

文章编号 1004-924X(2010)11-2398-09

利用负刚度效应调谐的硅调谐式陀螺仪

杨波,王寿荣,李坤宇,朱熙,曹慧亮

(东南大学 仪器科学与工程学院 微惯性仪表与先进导航技术教育部重点实验室,江苏 南京 210096)

摘要:为了验证硅调谐式陀螺仪原理的可行性,研究了硅调谐式陀螺仪的调谐机理,硅转子运动模态和加工工艺以及信号检测与再平衡控制回路。提出了一种利用力矩器的负刚度效应来实现硅调谐式陀螺仪调谐的新方法,推导了静电负刚度调谐的理论公式;设计、仿真、加工了硅薄片式转子平衡环部件和电容器极板,给出了电容信号敏感接口电路、升压放大电路、反馈校正电路和再平衡控制回路。在此基础上,实现了硅调谐式陀螺仪原理样机。试验结果证实,利用负刚度效应调谐是可行的,接口电路和再平衡控制回路设计是合理的。初步性能测试表明,硅调谐式陀螺仪可实现标度因数为 $1.42 \text{ mV}/((^\circ)/\text{s})$, 标度因数非线性为 2.47% , 量程为 $\pm 200 (^\circ)/\text{s}$ 。试验结果验证了该陀螺仪基本原理的可行性。

关键词:硅调谐式陀螺仪;负刚度效应;调谐;接口线路;再平衡控制回路

中图分类号:U666.123 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20101811.2398

Silicon tuning gyroscope tuned by negative stiffness effect

YANG Bo, WANG Shou-rong, LI Kun-yu, ZHU Xi, CAO Hui-liang

(Key Laboratory of Micro-inertial Instrument and Advanced Navigation Technology of the Ministry of Education, School of Instrument Science & Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: In order to verify the feasibility of the principle of a silicon tuning gyroscope, the tuning mechanism of the gyroscope, and the oscillation mode and process flows of a silicon rotor were introduced, and the signal detecting circuits and rebalancing control loops of the gyroscope were also researched. Then, a new tuning method which tuned the silicon tuning gyroscope by the negative stiffness effect from a moment meter was proposed. The tuned theoretical formula by negative stiffness effect was deduced, and the polar plate of a capacitor and the disc rotor with an equilibrium ring were designed, simulated and fabricated. Moreover, the interface circuit of sensing capacitance signals, the voltage booster circuit, feedback correcting circuit and the rebalancing control loop were designed. On the basis of above, a prototype of the silicon tuning gyroscope was achieved. Experiment results prove that the new tuning method based on the negative stiffness effect from moment meter is feasible, and the designs of interface circuits and rebalancing control loops are available. The preliminary performance test of the prototype shows that the scale factor is $1.42 \text{ mV}/((^\circ)/\text{s})$, scale factor nonlinearity is 2.47% and the maximum rate is $\pm 200 (^\circ)/\text{s}$, which proves that the feasibility of the proposed tuning method for silicon tuning gyroscopes.

收稿日期:2010-02-03;修订日期:2010-04-20.

基金项目:教育部博士点新教师基金资助项目(No. 200802861063);东南大学基本科研业务费创新基金资助项目(No. 3222000501);船舶工业国防预研基金资助项目(No. 6922001045);航空基金资助项目(No. 20090869007)

Key words: silicon tuning gyroscope; negative stiffness effect; tuning; interface circuit; rebalancing control loop

1 引言

微机械陀螺按工作原理可分为振动式陀螺和转子式陀螺。目前常见的振动陀螺包括硅振动陀螺和石英陀螺,由于微机械加工工艺的局限性,振动陀螺存在检测质量薄、一次成型、应力难消除等缺陷,同时,加工误差导致的驱动模态与检测模态难以精确匹配,限制了灵敏度的提高,制约了微机械陀螺仪精度的提高,目前国内的精度水平在 $10 \sim 100(^{\circ})/h$,尚不能满足战术武器高精度制导控制要求^[1-4]。传统的机电陀螺仪,虽然精度较高,但其体积大、重量高、价格从几千到几万美元不等,且其加工、装配、调谐极其复杂^[5-7],因此,市场迫切需要一种体积较小、价格较低,而性能指标与昂贵的机电陀螺仪相当的新型陀螺。2003年,美国 Lyle J. Jenkins 等人提出一种微机电混合式陀螺仪^[8],其设计原理采用传统的动力调谐方式,由高速旋转的电机通过挠性支承带动硅薄片转子高速旋转,产生动量矩,并敏感角运动信号;信号检测和力矩反馈采用硅微陀螺仪的电容检测和静电力反馈方式;而加工则结合了传统精密机械加工和硅微机械加工技术。该陀螺仪既具有传统动力调谐陀螺仪动量矩大、信号灵敏度高,即高精度性能(理论精度可达到 $0.005 (^{\circ})/h$),又具有硅微陀螺仪体积小、价格低等优点,其尺寸大小相当于动力调谐陀螺仪的 $1/5$,具有很强的市场竞争力^[9-10]。

