

感知微系统内嵌式智能轴承关键技术与应用展望

韩清凯¹, 赵宇来², 马树军², 于长鑫³

(1. 东北大学 佛山研究生创新学院, 广东 佛山 528312; 2. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819;

3. 瓦房店轴承集团有限责任公司, 辽宁 大连 116300)

摘 要: 高性能滚动轴承作为重大装备的核心基础部件, 其智能化需求在风电、工程机械和轨道交通等领域日益迫切。首先, 分析了智能轴承的技术特点, 总结了国内外相关研究进展与发展动态。然后, 重点讨论了感知微系统内嵌式智能轴承的系统组成、工作原理与关键技术, 包括功能结构一体化设计、感知机理与数字化传感技术、精密制造与装配工艺, 以及性能检测与试验考核。最后, 对智能轴承技术的未来发展趋势和推广应用前景进行了评述与展望, 为相关领域技术创新与产业化提供了理论支撑和实践指导。

关键词: 智能轴承; 感知微系统; 功能结构一体化设计; 传感器原位制造; 状态监测; 故障诊断

中图分类号: TH 133.33 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2025)07-0094-14

Key Technologies and Future Applications of Smart Bearing Embedded Perception Microsystems

HAN Qing-kai¹, ZHAO Yu-lai², MA Shu-jun², YU Chang-xin³

(1. Foshan Graduate School of Innovation, Northeastern University, Foshan 528312, China; 2. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 3. Wafangdian Bearing Group Corp., Ltd., Dalian 116300, China. Corresponding author: HAN Qing-kai, E-mail: qk.han@hotmail.com)

Abstract: High-performance rolling bearings, as essential components of major equipment, are increasingly in demand for intelligent capabilities in fields such as wind power, engineering machinery, and rail transportation. Firstly, the technical characteristics of smart bearings are analyzed, and the related research progress and development trends at home and abroad are summarized. Then, the system composition, working principle and key technologies of the smart bearing embedded perception microsystem are mainly discussed, including integrated functional-structural design, sensing mechanisms and digital sensing technology, precision manufacturing and assembly processes, as well as performance testing and experimental evaluation. Finally, the future development trends and application potential of smart bearing technology are expounded and predicted, providing theoretical and practical guidance for technological innovation and industrialization in related fields.

Key words: smart bearing; perception microsystem; integrated design of functions and structures; sensor in-situ fabrication; status monitoring; fault diagnosis

目前, 中国制造业取得了辉煌成就, 在航空航天、深地深海、交通运输、能源电力以及国防等众多领域都显示出中国制造业的巨大创新力量^[1]。制造强国战略是中国作出的重大战略决策, 推动中国制造业发展取得历史性成就、实现历史性变革^[2]。制造强国战略包括了对智能制造的数

字化、网络化、智能化三个阶段的表述, 智能制造是中国推进制造强国战略的主攻方向^[3]。中国制造业高水平发展、制造强国战略顺利实施很大程度上取决于产业基础能力, 其中核心基础零部件是国家工业整体素质和核心竞争力的体现。滚动轴承作为关键核心基础零部件, 应用范围极广,

重大机械装备要求配套的轴承具有高承载、高精度、长寿命、高可靠性等高性能指标,研发智能化轴承产品(或称智能轴承)是目前高端、高性能轴承领域的重要任务^[4]。

在制造强国战略和智能制造大背景下,很多行业都对轴承智能化,特别是智能轴承技术提出了迫切需求。随着高端装备技术发展,装备的整体性能和长寿命安全运行要求都在不断突破和提升,轴承的重要性也越来越突出。高精度、高转速、高承载、长寿命、高可靠性、免维护保养,以及标准化、单元化、通用化已成为高端轴承的重要技术特征^[5]。由于历史原因,中国高端轴承技术与世界轴承强国相比仍存在明显差距。许多重大装备用高端轴承经常发生故障,导致整机设备或整个工艺系统不能正常工作,甚至出现重大安全事故,维护成本高昂,经济损失巨大。例如,风电主轴轴承,在恶劣环境下工作,承受大的冲击偏载作用,经常出现严重的疲劳剥落或断裂、欠润滑烧伤,导致抱轴卡机事故,维修1次花费上千万元。对高端轴承进行实时状态监测与故障预警十分重要,这有助于提高其可靠性与维护水平。另外,高端轴承高性能长寿命可靠性研制也需要较准确的内部服役状态真实数据,只有利用智能轴承的先进感知技术才能获得在特定装备典型结构和工作条件下的轴承使用边界和轴承运行特征,从而提高轴承设计与分析的准确性和装备适应性。为此,很多行业都对轴承智能化提出了迫切需求,引入先进传感技术,实时监测轴承状态,实现智能轴承广泛应用,以提高轴承及装备的寿命、可靠性、监测与维护能力,并满足数字化智能化运行要求。发展智能轴承技术是当前高性能智能制造技术及装备的重要趋势,因此国内外对智能轴承技术的研发都高度重视^[6-7]。

在当前全球数字化、网络化、智能化技术快速发展的大背景下,融合先进传感、智能信号处理、精密与智能制造的智能轴承产品及技术取得了跨越式进步。近年来,许多国外轴承公司研发了若干形式和类型的智能轴承产品,中国大力支持智能轴承基础理论和关键技术研究,并取得了很多基础性和创新性成果。东北大学、瓦房店轴承集团有限责任公司与多家高校、科研单位和企业组成联合团队,在感知微系统内嵌式智能轴承的共性关键技术与产品研制、典型产品应用方面取得了重要突破。

本文针对智能轴承技术特点、国内外技术状

态和发展趋势进行综述评价,然后重点介绍感知微系统内嵌式智能轴承的若干关键技术与实现方法,再结合典型智能产品研制与试验,对比研究了基于智能轴承的状态感知方法以及对典型故障的监测诊断方法。结果表明,感知微系统内嵌式智能轴承在承载能力、寿命与可靠性受控的条件下具有与普通轴承的互换性,并且内嵌式传感器比传统监测方式更加靠近信号发生源,因此可以大幅度提高信噪比,从而提高早期微弱故障诊断的成功率。基于智能轴承,可对设备运行参数进行实时监测,进而实现设备运行状态的综合分析与智能运维。

1 智能轴承技术特点与国内外研究现状评述

1.1 智能轴承的定义与特点

研究人员对智能轴承已经给出了一个较宽泛的定义^[8],认为智能轴承是“在传统轴承的基础上,通过集成不同用途的传感装置和调控装置,形成独特的轴承结构单元,并利用信息处理、自动控制等技术实现轴承运行状态的在线监测、故障检测以及实时调控”^[9]。根据图1的构成原理,智能轴承的拓扑结构分为三层,包括物理层、信息层和应用层,其中物理层包括轴承、集成电路和云平台。

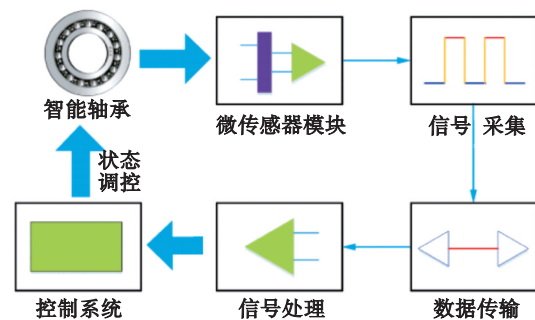


图1 智能轴承系统^[9]

Fig. 1 Smart bearing system^[9]

中国轴承协会对智能轴承给出了相对严格的定义^[4],智能轴承是由经过改进的轴承本体及相关辅件、嵌入到轴承体内或相关辅件内的微型传感器、处理传输电路/芯片、采集与信息处理、分析软件和轴承服役状态调控等装置组成,可实现轴承服役状态的自感知(自检测)、自决策(自诊断)、自调控(自执行)的轴承系统。智能轴承可以分为两类:①传感器轴承,具有服役状态自感知、

自决策功能;②全功能型智能轴承,不仅具有服役状态自感知、自决策功能,而且可以自执行、自调控.智能轴承是“机、电、软”的结合体,是“数字双胞胎”.上述定义比较符合人们关于智能机器的认知,即智能机器是“使用传感器来监测环境并调整其运行,以在不确定且易变的环境下完成特定任务的机器”.因此,智能机器包括智能轴承,是一种可以实现自我“照顾”的机械系统,使用其内置的智能程序来检测潜在的问题并简化维护间隔时间与程序.所以,智能轴承的定位不再局限于传感与监测能力,还要具有自主决策和自主调控的能力.总的来说,更高层级上的智能轴承应具备多源服役信息自感知、健康异常状态自决策、服役工况参数自调控3个方面突出的智能化特点.

在智能轴承技术中,如何利用微传感器技术进行轴承感知存在着明显不同的理解.近年来,人们特别强调了轴承服役状态的原位感知能力是智能轴承的关键核心技术之一.传统轴承受限于非源端监测方式,信号获取困难、信号质量差,难以准确监测轴承实际服役状态,而智能轴承旨在全面并足够敏感地感知轴承服役中的载荷、振动、转速、温度、润滑(油/脂)等多种物理参量^[10].因此,人们希望智能轴承的感知元件传感器应比传统监测方式更加接近甚至嵌入到轴承本体,尽可能靠近轴承内部故障源,这样对轴承状态和故障感知更敏感,可以大幅度提高信噪比,提高早期故障诊断的成功率.随着安装在轴承座上的传感器对轴承进行状态监测的技术日渐成熟,以及传感器外置式智能轴承技术的不断发展和逐步应用,感知微系统内嵌式智能轴承技术正取得新的突破.

