

半球谐振陀螺发展综述

帅 鹏¹, 魏学宝², 邓 亮²

(1. 装备采购中心, 北京 100071; 2. 北京自动化控制设备研究所, 北京 100074)

摘 要: 首先阐述了半球谐振陀螺工作原理及技术优势, 后着重对其在美国、俄罗斯、法国的发展历程、应用场景、技术发展、精度指标及进行了综述, 同时概述了国内的发展历程、现阶段达到水平。其后, 针对海上领域武器系统的特点及需求, 在借鉴国外已有应用的基础上, 论述半球谐振陀螺在海上应用的可能性及优势。最后对半球谐振陀螺的未来发展进行了展望。

关键词: 半球谐振陀螺; 国内外现状; 惯性技术

中图分类号: U666.1

文献标志码: A

文章编号: 2095-8110(2018)06-0017-08

A Survey of Hemispherical Resonator Gyro

SHUAI Peng¹, WEI Xue-bao², DENG Liang²

(1. Equipment Procurement Center, Beijing 100071, China;

2. Beijing Institute of Automatic Control Equipment, Beijing 100074, China)

Abstract: This paper first expounds the working principle and technical advantages of the hemispherical resonant gyro. After that, it focuses on its development history, application scenarios, technological development, and accuracy indicators in the United States, Russia, and France. It also outlines the domestic development process and current level. Then, in view of the characteristics and needs of weapons systems in the maritime field, on the basis of the existing applications in foreign countries, the possibility and advantages of the hemispherical resonant gyro in offshore applications are discussed. Finally, the future development of the hemispherical resonant gyro is prospected.

Key words: HRG; State of the art; Inertial technology

0 引言

半球谐振陀螺(Hemispherical Resonator Gyro, HRG)是一种没有高速转子和活动支承的振动陀螺, 具有精度高、质量小、体积小、启动时间短、高过载(3000g)的特性, 连续工作15年的可靠度高达0.995, 被誉为最具潜力的哥式振动陀螺^[1-3]。国外HRG研制主要集中在美国、俄罗斯与法国这3个国家, 于20世纪90年代在理论及应用上便已实现突破, 目前已达到惯性级精度水平, 并成功应用在各个领域。美国Northrop Grumman公司的

HRG系统主要应用在对可靠性、抗电磁辐射要求较高的空间飞行器、卫星等项目中^[4], 根据最新数据(2018年初)统计, 其HRG系统已在空间飞行超过4000万h, 且100%任务成功; 法国萨基姆公司的HRG系列产品已成功应用在卫星、陆用装备、海军装备、飞航导弹、石油探测等多个领域; 俄罗斯HRG主要应用在通信卫星及武器系统中。国内HRG研制起步相对较晚, 但在理论及试验验证等方面也取得了一定的成果, 目前已经完成某些国家重大课题验收及卫星飞行试验。

收稿日期: 2018-10-08; 修订日期: 2018-10-29

作者简介: 帅鹏(1979-), 男, 硕士, 主要从事武器装备建设研究。E-mail: 25700759@qq.com

1 技术原理及优势

HRG 的工作原理是基于半球壳谐振子绕中心轴旋转时产生的哥氏效应,而使其振型在环向相对壳体进动的物理机制。

图 1 所示为 HRG 工作原理。当壳体绕中心轴转过 Φ 角时,振型相对半球壳反向转过 θ 角,且有 $\theta = K\Phi$, K 为振型的进动因子。只要精确测出振型相对壳体转过的角度 θ ,就可测出壳体绕中心轴转过的角度^[6-8]。

