

重联运营模式下城市轨道交通列车车底运用优化*

邓澄远¹ 卢锦生² 朱昌锋³ 孙元广¹ 马 斌³

(1. 广州地铁设计研究院股份有限公司交通规划分院, 510010, 广州;

2. 广州地铁集团有限公司运营事业总部, 510220, 广州; 3. 兰州交通大学交通运输学院, 730070, 兰州)

摘 要 [目的]重联运营模式能有效提升城市轨道交通客流与运量的匹配度,同时也为车底运用计划的编制带来挑战,因此需对该模式下车底与不同编组车次的接续问题进行研究。[方法]通过分析重联运营模式下城市轨道交通列车车底运用的特点,以及客流高峰向非高峰转化阶段车底的接续情况,以车底运用数量最小、车底接续时间费用最小及车底运用均衡性为目标,综合考虑车次接续唯一性、车底一致性、检修计划、节点常规接续、重联车次节点接续等相关约束,引入 MTSP(多旅行商问题),构建城市轨道交通客流高峰向非高峰转化阶段的车底运用优化模型,并设计了一种 MOFA-MCS(多策略协同多目标萤火虫算法)。以某条客流时段不均衡性较大的城市轨道交通线路为例,对该优化模型的可行性和合理性进行了验证。[结果及结论]重联运营模式下城市轨道交通车底运用优化方案能合理优化不同编组车次间的接续,降低企业运营成本。

关键词 城市轨道交通;列车;车底运用;重联运营模式

中图分类号 U292.6

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.01.036

Optimization of Urban Rail Transit Train Stock Utilization under Re-coupling Operation Mode

DENG Chengyuan¹, LU Jinsheng², ZHU Changfeng³, SUN Yuanguang¹, MA Bin³

(1. Transportation Planning Branch, Guangzhou Metro Design and Research Institute Co., Ltd., 510010, Guangzhou, China;

2. Operation Headquarters of Guangzhou Metro Group Co., Ltd., 510220, Guangzhou, China; 3. School of Traffic and Transportation, Lanzhou Jiaotong University, 730070, Lanzhou, China)

Abstract [Objective] Re-coupling operation mode can effectively improve the matching degree between the passenger flow and the transport capacity of urban rail transit, while it also poses challenges to the formulation of the train stock utilization plan. Therefore, it is necessary to conduct research on the connection between the train stock and different marshalling

train trips under this mode. [Method] By analyzing the characteristics of urban rail transit train stock utilization under the re-coupling operation mode and the connection situation of the train stock during the transition period from peak to off-peak passenger flow, aiming at minimizing the number of train stock in use and the connection time cost, and ensuring the balance of train stock utilization, relevant constraints such as the uniqueness of train service connection, the consistency of train stock, maintenance plans, regular node connections, and connection of coupled train service nodes are comprehensively considered. The MTSP (multiple traveling salesman problem) is introduced to construct an optimized train stock utilization model during the transition period from peak to off-peak passenger flow in urban rail transit. Moreover, a MOFA (multi-objective firefly algorithm) based on MCS (multiply cooperative strategies) is designed. In the case study of a certain urban rail transit line with significant imbalance of passenger flow in different periods, the feasibility and rationality of the above optimized model are verified. [Result & Conclusion] The optimized train stock utilization scheme of urban rail transit under the re-coupling operation mode can reasonably optimize the connection between different marshalling train trips and reduce the operation costs for enterprises.

Key words urban rail transit; train; train stock utilization; re-coupling operation mode

随着城市轨道交通日常客流出行规律的不断挖掘,运输组织模式创新成为解决客流与运量有效匹配,实现系统能耗节约及社会经济效益最大化的关键手段。重联运营模式能有效提高客流与运量的匹配度^[1],但也对车底运用计划的编制提出了一定的挑战。因此,如何合理安排重联运营模式下车底与不同编组车次的接续是亟待解决的关键问题。

文献[2]从网络运营角度研究了城市轨道交通车底运用。随着研究的深入,文献[3]将车底运用

* 广州地铁设计院集团有限公司科研项目(2022-1);甘肃省教育厅“双一流”科研重点项目(GSSYLXM-04)

与列车时刻表优化结合,构建了混合整数规划模型。然而,上述文献仅研究了固定编组下车底运用优化问题。近年来,灵活编组模式在城市轨道交通领域不断发展^[4]。2021 年 11 月上海轨道交通 16 号线试运行了“3+3”重联运营模式^[5]。文献[1,6]从工程技术角度分析了灵活编组及其组合运输模式的可行性。文献[7-8]从列车控制系统、车门与站台门对位等方面研究了灵活编组关键技术。文献[4]和文献[9]分别构建了灵活编组条件下城市轨道交通列车开行方案和轨道交通客货协同运输方案优化模型。上述成果基于不同视角研究了城市轨道交通灵活编组问题,但缺乏对重联运营模式下车底运用的研究。

