

DOI:10.11918/202001104

相位误差对 MEMS 陀螺检测的影响分析及校正

钟燕清^{1,2}, 田易^{1,2}, 阎跃鹏^{1,2}, 孟真¹, 陈华¹, 李继秀¹, 张兴成¹

(1. 中国科学院微电子研究所, 北京 100029; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为提升 MEMS 陀螺的整体检测性能, 对解调参考信号的相位误差对 MEMS 陀螺检测的影响进行了分析, 提出了基于矢量内积鉴相器的相位校正方法。首先从原理上分析了相位误差对解调结果的影响, 然后建立了开环解调、静电力反馈正交误差消除加开环解调、静电力反馈正交误差消除加闭环解调 3 种典型 MEMS 陀螺检测电路的仿真模型, 对解调参考信号存在相位误差的情况进行了仿真。仿真结果表明: 不同解调方式中, 相位误差对角速度和正交误差的解调影响基本一致, 对陀螺的动态范围影响各不相同。同等输入条件下, 解调参考信号的相位误差越大, 角速度和正交误差的解调结果与真实值的偏差就越大, 有必要进行相位校正以消除其影响。在此基础上, 首次将矢量内积鉴相法引入了 MEMS 陀螺检测电路中, 提出了一种可以适用于 3 种情况的相位校正方法, 并进行了仿真。仿真显示, 该方法可以消除相位误差, 校正正交误差系数和角速度解调误差, 提升静电力反馈正交误差消除加开环解调电路的动态范围, 且不会影响 MEMS 陀螺的启动时间, 具备良好的通用性。

关键词: 相位误差; 检测; 开环; 闭环; 正交误差; 角速度; 解调

中图分类号: TN79 + 1

文献标志码: A

文章编号: 0367 - 6234(2021)12 - 0121 - 06

Impact analysis and correction of phase error on MEMS gyroscope detection

ZHONG Yanqing^{1,2}, TIAN Yi^{1,2}, YAN Yuepeng^{1,2}, MENG Zhen¹, CHEN Hua¹, LI Jixiu¹, ZHANG Xingcheng¹

(1. Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To improve the overall detection performance of MEMS gyroscope, the impact of phase error in demodulated reference signal on the detection of MEMS gyroscope was analyzed, and a phase correction method based on vector inner product phase detector was proposed. Firstly, the impact of phase error on demodulation results was theoretically analyzed. Then, the simulation models of three typical MEMS gyroscope detection circuits were established, including open-loop demodulation, electrostatic feedback quadrature error cancellation plus open-loop demodulation, and electrostatic feedback quadrature error cancellation plus closed-loop demodulation, and simulation of phase error in demodulated reference signal was carried out. Results show that among the three demodulation methods, the impacts of phase error on angular velocity and quadrature error were basically the same, while those on the dynamic range of gyroscope were different. Under the same input conditions, the larger the phase error was, the more the demodulated angular velocity and quadrature error were deviated from the real value, so it is necessary to carry out phase correction to eliminate such influence. On this basis, the vector inner product phase detection method was introduced into the MEMS gyroscope detection circuit, and a general phase correction method which can be applied in three cases was proposed and simulated. Simulation results indicate that this method can eliminate phase error, calibrate quadrature error coefficient and angular velocity demodulation error, and improve the dynamic range of electrostatic feedback quadrature error cancellation plus open-loop demodulation circuit without affecting the start-up time of MEMS gyroscope, which has good versatility.

Keywords: phase error; detection; open-loop; closed-loop; quadrature error; angular velocity; demodulation

MEMS 陀螺是消费类陀螺的主流分支, 以其体积小、成本低受到人们的广泛关注。然而, 由于加工技术的限制, MEMS 陀螺存在固有的加工误差, 同时极易受到各种噪声干扰, 极大限制了角速度的测量精度和测量范围。为了达到更好的控制效果, 通常

在驱动电路采用闭环控制的方式, 以实现稳定幅度稳定频率的设计效果; 而在检测端, 根据对成本和控制精度的要求, 进行不同检测电路的设计^[1-2]。MEMS 陀螺解调方法主要为同步解调, 解调电路按照环路特性, 可分别为开环解调电路和闭环解调电路。为达到消除正交误差的目的, 通常在检测电路中附加正交误差消除通路^[3]。因此, MEMS 陀螺检测电路大体可以被分为纯开环解调(下文简称开环检测); 闭环正交误差消除 + 开环解调(下文简称单

