

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.05.011

考虑机场站客流的地铁末班车衔接研究

王林, 徐小明

(合肥工业大学汽车与交通工程学院, 安徽合肥 230009)

摘要: 地铁末班车衔接问题关系到乘客能否乘坐地铁实现当天的最后一次出行。特别对于深夜到达城市机场的乘客而言, 由于机场地理位置的因素, 错过地铁末班车意味着乘客的出行费用将会大幅增加。文章基于乘坐末班车出发的客流, 以 OD(origin-destination) 可达乘客人数最大化和登车乘客人均等待时间最小化为目标建立地铁末班车时刻表优化模型, 设计基于遗传算法的求解方法。最后, 以西安地铁网络为例开展算例研究, 结果表明: OD 可达的乘客人数提高了 27.70%, 其中机场站来源的乘客人数增长了 55.82%, 人均等待时间平均下降了 32.37%, 验证了所提模型和方法的有效性。

关键词: 地铁末班车; 时刻表优化; 机场线; 遗传算法; OD 可达性

中图分类号: U239.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-5060(2025)05-0651-09

Study on last train connection of subway considering passenger flow of airport station

WANG Lin, XU Xiaoming

(School of Automobile and Traffic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The problem of the last train connection is related to whether passengers can take the subway to achieve the last trip of the day. Especially for passengers who arrive at the city airport late at night, due to the geographical location of the airport, missing the last train of the subway means that the travel costs of these passengers will increase significantly. Therefore, this paper considers the passenger flow departing from the last train, establishes the optimization model of the last train timetable with the goal of maximizing the number of origin-destination(OD) passengers and minimizing the waiting time of boarding passengers, and designs a solution method based on genetic algorithm. Finally, a case study of Xi'an subway network is carried out. The results show that the number of OD passengers increases by 27.70%, among which the number of passengers from airport stations increases by 55.82%, and the average waiting time per passenger decreases by 32.37%, which verifies the effectiveness of the proposed model and method.

Key words: last train of subway; timetable optimization; airport intercity line; genetic algorithm; origin-destination(OD) accessibility

日益发展的社会经济和科技水平, 促使人们追求更高的生活质量。出行作为衣食住行的一部分, 其重要性不言而喻。城市地铁因其安全、快捷、舒适、良好社会经济性等特点成为居民重要的出行方式之一, 城市地铁的衔接优化一直是研究热点。在现实生活中, 城市地铁进入后半夜一般

就要进行维护, 不再提供服务, 本文主要研究地铁末班车的衔接优化。

根据考虑约束和目标的不同, 城市地铁的衔接研究可以分为非末班车和末班车时刻表的衔接研究。非末班车的衔接研究一般要考虑地铁容量约束, 不考虑地铁的收车时刻约束, 研究侧重于减

收稿日期: 2023-06-30; 修回日期: 2023-09-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(72071059); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(JZ2023YQTD0073)

作者简介: 王林(1997—), 男, 安徽安庆人, 合肥工业大学硕士生;

徐小明(1989—), 男, 安徽合肥人, 博士, 合肥工业大学副教授, 硕士生导师, 通信作者, E-mail: xmxu@hfut.edu.cn.

少乘客的等待时间、总旅行时间^[1-4]和提高地铁运营效益^[5-7]。而对于末班车的衔接研究,则需要考虑列车的收车时刻约束,不考虑地铁容量约束,现有相关研究主要侧重于增加末班车的成功换乘衔接次数及 OD(origin-destination)可达性。

在增加末班车的成功换乘衔接次数方面,文献[8]同时考虑末班车乘客的换乘等待时间以及换乘衔接数,以最大化换乘衔接间隔为目标建立末班车时刻表优化模型;文献[9]提出 2 种地铁末班车衔接优化模型,以最小化换乘冗余时间的标准差,实现地铁末班车换乘的成功衔接。

在提高整个网络的 OD 可达性方面,文献[10]关注优化后时刻表与现有时刻表间的差异,设计以 OD 可达性、平均换乘冗余时间最大化及时刻表改动最小化为目标的时刻表协调优化模型;文献[11]考虑乘客等待时间和 OD 可达性,构建一个以最小化乘客平均等待时间以及最大化 OD 可达对数为目标的优化模型;文献[12]以实际 OD 可达的乘客人数为标准,开发以最大化可达 OD 对的加权和为目标的优化模型。同样是以最大化可达 OD 对的加权和为目标建立模型,与前者使用现有商业软件直接求解不同的是,文献[13]开发与基于时刻表的 Dijkstra 算法相结合的遗传算法。此外,有些研究还考虑了城市轨道交通与其他出行工具(如公交车)间的衔接,文献[14]关注乘客换乘到公交车的过程,以最大化成功换乘衔接次数以及最小化乘客等待时间为目标构建了模型。

综上所述,现有的末班车研究缺乏对网络中特定人群(如城郊机场站的末班车乘客)的重点关注。一方面,机场站的乘客出行成本相较于其他站点的乘客更大;另一方面,在末班车时段,对于普通站点和机场站的客流进站速率的刻画应具有明显区别,本文中普通站客流的进站速率视作一个常数,而机场站的客流进站速率伴随航班乘客的到来发生明显提升。基于以上原因,本文特别考虑了机场站末班车乘客的接驳,建立了最大化 OD 可达乘客人数和最小化登车乘客平均等待时间的多目标末班车时刻表协调优化模型,设计了基于遗传算法的求解方法,得到最优时刻表。

1 问题描述

已知一个城市地铁网络的线路集合 $L = \{l | l=0, 1, 2, \dots, n\}$, $n+1$ 为线路的总条数;线 l 上车站的集合 $S_l = \{s | s=0, 1, 2, \dots, m\}$, $m+1$ 为线 l

