

文章编号 1004-924X(2016)05-1050-07

## 常温下硅微谐振加速度计零偏稳定性的提高

严 斌, 尹永刚, 董景新\*

(清华大学 精密仪器系 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084)

**摘要:** 考虑环境温度会影响硅微谐振加速度计(MSRA)的测量精度, 本文研究了谐振梁的频率漂移及抑制方法以便提高其在常温下的零偏稳定性。针对结构热膨胀导致的应力进行了建模仿真, 并根据仿真结果优化设计了一种低热应力的双端固支梁的结构来降低热膨胀系数不匹配带来的频率漂移。实验测得新结构的单梁谐振频率的温度系数从典型结构的约 30 Hz/°C 降为 -1.5 Hz/°C, 与仿真结果 -1.14 Hz/°C 基本一致。为了进一步提高该加速度计的零偏稳定性, 设计了一种高精度测温电路用来补偿温漂, 该电路测温灵敏度为 96.25 mV/°C, 测量噪声约为 0.000 2 °C。实验结果表明, 采用优化后的结构结合线性温度补偿的方法, 可使该硅微谐振加速度计的 1 h 零偏稳定性在常温下达到 10 μg 以下, 比改进前实验室获得的 52 μg 水平提升了 80%, 满足了高精度加速度测量的要求。

**关键词:** 硅微加速度计; 谐振梁; 结构优化; 温度补偿; 零偏稳定性

**中图分类号:** TH824.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162405.1050

## Improvement of bias stability of micromechanical silicon resonant accelerometer at room temperature

YAN Bin, YIN Yong-gang, DONG Jing-xin\*

(State Key Laboratory for Precision Measurement Technology and Instruments,  
Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

\* Corresponding author, E-mail: dongjx@mail.tsinghua.edu.cn

**Abstract:** In consideration of the effect of ambient temperature on the precise measurement of a micromechanical silicon resonant accelerometer (MSRA), the frequency drift of the resonant beam and suppression methods were analyzed to improve its zero-bias stability in the ambient temperature. The stress caused by structural thermal expansion was modeled and simulated and an improved structure with a lower thermal stress was designed and fabricated to reduce the frequency shift caused by non-matching of thermal expansion coefficients. The test experiments show that the temperature coefficient of resonant frequency of the single beam decreases from about 30 Hz/°C to -1.5 Hz/°C, which is close to the simulated value of -1.14 Hz/°C. To further improve the bias stability of the MSRA, a precise temperature measurement circuit was designed to compensate the temperature shift, and the circuit shows its temperature sensitivity to be 96.25 mV/°C and the noise to be 0.000 2 °C. By proposed optimizing structure and linear temperature compensation method, the bias stability of the optimized MSRA is superior to 10 μg within 1 h at the room temperature, which is 80% higher than

收稿日期: 2015-12-11; 修订日期: 2016-01-15.

基金项目: 总装备部十二五预研基金资助项目(No. 20114113015)

previous level of our laboratory ( $52 \mu\text{g}$ ) and satisfies the requirements of high-precision acceleration measurement.

**Key words:** micromechanical silicon resonant accelerometer; resonant beam; structure optimization; temperature compensation; bias stability

## 1 引 言

硅微谐振式加速度计(Micromechanical Silicon Resonant Accelerometer, MSRA)是一种基于双端固支梁谐振原理的微惯性传感器,其输出的频率信号与所测量的加速度呈线性关系,具有成本低、动态范围大和分辨率高等优点,适用于惯性导航系统中<sup>[1]</sup>。受国内微机械结构加工条件限制,目前硅微谐振式加速度计常采用 SOG 工艺加工,该工艺具有流程简单、技术成熟等优点<sup>[2-5]</sup>。

