

文章编号 1004-924X(2014)01-0109-08

# 具有增益补偿功能的微机械陀螺数字化驱动闭环

杨 亮, 苏 岩, 裘安萍, 夏国明\*  
(南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:**提出了具有增益补偿功能的数字化驱动闭环方法,以便提高微机械陀螺标度因数的稳定性。介绍了微机械陀螺的工作原理,对其运动方程的分析显示:为了提高标度因数的稳定性,需要提高陀螺驱动模态振动速度的稳定性;而振动速度的稳定性与驱动环路中 C/V 转换电路增益的稳定性相关。为此,设计了增益补偿算法,配合自动增益控制环节和锁相环节构建了具有增益补偿功能的数字化驱动闭环。仿真结果表明,在 C/V 转换电路增益相对变化量为 7.4% 时,振动速度幅值的相对变化量由无增益补偿时的 7.29% 降到了有增益补偿时的 0.12%。实验结果表明,增加增益补偿环节后,标度因数的温度系数在 -40℃ 到 60℃ 的降幅达到了 90%。得到的结果验证了具有增益补偿功能的微机械陀螺数字化驱动闭环可以较大幅度地提高微机械陀螺标度因数的稳定性。

**关键词:**微机械陀螺仪;驱动闭环;数字化驱动;增益补偿

**中图分类号:**U666.1;V241.5 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142201.0109

## Digital drive closed-loop with gain compensation for micro-machined gyroscope

YANG Liang, SU Yan, QIU An-ping, XIA Guo-ming\*

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

\* Corresponding author, E-mail: xgmseu@gmail.com

**Abstract:** A digital drive closed-loop method with gain compensation was proposed to improve the stability of scale factor for a micro-machined gyroscope. The working principle of the micro-machined gyroscope was analyzed and the analysis results on the dynamic equation show that in order to improve the stability of the scale factor, the stability of drive-mode vibration speed of the gyroscope should be improved. However, the stability of drive-mode vibration speed of the gyroscope is dependent on the stability of gain of a C/V conversion circuit in the drive closed-loop. Therefore, a gain compensation algorithm was proposed and the digital drive closed-loop with gain compensation was designed by combining with a automatic gain control loop and a phase locked loop. Simulation results show when the gain of C/V conversion circuit changes 7.4% in relative, the amplitude of vibration velocity changes from 7.29% without gain compensation to 0.12% with gain compensation. Experiment results indicate that the temperature coefficient of scale factor within -40℃ to 60℃ is reduced by 90% after gain compensation. It verifies that the digital drive closed-loop with gain compensation can significantly improve the stability of scale factor for the micro-machined gyroscope.

**Key words:** micro-machined gyroscope; drive closed-loop; digital driving; gain compensation

收稿日期:2013-07-19;修订日期:2013-08-18.

基金项目:国防预研基金资助项目(No. 9140A09011011BQ02)

## 1 引言

零偏稳定性和标度因数稳定性是硅机械陀螺的 2 个非常重要的性能指标<sup>[1]</sup>。这 2 个指标与温度等环境因素有着密切的关系。当环境温度改变时,会直接导致陀螺敏感结构参数的变化、材料特性参数的变化、品质因数的变化以及测控电路参数的变化,这些变化最终都体现在零偏稳定性和标度因数稳定性上<sup>[1-3]</sup>。为了解决温度所导致的陀螺零偏和标度因数的变化,常用的两种方法是温度控制<sup>[4-5]</sup>和温度补偿<sup>[3-6]</sup>。温度控制是指保持陀螺外部环境温度恒定,以达到提高陀螺零偏稳定性和标度因数稳定性的目的<sup>[4]</sup>。这种方法的主要缺点是功耗和延迟大,无法应用于对体积和功耗均要求严格的场合。温度补偿是指通过温箱对陀螺零偏和标度因数的温度特性进行标定,得到零偏和标度因数的温度系数,然后在工作时通过测量温度或与温度相关的量对零偏和标度因数进行温度补偿<sup>[4,6-7]</sup>。这种方法使得对陀螺进行温度补偿的效率低,不满足微机械陀螺批量化生产的特点,同时大幅度提高了单个微机械陀螺生产的成本。现有文献中对陀螺零偏温度补偿方法讨论的较多,而对陀螺标度因数温度补偿方法讨论的相对较少。