上车站的总数;线 l 上乘客出行起点站集合为 O_l , $O_l \subseteq S_l$;地铁网络中考虑 OD 对的集合为 U , ζ_{fg} 表示一个由站 f 到站 g 的 OD 对, $\zeta_{fg} \in U$;搭乘机场站末班车乘客的航班集合 $G = \{p | p=0, 1, \dots, n'\}$, $n'+1$ 为相关航班的数量。

本文将每条线起始站末班车与次末班车的发车间隔、列车在连续两车站间的区间运行时间以及在车站的停站时间设置为决策变量。在地铁连续发车安全间隔,最大最小区间运行时间以及停站时间等运行约束下,优化末班车时刻表以最大化 OD 可达的乘客人数,同时最小化登车乘客的人均等待时间,提高地铁运营效率及乘客乘车感受。

为更加准确地描述问题,进行以下说明:

1) 本文将地铁一条双向线路上、下行两方向视作方向相反的 2 条线路。

2) 本文中起点站(终点站)指乘客出行的起点站(终点站),而非列车运行始发站(终点站)。

3) 在现实网络中,由于两相邻换乘站之间的车站可达性相同^[13],在两相邻换乘站之间所有车站里选定一个代表站作为乘客出行的 O 点和 D 点。

4) 由于末班车时段客流量很小,本文忽略了乘客上下车时间,乘客进站速率即视为乘客登车速率。

5) 依据是否包含航班末班车乘客,本文考虑的起点站分为机场站和普通起点站。

6) 最终 OD 可达的乘客来源由机场站的乘客和普通起点站的乘客 2 个部分构成。在机场站,乘客又由航班来源的末班车乘客和其他来源的末班车乘客构成。末班车登车乘客的等待时间由在换乘站的等待时间、在机场站的等待时间及在普通起点站的等待时间组成。

为简化问题,本文做如下假设:① 网络中所有换乘方向的乘客换乘走行时间已知;② 所有线路上的末班车承载能力足够;③ 不考虑机场站航班客流的影响,所有起点站的乘客进站速率已知且为常数,所有航班的末班车乘客进站速率已知且为常数。

2 数学模型

2.1 目标函数

2.1.1 最大化 OD 可达的乘客人数(目标 1)

计算 OD 可达的乘客人数的基本步骤是:首先求出所有起点站的登车人数,即线网所有 OD

的总交通需求;然后由时刻表得到可达的 OD 对集合;最后根据已知的 OD 需求比率计算出 OD 间的乘客人数,进而得出目标 1 的数学表达式。

1) 机场站登车人数。在线 l 上机场站 f , 已知每个航班中乘坐末班车的人数 Q_p , 对于航班 p 的末班车乘客的接驳存在 2 种情形。当 $\varphi(t_{lf}^d - t_p^a) \geq Q_p$, 航班 p 的末班车乘客全部登上末班车; 当 $\varphi(t_{lf}^d - t_p^a) < Q_p$, 航班 p 中只有部分乘客登上末班车。航班 p 的乘客中登车人数 P_p^{in} 计算公式为:

$$P_p^{\text{in}} = \begin{cases} Q_p, & \varphi(t_{lf}^d - t_p^a) \geq Q_p; \\ \varphi(t_{lf}^d - t_p^a), & \varphi(t_{lf}^d - t_p^a) < Q_p \end{cases} \quad (1)$$

其中: φ 为航班 p 末班车乘客的进站速率; t_{lf}^d 为线 l 上末班车在车站 f 的发车时刻; t_p^a 为航班 p 中第 1 个到达机场站站台的乘客的到达时刻。

机场站的登车人数 P_{lf}^{in} 表示为:

$$P_{lf}^{\text{in}} = \sum_{p \in G} P_p^{\text{in}} + \varphi_f(t_{lf}^d - t_{lf}^{d_2}) \quad (2)$$

其中: G 为搭乘机场站末班车乘客的航班集合; φ_f 为起点站 f 的末班车乘客进站速率; $t_{lf}^{d_2}$ 为线 l 上次末班车在车站 f 的发车时刻; $\varphi_f(t_{lf}^d - t_{lf}^{d_2})$ 为机场站其他来源末班车乘客的登车人数。

2) 普通起点站登车人数。对于线 l' 上起点站 f' 而言,其登车人数计算公式为

$$P_{l'f'}^{\text{in}} = \varphi_{f'}(t_{l'f'}^d - t_{l'f'}^{d_2}) \quad (3)$$

3) 总登车人数。从以上讨论可知,考虑的所有起点站的总登车人数 P_0 表示为:

$$P_0 = \sum_{l \in L} \sum_{f \in O_l} P_{lf}^{\text{in}} \quad (4)$$

4) OD 可达的乘客人数。OD 对 ζ_{fg} 间的乘

$$W = \begin{cases} 0, & t_{l's}^d - (t_{l'k}^a + t_{l's}) < 0; \\ t_{l's}^d - (t_{l'k}^a + t_{l's}), & 0 \leq t_{l's}^d - (t_{l'k}^a + t_{l's}) < h_{l's}; \\ t_{l's}^d - (t_{l'k}^a + t_{l's}) - zH_{l's}, & t_{l's}^d - (t_{l'k}^a + t_{l's}) \geq h_{l's} \end{cases} \quad (7)$$

其中, z 表示换乘乘客到达站台后,能够乘坐的除最后两班列车之外的列车班次,具体公式为:

$$z = \left\lfloor \frac{t_{l's}^d - (t_{l'k}^a + t_{l's})}{H_{l's}} \right\rfloor \quad (8)$$

