

地铁早高峰时段车辆基地一体化发车能力 计算方法研究*

黄宗志¹ 李纵然² 陈 垚² 柏 赞²

(1. 广州地铁设计研究院股份有限公司, 510010, 广州; 2. 北京交通大学交通运输学院, 100044, 北京)

摘 要 [目的]既有分区段发车能力研究未考虑到地铁车辆基地一体化发车全流程中的能力瓶颈及平行作业过程,应当聚焦列车从停车列检库运行至正线站台的全过程,系统分析发车能力瓶颈,提出地铁车辆基地早高峰一体化发车能力计算方法,为地铁车辆基地的发车能力评估与优化提供理论支撑。[方法]基于区段划分方法,分别研究列车进路方式、列车进路和调车进路相结合方式下的车辆段内咽喉区通过能力,以及不同加车径路下的段外接轨站加车能力。引入作业时间表和时距图分析,建立精细化能力计算模型。进一步分析分区段的能力瓶颈及平行作业过程,针对单线出段和双线出段两种方式,提出车辆基地一体化发车能力计算方法。将理论数值计算结果与广州地铁6号线萝岗车辆段实际运营数据进行对比,以验证方法的可靠性。[结果及结论]广州地铁6号线萝岗车辆段双线出段方式下,早高峰期理论最小发车间隔为223.6 s,对应最大发车能力为17列/h。实际运营中,早高峰期发车间隔为222.6 s,实际出段列车数量为17列,与理论值误差仅为0.45%,验证了数值计算的可靠性。

关键词 地铁; 车辆基地; 一体化发车; 早高峰发车能力; 咽喉区通过能力; 接轨站加车能力

中图分类号 U292.15

DOI:10.16037/j.1007-869x.20245854

Integrated Train Dispatching Capacity Calculation Method for Metro Vehicle Depot during Morning Peak Hours

HUANG Zongzhi¹, LI Zongran², CHEN Yao², BAI Yun²

(1. Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd., 510010, Guangzhou, China; 2. School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, 100044, Beijing, China)

Abstract [Objective] The capacity bottlenecks and parallel operations throughout the full-process of integrated train dispatching from metro vehicle bases are not fully touched in ex-

isting section-based dispatching capacity studies. Therefore, it is necessary to focus on the complete process of trains operating from the stabling and inspection garages to the mainline platforms, systematically analyze dispatching capacity bottlenecks, and propose a calculation method for the integrated dispatching capacity of metro vehicle bases during morning peak hours, providing theoretical support for the evaluation and optimization of depot dispatching capabilities. [Method] Based on the section division method, the throat area passing capacity within vehicle depot under train routing and coordinated dispatch-routing modes, as well as the additional train insertion capacity at connection stations under different insertion routes, a detailed capacity calculation model is established by introducing operational timetables and time-distance diagrams. Further analysis is conducted on the capacity bottlenecks of different sections and the parallel operation processes. For both single-track and double-track dispatching scenarios, an integrated dispatching capacity calculation method for metro vehicle bases is proposed. Theoretical calculation results are compared with actual operational data from the Luogang Depot of Guangzhou Metro Line 6 to verify the reliability of the method. [Result & Conclusion] Under the double-track dispatching mode at the above-mentioned depot, the theoretical minimum dispatching interval during morning peaks is 223.6 seconds, corresponding to a maximum dispatching capacity of 17 trains per hour. In actual operation, the observed dispatching headway during morning peaks is 222.6 seconds, with 17 trains dispatched, resulting in a deviation of only 0.45% from the theoretical value, thus verifying the reliability of numerical calculation.

Key words metro; depot; integrated train dispatching; train dispatching capacity in morning peaks; throat area passing capacity; additional train insertion capacity at connection stations

地铁车辆基地发车能力是制约线路高峰期运营供给效率的关键因素。目前,研究大多根据车辆

* 国家自然科学基金项目(71971016,72101019)

基地发车作业过程分为车辆段内咽喉区通过能力和段外接轨站加车能力两部分。已有较多学者对车辆段内咽喉区通过能力进行研究^[1-15],文献[16]将出段过程细分为进路排列、司机作业和列车走行3个关键环节,建立了咽喉区通过能力计算模型;文献[17]通过构建数学模型,计算咽喉区列车总通过时间,为车辆基地发车能力评估提供了量化依据;文献[18]则对比了不同进路方式下的咽喉区通过能力,指出列车进路方式以及列车进路和调车进路相结合的进路方式(以下简称“列调结合”)可显著提升发车能力。在段外接轨站加车能力研究方面,文献[19]基于区段划分法,提出了不同接轨形式及出段方式下的加车能力计算方法;文献[20]分析了中部接轨站高峰期的正线加车过程及行车间隔优化策略。

