



牵引电机智能轴承技术研究

朱永生¹, 高睿轩¹, 林昱涛¹, 任智军², 洪 军¹

(1. 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, 陕西 西安 710049;

2. 西安交通大学 前沿科学技术研究院, 陕西 西安 710049)

摘要: 针对传统外部传感器在牵引电机轴承状态监测中存在的信号传递衰减与环境噪声干扰问题, 文章提出并研制了一种面向轨道交通牵引电机的高性能智能轴承系统。在硬件方面, 设计了宽频声学信号监测模块、轴承内圈温度监测模块及抗干扰振动监测模块, 以提升复杂环境下多源信号的高保真采集性能与系统运行可靠性; 在软件层面, 开发了高集成度、模块化的信号处理与状态评估算法。通过模拟试验台验证了该系统能准确、稳定地捕获高频声音与高保真振动信号, 内圈温度测量误差小于 $\pm 2^{\circ}\text{C}$, 并可有效识别轴承早期润滑不足状态。研究表明, 该系统为提升轨道交通牵引电机轴承的智能化监测技术水平与列车运行安全提供了重要的工程实践支持。

关键词: 轨道交通; 牵引电机; 智能轴承; 状态监测; 多源信号采集

中图分类号: TH133.33; U264.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-128X(2026)01-0013-08

0 引言

随着轨道交通技术向高速化、重载化方向飞速发展, 牵引电机作为列车的“心脏”, 其运行可靠性直接关系到整个轨道交通系统的运营安全^[1]。牵引电机轴承作为核心支撑组件, 其状态直接影响电机的性能与服役寿命。然而, 在变载荷、高转速及复杂轮轨激励等恶劣工况下长期运行, 牵引电机轴承极易出现磨损、疲劳以及由变频驱动引发的电腐蚀等问题。若不能及时发现和解决, 不仅会导致电机骤停、大幅增加维保成本, 还可能引发列车晚点、停运甚至脱轨等严重的公共交通安全事故^[2]。因此, 对轨道交通牵引电机轴承进行精准、实时的状态监测至关重要^[3]。

相比于传统外部安装传感器的监测方式, 智能轴承^[4-5]将多种微传感器与电子元器件集成于轴承本体, 缩短了信息传递路径, 减少了其他部件的噪声干扰, 具有信号质量高的优势^[6], 为轴承早期微弱故障或不良状态的提前预警提供了可能^[7]。轴承行业领先企业已相继推出相应的智能轴承产品并实现工程应用。例如,

SKF Insight^[8]解决方案成功应用于列车轴承监测, 使维护成本降低了30%; 舍弗勒公司推出的VarioSense轴承^[9]实现了润滑监测与自调控。由此可见, 智能轴承技术正逐渐成为轴承状态监测发展的重要方向。

当前, 智能轴承主要采用外挂式监测方案^[10-12], 即将采集系统通过附加结构集成于轴承端面以实现其功能。例如, 文献[13]通过无线供电技术和滚动轴承旋转套圈, 并采用外挂方式与轴承外圈贴合, 实现了轴承内圈温度采集与振动监测。然而, 该方案将温度和振动监测模块分别设计为独立板块, 导致系统集成度较低; 且内圈温度监测方法复杂, 不利于工业实际应用。文献[14]采用外挂式结构实现了轴承温度、转速和振动的集成监测。但研究中振动背景噪声较大, 未经实际测试, 其准确性、可靠性及对轴承监测的有效性尚待验证。此外, 该研究采用杜邦线连接4G通信模组进行数据传输, 既降低了系统集成度, 又导致接口稳定性与可靠性不足, 影响数据传输的准确性。文献[15]以及文献[4]等在外挂结构基础上集成了声音、振动、温度、转速及载荷5种物理量的集成监测, 并初步验证了数据采集的基本功能。但受限于采集芯片

基金项目: 山西省科技重大专项计划“揭榜挂帅”项目(202501110101009)

通信作者: 任智军, 男, 博士, 硕士生导师, 主要从事滚动轴承数字化设计及智能化方面的研究; E-mail: renzhijun@xjtu.edu.cn

引用格式: 朱永生, 高睿轩, 林昱涛, 等. 牵引电机智能轴承技术研究[J]. 机车电传动, 2026(1): 13-20. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2026.01.002.

Citation: ZHU Yousheng, GAO Ruixuan, LIN Yantao, et al. Smart bearing technology for traction motors[J]. Electric drive for locomotives, 2026(1): 13-20. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2026.01.002.

