

DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2024.03.006

引用格式:程毅,张生,向冠华.考虑竞争关系的高铁接运公交时刻表优化方法[J].公路与汽运,2024,40(3):26-32.

Citation:CHENG Yi, ZHANG Sheng, XIANG Guanhua. Optimization method of high-speed rail transit timetable considering competition[J]. Highways & Automotive Applications, 2024, 40(3): 26-32.

考虑竞争关系的高铁接运公交时刻表优化方法^{*}

程毅, 张生, 向冠华

(长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 为提升高铁接运公交的接驳效率,最大化公共交通分担比例,研究考虑竞争关系的高铁接运公交时刻表优化方法。针对高铁接运公交时刻表与乘客接驳方式选择之间的反馈关系,建立多目标双层规划模型。基于高铁换乘客流分布规律,提出考虑车辆容量限制的公交乘客平均等待时间计算模型,以乘客平均候车时间最小、公交运营成本最小为目标建立上层公交发车时刻表优化模型,下层模型通过 Logit 模型对高铁乘客接驳选择行为进行建模,分析公交时刻表变动对接驳需求的影响;设计基于带精英策略的非支配排序遗传算法(Elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm, NSGA-II)对模型进行求解,算例结果表明,模型解相较于初始方案解有明显提升,考虑其他接驳方式对接运公交客流影响时,模型的优化程度比传统模型的优化程度更高。

关键词: 城市交通;接运公交;时刻表优化;高铁;多模式交通;多目标双层规划

中图分类号:U491.17

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2024)03-0026-07

在多模式交通体系快速发展的今天,接驳优化成为实现不同交通方式之间无缝衔接的关键。随着高铁建设的迅速发展,各城市都把高铁站作为城市增长极,建立综合运输枢纽,高铁接驳优化变得尤为重要。对于多数城市来讲,公交是高铁接驳最重要的方式。调整接驳公交线网,合理优化高铁既有接运公交的时刻表,对实现高铁客流的快速集散,吸引更多高铁乘客绿色出行,降低社会成本具有重要意义。

近年来,考虑接驳的公交时刻表优化受到众多学者的关注。文献[1-2]构建了乘客换乘成本和运营成本最小的公交发车优化模型,此为接驳公交时刻表优化的一般方法,缺乏对客流到达分布或协调调度的考虑。安实等设计了基于换乘时间窗的公交时刻表优化策略^[3]。胡宝雨等将城市轨道交通接驳公交网络划分为子网络,采用优化子网络以达到局域网最优的方法构建协调调度模型^[4]。文献[5-6]以乘客换乘总成本和系统运营成本最小为目标,建立了轨道与接运公交的协同时刻表优化模型。郭小乐等以流失乘客数最少、使用的公交车辆数最小为优化目标,建立了高铁站接运公交时刻表与车辆调度多目标综合优化模型,但未考虑导致乘客流失的具体

成因^[7]。袁振洲等分析高铁客流分布,采用威布尔分布拟合乘客总换乘时间,提出了非均匀发车间隔下高铁接驳公交时刻表优化模型,较为细致地刻画了乘客的换乘时间,但未考虑车辆容量对乘客等待时间的影响,不符合高铁接驳客流量大的特点^[8]。已有研究多以用户出行行为的先验信息来设定乘客的出行需求,忽略了时刻表优化与乘客需求间的相互作用。文献[9-11]采用双层规划模型解决乘客需求的弹性化问题,但仅局限于单一的公交网络,未考虑多模式交通间的竞争博弈。在当今城市多模式交通网络环境下,高铁接运公交与城市轨道、出租车、私家车等方式存在竞争关系,表现在接运公交服务质量的提升(如公交时刻表优化)会吸引其他接驳方式的乘客,导致传统的一体化时刻表优化模型出现输入需求失真,优化效果不明显。本文针对多接驳模式下高铁换乘方式的竞争关系,根据高铁乘客换乘客流特点,结合车容限制,构建时刻表与接运公交配流相互反馈的多目标双层优化模型,上层模型通过调整各接运公交线路的时刻表达达到高铁乘客平均等待时间和公交车运营成本最小的目标,下层模型基于 Logit 模型对各换乘方式进行配流,最后设计

^{*} 基金项目:长沙理工大学国际合作拓展项目(2019IC10);湖南省交通科技项目(202140)