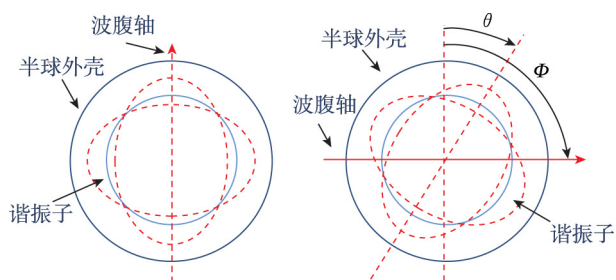


图 1 半球谐振陀螺工作原理

Fig 1 The working principle of HRG

HRG 结构非常简单,如图 2 所示,基本组件为激励器(激励罩、激励电极)、一个由熔融石英材料制成的谐振子和检测器(读出电极、读出基座)。因此,成本相对较低^[9];装配完成后,整个陀螺形成一个完全固连的整体,这种固体化的结构可保证其能够承受 3000g 的冲击;选用元器件数量非常少,谐振子的振动仅有几微米,对结构不产生任何破坏,也不会产生应力集中,因此在结构上保证其具有极高的可靠性,HRG 连续工作 15 年的可靠度高达 0.995^[10];工作原理为振动特性,在惯性作用下,当 HRG 断电 15min 依然可以完成角速率测量;部件主要为石英结构,且无热能、光源等器件,因此,抗电离辐射能力极强;其理论精度不受尺寸效应的限制,因此在同等精度陀螺中,具有一定的体积优势;通过控制电路,可实现在线标定陀螺漂移,减少后期的维护成本^[11-13]。

2 国内外研究进展

2.1 国外研究进展

国外最早研制 HRG 的国家主要为美国、俄罗斯及法国,目前 HRG 已成功应用在空间型号、飞机、导弹及海洋领域。此外,英国、日本等国家也有多家公司在研制 HRG。

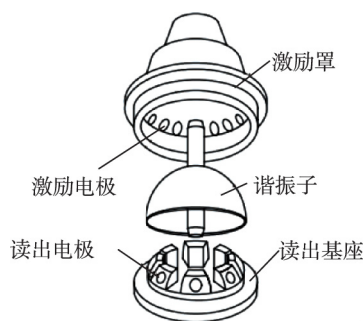


图 2 半球谐振陀螺组成

Fig 2 The composition of HRG

2.1.1 美国研究进展

1890 年, G. H. Bryan 发现在振动的壳体(高脚杯)旋转时,由于哥氏惯性力的作用,壳体壁挠性振动主振型的自振频率发生裂解,导致驻波既相对高脚杯又相对惯性空间进动,此理论奠定了 HRG 的基础。此后, A. Kalnin 提出了薄壳型振子的振动理论, Chintsun 对半球壳的轴对称和非轴对称振动的研究取得了一定的成果。1965 年, Dr. David Lynch 建立了第一个半球壳的振动理论模型,并利用振动金属环证明了 G. H. Bryan 论述的理论可行性。1975 年,在美国海军的支持下, Delco 公司采用低阻尼的熔融石英为谐振子材料,从而奠定了 HRG 能够达到高水平的陀螺的基础。经过不懈的努力,1979 年成功研制 $\Phi 58\text{mm}$ 的酒杯型 Block 10 HRG,并成功申请了专利。1982 年 9 月,性能更高的蘑菇型 Block 20 HRG 问世,经海军测试,其精度优于 $1(^{\circ})/\text{h}$,由此获得海军的认可,从而刺激了 HRG 的迅速发展。随着调平算法的发明,1983 年,性能更高的双基振子的 Block 30 HRG 问世。Block 系列产品如图 3 所示^[14-15]。



图 3 Block 10/Block 20/Block 30

Fig 3 Block 10/Block 20/Block 30

随着工艺和电子学水平的提高,HRG 性能不断提升,1986 年新一代 HRG 产品研制成功,主要包括可在恶劣条件下工作的 HRG158,用于战略防御拦截导弹、战术导弹及返回式导弹的 HRGR130 和用于动力推进杀伤性武器的 HRG115。1987—1990 年,通过利用激光去除质量的谐振子平衡装