性能, 信号质量不足以支持高频数据采集及相应算法的嵌入, 难以实现高频信息监测功能。此外, 上述研究还存在功能单元划分缺乏独立性、程序运行可靠性不足等问题。

尽管当前智能轴承已具备多物理量采集的基本功能, 但在监测轴承状态时仍存在信号监测性能不足的问题, 主要体现在以下 3 个方面: ①高频信息监测能力受限。轴承长时间运转时, 相比于轴承缺陷故障, 磨损和润滑不足等问题更为常见。Mobil 公司^[16]的试验结果表明, 润滑和轻微撞击产生的信号特征频率常出现在 30 kHz 范围, 而当前智能轴承的声音监测频宽仅为 20 kHz^[15], 难以全面提取轴承早期的微弱故障特征^[17], 这无形中增大了可靠监测有效信息的难度。②内圈温度监测能力受限。轴承运转过程中, 接触摩擦会产生大量热量, 导致温升过大。在冷却系统作用下, 内圈温升显著大于外圈^[18], 因此外圈温度可能无法及时反映轴承的异常状态。但现有智能轴承仅监测外圈温度, 缺乏内圈温度信息。③监测系统可靠程度较低。现有智能轴承应用的传统模拟式芯片用于振动监测时, 易受电磁、温度等干扰^[19], 影响有效信号的捕捉。

针对上述问题, 本文从边缘端硬件监测系统与上位机软件系统两方面入手, 研究了一种面向牵引电机的高可靠性智能轴承系统。在硬件层面, 设计了宽频声学信号监测模块, 扩展声音监测频宽, 实现轴承全局性故障的监测; 设计了轴承内圈温度监测模块, 全面掌握轴承运行时的温度状态; 改进了振动监测方法, 提高了抗干扰能力, 确保在复杂环境中能稳定、准确地获取振动数据; 同时, 对主控、存储及通信模块进行优化设计, 提升了系统的整体可靠性。在软件层面, 开发了集成化、模块化的软件算法。最后, 通过试验验证了该智能轴承监测系统的有效性。本研究为提升轨道交通牵引电机轴承的智能化监测技术水平与列车运行安全提供了技术支撑。

1 智能轴承监测系统研究

1.1 总体监测框架

为实现智能轴承对振动、声音、温度、转速及载荷等多物理量的综合监测需求, 本文设计了如图 1 所示的智能轴承总体监测框架。首先, 利用智能轴承硬件监测系统实时采集多物理量数据, 并将其上传至上位机进行存储与初步处理。随后, 上位机将处理后的数据进一步上传至云端, 结合大数据和机器学习技术, 训练出适用于各种工况且具备多种功能的监测诊断模型。最后, 通过高效的模型部署策略, 将训练好的模型集成至边缘端, 实现智能轴承的“自诊断”功能。云平台负责接收数据并训练监测模型, 再将模型植入

到边缘端以实时监测轴承状态。其中, 硬件系统与上位机软件系统是获取高质量轴承信号、实现边缘处理的重要基础。因此, 本文主要聚焦于这两个方面的研究。

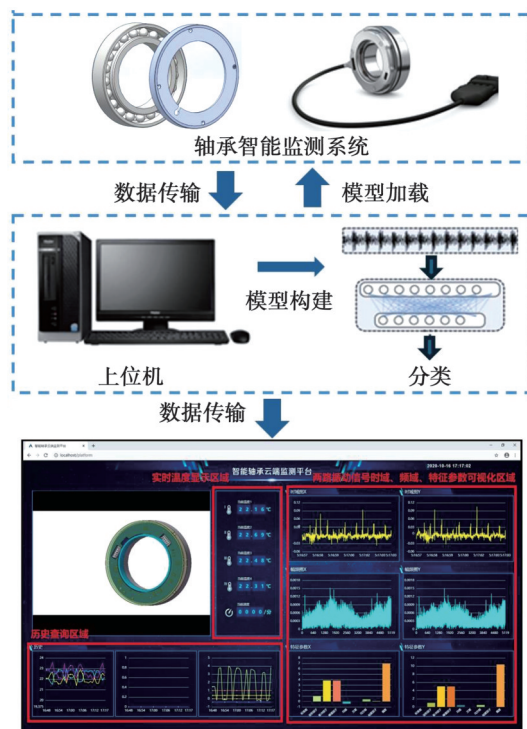


图1 智能轴承总体监测框架

Fig. 1 Overall monitoring framework for smart bearings

1.2 硬件系统

根据上述智能轴承监测系统的功能需求, 硬件部分划分为数据采集、存储、通信、主控及电源管理 5 个模块, 如图 2 所示, 以下将对它们进行详细分析。

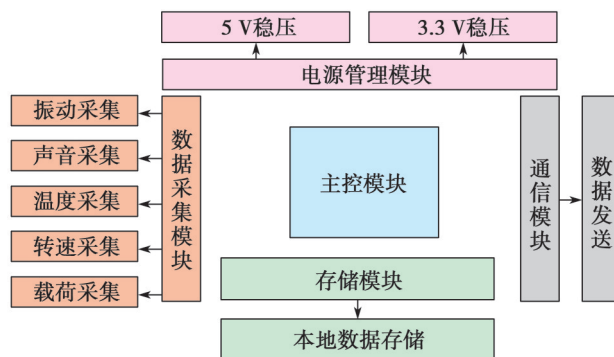


图2 智能轴承硬件系统功能模块

Fig. 2 Functional modules of smart bearing hardware system

1) 数据采集模块

数据采集模块集成了多种传感器, 负责将轴承的各类物理量信息转换为电信号并将其传递至主控模块。在模块设计中, 传感器的选型需综合考虑轴承状态特征频率的频带范围, 以及传感器体积与结构空间的匹配关系。具体而言, 振动传感器选用三轴式数字振动传感器, 相较于现有智能轴承监测系统常用的模拟式