基于此,本文在分析城市轨道交通车底运用问题特点,以及重联运营模式下车底接续的基础上,通过引入 MTSP(多旅行商问题),构建了城市轨道交通客流从高峰向非高峰转化阶段的车底运用优化模型,并设计了一种 MOFA-MCS(多策略协同多目标萤火虫算法)。

1 问题描述及分析

城市轨道交通车底运用优化即根据车底接续标准等信息,合理安排现有车底,完成列车运行图规定的车次任务。重联运营模式下,客流高峰时段两列车重联运行,非高峰时段拆解成单组运行,高峰向非高峰转化阶段出现两种编组列车混跑的情况,车底接续错综复杂,提升了车底运用计划编制难度。客流高峰向非高峰转化阶段的车次接续如图 1 所示。

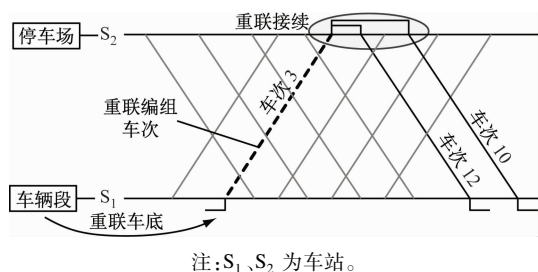


图 1 客流高峰向非高峰转化阶段的车次接续图

Fig. 1 Train trips connection diagram during the transition period from peak to off-peak passenger flow

考虑到客流高峰向非高峰转化阶段车底接续的复杂性,将重联车次拆分为两个基本编组车次,分别安排 1 列车底执行。重联车次拆分法如图 2 所示。

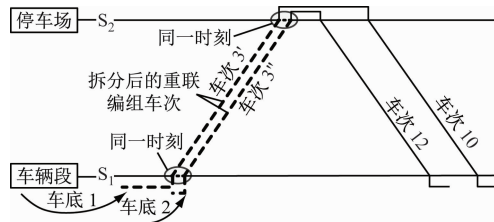
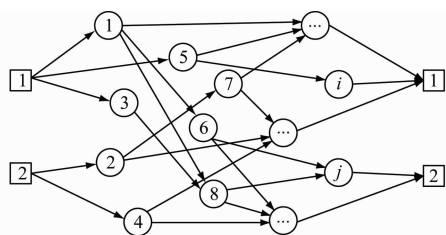


图 2 重联车次拆分法

Fig. 2 Splitting method of coupled train trips

基于此,将车底运用问题转化为 MTSP,车次实际接续需满足时空接续及检修要求。构建车次接续网络 $G = \{V, E\}$ (V 为节点集合, E 为连接边集合),如图 3 所示。



注: \square 内数字为停车场节点; \bigcirc 内数字和字母为车次节点; \rightarrow 为接续边。

图 3 车次接续网络

Fig. 3 Train trips connection network

车次接续网络包括节点集合 $V = \{C, A\}$, 其中: C 为停车场和车辆段(以下简称“场段”)集合,场段中停放的车底集合为 K ,任一车底 $k \in K$; A 为车次节点,任一车次 $i \in A$,每个车次节点都包括始发车站 $S_{d,i}$ 、终到车站 $S_{a,i}$ 、始发时间 $t_{d,i}$ 、终到时间 $t_{a,i}$ 、运行里程 l_i 和运行时间 t_i 等的属性。

2 车底运用优化模型构建

2.1 约束条件

2.1.1 车次接续唯一性约束

任一车次节点都有一个前续节点和后继节点,且一个车次节点只能由一个车底执行。设 $x_{k,ij}$ 为 0-1 变量,1 表示车底 k 执行完节点 i 后执行节点 j ,取 0 反之,则节点间的接续关系为:

$$\sum_{i \in V, i \neq j} \sum_{k \in K} x_{k,ij} = 1, \forall j \in A \quad (1)$$

$$\sum_{j \in A, i \neq j} \sum_{k \in K} x_{k,ij} = 1, \forall i \in A \quad (2)$$

2.1.2 车底一致约束

车底执行任一车次任务时,该车次任务的前续节点和后继节点均由该车底执行,即:

$$\sum_{j \in A} x_{k,ij} = \sum_{j \in A} x_{k,ji}, \forall i \in V, k \in K \quad (3)$$

