

抗过载微陀螺结构的高灵敏设计与仿真

褚伟航^{1,2,3}, 李孟委^{1,2,3}, 王 宾^{1,2,3}, 吴承根^{1,2,3}

(1. 中北大学 电子测试技术国家重点实验室, 山西 太原 030051; 2. 中北大学 仪器与电子学院, 山西 太原 030051;

3. 中北大学 微系统集成研究中心, 山西 太原 030051)

摘 要:为解决高过载微陀螺难以实现高灵敏检测的问题,设计了一种高灵敏且高过载的微陀螺结构。设计的微陀螺结构驱动模态与检测模态的频率高度匹配,提高了微陀螺的结构灵敏度。该微陀螺采用面内检测方式,驱动与检测模态阻尼类型主要为滑膜阻尼,实现了在大气压环境下微陀螺的高品质因数 Q 值设计。微陀螺均采用双悬臂梁设计,增加了微陀螺结构的稳定性,进而提高了其抗过载能力。最后通过微陀螺的器件级仿真,得到了所设计陀螺结构在驱动方向过载能力约为 $100\ 000g$ ($g=9.8\text{ m/s}^2$),检测方向过载能力约为 $70\ 000g$ 的前提下,结构灵敏度为 $53\text{ nm}/[({}^\circ)/\text{s}]$ 。

关键词:微机电系统(MEMS)陀螺;结构设计;结构灵敏度;高过载

中图分类号:TM153;TH703

文献标识码:A

High-Sensitivity Design and Simulation of a High Overload MEMS Gyroscope Structure

CHU Weihang^{1, 2, 3}, LI Mengwei^{1, 2, 3}, WANG Bin^{1, 2, 3}, WU Chenggen^{1, 2, 3}

(1. Science and Technology on Electronic Test & Measurement Laboratory, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China;

3. Center for Microsystem Integration North University of China, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In order to solve the problem of highly sensitive detection of high overload micro gyroscope, a micro gyroscope structure with high sensitivity and high overload. The frequencies of the designed micro-gyroscope at the driving modal and detection modal are highly matched, thus the structure sensitivity are improved. The in-plane detection approach is adopted and the typical damping type of the driving and detection modals is synovial damping. The high Q -factor design of the micro gyroscope at atmospheric pressure is realized. The proposed micro-gyro adopts double cantilever beam design, thus the stability of the micro gyroscope structure is increased, and the anti-overload ability is improved. The device-level simulation of the proposed micro-gyro show that its structural sensitivity is $53\text{ nm}/[({}^\circ)/\text{s}]$ under the situations of about $100\ 000g$ ($g=9.8\text{ m/s}^2$) of the computational overload capacity in driving direction and of about $70\ 000g$ of the computational overload capacity in detection direction.

Key words: micro-electro-mechanical system (MEMS) gyroscope; structure design; structure sensitivity; high overload

0 引言

在战术导弹、智能炮弹的应用背景下,提高恶劣环境下微机电系统(MEMS)陀螺的可靠性非常必要。微陀螺敏感梁在冲击作用下断裂是导致其失效的主要原因之一。然而提高微机械陀螺过载能力,常通过提高梁的刚度实现,这将降低微陀螺的检测

灵敏度,影响微陀螺的检测精度。

迄今为止,研究人员已开展了大量关于 MEMS 器件抗过载特性的研究,试图提高其在大冲击环境下的可靠性与灵敏度^[1-6]。2005 年,上海微系统所与同济大学联合研制了一款音叉式微机械陀螺,驱动模态固有频率为 $2\ 507\text{ Hz}$,检测模态固有频率为

收稿日期:2015-12-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61571405;62201070516);山西省攻关基金资助项目(20130322005-4)

作者简介:褚伟航(1989-),女,吉林松原人,硕士生,主要从事微纳器件及系统方面的研究。导师简介:李孟委,男,副教授,主要开展新原理 MEMS 惯性传感器及导航研究,专注于 MEMS 陀螺研究,对新原理、新效应的微纳器件创新设计感兴趣。

