

城市轨道交通 5G 公专网无线覆盖方案研究

刘为俊^{1,2}

(1. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 430063, 武汉; 2. 无锡时代智能交通研究院有限公司, 214121, 无锡)

摘 要 [目的]城市轨道交通 5G 公专网是 5G 公网在城市轨道交通行业的垂直应用,其无线覆盖方案与 5G 公网仅需满足公众乘客对移动通信的需求存在较大差异。因此需研究城市轨道交通 5G 公专网无线覆盖方案。[方法]以城市轨道交通无线通信业务需求为前提,针对城市轨道交通的复杂应用环境,明确了 5G 公专网无线覆盖范围,提出了不同应用场景下无线覆盖技术指标要求;设计了隧道区域、地面区域和室内区域不同场景下的无线覆盖方式;探讨了无线网络容量优化和覆盖优化措施。[结果及结论]所形成的以业务需求为导向的城市轨道交通 5G 公专网无线覆盖方案是全场景、连续性的解决方案。城市轨道交通 5G 公专网无线覆盖方案还应统筹考虑运营商不同制式、多频段无线系统共建共享及系统之间干扰问题,以为城市轨道交通用户提供良好的 5G 公专网服务。

关键词 城市轨道交通; 5G 公专网; 无线覆盖; 业务需求; 网络优化

中图分类号 U285.2

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.04.039

Research on Urban Rail Transit 5G Public-private Network Wireless Coverage Scheme

LIU Weijun^{1,2}

(1. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., 430063, Wuhan, China; 2. Wuxi Times Intelligent Transportation Research Institute Co., Ltd., 214121, Wuxi, China)

Abstract [Objective] The urban rail transit 5G public-private network (PPN) is a vertical application of 5G public network in urban rail transit industry, which differs significantly from the wireless coverage scheme of the 5G public network when only catering to the communication needs of the general public passengers. Therefore, it is necessary to study the wireless coverage scheme for urban rail transit 5G PPN. [Method] Based on the wireless communication service requirements of urban rail transit, considering its complex application environment, the wireless coverage range of the 5G PPN for urban rail transit is defined, and different requirements of wireless coverage technology index are proposed for various application scenarios. Different wireless coverage methods for tunnel areas, ground areas, and indoor areas are designed, and optimization

measures for wireless network capacity and coverage are explored. [Result & Conclusion] The formed urban rail transit 5G PPN wireless coverage scheme, oriented towards service requirements, is a comprehensive and continuous solution for all scenarios. The scheme should also consider the coordination of different operator standards, multi-frequency band wireless system co-construction and sharing, and interference between systems to provide urban rail transit users with reliable 5G PPN services.

Key words urban rail transit; 5G public-private network; wireless coverage; business requirement; network optimization

城市轨道交通 5G 公专网(以下简称“5G 公专网”)是基于运营商 5G 公网,利用网络切片技术,提供专属网络能力,承载城市轨道交通数据、语音、视频等业务应用,覆盖城市轨道交通全场景,实现 5G 公网专用的网络^[1]。目前,南京地铁宁句线承载智慧化业务应用的 5G 公专网已于 2021 年年底开通运营^[2];天津地铁 9 号线正在实施基于 5G 公专网的 MC(关键业务)集群调度业务;其他城市的轨道交通也进行了许多采用 5G 公专网承载新型业务应用的探索。为解决城市轨道交通 5G 公专网建设的标准化问题,中国城市轨道交通协会组织行业内相关单位和电信运营商等正在编制 5G 公专网系列团体标准。

由于城市轨道交通应用场景特殊,具有封闭性强且物理环境复杂等特点,因此对 5G 公专网无线覆盖要求很高。5G 公专网无线覆盖质量与城市轨道交通业务需求应用效果密切相关,为保障城市轨道交通 5G 公专网系统的质量,以及可靠性、可用性和可维护性,研究及优化 5G 公专网的无线覆盖方案十分必要。

