

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2019.06.003

半球谐振陀螺惯性系统设计探讨

徐海刚¹, 潘兴旺², 邱丽玲¹, 赵雨楠¹, 钟润伍¹, 马涛¹

(1. 北京自动化控制设备研究所, 北京 100074;
2. 火箭军驻北京地区第六军事代表室, 北京 100074)

摘要:研究了速率积分半球谐振陀螺及其惯性系统的技术特点和应用, 并与光学陀螺惯性系统进行了比较。介绍了半球谐振陀螺短期断电工作和小体积低功耗的特点, 探讨了自校准技术, 并分析了环境适应性设计和对配套部件的要求, 为半球谐振陀螺惯性系统工程化设计提供了开放性观点。

关键词:半球谐振陀螺; 惯性系统设计; 自校准技术

中图分类号: U666.1 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 2095-8110(2019)06-0014-05



Research on Inertial System Design of Hemispheric Resonant Gyro

XU Hai-gang¹, PAN Xing-wang², QIU Li-ling¹, ZHAO Yu-nan¹, ZHONG Run-wu¹, MA Tao¹

(1. Beijing Institute of Automatic Control Equipment, Beijing 100074, China;
2. China Rocket Army's Sixth Military Representative Room, Beijing 100074, China)

Abstract: This paper studies on the technical characteristics of the rate integral hemispherical resonant gyro and its inertial system, and compares the system with the optical gyro inertial system. It introduces the characteristics of short-term power-off operation and small-volume low-power of the hemispherical resonant gyro, discusses the self-calibration technology, and analyzes the environmental adaptability design and the requirements for the matching components. It provides an open view for engineering design of hemispherical resonant gyro inertial system.

Key words: Hemispherical resonant gyro; Inertial system design; Self-calibration technique

0 概述

就目前的发展历程来看,半球谐振陀螺在惯性技术发展史上并不具备典型性。整体来看,大部分陀螺及惯导系统都是一气呵成的,尽管中间有技术攻关的艰难时期,但始终是业界公认的发展方向。随着技术的进步,其应用范围也逐步从中低端扩展到高端;且随着技术成熟度的提高、新需求的提出以及新型陀螺的发展,传统的机械陀螺惯导系统逐

步进入衰退期,技术不再发展(未必已达到性能极限),应用范围显著缩小。关于一种陀螺的发展,作者认为有一个发展窗口期的问题,在这个窗口期内,业界共识、研究基础、人才条件、应用牵引等尽是有利条件,占据天时、地利、人和;错过此窗口期,或者期间没有进行充分发展,就很难再进一步发展起来。

但是,并非所有陀螺的发展都符合这样的规律。简单地总结规律有马后炮和偷懒的心理因素,

收稿日期:2019-09-20;修订日期:2019-10-26

基金项目:国家重点实验室基金(61425060203)

作者简介:徐海刚(1979-),男,研究员,主要从事导航、制导与控制方面的研究。E-mail: buaaxuhg@126.com

强行套用所谓规律就更是危险；当然，以个例否定常识也并非明智之举。每一种陀螺都有其自身的技术特点和所依赖的社会工业基础，特别是，杰出的研究者和企业对其发展甚至起决定性的作用，使其发展历程并不符合所谓的规律，而是呈现新的特点。半球谐振陀螺的发展有其自身的特点，具体历

程已有大量文献介绍，本文不再赘述。应该说，若非 20 世纪 90 年代诺格公司(Northrop Grumman)研究者对关键技术的突破以及 2000 年至今赛峰公司(SAFRAN)的创新性发展与应用，半球谐振陀螺可能不会面临新的发展窗口期(图 1 为赛峰公司半球谐振陀螺技术发展及产品的应用情况)^[1-3]。



图 1 赛峰公司半球谐振陀螺典型产品及其应用

Fig. 1 SAFRAN HRG products and applications

近年来，半球谐振陀螺开始重新得到国内研究机构的广泛关注，对相关方法和难点进行了研究，并提出了多种观点^[4-10]。半球谐振陀螺的推广与应用，绕不开与光学陀螺，特别是同光纤陀螺的全面比较^[11]。从系统形态的角度来看，当前采用光纤陀螺可实现等效体积 3L、质量 3kg、功耗 10W、性能 1nmile/h、可大批量低成本生产的惯性系统产品；从远期发展来看，光纤陀螺的体积和质量有望进一步减小到 1L 和 1kg。半球谐振陀螺惯性系统需要瞄准优于小体积低功耗这一设计目标，才能有希望获得全面广泛的应用；仅就当前可见的产品形态来看，尚不具备光纤陀螺惯性系统的显著优势。因

