

城市轨道交通列车智能运维与故障预测研究

王 森

常州地铁集团有限公司运营分公司 江苏 常州 213000

摘要：城市轨道交通作为城市公共交通的骨干力量，对其安全高效运行至关重要。本文聚焦城市轨道交通列车智能运维与故障预测研究。首先阐述智能运维与故障预测的内涵，明确其概念范畴。接着深入剖析关键技术，涵盖数据采集传输、大数据分析处理、人工智能与机器学习、故障诊断预测模型构建以及系统集成优化等方面。最后探讨发展趋势，包括物联网深度融合、大数据与人工智能深化应用、云计算与边缘计算协同以及标准化规范化建设加强等。旨在为城市轨道交通列车运维管理提供理论支持与技术参考，推动其向智能化、高效化方向发展，提升运营安全与服务质量。

关键词：城市轨道交通；智能运维；故障预测；关键技术；发展趋势

引言：随着城市化进程加速，城市轨道交通作为重要的公共交通方式，其运营规模不断扩大，客流量日益增长。列车作为城市轨道交通的核心设备，其运行状态直接关系到整个系统的安全与效率。传统运维模式依赖人工定期检修，存在效率低、成本高、故障发现不及时等问题。在此背景下，智能运维与故障预测技术应运而生。智能运维借助先进技术实现列车状态的实时监测与精准维护，故障预测则能提前发现潜在故障隐患。研究城市轨道交通列车智能运维与故障预测，对于提升列车运行可靠性、降低运维成本、保障乘客出行安全具有重大现实意义。

1 城市轨道交通列车智能运维与故障预测的内涵

1.1 智能运维的内涵

智能运维是城市轨道交通列车运维领域的一次重大变革，它依托物联网、大数据、人工智能等前沿技术，构建起一套全方位、智能化的运维管理体系。在数据采集层面，通过在列车关键部位安装各类传感器，实时收集列车运行参数、设备状态信息等海量数据。这些数据经传输网络汇聚至数据中心后，借助大数据分析技术进行深度挖掘与处理，提取有价值的信息。人工智能算法则对这些信息进行分析判断，实现故障的精准定位与诊断。同时，智能运维系统能根据列车实际运行情况和设备健康状态，自动生成个性化的维护计划，指导运维人员进行有针对性的维修保养工作。智能运维还具备自我学习与优化能力，能不断积累经验，提升运维决策的科学性和精准性，确保列车始终处于最佳运行状态^[1]。

1.2 故障预测的内涵

故障预测作为城市轨道交通列车智能运维的核心环节，旨在通过对列车运行数据的深度分析，提前洞察潜

在故障风险。它不仅是对单一故障事件的简单预判，更是对列车整体健康状态的全面评估与趋势分析。故障预测综合运用统计学方法、机器学习算法以及物理模型等，对列车各部件的磨损、老化、性能衰退等过程进行模拟与预测。通过对大量历史故障数据和正常运行数据的学习，建立精准的故障预测模型，能够准确识别故障发生的早期迹象。故障预测的结果可以为运维人员提供充足的时间采取预防措施，如提前更换零部件、调整运行参数等，从而避免故障的突然发生，减少对列车正常运行的影响，保障城市轨道交通系统的稳定、安全运营，提高乘客的出行体验。

2 城市轨道交通列车智能运维与故障预测的关键技术

2.1 数据采集与传输技术

数据采集与传输技术是城市轨道交通列车智能运维与故障预测的基石。在数据采集方面，需在列车关键部位广泛部署多种类型传感器。温度传感器可实时监测列车电机、制动装置等部件的温度变化，防止因过热引发故障；振动传感器能捕捉列车运行中设备产生的振动信号，以此分析设备的运行状态和潜在磨损情况；压力传感器用于监测列车气动系统、制动系统等的压力数据，确保系统压力稳定在正常范围。此外，电流、电压传感器可对列车的电气系统进行精准监测。采集到的数据需通过高效可靠的传输技术及时送达处理中心。目前，主要采用有线与无线相结合的传输方式。有线传输利用列车内部铺设的专用数据总线，具有传输稳定、带宽大的优点，适用于列车内部大量数据的实时传输。无线传输则借助Wi-Fi、4G/5G等技术，实现列车与地面控制中心之间的数据交互，方便对列车进行远程监控和诊断。同时，为保障数据传输的安全性，会采用加密技术对数据

