

半球谐振陀螺装配技术的发展现状及趋势^{*}

金 鑫¹, 刘晓豪¹, 李绍良², 李朝将¹, 李寅岗¹, 陈效真³, 蔚 行¹

(1. 北京理工大学 机械与车辆学院 · 北京 · 100081;
2. 上海航天控制技术研究所 惯性工程技术研究中心 · 上海 · 201109;
3. 北京航天控制仪器研究所 · 北京 · 100039)

摘要: 目前, 半球谐振陀螺在装配过程中存在着装配精度低、一致性差、成品率低等问题。半球谐振陀螺装配技术的短板制约着半球谐振陀螺性能指标的提升、高合格率和批量化生产。通过调研半球谐振陀螺产品的研究现状, 分析了影响半球谐振陀螺精度的因素, 阐述了在半球谐振陀螺装配过程中亟需突破的关键技术, 包括面向装配的几何误差建模技术、无损柔性夹持技术、铟焊低应力连接装配工艺、非平行板电容精密检测等关键技术, 并对半球谐振陀螺装配技术的发展趋势进行了展望。

关键词: 半球谐振陀螺; 精密装配; 误差建模; 铟焊连接; 低应力装配

中图分类号: TH824 文献标志码: A 文章编号: 2096-5974(2021)01-0001-10

Development Status and Trend of Hemispherical Resonator Gyroscope Assembly Technology

JIN Xin¹, LIU Xiaohao¹, LI Shaoliang², LI Chaojiang¹, LI Yingang¹, CHEN Xiaozhen³, YU Hang¹

(1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081;
2. Shanghai Engineer Research Center of Inertia, Shanghai Aerospace Control Technology Institute, Shanghai 201109;
3. Beijing Institute of Aerospace Control Devices, Beijing 100039)

Abstract: At present, the assembly process of the hemispherical resonant gyroscope (HRG) has problems such as low assembly accuracy, poor consistency and low yield. The shortcoming of the hemispherical resonant gyroscope assembly technology is one of the main reasons that restrict its performance index improvement, high qualification rate and mass production. First, it summarizes the research status of hemispherical resonant gyroscope products, summarizes the key technology of hemispherical resonant gyroscope assembly, and explains the urgent need to break through the assembly-oriented geometric error modeling technology, non-destructive flexible clamping technology, indium key technologies such as welding connection process and precision detection technology of non-parallel plate capacitance. And finally analyze the development trend of hemispherical resonant gyroscope assembly technology.

Keywords: HRG; precision assembly; error modeling; indium welding connection; low-stress assembly

0 引言

半球谐振陀螺 (Hemispherical Resonator Gyroscope, HRG) 是一种基于哥氏效应的固体波动

陀螺, 其具有精度高、寿命长、可靠性高、小型化、集成化等诸多优势, 被国内外惯性技术界公认为是 21 世纪可应用于航空航天惯导系统中的最为理想的惯性器件。在半球谐振陀螺的装配过程

* 收稿日期: 2020-12-17; 修回日期: 2021-01-05

基金项目: 上海航天科技创新基金项目 (SAST2020-061)

作者简介: 金鑫 (1971—), 女, 博士, 教授, 博士生导师。E-mail: goldking@bit.edu.cn。

通信作者简介: 李朝将 (1985—), 男, 博士, 特别研究员, 博士生导师。E-mail: mecqli@bit.edu.cn

中，常出现零件加工质量合格、但装配后的陀螺精度仍然达不到要求的现象。其中，半球谐振陀螺的装配工艺与技术是制约陀螺整体性能和稳定性的主要原因之一。本文对美国、俄罗斯、法国、中国的半球谐振陀螺的研究历程、技术及应用现状进行了介绍，分析了半球谐振陀螺装配的关键技术，包括面向装配的几何误差建模技术、无损柔性夹持技术、钢焊低应力连接装配工艺、非平行板电容精密检测等关键技术，并对半球谐振陀螺装配技术的未来发展方向进行了展望。

1 半球谐振陀螺产品的国内外发展现状

美国、俄罗斯及法国最早开始了对半球谐振陀螺的研制，并将其成功应用在了空间型号、飞机、导弹及海洋领域。此外，英国、日本等国家也有多家单位在研究 HRG 的相关技术。

1.1 美国

1890 年，英国物理学家 G. H. Beyan 在敲击酒

杯时发现，在振动的壳体（高脚杯）旋转时，由于哥氏惯性力的存在，驻波相对于高脚杯和惯性空间发生进动，这是半球谐振陀螺的理论基础^[1]。此后，A. Kalnin 提出了薄壳型振子的振动理论，Chintsun 分析了半球壳的轴对称和非轴对称的振动情况。1965 年，Delco 公司的 David Lynch 建立了第一个半球壳的振动理论模型，证明了 G. H. Beyan 论述的理论的可行性，并利用环形电极对谐振子进行了参数激励，进而研制出了第一个速率积分式的半球谐振陀螺^[2-3]。19 世纪 70 年代，熔融石英材料开始被应用于半球谐振陀螺的制造。这奠定了 HRG 能够成为高水平陀螺的基础，使陀螺精度能够达到 $10(^{\circ})/h$ 。1979 年—1983 年，在美国海军的支持下，Delco 公司成功研制出了 Block 系列的 HRG 产品。其中，Block 20 HRG 的精度优于 $1(^{\circ})/h$ 。Block 30 HRG 采用了性能更高的双击振子，其谐振腔的直径为 58mm。Block 系列产品如图 1 所示^[4-5]。



