

滚动轴承产品技术发展的现状与方向

杨晓蔚^{1 2 3}

(1. 洛阳轴研科技股份有限公司, 河南 洛阳 471039; 2. 中浙高铁轴承有限公司, 浙江 衢州 324000;
3. 高端轴承摩擦学技术与应用实验室, 河南 洛阳 471003)

摘要: 以全球轴承工业的视野, 截取 21 世纪以来近 20 年的历史跨度, 在系统分析世界著名轴承公司主导产品的基础上, 从技术和产品 2 个层面阐述了轴承产品技术发展现状, 从减摩化、轻量化、单元化、智能化和鲁棒性等不同维度解析了轴承产品技术发展方向, 并对未来总的发展方向及具体发展议题进行了展望。

关键词: 滚动轴承; 产品; 技术; 发展; 现状; 方向

中图分类号: TH133.33 **文献标志码:** B **文章编号:** 1000 - 3762(2020)08 - 0065 - 06

Current Situation and Direction for Technology Development of Rolling Bearing Products

YANG Xiaowei^{1 2 3}

(1. Luoyang Bearing Science & Technology Co. Ltd. Luoyang 471039, China; 2. Zhongzhe High-Speed Railway Bearing Co. Ltd., Quzhou 324000, China; 3. National United Engineering Laboratory for Advanced Bearing Tribology, Luoyang 471003, China)

Abstract: From the perspective of global bearing industry, intercepting historical span of nearly 20 years since the beginning of 21st century. Based on systematic analysis of leading products produced by world-renowned bearing companies, the current situation for technology development of bearing products is elaborated from technical and product levels. The direction for technology development of bearing products is analyzed from different dimensions of antifriction, lightweight, unitization, intelligence and robustness. The future general development direction and specific development issues are prospected.

Key words: rolling bearing; product; technology; development; current situation; direction

滚动轴承(以下简称轴承)产品技术,是指将轴承作为一整类产品,其所包含的技术内涵或体现的技术特性,如高精度、高转速、低噪声、高载荷容量、长寿命与高可靠性等。产品技术的背后,是具体的设计技术、材料技术、润滑技术、密封技术等,这些都属于产品技术的支撑技术^[1]。

对于轴承产品技术的方向性、趋势性、潮流性的判断,需要放在一个较大的时空概念下才能更好地审视、洞察和判断,否则只是短期时段、局部领域的昙花一现的个案,而构不成引领性的风向标。因此,必须以全球轴承工业的视野,截取一个较长的历史跨度,系统分析研究“头部企业”(世界著名轴承公司)的主导产品,才可以梳理出脉络比较清晰的技术发展方向。

1 轴承产品技术发展现状

1.1 技术进步与突破

20 世纪八九十年代,轴承产品技术最突出的主流方向是加强型、低噪声和长寿命,另外在高精度方面,除了 P4(高精密级)、P2(超高精密级)的标准公差等级及 SP,UP,P2A 等特殊公差等级之外,又提出了 NRRO,即“非重复跳动”指标。而进入 21 世纪以来的二十年间,轴承在追求高性能与长寿命方面,又达到了新高度。

1.1.1 高性能

转速方面,重点聚焦于使用方便、维护简单、绿色环保的脂润滑轴承,其 $d_m \cdot n$ 值已达到 $2.0 \times 10^6 \text{ mm} \cdot \text{r}/\text{min}$,而过去的脂润滑轴承的推荐值仅为 $0.6 \times 10^6 \text{ mm} \cdot \text{r}/\text{min}$ 。

收稿日期: 2020 - 03 - 19; 修回日期: 2020 - 03 - 25

承载能力方面,基本上各类型轴承都普遍有所提高,如轴承额定动载荷计算公式中的 b_m 系数,许多公司又做了调整,以应用最为广泛的深沟球轴承为例, b_m 系数在原1.3的基础上又提高了15%。

