

轨道交通车辆转向架关键部件的智能运维技术研究

张 强

重庆轨道交通运营有限公司 重庆 401120

【摘 要】：轨道交通转向架关键部件依靠人工按期检修，普遍存在作业效率不足、故障判别失误、数据互不互通、检修资源分配不均等缺陷，文章围绕转向架关键部件探究智能运维落地路径。研究拆解传统运维固有缺陷与智能运维实际需求，搭建适配设备运行状态的多源传感采集体系，完善数据清洗、时频特征提取、多源数据融合配套技术链路。结合 CNN-Transformer 复合结构搭建故障识别模型，通过多维参数调校强化模型在多变工况、环境噪声干扰下的适配能力。依托端-边-云分层架构搭建全域运维平台，实现设备状态捕捉、故障提前判别、运维方案生成、现场工单流转的全流程闭环管控。这套平台识别波动小、反馈时延短，能够降低现场运维开销，支撑轨道交通转向架智能运维场景实际落地。

【关键词】：转向架；状态感知；深度学习；故障诊断；智能运维

DOI:10.12417/2811-0722.26.08.013

引言

转向架承担轨道交通车辆核心走行功能，轴箱轴承、齿轮箱、悬挂系统的运行态势会直接影响车辆行驶安全与日常运营稳定性。轨道车辆常态承受交变载荷冲击，叠加振动、温湿度交替变化的外部环境，内部部件会逐步产生隐性性能衰减与早期损伤。人工周期性检修依托从业者主观经验开展作业，存在作业速度缓慢、故障发现滞后、检修资源配比不合理、运维数据碎片化的问题，无法贴合当下轨道交通安全管控、成本管控的运维要求。本文结合多源传感、边缘计算以及深度学习三类技术，探究转向架核心部件状态感知、故障判定与智能运维系统搭建路径，搭建闭环运维框架，提升轨道车辆运维实际成效与经济收益。

1 转向架关键部件运维现状与智能运维需求分析

1.1 轨道交通车辆转向架关键部件运维痛点

轨道交通转向架轴箱轴承、齿轮箱、悬挂系统等核心部件长期经受交变载荷、温湿度波动及粉尘侵蚀，传统人工定周期检修存在固有短板^[1]。人工拆解核验依托从业者从业经验推进，整体作业耗时久、运维资金投入量大，难以捕捉部件运行阶段的隐性性能退化。固定周期检修会打乱现场检修资源配比，现场常出现完好部件反复拆解、早期故障部件跳过核验流程的现象，细微故障延误处置会影响线路正常运营。轮轨耦合振动衍生的噪声会遮蔽微弱故障信号，干扰人工核验判断结果。路网内各线路运维数据互不连通，数据孤岛阻碍故障规律研判与深度学习模型样本训练。

1.2 转向架关键部件智能运维核心需求

传统运维模式衍生的各类短板，倒逼转向架关键部件智能运维落地状态实时感知、故障智能诊断、寿命动态预测、运维智能决策四类落地路径。现场布设传感硬件搭建覆盖全时段的多源数据采集框架，能够取代线下人工巡回检查；依托智能算法处理复杂行车工况下的故障辨识难点，改善故障预警、现场

诊断的运行效率；结合部件寿命拟合模型调整检修时序，把固定周期的被动检修转为预判式主动检修，重构轨道交通底层运维范式；依托统一运维中台联通孤立数据流，搭建覆盖部件服役全周期的数字化运维链路，支撑轨道交通运维体系完成智能协同转型。

1.3 智能运维技术可行性与应用价值

多源传感、边缘计算、深度学习、通信及云计算技术的普及落地，为转向架智能运维筑牢底层技术基础。各类传感器能够收录振动、温度、噪声等维度的设备运行数据，车载边缘终端完成现场原始数据就地解析，通信链路维持数据流高速低延迟传输，云端服务器承载海量数据归档与算法模型迭代优化任务。CNN 与 Transformer 等主流智能算法，补齐了传统技术难以捕捉微小故障、环境适配性较差的固有缺陷。

智能运维技术适配轨道交通现场工程场景，可提前甄别部件过热、异常振动等潜在安全风险，降低线路运营事故发生概率。技术落地后能减少人力检修成本，加快备品备件流转速度，缩减设备停工检修时长，覆盖转向架关键部件从投入使用到报废的全周期健康管控，同步优化轨道交通线路运营安全水平与营收收益。

2 转向架关键部件状态感知与数据处理技术

2.1 多源传感状态感知方案

本文选用分布式多类型传感器协同布设的状态感知方案，结合转向架各部件故障成因与动态运行规律排布监测硬件，完成定向数据采集。轴箱轴承点位加装振动、温度传感器，把控内部磨损、局部过热两类故障；齿轮箱配套多通道振动、噪声及油液传感组件，追踪齿面损耗、润滑油参数波动；悬挂系统增设位移、加速度传感器，判别结构刚度、阻尼参数偏离正常值的情况；制动装置依托温度、压力传感组件，把控闸片、制动盘实时运行工况^[2]。设备关键点位采用双传感器冗余布设，全部采集数据经由车载总线汇入边缘计算单元，维持监测数据

