

导轨式胶轮系统高架线路互联互通方案研究^{*}

房霄虹 张梦然 李泽文

(中铁工程设计咨询集团有限公司, 100055, 北京//第一作者, 高级工程师)

摘要 目的:为继承和保持网络化互联互通运营的优势,实现线路和车辆等资源的充分利用和多向性客流需求的充分满足,同时解决高架线路立体交叉及立交设置联通线造成的空间占用和景观影响问题,在分析导轨式胶轮系统高架线路互联互通影响因素基础上,从配线、道岔、运营交路、车站布置及停站方案等方面综合构建了高架线路互联互通的平交实施方案。**方法**:针对不同的联通线设置和停站方案,明确提出了平交方案互联互通的作业流程,进行了典型案例互联互通能力计算,并根据计算结果给出不同互通需求下的停站方案建议:在两线间仅采用单象限双向互通时,建议采用路口前后站台均停车方案;在两线间采用对向的两象限四向互通时,仅在路口前停车方案在能力和速度保障上更有优势。**结果及结论**:通过了平交互联互通实施方案的搭建和能力检算,验证了导轨式胶轮系统高架线路互联互通平交实现的可行性,为后续实际工程中的互联互通设计和运营提供了理论支持和技术保障。

关键词 导轨式胶轮系统;高架线路;互联互通方案

中图分类号 U442.55

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.07.006

Research on Guideway Rubber-tyred System Elevated Line Interoperability Plan

FANG Xiaohong, ZHANG Mengran, LI Zewen

Abstract Objective: To achieve the goals of inheriting and maintaining the advantages of networking interoperation, fully utilizing resources such as routes and vehicles, comprehensively satisfying the multi-directional passenger demands, and addressing the issues of space occupation and landscape impact caused by elevated line interchange and interoperation line setting, a level crossing interoperability implementation plan for elevated lines is comprehensively constructed from aspects such as auxiliary lines, turnouts, operational routing, station layout, and station stopping schemes through analyzing factors that affect the interoperability of guideway rubber-tyred system elevated lines. **Method**: For different interoperation line settings and station stopping schemes, the operational process for level

crossing interoperability is distinctly proposed, and capacity calculations for interoperability in typical cases are conducted. Based on the calculation results, different station stopping scheme recommendations are given for different interoperability requirements: when one-quadrant two-way interoperability is designed for two lines, it is recommended to use the scheme of parking at platforms both before and after intersection; when diagonal two-quadrant four-way interoperability is designed for two lines, parking only at the platform before intersection has advantages in capacity and speed guarantees. **Result & Conclusion**: Finally, through the formulation of level crossing interoperability implementation plan and checking calculation of capacity, the feasibility of level crossing interoperability implementation on guideway rubber-tyred system elevated lines is verified, providing theoretical support and technical guarantee for the interoperability design and operation in subsequent practical engineering.

Key words guideway rubber-tyred system; elevated line; interoperation scheme

Author's address China Railway Engineering Design and Consulting Group Co., Ltd., 100055, Beijing, China

同制式线路的互联互通,能最大程度地实现资源的共享和充分利用,减少乘客换乘时间,提高乘客直达性,缩短乘客出行时间,进而提高运营服务水平并充分发挥网络化的效率。地面有轨电车系统运营组织方式与传统地铁系统相比最大不同和优势在于,一般采用多线路正线互通运营的组织方式^[1],其能提高运营组织灵活性,方便乘客出行,实现资源共享。

导轨式胶轮系统(又称“云巴”)是低运量轨道交通中的一种新系统,基本采用独立路权、高架敷设,与同为低运量系统的地面有轨电车相比,其显著提高了列车运行的智能化水平和安全性,保证了道路资源占用的减少、旅行速度的提高及系统设计

^{*} 中铁工程设计咨询集团有限公司科研项目(单轨-研 2020-3-12)