其中: $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示对参数向下取整; $H_{l's}$ 为线 l' 上列车在站 s 的发车间隔。

由上述分析可知,末班车乘客在换乘站的总等待时间公式为:

$$T_{\text{trans}} = \sum_{\zeta_{fg} \in U_s} \sum_{S_{kfg}^{\zeta_{fg}}} \sum_{l \in L} \sum_{l' \in L} WQ^{\zeta_{fg}} \quad (9)$$

其中, $S_{kfg}^{\zeta_{fg}}$ 为 OD 对 ζ_{fg} 间第 k 条路径上换乘站的集合。

客人数 $Q^{\zeta_{fg}}$ 表示为:

$$Q^{\zeta_{fg}} = \frac{r^{\zeta_{fg}}}{\sum_{\zeta_{fg'} \in V^{lf}} r^{\zeta_{fg'}}} P_{lf}^{\text{in}} \quad (5)$$

其中: $r^{\zeta_{fg}}$ 为 OD 对 ζ_{fg} 间的交通需求占总交通需求的比率; V^{lf} 为中间变量,表示得到集合 U 中起点站为线 l 上 f 站的 OD 对的集合。

综上,OD 可达的乘客人数 P 计算公式为:

$$P = \sum_{\zeta_{fg} \in U_1} Q^{\zeta_{fg}} \quad (6)$$

其中, U_1 为中间变量,表示地铁网络中可达的 OD 对集合。

2.1.2 最小化登车乘客人均等待时间(目标 2)

1) 登车乘客在换乘站的等待时间。讨论 OD 对 ζ_{fg} 间的乘客在换乘站的换乘情况。如果乘客乘坐的是线 l 上的倒数第 j 列列车,那么其到达换乘站 s 的时刻为倒数第 j 列列车的到达时刻 $t_{l's}^a$,又已知乘客在换乘站 s 由线 l 站台到线 l' 站台的走行时间 $t_{l's}$ 以及线 l' 上在车站 s 末班车和次末班车之间的发车间隔 $h_{l's}$ 。根据到达时刻,末班车乘客在换乘站的换乘情况分 3 种:当 $t_{l's}^d - (t_{l'k}^a + t_{l's}) < 0$ 时,表示乘客到达站台的时刻要晚于换入线上末班车的发车时刻,乘客错过末班车;当 $0 \leq t_{l's}^d - (t_{l'k}^a + t_{l's}) < h_{l's}$ 时,乘客只能乘坐末班车;当 $t_{l's}^d - (t_{l'k}^a + t_{l's}) \geq h_{l's}$ 时,乘客可以乘坐除末班车以外其他班次的列车。为了便于计算,当 $t_{l's}^d - (t_{l'k}^a + t_{l's}) < 0$ 时,令乘客换乘等待时间 $W = 0$ (在后续目标函数作为遗传算法适应度函数出现时,令 $W = \theta$, θ 是一个足够大的正数,用作惩罚因子),此时乘客在换乘站的等待时间 W 为:

2) 登车乘客在机场站的等待时间。对于线 l 上机场站 f 堆,航班 p 的登车乘客总等待时间 T_p 可表示为:

$$T_p = \begin{cases} \left(t_{lf}^d - t_p^a - \frac{Q_p}{2\varphi} \right) P_p^{\text{in}}, & \varphi(t_{lf}^d - t_p^a) \geq Q_p; \\ \frac{1}{2} (t_{lf}^d - t_p^a) P_p^{\text{in}}, & \varphi(t_{lf}^d - t_p^a) < Q_p \end{cases} \quad (10)$$

机场站末班车乘客总等待时间 T_{lf} 可表示为:

$$T_{lf} = \sum_{p \in G} T_p + \frac{1}{2} \varphi_f (t_{lf}^d - t_{lf}^{d_2})^2 \quad (11)$$

其中, $\frac{1}{2}\varphi_f(t_{lf}^d - t_{lf}^{db})^2$ 为机场站其他来源登车乘客等待时间。

3) 登车乘客在普通起点站的等待时间。对于线 l 上起点站 f 而言, 登车乘客总等待时间计算公式为:

$$T_{lf} = \frac{1}{2}(t_{lf}^d - t_{lf}^{db})P_{lf}^m \quad (12)$$

4) 登车乘客在起点站的总等待时间。在所有起点站的总等待时间 T_0 可表示为:

$$T_0 = \sum_{l \in L} \sum_{f \in O_l} T_{lf} \quad (13)$$

综上, 末班车登车乘客的人均等待时间 T 可表示为:

$$T = \frac{T_{\text{trans}} + T_0}{P_0} \quad (14)$$

2.1.3 目标函数的表示

对目标 1 乘客人数 P 、目标 2 人均等待时间 T 作归一化处理, 即

$$\bar{P} = \frac{P - P_{\min}}{P_{\max} - P_{\min}}; \quad \bar{T} = \frac{T - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}} \quad (15)$$

综上, 目标函数可表示为:

$$\max(\beta_1 \bar{P} - \beta_2 \bar{T}) \quad (16)$$

其中, β_1 、 β_2 为权重系数。

2.2 约束条件

确定每条线上末班车在每个车站的发车时刻 t_b^d 和到达时刻 t_b^a , 即

$$t_b^d = t_{l_0}^d + h_{l_0} + \sum_{k=0}^{s-1} t_{lk}^{\text{run}} + \sum_{r=1}^s t_{lr}^{\text{sta}}, \quad \forall l \in L, s \in S_l \quad (17)$$

$$t_b^a = t_{l(s-1)}^d + t_{l(s-1)}^{\text{run}}, \quad \forall l \in L, s \in S_l, s \neq 0 \quad (18)$$