此外,既有研究多聚焦于单一区段能力分析,未能充分考虑车辆基地一体化发车全流程中的能力瓶颈及平行作业过程^[21]。文献[22]虽指出发车能力由库前至转换轨前和转换轨后进入正线运营两个过程控制,但其研究仍局限于咽喉区通过能力的主控因素分析,缺乏一体化发车能力量化计算方法。鉴于此,本文考虑列车从停车列检库出发运行至正线站台的出库全流程,提出车辆基地一体化发车能力计算方法,研究不同列车进路方式下的咽喉区通过能力、不同加车径路下的接轨站加车能力计算方法,并基于广州地铁6号线萝岗车辆段实际运营数据验证方法的有效性,为车辆基地发车能力评估与优化提供理论依据。

1 咽喉区通过能力及接轨站加车能力计算方法

1.1 咽喉区通过能力

本文以既有的列车进路、列调结合为例,给出咽喉区通过能力计算公式。不同进路方式下的进路划分如图1所示。列车进路方式下,划分停车列检库至转换轨出清点处为一个进路,一次性办理完成出段进路如图1a)所示。列调结合方式下,在总出发信号机处进行进路划分如图1b)所示,将停车列检库至总出发信号机末端设为调车进路,将总出发信号机末端至转换轨出清点处设为列车进路。

设 m 为不同进路方式编号, $m=1$ 为列车进路, $m=2$ 为列调结合。接下来,分析作业流程,建立列车作业时距图,提出不同进路方式下的咽喉区总发

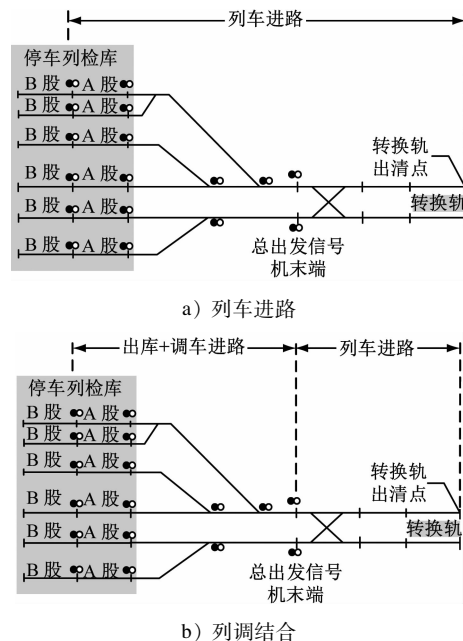


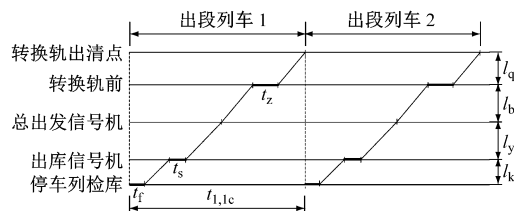
图1 不同进路方式下的进路划分

Fig. 1 Route division under different routing modes

车时间 $t_{m,yhq}$ 的计算方法。

1.1.1 列车进路

列车进路方式下,相邻两列出段列车的作业时距图如图2所示。



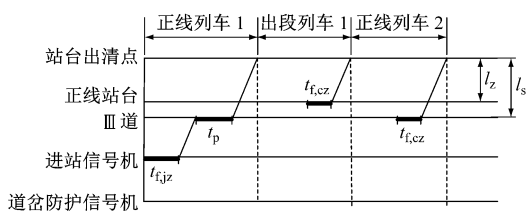
注: l_k —出段列车 i 从停车列检库至出库信号机前的距离; l_y —出段列车 i 从出库信号机至总出发信号机的距离; l_b —出段列车 i 从总出发信号机至转换轨前的距离; l_q —出段列车 i 从转换轨至转换轨出清点的距离; t_f —道岔搬动和进路办理的作业时间及反应时间; t_s —一度停车确认平交道无人的作业时间; t_h —转换轨模式切换的时间; $t_{1,lc}$ —列车进路方式下两列出段列车办理列车进路的行车间隔。

图2 列车进路方式下相邻两列出段列车的作业时距图

Fig. 2 Time-distance diagram for two adjacent dispatching trains under train routing mode

