

Research on the Closed-Loop Driving Method of the Silicon Micro-Machined Gyroscope

MAN Haiou^{1*}, XIAO Dingbang², WU Xuezhong², CHEN Zhihua², HOU Zhanqiang²

(1. Military Representative Office, General Armament Department, Changde Hunan 415007, China;

2. College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: A new temperature compensation scheme is investigated in order to reduce the effect of the environment temperature which have great influence to the bias of silicon micro-machined gyroscope. By research on the temperature characteristics of drive frequency, the perfect linear relation between drive frequency and temperature is found. Consequently, with some calibration, the drive frequency can be used as a gauge of the inner temperature of gyroscope chip, which solves the inaccuracy and hysteresis quality of traditional temperature transducer. The model between drive frequency and bias is established and take temperature compensation verification on the bias of silicon micro-machined gyroscope. The experiment shows that bias temperature sensitiveness is advanced from $0.053 \text{ }^\circ/(\text{s}\cdot^\circ\text{C})$ to $0.00244 \text{ }^\circ/(\text{s}\cdot^\circ\text{C})$ between $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ to $60 \text{ }^\circ\text{C}$, which improve the bias temperature coefficient in the whole temperature range.

Key words: silicon micro-machined gyroscope; bias; temperature compensation; drive frequency

EEACC: 7630; 2575

doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2012.05.014

基于驱动频率的硅微陀螺零偏补偿方法研究

满海鸥^{1*}, 肖定邦², 吴学忠², 陈志华², 侯占强²

(1. 总装驻常德地区军代室, 湖南 常德 415007; 2. 国防科技大学机电工程与自动化学院, 长沙 410073)

摘要: 针对硅微陀螺的零偏受环境温度影响比较敏感的问题, 研究了一种新的温度补偿方案。通过研究驱动频率的温度特性, 发现驱动频率与温度之间存在很好的线性关系, 经过适当的标定, 驱动频率可以作为内置温度传感器取代传统的温度传感器, 解决了传统传感器温度不准确和测量滞后的问题。建立了驱动频率与零偏的模型, 对硅微陀螺的零偏进行了温度补偿验证。验证试验表明, 在 $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ ~ $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 全温区范围内, 零偏温度灵敏度由 $0.053 \text{ }^\circ/(\text{s}\cdot^\circ\text{C})$ 提高到 $0.00244 \text{ }^\circ/(\text{s}\cdot^\circ\text{C})$, 有效地改善了全温区的零偏温度系数。

关键词: 硅微陀螺; 零偏; 温度补偿; 驱动频率

中图分类号: TP212.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2012)05-0624-04

与传统的石英微陀螺相比, 硅微陀螺采用薄硅片作为衬底, 可以实现微结构的制作与半导体加工工艺匹配, 符合微机械陀螺的未来发展趋势。由于硅材料的热敏特性, 外界环境温度变化时, 会引起硅材料物理特性发生变化, 从而导致硅微陀螺结构参数发生变化。温度误差是硅微陀螺的主要误差来源之一。当温度变化时, 硅微陀螺的零偏会产生明显漂移, 严重影响硅微陀螺全温区范围的零偏稳定性和输出精度, 因此很有必要研究零偏与温度的关系, 对硅微陀螺全温区的零偏进行补偿。

文献[1-2]分别在激光陀螺的腔体和壳体上安装了温度传感器, 建立了零偏与温度的多项式补偿

模型, 补偿后提高了陀螺的零偏稳定性。文献[3-4]采用在光纤陀螺光纤环的内壁和外壁放置温度传感器的办法来考察温度与零偏的关系, 建立了光纤陀螺零偏温度误差模型, 补偿后有效改善了光纤陀螺的温度性能。而采用 MEMS(微机电系统)技术的硅微陀螺体积较小, 采用外置温度传感器会增加硅微陀螺的体积和功耗。为提高机械品质因数, 硅微陀螺机械结构部分采用了真空封装, 封装后, 管壳内部无法放置温度传感器, 致使机械结构部分的温度与外部环境存在“延迟”, 外置温度传感器也无法准确及时反映机械结构部分的温度。一直以来, 国内外相关研制单位都在寻找温度传感器替代物理

量,美国斯坦福大学在文献[5-6]中研究了温度与硅谐振器品质因数 Q 的关系,在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的范围内,温度每变化 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$,品质因数变化 1% ,首次提出了可以采用品质因数作为温度传感器对谐振器的频率进行补偿的方法,随后设计了相应的电路,实现了对硅谐振器频率的温度补偿,取得了很好的效果。文献[7]中的硅微陀螺采用开环定频驱动,通过温度试验发现相位的变化与温度近似为线性关系,即驱动模态相位直接反映了陀螺的温度,可以作为硅微陀螺的内部温度传感器。文献[8]通过研究模态频率与温度之间的关系,发现硅微陀螺驱动轴谐振频率与温度之间存在很好的线性相关性。本文提出利用硅微陀螺驱动模态的谐振频率作为温度传感器来标定陀螺表头内部的温度,进一步研究驱动频率与零偏之间的关系,利用驱动频率代替温度对零偏进行补偿,实现了在线补偿,补偿效果较为理想。

