

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2026.03.011

城市轨道交通云信号系统 关键技术研究

余 斌¹, 高晓菲²

(1. 杭州市地铁集团有限责任公司, 杭州 310020; 2. 浙江众合科技股份有限公司, 杭州 310051)

摘 要: 随着我国城市轨道交通建设的快速推进, 线路网络化布局不断完善, 智能化运营需求持续提升, 既有传统信号系统在资源利用率、灵活扩展性等方面的短板日益凸显, 已难以适配现代城市轨道交通高密度、高可靠性、高效运维的运营要求。针对此问题, 对城市轨道交通云信号系统的架构设计、关键技术进行研究。首先, 采用对比分析方法, 系统梳理传统信号系统的设计局限与使用痛点, 重点剖析云信号系统的整体架构组成, 结合城市轨道交通运营实际需求, 提出针对性的云信号系统架构设计思路; 然后, 深入研究支撑系统设计与实施的云化 SIL4 安全技术、车地安全实时通信技术、传统信号业务应用与安全云平台的适配技术等关键核心技术; 最后, 结合工程实践数据, 总结云信号系统相较传统信号系统的应用优势。研究结果表明: 与传统信号系统相比, 云信号系统可有效缩短既有线路信号系统改造周期约 10%, 有效降低全生命周期成本约 30%。研究成果可以为城市轨道交通信号系统的升级迭代以及云信号系统的实施应用提供理论支撑与实践参考。

关键词: 城市轨道交通; 云信号; 云平台; 信号系统

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2026)03-0087-06

Key Technologies for Cloud-based Signaling System in Urban Rail Transit

YU Bin¹, GAO Xiaofei²

(1. Hangzhou Metro Group Co., Ltd., Hangzhou 310020; 2. UniTTEC Co., Ltd., Hangzhou 310051)

Abstract: With the rapid advancement of urban rail transit construction in China, the networked layout of lines has been continuously improved, and the demand for intelligent operation has been steadily rising. However, the shortcomings of the existing traditional signaling system in terms of resource utilization and scalability have become increasingly prominent, making it difficult to meet the operational requirements of modern urban rail transit, such as high density, high reliability, and efficient operation and maintenance. In response to this problem, the core purpose of this study is to clarify the development path of the next-generation signaling system empowered by cloud platforms, break through the application bottlenecks of the traditional signaling system, and provide theoretical support and practical reference for the upgrading and iteration of urban rail transit signaling systems. In the research process, the comparative analysis method was adopted to systematically sort out the architectural limitations and application pain points of the traditional signaling system. This study focuses on analyzing the overall architectural composition of the cloud-based signaling system, and proposes targeted architectural design

收稿日期: 2026-01-27 修回日期: 2026-03-16

第一作者: 余斌, 男, 硕士, 高级工程师, 从事城市轨道交通规划与管理, yubin@hzm metro.com

通信作者: 高晓菲, 女, 硕士, 高级工程师, 从事城市轨道交通信号系统研究设计, gaoxiaofei@unittec.com

基金项目: 浙江省科学技术厅(2025C01030)

引用格式: 余斌, 高晓菲. 城市轨道交通云信号系统关键技术研究[J]. 都市轨道交通, 2026, 39(3): 87-92.

Yu Bin, Gao Xiaofei. Key technologies for cloud-based signaling system in urban rail transit[J]. Urban rapid rail transit, 2026, 39(3): 87-92.

ideas and key technology application schemes for the cloud-based signaling system in combination with the actual operational needs of urban rail transit. In addition, in-depth research is conducted cloud-based SIL 4 safety technology, safe real-time train-to-ground communication technology, and adaptation technology between traditional signaling service applications and secure cloud platforms. The research results indicate that the cloud-based signaling system can effectively make up for the deficiencies of the traditional signaling system, improve the operational efficiency and maintenance level of the signaling system, and provide strong support for the networked and intelligent development of urban rail transit. The findings provide a useful reference for the design, optimization, and engineering implementation of cloud-based signaling systems, and may support the transition of urban rail transit signaling systems toward cloud-based and intelligent architectures.