基于带精英策略的非支配排序遗传算法 (Elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm, NSGA-II) 对双层规划模型进行求解和验证。

1 问题描述

高铁站作为旅客到达城市后的出行始发地,降乘乘客的 OD 模式为“一对多”,可将空间上相近的乘客出行目的地聚集为需求点 $d_n \in D$ (D 为高铁乘客目的地集合, $\forall d_n \in D$)。不同公交线路服务不同的需求点,定义公交线路 l 服务的需求点集合 D_l , $D_l \in D$,公交线路 l 服务需求点 $d_n \in D_l$ 。在尚未建成轨道交通的城市,乘客选择公共交通、出租车、私家车等到达目的地,将每种交通方式的效用函数建模为乘客从出站到达需求点 D_n 的完整出行链的广义费用函数,基于 Logit 模型计算乘客不同方式出行的广义费用函数和客流配比^[12],公交乘客候车时间减少则公交出行成本降低,配流比增大,公交需求增大。在研究时段内,第 j ($\forall j \in J$) 车次高铁列车的到站时刻为 B^j ,有 L 条公交线路服务于该高铁站,公交线路 l ($\forall l \in L$) 的第 i 车次发车时刻为 A_l^i 。如图 1 所示, j 车次高铁列车到站后,选择公共交通接驳的乘客步行时间为 t_{walk} ,则乘客到站后的等待时间 $t_w = A_l^i - B^j - t_{\text{walk}}$ 。由于高铁到站时间和乘客换乘模式的固定性,接驳公交的发车时刻 A_l^i 决定乘客的候车时间。 A_l^i 不变,乘车人数 q_{bus}^i 改变,则乘客平均候车时间 \bar{T}_w^i 随之改变,即乘客的平均等待时间随着乘客需求的变化而改变。

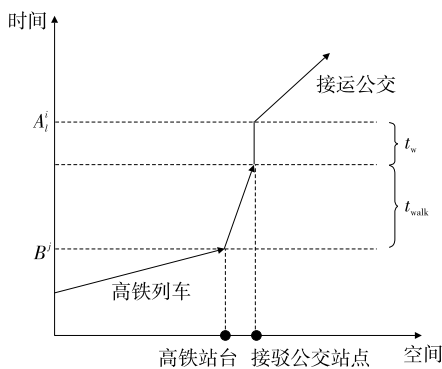


图 1 公交乘客等待时间分析

综上,高铁接运公交时刻表优化与乘客接驳方式选择是一个主从问题,可采用双层规划模型进行表示:上层模型以公交乘客的等待时间和公交车运营成本最小为目标对接运公交的时刻表进行优化,下层模型依据上层模型的优化结果调整各接驳方式

的配流比例,并将计算结果返回上层模型更新优化目标。

2 数学模型

2.1 模型假设

基于实际场景,建立模型时做以下假设:1) 各交通方式的出行路径固定且不考虑运行延误;2) 乘客按先到先乘的原则排队上车;3) 忽略公交车至高铁站点的空驶时间;4) 不考虑公交车、出租车或私家车外的换乘方式;5) 非高铁乘客需求忽略不计;6) 高铁乘客每次出行只使用一种交通方式;7) 乘客出站换乘各种交通方式的步行距离一致。

2.2 接运公交乘客等待时间

在实际情况中,由于每位乘客步行速度不同,换乘乘客流的步行时间是离散的,现有研究以正态分布拟合乘客换乘走行时间^[13-14],根据其概率密度函数性质对高铁到站后某段时间到达接运公交车站的乘客数量进行求解。

为方便研究,将连续的研究时间进行粒度为 τ 的离散化处理,如研究时段为 $[0, T]$,则时段 $[0, T]$ 被切割为 T/τ 个时间片段,时间粒度节点用 t 索引, $t \in \{0, 1, 2, \dots, \tau\}$ 中每个值对应实际研究时段内的 τt 时刻。

