

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2023.01.015

市域(郊)铁路快慢车运行 停站策略优化

张 钊¹, 王 伟², 石 竹², 林正南¹, 黄友能¹

(1. 北京交通大学电子信息工程学院, 北京 100044; 2. 交控科技股份有限公司, 北京 100070)

摘要: 市域(郊)铁路具有高速、公交化运行的特点, 相比在地铁线路上研究快慢车运行的停站策略, 市域(郊)铁路具有多次越行的特征。首先分析市域(郊)铁路多次越行的原因, 然后以多次越行对乘客待避时间的影响为基础, 将乘客总出行时间最小作为优化目标, 构建 1:N 开行比例下快慢车停站策略的优化模型, 并采用郊狼优化算法进行建模, 最后基于实际线路运营数据进行仿真计算。结果表明: 在满足发车间隔一定的条件下, 相比于站站停运行方式, 采用快慢车多次越行的停站策略, 乘客在车总时间可减少 22.25%, 乘客总出行时间可减少 8.82%, 从而验证了市域(郊)铁路快慢车运行停站策略的有效性。

关键词: 市域(郊)铁路; 快慢车; 停站策略; 郊狼优化算法; 越行

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2023)01-0099-07

Optimization of Stop Strategy Suitable for Operation of Express-local Train of Suburban Railway

ZHANG Zhao¹, WANG Wei², SHI Zhu², LIN Zhengnan¹, HUANG Youneng¹

(1. School of Electronic Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044;

2. Traffic Control Technology Co., Ltd., Beijing 100070)

Abstract: Suburban railways are characterized by high-speed public transportation operations. Compared with the stop strategy of express-local train operation on subway lines, the Suburban Railway has the characteristic of multiple overtakings. First, this study analyzed the reasons for multiple overtaking of the Suburban Railway, and based on the impact of multiple overtaking on the waiting time of passengers, the minimum total trip time of passengers was taken as the optimization objective. Then, we constructed the optimization model of the stop strategy under 1: N express-local trains. The coyote optimization algorithm was used for modeling. Finally, a simulation calculation was performed based on the actual line operation data. Under the condition of meeting a certain departure interval, compared with the only local trains, the total time of passengers onboard can be reduced by 22.25% and the total trip time of passengers can be reduced by 8.82%. The results showed that the stop strategy proposed in this paper is effective for the operation of express-local trains on suburban railways.

Keywords: suburban railway; express-local train; stop strategy; coyote optimization algorithm; overtaking

随着社会经济的发展, 城市化进程加快, 都市圈建设成为国家发展重点。2021年2月24日, 中共中央、国务院印发了《国家综合立体交通网规划纲要》, 将京津冀、长三角、粤港澳大湾区、成渝地区双城经

收稿日期: 2021-12-07 修回日期: 2022-06-08

第一作者: 张钊, 男, 硕士研究生, 从事市域(郊)铁路列车控制研究, 20120284@bjtu.edu.cn

基金项目: 北京市科技计划课题(Z181100003918006)

引用格式: 张钊, 王伟, 石竹, 等. 市域(郊)铁路快慢车运行停站策略优化[J]. 都市轨道交通, 2023, 36(1): 99-105.

ZHANG Zhao, WANG Wei, SHI Zhu, et al. Optimization of stop strategy suitable for operation of express-local train of suburban railway[J]. Urban rapid rail transit, 2023, 36(1): 99-105.

济圈明确为建设面向世界的4大国际性综合交通枢纽集群^[1],为市域(郊)铁路建设提供了很大发展空间。

市域(郊)铁路是连接中心城区、副中心和半径50~70 km的新城、城镇组团和跨界地区,最高速度为120~200 km/h,为通勤客流提供公交化运输服务的轨道交通系统。市域(郊)铁路具有公交化特征,最高运行速度200 km/h,列车运行的最小间隔可达到3 min^[2],乘客断面客流在时间和空间上分布不均匀。为了满足乘客多样化的出行需求,需要采用更加灵活的快慢车开行方案,合理的停站方案对于减少乘客出行时间、提高交通服务水平具有重要意义。