1 5G 公专网业务需求

5G 技术具有大带宽、广连接、低时延、高可靠性等特点。3GPP(第三代合作伙伴计划)定义了 5G

三大应用场景,包括 eMBB(增强移动宽带)、mMTC(大规模机器通信)、uRLLC(高可靠低时延通信),与此相对应的 5G 公专网城市轨道交通无线通信典型业务需求场景如表 1 所示。

表 1 基于 5G 公专网应用场景的城市轨道交通业务需求
Tab. 1 Urban rail transit service requirements based on 5G PPN application scenarios

5G 公专网 应用场景	城市轨道交通业务需求
eMBB	IMS(车内监视系统)车载视频监视业务、PIS(乘客信息系统)车载视频业务、轨行区综合巡检业务、车辆健康管理业务等
mMTC	数据采集类业务、物联网类业务、定位业务等
uRLLC	集群调度类业务、列车控制类业务、紧急文本业务等

从表 1 可以看出,基于 5G 公专网的城市轨道交通业务需求可能是单一场景应用,也可能是三大

场景的混合应用,从无线覆盖角度需考虑网络带宽、容量和时延等因素。

2 无线覆盖要求

5G 公专网在城市轨道交通范围的无线覆盖包括地下/地面、室内/室外、移动/静止等多态场景。针对不同场景情况,应采用灵活的覆盖方案,在成本最优的条件下满足 5G 公专网无线覆盖需求。

2.1 覆盖区域要求

5G 公网在城市轨道交通内的无线覆盖主要是为满足公众移动用户的通信需求,因此一般会在乘客活动区域进行深度覆盖,如站厅、站台、隧道、出入口等;而对城市轨道交通车辆基地、设备用房区域等并没有完全覆盖。为满足表 1 中的业务需求,5G 公专网在城市轨道交通内需要连续性覆盖,对应覆盖区域要求见表 2。

表 2 城市轨道交通 5G 公专网覆盖区域
Tab. 2 Urban rail transit 5G PPN coverage areas

覆盖区域	业务范围	特点
线路	正线、折返线、停车线、渡线及安全线,与其他线路的联络线,车辆基地出入线,等等	地下隧道、地面高架/路基
建筑体	线网中心/控制中心,车站公共区、站台、主要办公/设备用房区、出入口、换乘通道等,区间风井、变电所等	地下、地面
车辆基地	咽喉区、试车线、各类库区等	一般为地面,也存在上盖物业情况

从表 2 可以看出,5G 公专网在城市轨道交通内的无线覆盖区域较 5G 公网更大。因此,需要采取更有针对性的 5G 公专网无线覆盖措施。

2.2 覆盖指标要求

在满足城市轨道交通乘客通信需求下,各家运营商的 5G 公网无线覆盖指标要求^[3]如表 3 所示。表 3 中,三家运营商 5G NR(5G 新空口)在 95%覆盖概率下,SS-RSRP(同步信号参考信号功率)均一致,SS-SINR(同步信号信干噪比)略有差异。

表 3 不同运营商 5G 公网无线覆盖指标要求
Tab. 3 5G public network coverage index requirements of different operators

运营商	SS-RSRP/ dBm	SS-SINR/ dB	覆盖概率/ %
中国移动 NR 2.6 GHz	≥-105	≥0	95
中国电信 NR 3.5 GHz	≥-105	≥3	95
中国联通 NR 3.5 GHz	≥-105	≥3	95

对于 5G 公专网,需要根据城市轨道交通业务

需求特征和指标、各物理环境区域特点来确定其覆盖指标。结合国内城市轨道交通 5G 公专网业务应用情况、测试数据和工程案例,表 4 给出了城市轨道交通 5G 公专网不同区域 SS-RSRP、SS-SINR、边缘速率等具体特征化覆盖指标要求,与 5G 公网指标存在一定差异性。

3 无线覆盖方式

根据表 2 中 5G 公专网无线覆盖区域,在满足表 4 中覆盖指标要求前提下,同时考虑 5G 公网用户需求,针对覆盖区域特点采用不同无线覆盖方式,以达到最佳覆盖效果。采用以下原则来确定无线覆盖方式:

- 1) 在地下隧道区域,采用泄漏同轴电缆方式覆盖;
- 2) 在地面高架/路基区段及车辆基地露天区域,宜采用附近地面宏基站天线方式进行覆盖,并采取针对性的满足城市轨道交通需求的覆盖措施;
- 3) 在建筑体内及车辆基地库内等区域,宜采用

表 4 5G 公网覆盖指标要求

Tab. 4 5G PPN coverage index requirements

区域	SS-RSRP		SS-SINR		上行/下行边缘速率	
	指标值/dBm	覆盖率/%	指标值/dB	覆盖率/%	指标值/(Mbit/s)	覆盖率/%
线路(电客车车厢内)	≥ -105	≥ 95	≥ 3	≥ 95	≥ 20	≥ 90
线网中心、控制中心、车站设备区、变电所、区间风井	≥ -105	≥ 95	≥ 0	≥ 95	≥ 20	≥ 90
车站公共区	≥ -95	≥ 95	≥ 0	≥ 95	≥ 20	≥ 90
车辆基地库内区域	≥ -95	≥ 98	≥ 3	≥ 95	≥ 30	≥ 90
车辆基地其他区域	≥ -105	≥ 95	≥ 3	≥ 95	≥ 20	≥ 90

新型室内分布系统进行覆盖。

3.1 隧道区域

对于隧道内的 5G 公网覆盖,还需要统筹考虑三家运营商 2G/3G/4G 多种制式、不同频段的覆盖需求,采用 POI(多系统合路平台)合路运营商多种制式无线信号,通过基站和宽频段低损 LCX(漏缆)进行隧道覆盖。为满足 5G 公网隧道覆盖需求,达到对列车车厢内最佳覆盖效果,漏缆的高度应位于列车车窗上沿和下沿高度之间,并结合隧道限界情况采用 4 根漏缆或 2 根漏缆进行部署。主要有以下三种部署方案:

1) 4 根 5/4"(5/4 英寸)漏缆部署方案。采用 4 根全频段 5/4"漏缆(见图 1),实现 5G 公网 4T4R(4 发 4 收)接入,漏缆间距不小于 300 mm,断点间距可设为 450 m 左右;其他容易产生互调干扰的频段进行分缆接入。

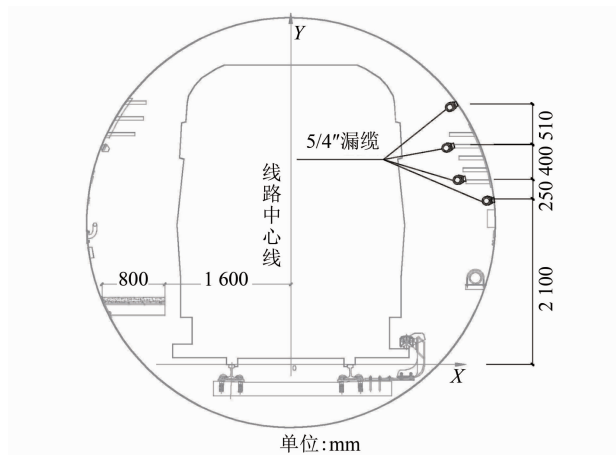


图 1 4 根 5/4"漏缆部署方案示意图

Fig. 1 Deployment scheme diagram of four 5/4"LCXs

2) 2 根 5/4"漏缆和 2 根 13/8"(13/8 英寸)漏缆部署方案。采用 2 根低损耗高频段 5/4"漏缆和 2 根 13/8"漏缆覆盖(见图 2),每对漏缆间距不小于 500 mm(交叉布放),断点间距设为 550 m 左右。

