

基于相位控制的硅微机械陀螺驱动控制技术

罗兵¹ 王安成¹ 吴美平¹

摘要 全面分析、研究并实现了一种基于相位控制的硅微机械陀螺 (Silicon micromechanical gyroscope, SMG) 驱动控制技术. 分析了硅微陀螺驱动模式的动力学特性, 阐述了相位控制方案的基本原理; 在此基础上建立了控制环路, 采用自激振荡理论分析了其稳定性; 建立了环路的相位模型, 引入特异因子实现相位控制误差到频率差 (工作频率与驱动模式谐振频率之差) 的转换; 建立了对应于相位控制环路的频率模型, 当环路滤波器为一阶模型时, 与传递函数为二阶的信号跟踪锁相环 (Phase locked loop, PLL) 不同, 总的闭环模型仅为一阶; 最后基于 FPGA 平台, 采用线性鉴相方式设计了数字化相位控制环路, 并结合幅值控制实现了双闭环驱动控制电路. 测试结果表明, 该方案可实现硅微陀螺驱动端的高精度控制.

关键词 硅微陀螺, 驱动控制, 相位控制, 锁相环

DOI 10.3724/SP.J.1004.2012.00206

A Drive Control Scheme Based on Phase-control for Silicon Micromechanical Gyroscopes

LUO Bing¹ WANG An-Cheng¹ WU Mei-Ping¹

Abstract A drive control scheme based on phase-control for silicon micromechanical gyroscopes (SMG) is studied and implemented. By analyzing the dynamical characteristics of the drive mode, the elementary principle of phase control scheme upon which the control loop is built is described and the stability of the loop is presented using the theory of self-sustained oscillation. The phase model of the loop is modeled where a special factor is introduced to realize the conversion from phase-error to frequency-error which is the difference between current working frequency and the resonance-frequency of the drive mode. By building the frequency closed-loop corresponding to the phase-control loop, we find that the order of the loop-filter is just one when considering loop-filter as a first-order-model, which is different from the general phase locked loop (PLL) that is second-order. Elaborate design of the digital phase-control circuit is carried out based on the FPGA platform where a linear phase-detector is applied. Aided by an amplitude control loop, a double-closed-loop drive control circuit is realized. Results show that the drive control loops work precisely.

Key words Silicon micromechanical gyroscope (SMG), drive control, phase control, phase locked loop (PLL)

作为一种新型角速度传感器, 硅微机械陀螺 (Silicon micromechanical gyroscope, SMG) 具有体积小、重量轻、成本低、易于批量生产等诸多优点, 应用潜力巨大. 为了提高 SMG 的检测灵敏度与刻度因数稳定性, 通常采用闭环驱动的方式使驱动信号频率跟踪不断变化的驱动模式自然频率 (称为稳频控制), 同时保持驱动轴振动速度的幅值恒定^[1].

锁相环 (Phase locked loop, PLL) 技术是微机械陀螺闭环驱动稳频控制的一种典型实现方法. PLL 本质上是一个相位控制系统, 环路锁定时, 其振荡器输出与参考输入同频同相 (或相位相差 90°). 文献 [2] 介绍了 PLL 及其用于一般振动形态控制的主要性能, 文献 [3] 利用 PLL 实现了一种微机电

系统 (Micro-electro-mechanical systems, MEMS) 振动结构的自然频率跟踪, 并将系统考虑成复杂的 5 阶模型进行理论与仿真, 推导出了系统稳定时环路增益的选择指标. 文献 [4] 给出了 PLL 在 MEMS 器件自然频率跟踪方面的一个具体应用, 文献 [5] 将 PLL 应用到 MEMS 陀螺的模式频率匹配上, 文献 [6-11] 则间接或直接地采用 PLL 实现微机械陀螺的稳频控制. 概括说来, PLL 用于微机械陀螺稳频控制主要表现为两种方式: 一是利用其锁定状态下相移恒定的特点, 构建微机械陀螺驱动轴的自激振荡回路, 如文献 [6]; 另一种是直接借鉴其锁相即锁频的思想, 结合微机械陀螺的相频特性, 建立相位控制环路^[7-11], 这种方式也可称为相位控制技术, 本文的研究对象即为此.

正如文献 [3] 所提到的, PLL 很早就被用于振动结构的自然频率跟踪, 但是却鲜见对其系统模型、性能等方面的严格的理论分析, 在用于微机械陀螺稳频控制时尤其如此, 如文献 [7-11] 中多数仅局限于环路结构与基本原理的介绍, 缺乏对模型的深入分析. 另一方面, 对基本的 PLL 进行建模与理论分析

收稿日期 2011-04-27 录用日期 2011-10-24
Manuscript received April 27, 2011; accepted October 24, 2011
国家高技术研究发展计划 (863 计划) (2006AA12Z319) 资助
Supported by National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2006AA12Z319)
本文责任编辑 胡小平
Recommended by Associate Editor HU Xiao-Ping
1. 国防科学技术大学机电工程与自动化学院 长沙 410073
1. College of Mechatronic Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073

