

文章编号 1004-924X(2013)11-2870-07

高品质因数微机械陀螺的温度自补偿

杨 亮, 苏 岩, 裘安萍, 夏国明*

(南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要:建立了以微机械陀螺驱动模式固有频率为虚拟温度传感器的温度补偿系统, 以实现微机械陀螺标度因数和零偏的高精度温度补偿。研究了自主设计的微机械陀螺的驱动模式固有频率的温度特性, 通过实验手段获得了频率的温度系数为 $(-26.9 \pm 2.03) \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$, 且温度测量精度 1 s 平均时为 $0.075 \text{ } ^\circ\text{C}$, 20 s 平均时为 $0.004 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。在分析微机械陀螺标度因数和零偏温度特性的基础上, 提出了一种二阶温度补偿方案, 并给出了补偿原理和算法示意图。最后, 利用驱动模式固有频率对标度因数和零偏进行了温度自补偿。实验结果表明, 在 $-40 \text{ } ^\circ\text{C}$ 到 $60 \text{ } ^\circ\text{C}$, 标度因数的最大相对变化量从补偿前的 2.1% 下降到了 0.05%; 零偏的最大相对变化量从补偿前的 8.9% 下降到了 0.1%; 室温下 2 h 的零偏实验表明, 温度补偿后微机械陀螺的零偏不稳定性由 $4.1(^\circ)/\text{h}$ 降到了 $0.42(^\circ)/\text{h}$, 满足了微机械陀螺温度补偿的高精度要求。

关键词:微机械陀螺; 温度补偿; 固有频率; 标度因素; 零偏

中图分类号:U666.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132111.2870

Self-temperature compensation for high quality factor micro-machined gyroscope

YANG Liang, SU Yan, QIU An-ping, XIA Guo-ming

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

* Corresponding author, E-mail: xgmseu@gmail.com

Abstract: A temperature compensation system was build by using the drive-mode natural frequency as a virtual temperature sensor to achieve high-precision temperature compensation for the scale factor and zero bias of a micro-machined gyroscope. The temperature characteristics of the drive-mode natural frequency were explore, and its coefficient $(-26.9 \pm 2.03) \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$ was obtained. The frequency stability was translated to temperature precision to be $0.075 \text{ } ^\circ\text{C}$ at 1 s average and $0.004 \text{ } ^\circ\text{C}$ at 20 s average. On the basis of analysis of the temperature characteristics of scale factor and zero bias, a second-order temperature compensation scheme was proposed, and the principle and block-diagram of compensation algorithm were given. Finally, the scale factor and zero bias were compensated using the drive-mode natural frequency. The experiment results show that the maximum relative change of scale factor is reduced from 2.1% to 0.05% and that of zero bias is reduced from 8.9% to 0.1% at $-40 \text{ } ^\circ\text{C}$ to $60 \text{ } ^\circ\text{C}$. The zero bias experiment at room temperature for 2 hours shows that the bias non-

收稿日期:2013-06-17; 修订日期:2013-07-17.

基金项目:国防预研基金资助项目(No. 9140A09011011BQ02)

stability is reduced from $4.1(^{\circ})/h$ to $0.42(^{\circ})/h$ after compensation. These results satisfy the demand of micro-machined gyroscopes for high-precision temperature compensation.

Key words: micro-machined gyroscope; temperature compensation; natural frequency; scale factor; zero bias

1 引 言

目前,国内外微机械陀螺的性能在逐年提升,国外已有 Allan 方差零偏不稳定性小于 $1(^{\circ})/h$ 的陀螺研制成功^[1-3],但是微机械陀螺零偏的长期稳定性和标度因数的漂移限制了其在更高精度领域的应用。对于多数的微机械陀螺,影响其性能的关键因素是温度,所以对陀螺的零偏和标度因数进行温度补偿显得非常必要。

目前国内外已有很多在微机械陀螺温度补偿方面的研究报道,多数的温度补偿都是基于外置温度传感器来对陀螺工作的外部环境温度进行测量进而对陀螺的输出进行补偿的。而外置温度传感器测量的温度与微机械结构内部温度存在温度梯度效应,且其精度在 1 s 平均时一般为 $\pm 0.5^{\circ}C$ 左右,更高的精度需更长的测量时间,这极大地限制了其在高精度陀螺温度实时补偿中的应用。