为了解决温度控制和温度补偿的问题,文献[8]提出了一种在驱动信号上附加一个低频参考信号,用以识别敏感结构和驱动检测电路的增益变化,并对该增益进行补偿的方法,实验表明在 $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 到 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,标度因数的变化从 $-3.5\%$ 到 $5.2\%$ 降到了 $-0.009\%$ 到 $0.15\%$ ,取得了很好的结果。但经过分析发现该方法不适用于高 $Q$ 值的陀螺(如 $Q>10\ 000$ )<sup>[9]</sup>,因为高 $Q$ 值使得偏离驱动模态固有频率的其他频率信号不能通过驱动模态到达驱动检测端。为此,本文改进了这种具有增益补偿功能的数字化驱动闭环方法,以提高高 $Q$ 值微机械陀螺标度因数的稳定性。

## 2 系统模型和标度因数温度特性分析

微机械陀螺可以用具有二自由度的质量块来表示,如图 1 所示。图中的深色部分为固定部分,

与基座固连,其中 $S_1$ 和 $S_2$ 为敏感模态的固定检测电极;质量块为可动部分通过支撑梁与基座相连。其中质量块的 $x$ 方向被称为驱动模态,并在驱动闭环电路的控制下,保持恒幅振荡; $y$ 方向被称为敏感模态,当 $z$ 轴方向有角速度输入时,质量块在敏感模态方向就会受到哥氏力作用而产生位移变化,从而与电极 $S_1$ 和 $S_2$ 构成差动检测电容。理想情况下,该差动检测电容与输入角速度成正比。

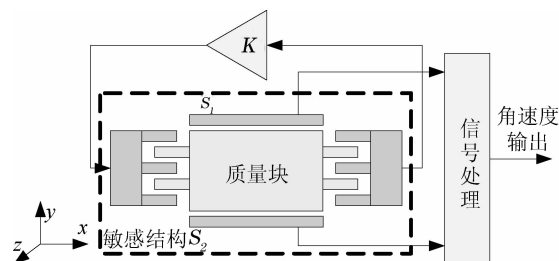


图 1 微机械陀螺敏感结构和电路示意图

Fig. 1 Block diagram of sensitive structure and circuit of micro-machined gyroscope

图 1 所示的陀螺质量块运动方程可以用式(1)来表示:

$$\begin{cases} \dot{x}_x = A_x \sin(\omega_d t) \\ \ddot{y} + \frac{\omega_{ny}}{Q_y} \dot{y} + \omega_{ny}^2 y = -2\Omega_z \dot{x}_x \end{cases} \quad (1)$$

其中: $\dot{x}_x$ 为驱动模态的振动速度, $A_x$ 为驱动模态振动速度的幅值, $\omega_d$ 为驱动频率, $y$ 为敏感模态的位移, $\omega_{ny}$ 为敏感模态固有频率, $Q_y$ 为敏感模态的品质因数, $\Omega_z$ 为 $z$ 轴方向输入的角速度。

由式(1)可得陀螺敏感结构的机械灵敏度为:

$$SF_m = \frac{y}{\Omega_z} = \frac{2A_x}{\sqrt{(\omega_{ny}^2 - \omega_d^2)^2 + \left(\frac{\omega_{ny}\omega_d}{Q_y}\right)^2}} \quad (2)$$

由于本文所研究的微机械陀螺驱动模态的品质因数比较大( $Q>10\ 000$ ),且两模态的频率满足: $\omega_{ny} = (1 + 3\% \sim 5\%) \omega_d$ ,所以式(2)可以化简为:

$$SF_m \approx \frac{2A_x}{\omega_{ny}^2 - \omega_d^2} \quad (3)$$

对式(3)的两边分别对温度 $T$ 求偏导,可得:

$$\frac{1}{SF_m} \frac{\partial SF_m}{\partial T} = \frac{1}{A_x} \frac{\partial A_x}{\partial T} - \frac{2\left(\omega_{ny} \frac{\partial \omega_{ny}}{\partial T} - \omega_d \frac{\partial \omega_d}{\partial T}\right)}{\omega_{ny}^2 - \omega_d^2} \quad (4)$$

在式(4)中,因为 $\omega_{ny}$ 和 $\omega_d$ 具有相近的温度系

数<sup>[10]</sup>,所以式(4)可简化为:

$$\frac{1}{SF_m} \frac{\partial SF_m}{\partial T} \approx \frac{1}{A_x} \frac{\partial A_x}{\partial T}. \quad (5)$$