图 1 Block 10/Block 20/Block 30

Fig. 1 Block 10/Block 20/Block 30

1987 年，Delco 公司研发了 HRG-130T 及 HRG-130Y 系列陀螺，首次应用了激光调平技术，为后续的 HRG 生产奠定了基础。1990 年，Lynch 等^[6]系统地研究了积分式的三件套构型 HRG 的结构、控制方法及误差来源。HRG 开始被应用于航天领域，并逐步走向技术成熟。随后，美国诺格公司收购了 Delco 公司。2004 年起至今，诺格公司主要的半球谐振陀螺工程应用产品的型号为 HRG-130P。该型号产品改进了以往的半球谐振陀螺的装配技术，并且采用了低应力镀膜技术，产品的零偏稳定性小于 $0.0015(^{\circ})/h$ ，角度随机游走小于 $0.00015(^{\circ})/h^{1/2}$ ，具有极高的可靠性，

产品如图 2 所示。此外，SSIRU 系统的零偏稳定性最高可达 $0.0001(^{\circ})/h$ ，角度随机游走最高可达 $0.00002(^{\circ})/h^{1/2}$ ，是目前公开报道的半球谐振陀螺产品中的最高指标。

2012 年起，诺格公司开始研究微型半球谐振陀螺（mHRG）。mHRG 在以往产品的基础上进行了极大的简化，其仅由 5 个核心部件组成，其整装图和零件图如图 3 所示^[7-8]。mHRG 的零偏稳定性小于 $0.005(^{\circ})/h$ ，角度随机游走小于 $0.00025(^{\circ})/h^{1/2}$ 。若采用实时自校准技术，其零偏稳定性可达 $0.001(^{\circ})/h$ ^[7]。

美国 HRG 发展的三个阶段如表 1 所示。



(a) HRG-130P



(b) SSIRU 组合

图 2 美国诺格公司现阶段的 HRG 产品

Fig. 2 The current HRG products of Northrop Grumman



(a) mHRG 整装图



(b) mHRG 组件

图 3 mHRG 及其零件图

Fig. 3 Diagram of mHRG and its parts

表 1 美国 HRG 产品的发展历程

Tab. 1 Development history of American HRG products

时间	1980 年—2004 年	2004 年—2012 年	2012 年至今
产品	陀螺: HRG-130Y 系统: SIRU	陀螺: HRG-130P 系统: SSIRU	陀螺: mHRG
现状	停产, 被 130P 取代	主要工程应用产品	工程样机-未见应用报道
精度	0.01 ($^{\circ}$) / h~ 0.002 ($^{\circ}$) / h	0.001 ($^{\circ}$) / h~ 0.0005 ($^{\circ}$) / h	0.005 ($^{\circ}$) / h~ 0.0005 ($^{\circ}$) / h
技术	三件套结构 激光制齿谐振子 力平衡-全角模式	三件套结构; 改进装配技术; 低应力镀膜; 调平技术优化;	两件套-结构 精简 改进电路控制技术 自校准技术 合控制技术优化

1.2 俄罗斯

在美国 HRG 技术发展的同时, 苏联也有大量科研单位参与了 HRG 技术的研究。在理论研究方面, 苏联科学院的 Zhuravlev 和 Klimov 的专著《固体波动陀螺》为苏联 HRG 的研制奠定了理论基础。苏联研制的速率积分式 HRG 的精度优于 $0.0001 (^{\circ}) / h^{[9]}$ 。在工程领域中, 梅吉科公司和拉明斯克机械制造局等单位主要参与了 HRG 的生产。梅吉科公司和拉明斯克机械制造局生产的产品的相关信息如表 2 所示^[10]。

表 2 俄罗斯的 HRG 产品信息

Tab. 2 Information of Russian HRG products

公司	梅吉科	拉明斯克
型号及尺寸	HRG-30ig 30mm	最早研制的 HRG 的直径为 100mm, 后来的产品直径为 50mm
零偏稳定性	优于 $0.01 (^{\circ}) / h$	$0.005 (^{\circ}) / h \sim 0.001 (^{\circ}) / h$
应用领域	航天及石油勘探等领域	主要应用于航空领域

1.3 法国

法国 Safran 集团旗下的 Sagem 公司从 20 世纪 90 年代开始研究 HRG 技术。虽然法国开始研制 HRG 技术的时间远在美国和俄罗斯之后, 但是近年来, 其 HRG 产品实现了重大的技术创新, 为整个惯性领域带来了重大的影响。1994 年, Sagem 公司实现了对 HRG 的全角控制。在全角控制模式下, 只需要很小的控制, 就能够实现幅度控制和正交控制; 2009 年, Sagem 公司采用激光

和离子束调平技术对谐振子进行了精密调平，搭建了能够实现谐振子频率调谐和 6 自由度自动调平的平台；此外，Sagem 公司研制了 HRG 两件套技术，将原始的球面电极改进成了平面电极，使得装配间隙更容易被控制，装配精度得到了提升^[11-13]。Sagem 公司生产的 HRG 如图 4 所示。目前，Sagem 公司已具备了年产 25000 轴的批产能力，HRG 的精度为 $0.1 (^{\circ}) / h \sim 0.001 (^{\circ}) / h$ 。同时，HRG 为其公司重点研发的惯性测量产品。