中国电信和中国联通的 3.5 GHz 频段接入 5/4"漏缆,其余频段接入 13/8"漏缆。

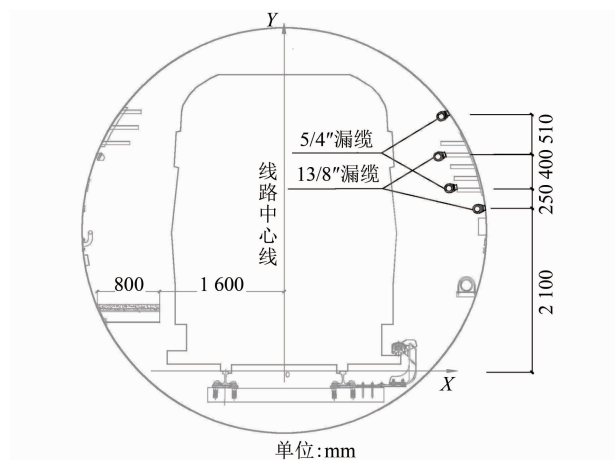


图 2 2 根 5/4"和 2 根 13/8"漏缆部署方案示意图

Fig. 2 Deployment scheme diagram of two 5/4"and two 13/8"LCXs

3) 2 根 5/4"漏缆部署方案。采用 2 根全频段 5/4"漏缆(见图 3),断点间距可设为 450 m 左右。所有频段均接入 2 根漏缆中,漏缆间距不小于 500 mm。

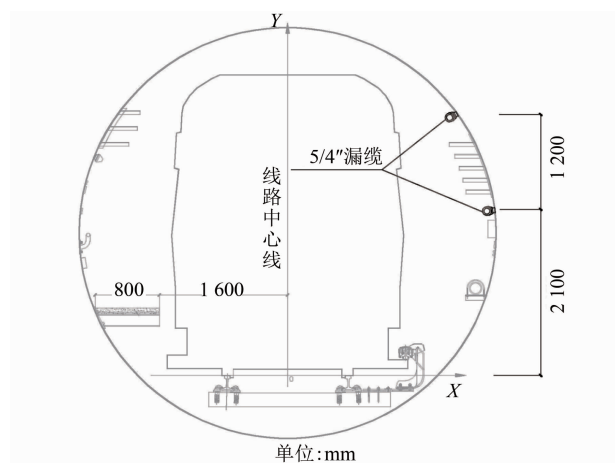


图 3 2 根 5/4"漏缆部署方案示意图

Fig. 3 Deployment scheme diagram of two 5/4"LCXs

某城市轨道交通线路 5G 公专网覆盖分别采用 4 根 5/4"漏缆和 2 根 5/4"漏缆部署方案时下行速率测试结果如表 5 所示。从表 5 中可以看出,采用 4 根漏缆 4T4R 的下行速率较采用 2 根漏缆 2T2R 的提升了 40%以上。

表 5 4 根漏缆与 2 根漏缆部署方案测试结果

Tab.5 Test results of deployment schemes of four LCXs and two LCXs

测试项目	下行峰值速率/ (Mbit/s)	下行最小速率/ (Mbit/s)	下行平均速率/ (Mbit/s)
NR 3.5 GHz 4 根漏缆	980	601	888
NR 3.5 GHz 2 根漏缆	747	475	613
NR 2.6 GHz 4 根漏缆	1 062	731	970
NR 2.6 GHz 2 根漏缆	865	523	680

因此,为保证 5G 公专网覆盖效果和满足容量要求,推荐采用 4 根 5/4"漏缆方案,其中 2G/3G/4G 网络接入其中的两根漏缆,5G 公专网接入四根漏缆。同时,为避免干扰,保证多根漏缆 MIMO(多进多出技术)效应,漏缆间距要求在 4~10 个 λ (波长)之间。通过计算得到各个频段的漏缆间距要求,如表 6 所示。考虑到隧道限界实际情况,建议漏缆间距尽量不小于 4 λ ,因此 5G 公专网多根漏缆之间最小间距 ≥ 300 mm。

表 6 漏缆 MIMO 间距

Tab.6 LCX MIMO spacing

频段/MHz	漏缆间距/mm	
	最小间距(4 λ)	最大间距(10 λ)
1 800	667	1 667
1 900	632	1 579
2 100	572	1 429
2 600	462	1 154
3 500	343	867
3 600	333	833