Keywords: urban rail transit; cloud-based signaling; cloud platform; signaling system

随着技术的不断发展,城市轨道交通信号系统从传统的基于通信的列车控制(communication based train control, CBTC)系统发展到互联互通的 CBTC 系统,再发展到全自动运行的 CBTC 系统,虽然系统在安全性、可靠性、自动化程度、运输效率等方面取得了很大的进步,但从信号系统的本质分析,这些创新应用依旧沿用传统的设计逻辑,在设备组成、网络架构、接口等具体工程设计及运营维护方面并未取得突破。

在大数据云计算、信息化、集成电路技术的快速发展趋势下,学者们开展了下一代信号系统架构方面的研究。2021 年,欧洲铁路行业发布了白皮书^[1],提出了一种“通用安全计算平台”的概念,目标是车载和轨旁系统打造一个统一的技术框架。中国城市轨道交通协会发布的《中国城市轨道交通智慧城轨建设纲要》^[2],也提纲挈领地提出了以城轨云为基础的新型城市轨道交通体系,并对信号系统提出了全面自动化以及互联互通等更高的要求,然而信号系统对安全性、实时性、可靠性的要求较高,通用的云技术无法满足信号系统 SIL4(safety integrity level 4)级的安全和实时性要求,而且也缺少基于安全云的信号系统示范应用^[3-4]。与此同时,现有信号系统虽能保障列车运行安全与运营效率,但在后续改造升级阶段普遍存在技术门槛高、投入成本大等难题,目前既有运营线路的改造诉求极为紧迫,如何通过技术创新,实现系统集成化、智能化、控制软件与硬件载体解耦,并大幅降低全生命周期成本,已成为我国城市轨道交通未来发展的核心命题。

基于此,本文提出云信号系统架构设计思路,重点适配既有线路改造的紧迫需求,突破传统架构固化、资源利用率低的局限,降低既有线路改造的技术门槛,实现架构与工程实际的深度适配,从设计层面破解改造难题,研究云信号系统落地的核心技术瓶颈,整合云化 SIL4 安全、车地安全实时通信及信号业务与云

平台适配等核心技术,形成可落地、低成本的技术体系,打破传统信号系统改造中技术适配性不足、改造难度大的痛点,为既有线路高效改造工程化实施提供技术支撑。

1 云信号系统架构设计

传统信号系统的 SIL4 应用,需要信号厂家从硬件设计阶段开始全程进行研发并完成安全认证,开发周期长,成本代价大,而基于虚拟化或者云化的云信号系统,主要通过软件逻辑去实现 SIL4,在对软件和硬件的依赖关系解耦后,使用标准化的开发接口可以快速实现 SIL4 应用的开发,从而大大降低开发成本和应用周期,而且对于终端用户而言,他们可以把专用的备品备件更换成更通用的服务器,空间占用更少,用电量也更少。

在系统架构部署上,传统信号系统采用中心-车站-轨旁三级分布式架构,以车站级独立控制为核心,实现联锁(computer based interlocking, CBI)、区域控制(zone controller, ZC)、自动列车监控(automatic train supervision, ATS)子系统等相关功能的本地化部署与运行,如图 1 所示。传统信号系统各车站系统相对独立,在区域控制、可靠性隔离等方面具备一定优势,但各车站系统间信息交互相对有限,存在一定程度的信息协同不足问题,不利于全局状态感知与资源统筹利用,而且在传统信号系统中,联锁设备的辖区划分受到既有设备连接关系的严格限制,这种固定化的连接方式使得系统的升级改造面临诸多困难。由于采用集中化的设备布置方案,导致现场线缆数量庞大且布线复杂,而系统应用容量在设计之初就已确定,在改造时缺乏灵活性,当遇到线路需要延伸或采用分期开通方案时,系统的弹性扩展能力明显不足,在系统扩容时,如果选择新增控制器设备,往往会造成资源闲置和投资浪费,而如果采用利旧方案,现有设备的处

