

# 数据与模型双核驱动的城市轨道交通自动售检票 智能运维系统架构设计与实现

李景虎<sup>1</sup> 蔡佳妮<sup>2</sup> 范海斌<sup>3</sup> 夏 熠<sup>1</sup> 高习明<sup>4</sup>

(1. 上海申通地铁集团有限公司运营设施设备管理部, 201102, 上海;

2. 上海申通地铁集团有限公司技术中心, 201103, 上海; 3. 上海轨道交通第三运营公司, 200070, 上海;

4. 上海华虹计通智能系统股份有限公司, 201206, 上海)

**摘 要** [目的]城市轨道交通传统 AFC(自动售检票)系统存在维修速度慢、维修方法过时、维修计划不合理和维修成本高等问题。需要采用数字化与智能化主动监测维护方法,基于数据与模型双核驱动搭建城市轨道交通 AFC 智能运维系统,将周期性的计划修转变为状态修和预知修,进而提高运维效率,降低运维成本。[方法]介绍了城市轨道交通 AFC 智能运维系统的架构及主要功能。先通过多传感器融合收集终端设备的数据,并通过上传到大数据平台进行处理,再利用深度学习算法与天牛须搜索优化算法对收集的数据进行数据分析,并优化模型,进而识别故障模式和预测潜在的设备故障。此外,该系统还采用了自动化工作流程管理工具来分析运维任务的执行效率,以优化日常维护和紧急响应策略。[结果及结论]该系统在上海轨道交通 3 号线试点运行中表现出色,能实现智能维护、设备动态履历管理、远程监控、移动终端、无纸化维护等功能,其运行平稳、操作方便、流程顺畅。通过效益分析可知,该系统切实提高了工作维修效率,降低了运营成本。

**关键词** 城市轨道交通; 自动售检票系统; 智能化运营维护; 经济效益

**中图分类号** U231.94:U293.2<sup>+</sup>2

**DOI**:10.16037/j.1007-869x.2024.06.037

## Design and Realization of Urban Rail Transit AFC Intelligent Operation and Maintenance System Architecture Driven by Dual-core of Data and Model

LI Jinghu<sup>1</sup>, CAI Jiani<sup>2</sup>, FAN Haibin<sup>3</sup>, XIA Yi<sup>1</sup>,  
GAO Ximing<sup>4</sup>

(1. Operation Facilities and Equipment Management Department, Shanghai Shentong Metro Group Co., Ltd., 201102, Shanghai, China; 2. Technical Center, Shanghai Shentong Metro Group Co., Ltd., 201103, Shanghai, China; 3. Shanghai Metro Third Operating Company, 200070, Shanghai, China; 4. Shanghai Huahong Jitong Intelligent Systems Co., Ltd.,

201206, Shanghai, China)

**Abstract** [Objective] The traditional urban rail transit AFC (automatic fare collection) system suffers from maintenance problems such as slow speed, outdated method, unreasonable plan and high cost. It is necessary to adopt digital and intelligent active monitoring and maintenance methods, and build an urban rail transit AFC intelligent operation and maintenance system architecture drive by dual-core of data and model, transforming periodic scheduled maintenance into condition-based and predictive maintenance, so as to improve the efficiency of operation and maintenance and reduce the cost.

[Method] The architecture and main functions of AFC intelligent operation and maintenance system for urban rail transit is introduced. Firstly, the terminal equipment data are collected through multi-sensor fusion and uploaded to the big data platform for processing. Then, the collected data are analyzed by deep learning algorithm and BAS (beetle antennae search algorithm), and the model is optimized to further identify the failure mode and predict the potential equipment failure. In addition, the system uses automated workflow management tools to analyze the execution efficiency of the operation and maintenance tasks, and optimize the routine maintenance and emergency response strategies. [Result & Conclusion] The system performs well in the trial operation on Shanghai Metro Line 3, and it can realize intelligent maintenance, dynamic equipment history management, remote monitoring, mobile terminal, paperless maintenance and other functions, featuring stable running, convenient operating, and smooth workflow. The benefit analysis shows that the system effectively improves the maintenance efficiency and reduces the operation cost.