为了解决外置温度传感器的缺点,文献[4-5]通过实验指出微机械陀螺的驱动模态作为一个谐振器其固有频率与温度具有很好的线性度,可以将驱动频率用作虚拟的温度传感器对陀螺的零偏和标度因数进行温度补偿。文献[3]指出,将驱动频率用作虚拟的温度传感器还需使陀螺驱动模态具有高的品质因数。而本课题组所研究的微机械陀螺采用真空封装技术,保证了陀螺驱动模态具有高的品质因数^[6]。

本文针对课题组自主研制的微机械陀螺,通过对其驱动模态固有频率温度特性的研究,分析其用作虚拟温度传感器的优点,并藉此建立陀螺零偏和标度因数的温度自补偿算法。

2 标度和零偏温度特性分析

本课题组自主研制的双质量线振动式硅微机械陀螺结构如图 1 所示,由可动激励梳齿、固定激励梳齿、可动检测梳齿、固定检测梳齿、支承梁以及基座等组成。可动部分结构通过基座固定在玻

璃衬底上,固定激励梳齿和固定检测梳齿也固定在玻璃衬底上。在固定激励梳齿上加载带直流偏置的交流电压,使检测质量沿 x 轴作一定规律的往复振动,从而产生角速率传感器所需要的驱动力。当角速率传感器有绕 z 轴的输入时,检测质量在 y 轴向会受到哥氏力的作用,使可动检测梳齿与固定检测梳齿之间产生相对运动,形成差动检测电容。在理想条件下,该检测电容与输入角速率成正比^[7]。

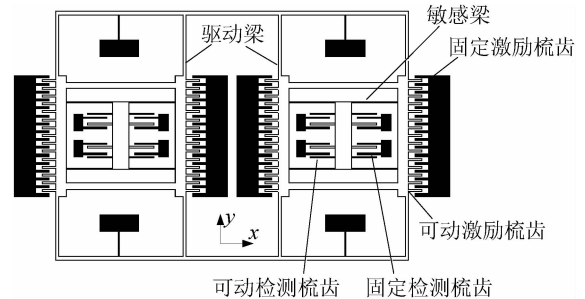


图 1 微机械陀螺结构示意图

Fig. 1 Block diagram of micro-machined gyroscope structure

由于陀螺两模态之间存在着正交误差^[7],所以图 1 所示的陀螺质量块运动方程可以用式(1)来表示:

$$\begin{cases} x_x = A_x \sin(\omega_{nx} t) \\ \ddot{y}_x + \frac{\omega_{ny}}{Q_y} \dot{y}_x + \omega_{ny}^2 y_x = -2\Omega_z \dot{x}_x + \frac{\sin 2\alpha}{2m_y} (k_{xx} - k_{yy}) x_x \end{cases} \quad (1)$$

其中: x_x 为驱动模态的振动位移, A_x 为驱动模态振动位移的幅值, ω_{nx} 为驱动模态的固有频率, y_x 为敏感模态的位移, ω_{ny} 为敏感模态固有频率, Q_y 为敏感模态的品质因数, Ω_z 为 z 轴方向输入的角速度, α 为驱动模态与敏感模态之间的耦合角度, m_y 为敏感模态的等效质量, k_{xx} 为驱动模态的刚度, k_{yy} 为敏感模态的刚度。

由文献[5]可知,陀螺的输出 V_{Ω_z} 可以表示为:

$$V_{\Omega_z} = SF(T) \cdot \Omega_z + V_{\text{bias}}(T), \quad (2)$$

其中: $SF(T)$ 为陀螺的标度因数,且与温度 T 有

关; $V_{\text{bias}}(T)$ 为陀螺在零输入时的输出, 即零偏, 且与温度 T 有关。

由式(1)可以求得:

$$SF(T) = K_s \frac{2\omega_{nr} A_x Q_{\text{equ}}}{\omega_{ny}^2} \sin \beta, \quad (3)$$

$$V_{\text{bias}}(T) = K_s \frac{A_x (k_{xx} - k_{yy}) Q_{\text{equ}}}{2m_y \omega_{ny}^2} \sin 2\alpha \cos \beta, \quad (4)$$