的文献虽然很多, 但因为没有考量微机械陀螺这一控制对象的特殊性, 无法直接用于对基于 PLL (或相位控制) 的微机械陀螺稳频回路的分析与设计. 本文正是针对这一问题, 全面分析、研究并实现了一种基于相位控制的硅微陀螺驱动方案. 结合 SMG 的动力学特性和 PLL 的基本结构, 建立了基于 PLL 的相位控制环路, 首先重点对环路的稳定性进行分析, 然后从相位和频率两个层面对环路模型进行深入分析, 得到了很有意义的结论. 本文建立了控制环路的 Simulink 模型, 仿真分析了控制性能. 最后辅以幅值控制环路, 基于 FPGA 实现了数字化双闭环的 SMG 驱动控制电路, 并在板测试了电路的基本性能.

1 硅微机械陀螺驱动端动力学分析

硅微陀螺驱动端示意图如图 1 所示, 中间为可动质量块, 两侧阴影部分为固定驱动电极^[7].

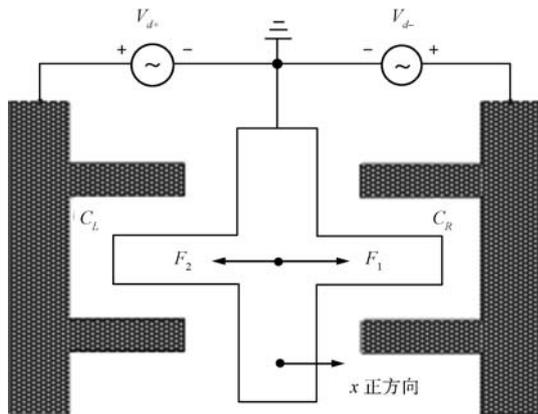


图 1 硅微陀螺驱动端示意图

Fig. 1 The diagram of drive axis for SMG

在固定电极上施加驱动电压 V_{d+} 和 V_{d-} , 由于电势差的存在, 对可动质量块产生静电力 F_1 和 F_2 , 二者的合力即驱动力 F_{es} 为

$$F_{es} = F_1 - F_2 = \frac{1}{2} V_{d+}^2 \left| \frac{\partial C_L}{\partial x} \right| - \frac{1}{2} V_{d-}^2 \left| \frac{\partial C_R}{\partial x} \right| \quad (1)$$

式中, x 是可动质量在驱动方向的位移; C_L , C_R 分别为左右两侧的梳齿电容. 驱动电压由同一直流 V_{DC} 和角频率为 ω_d 的差分正弦交流电压信号合成, 分别为

$$\begin{cases} V_{d+} = V_{DC} + V_{AC} \sin(\omega_d t) \\ V_{d-} = V_{DC} - V_{AC} \sin(\omega_d t) \end{cases} \quad (2)$$

将式 (2) 代入式 (1), 得:

$$F_{es} = \eta V_{AC} V_{DC} \sin(\omega_d t) \quad (3)$$

其中, η 是与陀螺结构有关的常数. 驱动端可以看作一个典型的二阶系统, 其动力学方程表示为

$$m_x \ddot{x} + D_{xx} \dot{x} + k_{xx} x = F_{es} \quad (4)$$

则驱动方向的振动位移为

$$x(t) = A_x \sin(\omega_d t + \varphi_d) \quad (5a)$$

$$A_x = \frac{\eta V_{AC} V_{DC}}{\sqrt{(\omega_{0x}^2 - \omega_d^2)^2 + \omega_{0x}^2 \omega_d^2}} \frac{m_x}{Q_x^2} \quad (5b)$$

$$\varphi_d = -\arctan \frac{\omega_{0x} \omega_d}{(\omega_{0x}^2 - \omega_d^2) Q_x} \quad (5c)$$

式中, m_x , D_{xx} 和 k_{xx} 分别为二阶系统的质量、阻尼和弹性系数; $\omega_{0x} = \sqrt{k_{xx}/m_x}$ 为驱动端的谐振频率; $Q_x = \sqrt{k_{xx} m_x / D_{xx}}$ 为驱动端的品质因数.

2 硅微机械陀螺相位控制环路的建立及其稳定性分析

2.1 基于相位控制的驱动稳频原理

硅微机械陀螺驱动控制包含稳频和恒幅两个方面, 前者是使加在驱动端上的交流信号频率 ω_d (称为工作频率) 跟踪驱动模态自然频率 ω_{0x} , 以保证驱动端始终处于谐振状态, 后者是使驱动振动位移的幅值 A_x 稳定在一预设值上以提高刻度因数稳定性.