2 结构原理

硅调谐式陀螺仪如图 1 所示^[9]。陀螺转子和平衡环在电机的驱动下高速旋转,获得较大的动量矩,当有沿 x/y 方向的角速度输入时,转子受到哥氏力矩作用,在转动一圈的过程中,转子分别通过内外挠性扭杆绕自转轴发生偏转,从而导致陀螺转子与信号检测极板间电容发生改变,通过检测电容信号提取出变化的电容即可以获得转角大小。为了使陀螺转子始终工作在静态平衡位置,通过力矩反馈极板对陀螺转子施加静电力矩

来产生修正和补偿效应,并间接用以测量陀螺仪输入角速度。

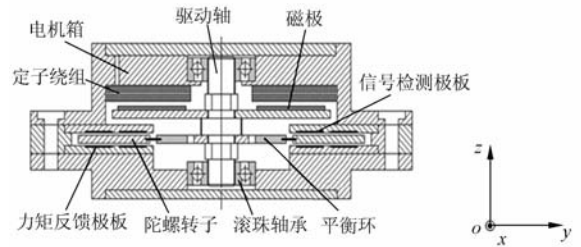


图 1 硅调谐式陀螺仪示意图

Fig. 1 Schematic diagram of silicon tuning gyroscope

3 负刚度调谐机理

传统的动力调谐陀螺仪一般通过精密机械加工技术反复调整扭杆的正刚度系数,平衡环的转动惯量或改变电机旋转角速度来实现调谐。然而,硅调谐式陀螺仪的转子和平衡环通过体硅微加工工艺加工而成,结构尺寸一次成型,很难对其进行反复修正,且相对误差较大,因此,加工完成后必定存在残余刚度,仅仅通过调整电机转速很难实现调谐。

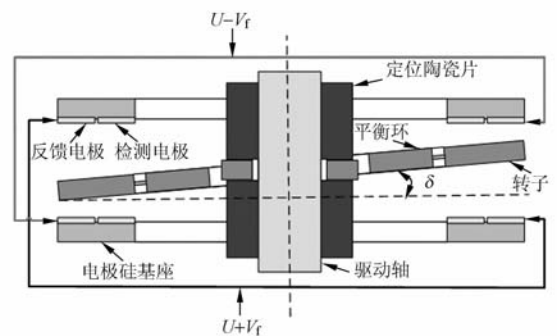


图 2 负刚度调谐示意图

Fig. 2 Schematic diagram of tune by negative stiffness

本文提出了一种利用力矩器的负刚度效应来进行调谐的新方法,如图 2 所示。通过在反馈电极上施加较大的预载电压 U ,一方面产生反馈力矩,另一方面产生负刚度效应,用于调谐。转子偏转示意图如图 3 所示,取转子上微元 dA ,则微

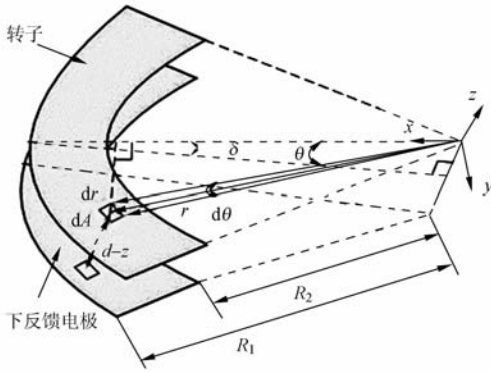


图 3 转子偏转示意图

Fig. 3 Schematic diagram of disc rotor deflection

元 dA 与下反馈电极间电容为

$$dC = \frac{\epsilon r d\theta dr}{d-z}, \quad (1)$$

式中 d 为两极板间的距离。由于在反馈电极上施加了反馈电压 $U - V_f$, 在 z 方向产生的静电力为:

$$dF_e = \frac{1}{2} \frac{\partial(dC)}{\partial z} (U - V_f - V_d)^2, \quad (2)$$

式中 V_d 为转子上的感应电压。

由此静电力对 y 轴产生的静电力矩为:

$$dM_{y_1} = 2r \cos \theta dF_e = \frac{\epsilon r^2 d\theta dr}{(d-z)^2} (U - V_f - V_d)^2$$

式中 $z = r \cos \theta$, $-\pi/4 < \theta < \pi/4$, $R_2 < r < R_1$ 则

$$M_{y_1} = \epsilon (U - V_f - V_d)^2 \iint \frac{r^2 \cos \theta}{(d - r \cos \theta)^2} d\theta dr \approx \epsilon (U - V_f - V_d)^2 \left(\frac{\sqrt{2}(R_1^3 - R_2^3)}{3d^2} + \frac{(R_1^4 - R_2^4)(\pi + 2)}{8d^3} \right) \delta.$$