国内外学者已对快慢车停站策略进行了相关研究。Jamili等^[3]研究了在不确定条件下的城市轨道交通跨站停列车运行模式,提出了基于鲁棒性的城市轨道交通快慢车停站方案模型。Abdelhafiez等^[4]综合考虑车站的布置形式以及乘客换乘模式,以乘客出行平均时间为优化目标构建了非线性整数模型,并对其进行松弛和线性化,求解最优的跨站策略。段凌林等^[5-6]研究在大小交路的基础上开行快慢车,并分别构建以乘客出行时间单目标优化模型和以乘客出行成本、企业运营成本的双目标非线性整数优化模型,在模型中列车最高运行速度不超过80 km/h。万浩纯等^[7]建立的快慢车开行方案基于单次越行过程分析,优化乘客出行时间,在此基础上,进一步研究运能与客流量的匹配程度。唐禄林等^[8]从降低企业运营成本角度出发,基于单次越行过程分析构建快慢车停站优化模型,模型中线路最高限速100 km/h,通过减少乘客出行感知时间以及车底周转时间,从而减少车底配置数量,降低成本。

可以看出,目前关于快慢车运行的停站优化策略主要集中在最高运行速度一般不超过100 km/h的列车,且主要基于单次越行,未将越行次数作为变量纳入到研究的模型中。而市域(郊)铁路最高运行速度可达200 km/h,列车运行的最小间隔可达到3 min,慢车存在全线被越行多次的情况,本文结合市域(郊)铁路运行特征,将越行次数和开行比例纳入到研究模型中,同时考虑不同起讫点乘客在车时间差异以及快车越行对慢车乘客待避时间的影响,以乘客出行总时间为优化目标,构建多次越行下快慢列车停站方案的优化模型,并结合郊狼优化算法进行仿真计算。

1 快慢车停站模型

1.1 模型假设

充分考虑到市域(郊)铁路快慢车运行策略的复杂

性,便于建模分析求解,对模型做出以下假设:

- 1) 快车仅在中间车站越行慢车,车站是否具备越行能力应根据工程实际,在模型中纳入约束条件考虑;
- 2) 模型只研究列车单方向运行情况,另一个方向可参考模型另行计算;
- 3) 列车运行采取单一交路,相同编组,且编组车辆技术参数相同;
- 4) 在实际运营中,通常慢车较多,且不同类型列车开行对数互为整数倍,以减少对线路通过能力的影响^[9]。快慢车开行比例为1:N,N为正整数;
- 5) 为减少运营组织的复杂性,提高运营企业的积极性,选取三类发车间隔作为决策变量优化^[10];
- 6) 列车最高运行速度相同,快慢车的旅行时间差别只存在于停站时间和启停车附加时分上;
- 7) 乘客到达站台服从随机正态分布;
- 8) 乘客出行路径的起终点车站类型不同时,乘客默认选择出行时间最短路径;
- 9) 越行车站最小追踪间隔 I_{\min} 相同。

1.2 参数说明

M 为线路上的车站数量; N 为一个快慢车周期内慢车数量; T 为优化时段长度; I_{\min} 为列车最小追踪间隔; I_{\max} 为最大平均发车间隔; t_{ij} 为站 i 至站 j 的运行时间, s ; t_w 为列车启停附加时间以及停站时间, s ; C_z 为单辆列车的设计载客量,人次; q_{ij} 为从 i 站到 j 站的客流量,人次; q_{\max} 为断面最大客流,人次; η_{\min} 为最小满载率; η_{\max} 为最大满载率; n 为慢车全线被不同快车越行的次数; h_{sf} 为慢车至快车的发车间隔, s ; h_{fs} 为快车至慢车的发车间隔, s ; h_{ss} 为慢车至慢车的发车间隔, s ; t_z 为一个快慢车发车周期时间, s ; Δt 为前后慢快车到站间隔, s ;

$$S_i = \begin{cases} 1 & \text{第}i\text{个车站具备越行能力;} \\ 0 & \text{否则} \end{cases};$$

$$x_{ki} = \begin{cases} 1 & \text{第}i\text{个车站快车停站;} \\ 0 & \text{否则} \end{cases};$$

$$x_{yji} = \begin{cases} 1 & \text{周期内第}j\text{辆慢车在第}i\text{个车站被越行;} \\ 0 & \text{否则} \end{cases}。$$

