

文章编号:1004-2474(2018)04-0526-03

石英微机电陀螺的机械耦合误差研究

林日乐,李文蕴,张桐,谢佳维,蒋昭兴,满欣,江黎

(中国电子科技集团公司第二十六研究所,重庆 400060)

摘要:石英微机电陀螺是一种利用科里奥利(Coriolis)效应的振动陀螺,工作时敏感芯片处于谐振状态,机械耦合误差是其主要误差源。分析了敏感芯片机械耦合误差因素,提出了驱动与检测模态解耦设计、振动隔离设计及轴对称质量平衡设计改进方案,实验结果表明,通过改进设计,有效抑制了敏感芯片机械耦合误差,提高了陀螺的精度及环境适应性。

关键词:石英;微机电陀螺;机械耦合误差

中图分类号: TN37; TM23 **文献标识码:** A **DOI:** 10. 11977/j. issn. 1004-2474. 2018. 04. 012

Study on the Mechanical Coupling Error of Quartz MEMS Gyroscope

LIN Rile, LI Wenyun, ZHANG Tong, XIE Jiawei, JIANG Zhaoxing, MAN Xin, JIANG Li

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

Abstract: The quartz MEMS gyroscope is a kind of vibratory gyroscope that makes use of the Coriolis effect. The sensitive chip is in a resonance state during operation, and the mechanical coupling error is its main source of error. The error factors of the mechanical coupling of the sensitive chip are analyzed. The improvement schemes of the decoupling design of the driving and detecting modes, the vibration isolation design and the axisymmetric mass balance design are proposed. The experimental results show that by improving the design, the mechanical coupling error of the sensitive chip is effectively suppressed, and the precision and environmental adaptability of the gyro are improved.

Key words: quartz; MEMS gyroscope; mechanical coupling error

0 引言

石英微机电陀螺是一种微型振动陀螺,采用石英晶体为敏感芯片材料,通过微加工工艺制造,产品具有温度性能好,体积小,可靠性高和适合低成本批量生产等特点,可广泛应用在稳定、控制、制导、导航等领域。石英微机电陀螺的零偏输出误差主要由敏感器件的机械耦合误差和电路信号处理误差构成。而敏感器件的机械耦合误差是主要误差源,是影响陀螺综合精度及环境适应性的关键因素。

1 石英微机电陀螺工作原理

石英微机电陀螺敏感芯片通常采用双端音叉结构,工作时驱动音叉处于谐振状态,在有外加角速度输入时,由于科里奥利(Coriolis)力的作用,使检测音叉做受迫振动,振动幅度正比于驱动音叉运动的速度和外加角速度,利用石英晶体的压电效应,通过电路解调即可得到一个正比于输入角速度的直流电压输出^[1]。石英微机电陀螺的工作原理如图1所示,

其敏感芯片结构及工作模态如图2所示。

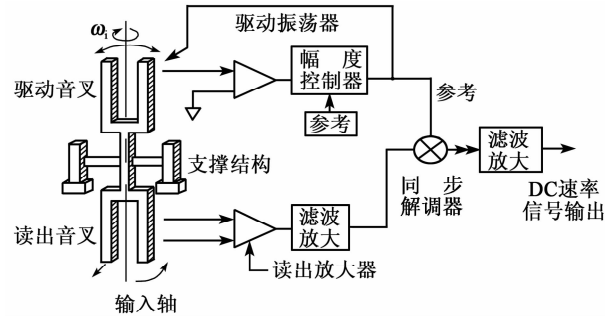


图1 石英微机电陀螺工作原理图

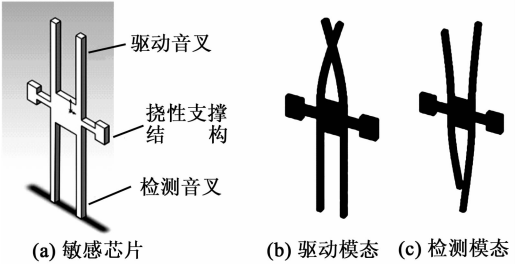


图2 双端音叉敏感芯片结构示意图及工作模态

收稿日期:2017-10-20
作者简介:林日乐(1975-),男,海南文昌人,研究员,硕士,主要从事惯性器件技术的研究。

2 机械耦合误差特性分析

石英微机电陀螺机械耦合误差主要由几个部分构成,由驱动音叉激励振动耦合到检测音叉引起的零偏误差;由于敏感芯片结构质量不平衡和未进行隔振设计而响应外部振动引起的耦合误差。