同理, 在另外一边反馈电极上施加了反馈电压 $U + V_f$, 由此产生的静电力矩为

$$M_{y_2} \approx \epsilon (U + V_f - V_d)^2 \left(\frac{\sqrt{2}(R_1^3 - R_2^3)}{3d^2} - \frac{(R_1^4 - R_2^4)(\pi + 2)}{8d^3} \right) \delta,$$

则施加在转子上总静电力矩为(这里假设 V_d 受高频载波调制, 忽略其影响):

$$M_y = M_{y_1} + M_{y_2} \approx K_f V_f + K_{U_f} \delta, \quad (3)$$

式中, $K_f = -4\sqrt{2}\epsilon(R_1^3 - R_2^3)U/(3d^2)$, 为力矩传递系数; $K_{U_f} = (\pi/4 + 0.5)\epsilon(R_1^4 - R_2^4)(U^2 + V_f^2)/d^3$, 为负刚度系数。上式中第一项为静电反馈力矩, 主要用于补偿由角速度输入导致的哥氏力矩, 第二项为负刚度力矩项, 用于改变系统的有效刚度。

类似挠性陀螺仪运动方程, 忽略陀螺阻尼力矩和二次谐波力矩等次要因素时, 硅调谐式陀螺

仪的运动方程为^[5]:

$$J\ddot{\gamma} + H\dot{\delta} + (\Delta K - K_{U_f})\gamma = K_f V_{f_A} - J\dot{\phi}_x - H\dot{\phi}_y, \quad (4)$$

$$J\ddot{\delta} - H\dot{\gamma} + (\Delta K - K_{U_f})\delta = K_f V_{f_B} - J\dot{\phi}_y + H\dot{\phi}_x, \quad (5)$$

式中 H 为陀螺仪的角动量; J 为转动惯量; $\Delta K = K_p - (I_e - I_z/2)\dot{\varphi}^2$ 称为剩余刚度项, I_e 为平衡环绕 x 或 y 轴的转动惯量; I_z 为平衡环绕 z 轴的转动惯量, $\dot{\varphi}$ 为驱动电机旋转角速度, K_p 为内外扭杆刚度系数; γ 和 δ 分别为陀螺转子自转轴绕陀螺仪壳体坐标系相对驱动轴的转角; $\dot{\phi}_y$ 和 $\dot{\phi}_x$ 分别为陀螺仪壳体相对惯性空间的运动角速度, $K_f V_{f_A}$ 和 $K_f V_{f_B}$ 分别为作用于陀螺转子上 x 轴和 y 轴的反馈力矩。

令 $\Delta K - K_{U_f} = 0$, 且假设 $U^2 \gg V_f^2$, 得

$$U \approx \pm \sqrt{\frac{d^3(K_p - (I_e - I_z/2)\dot{\varphi}^2)}{\epsilon(\pi/4 + 0.5)(R_1^4 - R_2^4)}}, \quad (6)$$

式(6)表明, 当结构参数确定后就可以根据该式计算出实现硅调谐式陀螺仪调谐所需的预置电压。

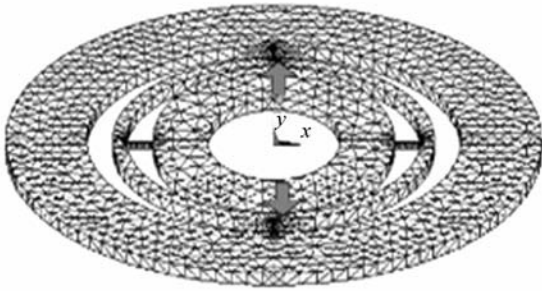
4 模态仿真与结构加工

硅转子平衡环部件是硅调谐式陀螺仪的核心部件, 直接决定了陀螺性能优劣, 因此, 采用 ansys 软件对该部件进行了仿真优化。表 1 为优化后的硅转子前六阶模态, 可见前两阶有用模态与后四阶干扰模态频差较大, 有较好的隔离作用。同时, 仿真表明, 硅转子平衡环的驱动转速(或频率)应该尽量避开上述模态频率。实际驱动转速为 10 000 r/min, 可以有效避开上述模态频率。图 4 为前两阶模态的模态图, 可见前两阶有用模态分别为转子内外扭杆的扭转模态, 与理论相符。