理能力又难以满足新的需求,因此,无论采用哪种扩容方式,都会对既有系统的正常运行产生重大影响,这种影响往往涉及系统性能、可靠性和安全性等多个方面。

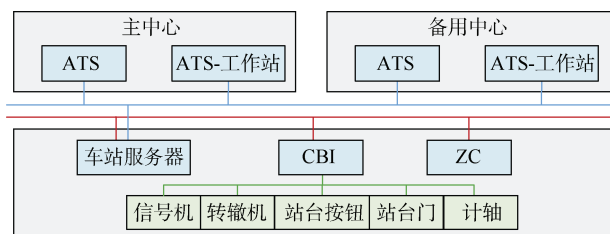


图1 传统信号系统架构及部署

Figure 1 Architecture and deployment of traditional signaling systems

云信号系统是新一代轨道交通信号技术,采用云-边缘两级集中控制架构,系统将核心控制逻辑,如联锁、区域控制、自动列车监控子系统等均上移至云数据中心,轨旁仅保留智能控制器与通信设备,通过5G和工业以太网等实现车-云或者车-车协同通信,支持跨线以及跨城的统一管控与资源共享^[5]。相对于传统基于专用嵌入式单板的系统,云信号系统采用通用型服务器替代地面设备中的计算单元,通过虚拟机的方式在服务器上部署多个业务应用,从而减少专用硬件板卡的数量、降低系统成本^[6-7]。车站部署轨旁电子控制单元(electronic control unit, ECU),用于实现轨旁设备采集和驱动,提供基础联动功能,并实现高效的车地站台门联动以及紧急情况下的列车降级运行功能。

云信号系统依赖的安全云平台采用虚拟机安全隔离不同的应用,每个虚拟机独享所需的计算资源,保障应用平稳运行。云信号系统架构及部署如图2所示,云信号系统在架构设计上,将安全逻辑计算功能与采集执行单元进行物理分离,这种设计使得应用辖区的划分具有极大的灵活性。系统可以根据实际需求进行弹性调整,无论是新增虚拟化应用还是合并现有功能,都能以较低的成本实现,同时保持高度的灵活性,满足不同场景下的应用需求^[8-9],而且轨旁电子控制单元ECU的布置方案采用与辖区独立的设计理念,这种创新的布置方式能够根据现场设备的实际情况进行智能优化。通过优化布置,不仅可以显著减少线缆的使用量,还能有效降低系统的综合建设成本和后期维护成本,实现经济效益的最大化。ECU采用成熟的全电子联锁驱采技术,这项技术的应用为系统提供了可靠的应急保障能力,在突发应急情况下,系统能够为

