

# 半球谐振陀螺现状及发展趋势

毛海燕<sup>1</sup>, 梁宇<sup>2</sup>, 袁小平<sup>1</sup>, 唐平<sup>1</sup>, 彭慧<sup>1</sup>, 卜继军<sup>1</sup>

(1. 中国电子科技集团公司第26研究所, 重庆 400060; 2. 重庆工商大学机械工程学院, 重庆 400067)

**摘要:**半球谐振陀螺仪是一种高精度、高可靠和长寿命的新型固态陀螺仪, 它具有一系列独特的优点, 且是目前唯一达到惯性级性能的振动陀螺, 受到惯性技术界的极大关注。该文在分析了国内外有关半球谐振陀螺报道的基础上, 对半球谐振陀螺的发展历程, 国内外研究情况、现状等进行了综合报道和评述, 并对半球谐振陀螺的发展前景进行了展望。

**关键词:**半球谐振陀螺; 现状; 发展趋势

**中图分类号:**TP212; U666.1 **文献标识码:**A

## The Current Status and Future Trends of HRG

MAO Haiyan<sup>1</sup>, LIANG Yu<sup>2</sup>, YUAN Xiaoping<sup>1</sup>, TANG Ping<sup>1</sup>, PENG Hui<sup>1</sup>, BU Jijun<sup>1</sup>

(1. 26th Institute of China Electronic Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China;

2. School of Mechanical Engineering, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China)

**Abstract:** The hemispherical resonator gyroscope (HRG) is a kind of novel solid-state gyroscope with high precision, high reliability and long life. HRGs has a series of unique advantages and is the only vibration gyroscope which can be up to the inertial grade, thus has been drawn great attention in the inertial technology community. Based on analyzing the reports on HRGs at home and abroad, the development and current status of HRGs are overviewed and commented in this paper. The future trends of HRGs is also discussed.

**Key words:** HRG; current status; development trends

### 0 引言

近年来,随着航天技术的深入发展,空间与航天领域已成为国家安全和利益的战略“制高点”<sup>[1]</sup>,越来越受到各国的重视,而高性能陀螺仪的惯性姿态控制单元是航天技术发展的关键器件之一。半球谐振陀螺作为一种新型的惯性姿态测量单位的器件,具有很高的测量精度,超强的稳定性和可靠性,良好的抗冲击振动性及温度性能,还具有独特的关机抗辐射能力,特别是它独有的15年以上的工作寿命,连续工作可靠度可达0.995的特点,适合在空间飞行器、卫星、战略武器等需要长时间工作或储存的装备中使用,由半球谐振陀螺仪构建的惯性姿态敏感器是航天任务最理想的选择。

在国外,半球谐振陀螺(HRG)已作为成品在飞机导航设备、宇宙飞船和卫星上得到较广泛的应用<sup>[2]</sup>。而国内从十·五开始也展开了半球谐振陀螺

仪的研制工作。

### 1 国、内外半球陀螺发展现状

#### 1.1 国内半球谐振陀螺发展现状

20世纪80~90年代,我国开始了半球谐振陀螺仪的理论研究。中国台湾大学对半球谐振陀螺仪模态进行了分析,并对谐振子半径为50 mm的样机进行了实验研究。北京航空航天大学、东北大学、南京航空航天大学等从理论上对半球谐振子的参数设计、振动等问题进行了分析。中国电子科技集团第26所一直坚持HRG的研制工作,并取得了较大的进展,它前期利用俄罗斯技术,在直径 $\varnothing 60$  mm的HRG制作工艺上取得了突破,开发了相应的高性能样机,目前主要开发直径为 $\varnothing 30$  mm的HRG,并于2012年10月成功完成卫星闭环控制实验。

