

# 智能轴承关键技术及发展趋势\*

朱永生, 张盼, 袁倩倩, 闫柯, 洪军

(西安交通大学现代设计及转子轴承系统教育部重点实验室 西安, 710049)

**摘要** 智能轴承是具有自感知、自决策及自调控功能的轴承单元,是高端轴承发展的主要方向。首先,分析了智能轴承的特点,总结了智能轴承的国内外研究进展和发展动态,认为目前智能轴承技术尚处在初级阶段,自决策和自调控功能尚不成熟;其次,探讨了智能轴承关键技术,包括传感器技术、自供电/无线供电技术、信号无线传输技术、轴承状态智能评估及智能诊断技术以及轴承状态智能调控技术;最后,讨论了智能轴承系统化、监测信息多样化及智能化的发展趋势。

**关键词** 智能轴承; 传感器轴承; 状态监测; 状态调控

**中图分类号** TG17; TH133

## 引言

轴承是回转支撑单元的核心零部件,被誉为回转支撑系统的“心脏”,广泛应用于航空航天、高铁与汽车轮毂、大型转子及精密机床等各个领域,其发展水平的高低往往代表或制约着一个国家机械工业和其他相关产业的发展水平<sup>[1]</sup>。我国高度重视高端滚动轴承的发展,推出了一系列支持政策,如《国家中长期科学技术发展规划纲要(2006—2020年)》、《装备制造业调整与振兴规划》(国务院,2009年)、《智能制造“十二五”专项规划》(科技部,2012年)及《工业强基专项行动》(工信部,2014年)等,特别是2015年国务院发布的制造强国战略行动纲领《中国制造2025》,重点强调要强化高性能滚动轴承等工业基础件研发能力。智能化是现代工业的发展趋势,智能技术已引起各个国家的高度重视,在此大背景下高端轴承的发展必然离不开智能化趋势,智能轴承应运而生<sup>[2-3]</sup>。

## 1 智能轴承的定义和特点

智能轴承是在传统轴承的基础上集成不同用途的传感装置和调控装置,使其结合成为一体而形成独特的轴承结构单元,利用信息处理、自动控制等技术实现轴承运行状态实时在线监测、故障检测以及状态实时调控,其系统简图<sup>[4]</sup>如图1所示。

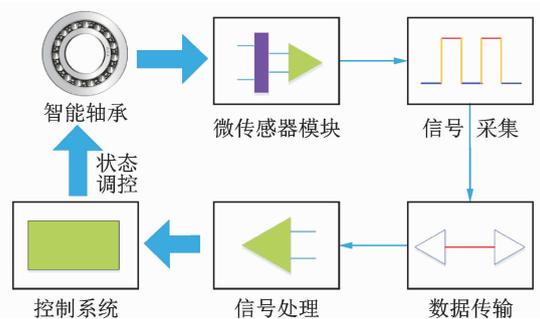


图1 智能轴承系统

Fig. 1 Smart bearing system

相比于普通轴承,智能轴承具备以下特点。

1) 自感知:智能轴承基于微传感器技术集成转速、振动、温度、载荷及润滑状态等多源服役信息采集传感装置,传感器集成化程度高,可实现对外圈、内圈、保持架甚至滚动体服役信息的监测与识别,信息覆盖程度高;由于传感器直接集成于轴承本体,监测信号的信噪比高,能更灵敏、更早期地发现设备及轴承状态的异常。

2) 自决策:基于海量轴承服役数据,结合大数据与深度学习技术,提取轴承健康状态下的服役信息特征,识别当前运行状态与轴承历史数据趋势,评估轴承的服役健康状态,对可能出现的异常工况做出预警判断。

3) 自调控:在轴承服役状态监测与评估诊断的

\* 国家自然科学基金资助项目(51675410)  
收稿日期:2018-10-10

基础上,结合滚动轴承服役状态机理研究,通过润滑剂量、冷却参数、预紧状态及工况(如转速、切削量)等调节滚动轴承的服役状态,提高重大装备服役的安全可靠性及维修的可预知性。