另外,智能轴承除了特有的监测和诊断能力以及自调控能力之外,仍需保持传统轴承的基本功能和性能,包括尺寸互换性、回转精度及保持能力、承载能力、寿命和可靠性等,在很多场合下也应该满足与同级别传统轴承相当的指标.

1.2 智能轴承技术研究与产品开发情况

从20世纪80年代开始,已经开展智能轴承技术或传感器轴承的研究与成品的应用,代表性产品主要用于汽车防抱系统(antilock brake system, ABS).通过对轴承转速、温度、振动及载荷等数据的监测、分析,从而形成反馈.长期以来,国际知名轴承公司在智能轴承的研究和商品化应用方面一直在不断推进.国外的智能轴承企

业具有较强的研发实力和市场竞争力,形成了一批具有自主知识产权和国际影响力的智能轴承技术产品和系统.国外代表性智能轴承技术和典型产品如表1所示,其中3种智能轴承的结构形状如图2所示.可以看出,这些已经得到商品化应用的智能轴承,属于传感器外置式轴承.此外,学者们针对智能轴承产品的相关技术也开展了较多研究,Zaghari等^[11]通过将热能转换为电能,提出了1种用于喷气式航空发动机的高温自供电智能轴承,以实现轴承及发动机服役状态的监测. Choi等^[12]开发了1种基于摩擦电纳米发电机的自供电智能滚子轴承.文献[13]总结了自供电智能轴承的原理、技术以及在状态监测和故障诊断方面的应用.在自调控方面,Guimaães等^[14]提出1种利用形状记忆合金来进行振动抑制的智能轴承,该轴承能够在升速和降速时自动感知振动并调节支承刚度,从而降低旋转机械整体振动幅值.

目前国内研究多数实现了非源端监测,数据传输之后的诊断与运维技术在国际上处于领先地位.例如,张志鑫等^[15]根据智能轴承监测系统的功能,将其划分为供电模块、数据采集模块、最小系统、存储发送模块,并进行相关模块的设计.林昱涛等^[16]利用交叉自注意力机制使声音信号与振动信号在特征提取过程中交互与融合,从而实现端到端的智能轴承故障诊断. Han等^[17]开发了1种摩擦电滚动轴承,采用输出电流的均方根值和频率作为转速指标,并分析了保持架、滚珠材料、外圈材料等设计参数对TRBB(temporal reference-based beamforming)转速传感器灵敏度的影响.邵毅敏等^[18]分析了智能轴承复合传感器与轴承本体连接部的结构参数对轴承应力和变形的影响,利用模拟仿真和台架试验验证了智能轴承在故障检测能力方面的优越性.陈小龙等^[19]基于接触载荷连续测量方法提出了1种测量轴承接触载荷的智能滚子,并通过标定试验获取载荷传感器输出与接触载荷间的线性关系,进而实现接触载荷测量.

国外公司在智能轴承技术和产品开发与应用的理念上存在较大差异.例如,SKF(斯凯孚)公司报道的智能轴承技术重点解决与轴承寿命相关的因素,如温度、载荷、转速等的测量,更强调对轴承运行时的状态分析及寿命预测能力. FAG(舍弗勒)公司推出的风电轴承智能健康管理系统(WinCheck等)通过检测和判断油膜状态、轴承

载荷、内外圈温度、径向和轴向振动、低速轴转速等参量,主要实现风电轴承的故障诊断和主动运维.NTN(恩梯恩)公司的机床主轴用内置传感器轴承单元,具有检测运行时轴承载荷和载荷变化能力,用载荷传感器替代以往使用的热流传感

器,可以检测轴承发生咬死前承受的激增预紧载荷,有助于防止轴承咬死;并且通过监测切削载荷变化等加工状态,有助于提高加工品质和生产能力.

表 1 代表性智能轴承研究机构及其典型技术与产品

Table 1 Representative smart bearing research institutions and their typical technologies and products

序号	机构名称	典型技术	典型产品	应用领域
1	瑞典斯凯孚公司 (SKF)	复合传感器集成、自主数据分析和诊断、远程监控云端	“Insight Metro”智能轴承 ^[20]	风电、轨道交通、汽车、机床等
2	德国舍弗勒公司 (FAG)	多功能传感器集成、自感知状态监测、远程监控云端	“FAG-Variosense”系列智能轴承 ^[21]	轨道交通、汽车、机床、风电等
3	美国铁姆肯公司 (TIMKEN)	联合负荷分析、超高速应用分析等	“TRBS”智能轴承监测系统	风电、航空航天、医疗等
4	日本恩梯恩公司 (NTN)	三轴负荷传感器、旋转传感器、挤压切削花键	“Smart Sensor Bearing”智能轴承 ^[22]	轨道交通、汽车、机床等
5	日本精工株式会社 (NSK)	传感器集成、剩余寿命预测技术及实时报警	“Ensk”智能轴承 ^[23]	汽车、机床、泵和压缩机等

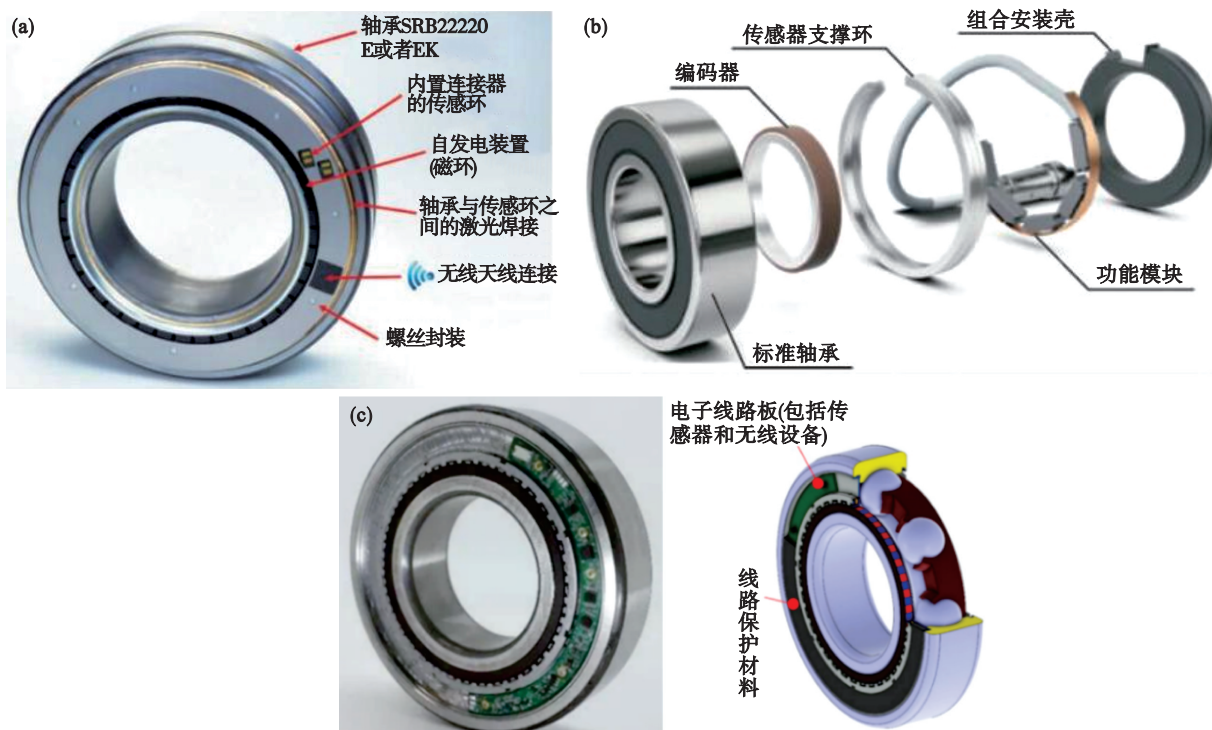


图 2 国外代表性智能轴承结构

Fig. 2 Representative smart bearing structures abroad

(a)—SKF公司的“Insight Metro”智能轴承^[20]; (b)—FAG公司的“FAG-Variosense”智能轴承^[21]; (c)—NTN公司的“Smart Sensor Bearing”智能轴承^[22].

调研智能轴承技术的国内外研究动态,大多是以外置式智能轴承为主,针对传感器外置式智能轴承开展的研究工作很多,发展历史也较长.但是,通过在轴承端面外置传感器或微纳传感元件的感知能力毕竟受限,其本质为非源端监测或

间接测量,因此信号获取能力和信号质量问题难以解决.此外,这类外置式智能轴承需要额外的安装空间,在很多场合下实际使用会受到限制.为此,近年来,人们更多地转向感知微系统内嵌式智能轴承的研究和产品开发.