2.1.3 检修作业约束

设双周检累计运行里程和时间标准分别为 L_m 和 T_m ; 车底 k 的初始累计运行里程和时间分别为 $l_{k,0}$ 和 $t_{k,0}$; 两节点间的接续时间为 T_{ij} ; $y_{i,k}$ 为 0-1 变量, 取 1 表示节点 i 由车底 k 执行, 取 0 反之。则车底继前次检修后的累计运行里程 L_k 和累计运行时间 T_k 分别为:

$$L_k = l_{k,0} + \sum_{i \in A} (l_i y_{i,k}), \quad \forall k \in K \quad (4)$$

$$T_k = t_{k,0} + \sum_{i \in A} (t_i y_{i,k}) + \sum_{i \in A} \sum_{j \in A} (T_{ij} x_{k,ij}), \quad \forall k \in K \quad (5)$$

车底累计运行里程 L_k 或累计运行时间 T_k 并非每次都刚好能达到检修标准, 因此, 引入检修波动系数 λ , 当 L_k 或 T_k 在一定范围内时才可进行检修作业。即:

$$|L_k - L_m| \leq \lambda L_m, \quad \forall k \in K \quad (6)$$

$$|T_k - T_m| \leq \lambda T_m, \quad \forall k \in K \quad (7)$$

2.1.4 节点常规接续约束

车底接续车次节点的情况分为: 车底接续完前一车次后折返接续后一车次; 车底执行完前一车次后先入段检修, 完成检修后继续接续后一车次。

1) 无检修作业时, 车底接续如图 4 所示。

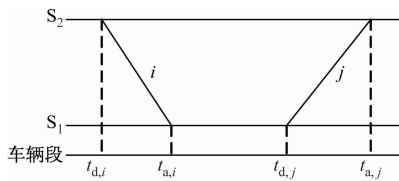


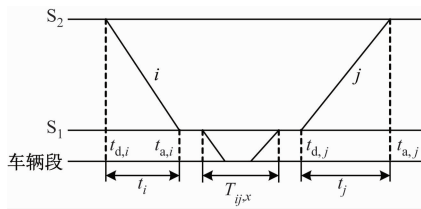
图 4 无检修作业时的车底接续

Fig. 4 Train stock connection without maintenance

设 $z_{k,i}$ 为 0-1 变量, 1 表示车底 k 执行完节点 i 后达到检修标准, 取 0 反之。由图 4 可知: 两节点之间的接续时间 T_{ij} 不能小于车底最小接续时间标准 $T_{f,ij}$, 即:

$$T_{ij} \geq T_{f,ij}, \quad S_{a,i} = S_{d,j}, \quad t_{d,j} > t_{a,i}, \quad z_{k,i} = 0 \quad (8)$$

2) 有检修作业时, 车底接续如图 5 所示。



注: $T_{ij,x}$ 为车底实际检修时间。

图 5 有检修作业时的车底接续

Fig. 5 Train stock connection with maintenance work

由图 5 可知: 检修情况下需在 $T_{f,ij}$ 的基础上增加一个车底检修时间标准 T_m 。本文只考虑在车站 S_1 设置车辆段, 当车底达到检修标准且到达终到站 S_1 时, 两车次才能在检修后接续。则此时接续标准为:

$$T_{ij} \geq T_{f,ij} + T_m, \quad S_{a,i} = S_{d,j} = S_1, \quad t_{d,j} > t_{a,i}, \quad z_{k,i} = 1 \quad (9)$$

其中: 车底检修时间标准 T_m 包括车底入段走行时间 $t_{x,r}$ 、双周检作业时间标准 $t_{x,s}$, 以及车底出段走行时间 $t_{x,c}$ 三部分, 即:

$$T_m = t_{x,r} + t_{x,s} + t_{x,c}, \quad \forall i \in A, \forall j \in A, k \in K \quad (10)$$

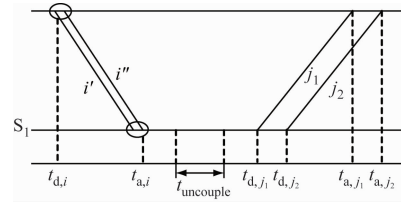
综上, 节点常规接续约束可表示为:

$$(t_{d,j} - t_{a,i}) x_{k,ij} \geq T_{ij} x_{k,ij}, \quad S_{a,i} = S_{d,j}, \quad t_{d,j} > t_{a,i} \quad (11)$$

