

轨道交通信号电源的智能健康管理系统

顾臻浩

(上海地铁维护保障有限公司通号分公司, 200235, 上海)

摘要 [目的]轨道交通信号电源系统采用双母线双不间断电源的架构,虽提高了系统冗余度,却无法实际降低元件的故障率。为了提高轨道交通信号系统的安全性和可靠性,有必要研究一套轨道交通信号电源的智能健康管理系统。实现对信号系统电源及设备的实时监控、故障诊断与预测性维护。[方法]详细阐述了轨道交通信号电源智能健康管理系统的功能需求、架构、模块组成及模块功能。该系统以信号电源系统或设备的运行状态实时监测为基础,根据信号电源的结构与工作原理,构建精确的仿真模型和寿命预测模型,通过数据采集、健康状态分析、故障诊断和故障预测等功能,实现对信号电源全寿命周期的健康管理。[结果及结论]轨道交通信号电源智能健康管理系统基于大数据处理与挖掘,采用 AHP(层次分析)法及仿真模型,能够实现对信号电源全寿命周期的智能化健康管理,有助于提高信号电源的可靠性与安全性,降低维护成本。

关键词 信号电源;智能健康管理;故障诊断;故障预测;预测性维护;仿真模型;全寿命周期健康管理;备件管理

中图分类号 U284.77+2

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.11.010

Intelligent Health Management System for Rail Transit Signaling System Power Supply

GU Zhenhao

(Telecom & Signal Branch, Shanghai Metro Maintenance Support Co., Ltd., 200235, Shanghai, China)

Abstract [Objective] The dual-bus and dual-interruptible power supply (UPS) architecture in rail transit signaling system power supply enhances the system redundancy but does not effectively reduce component failure rates. To improve the safety and reliability of the rail transit signaling system, it is necessary to develop an intelligent health management system for signal power supply, enabling real-time monitoring, fault diagnosis, and predictive maintenance of signaling system power supply and equipment. [Method] The design requirements, architecture, module composition, and functions of the intelligent health management system for rail transit signaling system power supply are elaborated in detail. The system is based on real-time monitoring of the operational status for the signaling system power supply or equipment. By understanding the

structure and operating principles of the signaling system power supply, the precise simulation and life prediction models are constructed. Functions such as data acquisition, health status analysis, fault diagnosis, and fault prediction are used to implement health management for the signaling system power supply throughout its lifecycle. [Result & Conclusion] The intelligent health management system for rail transit signaling system power supply utilizes big data processing and mining, applies the AHP (analytic hierarchy process) method and simulation models, aiming to achieve intelligent lifecycle health management of the signaling system power supply, improving reliability and safety while reducing maintenance costs.

Key words signal power supply; intelligent health management; fault diagnosis; fault prediction; predictive maintenance; simulation model; full lifecycle health management; spare parts management

轨道交通信号电源系统为信号系统的关键组成部分,其运行状态直接影响整个信号系统的稳定性与可靠性^[1-3]。

上海轨道交通已根据 TB/T 1528—2018《铁路信号电源系统设备》相关技术要求,全面采用双母线双 UPS(不间断电源)的信号电源系统架构。该架构虽提高了系统冗余度,却无法实际降低元件的故障率,增设的母线及 UPS 冗余硬件还会导致无感故障(指后续信号用户无法感知、察觉的故障)呈现上升趋势。对此,本文提出轨道交通信号电源的智能健康管理系统(以下简称“健康管理系统”),采用 AHP(层次分析法)及仿真模型,从需求分析、方案设计及功能实现等方面展开研究,以期为类似项目提供新的思路。

1 健康管理系统的功能需求

随着上海轨道交通的大规模建设、运营,信号电源系统的运维管理工作已全面进入到路网级运营阶段。截至 2023 年底,上海轨道交通信号电源系统共包括 1 300 余台信号电源屏及 900 余台 UPS,

其关键部件已到达万台规模。要实时监测如此多的关键系统和部件运行状态,只有依托大数据及人工智能等技术,采用智能化的设备运维管理方法,分析挖掘信号系统运行数据和检修数据,诊断并预测设备健康状态,才能切实保障信号系统的安全性和可靠性。

当前,信号电源系统的健康管理存在以下主要痛点:

1) 硬件产品种类多,涉及设备类型繁多,难以统一运维;运营规模上升迅速,规模庞大,难集中管理;早期与后期的信号系统设备集成了不同国家的产品,故各类子系统设备的供电需求存在较大差异。因此,与城市轨道交通其他低压电源系统相比,信号电源系统的定制化程度极高,对运维管理形成了巨大的挑战。

2) 设备运行数据孤岛效应显著,数据间难以联

动,使得管理经验沉淀困难,相关运维业务特征与数据资产价值未得到充分发挥。

3) 信号电源系统主要部件参数及维修策略如表 1 所示。为满足可靠度要求或运行环境要求,辅助指标应达到表 1 中的辅助指标要求。若辅助指标无法达到相应要求,则应具体分析原因。例如,当铅酸蓄电池内阻 R 不满足表 1 的要求时,应不仅计算其理论寿命,还要兼顾分析运行环境的影响。结合各类设备的辅助指标要求,按年度综合评估设备的运行状态后,维护单位应实施计划修或者故障修。由此可见,当前信号电源系统的设备维保管理仍主要采用修程修制的计划性维护维修策略,而非支持全生命周期的管理策略。传统的维保管理方式未对关键参数与辅助参数赋予差异化权重,也无法直接体现设备的实际健康度^[4-5]。

表 1 信号电源系统主要部件参数及维修策略

Tab. 1 Parameters and maintenance strategies of signaling power supply system main components

管理对象	关键部件	理论寿命/ 万 h	关键状态 评估规则	辅助指标	辅助指标要求	辅助状态 评估规则	维修策略
信号电源屏	切换系统	8.76	线性递减	MTBF	$\geq 6.5 \times 10^4$ h	指标突破	计划修
	功率模块	8.76	线性递减	MTBF	$\geq 6.5 \times 10^4$ h	指标突破	计划修
UPS	交直流电容	4.38	线性递减	温度	$-5 \sim 40$ °C	指标突破	计划修
	散热风扇	1.75	线性递减	温度	$-5 \sim 40$ °C	指标突破	故障修
	辅助电源板	8.76	线性递减	MTBF	$\geq 6.5 \times 10^4$ h	指标突破	计划修
储能系统	磷酸铁锂电池	8.76	线性递减	VC	$2.86 \sim 3.6$ mΩ	指标突破	计划修
	铅酸蓄电池	8.76	线性递减	R	$6 \sim 20$ mΩ	指标突破	计划修
监测系统	监测模块	6.50	指标突破				故障修

注:线性递减指根据 TB1528 系列标准线性递减地评估关键部件寿命参数(以 10 年寿命的电源屏功率模块为例,运行首年为 100 分,第二年为 90 分,以此类推,10 年后为 0 分);MTBF 为平均无故障工作时间;VC 为单体电压。

综上所述,在轨道交通信号电源系统运维过程中,对智能化、体系化健康管理的需求迫在眉睫。健康管理系统应能通过实时监测、数据分析与预测等手段,提升信号电源系统的稳定性,预防故障的发生,从而确保轨道交通的安全与高效运营。随着我国轨道交通网络的不断发展,健康管理将成为未来轨道交通运营维护的重要方向^[6]。

2 健康管理系统的架构与模块

2.1 健康管理系统的架构

健康管理系统以信号电源系统或设备的运行状态实时监测为基础,根据信号电源的结构与工作

原理,构建精确的仿真模型,通过数据采集、健康状态分析、故障诊断和故障预测等功能,实现对信号电源全寿命周期的健康管理。

健康管理系统的监测对象为信号电源屏、UPS、铅酸电池及锂电池等储能设备、监测系统。重点监测内容为信号电源屏的切换系统及功率模块工作状态,UPS 的运行温度及交直流电容(组)寿命,铅酸蓄电池的电压及内阻参数,锂电池的单体电压及整体一致性参数。

健康管理系统采用 Web(万维网)技术,基于 Winform 开发平台,其控件能较好地兼容不同种类、不同时期的信号电源硬件;其成熟的开发框架能高

效地完成大规模系统的整合,是实现集中管理、统一运维的基础。相比基于修程修制的传统健康管理方式,健康管理系统充分利用当代计算机及网络技术,高效地解决了复杂定制系统的健康管理难题,面向用户智能化、信息化的需求拓展了故障预测、维修计划及保养策略等应用功能,并向平台消息服务等第三方平台提供了数据接口。健康管理系统的整体架构如图 1 所示。