收稿日期: 2020 - 01 - 31

作者简介: 钟燕清(1984—), 女, 博士研究生;

阎跃鹏(1963—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 阎跃鹏, yanyuepeng@ime.ac.cn

闭环检测)^[4-8]以及闭环正交误差消除+闭环解调^[9](下文简称双闭环检测)共 3 种实现方式。其中,纯开环检测电路最简单,无法消除正交误差的影响,因此最容易受噪声干扰、精度最低;单闭环检测的方式可以消除正交误差,降低误差对角速度解调的影响,电路复杂度介于两者之间;双闭环检测电路的复杂度最高,但是可以实现同时消除正交误差和提高抗干扰能力的效果,解调精度最高。在现有文献中,人们对 MEMS 陀螺的研究主要集中在正交误差消除方法、零偏稳定性指标、温度特性及校准等方面,但是对解调参考信号带来的误差缺乏足够关注。理想情况下,解调参考信号与陀螺表头的检测输出信号是完全同相和正交的关系,因此能准确的分离出角速度信号和正交误差信号。然而,实际电路中由于陀螺器件的不完全对称性、驱动和检测信号放大特性以及参考信号产生电路(通常在驱动环路中)与检测电路链路特性差异的存在,参考信号与检测信号很难达到完全同相^[10]。因此,本文在已有文献的基础上,进一步分析解调参考信号相位误差对解调效果的影响,并提出通用的校正方法。

本文首先分析相位误差对解调结果的影响,并对现有的解调方式进行建模和仿真;然后对相位误差进行调整,提出改进的基于矢量内积法的相位误差校正电路;最后对改进后的电路进行仿真,验证此方法的有效性。

1 原理分析

MEMS 陀螺是一种惯性器件,其工作原理是柯氏力原理,可类比于两个互相正交的阻尼-弹簧系统。当质量块沿着驱动方向做简谐振动时,如果在与驱动-检测平面垂直的方向有角速度变化,则在检测方向会感应出与角速度大小成正比的柯氏力。驱动轴 x 、检测轴 y 的动力学方程可以用二阶微分方程来表征,即

$$\begin{bmatrix} m_x & 0 \\ 0 & m_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{xx} & c_{xy} \\ c_{yx} & c_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} \\ k_{yx} & k_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_d \\ -2m_c \Omega_z \dot{x} \end{bmatrix} \quad (1)$$

理想情况下,驱动轴 x 与检测轴 y 完全正交,同时通过真空封装可以使得阻尼耦合项趋近于 0,式(1)中 c_{yx} 、 c_{xy} 、 k_{yx} 、 k_{xy} 均为 0。因此驱动轴与检测轴的运动学方程完全独立,检测轴受力只有柯氏力,其大小与质量块驱动端的运动速度以及输入角速度成正比。然而由于加工误差的存在, $k_{yx} \neq 0$,检测轴受力为驱动力耦合分量与柯氏力的叠加,从而造成检测轴的角速度信号中包含正交误差分量,动力学方程变成:

$$m_y \ddot{y} + c_y \dot{y} + k_{yy} y = -k_{yx} \dot{x} - 2m_c \Omega_z \dot{x} \quad (2)$$

以单闭环检测电路为例,采用在检测输入端产生与正交误差幅值相等,相位相差 180° 的信号,使得式(2)右侧 $-k_{yx} \dot{x}$ 项为 0,从而达到去除正交误差信号的目的,是常规正交误差消除中主流方式——静电力反馈正交误差消除的原理。图 1 为闭环正交误差消除+开环检测的原理框图。

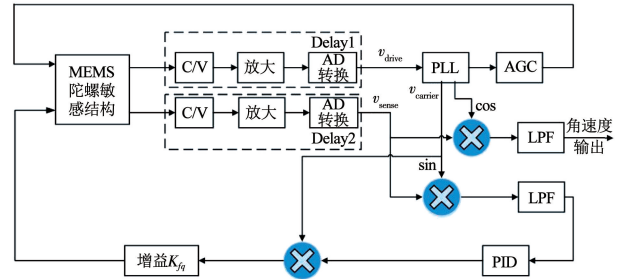


图 1 单闭环检测电路原理框图

Fig. 1 Principle diagram of single closed-loop circuit

假定陀螺驱动的谐振频点为 ω_d ,驱动的输出电压经过 C/V、放大和 AD 转换后为 $v_{drive} = A \sin(\omega_d t + \theta_1)$,则由式(2)可以得出存在正交误差的检测端输出为

$$v_{sense} = B \sin(\omega_d t + \theta_2) + C \cos(\omega_d t + \theta_2) \quad (3)$$