2.1.5 重联车次节点接续约束

根据重联编组车次处理方法, 将重联编组车次 i 拆分成基本编组车次 i' 和 i'' , 拆分后按常规接续安排车底, 则重联车次接续情况如下:

1) 客流高峰向非高峰转化阶段, 重联编组列车在车站拆解成基本编组列车后上线运行, 如图 6 所示。其中: i' 和 i'' 为重联编组车次 i 拆分得到的两基本编组车次, j_1 和 j_2 为接续重联编组车次节点的两个基本编组车次节点。



注: $t_{uncouple}$ 为拆解时间。

图 6 客流高峰向非高峰转化阶段车次接续

Fig. 6 Train trip connection during the transition period from peak to off-peak passenger flow

两节点之间的接续时间不应小于车底最小接续时间标准:

$$(t_{d,j_1} - t_{a,i'}) x_{k,i'j_1} \geq T_{i'j_1} x_{k,i'j_1}, \quad \forall i' \in A, \forall j_1 \in A, \quad t_{d,j_1} > t_{a,i'}, \quad S_{d,j_1} = S_{a,i'} \quad (12)$$

$$(t_{d,j_2} - t_{a,i''}) x_{k,i''j_2} \geq T_{i''j_2} x_{k,i''j_2}, \quad \forall i'' \in A, \forall j_2 \in A, \quad t_{d,j_2} > t_{a,i''}, \quad S_{d,j_2} = S_{a,i''} \quad (13)$$

两节点之间的接续时间需在车底最小接续时间标准的基础上增加一个拆解时间 $t_{uncouple}$ 。

$$T_{i'j_1} = T_{z,i'j_1} + t_{uncouple} \quad (14)$$

$$T_{i''j_2} = T_{z,i''j_2} + t_{uncouple} \quad (15)$$

若车底在执行完车次后, 先进行检修再接续后一车次, 则还需考虑检修时间, 即:

$$T_{i'j_1} = T_{z,i'j_1} + t_{\text{uncouple}} + T_{x,k_1} \quad (16)$$

$$T_{i'j_2} = T_{z,i'j_2} + t_{\text{uncouple}} + T_{x,k_2} \quad (17)$$

2) 客流高峰时段,列车重联运行。若车底 k_1 和 k_2 接续完重联车次 i 后无须检修即可接续重联车次 j ,则此时接续约束同节点常规接续约束;若接续过程中车底 k_1 或 k_2 达到检修标准,则无须在车站拆解,另行安排其他满足接续条件的车底完成车次接续。

2.2 目标函数

本文以最小化车底运用数量 z_1 为第一目标,以最小化车底接续时间费用 z_2 为第二目标,以车底运用均衡性 z_3 为第三目标,即:

$$\min z_1 = \sum_{k \in K} \max_{i,j \in V} x_{k,ij} \quad (18)$$

$$\min z_2 = \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{k \in K} [\psi(t_{d,j} - t_{a,i}) x_{k,ij}] \quad (19)$$

$$\min z_3 = \frac{1}{n} \sum_{k \in K} \left[l_k - \frac{1}{n} \sum_{k \in K} l_k \right]^2 \quad (20)$$

式中:

ψ ——单位接续时间成本;

l_k ——车底 k 在运行周期内的累计运行里程。

$$\begin{cases} \theta_i(t+1) = \omega_0 \theta_i(t) + (1 - \omega_0) \beta_{g^*i}(r_{g^*i})(\theta_{g^*}(t) - \theta_i(t)) + 2r_{g^*i} \otimes s \\ \theta_j(t+1) = \omega_0 \theta_j(t) + (1 - \omega_0) \beta_{g^*j}(r_{g^*j})(\theta_{g^*}(t) - \theta_j(t)) + 2r_{g^*j} \otimes s \end{cases} \quad (21)$$

$$\begin{cases} \theta_i(t+1) = \theta_i(t) + \omega_0 \beta_{ij}(r_{ij})(\theta_j(t) - \theta_i(t)) + (1 - \omega_0) \beta_{g^*i}(r_{g^*i})(\theta_{g^*}(t) - \theta_i(t)) + (r_{ij} + r_{g^*i}) \otimes s, i > j \\ \theta_j(t+1) = \theta_j(t) + \omega_0 \beta_{ij}(r_{ij})(\theta_i(t) - \theta_j(t)) + (1 - \omega_0) \beta_{g^*j}(r_{g^*j})(\theta_{g^*}(t) - \theta_j(t)) + (r_{ij} + r_{g^*j}) \otimes s, i > j \end{cases} \quad (22)$$

