

地铁列车牵引电机轴承故障诊断技术的实施

陈旻昱 徐春龙

济南轨道交通集团运营有限公司 山东 济南 250014

【摘要】：地铁列车牵引电机轴承作为保障列车安全与运行效率的关键部件，其故障诊断技术的研究与实施直接关系到城市轨道交通的稳定性与经济性。本文围绕牵引电机轴承故障机理展开分析，重点探讨振动信号、温度特征与电流分析在故障识别中的作用，并结合信号处理方法与智能算法的应用路径，提出了一套适用于地铁运行工况的诊断技术框架。多源信息融合与智能化诊断模型的构建，不仅提升了故障识别的准确率，还缩短了检测时间，为地铁列车的预防性维护和状态监测提供了有效支撑。本研究为地铁系统的运维部门在实际操作中推广先进诊断技术提供理论依据与实践参考，有助于推动轨道交通装备的智能化发展与安全运营。

【关键词】：地铁列车；牵引电机；轴承故障；诊断技术

DOI:10.12417/2811-0528.25.022.031

引言

地铁作为现代城市交通的重要组成部分，其运行的安全性和可靠性始终备受关注。牵引电机轴承作为地铁列车核心部件之一，一旦发生故障，往往会导致列车运行效率下降甚至停运，带来严重的经济损失与安全隐患。对牵引电机轴承的故障诊断技术进行深入研究具有重要意义。近年来，振动分析、温度监测及电流特征提取等方法被广泛应用于故障识别，智能算法与大数据技术的引入更是极大提升了诊断的精度和实时性。本文将围绕地铁列车牵引电机轴承故障诊断的技术路径展开探讨，旨在为城市轨道交通设备的安全运行与维护提供新的思路和方法，同时也为后续研究和技术优化奠定理论与实践基础。

1 地铁列车牵引电机轴承故障的特征与影响

地铁列车牵引电机轴承在长期运行过程中承受着复杂的载荷和频繁的启停工况，其运行状态直接决定电机的可靠性和寿命。该部件在高转速、高负载以及振动冲击的作用下，容易产生疲劳点蚀、滚动体剥落、润滑失效以及保持架损伤等典型故障形式。轴承故障的早期表现多为微弱振动频谱的变化和温度异常，而在中后期则可能出现明显的异响、转矩波动和能耗增加。这些特征不仅为诊断提供了信号依据，同时也是评估设备健康状况的重要参考。在地铁列车的运行工况下，由于环境噪声和外部干扰复杂，故障信号往往被掩盖，导致诊断难度增大，因此需要对轴承特征信号进行深入研究和准确提取。

牵引电机轴承故障对地铁系统的影响具有多方面的表现。轻度的轴承磨损可能导致电机效率下降，增加能源消耗，缩短运用周期；而严重的损伤则可能引发电机转子失衡、定子绕组过热甚至烧毁，最终引发列车停运。这种连锁效应不仅影响运营效率，还会造成大规模乘客延误和经济损失。在地铁高密度运行的背景下，任何因轴承失效带来的临时检修或停运，都可

能扰乱整个线路的运营节奏，增加安全风险。轴承故障带来的异常振动还可能通过传递路径影响到车体和轨道结构，加剧其他部件的疲劳损伤，形成系统性隐患。由此可见，及时识别轴承故障不仅是单一设备维护的问题，更是保障轨道交通整体安全和可持续运行的关键。

在长期的工程实践中，已经有多个地铁运营案例表明，牵引电机轴承故障往往是隐蔽而突发的，其产生与环境条件、维护措施以及设计工况均有密切关系。高湿度环境会加速润滑剂劣化和金属腐蚀，沙尘颗粒则容易进入轴承内部造成磨粒磨损，而不合理的维护间隔则可能导致早期损伤未被发现。由此产生的影响不仅是局部性的电机损坏，还可能诱发更大范围的安全事故。研究并总结轴承故障的特征规律，明确其在运行过程中对列车性能和安全的影响，对于制定合理的运维策略和优化维护体系具有重要的理论和实践意义。

2 故障诊断技术的实施路径与关键方法

地铁列车牵引电机轴承的故障诊断需要结合信号获取、特征提取和状态评估三个主要环节构建系统化路径。在信号获取方面，振动传感器、红外测温仪以及电流监测装置是常见的手段，它们能够从不同角度捕捉轴承的运行信息。振动信号反映了滚动体与滚道间的冲击特征，温度信号揭示了润滑状态与摩擦能耗的变化，而电流信号则能够在机械振动未显著时提前揭示潜在故障。通过多源信号采集，可以实现对轴承运行状态的立体化监测，从而为后续诊断提供高质量的原始数据。