根据式 (5c), 在任一时刻, 不同的 ω_d 决定了驱动端输入输出信号的相移 φ_d . 当 $\omega_d = \omega_{0x}$ 时, $\varphi_d = \varphi(\omega_{0x}) - \pi/2$, 即说明驱动端处于谐振, 否则表示驱动端偏离谐振. 通过控制相移 φ_d 使之等于 $\varphi(\omega_{0x})$ 就能够实现驱动端稳频控制. 基本思路为: 通过扫频的方法确定出驱动端谐振时振动信号的相移 $\varphi(\omega_{0x})$, 然后设计一个移相为 φ_0 的移相单元保证移相后的总相移为 0, 即满足 $\varphi_0 + \varphi(\omega_{0x}) = 0$. 实际工作时通过锁相环实时调整输出频率 ω_d , 使 $\varphi_0 + \varphi_d = 0$, 此时就有 $\varphi_d = \varphi(\omega_{0x})$, 从而间接实现了 $\omega_d = \omega_{0x}$.

2.2 基于相位控制的驱动稳频回路

如图 2 所示, 建立了基于相位控制的硅微机械陀螺锁相环驱动控制环路, 它主要包括 PLL 和被控对象两部分. PLL 包括鉴相器, 环路滤波器和压控振荡器 (Voltage-controlled oscillator, VCO). 鉴相器用来比较参考输入信号 (b 点) 与 VCO 输出信号之间的相位差, 经过环路滤波器 (即控制器) 得到控制信号 u , 送到压控振荡器对输出信号的频率 ω 进行调整. 当环路锁定时, 输出信号与输入信号的相位一致, 因此也实现了输出信号与输入信号的频率一致, 即频率跟踪.

被控对象包括驱动力产生、陀螺驱动端, 振动位移检测等环节. 由式 (5c), 当陀螺的驱动端处于谐振状态时, 振动位移检测电路检测到的信号滞后驱动信号 90° . 为了使环路的总相移为 0, 需要加上可调移相模块来补偿电路中所有的附加相移, 使闭环驱动回路稳定工作在陀螺的谐振频率处. 图中 A 表示锁相环的增益, F 表示被控对象的增益.

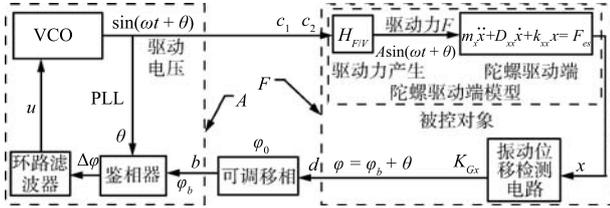


图 2 基于相位控制的硅微机械陀螺驱动控制回路

Fig. 2 Drive control loop based on phase control for SMG

2.3 频率回路的稳定性分析

图 3 给出了负反馈系统的自激振荡示意图.

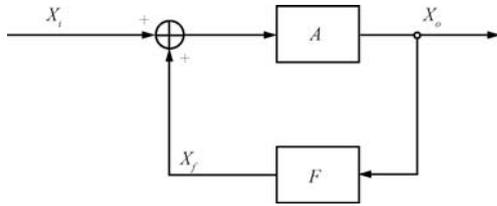


图 3 负反馈系统的自激振荡示意图

Fig. 3 Self-sustained oscillation diagram for negative feedback amplifier circuit

图 3 中, X_i 表示输入量, X_o 表示输出量, A 和 F 分别表示前向通道和反馈通道放大倍数 (增益), 则电路产生自激振荡时模和相角的平衡条件为

$$\begin{cases} |AF| = 1 \\ \angle(AF) = 2n\pi, \quad n \in \mathbf{N} \end{cases} \quad (6)$$

下面根据自激振荡理论分析图 2 所示闭环回路的稳定性.

图 2 中, c_2 点到 d 点的相移为 φ_d (结果值见式 (5c)), d 点到 b 点可调移相为 φ_0 , b 点到 c_1 点相移为 0, 因此当 $\varphi_0 + \varphi_d = 0$ 时, 整个环路的相移等于 0, 满足式 (6) 的相位平衡条件.

锁相环输出信号的幅值 $|A_{c1}|$ 是恒定的, 故 $|A|$ 是变化值, 取决于 b 点输入信号的幅值 $|A_b|$. $|F|$ 由式 (5b) 决定.

$$|A_b| = |A_d| = |A_{c2}||F| \quad (7)$$

则

$$|A_{c1}| = |A_b||A| = |A_d||A| = |A||F||A_{c2}| \quad (8)$$

所以

$$|AF| = \frac{|A_{c1}|}{|A_{c2}|} \quad (9)$$

电路刚上电时可以认为陀螺驱动端 c_2 与 VCO 的输出端 c_1 没有连接关系, 即在输入信号幅值 $|A_{c2}| = 0$ 的条件下, VCO 依然有幅度稳定的输出, $|AF| = |A_{c1}|/|A_{c2}| > 1$, 满足起振条件, 系统开始起振. 当 VCO 建立起稳定的输出以后, 则可以认为 c_1 与 c_2 连接上, $|A_{c2}| = |A_{c1}|$, $|AF| = |A_{c1}|/|A_{c2}| = 1$, 满足式 (6) 的幅值平衡条件, 系统等幅振荡.

可见, 闭环回路满足自激振荡的幅值、相位条件.

