

基于数据驱动的地铁车辆故障预测研究

王雅莉

北京市地铁运营有限公司

DOI:10.32629/etd.v6i5.16870

[摘要] 随着城市化进程加速,地铁已成为城市公共交通的核心载体,其运行安全性与稳定性直接关系到市民出行体验和城市交通系统效率。传统定期维修模式难以适应地铁车辆高负荷、高频率的运营需求,易导致过度维修或故障漏判。本文提出一种基于数据驱动的地铁车辆故障预测方法,通过多传感器数据采集、数据预处理、特征工程与机器学习算法构建预测模型,实现对关键部件故障的早期预警。

[关键词] 地铁车辆; 故障预测; 数据驱动; 多传感器融合; 机器学习

中图分类号: TP242 **文献标识码:** A

Research on data-driven prediction of subway vehicle faults

Yali Wang

Beijing Subway Operation Co., Ltd.

[Abstract] With the acceleration of urbanization, the subway has become the core carrier of urban public transportation, and its operational safety and stability are directly related to the travel experience of citizens and the efficiency of the urban transportation system. The traditional regular maintenance mode is difficult to adapt to the high load and high-frequency operation needs of subway vehicles, which can easily lead to excessive maintenance or missed fault diagnosis. This article proposes a data-driven method for predicting subway vehicle faults, which constructs a prediction model through multi-sensor data collection, data preprocessing, feature engineering, and machine learning algorithms to achieve early warning of key component faults.

[Key words] subway vehicles; Fault prediction; Data driven; Multi-sensor fusion; machine learning

引言

城市轨道交通作为现代都市交通体系的骨干,在缓解交通拥堵、降低环境污染、提升城市竞争力方面发挥着不可替代的作用。截至2024年底,我国内地已有54个城市开通城市轨道交通,运营里程突破1.4万公里,地铁车辆保有量超过6万辆。随着运营网络的持续扩张和运营年限的增长,地铁车辆关键部件老化、磨损问题日益突出,轮轨磨损、转向架故障、制动系统失效等已成为导致非正常停运的主要原因。据统计,地铁车辆故障中70%以上源于关键部件的渐进式失效,这类故障具有隐蔽性强、演化过程复杂等特点,传统定期维修模式难以实现精准预判,不仅增加了运营成本,还可能引发安全事故。

数据驱动技术的快速发展为地铁车辆故障预测提供了新路径。对多源异构数据进行深度挖掘与分析,能够构建设备健康状态评估体系,实现故障的早期识别与寿命预测,推动运维模式从“定期维修”向“预测性维护”转型。基于数据驱动的故障预测方法可实现地铁车辆故障的早期预警,提前24小时以上识别潜在故障风险,为运维人员预留充足处理时间,有效避免恶性事故发生,为地铁车辆设计改进提供数据支撑,推动轨道交通装备

向智能化、高可靠性方向发展。

1 地铁车辆预测和维护中面临的挑战和问题

城市轨道交通系统的重要组成部分之一就是地铁车辆,其故障预测水平和维护质量与交通运营安全性和效率息息相关。实际运行中,地铁车辆有着诸多挑战和现存问题,其中最突出的问题包括维护成本过高和维护效率低下,这也是故障预测不到位的直接影响。随着城市规模的不断扩大和地铁线路的不断延伸,车辆数目急剧增加,传统的预测模式和维护模式无法应对日益增长的运行需求。为了保证安全,检修人员会对零件进行定期检查和更换,但定时更换方式忽视了不同零部件的实际磨损情况,造成不必要的资源浪费。现行的故障预测机制不完善会使许多潜在问题不能提前发现,这就增加了突发故障的风险,影响地铁正常运行。当前,城市轨道交通系统中的车辆越来越复杂,对预测和维护工作提出了更高的要求。地铁交通中关键技术更新迭代速度很快,对检测和维护人员的专业技术水平也提出了更高的要求。只有采取更精细化的管理,才能够保障车辆的安全稳定运行。在实际操作中,普遍存在信息不对称和数据孤岛的情况,这限制了预测和维护工作,阻碍了新技术的进步和发展。在

当前大数据时代背景下,科学运用车辆运行过程中产生的数据,实现对地铁车辆的精准监测和故障预测,成为亟待解决的问题。另外维护流程不够标准化、自动化程度不高,也是当前需要解决的一大难题。通过引入数据分析和物联网等先进技术手段,积极探索全新的故障预测和维护策略,能够大大提高预测和维护工作的智能化水平。使用高精度的传感器实时采集地铁各部件的工作状态数据,运用复杂的数据分析算法对异常情况进行准确识别,并及时发出预警,帮助做出正确决策。统一建立的共享数据平台,可以打破信息壁垒,加强各部门各人员间的协调合作,确保数据全面分享和高效利用。建立全面覆盖、高效率运行的预测和维护体系有效降低维护成本,提高预测精度,增强地铁的安全性,助力城市轨道交通可持续发展,同时相关技术的应用给未来智能交通系统构建提供了宝贵的经验和参考案例。^[1]