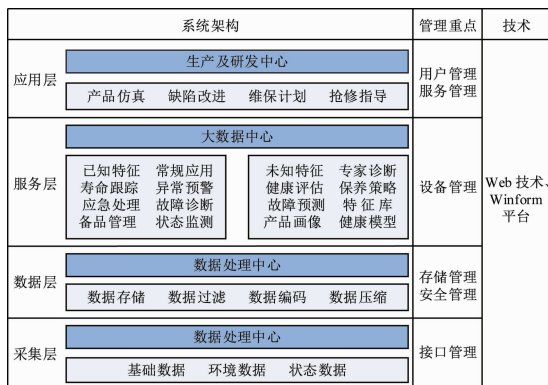


图 1 健康管理系统的整体架构图

Fig. 1 Overall architecture diagram of health management system

2.2 功能模块设计

针对监测内容,健康管理系统的功能采用模块化设计,主要由数据采集模块、健康状态分析模块、故障诊断模块、故障预测模块、备件管理及用户界面模块组成。

数据采集模块:负责实时采集信号电源的运行数据,包括电压、电流、温度等关键参数。采集到的数据将用于后续的健康状态分析、故障诊断和故障预测。

健康状态分析模块:基于采集到的数据,利用大数据分析和挖掘技术,对信号电源的健康状态进行实时评估。通过对比历史维护数据和设定寿命阈值,健康管理系统能够判断信号电源是否处于正常状态,并生成相应的健康状态报告。

故障诊断模块:当信号电源出现异常时,故障诊断模块将利用仿真模型进行故障模拟与诊断。通过对比实际运行数据与仿真数据的差异,健康管理系统能够准确识别故障类型与位置,为运维人员提供故障诊断报告和维修建议。

故障预测模块:基于历史数据和仿真模型,故障预测模块能够预测信号电源的剩余寿命和潜在故障。通过提前预警,健康管理系统能够帮助运维

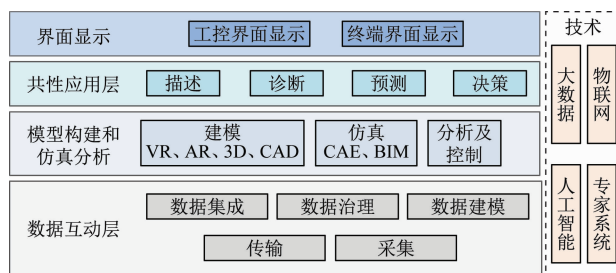
人员制定预防维修计划,降低故障发生的风险。

备件管理模块:该模块能够根据信号电源的维修记录与故障预测结果,提前准备所需的备件清单,确保在故障发生时能够迅速进行维修,减少停机风险。

用户界面模块:采用可视化触屏界面设计,人机界面友好,易于操作。用户可以通过界面查看信号电源的健康状态、故障诊断报告、故障预测结果及维护建议等信息。

2.3 健康管理应用层框架

健康管理系统的核心应用层框架如图 2 所示。监控设备对数据进行采集和传输,根据需求对数据进行集成、建模和治理,并通过分析及控制、仿真与建模,实现描述、诊断、预测和决策等功能,最终显示在工控界面和终端界面上。



注:VR—虚拟现实技术;AR—增强现实技术;3D—三维建模软件;CAD—计算机辅助设计制图软件;CAE—精确制图软件;BIM—建筑信息化模型软件。

图 2 健康管理应用层框架

Fig. 2 Application layer framework of health management system

整个功能的开发基于站内各设备监控信息的采集与处理,需要注意数据采集的全面性及长时间的大数据积累。根据采集信息进行大数据处理及专家系统智能分析,以实现对整个信号电源的智能化[7]。

3 健康管理模型与计算

3.1 模块健康分与模块健康度的计算

连接数据库后,健康管理系统会动态获取负载监控板、配电监控板、数字切换控制板、UPS、电池和模块柜的各指标数值,并根据各模块的指标值计算 x 模块的模块健康分 A_x 和模块健康度 H_x 。其中:

$$A_x = \sum_{i=1}^N [(x_i - x_{i,s}) / (BCD)] \quad (1)$$

$$H_x = (100 - E_x) \times 100\% \quad (2)$$

式中:

B ——矩阵的单位值,在本模型中为重要度,用于衡量其他元素相对于基准元素的重要程度(如果某元素被认为与基准元素同等重要,那么该元素 $B = 1$;如果某元素比基准元素重要两倍,则该元素 $B = 2$;如此类推);

C ——故障基础分,不同故障等级对应的故障基础分如表 2 所示;

D ——指标权重,可用 AHP 确定;

E_x —— x 模块的故障分;

N_x —— x 模块的指标数;

x_i —— x 模块中第 i 个指标值;

$x_{i,s}$ —— x 模块中第 i 个标准值。

每个模块会有一个故障报警阈值,根据模块本身情况设定;每当模块的值超过(或低于)设定阈值,则会将相关信息作为故障信息记录在数据库中。

信号电源系统整体健康分 S 为:

$$S = 100 - \sum_x (H_x D_x) \quad (3)$$

通过信号电源设备部件数据库及应用层的交

表 2 不同故障等级对应的故障基础分

Tab.2 Fault base scores corresponding to different fault levels

故障等级	故障定义	C
P_0	满足以下任一条件: 1) 核心功能不可用; 2) 服务不可用; 3) 资金损失; 4) 客户投诉; 5) 信号电源系统/数据安全故障	50
P_1	满足以下任一条件: 1) 次要功能不可用; 2) 服务波动; 3) 业务指标偏离预期	20
P_2	其他	10

互,通过模块健康分及健康度算法,形成实时动态的健康管理系统的策略,如图 3 所示。与原修程修制的周期性策略相比,健康管理系统的策略增加了指标权重、故障基础分、模块权重的参数,能更加高效准确地反映设备的实际状态,可为后续精准的预防性运维提供数据基础。

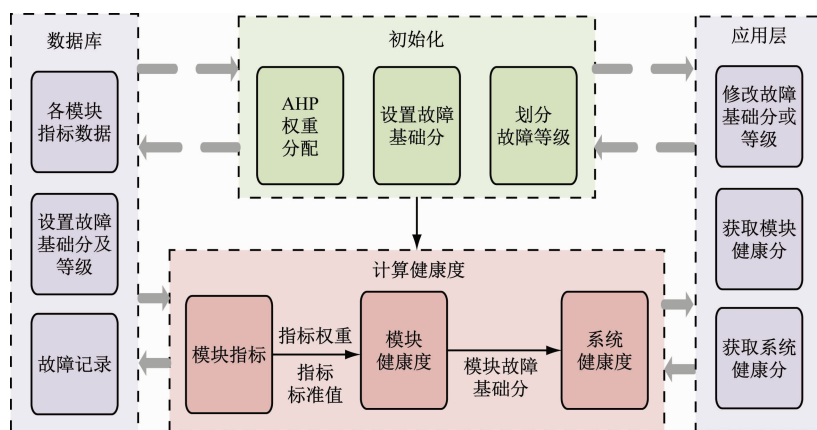


图 3 健康管理系统的策略示意图

Fig.3 Schematic diagram of health management strategy

3.2 信号电源故障分及故障等级划分

为了量化评估故障,可以为每个故障等级分配一定分数(即故障分),可以根据实际情况和运营单位的需求进行设定。

设备的总体健康度,可以通过综合考虑其所有的故障分来计算。一种简单的方法是计算所有故障分的算术平均值或加权平均值,然后将其转换为百分比或某种标准化的健康度指标。然而,由于轨道交通信号电源设备的复杂性,综合评估不仅要考虑故障分,还要考虑故障发生的频率、故障的修复

速度、设备的运行时间及环境条件等多种因素。通过对这些因素进行加权计算,得到一个能够更准确地反映设备健康状态的总健康度指标。

3.3 层次分析法

为了判断信号电源系统健康度,采用 AHP 对信号电源系统各组成部分的重要度进行比较并排序。上海轨道交通信号电源系统的层次结构模型如图 4 所示。为提升层次结构模型精度,根据信号电源屏采用的配电架构,其判断矩阵的重要度指标取值建议结合专家判断法进行连续取值,取值范围为

[1.0,10.0]。

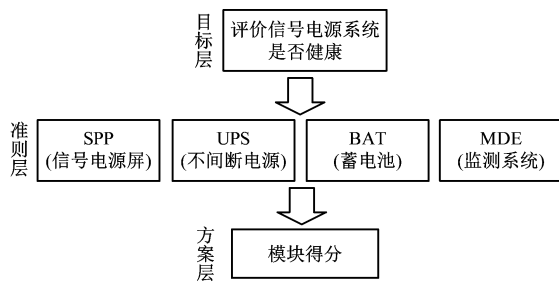


图4 上海轨道交通信号电源系统的层次结构模型

Fig.4 Hierarchical structure model of Shanghai rail transit signaling power supply system