将传感元件嵌入到轴承本体的内嵌式智能轴承,其信号获取能力更强,能准确捕捉轴承源端数据,克服了传递路径衰减和噪声干扰等问题,大幅提高了轴承服役状态监测能力^[24].近年来,国外著名公司高度重视感知微系统内嵌式智能轴承.NTN公司推出了可以商业化的此类智能轴承,即NTN传感器集成轴承“Talking Bearing TM”产品,其结构如图3所示.该产品的重要技术突破是将外部的状态监测传感器移到了轴承内部,从而表现出了与现有状态监测方案不同的优势,具有更高灵敏度及更先进的状态监测和异常诊断的优点,并且强调在满足尺寸和载荷容量条件下和标准轴承之间的互换性.此外,不需要外部供电和数据传输电缆,提升了使用的便利性.

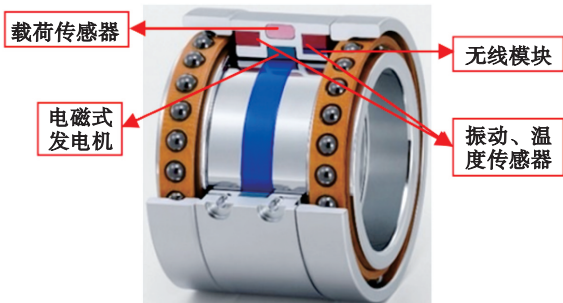


图3 NTN公司的机床主轴用内嵌传感器轴承单元
Fig. 3 NTN's sensor-embedded bearing unit for the machine tool spindle

SKF公司提出了1种传感器滚子(sensor roller)单元^[25],它由1个空心滚子和1个包含测量传感器及其传输数据的电子元件的嵌入式单元所组成,利用嵌入滚子内部的传感器来采集运行载荷、温度和滚子转速,这3种数据对于判断轴承寿命、接触应力、热效应、滚子偏斜等都至关重要.虽然温度和转速都会影响轴承寿命,但载荷的影响要更加明显.实际上,智能轴承要在继承传统轴承功能基础上实现自决策和自调控是十分困难的,比较成功的案例是FAG公司的智能润滑系统,具备了基于智能轴承视情维护自动调控的基本能力^[8],该系统如图4所示.

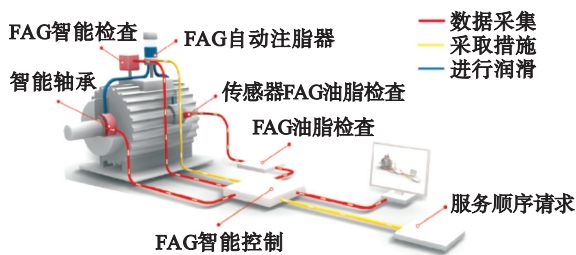


图4 舍弗勒智能润滑系统
Fig. 4 Schaeffler intelligent lubricating system

结合智能轴承的发展动态分析,目前智能轴承的发展仍存在以下几方面问题:1) 智能轴承主要是将商用传感器外置到轴承,缺乏针对特殊工作环境(如低速重载、高速轻载、高速高温)下智能轴承专用传感器的功能结构设计及测试技术;2) 目前主流的智能轴承运维系统大多基于对监测参量进行阈值判断的策略来识别故障,海量数据的实时处理和分析能力以及智能化水平不够,缺乏有效的全生命周期智能轴承运维功能;3) 目前智能轴承的制造工艺、试验验证技术及装备严重缺乏,同时缺少相关标准,影响了技术的推广和应用.

2 感知微系统内嵌式智能轴承系统组成与工作原理

东北大学高性能轴承技术团队开展了感知微系统内嵌式智能轴承的设计、分析、制造以及应用全流程的共性关键技术研究,以风电主轴轴承和工程机械轴承为主要应用对象,给出了风电、工程机械领域轴承国产化替代及智能化升级的技术路线.风电发电机的偏航和变桨轴承、主轴轴承等载荷复杂、环境恶劣,导致其服役状态异常复杂.此外,风电轴承需要20年或更长寿命指标,在长期服役期间内不会出现危险故障.工程机械轴承如大型电铲顶部滑轮轴承在恶劣环境下工作,间歇式重载和瞬时超载,经常出现大负载导致的过热胶合,以及严重的外物侵入磨损故障,轴承故障经常发生并导致整机停机.为此,在满足轴承承载和传动功能的同时,能够对轴承服役状态进行原位实时监测,保障轴承和设备的安全运行十分重要.风电、工程机械等大型及超大型轴承是智能轴承技术的主要应用领域.在超大型轴承应用场景下,感知微系统内嵌式智能轴承具有较好的应用前景.

面向风电主轴轴承和工程机械轴承,替代传统并具有服役状态源端监测与智能运维功能的感知微系统内嵌式智能轴承的系统组成如图5所示.具体包括:先在轴承套圈合适位置上开槽;然后将温度、应变、振动传感敏感元件成品嵌入轴承本体,或利用原位制备技术敏感元件材料喷印直写到轴承槽内结构本体上;再把轴承状态源端监测微系统嵌入到槽内并进行封装,该微系统集成信号处理功能与故障检测算法;最后,微系统将采集到的轴承源端多物理量信号数据传输到

轴承座旁系统,再上传到远程智能运维系统,进行轴承边缘端或云端的趋势分析、故障预警和运维决策。

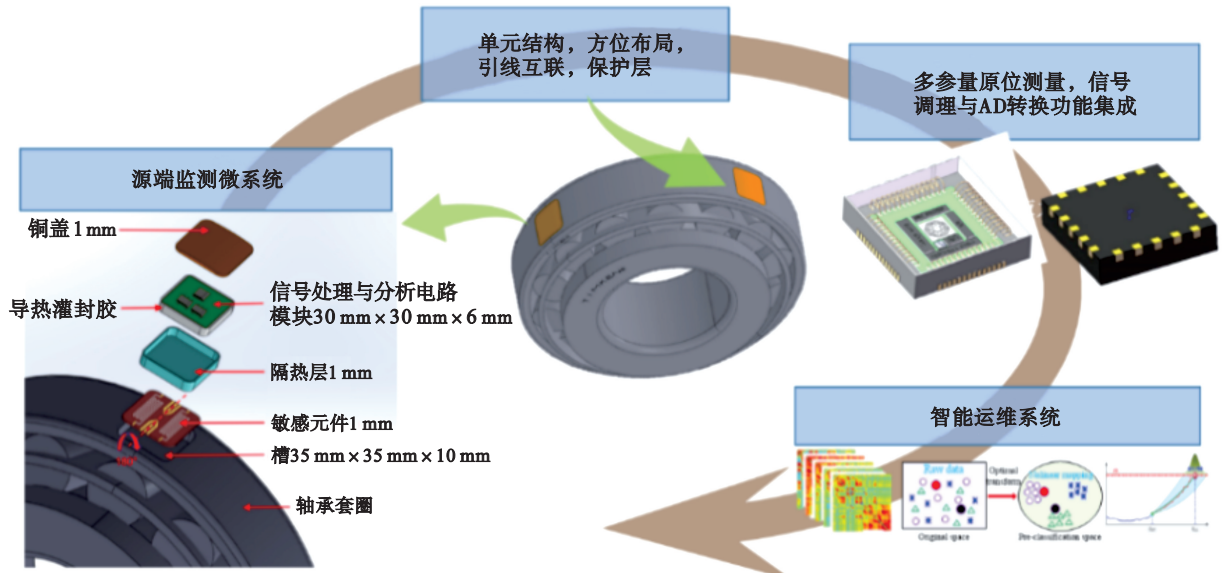


图 5 感知微系统内嵌式智能轴承的系统组成

Fig. 5 System composition of smart bearing embedded perception microsystem

感知微系统内嵌式智能轴承的服役状态参量感知原理如图 6 所示.在轴承套圈槽内的敏感元件可以感知轴承服役时的载荷、振动、转速、温度等物理参量.其中振动、温度以及载荷属于直接测量,而转速属于间接测量.振动信号主要基于压电原理的正压电效应,即滚动体通过套圈时的压力造成压电材料(压电晶体和压电陶瓷等)发生形变,进而产生电极化的现象,将机械能转换为电能,从而实现对振动加速度信号的测量.温度传感器的原理是根据温度敏感材料(半导体材料)随温度变化时电阻变化,将轴承温度转化成电信号,并尽量利用温度影响电阻的线性区间.应变主要根据应变效应,将滚动体通过套圈时的变形转换成电信号,并通过计算和修正得到滚动体通过套圈时的载荷(应力).轴承的瞬时转速或平均转速可以通过采集的应变脉冲信号转换得到,即间接测量得到轴承转速参数.感知微系统内嵌式智能轴承的服役状态健康监测与智能运维的工作原理如图 7 所示.由于智能轴承内嵌的监测微系统属于轻量化低功耗单片机系统,采样频率及信号传输速度均受到一定限制,并且不可能获得智能轴承故障标签样本.为此,主要采用多参量融合的自适应机器学习异常识别方法,采用运算次数少、网络模型轻量化的源端数据处理技术,提高智能轴承的早期微弱故障预警能力.智能轴承可识别的轴承故障主要

包括疲劳剥落、过热烧伤等早期微弱故障,以及对时变载荷和时变转速甚至轴承打滑的数据分析处理.通过构建源端多参量监测数据库并持续更新,进而实现数据驱动的智能轴承全生命周期服役健康状态评估、故障智能预警和维修决策优化.