式(21)和式(22)中: $\theta_i(t)$ 、 $\theta_j(t)$ 分别为第 t 代萤火虫 i 和 j 所处的位置; ω_0 为 $[0,1]$ 上均匀分布的随机数; r_{ij} 为 i 和 j 之间的欧氏距离; r_{g^*i} 、 r_{g^*j} 分别为精英个体 g^* 与萤火虫 i 和 j 之间的欧氏距离; β_{g^*i} 、 β_{g^*j} 分别为精英个体 g^* 与萤火虫 i 和 j 间的吸引力; β_{ij} 为萤火虫 i 和萤火虫 j 之间的吸引力; s 为 Lévy flights 随机扰动; \otimes 为内积运算符。

车底运用 MOFA-MCS 算法流程如图 8 所示。

4 算例分析

以某条客流时段不均衡性较大的城市轨道交通线路为例,该线路全长 22 km,采用“4+4”重联模式,线路两端分别设有 1 个车辆段和 1 个停车场。列车出入段时间 2 min,车底在站折返标准 180 s,拆解作业时间 1 min,单位接续时间成本 $\psi = 30$ 元/min。双周检累计走行里程标准 5 000 km,检修作

3 算法设计

设计 MOFA-MCS 算法^[10]并进行求解。

根据车底运用方案优化模型的特点,萤火虫编码方式如图 7 所示。

车底 1	x_{11}	x_{12}	...	x_{1l}
车底 2	x_{21}	x_{22}	...	x_{2l}
\vdots	\vdots	\vdots		\vdots
车底 k	x_{k1}	x_{k2}	...	x_{kl}

需满足唯一性约束

图 7 萤火虫编码方式

Fig. 7 Firefly coding method

其中: x_{kl} 为 0-1 变量,1 表示车底 k 执行车次 l ,取 0 反之。矩阵每行为各车底需要执行的车次,每列表示车次被执行情况。

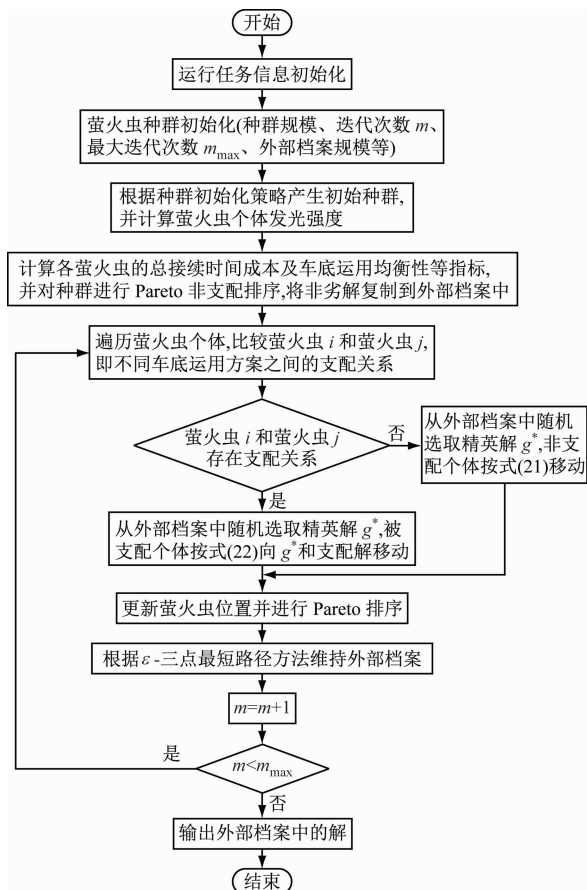
为增强全局搜索能力,在萤火虫位置更新中引入 Lévy flights 随机扰动^[10],并选择一个精英解 g^* 引导萤火虫移动,其位置更新策略如下:

业时间 0.5 d,检修波动系数 $\lambda = 0.01$ 。运营开始时共有车底 35 列,全部为基本编组车底,其中车底 6、13 和 29 接近检修标准,累计走行里程分别为 4 879 km、4 893 km 及 4 915 km。线路早高峰时段为 07:00—09:00,选取 07:00—12:00 时段内的车次进行算例分析。部分列车时刻表见表 1。

经反复测试,将 MOFA-MCS 算法相关参数设置如下:种群规模为 200,外部档案的最大容量为 200,步长因子 $\alpha = 0.25$,萤火虫最大吸引力 $\beta_0 = 1.0$,光吸收系数 $\gamma = 1.0$ 。基于 Matlab 软件,求解得到车底运用 Pareto 方案,如表 2 所示。