**Key words** urban rail transit; automatic fare collection system; intelligent operation and maintenance; economic benefit

城市轨道交通(以下简称“城轨”)AFC(自动售检票)系统传统的运维管理采取“一刀切”模式,存

在故障维修速度慢、维修方法过时、维修计划不合理及维修成本高等诸多缺陷。而数字化、智能化的主动监测维护方式能将周期性的计划修转变为状态修和预知修,不仅有利于实现运维管理的高效性和经济性,也有利于实现大数据化、智慧化的成熟运维模式。对此,为了提高城轨 AFC 系统运维效率,并降低运维成本,也为了构建设备设施大数据分析和智慧化应用平台的基础,本文提出了数据与模型双核驱动的城轨 AFC 智能运维系统,并使用深度强化学习和天牛须搜索优化算法,为设备维保和专项维修提供技术保障。

## 1 城轨 AFC 智能运维系统的架构设计

### 1.1 整体架构设计

城轨 AFC 智能运维系统运用大数据、移动互联网及人工智能等数字化技术手段,其整体架构如图 1 所示。城轨 AFC 智能运维系统由基础硬件、大数据平台、AFC 智能运维核心及前端 AFC 设备管理系统组成。其中基础硬件主要包括车站计算机系统及车站终端设备如自动售票机、自动检票机(闸机)、票房售(补)票机、自动充值(查询)机等,用于为乘客提供各类售检票服务。车站终端设备安装在各车站的站厅层内,通过车站局域网络连接到车站计算机系统。基础硬件设备收集的数据经由交换机进入大数据平台,经数据处理后,经由防火墙上传到网络;城轨 AFC 智能运维系统根据处理后的数据对 AFC 系统进行维护、监控和运营管理,并通过前端(即移动端和电脑端)软件实现实时监控。

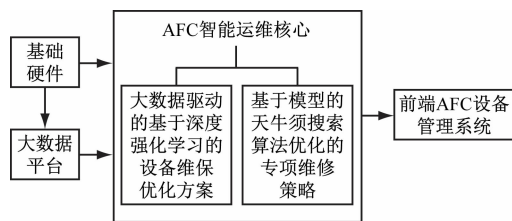


图1 城轨 AFC 智能运维系统整体架构

Fig. 1 Overall architecture of urban rail transit AFC intelligent operation and maintenance system

大数据平台主要记录 AFC 智能运维系统所需的所有基础信息。目前城轨设备的状态与故障信息,是全部上传、重复上传,上海全路网数据为 2 000 万条/d 左右。这些状态与故障信息,必须经过处理加工才能有效利用。为此,大数据平台利用大数据驱动,优化了基于深度强化学习的设备维保方案。

同时,该平台也改进了基于模型的天牛须搜索算法,以制定专项维修策略,为故障处理、故障统计、工况统计、专项维修策略,提供更为精准有效的数据支撑。

前端 AFC 设备管理系统主要包括针对 AFC 智能运维系统特点和目标研发的上海轨道交通 AFC 设备管理系统和给维保人员使用的桌面端软件。

### 1.2 数据库架构设计

考虑到城轨的未来可发展性,城轨 AFC 智能运维系统需要对未来一定时间内的客流数据、故障数据及健康诊断数据进行综合分析预测,故对数据库要求较高,其整体数据库架构如图 2 a) 所示。在兼顾可靠性与经济性的条件下,推荐 Oracle 11 g 数据库为 AFC 智能运维系统数据库的首选方案。由于车站与控制中心均使用 Windows 系统作为开发框架的稳定性关系操作系统,为保证 AFC 智能运维系统数据库的完整一致,车站与控制中心选用的数据库应一致。图 2 b) 为城轨 AFC 智能运维系统桌面端软件的前端和后端开发架构。