耐受温度方面,轴承常规的适用温度为 $-40 \sim 120\text{ }^\circ\text{C}$,而现在对有些通用轴承耐受低温极限要求已到 $-55\text{ }^\circ\text{C}$ (此温度下,部分轴承零件材料将会面临低温脆性,即“冷脆”的风险)。

低噪声方面,轴承类型已从深沟球轴承、圆柱滚子轴承等扩展到对使用要求一直比较“粗放”的调心滚子轴承。

摩擦力矩方面,已从精密仪器轴承延伸到汽车轴承、家电轴承、风电轴承、工业齿轮箱轴承等。

轴承在很多应用场合,都要求具备“全能”的技术特性。上述的高性能,体现在具体的轴承上很多都是叠加的,也即综合性能要优良卓越。

高性能是以相关技术的显著进步为基石的,如软件方面有轴承CAD技术的普及化,有限元及仿真设计分析技术的下沉化,摩擦学应用技术的深度化等,还包括材料、装备等各个方面硬件的有力支撑。

1.1.2 长寿命

著名品牌的电机轴承、机床轴承等,疲劳寿命已足以满足要求而基本无需考虑。电机轴承多采用密封结构,因此主要以润滑脂寿命为判断准则;机床轴承则主要以磨损寿命或精度寿命为失效依据。

汽车轴承:轮毂、变速箱等关键部位轴承,要求设计寿命达到 $10 \times 10^5\text{ km}$ 甚至 $12 \times 10^5\text{ km}$ 。

铁路轴承:SKF最新推出的轴箱轴承,其大修(分解检修)周期可由常规的 $10 \times 10^5\text{ km}$ 提高到 $17 \times 10^5\text{ km}$ ^[2]。

盾构机主轴承:要求无故障使用寿命10 000 h或10 km。

风电轴承:使用寿命要求20年,这可能是迄今为止对轴承寿命要求最长的应用领域。

轴承寿命的显著提高,贡献最大的首先是原材料的技术进步,如日本、欧洲和美国的高纯净度真空脱气轴承钢,达到了特殊冶炼方法的电渣重熔钢或真空电弧重熔钢的疲劳寿命水平,包括特殊材料(如高温钢M50NiL、高氮钢Cronidur30等)及特殊热处理(如纳米级贝氏体淬火、高残余奥氏体热处理等)的应用;其次,润滑(如长寿命润滑剂)、密封(如高性能密封结构与材料)、结构设计

(如加强型优化设计)、精密加工(如高尺寸形状精度与低表面粗糙度的磨削超精)、质量控制(如超声波无损检测)等也发挥着重要作用。

在长寿命的技术背景中,一些基础性研究成果所带来的变化及影响相当深刻。

在轴承寿命概念方面,经过早期(无限寿命)→长期(有限寿命)→近期(无限寿命)的演进又一次确立了轴承具有“无限寿命”的特性,即通过几十年大量的试验数据表明,轴承存在一个“疲劳极限”,只要低于这一应力值或载荷值,轴承将不会发生疲劳破坏。这一概念彻底推翻了半个多世纪以来存在于经典理论暨教科书中的说法:无论怎样设计合理、制造精良、安装正确、润滑良好、维护得当,轴承都不可能永远运转下去,最终总会因为疲劳而失效。

在轴承疲劳机理方面,欧、日、美等轴承工业发达国家由于轴承钢的纯净度水平已经达到了相当高的程度,轴承疲劳机理已从第1种的“内部起源型为主”转为第2种的“表面起源型为主”。另外,白色组织(WEA)作为第3种疲劳机理,也已获得广泛共识。

在轴承寿命计算方面:1)在国际标准ISO 281:2007《Rolling bearings – dynamic load ratings and rating life》中,基于最小寿命理论给出了大于90%可靠度的新的 a_1 修正系数,将最高可靠度由原99%扩展至了99.95%,基于SKF的研究成果,引入了“疲劳载荷极限” C_u 及“轴承寿命计算系统方法”的 a_{ISO} 寿命修正系数;2)SKF继1989年提出修正轴承寿命模型后,又于2015年提出了广义轴承寿命模型,将表面疲劳与次表面引发疲劳分离开,引入了表面疲劳模式。