1.3 目标函数分析

1.3.1 越行模式分析

在始发站,快车、慢车发车间隔不同且交错发车,同种类列车之间的发车间隔保持均衡。

列车发车间隔和快车停站位置以及停站时间决

定越行站位置,越行判定过程和发车模式如图 1 所示。

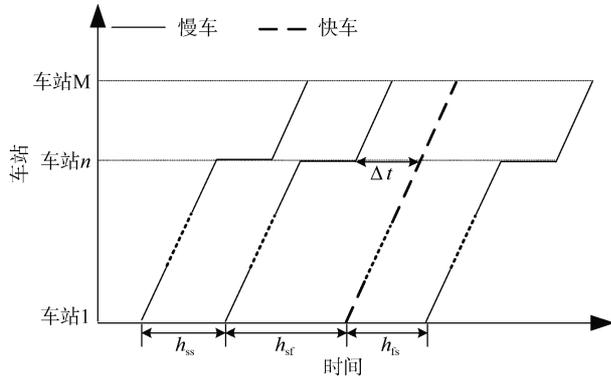


图 1 越行作业原理示意图

Figure 1 Schematic of the principle of overtaking

一个快慢车发车周期连续发出 N 辆慢车, 然后发出一辆快车, 以此循环。周期时间为

$$t_z = h_{sf} + h_{fs} + (N-1)h_{ss} \quad (1)$$

快车在越行站对慢车进行越行, 对模型求解的结果有着重要影响。由于快慢车参数一致, 到达站台的间隔受发车间隔、停站时间影响。应判断前后慢快车到站间隔是否小于最小追踪间隔, 即 Δt 是否小于 I_{\min} , 若小于, 则为越行站。

由于市域(郊)铁路最高运行速度能达到 200 km/h, 跨站能节省启停附加时间和停站时间, 并且平均发车间隔可达到 3 min, 存在慢车被后续快车再次越行的情况, 即慢车全线被越行两次或多次, 需要再次判断越行车站的位置。多次越行示意如图 2 所示。

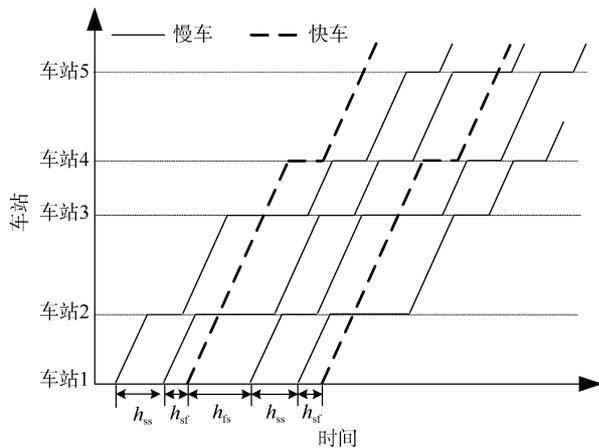


图 2 多次越行示意图

Figure 2 Schematic of multiple overtaking

一个快慢车发车周期中, 第 j 辆发车的慢车是否在车站 i 被越行 n 次的判定条件为

$$h_{sf} + (N-j) \cdot h_{ss} + (n-1)t_z - \sum_{m=2}^i (1-x_{km})t_w - \quad (2)$$

$$2(n-1)I_{\min} < I_{\min}$$

为保证最小发车间隔, 慢车在越行站应在原本停站时间基础上增加停站时间 $2I_{\min}$ 。

1.3.2 客流分析

乘客起讫点车站类型会对乘客出行时间造成影响, 越行过程会造成不同的影响。将快车停靠车站称为快车站, 其余车站称为慢车站。根据乘客起讫点车站类型将乘客客流分为四类。

