

基于虚拟编组技术的麦加轻轨繁忙时段 运输组织优化*

张 龙

(中国铁建股份有限公司, 100080, 北京)

摘 要 [目的]随着麦加朝觐客流的逐年增长,麦加轻轨繁忙时段运行方案的通过能力达到饱和。为此,探究虚拟编组技术对麦加轻轨繁忙时段运行模式的优化效果,以提升其通过能力。[方法]在研究过程中,通过对发车间隔和发车顺序的深入分析,构建了开行方案。在不同时段采用了A—E共计5种运行模式,以繁忙时段(运行模式C)内总开行列车数最多为目标,运用运行图周期分析方法,得出了最优的运行方案。[结果及结论]研究结果表明,采用虚拟编组技术优化后的运行方案相较于既有的繁忙时段运行方案,能够压缩部分列车发车间隔时间,从而提升运行图周期,进而提高通过能力。虚拟编组技术的应用使得在繁忙时段(5 h)内能够开行144对列车,相较于原有模式的132对,通过能力相对提升了9.1%。该研究的实际意义在于为麦加轻轨提升通过能力及服务水平提供了现实可行的方案。

关键词 麦加轻轨;发车间隔优化;虚拟编组技术;开行方案

中图分类号 U292.31

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.07.024

Optimization of Mecca Light Rail Train Organization during Peak Hours Based on Virtual Formation Technology

ZHANG Long

(China Railway Construction Co., Ltd., 100080, Beijing, China)

Abstract [Objective] With the annual increase of pilgrim flow in Mecca, the throughput capacity of Makkah Metro Pink Line (simplified as Mecca light rail) operation plan during peak hours is saturated. Therefore, it is aimed to explore the optimization effect of virtual formation technology on the operational mode of Mecca light rail during peak hours, targeting at improving its throughput capacity. [Method] In the research process, an operation plan is constructed through in-depth analysis of departure intervals and sequencing. Five operational modes, denoted as A to E, are adopted for different hours.

With the objective of maximizing the total number of trains operated during peak hours (operational mode C), the optimal operation plan is obtained using timetable cycle analysis method. [Result & Conclusion] Research results indicate that the operation plan optimized with virtual formation technology, compared to the existing plan for busy hours, can compress the departure intervals of some trains, thereby improving the timetable cycle and consequently enhancing throughput capacity. The application of virtual formation technology allows for the operation of 144 pairs of trains during busy hours (about 5 hours), demonstrating a relative increase of 9.1% in throughput capacity compared to the original mode of 132 pairs. The practical significance of the research lies in providing a realistic and feasible solution for enhancing the throughput capacity and service level of Mecca light rail.

Key words Mecca light rail; departure interval optimization; virtual marshalling technology; operation plan

麦加轻轨是中国企业在中东地区建成的第一条轻轨,也是沙特首条轻轨,其位于伊斯兰教的圣地麦加,主要服务于穆斯林朝圣客流^[1]。由于朝觐有严格的流程和时间限制,其客流呈现超大密度、强潮汐性等特点,因此该项目为当前全球小时断面设计运能最大、运营模式最复杂、运营任务最繁忙的城市轨道交通项目。

中铁建国际公司作为沙特阿拉伯指定的麦加轻轨运营方,精心设计每年的试运营、客流组织、运输组织、安全认证及保障等工作,圆满完成了历年朝觐客流的运输任务。这不仅为中铁建国际公司带来了可观的收益,也大大提高了我国铁路企业在穆斯林世界的声誉。

在运输组织方面,中铁建国际公司考虑到其完全不同于普通地铁的客流特点,设计了一套符合客流需求、持续7天6夜且多种运营模式不断转换的

* 国铁集团科研开发计划基金项目(P2023T001)

复杂运输组织方案,取得了显著效果。尤其在客流需求最为集中的时段,采用拉锯开行的“模式 C”输送的高峰断面客运量单向高达 7.2 万人/h。但由于每年的朝圣者多在 230 万人以上且出行极其集中,因此麦加轻轨的运力仍远不能满足客流需求。