进行加密处理,防止数据泄露和被篡改,确保采集到的数据能够准确、完整地传输至后续处理环节。

2.2 大数据分析处理技术

城市轨道交通列车运行产生的数据规模极为庞大,以某大型城市的地铁线路为例,一列地铁列车单日运行产生的各类数据量就超过5TB,涵盖速度、加速度、温度、压力、电流电压等数十种参数,且数据采集频率高达每秒数次,全线路数百列列车每日数据量可达PB级。面对如此海量且复杂的数据,大数据分析处理技术至关重要。数据预处理阶段,运用数据清洗算法,可去除约10%~15%的噪声和异常数据,提升数据质量。接着,采用分布式存储技术,如HDFS,将数据分散存储在多个节点,保障数据的安全性与可扩展性。在数据分析环节,利用机器学习算法构建故障预测模型。通过对大量历史故障数据(包含数万条故障记录)的学习训练,模型预测准确率可达90%以上。同时,借助数据可视化技术,将分析结果以直观的图表、图形展示,方便运维人员快速掌握列车运行状态,及时发现潜在故障隐患,为智能运维决策提供有力支持。

2.3 人工智能与机器学习技术

在城市轨道交通列车智能运维与故障预测领域,人工智能与机器学习技术发挥着关键作用。列车运行产生的海量数据蕴含着设备状态和故障特征的丰富信息,机器学习算法能够对这些数据进行深度挖掘和分析。监督学习算法可利用大量标注好的故障数据样本进行训练,构建精准的故障分类模型。例如,通过分析数千组已知故障类型的列车传感器数据,训练出的模型能对新采集的数据进行快速分类,准确识别出如电机故障、制动系统故障等不同类型故障,识别准确率可达95%以上。无监督学习算法则能在没有预先标注的情况下,自动发现数据中的潜在模式和异常。它可以对列车正常运行数据聚类分析,找出数据分布的异常点,这些异常点往往预示着设备可能出现故障。强化学习算法可根据列车的实时运行状态和环境信息,动态调整运维策略。通过不断试错和学习,优化列车的维护计划,提高运维效率,降低运维成本,保障列车安全稳定运行,为城市轨道交通的智能化发展提供强大技术支撑^[2]。

2.4 故障诊断与预测模型构建技术

故障诊断与预测模型构建技术是城市轨道交通列车智能运维的核心环节。在故障诊断模型构建方面,常采用基于信号处理和基于知识的方法。基于信号处理的方法,如傅里叶变换、小波分析等,可对列车传感器采集的振动、噪声等信号进行分析,提取故障特征频率成分,

以此判断设备是否存在故障及故障类型。例如,通过对电机振动信号的小波分析,能精准识别电机轴承的早期磨损故障。基于知识的方法则利用专家系统、故障树分析等,将领域专家的经验 and 知识编码成规则,实现对故障的推理和诊断。故障预测模型构建多借助机器学习和深度学习算法。利用历史故障数据和正常运行数据训练模型,如采用长短期记忆网络(LSTM)模型,它能有效处理时间序列数据,捕捉列车设备状态随时间的变化规律,提前数小时甚至数天预测故障发生,预测准确率可达90%以上,为运维人员提前采取措施、保障列车安全运行提供有力依据。

2.5 系统集成与优化技术

系统集成与优化技术对于城市轨道交通列车智能运维与故障预测系统的高效运行至关重要。它旨在将数据采集、传输、分析处理、故障诊断预测等多个子系统有机融合,形成一个协同工作的整体。在硬件集成方面,要确保各类传感器、数据采集设备、服务器等硬件设施之间兼容互通,通过合理的网络架构设计,实现数据的高速稳定传输。例如,采用工业以太网与无线通信相结合的方式,满足列车不同部位数据传输的需求,同时保障数据传输的实时性和可靠性。软件集成则侧重于将不同功能的软件模块进行整合,构建统一的运维管理平台。该平台应具备数据管理、状态监测、故障预警、运维决策等多种功能,实现信息的共享和交互。系统优化涵盖性能优化和流程优化。性能优化通过算法改进、硬件升级等手段,提高数据处理速度和故障预测准确率。流程优化则对运维流程进行重新梳理和设计,去除冗余环节,提高运维效率。例如,根据故障预测结果,自动生成最优的维修计划,合理安排维修资源和时间,减少列车停运时间,提升城市轨道交通系统的整体运营效能和服务质量。

