

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2017.03.014

MEMS 梳齿音叉陀螺温度漂移特性研究

刘梦祥, 樊琦, 赵健, 苏岩

(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

摘要: 由于 MEMS 音叉陀螺多用于车载及无人机导航等应用场合, 而外界温度环境因素对其零偏性能有着很大的影响, 因此其温度引起的零偏漂移的大小直接影响着最终导航的性能。研究了全温范围传感器漂移特性, 旨在提升陀螺温度漂移特性。通过改进电路设计以及采用实时补偿算法对其全温范围温度引起的零偏漂移进行补偿, 将零偏稳定性提升了一个数量级。

关键词: MEMS; 音叉陀螺; 零偏稳定性; 温度漂移

中图分类号: TH712

文献标志码: A

文章编号: 2095-8110(2017)03-0082-07

Study on Temperature Drift Characteristics of MEMS Comb Tuning Fork Gyro

LIU Meng-xiang, FAN Qi, ZHAO Jian, SU Yan

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: As the surrounding temperature has a great impact on the bias of MEMS (micro-electro-mechanical system) tuning fork gyro, which is commonly used in automobile and UAV navigation applications, the final performance of navigation can be directly affected by its bias stability which has much to do with temperature. To improve the bias of the gyro, the temperature drift characteristic at full temperature range is studied in this paper. The bias stability is improved by an order of magnitude through better design of the circuit and the real-time compensation algorithm.

Key words: MEMS; Tuning fork gyro; Bias stability; Temperature drift

0 引言

陀螺是一种测量载体相对惯性空间运动角速度的惯性仪表, 是现代惯性导航及控制系统的核心。随着 20 世纪 80 年代后期 MEMS 的兴起, 出现了采用 MEMS 工艺制造的陀螺。目前市场上的 MEMS 陀螺多为音叉陀螺, 与传统陀螺相比, MEMS 陀螺具有体积小、质量小、成本低、功耗低、易与电路集成等优点^[1]。因此, MEMS 陀螺无论在民用还是军用领域都具有广阔的应用前景。

世界上第一个具有实用意义的 MEMS 陀螺于

1991 年由美国 Draper 实验室公布^[2], 之后许多国家的大学、研究机构和知名公司相继加入, 在世界范围内掀起了 MEMS 陀螺的研究热潮。经过 20 多年的发展, 这场技术革命使得“阳春白雪”的高端惯性仪表演变为“下里巴人”的惯性传感芯片, 在消费类电子、汽车电子、工业和军用等领域得到全面应用^[3]。

目前, MEMS 陀螺的零偏稳定性(陀螺的主要性能指标)已经优于 $10(^{\circ})/h$, 达到了低端战术级的水平, 其中南京理工大学研制的 MEMS 硅微梳齿音叉陀螺性能已达到 $0.5(^{\circ})/h$ ^[4], 但是仍然无法满足纯惯性导航的要求(零偏稳定性 $< 0.05(^{\circ})/h$)。

收稿日期: 2017-02-12; 修订日期: 2017-03-28

基金项目: 国家自然科学基金(61371039)

作者简介: 刘梦祥(1993-), 男, 博士, 主要从事 MEMS 陀螺技术方面的研究。E-mail: lmx_njust_cn@163.com

在很多应用场合还依赖于 GPS 定期提供的位置信息对惯性传感器的误差进行修正,以满足运动载体对导航和姿态控制精度的要求^[5]。在 GPS 信号受到干扰或者拒止的场合,如陌生复杂环境、室内导航、深海探测等,长时间自主导航的需求更为迫切,对 MEMS 陀螺的性能提出了更高的要求。因此为了进一步提高其零偏稳定性,针对其温度引起的零偏漂移特性的探究尤为重要。

1 零偏理论分析

MEMS 音叉陀螺在振动陀螺理论上逐渐发展,其核心原理是哥氏效应(Coriolis effect)^[6]。其机械结构由一对完全相同的子结构组成,如图 1 所示。2 个检测质量块左右对称布置;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 个检测质量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 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^[7]。