3 感知微系统内嵌式智能轴承的关键技术及实现

感知微系统内嵌式智能轴承的关键技术主要包括:轴承服役状态源端监测理论、功能结构一体化设计、多参量传感器原位制备、源端监测微系统与信号分析处理、智能轴承运维决策、智能轴承高性能制造、智能轴承检测与试验、工程应用方法等多个方面的关键技术.本文对前 4 个基础性的关键技术进行介绍.

3.1 智能轴承服役状态源端监测理论

在智能轴承服役状态源端监测理论方面,现有传感器外置式智能轴承不断提高传感监测系统的集成化程度,但仍难以获取轴承全位置的综合服役状态信息.感知微系统内嵌式一体化智能轴承是在轴承内部信号源邻近位置感知多个物理量,这与传统的轴承状态感知有较大区别.智能轴承服役状态源端监测理论是实现智能轴承高灵敏感知和提高信号获取能力与有效性的理论基础.

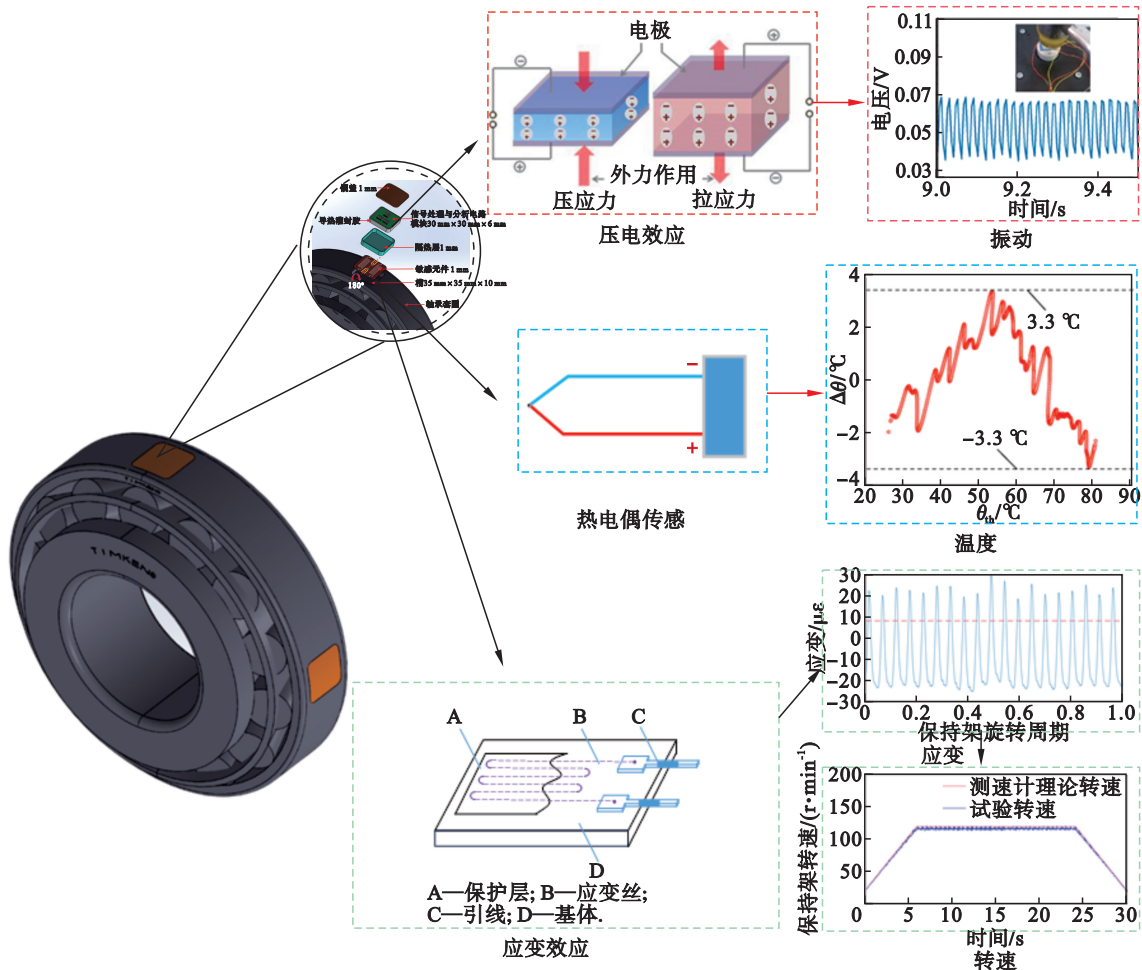


图6 感知微系统内嵌式智能轴承多物理量传感测量原理

Fig. 6 Multi-physical quantity sensing measurement principle of smart bearing embedded perception microsystem

目前,内嵌式智能轴承在复杂服役工况条件下的高保真分析模型、服役状态与测点源端物理量之间的关联机制、测点位置参数优化以及全息服役状态反演等在国内外研究中尚属起步阶段.例如,肖嘉伟等^[26]针对智能轴承结构和感知单元集成中信息感知测点综合最优选取困难的问题,以角接触球轴承为嵌入式智能轴承的轴承本体结构,结合有限元分析研究了考虑3种载荷下轴承外圈开槽前后不同测点的应力和变形信息响应分布及影响,提出了1种基于主成分分析的嵌入式智能轴承感知测点最优选择方法.陈金海等^[27]选择合适的温度传感器与轴承本体结合,并设计了智能轴承温度监测系统,试验结果表明与外圈温度和振动信号相比,内圈温度对轴承服役状态的变化更为敏感.

为此,感知微系统内嵌式智能轴承采用嵌入槽测量的方式感知源端物理量,轴承套圈-滚动体组件在力、热、摩擦接触、弹流润滑等多重交互作用下,其服役状态与轴承套圈振动、温度、应变

源端物理量呈现非线性的关联机制,给服役状态的识别带来巨大困难.因此,探究智能轴承服役状态与源端多物理量之间的非线性关联机制,突破智能轴承服役状态全息反演的技术,从而形成重载轴承服役状态的多物理量源端监测理论.东北大学团队提出了轴承内部状态感知的应力脉冲法.该方法是通过轴承套圈上应变片的实时测量,映射出滚子通过滚道时产生的瞬态接触应力,映射出滚子通过滚道时产生的瞬态接触应力.通过有限元模拟从原理上阐明了应力脉冲法对动态接触应力的感知能力,通过试验进行了验证,并探索了滚子局部缺陷检测的实际应用.智能轴承应力脉冲法的源端监测原理如图8所示.图9为故障滚子轴承在2种接触状态下的应力脉冲试验信号,与故障滚子轴承的有限元仿真应力脉冲信号结果具有一致性.在正常接触状态下,故障滚子产生的应力脉冲波峰明显低于其他滚子,说明该故障滚子承载能力降低;而在非接触状态下,故障滚子几乎没有产生应力脉冲,此时故障滚子没有承载.

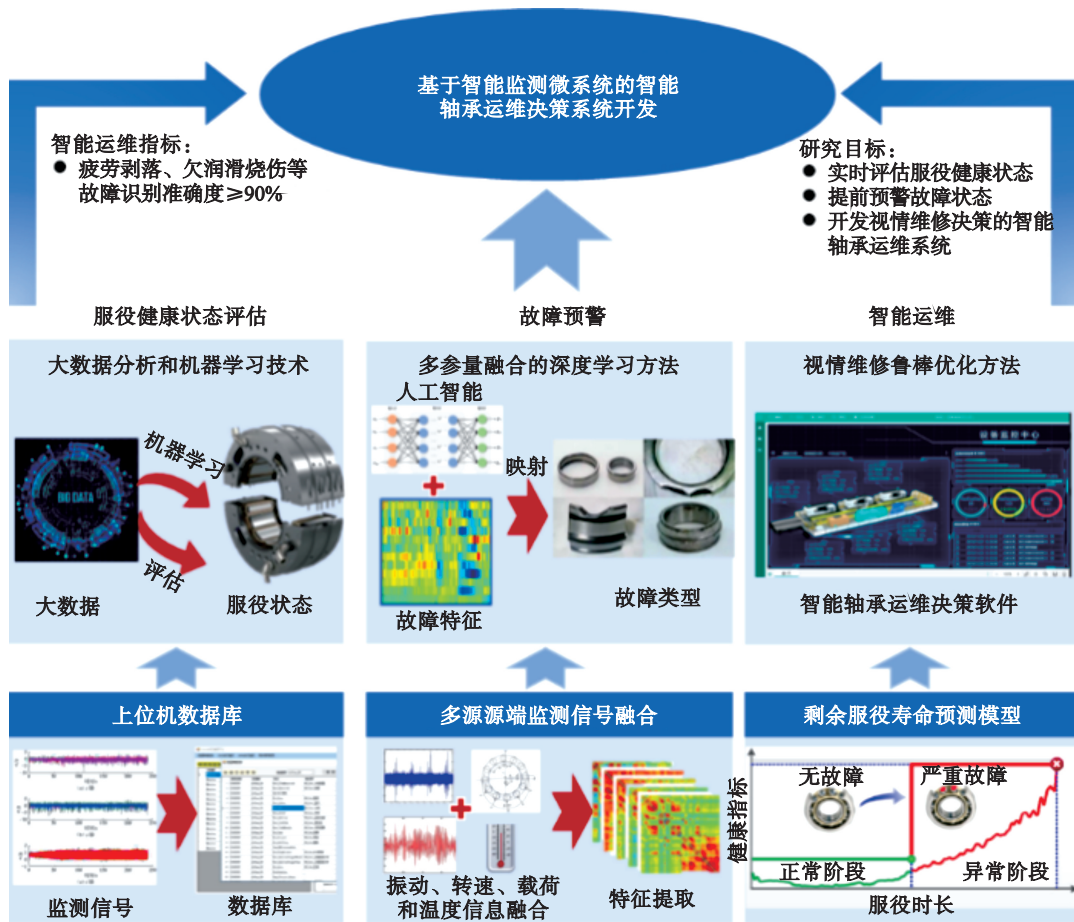


图 7 感知微系统内嵌式智能轴承的状态监测与智能运维原理

Fig. 7 Principle of condition monitoring and intelligent operation and maintenance of smart bearing embedded perception microsystem

