

文章编号 1004-924X(2014)09-2381-08

硅微陀螺仪零偏稳定性的优化

赵 阳, 裘安萍, 施 芹, 夏国明*, 赵 健
(南京理工大学 MEMS 惯性技术研究中心, 江苏 南京 210094)

摘要: 为了进一步提高硅微陀螺仪的零偏稳定性, 使其满足更高精度应用场合的需求, 研究了硅微陀螺仪零偏稳定性优化技术。以典型 Z 轴硅微陀螺仪为例, 对影响其零偏稳定性的主要因素: 机械耦合误差、电路耦合误差、机械热噪声、接口电路噪声进行了完整分析, 并从抑制零偏温度漂移及输出噪声两个角度提出了改善硅微陀螺仪零偏稳定性的设计原则。基于上述原则, 优化设计了硅微陀螺仪的机械结构及接口电路。最后对所设计的硅微陀螺仪进行了零偏稳定性测试, 以验证所提出优化设计原则的有效性。实验结果表明, 4 个测试组的硅微陀螺仪零偏输出均无明显漂移, 且零偏稳定性在 $6 (^{\circ})/h$ 左右, 达到了中等战术级水平。

关键词: 硅微陀螺仪; 零偏稳定性; 机械耦合误差; 前置接口放大器

中图分类号: TH824 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142209.2381

Optimization of bias stability for silicon microgyroscope

ZHAO Yang, QIU An-ping, SHI Qin, XIA Guo-ming*, ZHAO Jian

(MEMS Inertial Technology Research Center,
Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

* Corresponding author, E-mail: xiaguoming@njust.edu.cn

Abstract: To improve the bias stability of a silicon microgyroscope for more precise applications, the optimization of bias stability for the silicon microgyroscope was explored. By taking a typical Z-axis silicon microgyroscope for an example, zero-rate output errors of a typical Z-axis silicon microgyroscope caused by mechanical coupling, electrical coupling, mechanical thermal noise and interface circuit noise were analyzed. On the basis of decreasing the drift and noise of zero-rate outputs, the design principle to improve the bias stability of the silicon microgyroscope was proposed. The mechanical structure and interface circuits for the silicon microgyroscope were designed. To verify the availability of the design principle, the bias stability of the silicon microgyroscope was tested. Experimental results indicate that the zero-rate outputs of four tested silicon microgyroscopes are no obvious drifts, and their bias stabilities are at the level of $6 (^{\circ})/h$. It suggests that the proposed silicon microgyroscope has reached a medium tactical precision grade.

Key words: silicon microgyroscope; bias stability; mechanical coupling error; interface preamplifier

收稿日期: 2014-01-18; 修订日期: 2014-03-04.

基金项目: 武器装备预研基金资助项目 (No. 9140A09011011BQ02); 国家 863 高技术研究发展计划资助项目

1 引言

硅微陀螺仪具有体积小、成本低、可批量生产、易于与电子线路集成等优点,因此其在军事及民用领域都具有广阔的应用前景^[1-3]。近年来,硅微陀螺仪在汽车安全、相机图像稳定、手机及游戏控制器姿态感知等领域得到了广泛的应用。耶鲁大学 2011 年的报告指出,在 2011~2016 年间硅微陀螺仪的市场份额将增长 10% 以上^[4]。虽然发展迅猛,但硅微陀螺仪的性能还未达到更高精度惯性级器件的水平,其中零偏稳定性水平是制约其应用的最大障碍。目前美国 Draper 实验室、JPL 实验室、佐治亚理工大学、加州伯克利大学在相关方面的研究处于领先地位,其研制的硅微陀螺仪零偏稳定性水平在 $0.1 \sim 10$ ($^{\circ}$)/h 量级^[5-8],可满足中高精度战术级器件的应用需求。国内院校在该方面的研究与国外先进水平尚存在一定差距,目前的零偏稳定性水平在 $10 \sim 20$ ($^{\circ}$)/h 量级^[9-10]。因此对于硅微陀螺仪零偏稳定性的分析与研究具有重要意义。

本文以典型 Z 轴硅微陀螺仪为例(同样适用于其他科里奥利硅微陀螺仪),首先分析了影响其零偏稳定性的各项因素,并在此基础上提出了优化硅微陀螺仪零偏稳定性的设计原则,最后对采用以上设计原则所制造的硅微陀螺仪进行了零偏稳定性的实验测试,验证了所提出优化设计原则的有效性。

