

# 关于城市轨道交通系统协同及最小化的思考

陈 光

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 430063, 武汉)

**摘 要** [目的] 当前城市轨道交通系统存在信息孤岛、协同效率低下等问题, 难以满足数字化转型和高安全性、高自动化水平的需求。为解决这些问题, 须对机电系统高效协作和最小化问题进行深入研究。[方法] 分析了城市轨道交通系统的现状, 包括系统构成、接口现状及协同最小化案例, 并提出了系统协同及最小化发展的规划和实施路径。[结果及结论] 随着数字化转型和智慧城市轨道交通建设的推进, 系统协同及最小化将成为提升城市轨道交通效率、服务质量和安全性的重要手段, 具有广阔的应用前景。

**关键词** 城市轨道交通; 系统; 协同; 最小化

**中图分类号** U231.7

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2025.03.032

## Thoughts on Coordination and Minimization of Urban Rail Transit Systems

CHEN Guang

(China Railway Fourth Survey and Design Institute Group Co., Ltd., 430063, Wuhan, China)

**Abstract** [Objective] Current urban rail transit system faces issues such as information silos and low coordination efficiency, which hinder the ability to meet the demands for digital transformation, high safety, and high automation level. To address these problems, an in-depth study of the efficient collaboration and minimization of electromechanical systems is required. [Method] The current state of urban rail transit systems is analyzed, including system composition, interface status, and case studies of coordination minimization. A development plan and implementation path for system coordination and minimization are proposed. [Result & Conclusion] With the advancement of digital transformation and smart urban rail transit construction, system coordination and minimization will become important means to enhance the efficiency, service quality, and safety of urban rail transit, offering broad application prospects.

**Key words** urban rail transit; system; coordination; minimization

轨道交通线路总长度 11 224.14 km。根据“十四五”规划和 2035 年远景目标纲要, 至 2035 年预计新增城市轨道交通运营里程 3 000 km, 平均每年新增运营里程约 200 km, 未来城市轨道交通建设仍保持高速增长态势。

在早期的城市轨道交通建设过程中, 各系统主要围绕实现自身功能进行设计与接口内容传递。然而, 在当前及未来的数字化转型、高安全性需求和高自动化水平背景下, 这种建设模式难以满足控制系统间的高效协作以及信息化系统数据挖掘效益的提升。因此, 如何打破各核心系统间的壁垒, 实现互信与系统最小化, 成为影响未来城市轨道交通系统高效协作、升级迭代与健康发展的关键因素, 亟须深入规划与探讨。

## 1 城市轨道交通系统现状

当前, 城市轨道交通的核心系统主要由车辆系统、信号系统、通信系统、站台门系统及综合监控系统等组成。这些系统间存在信息交互, 共同协作以完成特定功能和安全防护, 且系统架构已发展成熟, 协作运行稳定。然而, 各系统间存在严格的物理接口划分, 设计、研发和建设阶段相对封闭, 内部运行机制不对外开放, 导致在城市轨道交通核心系统中形成了逻辑控制和信息共享的孤岛。这直接影响了系统间的协同效率、RAMS(可靠性、可用性、可维护性、安全性)匹配水平以及冗余设备的配置。

近年来, 针对上述问题及需求, 部分城市和工程线路已开始尝试进行适应核心系统新生态的相关研究与探索, 如武汉地铁 5 号线、青岛地铁 6 号线和北京地铁 11 号线等。

### 1.1 城市轨道交通系统构成现状

为确保线路的高效运转和安全运营, 城市轨道交通需要构建由多个系统组成的运营保障体系, 以应对复杂的运营场景和任务。如图 1 所示, 整体系统构成按物理位置可分为中心设备、车辆基地设

近年来, 我国城市轨道交通大力发展, 截至 2023 年 12 月, 中国内地累计有 55 个城市投运城市

备、车站及轨旁设备以及列车设备。不同系统根据业务需求在不同地点部署相关设备,同时各系统又包含数据存储设备、控制单元设备及执行设备等,通过网络传输构成完整系统。然而,当前城市轨道交通