此，需要在发展半球谐振陀螺技术的同时，加强相应惯性系统技术的研发。

本文的目的是对半球谐振陀螺的特点和应用进行实事求是的讨论，总结提出了一些开放性的观点，并从应用的角度对相应的惯性系统设计进行了探讨。

1 探讨

1.1 短期断电工作特点

短期断电工作的说法主要是基于半球谐振陀螺的一个特点：经精密加工和修调后的谐振子具有极高的 Q 值和较长的阻尼衰减时间，短期(本文认

为应小于 10s) 断电期间仍能精确地保持振型并积分(如果工作在速率积分模式)载体角运动。这一特点在原理上是存在的,但在工程实践中,有以下两方面的因素会影响其应用。

1) 陀螺设计实现上的限制。半球谐振陀螺从上电到正常工作,一般需要经历各部件自检、起振、闭环建立振型、开始测量等阶段。尽管断电后谐振子仍能在一定时间内保持振型和积分功能,但重新上电后的自检、起振、闭环建立振型等操作会严重破坏之前的谐振子保持的状态;通过复杂的功能设计,有可能避免对振型的完全破坏,但必然存在不可忽略的精度损失,且需要慎重考虑相应的设计代价。

2) 系统应用上的局限。尽管陀螺断电后仍可以对输入轴方向的角运动进行精确的积分,但载体的运动是三维的,仅每个轴单独进行角度测量、没有系统级处理电路进行高频三维姿态更新运算,会存在转动的不可交换性误差并导致无法得出准确的姿态,除非载体仅有一个轴的角运动,这显然几乎不可能。

可见,半球谐振陀螺的短期断电仍能工作的特性,并不具备工程可用性,因此并不能作为其与其他种类陀螺相比较的优点。

1.2 小体积低功耗特点

小体积低功耗被认为是半球谐振陀螺的另一个突出优点予以关注。从系统应用的角度来看,小体积和低功耗这两个设计重点需要相互支撑,有时甚至是矛盾的。事实上,从当前国外典型产品来看,并不具备明显的小体积低功耗的特点。以赛峰典型产品 Sigma20m 为例,其体积为 $208\text{mm} \times 136\text{mm} \times 292\text{mm}$,功耗为 28W ^[12];试想,如果这一产品的体积压缩到 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 100\text{mm}$ (从报导的陀螺体积和系统配置来看是可能实现的),而功耗仍为 28W ,将会导致系统自然升温达到 40°C 以上,这将是灾难性的! 反之,仅以当前的产品形态,相比同样产自法国的 iXblue 的 PHINS 光纤陀螺惯性系统(体积 $160\text{mm} \times 160\text{mm} \times 160\text{mm}$,功耗 15W)^[13],无论是体积还是功耗,甚至是成本、可制造性、可靠性、寿命(将所有航天器上的光纤陀螺工作时间累积起来应该是一个更为不可思议的数字),与半球谐振陀螺惯性系统相比都不具备优势。

根据研究经验,半球谐振陀螺需要较高的工作电压,始终在控制谐振子按照预想的方式进行机械



图2 Sigma20m 与 PHINS 外形对比

Fig. 2 The shape contrast of Sigma20m and PHINS

振动,其处理电路也相对较为复杂,需要较高的功耗。因此,需要采取提高谐振子 Q 值、分时复用控制方案、优化控制参数、设计 ASIC 电路等措施以显著降低陀螺功耗,这些是必须要做的工作,否则,小体积这一设计目标将面临极大的挑战。此外,半球谐振陀螺惯性系统的设计,不仅需要关注传感器的表头部分是否足够小,还要关注传感器整机(表头+配套电路等)的体积、安装使用方式、对结构设计要求、配套加速度计、配套系统处理电路、整机功耗等因素。

