

基于地铁网络化管理转型的车站机电设备集成控制架构^{*}

葛世平¹ 黄建林¹ 陈 冈²

(1. 上海申通地铁集团有限公司, 201103, 上海; 2. 触城信息科技(上海)有限公司, 200233, 上海)

摘 要 [目的]既有地铁车站机电系统中的各专业子系统都是基于相关行业成熟系统,通过适应性改造而应用于地铁车站,虽能满足一些车站功能需求,但因没考虑地铁系统的运行特征和管理需求,因此难以实现一体化融合,且严重阻碍相关专业子系统发展和管理能级提升。因此需从底层探索车站机电设备集成控制架构及其演进路线,以提升管控效率。[方法]介绍了地铁网络化运营和管理的特征,以及网络化管理的趋势和要求。对传统车站机电设备控制架构中存在的架构复杂、控制功能差、功能单一、子系统联动性差、升级改造困难等问题进行了深入分析,并提出了相应的突破方式。以车站机电设备集中管控为目标,提出了以云、边、端为核心架构的车站机电设备集成控制一体化设计方案,并介绍了该方案在不同创新应用场景下的应用设计案例。[结果及结论]通过引入功能更为强大的边缘控制器,对既有地铁车站机电设备控制架构进行重塑,形成了以云、边、端为核心架构、适用于网络化管理的车站机电设备集成控制架构,可有效提升车站机电设备集中管控效能,增强车站机电设备功能,弥补管理盲区,同时可实现终端设备高效联动。

关键词 地铁车站; 机电设备; 集成控制; 边缘控制器

中图分类号 U29-39

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.05.002

Integrated Control Architecture of Station EM Equipment Based on Metro Networked Management Transformation

GE Shiping¹, HUANG Jianlin¹, CHEN Gang²

(1. Shanghai Shentong Metro Group Co., Ltd., 201103, Shanghai, China; 2. City Antenna Info. Tech. (Shanghai) Co., Ltd., 200233, Shanghai, China)

Abstract [Objective] Each technical subsystem in the EM (electromechanical) system of existing metro stations is based on mature systems in related industries, and applied to metro stations after adaptive modification. Despite meeting some functional requirements of the stations, these subsystems can hardly be integrated for lack of considering the operation char-

acteristics and management needs of metro system, thus seriously hindering the development and improvement of management capabilities of related technical subsystems. Therefore, it is necessary to explore the integrated control architecture of station EM equipment and its evolution route from the bottom layer to improve the efficiency of management and control.

[Method] The characteristics of metro networked operation and management, and the trends and requirements of networked management are introduced. An in-depth analysis of the problems existing in the control architecture of traditional station EM equipment, such as complex architecture, poor control functions, single function, poor linkage of subsystems, as well as difficulties in upgrading and transformation, corresponding breakthrough methods are proposed. Aiming at the centralized management and control of station EM equipment, an integrated design scheme for the above EM equipment intensive control is proposed with cloud, edge, and end as the core architecture, and some application design cases of this scheme in different innovative application scenarios are introduced.

[Result & Conclusion] By introducing more powerful edge controllers, the control architecture of the EM equipment in existing metro stations is reshaped, forming an integrated control architecture of station EM equipment suitable for networked management, with cloud, edge, and end as its core architecture. This architecture can effectively improve the efficiency of centralized management and control of station EM equipment, enhance their functions, make up for the management blind areas, and at the same time achieve efficient linkage of terminal devices.

Key words metro station; EM equipment; integrated control; edge controller

车站机电系统是地铁车站最为重要的系统之一,是车站能否安全舒适有序保障乘客出行的重要设施设备系统,是包含多设备多业务的复杂系统,

^{*} 上海申通地铁集团有限公司科研项目(JS-KY22R030)

也是地铁车站防灾救灾最为重要的系统。

既有地铁车站机电系统中的各专业子系统都是基于相关行业成熟系统,通过适应性改造而应用于地铁车站,虽能满足一些车站功能需求,但没考虑地铁系统的运行特征和管理需求。比如后期建设的综合监控子系统,因受制于专业壁垒和建设管理局限,较难与既有车站机电系统实现一体化融合。同时,由于技术架构原因,各机电子系统不能与移动通信、大数据处理、智能监控等新技术进行有效结合,严重阻碍了相关专业子系统发展和管理能级提升。因此,必须从底层探索车站机电设备集成控制架构及其演进路线,以提升管控效率。