收稿日期:2014-05-16

作者简介:毛海燕(1979-),女,四川人,工程师,主要从事惯性科技情报研究。

## 1.2 国外半球陀螺发展现状

半球谐振陀螺技术发展起源于上世纪 70 年代,世界上最早研制半球谐振陀螺仪的是美国 Delco 公司(后并入 Northrop Grumman 公司),自 1996 年以来,它首次将半球谐振陀螺仪用于空间中之后,半球谐振陀螺作为高价值任务的“优选传感器”,已在超过 91 套系统(125 颗卫星)中累计空间飞行  $25 \times 10^6$  h,任务成功率为 100%,充分验证其空间应用的独特优势。俄罗斯的 HRG 在陀螺仪的设计、信号处理及系统设计上,其理论都是相当领先的,近几年随着俄罗斯航天工业复苏,又开始加紧半球陀螺的应用研究,拟应用于通信卫星。HRG 俄罗斯拉明斯克仪器制造设计局早期研制直径为  $\varnothing 100$  mm 的半球谐振陀螺,又开发了直径为  $\varnothing 50$  mm 的半球谐振陀螺,其随机漂移达到  $0.005 \sim 0.010$  ( $^{\circ}$ )/h。俄罗斯 SIE Medicon 研究直径为  $\varnothing 30$  mm 的半球谐振陀螺,并开发了独特的调平技术<sup>[9]</sup>。欧洲惯性导航系统制造集团的法国 SAGEM 公司致力于半球谐振陀螺仪技术的研究,得到了法国空间局 CENS 和防御局 DGA 的支持,其 Regrs 20(HRG)速率敏感振动陀螺,在惯性测量技术的成本效益控制方面取得了突破,已将  $0.1 \sim 1.0$  ( $^{\circ}$ )/h 半球谐振陀螺仪产品作为战术级应用,正在研制的  $0.01$  ( $^{\circ}$ )/h 半球谐振陀螺仪作为惯导产品,将应用在空间技术领域(主要是通讯和地球观测卫星)。图 1 为 SAGEM 公司的半球谐振陀螺。



图 1 SAGEM 公司的半球谐振陀螺

## 1.3 国内外半球陀螺的差距及解决途径

我国对半球谐振陀螺的研究起步较晚,与国外成熟的应用相比,差距还相当大。目前,国内半球谐振陀螺在卫星和航天器上的应用还仅处于初步探索阶段。虽然部分加工与处理的技术水平已达到甚至超过俄罗斯的现有状态,接近国际同领域先进水平,但国外在卫星、武器等工程应用上已遥遥领先,我国应加决在这些方面的研制进度。

在精度方面,多使用数字电路来代替模拟电路,

以减少电路温度漂移的影响,并充分考虑电磁兼容环境、温度环境的优化;完善地面测试验证方法,使惯性敏感精度进一步提高,零偏稳定性从现有的  $10^{-2}$  量级提升到  $10^{-3} \sim 10^{-4}$  量级,满足未来高精度、长寿命卫星平台的需求。

在寿命方面,重点考核陀螺表头的长期稳定性,查找是否有加工应力带来的影响,通过寿命试验摸底评估,以期验证敏感头的寿命。电路方面需进行抗辐照试验考核,并通过理论计算获得 15 年以上寿命的证明。

在小型化方面,通过惯性敏感器表头小型化,惯性敏感器电路系统集成化来实现小型化。尺寸、质量进一步瞄准 4 kg 以内的,以满足深空探测器的需求。

## 2 国外半球谐振陀螺的应用及典型产品

2009 年,美国开发出高精度半球陀螺 HRG130P(见图 2),并组建了新一代可升级型的空间惯性参考单元(SIRU)(见图 3),其性能得到大幅度改善。SIRU 为全冗余的交叉捷联容错设计,采用宽脉冲调制、比例系数线性度和稳定性比传统的阶跃数字模拟转换提高了 2 个数量级(见表 1)。模拟信号解调升级为读出信号直接高速数字采样进行数字解调,全数字电路,低功耗。新的系统信号处理提高了带宽,响应时间降低到小于 1 ms,带宽增至 650 Hz,满足某些空间应用的大带宽(高达 200 Hz),高精度和速率力平衡控制要求。