1.3 自校准技术应用

受限于制造、电路、控制等因素,半球谐振陀螺在使用中会表现出相应的零位和标度因数误差。半球谐振陀螺独特的误差特性,使其可以实现参数的在线自校准,常用方法为:通过冗余配置,逐一实现对每个陀螺的监控和校准;陀螺校准时,可通过模态切换实现对零偏的校准,可通过驱动振型角进动实现对标度因数的校准。

尽管原理简单,但其实现需要考虑诸多因素。一是,陀螺进动速率有限(几度每秒量级),因此,无论模态切换还是振型角进动,都需要较长的时间,所以要求陀螺的零偏和标度因数误差在较长的校准周期内保持相对稳定,即要求陀螺自身具备较高的精度,是可校准的。二是,陀螺在进行自校准时,需要另外 3 只陀螺组合提供参考角速率,即使在高动态条件下也能保证角速度的精度。这对 4 只陀螺间的安装角精度和稳定性、自标定策略提出了很高的要求。即一方面要求安装关系经过精确标定,并且长期应用也能保持精度;另一方面在策略上应避免在大角速度下标定零偏和在小角速度下标定标度因数。

由上分析可见,在动态条件下实现参数自标定有较高的技术难度。另一种策略是在初始对准阶

段进行自标定,特别是在准备时间较为充分的应用条件下,可以对零偏和标度因数误差进行激励,同时采用对准滤波器估计相应的误差参数,从而实现自标定,这种工作方式仅配置 3 只陀螺即可实现。

1.4 环境适应性设计考虑

半球谐振陀螺有其自身的使用特点,需要从力学、热学、气密等方面综合考虑系统环境适应性,以满足各类载体的使用需求^[14]。

在力学方面,因其为机械振动陀螺,故外界的过载和振动加速度会对陀螺性能产生一定影响。为解决这一问题,一是要在陀螺设计中重点考虑谐振子的加工精度,尽量降低陀螺对加速度的敏感性,并且进行相应的建模补偿;二是进行精细化的结构设计和陀螺选型,使得各陀螺之间、陀螺与结构之间的谐振频率有一定差别,避免相互影响;三是采用良好的减振设计,减振器的选择应在保持结构刚度的同时最大限度地衰减高频振动。

在热学设计方面,如前所述,核心仍是显著降低陀螺的功耗;此外,还可从系统角度采取多轴陀螺共用电路、陀螺控制电路与导航信息处理电路合并等措施。因为功耗的限制,不能仅凭部件体积来设计系统结构,而是应通过热设计仿真来确定合适的系统结构,使得系统自身温升处于可接受的范围。可以预见,半球谐振陀螺功耗的优化是影响相应惯性系统形态演化的一个极为重要的因素。

在气密性设计方面,因谐振子需要工作在真空环境下才能发挥出高 Q 值,所以需要给其构建一个稳定可靠的真空环境。就目前陀螺的体积和功耗来看,作者认为可以考虑设计两层真空,一层在陀螺级实现,使得陀螺成为可不依赖系统环境工作的传感器,便于维修更换;另一层在系统级,给陀螺工作提供更为可靠的环境保障。

通过上述力学、热学、气密等方面的设计,可使半球谐振陀螺惯性系统具有良好的环境适应性。

1.5 对配套部件的需求

为实现具有显著体积和功耗优势的系统^[15],需要系统核心部件同步协调发展,重点考虑加速度计和信息处理电路等部件。

对于半球谐振陀螺惯性系统,在陀螺实现小型化低功耗的同时,需要有合适的配套加速度计才能满足系统设计需求。常用的石英挠性加速度计需要 $\pm 15\text{VDC}$ 供电和高精度模数转换电路,体积相对较大;且其一般靠近陀螺安装,发热对陀螺性能有

一定影响,功耗也相对较高。微机电加速度计在满足系统性能需求的前提下在应用上极具优势,其体积小,功耗低,一般采用纯数字接口(常用 SPI)而不需要模数转换电路,且采用标准 5V 供电,应该是导航级惯性系统长远发展的首选加速度计。因此,随着半球谐振陀螺的发展,对微机电加速度计的发展也提出了相应需求。

实现低功耗的另一种方式是采用电路的集成化设计。一是考虑采用接口丰富且低功耗的 ARM 系列处理器,其计算性能完全可满足导航计算的需求;二是考虑将惯性系统处理电路与陀螺控制电路集成设计,采用高性能或双核、多核处理器,仅需在陀螺控制电路上增加部分接口电路即可实现完整的导航计算功能。