振动传感器^[15], 无须集成ADC芯片及对数模电路进行划分, 不仅简化了电路设计, 而且提高了信号的抗干扰能力。此外, 该传感器可同时监测3个方向的振动信号, 提升了振动监测的全面性和准确性。声学传感器选用频宽为80 kHz的数字声音传感器, 覆盖了润滑状态的特征频段, 为润滑监测提供了保障。内圈温度监测采用红外传感器, 转速测量采用霍尔转速传感器方案, 载荷测量采用应变电桥方案。

2) 存储模块

存储模块负责保存采集到的数据, 为用户提供充足的存储空间。本监测系统需采集声音、振动、温度、转速和载荷5种物理量, 其中振动和声音为快变信号, 对采样率要求较高, 因此产生的数据量也相对较大。为避免在数据传输过程中因网络中断而导致数据无法有效上传, 进而造成上位机端数据丢失, 有必要增设存储模块, 以确保数据的完整性与安全性。

3) 通信模块

通信模块负责将主控模块处理好的数据准确、无误地进行转发, 完成硬件监测系统与软件系统之间的对接。无线传输方式便于引入多个设备, 具有较高的系统扩展性, 同时有利于实现数据的云端存储。当前主流的无线通信技术主要包括无线局域网(WiFi)、ZigBee、蓝牙等。其中, WiFi技术具备传输速率快、传输距离远、模块体积小、易于集成等优点。尽管其功耗相对较高, 但本监测系统采用有线供电方式, 功耗并非关键制约因素。因此优先选择WiFi作为监测系统的无线通信方式。

4) 主控模块

主控芯片作为整个监测系统的核心控制单元, 不仅负责驱动传感器进行数据采集, 还承担数据存储、发送与分析等管理任务, 是保证系统高效运行的关键。在工业现场应用中, 主控芯片的选择需综合考虑低功耗、高性价比、快速响应、高可靠性与高稳定性等多方面要求。此外, 由于智能轴承设计对体积有较严格限制, 芯片的封装尺寸亦需纳入考量。基于上述因素, 本文选择STM32系列芯片作为监测系统的主控芯片。

5) 电源管理模块

电源管理模块负责将外部输入电压转换为各模块所需的工作电压。考虑到系统中存在5 V和3.3 V两种供电需求, 因此分别设计两个稳压模块, 将输入电压分别稳压至5 V和3.3 V, 从而保证在不同工况下为系统提供稳定可靠的电源输出。

基于上述模块设计, 本研究进一步构建了如图3所示的环形PCB电路板, 形成一套完整的智能轴承硬件监测系统。该监测系统采用微型化外挂式结构, 通过螺栓紧固方式安装于轴承外圈的轴向端面。此种安装方式确保了监测模块与轴承本体的刚性连接, 其优点主要体现在以下两方面: 一方面, 显著缩短了振动及

声学信号的传递路径, 有效减小信号在多级机械界面传输过程中的衰减, 从而获取更具代表性的宏观物理信号; 另一方面, 端面布置使红外温度传感器获得直接指向轴承内圈的测量视野, 能够更灵敏地捕获反映轴承核心运行状态的温升信息。

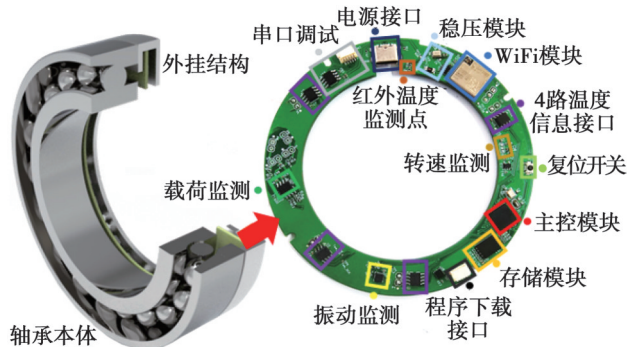


图3 智能轴承硬件结构设计

Fig. 3 Structural design of smart bearing hardware

1.3 软件系统

为满足智能轴承监测系统的功能需求, 除硬件系统外, 还需配套相应的软件系统, 以实现数据采集、存储、发送和监测功能, 如图4所示。本系统将软件划分为边缘端程序与上位机程序两部分。边缘端程序运行于智能轴承硬件平台, 具体包括硬件驱动模块、数据采集模块、数据存储模块、数据压缩模块、数据发送模块、看门狗设计以及数据诊断模块。上位机程序运行在本地计算机中, 二者通过WiFi无线通信方式完成数据传输。