2 112 Hz。测试结果显示该陀螺的抗过载能力为 2 000g($g = 9.8 \text{ m/s}^2$),而其灵敏度仅为 6 mV/[$(^\circ)/\text{s}$]^[7-8]。同济大学与上海微系统所于 2013 年优化 2005 年所设计的音叉式陀螺,专门针对高 g 值冲击环境。该陀螺是在一个 300 μm 的硅片上利用体硅微加工技术制作的。该微陀螺结构有抗震阻挡器的设计,通过阻挡器的作用,抗过载能力可提高约 300%。冲击实验表明,该陀螺沿 x 轴的抗冲击能力为 15 000g, y 方向的抗过载能力为 14 000g, z 方向的抗过载能力为 11 000g。然而测试得到所设计微陀螺驱动模态频率为 10 236 Hz,检测模态频率为 11 158 Hz,频率差为 922 Hz,微陀螺的结构灵敏度水平不理想^[9]。

本文提出并设计了一款微机械陀螺结构,采用电磁驱动,磁阻检测。驱动方向的位移不受限于梳齿结构,仅需考虑梁的线性工作范围及梁与质量块的间隙。通过增大驱动方向位移幅值及微陀螺模态匹配的设计可有效提高微陀螺的位移灵敏度,通过牺牲位移灵敏度的冗余量来提高过载能力,解决高过载微陀螺的高灵敏检测问题。

1 磁阻微陀螺的设计

1.1 磁阻微陀螺检测原理

图 1 为磁阻效应微陀螺的原理。微机械陀螺的柯氏力(F_c)驱动磁体远离或靠近磁敏电阻,二者间距发生了变化,使磁敏电阻敏感到的磁场发生变化,磁场变化引起磁敏电阻中电流发生变化,从而导致磁敏电阻的阻值发生剧烈变化,通过测量阻值变化能实现对微弱柯氏力的检测。其中,磁阻变化量与磁场变化成几何数增长^[10],而磁场变化与间距变化成指数关系,所以磁阻效应对间距的变化极其灵敏。

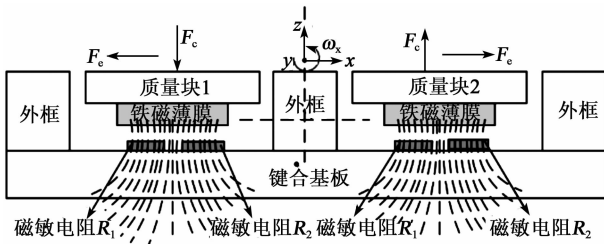


图 1 磁阻效应微陀螺原理图

1.2 磁阻微陀螺的结构设计

通过深入研究现有的微机械陀螺结构,结合本报告中微机械陀螺的检测原理,提出微陀螺结构的设计方案如图 2 所示。

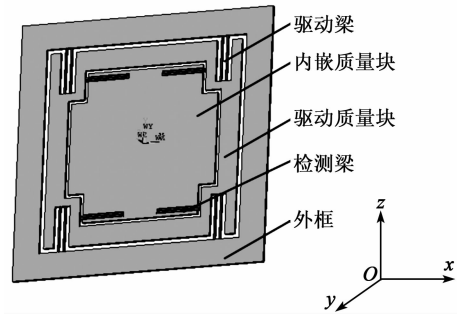


图 2 磁阻微陀螺结构图

表 1 微陀螺结构尺寸

质量块边长/ μm	驱动梁长/ μm	检测梁长/ μm	驱动梁厚/ μm	驱动梁运动间隙/ μm
3 000	787	688	45	68
质量块厚/ μm	驱动梁宽/ μm	检测梁宽/ μm	检测梁厚/ μm	检测梁运动间隙/ μm
45	19	14	45	15

