

石英微机械陀螺敏感芯片的结构解耦特性研究

林日乐,李文蕴,谢佳维,满欣

(中国电子科技集团公司第二十六研究所,重庆 400060)

摘要:石英微机械陀螺敏感芯片通常采用双端音叉结构,驱动音叉和检测音叉的振动耦合误差是其主要误差源。对双端音叉结构陀螺敏感芯片进行了结构解耦设计仿真,分析了芯片安装区对检测音叉振动特性的影响。通过解耦设计,减小了零偏误差信号,提高了陀螺敏感芯片的稳定性。

关键词:石英微机械;陀螺;敏感芯片;结构解耦

中图分类号:TN384 **文献标识码:**A

Study on the Structure Decoupling Characteristic of the Sensitive Chip of Quartz MEMS Gyroscope

LIN Rile, LI Wenyun, XIE Jiawei, MAN Xin

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

Abstract: The sensitive chip of quartz MEMS gyroscope usually adopts the double ended tuning fork structure. The vibration coupling error which comes from the drive and detection tuning forks is the main error source. The structure decoupling design and simulation of the sensitive chip with double-end tuning fork have been carried out in this paper. The impact of chip mounting area on the vibration characteristics of the detection tuning fork has been analyzed. The bias error signal of gyroscope has been reduced and the stability of the sensitive chip has been improved by using the proposed decoupling design.

Key words: quartz MEMS; gyroscope; sensitive chip; structure decoupling

0 引言

石英微机械陀螺是一种微型振动陀螺,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、制导及导航等领域。石英微机械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振动状态,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]。提高石英微机械陀螺敏感芯片稳定性的关键是避免检测音叉又受到驱动音叉激励振动的影响,即结构的解耦设计,同时避免芯片安装区对检测音叉特性的影响。如音叉结构设计不合理或由于工艺误差导致结构不平衡,在驱动音叉谐振时,振动误差信号会传递到检测音叉,引起零偏误差信号;芯片安装区不处于检测音叉的振动节点位置,其振动特

性会受安装区的影响,从而影响稳定性。因此,结构上的解耦设计及检测音叉振动节点设计是提高双端音叉式石英微机械陀螺敏感芯片稳定性的关键因素。

1 陀螺敏感芯片的结构解耦特性分析

石英微机械陀螺敏感芯片一般采用一体式音叉结构,有单端音叉、双端音叉等结构形式。单端音叉结构中驱动音叉和检测音叉共用一对音叉,其结构简单,体积小,但由于驱动音叉和检测音叉不能隔离设计,驱动振动容易耦合到检测音叉,产生较大的零偏误差。双端音叉结构将驱动音叉和检测音叉分开设计,结构示意图如图1所示。双端音叉结构能独立调节各自的谐振频率和品质因数,并能更好地将微弱的科里奥利检测振动和大幅度的驱动振动分开,有利于减小耦合误差,提高灵敏度。双端音叉结构最大优势是可通过合理的结构设计,减小驱动激励振动对检测音叉的影响,避免机械耦合误差^[2-4]。