随着通信信号与控制技术的不断发展,以车车通信等技术为基础的虚拟编组技术(又称虚拟联挂技术)日趋成熟,成为提高轨道交通通过能力的重要发展方向。采用虚拟编组技术的列车可实现列车信息(如位置、速度)的共享,使相邻列车可采用同步的驾驶策略,也就是形成一种虚拟的联挂关系,可大大压缩列车间的追踪间隔^[2]。为进一步提升麦加轻轨的通过能力,本文重点研究虚拟编组技术对麦加轻轨最繁忙时段的能力提升情况,以验证其效果。

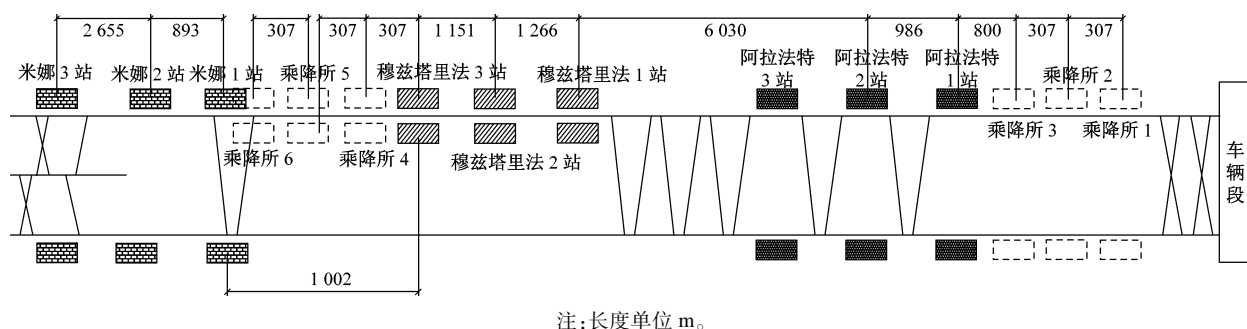


图1 麦加轻轨车站分布示意图

Fig. 1 Distribution diagram of Mecca light rail stations

基于朝觐期间朝觐者不同时间段来往于不同朝圣地点的客流特点,麦加轻轨在不同时段采用了A—E 共计 5 种运行模式,各模式的列车开行频率和运行路径均有所不同。具体的 A—E 运行模式参考文献[3]。本文只对客运量最集中、运输压力最大的运行模式 C 时间段进行研究和分析。

1.2 运行模式 C 的运输组织

运行模式 C 于每年伊斯兰历 12 月 9 日 19 时开始至次日零点结束,共计 5 h,对应的是朝觐中客流最集中的时段,乘客需尽快从阿拉法特赶赴穆兹塔里法。因此,该时段的通过能力是整个朝觐期间通过能力的瓶颈。为了提高通过能力,麦加轻轨采取的是“拉锯模式”,即上、下行线路皆单线双向运行,原线返回时折返行驶至对应初始位置。每条线均按照 3 列列车一组的方式,组织列车按列车组追踪运行。

图 2 表示了上行线路各列车组从阿拉法特车站组向穆兹塔里法车站组定点开行的分组方案。具

1 麦加轻轨最繁忙时段运输组织现状分析

1.1 麦加轻轨的基本情况

麦加轻轨起于加马拉站,经米娜、穆兹塔里法,至终点阿拉法特地区,全长 18.70 km,运营里程约 14.78 km^[3]。轻轨线路正线为双线,全线共设 9 座车站,分别为阿拉法特 1 站、2 站、3 站,穆兹塔里法 1 站、2 站、3 站,米娜(加马拉)1 站、2 站、3 站。阿拉法特 1 站邻靠车辆段,为提高高峰时段的通过能力,该站与车辆段之间设有 3 处乘降所,即乘降所 1 站、2 站、3 站。同时为提高高峰时段定点运输点之间的列车折返效率,在穆兹塔里法 3 站与米娜 1 站之间又设有 3 个乘降所,分别为乘降所 4、5、6。麦加轻轨车站分布及站间距如图 1 所示。

