

石英音叉陀螺的温度特性及其补偿方法

李世国,朱振忠,杨 勇,卜继军

(中国电子科技集团公司第二十六研究所,重庆 400060)

摘 要:石英音叉陀螺的零偏随温度的改变而变化,根据石英音叉陀螺的工作原理和3种零偏温度特性,建立了相应的数学模型。根据不同的数学模型设计相应的补偿电路,并通过具体的实验数据分析补偿的效果和各种补偿方式的适应性。

关键词:石英音叉陀螺;零偏温度特性;温度补偿

中图分类号:TN384

文献标识码:A

Temperature Characteristics and Temperature Compensation Models of Quartz Tuning Fork Gyroscope

LI Shiguo, ZHU Zhenzhong, YANG Yong, BU Jijun

(26th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China)

Abstract: Bias of the quartz tuning fork gyroscope is changed with temperature. According to the working principle of the quartz tuning fork gyroscope and three bias temperature characteristics, the corresponding mathematics models were established. Then appropriate compensation circuit was designed according to different mathematical models, and the effects of compensation and the adaptability of compensation method were analyzed by using specific test data.

Key words: quartz tuning fork gyroscope; bias temperature characteristics; temperature compensation

0 引言

石英音叉陀螺是以石英晶体为基体材料制作的振动型角速率传感器,具有体积小,成本低,精度适中,使用简单及可靠性高等优点^[1],广泛应用于航天、航空、船舶等军用和民用领域,是近年的研究热点^[2-8]。

由于石英音叉陀螺零偏随温度的改变而变化,这种变化会对陀螺的稳定性、可靠性等性能指标产生较重要的影响,给温度特性补偿、实际应用带来不利因素,是影响工程应用的主要问题。因此,在实际工程应用中,石英音叉陀螺零偏温度特性分析和温度补偿技术是解决陀螺稳定性和可靠性的有效技术。本文基于陀螺的几种典型的零偏温度模型,开展多次多项式拟合特性分析,并根据分析结果,采取模拟和数字方式等技术进行补偿。通过对几个陀螺样品的实验表明,针对陀螺不同模型的温度特性,其相应的温度补偿方法是解决实际工程应用的有效手段。

段。

1 石英音叉陀螺工作原理

石英音叉陀螺是以石英晶体为基体材料制作的振动型角速率传感器,如图1所示。

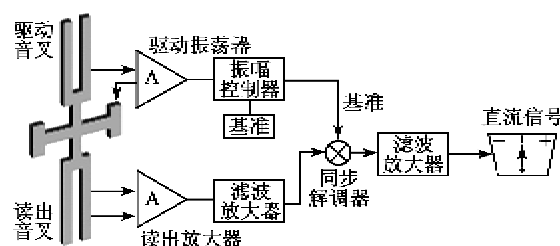


图1 石英音叉陀螺基本原理框图

陀螺敏感器件的结构为双端音叉型,电极沉积在音叉的表面,利用石英晶体的逆压电效应和压电效应进行激励和检测^[4]。当驱动音叉被激励后会以其自然频率在音叉平面振动,当振动元件绕其垂直轴旋转时,音叉受到哥氏力的作用产生一个垂直于音叉平面的振动^[5],这个哥氏力运动传递到读出音

收稿日期:2014-08-21

作者简介:李世国(1981-),男,重庆市梁平县人,工程师,主要从事惯性技术的研究。

叉,使读出音叉垂直于音叉平面振动。读出音叉振动的幅度正比于外加角速度和驱动音叉运动的速度,电极被制作在读出音叉上用来检测,检测到的信号经放大、同步检波和滤波得到一个正比于输入角速率的直流电压信号。

2 零偏温度特性分析

在陀螺零偏温度特性的误差分析中,建立连续变化的温度试验环境,对产品零偏随温度变化曲线进行采集,是开展温度补偿工作的前提条件。通过对采集的数据进行零偏温度特性变化趋势的分析,以及产品在各温度点零偏值的标定,为零偏温度特性补偿提供条件。测试数据证实,产品的零偏与温度不只是简单的对应关系,零偏与温度及温度变化的速率有关。

针对陀螺零偏温度补偿方法,把陀螺的零偏温度特性模型分为线性曲线型、U型曲线型及无规则曲线型3种类型。每种类型模型选择二只常规石英音叉陀螺样品,进行实际温度特性测试,并将测试数据整理为零位温度特性曲线,如图2~4所示。

