

城市轨道车辆轨旁智能运维技术研究^{*}

赵 明¹ 高明亮^{1**} 高 珊¹ 孙洪亮¹ 郭剑平²
刘德权¹ 李方正² 杨晓娜³

(1. 中车长春轨道客车股份有限公司国家轨道客车工程研究中心, 130062, 长春;

2. 中车长春轨道客车股份有限公司检修运维事业部, 130062, 长春;

3. 中车长春轨道客车股份有限公司人力资源部, 130062, 长春//第一作者, 副总工程师)

摘 要 针对当前城市轨道交通车辆运维中存在的维修周期长、成本高、质量低、存在过度修和欠修等问题, 开展轨旁智能运维技术的研究与应用。轨旁智能运维基于 AI(人工智能)、大数据、物联网、云计算等新兴技术, 为实现城市轨道交通车辆智能运维提供了技术上的可行性。深入讨论了轨旁智能运维技术面临的核心挑战, 基于 AI 中台创造性地提出了以数据为驱动、以用户体验为宗旨, 打造全寿命周期、全价值链的数据业务链路的新型轨旁智能运维技术。该技术以车辆轨旁运维设备全寿命周期检修综合成本为目标, 通过建立轨旁运维模型, 实现车辆轨旁运维的状态修和计划预防修, 有效降低了车辆运维成本, 实现了车辆服务模式的创新。

关键词 城市轨道交通; 车辆; 轨旁智能运维技术

中图分类号 U29-39

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.02.030

Research of Trackside Intelligent Operation and Maintenance Technology for Urban Rail Transit Vehicle

ZHAO Ming, GAO Mingliang, GAO Shan, SUN Hongliang, GUO Jianping, LIU Dequan, LI Fangzheng, YANG Xiaona

Abstract Aiming at the problems of long maintenance cycle, high cost, low quality, over-repair and under-repair in current urban rail vehicle operation and maintenance process, the research and application of trackside intelligent operation and maintenance (hereinafter referred to as TIOM) technology is carried out. Based on emerging technologies such as AI, big data, Internet of Things, cloud computing and so on, TIOM provides technical feasibility for the realization of urban rail vehicle intelligent operation and maintenance. In this article, the core challenges faced by TIOM technology is discussed in

depth, then, based on AI intelligent middle station, a data driven, user experience oriented new type TIOM technology with data link for the full life cycle and full value chain is creatively proposed. Aiming at the comprehensive cost of the whole life cycle maintenance of trackside vehicle equipment, this technology establishes a maintenance decision-making model to realize the trackside operation and maintenance of vehicle state repair and planned preventive repair. The result is that the application of TIOM technology effectively reduces the cost of vehicle operation and maintenance, and realizes the innovation of vehicle service mode.

Key words urban rail transit; vehicles; trackside intelligent operation and maintenance technology

First-author's address National Engineering Research Center of Railway Vehicles, CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China

目前城市轨道交通车辆维修周期长、成本高、质量低, 存在过度修、欠修等车辆运维情况。如何确保车辆安全、实现运维降本增效是亟待解决的问题。自此, 国内外城市轨道交通车辆制造企业不断开展业务实践与创新, 致力于打造专业化、精细化、智能化和集约化的城市轨道交通车辆运维企业。由于受车辆采集数据种类少、质量差、传输网络带宽不够及运维设备落后等客观条件的约束, 车辆运维模式虽然有了较大的创新, 但依旧无法满足用户定制化、智能化的需求。AI(人工智能)、5G(第五代通信技术)、大数据、物联网、云计算等新兴技术的快速发展, 为实现智能运维提供了技术上的可行性。通过新兴信息技术与城市轨道交通的深度融合, 打破数据壁垒, 实现多系统集成、健康检测、智

^{*} 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划课题(P2009J001)