置、更新电路系统、改进工艺等,最终成功研制出体积更小、精度更高的 HRG130T。同时在空军的支持下,对 HRG 进行核辐射条件下的兼容性测试,测试结果证明 HRG 完全可以在外太空或高辐射条件下应用。1987 年,Delco 公司与波音公司联合在波音 767 商用运输机上对采用 HRG 的捷联导航系统进行了试验,并获得成功。1991 年,以开发飞机导航用惯性参考装置为宗旨的 Carousel-400 计划启动,采用 6 轴冗余设计的 HRG158X 由此研制成功。不久后又完成了基于 HRG158Y 的 Carousel-404 的设计,由德国汉莎航空公司的飞行测试表明,其导航精度优于 0.8 nmile/h 。1991 年,在波音 747 飞机上成功采用 HRG 惯导系统,连续飞行 3000h 无故障。海湾战争造成航空业的不景气,使得 HRG 订单远低于预期,Delco 公司被迫停止了 HRG 的生产。HRG 158X/HRG158Y 如图 4 所示^[16-18]。



图 4 HRG 158X/HRG158Y(Carousel-400)

Fig 4 HRG 158X/HRG158Y(Carousel-400)

1994 年,Litton 公司收购了 Delco 公司的惯性事业部,并对 HRG 投入了大量的资源支持,由此,HRG 性能得到全面提升,产品也开始向更多应用领域拓展。HRG 130R 在原有技术的基础上,通过优化电极配置、采用新材料、减小尺寸等方法,满足了石油钻井行业对极端温度($-40 \sim 155^\circ\text{C}$)下工作、可承受恶劣的环境($500g$ 冲击, $30g$ -RMS 随机振动)的需求;由 HRG 130Y 改进设计的 HRG 130P,通过金属壳密封,消除氮渗漏问题,成为目前主推的 HRG 产品;Hubble HRG 通过改进封装工艺,最大限度地减少了输出噪声及热干扰,最终满足了哈勃太空望远镜的需求。1994—1995 年,Draper 实验室对 HRG130Y 进一步升级,此后在海军 SP23 战略导弹导航部门与空军弹道导弹办公室的联合支持下,包含 4 个 HRG130Y 的空间惯性基准单元(Space Inertial Reference Unit, SIRU)于 1996 年正式应用在外太空项目中,该系统在 15 年

中任务成功概率高达 $0.998^{[19]}$ 。由于 SIRU 性能好,此后 NEAR 小行星登陆、水星探险、撞入彗星、商业通信卫星及 CASSINI(2017 年 9 月正式完成任务)的土星环绕任务、韦伯望远镜(预计 2018 年底发射)的导航系统都采用了 SIRU 系统。1999—2004 年,为满足鱼叉 Mk6LE 系统要求,海军对 HRG130P 进行了全面测试,包括长达 100d 的稳定性测试、标度因子线性度测试、振动测试、电磁特性测试等,测试结果表明,HRG130P 完全满足 Mk6LE 系统要求。HRG130P/HRG 130Y 如图 5 所示。



图 5 HRG130P/HRG 130Y(SIRU)

Fig 5 HRG130P/HRG 130Y(SIRU)

2000 年,Northrop Grumman 公司收购了 Litton 公司,在不断提高 HRG 系列产品性能的同时,HRG 产品开始系列化生产,其中针对太空应用领域的 SIRU 系列产品为其主要产品,如图 6 所示,此系列包括 SIRU(零偏稳定性 $0.0015^\circ/\text{h}$ 、随机游走 $0.00015^\circ/\sqrt{\text{h}}$)、SIRU-L(零偏稳定性 $0.0015^\circ/\text{h}$ 、随机游走 $0.0002^\circ/\sqrt{\text{h}}$)、SIRU-E(零偏稳定性 $0.0015^\circ/\text{h}$ 、随机游走 $0.00005^\circ/\sqrt{\text{h}}$),这是当前公开报道的最高精度的 HRG 系列化产品。截止到 2018 年,超过 125 套 HRG 系统(约 89 颗卫星)在空间飞行超过 4000 万 h,100% 任务成功,充分验证了 HRG 的高可靠性、长寿命和连续工作的优势^[20]。