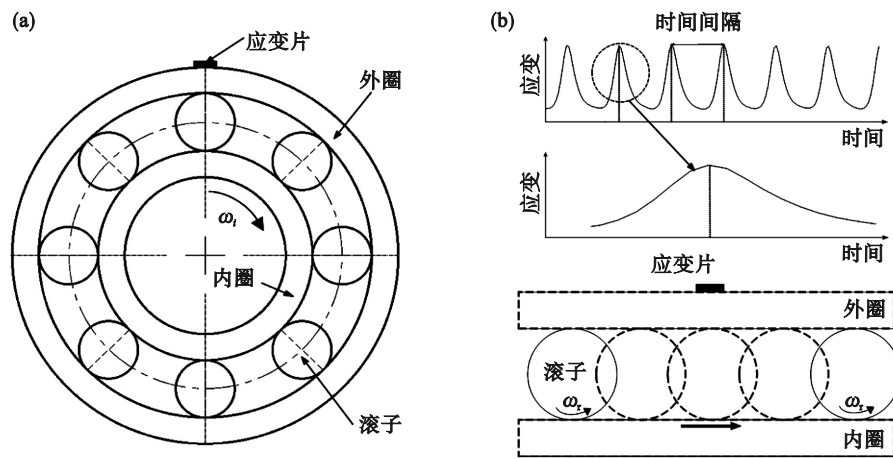


图 8 轴承外圈监测应变脉冲测试原理

Fig. 8 Principle of strain pulse testing for monitoring the bearing's outer rings

(a)—外圈应变片布置示意图; (b)—应力脉冲测试原理图。

3.2 智能轴承功能结构一体化设计技术

在智能轴承功能结构一体化设计方面,将源端监测传感元件、数据处理单元等所集成的微系统内嵌到轴承本体结构,在保证传感元件和微系

统测试功能的前提下对轴承进行功能结构一体化设计,确保智能轴承的强度、寿命及可靠性.目前智能轴承的功能设计是将电子元件与传感器分别拼装,结构设计仅限于传统轴承的强度分

析、寿命分析和可靠性评价.

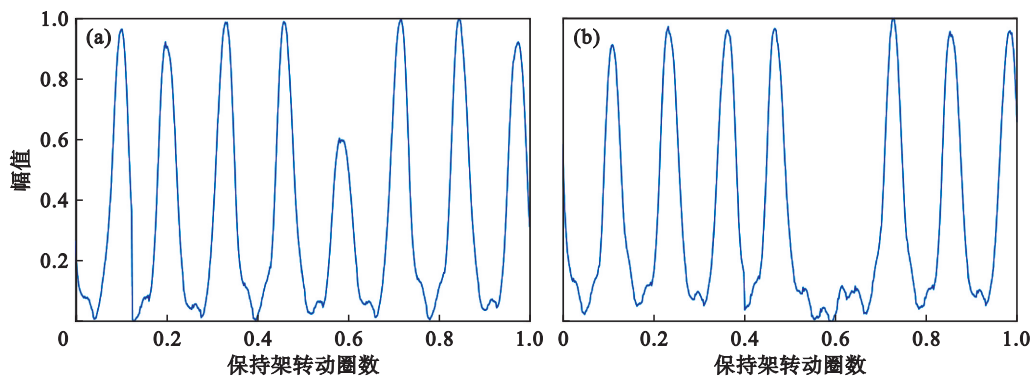


图9 故障滚子轴承的应力脉冲信号

Fig. 9 Stress pulse signal of the faulty roller bearing

(a)—正常接触状态; (b)—非接触状态.

内嵌式智能轴承一般需要在轴承本体结构上开槽,才能进行轴承与传感器的集成,但是不合理的开槽势必会影响轴承应力分布,造成轴承性能降低,这与应用智能轴承的初衷是相悖的^[5]. 目前已有这方面的研究. 例如,张文远等^[28]分析了轴承服役状态下的载荷分布,并结合有限元模型,研究了外圈开槽对轴承可靠度的影响,确定了滚动轴承外圈径向开槽结构;Chen等^[29]在此基础上进一步考虑了轴承服役状态下温度场的影响. 刘浩等^[30]对内嵌式智能轴承的开槽外圈进行ANSYS有限元分析时,拟合接触面的加载,得出槽的尺寸对轴承最大变形和应力的影响关系. 因此,轴承结构上的开槽方式需要着重加以优化设计. 上述工作只是考虑了内嵌式智能轴承的部分功能并分析单一因素影响,感知微系统内嵌式智能轴承功能结构一体化设计技术目前仍缺乏完整的设计理论和体系. 东北大学团队研究了智能轴承的功能结构一体化设计关键技术,提出采用基于系统工程的理论体系,涵盖需求、功能、逻辑、物理、可靠性分析以及评价,如图10所示. 具体而言,功能包括承载、传感、微系统、故障诊断和运维技术,并且考虑轴承以及感知部件共同组成功能结构一体化系统. 逻辑是指对轴承本体、敏感元件和微系统进行仿真分析与试验验证,对座上系统进行状态监测和故障诊断. 物理实现最终的设计输出,包括结构设计、硬件设计和软件设计方案. 另外,还要考虑可靠性分析,主要包括危险性分析、故障树分析(fault tree analysis, FTA)、子系统重要度分析、失效模式分析、可靠性评价、耐久性分析等,以及相应的轴承性能评价指标,包括平均无故障工作时间(mean time between failure, MTBF)、振动和温度检测精度、

温度检测量程、转速检测精度和测试范围、载荷检测精度、载荷传感器原位制造位置精度和轴承内嵌式微系统尺寸等.

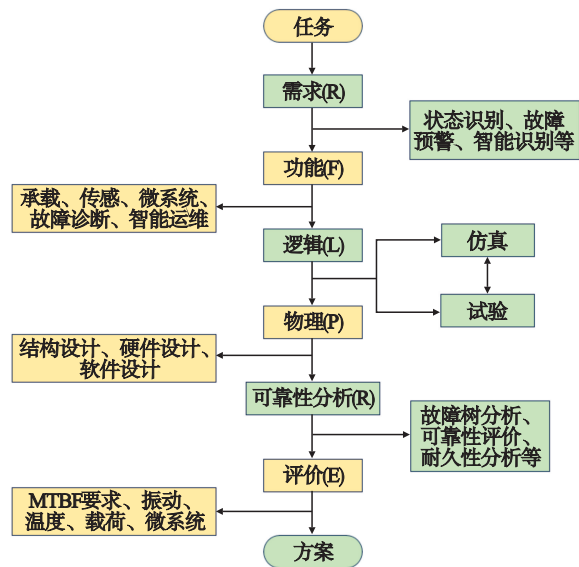


图10 基于系统工程的智能轴承功能结构一体化设计方法框图

Fig. 10 Diagram of the integrated design method of smart bearing functions and structures based on system engineering