^{**} 通信作者

能决策等功能,提高轨道交通车辆运维的智能化程度。

轨旁智能运维技术作为车辆智能运维的关键核心技术,对车辆关键系统设备(走行部、车顶、车底等)的监测、车辆运行品质的评价、核心部件的预防性维护及预测性维护起着重要的作用。轨旁智能运维系统是以数据为驱动,以用户体验为导向,在设计阶段考虑检修应用,通过健康管理技术,搭建检修信息管理系统,并结合智能检测装备,基于轨旁 AI 中台技术实现智能化维修决策与业务管理。通过增加状态修内容,最大程度实现均衡修、可视化作业调度与资源管理,最终实现城市轨道交通车辆的智能运维。轨旁智能运维系统通过工业物联网技术将车辆、供电、信号等专业系统设备形成物联,结合移动点巡检及办公系统,形成场段系统的综合联网与数字化管理。轨旁设备对车辆状态进行检测,并通过网络传输到地面健康管理系统,通过从该系统的大数据中挖掘故障特征,并对其变化趋势进行分析,智能辅助车辆、人员决策。

轨旁智能运维技术系统通过在检修基地、运营线路上安装基于红外感应、温度监测、射频感知、3D 图片等传感技术的轨旁检测装置,自动检测车辆车体和车底的磨损情况、轮对和闸片的尺寸、轴承温度,以及车辆走行品质等信息,以此来辅助人工决策。该系统设置在列车出入库线上,配备 360° 车体外观检测、轮对尺寸检测、受电弓/受流器检测、车底设备红外检测等功能。通过光谱分析、图像分析、声纹分析、温振融合等先进技术对车体外观、车轮尺寸状态、受电弓/受流靴的重要参数、车底关键设备的温度等重要项点进行自动检测,并自动识别出列车相关异常情况,同时搭建排程与调度工具,为车辆运维提供可视化的作业调度与资源管理;通过构型管理技术将维修规程与知识结构化与标准化^[1]。

AI、云计算等相关研究的深入,为实现轨旁智能运维提供了方法支撑^[2]。因此,突破传统的轨旁运维管理模式,实现轨旁车辆服役全生命周期过程的数字化、精细化、智能化管理,是轨旁检测运维的发展趋势^[3]。

1 轨旁智能运维技术的核心挑战

目前国内已形成较为规范的城市轨道交通车辆轨旁运用、检修、管理规范及技术架构,具备了多业务

场景的实际应用,取得了一定应用效果,但距离真正达到轨道交通智能运维水平,还面临着许多核心技术与管理挑战。

1) 系统化协同。当前城市轨道交通车辆生产、总装、运用、检修等环节相对比较独立,尤其是各方的技术架构、数据资产形式、管理模式各不相同,信息互通性差,造成车辆无法实现数据全寿命贯通,以及无法实现业务价值链的全生命周期数据建设。系统化协同就是要解决数据各方,即数据标准、数据体系、数据架构协调一致,保证数据通及系统平台通,最终实现以纯净数据为驱动的全生命周期业务创新。

2) 柔性化运行。城市轨道交通车辆配置信息的逻辑控制、下发和安全隔离,以及 Wi-Fi(无线网络)装载机制与 MVB(多功能车辆总线)传输机制,均会让轨旁智能运维系统随需而变。支持动态执行轨旁业务模型规则和流程的引擎是实现轨旁智能运维系统柔性化运行的另一大支撑点,如:预警引擎、预测引擎、流程等。以模型预警引擎为例,通过业务数据进行模型编程,模型提供的能力经由 AI 可视化编排,既可实现先诊断后预警,也可实现先预警后优化;针对重要的故障逻辑,还可实现预警模型环节的自定义。通过 AI 编排能力而非修改代码来满足具体业务情况,大大增强了轨旁智能运维系统的灵活性和应变能力。