体为车组中的 3 列车分别与 3 个相邻车站一一对应,列车从对应车站运行至另一对应车站。其中列车连接线表示了定点运输的经停站及运行路径。

以上行线路为例,1—3 号车为一组,分别在阿拉法特 3 站—1 站停站上客,载客分别运行至穆兹塔里法 3 站—1 站停站下客,下客完毕后,1—3 号列车依次向米娜方向运行一段距离停车等待。同时 4—6 号车为一组,紧随 1—3 号车依次在虚拟站 3—1 出站,分别运行至阿拉法特 3 站—1 站停站上客,载客运行至穆兹塔里法 3 站—1 站停站下客,下客完毕后,1—6 号车空车状态沿原线返回到初始位置。

该模式避开了限制线路能力的跨线折返过程,采用两端双司机值乘的方式极大压缩了折返时间,进而提升了线路能力,是基于当前技术设备条件下,面向出发地、目的地均较为集中的大客流所采取的一种非常有效的方式,在实际运营中也取得了非常好的效果,在 5 h 内可开行列车 132 列左右,最

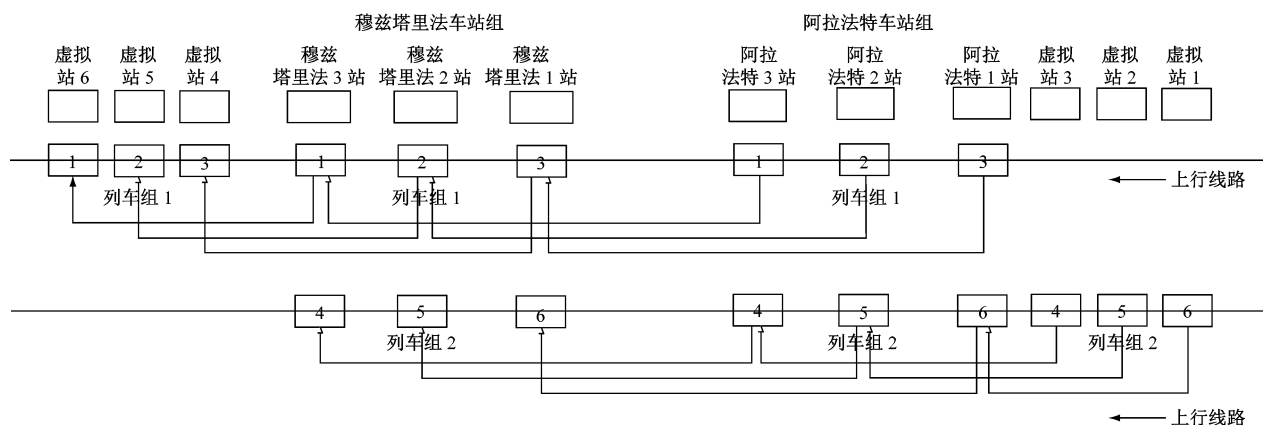


图2 车站和列车分组定点运输开行模式

Fig. 2 Station and train grouping fixed-point transport operational mode

大程度地满足了客流需求。

2 运行模式 C 的通过能力分析

2.1 运行模式 C 的具体运行情况

运行模式 C 在通过能力提升方面存在以下几项限制：

1) 车站客流集散压力较大，乘客上下车时间较长，通过客流组织，停站时间现已压缩至 150 s，从基础设施能力和安全角度来讲，不具有进一步压缩停站时间和追踪间隔时间的条件。

2) 借鉴运行模式 B 采取常规的双线成对追踪运行方式时，由于需要绕行经过道岔、发车拥挤等问题，在 14.5 h 内可开行 257 列列车。比运行模式 C 运输效率低 48.9%。不建议采用此运行方式。

