

基于智能监测的铁路货物装载加固状态实时评估

马向原

北京铁路物流中心 北京 100076

DOI: 10.12238/ems.v8i1.17680

[摘要] 铁路货物运输作为国家综合交通运输体系的重要组成部分，其安全性与运输效率直接关系到国民经济的稳定运行。货物在运输过程中的位移、倾斜或加固失效等异常状态，若未能及时识别，极易引发脱轨、倾覆等重大安全事故。传统的人工巡检与定点监测手段存在滞后性强、覆盖范围有限等固有缺陷，难以满足现代铁路运输对实时性与精准性的要求。随着物联网、边缘计算与智能感知技术的快速发展，构建基于智能监测的铁路货物装载加固状态实时评估体系成为可能。通过多源传感器融合、动态特征提取与状态评估模型的构建，实现对货物装载状态的全时域、全过程监控，能够显著提升风险预警能力与应急响应效率。该体系不仅优化了运输安全管理流程，也为铁路货运智能化转型提供了关键技术支持。

[关键词] 智能监测；铁路货物；装载加固状态

引言

铁路运输以其运量大、成本低、能耗小、安全性高等优势，在我国大宗货物与长距离运输中占据主导地位。随着“交通强国”战略的深入推进，铁路货运量持续攀升，货物种类日趋复杂，对运输过程的安全性提出了更高要求。货物在运输过程中受线路条件、列车运行状态、气候环境等多重因素影响，极易发生位移、扭转、倾斜乃至加固结构失效等现象。此类异常若未被及时发现与处置，可能演变为严重的行车事故，造成人员伤亡与重大经济损失。当前，货物装载状态的监控主要依赖装车后的静态检查与途中的人工抽查，缺乏对运输全过程的动态感知能力。检测手段的滞后性与不完整性，使得潜在风险难以在萌芽阶段被识别。近年来，智能传感、无线通信与数据分析技术的突破，为解决这一难题提供了新思路。

一、智能监测体系的架构设计与技术集成

(一) 多源异构传感器的协同部署与功能定位

在铁路货物装载加固状态的实时评估中，传感层是数据采集的物理基础，其部署策略与功能配置直接决定了监测的全面性与可靠性。针对货物在运输过程中可能发生的横向滑移、纵向窜动、垂向跳动及扭转等复杂运动形态，需构建多维度、多物理量的传感网络。加速度传感器用于捕捉货物在三维空间内的振动与冲击特性，尤其在列车启动、制动及通过道岔、弯道时的瞬态响应，为判断异常受力提供依据。应变传感器则嵌入关键加固部件，如钢丝绳、紧固器、挡木或

集装箱角件，实时监测其受力变化，识别因松动、断裂或疲劳导致的加固失效。位移传感器采用非接触式激光测距或高精度电感式探头，布置于货物与车体之间，用于量化相对位移量，设定阈值报警机制。倾角传感器集成于货物重心附近或加固框架上，持续监测姿态角变化，防止因重心偏移引发的倾覆风险。此外，环境传感器如温湿度、雨量计等，可辅助分析外部环境对加固材料性能的影响，例如湿滑导致摩擦力下降或低温引发材料脆化。传感器的选型需兼顾精度、稳定性、抗电磁干扰能力及宽温域适应性，确保在复杂铁路运行环境中长期可靠工作。部署方案遵循“关键点覆盖、冗余备份、低侵入性”原则，避免对正常装车作业与货物安全造成干扰。通过有线与无线混合组网方式，实现数据的高效汇聚与低延迟传输。

(二) 边缘计算与数据预处理的实时化实现

传感数据的海量性与时效性对数据处理架构提出了严峻挑战。若将所有原始数据上传至中心服务器进行处理，不仅占用大量通信带宽，且难以满足毫秒级响应的预警需求。因此，边缘计算技术被引入监测体系，在靠近数据源的节点部署具备计算能力的边缘网关或智能终端，实现数据的本地化处理与初步决策。边缘层的核心功能包括信号滤波、特征提取与异常初筛。原始信号常混杂有高频噪声与系统漂移，需采用数字滤波算法如卡尔曼滤波或小波变换进行去噪处理，提升信噪比。在时域与频域内提取关键特征参数，如加速度峰值、均方根值、冲击指数、应变变化率、位移趋势斜率等，

形成低维特征向量,大幅压缩数据量。基于预设的物理阈值与统计模型,边缘节点可对特征向量进行实时判别,识别出可能的异常事件,如瞬时剧烈冲击或持续性位移增长,并触发本地报警或优先上传可疑数据。该机制有效减轻了云端计算负担,缩短了从感知到响应的闭环时间。同时,边缘设备支持固件远程升级与参数动态配置,适应不同货物类型与运输线路的差异化监测需求。

