

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2017.03.015

电容式微机械陀螺温度特性研究及温度补偿

邸昕鹏, 陈伟平, 刘晓为

(哈尔滨工业大学航天学院, 哈尔滨 150001)

摘要:电容式 MEMS 角速率传感器零位的全温稳定性是其实用化的最重要的技术指标之一。分析了陀螺工作原理,从传感器敏感表头的空气阻尼、谐振频率等方面分析了机械结构的温度特性,得出了在全温区内驱动力与传感器零位输出的相关性。根据对陀螺表头和接口电路的温度特性分析,设计了恒定跨导高线性度的运算放大器,实现了全温低相位偏移、低幅值偏移的接口 ASIC,并在高压 N 阱 COMS 工艺下流片。通过驱动力信号对零位进行温度补偿,包含了机械结构刚度和空气热阻尼等因素的影响,理论上比单独的谐振频率补偿更准确,而且驱动力信号可直接由接口电路给出,避免复杂的采样。在 $-40^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内进行零位温度循环测试,驱动力幅值对零位输出进行三阶拟合补偿,补偿后全温零位温度漂移小于 $26.7(^{\circ})/\text{h}(1\sigma)$ 。

关键词:MEMS 陀螺;接口 ASIC;低温漂;温度补偿

中图分类号:V19

文献标志码:A

文章编号:2095-8110(2017)03-0089-05

Research on the Temperature Characteristic and Compensation of Capacitive MEMS Gyroscope

DI Xin-peng, CHEN Wei-ping, LIU Xiao-wei

(School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: For capacitive MEMS angular velocity sensor, the full temperature stability of zero point is one of the most important technical indexes practically. Based on the principle of gyroscope, The correlation between driven-force and zero-point output of sensor is summarized according to the analysis of temperature characteristic of physical structure in terms of air-damping and resonant frequency of sensor header. And based on this analysis, a constant trans-conductance high-linearity amplifier is designed to realize the low phase-drift and low amplitude-drift interface ASIC at full-temperature range. The chip is fabricated in a standard $0.5 \mu\text{m}$ CMOS process. Compensation, which is more accurate than resonant frequency, in theory, achieved by driven-force to zero-point drift and caused by the stiffness of physical construction and air-damping, is adopted. Moreover, the driven-force signal can be obtained from the drive-circuit to avoid complex sampling. The test result shows the zero-point drift is lower than $26.7(^{\circ})/\text{h}$ (1-sigma) at the temperature range from -40°C to 60°C after three-order compensation made by driven-force amplitude.

Key words: MEMS gyroscope; Interface ASIC; Low temperature drift; Temperature compensation

收稿日期:2017-02-11;修订日期:2017-03-26

基金项目:国家自然科学基金(61204121)

作者简介:邸昕鹏(1987-),男,博士,主要从事集成电路方面的研究。E-mail:dixpeng1@163.com

0 引言

角速度传感器广泛应用于惯性测量、航空航天以及消费电子产品中,尤其 MEMS 陀螺以其体积小、成本低、性能高等特点逐渐取代传统陀螺。目前 MEMS 陀螺稳定性、线性度等关键技术指标已经达到高精度应用水平,但是其环境适应性水平相对较低,尤其是温度特性还有待进一步提高,成为制约陀螺应用的关键技术。目前主要通过外置温度传感器采集温度对输出零位进行补偿^[1-3]。但是由于温度的扩散梯度导致难以实时采集传感器内部温度,使得全温区零位补偿效果较差。而且目前多数接口电路为分立器件,温度分布不均匀,也会在一定程度上导致温度性能变差。基于以上原因,本文分析了传感器表头的驱动阻尼和谐振刚度等参数与温度之间的关系,得到了更加准确的驱动力温补方法,设计了能够实现全温电学耦合恒定的低温漂接口 ASIC,从电路上改善温度特性,最终使陀螺达到更好的温度性能^[4-6]。

1 陀螺工作原理

电容式硅微机械陀螺是通过中心质量块的振动使其与固定电极间产生交变电容,通过检测由哥氏力引起的敏感方向的电荷变化来实现陀螺功能。结构分为驱动方向 x 和敏感方向 y 两个相互正交的方向,两个方向都遵循二阶振荡运动方程^[7-8]。

在驱动方向 x 上,当驱动力为 F_0 时,其运动方程为

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} + \lambda_d \frac{dx}{dt} + k_d \cdot x = F_0 \cos(\omega t) \quad (1)$$