式(5)表明,陀螺标度因数的稳定性与驱动模态振动速度幅值的稳定性呈正相关关系,提高标度因数的稳定性就必须要提高驱动模态振动速度幅值的稳定性。

### 3 具有增益补偿功能的数字化驱动闭环工作原理

式(5)表明标度因数的稳定性与驱动模态振动速度幅值  $A_x$  的稳定性密切相关,为此常采用驱动闭环的方法对振动速度的幅值  $A_x$  进行控制,保证其具有较好的稳定性。经典的数字化驱动闭环原理如图 2 所示<sup>[11-12]</sup>。

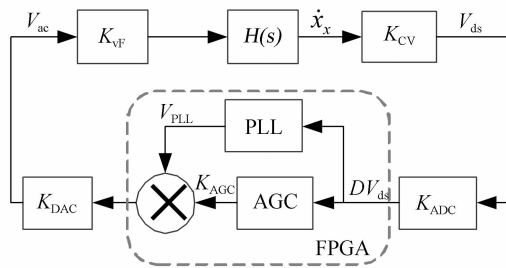


图 2 数字化驱动闭环示意图

Fig. 2 Block diagram of digital drive closed-loop

图 2 所示的数字化驱动闭环主要包括了锁相环(PLL)环节和自动增益控制(AGC)环节。其中 PLL 环节用来跟踪驱动模态谐振频率的变化,AGC 环节用来控制驱动模态振动速度的幅值。图 2 中的  $K_{CV}$  为 C/V 转换电路的增益, $K_{ADC}$  为模/数转换器(ADC)的等效增益, $K_{DAC}$  为数/模转换器(DAC)的等效增益, $K_{vF}$  为电压/力转换系数。 $H(s)$  为陀螺驱动模态的传递函数,其表达式如式(6)所示。

$$H(s) = \frac{1}{m_x} \frac{1}{s^2 + \frac{\omega_{nx}}{Q_x} s + \omega_{nx}^2}, \quad (6)$$

其中: $m_x$  为驱动模态的等效质量, $\omega_{nx}$  为驱动模态的固有频率, $Q_x$  为驱动模态的品质因数。

驱动闭环在 AGC 环节的作用下,能够保证式(7)的恒成立。

$$K_{AGC} |V_{PLL}| K_{DAC} K_{vF} |H(s)| K_{CV} K_{ADC} = |CV_{ds}| = C, \quad (7)$$

式中: $V_{PLL}$  为锁相环的输出信号,幅值恒定, $C$  表示一个常数, $|A|$  表示求取  $A$  的幅值。

在式(7)中,除了增益  $K_{AGC}$  外,其他增益系数  $K_{DAC}$ 、 $K_{vF}$ 、 $K_{CV}$ 、 $K_{ADC}$  和  $|H(s)|$  都相当于自变量,随着环境的温度、湿度等条件的变化而变化;而  $K_{AGC}$  是一个被动变化量,用来补偿其他各项增益的变化,从而保持式(7)的恒成立。

根据驱动闭环设计的目的,AGC 环节应保持驱动模态振动速度幅值  $A_x$  的稳定,即保证式(8)的恒成立。

$$|x_x| = A_x = C_1, \quad (8)$$

式中: $C_1$  表示一个常数。

从图 2 和式(7)可以得到  $A_x$  可以用式(9)来表示:

$$A_x = K_{AGC} |V_{PLL}| K_{DAC} K_{vF} |H(s)| = \frac{C}{K_{CV} K_{ADC}}. \quad (9)$$

综合式(8)和式(9)可以看出,若要同时让这 2 个式子成立,则必须满足:

$$K_{CV} K_{ADC} = C_2, \quad (10)$$

式中: $C_2$  表示一个常数。

即在图 2 所示的驱动闭环情况下,如果要保持驱动模态振动速度的幅值是一个恒定的值,就必须满足  $K_{CV}$  和  $K_{ADC}$  两者的乘积为一个恒定的值。但在实际情况中,这点很难做到,为此本文提出了一种具有增益补偿功能的数字化驱动闭环方法,闭环控制框图如图 3 所示。