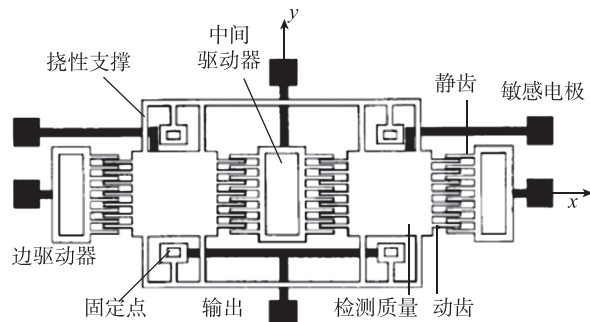


图 1 音叉陀螺驱动及检测模式图

Fig. 1 The drive and sense mode of tuning fork gyro

在 MEMS 音叉陀螺的实际应用中,对陀螺微结构精度要求很高,而微机械制造工艺不够完善且存在相对误差较大,包括系统误差及陀螺驱动后产生的动态误差。其中对零偏稳定性影响最主要的误差来源是加工引起的非对称阻尼及非对称刚度误差。

图 2 所示为 MEMS 音叉陀螺系统框图。

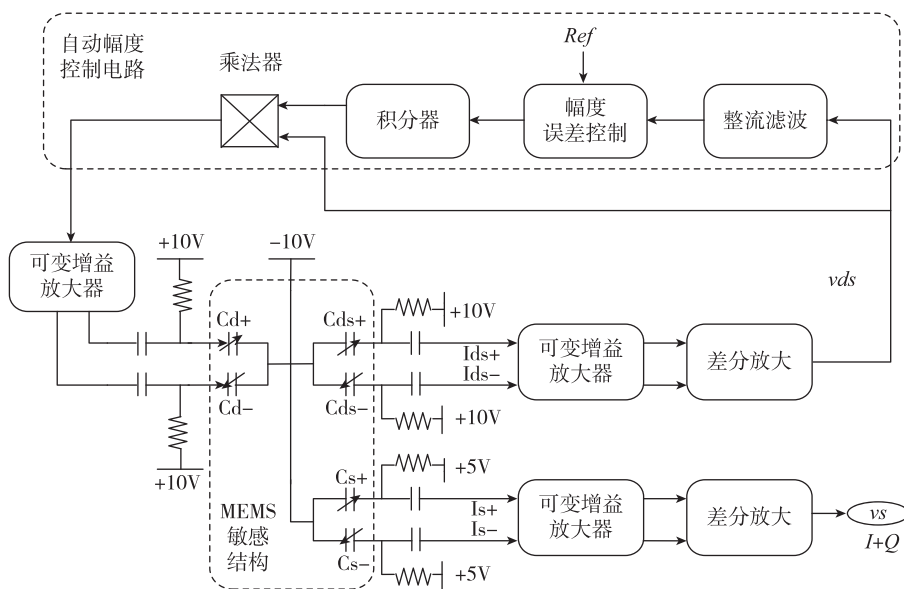


图 2 MEMS 音叉陀螺系统框图

Fig. 2 The system block diagram of tuning fork gyro

MEMS 音叉陀螺的运动模型为一个两自由度运动方程,其二阶矢量运动方程如下

$$m\ddot{q} + (C + 2mGk\Omega)\dot{q} + (K + mG^2(k\Omega)^2 + mGk\dot{\Omega})q = F + ma$$

其中, m 为等效质量, $q = [x, y]^T$ 为二维位移矢量, C 为阻尼矩阵, K 为刚度矩阵, $G = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$, k 为无单位量纲的角度系数(傅科摆中 $k=1$), Ω 为

输入角速度,由于驱动模态为自激驱动,因此驱动力 $F = F \sin(\omega_d t)$ 与驱动模态谐振频率相同, a 为外部加速度。

而对于开环检测的 MEMS 音叉陀螺,对其 y 轴速度幅值进行求解,忽略非对称阻尼项,由陀螺二阶矢量运动方程可得到陀螺检测通道前放哥氏信号和正交信号:

$$I = 2\Omega A_x \omega_d m_x G_{V/F} \sin(\omega_d t)$$

$$Q = \alpha A_x G_{V/F} \cos(\omega_d t)$$

其中, I 和 Q 分别为检测通道中的哥氏信号和正交信号, A_x 为驱动模态运动幅度, α 为正交误差系数, $G_{V/F}$ 为结构电路增益。

陀螺解调电路属于相敏解调,即将检测前放输出信号与一个参考基准信号相乘,再经过低通滤波得到输入角速度。其解调公式为 $(I+Q) \cdot \sin(\omega_d t)$,低通后只剩下 $\frac{1}{2}|I|$,这样解调相位和幅值的稳定性直接影响着陀螺的零偏性能。