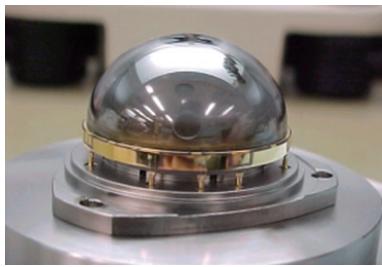


图 4 Sagem 公司生产的 HRG
Fig. 4 HRG produced by Sagem

1.4 中国

中国的 HRG 研究始于 20 世纪 80 年代，研制单位主要包括中国电子科技集团公司第 26 所、上海航天控制技术研究所、哈尔滨工业大学、北京航空航天大学、国防科学技术大学、北京理工大学等科研院所。在理论研究方面，我国开展了针对力学模型、信号检测、误差机理分析、振幅控制、温度特性及装配工艺等理论的研究，同样也进行了 HRG 样机的研制，取得了丰硕的成果。2002 年，中电 26 所完成了第一台力平衡模式的 HRG 的样机研制，并且建成了一条 HRG 批量生产线。目前，国内 HRG 的精度在动态范围内可以满足航天领域的低动态需求，但与国外相比还存在较大差距^[13-14]。国内 HRG 的主要性能与国外同类产品的对比结果如表 3 所示。

表 3 国内外半球谐振陀螺的主要参数对比

Tab. 3 Comparison between domestic and abroad HRGs

国家	美国	俄罗斯	法国	中国
代表单位	NG	拉明克斯	Sagem	中电 26 所
谐振子直径/mm	30	30	20	30
零偏稳定性/ [(^{\circ}) / h]	0.0001	0.001	0.01	0.0016
随机游走/ [(^{\circ}) / h^{1/2}]	0.00002	0.0001	0.0001	—
非线性度/ 10^{-6}	1	2	5	50

2 半球谐振陀螺的装配技术

2.1 半球谐振陀螺的精度影响因素

在 HRG 的实际生产过程中，影响半球谐振陀螺精度的因素较多。理论研究发现，影响 HRG 精度的主要因素包括谐振子的加工误差、精密装配过程中的误差、激励与检测电极的制备误差、控制回路误差，以及环境载荷误差等，HRG 的综合误差分类如图 5 所示。裸振子的加工误差包括材料制备、结构加工、后处理等制造过程中形成的影响裸振子性能指标的尺寸误差、形状误差、表面粗糙度、质量及其分布的均匀度、亚表面层损伤、加工残余应力等。基座上电极的制备误差和谐振子镀膜误差主要影响电极的形位误差和偏心误差，使得激振中心与谐振子质心、形心不一致，进而导致谐振子产生振动误差；同时，各个电极面积误差使得谐振子的静电控制力不一致，导致谐振子唇沿由于振幅不同而产生误差。精密装配过程中的误差主要是指装配间隙误差、电极间的极板间距误差、正对面积偏差，以及谐振子几何球心、质量中心、谐振中心、激励罩的激励电极中心、读出基座输出检测中心以及形成的静电场中心六心不重合等^[15]。控制回路误差是指由 HRG 组件加工装配误差所导致的振幅控制系统和速率控制系统的激励电极误差，从而导致输出误差。环境载荷的变化亦可对 HRG 的整体性能产生影

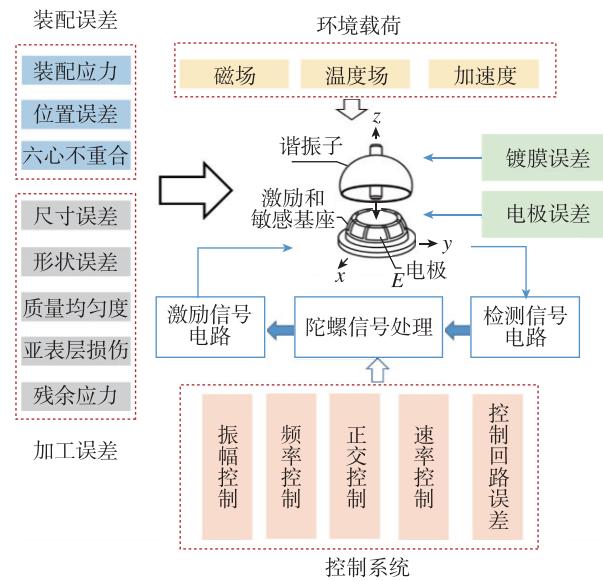


图 5 半球谐振陀螺综合误差模型

Fig. 5 Synthetic error model of HRGs

响, 如半球谐振陀螺在使用过程中的环境加速度、温度场和磁场等的变化。因此, 半球谐振陀螺在加工、装配、检测和测试过程中要充分考虑上述因素的宏、微观影响, 建立基础理论模型, 攻关核心技术, 自主研发相关设备与软件。

2.2 半球谐振陀螺的装配误差分析

由半球谐振陀螺在装配过程中造成的装配间隙误差、谐振子与传感器的不同心误差以及由装配连接工艺不同引发的应力分布不均匀, 使得谐振子在振动时易发生频率裂解, 同时使得分布在谐振子圆周的阻尼比不同, 最终导致谐振子上的驻波以不同的速率衰减而产生漂移。