3 相位控制环路模型简化与分析

3.1 控制环路的相位模型

图 2 中, b 点的相位为 $\varphi_b = \varphi_0 + \varphi_d + \theta$, 经过鉴相器后相位为 $\Delta\varphi = \varphi_0 + \varphi_d$, 与压控振荡器的初始相位 θ 无关, 因此可以建立如图 4 所示的闭环控制回路相位控制模型, 其中 f_0 是初始频率, 常常取谐振频率 f_{0x} 作为初值 (下文如无特殊说明, 即用 f_0 作为初始频率, $\omega_{0x} = 2\pi f_{0x}$). 考虑到驱动信号频率 ω_d 在环路调节过程中是一个时变量, 将其写成 $\omega(t)$.

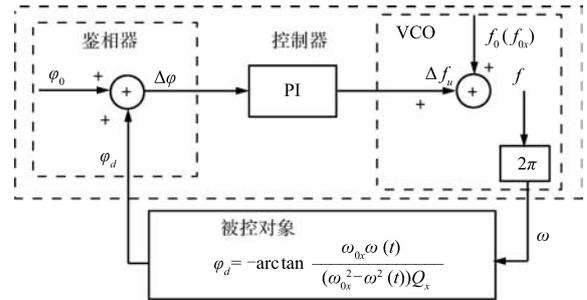


图 4 硅微机械陀螺驱动控制回路的相位模型

Fig. 4 Phase model of drive control loop for SMG

3.2 相频转换特异因子

在锁相环路锁定的情况下, 即在环路的跟踪过程中, 可以将式 (5c) 线性化, 即在 $\omega(t) = \omega_{0x}$ 处进行一阶泰勒展开, 有:

$$\begin{aligned} \varphi_d &= -\arctan \frac{\omega_{0x}\omega(t)}{(\omega_{0x}^2 - \omega^2(t))Q_x} \approx \\ &= -\frac{\pi}{2} - \frac{2Q}{\omega_{0x}}(\omega(t) - \omega_{0x}) \end{aligned} \quad (10)$$

设定 $\varphi_0 = -\varphi(\omega_{0x}) = \pi/2$, $\Delta\omega = (\omega(t) - \omega_{0x}) = 2\pi(f(t) - f_{0x}) = 2\pi\Delta f$, 则

$$\Delta\varphi = \varphi_0 + \varphi_d = \varphi_d - \varphi(\omega_{0x}) \approx -\frac{2Q}{\omega_{0x}}$$

$$(\omega(t) - \omega_{0x}) = -\frac{2Q}{\omega_{0x}}\Delta\omega = -2\pi\frac{2Q}{\omega_{0x}}\Delta f \quad (11)$$

即 Δf 与 $\Delta\varphi$ 之间存在一个转换函数 $K_{f-\varphi}$:

$$K_{f-\varphi} = \frac{\Delta\varphi}{\Delta f} = -\frac{2Q \cdot 2\pi}{\omega_{0x}} = -\frac{2Q}{f_{0x}} \quad (12)$$

转换函数 $K_{f-\varphi}$ 与陀螺参数 (Q, f_{0x}) 有关, 称其为陀螺相频转换特异因子. 利用 $K_{f-\varphi}$, 可将控制器分解成转换函数 $K_{\varphi-f} (= -1/K_{f-\varphi})$ 与标准 PI 控制器两部分, 得到图 5.

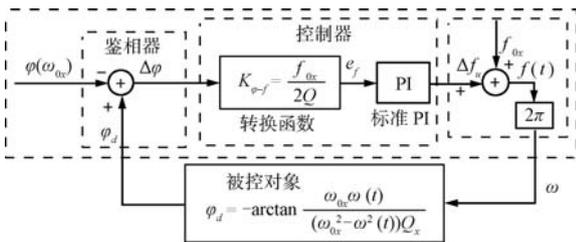


图 5 基于转换函数的硅微机械陀螺相位控制环路相位模型
Fig. 5 Phase model of phase control loop based on transform function for SMG

3.3 控制回路的频率模型

定义图 5 中经过转换函数 $K_{\varphi-f}$ 后的信号为 e_f , 即鉴相器与特异因子一起完成了频率差检测. 由式 (12) 得:

$$e_f = \frac{f_{0x}}{2Q}\Delta\varphi = \frac{f_{0x}}{2Q}(-2\pi\frac{2Q}{\omega_{0x}}\Delta f) = -\Delta f = f_{0x} - f(t) \quad (13)$$

因此, e_f 为实际频率误差, 据此将原相位环路简化为频率闭环回路, 如图 6 所示, 该回路为一个单位负反馈回路, 可以自动实现对谐振频率 f_{0x} 的跟踪.