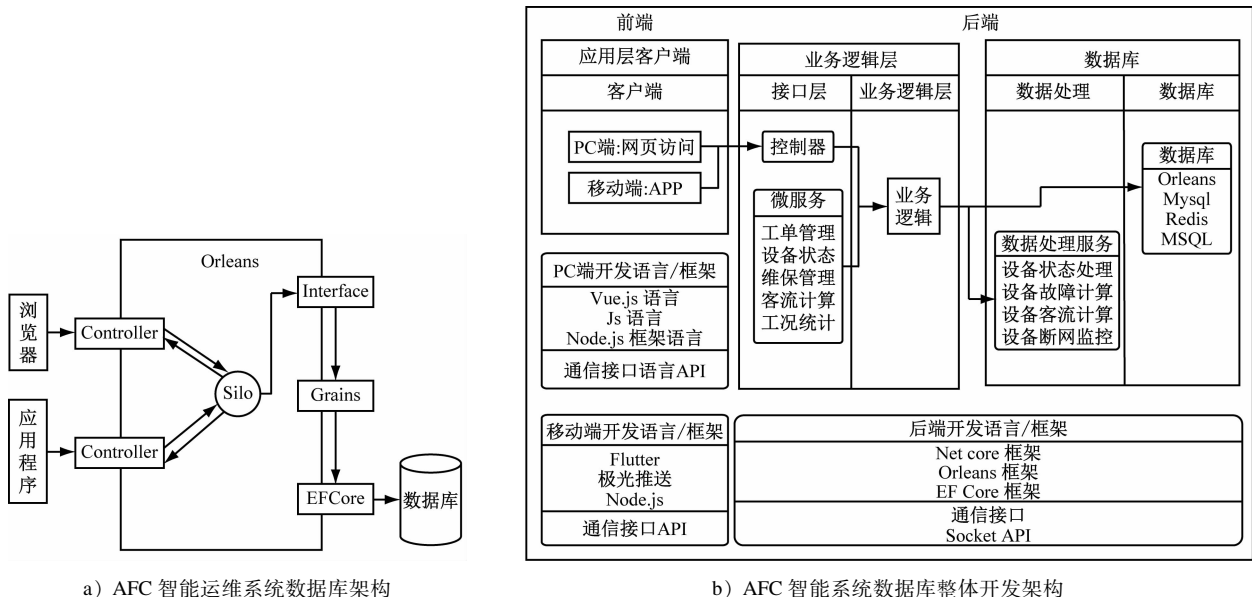
数据库硬件组成:型号为 IBM Power System S812L(8247-21L) \* 2 的服务器,型号为 POWER8、频率为 3.42 GHz 的 CPU(中央处理器),容量为 64 GiB 的内存,2 台液晶显示器及 2 部光纤存储交换机。

为保证城轨 AFC 智能运维系统的可靠性,采用 Oracle RAC 集群数据库,以实现负载均衡和故障无缝切换。为保证数据安全可靠,城轨 AFC 智能运维系统数据库还建立了完整的备份策略,包括定期的全量备份策略与增量备份策略。

经实际运用效果验证,城轨 AFC 智能运维系统完全适用于自动售检票系统的运维管理。城轨 AFC 智能运维系统的整体设计已考虑多专业系统的并行运行,并将数据标准化纳入其体系设计中;理论上,城轨 AFC 智能运维系统还可兼容多专业系统的运维管理。实际应用前提条件更多取决于交通行业运营管理模式的变更。

## 2 城轨 AFC 智能运维系统的技术

城轨 AFC 智能运维系统,通过对 AFC 系统设备运行数据信息的采集、清洗、治理,以及对设备部件的健康诊断及在线监控,形成标准体系的格式化数据,运用大数据、移动互联网、深度自主学习等数字化技术手段,为城轨 AFC 系统运维提供更有效的



注:PC 为个人电脑;APP 为应用程序;Controller 为处理进入请求,协调模型和视图的组件;Grains 为基本计算单元和分布式对象模型;Silo 为管理 Grains 的服务器节点;Interface 为 Grain 接口,定义了处理类型的 Grain 请求;Orleans 为微软云计算编程模式;EF Core 为微软开发的对象关系映射框架;Socket API 为套接字接口。

图 2 AFC 智能运维系统数据库架构及数据库整体开发架构

Fig. 2 AFC Intelligent operation and maintenance system database architecture and overall database development framework

管理方法、措施与建议,提高 AFC 系统的运行效率与稳定性,提高设备设施完好率,提升维保效率,最终实现降本增效。城轨 AFC 智能运维系统将按自动化与数字化阶段、智能化阶段、智慧化阶段,分别采用不同的技术,实现不同的功能。

### 2.1 大数据驱动的、基于深度强化学习的设备维保方案优化

城轨 AFC 智能运维系统基于深度强化学习构建,能更好地匹配调度规则,可以根据设备状态变化实时调整调度策略,能提升维保效率和稳定性,避免运维流程和系统运行遭受严重干扰,进而确保了城轨 AFC 智能运维系统的连续性和鲁棒性。

#### 2.1.1 AFC 系统的数据收集

AFC 系统的数据收集内容主要包括移动运维数据、基础信息库数据,以及设备故障维修数字化、设备部件维护保养及其他运营管理辅助功能的数据等。

1) 移动运维数据。维保人员在移动终端上接收后台派发的工单,工单执行过程信息与结果通过移动终端及时上传至大数据平台。

2) 基础信息库数据。基础信息库用于记录系统所需的所有基础信息,包括线路、站点、专业、设备及部件等信息,设备基础信息来源于输入、导入,也可通过状态信息自动进行维护。