图 6 SIRU 系列产品及其应用

Fig 6 SIRU series products and applications

随着 HRG 技术的逐渐成熟,加之微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)工艺的推广,同时惯性市场对低成本、小型化、高性能惯性器件的需求不断增加,集 HRG 高可靠性、低成本及利于批量化生产 MEMS 优点于一体的微半球谐振陀螺(micro-HRG, mHRG)产品被确定为新的发展

方向^[21-23]。2009 年,在美国陆军的 NVESD 远程目标定位器改进计划 (FTLIP) 下, Northrop Grumman 公司开始了小型内电极 HRG 的研究,得到了第一代 (Gen-1) mHRG^[23-25]。此后通过内部资助研究进行了第二代 (Gen-2) mHRG 的研发。2012 年初,完成了第一款 Milli-HRG 制造并进行了测试,如图 7 所示,直径仅为 $\Phi 35\text{mm}$,质量仅为 113.4g,零偏稳定性小于 $0.003(^{\circ})/\text{h}$ 、随机游走小于 $0.0003^{\circ}/\sqrt{\text{h}}$,这项工作表明 mHRG 是高精度应用的理想选择。为提高 mHRG 精度, Northrop Grumman 公司也在积极开展 mHRG 相关技术的研究,从 2012—2017 年,研发了多项技术及专利,主要包括陀螺漂移自标定、标度因数自标定、自校准等多项技术,通过测试表明,这些方法可使 mHRG 精度提高 1 个数量级^[26-28]。



图 7 Milli-HRG
Fig 7 Milli-HRG

2.1.2 俄罗斯研究进展

在得知美国在 HRG 领域取得的成果后,苏联认为 HRG 为必须拥有的技术,此后大量科研单位参与研究。1985 年,茹拉夫廖夫 B. Ф. 和克里莫夫 Д. М. 的基础性专著《半球陀螺》奠定了理论基础。而后,拉明斯克仪器制造设计局相继完成了 $\Phi 100\text{mm}$ 和 $\Phi 50\text{mm}$ 的 HRG 的研制,零偏稳定性可达 $0.005(^{\circ})/\text{h} \sim 0.01(^{\circ})/\text{h}$ 。俄罗斯莫斯科机电自动化仪表研究所开发了 $\Phi 60\text{mm}$ 和 $\Phi 25\text{mm}$ 的 HRG,零偏稳定性可达 $0.01(^{\circ})/\text{h}$ 。俄罗斯 SIE Medicon 研究了直径为 30mm 的 HRG,并开发了独特的调平技术,产品拟用于井斜测试。国立莫斯科罗蒙诺索夫大学、俄罗斯科学院莫斯科机械研究所、俄罗斯朱可夫斯基空军工程研究院等对 HRG 的振动模型进行了深入的研究,对改进 HRG 的设计极为关注。最新资料表明,近几年来俄罗斯的半球陀螺研制取得了很大的进展,2002 年底,俄罗斯拉明斯克设计局研制的以 HRG 构成的垂直导航系

统已完成项目的全部论证,并考虑正式投入武器装备应用。鉴于 HRG 的低成本、高可靠性的特点,俄罗斯惯导装备开始大量装备 HRG。2003 年起,苏霍伊设计局生产的苏系飞机,惯性系统将全部换装为由 HRG 构成的惯性导航单元。近年来,随着其航天工业的复苏,HRG 技术的研究也进一步加深和完善,HRG 在俄罗斯各领域导航系统中仍然占据重要地位。