能力的提升。但同时,由于受到空间条件和城市景观限制,如何继承和保持有轨电车互联互通运营的优势,成为其发展中必须面对和解决的关键问题之一。

1 高架线路互联互通的影响因素分析

1) 导轨式胶轮系统线路采用高架敷设,利用橡胶轮胎在专用 U 型轨道梁上运行,通过内侧导向实现胶轮列车行驶方向的转换。该轨道采用钢结构梁的设计,美观轻巧,截面宽度仅为 1.7 m,可通过增大跨度减少墩柱量,从而减少占地面积,增加环境适应性。但是,互联互通多线路交织的空间占用和景观影响问题仍是必须重点考虑的因素。图 1 为高架轨道梁实景图。

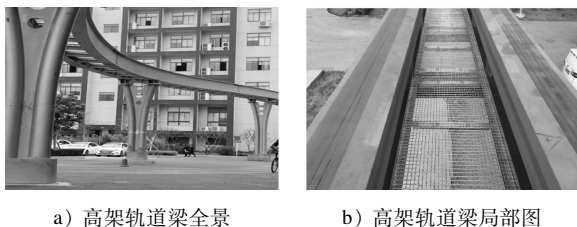


图 1 高架轨道梁实景图

Fig. 1 Pictures of elevated track beam

2) 导轨式胶轮系统高架线路采用平移道岔,其基本形式如图 2 所示。该道岔通过滑块的水平运动,改变道岔前后轨道梁的通道路径,以实现车辆行驶方向的转换。道岔结构与钢轮钢轨轨道系统有明显不同,互通节点的处理须根据道岔特点来特殊设计。

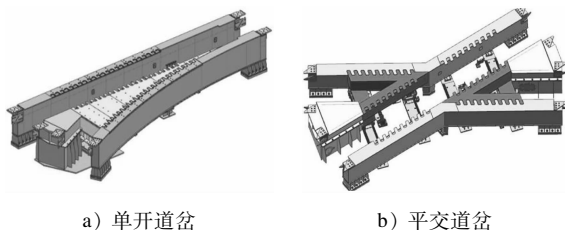


图 2 平移道岔基本形式^[2]

Fig. 2 Basic form of translation turnout^[2]

3) 导轨式胶轮系统的高架线路为全封闭线路,其系统能力不宜低于 30 对/h,最高运行速度为 80 km/h。高架线路互联互通方案的设计不能影响各线的通过能力和旅行速度。

4) 采用先进的卫星定位、超宽带定位和速度传感器等 3 种融合定位方式,沿线无需安装轨旁设备

就能实现连锁、移动闭塞等操作^[3];使用秒级响应道岔,转辙速度快;采用全自动驾驶,车车通信互动,环境智能化感知,连续定位纽带。列车运行智能化控制水平高,有利于提高互联互通能力。

2 高架线路互联互通方案

2.1 配线及道岔方案

2.1.1 既有互联互通配线形式

1) 车站配线。车站配线形式一般是通过在车站接车端或发车端设置单渡线或交叉渡线,以实现 2 个方向的列车互联互通跨线运营。互联互通车站配线形式如图 3 所示。其车站总体布置较紧凑,配线工程量小,各项设备利用率较高^[4]。但该方案要求互通线路的走向基本呈“X”形交叉,换乘车站平行并列布置,两线正线相交位置多采用立交实现。

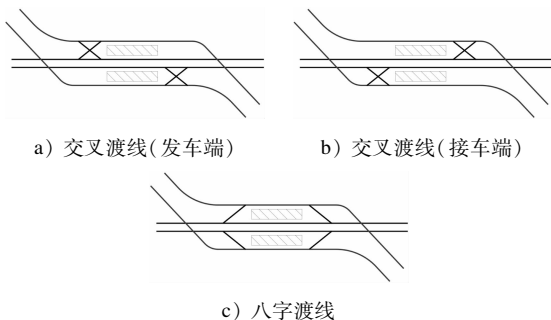


图 3 互联互通车站配线形式

Fig. 3 Auxiliary line forms of interoperation station

2) 双线联络线。互联互通的另一种配线形式,是通过双线联络线来实现不同线路间的跨线运营,其配线形式如图 4 所示。此类联络线具有正线运营的功能,本研究其统称为联络线。联络线布置的数量及位置是根据互通方向的需求予以确定。但采用联络线方案,车站站台须分离布置。联络线与正线间存在多处交织,使得配线的工程量较大。同时