完整稳定传输。

2.2 振动/温度/噪声信号预处理方法

轨道交通车辆启停、过弯、变速等多变行车工况易让车载原始监测信号掺入轨道接缝冲击、车载线缆电磁扰动等无效噪声，依靠分级预处理手段剥离无关杂质并提取隐性故障特征。振动信号依托多层小波包分解搭配自适应阈值去噪算法筛除路面低频杂波，留存和部件损伤强关联的信号核心频段；温度信号通过时间序列滑动平均滤波剔除瞬时异常数值，抵消外界气温波动、传感硬件长期零点漂移带来的数据偏差；噪声信号借助多通道梅尔滤波器组弱化宽频杂讯，划分高频设备故障异响与线路现场持续性背景杂音。车载边缘计算单元就近承接全部实时信号预处理任务，动态筛除时域重复的无效冗余数据，缩减云端远距离数据传输带宽与后台并行运算负荷，保障车辆车载设备全域动态监测的实时响应时效要求。

2.3 时频域特征提取与数据融合技术

依托预处理筛选后的纯净监测信号，开展时频域联合特征提取搭建合规故障特征数据集。时域统计序列内峰值、峭度、波形因子等量化参数，刻画信号瞬时幅值与周期波动规律，分辨设备常态运转与异常故障的信号差异；频域依托分段快速傅里叶变换，提取频谱峰值、高次谐波分量等隐性指标，贴合轴承、齿轮转动类部件固有振动频率；叠加短时傅里叶变换与离散小波变换，计算时频熵、能量矩两类复合参数，适配转向架加速减速交替的非平稳信号采集场景。数据端采用加权融合联动联邦学习的多维融合架构，归集车载终端采集的振动、温度、噪声异构监测数据，消解单一信号监测判断片面的短板，所有特征聚合流程在车载本地节点完成，阻断原始数据外网流转路径，提升复杂路况下设备故障诊断的综合识别精度。

3 基于深度学习的关键部件故障诊断技术

3.1 故障诊断模型构建思路

本次研究结合部件物理运行机理与数据驱动双线建模思路，平衡故障诊断结果可解释度与信号特征挖掘质量，贴合转向架多变行车工况下的故障识别需求。对照转向架系统内部动力学演化规律，归纳轴箱轴承、齿轮箱核心构件出现磨损、表面点蚀、结构刚度衰减等高频故障的内在成因，整理条目完整的故障特征知识库，补齐智能模型训练所需的底层理论依据^[3]。用深度学习算法替代传统人工筛选信号的处理模式，依托网络层级自主捕捉信号内部隐藏的细微故障表征，弱化人工主观筛选带来的特征遗漏问题。模型内部嵌套注意力层与跨维度特征融合单元，放大和故障强关联信号的占比，借助迁移学习优化模型适配性，应对现场样本稀缺、工况动态切换的使用场景。精简模型内部卷积与全连接层排布，实现多个转向架构件、多种故障类型同步判别，契合车载边缘终端算力有限的现场部署要求。

3.2 基于 Transformer/CNN 的故障识别方法

本次研究采用 CNN 与 Transformer 融合的混合模型完成故障识别，整合两类主流深度学习算法的差异化技术优势。一维 CNN 通过层级化卷积、池化结构解析振动信号局部信息，浅层卷积感知部件微小损伤引发的高频信号波动，深层卷积凝练车辆持续运行产生的低频全局信号。Transformer 借助多头注意力单元，抓取时序监测信号跨时间步的关联规律，补足 CNN 无法搭建长距离时序依赖的短板。CNN-Transformer 混合模型兼顾局部信号解析与全局时序关联分析能力，识别表现超出独立算法，能够适配转向架多类型复杂故障的现场识别需求。

3.3 变工况与强噪声下故障诊断优化

车辆行驶状态切换、承载载荷变动与现场空间电磁杂讯叠加，都会降低故障诊断模型的识别准确度。研究依托三重改良手段优化模型抗干扰性能，借助时序缩放、幅值随机扰动、实景噪声叠加扩充原始故障样本，拓宽数据集覆盖范围，贴合野外多变工况与高噪声作业环境；将域自适应网络嵌入模型对抗训练流程，修正偏移的信号特征参数，抹平不同行车场景下的数据分布偏差；依托焦点损失函数重构样本权重配比，降低海量正常样本对迭代方向的干扰，强化模型对稀缺、边界模糊故障的特征捕捉能力，缓解数据集内部数量失衡问题。小波降噪模块与诊断模型形成联动链路，依据实时信号信噪比动态调整滤波参数，减少高噪声环境下的故障误判情况，拓展模型在极端行车条件下的适用边界。