M 为质量块的质量, λ_d 为质量块在驱动方向的阻尼系数, k_d 为质量块在驱动方向的弹性系数。当驱动频率 ω 等于驱动固有频率 $\sqrt{\frac{k_d}{M}}$ 时,驱动方向谐振,位移 x 的稳态解为

$$x(t) = \frac{F_0}{\sqrt{\frac{k_d}{M} \lambda_d}} \sin(\omega_d t) \quad (2)$$

其中, ω_d 为驱动谐振频率。

在垂直于 xy 平面的 z 方向有 $\Omega = \Omega_0 \cos(\omega_i t)$ 的角速度输入时,由哥氏力原理,在敏感检测端 y 方向产生 $F_c = 2M\Omega x'(t)$ 大小的哥氏力,其运动方程为

$$M \frac{d^2 y}{dt^2} + \lambda_s \frac{dy}{dt} + k_s y = 2 \frac{F_0}{\sqrt{\frac{k_d}{M} \lambda_d}} M \omega_d \Omega_0 \cdot \cos(\omega_i t) \cdot \cos(\omega_d t) \quad (3)$$

其中, λ_d 为质量块在敏感方向的阻尼系数, k_s 为质量块在敏感方向的弹性系数,位移的稳态解近似为

$$y(t) = k \frac{F_0}{\sqrt{\frac{k_d}{M} \lambda_d}} \Omega_0 \cos(\omega_i t) \cos(\omega_d t) \quad (4)$$

k 为与传感器参数相关的系数。以 $\cos(\omega_d t)$ 解调并低通滤波后即可得到与输入角速度成比例的角速度输出结果^[9]。

根据陀螺工作原理设计了如图 1 所示接口电路,为了降低低频噪声,在质量块上加载高频正弦波调制信号,在 CV 变换后再用高频解调。在驱动端,采用直流叠加交流电压驱动方式,由自动增益控制单元控制驱动交流信号幅值不变,通过调节直流值保证驱动环路动态平衡,从而使质量块最大振动速度不变,谐振在固有频率点。在敏感端采用差分检测 CV 变换,经过二次解调滤波得到角速度输出^[10]。

2 陀螺温度特性研究及温度补偿

表头的寄生哥氏力、正交耦合以及电路的电学耦合、相位偏移等因素都影响陀螺输出,尤其是温度变化将改变陀螺表头和接口电路的参数,使得陀螺输出随温度变化而改变,产生零位温漂^[11]。

2.1 机械表头的温度特性分析

温度对表头的影响主要通过改变阻尼系数和谐振频率来产生。阻尼系数可以表示为式(4)的形式。 A 表示梳齿间的重叠面积, D 表示梳齿间距。

$$\lambda_x = \frac{\mu_{\text{eff}} A}{D} \quad (5)$$

μ_{eff} 为空气温度系数,其表达式为

$$\mu_{\text{eff}} = \frac{384\mu_0}{T + 111} \cdot \left(\frac{T}{273}\right)^{1.5} \quad (6)$$

