

文章编号 1004-924X(2017)07-1843-07

带温度补偿的低温漂石英微机械陀螺 接口 ASIC 设计

付 强, 尹 亮*, 陈伟平, 刘晓为

(哈尔滨工业大学 MEMS 中心, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 本文通过分析石英陀螺的工作原理, 设计了闭环自激驱动、低噪声相敏解调原理的接口电路, 并研究了驱动力耦合对零位输出造成的影响, 以提高石英陀螺的环境适应性。通过研究传感器敏感表头的空气阻尼和谐振频率等方面的温度特性, 得出温度对驱动力幅值的影响。进而提出通过驱动力幅值进行温度补偿的方法。对接口电路温度特性以及对陀螺零位输出的影响进行了分析, 设计了全温区带宽恒定的运算放大器单元, 抑制由于检测信号中高次谐波分量比例变化产生的温度漂移, 并在高压 N 阱 CMOS 工艺下流片, 实现低温漂接口 ASIC。在 $-45\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内对石英陀螺整机进行零位温度循环测试, 利用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 $20^{\circ}/\text{hr}$ (1σ), 短期稳定性为 $5^{\circ}/\text{hr}$, 输出噪声为 $0.001^{\circ}/\text{s}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

关键词: 石英陀螺; 温度补偿; 接口 ASIC; 温度漂移

中图分类号: TN40 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172507.1843

ASIC design of micro-mechanical gyro interface of low temperature drift quartz with temperature compensation

FU Qiang, YIN Liang*, CHEN Wei-ping, LIU Xiao-wei

(Harbin Institute of Technology, MEMS Center, Harbin 150001, China)

* Corresponding author, E-mail: yinliang_2003@126.com

Abstract: Through analyzing operating principle of quartz gyro, interface circuit of closed-loop self-excited drive and based on principle of low-noise phase sensitive demodulation was designed, and influence of driving force coupling on zero position output was researched to increase environmental adaptability of quartz gyro. Effect of temperature on amplitude of driving force was obtained through researching temperature feature on aspects of air damping and resonant frequency, etc of sensitive header of sensor. Then method of conducting temperature compensation via amplitude of driving force was proposed. Temperature features of interface circuit and influence to zero position output of gyro were analyzed, and operational amplifier unit of constant bandwidth in the whole temperature area was designed to restrain temperature drift due to change of proportion of high-frequency harmonic component in detection signal. The chip was implemented in high voltage N-well CMOS process and

收稿日期: 2016-08-08; 修订日期: 2016-10-18.

基金项目: 上海航天科技创新基金 (No. SAST2015052)

interface ASIC with low-temperature drift was achieved. Cyclic test of zero position temperature was conducted on whole machine of quartz gyro in temperature scope of $-45^{\circ}\text{C}\sim 85^{\circ}\text{C}$ to conduct three-order fitting compensation on zero position output with amplitude of driving force. Zero position temperature drift of whole temperature after compensation was less than $20^{\circ}/\text{hr}(1\sigma)$ with short-term stability and output noise respectively as $5^{\circ}/\text{hr}$ and $0.001^{\circ}/\text{s}/\sqrt{\text{Hz}}$.

Key words: quartz gyro; temperature compensation; interface ASIC; temperature drift