其中: K_s 为敏感模态开环检测电路的增益系数, β 为相敏解调时敏感模态检测电路输出信号与参考信号之间的相位差, Q_{equ} 为等效品质因数, 其表达式为:

$$Q_{\text{equ}} = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega_{nr}}{\omega_{ny}}\right)^2\right]^2 + \left(\frac{\omega_{nr}}{Q_y \omega_{ny}}\right)^2}}. \quad (5)$$

因为在陀螺设计时, 敏感模态的固有频率 ω_{ny} 和驱动模态的固有频率 ω_{nr} 满足 $\omega_{ny} = (1 + 3\% \sim 5\%) \omega_{nr}$ 甚至更大^[8], 而真空封装的陀螺, Q_y 往往大于 10 000^[6], 所以式(5)可以简化为:

$$Q_{\text{equ}} \approx \frac{1}{1 - (\omega_{nr}/\omega_{ny})^2}. \quad (6)$$

温度在 2 个方面对标度因数与零偏有影响, 一方面是微机械结构部分, 如它的谐振频率与品质因数都会随温度变化, 另一方面为电路, 主要为电路器件的温度系数。从式(3)、式(4)和式(6)可以看出标度因数及零偏会受到较多参数的影响, 如驱动与检测谐振频率, 品质因数, 电路增益等, 并且它们之间存在非线性关系。因此本文采用拟合的方法对零偏与标度因数的温度系数进行补偿。

3 陀螺固有频率的温度特性

拟合补偿中, 温度信息中包含的噪声会增加到陀螺输出噪声中, 因此需要有一个低噪声温度传感器且其温度测量精度也必须比较高, 以便对陀螺进行高精度温度补偿。

根据文献[9-10]可得到陀螺驱动模态固有频率的公式为:

$$f_{nr} = \frac{1}{2\pi} \omega_{nr} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{4EhW^3 + \pi AL^2 \sigma / 4}{mL^3}}, \quad (7)$$

式中: E 为硅材料的杨氏模量, L 、 W 、 h 分别为驱动模态支撑梁的长、宽和厚, σ 为残余应力。

由于陀螺敏感结构的机械尺寸参数随温度所产生的变化, 与硅材料的热膨胀系数 α_{si} 有关, 所

以由式(7)可以求得驱动模态固有频率温度系数 TC_f 为:

$$TC_f = \frac{1}{\omega_{nr}} \frac{\partial \omega_{nr}}{\partial T} = \frac{1}{\omega_{nr}^2} \frac{4hW^3}{mL^3} \frac{\partial E}{\partial T} + \frac{1}{\omega_{nr}^2} \frac{\pi A}{4mL} \frac{\partial \sigma}{\partial T} + \frac{1}{2} \alpha_{\text{si}}. \quad (8)$$

在文献[10-11]中指出, 由杨氏模量所引起的固有频率温度系数远远大于由热应力和热膨胀所引起的固有频率温度系数, 所以忽略式(8)右边的第二项和第三项, 即只认为驱动模态固有频率的温度系数与杨氏模量有关。由于单晶硅的杨氏模量与温度呈线性关系^[12], 所以可以认为驱动模态固有频率与温度之间也具有线性关系。

为了验证陀螺的驱动频率与温度之间具有线性关系以及测量驱动频率的温度系数和精度, 进行了驱动模态固有频率的温度实验, 实验结果如图 2 所示。

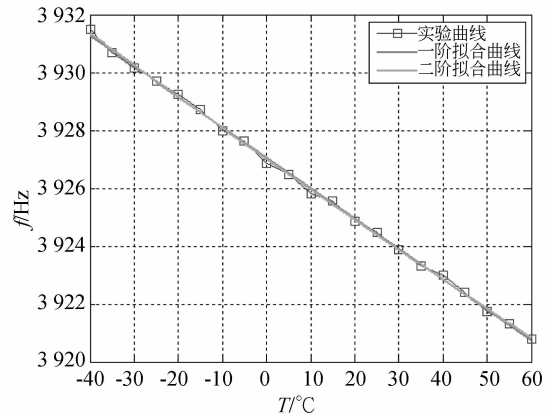


图 2 驱动模态固有频率与温度之间的关系

Fig. 2 Relationship between drive-mode natural frequency and temperature

图 2 中一阶线性拟合曲线和二阶拟合曲线的方程分别为:

$$f_{nr} = -0.105 2T + 3 927.1, \quad (9)$$

$$f_{nr} = 5.370 6 \times 10^{-5} T^2 - 0.106 3T + 3 927.0, \quad (10)$$

其中: T 为温度, 单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。

从式(10)可以看出, 频率的温度二次项系数远小于温度的一次项系数, 说明了驱动模态固有频率与温度之间存在着良好的线性关系。并可以求得驱动模态固有频率的温度系数为 $-2.69 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 。