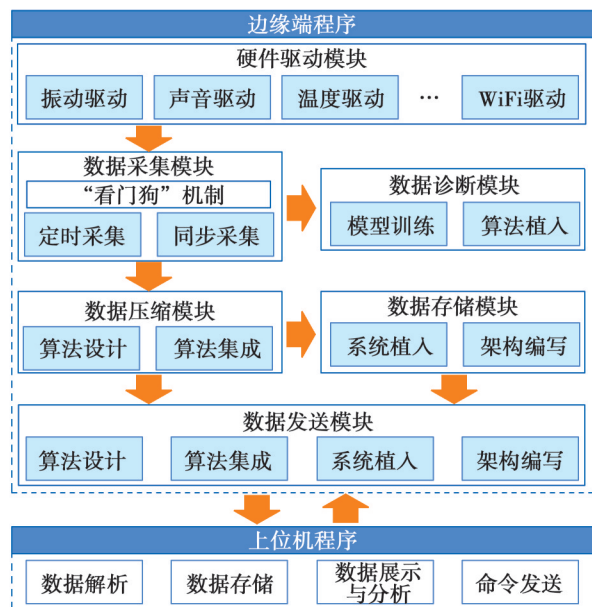


图4 智能轴承软件系统架构

Fig. 4 Architecture of smart bearing software system

硬件驱动模块负责开发适配各芯片的底层驱动, 以保证各芯片基本功能的实现, 为其他程序的开发奠定基础。数据采集模块主要负责协调不同传感器的运

行, 确保其有序、高效地同步采集所需数据, 从而解决多物理量同步采集的问题。看门狗模块用于保障程序的可靠运行, 实时监测系统状态, 防止因异常情况导致系统崩溃。数据压缩模块能够提升数据传输效率并降低存储空间占用。数据诊断模块负责完成诊断模型的训练并将其集成至监测系统的边缘端, 从而实现轴承状态监测功能。基于 FAT 文件管理系统的数据存储模块, 主要完成文件系统的植入及存储架构的编写, 通过建立文件索引实现对压缩数据的存储, 提高了数据存储管理的效率。基于 WiFi 的数据发送模块主要实现与上位机的数据对接, 保证监测数据的稳定、无差错传输。上位机的主要任务是发送控制命令, 接收、存储和展示监测数据, 并为故障诊断算法提供服务, 其界面如图 5 所示。上述功能模块协同工作, 共同支撑智能轴承监测系统的稳定、高效运行。

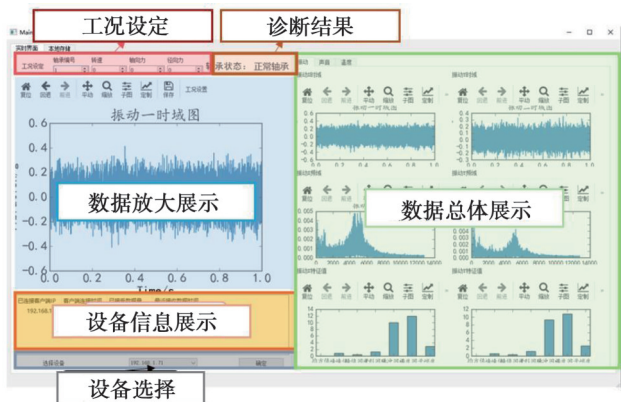


图 5 上位机软件界面

Fig. 5 Upper computer software interface

2 试验验证

为验证上述智能轴承监测系统在多物理量采集方面的准确性与稳定性, 以及其对牵引电机轴承中较为常见的润滑状态监测的有效性, 分别进行了信号采集试验和润滑监测试验。

2.1 信号采集试验

1) 振动信号采集

振动信号是轴承故障诊断中最常见且最有效的信号, 其采集的准确性直接关系到后续算法的可靠性。因此, 有必要开展振动信号采集验证试验。为验证智能轴承监测系统在振动信号采集准确性及冲击响应能力方面的性能, 设计了敲击试验。

在试验中, 采用商业振动传感器 (BK4535 型) 搭配米勒贝母数据采集设备, 与智能轴承监测系统同步进行数据采集, 两者采集到的振动数据对比如图 6 和图 7 所示。从时域响应对比图可以看出, 智能轴承监测系统与商业振动传感器对敲击激励的时域响应幅值基本相同, 均呈现明显的振动衰减特征, 且衰减时间和衰减过程基本一致。进一步分析频域响应对比图, 两者在敲击响应的频域表现基本一致, 频率成分和频率分量幅值均表现出相似的特征。上述对比试验结果表明, 智能轴承监测系统能够获得与商业设备基本一致的振动数据, 充分证明了本系统具备良好的振动监测能力。