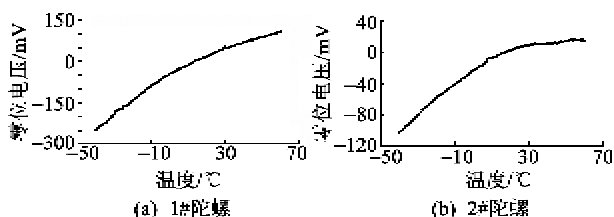


图2 陀螺零位温度线性曲线

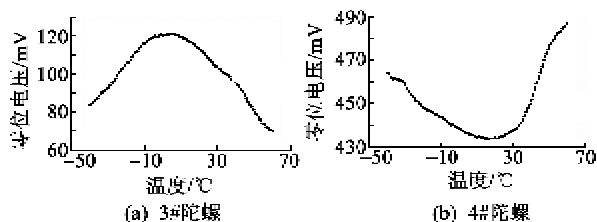


图3 陀螺零位温度U型曲线

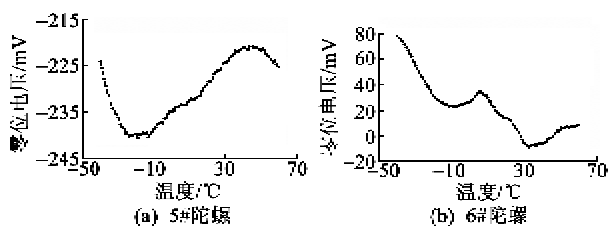


图4 陀螺零位温度无规则曲线

由图2可见,1#和2#陀螺样品的零位随温度变化的趋势相近,近似于线性关系,一般称此类似的曲线为线性曲线模型。由图3可见,3#和4#陀螺

样品的零位随温度变化的趋势几乎相反,且曲线图类似于U型或反U型模型。由图4可见,5#和6#陀螺样品的零位随温度变化情况较复杂,且整个曲线无规则,一般称为无规则曲线型。

3 温度特性的拟合

在对石英音叉陀螺零偏温度误差进行补偿前,温度特性的拟合是一项重要的工作,它直接影响误差补偿的效果。根据石英音叉陀螺3个模型的实际温度特性测试,采用不同的拟合方式,为最终获得补偿电压提供较准确的依据。线性曲线模型式为

$$Y = k_n x^n + k_{n-1} x^{n-1} + \dots + k_1 x + k_0 \quad (1)$$

图2中,相对线性程度较高,应用式(1)中二次多项式($n=2$)拟合,其拟合度均高于99.5%。图3中,采用线性公式明显无法拟合,应用式(1)五次多项式($n=5$)拟合后,2只陀螺的拟合度均高于99.5%。图4中,无法用线性拟合方式拟合,需采用多次多项式拟合,分别用多次多项式对其零位温度特性进行拟合,随着多项式阶次的提高,样品的拟合度相应提高。5#和6#陀螺用六次多项式拟合后,2只陀螺的拟合度均高于99%。

4 补偿方法及结果

根据拟合结果分析,采用高阶多项式对样品的零位温度曲线进行拟合,可精确地反映实际的零位温度特性,且随着多项式阶次的提高,样品的拟合度也随之提高,但补偿电压产生电路的复杂程度也随之增加。采用模拟电路方式产生补偿电压,可解决二阶以下的温度模型。对于需要采用二阶以上进行补偿的情况,采用数字电路是有效的解决途径。

针对线性曲线模型采用模拟线性补偿方式,对U形曲线模型采用模拟非线性补偿方式,对无规则曲线采用数字式补偿方式。

4.1 零位温度误差的线性补偿

在各种温度补偿形式中,线性补偿电路最简单,其感温元件可采用线性输出模拟电压的温度传感器,也可使用二极管,利用二极管管压降随温度生高线性降低的特性来获取温度信息。采用微小封装的双二极管,在同样的温度变化时,可以产生比单个二极管高1倍的电压变化量,即感温元件的温度灵敏度提高1倍。设计的零位温度误差的线性补偿的电路原理如图5所示。图中, U_{out0} 是陀螺前级输出信号,经 U_{1A} 等元件组成的陀螺后级放大电路,产生输

出信号 U_{out} 。补偿电压产生电路由 R_5 、 R_6 、 R_7 、 D_1 等组成。其中 D_1 为双二极管, U_0 为补偿电压。

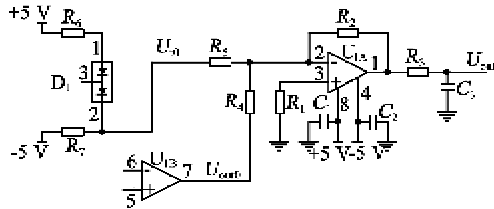


图5 零位温度误差的线性补偿的电路原理图
经分析计算可得补偿输出电压为

$$U_1 = -\frac{18.8K \times t}{R} + 5000K - \frac{41280K}{R} \quad (2)$$

式中: t 为温度; $R = R_1 + R_7$; $K = R_2/R_5$ 。

由 U_1 与式(1)中($n=2$)可计算出1#和2#陀螺的补偿电路参数,获得的补偿结果如图6所示。其中1#陀螺的全温范围零位变化由补偿前的360 mV减少到60 mV;2#陀螺的全温范围零位变化由补偿前的120 mV减少到40 mV。由此可见,采用模拟线性补偿方式,可在一定程度上减小石英音叉陀螺零位输出随温度的变化量,提高产品的温度特性。