在轴承剩余寿命评估方面,NSK首创了“疲劳度指数”这一概念,通过X射线对材料中马氏体半高宽与残余奥氏体的变化来推测轴承剩余使用寿命。Schaeffler则基于实际载荷谱,即以名义额定寿命减去当前已运行时间来计算轴承剩余使用寿命。

1.2 产品升级与创新

1.2.1 通用轴承普遍实现了升级换代

通用轴承也称为标准轴承,对其的一般认知似乎是通用性较强但技术含量不高的轴承,但国际著名轴承公司在21世纪开始,几乎同步进行了升级换代,如SKF的Explorer(探索者)轴承(1999年起)及其升级版(2011年起),Schaeffler的X-life轴承(2003年起),NSK的HPS(High Perform-

ance Standard) 轴承(2004年起),NTN的ULTAGE(安特杰)轴承(2004年起)。

这些通用轴承的升级换代,大多公司实现的是“垂直换代”,即完全替代原“标准轴承”,或者说是“重新定义了标准轴承”。改进的技术内容,主要是进一步“提高了轴承的承载能力与寿命,减小了轴承的摩擦力矩(即提高了轴承转速),降低了轴承振动噪声”等综合性能:如NSK的HPS调心滚子轴承寿命提高了2倍,极限转速提高了20%以上;NTN的ULTAGE深沟球轴承,以用于高速伺服电动机为例,润滑脂寿命提高了约5倍,转速提高了2倍以上,噪声又降低了3 dB(A)。

通用轴承量大面广,其技术性能的普遍提高,相当于从底部提升了轴承产品的整体技术水平,实际意义非常巨大。

由于通用轴承技术质量水平的大幅度提高,“通用轴承专用化”的范围也越来越扩大,如上述升级产品在许多专用轴承领域都得到广泛应用,且表现优异。通用轴承专用化这一现象的泛化与增强,既有利于轴承企业的批量化组织生产,又有利于轴承用户的低成本使用维护,将大大促进技术性与经济性的相得益彰。

1.2.2 专用轴承进一步创新提升

专用轴承直接面向配套主机,需要满足各种苛刻的个性化要求(包括极端工况和极限性能),集成着许多先进甚至是尖端技术的应用,是轴承工业聚焦于性能提升与科技创新的核心产品载体。

1) 机床主轴轴承。以角接触球轴承为代表,SKF推出有CD、CE和FB3种结构形式,分别适用于重载、高速和超高速,实现了工况的全覆盖;Schaeffler在RS、HS系列的基础上,又开发了M系列,其结合了前2个系列的优点,且可靠性进一步提高;NSK开发了全新一代“robust”系列轴承,具有低温升、抗咬合、长寿命等综合优良性能,其中用于超高速轴承的SHX耐热钢,比航空发动机主轴轴承用M50钢更抗咬合、耐磨损且具有更优的疲劳寿命^[3]。

2) 电机轴承。Schaeffler的新一代C型深沟球轴承,减小摩擦力矩35%,降低噪声50%,宣称是“与1883年磨球机的发明(作者注:即现代轴承工业发祥的标志)相提并论的历史里程碑”;NSK的GR系列深沟球轴承,具有低能耗、平顺静音的技术特点,适用于空调器、吸尘器、CPU冷却风扇等

高效能电动机。

3) 汽车轴承。乘用车用第3代轮毂轴承单元逐步成为市场主导产品。NSK开发的用于皮卡、大型SUV和商用车的第2.5代圆锥滚子轮毂轴承单元,通过集成化及低摩擦技术的应用,进一步提高了汽车的可靠性和燃油效率;SKF的轻型汽车轮毂轴承单元,凸缘部位以铝合金代替钢材,不仅质量减轻30%,而且在腐蚀性环境和宽温域下仍能保持其刚度和耐久性;Schaeffler的重型卡车用免维护(无需更换密封件和润滑脂)圆锥滚子轮毂轴承单元,质保期 50×10^4 km,设计寿命 100×10^4 km,终生免维护,而先前的第2代轮毂轴承单元的设计寿命仅要求 30×10^4 km, 50×10^4 km;JTEKT的“高温和高速用增压器用轴承单元”,采用耐高温材料的套圈、保持架和陶瓷滚动物体等,在工作温度350℃下,转速可达250 000 r/min,而传统的增压器用轴承只能在工作温度150℃下达到50 000 r/min。

