

航天轴承发展综述

洛阳轴承研究所有限公司副总经理、总工程师 李文超

航天轴承主要应用于卫星、飞船和空间站、运载火箭和各种战略战术导弹及其地面辅助遥感遥测、测控通信系统和地面发射系统等航天装备，通常在高真空、高转速、耐腐蚀、耐辐射、宽温域、自润滑等特殊工况下使用，精度、寿命和可靠性要求高，需要开展专项研究，综合运用接触力学、润滑理论、摩擦学、疲劳与破坏、热处理与材料组织等基础研究和交叉学科的相关理论解决航天轴承研发当期所存在的设计、材料、润滑、制造、检测与试验等一系列技术难题。

1. 航天轴承研究现状

航天轴承技术壁垒多，设计、材料、制造及试验技术处于轴承行业金字塔顶端。近年来，我国航天轴承技术发展较快，但与西方发达国家相比，仍处于“跟跑向并跑”转换阶段。虽然在主机型号的牵引下，攻克了部分关键技术瓶颈，积累了大量的研制经验，但与国际先进水平相比仍有一定差距，依然存在瓶颈问题亟需突破、研制条件亟待改善。

1.1 设计仿真技术

国外各主要轴承公司均建立了轴承结构、材料、润滑、工况等参数的数据库，在此基础上以动力学、弹性流体动力润滑理论和有限元分析方法为主，优化设计程序中考虑轴承的动态性能，对轴承进行全面分析，设计出轴承的最佳结构及尺寸，保证了更高的寿命及可靠性。

国内虽通过多年不断的专项攻关，开发了轴承的设计分析程序，但分析结果与国外的分析结果偏差较大，而且仅能对特定工况下轴承的性能进行分

析，通用性不强，系统性研究不够深入。

1.2 材料技术

国外大型轴承厂商不单纯生产轴承，都设有专门事业部进行轴承材料的研究和开发，针对有特殊工况要求的轴承，开发了多种新型金属材料及双真空冶炼工艺，如德国 SCHAEFFLER 公司基于 Cronidur30 高氮不锈轴承钢，开发出了 X-life 系列超长寿命轴承，在航天领域成功实现配套。针对真空、高温、耐腐蚀、防辐射等特殊工况，研制开发了 Si_3N_4 、 Al_2O_3 、 SiC 等陶瓷轴承材料，以及适合于高真空环境的 MAC 润滑油，大幅延长了轴承使用寿命。

国内部分关键部位轴承开始采用双真空冶炼材料，较以前材料质量有了大幅度提高，但现用轴承钢材的性能需要进一步提高，批次差异还需进一步控制。高氮不锈轴承钢、 Si_3N_4 、 Al_2O_3 、 SiC 等轴承材料已逐步应用于航天轴承产品中。

1.3 制造技术

航天轴承作为典型的精密机械产品，加工精度基本上要求达到微米级。国外企业加工设备的精度、自动化和智能化程度较高，多利用联线柔性化技术、关键共性过程集中控制技术，加工过程广泛采用自动控制磨削技术、主动测量技术和无损探伤技术；热处理普遍采用真空热处理和可控气氛保护技术，轴承零件脱碳少，硬度、组织均匀，最终获得的产品达到了高度的参数一致性。

从“十二五”以来，国内加工工艺和装备水平有了质的提升，但总体上与国外比还有一定的差距，如特种结构零件冷热加工工艺、高氮不锈钢和高强韧耐高温轴承钢的工艺还需要进一步试验研究和应用验证。

1.4 检测技术

国外在轴承质量控制方面，检测仪器齐全、先进，特别是 CT 无损检测技

术、非接触测量技术、多参数测量技术的大量应用，有效降低了材料、热处理、磨加工等缺陷引起的轴承失效问题，确保了产品质量和性能。

近年来国内航天轴承的检测手段在不断加强，高精度的通用检测设备可基本满足标准型轴承的尺寸、精度检测需要。但在批量无损检测、异形轴承专用检测、寿命预测等方面的检测手段还不健全，还难以满足下一代装备需求。

1.5 试验技术

国外企业非常重视轴承试验工作，开展了、滑油污染试验、高速打滑试验、超载试验、故障再现试验等各项性能试验，积累了大量的试验数据，为轴承设计、选材、工艺优化及合理选型与使用提供了重要依据。

近些年，洛阳轴承研究所有限公司等航天轴承配套优势单位的试验能力有了明显的增强，但还存在以下三方面问题：

- (1) 试验能力仍有不足，部分试验设备落后于试验发展需求；
- (2) 对轴承实际工况模拟度不够，验证不充分；
- (3) 重复性试验较多，基础研究试验少，且对试验数据分析深度不够。