对图 2 进行分析,图中阴影部分面积为乘客换乘步行时间在单位时间 $[t-1, t]$ 内的概率 ∂_{t-1}^i ,可通过正态概率密度函数积分 $f(x)$ 计算:

$$\partial_{t-1}^i = \int_{t-1}^t f(x) dx \quad (1)$$

式中: $f(x)$ 按式(2)计算。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2)$$

式中: μ 为乘客步行时间样本的均值; σ^2 为方差。

假设样本空间为所有乘坐公交线路 l 的乘客,

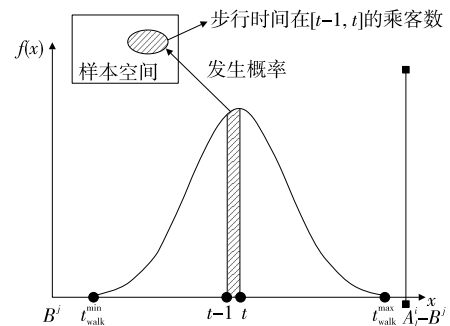


图 2 换乘步行时间概率密度示意图

则单位时间 t 内乘坐公交线路 l 的乘客数量 $q_{bus}^{j,l}$ 为:

$$q_{bus}^{j,l} = \sum_{d_n \in D_l} q_{bus}^{j,d_n} \int_{t-1}^t f(x) dx \quad (3)$$

式中: q_{bus}^{j,d_n} 为第 j 列高铁列车换乘接运公交至需求点 d_n 的乘客数。

单位时间 t 内换乘公交线路 l 的乘客到站分布函数 $p(t)$ 可表示为:

$$p(t) = q_{bus}^{j,l} \int_{t-B^{j-1}}^{t-B^j} f(x) dx, B^j \leq t \leq B^{j+1} \quad (4)$$

考虑公交车容量限制,引入乘客登车极限时刻 A_l^{i*} 表示乘客能乘坐公交线路 l 第 i 车次接运公交的最晚到站时刻。对图 3 进行分析,高铁列车在 B^j 时刻到站,经过乘客最小步行时间 t_{walk}^{min} ,乘客在接运公交站台积累,经过乘客最大步行时间 t_{walk}^{max} 后,该列高铁乘客乘坐公交线路 l 的乘客 $q^{j,l}$ 全部到达站点,当 $A_l^{i*} < A_l^i$ 时,在公交线路 l 第 i 车次公交到站前,站台累积乘客数量已经超过车辆容量,产生 q^z 个滞站乘客。根据假设 2,只有前 c 个乘客能够乘上该车次公交车,第 c 个到达公交车站的乘客到站时间即为 A_l^{i*} ,该部分乘客的等待时间为:

$$T_w^{l,c} = \sum_{i \in I_l} \sum_{t \in [A_l^{i-1}, A_l^{i*}]} p(t)(A_l^i - t) \quad (5)$$

式中: $T_w^{l,c}$ 为非滞站乘客的等待时间; I_l 为接运公交线路 l 的发车车次集合。

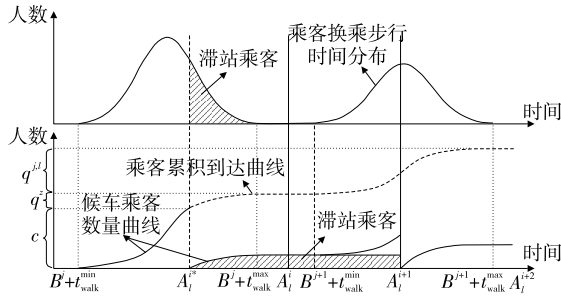


图 3 乘客等待时间分析

在极限登车时刻 A_l^{i*} 后,下一车次到站时刻 A_l^{i+1} 前到达而滞站乘客的等待时间 $T_w^{l,z}$ 为:

$$T_w^{l,z} = \sum_{i \in I_l} \sum_{t \in [A_l^{i*}, A_l^{i+1}]} p(t)(A_l^{i+1} - t) \quad (6)$$

第 $i+1$ 车次能够接走全部在站乘客时,可以认为 $A_l^{i+1} = A_l^{i+1*}$,此时有:

$$A_l^{i*} = \min\{A_l^i, \max[u \mid \sum_{t \in [A_l^{i-1}, u]} p(t) \leq c]\} \quad (7)$$

式中: u 为研究时段内某时刻,用来标记乘客最晚乘车时刻。

研究时段内搭乘公交线路 l 的乘客总等待时间

T_w^l 为:

$$T_w^l = \sum_{i \in I_l} \sum_{t \in [A_l^{i-1}, A_l^{i*}]} p(t)(A_l^i - t) \quad (8)$$

乘客搭乘公交线路 l 的平均等待时间 \bar{T}_w^l 为:

$$\bar{T}_w^l = \frac{\sum_{i \in I_l} \sum_{t \in [A_l^{i-1}, A_l^{i*}]} p(t)(A_l^i - t)}{\sum_{j \in J} q_{bus}^{j,l}} \quad (9)$$