I 类: 起讫点均为慢车站, 仅乘坐慢车, 则客流量为

$$Q_I = \sum_{i=1}^{M-1} (1-x_{ki}) \sum_{j=i+1}^M (1-x_{kj}) q_{ij} \quad (3)$$

II 类: 起讫点均为快车站, 仅乘坐快车, 则客流量为

$$Q_{II} = \sum_{i=1}^{M-1} x_{ki} \sum_{j=i+1}^M x_{kj} q_{ij} \quad (4)$$

第 III 类: 起点为慢车站, 终点站为快车站, 以出行时间最短乘坐, 则客流量为

$$Q_{III} = \sum_{i=1}^{M-1} (1-x_{ki}) \sum_{j=i+1}^M x_{kj} q_{ij} = Q_{III_s} + Q_{III_o} \quad (5)$$

该类客流又分为换乘客流 Q_{III_s} 和非换乘客流 Q_{III_o} , 若中间车站无快车站, 则全程乘坐慢车, 为非换乘客流; 若中间车站存在快车站, 为减少在车时间, 应尽可能多乘坐快车, 所以在靠近起点站的快车站换乘且仅换乘一次, 是否换乘需要加上换乘时间后与乘坐慢车的时间长短进行比较。

第 IV 类: 起点为快车站, 终点站为慢车站, 以出行时间最短乘坐, 则客流量为

$$Q_{IV} = \sum_{i=1}^{M-1} x_{ki} \sum_{j=i+1}^M (1-x_{kj}) q_{ij} = Q_{IV_s} + Q_{IV_o} \quad (6)$$

分为换乘客流 Q_{IV_s} 和非换乘客流 Q_{IV_o} , 若中间车站无快车站, 则全程乘坐慢车, 为非换乘客流; 若中间车站存在快车站, 应在靠近终点站的快车站换乘, 同理需要比较换乘与否的出行时间长短。

1.3.3 乘客候车时间

当发车间隔小于 10 min, 乘客到达规律服从正态分布, 全体乘客平均候车时间数值上等同于列车发车间隔的一半^[1]。根据客流分析, 等待慢车的客流总候

车时间为

$$t_{候慢} = \frac{t_z}{2N} \cdot (Q_I + Q_{III} + Q_{IVo}) \quad (7)$$

等待快车的客流总候车时间为

$$t_{候快} = \frac{t_z}{2} \cdot (Q_{II} + Q_{IVs}) \quad (8)$$

1.3.4 乘客换乘时间

III 和 IV 类乘客若换乘, 则会产生额外的换乘时间。线路为单方向单一交路, 乘客同站台进行换乘, 不考虑乘客换乘走行时间, 换乘时间为换乘时的候车时间^[12], 参考候车时间计算, III 和 IV 类客流的换乘时间为

$$t_{III换} = \frac{t_z}{2} \cdot Q_{III} \quad (9)$$

$$t_{IV换} = \frac{t_z}{2N} \cdot Q_{IVs} \quad (10)$$

1.3.5 乘客在车时间

I 类乘客的在车时间需要考虑被越行时的额外等待时间。在车时间为

$$t_{I在} = t_{ij} + (j-i)t_w + \frac{2I_{min}}{N} \cdot \sum_{k=1}^{N-1} \sum_{l=i}^{j-1} x_{ykl} \quad (11)$$

II 类乘客的在车时间为

$$t_{II在} = t_{ij} + \sum_{m=i}^{j-1} x_{km} \cdot t_w \quad (12)$$

III 类乘客的在车时间首先判断是否可以换乘, 若中间车站没有快车站, 则有

$$t_{III在} = t_{I在} \quad (13)$$

并将该客流纳入到 Q_{IIIo} 中, 若存在最靠近起点的快车站 l , 在车时间为

$$t_{III在} = t_{ij} + (l-i)t_w + \frac{2I_{min}}{N} \cdot \sum_{k=1}^{N-1} \sum_{h=i}^{l-1} x_{ykh} + \sum_{m=l}^{j-1} x_{km} \cdot t_w \quad (14)$$

