

车站环境与设备监控系统组网优化及多重冗余方案研究*

徐 深 徐卫峰 李 兵 张长开 石祥建 卢海松 王哲蓓 刘 文

(南京南瑞继保电气有限公司, 211102, 南京)

摘 要 [目的] 针对地下车站设备双端布局的结构特点, 为充分利用 BAS(环境与设备监控系统)的 A、B 端 PLC(可编程逻辑控制器)设备配置, 并最大程度增加系统冗余程度, 特对车站环境与设备监控系统组网优化及多重冗余方案进行研究。[方法] 提出了一种地铁 BAS 和 PLC 组网优化及多重冗余实现方法。该方法通过多控制器与远程 I/O(输入/输出)无差别组网、PLC 多重冗余架构及运行策略优化, 对原有系统架构进行了改进。[结果及结论] 优化后的系统能够有效避免主端 PLC 失效后车站 BAS 系统处于失控状态的问题, 提升了系统的整体可靠性和应急联动能力。尤其是在极端情况下, 优化后的系统能够最大限度保证应急模式的稳定执行, 从而有效保障车站的运行安全。

关键词 地铁; 环境与设备监控系统; 可靠性; 结构优化; 多重冗余

中图分类号 U231.7

DOI:10.16037/j.1007-869x.20230700

Networking Optimization and Multi-level Redundancy Schemes for Station BAS

XU Shen, XU Weifeng, LI Bing, ZHANG Chang-kai, SHI Xiangjian, LU Haisong, WANG Zhebei, LIU Wen

(Nari-relays Electric Co., Ltd., 211102, Nanjing, China)

Abstract [Objective] In response to the structural characteristics of the dual end layout for underground station equipment, fully utilize the configuration of BAS (building automation system) A-end and B-end PLC (programmable logic controller) equipment, and maximize the system redundancy, a networking optimization and multi-level redundancy scheme for station BAS is investigated. [Method] A method of implementing the networking optimization and multi-level redundancy for metro BAS and PLC systems is proposed. This method improves the original system architecture through non-differentiated networking of multiple controllers and remote I/O (input/output), multi-level PLC redundancy architecture, and op-

erational strategy optimization. [Result & Conclusion] The optimized system effectively prevents station BAS from becoming uncontrollable in the event of a master PLC failure, thereby enhancing the overall system reliability and emergency response capability. In particular, under extreme conditions, the optimized system ensures the stable execution of emergency modes to the greatest extent possible, effectively safeguarding station operational safety.