3) 可视化编排。轨旁智能运维 AI 可视化编排的实现使轨旁智能运维更具象化,从而在一定程度上降低了该系统管控和运营的门槛。例如,可自定义地按业务流组装的配置视图,将配置模型以可视化的方式进行呈现。利用统计分析画布,通过拖曳功能进行模型的设计,同时结合知识库,即可实现丰富的统计、挖掘、预警等业务场景。此外,利用可视化的自助分析平台、可视化的数据加工、向导性标签的生产及可视化的运营结果等功能使轨旁智能运维系统的核心能力更直观、更易操作,并以更有建设性的方式促进业务思考,从而更好地帮助各角色发挥轨旁智能运维系统的价值。

4) 动态化扩展。基于组件化的结构设计、横向分层和纵向分割的架构、标准化的接口、动态插件框架、适当扩展点的预留,以及满足通用业务所需的默认扩展,保证了轨旁智能运维系统的可成长性。动态化扩展是未来轨旁智能运维技术发展的必经之路,在一定程度上减少了定制的工作量和难

度,从而降低了维护成本。轨旁智能运维系统应将不同的功能拆分为不同的功能包,这样可根据该系统的实际需要进行组装叠加。业主对于轨旁智能运维模型有各自的个性需求,而通过拆分的功能包即可自由组装出各业务板块或各行业所需要的轨旁智能运维模型执行单元。在此基础上,结合功能包的叠加机制,各业务应用方再根据实际场景需要添加合适的插件进行扩展,就可完成被管控的轨旁智能运维系统的迭代演化。

5) 生态化开放。能力开放是构建轨旁智能运维生态的前提。轨旁智能运维系统应提供统一的开放平台,结合组件化的机制、标准化的接口、可视化的能力地图和 API(应用程序编程接口)文档,以及内、外部开源市场等,方便企业内部了解轨旁智能运维系统,并在此基础上接入轨旁智能运维模型。通过将企业自身的轨旁智能运维能力赋能给上、下游,推动轨旁智能运维数字化能力建设,促成产业协同。通过开放的轨旁智能运维平台,发展轨旁智能运维系统的生态体系,拓展企业业务的边界,从而加快企业的数字化转型。

6) 精兵模式 + 沉淀轨旁智能运维平台能力。未来城市轨道交通车辆轨旁智能运维技术的发展将会朝着基于数字化、智能化的智能运维技术方向演变,因此,更高层次的人才与业内最强轨旁智能运维平台的搭建业务需求变得更加迫切。培养与引进高层次人才,组建“精兵模式”组织架构。该组织架构运作模式的创新,不仅可提升效率,更是实现了即便投入大量人力也无法实现的任务。最强

的轨旁智能运维平台是借助数字化的力量,以共享和能力为导向,将轨旁智能运维的各项能力拆解成众多能力块沉淀在平台上,并共享给所有轨旁智能运维业务,形成了“精兵 + 平台”的组织模式,最终实现负责输出能力、沉淀能力的最强轨旁智能运维平台。

2 轨旁智能运维系统的关键技术

2.1 轨旁智能运维技术架构

轨旁智能运维技术架构如图 1 所示。轨旁智能运维技术架构是以数据为驱动,面向用户体验为中心,满足了用户定制化、多制式、可快速开发部署移植、可插拔等需求。该技术架构吸收了微服务“按业务领域”的纵向拆分方法,形成了“高内聚、低耦合”的能力。在数据源层面上,轨旁智能运维系统适应于多源异构数据源的采集,支持结构化、非结构化、半结构化数据源,以及文本数据、爬虫数据、埋点数据等多种数据结构。针对不同数据源的采集采用不同的实现形式,离线、在线、实时的数据源,以及不同主题的数据源均考虑采用高可靠性、响应迅速的数据采集工具,支持分布式、流式计算,数据库统计分析,以及最新的深度学习架构计算形式。在存储层面上,轨旁智能运维系统支持不同种类、不同数量的数据存储形式,以及支持不同数据库的同步操作,从而满足数据源的一致性和可靠性要求。轨旁智能运维系统提供面向服务的微服务架构体系,支持多制式、快速部署、复杂均衡、容错分析等平台部署开发能力。



