

轴承关键共性技术研究现状和发展趋势

河南科技大学机电工程学院副院长 邱明

1 发展轴承关键共性技术的意义

轴承共性技术是指在轴承研发设计制造领域内已经或未来可能被广泛采用，研发成果可共享，并对轴承产业及轴承企业产生深刻影响的一类技术。轴承共性技术通常在整个轴承产业技术链条中处于基础性的地位，其发展对国家技术进步和轴承产业竞争力提升具有重要的支撑作用。目前我国轴承行业虽然取得了较大的发展，但和国际先进水平还有较大差距，具体体现在：自主创新能力薄弱，多数产品的研发仍然停留在经验设计上；轴承产品研发的投入明显不足，投入力度低于主机行业；关键核心技术缺失，重要技术装备领域关键配套轴承的一些设计研发技术还未完全掌握；多数关键轴承处于技术模仿、技术跟踪阶段，轴承精度、性能、寿命和可靠性达不到主机的要求。归根到底，导致目前我国轴承行业落后的原因是轴承产品研发技术基础薄弱，共性技术研发体系缺失，基础性和共性技术研究弱化。因此，为使我国轴承行业能够取得长足的进步，要大力发展轴承设计制造的关键共性技术。

2 亟需解决的几项轴承关键共性技术

2.1 轴承设计方法技术

(1) 轴承设计理论

轴承力学模型经历静力学分析模型、拟静力学分析模型、拟动力学分析模型及动力学分析模型等几个发展阶段。早期仅根据理想的运动状态和简单的运动关系建立静力学分析模型，很难准确预测和描述轴承运动状态。拟静力学分析模型相对完善，可有效预测滚动体转速、轴承疲劳寿命、轴承变形和刚度等运动参数，可基本满足工程需要，但不能分析轴承瞬态不稳定现象，也不能完整描述轴承动态性能。动力学分析模型不仅可有效分析轴承的载荷和转速随时间变化时的工作状态及滚动体和保持架的稳定性等，而且可更真实准确地描述轴承的动态和稳态运动，所以近些年动力学分析方法成为轴承设计理论的一项关键共性技术，拟动力学分析方法和动力学分析方法的研究和发展应该得到广大轴承科研工作者的重视。

(2) 减摩设计

在可持续发展的理念下，节能、节材、环保成为新的技术发展趋势，轴承的设计理

念已经从“加强型”设计转向了“减摩型”设计。减小轴承摩擦，除了可从特别重要的润滑方面（包括润滑剂、润滑方式及接触副的表面粗糙度）着手外，主要任务是减小属于轴承内在特性的滚动摩擦和滑动摩擦。轴承减摩设计的原则为：在保证轴承其他性能及使用寿命要求的前提下进行减摩设计，不能仅单纯追求减摩而严重影响其他性能、寿命及可靠性的实现，使轴承难以满足规定的使用要求。推动轴承减摩设计技术的发展能使我国轴承产业适应国际市场的需要。

(3) 仿真设计

虚拟设计是基于计算机建模和仿真的设计技术。它强调在产品投入生产之前，将产品的设计、分析、测试、制造等过程在计算机构造的虚拟开发环境中进行数字化模拟，并完成产品在设计研制阶段要解决的问题，即完成产品的概念设计、实体造型，并在虚拟出的产品上进行功能和产品工作性能的仿真，其结果用于修改设计。虚拟设计的优越性在于可以在设计阶段进行仿真分析，观察零件的变形过程和应力分布情况以及模拟零部件的装配过程，检查所用零部件是否合适和正确可靠性设计，从而节省设计成本，提高设计效率。推动轴承仿真设计的发展也是促进轴承共性技术发展的重要举措。