表 1 硅转子前六阶模态

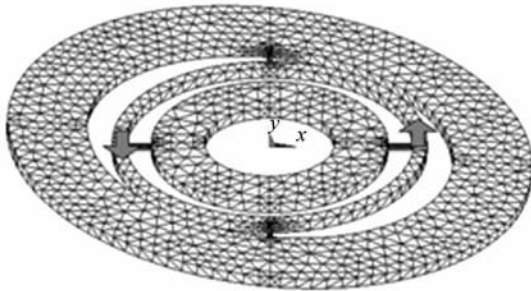
Tab. 1 The first six modes of rotor

阶数	频率/Hz
1	251
2	284
3	1 014
4	2 265
5	2 404
6	2 513



(a) 内扭杆转动模式

(a) Rotational mode of inner torsion bar



(b) 外扭杆转动模式

(b) Rotational mode of outer torsion bar

图 4 转子模式仿真

Fig. 4 Mode simulation of disc rotor

采用国内体硅加工工艺对硅转子平衡环部件和电容极板进行了加工。由于硅转子平衡环部件较厚,因此加工中直接采用 180 μm 厚的原硅片直接加工,加工工艺如图 5 所示。加工需要分两次刻蚀进行:首先采用 ICP 深槽刻蚀工艺,将硅片刻蚀成等厚的转子组件;然后将圆环部分遮光,对扭杆进行双面刻蚀,得到符合设计厚度的扭杆。具体操作是先腐蚀扭杆一面至凹槽深度为圆环与扭杆厚度差的一半,再腐蚀扭杆另一面至同样深度。最终得到转子平衡环样片和电容极板如图 6 所示。



(b) 刻蚀扭杆一侧

(b) Etching one side of torsion bar



(c) 刻蚀扭杆另一侧

(c) Etching the other side of torsion bar

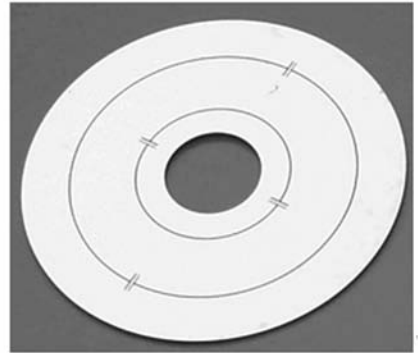


(d) 得到转子组件

(d) Forming disc rotor

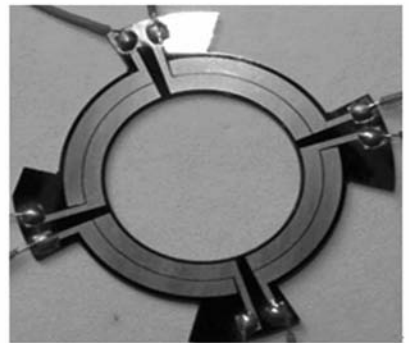
图 5 转子加工工艺

Fig. 5 Process flows of disc rotor



(a) 转子

(a) Disc rotor

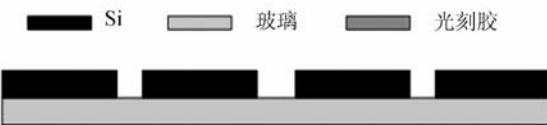


(b) 电容极板

(b) Capacitor plate

图 6 转子与电容极板样片

Fig. 6 Prototypes of disc rotor and capacitor plate



(a) ICP 深刻蚀硅片

(a) ICP etching silicon

■ Si □ 玻璃 ■ 光刻胶

5 信号检测与再平衡控制回路设计

不同于传统的动力调谐陀螺仪,硅调谐式陀螺仪采用电容信号检测方式提取由角速度输入导致的转子进动,并通过施加静电力反馈力矩来平衡由角速度输入导致的陀螺力矩,其再平衡回路控制原理框图如图 7 所示。电路原理为:通过在

反馈电极上施加两组不同频率的载波(图中仅画出一组)分别调制两个方向的变化电容,接着电容信号通过公共的检测电极和放大电路放大,然后通过带通选频将两路信号分离开来。由于硅调谐式陀螺仪通过静电负刚度调谐和静电力反馈,需要大于电源电压的反馈电压和预载电压,因此电路设计升压放大模块来实现上述功能。

