

文章编号 1004-924X(2013)05-1272-10

# 硅微振动陀螺仪设计与性能测试

贾方秀\*, 裘安萍, 施芹, 苏岩

(南京理工大学 MEMS 惯性技术研究中心, 江苏 南京 210094)

**摘要:**介绍了基于 DDSOG(Deep Dry Silicon On Glass) 工艺自主研发的硅微振动陀螺仪的结构, 封装, 及信号与性能检测。利用结构解耦的方法和 DDSOG 工艺设计和制备了双质量线振动式陀螺结构。为了提高它的机械灵敏度、可靠性和长期稳定性, 采取真空封装技术实现了器件级真空封装, 并消除了轴向加速度等共模干扰的影响。陀螺电路采用自激闭环驱动、开环检测的方式, 简化了电路。为了降低环境温度对陀螺零偏的影响, 研究了既定范围内陀螺的输出特性, 建立了陀螺输出与温度之间的关系模型, 设计了温度补偿电路, 降低了陀螺整表的功耗和体积。对采用上述技术的硅微陀螺仪进行了性能测试, 测试结果表明, 陀螺  $Q$  值  $>100\ 000$ , 量程为  $\pm 500(^{\circ})/s$ , 标度为  $21.453\text{ mV}\cdot(^{\circ})^{-1}\text{ s}^{-1}$ , 非线性和对称性分别为  $36.905\times 10^{-6}$  和  $184.125\times 10^{-6}$ 。常温下陀螺零偏稳定性为  $7.714\ 3(^{\circ})/h$ , 带宽为  $100\text{ Hz}$ , 整表体积为  $31\text{ mm}\times 31\text{ mm}\times 12\text{ mm}$ , 功耗为  $288\text{ mW}$ 。该陀螺仪性能好、体积小、功耗低, 在中等精度的惯性导航系统中有良好的应用前景。

**关键词:**硅微振动陀螺仪; 真空封装; 自激驱动; 温度补偿

**中图分类号:** V241.5; V666.123 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132105.1272

## Design and experiment of micro machined vibratory gyroscope

JIA Fang-xiu\*, QIU An-ping, SHI Qin, SU Yan

(MEMS Inertial Technology Research Center,  
Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

\* Corresponding author, E-mail: jiafangxiu@1261.com

**Abstract:** A novel MEMS vibratory gyroscope was fabricated by our research group, and its structure, packaging, signal detection and performance measurement were described. The dual-mass MEMS vibratory gyroscope was designed by a structure-decoupled method and prepared by the Deep Dry Silicon On Glass (DDSOG). To improve the mechanical sensitivity, reliability and stability, the gyroscope was packaged by vacuum technology and the common mode disturbance caused by axial acceleration was also eliminated. A self-resonance drive circuit with Automatic Gain Control (AGC) was employed in the drive closed loop to keep the stable amplitude and frequency of the drive-mode. The open loop detect circuit was adopted to simplify the whole control system. In order to reduce the temperature impact on the bias of gyroscope, the gyroscope's outputs within a certain temperature range were studied, and the relationship model between gyroscope outputs and temperature was established. On the basis of the model, a proper temperature real-time compensation system using a platinum resistor

收稿日期: 2012-11-22; 修订日期: 2013-01-23.

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目 (No. 61201391); 中国人民解放军总装备部预研基金资助项目 (No. 9140A09022309BQ02)

was designed to reduce the power consumption, meanwhile to minimize the volume of the system. The experiment results show that the gyroscope has a quality factor above 100 000, the operating range of  $\pm 500(^{\circ})/s$  with the scale factor of  $21.453 \text{ mV} \cdot (^{\circ})^{-1} \cdot s^{-1}$  and nonlinearity and asymmetry errors of  $36.905 \times 10^{-6}$  and  $184.125 \times 10^{-6}$  respectively. Moreover, at room temperature the bias of the gyroscope is  $7.7143(^{\circ})/h$  over a 100 Hz bandwidth, the whole system volume is  $31 \text{ mm} \times 31 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$  and the power consumption is 288 mW. The proposed vibratory gyroscope has a promising prospect for the inertial navigation system with a medium accuracy due to its high performance, small volume and low power consumption.

**Key words:** micro machined vibratory gyroscope; vacuum packaging; self-oscillation-driven; temperature compensation

## 1 引言

硅微机械陀螺是一种(Micro-Electro-Mechanical Systems) MEMS 传感器,具有微型化、智能化、多功能集成化和适于批量生产等优点。硅微机械陀螺的优异特性使其在工业自动化领域、军事应用等方面有广泛的应用前景和应用价值。尤其在军事应用方面,主要用于弹药的惯性制导、飞行器的导航和姿态控制、平台稳定、便携式单兵导航等。目前在部分低精度应用领域,硅微机械陀螺已经逐步替代体积庞大的机械陀螺和价格昂贵的光纤和激光陀螺。但是在导航、制导等高精度惯性测量领域中,由于硅微机械陀螺具有性能指标低、功耗高、体积大等缺点而使其应用受到限制。目前,国外硅微机械陀螺研究机构主要有美国 Draper 实验室、Analog Device 公司、加州大学 Berkeley 分校、HoneyWell 公司等。2002 年,JPL 设计的首蓓叶结构的硅微陀螺仪,经 Allan 方差处理后最佳的零偏稳定性达到了  $1(^{\circ})/h$ ,功耗为 1 W,体积为 127.43 立方厘米<sup>[1]</sup>。2009 年美国佐治亚理工大学采用(Complementary Metal Oxide Semiconductor)CMOS 电路实现了调谐式陀螺的模式匹配,经 Allan 方差处理后,其零偏稳定达到了  $0.16(^{\circ})/h$ ,带宽为 10 Hz<sup>[2]</sup>。ADI 的商用陀螺 MEMS 陀螺仪 ADIS16136 的零偏稳定性为  $3.5(^{\circ})/h$ ,带宽为 380 Hz,量程为  $\pm 450(^{\circ})/s$ ,功耗小于 1 W。2010 年,东南大学研制了基于数字测控电路的硅微陀螺仪,该陀螺仪量程为  $\pm 300(^{\circ})/s$ ,零偏稳定性为  $15.18(^{\circ})/h$ ,而非线性为  $1.388 \times 10^{-6}$ <sup>[3]</sup>。同年,该校报道了一种新的对称全解耦硅微陀螺仪,实验证实该硅微陀

