

城市轨道交通低运能系统建设与运营发展

程 樱^{1,2}

(1. 上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司, 200125, 上海; 2. 上海有轨电车工程技术研究中心, 200125, 上海)

摘 要 [目的]城市轨道交通低运能系统具有功能定位多样、线路布设灵活、经济环保低碳等优点,已成为城市轨道交通发展的重要组成部分,但其具有制式多样、运用环境多样、发展进程不一等特点,因此有必要对低运能系统目前在建设与运营中存在的问题进行研究。[方法]介绍了低运能系统的发展概况;结合国家相关政策,从运营效益、工程造价、投融资模式、制式选择等方面分析其在建设及运营过程中面临的挑战。[结果及结论]从推动一体化建设与网络化运营以提升运营效益、集约用地及精简配置以降低工程造价、创新投融资及降低地方政府债务风险、开展已运营项目的后评估或效益评价等方面提出相应发展建议,并建议因地制宜选择低运能系统制式,构建经济适用的多层次、多制式低运能系统。

关键词 城市轨道交通;低运能系统;建设与运营

中图分类号 U239.5

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.12.004

Construction and Operation Development of Low-Capacity Urban Rail Transit System

CHENG Ying^{1,2}

(1. Shanghai Urban Construction Design & Research Institute (Group) Co., Ltd., 200125, Shanghai, China; 2. Shanghai Engineering Research Center of Tramway, 200125, Shanghai, China)

Abstract [Objective] With the advantages of diverse functional positioning, flexible line layout, economic and environmental protection, low-carbon, etc., the low-capacity urban rail transit system has become an important part of urban rail transit development. However, due to its characteristics of diverse system modes, diverse application environments, and different development processes, it is necessary to study the problems currently existing in the construction and operation of the low-capacity system. [Method] A development overview of the low-capacity urban rail transit system is introduced. Combined with relevant national policies, challenges faced by the system in the construction and operation process are analyzed from the aspects of operational efficiency, project cost, investment and financing models, and modes selection. [Result & Conclusion] Corresponding development suggestions

are put forward from the aspects of promoting integrated construction and networked operation to improve operational efficiency, implementing intensive land use and streamlined configuration to reduce project costs, adopting innovative investment and financing to reduce local government debt risks, and conducting post-evaluation or benefit evaluation of operating projects. It is also recommended to select the low-capacity system mode according to local conditions and build an economical and applicable multi-level, multi-mode low-capacity system.

Key words urban rail transit; low-capacity system; construction and operation

近年来,城市轨道交通低运能系统(以下简称“低运能系统”)因其功能定位多样、线路敷设灵活、经济环保低碳等优点发展迅速,且制式层出不穷,已成为城市轨道交通的重要组成部分。然而,低运能系统在不同城市的功能定位不同,发展进程不一,且系统制式较多,适用条件差别较大。低运能系统在我国的发展过程中,各线路无论在建设方面还是运营方面均存在较大的差异,运营品质良莠不齐。此外,部分在建线路停工、运营线路客流低迷、运营效益不佳等现状均暴露了其发展过程中所遇到的问题。本文结合国家相关政策,在分析低运能系统现存问题的基础上,分析其在建设运营过程中可能面临的挑战,并提出相应的发展建议,以促进低运能系统高质量、可持续健康发展。

1 低运能系统发展概况

1.1 低运能系统定义

发改基础〔2021〕1302号《“十四五”城市轨道交通规划建设实施方案》通知(以下简称“1302号文”)提出:低运量轨道交通系统是服务于城区、外围组团、工业园区、旅游景区等高峰小时单向最大断面客流量在0.5万~1.0万人次左右的城市轨道交通系统。随着行业内对城市轨道交通系统本身运输能力(以下简称“运能”)的愈加关注,如今普遍

称之为“低运能系统”。

1.2 低运能系统制式与分类

近几年,低运能系统制式百花齐放,相关部门对其范围和分类进行了修改调整,但对其制式的说法尚不统一。

目前,我国普遍沿用中国城市轨道交通协会发布的团体标准 T/CAMET 00001—2020《城市轨道交通分类》,将城市轨道交通分为十大制式,并按照其线路运能将悬挂式单轨系统、有轨电车系统、导轨式胶轮系统、电子导向胶轮系统划分为低运能系统^[1]。