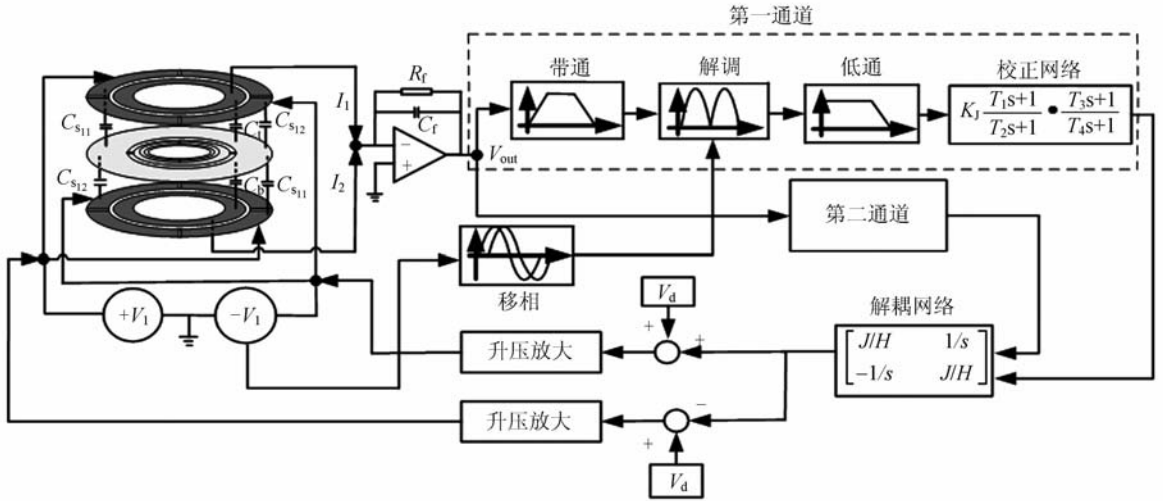


图 7 再平衡回路控制原理框图

Fig. 7 Block diagram of rebalancing control loop

5.1 接口电路设计

接口电路如图 8 所示^[11-12],两路敏感电容分别被两路不同频率的载波信号调制,接着放大,然后在后续电路中通过带通选频网络将两路信号分离开来,

$$V_{out} = K_{CV_1} \Delta C_1 + K_{CV_2} \Delta C_2, \quad (7)$$

式中 $K_{CV_1} = (C_t + C_b) V_1 / (2C_{s_{11}} + 2C_{s_{12}} + C_t +$

$C_b + C_p) C_f$, $K_{CV_2} = (C_t + C_b) V_2 / (2C_{s_{21}} + 2C_{s_{22}} + C_t + C_b + C_p) C_f$, ΔC_1 和 ΔC_2 分别为两路敏感电容, C_p 为寄生电容。由上式可见,增加电容 C_t 和 C_b ,减小电容 C_p 都可以提高信号灵敏度。

5.2 升压放大电路设计

设计的升压放大电路如图 9 所示,反馈电压首先通过乘法器 AD633 被 65 kHz 交流载波调制,接着通过功率放大器和变压器进行功率放大和升压,最后通过低通滤波器进行滤波转换回直流,然后施加在反馈电极上。

5.3 校正网络设计

再平衡回路是一个闭环控制回路,为了维持闭环系统的稳定并获得良好的动态性能,必须详细设计校正环节,使开环系统具有合适的相角裕度和幅值裕度,类似传统动力调谐陀螺仪,解耦后开环系统的传递函数为^[5]:

$$G_K(s) = G_K' G_J(s), \quad (8)$$

式中 $G_K' = K_{\infty} K_{CV} K K_f / (H s^2)$, 为陀螺解耦后开环传递函数, K_{∞} 为由转子偏转导致电容变化系

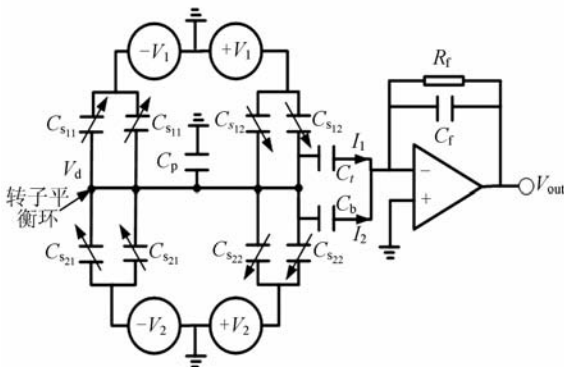


图 8 接口电路图

Fig. 8 Diagram of interface circuit

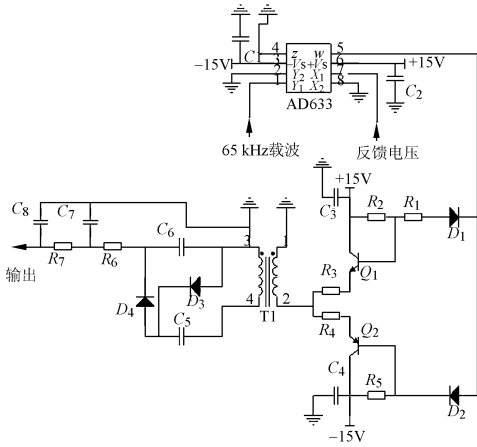


图 9 升压放大电路

Fig. 9 Diagram of voltage booster circuit

数, K_{CV} 为由电容变化导致接口电压变化系数, K 为其它增益系数。设计校正环节 $G_J(s)$ 为

$$G_J(s) = K_J \frac{T_1s + 1}{T_2s + 1} \cdot \frac{T_3s + 1}{T_4s + 1} \quad (9)$$

根据系统要求, 设定校正网络转折频率 $1/T_1, 1/T_2, 1/T_3, 1/T_4$ 分别为 20, 40, 20, 500 rad/s, 得到开环曲线穿越 0 dB 点的斜率近似为 -20 dB/dec, 且有一定宽度, 穿越 0 dB 点后以大于 -40 dB/dec 的速度衰减, 校正后开环系统的幅值裕度为 19.1 dB, 相角裕度为 56.9 dB, 如图 10 所示。最终闭环带宽为 68 Hz, 满足系统带宽大于 50 Hz 要求。