螺仪零偏温度系数为  $57.68(^{\circ})/(h^{\circ}C)$ ,可见,温度系数过大仍是限制硅微陀螺仪零偏性能提高的重要因素<sup>[4]</sup>。许多研究者采取了温度控制或者温度补偿的方法来降低温度对陀螺零偏的影响,取得了较好的效果<sup>[5-6]</sup>。但这些方法大多基于数字处理平台,增加了系统的复杂性和功耗,而系统功耗增加还会导致温升。

由于国内的硅微陀螺研究起步较晚,一些关键技术与国外同行存在一定差距,虽然做出了陀螺样机,但其性能指标还不能完全达到速率级要求,离战术级和惯性级的要求就更远了<sup>[7]</sup>。本文以提高硅微陀螺性能指标、降低整表体积和功耗为目标,详细阐述了本实验室硅微陀螺的结构、封装方法、信号检测电路,并进行了性能测试,为进一步提高硅微陀螺性能指标提供了一定的技术储备。

## 2 硅微陀螺结构和制备方法

### 2.1 结构设计

硅微陀螺的结构形式决定其能否实现高性能。为了减小温度和环境干扰,消除共模干扰,陀螺采用双质量、全对称式结构。其结构简图如 1 所示。

陀螺仪机械结构由一对完全相同的子结构组成,2 个子结构左右对称布置;采用 2 组支撑梁将驱动部分与检测部分分开,实现了驱动方向与检测方向的运动解耦,从而减小误差信号;2 个子结构的驱动运动和检测运动均为相向运动,形成梳齿差动电容检测,实现了敏感输出解耦,可有效抑制干扰信号。陀螺工作时,在驱动梳齿上施加带有直流偏置的交流电压,使两边的驱动结构沿 X

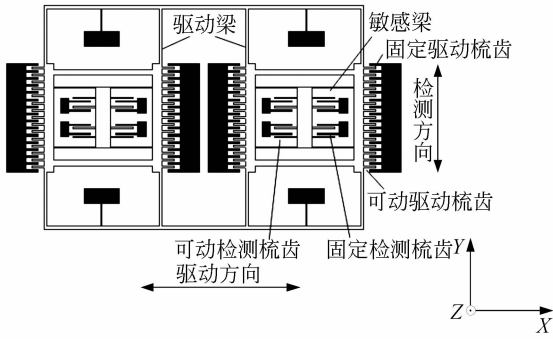


图 1 硅微振动式陀螺仪结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of silicon micromachined vibratory gyroscope

轴做交变的反相振动, 当有绕 Z 轴的角速度输入时, 左右两边质量块受到沿 Y 轴的相反的哥氏力, 使得检测梳齿电容发生变化, 电容的变化量与输入的角速度成正比。对称的双质量结构使左右两边检测电容的变化方向相反, 形成差动输出。通过 Y 轴方向上检测梳齿与固定梳齿间的电容变化量便可以感受 Z 轴方向的输入角速度。

双质量微机械陀螺仪可看做一个二阶  $n$  自由度的线性系统。分别对陀螺的驱动和检测部分进行动力学简化, 驱动部分可以简化为一个 2 自由度的质量弹簧系统, 检测部分可以简化为一个单自由度的质量弹簧系统。动力学简化模型如 2 所示。

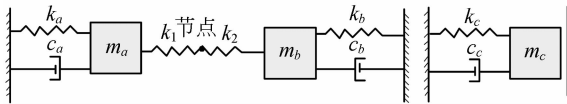


图 2 双质量微机械陀螺仪动力学简化模型

Fig. 2 Simplified dynamic model of dual-mass micro-machined gyroscope

驱动和检测的动力学方程分别为:

$$\ddot{x} + 2\xi_x \omega_x \dot{x} + \omega_x^2 x = \frac{F_d}{m_a + m_b} \sin(\omega_d t), \quad (1)$$

$$\ddot{y} + 2\xi_y \omega_y \dot{y} + \omega_y^2 y = -2\Omega_z \dot{x}. \quad (2)$$

$m_a, m_b, m_c$  为各质量块的质量,  $k_a, k_1, k_2, k_b, k_c$  为各弹簧的刚度系数,  $\xi_x, \xi_y$  为驱动模态和检测模态的阻尼比,  $\omega_x, \omega_y$  为驱动和检测模态的固有频率。  $F_d \sin(\omega_d t)$  为驱动方向简谐力, 而  $-2\Omega_z \dot{x}$

是输入角速率为  $\Omega_z$  时在敏感方向上产生的哥氏加速度,  $\dot{x}$  为驱动方向上质量块的运动速度。可见, 在角速度输入时, 敏感方向产生的哥氏加速度与驱动方向的驱动速度成正比。

