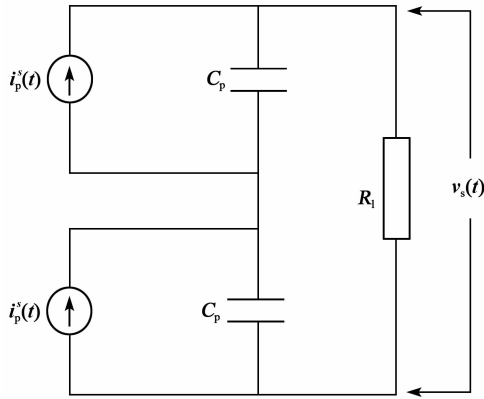


图2 电路简图

根据 Kirchhoff 定律,图2所示的电路图可表示为

$$\frac{C_p}{2} \frac{dv(t)}{dt} + \frac{v(t)}{R_l} = i_p(t) \quad (13)$$

式中内部电容(C_p)和电流源项(i_p)分别为

$$C_p = \frac{\bar{\epsilon}_{33} b L}{h_p} \quad (14)$$

$$i_p = \sum_{r=1}^{\infty} \kappa_r \frac{d\eta_r(t)}{dt} \quad (15)$$

式中: $\bar{\epsilon}_{33}$ 为介电常数; κ_r 为电路方程中模态耦合项,即:

$$\kappa_r = -\bar{\epsilon}_{31} h_{pc} b \int_0^L \frac{d^2 \varphi_r(x)}{dx^2} dx = -\bar{\epsilon}_{31} h_{pc} b \left. \frac{d\varphi_r(x)}{dx} \right|_{x=L} \quad (16)$$

由于固定端处电极的弯曲斜率为0,故第 r 阶模态对耦合项的贡献仅取决于集中质量块处。

1.3 单模态速度频率响应函数

基座在简谐激励作用下产生平动 $g(t) = Y_0 e^{j\omega t}$

与微小转动 $h(t) = \theta_0 e^{j\omega t}$, 其中, Y_0 和 θ_0 为平动与微小转动的幅值, ω 为外激励频率, j 为虚数单位, 将平动与转动公式代入式(12)得到简谐激励下的模态力函数 $f_r(t) = F_r e^{j\omega t}$, F_r 为力的幅值:

$$F_r = -\sigma_r \omega^2 Y_0 - \tau_r \omega^2 \theta_0 \quad (17)$$

$$\sigma_r = -m \int_0^L \varphi_r(x) dx - M_t \varphi_r(L) \quad (18)$$

$$\tau_r = -m \int_0^L x \varphi_r(x) dx - M_t L \varphi_r(L) \quad (19)$$

假设 $\eta_r(t) = H_r e^{j\omega t}$ 和 $v(t) = V e^{j\omega t}$, 分别代入式(10)和式(13)中得到关于幅值 H_r 和 V 的方程

$$(\omega_r^2 - \omega^2 + j2\zeta_r \omega_r \omega) H_r + \chi_r V = F_r \quad (20)$$

$$\left(\frac{1}{R_l} + j\omega \frac{C_p}{2} \right) V - j\omega \sum_{r=1}^{\infty} \kappa_r H_r = 0 \quad (21)$$

联立式(20)、(21)求振动幅值函数 H_r , 代入 $\eta_r(t) = H_r e^{j\omega t}$ 中。其中, 当外激励频率接近梁的第 r 阶固有频率时, 振动响应的主要贡献为第 r 阶模态, 表达式为

$$\hat{w}_{rel}(x, t) = \hat{A}(\omega, x) (-\omega^2 Y_0 e^{j\omega t}) + \hat{\psi}(\omega, x) (-\omega^2 \theta_0 e^{j\omega t}) \quad (22)$$

假设 $\theta_0 = 0$ 。其中 $\hat{A}(\omega, x)$ 表示第 r 阶模态梁的横向位移响应关于基座平动加速度的频响函数:

$$\hat{A}(\omega, x) = [(2 + j\omega R_l C_p) \sigma_r \varphi_r(x)] / [(2 + j\omega R_l C_p) (\omega_r^2 - \omega^2 + j2\zeta_r \omega_r \omega) + j2\omega R_l \kappa_r \chi_r] \quad (23)$$

当 $x = L$ 时, 式(23)表示自由端的相对速度频响函数, 而实验测得的是自由端的绝对速度, 因此, 应在式(23)基础上添加基座位移, 则有

$$\hat{A}_1(\omega, L) = \frac{\frac{d\hat{w}(L, t)}{dt}}{-\omega^2 Y_0 e^{j\omega t}} = \frac{\frac{d}{dt} [\hat{w}_{rel}(x, t) + w_b(x, t)]}{-\omega^2 Y_0 e^{j\omega t}} = \frac{1}{j\omega} + j\omega \hat{A}(\omega, L) \quad (24)$$

式(24)为 Erturk 给出的速度关于基座加速度的频率响应函数。利用 MATLAB 根据式(24)计算 2.5~20 Hz 低频段内, $R_l = 1 \text{ k}\Omega$ 、 $33 \text{ k}\Omega$ 、 $470 \text{ k}\Omega$ 情况下模型结果与实验结果的相对误差百分比为 216%、223%、567%。

以 $R_l = 1 \text{ k}\Omega$ 为例, 本文实验数据利用 Getdate 软件从文献[9]中获得, 由于 Erturk 文中未绘制 0~20 Hz 的仿真结果, 实际仿真结果如图3所示。由图可知, 0~20 Hz 时, 频率越小, 误差越大, 若 $\omega = 1.5 \text{ Hz}$ 时, $\hat{A}_1$ 应接近于 0, 而按式(24)计算结果为

0.97。

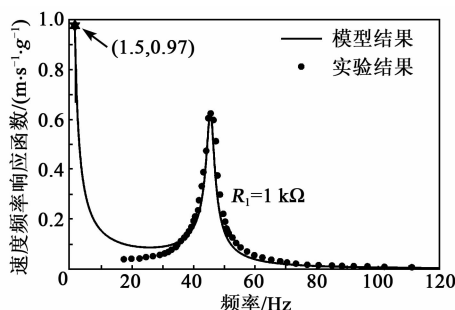
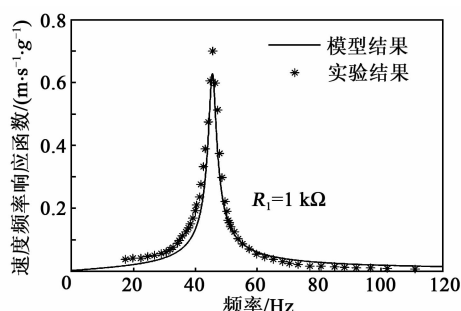


图3 模型结果与实验结果对比

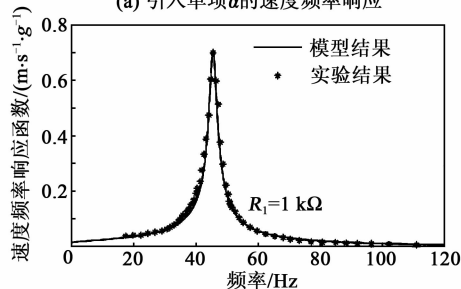
2 模型修正

本文首先针对0~20 Hz时的偏差进行调整,使频响函数幅值与实验数据一致,再对后续造成的共振频率处微小误差进行调整。

对比分析发现,计算结果与实验结果存在误差的主要原因是在0~20 Hz时基座处速度频响幅值过大。为解决 $1/(j\omega)$ 值过大问题,在此基础上乘 $\sin(\omega\alpha)$,以 $\alpha=0.0016$ 为例,在0~20 Hz时修正后的速度频响幅值的计算结果得到较好改善,如图4所示。



(a) 引入单项 α 的速度频率响应



(b) 综合考虑 α 与 β 的速度频率响应

图4 对速度频率响应结果的修正

文献[9]可知,负载电阻为1 kΩ时,梁的一阶固有频率为45.6 Hz。观察图4(a)发现,引入 $\sin(\omega\alpha)$ 后的速度频响幅值在共振频率处出现峰值降低的情况,再次引入修正函数 $1 + \tan \beta$ 对式(24)的第二项进行修正,以 $\beta=0.12$ 为例,修正后的结果如图4(b)所示,共振频率处的速度频响幅值得到明显改善。

式(24)修正后,使该模型下的速度频率响应函数的解析解与实验解几乎一致,修正后的速度频率响应函数为

$$A_{\text{modified}}(\omega, L) = \frac{1}{j\omega} \sin(\omega\alpha) + j\omega \hat{A}(\omega, L) \times (1 + \tan \beta) \quad (25)$$

利用 MATLAB 数值计算得到 α 的合理取值范围为 $[0.0001, 0.0018]$, β 的合理取值范围为 $[0.1, 0.25]$ 。

3 算例分析

选取文献[9]中的悬臂式压电能量采集器的几何、材料参数进行计算。基梁与 PZT 长度均为 50.8 mm;悬臂梁宽为 31.8 mm;基梁与 PZT 厚度分别为 0.14 mm、0.26 mm; $M_t=0.012$ kg;PZT 与基梁质量密度分别为 $7800 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $9000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$;基梁与 PZT 杨氏模量分别为 105 GPa、66 GPa;压电常数 $d_{31}=-190 \text{ pm} \cdot \text{V}^{-1}$;介电常数 $\epsilon_{33}=1.33 \times 10^{-8} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$ 。分析不同负载电阻及参数值下速度频响函数的准确性,为了便于比较,本文自由端速度表示基础激励加速度为 g ($g=9.8 \text{ m/s}^2$) 条件下的输出结果。

首先固定 β 值,研究仅 α 变化时修正函数对3种不同负载电阻(1 kΩ、33 kΩ、470 kΩ)的速度频率响应的影响。根据式(25),利用 MATLAB 计算修正模型下的速度频响函数值,采用二范数计算模型结果与实验结果的相对误差百分比,如图5所示

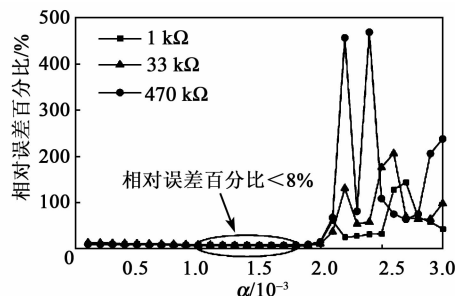


图5 模型与实验结果相对误差百分比

由图5可见,相对误差百分比先随 α 值增大而减小,在 $[0.0010, 0.0018]$ 时,相对误差百分比控制在8%以内,此时修正后的模型与实验结果几乎一致。当 $\alpha > 0.002$ 时,相对误差百分比急剧增加并伴随大幅度震荡。

其次研究 α 与 β 同时变化对速度频率响应的影响, α 控制在 $[0.0001, 0.0018]$, β 控制在 $[0.01, 0.30]$,利用 MATLAB 计算此范围下的相对误差百分比。计算结果表明,修正后模型的相对误差百分

比均随 α 、 β 值的增加先减小后增加。根据 MATLAB 数值计算结果可知, $R_1=1\text{ k}\Omega$ 的分布参数模型, $\alpha=0.001\ 6$, $\beta=0.19$ 时,相对误差百分比为7.24%; $R_1=33\text{ k}\Omega$ 时, $\alpha=0.001\ 7$, $\beta=0.21$,相对误差百分比为5.7%; $R_1=470\text{ k}\Omega$ 时, $\alpha=0.001\ 3$, $\beta=0.17$,相对误差百分比为7.24%。

综合考虑3种负载电阻情况,计算速度频响函数的加权平均误差。首先,以增大输出电流为目的,考虑短路情况下电流输出达到最大值,因此,3种负载电阻情况权系数分别取0.4、0.3、0.3,加权平均误差为6.7%。其次考虑以增大输出电压为目的,开路情况下的电压输出达到最大值,因此,3种负载电阻情况权系数取0.3、0.3、0.4,加权平均误差为6.7%。

4 结论

本文以悬臂式压电能量采集器为研究对象,考虑 Erturk 建立的分布参数模型下速度频响函数存在误差,提出相应的修正公式,结论如下:

1) 外激励频率较低时,基座处速度频响误差较大,导致能量采集器误差增大。

2) 针对基座和共振峰值处误差引入两项修正函数 $\sin(\omega\alpha)$ 和 $1+\tan(\omega\beta)$,其中 α 取值 $[0.000\ 1, 0.001\ 8]$, β 取值 $[0.1, 0.25]$,模型相对误差百分比控制在8%以内。

3) 以提高能量采集器的输出电压和输出电流为目的,3种负载电阻的加权平均误差均为6.7%。

本文所有推导均在 Euler-Bernoulli 梁假设的条件下进行,未考虑梁的剪切变形及转动惯量的影响,对于功能梯度材料类(FGM)的复合材料梁,运用此假设推导不再成立,应采用 Timoshenko 梁假设进行研究。

参考文献:

- [1] NADER J. Piezoelectric-based vibration control: from macro to micro scale system[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2017.
- [2] 唐礼平. 悬臂式压电俘能器机电耦合模型及参数对性能影响研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.
- [3] ERIC M, ANDREW S, TIM C, et al. Architectures for vibration-driven micropower generators[J]. Journal of Microelectro Mechanical System, 2014, 13(3): 429-440.
- [4] 赵兴强, 温志渝. 基于压电材料的振动能量收集器的谐振频率调节[J]. 压电与声光, 2013, 35(2): 241-244.

of vibration energy harvester based on piezoelectric material[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2013, 35(2): 241-244.

- [5] 马小青, 龚立娇, 潘巧生, 等. 质量块位置对压电悬臂梁发电性能影响分析[J]. 压电与声光, 2018, 40(5): 789-792.
- MA X Q, GONG L J, PAN Q S, et al. Analysis of influence of mass block position on the power generation performance piezoelectric cantilever beam[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2018, 40(5): 789-792.
- [6] 唐礼平, 王建国. 一种具有新型动力放大器压电悬臂梁俘能器计算模型和解析解[J]. 计算力学学报, 2017, 34(5): 650-656.
- TANG L P, WANG J G. Modeling and analytical solution of piezoelectric cantilevered energy harvester with a new dynamic magnifier[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2017, 34(5): 650-656.
- [7] 杨斌强, 徐文谭, 陆国丽, 等. 宽频压电振动能量采集器的分布参数模型与实验[J]. 中国机械工程, 2017, 28(2): 127-134.
- YANG B Q, XU W T, LU G L, et al. Distributed parameter model and experiments of a broadband piezoelectric vibration energy harvester[J]. China Mechanical Engineering, 2017, 28(2): 127-134.
- [8] 何燕丽, 赵翔. 曲梁压电俘能器强迫振动的格林函数解[J]. 力学学报, 2019, 51(4): 1170-1179.
- HE Y L, ZHAO X. Closed-form solutions for forced vibrations of curved piezoelectric energy harvesters by means of Green's function[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2019, 51(4): 1170-1179.
- [9] INMAN D J, ERTURK A. An experimentally validated bimorph cantilever model for piezoelectric energy harvesting from base excitations[J]. Smart Materials and Structures, 2009, 18: 1-17.
- [10] 王青萍. 基于压电悬臂梁的振动能量收集器的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.
- [11] INMAN D J, ERTURK A. Mechanical of cantilever piezoelectric vibration energy harvesters[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2008, 19: 1311-132.
- [12] ERTURK A, TARAZAGA P A, FARMER J R, et al. Effect of strain nodes and electrode configuration on piezoelectric energy harvesting from cantilevered beams[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2009, 131(1): 86-96.

基于 Φ -OTDR 的光纤准分布式氢泄漏监测

李树东¹, 苏阳¹, 何光层¹, 朱珏佩¹, 彭文英¹, 官贺^{1,2}, 杨永济¹, 巫涛江^{2,3}, 吴德操²

(1. 云南电网有限责任公司保山供电局, 云南 保山 678002; 2. 重庆理工大学 智能光纤感知技术

重庆市高校工程研究中心, 重庆市光纤传感与光电检测重点实验室, 重庆 400054;

3. 电梯智能运维重庆市高校工程中心, 重庆 402260)

摘要: 为了有效监测氢气管道的氢泄漏, 本文提出了一种基于相位敏感光时域反射仪(Φ -OTDR)的准分布式氢泄漏实时在线监测系统。首先去除单模光纤包层, 接着在去除包层的光纤表面采用化学镀膜法镀上对氢气敏感的钯膜, 其次在钯膜表面涂上一层疏水溶胶, 然后将涂覆有疏水溶胶的氢敏光纤安装在聚四氟乙烯槽中, 最后采用 Φ -OTDR 分布式氢传感系统对氢气管道氢泄漏进行监测。结果表明, 光纤 Φ -OTDR 分布式氢传感系统能准确地对氢气管道周界氢浓度的微小变化做出快速响应, 响应时间为 60 s, 位置分辨率达到 50 mm, 氢气浓度检测下限达到 $1\,000 \times 10^{-6}$ 。研究结果表明, 基于光纤 Φ -OTDR 的测量系统能对长距离、大范围内的氢气管道氢泄漏进行准确检测。

关键词: 相位敏感光时域反射仪(Φ -OTDR); 光纤; 分布式检测; 氢泄漏; 氢敏钯膜

中图分类号: TN252 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11977/j.issn.1004-2474.2020.06.012

Optical Fiber Quasi-distributed Hydrogen Leakage Monitoring Based on Φ -OTDR

LI Shudong¹, SU Yang¹, HE Guangceng¹, ZHU Yupei¹, PENG Wenying¹, GONG He^{1,2},

YANG Yongji¹, WU Taojiang^{2,3}, WU Dechao²

(1. Baoshan Power Supply Bureau of Yunnan Power Grid Co. LTD., Baoshan 678002, China; 2. Intelligent Fiber Sensing Technology of Chongqing Municipal Engineering Research Center of Institution of Higher Education, Chongqing Key Laboratory of Fiber Optic Sensor and Photodetector, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China; 3. Elevator Intelligent Operation and Maintenance of Chongqing Municipal Engineering Research Center of Institution of Higher Education, Chongqing 402260, China)

Abstract: To effectively monitor the hydrogen leakage of hydrogen pipeline, a quasi-distributed real-time online hydrogen leakage monitoring system based on Φ -OTDR is proposed in this paper. First, the cladding of the single-mode fiber was removed, and then the hydrogen-sensitive palladium film was coated on the surface of fiber without cladding by using the chemical coating method to response the hydrogen, thereafter, the hydrophobic sol was coated on the palladium film. Second, the hydrophobic sol coated fiber was installed in the PTFE channel. Finally, the hydrogen leak of the hydrogen pipeline was monitored by using the Φ -OTDR distributed hydrogen sensing system. The results show that the optical fiber Φ -OTDR distributed hydrogen sensing system can accurately respond to small changes in hydrogen concentration around the hydrogen pipeline. The response time was 60 s, the position resolution was 50 mm, and the lower limit of detection for hydrogen concentration was $1\,000 \times 10^{-6}$. The research results show that the measurement system based on optical fiber Φ -OTDR can accurately detect hydrogen leaks in hydrogen pipelines over a long distance and large range.

Key words: Φ -OTDR; optical fiber; distributed detection; hydrogen leakage; hydrogen sensitive palladium film

0 引言

氢气具有燃烧热值高、可再生、清洁无污染等优点,被认为是一种理想的清洁能源^[1-3]。但是,由于

氢原子体积小,常温常压下其密度和质量小,存贮过程中易发生泄漏^[4],故而氢气未能得到很好的推广应用。在常温常压下,当氢气泄漏到空气中的浓度

收稿日期:2020-08-25

基金项目:重庆市教委基金资助项目(KJQN201905604);重庆市科技局技术创新与应用发展重点基金资助项目(cstc2019jscx-mbdxX0002)

作者简介:李树东(1970-),男,云南大理市人,工程师,主要从事电力设备设施安防系统、电网运行管理等研究。E-mail: 371493387@qq.com。通信作者:吴德操(1984-),男,重庆人,副教授,博士,主要从事光纤传感器的研究。E-mail: wudecao@cqut.edu.cn。

达到4%~75%时,已达到可爆炸状态,遇明火、电流等极易爆炸,从而引发重大安全事故^[5]。因此,对氢气制造、储存、运输、应用等周界环境中的氢气浓度进行分布式实时检测,是实现氢能安全可靠、普遍应用的关键^[6-7]。

当前用于氢气浓度检测的传感器主要有电化学、半导体和光纤传感器^[8-10]。其中电化学和半导体氢气传感器易受外界环境的干扰,且存在自放导致氢气爆炸的风险。光纤传感器具有几何尺寸小,灵敏度较高,响应快,可分布式测量,安全性高及稳定性好等特点,成为检测氢气最有效的方法。

光纤氢气传感器主要包括布喇格光栅光纤氢传感器、干涉型光纤氢传感器及消逝场型光纤传感器。其中,基于相位敏感光时域反射仪(Φ -OTDR)的干涉型光纤氢传感系统可实现对氢泄漏的分布式定位,同时检测系统具有监测范围广,可隐蔽,不受地形地貌限制等优势,成为大范围分布式氢泄漏安全监测技术的最佳选择之一^[11-13]。

目前关于 Φ -OTDR氢泄漏检测技术,研究者们主要围绕 Φ -OTDR检测系统硬件电路和软件算法方面开展研究工作^[14-16],关于 Φ -OTDR传感系统中分布式光纤氢传感器的相关研究工作还十分缺乏。当前光纤 Φ -OTDR传感系统对长距离或大范围氢泄漏分布式测量的定位精度及其准确性仍较低,因此,在现有的 Φ -OTDR和干涉型光纤氢传感器技术基础上,设计一种基于 Φ -OTDR的用于准确探测长距离或大范围氢泄漏的分布式光纤传感器及检测系统十分必要。

本文为了准确、分布式、长距离监测氢气管道氢泄漏,提出了一种基于 Φ -OTDR的分布式光纤氢泄漏在线监测系统。实验制备了分布式光纤氢浓度传感器,并对该氢敏光纤传感器进行了封装。实验采用 Φ -OTDR分布式氢传感系统对氢气管道氢泄漏进行监测,分析了传感器系统对氢泄漏点的定位精度、响应时间及其对氢浓度的检测下限。

1 Φ -OTDR 氢气泄漏测量原理

光纤 Φ -OTDR分布式传感系统的原理如图1所示,窄带脉冲激光(相干性强)从光纤的一端注入,用光探测器探测光纤后向瑞利散射光相位(频率)变

化信息^[17]。

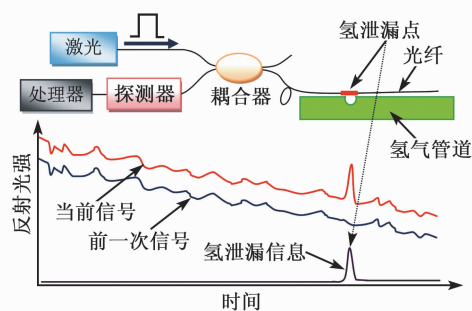


图1 Φ -OTDR 氢气泄漏检测原理示意图

图1中,当氢气管道某点处由于氢泄漏,原子氢会在光纤表面附着的钯(Pd)膜表面解离并吸收到Pd晶格中,吸收原子氢后会引发钯膜体积发生膨胀,从而导致局部光纤发生形变;发生形变的光纤区域内部纤芯和包层折射率发生变化,进而引起光纤中散射光相位变化。通过测量光纤中反向传输的光相位变化信息,即可获得氢气泄漏点的位置信息和氢气浓度信息。此外,由于钯膜对氢气的响应特性具有可逆性,因此,采用光纤 Φ -OTDR分布式传感系统对氢气泄漏进行分布式在线检测也具有可逆性。

2 氢敏光纤传感器及检测系统

2.1 氢敏准分布式光纤传感器

氢敏准分布式光纤传感器采用光纤模场直径为 $\varnothing 3.3 \mu\text{m}@1310 \text{ nm}$,波长为 $960 \sim 1600 \text{ nm}$,光纤直径为 $\varnothing (125 \pm 1.0) \mu\text{m}$,涂覆层直径为 $\varnothing (250 \pm 20) \mu\text{m}$,数值孔径为 $\varnothing 0.35$ 。为了验证基于 Φ -OTDR的分布式光纤氢泄漏在线监测系统能准确检测不同位置点的氢泄漏信息,实验在同一光纤上制备了4个氢敏检测点,即将一根长为600 mm的光纤分成8段,其中4段长均为50 mm,另外4段长均为100 mm,如图2所示。

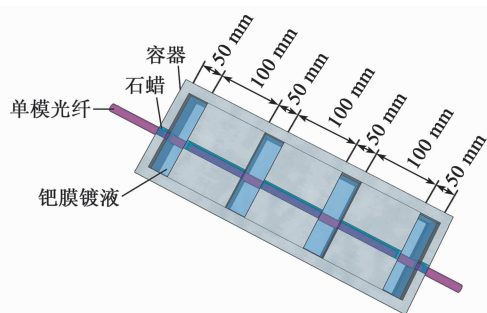


图2 氢敏分布式光纤传感器制备容器结构示意图

氢敏准分布式光纤传感器制备步骤如下:

1) 采用光纤剥线钳去除长为 50 mm 的光纤涂覆层,然后用酒精将其表面擦拭干净。

2) 将光纤安装在钽膜镀膜槽中,钽膜镀膜槽采用聚四氟乙烯制备,光纤与容器间采用石蜡密封。

3) 钽膜镀液制备如下:

a. 称量 0.024 2 g 三羟甲基氨基甲烷(Tris),溶于体积为 20 mL 去离子水中,获得 10 mmol/L Tris 溶液,并将溶液 pH 值调至 8.5,备用。

b. 称量 20 mg 盐酸多巴胺,溶解于体积为 10 mL 步骤 a 获得的 Tris 缓冲液中,混合并搅拌均匀,获得 2 g/L 盐酸多巴胺溶液。

c. 称量 0.443 3 g 的 PdCl_2 溶解于体积为 25 mL、摩尔浓度为 0.2 mol/L 的 HCl 溶液中,混合搅拌均匀,获得体积为 25 mL、摩尔浓度为 10 mmol/L 氯钯酸溶液中,备用。

d. 称量 0.007 56 g 的 NaBH_4 ,缓慢、分批次将其溶解于体积为 20 mL 的去离子水中,获得浓度为 10 mmol/L 的 NaBH_4 溶液,现配现用。

4) 将步骤 2) 获得的 2 g/L 盐酸多巴胺溶液依次加入图 2 中的 4 个钽膜镀液池中,6 h 后将盐酸多巴胺溶液排出,然后用去离子水漂洗光纤 10 次,去除光纤表面残留的多巴胺溶液,最后将光纤在 60 °C 下真空干燥 12 h。由此可通过多巴胺的自聚合效应在光纤表面形成厚约 100 nm 的聚多巴胺薄膜涂层。

5) 将步骤 4) 获得具有聚多巴胺涂层的光纤区域,加入浓度为 10 mmol/L 的氯钯酸溶液,并将溶液的温度升温至 60 °C,3 h 后将氯钯酸溶液全部排出,并重新注入浓度为 10 mmol/L 的 NaBH_4 水溶液,继续还原聚多巴胺涂层表面氯钯离子^[18-19]。由此可在光纤表面生长出一层均匀致密的、厚 10 μm 的氢敏钽膜,重复 50 次实验后钽膜表明形貌如图 3 所示。

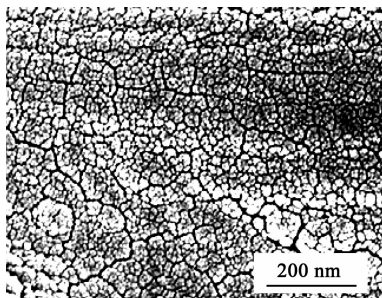


图 3 重复 50 次实验后钽膜结构扫描电镜图

6) 排出氯钯酸溶液,并向 4 个钽膜镀液池中加入无水乙醇溶解其石蜡。将光纤从容器中取出,即获得氢敏分布式光纤传感器。

为了增强氢敏分布式光纤传感器的防水防污、耐盐、耐酸碱、防结冰、防钽膜脱落的性能,从而提高传感器的使用寿命,在生长好钽膜的光纤表面涂覆一层厚为 5 μm 的超疏水透气聚偏氟乙烯(PVDF)薄膜材料。钽膜表面 PVDF 涂覆层制备步骤如下:

1) 将 2.0 g 的 PVDF 粉体溶解于 50 mL 的二甲基甲酰胺有机溶剂中,待 PVDF 粉体溶解完全后,即获得 PVDF 溶胶。

2) 将光纤浸入 PVDF 溶胶中,保持 10 min 后取出,在 60 °C 下干燥 6 h,即获得 PVDF 涂覆氢敏分布式光纤传感器。最后,为了增强 PVDF 涂覆氢敏分布式光纤传感器的机械性能,将传感器封装在聚四氟乙烯凹槽中,传感器结构及封装示意图,如图 4、5 所示。

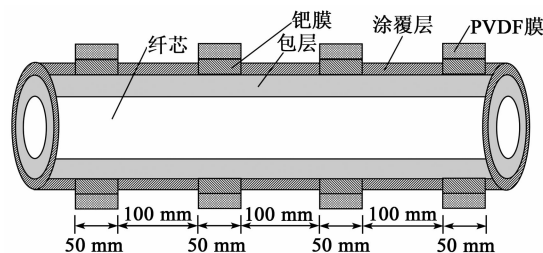


图 4 传感器结构示意图

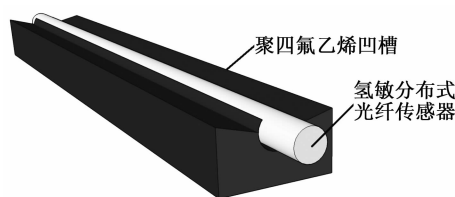


图 5 传感器封装示意图

2.2 Φ -OTDR 氢敏准分布式光纤测量系统

基于 Φ -OTDR 的氢敏准分布式测量实验装置示意图如图 6 所示。图中,氢敏区从上至下依次标记为氢敏区 I、氢敏区 II、氢敏区 III 和氢敏区 IV。

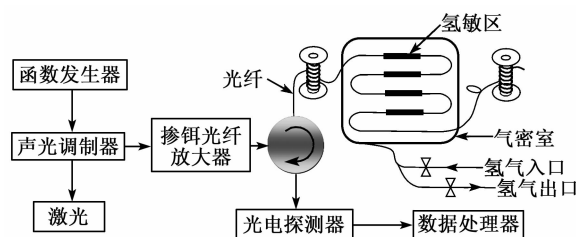


图 6 Φ -OTDR 检测系统原理图

系统中激光光源的线宽为 100 Hz, 输出波长为 1 550 nm。超窄激光经 200 MHz 声光调制器和掺铒光纤放大器后, 得到峰值功率约为 25 dBm 的脉冲光, 并由 1 550 nm 环形器直接注入到氢敏准分布式传感光纤。脉冲光在光纤内部沿着光纤向前传输, 由于氢气泄漏点处光纤表面钯膜膨胀引起光纤折射率发生变化, 导致瑞利散射光散射特性发生变化, 从而导致光相位发生变化; 然后通过环形器进入带宽为 20 GHz 的光电探测器, 并由数据处理单元对获得的光频率漂移进行信息提取等处理, 即实现对氢泄漏点的位置和浓度的测量。本实验系统中氢敏区 I、II、III 和 IV 所在的位置点分别为 800 000 mm、800 150 mm、800 300 mm、800 450 mm。

实验测试过程中, 当气密室中充满空气时, 将其作为参考; 随后抽空气密室, 并充满不同氢浓度的气体, 用于测量准分布式光纤传感器对氢气的响应特性。为了避免氢敏钯膜中的 Pd 纳米颗粒发生相变, 室温下将使用的氢浓度保持在 $20\ 000 \times 10^{-6}$ 以下。

3 实验结果与讨论

3.1 Φ -OTDR 传感系统对氢泄漏定位

为了表征基于 Φ -OTDR 的光纤测量系统能对氢泄漏位置进行准确定位, 监测了不同位置点处频率的变化信息, 实验结果如图 7 所示。

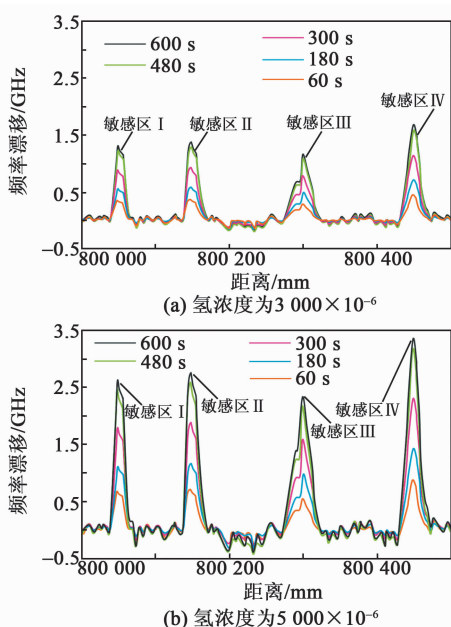


图7 准分布式光纤氢传感器对氢气响应特性

由图 7 可见, 当向图 6 中的气密室中通入氢气 60 s 时, 光纤的 4 个氢敏位置呈现出清晰的反射峰, 且频移漂移随时间的增加而增强, 其原因是钯膜能快速地吸附氢气并发生膨胀^[10], 从而对光纤产生局部应变, 进而改变光纤折射率, 引起光相位发生变化。当采样时间间隔从 480 s 增至 600 s 时, 传感器输出频率漂移量变化变慢, 其原因是钯膜吸氢逐渐趋于饱和, 导致光纤折射率变化趋于稳定。由此可见, 基于 Φ -OTDR 的氢敏光纤准分布式传感系统能快速(响应时间小于 60 s)、准确地定位氢泄漏点, 其位置分辨率达到 50 mm。

此外, 对比图 7(a)、(b) 可知, 氢浓度越高, Φ -OTDR 系统输出频率漂移量越大。因此, 采用本文研制的准分布式氢敏光纤传感器的 Φ -OTDR 测量系统能对氢浓度进行检测。

3.2 Φ -OTDR 传感系统对氢泄漏连续监测

为了验证基于 Φ -OTDR 的氢敏准分布式测量系统能准确、连续、重复地监测氢浓度变化信息, 实验研究了变氢浓度下(氢浓度变化顺序: $0 \rightarrow 1\ 000 \times 10^{-6} \rightarrow 6\ 000 \times 10^{-6} \rightarrow 0 \rightarrow 10\ 000 \times 10^{-6}$)的传感系统输出信号, 如图 8 所示。

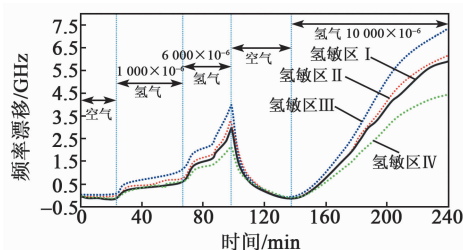


图8 光纤氢传感器在 240 min 内对氢气的连续响应特性

由图 8 可看出, 当氢浓度变化时, 4 个氢敏感点的频率漂移均发生明显变化。当氢浓度从 0 增加到 $1\ 000 \times 10^{-6}$, 4 个传感器的频率漂移均随着氢浓度的增大而增加, 且在浓度升高的瞬间, 频率漂移也急剧加剧, 这表明传感器系统对氢浓度的检测下限达到 $1\ 000 \times 10^{-6}$ 。当氢浓度从 $6\ 000 \times 10^{-6}$ 降至 0 时, 4 个氢敏感点的频率漂移迅速回到 0, 其原因在于氢敏钯膜具有快速解吸附氢气的功能^[10]。当钯膜中的氢气完全释放完时, 光纤的折射率回到初始值, 从而导致光相位差回到 0。随后, 当氢浓度从 0 增至 $10\ 000 \times 10^{-6}$ 时, 传感器的频率漂移量又迅速增大。研究结果表明, 基于 Φ -OTDR 的氢敏准分布式测量系统能准确、连续、重复地监测氢浓度变化

信息。

4 结束语

为了有效监测氢气管道氢泄漏信息,首先采用化学镀膜在单模光纤表面间隔生长了一层氢敏钼膜用于实现氢敏准分布式测量。其次,为了增强氢敏光纤传感器的使用寿命和机械性能,在钼膜表面涂覆了一层 PVDF 疏水溶胶,并将涂覆了 PVDF 疏水溶胶的光纤传感器封装在聚四氟乙烯凹槽中。最后建立了基于 Φ -OTDR 的分布式氢泄漏实时在线监测系统,实验测试了准分布式氢敏光纤传感器对氢气的响应特性。实验结果表明,采用本文研制的准分布式氢敏光纤传感器的 Φ -OTDR 测量系统能准确、快速地定位和测量氢气浓度变化信息,其位置分辨率达到 50 mm,氢气浓度检测下限达到 $1\ 000 \times 10^{-6}$ 。该系统能对长距离、大范围内的氢泄漏或氢浓度进行准确检测。

参考文献:

- [1] ZHONG N, LIAO Q, ZHU X, et al. A fiber-optic sensor for accurately monitoring biofilm growth in a hydrogen production photobioreactor [J]. Analytical Chemistry, 2014, 86(8): 3994-4001.
- [2] LIAO Q, ZHONG N, ZHU X, et al. Enhancement of hydrogen production by optimization of biofilm growth in a photobioreactor [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40(14): 4741-4751.
- [3] 许世森,张瑞云,程健,等. 电解制氢与高温燃料电池在电力行业的应用与发展 [J]. 中国电机工程学报, 2019 (9): 3.
- [4] 郑津洋,张俊峰,陈霖新,等. 氢安全研究现状 [J]. 安全与环境学报, 2016, 16(6): 144-152.
- [5] 罗承先. 世界氢能储运研究开发动态 [J]. 中外能源, 2017, 11: 41-49.
- [6] 周贤,杨沫,明兴祖,等. 不同银含量的 Pd-Ag 复合膜微结构光栅光纤氢气传感特性 [J]. 光子学报, 2019, 48(8): 0806004.
- [7] 穆青青,刘晓波,刘伟. 多层 Au-Pd 核壳纳米颗粒膜增敏的光纤氢气传感器 [J]. 光学精密工程, 2019, 27 (8): 1681-1687.
- [8] 母坤,童杏林,胡畔,等. 氢气传感器的技术现状及发展趋势 [J]. 激光杂志, 2016, 37(5): 1-5.
- [9] 郭雪原,詹青燃,金贵新,等. 高选择性的 In_2O_3 基热线型氢气传感器 [J]. 稀有金属材料与工程, 2016, 45 (11): 3010-3014.
- [10] CHEN M, XIN X, LIU H, et al. Monitoring biohydrogen production and metabolic heat in biofilms by fiber-Bragg-grating sensors [J]. Analytical Chemistry, 2019, 91(12): 7842-7849.
- [11] WU H, XIAO S, LI X, et al. Separation and determination of the disturbing signals in phase-sensitive optical time domain reflectometry (Φ -OTDR) [J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(15): 3156-3162.
- [12] 董百合,江飞,邢冀川. Φ -OTDR 光纤预警系统的周界安防入侵定位 [J]. 光学技术, 2017, 43(5): 473-477.
- [13] 张春熹,邓卓,王夏霄,等. 谱减降噪法在相位敏感 OTDR 扰动传感系统中的应用 [J]. 激光杂志, 2019, 40 (3): 16-19.
- [14] CHEN M, MASOUDI A, BRAMBILLA G. Performance analysis of distributed optical fiber acoustic sensors based on φ -OTDR [J]. Optics Express, 2019, 27(7): 9684-9695.
- [15] 熊显名,崔向良. φ -OTDR 全分布式光纤振动传感系统的车辆识别方法改进 [J]. 激光杂志, 2018(6): 70-73.
- [16] ESCOBEDO J L B, JASON J, LÓPEZ-MERCADO C A, et al. Distributed measurements of vibration frequency using phase-OTDR with a DFB laser self-stabilized through PM fiber ring cavity [J]. Results in Physics, 2019, 12: 1840-1842.
- [17] 梁可桢,潘政清,周俊,等. 一种基于相位敏感光时域反射计的多参量振动传感器 [J]. 中国激光, 2012, 39(8): 119-123.
- [18] CHEN G, ZHU X, CHEN R, et al. Gas-liquid-solid monolithic microreactor with Pd nanocatalyst coated on polydopamine modified nickel foam for nitrobenzene hydrogenation [J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 334: 1897-1904.
- [19] CHEN R, FENG H, ZHU X, et al. Interaction of the Taylor flow behaviors and catalytic reaction inside a gas-liquid-solid microreactor under long-term operation [J]. Chemical Engineering Science, 2018, 175: 175-184.

光纤布喇格光栅的低温传感特性研究

李博文, 刘颖刚, 宋小亚, 傅海威, 贾振安, 高 宏

(西安石油大学 陕西省油气资源光纤探测工程研究中心, 陕西省油气井测控技术重点实验室, 陕西 西安 710065)

摘 要:为了解决光纤光栅在低温环境中的应用问题, 该文从光纤布喇格光栅(FBG)的传感理论出发, 通过深入分析了FBG在 $-60\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时热光系数和热膨胀系数的变化。采用2根未封装的FBG进行实验验证, 得到了FBG在低温环境下的响应情况。研究表明, FBG在低温环境下具有良好的响应和重复性, 这对FBG在低温环境中的应用具有重要指导意义。

关键词:光纤布喇格光栅(FBG); 低温; 热光系数; 热膨胀系数

中图分类号: TN65 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11977/j.issn.1004-2474.2020.06.013

Research on Low Temperature Sensing Characteristics of Fiber Bragg Grating

LI Bowen, LIU Yinggang, SONG Xiaoya, FU Haiwei, JIA Zhen'an, GAO Hong

(Shaanxi Engineering Research Center of Oil and Gas Resource Optical Fiber Detection & Shaanxi Key Laboratory of Measurement and Control Technology for Oil and Gas Wells, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

Abstract: In order to solve the application problem of fiber grating in low temperature environment, based on the sensing theory of fiber Bragg grating(FBG), through in-depth analysis of the changes of the thermo-optical coefficient and thermal expansion coefficient of FBG at the range of $-60\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, and two unsealed FBGs is used for experimental verification, the response of FBG in low temperature environment is obtained in this paper. The results show that FBG has good response and repeatability in low temperature environment, which has important guiding significance for the application of FBG in low temperature environment.

Key words: fiber Bragg grating(FBG); low temperature; thermo-optical coefficient; thermal expansion coefficient

0 引言

随着光纤制造产业的快速发展, 光纤布喇格光栅(FBG)获得巨大发展, 为FBG在光纤传感领域的研究和应用提供了广阔的空间^[1-2]。与传统传感器相比, FBG具有体积小, 质量小, 抗电磁干扰及易集成等优点, 在航空航天、医用医学、环境监测方面得到了广泛应用^[3-5]。迄今为止, 科研工作者已研制出基于FBG的用于温度、振动、流量、压力等单点式传感或分布式传感的光纤传感器^[6-10]。

在众多物理量的传感测量应用中, 基于FBG的温度传感器得到了研究者的特别关注, 发展更迅速。因无涂覆的裸FBG在室温以上的温度灵敏度较低(通常在 $0.009\sim 0.013\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$)和较高的线性响应,

研究者提出了如入膜片粘贴、温敏材料物封装等增敏方法, 在保持线性响应特性的前提下提高FBG的温度响应灵敏度, 拓展FBG的使用范围^[11-12]。但是相关研究主要集中在室温以上的温度环境中, 对室温, 特别是0以下的FBG的研究相对较少。

任何材料的特性都会受环境温度影响。而FBG是通过改变光纤纤芯内部的折射率分布形成的特殊光学效应, 在 $25\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 纤芯材料的热光系数和热膨胀系数可被看成常量, 导致反射波长随温度线性漂移。当环境温度低于0时, 材料的热光系数和热膨胀系数会发生变化, 线性漂移的特性和灵敏度大小是否会被改变, 这对研究FBG的封装增敏技术非常重要, 在实现高灵敏高线性度FBG的温度传感检测中具有重要意义。

收稿日期: 2020-07-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61805197); 中国陕西省自然科学基金基础研究计划基金资助项目(2013JM8032); 陕西省教育厅科研计划基金资助项目(20JS122); 西安石油大学研究生创新基金资助项目(YCS19211032)

作者简介: 李博文(1994-), 男, 陕西人, 硕士生, 主要从事光纤温度传感器的制作与研究。通信作者: 刘颖刚(1977-), 男, 副教授, 硕士, 主要从事光纤传感技术与应用方面的研究。E-mail: ygliu@xsyu.edu.cn.

实验是将 2 根未封装的 FBG 放入低温恒温槽,改变低温恒温槽设备的运行参数,研究了 FBG 在 $-60\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的低温传感特性。实验结果表明,两个 FBG 的温度灵敏度分别为 $13.1\text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ 和 $13.5\text{ pm}/^{\circ}\text{C}$,线性拟合度分别为 0.999 4 和 0.999 0。在低温环境及室温以上,FBG 具有相同的响应度和重复性,这将使 FBG 在食品冷藏、极端气温测量及化学试剂储存等低温传感领域的应用成为可能。

1 FBG 的温度传感原理分析

对于均匀的 FBG,当输入光波长满足布喇格条件时,这一特定波长发生反射,其余波长发生透射。因此,对特定波长进行反射的特性,其作用相当于光纤纤芯内部形成一种窄带滤波器。根据耦合模型理论^[13-14],FBG 的中心波长为

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (1)$$

式中: λ_B 为 FBG 反射光的中心波长; n_{eff} 为 FBG 纤芯的有效折射率; Λ 为 FBG 的光栅周期。当外界被测量发生改变而引起 n_{eff} 和 Λ 变化时,都将导致 λ_B 发生改变。同样,FBG 的 λ_B 变化也可以反映被测参量的变化情况。

当外界温度发生变化时,热光效应的存在会导致 FBG 的有效折射率发生变化。同时,热膨胀效应也会使 FBG 的光栅周期发生改变。此外,温度也会引起光纤内部热应力变化,这是弹光效应引起的,而弹光效应对 FBG 的温度灵敏度影响微弱,通常在分析 FBG 温度灵敏度时忽略其影响。因此, λ_B 受到温度影响时,其偏移量为

$$\Delta\lambda_B = 2(n_{\text{eff}}\Delta\Lambda + \Lambda\Delta n_{\text{eff}}) = \lambda_B(\alpha + \xi)\Delta T \quad (2)$$

式中: $\alpha = \Delta\Lambda/(\Lambda\Delta T)$ 为热膨胀系数; $\xi = \Delta n_{\text{eff}}/(n_{\text{eff}}\Delta T)$ 为热光系数; ΔT 为温度变化量。因此,FBG 对温度的灵敏系数为

$$K_T = \Delta\lambda_B/\Delta T = \lambda_B(\alpha + \xi) \quad (3)$$

由式(3)可知, K_T 主要与其 λ_B 、 α 和 ξ 有关,而 α 、 ξ 与制作 FBG 的光纤材料有关。室温中, $\xi = 8.3\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, $\alpha = 0.55\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,忽略其随温度变化的影响,认为 λ_B 随温度变化是一种线性的关系,对应的温度灵敏度可达 $13.71\text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ ^[15]。

若要讨论 FBG 漂移与温度的变化,就需对光纤材料的 ξ 和 α 进行深入研究。常用石英光纤的主要材料是二氧化硅(SiO_2),外加极少量的其他材料。因此,对石英光纤原材料的 α 和 ξ 进行分析,即可探究出 FBG 的 α 、 ξ 与温度的关系。

表 1 为几种不同的石英材料的热膨胀量与温度

(T)的关系^[16]。目前,石英光纤采用的石英材料是 Spectrosil 1000,主要对该材料的热膨胀性进行了分析。

表 1 不同的石英材料单位长度膨胀量与 T 的关系

$T/^{\circ}\text{C}$	单位长度膨胀量/ 10^{-6}			
	Spectrosil 1000	IR Vitreosil 1100	Spectrosil 1400	Silicon Sil
	1000	1100	1400	Sil
-178.15	-0.38	-0.47	—	-0.41
-168.15	-0.32	-0.38	-0.59	-0.24
-158.15	-0.24	-0.32	-0.47	-0.10
-148.15	-0.19	-0.28	-0.45	0
-138.15	-0.13	-0.21	-0.38	0.26
-130.15	0	—	-0.35	—
-74.15	0.26	0.26	0.06	1.38
-65.15	0.30	0.26	0.12	1.56
-58.15	0.36	—	0.14	—
9.85	0.44	0.42	0.30	2.35

表 2 为熔融 SiO_2 折射率与 T 的关系^[17]。熔融 SiO_2 与石英光纤的温度特性相近,因而可以用来探讨石英光纤的热光特性。由 α 和 ξ 的定义可知,热膨胀系数为 $\Delta L/(L\times\Delta T)$,热光系数为 $\Delta n/(n\times\Delta T)$ ($\Delta n/n$ 为折射率相对变化量)。取 $n=1.455\ 9$, $T=0$,绘制了石英材料 $\Delta L/L$ 、 $\Delta n/n$ 与 T 的关系图,如图 1、2 所示。

表 2 熔融 SiO_2 折射率与 T 的关系

$T/^{\circ}\text{C}$	$\frac{\Delta n}{n}/10^{-4}$	$T/^{\circ}\text{C}$	$\frac{\Delta n}{n}/10^{-4}$
-80	-6.2	-10	-0.8
-70	-5.5	0	0
-60	-4.8	10	0.9
-50	-4.0	20	1.7
-40	-3.2	30	2.5
-30	-2.4	40	3.4
-20	-1.6	50	4.3

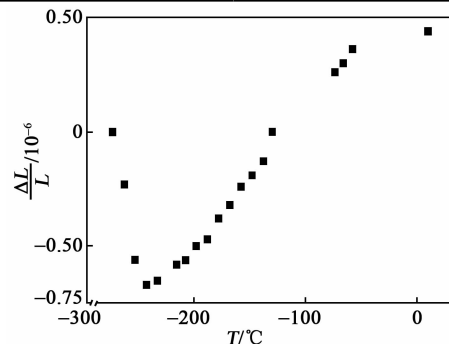
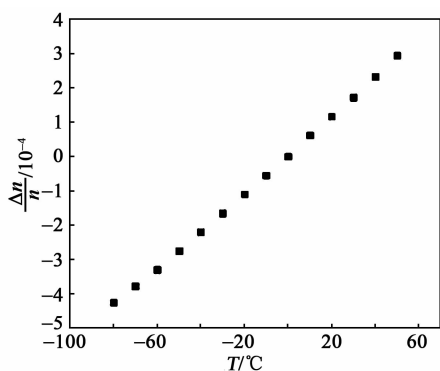


图 1 石英材料 $\Delta L/L$ 与 T 的关系图

图2 石英材料 $\Delta n/n$ 与 T 的关系图

由图1可知,在 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~室温($25\text{ }^{\circ}\text{C}$)时, $\Delta L/(L \times \Delta T)$ 的斜率先增大再减小,即在此温度范围的热膨胀系数先变大再减小。在 $-75\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,热膨胀系数最大约为 $5.3 \times 10^{-9}/^{\circ}\text{C}$,最小约为 $1.2 \times 10^{-9}/^{\circ}\text{C}$ 。由图2可知,在 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~室温时, $\Delta n/(n \times \Delta T)$ 的斜率随温度的升高有微小的升高,基本与温度呈线性关系,即热光系数约为 $5.56 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。比较热光系数和热膨胀系数可知, ΔT 引起 $\Delta n/n$ 的变化远高于 $\Delta L/L$ 的变化,两者相差3个数量级。此外,在 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~室温时, $(\alpha + \xi)$ 的极差为 $4.1 \times 10^{-9}/^{\circ}\text{C}$ 。若以图2所得的热光系数为分母,则 $(\alpha + \xi)$ 的相对极差为 0.073% 。综上所述,热光系数随 T 变化的线性效应远强于热膨胀系数随 T 变化的非线性效应,所以无法改变 $(\alpha + \xi)$ 与 T 之间的线性关系。

在 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~室温时,由于热光效应占主导因素,热膨胀效应对光纤的非线性变化只会略微影响波长漂移与温度间的线性关系。因此,在 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~室温时,FBG的中心波长漂移与温度间的关系也是线性的。

2 实验结果及分析

FBG低温测试实验装置如图3所示。实验系统由SM125解调仪、笔记本电脑、超低温计量测定恒温槽(温度为 $-80\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$,分辨率为 $\pm 0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$)及2根FBG组成。其中,主要测试设备是超低温恒温槽,在进行低温实验时,超低温恒温槽中所加液体为无水乙醇,可实现从 $-80\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的降温或升温过程。本实验主要研究 $-60\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时FBG的温度特性。

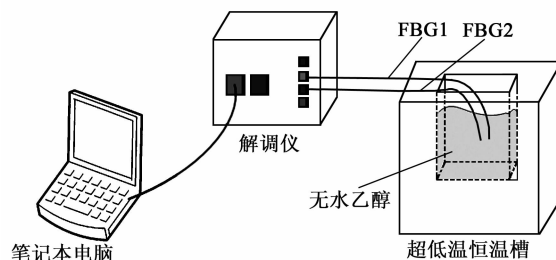


图3 实验装置图

本实验所采用的FBG1、2均为康宁SMF-28光纤制造,其室温下中心波长分别为 1547.790 nm 和 1547.775 nm 。实验中,将FBG1、2放入超低温恒温槽中,对超低温恒温槽的运行参数进行设置,使温度在实验所需范围内变化。我们以每 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为步长,记录下FBG1、2在不同温度下的光谱。

当温度变化时,FBG1、2的光谱变化如图4所示。由图可知,FBG1、2在降温 and 升温过程中均漂移稳定,降温过程向短波方向漂移,升温过程向长波方向漂移,且相同温度间隔漂移量无明显差异。

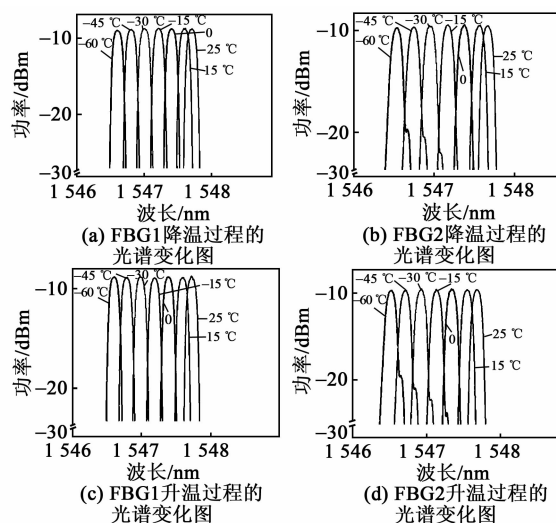
图4 FBG1、2随 T 变化的光谱变化图

图5为FBG1、2在升、降温过程中中心波长位置的变化。由图可见,在升、降温过程中,2个FBG均展现出良好的稳定性,波长漂移与温度间呈现出良好的线性关系,且2个FBG的重复性很好,升、降温过程中,同一温度中心波长位置的绝对差值小于 0.035 nm 。图6为FBG1、2的线性拟合图。由图6可知,降温过程中FBG1、2的温度灵敏度分别为 $13.1\text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ 和 $13.5\text{ pm}/^{\circ}\text{C}$,其拟合曲线线性度分别高达 0.9994 和 0.9990 。本实验中FBG展现出良好的线性度,这也是对前文理论推断可靠性的验证。

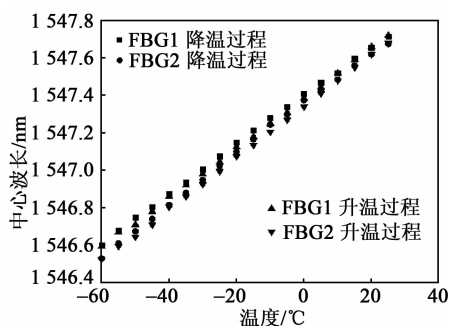


图5 FBG1、2 升、降温过程中中心波长的位置图

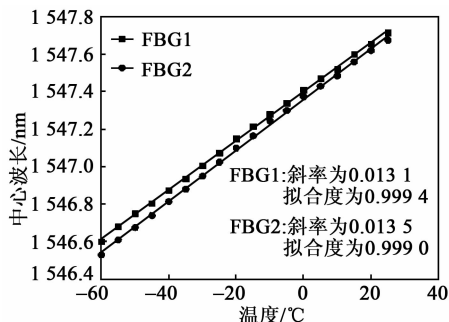


图6 FBG1、2 的波长漂移线性拟合图

3 结束语

从 FBG 的理论和实际应用出发,深入探究其在 $-60 \sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的低温传感特性。通过深入研究此范围内热膨胀系数和热光系数随温度的变化情况,得到此范围内 FBG 中心波长漂移与温度间呈线性关系,后经实验验证。此外,FBG 在此范围内响应良好,重复性极佳。因此,此研究将在食品冷藏、极端气温测量及化学试剂储存等方面具有重要的意义。

参考文献:

- [1] 刘颖刚,张伟,贾振安,等.微纳光纤布拉格光栅液体折射率传感实验研究[J].光电子·激光,2016,27(5):486-490.
- [2] LI H, ZHAO Q, JIANG S, et al. FP cavity and FBG cascaded optical fiber temperature and pressure sensor[J]. Chinese Optics Letters, 2019, 17(4): 43-47.
- [3] LI J, ZHANG J, SUN H, et al. An optical fiber sensor based on carboxymethyl cellulose/carbon nanotubes composite film for simultaneous measurement of relative humidity and temperature[J]. Optics Communications, 2020, 461: 125740.
- [4] 任越,张钰民,钟国舜,等.管式光纤光栅高温传感器封

装及温度特性[J].激光与红外,2020,50(5):598-601.

- [5] 戎丹丹,张钰民,杨润涛,等.全金属化应变不敏感 FBG 温度传感器特性研究[J].激光与红外,2018,48(9):1133-1138.
- [6] 钟志鑫,段君淼,张浩,等.光纤光栅水流流向传感器的设计[J].水利水电技术,2020,51(7):63-69.
- [7] YU X, SONG N, SONG J, et al. A novel method for simultaneous measurement of temperature and strain based on EFPI/FBG[J]. Optics Communications, 2020, 459: 125020.
- [8] ZHANG W, TUERDAHONG N, ZHU L, et al. Temperature and refractive index measurement using an optical fiber sensor featuring PCF-FP and FBG inscribed by femtosecond laser[J]. Optik, 2019, 194: 163095.
- [9] PAIXAO T, PEREIRA L M, RUI M, et al. Bragg gratings and Fabry-Perot interferometers on an Er-MgO-doped optical fiber[J]. Optics and Laser Technology, 2019, 123: 105946.
- [10] KHADKA S, HOFFMAN J, KUMOSA M. FBG monitoring of curing in single fiber polymer composites[J]. Composites Science and Technology, 2020, 198: 108308.
- [11] 郭永兴,匡毅,熊丽,等.不同封装方式的光纤光栅传感与温补特性[J].激光与光电子学进展,2018,55(11):99-106.
- [12] 韩笑笑,员琳,樊琳琳,等. FBG 封装材料热膨胀系数对温度传感精度的影响[J].半导体光电,2019,40(3):375-379.
- [13] KINET D, MÉGRETE P, GOOSSEN K W, et al. Fiber Bragg grating sensors toward structural health monitoring in composite materials: Challenges and solutions[J]. Sensors, 2014, 14(4): 7394-7419.
- [14] 王健刚,刘汉法.耦合模理论对光纤光栅的分析[J].山东理工大学学报(自然科学版),2007,21(1):84-87.
- [15] CHEN Z, XIONG S, GAO S, et al. High-temperature sensor based on Fabry-Perot interferometer in microfiber tip[J]. Sensors, 2018, 18(1): 202.
- [16] WHITE G K. Thermal expansion of reference materials: copper, silica and silicon[J]. Journal of Physics D Applied Physics, 1973, 6(17): 2070.
- [17] WAXLER R M, CLEEK G W. The effect of temperature and pressure on the refractive index of some oxide glasses[J]. Physics and Chemistry, 1973, 77A(6): 755.

光致发光发热光分频利用光纤研究

靳越^{1,2}, 巫涛江^{2,3}, 李玉洁^{2,3}, 吴德操²

(1. 张家口职业技术学院 电气工程系, 河北 张家口 075051; 2. 重庆理工大学 智能光纤感知技术

重庆市高校工程研究中心, 重庆市光纤传感与光电检测重点实验室, 重庆 400054;

3. 电梯智能运维重庆市高校工程中心, 重庆 402260)

摘要: 该文利用光热转换六硼化镧(LaB_6)、加拿大树脂、纳米 SiO_2 , 制备了不同掺杂含量的 LaB_6 - SiO_2 -加拿大树脂溶胶, 并涂敷在塑料光纤表面, 构成了光致发光发热光分频利用光纤。测试了 LaB_6 颗粒的吸收光谱及升温速率, LaB_6 掺杂含量与涂敷层厚度对光纤表面发光发热性能的影响。 LaB_6 在波长为 510~650 nm 时出现弱吸收, 用于光辐射; LaB_6 对其他可见-近红外波段的光呈现出强吸收, 用于产热。当 LaB_6 的质量分数为 0.30%, 涂敷层厚为 200 μm 时, 光纤表面发光发热的均匀性最佳, 观测点的平均发光强度及平均升温速率分别达到 26.59 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 和 0.29 $^\circ\text{C}/\text{min}$, 实现了可见-近红外光谱的光分频利用。

关键词: 六硼化镧; 塑料光纤; 光热转换; 光热辐射; 光分频利用

中图分类号: TN247 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11977/j.issn.1004-2474.2020.06.014

Study on Photoluminescence Heating and Spectral Beam Splitting Utilizing Optical Fiber

JIN Yue^{1,2}, WU Taojiang^{2,3}, LI Yujie^{2,3}, WU Dechao²

(1. Dept. of Electric Engineering, Zhangjiakou Vocational and Technical College, Zhangjiakou 075051, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Fiber Optic Sensor and Photodetector, Intelligent Fiber Sensing Technology of Chongqing Municipal Engineering Research Center of Institution of Higher Education, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China; 3. Tielian Operation and Maintenance of Chongqing Municipal Engineering Research Center of Institution of Higher Education, Chongqing 402260, China)

Abstract: The LaB_6 - SiO_2 -Canadian resin sols with different doping content of LaB_6 were prepared by using the lanthanum hexaboride(LaB_6) nanomaterials, Canadian resin sol and nano- SiO_2 , and then coated on the surface of plastic optical fiber to form a photoluminescence heating and spectral beam splitting utilizing optical fiber. The absorption spectrum and heating rate of LaB_6 particles were tested, and the effects of the doping content of LaB_6 and the thickness of the coating layer on the luminous heating performance of the fiber surface were investigated. The results showed that the LaB_6 exhibited weak absorption at the wavelength of 510~650 nm for light radiation, while exhibited strong absorption for light at other visible-near infrared bands for heat generation. When the mass fraction of LaB_6 is 0.30% and the coating thickness is 200 μm , the uniformity of photoluminescence heating on the surface of optical fiber is the best, and the average luminous intensity and average heating rate of the observation points reach 26.59 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ and 0.29 $^\circ\text{C}/\text{min}$, respectively, and realizes the utilizing of spectral beam splitting in the visible-near infrared spectrum.

Key words: LaB_6 ; plastic optical fiber; photothermal conversion; photothermal radiation; spectral beam splitting utilizing

0 引言

光致光热辐射和光分频利用是提高光能利用效

率的有效方法^[1]。目前光致光热辐射技术已被广泛

应用于流体加热、光化学反应、光生物反应、太阳能

收稿日期: 2020-07-29

基金项目: 河北省人力资源和社会保障厅 2017 年度人才培养工程基金资助项目(No. A2017002044); 张家口教育科学“十二五”规划重点基金资助项目(No. 152809); 国家自然科学基金资助项目(No. 51876018); 重庆市教委基金资助项目(KJQN201905604); 重庆市科技局技术创新与应用发展重点基金资助项目(cstc2019jscx-mbdxX0002)

作者简介: 靳越(1975-), 男, 河北张北人, 副教授, 硕士, 主要从事信息处理与信号分析及光能分频利用技术的研究。E-mail: jinyuezk@163.com。通信作者: 吴德操(1984-), 男, 重庆人, 高聘副教授, 博士, 主要从事光纤传感器的研究。E-mail: wudecao@cqut.edu.cn。

电池等领域^[2-3]。纳米光热转换材料的研究^[4-5]是为了提高光致光热辐射效率。

纳米光热转换材料中,以金、银为基础的贵金属光热转换材料和以铜、铝等为基础的非贵金属基材料成为研究者们关注的焦点^[6-7]。研究表明,通过调控金属纳米材料的形貌、尺寸及晶相可以实现对其表面等离子共振效应的调节,从而实现对金属纳米材料的特征吸收波长、吸收率及光热转换效率的调控^[8]。但是,金属基材料的生物相容性低及耐腐蚀性能差,限制了其应用领域。为了提升光热转换材料的生物相容性,无机非金属六硼化镧(LaB_6)光热转换纳米材料得到了广泛地研究,其中,Chen 等^[9]研究发现,随着 LaB_6 颗粒浓度增加和颗粒粒径的减小, LaB_6 的光热转换性能相应提高。Li 等^[1,10]采用 LaB_6 纳米颗粒与壳聚糖制备了一种光热转换溶胶,并将该溶胶涂覆在载玻片表面,发现涂覆有 LaB_6 的载体对波长为 510~650 nm 的光谱具有弱吸收(强透射),其透射光谱可用于光合细菌生长代谢;而其他波段的光则由 LaB_6 吸收并转化为热辐射,为细胞生长代谢提供热能。在此基础上,Zhong 等^[2]采用 LaB_6 纳米颗粒、壳聚糖及空心石英管制备了光致光热辐射光纤,并将其应用于强化生物膜产氢。虽然,已报道的 LaB_6 /壳聚糖涂覆光纤表面具有较好的光热辐射特性,但由于壳聚糖耐腐蚀性差,且易发生溶胀,从而导致光纤表面脱落,因此,该光致发光发热光纤难以用于 $\text{pH}<3$ 和 $\text{pH}>10$ 的液相环境。

为了提高 LaB_6 涂覆光致发光发热光纤的耐酸碱碱性,首先制备了 LaB_6 纳米材料、 SiO_2 纳米材料及 LaB_6 - SiO_2 -加拿大树脂溶胶,并将溶胶涂覆在塑料光纤表面,构成了光致发光发热光分频利用光纤。实验表征了 LaB_6 的表面形貌,研究了 LaB_6 的吸收光谱、热辐射性能及 LaB_6 掺杂含量与涂敷层厚度对光纤表面发光发热性能的影响。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

实验中使用的材料主要有粒径为 $\varnothing 44\ \mu\text{m}$ 的 LaB_6 初料、加拿大树脂(加拿大树脂薄膜具有赖酸碱腐蚀性^[11])、二甲苯、原硅酸四乙酯等。其中 LaB_6 纳米材料制备步骤如下:

1) 取一定量的 LaB_6 初料和玛瑙研磨珠(质量比为 1:1.5)放入研磨罐。

2) 向研磨罐中加入少量乙二醇分散剂。

3) 启动行星式球磨机对 LaB_6 初料进行研磨 9 h,转速为 350 r/min。

SiO_2 纳米材料采用原硅酸四乙酯水解法制备^[12]。加拿大树脂采用二甲苯进行稀释(体积比为 1:3)。其次,采用研磨后的 LaB_6 、 SiO_2 及稀释后的加拿大树脂制备 LaB_6 - SiO_2 -加拿大树脂溶胶(SiO_2 质量分数为 1.5%)。

1.2 光致发光发热光分频利用光纤

为了制备光致发光发热光分频利用光纤,首先使用浸涂机将 LaB_6 - SiO_2 -加拿大树脂溶胶涂覆在去除光纤包层的塑料光纤表面(直径为 $\varnothing 6\ \text{mm}$ 、长为 200 mm),涂层厚度由镀膜提拉次数决定。然后将涂覆有溶胶的塑料光纤置于 65 °C 的真空干燥箱中干燥 36 h,即获得光致发光发热光分频利用光纤。

1.3 光致发光发热光分频利用光纤表征

LaB_6 表面形貌使用 JSM-7800F 电子显微镜进行表征,粒径采用动态光散射(DLS)粒径分析仪进行分析,涂覆层厚度采用光学显微镜进行分析,吸收光谱使用分光光度计进行测试,光纤表面发光强度采用光功率计(波长为 200~1 100 nm,测量范围为 100 pW~0.2 W,不确定度为 1%~4%,传感探头直径为 $\varnothing 5\ \text{mm}$)进行测试。采用质量分数为 0.15% 的 LaB_6 乙二醇溶液测试 LaB_6 的光热转换特性,其中光致热激发光采用发光二极管光源(光谱范围为 380~780 nm,功率为 150 W/m²),测温传感器采用光纤布喇格光纤传感器进行测试(布喇格谐振中心波长为 1 550.28 nm,温度分辨率为 0.1 °C)。光纤表面温度采用光纤布喇格传感阵列进行测量,该传感阵列由 7 个光纤布喇格传感单元构成,其谐振中心波长分别为 1 515.96 nm、1 520.53 nm、1 525.46 nm、1 531.17 nm、1 538.63 nm、1 545.89 nm 和 1 553.74 nm,各传感单元的长为 5 mm、温度分辨率为 0.1 °C。

2 实验结果与分析

2.1 LaB_6 表面形貌及光热特性

研磨后 LaB_6 颗粒的表面形貌和粒径统计分布图,如图 1 所示。由图 1(a)可知,经行星式球磨机研磨后的 LaB_6 具有纳米尺度。图 1(b)进一步显示,粒径 $\varnothing 44\ \mu\text{m}$ 的 LaB_6 初料经研磨后变为平均直径为 $\varnothing 290\ \text{nm}$ 的 LaB_6 纳米材料。Chen 等^[9]研究

指出,当 LaB_6 的粒径约为 $\varnothing 290 \text{ nm}$ 时,在紫外-近红外光谱范围内的光热转换能力最高。

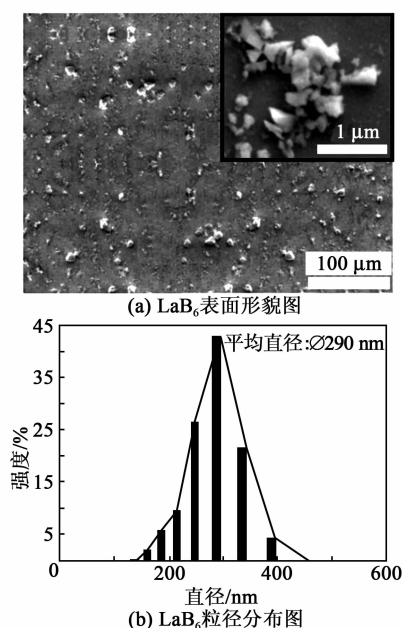


图1 LaB_6 表面形貌及粒径分布图

为了进一步揭示 LaB_6 纳米材料的光谱吸收及光热转换特性,将 LaB_6 纳米材料均匀地分散在乙二醇溶液中,实验获得的吸收光谱和光热转换特性曲线如图2所示。

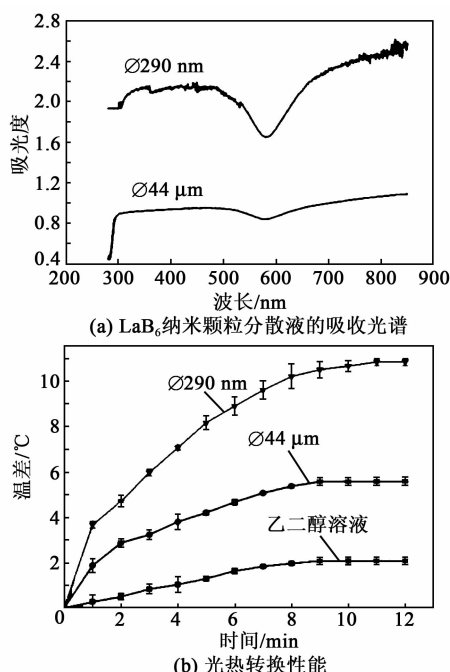


图2 $w(\text{LaB}_6) = 0.15\%$ 时, LaB_6 纳米颗粒分散液的吸收光谱及光热转换性能

由图2(a)可知, LaB_6 在波长为 $300 \sim 510 \text{ nm}$ 和 $650 \sim 850 \text{ nm}$ 时的吸光度大。其中,波长为 $300 \sim$

510 nm 时的光吸收由 LaB_6 的能带间电子跃迁吸收产生^[13],波长为 $650 \sim 850 \text{ nm}$ 时的光吸收由 LaB_6 的自由电子发生表面等离子体效应产生^[14]。此外,由图2(a)还可知, LaB_6 颗粒尺寸越小,波长为 $300 \sim 850 \text{ nm}$ 时的吸光度越大,其原因是 LaB_6 晶体的表层是吸收光能的主要区域,在相同质量分数情况下, LaB_6 粒径越小,比表面积越大,总的有效吸光面积越大,吸光度越大。

由图2(b)可知,在 12 min 内,聚乙二醇溶液、掺杂粒径为 $\varnothing 44 \mu\text{m}$ 的 LaB_6 聚乙二醇溶液和掺杂粒径为 $\varnothing 290 \text{ nm}$ 的 LaB_6 聚乙二醇溶液的升温速率分别是 $0.18^\circ\text{C}/\text{min}$ 、 $0.40^\circ\text{C}/\text{min}$ 和 $0.83^\circ\text{C}/\text{min}$ (初始温度为 25°C)。这表明 LaB_6 纳米材料在 $380 \sim 780 \text{ nm}$ 光谱范围内具有较好的光热转换特性,且随着 LaB_6 粒径的减小,光热转换效率越高。

2.2 LaB_6 掺杂含量对光纤表面光热辐射的影响

为了获得光致发光发热光纤,实验首先制备了不同成分的光纤涂敷材料,测试了不同薄膜材料的吸收光谱,如图3所示。

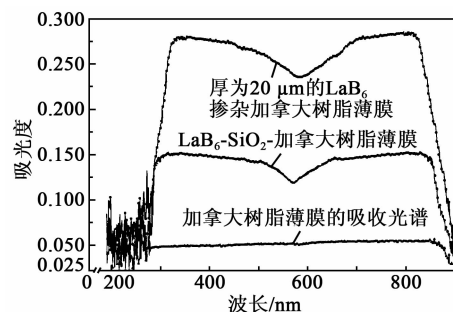


图3 涂覆膜吸收光谱

由图3可知,加拿大树树脂薄膜在 $300 \sim 900 \text{ nm}$ 光谱范围内无明显吸收峰,表明加拿大树树脂适合作为 LaB_6 纳米材料的粘附剂,进而将 LaB_6 固定在光纤表面。此外,对比图2(a)和图3可知, LaB_6 的特征吸收光谱明显呈现在 LaB_6 掺杂加拿大树树脂薄膜和 $\text{LaB}_6\text{-SiO}_2$ -加拿大树树脂薄膜中。同时, SiO_2 掺杂可改善薄膜的吸光度,从而实现对薄膜的光吸收、热辐射和光辐射的调节。

当 $\text{LaB}_6\text{-SiO}_2$ -加拿大树树脂薄膜涂敷在光纤表面时,其光纤表面光热转换和发光性能如图4所示。由图4(a)可知,在光纤长为 10 mm 处表面温度随着 LaB_6 质量分数的增加而增大(初始温度为 25°C ,辐照时间为 12 min),其原因是 LaB_6 的质量分数越高,光热产量越高。同时,图4(b)也显示,在光纤长为 10 mm 处表面发光强度随着 LaB_6 质量分数的增加

而增大,其原因是 LaB_6 的折射率高于塑料光纤纤芯的折射率^[2],从而诱导纤芯中更多的光束折射进入涂敷层,而涂敷层中的 LaB_6 会进一步对光产生散射,促使未被 LaB_6 吸收的光束在光纤表面辐射; LaB_6 质量分数越高,光诱导和光散射能力越强,光纤表面光辐射强度越高。虽然光纤输入端表面光热辐射随着 LaB_6 质量分数的增大而增大,但是,在整个光纤长度区域呈现出严重的分布不均匀性。当 $w(\text{LaB}_6)=0.30\%$ 时,光纤表面光热辐射的均匀性最佳。

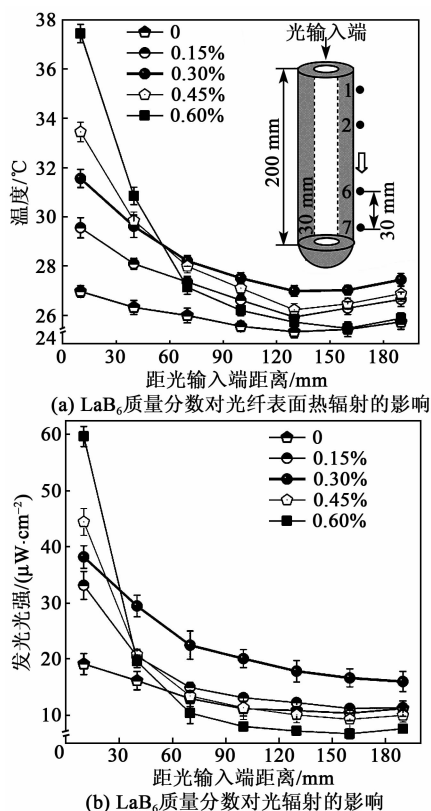


图4 涂覆层厚为 $100\ \mu\text{m}$ 时, $w(\text{LaB}_6)$ 对光纤表面热辐射及光辐射性能的影响

2.3 涂覆层厚度对光纤表面光热辐射的影响

为了进一步提升光纤表面的光热辐射强度及其均匀性,实验研究了 LaB_6 - SiO_2 -加拿大树脂涂敷厚度对光纤表面的光热辐射强度及其均匀性的影响,实验结果如图5所示。由图5(a)可知,光纤光输入端表面温度随着涂敷层厚度的增加而增大,其原因是厚度越大, LaB_6 质量分数越高,光热产量越高。同时,图5(b)也显示在光纤光输入端(10 mm处),其表面光辐射强度随着涂敷层厚度的增加而增大,原因在于涂敷层越厚, LaB_6 的质量分数越高,光诱导和光散射能力越强,未被吸收的光束在光

纤表面光辐射强度越高。此外,由图5还可知,虽然光纤输入端表面光热辐射随着涂敷层厚度的增大而增大,但在整个光纤区域呈现出了严重的分布不均匀性。当涂敷层厚为 $200\ \mu\text{m}$ 时,光纤表面光热辐射的均匀性最佳,观测点的平均发光强度与平均升温速率分别达到 $26.59\ \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 和 $0.29\ ^\circ\text{C}/\text{min}$,最大发光强度及最大温升速率差分别为 $25.24\ \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 和 $0.51\ ^\circ\text{C}/\text{min}$ (初始温度 $25\ ^\circ\text{C}$ 、辐照时间 $12\ \text{min}$)。

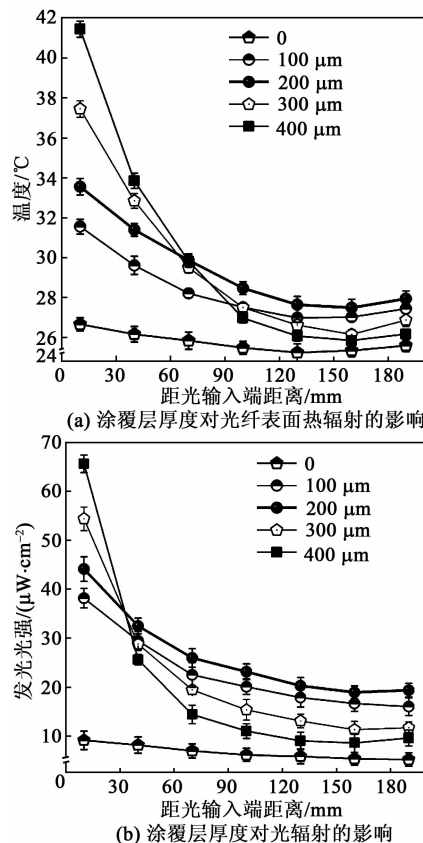


图5 $w(\text{LaB}_6)=0.30\%$ 时,涂覆层厚度对光纤表面热辐射及光辐射性能的影响

3 结束语

本文采用 $\varnothing 290\ \text{nm}$ 的 LaB_6 纳米材料、 SiO_2 及二甲苯稀释的加拿大树脂制备了 LaB_6 - SiO_2 -加拿大树脂溶胶,并将该溶胶涂敷在去除包层的塑料光纤表面,制备了具有良好生物兼容性和耐酸碱腐蚀的光致发光光纤。实验分析了 LaB_6 纳米材料的表面形貌,测试了 LaB_6 纳米材料的光谱吸收特性及光热转换特性,并在此基础上研究了 LaB_6 掺杂含量及 LaB_6 - SiO_2 -加拿大树脂涂敷厚度对光纤表面光热辐射特性的影响。研究发现,当 LaB_6 质量分数为 0.30% 、涂敷层厚为 $200\ \mu\text{m}$ 时,光纤表面光热辐射

的均匀性最佳,在光纤表面的7个观测点上,平均发光强度与平均温升速率分别达到 $26.59 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 和 $0.29^\circ\text{C}/\text{min}$,最大发光强度及最大温升速率差分别为 $25.24 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 和 $0.51^\circ\text{C}/\text{min}$ 。该研究实现了光纤光致光热辐射和光分频利用。

参考文献:

- [1] LI Y,ZHONG N,LIAO Q,et al. A biomaterial doped with LaB_6 nanoparticles as photothermal media for enhancing biofilm growth and hydrogen production in photosynthetic bacteria [J]. International Journal of Hydrogen Energy,2017, 42(9):5793-5803.
- [2] ZHONG N,ZHAO M,ZHONG L,et al. Luminous exothermic hollow optical elements for enhancement of biofilm growth and activity[J]. Optics Express,2017, 25(6):5876-5890.
- [3] 杨安礼,胡芑,章高伟,等. 太阳能电池表面镀膜分光膜的CPV/T系统设计与光学分析[J]. 太阳能学报,2017, 38(12):3259-3264.
- [4] 闫鑫,徐进良. 超疏水表面太阳能加热金-水纳米流体液滴蒸发特性[J]. 化工学报,2019,70(3):892-900.
- [5] 刘长青,王德兵,何燕,等. 基于磁性纳米流体的中温太阳能吸收与光热转换性能[J]. 科学通报,2019(增刊2):3041-3048.
- [6] 张丽莎,胡俊青,陈志钢. 金纳米结构光热转换材料的研究进展[J]. 材料导报,2012(19):5-9.
- [7] 李栋,吴洋洋,刘昌宇,等. 分散剂对 Al_2O_3 -paraffin 纳米流体吸收太阳能的影响[J]. 工程热物理学报,2019(7):1607-1611.
- [8] DREADEN E,MACKEY M,HUANG X,et al. Beating cancer in multiple ways using nanogold[J]. Chemical Society Reviews,2011,40(7):3391-3404.
- [9] CHEN C J,CHEN D H. Preparation of LaB_6 nanoparticles as a novel and effective near-infrared photothermal conversion material[J]. Chemical Engineering Journal,2012,180:337-342.
- [10] 李奕杉,钟年丙,廖强,等. 基于六硼化镧与壳聚糖的光热转换生物材料[J]. 发光学报,2017,38(8):1021-1027.
- [11] ZHONG N,ZHAO M,ZHONG L,et al. A high-sensitivity fiber-optic evanescent wave sensor with a three-layer structure composed of Canada balsam doped with GeO_2 [J]. Biosensors and Bioelectronics, 2016, 85: 876-882.
- [12] LIAO Q,ZHONG N,ZHU X,et al. High-performance biofilm photobioreactor based on a GeO_2 - SiO_2 -chitosan-medium-coated hollow optical fiber[J]. International Journal of Hydrogen Energy,2014,39(19):10016-10027.
- [13] SHIN-ICHI K S,NANBA T,KUNII S,et al. Low-energy optical excitation in rare-earth hexaborides[J]. Physical Review B,1994,50(3):1406.
- [14] HIROMITSU T,HIROKO K,KENJI A. Solar control dispersions and coatings with rare-earth hexaboride nanoparticles[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2008,91(9):2897-2902.