是否换乘的判断条件为

$$\frac{t_z}{2} + t_{III在} < t_{I在} \quad (15)$$

若式(15)成立, $t_{III在}$ 取值同式(14), 将该客流纳入到 Q_{III} 中。否则 $t_{III在}$ 取值同式(13), 并将该客流纳入到 Q_{IIIo} 中。

IV 类乘客的在车时间首先判断是否可以换乘, 若中间车站没有快车站, 则有

$$t_{IV在} = t_{I在} \quad (16)$$

并将该客流纳入到 Q_{IVo} 中, 若存在最靠近终点站

的快车站 l , 在车时间为

$$t_{IV在} = t_{ij} + (j-l)t_w + \sum_{m=i}^{l-1} x_{km} \cdot t_w + \frac{2I_{min}}{N} \cdot \sum_{k=1}^{N-1} \sum_{h=l}^{j-1} x_{ykh} \quad (17)$$

是否换乘的判断条件为

$$\frac{t_z}{2N} + t_{IV在} < t_{I在} \quad (18)$$

若式(18)成立, $t_{IV在}$ 取值同式(17), 将该客流纳入到 Q_{IVs} 中。否则 $t_{IV在}$ 取值同式(16), 将该客流纳入到 Q_{IVo} 中。

1.4 基于多次越行的停站模型

快慢车开行策略的优化模型主要包括目标函数和约束条件两部分。

1.4.1 目标函数

根据 1.3 的分析, 优化目标为乘客总出行时间最小, 主要包括乘客候车时间、乘客在车时间以及乘客换乘时间 3 部分, 总出行时间 Z 的目标函数为

$$\min Z = t_{候慢} + t_{候快} + \sum_{i=1}^{IV} t_{I在} Q_i + t_{III换} + t_{IV换} \quad (19)$$

1.4.2 约束条件

1) 发车间隔约束。最小发车间隔:

$$h_{sf} \geq I_{min}, h_{fs} \geq I_{min}, h_{ss} \geq I_{min} \quad (20)$$

最大平均发车间隔:

$$\frac{t_z}{N+1} \leq I_{max} \quad (21)$$

2) 快车停站约束。起点终点站停站:

$$x_{k1} = x_{kM} = 1 \quad (22)$$

中间站快车站数量大于等于 1, 不能全为快车站:

$$3 \leq \sum_{i=1}^M x_{ki} < M \quad (23)$$

3) 越行站约束。为减少乘坐慢车乘客等待时间, 快车站不作为越行站:

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N x_{ki} \cdot x_{yji} = 0 \quad (24)$$

一辆慢车单方向全线至多被越行 n 次:

$$h_{sf} + n \cdot t_z - n \cdot 2I_{min} - \sum_{i=2}^{M-1} (1-x_{ki}) t_w \geq I_{min} \quad (25)$$

被越行站应当具备越行能力:

$$\sum_{i=2}^{M-1} \sum_{j=1}^N x_{yji} \cdot (1-S_i) = 0 \quad (26)$$

4) 到发时刻约束。慢车到发时刻约束:

$$\begin{cases} d_{ji} = (j-1)h_{ss} + (i-1)t_w + 2I_{\min} \sum_{k=2}^{i-1} x_{yjk} \\ f_{ji} = d_{ji} + t_w + 2I_{\min} x_{yji} \end{cases} \quad (27)$$

式中: d_{ji} 为第 j 辆慢车在 i 站的到站时刻; f_{ji} 为第 j 辆慢车在 i 站的发车时刻。

快车到发时刻约束:

$$\begin{cases} d_{(N+1)i} = t_z - h_{fs} + t_w \cdot \sum_{j=1}^{i-1} x_{kj} \\ f_{(N+1)i} = d_{(N+1)i} + t_w \cdot x_{ki} \end{cases} \quad (28)$$