为了得到驱动模态固有频率在恒定温度下的

温度特性,在 WST-2 型温控箱中进行了恒温实验,温度控制在 20 °C。实验时在陀螺上电后,保温 10 h 后再采集陀螺驱动模态的固有频率 1 h,采样频率为 10 Hz。对数据进行 Allan 方差分析后可以得到图 3。

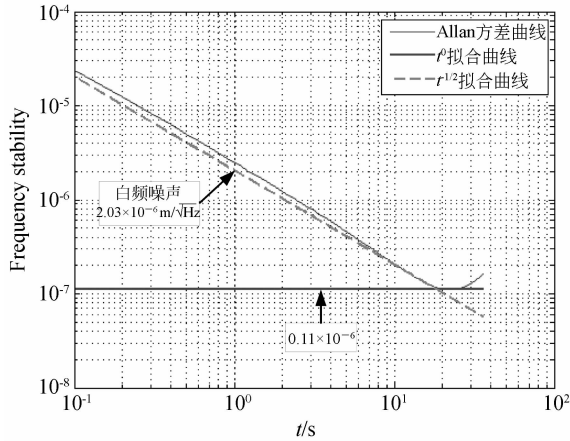


图 3 驱动模态固有频率的 Allan 方差分析图

Fig. 3 Allan analysis of drive-mode natural frequency

从图 3 可以看出,频率的白频噪声为 $2.03 \times 10^{-6} / \sqrt{\text{Hz}}$,具有很好的噪声性能,可以最大限度地降低温度补偿后恶化输出信号的噪声。

结合式(9),并根据图 3 可以得出,频率对温度的测量精度 1 s 平均时为 0.075 °C;20 s 平均时的测量精度为 0.004 °C。可以看出,频率的温度测量精度明显高于常用的温度传感器,所以非常适合用来作虚拟的温度传感器,以便对陀螺的标度因数和零偏进行高精度温度补偿。

4 标度和零偏温度自补偿算法

由于标度因数和零偏均是温度的函数,在温度补偿时,采用多项式拟合补偿的方法不但简单而且完全能够满足精度需要,本文采用二阶拟合的方法对标度因数 $SF(T)$ 和零偏 $V_{\text{bias}}(T)$ 进行温度补偿。

因式(2)可以写做:

$$V_{\Omega_z} = SF(T)[\Omega_z + V'_{\text{bias}}(T)], \quad (11)$$

其中:

$$V'_{\text{bias}}(T) = \frac{V_{\text{bias}}(T)}{SF(T)}.$$

从式(2)和式(11)可以看出,对 $SF(T)$ 的温度补偿会影响到对 $V_{\text{bias}}(T)$ 的温度补偿,因此首

先对 $SF(T)$ 进行温度补偿。假设 $SF(T)$ 的二阶拟合表达式为:

$$SF(T) = SF_0 \cdot (1 + a_s \cdot f_{nx} + b_s \cdot f_{nx}^2). \quad (12)$$

由式(11)和式(12)可以求得对标度因数进行温度补偿后的陀螺输出 $V_{\Omega_z}^S$ 为:

$$V_{\Omega_z}^S = \frac{V_{\Omega_z}}{(1 + a_s \cdot f_{nx} + b_s \cdot f_{nx}^2)} = \frac{SF_0 \cdot \Omega_z + V'_{\text{bias}}(T)}{SF_0 \cdot \Omega_z + V'_{\text{bias}}(T)}, \quad (13)$$

其中: $V_{\text{bias}}^S(T)$ 为对标度因数进行温度补偿后的陀螺零偏输出。

在标度因数的温度补偿基础上,进行零偏的温度补偿,同样假设的三阶拟合表达式为:

$$V_{\text{bias}}^S(T) = V_{\text{bias}0}^S + a_b \cdot f_{nx} + b_b \cdot f_{nx}^2. \quad (14)$$