其中: h_{l_0} 为决策变量, 表示线 l 上始发站最后一个发车间隔; t_{lk}^{run} 为决策变量, 表示线 l 上末班车从车站 k 到 $k+1$ 的区间运行时间; t_{lr}^{sta} 为决策变量, 表示线 l 上末班车在车站 r 的停站时间。

末班车的区间运行和停站时间调整应符合实际运营条件和要求, 需要满足下列约束条件, 即

$$t_{ls}^{\text{sta}} \leq t_{ls}^{\text{sta}} \leq \bar{t}_{ls}^{\text{sta}}, \quad \forall l \in L, s \in S_l, s \neq 0 \quad (19)$$

$$t_{ls}^{\text{run}} \leq t_{ls}^{\text{run}} \leq \bar{t}_{ls}^{\text{run}}, \quad \forall l \in L, s \in S_l \quad (20)$$

其中: t_{ls}^{sta} 、 $\bar{t}_{ls}^{\text{sta}}$ 分别为线 l 上末班车在车站 s 的最小、最大停站时间; t_{ls}^{run} 、 $\bar{t}_{ls}^{\text{run}}$ 分别为线 l 上末班车从车站 s 到 $s+1$ 的最小、最大区间运行时间。

为保证列车运行安全和服务质量, 每条线上每个车站的末班车和次末班车之间应满足发车间

隔时间约束和发到间隔时间约束, 即

$$h_l \leq t_b^d - t_b^d \leq \bar{h}_l, \quad \forall l \in L, s \in S_l \quad (21)$$

$$t_b^a - t_b^d \geq h_l^{\text{da}}, \quad \forall l \in L, s \in S_l \quad (22)$$

其中: h_l 、 \bar{h}_l 分别为线 l 上的最小、最大发车间隔时间; h_l^{da} 为线 l 上的最大发到间隔时间。

考虑到地铁系统维护需求和运行成本, 各线路上末班车的收车时刻 t_m^a 应有一个最晚限制, 即

$$t_m^a \leq T_l, \quad \forall l \in L \quad (23)$$

其中, T_l 表示线 l 上末班车的最晚收车时刻。

3 求解算法

3.1 OD 间可选路径的预处理

本文利用 K 短路算法进行路径预处理。基于原始时刻表, 本文中相邻车站之间的成本设置为两者之间的列车运行时间, 具体过程描述如下:

1) 使用最短路算法找到所有 OD 的最短路径, 记为每个 OD 的第 1 条路径并标记路径上所有的换乘站。

2) 对于某个 OD, 依次将最短路径上每个换乘站到任一与之相邻的车站的成本设置为无限大, 并使用最短路算法搜索最短路径, 直到 OD 之间已找不到路径或找出 5 条待选路径为止。

3) 对所有 OD 重复步骤 2) 的操作。若所有 OD 的可能路径都已找到, 则针对 OD 间乘客可选路径的预处理完成。

3.2 遗传算法

列车时刻表协同问题已经被学者证明是 NP-难问题^[15], 在处理复杂地铁网络时, 启发式算法被广泛应用于求解列车时刻表问题。由此, 本文设计了基于遗传算法的求解方法。

染色体结构以及交叉变异操作如图 1 所示。本文选择每条线起始站最后一个发车间隔 h_{l_0} 、末班车在连续 2 个车站之间的区间运行时间 t_{ls}^{run} 以及在车站的停站时间 t_{ls}^{sta} 作为决策变量, 并采用浮点数编码构造染色体, 每条染色体表示一组解, 解的表示如图 1a 所示。在满足约束条件式(17)~(23)的情况下随机生成初始种群。适应度函数在模型目标函数的基础上引入一个惩罚因子 θ 得出。种群进化时的选择、交叉以及变异算子分别采用轮盘赌、两点交叉、基本位变异。两点交叉是将 2 条父代染色体 2 个基因之间的所有值互换得到子代染色体; 基本位变异是将染色体上某个基因值随机改变得得到 1 条新的染色体。若染色体经过交叉或变异操作产生的子代不满足相关约束条

件,则舍弃该子代,重新对父代染色体进行相同操作,直到子代满足约束条件,最终生成新一代种群。达到设定的终止条件,算法停止,输出最优个体,再根据约束条件式(17)、(18)输出最优解,即末班车时刻表。

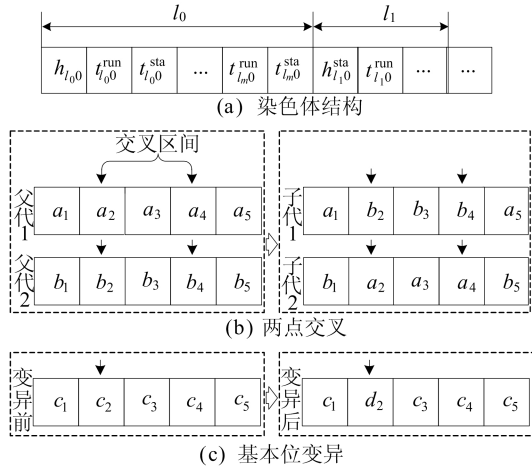


图 1 染色体结构以及交叉变异操作

4 算例分析

4.1 关键 OD

由于地铁末班车时刻表无法协调使得所有 OD 都可达,受文献[10]的启发,结合末班车乘客主要是从市中心流向市郊的出行特点,本文重点考虑了一些关键 OD。关键 OD 的挑选原则是除了以机场线的机场站作为起点的 OD 外,其余所有 OD 的起点必须位于市中心,终点则是位于除市中心以外的位置。