1 引言

石英 MEMS 陀螺以其体积小、造价低和高性能等优势得到广泛应用和迅速发展^[1]。在部分应用中正在逐步取代光纤陀螺、激光陀螺。尤其在航空、航天以及国防工业方面已成为主导产品。瑞典的 Uppsala 大学和 Colibri Pro Development AB 公司于 2000 年开发出的石英陀螺,零位稳定性小于 $0.5(^{\circ})/\text{s}$,线性度小于 0.5% ,温度系数为 $1(^{\circ})/\text{s}/^{\circ}\text{C}$ ^[2]。2005 年 Nihon Dempa Kogyo 针对消费电子类产品需求,推出了堪称当时世界最小的陀螺仪,封装尺寸为 $2.5\text{ mm}\times 3.2\text{ mm}\times 1.3\text{ mm}$,输出噪声为 $0.1(^{\circ})/\text{s}$ 。日本丰田公司设计的微机械石英陀螺接口电路采用 PCB 混合集成方式实现,量程为 $\pm 100(^{\circ})/\text{s}$,刻度因子为 $20\text{ mV}/(^{\circ})/\text{s}$,非线性小于 3% ,在 $-30\sim 85^{\circ}\text{C}$ 范围内输出偏置误差小于 $1(^{\circ})/\text{s}$ 。而目前世界最领先的石英陀螺产品是由美国 BEI 公司推出的,标志性的型号为 QRS11 和 QRS16。该公司生产的石英陀螺已经实现了双片集成,并在惯性测量、航空航天和战术级武器系统中有广泛应用。其中性能最高的 QRS116 短期偏置稳定性小于 $3(^{\circ})/\text{h}$,非线性小于 0.05% ,噪声密度小于 $0.002(^{\circ})/\text{s}/\sqrt{\text{Hz}}$,温度稳定性小于 $20(^{\circ})/\text{h}$ 。最近几年我国电子 26 所、航天 704 所、33 所、国防科大、哈尔滨工业大学等单位在石英陀螺的研究方面均取得了较大进步^[3],部分陀螺性能已接近世界领先水平。但是在全温性能方面还较落后,严重影响其实用化。综上所述,制约陀螺应用的关键技术是其全温区零位稳定性,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。但是由于温度的扩散梯度导致实时采集传感器内部温度较困难,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

导致温度稳定性变差。基于以上原因,本文设计了低温漂接口 ASIC,并采用驱动力实时进行温度补偿,以使石英陀螺具有更好的温度性能。

2 石英陀螺原理及接口电路设计

2.1 石英陀螺工作原理

图 1 为 CNC 影像检测系统原理图。石英陀螺是以哥氏力原理为依据的角速度检测传感器,它利用石英晶体的压电及逆压电效应实现力学量与电学量之间的转换。石英陀螺一般采用如图 1 所示的双音叉结构,该陀螺分为驱动方向 x 和敏感检测方向 y 两个相互正交的方向,工作时两个方向都遵循二阶振动微分方程。

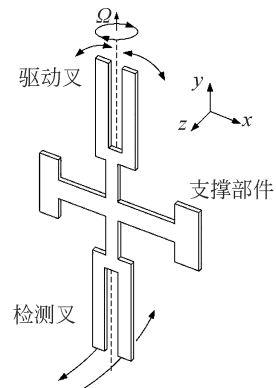


图 1 石英陀螺敏感元件结构图

Fig. 1 Structure graph of sensitive components for quartz gyroscope

当 x 方向的驱动力为 $F_d = F_0 \cos(\omega_d t)$ 时,驱动方向上位移 x 的稳态解为:

$$x(t) = \frac{F_0}{\omega_d \lambda_d} \sin(\omega_d t), \quad (1)$$

其中, λ_d 为音叉振动阻尼系数, ω_d 为驱动谐振频率^[4]。

根据哥氏力原理知,当 z 方向有大小为 $\Omega = \Omega_0 \cos(\omega_c t)$ 的角速度输入时,在 y 方向将产生大

小为 $2B_d M \omega_d \Omega_0 \cos(\omega_s t) \cdot \cos(\omega_d t)$ 的哥氏力。 M 为等效振荡质量, B_d 为与结构参数相关的常数。当检测音叉固有谐振频率与驱动音叉的振动频率不同时, 在检测 y 方向上将产生受迫振动, 此时位移 y 的稳态解为:

$$y(t) \approx B_s \Omega_0 \cos(\omega_s t) \cos(\omega_d t), \quad (2)$$

式中: B_s 为与结构参数相关的常数, 用 $\cos(\omega_d t)$ 信号同相解调后, 再通过低通滤波即可得到与输入角速度成正比的输出^[5]。

2.2 接口电路设计

根据陀螺的工作原理, 设计了如图 2 所示的接口电路原理图。在驱动端, 由石英音叉振动产生电荷, 电荷在音叉间移动形成电流, 跨阻放大器 OP1 将电流信号转化为电压信号的同时使相位移动 90° , 从而满足自激相位条件。自动增益控制电路由峰值检测电路、比例积分电路和参考电压组成。其中峰值检测电路用于对前级跨阻输出的信号进行峰值检测, 得到负向半波整流信号。该信号和正向的参考电压同时对比例积分器注入电流, 静电流值可用于控制积分器输出的大小。驱动生成电路用以实现跨阻输出和积分器输出相

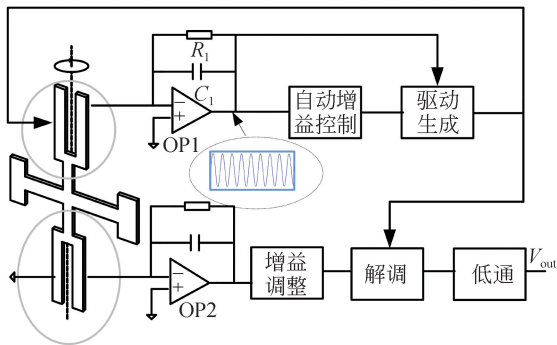


图 2 闭环自激驱动石英陀螺接口 ASIC 原理图

Fig. 2 Schematic of quartz gyroscope interface ASIC by closed loop self excited driving

$$f(T) = f_0 [1 + \alpha(T - T_0) + \beta(T - T_0)^2 + \gamma(T - T_0)^3], \quad (5)$$

其中 f_0 为室温 T_0 下的频率输出。各阶系数由音叉结构参数确定, 其中一阶系数 α 的影响最为显著, 所以频率与温度近似为线性关系。

3.2 电路的温度特性

对电路而言, 温度将给接口电路带来两方面的影响:

(1) 由于电荷放大器的输入端是高阻节点, 故

乘, 最终得到驱动信号, 完成闭环自激驱动。当跨阻输出电压与参考电压对积分器注入的静电流为零时, 驱动达到动态稳定状态。在检测端, 电荷放大器 OP2 将携带角速度信息的表头电荷变化转化为电压信号, 经过增益调整后, 由驱动参考信号同相解调, 最后通过低通滤波得到角速度输出。

3 石英陀螺温度特性分析

3.1 表头的温度特性

对表头而言, 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, 从而产生位移振动分量和驱动力分量, 即正交耦合力和寄生力。为保证传感器灵敏度恒定, 闭环自激驱动环路需保持驱动位移恒定, 所以正交耦合不变。而根据公式(1)可知, 当驱动位移幅值恒定时, 驱动力幅值正比于驱动频率与阻尼系数的乘积。这样, 当驱动频率和阻尼系数随温度变化时, 将导致驱动力变化, 寄生力也将发生变化, 而由于寄生力与哥氏力同相位, 会被解调至最终角速度输出, 最终将引起测量误差。

温度主要影响表头的阻尼系数和谐振频率。阻尼系数可以表示为公式(3)的形式:

$$\lambda_x = K \mu_{\text{eff}}, \quad (3)$$

式中: K 是由表头结构尺寸参数决定的常数, μ_{eff} 为空气温度系数。设 T 为绝对温度^[6], $\mu_0 = 1.71 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{S}$ 为 0°C 时空气的粘度系数, 其值在 $-40 \sim 85^\circ\text{C}$ 近似线性^[7]。则 μ_{eff} 的表达式为:

$$\mu_{\text{eff}} = \frac{384\mu_0}{T+111} \cdot \left(\frac{T}{273}\right)^{1.5}, \quad (4)$$

根据 Gorini 等人关于石英音叉温度传感器的理论知, 石英音叉谐振频率与温度的关系可表示为三阶级数形式:

驱动信号对敏感检测电路的电学耦合不可忽略。另外, 驱动信号幅值随温度变化, 所以电路耦合也会造成输出随温度变化。

(2) 由于驱动信号存在非线性与失真, 如果运算放大器带宽随温度变化, 则将导致驱动信号的谐波分量被耦合到检测端的比例发生变化, 从而导致输出变化。

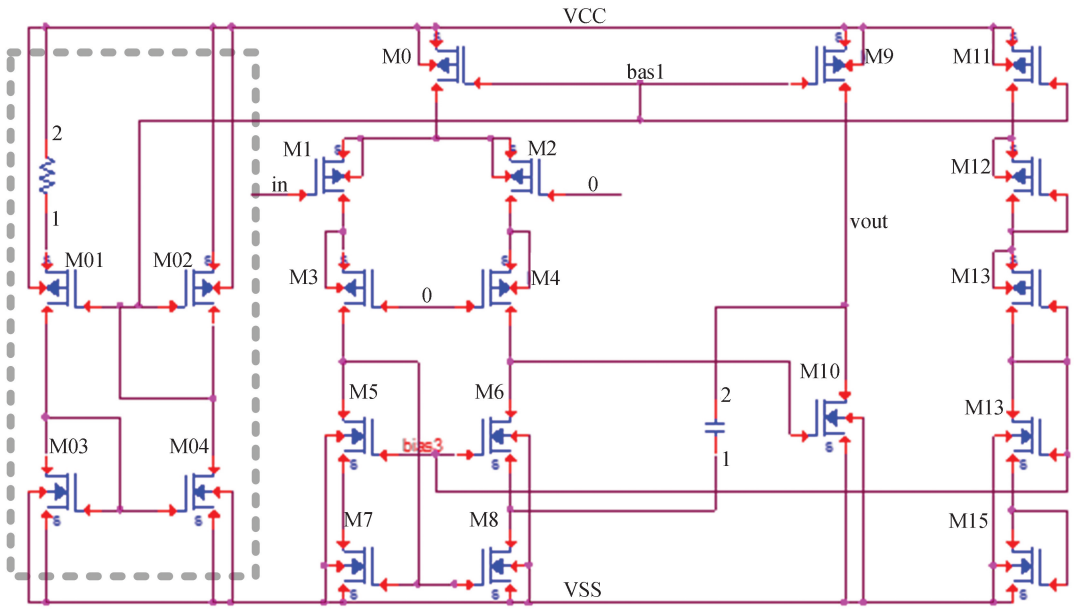


图 3 恒定跨导运算放大器

Fig. 3 Constant transconductance amplifier

4 低温漂 ASIC 设计及温度补偿

4.1 低温漂电路设计

解决角速度的输出温度漂移问题首先要设计低温漂电路,其中带宽对温度不敏感的运算放大器的设计是决定性因素。由于增益带宽积等于运放跨导与负载电容比值,当负载电容不变时,可设计如图 3 所示的恒定跨导运放以消除温度对带宽的影响^[8],进而改善因温度变化造成的输出零位变化。

图 3 虚线框内是恒定跨导偏置电路,所有的 MOS 管都工作在饱和区,根据 KCL 定理和 MOS 管电流公式可以得到^[9]:

$$\sqrt{\frac{2I_{DS02}}{\mu_p C_{ox} \left(\frac{W}{L}\right)_{02}}} + V_{TH02} = \sqrt{\frac{2I_{DS01}}{\mu_p C_{ox} \left(\frac{W}{L}\right)_{01}}} + V_{TH01} + I_{DS01}R \quad (6)$$

当 M03 和 M04 宽长比相同时,两支路电流相同,求解化简可得:

$$I_{DS02} = \frac{2}{\mu_p C_{ox} R^2} \left(\sqrt{\frac{L_{01}}{W_{01}}} - \sqrt{\frac{L_{02}}{W_{02}}} \right)^2 \quad (7)$$

则 M02 管跨导为:

$$G_{M02} = \sqrt{2\mu_p C_{ox} \left(\frac{W_{02}}{L_{02}}\right) I_{DS02}} = \frac{2}{R} \left(1 - \sqrt{\frac{(W/L)_{02}}{(W/L)_{01}}} \right) \quad (8)$$