理想情况下,硅微谐振式加速度计输出频率只与所敏感的加速度有关。但是单晶硅的杨氏模量会随温度变化,以及硅、玻璃两种材料的热膨胀系数不一致会引起谐振梁内应力变化<sup>[6]</sup>。这将导致环境温度变化时加速度计输出的频率产生漂移。采用热膨胀系数与硅相近的 Pyrex7740 玻璃作为基底,可以减少热应力的影响,加工中的高温及磨削过程使结构内存在残余应力,老化后可得到一定程度的释放<sup>[7]</sup>。但是若不对结构和电路做特殊设计,普通硅微谐振加速度计仍无法满足高精度测量的需求。

零偏稳定性是反映加速度计精度的关键指标之一<sup>[8]</sup>。当环境温度变化时,零偏稳定性会受到较大影响。此前实验室设计的谐振加速度计的 1 h 零偏稳定性为  $52 \mu\text{g}$ <sup>[9]</sup>,航天十三所优于  $20 \mu\text{g}$ <sup>[10]</sup>,东南大学在 2013 年性能为  $23 \mu\text{g}$ <sup>[4]</sup>,从各研究单位文献中均可以看到性能受温度影响较大。国外报道中性能最好的是美国 Draper 实验室,其在高精度温控下实现了优于  $1 \mu\text{g}$  的零偏稳定性<sup>[1]</sup>。而实现高精度的温控功耗和难度都较大,目前考虑在常温下提高加速度计的性能。常温下传感器温度变化主要来源于两个方面:电路自身发热和外界环境波动。电路在上电后为近似的恒热源,随着热量逐渐平衡,温度上升越来越慢。而外界环境的气温变化虽然较为缓慢,但波动幅值也在  $1^\circ\text{C}$  以上,而且容易受气流、人或物的

干扰。因此要提高谐振加速度计的零偏稳定性,就需要降低温度对传感器的影响。

本文通过研究温度对谐振梁频率影响的模型,进行了理论计算和有限元仿真,提出了减小温度影响的方法——优化结构和温度补偿。实验结果表明,采用优化的结构,在温度补偿后,加速度计的 1 h 零偏稳定性在常温下达到了  $10 \mu\text{g}$  以内。

## 2 谐振梁受温度影响的分析

### 2.1 谐振梁频率-温度模型

谐振梁温度模型已有一些研究<sup>[3,11]</sup>,主要参数如表 1 所示。

表 1 谐振梁的主要参数

Tab. 1 Main parameters of resonant beam

参数	值
等效质量( $m$ )	$4.17 \times 10^{-9} \text{ kg}$
硅杨氏模量( $E$ )	$1.65 \times 10^{11} \text{ Pa}$
硅热膨胀系数( $\alpha_{\text{Si}}$ )	$2.6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
玻璃热膨胀系数( $\alpha_{\text{G}}$ )	$3.25 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
梁的长度( $L$ )	$1.068 \text{ mm}$
梁的宽度( $b$ )	$8 \mu\text{m}$



图 1 双端固支梁结构示意图

Fig. 1 Structure of a typical double-clamped beam

图 1 所示为典型双端固支梁,其谐振频率为:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{199EI}{L^3 M}} \approx 20 \text{ kHz}, \quad (1)$$

其中: $E$ 为硅的杨氏模量, $I$ 为梁截面垂直于纸面的转动惯量, $L$ 为梁长, $M$ 为梁的等效质量。

在没有外力作用时,材料杨氏模量的变化会

导致谐振梁谐振频率的变化,硅的杨氏模量温度系数在常温下约为  $-50 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ ,因此可推出频率的温漂系数  $S_{E-T}$  约为  $-0.5 \text{ Hz}/^\circ\text{C}$ ,如式(2):

$$S_{E-T} = \frac{df_0}{dt} = \frac{f_0}{2E} \cdot \frac{dE}{dt} = \frac{f_0}{2} \cdot \frac{dE/E}{dt} \quad (2)$$

在梁受到外力作用时,其谐振频率  $f$  与受到的轴向力  $P$  的关系可近似为<sup>[12]</sup>:

$$f(P) \approx f_0 \left[ 1 + \left( \frac{1}{2\pi} \right)^2 \frac{PL^2}{2EI} \right] \quad (3)$$