4.2 小规模算例

为了验证模型和算法的有效性,本文设计了一个简单的城市地铁网络,并按一定规则随机生成 4 组原始时刻表及 6 组不同的 OD 需求比率,每个时刻表以最早的末班车的发车时刻为 0 时刻,由于文章篇幅所限,只展示部分原始数据,相关数据见表 1、表 2 所列。表 1 中从表格第 2 列开始,每 1 列表示对应线路上末班车在各站的发车及到达时刻。表 2 只列出了比率 1~3,比率 4~6 由于篇幅原因省略。该网络由 6 条线路(L_5 、 L_6 为机场线)、11 个车站(其中 s_3 、 s_{10} 、 s_{11} 为起点站, s_2 、 s_4 、 s_7 为换乘站)构成,包含 28 个关键 OD 如图 2 所示,直线上的箭头表示行车方向。所有换乘方向的乘客换乘走行时间均设为 2 min。原始发车间隔设为 5 min,最小和最大发车间隔分别设为 2、8 min,区间运行时间以及停站时间的调

整范围限制在原始时刻表的 $[0.7, 1.5]$ min,但不能低于设置的最小值或超过设置的最大值。起点站 s_3 、 s_{10} 站乘客进站速率设为 5 人/min;起点站 s_{12} 任一机场航班乘客进站速率设为 8 人/min,其他来源乘客进站速率设为 2 人/min。由于网络规模较小,每条线上的末班车收车时刻不作延长。

表 1 原始时刻表 1 部分线路末班车到发时刻

状态	L_1		L_2		L_3	
	车站	时刻	车站	时刻	车站	时刻
发车	s_1	0	s_5	26.00	s_6	10.00
到达	s_2	21.51	s_4	28.36	s_7	39.58
发车	s_2	22.61	s_4	29.56	s_7	40.61
到达	s_3	42.98	s_3	34.33	s_4	52.49
发车	s_3	43.32	s_3	34.63	s_4	53.60
到达	s_4	50.79	s_2	45.67	s_8	72.26
发车	s_4	51.64	s_2	46.79		
到达	s_5	55.01	s_1	63.51		

表 2 部分关键 OD 交通需求占总交通需求的比率

起点站	终点站	比率 1	比率 2	比率 3
s_3	s_1	0.045 45	0.032 79	0.037 04
s_3	s_5	0.036 36	0.008 20	0.055 56
s_3	s_6	0.018 18	0.065 57	0.037 04
s_3	s_7	0.036 36	0.040 98	0.018 52
s_3	s_8	0.036 36	0.057 38	0.037 04
s_{10}	s_9	0.009 09	0.032 79	0.055 56
s_{10}	s_{11}	0.054 55	0.065 57	0.037 04
s_{10}	s_1	0.009 09	0.049 18	0.055 56

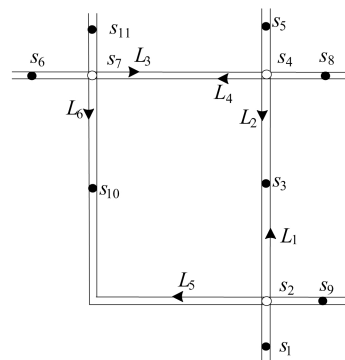


图 2 小规模网络

基于遗传算法对模型进行求解,权重系数 β_1 、 β_2 分别设置为 0.25、0.75,交叉概率和变异概率分别设置为 0.90、0.10,种群规模设置为 50,最大迭代次数设置为 300。以时刻表 1 为例测试种群的收敛情况,如图 3 所示,算法运行到 100~150 次开始保持稳定,说明本文设计的算法具有良好的鲁棒性。

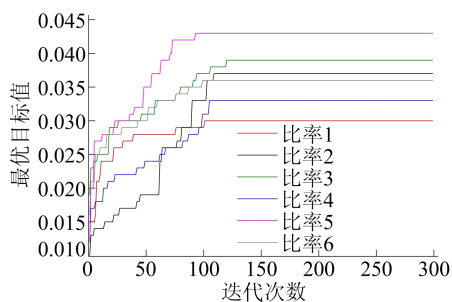


图 3 遗传算法种群收敛图

同样以时刻表 1 为例,比较 6 组 OD 比率下的优化效果差异,结果显示:不同 OD 比率下最差的优化结果对应的细化指标都明显好于优化前,优化效果对比见表 3 所列。表 3 中:直达人数是指不经过换乘 OD 可达的末班车乘客人数;换乘

人数是指经过换乘 OD 可达的末班车乘客人数;机场站人数是指 OD 可达的末班车乘客中来自机场站的乘客人数。对每一个时刻表分别使用 6 组不同的 OD 需求比率来进行实验,然后对这 6 组的实验结果取平均值,以尽量消除随机产生数据的偶然性对实验结果的影响。

从运行结果来看,优化后的时刻表对应的可达 OD 对数、直接 OD 可达的末班车乘客人数、通过换乘 OD 可达的末班车乘客人数、总人数以及这其中来自机场站的乘客人数都比优化前有比较明显的增加,与此同时,所有末班车登车乘客的人均等待时间相较于优化前都有一定程度地减少,证明了模型的有效性。部分优化结果见表 4 所列。