2 零偏理论分析

2.1 实验探究

对于陀螺来说,零偏性能无疑是个非常重要的性能指标。一般认为零偏来源:1)非对称阻尼以及驱动信号到检测馈通引起的同相误差;2)非对称刚度引起的正交信号。在真空封装和高 Q 值的情况下,陀螺的非对称阻尼一般要远远小于非对称刚度的影响,因此在本次实验中,我们忽略第一项误差源,重点考虑正交信号受温度变化引起的零偏漂移;MEMS 音叉陀螺角速度信号是由陀螺输出检测信号(角速度信号与正交信号)和解调参考信号相敏解调得到,因此正交信号的幅值变化与解调相角差变化对于零偏来说是至关重要的;

本实验采用的陀螺仪是我们团队和中电十三所合作研发的实验室样机,采集电路为模拟分立器件 PCB 板,如图 3 所示。

将带测试的陀螺固定在工装上,利用 NI-DAQ 采集陀螺的驱动检测前放及检测前放的两路正弦信号(100kHz 采样率),在 Labview 中实现对两路正弦信号的幅值及相角差的实时测量($90^\circ - \Delta\theta$),同时采集陀螺的解调输出信号,降采样至 1Hz 输出。经过对不同批次表头的多次测量,分析采集数据,得到的实验现象基本相同,下面给出其中一组通过采集陀螺在 $-25^\circ\text{C} \sim 50^\circ\text{C}$ 范围内的零偏输

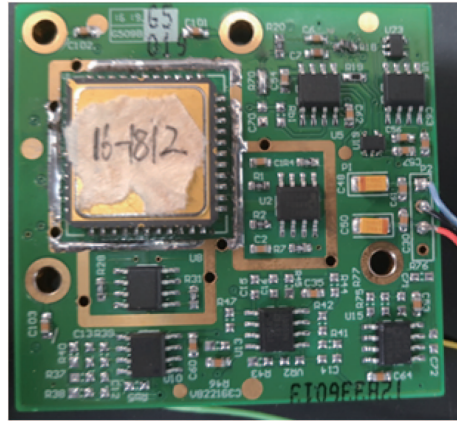
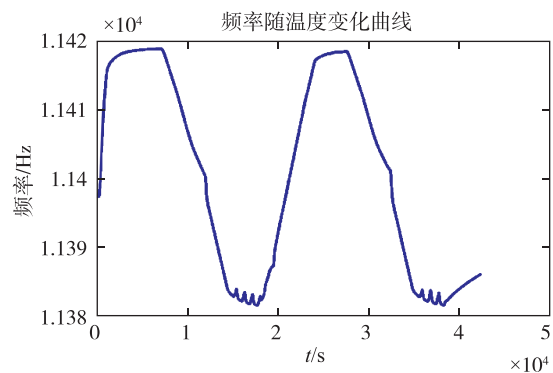


图 3 南京理工大学与中电十三所合作陀螺样机

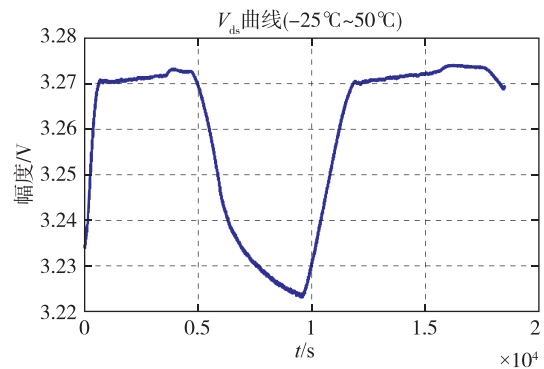
Fig. 3 The gyro prototype made by NUST and CETC 13