由式(13)和式(14)可以得到陀螺经过零偏温度补偿后的输出为:

$$V_{\Omega_z}^{SB} = V_{\Omega_z}^S - (a_b \cdot f_{nx} + b_b \cdot f_{nx}^2) = SF_0 \cdot \Omega_z + V_{\text{bias}0}^S. \quad (15)$$

由式(11)、式(13)和式(14)可以得到陀螺标度因数和温度补偿的整个过程如图 4 所示。

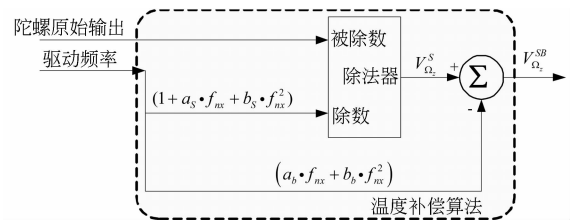


图 4 微机械陀螺温度补偿算法示意图

Fig. 4 Block diagram of temperature compensation algorithm for micro-machined gyroscope

5 温度补偿后零偏噪声性能分析

陀螺零偏输出的稳定性主要分为长期稳定性和短期稳定性,其中长期稳定性主要与温度、器件的老化等缓变长周期因素有关,而短期稳定性则主要体现在白噪声之类的短周期高频分量上,且对微机械陀螺来说其短期稳定性主要体现在角度随机游走项上^[13]。由式(11)~式(15)可以得到温度补偿后的零偏输出为:

$$V_{\text{bias}}^{SB} = \frac{V_{\text{bias}}(T)}{(1 + a_s \cdot f_{nx} + b_s \cdot f_{nx}^2)} - (a_b \cdot f_{nx} + b_b \cdot f_{nx}^2). \quad (16)$$

由于陀螺原始零偏 V_{bias} 的噪声与驱动模态谐振频率 f_{nr} 的噪声相互独立,所以由上式可以求得温度补偿后零偏输出的噪声为:

$$N_{noise}(V_{bias}^{SB}) = \text{sqr}t\left(\frac{N_{noise}^2(V_{bias})}{(1+a_s \cdot f_{nr} + b_s \cdot f_{nr}^2)^2} + \left[\frac{V_{bias}(a_s + 2b_s \cdot f_{nr})}{(1+a_s \cdot f_{nr} + b_s \cdot f_{nr}^2)^2} + (a_b + 2b_b \cdot f_{nr})\right]^2 N_{noise}^2(f_{nr})\right), \quad (17)$$

其中:sqr为开方运算, $N_{noise}(A)$ 表示求取信号 A 的噪声分量。

从式(17)可以看出,温度补偿后的陀螺输出,其噪声主要来自两部分,一部分为陀螺原始输出的噪声分量,一部分来自于频率信号的噪声分量。

根据式(9)以及后面的式(19)和式(21),可以将式(17)简化为:

$$N_{noise}(V_{bias}^{SB}) \approx \text{sqr}t(N_{noise}^2(V_{bias}) + V_{bias}^2(a_s + 2b_s \cdot f_{nr})^2 N_{noise}^2(f_{nr})). \quad (18)$$

由上式可以看出,经过温度补偿后的零偏输出,其短期噪声的最大值要大于比无补偿时的零偏输出差。

6 试验及结果

根据图 4 所示的仿真模型,使用现场可编程门阵列(FPGA)编写了温度补偿算法,相应的硬件电路图如图 5 所示。图 5 所示的陀螺为数字化驱动闭环、开环检测的陀螺,该陀螺通过串口以 400 Hz/frame 的速率向上位机发送包含有角速度信息的数据,其中角速度信息用 24 bit 表示。上位机采用自编的 Labview 程序对数据进行读取和解码,如图 6 所示。保存时,对数据进行平均滤波,以 10 Hz/frame 的速率将数据保存到文件中。

为了验证温度补偿效果是否有效,以及获取温度补偿算法所需的参数,首先测试了无温度补偿时的微机械陀螺标度因数和零偏的温度曲线,并利用该数据获得了温度补偿算法所需的参数。然后,建立了温度补偿算法并对陀螺的输出进行温度补偿,再次测试了标度因数和零偏的温度曲线。