交通系统整体缺乏完备的规划,模块及子系统间存在功能重叠且未进行充分融合与协同,导致系统数量及设备部署较多,整体系统结构相对复杂繁琐。

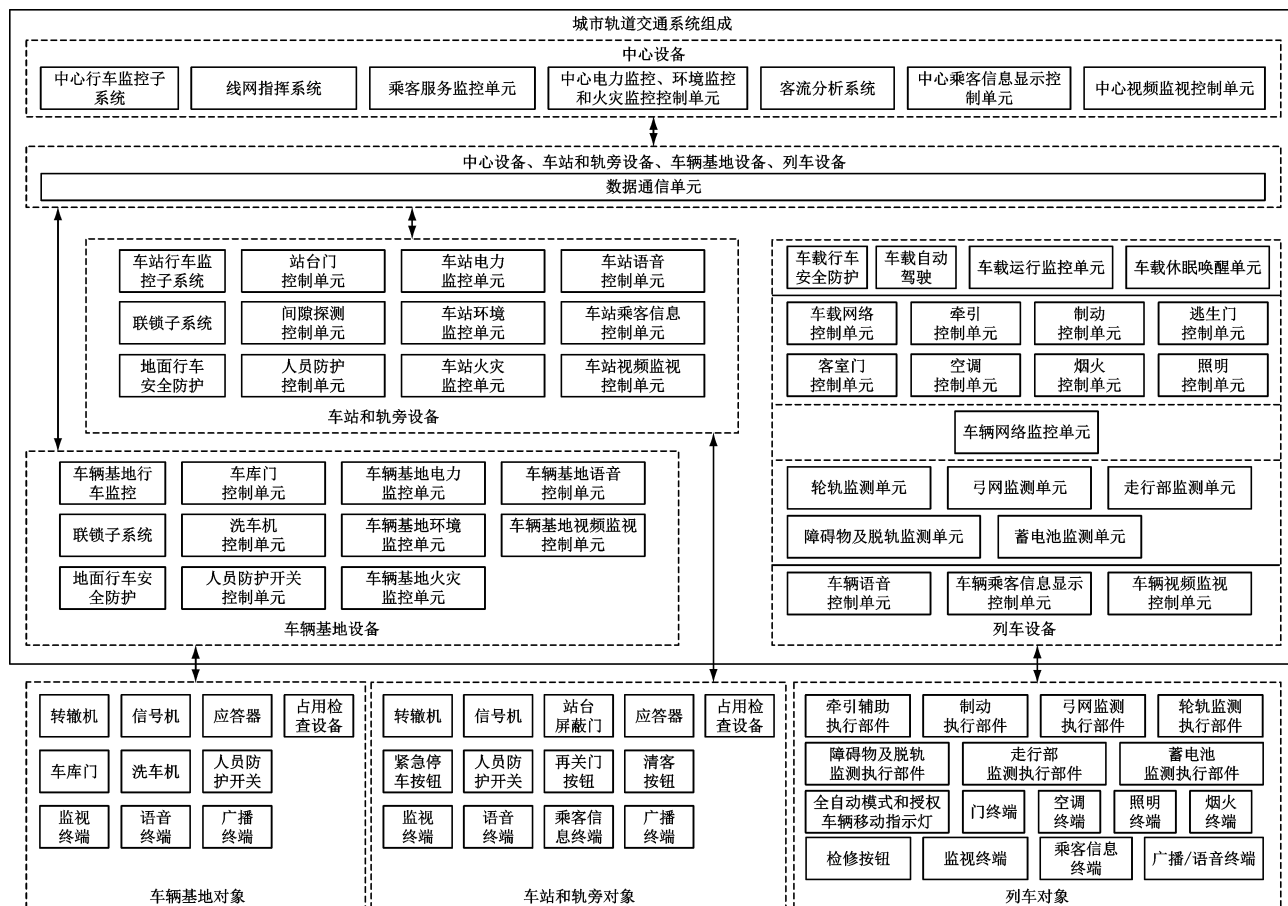


图1 城市轨道交通系统组成

Fig. 1 Composition of urban rail transit system

## 1.2 城市轨道交通系统接口现状

图2为城市轨道交通系统主要接口示意图。在此架构下,每个系统均通过物理接口与外部系统建立联络,以协同完成特定的功能。具体而言,每个系统可能与多个外部系统存在物理接口,例如信号系统便与车辆系统、站台门系统、通信系统等多个系统存在接口内容。

然而,当前的接口现状呈现出关系较为复杂的特点。接口数量及接口方式并未根据业务属性进行明确的区分与统筹,导致不同业务属性的接口相互交叉混杂。这种现状不仅增加了接口管理的难度,还导致了接口数量的繁多,不利于系统间的高效协作与整体性能的优化。

因此,针对当前城市轨道交通系统接口现状的

复杂性,有必要进行进一步的梳理与优化,以明确接口的业务属性,减少不必要的接口交叉,从而降低接口数量,提升系统间的协作效率与整体性能。

## 1.3 城市轨道交通系统协同最小化案例

针对前文所述的一系列问题,当前已有部分城市实施了系统融合的相关案例,旨在满足城市轨道交通发展的需求,适应新技术的变革,并构建新的系统生态环境。

### 1.3.1 信号系统与站台门控制单元一体化融合

在武汉地铁5号线的工程项目中,成功实施了站台门与信号系统的集成方案。该方案通过信号系统与站台门控制单元的一体化融合,有效解决了全自动运行工程中异物间隙探测功能联动、车门与站台门对位隔离以及安全性匹配等关键问题。集

城市轨道交通主要系统接口																																
						1						2	3	4	5	6	7						8	9	10							
						通信						信号	综合 监控	环境 与设备 监控	自动 售票 票	站台 门	供电						车辆	场段 工艺	云平 台							
						TX											TH	ISCS	BAS	AFC	PSD	GD						CL	GY			
						(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)											(1)				(2)	(3)	(4)	(5)	(6)		
						传输	时钟	无线 通信	广播	乘客 信息	视频 监视							变电 所	电力 监控	接触 轨	杂散 电流	供电 辅助 系统	能量 运控 系统									
