

# 基于数字孪生的城市轨道交通智慧运维应用

王楠<sup>1,2</sup> 陈亚冬<sup>1</sup>

(1. 上海市隧道工程轨道交通设计研究院, 200235, 上海; 2. 上海申电云数字科技有限公司, 200063, 上海//第一作者, 高级工程师)

**摘要** 目的: 在城市轨道交通数字化转型的发展趋势下, 我国大部分城市轨道交通运营单位均致力于城市轨道交通智慧运维体系建设, 需对城市轨道交通智慧运维应用过程中出现的问题及面临的痛点进行深入研究。方法: 介绍了上海城市轨道交通智慧运维的应用情况, 提出将数字孪生应用于城市轨道交通智慧运维平台中。对海量多源异构数据的处理、“管用修”智慧管理业务流程的建立、信息资源的融合等问题提出了智慧运维的解决方案。在此基础上, 搭建了智慧车站平台、智慧维保平台的功能架构, 阐述了城市轨道交通线网-车站两级云计算平台在实时数据和业务整合上的方案。结果及结论: 智慧运维需要在建设之初即应做好统一规划。基于数字孪生的城市轨道交通智慧运维应用可以提高设备的智能化感知水平, 降低人工运维强度, 提高运维质量, 降低运维成本。

**关键词** 城市轨道交通; 数字孪生; 智慧运维; 智慧维保平台; 智慧车站平台

**中图分类号** U29-39

**DOI**: 10.16037/j.1007-869x.2023.11.036

## Research on Intelligent Operation and Maintenance Application of Urban Rail Transit Based on Digital Twins

WANG Nan, CHEN Yadong

**Abstract** Objective: With the trend of digital transformation in urban rail transit, the most urban rail transit operation units in China are committed to the construction of a smart operation and maintenance system for urban rail transit. In-depth research is needed on the problems and pain points that encountered in the application process of smart operation and maintenance to urban rail transit. Method: The application of smart operation and maintenance in Shanghai urban rail transit is presented, proposing the use of digital twins in the smart operation and maintenance platform for urban rail transit. Solutions for processing massive and heterogeneous data, establishing smart management business processes for effective maintenance and repair, and integrating information resources are proposed. Based on these solutions, the functional architecture of smart station platform and smart maintenance

platform is developed, and a cloud computing platform for real-time data and business integration between the urban rail transit network and stations is described. **Result & Conclusion:** Intelligent operation and maintenance require uniform planning from the beginning of construction. Based on digital twinning, intelligent operation and maintenance applications for urban rail transit can improve the level of intelligent perception of equipment, reduce the intensity of manual operation and maintenance, while improving the quality and reducing the cost of operation and maintenance.

**Key words** urban rail transit; digital twin; intelligent operation and maintenance; smart maintenance platform; smart station platform

**First-author's address** Shanghai Tunnel Engineering & Rail Transit Design and Research Institute, 200235, Shanghai, China

城市轨道交通运营单位日常巡检、设备维护维修等运营工作强度大、重复度高, 且需填报数量庞大的纸质表单。智慧运维管理应解决对外部维护维修人员进行管理、对车站管理人员进行监督、对站内工作进行无纸化闭环管控等痛点问题。在城市轨道交通数字化转型的发展趋势下, 以上海、北京、广州为代表的大型城市近几年均致力于城市轨道交通智慧运维体系建设, 并解决了一部分运维问题<sup>[1-3]</sup>。随着运维需求的不断增加, 出现了一些新的痛点问题, 主要包括多系统、多平台、零散功能的融合度不够, 线路级运维向线网级运维需求的转换不协调, 海量运营数据进入云平台的需求难以满足等。

数字孪生是指在数字空间中用高度精确的数字模型来映射真实世界中的事物, 并将真实世界中采集得到的数据信息反映到数字模型中。数字模型会随采集数据的改变而变化, 研究者可以基于数字模型对各类信息数据进行联动, 并进行具有预测功能的可视化仿真分析<sup>[4]</sup>。目前上海、重庆、苏州



等地的城市轨道交通智慧运维应用大多在竣工模型的基础上集成了运营期间各类静态和动态数据,这些数据主要包括设备厂商产品模型与资料、资产信息、设备运行状态信息、视频监控信息及人员定位信息等。数字化模型与车站实际运行状态相对应,初步实现了数字孪生<sup>[5]</sup>,建立了以云计算、大数据、IoT(物联网)、人工智能等新兴信息技术为基础的轨道交通智慧运维系统,以提升设施设备的接入及感知能力,降低运营维护成本,实现城市轨道交通的高质量发展<sup>[6]</sup>。