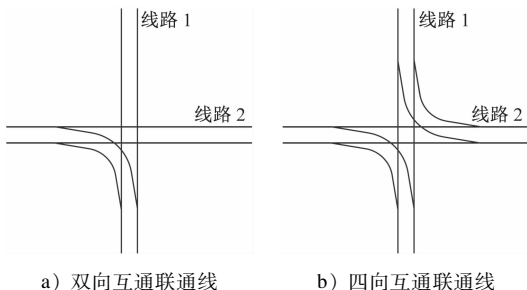


图 4 互联互通双线联络线配线形式

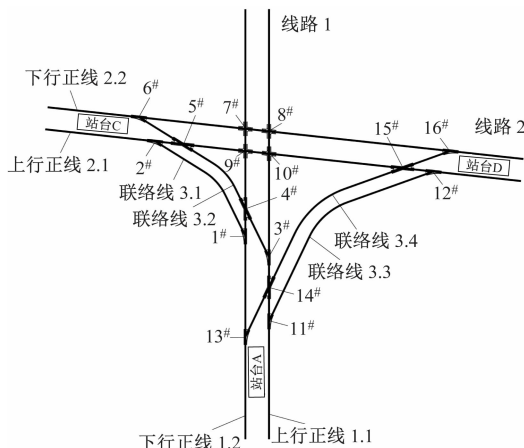
Fig. 4 Auxiliary line forms of interoperation double-track connecting lines

高架线路采用立交方案的空间占用和景观影响问题均非常大。

2.1.2 高架线路互联互通配线形式及道岔方案

独立路权、高架敷设的导轨式胶轮系统,主要沿市政道路敷设,线路也多采用“十字”相交;受车站布局及线路转弯半径等限制,车站渡线配线形式难以适用,宜采用双线联通线的形式。同时,为尽量减小空间占用和景观影响,在实施条件和通过能力允许的条件下,导轨式胶轮系统高架线路推荐采用全平交或部分平交的方案以实现互联互通。

图5为导轨式胶轮系统互联互通联通线配线形式。图6为十字交叉平交道岔布置图。导轨式胶轮系统的线路一般沿道路路中或路侧敷设。根据敷设道路的相交关系,2条线路呈一定夹角的“十”字形交叉。为实现正线交织点的完全平交,在线路交点处设置4组平交道岔(见图5中的7[#]、8[#]、9[#]、10[#])。平交道岔间距离和角度需根据具体线形和线间距来布置(见图6),每一组平交道岔都能通过交



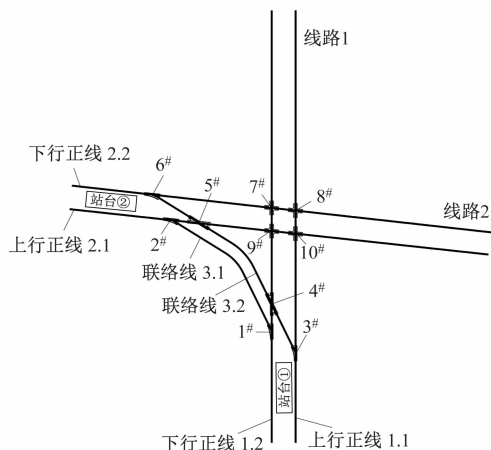
c) 四向互通配线形式二

注:1[#]—16[#]表示平交道岔;1.1、1.2、2.1、2.2表示正线编号;3.1、3.2、3.3、3.4表示联络线编号。

图5 导轨式胶轮系统互联互通联通线配线形式

Fig.5 Auxiliary line form of guideway rubber-tyred system interoperation connecting lines