3) 受轨道线路、列车性能、基础设施的能力限制，不能通过提升运行速度、增加列车编组、增加车厢载客量及优化开行密度等来提升整体客运量。

4) 发车瞬时功率较大，供电线路只能承受 2 列

列车同时启动。不能同时启动全部列车来压缩发车间隔。

模式 C 同时存在采用虚拟联挂技术所不可避免的缺点：

1) 载客时间过于集中，容易造成乘客排队拥堵。

2) 采用“拉锯模式”运行时，由于各列车走行距离不一，各列车在虚拟站有部分等待时间，影响了运输效率。

受以上因素的限制，运行模式 C 采用列车组的方式追踪运行，以发车顺序为例，将列车分为 4 组，每组由 3 列车构成，按组号顺序依次发车，分组顺序如图 3 所示。各组间发车间隔皆涉及到上下行线路的切换，组间发车间隔设计为 15 s。组内发车受限于瞬时功率过大和避免司机误操作等的影响，采用各列车依次启动的方式发车，组内发车间隔设计为 5 s。列车同条线路返程时倒序发车，且间隔时间相同。

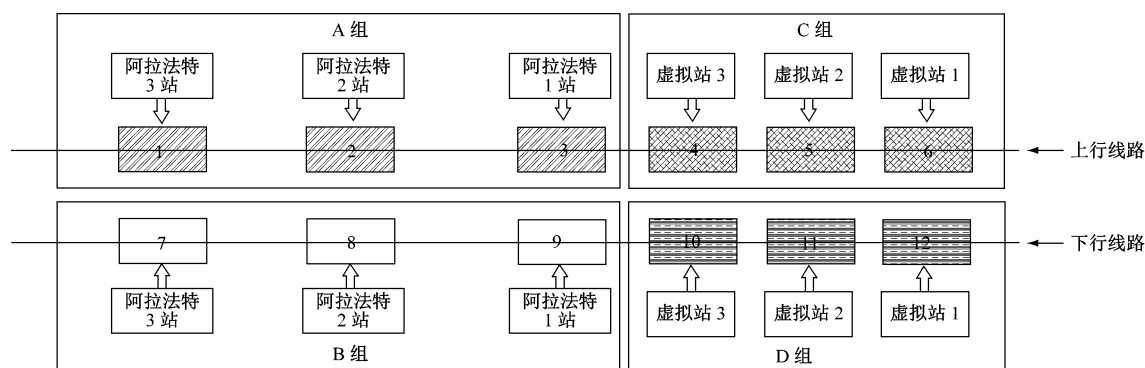


图3 运行模式 C 发车顺序分组示意图

Fig. 3 Grouping diagram of operational mode C train departing sequence

2.2 运行模式 C 的通过能力计算

运行模式 C 的通过能力取决于列车运行图周期,为此铺画了其运行图如图 4 所示。以列车 1 为例,其运行图周期包括:发车运行至穆兹塔里法 3 站,在穆兹塔里法 3 站停站下客,运行至虚拟站 6,在虚拟站 6 等待同线折返;自虚拟站 6 返回至阿拉法特 3 站,在阿拉法特 3 站同线折返同时上客。以上环节中,列车在各站间运行时间需通过仿真计算获取;列车在虚拟站 6 等待折返的时间则取决于其

他列车的运行状态,而其他列车的状态与各自运行时间有关。由此可见,由于各列车运行距离不同,其运行时间也有一定差异;各列车在虚拟站均有一定的等待时间,而该等待时间取决于其他列车的作业状态,这导致运行图周期的计算存在一定难度。为解决该问题,本文首先通过牵引计算获取各列车的运行时间,再通过构建工序图的方式获取列车在虚拟站的等待时间,进而可求出运行图周期和通过能力。