轨旁设备提供基础逻辑控制功能,确保列车在特殊工况下的安全运行,为应急行车提供了坚实的安全保障基础,这种设计既保证了系统的可靠性,又提升了整体运营的安全性。

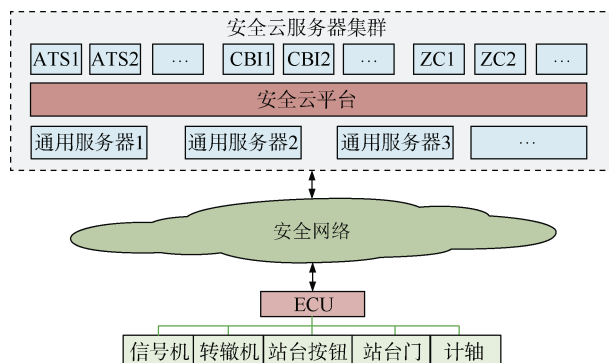


图2 云信号系统架构及部署

Figure 2 Architecture and deployment of cloud-based signaling system

2 云信号系统关键技术

2.1 基于云平台的安全技术

城市轨道交通云信号系统除满足 SIL4 安全完整性等级认证要求外,还应严格遵循 RAMS(reliability, availability, maintainability and safety)相关标准要求,完成系统型式试验,确保其可靠性、可用性、可维护性及安全性不低于传统信号系统。云信号系统安全性依赖于安全云平台,为保证信号系统的 SIL4 级安全要求,云信号系统要具备 SIL4 级的云安全技术^[10]。传统信号系统的安全保障技术是基于专用硬件的平台定制,其所需的确定性时钟、确定性运行环境、确定性网络在基于云的通用服务器和软件中一般不具备,因此云信号系统需要寻找到合适的安全云平台,该安全云平台能够通过安全保障技术实现 SIL4 级安全保障,而二取二冗余技术作为一种高可靠性的安全架构,在轨道交通信号控制、核电控制系统、航空电子设备等安全完整性等级 SIL3/4 级的应用场景中发挥着关键作用。传统信号系统与云信号系统二取二冗余技术实现对比如图3所示。

二取二冗余技术的核心设计理念是通过双重冗余机制最大化系统的故障检测能力,为关键基础设施提供最高级别的安全防护保障。当系统检测到任何异常或不一致情况时,能够立即执行安全导向的响应策略,确保系统快速进入预设的安全状态,从而有效避免潜在的安全事故发生。二取二冗余技术不仅能够满足 SIL4

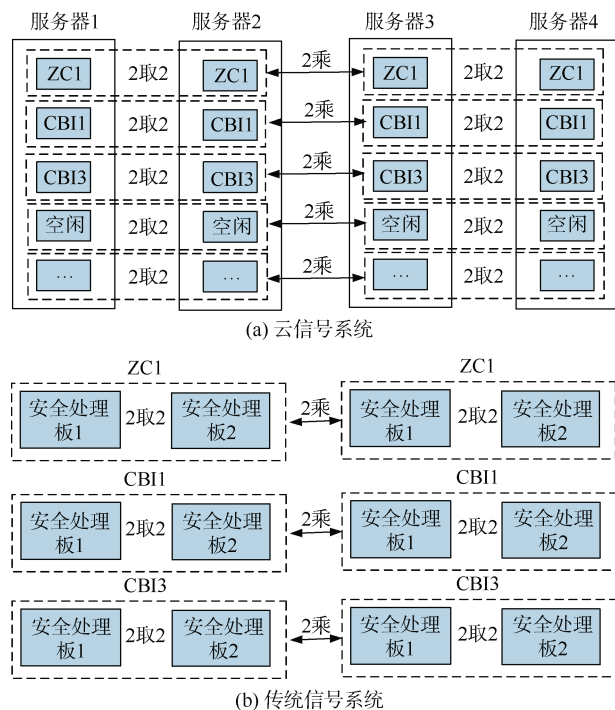


图3 云信号系统与传统信号系统二取二冗余技术对比
Figure 3 Comparison of 2-out-of-2 redundancy technology between cloud-based signaling systems and traditional signaling systems

等级对随机硬件故障的检测要求,还能有效应对系统性故障的挑战,为安全关键系统提供全方位的保护。其详细的工作原理可分解为以下3个关键环节:首先,在双通道独立处理阶段,系统采用完全独立的双计算通道架构,每个通道都配备异构的硬件平台和差异化的软件算法,这种设计能够显著降低共因失效的风险,确保两个通道的运算过程真正实现物理和逻辑上的独立性;其次,在实时比较环节,系统配置了高精度的比较器模块,该模块会在每个计算周期的重要节点对两个通道的输出结果进行严格的实时比对,这种持续性的交叉验证机制能够及时发现任何微小的运算偏差;最后,在动作决策阶段,系统会根据比较结果采取差异化的响应策略,当两个通道的输出结果完全一致时,系统会判定为有效输出并执行相应操作;而当检测到任何不一致情况时,系统会立即切断输出或触发预设的安全保护状态,从而确保系统始终处于受控的安全运行模式。

安全云平台安全计算节点周期执行内存故障检测、安全时钟偏差检测,如果检测到故障则触发安全动作,而且可利用硬件辅助虚拟化技术,确保虚拟机之间、虚拟机与管理程序之间的内存和设备访问隔离,