2.3 多目标双层优化模型

上层时刻表多目标优化模型为:

$$\min Z_1 = \sum_{l \in L} \bar{T}_w^l \quad (10)$$

$$\min Z_2 = \sum_{j \in J} \sum_{d_n \in D} q_{bus}^{j,d_n} (S + F_{n,bus}) - \sum_{l \in L} \sum_{t=1}^{\tau} C_l^t F_l \quad (11)$$

$$s.t. \begin{cases} A_l^{i+1} > A_l^i, \forall i \in I, l \in L \\ C_l^i \in \{0, 1\}, l \in L \end{cases} \quad (12)$$

$$(13)$$

式中: L 为接运公交线路集合, $\forall l \in L$; S 为公交运营补贴,补贴模式为按乘客数计算; $F_{n,bus}$ 为公交票价; C_l^i 为 0~1 变量,公交线路 l 在时刻 t 发车时 $C_l^i = 1$,否则 $C_l^i = 0$; F_l 为公交线路 l 的单趟运营成本。

式(10)、式(11)为所有乘客平均候车时间和公交运营成本最小的目标函数;式(12)为发车顺序约束,表示车次 i 的发车时刻在第 $i+1$ 之前,且同线路车辆无法在同时刻发车;式(13)为 0~1 变量,用来标记公交线路 l 的总发车车次。

下层接驳客流分配模型为:

$$q_{bus}^{j,l} = \sum_{d_n \in D_l} q_{bus}^{j,d_n} \frac{\exp(-\theta C_k^{d_n})}{\sum_{k \in K} \exp(-\theta C_k^{d_n})} \quad (14)$$

$$C_{bus}^{d_n} = \alpha_1 \bar{T}_w^l + \alpha_2 \frac{M_{n,b}}{v_{bus}} + F_{n,bus} \quad (15)$$

$$C_{car}^{d_n} = \beta \frac{M_{n,r}}{v_{car}} + F_p + \eta M_{n,r} \quad (16)$$

$$C_{taxi}^{d_n} = \gamma \frac{M_{n,r}}{v_{taxi}} + 2[(M_{n,r} - 2)] + 8 \quad (17)$$

式中: q_{bus}^{j,d_n} 为第 j 列高铁乘客到达需求点 d_n 的乘客数; θ 为出行费用效益系数; $C_k^{d_n}$ 为高铁乘客乘坐 k (k 为高铁乘客接驳方式集合, $k = \{bus, car, taxi\}$) 交通方式到需求点 d_n 的费用; α_1 为公交车候车时间价值; α_2 、 β 、 γ 分别为公交车、小汽车、出租车的乘车时间价值; $M_{n,b}$ 为高铁站到需求点 d_n 的公交线路距离; v_k 为交通方式 k 的行驶速度; $M_{n,r}$ 为高铁

站到需求点 d_n 的道路网最小距离, $d_n \in D$; F_p 、 η 分别为私家车出行的停车费和燃油费。

式(14)计算第 j 列高铁乘客乘坐公交线路 l 的需求人数;式(15)为接运公交的广义费用函数,难以分析每位乘客的具体等待时间,以线路平均值作为乘客的候车时间;式(16)、式(17)为私家车和出租车的广义费用函数,由于其出行特性,不考虑候车时间,私家车出行的经济成本 $F_{n,car}$ 包括停车费 F_p 和燃油费 η ,出租车的出行经济成本 $F_{n,taxi}$ 按起步价 8 元加里程价 2 元计算。

3 求解算法

3.1 算法描述

本文构建的双层优化模型是一个非线性非凸混合整数问题,各出行方式的出行需求由方式选择模型定义,而方式选择模型是接运公交发车时刻方案的非线性非连续映射,这一问题在数学上难以求得最优解。目前,多采用进化算法求解这一问题。进化算法中 NSGA-II 具有生成多个点并进行多方向搜索的特征,较适合求解最优解搜索空间非常复杂的多目标优化问题。因此,以该算法为基础设计双层规划模型求解算法,算法流程见图 4。

