

半球谐振陀螺温度特性及补偿分析

周强¹, 覃施懿¹, 方海斌¹, 方针¹, 江黎¹, 申军鸣²

(1. 中国电子科技集团公司第二十六研究所, 重庆 400060; 2. 深圳市南山实验教育集团, 广东 深圳 518052)

摘 要: 半球谐振陀螺仪(HRG)是一种高精度、高可靠、长寿命的新型固体振动陀螺仪。温度变化会影响半球谐振陀螺的漂移、零偏等性能指标。为减小这种影响, 该文通过研究分析半球谐振陀螺的温度特性, 设计了温度补偿电路。采用温度补偿电路后, 半球陀螺漂移精度从 0.05 (°)/h 提高到 0.03 (°)/h。

关键词: 半球谐振陀螺仪; 温度特性; 控制电路; 漂移; 温度补偿

中图分类号: TN709

文献标识码: A

The Temperature Characteristic and Compensating Analysis of HRG

ZHOU Qiang¹, QIN Shisi¹, FANG Haibin¹, FANG Zhen¹, JIANG Li¹, SHEN Junming²

(1. No. 26 Research Institute, China Electronic Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China;

2. Shenzhen Nanshan Experimental Educational Group, Shenzhen, 518052, China)

Abstract: Hemispherical resonator gyro(HRG) is a new solid state vibrating gyro of high-precision, high-reliability and long-life. The change of temperature will influence the drift and bias of HRG. The temperature characteristic of HRG is analyzed and a temperature-compensation circuit is designed to reduce the interference. By using the temperature-compensation circuit, the drift-performance of HRG is improved from 0.05 (°)/h to 0.03 (°)/h.

Key words: hemispherical resonator gyro(HRG); temperature characteristic; controlling circuit; drift; temperature compensate

0 引言

半球谐振陀螺(HRG)是一种基于轴对称壳体中的驻波振动在旋转时的哥氏效应原理的新型固态波陀螺。半球陀螺因其具有精度高, 可靠性高, 寿命长及抗辐射等优点而广泛应用于航空惯导系统、兵器惯导系统等方面, 在空间领域的应用中更是具备其他陀螺所不能相比的显著优势。加快我国半球谐振陀螺技术水平的提高, 研制基于半球谐振陀螺技术的长寿命、高精度、高可靠性的惯性导航系统, 对于促进我国的空间技术发展和早日实现深空探索都具有重大意义。

本文通过对半球谐振陀螺温度特性的详细分析, 引入合理的温度补偿控制电路, 削弱了温度对半球谐振陀螺输出的影响, 提高了陀螺漂移等性能指标。

1 半球谐振陀螺简介

半球谐振陀螺是一种新型固态波陀螺, 主要由激励罩、谐振器和读出基座 3 个部分构成, 其基本工作原理为半球形谐振子在谐振状态下产生驻波振动, 当半球谐振子以角速率 ω 旋转时, 驻波振动将

受哥氏力作用相对半球谐振子进动, 且驻波振动的振型进动速率与输入角速率成比例关系。输出角度与输入角速率间的传递函数为 0.3/s, 如图 1 所示。

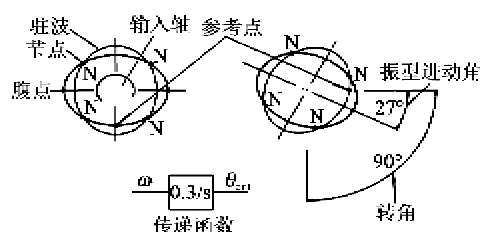


图1 陀螺进动示意图

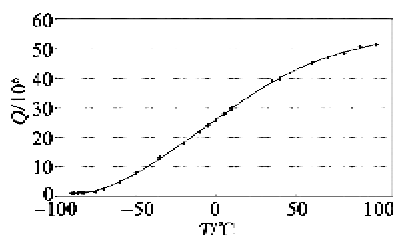
2 半球谐振陀螺温度特性分析

2.1 半球谐振子谐振频率的温度特性

半球谐振陀螺的敏感部件为半球谐振子, 半球谐振子的壳厚、半径、杨氏模量、材料密度等工艺参数的温度特性变化, 会导致谐振子总的刚度和阻尼的变化, 必然将影响陀螺的输出。半球谐振子由熔融石英玻璃材料精密加工而成, 熔融石英玻璃材料的品质因数 Q 值随温度 T 变化而产生变化, 图 2 为典型的 T 与熔融石英玻璃材料 Q 值间的关系。