式中: B 为正交误差信号的电压输出幅度, C 为柯氏力对应的电压输出幅度。由于质量块驱动端位移远远大于检测端位移,因此正交耦合带来的速率等效正交误差非常大,通常在几十到几百 $^\circ/s$ 的量级,是陀螺角速度解调结果的主要误差来源^[11]。现有文献中,通常默认 $\theta_1 = \theta_2$,即参考信号与检测输出不存在相位差,或者直接忽略掉此项。然而实测发现,由于电路中寄生电容、寄生电感以及元件非线性的影响,驱动与检测信号在输出后经历不同的信号路径,在后续的 C/V 转换、放大滤波和 AD 转换环节中被引入了不同的延迟,从而使得解调参考信号与检测信号存在不同程度的相位差,导致检测性能受到影响。

假定 delay1 和 delay2 存在相位差 φ_{ed} ,为简化分析,假定 $\theta_1 = 0$,解调参考信号幅值为单位幅值 1,则解调参考信号分别为 $\sin(\omega_d t)$ 、 $\cos(\omega_d t)$, $\theta_2 = \varphi_{ed}$ 。

开环情况下,检测端角速度输出为

$$\begin{aligned} v_{sense} * \cos(\omega_d t) &= B \sin(\omega_d t + \varphi_{ed}) \cos(\omega_d t) + \\ &C \cos(\omega_d t + \varphi_{ed}) \cos(\omega_d t) = \frac{1}{2} B [\sin(2\omega_d t + \varphi_{ed}) + \\ &\sin(\varphi_{ed})] + \frac{1}{2} C [\cos(2\omega_d t + \varphi_{ed}) + \cos(\varphi_{ed})] \quad (4) \end{aligned}$$

经过低通滤波器后,得到:

$$v_{\Omega} = \frac{1}{2} B \sin(\varphi_{ed}) + \frac{1}{2} C \cos(\varphi_{ed}) \quad (5)$$

同理, 正交误差通路的解调结果为

$$v_{\text{quad}} = \frac{1}{2}B\cos(\varphi_{\text{ed}}) + \frac{1}{2}C\sin(\varphi_{\text{ed}}) \quad (6)$$

当检测端角速度输入为 0 而 φ_{ed} 非 0 时, 由式(5)可知 v_{Ω} 不为 0, 将此时 v_{Ω} 对应的角速度值称为零输入等效角速度。零输入等效角速度反映了陀螺静止条件下检测端的位移幅度, 同等情况下零输入等效角速度越小, 陀螺的动态范围越大, 线性度越高。

在开环的基础上, 添加正交误差反馈环路, 得到单闭环检测电路。其中正交误差消除环路如图 2 所示。

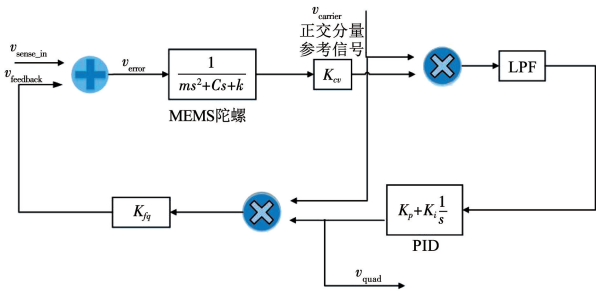


图 2 正交误差消除环路简化等效模型

Fig. 2 Simplified equivalent model of quadrature cancellation loop

根据传输函数可以得到正交误差分量解算值 v_{quad} 与检测端输入 $v_{\text{sense_in}}$ 的关系为

$$\begin{cases} v_{\text{quad}} = v_{\text{feedback}} / (k_{f_q} * v_{\text{carrier}}) \\ v_{\text{feedback}} = \text{LPF}((v_{\text{sense_in}} - v_{\text{feedback}}) * K_{\text{total}} * v_{\text{carrier}}) * k_{f_q} * v_{\text{carrier}} \end{cases} \quad (7)$$