此外, 为验证改进后的数字式振动传感器监测方案的抗干扰能力, 将改进前后的方案分别在转速 900

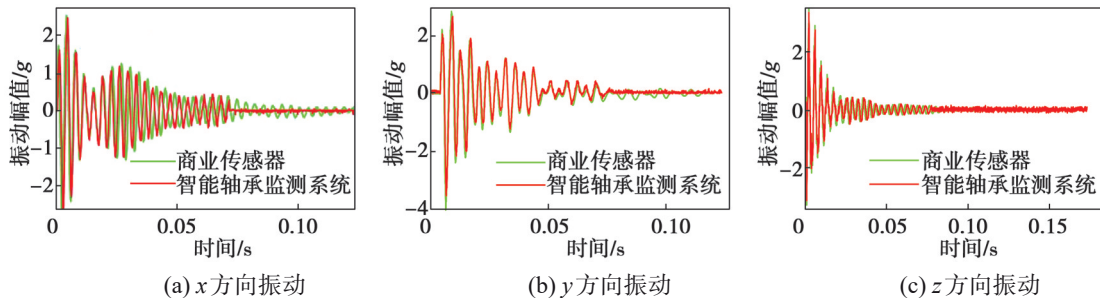


图 6 振动信号冲击响应时域对比

Fig. 6 Time-domain comparison of impulse responses to vibration signals

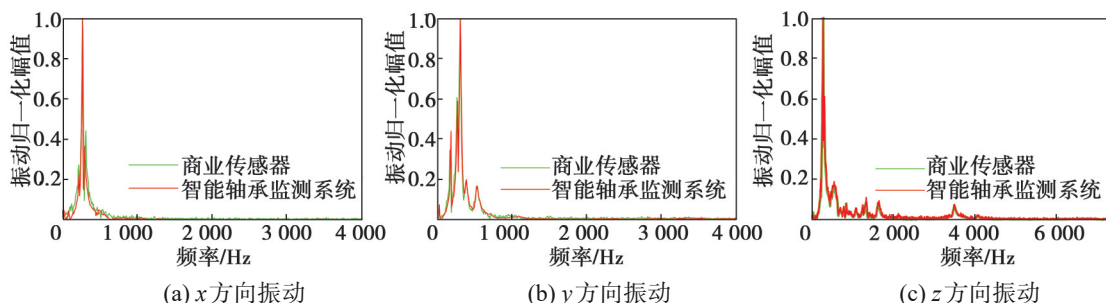


图 7 振动信号冲击响应频域对比

Fig. 7 Frequency-domain comparison of impulse responses to vibration signals

r/min、径向力1 000 N、轴向力1 000 N的工况下进行测试。对比分析测试结果如图8所示, 原方案在振动监测过程中存在约10 Hz的低频信号干扰现象; 相比之下, 优化方案有效消除了该干扰, 展现出更为稳定和可靠的性能。

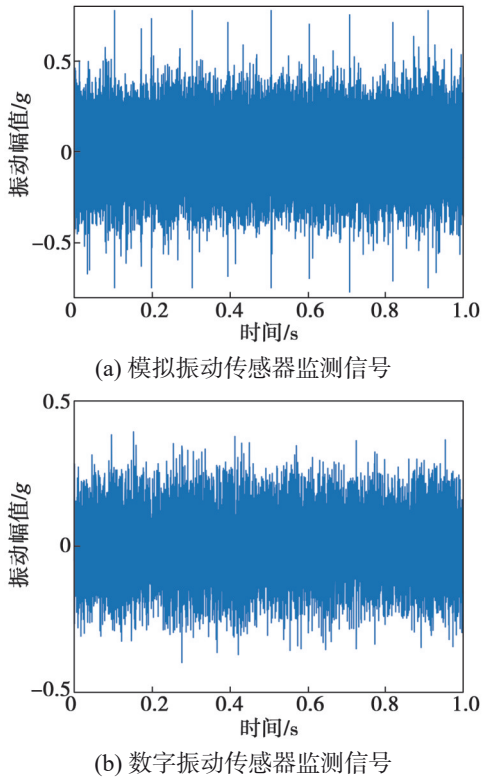


图8 振动监测方案对比

Fig. 8 Comparison of vibration monitoring schemes

2) 声音信号采集

声音信号对轴承全局性故障监测至关重要, 尤其是磨损和润滑不足等故障, 且此类故障在高频段往往表现出较强的响应。为了全面验证智能轴承监测系统在声音监测方面的灵敏度和准确性, 设计并开展了一系列频率响应验证试验。

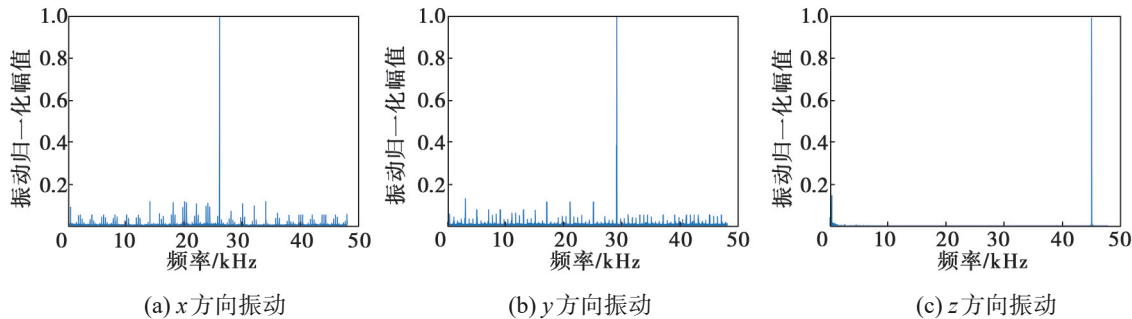


图10 声音信号频率响应

Fig. 10 Frequency response of sound signals

3) 内圈温度采集

为验证智能轴承内圈温度监测的有效性, 采用与商业数据采集系统MX100 (K型热电偶, 测量误差小于±0.7℃) 同步采集温度的方式进行对比。将智能轴承

为模拟不同频率的声音信号, 选用频率响应范围为2.5~60 kHz的高频扬声器PW5120N。由信号发生器产生不同频率的信号驱动扬声器, 以输出相应频率的声音, 从而构建可靠的声音信号源, 如图9所示。将智能轴承监测系统应用于不同频率声音环境下采集数据, 通过对比分析系统对各频率声音信号的响应, 验证其对声音信号的监测能力。试验中, 选取25 kHz、30 kHz和45 kHz作为示例频率, 由信号发生器产生相应信号。同时, 并将智能轴承监测系统放置在距离声源1 cm处进行信号采集。