由表 2 可见:方案 2 车底运用均衡性最好,但其车底总接续成本最大。方案 2 客流高峰向非高峰转化阶段的车次接续如图 9 所示。

由图 9 可知:方案 2 部分车次间接续时间过长,导致总接续成本偏高。方案 3 总接续成本最低,说



注: ε 为容忍度。

图 8 车底运用 MOFA-MCS 算法流程

Fig. 8 MOFA-MCS algorithm flow chart of train stock utilization

表 1 部分列车时刻表

Tab. 1 Timetable of partial trains

车次编号	始发站	始发时刻	终到站	终到时刻	列车编组/辆
1002	Z_1	07:00	Z_{10}	07:24	4+4
1004	Z_1	07:07	Z_{10}	07:31	4+4
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
1020	Z_1	08:00	Z_{10}	08:24	4+4
1022	Z_1	08:04	Z_{10}	08:28	4+4
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
1110	Z_1	11:48	Z_{10}	12:12	4
1112	Z_1	11:55	Z_{10}	12:19	4
1001	Z_{10}	07:02	Z_1	07:27	4+4
1003	Z_{10}	07:09	Z_1	07:34	4+4
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
1019	Z_{10}	08:02	Z_1	08:27	4+4
1021	Z_{10}	08:06	Z_1	08:31	4+4
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
1109	Z_{10}	11:50	Z_1	12:15	4
1111	Z_{10}	11:57	Z_1	12:22	4

表 2 车底运用 Pareto 方案

Tab. 2 Pareto scheme of train stock utilization

方案	车底数量/列	总接续成本/元	车底运用均衡性
1	31	36 340	1 153.25
2	32	40 320	516.36
3	33	33 150	1 489.17
4	34	33 940	915.59
5	35	40 140	689.13

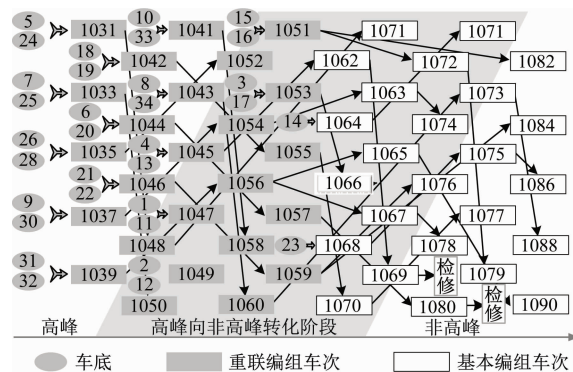


图 9 方案 2 客流高峰向非高峰转化阶段的车次接续

Fig. 9 Train trip connection during the transition period from peak to off-peak passenger flow in Scheme 2

明车次间接续较紧凑; 方案 4 总接续成本和车底运用均衡性均比较均衡; 方案 1 投入的车底最少, 增加了车底周转的难度, 导致车底运用均衡性较差; 方案 5 车底运用均衡性较好, 但车底投入数量和总接续时间成本偏高, 且车底投入达到其数量上限。为方便对各方案定性分析, 对表 2 指标进行量纲一化处理, 得到方案综合效用, 见表 3。

表 3 不同方案综合效用

Tab. 3 Comprehensive effect of different schemes

方案	量纲一的车底数量	量纲一的总接续成本	量纲一的车底运用均衡性	量纲一的综合效用
1	0	0.444	0.65	0.91
2	0.25	1.000	0	0.80
3	0.50	0	1.00	0.67
4	0.75	0.111	0.41	0.79
5	1.00	0.970	0.18	0.46

由表 3 可知: 方案 1 综合效用最好, 方案 5 最差。方案 1 和方案 5 中重联车次的接续及被执行示意图如图 10 和图 11 所示。

由图 10 和图 11 可知: 方案 5 总接续时间较长, 主要体现在车次 1001 与 1022 的接续上。调整部分车次的接续一定程度上会提高车底运用的均衡性, 但可能会牺牲车底总接续时间成本。在车底运用

计划制定中,不能仅关注单一指标,需根据线路实际通盘考虑,选择各项指标都比较均衡的方案。

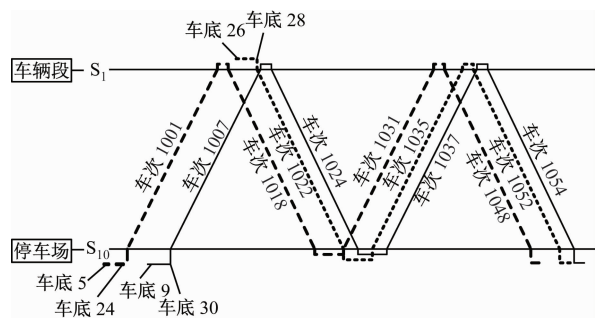


图 10 方案 1 重联车次的接续及被执行示意图

Fig. 10 Schematic diagram of coupled train trips connection and execution in Scheme 1