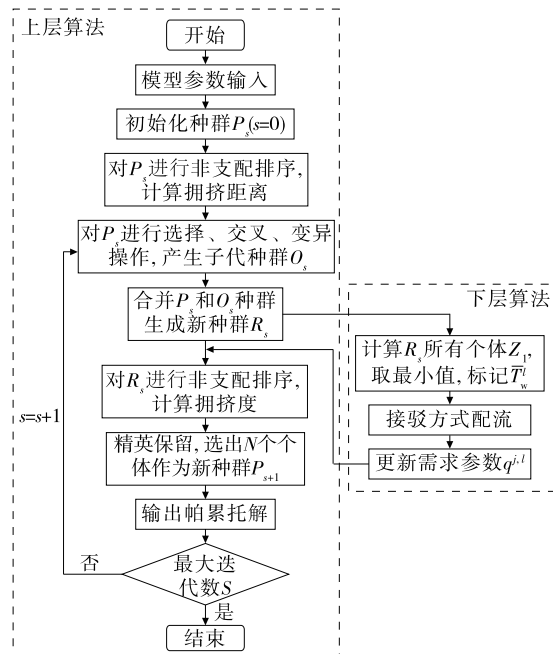


图 4 求解算法流程

3.2 关键步骤

3.2.1 编码

取时间粒度 τ 为 1 min,发车时刻编码采用二

进制格雷码:每个随机生成的基因对应于一个可能的时间点,其中“1”表示发车,“0”表示在相应时刻未发车,染色体长度对应研究时段内以分钟为单位的离散数。编码方案和取值见图 5。

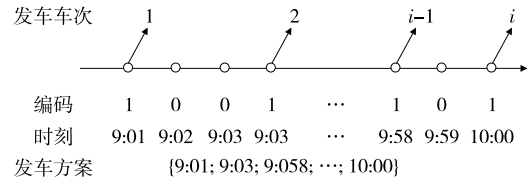


图 5 编码结构及取值

3.2.2 非支配排序

计算种群中每个个体的目标函数,定义非支配解的个体等级为 Rank1,删去种群中 Rank1 的个体,将剩余个体中非支配解定义为 Rank2,如此循环,直至得到种群中所有个体的帕累托等级。其中,非支配解定义为:任何两个个体的解 Z_1 和 Z_2 ,对所有解而言, Z_1 均优于 Z_2 ,则称 Z_1 支配 Z_2 ;若 Z_1 的解没有被其他解支配,则 Z_1 为非支配解。

3.2.3 拥挤度计算

拥挤度用于计算个体周围的种群密度,根据拥挤度可以更有效地调整种群多样性。拥挤度计算方法:对于帕累托等级相同、解在边缘的个体,拥挤度取正无穷;中间个体拥挤度 d_v 按式(18)计算。第 i 个个体拥挤度越大,其与相邻个体的距离越远,差异越大;拥挤度越小,相似性越高。

$$d_v = [Z_1(i+1) - Z_1(i-1) + Z_2(i+1) - Z_2(i-1)] \quad (18)$$

4 算例分析

4.1 场景描述

某高铁站在研究时段[9:00,10:00]有 5 列高铁列车到达,该站为 3 条接驳公交线路的始发站,接运公交服务的需求点为 9 个(见图 6),每条公交线路

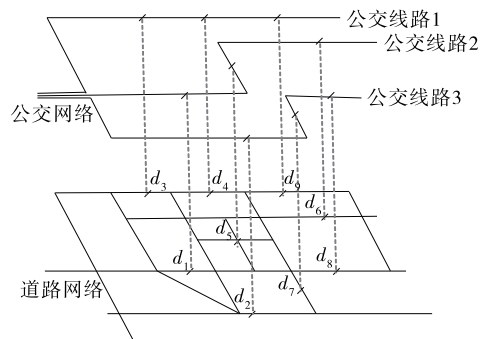


图 6 多模式路网图

以 10 min 的均匀间隔发车,乘客换乘的最小步行时间 t_{walk}^{\min} 为 357 s,最大走行时间 t_{walk}^{\max} 为 900 s,步行时间样本均值 μ 为 591 s,方差 σ^2 为 114^[8]。

B^j 时刻到达的第 j 辆高铁乘客在需求点 d_n 的需求见表 1,公交车运营参数见表 2,公交补贴 S 为 0.2 元/人^[15]。

接运公交车速度为 18 km/h,小汽车和出租车速度为 30 km/h,燃油费 η 为 0.8 元/km^[16],私家车停车费 F_p 为 10 元/次。路网运行参数计算见表 3。