表 3 6 组 OD 比率下的时刻表 1 优化前、后指标对比

OD 比率	状态	可达 OD 对数	直达人数	换乘人数	总人数	机场站人数	人均等待时间/(min/人)
比率 1	优化前	16	77	18	95	26	4.49
	优化后	20	97	53	150	33	4.20
比率 2	优化前	16	68	24	92	23	4.74
	优化后	21	86	70	156	30	4.19
比率 3	优化前	16	87	27	114	25	4.58
	优化后	19	110	42	152	30	4.29
比率 4	优化前	16	84	17	101	22	4.17
	优化后	20	116	52	168	35	4.16
比率 5	优化前	16	86	29	115	26	4.54
	优化后	19	107	48	155	33	4.23
比率 6	优化前	16	93	22	115	27	4.25
	优化后	19	109	36	145	32	3.84

表 4 不同时刻表优化前、后指标对比

时刻表	状态	可达 OD 对数	直达人数	换乘人数	总人数	机场站人数	人均等待时间/(min/人)
时刻表 1	优化前	16.00	83	23	106	25	4.46
	优化后	19.67	104	50	154	32	4.15
时刻表 2	优化前	16.00	83	17	105	26	3.86
	优化后	19.33	97	38	141	37	3.82

4.3 西安地铁网络

4.3.1 现实案例优化结果分析

2022 年西安地铁网络拥有 16 条线路(8 条双向线路,其中 L_{15} 、 L_{16} 为机场线),14 个换乘站。共挑选出 106 个关键 OD,包含 4 个 O 点(s_{12} , s_{30} , s_{36} , s_{41})、29 个 D 点,直线上的箭头表示行车方向,相关网络图如图 4 所示。

乘客换乘走行时间均设置为 3 min。最小以及最大连续发车间隔分别设置为 2、20 min。区间运行时间以及停站时间的调整范围比例均设定

为 $[0.7, 1.5]$ min,但不能低于设置的最小值或超过设置的最大值。每条线列车服务关闭时间最多延长 5 min。

由于目前缺乏地铁车站乘客进站速率的直接数据统计,只能根据西安地铁、中国地铁信息网等公开的客流数据及文献推算末班车乘客进站速率。推算思路如下:由每条线上的日均客流量、车站数和日运营时间算出每个车站每分钟的平均客流量;再结合文献[16]关于末班车时段客流量在全天总客流量中所占比例的统计,最终推算末班

车乘客平均进站速率。

由于文章篇幅所限,本文不列出具体的推算过程。机场站来自航班的末班车乘客进站速率可由地铁安检系统的通过能力^[17]推算得出。根据

推算结果,普通起点站 s_{12} 、 s_{30} 、 s_{36} 乘客进站速率分别设置为 9、5、3 人/min;机场站 s_{41} 任一机场航班乘客进站速率设置为 8 人/min,其他来源乘客的进站速率设置为 1 人/min。

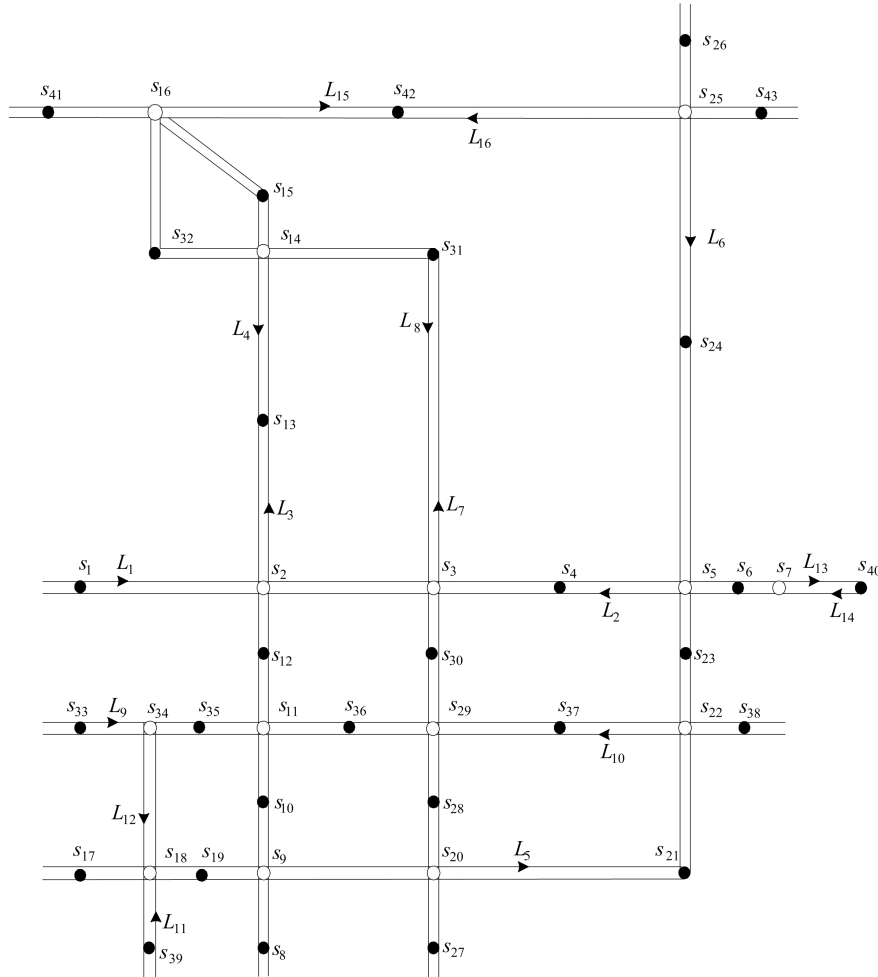


图 4 西安地铁网络

本文基于遗传算法求解模型,权重系数 β_1 、 β_2 分别设置为 0.4、0.6,交叉概率和变异概率分别设置为 0.90、0.15,种群规模设置为 100,最大迭代次数设置为 200,分析时刻表优化前、后的相关指标见,表 5 所列。