2 总结

本文探讨了半球谐振陀螺惯性系统的设计。其他补充说明如下:1)上述探讨都是开放性的,未经过充分试验验证,为抛砖引玉。2)文中所说陀螺为可工作在大角速度条件下的半球谐振陀螺,无论是处于全角模式还是混合模式;仅可工作在小量程的陀螺因应用范围过于单一而不在考虑范围之内。3)国外对半球谐振陀螺的创造性发展,其过程与结果都值得国内借鉴。此外,社会工业基础如何构建和资本是否能在这样的技术发展中起到巨大推动作用甚至决定性作用也值得探讨。

参考文献

- [1] Rozelle D M. The hemispherical resonator gyro: from wineglass to the planets[C]// Proceedings of 19th AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting, San Diego, 2009: 1157-1178.
- [2] Jeanroy A, Grosset G, Goudon J C, et al. HRG by Sagem from laboratory to mass production[C]// Proceedings of IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems. IEEE, 2016: 1-4.
- [3] Remillieux G, Delhay F. Sagem coriolis vibrating gyros: a vision realized[C]// Proceedings of Inertial Sensors and Systems Symposium. IEEE, 2014: 1-13.
- [4] 雷霆. 半球谐振陀螺控制技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
Lei Ting. Research on hemispherical resonant gyro control technology[D]. Chongqing: Chongqing University, 2006(in Chinese).

- [5] 周小刚, 汪立新, 方针, 等. 半球谐振陀螺平台调平系统设计及仿真[J]. 宇航学报, 2011, 32(3): 549-553.
Zhou Xiaogang, Wang Lixin, Fang Zhen, et al. Design of HRG leveling system and simulation experiment[J]. Journal of Astronautics, 2011, 32(3): 549-553(in Chinese).
- [6] 高胜利. 半球谐振陀螺的分析与设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008.
Gao Shengli. Analysis and design of hemispherical resonant gyro[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2008(in Chinese).
- [7] 杨倩. 基于半球谐振陀螺的惯性导航系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009: 16-22.
Yang Qian. Research on inertial navigation system based on hemispherical resonant gyro[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2009: 16-22(in Chinese).
- [8] 祁家毅, 任顺清, 冯士伟, 等. 半球谐振陀螺仪随机误差分析[J]. 中国惯性技术学报, 2009, 17(1): 98-101.
Qi Jiayi, Ren Shunqing, Feng Shiwei, et al. Random error analysis of hemispherical resonator gyro[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2009, 17(1): 98-101(in Chinese).
- [9] 高胜利, 吴简彤. 基于多电极的半球谐振陀螺信号检测[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2008, 29(5): 474-478.
Gao Shengli, Wu Jiantong. Detecting signals of a hemispherical resonator gyro(HRG) with multiple electrodes[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2008, 29(5): 474-478(in Chinese).
- [10] 倪受东, 吴洪涛, 嵇海平, 等. 微型半球陀螺仪的误差源研究[J]. 传感器与微系统, 2007(1): 35-37.
Ni Shoudong, Wu Hongtao, Ji Haiping, et al. Study on error source of miniature hemisphere gyroscope[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2007(1): 35-37(in Chinese).
- [11] Matthews A, Rybak F J. Comparison of hemispherical resonator gyro and optical gyros[J]. IEEE Aerospace and Electronics Systems Magazine, 1992, 7(5): 40-46.
- [12] Rozelle D M, Meyer A D, Trusov A A, et al. Milli-HRG inertial sensor assembly: a reality[C]// IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems. IEEE, 2015: 1-4.
- [13] Meyer A D, Rozelle D M. Milli-HRG inertial navigation system[J]. Gyroscopy & Navigation, 2012, 3(4): 24-29.
- [14] Trusov A A, Meyer A D, Mccammon G H. Toward software defined coriolis vibratory gyroscopes with dynamic self-calibration[C]// Proceedings of DGON Inertial Sensors and Systems(ISS). IEEE, 2016.
- [15] Lynch D, Matthews A, Varty G T. Innovative mechanization to optimize inertial sensors for high or low rate operations[J]. Symposium Gyro Technology, 1997, 16(9): 1-9.