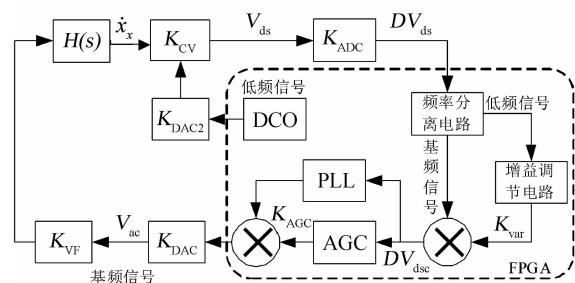


图 3 具有增益补偿功能的数字化驱动闭环示意图

Fig. 3 Block diagram of digital drive closed-loop with gain compensation

图 3 中的 DCO 为数字控制振荡器,用来产生一个幅值恒定的低频参考信号,该参考信号的频

率远低于陀螺驱动模式的固有频率(在图 3 中称之为基频),以便后面通过频率分离电路将低频参考信号和基频信号分开。本文所研究微机械陀螺驱动模式的固有频率在 4 kHz 附近,所采用的参考信号频率为 100 Hz。 $K_{DAC2}$  为低频信号 DAC 的等效增益。

从图 3 可以看出,低频参考信号经过了 C/V 转换电路和 ADC 2 个环节,所以通过频率分离电路所得到的低频信号,能够很好地反映  $K_{CV}$  和  $K_{ADC}$  两者增益乘积的变化。当  $K_{CV}$  和  $K_{ADC}$  发生变化时,就可以通过频率分离电路所得到的低频信号幅值对增益变化进行补偿,使 AGC 的输入信号能够更好地反映陀螺驱动模式振动速度  $x_r$  的变化。为此增益补偿环节必须在任何时候都能够满足式(11)。

$$K_{DAC2} K_{CV} K_{ADC} K_{sep} K_{var} = C_2, \quad (11)$$

其中: $C_2$  为常数, $K_{sep}$  和  $K_{var}$  分别为频率分离电路的增益和补偿增益,其中补偿增益用来补偿  $K_{CV}$  和  $K_{ADC}$  变化。

为了验证 DAC 等效增益  $K_{DAC2}$  的温度系数和 C/V 转换电路增益  $K_{CV}$  温度系数的相对大小,测量了某一幅度参考信号经过 DAC2、C/V 转换电路、ADC 和频率分离电路后输出幅度的温度曲线,如图 4 所示。其中 DAC 选用 TI 公司的 DAC8881,其等效增益  $K_{DAC2}$  的温度系数由数据手册可知为  $\pm 0.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。

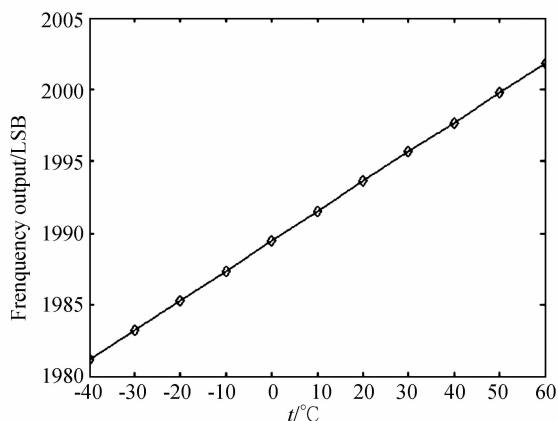


图 4 频率分离电路低频输出端信号的温度曲线

Fig. 4 Temperature curve of frequency separation circuit at low frequency output port

由上图可以求得低频参考信号输出的温度系数为  $1.036 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ ,明显大于  $K_{DAC2}$  的温度系数  $\pm 0.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ,而频率分离电路由算法实现,其增益系数  $K_{sep}$  不存在温度系数,所以可以认为频率分离电路低频输出信号的温度系数是由 C/V 转换电路和 ADC 造成的。

由式(11)可知,当  $K_{CV} K_{ADC}$  的乘积变化时,可以通过算法控制  $K_{var}$  的值来保持式(11)的恒成立,进而达到保持驱动模式振动速度幅值恒定的目的。增益补偿算法可以通过下面三步来实现。

(1)取一个常数  $V_{ref}$  作为增益基准。在实际中可以取在某温度点下,低频参考信号通过 C/V 转换电路、ADC 和频率分离电路后输出的幅值做为增益基准。