2 硅微陀螺仪概述

2.1 硅微陀螺仪结构及工作原理

针对如图 1 所示的 Z 轴硅微陀螺仪进行研究,基于科里奥利效应来敏感 Z 轴向输入角速度。X 轴方向为其驱动轴向,利用梳齿结构产生的静电力进行驱动;Y 轴方向为其检测轴向,通过检测极板间电容的变化来检测 Z 轴方向的输入角速度,同时检测极板构成差分输出。

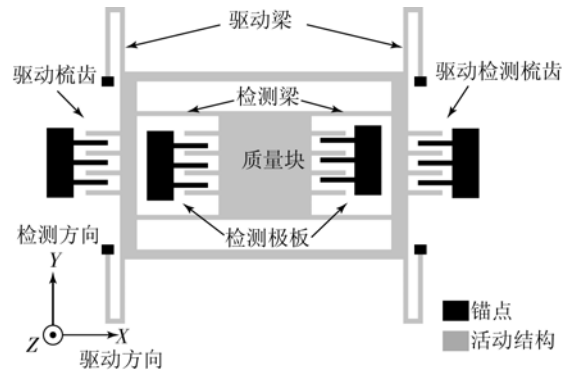


图 1 硅微陀螺结构示意图

Fig. 1 Sketch of structure for silicon microgyroscope

2.2 硅微陀螺仪接口电路

硅微陀螺仪接口电路如图 2 所示,其驱动环路采用典型的闭环自激振荡电路使陀螺振荡在其谐振频率处的自动增益控制(Automatic Gain Control, AGC)环节使其保持稳定的振荡速度来提供检测方向科里奥利力的基准。检测电流经过前置放大器放大后与来自驱动环路的基准信号进行解调,再经过低通滤波滤除高频谐波后得到正比于输入角速度的直流输出信号 V_{out} 。

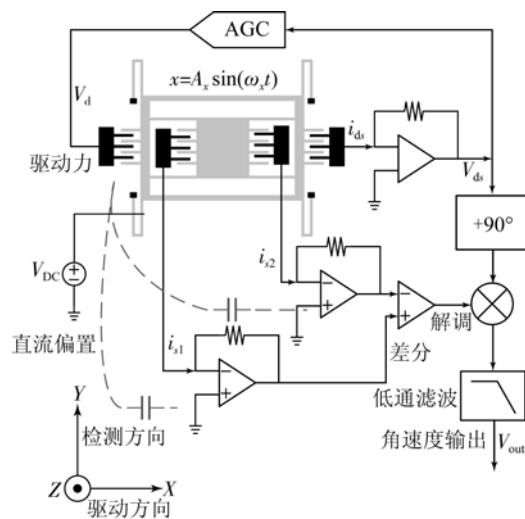


图 2 硅微陀螺仪接口电路示意图

Fig. 2 Sketch of interface circuits for silicon microgyroscope

3 硅微陀螺仪零偏稳定性分析

3.1 零偏稳定性定义及模型

零偏稳定性是指硅微陀螺仪在零输入角速度情况下输出信号的稳定程度,是衡量硅微陀螺仪

刚度耦合误差 Ω_{ze1} 与驱动位移同相,与有用检测信号相差 90° , 阻尼耦合 Ω_{ze2} 与驱动速度同相,与有用检测信号同相。为了降低零偏漂移,必须将式(7)和式(8)两误差项降至最低,且使得 Ω_z/x_y 环节的幅度及相位随温度变化最小。

刚度耦合误差是由于工艺加工误差使得支撑梁宽度不对称, X 方向驱动力在检测 Y 方向引起位移所造成的^[15]。如果支撑梁宽度为 ω , 工艺加工偏差为 $\delta\omega$, 支撑梁数量为 n , 刚度耦合误差可表示为:

$$\Omega_{ze1} \approx \frac{3\sqrt{nk_{yr}}}{2\omega_x m_x} \times \frac{\delta\omega_{rms}}{\omega} = \frac{3\sqrt{nk_{yr}}}{2k_x} \times \frac{\omega_x m_x}{m_y} \times \frac{\delta\omega_{rms}}{\omega}. \quad (9)$$