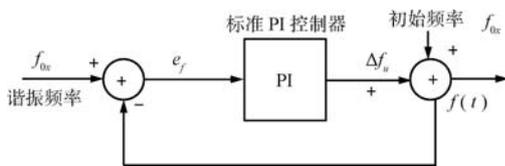


图 6 硅微机械陀螺频率闭环控制回路
Fig. 6 Frequency closed-loop for SMG

PI 控制器的传递函数为

$$G_{PI}(s) = K_P + \frac{K_i}{s} \quad (14)$$

则简化的硅微机械陀螺频率闭环回路的传递函数为

$$G(s) = \frac{f(s)}{f_{0x}(s)} = \frac{G_{PI}(s)}{1 + G_{PI}(s)} = \frac{K_p s + K_i}{(1 + K_p)s + K_i} \quad (15)$$

可见, 闭环回路的模型阶数只等于环路滤波器 (PI 环节) 的阶数, 锁相环中压控振荡器这一积分环节的作用被控制对象 (陀螺) “抵消”. 这说明, 当环路滤波器为一阶模型时, 闭环回路总的闭环模型仅为一阶, 这与传递函数为二阶的信号跟踪锁相环是不同的, 传统分析中多数都没有注意到这一点.

4 硅微机械陀螺相位控制环路模型仿真

如图 7, 建立了相位控制环路的 Simulink 仿真模型. 其中环路滤波器使用 PI 环节; 陀螺驱动轴模型采用二阶传函模型, 初始自然频率设为 2700 Hz, Q 值设为 8000; 鉴相器采用双相锁定放大器原理结合四象限反正切函数实现 (第 5.1 节将进行介绍). 为了考察环路所输出的驱动信号频率对陀螺驱动模式自然频率的跟踪情况, 设定了三个自然频率跃变点, 跃变点通过开关选择, 由时间控制. 图 8 给出了驱

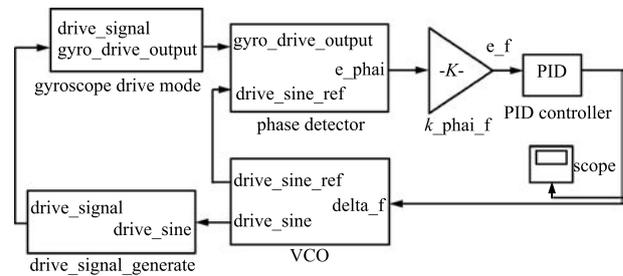


图 7 硅微机械陀螺相位控制回路 Simulink 模型
Fig. 7 The simulink model of the phase-control loop for SMG

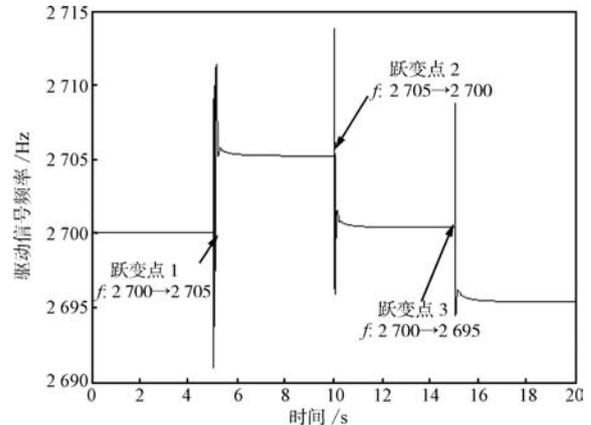


图 8 陀螺驱动轴自然频率有跃变时回路的频率跟踪效果
Fig. 8 The frequency-tracking performance of loop when the nature frequency of the drive mode changes sharply

动轴自然频率跃变时控制环路的频率跟踪效果, 其中的“ $f: f_1 \rightarrow f_2$ ”表示自然频率由 f_1 跃变到 f_2 . 由图可知, 当驱动自然频率变化时, 控制环路经过短暂调整后便可实现跟踪 (跟踪后的稳态误差可通过进一步整定控制器参数予以有效抑制).

5 基于 FPGA 平台的驱动控制方案的实现

5.1 线性鉴相的实现

设陀螺输入信号 $\sin(\omega t)$, 假设驱动端引起的相移为 φ_{d0} , 调理电路、ADC 等部分引起的相移为 φ_{d1} , 总相移为 φ_d , 则经过量化后的输出信号为: $S = A_x \sin(\omega t + \varphi_d)$, 其中 A_x 为信号幅值, 与 VCO 输出信号相乘并滤波, 得到同相分量 x 与正交分量 y , 同相分量和正交分量的乘法解调和滤波过程如下:

$$x = LPF(S \sin(\omega t)) = LPF \left\{ -\frac{A_x}{2} [\cos(2\omega t + \varphi_d) - \cos \varphi_d] \right\} = \frac{A_x}{2} \cos \varphi_d \tag{16}$$

$$y = LPF(S \cos(\omega t)) = LPF \left\{ \frac{A_x}{2} [\sin(2\omega t + \varphi_d) + \sin \varphi_d] \right\} = \frac{A_x}{2} \sin \varphi_d \tag{17}$$

式中, 符号 LPF 表示低通滤波. 利用四象限反正切

函数就可以得到线性方式的鉴相:

$$\varphi_d = \arctan \left(\frac{y}{x} \right) \tag{18}$$

5.2 相位与幅值解耦的双闭环控制

基于 FPGA 平台, 建立了数字化的相位控制环路以实现稳频, 同时辅以直流电平控制环路实现横幅, 二者构成了解耦的双闭环驱动控制方案, 结构如图 9 所示. 两个环路的原理简要叙述如下:

基于相位控制的稳频环路: 根据式 (11) 得到 $\Delta\varphi = \varphi_d + \varphi_0$, 然后利用式 (13) 求得 e_f , 经 PID 控制器计算出控制信号 Δf_u , 与参考频率 f_{0x} 叠加形成 $f(t)$, 然后利用 DDS 技术合成驱动输入交流电压信号 $V_{AC} \sin(\omega_d t)$.