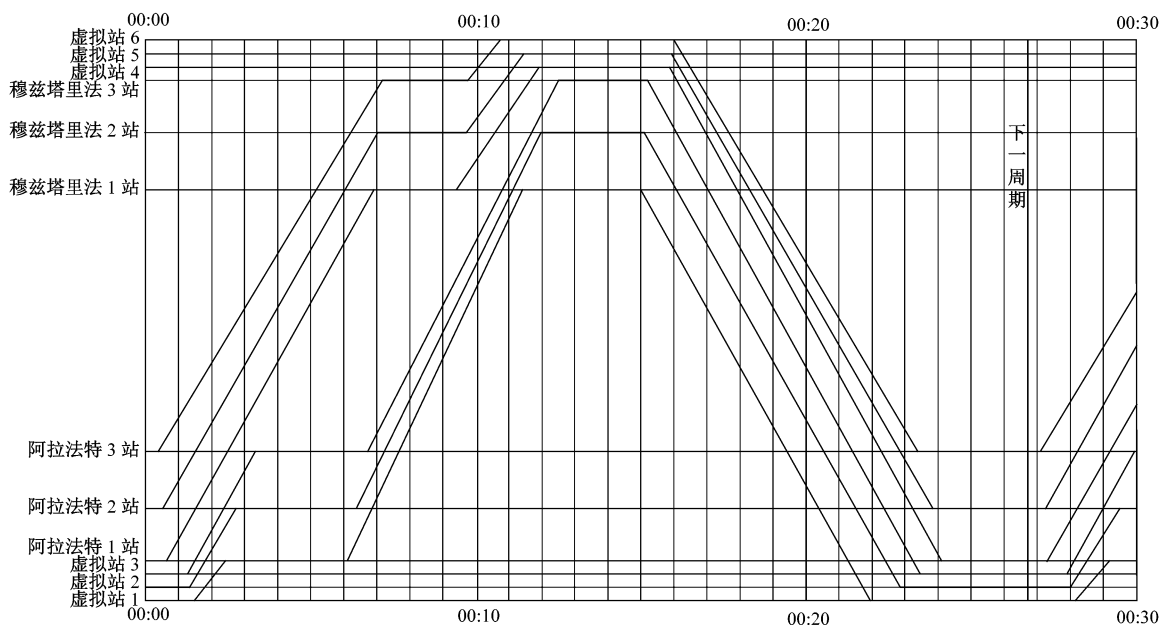


图 4 运行模式 C 上行线路列车运行图

Fig. 4 Train running diagram of operational mode C upward line

通过牵引计算获取的各列车在各区间运行时分见表 1,其中各列车均有 3 次起停过程,各列车起

停过程的走行距离、时间及起停站等信息详见图 4 所示列车运行图。

表 1 运行模式 C 在 1 个运行周期内各列车运行时间

Tab. 1 Running time of each train in one running cycle of operational mode C

列车编号	1 个运行周期内各列车在各个作业过程中的运行时间/s								
	起停过程 1			起停过程 2			起停过程 3		
	加速	匀速	减速	加速	匀速	减速	加速	匀速	减速
列车 1	35	348	22	35	9	22	35	389	22
列车 2	35	340	22	35	47	22	35	420	22
列车 3	35	319	22	35	90	22	35	442	22
列车 4	35	62	22	35	348	22	35	442	22
列车 5	35	31	22	35	340	22	35	404	22
列车 6	35	9	22	35	319	22	35	361	22

各列车折返等待时间需由其他作业环节推算得出,根据推算,列车 1—3 分别在虚拟站 6—4 的等

待时间分别为 313 s、212 s、240 s,列车 4—6 在虚拟站 3—1 的等待时间分别为 75 s、80 s、85 s,运行图

周期为 1 599 s。5 h 内通过能力为 132 列列车。这与实际列车开行情况一致,也证明实际运营中已经充分利用了该模式的能力,在不改变运行模式的前提下已无法再增开列车。