其中, T 为绝对温度, μ_0 为温度为 0°C 时空气的黏度系数。

通过式(5)、式(6)可以得到热阻尼与温度之间的关系。

对于不同的结构,谐振弹性梁的刚度表达式略有不同,典型的梳齿结构刚度计算如式(7)所示

$$k = \frac{2t\omega^3 W}{L_3 \omega^3 + (2L_1^3 + L_2^3) W} \cdot E \quad (7)$$

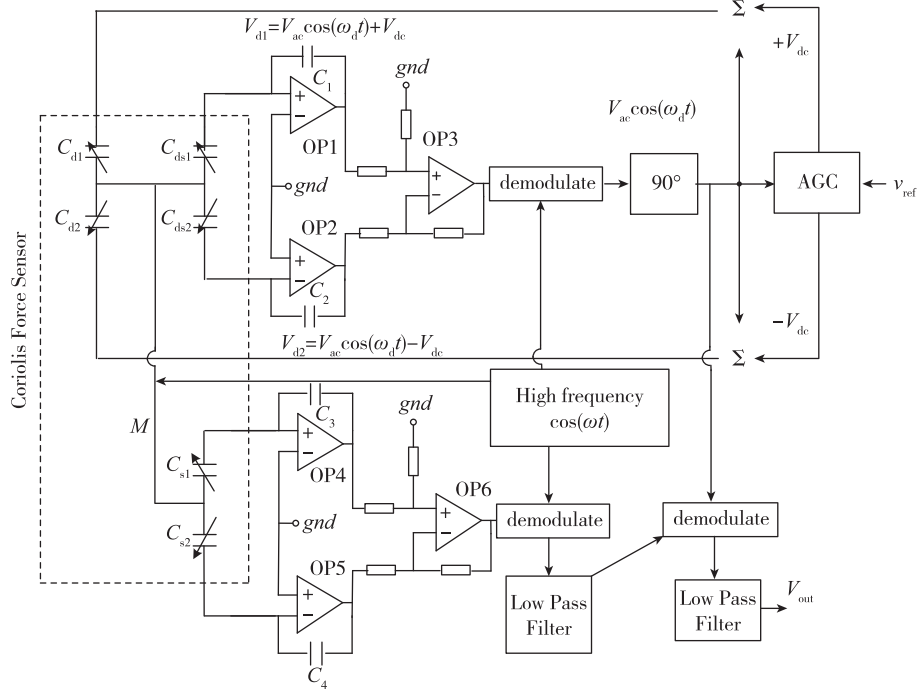


图 1 陀螺驱动控制及角速度检测原理

Fig. 1 The driving and angular ratio detecting principle of MEMS gyroscope.

其中, ω 、 W 、 L 和 t 为弹性梁的物理尺寸参数。

杨氏模量 E 与温度的关系可由半经验公式(8)表示, 其中, E_0 是在绝对温度 0K 下的杨氏模量, $B=15.8\text{MPa/K}$, $T_0=317\text{K}$ 为常数。

$$E = E_0 - BT \exp(-T_0/T) \quad (8)$$

通过式(7)、式(8)可以得到刚度与温度之间的关系。

根据以上分析, 当温度变化时, 阻尼系数和谐振频率将发生改变, 而闭环驱动保证谐振位移幅值恒定, 即式(2)中 $x(t)$ 的幅值不变。所以, 当阻尼系数和刚度发生变化时, 驱动力必将随温度变化^[11-13]。

对传感器表头而言, 工艺误差会导致驱动位移和驱动力与敏感检测方向不完全正交, 产生位移振动分量和驱动力分量, 即正交耦合和寄生力。由于本文设计驱动原理保证驱动位移幅值恒定, 所以正交耦合恒定不变。但是驱动力随温度变化, 进而寄生哥氏力变化, 导致角速度输出也将随温度变化。

2.2 接口电路温度特性分析

为了改善噪声特性, 采用高频调制原理, 而在运放带宽有限的条件下, 电路温度特性主要体现在运放的相位温度特性。以图 2 中电荷放大器 OP4 为例, 其传递函数为

$$\bar{A} = - \frac{\frac{C_{s1}}{C_3}}{1 + (\frac{s}{P_1} + 1)(\frac{s}{P_2} + 1) \frac{C_{s1} + C_3}{C_3 A_0}} \quad (9)$$

式中, A_0 为运放的中频增益, P_1 、 P_2 为运放的 2 个极点。当 $P_1 \ll P_2$ 时, 求得相角 φ 为

$$\begin{aligned} \varphi &= -\arctan \frac{\left(\frac{1}{p_1} + \frac{1}{p_2}\right) \omega \frac{C_{s1} + C_3}{C_3}}{1 + \frac{C_{s1} + C_3}{A_0 C_3} \left(1 - \frac{\omega^2}{p_1 p_2}\right)} \\ &\approx -\arctan \frac{(C_{s1} + C_3) \omega}{C_3} \frac{1}{p_1 A_0} \end{aligned} \quad (10)$$

式中, 只有 p_1 、 A_0 与电路温度特性相关, 而 $p_1 A_0 = \frac{G_M}{C}$, 其中, G_M 是运放跨导, C 是负载电容。设计恒定跨导运算放大器可以有效解决温度对电路的影响^[15-16]。

如图 2 所示, 所有的 MOS 管都工作在饱和区, 假设 M_1 的宽长比大于 M_2 宽长比, M_3 和 M_4 宽长比相同, 构成电流镜, 保证 $I_{DS1} = I_{DS2}$, 根据 KCL 定理及饱和 MOS 管电学公式可得到 M_2 管跨导为

$$G_{M2} = \sqrt{2\mu_p C_{ox} \left(\frac{W_2}{L_2}\right) I_{DS2}} = \frac{2}{R} \left(1 - \sqrt{\left(\frac{W}{L}\right)_2 / \left(\frac{W}{L}\right)_1}\right) \quad (11)$$

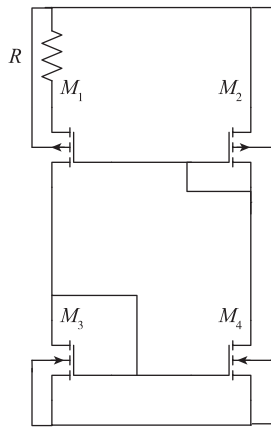


图2 恒定跨导偏置电路

Fig. 2 The constant G_M bias circuit

由式(9)可以看出, G_M 只与 R 的温度相关, 在集成电路中选用井电阻和多晶电阻可实现温度互补, 从而 R 的值不随温度变化, G_M 也就不随温度变化^[17-18]。