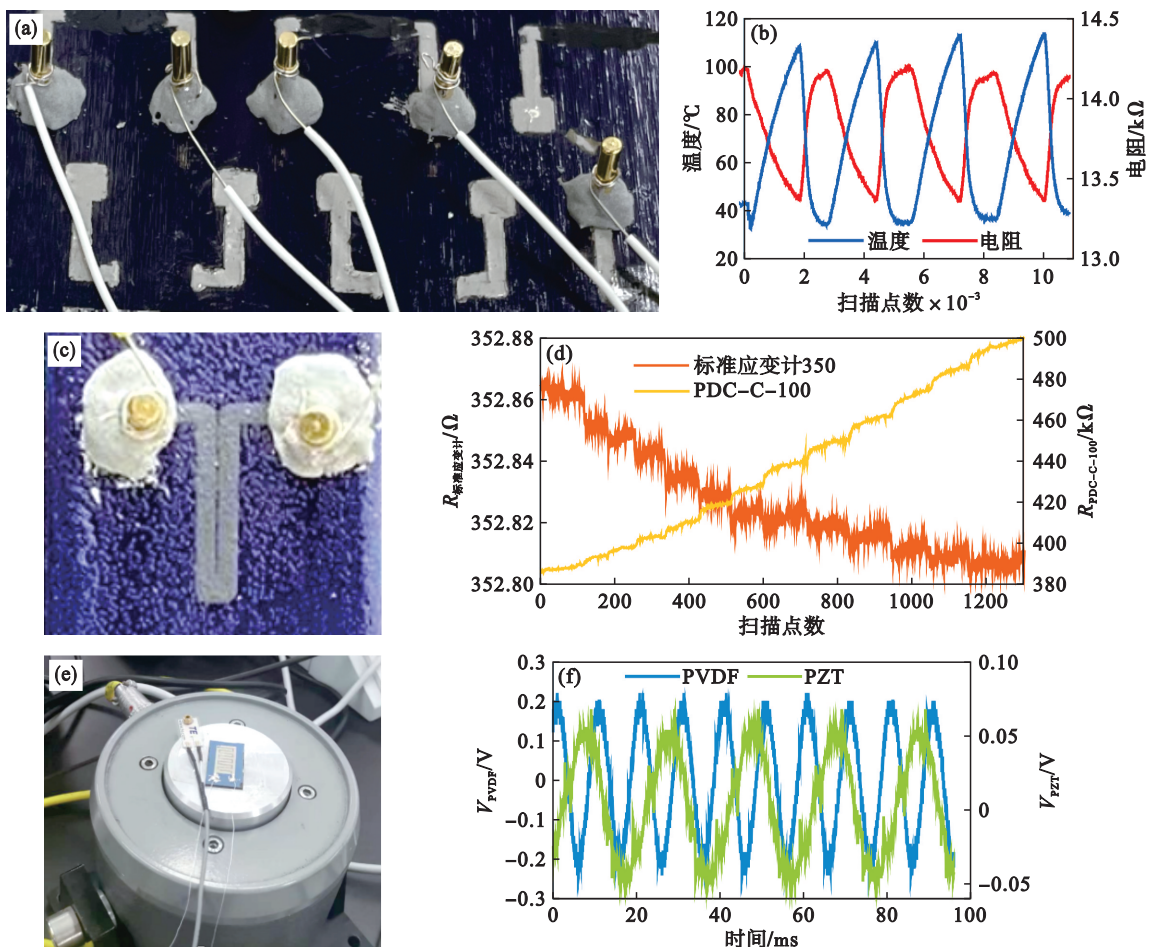
3.3 多参量传感器原位制备技术

在多参量传感器原位制备及高可靠集成技术方面,感知微系统内嵌式一体化智能轴承的核心是将传感功能与数据处理功能原位集成在信号源位置,提高轴承状态感知能力和信号传输质量^[9]. 例如,张以忱等^[31]讨论了基于微机电薄膜传感器的智能轴承结构及组成,包括薄膜传感器的特点、种类、安装形式以及制备等关键技术问题. 当前,在传感器原位制备方面,国内外大多是在轴承端面沉积传感器,且仅限于2个参数的测量,

多参量传感元件原位制备尚处于探索阶段,且寿命和可靠性均较低.在传感器测试方面,Bashir等^[32]提出了1种用于航空发动机智能轴承的传感器服役性能的预评估方法,具体是将宽频加速度传感器以及温度传感器等放置在恶劣环境中,测量传感器的性能并与放置前的性能进行比较.

东北大学团队发展了在轴承开槽部位进行薄膜传感器原位制备的新技术并开展了相关测试研究.在激光作用下使液相陶瓷在轴承表面快速成型的方法及其轨迹优化方法是实现轴承原位感知的关键.在激光作用的喷印直写中,多场力作用导致的微流体流变行为和基体运动状态的匹配性决定了直写图案的形态特征,喷印参数与平台运动参数的高效协同控制是实现传感图形高精度成型的前提.该团队实现了轴承表面传感元件的一步化制备,其膜层满足过渡层、绝缘

层、敏感层和保护层等在物理和化学特性及其膜层间特性的匹配要求,同时兼顾多物理量测量.探明和掌握了先驱体陶瓷热-力-电特性功能调控机制,基于此构建了功能丰富、具有高适配特性的先驱体陶瓷材料.此外,该团队开发出3种温度薄膜元件材料体系:①PDC(先驱体陶瓷)+Pt(正温度系数: $500 \times 10^{-6} \sim 1\,000 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$),②PDC+C(负温度系数: $-490 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$),③PDC+TiB₂(负温度系数: $-500 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$);2种应变薄膜元件材料体系:PDC+Pt/C/ITO(铜锡氧化物),PDC+ITO(合金基底:GF(应变灵敏系数) > 80);1种金属基薄膜压电元件.上述基于先驱体陶瓷多参量薄膜元件(温度/应变/压电)均可在绝缘/金属衬底上制备,传感功能均得到验证,图11是在轴承套圈开槽内部制备的薄膜传感器试验样片和相应的测试曲线.



注:PVDF为聚偏氟乙烯;PZT为锆钛酸铅.

图 11 基于先驱体陶瓷制备的薄膜传感器

Fig. 11 Thin-film sensors based on precursor ceramic fabrication

(a)—金属基薄膜温度传感器样片;(b)—温度传感测试曲线;(c)—金属基薄膜应变传感器样片;
(d)—应变传感电阻测试曲线;(e)—金属基压电薄膜加速度传感器样片;(f)—加速度传感测试曲线.

3.4 源端监测微系统与信号分析处理

在智能轴承传感信号采集处理微系统技术方面,目前主流技术大多具备传感能力,通过轴承外部电路单元实现信号放大调理与传输,极少能在轴承内部源端进行监测信号的处理.因此,在微小化高度集成的轴承监测微系统硬件开发与片上计算技术方面,学者仍然面临较大挑战.

随着微芯片系统功能愈发复杂,单片集成电路已无法满足复杂微系统的集成需求,IC(integrated circuit)技术领域着力于三维异质异构集成技术的开发与优化^[33].TSMC(台湾积体电路制造股份有限公司)开发的集成芯片系统(system on integrated chips, SoIC)技术通过在硅基 Interposer 上以 2.5D/3D 方式集成同构/异构 Chiplet,可使凸点间距减小至原来的 1/4,互连密度提高 16 倍以上,互连寄生减小至原来的 1/10 以下^[34].Ki 等^[35]提出的 SWIFT 晶圆级集成技术可使引线间距缩减至 2 mm.Intel Agilx 系列高性能 FPGA(field-programmable gate array)采用 EMIB(embedded multi-die interconnect bridge)集成技术将多个 Chiplet 灵活组合,可实现 116 Gb/s 的数据收发速率,且功耗降低了 40%^[36].DARPA(美国国防高级研究计划局)基于可扩展毫米波架构

(scalable millimeter-wave architectures for reconfigurable transceivers, SMART),利用 3D 集成技术将天线、GaAs 放大器、移相器等多个晶圆集成,研制了可重构收发器,成功使系统高度减小至 1 cm 以下,并将微系统输出功率提升至 100 W^[37].可以看出,系统集成技术是研制多功能、高性能、微型化、高可靠电子系统的重要技术.

东北大学团队开展了源端元件电学互联结构设计及制备研究,分析源端元件信号传输稳定性的劣化演变机理,掌握模数转换和信号调理功能一体化微系统设计及组装工艺流程,实现了多参量源端监测元件、处理电路、供电电路与信号传输电路的高可靠低功耗集成.所研制出的采集系统总体设计方案如图 12 所示.采用静态 ADC(analog-digital converter)和 MCU(microcontroller unit)进行采集与数据处理.对于 ADC 采用 ADS124S08,MCU 采用 STM32H750,通过 UART(universal asynchronous receiver/transmitter)与上位机系统传输数据.应变与温度通过 ADS124S08 进行采集,振动信号经过放大滤波电路后由 STM32H750 中的 ADC 进行采集.开发出的智能轴承内嵌 PCB(printed circuit board)集成电路微系统如图 13 所示.

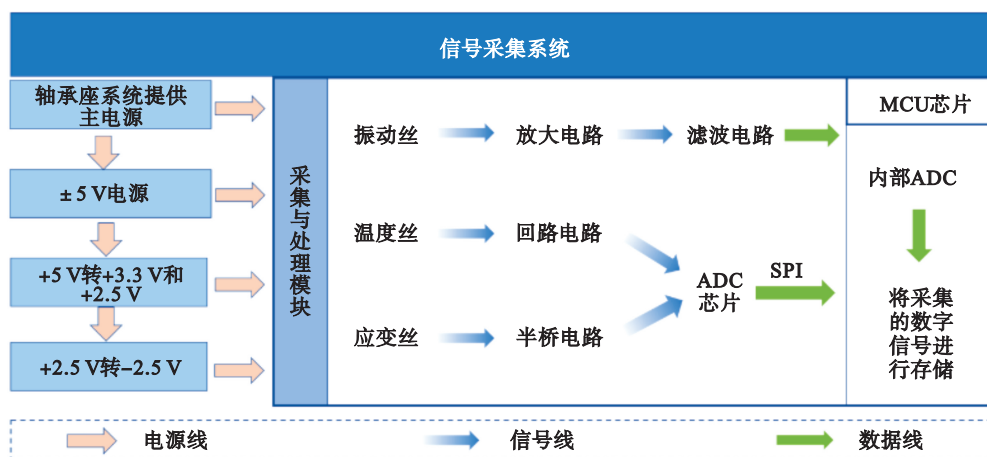


图 12 采集系统总体设计图

Fig. 12 Overall design of the acquisition system

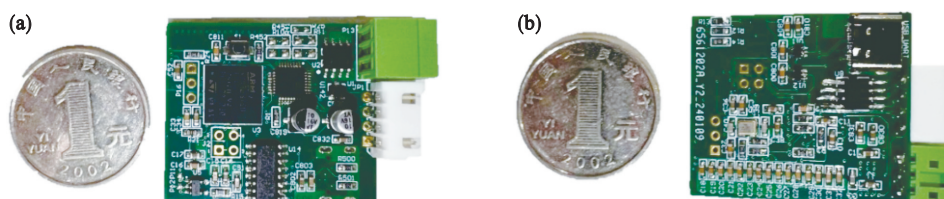


图 13 PCB与集成电路实物图

Fig. 13 Physical diagram of PCB and integrated circuit

(a)—正面; (b)—反面.