(三) 无线通信网络的可靠性保障与协议优化

监测数据的可靠传输是连接感知层与分析层的纽带。铁路运输环境具有移动性、长距离、强电磁干扰等特点,对通信网络的稳定性与覆盖连续性构成挑战。系统采用多模融合的无线通信策略,结合短距离无线技术与广域蜂窝网络。在编组站、装卸区等固定场景,利用 Wi-Fi 或 ZigBee 构建局域传感网络,实现高密度、低功耗的数据汇聚。在列车运行过程中,主要依赖 4G/5G 蜂窝网络进行广域传输,确保数据在移动状态下的持续回传。为应对隧道、山区等信号盲区,系统设计断点续传与本地缓存机制,边缘设备在通信中断时暂存数据,待信号恢复后自动补传,避免数据丢失。通信协议采用轻量级 MQTT 或 CoAP,优化报文结构,减少传输开销,提升在弱网环境下的传输效率。同时,引入数据加密与身份认证机制,防止数据窃取或恶意注入,保障信息传输的安全性。网络拓扑采用星型与网状混合结构,关键节点设置冗余链路,提升整体网络的容错能力。通过 QoS (服务质量) 分级管理,优先保障报警信息与关键状态数据的传输,确保高优先级信息的低延迟送达。

二、货物装载加固状态的动态建模与评估方法

(一) 基于物理机理的多体动力学仿真与参数标定

要实现对装载加固状态的精准评估,必须建立能够反映真实物理过程的动态模型。多体动力学理论为描述货物、加固装置与车体之间的相互作用提供了数学框架。将货物、车体、转向架等视为刚体或柔性体,通过铰接、弹簧-阻尼器等约束关系构建系统动力学方程。模型输入包括线路几何参数(坡度、曲线半径、超高)、列车运行状态(速度、加速度、制动率)及外部激励(风载、轨道不平顺谱)。通过数值求解,可仿真不同工况下货物的受力分布、位移轨迹与振动模态,为理解异常状态的形成机理提供理论依据。例如,模拟列车通过小半径曲线时离心力对货物横向稳定性的影响,或

紧急制动时惯性力导致的纵向拉伸效应。仿真结果与实测数据对比,用于反向标定模型中的关键参数,如货物与车板间的摩擦系数、加固绳索的弹性模量、阻尼比等,提升模型的预测精度。经过验证的仿真模型可作为“数字孪生”底座,用于预测特定运输任务中的潜在风险点,指导传感器布设与预警阈值设定。

(二) 数据驱动的状态识别与模式分类算法

在实际运行中,货物装载状态受多种不确定因素影响,仅依赖物理模型难以覆盖所有工况。因此,引入数据驱动的方法,通过机器学习算法从历史监测数据中学习状态演变规律。首先,对采集的多维时序数据进行标注,划分正常、轻微偏移、严重松动、濒临失效等状态类别,构建训练数据集。采用监督学习算法如支持向量机(SVM)、随机森林(RF)或深度神经网络(DNN),训练分类模型。DNN中的长短期记忆网络(LSTM)或一维卷积神经网络(1D-CNN)特别适用于处理时间序列数据,能够自动提取时序依赖特征,识别状态演变的动态模式。例如,LSTM可捕捉应变信号的缓慢增长趋势,预示加固部件的疲劳累积;CNN可识别加速度频谱中的异常谐波成分,关联特定故障类型。对于无标签数据,可采用聚类算法如K-means或自编码器进行无监督学习,发现潜在的异常模式。模型训练过程中引入交叉验证与正则化技术,防止过拟合,确保泛化能力。通过混淆矩阵、F1分数等指标评估模型性能,并持续迭代优化。

(三) 融合物理模型与数据驱动的混合评估框架

单一的建模方法存在局限性:物理模型依赖精确参数,难以适应复杂边界条件;数据驱动模型需要大量标注数据,且解释性较差。为此,构建融合物理机理与数据驱动的混合评估框架,发挥二者互补优势。该框架以物理模型的仿真输出作为先验知识,指导特征工程与模型设计。例如,将多体动力学仿真得到的理论加速度响应作为基准,计算实测信号与之的残差,该残差序列蕴含了模型未涵盖的异常信息,可作为机器学习模型的输入特征,提升对微小异常的敏感度。反之,数据驱动模型识别出的异常模式可反馈至物理模型,用于修正参数或更新边界条件,实现模型的在线自适应。进一步,采用贝叶斯推理或证据理论,对物理模型的预测结果与数据驱动的分类结果进行融合,生成综合置信度评分,量化状态评估的不确定性。该混合框架不仅提高了评估的准确