2 数据分析在地铁车辆故障预测中的重要作用

数据分析能够在地铁车辆预测和维护领域发挥积极作用。将地铁车辆运行中的数据,比如速度、加速度、温度、振动频率等参数集中收集,给车辆建立特有的健康档案。此类数据不光能反映地铁当前的工作状态,还可以预测未来故障。通过运用数据分析算法,从大量数据中提取有价值的信息,制定精准的维护计划,对历史故障数据进行深度挖掘和分析,能够发现特定故障模式和特定运行状况之间的关联,实现对类似故障的提前预测。同时借助云计算技术,在节约本地计算资源的前提下,对海量数据迅速处理,提高数据分析的及时性和准确性,提高预测和维护工作的预见性,对资源配置进行优化。传统的预测方式和维护模式多是依赖于固定周期的检查和更换零件,这种固有模式会造成资源浪费,相较之下,基于数据分析的智能预测和维护系统,能够根据实际需求情况调整预测和维护计划,在必要时进行检查和维修,减少维护成本,提高维护效率。这种系统还能够整合多方来源的数据,如车载传感器数据、轨道环境信息和运行调度数据,构建一个多维度、多层次的综合评估体系,更准确地反映车辆整体健康状况,敏锐识别容易被忽视的潜在风险,为预测性维护带来强有力的技术支撑。在实践运行中,数据分析的应用也面临着一些挑战,比如控制数据质量、保护隐私以及共享数据等问题。为了保障分析结果的准确性,要求数据来源具有高质量,因此要建立严格的数据采集和筛选机制,减少干扰噪音和错误信息同时,在数据传输和存储时要采取必要的加密措施,保障数据信息安全。此外,为了最大化发挥数据分析的优势,要打破组织内部存在的数据孤岛现象,加强不同部门和人员之间的沟通与合作。只有让数据生态系统更具开放性和共享性,才能实现数据驱动的智能维护目标,推动地铁车辆运营工作进一步发展,提高城市轨道交通系统的整体安全性,为乘客提供更加可靠、安全的服务保障。^[2]

3 实时故障预测和智能维护策略的构建

构建实时故障预测和智能维护策略是现代地铁车辆管理的重要发展方向。采用先进的传感器技术、物联网和数据分析算法,对地铁车辆运行状况进行实时监测和健康评估。在实践操作

中,传感器广泛应用于发动机制动系统和转向器等关键部位,对温度、震动和压力等物理参数进行实时监测,将这些数据通过无线通信技术汇总至中央处理平台,再经过复杂的数据处理、数据滤波、特征提取和模式识别等处理流程,最终转化为可操作的信息形式。系统参照历史数据识别不同故障情况的特征,一旦出现类似的异常情况,在第一时间内发出预警,提醒维护人员及时采取行动。完善的故障预测模型可以保障智能维护系统的高效运行,这有赖于高质量的输入数据,再结合先进的机器学习和数据分析方法优化模型性能。基于深度学习的科学算法具有强大的模式识别能力,广受使用者好评,其可以在大量数据中归纳、发现潜在规律,并据此进行精准的故障预测。智能维护系统要提高适应性和灵活性,才能更好地应对多样的地铁运营环境,处理各种突发状况。比如天气条件较恶劣时,系统可以根据外部环境的变化来调整预警阈值,尽可能在多样环境下全面提供可靠的维护建议。可以利用仿真技术对预测和维护预案进行演习,验证方案的可行性和效果,提高检测和维护工作的科学性和严谨性。预测和维护策略的落实要依靠高效的组织协调机制,要求各部门间打破沟通壁垒,促进信息交流和技术共享,建立跨职能的专业团队,集合不同区域的专业知识和资源,携手解决预测和维护过程中的复杂问题。引入信息化管理系统,自动分配预测和维护任务,并进行实时跟踪,提高工作效率,减少人为失误。在这样的框架支撑下故障预测和智能维护,涵盖从采集数据、分析数据、执行决策的全程管理。全方位的系统模式大大降低事故的发生率,延长地铁设备的使用寿命,给地铁公司节约人力、物力成本,从而加强整体的竞争力。