### 1 上海城市轨道交通智慧运维应用介绍

由于各地城市轨道交通集团的运营管理模式、运维痛点略有差异,其痛点的解决方式大多由两部分产品组成,即智慧车站类产品和智慧维保类产品。以上海城市轨道交通为例,上海申通地铁集团有限公司数字化转型总体架构由“一朵云、一张网、一个大数据平台、五大应用系统群”,以及网络安全体系和标准体系组成<sup>[7]</sup>。其中:五大应用系统群中的设施设备管理及运营管理,分别对应智慧设施设备管理系统解决方案及智慧运营管理系统解决方案。

1) 智慧设施设备管理系统解决方案。该方案主要以智慧维保类平台产品为代表,集成了车辆、供电、通信信号、轨道隧道桥梁及车站机电等专业的智能监测数据,可作为智慧维保平台的数据支撑。在完成顶层规划设计的基础上,应统一系统架构、分步实施建设,生产核心模块应优先实施,逐步搭建完成线网级的智慧维保系统。

2) 智慧运营管理系统解决方案。该方案主要以智慧车站类平台产品为代表,对车站原有的数字资产交付标准进行扩展,以实现安全监控综合化及应急处置高效化。将车站设施设备的运行状态等动态数据与静态模型应用于设备维护维修等运营流程中,以提升城市轨道交通的安全监控、预警以及应急处置能力,提升综合运维管理水平。

### 2 智慧运维的解决方案

城市轨道交通智慧运维平台需要承载的数字孪生数据和运维人员采集数据存在数据量大、业务分散、功能复杂等特点,很多城市采用城市轨道交通云平台架构搭建其智慧运维平台<sup>[8]</sup>,以提供智慧运维的解决方案。

### 2.1 海量多源、异构数据的处理

基于数字孪生的智慧运维管理平台在进行各类数据的收集及承载时,需要兼顾数据的兼容性、易用性及专业性等特点。基于数字孪生的智慧运维管理应用,其首要目标是完成海量多源、异构数据的集成与共享。应在城市轨道交通数字孪生静态数据的基础上,开发城市轨道交通运维期多源、异构数据的通用接口,以集成 CCTV(闭路电视)、ISCS(综合监控系统)、AFC(自动售检票)、OA(办公自动化)及人员定位信息等数据。在 B/S(浏览器/服务器)及 C/S(客户端/服务器)双构架下,应用 Web(万维网)、BIM(建筑信息模型)、GIS(地理信息系统)、AI(人工智能)及 IoT 等技术,将各专业设备的运行状态、故障状态及能耗等数据有效、实时地反映在智慧运维平台中,实现物联网数据、动态业务数据与静态模型的自动化集成和轻量化共享,初步完成数字孪生底座的建设。城市轨道交通智慧运维平台数字孪生底座建设形式如图 1 所示。

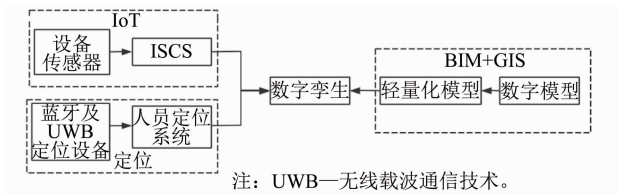


图 1 城市轨道交通智慧运维平台数字孪生底座建设形式示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the construction form of the digital twin base for urban rail transit intelligent maintenance platform

### 2.2 “管用修”智慧管理业务流程的建立

城市轨道交通运营管理工作涉及的人员众多,应建立基于“管用修”智慧管理业务流程的智慧运维系统,强化智能数据采集、智能业务处理及智能数据分析 3 大能力,综合打造设备状态实时感知预警、设备全寿命管理、生产业务全流程管控及专家分析 4 个体系。智慧管理业务的应用集成,应以实现主要业务流程自动化和规范化、管理现代化为目标,并为以设备设施为管理核心的生产管理全过程的控制、优化及决策提供支持。

智慧运维管理平台将日常巡检及维护维修等运营流程内置于本平台中,通过自定义模板、流程和标准化表单,支持全专业设备设施巡检及维护工作的自定义拆分组合、流程控制及人员控制,实现数字化驱动维护计划、巡检任务及维修工单的自动



