

# 轨道交通工务智能运维体系的设计与应用

樊晓东<sup>1</sup> 孟俊华<sup>1</sup> 张宜霞<sup>1</sup> 杨 维<sup>1</sup> 迟胜超<sup>2</sup> 樊晓莉<sup>3</sup> 唐文平<sup>3</sup> 王泰蔚<sup>3</sup>

(1. 宽衍(北京)科技发展有限公司, 100089, 北京; 2. 西南交通大学牵引动力国家重点实验室, 610031, 成都;

3. 西安火眼智能检测研究院有限公司, 710061, 西安//第一作者, 总经理)

**摘 要** 针对以人工为主的轨道交通传统工务模式所产生的诸多弊端,如病害漏检误检、维修不足、过度维修、难以长期跟踪病害发育、难以确定仓储物料的状态等,设计了一种工务智能运维体系。该体系基于可扩展的多层分级架构,可对轨道交通的各类结构病害及部件故障实现准确识别与数字化管理。结合先进的仓储管理与远程专家指导,智能化制定维修策略并更新相关数据,从而对轨道交通的多种场景实现智能化工务运维,并允许用户根据实际需求对该系统进行功能增减和调整,实现了工务运维成本的降低和管理模式的简化,为业主单位降本增效。

**关键词** 轨道交通;工务智能运维体系;病害故障管理;智慧城轨

**中图分类号** U231.94

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2023.02.024

## Design and Application of Rail Transit Track Work Intelligent Operation and Maintenance System

FAN Xiaodong, MENG Junhua, ZHANG Yixia, YANG Wei, CHI Shengchao, FAN Xiaoli, TANG Wenping, WANG Taiwei

**Abstract** The rail transit conventional track maintenance based on labor is challenged by various shortcomings, such as incorrect defect detection, under/over maintenance, difficult defect development tracking and evaluation, and difficult condition monitoring of materials in the warehouse, thus a track work intelligent operation and maintenance system is designed. The proposed system addresses these shortcomings by using an extensible multitier architecture design, realizing accurate identification and digitalized management of various structural defects and parts failure in rail transit. Combined with the advanced warehouse management and remote expert support, maintenance strategies will be intelligently formulated, and relevant data will be updated. Thus multi-scenario intelligent operation and maintenance of rail transit track work is realized and system function-wise adjustment/update is available to users in terms of meeting various practical requirements, lowering track

work cost and simplifying management mode, achieving both cost reduction and efficiency improvement for owner unit.

**Key words** rail transit; track work intelligent operation and maintenance system; defect and failure management; smart urban rail

**First-author's address** Kuanyan (Beijing) Technology Development Co., Ltd., 100089, Beijing, China

工务运维是轨道交通的主要专业之一,其通过巡检和维修的方式确保轨道交通线路及相关设施的正常使用。传统的工务运维主要以人工方式依靠人类视觉完成对结构病害和部件故障(以下简称“病害故障”)的检测与维修,从而导致诸多弊端,如人员培训和线路巡检的时间成本高、劳动量大、人的主观情绪导致运维效率不稳定、病害故障的当前数据与历史数据比对效率低、难以跟踪病害故障的发育、难以识别隐患等。同时,受限于管理制式的差异化,传统的工务运维体系难以实现数字化、自动化、智能化的转变,无法应对日益增长的轨道交通里程所带来的挑战<sup>[1]</sup>。

为应对持续增长的轨道交通运营里程对工务运维产生的压力,国内外已有多项研究侧重于探索使用智能化、集成化平台以降低轨道交通运维工作的压力。例如,上海的智慧地铁 1.0 及 2.0<sup>[2]</sup>、青岛地铁 6 号线<sup>[3]</sup>、欧盟的 Shift2Rail 铁路项目<sup>[4]</sup>和英国的 TIRIS(泰雷兹集团的智能运维平台)铁路项目<sup>[5]</sup>,均致力于使用智能巡检与监测、智能健康管理、智能决策制定等模块以提升工务运维效率,并通过先进的仓储管理方式降低各项成本开支。然而,现有的工务智能运维亦存在检测监测手段不够丰富、信息传输方式保守、智能运维标准体系有待完善等不足之处<sup>[2]</sup>。