1 地铁网络化运营及管理特征

地铁运行本质特征是线,管理特征是网。从线的角度来看,地铁运营有别于传统铁路,其特点是高密度、大运量、专用路权、合适的站间距,以及实现列车以最高速度运行,以保证其快捷性,满足现代城市早晚高峰的运能需求。地铁各线之间的车辆型号、信号系统、供电制式可以不一样,但都是在体现线特征的前提下,更好满足客流需求和线路运营的适应性。从网的角度来看,地铁网络形态与城市的空间布局有关,在中心城区,地铁网络不可避免地采用网格化布局,网络管理比线路管理具有更高效的经济性。

基于这一特点,可将地铁车站的机电系统分为核心专业系统和非核心专业系统。与线路运行有关的系统都是核心系统,如车辆、信号、供电、屏蔽门等专业系统,这些专业系统基本是按照线路布局。其中一些专业系统(如屏蔽门)相互联动紧密,这些专业系统直接影响运营效率,对其可靠性要求高。非核心机电专业系统是指与线路运营效率关联不大的系统,包括独立存在于各个车站内且不影响运营效率的车站机电系统。正是这种独立性、非核心特点,面向全网的扁平化的集中管控模式极其适用于对非核心车站机电系统的管理。通过建立全网统一的车站机电系统监控平台实现对全网车站机电系统的管理,维修方式从预防性维修、故障性维修转变为真正的状态维修,从而降低运行成本,提升管控效率。

2 网络化管理的趋势及要求

网络化管理是利用现代先进通信和监控手段,

基于中央集中的、直接面向对象的扁平化管理。这种管理模式突破了传统管理模式的管理幅度,能够极大优化组织架构,使管理效率获得提升。

2.1 管理的集中性

车站机电系统网络化管理的最大难题是点多面广、规模体量巨大、不同厂商分期建设、技术封闭、专业系统层级多,再加上标准不统一,容易引发管理失明。另一方面,由于机电系统设备的分散性,造成整个管理体系分散,不利于资源的集中调配和统筹利用。管理的集中性是将管理对象的运行状态和特征等信息向中央集中汇聚,通过所形成的集中管控的规模效应提升管理效能,同时也为机电系统设备标准化和管理智能化提供基础。

2.2 管理的深度性

管理深度取决于管理的专业能力。由于车站机电系统设备的分散性布局,造成点多面散,因此不可能保证现场每个专业工程师都具有较高水平;因同时受制于采集数据维度和数据量的限制,现场专业工程师对设备的认知也存在极大的不充分性,会造成不能有效判断设备本体状态。同时,既有设备的功能并不完全满足车站管理本身要求也影响管理的深度,因存在一定的功能限制和管理盲区,许多管理要求需要依托人工弥补,造成管理深度不足。

2.3 管理的智能化

目前,许多管理要求的实现仍然需要投入大量人力。比如:获取车站环境状态,需要依托周期性的车站巡检;操控车站开关站,需要站务员到现场手动逐项操作;判断现场客流情况,需要通过现场观察,或通过 CCTV(视频监控)系统进行人工判别;判断设备故障点,需要依托人力逐项检查,费时费力,而且许多工作还不能在地铁运营期间完成;等等。另外,受制于成本压力,未来车站人员精减是必然趋势,传统依托人力完成的工作,未来必然交由设备完成,因此提升设备的智能化水平是唯一选择。通过不断提升末端设备状态的智能化感知能力,推动状态研判及功能拓展,包括设备终端本体的状态趋势研判、故障点定位、设备重启、故障点锁闭、影响路径切除以及功能互联等。

3 现有车站机电设备控制架构的制约及突破方式

3.1 车站各自相互独立,缺乏集中性

传统机电设备管理是基于各车站点状分布和

线路管理模式,维护成本高且资源浪费、工时利用率低,信息传递效率低且准确性差。可采用面向对象的基于边缘控制的云、边、端智能控制架构,以边缘控制为核心,采用集中(中央或车站智能控制)加分散(就地智能控制)的控制策略,实现高安全、高可靠的集中和就地智能管控。按照网络规模的不同,可以全网集中管控或划分为若干区域相对集中管控,通过建立面向对象的集中监控平台,将机电系统终端设备状态监控统一纳入集中监控平台,实现设备状态的集中掌控。同时,实现智能监控、自动监控以及场景化控制集中,提供如智能风险管控、自动派发工单及智能统筹调用应急抢修力量等功能。