4) 铁路轴承。NSK新研发的双列圆柱滚子轴箱轴承,适用于设计时速320 km/h的E5系列高速列车,而原来仅能满足设计时速为275 km/h的E2、E3系列列车^[4];SKF、Schaeffler、NTN及NSK提供于中国高铁动车组的轴箱轴承,均能满足列车运营时速200~350 km/h且具有长交路、高密度、宽温域、复杂地质条件的苛刻要求;Schaeffler最新推出的牵引电动机用J20G绝缘轴承,套圈喷涂陶瓷,耐受击穿电压达到DC5 000 V(过去一般为DC1 000 V,最高为DC3 000 V),是目前国际上最领先水平。

5) 风电轴承。风电轴承是近20年来发展最为迅猛的专用轴承,创新产品主要集中在主轴轴承和增速器轴承上。如TIMKEN的主轴用TDI型双列圆锥滚子轴承,可吸收轴向载荷,减少齿轮箱的磨损即延长其使用寿命;SKF的主轴用“鸚鵡螺”双列圆锥滚子轴承单元,可以方便连接,减轻重量,减小摩擦,提高风机运行的可靠性。TIMKEN的增速器行星轮集成式柔性销组件,将齿轮与轴承外圈一体化,杜绝了外圈“跑圈”的可能性,同时提高了轴承的承载能力,柔性销结构还改善了齿轮的啮合性能;Schaeffler等公司的增速器中高速端轴承,采用氧化发黑涂层(黑化)处理,不仅可以减轻高速轻载打滑损伤,耐受腐蚀和改善润滑剂表面的附着力,而且可以有效防止白色组织裂纹的发生,其中NSK采用自主研发的AWS-TF

钢 耐白色组织寿命提高7倍 耐表面剥落寿命提高3倍 韧性则提高了2倍。

6) 其他专用轴承。轧机轴承——NTN的轧辊用密封四列圆锥滚子轴承防水性能和承载能力提高至2倍,使用寿命改进至1.8倍。矿山机械轴承——TIMKEN的DuraSpe $\times \times$ 功率密度系列圆锥滚子轴承用于水泥立磨机,承载能力提高了28%,使用寿命提高至原轴承的2倍^[5]。振动机械轴承——NSK的CA- VS3, CA- VS4调心滚子轴承,与原CA- VS轴承相比,寿命最高可增长至2倍,额定动载荷提高25%。

这一时期,在细分市场上形成较大增量的专用轴承有风电轴承、机器人轴承、新能源汽车轴承、高铁轴承以及医疗器械轴承等,其中大多都依赖于中国市场的快速发展。而风电设备的大功率化(8 MW, 10 MW, 12 MW 甚至更大)、新能源汽车驱动电动机的高速化等发展趋势,也给关键部位配套轴承提出了不小挑战,各种解决方案的创新也极大地促进了轴承产品技术水平向高阶跃升。