收稿日期: 2015-04-08

作者简介: 周强(1979-), 男, 四川隆昌人, 硕士生, 主要从事半球谐振陀螺技术研究。

图2 典型熔融石英玻璃材料 Q 与 T 的关系曲线

由图2可见,熔融石英玻璃材料的 Q 值随 T 上升而提高,且在 $-50 \sim +50$ °C 温度范围内,基本呈线性单调递增趋势。熔融石英玻璃材料的 Q 值影响半球谐振子的谐振频率,因此,半球谐振子的谐振频率也受 T 的影响。而半球谐振子又属于弹性薄壳结构,要进行精确的模型分析较难。文献[1]对半球谐振子的二阶四波腹振动有较详细的研究分析,其中指出半球谐振子的四波腹振动频率为

$$\omega = 1.5127 h / R^2 \cdot (E / (1 + \mu) \cdot \rho)^{-1/2} \quad (1)$$

式中: h 为半球壳厚; R 为球面半径; E 为杨氏模量; μ 为泊松比; ρ 为材料密度。

半球谐振子谐振频率可体现半球谐振子工艺参数的温度特性变化。文献[2]指出,谐振子振动频率的变化与谐振子的温度变化成线性关系。HRG32 型半球陀螺的半球谐振子谐振频率温度特性为

$$T = 5.0826 \times (f - 2280.0725) \quad (2)$$

式中 f 为谐振频率。

因此,本文采用以下测试方案对半球谐振陀螺谐振子谐振频率的温度特性进行精确测试。首先,在常温状态,对处于长时间(>3 h)静态稳定工作的某半球陀螺,使用多功能复用表 HP34401A 测试陀螺谐振驻波信号的波腹频率,即半球谐振子谐振频率,然后将陀螺整体置于温箱中,降温到 -30 °C 并恒温直到陀螺输出稳定,谐振频率变化不明显为止,由于半球陀螺内部处于高真空状态,其内部温度变化缓慢,谐振子要达到外部工作环境温度通常需 $4 \sim 5$ h,在整个升温、恒温过程中,连续记录波腹信号频率变化,其测试的结果如图3所示。

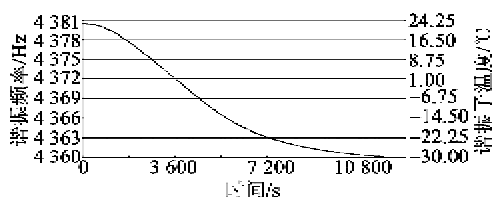


图3 半球谐振子频率温度特性

由图3可看出,谐振子谐振频率与温度变化基本线性相关,该半球谐振子谐振频率温度特性约为 0.38 Hz/°C。

进一步的试验研究表明,半球谐振子谐振频率温度特性为

$$\Delta f / f_0 \approx 86.4 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \quad (3)$$

式中: Δf 为谐振频率增量; f_0 为 20 °C 时谐振频率。

2.2 半球谐振陀螺输出的温度特性

在精确测试半球陀螺谐振频率温度特性的过程中,采用多功能复用表 HP34401A 对半球陀螺的输出进行了测试,并在陀螺处于 -30 °C 稳定状态后,升温到 $+45$ °C,并在 $+45$ °C 恒温,记录整个高低温工作过程中陀螺输出及谐振频率变化,测试试验结果如图4所示。

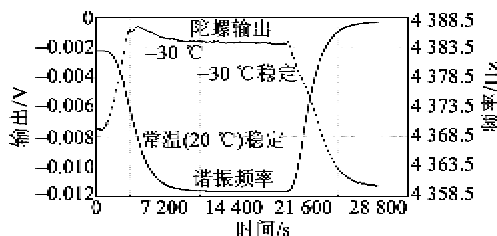


图4 半球谐振陀螺输出及谐振频率温度特性

由上述测试试验的结果可看出,陀螺输出的温度特性与谐振子谐振频率的温度特性一致,与温度线性相关,因此,半球谐振子谐振频率随温度的线性变化是半球谐振陀螺输出随温度变化的重要因素。为获得详细及精确的半球陀螺输出温度特性数据,我们通过以下测试方案进行了半球谐振陀螺温度特性逐点测试试验:首先,对常温状态下长时间(>3 h)静态稳定工作的半球陀螺,记录陀螺输出;然后降温到 -30 °C,待陀螺输出稳定后,记录陀螺输出;再升温到 -20 °C,待陀螺输出稳定后,记录陀螺输出;依次完成 -10 °C、 0 °C、 $+10$ °C、 $+30$ °C、 $+45$ °C 各温度点陀螺输出测试;整个测试试验过程中,采用多功能复用表 HP34401A 连续采集陀螺输出并将数据送入计算机中存储。测试试验结果如图5所示。