### 2.2 制备工艺

本文采用 Deep Dry Silicon on Glass (DDSOG) 工艺方案加工硅微振动陀螺仪, 工艺流程图如 3 所示。在硅片和玻璃材料准备完毕后, 根据掩模板形状在硅片和玻璃上涂光刻胶; 其次, 采用反应离子刻蚀 RIE 技术在硅片上刻出键合台, 在玻璃片上沉积金属电极和引线; 再次, 采用阳极键合的方法进行硅-玻璃键合; 最后, 进行双面光刻, 采用 CIP 深刻蚀, 完成质量块、支撑梁、梳齿等结构的加工。

DDSOG 工艺流程简单, 全部工艺只需要 3 次光刻, 成品率高且工艺成本低。该工艺较表面加工工艺具有更大的深宽比, 且制备的质量块较大, 故采用该工艺制备的陀螺结构灵敏度较高。特别是器件的可动结构材料是单晶硅, 内应力很小, 在加工过程中避免了高温工艺和其他材料在结构层上的复合, 因此最后获得的陀螺结构的应力和应力梯度均较小<sup>[8]</sup>。

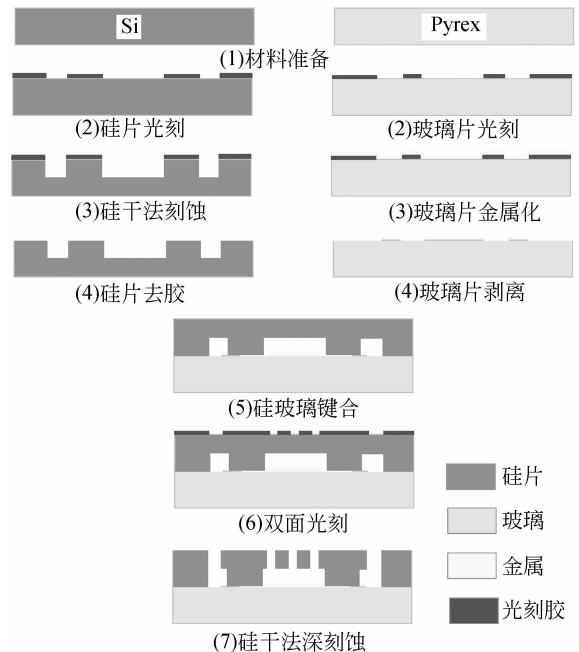


图 3 DDSOG 工艺流程

Fig. 3 Fabrication process of DDSOG

在电镜下观察加工出的陀螺梳齿结构,如 4 所示:

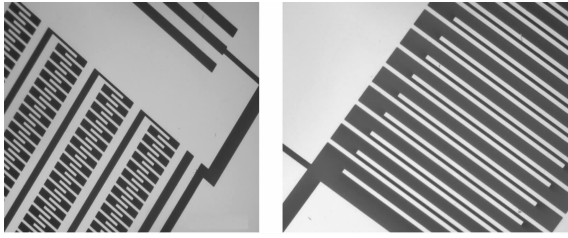


图 4 电镜下观察所得陀螺梳齿结构

Fig. 4 Comb structure of gyroscope obtained by scanning-electron-micrograph

### 2.3 器件级真空封装

对硅微陀螺来说,品质因数越大则振动幅值和振动频率越稳定,另外增大陀螺品质因数可以降低陀螺驱动电压,减小阻尼耦合,提高陀螺的可靠性和长期稳定性。为了进一步提高 MEMS 陀螺仪的品质因数以提高其灵敏度和分辨率,采用了真空封装技术。对真空封装后的陀螺采用 Ring-down 法测试其 Q 值<sup>[9]</sup>,由陀螺驱动的动力学方程(1)可知,在驱动方向上,振动方程的解为:

$$x(t) = \frac{F_d}{k} \frac{\sin(\omega t - \varphi)}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left[2\xi\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)\right]^2}} + X_1 e^{-\xi\omega_n t} \sin(\sqrt{1 - \xi^2} \omega_n t + \varphi_1). \quad (3)$$

上式第二项为余弦函数,其零输入响应最终会衰减到零,故方程的稳态解是零状态响应时:

$$x(t) = \frac{F_d}{k} \frac{\sin(\omega t - \varphi)}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left[2\xi\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)\right]^2}}. \quad (4)$$

当有一瞬时冲击  $F_\delta$  施加到二阶系统时,若冲击为接近理想的冲击,则从冲击结束后的时刻开始,二阶方程的振幅解仅为方程的通解,即零输入响应的衰减信号。即:

$$X_{\delta+} = X_1 e^{-\xi\omega_n t} \sin(\sqrt{1 - \xi^2} \omega_n t + \varphi_1). \quad (5)$$

上述信号包络线和衰减的正弦信号均与系统固有频率及阻尼相关。对于衰减信号  $z(t) = Ze^{-\xi\omega_n t}$ ,其时间常数可以表示为  $\tau_0 = 1/(\xi\omega_0)$ 。则陀螺 Q 值为:

$$Q = \frac{1}{2\xi} = \frac{1}{2} \tau_0 \omega_0 = \frac{1}{2} \tau_0 2\pi f_0 = \pi \tau_0 f_0. \quad (6)$$

由此,Ring-down 法测量原理如图 5 所示:

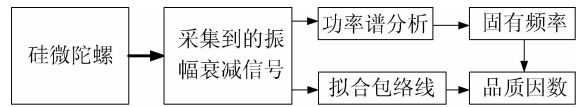


图 5 Ring-down 法测量陀螺 Q 值原理框图

Fig. 5 Schematic of Ring-down method for quality factor measurement

对被测陀螺采用正弦信号冲击,使用 NI 公司 USB-6366 型数据采集卡以 500 kHz 的采样频率采集得到的振幅衰减信号如图 6 所示:

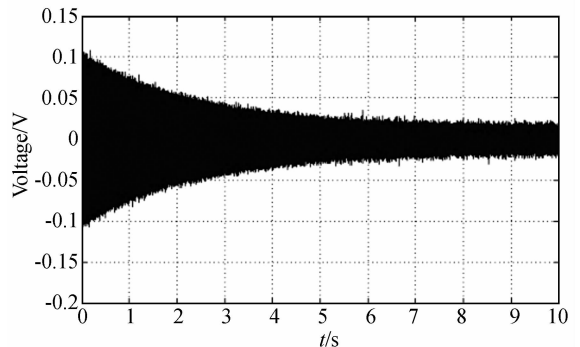


图 6 正弦冲击后的振幅衰减信号

Fig. 6 Amplitude fading signal after applying a sine voltage

对所获得的振幅衰减信号包络进行拟合,计算可得,包络线的表达式为:

$$z(t) = 0.07345 \cdot e^{-0.4235t}. \quad (7)$$

采用周期图法获得的振幅衰减信号功率谱如图 7 所示:

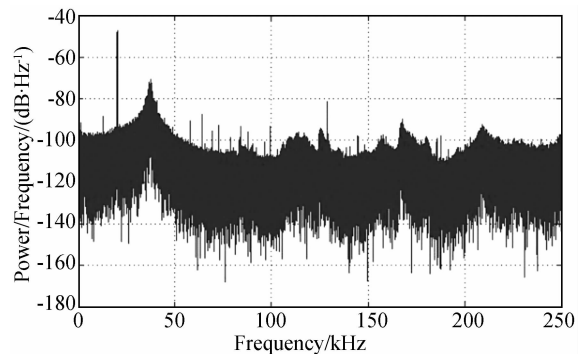


图 7 衰减信号的周期图法功率谱估计

Fig. 7 Power spectrum estimation based on periodogram for fading signal

由图 7 可知,由功率谱计算可得峰值频率为 20.404 8 kHz。则:

$$Q = \frac{1}{2\xi} = \frac{1}{2 \times \frac{0.4235}{2\pi \times 20.4048 \times 10^3}} = 1.5137 \times 10^5. \quad (8)$$

实验证实,采用真空封装后的 MEMS 陀螺仪的品质因数大于 100 000。

本课题组采用钎焊技术实现 MEMS 陀螺仪的真空封装,采用 LCC12 表面贴装形式的陶瓷管壳,焊料为共晶金锡合金,盖板为镀金的合金,陀螺仪表头体积为 15 mm×15 mm×3.5 mm。器件级真空封装的陀螺表头如图 8 所示。

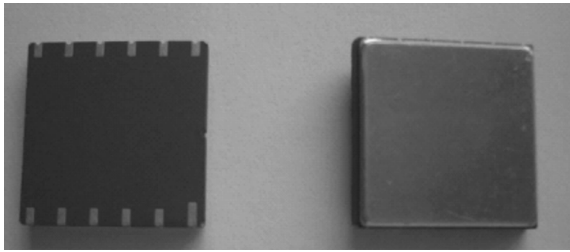


图 8 器件级真空封装的陀螺表头

Fig. 8 Gyroscope header with device-level vacuum packaging

### 3 陀螺测控电路

陀螺测控电路包括两大部分:驱动闭环回路和敏感检测电路。所采用的测控电路如图 9 所示,与数字方式的测控电路相比<sup>[11]</sup>,其易于实现、功耗低、体积小。

在敏感方向产生的哥氏加速度与驱动方向的驱动速度成正比,而且由驱动速度信号所提取的电压信号为检测电路提供解调参考信号。可见,硅微陀螺的精度很大程度上取决于驱动电路的性能。为了提高硅微机械陀螺仪的检测精度,获得稳定的驱动速度和频率,电路采用自激闭环驱动的方式,同时采用 DC-AM 自动增益控制(AGC)保持恒定的驱动振动速度。

在驱动闭环中,由跨阻放大器、自动增益控制电路和乘法器 3 部分组成。驱动振动速度经跨阻放大器获得驱动检测电压,通过带通滤波器运算放大、相位调整后产生  $V_{ds}$ 。 $V_{ds}$  经过整流、低通,与参考电压比较后经 PI 环节得到电压  $V_{PI}$ ,该电压与  $V_{ds}$  相乘得到交流信号,并与直流电压叠加后形成静电驱动电压  $V_f$  作用在梳齿上。