(1) 装配间隙误差

装配间隙误差主要来源于谐振子和读出基座的表面形状误差、空间位姿不对称误差、装配不同心误差。装配间隙误差会导致电极极板间距不同, 以及电极的正对面积不一致。这会导致在不同的方向对谐振子产生的静电力大小不一样, 在不同的间隙轴方向受到的阻力不同, 大间隙轴方向的 Q 值大于小间隙轴方向的 Q 值, 谐振子的振幅不一致, 从而导致 HRG 出现漂移, 影响 HRG 的整体性能。静电力的大小如公式(1)所示

$$F = \frac{V^2 \epsilon A}{2d^2} \quad (1)$$

其中, F 为静电力, V 为控制电压, A 为电极正对面积, d 为极板间距。

(2) 谐振子与读出基座装配不同轴的误差分析

在装配过程中, 零件的安装、夹持、对准、连接等因素会造成谐振子和读出基座的不对称, 以及任意界面不同心(或不同轴), 甚至出现质心偏差, 进而导致传感器位置的初始间距不相等。这种误差不仅使得谐振子的振动在正交轴分解时出现误差, 同样也会导致出现信号的检测误差^[16]。谐振子与读出基座不同心的误差分析原理如图 6 所示。

在图 6 中, O 为谐振子中心, O' 为读出基座中心。读出基座向左偏移 δ_1 , 向上偏移 δ_2 , 谐振子的半径为 R , 均匀分布的 8 个电极的读出基座的半径为 r 。根据文献[16], 谐振子与读出基座的不同心会对信号检测造成很大影响。

(3) 装配残余应力

半球谐振陀螺系统的装配残余应力直接影响

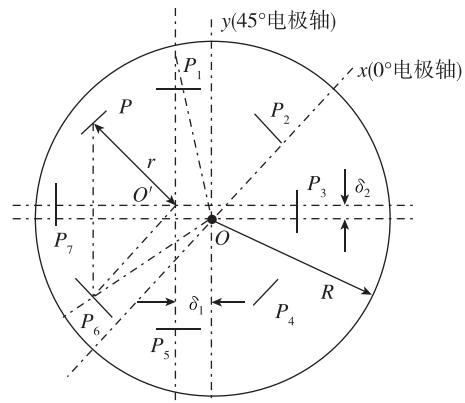


图 6 谐振子与传感器不同心时的误差

Fig. 6 Error of eccentric resonator and sensors

着半球谐振陀螺的精度及其稳定性, 而零部件残余应力主要来源于在机械加工过程中零件谐振子表面产生的残余应力, 这些应力损伤会在谐振子表面留下肉眼无法分辨的细小裂纹; 另外的来源, 是由谐振子与基座连接装配工艺所引发的非均匀应力, 如在钢焊或胶接过程中因高低温导致的零部件表面残余应力及非均匀应力。非均匀应力通常在后处理工艺中被去除, 但装配残余应力将会导致谐振子的 Q 值和陀螺的对称性损失, 最终影响陀螺的零偏稳定性、重复性、噪声、标定因数稳定性等核心精度指标^[17]。

因此, 在半球谐振陀螺的装配过程中开展考虑上述因素的装配误差作用机制、装配误差关键调控技术、低应力装配工艺方法的研究, 以及针对高效、高精度智能化装备的研究, 对于建立半球谐振陀螺制造的理论体系、打破国外技术封锁、突破“卡脖子”的关键技术、缩短与国外技术的差距、提升我国半球谐振陀螺的制造水平而言, 具有重要的意义。

3 半球谐振陀螺装配的关键技术及发展

我国的半球谐振陀螺技术研究起步较晚, 技术储备能力较弱。半球谐振陀螺由谐振子和读出基座装配而成, 对电极间隙的要求极高, 因此半球谐振陀螺的微装配工艺是其制造的核心工艺。目前, 半球谐振陀螺在装配过程中存在装配精度低、一致性差、成品率低等问题, 因此必须攻克面向装配的几何误差建模技术、无损柔性夹持与对准技术、半球谐振子与基座钢焊连接工艺技术, 以及非平行板电

容精密检测技术等关键技术。

3.1 面向装配的几何误差建模技术

在半球谐振陀螺零件的装配过程中，会出现零件的加工质量合格但装配后的陀螺精度达不到要求的现象，可见装配精度直接影响着部件或产品的最终性能。影响装配精度的主要因素是零件在加工过程中形成的几何误差、零件间的配合误差，以及多零件装配的累积误差。由于半球谐振陀螺对装配精度的要求极其严格（对误差的要求一般为微米级别），装配面上微小的几何误差就会使实际的装配位姿偏离理想装配位姿。因此，需要找出零件几何误差与半球谐振陀螺装配精度的定量关系，进而实现对装配精度的预测和控制。

北京理工大学微小型制造研究所的金鑫等^[15]提出了面向装配的几何误差三维一体化建模技术。首先用接触式或非接触式的高精度测量仪对关键零部件装配面的几何误差进行了精确测量，然后基于实际测量的几何误差数据，采用 NURBS 曲面建立了零件的几何误差装配面模型，最终将建立的误差曲面模型与理想的三维实体模型进行了集成，得到了带有几何误差的三维实体模型^[18-20]。该几何误差建模方法如图 7、图 8 所示。该方法为准确计算谐振子和读出基座的质心、形心、激励中心和检测中心奠定了基础，为后续满足装配精度要求的装配工艺设计和优化提供了参考依据。