1.3 国内运营情况

截至 2023 年底,我国内地已有 30 座城市共开通 53 条运营低运能系统线路,运营里程达 791.4 km,线路长度为 727.1 km,车站 832 座。其中:23 座城市开通运营有轨电车线路 39 条,线路长度为 515.8 km,运营里程为 580.2 km,占低运能系统运营里程的 73.3%;7 座城市开通运营电子导向胶轮系统线路 10 条,运营里程为 168.5 km,占低运能系统运营里程的 21.3%;3 座城市开通运营导轨式胶轮系统线路 3 条,运营里程为 32.2 km,占低运能系统运营里程的 4.1%;1 座城市开通运营悬挂式单轨系统线路 1 条,运营里程为 10.5 km,占低运能系统运营里程的 1.3%。近 10 年,低运能系统运营里程增长了约 7 倍。此外,有数条园区线等非公共交通线路相继开通运营,如有轨电车系统的东莞华为松山湖有轨电车(华为溪村小火车),导轨式胶轮系统的深圳坪山园区云巴线、长沙雨花园区云巴线、西安草堂园区云巴示范线、合肥长丰园区云巴线。

1.4 国内建设及规划情况

截至 2023 年底,我国内地共有 19 座城市在建低运能系统线路共 20 条,在建线路长度为 367.6 km。其中:有轨电车系统在建城市 14 座,在建线路 14 条,在建长度约为 253.0 km;导轨式胶轮系统在建城市 3 座,在建线路 3 条,在建长度约为 58.9 km;电子导向胶轮系统在建城市 2 座,在建线路 3 条,在建长度约为 55.7 km。

截至 2022 年底,根据已发布的线网规划文件,7 座城市规划建设低运能系统,共计线路 41 条,线路长度约为 684.0 km。

低运能系统在敷设方式、经济性、适用性、建设周期等方面的优势,使其在我国得以迅速发展,国家也相继出台了一系列政策,使其审批及建设规划

流程更加规范。

2 国家相关政策

2018 年 7 月,中华人民共和国国务院办公厅发布国办发〔2018〕52 号《国务院办公厅关于进一步加强城市轨道交通规划建设管理的意见》(以下简称“52 号文”),要求有轨电车项目:① 由省级发展和改革委员会(以下简称“发改委部门”)负责审批(核准),并做好与相关规划的统筹衔接工作;② 除城市轨道交通建设规划中明确采用特许经营模式的项目外,项目总投资中的财政资金投入不得低于 40%,并严禁以各类债务资金作为项目资本金。

2021 年 9 月,中华人民共和国住房和城乡建设部印发 1302 号文,进一步明确了“十四五”低运能系统规划建设工作要点(见表 1)。此外,对于开通运营 3 年后实际客运强度仍未达到相关要求的线路,应由省级发改委部门会同有关单位组织、有关城市委托第三方机构开展专题评估,相关情况及时抄送中华人民共和国国家发展和改革委员会。

表 1 “十四五”低运量轨道交通系统规划建设工作要点
Tab. 1 Key points for the planning and construction of low-capacity rail transit systems in the 14th Five-Year Plan

要点	内容
财政收入	建设期项目总投资中的财政资金比例不得低于 80%
财务平衡	轨道交通剩余负债加上本期规划拟新增负债占当年市区一般公共预算收入比例不得超过 300%
敷设方式	地面为主,进出枢纽及个别困难地段可研究采用高架等其他敷设方式
初期客运强度	不得低于 0.1 万人次/(km·d)
直接工程投资	不得超过 10 ⁴ 万元/km
审批权限	省级发展改革部门(高架敷设比例 > 30% 时,需会同相关部门组织专题论证,并开展投资超限性评估和客运强度评估,书面抄送中华人民共和国国家发展和改革委员会)

2022 年 7 月,建城〔2022〕57 号《“十四五”全国城市基础设施建设规划》(以下简称“57 号文”)中明确提出,分类推进城市轨道交通建设:Ⅰ型大城市应结合实际推进轨道交通主骨架网络建设,并研究利用中低运量轨道交通系统适度加强网络覆盖,尽快形成网络化运营效益;符合条件的Ⅱ型大城市