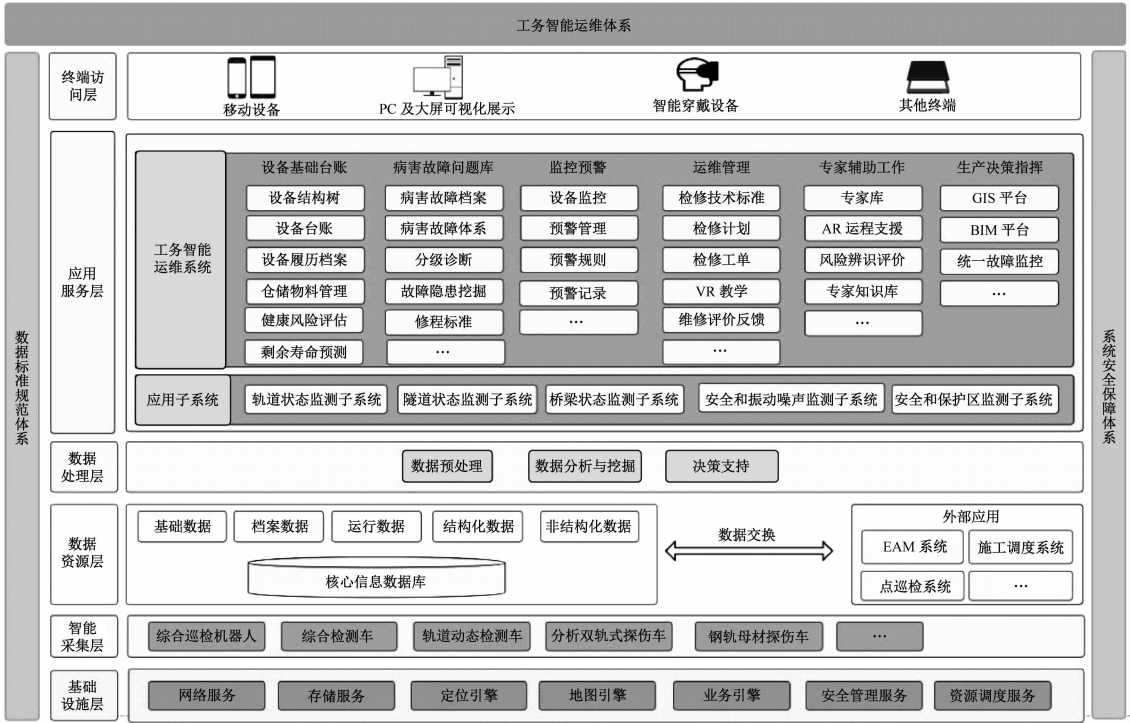
本文基于上述研究,介绍了一种应用于轨道交通工务专业的智能运维体系。该体系使用多种检

测、监测设备确保丰富数据的获取,使用 5G(第五代移动通信)技术与边缘计算技术,确保高效的数据传输与计算,从而实现对各类病害故障的监测、检测、评级、数据沉淀等;同时自动生成相应的维修工单,对各类病害故障建档并支持二次循环,从而长期跟踪其发育情况,为多种轨道交通场景提供全寿命周期病害故障管理,提升巡检、维修等各项工务运维工作的效率,从而降低运维成本。轨道交通工务智能运维体系采用标准化、模块化设计,允许用户根据实际需求对该体系进行功能的更新、增减,实现人与人工智能的紧密结合,顺应第四次工业革命的发展潮流<sup>[6]</sup>。