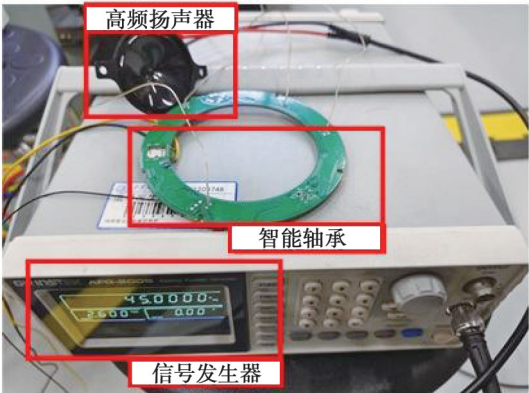


图9 声音响应试验

Fig. 9 Sound response test

智能轴承监测系统所采集信号的频域响应如图10所示。结果表明, 该系统能够对不同频率信号作出正确响应, 且在45 kHz以内的频率范围内表现良好。图10中出现的倍频信号可能源于扬声器自身的非线性特性: 在高频激励下, 扬声器易产生非线性失真, 进而激发基频的谐波或倍频分量。上述试验结果验证了智能轴承监测系统在高频段声音监测方面具有较高的可靠性和准确性, 系统具备良好的声音监测能力, 可有效捕捉轴承全局性故障中如磨损、润滑不足等导致敏感声音信号。

监测系统的红外温度传感器对准MX100的测温位置, 并在不同距离下设定变量进行温度采集。利用加热台模拟轴承的实际工作温度, 以相同采样率采集不同温度点的数据, 每个温度点重复采集10组数据, 通过取

平均值的方式减小随机误差。试验装置如图 11 所示。



图 11 内圈温度试验

Fig. 11 Inner race temperature test

内圈温度试验结果如图 12 所示，红外温度监测误差随着距离增加而增大。当距离为 1 cm 时，即实际监测过程中系统与轴承内圈的距离，监测误差最小，在 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内。上述试验结果表明，智能轴承监测系统能够有效、准确地捕捉内圈温度变化。

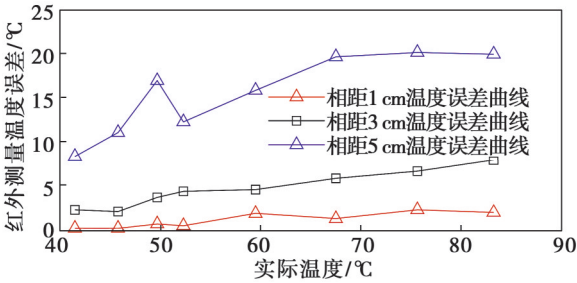


图 12 内圈温度试验结果

Fig. 12 Inner race temperature test results

2.2 润滑监测试验

轴承全局性缺陷是导致轴承故障的主要原因之一。FAG、SKF 等轴承制造商已针对轴承运转状态下的润滑不足问题开展深入研究，结果表明约 40%~80% 的轴承缺陷与润滑不足密切相关^[20-21]。在轴承全局性故障的早期阶段，由润滑不足引起的细微变化难以被传统状态监测设备捕捉。传统设备如加速度计的带宽通常低于 20 kHz，限制了其对此类微小变化的检测能力。此外，虽然声发射信号也可用于监测轴承全局性故障，但由于实际工作环境的限制以及声发射传感器自身体积较大，在故障源附近直接安装该传感器较为困难。为此，本系统利用高频 MEMS 麦克风采集轴承运行过程中的声音信号，以实现对此类微小变化的有效监测。

为验证智能轴承监测系统中声音信号对轴承润滑不良状态的监测能力，设计了如图 13 所示的轴承润滑试验。试验选用两个轴承作为研究对象，其中一个为充分润滑状态，润滑脂填充量占轴承内部空间的 1/3；

另一个为润滑不足状态，润滑脂填充量仅占轴承内部空间的 1/10。将两个轴承依次安装于 BPS 试验台上，在转速为 900 r/min、轴向载荷为 1 000 N、径向载荷为 1 000 N 的工况下，利用智能轴承监测系统进行监测。

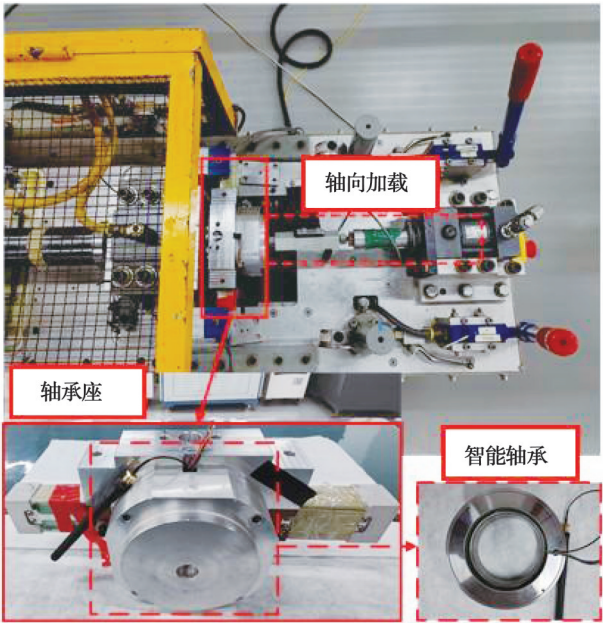
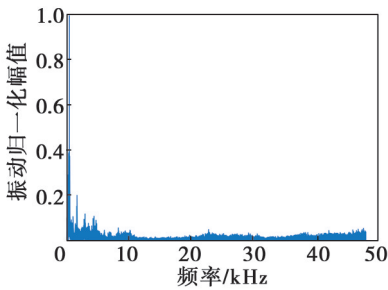