设不同进路方式下车辆段内运行的第 i 列车与后续列车的行车间隔为 $t_{m,i}$ 。列车进路方式($m=1$)下,咽喉区总发车时间 $t_{1,yhq}$ 如式(1)所示:

$$t_{1,yhq} = \sum_{i=1}^n t_{1,i} = \sum_{i=1}^n \left(t_f + \frac{l_{k,i}}{v_1} + t_s + \frac{l_{y,i}}{v_2} + t_h + \frac{l_{b,i}}{v_2} + \frac{l_{q,i}}{v_2} \right) \quad (1)$$



注: l_s —Ⅲ道站台至站台出清点的距离; l_z —正线站台至站台出清点的距离; t_p —列车停站进行上下客的作业时间; $t_{f,jz}$ —办理正线列车进站进路的作业时间; $t_{f,cz}$ —办理正线列车出站进路的作业时间。

图5 出段列车与正线列车存在平行作业时的加车过程时距图

Fig. 5 Time-distance diagram of train insertion in parallel operations between outbound trains and mainline trains

1.2.2 存在敌对进路

出段列车与正线列车存在敌对进路时的作业时距图如图6所示,当正线列车尾部出清站台出清点,道岔防护信号机开放,出段列车才可进行出段作业。

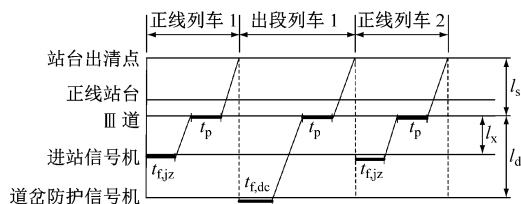
由此给出出段列车与正线列车存在敌对进路条件($g=2$)下,考虑正线列车防干扰时,相邻两列出段列车的接轨站加车间隔 $t_{2,jgz}$ 如式(5)所示:

$$t_{2,jgz} = \max \left(t_{f,jz} + \frac{l_x + l_s}{v_3} + t_p, I_{\min} \right) + \max \left(t_{f,dc} + \frac{l_d + l_s}{v_3} + t_p, I_{\min} \right) \quad (5)$$

不考虑正线列车干扰时,相邻两列出段列车的

接轨站加车间隔 $t_{2,jgz}$ 如式(6)所示:

$$t_{2,jgz} = \max \left(t_{f,dc} + \frac{l_d + l_s}{v_3} + t_p, I_{\min} \right) \quad (6)$$



注: l_d —道岔防护信号机至Ⅲ道站台的距离; l_x —进站信号机至Ⅲ道站台的距离; $t_{f,dc}$ —办理出段列车进站作业及道岔防护信号机开放的时间。

图6 出段列车与正线列车存在敌对进路时的作业时距图

Fig. 6 Time-distance diagram in opposite routing operation between outbound trains and mainline trains

2 车辆段一体化发车能力计算方法

基于前文提出的咽喉区通过能力和接轨站加车能力计算公式,接下来分析单线出段、双线出段方式下列车从列检库出发至正线站台的全流程,提出车辆基地一体化发车能力计算方法。

2.1 单线出段方式下的一体化发车能力

单线出段下固定一条出入段线承担出段作业,另一条承担入段作业,咽喉区和接轨站作业不存在平行作业过程,单线出段方式下的一体化发车流程如图7所示。车辆基地发车能力受到车辆段内咽喉区通过能力、段外接轨站加车能力最小值的制约。

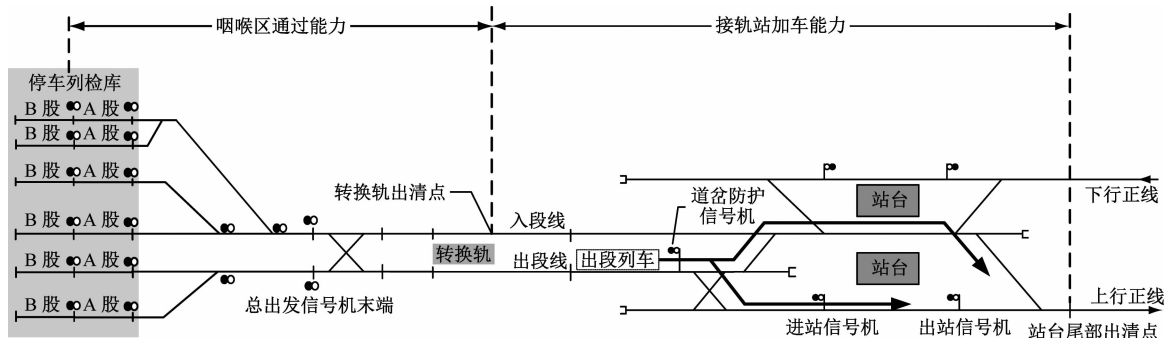


图7 单线出段方式下的一体化发车流程图

Fig. 7 Flow chart of integrated train dispatching under single-track mode

由此,单线出段方式下的车辆基地一体化发车能力计算式如式(7)所示:

$$N_{fc,d} = \min \left(\frac{3\,600n(1-\alpha)}{t_{m,yhq}}, \frac{3\,600}{t_{g,jgz}} \right) \quad (7)$$