式中: v_{carrier} 为单位幅度的载波 $\sin(\omega_d t)$, 其中 $v_{\text{sense_in}} = B\sin(\omega_d t + \varphi_{\text{ed}}) + C\cos(\omega_d t + \varphi_{\text{ed}})$, $K_{\text{total}} = \frac{k_{\text{cv}} k_{f_q} (k_p + k_i/s)}{ms^2 + Cs + k}$, 则由式(7)可得

$$v_{\text{quad}} = \frac{k_{\text{cv}} k_{f_q} (k_p s + k_i)}{2(ms^3 + Cs^2 + ks) + k_{\text{cv}} k_{f_q} (k_p s + k_i)} \Big|_{s=j\omega_d} \cdot (B\cos \varphi_{\text{ed}} + C\sin \varphi_{\text{ed}}) \quad (8)$$

这是一个 3 阶的传输函数, 在保证系统稳定的情况下分母项中 s 的三次项和二次项占据主导, 所以解调正交误差 v_{quad} 与式(6)总体趋势一致。

同样的分析方法可以得到, 单闭环、双闭环检测电路中角速度的值与参考信号相位误差的关系同开环检测相近。如果忽略 φ_{ed} 的影响而不对其进行修

正, 则反馈效果和角速度均会发生大的误差, 进而影响后续的解调。下面通过电路模型仿真验证分析的正确性。

2 电路分析与仿真

为模拟实际电路中的参考信号相位误差, 分别建立了开环检测、单闭环检测和双闭环检测 3 种电路的模型, 通过调整相位误差的大小来观察相位误差对 3 种电路的影响。由于参考载波的同相分量和正交分量通常是由驱动电路产生的同频信号, 电路延迟差异非常小, 此处假定其相对检测端输出信号的相位差一致。

设置正交误差刚度系数 $k_{y_x} = 1 \text{ N/m}$, 角速度输入 $= 1^\circ/\text{s}$, 考察相位误差从 $-30^\circ \sim 30^\circ$ 之间变化对解调结果的影响。

2.1 3 种解调电路

在纯开环解调电路中, 只对信号进行解调, 没有正交误差消除和反馈的通道, 因此参考信号的偏差直接影响角速度解调和正交误差解调的结果。相比于开环检测, 单闭环检测电路中增加了正交误差分量的反馈环路, 因此检测端的输出信号主要分量——正交分量得到了抑制, 动态范围将大于纯开环解调。在双闭环检测电路中, 存在两条反馈通路, 正交误差分量和角速度分量均被反馈分量抵消, 陀螺检测端端位移接近于 0, 测量范围最大。当不存在相位误差时, 环路是收敛的, 正交误差信号得到较好的抑制, 解调角速度与实际角速度相符合。由于信号通路的不同延迟, 造成解调参考信号与实际检测端输出信号相位不一致的情况, 会影响反馈量的大小, 从而影响最终的角速度解调结果。

2.2 相位误差影响的仿真

在 Simulink 中建立开环检测、正交误差消除 + 开环解调、正交误差消除 + 闭环解调 3 种模型, 并进行仿真, 仿真参数见表 1。

在正交误差系数和角速度输入均恒定的情况下, 对每种模型分别进行 13 组仿真, 每组仿真包含 13 个相位误差, 从 $-30^\circ \sim 30^\circ$, 以步长 5° 递增, 每组仿真 10 s, 共得到 39 组数据。对每组数据的角速度解调结果、正交误差解调结果以及陀螺零输入等效角速度进行比较, 得到检测电路与参考信号的相位误差对解调结果的影响如图 3 所示。

表 1 MEMS 陀螺仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters of MEMS gyroscope

陀螺质量块质量/kg	驱动频点/Hz	检测频点/Hz	检测端 Q 值	检测端正交误差系数/($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	检测端角速度输入/($(^\circ) \cdot \text{s}^{-1}$)
1.5×10^{-7}	15 950	16 000	4 000	1	1