专业 序号	专业名称	专业 代码	子系统 序号	子系统名称	子系统 代码	TS	CLK	RAD	PA	PIS	CCTV											可 视 化 接 地										
1	通信	TX	(1)	传输	TS			*		*	*	*	*	*		*			*	*	*	*	*		*							
			(2)	时钟	CLK			*		*	*	*	*	*	*		*			*		*	*		*							
			(3)	无线通信	RAD								*											*								
			(4)	广播	PA					*		*	*																			
			(5)	乘客信息	PIS							*	*											*	*							
			(6)	视频监控	CCTV									*												*						
2	信号	XH												*			*					*										
3	综合监控	ISCS													*	*	*		*		*			*								
4	环境与设备监控	BAS																			*											
5	自动售票	AFC																						*								
6	站台门	PSD																														
7	供电	GD	(1)	变电所																												
			(2)	电力监控																												
			(3)	接触轨																												
			(4)	杂散电流																												
			(5)	供电辅助系统																												
			(6)	能量运控系统																					*							
8	车辆	CL																														
9	场段工艺	GY																														
10	云平台																															

注：\* 表示此处有接口。

图 2 城市轨道交通系统主要接口示意图

Fig. 2 Diagram of urban rail transit system main interfaces

成后的控制单元能够直接与信号联锁和车载设备联动,显著减少了继电接口,提升了整体系统的可靠性;同时,减少了联动传输信息的环节,降低了节点故障率,增强了系统的可维护性;此外,还提高了站台门的响应速度,减少了延时和无效作业时间,从而提升了运营效率<sup>[1-2]</sup>。