读者信息反馈卡(2020年第6期)

▲您目前最感兴趣的技术问题:_____

▲您认为本期最佳文章:_____理由:_____

▲您认为本期欠佳文章:_____理由:_____

▲您希望本刊增加哪些内容:_____

读者姓名:_____通信地址:_____邮码:_____

复印有效

基于光纤光栅传感网络的电梯健康状态监测系统

巫涛江^{1,2}, 余晓毅¹, 张春娟¹, 尹劲松¹, 石胜辉²

(1. 电梯智能运维重庆市高校工程中心, 重庆 402260; 2. 重庆理工大学 光纤传感与光电检测重庆市重点实验室, 重庆 400054)

摘 要:针对传统大型电梯钢架结构健康监测手段的传感器布线复杂、传感器退化快等问题,提出了一种基于光纤光栅式传感器构成的准分布式光纤传感网。首先阐明了光纤光栅应力、温度传感器的基本原理,采用“空分复用+波分复用”的方式构建电梯钢架结构的光纤光栅远程传感监测系统,设计应变和位移传感器阵列,并研究了光纤光栅应变计和位移计的解调算法。然后使用电梯钢架结构实物模型搭建相应的试验系统,安装光纤光栅应变计和位移计准分布式网络进行测试,并开发配套的电梯钢架结构运行健康状态监测软件,试验测试结果表明,系统能够实时响应,稳定性良好。该系统为室外大型竖行和斜行电梯的安全运行提供了实时监测数据和安全预警功能,可为其“按需维保”提供大数据支撑。

关键词:电梯钢架结构;光纤光栅;应力计;位移计;安全监测

中图分类号: TN65; TP306 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11977/j.issn.1004-2474.2020.06.015

Elevator Health Monitoring System Based on Fiber Bragg Grating Sensor Network

WU Taojiang^{1,2}, YU Xiaoyi¹, ZHANG Chunjuan¹, YIN Jingsong¹, SHI Shenghui²

(1. Chongqing University Engineering Center for Intelligent Elevator Operation and Maintenance, Chongqing 402260, China;

2. Chongqing Key Laboratory of Optical Fiber Sensor and Photoelectric Detection, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

Abstract: A quasi-distributed fiber optic sensor network based on fiber Bragg grating (FBG) sensor is proposed in order to solve the problems of complicated sensor wiring and fast sensor degradation of the traditional health monitoring methods for large elevator steel frame structure. First, the basic principles of FBG stress and temperature sensors are presented, and the overall scheme of FBG remote sensing and monitoring system with elevator steel frame structure by the method of “space division multiplexing + WDM” is constructed, the strain and displacement sensor array are designed, and the demodulation algorithm of FBG strain gauge and FBG displacement meter are investigated. Then, the actual model of the elevator steel frame structure was used to build the corresponding test system, the FBG strain gauge and FBG displacement meter are installed to test the distributed network, and the supporting health condition monitoring software of the elevator rigid structure is developed. The test results show that the proposed system can respond in real time with good stability. The system provides real-time monitoring data and safety warning functions for the safe operation of outdoor large vertical and diagonal elevators, and can provide big data support for “on-demand maintenance”.

Key words: elevator steel frame structure; fiber Bragg grating; stress meter; displacement meter; safety monitoring

0 引言

电梯已成为人们生活中不可或缺的一部分,同时也是现代社会城镇化建设中必不可少的重要建筑

设备之一。随着社会的进步,我国的超高层建筑越来越多,高速电梯的需求也越来越大。此外,国内许多重点景区为了吸引和满足游客的需求,都会安装

收稿日期:2020-09-04

基金项目:重庆市教委科技重点基金资助项目(KJZD-K201905601, KJQN201905604);重庆市科技局重点基金资助项目(cstc2019jscx-mb-dxX0002)

作者简介:巫涛江(1994-),男,重庆人,助教,硕士生,主要从事光纤传感器、电梯智能监测等方面的研究。通信作者:石胜辉(1980-),男,重庆人,讲师,硕士生导师,博士,主要从事光电传感、光纤传感方面的研究。E-mail:shshill@cqut.edu.cn。

各种大型室外独立钢架结构的观光电梯^[1-3]。因此,电梯作为高层建筑、大型景区观光上的主要交通工具,对未来电梯技术进行研究,保障电梯的安全运行,有着重要的意义。同时,随着自动控制、通讯、计算机、电子等先进技术的发展,现代电梯技术也正在朝着智能化的方向发展^[4-6]。

各种大型室外观光电梯健康状态的智能远程安全监测对保证乘客的生命安全非常必要,同时有利于对电梯的运行进行安全预警和按需维保。对于室外观光电梯大型钢架结构的健康状态监测的参数主要包括钢架应变和导轨位移。对电梯钢架应变、导轨位移的传统方法是采用钢弦式传感器,具有灵敏度高的优点,但是传感器存在布线复杂、退化快的问题。光纤光栅式传感器具有灵敏度高,体积小,质量小,抗电磁干扰,全光纤化,易构成网络化及远程传感等优点。经过几十年的发展,其传感器及解调系统成本已降到很低的水平,被广泛应用于各种实际工程结构的温度、应变、压力、位移及振动等物理量的实时监测,如建筑、桥梁、大坝、公路、隧道等大型建筑物应变、温度、振动等多参量的实时监测^[7-10]。

本文利用光纤光栅式传感器构成准分布式光纤网络,设计和构建应用于电梯钢架结构健康状态的远程监测系统,主要为室外大型电梯的安全运行提供实时监测数据和安全预警功能,并为按需维保提供大数据支撑。

1 基本原理

1.1 电梯的独立钢架结构

根据不同的结构形式,现有电梯可分为电梯井结构电梯、室外钢架结构竖行电梯及斜行电梯3种。目前竖行电梯除安装在建筑结构内部的形式外,还存在独立于建筑物之外的结构形式,这种结构形式的电梯大多采用钢架结构来搭建和安装,对电梯运行起到支撑和保护作用。此时,需要对导轨位移、轿厢振动信号进行监测,以及对外围钢架结构的应力分布实时监测,保障电梯安全运行。

斜行电梯作为一种新型的电梯形式,主要应用于一些特殊场合,如旅游观光景点、不规则结构建筑安装电梯等。这些电梯使用场所环境较复杂,因而实现此类电梯的安全监测非常必要,同时需要监测的参数也会随之增多。此外,由于斜行电梯不是做垂直运动的,因此,导轨在电梯运行过程中会受到较

大的应力,甚至产生形变。对此类电梯的安全监测除包括导轨位移、轿厢振动、钢架结构的应力检测外,还需考虑导轨应力分布及形变等因素。

1.2 光纤光栅传感器原理

光纤布喇格光栅(FBG)是在光敏光纤的纤芯中引入周期性的折射率条纹调制,一般FBG的光栅周期设计为500~550 nm,长度为几毫米。根据光纤耦合模理论可知,当宽带光在FBG中传输时,纤芯模产生模式耦合,满足布喇格条件的光被反射回来,反射光的中心波长^[7]为

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (1)$$

式中: λ_B 为布喇格中心波长; n_{eff} 为光纤纤芯有效折射率; Λ 为光栅周期。由式(1)可知,FBG的 λ_B 由 n_{eff} 和 Λ 决定,任何外界环境(应变、温度及压力等)的变化使这两个参数发生变化都将导致FBG的 λ_B 发生漂移。实际应用中,通过光纤光栅解调仪检测FBG的 λ_B 的变化量就可测量外界参数的变化。

FBG的中心波长漂移($\Delta\lambda_B$)与它所受的纵向应变($\Delta\epsilon$)的关系^[11]为

$$\Delta\lambda_B = \lambda(1 - p_e)\Delta\epsilon = K_\epsilon\Delta\epsilon \quad (2)$$

式中: p_e 为光纤的弹光系数; K_ϵ 为FBG的纵向应变灵敏度。由式(2)可知,FBG对纵向应变的响应具有良好的线性度。

FBG的温度灵敏度(K_T)^[11]为一常数,其大小仅取决于光纤材料的热光系数、热膨胀系数及布喇格波长,因此,FBG是一种线性特性良好的温度传感器。 K_T 为

$$K_T = (\xi + \alpha)\lambda_B \quad (3)$$

式中 ξ 和 α 分别为FBG的热光系数和热膨胀系数。实际应用中,FBG会同时受到多个参数的影响,如应变和温度的同时变化,将导致其响应为多个参数的总体效应,因此,需要对这些被检测参数进行解耦合。一般是将两个谐振波长不同的FBG串联并进行外部封装,构成一个传感器,该封装后的“双FBG”传感器则可同时对应变和温度进行检测。

2 电梯钢架结构的光纤光栅远程传感监测系统设计

2.1 监测系统总体方案

本监测系统主要包括电梯钢架结构监测现场的光纤光栅传感网络,位于机房的光纤光栅动态解调仪,设置于远端的电梯运维监测中心的结构健康分

析软件,如图 1 所示。光纤光栅传感网络由准分布式光纤光栅应变传感阵列和准分布式光纤光栅位移传感阵列构成,采用“空分复用+波分复用”的方案,并需要根据电梯钢架结构和导轨的监测关键点进行传感网络设置。

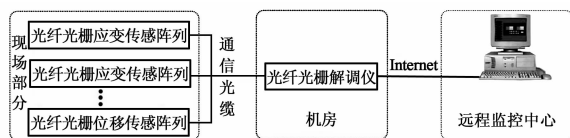


图 1 基于准分布式光纤光栅传感网络的电梯钢架结构监测系统结构示意图

其中,光纤光栅应变传感器主要对电梯的外部独立钢架的应变变化进行动态监测,光纤光栅位移传感器主要对电梯导轨与钢架的间距变化进行动态监测,如图 2 所示。FBG 的传感信号被反向传播后通过通信光缆传输到多通道动态光纤光栅解调系统,实时解调各个 FBG 传感单元的波长漂移量并计算相应的外部参数值。多通道动态光纤光栅解调系统解调出来的各 FBG 传感单元的外部参数值,通过计算机以太网实时传输至远端的电梯运维监测中心的结构健康分析软件,完成数据的存储、分析及可视化显示。

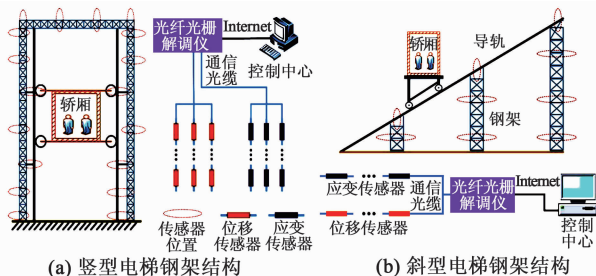


图 2 准分布式光纤光栅传感网络在竖型和斜型电梯钢架结构中的设置

2.2 FBG 应变和位移传感器阵列设计

准分布式光纤光栅传感网络采用“空分复用+波分复用”设计方案,以竖型电梯钢架结构的监测为例(与斜型电梯设计方案一致)(见图 3),多通道光纤光栅解调仪通过 24 芯通信光缆空分复用连接多条光纤线路,每条光纤线路对应一路压力传感通道或位移传感通道(一条通道对应一条单芯光缆),每一条通道按照波分复用的方式级联多个光纤光栅应变计或位移计通过光纤复合束器与多芯光缆跳线连接。光纤光栅应变计和光纤光栅位移计分别对电梯外部独立钢架的应变和导轨与钢架的间距变化进行

传感,如图 3 所示。光纤光栅应变计和光纤光栅位移计都采用“双 FBG”封装的方法,其中的一个 FBG 传感单元用于温度补偿,因此,应变计及位移计同时也能够获得监测点的温度值。

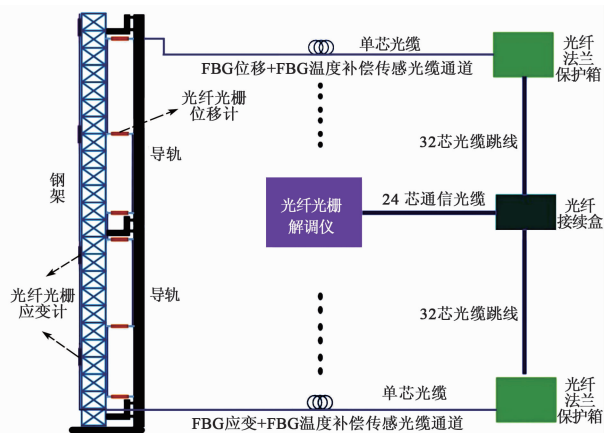


图 3 准分布式光纤光栅传感网络设计与安装

准分布式光纤光栅传感网络“空分复用+波分复用”的原则是:不同通道的 FBG 传感单元谐振波长可重叠,且均处于 C 波段(1 525~1 565 nm),相同通道的 FBG 传感单元的谐振波长不同,且相互间的波长间隔需大于 2 nm。此外,相同通道的多个应变计或位移计的谐振波长在 C 波段中分为下波段(1 528~1 548 nm)和上波段(1 548~1 568 nm),则单个应变计或位移计中,用于应变或位移测量的 FBG 的谐振波长设计在 C 波段的下波段区域,而用于温度补偿测量的 FBG 的谐振波长设计在 C 波段的上波段区域,这样将有利于提高对应变(位移)或与温度的解耦精度。

2.3 光纤光栅应变计和位移计解调算法

根据传感器采用双 FBG 的结构,光纤光栅应变计检测应变大小的解算公式^[12]为

$$\epsilon = [(A_1^* - A_1) - (A_2^* - A_2)/K_2 \cdot K_3]/K_1 \quad (4)$$

式中: A_1^* 为应变光栅当前测量波长; A_1 为应变光栅安装完成后的初始波长; A_2^* 为温度光栅当前测量波长; A_2 为温度光栅安装完成后的初始波长; K_1 为应变系数; K_2 为温度光栅的温度系数; K_3 为应变光栅的温度系数。

对于光纤光栅位移计,也是基于应变的原理,即外部位移量通过给位移计中的应变光栅加载应变,将位移量的大小转化为应变量的大小进行测量,因此,光纤光栅位移计具有与应变计类似的计算公式,

其位移量^[12]为

$$L = [(B_1^* - B_1) - (A_2^* - A_2)/K_2 \cdot S_3]/S_1$$

(5)

式中: B_1^* 为位移光栅当前测量波长; B_1 为位移光栅安装完成后的初始波长; S_1 为位移系数; S_3 为位移光栅的温度系数。对于传感点的温度, 光纤光栅应变计和位移计的计算方法一致, 由式(4)、(5)可知, 温度 $T = (A_2^* - A_2)/K_1$ 。

3 系统实现与测试结果分析

3.1 系统实现

本系统采用的动态光纤光栅解调仪(GC-97001C)具有高重复性, 高精度, 高速测量, 大容量, 全半导体部件, 稳定可靠, 所有通道同步测量, 独立自动/手动增益控制, 大动态范围及内置绝对参考的特点, 其主要性能参数如表 1 所示, 供电电源 5 V DC/4 A, 功耗约 15 W。根据本应用的复用设计方案, 该光纤光栅解调仪空分复用 8 个通道, 每个通道可通过波分复用 20 个(40 nm/2 nm)FBG 传感单元, 即 10 个双 FBG 的应变计(或位移计), 则该系统能够最多同时解调 80 个应变计(或位移计)的光谱参数。

表 1 动态光纤光栅解调仪(GC-97001C)性能参数

波长/nm		扫描频率/kHz	波长精度/pm
1 528~1 568		1	±2
通道数	波长重复性/pm	动态范围/dB	通讯接口
8	±2	30	RJ-45 Ethernet

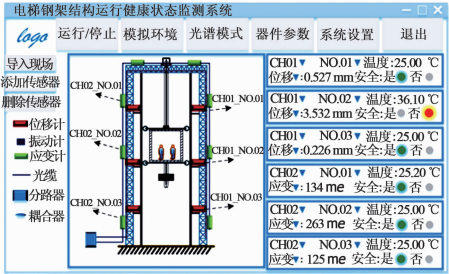
本工程中使用的光纤光栅应变计安装于钢结构表面, 用于监测电梯钢架结构的关键点的应变, 拉杆式光纤光栅位移计用于电梯导轨与其钢架结构的位移变化的监测, 它们防护等级均为 IP68, 双端出纤 FC/APC 接口, 出纤光缆可承受 100 N 的拉力, 适应环境温度 -40~+120 ℃, 湿度小于 95%, 无凝露。

3.2 测试分析

为验证本方案设计的可行性, 测试采用 4 层电梯钢架结构模型, 并使用本案的动态光纤光栅解调仪(GC-97001C)其中两个通道, 通过波分复用方式分别串接 3 个钢结构表面安装光纤光栅应变计和 3 个拉杆式光纤光栅位移计, 并采用贴装的方式分别安装于电梯钢架结构上及电梯导轨和钢架之间的空间, 电梯实物模型及传感器安装的局部图片效果如图 4(a)所示。



(a) 电梯实物模型及传感器安装的局部图片效果



(b) 电梯钢接结构运行健康状态监测软件系统界面

图 4 电梯实物模型及传感器安装的局部图片效果及
电梯钢接结构运行健康状态监测软件系统界面

根据动态光纤光栅解调仪的通讯接口协议和传输的数据格式, 用 LabVIEW 开发了“电梯钢接结构运行健康状态监测软件系统”, 界面效果如图 4(b)所示。器件参数和监测点设置好后, 可根据实际情况设置电梯钢架结构各监测点应变、位移及温度的报警阈值, 测试中分别设置为 300 $\mu\text{ε}$ 、4 mm 和 30 ℃。在测试过程中, 通过人为在监测点施加应变、位移及温度的变化, 表明当监测点应变、位移及温度超过设定阈值后, 系统现实报警响应时间小于 1 s, 连续测试 1 个月, 系统稳定性良好。

4 结束语

本文利用在钢结构表面安装光纤光栅应变计和单个拉杆式光纤光栅位移计光纤光栅式传感器构成准分布式光纤网络, 采用“空分复用+波分复用”的方式设计和构建应用于电梯钢架结构健康状态的远程监测系统, 开发了相应的数据采集和软件分析系统, 通过试验测试, 系统能够实时响应, 稳定性良好。该系统为室外大型竖型和斜型电梯的安全运行提供实时监测数据和安全预警功能, 可为其“按需维保”提供大数据支撑。

参考文献:

[1] 李义平. 电梯安全远程监控管理系统设计与开发[D]. 北京: 北京邮电大学, 2017.

压电惯性驱动器理论分析与应用测试

田晓超¹,王海刚¹,王虎¹,孙禹泽¹,朱金志¹,王志聪¹,杨志刚²

(1. 长春大学机械与车辆工程学院, 吉林 长春 130022; 2. 吉林大学机械与航空航天工程学院, 吉林 长春 130025)

摘要:为了探究压电驱动器的输出性能及提高压电驱动机构的性能, 该文对“十”字型压电惯性驱动器进行了理论分析与应用测试。首先说明了驱动器结构组成与驱动机理; 然后利用弹性力学理论对驱动器进行了理论分析, 得出驱动器弹性振动位移表达式, 给出了影响驱动器性能的影响因素; 最后对驱动器进行实验应用测试, 将其用于驱动盲文柔性点显装置。结果表明, 该驱动器能较好地实现系统驱动, 放大柔性薄膜凸点的位移输出, 柔性薄膜触点凸出明显, 性能良好。验证了用这种压电惯性驱动器实现系统驱动是可行且有效的。

关键词:惯性驱动器; 压电振子; 悬臂梁; 弹性力学

中图分类号: TN384; TM22; TH35 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11977/j.issn.1004-2474.2020.06.016

Theoretical Analysis and Application Test of Piezoelectric Inertial Actuator

TIAN Xiaochao¹, WANG Haigang¹, WANG Hu¹, SUN Yuze¹, ZHU Jinzhi¹,
WANG Zhicong¹, YANG Zhigang²

(1. Institute of Mechanical and Vehicle Engineering, Changchun University, Changchun 130022, China;

2. College of Mechanical and Aerospace Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract: In order to explore the output performance of the piezoelectric actuator and improve the performance of the piezoelectric driving mechanism, this research has conducted theoretical analysis and application test of the cross shaped piezoelectric inertial actuator. Firstly, the driving mechanism and structure composition of the actuator were presented; then the expressions of the elastic vibration displacement were obtained according to the elastic mechanics analysis of the actuator and the factors that affect the performance of the actuator were determined. Finally, the experimental tests of the actuator were implemented, in which the actuator was used to drive the flexible braille dot display device. The results indicated that the actuator had good work capability, obvious protrude of the flexible film bumps. The results showed that the actuator can effectively drive the system and amplify the output displacement of the flexible film bumps, and the flexible film contact protrudes obviously and has good performance. Thus, the research indicated that it is feasible and effective to drive system by using the piezoelectric inertial actuator.

Key words: inertial actuator; piezoelectric vibrator; cantilever; elastic mechanics

0 引言

目前基于压电振子构造的驱动器广泛用于压电泵、疲劳试验机及送料器等驱动机构上^[1-3], 其具有控制精度高, 速度快, 体积小及无磁干扰等特点。压电振子变形精度可以达到微米级或纳米级, 常被作为高速、高精度的驱动源使用^[4]。驱动器的作用及工作机理主要是激励和调节系统的共振频率, 使系统处于共振状态下工作。将压电振子作为激励源,

通过共振作用将系统的输出位移放大, 实现驱动器的功能^[5]。目前压电驱动器的工作机理、结构及应用技术引起了国内外研究人员的广泛关注。

美国 Dobruki 等^[6]、Christopher 等^[7]利用有限元法对周边固定支承和简支边界的片式压电振子进行动态和静态分析, 并推导出相应的数学表达式。李丹等^[8]、吕航等^[9]利用 ANSYS 软件模拟三叠片换能器和矩形换能器的振动模态, 并进行谐响应分

收稿日期: 2020-07-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51705031, 51875234); 吉林省科技厅自然科学基金资助项目(20200201063JC); 吉林省科技厅优秀青年人才基金资助项目(20190103050JH)

作者简介: 田晓超(1986-), 男, 吉林长春人, 副教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事压电驱动与控制技术、微小机械与精密机械等方面的研究。通信作者: 杨志刚(1956-), 男, 吉林长春人, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事压电驱动与控制技术、微小机械与精密机械等方面的研究。

析,得到了模态频率与尺寸参数关系和变化规律,为换能器的优化设计提供了理论依据。孙晓峰等^[10]、彭太江等^[11]利用弹性理论对片式换能器进行分析,推导出了换能器弯曲振动方程及增大压电振子振动位移的方法。李东明等^[12]对矩形压电振子的位移输出进行分析,利用本构方程推导出了中间有金属材料矩形压电振子的位移表达式。龚立娇等^[13-14]、曲绍鹏等^[15]给出了复合板式的压电振子共振频率的表达式,计算分析了固有频率与几何尺寸之间的关系,并与模态分析值进行对比,验证了理论分析的正确性。

本文对“十”字型压电惯性驱动器进行了理论分析与应用测试,将驱动器用于驱动盲文柔性点显装置,驱动效果较好,验证了用这种压电惯性驱动器实现系统驱动可行且有效。

1 结构设计

压电惯性驱动器结构示意图如图1所示。金属基板为“十”形结构,每个悬臂双面上贴置压电陶瓷片。用环氧树脂胶将压电陶瓷片粘接在金属基板两侧,粘接时施加适当的压力,使树脂胶在粘接面上均匀地展开,让胶层变薄。胶合层避免压电陶瓷片在金属基板上滑动且具有坚固、不易脱落的优点。支撑方式为中心固支式,压电陶瓷片尺寸小于基板长度,基板多出的部分用于粘接配重质量块。

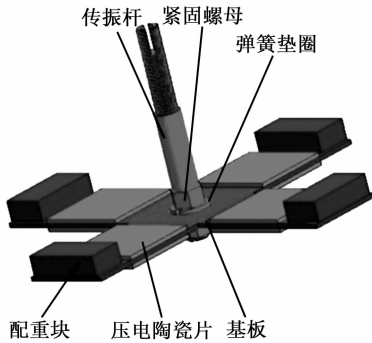


图1 压电惯性驱动器结构示意图

压电陶瓷片与金属基板构成压电振子,在外界交变信号作用下往复弯曲振动,配重块将振动放大,当驱动频率与压电驱动器构造的驱动机构固有频率接近或一致时系统发生共振,进而实现压电驱动器的惯性驱动。

2 压电振子弹性分析

以弹性薄板小挠度弯曲理论分析压电惯性驱动

器振动,利用直线、层间无挤压及中间层无应变假设理论分析求解。驱动器在交变信号下产生受迫振动。

设薄板单位面积上所受弹性力 $D\nabla^4 w_e$ 与静载荷平衡,即

$$D\nabla^4 w_e = q \quad (1)$$

式中: q 为静载荷; D 为弯曲刚度; ∇ 为算子; w_e 为横向位移。

设薄板在动力载荷 $q_t = q_t(x, y, t)$ 作用下振动, $w_t = w_t(x, y, t)$ 为某一瞬时挠度,则薄板每单位面积上所受的弹性力 $D\nabla^4 w_t$ 将与 q 、 q_t 及惯性力 q_i 平衡,即

$$D\nabla^4 w_t = q + q_t + q_i \quad (2)$$

薄板的加速度为 $\frac{\partial^2 w_t}{\partial t^2}$,求得薄板单位面积上的

$q_i = -\bar{m} \frac{\partial^2 w_t}{\partial t^2}$,将 q_i 代入式(2)可得:

$$D\nabla^4 w_t = q + q_t - \bar{m} \frac{\partial^2 w_t}{\partial t^2} \quad (3)$$

式中 $\bar{m}$ 为薄板单位面积内质量。

将式(3)代入式(1)可得:

$$D\nabla^4 (w_t - w_e) = q_t - \bar{m} \frac{\partial^2 w_t}{\partial t^2} \quad (4)$$

式(4)中 w_e 不随时间变化,则 $\frac{\partial^2 w_e}{\partial t^2} = 0$,式(4)

可化简为

$$D\nabla^4 (w_t - w_e) = q_t - \bar{m} \frac{\partial^2 w_t}{\partial t^2} (w_t - w_e) \quad (5)$$

令 $w = w_t - w_e$ 为相对于平衡位置任一瞬时位移,由式(3)可得压电振子的受迫振动微分方程为

$$\nabla^4 w + \frac{\bar{m}}{D} \frac{\partial^2 w_t}{\partial t^2} = \frac{q_t}{D} \quad (6)$$

将薄板动力载荷展开成振形函数级数形式为

$$q_t(x, y, t) = \sum_m F_m W_m(x, y) \quad (7)$$

薄板在瞬时 t 的挠度为无数振形下的挠度相叠加的结果,用 $W_m(x, y)$ 表示振形函数。将式(6)的解答取为如下形式:

$$w = \sum_m W_m = \sum_m T_m W_m(x, y) \quad (8)$$

将式(7)、(8)代入式(6)可得

$$\sum_m T_m \nabla^4 W_m + \frac{\bar{m}}{D} \sum_m \frac{d^2 T_m}{dt^2} W_m = \frac{1}{D} \sum_m F_m W_m \quad (9)$$

薄板上每一点 (x, y) 的挠度可表示成固有频率为 ω_m 的无数个简谐振动的挠度叠加, ω_m 由自由振动的振形微分方程 $\omega_m^2 = \frac{D}{m} \frac{\nabla^2 W_m}{W_m}$ 求得, ω_m 由薄板固有特性决定。

$$\frac{\omega_m^2 \bar{m}}{D} = \gamma^4 \quad (10)$$

$$\nabla^4 W_m - \gamma^4 W_m = 0 \quad (11)$$

由式(10)、(11)可得:

$$\nabla^4 W_m = \gamma^4 W_m = \frac{\omega_m^2 \bar{m}}{D} W_m \quad (12)$$

将式(12)代入式(9)可得:

$$\omega_m^2 T_m + \frac{d^2 T_m}{dt^2} = \frac{1}{m} F_m \quad (13)$$

式(13)的解可表示为

$$T_m = A_m \cos(\omega_m t) + B_m \sin(\omega_m t) + \tau_m(t) \quad (14)$$

式中 $\tau_m(t)$ 为任一特解, 通过初始条件求得 A_m, B_m 。再将其代入式(8)可得薄板任一瞬时的挠度:

$$\begin{aligned} w = \sum_m^\infty W_m = \sum_m^\infty [A_m \cos(\omega_m t) + \\ B_m \sin(\omega_m t) + \tau_m(t)] W_m(x, y) \end{aligned} \quad (15)$$

令 $q_t = q_0(x, y) \cos(\omega t)$, 由中间固支矩形复合薄层合板的振形函数为

$$W_m = 1 + \cos \frac{2m\pi x}{L} \quad (16)$$

式中 L 为 x 方向复合层板的长度。

将 q_t 的表达式以级数形式展开, 可得

$$q_0(x, y) = \sum_m^\infty C_m (1 + \cos \frac{2m\pi x}{L}) \quad (17)$$

按照三角级数的展开公式有

$$C_m = \frac{2}{L} \int_0^L q_0(x, y) (1 + \cos \frac{2m\pi x}{L}) dx \quad (18)$$

将式(16)、(17)代入式(7)可以得到 $F_m = C_m \cdot \cos(\omega t)$, 代入式(13)可得

$$\frac{d^2 T_m}{dt^2} + \omega_m^2 T_m = \frac{1}{m} C_m \cos(\omega t) \quad (19)$$

微分方程特解可以取为 $\tau_m = \frac{C_m \cos(\omega t)}{\bar{m}(\omega_m^2 - \omega^2)}$, 由

式(15)得挠度的表达式为

$$\begin{aligned} w = \sum_m^\infty W_m = \sum_m^\infty [A_m \cos(\omega_m t) + B_m \sin(\omega_m t) + \\ \frac{C_m}{\bar{m}(\omega_m^2 - \omega^2)} \cos(\omega_m t)] (1 + \cos \frac{2m\pi x}{L}) \end{aligned} \quad (20)$$

设 q_t 的初始条件为

$$w_0 = (w)_{t=0} = 0 \quad (21)$$

$$v_0 = \left(\frac{\partial w}{\partial t} \right)_{t=0} = 0 \quad (22)$$

由 $v_0 = 0$ 得 $B_m = 0$, 由 $w_0 = 0$ 可推出:

$$A_m = - \frac{C_m}{\bar{m}(\omega_m^2 - \omega^2)} \quad (23)$$

将式(23)代入式(20)可得挠度解为

$$\begin{aligned} w = \sum_m^\infty W_m = \sum_m^\infty \frac{C_m}{\bar{m}(\omega_m^2 - \omega^2)} [\cos(\omega t) - \\ \cos(\omega_m t)] \left(1 + \frac{2m\pi x}{L} \right) \end{aligned} \quad (24)$$

当驱动频率 ω 与薄层合板的 ω_m 相近或一致时可得:

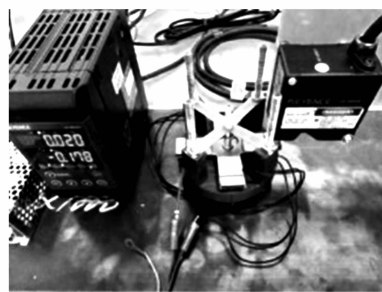
$$W_m = \frac{C_m}{2m\omega_m} t \sin(\omega_m t) \left(1 + \frac{2m\pi x}{L} \right) \quad (25)$$

由上述理论推导可知, W_m 随着 t 的增大而增大, 说明系统发生共振, 由于阻尼的存在, 振动不会无限增大。 ω 及输出位移与本身参数有关, 如压电陶瓷片和金属基板材料属性、厚度、长度及配重质量有关。

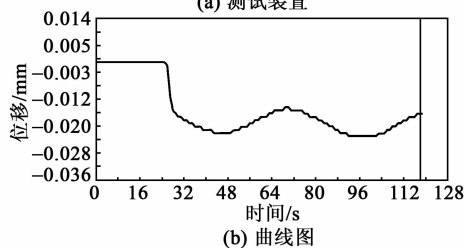
3 实验测试

3.1 驱动器输出位移测量

将惯性驱动器固定在支座上, 用高精度激光位移计测量悬臂梁端部的最大振幅, 所需实验条件有: 压电陶瓷晶片的尺寸为 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 厚); 金属铜基板的尺寸为 $89 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 0.2 \text{ mm}$ 。施加交变驱动信号, 测试装置和结果如图 2 所示。



(a) 测试装置



(b) 曲线图

图 2 驱动器振幅测试装置及曲线图

从图 2 可看出, 惯性驱动器的振幅最大值为

0.018 mm,谐振频率为 320.2 Hz。

3.2 配重块对驱动器影响

实验测试选择 4 种不同质量(6.33 g、10.06 g、11.75 g、13.28 g)的配重块进行实验。用阻抗分析仪测试不同质量驱动器的谐振频率,实验测试曲线如图 3 所示。图中, θ 为阻抗角。

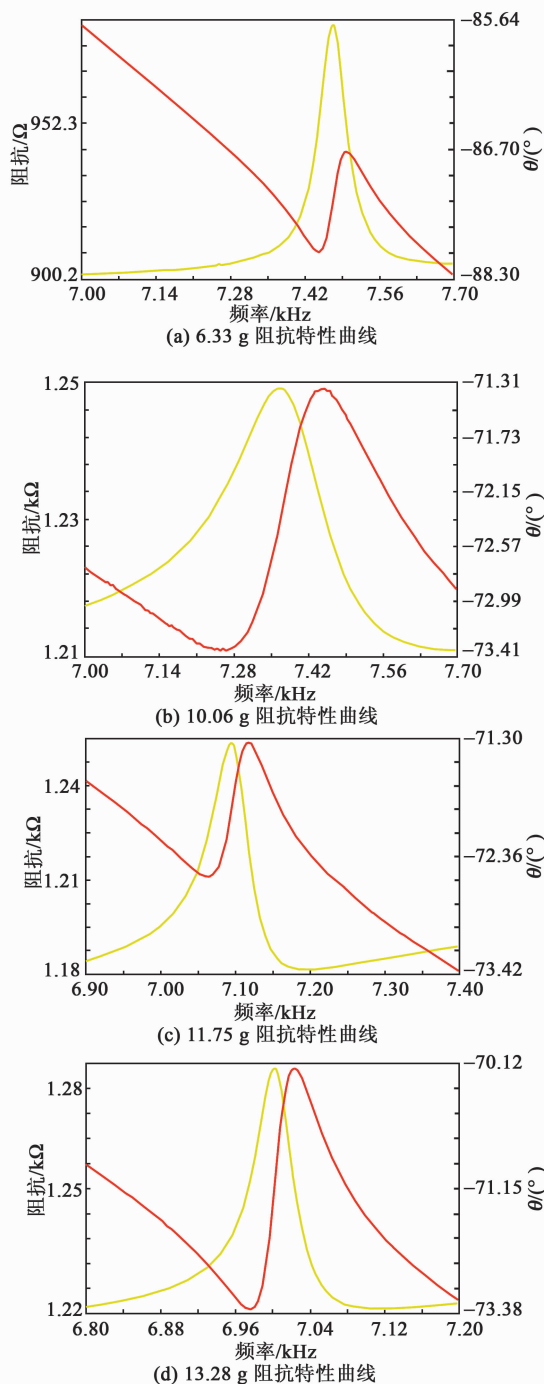


图3 不同配重质量驱动器阻抗图

由图 3 可知,谐振频率随附加质量块的增大而减小,但压电振子端部配重块质量不宜过大,太大的

配重块会降低压电振子端部惯性力及振幅,同时易造成压电晶片碎裂。

4 应用测试

将压电惯性驱动器用于驱动柔性盲文点显装置中,测试几种不同尺寸参数的驱动器对系统的输出性能,测试装置如图 4 所示。



图4 测试装置图

4.1 配重块对系统的影响

采用高精度激光位移计测试压电驱动器振幅与柔性薄膜的振幅,压电振子宽为 10 mm,长为 79 mm,测试曲线如图 5、6 所示。

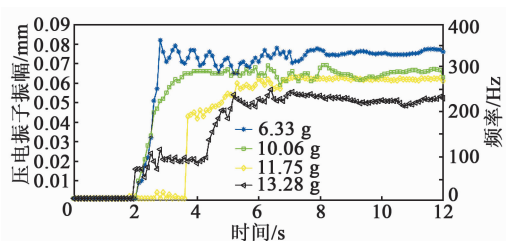


图5 压电驱动器振幅曲线图

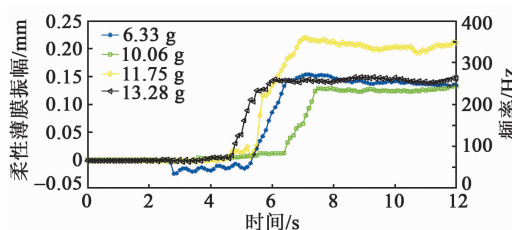


图6 柔性薄膜振幅曲线图

由图 5、6 可知,驱动器与柔性薄膜的输出振幅随着配重质量的增加呈减小的趋势,配重质量越大,柔性薄膜和驱动器的振幅越小。当配重块质量为 6.33 g 时,系统共振频率为 348 Hz,压电驱动器的振幅为 0.08 mm,柔性薄膜振幅为 0.22 mm,放大振幅接近 3 倍。

4.2 悬臂长度对系统的影响

压电振子悬臂宽为 10 mm,配重块为 6.33 g,基板厚为 0.2 mm,压电晶片厚为 1 mm。将压电振子悬臂长作为变量,分别取 49 mm,79 mm,89 mm 3 种悬臂长度进行实验,测试曲线如图 7、8 所示。

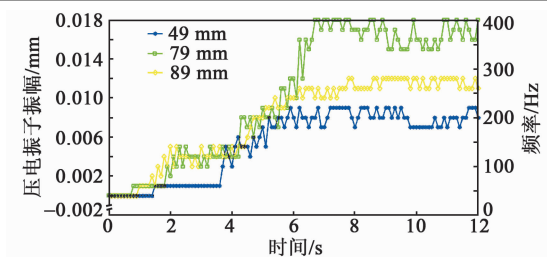


图7 压电驱动器振幅曲线图

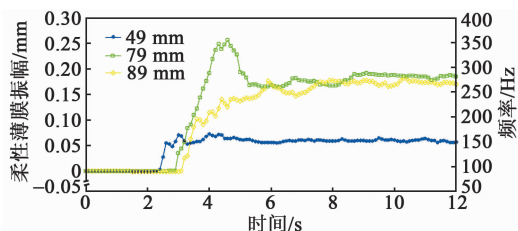


图8 柔性薄膜振幅曲线图

由图7、8可知,压电驱动器振幅近似为0.017 mm,柔性薄膜最大振幅近似为0.26 mm,放大倍数为15.29倍,放大效果明显。

4.3 悬臂宽度对系统性能的影响

压电振子悬臂长为79 mm,配重块质量为6.33 g,基板厚为0.2 mm,压电晶片厚为1 mm的压电振子。分别选取压电振子悬臂宽为10 mm,20 mm,25 mm进行实验测试,得到驱动器与柔性薄膜振幅曲线如图9、10所示。

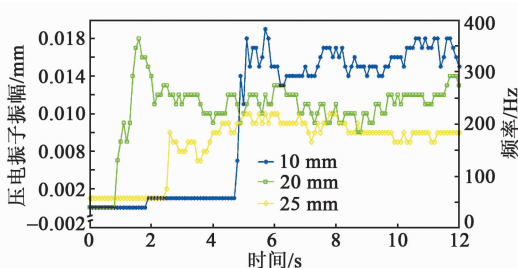


图9 压电振子位移曲线图

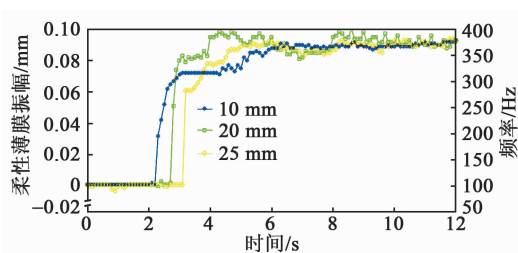


图10 柔性薄膜位移曲线图

由图9、10可知,压电振子悬臂宽度对压电驱动器和柔性薄膜的输出影响较小,柔性薄膜最大振幅约0.1 mm。

5 结束语

本文利用弹性力学对“十”字压电驱动器进行了弹性理论分析,得出了驱动器特性结构参数的影响

因素;实验测试了驱动器的输出位移和阻抗特性。将其用于驱动盲文柔性点显装置,该驱动器能较好地实现系统驱动,放大柔性薄膜凸点的位移输出明显,性能良好。验证了用这种压电惯性驱动器实现系统驱动是可行的、有效的。

参考文献:

- [1] 沈燕虎,杨志刚,刘勇,等.垂直驱动式压电振动送料器的设计[J].上海交通大学学报,2014,48(8):1149-1154.
SHEN Yanhu, YANG Zhigang, LIU Yong, et al. Design of vertically driven piezoelectric vibration feeder [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2014, 48 (8): 1149-1154.
- [2] 谢海峰,接勐,康晓涛,等.压电共振型隔膜气泵设计[J].农业机械学报,2012,43(12):246-250.
XIE Haifeng, JIE Meng, KANG Xiaotao, et al. Design of piezoelectric resonant diaphragm air pump [J]. Journal of Agricultural Machinery, 2012, 43(12): 246-250.
- [3] 田晓超,杨志刚,李庆华,等.压电驱动式疲劳试验系统动态特性分析[J].压电与声光,2016,38(6):911-914.
TIAN Xiaochao, YANG Zhigang, LI Qinghua, et al. Analysis of dynamic characteristics of piezoelectric driven fatigue test system [J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2016, 38(6): 911-914.
- [4] 吴博达,鄂世举,杨志刚,等.压电驱动与控制技术的发展与应用[J].机械工程学报,2003,39(10):79-85.
WU Boda, E Shiju, YANG Zhigang, et al. Development and application of piezoelectric drive and control technology [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(10): 79-85.
- [5] SINGH S, KUMAR N, GEORGE D, et al. Analytical modeling, simulations and experimental studies of a PZT actuated planar valveless PDMS micro-pump [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2015, 225: 81-94.
- [6] DOBRUKI, RAMIREZ G. Free vibration of laminated circular piezoelectric plates and discs [J]. Journal of Sound and Vibration, 2000, 229(4): 935-956.
- [7] CHRISTOPHER J M, FRED K F. Optimization of a circular piezoelectric bimorph for a micropump driver [J]. Journal of Micromechanics & Microengineering, 2000, 10(3): 459-465.
- [8] 李丹,卢贵武,王东.三叠片换能器的仿真与测试[J].内蒙古师范大学学报(自然科学汉文版),2013,42(4): 417-421.
LI Dan, LU Guiwu, WANG Dong. Simulation and test of sandwich dipole transducer [J]. Journal of Inner Mongolia Normal University (Natural Science Edition), 2013, 42(4): 417-421.

- tion), 2013, 42(4): 417-421.
- [9] 吕航, 刘治国, 范明庆. 基于 APDL 的矩形复合压电振子的优化设计[J]. 微特电机, 2013, 41(8): 33-35.
LÜ Hang, LIU Zhiguo, FAN Mingqing. Optimization design of pound ultrasonic motor vibrator based on APDL[J]. Small & Special Electrical Machines, 2013, 41(8): 33-35.
- [10] 孙晓锋, 杨志刚, 邵泽波, 等. 泵用圆形压电双晶片弯曲变形分析[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(1): 31-35.
SUN Xiaofeng, YANG Zhigang, SHAO Zebo, et al. Flexural deformation analysis of circular bimorph for piezoelectric pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(1): 31-35.
- [11] 彭太江, 阚君武, 杨志刚, 等. 圆形压电振子弯曲变形数值模拟与实验[J]. 中国机械工程学报, 2009, 20(16): 1987-1991.
PENG Taijiang, KAN Junwu, YANG Zhigang, et al. Numerical simulation and experiments on bending vibration characteristics of circular piezoelectric vibrator[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(16): 1987-1991.
- [12] 李东明, 孙宝元, 董维杰, 等. 压电双晶片执行器驱动位移模型研究[J]. 中国机械工程, 2003, 14(17): 1499-1502.
LI Dongming, SUN Baoyuan, DONG Weijie, et al. Study on displacement model for piezo-bimorph actuator[J]. China Mechanical Engineering, 2003, 14(17): 1499-1502.
- [13] 王玉山, 龚立娇, 王锐. 铜-压电陶瓷复合型悬臂压电振子发电性能分析[J]. 压电与声光, 2013, 35(3): 395-397.
WANG Yushan, GONG Lijiao, WANG Rui. Analysis on generating of piezoelectric cantilevers based on the brass-piezoelectric ceramic composite[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2013, 35(3): 395-397.
- [14] 龚立娇, 王玉山. 悬臂压电叠层复合梁的弯曲振动固有频率[J]. 机械设计与制造, 2012, 3(3): 221-223.
GONG Lijiao, WANG Yushan. Natural frequency of flexural vibration of cantilever piezoelectric laminated composite beam[J]. Machinery Design & Manufacture, 2012, 3(3): 221-223.
- [15] 曲绍鹏, 李东明. 压电双晶片谐响应有限元模拟分析[J]. 大连交通大学学报, 2012, 33(4): 26-29.
QU Shaopeng, LI Dongming. Finite element analysis of the piezoelectric bimorph harmonic response[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2012, 33(4): 26-29.
-
- (上接第 799 页)
- [2] 肖锦. 电梯远程监控系统数据中心的设计与实现[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [3] 韩树新, 刘松国, 万健如, 等. 电梯状态在线监测技术研究现状与发展趋势[J]. 中国电梯, 2011(7): 10-14.
HAN Shuxin, LIU Songguo, WAN Jianru, et al. Research status and developing trend of online state monitoring technology for elevators[J]. China Elevator, 2011(7): 10-14.
- [4] ZHI Fangqi, GE Yongzhe, XU Hongyu. The design of elevator monitoring terminal based on the GPRS[J]. Applied Mechanics & Materials, 2013, 313/314: 1180-1183.
- [5] 于海宁, 刘修宽. 物联网电梯安全智能监控系统的研究[J]. 信息系统工程, 2014(10): 43-43.
YU Haining, LIU Xiukuan. Research on elevator safety intelligent monitoring system based on Internet of things[J]. Information System Engineering, 2014(10): 43-43.
- [6] 陈家焱, 洪涛, 刘钢海, 等. 物联网技术的电梯安全监控系统研究[J]. 中国计量学院学报, 2013, 24(3): 231-236.
CHEN Jiayan, HONG Tao, LIU Ganghai, et al. Research of elevator safety monitoring system based on internet of things technology[J]. Journal of China University of Metrology, 2013, 24(3): 231-236.
- [7] 饶云江, 王义平, 朱涛. 光纤光栅原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [8] DONG Xiaoyi, ZHANG Hao, LIU Bo, et al. Tilted fiber Bragg gratings principle and sensing applications[J]. Photonic Sensors, 2011, 1: 6-30.
- [9] LU Te'an, SUN Yuezheng, MORENO Y, et al. Excessively tilted fiber grating-based vector magnetometer[J]. Optics Letters, 2019, 44: 2494-2497.
- [10] XIE Lang, LUO Binbin, ZHAO Mingfu, et al. Orientation-dependent optic-fiber accelerometer based on excessively tilted fiber grating[J]. Optics Letters, 2020, 45: 125-128.
- [11] 罗彬彬. 光纤 Bragg 光栅传感技术及其生化传感应用研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2012.
- [12] 谭跃刚, 洪流. 机械装置的光纤光栅动态检测技术及应用[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2018.

一种新型 Ce : GAGG 闪烁探测器性能研究

王璐,王强,屈菁菁,董鸿林,方承丽,丁雨瞳

(中国电子科技集团公司第二十六研究所,重庆 400060)

摘要:该文将新型掺钕钐铝石榴石(Ce : GAGG)闪烁晶体与 CR-173 光电倍增管耦合,并将其和分压电路、高压模块、前放电路一起封装在铝合金外壳中,制成新型 Ce : GAGG 闪烁探测器。研究了不同尺寸 Ce : GAGG 闪烁晶体、不同耦合方式及反射层封装材料对新型 Ce : GAGG 闪烁探测器光产额和能量分辨率的影响,同时与封装好的 1 英寸(1 英寸=2.54 cm)掺铊碘化钠(NaI(Tl))闪烁晶体进行对比实验,并对 Ce : GAGG 和 NaI(Tl)闪烁探测器的能量线性进行测量。实验结果表明,小体积的 Ce : GAGG 闪烁探测器性能最好;光学硅脂耦合可提高闪烁探测器的性能;银反射膜(ESR 膜)材料封装闪烁探测器性能最好;Ce : GAGG 闪烁探测器性能优于 NaI(Tl)闪烁探测器。

关键词:掺钕钐铝石榴石(Ce : GAGG)闪烁晶体;探测器;光电倍增管;光产额;能量分辨率

中图分类号:TN29;TL812 **文献标志码:**A **DOI:**10.11977/j.issn.1004-2474.2020.06.017

Study on the Performance of a Novel Ce : GAGG Scintillation Detector

WANG Lu, WANG Qiang, QU Jingjing, DONG Honglin, FANG Chengli, DING Yuchong

(The 26th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China)

Abstract: In this work, a new Ce : GAGG scintillation crystal is coupled with the CR-173 photomultiplier tube, and then is packaged in an aluminum alloy shell together with voltage divider circuit, high voltage module and pre-amplifier circuit to fabricate a novel Ce : GAGG scintillation detector. The effects of different sizes of Ce : GAGG scintillation crystals, different coupling modes and different reflective layer packaging materials on the light yield and energy resolution of the Ce : GAGG scintillation detector are studied, at the same time, it is compared with the packaged 1 inch (1 inch=2.54 cm) thallium doped sodium iodide (NaI(Tl)) scintillation crystal, and the energy linearity of Ce : GAGG and NaI(Tl) scintillation detectors is measured. The experimental results show that the small size of Ce : GAGG scintillation detector has the best performance; the optical silicone coupling can significantly improve the performance of the scintillation detector; the enhanced specular reflector (ESR) material packaging scintillation detector has the best performance; the performance of Ce : GAGG scintillation detector is better than NaI(Tl) scintillation detector.

Key words: Ce : GAGG scintillator; detector; photomultiplier tube(PMT); light yield; energy resolution

0 引言

钐离子掺杂的钐铝镓多组分石榴石晶体($Gd_3\{Al,Ga\}_5O_{12}, Ce : GAGG$)是一种新型的无机闪烁晶体材料。自 2011 年以来^[1],越来越受到广泛关注。目前,Ce : GAGG 闪烁探测器已经在核医学^[2-3]、空间探测^[4]及核辐射探测^[5-7]等领域进行了实际应用。与常用掺铊碘化钠(NaI(Tl))、掺铊碘化铯(CsI(Tl))、锗酸铋(BGO)及硅酸钆镨(LYSO)相比,Ce : GAGG 闪烁晶体具有光产额高,密度较

大,衰减时间快,物化性能稳定及无自发辐射等优点^[8-9],是新型核辐射探测器的理想材料。

本文采用 Ce : GAGG 闪烁晶体、光电倍增管、高压模块、分压电路等组成探测器,研究不同尺寸的 Ce : GAGG 闪烁晶体、耦合方式及反射层封装材料的探测器性能,同时在同一实验环境下与 1 英寸(1 英寸=2.54 cm)NaI(Tl)闪烁晶体进行对比实验,对光产额、能量分辨率、能量线性等性能进行对比测试。

收稿日期:2020-07-28

基金项目:2016 年工信部工业强基工程基金资助项目(TC160A310-17)

作者简介:王璐(1987-),男,重庆人,工程师,硕士,主要从事 X 线探测器相关的研究。E-mail:32376392@qq.com。通信作者:王强(1986-),男,重庆人,工程师,硕士,主要从事核辐射探测相关的研究。E-mail:wqetc@163.com。

1 探测器设计及组装

探测器结构示意图如图 1 所示,该探测器主要由 Ce : GAGG 闪烁晶体、光电倍增管、分压电路、前放电路、高压模块、输入和输出接插件及封装材料等组成。

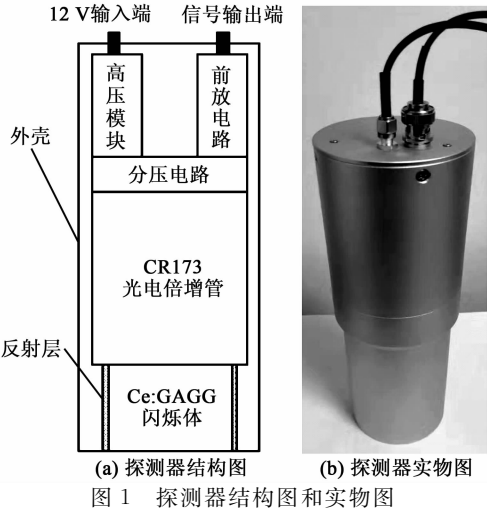


图 1 中,闪烁晶体用于探测 X/γ 线,并将 X/γ

线转化为光电子;光电倍增管用于接收闪烁光子,并将其转化为电信号;读出电路用于为光电倍增管分配电压,并将阳极信号输出;高压模块用于为光电倍增管提供高压;接插件用于对输入和输出信号的转接;封装材料包括闪烁晶体反射层材料和光学耦合剂。

2 实验测试及结果

2.1 材料的选择

光电倍增管型号选择北京滨松生产的 CR173 光电倍增管;Ce : GAGG 闪烁晶体由中国电子科技集团公司第二十六研究所提供,尺寸为 $\varnothing 8\text{ mm}\times 8\text{ mm}$ 、 $\varnothing 25\text{ mm}\times 25\text{ mm}$ 、 $\varnothing 50\text{ mm}\times 50\text{ mm}$,晶体端面抛光,其他面细磨,常用的闪烁晶体性能参数如表 1 所示。对比实验的 1 英寸 NaI(Tl)闪烁晶体由北京玻璃研究院提供,实验研究所用的闪烁晶体如图 2 所示。其中,反射层封装材料选择聚四氟乙烯(Teflon)、银反射膜(ESR 膜)、硫酸钡(BaSO_4)、二氧化钛(TiO_2),光学耦合剂选择美国 EJ 公司的 EJ-550 光学硅脂。

表 1 闪烁晶体性能参数

闪烁晶体	光产额/MeV	密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	衰减时间/ns	发射峰波长/nm	有效原子序数	潮解性	是否具有自发辐射
Ce : GAGG	54 000	6.63	94	540	54	否	否
NaI(Tl)	38 000	3.67	250	415	50	极易	否
CsI(Tl)	56 000	4.52	1 100	550	54	轻微	否
BGO	8 200	7.13	300	480	74	否	否
LYSO	25 000	7.15	40	420	62	否	是

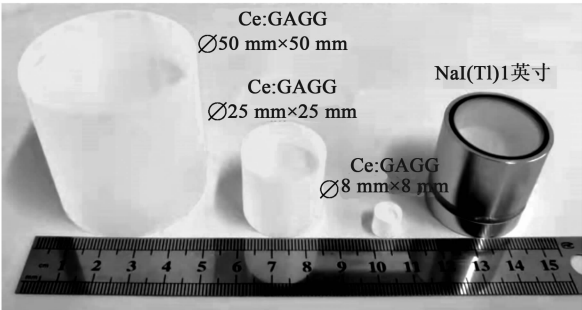


图 2 闪烁体图片

2.2 耦合测试

3 种不同尺寸的 Ce : GAGG 闪烁晶体表面不封装,抛光面与光电倍增管端面直接耦合,测试得到能谱图,同时测量 1 英寸 NaI(Tl)闪烁晶体与光电倍增管端面直接耦合的能谱图,得到空气耦合情况下 4 种闪烁晶体的能谱对比如图 3(a)所示。再将 4 种闪烁晶体与光电倍增管端面通过光学硅脂耦合,测试得到能谱对比如图 3(b)所示。

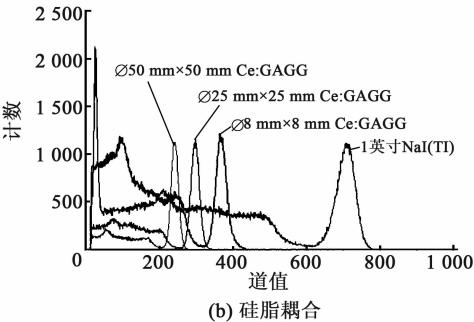
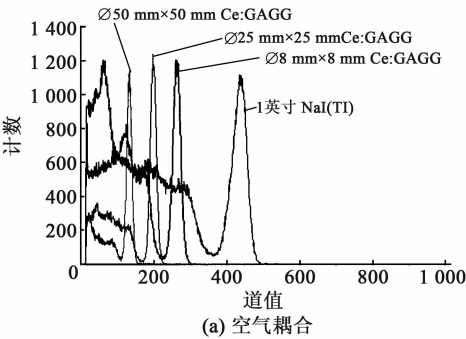


图 3 不同耦合方式能谱图

表 2 为计算得到 4 种闪烁晶体与光电倍增管不同耦合方式下相对光产额和能量分辨率的对比。由表 2 可知,采用硅脂耦合方式相对光产额和能量分辨率都有较大提高。

表 2 不同耦合方式测试结果对比

闪烁体种类	尺寸/mm	空气耦合		硅脂耦合	
		相对光产额	能量分辨率/%	相对光产额	能量分辨率/%
Ce : GAGG	∅8×8	265	9.3	368	8.9
	∅25×25	199	9.5	297	9.0
	∅50×50	132	12.3	240	9.6
NaI(Tl)	25.4	438	10.3	705	8.0

2.3 不同反射层封装测试

3 种不同尺寸的 Ce : GAGG 闪烁晶体表面除出光面外其他面分别采用 Teflon、ESR 膜、BaSO₄、TiO₂ 4 种封装材料进行封装,通过光学硅脂耦合,得到不同反射层封装材料的能谱对比图如图 4 所示。

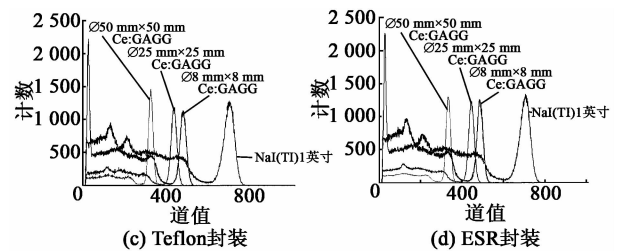
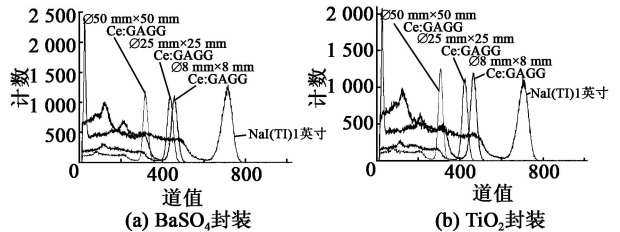


图 4 不同反射层封装材料能谱图

通过计算得到 3 种不同尺寸的 Ce : GAGG 闪烁晶体表面在不同封装材料情况下的相对光产额和能量分辨率的对比数据,如表 3 所示。

表 3 不同反射层封装材料测试结果对比

闪烁体种类	尺寸/mm	BaSO ₄ 封装		TiO ₂ 封装		Teflon 封装		ESR 膜封装	
		相对光产额	能量分辨率/%	相对光产额	能量分辨率/%	相对光产额	能量分辨率/%	相对光产额	能量分辨率/%
Ce : GAGG	∅8×8	465	7.3	433	7.0	467	7.0	485	6.7
	∅25×25	418	7.1	449	8.0	430	7.1	445	6.9
	∅50×50	306	8.0	289	8.5	328	7.8	333	7.7
NaI(Tl)	∅25.4×25.4	707	8.1	707	8.0	707	8.1	705	8.0

2.4 探测器线性度测试

线性度是衡量入射粒子能量与探测器给出的信息是否成线性关系,分别采用 Ce:GAGG 探测器和 NaI(Tl)探测器测量²⁴¹Am、¹³⁷Cs、²²Na 3 种标准放射源的能谱图,图 5 为 Ce : GAGG 和 NaI(Tl)探测器线性度测试能谱图。

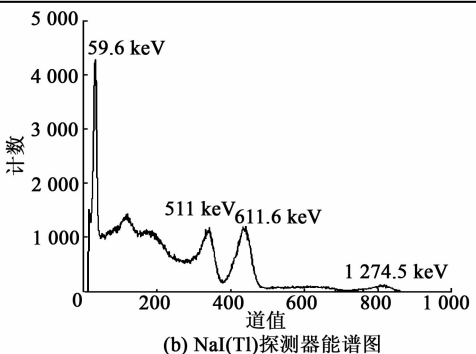
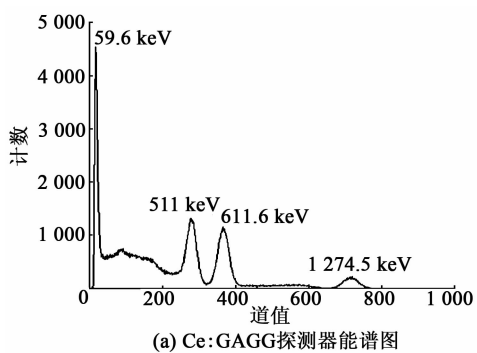


图 5 探测器线性度测试能谱图

通过对 Ce : GAGG 和 NaI(Tl)探测器线性度测试能谱图计算得到²⁴¹Am、¹³⁷Cs、²²Na 3 种标准放射源的各种特征峰及相应的相对光产额道值,图 6 为两种探测器能量线性拟合相关度对比。由图可知,Ce : GAGG 探测器的能量线性度稍好于 NaI(Tl)

探测器。图中, $r_{\text{NaI(Tl)}}$ 为 NaI(Tl)探测器的能量线性拟合相关度, $r_{\text{Ce : GAGG}}$ 为 Ce : GAGG 探测器的能量线性拟合相关度。

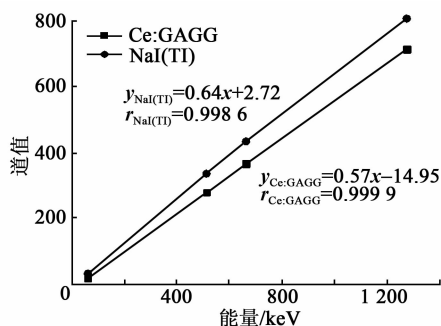


图6 线性度对比

3 结束语

本文通过对新型 Ce : GAGG 闪烁探测器的不同晶体尺寸、耦合方式和反射层封装材料的性能试验研究,并与北京玻璃研究院的 1 英寸 NaI(Tl)标准晶体进行对比。试验结果表明, $\varnothing 8 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 的 Ce : GAGG 闪烁晶体性能最好;光学硅脂耦合剂能提高闪烁探测器的性能;ESR 膜反射层封装材料性能优于 Teflon、 BaSO_4 、 TiO_2 ; Ce : GAGG 闪烁探测器的能量分辨率最好(可达到 6.7%),能量线性拟合相关度为 0.999 9,性能比 1 英寸 NaI(Tl)闪烁探测器优。

本文采用的光电转换器件 CR173 峰值波长为 420 nm,而 Ce : GAGG 闪烁晶体的发光峰值波长为 540 nm,因波长不匹配会导致量子效率偏低,影响了 Ce : GAGG 闪烁探测器的性能,因此,为提高 Ce : GAGG 闪烁探测器的性能,后续我们将调研与 Ce : GAGG 闪烁晶体发光波长相匹配的光电转换器件,并进行试验研究。

参考文献:

[1] KAMADAK, YANAGIDA T, ENDO T, et al. 2 inch diameter single crystal growth and scintillation proper-

ties of Ce : $\text{Gd}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}$ [J]. Journal of Crystal Growth, 2012, 352(1): 88-90.

- [2] YEOM J Y, YAMAMOTO S, DERENZO S, et al. First performance results of Ce : GAGG scintillation crystals with silicon photomultipliers [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2013, 60(2): 988-992.
- [3] LIPOVEC A, SHIMAZOE K, TAKAHASHI H. Development of high-resolution gamma detector using sub-mm GAGG crystals coupled to TSV-MPPC array [J]. Journal of Instrumentation, 2016, 11(3): C03026-C03026.
- [4] YONEYAMA M, KATAOKA J, ARIMOTO M, et al. Evaluation of GAGG : Ce scintillators for future space applications [J]. Journal of Instrumentation, 2018, 13(2): P02023-P02023.
- [5] 刘毅, 帅磊, 张济鹏, 等. 基于 GAGG : Ce 晶体耦合 SiPM 的位置灵敏探测器的设计与评估 [J]. 原子能科学技术, 2018, 52(8): 1487-1491.
- [6] MORISHITA Y, YAMAMOTO S, IZAKI K, et al. Optimization of thickness of GAGG scintillator for detecting an alpha particle emitter in a field of high beta and gamma background [J]. Radiation Measurements, 2018, 112: 1-5.
- [7] TAGGART M P, NAKHOSTIN M, SELLIN P J. Investigation into the potential of GAGG : Ce as a neutron detector [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2019, 931(1): 121-126.
- [8] 冯大建, 丁雨瞳, 刘军, 等. Ce : GAGG 闪烁晶体生长与性能研究 [J]. 压电与声光, 2016, 38(3): 430-432.
FENG Dajian, DING Yuchong, LIU Jun, et al. Study on the growth and scintillation properties of Ce : GAGG crystal [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2016, 38(3): 430-432.
- [9] 程翀, 王益元, 许浒, 等. GAGG : Ce 探测器与 NaI : Tl 探测器性能比较 [J]. 核电子学与探测技术, 2017(1): 16-19.