## 2 智能轴承发展现状

传统轴承运行状态监测方法是将传感器安装在设备上,虽然传感器布置方便,但是能监测的信号类型少,并且由于传感器距离被测位置远,信号衰减及干扰问题较为突出。智能轴承将传感器集成于轴承本体,传感器距信号源近,所获得的信号信噪比高且对轴承状态变化的反应更为迅速。

早期的智能轴承技术主要停留在“传感器轴承”层面,通过在轴承上集成传感器实现自感知功能,如第3代汽车轮毂单元中就集成了ABS转速传感器。按照监测目的不同,可集成的传感器的类型多样,主要以监测转速、温度、振动及载荷等为主。如国外轴承企业NTN公司<sup>[5]</sup>将含有三轴负荷传感器和旋转传感器的轮毂轴承与等速万向节集为一体,开发出了等速万向节轮毂轴承单元。NSK<sup>[6]</sup>开发完成的铁路客车用带传感器轴箱轴承在日本新干线为首的铁路列车领域得到了广泛应用,该传感器轴承具有多种传感功能,可监测轴承温度、振动以及转速。SKF<sup>[7]</sup>开发出具有振动、温度无线监测的铁路车辆轴承。

国内关于智能轴承的研究目前主要集中在高校,如刘浩等<sup>[8-9]</sup>研究了嵌入式结构的智能轴承,通过在轴承外圈开槽嵌入振动加速度传感器的方式来监测轴承的运行状态信号。邵毅敏等<sup>[10]</sup>提出了一种基于嵌入式多参量传感器的智能轴承结构,该复合传感器包括2个微型振动加速度传感器、2个微型转速传感器和2个微型温度传感器,实现了对轴承运转过程中水平和垂直地面两方向的振动信号、轴承转速信号、内圈(轴)和外圈温度信号的采集。王方哲<sup>[11]</sup>设计完成了一种集成振动系统,将传感器采集系统固定至轴承的外圈,使测试系统与轴承成为一体,从而获得较高的信号质量。

近年来,国际轴承行业巨头SKF<sup>[12]</sup>提出了一种革命性的轴承状态管理技术——SKF Insight(洞悉)技术,洞悉轴承结构如图2所示,主要集成了转速、温度、振动、载荷及润滑状态等多种传感器,并具备自发电、无线信号传输等功能。该轴承技术目前已在风电、铁路及汽车等高端领域得到了应用,结合

Internet网络、云技术、状态监测及信号处理技术,实现了对轴承运行工况及运行状态的监测、评估及预测。同时,该技术可实现智能组网,使得多个轴承实现相互通信形成“网状网络”,将状态信息发送到云端进行决策分析,在自感知的基础上,实现了一定意义上的自决策,是智能轴承技术目前最具有代表性的成果。

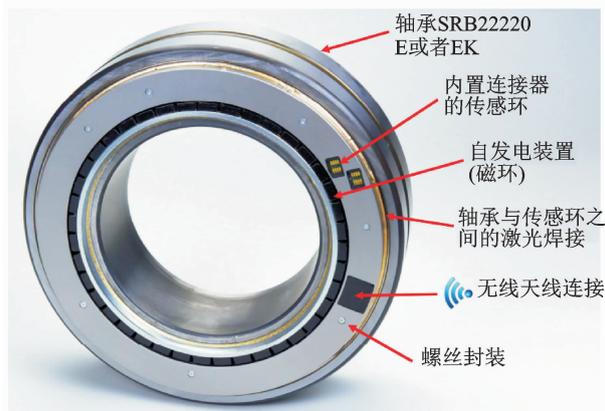


图2 SKF洞悉

Fig. 2 SKF insight

SKF提出的智能轴承状态评估技术框架如图3所示,该技术框架包括数据采集、信号处理、特征提取、故障检测、剩余寿命评估及状态调控等多个关键步骤,构建了智能轴承完整的技术框架。