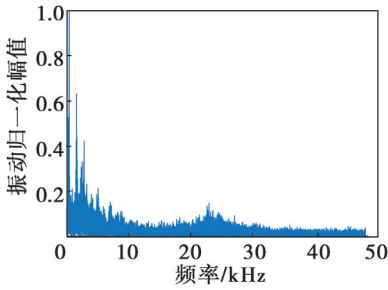
图 13 润滑监测试验

Fig. 13 Lubrication monitoring test

试验结果如图 14 所示。由图 14 可知，润滑正常的轴承在运转过程中，高频信号幅值无明显变化；而润滑不足的轴承在 20~30 kHz 频段内出现明显波峰。对比两者在高频信号上的差异，可清晰地看出润滑状态对轴承运行特性的影响。上述结果充分表明，智能轴承监测系统具备监测轴承润滑不足状态的能力。



(a) 润滑充分声音频谱



(b) 润滑不足声音频谱

图 14 润滑试验数据对比

Fig. 14 Comparison of lubrication test signals

3 结论

本研究针对牵引电机轴承状态监测需求, 设计并研制了智能轴承监测系统, 并与商业数据采集设备开展了多物理量信号采集与润滑状态监测的对比试验。主要结论如下:

①所研制的硬件监测模块具有良好的高频响应和抗干扰能力。系统可有效获取宽频声音(响应达45 kHz)和高保真振动信号, 消除了原方案中约10 Hz的低频干扰。

②内圈温度监测精度较高。利用红外传感器实现非接触式温度监测, 在1 cm间距下测量误差控制在 ± 2 °C以内, 能够准确反映轴承运行温升。

③系统具备早期不良润滑状态的监测能力。通过捕获20~30 kHz频段的高频声音特征, 可有效区分轴承正常润滑与润滑不足状态, 为轴承全局性故障预警提供了支撑。

尽管本系统在初步试验中表现良好, 但仍存在以下不足:

①当前研究侧重于硬件平台的设计与开发, 后续需进一步细化边缘端的特征提取算法与判据设计, 以支持更复杂的故障类型识别及状态定量评估。

②当前主要进行了实验室模拟环境下的性能验证, 后续需在强电磁干扰、高温等实际服役条件下, 开展系统可靠性及抗干扰能力的演化试验。

③当前开发的监测系统实现了工况信号的采集, 但载荷监测的长期可靠性与标定方法尚需深入研究。未来需探索轴承本体振动与轮轨激励、传动系统振动等外部成分的解耦分离算法, 以持续提升监测信号对轴承状态表征的专属性。

参考文献:

- [1] 谢永超, 吴灿辉, 严俊, 等. 轨道交通牵引电机智能综合测试系统设计[J]. 微电机, 2021, 54(6): 71-75.
XIE Yongchao, WU Canhui, YAN Jun, et al. Design of intelligent comprehensive test system for traction motor in rail transit[J]. Micromotors, 2021, 54(6): 71-75.
- [2] 杨岗, 卫昱乾, 李芾. 基于特征融合的牵引电机轴承声学故障诊断[J]. 机车电传动, 2023(2): 103-112.
YANG Gang, WEI Yuqian, LI Fu. Acoustic fault diagnosis of traction motor bearing based on fusion feature[J]. Electric drive for locomotives, 2023(2): 103-112.
- [3] 刘禹清, 陈再刚, 閻鑫, 等. 复杂机车振动环境下牵引电机轴承服役寿命评估[J]. 力学学报, 2022, 54(7): 1820-1829.
LIU Yuqing, CHEN Zaigang, GE Xin, et al. Service life evaluation of traction motor bearings in complicated vibration environment of a locomotive[J]. Chinese journal of theoretical and applied mechanics, 2022, 54(7): 1820-1829.
- [4] 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 Zhixin, NIU Qingbo, YANG Mingqi, et al. Intelligent bearing monitoring system based on multi physical quantity integration[J]. Bearing, 2024(4): 55-63.
- [5] 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.
ZHU Yongsheng, ZHANG Pan, YUAN Qianqian, et al. Key technologies and development trend of smart bearing[J]. Journal of vibration, measurement & diagnosis, 2019, 39(3): 455-462.
- [6] 崔宝珍, 王浩楠, 彭智慧, 等. 智能轴承自供电结构设计及仿真分析[J]. 轴承, 2023(1): 17-22.
CUI Baozhen, WANG Haonan, PENG Zhihui, et al. Design and simulation analysis of self-power supply structure of intelligent bearings[J]. Bearing, 2023(1): 17-22.
- [7] 张琛, 赵荣珍, 邓林峰, 等. 基于SVD-EEMD和TEO的滚动轴承弱故障特征提取[J]. 振动、测试与诊断, 2019, 39(4): 720-726.
ZHANG Chen, ZHAO Rongzhen, DENG Linfeng, et al. Weak fault feature extraction method for rolling bearings based on SVD-EEMD and TEO energy spectrum[J]. Journal of vibration, measurement & diagnosis, 2019, 39(4): 720-726.
- [8] 斯凯孚(中国)销售公司. 一种全新的轴承状态监测技术-斯凯孚洞悉(SKF Insight™)[J]. 设备管理与维修, 2013(11): 71.
SKF (China) Sales Company. A brand-new bearing condition monitoring technology-SKF Insight™[J]. Plant maintenance engineering, 2013(11): 71.
- [9] Schaeffler Technologies AG & Co. KG. Schaeffler Vari-oSense[EB/OL] (2019-09-17) [2025-10-12]. https://www.schaeffler.de/en/news_media/media_library/downloadcenter-detail-page.jsp?id=87447361.
- [10] 张凯, 梁波, 高昕星, 等. 多参数监测智能轴承的设计与研究[J]. 科技资讯, 2023, 21(21): 124-128.
ZHANG Kai, LIANG Bo, GAO Xinxing, et al. Design and research of intelligent bearings for multiparameter monitoring[J]. Science & technology information, 2023, 21(21): 124-128.
- [11] 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 Yimin, TU Wenbing, YE Jun. Analysis on structure and monitoring capability of new type smart bearings[J]. Bearing, 2012(5): 27-31.
- [12] 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 Yimin, TU Wenbing, ZHOU Xiaojun, et al. Smart bearing based on embedded multi-parameter sensors[J]. China mechanical engineering, 2010, 21(21): 2527-2531.
- [13] 王方哲. 滚动轴承嵌入式集成监测系统研究[D]. 西安: 西