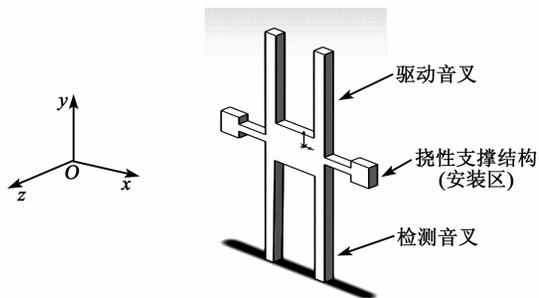


图1 石英微机械陀螺双端音叉敏感芯片结构示意图

双端音叉结构的驱动模态和检测模态如图2所示。设计了一组结构参数,芯片结构长11.0 mm,厚0.36 mm,驱动音叉长3.7 mm,宽0.2 mm;读出音叉长4.3 mm,宽0.2 mm。利用有限元仿真软件^[5]计算得到其工作频率为12 655 Hz。在驱动音叉上施加激励力,使其处于谐振工作状态,计算得到此时检测音叉的垂直位移为0.006 μm ,检测音叉的垂直振动幅度小。对于这种理想模型,在没有外加角速度输入时,检测音叉基本不产生振动,即未产生误差信号,双端音叉结构达到很好的解耦状态。由于石英晶体的各向异性特性,在采用湿法工艺进行腐蚀成型时,音叉的侧壁会产生凸缘,如图3所示。凸缘的存在导致音叉结构不对称、不平衡,驱动音叉的水平(x 轴向)振动会在 z 轴向产生分量,通过结构传递到检测音叉,使检测音叉在 z 方向上也产生受迫振动,从而产生零偏误差信号。通过仿真分析,在工艺误差导致音叉结构不对称的情况下,检测音叉的垂直位移达到0.95 μm ,相对于理想模型,幅度扩大约150倍,这将导致大的零偏误差。通过对驱动音叉、检测音叉和支撑结构参数进行优化及解耦设计,以及工艺方案的优化,可有效减小因工艺误差导致的零偏误差信号。改进后,在存在工艺误差的情况下,检测音叉的垂直位移减小到0.046 μm ,与结构优化前相比,幅度缩小了近95%,达到了很好的解耦效果。几种不同结构状态仿真分析得到的检测音叉的垂直位移如表1所示。

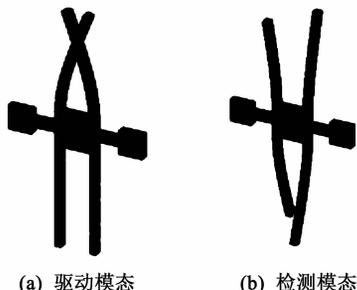


图2 石英微机械陀螺双端音叉敏感芯片工作模态

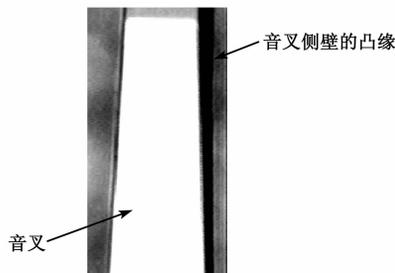


图3 腐蚀后侧壁有凸缘的音叉

表1 不同结构解耦状态仿真分析得到的检测音叉的垂直位移

敏感芯片结构模型	检测音叉的垂直位移/ μm
理想结构	0.006
考虑工艺误差音叉上有凸缘的芯片结构	0.950
优化挠性支撑结构参数后的芯片结构	0.214
改进方案及系统优化参数后的芯片结构	0.046

2 敏感芯片的结构节点特性分析

陀螺敏感芯片通过安装区固支,双端音叉处于可自由谐振状态,安装方式如图4所示。图中,驱动音叉振动方向与安装区平面平行,检测音叉振动方向与安装区平面垂直。安装区状态对音叉的振动稳定性影响较大,为提高灵敏度及稳定性,同时避免外部振动、热等因素对敏感芯片的影响,安装区常设计成挠性支撑结构。结构设计时,应该让检测模态的振动节点处于支撑结构位置,如图5所示。检测模态的振动节点如果没有在支撑结构位置,外部振动会以扭转运动方式耦合到音叉上,影响科里奥利效应引起的检测音叉的运动;如果检测模态的振动节点位于支撑结构位置,外部振动会使音叉表征出共模运动形式而被抑制,不会影响检测信号,从而提高了敏感芯片的稳定性^[6]。本文设计了4组结构参数,采用有限元分析方法,计算出检测音叉的振动节点位置与支撑结构位置的距离,以及其检测频率在不同的安装约束条件下的变化率,如表2所示。图6为节点位置 a 与检测频率变化率的关系。仿真分析结果表明,检测音叉的振动节点位置处于安装区支撑结构位置,能减少振动能量耗散,提高稳定性,同时也避免了外界振动条件对敏感芯片的影响,提高了敏感芯片的环境适应性。