在特征提取与处理环节中，信号分析技术的选择至关重要。传统的时域与频域分析方法能够初步识别异常频率和冲击幅值，但在面对复杂工况和强噪声环境时往往难以获得理想效果。为此，小波变换、经验模态分解、希尔伯特包络分析等时频方法被广泛应用，它们能够分离出轴承故障的特征频率，突

出弱信号并抑制噪声。基于包络谱和自相关函数的分析能够更准确地揭示早期损伤特征。随着数据量的增加,特征参数的融合方法逐渐成熟,多维特征向量的构建使得故障诊断从单一信号分析转向了多维度、多角度的综合判断。

在状态评估与诊断决策阶段,人工智能与模式识别技术的引入极大推动了诊断方法的进步。神经网络、支持向量机、模糊逻辑等方法能够在特征数据的基础上构建故障识别模型,实现对不同类型轴承损伤的自动分类与判断。尤其是在地铁牵引电机轴承这种运行环境复杂、数据规模庞大的场景下,基于机器学习的诊断模型能够不断优化识别精度,提升诊断效率。通过建立数据驱动的健康评估体系,地铁运维部门能够提前预判潜在故障,实施有针对性的维护措施,从而减少停运时间和维修成本,实现预防性维护与状态维修的结合。

3 基于智能化的诊断模型构建与应用价值

智能化诊断模型的构建是地铁列车牵引电机轴承故障诊断技术发展的核心方向。通过引入深度学习、卷积神经网络以及迁移学习等先进方法,可以实现从原始信号到故障模式的端到端自动识别。这一转变不仅避免了人工经验依赖和复杂的特征工程,还提升了模型在复杂工况下的泛化能力。结合大数据平台,模型能够不断从实际运行数据中学习和优化,形成动态更新的诊断体系。这种智能化架构既满足了实时在线监测的需求,又为长期趋势预测提供了可靠支撑。

在应用价值方面,智能诊断模型的推广为地铁系统的安全运营带来了显著成效。通过实时监测与智能预警,运维人员能

够在早期阶段发现潜在隐患,避免故障演化为严重事故,从而提高地铁运行的安全水平。智能诊断减少了依赖人工巡检和传统定期维护的成本,提升了维护资源的利用效率。随着运维模式从事后维修转向预防性维护,地铁企业能够有效降低全寿命周期成本,实现经济性与安全性的统一。智能诊断结果还可与调度系统、维修计划系统相结合,形成跨部门协同的智慧运维格局,为轨道交通行业的数字化与智能化转型提供技术支撑。

在未来发展趋势上,智能诊断模型的应用将不仅局限于单一轴承的状态识别,而是向全系统的健康管理拓展。通过与物联网平台结合,可以实现多列车、多线路的运行数据集中管理与统一分析;通过与数字孪生技术结合,可以在虚拟环境中模拟轴承故障的演化过程,从而优化维护策略并验证诊断模型的可靠性。这种基于智能化的综合应用将极大提升轨道交通的运行安全性与服务水平,也将为城市轨道交通体系的智能升级提供强有力的技术保障。

4 结语

本文围绕地铁列车牵引电机轴承故障诊断技术展开深入探讨,从故障特征与影响分析到诊断路径与方法总结,再到智能化诊断模型的构建与应用价值,系统地呈现了这一技术在轨道交通领域的必要性与前瞻性。只有通过多源信号融合与智能算法应用,才能实现高效、精准的故障识别,为地铁列车的安全运营提供可靠保障。未来在大数据、人工智能及物联网的支持下,故障诊断技术将不断优化,逐步形成智慧化、全生命周期的运维体系,为城市轨道交通的安全与可持续发展提供坚实支撑。

参考文献:

- [1] 陈伟;周浩.基于多源信息融合的电机轴承故障诊断方法研究[J].电气技术,2022,23(4):55-61.
- [2] 刘敏;韩涛.智能算法在轨道交通牵引电机故障诊断中的应用[J].铁道机车车辆,2023,43(6):102-108.
- [3] 孙凯;郑洋.城市轨道交通设备状态监测与智能维护技术进展[J].城市轨道交通研究,2021,24(5):87-94.