基于中国人均单位时间价值,公交车、小汽车、出租车的出行时间价值系数取 1.0 : 1.5 : 1.3^[17],候车时间价值为车内时间的 2 倍^[18],设定参数 α_1 为 20 元/h, α_2 为 40 元/h, β 为 26 元/h, γ 为 30 元/h。

表 1 高铁乘客至各需求点的出行量

B^j	到达需求点 d_n 的总人数/人								
	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	d_8	d_9
9:08	23	16	42	24	28	18	29	30	13
9:17	22	27	18	22	24	25	30	24	15
9:24	29	26	20	18	30	22	24	27	21
9:33	29	18	26	20	19	26	25	28	23
9:45	29	18	24	23	24	19	17	17	19

表 2 公交车运营参数

公交线路 l	服务需求点	单车运行成本 F_l /元
1	d_3, d_4, d_9	79
2	d_1, d_5, d_6	94
3	d_2, d_7, d_8	85

表 3 路网运行参数计算

d_n	公交网络			道路网			
	$M_{n,b}/\text{km}$	$F_{n,bus}/\text{元}$	$\frac{M_{n,b}}{v_{bus}}/\text{h}$	$M_{n,r}/\text{km}$	$F_{n,car}/\text{元}$	$F_{n,taxi}/\text{元}$	$\frac{M_{n,r}}{v_{car}}/\text{h}$
d_1	2.6	3	0.14	2.6	9.2	17.4	0.09
d_2	4.3	3	0.24	2.7	9.4	17.5	0.09
d_3	4.5	3	0.25	3.9	11.8	19.4	0.13
d_4	5.6	3	0.31	5.0	14.0	21.2	0.17
d_5	4.8	3	0.27	4.8	13.6	20.9	0.16
d_6	8.6	3	0.47	8.0	20.0	26.0	0.27
d_7	6.1	3	0.34	5.1	14.2	21.4	0.17
d_8	7.8	3	0.43	7.8	19.6	25.7	0.26
d_9	7.2	3	0.40	6.6	17.2	23.8	0.22

4.2 模型求解

采用 Python 编程语言对模型进行验证。试验环境如下:处理器 Intel(R) Core(TM) i5-6500, CPU@3.20GHz,内存 16 GB。为分析模型的有效性,对不考虑换乘方式间竞争关系的传统模型(上层优化模型)与改进模型(考虑竞争关系的双层优化模型)分别求解,算法采用相同参数设置:种群规模为 40 个,最大迭代次数为 100 次,交叉概率为 0.8,变异概率为 0.1。某次计算中,传统模型(不考虑竞争关系)与改进模型分别获得初始方案在内的 5 个、7 个帕累托最优解,算法运行时间分别为 317 s、544 s,其中包含初始方案目标值。算法迭代过程中乘客等待时间寻优过程见图 7。为验证传统模型在考虑竞争关系下的有效性,用传统模型所得解对公

交车进行配流,再依此计算乘客等待时间,各帕累托解目标值见表 4,优化目标的关系见图 8。

在帕累托解集中,随着乘客平均等待时间的减少,公交车运营成本增大,说明两个优化目标存在冲

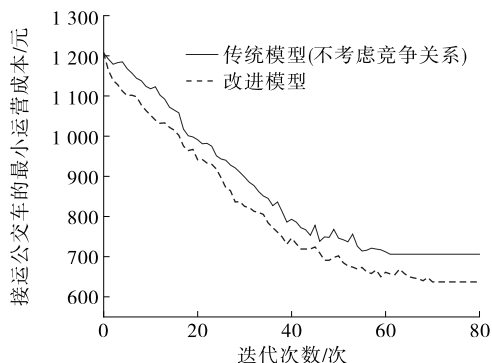


图 7 公交运营成本迭代示意图

表 4 不同模型的优化结果对比

帕累托解编号	乘客平均等待时间/s		接运公交车运营成本/元	
	传统模型	改进模型	传统模型	改进模型
1	337	337	1 206	1 206
2	258(315)	321	691(706)	667
3	320(274)	276	726(813)	692
4	283(236)	268	783(870)	721
5	254(187)	231	894(1 103)	776
6	—	224	—	823
7	—	184	—	1 022