2 轴承产品技术发展方向的分析

轴承产品技术近一时期的主要发展方向,若按不同维度进行解析,主要可凝练概括如下。

2.1 减摩化

在全球经济社会绿色发展的大趋势下,减摩化(也称为节能化等)已成为轴承产品技术发展方向中最重要的主题。NTN直接声称轴承为“eco-products”即生态产品。SKF推出的E2深沟球轴承,即使与其探索者轴承相比,摩擦损耗又降低了至少30%以上;其开发的X-Tracker低摩擦汽车轮毂轴承单元,与传统轮毂轴承单元相比,摩擦力矩减小25%,以在中型车上的应用为例,可减少1.3 g/km的CO₂排放。NSK的GR系列深沟球轴承,摩擦力矩减小40%~50%。JTEKT持续开发的低摩擦力矩圆锥滚子轴承,从1990年到2015年,共经历了4代,从第1代到第4代,摩擦力矩与标准轴承相比降低幅度依次为10%、20%、50%和65%,其中第3代LFT-Ⅲ的成果曾获日本摩擦技术奖,第4代LFT-Ⅳ则被称为“下一代超低摩擦力矩圆锥滚子轴承”^[6]。NSK更是从1980年开始至2017年,将圆锥滚子轴承不断升级迭代到了第6代,摩擦力矩累计降低了70%左右^[7]。

2.2 轻量化

轻量化既是节能化的一个实现路径,本身还

具有节材的价值。现代机械设计的目标函数中,轻量化往往是一个核心指标,尤其是对于航天、航空飞行器而言,追求减轻质量已到了按“克”计量的程度。汽车轻量化也是其关键技术之一,特别是对于新能源汽车的“续航里程焦虑”,除了不断提高动力电池的能量密度之外,整车实现轻量化以降低能耗就是另外一条“逆向思维”的解决路径。轴承本身不仅在做轻量化的贡献,而且使得配套的驱动电动机、变速箱等总成部件也可以由于紧凑化而进一步轻量化,成效更为显著。

轻量化产品比较突出的有NTN开发的微型汽车用超轻轮毂轴承单元,仅重1.0 kg,为“世界最轻”的汽车轮毂轴承单元^[8];减速机用角接触球轴承,与原产品相比,径向、轴向尺寸分别减小30%和25%,质量减轻55%。SKF轻型轮毂轴承单元总质量减少约30%,而性能与可靠性仍与原产品相当。

本身自带轻量化特征的轴承,如滚针轴承,具有替代其他类型轴承的独特优势,如NSK自动变速箱用密封冲压外圈滚针轴承,壁厚仅1.5 mm,为“世界最薄”,可替代原用滑动轴承(即衬套)。随着转速等“短板”性能的改善,滚针轴承的拓展空间将会越来越大。

现代材料、润滑及密封等技术的显著进步,使轴承寿命大大增长。换言之,在同样使用寿命要求下,可以用更小规格的轴承替代原尺寸较大的轴承——这些也是轴承实现轻量化的“开放型”思路,而不仅仅局限于在轴承外形尺寸上“做减法”。

2.3 单元化

轴承产品的组件化和单元化并不是一个新鲜事物,如早期推出的第1、2、3代汽车轮毂轴承单元,第1、2代汽车离合器轴承单元,计算机硬盘驱动器主轴轴承单元,洗衣机轴承单元等,而后期又陆续开发了第4、5、6代汽车轮毂轴承单元,免维护重型卡车轴承单元,汽车涡轮增压器轴承单元,铁路轴箱轴承单元,机床主轴轴承单元及滚珠丝杠组配轴承单元,工程机械行星轮滚针轴承单元,风电主轴双列圆锥滚子轴承单元等。由于农业机械要求维护方便、更换简单,轴承单元化成为一种很好的解决方案,如SKF和Schaeffler开发出了多种播种机圆盘轴承单元,联合收割机逐稿器振动曲轴用轴承单元,振动筛驱动和过桥输送机构的情轮轴承单元,免维护犁盘轴承单元等,应用领域不断扩展,类型品种不断增加。

需要特别指出的是,轴承产品单元化是一个很好的发展方向,但不可泛化与滥用,为单元化而单元化,而不是面向实际应用。典型案例莫如第4代汽车轮毂轴承单元,其是将内、外圈带凸缘的轮毂轴承与等速万向节集成于一体,形成了连接与传动的两大功能,创意非常好,但从提出到现在已经过去了20多年,商用的例子极少。深究其根本原因,就是违背了机械设计中最基本的可靠性准则,将轮毂轴承和等速万向节2个易损件结合在一起,使用可靠性大大降低,而且更换成本大大提高(2个部件分置时哪件坏了更换哪件,集成后无论哪件损坏都需整体更换)。第5、6代汽车轮毂轴承单元实际上也存在相同的问题,注定在商用化道路上比较艰难。因此,开发轴承单元时,不仅要从结构和功能上进行构思,更要从使用性能上,尤其是可靠性、维修性、经济性上加以综合考虑,否则市场将会给出最好的答案。