替动作实现南北方向和东西方向列车的运行。联通线与正线的接入点宜采用单开道岔(见图5中1[#]、2[#]、3[#]、6[#]、11[#]、12[#]、13[#]、16[#]),联通线与正线的交织点宜采用平交道岔(见图5中4[#]、5[#]、14[#]、15[#])。



a) 双向互通配线形式

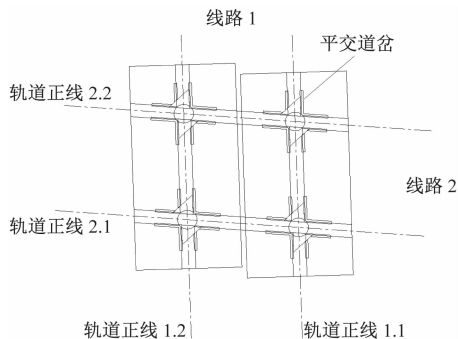


图6 十字交叉平交道岔布置图

Fig.6 Layout diagram of level crossing turnout

2.2 网络化运营典型交路设计

互联互通方案的行车组织一般采用多交路设计。网络化运营典型交路设计如图7所示。但开行交路的数量、交路间开行比例,以及各交路的折返点、开行对数,均需结合具体线路的客流需求、工程实施条件、工程投资和运营成本等综合确定。

2.3 车站布置及停站方案

2.3.1 车站布置

根据互通的需求数量及方向确定联通线的数量和布置象限,联通线接入正线端分别布置岛式站台,多个站台同属于一座换乘车站。同时综合换乘的客流需求强度、换乘便利性及工程可实施性等因

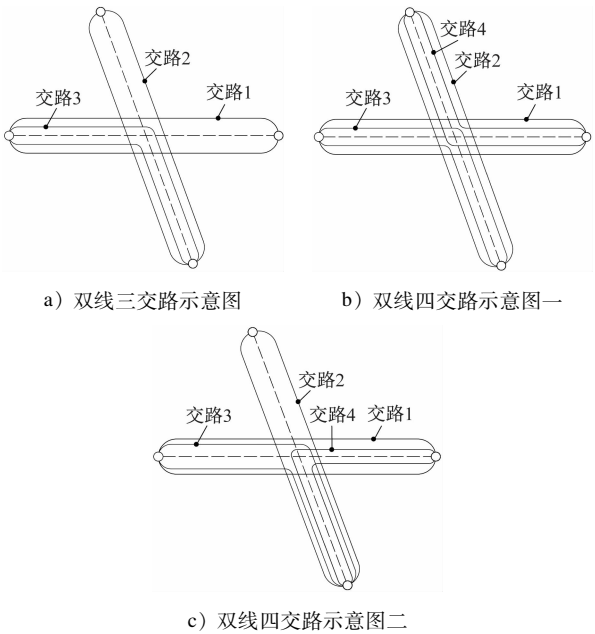


图 7 网络化运营典型交路形式示意图

Fig. 7 Typical routing forms of networking operation

素,考虑各站台间换乘联络通道的设置。以西南象限双向互通为例,车站及联络通道布置如图 8 所示。



图 8 车站及联络通道布置示意图(西南象限双向互通为例)

Fig. 8 Diagram of station and connecting passage layout (the case of southwest quadrant two-way interconnection)

2.3.2 停站方案

因多个站台同属一座车站,结合列车在路口前后站台是否停车,列车运行及停站存在 2 种方案:

- 方案一:任意方向的运行列车仅在路口前站台停车,过路口后在同车站的另一站台通过不停车。有联通线连接的线路方向间通过列车跨线运行实现互通,无联通线连接的线路方向间,推荐选用付费区通道换乘,乘客可选择由到达车站换乘前往对方车站,选乘所需搭乘的线路方向。
- 方案二:任意方向的运行列车在路口前后站台

均停车。有联通线连接的线路方向间通过列车跨线运行实现互通,无联通线连接的线路方向间,乘客可通过付费区通道换乘,也可通过有联通线连接的线路间跨线列车到达目标线路车站站台,然后至对向站台换乘对向列车。

3 联通线平交方案互联互通能力分析

导轨式胶轮系统高架线路互联互通采用平交方案,列车运行存在敌对进路,后续作业要等待前序作业完成后方可进行。这必然对通过能力造成影响。互联互通平交方案能否成立,还必须结合通过能力进行验算。