式中: $d_{(N+1)i}$ 为快车在 i 站的到站时刻; $f_{(N+1)i}$ 为快车在 i 站的发车时刻。

一个周期中最后一辆慢车的发车时刻不能晚于后一个周期中第一辆慢车的到站时刻:

$$f_{Ni} \leq t_z + d_{1i} \quad (29)$$

快车停站时的到发时刻与任一慢车的到发时刻无交集:

$$(d_{(N+1)i}, f_{(N+1)i}) \cap (d_{ji}, f_{ji}) = \emptyset \quad (30)$$

5) 满载率约束。

$$\begin{cases} \frac{(N+1)3600}{t_z} \eta_{\max} > q_{\max} \\ \frac{(N+1)3600}{t_z} \eta_{\min} < q_{\max} \end{cases} \quad (31)$$

2 停站策略算法设计

本文所建立的市域(郊)铁路快慢列车运行策略优化研究模型为单目标非线性规划模型, 采用郊狼优化算法对其进行求解, 郊狼优化算法是一种群体智能算法, 参数少易于调整^[13]。

2.1 种群初始化

郊狼优化算法中每只郊狼的社会状态因素是由决策变量组成的, 代表模型的一个解, 解的每一维度都是一个决策变量。建立的模型中决策变量包括快车停站序列, 采用二进制数组表示, 实现时转换为十进制整数, 以及三类发车间隔, 可以组成一个四维数组。种群初始化时, 根据停站序列范围以及种群大小随机初始化郊狼种群。

$$\text{coyote}(i) = \{[X_1, h_{sf1}, h_{fs1}, h_{ss1}]; [X_2, h_{sf2}, h_{fs2}, h_{ss2}]; \dots; [X_n, h_{sfn}, h_{fsn}, h_{ssn}]\} \quad (32)$$

式中: X 为二进制停站序列的十进制整数表示。

2.2 适应度函数设计

适应度函数一般由目标函数转化而来, 指导着郊狼优化算法的进化方向, 也对郊狼优化算法的收敛速度有着很大影响。通过给目标函数添加由约束条件转化的惩罚项的方式构造适应度函数, 目标函数 Z 与郊狼个体不满足模型的约束条件的次数 C 所构成适应度函数为

$$\text{fitness} = Z + \beta C \quad (33)$$

式中: β 为惩罚系数。最后, 依次判断郊狼的社会状态因素是否满足约束条件, 每不满足一次则累加计数, 通常给总次数乘以较大惩罚系数, 使得不满足约束条件的郊狼在迭代中被淘汰。

2.3 最大迭代次数

最大迭代次数是郊狼优化算法的终止条件, 设置合适的迭代次数能够在得到优秀解的同时缩短时间。

2.4 具体流程

采用郊狼优化算法求解快车停站序列模型的具体流程如下:

Step 1: 输入研究时段内计划区间运行时间 T , 慢车比例 M 和停站时间 t_w , 乘客客流矩阵 Q_{OD} , 整数搜索范围, 最小追踪间隔 I_{\min} , 最大平均发车间隔 I_{\max} , 列车设计载客量 C_z 以及满载率 η 。

Step 2: 设置郊狼优化算法的参数: 郊狼组的数量 N_p 、组内郊狼的数量 N_c 、最大迭代次数 N_f 。根据决策变量维度以及搜索空间随机初始化每只郊狼的社会状态因素 $\text{coyote}(i)$, 其中 $i \in [1, N_p \times N_c]$, 并随机分组。

Step 3: 将每只郊狼代入适应度函数 fitness 计算其社会适应能力。寻找适应度最小值以及初始种群的最优郊狼个体, 开始迭代。

Step 4: 进行组内的郊狼成长、生死操作。根据适应度值对组内郊狼进行排序, 确定组内最优郊狼 α 。组内文化趋势 cult 取郊狼组矩阵每一列的中位数。组内每只郊狼都被最优郊狼和中游郊狼影响, 通过式(33)、式(34)进行成长。

$$\begin{cases} \delta_1 = \alpha - \text{soc}_{r1} \\ \delta_2 = \text{cult} - \text{soc}_{r2} \end{cases} \quad (34)$$

$$\text{new}_{\text{soc}_{rc}} = \text{soc}_{rc} + \delta_1 s_1 + \delta_2 s_2 \quad (35)$$