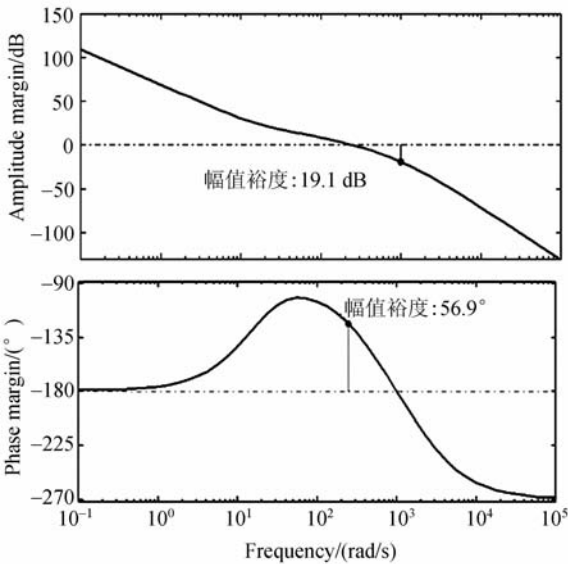
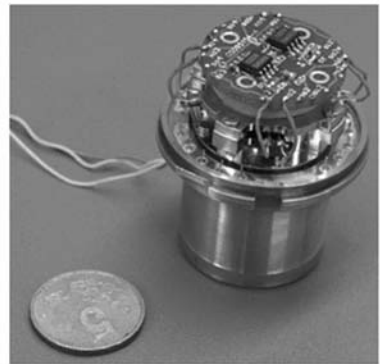


图 10 系统开环波特图

Fig. 10 Open loop Bode diagram

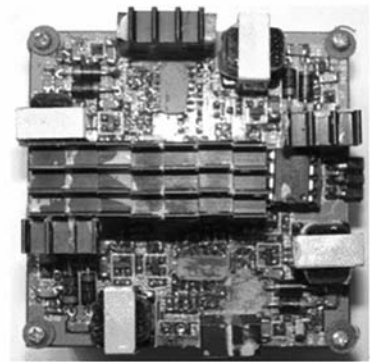
6 试 验

为了验证硅微调谐式陀螺仪原理和负刚度调谐机理的正确性, 对硅微调谐式陀螺仪进行了试验研究。首先对硅微调谐式陀螺仪的转子平衡环部件、电容信号器及其它配件进行了组装调试, 其中驱动电机初步采用动力调谐陀螺仪的小型磁滞电机(后续将改用体积更小的微型电机), 接着将硅调谐式陀螺仪机械敏感部件与接口电路和后续的测控电路进行了联调, 设计实现了硅调谐式陀螺仪的原理样机, 如图 11 所示。为了分离两路敏感信号, 分别采用 16 kHz 和 4 kHz 的信号对两路敏感电容信号进行调制, 其接口信号波形如图 12 所示。接口输出信号为两路敏感信号的混合信号, 如图 12(a) 所示, 后续进行了滤波分离获得两路敏感信号, 如图 12(b), (c) 所示。



(a) 陀螺结构与接口电路

(a) Structure and interface circuit

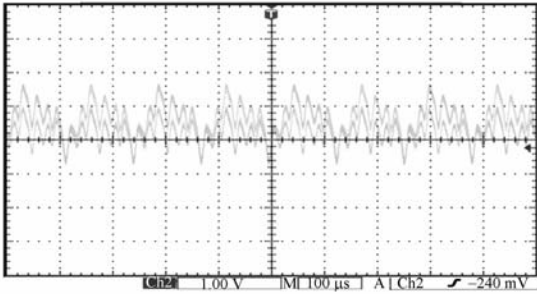


(b) 测控电路

(b) Detecting & controlling circuit

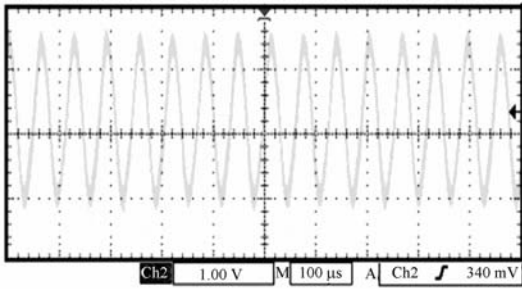
图 11 硅调谐式陀螺仪原理样机

Fig. 11 Prototypes of silicon tuning gyroscope



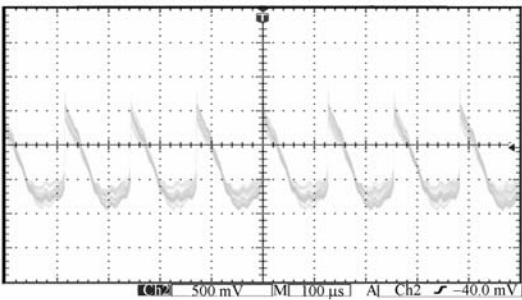
(a) 接口信号波形

(a) Signal waveform of interface circuit



(b) 信号分离后 1 通道波形(16 kHz 信号)

(b) Signal waveform in the first channel after signal separation(16 kHz signal)



(c) 信号分离后 2 通道波形(4 kHz 信号)

