

供电设备状态监测与故障预警技术应用

王乐 苏志诚 陈震 任付凯

青岛地铁运营有限公司 山东 青岛 266000

摘要: 随着电力需求增长与设备运行时间延长,供电设备故障问题凸显,地铁系统中此类故障可能导致列车停运,影响重大。状态监测与故障预警技术通过实时获取运行数据,结合数据分析和人工智能,可及时发现潜在故障并预警。当前,实时监控技术借助传感器和远程通信实时采集数据,物联网提升数据采集传输效率,传感器应用面临环境挑战。故障预警技术基于数据分析模型、人工智能算法和多维数据融合实现。传感器、大数据、云计算、人工智能等关键技术支撑其发展,在实际应用中成效显著,但也存在技术难点,未来将向智能化、高效化发展,推动供电设备管理升级。

关键词: 供电设备; 状态监测; 故障预警; 数据分析; 智能化

引言

电力系统稳定性关乎国家经济和社会运转。近年来,电力需求上升与设备运行时间延长使故障问题增多,确保供电安全可靠成亟待解决的问题。在地铁系统中,供电设备故障可能直接导致列车停运,影响市民出行与城市交通秩序,因此状态监测与故障预警技术的应用更为关键。这些技术通过实时获取运行数据,结合数据分析和人工智能,及时发现潜在故障并预警,大幅提高电力系统安全性。随着传感器、大数据和云计算发展,技术不断升级,为电力企业及地铁运营方提供了精细化、智能化管理手段。

1 供电设备状态监测技术的现状与发展趋势

1.1 供电设备运行状态的实时监控技术

供电设备的实时监控是保障电力系统稳定运行的核心。传统的人工巡检方式依赖定期检查,难以应对日益增长的电力负荷和设备复杂性,无法保证全面性和及时性。当前,实时监控技术通过传感器和远程通信技术,实时采集设备运行数据,如电流、电压、温度和压力等,全面反映设备健康状况。借助互联网和数据处理能力,监控信息可以快速传输并处理,显著提高响应速度,减少人工干预。地铁系统中,供电设备分布在地下隧道、车站等复杂环境,通过分布式光纤传感器和无线传感网络,可实时监测牵引变电所、接触轨等核心设备的温度、振动及绝缘状态,异常数据即刻触发告警,避免运营中断。无线通信进步拓宽覆盖范围,确保设备稳定安全,提升电力系统可靠性。

1.2 状态监测技术中的数据采集与传输方法

数据采集与传输是供电设备状态监测系统的核心环节,直接影响监测的准确性与效率。通过各种传感器监测设备的关键参数(如温度、电流、电压),采

集的数据通过不同的传输方式(无线、光纤、有线等)发送至中央处理系统。近年来,物联网技术的应用提升了数据采集与传输的效率,改善了传输速度和稳定性,尤其在偏远区域和难以接触的设备中表现尤为重要。地铁供电系统数据采集需兼顾实时性与抗干扰性,接触轨数据经高频采样传感器获取后,通过工业以太网与5G专网双通道传至控制中心,满足动态监测需求,抵御隧道强电磁干扰。系统通过多点监控和冗余机制保数据完整,使用加密技术防止数据泄露篡改,确保数据安全可靠。

1.3 传感器技术在设备监测中的应用与挑战

传感器在状态监测中至关重要,可实时监测温度、电流等参数,但受环境影响大,长期使用易出现寿命和可靠性问题。针对地铁供电设备特殊环境,耐潮湿、抗振动的复合型传感器已投入使用,如地铁牵引变压器上的集成式温度—油位—瓦斯传感器,可同时监测多项指标,具备自我校准功能,解决地下环境传感器漂移问题。研究人员正开发新型传感器,采用先进材料和设计,确保长期稳定运行,小型化和集成化也成为发展方向,以提升监测系统性能。

2 供电设备故障预警技术的原理与实现路径

2.1 基于数据分析的故障预测模型

故障预测模型通过对设备状态监测数据的分析,能够提前识别设备潜在的故障风险。采用数据挖掘和机器学习等方法,基于历史运行数据和实时监控信息,建立预测模型,对设备的运行趋势进行分析,从而实现故障的早期预警。这些模型能够识别设备的异常模式,帮助预测故障的发生。常见的预测方法包括回归分析、神经网络、支持向量机等,这些方法通过不断优化和更新模型,提高故障预测的准确性。地铁领域,

接触轨磨耗预测模型基于历史故障数据与实时信息,通过 LSTM 神经网络分析集电靴与接触轨动态接触数据,可提前 3~6 个月预测磨耗超标风险,避免接触轨断线致运营中断。数据分析还能提供故障原因线索,帮助快速定位问题,大数据分析利用海量数据更精准预测故障。

