

# 微机械陀螺仪温度特性及补偿算法研究

陈 怀, 张 嵘, 周 斌, 陈志勇

( 清华大学 精密仪器与机械学系, 北京 100084 )

**摘 要:** 微机械陀螺是近代发展起来的一种角速率传感器, 与传统陀螺仪相比, 它具有体积小、重量轻、价格便宜等特点, 但其性能受环境温度的改变影响很大。通过分析温度变化对微机械陀螺仪的影响, 推导出陀螺输出、驱动轴相位与温度的关系, 提出了一种无温度传感器的新型补偿算法, 经温度实验补偿后的陀螺温度漂移减小到补偿前的 5%, 为微机械陀螺的性能改善提供了一种新的途径。

**关键词:** 微机械陀螺仪; 温度特性; 补偿

中图分类号: TH7; V241.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-9787(2004)10-0024-03

## Research on thermal characteristic and compensation algorithm for MEMS-gyroscope

CHEN Huai, ZHANG Rong, ZHOU Bin, CHEN Zhi-yong

( Dept of Precision Instr & Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China )

**Abstract:** MEMS-gyroscope is a kind of angular-rate-sensor developed in recent years, which has smaller size, lighter weight and lower cost than traditional rate-sensor. But temperature changing largely influences the performance of MEMS-gyroscope. The influence by temperature changing is analyzed. Relation among zero-rate-output, phase of drive-axis and temperature is derived. Therefore, a novel compensation algorithm without temperature-sensor is presented. The thermal bias drift of the gyroscope compensated by temperature-experiment is reduced to 5% of the value before compensation. The results show a new method to improve the performance of MEMS-gyroscope.

**Key words:** MEMS-gyroscope; thermal characteristic; compensation

### 0 引 言

近年来, 微机械陀螺得到了很大的发展, 出现了音叉式、线振动式、振动轮式等多种结构型式, 并在越来越多的领域获得了重要应用。本文作者研制的振动轮式微机械陀螺仪的结构是: 轮子左右两边是梳齿驱动器, 上下为检测质量片。在梳齿电容上加载交变驱动电压时, 由于静电力的作用, 陀螺就会绕 Z 轴(驱动轴, 垂直于轮面)做角振动。此时, 如果陀螺载体有绕 Y 轴的角速度, 那么, 受哥氏力的影响, 陀螺产生绕 X 轴的角振动, 则质量片和基板上电极之间形成的电容就会发生周期性变化, 其大小反映了陀螺载体的角速度。

微机械陀螺仪的性能随环境温度的改变有较大的变化。陀螺表头的尺寸结构、材料的弹性模量以及陀螺检测电路中电子器件的性能都会随温度的改变而变化, 主要影响到陀螺的零位输出和标度因子发生改变<sup>[1,2]</sup>。仔细分析温度对陀螺各参数产生的影响, 可以找出合理的补偿算法, 从而获得陀螺温度特性的改善。

### 1 温度对微机械陀螺的影响分析

首先, 温度变化时, 陀螺仪微机械结构主要发生两种变化: 尺寸的大小改变和材料弹性模量改变, 其中, 尺寸随温度的改变对陀螺的性能影响很小<sup>[3]</sup>。这里主要讨论材料弹性模量变化的影响。

材料弹性模量的变化会改变系统刚度, 而陀螺的谐振频率会随系统刚度而改变, 因此, 温度变化会导致陀螺谐振频率产生漂移。

弹性模量随温度变化基本成线性关系, 可用式(1)表示

$$E(T) = E_0 - E_0 \kappa_{ET} (T - T_0), \quad (1)$$

式中  $E(T)$ 、 $E_0$  分别是硅材料在温度为  $T$ 、 $T_0$  时的弹性模量, MPa;  $T_0 = 300$  K;  $\kappa_{ET}$  为硅材料弹性模量温度变化系数, 其值在  $25 \times 10^{-6} \sim 75 \times 10^{-6}$  之间, 可取均值  $50 \times 10^{-6}$ 。