此结构采用内嵌质量块的结构形式,实现检测模态与驱动模态间的解耦,采用面内检测方式,主要由驱动梁、检测梁、驱动质量块、内嵌质量块等组成,通过检测梁将驱动质量块与内嵌质量块连接在一起,通过驱动梁将驱动质量块与外框架连接固定。当微陀螺在驱动模态运动时,内嵌质量块充当驱动质量块,在驱动模态(x 轴)作简谐振动。当微陀螺受到柯氏力的作用在检测方向(y 轴)运动时,驱动质量块在检测方向无自由度,内嵌质量块起到检测质量块的作用,由于检测梁的支撑作用,内嵌质量块在驱动方向无自由度,实现了结构的解耦。此结构点有:

- 1) 采用解耦结构设计,检测模态采用内嵌质量块,有效减小了驱动模态和检测模态之间的机械耦合。在磁场设计时,采用驱动磁场与检测磁场分离设计,可有效避免驱动磁场与检测磁场之间的耦合。
- 2) 采用电磁驱动方式,可避免由于静电梳齿结构的梳齿电压击穿,横向冲击时会导致吸合失效的问题。易加工,且前期项目已成功验证电磁驱动的可行性^[11]。
- 3) 双悬臂梁的设计,易加工,振动平稳,可以增加微陀螺的抗冲击能力。
- 4) 面内检测方式,相比于离面检测可有效减小检测模态的阻尼,在大气压环境下可实现较高的品质因数。
- 5) 通过对结构尺寸的设计,达到微陀螺模态频率匹配的效果,模态匹配可提高微陀螺的机械灵敏度。在模态匹配的前提下,可降低机械灵敏度对刚度的要求,结合双悬臂梁的设计,可实现微陀螺较高的过载能力。

微机械陀螺设计中品质因数、结构灵敏度、陀螺带宽及过载能力等参数是重要的设计参量,且

$$Q_x = \frac{1}{2\xi_x} = \frac{m_x \omega_n}{c_x} \quad (1)$$

$$S_y = \frac{B_y}{\Omega} = \frac{2 \cdot F_0 \cdot \omega_d \cdot Q_x}{m_x \cdot \omega_x^2 \cdot \omega_y^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\omega_d}{\omega_y}\right)^2\right)^2 + \frac{1}{Q_y^2} \left(\frac{\omega_d}{\omega_y}\right)^2}} \quad (2)$$

$$BW = \frac{\omega_n}{Q_y} = 2\xi_y \omega_n \quad (3)$$

$$a_{x,\max} = -4\pi^2 f_x^2 x \quad (4)$$

$$a_{y,\max} = -4\pi^2 f_y^2 y \quad (5)$$

式中: F_0 为微陀螺的驱动力; ω_n 为驱动模态固有频率; ω_d 为驱动方向频率; Q_x 为驱动方向品质因数; Q_y 为检测方向品质因数; m_x 为驱动方向质量; ω_x 为驱动方向固有圆频率; ω_y 为检测方向固有圆频率; c_x 为驱动方向阻尼; ξ 为阻尼比; S_y 为微陀螺的结构灵敏度; BW 为带宽; $a_{x,\max}$ 为驱动方向最大过载能力; $a_{y,\max}$ 为检测方向最大过载能力; f_x 为驱动方向固有频率; f_y 为检测方向固有频率; x 为驱动梁的有效运动距离; y 为检测梁的有效运动范围。

2 磁阻微陀螺的 ANSYS 仿真分析

2.1 磁阻微陀螺的模态分析

利用 ANSYS 软件对微陀螺结构进行模态分析,得到其前四阶模态如图 3 所示。一阶模态为驱动模态,二阶模态为检测模态,仿真验证微陀螺的驱动与检测模态的频率匹配度很好,频率差仅为 1 Hz。表 2 为陀螺各阶频率仿真值。