3.5 智能轴承服役状态的源端监测信号特征分析及早期预警技术

智能轴承的突出特点是对轴承服役状态的源端监测能力,进而具有先进的状态监测和异常诊断功能.由于传感器内置于轴承之中,相比外置式传感器的检测能力明显提高,能够以更高灵敏度检测轴承状态,从而尽早诊断出运行状态的异常.

目前已开展了较多相关研究,例如,闫柯等^[38]研究了合成量子点温敏传感器,通过量子点材料的感温感光特性,实现滚动轴承内圈、保持架温度测量.邵毅敏等^[24]优化了外挂式轴承结

构,设计了1种基于嵌入式多参量传感器的智能轴承,并以NNU4930/W33型双列圆柱滚子轴承为例进行试验验证,构造具有2个振动加速度传感器、转速传感器及温度传感器的复合传感器装置.这种智能轴承监测结构相对独立,可以实现高温、强噪声及重油污等恶劣工况条件下实时监测轴承的运行状态,相比于传统轴承,故障信号特征明显,如图14所示.葛亮^[39]开发了1种具有在线监测及诊断功能的高速铁路车辆用双列圆柱滚子智能轴承,设计了原理样机并进行模拟故障实验,实现了基于多参量的故障信号特征提取和分析.

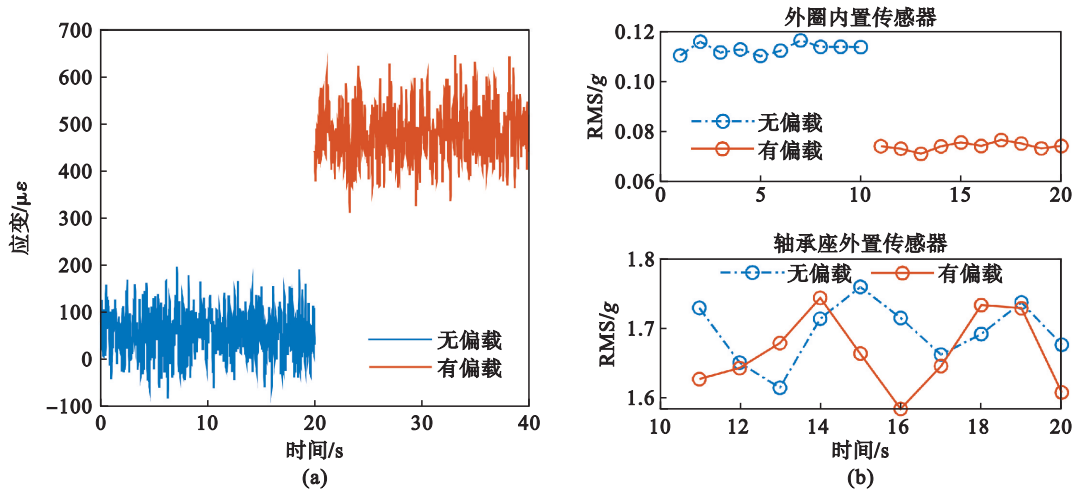


图14 偏载作用下轴承套圈嵌入槽应变信号与加速度有效值

Fig. 14 Strain signal and RMS of acceleration of the bearing's ring embedded groove under partial load

(a)—应变; (b)—加速度有效值.

由于智能轴承监测微系统采样频率及信号传输速度的限制,以及缺少早期微弱故障样本,给异常识别和故障预警带来困难.为此,重点研究多参量融合的自适应机器学习异常识别机制,开发出运算次数少、网络模型轻量化并满足计算结果需要的源端数据处理技术格外重要.此技术应能够对振动、温度、转速、载荷等信号在线采集、压缩传输、滤波、去噪,从而突破采样频率低、信号传输速度慢和早期故障信号微弱的限制,提高智能轴承的早期微弱故障预警能力,为微系统智能运维决策提供支持.

东北大学团队利用所研制的感知微系统内嵌式智能轴承,在工程机械轴承试验机上开展了源端应变信号和加速度信号的直接测量,并与轴承座上测得的加速度信号进行对比,结果如图14所示.通过信号的时域特征参数对比,可以明显看出:在套圈上测得的应变信号与振动加速度信号均对轴承受到偏载作用等导致的状态变化十

分敏感,而常规的轴承座拾振信号没有任何变化,特征分析的结果不能用于状态评价与故障诊断.图14a所示在轴承外套圈上测得的应变信号随施加的单向径向载荷(偏载)的变化而发生明显变化.而在图14b中,在套圈上测得的加速度信号有效值(即均方根,RMS)也具有相应的明显变化特点,而在轴承座上测得的加速度信号则没有随着偏载的施加而发生明显变化.

4 结论与展望

智能轴承是高端轴承的发展趋势,感知微系统内嵌式智能轴承由于源端监测的高敏感性和可互换性的突出优点,将会在工程中得到愈加广泛的应用.本文首先总结了现有智能轴承的类型和特点,以及国内外的研究进展和发展态势.然后,针对内嵌式智能轴承功能结构一体化设计,从内嵌式智能轴承的服役状态源端监测理论、功

能结构一体化设计、多参量传感器原位制备与集成、源端监测微系统与智能运维以及内嵌式智能轴承源端监测信号特征分析及早期预警 5 个方面对其关键技术进行了探讨,同时也为未来的发展方向提供了研究思路。

感知微系统内嵌式智能轴承开发重点在于真实载荷与工况条件的轴承整体结构强度的分析,构建异构结构智能轴承疲劳分析、寿命设计与可靠性评价方法;掌握保证多参量测量功能的多层敏感元件几何结构设计及强度分析方法;构建功能条件约束下内嵌式微系统的敏感元件、集成电路与封装系统的结构设计方法,实现疲劳强度分析与热功能设计;提出智能轴承功能设计和结构设计的考核方法,形成功能结构一体化设计技术体系。感知微系统内嵌式智能轴承的成功应用将在继承传统智能轴承自感知、自决策以及自调控的基础上,最终实现滚动轴承的高性能设计、精准装调、动力学调控、故障预警与智能运维。

参考文献:

- [1] 王政. 制造强国 步履铿锵[N/OL]. 人民日报, 2022-08-15 [2024-08-01]. [https://data. people. com. cn/rmrb/20220815/1](https://data.people.com.cn/rmrb/20220815/1). (Wang Zheng. Make a powerful country, with a sonorous step [N/OL]. People's Daily, 2022-08-15 [2024-08-01]. [https://data. people. com. cn/rmrb/20220815/1](https://data.people.com.cn/rmrb/20220815/1).)
- [2] 跟着总书记看中国 | 制造强国[EB/OL]. (2024-07-29) [2024-08-01]. <http://v. people. cn/n1/2024/0729/c447862-40287792.html>. (Follow the general Secretary to see China | manufacturing powerhouse [EB/OL]. (2024-07-29) [2024-08-01]. [http://v. people. cn/n1/2024/0729/c447862-40287792.html](http://v.people.cn/n1/2024/0729/c447862-40287792.html).)
- [3] 周济. 推进制造业数字化转型、智能化升级[J]. 现代制造, 2024(2): 54. (Zhou Ji. Promote digital transformation and intelligent upgrading of manufacturing industry[J]. *Maschinen Markt*, 2024(2): 54.)
- [4] 何加群. 论我国重大技术装备轴承的自主安全可控[J]. 轴承, 2022(1): 1-17. (He Jia-qun. Discussion on independence, safety and controllability of bearings for major technical equipment in China[J]. *Bearing*, 2022(1): 1-17.)
- [5] 马芳, 刘璐. 航空轴承技术现状与发展[J]. 航空发动机, 2018, 44(1): 85-90. (Ma Fang, Liu Lu. Present situation and development of aviation bearing technology[J]. *Aeroengine*, 2018, 44(1): 85-90.)
- [6] 陈金海, 李伟, 张文远, 等. 智能滚动轴承监测方法与技术研究现状综述[J]. 机械强度, 2021, 43(3): 509-516. (Chen Jin-hai, Li Wei, Zhang Wen-yuan, et al. Research status of smart rolling bearing monitoring methods [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2021, 43(3): 509-516.)
- [7] Brusa E. Design of a kinematic vibration energy harvester for a smart bearing with piezoelectric/magnetic coupling[J]. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2020, 27(15): 1322-1330.
- [8] 朱永生, 张盼, 袁倩倩, 等. 智能轴承关键技术及发展趋势[J]. 振动. 测试与诊断, 2019, 39(3): 455-462, 665. (Zhu Yong-sheng, Zhang Pan, Yuan Qian-qian, et al. Key technologies and development trend of smart bearing [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2019, 39(3): 455-462, 665.)
- [9] 高航, 吕青, Gao Robert X. 基于微传感器的智能轴承技术[J]. 中国机械工程, 2003, 14(21): 1883-1885. (Gao Hang, Lyu Qing, Gao R X. Technology of smart bearing based on microsensors [J]. *China Mechanical Engineering*, 2003, 14(21): 1883-1885.)
- [10] Fukushima Y, Goto T, Toyoguchi Y, et al. Development of sensor integrated bearing "Talking Bearings TM" [J]. *NTN Technical Review*, 2022(89): 35-40.
- [11] Zaghari B, Weddell A S, Esmacili K, et al. High-temperature self-powered sensing system for a smart bearing in an aircraft jet engine [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, 69(9): 6165-6174.
- [12] Choi D, Sung T, Kwon J Y. A self-powered smart roller-bearing based on a triboelectric nanogenerator for measurement of rotation movement[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2018, 3(12): 1800219.
- [13] Zhang Y, Wang W, Wu X, et al. A comprehensive review on self-powered smart bearings [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023, 183: 113446.
- [14] Guimarães O A, Almeida S A, de Jose A C, et al. Design and experimental analysis of a smart bearing using shape memory alloy springs [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2020, 31(11): 1390-1402.
- [15] 张志鑫, 牛青波, 杨明奇, 等. 基于多物理量集成的智能轴承监测系统[J]. 轴承, 2024(4): 55-63. (Zhang Zhi-xin, Niu Qing-bo, Yang Ming-qi, et al. Intelligent bearing monitoring system based on multi physical quantity integration[J]. *Bearing*, 2024(4): 55-63.)
- [16] 林昱涛, 牛青波, 马天旭, 等. 基于 Transformer 的智能轴承声-振融合故障诊断[J]. 轴承, 2023(2): 67-73. (Lin Tan-tao, Niu Qing-bo, Ma Tian-xu, et al. Acoustic-vibration fusion fault diagnosis for intelligent bearing based on transformer[J]. *Bearing*, 2023(2): 67-73.)
- [17] Han Q K, Ding Z, Qin Z Y, et al. A triboelectric rolling ball bearing with self-powering and self-sensing capabilities [J]. *Nano Energy*, 2020, 67: 104277.
- [18] 邵毅敏, 涂文兵, 叶军. 新型智能轴承的结构与监测能力分析[J]. 轴承, 2012(5): 27-31. (Shao Yi-min, Tu Wen-bing, Ye Jun. Analysis on structure and monitoring capability of new type smart bearings [J]. *Bearing*, 2012(5): 27-31.)
- [19] 陈小龙, 仲志丹, 李云峰, 等. 基于智能滚子的轴承接触载荷测量方法[J]. 轴承, 2024(10): 18-25. (Chen Xiao-long, Zhong Zhi-dan, Li Yun-feng, et al. Measurement method for contact load of bearings based on intelligent rollers[J]. *Bearing*, 2024(10): 18-25.)
- [20] 培恩. 斯凯孚(SKF)发布突破性的轴承状态监测技术: 斯凯孚洞悉[J]. 润滑与密封, 2013, 38(5): 18. (Paine. SKF released a breakthrough bearing condition monitoring technology: SKF insight [J]. *Lubrication Engineering*, 2013, 38(5): 18.)
- [21] Andreas S. Bearing with airborne sensors[EB/OL]. (2017-08-23) [2024-09-10]. [https://mma. vogel. com. cn/c/2017-08-23/876615.shtml](https://mma.vogel.com.cn/c/2017-08-23/876615.shtml).
- [22] 恩梯恩开发出内置传感器的万向节轮毂单元[J]. 润滑与

- 密封, 2013, 38(3): 60.
(Entien developed a universal joint hub unit with built-in sensors[J]. *Lubrication Engineering*, 2013, 38(3): 60.)
- [23] NSK. NSK 高性能轴承成功应用于北海道新干线列车 [EB/OL]. (2015-12-14) [2024-08-01]. <https://www.nsk.com.cn/company/news/2015/news150806.html>.
(NSK. NSK high-performance bearings have been successfully applied to the Hokkaido Shinkansen trains [EB/OL]. (2015-12-14) [2024-08-01]. <https://www.nsk.com.cn/company/news/2015/news150806.html>.)
- [24] 邵毅敏, 涂文兵, 周晓君, 等. 基于嵌入式多参量传感器的智能轴承[J]. *中国机械工程*, 2010, 21(21): 2527-2531.
(Shao Yi-min, Tu Wen-bing, Zhou Xiao-jun, et al. Smart bearing based on embedded multi-parameter sensors [J]. *China Mechanical Engineering*, 2010, 21(21): 2527-2531.)
- [25] 斯凯孚公司. 传感化的滚子: 201811607467.7[P]. 2022-02-08.
(SKF.Sensorized roller: 201811607467.7[P]. 2022-02-08.)
- [26] 肖嘉伟, 张艺超, 陈市, 等. 嵌入式智能轴承信息感知测点优化方法[J]. *轴承*, 2023(2): 12-18.
(Xiao Jia-wei, Zhang Yi-chao, Chen Shi, et al. Optimization method for information sensing measuring points of embedded smart bearing [J]. *Bearing*, 2023(2): 12-18.)
- [27] 陈金海, 张文远, 罗梦婷, 等. 智能滚动轴承内圈温度监测系统研究[J]. *仪表技术与传感器*, 2021(10): 103-108.
(Chen Jin-hai, Zhang Wen-yuan, Luo Meng-ting, et al. Research on temperature monitoring system of inner ring of intelligent rolling bearing [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2021(10): 103-108.)
- [28] 张文远, 陈金海, 花国然, 等. 嵌入式智能轴承结构分析与振动监测系统设计[J]. *机械强度*, 2022, 44(6): 1293-1299.
(Zhang Wen-yuan, Chen Jin-hai, Hua Guo-ran, et al. Research on embedded smart bearing structure analysis and vibration monitoring system design [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2022, 44(6): 1293-1299.)
- [29] Chen J H, Zhang W Y, Wang H. Intelligent bearing structure and temperature field analysis based on finite element simulation for sustainable and green manufacturing [J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2021, 32(3): 745-756.
- [30] 刘浩, 杨拥民, 陈仲生. 基于嵌入式传感器的智能轴承结构分析[J]. *兵工自动化*, 2006, 25(6): 43-45.
(Liu Hao, Yang Yong-min, Chen Zhong-sheng. Structural analysis of smart bearing based on embedded sensor [J]. *Ordnance Industry Automation*, 2006, 25(6): 43-45.)
- [31] 张以忱, 刘希东, 巴德纯, 等. 智能轴承用薄膜传感器[J]. *真空*, 2003, 40(6): 6-10.
(Zhang Yi-chen, Liu Xi-dong, Ba De-chun, et al. Thin film sensor application in smart bearing [J]. *Vacuum*, 2003, 40(6): 6-10.)
- [32] Bashir I, Zaghari B, Harvey T J, et al. Design and testing of a sensing system for aero-engine smart bearings [C]// *Proceedings of EUROSENSORS 2018*. Graz, 2018: 1005-1009.
- [33] 朱晓泉, 周瑜, 刘云飞, 等. 微系统技术发展现状及趋势[J]. *电声技术*, 2021, 45(7): 21-29.
(Zhu Xiao-xiao, Zhou Yu, Liu Yun-fei, et al. Development status and trends of microelectronic information system [J]. *Audio Engineering*, 2021, 45(7): 21-29.)
- [34] Chen M F, Chen F C, Chiou W C, et al. System on integrated chips (SoIC (TM) for 3D heterogeneous integration [C]// *2019 IEEE 69th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*. Las Vegas, 2019: 594-599.
- [35] Ki W, Lee W, Mok I, et al. Chip stackable, ultra-thin, high-flexibility 3D FOWLP (3D SWIFT® technology) for hetero-integrated advanced 3D WL-SiP [C]// *IEEE 68th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*. San Diego, 2018: 580-586.
- [36] Ganusov I K, Iyer M A, Cheng N, et al. Agilix™ generation of Intel® FPGAs [C]// *2020 IEEE Hot Chips 32 Symposium (HCS)*. Palo Alto, 2020: 1-26.
- [37] Bhutani A, Gottle B, Lipp A, et al. Packaging solution based on low-temperature cofired ceramic technology for frequencies beyond 100 GHz [J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2019, 9(5): 945-954.
- [38] 闫柯, 高闯, 朱永生, 等. 基于碲化镉量子点的滚动轴承内圈测温原理与实现技术[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(4): 134-140.
(Yan Ke, Gao Chuang, Zhu Yong-sheng, et al. Research on the temperature measurement principle and realization technology of rolling bearing inner ring based on CdTe quantum dots [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(4): 134-140.)
- [39] 葛亮. 基于嵌入式传感器的铁路车辆智能轴承关键技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009: 24-26.
(Ge Liang. Research on key technologies of intelligent bearings for railway vehicles based on embedded sensors [D]. Chongqing: Chongqing University, 2009: 24-26.)