注:帕累托解 1 为初始方案;括号中的数值为不考虑竞争关系时优化目标值。

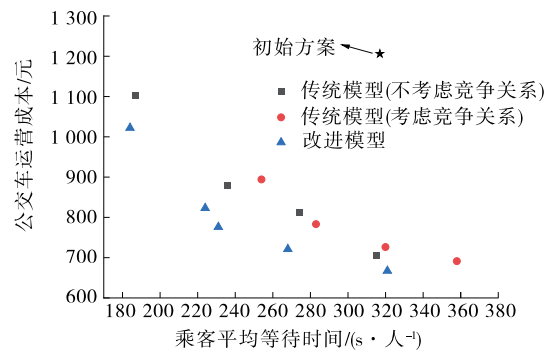


图 8 优化目标关系图

突,一定程度上证明模型目标设置合理。相对于传统模型,改进模型可得到更多的时刻表优化方案,增加较小的运营成本便可大幅度缩短乘客的平均等待时间。

如表 5 所示,不考虑竞争关系时,相较于初始方案,传统模型与改进模型对乘客的平均等待时间分别平均降低 19.63%、22.52%,公交车运营成本分别降低 27.43%、33.51%。考虑接驳方式间竞争关系时,传统模型对乘客平均等待时间与公交车运营成本的优化幅度分别为 9.86%、35.45%,乘客平均等待时间的优化效果下降明显,公交车运营成本有一

表 5 不同模型的优化效果对比

优化模型	平均优化比例/%	
	乘客平均等待时间	接运公交车运营成本
传统模型(不考虑竞争关系)	19.63	27.43
传统模型(考虑竞争关系)	9.86	35.45
改进模型	22.52	33.51

定程度降低,这是由于公交需求变化没有得到进一步的反馈。考虑高铁接驳方式间竞争关系时,本文提出的双层优化模型的优化效果优于传统一体优化模型。

5 结论

(1) 根据高铁乘客换乘特性,结合乘客换乘步行时间分布与高铁到站时刻,提出考虑车容量限制的乘客等待时间计算模型。同时考虑接驳方式间的竞争关系,构建多目标双层规划模型,上层模型以公交线路乘客平均等待时间和公交车运营成本最小为优化目标,下层模型以乘客换乘出行的广义费用函数建立接驳方式选择的 Logit 模型。

(2) 基于 NSGA-Ⅱ 设计求解算法,对多目标双层规划模型进行求解,得到传统模型与改进模型的帕累托解集。不考虑竞争关系时,传统模型与改进模型均对初始方案有较明显的优化;考虑竞争关系时,传统模型的优化效果明显下降,进一步说明了本文所建模型的有效性。

(3) 本文对于乘客等待时间的计算仅考虑高铁换乘乘客,实际上,时刻表改变同样会影响非高铁乘客的等待时间,这是下一步须进行研究的内容。

参考文献:

[1] SHAFABI Y,KHANI A.A practical model for transfer optimization in a transit network: model formulations and solutions[J]. Transportation Research Part A:Policy and Practice,2010,44(6):377-389.

[2] FONSECA J P,VAN DER HURK E,ROBERTI R,et al.A matheuristic for transfer synchronization through integrated timetabling and vehicle scheduling[J]. Transportation Research Part B:Ethodological,2018,109:128-149.

[3] 安实,崔文,王健.基于换乘时间窗的公交区域时刻表优化方法[J].公路与汽运,2015(5):57-61.

[4] 胡宝雨,艾雨豪,程国柱.基于地铁线路的常规公交局域网络协调调度模型[J].华南理工大学学报(自然科学版),2021,49(1):134-141.

[5] DOU X P,GONG X L,GUO X C,et al.Coordination of feeder bus schedule with train service at integrated transport hubs[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board,2017,2648(1):103-110.

[6] XIONG J,HE Z B,GUAN W,et al.Optimal timetable development for community shuttle network with