2.4 智能化

智能轴承的雏形是20世纪80年代开始面世的“带ABS防抱死系统传感器的汽车轮毂轴承”,因而最早被称为“带传感器轴承”。之后,逐渐扩展应用至很多领域,如铁路、风电、机床、机器人、伺服电动机、电动汽车及摩托车等。目前,在铁路与风电行业中,智能轴承应用比较突出。这是由于铁路运输要求高可靠性与高安全性,对其运行状态必须随时监控,采用智能轴箱轴承及智能牵引电机轴承等可方便满足这一使用需求;而风电场一般都地处偏远,人工巡检非常困难,采用智能轴承,对偏航、变桨、主轴、齿轮箱、发电机等关键部位进行远程监控,能很好地解决这一应用场景中最大的“痛点”问题。

智能轴承最基本的监测参数是温度和振动,更先进的还有转速、转向、位置、开关、应力、应变、载荷、扭矩等,相关功能也在不断扩展,如SKF在2013年发布的洞悉(Insight)轴承,是一个“能够实时进行轴承状态信息无线传输的集成式自供电传感器套件”,其宣传语为“轴承状态监测领域的突破性创新”“领先实现了轴承作为机械‘大脑’的梦想”。洞悉智能轴承的关键技术包括微型化、自供电、简易性和智能组网,功能强大。

智能轴承的形态一般是直接在轴承上内嵌或外挂传感器,其中内嵌式更符合智能轴承本身成为一个完整产品的定义,因此几大国际著名轴承公司,如SKF、Schaeffler、NSK、NTN等均重点致力

于此类产品的自主研发。Schaeffler推出的一款VarioSense Bearings智能轴承另辟蹊径,其形态是“标准轴承+传感器集束”,即轴承本身的外形尺寸与结构不变,而与之组合的传感器集束则按模块化方式配置多种不同的传感器。这种将智能轴承打造成一款“标准化产品”的创意具有工业化思想,市场应用前景广阔。

若将带传感器的轴承称为“智能轴承1.0”的话,目前则已经进入了“智能轴承2.0”时代,即“从感知到执行”,如搭载有微电动机等“执行器”的智能轴承,可以实现状态感知、信号采集、数据传输、运算分析、状态控制的全闭环处理。

SKF在2014年与2018年出版的最新中、英文轴承样本上,智能轴承已成为“封面产品”,这从另一个侧面预示着其扮演主角的高光时刻即将来临。

2.5 鲁棒性

robust或robustness的音译是鲁棒性,意译则是抗变换性、健壮性、稳健性、耐受性等,在整个工程技术界都是一个出现较晚的词汇,导入轴承工业领域时间更短,是一个直到现在仍比较生疏的冷僻概念,但近来却越来越成为“高频热词”。如Schaeffler的X-life圆柱滚子轴承用MPAX黄铜实体保持架MPAX就采用了“鲁棒性设计”(robust design),以更加耐受振动及冲击载荷,并适用于高速运转;NSK最新推出的机床轴承就直接称为“robust”系列,不仅耐烧粘,而且具有耐磨损、抗疲劳等其他突出性能。SKF对压缩机与泵类轴承的设计目标之一,就是提高其耐受非理想工况下的鲁棒性。NTN针对风电齿轮箱轴承,“增强可靠的鲁棒性定制方案”成为技术准则。对于工程机械与农业机械用轴承,具备鲁棒性已成为基本要求,类似的这些“非道路车辆”,作业环境更为复杂苛刻(颠簸振动、尘土泥水、严寒酷暑),因此要求配套轴承必须具有很强的适用性和耐受性。