一致性校验:计算校验系数 Q_{CR} ,若小于0.1则通过校验,说明此时的指标权值合理。即:

$$Q_{CR} = Q_{CI}/Q_{RI} \quad (4)$$

表4 信号电源系统的AHP示例表

Tab.4 AHP samples of signaling power supply system

模块	重要度指标取值				重要度指标量纲一化值				和值	权重值
	SPP	UPS	BAT	MDE	SPP	UPS	BAT	MDE		
SPP	1.0	0.5	2.0	2.0	0.250	0.263	0.235	0.200	0.948	0.237
UPS	2.0	1.0	5.0	5.0	0.500	0.527	0.588	0.500	2.115	0.529
BAT	0.5	0.2	1.0	2.0	0.125	0.105	0.118	0.200	0.548	0.137
MDE	0.5	0.2	0.5	1.0	0.125	0.105	0.059	0.100	0.389	0.097
和值	4.0	1.9	8.5	10.0	1.000	1.000	1.000	1.000	4.000	1.000

注:各模块权重值是根据既有双母线电源屏、双UPS架构,并配置磷酸铁锂蓄电池进行评估的。

将表3及表4的数据代入式(4)及式(5),计算可得 $Q_{CI}=0.023$, $Q_{RI}=0.89$, $Q_{CR}=0.026$ 。由计算结果可见, $Q_{CR}<0.1$,检验通过,表明计算得到的权重值可用。这说明判断矩阵的一致性是可以接受的,否则应对判断矩阵做适当修正。

3.4 仿真模型

根据图2所示,通过CAD、BIM等软件对信号电源设备进行物理设备建模,基于设备运行原理,充分描述设备的动态行为(如信号电源屏市电输入转换、UPS进入旁路工作等)和故障模式(如模块冗余失效、设备通信中断等)。建模尺度应充分考虑信号电源设备结构的多样性,建立分层模型框架,既可捕捉设备复杂行为,又可提升仿真精度。虚拟环境构建上,利用既有信号电源屏、UPS及蓄电池监测传感技术,获取真实的物理设备运行数据,实现物理设备与虚拟仿真模型的实时数据交互,确保物理事件能真实反映在虚拟环境中。

基于通用型CAE技术,可使用Abaqus等软件

其中, Q_{CI} 为一致性指标, Q_{RI} 为随机一致性指标。有:

$$Q_{CI} = \frac{\lambda_{\max} - m}{m - 1} \quad (5)$$

式中:

λ_{\max} ——矩阵最大特征值;

m ——影响因素个数。

信号电源系统的 Q_{RI} 取值如表3所示,相应的AHP示例如表4所示。

表3 信号电源系统的 Q_{RI} 的取值表

Tab.3 Q_{RI} values of signaling power supply system

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Q_{RI}	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46	1.49

对上述模型进行多物理场耦合仿真,收集信号电源设备传感器数据(包括温度、湿度等环境数据)并进行数据清洗、特征提取和降噪处理等预处理,为评估设备性能、预测部件寿命提供高质量的数据。在进行信号电源设备仿真时,应充分进行异构数据整合,融合来自传感器、电子维修记录等多模态数据,消除噪声和冗余,进一步提高预测的准确性和可靠性,识别潜在的故障隐患。

因此,健康管理系统以仿真模型为故障诊断模块的核心。仿真模型可以基于采集到的数据来模拟信号电源在各种工作环境和条件下的运行状态,能准确地预测各设备及部件的性能和寿命,可用于故障模拟与诊断,有助于快速定位故障原因,能提高故障诊断的准确性和效率。