1.6 应用技术

轴承性能的优劣约 1/3 与安装使用有关，若轴承在使用过程中应用不当，将导致轴承早期失效，达不到设计要求。国外企业拥有专业的轴承应用专家团队和完备的标准化体系，对轴承应用和失效分析技术的研究较为系统和深入，有效降低了轴承选型、安装和使用风险。我国许多主机单位长期视轴承为通用件，未系统考虑轴承在主机中的工作状态及产品性能需求，由于没有提供确切的工况和使用需求，致使轴承应用也出现较多问题。

2. 航天轴承关键技术

我国航天轴承技术已有较好基础，但面对任务需求仍需突破多项关键技

术，对照任务需求，梳理出当前和今后一段时间内急需发展的航天轴承关键技术。

2.1 多学科全周期一体化双向设计技术

轴承的高速性能、承载能力、寿命、力矩性能等，主要取决于轴承的设计技术。随着各种新型航天器的不断发展，对轴承的研制周期要求越来越短，精度、性能指标要求越来越严格，传统设计流程难以满足轴承的研制要求。国外通过各种 CAD 尺寸仿真—CAE 有限元分析—CAM 辅助成型及加工—VIRTUAL LAB 虚拟试验仿真构成的仿真系统，可以快速实现轴承零件尺寸、结构性能、模型制作、试验分析等的全过程仿真。通过仿真分析，可以在短期内发现轴承设计薄弱点，缩短研制周期，对提高轴承选材、结构参数优化、性能验证与分析能力发挥了重要作用。

2.2 轴承新材料研发与应用评价技术

2.2.1 耐高温陶瓷材料

氮化硅陶瓷材料与轴承钢相比具有低密度、低膨胀系数、高弹性模量、高硬度等特性，能够有效降低轴承由于润滑不良造成的影响，延长轴承使用寿命。此外，氮化硅陶瓷失效形式与轴承钢相同，均为疲劳剥落，因而，氮化硅陶瓷作为轴承滚动体材料被广泛使用。目前，国产氮化硅陶瓷球质量及可靠性水平较之国外产品仍存在短板，不能稳定满足主机使用要求，亟需完善高性能热等静压陶瓷滚动体技术研制基础，攻克国产热等静压氮化硅陶瓷滚动体的技术瓶颈。

2.2.2 多孔聚酰亚胺保持架材料

多孔聚酰亚胺保持架是由聚合物树脂经特殊工艺压制烧结成型，后将润滑油压入多孔材料。轴承运转时，保持架中润滑油溢出至表面，滚动体转动时将保持架表面润滑油转移到接触的滚道面上逐渐形成油膜，从而起到润滑

作用。美国圣戈班公司生产的 Meldin®9000 多孔聚酰亚胺,为各向同性材料,微孔特性优异,系统研究了该类材料的多维度指标,并建立了与不同服役工况适配的个性化指标体系。洛阳轴承研究所有限公司已研制出主要技术指标与 Meldin®9000 相当的多孔聚酰亚胺材料并应用于多型号航天轴承,在材料孔径的集中度上仍需要进一步提升。

2.2.3 固体自润滑保持架材料

固体自润滑保持架材料通常以自润滑性能优异的聚合物树脂为基材,如聚四氟乙烯、聚酰亚胺,添加增强及润滑改性材料制得的复合材料。固体润滑轴承通常采用在轴承工作面上制备的润滑薄膜并配以该类自润滑保持架的方式。轴承在运作时,滚道上的润滑薄膜起到初始润滑,滚动体与保持架接触碰撞,保持架材料形成的转移膜有序转移至滚动体上,继而转移到轴承滚道,实现长效可靠的自润滑。可以说,自润滑保持架材料转移膜的连续性、均匀性和稳定性直接决定了固体自润滑轴承的寿命及可靠性。随着轴承工况及寿命需求日益苛刻,急需要开展航天长寿命轴承适用的新型保持架材料的研制。近些年国外的研究报道较少,很难追踪到国外的材料及应用信息,需要结合主机需求,自主创新,开发出新型自润滑保持架材料,以满足长寿命高可靠性轴承之需。

2.3 接触润滑磨损状态分析与寿命预测技术

轴承接触磨损、润滑状态评价及寿命预测技术旨在采用深度学习算法在多源信息(振动、温度、功耗等)与轴承接触磨损及润滑状态之间,实现信息端到状态端映射关系智能学习,通过映射关系对轴承状态进行评价;采用不同个体、不同失效形式轴承寿命试验多源信息共享一个深度学习模型的方法,让模型从多序列样本中学到轴承接触磨损、润滑状态变化趋势,通过状态变化趋势对其服役寿命进行智能预测。

