

平台惯导系统中的半球谐振陀螺

余波,周强,方针,方海斌,简福斌,韩世川

(中国电子科技集团公司第二十六研究所 固态惯性技术重庆市工程实验室,重庆 400060)

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。为了使陀螺可适用于平台惯导系统的应用,通过对半球陀螺控制电路的改进,提高了半球陀螺的动态特性、带宽、精度等性能指标,测试结果表明,半球陀螺的动态测量范围达到 $-60\sim+60$ ($^{\circ}$)/s;带宽扩展到 ≥ 75 Hz;漂移达到 0.06 ($^{\circ}$)/h,满足了平台惯导系统的应用需求。

关键词:半球谐振陀螺仪;平台惯导系统;动态特性;带宽;控制电路;漂移

中图分类号:V241.03 **文献标识码:**A

The Hemispherical Resonator Gyro in the Platform Inertial Navigation System

YU Bo, ZHOU Qiang, FANG Zhen, FANG Haibin, JIAN Fubin, HAN Shichuan

(Engineering Lab. of Solid Inertial Technology, 26th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China)

Abstract: Hemispherical Resonator Gyro(HRG) is a new solid state vibrating gyro with high-precision, high-reliability and long-life. In order to make HRG applicable to the platform inertial navigation system, the performance index of the dynamic characteristic, bandwidth and precision are improved by improving the control circuit of the HRG. The test results show that the dynamic measurement range of HRG is up to $-60\sim+60$ ($^{\circ}$)/s, the bandwidth is extended to ≥ 75 Hz, and the bias drift is up to 0.06 ($^{\circ}$)/h. It can satisfy the application requirement of the platform inertial navigation system.

Key words: hemispherical resonator gyro; platform inertial navigation system; dynamic characteristic; bandwidth; control circuit; drift

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。具有精度高,体积小,功率低,启动快,可靠性高及寿命长等优点。因此,HRG在航空、船舶和兵器等军事领域的飞机、舰艇等武器平台、战术导弹、火炮等武器系统中均有较广泛的应用前景。

在国外,半球陀螺已在飞机导航设备、宇宙飞船和卫星上得到较广泛的应用^[1];在国内,随着我国半球陀螺研制水平的发展,陀螺精度日益提高,已可满足平台惯导系统使用要求。作为一种惯导级陀螺,如能在制导系统中得到应用,势必提升中远程武器的精确打击能力,因此,半球陀螺在制导系统中的应

用研究就显得越来越紧迫。

本文通过对HRG控制电路的改进,提高了陀螺的动态特性、带宽、精度等性能指标,满足了平台惯导系统的应用需求,为半球陀螺在平台惯导系统中的工程化应用奠定了基础。

1 半球谐振陀螺简介

HRG作为新型固态振动陀螺,主要由激励罩、谐振子和读出基座3个部分构成^[2],其基本工作原理为:半球形谐振子的球壳唇沿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,驻波振动将在哥氏力作用下产生进动效应,其进动速率与输入角速率成比例。输出角(θ_{out})与输入角速率(ω_i)之间的传递函数为 $0.3/s$,如图1所示。

收稿日期:2016-11-06

基金项目:平台惯导系统成果转化应用研究预研基金资助项目

作者简介:余波(1970-),女,重庆人,高级工程师,主要从事惯性振动陀螺的研究。

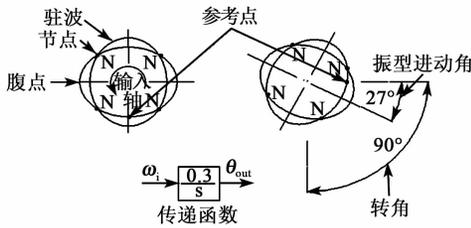


图 1 陀螺进动示意图

2 平台惯导系统中的半球陀螺

2.1 平台惯导系统简介

平台惯导系统能够建立惯性坐标基准,实现惯性坐标系沿 3 正交方向的加速度测量,测量载体的 3 个姿态角,完成初始调平和方位锁定,误差系数的自标定以及方位自对准等功能。

半球陀螺平台惯导系统以三框架平台惯导系统为基础,三环三轴半球陀螺平台惯导系统由台体、内环、外环 3 部分构成,其台体相对于基准面具有 3 个转动自由度。通过安装于台体上相互正交的 3 个半球陀螺进行角加速度测量和相互正交的 3 个挠性加速度计进行线加速度测量。其基本结构图如图 2 所示。图中, x_p, y_p, z_p 分别为平台坐标系 x, y, z 方向; a_x, a_y, a_z 分别为 x, y, z 方向的加速度。