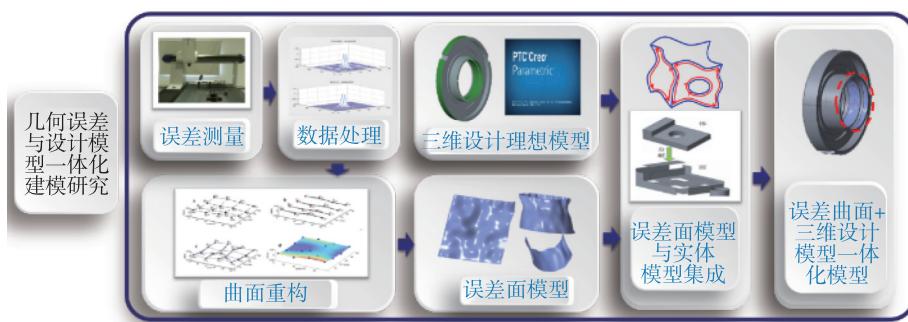


图 7 几何误差建模方法

Fig. 7 Geometric error modeling method

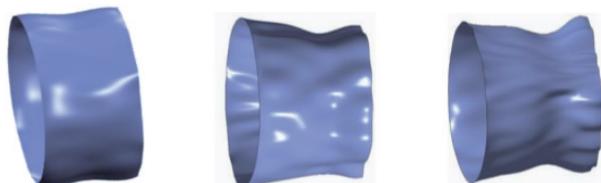


图 8 NURBS 曲面模型

Fig. 8 NURBS surface model

3.2 无损柔性夹持与对准技术

半球谐振陀螺的核心元件为谐振子和读出基座，半球谐振子的制造材料目前常为硬脆易碎的熔石英玻璃，直径范围通常为 15mm~60mm，壁厚范围为 0.3mm~1.1mm。考虑其大尺度范围的特点以及微小薄壁的结构特性，半球谐振子的制造需要提高对工装夹具的要求，以实现高精度的柔性无损夹持。

针对不同结构的精密微小型零件，可采用多种不同的微夹持器。一种夹持器为机械式，这类

夹持器具有两个以上手指，通过手指端部的运动实现夹持动作。另一种夹持器为吸附式，这类夹持器利用真空、液体、静电等产生的吸附力对微小型零件进行定位或抓取^[21-23]。还有一种夹持器为气囊式，这类夹持器采用硅胶材料（伸长率可达 450%，回弹性高达 40%）制成气囊，具有超弹性和形状可变的特点。随着气压和挤压力增大，气囊与零部件内腔的接触面积增大，避免了零件因受力不均而导致局部应力过大，进而造成损坏。柔性气囊式夹持器的结构如图 9 所示。

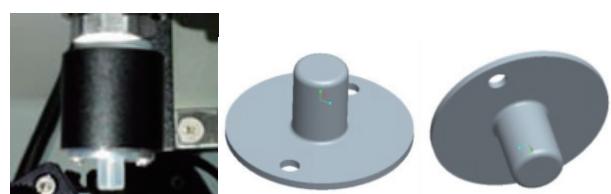


图 9 充气式硅胶气囊柔性夹持头

Fig. 9 Inflatable silicone air bag flexible clamping head

由于半球谐振子具有微小、易碎的特点, 为确保不会因夹持力过大而导致零件损坏, 需采用无损夹持技术。在机械式微夹持器的手指端头配置毫牛级多维力传感器, 通过弹簧接触结构或柔性材料(如聚四氟乙烯)减小夹持面的变形程度。通过弹簧变形量来控制夹持力, 在夹持谐振子中心杆上端时避免由于夹持力过大而损坏谐振子表面或由于夹持力过小而导致被夹持零件脱落, 进而实现无损柔性夹持。

对读出基座等零件的夹持可采用气囊式微夹持器。真空吸附式夹持器具有结构简单、环境兼容性好、零件结构可跨尺度结合的特点。随着充气量的增加, 气囊可以提供克服零件本身重力和惯性力的扭矩, 使气囊外侧与零件内壁逐渐均匀接触, 从而实现零件的无损定位夹持。

对于高精度的微装配系统, 决定系统装配精度的是对位检测技术。国内外中间尺度的微装配系统普遍采用基于CCD的显微视觉检测系统。具体配置方案包括单目视觉、多目视觉和基于单目视觉的多视角对位检测三类。

(1) 单目视觉检测方法

该方法一般适用于高度远小于横向尺度的平板类结构, 一般将光学系统光轴垂直于被装配件表面进行放置。该方法简单易行, 对光源、CCD等检测设备的空间配置要求不高, 但很难保证相对较高的精度。

(2) 多目视觉检测方法

一般为传统的双目或三目视觉检测, 可以实现复杂零件空间三维姿态的识别和位置检测。美国明尼苏达大学的Yang G和James A Gains^[24-25]利用多目视觉检测系统实现了复杂零件空间三维位姿的检测, 并通过微应变检测实现了非接触式的微力检测。多目视觉的空间布局会严重制约微操作的空间区域, 增加系统累积误差, 降低检测精度。