可知,降低刚度耦合误差可通过降低驱动方向谐振频率,增大梁宽,减小相对刚度耦合系数 k_{yr}/k_x 来实现。由文献[16]可知,采用折叠梁或 U 型梁可获得最小的相对刚度耦合系数 k_{yr}/k_x 。同时为了降低硅微陀螺仪对外界环境振动的敏感度,驱动方向的谐振频率需保持在几千赫兹以上,在此设计中,驱动谐振频率设定为 4 kHz 左右,以获得较低的刚度耦合误差并有效地隔离外界环境振动影响。

阻尼耦合误差来源于驱动梳齿间的间距不对等,使得 X 方向驱动力耦合至 Y 方向,该误差相比于刚度耦合误差要小得多,其对于零偏稳定性的影响也较小^[16]。该项误差的降低有赖于驱动梳齿设计时的对称性及加工工艺水平的提高,此外由式(7)可知,增大质量块的质量可以降低该项误差,采用体硅工艺可刻蚀出更深的结构层,获得更大的质量块体积,有利于降低该项误差^[17]。

由式(5)、(6)可知,检测频率与驱动频率的频差 $(\omega_y - \omega_x)$ 及检测方向品质因数 Q_y 决定了 Ω_z/x_y 环节的增益及相移,同时决定了其随温度(频率、品质因数)的变化趋势,需合理设计。由图 4 可知增大频差 $\omega_y - \omega_x$, 增大 Q_y 可降低其变化对 $K_3(\omega_x)$ 、 $\varphi_3(\omega_x)$ 的影响,可以降低 Ω_z/x_y 环节的温度系数。采用真空封装可实现极高的品质因数 Q_y (大于 10 000)^[18], 频差的增大虽然可以降低其温度系数,但会降低 Ω_z/x_y 环节的增益,在此设计中选择频差在 400 Hz 左右,在保证 Ω_z/x_y 环节足够增益的情况下降低其温度系数。

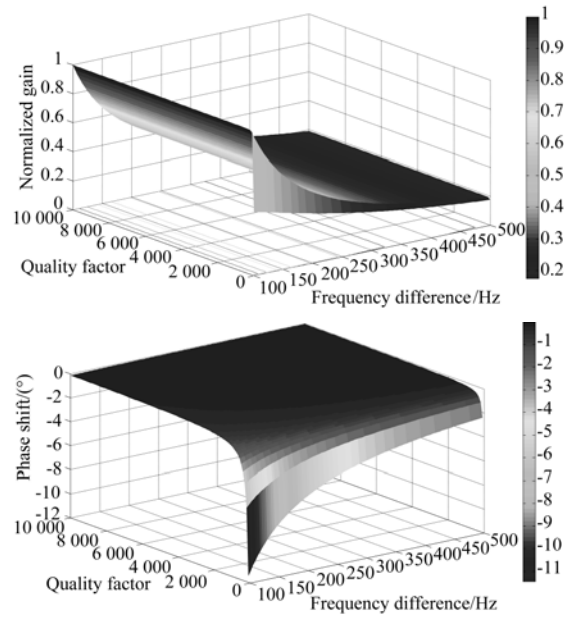


图 4 Ω_z/x_y 环节增益及相移与频差及品质因数关系
Fig. 4 Gain and phase of Ω_z/x_y for different $(\omega_y - \omega_x)$ and Q_y

3.3 电路耦合

除了机械耦合,来自硅微陀螺仪接口电路间的耦合也构成了一部分零偏误差。图 2、3 中由驱动极板至检测极板间的寄生电容形成了电路耦合的主要路径,该寄生电容将驱动信号耦合到了检测路径,形成了零偏误差,该角速度误差为:

$$\Omega_{ze3} = \frac{\omega_x C_P V_d}{K_3(\omega_x) K_4(\omega_x)}, \quad (10)$$

式中: C_P 为寄生电容值, V_d 为陀螺驱动电压幅值。在驱动环路中,陀螺驱动位移幅值可表示为:

$$A_x = V_d \times K_1(\omega_x) = \frac{V_d Q_x}{m_x k_x}. \quad (11)$$

硅微陀螺仪的驱动位移由所需要的量程、标度因数等指标直接决定,是一个确定量,将式(11)带入式(10)可得:

$$\Omega_{ze3} = \frac{\omega_x C_P A_x m_x k_x}{K_3(\omega_x) K_4(\omega_x) Q_x} = \frac{\omega_x^3 C_P A_x m_x^2}{K_3(\omega_x) K_4(\omega_x) Q_x}. \quad (12)$$