从式(2)看到,即使材料杨氏模量不变,在外力变化时,谐振频率也会发生改变。对该情况下的频率温漂系数进行推导:由于硅与玻璃的温度系数仍有细微差异,两侧固定锚点间距为  $d$  的振梁将受到力  $P$  为式(4)所示,其中,  $\alpha_{\text{Si}}$  为硅热膨胀系数,  $\alpha_{\text{G}}$  为玻璃热膨胀系数,  $t$  为温度,  $k$  为振梁轴向刚度:

$$P_0(t) = d(\alpha_{\text{G}} - \alpha_{\text{Si}})tk \quad (4)$$

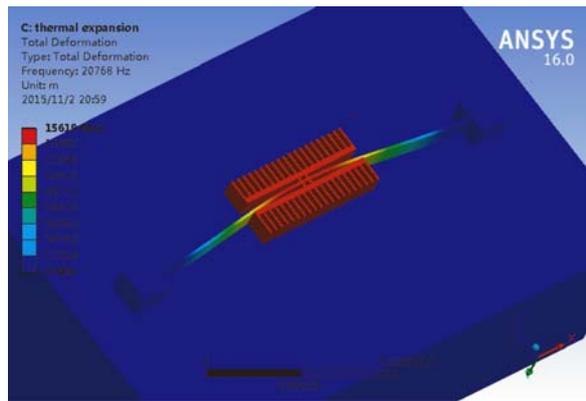
而振梁轴向刚度  $k = ES/L$ ,且此处  $d \approx L$ ,因此,输出频率受热膨胀系数影响的温度漂移系数  $S_{P-T}$  为:

$$S_{P-T} = \frac{df(P)}{dt} = \frac{3f_0L^2(\alpha_{\text{G}} - \alpha_{\text{Si}})}{2\pi^2b^2} \quad (5)$$

计算结果约为  $35 \text{ Hz}/^\circ\text{C}$ 。

### 2.2 有限元仿真

在 Ansys 中对上述两种情况下进行仿真,如图 2 所示。其中,图 2(a)为对振梁两端进行理想的固定约束,且自身热膨胀系数设为 0,改变温度仿真杨氏模量变化引起的频率变化;图 2(b)所示为使用玻璃基底对振梁两端进行固定约束,且杨氏模量温度系数设为 0,改变温度仿真热膨胀引起的频率变化。



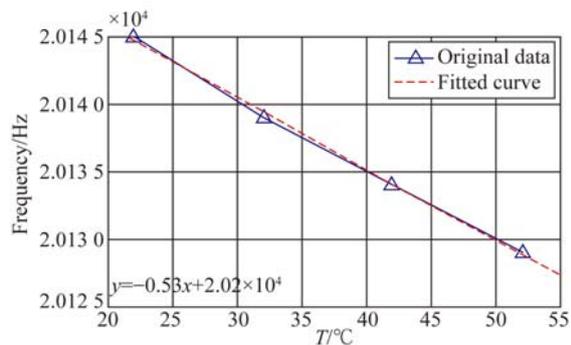
(b) 热膨胀的影响

(b) Effect of thermal expansion

图 2 Ansys 中仿真谐振频率的漂移

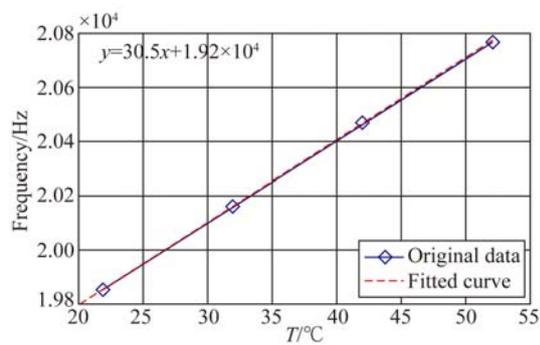
Fig. 2 Simulation of resonant frequency drift in ANSYS