### 1.3.2 车载信号系统与车辆控制系统一体化融合

随着控制系统的不断迭代升级和对运营能力的进一步提升需求,列车自主运行成套技术已成为行业运行控制系统研究的热点方向。目前,已在青岛地铁 6 号线工程中示范应用了相关创新项目和国家示范工程。该项目以车载信号系统与车辆控制系统的深度融合为特征,实现了列车运行方式由自动化向自主化的转变,构建了一种全新的系统制式。该系统集成了信号、牵引、制动、网络、防撞等多个系统,从全系统层面进行了最小化设计和功能再分配,形成了列车级别的“控制大脑”,全面提升了列车的运行、维护和智能化水平<sup>[3]</sup>。

此外,在城市轨道交通行业内,还存在其他系统融合案例,如云平台的多系统业务整合、大数据平台的多系统数据收集与数据治理等。这些案例均体现了城市轨道交通行业内系统一体化、最小化发展的趋势和需求<sup>[4]</sup>。

## 2 系统协同及最小化发展规划

针对城市轨道交通系统协同及最小化的发展,需将系统最小化发展需求作为顶层设计核心,深入剖析行业内各系统的业务属性,识别系统协作中亟待解决的关键问题。在需求驱动的基础上,依据当前系统的业务逻辑及组成现状,进行合理规划,并明确实施步骤,以此指导系统最小化发展的实施,并确定系统迭代升级的具体方向。

### 2.1 系统协同及最小化发展需求

通过对当前行业系统组成现状及相关问题的深入分析,总结出系统进一步迭代升级的主要需求,包括系统最小化需求、RAMS 匹配性需求、系统



响应速度提升需求以及数据共享与数据挖掘需求。

### 2.1.1 系统最小化的需求

系统最小化的需求主要体现在两个方面:一是系统内部逻辑单元的最小化。当前,系统内部常通过多重冗余机制来提升整体可靠性和可用性,但这也同时增加了系统的复杂度。因此,在提升 RAMS 水平时,需要平衡系统规模、冗余度以及应用工程环境。此外,系统内部架构需进一步优化,特别是在线网达到一定规模时,不同线路的同一系统应进行集约整合和再分配,以优化线网、线路资源。二是打破系统间的壁垒,实现系统间的最小化整合。在研制阶段,各系统内部原理设计相对封闭,导致不同系统在硬件或功能层面存在双重冗余,这不仅造成资源浪费,还增加了维护成本并降低了系统响应速度。

### 2.1.2 RAMS 的匹配性需求

城市轨道交通机电系统对各专业 RAMS 指标有明确要求,并根据系统参与运营的重要程度进行权重分配。近年来,随着自动化技术和人工智能技术在城市轨道交通中的广泛应用,全自动运行已成为普遍现象。该技术的关键特点是系统间耦合性更强,需要在复杂任务规约下进行系统间的协同联动和安全防护。然而,系统间 RAMS 指标要求不一致,接口可靠性等不匹配,影响了整体大系统的性能指标。通过最小化系统理念,对关键控制单元进行融合,可有效解决这些问题,并实现大系统整体性能的提升,同时优化城市轨道交通整体系统生态环境。

### 2.1.3 系统协同响应速度的需求

系统协同响应速度对列车运行的多项关键指标和行车控制性能具有决定性影响。以信号系统安全制动模型为例,紧急制动曲线是列车速度不可逾越的界限,防护在前车后方。然而,该曲线的终点 LMA(移动授权限制点)与前车之间必须预留一定的安全距离,而系统响应延时带来的位置不确定性是影响安全距离长度的重要因素之一,进而直接影响列车追踪间距。通过系统一体化及融合理念,优化控制层级和数据流,减少传输节点和缩短传输链路,可提高系统整体响应速度,进一步提升系统能力,实现运营指标的优化和提升。