(3) 单目视觉多视角检测方法

美国劳伦斯国家实验室使用三自由度单目视觉多视角系统实现了对多位置微装配过程的检测, 同时通过在装配基体上的不同位置设置平面反光镜, 实现了对多视角微装配的检测^[26-27]。其原理图和实物图如图10所示。

3.3 半球谐振子与基座钢焊连接工艺技术

半球谐振子与石英基座的焊接工艺是影响半

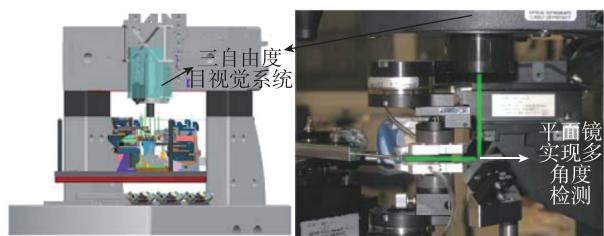


图10 装配原理图与实物对照图

Fig. 10 Assembly schematic diagram and object comparison diagram

球谐振陀螺装配精度的关键技术之一。半球谐振子通过中心杆与读出基座相连, 支撑杆与读出基座以钢焊的形式实现连接, 而其焊接刚度也会直接影响半球谐振陀螺的精度。焊接刚度不够时, HRG容易受到非敏感方向输入的加速度的影响, 导致产生测量误差^[28]。

为确保两套件结构半球谐振陀螺的装配精度和可靠性, 需要对半球陀螺核心零件——半球谐振子和石英基座的焊接工艺进行深入研究。热熔钢封技术通常在真空环境下进行, 是将纯钢或钢合金进行加热熔化、利用熔化后的钢的毛细作用对焊缝进行填充进而实现封接的过程。在热熔钢封过程中, 影响封接结果的主要因素包含如下三个:

(1) 钢能否与焊接表面形成良好的浸润。相关研究表明, 石英玻璃和钢的浸润性较差。为了提高钢封质量, 在实际生产时, 会在玻璃表面镀制一层薄膜。Au、Ag、Cu和Pt的金属薄膜与玻璃的浸润性较好^[29]。钢锡合金与未镀膜玻璃在封接处会有气泡产生, 其在镀膜后的玻璃片上的润湿性及铺展性较好, 且在熔化合金前沿产生了一个润湿环。

(2) 在钢焊过程中, 钢及焊接表面的杂质会降低钢熔化后的流动性, 并且产生气孔, 从而影响焊接刚度。因此, 在钢焊前, 需要对焊接表面进行清洗, 去除杂质和氧化层。

(3) 钢焊过程中的真空中度与加热温度也会影响钢的流动性。因此, 在对钢进行熔化时, 温升不宜过快, 保温时间不宜过短, 以避免钢内部的气体释放不彻底, 在冷却后形成气孔。

国内外对于钢封技术的研究主要集中于半导体激光器的封装以及氦氖激光陀螺仪的封装过程^[30-32], 而有关半球谐振陀螺钢焊工艺研究的报

道则较少^[22-24]。

3.4 非平行板电容精密检测技术

半球谐振陀螺装配质量合格的标准是由球面读出的8对基座电极的电信号检测量相同，即谐振子与读出基座的空间间隙均匀。而在实际装配过程中，电极的加工误差及安装的位置误差均会导致电信号检测出现误差，这对半球谐振陀螺球面电容的计算公式提出了更高的要求。

黄绍书、王金霞^[33]从平行板电容器的电容计算公式出发，并给予非平行板电容器串联与并联的思想，利用微积分原理，将一个普通的电容器看成无限多个微平行板电容器的串联。根据电容器串联规律进行积分，最终给出了球冠形电容器电容和柱冠形电容器电容的简易计算方法。万步勇、张小松等^[34]利用保角变换将非平板电容器变换为平行板电容器，再利用施瓦兹-克利斯多菲变换计算了考虑边缘效应时的电容器的电容，讨论了平板倾斜角和边缘效应对平行板电容器电容的影响。电极在加工过程中不可避免地存在几何误差，用原子力显微镜测量的电极表面形貌如图11所示。随着检测电极间距的减小，电极表面粗糙度会对其空间电场分布产生影响。张海峰、刘晓为等^[35]研究了电极表面粗糙度对检测电容的影响，建立了粗糙度电极的平行板电容器模型，并采用有限元法分析了表面粗糙度和边缘效应对静电场分布的影响。

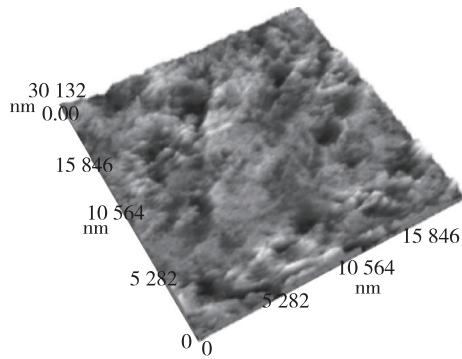


图11 电极表面的AFM扫描形貌图

Fig. 11 Structure of electrode surface

4 半球谐振陀螺装配技术的发展趋势

结合目前半球谐振陀螺的研究与应用现状，

半球谐振陀螺装配技术的发展趋势主要包括以下几个方面：

(1) 高精度：目前，半球谐振陀螺的装配以传统的手工和半自动化装配为主。半球谐振陀螺的装配精度直接影响着设备的导航精度。装配精度不够，将导致产品的质量一致性差、可靠性低、生产效率不高。传统的刚性自动化装配的装配精度不高，不具有产品变动的柔性，因此亟需发展针对研制和生产过程的多品种、变批量的半球谐振陀螺精密、可靠、柔性且高效的装配技术。高精度装配技术是提升半球谐振陀螺整体性能的必由之路。