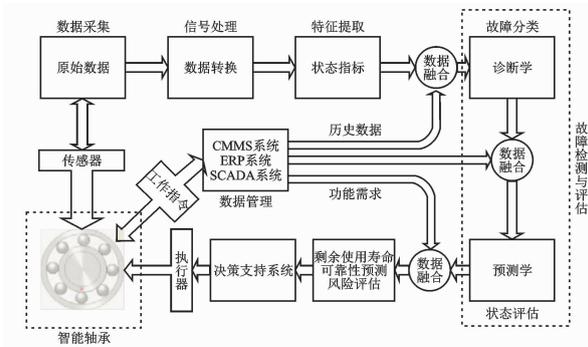


图3 SKF状态评估技术框架

Fig. 3 The technical framework of SKF condition assessment

舍弗勒集团<sup>[13]</sup>结合其轴承自动润滑系统、智能控制器以及传感器轴承,提出了如图4所示的智能润滑系统。通过准确监控和测量润滑状态、磨损颗粒、温度、振动等轴承运行状态数据,以及力、扭矩和速度等工况参数,获得精确的设备状态信息及大多数工艺(过程监测)和生产状态数据。计算机综合数据信息可以自我“诊断病情”,若轴承存在问题则命令润滑系统做出相应动作调节润滑参数,传感器继

续采集轴承状态信息并将之反馈给计算机,当轴承状态健康时其自我维修动作完成。该系统实现了对轴承运行状态的在线调整功能,具备了初步的智能轴承自调控功能。

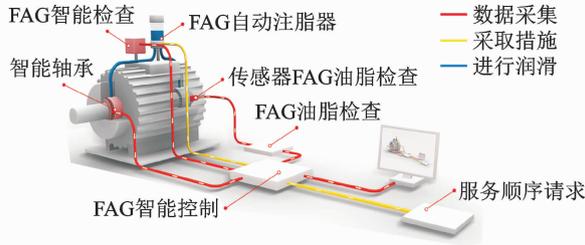


图 4 舍弗勒智能润滑系统

Fig. 4 Schaeffler intelligent lubricating system

同时,舍弗勒集团近年来推出了可灵活组态的FAG-Variosense系列智能轴承<sup>[14]</sup>,其结构如图5所示。其主要的特点是模块化监测功能,可根据需求,灵活配置相应的监测模块完成多种物理量的监测,如可监测轴承温度、转速、径向轴位移以及载荷等数据。传感器组的外壳与径向轴密封圈的外圈固定在一起,而旋转的测量件与轴承内环固定连接在一起,形成了一个结构很紧凑的单元,能够与各种不同尺寸轴承相适配。

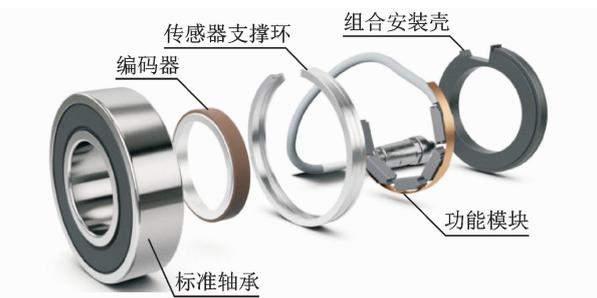


图 5 舍弗勒 FAG-Variosense 智能轴承

Fig. 5 Schaeffler FAG-Variosense intelligent bearing

基于上述 Variosense 传感器单元,舍弗勒集团提出的智能生态系统概念如图6所示,该系统具备和SKF洞悉轴承类似的架构,提供了一个基于云的、全面的硬件和软件基础设施,包括从配备传感器组件到数字化服务的每个数字化增值阶段。

综合以上研究进展可知,目前智能轴承技术的发展大多关注在传感器轴承层面,通过对传感器的集成、对基于云的状态监测技术的研究,实现了轴承自感知及一定程度的自决策功能,在自调控技术方面主要以简单的润滑调整技术为主,缺乏对轴承载荷、工况、冷却等的综合调控。相比于国外的技术发展,国内在此方面的研究有很大的空白。