3.5 寿命预测模型

寿命预测是健康管理系统中至关重要的功能。它依托于产品及元件的设计MTBF、性能退化模型及已工作时间等关键信息,旨在准确评估模块的剩

余寿命。对于已维修的模块,寿命预测基础数据应动态更新,以确保预测结果的准确性和实时性。

1) 收集产品及元件的设计 MTBF、性能退化模型及已工作时间等基础数据。

2) 根据性能退化模型,分析产品的性能退化情况,预测其未来性能变化趋势。

3) 结合设计 MTBF 和已工作时间,计算产品的剩余寿命。

4) 对于已维修的模块,动态更新寿命预测基础数据,并重新进行寿命预测。

5) 输出寿命预测结果,为产品的维护和管理提供决策支持。

4 健康管理系统的优势

4.1 提高设备可靠性和稳定性

实时监测与预警:通过传感器和数据采集设备,健康管理系统能够实时监测设备的运行状态,及时发现设备的异常情况并发出预警信息。这有助于防止设备故障的发生,确保轨道交通系统的安全稳定运行。

故障诊断与定位:基于先进的数据分析技术,系统能够快速诊断设备的潜在故障,并精确定位故障位置。这减少了故障排查的时间,提高了故障处理的效率,降低了因设备故障导致的运营中断风险。

4.2 降低维护成本

预测性维护:通过对设备历史数据和实时运行数据的深度分析,健康管理系统能够预测设备的寿命周期和潜在故障点,从而提前制定维护计划。这种预测性维护方式避免了传统定期检修的盲目性,减少了不必要的维护成本,并提高了设备的利用率。

优化维护资源分配:健康管理系统可以根据设备的健康状况和维护需求,合理分配人力、物力和财力等维护资源。这有助于提高维护资源的利用效率,降低维护成本。

4.3 提高运营效率

减少停机时间:通过实时监测和预测性维护,健康管理系统能够降低设备故障导致的停机时间,确保轨道交通的连续运营。这有助于提高运营效率,提升乘客的出行体验。

优化运营调度:健康管理系统可以根据设备的实际运行情况和维护计划,为运营调度提供数据支持,提高运营效率和服务质量。

4.4 提升决策支持能力

数据驱动决策:健康管理系统生成的设备健康报告及故障预测报告等,为管理层提供了丰富的数据支持。这些数据有助于管理层制定更科学的资产管理策略、运营计划和维修策略。

提高管理效率:健康管理系统支持远程监控和管理,确保管理层可以随时查看设备的运行情况和维护记录。这提高了管理效率,降低了管理成本。

4.5 增强安全性

安全隐患及时发现:健康管理系统持续监控设备的运行状态,能够及时发现潜在的安全隐患。这有助于管理层及时采取措施消除隐患,保障财产和人身安全。

提升应急响应能力:在设备发生故障时,健康管理系统能够迅速提供故障信息和定位信息,为应急响应提供有力支持。这有助于缩短故障处理时间,降低故障对轨道交通系统的影响。

4.6 促进资源节约与环境保护

节能减排:通过优化设备的使用和维护策略,健康管理系统有助于降低轨道交通系统的能源消耗和排放。这符合当前绿色发展的理念,有助于推动轨道交通行业的可持续发展。

5 结语

本文介绍了健康管理系统的的设计理念、系统架构、关键技术及应用效果。该系统能够实现对信号电源的实时状态监测、故障诊断及预测性维护,为轨道交通的安全运行提供了有力保障。未来,随着人工智能及物联网等技术的不断发展,健康管理系统将在轨道交通领域发挥更加重要的作用,为轨道交通行业的可持续发展提供有力支持。

参考文献

- [1] 肖旭慧. 城市轨道交通信号系统新技术发展现状与展望研究[J]. 运输经理世界, 2022(14): 89.
XIAO Xuhui. Research on the development status and prospect of new technology of urban rail transit signaling system[J]. Transport Business China, 2022(14): 89.
- [2] 李聪. 地铁信号系统智能运维方案设计[J]. 铁道通信信号, 2019, 55(2): 86.
LI Cong. Design of intelligent operation and maintenance plan of subway signaling system[J]. Railway Signalling & Communication, 2019, 55(2): 86.