### 2.1.4 数据共享及数据挖掘的需求

数据的价值在于共享和深层次挖掘,以发现发展趋势和变化规律。目前,大部分城市轨道交通已

形成线网规模,积累了海量数据。这些数据的价值已不仅限于同一领域,多维度、多层次的数据整合分析是精细化控制和管理的主要输入。以客流数据为例,客流数据包括历史客流数据、短期客流数据、实时客流数据以及断面拥挤度数据等,主要用于统计客流情况、进行客运指标统计和运营服务优化。当前智能行车调度系统进行全线网编图时,为精准匹配客运需求和线网具备的运力资源,需要进行客流数据分析和实时监控。同样地,智慧车站系统为了指引乘客出行,也需要进行客流数据分析并进行预测。由此可见,某些数据资源已成为多系统的共性需求。针对相同业务需求进行系统融合可提高数据利用效率,同时节省硬件资源和优化大系统结构。

## 2.2 多系统最小化建设规划

回顾城市轨道交通机电系统的升级迭代历程,其始终致力于保障运输安全、提升运输效率、降低建造成本及优化服务质量<sup>[5]</sup>,并不断推进系统自动化水平和系统间协同能力的提升。基于当前城市轨道交通系统的最小化需求、RAMS 匹配性需求、系统响应速度需求及数据共享需求,并结合工程实施的难易程度,多系统最小化协同程度可划分为以下4个等级:

1) 0级:系统间独立接口。此等级为系统协同最小化中的最低级别,系统间相互独立,通过传统物理接口实现必要的接口信息传输。系统内部逻辑及信息封闭不互通,业务相互独立。

2) I级:信息系统最小化。在此等级中,各系统的部分子系统进行最小化融合,主要聚焦于信息采集、数据分析子系统及非强安全相关子系统的融合。相关子系统业务属性存在交叉,对采集的数据有共性需求,但不涉及各系统的核心业务。

3) II级:控制系统最小化。此等级在信息系统最小化的基础上,进一步实现控制单元的一体化协同。主要针对需进行接口的控制单元,开展系统控制单元内部逻辑的协同设计及工作机制的开放融合。

4) III级:基于最小化的通用平台。此等级旨在打造基于最小化、多业务集成的硬件通用平台,通过该平台承载多系统业务,实现大数据共享。同时,进行控制单元的最小化融合,建立虚拟接口以互换信息,使系统间能够高度协同联动。

表1为不同等级下的系统最小化主要内涵及一

体化特征。

表 1 多系统最小化等级规划

Tab.1 Multi-system minimization level planning

最小化等级	一体化内涵	一体化特征
0 级	系统间独立接口	各个系统高度独立 系统之间通过物理接口传输必要信息 系统之间业务逻辑严格区分
I 级	信息系统最小化	各系统信息子系统进行融合 数据共享,数据互通互用 开放设备状态,实现信息子系统一体化建设
II 级	控制系统最小化	系统间 RAMS 指标高度匹配 数据共享,数据互通互用,大数据辅助决策 系统逻辑分析控制层融合协同,执行层相对独立
III 级	基于最小化的通用平台	基于通用硬件平台,承载多系统业务 实现了平台即服务的目标,功能集成、设备精简 安全、便捷、高效、绿色、经济一体化装备 通用的软硬件接口,支持不同专业、不同厂商应用系统

### 2.3 系统协同及最小化工程实施

在城市轨道交通大系统中实施系统最小化协同建设时,应遵循经济性最优、融合业务需求明确及建设次序周期的原则。根据城市轨道交通新线建设、延伸线建设及老线改造等项目进行分阶段实施,并结合线网规划有序推进。

对于新线建设,关键在于确定项目目标定位,如是否采用全自动运行技术、基于车车通信的列车运行控制或多网融合简化列车等。结合项目目标定位及最小化系统规划层级,可匹配并确定完善的建设方案。