3.1 平交方案互联互通作业流程

在两线互联互通的运行组织过程中,主要存在 2 种列车:本线直行列车和跨线互通列车。因此作业也可分为:直行列车交替作业及跨线互通作业。

1) 直行列车交替作业流程(见图 9):线路 1 本线直行列车进①站台;线路 1 本线直行列车在规定的停站时间内完成上下客;线路 1 本线直行列车出站通过平交道岔组 A 点;平交道岔组完成方向转换;线路 2 本线直行列车出站通过平交道岔组 D 点。两线交织的平交道岔组既是直行列车交替作业的冲突点,也是交替作业能力的瓶颈,即在前序列车出清平交道岔组并完成道岔转换作业前,后续列车不能通过。但通过精准地控制后续列车的发车时刻,可有效缩短两列车的发车间隔,从而提高通过能力。

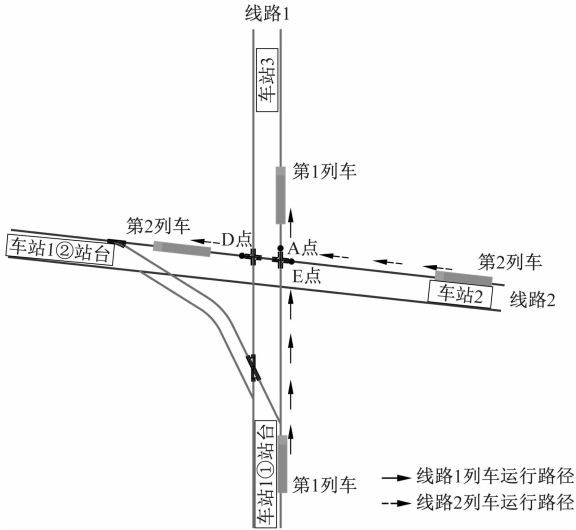


图 9 互联互通直行列车交替作业顺序示意图

Fig. 9 Diagram of alternative operation sequence of interoperation through trains

2) 跨线互作作业流程(见图 10):线路 1 本线直行列车进①站台;本线直行列车在规定的停站时间内完成上下客;线路 1 本线直行列车出站;线路 1 跨线互通列车进①站台;跨线互通列车在规定的停站时间内完成上下客;线路 1 跨线互通列车通过联通线到达②站台过 B 点;线路 1 跨线互通列车离开/通过②站台;开放线路 2 直行列车允许进入②站台进路;线路 2 本线直行列车进入②站台。

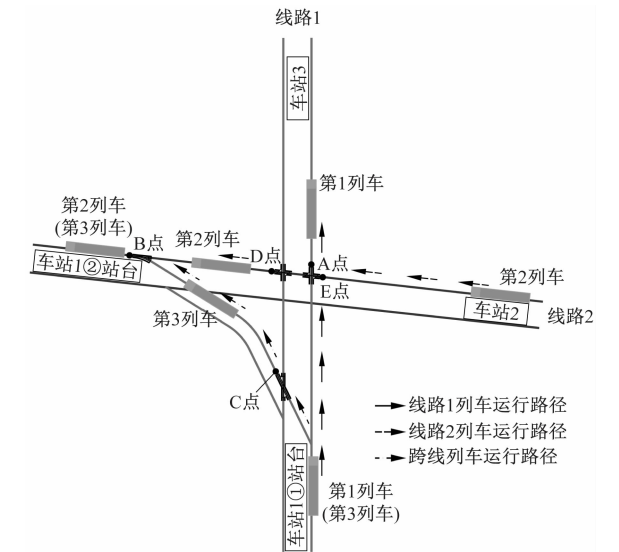


图 10 互联互通跨线互通作业顺序示意图

Fig. 10 Diagram of interconnection operation sequence of interoperation crossing trains

3.2 典型案例互通节点能力计算

导轨式胶轮系统,一般采用 2~4 模块编组,编组越多列车长度越长,对能力产生影响更大。故本文以 4 模块编组为案例,针对车站不同停站方案,进行联通线平交方案能力计算。

3.2.1 基础数据

列车采用 4 模块编组,其最高运行速度为 80 km/h,起动平均加速度 $>1.0\text{ m/s}^2$,行车制动平均减速度 $\geq 1.0\text{ m/s}^2$,紧急制动平均减速度 $\geq 1.2\text{ m/s}^2$,办理进站进路时间为 15 s,办理出站进路时间为 19 s。单开道岔直向过岔不限速,侧向过岔限速为 15 km/h;平交道岔过岔不限速。