应结合城市交通需求,因地制宜推动中低运量轨道交通系统规划建设。

3 低运能系统建设与运营挑战

57 号文提出分类推进城市轨道交通建设,利用低运能系统构建多层次城市轨道交通系统,以促进低运能系统在不同规模城市呈现多种发展模式。同时,1302 号文对低运能系统项目在立项审批、运营效益、工程造价、评价机制等方面提出了新要求。因此,为促进其健康发展,本节结合部分已开通运营的低运能系统线路,分析现存问题,提出相关发展建议。

3.1 运营效益

根据中国城市轨道交通协会的相关统计,2019 年有轨电车平均客运强度为 892 人次/(km·d),尚不满足 1302 号文“初期客运强度不得低于 0.1 万人次/(km·d)”的要求。此外,我国有轨电车线路中只有广州海珠有轨电车 1 号线、淮安现代有轨电车 1 号线、武汉光谷现代有轨电车 T1 线、深圳龙华现代有轨电车、北京现代有轨电车西郊线、佛山南海有轨电车 1 号线,这 6 条有轨电车线路初期客运强度不低于 0.1 万人次/(km·d),达标率仅 20%。

对此,本文提出以下发展建议:

1) 明确城市公共交通优先发展理念。单条道路的单向运能为 2 100~2 700 人次/h,而单条低运能系统线路的单向运能为 10 000 人次/h,是道路交通的 4~5 倍。因此,在交通需求大的区域,道路资源应坚持向公共交通倾斜,避免低运能系统线路断面布设后,仍对机动车道执行“占一还一”理念,即有轨电车占掉一个车道就要在旁边重新开设一个机动车道,应尽快形成网络,形成层次清晰、结构合理的公共交通体系,最后通过与城市轨道交通大运能系统的融合、与道路公交的整合等,充分发挥出公交优先效益,提升客流效益。

2) 坚持以人为本,以运营为导向进行规划建设。低运能系统线网规划应匹配上位规划,避免因建设时序偏差较大而出现运营客流不足的情况。另外,选择首期开通线路时,应坚持以客流需求为首要因素,避免非客流因素主导线址选择。同时,应提升首通段建设与运营管理水平,提高线路旅行速度,避免运营效益不佳,进而影响原规划的后续建设线路落地,使得运营客流量更加难以提升。

3) 推动一体化建设与网络化运营。相比于香

港轻铁,我国其他网络化运营的有轨电车线网复线系数较低,仍有较大的发展潜力(见表 2)。上海松江有轨电车二阶段网络化运营后,运营客运量达到之前的 2 倍。截至 2020 年 9 月,上海松江有轨电车线日均客运量为 2.54 万人次/d,最高日客运量达到了 3.62 万人次/d,是一阶段日均客运量的 2.0 倍。因此,本文建议推动低运能系统网络化运营,以有效提升客流效益。

表 2 我国有轨电车网络化运营情况

Tab. 2 Networked operation status of trams in China

线路名称	运营长度/ km	线路长度/ km	复线系数
上海松江有轨电车	39.20	30.68	1.28
深圳龙华现代有轨电车	15.40	11.72	1.31
武汉光谷现代有轨电车	42.33	29.80	1.42
长春有轨电车	17.50	12.20	1.43
沈阳浑南现代有轨电车	102.60	63.40	1.62
东莞华为松山湖有轨电车	16.40	7.72	2.12
香港轻铁	101.10	36.10	2.80

2023 年有轨电车系统运营里程增加有两方面原因:① 新线(如苏州高新有轨电车 2 号线延伸线)开通运营;② 在既有工程基础上增加了新的运营交路方案,延长了运营里程,如武汉光谷现代有轨电车、龙华现代有轨电车、华为松山湖有轨电车,充分利用了既有工程条件,结合运营实际,合理增加运营交路,既实现了运营效益的提升,也体现了网络化运营的意义。

3.2 工程造价

根据 1302 号文要求:低运量轨道交通项目直接工程投资(工程费用和车辆购置费)不得超过 10^4 万元/km。统计部分已开通运营的低运能轨道交通线路,17 条线路中仅有 3 条线路的直接工程投资达标(见图 1)。

直接工程投资包括工程费用和车辆购置费。目前,已运营线路平均总投资经济指标为 15 065 万元/km,其中,平均直接工程投资经济指标为 12 277 万元/km。平均工程费用的经济指标为 9 753 万元/km,占总投资金额的 64.7%。平均车辆购置费为 2 524 万元/km,占总投资金额的 16.8%。