- metro stations[J].Transportation Research Part C:Emerging Technologies,2015,60:540-565.
- [7] 郭小乐,宋瑞,何世伟,等.高铁车站接运公交时刻表与车辆调度综合优化[J].铁道学报,2019,41(1):20-28.
- [8] 袁振洲,刘立强,王佳冬,等.考虑不均匀发车间隔的高铁接运公交时刻表与车辆调度优化[J].北京交通大学学报,2021,45(4):44-53.
- [9] MA T Y.A hybrid multiagent learning algorithm for solving the dynamic simulation-based continuous transit network design problem[C]//2011 International Conference on Technologies and Applications of Artificial Intelligence.November 11—13,2011.Chung Li, Taiwan, China.IEEE,2011:113-118.
- [10] 暨育雄,曹朋亮,刘冰,等.多模式公交服务模式及时刻表协同优化设计[J].同济大学学报(自然科学版),2022,50(3):409-417.
- [11] 王正武,姜宇宇,谭笑.管理者与乘客相互影响下的响应型接驳公交协调优化[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2021,18(1):40-48.
- [12] 奴尔加马力·安尼瓦,王令飞,艾力·斯木吐拉.基于 Logistic 模型的定制公交出行选择影响因素研究:以乌鲁木齐市为例[J].公路与汽运,2019(6):23-25+29.
- [13] 吕慎,田锋,莫一魁.轨道交通枢纽地铁换乘接运公交乘客平均候车时间研究[J].公路交通科技,2014,31(12):92-97.
- [14] 李超.城市轨道交通站换乘乘客走行规律研究[D].北京:北京交通大学,2018.
- [15] 陈坚,邵毅明,马庆禄.多方式弹性需求下公交定价双层规划模型[J].运筹与管理,2014,23(4):206-212.
- [16] 孙杨,宋瑞,何世伟.弹性需求下的接运公交网络设计[J].吉林大学学报(工学版),2011,41(2):349-354.
- [17] 高婷婷,王武宏.基于时间价值的城市交通出行成本研究[J].铁道运输与经济,2014,36(2):1-3+10.
- [18] 朱海.铁路客运枢纽旅客换乘行为分析与衔接系统协调研究[D].成都:西南交通大学,2020.
- 收稿日期:2023-04-19

(上接第 25 页)

评估结果进行经营权转让。3) 关注服务区收入,企业应克服运营培育期内服务区经营较困难的问题,实现服务区的进一步增收。4) 通过高速公路沿线资源开发、广告位出售、光伏发电、旅游资源开发等探索增收途径。

(5) 提前谋划,寻找优质项目。利用已有高速公路的良好优势,通过总体布局和专业投资团队良好的实践积累,从省厅到地方、从规划到咨询、从资金筹措到项目实施等各环节创造做大做强条件,提前谋划,寻找优质项目。

参考文献:

- [1] 中共中央,国务院.粤港澳大湾区发展规划纲要[A/OL].(2019-02-18)[2024-04-10].https://www.gov.cn/zhengce/202203/content_3635372.htm # 1.
- [2] 叶瑞云,赵长相.粤港澳大湾区及大数据视角下的干线路网规划[J].公路,2022,67(4):267-270.
- [3] 杨锐烁.面向粤港澳大湾区的南沙交通发展策略[J].交通与港航,2020,7(5):56-60.
- [4] 冯心宜.粤港澳大湾区高速公路互通立交通行能力分析[J].中外公路,2021,41(4):380-384.
- [5] 范文强,李桂波.粤港澳大湾区背景下宝安区道路交通发展研究[J].交通与运输,2022,38(6):16-20.
- [6] 杨璟仪,潘玲.高质量发展背景下高速公路改扩建工程安全管理模式与管控技术[J].广东公路交通,2023,49(3):67-72.
- [7] 梁建伟.基于 SWOT 分析的粤港澳大湾区发展研究[J].广东经济,2018(2):58-61.
- [8] 梁亚莉,李杲岭,杨冰,等.基于 SWOT-AHP 模型的中小型高速公路运营企业发展战略研究[J].交通工程,2022,22(2):31-36+43.
- [9] 成冰,卢铭悦,陈惠灵.粤港澳大湾区城市临界地区交通发展策略研究:以东莞水乡功能区为例[J].公路与汽运,2023(2):11-16+21.
- [10] 沈子明.粤港澳大湾区轨道交通一体化发展研究[C]//中国城市规划学会城市交通规划学术委员会.创新驱动与智慧发展:2018 年中国城市交通规划年会论文集.北京:中国建筑工业出版社,2018.
- [11] 张炳江.层次分析法及其应用案例[M].北京:电子工业出版社,2014:10-14.
- [12] 深圳市交通运输局宝安管理局,深圳市城市交通规划设计研究中心股份有限公司.宝安区路网优化及高快速路衔接规划[Z].深圳:深圳市交通运输局宝安管理局,2020.
- [13] 孙继德.建设项目的价值工程[M].2 版.北京:中国建筑工业出版社,2011.
- 收稿日期:2024-04-18