4 数据驱动在地铁车辆故障预测中的具体应用

4.1 收集数据和预处理

首先要解决地铁车辆故障预测中的收集数据和预处理问题,在车辆运行时相关子系统会产生海量的运行数据,比如传感器可采集到温度、震动、电流等连续数据以及设备控制系统所产生的开关状态、故障代码等离散数据,另外还有一些维修日志、操作记录等文本格式数据。系统在收集数据完毕后,要进行初步的校验和筛选,剔除明显异常数据,像超出量程的信息或前后不一致的数值等。将筛选后的数据上传至共享中心后,再进一步清洗和转换,去除重复数据,补齐缺失值,将数据格式统一转换,再进行适量压缩和存储。使用列式存储、数据分析等功能,提高数据查询速率和搜索效率。^[3]

4.2 提取和选择特征

故障预测和诊断的基础是其高质量的特征。地铁车辆的运行数据具有高维度、非线性、时变等特性。通常可采取时域、频域和时频域三类方法进行提取特征。其中时域特征用来反映信号均值、方差和峰值等统计特性,其计算较简单,但容易受到噪声干扰;频域特性用来反映频谱中心、宽带等频率特性,可以发现周期性故障,但无法体现故障的时间演变;时频域特征,比如小波系数、希尔伯特-黄变换等,可以对信号时间进行同步捕捉,但其计算复杂程度较高。另外也可利用信号处理和机器学习技

术建立高阶统计量、自回归系数的高级特征,有基于统计指标的过滤法,比如方差分析法、互信息法等和基于模型的包裹法,如递归特征消除法,以及嵌入式方法比如L1正则化法。特征选择可以降低数据的维度,降低计算开销,提高模型的泛化能力,避免过拟合。

4.3 故障预测算法设计

预测的目标是在故障发生之前发现设备性能的退化趋势,给维修人员提供检测支持。可以根据预测时间尺度的不同将故障预测分为短期、中期和长期。短期预测重点关注未来几小时至几天内的设备状态,主要采取统计模型和机器学习方法,如ARIMA、SVM等,中期预测重点关注几周至几个月的运行趋势,在统计历史数据之外再结合设备的物理模型和演化机理,比如卡尔曼滤波,粒子滤波等,长期预测重点评估生命周期尺度上的设备健康状态及剩余寿命,多采用生存分析方法,比如cox比例风险模型,加速失效时间模型等。伴随深度学习技术的普及,神经网络在故障预测中应用的也越发频繁,比如LSTM、GRU等循环神经网络可以建模时间序列数据,CNN等卷积神经网络可以自动提取空间特征,DNN深度神经网络可以拟合复杂的非线性关系。深度学习自身的特征学习和表示能力对地铁车辆故障预测带来了关键性的技术支撑。

4.4 故障诊断和决策支持

在以往的故障诊断中主要依据专家的经验 and 诊断手册,容易出现主观性过强和不一致性。而基于数据分析的故障诊断是通过机器学习算法功能,在历史故障数据中借鉴学习故障模式和整合诊断规则。常用的诊断方法有基于案例的推理、基于规则的推理和基于模型的诊断等。其中基于案例的推理是在历史案例库中对比出和当前故障最为相似的案例,再总结历史案例的诊断结果进行推理;基于规则的推理是将专家的经验加以总结,再通过规则匹配和推理从而得出诊断结论;基于模型的诊断

则是建立设备的物理模型或者数据驱动模型,采取仿真模型或分析残差等方式对故障进行定位和溯源。这些方法可单独使用也可结合使用,形成混合诊断策略,将诊断结果提供给维修人员,帮助他们迅速排查和检修故障,并能将故障情况反馈给预测模型,不断更新预测策略,形成一个闭环的健康管理流程。

5 结束语

当前城市轨道交通正朝着网络化、高密度运营方向发展,对车辆运行安全性与可靠性的要求持续提升。本研究虽取得阶段性成果,但仍需在复杂工况适应性、新型故障模式识别、数字孪生融合应用等方面进一步深化。未来,随着人工智能、物联网、大数据技术的深度融合,数据驱动的故障预测将朝着更精准、更智能、更具泛化能力的方向发展,有望实现从单一部件故障预测向整车系统健康管理的跨越。

展望未来,期待通过多线路故障数据共享、跨领域技术融合、产学研协同创新,推动地铁车辆故障预测技术的规模化应用与持续迭代,为城市轨道交通运维体系的数字化转型注入新动能,助力构建更安全、更高效、更经济的现代城市轨道交通网络,为市民出行保驾护航。

[参考文献]

- [1]张承宽.地铁车辆故障预测与诊断技术研究[J].高速铁路,2024(18):78-80.
- [2]方建胜,张纪元.地铁车辆制动系统故障预测与健康管理技术研究[J].电子元器件与信息技术,2024,8(7):169-171.
- [3]戈春珍.基于故障数据分析的地铁车辆检修策略优化[D].北京:北京交通大学,2018.

作者简介:

王雅莉(1983--),女,汉族,山西晋城人,硕士,高级工程师,从事地铁车辆维修技术研究。