工程费用主要包含车站、正线区间、轨道、智能控制等弱电系统、供电系统、车辆基地等费用,低运能系统工程费用构成示意图如图 2 所示。由图 2 可

知:区间工程占比最大,车辆基地次之,供电工程、轨道工程位于第三和第四。

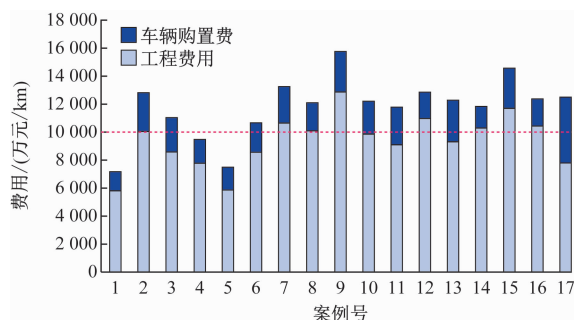


图 1 低运能系统线路直接工程投资

Fig. 1 Direct engineering investment for low-capacity system lines

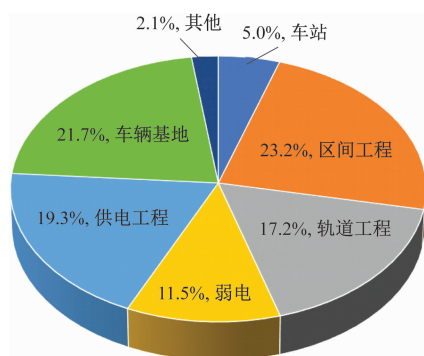


图 2 低运能系统工程费用构成示意图

Fig. 2 Schematic diagram of low-capacity systems engineering cost composition

需要指出的是,不同项目配置的车辆基地规模、标准不一,因此其费用在不同项目中存在较大差异。仅配置了停车场(或保养场)的项目,其车辆基地的工程费用会大幅下降。而配有车辆段的项目,我国多个基地面积超过 10 hm^2 ,车均占地面积基本在 $1\,800 \sim 2\,500 \text{ m}^2/\text{车}$,其平均车辆基地费用占本项目工程费用的比例高达 25%,既增大了工程投资,又增加了场站选址难度。

由于低运能系统在国内整体体量不大,车辆价格仍处于相对高位,且由于产品平台、供电方式、车辆配置及模块数量等原因,低运能轨道交通车辆价格相差较大。以供应量最大的有轨电车车辆为例,2012—2022 年间,中国中车集团有限公司在国内共中标约 600 组有轨电车车辆,平均价格约为 1 973 万元/组。车辆价格浮动区间为 1 450 万 ~ 2 700 万元/组。虽然车辆型式不尽相同,但价格差异较大,且整体处于高位。

基于此,本文提出以下控制工程造价的相关

建议:

1) 控制规模,集约用地。2018 年 9 月,GB/T 51328—2018《城市综合交通体系规划标准》,对城市有轨电车线路与车辆基地控制提出以下规定:①城市有轨电车宜采用地面敷设方式,线路(车站除外)用地控制宽度不宜小于 8 m;②城市有轨电车车辆基地占地面积宜按每 km 正线 $0.3 \sim 0.5 \text{ hm}^2$ 控制^[2]。

2022 年,由上海市地质调查研究院主编、上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司等单位参编的上海市工程建设规范 DG/TJ 08-2422—2023《节约集约建设用地标准》对车辆基地建设用地规模做出以下规定:车辆基地的规模应满足其停车和检修能力,并考虑线路长度、行车间隔及检修周期等因素,车辆基地车均建设用地指标如表 3 所示。

表 3 车辆基地车均建设用地指标

Tab. 3 Construction land indicators per vehicle in the vehicle base

车辆基地	用地指标/($\text{m}^2/\text{车}$)		
	市域线(市域铁路)	市区线(地铁)	局域线(有轨电车)
车辆段	1 040 ~ 1 300	800 ~ 1 000	1 300 ~ 1 600
定修段	780 ~ 1 100	600 ~ 900	1 000 ~ 1 450
停车场	520 ~ 780	400 ~ 600	700 ~ 1 000