2.4 特殊复杂工况安全可靠评价与数据分析技术

航天轴承种类繁多、结构特殊、工况各异，许多轴承在安装形式、润滑结构、环境温度、加载响应等许多方面各自有特殊的工况特点，对应的试验模拟要求越来越高。需要集成并综合运用多种控制技术，实现轴承转速、载荷、供油温度、供油流量、环境温度等参数的自动控制并可实现混合编谱试验，最终具备全要素、多工况、全自动的高效高模拟性试验考核手段，形成航天轴承快速综合性试验评价能力。

2.5 快速响应柔性制造技术

航天轴承制造过程具有多品种、小批量、零部件通用化程度低，工件制造过程路线长、工艺条件复杂等特点，需要对制造工艺所有环节的产品质量进行监测和控制。基于在线柔性精密轴承尺寸测量与智能数控装备构成闭环反馈、基于轴承中试快速迭代制造管理平台实现实时数据采集分析与决策实现预控制生产，才能真正形成虚实迭代优化的智能制造模式，通过对质量的感知改变制造系统的状态，达到保障制造质量及其一致性的目的。

3. 航天轴承典型产品

3.1 火箭发动机低温轴承

涡轮泵是液体火箭发动机的“心脏”部件，轴承对涡轮泵转子起支承作用，其性能与可靠性对火箭发动机至关重要。洛阳轴承研究所有限公司对低温、重载、高速涡轮泵轴承的研究始于上世纪六七十年代，经过多年来持续攻关，完成了“长征”系列火箭发动机涡轮泵轴承的配套任务，保证了“长征”系列运载火箭的顺利研制与成功发射。

从国内外该领域的产品性能和技术水平来看：国际上，欧、美、日、俄（苏联）在火箭发动机研究方面处于领先水平，其轴承在设计、材料、表面改性、润滑、试验等技术形成了良性发展体系，稳定性和轴承寿命都领先于

国内现有水平。国内在低温、重载、高速轴承的共性技术方面需开展持续研究，才可以满足未来航天装备发展的需求。

3.2 姿控飞轮轴承及其组件

姿控飞轮用轴承组件是由主轴、空间轴承、补充供油系统、加载系统、旋转质量本体等组成，一般安装于航天器姿控系统，其作用是为航天器提供合适的控制力矩，校正航天器的姿态偏差，或完成某种预定的姿态调整，其运转性能直接影响着航天器姿控精度、有效载荷成像、通讯质量，一旦失效会对整星任务造成灾难性影响。

在该领域，目前国内外的技术差距，主要体现在在轨服役寿命及轴承精度方面，为满足长寿命航天器发展需要，应在长寿命、高精度动量轮及轴承组件设计、润滑、加工、检测、试验技术方面继续加快迭代速度，以保障我国未来航天装备的发展需要。

3.3 高精度超薄壁轴承

高精度超薄壁轴承是对超出 GB/T273.3 规定的“17”系列轴承截面系数的产品统称，是我国现役的激光通信卫星指向机构等航天装备的核心零部件。高精度超薄壁轴承国外实施限制对华销售甚至禁运。目前我国研制的高精度超薄壁轴承基本满足主机使用要求，但在产品加工精度、检测精度及评价技术方面均存在一定差距。

3.4 固体润滑轴承

空间机构、航天飞行器的各种运动机构等战略高技术领域，轴承作为关键支撑和旋转部件有时承受着高低温交替、高真空、强辐射、长寿命等恶劣工况。随着航天装备技术的快速发展，主机的使用工况日益恶劣，这对其所使用的固体润滑轴承也提出了更高的要求，特别是使用寿命和可靠性要求的大幅提高，例如，部分卫星对固体润滑轴承提出了延寿几十倍甚至上百倍的

要求，亟需对固体润滑技术进行更为深入的研究以满足航天事业发展需求。

4. 航天轴承发展趋势

相对于国外先进水平，目前国内航天轴承在寿命、可靠性、灵敏度、谱系化、耐环境性能、研发周期等方面的综合技术水平较国外有明显差距，在产品结构方面高性能产品占比少，产品型谱、标准体系等方面尚未开展系统研究。

未来航天轴承及技术的发展方向：（1）持续推进产品向“三化”方向发展，以最少的品种满足不同装备的多样化需求，有利于规模化生产和产品质量保障；（2）产品向轻量化、集成化及智能化发展，以满足主机产品更新换代的要求；（3）产品向高速、高精度、高可靠性、低摩擦、低振动及低噪音方向发展；（4）采用和发展计算机辅助设计（CAD）、计算机辅助制造（CAM）以及计算机集成制造系统/信息管理系统（CIMS/IMS）技术；（5）在轴承产品上采用现代高新技术，如新材料、表面改性技术等，进一步提升轴承寿命及可靠性。