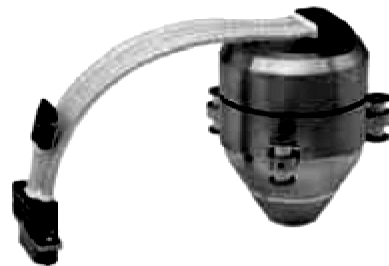


图 2 HRG130P

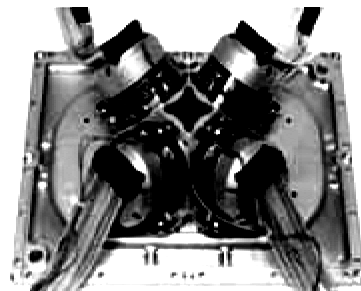


图 3 SIRU

表1 升级型 SIRUTM 技术指标

参数	基本性能	精确性能
速率范围/[ $^{\circ}$ ]/s]	$\pm 7$	$\pm 4$
	60	$< 1$
标度因数短期稳定性 $\times 10^{-6}$ ( $1\sigma$ )	1 h 不确定性, $\pm 8^{\circ}$ C,	1 h 不确定性, $\pm 1^{\circ}$ C,
	12 h 测试	12 h 测试
标度因数线性度 ( $1\sigma$ )	$30 \times 10^{-6}$ ,   速率  $\geq 1$ ( $^{\circ}$ )/s	$1 \times 10^{-6}$ ,  速率  $\geq 0.3$ ( $^{\circ}$ )/s
	0.108 ( $^{\circ}$ )/h,	0.001 ( $^{\circ}$ )/h,
	速率  $< 1$ ( $^{\circ}$ )/s	速率  $< 0.3$ ( $^{\circ}$ )/s
标度因数长期稳定性/ $\%$ ( $3\sigma$ )	0.5	0.5
	0.030 0	0.000 3
偏置短期稳定性/[ $^{\circ}$ ]/h] ( $1\sigma$ )	1 h 不确定性, $\pm 8^{\circ}$ C,	20 min 不确定性, $\pm 0.1^{\circ}$ C,
	12 h 测试	12 h 测试
偏置长期稳定性/[ $^{\circ}$ ]/h] ( $3\sigma$ )	1.3	1.3
角度随机游走/[ $^{\circ}$ ]/h $^{1/2}$ ]	0.000 30	0.000 06

目前半球谐振陀螺仪的空间应用在美国已相当成熟,从1996年至今,半球谐振陀螺仪参与的太空项目包括<sup>[4]</sup>:小行星登陆(NEAR,1996~2000年),土星环绕(CASSINI,1997~2008年),水星探测(Messenger,2004~2011年),深度撞击(Deep Impact,2005年),“哈勃太空望远镜”等项目,由HRG构成的SIRU更是以100%的成功率,完美完成任务<sup>[5-7]</sup>。相关的报道包括NASA的NEAR,Cassini(见图4),TDRS,EO-1,EOS,ICESat,GALEX宇宙飞船,水星探索及深度撞击;洛克希德·马丁公司的A2100卫星及Ikonos;波音公司的波音702及其他卫星<sup>[5-6]</sup>。在这些前沿的宇宙空间探测项目中,半球



图4 CASSINI号飞行器

谐振陀螺均表现出优良的性能,证实了半球谐振陀螺是作为空间探测任务惯性器件的最佳选择。

### 3 半球谐振陀螺的发展趋势

半球谐振陀螺仪技术从长远来看,未来的陀螺技术将以HRG和微机电系统(MEMS)为主向微型化方向发展,并作为航天任务和战略任务等高价值任务的首选陀螺<sup>[7-8]</sup>。主要发展方向有:

1) 高精度。国外半球陀螺仪随机漂移指标已经达到0.000 3 ( $^{\circ}$ )/h,还有提升的空间。

2) 系统应用多样化。早在上世纪90年代已成熟应用于多项卫星工程,运行良好,且成为其卫星系统惯性器件的首选;同时,半球陀螺的优良性能在战略战术武器上都能得到体现,国外已有成功应用的事例。

3) 系统形式多样。Northrop公司关于半球陀螺仪的产品已形成系列化,且组合系统产品具有很强的性能扩展性。

4) 适应强辐射环境应用。根据半球谐振陀螺传感器结构固有的抗辐射能力,研发传感器电子部件的进一步加固措施,满足外层空间探测需求。

5) 向小体积、微型化发展。半球陀螺目前已有两件套结构,同时还可利用MEMS技术生产出体积更小,质量更轻,成本更低,可靠性更高的微半球谐振陀螺。现阶段主要研发国家和机构如下:

a. 法国现在研发的谐振子20 mm的Regys20(半球谐振陀螺)速率敏感振动陀螺,在惯性测量技术的成本效益方面取得了突破。

b. 美国Northrop Grumman公司于2012年推出了新一代微型半球谐振陀螺仪(mHRG),mHRG的零偏稳定性已达到0.000 35 ( $^{\circ}$ )/h。并且已开始了超微型半球谐振陀螺仪( $\mu$ HRG)的研究。