Key words metro; BAS; reliability; structural optimization; multiple redundancy

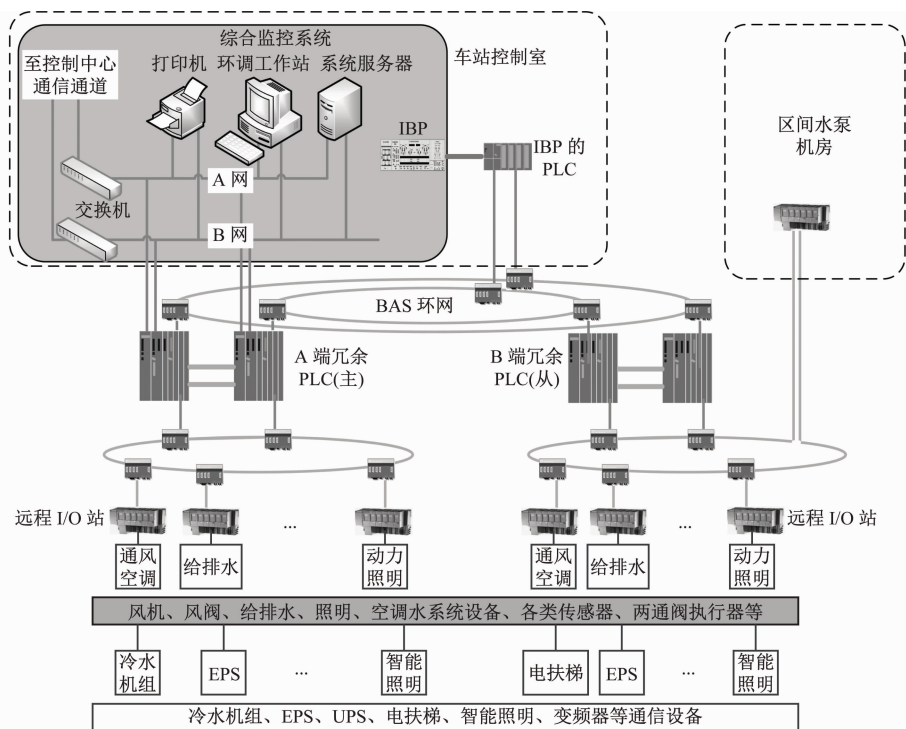
0 引言

地铁车站作为相对密闭的地下空间结构, 其 BAS(环境与设备监控系统)承担着对机电设备的有序监管和环境指标的优化调节功能。在火灾工况下, BAS 还需与 FAS(火灾报警系统)进行模式联动, 从而确保车站环境的安全与舒适^[1]。

以核心控制组件采用西门子品牌为例, 地下站 BAS 架构通常设计如下: 在车站的 A 端和 B 端(一般为上行和下行方向)各设置一套冗余控制器, 并配备相应的 I/O(输入/输出)模块, 用于监控两端的机电设备并执行通风空调模式。同时, 在车控室的 IBP(综合后备盘)上设置一套 PLC(可编程逻辑控制器), 用于接收应急模式按钮信号, 在监控平台失效时保证应急联动功能, 并驱动指示灯显示关键设备信息^[2]。图 1 为 BAS 系统西门子 PLC 系统架构。

基于上述功能描述, A 端和 B 端的 PLC 负责采集各自所连接的 I/O 点数据、执行所有设备的单点控制、进行设备间的连锁逻辑判断、与监控平台进行通信以及执行全站的所有模式, 因此对其性能和可靠性要求较高。相比之下, IBP 中的 PLC 任务相对简单, 主要负责采集 IBP 上的 I/O 点数据、与冗

* 江苏省 333 青年人才专项



注:EPS—消防应急电源;UPS—不间断电源。

图1 BAS 西门子 PLC 系统架构

Fig. 1 BAS Siemens PLC system architecture

余 PLC 进行通信以及执行应急模式联动逻辑,对其性能要求较低,但对可靠性要求同样很高。

此外,我国 PLC 也在行业内逐渐崭露头角,其系统组网架构与上述西门子架构基本一致^[3]。然而,现有 BAS 仍存在以下问题:

1) PLC 组网结构及功能实现受软硬件限制,系统可靠性有待提升;

2) PLC 控制器与监控平台的通信接口存在风险集中问题,A 端 PLC 成为制约系统可靠性的关键因素;

3) IBP 应急后备联动功能不完善,未充分利用独立 PLC 的优势来发挥其完整功能。

因此,优化和完善系统结构,充分发挥 BAS 各模块的功能,提升系统灾害应急联动的可靠性,是当前亟需解决的关键技术问题。

1 可靠性分析

1.1 模型建立

基于上一章节对典型地下车站 A、B 端 PLC 配置结构的调研结果,本文将监控功能的可靠性模型细分为 5 个核心单元:A 端控制器、A 端 I/O、B 端控制器、B 端 I/O 及 IBP 控制器。在构建模型时,遵

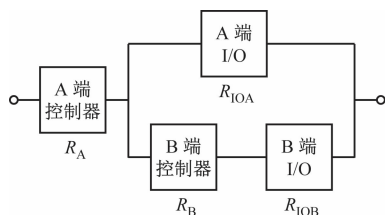
循以下原则:

- 1) 设定 A 端为主端,即靠近车控室的一端;
- 2) 在计算可靠度时,PLC 控制器选取其核心模块 CPU(中央处理器)作为考量对象;
- 3) 各端的 I/O 站点数量在计算可靠度时均简化为 1 个;
- 4) 对同类主要单元的可靠度数据进行等价处理;
- 5) 针对系统性故障,不具体考虑 I/O 模块的故障情况,而是选择冗余远程 I/O 站接口参与可靠度计算;
- 6) 监控后台设备,作为终端通信及显示设备,不在本次可靠性建模的考虑范围内;
- 7) 时间单位统一为年。

针对 4 个主要任务:A 端系统功能、B 端系统功能、系统整体功能及 IBP 应急联动功能,系统的可靠性结构呈现出串-并混联的特点。以系统整体功能和 IBP 应急联动功能为例,其可靠性框图^[4]如图 2 所示。

由图 2 可知:A 端控制器在整个可靠性模型中占据重要地位,当发生如下 3 种情况时,BAS 将失效:① A 端控制器发生故障;② A 端和 B 端所有

I/O 同时发生故障;③ A 端所有 I/O 和 B 端控制器同时发生故障。



注: R_A 、 R_B —A 端和 B 端控制器的可靠度; R_{IOA} 、 R_{IOB} —A 端和 B 端 I/O 的可靠度。

图2 系统总体可靠性框图

Fig. 2 Block diagram of system overall reliability

图3 为系统 IBP 应急联动可靠性框图。传统 IBP 盘的联动执行方案是通过 A 端 PLC 具体完成的。由图3 可知: IBP 应急联动可靠性模型是相当于在系统总体可靠性模型的基础上串联了 IBP 中的 PLC 环节。

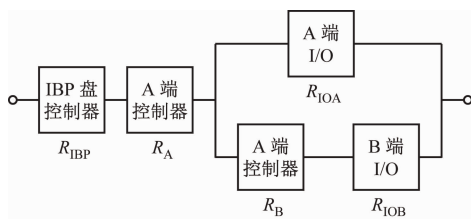


图3 系统 IBP 盘应急联动可靠性框图

Fig. 3 Block diagram of system IBP panel emergency linkage reliability

1.2 可靠度计算

针对4个任务在工作年限达到10年时的可靠度进行了计算,该计算以某PLC厂商所提供的设备MTBF(平均故障间隔时间)作为数据基础^[5],进而得出了每个单元的系统可靠度。表1为地铁BAS系统典型PLC组件的MTBF指标。

对于电子产品以及大型复杂系统与设备,通常可假定其寿命遵循指数分布,由此可得出以下转换关系^[4]:

$$T_{BF} = 1/\lambda$$

式中:

T_{BF} ——平均故障间隔时间;

λ ——故障率。

当产品的故障服从指数分布时,故障率为常数,产品可靠度 $R(t)$ 为:

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

式中:

t ——时间。

表1 地铁BAS系统典型PLC组件的MTBF指标
Tab.1 MTBF index of typical PLC components in metro BAS systems

名称	平均每年故障间隔时间 $T_{BF}/\text{年}$	平均每小时故障间隔时间 T_{BF}/h
CPU	34.50	302 220
电源	60.00	525 600
同步模块	394.90	3 459 324
以太网卡	56.10	491 436
机架	291.00	2 549 160
IBP 网卡	22.20	194 472
IBP CPU	30.90	270 684
远程 I/O 接口	48.70	426 612
DI(数字量输入)模块	105.30	922 428
DO(数字量输出)模块	105.70	925 932
AI(模拟量输入)模块	56.00	490 560
AO(模拟量输出)模块	20.20	176 952

冗余控制器根据并联模型公式计算其可靠度,见图4。



图4 并联模型可靠性框图

Fig. 4 Block diagram of parallel model reliability

$$R(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - e^{-\lambda_i t}]$$

式中:

i ——1, 2, ..., n ;

n ——并联单元数量。

当 $t=10$ 年时,结合上述计算式可得:

1) A 端和 B 端控制器 10 年可靠度 $R_A(10)$ 和 $R_B(10)$ 为:

$$R_A(10) = R_B(10) \approx 0.936 7$$

2) A 端和 B 端的 I/O 10 年可靠度 $R_{IOA}(10)$ 和 $R_{IOB}(10)$ 为:

$$R_{IOA}(10) = R_{IOB}(10) \approx 0.814 4$$

3) A 端系统 10 年可靠度 $R_{SA}(10)$ 为:

$$R_{SA}(10) = R_A(10)R_{IOA}(10) \approx 0.762 8$$

4) B 端系统 10 年可靠度 $R_{SB}(10)$ 为:

$$R_{SB}(10) = R_A(10)R_B(10)R_{IOB}(10) \approx 0.714 6$$

5) 系统总体 10 年可靠度 $R_S(10)$ 为:

$$R_S(10) = R_A(10) \{1 - [1 - R_{IOA}(10)]\} \cdot$$

$$[1 - R_B(10)R_{IOB}(10)] \approx 0.8955$$

6) 系统 IBP 的盘应急联动 10 年可靠度 $R_{SIBP}(10)$ 为:

$$R_{SIBP}(10) = R_{IBP}(10)R_S(10) \approx 0.6479$$

由上述分析可得,所有设备的采集与控制任务均通过主端 PLC 设备进行汇总处理。此架构高度依赖于主端 PLC 的可靠性,一旦主端 PLC 发生严重故障,无论对侧 PLC 控制器及远程 I/O 节点状态如何,均将导致全站 BAS 的监控功能失效。

1.3 优化可行性分析

基于此,由于 B 端系统的可靠度与 A 端系统存在一定的耦合关系,且 A 端控制器单元在可靠性框图中呈串联连接,这致使 B 端系统的可靠度低于 A 端系统。若实现 B 端系统与 A 端系统解耦,并在功能上建立平行且对等的关系,则能够在不削弱系统总体可靠度的前提下,有效提升 B 端系统的容错能力。图 5 为 B 端系统优化后的可靠性框图。

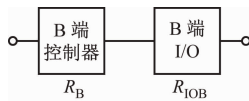


图 5 B 端系统优化后可靠性框图

Fig. 5 Block diagram of B-end system reliability after optimization

B 端系统优化后可靠度 $R_{SB,B}(10) = R_{SA}(10) \approx 0.7628 > R_{SB}(10)$

综上,B 端系统的可靠度与 A 端系统之间存在耦合关系,且 A 端控制器单元在可靠性框图中以串联方式接入,这导致了 B 端系统的可靠度相较于 A 端系统有所降低。若实现 B 端系统与 A 端系统的解耦,并在功能上构建平行且对等的关系(如图 6 所示),则能够在不降低系统整体可靠度的条件下,显著提高 B 端系统的容错性能。

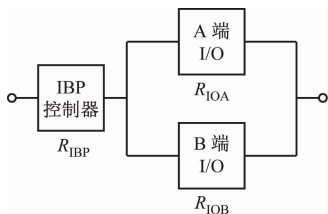


图 6 系统 IBP 优化后应急联动可靠性框图

Fig. 6 Block diagram of system IBP panel emergency linkage reliability after optimization

系统 IBP 应急联动优化后可靠度 $R_{SIBP,B}(10) = R_{IBP}(10) \{1 - [1 - R_{IOA}(10)] \cdot [1 - R_{IOB}(10)]\} \approx$

$$0.6986 > R_{SIBP}(10)$$

进一步地,为了提升系统可靠性,通过充分利用 A 端和 B 端控制器,将原有系统总体可靠性框图的串-并混联结构改进为并联-串联的冗余结构。图 7 为系统优化后的总体可靠性框图。优化前后可靠度和功能完整性对比见表 2、表 3。

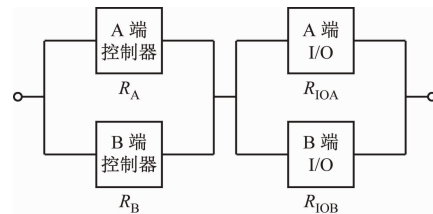


图 7 系统优化后总体可靠性框图

Fig. 7 Block diagram of overall reliability after system optimization

表 2 正常场景下优化前后可靠度对比

Tab. 2 Reliability comparison of various systems before and after optimization in normal scenario