而系统刚度与弹性模量成正比

$$K = K_0 [1 - \kappa_{ET} (T - T_0)], \quad (2)$$

式中  $K$ 、 $K_0$  分别是温度为  $T$ 、 $T_0$  时的系统刚度, N/mm。

由此得到陀螺谐振频率与温度的关系

$$\omega_n(T) = \sqrt{K/m} = \sqrt{K_0(1 - \kappa_{ET}(T - T_0))/m} \quad (3)$$

式中  $\omega_n(T)$  是温度为  $T$  时的陀螺谐振频率, Hz;  $m$  为检测质量片质量  $g$ 。

在温度  $T_0$  附近的小范围内时, 式(3)可以线性近似为

$$\omega_n(T) = \omega_n(T_0) [1 - 1/2 \kappa_{ET}(T - T_0)] \quad (4)$$

陀螺谐振频率的漂移, 对陀螺驱动模态和检测模态都有影响<sup>[1]</sup>。对于驱动模态, 在定频驱动方案条件下, 陀螺信号的振幅和相位将会随谐振频率而改变。

在开环情况下

$$y(t) = \frac{F}{\sqrt{(\omega_{nl}^2 - \omega_c^2)^2 + (\omega_{nl}\omega_c/Q_1)^2}} \cdot \sin\left(\omega_c t - \tan^{-1} \frac{\omega_{nl}\omega_c}{Q_1(\omega_{nl}^2 - \omega_c^2)}\right) \quad (5)$$

式中  $y(t)$  为驱动轴输出信号;  $F$  为驱动力幅值,  $N \omega_c$  为驱动力频率, Hz;  $\omega_{nl}$  为驱动轴谐振频率, Hz, 可由式(4)得出;  $Q_1$  为品质因数。

综合式(4)、式(5)得出信号振幅  $A$  和相位  $\Phi$

$$A = \frac{F}{\sqrt{(\omega_{nl}^2 - \omega_c^2)^2 + (\omega_{nl}\omega_c/Q_1)^2}} \quad (6)$$

$$\Phi(T) = -\tan^{-1} \frac{\omega_{nl}\omega_c}{Q_1(\omega_{nl}^2 - \omega_c^2)} \quad (7)$$

假设陀螺谐振频率为 1 750 Hz,  $\omega_c = \omega_{nl}(T_0) = 2 \pi \times 1\,750$  Hz,  $Q_1 = 50$ , 代入上述两式, 可绘出陀螺驱动模态信号振幅、相位与温度的关系曲线, 如图 1 所示。

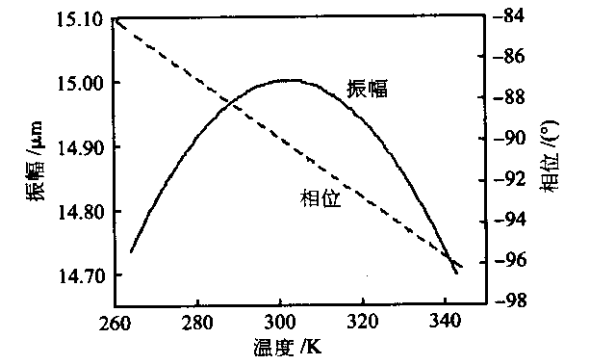


图 1 驱动模态振幅/相位-温度的关系曲线  
Fig 1 Relation curve among zero-rate-output, phase of drive-axis and temperature

由图 1 可以看出, 振幅与相位随温度变化都很大。为了保证陀螺输出增益恒定, 必须进行幅度闭环, 而相位的变化与温度近似线性关系, 即驱动模态相位直接反映了陀螺的温度。将式(7)在  $T_0$  附近小范围内线性近似为

$$\Phi(T) = -\frac{\pi}{2} - \kappa_{ET} Q_1 (T - T_0) \quad (8)$$

即为陀螺驱动轴相位与温度的近似线性关系。在  $-10 \sim 70$  °C 的温度范围内, 由式(8)计算得到的相位误差峰峰值

为  $0.0364^\circ$ , 精度在  $0.32\%$  内。因此, 陀螺驱动轴相位可以作为一个内部的温度传感器, 为实现温度补偿提供很好的参考信息。

温度对陀螺的检测模态信号的影响与驱动模态类似, 在  $-10 \sim 70$  °C 范围内, 检测模态振幅变化小于  $0.78\%$ , 相位变化  $0.417^\circ$ 。另外, 温度变化还会影响陀螺的检测电路。陀螺驱动轴总的相位信息与温度变化的关系由上述因素综合确定<sup>[4]</sup>。