3.2 现场控制架构复杂,系统简单叠加

现有技术架构是在子系统逐步叠加的背景上形成的(如早期的乘客信息系统就是后来增加的),且受制于建设期机电系统招标模式及各设备厂商的限制,对控制系统几乎没有进行整体设计,导致控制层级层层嵌套,各子系统相互独立,且线与线之间的各专业子系统控制规则性不强,造成整个控制逻辑的回路既复杂繁琐又功能落后。因此,可采用扁平 and 统一的控制拓扑结构替换既有的多层嵌套与多系统拼接的不规则复杂拓扑结构。

3.3 控制设备功能落后,控制效率低下

传统方案中常规采用 PLC(可编程逻辑控制器)为核心控制设备。PLC 在技术路径上着重于实现控制的实时性和可靠性,但编程开发对机电专业人员的能力要求较高,因此软件生态相对封闭,不能适应复杂场景的管控要求。可以采用融合了 NPU(神经网络处理器)和 GPU(图形处理器),且支持各种数据高速运算和视频 AI(人工智能)识别的边缘控制器,实现面向对象的智能控制。通过对控制对象进行不同的多维定义和封装,不仅可以解决上述传统控制存在的这些老大难管理问题,而且方便实现不同设备对象的智能化管控。

3.4 设备实现功能落后,功能单一且不能相互支撑

传统方案对设备控制功能要求简单,现场数据采集以离散的开、关量数据为主,关注各设备是否执行操作、准确受控,因此,控制核心采用点表+逻辑程序,虽然能够实现自动化控制,但功能交互和数据融合度不足,使得功能拓展受限且设备功能之间互相支撑不足。可结合车站管理要求,丰富场景设计,通过智能化改造,增强或拓展终端设备功能。

3.5 设备状态无法判别,不能实时准确掌控

传统机电设备状态监控手段单一,不仅不能全面反映设备状态,且监测精度与效率差,往往以计划修为主,造成维护管理模糊和资源浪费。可对设备状态表现的关键特征参数进行自动采集和智能分析,建立综合评价数据库,完整评价设备状态,为后续制定维护及大修改造策略提供可靠依据,同时数据采集的丰富性也可提升设备故障条件下故障点与故障成因判断的效率。

3.6 对设备及环境缺乏有效监控,存在管理盲区

车站空间布局和设备环境复杂,人员大都依靠巡检和传统的自带设备手段进行管控,不仅管控频次不足,而且还会存在许多管理盲区。因此,通过增强设备及环境感知覆盖面、扫除管理盲区,实现车站管控的全覆盖。

3.7 受制机电设备种类和数量庞大,对接与集成难度高,升级改造困难

车站机电设备厂商众多,控制逻辑和接口纷杂,要完成系统综合改造,不仅协调难度非常大,而且成本费用高、时间周期长。可利用边缘控制器接口丰富、主流通信协议全兼容、支持高级语言编程、可远程升级的优势,实现泛设备互联,做到快速、低成本的互联互通。

4 基于边缘控制器的车站机电设备控制路径及架构

4.1 车站机电设备管理分类

针对车站机电设备的功能要求、行车影响、技术特点、关联性等进行分析后,将设备分为关键设备和普通设备两类。针对屏蔽门、自动扶梯(无障碍电梯)、事故风机等关键设备的监测,采用日常运行状态+健康状态评估的混合模式,同时对故障和劣化趋势风险的现场响应做实时反馈跟踪。针对门禁等普通设备,采用日常运行状态监测模式,结合巡检与故障修模式进行管理。对不同类设备的管理特性及灾备联动模式,通过机电设备对象化模型进行预设和更新。

4.2 基于边缘控制器的车站机电设备控制架构

图1为基于边缘控制器的新型车站机电设备控制架构图。新的车站机电设备控制架构以边缘控制器(融合了 PLC、工业级网关、GPU 三类设备主要功能)为核心搭建,具有如下优势:

1) 采用云、边、端架构,实现网络集中控制。

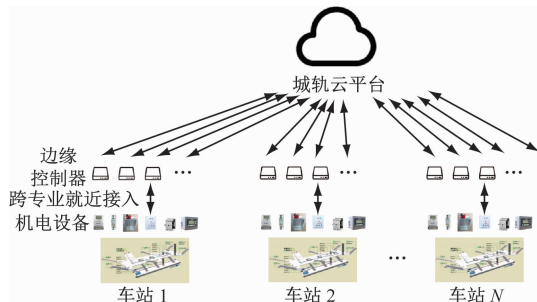


图1 基于边缘控制器的新型车站机电设备控制架构图

Fig.1 New control architecture diagram of station electromechanical equipment Based on Edge Controllers

云、端覆盖所有站点,获得站内设备的关键状态与维护信息,实现记录、存储和查询。通过对全网数据的长期分析、跟踪,可快速实现同类设备中不同技术类型、厂商、型号、批次间的运行情况比较,为建设和大修中的设备选择提供决策依据,同时支持优化、动态的维护策略在全网内有序更新,降低全网的总体维护成本。在火灾、限流、极端天气等重大事件触发多站、多线机电设备联动的场景下,中心端可轻易协调、同步、跟踪全网响应。

2) 机电设备控制拓扑和数据通信链路层级大幅压缩,结构清晰简单。现场端监控设备即边缘控制器与各机电设备、采集设备全为直接互联,无中转设备,无多层结构。配合机电设备对象化模型,会使设备故障定位更加快捷和精准,大幅降低故障处理的难度和时间周期。

3) 跨专业就近接入。机电设备在车站两端布置是有规律的,面向对象以空间为边界不分专业接入边缘控制器也是符合标准的。将车站机电设备不按专业划分,而是按照空间就近原则跨专业接入边缘控制器中,机电设备之间通信网络可依据空间特性进行统一的最优化部署,且支持设备终端的任意增减,可减少多专业系统独立建设下的重复投资,同时可降低设计、建设、维护过程中的相关投入。

4) 各专业机电设备在底层实现互联互通、数据共享,可实现更丰富的跨设备、跨专业增值应用,可促进设备和其专业子系统的有效融合,提升产出,并从整体上增加系统的可靠性。

5) 边缘控制器以 ARM 内核 + 开放软件生态为基础进行构建,具有实时控制 + 泛接口互联 + 边缘计算三大主要功能。基于高算力和广资源,边缘控制器能够提供操作系统 + 高级语言编程的良好

软件环境,可基于此建立机电设备对象化模型。业务软件通过调用这些预设的对象化模型,可实现便捷的实时控制,以及多设备、多系统间智能联动、场景化智能运行等业务应用。

6) 应用机电设备对象化模型,将车站机电设备控制从传统的过程化控制转变为对象化控制。在现场调试、故障维修、设备变更、管理需求更新等业务场景下,这可大幅降低现场人员与业务软件开发人员的工作难度,减少工时支出。

7) 结合边缘控制器 AI 算力和声光电多维数据采集、分析、识别能力,可以对机电设备内关键部件过温、结构劣化等隐蔽风险做出预警,提供传统模式中难以实现的深度监测和分析功能。

8) 基于云、边、端架构的灵活拓展性和边缘控制器的泛接口互联能力,可全面模拟人工巡检中摸、听、看的工作方式,依托边缘端神经网络算力和各专业内异常识别算法,实现自动、智能、快捷的设备与环境巡检,实现关键设备健康状态识别、趋势判断,支持车站机电设备维护向无人值守的智能巡检方向转变。

5 创新场景应用设计案例

5.1 针对车站自动扶梯的视频、音频、振动、温度融合传感的风险管控

CCTV 监控图像常规用于客流状态识别,边缘端控制器应用其图像还可识别出自动扶梯上乘客跌倒、逆行、拥堵等异常状态;基于振动感知数据,实现电机和主驱动轮轴承磨损过振的识别,预警扶梯内重要装置的结构劣化风险;基于非接触式温度探测数据,可识别扶手带磨损高导致的过温故障;基于音频采集数据和声纹识别等算法,可实现对内部器件异响、异物卡住梳齿板等故障的判断和报警,同时可替代每日开站前针对自动扶梯的人工巡检。

5.2 复杂联动场景设计

场景包括基于火情视觉和烟温探测智能分析的场景联动控制、复杂水情的智能综合管控、门禁系统对施工人员的有效管控等。可采用光学图像、红外图像、烟温感探测的综合采集分析,配合机电设备对象化模型,实现站内关键设备和重要环境的火情识别,以及后续故障点锁闭、影响路径切除、冗余系统启动、维修工单派送等一系列联动响应;采