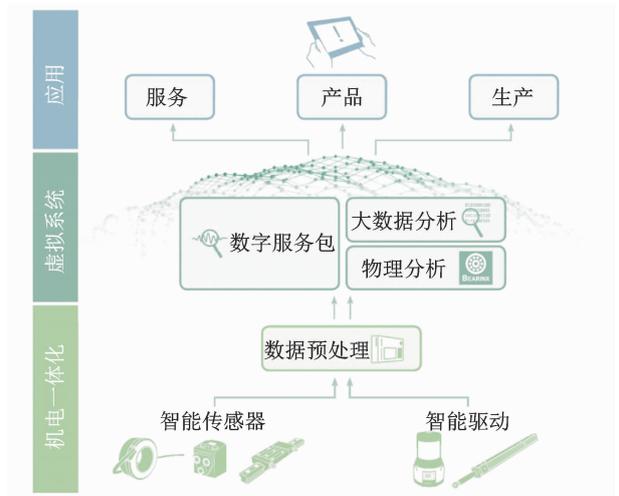


图 6 舍弗勒智能生态系统

Fig. 6 Schaeffler intelligent ecosystem

### 3 智能轴承关键技术

#### 3.1 传感器技术

传感器作为智能轴承的前端感知工具,是信息获取的关键。随着智能轴承对传感器体积、功能等方面要求的提高,传感器技术的发展主要强调以下几个方面的创新<sup>[15-18]</sup>。

1) 智能化:智能传感器主要由传感元件、微处理器以及相关电路相结合而构成,相对于传统传感器仅能输出待监测物理量原始信号而言,智能传感器能在传感器内部实现对原始数据的加工处理,进而与外界实现数据交换,其智能化主要体现在应用阶段信息数据自动收集与处理、信息存储与记忆、自学习与自适应、自校自检自补偿及自诊断等,其能力决定了智能化传感器具有高精度、高分辨率、高稳定性、高可靠性、强适应性以及较高性价比。

2) 微型化:传感器尺寸趋于微小化,既有利于集成化传感装置与轴承,又有利于保持轴承性能。随着集成微电子机械加工技术的日趋成熟,将半导体加工工艺引入传感器的生产制造,不但实现了规模化生产,而且为传感器微型化发展提供了重要的技术支撑。

3) 集成化:智能轴承要求同时监测轴承多种运行状态指标,将所需传感元件以及数据处理、存储、通信的相应电路集成在同一芯片上制成集成化传感器,具有高精度、高可靠性、高稳定性、高信噪比、高分辨率和高性价比等诸多优点。

4) 多样化:探索新型敏感材料与感知方法扩大了智能轴承的感知范围以及选择性,除了传统的半导体材料、陶瓷材料等,有机敏感材料、光导纤维、超导材料、纳米材料和生物材料等的发展为传感器多样化发展提供了物质基础。

### 3.2 自供电/无线供电技术

智能轴承技术需要对轴承进行长期的在线监测,供电问题是必须解决的一个难点。传统的有线供电技术大大限制了智能轴承在设备内部、在无外接电源等条件下的使用,因此自供电技术和无线供电技术在智能轴承中具有巨大的应用前景。

自供电技术之一是自发电,如图 2 所示 SKF 洞悉轴承所采用的技术。另外一种是通过捕获周围环境中的各种能量,如热能、机械能、辐射能及化学能等形式,利用震动模块通过敲击、震动、按压和平推等动作将这些能量收集起来,进而转化成电能。利用自供电技术,能够有效实现零电能消耗<sup>[19]</sup>。

无线供电技术是使用非辐射性的无线能量传输方式来驱动电器,可以采用电磁耦合、光电耦合及电磁共振等方式。无线供电技术由于其便捷性而得到了广泛的关注,但目前其能量传输效率等技术难题还未完全解决,要将其应用于智能轴承还需要进一步的研究<sup>[20]</sup>。王方哲等<sup>[11,21]</sup>建立了谐振无线供电系统,对无线供电技术在智能轴承中的应用进行了初步研究,其系统构成如图 7 所示。通过分析供电过程中供电频率、线圈直径等因素对供电性能以及涡流效应的影响,确定了供电系统相关参数并对供电系统进行了小型化设计,为轴承旋转套圈温度监测系统提供可靠的电能供给。