SnO₂压敏陶瓷掺杂 MnO₂的制备和性能研究

梁温馨¹,赵洪峰¹,康加爽¹,王昊¹,周远翔¹,谢清云²

(1. 新疆大学 电气工程学院电力系统及大型发电设备安全控制和仿真国家重点实验室风光储分室,新疆 乌鲁木齐 830046;

2. 西电避雷器有限责任公司,陕西 西安 710200)

摘要:采用 MnO₂ 部分替代 ZnO 的方法固相烧结制备了 SnO₂-ZnO-Ta₂O₅ 基压敏陶瓷。研究了 Zn, Mn 共同掺杂对 SnO₂ 微观结构和电学性能的影响,发现少量 Mn 的替代掺杂可以改善 SnO₂ 压敏陶瓷的非线性并显著提高其电压梯度。当 MnO₂ 的摩尔分数为 0.25% 时,样品的非线性达到了 21.37,电压梯度为 422 V/mm,泄漏电流为 72.12 μ A/cm²。造成这种变化的主要原因是 Mn 补充了 SnO₂ 晶格中 ZnO 原有的不溶部分,通过固溶反应产生了受主缺陷离子 Mn²⁺,增大了受主浓度,促进了势垒的形成。同时, Mn 在 SnO₂ 晶格中的溶解度较低,容易在晶界层析出,阻碍晶粒生长,增加了电压梯度。

关键词: SnO₂ 压敏陶瓷; 泄漏电流; 电压梯度; 微观结构; 肖特基势垒

中图分类号: TN384; TM28 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11977/j.issn.1004-2474.2020.06.018

Study on Preparation and Properties of SnO₂ Varistor Ceramics Doped with MnO₂

LIANG Wenxin¹, ZHAO Hongfeng¹, KANG Jiashuang¹, WANG Hao¹, ZHOU Yuanxiang¹, XIE Qingyun²

(1. The Wind Solar Storage Division of State Key Laboratory of Control and Simulation of Power System and Generation Equipment, School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 2. Xidian Surge Arrester Co., Ltd., Xi'an 710200, China)

Abstract: The SnO₂-ZnO-Ta₂O₅ based varistor ceramics was prepared by partial replacement of ZnO with MnO₂. The effects of Zn and Mn co-doping on the microstructure and electrical properties of SnO₂ were investigated. The experimental results showed that the substitution of ZnO with a small amount of MnO₂ could improve the nonlinear performance of the samples and significantly increase the voltage gradient. When the MnO₂ doping amount was 0.25%, the nonlinearity of the sample reaches 21.37, the voltage gradient was 422 V/mm, and the leakage current was 72.12 μ A/cm². The main reason for the change was that Mn supplements the original insoluble portion of ZnO in the SnO₂ lattice, and undergoes the solid solution reaction to generate the acceptor defect ion Mn²⁺, which promotes the formation of the potential barrier. At the same time, Mn has low solubility in SnO₂ lattice, so it was easy to segregate and precipitate on grain boundary layer, which hinders grain growth and increases voltage gradient.

Key words: SnO₂ varistor ceramics; leakage current; voltage gradient; microstructure; Schottky barrier

0 引言

二氧化锡(SnO₂)是具有金红石晶体结构的 n 型半导体。因为 SnO₂ 表面扩散(在低温下)和蒸发冷凝(在高温下),该材料的致密化较低,常被应用于气敏元件^[1]。PIAONAO 等^[2]用 CoO 作为致密剂,研制出 SnO₂ 基压敏陶瓷,使其成为 ZnO 压敏陶瓷的热门候选者。后续又发现 ZnO、MnO₂、CuO、

Li₂O₃ 等也可以充当 SnO₂ 的致密剂。其中 CoO、ZnO、MnO₂ 在作为 SnO₂ 的致密剂的同时,也充当着受主掺杂剂的作用^[3-5],且可以固溶于 SnO₂ 晶粒中,产生受主缺陷离子,促进势垒的形成,提升压敏陶瓷的电学性能。根据已有研究发现, SnO₂-ZnO 基压敏陶瓷的非线性和电压梯度普遍偏低,而 SnO₂-MnO₂ 基压敏陶瓷的电压梯度则很高^[6-7]。本

收稿日期:2020-06-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51762038)

作者简介:梁温馨(1995-),男,四川达州人,硕士生,主要从事先进陶瓷材料的研究。通信作者:赵洪峰(1980-),男,山东聊城人,硕士生导师,主要从事电工材料和过电压保护的研究。

文将不同量的 MnO₂ 以部分替代 ZnO 的方式加入到 SnO₂-ZnO-Ta₂O₅ 基压敏陶瓷中,研究 MnO₂ 和 ZnO 共同掺杂对 SnO₂ 压敏陶瓷微观结构和电学性能的影响。

1 实验

1.1 SnO₂-ZnO-MnO₂-Ta₂O₅ (SZT) 压敏陶瓷的制备

SnO₂ 压敏陶瓷的组成为: $x(\text{SnO}_2) = 98.95\%$, $x(\text{ZnO}) = (1 - X)\%$, $x(\text{MnO}_2) = X\%$ (其中 $X = 0, 0.25, 0.5, 0.75$, 摩尔分数), $x(\text{Ta}_2\text{O}_5) = 0.05\%$ 。严格按照 $w(\text{球石}) : w(\text{原料}) : w(\text{去离子水}) = 2 : 1 : 1$ 的质量比配置,先用一半去离子水稀释质量分数为 4.5% 的聚乙烯醇(PVA,作为粘合剂),加入到原料中混合搅拌,再用另一半去离子水稀释质量分数为 3.3% 的分散剂,同样加入到原料中混合搅拌,放入行星磨机中以 600 r/min 的转速处理 8 h,最后在 65 °C 的电烘箱中干燥 10 h。将干燥后的粉料碾碎,过 100 目筛。在压力为 100 MPa 条件下,将颗粒粉末压制成直径 $\varnothing 30$ mm、厚 2.5 mm 的圆盘。将圆盘放入马弗炉中,在空气中以 2 °C/min 从室温升至 1 300 °C 时烧结 2 h,再以 5 °C/min 降至室温。为方便后续电学测试,最后将圆盘两面涂上液态银浆,在 200 °C 的烘箱中固化 30 min,形成表面光滑的银电极。

1.2 样品的测量

为了观察样品内部的微观结构,将其砸碎,用扫描电子显微镜(SEM, Hitachi 8010 instrument)对样品断裂面进行成像。用 X 线衍射(XRD Model H/max 2500)仪对样品进行表征,用于分析样品中存在的晶相种类及其含量。

用宽带介电阻抗光谱仪(Novocontrol Concept 80)在 1 kHz 下测量样品的电容-电压(C-V)特性。电容的电压依赖性符合以下公式:

$$(1/C_b - 1/C_0)^2 = 2(\varphi_b + U_{gb}) / (q\epsilon_s N_d) \quad (1)$$

式中: q 为自由电荷; U_{gb} 为晶界击穿电压; C_b 为晶界单位面积的电容,当 $U_{gb} = 0$ 时, $C_0 = C_b$; ϵ_s 为 SnO₂ 的介电常数; N_d 为 SnO₂ 晶粒的施主密度; φ_b 为晶界中双肖特基势垒的势垒高度。因此,每个样品的 N_d 和 φ_b 都可以根据 $(1/C_b - 1/C_0)^2$ 对 U_{gb} 的线的斜率和截距得到^[8]。界面态密度 N_i 为

$$N_i = \left(\frac{2 N_d \epsilon_r \epsilon_0 \varphi_b}{q} \right)^{1/2} \quad (2)$$

为了得到样品在 $10^{-9} \sim 10^{-2}$ A 的小电流区的

电场-电流密度(E - J)特性,用源表(Model 2410)对样品进行了通电测量。非线性系数 α 可用下式进行推导:

$$\alpha = 1 / (\log E_2 - \log E_1) \quad (3)$$

式中 E_1 、 E_2 为对应电流密度下的击穿场强,分别由 $J = 1.0 \text{ mA/cm}^2$ 和 10 mA/cm^2 时的击穿电压确定。漏电流密度 J_L 在 $0.75E_{1\text{mA}}$ ($E_{1\text{mA}}$ 为电压梯度)处测量。

2 结果与讨论

图 1 为 $x(\text{MnO}_2)$ 不同时,SnO₂-ZnO-Ta₂O₅ (SZT) 压敏电阻的 SEM 图像。在晶粒与晶粒间发现了与 SnO₂ 主晶粒截然不同的微小颗粒,其可能是 SnO₂ 以外的其他晶相。此外,由图可知,随着 $x(\text{MnO}_2)$ 不断提高,晶粒尺寸不断减小,且晶粒分布趋于不均匀。

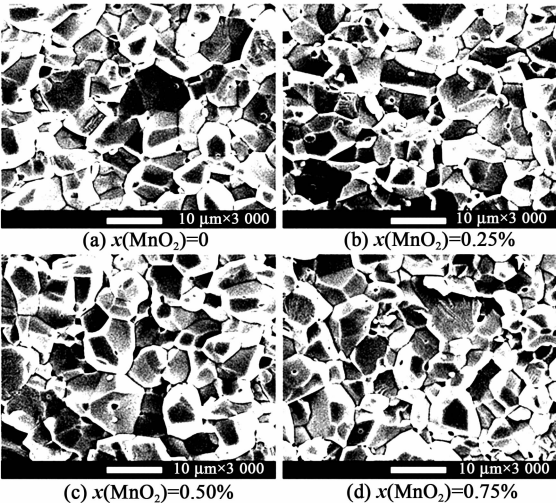


图 1 不同 $x(\text{MnO}_2)$ 制备的 SnO₂ 压敏陶瓷的 SEM 图像

基于图 1,样品的平均晶粒尺寸 d 根据线性截距法测量得到,如表 1 所示^[9]。平均晶粒尺寸的减小与掺杂离子 Zn、Mn 的固溶反应有关,其反应方程式如下:

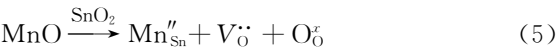
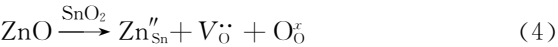


表 1 样品的微观结构和 E - J 参数

$x(\text{Mn})/\%$	$E_{1\text{mA}}/(\text{V} \cdot \text{mm}^{-1})$	$J_L/(\mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$	$d/\mu\text{m}$	α
0	151	289.53	6.20	4.35
0.25	422	72.12	5.71	21.37
0.50	491	84.42	5.65	16.16
0.75	650	90.28	5.31	12.11

根据式(4)、(5),ZnO 和 MnO_2 的掺杂产生了氧空位,氧空位通过促进离子扩散来提高样品的致密度^[10];同时随着 $x(\text{MnO}_2)$ 不断提高,由于 Mn^{2+} 的半径(0.083 nm)远大于 Sn^{4+} (0.069 nm),因此,大部分 Mn^{2+} 不能溶解于 SnO_2 ,会在晶界层偏析,形成富 Mn 层,这有利于晶界扩散,帮助致密。根据 P. R. Bueno 等研究发现,当 Mn 偏析的浓度过高时,会生成沉淀相 Mn_2SnO_4 ^[11]。由此推测前述微小颗粒为 Mn_2SnO_4 ,其降低了晶界的流动性,阻碍了晶粒生长,导致晶粒尺寸的减小。

图 2 为 $x(\text{MnO}_2)$ 不同时, SZT 压敏陶瓷样品的 XRD 图谱。由图可见,除 SnO_2 金红石相外,未发现其他晶相,这与图 1 的观测结果相反。其原因是与 SnO_2 主晶相相比, SZT 压敏陶瓷微小颗粒的含量较低,相关衍射峰的强度很低,从图 2 上难以观测,故而呈现出的晶相只有 SnO_2 金红石相,与以往研究结果一致^[5,12]。

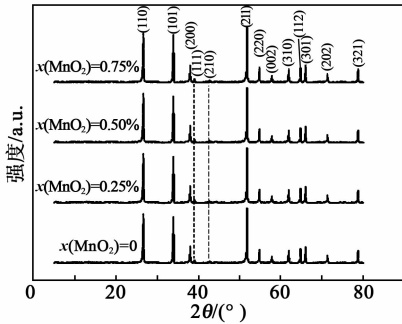


图 2 $\text{SnO}_2\text{-ZnO-MnO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5$ 压敏陶瓷的 XRD 图谱

图 3 为不同 $x(\text{MnO}_2)$ 的 SZT 基压敏电阻电流区域从 $0\sim1\times10^{-2}\text{ A/cm}^2$ 的 $E\text{-}J$ 特性。由图 3 所得参数($E_{1\text{ mA}}, J_L, \alpha$)如表 1 所示。随着 $x(\text{MnO}_2)$ 从 0 增加到 0.75%,样品的 $E_{1\text{ mA}}$ 从 151 V/mm 增加到 650 V/mm,呈现一直增大的趋势。 $E_{1\text{ mA}}$ 的计算公式如下^[13]:

$$E_{1\text{ mA}} = \bar{N} \cdot U_{\text{gb}} \quad (6)$$

式中 $\bar{N}$ 为单位长度的平均晶粒数。晶粒尺寸越小, $\bar{N}$ 越大,单位长度存在的晶界就越多。因此,电压梯度的增大与晶粒尺寸的减小有关,这与所得实验数据保持一致。 J_L 和 α 两者具有相反的变化趋势,当 $x(\text{MnO}_2) = 0.25\%$ 时,样品的 J_L 值被限制到最小($72.1\text{ }\mu\text{A/cm}^2$),其 α 达到最高(21.37)。

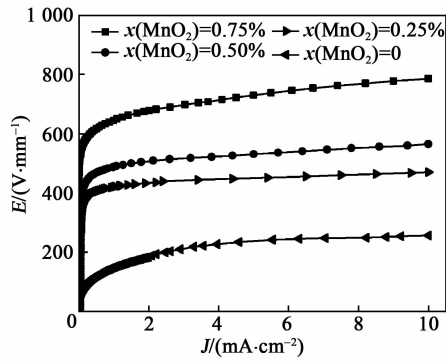


图 3 $\text{SnO}_2\text{-ZnO-MnO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5$ 压敏陶瓷的 $E\text{-}J$ 特性曲线

图 4 为由样品原始电容-电压($C\text{-}V$)特性曲线。根据式(1)可知, $(1/C_b - 1/C_0)^2$ 是关于 U_{gb} 的函数,结合图 4 和式(1)、(2)计算可得 N_i, N_d 和 φ_b ,如表 2 所示。 $x(\text{MnO}_2) = 0.25\%$ 时,样品中的 φ_b 和 N_d 值达到最大,分别为 1.18 eV 和 $4.1\times10^{23}\text{ m}^{-3}$;若进一步掺杂,则二者皆会减小。根据式(2)可知, N_i 由 N_d 和 φ_b 共同决定,其变化规律与 N_d 和 φ_b 一致,在 $x(\text{MnO}_2) = 0.25\%$ 时 N_i 达到最大值($2.7\times10^{16}\text{ m}^{-2}$)。 MnO_2 固溶反应产生的缺陷离子 Mn_{sn}'' 和氧空位,分别是 N_i 和 N_d 增大的原因。

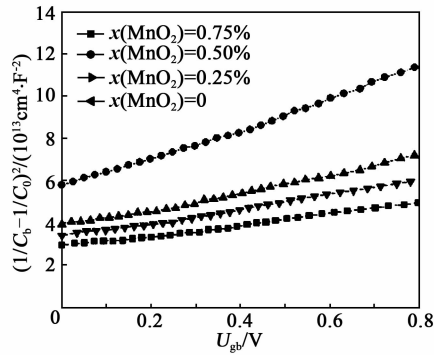


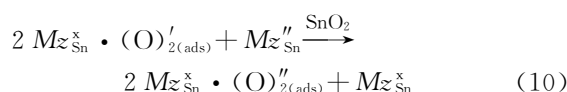
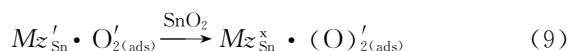
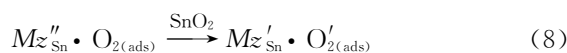
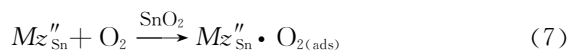
图 4 $\text{SnO}_2\text{-ZnO-MnO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5$ 压敏陶瓷的 $C\text{-}V$ 特性曲线

表 2 样品的 $C\text{-}V$ 参数

$x(\text{Mn})/\%$	$N_d/(10^{23}\text{ m}^{-3})$	$N_i/(10^{16}\text{ m}^{-2})$	φ_b/eV
0	1.3	1.2	0.72
0.25	4.1	2.7	1.18
0.50	3.2	2.3	1.06
0.75	2.5	1.9	0.93

压敏陶瓷拥有非线性是因为晶界区存在势垒,而负责形成势垒的主要是负电荷缺陷 O' 和 O'' ^[14]。因此,晶界区 O' 和 O'' 的浓度决定了势垒的好坏,影响着样品电学性能。根据式(4)、(5),生成了受主缺陷离子($\text{Mn}_{\text{sn}}'', \text{Zn}_{\text{sn}}''$),它们会在晶界区建立促进 O' 和 O'' 物质吸附的位置,即晶界界面 O' 和 O'' 物质的最大浓度取决于 $\text{Mn}_{\text{sn}}'', \text{Zn}_{\text{sn}}''$ 等受主缺陷产生的吸附

位点的水平,所以,ZnO、MnO₂的掺杂对晶界区势垒的优化有促进作用。氧气与游离在晶界区域的受主缺陷离子(Mn_{Sn}^{''},Zn_{Sn}^{''})系列反应方程式如下:



式中:Mz=Zn,Mn;上角x为不带电荷;下角ads为吸附位点。

由于Zn²⁺的半径(0.074 nm)比Sn⁴⁺的半径(0.069 nm)大,虽能固溶于SnO₂晶格中,但其溶解度不大。I. Sakaguchi等^[15]发现, $x(\text{ZnO}) = 0.25\% \sim 0.70\%$ 时,Zn在SnO₂晶粒的溶解度已达极限,不能溶解的Zn将在晶界层偏析,形成富Zn晶界。通过进一步采用XRD对样品进行晶相分析表明,当 $x(\text{ZnO}) > 1\%$ 时,SnO₂基压敏陶瓷中存在Zn₂SnO₄和ZnSnO₃相^[16-17]。因此,只要 $x(\text{ZnO}) < 1\%$,超出溶解极限的Zn会偏析在晶界而不至于生成第二晶相。ZnO在晶界的偏析提高了晶界处载流子的浓度,降低了晶界电阻,使势垒高度降低,最终导致非线性特性变差。根据以前文献的研究,当 $x(\text{ZnO}) = 0.5\%$ 时,SnO₂-ZnO-Ta₂O₅基压敏陶瓷的非线性最高,进一步掺杂会导致电学性能劣化^[6]。因此可以推测,当样品中 $x(\text{ZnO}) > 0.5\%$ 时,Zn可能会在晶界轻微偏析。本实验中MnO₂以部分替代ZnO的方式掺杂,MnO₂的适度掺杂可以替代原体系中偏析的ZnO量,即在不影响Zn_{Sn}^{''}缺陷离子浓度的情况下,新增加了Mn_{Sn}^{''}缺陷离子,这相当于增大了晶界处受主缺陷离子浓度。根据式(7)~(10)可知,新增的Mn_{Sn}^{''}缺陷离子促进了晶界势垒的形成,提高了势垒高度,改善了样品非线性特性。但是,随着 $x(\text{MnO}_2)$ 的持续增加, $x(\text{MnO}_2)$ 超出了在SnO₂晶格的固溶极限,多余的Mn²⁺会向晶界区扩散,吸引其他金属离子形成沉淀相Mn₂SnO₄。晶界区域的Mn₂SnO₄沉淀相阻碍了晶粒与晶粒融合,使晶粒尺寸缩小,增大了电压梯度。与此同时,随着金属离子的析出,减小了晶界层中受主缺陷离子浓度,降低了势垒高度,增大了泄漏电流。

3 结束语

本文研究了掺杂MnO₂的SZT基压敏陶瓷系

统的微观结构和电学性能。MnO₂的掺杂明显优化了SZT基压敏陶瓷的电学性能。

通过掺杂MnO₂,替代了原体系部分偏析的ZnO,增大了受主缺陷离子浓度,提升了势垒高度,从而优化了样品的电学性能。MnO₂的过量掺杂会在晶界上形成Mn₂SnO₄沉淀相。沉淀相的产生会极大地提高样品的电压梯度,但也损害了势垒,使样品非线性降低和泄漏电流增大。

$x(\text{MnO}_2) = 0.25\%$ 时可得到最好的电学性能,拥有最高的非线性系数(21.37)和最低的泄漏电流(72.1 μA/cm²),同时还有422 V/mm的电压梯度。这些性能的优化有助于制备综合性能优良的高梯度SnO₂压敏陶瓷。

参考文献:

- [1] 王春明,王矜奉,陈洪存,等. (Ba,Co,Nb)掺杂SnO₂压敏材料电学非线性的研究[J]. 压电与声光,2004,26(2):139-141.
WANG Chunming, WANG Jinfeng, CHEN Hongcun, et al. Effect of Ba on the electrical properties of (Co, Nb)-doped SnO₂ varistors[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2004, 26(2): 139-141.
- [2] PIANARO S A, BUENO P R, LONGO E, et al. A new SnO₂-based varistor system[J]. J Mater Sci Lett, 1995, 14(10): 692-694.
- [3] METZ R, KOUMEIR D, MOREL J, et al. Electrical barriers formation at the grain boundaries of Co-doped SnO₂ varistor ceramics[J]. J Eur Ceram Soc, 2008, 28(4): 829-835.
- [4] YONGVANICH N, NIYOMTRUM K, CHAIRATANASET C, et al. Enhancement of non-linear properties in SnO₂ varistors by ZnO doping[J]. Ceram Int, 2017, 43(1): 280-285.
- [5] LIU D J, WANG W Q, WANG F, et al. High nonlinear coefficient SnO₂ varistors tailored by Mn₂O₃ doping[J]. Mat Sci Semicon Proc, 2020, 117: 105160.
- [6] HE J F, PENG Z J, FU Z Q, et al. Effect of ZnO doping on microstructural and electrical properties of SnO₂-Ta₂O₅ based varistors[J]. J Alloy Compd, 2012, 528: 79-83.
- [7] BUONOCORE A L W, MOUTA R, GOMES J C, et al. Varistor behavior in a ternary system based on SnO₂ doped with a hexavalent donor: SnO₂-MnO₂-WO₃ [J]. J Alloy Compd, 2019, 811: 151538.

LiF/Li₂CO₃ 对 PZT 陶瓷低温烧结及压电性能的影响

赵世言¹, 胡望峰²

(1. 上海大学 材料科学与工程学院, 上海 200444; 2. 杭州应用声学研究所, 浙江 杭州 311400)

摘要:采用固相合成法制备了 $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3 + x\% \text{LiF}$ ($\text{PZT} + x\% \text{LiF}$) 及 $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3 + y\% \text{Li}_2\text{CO}_3$ ($\text{PZT} + y\% \text{Li}_2\text{CO}_3$) (x, y 为质量分数) 压电陶瓷, 研究了 x, y 不同对 PZT 压电陶瓷烧结性、晶体结构、微观形貌及压电性能的影响。随着 x, y 的增加, PZT 压电陶瓷的四方相晶胞比 (c/a) 均下降, 但在 $x=y$ 时, 与 $\text{PZT} + y\% \text{Li}_2\text{CO}_3$ 相比, $\text{PZT} + x\% \text{LiF}$ 的 c/a 较小, 居里温度基本不变, $\text{PZT} + x\% \text{LiF}$ 及 $\text{PZT} + y\% \text{Li}_2\text{CO}_3$ 的压电性能小幅提升后下降, 且在 $x=y=0.2$ 时, 其压电性能均取得最佳。结果表明, 掺杂 LiF、Li₂CO₃ 均能促进低温烧结, 提高致密度; 在 1 100 °C 烧结温度下, $\text{PZT} + y\% \text{Li}_2\text{CO}_3$ 样品性能较优, 且低温烧结效果更好。但在掺杂量较大时, LiF 对性能的恶化较小。

关键词: 锆钛酸铅 (PZT) 陶瓷; 低温烧结; Li₂CO₃; LiF

中图分类号: TN384; TM22 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11977/j.issn.1004-2474.2020.06.019

Effects of LiF/Li₂CO₃ on the Sintering Behavior and Piezoelectric Properties of PZT Ceramics

ZHAO Shiyan¹, HU Wangfeng²

(1. School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2. Hangzhou Applied Acoustics Research Institute, Hangzhou 311400, China)

Abstract: The $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3 + x\% \text{LiF}/\text{Li}_2\text{CO}_3$ ($\text{PZT} + x\% \text{LiF}$) and $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3 + y\% \text{Li}_2\text{CO}_3$ ($\text{PZT} + y\% \text{Li}_2\text{CO}_3$) (x and y are the mass fractions) piezoelectric ceramics were prepared by solid state process in this paper. The effects of different x and y on the sintering behavior, crystal structure, microstructure and piezoelectric properties of PZT ceramics have been investigated. With the increase of x and y , the tetragonal phase cell ratio (c/a) of PZT piezoelectric ceramics decreases, but when x is equal to y , the c/a of $\text{PZT} + x\% \text{LiF}$ is smaller than that of $\text{PZT} + y\% \text{Li}_2\text{CO}_3$, while the Curie temperature is basically unchanged, and the piezoelectric properties of $\text{PZT} + x\% \text{LiF}$ and $\text{PZT} + y\% \text{Li}_2\text{CO}_3$ decrease after a small increase. The piezoelectric properties of $\text{LiF}/\text{Li}_2\text{CO}_3$ and $\text{PZT} + y\% \text{Li}_2\text{CO}_3$ are the best when $x=y=0.2$. The results show that the addition of $\text{LiF}/\text{Li}_2\text{CO}_3$ can promote the low temperature sintering and increase density; at a sintering temperature of 1 100 °C, the properties of Li_2CO_3 samples are better than that of LiF , and the low-temperature sintering effect is better, but at a more amount of doping amount, LiF has less effect on the property deterioration.

Key words: PZT ceramics; low temperature sintering; Li₂CO₃; LiF

0 引言

锆钛酸铅 (PZT) 是一种性能优异的压电陶瓷材料, 因其具有高的压电常数、居里温度及机电耦合系数, 已成为用途最广的一类压电陶瓷。然而伴随着优异的性能, PZT 压电陶瓷也存在烧结温度较高 (1 200~1 300 °C) 等不足。在高温下, PZT 成分中的铅 (Pb) 会有严重的挥发, Pb 挥发不仅会造成成分波动性能下降, 同时也会对环境造成很大的污染;

并且随着低温共烧陶瓷 (LTCC) 技术的发展, 现代化无源集成器件、多层驱动器件都需要陶瓷材料本身具有较低的烧结温度, 从而和金属内电极匹配共烧。为了满足环境保护和工业化应用的迫切需求, 我们对 PZT 基压电陶瓷低温烧结进行了系统化的研究。

在低温烧结研究中, 常用的方法有添加烧结助剂、减小粉体粒径 (溶胶-凝胶化学法、高能球磨法) 及改变烧结方式 (热压烧结) 等。其中, 添加烧

收稿日期: 2020-11-12

作者简介: 赵世言 (1995-), 男, 山西运城人, 硕士生, 主要从事压电陶瓷低温烧结的研究。通信作者: 胡望峰 (1963-), 男, 江西高安人, 高级工程师, 主要从事压电陶瓷材料及元件、传感器技术的研究。E-mail: huwangfeng7159@sina.com。

烧结剂是运用最广且简便的方法。目前常用的烧结助剂有Ba(Cu_{1/2}W_{1/2})O₃^[1]、Bi₂O₃^[2]、Li₂CO₃^[3-9]、LiBiO₂^[10-13]、CuO^[14-18]及一些低熔点玻璃助烧结剂^[19-20]。其中Li₂CO₃由于熔点低,降温效果好,被广泛地应用于多种不同的压电陶瓷体系中。

Li₂CO₃中的Li⁺能进入晶格产生氧空位促进传质、与PbO形成Li₂PbO₃液相,是促进烧结的主要因素。降低烧结温度除引入Li⁺外,还有许多不同的引入方式。其中同样含有Li⁺且具有低熔点特性的LiF^[21]烧结助剂在压电陶瓷低温烧结的研究中报道较少。

本文将LiF作为烧结助剂加入到PZT压电陶瓷体系中,系统地研究了不同LiF助烧结剂添加量对PZT压电陶瓷晶体结构、微观形貌、压电性能和烧结过程的影响。同时将LiF与Li₂CO₃在PZT压电陶瓷中的不同烧结情况及效果进行了对比,深化了对LiF烧结机理的认识。

1 实验

采用高温固相法合成Pb(Zr_{0.52}Ti_{0.48})O₃(PZT)主晶相,使用原料质量比为PbO(99.9%)、ZrO₂(99.9%)、TiO₂(99.9%)、Li₂CO₃(99.9%)及LiF(99.9%),按照化学计量比称量原料。将称量的原料放于球磨罐中,使用酒精作为球磨介质,以 $w(\text{料}):w(\text{球}):w(\text{酒精})=1:4:1$ (质量比)球磨24 h后烘干原料。烘干后原料在800℃下预合成3 h。合成完毕的原料二次球磨24 h,烘干后加入质量分数8%的聚乙烯醇(PVA)进行造粒。造粒后粉体在40 MPa的压力下成型为直径 $\varnothing 20$ mm、厚1 mm的陶瓷素胚。素胚在600℃下排胶处理4 h,然后样品倒扣于坩锅中并使用PbZrO₃粉末密封。随后在1100℃条件下烧结2 h。烧结好的样品上、下表面被银,再在800℃下保温12 min烧渗银电极。制备好电极的样品放在120℃硅油中,以3 kV/mm、保压20 min的条件下进行极化处理。极化好的陶瓷样品老化24 h稳定后进行电学性能的测试。

通过X线衍射仪(XRD,Rigaku Ultima IV)进行晶体结构分析;利用扫描电子显微镜(SEM,Nova NanoSEM 450)观察样品的微观形貌;使用阿基米德排水法测定样品的密度;采用准静态压电常数测试仪(S5865 d₃₃ METER)测试样品的压电常数(d_{33});使用阻抗分析仪(Agilent 4294A)测量样品在不同频率下介电常数(ϵ_r)、损耗($\tan \delta$)、谐

振频率(f_r)及反谐振频率(f_a),并计算平面机电耦合系数 $k_p=\sqrt{2.46 \times \frac{f_a-f_r}{f_r}}$;使用GJW-1高温介电温谱测试系统测试居里温度 T_c ;使用热膨胀仪(NETZSCH DIL 402CL)分析样品的烧结收缩过程。

2 结果与讨论

图1为掺杂LiF及Li₂CO₃质量分数 x 、 y 不同时,在1100℃、2 h烧结条件下PZT+ $x\%$ LiF及PZT+ $y\%$ Li₂CO₃的XRD图。由图可知, x 、 y 不同时,PZT样品均无杂相,为纯钙钛矿结构。

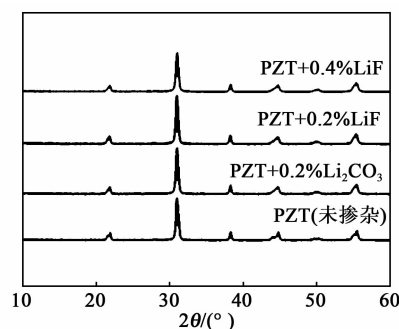


图1 x 、 y 不同时烧结样品的XRD图

图2为图1的局部放大图。由图可知,未掺杂PZT样品在衍射角 $2\theta=45^\circ$ 附近有明显的(002)、(200)衍射峰,处于三方、四方相准同型相界。在掺杂助烧结剂Li₂CO₃或LiF后,由图2还可看出,三方相含量增加,四方相含量减少,且四方相(002)与(200)衍射峰的强度比发生了变化,说明四方晶系晶胞比 c/a (四方晶系晶胞边长 $a=b<c$)发生了变化。用Jade软件峰形拟合可得,随着 x 的变化, c/a 由未掺杂时的1.018 4下降到 $x=0.4\%$ 时的1.012 6。掺杂Li₂CO₃或LiF均导致四方相晶体结构 c/a 下降,但在 $x=y=0.2$ 时,掺杂LiF样品的 $c/a=1.013 3$,而掺杂Li₂CO₃样品的 $c/a=1.014 5$ 。晶胞体积随着 x 的增加而下降,但随着 y 的增加而增大。这可能与Li⁺固溶进入PZT钙钛矿晶格的B位有关。考虑到Li⁺,Zr⁴⁺及Ti⁴⁺的半径分别为0.076 nm,0.072 nm及0.060 5 nm, Li⁺固溶进入B位会引起晶胞体积的增大。但另一方面F⁻的半径(0.133 nm)比O²⁻半径小(0.140 nm),F⁻取代O²⁻则会引起晶胞体积缩小,且F⁻取代O²⁻引起晶胞体积缩小,超过了Li⁺取代B位造成的晶胞体积膨胀,这解释了掺杂LiF导致晶胞体积缩小而掺杂Li₂CO₃却使其膨胀的实验现象。B位离子偏离氧八面体中心导致了PZT的自发极化,而B位离子

偏离氧八面体中心的原因主要是 B 位离子 (Zr^{4+}/Ti^{4+}) 的外层为 d^0 电子, 二次 Jahn-Teller 效应使 Ti^{4+}/Zr^{4+} 的 $3d^0/4d^0$ 轨道易于 O^{2-} 的 $2p$ 电子轨道形成较强的配位键, 从而使其偏离八面体中心产生自发极化, c/a 增加。而 Li^+ 属主族元素离子, 其外层电子为 s 电子, 因 $Li-O$ 键具有很强的离子键特性, 很难形成共价键, 因此, Li^+ 进入 B 位降低了 B 位离子偏离氧八面体中心的能力, 导致其自发极化下降, c/a 减小; 并且 F^- 取代 O^{2-} 后, 与 B 位形成的 $B-F$ 键相对于原本的 $B-O$ 键, 离子性增强, 从而进一步降低了 B 位离子偏离氧八面体中心的能力。所以在 $x=y$ 时, 掺杂 LiF 样品的 c/a 比掺杂 Li_2CO_3 样品的 c/a 小。

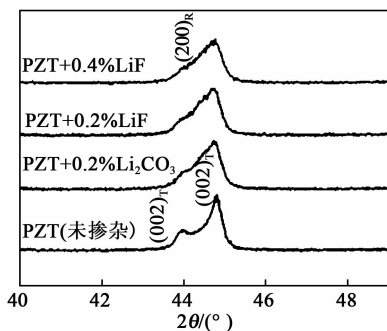


图2 图1的XRD放大图

图3为掺杂 LiF 、 Li_2CO_3 样品的烧结收缩曲线图。图中, ΔL 为样品从素胚到烧成陶瓷的线性收缩长度比。由图可知, 掺杂 Li_2CO_3 样品的收缩速率很快, 表现出较明显的液相烧结特征, 使 PZT 的致密化温度由 $1260^\circ C$ 降低到 $1100^\circ C$ 。掺杂 LiF 样品在烧结前期温度较低时比未掺杂 PZT 烧结速率大, 但在烧结后期反而阻碍了烧结, 在 $1250^\circ C$ 仍未致密化, 比未掺杂样品烧成所需时间长。相同烧结温度下, 掺杂 LiF 有一定的促进低温烧结效果, 比未掺杂 PZT 收缩更快, 但是比相同条件下掺杂 Li_2CO_3 样品慢。

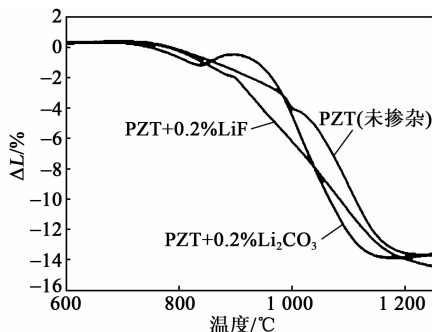


图3 掺杂 LiF 、 Li_2CO_3 样品的烧结收缩曲线图

图4为烧结温度及 x 、 y 不同时样品的烧结密度图。由图可知, 在 $1100^\circ C$ 的烧结条件下, 远未达到 PZT 的烧成温度, 烧结性很差, 密度 $< 7.5 g/cm^3$ 。当 $x=y=0.2$ 时, 因产生了低熔点液相, 促进了样品的烧结, 故两者致密度均得到了提高。 $x=y=0.2$ 时, 掺杂 Li_2CO_3 样品的密度均高于 LiF 样品的密度, 说明相同条件 Li_2CO_3 的低温烧结效果优于 LiF , 这与图3的结果一致。

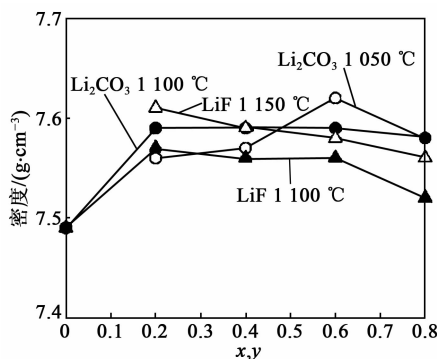
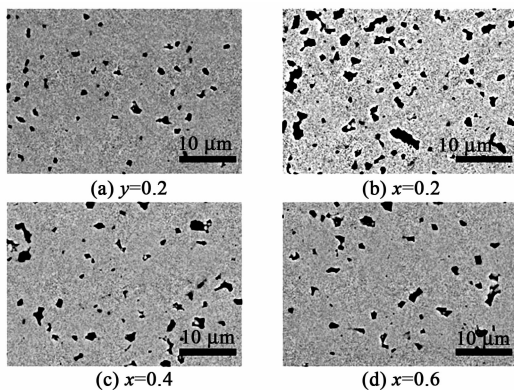


图4 烧结温度及 x 、 y 不同时样品的密度图

因为 Li_2CO_3 的熔点 ($723^\circ C$) 低于 LiF 的熔点 ($848^\circ C$), 在烧结更早期产生了液相, 液相促进烧结的作用时间大于相同条件下 LiF 的作用时间, 导致更致密的烧结。随着 x 、 y 的增大, 掺杂 Li_2CO_3 样品的密度提升后一直维持较高水平; 在 $x=0.2$ 时, 掺杂 LiF 样品密度达到峰值后逐渐减小。这说明少量烧结助剂的添加可以产生液相烧结, 促进颗粒重排和溶解沉淀, 从而改善烧结性并提高样品密度; 而当掺杂量过大时, 液相会在晶界处富集, 晶粒不均匀生长, 导致密度降低。

图5为 x 、 y 不同时, 样品经 $1100^\circ C$ 、2 h 烧结的 SEM 图。由图可知, 在 $x=y=0.2$ 时, 掺杂 LiF 样品的致密度小于掺杂 Li_2CO_3 样品的致密度, 这与图4的密度及图3烧结曲线结果一致。



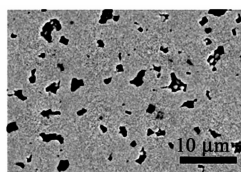
(e) $x=0.8$ 图5 x 、 y 不同时样品经1100℃、2h烧结的SEM图

图6为 x 、 y 不同时样品经不同温度烧结后的 d_{33} 。由图可知,随着 x 、 y 的增加,样品的 d_{33} 均先上升,在 $x=y=0.2$ 处 d_{33} 达到最大后下降,这与密度的变化趋势一致。掺杂少量Li₂CO₃产生适量液相,促进了烧结;同时Li⁺由于离子半径与B位离子半径相近,易进入晶格取代B位离子产生氧空位,使样品压电性能变硬,导致 d_{33} 随着 y 的增多急剧下降。掺杂LiF样品同样会产生液相,适量添加促进烧结,提升致密度。与Li₂CO₃不同,由于F⁻取代O²⁻的施主掺杂效应,抵消了部分Li⁺取代Zr⁴⁺、Ti⁴⁺的受主掺杂效应,所以对性能恶化程度小。

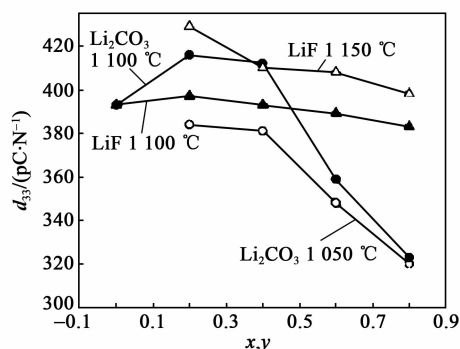
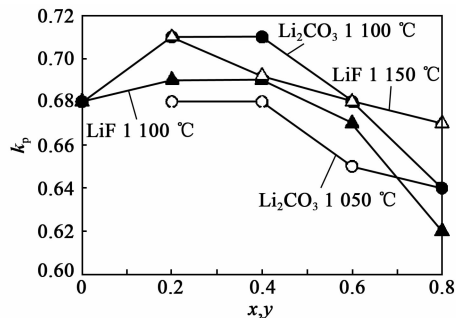
图6 烧结温度及 x 、 y 不同时样品的 d_{33}

图7为烧结温度及 x 、 y 不同时样品的 k_p 。由图可知,随着 x 、 y 的增加,PZT+ $x\%$ LiF及PZT+ $y\%$ Li₂CO₃样品的 k_p 均先增大后减小。在 $x=y=0.2$ 时,PZT+ $x\%$ LiF及PZT+ $y\%$ Li₂CO₃样品的 k_p 均达到最大; $x=y<0.2$ 时, k_p 开始随着 x 、 y 的增加而不断下降。

图7 烧结温度及 x 、 y 不同时样品的 k_p 图

掺杂Li₂CO₃、LiF样品的 d_{33} 和 k_p 均与样品密度有关,在1100℃下,与掺杂LiF烧结样品相比,掺杂Li₂CO₃烧结样品压电性能较优。Li₂CO₃烧结助剂可将PZT的烧结温度从1260℃降低到1100℃,且保持较好的性能;而相同掺杂量时LiF仅能将烧结温度降低到1150℃,降温效果略差。

图8为烧结温度及 x 、 y 不同时样品的 ϵ_r 图。由图可知,随着掺杂量的增加,掺杂LiF、Li₂CO₃样品的 ϵ_r 均在不断下降,而掺杂Li₂CO₃样品的 ϵ_r 下降较明显,可能是由于Li⁺取代B位的硬性掺杂效应降低了 ϵ_r ;而掺杂LiF样品的 ϵ_r 下降较平缓,可能是由于F⁻的软化效应与Li⁺的硬化效应相抵消。与掺杂Li₂CO₃样品相比,掺杂LiF对样品的 ϵ_r 影响较小。

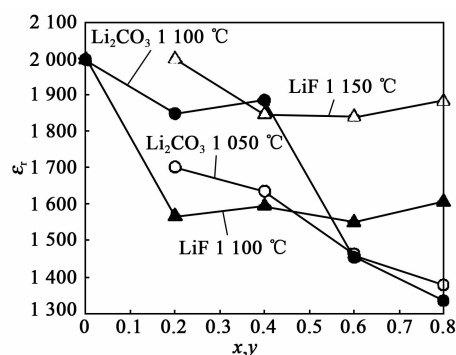
图8 烧结温度及 x 、 y 不同时样品的 ϵ_r 图

图9为烧结温度及 x 、 y 不同时样品的 $\tan \delta$ 。由图可知,随着 x 、 y 的增加,样品的 $\tan \delta$ 均先下降后上升。下降是由于适量助烧剂的掺杂使样品更致密,导致损耗下降。而掺杂量过多的烧结助剂会使材料的电学性能恶化,使样品的损耗上升。相同温度及掺杂量下,PZT+ $y\%$ Li₂CO₃样品的 $\tan \delta$ 小于PZT+ $x\%$ LiF样品的 $\tan \delta$,这是因为Li₂CO₃烧结助剂的低温烧结效果更好,相同条件下样品更致密,所以损耗更低。

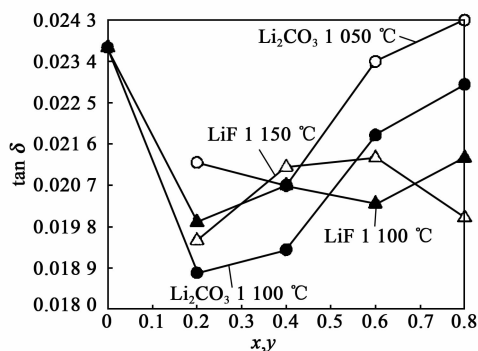
图9 烧结温度及 x 、 y 不同时样品的 $\tan \delta$ 图

表 1 为 x, y 不同时样品的介电性能。由表可知,随着 Li_2CO_3 或 LiF 掺杂量的增大, T_C 基本保持不变。相同条件下,在 T_C 处 LiF 掺杂样品的介电常数约为 Li_2CO_3 掺杂样品介电常数的 $1/2$ 。这可能与掺杂 LiF 样品的 c/a 更低及自发极化下降更严重有关。

表 1 x, y 不同时样品的介电性能

	烧结 温度/ $^{\circ}\text{C}$	$T_C/^{\circ}\text{C}$	$\epsilon_r(25^{\circ}\text{C})$	$\epsilon_{\max}$
PZT(未掺杂)	1 260	310	2 102	20 681
PZT+0.2%LiF	1 100	311	1 566	10 955
PZT+0.4%LiF	1 100	311	1 594	10 863
PZT+0.6%LiF	1 100	310	1 549	11 824
PZT+0.8%LiF	1 100	311	1 606	10 431
PZT+0.2% Li_2CO_3	1 100	312	1 848	22 530
PZT+0.4% Li_2CO_3	1 100	312	1 885	21 626
PZT+0.6% Li_2CO_3	1 100	311	1 453	23 108
PZT+0.8% Li_2CO_3	1 100	310	1 334	23 428

3 结束语

掺杂 LiF 、 Li_2CO_3 均能降低样品的烧结温度。 Li_2CO_3 可以将 PZT 的烧结温度由 $1\ 260^{\circ}\text{C}$ 降低到 $1\ 100^{\circ}\text{C}$, 且能保持较好的压电性能($d_{33}=416\text{ pC/N}$; $k_p=0.71$; $\epsilon_r=1\ 848$, $\tan\delta=0.018\ 8$), 而 $1\ 100^{\circ}\text{C}$ 条件下, 与掺杂 Li_2CO_3 样品相比, 掺杂 LiF 样品性能整体较低($d_{33}=388\text{ pC/N}$, $k_p=0.69$, $\epsilon_r=1\ 566$, $\tan\delta=0.019\ 9$)。

与掺杂 Li_2CO_3 样品相比, 掺杂 LiF 样品的低温烧结温度约高 50°C , 降低烧结温度效果略差, 但随着掺杂量的增加, 掺杂 LiF 样品的 d_{33} 和 ϵ_r 下降幅度较小, 即掺杂 LiF 对样品的综合性能影响较小。

参考文献:

- [1] NIE R, ZHANG Q, YUE Y, et al. Properties of low-temperature sintering PNN-PMW-PSN-PZT piezoelectric ceramics with $\text{Ba}(\text{Cu}_{1/2}\text{W}_{1/2})\text{O}_3$ sintering aids[J]. International Journal of Applied Ceramic Technology, 2016, 13(6): 1119-1124.
- [2] WANG C H. Effect of Bi_2O_3 addition and sintering time on the physical and electrical properties of lead-free $(\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5})\text{TiO}_3\text{-Ba}(\text{Zr}_{0.04}\text{Ti}_{0.96})\text{O}_3$ ceramics[J]. Journal of the American Ceramic Society Japan, 2009, 117(1365): 693-697.
- [3] TIWARI V, SRIVASTAVA G. The effect of Li_2CO_3 addition on the structural, dielectric and piezoelectric properties of PZT ceramics[J]. Ceramics International, 2015, 41(2): 2774-2778.
- [4] DONNELLY N J, SHROUT T R, RANDALL C A. The role of Li_2CO_3 and PbO in the low-temperature sintering of Sr, K, Nb(SKN)-doped PZT[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2010, 92(6): 1203-1207.
- [5] ZHANG Qian, YUE Yang, NIE Rui, et al. Achieving both high d_{33} and high T_C in low-temperature sintering $\text{Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-Pb}(\text{Mg}_{1/2}\text{W}_{1/2})\text{O}_3\text{-Pb}(\text{Zr}_{0.5}\text{Ti}_{0.5})\text{O}_3$ ceramics using Li_2CO_3 [J]. Materials Research Bulletin, 2017, 85: 96-103.
- [6] SIDDIQUI M, MOHAMED J J, AHMAD Z A. Piezoelectric and dielectric properties of $\text{Pb}_{0.93}\text{La}_{0.02}\text{Sr}_{0.05}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ceramics doped with Li_2CO_3 at low sintering temperature [J]. Ceramics International, 2017, 43(2): 2644-2649.
- [7] FAN G F, SHI M B, LU W Z, et al. Effects of Li_2CO_3 and Sm_2O_3 additives on low-temperature sintering and piezoelectric properties of PZN-PZT ceramics[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2014, 34(1): 23-28.
- [8] JIN B M, KIM I W, KIM J S, et al. Piezoelectric properties of $0.2[\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})]\text{-}0.8[\text{PbTiO}_3\text{-PbZrO}_3]$ ceramics sintered at a low temperature with the aid of Li_2O [J]. Journal of Electroceramics, 2005, 15(2): 119-122.
- [9] HOU Y D, CHANG L M, ZHU M K, et al. Effect of Li_2CO_3 addition on the dielectric and piezoelectric responses in the low-temperature sintered $0.5\text{PZN-}0.5\text{PZT}$ systems[J]. Journal of Applied Physics, 2007, 102(8): 704.
- [10] MAZUMDER R, SEN A. 'Ultra'-low-temperature sintering of PZT: A synergy of nano-powder synthesis and addition of a sintering aid[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2008, 28(14): 2731-2737.
- [11] LIANG R H, ZHANG W Z, GAO M, et al. Excellent electrostrictive properties of low temperature sintered PZT ceramics with high concentration LiBiO_2 sintering aid[J]. Ceramics International, 2013, 39(1): 563-569.
- [12] WANG X X, MURAKAMI K, SUGIYAMA O, et al. Piezoelectric properties, densification behavior and microstructural evolution of low temperature sintered PZT ceramics with sintering aids[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2001, 21(10/11): 1367-1370.
- [13] ZHANG S, XIA R, SHROUT T R. Low temperature sintering and properties of piezoelectric ceramics

- PSNT-Mn with LiBiO₂ addition[J]. *Materials ence & Engineering B*, 2006, 129(1/3): 131-134.
- [14] TSAI C C, CHU S Y, LU C H. Doping effects of CuO additives on the properties of low-temperature-sintered PMnN-PZT-based piezoelectric ceramics and their applications on surface acoustic wave devices[J]. *Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control IEEE Transactions on*, 2009, 56(3): 660-668.
- [15] CORKER D L, WHATMORE R W, RINGGAARD E, et al. Liquid-phase sintering of PZT ceramics[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2000, 20(12): 2039-2045.
- [16] SEO I T, LEE T G, KIM D H, et al. Multilayer piezoelectric haptic actuator with CuO-modified PZT-PZNN ceramics[J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 2016, 238: 71-79.
- [17] KIM B H, PARK J H, KIM B, et al. Dielectric and piezoelectric properties of low-temperature sintered lead zirconate titanate ceramics with 0.78PbO-0.22CuO flux addition[J]. *Metals and Materials International*, 2012, 18(6): 1067-1072.
- [18] AHN C W, SONG H C, NAHM S, et al. Effect of ZnO and CuO on the sintering temperature and piezoelectric properties of a hard piezoelectric ceramic[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2006, 89(3): 921-925.
- [19] JOSHI S, ACHARYA S. Influences of Liquid-phase sintering on structure, grain growth, and dielectric behavior of PbZr_{0.52}Ti_{0.48}O₃ ceramics[J]. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2016, 13(4): 753-762.
- [20] JIANG Shenglin, YI Jinqiao, SHEN Meng, et al. Effects of PbO-B₂O₃ glass doping on the sintering temperature and piezoelectric properties of 0.35Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O₃-0.65Pb(Zr_{0.41}Ti_{0.59})O₃ ceramics[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2015, 44(12): 4846-4851.
- [21] ZENG Z, WU Q, HAO M, et al. Impedance spectroscopy and piezoelectric property of LiF-doped PZN-PZT low-temperature sintering piezoelectric ceramics[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2018, 29(10): 8279-8286.
-
- (上接第813页)
- [8] MUKAE K, TSUDA K, NAGASAWA I. Capacitance-vs-voltage characteristics of ZnO varistors[J]. *J Appl Phys*, 1979, 50: 4475-4476.
- [9] WURST J C, NELSON J A. Lineal intercept technique for measuring grain size in two-phase poly crystalline ceramic[J]. *J Am Ceram Soc*, 1972, 55(2): 109-111.
- [10] FAYAT J, CASTRO M S. Defect profile and microstructural development in SnO₂-based varistors[J]. *J Eur Ceram Soc*, 2003, 23(10): 1585-1591.
- [11] BUENO P R, ORLANDI M O, SIMÕES L G P, et al. Nonohmic behavior of SnO₂-MnO polycrystalline ceramics I. correlations between microstructural morphology and nonohmic features[J]. *J Appl Phys*, 2004, 96(5): 2693-2700.
- [12] OSAMA, DESOUKY A, RADY K E. Synthesis, structure and dielectric properties of nanocrystalline SnO₂-CoO-Nb₂O₅ varistor doped with Cr₂O₃[J]. *J Mater Sci: Mater Electron*, 2017, 28: 4197-4203.
- [13] 陈洪存, 王矜奉, 王文新, 等. (Cd, Co, Nb)掺杂的 SnO₂压敏材料的电学性质[J]. *压电与声光*, 2004, 26(1): 42-44.
- CHEN Hongcun, WANG Jinfeng, WANG Wenxin, et al. Electrical properties of (Cd, Co, Nb)-doped SnO₂ varistor[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2004, 26(1): 42-44.
- [14] MARGIONTE M A L, SIMÕES A Z, RICCARDI C S, et al. Nonlinear characteristics of Cr₂O₃, WO₃, ZnO and CoO doped SnO₂ varistors[J]. *Mater Lett*, 2006, 60(1): 142-146.
- [15] SAKAGUCHI I, SAKAMOTO N, HASHIGUCHI M, et al. Characterization of oxygen defect and zinc segregation in the dense tin dioxide ceramics added with zinc oxide[J]. *J Ceram Soc Japan*, 2013, 121(1419): 956-959.
- [16] FOSCHINI C R, PERAZOLLI L, VARELA J A. Sintering of tin oxide using zinc oxide as a densification aid[J]. *J Mater Sci*, 2004, 39(18): 5825-5830.
- [17] SAADEDDIN I, HILAL H S, PECQUENARD B, et al. Simultaneous doping of Zn and Sb in SnO₂ ceramics: enhancement of electrical conductivity[J]. *Solid State Sci*, 2006, 8(1): 7-13.

Nb⁵⁺ 掺杂对 (Ca_{0.97}Ba_{0.03})Cu₃Ti₄O₁₂ 陶瓷结构与电性能的影响

胡建东, 钟鑫, 闵亮, 刘勇, 顾钧杰, 胡涛麟, 常想乐, 张晨

(江苏科技大学 材料科学与工程学院, 江苏 镇江 212003)

摘要: 该文利用固相反应法制备了 (Ca_{0.97}Ba_{0.03})Cu₃Ti_{4-x}Nb_xO₁₂ ($x=0, 0.01, 0.03, 0.05, 0.07, 0.10, 0.15, 0.20$, 摩尔分数) 陶瓷。借助 X 线衍射仪及扫描电子显微镜研究了 Nb⁵⁺ 的摩尔分数对 (Ca_{0.97}Ba_{0.03})Cu₃Ti₄O₁₂ 陶瓷的相结构及表面微观形貌的影响, 借助高低温介电测试系统和阻抗测试仪获得了 (Ca_{0.97}Ba_{0.03})Cu₃Ti_{4-x}Nb_xO₁₂ 陶瓷电性能变化规律。结果表明, 各组分 (Ca_{0.97}Ba_{0.03})Cu₃Ti_{4-x}Nb_xO₁₂ 陶瓷均为单相立方钙钛矿结构; Nb⁵⁺ 摩尔分数的增加可抑制 (Ca_{0.97}Ba_{0.03})Cu₃Ti_{4-x}Nb_xO₁₂ 陶瓷晶粒的生长并消除其晶粒异常长大; 适量掺杂 Nb⁵⁺ 能够有效提高 (Ca_{0.97}Ba_{0.03})Cu₃Ti_{4-x}Nb_xO₁₂ 陶瓷的晶界电阻, 从而降低其介电损耗, 且可提高 (Ca_{0.97}Ba_{0.03})Cu₃Ti_{4-x}Nb_xO₁₂ 陶瓷相对介电常数的温度稳定性。

关键词: 固相法; 钛酸铜钙; 陶瓷; 微观形貌; 电性能

中图分类号: TN384; TM28 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11977/j.issn.1004-2474.2020.06.020

Influences of Nb⁵⁺ Doping on Structure and Electric Properties of (Ca_{0.97}Ba_{0.03})Cu₃Ti₄O₁₂ Ceramics

HU Jiandong, ZHONG Xin, MIN Liang, LIU Yong, GU Junjie,

HU Taolin, CHANG Xiangle, ZHANG Chen

(School of Material Science and Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

Abstract: The (Ca_{0.97}Ba_{0.03})Cu₃Ti_{4-x}Nb_xO₁₂ ($x=0, 0.01, 0.03, 0.05, 0.07, 0.10, 0.15, 0.20$) ceramics have been prepared by the solid state reaction method. The influences of the mole fraction of Nb⁵⁺ on the phase structure and surface micromorphology of (Ca_{0.97}Ba_{0.03})Cu₃Ti₄O₁₂ ceramics have been investigated using the X-ray diffractometer and scanning electron microscope. The variations of the electric properties of the (Ca_{0.97}Ba_{0.03})Cu₃Ti_{4-x}Nb_xO₁₂ ceramics are obtained by the high and low temperature dielectric performance test system and impedance tester. The results show that the (Ca_{0.97}Ba_{0.03})Cu₃Ti_{4-x}Nb_xO₁₂ ceramics of various components are single-phase cubic perovskite structure. With the increase of the mole fraction of Nb⁵⁺, the grain growth of (Ca_{0.97}Ba_{0.03})Cu₃Ti_{4-x}Nb_xO₁₂ ceramics can be inhibited effectively and the abnormal grain growth is eliminated. The grain boundary resistance of (Ca_{0.97}Ba_{0.03})Cu₃Ti_{4-x}Nb_xO₁₂ ceramics can be effectively increased by appropriately doping Nb⁵⁺, thus its dielectric loss can be reduced, and the temperature stability of the relative dielectric constant of (Ca_{0.97}Ba_{0.03})Cu₃Ti_{4-x}Nb_xO₁₂ ceramics can also be improved.

Key words: solid state reaction method; copper calcium titanate; ceramics; surface micromorphology; electric property

0 引言

钛酸铜钙 (CaCu₃Ti₄O₁₂, CCTO) 属于体心立方类钙钛矿型化合物^[1], 其单胞由 8 个 ABO₃ 型小立方单元组成, 其中 Ca 和 Cu 原子占据 A 位, Ti 原子占据 B 位。该材料具有巨介电常数特性, 介电常

数可达 10⁵ 量级, 且在很宽的温区范围 (-170 ~ 120 °C) 和频率范围 (<10⁶ Hz) 内因其无结构相变而使介电常数几乎保持不变^[2-4]。与 BaTiO₃ 基铁电陶瓷相比, CCTO 陶瓷除具有巨介电常数及介电常数的温度稳定等特点外, 还具备成瓷温度更低

收稿日期: 2020-07-20

作者简介: 胡建东 (1999-), 男, 贵州毕节人, 主要从事钙钛矿型电子陶瓷材料的研究。E-mail: 1760796310@qq.com。通信作者: 张晨 (1981-), 女, 河北邯郸人, 副教授, 主要从事功能陶瓷材料的研究。E-mail: zhch1234581@163.com。

(1 000~1 100 ℃)的突出优势。因此,CCTO 陶瓷成为新一代层积型陶瓷电容器介质应用于微电子器件。目前,介电损耗(tan δ)过高是限制 CCTO 陶瓷作为Ⅱ类介质瓷大规模量产的主要问题。

由 D. C. Sinclair 等提出的内部阻挡层电容器(IBLC)模型认为:CCTO 陶瓷由具有绝缘特性的晶界和半导体晶粒组成^[5-6]。CCTO 陶瓷超高的介电常数由其内部存在的半导化晶粒和绝缘性晶界共同作用而产生,其中晶界的绝缘性与陶瓷的介电损耗有直接关系。

为解决 CCTO 陶瓷的 tan δ 过大而使电子器件发热严重,国内外研究人员主要针对 CCTO 陶瓷进行了 A 位或(和)B 位掺杂改性。A 位掺杂离子一般为+2 或+3 价阳离子,这类掺杂离子取代 A 位上的 Ca²⁺ 或 Cu²⁺^[7-10]。如 Mg²⁺ 改性的 CaCu_{2.9}Mg_{0.1}Ti₄O₁₂ 陶瓷的介电常数达 3.35×10^4 ,而其 1 kHz 下室温介电损耗(tan δ_{RT})仅约 0.06^[11]。Mg²⁺ 替代 Ca²⁺ 后,Ca_{1-x}Mg_xCu₃Ti₄O₁₂ 陶瓷试样的 tan δ 明显降低^[12]。又如 La³⁺ 取代可将 CCTO 基陶瓷的 tan δ 降至 0.03 以下,然而这也同时牺牲了其巨介特性^[13]。B 位掺杂离子一般为+4 价或+5 价的阳离子,其取代 B 位上的 Ti⁴⁺。如 Zr⁴⁺ 取代 CCTO 陶瓷 B 位的 Ti⁴⁺ 后,通过提高晶界电阻可降低体系介电损耗^[14]。也有研究人员利用 A 位和 B 位共掺杂获得了综合介电性能优良的 CCTO 基陶瓷,如 Nd³⁺ 和 Zr⁴⁺ 共掺的 Ca_{0.95}Nd_{0.05}Cu₃Ti_{3.95}Zr_{0.05}O₁₂ 陶瓷在 1 kHz 下,其介电常数达 19 426,tan δ 可降至 0.067^[15]。

由于 Ba²⁺ 能够有效改善 CCTO 基陶瓷的粒径分布并提高其耐电强度^[3],结合 Nb⁵⁺ 在 Ca-Cu₃Ti_{4-x}Nb_xO_{12+x/2} 陶瓷中可减小晶粒尺寸并提高介电常数的优点^[2],本文进一步采用传统固相法以定量 Ba²⁺ 取代 Ca²⁺ 后的 (Ca_{0.97}Ba_{0.03})Cu₃Ti₄O₁₂ 陶瓷为研究对象,探讨 Nb⁵⁺ 掺杂对 (Ca_{0.97}Ba_{0.03})Cu₃Ti₄O₁₂ 陶瓷物相结构、微观形貌、介电性能及阻抗的影响规律,以期找到降低 CCTO 基陶瓷的 tan δ 的有效途径并使其应用于温度稳定型陶瓷电容器介质领域。

1 实验

1.1 陶瓷试样的制备

采用固相法制备 (Ca_{0.97}Ba_{0.03})Cu₃Ti_{4-x}Nb_xO₁₂

($x=0,0.01,0.03,0.05,0.07,0.10,0.15,0.20$)陶瓷,按化学计量比称量高纯 CaCO₃(>99.0%)、BaCO₃(>99.0%)、CuO(>99.0%)、TiO₂(>97.0%)和 Nb₂O₅(>99.0%)等起始原料,以去离子水为研磨介质将其湿法球磨 24 h 后烘干,所得粉体在 900 ℃下煅烧保温 2 h;煅烧粉体再次湿法球磨 24 h 后烘干,加入质量分数为 5% 的聚乙烯醇(PVA)水溶液造粒过筛,在 5 MPa 下压成直径 Ø10 mm,厚 2 mm 的坯体;在 200 ℃和 600 ℃分别排胶 10 min 后,于 1 060 ℃下烧结保温 2 h 成瓷。陶瓷试样上、下表面均匀涂覆银浆,在 810 ℃下烧渗 10 min 后取出用于电性能测试。

1.2 测试方法

利用日本岛津 XRD-6000 型 X 线衍射仪(XRD,Cu 靶、Kα 谱线)对陶瓷试样进行相结构表征,测试角度为 20°~80°,扫描速率为 4 (°)/min。采用日本电子 SM-6480 型扫描电子显微镜(SEM,含能谱仪)获得陶瓷试样表面微观形貌信息。

利用安捷伦 E4980A 高精度 LCR 测试仪测量并计算获得试样的相对介电常数(ε_r)及 tan δ,在测试频率为 50 Hz~1 MHz 时获得室温下样品的阻抗。由 TZDM-200-300C 高低温介电测试系统在 1 kHz 下、-170~150 ℃下测得各组陶瓷试样的介电温谱。

2 结果与讨论

2.1 (Ca_{0.97}Ba_{0.03})Cu₃Ti_{4-x}Nb_xO₁₂ 陶瓷的物相分析

图 1 为 (Ca_{0.97}Ba_{0.03})Cu₃Ti_{4-x}Nb_xO₁₂ ($x=0,0.01,0.03,0.05,0.07,0.10,0.15,0.20$)陶瓷的 XRD 图谱。由图可知,所有掺杂 Nb⁵⁺ 的 (Ca_{0.97}Ba_{0.03})Cu₃Ti₄O₁₂ 陶瓷均为立方钙钛矿结构(JCPDF No. 75-1149),无第二相产生。因此,Nb⁵⁺ 进入 (Ca_{0.97}Ba_{0.03})Cu₃Ti₄O₁₂ 钙钛矿结构晶格点阵,成功取代了原点阵位置上的宿主离子。进一步通过 Jade 软件针对陶瓷样品的衍射峰位进行计算,得到 (Ca_{0.97}Ba_{0.03})Cu₃Ti_{4-x}Nb_xO₁₂ 陶瓷的晶格常数 a 及致密度(即阿基米德排水法实测密度与理论密度的比值),如表 1 所示。由表可知,掺杂 Nb⁵⁺ 使 (Ca_{0.97}Ba_{0.03})Cu₃Ti₄O₁₂ 陶瓷的 a 增大,这主要是因为 6 配位的 Nb⁵⁺ 半径为 0.078 nm,其大于 6 配位的 Ti⁴⁺ 半径(0.074 5 nm),当 Nb⁵⁺ 占据晶格 B 位后引起晶胞体积膨胀, a 增大。由表可发现,随着 Nb⁵⁺ 摩尔

分数的增大,陶瓷致密度逐渐降低。

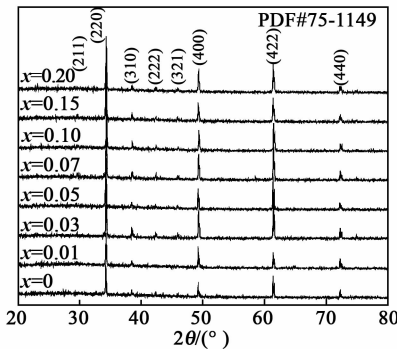


图 1 $(\text{Ca}_{0.97}\text{Ba}_{0.03})\text{Cu}_3\text{Ti}_{4-x}\text{Nb}_x\text{O}_{12}$ 陶瓷的 XRD 图谱

表 1 $(\text{Ca}_{0.97}\text{Ba}_{0.03})\text{Cu}_3\text{Ti}_{4-x}\text{Nb}_x\text{O}_{12}$ 陶瓷的晶格常数及致密度

x	0	0.01	0.03
a/nm	0.736 8	0.737 0	0.737 8
致密度/%	94.31	94.15	93.43
x	0.05	0.07	0.10
a/nm	0.737 9	0.738 4	0.738 3
致密度/%	93.19	91.67	91.78
x	0.15	0.20	
a/nm	0.738 9	0.739 3	
致密度/%	91.07	90.36	

2.2 $(\text{Ca}_{0.97}\text{Ba}_{0.03})\text{Cu}_3\text{Ti}_{4-x}\text{Nb}_x\text{O}_{12}$ 陶瓷的微观形貌

图 2 为 $(\text{Ca}_{0.97}\text{Ba}_{0.03})\text{Cu}_3\text{Ti}_{4-x}\text{Nb}_x\text{O}_{12}$ 陶瓷在 3 000 倍下的表面微观形貌。由图可知, Nb^{5+} 掺杂后陶瓷的平均晶粒尺寸及粒径分布情况均发生了变化, 主要表现为: 随着 Nb^{5+} 摩尔分数的增大, $(\text{Ca}_{0.97}\text{Ba}_{0.03})\text{Cu}_3\text{Ti}_{4-x}\text{Nb}_x\text{O}_{12}$ 陶瓷的平均晶粒尺寸明显减小; 未掺杂 Nb^{5+} ($x=0$, 见图 2(a)) 及 $x=0.01$, 0.03 (见图 2(b)、(c)) 的 $(\text{Ca}_{0.97}\text{Ba}_{0.03})\text{Cu}_3\text{Ti}_{4-x}\text{Nb}_x\text{O}_{12}$ 陶瓷出现明显的晶粒异常长大, 当 $x=0.05$ (见图 2(d)) 时, 陶瓷试样的晶粒异常长大得到有效缓解; 进一步增大 Nb^{5+} 摩尔分数可得到粒径分布均匀的细晶 $(\text{Ca}_{0.97}\text{Ba}_{0.03})\text{Cu}_3\text{Ti}_{4-x}\text{Nb}_x\text{O}_{12}$ 陶瓷。由此表明, 在烧结过程中, Nb^{5+} 摩尔分数的增加能抑制该 CCTO 基陶瓷晶粒的生长。这主要是由离子半径的差异引起离子扩散速度不同导致的。当离子半径较大的 Nb^{5+} 更多地取代离子半径较小的 Ti^{4+} 时, 将引起离子的扩散减缓, 晶粒生长速度降低, 从而晶粒得到细化。另一方面, CCTO 基陶瓷粗大晶粒的形成是液相烧结的结果, 而烧结过程中液相的产生又与各元素形成的共晶相或(和)富 Cu 晶间相密切

相关^[16]。 Nb^{5+} 掺杂制约了富 Cu 晶间相的形成, 从而减缓了晶粒生长速率。在以往 La^{3+} 掺杂及 Ba^{2+} 改性 CCTO 陶瓷的研究中也得到了类似 CCTO 基陶瓷平均晶粒尺寸随改性剂掺杂量增大而减小的现象^[17-18]。进一步对 Nb^{5+} 低掺杂量下的 $(\text{Ca}_{0.97}\text{Ba}_{0.03})\text{Cu}_3\text{Ti}_{4-x}\text{Nb}_x\text{O}_{12}$ 陶瓷中粗大晶粒以及细小晶粒进行选区能谱分析, 发现其细小的晶间相为 $r(\text{Cu}):r(\text{Ti})\approx 5:1$ (摩尔比) 的富 Cu 相; 而粗大晶粒是 $r(\text{Cu}):r(\text{Ti})\approx 1:2$ 的贫 Cu 相。此外, Nb^{5+} 高掺杂量 ($x=0.20$) 的 $(\text{Ca}_{0.97}\text{Ba}_{0.03})\text{Cu}_3\text{Ti}_{4-x}\text{Nb}_x\text{O}_{12}$ 陶瓷气孔率略有增大 (见图 2(h)), 这与第 2.1 节中叙述的随着 Nb^{5+} 摩尔分数的增大, 陶瓷致密度逐渐减小一致。

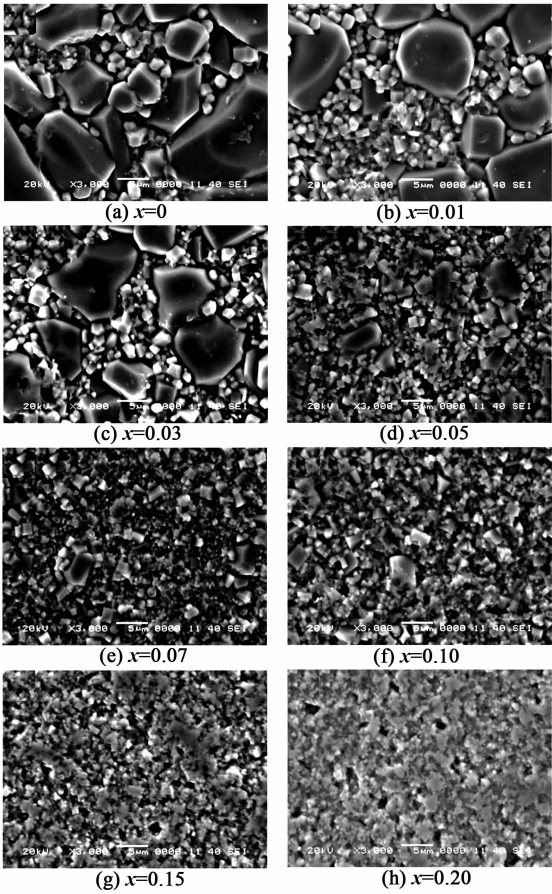


图 2 $(\text{Ca}_{0.97}\text{Ba}_{0.03})\text{Cu}_3\text{Ti}_{4-x}\text{Nb}_x\text{O}_{12}$ 陶瓷的表面微观形貌图

2.3 $(\text{Ca}_{0.97}\text{Ba}_{0.03})\text{Cu}_3\text{Ti}_{4-x}\text{Nb}_x\text{O}_{12}$ 陶瓷的介电性能

表 2 为 $(\text{Ca}_{0.97}\text{Ba}_{0.03})\text{Cu}_3\text{Ti}_{4-x}\text{Nb}_x\text{O}_{12}$ 陶瓷在 1 kHz、室温 (25 ℃) 下的相对介电常数 $\epsilon_{r\text{RT}}$ 及介电损耗 $\tan \delta_{\text{RT}}$ 。当 $x=0.01$ 及 0.03 时, $(\text{Ca}_{0.97}\text{Ba}_{0.03})\text{Cu}_3\text{Ti}_{4-x}\text{Nb}_x\text{O}_{12}$ 陶瓷具有较高的 $\epsilon_{r\text{RT}}(>6\ 000)$, 并能有效降低 $\tan \delta_{\text{RT}}$ 。

表 2 (Ca_{0.97}Ba_{0.03})Cu₃Ti_{4-x}Nb_xO₁₂ 陶瓷的
室温介电性能参数

x	$\epsilon_{\text{r RT}}$	$\tan \delta_{\text{RT}}$
0	13 331	0.252 7
0.01	7 809	0.096 1
0.03	6 492	0.149 1
0.05	12 789	0.262 3
0.07	5 440	0.324 0
0.10	19 196	0.951 6
0.15	9 433	0.475 4
0.20	12 959	0.324 8

图 3 为 (Ca_{0.97}Ba_{0.03})Cu₃Ti_{4-x}Nb_xO₁₂ 陶瓷在 1 kHz 下, ϵ_{r} 、 $\tan \delta$ 随温度 T 的变化曲线。由图 3(a)可知,在负温区间 ($T=-170\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 0$),各组分 (Ca_{0.97}Ba_{0.03})Cu₃Ti_{4-x}Nb_xO₁₂陶瓷的 ϵ_{r} 随 T 变化基本稳定。在正温区间 ($T=0\sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$),未掺杂 Nb⁵⁺ ($x=0$)的 CCTO 基陶瓷及 $x=0.05, 0.07, 0.10, 0.15, 0.20$ 的 (Ca_{0.97}Ba_{0.03})Cu₃Ti_{4-x}Nb_xO₁₂ 陶瓷的 ϵ_{r} 随 T 升高明显增大;当 $x=0.01, 0.03$ 时, (Ca_{0.97}Ba_{0.03})Cu₃Ti_{4-x}Nb_xO₁₂ 陶瓷的 ϵ_{r} 随 T 升高仅略有增大。即当 $x=0.01, 0.03$ 时可提高 (Ca_{0.97}Ba_{0.03})Cu₃Ti_{4-x}Nb_xO₁₂ 陶瓷相对介电常数的温度稳定性。