1 驱动频率的温度特性

1.1 驱动频率与温度的关系

当温度发生变化时,硅材料的弹性模量、残余应力、阻尼系数等会发生变化。弹性模量的变化会引起系统刚度发生变化,而硅微陀螺的谐振频率会随系统刚度变化而变化,因此温度变化会导致硅微陀螺谐振频率发生漂移。

文献[9]用实验证明了硅材料弹性模量的显著的温度效应。弹性模量随温度变化基本成线性关系。

$$E(T) = E(T_0) + k_E \cdot E(T_0) \cdot (T - T_0) \quad (1)$$

式中, $E(T)$ 、 $E(T_0)$ 分别是硅材料在温度为 T 、 T_0 时的弹性模量, $T_0 = 300\text{K}$, k_E 为硅材料弹性模量温度

变化系数。

由 Rayleigh 能量法可以确定微陀螺谐振频率 f 为

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{I}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_0 [1 + (k_E + \lambda_{\sigma} \alpha \cdot E(T_0)) \cdot (T - T_0)]}{I}} \quad (2)$$

式中, I 为结构转动惯量。谐振频率 f , 弹性模量 E , 线性尺寸 l 以及密度 ρ 与温度 T 之间的关系如式(3)所示^[10]:

$$\frac{1}{f_0} \frac{df_0}{dT} = - \left| \frac{1}{2E} \frac{dE}{dT} + \frac{1}{l} \frac{dl}{dT} + \frac{1}{2\rho} \frac{d\rho}{dT} \right| \quad (3)$$

式(3)中,除硅材料线性膨胀系数 $\frac{1}{l} \frac{dl}{dT}$ 为正外,其余各项均为负数。

弹性模量的温度系数

$$k_E = \frac{1}{E} \cdot \frac{dE}{dT} = \frac{2}{f_0} \frac{df_0}{dT} - \frac{2}{l} \frac{dl}{dT} - \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT} \quad (4)$$

将式(4)代回式(2)中,由于 $\lambda_{\sigma} \alpha \ll k_E$,可以得到模态谐振频率与温度之间的关系

$$f(T) = f_0 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{2}{f_0} \frac{df_0}{dT} - \frac{2}{l} \frac{dl}{dT} - \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT} \right) \cdot (T - T_0)} \quad (5)$$

式(5)就是模态频率的理论温度模型。

先将模态电路测试板和硅微陀螺表头进行数次老化试验,增加其稳定性。然后将电路板和硅微陀螺表头一起放入高低温试验箱,设置温度范围为 $60\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -40\text{ }^{\circ}\text{C}$,每隔 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为一个温度测试点,分别测量 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 共 11 个点,每个温度点保温 1 h,用 NF 频率分析仪测试其驱动轴的谐振频率。测试结果见表 1 和图 1。

表 1 驱动频率的温度特性

温度/ $^{\circ}\text{C}$	60	50	40	30	20	10	0	-10	-20	-30	-40
中心频率/Hz	2678.1725	2679.4675	2680.7575	2682.0650	2683.3800	2684.7025	2686.0550	2687.4075	2688.7825	2690.1875	2691.6025

在 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的范围内驱动频率变化了 13.43 Hz ,驱动轴频率温度系数 $-50 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。硅材料的线性膨胀系数为 $\alpha = 2.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,密度 ρ 温度系数为 $-13 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ^[11]。将以上参数代入式(5),并将式(5)在 $T=0$ 处进行泰勒展开,整理得到驱动频率的理论温度模型为:

$$f(T) = -0.122T + 2719.356 \quad (6)$$

理论温度模型与试验得到的温度模型的对比结果如图 1 所示。

由图 1 可以看出,通过理论分析可以得到驱动频率与温度成现行比例关系,与试验数据吻合得较好。对试验数据进行线性回归分析,由线性回归模型得到

的拟合数据与实验数据最大误差为 0.1195 Hz ,相对误差为 0.004% ,可以忽略不计。对试验结果进行线性回归分析得到拟合模型为:

$$f(T) = -0.134T + 2722.739 \quad (7)$$

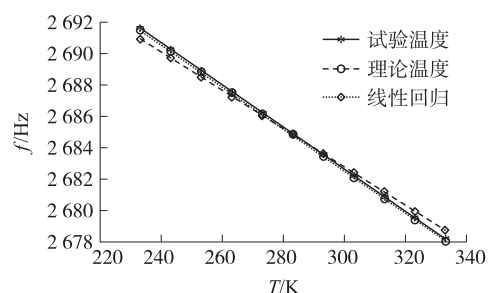


图 1 理论温度模型与试验温度模型对比图

式(7)就是驱动频率与温度的标定关系,因此可以用驱动频率代替温度作为温度传感器。

1.2 回归方程的显著性检验

利用方差分析法可以对求得的回归方程进行显著性检验^[12]。

回归平方和

$$U = \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y})^2 = 197.6902 \quad (8)$$