式中:

$N_{fc,d}$ ——单线出段方式下的车辆基地一体化发车能力,单位 列/h;

n ——总发车时间内发出的出段列车数量,单位 列;

α ——咽喉区的设备能力储备系数。

2.2 双线出段方式下的一体化发车能力

双线出段方式下,两条出入段线可同时进行出段或入段作业,咽喉区与接轨站作业存在平行过程,双线出段方式下的一体化发车流程如图8所示。当出段列车同时到达接轨站道岔防护信号机前等

待加车时,能力瓶颈在于加车能力;待加车作业完成后,咽喉区单条出入段线上的列车连续出库间隔较大,此时能力瓶颈转向咽喉区通过能力。由此,能力瓶颈在咽喉区通过能力与接轨站加车能力之间交替出现,不能简单取二者最小值。

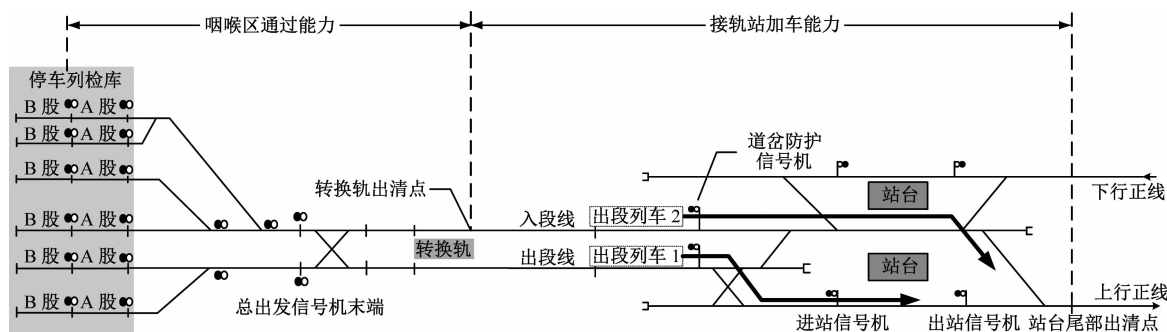


图8 双线出段方式下的一体化发车流程图

Fig.8 Flow chart of integrated train dispatching under double-track mode

基于分区段能力分析,一体化发车流程中的行车间隔可分为3种:①同一出入段线上相邻列车的咽喉区行车间隔;②不同出入段线上相邻列车的咽喉区行车间隔;③接轨站的加车间隔。通过比较3者大小,分析各时段瓶颈能力,得出第*i*列列车与后续列车处于不同出入段线时,双线出段方式下的一体化总发车时间如式(8)所示:

$$t_{sx} = \sum_{i=1}^n \max(h_{m,i}, t_{g,jgz}) \quad (8)$$

其他情况时,双线出段方式下的一体化总发车时间如式(9)所示:

$$t_{sx} = \sum_{i=1}^n \max(t_{m,i}, t_{g,jgz}) \quad (9)$$

式中:

t_{sx} ——双线出段方式下总发车时间;

$h_{m,i}$ ——第*m*种进路方式下,咽喉区运行的第*i*列列车与相邻出入段线上的后续列车间的行车间隔。

间隔。

进而得到双线出段方式下的车辆基地一体化发车能力 $N_{fc,s}$ 如式(10)所示:

$$N_{fc,s} = \frac{3600n(1-\alpha)}{t_s} \quad (10)$$

3 广州地铁6号线萝岗车辆段案例分析

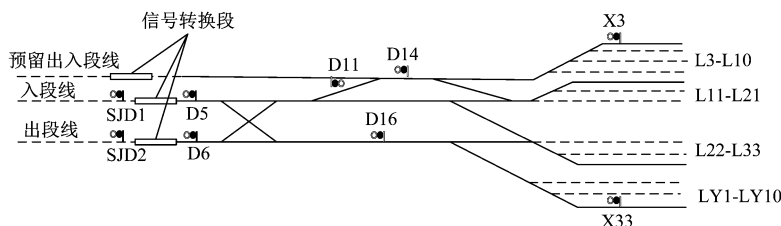
3.1 案例基础数据

以萝岗车辆段为例,其出段信号控制器设置及咽喉区关系如图9所示,采取了双线出段、列调结合方式。根据实际运营情况及文献[23],确定相关参数如下: $v_1 = v_2 = 12 \text{ km/h}$; $t_{f,jz} = t_{f,cz} = t_j = 30 \text{ s}$; $t_h = 20 \text{ s}$; $t_s = 30 \text{ s}$ 。

3.2 一体化发车能力计算方法验证

3.2.1 咽喉区通过能力计算

统计每股道进路的列车走行里程,计算得到各出段进路在咽喉区的占用时间如表1所示。



注:SJD1、SJD2—出段信号机的编号;D5、D6—总出发信号机的编号;D11、D14、D16—调车信号机的编号;X3、X33—出库信号机的编号;L3至L10、L11至L21、L22至L33、LY1至LY10—股道的编号。

图9 萝岗车辆段出段信号控制器设置及咽喉区关系示意图

Fig.9 Relation diagram of Luogang Depot outbound signal controller setting and throat area relation

表 1 各出段进路在咽喉区的占用时间统计

Tab.1 Occupancy time statistics of each outbound routing in throat area

进路	发车股道 编号	占用 次数	$t_{2,dc}/s$	$t_{2,lc}/s$	$t_{2,ir}/s$
进路 1	L3	2	249.8	97.1	249.8
	L4	2	240.2	97.1	240.2
	L5	2	247.1	97.1	247.1
	L8	1	238.7	97.1	238.7
	L9	1	239.9	97.1	239.9
	L10	1	239.0	97.1	239.0
	L11	2	243.2	97.1	243.2
	L12	2	242.3	97.1	242.3
	L13	2	241.4	97.1	241.4
	L14	2	234.8	97.1	234.8
	L15	2	241.4	97.1	241.4
	L16	2	240.5	97.1	240.5
	L17	2	240.2	97.1	240.2
	L18	2	240.5	97.1	240.5
	L19	2	240.5	97.1	240.5
	L20	2	240.2	97.1	240.2
	L21	2	240.5	97.1	240.5
进路 2	L22	2	237.5	97.1	237.5
	L23	2	240.2	97.1	240.2
	L24	2	240.2	97.1	240.2
	L25	2	240.2	97.1	240.2
	L26	2	240.5	97.1	240.5
	L27	2	240.8	97.1	240.8
	L28	2	241.1	97.1	241.1
	L29	2	241.4	97.1	241.4
	L30	2	242.0	97.1	242.0
	L31	2	242.6	97.1	242.6
	L32	2	243.2	97.1	243.2
	L33	2	243.8	97.1	243.8

经计算,进路 1 承担 31 列位发车任务,咽喉区平均行车间隔为 241.4 s,总发车时间为 7 482.8 s;进路 2 承担 24 列位发车任务,咽喉区平均行车间隔为 241.1 s,总发车时间为 5 787.0 s。咽喉区通过能力瓶颈集中于进路 1。考虑 10% 设备能力储备系数后,咽喉区通过能力为 13 列/h。

3.2.2 接轨站加车能力计算

萝岗车辆段采用单岛站台出入段线内插正线接轨形式,出段列车与正线列车存在敌对进路,萝岗车辆段接轨形式及距离参数如图 10 所示。作业参数如下:出站作业时间 15 s,最小追踪间隔 90 s,列车运行速度 30 km/h,停站时间 30 s。经式(4)计算,在不考虑正线列车干扰时,两列出段列车加车时间间隔为 116 s,对应接轨站加车能力为 31 列/h。

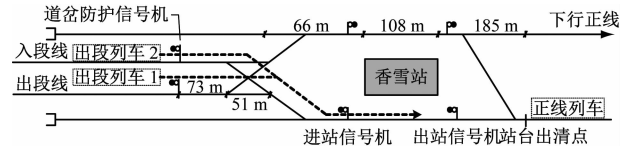


图 10 萝岗车辆段接轨形式及距离参数

Fig. 10 Luogang Depot rail connection form and distance parameters

3.2.3 一体化发车能力计算方法验证

为验证一体化发车能力计算法有效性,选取广州地铁 6 号线早高峰时段(05:02:03—06:01:24)实际运营数据进行对比分析。基于实际收发车作业计划,按“优先调度走行时间较短列车”原则对列检库出段进路排序,并运用本文提出的双线出段一体化发车能力计算方法,得出交替作业模式下的理论最大发车能力。理论最大发车能力下的早高峰小时行车计划如表 2 所示。