用非破损安装模式的流量监测手段,配合水压等信息数据,对供水和消防水管的泄漏风险做识别判断,异常工况下直接联动管线上电磁阀,实现泄漏路径的锁闭。

5.3 对正常运营中使用度不高的灾备设备或区域监控

针对如中间风井等实用度不高的灾备设备,实现自动控制+无人值守+智能巡检的全新运维模式改造。采用机器视觉技术手段,对中间风井内气灭钢瓶压力表、环控柜状态灯和显示屏、集水井和废水井出入口,以及重要区域做状态、参数识别;采用振动和电流数据采集分析技术手段,对事故风机实现健康状态在线监测;采用电流和水位数据采集分析技术手段,对水泵运行实现状态判断和智能控制。综合以上手段实现风、水、电、环境全方面的智能监控,可完全替代人工巡检。

5.4 针对因设备老化或功能升级产生的车站机电控制系统大修改造

使用全新的车站机电设备集成控制架构理念,以及边缘控制器的泛接口互联能力、机电设备对象化模型便捷应用优势,可摆脱既有信息丢失、多厂商协调困难、干扰日常运营风险等制约,在可控周期内,安全、有序地完成既有监控功能的替换和智能化升级目标。在实际替代案例中,一个标准地下站的机电系统大修改造,采用新的方案和技术,可在累计24 h(有效工作时间)内完成整体改造升级,同时可实现改造周期内对日常运营无干扰,达到无感改造要求。

6 结语

未来的车站机电设备控制将从传统的独立、单点的简单操作,转变为面向互联网、人工智能的集中化、智能化的复杂控制,且融合度越来越高。城市轨道交通经历了若干年的发展,受制于专业的壁垒和限制,系统融合度仍然存在许多改进空间。车站机电系统只是结合终端设备的综合控制做出的一次基于底层控制逻辑的调整,在其他大专业系统中,仍然还有许多融合要求值得进一步探讨研究。

参考文献

[1] 毕湘利. 依托数字化转型推进上海地铁高质量发展[J]. 城市

轨道交通研究, 2023, 26(11): 彩12.

BI Xiangli. Relying on digital transformation to promote high quality development of Shanghai metro[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(11): C12.

[2] 葛世平. 基于边缘控制逻辑的车站机电设备监控系统一体化设计[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(7): 72.

GE Shiping. Integrated design of station electromechanical equipment monitoring system based on edge control logic[J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(7): 72.

[3] 张冰. 基于BIM的地铁车站机电设备的运维节能管理[D]. 上海: 上海交通大学, 2016.

ZHANG Bing. Energy-saving management of electromechanical equipment in subway station based on BIM[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2016.

[4] 申樟虹, 乔志忠, 刘潇洋, 等. 城市轨道交通车站机电设备智能运维及能源管理系统[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(增刊2): 131.

SHEN Zhanghong, QIAO Zhizhong, LIU Xiaoyang, et al. Intelligent operation and maintenance and energy management system of electromechanical equipment in urban rail transit station[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(S2): 131.

[5] 陆一, 刘洪义. 无锡地铁综合监控系统云改造方案[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(增刊2): 134.

LU Yi, LIU Hongyi. Cloud transformation scheme of Wuxi subway integrated monitoring system[J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(S2): 134.

[6] 田茂伟. 城市轨道交通主、备用运营控制中心架构设计优化[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(9): 264.

TIAN Maowei. Optimization of OCC and BOCC architecture design for urban rail transit[J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(9): 264.

[7] 孟鸿飞. 新一代城市地下基础设施运行综合监测系统集成研究[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(7): 312.

MENG Hongfei. Integration research on next generation comprehensive monitoring system for urban underground infrastructure operation[J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(7): 312.

[8] 叶东, 郑杰, 代一平, 等. 计及指标重要度的地铁供电设备健康状态分级评估方法[J]. 都市快轨交通, 2024, 37(2): 116.

YE Dong, ZHENG Jie, DAI Yiping, et al. Health status grading evaluation method of subway power supply equipment considering index importance[J]. Urban rapid rail transit, 2024, 37(2): 116.

· 收稿日期: 2025-02-10 修回日期: 2025-03-14 出版日期: 2025-05-10

Received: 2025-02-10 Revised: 2025-03-14 Published: 2025-05-10

· 通信作者: 葛世平, 正高级工程师, 59435501@qq.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