作为参考,欧洲有轨电车车辆基地的用地规模更加集约。法国里昂有轨电车 T3 线车辆段长约为 250 m,宽约为 180 m,能够停 50 辆车,建设用地指标约为 $900 \text{ m}^2/\text{车}$,远小于我国有轨电车的建设用地指标。因此,我国建设有轨电车车辆基地时应合理进行系统配置及设备选型,合理控制规模,集约用地,以控制车辆基地的建设成本。

2) 精简建设,灵活运营。对于部分低运能系统线路而言,尤其是园区内部等非公共交通线路,可在规划建设时对相关标准、规范、要求等进行适当修改,不必严格执行,以减少建设成本。另外,非公共交通线路可通过灵活组织运营方案满足不同出行需求,以降低工程土建费用,集约用地。例如:华为青浦有轨电车采用单条线路,设置 4 座越行站,实现双向运营。

3) 线路敷设经济化,节点布设灵活。分析目前部分运营线路可知,低运能系统线路的旅行速度与桥隧比并不成正比(见图 3)。以苏州高新有轨电车为例,苏州高新有轨电车 1 号线桥隧比为 11.8%,苏

州高新有轨电车 2 号线桥隧比高达 38.0%, 但二者的旅行速度分别为 32 km/h 和 33 km/h, 相差不大。

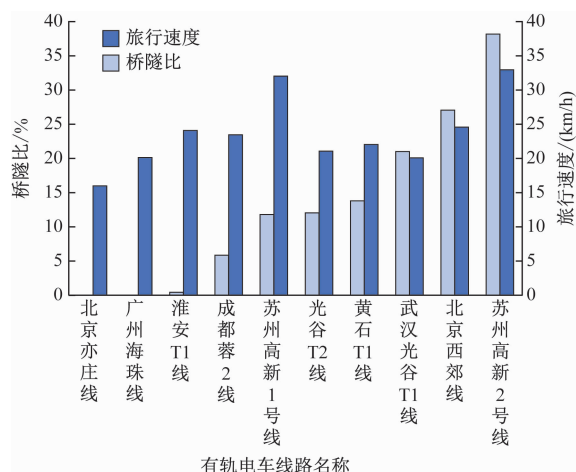


图3 低运能系统线路旅行速度与桥隧比关系图

Fig. 3 Relationship diagram between travel speed and bridge-tunnel ratio of low-capacity system lines

因此,应在影响运营效率的部分线路上审慎考虑路权和敷设方式,灵活敷设。例如:武汉光谷现代有轨电车三通节点采用全高架方式,以减小对路口的影响(见图4);苏州高新有轨电车1号线节点下穿横向道路,设置地面井结构,引进自然通风和采光,既减少了对横向道路的影响,又能降低成本(图5)。由此可知,基于地面公交优先发展理念,结合信号优先技术,灵活铺设局部线路,在有效保障低运能系统列车通行效率和客流效益的同时,合理控制工程造价。



图4 武汉光谷现代有轨电车三通节点高架敷设照片

Fig. 4 Elevated laying photo of Wuhan Optics Valley Modern Tram three-way node

4) 坚持在公交系统上做加法,进行系统配置和设备选型。低运能系统的设备及系统配置应在常规公交系统上做加法,而非在地铁系统上做减法,



图5 苏州高新有轨电车1号线地面井结构照片

Fig. 5 Ground well structure photo of SND (Suzhou New District) Tram Line 1

以防止非功能性的费用有所增加。同时,审慎开展技术引进工作,加强车辆和机电设备领域自主化,探索各种降低建设和运营成本的方式,总结低运能系统特点,精简设备与规模,因地制宜,提高项目经济效益。

3.3 投融资模式

根据 52 号文和 1302 号文要求,低运能轨道交通工程不能单纯依赖政府财政投资和债务融资,需创新投融资模式,降低地方财政负担,解决政府财政难题。

目前,我国低运能系统工程的投融资模式分为两种:以市场为主的投融资模式和以政府为主的投融资模式。

1) 以市场为主的投融资模式主要包括 BOT (建设-经营-转让) + 股权转让模式、PPP (政府和社会资本合作) 模式等。淮安现代有轨电车一期工程采用 BOT + 股权转让模式运作,总投资 35 亿元,经济指标约 1.5 亿元/km,是国内第一个由基础设施集成商承接的有轨电车项目。三亚市有轨电车示范线工程采用 PPP 模式运作,项目批复投资 14.7 亿元,经济指标约为 1.7 亿元/km,是国内第一条采用 PPP 模式成功实施落地的有轨电车项目。