### 1 轨道交通工务智能运维体系的构成与运行流程

轨道交通工务智能运维体系采用多层分级架构,包含基础设施层、智能采集层、数据资源层、数据处理层、应用服务层及终端访问层,见图 1。其

中:基础设施层包含该体系运行所必备的基础条件,如网络连接、实时定位等功能;智能采集层是主要数据的来源,包含线路装备化的一系列成果(如各型综合巡检设备)以及布设在现场重点监测项目的在线监测传感器等;数据资源层主要包含数据的存储、管理、交换等功能,针对轨道、隧道、桥梁等场景建立相应的设备数据管理平台,从而形成设施设备档案、病害故障的数据积累;数据处理层包含数据的预处理、分析挖掘、决策支持等 3 个部分,其将采集到的数据通过筛选、挖掘等计算,为后续应用服务层提供数据来源;应用服务层包含智能工务系统和应用子系统,可根据实际工作需要场景类型进行增减和调整,实现对多种场景进行智能工务运维工作;终端访问层为工务人员提供用户友好的交互体验,提升运维工作的效率。该体系的模块化设计允许新模块或子系统直接接入平台,使用标准化接口或消息队列的方式进行模块间的通信,保证了模块之间松耦合。



注:VR 为虚拟现实;AR 为增强现实;PC 为个人计算机;GIS 为地理信息系统;BIM 为建筑信息模型;EAM 为企业资产管理。

图 1 工务智能运维体系架构

Fig. 1 Intelligent operation and maintenance system architecture of track work

轨道交通工务智能运维体系的工作流程如图 2 所示。

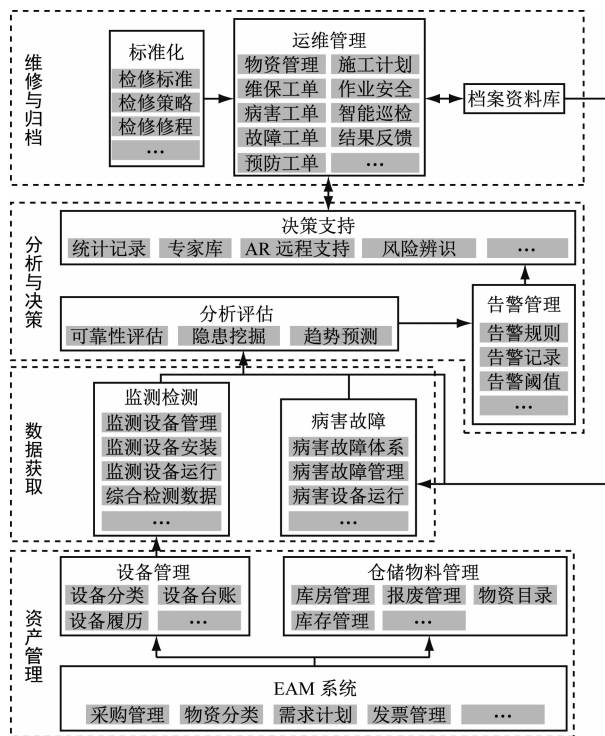


图2 轨道交通工务智能运维体系的运行流程

Fig. 2 Operation process of rail transit track work intelligent operation and maintenance system

步骤1 资产管理环节对现有实物资产和价值资产进行数字化管理。使用EAM系统可以集中管理资产的各类信息。轨道交通工务运维工作涉及庞大的资产,使用EAM系统将会高效地完成资产监控、利用、养护等工作,实现由设备管理(如设备分类、台账、档案履历等)和仓储物资管理(仓储物资目录、库存管理等)构成的资产实物管理机制。

步骤2 通过数据获取环节收集各型智能监测、检测设备产生的数据,并对其进行预处理计算。预处理计算通过将当前实时数据与病害故障档案库进行对比和筛选,以获取与当前监测、检测数据相关的有效内容,为后续病害故障计算提供实时数据和历史数据。病害故障数据库根据历次巡检、维修进行数据更新,确保数据的时效性。