当驱动端自然频率发生漂移时, 驱动端工作频率偏离变化后的谐振频率, $\Delta\varphi$ 不再为 0, 控制器对工作频率进行调节直至 $\Delta\varphi$ 等于 0, 从而实现驱动频率对谐振频率的跟踪.

基于电平控制的横幅环路: 当前幅值 amp 不等于设定值 amp_0 时, 计算出幅度差 $\Delta amp = amp_0 - amp$, 经 PID 输出控制信号 Δdc_u 对驱动直流进行修正, 直至 $amp = amp_0$, 即实现了幅度控制.

6 实验验证

图 10 所示是根据本文方案设计的电路板. FPGA 芯片选用 Xilinx 公司的 XC3S500E-4CP132I; 采用 24 位、采样频率 128 ksp/s 的 ADC 实现驱动振动位移信号的采集; 使用 16 位双通道电

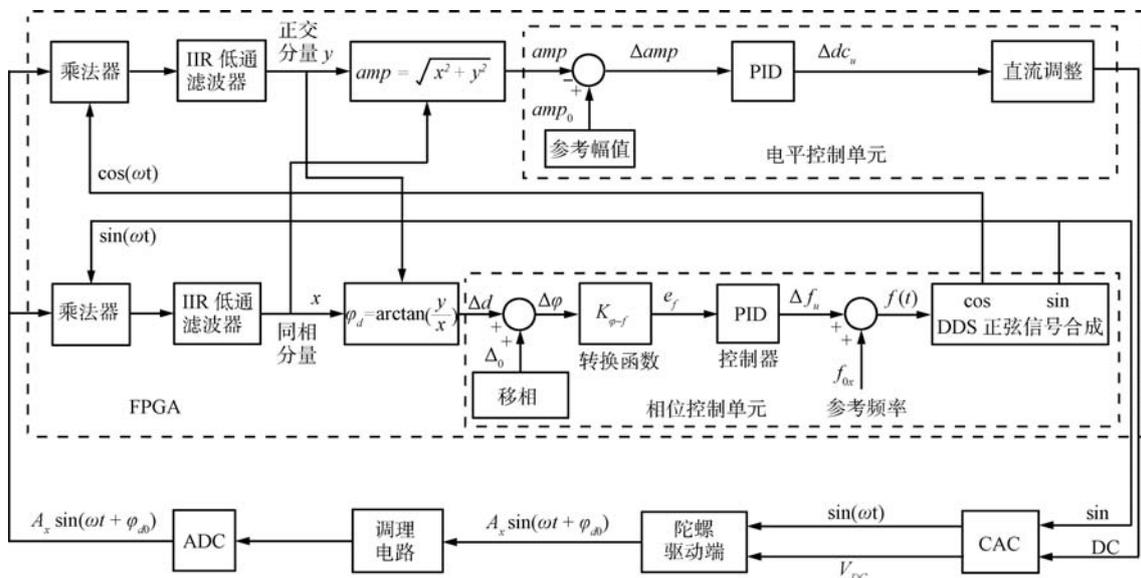


图 9 双闭环驱动控制结构图

Fig. 9 Structure diagram of double-closed-loop drive

流输出型 DAC, 用于合成驱动交流和直流电压信号. 测试用陀螺表头驱动轴自然频率在常温下的谐振频率为 4 156.3 Hz.