生成,实现全流程闭环管理。通过打通数据孤岛,形成设施设备全生命周期的动态履历,进而提升设施设备管理智能化水平。维护维修人员应进行无纸化管理,在现场操作时使用移动终端执行巡检任务,如图 2 所示。为此,应打通设备传感器至维修工单的数据流,集成运维动态数据,实现数据一体化,这既可降低巡检维护人员的工作强度,也可为城市轨道交通运营安全提供保障。



图 2 维修人员使用移动终端执行日常巡检任务  
Fig. 2 The picture of maintenance personnel using mobile terminals to perform daily inspection tasks

### 2.3 信息资源融合,实现“一屏总览”

智慧运维管理平台针对电梯、智慧厕所、应急预案等内容开发了专项管理模块。通过数据打通汇聚电梯全生命期履历信息,自动形成“一梯一档”。结合 IoT 技术集成智慧厕所监测数据,车站用水量、用电量等能耗数据可实现“一屏知全站”。聚合乘客投诉信息、遗失物品信息、出行路径查询等运营信息,可避免线上线下和传统车站 OA 系统之间的切换,面向乘客提供一站式服务,对外提升服务质量。配合全自动运行场景,智慧运维管理平台集成了车辆状态监测数据,可为多职能列控人员提供信息聚合终端,使列控人员能跟快速感知车辆状态、快速处置车辆故障。

智慧运维管理平台的用户覆盖了保障车站运营的各单位人员,在实现全线车站运维标准化管理的同时,通过统一标准的底层数据采集,可使车站级管理上升为线路级管理。单一公司级平台上升为多公司协作平台,进而实现“一屏总览、一网统管”,有效解决车站之间、公司之间的信息壁垒及信息滞后等问题,显著提升管理效率。

## 3 建设各类技术支撑平台

### 3.1 智慧车站平台

应基于数字孪生场景,利用建设阶段移交的竣

工数据,根据运营单位客运管理、维护维修管理、站务管理、人员管理及统计分析等业务需求,通过流程配置,实现运维业务流程的个性化、信息化,以及运维管理的可视化、精细化。智慧车站平台包含网页端、桌面端及移动端 3 个部分,其中:网页端用以实现业务板块的管理;桌面端用以集成轻量化数字模型场景,联动展示设备状态;移动端面向车站工作人员、委外单位及运营单位管理人员,用以实现现场数据采集、信息反馈、流程管控、信息查询及协同工作等功能,并对现场运行维护工作进行全面管控、对内外部人员进行精准管理,以切实达到提高工作和管理效率、实现增质增效的目标。智慧车站平台功能架构如图 3 所示,其中,涉及委外单位的模块主要包括施工登记、巡检管理、维护管理、维修管理及电梯管理等。



图 3 智慧车站平台功能架构图  
Fig. 3 Functional architecture diagram of smart station platform

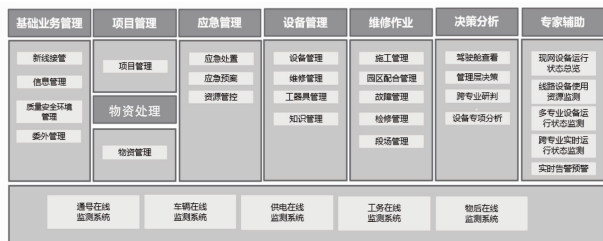
### 3.2 智慧维保平台

智慧维保是城市轨道交通智慧运维的重要组成部分,其核心是决策应变。应变有效性的衡量标准是从发现设备状态发生变化到确定有效对策的时间。智慧维保由车辆、供电、通信信号、轨道隧道桥梁、车辆基地及车站机电等 6 个专业智能监测模块组成,这些模块为智慧维保平台提供数据支撑。通过数据资源贡献技术,智慧维保平台可使一线人员能在事件处置一线及时获取相关处置对象的静态、动态数据的整合信息,支撑实时感知变化及实时分析变化,实时制定最优决策,并将决策自动推送给处置人员。