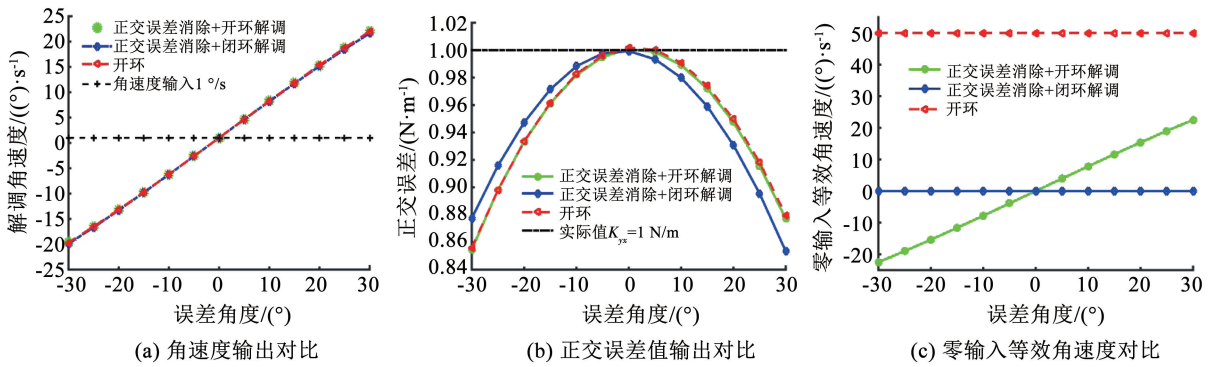


图 3 参考信号相位误差对解调结果的影响对比

Fig. 3 Comparison of impact of phase error in reference signal on demodulation result

在 3 种解调电路中,最终的角速度解调结果(如图 3(a)所示)和正交误差解调结果(如图 3(b)所示)均与理论值(由式(5)、(6)计算得到)一致。首先,由于正交误差的存在,相位误差的大小极大的影响角速度解调的值,误差越大、对解调角速度的影响越大。如图 3(a)所示,在输入为固定角速度 1 °/s 时,在本仿真系数前提下,值为 1 的正交误差等效为 50 °/s 的角速度输入,5 °的相位误差即可带来 4 °/s 的解调误差,误差值 4 倍于实际角速度输入。其次,相位误差会引起正交误差解调值的变化,如图 3(b)所示。仿真输入为 $k_{yx} = 1 \text{ N/m}$ 的固定输入时,正交误差解调值随着解调参考信号误差角度的变化而变化。相位误差越大,偏离越大,变化曲线与式(6)基本一致。最后,相位误差对 3 种解调电路的零位等效输入角速度的影响不同,如图 3(c)所示。对于纯开环检测,不管相位误差怎么变化,其零输入等效角速度不发生变化,均为 50 °/s。对于正交误差消除 + 闭环解调电路,由于其通过两个反馈回路限制了质量块的振动,使得质量块在检测模态位移始终接近于 0,因此零输入等效角速度对相位误差变化不敏感;而对正交误差消除 + 开环解调电路,零输入等效角速度随解调相位误差的变化而变化,变化量与解调相位误差成近似比例关系。

MEMS 陀螺是非线性器件,为了保证器件工作在线性区,需要使检测端位移尽可能小,甚至接近于 0。然而由于相位误差的存在,导致正交误差消除 + 闭环解调电路即使稳定时也存在大量的正交误差残余分量,质量块处于大位移区域。相位误差越大,残留越大,输出动态范围越受限制。

需要注意的是,在实际情况中参考信号的相位差受陀螺传输特性、电路元件、环境温度的影响较大,是一个缓慢变化的量,并且各个器件误差大小不同,难以获得经验值。因此,必须对现有电路进行改进,克服参考信号相位误差对解调的影响,以获得更

好的解调精度。

3 相位误差的校正方法

传统的自动控制系统中,对于相位误差的补偿通常采用超前滞后的补偿方法,可以取得较好的效果^[12-13]。然而由于此方法与电路放大特性相关,需要根据具体电路进行个性化调试,而且多用于模拟域,缺乏通用性。现有的 MEMS 陀螺解调电路多采用数字方案,已发表方案中很少单独考虑参考信号相位误差的补偿。考虑到驱动环路中数字锁相环具有相位可控且易于调节输出频率的优点,提出了一种基于矢量内积法的实时相位误差跟踪与补偿方法,在单闭环检测电路中进行了仿真。改进电路的原理如图 4 所示。

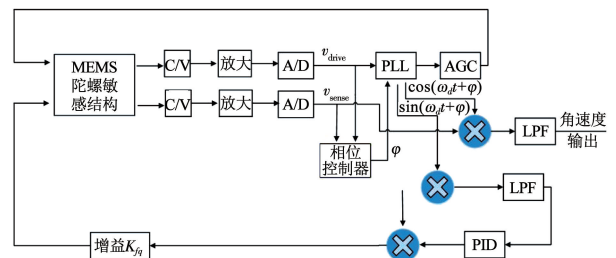


图 4 改进的单闭环检测电路框图

Fig. 4 Principle diagram of optimized single closed-loop circuit

由于新增加的鉴相器和锁相环部分功能是在 A/D 之后、同步解调之前,因此本方法无需区分电路的环路特性,可以同样适用于开环检测和双闭环检测电路。

3.1 矢量内积法鉴相原理

采用矢量内积法计算相位误差,并在陀螺的参考信号产生电路中校正相位误差,即可实现相位误差的校正。根据这种思路,设计了矢量内积鉴相模块,并进行了电路仿真。

由文献[14-15]可知,如果两路同频信号的相位差为 θ ,记为 $x(t) = A\sin(\omega t)$, $y(t) = B\sin(\omega t + \theta)$,