3.2.2 单象限双向互通能力计算

3.2.2.1 方案一

过轨列车仅在路口前站台停车。图 11 为直行与直行列车发车间隔计算截图。图 12 为直行与过轨列车发车间隔计算截图。由图 11 和图 12 可知:直行与直行列车发车间隔为 108 s,线路 1 直行与过

轨列车发车间隔为 165 s,过轨列车与线路 1 直行列车发车间隔为 97 s。



图 11 直行与直行列车发车间隔计算截图(方案一)

Fig. 11 Screenshot of through train departure interval calculation (scheme 1)

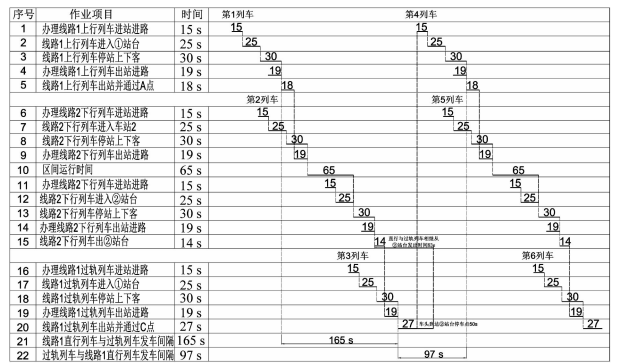


图 12 直行与过轨列车发车间隔计算截图(方案一)

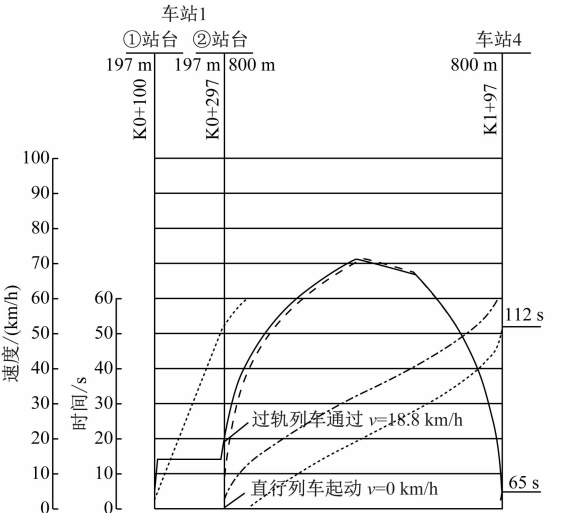
Fig. 12 Screenshot of through train and crossing train departure interval calculation (scheme 1)

但由图 12 可知,线路 2 直行列车从车站 1 ②站台出发与过轨列车通过车站 1 ②站台的间隔时间仅为 83 s,且后行过轨列车的通过速度大于前行出发列车的出发速度,将形成前慢后快的列车追踪运行,追踪间隔未必满足线路的车站通过能力要求。直行与过轨列车牵引曲线图如图 13 所示。

经验证,在考虑车站通过能力限制条件下,线路 2 列车离开车站 1 ②站台后,过轨列车需等待 4~10 s 再从①站台发车或在区间降速运行以保证与前车的追踪间隔,必将对通过能力或旅行速度造成影响。

3.2.2.2 方案二

任意方向的运行列车在路口前后站台均停车。图 14 为直行与直行列车发车间隔计算截图;图 15 为直行与过轨列车发车间隔计算截图。由图 14 和图 15 可知:直行与直行列车发车间隔为 108 s,线路 1 直行与过轨列车发车间隔为 165 s,过轨列车与线路 1 直行列车发车间隔为 97 s。



注：——为过轨列车速度-距离曲线；.....为过轨列车时间-距离曲线；--为直行列车速度-距离曲线；---为直行列车时间-距离曲线。

图 13 直行与过轨列车牵引曲线图

Fig. 13 Traction curve diagram of through train and crossing train



图 14 直行与直行列车发车间隔计算截图(方案二)

Fig. 14 Screenshot of through train departure interval calculation (scheme II)