智慧维保平台采用顶层规划设计,在统一系统架构后分步实施建设,生产核心模块应优先建设优先实施,以实现核心专业的在线监测。智慧维保平台功能架构如图 4 所示。

城市轨道交通运行设备的维保既具有及时性和





注：物后为物资后勤的简称。

图 4 智慧维保平台功能架构图

Fig. 4 Function architecture diagram of intelligent maintenance platform

预防性的特点,又具有管理协调复杂、可靠性保障要求高的特点。这两类特点相互交织,互为矛盾。以通信及信号专业为例,这 2 个专业通过从设备管理和生产组织双线推进,以设备状态可控、作业结果可控、故障定位准确、运维成本可控作为管理目标,依托设备状态感知技术,将部分维护工作从事后紧急抢修模式向事中状态变化处理、事前预知维修模式转换,以有效降低设备维护工作的响应要求和处理难度。应通过集成信号、通信生产运行信息及生产辅助信息,构建数据融合后的业务运维协同功能,基于应急联动实现从设备感知到运维人员生产全过程的质量及效率的全面提升,基于设备评估辅助指导设备状态修的维护转型。

### 3.3 云计算平台

由于智慧运维需求的不断增长,大量分散的数据资源、IT(信息技术)资源需要灵活利用,需要对实时数据和业务进行整合。随着轨道交通线路、设备系统、车站的增加,面向服务的云计算技术优势日益显著,该技术具有易于管理、动态高效、灵活扩展、稳定可靠及按需使用等特点,可满足虚拟化、弹性计算、高效等级安全等要求,并可大幅降低成本。城市轨道交通构建线网-车站两级的云计算平台,可实现计算、存储、网络资源的集约化配置。充分利用云计算资源,可为各系统数据的集成、分析及共享提供便利。利用云存储和云计算中心,通过虚拟化技术实现服务器硬件计算资源、存储资源和软件资源等的统一管理、统一分配、统一部署及统一备份,可打破单一应用对资源的独占,帮助企业提高资源管理效率。云平台兼顾了资源(包括虚机、存储及网络等)、数据服务及应用部署 3 个方面,即专有云平台包括平台资源支持与管理、大数据分析、应用部署管理 3 个部分,不仅涉及了基础底座和 IaaS(基础架构即服务)服务,更涉及到云超融合

PaaS(平台即服务)和 SaaS(软件即服务)。

## 4 结语

通过对车站级、线网级、各业务板块、各设备专业的智慧运维应用的研究,本文对各地城市轨道交通智慧运维管理的应用需求建议如下:

1) 若城市轨道交通项目建设过程中包含数字资产建设的工作,建议采用基于数字孪生的智慧运维管理方式,将智慧运维业务需求与数字资产相融合,采用智慧运维管理模式统一数据资产标准,以尽可能发挥数字资产的价值。

2) 智慧运维需要在建设之初做好统一规划。如果项目前期没能做好顶层架构规划,没有部署统一的无线传输网络、定位系统、数据存储及分析平台等软硬件设施,会因未统筹考虑运营周期的完整功能而导致项目后期缺少扩展能力,或无法有效形成统一系统,进而增加建设成本及运维成本。

3) 智慧运维应用产品应跟据各城市轨道交通运营管理单位的运营模式、数字化运用的程度等实际,选择与之相匹配的解决方案。

## 参考文献

- [1] 谢程祥,慕容匡. 广州市轨道交通“十三五”规划线路车站机电系统建设及运维项目[J]. 项目管理技术, 2021, 19(2): 110.  
XIE Chengxiang, MURONG Kuang. Electromechanical system construction and operation maintenance projects of Guangzhou rail transit '13th Five-Year Plan' line Stations[J]. Project Management Technology, 2021, 19(2): 110.
- [2] 温彤. 上海城市轨道交通智慧维保解决方案[J]. 城市轨道交通, 2022(2): 38.  
WEN Tong. Smart maintenance solution for Shanghai urban rail transit[J]. China Metros, 2022(2): 38.
- [3] 刘样平,阳连兴. 深圳地铁车辆智慧运维建设与实践[J]. 现代城市轨道交通, 2020(8): 120.  
LIU Yangping, YANG Lianxing. Construction and practice of intelligent operation and maintenance of Shenzhen metro vehicles[J]. Modern Urban Rail Transit, 2020(8): 120.
- [4] 张尧涛. 数字孪生技术在智能交通应用中的态势与建议[J]. 信息通信技术与政策, 2020(3): 24.  
ZHANG Jingtao. The trend and suggestions of application of digital twin in intelligent transportation[J]. Information and Communications Technology and Policy, 2020(3): 24.
- [5] 辛佐先,裴芳琼,孟柯. BIM+IoT 助力地铁车站运维管理数字化转型:以上海轨道交通 18 号线工程为例[J]. 中国勘察设计, 2022(增刊 1): 78.