出的数据,数据处理如图 4 所示,由于陀螺频率和温度呈线性关系,因此通常用陀螺频率的变化表征温度的变化趋势,该批表头温度灵敏度约为 $2^\circ\text{C}/\text{Hz}$,图 4(a)反映了温度随时间的变化曲线,分两次升降温,斜率平缓或抖动的区域为温箱保温阶段,图 4(b)、4(c)中 V_{ds} 与 V_s 曲线分别代表解调参考信号和陀螺检测输出信号,在输入角速度为 0 的情况下, V_s 曲线就代表正交信号。



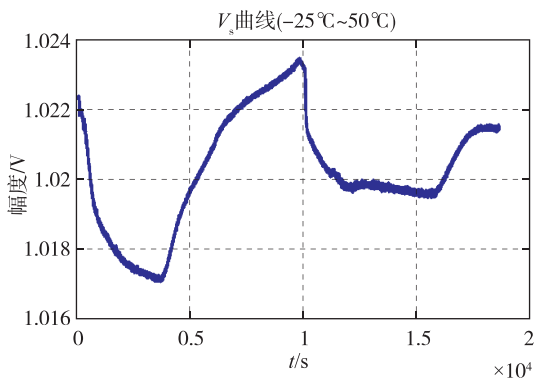
(a) 陀螺频率-时间曲线

(a) The frequency-time curve of gyro

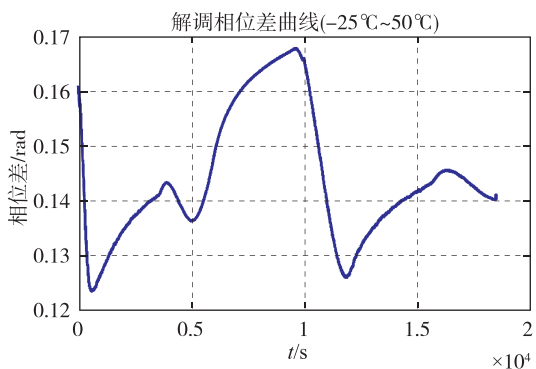


(b) 陀螺解调参考信号

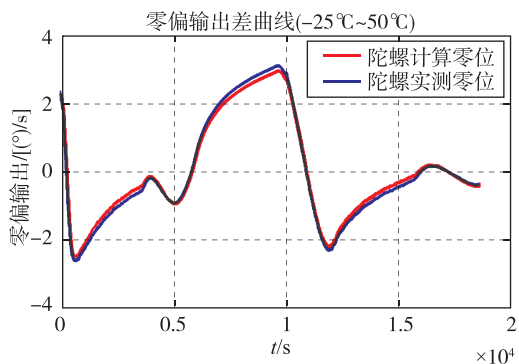
(b) Demodulation reference signal of gyro



(c) 陀螺检测信号
(c) The sense mode signal



(d) 陀螺解调相位差
(d) The demodulation phase error of gyro



(e) 陀螺解调相位差
(e) The demodulation bias of gyro

图 4 陀螺采集数据图

Fig. 4 Acquisition data of the gyro

图 4 中, V_{ds} 变化为 $3.23V \sim 3.275V$, 变化率为 1.39% ; V_s 变化为 $1.016V \sim 1.021V$, 变化率为 0.49% ; 相角差变化为 $0.12 \sim 0.165$ (对应 $83.1^\circ \sim 80.5^\circ$), 变化率为 37.5% ; 所以零偏主要为解调相角差引起, 实际输出与理论计算曲线吻合, 零偏曲线与解调相角差曲线一致。

2.2 相角补偿

初步实验已经验证相角差变化要远大于正交

幅值变化, 因此对相角差进行考察。相角差来源于: 1) 陀螺机械模型, 二阶系统参数变化 (Q 值变化, 即热阻尼) 引起的相角变化; 2) 陀螺电路引起的相角漂移, 主要为驱动前放以及检测前放。

初步判断来源 2) —— 电路相移占主要原因, 因为对于陀螺机械结构来说, 等效为高 Q 值的二阶模型, 机械结构的相移应该为 0.01° 的量级, 经 Matlab 仿真, 在 Q 值变化 1.3 倍的情况下, 相移从 -0.01056° 变为 -0.01368° , 变化了 0.00312° (如图 5 所示), 远远小于实际相移, 图中黑点为检测模态固有频率附近; 因此, 电路的相移主要来源于检测前放, 主要是接口电路带宽不足 (受运放增益带宽积限制), 相角曲线不陡峭 (相比二阶模型), 所以温度变化引起运放的变化, 进而产生相角变化。