由此可知,降低驱动谐振频率 ω_x , 合理设计版图减小寄生电容 C_P , 合理选择频差 $(\omega_y - \omega_x)$ 增大 $K_3(\omega_x)$ 增益,增大检测梳齿数量增大 $K_4(\omega_x)$ 增益,采用真空封装增大驱动方向品质因数 Q_x 可降低该角速度误差项。降低该部分误差信号随温度漂移的方法与抑制机械耦合误差温度漂移的方法一致。

3.4 机械噪声

硅微陀螺仪的机械热噪声主要是由弹性梁等机械部件的分子热运动及气体分子的热运动引起的陀螺结构随机波动造成的^[19]。阻尼是耗能元件,其能量通过热量而散失,故机械热噪声主要由结构阻尼决定,其噪声波动力可由谱密度的形式表示为:

$$f_n = \sqrt{4k_B T c B} (N / \sqrt{Hz}), \quad (13)$$

式中: k_B 为波尔兹曼常数; T 为绝对温度; c 为振动阻尼; B 为陀螺带宽。

将驱动和检测方向的随机波动力考虑在内可得到硅微陀螺动力学方程为:

$$m_x \ddot{x} + c_x \dot{x} + k_x x = f_x + f_{nx}, \quad (14)$$

$$m_y \ddot{y} + c_y \dot{y} + k_y y = -2 m_y \Omega_x \dot{x} + f_{ny}, \quad (15)$$

式中: f_{nx} 为驱动方向的噪声波动力, f_{ny} 为检测方向的噪声波动力。

由(14)、(15)可得到由于机械热噪声引起的等效输入角速度为:

$$\Omega_{ze4} = \frac{\sqrt{k_B T c_y B}}{m_y A_x \omega_x} = \sqrt{\frac{k_B T \omega_y B}{m_y A_x^2 \omega_x^2 Q_y}}. \quad (16)$$

采用真空封装增大检测方向品质因数 Q_y , 采用体硅工艺增大检测质量 m_y , 增大驱动谐振频率可有效地降低机械热噪声引起的角速度误差。

3.5 前置接口电路

对于采取了真空封装的高 Q 值硅微陀螺仪, 其接口电路的噪声水平比机械噪声零偏稳定性的影响更大, 同时接口电路各个环节也应具有低的温度系数, 并提供足够高的增益以满足标度因数的需求。

由接口电路引起的误差角速度可表示为:

$$\Omega_{ze5} = \frac{\sqrt{i_n^2 B}}{K_3(\omega_x) K_4(\omega_x)}, \quad (17)$$

式中: i_n^2 为接口电路的等效输入电流噪声功率密度, B 为陀螺仪带宽。由此可见该误差项的降低除了增大 $K_3(\omega_x)$ 、 $K_4(\omega_x)$ 的增益以外, 必须降低接口电路自身的输入电流噪声。

i_y/v_y 的前置接口电路是整个接口电路中最主要的噪声源, 因此设计具有高增益、低噪声、高的幅值及相位稳定性的前置接口电路对于提高零偏稳定性具有至关重要的意义。

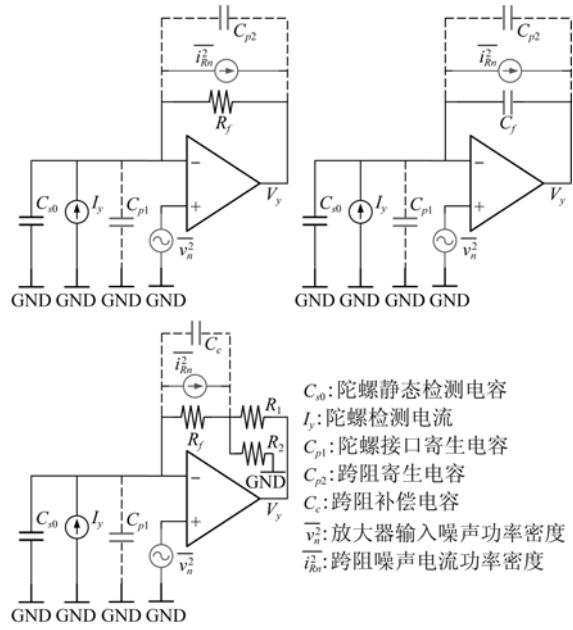


图 5 3 种前置接口电路示意图

Fig. 5 Schematic illustration of three kinds of front-end

硅微陀螺仪的前置放大器用于完成电流至电压的转换, 由于陀螺检测端输出的电流信号十分微弱, 因此前置放大器一般需要的增益较高, 在几十兆欧至百兆欧量级。在硅微陀螺仪的接口电路中, 前置放大器的实现主要有电容式及电阻式两种方式。