(下转第 52 页)

法工作。在这种情况下,故障列车原先锁闭的资源也无法通过信号系统自动释放,所有资源的锁闭和释放只能依靠人工确认,行车组织也将直接降级为人工调度模式,进而对日常运营造成巨大影响。故在信号系统需要通过 WLAN(无线局域网)+LTE(长期演进)双制式通信及双网冗余设计等有效技术手段,来确保车-地无线通信可靠与稳定^[7]。

2) 轨旁 ATP 设备根据所收 ID 信息来计算降级运行列车包络的尾部位置,进而释放线路资源。因此,折返线、存车线及站台等处的信标应合理布置,不仅要满足 CBTC 模式下列车的定位需求,还要确保列车停稳前最后报告的 ID 信息足以让轨旁 ATP 设备判断列车尾部已出清岔区,并及时释放道岔资源。若信标布置不合理,则列车可能实际已出清岔区,但轨旁 ATP 设备却根据收到的 ID 信息判断列车包络尾部位置仍位于岔区,从而造成道岔被长时间锁死,影响运营效率。

参考文献

- [1] 马伟杰,邢艳阳.城市轨道交通信号系统次级列车检测方法优化方案[J].城市轨道交通研究,2022,25(9):177.
MA Weijie, XING Yanyang. Optimization solution of secondary train detection method in urban rail transit signaling system[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(9): 177.
- [2] 李永康.简化CBTC系统次级列车检测设备和信号机的可行性[J].城市轨道交通研究,2017,20(增刊1):52.
LI Yongkang. Feasibility of simplifying auxiliary train detection equipment and signals for CBTC system[J]. Urban Mass Transit, 2017, 20(S1): 52.
- [3] 严冬,田卫刚.列车定位后备系统模型研究[J].铁路技术创新,2017(5):61.
YAN Dong, TIAN Weigang. Research on the model of train positioning reserve system[J]. Railway Technical Innovation, 2017(5): 61.
- [4] 李宇辉,邓建芳,钱世嘉.地铁应急处置后备定位系统的研究及开发[J].现代城市轨道交通,2022(6):26.
LI Yuhui, DENG Jianfang, QIAN Shijia. Research and development of backup location system for emergency response to metro interlocking failure[J]. Modern Urban Transit, 2022(6): 26.
- [5] 王磊.不同次级列车定位方案在TACS系统中的适用分析[J].中国高新科技,2023(8):28.
WANG Lei. Analysis for applicability of different secondary train positioning solution in TACS system[J]. China High-Tech, 2023(8): 28.
- [6] 吴杰.城市轨道交通信号系统次级列车定位技术发展研究[J].城市轨道交通研究,2021,24(11):37.
WU Jie. Research on urban rail transit signaling system secondary train positioning technology development[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(11): 37.
- [7] 柴娟,吴敏.基于信标的列车次级定位系统应用研究[J].城市轨道交通研究,2021,24(11):112.
CHAI Juan, WU Min. Application of beacon-based train secondary positioning system[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(11): 112.
- 收稿日期:2024-03-18 修回日期:2024-05-31 出版日期:2024-11-10
Received:2024-03-18 Revised:2024-05-31 Published:2024-11-10
· 通信作者:顾家泉,工程师,1580324015@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
- ~~~~~
- (上接第47页)
- [3] 李传建.城市轨道交通信号智能运维系统的设计与应用[J].设备管理与维修,2023(8):10.
LI Chuanjian. Design and application of intelligent operation and maintenance of urban rail transit signal system[J]. Plant Maintenance Engineering, 2023(8): 10.
- [4] 雷晶晶,李秋红,陈立宝,等.动力锂离子电池管理系统的研究进展[J].电源技术,2010,34(11):1192.
LEI Jingjing, LI QiuHong, CHEN Libao, et al. Review on power Li-ion battery management system[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2010, 34(11): 1192.
- [5] 周伟光.基于STM32的工业锂电池前端集中监控管理系统[D].武汉:华中科技大学,2014.
ZHOU Weiguang. A STM32-based centralized front-end industrial lithium-ion battery monitoring and management system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014.
- [6] 马龙.城市轨道交通信号系统智能维护监测平台研究与应用[J].铁道通信信号,2021,57(11):73.
MA Long. Study and application of intelligent maintenance support platform for signal system in urban rail transit[J]. Railway Signaling & Communication, 2021, 57(11): 73.
- [7] 邓志翔.城市轨道交通信号电源系统配置方案研究[J].城市轨道交通研究,2012,15(6):66.
DENG Zhixiang. Signal power configuration proposal on urban rail transit[J]. Urban Mass Transit, 2012, 15(6): 66.
- 收稿日期:2024-04-24 修回日期:2024-07-05 出版日期:2024-11-10
Received:2024-04-24 Revised:2024-07-05 Published:2024-11-10
· 通信作者:顾臻浩,工程师,284212209@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