步骤3 经预处理的数据通过分析与决策环节进行特征诊断、预测分析、决策制定等工作,以判断是否存在病害、故障及隐患,或通过AR设备实现专家的远程协助,对已发现的病害故障进行等级评估,对运维业务的决策制定提供科学指导与评估。

步骤4 维修与归档环节将已制定的决策转化为运维业务,对各类病害、故障及隐患派发工单,实

施相关的维保工作。同时,该环节对档案资料库进行更新,对现有的各类数据结构(例如病害故障体系、设备台账履历等)进行优化,为未来的工务运维工作提供有效的数据集。

## 2 轨道交通工务智能运维体系的重点功能

轨道交通工务智能运维体系基于对实时信息和历史信息分析,结合工务运维工作规程和管理规范,通过设备基础台账、病害故障问题库、监控预警、运维管理、专家辅助工作、生产决策指挥六大功能实现工务运维管理方式的数字化与智能化,完成在线闭环的运维管理流程规范化工作。

设备基础台账通过收集工务相关记录,建立工务设备档案(设备结构台账、设备技术资料、移动替换和调拨信息)。通过监测数据及档案综合分析,实现对设备寿命预测及健康评估,以及对工务专业相关的各仓库备品备件、物料、工器具的管理工作。结合备件使用历史以及档案数据的分析实现备件仓储寿命及安全库存预警。

病害故障问题库由病害故障档案、病害故障体系、病害故障分析三部分构成。病害档案是针对工务系统竣工图、工务设备图纸、技术方案、技术资料、病害故障分析报告等文档的数字化管理,通过权限管理实现对文件增、删、改、名称检索、分类检索、模糊识别等操作。病害故障体系基于故障档案,将病害故障资料与工务设备、线路、车站等信息相关联,对各类病害故障实现分类,为运维人员提供快速查询功能。基于病害故障档案及体系,分析并制定病害故障分级标准,进一步优化病害故障问题库的结构,为病害故障趋势预测提供研究基准。病害故障分析基于当前监测、检测数据以及相关病害故障历史数据的挖掘和分析,预测、判断是否存在病害故障或隐患,并监测病害故障的长期跟踪发育。

监控预警基于各型监测设备上报的数据可实现病害故障的监测状态评价、信息综合展示、异常预警等功能,根据历史监测数据建立数据库,实现对预警规则和告警阈值的确定,以及对检测预警的智能化、数字化管理。

运维管理将各类病害故障与维修标准、计划工单等信息融合,从而实现检修技术标准建立,工单自动生成、维修评价反馈、VR教学等功能。智能

化、数字化的工单生成功能有助于实现对各类病害故障的集中管理,通过进一步优化现有的病害故障问题库,提升运维工作效率。VR 教学基于病害故障问题库和维修标准,在 VR 环境中对各类病害故障、维修工具等信息进行仿真和还原,使用 VR 手柄进行虚拟维保工作,实现可视化的高效率教学、培训等工作,从而弥补传统师傅-徒弟教学模式的不足,例如难以实现一对多教学、错误场景难以复现、关键数据无法可视化等。

专家决策支持需要建立标准解决方案库,基于低时延、高带宽的 5G 技术,通过 AR 方式实现专家与运维人员的远程沟通,辅助运维人员进行各类病害故障的维修、评级及风险辨识等工作。

分析决策功能基于 BIM、GIS 等技术实现大屏可视化的病害故障展示,针对不同运维业务建立应急预案,实现应急事件发生时对应急人员的引导,并为指挥人员的决策制定提供帮助。