残余平方和

$$Q = \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 = 0.0462 \quad (9)$$

驱动频率与温度的线性关系是否密切,取决于 U 及 Q 的大小, U 越大 Q 越小说明驱动频率与温度的线性关系越密切。回归方程显著性检验通常采用 F 检验法,对于一元线性回归,统计量 F 为:

$$F = \frac{U/1}{Q/(N-2)} \quad (10)$$

对比 F 分布表,可以计算得到

$$F = \frac{197.6902}{0.0462/9} = 38511 \geq F_{0.01}(1,9) \quad (11)$$

因此回归方程是高度显著的,驱动频率与温度的线性关系十分密切。经过适当的标定,驱动频率是可以代替外部温度传感器作为硅微陀螺的内部传感器的。

1.3 驱动频率的重复性

在 $60\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内,对相同结构不同工艺批次的微陀螺表头进行了驱动频率的温度特性测试,测试结果见图2。

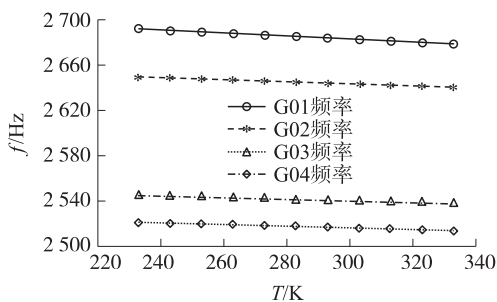


图2 不同微陀螺表头的温度特性

由图2可以看出,不同微陀螺表头的驱动频率跟温度均呈现线性反比例的关系,驱动频率的温度特性是存在共性规律的,驱动频率的温度模型具有普遍适用性。因此,经过适当的标定,驱动频率可以代替温度作为温度补偿量。

2 零偏与频率的关系

设置温控箱温度范围为 $60\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -40\text{ }^{\circ}\text{C}$,每隔 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为一个温度测试点,分别测量 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、

$30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 共11个点,每个温度点保温1h,同时记录零偏电压值和相应的驱动轴谐振频率。测试结果见图3。

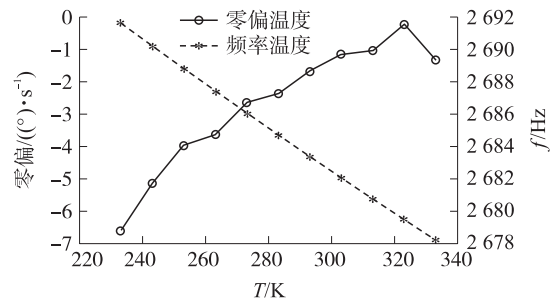


图3 零偏和驱动频率与温度之间的关系

在全温区($60\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -40\text{ }^{\circ}\text{C}$)范围内,零偏的变化范围比较大,零偏与温度的关系是非线性的。 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时零偏值为 $-1.324\text{ }^{\circ}/\text{s}$, $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时零偏值为 $-6.601\text{ }^{\circ}/\text{s}$,零偏变化了 $5.277\text{ }^{\circ}/\text{s}$,零偏温度灵敏度为 $0.053\text{ }^{\circ}/(\text{s}\cdot^{\circ}\text{C})$ 。因此,很有必要建立零偏的温度补偿模型,对零偏进行补偿。

零偏与温度的关系是非线性的,对于非线性的函数,可以采用多项式拟合进行逼近。利用统计检验的方法,可以合理地确定多项式拟合曲线的阶数。对图3中的试验结果进行多项式回归分析,得到硅微陀螺全温区零偏与温度的二次多项式拟合模型(零偏单位 $^{\circ}/\text{s}$)

$$B = -6.37 \times 10^{-4} T^2 + 0.4159 \times 10^3 T - 68.7704 \quad (12)$$

采用驱动频率作为温度传感器,根据驱动频率线性回归模型,由式(7)可以得到

$$\begin{cases} T = -7.463 \times [f(T) - 2722.739] \\ T^2 = 55.692 \times [f(T) - 2722.739]^2 \end{cases} \quad (13)$$