3 温度补偿及测试结果

根据温度对传感器零位输出的影响分析, 影响传感器零位输出的主要因素是寄生哥氏力。当机械表头的空气阻尼和刚度随温度变化时, 为保证驱动位移幅值不变, 所需的驱动力必然随温度相应变化, 从而使寄生力发生变化, 影响最终输出。这样, 驱动力完全可以实时表征温度的变化, 通过驱动力对角速度输出实时补偿即可消除温度对输出的影响。由于表头的温度特性是非线性的, 所以应进行如式(12)的高阶补偿。

$$V_{final} = V_{out} + \sum_{i=1}^n k_i V_{dc}^i \quad (12)$$

其中, V_{final} 为最终输出, V_{out} 为补偿前输出, V_{dc} 为直流驱动信号。

该补偿方法优点是包含表头主要参数温度特性, 与单纯用驱动频率温度补偿相比, 能够适应低真空度机械表头, 从根本上补偿了温度对传感器特性的影响。同时具有更加简单的电路设计。

图3所示为MEMS硅陀螺测试系统, 右侧是采用 $0.5\mu\text{m}$ CMOS 工艺生产的接口 ASIC 照片。将陀螺置于温箱中, 进行温度特性测试, 经过 $-40^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$ 全温区扫描, 对 V_{out} 和 V_{dc} 进行采样, 采样结果如图4所示, 可以看出两者具有相关性。根据式(12)进行三阶数字补偿, 补偿结果如图5所示, 在传感器刻度因数为 $35\text{mV}/[^\circ/\text{s}]$ 的情况下, 补偿后

全温零位稳定性为 $26.7(^\circ)/\text{h}$ (1σ)。角速度输出 Allen 方差测试结果为 $0.098(^\circ)/\sqrt{\text{h}}$, 偏置稳定性为 $2.63(^\circ)/\text{h}$ 。图6所示为 Allen 方差曲线。

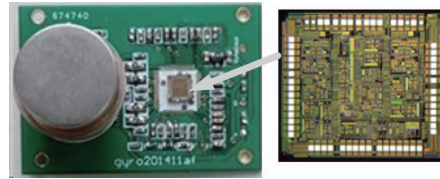


图3 MEMS 硅陀螺测试系统

Fig. 3 The test system of gyroscope

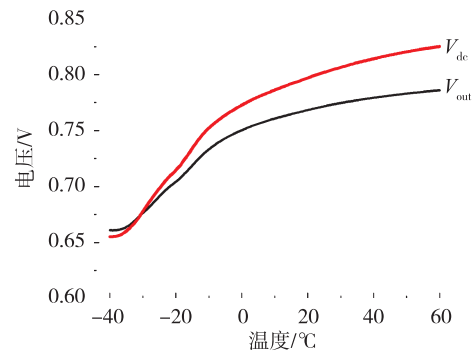


图4 MEMS 硅陀螺传感器输出和直流驱动温度测试

Fig. 4 The sampling curves of V_{out} and V_{dc}

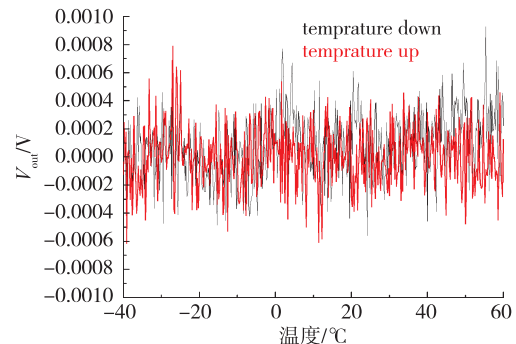


图5 MEMS 陀螺零位输出温度补偿结果

Fig. 5 The temperature compensation results of zero point output of MEMS gyroscope