2 温度实验及其结果分析

温度实验采用本文作者自行研制的振动轮式微机械陀螺, 在  $0 \sim 70$  °C 的温度范围内(包括升温过程和降温过程), 温度间隔为  $5$  °C 的条件下, 得到图 2 所示的测试结果。

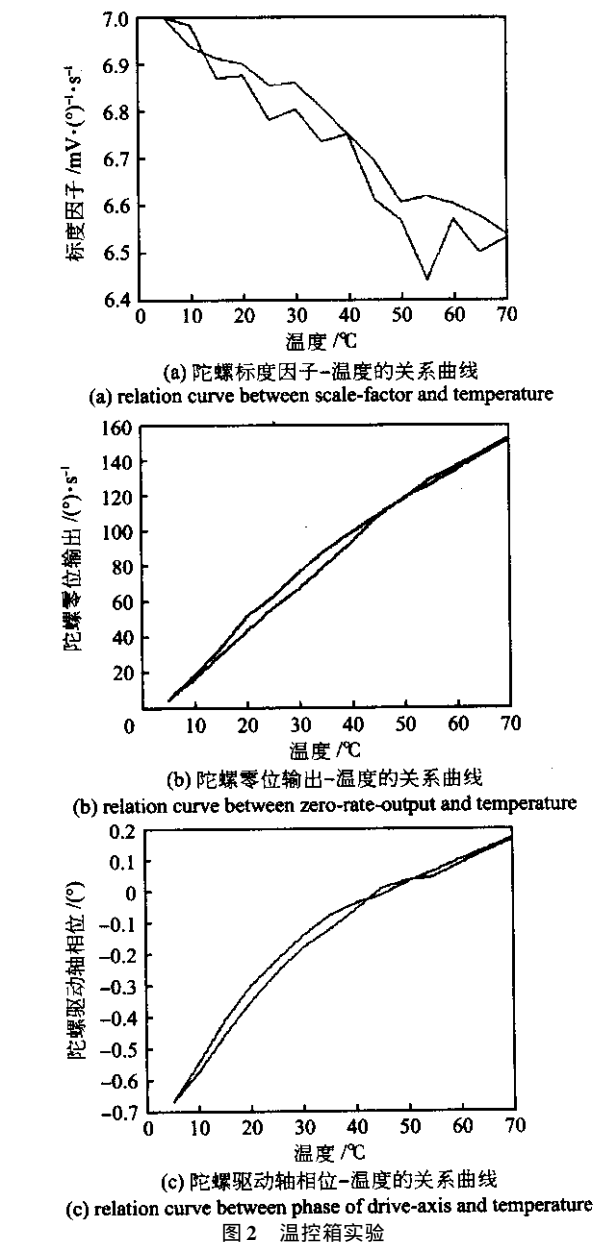


图 2 温控箱实验  
Fig 2 Result of temperature experiment  
由图 2(a)得出, 在  $0 \sim 70$  °C 的温度范围内, 陀螺标度

因子的变化在  $\pm 0.25\text{ mV}/((^{\circ})\cdot\text{s}^{-1})$  范围以内,变化率为  $\pm 4.3\%$ ;而由图 2 (b) 得出:陀螺的零位输出漂移了  $160^{\circ}/\text{s}$ 。二者相比知道,陀螺的零位输出受温度影响远远大于标度因子受温度的影响。因此,对陀螺零位输出温度漂移的补偿是温度补偿算法研究的重点。

由图 2 (c) 中得出:陀螺驱动轴相位随温度变化的关系虽然存在一定的非线性,但是,证明了前文的分析,即陀螺驱动轴相位可以反映陀螺结构的温度,可以作为一个内部的温度传感器进行温度补偿。

绘出陀螺零位输出和驱动轴相位的关系曲线,如图 3 所示。

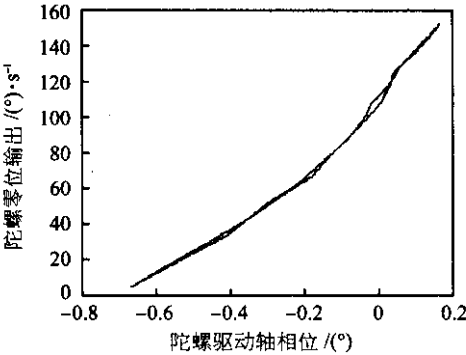


图 3 陀螺零位输出-驱动轴相位的关系曲线

Fig 3 Relation curve between zero-rate-output and phase of drive-axis

从图 3 看出,陀螺零偏与驱动轴相位之间的关系在升温过程和降温过程中比较一致,这证明了由陀螺内部信息代替温度传感器而获得的温度信息没有滞后的问题;虽然,陀螺零位输出与驱动轴相位的关系具有一定的非线性,但