注:Spring Cloud 为微服务云架构;Spring Boot 为微服务微架构;Flink 为流式处理;Tensor-Flow 为谷歌深度学习架构;PyTorch 为一个开源的 Python 机器学习库。

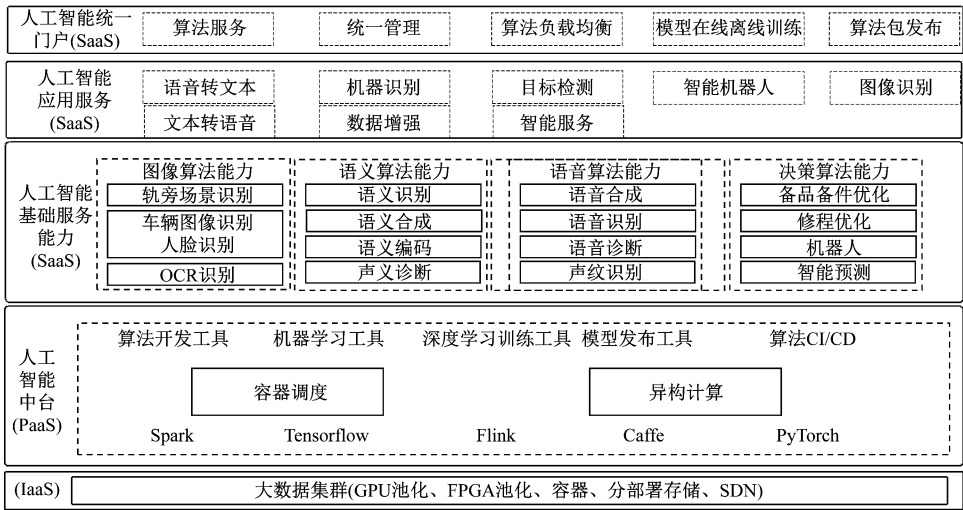
图 1 轨旁智能运维技术架构

Fig. 1 Technical architecture of trackside intelligent operation and maintenance

2.2 轨旁 AI 中台技术架构

轨旁 AI 中台是基于人工智能技术,以高内聚、低耦合的面向轨旁业务服务场景的能力中心,打造持续演进的轨旁智能决策服务平台。传统的轨旁运维系统主要利用机器学习、深度学习算法进行业务场景辨识与诊断,该系统仅能实现部分业务场景诊断,且诊断正确率较低。当面对批量、众多智能服务场景时,传统轨旁运维系统的实现手段、实现

方式变得很单一。因此,轨旁智能运维系统进行数据批量响应处理,以及快速搭建服务模型并高效维护亟待解决。轨旁 AI 中台因此落地而生,为用户需要的 AI 算法模型提供了一站式构建、离线在线模型训练和全生命周期管理的服务,以满足批量、众多智能决策服务场景能力。轨旁 AI 中台技术架构如图 2 所示。



注:Spark 为专为大规模数据处理而设计的快速通用的计算引擎;Caffe 为伯克利人工智能研究小组和伯克利视觉和学习中心开发的深度学习框架;OCR 为光学字符识别;SaaS 为软件即服务;PaaS 为平台即服务;IaaS 为基础设施即服务;CI 为持续集成;CD 为持续交付;GPU 为并行处理器;FPGA 为现场可编程门阵列;SDN 为软件定义网络。