实验时将数字化微机械陀螺放在带有温控功能的型号为 WST-2 转台的立轴上,上电待陀螺输出稳定后,开始温度试验,试验环境如图 6 所示。

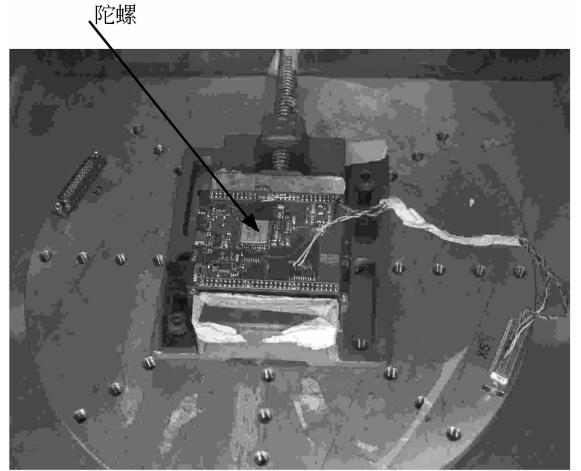


图 5 数字化微机械陀螺

Fig. 5 Digitized micro-machined gyroscope

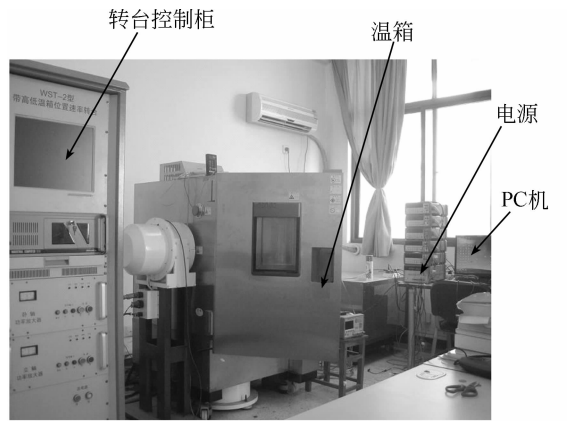


图 6 微机械陀螺测试环境

Fig. 6 Test environment for micro-machined gyroscope

试验在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下进行,每隔 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 进行一个温度点测试,并在每个温度点保温 1 h 后进行标度试验。在标度试验时分别进行了 $10\text{ }(^{\circ})/\text{s}$ 和 $20\text{ }(^{\circ})/\text{s}$ 两个转速下的实验,并在每个转速下测试 30 s;零偏试验时,在每个温度点测试了 30 s。实验数据经过处理后得到如图 7 所示的标度因数与温度之间的曲线,图 8 所示的零偏与温度之间的曲线。

从图 7 和图 8 可以分别得到无温度补偿和有温度补偿时的标度因数和零偏的二阶拟合曲线分别为:

$$SF = 0.001T^2 - 1.177T + 5\ 466.7, \quad (19)$$

$$SF^{SB} = 3.563 \times 10^{-5} T^2 - 0.029\ 5T + 5\ 485.7, \quad (20)$$

$$V_{bias} = 0.066T^2 - 8.625T + 8\ 226.4, \quad (21)$$

$$V_{bias}^{SB} = -4.988 \times 10^{-5} T^2 - 0.0413T + 3213.7, \quad (22)$$

其中: SF^{SB} 和 V_{bias}^{SB} 分别代表温度补偿后的标度因数和零偏。

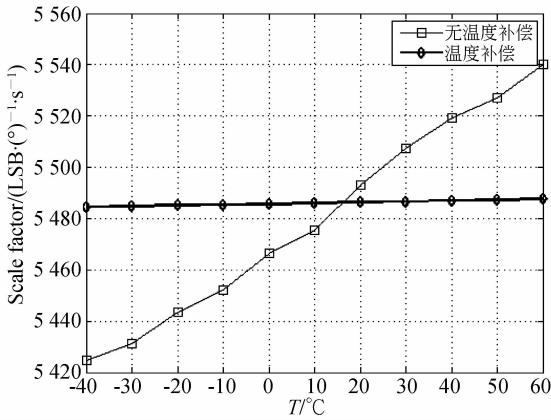


图 7 标度因数与温度之间的关系

Fig. 7 Relationship between scale factor and temperature

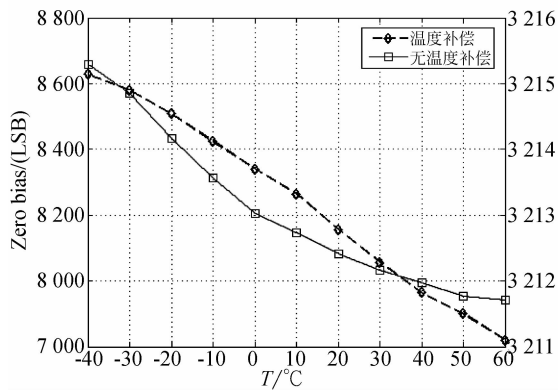


图 8 零偏与温度之间的关系

Fig. 8 Relationship between zero bias and temperature

对比式(19)和式(20)、式(21)和式(22)可以看出,在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 到 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, 标度因数的最大相对变化量从补偿前的 2.1% 下降到了 0.05%; 零偏的最大相对变化量从补偿前的 8.9% 下降到了 0.1%。说明了采用频率进行温度自补偿后,陀螺的标度因数和零偏温度系数都有了较大幅度的降低。

为了验证陀螺零偏在无温度补偿和有温度自补偿情况下的长期稳定性,在室温下进行了 2 h 的实验,并对数据进行 Allan 方差分析,结果如图 9 所示。

从图 9 可以看出,无温度补偿时,陀螺的零偏不稳定性在积分时间为 7 min 时达到最小值为 $4.1(^{\circ})/\text{h}$; 温度补偿后,陀螺的零偏不稳定性在积分时间为 4 min 时达到最小值为 $0.42(^{\circ})/\text{h}$ 。同

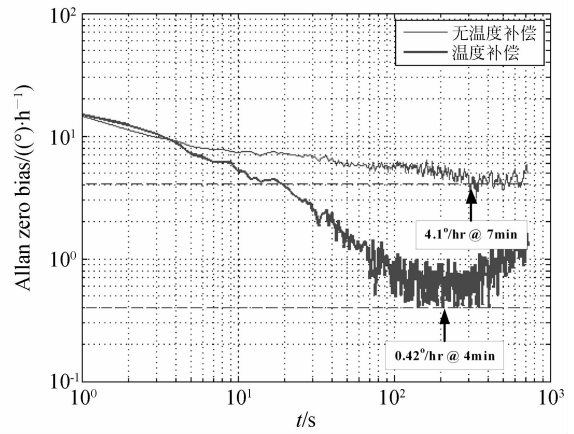


图 9 零偏的 Allan 方差分析

Fig. 9 Allan analysis of zero bias

时,Allan 方差分析得到零偏的角度随机游走温度补偿前和补偿后分别为 $1.08(^{\circ})/\sqrt{\text{h}}$ 和 $1.13(^{\circ})/\sqrt{\text{h}}$ 。说明了温度补偿可以提高陀螺的零偏不稳定性,而不能提高陀螺的角度随机游走,甚至会恶化角度随机游走,这是因为角度随机游走表达了陀螺的短期噪声水平,温度补偿时会将温度传感器即驱动模态谐振频率的噪声代入陀螺的输出中,从而恶化陀螺的短期噪声水平。

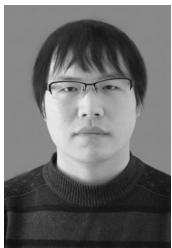
7 结 论

本文建立了以微机械陀螺驱动模态固有频率为虚拟温度传感器的温度补偿系统,实现了对微机械陀螺标度因数和零偏的高精度温度补偿。首先研究了自主设计的微机械陀螺驱动模态固有频率的温度特性,通过计算和实验手段得到了频率的温度系数为 $(-26.9 \pm 2.03) \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}$,同时频率的恒温实验数据表明频率对温度的测量精度在 1 s 时为 $0.075\text{ }^{\circ}\text{C}$,在 20 s 时为 $0.004\text{ }^{\circ}\text{C}$,满足了微机械陀螺温度补偿的需要。然后,根据微机械陀螺的标度因数和零偏温度特性的分析结果,提出了一种高阶温度补偿的方案。最后,利用驱动模态固有频率对标度因数和零偏进行了温度自补偿。实验结果表明,在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 到 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$,标度因数的最大相对变化量从补偿前的 2.1% 降到了 0.05%; 零偏的最大相对变化量从补偿前的 8.9% 降到了 0.1%; 室温下 2 h 的零偏实验表明温度补偿后微机械陀螺的零偏不稳定性由补偿前的 $4.1(^{\circ})/\text{h}$ 降到了 $0.42(^{\circ})/\text{h}$ 。满足了微机械陀螺温度补偿的高精度要求。