3) 设备故障维修的数字化及智能化数据。维保人员在移动终端上接收维修工单,维修过程与结果通过移动终端上传大数据平台。

4) 设备部件智能化维护保养数据。智能化维护应实现对部件的差异性维护保养,均衡各设备的使用频率,实现精细化成本控制。

5) 其他运营管理辅助功能数据。城轨 AFC 智能运维系统提供一键日常巡检功能,可巡检系统软件、参数版本及设备实时状态等信息,自动保存巡检结果,并根据需求生成报表或单据,支持无纸化工作。

#### 2.1.2 建立模型和优化参数

对 AFC 智能运维系统中维保工人和设备及调度过程中数据实时生成和传输机制的详细描述,并提出构建 AFC 设备维保系统模型方案。根据收集的数据,优化维保数据和 AFC 智能运维系统参数,利用深度学习训练 AFC 智能运维系统状态数据,实现智能调度规则匹配。针对选择冲突和延时等情况,优化复合调度规则,实现在线调度和学习。

### 2.2 基于天牛须搜索算法优化模型的专项维修策略

在设备异常监控方面,传统方法通常是设备参数设定正常工作范围,并不间断监控设备参数变化,一旦设备参数超出正常工作范围,设备监控系统就报警或采取其他措施,极可能导致生产中断,



严重影响城轨的连续运行。而天牛须搜索算法正好提供了一种高效的解决方案,天牛须搜索算法是2017年提出的一种元启发式单体搜索算法,其模仿天牛使用触角感知气味的方式进行搜索,具有准确预警、低算力消耗、快速响应、快速收敛和强适应性等优势。

通过对累积的 AFC 智能运维系统运行数据进行大数据分析和建模,可以精确计算分析设备部件的工况,为设备维修和大修提供基础数据支持。这种方法可以确定专项维修和大修的精确周期和范围,实现精细化成本控制,从而降低 AFC 智能运维系统运营的总成本。

专项维修策略模型的建立步骤:

1) 首先,对设备及部件的历史异常点进行标注,建立设备历史运行自回归模型,并将设备历史运行自回归模型进行参数化;然后,运用带滑窗迭代最小二乘法建立异常监测求解模型。

2) 采用单次测量天牛须优化算法进行异常监测求解模型参数的整定。

3) 实时读取设备及部件的数据,运行已整定完参数的异常监测求解模型,对数据进行实时监测。一旦监测到数据异常,则需要工作人员前往设备处确认,若设备发生故障,则运用单次测量天牛须优化算法对异常监测求解模型参数进行再次整定。

专项维修策略模型具有自我学习功能,能在运营过程中根据运维数据实现自我完善。

### 3 城轨 AFC 智能运维系统前端开发

以城轨 AFC 智能运维系统架构和技术为基础,开发 AFC 智能运维系统管理软件和移动端设备,其中 AFC 智能运维系统管理软件(如图3所示)可以



图3 上海轨道交通 AFC 智能运维设备管理系统界面截图  
Fig. 3 Screenshot of Shanghai Rail Transit AFC intelligent operation and maintenance equipment management system

使管理人员便捷地查看系统整体的运行状况,包括车站设备情况、线路情况、客流情况等,并能对各类故障或事故做出快速反应。

基于数据分析和建模,创建一个维修、保养和改造的相关策略知识库。根据设备及部件全生命周期的跟踪分析,经过归纳论证,该策略知识库可为地铁建设及运营管理的标准化文件编制及修改提供依据。

根据维修需要与运维管理方式,形成维修人员端与控制中心端所使用的移动端应用,界面如图4所示。通过深度强化学习算法,控制中心可以监控维修情况并分配任务给维修人员,维修人员可查看系统分配任务,并根据所分配任务前往检修。



a) 控制中心移动端界面 b) 维修人员移动端界面

图4 控制中心与维修人员移动端界面

Fig. 4 Mobile interface between the control center and the maintenance personnel

### 4 城轨 AFC 智能运维系统的项目效益预测

上海申通地铁集团以3号线作为城轨 AFC 智能运维系统先行试点,已完成第一期开发,并于2021年5月在3号线全线试用,根据统计,3号线每天的故障及状态数据达10万条以上,经过清洗与分析,需要处理的故障工单基本为200条/d左右,不仅实现了维修工单自动化的可操作性,同时还为故障处理、故障统计、工况统计及专项维修策略提供了更为精准有效的数据支撑。以3号线为例,从人力和成本两方面进行效益预测。