式中 A 、 B 分别为被测信号的幅值。则信号 $x(t)$ 、 $y(t)$ 的相位差与其互相关值 $R_{xy}(0)$ 及自相关值 $R_{xx}(0)$ 、 $R_{yy}(0)$ 的关系如下:

$$\theta = \arccos\left(\frac{R_{xy}(0)}{\sqrt{R_{xx}(0)R_{yy}(0)}}\right) \quad (9)$$

其中:

$$R_{xy}(0) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(\omega n T_s) * y(\omega n T_s)$$

$$R_{xx}(0) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(\omega n T_s)^2$$

$$R_{yy}(0) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N y(\omega n T_s)^2$$

式中: T_s 为信号采样率, N 为一次计算的取样点数, 通常为 $1/\omega T_s$ 的整数倍。采用此算法精度高、算法简单易实现, 且相位检测值不受信号幅值变化的影响。

设置采样率为 512 kHz, 信号频率为 16 kHz, 取样点数 $N = 128$, 设置相位偏移从 $0^\circ \sim 30^\circ$ 正弦变化, 得到跟踪效果如图 5 所示。跟踪过程是实时的, 且在整周期采样的情况下, 跟踪精度达到了 0.01° 。

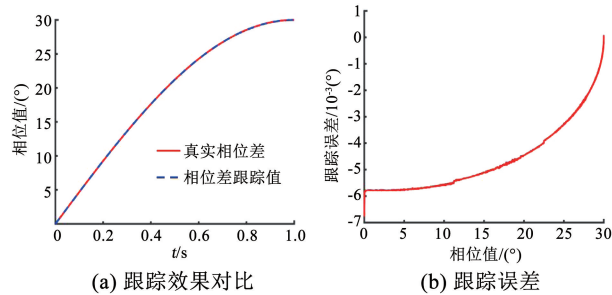


图 5 矢量内积法相位跟踪效果

Fig. 5 Phase tracking effect of vector inner product method

3.2 相位控制器

在内积鉴相器的基础上增加相位偏置, 形成图 4 中的相位控制器, 如图 6 所示。

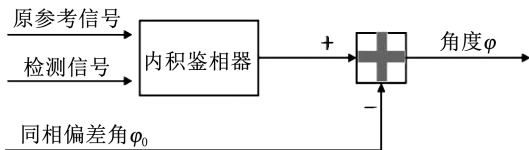


图 6 相位控制器原理框图

Fig. 6 Principle diagram of phase controller

在实际电路中, 式(1)中的阻尼耦合项 c_{yx} 不一定为 0, 因此会引入同相误差, 使得由内积鉴相器输出的角度中包含了同相分量引入的偏差角 φ_0 。

假定式(3)中 $\theta_2 = \varphi$, 同相分量幅值为 C_0 , 则有

$$v_{\text{sense}} = B\sin(\omega_d t + \varphi) + C_0 \cos(\omega_d t + \varphi) = D\sin(\omega_d t + \varphi + \varphi_0) \quad (10)$$

式中 $D = \sqrt{B^2 + C_0^2}$, $\varphi_0 = \arctg(C_0/B)$ 。

由于在实际电路中, 正交分量和同相分量的幅值是未知量, 因此需要采用角度校正的方式获得真实相位误差。角度校正的方法为:

1) 保持陀螺静止, 采用矢量内积法求得参考信号与检测输出的偏差角 $\varphi + \varphi_0$, 并使用此角度调整参考信号的相位, 得到正交支路解调参考信号为 $\sin(\omega_d t + \varphi + \varphi_0)$, 角速度解调参考信号为 $\cos(\omega_d t + \varphi + \varphi_0)$ 。采用调整后参考信号进行解调, 得到正交误差支路输出为 D ;