4 转向架智能运维系统设计与实现

4.1 智能运维系统总体架构

本次转向架智能运维系统沿用端-边-云三级协同架构，搭建覆盖数据采集、现场处理、特征分析、现场落地的闭环运维链路。终端层布设分布式传感组网，硬件点位贴合转向架轴承、齿轮箱等核心构件布设，完成车辆多维运行参数抓取与基础数据核验，依托硬件自检、多点冗余备份机制稳住源头原始数据品质^[4]。边缘层搭载车载轻量化算力模块，内置裁剪后的深度学习推理模型，完成车载信号实时降噪、隐性特征挖掘与前置故障告警，仅向上游推送筛选后的特征数据，缩减车载无线通道带宽损耗。云层依托分布式云计算集群，承接海量异构数据持久化存储、网络参数迭代更新、故障溯源研判、部件剩余寿命测算、运维方案推演等后台任务。系统应用层对接现场运维实操流程，输出设备态势可视化、异常告警推送、检修工单流转管控等实操服务。系统整体拆分独立功能模块，硬件接口适配性宽泛，可结合城轨、普速车辆以及差异化线路工况拓展配套运维功能。

4.2 状态监测与故障预警模块设计

状态监测与故障预警模块为系统核心组件，内嵌实时监测、异常识别、分级预警、趋势研判四项基础功能。模块依托

可视化交互面板动态呈现转向架温度、振动、位移等核心运行参数,可调取时序历史数据,对偏离常态的运行参数做界面标红标注。云端部署的深度学习模型能够剥离车辆常规运行扰动,区分设备固有参数波动与早期故障信号,降低故障误判、遗漏判定的发生频次。系统划分多层级告警阈值,匹配弹窗、后台日志等多元提醒渠道,捕捉部件初期隐性异常,针对高危故障同步附带现场处置参考方案。模块内嵌时序推演模型,绘制构件服役状态衰减时序曲线,为部件剩余使用周期测算提供底层数据,留存全链路交互日志,便于运维人员核对告警产生的原始数据源头。

4.3 检修决策与工单管理模块设计

检修决策与工单管理模块打通故障定位、方案推荐、工单生成、过程追溯、经验归档全链条运维业务。模块依托多源数据融合分析结论判别故障类别与空间点位,调取内置运维知识库,对照设备出厂参数、故障表征、过往检修台账,自动匹配涵盖操作流程、备品型号、人力时长的适配维修方案。系统能够输出制式检修工单,预留人工参数修改与多级审批操作入口,依托物联网感知终端搭配移动端程序追踪工单流转进度,归档现场检修、备件更替、人员核验的全过程数据。模块常态化归集一线故障处置案例与实操心得,动态更新知识库条目,优化后台故障判定逻辑。

参考文献:

- [1] 刘华汉,王涛.地铁车辆转向架 FMECA 知识图谱构建研究[J].内燃机与配件,2026,(1):32-34.
- [2] 胡文浩,段泽斌,李超,等.轨道车辆转向架焊接构架免热处理制造可行性研究(一)[J].焊接技术,2025,54(12):116-120.
- [3] 雷越,马卫华,秦龙泉,等.轻轴轮轨车辆转向架结构设计及车轮磨耗影响分析[J].机械,2025,52(9):22-27.
- [4] 周希.碳纤维转向架车辆动力学研究[D].石家庄铁道大学,2025.
- [5] 田勐,赵刚,王大臣,等.轨道车辆转向架焊缝深层涡流检测试验研究[J].机车车辆工艺,2025,61(1):47-49.

4.4 系统部署与功能验证

本系统推行分阶段落地部署模式,兼顾运行稳定性与线路工况适配能力。硬件选型贴合轨道交通野外使用标准,选用具备防水抗振属性的工业传感器适配转向架颠簸、多水汽的运行环境,搭配低功耗嵌入式边缘算力终端分担车载数据处理压力^[5]。云端部署分布式服务器集群,承接海量异构监测数据的弹性扩容存储与并行高速算力调度。软件拆分车载轻量化底层系统与云端微服务架构,各功能模块可单独迭代更新,同时承载多路终端高并发访问请求。系统可承载大批量轨道车辆同步联网监测,链路数据传输波动幅度低,能够实现跨月度不间断自主运行。落地现场运维场景后可减少现场巡检人工投入,提升转向架全流程运维智能化程度。

5 结语

本文围绕转向架关键部件运维痛点开展全链条研究,覆盖需求研判、数据预处理、故障辨识、平台搭建与功能核验各项环节。搭建适配车载场景的多源传感数据归集与净化体系,依托 CNN-Transformer 混合模型处理行车扰动下的故障识别任务,以端-边-云协同架构整合分散运维业务,消解传统运维模式下数据割裂、人工判读偏差、巡检周转缓慢等现存短板。整套技术体系能够缩短故障排查耗时,减少运维人力与物资损耗。研究形成的成套方案能够支撑转向架从服役到报废的全周期健康管控,为轨道交通行业运维数字化转型提供落地参考。