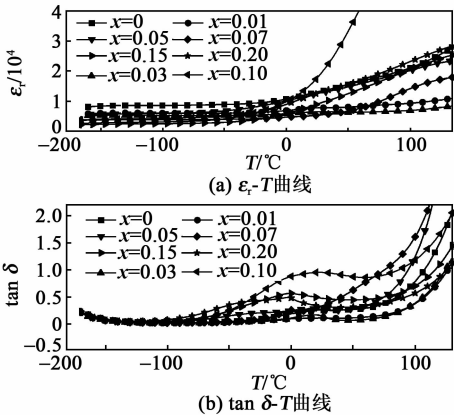


图 3 (Ca_{0.97}Ba_{0.03})Cu₃Ti_{4-x}Nb_xO₁₂ 陶瓷的介电温谱

表 3 为在 1 kHz、 $-55\sim 125\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时 (Ca_{0.97}Ba_{0.03})Cu₃Ti_{4-x}Nb_xO₁₂ 陶瓷的相对介电常数温度变化率 ($\Delta\epsilon_{\text{r}}/\epsilon_{\text{r RT}}$), 即

$$\Delta\epsilon_{\text{r}}/\epsilon_{\text{r RT}} = \frac{\epsilon_{\text{r}} - \epsilon_{\text{r RT}}}{\epsilon_{\text{r RT}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: ϵ_{r} 为任意温度下的相对介电常数; $\Delta\epsilon_{\text{r}}$ 为相对介电常数的变化量。由表 3 可知, 当 $x=0.03$ 时可降低 (Ca_{0.97}Ba_{0.03})Cu₃Ti_{4-x}Nb_xO₁₂ 陶瓷在 $-55\sim 125\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温区的 $\Delta\epsilon_{\text{r}}/\epsilon_{\text{r RT}}$, 其仅为 $-19\%\sim +24\%$, 与电子工业协会的层积型陶瓷电容器 X7R 标准 (即 $\Delta\epsilon_{\text{r}}/\epsilon_{\text{r RT}} \leq \pm 15\%$) 接近。

表 3 (Ca_{0.97}Ba_{0.03})Cu₃Ti_{4-x}Nb_xO₁₂ 陶瓷在
 $-55\sim 125\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温区的 $\Delta\epsilon_{\text{r}}/\epsilon_{\text{r RT}}$

x	0	0.01	0.03
$(\Delta\epsilon_{\text{r}}/\epsilon_{\text{r RT}})/\%$	$-33\sim +97$	$-23\sim +36$	$-19\sim +24$
x	0.05	0.07	0.10
$(\Delta\epsilon_{\text{r}}/\epsilon_{\text{r RT}})/\%$	$-47\sim +80$	$-27\sim +222$	$-74\sim +419$
x	0.15	0.20	
$(\Delta\epsilon_{\text{r}}/\epsilon_{\text{r RT}})/\%$	$-69\sim +161$	$-68\sim +112$	

由图 3(b)可知,在低温区各组分 (Ca_{0.97}Ba_{0.03})Cu₃Ti_{4-x}Nb_xO₁₂ 陶瓷的 $\tan \delta$ 随 T 升高而基本恒定不变,在高温区各组分陶瓷的 $\tan \delta$ 随 T 升高而迅速增大。当 $x=0.01$ 和 0.03 时, (Ca_{0.97}Ba_{0.03})Cu₃Ti_{4-x}Nb_xO₁₂ 陶瓷试样在整个测试温区内都具有低于其他组分的 $\tan \delta$ 。

2.4 (Ca_{0.97}Ba_{0.03})Cu₃Ti_{4-x}Nb_xO₁₂ 陶瓷的阻抗

样品的复阻抗 Z^* 为

$$Z^* = Z' - iZ'' \quad (2)$$

式中: Z' 为阻抗的实部; Z'' 为阻抗的虚部。图 4 为 (Ca_{0.97}Ba_{0.03})Cu₃Ti_{4-x}Nb_xO₁₂ 陶瓷在 20 Hz $\sim$ 1 MHz 时的室温阻抗谱。由 IBL 模型可知, 图 4 外推后在低频下与 Z' 轴交点值为晶界电阻 (R_{gb}), 而在高频下与 Z' 轴交点值为晶粒电阻 (R_{g})。由图 4 曲线外推得到 $x=0.03$ 的 (Ca_{0.97}Ba_{0.03})Cu₃Ti_{4-x}Nb_xO₁₂ 陶瓷样品在低频下与 Z' 轴交点值最大, $x=0.01$ 的陶瓷试样在低频下与 Z' 轴交点值次之, 均大于其他 Nb⁵⁺ 掺杂量的 CCTO 基陶瓷样品。由此表明, $x=0.03$ 的 (Ca_{0.97}Ba_{0.03})Cu₃Ti_{4-x}Nb_xO₁₂ 陶瓷样品的 R_{gb} 最大, $x=0.01$ 的陶瓷试样次之。这也很好地解释了前述当 $x=0.01, 0.03$ 时, (Ca_{0.97}Ba_{0.03})Cu₃Ti_{4-x}Nb_xO₁₂ 陶瓷的 $\tan \delta$ 有效降低的原因, 即晶界的绝缘性与 CCTO 基陶瓷的 $\tan \delta$ 有直接关系, 降低晶界的电导率即提高晶界的电阻率可有效降低 $\tan \delta$ 。

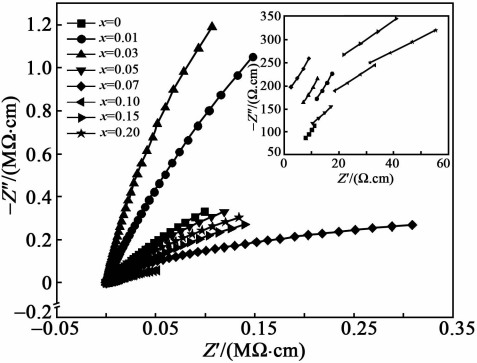


图 4 (Ca_{0.97}Ba_{0.03})Cu₃Ti_{4-x}Nb_xO₁₂ 陶瓷的室温阻抗谱

3 结论

本实验采用固相反应法制备了 Nb^{5+} 改性的 $(\text{Ca}_{0.97}\text{Ba}_{0.03})\text{Cu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ 陶瓷, 研究不同 Nb^{5+} 掺杂量下陶瓷相结构、微观形貌、介电性能及阻抗的变化, 得出如下结论:

1) 各组分 $(\text{Ca}_{0.97}\text{Ba}_{0.03})\text{Cu}_3\text{Ti}_{4-x}\text{Nb}_x\text{O}_{12}$ ($x = 0, 0.01, 0.03, 0.05, 0.07, 0.10, 0.15, 0.20$) 陶瓷均为立方钙钛矿结构单相多晶体, 且随着 Nb^{5+} 掺杂量的增加, 其晶格常数增大。

2) Nb^{5+} 掺杂量的增加能够有效抑制 $(\text{Ca}_{0.97}\text{Ba}_{0.03})\text{Cu}_3\text{Ti}_{4-x}\text{Nb}_x\text{O}_{12}$ 陶瓷晶粒的生长, 并消除其晶粒异常长大; Nb^{5+} 摩尔分数高于 0.05 时易获得粒径分布均匀的细晶 $(\text{Ca}_{0.97}\text{Ba}_{0.03})\text{Cu}_3\text{Ti}_{4-x}\text{Nb}_x\text{O}_{12}$ 陶瓷。

3) 适量掺杂 Nb^{5+} 可有效增大 $(\text{Ca}_{0.97}\text{Ba}_{0.03})\text{Cu}_3\text{Ti}_{4-x}\text{Nb}_x\text{O}_{12}$ 陶瓷的晶界电阻, 从而降低其介电损耗, 且可提高 $(\text{Ca}_{0.97}\text{Ba}_{0.03})\text{Cu}_3\text{Ti}_{4-x}\text{Nb}_x\text{O}_{12}$ 陶瓷相对介电常数的温度稳定性。

4) Nb^{5+} 摩尔分数为 0.03 的 $(\text{Ca}_{0.97}\text{Ba}_{0.03})\text{Cu}_3\text{Ti}_{3.97}\text{Nb}_{0.03}\text{O}_{12}$ 陶瓷具有优良的综合介电性能: 室温相对介电常数高于 6 400, 室温介电损耗低于 0.15, $-55 \sim 125\text{ }^\circ\text{C}$ 时的相对介电常数温度变化率为 $-19\% \sim +24\%$, 为在 CCTO 基陶瓷中寻求 X7R 型电容器介质材料提供了指导。

参考文献:

- [1] 陈克丕, 李翠伟. 钛酸铜钙/钛酸钙复合陶瓷的制备和介电性能 [J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 38(增刊 2): 387-390.
- [2] HONG S H, KIM D Y, PARK H M, et al. Electric and dielectric properties of Nb-doped $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ceramics [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2007, 90(7): 2118-2121.
- [3] WU S, LIU P, LAI Y, et al. Effect of Ba^{2+} doping on microstructure and electric properties of calcium copper titanate ($\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$) ceramics [J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2016, 27(10): 10336-10341.
- [4] 刘鹏, 贺颖, 李俊, 等. 添加 Nb 对 $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ 陶瓷介电性能的影响 [J]. 物理学报, 2007, 56(9): 5489-5493.
- [5] ADAMS T B, SINCLAIR D C, WEST A R, et al. Giant barrier layer capacitance effects in $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ceramics [J]. Advanced Materials, 2002, 14(18): 1321-1323.
- [6] SINCLAIR D C, ADAMS T B, MORRISON F D, et al. $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$: One-step internal barrier layer capacitor [J]. Appl Phys Lett, 2002, 80(12): 2153-2155.
- [7] SHRI P B, VARMA K B R. Microstructural and dielectric properties of donor doped (La^{3+}) $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ceramics [J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2006, 17(11): 899-907.
- [8] HE K, LUO Y, YU R, et al. Influence of Yb_2O_3 on electrical and microstructural characteristics of $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ceramics [J]. Materials Research Bulletin, 2015, 69: 98-103.
- [9] LI T, CHEN J, LIU D, et al. Effect of NiO-doping on the microstructure and the dielectric properties of $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ceramics [J]. Ceramics International, 2014, 40(7): 9061-9067.
- [10] BOONLAKHORN J, KIDKHUNTHOD P, PUTASAEENG B, et al. Giant dielectric behavior and electrical properties of $\text{Ca}_{1-3x/2}\text{Lu}_x\text{Cu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ceramics [J]. Applied Physics a Materials Science & Processing, 2015, 120(1): 89-95.
- [11] NAUTIYAL A, AUTRET C, HONSTETTRE C, et al. Local analysis of the grain and grain boundary contributions to the bulk dielectric properties of $\text{Ca}(\text{Cu}_{3-y}\text{Mg}_y)\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ceramics: Importance of the potential barrier at the grain boundary [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2016, 36(6): 1391-1398.
- [12] LI W, QIU S Y, CHEN N, et al. Enhanced dielectric response in Mg-doped $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ceramics [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2010, 26(8): 682-686.
- [13] FENG L, TANG X, YAN Y, et al. Decrease of dielectric loss in $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ceramics by La doping [J]. Physica Status Solidi (a)-Applications and Materials Science, 2006, 203(4): R22-R24.
- [14] RANI S, AHLAWAT N, SANGWAN K M, et al. Structural investigation and giant dielectric response of $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ceramic by Nd/Zr co-doping for energy storage applications [J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2018, 29(13): 10825-10833.
- [15] RANI S, AHLAWAT N, KUNDU R S, et al. Structural and dielectric properties of $\text{Ca}_{0.95}\text{Nd}_{0.05}\text{Cu}_3\text{Ti}_{3.95}\text{Zr}_{0.05}\text{O}_{12}$ ceramic [J]. Ferroelectrics, 2017, 516: 156-166.
- [16] BOONLAKHORN J, CHANLEK N, SREPUSHARAWOOT P, et al. Improved dielectric properties of $\text{CaCu}_{3-x}\text{Sn}_x\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ceramics with high permittivity and reduced loss tangent [J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2020, 31: 15599-15607.
- [17] 李旺, 罗哲, 唐鹿, 等. La^{3+} 掺杂 $\text{Ca}_{1-x}\text{La}_x\text{Cu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ 陶瓷的制备及性能研究 [J]. 人工晶体学报, 2017, 46(9): 1735-1739.
- [18] 钟鑫, 吴洋, 唐柱明, 等. Ba^{2+} 掺杂对 $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ 陶瓷结构与电性能的影响 [J]. 压电与声光, 2020, 42(4): 492-496.
- ZHONG Xin, WU Yang, TANG Zhuming, et al. Effect of Ba^{2+} doping on structure and electric properties of $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ceramics [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2020, 42(4): 492-496.

螺旋电极压电扭转驱动器的设计与有限元分析

郭全圆¹, 刘永刚^{1,2}, 曾奥柯¹, 闫鹏飞¹

(1. 河南科技大学 机电工程学院, 河南 洛阳 471003; 2. 河南科技大学 机械装备先进制造河南省协同创新中心, 河南 洛阳 471003)

摘 要: 该文设计了一种新型叉指型电极 (IDE) 结构形式的螺旋电极压电扭转驱动器, 推导并建立了螺旋电极平面有效电极区域内点的应变理论方程。利用 ABAQUS 对该理论方程进行验证, 并着重研究了电压、径向尺寸、圆盘厚度对该压电驱动器应变的影响。结果表明, 螺旋电极压电扭转驱动器能够产生较大的切向应变和径向应变输出; 增大电压, 减小压电圆盘径向尺寸和压电圆盘厚度, 有利于提高驱动器的驱动性能; 在螺旋角、压电圆盘径向尺寸和电压一定时, 螺旋电极压电扭转驱动器的切向应变达到普通电极型的 17.5 倍, 径向应变是普通电极型的 1.6 倍。

关键词: 螺旋电极压电扭转驱动器; 螺旋电极; 切向应变; 径向应变; 螺旋角

中图分类号: TN384; TM22 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11977/j.issn.1004-2474.2020.06.021

Design and Finite Element Analysis of Piezoelectric Torsional Actuator with Spiral Electrode

GUO Quanyuan¹, LIU Yonggang^{1,2}, ZENG Aoke¹, YAN Pengfei¹

(1. School of Mechatronics Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China;

2. Collaborative Innovation Center of Machinery Equipment Advanced Manufacturing of Henan Province, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China)

Abstract: A new piezoelectric torsional actuator with the structure of spiral electrode based on the interdigital electrode (IDE) was designed, and the theoretical equation of strain for points in the effective electrode region of spiral electrode plane is derived and established. The theoretical equation was verified through the analysis software ABAQUS, and the influences of voltage, radial dimension and disk thickness on the strain of the piezoelectric actuator were studied. The results show that the piezoelectric torsional actuator with spiral electrode can produce large tangential strain and radial strain output, increasing the voltage and reducing the radial size and thickness of the piezoelectric disc are beneficial to improve the driving performance of the actuator. The tangential strain of the piezoelectric torsional actuator with spiral electrode can reach 17.5 times and the radial strain is 1.6 times that of the common electrode when the spiral angle, the radial size of the piezoelectric disc and the voltage are fixed.

Key words: spiral electrode piezoelectric torsional actuator; spiral electrode; tangential strain; radial strain; spiral angle

0 引言

压电驱动器主要是利用压电材料的机电耦合特性来实现驱动功能的一类驱动元件。与传统的机电驱动元件相比, 压电驱动器具有位移分辨率高, 响应速度快, 激励能量小及不受电磁干扰等优点, 广泛应用于航空航天、精密光学系统、微米纳米驱动等精密

领域^[1]。近年来, 压电驱动器研究大多是对径向或轴向直线驱动性能的研究, 对扭转驱动性能的研究较少。由于在超声波电机、压电马达、精密定位等领域都需要用到扭转驱动, 不少国内外学者们都希望研制出具有较强扭转驱动能力的压电扭转驱动器。目前提出的压电扭转驱动器根据实现扭转方式的不

收稿日期: 2020-08-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50975075); 河南省基础与前沿技术研究计划重大基金资助项目 (152300410083); 河南省产学研合作基金资助项目 (182107000012)

作者简介: 郭全圆 (1990-), 男, 河南商丘人, 硕士生, 主要从事智能材料与结构的研究。刘永刚 (1972-), 男, 河南洛阳人, 副教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事智能材料与结构的研究。

同可分为机械转换式^[2-4]和直接利用压电常数式^[5-7]。机械转换式通过将压电元件产生的直线位移利用一些机械转换机构变成扭转位移输出,由于机械转换机构的存在,不可避免地出现驱动性能的损耗,且此类驱动器一般结构复杂,整体体积大,生成成本高,不利于精密微驱动场合应用。利用压电常数式是通过改变压电驱动器的结构形式,使驱动器自身的切向应变最大化,其中电极结构形式对扭转性能的影响最大。相对于机械转换式,此类驱动器结构简单,扭转驱动效率高,适用于不同要求的驱动场合。就目前提出的利用压电常数扭转驱动器来看,虽然实现了预期的扭转效果,但电极结构形式均较复杂,制造难度大且成本高。

为了进一步降低压电扭转驱动器的结构复杂度和提高扭转驱动效率,本文提出了一种螺旋电极压电扭转驱动器。依据对数螺旋公式建立了螺旋电极线方程,螺旋电极线采用平面化布置,使压电扭转驱动器结构简单新颖,能有效降低制造难度和成本,易于集成化、微小化生产,且能较好适用于精密微驱动场合。通过分析压电圆盘平面内应变分布规律和在螺旋角一定的条件下驱动电压 U 、压电圆盘径向尺寸 D 和厚度 h 对应变性能的影响,并与普通电极型压电驱动器进行对比,为螺旋电极型的压电扭转驱动器的设计与制造提供了指导和理论依据。

1 螺旋电极压电扭转驱动器结构及理论分析

1.1 结构形式

螺旋电极压电扭转驱动器(见图 1)由薄圆盘形压电圆盘基体和压电圆盘基体两侧的电极平面组成。两侧电极平面内分别布置一对螺旋电极,形成螺旋结构并像叉指电极(IDE)那样交错,两对螺旋电极处于中心轴向对称状态。这样一方面在充分利用电极平面区域的前提下简化了电极结构,另一方面能够较好地利用压电常数 d_{33} 、 d_{31} 共同作用产生的剪切应变,提高扭转驱动器的扭转驱动效率。一般情况下,螺旋电极压电扭转驱动器是一种薄圆盘结构,施加电压载荷后,正负螺旋电极间的电场线可看作是平行于压电圆盘表面,垂直于螺旋电极线^[8]。图 1 中, W 为电极宽度, P 为电极中心距离。图 2 为普通电极型压电驱动器结构简图。

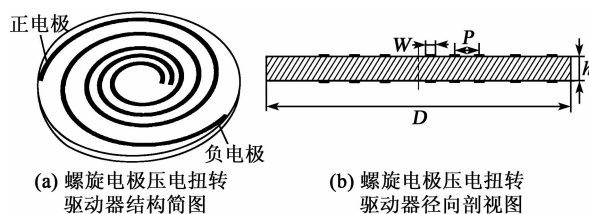


图 1 螺旋电极压电扭转驱动器结构图

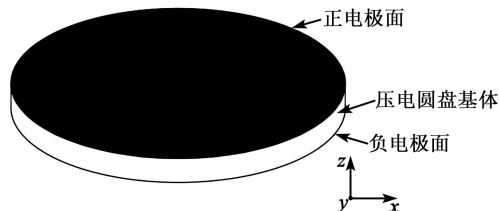


图 2 普通电极型压电驱动器结构简图

1.2 局部坐标系的建立及局部应变分析

螺旋电极压电扭转驱动器的螺旋电极线满足对数螺旋方程,且为压电圆盘半径的函数。螺旋电极线上任意点的切向与径向间的夹角各不同,由于螺旋电极既是工作电极又是极化电极,在极化电场的作用下,使得螺旋电极线上任意点的极化方向各不同。不同的极化方向决定不同的压电常数,而压电驱动器的性能与压电常数相关,且通常用径向与切向的应变(或应力)来表征^[9]。为了能使用统一的压电常数准确表达螺旋电极压电扭转驱动器切向应变和机电性能的关系,需要定义压电元件的坐标系以及局部材料坐标系。图 3 为螺旋电极压电扭转驱动器局部电极线结构坐标系。在螺旋电极线上任取一点,过该点的圆周切向为 y 方向,过该点垂直于圆周切向的方向为 x 方向,垂直于螺旋线的方向为 3 方向,螺旋线的切向为 1 方向, xy 平面的法向为 z 方向。螺旋线上任意一点的螺旋角定义为该点螺旋线的切线方向与过该点的圆周切线之间的夹角 β ,定义螺旋曲线逆时针旋转时 β 为正,顺时针旋转时 β 为负。

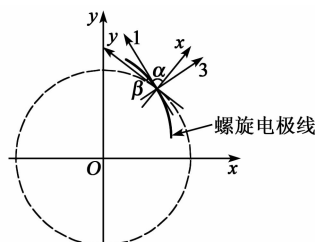


图 3 局部电极线结构坐标系

压电元件极化时,螺旋电极的结构特性造成压电元件沿电极线任意点的极化电场方向均不同,为便于分析,采用分割电极法对扭转驱动器进行研究,

即沿螺旋电极线方向把驱动电极分割成有限多个电极间隔,如图4所示。每个电极间隔可近似看作一个场强均匀体,电极间隔内极化方向相同且极化均匀。在此条件下, d_{33} 将产生一个平行于电场的平面内应变, d_{31} 将产生另一个垂直于电场沿电场线切向的平面内应变。对于每一个电极间隔, d_{33} 和 d_{31} 应变在切向和垂直于切向的正交线上都具有非零剪切分量,在 d_{33} 和 d_{31} 的共同作用下,这些剪切分量会引起每个电极间隔产生偏转(见图5),这是螺旋电极压电扭转驱动器能产生扭转位移的原因。

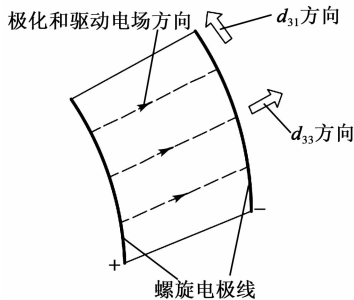


图4 电极间隔电场分布

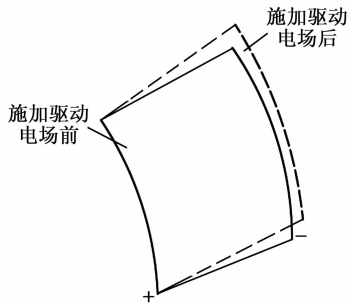


图5 电极间隔变形图

1.3 理论推导

螺旋电极压电扭转驱动器上、下表面的螺旋电极基于一对对数螺旋公式建立,其方程为

$$r = ae^{b\theta} \quad (1)$$

式中: a 、 b 为常数; e 为自然对数; θ 为螺旋电极绕圆心旋转的角度。

为使压电驱动器性能最大化,在同一电极平面上的正负螺旋电极线之间的位置是一种螺旋叉指型布置(见图6),即在同一圈数内,一条螺旋电极线布置于另一条螺旋电极线的螺距中间位置,因此,根据已知螺旋电极线方程可推出另一条螺旋电极线方程。在已知螺旋电极线上任取一点 $M(r_m, \theta_m)$,连接 OM 并延长 OM ,交同一螺旋电极线的相邻螺旋电极环于点 $N(r_n, \theta_m + 2\pi)$,设 MN 的距离为 L ,过点 N 的有效相邻正负电极间距为 p ,则由几何关系知另一条电极螺旋方程 r_0 为

$$r_0 = \frac{ae^{b(\theta_m + 2\pi)} - ae^{b\theta_m}}{2} + ae^{b\theta_m} = \frac{e^{2\pi b} + 1}{2} ae^{b\theta} \quad (2)$$

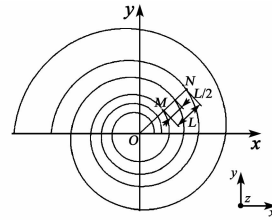


图6 螺旋电极线布置图

由式(1)、(2)可知,同一平面上两条螺旋电极线的螺旋角相等。为便于对螺旋电极进行研究,在下文分析计算中,取 $a=1$ 。

为便于对扭转性能进行描述和分析,需对坐标系进行变换。根据几何原理并利用邦德矩阵变换关系,将1-3坐标系下的应变变换为 x - y 坐标系下的应变,设驱动电压为 U ,电场强度为 E ,得到螺旋电极平面有效电极区域内点的剪切应变为

$$\epsilon_{xy} = 4d_{31} \frac{U}{L} \sqrt{\frac{b^2}{1+b^2}} - 4d_{33} \frac{U}{L} \sqrt{\frac{b^2}{1+b^2}} \quad (3)$$

由式(3)可知,当 b 一定时,平面内任意点的应变主要由正负螺旋电极之间的 E 决定,因此有必要对螺旋电极之间 E 的分布规律及作用机理进行分析。如图7(a)所示,螺旋电极之间的电场线在理想状态下可看作是始终平行于压电圆盘基体表面,在实践应用中电场线的分布并不像理想状态那样均匀,电场线的分布总体上可分为电场均匀区、电场过渡区和电场死区3部分^[10](见图7(b))。由图7(b)可知,在螺旋电极线正下方区域,该区域的电场强度非常小,接近于中间位置甚至有零场强区域出现。电场在远离螺旋电极的区域分布较均匀,在电场死区与电场均匀区之间,场强呈现出从小到大、从非均匀到均匀的过渡^[11]。由于螺旋电极既作极化电极又作驱动电极,因此,在垂直螺旋电极线的切向既有工作电场还有极化电场,从而导致螺旋电极附近的自由应变的分布是一种非线性的变化,只有在正负螺旋电极之间与电场均匀区相对应的位置才表现出近似线性^[12]。

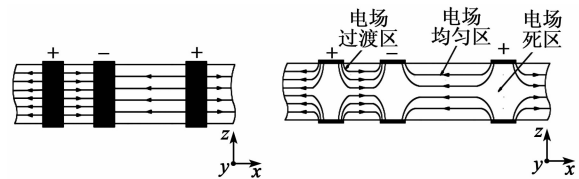


图7 电场分布图

2 有限元分析

螺旋电极压电扭转驱动器的极化方向沿电极线

不断变化,针对此种复杂条件下的压电耦合仿真分析,采用沿电极线分割多个电极间隔子体的方法进行研究,当分割的电极间隔子体数量足够多时,可认为各个电极间隔子体的材料性质一致。分割电极间隔子体如图 8(a)所示,上、下表面电极层厚度均为 $5\text{ }\mu\text{m}$,在模型建立时忽略不计。本文所述的螺旋电极压电扭转驱动器在工作时采用中心部分区域完全固定的约束条件,因此,在对电极间隔进行切割时沿径向方向且保留中心无电极区域,方便在有限元分析软件中进行边界约束,电极间隔切割模型如图 8(b)所示。由于此种螺旋电极压电扭转驱动器结构的厚径比远小于 1,在对模型进行有限元分析前需根据均匀场理论作出 4 个假设:

- 1) 极化方向垂直于电极中心线。
- 2) 两部分切割实体极化均匀且方向相反。
- 3) 忽略电极非对称性对结果的影响。
- 4) 采用固定的压电常数 d 和 e 。

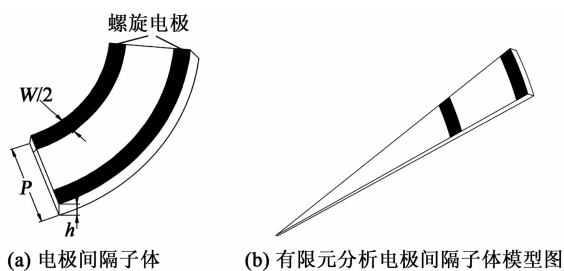


图 8 电极间隔

2.1 模型建立

本文选用的压电陶瓷为 PZT-51,材料参数参见文献[12]。

普通型压电驱动器直接利用 ABAQUS 三维建模工具建立。螺旋电极压电扭转驱动器具体建模流程如图 9 所示。部分模型采用在整体模型的基础上沿螺旋电极线等角切割的方法建立,切割模型如图 8(b)所示。螺旋电极压电扭转驱动器与普通型压电驱动器均选用 standard 单元类型中的 C3D10E 十节点二次压电四面体单元。

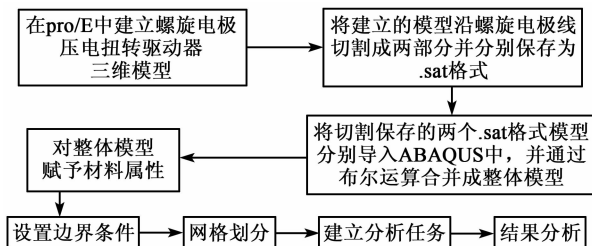


图 9 有限元分析流程图

2.2 切向应变沿径向的变化

$W=0.2\text{ mm}$, $h=0.5\text{ mm}$, $D=10\text{ mm}$, $U=$

$1\text{ }000\text{ V}$,当改变螺旋电极线螺旋角,即取 $b=0.08\sim 0.14$ 时,利用部分模型建模方法建立电极间隔有限元模型,并通过理论计算和有限元仿真进行对比分析,结果如图 10 所示。由图可见,随着 D 的增加,剪切应变整体上处于一种减小的趋势,减小速度由慢到快,其原因是由于螺旋电极线的结构特性造成。根据螺旋电极线的结构可知,正负螺旋电极间距增加的速率由慢到快,进而导致电场强度减小速率由慢到快,而正、负电极间的电压不变。同时,理论计算值与有限元仿真值随 D 的变化具有相同的规律性且数值符合性较好,在 $b=0.14$, $D=7\text{ mm}$ 时,理论值与仿真值间的最大误差为 6.9% ,说明了理论推导的正确性。

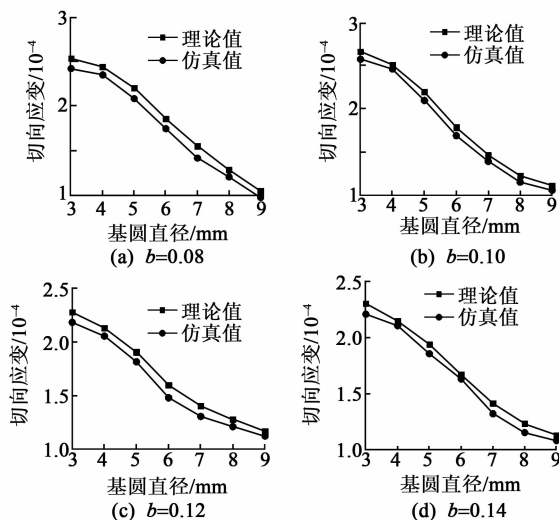


图 10 切向应变与基圆直径的关系

为了更好地分析螺旋电极扭转驱动器的驱动性能且便于对比分析,我们采用固定的螺旋角值,即取 $b=0.1$ 建立螺旋电极压电扭转驱动器整体有限元模型。通过分析电压、压电圆盘径向尺寸、压电圆盘厚度对应变的影响,得到与之相对应的应变影响规律,并与普通电极型压电驱动器的应变输出进行对比。对于普通电极型压电驱动器的建模,除了电极平面结构形式固定不变,均为在压电圆盘基体两侧电极平面充满电极材料作为驱动器的正负电极,结构简图如图 2 所示,其他关键结构尺寸均与螺旋电极压电扭转驱动器结构尺寸保持一致,下文对普通电极型压电驱动器的结构尺寸参数不再赘述。

2.3 电压对应变的影响

当 $W=0.2\text{ mm}$, $h=0.5\text{ mm}$, $D=10\text{ mm}$, $U=200\sim 2\text{ }000\text{ V}$ 时,螺旋电极压电扭转驱动器应变输

出与电压的关系如图 11 所示。由图可见,驱动器的应变输出随电压的变化表现出良好的线性规律。随着电压递增,压电扭转驱动器的切向应变输出和径向应变输出均呈线性增大且增大趋势明显,因此,增加驱动电压对于提高压电扭转驱动器的驱动性能具有显著的作用。由图 11(a)可知,电压的变化对普通电极型压电驱动器切向应变输出的影响远小于对螺旋电极压电扭转驱动器切向应变输出的影响,进一步体现了螺旋电极结构形式在扭转驱动性能方面的优越性。

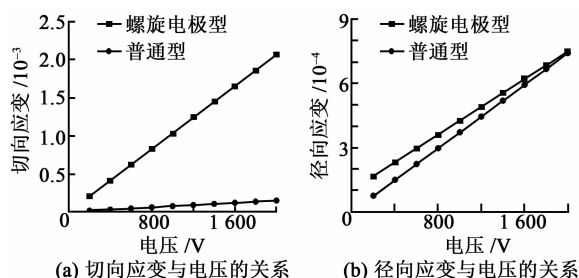


图 11 应变与电压的关系

2.4 压电圆盘径向尺寸对应变的影响

$U=1\ 000\ \text{V}$, $W=0.2\ \text{mm}$, $h=0.5\ \text{mm}$, 当 $D=6\sim 16\ \text{mm}$ 时,螺旋电极压电扭转驱动器的整体应变输出与 D 的关系如图 12 所示。由图可知,随着 D 的增加,螺旋电极压电扭转驱动器的扭转应变和径向应变都逐渐减小,减小速率由快到慢,其原因是由于螺旋电极的结构特性使螺旋电极线之间的电极间距随着 D 的增加而增加,导致 E 沿径向逐渐变小。同时, D 对螺旋电极压电扭转驱动器的应变输出影响较大,而对普通电极型压电驱动器的应变输出影响较小。对于螺旋电极压电扭转驱动器而言,当 $D=6\ \text{mm}$ 时,切向应变和径向应变最大值分别为 1.467×10^{-3} 和 6.113×10^{-4} ,此时切向应变是普通电极型压电驱动器的 17.5 倍,径向应变是普通电极型压电驱动器的 1.6 倍;当 $D=16\ \text{mm}$ 时,切向应变和径向应变最小值分别为 6.133×10^{-4} 和 3.021×10^{-4} 。

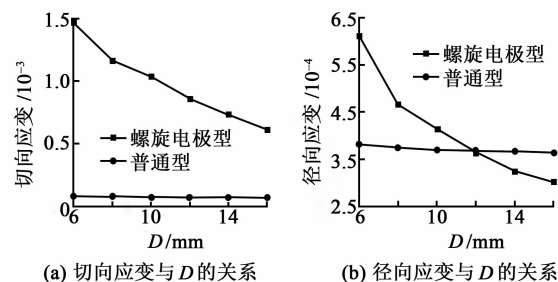


图 12 应变与压电圆盘直径的关系

2.5 压电圆盘厚度对应变的影响

图 13 为 $U=1\ 000\ \text{V}$, $W=0.2\ \text{mm}$, $D=10\ \text{mm}$, $h=0.3\sim 0.8\ \text{mm}$ 时应变输出变化曲线。由图可见,随着 h 的增加,螺旋电极压电扭转驱动器的切向应变和径向应变输出都逐渐减小,这主要是由于随着 h 的增加,螺旋电极下电场死区的区域不断增大, E 随着电场死区区域的增加而减小,进而导致切向应变和径向应变输出发生变化。同时, h 的变化对螺旋电极压电扭转驱动器切向应变输出的影响大于对普通电极型压电驱动器应变输出的影响,而对径向应变输出的影响规律相似。

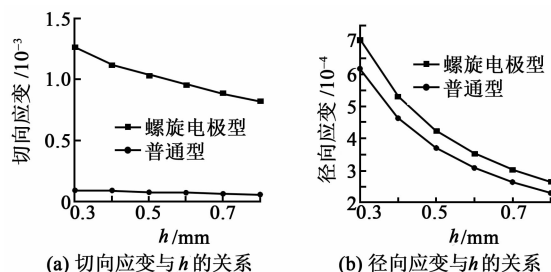


图 13 应变与 h 的关系

结合图 11~13,在模型螺旋电极线方程一定的前提下, U 、 D 和 h 的改变都会造成螺旋电极压电扭转驱动器驱动性能发生改变,因此,通过适当增加 U 、减小 D 和 h 可提高螺旋电极压电扭转驱动器的驱动性能。如 $b=0.1$, $U=1\ 000\ \text{V}$, $D=6\ \text{mm}$, $W=0.2\ \text{mm}$, $h=0.5\ \text{mm}$ 时,螺旋电极压电扭转驱动器的切向应变输出为 1.467×10^{-3} ,是普通型压电驱动器的 17.5 倍;径向应变输出为 6.113×10^{-4} ,是普通型压电驱动器的 1.6 倍。

3 结论

本文设计了一种新型的螺旋电极压电扭转驱动器,通过一般对数螺旋方程推导了螺旋电极压电扭转驱动器的螺旋电极方程,建立并验证了螺旋电极压电扭转驱动器有效电极区域内点的输出应变方程。利用 ABAQUS 分析软件分析了在螺旋角一定的条件下,电压、压电圆盘径向尺寸和压电圆盘厚度对切向应变的影响。结果表明:

1) 螺旋角在一定范围内的螺旋电极压电扭转驱动器的切向应变输出沿压电圆盘径向逐渐减小且与理论计算值相符,理论值与仿真值的最大误差在 7% 以内。

2) 螺旋电极压电扭转驱动器能产生较大的切向应变和径向应变输出,当螺旋电极线螺旋角固定

时,增大电压、减小压电圆盘的径向尺寸和厚度都有利于提高螺旋电极压电扭转驱动器的扭转驱动性能。因此,在生产制造中,通过改变电压、压电圆盘径向尺寸和厚度可获取适用不同驱动场合的螺旋电极压电扭转驱动器。

3) 在螺旋角、压电圆盘径向尺寸和电压一定时,螺旋电极压电扭转驱动器的切向应变可达到普通型压电驱动器的 17.5 倍,径向应变是普通型压电驱动器的 1.6 倍。

参考文献:

- [1] 于保军,司苏美,林洁琼,等. 压电陶瓷驱动器建模与控制技术的研究[J]. 机械设计与制造, 2019(3): 135-139.
YU Baojun, SI Sumei, LIN Jieqiong, et al. Research on modeling and control technology of piezoelectric ceramic actuator [J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2019(3): 135-139.
- [2] 王云. 步进蠕动式旋转精密压电驱动器及其控制系统研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2019.
- [3] 田晓超,杨志刚,王锐,等. 压电式旋转驱动器的设计与实验[J]. 压电与声光, 2018, 40(2): 16-20.
TIAN Xiaochao, YANG Zhigang, WANG Rui, et al. Design and experiment of piezoelectric rotary actuator[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2018, 40(2): 16-20.
- [4] 温建明,马继杰,曾平,等. 压电旋转驱动器制作及性能测试[J]. 光学精密工程, 2013, 21(1): 131-136.
WEN Jianming, MA Jijie, ZENG Ping, et al. Production and performance test of piezoelectric rotary actuator[J]. Optics a Precision Engineering, 2013, 21(1): 131-136.
- [5] 余远根,祝元坤,郑学军,等. 不同边界条件下 d_{15} 模式压电俘能器的俘能性能[J]. 压电与声光, 2016, 38(1): 99-105.
YU Yuangen, ZHU Yuankun, ZHENG Xuejun, et al. Energy harvesting performance of d_{15} mode piezoelectric energy harvester under different boundary conditions[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2016, 38(1): 99-105.
- [6] 聂凯. 基于剪切模式的压电陶瓷换能器的研究与设计[D]. 北京:北京大学, 2014.
- [7] HAN J, HU J, WANG S X, et al. A novel cylindrical torsional magnetoelectric composite based on d_{15} shear-mode response[J]. Journal of Physics D Applied Physics A Europhysics Journal, 2015, 48(4): 45-50.
- [8] PAN C L, MA Y T, LIU Y B, et al. Torsional displacement of piezoelectric fiber actuators with helical electrodes[J]. Sensors & Actuators A Physical, 2008, 148(1): 250-258.
- [9] 肖广军,潘成亮,刘永斌,等. 螺旋叉指电极式压电圆片换能器的有限元分析与实验比较[J]. 振动与冲击, 2015, 34(23): 139-143.
XIAO Guangjun, PAN Chengliang, LIU Yongbin, et al. Finite element analysis and comparison between simulation and test for a discal piezoelectric transducer with spiral interdigitated electrodes[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(23): 139-143.
- [10] 刘永刚,曹胜捷,李冬颖,等. 大位移交叉环形电极压电驱动器结构优化[J]. 压电与声光, 2018, 40(4): 74-78.
LIU Yonggang, CAO Shengjie, LI Dongying, et al. Structural optimization of large displacement cross-ring electrode piezoelectric actuator[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2018, 40(4): 74-78.
- [11] 甘宽,李敏,孔岳. 电极非对称对压电材料驱动性能的影响[J]. 压电与声光, 2015, 37(3): 71-77.
GAN Kuan, LI Min, KONG Yue. Influences of electrode asymmetry on the actuation performance of piezoelectric materials [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2015, 37(3): 71-77.
- [12] 刘永刚. 基于 ANSYS 的交叉指形电极压电纤维复合材料仿真研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2005.

盆架形压电振子同型模态驱动平面电机研究

王哲逸, 贺红林, 方志敏, 吴兴强

(南昌航空大学 航空制造工程学院, 江西 南昌 330063)

摘要:为满足高精度平面运动的需求,提出了一种盆架形的平面超声电机,选取该定子的反对称纵向伸缩振动、左右方杆面内一阶弯振、前后方杆面内一阶弯振模态为工作模态,纵振模态与弯振模态复合形成 xOz 、 yOz 面的椭圆运动。该文阐述了电机的驱动原理,基于ANSYS分析软件建立了定子有限元模型,优化了结构尺寸,实现了干扰模态分离,进行了谐响应和瞬态分析,进行了运动调节特性分析。基于频率一致性优化得到盆架形定子的整体尺寸为 $53.136\text{ mm} \times 4.550\text{ mm} \times 4.560\text{ mm}$,定子驱动足上 x 、 y 、 z 向振幅分别为 $2.0\text{ }\mu\text{m}$ 、 $1.49\text{ }\mu\text{m}$ 、 $3.36\text{ }\mu\text{m}$,模拟出了椭圆运动轨迹,验证了该平面电机具有良好的运动特性,并给出了定子固定方式及设计了电机装配结构。

关键词:平面超声电机;盆架形定子;机电耦合模型;动力学特征

中图分类号:TN384;TM22 **文献标志码:**A **DOI:**10.11977/j.issn.1004-2474.2020.06.022

Study on Planar Motor Driven by Basin-shaped Piezoelectric Vibrator in Homo-mode

WANG Zheyi, HE Honglin, FANG Zhimin, WU Xingqiang

(School of Aeronautical Manufacturing, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: In order to meet the needs of high-precision plane motion, a basin-shaped plane ultrasonic motor is proposed in this paper. The anti-symmetric longitudinal stretching vibration, the first-order bending vibration in the plane of the left and right square bars, and the first-order bending vibration modes of the front and rear square bars are selected as the operating modes, and the longitudinal vibration mode and bending vibration mode composite to form the elliptical motion of xOz and yOz surfaces. The driving principle of the motor is presented in this paper. Based on ANSYS analysis software, the finite element model of stator is established, the structure size is optimized, the interference mode separation is realized, the harmonic response and transient analysis are carried out, and the motion regulation characteristics are analyzed. Based on the optimization of frequency consistency, the overall size of the basin-shaped stator is $53.136\text{ mm} \times 4.550\text{ mm} \times 4.560\text{ mm}$, and the x , y and z -directional amplitudes on the stator driving foot are $2.0\text{ }\mu\text{m}$, $1.49\text{ }\mu\text{m}$, and $3.36\text{ }\mu\text{m}$ respectively. The elliptical motion trajectory is simulated, and the good motion characteristics of the planar motor are verified. The stator fixing method is given and the motor assembly structure is designed.

Key words: ultrasonic planar motor; basin-shaped stator; electromechanical coupling model; dynamic feature

0 引言

超声电机是利用压电材料逆压电效应实现电能到结构振动能的转换,并通过摩擦耦合将振动转化成旋转或直线运动的一种新概念电机^[1]。超声波电机的基本工作原理是:将电压信号施加在由压电陶瓷和金属弹性体构成的电机定子上,由于压电陶瓷的逆压电效应,电机定子弹性体产生变形,当激励电压频率与定子弹性体的共振频率接近时,定子便会产生一定规律的机械振动^[2-5]。定子发生振动时,定

子表面质点会产生一定轨迹的椭圆运动,一方面质点产生的法向位移对转子产生一定压力,另一方面质点和转子间的切向位移使其产生相对滑动,这样通过定子和转子间的摩擦耦合,驱动电机的转子转动^[6-9]。超声波电机是典型的低速大力矩电机,与一般电机相比其具有输出力矩大,可控性强,正反转特性一致及低速稳定性好等特点,非常适用于各类航天器和武器装备的驱动器和伺服系统,具有较高的研究价值^[10-11]。因此,本文建立了盆架形超声波电

收稿日期:2020-09-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51665040);江西省自然科学基金资助项目(20181BAB206024);江西省自然科学基金重点资助项目(20202ACB202003);南昌航空大学研究生创新专项基金资助项目(YC2020-029)

作者简介:王哲逸(1997-),男,江西井冈山人,硕士生,主要从事精密压电驱动的研究。E-mail:1042673315@qq.com。通信作者:贺红林(1967-),男,教授,博士,主要从事压电驱动、结构动力学及机电一体化系统设计技术的研究。E-mail:hehonglin1967@163.com。

机的有限单元法(FEM)模型,运用 ANSYS 15 仿真分析了改变方杆的高度、横截面大小、直径孔的深度和直径、陶瓷片位置等参数对电机弯纵振的影响^[12-13]。针对定子尺寸对电机工作状态的影响及对电机进行定子驱动足振动性能和电机输出性能的研究,对完善电机的设计、改善电机输出特性具有一定的意义^[14]。

1 盆架形超声波电机的结构

1.1 定子构型设计及工作模式选取

本文提出的定子模型如图 1(d)所示,定子由 4 根方杆与十字结构体相连构成,在十字结构体中心设置通孔以便安装。图中 L 为方杆高度, L_1 为直径孔高, H 为方杆长, K 为方杆宽, K_1 为十字结构体杆长, K_2 为十字结构体通孔边长, R 为直径孔直径。为使各方杆产生较纯正的面内弯振和反对称纵振,在各根方杆与十字结构体连接处开设了小槽口;为增强各杆的柔性以利增大其弯曲工作振幅,在各方杆的中心处制作直径孔。通过微调这些孔的尺寸,还可实现调整定子工作模式频率的目的,有利于实现工作模式频率的一致性。在 4 根方杆的顶部均设有驱动足用于传递运动,并将压电陶瓷片对称贴于每根方杆的两侧。其中靠近十字结构体的 16 片压电陶瓷用于激励定子产生反对称纵向伸缩振动模式,靠近两端的 16 片陶瓷片用于激励定子产生面内弯振。选取盆架形定子的前(后)方杆与左(右)方杆

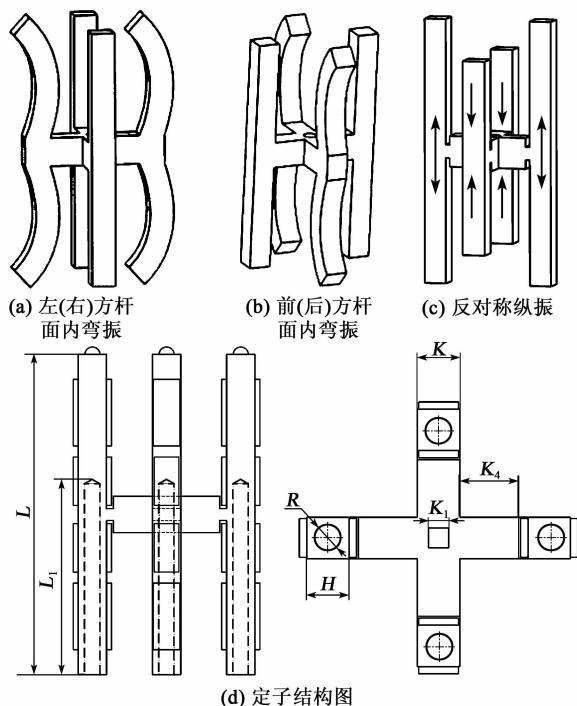


图 1 盆架形超声电机定子模型

的反对称纵向伸缩振动模式、左(右)方杆面内同型“3”字型弯振模式、前(后)方杆同型“3”字型面内弯振模式作为理想工作模式。电机利用反对称纵向伸缩振动分别与左(右)方杆面内弯振、前(后)方杆面内弯振的振动进行耦合,从而使左(右)、前(后)方杆驱动足分别复合形成在 yOz 、 xOz 平面运动的椭圆轨迹,驱使电机驱动足板沿着 x 、 y 方向移动,实现电机的平面运动。

1.2 压电陶瓷配置

为了有效激励定子三相工作模式的谐振并减少驱动电源的相数,同时也为了尽可能避免“短路”现象,须对压电陶瓷片进行合理的供电配置,如图 2 所示。为达到有效激励电机定子的目的,首先对各压电陶瓷片与定子基体接触面的电极均进行“接地”处理;同时,对用于纵振激励陶瓷片组中的各陶瓷片定子基体背离面电极均通入 $U_2 \cos \omega t$ 的简谐电激励信号;对用于前(后)方杆弯振激励陶瓷片组中的各陶瓷片定子基体背离面电极均通入 $U_1 \sin \omega t$ 的简谐电激励信号;对用于左(右)方杆弯振激励陶瓷片组中的各陶瓷片定子基体背离面电极则须通入 $U_3 \sin \omega t$ 的简谐电激励信号,其中 $U_i (i=1,2,3)$ 为激励信号电压幅值, ω 为激励信号频率, t 为时间。为了能激励驱动足产生微米级振幅,从而驱动足能有效地推动驱动足板滑移,要求所接 ω 与定子的的工作模式频率接近,且应保证各个工作模式频率间的差值不能超过 0.5%。如果各个工作模式频率间相差过大,则需通过调整定子基体的尺寸来适当地调节工作模式频率,同时要求驱动信号 U_1 、 U_2 、 U_3 的电压幅值应控制在 150~300 V,并将同组激励左(右)方杆面内弯振的陶瓷片激励方向设为 x 方向,同组激励前(后)方杆面内弯振的陶瓷片激励方向设为 y 方向,同组激励反对称纵振的陶瓷片激励方向为指向定子基体方向。

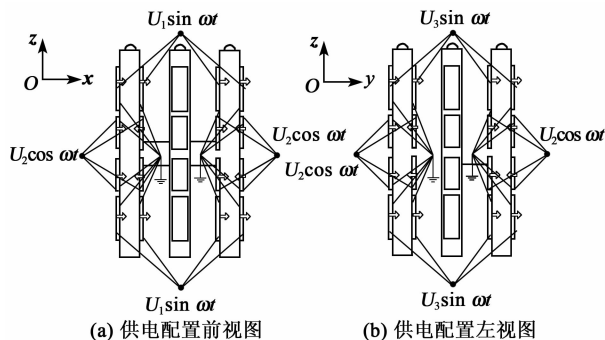


图 2 定子压电陶瓷极化供电配置

1.3 驱动足椭圆轨迹方程

盆架形电机定子的数字模型和工作模态具有对称性,故取右驱动杆和前驱动杆来分析定子驱动足的运动轨迹和触发激励振动的条件。根据上述定子供电配置,首先对陶瓷片与定子基体接触的电极面均进行接地处理,再对右驱动杆上的压电陶瓷片定子基体背离面表面通入频率相同、初始相位不同的简谐电激励信号。此时右驱动杆驱动足沿 x 、 z 方向的运动方程为

$$\begin{cases} u_x = U \sin(\omega t + \alpha) \\ u_z = W \sin(\omega t + \gamma) \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_x 、 u_z 分别为驱动足沿 x 、 z 方向的位移; U 、 W 分别为驱动足在 x 、 z 方向的振幅; α 、 γ 分别为驱动足在 x 、 z 方向的初始相位。

对式(1)进行变化得到右杆驱动足在 xOz 平面内的运动轨迹:

$$\frac{u_x^2}{U^2} - 2 \frac{u_x u_z}{UW} \cos \varphi + \frac{u_z^2}{W^2} = \sin \varphi \quad (2)$$

式中 $\varphi = \alpha - \gamma$, $\varphi \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$ 。

同理,对前驱动杆上的压电陶瓷片定子基体背离面表面瓷施加频率相同、初始相位不同的简谐电激励信号,此时前驱动杆驱动足沿 y 、 z 方向的运动方程为

$$\begin{cases} u_y = V \sin(\omega t + \beta) \\ u_z = W \sin(\omega t + \gamma) \end{cases} \quad (3)$$

式中: u_y 为驱动足沿 y 方向的位移; V 为驱动足在 y 方向的振幅; β 为驱动足 y 方向上的初始相位。

对式(3)进行变化可得前杆驱动足在 yOz 平面内的运动轨迹:

$$\frac{u_y^2}{V^2} - 2 \frac{u_y u_z}{VW} \cos \phi + \frac{u_z^2}{W^2} = \sin \phi \quad (4)$$

式中 $\phi = \beta - \gamma$, $\phi \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$ 。

由式(2)、(4)可得,当 φ 或 ϕ 为 $\pi/2$ 时,驱动足的运动轨迹为标准椭圆;当 φ 、 ϕ 由 $\pi/2$ 减小时,驱动足椭圆轨迹逐渐变扁;当 φ 或 ϕ 为 0 时,驱动足的运动轨迹变成直线。故为了更好地激励定子产生椭圆运动,用于激励面内弯振的简谐交变电压和用于激励反对称纵向伸缩振动的简谐交变电压之间需存在 $\pi/2$ 的相位差。

1.4 定子驱动机理

电机定子对矩形动子板的驱动过程即 3 种振动模态耦合的过程。图 3 为一个振动周期下的矩形动子板运动过程,本文以 xOz 、 yOz 面来展示三相工作模态叠加下定子的工作原理。

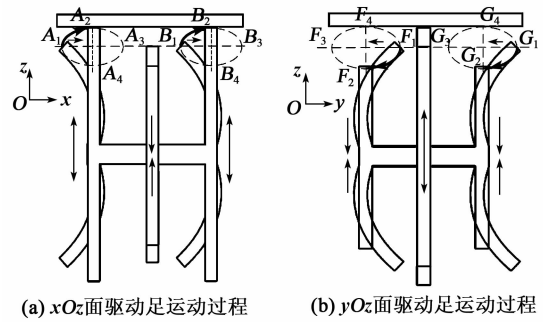


图3 定子驱动足运动轨迹

1) 在 $0 \sim T/4$ (T 为周期) 时段,前、后杆的纵振则使它们由初始杆长伸张成最大杆长,使左、右方杆上的驱动足与动子组件上的矩形动子板接触,而左、右方杆的弯曲模态振动使两杆由最大面内左弯状态恢复成直杆状态,从而使左、右方杆上驱动足 A 、 B 分别由 A_1 、 B_1 运行至 A_2 、 B_2 位置并推动矩形动子板沿 x 方向移进一个步矩;与此同时,前、后方杆的纵振则使它们由初始长度收缩至最小杆长,使前、后方杆上的驱动足 F 、 G 与矩形动子板脱离接触,前、后方杆的弯曲模态振动则使前、后方杆由最大前面内弯状恢复成直杆状,从而使前、后方杆上的驱动足 F 、 G 分别由 F_1 、 G_1 行进到 F_2 、 G_2 位置。

2) 在 $T/4 \sim T/2$ 时段,左、右方杆的纵振使它们均由最大杆长恢复到初始杆长,此时两杆上的驱动足仍保持与矩形动子板接触,而左、右方杆的弯振模态却使两杆由直杆状弯成最大右弯状,从而使左、右方杆上驱动足 A 、 B 分别由 A_2 、 B_2 运行至 A_3 、 B_3 位置,并推动矩形动子板沿 x 方向再移进一个步矩;与此同时,前、后方杆的纵振则使它们由初始最小杆长恢复到初始杆长,使前、后方杆上的驱动足 F 、 G 仍不与矩形动子板接触,而前、后方杆的弯曲模态振动则使前、后方杆由直杆状弯曲成最大后弯状,从而使前、后方杆上的驱动足 F 、 G 分别由 F_2 、 G_2 行进到 F_3 、 G_3 位置。

3) 在 $T/2 \sim 3T/4$ 时段,左、右方杆的纵振使其由初始长度收缩成最小杆长,而使驱动足 A 、 B 脱离与矩形动子板的接触,而左、右方杆的弯振则使它们由最大右弯态恢复成直杆状,从而使左、右方杆上的驱动足 A 、 B 分别由 A_3 、 B_3 运行至 A_4 、 B_4 位置;与此同时,前、后方杆的纵振则使它们由初始杆长伸长成最大杆长,致使前、后方杆上的驱动足 F 、 G 与矩形动子板相接触,而前、后方杆的弯曲模态振动则使前、后方杆由最大后弯状恢复成直杆状,从而使前、后方杆上的驱动足 F 、 G 分别由 F_3 、 G_3 行至 F_4 、 G_4 位置,并推动矩形动子板沿 y 方向移进第一个步矩。

4) 在 $3T/4 \sim T$ 时段内, 左、右方杆的纵振使其由最小杆长恢复为初始长度, 使驱动足 A 、 B 仍不与矩形动子板接触, 左、右方杆的弯振则使它们由直杆状弯曲成最大左弯状态, 从而使左、右方杆上的驱动足分别由 A_4 、 B_4 运行至 A_1 、 B_1 位置; 与此同时, 前、后方杆的纵振则使它们由最大杆长恢复到初始杆长, 使前、后方杆上的驱动足 F 、 G 仍与矩形动子板保持接触, 而前、后方杆的弯曲模态振动则使前、后方杆由直杆状弯曲成最大前弯状, 从而使前、后方杆上的驱动足分别由 F_4 、 G_4 行至 F_1 、 G_1 位置, 并推动矩形动子板沿 y 方向移进第二个步距。

2 结构动力学优化

2.1 电机定子 FEM 模型

本文中的盆架形定子结构属于较复杂的弹性结构, 故使用 ANSYS 对其进行数字化建模。定子体由多个零件组成, 需对不同零件设置相应的材料属性。定子驱动杆和驱动足选用 45 号碳钢, 单元类型设置为 SOLID185, 压电陶瓷材料选用 PZT-8, 单元类型设置为 SOLID5, 并输入压电材料密度、压电系数、介电常数矩阵等参数。考虑到定子驱动杆两侧的压电陶瓷极化方向成对称状态, 压电材料的属性定义按两种方向进行设置。压电陶瓷片与弹性体并非一体, 需先将两者粘合在一起再进行网格划分。定子基体同时存在小槽口和直径孔, 为了便于网格划分, 先对其基体进行自由网格划分, 再对压电陶瓷片进行更规则的六面体网格划分。定子体总单元数量为 105 331 个, 选取图中 D 点作为后续分析对象, 图 4 为定子构型图。

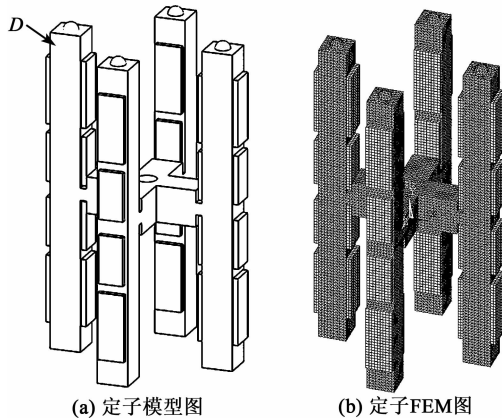


图 4 定子构型图

2.2 模态一致性及电机定子尺寸分析

超声电机的平稳工作建立在三相工作模态频率一致上, 而工作模态频率与定子结构尺寸相关, 研究定子模态频率和定子结构尺寸间的关系尤为重要。盆架形电机的定子结构尺寸较多, 故取对定子模态频率影响较大的结构尺寸作为定子的特征尺寸进行

分析。本文提出的盆架形定子为对称结构故取其左方杆和前方杆进行分析, 图 5 为盆架形电机定子各特征尺寸与工作模态频率之间的关系。由图可知, K_4 增大时, 左、前方杆面内弯振频率均下降, 反对称纵振频率基本不变; L_1 增大时, 左、前方杆面内弯振频率基本不变, 反对称纵振频率下降; R 增大时, 左、前方杆面内弯振频率上升, 反对称纵振频率下降; L 增大时, 左、前方杆面内弯振频率及反对称纵振频率均下降, 且各模态频率的间距扩大; H 增大时, 左方杆面内弯振、前方杆面内弯振频率、反对称纵振频率先上升再下降且各模态频率的间距减小; K 增大时, 左、前方杆面内弯振频率上升, 反对称纵振频率基本不变, 各模态频率的间距减小。

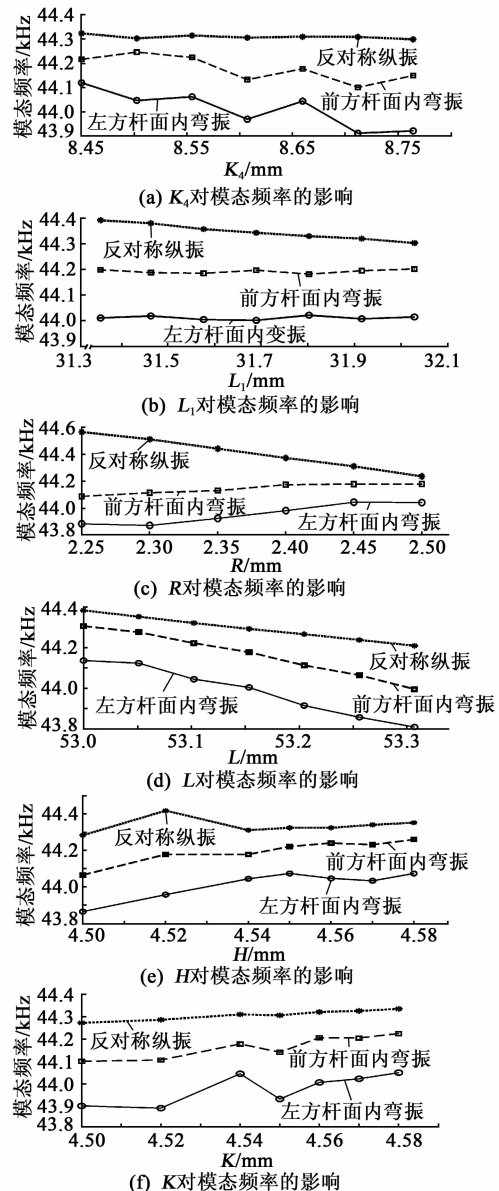


图 5 定子各特征尺寸对模态频率的影响

以满足三相工作模态频率一致性为前提,通过对上述结构尺寸进行优化分析得到定子结构尺寸如表1所示。

表1 盆架形结构定子优化尺寸

尺寸	L/mm	L_1/mm	H/mm	R/mm	K/mm	K_4/mm
初始值	53.150	33.25	4.56	2.35	4.56	8.70
优化值	53.136	31.90	4.55	2.45	4.56	8.64

3 盆架形压电定子谐响应分析

为保证超声电机有平稳的工作状态,各相工作模态要有较接近的振动幅值和模态频率,且在工作模态附近无干扰模态,否则电机在运动过程中易出现干扰振动导致电机无法正常运转。用表1所得优化后的数据建立电机定子有限元模型,并给压电陶瓷片表面施加250 V激励电压,基体接触面不施加激励电压,并按图2所示方式对压电陶瓷片接电。将谐响应分析频域设置为43.0~44.5 kHz,计算步长50 Hz/步,计算结果如图6所示。由图可知,盆架形定子的各相工作模态振幅均在43 890 Hz左右出现峰值,且在43.0~44.5 kHz时及峰值附近无其他干扰模态,说明电机在此频段内工作稳定。

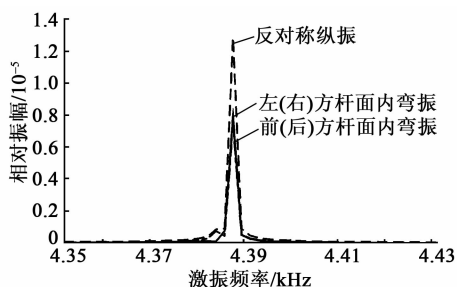


图6 定子振动频率特性曲线

4 盆架形压电定子瞬态响应分析

为了确保电机定子能平稳工作,还需对其进行各相振动幅值响应分析,只有当压电定子驱动足产生微米级振幅时才能推动矩形动子板运动。借助ANSYS分析软件对盆架形压电振子在给定频率下的动力学分析。以前方杆上的D点(见图3(a))为例,对各陶瓷片施加43 890 Hz、250 V、相位差 $\pi/2$ 的激励电压,运用ANSYS瞬态响应求解器对驱动足的位移情况进行求解,得到D点的振动响应如图7所示。由图可看出,定子驱动足达到稳态振动的响应时间仅为0.8 ms,定子驱动足振动到达稳态后沿x、y、z的振动幅值分别为2.0 μm 、1.49 μm 、3.36 μm ,满足定子驱动要求。

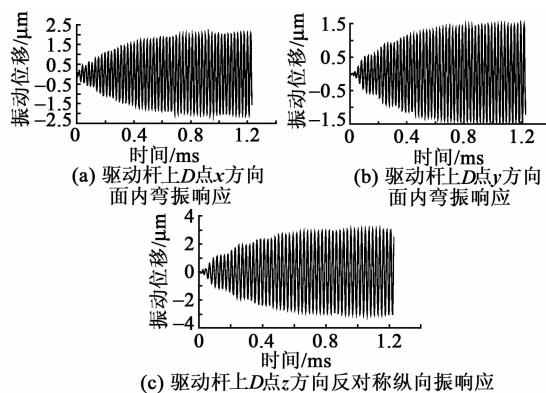


图7 驱动足沿x、y、z方向的振动响应

当同时激励前(后)方杆和左(右)方杆时产生运动耦合现象,图8为驱动足在 xOz 、 yOz 平面内的椭圆运动轨迹。驱动足椭圆运动轨迹呈扁平状、有较长的驱动弧。

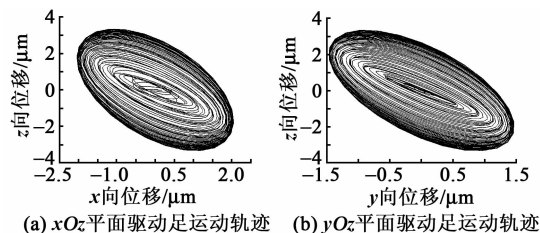


图8 驱动足在 xOz 、 yOz 平面内的椭圆运动轨迹

5 定子运动调节特性

超声电机以交流电压作为激励信号,为获得更稳定的工作状态,需对通入的激励信号电压以及频率对驱动足的影响进行分析。由图9(a)可知,随着施加在陶瓷片上的激励信号电压不断升高,驱动足的各向振幅与电压成线性正比关系。当电压增大时,振动幅度增大。用频率不同、电压相同的激励信号施加于陶瓷片,得到如图9(b)所示的驱动足调频振动特性关系,驱动足的各相振幅与激励频率成非线性关系。随着 ω 的增加,驱动足的振动幅值出现先增后减的现象,振幅峰值出现在43 890 Hz处。

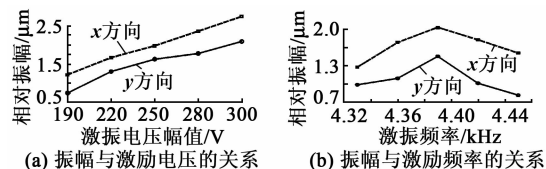


图9 盆架形定子驱动足振动调节特性

6 电机装配结构

满足电机定子装夹的同时,电机装配体还需满足定子和动子板之间存在一定的可调预紧力来保证连接的可靠性。本文选取盆架形定子的十字结构体

中心处作为装夹位置,可以大幅度地降低因固定造成的工作模态漂移。图 10 为盆架形定子电机装配结构。由图可知,压电定子通过螺栓与顶部支座固定,通过橡皮垫圈施加预紧力和避免直接接触,动子板通过滚珠与盖板接触形成滚动副。

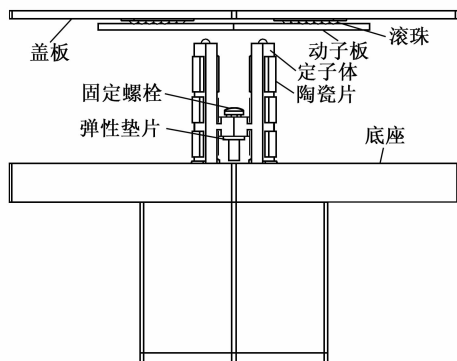


图 10 盆架形定子电机装配结构

7 结论

1) 提出了盆架形平面超声电机原理及其定子结构,选取定子的前(后)方杆与左(右)方杆之间的反对称纵向伸缩振动模态、左(右)杆面内同型“3”字型弯振模态、前(后)杆同型“3”字型弯振模态作为工作模态。

2) 建立了盆架形平面超声电机的有限元模型,确定定子配电模式,对定子进行三相工作模态一致性进行分析,求得定子的基本结构为 $53.136\text{ mm} \times 4.550\text{ mm} \times 4.560\text{ mm}$ 。

3) 对定子进行瞬态响应分析,模拟出定子驱动足运动椭圆轨迹,验证了电机驱动原理。

4) 分析得到了电机的调压、调频幅值运动特性规律。

5) 设计了一种盆架形定子固定夹持方案,建立了电机的三维装配模型,利用振子上的 4 个驱动足交替推动动子运动,以达到增大电机动力输出的目的。

参考文献:

[1] 赵淳生,朱华. 超声电机技术的发展和应[J]. 机械制造与自动化,2008(3):1-9.

[2] 贺红林,江涛,付磊,等. 双十字压电振子同型弯振模态驱动的平面超声电机[J]. 工程设计学报,2019,26(5):594-602.

[3] LI Xiang, KAN Chaohao, CHENG Yuan, et al. Performance evaluation of a bimodal standing-wave ultrasonic motor considering nonlinear electroelasticity;

Modeling and experimental validation[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 141:106475. 1-106475.16.

- [4] 范佳丽,张彦虎,周玉华,等. 新型面内纵-弯复合型直线超声电机研究[J]. 压电与声光,2019,41(6):819-823. FAN Jiali, ZHANG Yanhu, ZHOU Yuhua, et al. Study on a novel in-plane longitudinal-bending compound linear ultrasonic motor[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2019, 41(6):819-823.
- [5] 张健,王笑竹,何勍,等. H 形直线超声电机振子的结构分析及模态优化[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(25):183-190.
- [6] 郑杰基,陈宁,焦西凯,等. 超声电机的预压力特性分析与优化[J]. 光学精密工程, 2020, 28(4):782-789.
- [7] ZHU Yuanfei, YANG Tianyue, FANG Zhiwei, et al. Contact modeling for control design of traveling wave ultrasonic motors[J]. Sensors and Actuators A Physical, 2020, 310:112037.
- [8] SUN Dong, TANG Yajuan, WANG Jiong, et al. Design of an H-shaped linear piezoelectric motor for safety and arming device[J]. Sensors and Actuators A Physical, 2019, 303:111687.
- [9] LU Danhong, LIN Qiuxiang, CHEN Bingxun, et al. A single-modal linear ultrasonic motor based on multi vibration modes of PZT ceramics[J]. Ultrasonics, 2020, 107:106158.
- [10] YANG Chengping, XIE Kunju, CHANG Jinyuan. Design and simulation of an ultrasonic linear motor with dual piezoelectric actuators[J]. Microsystem Technologies, 2020, 26(1):71-78.
- [11] 郑伟,王繁,余罗兼,等. 用于嵌入系统的超声电机驱动设计[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2020(2):128-131.
- [12] ZHANG Liwei, ZHENG Huiming, HUANG Shouqing, et al. A life test of ultrasonic motors under different torque loads and the analysis of the characteristics of wearing surfaces[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2020, 234(5):770-777.
- [13] ZHENG Wei, ZHOU Jingliang, RUAN Yuzhen. Effects of ultrasonic motor stator teeth height on start reliability[J]. Energy Harvesting and Systems, 2015, 2(3/4):153-156.
- [14] 梁大志,时运来,朱华,等. 超声电机驱动及控制技术的新进展[J]. 振动·测试与诊断, 2012, 32(6):990-993.

集成铌酸锂光子器件技术的研究进展

张涛¹, 何杰¹, 胡少勤¹, 许昕¹, 张玉蕾²

(1. 中国电子科技集团公司第二十六研究所, 重庆 400060; 2. 中国电子科技集团公司第四十四研究所, 重庆 400060)

摘要: 铌酸锂单晶薄膜(LNOI)具有透光光谱宽, 折射率高, 二阶非线性高及压电响应大等优点, 是一种重要的集成光子学基础材料。LNOI材料具有亚波长尺度的光约束和光电器件的高密度集成能力, 能够实现具有更高性能、更低成本的全新器件及应用, 给光通信和微波光子学带来革命性的变革。该文重点综述了LNOI的制备技术、LNOI电光调制器、LNOI声光调制器和LNOI电光频率梳的最新研究进展, 简要讨论了铌酸锂光子器件在制作工艺和系统实现中面临的挑战。

关键词: 绝缘体上铌酸锂; 集成光子器件; 铌酸锂单晶薄膜(LNOI)电光调制器; 铌酸锂单晶薄膜(LNOI)声光调制器; 铌酸锂单晶薄膜(LNOI)光学频率梳

中图分类号: TM282; TN2 文献标志码: A DOI: 10.11977/j.issn.1004-2474.2020.06.023

Current Progress of Integrated Lithium Niobate Photonic Device Technology

ZHANG Tao¹, HE Jie¹, HU Shaoqin¹, XU Xin¹, ZHANG Yulei²

(1. The 26th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China;

2. The 44th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China)

Abstract: Lithium niobate(LiNbO₃) on insulator(LNOI) is a promising material for integrated photonics, owing to its unique properties of wide optical transparency window, high refractive index, large second order nonlinearity and large piezoelectric response. The integrated LN material, featuring sub-wavelength scale light confinement and high integration of optoelectronic components, has the potential to enable higher performance, lower cost and entirely new devices and applications, and revolutionize optical communication and microwave photonics. This review focusses on the current progress of LNOI electro-optic modulator, LNOI acousto-optic(AO) modulator and LNOI electro-optic frequency comb, and briefly discusses the challenges meeting from fabrication and system realization.