性与鲁棒性，也增强了决策结果的可解释性，为运维人员提供更具说服力的风险判断依据。

三、实时评估系统的集成应用与安全闭环

(一) 云端分析平台的架构设计与功能实现

实时评估系统的效能最终体现在云端分析平台的智能化水平。平台采用微服务架构，实现模块化部署与弹性扩展。核心功能模块包括数据存储、状态评估、风险预警、可视化展示与决策支持。海量监测数据经通信网络接入后，存入时序数据库（如 InfluxDB）与关系型数据库（如 PostgreSQL），支持高效查询与长期归档。状态评估引擎调用预训练的混合模型，对实时数据流进行持续分析，输出当前装载状态分类结果与健康度指数。风险预警模块设定多级报警阈值（如预警、严重、紧急），根据评估结果自动触发短信、APP 推送或声光报警，并生成结构化报警报告。可视化界面以地理信息系统（GIS）为底图，动态显示列车位置、各车厢货物状态热力图、关键参数趋势曲线等，支持多维度钻取分析。决策支持模块结合运输计划、线路信息与应急预案，为调度中心提供处置建议，如限速运行、就近停车检查或启动应急响应。平台还具备用户管理、权限控制与审计日志功能，确保系统安全可控。

(二) 安全预警与应急响应的联动机制

实时评估的价值在于将风险识别转化为有效的安全行动。系统建立与铁路既有调度指挥系统（TDCS/CTC）的接口，实现信息的无缝对接。当检测到严重异常时，评估平台不仅向货运管理人员报警，同时将风险等级与位置信息推送至列车司机与行车调度员。调度员可根据预警信息，调整列车运行计划，如安排在前方站停车检查、降低通过危险区段的速度，或协调救援力量待命。司机可通过车载终端接收预警提示，增强驾驶警觉性，采取平稳操纵措施，避免加剧货物扰动。在极端情况下，系统可支持与列车自动控制系统（ATC）联动，实施强制限速或紧急制动，防止事故升级。此外，建立标准化的应急处置流程，明确各岗位职责与响应时限，确保预警信息得到及时、规范的处理。通过定期演练与复盘，持续优化联动机制，提升整体应急响应效率。

(三) 系统效能的持续优化与反馈迭代

实时评估系统并非一成不变，而是一个持续学习与进化

的有机体。建立数据闭环，将每次报警事件的处理结果、现场核查情况与事故记录反馈至系统，用于修正模型参数与优化算法逻辑。例如，若某次误报被确认为正常工况，则调整相应特征的权重或报警阈值；若漏报事件发生，则补充训练数据，增强模型对该类异常的识别能力。引入在线学习机制，使模型能够适应新型货物、新线路或气候变化带来的新特征。定期进行系统健康度评估，检查传感器精度、通信质量与计算资源负载，及时维护或升级硬件设备。通过 A/B 测试比较不同算法版本的性能，选择最优方案上线。同时，收集用户反馈，优化人机交互界面与报警策略，提升用户体验与系统可用性。

结论

基于智能监测的铁路货物装载加固状态实时评估体系，通过深度融合物联网感知、边缘智能计算与数据驱动分析，实现了从被动响应向主动预防的安全管理模式转变。该体系不仅突破了传统人工检查的时空局限，更通过构建物理机理与数据规律相融合的动态评估模型，显著提升了对潜在风险的识别精度与预警时效。其应用有效降低了因货物位移或加固失效引发的行车事故概率，为铁路货运的高效、安全运行提供了坚实的技术保障。随着人工智能与数字孪生技术的进一步发展，该评估体系将持续进化，成为智慧铁路建设中不可或缺的核心组件，推动整个运输链条向更高水平的智能化与自主化迈进。

[参考文献]

- [1] 王童, 吕守玉, 韩胜康, 荀雍钊. 铁路货物列车制动机车底智能巡检系统研究[J]. 高速铁路新材料, 2025, 4(04): 80-84.
- [2] 侯通, 于雪娇, 周凌云, 任筱锐, 褚家亮. 铁路多式联运货物品名衔接互认技术研究[J]. 铁道运输与经济, 2025, 47(04): 10-17.
- [3] 王三宝. 新时代背景下铁路货物运输对行车调度的要求分析[J]. 中国储运, 2024, (11): 105-106.
- [4] 叶飞. 铁路货车装载状态图像智能识别技术研究[D]. 中国铁道科学研究院, 2024.
- [5] 杨广全, 杨旭, 史村. 铁路货物装卸机械人机安全防护智能预警系统设计[J]. 铁道货运, 2024, 42(01): 26-30.