由表 5 可知,时刻表优化后相较于优化前可

达 OD 对数增加了 11.76%,直接到达及通过换乘到达的乘客人数分别增长了 24.87%,30.18%,OD 可达总人数增加了 27.70%,其中来自机场站的乘客人数提高了 55.82%,此外,时刻表优化后所有登车乘客的人均等待时间还有较为明显的减少,降幅达到 32.37%。

表 5 时刻表优化前、后指标对比

指标	可达 OD 对数	直达人数	换乘人数	总人数	机场站人数	人均等待时间/(min/人)
优化前	55	398	454	852	378	10.75
优化后	61	497	591	1 088	589	7.27

为进一步的验证所建模型的实用性,本文在相同的约束和数据条件下,分别以 2 个单目标即最大化 OD 可达末班车乘客人数 P 、最小化末班

车登车乘客人均等待时间 T 为研究对象进行实验,并与本文所构建的多目标模型运算结果比较。从结果可以看出,多目标模型较好地权衡了 OD

可达的乘客人数与人均等待时间之间的关系,在尽可能多的末班车乘客 OD 可达的同时,末班车登车乘客的人均等待时间尽可能少,具体结果见表 6 所列。

表 6 不同目标函数的运行结果对比

目标函数	OD 可达乘客人数	人均等待时间/(min/人)
$\max P$	1 103	13.31
$\min T$	650	5.23
$\max(\alpha_1 \bar{P} - \alpha_2 \bar{T})$	1 088	7.27

4.3.2 航班到达频次灵敏度分析

本文以西安地铁网络为研究对象,通过增减末班车时段内航班到达的数量,分析航班到达频次对最终优化结果的影响。任一航班的末班车乘客数量在 90~130 范围内随机生成,并且假定相关航班到达时刻在末班车时段内均匀分布,其他参数的设置与前文案例相同。

计算结果显示,随着航班到达频次的增加,最终 OD 可达总乘客人数以及机场站人数明显增多。但二者并不是严格正相关的,当航班到达频次增加到 11 后,优化目标值逐渐趋于稳定,不再有明显变化。这是因为航班到达频次从 1 增长到 11 时,每有航班客源到来,机场站进站速率会明显加快,机场站航班来源的乘客总量在增加,而目标函数总是向着总体最优的方向发展,所以目标函数值增加。但从 11 增加到 15,末班车时段内航班到达数量增加到了一定数量,此时该时段内机场站有源源不断的航班乘客进入,其进站速率变成一个常数,又受发车间隔约束的影响,最终导致优化效果几乎不再变化,结果见表 7 所列。

表 7 航班到达频次灵敏度分析

到达频次	总人数	机场站人数	人均等待时间/(min/人)
1	735	74	7.14
3	852	251	6.96
5	966	423	7.41
7	1 088	589	7.27
9	1 111	684	7.13
11	1 132	768	7.24
13	1 138	755	7.33
15	1 130	765	7.24

表 7 中,到达频次是指末班车时段内航班到达的数量。综合以上的分析说明了所提多目标的末班车时刻表优化模型的有效性与实用性。

5 结 论

本文探讨了考虑机场线的机场站末班车乘客

接驳的轨道交通网络末班车时刻表优化问题。以最大化 OD 可达的末班车乘客人数以及最小化登车乘客人均等待时间为目标,并设计启发式算法求解实际问题。本文研究结果证明了所提多目标优化模型的有效性与实用性,实现了尽可能多的末班车乘客 OD 可达的同时又使得人均等待时间有一定程度的下降,提高了乘客的实际出行感受,有利于提升城市地铁末班车的服务能力和质量,鼓励更多的人乘坐公共交通。

本文研究的是列车运营正常情况下的时刻表协同问题,但实际生活中,线网上的意外事件或技术问题可能会导致运营期间的末班车延误,影响末班车乘客的乘车和换乘,因此,考虑列车延误情况下的地铁末班车调度是进一步研究的方向。此外,对于出行途中换乘失败的乘客,是否可以考虑协调同站或附近的深夜公交车或其他的交通工具对这部分乘客进行接驳,基于此,实际效果、经济性等都是值得进一步研讨的问题。

[参 考 文 献]

- [1] GUO X, WU J, SUN H, et al. Timetable coordination of first trains in urban railway network: a case study of Beijing[J]. Applied Mathematical Modelling, 2016, 40(17/18): 37-51.
- [2] XU X, LI K, LI X. A multi-objective subway timetable optimization approach with minimum passenger time and energy consumption[J]. Journal of Advanced Transportation, 2016, 50(1): 69-95.
- [3] YIN J, TAO T, YANG L, et al. Energy-efficient metro train rescheduling with uncertain time-variant passenger demands: an approximate dynamic programming approach [J]. Transportation Research Part B Methodological, 2016, 91: 178-210.
- [4] LIEBCHEN C, SCHACHTEBECK M, SCHOEIBEL A, et al. Computing delay resistant railway timetables[J]. Computers & Operations Research, 2010, 37(5): 857-868.
- [5] GUO X, SUN H, WU J J, et al. Multiperiod-based timetable optimization for metro transit networks[J]. Transportation Research, 2017, 96: 46-67.
- [6] CHOW A, PAVLIDES A. Cost functions and multi-objective timetabling of mixed train services[J]. Transportation Research, 2018, 113: 335-356.
- [7] PETERING M, HEYDAR M, BERGMANN D R. Mixed-integer programming for railway capacity analysis and cyclic, combined train timetabling and platforming[J]. Transportation Science, 2016, 50(3): 892-909.
- [8] KANG L J, WU J J, SUN H J, et al, et al. A practical model for last train rescheduling with train delay in urban railway transit networks[J]. Omega, 2015, 50(1): 29-42.