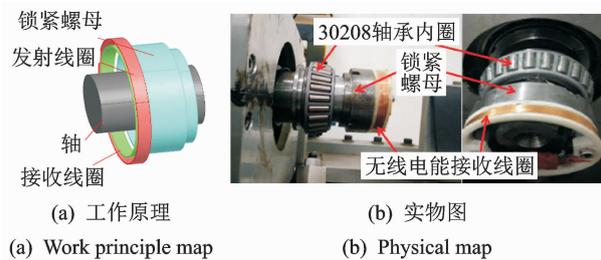


图 7 供电结构示意图

Fig. 7 The diagram of wireless power supply system

### 3.3 信号无线传输技术

传感器采集的信息需要通过信号传输技术稳定可靠地传输到服务器、用户端或云端。信号传输技

术可分为有线通信和无线通信两类。无线通信由于不受地域和空间限制,对分布式应用的智能轴承非常适用。目前常用的无线通信技术主要有蓝牙无线通信技术、ZigBee 技术及 Wi-Fi 技术等,但是要将其应用于智能轴承工程实际,其信号传输的安全性、可靠性以及数据传输速率等问题有待进一步提高。

针对智能轴承应用范围广、数量多等特点,自组网技术在智能轴承技术中具有广阔的应用前景。轴承单元的智能化、无线化,使得大范围内多个智能轴承的监测成为可能,而自组网技术是实现多轴承信息互通的关键。自组网的所有节点呈现网状结构,任何一个节点都具备连接作用,某个节点的故障不会影响整个网络的运行,如果终端要与覆盖范围之外的终端进行通信,中间节点就可以充当传输介质的作用。数据传输能力、组网能力及网络稳定性是自组网技术的关键,由于其无线传输、高度的动态拓扑、无中心以及多跳路由等特点,依然有许多复杂而难以实现的问题需要解决。

### 3.4 轴承状态智能评估及智能诊断技术

自感知是智能轴承的核心技术之一,轴承状态智能评估及智能诊断技术是实现自感知的前提。随着智能轴承的应用,需要监测的轴承群体规模大,单个轴承需要采集信号的部位(外圈、内圈、保持架和滚动体)及信号种类(温度、诊断、声音、载荷和润滑等)多样,数据采集及处理的时间跨度覆盖轴承全寿命周期,因此智能轴承将产生海量的数据,需要综合多信息融合以及现代信号处理方法对其进行实时处理。

传统的状态评估及诊断方法如专家系统、人工神经网络等过分依赖诊断专家和专业技术人员的经验知识,稀缺的诊断专家已经不能满足海量数据的处理和故障诊断。智能轴承的多状态量在线监测功能将大大丰富轴承的运行状态数据,因此大数据背景下轴承状态智能监测及智能诊断技术拥有巨大的机遇<sup>[22]</sup>。如何利用大数据、深度学习等技术构建智能轴承在线健康状态评估模型,实时精确自动地识别轴承故障类型、严重程度以及变化趋势,从而及时采取有效措施,是需要解决的重要问题。

### 3.5 轴承状态智能调控技术

自调控是智能轴承的主要特点之一。其目标是

在在轴承服役状态评估及智能诊断的基础上,控制系统根据优化算法结合滚动轴承服役状态机理研究,通过润滑剂量、冷却参数、预紧状态以及工况(如转速、切削量)等调节,实现对滚动轴承性能调控,从而保证重大装备服役全寿命周期性能的优化。