(2)在驱动闭环工作过程中,实时地检测频率分离电路低频输出端信号的幅值  $V_{low}$ ,此值即反映了  $K_{CV}$  和  $K_{ADC}$  两者增益乘积的变化,由此可得到补偿增益系数  $K_{var}$  为:

$$K_{var} = \frac{V_{ref}}{V_{low}}. \quad (12)$$

(3)将频率分离电路所得到的基频信号乘以  $K_{var}$  即可得到增益调整后的基频信号。

从此步骤可以看出,该增益补偿算法不需要对每个陀螺设计或标定独有的补偿系数,从而满足了陀螺在批量生产时的温度补偿,降低单个器件的成本。

## 4 仿真分析

根据图 3 所示的具有增益补偿功能的微机械陀螺驱动闭环示意图,在 simulink 中构建了仿真模型,如图 5 所示。从图中可以看出,该仿真模型主要包含了 3 个环节:AGC 环节、PLL 环节和增益补偿环节。

在仿真时,保持 ADC 等效增益  $K_{ADC}$  不变,只改变 C/V 转换电路的增益,假设其变化示意图如图 6 所示,此时其最大相对变化量为 7.36%。因为在实际工作时温度是一个缓变量,由其所导致的增益变化也必然是缓慢变化的,所以在图 6 中设置了 2 个斜坡量来模拟。