表 2 理论最大发车能力下的早高峰小时行车计划

Tab.2 Peak hour operation timetable under theoretical maximum dispatching capacity

序号	发车股道 编号	出入段线 类型	能力瓶颈 指标	与前车发车 间隔时间/s
1	L14	出段线		
2	L22	入段线	$t_{2,yhq}$	238.4
3	L8	出段线	$t_{2,jgz}$	116.0
4	L23	入段线	$t_{2,yhq}$	238.7
5	L14	出段线	$t_{2,yhq}$	240.2
6	L22	入段线	$t_{2,yhq}$	234.8
7	L10	出段线	$t_{2,yhq}$	237.5
8	L23	入段线	$t_{2,yhq}$	239.0
9	L9	出段线	$t_{2,jgz}$	116.0
10	L24	入段线	$t_{2,yhq}$	239.9
11	L4	出段线	$t_{2,yhq}$	240.2
12	L24	入段线	$t_{2,yhq}$	240.2
13	L4	出段线	$t_{2,yhq}$	239.9
14	L25	入段线	$t_{2,yhq}$	240.2
15	L17	出段线	$t_{2,yhq}$	240.2
16	L25	入段线	$t_{2,yhq}$	240.2
17	L20	出段线	$t_{2,yhq}$	240.2

表 2 显示,萝岗车辆段早高峰期理论最小平均发车间隔为 223.6 s,对应最大发车能力为 17 列/h。由实际运营计划可知,早高峰期实际发车数量为 17 列,实际最小平均发车间隔为 222.6 s,与理论值误

差仅为0.45%,验证了数值计算的可靠性。建议结合实际运营调整参数取值,提升方法的适用性。

4 结语

本文提出了地铁车辆基地早高峰一体化发车能力计算方法,通过分析列车进路、列调结合进路方式下咽喉区通过能力、不同加车径路下的接轨站加车能力计算方法,建立了单、双线出段方式的一体化能力模型。基于广州地铁6号线萝岗车辆段的实证案例验证了方法的有效性。此外,双线出段时因平行作业特性,发车瓶颈可能在咽喉区通过能力与接轨站加车能力间动态转换,需结合运营场景识别重叠瓶颈区域。