图 2 轨旁 AI 中台技术架构

Fig. 2 Technical architecture of trackside AI middle station

3 轨旁智能运维系统的主要功能

轨旁智能运维系统主要通过通过在检修基地、运营线路上安装的基于红外感应、温度监测、射频感知、3D 图片等传感技术的轨旁检测装置,自动检测车辆车体和车底的磨损情况、轮对和闸片的尺寸、轴承温度及车辆走行品质等信息,基于 AI 中台构建智能模型实现智能决策替代人工决策。该系统设置在列车出入库线,配备 360°车体外外观检测、轮对尺寸检测、受电弓/受流器检测、车底设备红外检测等功能。当列车不停车通过该区域,通过线阵扫描、图像识别、光学测量法、红外扫描等先进技术对车体外外观、车轮尺寸状态、受电弓/受流靴的重要参数、车底关键设备温度等重要项点进行自动检测,并自动识别出列车相关异常。通过对检测数据的管理与挖掘,实现轨旁精准智能管理。轨旁智能运维系统的主要功能见图 3。

3.1 受电弓及车顶图像检测功能

受电弓及车顶图像检测系统采用高分辨率摄像机对受电弓碳滑板顶部进行抓拍,通过采集碳滑板图像并识别碳滑板裂纹、异物、平行度、偏转角度等信息,识别受电弓滑板碳粉磨耗、偏磨、掉块等缺陷。采用超高清线扫描技术获取车顶的多角度全景图像,通过对图像的分析,利用 AI 中台建模实现对空调外观、避雷器外观、受流器、无线电天线、ATC (列车自动控制) 天线等车顶电气,以及异物、牵引丢失、受流器变形等故障的自动报警。受电弓及车顶图像检测系统安装在列车运行轨道旁,作为固定式设备对行经列车进行自动检测。其主要功能包含:

- 1) 自动识别城市轨道交通车辆车号和端位,识别数据报表截图见图 4。
- 2) 采集受电弓图像,该图像包含受电弓碳滑板的三维姿态(见图 5)及其尺寸信息。

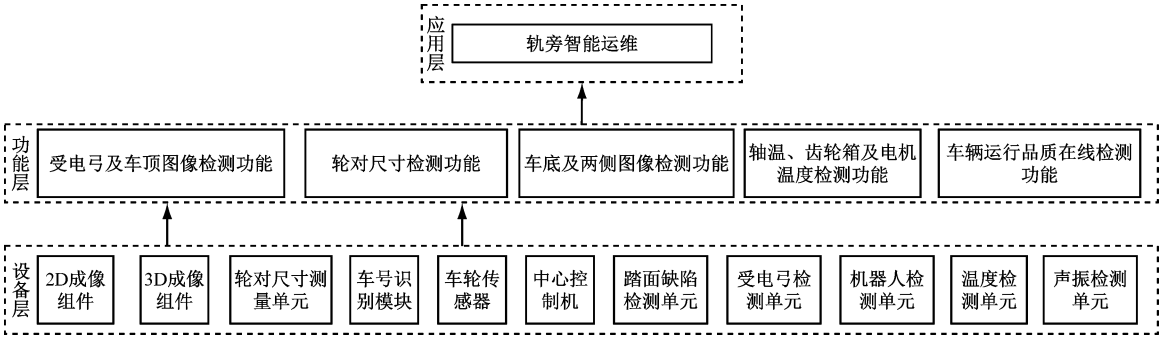


图 3 轨旁智能运维系统的主要功能

Fig. 3 Main functions of trackside intelligent operation and maintenance system

记录查询

单位		所有单位		设备	所有设备		型号	所有型号		车号	所有车号		车型	所有车型		班次	所有	
期限		所有状态		起始	2016-01-25 11:53		结束	2016-01-28 11:54		确定		导出Excel		打印预览				
序号	检测时间	检测设备	受检机车	端位	所属单位	检测状态	处理状态	查看				操作						
1	2016-01-28 11:53:53	受电弓检测系统	B-0132	I	本段	无超限	--	数据	修改 删除									
2	2016-01-28 11:48:14	受电弓检测系统	B-0102	I	本段	有超限	未处理	数据	修改 删除									
3	2016-01-28 11:44:28	受电弓检测系统	B-0112	I	本段	有超限	未处理	数据	修改 删除									
4	2016-01-28 11:41:43	受电弓检测系统	B-0127	I	本段	无超限	--	数据	修改 删除									