2) 以政府为主的投融资模式是指政府出资 100%,完全由政府独立完成建设,项目验收后再独立运营,如苏州高新有轨电车 1 号线。但此种模式下,政府需承担巨额财政支出。为了严控地方政府债务风险,出现了新型投融资模式——政府投资 + 银行贷款模式。例如:黄石有轨电车一期工程总投资 48.02 亿元,新开发银行主权贷款 27.60 亿元,约占 57%,贷款总时限为 25 年,综合利率约为

3.35% ;地方配套财政资金 19.30 亿元,约占 40% ;企业自筹资金 1.12 亿元,约占 3%。该线是我国首个获得国际金融组织支持、首条由中华人民共和国国家发展和改革委员会和中华人民共和国财政部联合审批立项的有轨电车项目。

3.4 制式选择

低运能系统具备功能定位多样、线路布设灵

活、制式选择较多等优点。同时,我国幅员辽阔,城市规模不同,建设区域地貌及经济情况不同,道路条件不同,导致各城市相适应的制式也会有所不同,因此在建设运营过程中应因地制宜,合理选择经济适用的低运能系统制式,以构建多层次低运能系统。低运能系统制式技术特征对比如表 4 所示。

表 4 低运能系统制式技术特征对比

Tab.4 Comparison of technical characteristics for low-capacity system modes

系统制式	运输能力/ (人次/h)	设计速度/ (km/h)	路权 形式	敷设 方式	驾驶模式	供电方式	建设 周期/年	建设成本/ (万元/km)
悬挂式 单轨	5 000 ~ 15 000	60 ~ 80	全封闭	高架 为主	在 ATP(列车自动防 护)监督下的人工驾 驶模式	接触轨	1 ~ 2	15 000(仅 1 条运营 线路)
有轨电车	5 000 ~ 1 2000	60 ~ 70	开放式 或部分 封闭	地面 为主	司机瞭望驾驶,部分 线路配备司机辅助驾 驶系统	接触网、超级电容或 蓄电池,超级电容为 主流	1 ~ 2	10 000 ~ 15 000
导轨式 胶轮	5 000 ~ 12 000	60 ~ 80	全封闭	高架 为主	全自动运行	蓄电池或超级电容	1 ~ 2	10 000 ~ 15 000
电子导向 胶轮	5 000 ~ 12 000	60 ~ 70	开放式或 部分封闭	地面 为主	有人值守的自动驾驶	蓄电池或超级电容	1	3 000 ~ 6 000

4 结语

中国城市化进程不断发展,交通需求不断增长,新型城镇化、双碳战略下的绿色交通发展理念日益增强,低运能轨道交通发展是完善多制式多层次轨道交通的重要组成部分。本文结合 52 号文、1302 号文提出的相关工作要点,指出低运能系统在建设及运营过程中面临的问题与挑战,并提出相应建议:

1) 在提升运营效益方面,应明确公交优先的发展理念;坚持以人为本,以运营为导向进行规划建设;推动一体化建设与网络化运营等。

2) 在降低工程造价方面,应控制规模,集约用地;精简建设,灵活运营;坚持在公交系统上做加法,进行系统配置和设备选型。

3) 在创新投融资模式方面,积极探索新型投融资模式,降低地方政府债务风险。

4) 积极开展已运营项目的后评估或效益评价,系统性总结试运营期间的经验教训,以提升后续线路的建设及运营水平,如三亚有轨电车示范线。

5) 因地制宜选择低运能系统制式,构建经济适

用的多层次、多制式低运能系统。

参考文献

- [1] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通分类: T/CAMET 00001—2020[S]. 北京:中国铁道出版社,2020.
China Urban Rail Transit Association. Classification of urban rail transit: T/CAMET 00001—2020[S]. Beijing: China Railway Press, 2020.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家市场监督管理总局. 城市综合交通体系规划标准:GB/T 51328—2018[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2018.
Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. Urban comprehensive transportation system planning standard: GB/T 51328—2018[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2018.

· 收稿日期:2024-02-26 修回日期:2024-05-17 出版日期:2024-12-10

Received:2024-02-26 Revised:2024-05-17 Published:2024-12-10

· 通信作者:程樱,高级工程师,356486338@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