2.6 其他方面

除了上述几个方面比较突出之外,加强型、低噪声等仍是轴承产品技术发展的重要方向,尽管技术已经成熟,基本上达到了目前研发与制造手段所能企及的顶端,但一直还在持续提高。

3 轴承产品技术未来发展方向的展望

将目前的轴承产品技术发展方向与现代制造装备产业的未来发展趋势相结合,可以对未来做

出如下展望。

3.1 总的发展方向

在轴承“精度、性能和寿命”三大特征技术质量中 精度基本已置顶,可以满足现阶段及可见未来的需求,而高性能与长寿命则是轴承产品技术发展追求的永恒方向,似乎没有止境。

3.2 具体发展议题

1) 节能减排是国际社会应对环境污染、气候变化的广泛共识与一致行动,轴承减摩化将不断升级。

2) 在高速化成为提高电动机(特别是新能源汽车驱动电动机)、压缩机等动力机械功率密度的主流趋势推动下,轴承速度性能将进一步提升。

3) 鲁棒性将扩展成为许多轴承的基本技术要求。

4) 智能轴承使简单机械都可以实现数字化和物联网,因此,智能轴承被称为是“与工业 4.0 无缝对接的产品”,这一言简意赅、直达本质的定义,预示着智能轴承具有广阔的发展空间,而内嵌式、微型化、多参数、多功能无疑是其最主要的技术特征。

5) 可同时承受径向、轴向联合载荷的圆锥滚子轴承,径向截面小,特别适用于轻量化发展趋势的滚针轴承以及 18,19 尺寸系列的深沟球轴承、角接触球轴承等,将会继续扩大其应用。

6) 随着方便运维的密封轴承更广范围的渗透,高性能(长寿命、低噪声、宽温域、环保型等)润滑脂的研发仍将是一个持久的“热点”。

7) 保持架长期处于轴承研究中的“薄弱环节”随着对其在轴承性能提升中制约作用的认识不断深化,关于新型保持架的设计、材料及加工技术研究将保持较高的活跃度。

8) 导入表面疲劳模型的轴承寿命理论,不久将可能成为新的轴承寿命计算准则,纳入国际标准。

9) 基于大数据应用和模型算法的完善,轴承剩余寿命的预测将会更加精准化,并走向实用化与工具化。

参考文献:

- [1] 杨晓蔚. 滚动轴承产品技术发展状况[J]. 轴承, 1997(1): 2-8, 45.
- [2] SKF Annual report 2016 [R]. Sweden: SKF, 2016.
- [3] NSK Super Precision Bearings [Z]. Japan: NSK, 2003.
- [4] NSK. Shinkansen axle cylindrical roller bearings for E5 series bullet train [J]. Motion & Control, 2015(25): 51-52.
- [5] 铁姆肯公司成功案例集锦 [Z]. America: Timken, 2010.
- [6] JTKET. Development of next generation low friction torque tapered roller bearing(LFT-IV) [J]. JTEKT Engineering Journal, 2017(1014E): 69-73.
- [7] NSK. Low-friction technology for tapered roller bearings [J]. Motion & Control, 2018(29): 51-59.
- [8] NTN. Ultra-light GEN3 hub bearings [J]. Technical Review, 2004(72): 87.

(编辑: 钞仲凯)

《滚动轴承质量检验》依据国家和行业的有关轴承质量的最新检验标准(共70多个)以及企业的实际检验情况,系统介绍了轴承原材料各项目检验,并按照最常用的深沟球轴承和汽车配套用圆锥滚子轴承的加工顺序,依次介绍了轴承零部件(套圈、滚动体、保持架)的冷、热加工各道工序检验和成套轴承的成品检验,还详细介绍了这些检验的检测项目、检测方法和判断标准。

中国计量出版社出版,每册定价38元,邮寄费10元。需要者请与洛阳轴承研究所有限公司技术资料发行室 **李娜** 联系。

电 话: 0379-64881150