式中: soc_{r1} , soc_{r2} 均为随机郊狼; s_1 , s_2 为随机权重; 成长后重新计算其适应度值, 保留适应度小的郊狼。通过随机状态空间产生新生郊狼, 计算其适应度值, 用结果优秀的进行替代。

Step 5: 根据驱离概率使郊狼随机地被一组驱离, 被另一组接纳, 更新每只郊狼的年龄。

Step 6: 判断循环次数是否达到最大, 如果达到就停止循环; 否则, 根据步骤 Step 4、Step 5 继续循环迭代。

Step 7: 输出最优郊狼及其适应度值, 得到快车车站序列以及三类发车间隔。

3 仿真验证

3.1 运营数据和模型参数

以 A 市某条直线型市域轨道交通线路为研究对象。该线路总里程为 68.39 km, 总车站数为 12 座, 平均站间距为 6.22 km。结合运营计划, 该线路采用单一交路和 6A 编组方案, 列车设计载客量为 1 488 人, 列车区间最高运行速度最高为 200 km/h, 快慢车开行比例为 1 : 2, 具备越行能力的车站为 2、5、8、11 站。线路运营参数如表 1 所示。

遵照慢车被不同快车越行的次数不应超过 2 次的要求^[1], n 取 2; 遵照快慢车间的最小追踪间隔宜控制在 90 s 以内, 列车运行最小间隔不宜大于 3 min, 停站时间宜控制在 40 s 以内的要求^[14], 取 90 s 作为最小追踪间隔, 取 40 s 作为停站时间。以 200 km/h 作为限速, 根据 CRH6A 动车参数计算得到启停附加时间约为 60 s。模型参数设置如表 2 所示。

3.2 客流数据

线路的客流特征是制定开行策略的关键因素, 应根据客流需求来制定开行策略。案例线路远期高峰小时单方向 OD 预测客流量如表 3 所示。

表 1 线路区间长度及纯运行时分

Table 1 Line section length and pure operation time

区间序号	区间长度/km	纯运行时间/s
1	3.93	88.42
2	9.93	178.74
3	3.43	77.17
4	8.58	154.44
5	6.16	116.72
6	5.78	115.60
7	6.02	114.06
8	4.31	86.20
9	6.88	130.36
10	5.49	109.80
11	7.88	149.31

表 2 模型参数设置

Table 2 Values of model parameters

参数	数值
M	12
N	2
n	2
T	1 h
I_{min}	90 s
I_{max}	360 s
t_w	100 s
η_{min}	0.5
η_{max}	1.3
N_p	10
N_c	10
β	10^8

表 3 高峰小时线路 OD 客流量

Table 3 Passenger flow from origin to destination stations in peak hour

车站	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	187	877	1 020	85	51	3 359	86	3 172	2 520	155	1 120
2	0	0	144	203	36	29	112	52	58	29	58	86
3	0	0	0	561	62	218	438	43	2 333	1 587	155	3 359
4	0	0	0	0	52	240	444	109	2 054	2 986	104	3 172
5	0	0	0	0	0	14	56	22	743	2 972	743	2 229
6	0	0	0	0	0	0	564	123	691	778	144	1 123
7	0	0	0	0	0	0	0	58	1 008	662	166	979
8	0	0	0	0	0	0	0	0	86	115	58	64
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	778	86	1 123
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	86	1 008
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	173
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

3.3 结果分析

默认乘客选择出行时间最短路径,根据 1.3.2 分析,在该算例下的乘客客流量分类结果如表 4 所示。

表 4 客流量分类
Table 4 Flow Classification

Q_I	Q_{II}	Q_{III}		Q_{IV}	
		Q_{III_s}	Q_{III_o}	Q_{IV_s}	Q_{IV_o}
1 279	34 560	8 885	1 341	1 172	771

在 1:2 的快慢车比例下求解得到最优停站策略。以乘客总出行时间最小为优化目标的快慢车停站策略求解的最优方案为: h_{sf} 等于 165 s, h_{fs} 等于 120s, h_{ss} 等于 120 s, 周期中第 1 辆和第 2 辆发车的慢车被越行车站分别是 2、8 站。满足慢车全线最多被越行 2 次的要求。除在首尾站停站外,快车在 3、4、7、9、10 站停车。