仿真结果可见,两种情况的计算值均与仿真结果一致,如图 3 所示。且相比于热膨胀引起的应力影响 ( $-30.5 \text{ Hz}/^\circ\text{C}$ ),杨氏模量的影响 ( $-0.53 \text{ Hz}/^\circ\text{C}$ )要小很多。因此硅结构和玻璃基底热膨胀系数不一致是造成谐振式加速度计零偏温度漂移的主要原因。



(a) 杨氏模量的影响

(a) Effect of Young's modulus

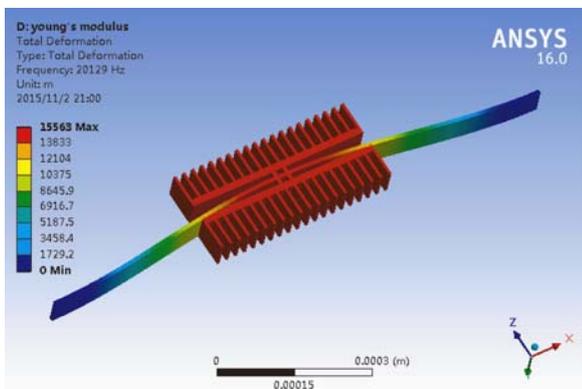


(b) 热膨胀的影响

(b) Effect of thermal expansion

图 3 谐振频率受温度影响的仿真结果

Fig. 3 Simulation results of resonant frequency drift



(a) 杨氏模量的影响

(a) Effect of Young's modulus

### 3 减小温度影响的方法

为了减小温度对硅微谐振加速度计输出频率的影响,提出结构优化和温度补偿两种解决方法。

#### 3.1 结构优化

根据前文的仿真结果,对结构优化的主要目的是降低硅-玻璃热膨胀系数不一致产生的应力。由式(4)可知,若减小锚点水平方向间距  $d$ ,可使得热膨胀引起的应力大大降低,进而减小频率的温漂。

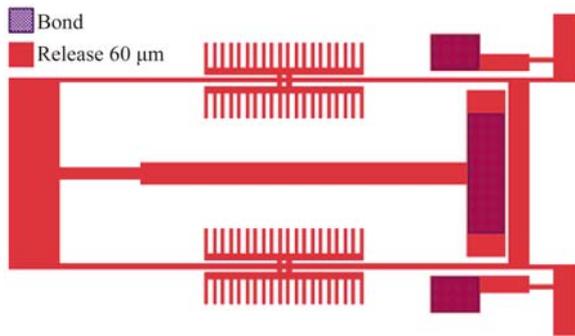


图 4 优化后的振梁结构

Fig. 4 Improved structure of beams

如图 4 所示,深色块为锚点,浅色为可动硅结构,参考文献[3,13]的设计思路,将上、下振梁分开一定距离后,通过左侧龙门再向右引出较粗梁(考虑刚度太低会吸收部分质量块产生的惯性力),深入右侧后通过锚点固定支撑,使得振梁的左右两端固定锚点尽量设计在同一竖直线上。在使锚点尽量在同一竖直线的时候,还需要保证整体结构的模态不会相互干扰,其他模态与振梁反向振动模态间隔最好在 1 kHz 以上。

为提高仿真速度,利用结构对称性,可只使用 1/4 的结构进行仿真,并在对称面上进行零位移约束,如图 5 所示。分别对杨氏模量和热膨胀的影响进行仿真,结果如图 6 所示,热膨胀系数不匹配引起的频率变化从之前的 30.5 Hz/°C 减小到 -0.6 Hz/°C,与杨氏模量的温漂引起的频率变化相近,总体漂移系数约为 -1.14 Hz/°C。