Key words: lithium niobate(LiNbO₃) on insulator(LNOI); integrated photonic device; LNOI electro-optic modulator; LNOI acousto-optic modulator; LNOI electro-optic frequency comb

0 引言

铌酸锂(LiNbO₃, LN)晶体是一种集压电、铁电、声光、电光、光弹、光折变等性能于一体的人工合成多功能材料, 其不仅具有稳定的化学性质, 基本不与常见的强酸/强碱反应, 且热稳定性好, 即使在1 000 ℃以上也不会发生分解, 是一种重要的、不断开辟新应用领域的无机非金属多功能晶体材料。LN晶体已广泛应用于微声声表面波(Micro-Acoustic SAW)器件、红外探测器、激光调制器、光通讯调制器、光学开关、光参量振荡器、集成光学元件、激光倍频器、自倍频激光器、光折变器件如高分辨的全息存储、光波导基片和光隔离器等方面, 且在

光子海量存储、光学集成等领域也有着广阔的应用前景, 被誉为光电子时代的“光学硅”^[1]。

采用LN单晶块材制作的传统LN光电器件, 其体积大, 难以实现硅基微系统集成。在器件向集成化、微型化发展的趋势下, 为了实现光电器件的片上集成, 迫切需求高质量LN薄膜材料。采用传统方法生长的LN薄膜存在取向控制难, 生长温度过高及锂(Li)挥发引起化学计量比偏析等技术难题^[2], 导致制备的LN薄膜择优取向度差、缺陷密度高且薄膜为多晶薄膜, 性能远低于单晶块材。近年来, 为满足下一代光电器件在集成化、小型化发展趋势下对高品质LN薄膜材料的迫切需求, 采用离子注入技术和晶圆直接键合技术相结合的“Smart-

Cut”薄膜转移制备工艺制备出绝缘体上 LN 单晶薄膜(LNOI)并获得了应用。LNOI 技术是一项革命性技术,使得实现具有更高性能、更低成本的全新光电子器件和应用成为可能,这为研制集成光子器件提供了新的解决途径和方案^[3-14]。哈佛大学约翰保尔森工程与应用科学学院在一项关于 LN 的研究报告中对 LNOI 如此评价:如果电子革命的中心以使其成为可能的硅材料而命名为“硅谷(Silicon Valley)”,那么,光子革命的发源地就将会以 LN 材料而命名为“铌谷(Lithium Niobate Valley)”^[15]。基于 LNOI 的集成光子器件技术是一种能与硅光子技术兼容的混合集成技术,实现的器件具有体积小,质量小,工作频率高,易制作和 IC 集成的优点,市场前景广阔,现已成为国内外的研究热点。本文综合研究了基于 LNOI 的集成光子器件的最新研究进展、未来发展趋势,并讨论了集成 LN 光子器件目前面临的挑战。

1 LNOI 的制备及发展

在低折射率的介质材料上制备出高性能的 LNOI 是实现集成铌光子器件的关键,但传统制备 LN 薄膜的方法,如化学气相沉积法、射频溅射法、分子束外延法、溶胶-凝胶法和脉冲激光沉积法等,难以生产出高结晶质量的 LN 薄膜且只能获得多晶薄膜,而外延生长的 LN 薄膜不仅结晶质量难与单晶 LN 晶圆相媲美,且由于晶格匹配的限制,对衬底材料的特性有着严格要求。

近年来,采用离子注入技术与直接键合技术相结合的方法制备晶体离子切片已成为非常有前景的技术^[5]。这种称之为“Smart-Cut”的技术最初由法国 SOITEC 公司开发^[16],应用于制造绝缘体上硅(SOI)晶圆。“Smart-Cut”技术的特点是保留了载体底物,使用 He^+ 注入和晶圆键合工艺能够实现大面积单晶薄膜的转移制备,其最大的优势是能够制备出任意切型的高质量单晶薄膜材料,且剥离的注入基片可重复使用,提高了材料的利用率,节约了生产成本。目前,离子注入剥离转移技术已成为制备 SOI 的主流技术,采用离子注入剥离技术制备的 SOI 晶圆材料已获得成熟的商业应用。

为了克服传统生长法制备 LN 薄膜存在的如缺 Li 相、薄膜择优取向度差、缺陷密度高且薄膜为多晶薄膜等缺点,1998 年, M. Levy 等^[17]把制作 SOI 晶圆的离子注入剥离技术用于制备 LNOI,他们采用在 LN 晶片表面注入 He^+ ,然后对其进行侧面腐蚀并获得单晶 LN 薄膜。2004 年, P. Rabiei 等利用

离子注入技术和直接键合技术相结合的方法,制作出单晶 LN 薄膜^[4],即“绝缘体上铌酸锂(LNOI)”,这是“Smart-Cut”技术在 LN 单晶薄膜制备上的首次成功应用。2012 年,山东大学和瑞士联邦理工大学的联合研究团队利用“Smart-Cut”技术成功制作了基于 LN 衬底、二氧化硅(SiO_2)隔离层的 LN 薄膜,所得 LNOI 完整度高且未破坏 LN 晶格结构。其具体的实验制作方法如图 1 所示^[7]。步骤如下:

- 1) 在 LN 基底上嵌入 He^+ ,通过调整注入溶度和时间来改变 He^+ 在材料上的嵌入深度。
- 2) 另取一块 LN 基底,在表面上沉积厚约 $2\ \mu\text{m}$ 的 SiO_2 隔离层。
- 3) 将第 1)步得到的 LN 和第 2)步得到的 LN 晶体进行黏合。
- 4) 由于 LN 嵌入 He^+ 的部位更易被氢氟酸(HF)腐蚀,故利用 HF 将注入 He^+ 的部位腐蚀分离后,就能得到在 LN 基底和 SiO_2 隔离层上的 LN 薄膜。
- 5) 利用高温退火和抛光得到所需的 LNOI^[7]。

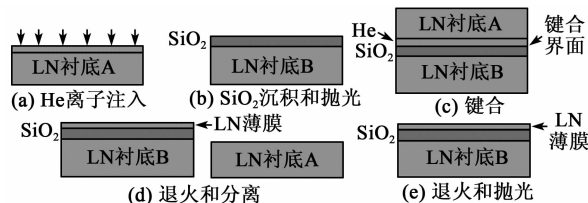


图1 LNOI的主要制备工艺流程

然而,这种 LNOI 结构的衬底为单晶 LN 晶片,由于 LN 是一种与 CMOS 不兼容的宽禁带绝缘体材料,不能用 CMOS 代工工艺进行加工处理,难以实现在微机电系统(MEMS)工艺器件上的集成,因此,目前 LN 集成光子器件仍主要基于传统离子交换技术、飞秒(fs)激光直写技术和机械切片技术等实现。这些技术与 Si 光子或 III-V 族光子器件采用的现代光刻技术或代工加工技术截然不同,尽管目前已能实现高性能的 LN 器件,但 LN 集成光子技术的发展仍落后于 III-V 族半导体集成光学和 Si 光子集成光学技术的发展。Si 不仅是微电子学中最重要基础材料,且在集成光学领域也有着重要的应用,将 Si 和 LNOI 进行异质集成以实现 Si 基 LNOI,则可以同时发挥 LN 和 Si 在高速光子芯片和 CMOS 电路方面的优势,为 LN 光路和 Si CMOS 电路实现光电混合集成提供一个有前景的平台。

2016 年,美国加州大学圣地亚哥分校和桑迪亚

国家实验室的联合研究团队采用室温键合工艺实现了无中间层 Si 单晶薄膜与 LNOI 的直接键合, 实现在 Si 衬底上的 LNOI 厚度达到几百纳米。然后, 他们采用深紫外光刻工艺成功制作了混合光子波导^[27], 该项研究验证了用于 Si 光子的晶圆级代工工艺可用于实现集成 LN 光子器件, 为发展 Si/LN 集成器件奠定了坚实的基础。

2 集成 LN 光子器件技术

LNOI 作为一种新兴的光子芯片材料正使 LN 产业发生革命性的变革, 从而能够实现具有更高性能、更低成本的全新器件及应用。目前基于 LNOI 的集成光子器件的研究热点主要包括高速电光调制器、声光调制器及光学频率梳等。

2.1 LNOI 电光调制器

光调制技术是现代高速通信网络构建中不可缺少的一环。LN 调制器是构建高速光通信网络的关键器件, 具有宽带可调, 消光比高, 技术成熟和易于工业大批量生产等优点, 在现代通信网络中得到广泛的应用。随着 5G 网络、云计算、VR、数据通信与高清视频等业务的高速发展, 带动核心光网络向超高速和超远距离传输升级, 对承载海量信息的光通信骨干网的需求也提出了更高的要求。但是受限于 LN 材料中的自由载流子效应, 传统 LN 基电光调制器的信号质量、带宽、半波电压、插入损耗等关键性能参数的提升逐渐遭遇瓶颈; 此外, 传统 LN 基电光调制器与 CMOS 工艺不兼容, 不能满足光电系统小型化、集成化的发展需求。LNOI 具有高单晶性、与衬底间折射率对比大等优势, 能够将光场约束在

亚微米尺度传输, 极大地提高了电场与光场的重叠度, 有利于器件尺寸的微缩, 为解决光电子系统小型化、集成化提供了有效的技术途径。新型铌酸锂集成电光调制器结合了成熟的硅光子技术和单晶铌酸锂薄膜的优良特性, 能够实现小尺寸、高速率和低调制电压的调制目标, 将在未来高速通信网络中发挥重要作用。

2018 年, 哈佛大学约翰保尔森工程与应用科学学院、诺基亚-贝尔实验室与中国香港城市大学的联合研究团队采用 LNOI 研制出 Si 基单片集成 LN 电光调制器^[18]。该项研究最大的突破在于采用先进的纳米制造工艺成功缩小了调制器的尺寸, 实现的器件长度 5 mm, 表面面积只有传统调制器的 1/100, 但数据传输速度高达 210 Gbits/s, 数据带宽由 35 GHz 提升至 100 GHz, 远高于传统调制器的数据传输速度和效率; 半波电压只有 1.4 V, 光损耗为 0.5 dB, 仅为传统电光调制器的 1/10, 因而具有耗电低、光损耗极低的优点。图 2 是与 CMOS 工艺兼容的 Si 基集成 LNOI 电光调制器芯片示意图。这项研究采用单片集成 LN 光子器件同时实现了低半波电压和超大电光(EO)带宽的 LNOI 电光调制器, 这种可扩展的电光调制器不仅能为下一代光通信网络和微波光子系统提供低成本、低功耗和超高速解决方案, 还能够实现皮秒时间尺度的可重构、大规模、超低损耗光子电路, 在量子光子学吉赫兹大规模开关网络、微波光子学光域无线电信号处理、自感知光网络、拓扑光子电路和光子神经网络等领域具有潜在的重大应用前景。

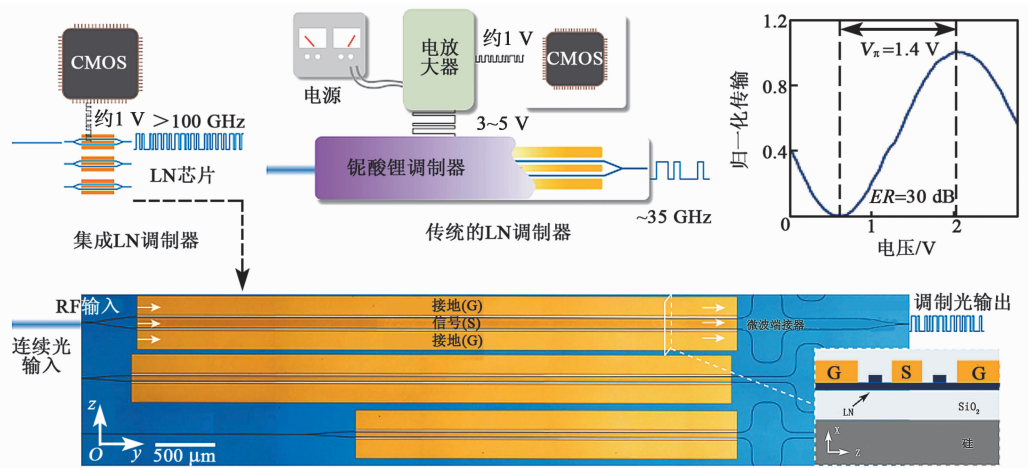


图2 集成 LNOI 电光调制器

LNOI 电光调制器工艺较复杂, 且不利于接入现有的集成光学系统, 但硅光子工艺已发展成熟并

获得了商业应用。若能实现薄膜光波导与成熟的 SOI 光波导的混合集成, 从而将 LNOI 材料纳入 Si

光子集成系统中,则将能够实现 Si 基 LN 调制器与其他集成光学器件的片上互连,在未来更有利于构建高集成度、高速光通信网络,具有良好的市场前景。超越 Si 光子的 Si/LN 混合集成电光调制器已成为 LN 电光调制器新的发展方向。

2018~2019 年,美国加州大学圣地亚哥分校、桑迪亚国家实验室和加州理工学院喷气推进实验室(JPL)的联合研究团队在 Si 光子平台上,采用常规光刻工艺和晶圆加工工艺实现了 Si/LN 混合集成的马赫-曾德尔电光调制器^[19-20]。制作器件的 LNOI 晶圆来自中国济南晶正电子科技有限公司,工艺上采用桑迪亚国家实验室的多项目晶圆(MPW)Si 光子工艺技术。图 3 为器件的制备方法,实现的混合结构电光调制器的 3 dB 电调制带宽大于 100 GHz,器件的设计与制作工艺均与 Si 光子工艺兼容。

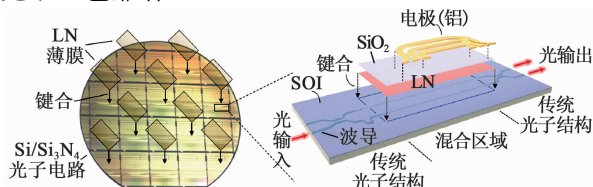


图 3 3 dB 电调制带宽大于 100 GHz 的 Si/LN 混合集成电光调制器

2020 年,中国中山大学的研究人员采用内嵌 SOI 光波导和脊形结构 LN 薄膜光波导相结合的方法,在 LN 薄膜下方放置锥形硅波导,将光完全耦合入脊形 LN 波导(见图 4^[21]),最终研制出的 Si/LN 电光调制器带宽达到 60 GHz,半波电压 2.25 V,消光比达 40 dB,调制器芯片插入损耗降至 2 dB,调制速率高达 120 Gbits/s。

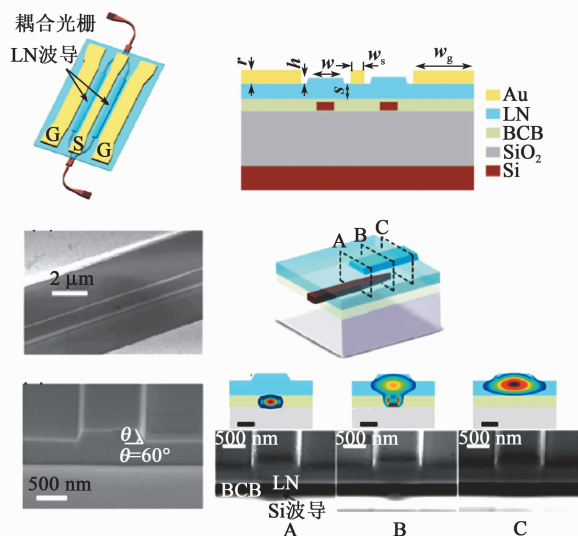


图 4 Si/LN 电光调制器

2.2 LNOI 声光调制器

无论是传统通信还是未来的超导量子计算机与全球量子网络的连接,微波信号和光信号之间的高效转换都具有重大的应用意义。与电磁介导法相比,采用机械/声学介导法具有更高的品质因数(Q)和更小的模式体积,这将成为一种新兴的微波-光信号转换的有效替代方案。目前已实验验证了在自由空间法布里-珀罗腔体内采用膜片悬浮结构能够获得令人满意的转换效率^[22],但能否实现器件的大规模集成仍面临巨大的挑战。采用纳米尺度的压电光学晶体(OMCs)虽为微波-光信号转换器提供了全集成平台^[23-24],但却存在微波-光信号转换效率低的问题。为了解决这个问题,哈佛大学约翰保尔森工程与应用科学学院、加州理工学院的联合研究团队提出了一种基于 LNOI 的集成声光马赫-曾德尔调制器,如图 5 所示^[25]。利用这种声光(AO)调制器进行了片上微波-光信号转换实验验证,AO 调制器的微波-声信号转换效率达 90%,提高了微波-光信号转换器的转换效率;器件的半波电压为 3.9 V,半波电压长度积为 0.15 V·cm,只有目前最先进的电光调制器的 1/10。研制的 AO 调制器不仅可用于微波-光信号转换器,还可用于光模式转换、片上光路由器、光脉冲合成器及吉赫兹光学频率梳,提高了系统性能并降低了所需的微波功率。

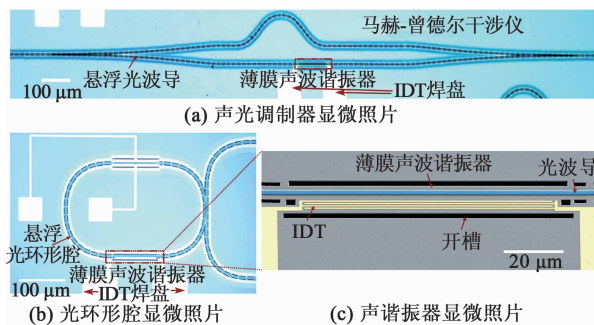


图 5 悬浮 LN 薄膜上的集成 AO 器件

2.3 LNOI 光学频率梳

光学频率梳(OFC)在本质上是一种频率精确稳定的锁模激光脉冲光源,在时域中为等间隔、等幅度的超短脉冲序列,在频域中则为规则且等间隔的梳齿线,相邻梳齿间的间隔(一般处于射频波段)精确地等于脉冲序列的重复频率。光频梳在时间-频谱上均具有极高的分辨率和稳定性,在光谱成像、光学原子钟、高精度全球定位系统、激光雷达等领域有

着重要的应用。

LNOI 微环谐振器是一种光波导器件,其具有损耗小,成本低,结构紧凑及集成度高等优点,并与 CMOS 工艺有很高的兼容性,易与其他光电器件实现单片集成,在光频梳领域具有重要的应用价值。

2019 年,哈佛大学约翰保尔森工程与应用科学学院和斯坦福大学爱德华金斯顿实验室的联合团队报道了基于 LNOI 微环谐振器实现的宽带光频梳,如图 6 所示^[26]。光频梳的梳齿带宽大于 80 nm,梳齿线大于 900 条,光输入 1 550 nm,重复率约 10 GHz,能够产生宽且稳定的梳齿频谱。

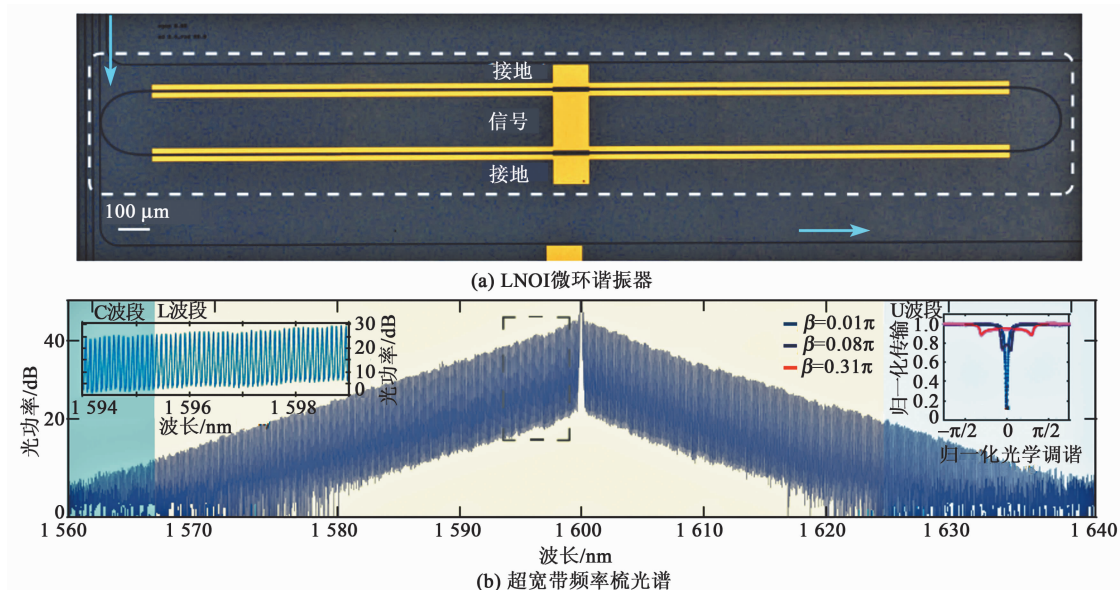


图6 集成电光频率梳

3 总结与展望

铌酸锂单晶薄膜(LNOI)具备诸多传统光子材料的高速电光调控、超低损耗、易实现高效异构集成等优越性能,为 LN 光路与 Si CMOS 电路实现光电混合集成提供了平台。因此,基于 LNOI 的集成铌酸锂光子器件正处于快速发展阶段,结合 LN 本身的多功能性和更丰富的微纳加工工艺,类型多样、结构更复杂的多功能集成光子学系统有望在 LNOI 薄膜平台上得以实现,未来在大规模光子集成、光电集成、微波光子集成等领域将具有重要的应用价值。

但是,集成铌酸锂光子器件在大规模量产及 LNOI 芯片系统的实现等方面仍面临很大的挑战。目前报道的集成铌酸锂光子器件制作技术只适合实验室原型器件的制备,探索具有代工兼容性的集成铌酸锂光子器件批量制造工艺将是未来集成铌酸锂光子器件的重要研究方向。此外,要实现 LNOI 芯片系统,除集成铌酸锂光子器件外,还需要研制极化控制器、转换器、光源、探测器及光放大器,但由于 LN 不具备直接带隙,因此,LNOI 与其他材料的异构集成(如 III-V 半导体、钢磷和锗)也是未来集成

铌酸锂光子器件的研究重点。

参考文献:

- [1] KÖSTERS M, STURMAN B, WERHEIT P, et al. Optical cleaning of congruent lithium niobate crystals [J]. Nature Photonics, 2009, 3: 510-513.
- [2] SIMÕES A Z, ZAGHETE M A, STOJANOVIC B D, et al. LiNbO₃ thin films prepared through polymeric precursor method [J]. Materials Letters, 2003, 57: 2333-2339.
- [3] LEVY M, OSGOOD R M, LIU R, et al. Fabrication of single-crystal lithium niobate films by crystal ion slicing [J]. Appl Phys Lett, 1998, 73(16): 2293-2295.
- [4] RABIEI P, GUNTER P. Optical and electro-optical properties of submicrometer lithium niobate slab waveguides prepared by crystal ion slicing and wafer bonding [J]. Appl Phys Lett, 2004, 85(20): 4603-4605.
- [5] NAKATA Y, GUNJI S, OKADA T, et al. Fabrication of LiNbO₃ thin films by pulsed laser deposition and investigation of nonlinear properties [J]. Appl Phys A, 2004, 79(416): 1279-1282.
- [6] RABIEI P, GUNTER P. Sub-micron thin films of

- lithium niobate single crystals prepared by crystal ion slicing and wafer bonding[C]//Baltimore, Maryland, USA; Conference on Lasers and Electro-Optics, 2005; 235-237.
- [7] POBERAJ G, HU Hui. Lithium niobate on insulator (LNOI) for micro-phonic devices[J]. *Laser Photonics Reviews*, 2012, 6(4): 488-503.
- [8] HAN Huangpu, CAI Lutong, HU Hui. Optical and structural properties of single-crystal lithium niobate thin film[J]. *Optical Materials*, 2015, 42:47-51.
- [9] GONG Songbin, SHI Lisha, PIAZZA G. High electromechanical coupling MEMS resonators at 530 MHz using ion sliced X-cut LiNbO₃ thin film[C]//Montreal, Quebec City, Canada; IEEE/MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2012;17-22.
- [10] MOULET J S, PIJOLAT M, DECHAMP J, et al. High piezoelectric properties in LiNbO₃ transferred layer by the smart cut(TM) technology for ultra-wide band BAW filter applications[C]//San Francisco, California, USA; IEEE International Electron Devices Meeting, 2008: 15-17.
- [11] SADAKA M, RADU I, CHRYSTELLE L B, et al. Smart stacking(TM) and smart cut(TM) technologies for wafer level 3D integration[C]//Pavia, Italy; Proceedings of 2013 International Conference on IC Design & Technology (ICICDT), IEEE, 2013: 29-31.
- [12] RADU I, NGUYEN B Y, GWELTAZ G, et al. 3D monolithic integration: stacking technology and applications [C]//Leuven, Belgium; IEEE International Conference on International Conference on IC Design & Technology (ICICDT), 2015: 1-3.
- [13] LI Chen, NAGY J, REANO R M. Patterned ion-sliced lithium niobate for hybrid photonic integration on silicon[J]. *Optical Materials Express*, 2016, 6(7): 2460-2467.
- [14] BRUNET L, FENOUILLET-BERANGER C, BATUDE P, et al. Breakthroughs in 3D sequential technology [C]//San Francisco, California, USA; IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), 2018: 1-5.
- [15] BURROWS L. Now entering, lithium niobate valley [EB/OL]. (2017-12-17)[2020-06-12]. <https://www.sciencedaily.com/releases/2017/12/171221133650.htm>
- [16] BRUEL M. Silicon on insulator material technology [J]. *Electronics Letters*, 1995, 31(14): 1201-1202.
- [17] LEVY M, OSGOOD R M, LIU R, et al. Fabrication of single-crystal lithium niobate films by crystal ion slicing[J]. *Appl Phys Lett*, 1998, 73(16):2293-2295.
- [18] WANG Cheng, ZHANG Mian, CHEN Xi, et al. Integrated lithium niobate electro-optic modulators operating at CMOS-compatible voltages[J]. *Nature*, 2018, 562:101-104.
- [19] WEIGEL P O, ZHAO Jie, FANG K, et al. Bonded thin film lithium niobate modulator on a silicon photonics platform exceeding 100 GHz 3-dB electrical modulation bandwidth[J]. *Optics Express*, 2018, 26(18): 23728-23739.
- [20] WANG Xiaoxi, WEIGEL P O, ZHAO Jie, et al. Achieving beyond-100-GHz large-signal modulation bandwidth in hybrid silicon photonics Mach Zehnder modulators using thin film lithium niobate[J]. *APL Photonics*, 2019, 4(9):1-8.
- [21] SUN Shihao, HE Mingbo. 120 Gb • s⁻¹ hybrid silicon and lithium niobate modulators with on-chip termination resistor[C]//San Diego, California, United States; Optical Fiber Communication Conference, 2020.
- [22] HIGGINBOTHAM A P, BURNS P S, URMEY M D, et al. Harnessing electro-optic correlations in an efficient mechanical converter[J]. *Nature Physics*, 2018, 14:1038-1042.
- [23] JIANG Wentao, PATEL R N, MAYOR F M, et al. Lithium niobate piezo-optomechanical crystals[J]. *Optica*, 2019, 6(7):845-853.
- [24] FORSCH M, STOCKILL R, WALLUCKS A, et al. Microwave-to-optics conversion using a mechanical oscillator in its quantum ground state[J]. *Nature Physics*, 2020, 16:69-74.
- [25] SHAO Linbo, YU Mengjie, MAITY S, et al. Microwave-to-optical conversion using lithium niobate thin-film acoustic resonators [J]. *Optica*, 2019, 6(12): 1498-1505.
- [26] ZHANG Mian, BUSCAINO B, WANG Cheng, et al. Broadband electro-optic frequency comb generation in a lithium niobate microring resonator[J]. *Nature*, 2019, 568:373-377.
- [27] WEIGEL P O, SAVANIER M, DEROSE C T, et al. Lightwave circuits in lithium niobate through hybrid waveguides with silicon photonics[J]. *Nature Science Reports*, 2016, 6:1-9.

基于区间二型 T-S 模糊系统的压电迟滞特性建模

陈圣鑫, 赵新龙, 苏强, 苏良才

(浙江理工大学 机械与自动控制学院, 浙江 杭州 310018)

摘要:为了辨识压电驱动器中固有的迟滞特性,提出了一种基于区间二型 Takagi-Sugeno(T-S)模糊系统的建模方案。首先,引用垂直距离公式替换传统的误差计算公式,使聚类算法与所辨识的超平面结果直接相关联,并提出了改进的区间二型模糊 C 回归模型(FCRM)聚类算法用于模糊空间的划分,提高了区间划分精度。其次,针对超球型高斯隶属度函数与超平面型聚类算法结构不匹配的问题,引入了与超平面相匹配的超平面隶属度函数完成模糊前件参数的辨识,并利用最小二乘法完成模糊后件参数的辨识。最后,利用上述方案完成了压电驱动器迟滞特性的建模。实验结果证明该方案是有效的。

关键词:压电驱动器;迟滞非线性;Takagi-Sugeno(T-S)模糊系统;模糊 C 回归模型;区间二型模糊集

中图分类号:TN273;TM22 **文献标志码:**A **DOI:**10.11977/j.issn.1004-2474.2020.06.024

Modeling of Piezoelectric Hysteresis Based on Interval Type-2 T-S Fuzzy System

CHEN Shengxin, ZHAO Xinlong, SU Qiang, SU Liangcai

(College of Mechanical Engineering and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract:In order to identify the inherent hysteresis characteristic of the piezoelectric actuator, a modeling scheme based on the interval type-2 Takagi-Sugeno(T-S) fuzzy system is proposed in this paper. First, the vertical distance formula is used to replace the traditional error calculation formula, so that the clustering algorithm is directly related to the identified regression plane results, and a modified interval type-2 fuzzy C-regression model(FCRM) clustering algorithm is proposed to divide the fuzzy space and improve the accuracy of interval division. Second, in view of the problem that the hyperspherical Gaussian membership function does not match the structure of the hyperplane clustering algorithm; the hyperplane membership function matching with the hyperplane is introduced to complete the identification of the fuzzy antecedent parameters, and the least square method is used to identify the fuzzy consequent parameters. Finally, the hysteresis characteristics of the piezoelectric actuator are modeled by using the above-mentioned scheme. The effectiveness of the proposed modeling method is verified by experiments.

Key words:piezoelectric actuator; hysteresis nonlinearity; T-S fuzzy system; fuzzy C-regression model; interval type-2 fuzzy sets

0 引言

压电驱动器作为一种可以将电能转化为机械运动的微位移元件,由于其体积小,精度高等特点被广泛应用于超精密系统中。但是,其固有的迟滞特性会降低精密系统中的控制精度,甚至影响系统的稳定性^[1-3],故而需要对迟滞进行建模。Takagi-Sugeno(T-S)模糊模型因其结构简单、辨识精度高的特点而被广泛应用于复杂非线性系统的建模^[4-6]。T-S 模型的结构辨识主要包括模糊区间的划分、模糊

前件参数和后件参数辨识。

在模糊区间划分方面,模糊聚类算法得到了广泛应用,主要有模糊 C 均值(FCM)聚类算法和模糊 C 回归模型(FCRM)聚类算法等。其中,FCM 聚类算法作为以欧氏距离为依据进行区间划分的方法,更适用于超球型的模型结构。FCRM 聚类算法作为一种超平面型聚类算法,其迭代产生的超平面与 T-S 模糊模型的子模型有相似的结构,FCRM 聚类算法更适合于 T-S 模型模糊区间的划分。KUNG 等^[7]提出了 FCRM 聚类算法的有效性准则,用来选择合适

收稿日期:2020-06-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61273184)

作者简介:陈圣鑫(1996-),男,山东泰安人,硕士生,主要从事非线性迟滞系统建模和控制的研究。通信作者:赵新龙(1977-),男,山东海阳人,教授,博士,主要从事精密机电系统建模与控制、智能控制的研究。

的聚类个数,但对于给定的压电输入信号来说,所需划分的聚类个数有限,并不需要有效性准则的判断。CHANG 等^[8]使用垂直距离公式替换了传统聚类算法的误差公式,使聚类划分更准确,但并未进一步考虑聚类算法和模型的结构匹配问题。在模糊前件参数辨识方面,LI 等^[9]提出了新的超平面型隶属度函数,解决了传统超球面钟型高斯函数与超平面型 FCRM 聚类算法结构不匹配的问题。在后件参数辨识方面,利用最小二乘法来完成模糊后件参数的辨识。

基于一型模糊集的 T-S 模糊系统已用于复杂非线性系统建模^[10-11],但是一型模糊集的隶属度值是清晰的,在处理不确定性方面存在局限性^[12-14]。区间二型模糊集通过将隶属度由清晰值扩展到一个区间值,把隶属度进一步模糊化,可以更有效地处理系统的不确定性和非线性^[15-17]。

本文基于文献^[18]提出的区间二型 FCRM 聚类算法,用垂直距离更新了算法中的误差计算^[8],提出了改进的区间二型 FCRM 聚类算法。引入超平面隶属度函数^[9],解决了超球型高斯隶属度函数与改进超平面型聚类算法的结构不匹配的问题。与其他建模方法相比,本文的创新点是:

1) 用垂直距离公式替换了传统 FCRM 聚类算法的误差公式,使聚类算法与其所辨识的超平面结果直接相关联,提高了模糊区间划分精度。

2) 用超平面隶属度函数替换了传统的超球型高斯隶属度函数,使其与改进超平面型聚类算法的结构相匹配,提高了建模精度。

1 基于区间二型 T-S 模糊模型的压电迟滞特性建模

1.1 压电驱动器迟滞建模

本文针对压电驱动器的迟滞特性,设计了一种基于区间二型 T-S 模糊系统的迟滞模型。 $\mathbf{x}(k)=[v(k), v(k-1), y(k-1)]$ 和 $\hat{y}(k)$ 分别作为区间二型 T-S 模糊系统的输入和输出。其中, $k=2, 3, \dots, n$, n 为样本数目, $v(k)$ 为压电驱动器的电压输入, $y(k-1)$ 为压电驱动器上一时刻的位移输出。

区间二型 T-S 模糊模型的结构辨识过程如下:

1) 利用聚类算法对数据 $(\mathbf{x}(k), \hat{y}(k))$ 进行模糊区间的划分。

2) 结合模糊隶属度函数进行模糊模型前件参

数的辨识。

3) 利用最小二乘法进行模糊模型后件参数的辨识。

1.2 区间二型 T-S 模糊模型辨识

1.2.1 模糊空间划分

假设将 n 个数据 $(\mathbf{x}_k, y_k) (k=2, \dots, n)$ 划分为 c 个聚类,则每个聚类中的数据样本都符合一个线性回归模型,该模型实际上是一个超平面回归函数,其中第 $i (i=1, \dots, c)$ 个超平面可表示为

$$\hat{y}_k^i = \mathbf{Q}_{i0} + x_{k1}\mathbf{Q}_{i1} + \dots + x_{kM}\mathbf{Q}_{iM} = [1 \quad \mathbf{x}_k] \cdot \mathbf{Q}_i \quad (1)$$

式中: $\mathbf{x}_k = [x_{k1}, \dots, x_{kM}]$ 为第 k 个输入向量; M 为输入向量的维数; $\hat{y}_k^i$ 为第 i 个超平面的输出; $\mathbf{Q}_i = [\mathbf{Q}_{i0}, \dots, \mathbf{Q}_{iM}]^T$ 为第 i 个超平面的待辨识参数。

为了匹配二型模糊区间的上、下隶属度,引用上、下超平面的形式^[18]。利用加权最小二乘法,得到上、下超平面系数:

$$\bar{\mathbf{Q}}_i = [\mathbf{X}^T \bar{\mathbf{W}}_i \mathbf{X}]^{-1} \mathbf{X}^T \bar{\mathbf{W}}_i \mathbf{Y} \quad (2)$$

$$\underline{\mathbf{Q}}_i = [\mathbf{X}^T \underline{\mathbf{W}}_i \mathbf{X}]^{-1} \mathbf{X}^T \underline{\mathbf{W}}_i \mathbf{Y} \quad (3)$$

其中

$$\mathbf{X}^T = [1 \quad \mathbf{x}_k]_{(M+1) \times (n-1)} \quad (4)$$

$$\mathbf{Y} = [y_k]_{(n-1) \times 1} \quad (5)$$

$$\bar{\mathbf{W}}_i = \begin{bmatrix} \bar{u}_{i2} & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \bar{u}_{i3} & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \bar{u}_{ik} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & \bar{u}_{in} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\underline{\mathbf{W}}_i = \begin{bmatrix} \underline{u}_{i2} & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \underline{u}_{i3} & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \underline{u}_{ik} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & \underline{u}_{in} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: $\bar{\mathbf{Q}}_i$ 和 $\underline{\mathbf{Q}}_i$ 分别为第 i 个上、下超平面的待辨识参数; $\bar{u}_{ik}$ 和 $\underline{u}_{ik}$ 分别为第 k 组数据对于第 i 个上、下超平面的隶属度。

降型得超平面系数^[18]:

$$\underline{Q}_i = \frac{\bar{Q}_i + \underline{Q}_i}{2} \quad (8)$$

为了使聚类划分更精确,引入了垂直距离公式^[8]:

$$d_{ik}(\underline{Q}_i) = \frac{|[1 \quad \mathbf{x}_k] \cdot \underline{Q}_i|}{\|\underline{Q}_i\|} \quad (9)$$

式中 $d_{ik}(\underline{Q}_i)$ 为 $\mathbf{x}_k$ 到第 i 个超平面的垂直距离。

当 $\sum_{i=1}^c u_{ik} = 1, k = 2, 3, \dots, n$ 时,利用模糊加权指数 m_1 和 m_2 ^[18] 可得两个独立的目标函数:

$$\min J_{m_1}(\mathbf{U}, \underline{Q}_i) = \sum_{k=2}^n \sum_{i=1}^c (u_{ik})^{m_1} \exp(d_{ik}^2(\underline{Q}_i)) \quad (10)$$

$$\min J_{m_2}(\mathbf{U}, \underline{Q}_i) = \sum_{k=2}^n \sum_{i=1}^c (u_{ik})^{m_2} \exp(d_{ik}^2(\underline{Q}_i)) \quad (11)$$

式中: $m_1, m_2 \in (1, \infty)$ 且 $m_1 \neq m_2$; $\mathbf{U} = [u_{ik}]_{c \times (n-1)}$ 为模糊划分矩阵; $u_{ik} \in [0, 1]$ 为第 k 组数据隶属于第 i 个超平面的隶属度。

利用拉格朗日乘子法,式(10)、(11)可写为

$$L_1(\mathbf{U}, \lambda) = \sum_{i=1}^c \sum_{k=2}^n (u_{ik})^{m_1} \exp(d_{ik}^2(\underline{Q}_i)) - \sum_{k=2}^n \lambda_k \left(\sum_{i=1}^c u_{ik} - 1 \right) \quad (12)$$

$$L_2(\mathbf{U}, \lambda) = \sum_{i=1}^c \sum_{k=2}^n (u_{ik})^{m_2} \exp(d_{ik}^2(\underline{Q}_i)) - \sum_{k=2}^n \lambda_k \left(\sum_{i=1}^c u_{ik} - 1 \right) \quad (13)$$

式中: λ_k 为拉格朗日乘子; $L_1(\mathbf{U}, \lambda)$ 和 $L_2(\mathbf{U}, \lambda)$ 分别对 λ_k 和 u_{ik} 求偏导,得到 u_{ik} 的最优值:

$$u_{ik}(L_1) = \frac{\{\exp[-d_{ik}^2(\underline{Q}_i)]\}^{\frac{1}{m_1-1}}}{\sum_{i=1}^c \{\exp[-d_{ik}^2(\underline{Q}_i)]\}^{\frac{1}{m_1-1}}} \quad (14)$$

$$u_{ik}(L_2) = \frac{\{\exp[-d_{ik}^2(\underline{Q}_i)]\}^{\frac{1}{m_2-1}}}{\sum_{i=1}^c \{\exp[-d_{ik}^2(\underline{Q}_i)]\}^{\frac{1}{m_2-1}}} \quad (15)$$

由于 $m_1 \neq m_2$, 可得 $\bar{u}_{ik}$ 和 $\underline{u}_{ik}$ 的表达式:

$$\bar{u}_{ik} = \max(u_{ik}(L_1), u_{ik}(L_2)) \quad (16)$$

$$\underline{u}_{ik} = \min(u_{ik}(L_1), u_{ik}(L_2)) \quad (17)$$

降型得隶属度 u_{ik} 的精确值^[18]:

$$u_{ik} = \frac{\bar{u}_{ik} + \underline{u}_{ik}}{2} \quad (18)$$

根据式(2)~(18),改进的区间二型 FCRM 聚类算法可以完成构建。该算法主要任务是把输入的数据对划分为 c 个聚类,同时输出 $\bar{Q}_i$ 和 $\underline{Q}_i$ 。步骤如下:

步骤 1: 定义聚类个数 c, m_1 和 m_2 且 $m_1 \neq m_2$, 终止阈值 ϵ 。初始化模糊划分矩阵 $\mathbf{U}_{c \times (n-1)}^0$, 设置初始迭代计数器 $r=0$ 。

步骤 2: 通过式(2)、(3)分别计算 $\bar{Q}_i$ 和 $\underline{Q}_i$, 通过式(8)降型得到 $\underline{Q}_i$; 通过式(9)计算 $d_{ik}(\underline{Q}_i)$ 。

步骤 3: 通过式(14)~(17)计算 $\bar{u}_{ik}$ 和 $\underline{u}_{ik}$ 。

步骤 4: 通过式(18)得到 u_{ik} , 得到新的模糊划分矩阵 $\mathbf{U}^{r+1} = [u_{ik}]_{c \times (n-1)}$ 。

步骤 5: 比较 $\mathbf{U}^r$ 和 $\mathbf{U}^{r+1}$, 如果满足 $\|\mathbf{U}^r - \mathbf{U}^{r+1}\| \leq \epsilon$, 迭代结束; 否则, $r=r+1$, 重复步骤 2~5。

引用式(9)替代了文献[18]中的误差计算公式, 通过使聚类算法与其所辨识的超平面结果直接相关, 使聚类的划分更精确。

1.2.2 前件参数辨识

钟型高斯函数作为超球面隶属度函数, 具有明确的聚类中心和宽度, 与本文所提超平面聚类算法结构不符。本文采用超平面隶属度函数^[9], 则输入 $\mathbf{x}_k$ 对应第 i 个模糊集合 B^i 的上、下模糊隶属度函数为

$$\bar{\mu}_{B^i}(\mathbf{x}_k) = \exp\left(-\tau \cdot \frac{d_{ik}(\bar{Q}_i)}{\max(\{d_{ik}(\bar{Q}_i), i = 1, \dots, c\})}\right) \quad (19)$$

$$\underline{\mu}_{B^i}(\mathbf{x}_k) = \exp\left[-\tau \cdot \frac{d_{ik}(\underline{Q}_i)}{\max(\{d_{ik}(\underline{Q}_i), i = 1, \dots, c\})}\right] \quad (20)$$

式中: $\tau \in [1, 100]$ 为一个可调整的常数; $d_{ik}(\bar{Q}_i)$ 和 $d_{ik}(\underline{Q}_i)$ 由式(9)计算得到; B^i 为第 i 条规则对应的模糊集合。

第 i 条规则的激活强度 $\omega^i(\mathbf{x}_k)$ 为

$$\omega^i(\mathbf{x}_k) = \frac{\bar{\mu}_{B^i}(\mathbf{x}_k) + \underline{\mu}_{B^i}(\mathbf{x}_k)}{2} \quad (21)$$

输入 $\mathbf{x}_k$ 对应的区间二型 T-S 模糊模型的输出如下:

$$\hat{y}_k = \frac{\sum_{i=1}^c \omega^i(\mathbf{x}_k) \cdot \hat{y}_k^i}{\sum_{i=1}^c \omega^i(\mathbf{x}_k)} \quad (22)$$

1.2.3 后件参数辨识

确定了模糊前件,可以通过下式得到模糊后件参数:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \lambda_2^1 & \lambda_2^1 x_{21} & \cdots & \lambda_2^1 x_{2M} & \cdots & \lambda_2^c & \lambda_2^c x_{21} & \cdots & \lambda_2^c x_{2M} \\ \lambda_3^1 & \lambda_3^1 x_{31} & \cdots & \lambda_3^1 x_{3M} & \cdots & \lambda_3^c & \lambda_3^c x_{31} & \cdots & \lambda_3^c x_{3M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda_n^1 & \lambda_n^1 x_{n1} & \cdots & \lambda_n^1 x_{nM} & \cdots & \lambda_n^c & \lambda_n^c x_{n1} & \cdots & \lambda_n^c x_{nM} \end{bmatrix} \quad (24)$$

其中

$$\lambda_k^i = \frac{\omega^i}{\sum_{i=1}^c \omega^i} \quad (25)$$

$$\omega^i = \frac{\mu_{B^i}(\mathbf{x}_k) + \mu_{\bar{B}^i}(\mathbf{x}_k)}{2} \quad (26)$$

在本文中,利用最小二乘法来辨识式(23)中的 θ 为

$$\theta = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{y} \quad (27)$$

2 实验与仿真

整个实验平台由压电驱动器(PZT-752.21C)、dSPACE DS1103、电压放大模块(E-505.00)、传感器模块(E-509.C1A)、控制台组成,用于实验数据的采集,实验平台如图1所示。然后针对10 Hz、50 Hz、100 Hz正弦输入进行模型验证。最后在正弦衰减输入下,与文献[10]中的建模方案进行对比。



图1 实验平台

输入信号为 $x(t) = 0.1 \sin(2\pi ft)$, 输入频率 $f = 10$ Hz、50 Hz、100 Hz, 给定参数 $\tau = 4$, $c = 5$, $m_1 = 1.7$, $m_2 = 3.3$, $\epsilon = 0.001$ 。

图2~4为 $f = 10$ Hz、50 Hz、100 Hz时模型输出与实际输出曲线。图5~7为 $f = 10$ Hz、50 Hz、100 Hz时的误差曲线。表1为不同输入频率下的模型误差。

$$\mathbf{y} = \mathbf{A} \cdot \theta \quad (23)$$

式中: $\theta = [\theta_0^1, \dots, \theta_M^1, \dots, \theta_0^c, \dots, \theta_M^c]^T$ 为待辨识后件参数; $\mathbf{y} = [y_2, y_3, \dots, y_n]^T$ 为系统的目标输出; 系数 $\mathbf{A}$ 为

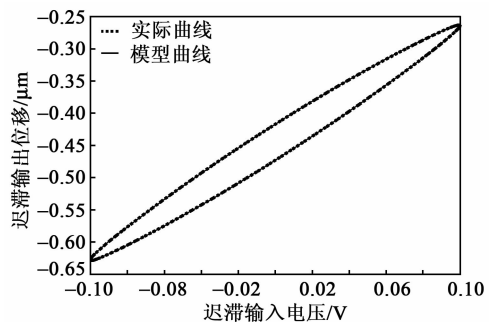


图2 $f = 10$ Hz时实际与模型输出曲线

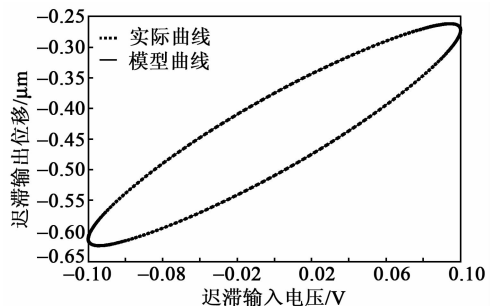


图3 $f = 50$ Hz时实际与模型输出曲线

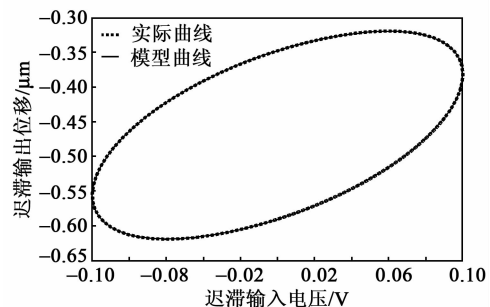


图4 $f = 100$ Hz时实际与模型输出曲线

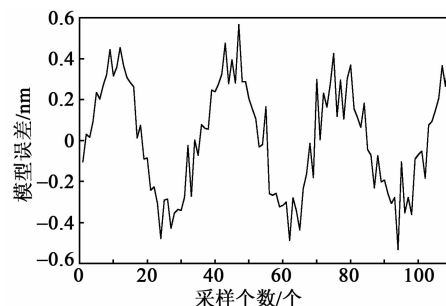


图5 $f = 10$ Hz时实际模型误差曲线

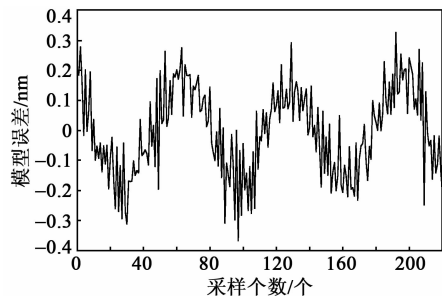


图 6 $f=50$ Hz 时实际模型误差曲线

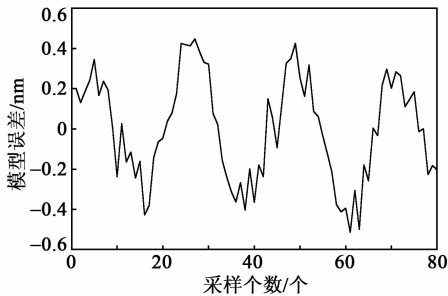


图 7 $f=100$ Hz 时实际模型误差曲线

表 1 不同输入频率下的模型误差

f/Hz	最大误差/ nm	最大相对 误差/%	均方差/ pm	模糊规 则数目
10	0.576 2	3.546×10^{-4}	7.285	7
50	0.347 7	7.352×10^{-4}	2.119	7
100	0.441 0	8.466×10^{-4}	4.565	7

为了验证该模型的辨识精度,选择超球面型隶属度函数的建模方案作为对比。在正弦衰减输入信号作用下,均采用三输入-单输出的模型结构,将本文模型与文献[10]中的建模方案进行比较。输出曲线及误差曲线对比分别如图 8、9 所示。模型对比如

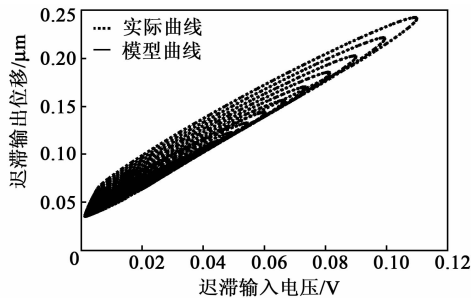


图 8 实际输出与模型输出曲线

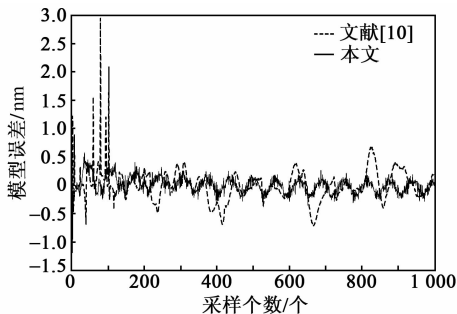


图 9 本文与文献[10]建模误差对比

表 2 所示。

表 2 本文与文献[10]模型参数对比

频率/ Hz	最大误差/ μm	最大相对 误差/%	均方差/ pm	模糊规 则数目
文献[10]	0.016 1	0.018 6	658.900	10
本文	0.001 2	0.001 3	2.176	7

3 结束语

本文建立了压电驱动器迟滞特性的区间二型 T-S 模糊模型。引用垂直距离公式替代了传统的误差公式,提出了改进的区间二型 FCRM 聚类算法用于模型的结构辨识,并引入了与该超平面型聚类算法结构相匹配的超平面隶属度函数,提高了建模精度。实验结果表明,该建模方案可以有效地辨识压电驱动器的迟滞特性。

参考文献:

[1] 郭亚子,朱玉川. 压电叠堆执行器迟滞非线性建模与分析[J]. 压电与声光,2017,39(4):520-524.
GUO Yazi, ZHU Yuchuan. Modeling and analysis on hysteresis nonlinear characteristics of the piezoelectric stack actuators[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2017, 39(4):520-524.

[2] 魏强,胡承忠,张栋,等. 压电驱动微定位工作台的建模[J]. 压电与声光,2010,32(2):247-250.
WEI Qiang, HU Chengzhong, ZHANG Dong, et al. Modeling of micro-positioning stage driven by PZT[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2010, 32(2):247-250.

[3] 王晓东,江国栋. 压电陶瓷迟滞建模及控制仿真[J]. 压电与声光,2015,37(6):926-929.
WANG Xiaodong, JIANG Guodong. Hysteresis modeling and control simulation of piezoelectric ceramic[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2015, 37(6):926-929.

[4] 李浩,李士勇. 一种基于量子遗传算法的扩展 T-S 模型辨识[J]. 控制与决策,2013(8):150-154.
LI Hao, LI Shiyong. An extended T-S model identification based on quantum genetic algorithm[J]. Control & Decision, 2013(8):150-154.

[5] 梁炎明,刘丁,伍光宇. 基于自适应重叠系数的 T-S 模型在线辨识算法及应用[J]. 控制与决策,2012, 27(9):1425-1428.
LIANG Yanming, LIU Ding, WU Guangyu. Online T-S model identification algorithm based on adaptive overlap coefficient and its application[J]. Control & Decision, 2012, 27(9):1425-1428.

(下转第 853 页)

基于 SINS/RTK 的动平台起降无人机导航系统研制

李星海¹, 闫志安², 徐亮², 许常燕¹, 李宝林¹, 龚巧¹

(1. 中国电科重庆声光电有限公司, 重庆 400031; 2. 中电科特种飞机系统工程有限公司, 四川 成都 610036)

摘要:针对无人机在动平台起降时对导航系统提出的导航精度高, 解算无人机与动平台降落点的相对定位精度高, 体积小及质量小等要求, 该文基于捷联惯性导航(SINS)、北斗动载波相位差分(RTK)技术及采用卡尔曼滤波多源导航信息融合技术, 研制了动平台起降无人机导航系统。试验结果表明, 系统地理系导航精度: 航向 $\leq 0.2^\circ(1\sigma(\sigma \text{ 为方差}))$, 姿态 $\leq 0.15^\circ(1\sigma)$, 水平定位 $\leq 0.4 \text{ m}(1\sigma)$, 高度 $\leq 0.8 \text{ m}(1\sigma)$; 动态下导航系统与移动基准站相对精度: 水平定位 $\leq 0.05 \text{ m}(1\sigma)$, 高度 $\leq 0.1 \text{ m}(1\sigma)$ 。飞行试验表明, 导航系统满足无人机在动平台起降对导航精度的要求。

关键词:捷联惯性导航系统(SINS); 北斗卫星导航; 载波相位差分(RTK); 无人机; 动平台; 相对定位; 北斗基准站

中图分类号: TN965; TN384

文献标志码: A

DOI: 10.11977/j.issn.1004-2474.2020.06.025

Development of UAV Navigation System for Taking-off and Landing on Moving Platform Based on SINS/RTK

LI Xinghai¹, YAN Zhi'an², XU Liang², XU Changyan¹, LI Baolin¹, GONG Qiao¹

(1. Chongqing Acoustic-Optic-Electronic CO., Ltd., Chongqing 400031, China;

2. CETC Special Mission Aircraft System Engineering Co., Ltd., Chengdu 610036, China)

Abstract: In response to the requirements of high navigation accuracy, high calculation precision of the relative positioning between the UAV and the landing point on the moving platform, small size and light weight of the navigation system, a UAV navigation system for taking-off and landing on moving platform is developed based on the strapdown inertial navigation(SINS), BEIDOU carrier phase differential technique (that is, the real-time kinematic technique, RTK) and the multi-source navigation information fusion technology based on Kalman filtering. The experimental results show that the accuracy of the navigation system of the geographical system is as follows, heading of less than or equal to $0.2^\circ(\sigma \text{ is the square difference})$, attitude of less than or equal to $0.15^\circ(1\sigma)$, horizontal positioning of less than or equal to $0.4 \text{ m}(1\sigma)$, and altitude of less than or equal to $0.8 \text{ m}(1\sigma)$; and the relative accuracy of the navigation system and the mobile reference station at dynamic conditions is as follows, horizontal positioning of less than or equal to $0.05 \text{ m}(1\sigma)$, altitude of less than or equal to $0.1 \text{ m}(1\sigma)$. The flight tests show that the proposed navigation system meets the navigation accuracy requirements of UAV's taking off and landing on the moving platform.

Key words: strapdown inertial navigation system(SINS); Beidou navigation satellite system; carrier phase differential technique(RTK); UAV; moving platform; relative positioning; Beidou base station

0 引言

微小型无人机(UAV)具有无人员伤亡, 质量小, 体积小, 成本低及航时长等优点, 在目标搜索、监视与跟踪、地理测绘、救灾、信息中继等领域具有重

要价值, 受到各国的重视。现代装备对无人机要求也越来越高, 能够在移动平台上起降是对无人机提出的一项新的技术要求^[1-4]。本文针对某型无人机在移动平台上起降需求, 研制了一款小型一体化导

收稿日期: 2020-07-29

作者简介: 李星海(1973-), 男, 重庆人, 高级工程师, 硕士, 主要从事惯性及组合导航、微系统及系统集成技术的研究。E-mail: lixinghaidavid@163.com。

航飞控系统,其中导航系统是基于捷联惯性导航系统(SINS)和动载波相位差分(RTK)北斗卫星导航技术进行研制的。

1 基于 SINS/动 RTK 的导航系统架构

基于 SINS/动 RTK 的无人机动平台导航系统由移动平台(如船载)系统和无人机载一体化导航飞控系统组成,如图 1 所示。

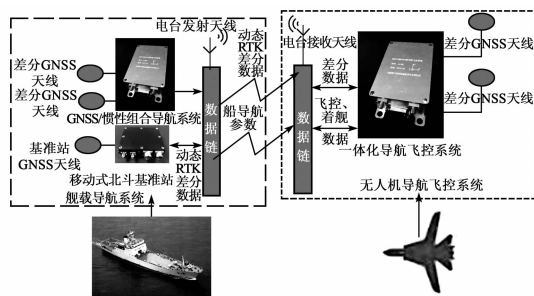


图 1 基于 SINS/北斗 RTK 导航系统组成框图

移动平台载系统由卫星/SINS 组合导航系统、北斗 RTK 移动基准站、数据链等部分构成,其中数据链划分为两个独立的信道,信道 1 向无人机实时发送移动平台的航向、姿态、速度、经纬高度等导航参数,信道 2 向无人机北斗移动站发送北斗基准站的 RTK 差分修正信息。

无人机载一体化导航飞控系统为无人机提供导航参数,完成无人机飞行控制、任务管理等功能。其中导航系统通过数据链实时接收移动基准站发送的 RTK 差分修正数据,进行动态 RTK 差分。采用卡尔曼滤波融合 SINS 和北斗 RTK 信息,实时解算以基准站为原点的坐标系下无人机东、北、天坐标及地理系下无人机的航向、姿态、速度、位置等导航参数,从而计算出基准站与无人机之间的厘米级精度矢量基线(包括相对水平距离和相对高度),基准站(或附近设定点)的位置即是无人机预定的着舰点,引导无人机完成精确着舰。

2 系统硬件设计

无人机一体化导航飞控机载系统主要包括导航系统和飞控系统(见图 2),其中系统主要由两套对称的主、辅导航微系统、北斗 RTK 模块及二次电源等组成。系统采用两余度冗余设计,其中每个导航微系统由惯性测量单元(IMU)、三轴磁场计、气压高度计、空速计(压差传感器)等组成的多源信息融合传感器单元和微型导航计算机等构成。

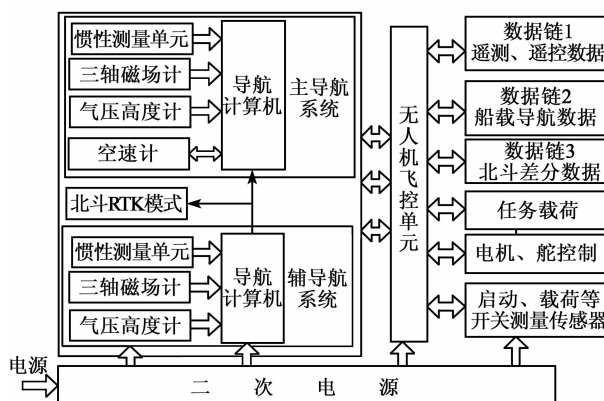


图 2 无人机一体化导航飞控系统组成框图

2.1 多源信息融合传感器单元

多源信息融合传感器单元是导航系统的核心,其中 IMU 是基于二十六所研制的石英微机械(MEMS)陀螺,并采用三维异构集成的微系统技术研制,系统集成了 3 个单轴的石英陀螺、1 个三轴加速计、1 个三轴磁场计、1 个大气压力计、1 个压差传感器(用作空速计)。这些高精度传感器均为 MEMS 传感器,其主要性能如下:

陀螺测量范围: $\pm 400 (^{\circ})/s$;

陀螺零偏稳定性: $5 (^{\circ})/h$;

加速度计测量范围: $\pm 8 g (g=9.8 m/s^2)$;

加速度计零偏稳定性: $0.1 mg$;

三轴磁力计测量范围: $\pm 8 \times 10^{-4} T$, 分辨率: $7.3 \times 10^{-8} T$;

气压力计测量范围: $1 \sim 120 kPa$, 分辨率: $0.0018 kPa$;

压差传感器测量范围: $\pm 6.895 kPa$, 分辨率: $0.6 Pa$ 。

多源信息融合传感器单元中的各种敏感器件都必须精确标定、补偿。其中陀螺、加速度计、磁场计在带温控的转台上进行标定,然后补偿零位、比例系数、温度系数等;气压计和压差传感器使用标准的压力标定系统进行标定,据此补偿零位、比例系数、温度系数。

2.2 动 RTK 北斗模块

RTK 载波相位差分技术是以载波相位观测值进行实时动态相对定位的技术,实时处理两个测量站载波相位观测量的差分方法,将基准站采集的载波相位发给移动站,移动站接收机计算出地理系下三维坐标,又采用 RTK 计算出相对坐标系下坐标。

北斗模块主要技术指标如下:

支持双天线卫星导航定位定向,支持北斗、GPS、GLONASS 及 Galileo 系统;

水平定位精度:1.5 m(单点),0.4 m(伪距差分),1 cm+1×10⁻⁶ (RTK);

高程定位精度:2.5 m(单点),0.8 m(伪距差分),1.5 cm+1×10⁻⁶ (RTK);

速度:≤0.05 m/s;

定向精度:≤0.2°/L(L 为基线度)。

船载北斗模块设置为移动基准站,输出 RTCM 3.0 差分数据,频率 10 Hz。无人机载北斗模块设置为北斗移动站,导航系统从中提取经度、纬度、高度、速度、经纬高度标准差、北斗航向及差分模式下东北天相对距离等。

2.3 组合导航计算机

无人机系统使用了两套独立的微型低功耗导航计算机,导航计算机的功能如下:

- 1) 提供与各种传感器的硬件接口。
- 2) 多源信息融合传感器数据采集。
- 3) 各种传感器参数误差补偿。
- 4) 完成捷联惯性导航解算,包括初始对准、捷

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{F}(t)\mathbf{X}(t) + \mathbf{G}(t)\mathbf{w}(t) \quad (1)$$

式中: $\mathbf{F}(t)$ 为状态转移矩阵; $\mathbf{G}(t)$ 噪声驱动矩阵; $\mathbf{X}(t)$ 为 18 阶状态变量,分别是东北天速度误差变量、纬度、经度、高度误差变量、俯仰、滚动、航向误差变量、 x 、 y 、 z 轴陀螺漂移变量、 x 、 y 、 z 轴加速度计零偏变量和 x 、 y 、 z 轴陀螺比例系数误差变量,即

根据惯导系统平台误差角方程、速度误差方程、位置误差方程和陀螺、加速度计的随机误差方程,建立系统误差向量状态方程组^[6]:

$$\dot{\mathbf{Z}}(t) = \mathbf{H}(t)\mathbf{X}(t) + \mathbf{v}(t) \quad (3)$$

式中: $\mathbf{H}(t)$ 观测矩阵; $\mathbf{v}(t)$ 观测噪声。

导航系统可在有北斗导航和无北斗导航模式下工作。当系统工作在 SINS 与北斗组合模式时,使用由动 RTK 差分北斗输出的导航参数作为观测量,即

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} V_{GE} - V_{IE} \\ V_{GN} - V_{IN} \\ L_G - L_I \\ \lambda_G - \lambda_I \\ h_G - h_I \\ \phi_G - \phi_I \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: L_G 、 λ_G 、 h_G 分别为北斗输出的纬度、经度及高度值; L_I 、 λ_I 、 h_I 分别为捷联惯导系统所输出的纬度、经度和高度值; V_{GE} 、 V_{GN} 分别为北斗输出的东向、北向的速度; V_{IE} 、 V_{IN} 分别为捷联惯导系统输出的东

联姿态解算及速度、位置计算。

5) 完成惯导与北斗、磁场计、大气数据的卡尔曼滤波信息融合,并对系统误差状态向量进行反馈校正。

自行研制微型导航计算机,其特点是:

1) 体积小(尺寸仅为 2.9 cm×2.4 cm)。

2) 功耗低(0.45 W)。

3) 采用两个 ARM M7 CPU,每个 CPU 算力达到 1 027 DMIPS。

4) 接口众多,满足与各种传感器、飞控计算机、数据链、光电吊舱等通信需求。

3 系统算法

导航系统采用卡尔曼滤波信息融合,卡尔曼滤波状态方程^[5]:

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{F}(t)\mathbf{X}(t) + \mathbf{G}(t)\mathbf{w}(t) \quad (1)$$

向、北向速度; ϕ_G 为北斗输出的航向角; ϕ_I 为捷联惯导系统输出的航向角^[7]。因此,可得系统的观测方程^[8]为

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{2 \times 2} & \mathbf{0}_{2 \times 16} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 12} \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 & \mathbf{0}_{1 \times 14} \end{bmatrix} \mathbf{X}_{18} + \begin{bmatrix} v_{VE} \\ v_{VN} \\ v_L \\ v_\lambda \\ v_h \\ v_\psi \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中

$$\mathbf{v} = [v_{VE} \ v_{VN} \ v_L \ v_\lambda \ v_h \ v_\psi]^T \quad (6)$$

式中: $\mathbf{v}$ 为观测信号的测量白噪声; v_{VE} 、 v_{VN} 、 v_L 、 v_λ 、 v_h 、 v_ψ 分别为北斗的东向速度、北向速度、纬度、经度、高度、航向噪声。

$\mathbf{v}$ 与系统的驱动白噪声 $\mathbf{W}$ 不相关。北斗导航测量的经度、纬度、高度、速度的误差随着环境、时间的变化而变化,因此,本文采用自适应卡尔曼滤波算法,实时动态改变观测噪声的分布特征,使导航系统

对飞行环境适应能力更强、精度更高。

在北斗卫星导航正常时,特别是工作在高精度 RTK 模式时,系统以北斗卫星导航的数据作为观测量对传感器计算的磁航向、大气数据机计算的气压高度、空速等参数进行再修正、学习,使其精度更高。

当北斗卫星导航系统定位无效时,系统工作在 SINS 与磁场计、大气数据组合模式,主要由磁场计、气压高度计、空速计提供系统的观测信息,构成观测方程,观测量为

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} V_{KE} - V_{IE} \\ V_{KN} - V_{IN} \\ L_K - L_I \\ \lambda_K - \lambda_I \\ h_H - h_I \\ \phi_M - \phi_I \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: V_{KE} 、 V_{KN} 分别为修正后的空速计航位推算东、北向的速度; L_K 、 λ_K 为纬度、经度; h_K 为气压计输出的高度值; ϕ_M 为磁场计计算的航向角。

4 系统试验

无人机导航系统的质量为 310 g,尺寸为 135 mm×73 mm×48 mm,功耗为 5.7 W。

转台测试中,导航系统姿态精度:航向角为 $0.068^\circ(1\sigma)$,俯仰角为 $0.035^\circ(1\sigma)$,滚动角为 $0.031^\circ(1\sigma)$ 。静态试验中,固定基准站 RTK 差分模式下的精度:水平定位为 $0.0019\text{ m}(1\sigma)$,高度为 $0.0047\text{ m}(1\sigma)$ 。

将北斗基准站设置为移动基准站 RTK 差分模式,图 3 为导航系统地理系下经度、纬度及高度漂移曲线,水平定位为 $0.256\text{ m}(1\sigma)$,高度为 $0.607\text{ m}(1\sigma)$ 。图 4 为动 RTK 导航系统与基准站相对定位曲线,无人机导航系统与移动基准站间的水平定位为 $0.0016\text{ m}(1\sigma)$,高度为 $0.0023\text{ m}(1\sigma)$ 。

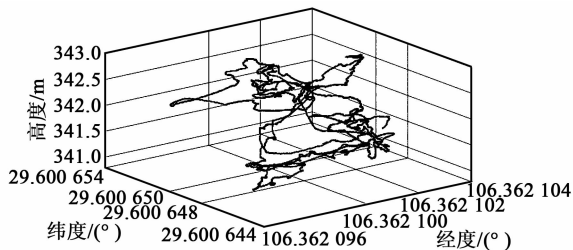


图 3 动 RTK 地理系下导航系统定位曲线

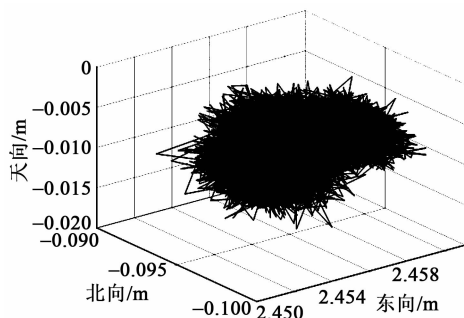


图 4 动 RTK 导航系统与基准站相对定位曲线

图 5 为无人机导航系统与高精度标准惯导一起安装在试验车上进行跑车试验的照片。图 6~8 分别为跑车试验中航向角、俯仰角及滚动角的对比曲线。无人机导航系统动态跑车试验中航向角为 $0.15^\circ(1\sigma)$,俯仰角为 $0.09^\circ(1\sigma)$,滚动角为 $0.07^\circ(1\sigma)$ 。



图 5 导航系统与标准惯导跑车试验照片

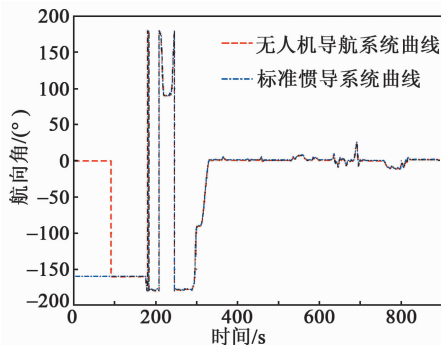


图 6 导航系统与标准惯导航向对比曲线

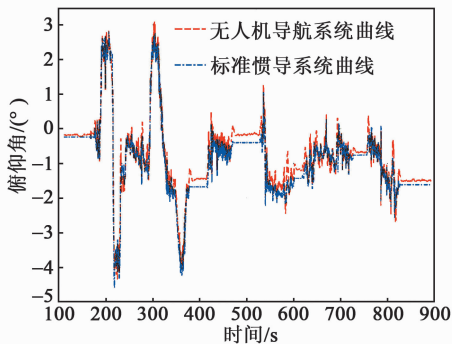


图 7 导航系统与标准惯导俯仰对比曲线

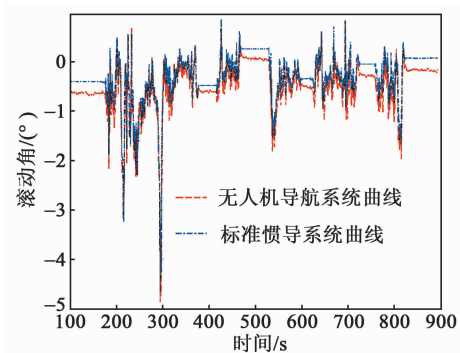


图 8 导航系统与标准惯导滚动对比曲线

在无人机导航系统与移动基准站之间相对 RTK 定位精度动态跑车试验中,导航系统、基准站及北斗天线同时安装在试验车上,试验前测量出无人机导航系统与移动基准站的间距,即水平距离为 1.297 m,天向距离为 0.007 m,试验车以约 40 km/h 的速度行驶。图 9、10 分别为跑车试验中导航系统与移动基准站之间的相对定位水平距离和天向距离曲线,其中 1~300 s 时,水平距离为 1.295 m,天向距离为 0.009 m;300 s 时,将基准站位置进行移动,导航系统输出的水平距离为 1.013 m,天向距离为 0.008 m;试验结束后,再次测量出导航系统与基准站的间距,即水平距离为 1.015 m,天向距离为 0.007 m。因此,无人机动态 RTK 相对水平定位精度为 0.002 m(1 σ),高程定位精度为 0.011 m(1 σ)。

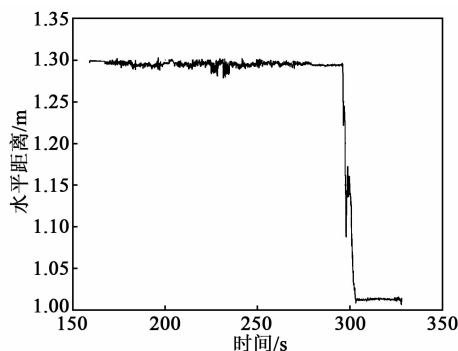


图 9 动态 RTK 相对定位水平距离曲线

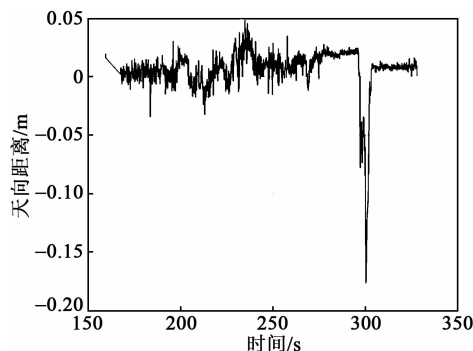


图 10 动态 RTK 相对定位天向距离曲线

无人机导航系统测试完成后,安装到某型旋翼固定翼混合布局无人机上进行飞行控制试验。图 11 为装备导航系统的无人机在野外飞行试验的照片。图 12 为在某机场进行飞行试验的照片。经超过 40 架次飞行测试表明,导航系统性能稳定、可靠。



图 11 装备导航系统的无人机野外飞行试验



图 12 装备导航系统的无人机机场飞行试验

5 结束语

基于 SINS/动 RTK 技术的无人机小型导航系统已初步满足无人机对导航系统在移动平台起降的导航参数要求。后续还将开展无人机在舰载平台上起降的大量试验,进一步验证导航系统的可靠性。

参考文献:

- [1] KALYANAM K, CHANDLER P, PACTHER M, et al. Optimization of perimeter patrol operations using unmanned aerial vehicles[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2012, 35(2): 434-441.
- [2] BETHKE B, VALENTI M, HOW J P. UAV task assignment[J]. IEEE Robotics and Automation Magazine, 2008, 15(1): 39-44.
- [3] 尹成义, 谭安胜. 舰载无人机与舰载预警直升机协同对海搜索[J]. 指挥控制与仿真, 2016, 38(4): 28-31.
- [4] 李强, 张淑丽, 蒙文巩. 国外舰载无人机着舰引导技术发展现状[J]. 无人系统技术, 2018, 1(2): 49-54.

- [5] 秦永元. 卡尔曼滤波与组合导航原理[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2004.
- [6] 李星海, 李勇建, 蔡体菁, 等. 光纤陀螺定位定向导航系统研究[J]. 压电与声光, 2010, 32(6): 953-956.
LI Xinghai, LI Yongjian, CAI Tijin, et al. Study on the fiber optic gyro position and azimuth determining navigation system [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2010, 32(6): 953-956.
- [7] 于国强, 邱志和. 导航与定位-现代战争的北斗星[M]. 北京:国防工业出版社, 2000.
- [8] 李星海, 陈述奇, 蔡体菁, 等. 火箭弹 MEMS 陀螺捷联惯导系统[J]. 压电与声光, 2012, 34(5): 703-707.
LI Xinghai, CHEN Shuqi, CAI Tijing, et al. MEMS gyro strapdown inertial navigation system(SINS) for rockets[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2012, 34(5): 703-707.
-
- (上接第 847 页)
- [6] 赵小国, 刘丁, 景坤雷. 融合改进蚁狮算法和 T-S 模糊模型的噪声非线性系统辨识[J]. 控制与决策, 2019, 34(4): 759-766.
ZHAO Xiaoguo, LIU Ding, JING Kunlei. Identification of nonlinear system with noise based on improved ant lion optimization and T-S fuzzy model[J]. Control & Decision, 2019, 34(4): 759-766.
- [7] KUNG C, SU J. Affine Takagi-Sugeno fuzzy modeling algorithm by fuzzy c-regression models clustering with a novel cluster validity criterion[J]. IET Control Theory & Applications, 2007, 1(5): 1255-1265.
- [8] CHANG C, TAO C. A novel approach to implement Takagi-Sugeno fuzzy models[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2017, 47(9): 2353-2361.
- [9] LI C, ZHOU J, CHANG L, et al. T-S fuzzy model identification based on a novel hyperplane-shaped membership function[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2017, 25(5): 1364-1370.
- [10] LI P, YAN F, GE C, et al. A simple fuzzy system for modeling of both rate-independent and rate-dependent hysteresis in piezoelectric actuators [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013, 36(1): 182-192.
- [11] ZHAO X, XIE H, PAN H. Modeling rate-dependent hysteresis in piezoelectric actuators using T-S fuzzy system based on expanded input space method [J]. Sensors & Actuators A Physical, 2018, 283: 123-127.
- [12] WU D, MENDEL J. On the continuity of type-1 and interval type-2 fuzzy logic systems [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2011, 19(1): 179-192.
- [13] CARA A, WAGNER C, HAGRAS H, et al. Multiobjective optimization and comparison of non-singleton type-1 and singleton interval type-2 fuzzy logic systems [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2013, 21(3): 459-476.
- [14] JUANG C, CHEN C. Data-driven interval type-2 neural fuzzy system with high learning accuracy and improved model interpretability [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2013, 43(6): 1781-1795.
- [15] MENDEL J, LIU X. Simplified interval type-2 fuzzy logic systems [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2013, 21(6): 1056-1069.
- [16] PRATAMA M, LU J, ZHANG G. Evolving type-2 fuzzy classifier [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2016, 24(3): 574-589.
- [17] FAZEL Z M H, DOOSTPARAST T A, TURKSEN I B, et al. A new indirect approach to the type-2 fuzzy systems modeling and design [J]. Information Sciences, 2013, 232(5): 346-365.
- [18] ZOU W, LI C, ZHANG N. A T-S fuzzy model identification approach based on a modified interval type-2 FRCM algorithm [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2018, 26(3): 1104-1113.