对于既有线延伸线路,重点在于分析既有运行弊端,并针对既有线运营存在的问题在延伸线路中进行适当改造,同时确保不影响既有线运营<sup>[6]</sup>。在此情况下,引入信息系统融合最小化是较为合理的选择。

对于系统大修改造项目,需兼顾当前工程既有条件,简化系统构成并提升系统总体性能。系统最小化是此类项目的发展方向,在构建最小化系统时,应着重考虑大修改造项目,以最大化发挥最小化理念的效益。

在实施路径方面,结合城市轨道交通建设需求,在系统化协同和最小化初期,可采用集成化建设方式。通过技术谈判,对专业间接口和专业间壁

垒进行剖析和再融合。同时,建设总体目标应以数据共享、联动协同和资源整合为导向,对专业边界进行重新定义。

### 3 系统协同及最小化的应用前景

随着数字化转型、智慧城市轨道交通建设及绿色发展的推进,城市轨道交通系统的生态环境将发生深刻变化。各专业系统之间的整合与融合发展将成为趋势,通过整合多个业务重叠的子系统为一个有机整体,实现信息、资源、硬件和软件等方面的共享与协同。这将进一步促进系统的互联互通和一体化平台的打造,推动技术标准和信息共享的统一,提高整个交通系统的效率、服务质量、安全性和可靠性,进而达到提升生产力、优化生产关系的目标。

当前,都市圈轨道交通的融合发展旨在进一步提升衔接能力和优化运力资源,其中信息融合是关键。打破不同轨道交通制式之间的信息共享壁垒,在共享数据底座的基础上,对客流数据、运行计划及运营维护信息进行最小化融合,是发展都市圈轨道交通融合的首要任务。

轻量化轨道交通在提供运输服务的同时具有架构简单的特点,对系统最小化的需求强烈。车辆可进行车载信号系统和车辆控制系统的一体化融合,同时还可实现车辆感知设备和车载网络设备的融合。控制中心可进行电力调度、行车调度及环境调度的融合。基地则可进行维修作业平台、场段维修调度及信号控制系统的融合。通过系统一体化融合,可充分发挥轻量化轨道交通的优势,并减少运营维护人员。

系统协同及最小化发展顺应数字化发展潮流,未来在改造项目、线网集约化管理项目等领域同样具有广阔的应用前景。

### 4 结语

综上所述,本文对城市轨道交通系统协同及最小化进行了深入思考和研究。通过调研当前行业内系统构建现状,挖掘了未来系统发展的迫切需求及存在的弊端,并提出了系统最小化发展的思路和规划。这些研究为后续系统的迭代升级及建设提供了一定的参考。

(下转第 180 页)