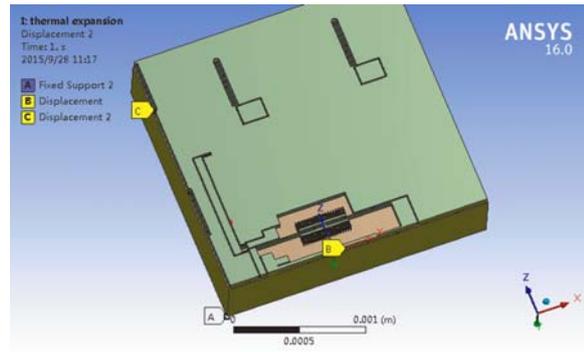
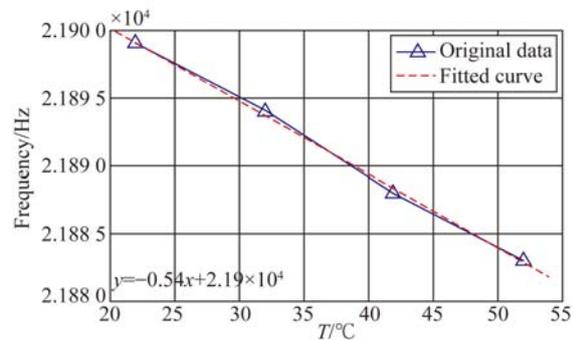


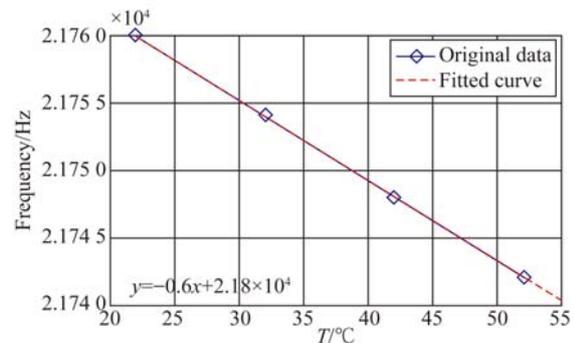
图 5 优化后 1/4 的传感器结构

Fig. 5 A quarter of improved sensor structure



(a) 杨氏模量的影响

(a) Effect of Young's modulus



(b) 热膨胀的影响

(b) Effect of thermal expansion

图 6 优化后谐振频率受温度影响的仿真结果

Fig. 6 Simulation results of resonant frequency drift

优化后的谐振式加速度计使用 SOG 工艺制作,并使用金属管壳进行真空封装,封装内部如图 7 所示。在不同温度点,对振梁做开环扫频实验,得到温漂系数约为 -1.51 Hz/°C,与仿真值 -1.14 Hz/°C 接近,验证了参数与仿真方法的正确性,如图 8 所示。

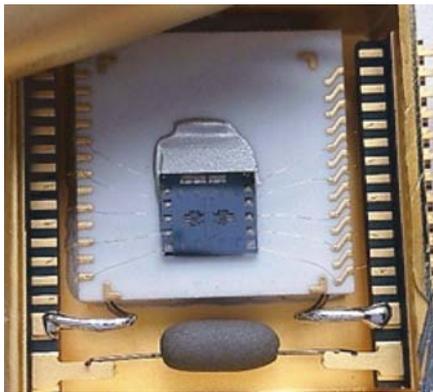


图 7 封装内部结构

Fig. 7 Inner structure of vacuum package

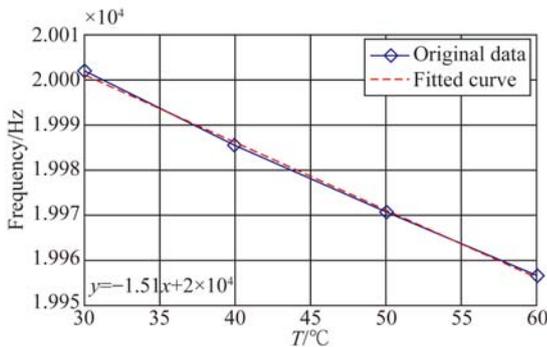


图 8 改进结构受温度影响的实验结果

Fig. 8 Temperature drift experiments of improved structure

另外,通过合理增加结构微杠杆的放大倍数,可以提高谐振式加速度计的标度因数<sup>[14]</sup>,也可以使加速度计在相同的振梁频率温漂下,减小测量加速度值的温漂。综合考虑量程与线性度后,设计的谐振式加速度计的标度因素为 66 Hz/g。