2.1.3 法国研究进展

Sagem 公司(目前已被 Safran 集团收购)从 20 世纪 90 年代开始在法国国家空间研究中心和法国武器装备部的大力支持下,开始对 HRG 技术进行研究。1994 年,通过对幅度控制、速率控制、正交控制等技术的完善,最终完成了全角控制方案;1998 年,通过使用高精度内圆磨床进行加工,采用轮廓仪、多普勒激光测振仪进行检测,实现了高 Q 值谐振子的加工;2004 年,使用同一组电机,回路间通过多种方式进行解耦,完成了高精度控制电路的设计;同年, HAMMER/AASM 战术级惯性测量单元 (Inertial Measurement Unit, IMU) 成功应用在 AASM (Modular Air-to-Ground Weapon) 项目中,截止到 2016 年,该项目共使用超过 4000 只 HRG,长期订货合同超过 10000 只;2007 年,REGYS 20 陀螺成功应用在 Spacebus 4000、Alphabus 等卫星项目中,截止到 2014 年,超过 100 只 HRG(REGYS20)在超过 8 颗在轨卫星上使用,产品性能良好;2009 年,采用激光、离子束进行调平、调频,修正重心位置、Q 值、频差的非均匀性,完成了 6 自由度(自动化)调平;2010 年,使用 CA 回路在线标定陀螺标度因数,利用控制回路冗余进行误差在线标定,从此完成了 HRG 关键技术攻关。随着 HRG 的完善,公司也不断完善 HRG 寻北仪、惯导系统、罗盘技术,并根据陆地、海上、空中环境的不同,基于相同精度 HRG 陀螺开发不同类型的产品。2012 年,STERNA 寻北仪、Sigma20 M 惯导、BlueNaute 系列惯性导航产品成功应用在各种舰船及坦克项目中;2013 年, SkyNaute 惯导成功应用在商用航空领域;2015 年, PRIMUS IMU 成功应用在 OEM 领域;2016 年,阿里安 6 型火箭采用 SpaceNaute 惯导,预计将会在 2020 年完成首次发射,自 2023 年起每年进行 11 次发射。Sagem 公司 HRG 技术的发展及产品应用情况如图 8 所示^[29]。



图 8 Sagem 公司 HRG 典型产品及其应用

Fig 8 Sagem company HRG products and applications

2.2 国内研究进展

自 20 世纪 80 年代,受美苏在 HRG 领域研究进展的鼓舞,国内也开始展开相关研究,并取得了阶段性成功。1992 年,兵器 205 所正式成立 HRG 科研项目组,成功研制出原理样机。此后,由于海湾战争导致航空业不景气,HRG 订单也受到了影响,国内对 HRG 的前景预期降低,HDR 研究一度陷入停顿。直到“十五”期间,中电 26 所联合哈尔滨工业大学空间控制与惯性技术研究中心与俄罗斯展开技术合作,在借鉴俄罗斯技术及生产的基础上,于 2002 年完成了第一个力平衡模式 HRG 样机的研制。此后国内 HRG 研究步入正轨,哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、北京航空航天大学、国防科学技术大学、第二炮兵学院、东南大学等多所高校展开理论研究,主要包括力学模型、信号检测、误差机理分析、振幅控制、动态建模、温度特性以及应用层面的理论分析及样机研制,并取得了丰硕的理论成果。产品研制成果主要集中在研究所,“十五”后中电 26 所承担了多项国家课题,攻克了谐振子加工平衡、电路优化设计、谐振子工艺等多项技术。2012 年 10 月,该所的 HRG 姿态控制系统成功完成了为期 2 年的空间卫星飞行试验;2015 年,顺利通

过了国家 863 项目长寿命高可靠 HRG 项目验收,该陀螺零偏稳定性达 $0.0016(^{\circ})/h$,达到国际先进水平^[1]。上海航天控制技术研究所以经过 6 年技术攻关,突破了高精度敏感器件控制技术、温度控制技术、信号采集处理技术等多项关键技术,实现了 HRG 惯性系统的自主研发,2018 年实现了通信技术试验卫星的成功首飞^[30]。图 9 所示为该系展示图。