是,曲线比较光滑,可以用二次曲线进行拟合,即

$$\Delta B_{ias} = 136.82\Phi^2 + 242.97\Phi + 109.60$$

(9)

式中  $\Delta B_{ias}$  为陀螺零位输出的补偿量; $\Phi$  为陀螺驱动轴相位。

陀螺采用了数字式检测电路,在数字信号处理器中很容易实现二次曲线的补偿算法。补偿后的陀螺在  $0\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$  的温度范围内,零位输出的漂移在  $\pm 4^{\circ}/\text{s}$  的范围内,为补偿前陀螺零位输出温度漂移的  $5\%$ 。

3 结束语

通过研究温度变化对微机械陀螺仪的影响,推导出了陀螺驱动轴相位与温度的关系,即陀螺驱动轴相位反映了陀螺内部的温度信息,可以作为温度补偿的一个虚拟的温度传感器。温度实验验证了这一关系,证明了这种补偿方法是可行的,并且具有无滞后的优点。

参考文献:

[ 1 ] Hong K S. Compensation of nonlinear thermal bias drift of rsonant rate sensor using fuzzy logic[ J ]. Semsors and Actuators ,1999 , 78 :143 - 148.

[ 2 ] Shcheglov K ,Evans C ,Gutierrez R. *et al.* Temperature dependent characteristics of the JPL silicon MEMS gyroscope[ A ]. 2000 IEEE Aerospace Conference Procee - dings[ C ]. Piscataway NJ USA :IEEE ,2000. 403 - 411.

[ 3 ] 周 斌. 微机械陀螺数字化技术研究[ D ]. 北京:清华大学精密仪器与机械学系, 2003.

作者简介:

陈 怀( 1980 - ) 男,河南省开封人,清华大学精仪系硕士研究生,主要研究方向为微机械惯性仪表和机电控制。

( 上接第 23 页 )

实验结果如表 1 所示。

表 1 实验结果

Tab 1 Experimental results

测试点 序号	测量位移量 ( $\mu\text{m}$ )	理论位移量 ( $\mu\text{m}$ )	绝对误差 ( $\mu\text{m}$ )
1	20.977	21.093	0.016
2	42.198	42.186	0.012
3	84.301	84.282	0.019

4 结 论

本文在双光栅干涉仪光路中实现了基于条纹移动的位移测量。所用区域只有 0 和 +1 级光的区域,这与一般的双光栅干涉仪不同,容易证明:在 Talbot 自成像区域内无法进行上述实验<sup>[3]</sup>,那里干涉条纹随位相体移动的同时,对比度也高且变化,最坏的情况时对比度为 0。本文用的是自成像区以外的区域,因此,扩充了 Talbot 干涉仪的应用范围。装置与 Talbot 干涉仪完全相同,只是  $G_1$  和  $G_2$  间隔的

选取不同。这样便保留了装置结构简单、易调整、工艺要求低和成本低的特点。若采用刻线高的光栅构成双光栅干涉仪,会使接收距离相对减少,这样会使传感器在体积上减少,易组装、易携带,可以检定其它高精度位移传感器、几何量计量定位、微细加工测量,同时,也测量那些可以转换为微位移或光程差的其它物理量。

参考文献:

[ 1 ] 廖延彪. 物理光学[ M ]. 北京:电子工业出版社,1986. 108 - 130.

[ 2 ] 母国光. 光学[ M ]. 北京:人民教育出版社,1978. 36 - 120.

[ 3 ] 霍彦明,崔 骥,许三南. 不规则光栅在双光栅衍射中的作用分析[ J ]. 南京理工大学学报,1998,22( 3 ):276 - 279.

[ 4 ] 苏绍景,刘 辉,吕海宝. 纳米级位移分辨率双光栅系统的多普勒分析[ J ]. 光学精密工程,2003( 2 ):8 - 11.

作者简介:

曲 伟( 1970 - ) 女,黑龙江省哈尔滨市人,黑龙江大学微电子学与固体电子学硕士毕业,现为黑龙江大学电子工程学院副教授。