5G 公专网建设时,对于隧道无线覆盖方式,可根据运营商引入移动通信系统制式、频段等情况合理选择最佳漏缆方案。

3.2 地面区域

城市轨道交通地面区域为开放场景,可通过城市轨道交通周围沿线室外宏基站天线覆盖,在无宏基站区域需要新建宏基站覆盖,以确保城市轨道交通业务区域连续性覆盖。

宏基站应尽量分布于城市轨道交通线路两侧,相邻站点采用“Z”线方式分布(见图 4),在城市轨道交通沿线形成规则带状覆盖。采用该方案,无线小区关系简单、切换时间短,尤其是在列车交汇时能够保证车内通信质量。

在 5G 公专网的城市轨道交通地面覆盖区域,为满足车厢内 $SS-RSRP \geq -105$ dBm 要求,宏基站点天线高度应在保证无线信号直射的基础上,沿径向穿透列车玻璃(见图 4)。为避免无线信号经过车体时损耗过大,建议天线相对轨面高度为 15~20 m,并适度调整天线倾角使天线主瓣方向对着车窗高度。

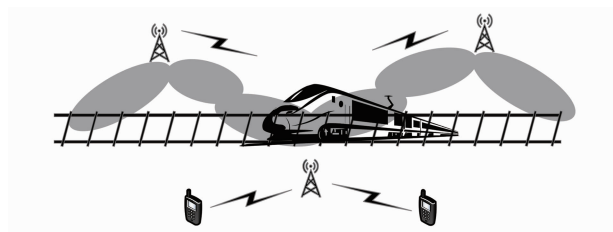


图 4 宏基站天线覆盖示意图

Fig. 4 Diagram of macro base-station wireless coverage

3.3 室内区域

对于城市轨道交通室内区域,可选用新型室内分布系统和传统室内分布系统两类解决方案。应结合 5G 公专网覆盖区域、业务需求等多方面因素,合理选择室内分布系统方案。

5G 公专网所覆盖室内区域,尤其是非公共区域,其用户数量虽然较乘客用户数少,但业务需求量大、无线覆盖指标要求高,建议采用新型室内分布系统^[4]。该系统由室内 BBU(基带处理单元)、扩展单元 RHub(射频拉远单元集线器)和远端单元 pRRU(皮基站)设备组成(见图 5)。由于 pRRU 具备小区分裂能力,可按需灵活配置容量,满足不同场景需求。

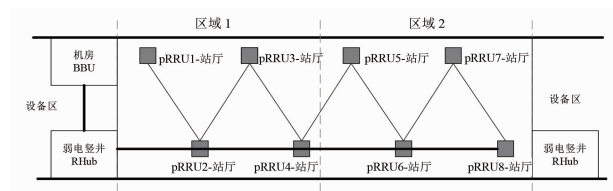


图 5 城市轨道交通典型车站站厅新型室内分布系统覆盖方式示意图

Fig. 5 Coverage scheme diagram of new indoor distribution system in urban rail transit typical station hall

图 5 中:远端单元 pRRU 在站厅公共区两侧交错布置,可以保证 5G 公专网无线覆盖均匀无盲区;为每个 pRRU 配备 4T4R 天线,以保证 5G 公专网容

量要求。

4 无线网络优化

5G 公专网无线网络优化与 5G 公网的原则和方法基本一致,在城市轨道交通应用场景中主要考虑容量优化和覆盖优化。

4.1 容量优化

在城市轨道交通的 5G 公专网业务需求中,每种业务定义的 5QI(5G 服务质量标识符)不同导致在使用过程中均会发生资源抢占,因此,需要进行容量优化,以做好业务保障。

5G 公专网无线网络部署完成后,系统容量主要依靠无线切片方案来保障。通常情况下,可供选择的切片方案包括 QoS(服务质量)调度、RB(资源块)资源预留、无线切频等。基于城市轨道交通业务的 5G 公专网,上行带宽占用需求大、下行业务量小;而基于城市轨道交通业务的 5G 公网,主要是下行流量大、上行流量小。当 5G 公专网用户与 5G 公网用户共用运营商 100 MHz 载波时^[5],建议采用为 5G 公专网用户预留 RB 资源或为 5G 公网用户分配固定比率 RB 资源的硬切片方案来实现无线资源调度。该方案不受公网用户负荷大小影响,能够保障城市轨道交通业务的容量需求。