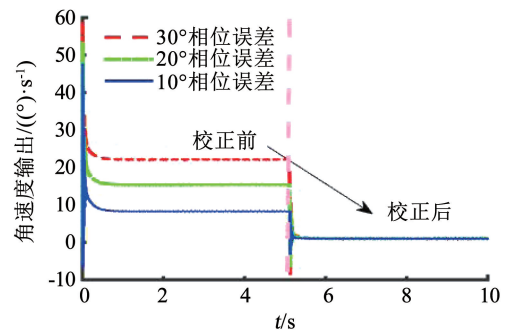
2) 对陀螺施加 Ω_0 °/s 的角速度, 采用调整后参考信号进行解调, 得到正交误差支路输出为 $D + \Omega_0 \sin \varphi_0$, 角速度支路输出为 $\Omega_0 \cos \varphi_0$;

3) 由 1)、2) 可以求得同相误差引入的角度误差 φ_0 , 鉴相得到的 $\varphi + \varphi_0$ 值扣除同相误差 φ_0 即可得到两支路的相位差 φ 。

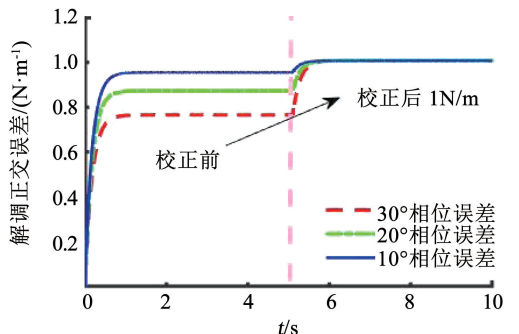
使用校正后相位差 φ 进行参考信号的相位调整, 得到的正交误差支路输出 B 为真正交误差, 角速度解调值扣除由于同相误差带来的角速度零位偏移量 C_0 为真实的角速度值。

3.3 校正结果分析

在改进的单闭环检测电路中进行仿真, 分别设置参考信号的相位误差为 10° 、 20° 、 30° , 角速度输入为 0, 其余电路参数同表 1。为便于比较, 在 $0 \sim 5$ s 时关闭相位控制模块, 在 5 s 时启动相位控制模块, 得到仿真结果如图 7 所示。



(a) 校正前、后解调角速度值



(b) 校正前、后解调正交误差值

图 7 校正效果对比

Fig. 7 Comparison of correction effect

由图 7 可见,经过相位控制器的相位调整,由相位误差引起的角速度和正交误差系数的解调误差均得到了校正。校正效果体现在:

1) 参考信号相位误差 $< 30^\circ$ 的条件下,经过相位校正,陀螺检测端的角速度解调误差得到大幅度的抑制,从校正前的数 $10^\circ/\text{s}$ 回到真值 0 附近;

2) 经过电路的校正,陀螺检测端的正交误差解调值恢复到真值,这将带来正交误差反馈信号大小不再受到相位误差的影响的好处,进而提升 MEMS 陀螺角速度解调的线性度。

此外,校正后陀螺检测端的零输入等效角速度值可以恢复到无相位误差的水平。也即在存在解调相位误差的情况下,本电路可以抑制零输入情况下陀螺的检测端位移至 0 附近,从而提升陀螺的动态范围和线性度。

然而,由于输入角速度的变化会影响检测端输出信号的相位,进而影响矢量内积鉴相模块的输出,因此矢量内积鉴相模块只能用于零角速度输入时相位误差判断,也即用户需要在零输入时测试参考信号与陀螺检测输出信号的相位差,记录相位误差值并调整好参考信号,在其他时间关闭该模块以保证相位误差值不受输入相位的影响。由于矢量内积鉴相器延迟极低,因此鉴相过程非常迅速,基本不会给 MEMS 陀螺的启动时间带来影响。

4 结 论

1) 参考信号相位误差对 MEMS 陀螺解调影响较大,对 3 种解调电路角速度解调和正交误差解调的影响大体相同,对单闭环电路的动态范围影响最大。速率等效正交误差等于 $50^\circ/\text{s}$ 的情况下, 5° 的参考信号相位误差即可引入 $4^\circ/\text{s}$ 的解调误差,非常有必要进行校正。

2) 改进后的电路可以消除相位误差,校正由相位误差带来的正交误差系数和角速度解调误差,降低单闭环电路的速率等效零位偏移,提升单闭环电路的动态范围。

3) 相位控制模块的设计考虑了电路中存在同相误差的情况,在存在同相误差的场合,需要用角度校正的方法去除同相误差对解调的影响。

4) 由于新增加的相位控制模块功能是在 A/D 之后、同步解调之前,因此本方法无需区分电路的环路特性,可以同样适用于开环检测和双闭环检测电路,具有良好的通用性。

参考文献

[1] ACAR C, SHKEL A. MEMS vibratory gyroscopes: Structural approaches to improve robustness[M]. New York, NY: Springer, 2008. DOI: 10.1007/978-0-387-09536-3_9