(2) 低应力：半球谐振子装配过程中的应力损伤会在谐振子表面留下微裂纹，导致谐振子Q值和对称性损失，进而影响陀螺精度。因此，需要优化装配过程中的钢焊工艺，降低加工和装配过程中所产生的应力，实现低应力装配。

(3) 智能化：半球谐振子和读数基座之间的间隙均匀性直接影响着电信号的数值。要实现半球谐振陀螺的智能装配，须建立零件位姿、间隙与电信号之间的定量关系数学模型，实现装配过程中谐振子位姿的智能自适应调整。

(4) 数字化：从零件几何误差的精确测量入手，基于数字孪生技术，在数字化系统中建立可完整表达几何误差信息的零件几何孪生模型。通过对装配过程进行仿真，建立装配体的物理孪生模型，合理优化装配参数。基于数字孪生的虚拟装配技术可以大幅提高半球谐振陀螺的装配效率和整体性能。

参考文献 (References)

- [1] BRYANG H. On the beats in the vibrations of a revolving cylinder or bell [J]. Cambridge Philosophical Society, 1980, 7 (3): 101-111.
- [2] ROZELLED M. The hemispherical resonator gyro: from wineglass to the planets [J]. Advances in the Astronautical Sciences, 2009, 134: 1157-1178.
- [3] LYNCHD D. Rotating-wave rotation detector and method of operating same: United States, 3719074 [P]. 1973-03-06.
- [4] REMILLIEUX G, GOUDON J C, ROBERFROIS D. Coriolis vibrating gyros for aeronautical applications [R]. SAE Technical Paper, 2011-01-2731, 2011.
- [5] MATTHEWS A. The operation and mechanization of the hemispherical resonator gyroscope [C] // IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium. Monterey:

- IEEE, 2018: 7-14.
- [6] LOPER E J, LYNCH D D. Vibratory rotation sensor : United States, 4951508 [P]. 1990-06-05.
- [7] TRUSOV A A, PHILLIPS M R, BETTADAPURA A, et al. MHRG: miniature CVG with beyond navigation grade performance and real time self-calibration [C] // IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems. Laguna Beach: IEEE, 2016: 29-32.
- [8] 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). Karlsruhe: IEEE, 2016: 1-11.
- [9] MATVEEV B A. 固体波动陀螺 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- MATVEEV B A. Solid wave gyroscope [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009.
- [10] PERELYAEV S E, BODUNOV B P, BODUNOV S B. Solid-state wave gyroscope: A new-generation inertial sensor [C] // 2017 24th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS). Saint Petersburg: IEEE, 2017.
- [11] JEANROY A, LEGER P. Gyroscopic sensor and rotation measurement apparatus constituting an application thereof: United States, 6474161 [P]. 2002-11-05.
- [12] JEANROY A, GROSSET G, GOUDON J C, et al. HRG by Sagem from laboratory to mass production [C] // IEEE International Symposium on Inertial Sensors & Systems. Laguna Beach: IEEE, 2016: 1-4.
- [13] JEANROY A, BOUVET A, REMILLIEUX G. HRG and marine applications [J]. Gyroscopy & Navigation, 2014, 5 (2): 67-74.
- [14] 潘瑤, 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.
- PAN Y, QU T L, YANG K Y, et al. Hemispherical resonator gyroscope: current advances and future trends [J]. Navigation Positioning & Timing, 2017, 4 (2): 9-13 (in Chinese).
- [15] 金鑫, 李泽宸, 陈效真, 等. 半球谐振陀螺精密集成组装技术探讨 [J]. 导航定位与授时, 2019, 6 (6): 1-7.
- JIN X, LI Z C, CHEN X Z, et al. Thoughts on precision integrated assembly technology of hemispherical resonant gyroscope [J]. Navigation Positioning & Timing, 2019, 6 (6): 1-7 (in Chinese).
- [16] 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 S L, WU J T. Detecting signals of a hemispherical resonator gyro (HRG) with multiple electrodes [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2008, 29 (5): 474-478 (in Chinese).
- [17] 刘付成, 赵万良, 杨浩, 等. 半球谐振陀螺技术 [J]. 导航与控制, 2020, 19 (Z1): 208-215.
- LIU F C, ZHAO W L, YANG H, et al. Technology of hemispherical resonator gyroscope [J]. Navigation and Control, 2020, 19 (Z1): 208-215 (in Chinese).
- [18] 张之敬, 金鑫, 周敏. 精密微小型制造理论、技术及其应用 [J]. 机械工程学报, 2007, 43 (1): 49-61.
- ZHANG Z J, JIN X, ZHOU M. Precise and microminiature manufacturing theory, technology and its appliance [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43 (1): 49-61 (in Chinese).
- [19] 陈建峰. 制造特性对液浮陀螺仪组件应力状态影响研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2014.
- CHEN J F. The study of effect of manufacturing characteristics on the stress state of the components in LFG [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2014 (in Chinese).
- [20] ZHANG T Y, ZHANG Z J, JIN X, et al. An innovative method of modeling plane geometric form errors for precision assembly [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Journal of Engineering Manufacture, 2016, 230 (6): 1-10.
- [21] 杨建业, 汪立新, 张胜修, 等. 半球谐振陀螺旋转惯导系统误差抑制机理研究 [J]. 宇航学报, 2010, 31 (10): 2321-2327.
- YANG J Y, WANG L X, ZHANG S X, et al. Depression mechanism of systematic errors for HRG-based rotating inertial navigation system [J]. Journal of Astronautics, 2010, 31 (10): 2321-2327 (in Chinese).
- [22] 张嘉易, 郭鹏跃, 郝永平, 等. 微小器件吸附式微夹持器的研究 [J]. 工具技术, 2016, 50 (8): 100-104.
- ZHANG J Y, GUO P Y, HAO Y P, et al. Study on adsorption decay holder of small part [J]. Tool Engineering, 2016, 50 (8): 100-104 (in Chinese).
- [23] 何泽地, 田东宁, 杨金川, 等. 薄壁球壳真空吸附装夹形力学分析与控制 [J]. 兵工学报, 2017, 38 (7): 1409-1415.
- HE Z D, TIAN D N, YANG J C, et al. Analysis and control of vacuum adsorption clamping deformation of thin-walled spherical shells [J]. Acta Armamentarii, 2017, 38 (7): 1409-1415 (in Chinese).
- [24] YANG G, GAINES J A, NELSON B J. Optomechatronic design of microassembly systems for manufacturing hybrid microsystems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2005, 52 (4): 1013-1023.
- [25] YANG G, GAINES J A, NELSON B J. A supervisory wafer-level microassembly system for hybrid MEMS fabrication [J]. Journal of Intelligent and Robotic System, 2003, 37: 43-68.
- [26] 孙涛, 高党忠, 唐永建, 等. 激光核聚变靶表面几何参数扫描探针测量技术 [J]. 原子能科学技术, 2002, 36 (Z1): 361-363.