欢迎订阅《压电与声光》杂志

基于 LABVIEW 的 MIMU 24 项误差参数的快速标定方法

刘志伟^{1,2}, 崔敏¹, 张鹏¹, 徐文武^{1,2}

(1. 中北大学 仪器与电子学院, 山西 太原 030051; 2. 中北大学 电子测试技术国家重点实验室, 山西 太原 030051)

摘要:针对传统微惯性测量单元(MIMU)标定方法过程繁琐、标定周期长且标定设备复杂等问题,该文设计了一种通过 LABVIEW 上位机控制小型三轴转台对 MIMU 进行快速标定的一种方法。首先建立 MIMU 标定模型,再通过分别构建陀螺仪和加速度计的卡尔曼滤波器来减小运算量和标定时间。以小型三轴转台的姿态与速度为基准求得速度误差与姿态误差作为观测量,通过 LABVIEW 上位机控制三轴转台按照所设计好的标定路径转动,采集 MIMU 输出并使用卡尔曼滤波器 LABVIEW 的子函数(VI)进行 MIMU 的 24 项误差参数估计。实验结果表明,该方法能实现对 MIMU 中的陀螺仪和加速度计的快速标定,与传统分立式标定法相比,其安装误差与常值漂移的精度基本一致,标定因数相对误差小于 0.006,标定时间由 3 h 减少至 30 min。

关键词:陀螺仪;加速度计;微惯性测量单元(MIMU);标定;LABVIEW

中图分类号:TN964;TH862 **文献标志码:**A **DOI:**10.11977/j.issn.1004-2474.2020.06.026

Rapid Calibration Method of MIMU 24 Error Parameters Based on LABVIEW

LIU Zhiwei^{1,2}, CUI Min¹, ZHANG Peng¹, XU Wenwu^{1,2}

(1. College of Instruments and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. State Key Laboratory of Electronic Testing Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Aiming at the problems of complicated calibration method, long calibration period and complicated calibration equipment of the conventional MIMU, a method quickly calibrating MIMU by controlling a small three-axis turntable by LABVIEW host computer is designed in this paper. First, the MIMU calibration model established, the by constructing the Kalman filters of the gyroscope and accelerometer separately to reduce the amount of calculation and calibration time. By taking the attitude and speed of the small three-axis turntable as the reference to obtain the speed error and attitude error as the observation measurement and by controlling the three-axis turntable to rotate according to the designed calibration path through the LABVIEW host computer, collect the MIMU outputs are collected and the 24 error parameters of MIMU are estimated by using the Kalman filter sub-VI (sub-function of LABVIEW). The experimental results show that the method can realize the rapid calibration of the gyroscope and accelerometer in MIMU, and the accuracy of the installation error and constant drift is basically consistent with that of the conventional discrete calibration method, and the relative error of calibration factor is less than 0.006, and the calibration time is reduced from 3 h to 30 min.

Key words: gyroscope; accelerometer; micro inertial measurement unit(MIMU); calibration; LABVIEW

0 引言

作为捷联微惯性导航系统(SMINS)中必不可

少的传感器单元,微惯性测量单元(MIMU)包含三

轴微机电系统(MEMS)加速度计和三轴 MEMS 陀

收稿日期:2020-07-16

基金项目:军委装备发展部预研基金资助项目(41403010305);装备预研兵器工业联合基金资助项目(6141B012907)

作者简介:刘志伟(1994-),男,山西神池人,硕士生,主要从事 IMU 标定、稳定平台设计等方面的研究。E-mail:lwzxinx@163.com。崔敏(1975-),女,讲师,主要从事新型传感标定技术、飞行体姿态测试、多传感器信息融合的研究。E-mail:10611707@qq.com。

螺仪,其可给 SMINS 提供加速度和转速的测量值,以便进行导航解算和姿态解算,从而得到载体的姿态、速度和位置等运动状态信息^[1]。由于 MEMS 陀螺仪和加速度计存在误差,MIMU 的精度直接影响 SMINS 的精度,且导航误差将随时间累积,故需要对 MIMU 进行误差补偿,以提高 SMINS 的导航精度。因此,对 MIMU 进行误差参数标定是误差补偿的必要手段^[2]。

传统的 MIMU 标定方法主要为分立式标定法,该方法需要精密的三轴转台输出速度和位置作为基准量来标定 MIMU 中的陀螺仪和加速度计^[3],但此方法依赖转台精度且浪费时间。因此,现在基于卡尔曼滤波器的系统级标定法被国内外广泛研究,该方法主要是通过建立 MIMU 的误差系数状态更新方程来估计 MINS 中的导航误差,即选取 MIMU 在不同转动状态下与转台之间的位置误差和速度误差作为观测量^[4],但其操作较复杂,且卡尔曼滤波器的维数过大,易造成系统运算量过大及数据发散。为了代替复杂的传统校准又保证标定的精度,本文提出了一种使用 LABVIEW 的上位软件进行标定过程中的转台控制和卡尔曼滤波器运算、数据处理,最终实现 MIMU 的快速便捷标定。

1 MIMU 的标定模型

建立 MIMU 的标定模型需分别建立加速度计和陀螺仪的误差模型,首先找到基准坐标系与陀螺仪和加速度计敏感轴坐标系的关系^[5]。选取载体坐标系 b ,基准坐标系 O 系为东、北、天地理坐标系,并将三轴转台的外环轴定义为 O_1 系、中环轴坐标系为 O_2 系,内环轴坐标系为 O_3 系,陀螺仪敏感轴系记为 g 系;加速度计敏感轴系记为 a 系^[6];由于安装误差的存在, g 系与 a 系均不是严格的正交坐标系。为减少标定模型的参数,可定义载体坐标系 b 系的 x_b 轴与加速度计敏感轴单位矢量 x_a 重合, y_b 轴在 $x_a y_a$ 平面内,且与 x_b 垂直, z_b 轴与 $x_b y_b$ 一起构成右手直角坐标系^[7]。则可得到一个加速度计的简化安装误差

$$\text{矩阵} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \Delta\theta_{yx} & 0 & 0 \\ \Delta\theta_{zx} & \Delta\theta_{zy} & 0 \end{bmatrix}。$$

加速度计的误差模型为

$$\delta f^b = \begin{bmatrix} \delta f_x^b \\ \delta f_y^b \\ \delta f_z^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta K_{ax} & & \\ E_{ayx} & \delta K_{ay} & \\ E_{azx} & E_{azy} & \delta K_{az} \end{bmatrix}。$$

$$\begin{bmatrix} f_x^b \\ f_y^b \\ f_z^b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \nabla_x \\ \nabla_y \\ \nabla_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: δf^b 为加速度计的测量误差; δK_{ai} ($i=x,y,z$) 为加速度计的标度因数误差; E_{aij} ($i,j=x,y,z;i \neq j$) 为加速度计的安装误差角^[8]; ∇_x 为 x 轴零偏; ∇_y 为 y 轴零偏; ∇_z 为 z 轴零偏。

陀螺仪的误差模型为

$$\delta \omega^b = \begin{bmatrix} \delta \omega_{bx}^b \\ \delta \omega_{by}^b \\ \delta \omega_{bz}^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta K_{gx} & E_{gxy} & E_{gxz} \\ E_{gyx} & \delta K_{gy} & E_{gyz} \\ E_{gzx} & E_{gzy} & \delta K_{gz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{bx}^b \\ \omega_{by}^b \\ \omega_{bz}^b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $\delta \omega^b$ 为陀螺仪的测量误差; δK_{gi} ($i=x,y,z$) 为陀螺仪的标度因素误差; E_{gij} ($i,j=x,y,z;i \neq j$) 为加速度计的安装误差角; ϵ_x 为 x 轴零偏; ϵ_y 为 y 轴零偏; ϵ_z 为 z 轴零偏。

以上建立了带有 21 个误差参数的 MIMU 的误差模型,校准标定过程是识别这些参数。

2 标定算法

针对传统的系统级标定直接将速度误差作为观测量且状态变量较多,系统维数过大造成的误差参数滤波收敛速度慢、标定时间长及运算量大等问题,设计了一种利用转台提供准确的速度、位置信息来标定 MIMU 的方案,通过分别构建陀螺仪和加速度计的卡尔曼滤波器减小预算量^[9]。

为了实现使用卡尔曼滤波来估计误差模型的参数,应建立状态方程和测量方程^[10]。这个过程的关键是导航误差方程:

$$\dot{\varphi} = \varphi \times (\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) + \delta \omega_{ie}^n + \delta \omega_{en}^n - \delta \omega_{ib}^n \quad (3)$$

$$\delta \dot{V}^n = f^n \times \varphi^n + \delta V^n \times (2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) + V^n \times (2\delta \omega_{ie}^n + \delta \omega_{en}^n) + \delta f^n \quad (4)$$

其中

$$\varphi = [\varphi_E \quad \varphi_N \quad \varphi_U]^T \quad (5)$$

$$\omega_{ie}^n = [0 \quad \omega_{ie} \cos L \quad \omega_{ie} \sin L]^T \quad (6)$$

$$\omega_{en}^n = \left[-\frac{V_N}{R_M} \quad \frac{V_E}{R_N} \quad \frac{V_E}{R_N} \tan L \right]^T \quad (7)$$

$$V^n = [V_E \quad V_N \quad V_U]^T \quad (8)$$

$$f^n = [f_E \quad f_N \quad f_U]^T \quad (9)$$

式中: $\boldsymbol{\varphi}$ 为姿态误差角; $\delta\boldsymbol{\omega}_{ib}^n$ 为导航坐标系 n 系中的陀螺仪测量误差; $\boldsymbol{\omega}_{ie}^n$ 为在 n 系下的陀螺仪测得的转速值; L 为纬度值; $\boldsymbol{\omega}_{en}^n$ 为导航系 n 系相对于 e 系的转速; R_M 和 R_N 为地球的子午线半径; $\mathbf{V}^n$ 为在导航系下的载体速度; $\mathbf{f}^n$ 为在导航系中加速度计的输出^[11]。

根据式(3)、(4)可得到陀螺仪和加速度计的卡尔曼滤波器的状态更新方程和量测方程。

2.1 陀螺仪的卡尔曼滤波方程

状态更新方程:

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}(t)\mathbf{X}(t) + \mathbf{G}(t)\mathbf{W} \quad (10)$$

其中

$$\mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{11}\omega_{hx} & C_{12}\omega_{hy} & C_{13}\omega_{hz} & C_{11}\omega_{by} & C_{12}\omega_{bz} & C_{13}\omega_{bx} & C_{11}\omega_{bz} & C_{12}\omega_{hx} & C_{13}\omega_{by} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{21}\omega_{hx} & C_{22}\omega_{hy} & C_{23}\omega_{hz} & C_{21}\omega_{by} & C_{22}\omega_{bz} & C_{23}\omega_{bx} & C_{21}\omega_{bz} & C_{22}\omega_{hx} & C_{23}\omega_{by} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{31}\omega_{hx} & C_{32}\omega_{hy} & C_{33}\omega_{hz} & C_{31}\omega_{by} & C_{32}\omega_{bz} & C_{33}\omega_{bx} & C_{31}\omega_{bz} & C_{32}\omega_{hx} & C_{33}\omega_{by} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\mathbf{X}_g = [\epsilon_{hx} \quad \epsilon_{hy} \quad \epsilon_{hz} \quad \delta K_{gx} \quad \delta K_{gy} \quad \delta K_{gz} \quad E_{gx,y} \quad E_{g,xz} \quad E_{g,yx} \quad E_{g,yz} \quad E_{g,zx} \quad E_{g,zy}] \quad (17)$$

$$\mathbf{X}_1 = [\varphi_E \quad \varphi_N \quad \varphi_U]^T \quad (18)$$

式中: $\mathbf{A}(t)$ 为系统状态矩阵; $\mathbf{X}$ 为系统状态变量; $\mathbf{G}(t)$ 为系统噪声驱动矩阵; $\mathbf{W}$ 为系统噪声; $\mathbf{X}_g$ 为陀螺仪的 12 项待标定误差参数; ϵ_{ux}^b 、 ϵ_{uy}^b 、 ϵ_{uz}^b 为陀螺仪输出的白噪声。

陀螺仪滤波器的观测方程为

$$\mathbf{Z} = \mathbf{H}(t)\mathbf{X}(t) + \mathbf{V}(t) \quad (19)$$

式中: $\mathbf{H} = [\mathbf{I}_{3 \times 3} \quad \mathbf{0}_{3 \times 12}]$; $\mathbf{Z} = [\varphi_E \quad \varphi_N \quad \varphi_U]$ 为姿态误差; $\mathbf{V}(t)$ 为系统观测白噪声矩阵。

陀螺仪标定需要进行 4 次转动, 前 3 次分别绕 x 、 y 、 z 陀螺仪敏感轴方向各转动 1 次^[12], 设定转速为 $10^\circ/\text{s}$, 旋转 720° , 为计算方便设置第 4 次转动的转速为 0, 静止 72 s。

2.2 加速度计的卡尔曼滤波方程

状态更新方程为

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{B}(t)\mathbf{X}(t) + \mathbf{G}(t)\mathbf{W} \quad (20)$$

其中

$$\mathbf{B}(t) = \begin{bmatrix} B_0 & B_1 & B_2 \\ \mathbf{0}_{15 \times 18} \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\mathbf{X}(t) = \begin{bmatrix} X_0 \\ X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\mathbf{A}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1(t) & \mathbf{A}_2(t) \\ \mathbf{0}_{12 \times 15} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\mathbf{X}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_1 \\ \mathbf{X}_g \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} \epsilon_{ux}^b \\ \epsilon_{uy}^b \\ \epsilon_{uz}^b \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\mathbf{G}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_b^n \\ \mathbf{0}_{12 \times 13} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} 0 & \omega_{ie} \sin \varphi & -\omega_{ie} \cos \varphi \\ -\omega_{ie} \sin \varphi & 0 & 0 \\ \omega_{ie} \cos \varphi & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\mathbf{G}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_b^n & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{C}_b^n \\ \mathbf{0}_{12 \times 6} \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\mathbf{W} = [\epsilon_{ux}^b \quad \epsilon_{uy}^b \quad \epsilon_{uz}^b \quad \nabla_{ux}^b \quad \nabla_{uy}^b \quad \nabla_{uz}^b] \quad (24)$$

式中 ϵ_w^b 、 ∇_w^b 分别为陀螺仪和加速度计输出的白噪声。

其量测方程为

$$\mathbf{Z} = \mathbf{H}(t)\mathbf{X}(t) + \mathbf{V}(t) \quad (25)$$

其中

$$\mathbf{H} = [\mathbf{I}_{6 \times 6} \quad \mathbf{0}_{6 \times 12}] \quad (26)$$

取观测量为

$$\mathbf{Z} = [\delta V_x \quad \delta V_y \quad \delta V_z \quad \varphi_E \quad \varphi_N \quad \varphi_U]^T \quad (27)$$

式中 δV_x 、 δV_y 、 δV_z 和 φ_E 、 φ_N 分别为速度误差和姿态误差。

加速度计标定的 10 位置转动路径如图 1 所示。

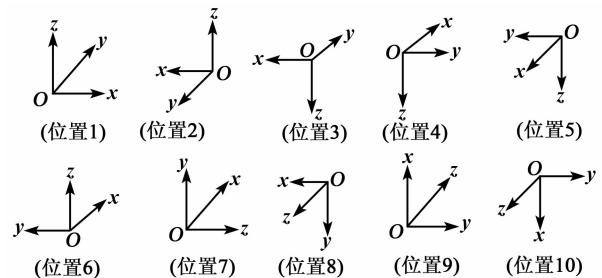


图 1 加速度计的 10 位置标定路径

3 快速标定原理

控制快速标定实现的核心是基于 LABVIEW 所设计的上位机,该上位机可通过建立与 MIMU 的串口通讯来读取 MIMU 输出进行姿态解算和导航解算,通过与运动控制卡(PMAC)的通讯来实现三轴转台 3 个轴的速度和位置的控制,最终将采集到的 MIMU 的姿态、导航速度、转台的态度和速度信息输入卡尔曼滤波器解算模块进行误差估计,得到 MIMU 24 项误差参数的无偏估计。标定系统设备如图 2 所示。

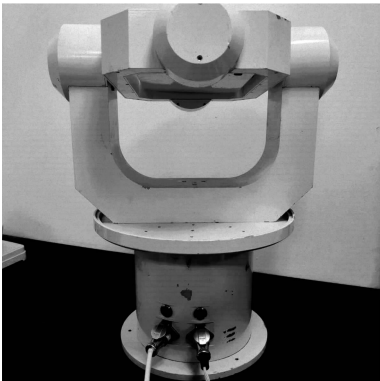


图 2 MIMU 标定设备

标定的具体过程如下:

- 1) 建立 LABVIEW 上位机与 MIMU 的通信,确认可进行数据传输和记录,系统上位机转台控制界面如图 3 所示。
- 2) MIMU 上电并预热 2 min,对 IMU 输出的数据进行导航解算,求出其解算后得到姿态角与导

航速度及捷联矩阵的相关参数,标定系统程序框图如图 4 所示。

- 3) 控制转台依次转动到对应的加速度计 10 位置标定位置,在每个位置的静止期间将转台和 MIMU 各自输出的姿态角和导航速度做差,将所得速度误差及姿态误差作为加速度计卡尔曼滤波器的观测量,并调用卡尔曼滤波器 LABVIEW 子函数(VI)对加速度计误差参数进行估计,完成加速度计的标定。
- 4) 控制转台的 3 个轴依次在陀螺仪的 3 个敏感轴方向按照第 2.1 节所设计的转动路径转动 3 次,并将转台和 MIMU 各自输出的姿态角做差,将所得姿态误差作为陀螺仪卡尔曼滤波器的观测量,调用卡尔曼滤波器 VI 对陀螺仪误差参数进行估计,完成陀螺仪的标定。
- 5) 对标定的参数进行显示和保存。



图 3 MIMU 标定系统上位机

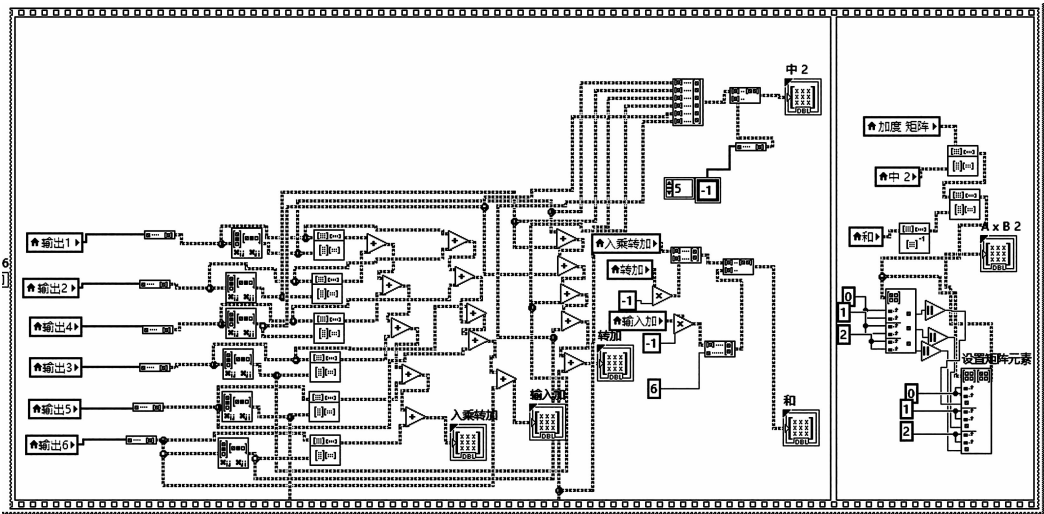


图 4 MIMU 标定程序框图

4 实验测试结果与对比

在上位机中分别设置好陀螺仪和加速度计的卡

尔曼滤波器参数,按照第 3 节所述标定的具体过程开始标定,得到的系统级标定结果与传统的分立式标定结果之间的比较如表 1 所示。

表 1 误差参数的真实值与校准结果(g 为重力加速度)

MEMS 陀螺仪 的误差参数	真实值	传统分立式 标定结果	系统级标定 结果	MEMS 加速度计的 误差参数	真实值	传统分立式 标定结果	系统级标定 结果
∇_x/g	0.016 0	0.015 5	0.016 4	$\epsilon_x/[(^{\circ})\cdot h^{-1}]$	0.017 9	0.017 5	0.018 1
∇_y/g	0.097 0	0.091 0	0.095 0	$\epsilon_y/[(^{\circ})\cdot h^{-1}]$	0.001 7	0.001 3	0.002 1
∇_z/g	-0.015 0	-0.013 0	-0.012 0	$\epsilon_z/[(^{\circ})\cdot h^{-1}]$	0.060 9	0.061 7	0.061 3
K_{ax}	1.004 5	0.994 5	0.994 5	K_{gx}	1.003 1	1.004 3	1.003 7
K_{ay}	1.002 1	0.997 8	0.997 8	K_{gy}	1.003 6	1.004 1	1.003 0
K_{az}	1.005 4	0.999 1	0.999 1	K_{gz}	1.006 2	1.006 9	1.005 8
E_{axy}	0.002 9	0.002 1	0.002 6	E_{gxy}	0.009 3	0.009 8	0.008 9
E_{axx}	-0.005 9	-0.006 6	-0.006 3	E_{gxz}	0.001 9	0.002 2	0.001 7
E_{azy}	0.002 8	0.003 5	0.002 6	E_{gyx}	0.013 0	0.013 7	0.013 1
				E_{gyz}	-0.010 7	-0.012 7	-0.011 1
				E_{gxx}	-0.004 7	-0.004 5	-0.004 9
				E_{gzy}	0.010 1	0.008 5	0.010 5

由表 1 可知,MIMU 的 24 个误差参数均能得到很好的估计。MEMS 陀螺零偏估计相对误差小于 0.004 ($^{\circ}$)/min,标度因数相对误差小于 0.006,安装误差角估计精度优于 14"。加速度计零偏相对误差小于 0.004 $g(g=9.8\text{ m/s}^2)$,标度因数误差相对误差小于 0.007,安装误差角估计精度优于 22"。

此外,传统分立式标定法所需标定时间为 3 h,而基于 LABVIEW 的快速标定系统将时间缩短至 30 min,验证了本文快速标定法的有效性。

5 结束语

本文所设计的基于 LABVIEW 上位软件对 MIMU 进行快速标定的方法,实现了 MIMU 中陀螺仪和加速度计的 24 项参数标定。为了减少系统运算量,分别设计陀螺仪和加速度计的卡尔曼滤波器,并以转台位置为基准求得速度误差和位置误差作为观测量。结果表明,与传统分立式标定法相比,本文方法可以快速且准确地标定出误差参数。

参考文献:

[1] 王辛望,沈小林,刘新生. 基于自适应 Kalman 滤波的 MEMS 陀螺随机误差分析[J]. 传感器技术学报, 2017,30(11):12-11.
WANG Xinwang, SHEN Xiaolin, LIU Xinsheng. Random error analysis of MEMS gyroscope based on adaptive Kalman filtering[J]. Journal of Sensor Technology, 2017,30(11):12-11.

[2] 唐博. 高速三轴转台的控制技术研究[D]. 北京:北京理工大学,2016.

[3] 孙伟强,张礼伟,熊巍,等. 激光陀螺惯组系统级标定方

法[J]. 中国惯性技术学报,2016,24(1):9-13.

[4] 董春梅,任顺清,陈希军. 基于三轴转台误差分析的 IMU 标定方法[J]. 系统工程与电子技术,2016,4: 896-901.

[5] 童树兵,张志利,周召发,等. 一种基于双轴位置转台的 IMU 快速标定方法[J]. 压电与声光,2016,38(5): 815-818.
TONG Shubing, ZHANG Zhili, ZHOU Zhaofa, et al. A fast calibration method of IMU based on dual-axis position turntable[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2016,38(5):815-818.

[6] YANG Y, ZHANG C, LU J, et al. In-flight calibration of gyros and star sensor with observability analysis for SINS/CNS integration [J]. IEEE Sensors Journal, 2017,17(21):7131-7142.

[7] 王琪,汪立新,沈强,等. 基于 D-最优的惯性平台自标定方案设计[J]. 中国惯性技术学报,2016,24(5): 583-588.

[8] 霍庚. 基于 Kalman 滤波的激光陀螺系统极标定方法研究[J]. 舰船电子工程,2015,35(5):40-42.

[9] JIANG R, YANG G, ZOU R, et al. Accurate compensation of attitude angle error in a dual-axis rotation inertial navigation system[J]. Sensors,2017,17(3):615.

[10] CHEN X, SHEN C. Study on error calibration of fiber optic gyroscope under intense ambient temperature variation[J]. Applied Optics,2012,51:3755-3762.

[11] 吴运平,何永前,林新荣. 捷联惯导系统标定方案设计[J]. 舰船电子工程,2017,37(2):47-50.

[12] 王洁. 高精度惯导系统在线标定与补偿及动态精度评估技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2016.

基于非完美声学黑洞的压电能量收集系统

汪 恒,唐荣江,郑伟光,文雁声

(桂林电子科技大学 机电工程学院,广西 桂林 541004)

摘 要:针对高频压电振动能量回收效率低的缺点,提出了一种基于非完美声学黑洞的压电阵列式能量收集系统。首先建立了非完美声学黑洞薄板结构模型,并分析了在时域和频域条件下能量聚集特性,非完美声学黑洞结构能量集聚于中心平台的多个位置。然后建立了阵列式压电俘能系统实验模型,结构中心平台上能量聚集点的输出电压存在较大的相位差,通过引入整流电路消除此相位差,对比分析了整流前后串、并联电路的输出电压,结果表明,整流后系统输出电压能力得到了较大提高。

关键词:声学黑洞;压电阵列;压电俘能;整流电路

中图分类号: TN384; TM22 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11977/j.issn.1004-2474.2020.06.027

Piezoelectric Energy Harvesting System Based on Imperfect Acoustic Black Hole

WANG Heng, TANG Rongjiang, ZHENG Weiguang, WEN Yansheng

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: A piezoelectric array energy harvesting system based on imperfect acoustic black holes is proposed to solve the problem of low energy recovery efficiency of high frequency piezoelectric vibration. The thin plate structure model of the imperfect acoustic black hole is established, and the energy accumulation characteristics in time domain and frequency domain are analyzed. The energy of the imperfect acoustic black hole structure is concentrated at several positions of the central platform. The experimental model of the piezoelectric array energy harvesting system is established. The output voltage of the energy gathering point on the central platform of the structure has a large phase difference, which is eliminated by introducing a rectifier circuit. The output voltage of the series and parallel circuits before and after rectification is compared and analyzed. The results show that the output voltage capability of the system has been greatly improved after rectification.

Key words: acoustic black hole; piezoelectric array; piezoelectric energy capture; rectifier circuit

0 引言

随着智能材料的不断发展和应用,利用压电材料将自然界的机械能转换为电能已日渐成熟,压电俘能器可以将环境中振动产生的机械能转换成电能,且具有节能环保、易于微型化等优点,近年来引起了广泛的关注。目前,压电式振动能量收集装置主要有悬臂梁式、圆盘式、板结构及堆叠结构等,以上各种形式的压电式振动能量收集系统可以实现低频特定环境下的俘能效果。但是现实环境中的高频振动,如电机脉冲宽度调制(PWM)高频谐波激励,其能量在结构中处于分散状态,这将增加能量收集的难度。如何有效提高能量收集效率已成为研究的

热门方向。

声学黑洞(ABH)效应通过结构阻抗的变化,使结构中波的相速度和群速度发生变化,在结构局部区域实现波的聚集。Krylov^[1]首次将 ABH 结构应用于板梁结构,通过利用改变结构中厚度的变化来操纵弯曲波,以捕获弯曲波的能量。

Ji 等^[2]研究了嵌入式 ABH 结构,实验结果表明,ABH 结构比传统的均匀结构更能有效地获取振动能量。Zhao 等^[3]采用有限元法对压电俘能结构进行了频域稳态分析及时域瞬态分析,结果表明,与均质板结构相比,具有 ABH 结构的压电换能器在宽频范围内有更高能量的转化效率。同时,对设计有 5 个等间距分布 ABH 的梁结构进行了能量回收

收稿日期:2020-07-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52065013,51405093);广西自然科学基金资助项目(2018GXNSFAA281276,2018GXNSFBA281012);校级创新基金资助项目(2019YCX008)

作者简介:汪恒(1993-),男,安徽安庆人,硕士生,主要从事振动噪声控制性能的研究。通信作者:郑伟光(1984-),男,副教授,硕士生导师。E-mail:weiguan, zheng@foxmail.com。

实验探究,展现了 ABH 结构在振动能量回收领域的潜力。Beck 等^[4]将压电分流阻尼技术引入 ABH 结构,实现了全频段振动控制。

现实条件下加工工艺存在限制,难以实现理想的 ABH 结构,黑洞往往会结构厚度减小到一定时产生截断。Schiller 等^[5]通过分析发现非完美 ABH 效应将使结构产生高能量的密度区域,但是能量并不集中于中心位置,而是偏移在多个点。Huang 等^[6]研究了弯曲波在这种广义 ABH 结构中的能量聚焦特性,从几何声学近似的角度进行了数值积分,分析了波的传播特性,并讨论了几何参数对 ABH 结构中弯曲波聚集特性的影响。由于板梁等结构边界都是有限的,黑洞结构在振动产生的能量传播过程中,弯曲波经过多次反射,最终聚集于中心平台的多个点上,且各点上激励存在一定的相位差。

Marc 等^[7]基于电路仿真软件(SPICE)指出,悬臂梁间输出电压相位差会导致阵列输出电流的降低。Baek 等^[8]设计了轴向转动结构用于击打压电悬臂梁,比较了阵列中压电振子激励间有无相位差时输出电压的差异。Liu 等^[9]通过实验研究了基于微机电系统(MEMS)的压电俘能器阵列,用多个整流桥去除相位差的影响后,输出的功率得到了提高。Lien 等^[10]通过对存在相位差的压电阵列进行理论分析和仿真验证,证明了通过优化电路可以提高输出功率。Moon 等^[11]分别研究了先整流后并联、先整流后串联和直接并联后整流 3 种连接和整流方式,以及其对压电阵列输出功率的影响。

本文研究了非完美 ABH 结构的压电俘能特性。建立了含有非完美 ABH 的板结构有限元模型,分析了时域和频域下的中心平台能量聚集效应。在中心平台的特定位置粘贴相同型号的压电薄片组成压电阵列,分析比较直接串、并联及整流后串、并联结构的输出电压特性。

1 ABH 原理及结构模型

1.1 ABH 的基本原理

将薄板按照一定指数进行裁剪,使其厚度变化 $h(r)$ 满足下式即可形成 ABH:

$$h(r) = \varepsilon r^m \quad (m \geq 2) \quad (1)$$

式中: ε 为常量; m 为幂指数; r 为楔形结构边到黑洞中心点的距离。

在二维 ABH 中,随着结构厚度的减小,弯曲波的相速度也逐渐减小,从而产生能量聚集效应。当 $m \geq 2$ 时,累积相位将趋近无限大,波无法到达边界

也无法反射回来,形成 ABH 效应。

1.2 ABH 的结构模型

本文所研究的 ABH 结构模型如图 1 所示,由于实际加工工艺的限制,黑洞结构厚度无法从板的均匀厚度按照幂指数函数递减至 0,因此,在 ABH 薄板中心存在一个厚度为 L_0 、半径为 r_0 的圆形平台,称为非完美 ABH。本文研究的黑洞结构的幂指数变化方程为 $h(r) = 5 \times 10^{-4} \times r^2$, ($r_0 \leq r \leq 200$),具体参数如表 1 所示。

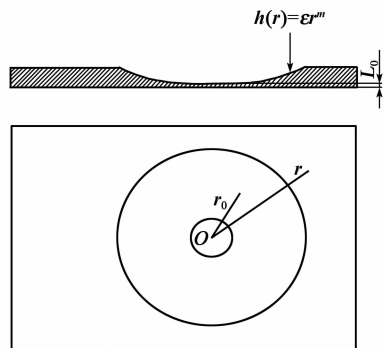


图 1 ABH 结构模型图

表 1 结构尺寸及材料参数

铝板密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	铝板弹性 模量/GPa	铝板 泊松比	铝板 长度/mm
2 690	70	0.345	370
铝板厚度/mm	铝板宽度/mm	r_0 /mm	L_0 /mm
240	5	20	0.2

2 ABH 的有限元模型分析

2.1 有限元模型

为了研究非完美 ABH 结构中波的传递特性,以及黑洞结构中心平台上波的聚集效应,并提高仿真结果的准确性,选用 Comsol 有限元软件里的网格划分单元大小为极细化,确保每个波长内包括至少 10 个单元格,其网格划分图如图 2 所示。

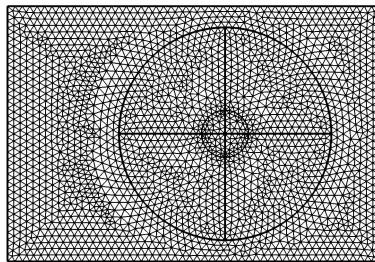


图 2 声学黑洞板结构网格划分图

2.2 频域下的仿真分析

左端固定约束,在距离平台中心 125 mm 处施加垂向载荷 1 N。分析了不同频率(4.0 kHz、5.0 kHz、6.0 kHz、7.0 kHz)下能量聚集效应(见图

3)。由图可知,ABH 结构具有很好的能量聚集效果,由于黑洞截断厚度的存在及边界存在多重反射,以致在中心平台形成了几处能量较大的聚集点。

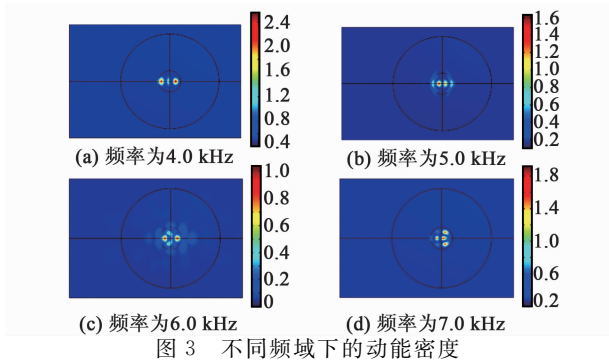


图 3 不同频域下的动能密度

2.3 时域下的仿真分析

在激励点施加幅值 1 N、频率 5 kHz 的正弦激励,得到了不同时刻黑洞板结构能量云图。选取部分时刻下的云图(见图 4),激励在板上所产生的振动能量,从均匀板的局部区域向非完美 ABH 进行扩散,最后在板结构的中心平台进行聚集,能量聚集于中心平台的多个点位置。

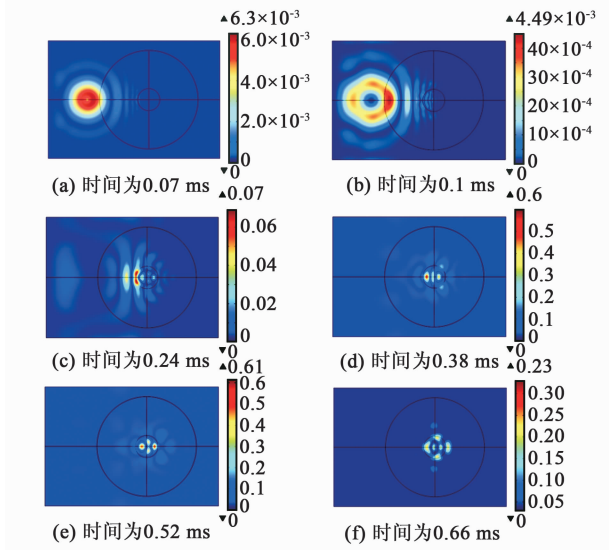


图 4 时域下动能密度

3 压电阵列及连接方式

3.1 压电片阵列式分布

由压电材料的正压电效应可知,压电振子的输出电压主要取决于其形变的大小。通过有限元建模分析非完美 ABH 中心平台的能量聚集点,可以确定选用合适数量及尺寸大小的压电薄片。

通过所述仿真分析,本文选用 6 片规格、尺寸相同的压电薄片,其半径为 r_1 ,厚度为 l_1 ,压电薄片材料选用 PZT-5H。压电薄片材料参数如表 2 所示,其分布如图 5 所示。

表 2 压电薄片材料参数

PZT-5H				
密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/ GPa	泊松比	r_1/mm	l_1/mm
7 500	66	0.3	7.5	0.45

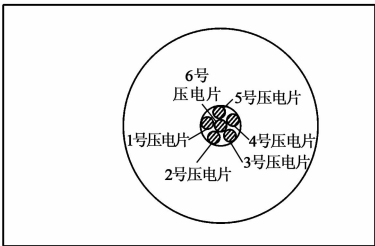


图 5 压电片摆放模型图

3.2 压电阵列式电路连接方式

多压电振子的输出电压与各压电振子间的连接方式(直接串、并联,整流后串、并联等)有关,连接方式不同,每个压电振子输出的电压耦合关系也不同。

图 6 为不同电路连接组合图。由图可知,本文基于振动叠加原理,采用了 4 组简单基本电路连接方式对压电阵列进行连接。

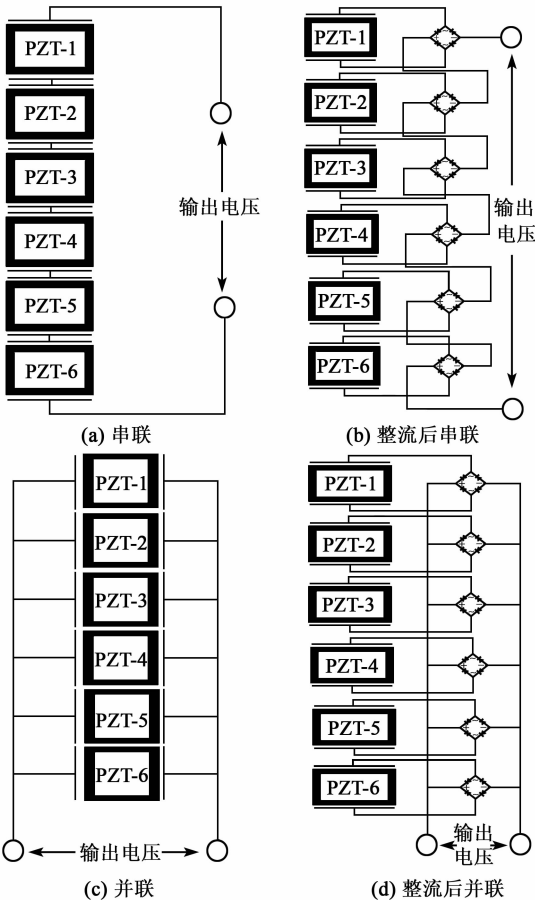


图 6 不同电路连接组合图

4 实验研究

为进一步检验非完美 ABH 的压电阵列式俘能系统的输出电压特性,本文设计了边界固定约束的板结构压电振子控制系统,并且对单个压电振子和多个压电振子串、并联,整流后串、并联时系统的输出电压特性进行了实验测试。整个测试系统如图 7 所示。



图7 声学黑洞的压电阵列测试系统

实验所用仪器设备为 DH5874 型功率放大器、LMS Test Lab 信号测试系统、AFG3021C 信号发生器、DH40020 型激振器及笔记本电脑。调节信号发生器,输出信号经过功率放大器后驱动激振器产生激励。实验中,通过调节功率放大器增益档来保持系统稳定的加速度值,最终获得各种电路组合方式下输出的有效值电压。

4.1 单个压电振子输出电压特性分析

在非完美 ABH 中心平台上粘贴 1~6 号压电薄片,测试实验如图 8 所示,通过激振器施加稳定激励。

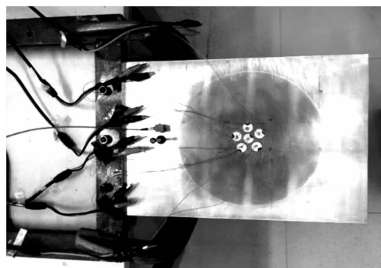


图8 单个压电片测试图

经过 LMS Test Lab 测试系统得出 1~6 号压电薄片两端产生的电压幅值及相位差,如图 9、10 所示。

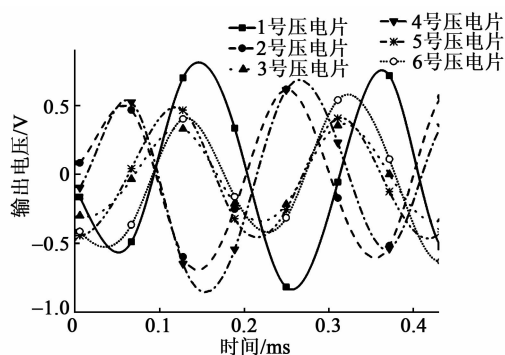


图9 单个压电片输出电压幅值

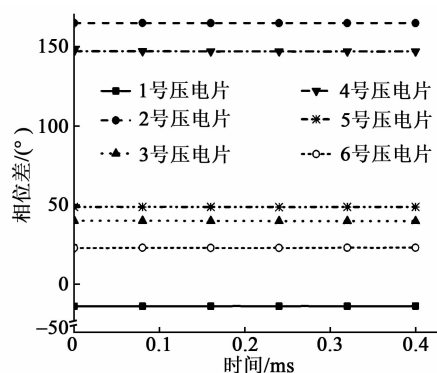


图10 单个压电片输出电压相位差图

从图 9、10 可知,1~6 号单个压电薄片两端输出的电压均存在明显的相位差异,且 1、2 号压电薄片输出电压相位差达 170° 。

4.2 压电阵列输出电压分析

本文采用直接串、并联及整流后串、并联 4 组基本电路连接方式对压电阵列式系统进行连接测试。

通过激振器施加相同的激励,在 LMS Test Lab 测试系统中选择测量频率为 4.0~5.5 kHz,每 500 Hz 选取一个有效电压值。通过测试得到的结果如图 11、12 所示。

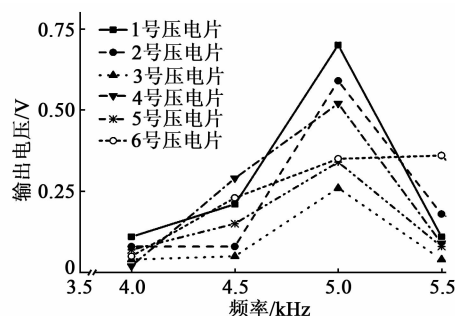


图11 单个压电片输出电压

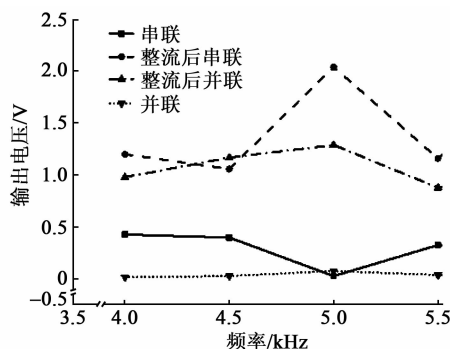


图12 直接串、并联及整流后串、并联压电片输出电压

由图 11、12 可得,直接串、并联的最大有效电压值为 0.5 V,低于单个压电薄片输出的最大有效电压 0.75 V。这是由于单个压电薄片的输出电压

相位差太大,电压在直接叠加时相互抵消,故输出电压值较低。而并联系统的输出电压值在整个频率范围均低,这是由于单个压电薄片输出电压直接并联,导致输出较低电压的压电振子等效成为输出较高电压的压电振子的负载,以及各组压电振子之间存在相位差带来的影响。

通过图 12 可看出,整流后再进行电路串、并联连接的俘能系统输出电压有效值明显提高。在频率为 7.0 kHz 下整流后串联电路两端输出的有效电压值为 3 V,比单个压电片输出的电压值提高了约 4 倍。

通过上述实验测试结果说明,基于 ABH 的压电式俘能系统中各组压电振子输出的电压存在的相位差是该系统不容忽视的问题,而整流后再串联的压电振子连接方式可有效解决系统中存在的相位差问题。当系统各组压电振子经过整流后再串联,输出端可以在一段频率范围内获得较高的有效输出电压值。

5 结束语

本文提出了基于非完美声学黑洞的压电阵列式俘能装置,对非完美声学黑洞结构进行了时域、频域下仿真分析,最后建立实验测试装置。结果表明,非完美声学黑洞中心平台上的各组压电振子两端的输出电压存在很大的相位差。压电振子的连接方式对系统输出的有效值电压具有较大影响。通过对比分析直接串、并联和整流后串、并联 4 种电路组合方式下系统输出的有效值电压可看出,基于非完美声学黑洞结构下的压电阵列式俘能系统,利用整流电路连接各压电振子,能较好地解决各压电振子输出电压的相位差,提高俘能系统的有效输出电压。

参考文献:

[1] KRYLOV V V. New type of vibration dampers utilizing the effect of acoustic 'black holes'[J]. Loughborough University, 2004, 90(5): 830-837.

- [2] JI H, LIANG Y, QIU J, et al. Enhancement of vibration based energy harvesting using compound acoustic black holes[J]. Mech Syst Signal PR, 2019, 132: 441-456.
- [3] ZHAO L, CONLON S C, SEMPERLOTTI F. Broad-band energy harvesting using acoustic black hole structural tailoring[J]. Smart Mater Struct, 2014, 23(6): 65021.
- [4] BECK B S. Improved negative capacitance shunt damping with the use of Acoustical black holes[C]//[S. l.]: Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2014.
- [5] SCHILLER N H, LIN S S, CABELL R H, et al. Design of a variable thickness plate to focus bending waves[M]. New York: Institute of Noise Control Engineering, 2012.
- [6] HUANG W, JI H, QIU J, et al. Analysis of ray trajectories of flexural waves propagating over generalized acoustic black hole indentations[J]. Journal of Sound and Vibration, 2018, 417: 216-226.
- [7] FERRARI M, FERRARI V, GUIZZETTI M, et al. Piezoelectric multifrequency energy converter for power harvesting in autonomous microsystems[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2008, 142(1): 329-335.
- [8] BAEK K H, HONG S K, KIM S B, et al. Rectifier and structural design for efficient energy harvesting system from impact-based piezoelectric array [C]//Aveiro, Portugal; Proceedings of ISAF-ECAPD-PFM, 2012.
- [9] LIU J, FANG H, XU Z, et al. A MEMS-based piezoelectric power generator array for vibration energy harvesting[J]. Microelectronics Journal, 2008, 39(5): 802-806.
- [10] LIEN I C, SHU Y C. Piezoelectric array of oscillators with respective electrical rectification[J]. SPIE, 2013: 868806.
- [11] MOON J W, JUNG H J, BAEK K H, et al. Optimal design and application of a piezoelectric energy harvesting system using multiple piezoelectric modules[J]. J Electroceram, 2014, 32(4): 396-403.

基于 LN/LT-POI 多层结构的 SAW 器件发展

何杰,马晋毅,胡少勤,许昕

(中国电子科技集团公司第二十六研究所,重庆 400060)

摘要:绝缘体上压电单晶薄膜结构材料(POI)为研制高性能、可集成的声表面波(SAW)器件提供了新的解决途径和方案,可满足射频(RF)前端在集成化、小型化发展趋势下对新一代压电声学器件的需求。该文介绍了 POI 的制备工艺技术。总结了基于铌酸锂/钽酸锂-POI(LN/LT-POI)多层结构的高性能 SAW 器件的最新研究成果,并展望了其未来的发展。

关键词:绝缘体上压电单晶薄膜结构材料(POI);声表面波(SAW)器件;5G 无线通信;射频前端;键合剥离

中图分类号:TN384;TM22 **文献标志码:**A **DOI:**10.11977/j.issn.1004-2474.2020.06.028

Development of SAW Devices on LN/LT- POI Multilayered Structure

HE Jie, MA Jinyi, HU Shaoqin, XU Xin

(The 26th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China)

Abstract: The piezoelectric-on-insulator film structure material(POI) can provide a breakthrough solution approach and scheme for developing integrated SAW devices with high performance, which can meet the urgent needs of the integration, miniaturization, high frequency and wide bandwidth of the next generation of piezoelectric acoustic devices under the development trend of RF front-end integration and miniaturization. In this paper, the fabricating technique of the POI. The latest research results of high performance SAW devices on LN/LT-POI structure are summarized, and its future development is prospected.

Key words: piezoelectric-on-insulator structure material(POI); SAW device; 5G wireless communication; RF front-end; smart-cut

0 引言

铌酸锂(LiNbO_3 , LN)晶体是一种集压电、铁电、声光、电光、光折变等性能于一体的人工合成多功能材料;钽酸锂(LiTaO_3 , LT)晶体的结构跟 LN 类似,也是一种重要的多功能晶体材料,具有优良的压电、铁电、声光及电光效应。能够满足压电应用的声学级 LN/LT 晶体可以制备声波谐振器、换能器、延迟线、滤波器等器件,应用于移动通信、卫星通信、数字信号处理、电视机、广播、雷达、遥感遥测等民用领域及电子对抗、引信、制导等军事领域。与其他材料相比, LN 和 LT 晶体在实现高频、大带宽声表面波(SAW)器件方面更具优势。

传统的 SAW 器件采用 LN/LT 单晶块材制备,实现的器件品质因数 Q 值较低且与 CMOS 工艺不兼容,因而难以实现硅基微系统集成。采用高性能的压电单晶薄膜可有效提高 SAW 器件的 Q 值且与 CMOS 工艺兼容。基于压电单晶薄膜的 SAW 器件

不仅可以通过采用高阻硅作为衬底来提高 SAW 器件的集成能力,还可通过选择高声速的蓝宝石或金刚石衬底来提高声波的传输速度,并且这些衬底可以提高声波的利用效率。因此,选择合适的压电单晶薄膜和制备工艺是获得高性能、高集成度的 SAW 器件的关键因素。

采用键合剥离技术制备的 LN/LT 单晶薄膜(LNOI/LTOI)是一种具有颠覆性意义的声学薄膜材料结构,基于 LNOI/LNOT 的绝缘体上压电单晶薄膜结构材料(POI)能够为研制更高性能、可集成的 SAW 器件提供新的解决途径和方案,可满足射频(RF)前端在集成化、小型化发展趋势下对新一代压电声学器件的迫切需求^[1-13],市场应用前景广。

1 绝缘体上 LNOI/LTOI 的制备方法

过去人们探索了多种 LN/LT 薄膜制备方法,如金属有机物化学气相沉积(MOCVD)法、射频溅射(RF sputtering)法、溶胶-凝胶(Sol-Gel)法、脉冲

激光沉积法和分子束外延法(MBE)等,但制备的LN/LT薄膜存在取向控制难,生长温度过高及锂(Li)挥发引起化学计量比偏析等技术难题^[14-15],导致LN/LT薄膜择优取向度差,缺陷密度高且易生长成多晶薄膜,性能远低于LN/LT单晶块材;而传统上在制备LN/LT薄膜时通常采用机械减薄的方式来降低薄膜厚度,由于晶圆厚度的不均匀性,这会损伤薄膜表面且薄膜厚度只能减少到约10 μm,不适合制备亚微米级以下的薄膜,因此,上述传统方法制备的LN/LT薄膜并未得到广泛的商业应用,获得高品质的亚微米级LN/LT薄膜还需要采用新的制备方法。

离子注入剥离(CIS)技术能够制备亚微米厚度的高质量单晶薄膜材料,具有制备工艺可控、离子注入能量、注入剂量、退火温度等工艺参数可选等优点。法国Soitec公司基于CIS技术并结合晶圆键合技术开发出了键合剥离(Smart-Cut)技术用于制备绝缘体上硅(SOI)晶圆^[16-17]。采用Smart-Cut技术制备SOI晶圆可以提高衬底材料的良率。仿照SOI的制备技术,人们采用Smart-Cut技术在Si支撑晶圆上制备高质量LN/LT单晶薄膜^[3,6,8,18-19]。

利用Smart-Cut技术制备LNOI的流程如图1所示^[5-6],具体流程为:

1) 将一定剂量的H⁺或He⁺注入具有合适取向的LN单晶块材,根据所需薄膜厚度调整注入时离子的剂量和能量,此时会在LN中的离子注入区域形成损伤层。

2) 选取另一种衬底晶圆(可以是硅(Si)也可以是同质的LN晶体),在衬底晶圆上沉积二氧化硅(SiO₂)层作为键合层,然后对沉积的SiO₂层表面和离子注入面进行化学机械抛光。

3) 将处理后的键合层表面和LN晶体的注入层面在常温下进行直接键合。

4) 对整体进行退火处理,在退火过程中,注入在LN晶体内的H⁺或He⁺形成气泡,使LN晶片沿着损伤层剥离,多余的LN将自动分离,最终使LN单晶薄膜转移至Si衬底上。采用Smart-Cut薄膜层转移技术可以生产大尺寸的LN单晶薄膜,其性能与LN块材相当^[18]。

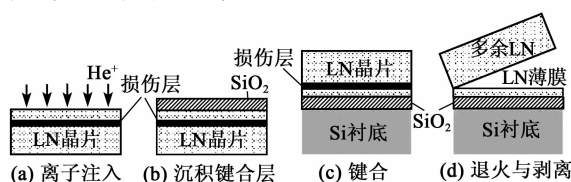


图1 LNOI制备流程

Smart-Cut技术也可用于制备LT单晶薄膜^[20-21]。基于Smart-Cut技术,法国Soitec公司和frec|n|sys公司联合开发了可用于制备SAW器件的LT-POI结构材料。LT-POI的制备流程如图2所示^[21]。首先对6英寸(1英寸=2.54 cm)LT晶圆进行离子注入,由于在LT单晶中注入H⁺可获得比注入He⁺更有利于单晶薄膜材料剥离的离子浓度分布^[22],因此,将具有一定能量和剂量的H⁺注入LT晶圆,从而在LT晶圆内部产生气泡层;离子注入完成后,在(100)Si支撑晶圆上沉积埋层氧化层(SiO₂层);对已注入H⁺的LT晶圆的键合面进行清洗,然后在室温下与Si晶圆进行亲水性键合;经过退火处理,注H⁺的LT晶圆将在气泡层处发生剥离,最后对转移至Si晶圆上的LT层进行化学机械抛光(CMP)即可获得POI基片。抛光后的POI基片需加以固化处理,固化过程可以恢复LT晶体的极化特性,从而恢复LT的压电特性。检测结果表明,采用Smart-Cut技术制备的6英寸POI基片的厚度不均匀度(晶圆内部)达到了3%,晶圆的表面粗糙度与经过镜面抛光的LT块材基片相当,且POI基片完全采用工业化生产,适用于多种LT切向和厚度,且达到了SAW级标准^[20]。

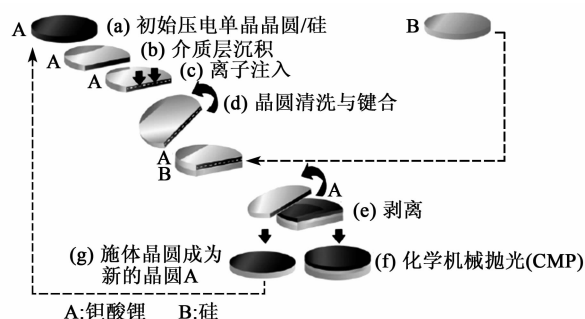


图2 Smart-Cut技术的原理及POI基片的制作工艺流程

2 LN/LT多层结构SAW基片

采用LN/LT多层结构基片的SAW器件不仅能同时提高器件的工作频率、机电耦合系数和插入损耗等特性,还具有更大的设计自由度,因此,世界各国的SAW器件研究机构提出了多种潜在的LN/LT多层结构解决方案,归纳起来主要有LN/玻璃^[23]、LT/石英异质声学层(HAL)^[24]、LN/石英^[25]、LN/金刚石^[26]等。然而,这些结构要么需要精确控制各层材料的厚度及残余应力,要么因为需要采用特殊材料功能层(如金刚石)而增加了器件生产成本,目前都未实现商业化;此外,尽管实现的

SAW 器件在机电耦合系数(k^2)、相速度及 Q 值等性能指标方面比传统的 SAW 器件更具优势,但仍难以实现器件的硅基集成。

日本村田制作所和法国 Soitec 公司提出的 LN/LT 绝缘体上压电单晶薄膜结构材料(LN/LT-POI)^[27,20]具有大的 k^2 、可控制的频率温度系数(TCF)、灵活的频率可扩展性、耐高功率能力及可与硅集成,且适合大规模生产制造而成为 SAW 器件的一项突破性技术,是 SAW 器件当前研究的主流。

日本村田制作所的 POI 结构材料也称为超高性能 SAW (I. H. P. SAW, Incredible High Performance SAW) 的多层结构,如图 3 所示^[27-29]。这种 POI 结构在 Si 支撑衬底上交替沉积了高阻抗层和低阻抗层(LiTaO₃/SiO₂/AlN/Si),通过合理设置底部各层的结构参数,可抑制体波向衬底内部的散射,从而将 SAW 能量限制在压电基片的表面,因此可以被看作是一种固态装配型薄片模式谐振器。采用这种多层结构实现的 1.9 GHz 单端口 I. H. P. SAW 谐振器^[29]的伯德- Q 值可达 4 200,是传统单端口 SAW 谐振器的 4 倍;TCF 为 $-8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,只有传统 SAW 谐振器的 1/5;带宽为 74 dB,比传统 SAW 谐振器大 20%。村田公司采用这种 I. H. P. SAW 谐振器实现了一种邻信道间隙极窄的新型 Wi-Fi 滤波器,以及一种用于频带 25/66/30 的新型六工器。这种六工器是目前技术难度最大的一种多工器,具有低插入损耗、陡峭的锐截止频率、大的衰减特性及极高的隔离度。

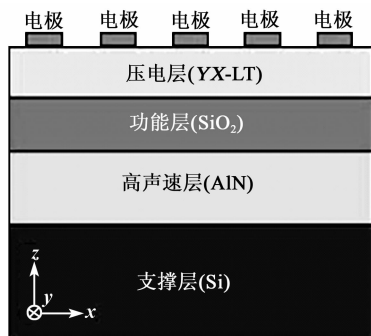


图3 村田公司 I. H. P. SAW 的基本结构

而法国 Soitec 公司制备的 POI 结构材料以高阻硅作为衬底,中间层为 SiO₂,相当于温度补偿层,称为埋层氧化层(Buried Oxide),顶层为压电单晶层(LT 层),厚度为 0.3~1.0 μm ,该层也称为器件层,Smart-Cut 技术能够保证 POI 结构各层具有很高的均匀度,且具有高质量的批量生产能力。图 4

为 Soitec 公司在非压电单晶衬底上制备的 SAW 器件用标准波导/材料叠层结构^[21]。

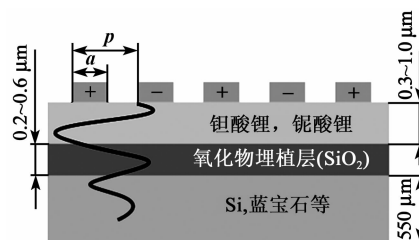


图4 采用 Smart-Cut 技术制备的 SAW 器件用标准波导/材料叠层

综合比较村田公司和 Soitec 公司两种 POI 结构可知,由于村田公司的 I. H. P. SAW 多层结构谐振器采用了旋转 Y 切 LT 单晶薄片和 SAW 横向剪切(SH)模式,结构的相速度和 k^2 都受到限制,其 $k^2 < 10\%$,且若将谐振频率扩展至更高频段还需要采用更窄的电极($< 200 \text{ nm}$),这会降低器件的耐功率能力并增加成本。因此,I. H. P. SAW 还不能完全满足 5G 移动通信对 SAW 器件的高频(如 sub-6 GHz)和大带宽($> 10\%$)要求。相反,法国 Soitec 公司的 LT-POI 结构能够很好地实现 SAW 器件的性能、成本、面积等的综合平衡,是各种多层结构中商业化最成功的衬底材料。

3 基于 LN/LT-POI 结构的高性能 SAW 器件的最新研究成果

3.1 LN-POI 结构 SAW 器件

为了应对在无线连接、无线移动设备要求的更大量更快速的数据传输、物联网(IoT)、无人驾驶和人工智能急剧增长的需求,下一代移动通信系统对 RF 前端滤波器在频率、相对带宽(FBW)、TCF、过渡带、插入损耗(IL)和体积等方面提出了越来越严格的要求。目前 4G RF 前端的商用滤波器解决方案采用的 SAW 谐振器能够实现的 $k^2 < 10\%$,滤波器的 $FBW < 4\%$ 。因此,5G 通信应用迫切需要具有高的 k^2 、大带宽和低损耗的新型声波器件。而 LN-POI 结构材料因具有极高的 k^2 ,是最有前景的宽带应用结构材料之一。

3.1.1 LN-POI 多层结构 SAW 谐振器

在 SAW 的传播模式中,纵向漏声表面波(LLSAW)模式比瑞利声表面波(Rayleigh SAW)模式、横向剪切声表面波(SH-SAW)及漏声表面波(LSAW)等 SAW 模式具有更高的相速度和更高的 k^2 ^[30-31]。因此,LLSAW 模式在实现满足 5G 通信

应用需要的更高频率、更大带宽、更小TCF的SAW滤波器方面比其他模式更具潜力。然而,LLSAW模式在由IDTs/压电单晶基片构成的传统SAW谐振器结构中传播时会发生横向剪切(SH)和纵向剪切(SV)体波辐射,这些体波辐射会引起较大的衰减,结果使LLSAW器件的Q值较低,与其他SAW模式相比,LLSAW模式的TCF性能相对较差。尽管人们试图改进LLSAW器件的性能,但取得的成就有限,LLSAW器件也因此并未在移动通信领域获得应用。

日本村田公司的研发团队基于固态装配型声体波(SMR-BAW)器件的能量约束原理,提出了一种LLSAW LN-POI多层波导结构^[32],这种POI结构由支撑基片(Si)、交替沉积的低阻抗(LAI)层和高阻抗层(HAI)构成的布喇格反射器及压电薄片构成,如图5所示。由于多层结构中各个叠层的声阻抗存在较大差异,因此会在布喇格反射器和压电层之间的边界处获得更高的反射系数,这样就把声能很好地约束在压电层的表面附近,从而抑制SAW能量泄漏。该团队采用目前用于SAW器件批量生产的准分子激光(KrF)光刻工艺制作了基于多层波导结构的单端口LLSAW谐振器,谐振器的压电层是X切LN,采用Smart-Cut技术制备,厚为340 nm;LAI采用厚为238 nm的SiO₂,HAI则采用厚为153 nm的铂(Pt);支撑基片采用Si;叉指换能器(IDT)指条对和孔径长度分别为100和25.5 μm,反射器数量为20,电极材料采用厚为0.08 μm的Al,金属化比率为0.5,波长λ=1.7 μm;器件检测

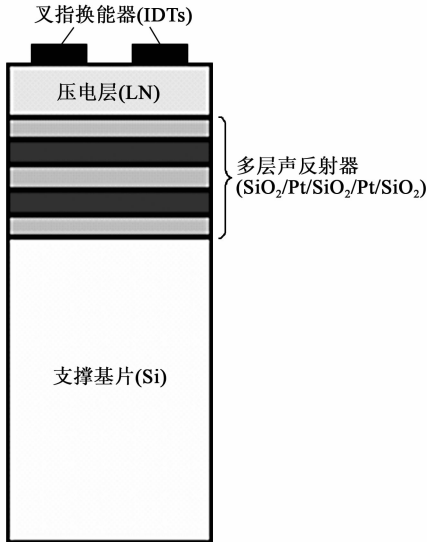


图5 日本村田公司提出的LLSAW波导结构^[5]

到的谐振频率为3.55 GHz,对应的相速度达到了6 035 m/s,约为传统SAW相速度的1.5倍,阻抗比和FBW分别为71 dB和9.5%,伯德-Q值为655。研制的谐振器可用于实现工作频率高于3 GHz的SAW滤波器和双工器。

该团队还采用相同的结构制作了5 GHz LLSAW单端口谐振器,根据3.5 GHz谐振器的设计,新的5 GHz谐振器的λ设置为1.2 μm,其他的所有结构参数也随着λ的缩减而相应减小。图6、7分别为3.5 GHz和5 GHz LLSAW谐振器的检测和拟合特性^[33]。由图6、7可知,尽管λ从1.7 μm缩小到1.2 μm,器件的性能并未发生严重劣化。

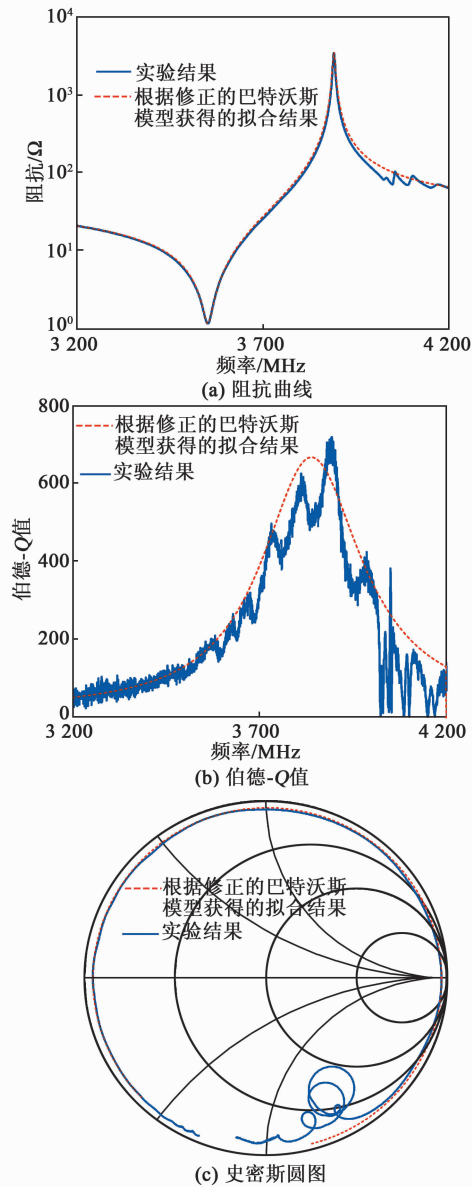


图6 3.5 GHz LLSAW谐振器的检测拟合特性

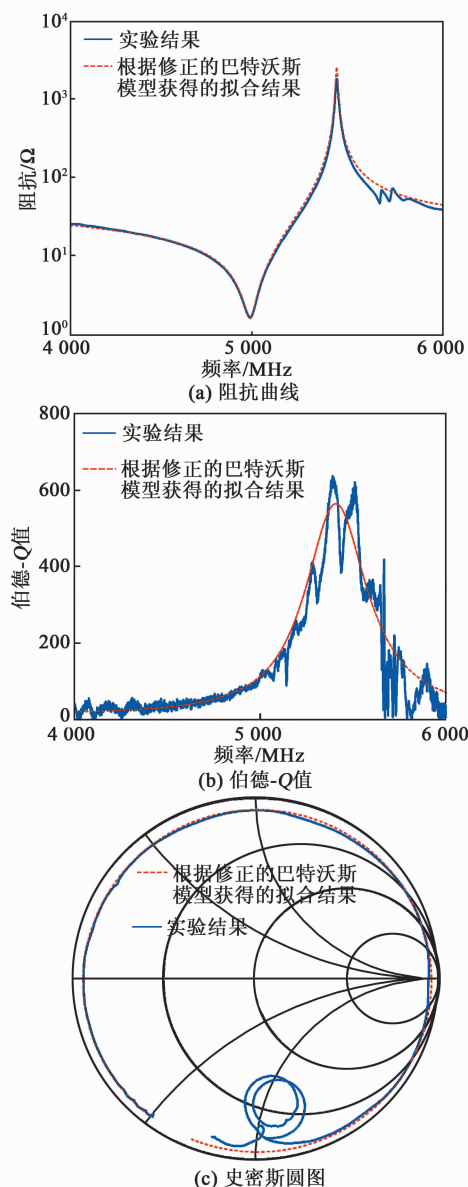


图7 5 GHz LLSAW 谐振器的检测拟合特性

村田公司研制的这种 5 GHz LN-POI 结构 LLSAW 谐振器颠覆了 SAW 器件在超高频(SHF)频段不能实用化的传统观念,此外,这种多层波导结构 LLSAW 器件在机械稳定性,层厚度可控制性和制造良率方面相对于传统 SAW 器件更具优势,适合高频、大带宽应用。

3.1.2 LN-POI 多层结构 SAW 滤波器

2020 年,上海微系统所和美国伊利诺伊大学厄巴纳-香槟分校的联合研究团队采用 Smart-Cut 技术将 X 切 LN 单晶薄膜与高声速、高导热的碳化硅(SiC)支撑衬底异质集成,实现了一种高性能的 LiNbO₃-on-SiC POI 结构^[34]。基于这种结构实现

的 SAW 谐振器的谐振频率约 1.95 GHz,导纳比高达 80.1 dB, k^2 高达 27.8%, Q 值接近 2 000,谐振器的综合性能品质优值(FoM)高达 530;利用制作的 SAW 谐振器实现了中心频率 2.29 GHz、3 dB 相对带宽 9.9%、通带内最小插入损耗 1.38 dB,带外抑制 41.6 dB、占位面积 0.75 mm² 的 SAW 滤波器。但滤波器的 TCF 为 $-48.2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,耐功率能力为 25 dBm,表明叉指电极的构成及工艺仍需优化,以获得更高的耐功率能力,同时 IDT 指条的几何结构也需要优化,从而能进一步抑制横向杂散模式。图 8 为滤波器的测试结果。

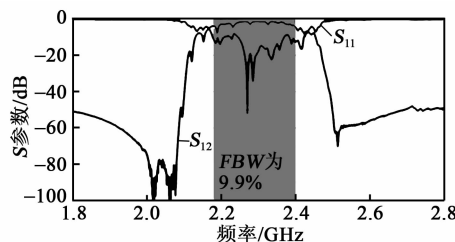


图8 LiNbO₃-on-SiC SAW 滤波器的测试结果

3.2 LT-POI 多层结构 SAW 器件

2019 年,Soitec 公司报道了一种采用 600 nm (YX)42°LT/500 nm SiO₂/(100)Si 的 LT-POI 结构材料。基于这种 POI 结构材料的 SAW 谐振器每侧有 120 组叉指对及 20 个镜像电极。声孔径为 40λ ,叉指与电极的间距为 1.2 μm ,金属与间距之间的比率为 0.5。POI 结构的 k^2 可达 8.13%,而传统 TC-SAW 器件的块体 LT 晶片仅为 5.98%(见图 9)^[35]。制作的中心频率 1.6 GHz 单端测试谐振器检测到的伯德-Q 值超过 1 700, $k^2 > 8\%$,TCF 低至 $5.8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,且根据所需频率要求,通过优化多层叠层结构的厚度还可进一步降低 TCF。

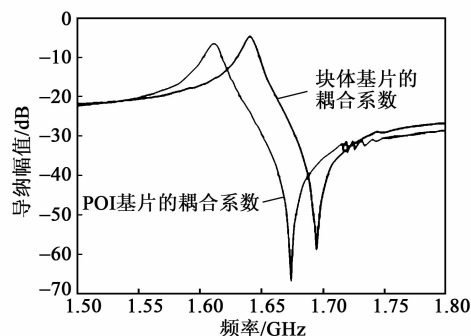


图9 POI 基片 SAW 谐振器和块体 LT 基片谐振器的耦合系数检测结果比较

基于 POI 谐振器实现的 2 GHz SAW 滤波器带宽为 80 MHz(1 dB 频带)、插入损耗小于 2 dB、抑制

度超过 40 dB、群延迟变化约为 50 ns 甚至更优(见图 10)。在整个工作温度范围内的 TCF 值低于 $10 \times 10^{-6}/\text{K}$, 滤波器带通特性还可进一步优化。

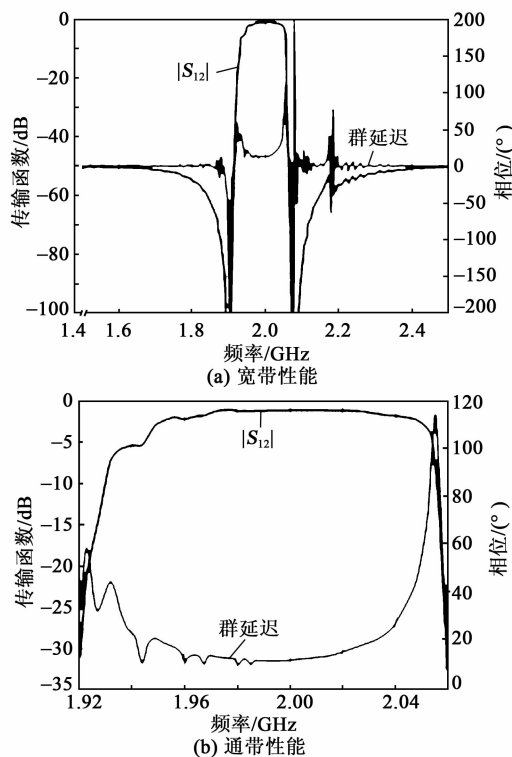


图 10 POI 基片 2 GHz SAW 滤波器的传输函数及群延迟

Soitec 公司的 LT-POI 结构 SAW 滤波器具有能量效率高, 损耗低, 温度敏感度低, 带宽大, 工艺流程简单及集成度高的特点, 在 5G 滤波器解决方案中具有替代温补型 SAW(TC-SAW)滤波器的潜力, 且基于 POI 的 SAW 滤波器在 L 波段和 S 波段还与 BAW 滤波器相媲美的性能。目前, Soitec 公司的 150 mm POI 结构的滤波器已实现量产, 未来 Soitec 公司还将开发直径为 $\varnothing 200$ mm 的 POI 结构, 以达到进一步降低总成本的目的。同时, Soitec 公司未来还将开发 LN POI 结构(LN-POI)。2020 年 7 月, Soitec 公司宣布为高通公司新一代 4G/5G ultraSAW 射频滤波器提供 POI 结构材料。基于 POI 结构的高通 ultraSAW 滤波器能够在 600 MHz~2.7 GHz 内提供如出色的发射、接收和交叉隔离能力、良好的频率选择性、高达 5 000 的品质因数、极低的插入损耗(提升了 1 dB)、优异的温度稳定性等高性能支持。Soitec 公司正努力使 POI 基片在未来几年内成为一项行业标准, 借助自身在压电材料方面的丰富经验, 结合 Smart Cut 技术, 可在其专用生

产线上大批量制造同款基片, 用于实现满足 5G 通信网络对高性能集成 SAW 滤波器的严格要求。

4 总结与展望

5G 通信、物联网和大数据应用需要具有高频、宽带、高 Q 值和低频率温度系数的高性能 SAW 器件。利用键合剥离(Smart-Cut)技术能够制备出具有高机电耦合系数和大带宽特性的 LN/LT 薄膜材料, 使制备高频、大带宽 SAW 滤波器成为可能, 从而能够使通讯频率从 2~3 GHz 提高至 6 GHz, 并使带宽增加 1 倍, 这将会给 RF 和通信产业带来真正的突破。由于 LN/LT 单晶薄膜可与 Si 集成, 因此, 可以通过相同 Si 芯片上器件的集成来进一步使滤波器小型化。总之, 基于 LN/LT 单晶薄膜的 RF SAW 器件能够促进 5G 应用和高频通信技术的发展, 而 Si 衬底上集成 LN/LT 单晶薄膜与 CMOS 工艺的兼容性又为在同一芯片上集成 MEMS、铁电、声学 and 光学器件开辟了新的可能性。因此, 随着 LN/LT 单晶薄膜材料以及新型声学器件技术的进一步发展, 采用 LN/LT-POI 结构的 RF SAW 器件在 5G 和后 5G 时代将具有更重要的应用前景。

参考文献:

- [1] LEVY M, OSGOOD R M, LIU R, et al. Fabrication of single-crystal lithium niobate films by crystal ion slicing[J]. Applied Physics Letters, 1998, 73(16): 2293-2295.
- [2] TAUZIN A, DECHARM J, MADEIRA F, et al. 3-inch single-crystal LiTaO₃ films onto metallic electrode using smart cut™ technology[J]. Electronics Letters, 2008, 44(13): 822-824.
- [3] SOLAL M, PASTUREAUD T, BALLANDRAS S, et al. Oriented lithium niobate layers transferred on 4" [100] silicon wafer for RF SAW devices[C]//Munich, Germany; 2002 IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings, 2002: 131-134.
- [4] PARK K D, ESASHI M, TANAKA S. Lithium-niobate-based surface acoustic wave device directly integrated on IC[C]//Orlando, USA; 2011 IEEE International Ultrasonics Symposium, 2011: 1956-1959.
- [5] RABIEI P, GUNTER P. Sub-micron thin films of lithium niobate single crystals prepared by crystal ion slicing and wafer bonding[C]//Baltimore, USA; Conference on Lasers and Electro-Optics 2005: 1-3.
- [6] POBERAJ G, HU Hui, SOHLER W, et al. Lithium

- niobate on insulator(LNOI) for micro-phonic devices [J]. *Laser Photonics Review*, 2012, 6(4): 488-503.
- [7] GONG Songbin, SHI Lisha, PIAZZA G. High electro-mechanical coupling MEMS resonators at 530 MHz using ion sliced X-cut LiNbO₃ Thin film[C]//Montreal, Canada; 2012 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2012; 1-3.
- [8] MOULET J S, PIJOLAT M, DECHAMP J, et al. High piezoelectric properties in LiNbO₃ transferred layer by the smart cutTM technology for ultra wide band BAW filter applications [C]//San Francisco, USA; 2008 IEEE International Electron Devices Meeting, 2008; 1-4.
- [9] SADAKA M, RADU I, LAGAHE-BLANCHARD C, et al. Smart stackingTM and smart cutTM technologies for wafer level 3D integration [C]//Pavia, Italy; Proceedings of 2013 International Conference on IC Design & Technology (ICIDT), 2013; 231-234.
- [10] RADU I, NGUYEN B Y, GAUDIN G, et al. 3D monolithic integration: Stacking technology and applications [C]//Leuven, Belgium; 2015 International Conference on IC Design & Technology (ICIDT), 2015; 1-3.
- [11] CLAVELIER L, DEGUET C, DI CIOCCIO L, et al. Engineered substrates for future more moore and more than moore integrated devices [C]//San Francisco, USA; 2010 International Electron Devices Meeting, 2010; 261-264.
- [12] REINHARDT A, BENAÏSSA L, DAVID J B, et al. Acoustic filters based on thin single crystal LiNbO₃ films; Status and prospects [C]//Chicago, USA; 2014 IEEE International Ultrasonics Symposium, 2014; 773-781.
- [13] YAN Youquan, HUANG Kai, ZHOU Hongyan, et al. Wafer-Scale fabrication of 42° rotated Y-cut LiTaO₃-on-insulator (LTOI) substrate for a SAW resonator [J]. *ACS Applied Electronic Materials*, 2019, 1 (8): 1660-1666.
- [14] SIMOESA A Z, ZAGHETEA M A, STOJANOVIC B D, et al. LiNbO₃ thin films prepared through polymeric precursor method [J]. *Materials Letters*, 2003, 57(15): 2333-2339.
- [15] WERNBERG A A, BRAUNSTEIN G H, GYSLING H J. Improved solid phase epitaxial growth of lithium tantalate thin films on sapphire, using a two-step metalorganic chemical-vapor deposition process [J]. *Appl Phys Lett*, 1993, 62(19): 2649-2651.
- [16] BRUEL M. Silicon on insulator material technology [J]. *Electronics Letters*, 1995, 31(14): 1201-1202.
- [17] BRUEL M, ASPAR B, AUBERTON-HERVÉ A J. Smart-cut; A new silicon on insulator material technology based on hydrogen implantation and wafer bonding [J]. *Jpn J Appl Phys*, 1997, 36(3B): 1636-1641.
- [18] TAUZIN A, DECHAMP J, MADEIRA F, et al. 3-inch single-crystal LiTaO₃ films onto metallic electrode using smart cutTM technology [J]. *Electronics Letters*, 2008, 44(13): 822-824.
- [19] LIU Weili, ZHAN Da, MA Xiaobo, et al. Fabrication of single-crystalline LiTaO₃ film on silicon substrate using thin film transfer technology [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2008, 26 (1): 206-208.
- [20] GORISSE M, DROUIN A, SINKUIN Y, et al. Oriented single-crystal LiTaO₃ thin film on silicon for high performances SAW components [C]//Kobe, Japan; 2018 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), 2018; 1-4.
- [21] BALLANDRAS S, COURJON E, BERNARD F, et al. New generation of SAW devices on advanced engineered substrates combining piezoelectric single crystals and silicon [C]//Orlando, USA; 2019 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium and European Frequency and Time Forum (EFTF/IFC), 2019; 1-6.
- [22] TIEGEL M C, MARTIN M L, LEHMBERG A K, et al. Crack and blister initiation and growth in purified iron due to hydrogen loading [J]. *Acta Materialia*, 2016, 115: 24-34.
- [23] KADOTA M, TANAKA S. Solidly mounted resonator using shear horizontal mode plate wave in LiNbO₃ plate [C]//New Orleans, USA; 2016 IEEE International Frequency Control Symposium (IFCS), 2016; 1-4.
- [24] KADOTA M, ISHII Y, TANAKA S. Capability of LiTaO₃/quartz HAL SAW resonators confirmed by simulation and measurement [C]//Orlando, USA; 2019 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium and European Frequency and Time Forum (EFTF/IFC), 2019; 1-4.
- [25] NAUMENKO N F. Optimization of LiNbO₃-quartz substrate for high-frequency wideband SAW devices using longitudinal leaky waves [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2020, 67(7): 1485-1491.