在站站停模式下,同等发车间隔计算方法为

$$t_{\text{interval}} = \frac{t_z}{N+1} \quad (36)$$

即以 135 s 为发车间隔实行站站停运营模式,乘客出行总时间为

$$t_{\text{总}} = \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=i+1}^M q_{ij} \left(\frac{t_{\text{interval}}}{2} + t_{ij} + (j-i)t_w \right) \quad (37)$$

基于候车时间和在车时间等指标进行结果对比,采用快慢车停站方案与站站停方案效果对比如表 5 所示。

表 5 快慢车停站方案与站站停方案效果对比
Table 5 Effect comparison between express/local trains and only local trains

指标	快慢车停站/min	站站停/min	变化率/%
总候车时间	141 311	54 009	+161.64
总在车时间	718 256	923 803	-22.25
总换乘时间	319 65	-	-
总出行时间	891 532	977 812	-8.82

乘客总出行时间的变化是候车时间、在车时间以及换乘时间共同作用的结果,当快慢车方案下全线乘客所节省的总在车时间高于所增加的起点站总候车时间和总换乘时间之和时,快慢车方案才具有正向的时间效益^[15]。

根据式(7)、式(8)可知等候快车的有 35 732 人次,等候慢车的有 12 276 人次。起点站等候快车的人数较

多,因此候车时间增加超过一倍。但总在车时间占总出行时间比重更多,节省的总在车时间比增加的总候车时间和总换乘时间之和更多,总出行时间减少 8.82%,表明该策略是有效的。

4 结论

1) 基于多次越行的场景,考虑最大断面客流与线路能力约束,建立单目标非线性整数规划模型。结果表明,该模型可以实现市域(郊)铁路快慢车运行的停站策略优化。

2) 在满足发车间隔一定的条件下,相比于站站停运行方式,采用本文提出的快慢车多次越行的停站策略,乘客在车总时间可减少 22.25%,乘客总出行时间可减少 8.82%。

由于越行次数对停站方案的效果会产生影响,因此灵敏度分析有待进一步研究和讨论。

参考文献

- [1] 中共中央国务院. 国家综合立体交通网规划纲要[J]. 北京: 人民出版社, 2021.
- [2] 北京市市场监督管理局, 北京市规划和自然资源委员会. 市域(郊)轨道交通设计规范: DB11/T 1980—2022[S]. 2022.
- [3] JAMILI A, AGHAEI P M. Robust stop-skipping patterns in urban railway operations under traffic alteration situation[J]. Transportation research part C: emerging technologies, 2015, 61: 63-74.
- [4] ABDELHAFIEZ E A, SALAMA M R, SHALABY M A, et al. Minimizing passenger travel time in URT system adopting skip-stop strategy[J]. Journal of rail transport planning & management, 2017, 7(4): 277-290.
- [5] 段凌林, 查伟雄, 李剑, 等. 城市轨道交通大小交路结合快慢车开行方案优化[J]. 铁道运输与经济, 2020, 42(5): 103-109.
DUAN Linglin, ZHA Weixiong, LI Jian, et al. Optimization of operation scheme for urban rail transit combining full-length and short-turn routing with express and slow train[J]. Railway transport and economy, 2020, 42(5): 103-109.
- [6] 曾翠峰, 侯宇菲, 罗钦, 等. 大小交路条件下的市域轨道交通快慢列车停站优化方案[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(7): 63-66.
ZENG Cui Feng, HOU Yufei, LUO Qin, et al. Optimal scheme of train stopping at express-local train station in condition of full-length and short-Run routes[J]. Urban mass transit, 2019, 22(7): 63-66.

(下转第 112 页)