石英微机电陀螺敏感芯片采用双端音叉结构,将驱动音叉和检测音叉分开设计,可独立地调节各自的谐振频率和品质因数,避免了单端音叉结构中由于驱动音叉和检测音叉共用一对音叉,使驱动音叉和检测音叉不能隔离设计,驱动振动易耦合到检测音叉,产生较大的零偏误差。双端音叉结构能更好地将微弱的科里奥利检测振动和幅度非常大的驱动振动分开,有利于减小机械耦合误差,并通过结构放大效应,提高灵敏度,从而提高了陀螺的信噪比。石英微机电陀螺敏感芯片驱动音叉谐振幅度在微米量级,检测音叉工作时位移变化在纳米量级,两者相差几个数量级,可见,通过合理设计双端音叉结构参数及挠性支撑结构,减少驱动音叉振动对检测音叉的机械耦合误差,对有效降低陀螺零偏误差起到关键作用^[2]。

设计了一组敏感芯片结构参数,芯片结构宽度 2.5~5.0 mm,驱动音叉长 2.0~3.5 mm,宽 0.08~0.1 mm,检测音叉长 2.2~4.0 mm,宽 0.06~0.09 mm。进行了有限元仿真分析,在驱动音叉上施加激励力,使其处于谐振状态,在无角速度输入的情况下,计算得到驱动音叉振动耦合到检测音叉引起的相应位移,得到不同结构参数下的耦合系数,从而评估芯片结构解耦设计的优劣。表 1 为在不同结构参数下,仿真分析得到的检测音叉耦合驱动音叉振动引起的相应位移,仿真分析结果表明,通过芯片结构解耦设计,驱动音叉对检测音叉的机械耦合误差可降低 70% 以上,从而有效抑制了陀螺零偏误差。

表 1 不同芯片结构参数下检测音叉的耦合误差

敏感芯片结构模型	检测音叉耦合位移误差/ μm
芯片结构参数组 1	0.003 02
芯片结构参数组 2	0.002 87
芯片结构参数组 3	0.000 71

石英微机电陀螺敏感芯片在工作时处于谐振状态,振动能量易通过支撑结构耗散,影响芯片稳定性;而外部的振动也会通过支撑结构传递到敏感芯片,引起响应振动,导致陀螺零偏振动误差。解决措施之一是通过优化音叉结构,使检测模态的振动节点位置处于安装区支撑结构位置,从而避免能量耗散,提高频率稳定性,同时也避免了外部振动条件对

敏感芯片的影响^[3]。同时,可通过改变敏感芯片的频率、质量,或采用真空封装的方式提高陀螺敏感芯片的品质因数,从而提升芯片的信噪比和环境适应性。在此基础上,设计合理的敏感芯片隔离结构也是一种有效的方法。通过设计敏感芯片隔离结构,能有效避免芯片振动能量耗散,提高稳定性,同时隔离了外部环境热、振动等因素对敏感芯片的影响,有效降低陀螺的振动噪声误差。设计的一种集成式敏感芯片隔离结构示意图如图 3 所示。仿真分析了不同的隔离结构参数对敏感芯片频率稳定性的影响,以及在 $0.04\text{ g}^2/\text{Hz}$ ($g=9.8\text{ m/s}^2$) 的振动条件下,其对振动误差的抑制效果,如表 2 所示。从表中可看出,良好的芯片隔离结构设计,能有效提升敏感芯片的稳定性,同时,对芯片振动耦合误差可降低 40% 以上,提高了环境适应性。

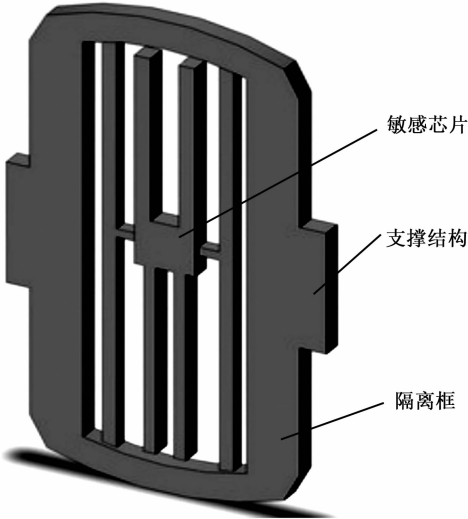


图 3 敏感芯片隔离结构示意图

表 2 不同敏感芯片隔离结构对稳定性及振动耦合误差的影响

隔离框 结构模型	检测频率 变化率/%	振动条件下检测音 叉耦合位移误差/ μm
隔离框结构 1	0.106	0.105
隔离框结构 2	0.055	0.095
隔离框结构 3	<0.002	0.057

由于设计或工艺原因导致的敏感芯片结构质量不平衡也是引起敏感芯片在振动条件下产生误差信号的关键因素,轴对称质量平衡设计是减小敏感芯片振动误差的关键因素。通过芯片结构轴对称设计及制造过程减小工艺误差,保证芯片结构质量平衡,以避免其在振动环境中由于结构不平衡导致的扰动,可有效提升其环境适应性。而芯片隔离框结构