从而为 SIL4 工作负载分配专用的物理中央处理器(central processing unit, CPU)核心、内存区域、网络接口,避免相互干扰。

安全云平台更强调隔离性与稳健性,虚拟化技术可借助硬件辅助实现底层强隔离,有效降低虚拟化应用间的耦合度,在故障隔离、异常访问防护等方面具有显著优势。尽管传统虚拟化在启动速度与可移植性上存在一定不足,但针对信号专业控制类应用,可通过镜像精简优化,将启动时间控制在秒级,以满足工程实际需求。采用容器化技术进行隔离虽具备启动快速等特点,但具有一定局限性,一方面,信号安全应用在部署时需执行严格的安全检查与认证流程,其启动耗时以分钟级计,容器快速启动的优势难以体现;另一方面,容器对操作系统依赖较强,复杂的软件层次会大幅增加安全应用的评估成本。综合安全性、隔离性与工程实用性,选用虚拟化部署更为合适。

2.2 大容量车地安全实时通信技术

云信号系统管辖能力是线网级的,因此需要满足 CBTC 以及全自动运行条件下,高密度、高频率的车地安全实时通信需求,为此要解决多并发实时通信问题、通信安全自主化问题、数据安全完整性问题、通信负载均衡和安全云内部报文实时路由问题^[11]。安全云信号系统中,双通道的虚拟机之间、虚拟机与安全监督单元之间、主备虚拟机之间、安全通道虚拟机与通信通道虚拟机之间、安全虚拟机与 ECU 之间,车地通信、不同安全应用之间均需要依赖网络通信。其中,双通道的虚拟机之间、虚拟机与安全监督单元之间实时性要求最高,主备虚拟机之间、安全虚拟机与 ECU 之间要求次之,安全通道虚拟机与通信通道虚拟机之间、车地通信、不同安全应用之间要求相对低一些,但也依然需要满足实时通信要求。

云信号系统的整体网络架构如图4所示,其具体特点如下:

- 1) 设备冗余。云平台交换机选用高性能工业级交换机,并采用交换机堆叠技术架构,实现链路与设备级双重冗余备份;
- 2) 冗余链路。骨干网和云平台交换机设置冗余链路;
- 3) 多地接入。云平台从骨干网的两处节点接入;
- 4) 高可用性。冗余链路连接,在任何一条链路发生故障时,备用链路能够迅速接替,保证网络的连续性和稳定性;

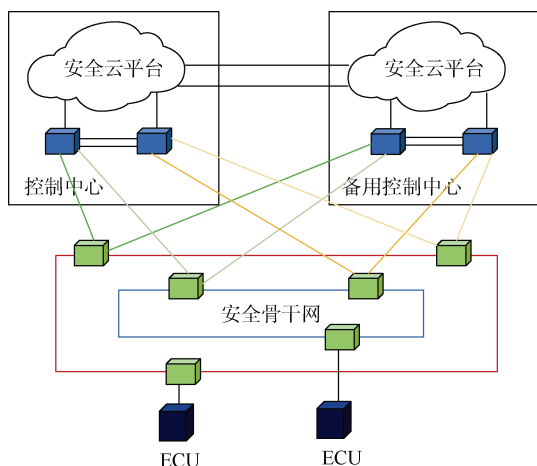


图4 云信号系统网络架构

Figure 4 Network architecture of cloud-based signaling system

5) 智能切换。使用灵活链路技术,可以智能地在主备链路之间进行切换,提高网络的可靠性和响应速度;

6) 负载平衡。主备链路设置可以在一定程度上实现负载平衡,避免单一链路过载,提高网络稳定性;