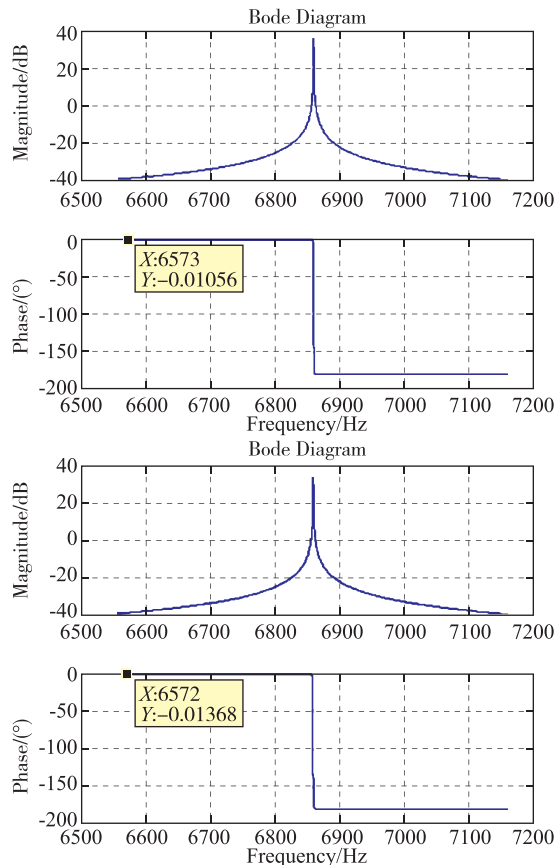
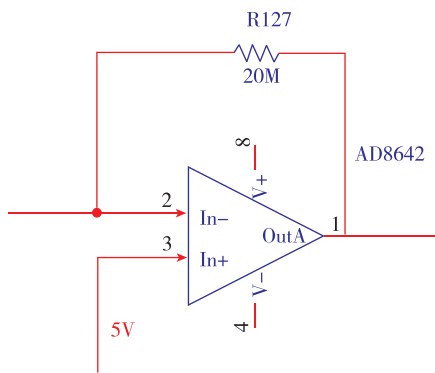


图 5 二阶模型在不同 Q 值下的 bode 图

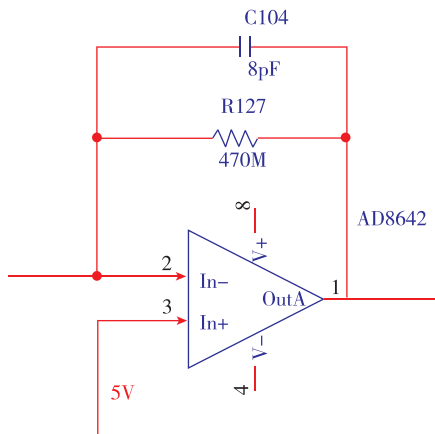
Fig. 5 The bode diagram of second-order model in different Q value

模拟电路 PCB 板采用跨阻式放大, 通过改进电路设计, 将前放电路改为跨电容式放大^[8], 增益保持不变, 如图 6 所示, 使得检测频率处相位后移到相位平缓变化的区域。