将式(13)代入式(12),得到零偏与频率的关系:

$$B = -0.0355 \times [f(T) - 2722.739]^2 - 3.104 \times 10^3 \times [f(T) - 2722.739] - 68.7704 = -0.0355 \times f(T)^2 - 2910.686 \times f(T) - 8188209.434 \quad (14)$$

3 零偏补偿试验验证

利用前面的频率与零偏的模型,在全温区范围内对零偏进行了补偿验证,补偿前后结果如图4所示。

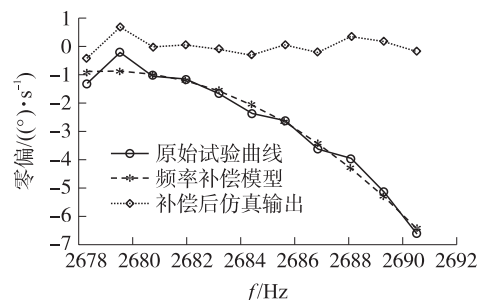


图4 全温区补偿前后零偏输出

零偏输出与频率是成反比的,随着频率的升高,零偏是逐步递减的。补偿前,全温区零偏温度灵敏度为 $0.053\text{ }^{\circ}/(\text{s}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1})$,补偿后,零偏基本在零附近上下波动,补偿后零偏温度灵敏度 $0.00244\text{ }^{\circ}/(\text{s}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1})$,有效地改善了全温区的零偏温度系数。

4 结论

硅微陀螺的零偏受温度影响较大,需要对其进行温度补偿,而驱动频率与温度之间有很好的线性关系,可以用驱动频率代替温度对零偏进行补偿。这样做的好处至少有两点:

(1)表头真空封装后,内部无法放置温度传感器,外置温度传感器与表头实际温度之间存在温度梯度,不能准确反映表头实际温度,作为微陀螺自身物理参数的驱动频率则准确反映了表头的实际温度。

(2)省去了外置传感器,减小电路板体积和功耗,并且频率的分辨率很高,对温度变化非常敏感。

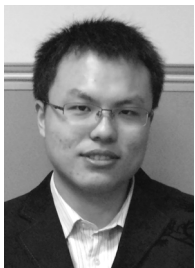
由于频率的分辨率较高,频率测量误差将对模型精度产生一定的影响,所以多项式模型的阶数不能太高,也可以采用频率输出-零偏列表法,可以提高补偿模型的精度。

参考文献:

[1] 赵小宁,李县洛,雷宝权.激光陀螺零偏温度补偿研究[J].中

国惯性技术学报,2004,12(3):55-57.

- [2] 汪之国,龙兴武,王飞.非平面腔四频差动激光陀螺的温度补偿[J].传感技术学报,2010,23(9):1236-1241.
- [3] 王海.光纤陀螺温度影响与误差补偿[J].北京航空航天大学,2007,33(5):549-552.
- [4] 周琪,秦永元,赵长山.光纤陀螺温度漂移误差的模糊补偿方案研究[J].传感技术学报,2010,23(7):926-930.
- [5] Bongsang Kim, Chandra Mohan Jha. Temperature Dependence of Quality Factor in MEMS Resonator [C]//MEMS2006, Istanbul, Turkey, 2006, 590-593.
- [6] Hopcroft M A, Agarwal M, Park K K. Temperature Compensation of a MEMS Resonator Using Quality Factor as a Thermometer [C]//MEMS2006, Istanbul, Turkey, 2006, 222-225.
- [7] Sun Feng, Guo Qiufen, Ge Yuansheng, et al. Research on Thermal Characteristic in Slow-Small Temperature Changing for MEMS Linear Vibration Gyroscope [C]//IEEE Mechatronics and Automation 2006, Luoyang, China, 2006, 476-479.
- [8] 满海鸥,肖定邦,吴学忠.硅微陀螺模态频率温度特性的研究[J].传感技术学报,2009,22(8):1117-1121.
- [9] Xinxin Li, Takahito Ono, Yuelin Wang, et al. Study on Ultra-Thin NEMS Cantilevers-High Yield Fabrication and Size-Effect on Young's Modulus of Silicon [J]. IEEE, 2002:427-430.
- [10] 谭一云,于虹,黄庆安,等.温度对硅纳米薄膜杨氏模量的影响[J].电子器件,2007,30(6):755-758.
- [11] Chang Liu, 著.黄庆安,译.微机电系统基础[M].北京:机械工业出版社,2007.
- [12] 费业泰.误差理论与数据处理[M].北京:机械工业出版社,2000.



满海鸥(1985-),男,江苏徐州人,硕士研究生,助理工程师,主要研究方向为惯性器件和自动武器的设计和开发, manseagull@163.com。