的设计也能够有效抑制由于结构质量不平衡导致的振动耦合误差。设计了一组参数,仿真分析了不同敏感芯片结构状态下,芯片上不同位置质量产生偏差所引起的机械耦合误差,如表 3 所示。由表可知,质量的不平衡可引起明显的耦合误差,而芯片隔离框的设计对抑制外部振动对敏感芯片性能的影响,效果明显。

表 3 敏感芯片结构质量不平衡引起的振动耦合误差

结构模型	位置	质量偏差/%	耦合误差/%
结构 1(无隔离框)	驱动音叉	0.40	1.64
结构 1(无隔离框)	驱动音叉	0.80	4.30
结构 1(无隔离框)	检测音叉	0.90	5.77
结构 2(有隔离框)	驱动音叉	1.90	0.10
结构 2(有隔离框)	检测音叉	0.75	0.77

3 实验

通过对敏感芯片的机械解耦设计、轴对称质量平衡设计及隔离框设计,有效改善了陀螺稳态零偏误差,抑制了输出噪声,改进前后的陀螺稳态零偏输出曲线如图 4 所示,改进后陀螺输出噪声减小了 30%左右。在 $0.04\text{ g}^2/\text{Hz}(20\sim2\,000\text{ Hz})$ 随机振动条件下的陀螺零偏输出如图 5 所示,良好的芯片结构设计,将陀螺振动过程中零偏变化由 $0.5\text{ (}^\circ\text{)}/\text{s}$

左右抑制到 $0.08\text{ (}^\circ\text{)}/\text{s}$ 以下,振动噪声大幅减小,有效提高了陀螺的环境适应性。

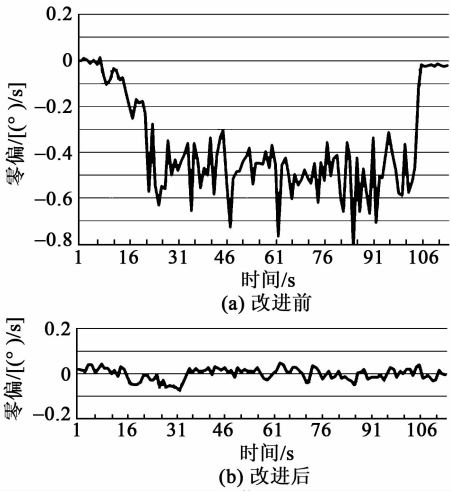


图 5 振动条件下陀螺零偏输出及噪声特性曲线

4 结束语

石英微机电陀螺是一种微型振动陀螺,敏感芯片音叉结构的机械耦合误差是其主要误差源。通过对陀螺敏感芯片结构进行驱动与检测模态解耦设计、振动隔离设计及轴对称质量平衡设计,抑制了敏感芯片的机械耦合误差,有效提高了陀螺的精度及环境适应性。

参考文献:

[1] 林日乐,谢佳维,周倩,等. 石英 MEMS 陀螺的结构特性分析[J]. 压电与声光,2011,33(4):544-546.
LIN Rile, XIE Jiawei, ZHOU Qian, et al. Analysis of the structure characteristics of quartz MEMS gyroscope[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2011, 33(4):544-546.
[2] UEHARAH, OHTSUKAT, INOUE T, et al. Miniaturized angular rate with laminated quartz tuning fork [C]//Vancouver: Frequency Control Symposium and Exposition, Proceedings of the 2005 IEEE International, 2005:886-891.
[3] MADNI A M, COSTLOW L E. Common design techniques for BEI GYROCHIP quartz rate sensors for both automotive and aerospace/defense markets [J]. IEEE Sensors Journal, 2003, 3(5):569-578.

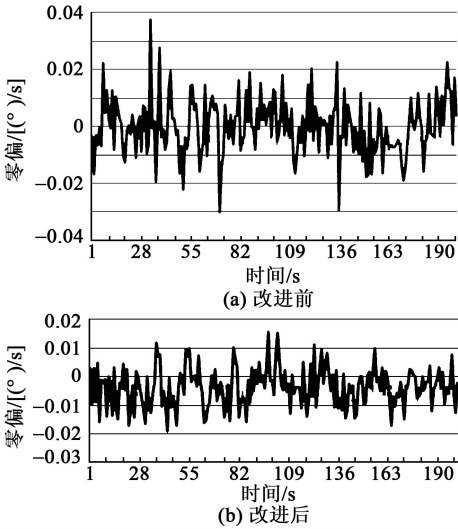


图 4 陀螺稳态零偏输出及噪声特性曲线