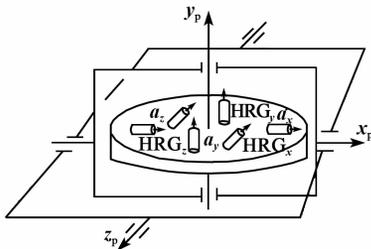


图 2 HRG 平台示意图

2.2 半球陀螺的电路改进

半球陀螺作为 HRG 平台系统的核心敏感器件之一,其为了满足平台惯导系统的精确性、稳定性和快速性,需具有高精度、高频率响应带宽、大动态范围。

半球陀螺电路的作用^[3]是将谐振子的物理振动通过读出电极转换为电信号;对电信号放大、处理;将处理得到的激励信号输出到驱动电极,控制谐振子的振动,其基本框图如图 3 所示。

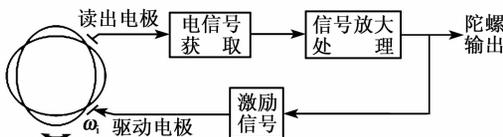


图 3 HRG 简明框图

半球陀螺电路系统是一个复杂的多环路控制系

统。各个控制环路中的功能电路的结构参数、元件精度等都对陀螺整体的性能指标有不同的影响。通过对半球陀螺的控制电路进行研究、分析、改进,半球陀螺的性能指标得到了进一步的提高,已可满足平台系统的应用需求。具体措施如下:

2.2.1 提高读取信号检测精度

由半球陀螺的结构特点可知,半球陀螺谐振子内表面与基座上的读出电极间的电容变化与谐振子振动幅度变化成正比。而这样的电容和电容变化量均很微小,获得的交变电流信号也很微弱,并伴随有较大的噪声干扰信号。因此,提高半球陀螺读取信号检测^[4]的精度是提高陀螺精度的关键之一。

通过理论研究和试验分析,采取以下措施可,有效地提高读取信号的检测精度,即

- 1) 使用多路读出电极,获取陀螺振动信号。
- 2) 改进高阻缓冲放大电路,将信号传输增益由原来的 0.3~0.4 提高到 0.95 以上,相位差由约 1° 变为不大于 0.05°。
- 3) 使用差分放大电路,提高共模抑制比(CM-RR)。

改进后的读取信号检测示意图如图 4 所示。

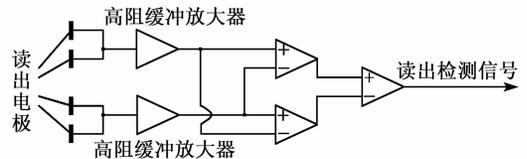


图 4 HRG 信号检测电路示意图

通过分析和处理可有效地提高检测信号的信噪比,测试得到陀螺节点信号约为 10 mV,噪声干扰 < 40 μV。

2.2.2 提高陀螺频率响应带宽

由半球陀螺基本原理^[5]可知,半球陀螺是一个速率积分陀螺,因此,要实现陀螺的稳定闭环控制,提高控制精度,需在陀螺电路中加入滤波环节(滤除高频噪声)和校正环节(提高系统精度)。由图 3 可知,半球陀螺开环传递函数可记为

$$G(s) = G_0(s)G_1(s)G_2(s) = \frac{K^*}{s} \frac{K_0 K_1}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} \frac{K_2 (T_d s + 1)}{s(T_3 s + 1)} = \frac{K(T_d s + 1)}{s^2 (T_1 s + 1)(T_2 s + 1)(T_3 s + 1)} \quad (1)$$

式中: K 为系统总增益,为各环节增益之积; T_1, T_2 为滤波环节时间常数; T_3, T_d 为校正环节时间常数; $G_0(s)$ 为陀螺传递函数; $G_1(s)$ 为滤波环节传递函数;