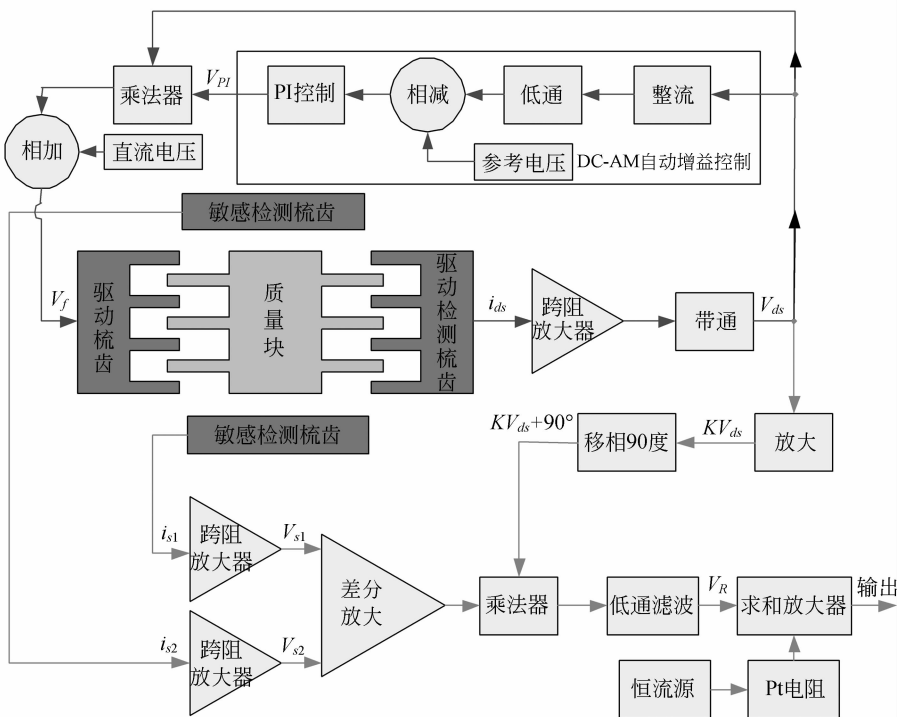


图 9 陀螺接口电路框图

Fig. 9 Block diagram of interface circuit for gyroscope

在检测电路中,差动的敏感检测电流信号  $i_{s1}$ 、 $i_{s2}$  经跨阻放大器提取后,变为差动电压信号,经差分放大器进一步放大。差分放大结构提高了检测灵敏度,降低了共模噪声的影响。差分放大后的敏感检测电压作为一路解调信号输入至乘法器,驱动检测电压信号经放大、移相  $90^\circ$  作为解调参考信号,二者经乘法器、低通滤波后获得角速度信号  $v_R$ 。

温度是影响陀螺误差的重要因素,为了提高陀螺的零偏稳定性,降低陀螺随温度的漂移,本文研究了陀螺在既定温度范围内零漂的变化,在恒温转台中,在 10、20、30、40  $^\circ\text{C}$  4 个温度点下对硅微陀螺进行了多次重复试验,用 Agilent 万用表以 1 Hz 的采样频率采集陀螺输出信号,每个温度点下采集 1 800 s,将所得结果平均,经最小二乘拟合可得陀螺在室温下的温度系数,所得结果如图 10 所示:

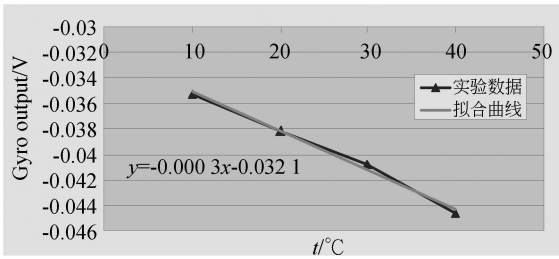


图 10 陀螺输出随温度变化曲线

Fig. 10 Gyroscope output varied with temperature

可见,陀螺在既定温度范围内其输出随温度几乎成线性变化,温度系数为  $0.3 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ ,若陀螺在启动过程中或环境温度上升  $3\sim 5^\circ\text{C}$ ,则陀螺零偏输出漂移为  $1\sim 1.5 \text{ mV}$ ,且温升过程为大迟滞系统,这将大大影响陀螺的零偏稳定性,必须加以补偿。

为了补偿环境温度对陀螺零偏的影响,我们选择 A 级铂电阻 Pt100 作为温度传感器,它具有体积小、响应快、便于使用等优点。室温时,PT100 阻值  $R_{PT}$  为:

$$R_{PT} = R_0(1 + At + Bt^2) \quad 0^\circ\text{C} < t < 850^\circ\text{C}, \quad (9)$$

其中,  $R_0$  为零度时 PT100 的阻值,  $t$  为环境温度,  $A = 3.908\ 02 \times 10^{-3}/^\circ\text{C}$ ,  $B = -5.082 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}^{-2}$ , 系数  $B$  对  $R_{PT}$  值的影响极小,在陀螺温度补偿过程中,可忽略不计。这样在室温下,PT100 阻值  $R_{PT}$  变化可简写为:

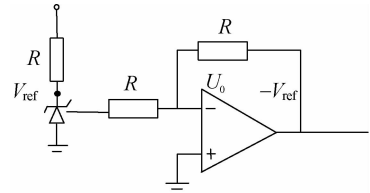
$$R_{PT} = R_0(1 + At). \quad (10)$$

由图 10 可知,陀螺在温度  $t$  时的输出可写为:

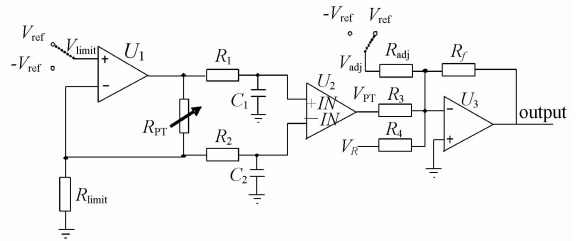
$$V_R = V_0 + K_{GYRO-T}t. \quad (11)$$

其中,  $V_0$  为  $0^\circ\text{C}$  时的陀螺零偏输出,  $K_{GYRO-T}$  为陀螺输出的温度系数,  $t$  为环境温度。

设计温度补偿电路如图 11 所示:



(a)参考电压产生模块  
(a)Reference voltage module



(b)温度补偿和调零电路  
(b)Circuits of temperature compensation and zero adjustment

图 11 陀螺输出温度补偿电路

Fig. 11 Temperature compensation circuit of gyroscope output

图 11(a)是参考电压产生模块,先通过稳压元件产生稳定的电压  $V_{ref}$ ,再经运算放大器  $U_0$  反向得到负参考电压  $-V_{ref}$ ;图 11(b)中,运算放大器  $U_1$  与  $V_{limit}$ 、 $R_{limit}$  形成恒流源,铂电阻  $R_{PT}$  可得到恒定的激励电流,为了消除 PT 电阻的自热效应,该激励电流应小于  $0.5 \text{ mA}$ <sup>[12]</sup>;为了提高电路稳定性,减少因连接导线产生的测量误差,铂电阻采用四线制接法,经仪表用放大器  $U_2$  差分后得到  $V_{PT}$ 。 $V_{PT}$ 、陀螺输出电压  $V_R$  经运算放大器  $U_3$  求和输出; $V_{adj}$ 、 $R_{adj}$  和  $R_f$  为陀螺最终输出  $V_{output}$  调零。由图 11(b)可知:

$$V_{PT} = \frac{V_{limit}}{R_{limit}} \cdot R_{PT}, \quad (12)$$

$$V_{output} = -\frac{R_f}{R_4}V_R - \frac{R_f}{R_3}V_{PT} - \frac{R_f}{R_{adj}}V_{adj}. \quad (13)$$

将式(11)、式(12)带入式(13)整理可得:

$$V_{output} = -\left(K_{GYRO-T} \cdot \frac{R_f}{R_4} + R_0 \cdot A \cdot \frac{R_f}{R_3} \cdot \frac{V_{limit}}{R_{limit}}\right)t - \left(\frac{R_f}{R_4} \cdot V_0 + \frac{R_f}{R_3} \cdot \frac{V_{limit}}{R_{limit}} \cdot R_0 + \frac{R_f}{R_{adj}} \cdot V_{adj}\right). \quad (14)$$

式(14)中,第一项为温度相关项,若使陀螺输出与温度无关,选择合适的参数使其满足:

$$K_{\text{GYRO-T}} \cdot \frac{R_f}{R_4} + R_0 \cdot A \cdot \frac{R_f}{R_3} \cdot \frac{V_{\text{limit}}}{R_{\text{limit}}} = 0. \quad (15)$$

若陀螺温度系数  $K_{\text{GYRO-T}}$  为正,则选择  $V_{\text{limit}} = -V_{\text{ref}}$ ; 反之,选择  $V_{\text{limit}} = V_{\text{ref}}$ 。

在无角速率输入时,若使陀螺输出为 0 V,选择合适的参数使其满足:

$$\frac{R_f}{R_4} \cdot V_0 + \frac{R_f}{R_3} \cdot \frac{V_{\text{limit}}}{R_{\text{limit}}} \cdot R_0 + \frac{R_f}{R_{\text{adj}}} \cdot V_{\text{adj}} = 0. \quad (16)$$

为了满足“调零”要求,可根据需要选择  $V_{\text{adj}} = -V_{\text{ref}}$  或者  $V_{\text{adj}} = V_{\text{ref}}$ 。

综上所述,测控电路采取闭环驱动、开环检测的方式,采取 PT 电阻可实现温度补偿,从而提高陀螺的零偏稳定性,同时可实现陀螺输出的“调零”,电路简单,易于实施,整体功耗小于 300 mW,大大降低了由陀螺电路自身功耗导致的升温。

## 4 整表封装和性能测试

### 4.1 整表封装

将真空封装的陀螺表头与陀螺测控电路相结合,并配合适当的减振系统,形成陀螺的整表封装,整表体积为 31 mm×31 mm×12 mm,整表组装如图 12 所示:

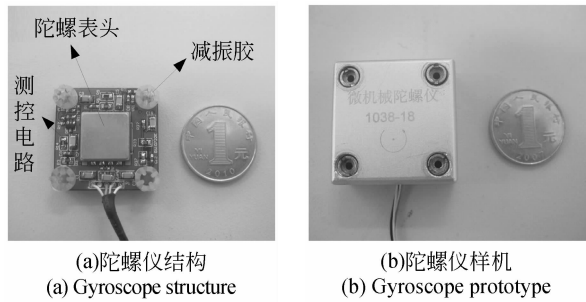


图 12 硅微陀螺仪整表组装

Fig. 12 Assembly of silicon micro gyroscope

### 4.2 性能测试

#### 4.2.1 陀螺量程、标度因数的测试

根据国产微机械陀螺测试细则,对本课题组研制的陀螺做了全面测试。在室温下,将待测陀螺安装并固定于测试转台上,使输入轴平行于转台轴,通过滑环连接到电源和数据采集计算机上,数据采集频率为 1 Hz。陀螺上电预热 10 min 后,测试陀

螺仪的静态输出,测试时间为 30 s;转台顺时针旋转,采集该转速下的陀螺输出,测试时间为 30 s;然后转台以相同转速逆时针旋转,采集该转速下的陀螺输出,测试时间同样为 30 s。在转速遍历过程中,将 30 个测量数据做平均,作为该转速下陀螺的输出。陀螺量程、标度因数测试数据如表 1 所示:

表 1 陀螺标度因数测试结果

Tab. 1 Measurement results of scale factor

顺时针		逆时针	
角速率/ (°)·s <sup>-1</sup>	输出均值 /mV	角速率 /(°)·s <sup>-1</sup>	输出均值 /mV
1	17.50	-1	-25.39
2	38.96	-2	-46.91
5	103.29	-5	-111.22
10	210.57	-10	-218.46
20	425.15	-20	-433.00
50	1 068.55	-50	-1 076.52
100	2 141.22	-100	-2 149.21
200	4 286.22	-200	-4 294.58
300	6 431.06	-300	-6 440.18
400	8 576.49	-400	-8 586.55
500	10 721.52	-500	-10 730.90
静态输出		-3.98 mV	