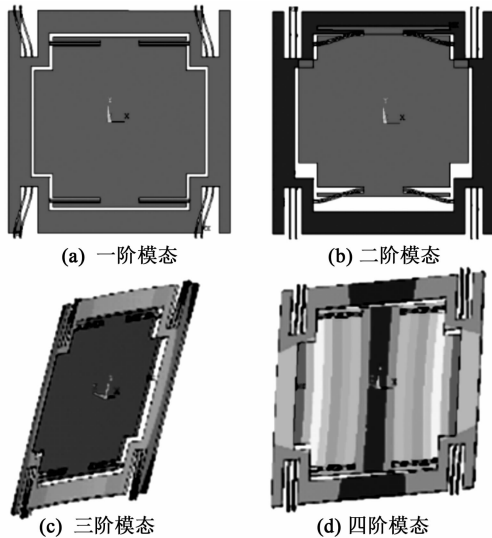


图 3 微陀螺模态仿真

表 2 陀螺各阶频率仿真值

模态	一阶	二阶	三阶	四阶
模态频率/Hz	5 923	5 924	8 429	12 522

微陀螺阻尼的计算可参考文献[12],考虑微陀螺悬臂梁的阻尼及质量块与边框间的阻尼,计算结果较精确,结合仿真得到的驱动模态固有频率,利用式(1)可求得大气压环境下 $Q_x = 2\,920$, $Q_y = 2\,900$;利用式(3)得到微陀螺的带宽约为 12 Hz;利用式(4)、(5)求得微陀螺驱动方向最大过载能力为 96 946g,检测方向最大过载能力为 69 262g。

2.2 磁阻微陀螺的振动特性仿真

在驱动方向上加载 $6\,\mu\text{N}$ 的正弦交变力时,仿真得到驱动方向幅频响应曲线如图 4(a)所示,检测方向幅频响应曲线如图 4(b)所示。在驱动方向加载驱动位移幅值载荷 $1.386 \times 10^{-5}\text{m}$,进行瞬态分析得到驱动方向位移仿真结果如图 5 所示。

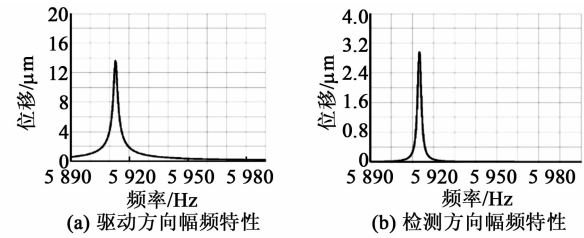


图 4 磁阻微陀螺谐振特性分析

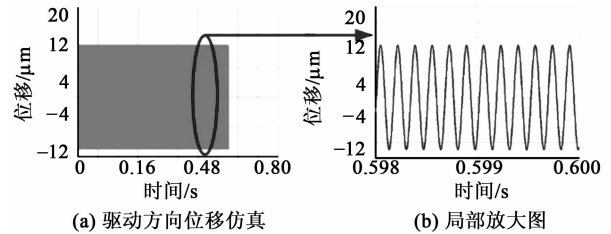


图 5 驱动方向瞬态分析结果

在检测方向上施加 $2\,\text{rad/s}$ 的角速率,得到检测方向瞬态分析结果如图 6 所示。

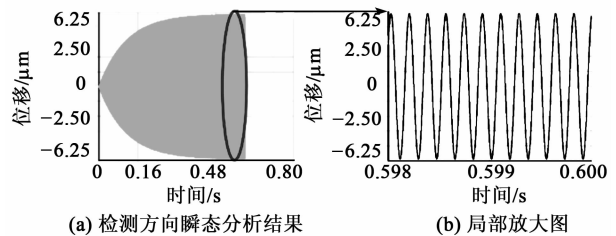


图 6 检测方向瞬态分析结果

由图 6 可知,在输入角速率为 $2\,\text{rad/s}$ 时,得到检测方向位移幅值为 $6.249 \times 10^{-6}\text{m}$,将其代入式(2)可得微陀螺位移灵敏度约为 $53\,\text{nm}/[({}^\circ)/\text{s}]$ 。