- SUN T, GAO D Z, TANG Y J, et al. Measurement technology of the surface characteristic of the inertial confinement fusion targets with scanning probe microscope [J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2002, 36 (Z1): 361-363 (in Chinese).
- [27] 杨冬, 虞孝麒, 龚达涛. X射线法测量的ICF靶丸参数的图像分析 [J]. 强激光与粒子束, 2004, 16 (12): 1553-1557.
- YANG D, YU X Q, GONG D T. Image analyses of ICF target by X-ray measurement [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, 16 (12): 1553-1557 (in Chinese).
- [28] 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.
- ZHAO H B. Study on error mechanism analysis and error restraint method for the hemispherical resonator gyroscope [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013 (in Chinese).
- [29] 赵菲菲, 赵宝升, 李伟, 等. 热封技术中多层金属薄膜的研究 [J]. 真空科学与技术学报, 2010, 30 (4): 351-354.
- ZHAO F F, ZHAO B S, LI W, et al. Improvement of thermal indium sealing by metal layer growth [J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2010, 30 (4): 351-354 (in Chinese).
- [30] 袁庆贺, 井红旗, 仲莉, 等. 大功率半导体激光器封装热应力研究 [J]. 中国激光, 2019, 46 (10): 91-96.
- YUAN Q H, JIN H Q, ZHONG L, et al. Thermal stressing high-power semiconductor laser packaging [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46 (10): 91-96 (in Chinese).
- Chinese).
- [31] 贾冠男. 大功率半导体激光阵列芯片封装关键技术研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2017.
- JIA G N. Research on key technologies of high power diode laser array packaging [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2017 (in Chinese).
- [32] 项经尧. 氦氖激光陀螺封界面数值模拟及失效机理研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
- XIANG J Y. Numerical simulation and failure mechanism study for the indium sealing interface of He-Ne laser gyro [D]. Hefei : Hefei University of Technology, 2017 (in Chinese).
- [33] 黄绍书, 王金霞. 用平行板电容器电容公式求非平行板电容器电容 [J]. 物理与工程, 2017, 27 (6): 51-53.
- HUANG S S, WANG J X. Calculation of capacitor capacitance of non-parallel plate with capacitance formula of parallel plate capacitor [J]. *Physics and Engineering*, 2017, 27 (6): 51-53 (in Chinese).
- [34] 万步勇, 张小松, 冯庆. 非平行板电容器电容的边缘效应研究 [J]. 大学物理, 2012, 31 (7): 9-12.
- WAN B Y, ZHANG X S, FENG Q. Edge-effect in capacitance of non-parallel plate capacitor [J]. *College Physics*, 2012, 31 (7): 9-12 (in Chinese).
- [35] 张海峰, 刘晓为, 李海, 等. 电极表面粗糙度对检测电容的影响 [J]. 光学精密工程, 2013, 21 (9): 2266-2271.
- ZHANG H F, LIU X W, LI H, et al. Effect of surface roughness of electrode on detecting capacitance [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21 (9): 2266-2271 (in Chinese).