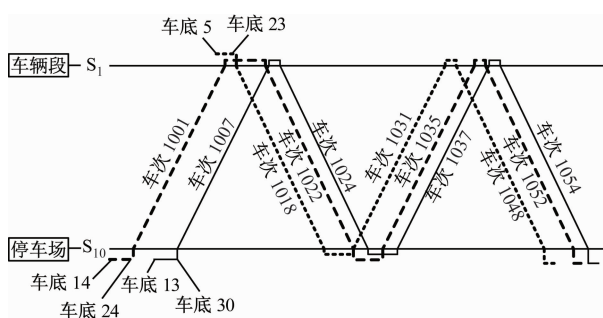


图 11 方案 5 重联车次的接续及被执行示意图

Fig. 11 Schematic diagram of coupled train trips connection and execution in Scheme 5

5 结语

重联运营模式在实现客流与运量动态匹配方面具有不可比拟的优势,开展重联运营模式下城市轨道交通车底运用方案优化研究,能合理优化不同编组车次间的接续,降低企业运营成本。本文基于 MTSP 的城市轨道交通重联编组车底运用优化模型对重联运营模式下车底运用计划优化具有很好的适用性,能为运营企业提供不同方案。本文研究的是单一交路、站站停模式下的车底运用问题,在后续研究中可考虑将重联运营模式与多交路及快慢车等模式结合,构建组合运营模式下车底运用优化模型,以进一步提高车底的运用效率,降低运营成本。

参考文献

- [1] 雷晓瑜,杨国飞,易晨阳,等. 轨道交通灵活编组及其组合运输组织特点的探讨[J]. 铁道运输与经济, 2015, 37(9): 64.
- LEI Xiaoyu, YANG Guofei, YI Chenyang, et al. Discussion on

flexible formation of rail transit and its characteristics of combined transport organization[J]. Railway Transport and Economy, 2015, 37(9): 64.

- [2] 郑锂,宋瑞,肖赞,等. 网络化运营下城市轨道交通列车车底运用计划编制的优化方法[J]. 中国铁道科学, 2014, 35(2): 104.
- ZHENG Li, SONG Rui, XIAO Yun, et al. Optimization method for working out vehicle scheduling plan of urban rail transit under network operation[J]. China Railway Science, 2014, 35(2): 104.
- [3] ZHAO S, YANG H, WU Y. An integrated approach of train scheduling and rolling stock circulation with skip-stopping pattern for urban rail transit lines[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2021, 128: 103170.
- [4] 禹丹丹,韩宝明,张琦,等. 基于灵活编组的轨道交通列车开行方案优化方法[J]. 北京交通大学学报, 2015, 39(6): 21.
- YU Dandan, HAN Baoming, ZHANG Qi, et al. Optimization method for train plan of urban rail transit based on the flexible length of train formation[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2015, 39(6): 21.
- [5] 范海宁,何勇浩. 城市轨道交通列车灵活编组方案及功能实现[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(9): 200.
- FAN Haining, HE Yonghao. Flexible marshalling scheme and function realization of urban rail transit train[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(9): 200.
- [6] 唐玉川,马保仁. 城市轨道交通灵活编组运营组织研究[J]. 铁道工程学报, 2014, 31(8): 96.
- TANG Yuchuan, MA Baoren. Research on the flexible car-set operation organization of urban rail transit[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2014, 31(8): 96.
- [7] 王冬海,黄柒光. 列车灵活编组在城市轨道交通全自动运行线路中的应用[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(增刊2): 102.
- WANG Donghai, HUANG Qiguang. Application of flexible train formation on rail transit FAO lines[J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(S2): 102.
- [8] 李团社. 地铁重联编组运营对站台门布置的影响及其解决方案[J]. 铁道运输与经济, 2021, 43(12): 126.
- LI Tuanshe. Influence of metro reconnection marshalling operation on layout of platform doors and its solutions[J]. Railway Transport and Economy, 2021, 43(12): 126.
- [9] 戚建国,周厚盛,杨立兴,等. 灵活编组条件下轨道交通客货协同运输方案优化[J]. 交通运输系统工程与信息, 2022, 22(2): 197.
- QI Jianguo, ZHOU Housheng, YANG Lixing, et al. Optimization methods of combined passenger and freight transportation based on flexible train composition mode[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2022, 22(2): 197.