图 9 上海航天控制所生产 HRG 系统

Fig 9 HRG of Shanghai Aerospace Control Technology Institute

虽然 HRG 飞行试验取得成功,且能够满足一定的使用要求,但距离工程化、实用化还有相当长的距离,其原因在于 HRG 敏感表头的制作过程中,误差

差异性较大,导致陀螺的一致性、可靠性问题较为突出。其中,小批量生产中同一批次的陀螺敏感表头品质因数和频差相差较大,进而直接导致陀螺性能的差异,影响 HRG 的共性与机理性研究。

随着欧美国家对 mHRG 的研究不断深入,国内也开始重视 mHRG 的研制。mHRG 技术难点主要为微加工工艺,清华大学、兵器 24 所都在展开 mHRG 的研究,目前国内尚无关于 mHRG 样机研制成功的报道。

3 HRG 产品在海上应用及探讨

随着世界各国对海洋领域的不断重视,各国海军装备技术发展如火如荼,各式新型舰艇不断入列,相关舰载技术和武器装备愈加先进。仅在 2017 年,英国伊丽莎白女王号航母正式加入英国海军、英国新一代护卫舰上装备的海上拦截者防空导弹系统首次发射、美国海军第二艘朱姆沃尔特级驱逐舰进行了首次海试、美国和英国共同研发的哥伦比亚级新一代弹道导弹核潜艇已取代目前正在服役的俄亥俄级核潜艇、澳大利亚海军新一代导弹驱逐舰霍巴特号正式加入现役、俄罗斯北风之神-A 级潜艇首舰弗拉基米尔大公号在北方机器制造厂下水。2017 年国内海军装备发展同样精彩不断,054A 型护卫舰、056 轻型护卫舰、052D 型驱逐舰等先进舰艇批量服役,首艘国产航母入水、055 型万吨级驱逐舰下水、4 万吨级 901 型综合补给舰服役、新型训练舰戚继光舰入列。随着各国对先进海军舰艇、装备、技术的不断投入,未来战争也将向着高技术、高可控、高度自动化、高对抗性、更广阔空间、作战方式多样化等方向发展,因此,对武器系统提出了更高的要求,也对武器系统的核心部件—惯导系统提出了更高的要求。高精度、长航时、高可靠性、长寿命、抗电磁干扰等将是现在及未来惯导系统的不懈追求。目前,国内长时间连续工作导航设备中的陀螺主要为静电陀螺、液浮陀螺、激光陀螺以及光纤陀螺。静电陀螺及液浮陀螺精度较高,但存在体积大、结构复杂、可靠性低、带宽和动态范围窄等问题;激光陀螺及光纤陀螺精度潜力较高,且具有较高的性能、体积优势,但精度易受电磁环境及温度影响,同时由于组成器件较多,可靠性相对较差,海军装备的光学陀螺惯导系统通常采用冗余备份方案来解决可靠性不高的问题。同时,海军武器及装备对惯导系统提出了 20 年甚至更高的免维护要求,

但受限与现有陀螺稳定性不高,尚无法满足高可靠性、长寿命的要求,这将严重制约我国海军武器装备的研制及发展。因此,迅速开展长寿命、高可靠性的陀螺研究,对我国海军武器装备的发展,具有极其深远的意义。HRG 的高精度、高可靠性、长寿命等特点可满足此要求,目前国外已有 HRG 成功应用在海军装备的成功先例。

在海上应用的 HRG 产品主要为 Safran 集团的 BlueNaute 系列惯导及罗盘产品。目前在全球出货量已超过 400 套,成功应用在海上工程船舶、科学考察船、水下机器人、海警船、海上油气平台、后勤补给舰等多种平台上,同时挪威、加拿大、法国、瑞典、以色列等多国海军也在使用该系统,如图 10 所示。