有增益补偿环节与无增益补偿环节的仿真结果对比如图 7~图 9 所示。

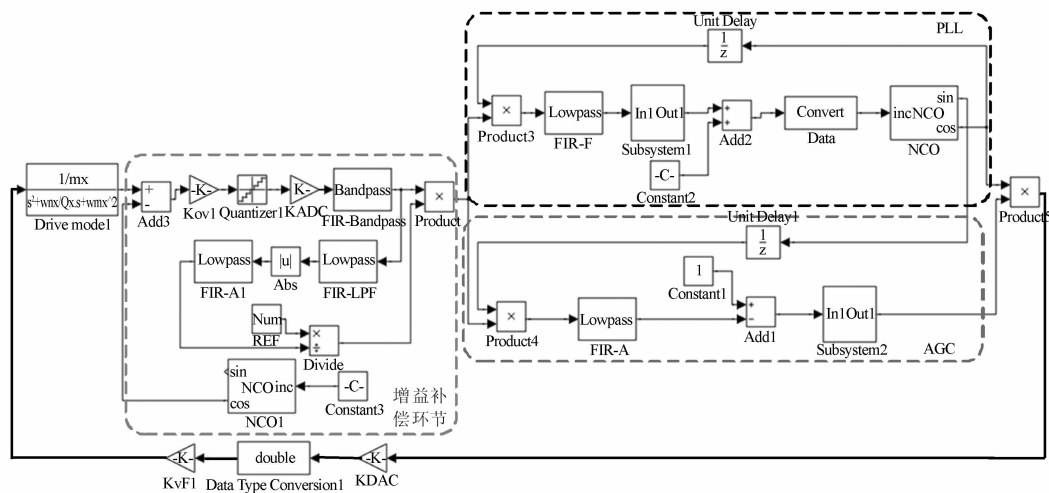


图 5 具有增益补偿功能的数字化驱动闭环仿真模型

Fig. 5 Simulation model of digital drive-closed loop with gain compensation

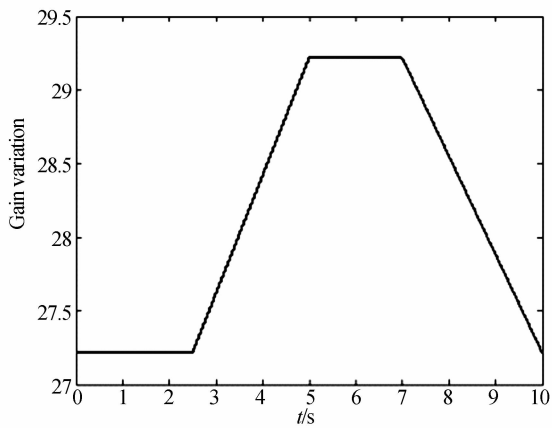


图 6 C/V 转换电路增益变化示意图

Fig. 6 Block diagram of gain variation of C/V conversion circuit

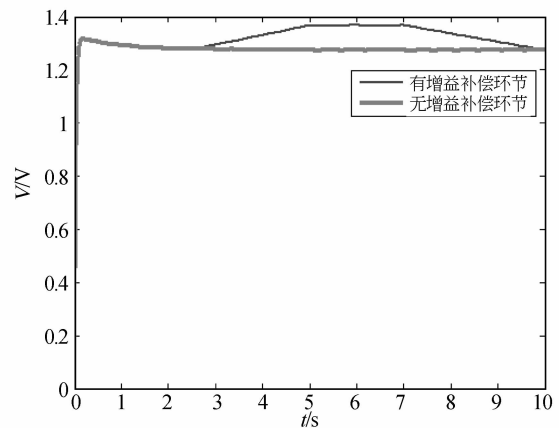


图 8 C/V 转换电路输出电压的幅值

Fig. 8 Amplitude of C/V conversion circuit output voltage

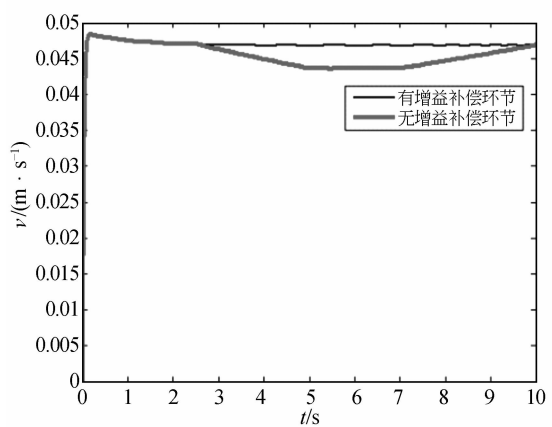


图 7 驱动模式振动速度幅值

Fig. 7 Amplitude of drive mode vibration velocity

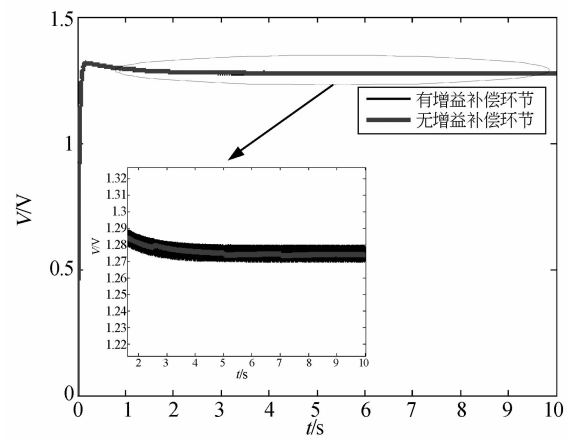


图 9 AGC 输入电压信号

Fig. 9 Input signal of AGC

从图 7 可以看出,无增益补偿环节时,驱动模态振动速度的幅值随 C/V 转换电路增益的变化而变化,且与增益变化的方向相反,在整个过程中驱动模态振动速度的幅值相对变化了 7.29%;有增益补偿环节时,驱动模态振动速度的幅值相对稳定,在整个过程中最大的相对变化量为 0.12%。由此可以看出,具有增益补偿环节的驱动闭环可大幅度提高振动速度幅值的稳定性。

从图 8 可以看出,无增益补偿环节时,驱动检测电压的幅值保持了较好的稳定性,这是因为其为 AGC 的输入信号而受到 AGC 的控制,在整个过程中驱动检测电压的幅值相对变化了 0.18%;有增益环节时,驱动检测电压的幅值与 C/V 转换电路的增益密切相关,且方向一致,此时驱动检测电压的幅值相对变化了 7.31%。

从图 9 可以看出,不论是否采用增益补偿环节,AGC 的输入信号与 C/V 转换电路增益的变化无关,充分说明了 AGC 对其输入信号有良好的控幅作用。但是有增益补偿时,AGC 输入信号幅值的短时噪声有所增加,这是由于增益补偿环节的输出增益不断调整的原因。

## 5 试 验

根据图 5 所示的仿真模型,搭建了具有增益补偿功能的数字化驱动闭环回路,并配合敏感模态的开环检测电路,组成了数字化微机械陀螺,如图 10 所示。该陀螺通过串口以 400 Hz/frame 的速率向上位机发送包含有驱动频率、增益补偿系数、角速度等信息的数据,其中角速度信息用 24