本研究突破了传统取最小值的能力评估方式,为车辆基地能力计算提供了新思路,后续可通过仿真手段进一步验证方法有效性。

参考文献

- [1] 黄宗志,肖雅玲,柏赞. ATC 车辆基地咽喉区通过能力计算方法研究[J]. 都市快轨交通, 2024, 37(2): 65.
HUANG Zongzhi, XIAO Yaling, BAI Yun. Capability calculation method of ATC depot throat area[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2024, 37(2): 65.
- [2] 丁建中,牛振宇. 基于通信的列车控制系统对车辆基地出入段能力的影响研究[J]. 城市轨道交通研究, 2011, 14(5): 31.
DING Jianzhong, NIU Zhenyu. Research of the entry-exit capacity of vehicle depot[J]. Urban Mass Transit, 2011, 14(5): 31.
- [3] 施董燕,周明. 上海轨道交通既有有线运能提升研究[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(10): 135.
SHI Dongyan, ZHOU Ming. Transport capacity enhancement for Shanghai urban rail transit existing lines[J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(10): 135.
- [4] 刘荣峰,钱江,周庭梁,等. 城市轨道交通场段出库列车发车进路自动办理时序卡控方法[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(9): 214.
LIU Rongfeng, QIAN Jiang, ZHOU Tingliang, et al. Automatic time sequence control method for outbound train departure route setting of urban rail transit depot[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(9): 214.
- [5] 祁勇,卢钢,王骏祺,等. 城市轨道交通无场段条件下线上停检线的收发车计划自动化排布系统[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(8): 247.
QI Yong, LU Gang, WANG Junqi, et al. Automated train scheduling and arrangement system for urban rail transit on-line parking inspection line without depot[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(8): 247.
- [6] 陈思远. 考虑建设成本和发车能力的地铁车辆基地咽喉区布设优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2023.
- CHEN Siyuan. Study on optimization of throat area layout of subway vehicle base considering construction cost and departure capacity[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2023.
- [7] 袁赫男. 地铁车辆基地咽喉区通过能力评估与仿真[J]. 北方交通, 2022(9): 75.
YUAN Henan. Evaluation and simulation of traffic passing capacity in the throat area of metro vehicle base[J]. Northern Communications, 2022(9): 75.
- [8] 邓佩坪. 地铁车辆段发车能力下降情况下行车计划编制优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2022.
DENG Peiping. Study on optimization of train planning under the condition of decreasing departure capacity of metro depot[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022.
- [9] 赵丹丹. 城市轨道交通 ATC 车辆基地早高峰发车计划优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2022.
ZHAO Dandan. Study on optimization of early peak departure plan of ATC vehicle base in urban rail transit[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022.
- [10] 袁辉辉. 提高地铁车辆段往返正线接发车效率的探讨[J]. 山东工业技术, 2018(12): 244.
YUAN Kuanghui. Discussion on improving the efficiency of receiving and departing from the main line of subway depot[J]. Shandong Industrial Technology, 2018(12): 244.
- [11] 陈垚,毛保华,柏赞,等. 城市轨道交通多交路模式下中间折返站能力分析[J]. 交通运输系统工程与信息, 2017, 17(3): 150.
CHEN Yao, MAO Baohua, BAI Yun, et al. Capacity analysis on intermediate turn-back stations with multi-routing in urban rail transit[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2017, 17(3): 150.
- [12] 邹毅翔. 网络化运营条件下深圳地铁车辆基地管理模式及车辆运检方案优化[D]. 广州: 广州大学, 2016.
ZOU Yihong. Management mode of Shenzhen Metro vehicle base and optimization of vehicle inspection scheme under the condition of network operation[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2016.
- [13] 李金帮. 广州地铁6号线浔峰岗停车场列车出场能力分析[J]. 城市轨道交通研究, 2015, 18(6): 144.
LI Jinbang. Analysis of the train factory capacity at Xunfenggang parking yard on Guangzhou Metro Line 6[J]. Urban Mass Transit, 2015, 18(6): 144.
- [14] 郭军强. 基于移动闭塞的状态发车技术研究[J]. 铁路通信信号工程技术, 2024, 21(6): 1.
GUO Junqiang. Research on state departure technology based on moving block[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2024, 21(6): 1.
- [15] 赵建. 城市轨道交通双层车场信号联锁系统设计方案研究[J]. 时代汽车, 2024(9): 169.
ZHAO Jian. Research on the design scheme of signal interlocking system in urban rail transit double-decker depot[J]. Auto Time, 2024(9): 169.
- [16] 刘炯,胡华,刘志钢,等. 城市轨道交通停车场/车辆段的列车出段能力分析与计算[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(11): 63.

- LIU Xian, HU Hua, LIU Zhigang, et al. Analysis and calculation of train exit capacity of urban rail transit stabling yard and depot[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(11): 63.
- [17] 陈东. 地铁车辆段发车能力研究[J]. 智能城市, 2021, 7(1): 3.
- CHEN Dong. Study on the departure capacity of metro depot[J]. Intelligent City, 2021, 7(1): 3.
- [18] 朱沪生, 洪海珠, 丁建中. 城市轨道交通车辆基地出入段扩能方法研究[J]. 城市轨道交通研究, 2011, 14(4): 1.
- ZHU Husheng, HONG Haizhu, DING Jianzhong. On capacity enlargement of depot exit-entry of urban rail transit[J]. Urban Mass Transit, 2011, 14(4): 1.
- [19] 宋周敏, 刘葛辉, 张晨曦. 车辆段接轨站出入段作业能力与运营组织分析[J]. 山东科学, 2019, 32(6): 79.
- SONG Zhoumin, LIU Gehui, ZHANG Chenxi. Analysis of operating capacity and organization of access operation at depot junction station[J]. Shandong Science, 2019, 32(6): 79.
- [20] 潘琢, 苗沁, 曾蓉娣. 车辆段位于线路中部时向正线增加运行列车的能力研究[J]. 城市轨道交通研究, 2016, 19(5): 86.
- PAN Zhuo, MIAO Qin, ZENG Rongdi. Train operation increase capability of depot located in the middle of urban rail transit line[J]. Urban Mass Transit, 2016, 19(5): 86.
- [21] 江志彬, 唐雁, 来佳雯, 等. 上海城市轨道交通车辆基地一体化管理模式研究[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(7): 26.
- JANG Zhibin, TANG Yan, LAI Jiawen, et al. Study on integrated management mode of Shanghai urban rail transit vehicle base[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(7): 26.
- [22] 徐彰杰. 重庆轨道交通白居寺车辆段段内发车能力研究[J]. 都市快轨交通, 2021, 34(3): 65.
- XU Zhangjie. Capacity analysis of entrance/exit line from Bajusi Depot of Chongqing rail transit[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2021, 34(3): 65.
- [23] 马骁. 广州地铁6号线萝岗车辆段早高峰时段发车效率分析及其提升对策[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(4): 147.
- MA Xiao. Analysis of vehicle dispatching efficiency during peak hours of Guangzhou Metro Line 6 Luogang Depot and improvement measures[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(4): 147.
- 收稿日期:2024-07-01 修回日期:2024-11-29 出版日期:2025-07-10
Received:2024-07-01 Revised:2024-11-29 Published:2025-07-10
· 第一作者:黄宗志,高级工程师,970062455@qq.com
通信作者:李纵然,博士研究生,21114053@bjtu.edu.cn
· ©《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 148 页)