由式(8)可看出, G_M 只与 R 的温度相关,在集成电路中选用阱电阻和多晶电阻可实现温度互补,从而使 R 的值不随温度变化,则 G_M 也就不随温度变化。同时在输入级采取差分结构,来降低运放非线性,输入管采用较大宽长,以增大输入管面积,可改善 $1/f$ 噪声^[10]。

4.2 零位温度补偿

通过对温度特性的分析可知,在保证接口电路温度特性的基础上,需要进行输出温度补偿。根据公式(1)可知,驱动位移幅值恒定时,驱动力与谐振频率和阻尼系数相关,从而与温度相关^[10]。对输出的影响可以表示为:

$$v_{out}(T) = k_1 \cdot F_d = k_1 \cdot \omega_d \lambda_d \quad (9)$$

其中 k_1 为从驱动力到寄生力,再经过检测端信号通路的总的等效增益系数。

此外,电路的驱动耦合也正比于驱动力。这样,通过采集驱动力的幅值对角速度输出进行温度补偿,能够得到较为精确的温度补偿效果。相比于用温度传感器测量温度再进行温度补偿的方法,该方法延时更小,补偿精度更高,而且不需要引入其它电路,有利于系统集成^[11]。

5 测试结果

本文根据石英陀螺原理,设计了接口 ASIC,采用 0.5 μm 双金属双多晶 N 阱高压 CMOS 工艺进行了流片加工。

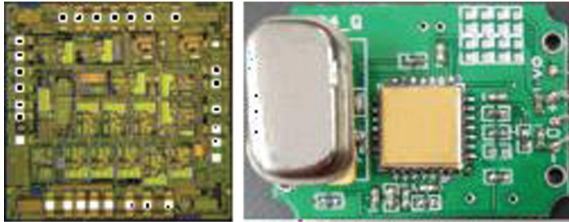


图 4 石英陀螺接口 ASIC 及整机测试系统

Fig. 4 Quartz gyroscope interface ASIC and whole machine testing system

图 4(彩图见期刊电子版)为芯片照片及 LCC 陶瓷封装芯片整机测试系统。结合航天 704 所的石英陀螺表头进行了整机测试。其中,全温测试在 -45~85 °C 之间按照每分钟变化 1°C 进行温度循环,同时对驱动信号和角速度输出采样。图 5 (彩图见期刊电子版)为角速度输出随温度变化曲线,图 6(彩图见期刊电子版)为驱动信号幅度有效值随温度变化曲线,图中黑色曲线为升温测试曲线,红色曲线为降温测试曲线。根据前文温度补偿分析知,利用图 6 所示的驱动力信号对图 5 所示的角速度输出信号进行同步补偿即可实现温度补偿。图 5 所示的升降温曲线在 20 mV/(°)/s 的刻度因数下,计算得出的全温区输出变化为 1030(°)/hr(1σ),其中温度滞回对应的输出变化为 297(°)/hr(1σ)。由于驱动力温度滞回与角速度输出温度滞回同步,在补偿时可以很大程度予以消除,而且最终补偿拟合是分别对升降温曲线进行温度补偿拟合后再取平均值得到的拟合系数,所以基本可以消除温度滞回的影响,从而得到最终温度补偿拟合曲线^[12]。

为了简单模拟电路的温度补偿,一般采用线性补偿就能达到较好的补偿效果,但是为得到更高的温度性能,目前多数采用三阶以上的高阶非线性补偿。本设计采用三阶温度补偿方案,分别对升温、降温曲线拟合并取平均值后即可得到温补拟合曲线为 $y = -1.314 44x^3 + 3.423 86x^2 -$