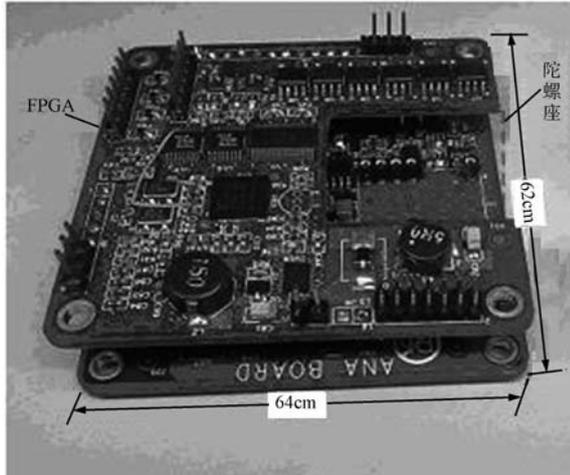


图 10 实验所用的电路板
Fig. 10 The PCB for experiment

首先测试相位控制环路对驱动轴自然频率的跟踪效果, 方法如下: 系统置入温控箱中, 设置不同的温度并充分保温, 在每个温度点先让陀螺工作在稳频状态, 一分钟后自动转入扫频测试状态, 相关数据由串口送出. 在稳频状态可以得到控制环路稳定后的输出频率, 即工作频率; 在扫频状态可以获取陀螺的幅频特性曲线进而得到谐振频率点, 其值约等于陀螺驱动轴的自然频率. 由于两种状态工作在同一温度点且时间间隔很短, 而其他实验条件完全相同, 可以认为同时测定了陀螺驱动轴工作频率和实际谐振频率, 也即同时测定了驱动轴自然频率和控制环路对自然频率跟踪后的频率输出, 两者的差值认为是环路的跟踪误差. 图 11 给出了测试结果, 经计算, 跟踪相对误差可达 10^{-6} 数量级.

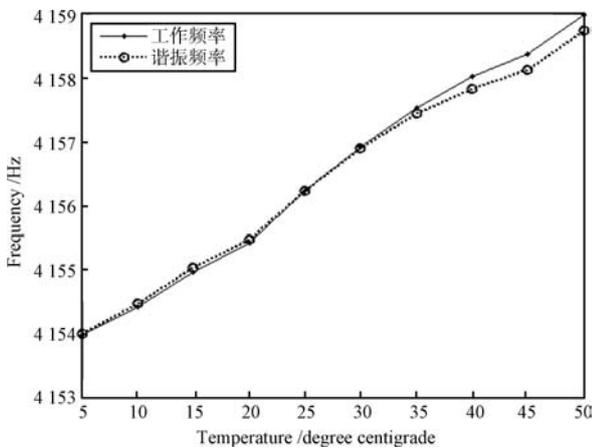


图 11 相位控制回路对驱动轴自然频率的跟踪测试结果
Fig. 11 The test result of phase-control loop tracking the nature frequency of drive mode

常温下对整个双闭环驱动控制电路的性能进行测试, 设定驱动振动信号幅值目标值为 4 V. 根据前 50 秒串口送出的频率、幅值数据绘制频率调节曲线与幅值控制曲线分别如图 12 和图 13 所示. 经计算, 系统稳定后, 频率跟踪的相对误差可达 10^{-6} 数量级, 幅值控制相对误差在 10^{-5} 数量级上.

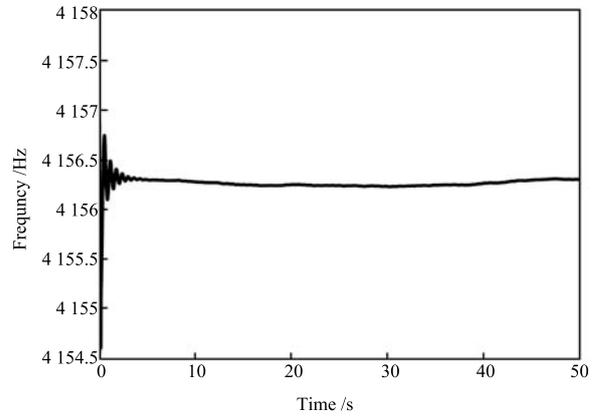


图 12 常温下频率跟踪曲线
Fig. 12 The frequency tracking graph in normal temperature

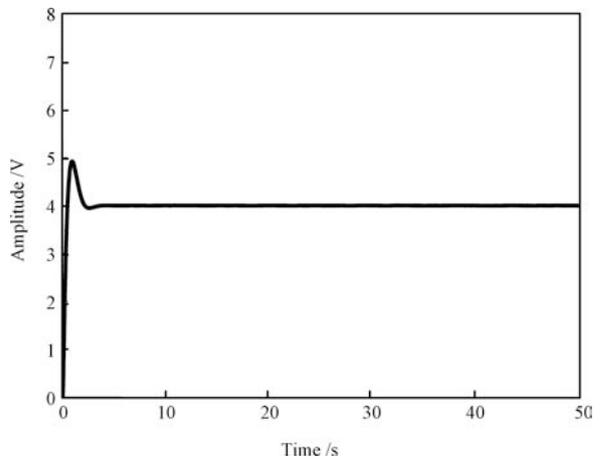


图 13 常温下幅值调节曲线
Fig. 13 The amplitude adjusting graph in normal temperature

7 结论

理论上, 对基于相位控制的微机械陀螺稳频控制回路进行了全面、深入的分析. 采用了自激振荡的基本原理分析了控制环路的稳定性; 从环路的相位模型出发, 导出了相频转换特异因子, 该因子反映了相位差与频率差的依赖关系, 可从陀螺的相频特性曲线中得到, 将其从环路控制器中分离出来, 可以将稳频环路中陀螺的特殊性抽象为一个待定常数, 进一步研究可用于微机械陀螺稳频回路控制器参数的批量化设计; 利用相频转换特异因子导出了环路的