- XIAO Liweining, BAI Yun, FU Changyou, et al. Research on train running state transition scheme based on virtual coupling technology[J]. Railway Standard Design, 2023, 67(8): 16.
- [14] 宋志丹, 徐效宁, 李辉, 等. 面向虚拟编组的列控技术研究[J]. 铁道标准设计, 2019, 63(6): 155.
- SONG Zhidan, XU Xiaoning, LI Hui, et al. Study on virtual-coupling-orientated train control technique[J]. Railway Standard Design, 2019, 63(6): 155.
- [15] 何晖, 代萌, 陶维杰, 等. 基于多智能体的重载列车虚拟编组协同巡航控制[J]. 中国铁道科学, 2023, 44(6): 196.
- HE Hui, DAI Meng, TAO Weijie, et al. Cooperative cruise control of heavy-haul train under VCTF based on multi-agent[J]. China Railway Science, 2023, 44(6): 196.
- [16] 邹劲柏, 陈一衡, 许哲谱. 基于通信时延概率分布的虚拟编组技术研究[J]. 应用技术学报, 2024, 24(1): 117.
- ZOU Jinbai, CHEN Yiheng, XU Zhepu. Research on virtual coupling technology based on probability distribution of communication delay[J]. Journal of Technology, 2024, 24(1): 117.
- [17] 邓澄远, 王卓, 陈虹兵, 等. 虚拟编组条件下列车区间解耦和耦合适用性分析[J]. 铁道运输与经济, 2024, 46(8): 198.
- DENG Chengyuan, WANG Zhuo, CHEN Hongbing, et al. Applicability of train decoupling and coupling in sections based on virtual coupling[J]. Railway Transport and Economy, 2024, 46(8): 198.
- [18] 柴铭, 刘皓元, 苏浩翔, 等. 基于 ATT-CNN-BiLSTM 的虚拟编组列车时空轨迹预测[J]. 铁道学报, 2024, 46(6): 80.
- CHAI Ming, LIU Haoyuan, SU Haoxiang, et al. Time-position trajectory prediction of trains in virtual coupling based on ATT-CNN-BiLSTM[J]. Journal of the China Railway Society, 2024, 46(6): 80.
- [19] 帅斌, 罗佳楠, 冯心妍, 等. 虚拟编组下基于跟驰模型的列车群运行控制方法研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2024, 24(3): 1.
- SHUAI Bin, LUO Jianan, FENG Xinyan, et al. A train group control method based on car following model under virtual coupling[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2024, 24(3): 1.
- [20] 唐涛, 罗啸林, 刘宏杰, 等. 城轨列车虚拟编组安全防护与运行控制技术研究进展[J]. 科技导报, 2023, 41(10): 31.
- TANG Tao, LUO Xiaolin, LIU Hongjie, et al. Research review of the protection and operation technology for virtually coupled train sets in metros[J]. Science & Technology Review, 2023, 41(10): 31.
- [21] 荀径, 陈明亮, 宁滨, 等. 虚拟重联条件下地铁列车追踪运行性能衡量[J]. 北京交通大学学报, 2019, 43(1): 96.
- XUN Jing, CHEN Mingliang, NING Bin, et al. Train tracking performance measurement under virtual coupling in subway[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2019, 43(1): 96.
- 收稿日期:2024-08-15 修回日期:2024-12-04 出版日期:2025-07-10
Received:2024-08-15 Revised:2024-12-04 Published:2025-07-10
· 通信作者:肖李蔚宁,工程师,xiaoliweining@163.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