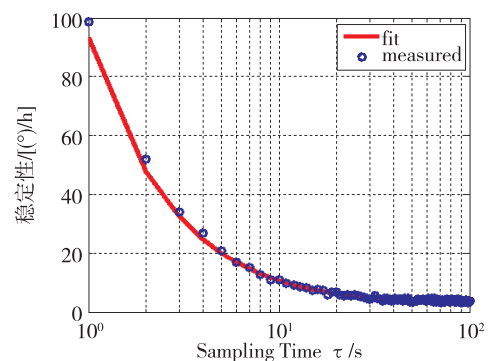


图6 Allen 方差曲线

Fig. 6 The curve of root Allan variance plot

该设计测试结果与目前世界主要硅陀螺性能参数比较如表1所示。

表1 本文工作与已报道工作的对比

Tab. 1 Comparison of this work with reported sensors

	Honeywell HG1930	AIS Si-IMU02	Senonor STIM202	Tronics& Si-Ware	本文
全温零位 稳定性 /[$^{\circ}$]/h	4.5	50	30	10	26.7
稳定性 /[$^{\circ}$]/h	0.6	1.5	0.5	1	2.63
随机游走 /[$^{\circ}$]/ \sqrt{h}	0.04	0.1	0.2	0.1	0.098

4 结论

本文分析了电容式 MEMS 硅陀螺工作原理,推导出温度对传感器的空气阻尼和刚度的影响,进而分析了温度对传感器输出的影响,提出了更为简单、适用范围更宽的驱动力温度补偿方法。本文分析并设计了低温漂传感器接口 ASIC,有效降低了传感器输出温度漂移。测试结果显示,补偿后的传感器温度漂移为 $26.7(^{\circ})/h(1\sigma)$,达到较好的温度补偿效果。角速度输出 Allen 方差测试结果为 $0.098(^{\circ})/\sqrt{h}$,偏置稳定性为 $2.63(^{\circ})/h$ 。

参考文献

[1] 王茹. MEMS 惯性器件发展与应用研究[J]. 河南科技, 2014(1): 123-124.

[2] 王勇. MEMS 技术发展及应用优势[J]. 飞航导弹, 2011(5): 85-89.

[3] 谷雨. MEMS 技术现状与发展前景[J]. 电子工业专用设备, 2013, 222(8):1-8.

[4] 江建明, 姜利飞, 汪家友, 等. 单片集成 MEMS 技术[J]. 传感器技术, 2005, 24(3):1-3.

[5] 刘云涛. 电容式 SIGMA-DELTA 微加速度计接口 ASIC 芯片研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2010.

[6] 吕炳均. 高阶 SIGMA DELTA 微加速度计接口 ASIC 芯片研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2012.

[7] Xu H, Liu X, Yin L. A closed-loop interface for a high-Q micromechanical capacitive accelerometer with 200ng/Hz input noise density [J]. IEEE Journal of

Solid-State Circuits, 2015, 50(9): 2101-2112.

- [8] Sadik A Z, Hussain Z M, Yu X, et al. An approach for stability analysis of a single-bit high-order digital sigma-delta modulator [J]. Digital Signal Processing, 2007, 17(6): 1040-1054.
- [9] Lota J, Janabi M A, Kale I. Stability analysis of higher-order delta-sigma modulators for sinusoidal Inputs [C]//Instrumentation and Measurement Technology Conference, Warsaw. Poland, 2007: 1-5.
- [10] Lota J, Janabi M A, Kale I. Nonlinear-stability analysis of higher order $\Delta\Sigma$ modulators for dc and sinusoidal inputs [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2008, 57(3): 530-542.
- [11] Dzhandzhgava G I, Bakhonin K A, Vinogradov G M, et al. Strapdown inertial navigation system based on a hemispherical resonance gyro [J]. Gyroscopy and Navigation, 2010, 1(2):91-97.
- [12] Moussa H, Bourquin R. Theory of direct frequency output vibrating gyroscopes [J]. IEEE Sensors Journal, 2006, 6(2): 310-315.
- [13] 施闻明, 杨晓东, 徐彬. 导弹飞行中无陀螺惯导系统的误差分析[J]. 弹箭与制导学报, 2007, 27(2): 103-106.
- [14] Shaeffer D K. MEMS inertial sensors: A tutorial overview [J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(4):100-109.
- [15] Kurbatov A M, Kurbatov R A. Radiation resistant fibers with depressed claddings for fiber optic gyro sensing coil [C] 22nd International Conference on Optical Fiber Sensors, SPIE, 2012:80-84.
- [16] Rogers T, Aitken N, Stribley K, et al. Improvements in MEMS gyroscope production as a result of using in situ, aligned, current-limited anodic bonding [J]. IEEE Sensors and Actuators, 2005, 11(2):106-110.
- [17] Judy M W. Evolution of integrated inertial MEMS technology [C]//Solid-State Sensor, Actuator and Microsystems Workshop Digest 0-9640024-5-0. Hilton Head Island, South Carolina, USA, 2004:27-32.
- [18] Chen F, Yuan W, Chang H, et al. Design and implementation of an optimized double closed-loop control system for MEMS vibratory gyroscope [J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 14(1):184-196.