$G_2(s)$ 为校正环节传递函数。

通过调整滤波环节和校正环节的时间常数 T ，可以实现对陀螺带宽的提高。半球陀螺控制电路中采用的校正环节如图 5 所示。

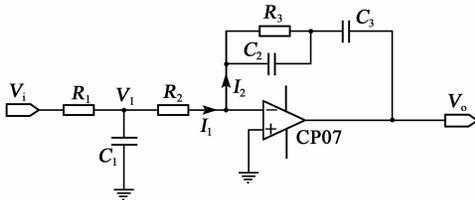


图 5 HRG 校正电路图

参考文献[6]提供的高阶最优模型设计方法，选取适当的电路参数，使 T_d 对应频率点为 2.15 Hz； T_3 对应频率点为 48.23 Hz；同时，减小滤波环节时间常数，使 T_1 、 T_2 对应频率点 $\geq T_3$ 。实测可得陀螺的闭环频率响应曲线，如图 6 所示。通过选取适当的 K ，可将陀螺闭环带宽提高到 75 Hz 以上。

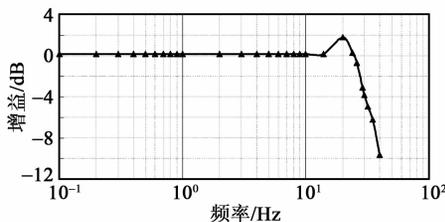


图 6 闭环频率响应图

2.2.3 提高陀螺动态工作范围

半球陀螺采用静电激励的方式实现对谐振子振动状态的控制。静电激励是通过在激励罩上的离散金属化驱动电极上施加驱动电压，由于驱动电极与谐振子金属化表面间的电势差，从而在谐振子的预期角位置上产生静电吸引力和排斥力，控制谐振子的振动状态。其优点是在激励不影响谐振子的固有振动状态下，可以建立高精度的振动。在力平衡方式下，施加力以保持驻波在特定位置，施力大小与输入角速率成比例。

静电力 F 与激励电极和谐振子之间的电势差 V^2 成比例^[7]，若电势差 V 的 DC 偏压为 V_{B0} ，激励电极上施加的交变驱动电压为 $V_\omega \sin \omega t$ ，即可得

$$F \propto (V_\omega \sin \omega t - V_{B0})^2 \quad (2)$$

式中 V_ω 为驱动电压。

将式(2)展开、化简，其中，常数项对谐振子动态特性几乎无影响，可不再考虑；而展开式中的与 $\cos 2\omega t$ 成比例的项对谐振子动态特性影响极小，也可忽略简化；因此，激励力可化简为

$$F \propto V_\omega V_{B0} \sin \omega t \quad (3)$$

因此，对于一个给定的 F ，如果 V_{B0} 增加，则 V_ω 可以减小。即相同的 V_ω 可以表示更大的 ω_i 。所以，通过提高激励电压，可以有效提高陀螺的动态工作范围。

我们将 V_{B0} 提高到 300 V，同时为了减小偏压变化的附加影响，保证 DC 偏压稳定性，使用如图 7 所示的电路提供的 V_{B0} 。

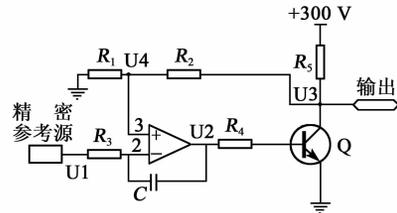


图 7 HRG 偏压稳定电路

通过以上改进，陀螺动态测量范围可提高到 ± 60 ($^\circ$)/s，抗过载范围 $\geq \pm 100$ ($^\circ$)/s。

3 测试结果

针对平台惯导系统的要求，通过对控制电路的改进，半球陀螺的性能指标得到了提升。图 8 为半球陀螺的长时间输出测试曲线。

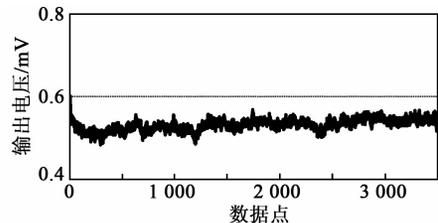


图 8 半球陀螺输出曲线

进一步对图 8 中的陀螺产品的性能指标进行测试，其结果如表 1 所示。

表 1 陀螺产品的性能指标

可测量范围/ $[^\circ$)/s]	-60~+60
标度因数/ $\{V \cdot [^\circ$)/s $\}^{-1}$	0.218 8
随机漂移/ $[^\circ$)/h]	0.062
带宽/Hz	75

由表 1 可知，陀螺产品在动态特性、带宽、随机漂移等性能指标已可以满足平台惯导系统的应用需求。

4 结论

通过对半球陀螺控制电路的改进，包括以下几点：

- 1) 设计、改进前级信号处理电路，提高陀螺信噪比。
- 2) 采用最优控制设计，提高陀螺带宽。

3) 采用多路高压驱动电极,提高陀螺动态能力,使陀螺在动态特性、带宽、控制精度、随机漂移等性能指标上有较大的提升。测试结果表明,半球陀螺的动态测量范围为 $-60 \sim +60$ ($^{\circ}$)/s;带宽 ≥ 75 Hz;漂移为 0.06 ($^{\circ}$)/h;完全可以满足平台系统的应用需求。