2.2 人工智能算法在故障预警中的应用

人工智能技术的引入为故障预警提供了强大的技术支持。通过机器学习、深度学习等人工智能算法,可以分析复杂的设备状态数据,识别出设备运行中的潜在问题。与传统的基于规则的故障预警方法相比,人工智能算法能够处理更加复杂和非线性的关系,适应性更强。地铁供电系统广泛应用 AI 视觉识别技术,隧道内高清摄像头结合 YOLO 算法,实时识别接触轨零部件松动、脱落,准确率超 98%,效率较人工巡检提升 50 倍,可夜间完成全线路检测。面对多种故障可能,人工智能能够用自我学习调整,优化预警模型,判断故障类型和概率,与实时监控结合提高预测精度,避免电力事故。

2.3 多维数据融合的预警技术发展

多维数据融合技术集成不同来源数据,提供全面设备状态视图,整合多维度数据生成综合健康评估模型,消除单一数据误差局限,提高预测准确性。地铁供电设备的多维数据融合体现在多系统协同,如融合牵引变电所电压波动、列车负荷、环境温湿度数据,通过知识图谱构建故障关联模型,精准定位直流断路器误动故障,较单一数据预警准确率提升 40%。类似电力变压器监测,融合多维度数据能更精确诊断故障位置和类型,该技术发展将大幅提升监测预警系统智能化水平。

3 供电设备状态监测与故障预警技术的关键技术分析

3.1 传感器技术的创新与应用发展

传感器作为供电设备状态监测系统的重要组成部分,其技术的不断创新和发展对整个系统的性能起着至关重要的作用。当前,传感器技术正朝着高精度、长寿命和智能化方向发展。先进的传感器能够在恶劣环境下保持稳定工作,并提供更加精准的数据。针对地铁第三轨供电系统,新型柔性薄膜传感器厚度仅 0.5mm,可贴合第三轨表面,耐受 -30℃至 80℃温差,实时监测接触电压与轨面磨损,解决传统传感器安装难、易受振动影响的问题。研究人员不断开发新型传感器,采用先进材料和设计,确保其长期稳定运行,传感器的小型化和集成化成未来发展方向,以提升系统集成度与性能。

3.2 大数据与云计算在故障预警中的作用

大数据和云计算技术在供电设备故障预警中的应用,为监测和预警系统提供了强大的数据支持。通过云计算平台,能够将分布各地的监测数据实时上传,并进行集中处理和分析。大数据技术能够处理海量设备数据,提取出设备运行的关键指标,识别出潜在的故障风险。地铁集团云端供电设备健康管理平台,汇聚多条线路牵引供电数据,日均处理超 5TB,通过 Spark 框架实时分析设备劣化趋势,针对直流快速断路器高频故障部件生成寿命预测报告,指导备品储备。云平台弹性计算能力提高数据处理存储效率,突破传统硬件限制,实现远程访问管理,提升故障诊断效率,促进数据共享协同,提高电力系统运维水平。

3.3 人工智能与机器学习的协同应用

人工智能和机器学习的协同应用,为供电设备的状态监测和故障预警带来了更多的可能性。机器学习技术通过对历史数据的学习和分析,能够自动发现设备运行中的异常模式,为故障预警提供支持。人工智能算法则能够处理更加复杂和高维的数据,并实时做出决策,识别出潜在的故障问题。地铁供电故障诊断中,基于强化学习的智能决策系统模拟故障处置方案,学习运维经验后,对杂散电流异常升高等新型故障自动生成策略,响应时间从 30 分钟缩至 5 分钟,减少故障影响。两者协同使系统具备自我学习优化能力,随算法进步,提高故障预测准确性,提前预警,降低故障对电力系统影响。

4 供电设备状态监测与故障预警系统的实际应用与挑战

4.1 典型案例分析与应用实践

在实际应用中,供电设备状态监测与故障预警技术已经取得了显著成果。在某地铁集团新线路部署全链路状态监测系统,牵引变电所安装智能巡检机器人,接触轨区段设激光雷达,通过 AI 融合多源数据,试运行期间成功预警 12 起潜在故障,故障检出率较传统提升 75%,减少经济损失超 200 万元。电力公司和地铁运营方将技术用于智能化管理,提升设备运行安全性和可靠性。

4.2 系统实施中的技术难点与解决方案

技术应用虽有进展,但实施中仍有难点。设备多样性复杂性要求监测系统适配,环境复杂使传感器数据易受干扰,降低准确性。地铁供电系统面临地下电磁干扰严重问题,某地铁公司采用扩频通信和小波变换滤波算法,将传感器数据信噪比提升至 35dB 以上;针对设备通信协议不兼容,开发统一数据网关,实现 8 类供电设备数据标准化接入。专家通过优化传感器