由于电容元件自身无噪声, 因而电容式放大器相比与电阻式放大器的噪声水平更低; 然而电容式放大器的增益正比与 $1/\omega_x C_f$, 直接与 ω_x 相关, 这将使得其容易受到温度变化的影响; 同时在几十~百兆欧增益的应用需求下, C_f 量值在 $0.2 \sim 1$ pF 左右, 然而其两端寄生电容 C_{p2} 的量级也在 0.5 pF 左右, 因此其最大增益及工作特性将极大程度地受到 C_{p2} 的限制。前文中提到采用体硅加工的制造工艺及增大检测梳齿的数量有助于零偏稳定性的提升, 这些措施都增大了陀螺的静态检测电容 C_s , 该电容在 6 pF 左右, 同时在陀螺表头与电路的接口处通常也存在几个皮法的寄生电容, 前置放大器的噪声将被 $(C_s + C_{p1}) / (C_f + C_{p2})$ 的比例放大, 当 C_f 较小时, 噪声性能也较差。

对于电阻式前置放大器, 在高增益的应用情况下, R_f 在几十~百兆欧量级, R_f 与其两端的寄生电容 C_{p2} 形成的极点将严重限制其可实现的最大增益及带宽, 使得其增益及相移都很大程度地依赖于 ω_x , 即温度的变化, 这种影响对于相移尤

为明显。

以上两种形式的前置放大器其最大增益都受到寄生电容 C_{p2} 的制约,且工作特性都较易受到温度的影响,都不能完全满足硅微陀螺仪的应用需求。本文采用了电阻式前置放大器的改进方案 T 型跨阻式放大器。该形式放大器增益为 $R_{eq} \approx (1 + R_1/R_2)R_f$, 因此 R_f 取较小电阻值依旧可以实现高的增益,大大降低了寄生电容对于可实现的最高增益及带宽的限制,降低了增益及相移随温度的漂移。同时只要合理设计 R_1/R_2 的比例及 R_f 、 C_c 的量值,T 型跨阻式放大器依旧可以实现较低的噪声水平,有关 T 型跨阻式放大器在文献[20]中进行过具体分析。

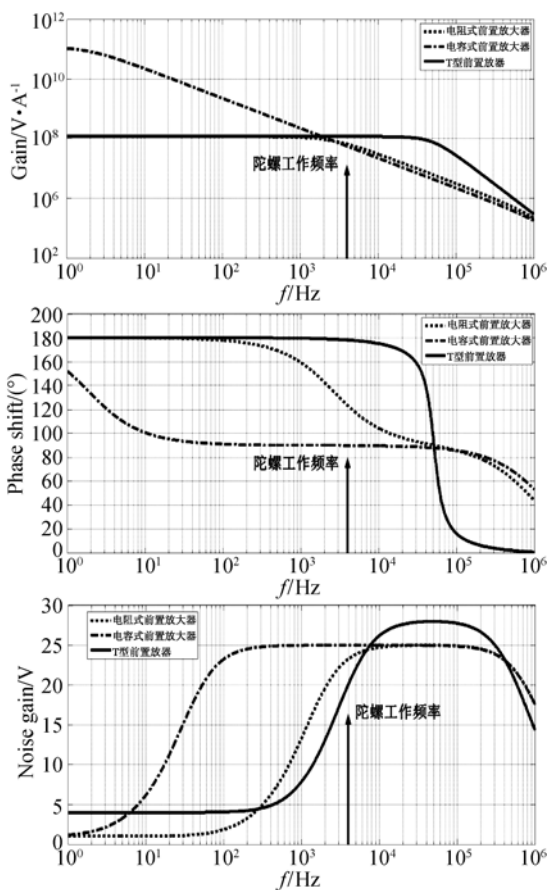


图 6 频率响应及噪声增益对比

Fig. 6 Comparison of frequency response and noise gain

由图 6 的对比可知,T 型跨阻式放大器在硅微陀螺仪的工作频率附近具有较好的增益及相移稳定度,而其他两种前置放大器带宽及增益受到寄生电容 C_{p2} 的限制。由于 $\overline{v_n^2}$ 为检测接口的主导噪声源,因此其增益便直接反映了前置接口电路