### 3 轨道交通工务智能运维体系的应用价值

#### 3.1 科学指导

轨道交通工务智能运维体系基于 5G 技术,允许专家进行远程指导和评估。5G 技术的高带宽、低时延特点保证了强大的数据交互,为专家判断病害故障成因、排查隐患、预判风险危害程度等提供了全面详实的实时信息,为高效、科学地制定巡检和维修方案提供了有力的数据支撑,避免维修不到位和过度维修情况的发生。同时,专家的远程指导还可对达到维修养护标准的设施设备开展综合诊断及趋势分析,从而科学地制定后续维修养护方案。

#### 3.2 提升工作效率与改变运维模式

传统的病害故障管理模式难以应对日益增长的轨道交通线路运营里程而暴露出的各种缺陷和漏洞,如设备基础信息不完整、查询统计信息难以获取、维修规划不合理、维修响应时间长等。轨道交通工务智能运维体系是使用互联网、物联网等先进技术,实现自动化、智能化的高效病害故障检测,以及数字化病害故障管理,促进资源结构优化整合,避免在工务运维工作中形成各监测、检测手段彼此独立、缺乏互联互通的信息管理系统。

轨道交通工务智能运维体系通过对积累的病害故障数据进行时间尺度的分析,实现对全寿命周期内各类病害故障的管理。对历次工务巡检结果

的研究可将传统的病害故障维修模式转化为状态维修模式,将传统的计划修模式转化成预测修模式,大幅减少了工务人员的巡检时长和劳动量,并提升了巡检准确度。人工成本和设备维护成本分别占城市轨道交通成本支出的 50% ~ 60% 和 10% ~ 15%<sup>[7]</sup>,同时各项工作效率的提升亦有助于降低全寿命周期内的各项运维成本。

#### 3.3 用户友好型使用体验

轨道交通工务智能运维体系的设计与用户需求紧密相连,该体系具有用户友好的可视化图形界面。模块化设计允许用户对该体系进行功能调整,以适应实际工作中变化的使用需求,如检测项目的增减、管理规范的变更等。如果产品功能和用户需求出现割裂的情况,将严重影响运维工作的开展和推进,从而形成影响轨道交通安全的隐患。友好的图形化操作界面有效提升了工务人员的工作效率。如果产品使用步骤重复且繁琐,极易给工务人员带来负面的使用体验和抵触情绪<sup>[8]</sup>,进而影响运维工作的正常开展和推进。

#### 3.4 加速城市数字化转型进程

数字革命是“百年未有之大变局”的关键元素之一<sup>[9]</sup>,轨道交通工务智能运维是城市数字化转型的重要组成部分,其对简化运维模式、建设一体化运维管理模式提供了坚实的基础。数字化的智能管理可高效完成实体轨道交通的运维工作,实现数字空间和实体需求的高效结合,对城市数字化转型有着深远的影响<sup>[10]</sup>。

### 4 轨道交通工务智能运维体系的开发及应用

目前,轨道交通工务智能运维体系 1.0 版已完成开发。图 1 中展示的各层级架构、数据标准体系、安全保障体系均已搭建,其中:基础设施层和终端访问层已全面开发完毕;根据客户需求,数据处理层和智能采集层已完成多型综合巡检装备(综合检测车和巡检机器人)及相应算法的研发并投入使用;数据资源层和应用服务层的大部分模块已完成开发,资产管理相关模块尚处于开发状态。该体系 2.0 版的开发侧重于将轨道交通相关的各类资产、仓储信息融入体系中。

轨道交通工务智能运维体系 1.0 版在青岛、南宁等城市轨道交通线路的实际测试中均表现出优

于人工的结果。例如,针对宽度仅为 0.2 mm 的衬砌裂纹,该体系可实现精准定位并快速完成其与相关历史数据的对比与风险等级评估,同时通过 AR 远程支援将专家的指导意见及时反馈给工务人员,为维修策略的制定提供帮助。