布局、增强滤波算法等手段,提高系统稳定性准确性,智能化软件精细处理数据,克服应用难点。

4.3 供电设备监控系统的优化与升级方向

监控系统优化升级是提升预警能力的重要途径。未来系统将更智能化,自主分析处理数据,提前预警。物联网普及使远程监控维护成为可能。地铁监控系统向“数字孪生”升级,某试点线路构建牵引供电系统数字孪生体,实时映射设备状态,模拟不同条件下响应,提前发现接触轨与集电靴匹配问题,指导检修从“周期修”向“状态修”转型。结合人工智能和云计算,系统能实时分析数据,预测故障并提出解决方案,持续升级以应对复杂电力环境,保障供电安全稳定。

5 供电设备状态监测与故障预警技术的未来发展与展望

5.1 智能化发展对设备监测技术的影响

人工智能和大数据技术的进步正在引领供电设备监测系统向智能化方向发展。未来的监测系统将能够自动化地识别设备的运行状态,并通过机器学习和深度学习算法分析设备的健康状况。地铁行业未来供电监测将实现“泛在感知+自主决策”,列车底部毫米波雷达动态监测接触轨磨损,结合 AI 决策系统自动生成临时限速或抢修指令,无需人工介入完成故障处置闭环。智能化系统提高数据处理速度精度,减少人工干预,提升管理效率,系统问题时自动预警,助维护人员提前维修,防止重大故障。

5.2 高效预警系统的实现路径与挑战

为了建立高效的故障预警系统,必须优化各个环节,包括数据采集、处理、分析和决策。高效预警系统需要实时获取设备的各项运行数据,确保数据的及时性和完整性。接着,通过先进的数据处理技术,快速筛选出可能的故障风险,并使用准确的分析方法预测潜在问题。地铁高效预警系统需突破“数据孤岛”,未来通过联邦学习实现不同线路数据协同建模,提升故障识别泛化能力;但老旧线路传感器改造难,需研发低成本、易安装的无源传感设备。数据质量和准确性是关键挑战,数据来源广且易有误差,处理不同来源数据并快速决策是技术难点,提升数据整合性与可靠性才能确保预警系统有效发挥作用。

5.3 未来技术趋势对供电设备管理的推动作用

未来供电设备的管理将高度依赖于自动化和智能

化技术,特别是物联网、云计算和人工智能的融合应用,将大大提升设备监测与故障预警系统的效率和准确性。物联网技术可以实现设备状态的实时监控,云计算则提供强大的数据处理和存储能力,而人工智能则进一步提升系统的自学习能力,使其能够不断优化监测和预警策略。地铁行业未来技术将推动供电设备管理进入“无人化运维”,机器人巡检、无人机航拍等与数字孪生平台结合,可将年度停电检修时间缩至 10 小时内,大幅提升运营效率。技术集成使电力公司及地铁运营方能精准管理设备,提前识别风险,优化维护计划,降低故障率,提高电网稳定性,降低成本,支撑电力行业智能化转型。

6 结语

供电设备状态监测与故障预警技术的应用,已成为保障电力系统稳定运行的关键支撑。实时监控、数据融合、人工智能等技术的融合,实现了对供电设备运行状态的精准把握和潜在故障的提前预警,在地铁等关键领域成效显著,大幅提升了故障检出率,减少了经济损失。当前,技术在实践中面临设备适配、环境干扰等挑战,但通过扩频通信、统一数据网关等解决方案,正逐步克服难题。未来,随着智能化、高效化技术的深入发展,数字孪生、联邦学习等技术的应用将推动系统向自主决策、无人化运维演进,促使供电设备管理从“周期修”向“状态修”转型,为电力系统的安全可靠运行注入持续动力,助力电力行业智能化转型迈向新高度。

参考文献:

- [1] 幸潜. 供电设备在线监测系统干式变压器设备状态评估模型分析与优化研究 [J]. 人民公交, 2025(10): 170-172.
- [2] 徐荣, 郭冲, 王均平, 等. 海上风电供电主设备状态评估与决策系统 [J]. 电工技术, 2024(24):250-253+256.
- [3] 李大全. 城市轨道交通供电设备状态检修策略探究 [J]. 智能建筑与智慧城市, 2024(10):179-181.
- [4] 陆喆. 机场供电设备状态检修和运维一体化技术研究 [J]. 电工技术, 2024(8):218-220.
- [5] 周世恒. 基于电磁式自供电的设备状态监测系统设计 [D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2023.