图 4 城市轨道交通车辆车号和端位自动识别数据报表截图



图 5 受电弓三维展示图

Fig. 5 Three-dimensional display of pantograph

- 3) 进行动态非接触自动图像分析处理,并记录受电弓的状态及其相关参数(见图6)。
- 4) 通过对碳滑板运动姿态的检测,可换算得到碳滑板接触力。
- 5) 采用线阵相机,多角度扫描车顶高清全景图

(见图7)。

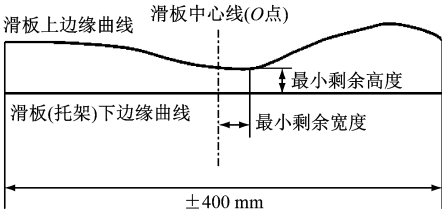


图 6 受电弓碳滑板参数简要说明图

Fig. 6 Brief description of pantograph carbon skateboard parameters

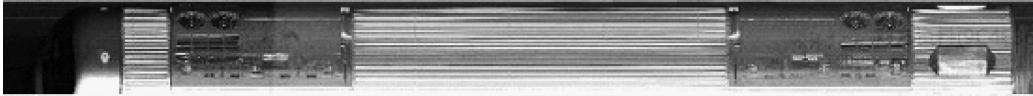


图 7 城市轨道交通列车车顶高清全景图

Fig. 7 HD panoramic view of urban rail transit train roof

6) 具有对检测数据进行分析、判断、整理的能力,能够实现故障预警及故障报警提示。

3.2 轮对尺寸的检测功能

轮对尺寸测量系统采用非接触式激光测量方法,能准确检测轮缘的高度和厚度以及轮径值等车轮外形关键尺寸,同时还具备车轮接触式擦伤检测、不圆度检测,以及踏面缺陷动态图像监测等功能。

1) 自动绘制车轮踏面轮廓线。该系统具备自动绘制车轮踏面轮廓线功能,并以不同颜色叠加显

示标准踏面轮廓线,从而直观显示车轮磨损情况;通过与标准踏面轮廓线进行对比,直观反映车轮磨损情况(见图8)。

2) 轮对外形尺寸自动检测。该系统具备轮对外形尺寸等参数的自动检测功能。

3) 超限报警设备具备红、黄、绿三级报警功能。针对单个车轮的尺寸测量值,以及同轴、同架、同车、同列轮对的尺寸测量值,实现红、黄、绿三级报警功能,并根据红色报警辅助声音及报警窗弹出提醒。

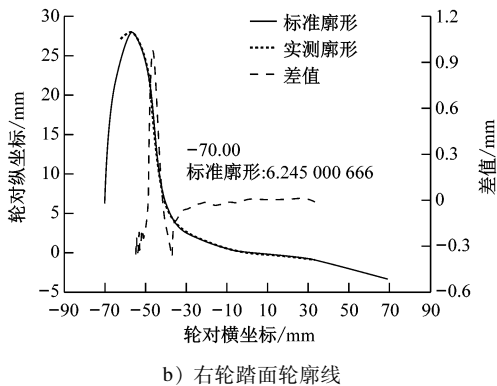
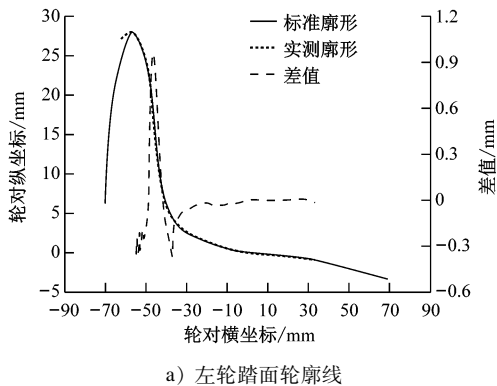