随着理论水平的提高和实践经验的不断累积,半球陀螺的工程化水平一定会越来越高,半球陀螺在武器平台系统上也一定会获得更广泛、深入的应用。

参考文献:

- [1] 吕志清. 半球谐振陀螺在宇宙飞船上的应用[J]. 压电与声光, 1999, 21(5): 349-353.
LYU Zhiqing. The applition of HRG in the spacecraft [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 1999, 21 (5): 349-353.
- [2] 胡睿智. 五自由度机械手臂及控制系统的设计[D]. 沈阳: 东北大学, 2011.
- [3] 郭洪武. 浅析机械手的应用与发展趋势[J]. 中国西部科技, 2012(10): 3-12.
GUO Hongwu. Analysis on the application and development trend of manipulator [J]. China West Technology, 2012(10): 3-12.
- [4] 千承辉, 刘洪立, 姜曜, 等. 基于压电薄膜传感器的软抓取机械手研究[J]. 压电与声光, 2016, 38(4): 523-526.
QIAN Chenghui, LIU Hongli, JIANG Yao, et al. A soft fetching manipulator research based on the piezoelectric thin film sensor[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2016, 38(4): 523-526.
- [5] 刘旭, 武澎, 吕延军. 一种柔性 PVDF 压电薄膜传感器的制备方案[J]. 仪表技术与传感器, 2016(1): 4-6.
LIU Xu, WU Peng, LYU Yanjun. Preparation solution soft flexible PVDF piezoelectric film sensor[J]. Instrument Technique and Sensor, 2016(1): 4-6.
- [6] 辛毅, 田红英, 蒋琪, 等. 基于 LabVIEW 的 PVDF 压电薄膜触觉滑觉识别系统[J]. 压电与声光, 2015, 37(5): 793-795.
XIN Yi, TIAN Hongying, JIANG Qi, et al. Tactile-slip sense recognition system made of PVDF film based on LabVIEW[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2015, 37(5): 793-795.
- [7] 辛毅, 杨庆雨, 郑浩田. PVDF 触觉滑觉传感器结构及其调理电路设计[J]. 压电与声光, 2014, 36(1): 76-78.
XIN Yi, YANG Qingyu, ZHENG Haotian. Study of tactile & slip sensor on structure and signal conditioning circuit design based on PVDF piezoelectric film[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2014, 36(1): 76-78.
- [8] 姜明文, 王人成, 罗志增, 等. 具有触觉滑觉功能的肌电假手[J]. 清华大学学报(自然科学), 2004, 44(8): 1051-1053.
JIANG Mingwen, WANG Rencheng, LUO Zhizeng, et al. Myoelectric prosthetic hand with tactile and slip feedback functions[J]. Journal of Tsinghua University (Sci & Tech), 2004, 44(8): 1051-1053.
- [9] 黄漫国, 樊尚春, 郑德智, 等. 多传感器数据融合技术研究进展[J]. 传感器与微系统, 2010(3): 5-8.
HUANG Manguo, FAN Shangchun, ZHENG Dezhi, et al. Research progress of muti-sensor data fusion technology[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2010(3): 5-8.
- [10] 向婷, 陈进军. 基于新型压阻触觉滑觉传感器软抓取机械手的研究[J]. 制造业自动化, 2013, 35(6): 69-71.
XIANG Ting, CHEN Jinjun. Soft grabbing manipulator research based on a new piezoresistive sensor [J]. Manufacturing Automation, 2013, 35(6): 69-71.
- [11] 沈国伟. 电容式触觉阵列传感器的原理与设计[J]. 传感器世界, 2007(3): 13-15.
SHEN Guowei. Principle and design of the capacitive touch sensor array [J]. Technology & Application, 2007(3): 13-15.
- [12] 严怀成, 黄心汉, 王敏. 多传感器数据融合技术及其应用[J]. 传感器技术, 2005(10): 6-9.
YAN Huaicheng, HUANG Xinhan, WANG Min. Multi-sensor data fusion technique and its application [J]. Journal of Transducer Technology, 2005 (10): 6-9.

(上接第 493 页)