1) 节约人力。采用城轨 AFC 智能运维系统前后的3号线运维人员配置如表1所示。由表1可

见,与采用前相比,采用城轨 AFC 智能运维系统后的运维人工减少了约 20%,说明该系统能有效节约人力。

2) 降本增效。通过实施智能维护策略、专项维修策略以及大修策略,城轨 AFC 智能运维系统实现了精准管理,不仅提高了计划的准确性和设备的可用率,还降低了模块更换和修理的成本。在确保城轨安全运行、保证运营服务质量的前提下,根据 2012 年 3 号线的运维费用统计,维保合同费用及大修费用总计为 10 504.33 万元(主要数据来自上海地铁第三运营有限公司)。采用城轨 AFC 智能运维系统后,维保总费用为 8 804.25 万元,可见维保费用降低了 16%。

表 1 采用城轨 AFC 智能运维系统前后的 3 号线运维人员配置

Tab.1 Personnel deployment before and after adoption of urban rail AFC intelligent operation and maintenance system

岗位	人员配置/人	
	采用前	采用后
驻站人员	42	27
抢修人员	18	18
维修组长	3	3
应急支援人员	8	8
线路主管	1	1
合计	72	57

## 5 结语

目前,城轨 AFC 智能运维系统实现了智能维

护、智能维保、设备动态履历管理、远程监控、移动终端、无纸化维护等功能,该系统运行平稳、操作方便、流程顺畅。通过效益分析,可以切实提高工作维修效率,降低运营成本,并计划未来推广到上海轨道交通所有线路。

## 参考文献

- [1] JIANG X, LI S. BAS: beetle antennae search algorithm for optimization problems[J]. International Journal of Robotics and Control, 2018, 1(1): 1.
  - [2] JIANG X, LI S. Beetle antennae search without parameter tuning (BAS-WPT) for multi-objective optimization[EB/OL]. (2017-08-11)[2021-10-21]. <http://arxiv.org/abs/1711.02395>.
  - [3] 方晖,王扬,蒋坚迪,等. AFC 系统基于区块链的跨城市安全联动框架设计[J]. 信息技术, 2021, 45(11): 143.  
FANG Hui, WANG Yang, JIANG Jiandi, et al. Cross-city security interaction framework design of AFC system based on block chain[J]. Information Technology, 2021, 45(11): 143.
  - [4] 林忠山,朱小莲,肖芳. 基于容器云平台的轨道交通自动售检票系统架构设计[J]. 电子技术与软件工程, 2021(19): 157.  
LIN Zhongshan, ZHU Xiaolian, XIAO Fang. Architecture design of automatic fare collection system for rail transit based on container cloud platform[J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2021(19): 157.
- 收稿日期:2021-12-24 修回日期:2022-03-22 出版日期:2024-06-10  
Received:2021-12-24 Revised:2022-03-22 Published:2024-06-10
- 通信作者:李景虎,正高级工程师,ljh287422@163.com
- ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 201 页)

- [6] VALIZADEH K A, SADAGHIANI M H, AHMADI M M. Numerical modeling of ground settlement control of large span underground metro station in Tehran Metro using Central Beam Column (CBC) structure[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012, 28: 1.
- [7] 李铁生,郝志宏,刘军,等. PBA 工法中导洞开挖顺序的优化分析研究[J]. 市政技术, 2016, 34(2): 67.  
LI Tiesheng, HAO Zhihong, LIU Jun, et al. Optimization analysis of pilot excavation sequence of PBA method[J]. Municipal Engineering Technology, 2016, 34(2): 67.
- [8] 王健宏,阳军生,刘守花,等. 邻近边坡地铁车站深基坑施工工法比选[J]. 建筑结构, 2020, 50(21): 133.  
WANG Jianhong, YANG Junsheng, LIU Shouhua, et al. Comparison and selection on construction methods for deep foundation pit of subway station adjacent to the slope[J]. Building Structure, 2020, 50(21): 133.
- [9] 赵江涛,牛晓凯,苏洁,等. 洞桩法地铁车站顺行密贴下穿

既有隧道方案优化研究[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(3): 176.

ZHAO Jiangtao, NIU Xiaokai, SU Jie, et al. Optimization of the construction scheme for a PBA metro station adjacent to an existing metro tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2018, 55(3): 176.

- [10] 李皓,葛克水. PBA 工法导洞开挖顺序数值模拟研究[J]. 施工技术, 2015, 44(7): 110.

LI Hao, GE Keshui. Research on heading pilot's excavation of PBA method[J]. Construction Technology, 2015, 44(7): 110.

- 收稿日期:2021-11-22 修回日期:2022-05-19 出版日期:2024-06-10  
Received:2021-11-22 Revised:2022-05-19 Published:2024-06-10
- 通信作者:田江涛,助理工程师,395814048@qq.com.com
- ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license