(a) 跨阻式放大

(a) Trans-impedance amplifier



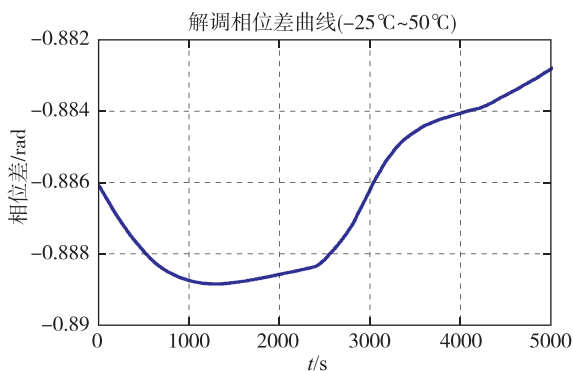
(b) 跨电容式放大

(b) Capacitive trans-impedance amplifier

图6 两种不同电路方案

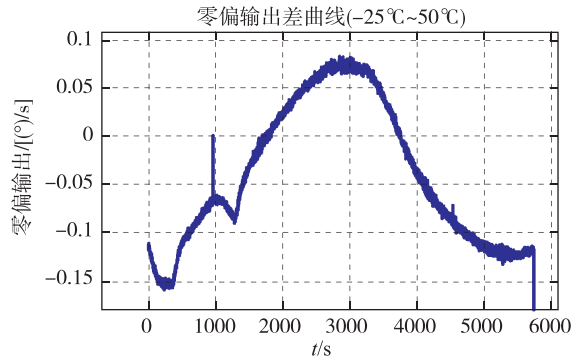
Fig. 6 Two different circuit methods

电路的相移主要来源于检测前放,主要因为接口电路带宽不足;因此采用了跨电容式补偿电路,如图7所示。



(a) 跨电容式解调相角差

(a) The demodulation phase error of capacitive trans-impedance amplifier



(b) 跨电容式解调零偏

(b) The demodulation bias of capacitive trans-impedance amplifier

图7 改进后实验曲线

Fig. 7 The improved experimental data

在实验室环境下,采集装置和条件与零偏探索实验一致,通过采集静态情况下陀螺在 $-25^{\circ}\text{C}\sim 50^{\circ}\text{C}$ 温度范围内陀螺的解调相角差及零偏输出,总结补偿前和补偿后两种方案陀螺输出,如表1所示。

表1 两种解调方案对比

Tab. 1 The comparison of the two demodulation methods

电路形式	跨阻式 PCB	跨电容式 PCB
V_{ds} 变化率/%	1.39	1.9
V_s 变化率/%	0.49	0.53
相角差变化率/%	37.5	0.9
零偏方差	0.008	3.5×10^{-4}
去趋势项陀螺零偏/ $[(^{\circ})/s]$	1.6	0.07

2.3 实验分析

分析两种方法相角差的变化可知,跨电容式方案零偏输出最稳定,由此可见,通过优化电路,使得前放电路带宽拓宽,增大相位稳定性,大大改善了陀螺最终输出零偏,计算得陀螺零偏稳定性提升了20倍。但是前放带宽不能无限扩展,因此需要对解调相角差进行实时捕捉,通过补偿电路,补偿解调相角差引起的温度变化引起的零偏漂移。

现阶段的问题是没有从根本上消除相角差的影响,解决方案有两种,一种是基于检测自解调的补偿;另一种是Bosch的基于相角差的补偿技术^[9]。

由于传统解调方案受解调相角差的误差影响较大,这里可将检测信号与其自身进行解调提取其幅度信号。在此方案中不存在相位误差的影响,但由于此时正交信号直接反应在陀螺输出中,其幅度的漂移将恶化陀螺零偏稳定性,因此需要对正交信

号进行温度补偿。由于正交信号正比于驱动位移信号，而 V_{ds} 及驱动频率的比值可实时反应陀螺的驱动位移变化，因此可以实现对正交信号的实时补偿，其补偿算法如图 8 所示。