自调控技术目前还处在发展阶段,除了在自动润滑技术上的研究较多外,其他调控技术研究相对较少,如前述的舍弗勒自动润滑系统。SKF公司研发了用于高速主轴和高速轴承的智能微量润滑系统MDS<sup>[23]</sup>,该系统在不损耗空气的情况下进行连续润滑,可以对润滑剂加注量进行自我调节,实时优化轴承润滑状态。此外,轴承预紧力在线调节技术在机床主轴中被广泛研究,如文献[24-25]为消除由于轴承在外载荷作用下的倾斜导致的主轴变形(见图8),设计了主轴非均匀预紧调控系统,如图9所示。通过调整主轴轴承系统非均匀分布的预紧力,为轴承偏转和旋转运动误差提供了一种新的补偿控制方法。另外,在轴承温度调控方面也有一定的研究和应用,如周子超<sup>[26]</sup>根据工况要求合理设计主轴结构布局 and 进行冷却参数优化,保证系统运行的热稳定性和预防热响应特性的影响,提高了系统整体综合性能,延长了主轴运行的寿命。

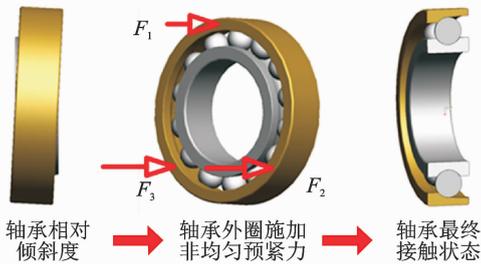


图8 轴承非均匀预紧目的

Fig. 8 Purpose of applying non-uniform preload on bearing

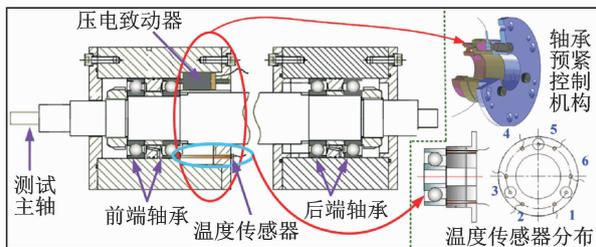


图9 非均匀预紧调节平台

Fig. 9 The non-uniform preload platform

现有的轴承状态智能调控技术大多是采用单一性能调控,但是单项指标调控往往会造成其他指标

恶化,如通过预紧力调控可以提高主轴的刚度特性,同时也会引起电主轴温度升高。因此,轴承状态智能调控既要研究调控模式多样化问题,也要通过机理研究,考虑调控后的综合性能指标。

## 4 发展趋势

结合智能轴承的定义及目前技术发展动态,可以从以下几个方面深入开展智能轴承的研究工作。

### 4.1 系统化

智能轴承并不是简单的将传感器集成到轴承上感知轴承运行状态,而是要形成自感知、自决策、自调控的闭环系统。传感器采集轴承多源服役信息,利用无线网络将轴承服役数据传输至云端(决策终端);云端利用专用智能算法处理评估轴承运行状态,并对轴承性能调控系统发送指令,通过调控预紧力、润滑剂量、冷却参数及工况参数(如转速、切削量等)等调节轴承状态。由此看出,智能轴承相较于传统轴承,将从一个单一轴承发展成为一个轴承单元或轴承系统。

### 4.2 监测信息多样化

监测信息单一不仅会割裂轴承不同故障之间的联系,而且难以完整描述轴承的健康信息状态。监测信息多样化包括轴承监测信息类型多样化和轴承监测部位多样化。传统的轴承在线监测指标只有温度、转速等简单信息,随着传感器技术及数据处理技术的发展,更多样的监测手段可以被集成在智能轴承中,如振动、润滑状态等,如某润滑脂传感器可同时监测水量、污染度、温度及机械磨损等指标。另外,受轴承自身的结构特性及运行后的动态特性限制,传统的信息监测更多是针对其外圈静止组件的监测,而内圈、滚动体及保持架等动态组件往往无法监测。Andrew等<sup>[27]</sup>对滚动轴承内外圈之间的温度差异研究表明,轴承正常运行温度达到稳定状态时,内圈与外圈温度相差近 $30^{\circ}\text{C}$ ,如图10(a)所示;轴承失稳临界点内圈温度急剧增大,而外圈温度变化很小并且相对滞后,如图10(b)所示。轴承动态组件通常含有更丰富的轴承状态信息,对它们的监测更能灵敏并准确地反映轴承运行状态。

目前已有多种监测手段可以监测轴承内圈、保