- 安交通大学, 2018.
- WANG Fangzhe. Research on embedded integrated monitoring system for rolling bearing[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2018.
- [14] 雒特. 智能轴承多参量集成监测系统研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2020.
- LUO Te. Research on multi-parameter integrated monitoring system of intelligent bearing[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2020.
- [15] 马天旭. 多物理量智能轴承监测技术研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2022.
- MA Tianxu. Research on smart bearing monitoring technology of multiple physical parameters[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2022.
- [16] Mobil. Guide to electric motor bearing lubrication[EB/OL]. [2025-10-12]. <https://www.mobil.com/lubricants/-/media/Files/global/us/industrial/tech-topics/tt-electric-motor-bearing-lubrication-guide.pdf>.
- [17] 庞学苗, 裴春兴, 燕春光, 等. 动车组牵引电机接地故障预测[J]. 机车电传动, 2021(4): 126-130.
- PANG Xuemiao, PEI Chunxing, YAN Chunguang, et al. Electrical grounding fault prediction of EMU traction motor [J]. Electric drive for locomotives, 2021(4): 126-130.
- [18] 李宝良, 王慧颖, 毕琳. 基于摩擦影响的圆柱滚子轴承温度场分析[J]. 润滑与密封, 2016, 41(3): 5-9.
- LI Baoliang, WANG Huiying, BI Lin. Analysis of temperature field of cylindrical roller bearing based on friction effect [J]. Lubrication engineering, 2016, 41(3): 5-9.
- [19] 陈佩祥. 基于FPGA的振动信号采集与分析系统研制[D]. 济南: 山东大学, 2023.
- CHEN Peixiang. Development of vibration signal acquisition and analysis system based on FPGA[D]. Jinan: Shangdong University, 2023.
- [20] SKF. Bearing damage and failure analysis[EB/OL]. [2025-10-12]. https://cdn.skfmediahub.skf.com/api/public/093168a92d25cc46/pdf_preview_medium/093168a92d25cc46_pdf_preview_medium.pdf.
- [21] Schaeffler Technologies AG & Co. KG. Rolling bearing damage[EB/OL]. (2010-12-22) [2025-10-12]. https://www.schaeffler-industrial-drives.com/en/news_media/media_library/downloadcenter-detail-page.jsp?id=114073.

Smart bearing technology for traction motors

ZHU Yousheng¹, GAO Ruixuan¹, LIN Tantai¹, REN Zhijun², HONG Jun¹

(1. Key Laboratory of Education Ministry for Modern Design & Rotor-Bearing System, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China; 2. Frontier Institute of Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China)

Abstract: Smart bearing technology effectively overcomes the issues of signal attenuation and environmental noise interference commonly encountered by conventional external sensors during the monitoring of bearing condition of traction motors. This paper presents the design and development of a high-performance smart bearing system tailored for traction motors in rail transit applications. For hardware, a broadband acoustic signal monitoring module, a bearing inner race temperature monitoring module, and an anti-interference vibration monitoring module were designed to significantly improve the high-fidelity acquisition of multi-source signals and the overall system reliability in complex environments. For software, highly integrated and modular algorithms for signal processing and condition evaluation were developed. The experiments on a simulation test rig show that the system can accurately and stably capture high-frequency sound and high-fidelity vibration signals, that the error of inner race temperature measurement is within ± 2 °C, and that the system can effectively identify early-stage insufficient lubrication conditions. This study provides valuable engineering support for advancing intelligent monitoring technology for rail transit traction motor bearings and ensuring the safe operation of rail vehicles.

Keywords: rail transit; traction motor; smart bearing; condition monitoring; multi-source signal acquisition