## 5 结语

本文介绍了一种应用于轨道交通的工务智能运维体系,该体系为工务人员提供了闭环的病害故障管理流程,其模块化设计允许用户根据实际需求进行功能的增减与调整,实现对各类病害故障的检测和预测。通过跟进各项运维工作的执行进度、人员安排及设备领用等,为巡检、维修和养护提供数字化记录,为维修养护方案的科学性提供评估依据,实现轨道交通多场景的全生命周期管理,从而大幅提升运维效率、降低运维成本,助力数字化城市的建设和发展。

## 参考文献

- [1] 唐明辉. 杭州至海宁城际铁路智能维保研究[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(10): 134.  
TANG Minghui. Research of Hangzhou-Haining Intercity Railway intelligent maintenance [J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(10): 134.
- [2] 王冰, 李洋, 王文斌, 等. 城市轨道交通智能运维技术发展及智能基础设施建设方法研究[J]. 现代城市轨道交通, 2020(8): 75.  
WANG Bing, LI Yang, WANG Wenbin, et al. Research on development of urban rail transit intelligent operation and maintenance technology and intelligent infrastructure construction method[J]. Modern Urban Rail Transit, 2020(8): 75.
- [3] 吕平. 青岛智慧地铁的研究与思考[J]. 现代城市轨道交通, 2020(4): 101.  
LYU Ping. Research and thinking on Qingdao smart subway[J].

Modern Urban Rail Transit, 2020(4): 101.

- [4] Europe's Rail. Smart maintenance concept[EB/OL]. (2020-01-10) [2022-08-02]. [https://rail-research.europa.eu/wp-content/uploads/2020/11/IMP2-WP6-D-ANS-046-01\\_-\\_D6.5\\_CBM\\_Smart\\_Maintenance\\_Concept.pdf](https://rail-research.europa.eu/wp-content/uploads/2020/11/IMP2-WP6-D-ANS-046-01_-_D6.5_CBM_Smart_Maintenance_Concept.pdf).
- [5] THALES. Whitepaper—intelligent asset management for the rail industry[EB/OL]. (2019-11-01) [2022-07-27]. [https://www.thalesgroup.com/sites/default/files/database/document/2019-11/Whitepaper\\_Predictive\\_Maintenance.pdf](https://www.thalesgroup.com/sites/default/files/database/document/2019-11/Whitepaper_Predictive_Maintenance.pdf).
- [6] 陈清泉. “四网四流”融合技术将引领电气化交通新时代[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(7): 6.  
CHEN Qingquan. 4-networks 4-flows integration technology guiding the new era of electrified transportation [J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(7): 6.
- [7] 贾文峥, 胡雪霏, 熊振兴, 等. 城市轨道交通智能维保发展现状及趋势[J]. 都市快轨交通, 2020, 33(2): 14.  
JIA Wenzheng, HU Xuefei, XIONG Zhenxing, et al. State of the art and trend of intelligent maintenance of urban rail transit facilities and equipment in China [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2020, 33(2): 14.
- [8] 段芳敏, 胡鹰, 宋天田. 城市轨道交通建设信息化管理推广应用难点及对策[J]. 现代城市轨道交通, 2021(2): 70.  
DUAN Fangmin, HU Ying, SONG Tiantian. Difficulties and countermeasures of popularization of information management in urban rail transit construction [J]. Modern Urban Rail Transit, 2021(2): 70.
- [9] 上海智慧城市发展研究院. 城市数字化转型白皮书(2021) [R]. 上海: 上海智慧城市发展研究院, 2021.  
Shanghai Smart City Development Institute. Whitepaper: digitalized transformation of cities in China (2021) [R]. Shanghai: Shanghai Smart City Development Institute, 2021.
- [10] 汪小勇. 城市数字化转型给轨道交通带来的机遇和挑战[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(4): 8.  
WANG Xiaoyong. Opportunities and challenges for rail transit in the process of urban digital transformation [J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(4): 8.

(收稿日期: 2022-09-21)

欢迎订阅《城市轨道交通研究》

服务热线 021—56830728 转 821