(下转第 664 页)

- 究进展[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(21): 268-274.
- [4] 任国宝, 任晨刚, 郁美丽, 等. 膳食纤维对小麦粉品质的影响[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(2): 6-11, 55.
- [5] YILMAZ I, DAGLIOGLU O. The effect of replacing fat with oat bran on fatty acid composition and physicochemical properties of meatballs[J]. Meat Science, 2003, 65: 819-823.
- [6] 卢亚东, 张成楠, 李秀婷, 等. 不同干燥方式燕麦蛋白的性质及对肌原纤维蛋白凝胶特性的影响[J]. 食品科学技术学报, 2021, 39(6): 53-63.
- [7] BEER M U, ARRIGONI E, AMADO R. Extraction of oat gum from oat bran; effects of process on yield, molecular weight distribution, viscosity and (1 \rightarrow 3)(1 \rightarrow 4)- β -D-glucan content of the gum[J]. Cereal Chemistry, 1996, 73(1): 59-62.
- [8] WU M, XIONG Y L, CHEN J, et al. Rheological and microstructural properties of porcine myofibrillar protein; lipid emulsion composite gels[J]. Journal of Food Science, 2009, 74(4): 207-217.
- [9] DU Y Q, LIU Y, WANG J H. Polysaccharides from *Umbilicaria esculenta* cultivated in Huangshan Mountain and immunomodulatory activity[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2015, 72: 1272-1276.
- [10] WANG J H, LUO J P, YANG X F, et al. Structural analysis of a rhamnoarabinogalactan from the stems of *Dendrobium nobile* Lindl[J]. Food Chemistry, 2010, 122(3): 572-576.
- [11] LIU Z P, PI F, GUO X B, et al. Characterization of the structural and emulsifying properties of sugar beet pectins obtained by sequential extraction[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 88: 31-42.
- [12] ZHOU F F, ZHANG Y D, ZHANG Q, et al. Structure characterization and immunological activity of a β -glucan from White *H. marmoreus* and its silver nanoparticle derivatives[J]. Carbohydrate Polymers, 2019, 210: 1-8.
- [13] 张诗思, 金永国, 马美湖. 黄原胶-氯化钠提高蛋黄液乳化性的研究[J]. 中国家禽, 2018, 40(4): 42-48.
- [14] WANG J H, XU J L, ZHANG J C, et al. Physicochemical properties and antioxidant activities of polysaccharide from floral mushroom cultivated in Huangshan Mountain[J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 131: 240-247.
- [15] LIU Y, QIANG M, SUN Z, et al. Optimization of ultrasonic extraction of polysaccharides from *Hovenia dulcis* peduncles and their antioxidant potential[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2015, 80: 350-357.
- [16] KE C, QIAO D, LUO J, et al. Immunostimulatory activity and structure of polysaccharide from *Streptococcus equi* subsp. *zoepidemicus*[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2013, 57: 218-225.
- [17] WANG M C, ZHU P L, JIANG C X, et al. Preliminary characterization, antioxidant activity *in vitro* and hepatoprotective effect on acute alcohol-induced liver injury in mice of polysaccharides from the peduncles of *Hovenia dulcis* [J]. Food & Chemical Toxicology, 2012, 50: 2964-2970.
- [18] 邱诗波, 邓鹏鹏, 钱虹, 等. 魔芋葡甘聚糖凝胶的研究进展[J]. 武汉工程大学学报(自然科学版), 2022, 44(4): 355-362.
- [19] 王团结, 冯志彪, 岳莹, 等. 茶多酚与大豆分离蛋白对复合乳化体系性质的影响[J]. 中国调味品, 2017, 42(4): 26-31.
- [20] LIU S L, ZHAO P C, ZHANG J J, et al. Physicochemical and functional properties of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) myofibrillar protein glycosylated with konjac oligo-glucosaminan [J]. Food Hydrocolloids, 2017, 67: 216-223.

(责任编辑 闫杏丽)

(上接第 658 页)

- [9] KANG L J, ZHU X N. Strategic timetable scheduling for last trains in urban railway transit networks[J]. Applied Mathematical Modelling, 2017, 45: 209-225.
- [10] KANG L, WU J, SUN H, et al. A case study on the coordination of last trains for the Beijing subway network[J]. Transportation Research Part B, 2015, 72(2): 112-127.
- [11] NIE W, LI H, XIAO N, et al. Modeling and solving the last-shift period train scheduling problem in subway networks[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2021, 569: 216-233.
- [12] ZHOU Y, WANG Y, YANG H, et al. Last train scheduling for maximizing passenger destination reachability in urban rail transit networks[J]. Transportation Research, 2019, 129: 79-95.
- [13] CHEN Y, MAO B, BAI Y, et al. Timetable synchronization of last trains for urban rail networks with maximum accessibility[J]. Transportation Research, 2019, 99: 110-129.
- [14] KANG L, ZHU X, SUN H, et al. Last train timetabling optimization and bus bridging service management in urban railway transit networks[J]. Omega, 2019, 84: 31-44.
- [15] IBARRA-ROJAS O J, RIOS-SOLIS Y A. Synchronization of bus timetabling [J]. Transportation Research, 2012, 46(5): 599-614.
- [16] 程涛, 周峰. 西安地铁 2 号线客流分析[J]. 城市轨道交通研究, 2015, 18(7): 5.
- [17] 陈春安, 荣建, 周晨静. 综合客运枢纽内部换乘设施通行能力研究[J]. 交通工程, 2017, 17(4): 7-12.

(责任编辑 吴亮)