重力场对半球谐振陀螺性能的影响

方仲祺^{1,2}, 方海斌^{1,2}, 雷霆^{1,2}, 谭品恒^{1,2}, 韩世川^{1,2}

(1. 中国电子科技集团公司第二十六研究所, 重庆 400060; 2. 固态惯性技术重庆市工程实验室, 重庆 400060)

摘要:半球谐振陀螺是唯一能达到惯导级精度的振动陀螺, 其谐振子振动状态可能受外界环境条件影响而发生改变, 使陀螺信号输出不稳定。为研究半球谐振陀螺对不同方向重力场的敏感性, 分析了重力场引起半球谐振陀螺信号输出改变的机理, 使用有限元法(FEM)对谐振子进行了结构刚度及锚点损耗两个维度的动力学仿真分析, 并开展相应测试验证分析结论。结果表明, 不同方向的重力场对半球谐振陀螺的性能无明显影响。

关键词:半球谐振陀螺; 重力场; 动力学仿真; 陀螺测试

中图分类号: TN384; TP212 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11977/j.issn.1004-2474.2020.06.029

Influence of Gravity Field on Performance of Hemispherical Resonator Gyro

FANG Zhongqi^{1,2}, FANG Haibin^{1,2}, LEI Ting^{1,2}, TAN Pinheng^{1,2}, HAN Shichuan^{1,2}

(1. The 26th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China;

2. Chongqing Engineering Laboratory of Solid Inertial Technology, Chongqing 400060, China)

Abstract: The hemispherical resonator gyro is the only vibratory gyro that can reach the accuracy of inertial navigation. The vibrational state of its resonator may change under the influence of external environmental conditions, making the output signal of gyro unstable. In order to study the sensitivity of the hemispherical resonator gyro to the gravity fields in different directions, the mechanism of HRG's signal output change caused by gravity field is analyzed. The dynamic simulation analysis of resonator in two dimensions of structure stiffness and anchor loss is carried out by using the finite element method(FEM), and corresponding tests are carried out to verify the analysis results. The results indicate that the gravity fields in different directions have no obvious effect on the performance of hemispherical resonator gyro.

Key words: hemispherical resonator gyro; gravity field; dynamics simulation; gyro testing

0 引言

半球谐振陀螺是唯一能达到惯导级精度的振动陀螺, 它所采用的材料具有很好的稳定性, 谐振子结构具有完美的对称性。与机械陀螺相比, 半球谐振陀螺具有独特的高可靠、长寿命的特点。与激光和光纤陀螺相比, 半球谐振陀螺尺寸更小、可靠性更高, 是一种很有前途的惯性器件^[1]。

半球陀螺是利用半球壳唇沿的径向驻波振动来感测基座相对惯性空间旋转的一种振动陀螺。半球陀螺的核心部件为谐振子, 谐振子在外加电压作用下维持环向波数为2的四波腹振动^[2], 其振动特性的变化直接影响其信号输出。半球陀螺在实际使用时不同位置的固定方向各不相同, 即边界条件存在差异, 其中较明显的影响因素是重力场。因此, 研究重力场对半球谐振陀螺输出的影响是必要的。

1 谐振子动力学仿真

1.1 重力场对振动频率及频差的影响

采用 Comsol Multiphysics 软件进行有限元仿真分析。相同结构在不同应力状态下将表现出不同的动力学特性。谐振子在自由状态下, 记其刚度为 $\mathbf{K}_0$, 当其受外界载荷作用时, 其结构刚度发生变化, 视外载的不同增加或降低, 这一部分刚度称为几何刚度, 记为 $\mathbf{K}_g$ 。考虑预应力作用下, 谐振子的特征值问题:

$$(-\omega^2 \mathbf{M} + (\mathbf{K}_0 + \mathbf{K}_g)) \Phi = \{0\} \quad (1)$$

式中: ω 为谐振子的振动频率; $\mathbf{M}$ 为谐振子的质量矩阵; Φ 为各坐标振幅组成的 n 阶列阵。

因此, 为考虑不同重力场对谐振子振动频率的影响, 需在模态分析前加一个静力分析, 将重力场及固定约束加入有限元求解模型中, 以更新结构的刚度矩阵。有限元模型如图1、2所示。重力

场平行于轴柄和垂直于轴柄两种情况下谐振子的频率均为 4 768.7 Hz。

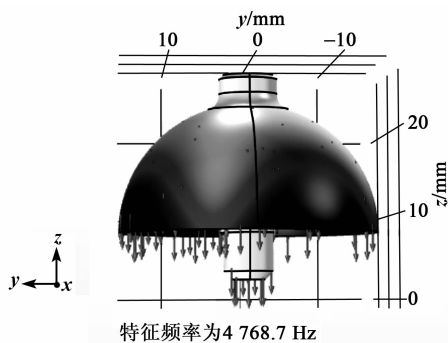


图 1 重力场平行于轴柄

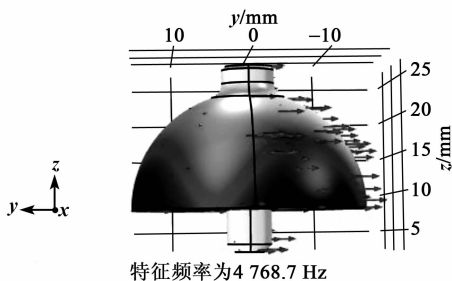


图 2 重力场垂直于轴柄

综上所述可知,在不同方向重力场作用下,谐振子四波腹振动频率无明显改变,这说明不同方向的重力场对谐振子自身结构刚度无明显影响,因此,不同方向重力场不会改变谐振子频率和频差。

1.2 重力场对能量损耗的影响

在谐振子振动频率不变的前提下,进一步分析可能对谐振子振动状态造成影响的因素。若谐振子振动能量在外界条件影响下发生改变,则其振动状态将发生改变,进而影响输出。影响谐振子振动能量的因素包括空气阻尼、热弹性损耗(TED)、表面损耗、声子-声子和声子-电子相互作用、锚点损耗等^[3-4]。谐振子在真空环境中工作,重力场不会影响陀螺的真空度;热弹性损耗取决于谐振子材料的特性,和重力场无关;表面损耗通常由缺陷、杂质及粗糙度等因素决定,和加工关系最密切;声子相互作用在低频谐振陀螺(<100 kHz)中可忽略不计,声子-电子相互作用取决于谐振子的材料性质,绝缘体可忽略不计。

因此,锚点损耗是谐振子能量损失的主要因素,而研究锚点损耗与外界重力场之间的关系,则可反映谐振子振动能量在外界条件影响下的变化情况,进而确定重力场是否影响半球谐振陀螺的输出。

品质因数(Q)可定义为每个振荡周期中存储能量与耗散能量的比值,即

$$Q = 2\pi \frac{E}{\Delta E} = 2\pi \frac{E}{\sum_{i=1}^n \Delta E_i} \quad (2)$$

式中: E 为每个谐振周期内,谐振子储存的总能量; ΔE_i 为每个影响因素损耗的能量。由于重力场主要影响锚点损耗,因此可通过仿真 Q 值来评估振动过程中谐振子能量的变化。

谐振子固定在锚点上,谐振子振动时,能量通过锚点耗散。由于使用有限元法(FEM)不可能对基片进行无限大的建模,为了仿真通过锚点损耗的机械能,需设置波的吸收边界,以避免其反射。在基片的外边界上添加非物理吸收层可吸收所有传出的波,直到它们达到吸收层的有限边界。

本文使用完美匹配层(PML)作为吸收层,当波进入 PML 时,将受到阻尼并呈指数衰减。根据谐振子设计及其边界,采用球形 PML 作为吸收层。在仿真模型中,认为锚点损耗是唯一影响 Q 值的因素,各阶模态的 Q 值可用下式表示^[5]:

$$Q = \left| \frac{\text{Re}(\omega)}{2\text{Im}(\omega)} \right| \quad (3)$$

式中: $\text{Re}(\omega)$ 为角振动频率的实部; $\text{Im}(\omega)$ 为角振动频率的虚部。这些值都可在 Comsol Multiphysics 软件中直接提取。

在模态分析前加一个静力分析,将重力场加入有限元求解模型中,以更新结构的刚度矩阵,再对系统进行本征频率仿真。加在模型上的重力场分为水平方向和垂直方向,大小均为 $1g (g=9.8 \text{ m/s}^2)$ 。

仿真结果如图 3~5 所示。由图 3~5 可知,当加入竖直重力场后,将影响谐振子垂直方向的振动,这种垂直方向的运动不会改变谐振子在周向的形状,即对其周向刚度影响很小,故 Q 值无明显变化;而加入水平方向的重力场以后,虽然影响其周向振动,但由于 1 倍重力场的作用量太小,对其刚度影响有限, Q 值减小 1.9%,无明显影响。表 1 为 Q 值仿真结果。

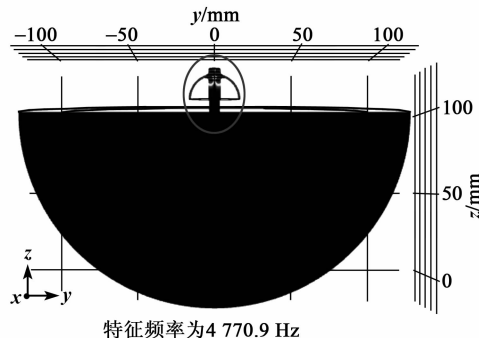


图 3 PML 仿真模型总体示意图

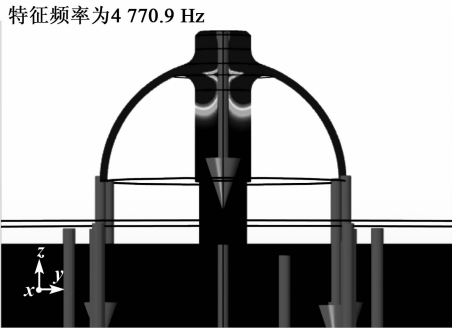


图 4 重力场平行于轴柄时的能量损耗

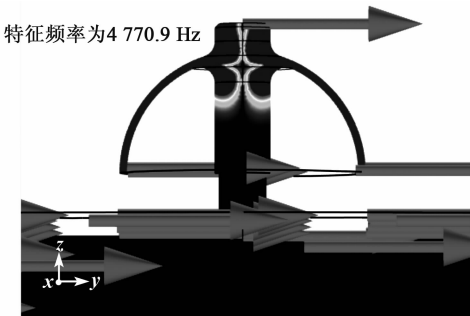


图 5 重力场垂直于轴柄时的能量损耗

表 1 Q 值仿真结果

重力场 方向	特征 频率	$ \text{Im}(\omega) $	$ \text{Re}(\omega) /10^{-10}$	$Q/10^{13}$
垂直	4 770.9	29 977	2.086	7.185
水平	4 770.9	29 977	2.127	7.047

2 与重力场有关的漂移测试

陀螺坐标系为 $Oxyz$, 其中 Ox 轴为陀螺仪输入轴(IA), y, z 轴所在的平面与输入轴垂直。陀螺的输出为脉冲信号, 改变陀螺坐标系与重力场的位置关系, 测试陀螺在不同位置下的输出可得到重力场对陀螺漂移的影响。陀螺与 g 有关漂移的测试方法为:

- 1) 将陀螺仪按坐标系“上东北”方向放置, 记录陀螺仪的输出值, 记为 N_1 。
- 2) 将陀螺仪按坐标系“下西北”方向放置, 记录陀螺仪的输出值, 记为 N_2 。
- 3) 将陀螺仪按坐标系“北上东”方向放置, 记录陀螺仪的输出值, 记为 N_3 。
- 4) 将陀螺仪按坐标系“南下东”方向放置, 记录陀螺仪的输出值, 记为 N_4 。
- 5) 将陀螺仪按坐标系“北西上”方向放置, 记录陀螺仪的输出值, 记为 N_5 。
- 6) 将陀螺仪按坐标系“南西下”方向放置, 记录陀螺仪的输出值, 记为 N_6 。

以上方法称为陀螺的六位置试验。 $N_1 \sim N_6$ 为 T 秒计数的脉冲输出, 则陀螺仪的零偏 D_0 , x, y, z 方向与 g 有关的漂移分别为 D_1, D_2 和 D_3 的计算公式为

$$\begin{cases} D_0 = \frac{N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5 + N_6}{6} \times \frac{3\,600}{TK} \\ D_1 = \frac{N_1 - N_2}{2} \times \frac{3\,600}{TK} - \Omega \sin \varphi \\ D_2 = \frac{N_3 - N_4}{2} \times \frac{3\,600}{TK} - \Omega \cos \varphi \\ D_3 = \frac{N_5 - N_6}{2} \times \frac{3\,600}{TK} - \Omega \cos \varphi \end{cases} \quad (4)$$

式中: T 为计数时间; K 为陀螺仪标度因数; Ω 为地球自转角速率; φ 为测试场纬度。

式(4)中 T 的计时精度、 K 及 φ 的计算不准确会对 D_1, D_2, D_3 的测试结果产生影响。但 T 的计时能达到很高的精度, φ 也可以准确地获得, 因此, T, φ 这两项对 D_1, D_2, D_3 的影响可忽略。

在 K 的测试中, 我们选取一系列的速率点 ω_i , 测试陀螺仪在这些输入点下的输出值, 然后采用最小二乘法拟合得到陀螺仪的 K 。而最小二乘法拟合得到的 K 在很大程度上受大角速率输入点的影响, 即拟合得到的 K 最接近大角速率输入点的瞬时标度因数, 而受小角速率输入速率点的影响很小。式(4)中的 K 是通过标度因数测试, 经最小二乘法拟合得到。因此, 要选取标度因数非线性度尽可能小的陀螺进行此项测试。

选取某半球谐振陀螺在通电预热一段时间后, 按上述方法测试与 g 有关的漂移, 结果如表 2 所示。 $\varphi = 29.6^\circ, K = 19\,995$ 脉冲数/ $^\circ$, 测试在每个位置下陀螺 100 s 内的输出脉冲数, 结果如表 2 所示。

表 2 与 g 有关的漂移测试结果

坐标系方位	100 s 内的输出脉冲数	与 g 有关的漂移/ [$^\circ \cdot \text{h}^{-1}$]
上东北	4 440	$D_1 = 0.033$
下西北	-3 850	
北上东	7 510	$D_2 = -0.034$
南下东	-6 980	
北西上	7 515	$D_3 = -0.019$
南西下	-6 991	

参与试验的陀螺仪精度为 0.02 ($^\circ$)/h。实测其与 g 有关的漂移为 $0.019 \sim 0.034$ ($^\circ$)/h, 与陀螺仪

精度处于同一量级,因此可以认为重力场对陀螺漂移无明显影响。

3 结束语

本文采用 Comsol Multiphysics 软件对半球谐振陀螺在重力场下进行了动力学仿真,结果表明,不同重力场方向对谐振子频率和频差无影响,谐振子 Q 值的相对变化量小于 2%。采用某半球谐振陀螺进行与 g 有关的漂移测试,结果表明,与 g 有关的漂移与陀螺仪精度处于同一量级。结合动力学仿真和陀螺实测数据可以认为,重力场对半球谐振陀螺的性能无明显影响。

参考文献:

- [1] 吕志清. 半球谐振陀螺在宇宙飞船上的应用[J]. 压电与声光, 1999, 21(5): 349-353.
LV Zhiqing. The applition of HRG in the spacecraft [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 1999, 21(5): 349-353.
- [2] TITTERTON D H, WESTON J L. Strapdown Inertial navigation technology[M]. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004.
- [3] DARVISHIAN A, SHIARI B, CHO J Y, et al. Investigation of thermoelastic loss mechanism in shell resonators[C]//Montreal, QC, Canada: ASME Int Mech Eng Congr Expo(IMECE), 2014: 1-6.
- [4] AHAMED M J, SENKAL D, SHKEL A M. Effect of annealing on mechanical quality factor of fused quartz hemispherical resonator [C]//Laguna Beach, CA, USA: 1st IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (ISISS), 2014: 1-4.
- [5] FRANQI A, BUGADA A, MARTELLO M, et al. Validation of PLM-based models for the evaluation of anchor dissipation in MEMS resonators[J]. European Journal of Mechanics A-Solids, 2013, 37: 256-265.
- [6] (上接第 870 页)
- [26] DOGHECHEA E, REMIENS D, SHIKATA S. High-frequency surface acoustic wave devices based on LiNbO_3 diamond multilayered structure[J]. Applied Physics Letters, 2005, 87: 1-3.
- [27] TAKAIT, IWAMOTO H, TAKAMINE Yuichi, et al. I. H. P. SAW technology and its application to microacoustic components[C]//Washington, DC, USA: 2017 IEEE International Ultrasonics Symposium(IUS), 2017: 1-8.
- [28] IWAMOTO H, TAKAI T, TAKAMINE Y, et al. A novel SAW resonator with incredible high-performances [C]//Kyoto, Japan: 2017 IEEE International Meeting for Future of Electron Devices, Kansai (IM-FEDK), 2017: 1-2.
- [29] TAKAI T, IWAMOTO H, TAKAMINE Y, et al. High-performance SAW resonator on new multilayered substrate using LiTaO_3 crystal[J]. 2017 IEEE Transaction on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2017, 64(9): 1382-1389.
- [30] TONAMIS, NISHIKATA A, SHIMIZU Y. Characteristics of leaky surface acoustic waves propagating on LiNbO_3 and LiTaO_3 substrates[J]. Jpn J Appl Phys, 1995, 34: 2664-2667.
- [31] MAKKONEN T, PLESSKY V P, STEICHEN W, et al. Surface-acoustic-wave devices for the 2.5~5 GHz frequency range based on longitudinal leaky waves[J]. Applied Physics Letters, 2003, 82(19): 3351-3353.
- [32] KIMURA T, KISHIMOTO Y, OMURA M, et al. 3.5 GHz longitudinal leaky surface acoustic wave resonator using a multilayered waveguide structure for high acoustic energy confinement[J]. Jpn J Appl Phys, 2018, 57: 1-4.
- [33] KIMURAT, OMURA M, KISHIMOTO Y, et al. A high velocity and wideband SAW on a thin LiNbO_3 plate bonded on a Si substrate in the SHF range[C]//Glasgow, United Kingdom: 2019 IEEE International Ultrasonics Symposium(IUS), 2019: 1239-1248.
- [34] ZHANG Shibin, LU Ruochen, ZHOU Hongyan, et al. Figure-of-merit enhancement for laterally vibrating lithium niobate MEMS resonators[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2020, 68(9): 3653-3666.
- [35] GONG Songbin, PIAZZA G. Surface acoustic wave devices using lithium niobate on silicon carbide [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2013, 60(11): 3888-3894.

宽温域压电超声换能器研究进展

王国良¹, 刘学良^{1,2}, 于法鹏^{1,2}, 赵显¹

(1. 山东大学 晶体材料国家重点实验室, 山东 济南 250100; 2. 山东本源晶体科技有限公司, 山东 济南 250000)

摘 要:作为重要的无损检测器件,压电超声换能器已广泛应用于国民经济的各个领域。随着现代工业技术特别是航空航天、核电能源和智能制造等工业技术的发展,各类工矿环境对压电换能器的性能提出了更高的要求,迫切期望压电换能器能在宽温域范围内稳定地监测设备的运转状况,提前预警,避免重要设备的结构性损坏。宽温域响应的压电超声换能器是目前压电器件技术领域的前沿性研究内容,该文重点介绍了能够工作在宽温域范围内的压电超声换能器及其结构,阐述了压电超声换能器在无损探伤方面的独特优势。

关键词:压电超声换能器;宽温域;高温;无损检测

中图分类号:TN384; TM22; TB552; TB35 **文献标志码:**A DOI:10.11977/j.issn.1004-2474.2020.06.030

Research Progress of Piezoelectric Ultrasonic Transducer with Wide Temperature Range

WANG Guoliang¹, LIU Xueliang^{1,2}, YU Fapeng^{1,2}, ZHAO Xian¹

(1. State Key Laboratory of Crystal Materials, Shandong University, Jinan 250100, China;

2. Shandong Original Crystal Technology Co., LTD, Jinan 250000, China)

Abstract: As an important nondestructive testing device, the piezoelectric ultrasonic transducers have been widely used in various fields of the national economy. With the development of modern industries, especially the aerospace, nuclear power plant and intelligent manufacture industries etc., various industrial and mining environments put forward higher requirements for the performance of piezoelectric transducers, so, it is urgently expected that the piezoelectric transducers can stably monitor the operation of equipment in a wide operational temperature range, giving early warning, and avoiding structural damage of important equipment. The piezoelectric ultrasonic transducer with wide operational temperature range is a frontier research content in the field of piezoelectric device technology. This paper focuses on the piezoelectric ultrasonic transducer and its structure than can operate in a wide temperature range, and describes the unique advantages of piezoelectric ultrasonic transducers in non-destructive detection.

Key words: piezoelectric ultrasonic transducer; wide temperature range; high temperature; nondestructive test

0 引言

近年来,随着石油化工、核电能源和工业制造等领域的快速发展,对于高温部件的无损检测需求呈现明显的上升趋势。面对各类工矿环境应用需求,人们迫切期望找到先进的无损探伤及检测技术方案,提前预警,避免因高温部件的破坏而带来不必要的经济损失。

宽温域应用的压电超声换能器是目前无损检测较理想的选择。压电超声换能器的研究与电子技术、自动控制技术、计算机技术及新材料等学科发展密切相关。压电超声换能器的结构主要由匹配层、压电层及背衬层组成^[1-4]。其中压电材料的选择决

定了该换能器的工作特性及对换能器工作温度范围产生的重要影响。换能器基于压电效应这一基本原理,实现电能和声能的相互转换,广泛应用于无损检测领域。自1880年居里兄弟在石英晶体上首次发现压电效应以来,压电材料及其器件的研究和发展极为迅速。1942年,压电性能优异的BaTiO₃压电陶瓷问世,其压电系数是石英晶体的60倍^[5-6]。此后,研究者们发现Pb(Zr,Ti)O₃陶瓷也拥有出色的压电性能^[7-8],随后各种压电单晶、弛豫型压电材料^[9-11]、有机物压电材料^[12-13]及各种复合压电材料相继出现^[14-15]。

近年来,研究人员通过选取性能优异的压电材

收稿日期:2020-07-29

基金项目:山东省重大科技创新工程基金资助项目(2019JZZY010313)

作者简介:王国良(1997-),男,山东潍坊人,硕士生,主要从事高温压电换能器设计和性能的研究。通信作者:于法鹏(1982-),男,山东青岛人,副教授,主要从事压电晶体生长、性能表征及传感应用基础的研究。

料,不断优化换能器内部结构设计,研制了各种宽温域响应的高灵敏度压电换能器,这些换能器在外加信号的激励下,利用压电材料的不同振动模式(伸缩振动或剪切振动)在一定距离范围内发射、接收特定模式的超声波(横波、纵波、SH₀波、兰姆(Lamb)波等)^[16]。在不损坏工件或原材料工作状态的前提下,利用超声波响应信号的差异对负载设备的表面和内部质量(裂纹、腐蚀等结构缺陷)进行诊断^[8, 17],可有效避免因这些缺陷导致的严重经济损失和设备损坏。目前,已有众多科研工作者通过选取不同性能的压电材料研制出各类压电超声换能器,其服役温度范围不断拓宽,极大拓展了压电超声换能器的工矿应用。本文将对宽温域响应的压电换能器的设计要点及目前开发的几类压电换能器进行介绍。

1 压电超声换能器的设计要点

对于无损检测用压电超声换能器,其核心压电材料的选择尤为重要。压电材料既可以将电信号转换成声信号(发射型换能器),向待检测物体发射超声检测波,也能接收从被检测物体反射回的声信号并转换成电信号(接收型换能器),所以压电材料通常要求具有较高的压电常数、机电耦合系数及电阻率(降低声损耗),这是制备高性能压电换能器的前提;此外,对于工作在宽温域范围内的压电换能器,压电材料的选择还需要充分考虑其压电性能的温度稳定性,保证压电常数、机电耦合系数等电学参量随温度变化较小。同时满足上述性能要求的压电材料是设计宽温域应用的压电换能器的理想选择。

通常,待检测负载与压电层的声阻抗均存在一定程度上的失配,因此,选择合适声阻抗值的匹配层在换能器设计方面起到了重要作用。

1) 匹配层的选材。常温下,按一定比例均匀混合环氧树脂和金属粉末^[18],可以通过调节该混合物中环氧树脂和金属粉末的比例来获得所需声阻抗,以达到声阻抗匹配效果。

2) 工作在宽温域范围内的换能器。通常可以选择高纯氧化铝等材料来设计匹配层,它既能够提供良好的声耦合,又能够对压电层起到一定的保护作用^[19]。

3) 匹配层的厚度。匹配层的厚度对器件性能也有影响,通常其厚度多选择为 $1/4$ 声波波长,且满足声阻抗匹配条件 $Z_m = (Z_l \times Z_t)^{1/2}$ (其中, Z_m 为匹配层的声阻抗值, Z_l 、 Z_t 分别为负载和压电层的声阻抗)。

背衬层是压电振子后方的一个衬垫层,它同样会对换能器的无损检测性能产生一定的影响,想要得到宽频带、窄脉冲、高检测灵敏度的压电换能器,

合适阻抗值的背衬层必不可少。在外加信号激励下,压电振子会向前、后两个方向同时辐射声波,通常我们需要的只是来自前方的回波信号,因此,要尽可能地减少来自后方反射波的干扰,此时背衬层就像无限大的吸声介质,令向后辐射的声波能够几乎全部消耗在背衬层中^[20],所以背衬层多选择声衰减系数大的材料,提高检测分辨率。常温条件下,选择环氧树脂与金属粉末的混合物作为声吸收体,如钨、铁、铜等与环氧树脂混合可得到具有高阻抗值的声吸收体,采用木屑、玻璃、软木等与环氧树脂混合也可得到性能优异的背衬材料;在高温应用时,具有一定孔隙率的氧化锆陶瓷也是一种不错的声吸收体^[21]。

最后,对于工作在宽温域环境下的压电换能器,随外界工作温度不断升高,其内部键合结构之间会由于热膨胀的差异,产生应力损坏,从而造成压电换能器检测灵敏度下降,因此,在压电换能器不同部分选材方面,应尽可能选择热膨胀系数相匹配的结构材料。

2 几种有代表性的压电换能器

2.1 石英晶体基压电换能器

石英晶体是最早获得应用的压电晶体材料,其主要化学成分为 α -SiO₂^[22]。石英晶体属于 32 点群,其物理化学性能稳定,而且室温下具有较高的电阻率($>10^{17} \Omega \cdot \text{cm}$),此外石英晶体还具有机械品质因数高,机械损耗和介电损耗极低的特性^[23]。1916 年,朗之万选取石英晶体为压电材料^[24],制作了超声换能器应用于水下声波发射和声回波接收,成功探测到海底的潜艇行踪。石英晶体虽然具有高熔点(约 1 750 ℃),但在 573 ℃左右时会有 $\alpha\beta$ 相变产生,对其器件的应用产生影响。当温度达到 350 ℃时,晶体中会有孪晶产生。这些因素都不利于石英晶体制备的压电器件在宽温域范围内应用。由此可知,用石英晶体研制的各种压电换能器通常工作在不高于 350 ℃的环境中^[25]。

2.2 锆钛酸铅基压电换能器

锆钛酸铅(PbZrO₃-PbTiO₃, PZT)压电陶瓷作为传统的压电材料,具有远高于石英晶体的压电常数和机电耦合系数,压电常数 d_{15} 可达 740 pC/N,机电耦合系数 $k_{15} = 68\%$ ^[26]。苗鸿臣等^[27-28]基于 PZT 优异的压电性能,采用标准的压电换能器连接技术^[29],研制了厚度剪切式压电换能器。该压电换能器的中心频率约为 210 kHz,且具有较高的检测灵敏度,能够有效产生和接收单模态 SH₀ 波,适用于大范围、长距离的工业设备健康监测。

有研究采用 PZT 的 x 向压电环片作为换能器的

压电层,且在 x 向环片传统的厚度剪切振动模式基础上进行了改进,提出了一种新型的厚度剪切振动模式。传统厚度剪切模式如图1(a)所示,压电片沿长度(L)方向(“3”方向)在面内极化,外界电场沿厚度(t)方向(“1”方向)施加;新型厚度剪切模式如图1(b)所示,压电片沿 t 方向(“3”方向)在面内极化,外界电场沿 L 方向(“1”方向)施加,压电环片在新的厚度剪切振动模式下,能够激发产生更稳定的检测信号。在上述改进的厚度剪切振动模式基础上,研究人员提出了一种压电圆环模型,圆环被分成12个扇区,每个扇区沿厚度方向极化,为了满足施加电场时电位的要求,相邻扇区极化方向相反,电场沿圆环周向施加,简易模型结构如图2所示。然后通过标准的压电换能器连接技术,将下述部件封装形成换能器实体。图中, W 为宽度。

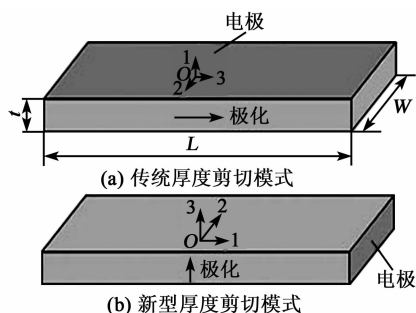


图1 传统与新型厚度剪切模式

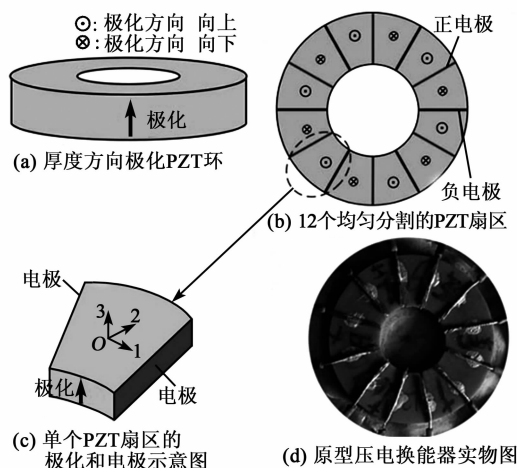
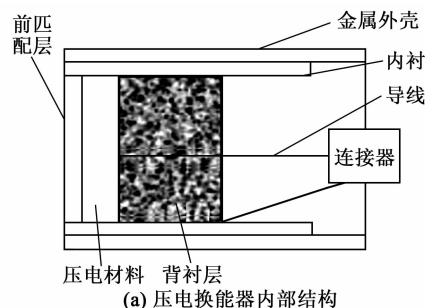


图2 压电圆环模型结构示意图

除上述厚度剪切型换能器外,对于PZT压电晶体的厚度伸缩振动模式也进行了大量研究,制备了基于厚度伸缩模式的高灵敏度压电换能器^[30],其内部结构如图3(a)所示,前端匹配层采用合适厚度的 Al_2O_3 ,以用来减小负载与压电材料间声阻抗失配度,并保护压电材料免受外界的伤害;背衬层多采用环氧树脂与金属粉末的混合物,将一定比例的环氧树脂与钨粉混合,经室温固化,得到高阻抗背衬层,

起到吸收多余反射声波的作用^[31];不同部分之间通过环氧树脂进行粘结,最后封装在不锈钢外壳内,不锈钢外壳可以减少测试过程中周围电磁波的电噪声干扰,最终得到标准的压电换能器(见图3(b))。



(a) 压电换能器内部结构



(b) 标准压电换能器

图3 压电换能器内部结构及标准压电换能器

由于PZT材料在使用过程中,其压电性能在稍高温下会发生老化而迅速退化,所以其使用温度远低于居里点 T_c (为 $160\sim 350\text{ }^\circ\text{C}$),这也就限制了PZT材料在更高温度环境下的应用,因此,PZT型压电换能器只能在低于 $160\text{ }^\circ\text{C}$ 的环境下工作。

2.3 铌酸锂晶体基压电换能器

铌酸锂(LiNbO_3 , LN)晶体是一种多功能晶体材料,属于 $3m$ 点群,压电性能优异, $d_{15}=75\text{ pC/N}$, $d_{33}=21\text{ pC/N}$ ^[32]。LN晶体用提拉法生长,是目前开发和应用较多的压电晶体之一。该晶体居里温度高(约 $1150\text{ }^\circ\text{C}$)^[33-34],虽然晶体有较高的居里温度,但当环境温度达到 $600\text{ }^\circ\text{C}$ 时,晶体会发生氧损耗^[35],导致晶体的高温电阻率显著下降,影响制备器件的稳定性。另外,随温度不断升高,LN晶体自身还会发生不同程度的化学分解(Li不稳定)^[36-38],这些因素都将限制该晶体在更高温度下($>600\text{ }^\circ\text{C}$)的传感应用。

Mohimi等^[39]利用LN晶体厚度剪切振动模式(d_{15} 模式),设计并制作了高性能超声导波换能器,用于检测和监控发电厂过热蒸汽管道的结构缺陷^[40]。研究人员通过切割特定尺寸的X切LN晶片,采用高温连接技术,将LN晶片与氧化铝背衬层结合,制备出LN基压电换能器原型器件。通过实验

方式验证了 LN 基原型换能器在宽温域范围内的工作特性。通过耐高温钢夹将 LN 基原型换能器干耦合到位于一高温炉膛内的钢棒下部,作为超声发射器,选取 PZT 基换能器置于钢棒的另一端,作为超声接收装置,用于测试 LN 基原型换能器的超声发射性能;然后再将 LN 基原型换能器作为超声接收器,接入特定的高温信号发射装置,进一步测试 LN 基原型换能器的超声接收性能。基本装置示意图如图 4 所示。

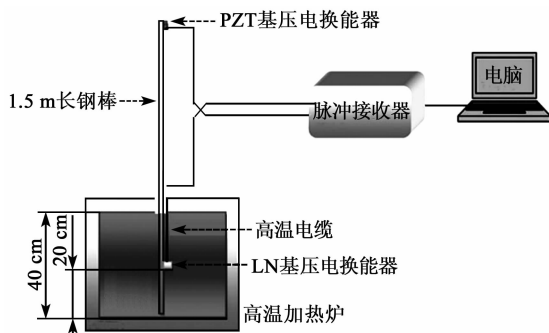


图 4 LN 基压电换能器高温性能测试装置

研究人员通过不断改变高温炉内的温度,验证了 LN 基压电换能器在不同温度下接收和发射超声波信号的能力。分别选取室温 and 600 °C 时的实验结果,绘制了时域分析曲线(见图 5)。由图可知,该压电换能

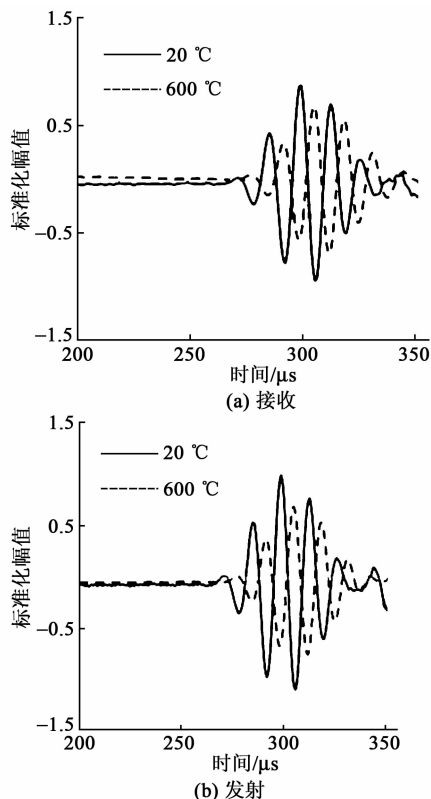


图 5 LN 基压电换能器在室温 and 600 °C 下接收和发射信号的幅值

器在室温~600 °C 时具有良好的发射和接收超声波信号的性能,只不过在高温时超声信号幅值有少许下降,这可能与晶体的物理化学性质变化有关。

除厚度剪切振动模式外,Atsushi Baba 等^[41]基于 LN 晶体的厚度伸缩振动模式(d_{33} 模式)也展开了深入研究,探讨其高温服役特性。通过获取 LN 晶体的 Z 向切片,经磁控溅射技术喷涂厚为 200 nm 的 Au 电极,随后选择与 LN 晶体热扩散系数相近的奥氏体不锈钢作为负载测试基片,将 LN 晶体与奥氏体不锈钢先通过高温陶瓷胶粘结,然后用高温银导电膏将外部高温矿物绝缘(MI)电缆连接在电极上,实现与外部设备的导通,最后把该原型换能器和负载一同放入高温电炉内,通过热电偶测温并实施温控。测试实验装置如图 6 所示。通过该装置可测试压电换能器的高温服役性能。

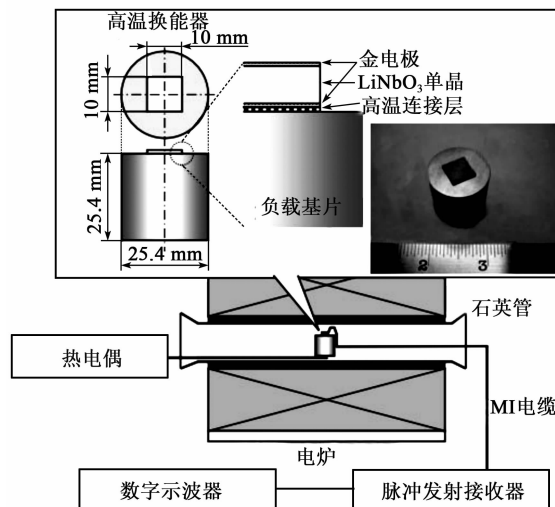


图 6 LN 基压电换能器高温性能测试装置

研究人员通过分析不同温度下的脉冲回波信号得出,该 LN 基压电换能器在室温到 1 000 °C 时能够稳定地接收到来自负载的脉冲回波信号,且具有较高的接收灵敏度。特别注意到,本文未发现 LN 晶体在 600 °C 时因为氧损失或高温的电阻变化对脉冲回波测试产生的影响,据此推测可能与晶体材料的品质提升有关。研究表明, LN 单晶在高温压电换能器设计及应用中具有一定的优势。

2.4 磷酸镓晶体基压电换能器

磷酸镓(GaPO_4)晶体是一种高温性能稳定的压电材料,最先采用水热法制备的 GaPO_4 晶体和石英晶体结构相同^[42],属于 32 点群,因而很多特性和石英相似,其 $d_{33} = 5 \text{ pC/N}$ 。 GaPO_4 晶体具有高的电阻率和机械品质因数(Q_m),室温下 Q_m 可达 10 000,

在 $\alpha\beta$ 相转变点 $970\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下压电性能稳定^[43-44]。但该晶体采用水热法生长,晶体内部会有部分游离态的 OH^- 集团,该集团的存在将影响晶体内部的极化率,对晶体的器件应用会产生一定影响^[42]。

利用 GaPO_4 晶体,M. Koston等^[45]开发了室温至 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的压电换能器。选取特定方向的 GaPO_4 晶片,在晶片表面镀上 100 nm 的铂金电极,通过Duralco124银胶将 GaPO_4 晶片粘结到有人工缺陷(直径 $\varnothing 0.8\text{ mm}$ 的侧钻孔)的负载钢板上,钢板高为 25 mm ,人工缺陷在距离钢板顶部 12.5 mm 处,如图7(a)所示。之后,通过纯银玻璃编织布线将该原型换能器和脉冲信号激发设备连接,实验装置如图7(b)所示。最后,将连接好设备中的 GaPO_4 基压电换能器放入高温炉内,测试器件在宽温域范围内对外界超声波信号的接收能力,实验装置如图7(c)所示。



图7 压电换能器与负载钢板、外部设备的连接装置及

GaPO_4 基压电换能器高温性能测试装置

通常,外加脉冲激发信号的频率决定被测材料中产生的超声波波长,波长越小则更易检测到材料内部的微小缺陷。研究结果显示,当外加信号频率为 3.5 MHz 时,利用 GaPO_4 基压电换能器便足以

检测到直径为 $\varnothing 0.8\text{ mm}$ 的人工缺陷小孔;另外,通过计算从钢板底部和人工缺陷处反射回的超声波信号的信噪比(SNR),验证得到了该压电换能器的高温检测性能,结果如图8所示。由图可知,在室温到 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, GaPO_4 基压电换能器的接收性能稳定,具有较高的接收灵敏度,信噪比 $>6\text{ dB}$,满足实际无损检测技术在宽温域工作范围内的需求。以上实验研究结果表明, GaPO_4 基压电换能器在无损检测领域具有潜在应用价值。

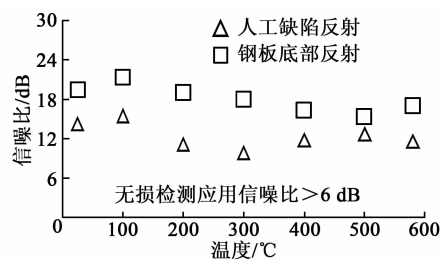


图8 室温至 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, GaPO_4 基压电换能器信噪比数值变化示意图

2.5 氮化铝晶体基压电换能器

氮化铝(AlN)晶体为六方纤锌矿结构,具有较高的居里温度(约 $2\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$),在达到居里温度前,该晶体无任何相变发生。 AlN 晶体属于 $6mm$ 点群,不对称的晶体结构使 AlN 显现出较优越的压电性能。据报道, AlN 晶体的 $d_{33}=5.6\text{ pC/N}$, $d_{14}=9.7\text{ pC/N}$ ^[46-47]。另外,该晶体具有优异的电阻特性,在 $1\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时电阻率约为 $5\times 10^{10}\text{ }\Omega\cdot\text{cm}$ ^[48],这些优势使 AlN 晶体在高温压电技术领域有着重要应用。

Taeyang Kim等^[49]利用 AlN 晶体研制了接收型压电换能器,器件的信噪比 $>20\text{ dB}$,且在 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下依然保持较高的工作灵敏度和稳定性。研究人员用一种抗高温耐腐蚀的夹持装置将 AlN 晶片和氧化铝绝缘板夹紧固定在厚 $300\text{ }\mu\text{m}$ 的不锈钢钢板上,并将它们一起放置于高温炉中。钢板的另一端采用Nd:YAG激光器照射(激光光源的波长为 532 nm ,脉冲持续时间为 6 ns ,脉冲重复频率为 10 Hz ,激光束直径约为 $\varnothing 10\text{ mm}$),当厚为 $300\text{ }\mu\text{m}$ 的不锈钢板表面被高功率脉冲激光垂直照射时,会在表面的微小区域内形成一个温度梯度,该温度梯度会在照明区域引发产生有规律的弹性膨胀和弹性压缩,基于这些弹性应变,该微小区域将转变为超声波波源,产生Lamb波,并且以弹性波的形式在钢板中传播^[50-51]。实验过程中通过不断改变高温炉的

温度,测试 AlN 基压电换能器件在宽温域范围内的接收性能。实验测试装置如图 9 所示。

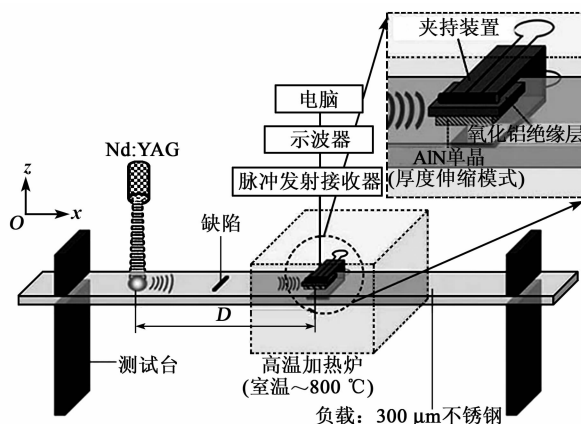


图9 AlN基压电换能器接收性能测试装置

研究人员首先验证 Nd:YAG 激光器在室温下产生 Lamb 波的长距离传播能力,通过改变 Lamb 波波源和 AlN 基压电换能器的间距进行验证。结果表明,在 10~20 cm 时,激光器产生的 Lamb 波具有良好的传播特性。为进一步检测 AlN 基压电换能器在高温时对声波信号的接收特性,通过改变高温炉内的温度,得到的实验结果如图 10 所示,即 AlN 基压电换能器接收到 S_0 波(Lamb 波中的对称波)的标准化幅值和对应 S_0 波的信噪比。由图可知,在室温~800℃时,随着温度的升高,AlN 基压电换能器接收到的信号幅值和信噪比逐渐减小,这可能与 AlN 单晶的表面在 700~800℃时发生氧化有关,表面态的变化导致电子能量损失和耗散,影响信号强度。另外,据文献[18, 41]报道,接收信号的减弱与压电换能器和实验夹具间热膨胀系数有关,这些因素都导致接收信号的减弱,不过在 800℃左右时,AlN 基压电换能器信噪比仍大于 20 dB,表明该器件在宽温域范围内具备良好的工作能力,是宽温域无损探伤应用的优良选择。

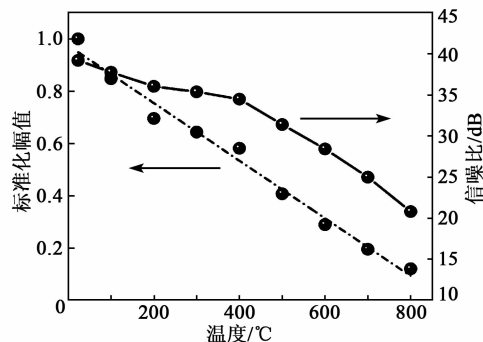


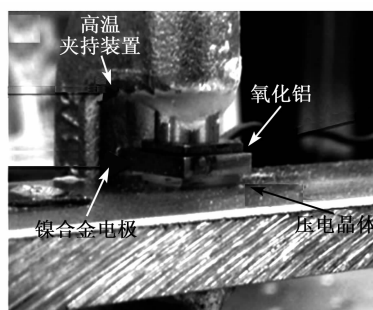
图10 S_0 波的标准化振幅和对应 S_0 波的信噪比

2.6 稀土钙氧硼酸盐晶体基压电换能器

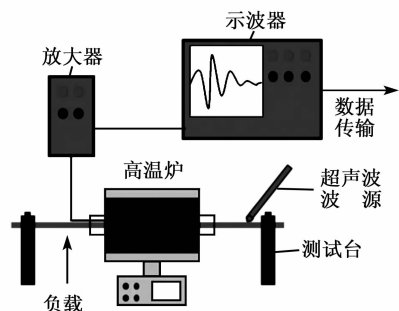
稀土钙氧硼酸盐晶体($RECa_4O(BO_3)_3$, RECOB, 其中 RE 表示 Y 和稀土元素)主要包括 YCOB、GdCOB 和 LaCOB 等,属于 m 点群。RECOB 晶体通常采用提拉法生长,易获得大尺寸优质单晶^[52-53]。其中,YCOB 晶体具有高的熔点(约 1 510℃),在 800℃时电阻率约为 $10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ ^[54-56],另外其压电常数较大, $d_{26}=8 \text{ pC/N}$,这些性能都表明 YCOB 晶体在高温压电领域具有一定的潜在应用优势。

2014 年,Joseph A. Johnson 等^[57]基于 YCOB 晶体优异的高温压电性能,根据其厚度剪切振动模式(d_{26} 模式),采用 $YXt-30^\circ$ 切型制备了压电元件,并试制了能工作在高温环境下的接收型压电换能器。

研究人员采用镍-铬-铁基固溶强化合金作为压电晶片电极,用耐高温的夹持装置将镀有电极的 YCOB 晶片固定在 309 不锈钢上,为防止信号干扰,在上电极与夹持装置间增加氧化铝隔板。原型换能器与负载连接装置如图 11(a)所示。按照 Hsu-Nielsen 实验设计原则,连接装置如图 11(b)所示。将上述原型换能器和负载置于高温炉内,以测试压电换能器在高温时的声波接收性能。利用图 11(b)中超声波波源产生超声检测波,同时位于高温炉内的 YCOB 基压电换能器接收信号,最后经外部设备进行信号分析。



(a) YCOB基压电换能器与负载连接装置



(b) YCOB基压电换能器高温接收性能测试装置

图11 YCOB 基压电换能器与负载连接装置及高温接收性能测试装置

研究结果证明,无论是在 30~120 kHz 时的零阶 Lamb 波还是 240 kHz 的一阶反对称波,高温炉内的 YCOB 基压电换能器都可以检测到声波信号,且在室温~1 000 ℃时均具有优异的接收特性。这些实验结果表明,YCOB 基压电换能器具有较好的宽温域工作特性,可以在 1 000 ℃下正常工作,具有良好的应用前景。

表 1 为各类压电材料及其制备的压电换能器件

表 1 几种压电材料的基本性能参数及其制备的压电换能器的耐温特性

	压电材料基本性能		压电换能器性能		
	$d_{33}/(\text{pC}\cdot\text{N}^{-1})$	T_{C} 或熔点/℃	工作温度/℃	温度稳定性	适用类型
$\alpha\text{-SiO}_2$	2~3	570	室温~350	稳定	发射型
PZT	约 593	160~350	室温~160	较稳定	发射、接收型
LiNbO ₃	21	1 150	室温~1 000	较稳定	发射、接收型
GaPO ₄	5	970	室温~600	稳定	接收型
AlN	5~6	2 000	室温~800	稳定	接收型
RECOB	约 6	约 1 500	室温~1 000	稳定	接收型

3 结 束 语

本文总结了近年来在宽温域范围内工作的压电超声换能器及其制备方法和性能。利用 AlN 和 RECOB 晶体研制的压电换能器具有比其他压电换能器更优异的高温服役特性,能够在宽温域范围内正常工作。考虑到 RECOB 系晶体能够采用提拉法生长并获得优质大尺寸单晶,因此,该晶体在宽温域压电换能器研发与应用方面更具优势,具有广阔的应用前景。同时,随着工业技术的发展,健康监测用特种压电换能器的工作环境通常伴随有辐照、腐蚀、低氧分压等严苛条件及其组合,这对宽温域压电超声换能器提出了更高的要求。因此,开发综合性能优异的压电晶体材料,研制耐严苛环境的压电换能器件将是今后工作的重点和难点。

参考文献:

[1] HUNT J W, ARDITI M, FOSTER F S. Ultrasound transducers for pulse-echo medical imaging[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering,1983,30(8): 453-481.

[2] CHEN Jingkuang. Capacitive micromachined ultrasonic transducer arrays for minimally invasive medical ultrasound[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering,2010,20(2): 023001.

[3] CAO Shaoping, GU Hongqing, SUN Guojun, et al. Innovative ultrasound transducers-purewave crystal technology and its applications[J]. Chinese Journal of Med-

的性能特点。与铅基压电材料相比,非铅非铁电性压电晶体(如 AlN 和 RECOB 等)具有更高的熔点及优良的压电性能温度稳定性。利用该类压电晶体研制的压电超声换能器在宽温域无损探伤应用方面优势更明显。当然,压电换能器的设计和推广应用,还需要考虑压电材料的制备难度问题,性能优异且成本相对低的压电材料是实现商业化推广应用的的首选。

ical Instrumentation,2005,29(5):360-367.

[4] LEE W, ROH Y. Ultrasonic transducers for medical diagnostic imaging[J]. Biomedical Engineering Letters, 2017, 7(2):91-97.

[5] NAN Cewen, BICHURIN M I, DONG Shuxiang, et al. Multiferroic magnetoelectric composites: historical perspective, status, and future directions[J]. Journal of Applied Physics, 2008,103(3):031101.

[6] UCHINO K. Advanced piezoelectric materials: science and technology[M]. Sawston, Cambridge: Woodhead Publishing Ltd, 2010:30-66.

[7] YE Zuoguang, NOHEDA B. Monoclinic phase in the relaxor-based piezoelectric/ferroelectric $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$ system[J]. Physical Review B, 2001, 64(18):184114-1-5.

[8] NOHEDA B, COX D, SHIRANCE G, et al. Polarization rotation via a monoclinic phase in the piezoelectric $92\%\text{PbZn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3\text{-}8\%\text{PbTiO}_3$ [J]. Physical Review Letters, 2001,86(17):3891-3894.

[9] SERVICE R F. Materials science: shape-changing crystals get shifter [J]. Science, 1997, 275 (5308): 1878-1878.

[10] SWARTZ S L, SHROUT T R, SCHULZE W A, et al. Dielectric properties of lead-magnesium niobate ceramics [J]. Journal of the American Ceramic Society, 1984,67(5):311-315.

[11] UCHINO K. High electromechanical coupling piezoelectrics: relaxer and normal ferroelectric solid solutions

- [J]. Solid State Ionics, 1998, 108(1/4): 43-52.
- [12] XU Renxin, CHEN Wen, ZHOU Jing, et al. Dielectric and piezoelectric properties of 0-3 PZT/PVDF composite doped with polyaniline[J]. Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition, 2006, 21(1): 84-87.
- [13] LAM M C W, LI Jinhua, CHAN H L W, et al. Linear pyroelectric sensor array based on PCLT/P(VDF/TrFE) composite[J]. Integrated Ferroelectrics, 2001, 35(1/4): 87-95.
- [14] NEWNHAM R E, SKINNER D P, CROSS L E. Connectivity and piezoelectric-pyroelectric composites[J]. Materials Research Bulletin, 1978, 13(5): 525-536.
- [15] SJINNER D P, NEWNHAM R E, CROSS L E. Flexible composite transducers[J]. Materials Research Bulletin, 1978, 13(6): 599-607.
- [16] 栾桂冬, 张金铎, 王仁乾. 压电换能器和换能器阵[M]. 北京: 北京大学出版社, 2005: 103-136.
- [17] KAZYS R, VOLEISIS A, VOLEISIENE B. High temperature ultrasonic transducers: review [J]. Ultrasound, 2008, 63(2): 7-17.
- [18] 周起. 铌镁酸铅-钛酸铅单晶剪切模式换能器性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [19] RATHOD V T. A review of acoustic impedance matching techniques for piezoelectric sensors and transducers[J]. Sensors, 2002, 20(14): 4051.
- [20] DUBOIS M A, MURALT P. Properties of aluminum nitride thin films for piezoelectric transducers and microwave filter applications[J]. Applied Physics Letters, 1999, 74(20): 3032-3034.
- [21] AMINI M H, SINCLAIR A N, COYLE T W. A new high-temperature ultrasonic transducer for continuous inspection[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2016, 63(3): 448-455.
- [22] HATCH D M, GHOSE S. The $\alpha\beta$ phase transition in cristobalite, SiO_2 [J]. Physics and Chemistry of Minerals, 1991, 17(6): 554-562.
- [23] 龚美霞. 石英晶体元器件技术的发展及应用[J]. 电子设计工程, 2001(1): 9-11.
- GONG Meixia. New development and application of quartz crystal components[J]. Electronic Design Engineering, 2001(1): 9-11.
- [24] YUN C, ISHII T, NAKAMURA K, et al. A high power ultrasonic linear motor using a longitudinal and bending hybrid bolt-clamped langevin type transducer[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2001, 40(5B): 3773-3776.
- [25] DAMJANOVIC D. Materials for high temperature piezoelectric transducers [J]. Current Opinion in Solid State & Materials Science, 1998, 3(5): 469-473.
- [26] PARK S E, SHROUT T R. Ultrahigh strain and piezoelectric behavior in relaxor based ferroelectric single crystals[J]. Journal of Applied Physics, 1997, 82(4): 1804-1811.
- [27] HUAN Qiang, MIAO Hongchen, LI Faxin. A uniform-sensitivity omnidirectional shear-horizontal (SH) wave transducer based on a thickness poled, thickness-shear (d_{15}) piezoelectric ring[J]. Smart Materials and Structures, 2017, 26(8): 08LT01.
- [28] MIAO Hongchen, HUAN Qiang, LI Faxin. Excitation and reception of pure shear horizontal waves by using face-shear (d_{24}) mode piezoelectric wafers [J]. Smart Materials and Structures, 2016, 25(11): 11LT01.
- [29] KAZYS R, VOLEISIS A, VOLEISIENE B. High temperature ultrasonic transducers: review[J]. Ultrasonics, 2008, 63(2): 7-17.
- [30] KIM K, HSU D K, AHN B, et al. Fabrication and comparison of PMN-PT single crystal, PZT and PZT-based 1-3 composite ultrasonic transducers for NDE applications[J]. Ultrasonics, 2010, 50(8): 790-797.
- [31] 张晋弘. 基于 PZT 厚膜的 MEMS 超声换能器[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2009.
- [32] SMITH R T, WELSH F S. Temperature dependence of elastic, piezoelectric and dielectric constants of lithium tantalate and lithium niobate[J]. Journal of Applied Physics, 1971, 42(6): 2219.
- [33] CARRUTHERS J R. Nonstoichiometry and crystal growth of lithium niobate[J]. Journal of Applied Physics, 1971, 42(5): 1846.
- [34] REIMANN K, FLYTZANIS C, ELSAESSER T, et al. High-field terahertz bulk photovoltaic effect in lithium niobate[J]. Physical Review Letters, 2014, 112(14): 146602.
- [35] DAMJANOVIC D. Materials for high temperature piezoelectric transducers [J]. Current Opinion in Solid State & Materials Science, 1998, 3(5): 469-473.
- [36] TUMER R C, FUIERER P A, NEWNHAM R E, et al. Materials for high-temperature acoustic and vibration sensors-A review[J]. Applied Acoustics, 1994, 41(4): 299-324.
- [37] YU Fapeng, LU Qiming, ZHANG Shujun, et al. High-

- performance, high-temperature piezoelectric BiB_3O_6 crystals[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2014, 3(2): 329-338.
- [38] PARK S E, SHROUT T R. Ultrahigh strain and piezoelectric behavior in relaxor based ferroelectric single crystals[J]. Journal of Applied Physics, 1997, 82(4): 1804-1811.
- [39] MOHIMI A, GAN T, BALACHANDRAN W. Development of high temperature ultrasonic guided wave transducer for continuous in service monitoring of steam lines using non-stoichiometric lithium niobate piezoelectric ceramic[J]. Sensors and Actuators A-physical, 2014, 216: 432-442.
- [40] BOND L J. Fitness tests for nuclear reactors[J/OL]. IEEE Spectrum Inside Technology, 2012: 25-29. <http://spectrum.ieee.org/energy/nuclear/fitness-tests-for-old-nuclear-reactors/0>.
- [41] BABA A, SEARFASS C T, TITTMANN B R. High temperature ultrasonic transducer up to 1 000 °C using lithium niobate single crystal[J]. Applied Physics Letters, 2010, 97(23): 232901.
- [42] PHILIPPOT E, IBANEZ A, GOIFFON A, et al. A quartz-like material: Gallium phosphate(GaPO_4); crystal growth and characterization[J]. Journal of Crystal Growth, 1993, 130(1/2): 195-208.
- [43] KREMPL P, SCHLEINZER G, WALLNO F W. Gallium phosphate, GaPO_4 : A new piezoelectric crystal material for high-temperature sensorics[J]. Sensors & Actuators A, 1997, 61(1/3): 361-363.
- [44] HAINES J, CAMBON O, PRUDHOMME N, et al. High-temperature, structural disorder, phase transitions, and piezoelectric properties of GaPO_4 [J]. Physics Review B, 2006, 73(1): 014103.
- [45] KOSTAN M, MOHIMI A, NAGESWARAN C, et al. High temperature gallium orthophosphate transducers for NDT[M]. Amsterdam: Elsevier Science BV, 2016: 987-990.
- [46] GUY I L, MUENSIT S, GOLDYS E M. Extensional piezoelectric coefficients of gallium nitride and aluminum nitride[J]. Applied Physics Letters, 1999, 75(26): 4133-4135.
- [47] WRIGHT A F. Elastic properties of zinc-blende and wurtzite AlN , GaN , and InN [J]. Journal of Applied Physics, 1997, 82(6): 2833-2839.
- [48] ZHANG Shujun, ALBERTA E, EITEL R E, et al. High temperature piezoelectric materials for actuators and sensors[C]//Bellingham: SPIE-INT Soc Optical Engineering, 2005: 279-286.
- [49] KIM T, KIM J, JIANG Xiaoning. AlN ultrasound sensor for photoacoustic Lamb wave detection in a high-temperature environment[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, 2018, 65(8): 1444-1451.
- [50] LEE H, SOHN H, YANG S, et al. Monitoring of pipelines in nuclear power plants by measuring laser-based mechanical impedance[J]. Smart Materials and Structures, 2014, 23(6): 065008.
- [51] KIM T, KIM J, JIANG Xiaoning. High temperature transducer using aluminum nitride single crystal for laser ultrasound detection[C]//Bellingham: SPIE-INT Soc Optical Engineering, 017: 10169.
- [52] FEI Y T, CHAI B, EBBERS C A, et al. Large-aperture YCOB crystal growth for frequency conversion in the high average power laser system[J]. Journal of Crystal Growth, 2006, 290(1): 301-306.
- [53] ZHANG Shujun, YU Fapeng, XIA Ru, et al. High temperature ReCOB piezoelectric crystals: Recent developments[J]. Journal of Crystal Growth, 2011, 318(1): 884-889.
- [54] HIROAKI T. Growth and piezoelectric properties of $\text{R}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ and $\text{RCa}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3$ (R : rare-earth elements) single crystals[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2006, 408: 474-479.
- [55] TIAN Shiwei, LI Lili, YU Fapeng, et al. Structural stability and electro-elastic property of YCOB crystal annealed in harsh environment[J]. Applied Physics Letters, 2018, 113(12): 122905.
- [56] TIAN Shiwei, LI Lili, YU Fapeng, et al. Electrical properties of yttrium calcium oxyborate crystal annealed at high temperature and low oxygen partial pressure[J]. Journal of Materiomics, 2019, 5(3): 363-371.
- [57] JOHNSON J A, KIM K, ZHANG Shujun, et al. High-temperature acoustic emission sensing tests using a yttrium calcium oxyborate sensor[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, 2014, 61(5): 805-814.

用于精确定向的低噪声半球陀螺设计

方海斌^{1,2}, 韩世川^{1,2}, 彭凯^{1,2}, 雷霆^{1,2}, 周闯^{1,2}

(1. 中国电子科技集团公司第二十六研究所, 重庆 400060; 2. 固态惯性技术重庆市工程实验室, 重庆 400060)

摘要:半球谐振陀螺是一种高精度、长寿命的新型振动陀螺仪。为设计具备良好角速率测量精度和低噪声特性的半球陀螺及满足航天器精确定向和姿态控制需求, 该文分析了半球陀螺噪声产生的机理, 讨论了谐振子参数、控制系统参数及电子线路对半球陀螺噪声的影响, 并针对敏感器和电子线路进行了优化设计。结果表明, 优化设计后的半球陀螺噪声及角度随机游走显著降低, 约为改进前的 50%, 与美国 Northrop Grumman 公司 HRG130P 半球谐振陀螺基本型的噪声水平基本相当。

关键词:精密定向; 半球谐振陀螺; 低噪声

中图分类号: TN384; TP212 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11977/j.issn.1004-2474.2020.06.031

Design of Low Noise Hemispherical Gyro for Precise Orientation

FANG Haibin^{1,2}, HAN Shichuan^{1,2}, PENG Kai^{1,2}, LEI Ting^{1,2}, ZHOU Chuang^{1,2}

(1. The 26th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China;

2. Chongqing Engineering Laboratory of Solid Inertial Technology, Chongqing 400060, China)

Abstract: The Hemispherical resonator gyro is a new kind of vibratory gyro with high precision and long life. In order to design a hemispherical resonator gyro with good angular rate measurement accuracy and low noise characteristics, and to meet the requirements of accurate orientation and attitude control of the spacecraft, the mechanism of noise generation of hemispherical resonator gyro is analyzed in this paper, and the effects of the harmonic oscillator parameters, control system parameters and electronic circuit parameters on the noise of the hemispherical gyro are discussed, the optimized design of the sensor and electronic circuit is carried out. The results show that the noise level and angular random walk after the optimized design are significantly reduced by about 50% of that before the optimized design, which is comparable to the noise level of the basic type HRG130P hemispherical resonator gyro from Northrop Grumman Corporation in U. S. A.