7) 安全性增强。多层次的冗余设计使得网络结构更为安全,能够有效防止单点故障带来的风险。

2.3 传统信号业务应用与安全云平台的适配技术

传统信号业务应用是基于专用平台开发的,要实现安全云平台上执行传统信号业务的应用,需要解决的问题包括信号业务应用跨指令集移植到虚拟化平台,信号业务应用与安全云平台基础设备服务共同配合实现高可用性的问题^[12]。安全云平台的发展目标必然是信号业务应用与平台独立演进,因此研究一套开放标准的安全云应用接口将有利于将安全云平台向开放平台发展。安全云应用接口需屏蔽平台底层的安全与容错机制,如冗余、表决、故障恢复等,使业务应用开发者无需关注安全冗余架构,仅需聚焦业务逻辑及安全相关应用条件等。安全云应用接口可优先采用成熟的现有应用程序编程接口(application programming interface, API)规范,减少自定义接口,降低移植成本,而且安全云应用接口需覆盖车载和轨旁场景,允许业务应用根据需求选择,避免为不同场景设计独立接口^[13],同时支持 API 版本演进,确保旧版本业务应用可在新版本平台上运行,同时允许新增功能扩展。传统信号业务应用和安全云平台的适配,能有效解决现存信号系统改造、升级维护成本高以及算力瓶颈明显无法满足高安全智能化算力需求的困境。

3 云信号系统优势

相比传统信号系统,云信号系统具有以下核心优势:

1) 云信号系统采用集中化架构,实现硬件资源的共享与动态分配,有效避免传统信号系统中各车站独立配置专用设备带来的重复投资,同时可大幅减少现场硬件设备数量与占地面积,为城市轨道交通节省宝贵的车站设备用房空间。以单条线路为例,云信号系统仅需配置4个机柜,在100 m²的标准设备机房内即可满足4条线路的设备部署需求,空间利用率得到显著提升。

2) 云信号系统突破既有信号系统辖区与设备部署强绑定耦合关系,可灵活划分安全应用管辖范围,降低辖区耦合度,有效缩小单点故障的影响范围,提升系统整体可用性,同时系统硬件设备高度精简,显著简化现场调试流程,大幅提升既有线路改造的便捷性与实施效率。经工程实测与改造案例验证,可有效缩短既有线路信号系统改造周期约10%。

3) 从建设到运维再到升级迭代,云信号系统在全生命周期内展现出显著的成本优势,系统采用商用化通用硬件核心设备,通过减少设备数量、降低备品备件数量、简化现场升级维护流程、降低运维人力投入等多重途径,有效降低信号系统的整体成本。结合工程实践测算与全生命周期成本(life cycle cost, LCC)模型分析,云信号系统较传统信号系统可有效降低全生命周期成本约30%。

4) 云信号系统通过深度整合城市轨道交通信号系统,实现跨专业软硬件资源的高效协同和共享复用,显著提升整体资源利用率,有效降低全生命周期运营成本,有力推动轨道交通建设与运营管理向自主化、智能化、绿色化和融合化方向高质量发展。

4 结论

1) 与传统信号系统相比,云信号系统可有效缩短既有线路信号系统改造周期约10%,有效降低全生命周期成本约30%,大幅减少现场硬件设备数量与占地面积。

2) 相较于传统信号系统的分布式独立控制架构,云信号系统集中式协同控制架构有效破解了传统信号系统资源利用率低、运维成本偏高、扩容拓展能力受限等突出问题,已成为智慧城轨未来演进的主流方向。

云信号系统的实施并非一蹴而就,需要平衡技术创新与安全稳定,优先在新建线路试点,再逐步对既

有线升级,结合实际项目需求选择合适的实施路径,确保系统安全、稳定、高效运行。现阶段,云信号系统在全面落地与规模化工程应用层面仍面临诸多技术难点与现实挑战,仍需持续攻关优化、深入研究完善。