执行系统	优化前可靠度	优化后可靠度
A 端系统 $R_{SA}(10)$	0.7628	0.7628
B 端系统 $R_{SB}(10)$	0.7146	0.7628
IBP 盘应急联动 $R_{SIBP}(10)$	0.6479	0.6986
系统总体 $R_S(10)$	0.8955	0.9617

表 3 故障场景下优化前后功能完整性对比

Tab. 3 Comparison of functional integrity before and after fault scenario optimization

场景	执行系统	优化前完整性	优化后完整性
A 端故障	A 端系统	异常	异常
	B 端系统	异常	正常
	IBP 盘应急联动	异常	正常
B 端故障	A 端系统	正常	正常
	B 端系统	异常	异常
	IBP 盘应急联动	正常	正常

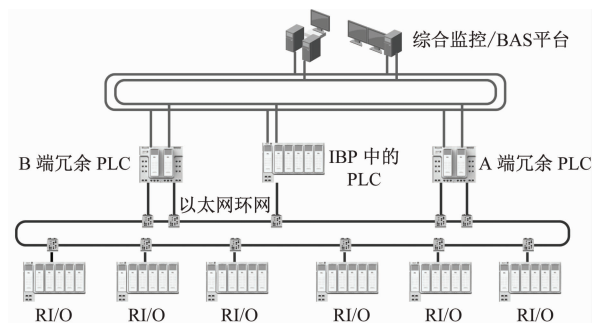
系统优化后总体可靠度 $R_{S,B}(10)$ 的计算式为:

$$R_{S,B}(10) = \{1 - [1 - R_A(10)][1 - R_B(10)]\} \cdot \{1 - [R_{IOA}(10)][1 - R_{IOB}(10)]\} \approx 0.9617 > R_S(10)$$

2 优化策略

2.1 多控制器与远程 I/O 无差别组网方法

图 8 为多控制器与远程 I/O 无差别组网架构。基于该架构,可实现以下功能:



注:RI/O—远程输入或输出。

图8 多控制器与远程I/O无差别组网架构

Fig. 8 Multi-controller and remote I/O undifferentiated networking architecture

a) IBP层间直控:在IBP中的PLC激活状态下,能够直接控制远程I/O,不依赖于A、B两端控制器,确保应急后备功能的完整性。

b) HMI双端通信:A、B两端PLC均与监控平台建立通信,实现功能解耦且互不影响。监控平台的模式指令同时发送给A、B两端PLC,由它们分别执行各自所辖机电设备的动作,如图9所示。

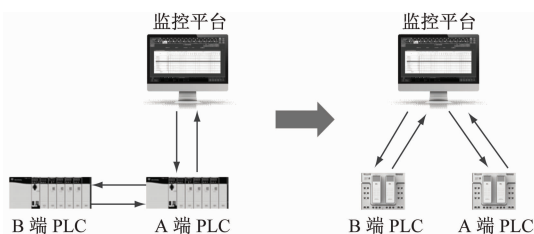


图9 双端控制器同后台通信架构改进示意图

Fig. 9 Diagram of both-end controllers and scada communication architecture improvement

2.2 BAS系统PLC多重冗余架构及运行策略

BAS系统PLC多重冗余架构下故障前后的系统运行方式如图10所示。该架构充分利用A、B两端冗余PLC,结合多控制器与远程I/O无差别组网方法,将A、B两端控制器与远程I/O共同组网,使两端控制器均具备对所有远程I/O的控制条件。当一端冗余PLC发生故障或断电时,控制器通过交互故障码快速诊断并实现通信链路逻辑重构,同时,通过动态权限裁定转移总线控制权。此时,另一端冗余PLC将承担网络上所有远程I/O的监控功能,以避免BAS功能失效。

为实现上述优化策略,需对PLC软件进行以下改造:

1) 两对PLC冗余控制器及IBP中的PLC需通过系统层网络共享详细的故障诊断信息。

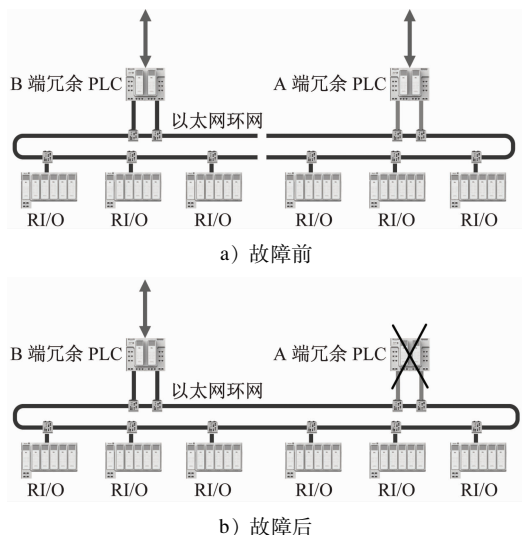


图10 BAS的PLC多重冗余架构下故障前后系统运行方式示意图

Fig. 10 Diagram of system operation mode before and after faults in PLC multi-level redundancy architecture of BAS system

2) 在应用层组态中,应结合其他控制器的故障诊断信息,对本控制器需要管辖的远程I/O节点进行判断筛选。这依赖于PLC固件的支持,并通过二次开发相应的总线报文交互逻辑接口实现。

3) IBP中的PLC需具备足够的硬件资源,以容纳全站应急工况的所有模式动作执行程序。

3 结语

综上所述,通过优化车站BAS组网方案并挖掘PLC设备潜能,提升了系统的稳定运行和应急联动可靠性。这为完善车站BAS可靠性提供了一种有益探索。产品开发人员和工程技术人员应充分考虑系统环境各方面因素,选择合适的PLC型号,并结合具体设备情况进行二次开发,以增强BAS的健壮性和稳定性,从而更好地满足设计规范要求和乘客安全出行的需求。

参考文献

- [1] 上海申通地铁集团有限公司轨道交通培训中心. 城市轨道交通车站机电设备[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2013.
Rail Transit Training Center of Shanghai Shentong Metro Group Co., Ltd. Electromechanical equipment of urban rail transit station[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2013.
- [2] 李晓菲, 冉航. 地铁通风空调系统设备管理节能分析[J]. 现代城市轨道交通, 2019(4): 15.
LI Xiaofei, RAN Hang. Energy-saving analysis on metro equipment management of ventilation and air-conditioning system[J].