2.2 轴承性能研究

轴承的性能主要包括：振动、噪声、摩擦力矩、打滑特性、润滑与密封及其他特殊性能技术。

(1) 轴承振动、噪声性能

轴承振动和噪声是轴承性能的综合反映，因此轴承振动和噪声特性已经上升为轴承极为重要的性能指标。目前研究主要围绕轴承减振降噪的加工和测量方法、静音与超静音轴承技术开展。而静音与超静音轴承技术主要针对静音轴承异音测量技术、影响静音轴承批量生产的关键工序技术、初期噪声及噪声寿命技术、静音轴承钢研制与开发技术、低噪声（静音或超静音）轴承制造与检测技术等开展研究。

(2) 轴承摩擦力矩性能

轴承摩擦力矩是各种因素对轴承旋转构成的阻力矩，是评价轴承运转灵活性及使用寿命的重要性能指标，也是轴承摩擦发热的直接原因。目前研究轴承摩擦力矩特性主要有：滚动轴承摩擦力矩的乏信息模糊预报、陀螺仪框架灵敏轴承摩擦力矩影响因素分析、航天仪表轴承极低速下保持架摩擦力矩分析、轴承内部几何参数对摩擦力矩的影响等。

(3) 轴承打滑特性

滚子轴承在工作过程中，由于转速、载荷、温度等因素的影响，滚子与滚道之间会

出现不同程度的打滑现象。开展滚子轴承打滑试验研究，掌握滚子与滚道之间的打滑特征和规律，围绕圆柱滚子轴承滚子打滑机理、圆柱滚子轴承启动阶段滚动体打滑特性、加速工况下高速圆柱滚子轴承打滑规律、滚动轴承局部缺陷打滑影响因素、防止滚子打滑损伤的表面处理等进行研究。

(4) 轴承润滑与密封特性

润滑不仅能减小摩擦和磨损，而且有利于轴承散热（油润滑时）、吸振、缓冲、防锈、密封（脂润滑时）及减小接触应力。密封的目的是防止灰尘、水分进入轴承，并阻止润滑剂流失。因此，润滑和密封的质量对滚动轴承的实际使用性能会有很大影响。目前主要围绕减摩密封材料与密封性能、润滑剂动态性能的评价方法开展研究。

(5) 特殊性能

随着主机工况越来越苛刻，主机对轴承提出更特殊的要求。如机器人减速器薄壁轴承具有的柔性特性对机器人动态性能、承载能力及运动精度的影响；为了避免轴承电蚀，高速动车组牵引电机轴承需具有绝缘特性；高温、腐蚀环境中需开发高温、耐腐蚀轴承等。

2.3 轴承精度研究

(1) 轴承滚道油石超精技术

油石超精技术可提高滚动轴承的公差等级。超精不仅可以使滚子和滚道带有微量凸度，同时轴承滚道粗糙度的超精精度可达到高于精磨后的精度。此外，油石材料、厚度、长度、高度、装夹也会对轴承的精度产生影响。

(2) 车削加工对轴承精度的影响

车削加工时，轴承套圈的夹具以及加工过程中直接参与轴承表面成型运动的刀具，都会对轴承精度造成影响。轴承加工时夹具夹持力的大小直接影响加工后轴承的精度，安装和拆卸轴承应注意使用适当的工具和方法。目前主要围绕滚动轴承安装、拆卸与调整对轴承旋转精度影响以及被加工轴承夹持方法对轴承旋转精度影响开展研究。

(3) 磨削加工对轴承精度的影响

滚动轴承的套圈滚道或沟道是其主要工作和承载表面，常常会因“应力集中”等现象使滚道两端出现疲劳剥落而导致滚动轴承过早的疲劳失效，因此滚道的几何形状和精度对轴承的性能和使用寿命影响明显，而磨削加工往往是作为滚动轴承套圈滚道几何精度的终端环节。目前主要围绕改善磨削加工工艺，即通过建立磨床的运动学模型，并对磨床主要机构的运动进行分析，排除设计中的不合理结构和因素；通过对运动部件的位