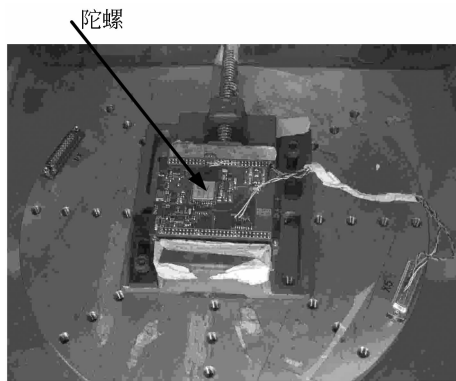


图 10 数字化微机械陀螺

Fig. 10 Digitized micro-machined gyroscope

bit 表示。上位机采用自编的 Labview 程序对数据进行读取和解码,保存数据时,对数据进行平均滤波,以 1 Hz/frame 的速率将数据保存到文件中。

实验时将数字化微机械陀螺放在带有温控功能的型号为 WST-2 转台的立轴上,上电待陀螺输出稳定后,开始温度试验。试验在  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$  进行,每隔  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  进行一个温度点测试,并在每个温度点保温 1 h 后进行标度试验。标度试验分别在  $\pm 10^{\circ}/\text{s}$  两个转速下进行,并在每个转速下测试 30 s。

在试验时,进行了编号为 TL1、TL2 和 TL3 3 个陀螺的增益补偿试验,并且 3 个陀螺的程序完全一样,包括增益补偿环节的参数。实验数据经过处理后得到如图 11 所示的标度因数与温度之间的曲线。

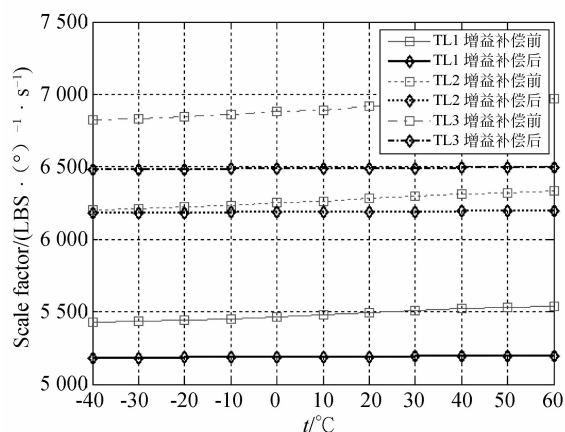


图 11 标度因数与温度之间的关系曲线

Fig. 11 Relation curve between scale factor and temperature

根据图 11 所示的实验数据可以计算得到 TL1、TL2 和 TL3 3 个陀螺的标度因数温度系数分别由增益补偿前的  $2.2019 \times 10^{-4}$ 、 $2.2722 \times 10^{-4}$  和  $2.2965 \times 10^{-4}$  降到了增益补偿后的  $2.449 \times 10^{-5}$ 、 $2.376 \times 10^{-5}$  和  $2.055 \times 10^{-5}$ , 平均降幅达到 90%。由此可以看出,该算法对陀螺具有较好的普适性,不必为每个陀螺设定独有的参数,方便陀螺的批量化生产。另外它还能够降低在陀螺测控电路 ASIC 化时,降低对接口电路增益稳定性的要求,进一步降低电路设计时的难度,提高微机械陀螺标度因数的稳定性。

## 6 结 论

本文以提高微机械陀螺标度因数的稳定性为目的,研究了具有增益补偿功能的数字化驱动闭环方法并介绍了其工作原理。通过对微机械陀螺运动方程的分析得到,为了提高陀螺标度因数的稳定性,需要提高陀螺驱动速度的稳定性;而提高驱动速度的稳定性,关键在于提高驱动环路中 C/V 转换电路增益的稳定性。为此,文中设计了具

有增益补偿功能的数字化驱动环路,并详细阐述了增益补偿环节的原理。仿真结果表明,在 C/V 转换电路增益变化 7.4% 时,与无增益补偿的驱动闭环方法相比,有增益补偿的陀螺驱动振动速度的幅值稳定性获得了提高,振动速度幅值的最大相对变化量从 7.29% 降到了 0.12%。实验结果表明,增加补偿环节后,标度因数的温度系数在  $-40^{\circ}\text{C}$  到  $60^{\circ}\text{C}$  的降幅达到了 90%,验证了具有增益补偿功能的微陀螺数字化驱动闭环可以大幅度提高微机械陀螺标度因数的稳定性。