4.2 覆盖优化

5G 公专网无线覆盖优化的难点在于城市轨道交通无线覆盖区域场景多样化、无线覆盖方式差异化,导致存在多种无线覆盖小区之间的切换问题:隧道轨行区小区之间切换;地面轨行区小区之间切换;隧道轨行区和地面轨行区小区之间切换;室内小区和室外宏基站之间切换。

为解决上述问题,首先应在 5G 公专网规划设计阶段根据城市轨道交通列车设计速度、切换时间、小区重选时间等因素对相邻小区无线覆盖重叠区长度进行计算,满足 5G 公专网用户完成小区重选和成功切换。

其次,在隧道轨行区采用多 RRU 小区合并技术,合理划分及合并小区(见图 6),使其既满足容量需求,又减少用户切换。如图 1 中,每 450 m 漏缆就有一个设备开断点接入不同小区 RRU 信号,会造成切换频繁,导致业务时延增加。在地面轨行区基于基站“Z”线方式分布,只需要设置该宏基站左右相邻小区邻区关系,可减少邻区数量,简化切换关系,保障用户成功切换。

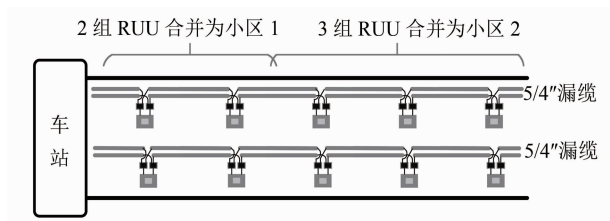


图 6 隧道轨行区 RRU 小区合并示意图

Fig. 6 Diagram of RRU cell convergence in tunnel track area

针对隧道轨行区和地面轨行区 RRU 小区之间的小区切换,建议在 5G 公专网隧道漏缆末端设置天线,与地面宏基站之间形成足够切换的覆盖重叠区,并设置唯一邻区关系,以减少切换时间。为解决室内小区和室外宏基站之间的切换,一般采用在轨道交通车站出入口室外 10 m 处室内小区外泄的信号电平比室外宏基站小区低 10 dB 的方案。

5 结语

本文根据 5G 网络特性,结合城市轨道交通业务需求,定义了 5G 公专网三大场景 eMBB、mMTC、uRLLC 应用;明确了城市轨道交通 5G 公专网需要全区域、连续性覆盖的要求,并针对不同区域场景、业务应用提出了 5G 公专网 SS-RSRP、SS-SINR 等详细技术指标要求。设计了不同场景下无线覆盖方式,对于隧道区域,推荐采用 4 根 5/4"漏缆方式,保证 MIMO 效应漏缆最小间距 ≥ 300 mm;对于地面区域,推荐采用宏基站、天线主瓣直射列车玻璃窗覆盖方式,并给出了宏基站天线距离轨面高度 15 ~ 20 m 的参考值;对于室内区域,推荐采用新型室内分布系统覆盖方式,以及为 pRRU 配备 4T4R 天线的保障无线速率方案。为确保无线网络服务质量,采用无线切片 RB 资源预留方式来保障 5G 公专网容量;采用小区合并、邻区关系设置、设置无线场强差值等技术来提升 5G 公专网无线覆盖效果。

城市轨道交通 5G 公专网无线覆盖方案还应统筹考虑运营商不同制式、多频段无线系统共建共享及系统之间干扰问题,为城市轨道交通用户提供良好的 5G 公专网服务,这将会推动 5G 公专网在“智慧城轨”和“绿色城轨”领域的应用,实现 5G 技术与城市轨道交通深度融合。

参考文献

- [1] 南京地铁集团有限公司. 轨道交通行业 5G 公专网白皮书 [Z]. 南京:南京地铁集团有限公司,2021.