(下转第 202 页)



维护的难度较低。如果线路之间光纤纵差保护没有工作或者没有配置,也能够对各种供电方式下的故障提供完备的保护。

该方法适用于单电源、双电源及多电源等各种供电方式,也适用于电源点动态变化及多个供电方向的供电系统。该方法适用于各种保护装置,适用于辐射状供电系统和环网供电系统,适用于城市轨道交通供电系统及其能量回馈系统、分布式发电和储能系统、区域供电系统等多个应用场合。

## 参考文献

- [1] 李钢,祝炎富,陆亦飞,等. 相互闭锁反向过流继电器在地铁交流供电系统中的应用[J]. 城市轨道交通研究, 2007, 10(6): 39.
- LI Gang, ZHU Yanfu, LU Yifei, et al. Characteristic of inter-block reverse overcurrent relay and its application in subway AC power system[J]. Urban Mass Transit, 2007, 10(6): 39.
- [2] 何歆. 两种数字电流保护在重庆轨道交通的应用探析[J]. 电工技术, 2018(19): 125.
- HE Xin. Analysis of the application of two types of digital current protection in Chongqing rail transit[J]. Electric Engineering, 2018(19): 125.
- [3] 刘晓晖,肖涛古,钟建恩. 数字通信过电流选跳保护在地铁大环网供电系统中的应用[J]. 城市轨道交通研究, 2015, 18(6): 137.
- LIU Xiaohui, XIAO Taogu, ZHONG Jian'en. Application of selection trip protection of digital communication over-current in

metro ring network power supply system[J]. Urban Mass Transit, 2015, 18(6): 137.

- [4] 李景坤. 地铁中压环网数字通信过电流保护方案[J]. 都市快轨交通, 2014, 27(3): 104.
- LI Jingkun. Overcurrent protection scheme of metro medium voltage ring network[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2014, 27(3): 104.
- [5] 黄皓,余臻,游晔. 数字化变电站低压母线保护的 GOOSE 通信研究[J]. 华东电力, 2011, 39(2): 221.
- HUANG Hao, YU Zhen, YOU Ye. Research on GOOSE communication for low-voltage bus protection in digital substation[J]. East China Electric Power, 2011, 39(2): 221.
- [6] 魏巍,严伟,沈全荣. 地铁数字电流保护技术的应用[J]. 都市快轨交通, 2014, 27(5): 60.
- WEI Wei, YAN Wei, SHEN Quanrong. Application of the digital network over current relay for metro[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2014, 27(5): 60.
- [7] 陈杰明. 基于 GOOSE 的 10 kV 简易母线保护研究和应用[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(4): 96.
- CHEN Jieming. 10 kV bus protection research and application based on GOOSE[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(4): 96.
- [8] 丁杰,杨前生,吕航,等. 智能变电站简易母线保护[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(14): 197.
- DING Jie, YANG Qiansheng, LYU Hang, et al. Simplified bus protection for smart substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(14): 197.

(收稿日期:2021-04-29)

## (上接第 197 页)

- XIN Zuoxian, PEI Fangqiong, MENG Ke. BIM+IoT helps digital transformation of metro station operation and maintenance management—taking Shanghai rail transit line 18 project as an example[J]. China Engineering Consulting, 2022(S1): 78.
- [6] 娄亭. 轨道交通车站机电设备智能运维系统研究与实践[J]. 交通世界, 2022(18): 57.
- LOU Ting. Research and practice on intelligent operation and maintenance system of electromechanical equipment in rail transit station[J]. Transportation World, 2022(18): 57.
- [7] 邓波,徐建军,高建,等. 城市轨道交通智能运维建设监测

内容分析[J]. 甘肃科技纵横, 2022, 51(3): 4.

DENG Bo, XU Jianjun, GAO Jian, et al. Intelligent operation and maintenance of urban rail transit monitoring content analysis[J]. Scientific & Technical Information of Gansu, 2022, 51(3): 4.

[8] 宋宗霞. 城市轨道交通机电云建设方案探讨[J]. 交通建设与管理, 2019(6): 80.

SONG Zongxia. Discussion on the construction scheme of electromechanical cloud for urban rail transit[J]. Transport Construction & Management, 2019(6): 80.

(收稿日期:2023-02-23)

欢迎访问《城市轨道交通研究》网站

<http://umt1998.tongji.edu.cn>