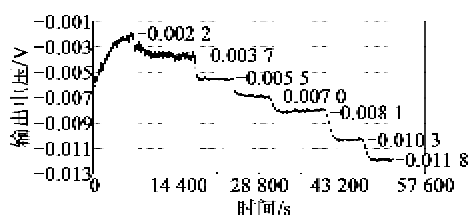


图5 半球谐振陀螺逐点温度特性图

选择不同温度点采集记录陀螺输出,然后进行

数据对比可看出,半球陀螺输出在相同温度点基本相同,且在整个温度范围内,均符合线性变化关系,且温度曲线斜率保持不变。测试试验对比结果如图6所示。

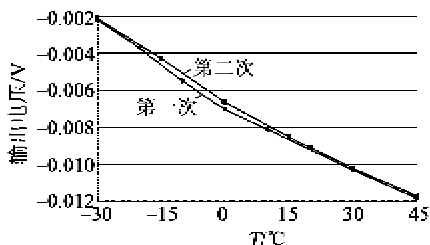


图6 陀螺输出逐点温度特性对比图

3 半球谐振陀螺温度补偿

通过以上分析可看出,半球谐振陀螺谐振子谐振频率随温度的线性变化引起了陀螺输出随温度的线性变化,文献[3]中指出,提高陀螺精度必须考虑稳定和减弱绝对温度及温度变化引起的陀螺输出变化。因此,必须对陀螺输出进行有效的温度补偿。

由于半球谐振陀螺表头的独特结构(谐振子置于真空封装中),因此,我们考虑通过对半球陀螺控制电路系统加入适当的温度补偿电路,实现对半球陀螺输出的有效温度补偿。半球谐振陀螺控制电路系统是一个复杂的多环路闭环控制系统,包含有幅度控制回路、速率控制回路、正交控制回路等多个闭环控制回路^[4],这些控制回路都具有独特的多种控制信号处理电路,基本的控制原理图如图7所示。

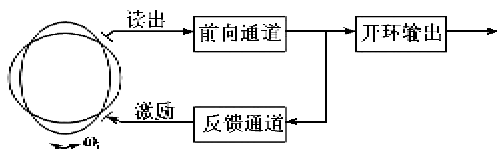


图7 半球谐振陀螺控制原理图

可见,在前向通道、反馈通道及开环输出3个位置中,若选择将补偿电路加入到前向通道或反馈通道,则即是温度补偿引入了整个控制回路中,控制回路中的校正、滤波、解调等各级处理电路都会对补偿信号产生一定的作用,同样,补偿信号也对各级控制处理电路产生一定的作用,从而影响到各级控制处理电路中传输的控制信号;并且,半球控制电路包含多个控制回路,理论和实践均表明,这多个控制回路之间存在复杂的耦合,补偿信号将会通过耦合作用到其他控制回路上去;这样的结果显然不是我们期望的。因此,为避免温度补偿电路的补偿信号引起不期望的控制电路系统稳态输出变化,同时,通过以上温度特性分析,对于陀螺输出随温度的线性

变化,在陀螺的开环输出部分,直接简便的将合适的温度补偿信号叠加到输出信号上即可有效实现补偿。简要的温度补偿电路结构图如图8所示。

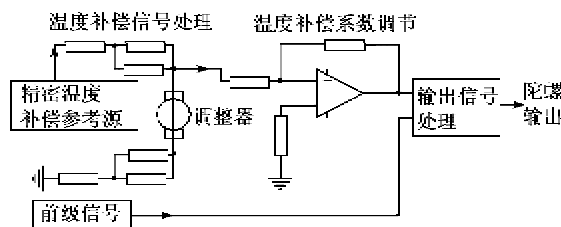


图8 温度补偿电路结构图

由图8可看出,通过精密的参考源及热敏传感器,我们得到同样随温度变化的补偿信号,然后经适当的补偿系数调整,与实际陀螺输出信号一同送进开环输出信号处理电路中,最后获得温度补偿后的陀螺输出信号。通过温度补偿电路,陀螺的输出零偏稳定性得到了较大改善,陀螺在工作温度范围内的输出零偏温度变化减小,陀螺随机漂移可提高到 $0.03(^{\circ})/h(-30\sim+45^{\circ}C)$ 。温度补偿后陀螺漂移曲线如图9所示。

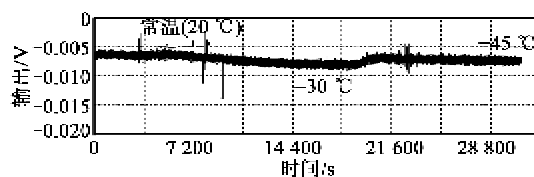


图9 温度补偿后的陀螺输出图

由图9可见,加入温度补偿后,陀螺输出特性明显得到改善,在 $-30\sim+45^{\circ}C$ 的变化范围内,输出量的变化范围不超过2 mV,陀螺输出的温度稳定性得到了提高。

4 结束语

半球谐振陀螺谐振子谐振频率随温度变化引起了半球陀螺的输出随温度变化,且这种变化是线性的。通过对半球陀螺输出温度特性的精确测试,调整控制电路系统中温度补偿电路参数,我们可以有效的实现对半球陀螺输出的温度补偿。通过温度补偿,我们可以将半球陀螺漂移由 $0.05(^{\circ})/h$ 提高到 $0.03(^{\circ})/h(-30\sim+45^{\circ}C)$ 。

作为新型高精度陀螺,半球谐振陀螺的研制是非常复杂和艰苦的,随着理论水平的提高和实践经验的不断累积,存在的问题一定会逐渐被发现和解决,半球陀螺的研制水平也一定会越来越高。

(下转第829页)