的噪声水平,由图 6 的对比可知 T 型前置放大器可实现较低的噪声水平。因此,选择 T 型前置放大器可以满足硅微陀螺仪高零偏稳定性的应用需求。

4 零偏稳定性测试

根据以上原则,对硅微陀螺仪的机械结构及接口电路进行了优化设计。该硅微陀螺仪的设计采用了体硅工艺并进行了真空封装,其结构层厚度达 $80 \mu\text{m}$,增大了其驱动及检测方向的质量。此外真空封装技术极大提升了其 Q 值 ($>10\ 000$),使其可获得良好的机械噪声性能并降低了刚度、阻尼及电路耦合误差。驱动方向的谐振频率设计为 4 kHz 左右(由于梁尺寸的工艺加工误差,实测频率为 3.8 kHz),且驱动与检测的谐振频率保持 400 Hz 左右的频差以保证 Ω_z/x_y 环节的温度鲁棒性并进一步降低其刚度耦合误差。在检测电路中使用了高增益低噪声的 T 型前置放大器,大大降低了其接口电路带来的等效角速度输入噪声。该硅微陀螺仪的关键系统参数如表 1 所示。

表 1 微机械陀螺关键参数

Tab. 1 Key parameters of researched silicon microgyroscope

参数	值
驱动频率 ω_x/kHz	3.8
检测频率 ω_y/kHz	4.2
驱动品质因数 Q_x	75 000
检测品质因数 Q_y	15 000
驱动位移 $A_x/\mu\text{m}$	2.1
驱动质量 m_x/kg	1×10^{-6}
检测质量 m_y/kg	0.96×10^{-6}
接口增益 $K_s(\omega_x)/\text{M}\Omega$	120
标度因数 $\text{SF}/(\text{mV}/(^\circ/\text{s}))$	35
量程 $\text{SR}/(^\circ/\text{s})$	± 300
带宽 BW/Hz	100

根据 IEEE 惯性传感器的测试标准^[11],对 4 只硅微陀螺仪进行零偏稳定性的测试。每组测试 1 h,测试环境无温控设备,且输出信号未进行温

度补偿,由安捷伦 34 401 A 万用表采集得到测试结果如图 7 所示。

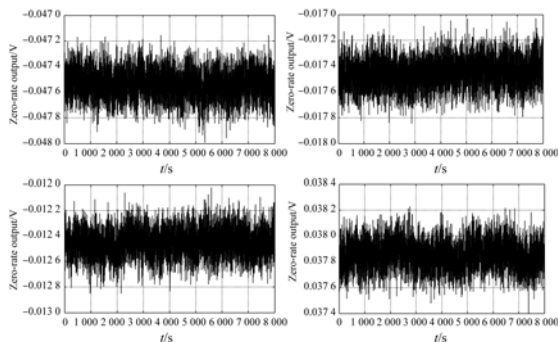


图 7 硅微陀螺仪零偏测试结果

Fig. 7 Zero rate outputs of silicon microgyroscope testing results

由测试结果可知,4 组零偏测试无明显的温度漂移,其 1 h 零偏稳定性如表 2 所示,4 只硅微陀螺仪零偏稳定性都在 $6 (^{\circ})/h$ 左右水平,已达到中等精度战术级水平。

参考文献:

- [1] 刘危,解旭辉,李圣怡. 微机械惯性传感器的技术现状及展望[J]. 光学精密工程, 2003, 11(5): 425-431. LIU W, XIE X H, LI SH Y. Present state and perspectives of micromachined inertial sensors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(5): 425-431. (in Chinese)
- [2] BARBOUR N, SCHMIDT G. Inertial sensor technology trends [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2001, 1(4): 332-339.
- [3] YAZDI N, AYAZI F, NAJAFI K. Micromachined inertial sensors [J]. *Proceedings of the IEEE*, August 1998, 86(8): 1640-1659.
- [4] YOLEDÉVELOPPEMENT. Technology trends for inertial MEMS 2011 [EB/OL]. <http://www.yole.fr>.
- [5] SHARMA A, ZAMAN M F, ZUCHER M, et al.. A $0.1^{\circ}/HR$ bias drift electronically matched tuning fork microgyroscope [C]. *IEEE 21st International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, MEMS 2008, Tucson, 2008*: 6-9.
- [6] JASON K P H. *Modeling and identification of*