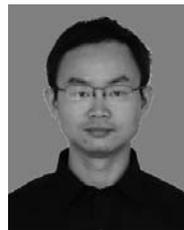
频率模型, 通过传函分析发现, 闭环回路总阶次不再为通常锁相环分析中所认为的环路滤波器阶数加 1, 压控振荡器积分环节被陀螺这一对象“抵消”, 这对环路滤波器的设计尤其是阶次选择是很有意义的。

实现上, 构建了基于 FPGA 的数字化双闭环驱动控制电路. 基于 PLL 的相位控制实现稳频, 利用直流电平控制实现恒幅, 其中稳频回路中 PLL 鉴相器采用了双相锁定放大原理和四象限反正切函数, 实现了一种线性方式的鉴相. 在板实测了基于相位控制的驱动控制回路性能, 验证了方案的可行性。

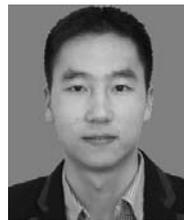
References

- 1 Shkel A M, Horowitz R, Seshia A A, Sungsu P, Howe R T. Dynamics and control of micromachined gyroscopes. In: Proceedings of the American Control Conference. San Diego, USA: IEEE, 1999. 2119–2124
- 2 Niezrecki C, Cudney H H. Structural control using analog phase-locked loops. *Journal of Vibration and Acoustics*, 1997, **119**(1): 104–109
- 3 Sun X, Horowitz R, Komvopoulos K. Stability and resolution analysis of a phase-locked loop natural frequency tracking system for MEMS fatigue testing. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2002, **124**(4): 599–605
- 4 Wang C W, Yu H H, Wu M C, Fang W L. Implementation of phase-locked loop control for MEMS scanning mirror using DSP. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 2007, **133**(1): 243–249
- 5 Chang B S, Sung W T, Lee J G, Lee K Y, Sung S. Automatic mode matching control loop design and its application to the mode matched MEMS gyroscope. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety. Beijing, China: IEEE, 2007. 1–6
- 6 Sung W T, Lee J Y, Lee J G, Kang T. Design and fabrication of an automatic mode controlled vibratory gyroscope. In: Proceedings of the 19th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems. Istanbul, Turkey: IEEE, 2006. 674–677
- 7 Xia G M, Yang B, Wang S R. New digital drive phase control for improving bias stability of silicon MEMS gyroscope. *Journal of Southeast University (English Edition)*, 2011, **27**(1): 47–51
- 8 Xiao Ding-Bang, Hou Zhan-Qiang, Man Hai-Ou, Wu Xue-Zhong, Li Sheng-Yi. The closed-loop driving method of microgyroscope. *Journal of National University of Defense Technology*, 2009, **31**(3): 116–121
(肖定邦, 侯占强, 满海鸥, 吴学忠, 李圣怡. 微陀螺闭环驱动方法. 国防科技大学学报, 2009, **31**(3): 116–121)

- 9 Zhou Wen-Wen, Zhang Rong, Zhou Bin, Chen Zhi-Yong. Drive loop design of single axis gyroscope based on SOPC. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2009, **17**(1): 67–70
(周文闻, 张嵘, 周斌, 陈志勇. 基于 SOPC 的单轴陀螺驱动环路设计. 中国惯性技术学报, 2009, **17**(1): 67–70)
- 10 Luo Bing, Wang An-Cheng, Wu Mei-Ping, Yu Hua-Peng. Digital double-closed-loop drive control scheme for silicon microgyroscope. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2010, **18**(6): 747–750
(罗兵, 王安成, 吴美平, 于化鹏. 硅微陀螺数字化双闭环驱动控制方法. 中国惯性技术学报, 2010, **18**(6): 747–750)
- 11 Liu D C, Lu N N, Cui J, Lin L T, Ding H T, Yang Z C, Hao Y L, Yan G Z. Digital closed-loop control based on adaptive filter for drive mode of a MEMS gyroscope. In: Proceedings of the 9th IEEE Sensors Conference. Kona, USA: IEEE, 2010. 1722–1726



罗兵 国防科学技术大学机电工程与自动化学院副教授. 主要研究方向为微机械陀螺, 嵌入式组合导航技术. 本文通信作者. E-mail: ruobing@nudt.edu.cn
(**LUO Bing** Associate professor at the College of Mechatronic Engineering and Automation, National University of Defense Technology. His research interest covers micromechanical gyroscopes, embedded integrated navigation technology. Corresponding author of this paper.)



王安成 国防科学技术大学机电工程与自动化学院博士研究生. 主要研究方向为惯性导航, 嵌入式组合导航技术. E-mail: ancheng2007@126.com
(**WANG An-Cheng** Ph.D. candidate at the College of Mechatronic Engineering and Automation, National University of Defense Technology. His research interest covers inertia navigation, embedded integrated navigation technology.)



吴美平 国防科学技术大学机电工程与自动化学院教授. 主要研究方向为惯性导航, 组合导航技术. E-mail: meipingwu@263.net
(**WU Mei-Ping** Professor at the College of Mechatronic Engineering and Automation, National University of Defense Technology. His research interest covers inertia navigation, integrated navigation technology.)