移、速度、加速度以及温度的数据进行分析，得到合理的磨削加工参数和调整方案，从而提高磨削轴承的精度和效率。

2.4 轴承的寿命与可靠性研究

(1) 轴承修正寿命研究

按照理想工况，当轴承被正确的选择、使用、安装和维护时，它们的服务寿命可通过 Lundberg-Palmgren 寿命理论进行预测。然而，通常轴承工作环境和理想环境存在较大差别，考虑到工作环境差异，应提出一个随工况变化的评估轴承寿命方法，即修正寿命方法，在此基础上，可引入寿命修正系数。目前，已经开展了不同游隙、材料、温度、润滑条件下，轴承寿命修正计算方法的研究。今后主要围绕轴承寿命修正系数、轴承损伤累积修正系数和轴承寿命修正计算软件开发，以及污染条件下轴承修正寿命开展研究。

(2) 轴承剩余寿命研究

轴承剩余寿命的预知不仅影响轴承维修策略的制定，而且可能造成主机灾难性事故。因此，有效地预测轴承的疲劳剩余寿命有助于了解主机的健康状态并制定优化的维修策略。现今主要围绕轴承剩余寿命预测与评估，开展了以非线性动力学为基础，轴承缺陷生长机理相关研究，以改进 EMD 方法作为球轴承性能退化特征量的提取手段，开展轴承疲劳剩余寿命分析，并在缺陷微观失效模式检测分析的基础上，结合 Paris 疲劳寿命预测理论，从失效机理出发研究轴承的疲劳剩余寿命预测方法。

(3) 轴承可靠性研究

滚动轴承在运行过程中起着承受载荷、传递载荷的作用，其可靠与否直接影响设备整体的性能，一旦发生故障，将使主机产生巨大损失。现今主要围绕基于无失效数据的轴承可靠性研究、基于状态振动特征的空间滚动轴承可靠性评估方法等开展研究。可通过置信度条件下轴承寿命的可靠度分析，确定可靠度和置信度的关系，再给定置信度和可靠度的额定寿命修正系数，最后得到验证置信度和可靠度的寿命试验方法。

3 轴承共性技术未来发展方向及展望

随着国家对轴承行业的日渐重视，轴承行业的投入越来越大，轴承相关共性技术一定会得到长足的发展。加速主机产品的更新换代，推动智能轴承配套的电气化技术协调发展，要求轴承可靠性设计技术、轴承虚拟设计技术的全面发展。同时未来也要大力推进计算机仿真技术及现代设计理论的应用，改变传统的设计方法，由轴承静力学、拟静力学向拟动力学、动力学方向发展。

未来我国轴承产品要着重向模块化、智能化、绿色化方向发展。当前随着高档数控

机床、电力装备、工业机器人及智能装备、航空装备、船舶和海洋工程装备、节能与新能源汽车等高端轴承应用领域实现重大突破，以及数字化网络化技术的飞速发展，必定推动轴承产品的智能化发展。从轴承运行状态远程自动检测，故障自动诊断和报警的轴承单元发展为服役状态自动控制的智能轴承单元，从而从根本上提高产品功能性能、可靠性和市场竞争力。

模块化也是未来轴承的发展方向，推动单元化的相关共性技术急需解决。在汽车领域，轿车轮毂轴承已从单一零件发展到单元化，进而发展到模块化。例如未来电动汽车用驱动系统将实现模块化和系统化，整合轮毂轴承、电动机和减速机的电动轮毂电动机，集成各种智能化传感器和数字控制系统的电动轮毂电动机系统。

此外，节能、绿色环保理念逐渐引入机械行业，轴承产品的绿色化也是未来的发展趋势。轴承运转时，低摩擦损耗、低摩擦力矩、轻量化、小量化、低噪音等性能对节能、绿色环保具有重要意义。因此在未来几年内要大力推进轴承低摩、轻量化、降噪等关键共性技术的发展。

* 邱明：博士，教授，博士生导师，河南科技大学机电工程学院副院长