

Design and Simulation of a Three-frame Capacitive Micromechanical Gyroscope

LI Jir-ming^{1,2}, GUO Hui-fang¹, LIU Jun^{1*}

1. Key Laboratory of Instrument Science & Dynamic Measurement (North University of China), Ministry of Education, Taiyuan 030051, China;
2. Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract: In order to solve the error brought by madding process and every aspect factor in conventional double-frame gyroscope, a novel micro machined silicon gyroscope of three-frame is presented, this structure is made of three frames. Driving mass is composed of the outside frame and the middle frame. Sensing mass is composed of the middle frame and the inside frame. When the outside frame moves, the inside frame is immobile v. v. The phenomenon on mechanical coupling is removed from the structure itself. Detailed analysis and simulations of the three-frame gyroscope are presented.

Key words: mems; gyroscope; capacity; frame

EEACC: 7230; 2575; 7630

一种三框架电容式硅微机械陀螺结构与仿真

李锦明^{1,2}, 郭慧芳¹, 刘俊^{1*}

(1. 中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 太原 030051; 2. 清华大学精密仪器与机械系, 北京 100084)

摘要: 为了解决传统双框架陀螺结构, 驱动和检测采用同一质量块, 以及加工等所引起的误差, 提出了一种三框架的硅微机械陀螺结构。此结构由三个框架组成, 其中外框架为驱动框架, 在 x 轴方向驱动, 内框架为检测框架, 当在 z 轴方向有角速度输入时, 在哥氏力的作用下, 在 y 轴方向检测。中间框架可随外框架或内框架一起运动。这种结构保证了当受到静电力驱动时, 检测框架完全静止, 同时, 当检测框架检测时, 驱动框架完全静止, 从结构本身上消除了机械耦合现象, 同时兼顾了陀螺的灵敏度和带宽的要求。该陀螺结构简单, 采用体硅加工工艺, 可进行批量加工。文中描述了该陀螺的结构设计特点及仿真结果。

关键词: mems; 陀螺; 电容; 框架

中图分类号: TP212.12

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2008)02-0258-03

陀螺是一种用于测量旋转速度或旋转角的仪器, 振动式微机械陀螺仪利用单晶硅或多晶硅制成的振动质量, 在被基座带动旋转时的哥氏效应感测角速度。微机械陀螺具有体积小、重量轻、成本低、功耗小、可靠性高、动力学性能好以及抗高过载等特点, 广泛应用于灵巧弹、制导炮弹、战术武器、动能武器、微小型卫星及微小型机器人等领域^[1]。

目前, 大多数陀螺结构相对复杂, 对于现有的加工技术不能满足其要求, 使得所加工出来的陀螺只能作为实验品, 而不能作为产品。因此, 设计结构简单, 加工可行, 完全解耦和大振幅线性振动的微机械陀螺成为研究的关键。

传统的双框架微机械陀螺结构如图 1 所示, 该

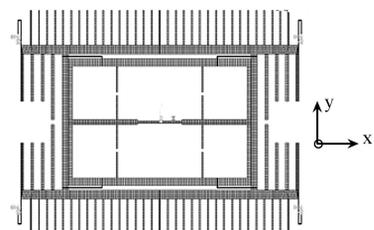


图 1 双框架微机械陀螺

结构在由内框架和外框架组成, 当受到 x 方向静电力作用时, 内框架及其所带检测梳齿与外框架及其所带驱动梳齿一起沿 x 轴振动, 在 z 轴方向(垂直于底座的方向)输入一定的角速度后, 内框架受到 y 轴方向的哥氏力, 从而带检测梳齿沿 y 轴方向振动。这种结构在驱动方向由于内框及其所带检测梳

齿的振动使得该陀螺具有一定的机械耦合^[2]。本文针对此设计了一种三框架电容式硅微机械线振动式陀螺。从结构本身完全解决了机械耦合现象。

1 结构及工作原理

三框架电容式硅微机械陀螺仪结构如图 2 所示,它由驱动电极、驱动检测电极、检测电极、带驱动梳齿的驱动框架、用于连接驱动框架的柔性杆、驱动框架内的中间框架及带检测梳齿的检测框架、将中间框架与驱动框架连接的柔性杆、中间框架与检测框架的柔性杆、检测框架与内部锚点连接的柔性杆等,驱动梳齿和驱动检测梳齿均采用横向梳齿电容,检测梳齿采用垂直梳齿电容。整个结构由柔性杆支撑并悬浮于衬底上^[3]。