(下转第 215 页)

- 信息化平台探索[J]. 铁路技术创新, 2023(1): 86.
- WU Feng, ZHANG Cengwei, ZHAN Hongji, et al. On information platform for full life cycle management of metro based on BIM+GIS[J]. Railway Technical Innovation, 2023(1): 86.
- [2] 赵刚. 城市轨道交通资产管理信息系统建设研究[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(4): 6.
- ZHAO Gang. Research on the construction of urban rail transit asset management information system[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(4): 6.
- [3] 赵刚. 基于“智慧地铁”的城市轨道交通资产管理系统研究[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(1): 166.
- ZHAO Gang. Research on urban rail transit asset management system based on 'smart metro'[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(1): 166.
- [4] 贾泽露, 朱毅, 唐文武. 服务城市精细治理的数字底座关键技术研究[J]. 地理空间信息, 2023, 21(2): 67.
- JIA Zelu, ZHU Yi, TANG Wenwu. Research on key technologies of digital base for urban fine governance[J]. Geospatial Information, 2023, 21(2): 67.
- [5] 保丽霞, 吴志周. 服务于复杂交通管理需求的数字化底座框架[J]. 中国交通信息化, 2023(A1): 293.
- BAO Lixia, WU Zhizhou. A digital infrastructure framework for complex traffic management needs[J]. China Transportation Informatization, 2023(A1): 293.
- [6] 陆培庆, 唐超. 移动式三维激光扫描技术在地铁隧道变形监测中的应用[J]. 测绘通报, 2020(5): 155.
- LU Peiqing, TANG Chao. Application of mobile 3D laser scanning technology in deformation monitoring of subway tunnels[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2020(5): 155.
- [7] 吴祥龙, 高华, 解兴申, 等. 基于BIM+GIS的城市轨道交通选线应用研究[J]. 铁道标准设计, 2022, 66(3): 18.
- WU Xianglong, GAO Hua, XIE Xingshen, et al. Research on application of the route selection in urban rail transit based on BIM+GIS[J]. Railway Standard Design, 2022, 66(3): 18.
- 收稿日期:2023-08-02 修回日期:2023-11-12 出版日期:2024-04-10
Received:2023-08-02 Revised:2023-11-12 Published:2024-04-10
· 作者:赵刚,高级工程师,zhaogsmtde@sina.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210页)

- Nanjing Metro Group Co., Ltd. White paper on 5G public-private network in rail transit industry[Z]. Nanjing: Nanjing Metro Group Co., Ltd., 2021.
- [2] 杨勇, 孙舒淼, 王国华, 等. 南京地铁5G公网智能应用探索及实践[J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20(8): 59.
- YANG Yong, SUN Shumiao, WANG Guohua, et al. Exploration of intelligent application of 5G public network specialized in Nanjing Metro[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(8): 59.
- [3] 江苏省通信学会. 城市轨道交通5G公网移动通信系统建设标准:T/JSIC 013-2021[S]. 南京:江苏省通信学会, 2021.
- Jiangsu Institute of Communication. Construction standards for urban rail transit 5G public network mobile communication system: T/JSIC 013-2021[S]. Nanjing: Jiangsu Institute of Communication, 2021.
- [4] 黄高云. 基于不同场景的5G无线网络规划分析[J]. 长江信息通信, 2022(5): 178.
- HUANG Gaoyun. Analysis of 5G wireless network planning based on different scenarios[J]. Changjiang Information & Communications, 2022(5): 178.
- [5] 何涛, 党选丽. 城市轨道交通5G公网建设思路探讨[J]. 现代城市轨道交通, 2021(12): 85.
- HE Tao, DANG Xuanli. Discussion on construction of 5G public and private networks of urban rail transit[J]. Modern Urban Transit, 2021(12): 85.
- 收稿日期:2023-12-14 修回日期:2024-01-20 出版日期:2024-04-10
Received:2023-12-14 Revised:2024-01-20 Published:2024-04-10
· 作者:刘为俊,高级工程师,99069293@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

欢迎访问《城市轨道交通研究》网站

<http://umt1998.tongji.edu.cn>