参考文献

- [1] RCA/OCORA Consortium. RCA/OCORA White Paper on Safety Computing Platform[R]. Brussels: European Railway Industry, 2021.
- [2] 中国城市轨道交通协会. 中国城市轨道交通智慧城轨发展纲要(2020—2035年)[R]. 北京: 中国城市轨道交通协会, 2020.
- [3] 渠军, 夏从东, 霍连, 等. 轨道交通云信号工程应用及国产化思考[J]. 科技与创新, 2025(5): 218-221.
- [4] 裴文艺. 云信号系统工程应用优化方案研究[J]. 铁道通信信号, 2024, 60(7): 8-13.
Pei Wenyi. Research on optimization scheme of engineering applications for cloud-based signaling system[J]. Railway signalling & communication, 2024, 60(7): 8-13.
- [5] 吴国兴. 云计算在城市轨道交通信号系统中的创新应用[J]. 数字技术与应用, 2025, 43(3): 205-207.
- [6] 冷勇林, 付胜华, 付芳蓉. 城市轨道交通信号系统设备精简化及云架构探究[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(11): 134-137.
Leng Yonglin, Fu Shenghua, Fu Fangrong. Research on equipment simplification and cloud construction of urban rail transit signal system[J]. Urban mass transit, 2020, 23(11): 134-137.
- [7] 李云, 王崇国, 殷江宁. 基于云边协同的城市轨道交通信号系统方案[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(7): 194-199.
- Li Yun, Wang Chongguo, Yin Jiangning. Urban rail transit signaling system scheme based on cloud-edge collaboration[J]. Urban mass transit, 2023, 26(7): 194-199.
- [8] 刘敏杰, 吴刚. 新一代基于云架构信号系统建设方案[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(2): 255-259.
- Liu Minjie, Wu Gang. New-generation signaling system construction scheme based on cloud architecture[J]. Urban mass transit, 2024, 27(2): 255-259.
- [9] 郭弘倩, 南迪. 基于云架构的城市轨道交通信号系统方案研究[J]. 铁路通信信号工程技术, 2024, 21(2): 72-77.
Guo Hongqian, Nan Di. Research on urban rail transit signal system scheme based on cloud architecture[J]. Railway signalling & communication engineering, 2024, 21(2): 72-77.
- [10] 丁军, 王开强. 基于云平台的下一代信号系统[J]. 城市轨道交通, 2022(3): 58-59.
- [11] 熊锋. 城市轨道交通信号系统安全云平台方案研究[J]. 科技创新与应用, 2023, 13(36): 120-123.
- [12] 吕辉环. 基于云架构的城轨信号系统分析与探讨[J]. 工程建设与设计, 2025(1): 116-118.
Lyu Huihuan. Analysis and discussion on urban rail transit signal system based on cloud architecture[J]. Engineering construction and design, 2025(1): 116-118.
- [13] 赵振杰, 郭建伟, 刘海川, 等. 基于城轨云的全自动运行系统设计与实践[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(10): 213-217.
Zhao Zhenjie, Guo Jianwei, Liu Haichuan, et al. Design and practice of fully automatic operation system based on urban rail transit cloud[J]. Urban mass transit, 2021, 24(10): 213-217.

(编辑: 王艳菊)

封面车站设计说明

港铁金钟站于2022年5月完成扩建后,成为港铁东铁线、荃湾线、港岛线及南港岛线四线交会的“超级换乘站”,也是工作日全网出行量超过550万人次的港铁网络内最繁忙的车站之一。金钟站既是香港铁路网络的核心枢纽之一,亦是城市人口流动与商业活动高度集中的重要节点。车站垂直向下延展,共有八层及深逾50m,罕见的多层地下中庭设计以34条自动扶梯连接不同层级站台和车站大堂,构筑出立体流畅的垂直布局。这里是乘客通行与换乘的主要通道,垂直交通动线高效便捷,既提升乘客出行舒适度,又能快速疏导站内大客流无缝换乘。中庭顶部的巨型天窗将自然光引入车站深层地下,让繁忙的车站空间明亮通透,整体环境更加舒适。

车站中庭悬挂的大型艺术装置《引领前行》,设计灵感源自港铁路线图,4组悬浮雕塑象征金钟站汇聚的4条线路,并分别呈现其专属配色。四条线路彼此交错,让人不禁联想到互不相识的乘客在车站里偶然相遇,为这件艺术品增添了温暖的人情味。它既还原了4条线路日常承载万千市民穿梭通勤的真实图景,也隐喻着每个人独一无二的生活轨迹。每个人都是想法各异、步履不同的独立个体,却常常搭乘同一趟列车、往返同一片区域,在日复一日的出行里,总会遇见众多同路人。

香港铁路有限公司 供稿