### 3.2 温度补偿

通常谐振式加速度计采用左右双侧梁结构,如图 9 所示,在敏感外部加速度时,一侧振梁受压,另一侧受拉,通过将两侧谐振频率相减,可以将常数项减去,只剩下与加速度相关的频率。同样,理论上左右两侧梁是完全对称的,其温漂也是一致的,可以通过差分去除温度对频率的影响。

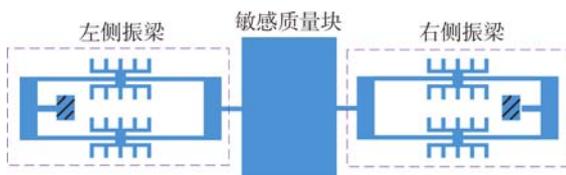


图 9 谐振式加速度计结构示意图

Fig. 9 Structure diagram of resonant accelerometer

但实际上,由于加工精度和黏片方式的限制,左右梁的温漂系数存在差异,差分后仍有较低的温漂系数,约为 0.28 Hz/°C,从而使零偏仍随着温度变化。将传感器连接闭环电路后,在常温下测量上电后 1.5 h 的闭环频率差分输出,除去前 0.5 h 的启动稳定过程,计算得到零偏稳定性为 194 μg。这相比于高精度的要求仍然差距较大,加速度计的零偏稳定性难以在常温下达到 10 μg 以下。

仿真和实验均表明频率与温度的一致性较好,因此考虑使用温度补偿提高零偏稳定性。差分后加速度传感器的标度因数为 66 Hz/g,则频率温度系数约为 4.2 mg/°C,要使噪声低于 10 μg,温度采集精度需要高于 0.002 °C。该需求对测温结果的相对精度及线性度要求高,而对其初始绝对偏差要求不高。针对这个需求,采用恒流源对封装内的 PT1000 温度传感器进行电阻测量,测温电路如图 10 所示。

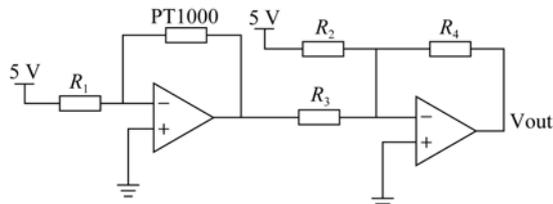


图 10 测温电路原理图

Fig. 10 Temperature measurement circuit

考虑自发热的影 响,电流不超过 0.3 mA。且在放大敏感温度的电压值之前,用减法器将常值偏置去除,以增加放大倍数提高灵敏度。输出电压为:

$$V_{out} = \left( \frac{V_{ref} R_{PT}}{R_1 R_3} - \frac{V_{ref}}{R_2} \right) R_4 = 96.25t(\text{mV}), \quad (6)$$

其中:  $t$  为温度,参考电压  $V_{ref} = 5 \text{ V}$ ,铂电阻  $R_{PT} = (1 + 0.00385t) \text{ k}\Omega$ ,  $R_1 = R_2 = 20 \text{ k}\Omega$ ,  $R_3 = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $R_4 = 100 \text{ k}\Omega$ 。

实际工作中,传感器温度及噪声曲线如图 11 所示,由于闭环电路功耗较大,温升接近 2 °C;每隔 50 点计算 1 次方差,得到测温噪声约为 0.000 2 °C。且测量的频率与温度的相关系数为 0.999,线性拟合后,残差噪声为 0.62 mHz,折合加速度噪声为 9.4 μg,如图 12 所示。