3 结束语

本文提出一种新原理检测微机械陀螺,利用隧道磁阻效应的高灵敏特性应用于微弱柯氏力检测中,实现隧道磁阻微陀螺的高灵敏检测。对微陀螺结构设计过程中,通过微陀螺驱动模态与检测模态频率匹配的方式获得较高的结构灵敏度为 $53 \text{ nm}/[({}^{\circ})/\text{s}]$ 。该陀螺采用面内检测的方式,故驱动模态与检测模态的阻尼类型主要为滑膜阻尼,实现了在大气压环境下微陀螺高品质因数的设计,驱动模态品质因数为 2 920,检测方向品质因数为 2 900。通过双悬臂梁的设计,提高了微陀螺的刚度与稳定性,进而提高了其抗过载能力,通过理论计算得到驱动方向最大过载能力约为 $100\ 000g$,检测方向最大过载能力约为 $70\ 000g$ 。

参考文献:

- [1] 王世涛,贾玉斌,张斌珍,等. 微加速度计冲击可靠性及防护[J]. 传感技术学报,2010,23(12):1690-1694.
WANG Shitao, JIA Yubin, ZHANG Binzhen, et al. Study on reliability and cushion for micro accelerometer in shock environment[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2010,23(12):1690-1694.
- [2] 刘勤,张威,郝一龙. 用于高冲击检测硅基三轴集成压阻式 MEMS 加速度芯片的建模与仿真[J]. 传感技术学报,2012,25(1):11-19.
LIU Meng, ZHANG Wei, HAO Yilong. Modeling and simulation of a silicon integration tri-axial piezoresistive MEMS accelerometer chip used for high impact test[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2012,25(1):11-19.
- [3] 揣荣岩,孙瑞,刘晓为,等. 高灵敏压力传感器过载保护结构设计[J]. 传感技术学报,2011,24(5):675-678.
CHUAI Rongyan, SUN Rui, LIU Xiaowei, et al. Overload protection design of high-sensitivity pressure sensor[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2011,24(5):675-678.
- [4] HARTZELL A, SILVA M G, SHEA H R. MEMS reliability[M]. New York:IEEE International Integrated Reliability Workshop Final Report,2011:85-110.
- [5] SUNDARAM S, TORMEN M, TIMOTIJEVIC B, et al. Vibration and shock reliability of MEMS: modeling and experimental validation[J]. J Micromech Microeng,2011, 21(4):1-13.
- [6] JIANG T, ZHOU J, FENG F. Study on designs of stoppers for MEMS devices in shock environment[J]. Appl Mech Mater,2012, 184 (185):510-515.
- [7] CHEN Y, JIAO J, XIONG B, et al. A novel tuning fork gyroscope with high Q-factors working at atmospheric pressure[J]. Microsyst Technol,2005,11(2):111-116.
- [8] JIANG T, WANG A L, JIAO J W, et al. Detection capacitance analysis method for tuning fork micromachined gyroscope based on elastic body model[J]. Sens Actuators A,2006,128(1):52-59.
- [9] ZHOU Jian, JIANG Tao, JIAO Jiwei, et al. Design and fabrication of a micromachined gyroscope with high shock resistance[J]. Microsyst Technol,2014,20(1):137-144.
- [10] MOODERA J S, KINDER L R, NOWAK J, et al. Geometrically enhanced magnetoresistance in ferromagnet-insulator-ferromagnet tunnel junctions[J]. Appl Phys Lett, 1996, 69(5):708.
- [11] 李孟委. 基于砷化镓的介观压阻效应微机械陀螺研究[D]. 太原:中北大学,2010.
- [12] 白晓晓,李孟委,褚伟航,等. 谐振式微陀螺中通孔质量块阻尼建模研究[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2015,36(3):366-371.
BAI Xiaoxiao, LI Mengwei, CHU Weihang, et al. Damping model analysis of a perforated mass in a micro resonator gyroscope[J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition),2015,36(3):366-371.