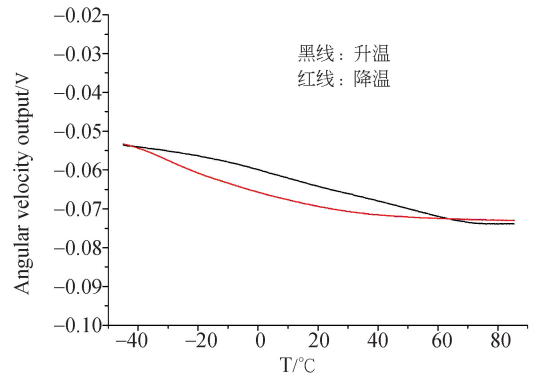


图 5 石英陀螺角速度输出温度特性曲线

Fig. 5 Temperature characteristic curves of angular velocity output for quartz gyroscope

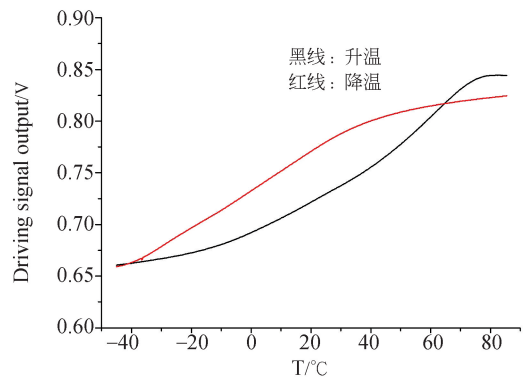


图 6 石英陀螺驱动力幅值温度特性曲线

Fig. 6 Temperature characteristic curves of quartz gyroscope driving force amplitude

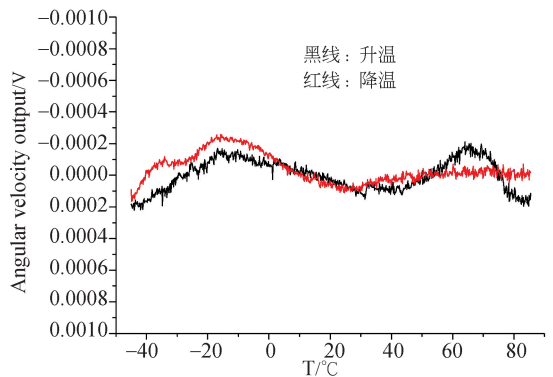


图 7 石英陀螺温度补偿后角速度输出全温变化

Fig. 7 Change of angular velocity in full temperature range of quartz gyroscope with temperature compensation

3.018 86x + 0.825 25。按照该曲线进行拟合可得到如图 7 所示补偿后的角速度零位输出曲线,根据实际测得的 20 mV/(°)/s 的刻度因数,计算

得到温度补偿后稳定性为 $19.8(^{\circ})/\text{hr}(1\sigma)$, 该稳

表 1 本文设计的低温漂石英陀螺与 QRS116 对比

Tab.1 Comparison of the low temperature drift quartz gyroscope and QRS116

性能指标	QRS116	本文设计
量程/ $(^{\circ}) \cdot \text{s}^{-1}$	± 100	± 200
温度稳定性 (3 阶补偿, 1σ) $/(^{\circ}) \cdot \text{hr}^{-1}$	20	19.8
短期稳定性 $/(^{\circ}) \cdot \text{hr}^{-1}$	3	5
非线性/ppm	500	200
输出噪声谱密度 $/(^{\circ})/\text{s}/\sqrt{\text{Hz}}$	0.002	0.001
带宽/Hz	60	60
建立时间/s	1.5	2

定性主要由拟合误差决定, 温度滞回的影响已相对不明显。对其它关键性能指标也进行了测试, 并且与目前国际先进水平的石英陀螺产品 BEI 公司的 QRS116 进行了性能对比, 结果如表 1 所示, 可见本文设计的陀螺的关键性能指标都与 QRS116 相当或优于其指标。

6 结 论

本文分析了石英音叉谐振原理, 并根据此原理完成了闭环自激驱动石英陀螺接口 ASIC 的原理设计。通过分析温度对石英陀螺机械表头空气阻尼和固有谐振频率的影响, 得出温度和驱动力的对应关系, 从而得出通过驱动力进行温度补偿的理论依据。完成了高温特性接口 ASIC 晶体管级设计并完成了流片加工, 结合传感器表头进行了相关性能测试, 其中全温零位输出稳定性达 $19.8(^{\circ})/\text{hr}(1\sigma)$ 。