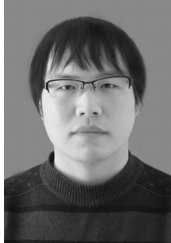
### 参考文献:

- [1] STRAUBE T M. *A temperature compensation procedure for performance improvement of mass-produced MEMS gyroscopes based on direct parameter measurement* [D]. United States: University of Colorado, 2010.
- [2] DAVIS W O. *Mechanical analysis and design of vibratory micromachined gyroscopes* [D]. United States: University of California, 2001.
- [3] 陈怀,张嵘,周斌,等. 微机械陀螺仪温度特性及补偿算法研究[J]. 传感器技术, 2004, 23(10): 24-26.  
CHEN H, ZHANG R, ZHOU B, *et al.*. Research on thermal characteristic and compensation algorithm for MEMS-gyroscope [J]. *Journal of Transducer Technology*, 2004, 23(10): 24-26. (in Chinese)
- [4] 夏敦柱,王寿荣,周百令. 硅微陀螺仪零偏温度性能补控方法设计[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2012, 42(2): 290-294.  
XIA D ZH, WANG SH R, ZHOU B L. ZRO temperature dependency compensating-control design of micro-gyro[J]. *Journal of Southeast University: Natural Science Edition*, 2012, 42(2): 290-294. (in Chinese)
- [5] XIA D ZH, CHEN S, WANG S, *et al.*. Microgyroscope temperature effects and compensation-control methods [J]. *Sensors*, 2009, 9(10): 8349-8376.
- [6] 顾广清,夏敦柱,李宏生,等. 硅微陀螺仪数字化温度补偿系统的实现[J]. 舰船电子工程, 2009, 28(12).  
GU G Q, XIA D Z, LI H SH, *et al.*. Realization of the digital temperature compensation system for silicon micro-machined gyroscope [J]. *Ship Electronic Engineering*, 2009, 28(12): 49-52. (in Chinese)
- [7] 满海鸥,肖定邦,吴学忠,等. 硅微陀螺模态频率温度特性的研究[J]. 传感技术学报, 2009, 22(8): 1117-1121.  
MAN H O, XIAO D B, WU X Z, *et al.*. Research on temperature characteristic of mode frequency of silicon micro-gyroscopes [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2009, 22(8): 1117-1121. (in Chinese)
- [8] ZHOU B, ZHANG R, CHEN Z Y. Online self-compensation for enhanced the scale factor stability of a micromachined gyroscope [C]. *8th China International Nanoscience and Technology Symposium*, 2009: 1-6.
- [9] 施芹,苏岩,袁安萍,等. MEMS 陀螺仪器件级真空封装技术[J]. 光学精密工程, 2009, 17(8): 1987-1992.  
SHI Q, SU Y, QIU A P, *et al.*. Device level vacuum packaging technologies of MEMS gyroscopes [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(8): 1987-1992. (in Chinese)
- [10] PRIKHODKO I P, TRUSOV A A, SHKEL A M. Achieving long-term bias stability in high-q inertial mems by temperature self-sensing with a 0.5 millicelcius precision [J]. *Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Workshop 2012, Hilton Head Island, South Carolina, USA*, 2012: 287-290.
- [11] 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.

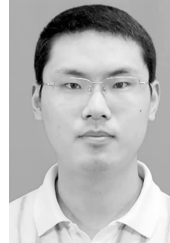
XIA G M, YANG B, WANG SH R. Digital self-oscillation driving technology for silicon micro machined gyroscopes [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(3): 635-640. (in Chinese)

[12] NEUL R, GOMEZ U, KEHR K, *et al.*. Micromachined angular rate sensors for automotive applications [J]. *Sensors Journal, IEEE*, 2007, 7(2): 302-309.

作者简介:



杨亮(1985-),男,河南三门峡人,博士研究生,2008年在南京理工大学获得学士学位,主要从事 MEMS 惯性传感技术研究。E-mail: memsyangliang@163.com



夏国明(1983-),男,河北冀州人,博士,讲师,2012年于东南大学获得博士学位,主要从事 MEMS 惯性技术研究。E-mail: xgmseu@gmail.com

(版权所有 未经许可 不得转载)