图5为mHRG照片,其直径约 $\varnothing 3.5$  cm,质量仅113.4 g。图中,mHRG由Northrop Grumman公司研制,主要部件数比现有HRG130P部件数少90%,偏置稳定性为0.000 35 ( $^{\circ}$ )/h,角度随机游走(ARW)为(0.000 3 ( $^{\circ}$ )/ $\sqrt{h}$ )。Northrop Grumman公司已开始利用由mHRG构成的IMU的研制,大小仅为377 cm $^3$ ,质量为752 g,功耗为5 W。图6为其概念图。



图 5 mHRG 照片图

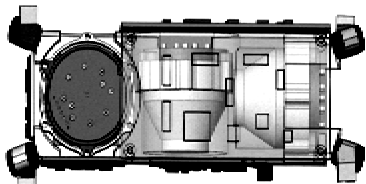


图 6 mHRG 惯性测量装置概念图

c. 美国已开始超微半球陀螺的研究,即微量级的半球陀螺的研究。该项目由美国 DARPA 项目资助,美国犹他大学开始了  $\mu$ HRG 的研究, $\mu$ HRG 为基于 MEMS 技术的半球陀螺,现处于实验室研究阶段,主要解决 HRG 制作成本高,体积大的问题。利用 MEMS 工艺制作带集成电极的 3D 半球结构,半球壳体由  $\text{SiO}_2$  材料组成,半球壳体的平均表面刚度为 5 nm,直径  $\varnothing 500\mu\text{m}$ , $Q=20\ 000$ 。利用 MEMS 技术制造而成的  $\mu$ HRG 使 HRG 实现了小体积,低成本,批量生产。图 7 为  $\mu$ HRG 结构图<sup>[9]</sup>。

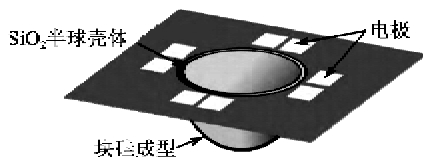


图 7  $\mu$  HRG 原理设计结构图

图 8 为  $\mu$ HRG 的光学成像图,采用了 3 种不同的技术对半球谐振器进行了测试,即

- 1) 静电驱动/敏感技术。
- 2) 压电增强静电驱动/静电敏感技术。

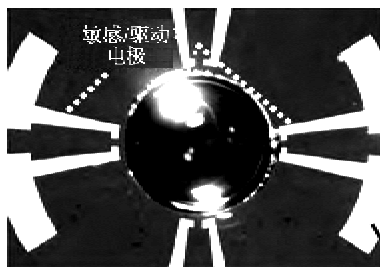


图 8  $\mu$  HRG 的光学成像图

3) 静电驱动/光学敏感技术。

测试结果表明,采用静电驱动/敏感技术得到了最佳的结果。

4 结束语

半球谐振陀螺是一种新型高精度、高可靠性的振动陀螺。它具有较高的测量精度、超强的稳定性和可靠性,其在空间领域的应用中所显示的优势是其他陀螺无法相比的。目前,半球谐振陀螺在惯性导航、制导和姿态稳定控制等系统中仍有较强的发展潜力,随着尺寸和精度的进一步改善,今后它将会在空间应用领域发挥越来越重要的作用,具有极广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] LYNCH D D. HRG development at delco, litton, and northrop grumman [C]//USA: The Anniversary Workshop at Yalta,2008;19-21.
- [2] SERGEI A, JEREBETS. Gyro evaluation for the mission to jupiter[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2007, 31(1):1-10.
- [3] LOPER E J, LYNCH D D, STEVENSON K M. Projected performance of smaller hemispherical resonator gyros[C]//Las Vegas: Position Location and Navigation Symposium PLANS'86, 1986;4-7.
- [4] 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.
- [5] 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. LY Zhiming. The application of HRG in the spacecraft [J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 1999, 21(5):349-353.
- [6] DICKINSON J, STRANDT C R. HRG strapdown navigator[C]//S. l.: The 1990's-A Decade of Excellence in the Navigation Sciences. IEEE PLANS'90, 1990: 110-117.
- [7] ROZELLE D M. The hemispherical resonator gyro: from wineglass to the planets[C]//San Diego: 19th AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting, 2009: 1157-1178.
- [8] LOVEDY P W, ROGERS C A. Free vibration of elastically supported thin cylinders including gyroscopic effects[J]. Journal of Sound and Vibration, 1968, 217(3):547-562.
- [9] PAI P, CHOWDHURY F K, MASTRANGELO C H, et al. MEMS-based hemispherical resonator gyroscopes[C]//Taipei: 11th IEEE Sensors Conference, 2012:170-173.