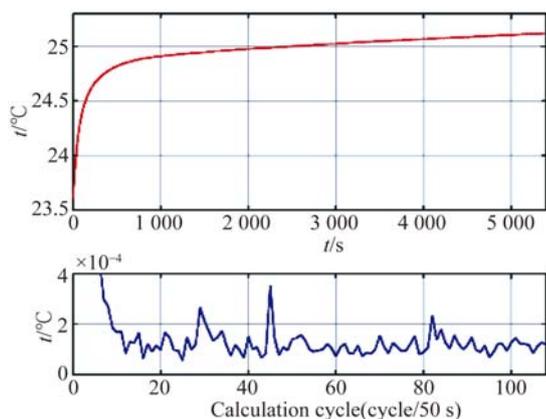


图 11 管壳内部测量的温度与噪声

Fig. 11 Measured temperature of sensor

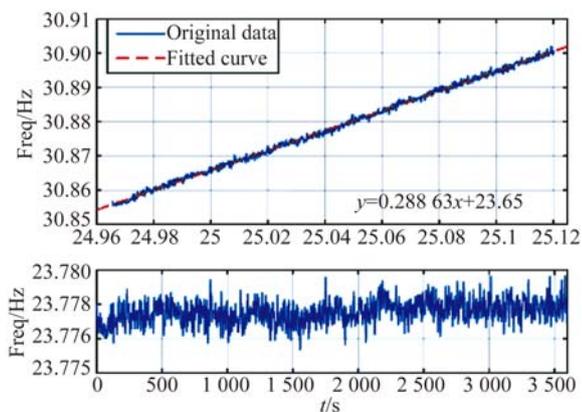


图 12 频率-温度线性拟合及补偿结果

Fig. 12 Linear fitting and compensation result

参考文献:

[1] HOPKINS R, MIOLA J, SETTERLUND R, et al.. The silicon oscillating accelerometer: a high-performance MEMS accelerometer for precision navigation and strategic guidance applications [C]. *Proceedings of the 61st Annual Meeting of The Institute of Navigation, Cambridge, MA:NTM*, 2005:1043-1052.

[2] 徐永青,杨拥军. 硅 MEMS 器件加工技术及展望 [J]. *微纳电子技术*, 2010, 47(7):425-431.

XU Y Q, YANG Y J. Processing technology and development of silicon MEMS [J]. *MEMS Device& Technology*, 2010, 47(7):425-431. (in Chinese)

[3] 王帆,董景新,赵淑明,等. 硅微谐振梁式加速度计抗温漂的微结构及工艺设计[J]. *中国惯性技术学报*,

3.3 实验结果

在常温下安装好传感器,充分释放掉安装应力后,反复通断电进行多次测量。测量结果表明改进后结构的补偿拟合系数一致性较好,在 0.28 Hz/°C 附近,可以使用线性补偿去除大部分温漂影响,如表 2。在 4 次测量中,对该传感器使用 -0.283 54 Hz/°C 的温度补偿系数进行线性补偿后,1 h 零偏稳定性均在 10 μg 以内。

表 2 频率-温度拟合系数与补偿后 1 h 零偏稳定性

Tab. 2 Frequency-temperature fitting coefficient and the bias stability within 1 h after compensation

拟合系数/(Hz/°C)	0.279 6	0.286 79	0.288 63	0.279 15
零偏稳定性/μg	9.6	8.9	9.4	9.5

4 结 论

本文对谐振梁结构热应力的温度影响进行了仿真,并根据仿真结果优化结构,降低温度对谐振频率的影响,典型结构的单梁谐振频率-温度系数约为 30 Hz/°C,结构优化后并加工出实物,其系数降为 -1.5 Hz/°C。然后设计了高精度的温度测量电路用于温度补偿,测量噪声约为 0.000 2 °C。最后用线性补偿的方法,对优化后结构左右两侧梁的差分频率进行温度补偿,使 1 h 零偏稳定性在常温下达到了 10 μg 以内,满足了项目需求,比之前实验室 52 μg 的水平提升了 80%。

2014, 22(2):227-232.