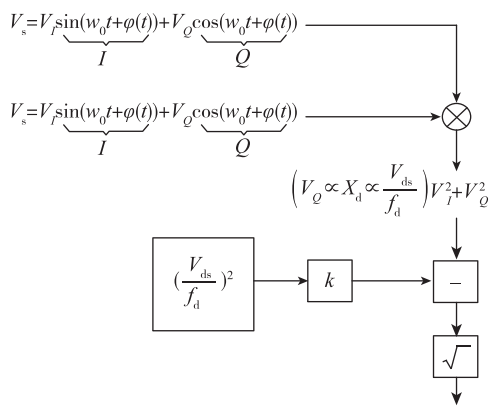


图 8 陀螺自解调零偏补偿方案
Fig. 8 The self-demodulation compensatory method of gyro bias

Bosch 通过标定解调相角差与温度之间的关系，建立补偿算法对两路解调信号进行加权，可一次性完成对陀螺零偏及标度的补偿，如图 9 所示。

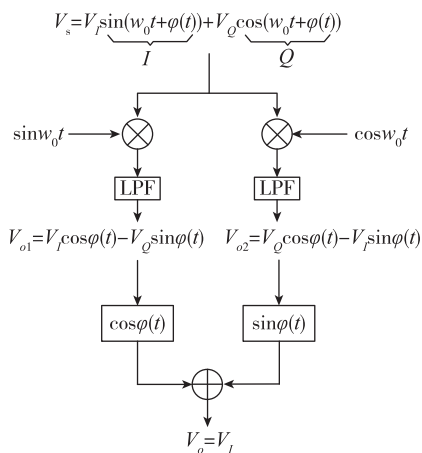


图 9 Bosch 提出的零偏补偿方案
Fig. 9 The compensatory method of gyro bias mentioned by Bosch

本实验改进的空间还很大，后期将针对这两种补偿方法进行进一步的实验验证，但是由于陀螺输出信号受外界环境以及结构耦合效应比较严重，基于检测自解调的方案中，陀螺输出信号可能会比较差，对自解调最终的零偏输出产生一定的影响。Bosch 的基于相角差的补偿技术可以一定程度上有

效地降低零偏稳定性，后期的验证将侧重于第二种方案的验证和改进。

3 结论

本文通过分析陀螺零偏影响因素，探索相角差和解调信号幅值变化对陀螺最终性能的影响，通过对比实验数据得出相角差对于陀螺零偏输出的影响要远大于幅值变动带来的影响，通过改进电路设计以及解调方案，对比跨阻式、跨电容式两种方法，相比于跨阻式，跨电容式方案陀螺零偏降低了一个数量级，大大改善了陀螺性能。

跨电容式电路的缺点在于电路容易发生非理想的振荡，后期希望通过设计合理解调方案避免相角差对零偏造成的影响。

参考文献

[1] Su J, Xiao D, Chen Z, et al. Dynamic force balancing for the sense mode of a silicon microgyro [J]. Measurement Science & Technology, 2013, 24 (9): 95-105.

[2] Greiff P, Boxenhorn B, King T, et al. Silicon monolithic micromechanical gyroscope [C]//International Conference on Solid-State Sensors Actuators, 1991: 966-968.

[3] Finkbeiner S. MEMS for automotive and consumer electronics [C]//Proceedings of the European Solid-State Device Research Conference (ESSDERC), 2013: 9-14.

[4] Zhao Y, Zhao J, Xia G M, et al. A 0.5°/h bias instability 0.067°/√h angle random walk MEMS gyroscope with CMOS readout circuit [C]//2015 IEEE Asian Solid-State Circuits Conference (A-SSCC), Xiamen, 2015:1-4.

[5] Lapadatu D, Blixhavn B, Holm R, et al. SAR500-A high-precision high-stability butterfly gyroscope with north seeking capability [J]. Optics & Precision Engineering, 2011, 19(3):635-640.

[6] Bernstein J, Cho S, King A T, et al. A micromachined comb-drive tuning fork rate gyro [C]//Micro Electro Mechanical Systems. IEEE, 1993:143-148.

[7] 管继平. 梳妆音叉双线振动硅微机械陀螺仪的技术研究[D]. 四川:电子科技大学, 2010:2-8.

[8] 赵阳, 裘安萍, 施芹, 等. 微机械陀螺检测接口建模及前置放大器优化[J]. 光学精密工程, 2013, 21(7): 1734-1740.

-
- [9] Ezekwe C D, Geiger W, Ohms T. A 3-axis open-loop gyro with demodulation phase error correction [C]// IEEE International Solid-State Circuits Solid-State Circuits Conference (ISSCC), IEEE, 2015: 1-3.
- [10] Geen J A, Sherman S J, Chang J F, et al. Single-chip surface micromachined integrated gyroscope with $50^\circ/\text{h}$ allan deviation [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2002, 37(12): 1860-1866.
- [11] Caminada C, Lasalandra E, Prandi L. Micro-electro-mechanical sensor with force feedback loop U. S. Patent 7275433 [P]. 2007-10-02.
- [12] Balachandran G K, Petkov V P, Mayer T, et al. A 3-axis gyroscope for electronic stability control with continuous self-test [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2016, 5(1): 177-186.