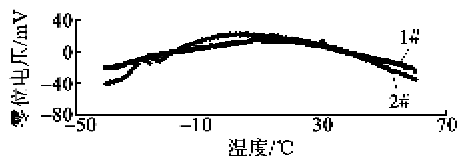


图6 线性模型补偿结果

4.2 零位温度误差的非线性补偿

在线性补偿电路中,将其感温元件改为具有非线性温度特性的元件后,可以得到具有非线性补偿功能的零位温度误差的补偿电路,如图7所示。

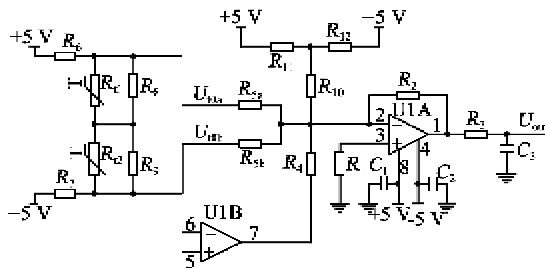


图7 零位温度误差非线性补偿电路

对于U形零位温度曲线模型,采用正、负温度系数热敏电阻共同组成感温元件,可获得近似的U形温度特性。当取合适的电路参数时, U_{out} 和 U_{in} 的U形温度特性曲线如图8所示。由于非线性补偿的电路参数计算较繁,通过编写专用程序软件,将产品原始零位温度数据输入,推导出所需各电阻参数,从而提高补偿效率。3#陀螺补偿结果如图9(a)所示,

其全温范围零位变化由补偿前的51 mV减少到15 mV,提高了产品的温度特性。4#陀螺补偿结果如图9(b)所示,其全温范围零位变化由补偿前的53 mV减少到12 mV。

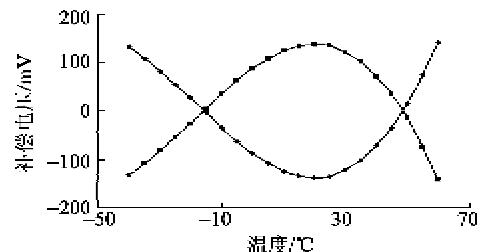


图8 正、负温度系数热敏电阻的复合温度曲线

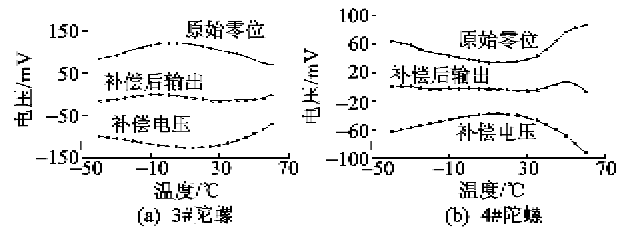


图9 U型曲线陀螺补偿结果

4.3 零位温度误差的数字式补偿

在数字式补偿电路中,感温元件采用温度传感器。图10为针对无规则曲线设计的数字式零位温度误差补偿电路简图。图中的温度传感器为数字输出形式(U_s),将陀螺的温度信息根据预先写入的多项式公式计算出补偿电压值,送入数字处理单元(U_2),电压信号通过电平转换电路,经末级放大电路形成与样品预先标定的原始零位相反的电压信号,两路信号相加后,形成产品零位温度特性的补偿。根据石英音叉陀螺的电路结构特点,零位温度特性的实际补偿可采用在后级放大器的输入端输入一个补偿电压,此补偿电压通过后级放大器后,产生与实际零位温度特性相反的输出,实现对陀螺零位输出的温度补偿。5#、6#陀螺补偿结果如图11所示,补偿后石英音叉陀螺的零位输出曲线有改善。

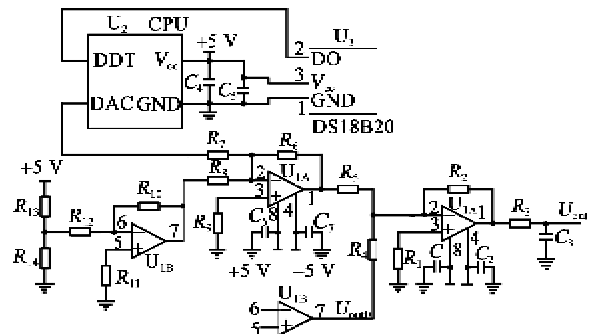


图10 零位温度误差无规则曲线模型补偿电路

(下转第511页)