(c) Signal waveform in the second channel after signal separation(4 kHz signal)

图 12 接口电路输出信号波形

Fig. 12 Output signal waveforms of interface circuit

同时,对硅微调谐式陀螺仪的负刚度调谐机理进行了试验验证。由于硅薄片式平衡环既小又薄,由平衡环产生的负弹性力矩量级很小,仅相当于扭杆正弹性力矩的 10^{-5} , 因此,在硅薄片式陀螺仪的动力调谐中,主要是通过调整静电负刚度来补偿内、外扭杆的正弹性力矩。区别于动力调谐陀螺仪调谐方式,硅微调谐式陀螺仪的初步调谐采用开环方式进行调谐,在恒定角速度输入

情况下可令式(4)中的 $V_{fA}=0, \delta=0$, 忽略 $\ddot{\gamma}$ 和 $\dot{\phi}_x$ 的影响,则得 $(\Delta K - K_{U_i})\gamma = -H\dot{\phi}_y$ 。通过调整预载电压 U 的大小可以改变有效刚度 $(\Delta K - K_{U_i})$ 大小,即可以改变开环系统的标度因数。当理论上处于完全调谐时,开环标度因数无穷大,由计算得到理论调谐预载电压为 112.3 V。利用负刚度调谐试验数据如图 13 所示,由图可知利用负刚度调谐是可行的,同时可见,越靠近调谐点,理论曲线与试验曲线相差越大,这一方面是由于转子平衡环结构与上下电极存在较大安装误差,导致预载电压越大,上下静电力越不平衡,无角速度输入时扭杆变形较大,导致标度因数误差较大;另一方面,越靠近调谐点,机械灵敏度越大,大角速度输入导致扭转角度越大,扭杆非线性越大,标度因数误差也较大。

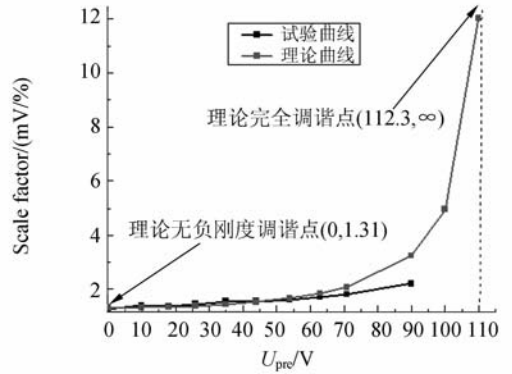


图 13 负刚度调谐试验测试曲线

Fig. 13 Test curve of tune by negative stiffness

通过施加预载调谐电压近似调谐后,实现了硅微调谐式陀螺仪的闭环控制,并进行了硅微调谐式陀螺仪的简单系统试验。图 14 是标度因数

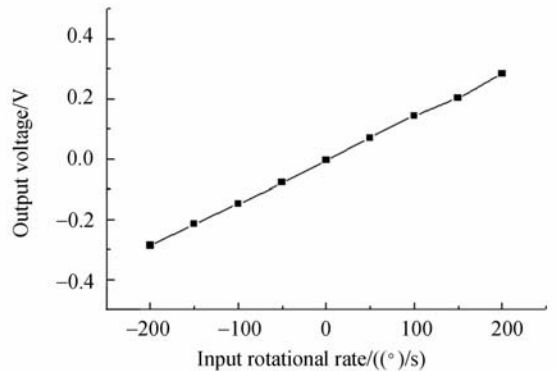


图 14 输出电压与输入角速度测试曲线

Fig. 14 Test curve of output voltage vs input rotational rate

测试数据曲线,标度因数为 $1.42 \text{ mV}/(^\circ/\text{s})$,标度因数非线性为 2.47% ,量程为 $\pm 200 (^\circ)/\text{s}$ 。

7 结 论

本文提出了利用力矩器的负刚度效应来实现硅调谐式陀螺仪调谐的新方法,推导了负刚度调谐的理论公式;设计、仿真、加工了硅微转子平衡环部件和电容极板;设计实现了硅微调谐式陀螺

仪信号检测、静电调谐、升压放大、反馈校正电路和力矩再平衡回路控制电路;最后,对硅调谐式陀螺仪部件进行组装调试,实现了原理样机。试验证实利用负刚度调谐是可行的,测控电路设计是正确的,硅微调谐式陀螺仪实现初步性能为标度因数 $1.42 \text{ mV}/(^\circ/\text{s})$,标度因数非线性 2.47% ,量程 $\pm 200 (^\circ)/\text{s}$ 。试验验证该陀螺仪的基本原理是可行的。

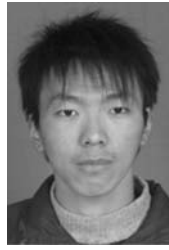
参考文献:

- [1] SUNG W T, SUNG S K, LEE J Y, *et al.*. Development of a lateral velocity-controlled MEMS vibratory gyroscope and its performance test[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2008, 18:1-13.
- [2] DONG Y, KRAFT M, HEDENSTIERNA N, *et al.*. Microgyroscope control system using a high-order band-pass continuous-time sigma-delta modulator[J]. *Sensor and Actuator A*, 2008, 145-146: 299-305.
- [3] 陈李,陈德勇,王军波,等.高性能电磁式微机械振动环陀螺[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(8): 1915-1921.
CHEN L, CHEN D Y, WANG J B, *et al.*. High performance electromagnetic micro-machined ring vibration gyroscope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(8): 1915-1921. (in Chinese)
- [4] YIN Y, WANG S R, WANG C C, *et al.*. Driving-mode test of dual-mass MEMS gyroscope[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(6): 1355-1360.
- [5] 周百令. 动力调谐陀螺仪设计与制造[M]. 南京:东南大学出版社, 2002.
ZHOU B L. *Design and Fabrication of Dynamically Tuned Gyroscope*[M]. Nanjing: Southeast University Press, 2002. (in Chinese)
- [6] 刘光斌,吴瑾颖,吴懿. 动力调谐陀螺仪的瞬态动力学及误差分析[J]. *电光与控制*, 2008, 15(5): 79-83.
LIU G B, WU J Y, WU Y. Analysis on transient dynamics and error for dynamically tuned gyro[J]. *Electronics Optics & Control*, 2008, 15(5): 79-83. (in Chinese)
- [7] 张连超,范世珣,范大鹏,等. 动力调谐陀螺再平衡回路数字化的研究与实现[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(12): 1974-1981.
ZHANG L C, FAN SH X, FAN D P, *et al.*. Research and implementation of digital control of dynamically tuned gyroscope rebalance loop[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(12): 1974-1981. (in Chinese)
- [8] JENKINS L, HOPKINS R E, KUMAR K. Hybrid wafer Gyroscope [P]. United States Patent: 6615681B1, 2003.
- [9] 葛羽. 混合式陀螺仪及其驱动电机的设计[D]. 南京:东南大学, 2007.
GE Y. *Design of hybrid gyroscope and drive electromotor* [D]. Nanjing: Southeast University, 2007. (in Chinese)
- [10] 张玉凤. 混合式陀螺仪及其关键技术研究[D]. 南京:东南大学, 2009.
ZHANG Y F. *Study on hybrid gyroscope and its key technologies* [D]. Nanjing: Southeast University, 2009. (in Chinese)
- [11] MURAKOSHI T, ENDO Y, FUKATSU K, *et al.*. Electrostatically levitated ring-shaped rotational-gyro accelerometer [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2003, 42(4B): 2468-2472.
- [12] GINDILA M V, KRAFT M. Electronic interface design for an electrically floating micro-disc[J]. *J. Micromech. Microeng*, 2003, 13(4): S11-S16.

作者简介:



杨波(1979—),男,湖北潜江人,博士,讲师,2007年于东南大学获得博士学位,主要从事微机电系统理论及应用(微纳米技术)的研究。E-mail: yangbo20022002@163.com



朱熙(1987—),男,江苏扬州人,硕士研究生,2008年于东南大学获得学士学位,主要从事微惯性器件测控电路的研究。E-mail: zhuxi960@126.com

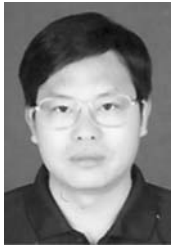
通讯作者:



王寿荣(1946—),男,江苏兴化人,教授,博士生导师,1970年、1982年于东南大学分别获得学士、硕士学位,主要从事惯性技术、微机电系统、精密仪器及机械等领域的教学与科研工作。E-mail: srwang@seu.edu.cn



曹慧亮(1986—),男,河北石家庄人,硕士研究生,2008年于辽宁工业大学获得学士学位,主要从事微惯性器件测控电路的研究。E-mail: caohuilian1986@126.com



李坤宇(1961—),男,江苏徐州人,博士,副教授,2001于南京理工大学获得博士学位,主要从事光学工程、惯性技术、微机电系统等方面的研究。E-mail: kunyuli@seu.edu.cn

● 下期预告

双面二维硅微条探测器的沾污失效分析及修复

韩励想^{1,2},李占奎¹,鲁 皖^{1,2},胡 钧^{1,2},杨彦云¹,王柱生¹

(1. 中国科学院近代物理研究所,甘肃兰州 730000; 2. 中国科学院研究生院,北京 100049)

硅微条探测器极易受到各种沾污导致性能下降甚至失效;其键合引线也大部分裸露,容易因机械力形成隐性或显性失效。本文根据探测器的制作工艺和结构,分析其性能下降和失效的原因,制定了合理的检测、维护、修复方案,该方案可以修复大部分因此类原因失效的探测器并提高其性能使用。另外,讨论了探测器的使用、存放方法,以提高其能量、位置分辨率,并增加工作稳定性,延长使用寿命。工作可以为此类探测器的设计、研制提供指导,并为其改进提供依据。