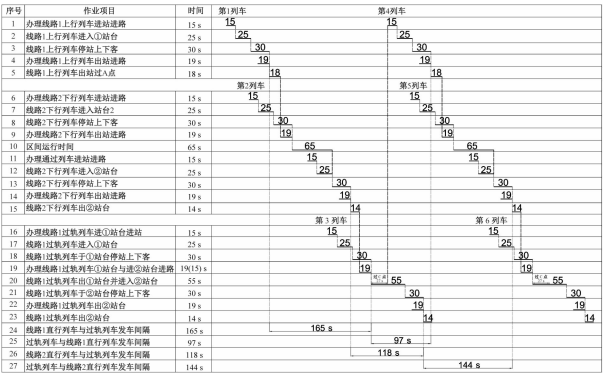


图 15 直行与过轨列车发车间隔计算截图(方案二)

Fig. 15 Screenshot of through train and crossing train departure interval calculation (scheme II)

3.2.3 对象限四向互通能力计算

与单象限双向互通采用同方式计算。若过轨列车仅在路口前站台停车,经通过能力计算可知:

直行与直行列车发车间隔为 90 s,线路 1 直行与过轨列车发车间隔为 102 s,过轨列车与线路 1 直行列车发车间隔为 97 s。

若任意方向的运行列车在路口前后站台均停车,经通过能力计算可知:直行与直行列车发车间隔为 102 s,线路 1 直行与过轨列车发车间隔为 133 s,过轨与线路 1 直行列车发车间隔为 97 s。

3.3 能力对比分析及方案建议

针对典型案例下 4 种不同互联互通方案,结合直行和过轨列车的开行比例,总结其停站方案及通过能力如表 1 所示。

表 1 不同互通方案通过能力对比分析表

Tab. 1 Comparative analysis of carrying capacity of different interoperation schemes

直行与过轨 列车开行比例	单象限双向互通		对向的两象限四向互通	
	仅路口 前停车/ (对/h)	路口前后 均停车/ (对/h)	仅路口 前停车/ (对/h)	路口前后 均停车/ (对/h)
直行: 过轨 = 1: 1	27. 5	27. 5	36. 2	31. 3
直行: 过轨 = 2: 1	29. 2	29. 2	37. 4	32. 5
直行: 过轨 = 3: 1	30. 1	30. 1	38. 0	33. 2

单象限双向互通方案对比,线路 1 路口前后均停车方案,不会因部分停车、部分通过而影响服务水平;两线路间交互客流通过联络通道换乘或通过跨线列车直通或同台换乘,这提高了换乘的便捷性,且由于不会受到车辆追踪间隔的影响,在通过能力上甚至高于仅在路口前停车方案。综上,在两线间仅采用单象限双向互通时,建议采用两站台均停车方案。

对向的两象限四向互通方案对比,路口前后均停车方案,两线路间交互客流通过联络通道换乘或通过跨线列车直通/同台换乘,提高了换乘便捷性,但由于路口前后车站均需停车上下客,通过能力低于仅在路口前停站方案,全线旅行速度和乘客出行时间也均会受到影响。因此,在两线间采用对向的两象限四向互通时,仅在路口前停车方案在能力和速度保障上更有优势。

4 结语

本文结合线路、车站、道岔等设置提出了导轨式胶轮系统互联互通平交配线方案,可实现导轨式胶轮系统高架线路通过平交方式的互联互通,降低了线路间立体交叉及立交设置联通线造成的城市

空间占用及景观影响。且针对不同的联通线设置和停站方案,进行了典型案例互联互通能力计算,并根据计算结果给出了不同互通需求下的停站方案建议,希望可为未来导轨式胶轮系统在实际工程中的互联互通设计和运营提供有益参考。

参考文献

- [1] 程樱. 现代有轨电车的典型道岔型式[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(4): 144.
CHENG Ying. Study on the typical style of turnouts in modern tram[J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(4): 144.
- [2] 比亚迪汽车工业有限公司. 比亚迪胶轮有轨电车系统总体设计原则及技术规范[Z]. 上海: 比亚迪汽车工业有限公司, 2019.
BYD Auto Industry Co., Ltd. Overall design principles and technical specifications of BYD rubber-tyred tram system[Z]. Shanghai: BYD Auto Industry Co., Ltd., 2019.