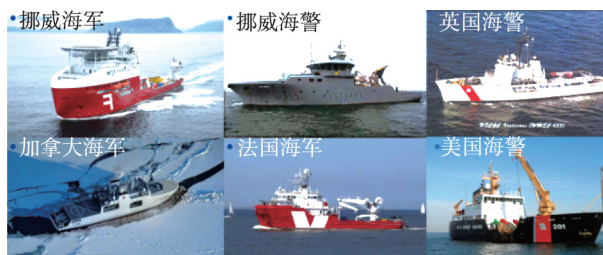


图 10 BlueNaute 系列产品在各国海上应用

Fig 10 BlueNaute series products used in offshore platforms

BlueNaute 系列惯导系统主要针对常规海上任务的需求,寻北精度为 $0.4^{\circ} \sim 0.08^{\circ}$ 。采用激光陀螺的 SIGMA 40 系列产品则在工作条件恶劣、工作时间更长的情况下使用,如 FREMM 级护卫舰、Barraconda 级潜艇。根据 Safran 官方最新资料显示,SIGMA 40 系列惯导系统将采用 HRG 替代激光陀螺,如图 11 所示。

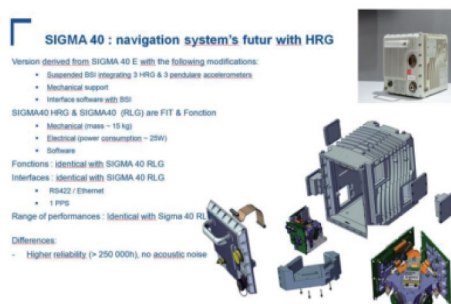


图 11 SIGMA 40 将采用 HRG

Fig 11 SIGMA 40: navigation system's future with HRG

随着国内海军装备的发展,各型作战平台及长航时武器装备对高精度、高可靠性、长寿命惯性导航设备有着迫切需求。美国在太空中成功应用

HRG 系统已经证明其具有极高可靠性,法国 HRG 在海洋领域的应用也为我国突破长航时、高可靠性惯导系统的瓶颈提供了参考,因此,国内需继续加强 HRG 的研发力度,早日实现海洋领域的应用。

4 展望

国外 HRG 发展主要分为 4 个阶段,第 1 阶段以理论研究及原理样机为主;第 2 阶段以型号为背景,开展产品研究;第 3 阶段,在型号基础上,将典型产品系列化,推广到更广的应用领域;第 4 阶段,与 MEMS 技术相结合开展更为深入的研究,以小型化、低成本、高性能为目标,开拓更广阔的市场。目前,已成功在深空探测姿态参考、洲际弹道的升空和再入制导、定向钻井方向控制和钻井测量、潜艇舰船精确导航、人造地球卫星和宇宙飞船的姿态参考等领域成功应用,其发展及产品应用对我国 HRG 发展具有一定的指导及借鉴意义。

我国长航时武器系统及作战平台等对连续长时间工作、高可靠性、抗电磁特性的惯性产品需求仍然迫切,HRG 自身特点可填补这一需求空白。目前,我国 HRG 还处于试验阶段,距离市场应用还有很长的路要走。对 HRG 的误差建模技术、谐振子加工工艺、谐振子调平、高精度控制电路、微振动信号处理技术等关键技术有待进一步研究,与国外开展技术合作及引进、HRG 理论研究、惯导/罗盘产品化的研究仍需同步开展,以争取早日实现 HRG 的产品化及领域应用。

近 10 年来,国外 HRG 主要以微型化为研究方向,同时小型化、轻质化、低成本也成为目前惯性器件的重要发展方向,因此,小体积、微型化的 HRG 仍然会是未来发展的重要方向。