(下转第 211 页)

等因素,改进了基于 MNL 模型的城市轨道交通车站接驳交通方式划分模型。该模型中仅接驳距离一个特征变量通过显著性检验,性别、年龄段及出行目的等因素最终不纳入模型的特征变量集。究其原因为:若接驳距离小于 1 km,出行者倾向于选择步行、自行车等接驳交通方式;出行距离越长,出行者越倾向于选择公共汽车、出租车、电瓶车等接驳交通方式,故接驳距离对接驳交通方式选择有显著影响;除此之外,性别、出行目的等与出行方式选择间不存在明显的相关性;出行者年龄越大,越倾向于选择公共汽车、电瓶车等接驳交通方式,这符合认知,但本次研究的调查数据未捕捉到出行者年龄和接驳交通方式选择间关系的显著性。

2) 对同和站晚高峰进站客流晴天和雨天接驳交通方式划分改进模型进行检验,准确率分别为 86.0% 和 77.2%,其中部分选择肢由于调查样本较少未能对模型中变量系数进行准确标定,故准确率较低;基于预测年度客流进站量、居住人口分布等数据,利用上述模型对目标站点的客流接驳需求进行预测,为接驳设施规模测算提供基础。

参考文献

[1] IEDA H, KATO H. A Model of bicycle-user's behavior in access-

transport to railway station[J]. Journal of the City Planning Institute of Japan, 1995, 30: 643.

[2] 广州市气象局. 2021 年广州市气候公报[R]. 广州:广州市气象局, 2021.

Guangzhou Meteorological Bureau. Climate report of Guangzhou in 2021[R]. Guangzhou: Guangzhou Meteorological Bureau, 2021.

[3] 叶霞飞, 顾保南. 轨道交通线路设计[M]. 上海: 同济大学出版社, 2010.

YE Xiafei, GU Baonan. Rail transit line design[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2010.

[4] 关宏志. 非集计模型: 交通行为分析的工具[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.

GUAN Hongzhi. Disaggregate model: tools for traffic behavior analysis[M]. Beijing: China Communications Press, 2004.

[5] 杨惠婷. 城市轨道交通站点接驳方式选择研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.

YANG Huiting. Research on the access-egress mode choice of urban rail transit stations [D]. Nanjing: Southeast University, 2018.

· 收稿日期:2022-09-17 修回日期:2022-11-01 出版日期:2025-01-10

Received:2022-09-17 Revised:2022-11-01 Published:2025-01-10

· 第一作者:蔡涵哲,高级工程师,caihanzhe@ dtsjy. com

通信作者:林俊彦,硕士研究生,oceanjustinlin@gmail. 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 197 页)

YAO Yanhong, XIA Dun. Motivation of collaborative innovation—collaborative surplus: formation mechanism and promotion strategy [J]. Science & Technology Progress and Policy, 2013, 30(20): 1.

[8] 国家知识产权局. 国际专利分类表(2024.01 版) [EB/OL]. (2023-11-10) [2024-09-12]. https://www.cnipa.gov.cn/art/2023/11/10/art_3161_188497.html.

State Intellectual Property Office. International patent classification list (2024.01) [EB/OL]. (2023-11-10) [2024-09-12]. [https://](https://www.cnipa.gov.cn/art/2023/11/10/art_3161_188497.html)

www.cnipa.gov.cn/art/2023/11/10/art_3161_188497.html.

· 收稿日期:2022-11-29 修回日期:2023-01-11 出版日期:2025-01-10

Received:2022-11-29 Revised:2023-01-11 Published:2025-01-10

· 第一作者:谢竣卿,硕士研究生,1923521334@qq. com

通信作者:任声策,教授,renshengce@ tongji. 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 203 页)

[10] 谢承旺, 张飞龙, 陆建波, 等. 一种多策略协同的多目标萤火虫算法[J]. 电子学报, 2019, 47(11): 2359.

XIE Chengwang, ZHANG Feilong, LU Jianbo, et al. Multi-objective firefly algorithm based on multiply cooperative strategies [J]. Acta Electronica Sinica, 2019, 47(11): 2359.

· 收稿日期:2022-09-13 修回日期:2022-10-13 出版日期:2025-01-10

Received:2022-09-13 Revised:2022-10-13 Published:2025-01-10

· 第一作者:邓澄远,工程师,dengchengyuan@ dtsjy. com

通信作者:朱昌锋,教授,cfzhu003@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