WANG F, DONG J X, ZHAO SH M, et al.. Temperature insensitive design of MEMS resonant accelerometer [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2014, 22(2):227-232. (in Chinese)

[4] HUANG L, YANG H, GAO Y, et al.. Design and implementation of a micromechanical silicon resonant accelerometer [J]. *Sensors*, 2013, 13(11):15785-15804.

[5] 石然,袁安萍,苏岩. 硅微谐振式加速度计的实现及性能测试 [J]. *光学精密工程*, 2010, 18(12): 2583-2589.

SHI R, QIU A P, SU Y. Implementation and experiments of micromechanical differential silicon resonant accelerometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(12):2583-2589. (in Chinese)

- [6] DONG J H, QIU A P, SHI R. Temperature influence mechanism of micromechanical silicon oscillating accelerometer [C]. *Power Engineering and Automation Conference (PEAM)*, Wuhan, P. R. China: IEEE, 2011:385-389.
- [7] LIU J, HUANG Q A, SHANG J, *et al.*. A new process to fabricate cavities in Pyrex7740 glass for high density packaging of micro-system [C]. *International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging (ICEPT-HDP 2008)*, Shanghai, P. R. China: IEEE, 2008:1-4.
- [8] 王巍, 王岩, 庄海涵, 等. 硅微谐振加速度计的温度特性[J]. *中国惯性技术学报*, 2013, 21(2):255-258. WANG W, WANG Y, ZHUANG H H, *et al.*. Temperature characteristic of silicon resonant accelerometer [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2013, 21(2):255-258. (in Chinese)
- [9] 王帆, 董景新, 赵淑明. 硅微振梁式加速度计的温度检测及闭环控制[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(6):1590-1597. WANG F, DONG J X, ZHAO SH M. Temperature measurement and close-loop control of silicon resonant accelerometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(6):1590-1597. (in Chinese)
- [10] 王岩, 张玲, 邢朝洋. 硅微谐振加速度计高精度相位闭环控制系统设计与实现[J]. *中国惯性技术学报*, 2014, 22(5):688-692. WANG Y, ZHANG L, XING CH Y. Design and implement of high precision phase closed-loop control system for silicon resonant accelerometer [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2014, 22(5):688-692. (in Chinese)
- [11] 裘安萍, 董金虎. 硅微谐振式加速度计的温度效应及补偿[J]. *纳米技术与精密工程*, 2012, 10(3):215-219. QIU A P, DONG J H. Temperature effect and compensation of silicon resonant accelerometer [J]. *Nanotechnology & Precision Engineering*, 2012, 10(3):215-219. (in Chinese)
- [12] 董景新, 曹宇, 万蔡辛, 等. 硅微谐振式加速度计 2 种谐振结构比较[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2010, 50(11):1825-1828. DONG J X, CAO Y, WAN C X, *et al.*. Comparison of two resonant structures in silicon oscillating accelerometers [J]. *Journal of Tsinghua University (Sc & Tech)*, 2010, 50(11):1825-1828. (in Chinese)
- [13] Michel N S. *Force multiplier in a microelectromechanical silicon oscillating accelerometer* [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2000.
- [14] 石然, 姜劲栋, 裘安萍, 等. 微杠杆在硅微谐振式加速度计中的应用[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(4):805-811. SHI R, JIANG SH D, QIU A P, *et al.*. Implementation and experiments of micromechanical differential silicon resonant accelerometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(4):805-811. (in Chinese)

## 作者简介:



严斌(1990—),男,江西鹰潭人,博士研究生,2011年于清华大学获得学士学位,主要从事 MEMS 惯性技术研究。E-mail: b-yan11@mails. tsinghua. edu. cn

## 通讯作者:



董景新(1948—),男,上海人,教授,博士生导师,1981年于清华大学获得硕士学位,主要从事 MEMS 惯性仪表技术和导航系统研究。E-mail: dongjx@mail. tsinghua. edu. cn

(版权所有 未经许可 不得转载)