图8 车轮踏面实测轮廓线与标准轮廓线对比

Fig. 8 Comparison between measured contour line and standard contour line of the wheel tread

3.3 车底及其两侧图像检测功能

车底及其两侧图像识别监测功能采用高清线阵成像技术,可实现对车底及两侧关键部件可视部位的在线监控;车底及其两侧图像的检测设备具有各类信息化接口,支持其与作业管理系统中数据的互联互通,实现对检修作业质量的监控;车底及其两侧图像检测设备采用模式识别技术、神经网络算法等自动识别技术实现关键部位预警功能,以此辅助检修库工作人员检修,提高车辆段列车检作业质量和作业效率。

3.4 轴温、齿轮箱及电机温度检测功能

轴温、齿轮箱及电机温度检测功能采用非接触红外测量方法,能自动测量列车轴箱、齿轮箱及电机的温度,实现被监测部件的自动实时故障诊断和分级报警。该系统具备轴箱轴承、齿轮箱侧、电机温度的自动检测功能,且以不同颜色叠加显示前5次温度特征值,并与本次温度特征值进行比较,从而直观显示轴温变化;该系统可对轴承端盖温度、齿轮箱端盖温度及电机温度进行实时监测,从而实现被监测部件的自动实时故障诊断和分级报警。轴温、齿轮箱及电机的温度检测见图9。

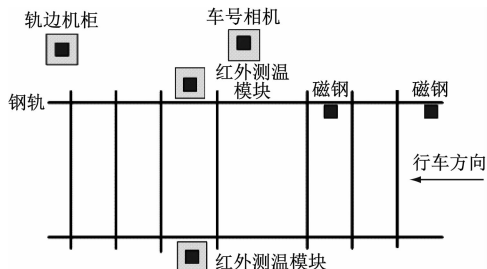


图9 轴温、齿轮箱及电机的温度检测

Fig. 9 Temperature detection of axle, gearbox and motor

3.5 车辆运行品质在线检测功能

采用轮轨动力学监测系统对踏面进行监测,对超标车辆适时采用适当的等级镟修,以改善车辆动力学性能,提高车辆运行安全性,延长轮对使用寿命。将车辆运行品质在线检测系统,安装于车辆运行正线上,以实现车速为30~160 km/h通过车辆的轮轨动力学监测。通过对轮轨动态力的实时监测实现车轮踏面状态、不圆度、多边形、超偏载及异常轮轨作用力的预报。其主要功能包含:

1) 车轮踏面损伤及多边形的监测。对通过测试平台的城市轨道交通车辆,连续测量车轮圆周踏面在轨道上产生的轮轨力,自动识别伤损车轮产生的冲击力。结合车辆运行速度及理论静轮重等参数,计算得到反映车轮踏面损伤严重程度的冲击当量。通过准确识别车轮多边形,并将数据上传并展示给管理人员。当数据超过设定阈值后,及时报警给管理人员。

2) 车辆横向稳定性监测。对通过测试平台的城市轨道交通车辆,连续测量车轮在轨道上产生的轮轨垂向力和横向力。识别车辆蛇形失稳状态,将数据上传并展示给管理人员。当数据超过设定阈值后,及时报警给管理人员。

3) 车辆轮重不均衡监测。对通过测试平台的城市轨道交通车辆,连续测量车轮圆周踏面在轨道上产生的轮轨力,计算得到各个车轮的理论静重,识别车辆轮重不均衡情况。若数据超过设定阈值,及时报警给管理人员。轨旁智能运维系统通过由车辆质量产生的位移与车轮质量产生的位移间的比例关系,计算得到各个车轮的理论静轮重,由此识别车辆轮重不均衡情况,如超重、偏载等。通过

(下转第133页)