- Modern Urban Transit, 2019(4): 15.
- [3] 张旭, 叶蔚, 徐琳. 城市地下空间通风与环境控制技术[M]. 上海: 同济大学出版社, 2018.
- ZHANG Xu, YE Wei, XU Lin. Ventilation and environmental control technology of urban underground space[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2018.
- [4] 曾声奎. 可靠性设计与分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- ZENG Shengkui. Reliability design and analysis[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011.
- [5] 重庆市轨道交通(集团)有限公司. 重庆轨道交通六号线支线二期工程(悦来-沙河坝)综合监控系统用户需求及技术规格书[A]. 重庆: 重庆市轨道交通(集团)有限公司, 2018: 11.
- Chongqing Rail Transit (Group) Co., Ltd. User requirements and technical specifications for the comprehensive monitoring system of Chongqing Rail Transit Line 6 Branch Line Phase II Project (Yuelai-Shaheba) [A]. Chongqing: Chongqing Rail Transit (Group) Co., Ltd., 2018: 11.
- [6] 徐深. 一种确定环境与设备监控系统中 PLC 的值班状态的方法与装置: 202010197702.9[P]. 2022-12-13.
- XU Shen. A method and device for determining PLC working state in BAS: 202010197702.9[P]. 2022-12-13.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 地铁设计规范: GB 50157—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of metro: GB 50157—2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.
- [8] 甘超莹, 甘建文, 顾野. 基于图像识别技术的城市轨道交通车站智能视频监控系统的的设计与应用[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(2): 76.
- GAN Chaoying, GAN Jianwen, GU Ye. Design and application of urban rail transit station intelligent video monitoring system based on image recognition technology[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(2): 76.
- [9] 董超, 张昱敏, 刘德伟. 城市轨道交通列车自动监控系统主备控制中心切换方案[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(5): 263.
- DONG Chao, ZHANG Yumin, LIU Dewei. Main and backup OCC switchover proposal for urban rail transit ATS system[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(5): 263.
- [10] 张亚社. 地铁车站空调机组轴承振动在线监测系统的设计[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(9): 144.
- ZHANG Yashe. Design of an online monitoring system for bearing vibration of air conditioning units in subway stations [J]. Urban Mass Research, 2020, 23(9): 144.
- [11] 楼灿灿. 地铁环境与设备监控系统设计研究[J]. 科技风, 2022, (26): 53.
- LOU Cancan. Research on the design of subway environment and equipment monitoring system[J]. Science and Technology Wind, 2022, (26): 53.
- [12] 竺方辉, 华寅飞, 方晖, 等. 地铁环境与设备监控系统节能控制的设计与实现[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(10): 46.
- ZHU Fanghui, HUA Yinfei, FANG Hui, et al. Design and implementation of BAS energy-saving control[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(10): 46.
- [13] 姚驰研. 轨道交通自动化中环境与设备监控系统的设计与应用[D]. 南京理工大学, 2020.
- YAO Chiyan. Design and application of environment and equipment monitoring system in rail transit automation [D]. Nanjing University of Science and Technology, 2020.
- [14] 薛春阳, 陈炳秋, 尤丽静, 等. 5G 和 Wi-Fi6 技术在地铁 BAS 中的应用[J]. 都市快轨交通, 2023, 36(2): 151.
- XUE Chunyang, CHEN Bingqiu, YOU Lijing, et al. Research and application of 5G and Wi-Fi6 technologies in subway BAS [J]. Urban Rapid Transit, 2023, 36(2): 151.
- [15] 胡振亚, 杨卓, 李韶光, 等. 地铁车站通风空调 BAS 控制方案优化分析[J]. 都市快轨交通, 2022, 35(5): 102.
- HU Zhenya, YANG Zhuo, LI Shaoguang, et al. Optimization analysis of BAS control scheme for ventilation and air-conditioning in subway stations [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2022, 35(5): 102.
- [16] 张子轩. 基于变频技术的地铁机电设备自动化监控系统[J]. 自动化与仪器仪表, 2021, (9): 124.
- ZHANG Zixuan. Automated monitoring system for subway mechanical and electrical equipment based on frequency conversion technology [J]. Automation and Instrumentation, 2021, (9): 124.
- [17] 黄力宁, 邓嫔. 地铁环控与设备监控系统自动生成与自动测试软件研究[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(7): 135.
- HUANG Lining, DENG Pin. Automatic generation and testing software of metro BAS system[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(7): 135.
- [18] 王旭, 谭庆慧. 基于 BAS 的地铁车站环控系统智能优化策略[J]. 建筑节能, 2023, 51(8): 120.
- WANG Xu, TAN Qinghui. Intelligent optimization strategy of subway station environmental control system based on BAS[J]. Building Energy Efficiency, 2023, 51(8): 120.
- [19] 张洪涛. 地铁环境控制系统与节能控制系统的集成方式[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(9): 85.
- ZHANG Hongtao. Integration mode of metro environmental control system and energy saving system[J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(9): 85.
- [20] 张章, 刘佳. 地铁车站环境与设备监控系统的节能优化方案[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(增刊 2): 25.
- ZHANG Zhang, LIU Jia. On energy-saving optimization scheme of BAS at metro station [J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(S2): 25.
- 收稿日期: 2023-06-20 修回日期: 2023-08-04 出版日期: 2025-07-10
Received: 2023-06-20 Revised: 2023-08-04 Published: 2025-07-10
• 通信作者: 徐深, 高级工程师, xushen@nrec.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