3 虚拟编组技术在运行模式 C 中的运用

3.1 虚拟编组技术在麦加轻轨应用的可行性

虚拟联挂技术可以使多列车同时起停,一方面这消除了组内联挂列车间的发车间隔时间^[4-5],另一方面列车在区间可实现由“绝对制动距离”到“相对制动距离”的转变,压缩列车的区间追踪间隔时间。一般来说,线路中的道岔是虚拟联挂技术运用的壁垒,一方面虚拟联挂技术不能压缩列车通过道岔驶入不同方向的时间间隔,因为需要预留距离让道岔有足够时间完成转换与锁闭;另一方面如果两列车以相对短距离虚拟联挂通过道岔,将产生一定的安全风险^[6]。而麦加轻轨运行模式 C 采用上、下行线路皆双单线双向运行,运行径路中无道岔,故没有道岔对虚拟联挂技术运用的限制。因此,麦加轻轨在虚拟联挂技术运用方面排除了这一限制性的影响因素,在应用虚拟联挂技术上具有天然优势。

从改造资金上来讲,沙特政府有雄厚的实力。虽然沙特阿拉伯绝大多数财富来自丰富的石油储藏,但宗教旅游在该国经济中扮演着重要角色。朝觐正朝和副朝每年为沙特阿拉伯的 GDP 增加约 120 亿美元,占沙特国内生产总值的 7%,是沙特阿拉伯第二大收入来源^[7]。沙特政府有意愿提供改造资金和政策支持,来优化现有运输组织,以提高麦加轻轨的运输效率和服务水平,促进宗教旅游业的发展。

3.2 虚拟编组技术对麦加轻轨通过能力的提升分析

在运行模式 C 基础上通过出站耦合等列车耦合与解耦方式灵活性的增加,线路通过能力得到进一步提升。以上行线路为例,运行周期都包含了 3 次起停过程和相同的停站间隔类型及数量,其中 3 次起停过程区间运行时分与原运行模式 C 相同。表 2 列举了虚拟联挂下上行线路 1 个运行周期内各列车停站状态时间表。

与原运行模式 C 相同,运行周期内的起停过程无法压缩,仍然是影响运行周期优化的主要瓶颈。而虚拟联挂技术的运用将往返发车间隔内可能由司机操作失误等因素设置的 16 个 5 s 发车间隔减

表 2 虚拟联挂下 1 个运行周期内各列车停站时间表
Tab. 2 Train station-stopping timetable within one running cycle of virtual coupling

列车编号	起停过程 1 停站时间/s	起停过程 2 停站时间/s	起停过程 3 停站时间/s
列车 1	150	203	222
列车 2	150	173	192
列车 3	150	150	175
列车 4	150	150	175
列车 5	150	188	203
列车 6	150	232	246

少至 8 个;将上下行线路转换的 6 个 15 s 转换间隔减少至 2 个。从比较分析结果来看,原模式 C 运行周期为 26.65 min,在虚拟联挂技术的运用下,运行周期为 24.99 min,5 h 的总通过能力是 144 对列车,相对通过能力提升 9.1%。

4 结语

根据朝觐活动的要求,面对短时间内的庞大客流,麦加轻轨的运营组织方案在不断优化。本文在分析麦加轻轨最新列车运行模式及往年运营效果基础上提出改进方案。针对需要重点优化的运行模式 C,提出了虚拟联挂技术的运用,通过计算分析,验证了基于虚拟联挂技术运用的可行性。分析结果表明:

1) 基于麦加轻轨独特的开行方式及线路设施,本文所提及的虚拟联挂方法在麦加轻轨运行模式 C 上运用具有良好的可行性。

2) 与非虚拟联挂相比,虚拟联挂技术在麦加轻轨上应用能提高线路通过能力。

虚拟联挂技术在麦加轻轨上应用的优化效果显著,可为麦加轻轨运行方案的优化提供重要参考。此外,受电力系统的限制,多列车虚拟联挂技术的运用方案尚有待进一步研究。

参考文献

- [1] 李文杰,刘东,董敬.中国铁路运营“走出去”现状分析与政策建议[J].中国铁路,2017(6):17.
LI Wenjie, LIU Dong, DONG Jing. Analysis on the current situation of overseas operation of China railway and suggestions on policy[J]. China Railway, 2017(6):17.
- [2] 张锐连,施国庆.“一带一路”倡议下海外投资社会风险管控研究[J].理论月刊,2017(2):135.