表 2 零偏稳定性测试结果

Tab. 2 Testing results of bias stability ($(^{\circ})/h$)

测试组	零偏稳定性
第一组	5.8
第二组	6.1
第三组	5.5
第四组	6.0

5 结 论

本文对影响硅微陀螺仪零偏稳定性的主要因素:机械耦合误差、电路耦合误差、机械热噪声以及接口电路噪声建立了模型并进行了完整分析。基于抑制零偏温度漂移及输出噪声提出了高零偏稳定性硅微陀螺仪的机械结构及接口电路设计原则。最后,对所设计的硅微陀螺仪进行了零偏稳定性测试。测试结果表明 4 只硅微陀螺仪的零偏稳定性都在 $6 (^{\circ})/h$ 左右,可达到中等精度战术级水平,具有较好的应用前景。

the Jet Propulsion Laboratory vibratory rate microgyroscope [D]. American: Mechanical engineering, University of California, 2002.

- [7] JIANG X S. *Capacitive position-sensing interface for micromachined inertial sensors* [D]. America: University of California, Berkeley, 2003.
- [8] Draper Laboratory, The Draper Technology Digest 2004 [EB/OL]. http://www.draper.com/technology_digest.html.
- [9] XIA D ZH, SHENG X, WANG SH R. A digital prototype miniature silicon microgyroscope [C]. *Proceedings of the 2010 5th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, Xiamen, 2010*: 429-432.
- [10] ZHANG R, GAO ZH Y, CHEN Z Y. A bulk micromachined vibrating wheel rate gyroscope [C]. *Proc. of the SPIE the International Society for Optical Engineering. Nanjing, 2001*: 54-58.
- [11] IEEE Std 528-2001. IEEE Standard for Inertial Sensor Terminology [S]. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2001.
- [12] ALLAN D W. Time and frequency (time-domain)

- characterization, estimation, and prediction of precision clocks and oscillators [J]. *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectr., Freq. Control*, 1987, 34(6):647-654.
- [13] HOPCROFT M A, NIX W D, KEENY T W. What is the Young's modulus of silicon [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2010, 19(2):229-238.
- [14] SAUKOSKI M, AALTONEN L, HALONEN K. Zero-rate output and quadrature compensation in vibratory MEMS gyroscopes [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2007, 7(12):1639-1652.
- [15] 施芹, 袁安萍, 苏岩, 等. 硅微陀螺仪的机械耦合误差分析 [J]. *光学精密工程*, 2008, 16(5):894-898.
- SHI Q, QIU A P, SU Y, *et al.*. Mechanical coupling error of silicon microgyroscope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(5):894-898. (in Chinese)
- [16] ARNAUD W. Bias contributions in a MEMS turning fork gyroscope [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2013, 22(2):303-308.
- [17] SHARMA A, ZAMAN M F, AYAZI F. A 104-dB dynamic range transimpedance-based CMOS ASIC for tuning fork microgyroscopes [J]. *Journal of Solid-State Circuits*, 2007, 42(8):1790-1802.
- [18] 施芹, 苏岩, 袁安萍, 等. MEMS 陀螺仪器件级真空封装技术 [J]. *光学精密工程*, 2009, 17(8):1987-1992.
- SHI Q, SU Y, QIU A P, *et al.*. Device level vacuum packaging technologies of MEMS gyroscopes [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(8):1987-1992. (in Chinese)
- [19] GABRIELSON T B. Mechanical-thermal noise in micromachined acoustic and vibration sensors [J]. *IEEE Trans on Electron Devices*, 1993, 40(5):903-909.
- [20] 赵阳, 袁安萍, 施芹, 等. 微机械陀螺检测接口建模及前置放大器优化 [J]. *光学精密工程*, 2013, 21(7):1734-1740.
- ZHAO Y, QIU A P, SHI Q, *et al.*. Modeling of sensing interface for micromachined gyroscope and its front-end optimization [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(7):1734-1740. (in Chinese)

作者简介:



赵 阳(1988—),男,河南洛阳人,博士研究生,2011年于南京理工大学获得学士学位,主要从事 MEMS 惯性技术方面的研究。E-mail: zhaoyang0216@yeah.net

通讯作者:



夏国明(1983—),男,河北冀州人,讲师,2011年于东南大学获得博士学位,主要从事 MEMS 惯性技术方面的研究。E-mail: xiaguoming@njust.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)