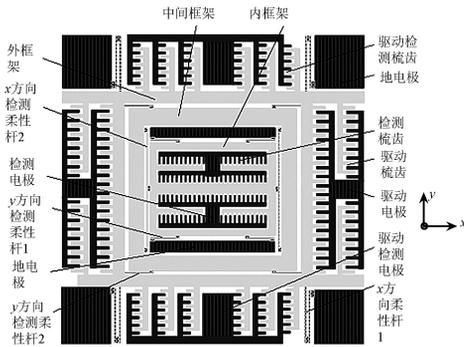


图 2 三框架硅微机械陀螺结构

四个角上的柔性杆通过锚点将驱动框架及与驱动框架相连的中间框架支撑并悬浮在衬底上;在静电驱动力作用下驱动框架与中间框架一起以驱动频率 ω_x 沿 x 轴左右运动;检测框架通过柔性杆连接在内部两个锚点上,同时通过柔性杆与中间框架相连接,当在 z 轴方向输入一定角速度 ω_y 时,中间框架受到沿 y 轴方向的周期性哥氏力 F_c 作用,该力迫使中间框架带动检测框架及检测梳齿沿 y 轴方向上下振动,其振幅与输入角速度大小成正比,检测梳齿电容构成差分电容对,梳齿的差分电容信号,经过信号处理电路后得到与输入角速度成正比的电信号,从而可以确定输入角速度的大小^[4]。

在结构设计时,外框和衬底通过折叠梁连接,通过适当的尺寸选择,使折叠梁沿 x 轴方向的等效刚度比较低,外框与中间框之间通过蟹型梁连接,通过适当的尺寸选择,使蟹型梁沿 x 轴方向的等效刚度很大,使得外框和中间框在 x 轴方向可以看作一个整体在运动;同样,内框与衬底通过蟹型梁连接,通过适当尺寸选择,使蟹型梁沿 y 轴方向的等效刚度比较低, x 轴方向的刚度很大,内框与中间框之间通过两个对称的蟹型梁连接,通过适当尺寸选择,使对

称蟹型梁沿 x 轴方向的刚度比较低,从而使得中间框和内框在 y 轴方向可以看作一个整体在运动。该结构与图 1 双框架结构的区别可以从图 3、图 4 看出来,其中图 3 是双框架陀螺的运动形式,图 4 是本文所描述三框架陀螺的运动形式,它们结构的重大差别在于双框架陀螺的内框架(检测质量块 m_2)参与驱动和检测两个运动,而三框架陀螺中只有不带梳齿的中间框架(中间质量块 m_3)参与驱动和检测两个运动,外框架(驱动质量块 m_1)只在驱动方向运动,内框架(检测质量块 m_2)只在检测方向运动,这样就避免了驱动方向的运动对检测方向的干扰。

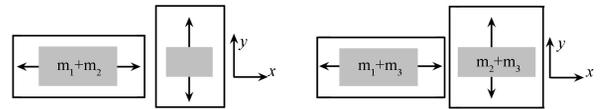


图 3 双框架结构运动形式 图 4 三框架结构运动形式

该结构驱动梳齿采用横向梳状叉指电容,通过改变电极板所对应的面积使得电容发生变化,左右对称的驱动电极分别接 $V_{dc} \pm V_{ac} \sin(\omega t)$,采用差分驱动方式,可有效消除静电力分布不均匀所引起的模态耦合,提高陀螺的灵敏度。检测梳齿同样使用垂直梳状叉指电容,通过改变电极板之间对应的面积使得电容发生变化,梳状叉指电容器对提高陀螺线性度和灵敏度比平行板电容更具有优势,同时,该结构中驱动和检测梳齿很多,对于提高陀螺的灵敏度也有一定的作用^[5]。

陀螺利用梳状结构的侧向静电驱动和垂直检测,结合折叠梁和蟹型梁结构可以获得较大的驱动幅度,有利于提高陀螺的灵敏度,三框架结构保证陀螺在驱动和检测模态的运动完全独立,从结构本身有效抑制了机械耦合对器件造成的误差。陀螺的工作尽涉及平面内运动^[6]。

2 有限元仿真

通过模态分析确定微机械陀螺结构的模态参数,主要包括固有频率、振型和柔性杆的尺寸,柔性杆的尺寸决定陀螺的各阶振型固有频率^[6]。微机械陀螺主要包含两个模态——驱动模态和敏感模态,两模态固有频率之差对结构的灵敏度有很大的影响。固有频率之差越小,表明两种模态间的匹配程度越高,灵敏度越高。

运用有限元分析软件 ANSYS 对结构进行模态分析,得到驱动模态和检测模态如图 5 和图 6 所示,这种结构具有驱动和检测完全解耦特性,即外框架运动时不会影响内框架的运动,反之亦然,但中间框架可同时随外框架和内框架运动。大大提高了陀螺