(下转第 151 页)

5 结论

1) 增加桩周注浆加固厚度可有效提升摩擦桩承载性能,加固区段荷载传递效率提升明显,桩侧摩阻力显著增大。相比于未注浆状态,摩擦桩桩周加固厚度 8 m 时,2[#]-14 桥墩墩顶沉降减少了 72%,墩台差异沉降也可得到充分改善;桩周加固宽度扩大对桩承载性能改善作用有限。

2) 采用数值计算结果指导注浆加固现场施工,由桥梁监测结果可知,保持初始加固方案下,将摩擦桩桩周注浆加固厚度设置为隧道底板下 8 m 时,各点位沉降及差异沉降均可满足控制要求。在有效的桩周注浆加固中,可将桩与加固区结合体看作特殊的桩基托换形式,在低碳模式下解决部分桥梁结构保护问题。

该明挖法隧道施工实现对既有桥梁变形有效控制的经验,可为类似工程提供参考。

参考文献

- [1] 李恒一,王志杰,何晟亚,等. 地铁基坑下穿铁路桥的桥墩保护设计方案合理性研究[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(7): 180.
- LI Hengyi, WANG Zhijie, HE Shengya, et al. Rationality study
- [3] 张龙. 麦加轻轨列车运行模式分析与优化研究[J]. 铁道运输与经济, 2022, 44(1): 134.
- ZHANG Long. Analysis and optimization of train operation mode of mecca light rail[J]. Railway Transport and Economy, 2022, 44(1): 134.
- [4] QUAGLIETTA E, SPARTALIS P, WANG M, et al. Modelling and analysis of Virtual Coupling with dynamic safety margin considering risk factors in railway operations[J]. Journal of Rail Transport Planning & Management, 2022, 22: 100313.
- [5] QUAGLIETTA E, WANG M, GOVERDE R M P. A multi-state train-following model for the analysis of virtual coupling railway operations[J]. Journal of Rail Transport Planning & Management, 2020, 15: 100195.
- [6] DI MEO C, DI VAIO M, FLAMMINI F, et al. ERTMS/ETCS virtual coupling: proof of concept and numerical analysis[J].

on pier protection and design scheme of metro foundation pit under-crossing railway bridge[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(7): 180.

- [2] 黄银钉. 地铁区间隧道下穿既有桥梁的桩基托换[J]. 城市轨道交通研究, 2012, 15(2): 100.
- HUANG Yinding. Bridge pile foundation underpinning in subway tunnel[J]. Urban Mass Transit, 2012, 15(2): 100.
- [3] 张忠苗. 灌注桩后注浆技术及工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009: 153.
- ZHANG Zhongmiao. Post-grouting technology of cast-in-place pile and its engineering application[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009: 153.
- [4] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥涵地基与基础设计规范: JTG 3363—2019[S]. 北京: 人民交通出版社, 2019: 31.
- Ministry of Transport of the People's Public of China. Specifications for design of foundation of highway bridges and culverts: JTG 3363—2019 [S]. Beijing: China Communications Press, 2019: 31.

· 收稿日期:2022-10-09 修回日期:2023-01-20 出版日期:2024-07-10
Received:2022-10-09 Revised:2023-01-20 Published:2024-07-10
· 通信作者:张海东,高级工程师,24098831@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

(上接第 145 页)

IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 21(6): 2545.

- [7] 方明华,魏玉光. 麦加轻轨运营经验 对中国铁路“走出去”的启示[J]. 中国铁路, 2016(12): 15.
- FANG Minghua, WEI Yuguang. Enlightenment of mecca light rail operation experience on “going global” of China railway[J]. China Railway, 2016(12): 15.
- [8] LIU Y, ZHOU Y, SU S, et al. An analytical optimal control approach for virtually coupled high-speed trains with local and string stability[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2021, 125: 102886.
- 收稿日期:2023-07-06 修回日期:2023-10-06 出版日期:2024-07-10
Received:2023-07-06 Revised:2023-10-06 Published:2024-07-10
· 通信作者:张龙,高级工程师,1776877996@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