参考文献

- [1] 潘瑶,曲天良,杨开勇,等.半球谐振陀螺研究现状与发展趋势[J].导航定位与授时,2017,4(2):9-13.
- [2] Matthews A, Rybak F J. Comparison of hemispherical resonator gyro and optical gyros[J]. Aerospace & Electronic Systems Magazine IEEE, 1992, 7(5): 40-46.
- [3] 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.
- [4] Anon. Northrop Grumman's hemispherical resonator gyro marks 30 million operating hours in space [DB/OL]. [2016-01-29]. <http://news.northropgrumman.com/news/releases/northrop-grumman-s-hemispherical-resonator-gyro-marks-30-million-operating-hours-in-space>.
- [5] 沈博昌,伊国兴,任顺清,等.半球谐振陀螺仪谐振子振动特性的有限元分析[J].中国惯性技术学报,2004,12(6):56-60.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 雷霆.半球谐振陀螺控制技术研究[D].重庆:重庆大学,2006.
- [12] 赵洪波.半球谐振陀螺仪误差机理分析与误差抑制方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.
- [13] 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,2007,26(1):30-32.
- [14] Remillieux G, Goudon J C, Roberfroid D. Coriolis vibrating gyros for aeronautical applications[R]. SAE Technical Paper, 2011.
- [15] Jeanroy A, Bouvet A, Remillieux G. HRG and marine applications[J]. Gyroscopy and Navigation, 2014, 5(2): 67-74.
- [16] Rozelle D M. The hemispherical resonator gyro: From wineglass to the planets[C]//Proceedings of 19th AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting, 2009: 1157-1178.
- [17] Remillieux G, Delhay F. Sagem Coriolis Vibrating Gyros: a vision realized[C]//2014 DGON Inertial Sensors and Systems Symposium (ISS). IEEE, 2014: 1-13.
- [18] Remillieux G, Delhay F. Sagem Coriolis Vibrating Gyros: a vision realized[C]//2014 DGON Inertial Sensors and Systems Symposium (ISS). IEEE, 2014: 1-13.
- [19] Lenoble A, Rouilleault T. PRIMUS: SWAP-oriented IMUs for multiple applications[C]//2016 DGON In-

- terial Sensors and Systems (ISS). IEEE, 2016; 1-16.
- [20] http://www.northropgrumman.com/Capabilities/SIRU/Documents/Scalable_SIRU_Family.pdf
- [21] Trusov A A, Meyer A D, Mccammon G H, et al. Toward software defined coriolis vibratory gyroscopes with dynamic self-calibration[C]// 2016 DGON Inertial Sensors and Systems (ISS). IEEE, 2016; 1-11.
- [22] Remillieux G, Delhay F. Sagem Coriolis Vibrating Gyros: a vision realized[C]// 2014 DGON Inertial Sensors and Systems Symposium (ISS). IEEE, 2014; 1-13.
- [23] Jeanroy A, Grosset G, Goudon J C, et al. HRG by Sagem from laboratory to mass production[C]// 2016 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems. IEEE, 2016; 1-4.
- [24] Trusov A A, Meyer A D, Mccammon G H, et al. Toward software defined coriolis vibratory gyroscopes with dynamic self-calibration[C]// 2016 DGON Inertial Sensors and Systems (ISS). IEEE, 2016; 1-11.
- [25] Bryan G H. On the beats in the vibrations of a revolving cylinder or bell[J]. Cambridge Philosophical Society, 1980, 7(3): 101.
- [26] Rozelle D M, Meyer A D, Trusov A A, et al. Milli-HRG inertial sensor assembly-a reality[C]// 2015 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (ISISS). IEEE, 2015; 1-4.
- [27] Meyer D, Rozelle D. Milli-HRG inertial navigation system[J]. Gyroscopy and Navigation, 2012, 3(4): 227-234.
- [28] Trusov A A, Phillips M R, Bettadapura A, et al. mHRG: Miniature CVG with beyond navigation grade performance and real time self-calibration[C]// 2016 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems. IEEE, 2016; 29-32.
- [29] Safran Electronics & Defense. BlueNaute PRIMUS 半球谐振惯性系统 [DB/OL]. [2017-11-10]. <https://wenku.baidu.com/view/c1dfc81930b765ce0508763231126edb6e1a767f.html>
- [30] 上海航天技术研究院半球谐振陀螺组合首飞成功 [EB/OL]. http://www.360doc.com/content/17/0620/19/28704984_664958132.shtml