- tunity of subway shield tunnel bonded steel ring with study on interfacial bond slip[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(10): 26.
- [2] 陈春红, 周奇辉, 邢玉芳, 等. 软土地层地铁盾构隧道管片收敛变形整治方案[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(9): 185.  
CHEN Chunhong, ZHOU Qihui, XING Yufang, et al. Improvement scheme for metro shield tunnel segment convergence deformation in soft soil stratum[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(9): 185.
- [3] 顾志敏, 吴哲. 城市轨道交通盾构隧道变形超限的壁后注浆加固治理技术[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(5): 61.  
GU Zhimin, WU Zhe. Research on wall grouting reinforcement measures for urban rail transit shield tunnel deformation exceeding limit[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(5): 61.
- [4] 魏纲, 张书鸣, 崔允亮, 等. 地面堆载下盾构隧道不同加固方法的加固效果研究[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(增刊1): 85.  
WEI Gang, ZHANG Shuming, CUI Yunliang, et al. Reinforcement effect of various methods for shield tunnels under ground surcharge[J]. Tunnel Construction, 2022, 42(S1): 85.
- [5] 柳献, 张浩立, 唐敏, 等. 内张钢环加固盾构隧道结构承载能力的试验研究—半环加固法[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(3): 131.  
LIU Xian, ZHANG Haoli, TANG Min, et al. Experimental study on bearing capacity of shield tunnel structures reinforced by inner tensioned steel ring half ring reinforcement method[J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51(3): 131.
- [6] 刘梓圣, 张冬梅. 软土盾构隧道芳纶布加固机理和效果研究[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(5): 155.  
LIU Zisheng, ZHANG Dongmei. The mechanism and effects of AFRP reinforcement for a shield tunnel in soft soil[J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51(5): 155.
- [7] 柳献, 张雨蒙, 王如路. 地铁盾构隧道衬砌结构变形及破坏探讨[J]. 土木工程学报, 2020, 53(5): 118.  
LIU Xian, ZHANG Yumeng, WANG Rulu. Discussion on deformation and failure of segmental metro tunnel linings[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(5): 118.
- [8] 姚志雄, 吉磊, 刘耀星. 交通荷载对浅埋群洞隧道的动力影响分析[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(3): 107.  
YAO Zhixiong, JI Lei, LIU Yaoxing. Analysis of the dynamic effect of traffic load on shallow multi-tube tunnel structure[J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(3): 107.
- [9] 贾永刚, 阳卫卫, 吴帆, 等. 装配整体式盾构管片结构及力学性能研究[J]. 都市快轨交通, 2023, 36(5): 59.  
JIA Yonggang, YANG Weiwei, WU Fan, et al. Structure and mechanical properties of assembled monolithic segments in shield tunneling[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2023, 36(5): 59.
- 收稿日期: 2022-12-05 修回日期: 2023-02-21 出版日期: 2025-03-10  
Received: 2022-12-05 Revised: 2023-02-21 Published: 2025-03-10  
• 通信作者: 徐浩, 高级工程师, hnlake2009@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
- ZHANG Huagang. Analysis and suggestions of ATS fusion scheme for comprehensive monitoring and signal[J]. Science and Technology Innovation and Application, 2023, 13(18): 153.
- [5] 彭其渊, 罗洁, 文雯, 等. 区域多制式轨道交通运输组织协同模式研究[J]. 交通运输工程与信息学报, 2020, 18(4): 1.  
PENG Qiyuan, LUO Jie, WEN Wen, et al. Research on regional multi-standard rail transit organization collaboration mode[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering and Information Technology, 2020, 18(4): 1.
- [6] 陈光. 基于贯通运营的地铁延伸段信号系统设计与改造[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(9): 139.  
CHEN Guang. Design and reform of metro signal system on the extension line based on official operation[J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(9): 139.
- 收稿日期: 2024-01-03 修回日期: 2024-02-23 出版日期: 2025-03-10  
Received: 2024-01-03 Revised: 2024-02-23 Published: 2025-03-10  
• 通信作者: 陈光, 高级工程师, 531043042@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
- [1] 邹海平. 城市轨道交通全自动运行系统站台门与信号系统集成方案研究[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(6): 261.  
ZOU Haiping. Research on FAO system platform screen door and signaling system integration scheme[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(6): 261.
- [2] 崔惠珊, 盖克荣, 李雪枝, 等. FAO 下信号系统与站台门一体化方案[J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20(5): 62.  
CUI Huishan, GAI Kerong, LI Xuezhi, et al. Integrated design scheme of signaling system and platform screen door under FAO[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(5): 62.
- [3] 孔军, 宋丹. 城市轨道交通车-车通信系统融合设计[J]. 现代城市轨道交通, 2021(9): 13.  
KONG Jun, SONG Dan. Vehicle-to-vehicle communication system integration design of urban rail transit[J]. Modern Urban Rail Transit, 2021(9): 13.
- [4] 张华刚. 综合监控与信号 ATS 融合方案分析及建议[J]. 科技创新与应用, 2023, 13(18): 153.