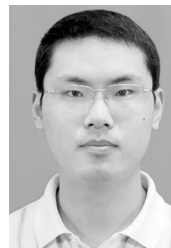
参考文献:

- [1] AJIT S, MOHAMMAD F Z, FARROKH A. A Sub-0.2 μ /hr bias drift micromechanical silicon gyroscope with automatic CMOS mode-matching[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2009, 44(5): 1593-1608.
- [2] AJIT S. *CMOS systems and circuits for sub-degree per hour MEMS gyroscopes* [D]. United States: Georgia, Georgia Institute of Technology, 2007.
- [3] PRIKHODKO I P, ZOTOV S A, TRUSOV A A, et al.. Sub-degree-per-hour Silico MEMS rate sensor wity 1 million qfactor [C]. *Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference (TRANSDUCERS)*, 2011 16th international, 2011: 2809-2812.
- [4] WANG X, WU W, FANG Z, et al.. Temperature drift compensation for hemispherical resonator gyro based on natural frequency[J]. *Sensors*, 2012, 12(5): 6434-6446.
- [5] STRAUBE T M. *A temperature compensation procedure for performance improvement of mass-produced MEMS gyroscopes based on direct parameter measurement* [D]. United States: University of Colorado, 2010.
- [6] 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)
- [7] 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)
- [8] WEINBERG M S, KOUREPENIS A. Error sources in in-plane silicon tuning-fork MEMS gyroscopes [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2006, 15(3): 479-491.
- [9] XIA D, CHEN S, WANG S, et al.. Microgyroscope temperature effects and compensation-control methods [J]. *Sensors*, 2009, 9(10): 8349-8376.
- [10] 凤瑞, 袁安萍, 施芹, 等. 双质量硅微机械陀螺固有频率温度特性研究[J]. *南京理工大学学报*, 2013, 37(1): 1-7.
- FENG R, QIU A P, SHI Q, et al.. Temperature characteristic of natural frequency of double-mass silicon micro-mechanical gyroscope [J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2013, 37(1): 1-7. (in Chinese)
- [11] ACAR C, SCHOFIELD A R, TRUSOV A A, et al.. Environmentally robust MEMS vibratory gyroscopes for automotive applications [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2009, 9(12): 1895-1906.
- [12] HOPCROFT M A, NIX W D, KENNY T W. What is the Young's modulus of Silicon? [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2010, 19(2): 229-238.
- [13] 李新刚. 微机电陀螺误差建模及其在飞行器组合导航中的应用[D]. 西安:西北工业大学, 2004.
- LI X G. *Error modeling of MEMS gyroscopes and its application on flight vehicle integrated navigation* [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2004. (in Chinese)

作者简介:

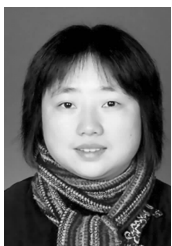


杨亮(1985—),男,河南三门峡人,博士研究生,2008年于南京理工大学获得学士学位,主要从事 MEMS 惯性传感技术研究。E-mail: memsyangliang@163.com



夏国明(1983—),男,河北冀州人,博士,讲师,2012年于东南大学获得博士学位,主要从事 MEMS 惯性技术研究。E-mail: xgmseu@gmail.com

导师简介:



袁安萍(1971—),女,浙江宁波人,教授,博士生导师,1998年、2001年于东南大学分别获得硕士、博士学位,主要从事 MEMS 惯性技术研究。E-mail: apqiu@mail.njust.edu.cn



苏岩(1967—),男,江苏苏州人,教授,博士生导师,1996年、2001年于东南大学分别获得硕士、博士学位,主要从事 MEMS 传感技术研究。E-mail: suyan@mail.njust.edu.cn