[2] BARBOUR N, SCHMIDT G. Inertial sensor technology trends[J]. IEEE Sensors Journal, 2001, 1(4): 332. DOI: 10.1109/7361.983473

[3] TATAR E, ALPER S E, AKIN T. Quadrature-error compensation and corresponding effects on the performance of fully decoupled MEMS gyroscopes[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2012, 21(3): 656. DOI: 10.1109/JMEMS.2012.2189356

[4] ANTONELLO R, OBOE R, PRANDI L, et al. Open loop compensation of the quadrature error in MEMS vibrating gyroscopes [C]//Proceedings of the 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics. Porto, Portugal; IEEE, 2009: 4034. DOI: 10.1109/IECON.2009.5415319

[5] NOROUZPOUR-SHIRAZI A, ZAMAN M F, AYAZI F. A digital phase demodulation technique for resonant MEMS gyroscopes[J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 14(9): 3260. DOI: 10.1109/JSEN.2014.2326974

[6] 杨亮, 苏岩, 袁安萍, 等. 具有增益补偿功能的微机械陀螺数字驱动闭环[J]. 光学精密工程, 2014, 22(1): 109
YANG Liang, SU Yan, QIU Anping, et al. Digital drive closed-loop with gain compensation for micro-machined gyroscope [J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(1): 109. DOI: 10.3788/OPE.20142201.0109

[7] 曹慧亮, 李宏生, 申冲, 等. 双质量硅微机械陀螺仪正交校正系统设计及测试[J]. 中国惯性技术学报, 2015, 23(4): 544
CAO Huiliang, LI Hongsheng, SHEN Chong, et al. Design and test on quadrature error correction system of dual-mass silicon MEMS gyroscope [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2015, 23(4): 544. DOI: 10.13695/j.cnki.12-1222/63.2015.04.023

[8] 曹慧亮, 王玉良, 石云波, 等. 硅微陀螺正交误差校正方案优化[J]. 光学精密工程, 2016, 24(1): 134
CAO Huiliang, WANG Yuliang, SHI Yunbo, et al. Optimization of quadrature error correction method for silicon MEMS gyroscopes[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(1): 134. DOI: 10.3788/OPE.20162401.0134

[9] CHEN Fang, YUAN Weizheng, CHANG Honglong, 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. DOI: 10.1109/JSEN.2013.2271586

[10] OMAR A, ELSHENNAWAY A, ABDELAZIM M, et al. Analyzing the impact of phase errors in quadrature cancellation techniques for MEMS capacitive gyroscopes [C]//Proceedings of the 17th IEEE Sensors Conference. New Delhi, India; IEEE, 2018: 1. DOI: 10.1109/ICSENS.2018.8589776

[11] SAUKOSKI M, AALTONEN L, HALONEN K A I. Zero-rate output and quadrature compensation in vibratory MEMS gyroscopes [J]. IEEE Sensors Journal, 2007, 7(12): 1639. DOI: 10.1109/JSEN.2007.908921

[12] 廖家祥, 李国斌, 姜力. 电路设计中的相位补偿技术[J]. 科技风, 2009(11): 154
LIAO Jiaxiang, LI Guobin, JIANG Li. Phase compensation technology in circuit design [J]. Technology Wind, 2009(11): 154. DOI: 10.3969/j.issn.1671-7341.2009.11.125

[13] 马振华, 张磊. 超前—滞后滤波器在某控制系统中的应用[J]. 科技风, 2018(9): 84
MA Zhenhua, ZHANG Lei. Application of lead-lag filter in a control system [J]. Technology Wind, 2018(9): 84. DOI: 10.19392/j.cnki.1671-7341.201809050

[14] 田桂平, 万钧力, 陈滢涛. 基于矢量内积法的高精度数字相位差计[J]. 电测与仪表, 2004, 41(10): 16
TIAN Guiping, WAN Junli, CHEN Yantao. High precision digital phase detector based on inner product theory [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2004, 41(10): 16. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1390.2004.10.005

[15] 牟卫华, 倪少杰, 白洋, 等. 采用向量内积的并行相关算法[J]. 国防科技大学学报, 2017, 39(5): 50
MOU Weihua, NI Shaojie, BAI Yang, et al. Parallel correlation algorithm based on vector dot product [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2017, 39(5): 50. DOI: 10.11887/j.cn.201705009