参考文献:

- [1] CHEN W P, WANG Q Y, YIN L. A high-performance interface ASIC for quartz vibrating gyroscope [J]. *Optoelectronics and Microelectronics Technology*, 2011: 263-266.
- [2] 齐广峰, 吕军锋. MEMS 惯性技术的发展及应用 [J]. *电子设计工程*, 2015(1): 87-89+92.
QI G F, LV J F. Development and application of MEMS inertial technology [J]. *Electronic Design Engineering*, 2015(1): 87-89+92. (in Chinese)
- [3] WANG Q Y, CHEN W P, YIN L, et al.. A closed-loop self-excited drive circuit for quartz gyroscope [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2012, 10(6): 497-502
- [4] 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.. MEMS gyroscope device level vacuum packaging technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(8): 1987-1992. (in Chinese)
- [5] 曹慧亮, 李宏生, 王寿荣, 等. 硅微机械陀螺仪测控电路的温度补偿 [J]. *光学 精密工程*, 2013, 21(12): 3118-3125.
CAO H L, LI H SH, WANG SH R, et al.. Temperature compensation of monitoring circuit for silicon MEMS gyroscope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(12): 3118-3125. (in Chinese)
- [6] VEIJOLA T, TUROWSKI M. Compact damping models for laterally moving microstructures with gas-rarefaction effects [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2001, 10(2): 263-273, June 2001.
- [7] WANG S W. Modeling and error compensation of MEMS gyroscope dynamic output data within the whole temperature range [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 311-313: 768-771.
- [8] 赵双, 刘云涛. 恒跨导轨对轨 CMOS 运算放大器的设计 [J]. *微电子学*, 2016, 46(3): 302-305+310.
ZHAO SH, LIU Y T. Design of a CMOS rail-to-rail operational amplifier with constant transconductance [J]. *Microelectronics*, 2016, 46(3): 302-305+310. (in Chinese)
- [9] ARBET D, KOVÁ M, NAGY G, et al.. High dynamic range and low distortion fully differential difference amplifier in CMOS [C]. 2015 25th International Conference Radio-elektronika IEEE, 2015: 114-117.
- [10] BELOUSOV E, TIMOSHENKO A, LOMOVSKAYA K. Low noise amplifier for MEMS gyroscope readout circuit [C]. 2016 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIConRusNW), 2016:

495-498.

- [11] 李世国,朱振忠,杨勇,等. 石英音叉陀螺的温度特性及其补偿方法[J]. 压电与声光, 2015, 37(3): 504-511.

LI SH G, ZHU ZH ZH, YANG Y, *et al.*. Temperature characteristics and temperature compensation models of quartz tuning fork gyroscope [J].

Piezoelectrics & Acoustooptics, 2015, 37(3): 504-511. (in Chinese)

- [12] FANG J CH, LI J L. Integrated model and compensation of thermal errors of silicon microelectromechanical gyroscope [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2009, 58(9): 2923-2930.

作者简介:



付 强(1979-),男,黑龙江哈尔滨人,博士研究生,2003年、2007年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士学位,主要从事集成传感器接口集成电路设计的研究。E-mail: qiangfhit@sina.com

导师简介:



陈伟平(1966-),男,黑龙江哈尔滨人,博士,教授,博士生导师,1989年于兰州大学获得学士学位,1992年、2008年于哈尔滨工业大学分别获得硕士、博士学位,主要从事微纳器件与微系统、集成传感器、集成电路设计与应用、无线传感网等方面的研究。E-mail: chenwp@hit.edu.cn

通信作者:



尹 亮(1977-),男,黑龙江哈尔滨人,博士研究生,2000年于黑龙江大学获得学士学位,2005年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事集成传感器接口集成电路设计的研究。E-mail: yinliang2003@126.com