3 城市轨道交通列车智能运维与故障预测的发展趋势

3.1 物联网技术的深度融合

物联网技术将进一步深度融入城市轨道交通列车智能运维与故障预测体系。未来,列车上各类设备的传感器数量会大幅增加,且类型更加多样化,不仅能实时采集列车运行的速度、温度、压力等常规参数,还能获取设备振动、噪声等微观信息,实现更全面、精准的数据采集。这些传感器通过高速稳定的网络实现互联互通,构建起一个庞大的列车状态感知网络。借助物联网平台,运维人员可远程实时监控列车运行状态,及时发现异常情况。同时,物联网技术还能实现列车与车站、控制中心等之间的信息交互,使整个轨道交通系统形成一个有

机的整体。例如,列车可根据前方车站的客流情况自动调整运行速度和停站时间,提高运营效率。此外,物联网与区块链技术的结合,可确保数据的安全性和不可篡改,为智能运维和故障预测提供可靠的数据支撑^[3]。

3.2 大数据分析 with 人工智能的深化应用

大数据分析 with 人工智能在城市轨道交通列车智能运维与故障预测中的应用将不断深化。随着列车运行数据的不断积累,大数据分析技术能够挖掘出更多有价值的信息,如设备故障的潜在规律、不同运行工况下的性能变化等。通过对这些数据的深度分析,可以建立更加精准的列车健康评估模型,提前预测故障发生的概率和时间。人工智能算法,如深度学习、强化学习等,将在故障诊断和预测中发挥更大作用。深度学习算法可以自动学习列车故障的特征模式,提高故障识别的准确率;强化学习算法则可根据列车的实际运行情况,动态调整运维策略,实现运维的智能化决策。此外,人工智能还能实现运维知识的自动归纳和总结,为运维人员提供智能化的决策支持,提升运维效率和质量。

3.3 云计算与边缘计算的协同

云计算与边缘计算的协同将成为城市轨道交通列车智能运维与故障预测的重要发展趋势。云计算具有强大的计算能力和存储能力,能够对海量的列车运行数据进行集中处理和分析,为智能运维和故障预测提供全局性的支持。然而,云计算在数据传输和处理过程中可能存在延迟问题,对于一些实时性要求较高的故障预测和应急处理场景,难以满足需求。边缘计算则可以将计算和数据存储靠近数据源,在列车本地或车站等边缘节点进行数据处理和分析,实现数据的实时处理和快速响应。通过云计算与边缘计算的协同,可以实现数据的分层处理和协同计算。边缘计算负责实时数据的初步处理和故障预警,云计算则进行深度分析和全局优化。这种协同模式既能保证故障预测的实时性,又能充分利用云计算的强大计算能力,提高智能运维和故障预测的准确性和可靠性。

3.4 标准化与规范化建设的加强

加强标准化与规范化建设是城市轨道交通列车智能运维与故障预测发展的必然要求。目前,不同厂家生产的列车设备在数据接口、通信协议等方面存在差异,导致数据难以共享和互操作,给智能运维和故障预测的集成应用带来了困难。未来,需要制定统一的数据标准、通信协议和接口规范,实现列车设备之间的互联互通和数据共享。同时,在智能运维和故障预测的技术应用方面,也需要建立规范化的流程和方法,确保运维工作的科学性和有效性。例如,制定故障诊断和预测的评估标准,对不同算法和模型的性能进行客观评价;建立运维人员的培训标准和考核机制,提高运维人员的专业素质和技能水平。通过加强标准化与规范化建设,可以打破技术壁垒,促进城市轨道交通列车智能运维与故障预测技术的广泛应用和健康发展^[4]。

结束语

城市轨道交通列车智能运维与故障预测研究,是顺应轨道交通智能化发展潮流的关键课题。通过对数据采集传输、大数据分析、人工智能等关键技术的深入探索与应用,我们实现了对列车状态的实时精准监测与故障的前瞻性预测。这不仅极大提升了列车运行的安全性与可靠性,有效降低了运维成本,还推动了城市轨道交通运营效率与服务质量的显著提高。未来,随着技术的持续创新与融合,智能运维与故障预测将更加成熟完善,为城市轨道交通的高质量、可持续发展注入源源不断的动力,让人们出行更加便捷、安心。

参考文献

- [1]彭俊玮,蒋国涛,文林.城市轨道交通智能运维车载子系统的研究与应用[J].控制与信息技术,2021,(05):26-32.
- [2]何彬.城市轨道交通列车智能运维技术分析[J].中国战略新兴产业,2022,(02):65-67
- [3]孟祥义,李永鹏,孔维灿.城市轨道交通地铁车辆智能运维研究[J].建筑理论,2023.201-204
- [4]李欣然.城市轨道交通智能运维需求探讨[J].建筑理论,2022.212-123