- [3] 左飞. 云巴胶轮有轨电车信号系统方案研究[J]. 铁路技术创

(上接第25页)

- PAN Xixiang. Research on suspended monorail design of the system guide way structure[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [2] 张元海, 何嘉祥, 王晨光, 等. 开闭混合断面薄壁梁约束扭转分析[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(2): 166.
ZHANG Yuanhai, HE Jiaxiang, WANG Chenguang, et al. Analysis on restrained torsion of thin-walled beams with open-closed mixed section[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(2): 166.
- [3] 康兴东, 徐崇, 张国栋, 等. 日本悬挂式单轨系统的应用与发展[J]. 国外铁道车辆, 2019, 56(5): 1.
KANG Xingdong, XU Chong, ZHANG Guodong, et al. Application and development of suspended monorail system in Japan[J]. Foreign Rolling Stock, 2019, 56(5): 1.
- [4] 陈圣刚, 谢群, 郭全全, 等. 小跨高比RC开口梁弹性扭转性能计算方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(8): 96.
CHEN Shenggang, XIE Qun, GUO Quanquan, et al. Calculation method for elastic torsional performance of open RC beams with small span-height ratio[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(8): 96.
- [5] CHEN S, DIAO B, GUO Q, et al. Experiments and calculation of U-shaped thin-walled RC members under pure torsion[J]. Engineering Structures, 2016, 106: 1.
- [6] 陈圣刚, 许见超, 郭全全, 等. 混凝土U形薄壁梁纯扭及弯

新, 2019(6): 111.

ZUO Fei. Study on signal system scheme of Yunba Rubber-tyred Tram[J]. Railway Technical Innovation, 2019(6): 111.

- [4] 周立新, 丛聪. 城市轨道交通接轨站布置图型探讨[J]. 铁道标准设计, 2006, 50(增刊1): 110.
ZHOU Lixin, CONG Cong. Discussion on layout graphics of connecting stations in urban rail transit[J]. Railway Standard Design, 2006, 50(S1): 110.
- [5] 顾海艇, 吕永波, 刘朝阳. 城市轨道交通互联互通车站配线设计能力计算[J]. 都市快轨交通, 2019, 32(2): 29.
GU Haiting, LYU Yongbo, LIU Zhaoyang. Design and capacity calculation of inter-connected station in urban rail transit[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2019, 32(2): 29.
- [6] 严静星. 城市道路信号交叉口的交通工程优化设计[D]. 南京: 东南大学, 2011.
YAN Jingxing. Traffic engineering optimization design of urban signalized intersections[D]. Nanjing: Southeast University, 2011.

(收稿日期: 2021-03-24)

扭承载力计算[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(2): 99.

CHEN Shenggang, XU Jianchao, GUO Quanquan, et al. Ultimate bearing capacity of U-shaped thin-walled RC beams under pure torsion and bending-torsion interaction[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(2): 99.

- [7] 徐玉野, 郑顺盈, 董毓利, 等. 薄壁U形钢板加固受火后钢筋混凝土梁受力性能研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(3): 58.
XU Yuye, ZHENG Shunying, DONG Yuli, et al. Mechanical performance of reinforced concrete beams after fire and strengthened with thin-walled U-shaped steel plate[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(3): 58.
- [8] AMINBAGHAI M, MURIN J, HRABOVSKY J, et al. Torsional warping eigenmodes including the effect of the secondary torsion moment on the deformations[J]. Engineering Structures, 2016, 106: 299.
- [9] 吴宏业. 开口截面薄壁组合梁简化设计应用研究[J]. 北方交通, 2020(8): 17.
WU Hongye. Application research on simplified design of thin-walled composite beam with open section[J]. Northern Communications, 2020(8): 17.
- [10] WANG H, ZHU E. Dynamic response analysis of monorail steel-concrete composite beam-train interaction system considering slip effect[J]. Engineering Structures, 2018, 160: 257.

(收稿日期: 2021-02-26)

欢迎访问《城市轨道交通研究》网站

www.umt 1998.tongji.edu.cn