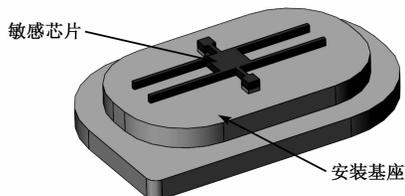


图4 敏感芯片安装示意图

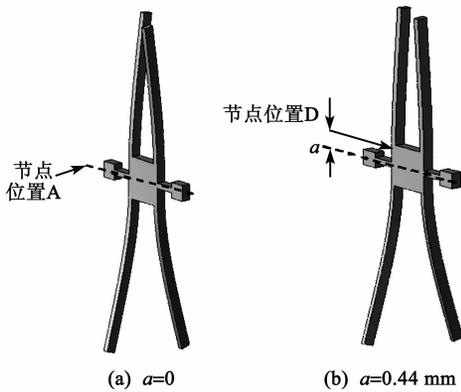


图 5 敏感芯片结构振动节点位置的设计

表 2 不同节点位置下检测频率的变化率

a/mm	0	0.086	0.260	0.440
检测频率变化率/%	0	0.02	0.27	0.55

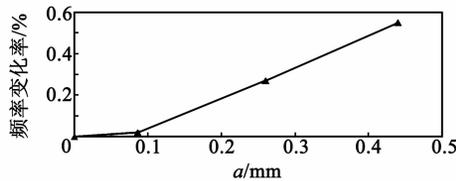


图 6 检测频率变化率与节点位置的关系

3 试验结果

设计加工了几种不同解耦及节点状态的敏感芯片,测试出敏感芯片在驱动激励下,没有角速度输入时,检测音叉垂直位移的大小以及对应的零偏误差信号,如图 7 所示。由图可见,结构解耦状态较好的敏感芯片,其零偏误差信号很小;结构振动耦合严重的敏感芯片,其零偏误差信号很大。结构振动耦合误差是陀螺零偏误差信号的主要来源之一,通过结构的合理解耦设计及工艺的优化,可有效减小耦合误差,提升陀螺的性能。

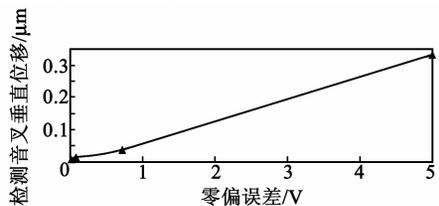


图 7 在驱动激励下,不同解耦状态敏感芯片的检测音叉垂直位移与零偏误差的关系

4 结束语

石英微机械陀螺是一种微型振动陀螺,敏感芯片音叉结构振动耦合误差是其主要误差源。通过对陀螺敏感芯片两端音叉结构进行解耦设计,能够减小驱动音叉激励振动对检测音叉的影响;同时,通过结构振动节点设计避免了安装区支撑结构对检测音叉振动状态的影响,从而有效减小了陀螺的零偏误差,并提高了陀螺的零偏稳定性及环境适应性。

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] 林日乐,李文蕴,赵建华,等. 石英微机械陀螺抗高冲击能力的优化研究[J]. 压电与声光,2013, 35(1): 56-58.
LIN Rilei, LI Wenyun, ZHAO Jianhua, et al. Optimization research on anti high shock ability of quartz MEMS gyroscope[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2013, 35(1):56-58.

[3] 李文蕴,林日乐,满欣. 石英微机械陀螺敏感芯片的抗振动分析与改进[J]. 压电与声光,2015, 37(4): 554-557.
LI Wenyun, LIN Rile, MAN Xin. Analysis and improvement of anti-vibration characteristic for the sensitive chip of quartz MEMS gyroscope[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2015, 37(4):554-557.

[4] UEHARAH, OHTSUKAT, INOUE, 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.

[5] 叶先磊,史亚杰. ANSYS 工程分析软件应用实例 [M]. 北京:清华大学出版社,2003:372-407.

[6] 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.