测试结果如图 13 所示:

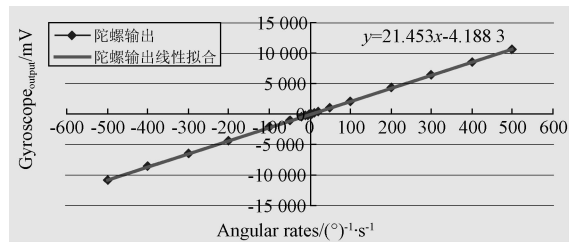


图 13 角速率输入和陀螺仪输出关系曲线

Fig. 13 Curve of angular rates and gyroscope outputs

由测试结果可知,陀螺量程为 ±500(°)/s,标度为 21.453 mV·(°)<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup>。经计算可得,非线性

为 $36.9049 \times 10^{-6}$ ,对称性为 $184.1254 \times 10^{-6}$ 。

4.2.2 陀螺零偏、零偏稳定性和零偏重复性测试

根据国产微机械陀螺测试细则,为了测量微机械陀螺的零偏、零偏稳定性和零偏重复性,将陀螺通过工装台固定在地基上,使陀螺的敏感轴指天,接通陀螺仪电源的同时开始采集陀螺的输出数据,

采集速率为1 Hz,测量时间为1 h,重复测量7次。每两次测量之间,陀螺断电1 h。

在无角速度输出时,陀螺仪在较长时间内输出的平均值对应的等效输入角速率称为零偏。零偏计算公式为:

$$\bar{F} = \frac{1}{N} \sum F_i, \quad (17)$$

$$B_{0m} = \frac{1}{K} \cdot \bar{F}, \quad (18)$$

$$B_0 = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^Q B_{0m}, \quad (19)$$

式中, $F_i$ 为每次采样的电压输出; $\bar{F}$ 为 $N$ 次测试得到的输出均值; $B_{0m}$ 为第 $m$ 次测试得到的陀螺零偏; $M$ 为零偏重复测量次数, $M=7$ ; $B_0$ 为陀螺零偏。

无角速度输入时,陀螺的输出值围绕均值波动,用均方差表示波动大小,该均方差的等效输入角速率为零偏稳定性。在此,利用零偏输出数据的 $1\sigma$ 来计算零偏稳定性,计算表达式为:

$$B_{sm} = \frac{1}{K} \cdot \left[ \frac{1}{(N/P-1)} \sum_{j=1}^{N/P} (F_j - \bar{F})^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (20)$$

$$B_s = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^Q B_{sm}, \quad (21)$$

式中, $F_j$ 是采样所得数据按照周期 $P$ 平均所得到的新样本, $P=10$ ; $B_{sm}$ 是第 $m$ 次测试得到的陀螺零偏稳定性; $B_s$ 为陀螺零偏稳定性。零偏重复性为:

$$B_r = \left[ \frac{1}{(M-1)} \sum_{m=1}^Q (B_{0m} - \bar{B}_0)^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (22)$$

式中, $\bar{B}_0$ 为陀螺零偏的平均值。

按照国产微机械陀螺测试细则,在常温下对本课题组研制的陀螺仪进行7次测量,测量数据如图14所示:

由测量结果可知,由于实现了温度补偿,在陀螺所测量的7组零偏输出均无斜漂现象。根据测量结果,按照式(17)至式(22),陀螺零偏测试结果如表2所示:

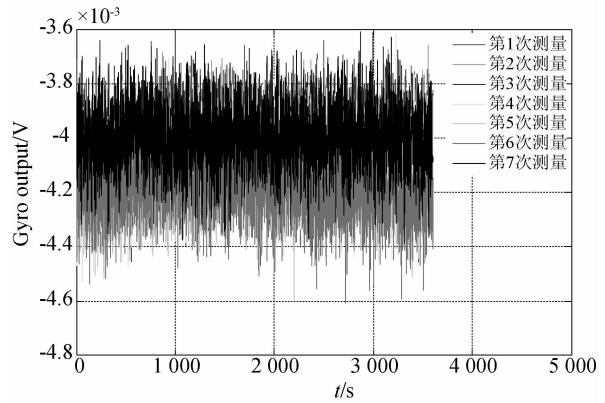


图14 陀螺仪7次零偏输出曲线

Fig. 14 Bias curves of gyroscope

表2 陀螺零偏测试结果

Tab. 2 Measurement results of zero offset for gyroscope

	零偏/ $(^\circ) \cdot s^{-1}$	零偏稳定性/ $(^\circ) \cdot h^{-1}$	零偏重复性/ $(^\circ) \cdot h^{-1}$
第1次	-0.188 4	7.752 9	
第2次	-0.188 2	8.322 2	
第3次	-0.186 0	7.623 9	
第4次	-0.191 3	8.327 2	12.015 7
第5次	-0.193 0	7.525 3	
第6次	-0.194 8	7.658 8	
第7次	-0.186 5	6.789 6	
平均值	-0.189 8	7.714 3	

由测量结果可知,陀螺零偏稳定性为 $7.7143^\circ/h$ ,零偏重复性为 $12.0157^\circ/h$ 。

经过一系列测试,本课题组研制的硅微振动式陀螺达到的其余性能指标汇总如表3所示:

表3 陀螺仪整体性能指标

Tab. 3 Performance parameters of gyroscope

性能参数	测量结果
带宽/Hz	100
量程/ $(^\circ) \cdot s^{-1}$	$\pm 500$
标度因数/ $mV \cdot (^\circ)^{-1} \cdot s^{-1}$	21.453
标度因数非线性/ $(\times 10^{-6})$	36.904 9
标度因数对称性/ $(\times 10^{-6})$	184.125 4
标度因数重复性/ $(\times 10^{-6})$	155.043 1
零偏稳定性/ $(^\circ) \cdot h^{-1}$	7.714 3
零偏重复性/ $(^\circ) \cdot h^{-1}$	12.015 7
阈值/ $(^\circ) \cdot s^{-1}$	0.008
分辨率/ $(^\circ) \cdot s^{-1}$	0.008
功耗/mW	288

## 5 结 论

本文围绕课题组自主研发的一种基于 DDSOG 工艺的硅微振动式陀螺仪样机展开工作。设计了全对称、双解耦的陀螺结构,减小了环境影响,消除了共模干扰;采取真空封装技术,品质因数  $Q > 100\ 000$ ,提高了陀螺的灵敏度和分辨率。为了降低陀螺自身功耗产生的温升影响,采取闭环驱

动、开环检测的测控电路;为了补偿环境温度对陀螺零偏造成的影响,研究了既定温度范围内陀螺零漂的变化,设计了基于 Pt 电阻的温度补偿电路;最后,对所研究的硅微振动式陀螺进行了性能测试。测试结果表明,陀螺量程为  $\pm 500(^{\circ}) \cdot s^{-1}$ ,标度为  $21.453\ mV \cdot (^{\circ})^{-1} s^{-1}$ ,常温下零偏稳定性优于  $8(^{\circ})/h$ ,非线性 and 对称性均在  $200 \times 10^{-6}$  以内,带宽为 100 Hz,整表体积为  $31\ mm \times 31\ mm \times 12\ mm$ ,陀螺整表功耗低于 300 mW。

## 参考文献:

- [1] BAE S Y, HAYWORTH K J, YEE K Y, *et al.*. High performance MEMS Micro-Gyroscope [C]. *Proc. SPIE*, 2002, 4755:316-324.
- [2] SHARMA A, ZAMAN M F, ZUCHER M, *et al.*. A  $0.1^{\circ}/HR$  bias drift electronically matched tuning fork microgyroscope [C]. *IEEE 21st International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, 2008, MEMS 2008, Tucson, AZ, USA, January, 2008:6-9.
- [3] XIA D ZH, SHENG X, WANG SH R. A digital prototype miniature silicon microgyroscope [C]. *Proceedings of the 2010 5th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEWS)*, Xiamen, China, 2010:429-432.
- [4] 杨波, 王寿荣, 李宏生, 等. 解耦硅微陀螺仪的结构误差分析和系统性能测试 [J]. *纳米技术与精密工程*, 2010, 8(6): 545-552.  
YANG B, WANG SH R, LI H SH, *et al.*. Structure error analysis and system performance test of decoupled silicon Micro-Gyroscope [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2010, 8(6): 545-552. (in Chinese)
- [5] XU L, YANG B, WANG SH R, *et al.*. Research on thermal characteristics and on-chip temperature-controlling for silicon Micro-gyroscope [C]. *Proceedings of the IEEE International Conference on Information and Automation, Shenzhen, China*, 2011:807-812.
- [6] ZHANG CH, WU Q S, YIN T, *et al.*. A MEMS gyroscope readout circuit with temperature compensation [C]. *Proceedings of the 2010 5th IEEE International conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*, Xiamen, China, 2010:458-462.
- [7] 周浩, 苏伟, 刘显学, 等. 解耦  $z$  轴微机械陀螺的研制 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19(9):2123-2130.  
ZHOU H, SU W, LIU X X, *et al.*. Development of decoupled  $z$ -axis micromachined gyroscope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(9):2123-2130. (in Chinese)
- [8] ACAR C, SHKEL A. *MEMS Vibratory Gyroscopes: Structural Approaches to Improve Robustness* [M]. New York: Springer, 2009:56-59.
- [9] YASUMURA K Y, STOWE T D, CHOW E M, *et al.*. Quality factors in micro- and submicron-thick cantilevers [J]. *Journal of Microelectromechanical systems*, 2000, 9(1): 117-125.
- [10] 夏国明, 杨波, 王寿荣. 硅微机械陀螺自激驱动数字化技术 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19(3):635-640.  
XIA G M, YANG B, WANG SH R. Digital self-oscillation driving technology for silicon micro machined gyroscopes [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(3):635-640. (in Chinese)
- [11] 贾方秀, 丁振良. 激光测距仪的脉冲电流供电温度控制系统 [J]. *光学精密工程*, 2009, 17(9): 2128-2135.  
JIA F X, DING ZH L. Temperature control system supplied by pulse-drive current for laser range finder [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(9): 2128-213. (in Chinese)

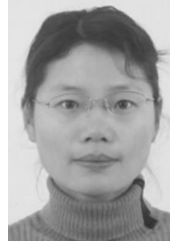
## 作者简介:



贾方秀(1981—),女,河南商丘人,博士,讲师,2005年、2012年于哈尔滨工业大学分别获得硕士、博士学位,现为南京理工大学机械工程学院讲师,主要从事测控电路设计、MEMS惯性技术研究。E-mail: jiafangxiu@126l.com



裘安萍(1971—),女,浙江宁波人,博士,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



施 芹(1977—),女,江苏东台人,博士,副研究员,2003年、2006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: sqinhy@mail.njust.edu.cn



苏 岩(1967—),男,江苏苏州人,博士,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: suyan@mail.njust.edu.cn

(本栏目编辑:马 健)

(版权所有 未经许可 不得转载)