Key words: precise orientation; hemispherical resonator gyro; low noise

0 引言

半球陀螺是唯一能达到惯导级精度的振动陀螺, 其利用半球壳唇沿的径向驻波振动来感测基座相对惯性空间旋转的一种振动陀螺^[1]。工作于力反馈模式的半球陀螺, 通过将波节点控制在一个固定位置, 可以将节点信号在模数转换前高度放大, 从而达到良好的角速率测量精度和低噪声特性^[2]。美国 Northrop Grumman 公司研制的三件套力反馈模式 HRG130P 半球陀螺(基本型的角度随机游走为 $0.000\ 3\ (^{\circ})/\text{h}^{1/2}$, 高精度型的角度随机游走为 $0.000\ 06\ (^{\circ})/\text{h}^{1/2}$)是目前世界上力反馈模式半球陀螺噪声性能的最高水平^[3]。

半球陀螺的噪声水平能够满足大部分航天器姿

态控制的要求, 但对于某些对精确定向具有更高要求的航天器, 则需要在现有设计的基础上作相应的改进。传统机械陀螺也可以达到较低的噪声水平, 但寿命和可靠性不理想, 因此迫切需要具有相同性能的长寿命陀螺^[4]。

本文在传统力反馈模式半球陀螺的基础上, 对降低陀螺噪声的方法进行了介绍。

1 噪声的影响因素分析

1.1 谐振子参数的影响

力反馈模式下的驻波进动方程为

$$\ddot{\theta} = \frac{\omega_0}{2Q} [-\Delta_{\text{sc}} \sin(2\theta) + \Delta_{\text{cs}} \cos(2\theta)] - \alpha \Omega + C_p \quad (1)$$

式中: ω_0 为谐振子频率; Q 为谐振子品质因数; Δ_{cs} 和 Δ_{cs} 分别为半球谐振子相隔 45° 的两个主轴的频率裂解值; α 为谐振子进动系数; Ω 为外界输入角速率; θ 为振型角; C_p 为控制系统。由式(1)可知, Q 、频率裂解值(Δ_c)及 C_p 都对陀螺噪声存在影响。

Q 值的损耗主要是谐振子石英材料内摩擦阻尼和金属化薄膜阻尼, 阻尼损耗表现为驻波在阻力作用下波幅的不稳定性, 陀螺性能表现为零位波动和噪声大。

Δ_c 主要由谐振子壳体质量和刚度分布不完全对称产生, 其值取决于制造工艺中不对称的误差量, 在有频率裂解存在的情况下, 谐振子有两个不同的振动频率, 由此合成的驻波振动会产生波动, 导致陀螺输出噪声大。

由于存在机械加工误差、材料缺陷、密度分布不均匀性, 加工后的谐振器与理想模型具有较大差异, 其振动模态包含多种高阶振动的复杂振动模态。随着陀螺精度的提高, 这些高阶振动的影响逐渐明显, 为实现低噪声目标, 需要降低这些高阶振动模态的影响。为了控制振子振动并获得精确的振动信号, 需要通过金属化工艺为绝缘的谐振子表面镀膜, 使其具有良好的导电性。膜层的质量直接影响谐振子的力学特性, 当谐振子表面膜层厚度不均匀时, 会造成质量分布误差, 振子原有的振动形态会发生变化导致振动频率分裂^[5]。

为了获得具有良好性能的谐振子, 需要提高加工精度及谐振子金属化成膜工艺, 减小制造工艺对 Q 和 Δ_c 的影响, 从而使陀螺实现低噪声性能。

1.2 控制系统参数的影响

图1为半球陀螺控制系统框图。图中 H 为反馈电路的传递函数, K_b 为敏感头信号增益, G_0 、 G_1 为电子线路信号增益, V 为陀螺输出噪声, 其表达式为

$$V = A_0 K_b G_0 G_1 \quad (2)$$

式中 A_0 为驻波振幅。

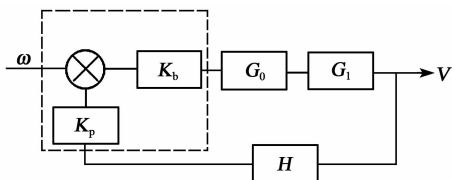


图1 控制系统框图

K_b 、 G_0 、 G_1 的分配中, 优先提高 K_b 和 G_0 , 降低 G_1 , 有利于降低噪声。通过选用低噪声和高输入阻

抗的放大器可以提高 K_b 值。

陀螺的驱动信号为高压信号, 检测信号尤其是波节点信号为微弱信号, 需要对检测信号做好屏蔽处理, 以减小外界信号对它的干扰。此外, 对检测信号进行差分处理可提高其抗干扰能力。在整个信号处理回路增益保持一致的前提下, 在陀螺控制系统的较前级(见图1中虚框部分)适当增大放大倍数有利于降低环路噪声。

1.3 电子线路的影响

理想电阻的热噪声为

$$V_n = \sqrt{4KTR\Delta f} \quad (3)$$

式中: K 为玻耳兹曼常数; T 为开氏温度; R 为电阻值; Δf 为带宽。

在功耗满足要求的前提下, 降低运放电路中电阻值, 可以降低陀螺噪声。

开关电源也会对陀螺噪声产生影响。开关电源主要为电磁干扰噪声(整流谐波、开关频率、高速电流和电压瞬变产生), 通过电源线以共模或差模形式向外传导, 并向空间辐射。通过在开关电源后增加线性电源, 可降低开关电源的噪声影响。

2 改进措施及效果

通过以上分析得出, 降低陀螺噪声的主要途径有优化谐振子性能、优化控制系统参数、改进信号处理方式及降低电路热噪声。优化谐振子性能包括提高 Q 和降低 Δ_c 。优化控制系统参数主要是在整个信号处理回路增益保持一致的前提下, 在陀螺控制系统的较前级适当增大放大倍数。电子线路降低噪声主要是在功耗满足要求的前提下, 降低运放电路中电阻值, 同时在开关电源后增加线性电源, 降低开关电源的噪声影响。

为了验证改进措施的有效性, 制造了一只半球陀螺样机, 谐振子的 $Q=9.0 \times 10^6$, $\Delta_c=0.001$ Hz。陀螺检测信号采取差分和屏蔽措施, 电路中适当降低电阻值及在开关电源后增加线性电源, 在陀螺控制系统前级适当增大放大倍数。

图2、3分别为常规和低噪声半球陀螺的噪声(采样时间为20 min, 采样间隔为0.5 s)。对原始的2400个采样值直接计算标准差作为陀螺的噪声。陀螺原始均值($\bar{\omega}$)为

$$\bar{\omega} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \omega_i \quad (4)$$

陀螺噪声(σ)为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\omega_i - \bar{\omega})^2}{N-1}} \quad (5)$$

式中: ω_i 为陀螺原始输出; $N=2\,400$ 为原始数据个数。

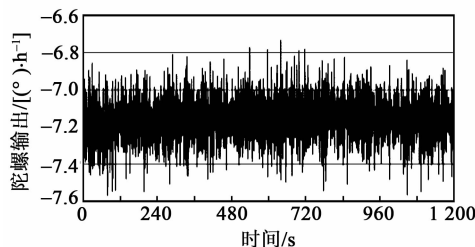


图2 常规半球陀螺的噪声

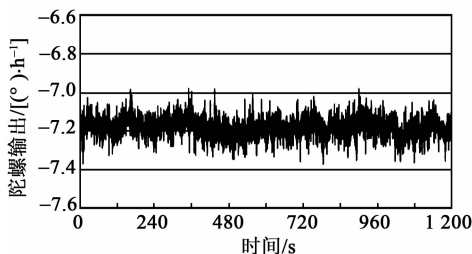


图3 低噪声半球陀螺的噪声

根据式(5)可得常规半球陀螺的 $\sigma=0.123\ (^{\circ})/\text{h}$,低噪声半球陀螺的 $\sigma=0.059\ (^{\circ})/\text{h}$ 。优化设计后的噪声为优化前的48%。

图4、5分别为常规及低噪声半球陀螺的Allan方差曲线。Allan方差拟合得到的常规半球陀螺的角度随机游走为 $0.000\,524\ (^{\circ})/\text{h}^{1/2}$,低噪声半球陀螺的角度随机游走为 $0.000\,282\ (^{\circ})/\text{h}^{1/2}$,优化设计后的角度随机游走为优化前的53.8%。

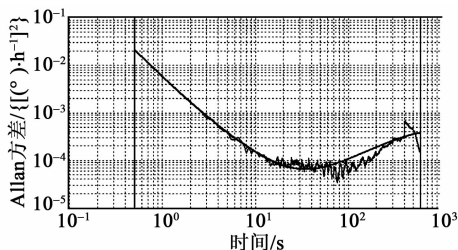


图4 常规半球陀螺的Allan方差曲线

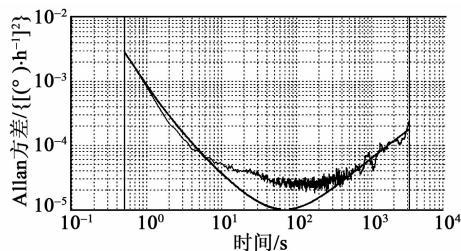


图5 低噪声半球陀螺的Allan方差曲线

3 结束语

通过对陀螺敏感器、控制系统及电子线路的优化设计,显著降低了半球陀螺的噪声。实测结果表明,改进后的陀螺噪声为 $0.059\ (^{\circ})/\text{h}(1\sigma)$,角度随机游走为 $2.82 \times 10^{-4}\ (^{\circ})/\text{h}^{1/2}$,噪声降低到优化设计前的50%左右,证明了优化设计的有效性。改进设计后的噪声与美国Northrop Grumman公司HRG130P半球谐振陀螺基本型的噪声水平相当,与HRG130P的高精度型尚有一定差距。

半球陀螺长寿命、高可靠的特性结合低噪声的优势,能够很好地满足遥感、地球观测及科学实验等对精确定向有较高要求的卫星的需要。

参考文献:

- [1] 吕志清. 半球谐振陀螺在宇宙飞船上的应用[J]. 压电与声光, 1999, 21(5): 349-353.
LV Zhiqing. The application of HRG in the spacecraft[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 1999, 21(5): 349-353.
- [2] 江黎, 覃施苏, 周强, 等. 半球谐振陀螺力反馈模式下信号处理方法分析[J]. 压电与声光, 2014, 36(6): 917-920.
JIANG Li, QIN Shishu, ZHOU Qiang, et al. Analysis of the signal processing method of HRG operating in force to rebalance mode[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2014, 36(6): 917-920.
- [3] 彭慧, 方针, 谭文跃, 等. 半球谐振陀螺发展的技术特征[J]. 导航定位与授时, 2019, 6(4): 108-114.
- [4] 刘付成, 赵万良, 宋丽君, 等. 半球谐振陀螺惯性敏感器及其空间应用[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2019.
- [5] МАТВЕЕВ А, ЛИПАТНИКОВ В И, АЛЕХИН А В. 固体波动陀螺[M]. 杨亚非, 赵辉, 译. 北京: 国防工业出版社, 2009.

《压电与声光》2020 年第 42 卷总索引

题 名	作 者	(期-页)
一种宽阻带窄带腔体滤波器的设计	李瑞涛,杨青慧,张怀武	(1-1)
压电基片上微流分析器件研究	章安良,董良威	(1-4)
基于梯形槽阵列的 SSPPs 型带通微波滤波器	王 远,熊厚博,王 耿,胡明哲	(1-8)
带宽恒定的电调带通滤波器	高端平,曹良足	(1-12)
声表面波射频识别系统的 FMCW 信号源设计	郭佳佳,陈智军,蔡达轩,贾 浩,徐海林,李亚飞	(1-16)
基于磷化铜材料的高速光纤声光调制器	朱 吉,吴 畏,王智林,杨 涛	(1-21)
基于分布式光纤传感的隔热层脱粘识别研究	单一男,武湛君,徐新生,费继友	(1-25)
压差式光纤矢量水听器声压相位灵敏度研究	张 滔,胡斌杰,陈超育,郭运动,邓志儒,石 滔,徐 栋	(1-29)
体声波磁电天线辐射性能的解析计算	彭春瑞,李君儒,钟 慧,任万春,高 杨	(1-34)
基于压电传感器的单一模态 Lamb 波损伤检测	周 凯,徐新生,武湛君	(1-38)
基于兰姆波在非压电基板驱动油滴运动的实验	田昱鑫,梁 威,丁文政,朱鹏飞	(1-42)
一种基于低温共烧陶的无引线键合封装	焦静静,石云波,赵永祺,赵思晗,张 婕,米振国,康 强	(1-47)
基于 CIDT 的声表面波标签防撞编码设计	黄鸿伟,陈智军,钟悦芸,朱卫俊,徐辅庆	(1-51)
基于压电陶瓷的等变厚度悬臂梁特性研究	杨 瑞,孙霞阳,杨胜兵,马超善,陈月娟,岳一轩	(1-57)
考虑介损的压电陶瓷开路输出电压研究	黄 达,魏 亚,郭为强,汪林兵	(1-62)
一种窄带温补型声表面波滤波器	冷俊林,董加和,陆 川,陈运祥,李桦林,陈尚权,彭 霄,寇 俊,唐永红,米 佳	(1-67)
一种高压压电陶瓷驱动电源的设计	胡 域,朱玉玉	(1-71)
行波型球形超声电机定子的优化设计	郭 语,陆 庆,孙志峻,宋爱国	(1-77)
非理想条件下换能器阵列指向性研究	陈 敏,朱品朝,黄 平,朱 雯,刘 旺,曾 强	(1-83)
用于挠性驱动的短筒型压电振子研究	温智益,何 劼,杨文鹏,乔冠尧	(1-88)
一种回折梁结构低频压电能量采集器	牟方晓,王 洪,刘景全	(1-93)
双 H 叉合式定子谐振驱动的压电平面电机研究	贺红林,邓传涛,龙玉繁,胡聪睿,冷新龙	(1-97)
一种高稳定性压电驱动电源设计	张玉婷,张文涛,钱 存,张紫杨,陈 云	(1-104)
基于 OFDR 技术的深层土体水平位移场监测研究	仇唐国,孙阳阳,卢天鸣,朱少华	(1-108)
微纳操纵成像系统的微分前馈自抗扰控制研究	吴文鹏,赵庆旭,王一帆,胡 贞	(1-113)
杠杆耦合式微机械陀螺仪特性分析	彭世刚,刘海鹏,高世桥,金 磊,李泽章	(1-118)
石英挠性加速度计磁路参数研究	杨 峰,王 勇,彭志高	(1-123)
一种基于共振腔的新型水听器探究	李 健,王 欣,陈世利,黄新敬	(1-127)
一种基于压缩感知的导波场重构方法	周 杨,骆 英,徐晨光,李鹏飞	(1-132)
大失准角下 SINS 的 KF/EKF2 混合滤波对准	赵彦明,秦永元	(1-137)
基于压电智能骨料的套筒灌浆料早期强度监测	杜永峰,杜进府	(1-142)
BAW 滤波器板上测试夹具设计	许夏茜,高 杨,袁 靖	(2-149)
超宽带低损耗 SAW 滤波器的优化设计	黄 歆,闫坤坤,黄 玮,魏勇平	(2-155)
基于新型声表面波单端对谐振器的生物传感器	齐晓琳,刘建生,何世堂,梁 勇	(2-159)
基于 SAW 技术的高精度频率测量仪设计与实现	陈心宇,曾融生,洪 业,杨雨诺,孙科学	(2-163)

- 超导电路与体声波谐振器组成的量子 iSWAP 门方案 张凯旋, 黄春晖(2-167)
- 基于双环系统的细步进频率合成器 沈文渊, 唐光庆, 杨清福, 穆晓华, 李庆洪, 蒋创新(2-173)
- 一种联合补偿的动态相位噪声优化设计方法 成 斌, 沈文渊, 叶 锋, 穆晓华, 蒋创新(2-178)
- 一种高精度幅相调理机制 李 伟(2-182)
- 石英微机电陀螺的频率干扰特性研究 林日乐, 谢佳维, 王 伟, 董 勇, 蒋昭兴, 冉龙明, 李文蕴, 罗 华, 朱振忠(2-186)
- 半球谐振陀螺静电驱动建模与分析 文 路, 江 黎, 蒋春桥, 林丙涛, 严隆辉(2-189)
- 半球陀螺封装激光焊“错边”现象探析 李 陟, 蒋春桥, 贺海平, 彭 凯, 陈 伟(2-193)
- 力反馈模式半球谐振陀螺幅度控制方法优化 严隆辉, 江 黎, 蒋春桥, 杨 峰, 文 路(2-197)
- 基于单光子技术的闪烁体衰减时间常数测量 王 强, 王 璐, 屈菁菁, 丁雨憧(2-200)
- 自动加料单晶炉的设计与研究 李海林, 武 欢, 王 瑞(2-203)
- 仿生毛发气流传感器在流场中的传感特性研究 徐 强, 李佳玲, 孙凯旋, 姜亚妮, 边义祥(2-207)
- 一种悬臂梁式 MSMA 振动能量采集器研究 张庆新, 吕俊伯, 杨 静, 王路平, 冯志刚(2-213)
- 一种机械式扫描血管内超声探头 卢少伟, 李明夏, 冯志华, 江小宁(2-218)
- 宽带组合式水声换能器设计研制及应用 张庆国, 黄其培, 李兴武, 连 莉(2-223)
- 基于兰姆波在玻璃基板驱动微升油水分离实验 丁文政, 梁 威, 张富强(2-230)
- 微米级 PZT 驱动器尺度相关的自由振动分析 陈 明, 郑世杰, 田志昌, 杨志军, 冯 鑫(2-235)
- 压电超声辅助研磨抛光技术研究进展 黄卫清, 宁青双, 安大伟, 杨成龙(2-240)
- 溴化铈晶体的阴阳离子共掺生长方法研究 武 欢, 李海林, 何 晔, 王 瑞, 刘建军, 王 佳, 丁雨憧(2-245)
- 一种基于介电弹性体阵列的能量转换装置 任贯华, 陈 洁, 崔春华, 赵丰刚, 李宝权(2-248)
- 双向驱动的柔顺结构微动平台的设计与测试 罗展鹏, 李国平, 韩同鹏, 杨依领, 赖文锋(2-252)
- Zn-Nb-O 微波介质陶瓷的结构与性能研究 王海宝, 王 峥, 庞振江, 李 越, 任孝武, 周加斌, 史建利, 高 峰(2-259)
- 压电驱动器迟滞特性的类 Hammerstein 模型 赵新龙, 沈 帅(2-263)
- 基于 SCKF 和姿态估计的 SINS/GPS 在线对准方法 张桓瑞, 刘向龙, 邵洪峰(2-268)
- 斐索干涉仪中压电陶瓷的非线性校正 王 芳, 卢庆杰, 韩 森(2-273)
- 含分流电路 Galfenol 声子晶体的带隙与减振性能 曹淑瑛, 王金川, 郑加驹, 张福宝(2-278)
- BPNN 辅助 KF 的 MEMS 陀螺仪数据处理方法 段志强, 刘洁瑜, 汪立新, 李新三, 沈 强(2-284)
- 双芯 D 型高灵敏度光子晶体光纤传感器的设计 魏方皓, 张祥军(3-289)
- 一种基于光纤 AOTF 的扫频光源 吴中超, 申向伟, 王大贵, 夏 茜, 王晓新, 张泽红, 何晓亮(3-293)
- 基于声光调制的微波信号多普勒移频技术 吴彭生, 吴 冉, 魏正武, 王 凯(3-296)
- 硅基超材料太赫兹波电光调制器 胡广尧, 文天龙, 张怀武(3-299)
- 布喇格反射型宽带单晶薄膜体声波滤波器 王晓学, 帅 焱, 田本朗, 白晓园, 吕 露, 简 珂, 罗文博, 吴传贵, 张万里(3-303)
- 体声波环形器的研究进展 袁 靖, 高 杨, 任万春(3-307)
- 一种高效率线性压电陶瓷驱动电源设计 王乐蓉, 韩 森(3-312)
- 基于双压电陶瓷驱动原理的精密定位平台研究 胡志平, 谷 森, 唐飞扬, 孙浩楠, 朱军辉, 王 勇, 汝长海(3-317)
- 双模式压电粘滑驱动器设计与试验 段铁群, 马颜龙, 孟庆亮, 田原实(3-321)
- 基于智能复合微结构的亚手掌尺度压电双驱扑翼微飞行器的研究 魏铭辰, 张卫平, 王晨阳, 赵佳欣, 孟 冉(3-326)
- 基于压电陶瓷神经网络模型的模型抑振研究 姚 壮, 周孟德, 温正权, 唐琳琳, 王琴琴, 刘 巍(3-330)
- 电极设计对 SMR 电学性能的影响 王诗元, 张 根, 彭春瑞, 张小德, 秦康宁, 钟 慧, 石 玉(3-336)

- BST 铁电薄膜的制备及介电性能研究 黄 歆,樊青青,翟禹光,黄 玮,李俊红,汪承灏(3-340)
- 氮氟流量比对 ErAlN 薄膜及 SAW 滤波器的影响 孙 贤,谢易微,许绍俊,杨成韬(3-345)
- Bi 掺杂 ZnO 籽晶层生长纳米 ZnO 薄膜性能研究 侯冰阳,李丽华,王 航,黄金亮(3-348)
- La_2O_3 的掺杂对氧化锌压敏陶瓷电性能的影响 万 帅,许 衡,曹 伟,谷山强,张 瑞,李桂芳(3-353)
- FeGaB 磁性薄膜中涡流损耗抑制方法的仿真 陈 颢,高 杨,任万春,彭春瑞,王 姮(3-357)
- 声表面波器件晶圆键合工艺研究 卢丹丹,米 佳,彭兴文,谭昕怡,金 中(3-361)
- 弯曲摆动作用下 MFC 输出开路电压幅值的研究 陈鹏瑜,常宗旭,袁 祥,高 飞,廉自生(3-365)
- 基于压电测力仪的模拟加载标定方法研究 张 军,王新蕾,任宗金(3-369)
- 基于长标距 FBG 应变传感器的筒仓拆除实时监测 张超荣,任 亮,张 庆,刘月新,李炳勇(3-374)
- 高温压电式加速度传感器的温度响应测试评价 杜晓辉,刘 帅,朱敏杰,卢铁林,张祖伟,袁宇鹏(3-381)
- 二维材料异质结增强的硅基太赫兹光调制器 王卓然,文天龙,张怀武(3-386)
- 一种用于石英音叉光声检测的前置带通滤波器 郭泽岩,郭 锋,孟祥翰,汪润东,童子洋(3-390)
- 高过载姿态测量中 MEMS 陀螺失效模式与研究进展 青 泽,牟 东,廉 璞,李东杰(3-394)
- 基于平板电极的半球谐振陀螺全角技术研究 蒋春桥,江 黎,谭品恒,方海斌,卜继军(3-404)
- 基于 MAA 全温滞后模型的 MEMS 陀螺仪零偏补偿技术 吴 英,蒋 博,邸 克,邹新海,刘 宇(3-409)
- 一种机载超声波液位传感器的设计 谭昕怡,曾祥豹,王登攀,张 毅(3-413)
- 小型化低剖面 UHF RFID 抗金属标签天线设计 唐旭阳,张博涵,张经纬,何大平,吴志鹏,刘成国(3-418)
- 一种陷波可重构的超宽带天线设计与研究 梁 青,王 超,苏正东,熊 伟(3-423)
- 基于均匀同心圆阵列的近场宽带波束形成 孟子健,王沛翌,陈海华(3-428)
- 一种星载可配置输出频率的 X 波段载波源 湛德军,宋 嵩,梁显锋(4-433)
- 基于柔性衬底的磁声表面波谐振器 刘 婉,鲁亚巍,胡文彬,白飞明(4-439)
- 体声波滤波器群时延波动的两种计算方法 袁 靖,高 杨,任万春(4-444)
- 单晶薄膜体声波谐振器频率温度特性研究 简 珂,帅 垚,田本朗,白晓园,罗文博,吴传贵,张万里(4-448)
- 一种低损耗高抑制的声表面波滤波器 陈彦光,董加和,陈清华,蒋世义,陈华志,李桦林,陈尚权,陆 川,赵雪梅(4-453)
- 粘弹性薄膜吸附的 QCM 气相 BVD 模型研究 葛赐雨,廖 霜,唐瑾菲,张馨予,谭 峰(4-456)
- 用于微波通信的 2.4 GHz 压控振荡器优化设计 段文娟,刘 博,王金婵,张金灿,刘 敏,孟庆端(4-461)
- 三维纳米线 SAW 气体传感器及报警器设计 任彦宇,王 露,王音心,杨 靖(4-466)
- 基于 SAW 抗干扰传输的无线传感器网络测温方法 李春东,卞振宇,高 源,郑 华(4-471)
- 大孔径中波声光可调滤光器 张泽红,王智林,刘 玲,陈永峰(4-477)
- 基于石英晶片扭转效应的微小推力测量研究 任宗金,朱晓雨,张 军(4-481)
- 光纤耦合声光调制器键合膜系设计与制备 刘保见,陈华志,曹家强,刘 玲(4-484)
- $\text{MgZr}_4(\text{PO}_4)_6$ 的反应及高温电性能研究 胡 胜,熊厚博,李享成(4-488)
- Ba^{2+} 掺杂对 $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ 陶瓷结构与电性能的影响 钟 鑫,吴 洋,唐柱明,周梓鑫,张 晨(4-492)
- 基于压电阻抗技术的木梁损伤识别研究 韩 芳,汪程凤,张全景(4-497)
- 基于压电薄膜的多信息触觉检测系统 惠乾鑫,高鑫宇,崔 猛,辛 毅(4-501)
- 方位安装误差对调平性能的影响及对策 张 涛,魏贵玲,冯 波,阳 洪,魏旭阳,陈 超,王 斌(4-506)
- 基于正逆向解算的单轴旋转惯导参数辨识方法 王灵草,阳 洪,胡小兵,张 裕(4-510)
- 基于压电薄膜的非接触式人体生理信号监测椅 张 琪,王太宏,段小川(4-515)
- 冲击波超压传感器 IEPE 电路设计 刘东来,王伟魁,彭泳卿,金小锋(4-519)

- 压电陶瓷驱动器迟滞建模与自适应控制 王 舟,陈远晟,王 浩,黄勤斌(4-523)
- 基于 PVDF 的可穿戴生理信号监测系统 侯天远,朱剑锋,刘 涛,辛 毅(4-529)
- 基于相位负反馈的振弦式陀螺驱动电路研究 陈志龙,黄 鸣,刘 鹏,舒 凯(4-533)
- 核电用压电加速度传感器的抗辐照屏蔽设计 钱俊江,袁宇鹏,陈清华,周 睿,张 萍,张祖伟,毋江东(4-540)
- 超声电机定子支撑结构的抗过载能力分析 曾劲松,张西平,盛练武,刘国宁(4-544)
- 压电柔性结构形状复合控制方法研究 张宗宇,周文雅,吕维梁,王晓明,马瑞鑫(4-550)
- 用于压电陶瓷轨迹跟踪的非奇异终端滑模控制 苏子业,余胜东(4-557)
- BTO/PDMS/C 柔性复合薄膜的制备及压电性能研究 苏晓晓,李银辉,李廷鱼,李朋伟(4-563)
- 一种多传感器融合的行人多模式自主定位方法 元 林,刘 宇,苟志平,杨 勇,路永乐,邹新海(4-568)
- 四足压电驱动装置的电源设计与研究 贾丹平,韩 硕,杨晓峰,王振华(4-573)
- 一种基于 WLP 封装的声表面波滤波器 陈尚权,吕 翼,赵雪梅,董加和,米 佳,陈彦光,伍 平(4-579)
- 小型化双通带声表滤波器设计研究 彭 雄,彭 霄,杜雪松,唐小龙,陈婷婷,蒋平英,马晋毅,唐 蜜(5-583)
- 声表面波免疫传感器高频检测系统设计 李晓雨,殷嘉伟,石幸圆,刘玉琪,孙科学(5-589)
- 数控可选通微带滤波器组的设计与仿真 曹良足,符先敏,蔡兵兵,李子敬(5-593)
- 基于 PVDF 压电薄膜阵列的多频声源设计 胡 明,孔德义,谢东岳,唐晓宁,徐 贺(5-598)
- 基于悬臂梁结构的惯性冲击直线压电马达 贺提喜,杨振中,程子阳,汤玉竹,郝 赛(5-603)
- 热冲击对石英晶体谐振器稳定性的影响研究 尹小三,徐俊俊(5-607)
- 一种质量块-弹簧自参数共振压电俘能器研究 陈忠成,解小东,谢 进(5-611)
- 高性能声学滤波器技术研究进展 李 晖,米 佳,胡少勤,李左翰,邱海莲(5-617)
- 基于六端口的声表面波谐振器查询系统研究 何 红,赵 佐(5-623)
- 复合氮化铝压电薄膜研制及其应用 陈运祥,赵雪梅,郑泽渔,陶 毅,伍 平,田亚睿,张永川,许东辉(5-628)
- 捷联式重力无源导航系统 蔡体菁,黄俊翔(5-631)
- 速率偏频激光捷联惯组加速度计分析 徐兵华,朱战霞,谢 波,袁建平(5-635)
- 多向复合超声换能器有限元分析与试验 高昌彬,薛进学,马文举,隆志力,赵 恒(5-640)
- 新型声表面波三轴加速度传感器的设计仿真 郭欣榕,张永威,谭秋林,张文栋(5-644)
- 光纤陀螺温变效应误差抑制方法研究 李 阳,黄 鑫,路彬彬,张登伟(5-649)
- TGG 法制备 $\text{Sr}_2\text{Nb}_2\text{O}_7$ 织构陶瓷及其性能研究 石钰琳,吴 超,王 丹,王鸿亮,吴肖骏,陈 强(5-655)
- TWUSM 振动模态鲁棒滑模观测器研究 荆 锴,林夏萍,董 砚(5-659)
- 压电泵驱动闭式水冷回路实验研究 卫铃佼,赵雅楠,梁惊涛(5-663)
- 超声相控阵系统提高延时分辨率的研究进展 徐皓胜,曾 伟,杨绍辉,曾德平(5-668)
- 离子注入剥离铈铝锂单晶薄膜的 Ar^+ 刻蚀研究 方远芊,罗文博,郝 昕,白晓园,曾慧中,帅 垚,张万里(5-674)
- 强脉冲 γ 线辐射对压电陶瓷材料性能的影响 毛世平,杨 靖,张祖伟,陈清华,王登攀,赵德锋,冯 波(5-678)
- 基于压电传感器的木材轴压损伤监测 刘孝禹,饶玉龙,张继承,肖家浩(5-681)
- 悬臂梁基底对压电俘能器输出响应的影响分析 吴新哲,闫守阳,高志强,韩 晶,焦国太(5-686)
- 圆环形压电振子疲劳仿真分析与实验研究 田晓超,王海刚,王 虎,吴 越,张思达,杨志刚(5-692)
- 压电执行器及其在液压阀中的应用 华顺明,张 宇,彭 宇,刘立君,许少锋(5-697)
- 压电能量回收的自适应机械开关电路 黄 瑶,秦 刚,刘伟群(5-704)
- 基于 H-like 模型的压电陶瓷作动器内模控制 尚爱鹏,王贞艳,贺一丹(5-708)
- 位移载荷下折叠式压电振子的疲劳分析 赵春明,龚立娇,周天烁,张 新,张鹏飞(5-713)

- 稳定提拉法晶体生长界面的装置和方法研究 周益民,何 晔,岑 伟,陈川贵,邓江涛(5-718)
- 安装误差对单轴旋转对准精度影响分析 刘 鑫,贾继超,黎 坤,赵瑞星,董树冰(5-721)
- 基于 IMU/视觉融合的导航定位算法研究 董伯麟,柴 旭(5-724)
- 基于耦合电感的压电能量采集电路设计与仿真 周天烁,龚立娇,赵春明,杨建欣(5-729)
- 相控阵聚焦超声控制系统的设计 王 欢,张 清,周红生,潘海林,刘道逸(6-735)
- 静电场对压电薄膜中声表面波传播的影响 刘智荣,谢立强,朱 敏,包文歧(6-739)
- 基于扇形基片集成波导的三频带通滤波器设计 张 胜,刘 硕,谢振江(6-743)
- 声表面波扭矩检测系统的分段环状天线设计 熊志强,陈智军,孙 聪,朱卫俊,郭佳佳(6-747)
- 熔覆层厚度对相控阵表面波聚焦特性的影响 周永立,周 刚,胡宏伟,刘芝平(6-752)
- 宽带声光器件声场仿真研究 吴中超,唐 诗,吴 畏,高维松,朱 吉,王智林(6-757)
- 高基频高机电耦合系数晶体滤波器 彭胜春,赵瑞星,阳 皓,邱泽林,李亚飞,温桢茹,唐 平,董 妹(6-761)
- 基于分布式光纤传感的防热结构损伤识别研究 柳敏静,夏梓旭,李建乐,武湛君,高东岳(6-765)
- 单偏振光纤声光调制器 吴 畏,唐 诗,王智林,令狐梅傲,朱 吉,傅礼鹏(6-769)
- 压电分流声子晶体杆带隙调控研究 张亚茹,郭 辉,袁 涛,孙 裴,王岩松,程 乾(6-772)
- 悬臂式压电能量采集器模型修正 郭 丽,周星德,杨 菁(6-777)
- 基于 Φ -OTDR 的光纤准分布式氢泄漏监测
..... 李树东,苏 阳,何光层,朱珏佩,彭文英,官 贺,杨永济,巫涛江,吴德操(6-782)
- 光纤布喇格光栅的低温传感特性研究 李博文,刘颖刚,宋小亚,傅海威,贾振安,高 宏(6-787)
- 光致发光发热光分频利用光纤研究 靳 越,巫涛江,李玉洁,吴德操(6-791)
- 基于光纤光栅传感网络的电梯健康状态监测系统 巫涛江,余晓毅,张春娟,尹劲松,石胜辉(6-796)
- 压电惯性驱动器理论分析与应用测试 田晓超,王海刚,王 虎,孙禹泽,朱金志,王志聪,杨志刚(6-800)
- 一种新型 Ce:GAGG 闪烁探测器性能研究 王 璐,王 强,屈菁菁,董鸿林,方承丽,丁雨潼(6-806)
- SnO_2 压敏陶瓷掺杂 MnO_2 的制备和性能研究 梁温馨,赵洪峰,康加爽,王 昊,周远翔,谢清云(6-810)
- $\text{LiF/Li}_2\text{CO}_3$ 对 PZT 陶瓷低温烧结及压电性能的影响 赵世言,胡望峰(6-814)
- Nb^{5+} 掺杂对 $(\text{Ca}_{0.97}\text{Ba}_{0.03})\text{Cu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ 陶瓷结构与
..... 胡建东,钟 鑫,闵 亮,刘 勇,顾钧杰,胡涛麟,常想乐,张 晨(6-820)
- 螺旋电极压电扭转驱动器的设计与有限元分析 郭全圆,刘永刚,曾奥柯,闫鹏飞(6-825)
- 盆架形压电振子同型模态驱动平面电机研究 王哲逸,贺红林,方志敏,吴兴强(6-831)
- 集成铌酸锂光子器件技术的研究进展 张 涛,何 杰,胡少勤,许 昕,张玉蕾(6-837)
- 基于区间二型 T-S 模糊系统的压电迟滞特性建模 陈圣鑫,赵新龙,苏 强,苏良才(6-843)
- 基于 SINS/RTK 的动平台起降无人机导航系统研制 李星海,闫志安,徐 亮,许常燕,李宝林,龚 巧(6-848)
- 基于 LABVIEW 的 MIMU 24 项误差参数的快速标定方法 刘志伟,崔 敏,张 鹏,徐文武(6-854)
- 基于非完美声学黑洞的压电能量收集系统 汪 恒,唐荣江,郑伟光,文雁声(6-859)
- 基于 LN/LT-POI 多层结构的 SAW 器件发展 何 杰,马晋毅,胡少勤,许 昕(6-864)
- 重力场对半球谐振陀螺性能的影响 方仲祺,方海斌,雷 霆,谭品恒,韩世川(6-871)
- 宽温域压电超声换能器研究进展 王国良,刘学良,于法鹏,赵 显(6-875)
- 用于精确定向的低噪声半球陀螺设计 方海斌,韩世川,彭 凯,雷 霆,周 闯(6-884)

Total Contents

Design of a Narrowband Cavity Filter with Wide Attenuation Band	LI Ruitao, YANG Qinghui, ZHANG Huaiwu(1-1)
Study on Microfluidic Analysis Device on Piezoelectric Substrate	ZHANG Anliang, DONG Liangwei(1-4)
A SSPs Microwave Band Pass Filter Based on Trapezoidal Slot Array	WANG Yuan, XIONG Houbo, WANG Geng, HU Mingzhe(1-8)
Tuned Bandpass Filter with Constant Bandwidth	GAO Ruiping, CAO Liangzu(1-12)
Design of FMCW Signal Source for Surface Acoustic Wave Radio Frequency Identification System	GUO Jiajia, CHEN Zhijun, CAI Daxuan, JIA Hao, XU Hailin, LI Yafei(1-16)
The High Speed Fiber Acousto-Optic Modulator Based on InP	ZHU Ji, WU Wei, WANG Zhilin, YANG Tao(1-21)
Research on De-bonding Identification of Thermal-protective Coating Based on Distributed Optical Fiber Sensing Technology	SHAN Yinan, WU Zhanjun, XU Xinsheng, FEI Jiyu(1-25)
Study on Acoustic Pressure Phase Sensitivity of Differential Pressure Optical Fiber Vector Hydrophone	ZHANG Tao, HU Binjie, CHEN Chaoyu, GUO Yundong, DENG Zhiru, SHI Tao, XU Dong(1-29)
Analytical Calculation of Radiation Performance of BAW Magnetolectric Antenna	PENG Chunrui, LI Junru, ZHONG Hui, REN Wanchun, GAO Yang(1-34)
Damage Detection with Single Mode Lamb Wave Based on Piezoelectric Transducers	ZHOU Kai, XU Xinsheng, WU Zhanjun(1-38)
Experiment on Driving Oil Droplet Movement on Non-piezoelectric Substrate Based on Lamb Wave	TIAN Yuxin, LIANG Wei, DING Wenzheng, ZHU Pengfei(1-42)
Wireless Bonding Package Based on Low Temperature Co-fired Ceramics	JIAO Jingjing, SHI Yunbo, ZHAO Yongqi, ZHAO Sihan, ZHANG Jie, MI Zhenguo, KANG Qiang(1-47)
Design of Anti-collision Code of Surface Acoustic Wave Tag Based on CDDT	HUANG Hongwei, CHEN Zhijun, ZHONG Yueyun, ZHU Weijun, XU Fuqing(1-51)
Research on Characteristics of Uniform and Variable Thickness Cantilever Beam Based on Piezoelectric Ceramics	YANG Rui, SUN Xiayang, YANG Shengbing, MA Chaoshan, CHEN Yuejuan, YUE Yixuan(1-57)
Study on Open Circuit Voltage of Piezoelectric Ceramics Considering Dielectric Loss	HUANG Da, WEI Ya, GUO Weiqiang, WANG Linbing(1-62)
A Narrowband Temperature Compensated SAW Filter	LENG Junlin, DONG Jiahe, LU Chuan, CHEN Yunxiang, LI Hualin, CHEN Shangquan, PENG Xiao, KOU Jun, TANG Yonghong, MI Jia(1-67)
Design of a High Voltage Piezoelectric Ceramic Driving Power Supply	HU Yu, ZHU Yuyu(1-71)
Optimization Design of Stator for Traveling Wave Spherical Ultrasonic Motor	GUO Yu, LU Qing, SUN Zhijun, SONG Aiguo(1-77)
Study on Directivity of Transducer Array Under Non-ideal Conditions	CHEN Min, ZHU Pingchao, HUANG Ping, ZHU Wen, LIU Wang, ZENG Qiang(1-83)
Research on Short-Cylinder Piezoelectric Vibrator for Flexible Driving	WEN Zhiyi, HE Qing, YANG Wenpeng, QIAO Guanyao(1-88)
A Low-frequency Piezoelectric Energy Harvester with Folded Beam Structure	MOU Fangxiao, WANG Qi, LIU Jingquan(1-93)
Study on Ultrasonic Planar Motor Driven by Dual-H-shaped Stator	HE Honglin, DENG Chuantao, LONG Yufan, HU Chongrui, LENG Xinlong(1-97)
Design of Piezoelectric Driving Power Supply with High Stability	ZHANG Yuting, ZHANG Wentao, QIAN Cun, ZHANG Ziyang, CHEN Yun(1-104)
Research on Monitoring of Horizontal Displacement Field of Deep Soil Based on OFDR Technology	QIU Tangguo, SUN Yangyang, LU Tianming, ZHU Shaohua(1-108)
Research on Control of Micro-nano Manipulation Imaging System Based on Differential Feedforward ADRC	WU Wenpeng, ZHAO Qingxu, WANG Yifan, HU Zhen(1-113)
Characteristic Analysis of Lever-coupled Micromachined Gyroscope	PENG Shigang, LIU Haipeng, GAO Shiqiao, JIN Lei, LI Zezhang(1-118)
Study on Magnetic Circuit Parameters of Quartz Flexible Accelerometer	YANG Feng, WANG Yong, PENG Zhigao(1-123)
Research on a New Type of Hydrophone Based on Sealed Cavity	LI Jian, WANG Xin, CHEN Shili, HUANG Xinjing(1-127)
A Guided Wave Field Reconstruction Method Based on Compressed Sensing	ZHOU Yang, LUO Ying, XU Chenguang, LI Pengfei(1-132)
KF/EKF2 Hybrid Filter for SINS Alignment Under Large Misalignment Angles	ZHAO Yanming, QIN Yongyuan(1-137)
Early Strength Monitoring of Sleeve Grouting Material with Piezoelectric Smart Aggregate	DU Yongfeng, DU Jinfu(1-142)
Design of BAW Filter On-board Test Fixture	XU Xiaxi, GAO Yang, YUAN Jing(2-149)
The Optimal Design of Ultra-Wideband Low Loss SAW Filter	HUANG Xin, YAN Kunkun, HUANG Wei, WEI Yongping(2-155)
A Staphylococcus Aureus Biosensor Based on a Novel Surface Acoustic Wave One Port Resonator	QI Xiaolin, LIU Jiansheng, HE Shitang, LIANG Yong(2-159)
Design and Implementation of High Precision Frequency Measuring Instrument Base on SAW	CHEN Xinyu, ZENG Rongsheng, HONG Ye, YANG Yunuo, SUN Kexue(2-163)
Scheme of Quantum iSWAP Gate Composed of Superconducting Circuits and Bulk Acoustic Wave Resonator	ZHANG Kaixuan, HUANG Chunhui(2-167)
A Fine Step Frequency Synthesizer Based on Double Loop System	SHEN Wenyan, TANG Guangqing, YANG Qingfu, MU Xiaohua, LI Qinghong, JIANG Chuangxin(2-173)
An Optimal Design Method of Dynamic Phase Noise Based on Combined Compensation	CHENG Bin, SHEN Wenyan, YE Feng, MU Xiaohua, JIANG Chuangxin(2-178)
A High Precision Amplitude and Phase Modulation Mechanism(APMM)	LI Wei(2-182)

Research on Frequency Interference Characteristic of Quartz MEMS Gyroscope	...
... LIN Rile, XIE Jiawei, WANG Wei, DONG Yong, JIANG Zhaoxing, RAN Longming, LI Wenyun, LUO Hua, ZHU Zhenzhong(2-186)	
Modeling and Analysis of the Electrostatic Drive of HRG	WEN Lu, JIANG Li, JIANG Chunqiao, LIN Bingtao, YAN Longhui(2-189)
Analysis of "Misalignment" in Laser Welding for Hemispherical Gyroscope Packaging	...
... LI Zhi, JIANG Chunqiao, HE Haiping, PENG Kai, CHEN Wei(2-193)	
Optimization of Amplitude Control Method of Hemispherical Resonator Gyroscopes Under Force-to-rebalance Mode	...
... YAN Longhui, JIANG Li, JIANG Chunqiao, YANG Feng, WEN Lu(2-197)	
Measurement of Scintillator Decay Time Constant Based on Single Photon Technology	...
... WANG Qiang, WANG Lu, QU Jingjing, DING Yuchong(2-200)	
Design and Study of Automatic Feeding Czochralski Crystal Furnace	LI Hailin, WU Huan, WANG Rui(2-203)
Study on Sensing Characteristics of Bionic Hair Flow Sensor in Flow Field	...
... XU Qiang, LI Jialing, SUN Kaixuan, JIANG Yani, BIAN Yixiang(2-207)	
Study on a Kind of Cantilever Beam MSMA Vibrational Energy Harvester	...
... ZHANG Qingxin, LYU Junbo, YANG Jing, WANG Luping, FENG Zhigang(2-213)	
A Mechanical Scanning Intravascular Ultrasound(IVUS) Probe	LU Shaowei, LI Mingxia, FENG Zhihua, JIANG Xiaoning(2-218)
Design, Development and Applications of Wideband Underwater Acoustic Transducer with Combination Mode	...
... ZHANG Qingguo, HUANG Qiwei, LI Xingwu, LIAN Li(2-223)	
Experiment on Separation of Microliter Oil/Water Mixed Droplets on Glass Substrate Driven by Lamb Wave	...
... DING Wenzheng, LIANG Wei, ZHANG Fuqiang(2-230)	
Analysis of Size-dependent Free Vibration of Micro-scale PZT Driver	...
... CHEN Ming, ZHENG Shijie, TIAN Zhicang, YANG Zhijun, FENG Xin(2-235)	
Advances in Piezoelectric Ultrasonic Assisted Grinding and Polishing Technology	...
... HUANG Weiqing, NING Qingshuang, AN Dawei, YANG Chenglong (2-240)	
Study on the Growth Method of CeBr₃ Crystal by Anionic and Cationic Co-doping	...
... WU Huan, LI Hailin, HE Ye, WANG Rui, LIU Jianjun, WANG Jia, DING Yuchong(2-245)	
An Energy Conversion Device Based on Dielectric Elastomer Array	...
... REN Guanhua, CHEN Jie, CUI Chunhua, ZHAO Fenggang, LI Baoquan(2-248)	
Design and Test of Two-way Driven Compliant Structure Micro-motion Stage	...
... LUO Zhanpeng, LI Guoping, HAN Tongpeng, YANG Yiling, LAI Wenfeng(2-252)	
Study on the Structure and Properties of Zn-Nb-O Microwave Dielectric Ceramics	...
... WANG Haibao, WANG Zheng, PANG Zhenjiang, LI Yue, REN Xiaowu, ZHOU Jiabin, SHI Jianli, GAO Feng(2-259)	
Hammerstein-like Model for Hysteresis Characteristics of Piezoelectric Actuators	ZHAO Xinlong, SHEN Shuai(2-263)
SINS/GPS Online Alignment Method Based on SCKF and Initial Attitude Estimation	...
... ZHANG Huanrui, LIU Xianglong, SHAO Hongfeng(2-268)	
Nonlinear Correction of Piezoelectric Ceramic in Fizeau Interferometer	WANG Fang, LU Qingjie, HAN Sen(2-273)
Band Gaps and Vibration Reduction of Galferol Phononic Crystal with Shunt Circuit	...
... CAO Shuying, WANG Jinchuan, ZHENG Jiaju, ZHANG Fubao(2-278)	
Research on Data Processing Method of MEMS Gyroscope Based on BPNN Assisted Kalman Filter	...
... DUAN Zhiqiang, LIU Jieyu, WANG Lixin, LI Xinsan, SHEN Qiang(2-284)	
Design of Dual Core D-type Photonic Crystal Fiber Sensor with High Sensitivity	WEI Fanghao, ZHANG Xiangjun(3-289)
A Swept Light Source Based on Fiber Acousto-optical Tunable Filter	...
... WU Zhongchao, SHEN Xiangwei, WANG Dagui, XIA Qian, WANG Xiaoxin, ZHANG Zehong, HE Xiaoliang(3-293)	
A Microwave Doppler Frequency Shift Technology Based on Acousto-Optic Modulation	...
... WU Pengsheng, WU Ran, WEI Zhengwu, WANG Kai(3-296)	
Silicon-based Metamaterial Terahertz Wave Electro-optic Modulator	HU Guangyao, WEN Tianlong, ZHANG Huaiwu(3-299)
Preparation and Characterization of Bragg Reflective Wide-band Thin Film Bulk Acoustic Filters	...
... WANG Xiaoxue, SHUAI Yao, TIAN Benlang, BAI Xiaoyuan, LYU Lu, JIAN Ke, LUO Wenbo, WU Chuangui, ZHANG Wanli(3-303)	
Research Progress of Bulk Acoustic Wave Circulator	YUAN Jing, GAO Yang, REN Wanchun(3-307)
Design of a Linear Piezoelectric Ceramic Drive Power Supply with High-efficiency	WANG Lerong, HAN Sen(3-312)
Research on Precision Positioning Stage Based on Dual Piezoceramics Driving Principle	...
... HU Zhiping, GU Sen, TANG Feiyang, SUN Haonan, ZHU Junhui, WANG Yong, RU Changhai(3-317)	
Design and Experiment on Dual-mode Piezoelectric Stick-Slip Actuator	DUAN Tiequn, MA Yanlong, MENG Qingliang, TIAN Yuanshi(3-321)
Investigation of Sub-palm-scale Double Piezoelectric Driving Flapping Wing Micro-aircraft Based on Smart Composite Microstructures	...
... WEI Mingchen, ZHANG Weiping, WANG Chenyang, ZHAO Jiaxin, MENG Ran(3-326)	
Research on Vibration Suppression of Model Based on Neural Network Model of Piezoelectric Ceramic	...
... YAO Zhuang, ZHOU Mengde, WEN Zhengquan, TANG Linlin, WANG Qinqin, LIU Wei(3-330)	
Effect of Electrode Design on Electrical Performance of SMR	...
... WANG Shiyuan, ZHANG Gen, PENG Chunrui, ZHANG Xiaode, QIN Kangning, ZHONG Hui, SHI Yu(3-336)	
Preparation and Dielectric Properties of Barium Strontium Titanate(BST) Ferroelectric Thin Films	...
... HUANG Xin, FAN Qingqing, ZHAI Yuguang, HUANG Wei, LI Junhong, WANG Chenghao(3-340)	
Effect of Nitrogen-Argon Flow Ratio on ErAlN Film and SAW Filter	SUN Xian, XIE Yiwei, XU Shaojun, YANG Chengtao(3-345)

Study on Properties of Nano ZnO Films Grown by Bi-Doped ZnO Seed Layer	HOU Bingyang, LI Lihua, WANG Hang, HUANG Jinliang(3-348)
Effect of La₂O₃ Doping on Electrical Properties of ZnO Varistor Ceramics	WAN Shuai, XU Heng, CAO Wei, GU Shanqiang, ZHANG Rui, LI Guifang(3-353)
Simulation of Eddy Current Loss Suppression in FeGaB Magnetic Thin Films	CHEN Si, GAO Yang, REN Wanchun, PENG Chunrui, WANG Heng(3-357)
Study on Wafer Bonding Technology of SAW Devices	LU Dandan, MI Jia, PENG Xingwen, TAN Xinyi, JIN Zhong(3-361)
Study on Output Open-circuit Voltage Amplitude of MFC Under Bending and Swinging	CHEN Pengyu, CHANG Zongxu, YUAN Xiang, GAO Fei, LIAN Zisheng(3-365)
Research on Calibration Method of Simulation Loading Based on Piezoelectric Dynamometer	ZHANG Jun, WANG Xinlei, REN Zongjin(3-369)
Real-time Monitoring of Silo Demolition Based on Long-gauge FBG Strain Sensor	ZHANG Chaorong, REN Liang, ZHANG Qing, LIU Yuexin, LI Bingyong(3-374)
Test and Evaluation of Temperature Response of High-temperature Piezoelectric Acceleration Sensor	DU Xiaohui, LIU Shuai, ZHU Minjie, LU Tielin, ZHANG Zuwei, YUAN Yupeng(3-381)
Silicon-based Terahertz Optical Modulator with Enhanced 2D Material Heterostructure	WANG Zhuoran, WEN Tianlong, ZHANG Huaiwu(3-386)
A Pre-bandpass Filter for Photoacoustic Detection of Quartz Tuning Fork	GUO Zeyan, GUO Feng, MENG Xianghan, WANG Rundong, TONG Ziyang(3-390)
Failure Modes and Research Progress of MEMS Gyroscope in High Overload Attitude Measurement	QING Ze, MU Dong, LIAN Pu, LI Dongjie(3-394)
Study on Whole Angle Technology of Hemispherical Resonator Gyroscope Based on Surface Electrodes	JIANG Chunqiao, JIANG Li, TAN Pinheng, FANG Haibin, BU Jijun(3-404)
Zero Bias Compensation Technology of MEMS Gyroscope Based on MAA Full Temperature Hysteresis Model	WU Ying, JIANG Bo, DI Ke, ZOU Xinhai, LIU Yu(3-409)
Design of an Airborne Ultrasonic Liquid Level Monitoring Sensor	TAN Xinyi, ZENG Xiangbao, WANG Dengpan, ZHANG Yi(3-413)
Design of Miniaturized and Low-profile UHF RFID Metal-mountable Tag Antenna	TANG Xuyang, ZHANG Bohan, ZHANG Jingwei, HE Daping, WU Zhipeng, LIU Chengguo(3-418)
Design and Research of a Band-Notch Reconfigurable UWB Antenna	LIANG Qing, WANG Chao, SU Zhengdong, XIONG Wei(3-423)
Near-field Broadband Beamforming Based on Uniform Concentric Circular Array	MENG Zijian, WANG Peizhao, CHEN Haihua(3-428)
A Space-borne X-band Carrier Source with Configurable Output Frequency	CHEN Dejun, SONG Song, LIANG Xianfeng(4-433)
Magnetic Surface Acoustic Wave Resonator Based on Flexible Substrate	LIU Wan, LU Yawei, HU Wenbin, BAI Feiming(4-439)
Two Calculation Methods for Group Delay Ripple of Bulk Acoustic Wave Filter	YUAN Jing, GAO Yang, REN Wanchun(4-444)
Study on Frequency and Temperature Characteristics of Single Crystal Thin Film Bulk Acoustic Resonators	JIAN Ke, SHUAI Yao, TIAN Benlang, BAI Xiaoyuan, LUO Wenbo, WU Chuangui, ZHANG Wanli(4-448)
A SAW Filter with Low Insertion Loss and High Suppression	CHEN Yanguang, DONG Jiahe, CHEN Qinghua, JIANG Shiyi, CHEN Huazhi, LI Hualin, CHEN Shangquan, LU Chuan, ZHAO Xuemei(4-453)
Study on Gas-phase BVD Model of QCM Absorbed by Viscoelastic Film	GE Ciyu, LIAO Shuang, TANG Jinfei, ZHANG Xinyu, TAN Feng(4-456)
Optimization Design of 2.4 GHz VCO for Microwave Communication	DUAN Wenjuan, LIU Bo, WANG Jinchuan, ZHANG Jincan, LIU Min, MENG Qingduan(4-461)
Design of a 3-D Nanowire SAW Gas Sensor and Alarm Detector	REN Yanyu, WANG Lu, WANG Yinxin, YANG Jing(4-466)
Temperature Measurement Method of Wireless Sensor Network Based on SAW Anti-interference Transmission	LI Chundong, BIAN Zhenyu, GAO Yuan, ZHENG Hua(4-471)
A Large Aperture Medium-wave Acousto-optic Tunable Filter	ZHANG Zehong, WANG Zhilin, LIU Ling, CHEN Yongfeng(4-477)
Research on Micro-Thrust Measurement Based on Torsional Effect of Quartz Wafer	REN Zongjin, ZHU Xiaoyu, ZHANG Jun(4-481)
Design and Preparation of Bonding Membrane System of Optical Fiber Coupling Acousto-optic Modulator	LIU Baojian, CHEN Huazhi, CAO Jiaqiang, LIU Ling(4-484)
Study on MgZr₄(PO₄)₆ Reaction and High Temperature Electrical Properties	HU Sheng, XIONG Houbao, LI Xiangcheng(4-488)
Effect of Ba²⁺ Doping on Structure and Electric Properties of CaCu₃Ti₄O₁₂ Ceramics	ZHONG Xin, WU Yang, TANG Zhuming, ZHOU Zixin, ZHANG Chen(4-492)
Damage Detection for Timber Beams Based on Piezoelectric Impedance Technology	HAN Fang, WANG Chengfeng, ZHANG Quanjing(4-497)
Multi-information Tactile Detection System Based on Piezoelectric Film	HUI Qianxin, GAO Xinyu, CUI Meng, XIN Yi(4-501)
Influence of Azimuth Installation Error on Leveling Performance and Countermeasures	ZHANG Tao, WEI Guiling, FENG Bo, YANG Hong, WEI Xuyang, CHEN Chao, WANG Bin(4-506)
The Forward and Backward Processes Algorithm for Identifying Parameter in Single-axis Rotation Inertial Navigation System	WANG Lingcao, YANG Hong, HU Xiaobing, ZHANG Yu(4-510)
Non-contact Human Physiological Signal Monitoring Chair Based on Piezoelectric Film	ZHANG Qi, WANG Taihong, DUAN Xiaochuan(4-515)
Design of IEPE Circuit for Shock Wave Overpressure Sensor	LIU Donglai, WANG Weikui, PENG Yongqing, JIN Xiaofeng(4-519)
Hysteresis Modelling and Adaptive Control of Piezoelectric Actuators	WANG Zhou, CHEN Yuansheng, WANG Hao, HUANG Qinbin(4-523)

Wearable Physiological Signal Monitoring System Based on PVDF	HOU Tianyuan, ZHU Jianfeng, LIU Tao, XIN Yi(4-529)
Research on Driving Circuit of Vibrating-string Gyro Based on Phase Negative Feedback	CHEN Zhilong, HUANG Ming, LIU Peng, SHU Kai(4-533)
Radiation Shielding Design of Piezoelectric Accelerometer for Nuclear Power	QIAN Junjiang, YUAN Yupeng, CHEN Qinghua, ZHOU Rui, ZHANG Ping, ZHANG Zuwei, MU Jiangdong(4-540)
Analysis of Anti-overload Capability of the Stator Support Structure of Ultrasonic Motor	ZENG Jinsong, ZHANG Xiping, SHENG Lianwu, LIU Guoning(4-544)
Research on Shape Compound Control Method of Piezoelectric Flexible Structure	ZHANG Zongyu, ZHOU Wenya, LYU Weiliang, WANG Xiaoming, MA Ruixin(4-550)
Nonsingular Terminal Sliding Mode Control for Trajectory Tracking of Piezoelectric Ceramics	SU Ziyi, YU Shengdong(4-557)
Preparation and Piezoelectric Properties of BTO/PDMS/C Flexible Composite Film	SU Xiaoxiao, LI Yinhui, LI Tingyu, LI Pengwei(4-563)
A Multi-mode Autonomous Positioning Method for Pedestrians Based on Multi-sensor Fusion	QI Lin, LIU Yu, GOU Zhiping, YANG Yong, LU Yongle, ZOU Xinhai(4-568)
Design and Study on Power Supply of Four-Legged Piezoelectric Actuators	JIA Danping, HAN Shuo, YANG Xiaofeng, WANG Zhenhua(4-573)
A SAW Filter Based on Wafer Level Packaging	CHEN Shangquan, LYU Yi, ZHAO Xuemei, DONG Jiahe, MI Jia, CHEN Yanguang, WU Ping(4-579)
Study on the Design of Miniaturized Dual Band SAW Filter	PENG Xiong, PENG Xiao, DU Xuesong, TANG Xiaolong, CHEN Tingting, JIANG Pingying, MA Jinyi, TANG Mi(5-583)
Design of High-frequency Detection System for SAW Immunosensor	LI Xiaoyu, YIN Jiawei, SHI Xingyuan, LIU Yuqi, SUN Kexue(5-589)
Design and Simulation of Digital-control Selectable Microstrip Filter Bank	CAO Liangzu, FU Xianmin, CAI Bingbing, LI Zijing(5-593)
Design of Multi-frequency Acoustic Source with Piezoelectric PVDF Film Array	HU Ming, KONG Deyi, XIE Dongyue, TANG Xiaoning, XU He(5-598)
Inertia Impact Linear Piezoelectric Motor Based on Cantilever Structure	HE Tixi, YANG Zhenzhong, CHENG Ziyang, TANG Yuzhu, HAO Sai(5-603)
The Study on the Influence of Thermal Shock for Stability of Quartz Crystal Resonators	YIN Xiaosan, XU Junjun(5-607)
Study on an Auto-parametric Resonance Piezoelectric Energy Harvester with Mass Block-Spring Subsystem	CHEN Zhongcheng, XIE Xiaodong, XIE Jin(5-611)
Research Progress of High Performance Acoustic Filter Technologies	LI Hui, MI Jia, HU Shaoqing, LI Zuohan, QIU Hailian(5-617)
Study on Surface Acoustic Wave Interrogation System Based on a Six-port Resonator	HE Hong, ZHAO Zuo(5-623)
Preparation and Application of Composite AlN Piezoelectric Films	CHEN Yunxiang, ZHAO Xuemei, ZHENG Zeyu, TAO Yi, WU Ping, TIAN Yarui, ZHANG Yongchuan, XU Donghui(5-628)
Strapdown Gravity Passive Navigation System	CAI Tijing, HUANG Junxiang(5-631)
Analysis and Study on the Accelerometer of Rate-bias Laser Inertial Measurement Unit	XU Binghua, ZHU Zhanxia, XIE Bo, YUAN Jianping(5-635)
Finite Element Analysis and Experiment of Multi-directional Composite Ultrasonic Transducer	GAO Changbin, XUE Jinxue, MA Wenju, LONG Zhili, ZHAO Heng(5-640)
Design and Simulation of a Novel SAW Triaxial Acceleration Sensor	GUO Xinrong, ZHANG Yongwei, TAN Qiulin, ZHANG Wendong(5-644)
Research on the Suppression Method of Temperature Transience Effect Error of Fiber Optic Gyroscope	LI Yang, HUANG Xin, LU Binbin, ZHANG Dengwei(5-649)
Preparation and Property Study on $\text{Sr}_2\text{Nb}_2\text{O}_7$ Textured Ceramics by Template Grain Growth	SHI Yulin, WU Chao, WANG Dan, WANG Hongliang, WU Xiaojun, CHEN Qiang(5-655)
Research on Robust Sliding Mode Observer for TWUSM Vibration Modes	JING Kai, LING Xiaping, DONG Yan(5-659)
Experimental Research on Water Cooling Closed-Loop Driven Piezoelectric Pump	WEI Lingjiao, ZHAO Yanan, LIANG Jingtao(5-663)
Research Progress on Improving Delay Resolution of Ultrasonic Phased Array System	XU Haosheng, ZENG Wei, YANG Shaohui, ZENG Deping(5-668)
Study on Ar^+ Etching of Crystal-Ion-Sliced Lithium Niobate Single Crystal Thin Film	FANG Yuanping, LUO Wenbo, HAO Xin, BAI Xiaoyuan, ZENG Huizong, SHUAI Yao, ZHANG Wanli(5-674)
Effect of Intense Pulsed Gamma Radiation on Properties of Piezoelectric Ceramics	MAO Shiping, YANG Jing, ZHANG Zuwei, CHEN Qinghua, WANG Dengpan, ZHAO Defeng, FENG Bo(5-678)
Timber Axial Pressure Damage Monitoring Based on Piezoceramic Sensor	LIU Xiaoyu, RAO Yulong, ZHANG Jicheng, XIAO Jiahao(5-681)
Analysis of Influence of Cantilever Beam Substrate on Output Response of Piezoelectric Energy Harvester	WU Xinzhe, YAN Shouyang, GAO Zhiqiang, HAN Jing, JIAO Guotai(5-686)
Fatigue Simulation Analysis and Experimental Study on Ring Piezoelectric Vibrator	TIAN Xiaochao, WANG Haigang, WANG Hu, WU Yue, ZHANG Sida, YANG Zhigang(5-692)
Piezoelectric Actuator and Its Application in Hydraulic Valve	HUA Shunming, ZHANG Yu, PENG Yu, LIU Lijun, XU Shaofeng(5-697)
Adaptive Mechanical Switching Circuit for Piezoelectric Energy Harvesting	HUANG Yao, QIN Gang, LIU Weiqun(5-704)
Internal Mode Control of Piezoelectric Ceramic Actuator Based on H-like Model	SHANG Aipeng, WANG Zhenyan, HE Yidan(5-708)
Fatigue Analysis of Folded Piezoelectric Vibrator Based on Displacement Load	ZHAO Chunming, GONG Lijiao, ZHOU Tianshuo, ZHANG Xin, ZHANG Pengfei(5-713)
Study on Device and Method of Stabilizing Growth Interface of Czochralski Method	ZHOU Yimin, HE Ye, CEN Wei, CHEN Chuangui, DENG Jiangtao(5-718)

Analysis of Effect of Installation Error on Alignment Accuracy of Single-Axial Rotation	LIU Xin, JIA Jichao, LI Kun, ZHAO Ruixing, DONG Shubing(5-721)
Research on Navigation and Localization Algorithm Based on IMU/Vision Fusion	DONG Bolin, CHAI Xu(5-724)
Design and Simulation of Piezoelectric Energy Harvesting Circuit Based on Coupled Inductance	ZHOU Tianshuo, GONG Lijiao, ZHAO Chunming, YANG Jianxin(5-729)
Design of Phased Array Focused Ultrasound Control System	WANG Huan, ZHANG Qing, ZHOU Hongsheng, PAN Hailin, LIU Xiaoyi(6-735)
Effect of Static Electric Field on SAW Propagation in Piezoelectric Films	LIU Zhirong, XIE Liqiang, ZHU Min, BAO Wenqi(6-739)
Design of Triple-band Bandpass Filter Based on Fan-shaped Substrate Integrated Waveguide	ZHANG Sheng, LIU Shuo, XIE Zhenjiang(6-743)
Design of Segmented Loop Antenna for Surface Acoustic Wave Torque Measurement System	XIONG Zhiqiang, CHEN Zhijun, SUN Cong, ZHU Weijun, GUO Jiajia(6-747)
The Influence of Cladding Layer Thickness on Surface Wave Focusing Characteristics of Phased Array	ZHOU Yongli, ZHOU Gang, HU Hongwei, LIU Zhiping(6-752)
Study on Acoustic Field Simulation of Broadband Acousto-optical Devices	WU Zhongchao, TANG Shi, WU Wei, GAO Weisong, ZHU Ji, WANG Zhilin(6-757)
Crystal Filter with High Fundamental Frequency and High Electromechanical Coupling Coefficient	PENG Shengchun, ZHAO Ruixing, YANG Hao, QIU Zelin, LI Yafei, WEN Zhiru, TANG Ping, DONG Shu(6-761)
Research on Damage Detection of Heat-insulating Structure Based on Distributed Optical Fiber Sensor	LIU Mingjing, XIA Zixu, LI Jianle, WU Zhanjun, GAO Dongyue(6-765)
Single Polarization Fiber Acousto-Optic Modulator	WU Wei, TANG Shi, WANG Zhilin, LINGHU Mei'ao, ZHU Ji, FU Lipeng(6-769)
Study on Band Gap Regulation of Phononic Crystal Rod with Piezoelectric Shunting	ZHANG Yaru, GUO Hui, YUAN Tao, SUN Pei, WANG Yansong, CHENG Qian(6-772)
Model Modification for Cantilever Piezoelectric Energy Harvester	GUO Li, ZHOU Xingde, YANG Jing(6-777)
Optical Fiber Quasi-distributed Hydrogen Leakage Monitoring Based on Φ -OTDR	LI Shudong, SU Yang, HE Guangceng, ZHU Yupei, PENG Wenying, GONG He, YANG Yongji, WU Taojiang, WU Dechao(6-782)
Research on Low Temperature Sensing Characteristics of Fiber Bragg Grating	LI Bowen, LIU Yinggang, SONG Xiaoya, FU Haiwei, JIA Zhen'an, GAO Hong(6-787)
Study on Photoluminescence Heating and Spectral Beam Splitting Utilizing Optical Fiber	JIN Yue, WU Taojiang, LI Yujie, WU Dechao(6-791)
Elevator Health Monitoring System Based on Fiber Bragg Grating Sensor Network	WU Taojiang, YU Xiaoyi, ZHANG Chunjuan, YIN Jingsong, SHI Shenghui(6-796)
Theoretical Analysis and Application Test of Piezoelectric Inertial Actuator	TIAN Xiaochao, WANG Haigang, WANG Hu, SUN Yuze, ZHU Jinzhi, WANG Zhicong, YANG Zhigang(6-800)
Study on the Performance of a Novel Ce : GAGG Scintillation Detector	WANG Lu, WANG Qiang, QU Jingjing, DONG Honglin, FANG Chengli, DING Yuchong(6-806)
Study on Preparation and Properties of SnO_2 Varistor Ceramics Doped with MnO_2	LIANG Wenxin, ZHAO Hongfeng, KANG Jiashuang, WANG Hao, ZHOU Yuanxiang, XIE Qingyun(6-810)
Effects of $\text{LiF}/\text{Li}_2\text{CO}_3$ on the Sintering Behavior and Piezoelectric Properties of PZT Ceramics	ZHAO Shiyan, HU Wangfeng(6-814)
Influences of Nb^{5+} Doping on Structure and Electric Properties of $(\text{Ca}_{0.97}\text{Ba}_{0.03})\text{Cu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ Ceramics	HU Jiandong, ZHONG Xin, MIN Liang, LIU Yong, GU Junjie, HU Taolin, CHANG Xiangle, ZHANG Chen(6-820)
Design and Finite Element Analysis of Piezoelectric Torsional Actuator with Spiral Electrode	GUO Quanyuan, LIU Yonggang, ZENG Aoke, YAN Pengfei(6-825)
Study on Planar Motor Driven by Basin-shaped Piezoelectric Vibrator in Homo-mode	WANG Zheyi, HE Honglin, FANG Zhimin, WU Xingqiang(6-831)
Current Progress of Integrated Lithium Niobate Photonic Device Technology	ZHANG Tao, HE Jie, HU Shaoqin, XU Xin, ZHANG Yulei(6-837)
Modeling of Piezoelectric Hysteresis Based on Interval Type-2 T-S Fuzzy System	CHEN Shengxin, ZHAO Xinlong, SU Qiang, SU Liangcai(6-843)
Development of UAV Navigation System for Taking-off and Landing on Moving Platform Based on SINS/RTK	LI Xinghai, YAN Zhi'an, XU Liang, XU Changyan, LI Baolin, GONG Qiao(6-848)
Rapid Calibration Method of MIMU 24 Error Parameters Based on LABVIEW	LIU Zhiwei, CUI Min, ZHANG Peng, XU Wenwu(6-854)
Piezoelectric Energy Harvesting System Based on Imperfect Acoustic Black Hole	WANG Heng, TANG Rongjiang, ZHENG Weiguang, WEN Yansheng(6-859)
Development of SAW Devices on LN/LT- POI Multilayered Structure	HE Jie, MA Jinyi, HU Shaoqin, XU Xin(6-864)
Influence of Gravity Field on Performance of Hemispherical Resonator Gyro	FANG Zhongqi, FANG Haibin, LEI Ting, TAN Pinheng, HAN Shichuan(6-871)
Research Progress of Piezoelectric Ultrasonic Transducer with Wide Temperature Range	WANG Guoliang, LIU Xueliang, YU Fapeng, ZHAO Xian(6-875)
Design of Low Noise Hemispherical Gyro for Precise Orientation	FANG Haibin, HAN Shichuan, PENG Kai, LEI Ting, ZHOU Chuang(6-884)

CONTENTS

Design of Phased Array Focused Ultrasound Control System	WANG Huan, ZHANG Qing, ZHOU Hongsheng, PAN Hailin, LIU Xiaoyi(735)
Effect of Static Electric Field on SAW Propagation in Piezoelectric Films	LIU Zhirong, XIE Liqiang, ZHU Min, BAO Wenqi(739)
Design of Triple-band Bandpass Filter Based on Fan-shaped Substrate Integrated Waveguide ...	ZHANG Sheng, LIU Shuo, XIE Zhenjiang(743)
Design of Segmented Loop Antenna for Surface Acoustic Wave Torque Measurement System	XIONG Zhiqiang, CHEN Zhijun, SUN Cong, ZHU Weijun, GUO Jiajia(747)
The Influence of Cladding Layer Thickness on Surface Wave Focusing Characteristics of Phased Array	ZHOU Yongli, ZHOU Gang, HU Hongwei, LIU Zhiping(752)
Study on Acoustic Field Simulation of Broadband Acousto-optical Devices	WU Zhongchao, TANG Shi, WU Wei, GAO Weisong, ZHU Ji, WANG Zhilin(757)
Crystal Filter with High Fundamental Frequency and High Electromechanical Coupling Coefficient	PENG Shengchun, ZHAO Ruixing, YANG Hao, QIU Zelin, LI Yafei, WEN Zhiru, TANG Ping, DONG Shu(761)
Research on Damage Detection of Heat-insulating Structure Based on Distributed Optical Fiber Sensor	LIU Minjing, XIA Zixu, LI Jianle, WU Zhanjun, GAO Dongyue(765)
Single Polarization Fiber Acousto-Optic Modulator	WU Wei, TANG Shi, WANG Zhilin, LINGHU Mei'ao, ZHU Ji, FU Lipeng(769)
Study on Band Gap Regulation of Phononic Crystal Rod with Piezoelectric Shunting	ZHANG Yaru, GUO Hui, YUAN Tao, SUN Pei, WANG Yansong, CHENG Qian(772)
Model Modification for Cantilever Piezoelectric Energy Harvester	GUO Li, ZHOU Xingde, YANG Jing(777)
Optical Fiber Quasi-distributed Hydrogen Leakage Monitoring Based on Φ -OTDR	LI Shudong, SU Yang, HE Guangceng, ZHU Yupei, PENG Wenying, GONG He, YANG Yongji, WU Taojiang, WU Dechao(782)
Research on Low Temperature Sensing Characteristics of Fiber Bragg Grating	LI Bowen, LIU Yinggang, SONG Xiaoya, FU Haiwei, JIA Zhen'an, GAO Hong(787)
Study on Photoluminescence Heating and Spectral Beam Splitting Utilizing Optical Fiber	JIN Yue, WU Taojiang, LI Yujie, WU Dechao(791)
Elevator Health Monitoring System Based on Fiber Bragg Grating Sensor Network	WU Taojiang, YU Xiaoyi, ZHANG Chunjuan, YIN Jingsong, SHI Shenghui(796)
Theoretical Analysis and Application Test of Piezoelectric Inertial Actuator	TIAN Xiaochao, WANG Haigang, WANG Hu, SUN Yuze, ZHU Jinzhi, WANG Zhicong, YANG Zhigang(800)
Study on the Performance of a Novel Ce : GAGG Scintillation Detector	WANG Lu, WANG Qiang, QU Jingjing, DONG Honglin, FANG Chengli, DING Yuchong(806)
Study on Preparation and Properties of SnO ₂ Varistor Ceramics Doped with MnO ₂	LIANG Wenxin, ZHAO Hongfeng, KANG Jiashuang, WANG Hao, ZHOU Yuanxiang, XIE Qingyun(810)
Effects of LiF/Li ₂ CO ₃ on the Sintering Behavior and Piezoelectric Properties of PZT Ceramics	ZHAO Shiyan, HU Wangfeng(814)
Influences of Nb ⁵⁺ Doping on Structure and Electric Properties of (Ca _{0.97} Ba _{0.03})Cu ₃ Ti ₄ O ₁₂ Ceramics	HU Jiandong, ZHONG Xin, MIN Liang, LIU Yong, GU Junjie, HU Taolin, CHANG Xiangle, ZHANG Chen(820)
Design and Finite Element Analysis of Piezoelectric Torsional Actuator with Spiral Electrode	GUO Quanyuan, LIU Yonggang, ZENG Aoke, YAN Pengfei(825)
Study on Planar Motor Driven by Basin-shaped Piezoelectric Vibrator in Homo-mode	WANG Zheyi, HE Honglin, FANG Zhimin, WU Xingqiang(831)
Current Progress of Integrated Lithium Niobate Photonic Device Technology	ZHANG Tao, HE Jie, HU Shaoqin, XU Xin, ZHANG Yulei(837)
Modeling of Piezoelectric Hysteresis Based on Interval Type-2 T-S Fuzzy System	CHEN Shengxin, ZHAO Xinlong, SU Qiang, SU Liangcai(843)
Development of UAV Navigation System for Taking-off and Landing on Moving Platform Based on SINS/RTK	LI Xinghai, YAN Zhi'an, XU Liang, XU Changyan, LI Baolin, GONG Qiao(848)
Rapid Calibration Method of MIMU 24 Error Parameters Based on LABVIEW	LIU Zhiwei, CUI Min, ZHANG Peng, XU Wenwu(854)
Piezoelectric Energy Harvesting System Based on Imperfect Acoustic Black Hole	WANG Heng, TANG Rongjiang, ZHENG Weiguang, WEN Yansheng(859)
Development of SAW Devices on LN/LT- POI Multilayered Structure	HE Jie, MA Jinyi, HU Shaoqin, XU Xin(864)
Influence of Gravity Field on Performance of Hemispherical Resonator Gyro	FANG Zhongqi, FANG Haibin, LEI Ting, TAN Pinheng, HAN Shichuan(871)
Research Progress of Piezoelectric Ultrasonic Transducer with Wide Temperature Range	WANG Guoliang, LIU Xueliang, YU Fapeng, ZHAO Xian(875)
Design of Low Noise Hemispherical Gyrofor Precise Orientation	FANG Haibin, HAN Shichuan, PENG Kai, LEI Ting, ZHOU Chuang(884)

压电与声光

YADIAN YU SHENGGUANG PIEZOELECTRICS & ACOUSTOOPTICS

(双月刊)(1979 年创刊)
第 42 卷 第 6 期(总第 255 期)
2020 年 12 月 20 日出版
卷 终

(Bimonthly)(Started in 1979)
Vol. 42, No. 6(Serial Issue No. 255)
Published on Dec. 20, 2020
End of Volume

主管单位:中国电子科技集团公司
主办单位:四川压电与声光技术研究所
编辑出版:《压电与声光》编辑部

主 编:胡少勤
执行主编:许 昕
责任编辑:杨 莉
印 刷:重庆紫石东南印务有限公司
国内发行:《压电与声光》编辑部

地 址:重庆市南岸区南坪花园路 14 号
(400060)
电 话:(023)65860260(编辑)
(023)65860283(发行)
网 址:www.peaotec.com
电子邮箱:ydsipsat@163.com

Competent Department: China Electronics Technology Group Corporation
Sponsored by: Sichuan Institute of Piezoelectric and Acoustooptic Technology
Edited and Published by: Editorial Office of Journal of
PIEZOELECTRICS & ACOUSTOOPTICS

Chief Editor: HU Shaoqin
Executive Chief Editor: XU Xin
Managing Editor: YANG Li
Printed by: Chongqing Purplestone Southeast Printing Co., LTD.
Distributed by: Editorial Office of Journal of
PIEZOELECTRICS & ACOUSTOOPTICS

Address: No. 14 Garden Road, Nanping, Nan'an District Chongqing City,
Chongqing 400060
Tel: (023)65860260(Edinton)
(023)65860283(Distribution)
http://www.peaotec.com
E-mail: ydsipsat@163.com

中国标准连续出版物号: ISSN 1004-2474
CN 50-1091/TN

定价: 20.00 元