的信噪比,降低陀螺的零漂。该三框架硅微机械陀螺在信噪比各方面将优于其它硅微机械陀螺^[7]。

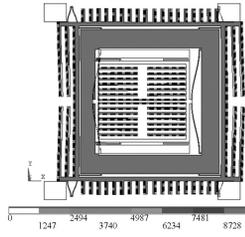


图5 陀螺驱动模式

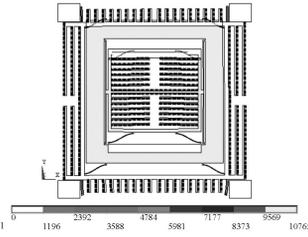


图6 陀螺检测模式

3 制造

MEMS 器件的加工工艺目前有体硅工艺、表面加工技术和 LIGA 加工工艺。体硅加工工艺简单,是一个成熟的工艺过程,生产成本低,适合简单几何形状,仅限于低深宽比的几何形状;表面微加工需要在基底上构造材料层,复杂的研磨设计及生产,必须腐蚀牺牲层,工艺耗时多,成本大,有界面应力和粘连等问题,适合于复杂的形状;LIGA 工艺花费最多,需要研制位注入压膜技术及进行大批量生产的设备,但其微结构的深宽比不受限制,是唯一可生产金属微结构的工艺。对于本结构而言,结构几何形状简单,器件的厚度对结构的固有频率没有影响,没有必要选择 LIGA 工艺,同时结构中梳齿较多,如果选用表面加工工艺,容易出现界面应力和梳齿吸合等现象,从国内的实际情况和加工成本来看,选择比较成熟的体硅加工工艺,简单可行,可批量生产^[8]。

4 结束语

陀螺利用梳状结构的侧向静电驱动和垂直检

测,有利于提高陀螺的灵敏度,采用的三框架结构保证陀螺在驱动和检测模式的运动完全独立,从结构本身有效抑制了机械耦合对器件造成的误差。陀螺的工作仅涉及平面内运动,制作的陀螺灵敏度等性能参数具有很好的片间一致性。

差分驱动方式的采用可有效消除静电力分布不均匀所引起的模式耦合,提高陀螺的灵敏度,驱动模式频率与敏感模式频率匹配很好。这种三框架结构在驱动方向采用折叠梁和蟹型梁双弹簧驱动设计,增大了陀螺在驱动方向的位移,在检测方向也采用双蟹型梁检测设计,使得检测方向的振幅也增大。在加工方面采用体硅工艺加工,硅玻璃键合工艺,以硅为材料的微机械结构,可以实现大批量制造,工艺过程简单。具有一定的实用价值。

参考文献:

- [1] 刘俊,石云波,李杰.微惯性技术[M].电子工业出版社,2005.
- [2] 李锦明.电容式微机械陀螺仪设计[M].北京:国防工业出版社,2006.
- [3] William Albert Clark. Micromachined Vibratory Rate Gyroscope[D]. University of California, Berkeley:thesis of doctor.
- [4] Xie Huikai, Gary K. Fedder, Vertical Comb-Finger Capacitive Actuation and Sensing for COMS-MEMS[J]. Sensors and Actuators, 2002, A95:212-221.
- [5] 熊敏敏,王寿荣,袁安萍.三自由度水平轴硅微机械陀螺结构设计仿真,2004,2(3):225-228.
- [6] 王元山,王寿荣,许宜申.一种解耦的微机械陀螺研究[J].中国惯性技术学报,2006,14(3):56-58.
- [7] 李林,李锦明,张文栋.梳齿式微机械陀螺支撑系统的结构仿真与分析[J].传感技术学报.2006,19(4)1144-1147.
- [8] 霍明学,陈伟平,曹一江.体硅微机械陀螺的设计与模拟[J].哈尔滨工业大学学报.2005,37(9)1196-1199.



李锦明(1971-),男,副教授,山西省微米纳米工程技术研究中心主任助理。主要从事 MEMS 及微机械陀螺方面的研究。



郭慧芳(1983-),女,硕士研究生,中北大学微电子学与固体电子学专业,主要从事 MEMS 技术及传感器方面研究,ghf418@sina.com.



刘俊(1968-),男,教授,博士生导师。现任“仪器科学与动态测试”教育部国家重点实验室常务副主任,中国兵工学会测试技术专业委员会秘书长。主要研究方向为微纳机电系统中的微惯性技术、武器系统高冲击和高压高温恶劣环境下的惯性测量,liuj@nuc.edu.cn.