

考虑公交与地铁换乘需求的公交时刻表优化

赖元文, 陈艳生, 王书易, 张宇龙, 朱新运

(福州大学 土木工程学院, 福州 350116)

摘要: 在考虑公交与地铁之间换乘需求的情况下, 提出了一种全天的公交时刻表优化方法。首先, 构建了一个优化模型, 旨在最小化乘客候车时间成本和公交企业运营成本。然后, 设计了遗传-模拟退火混合算法进行求解。最后, 以福州市公交 1 路上行方向为例, 验证了本文模型及算法的有效性和实用性。时刻表优化后, B-M 模式、M-B 模式和非换乘模式下乘客候车时间成本平均降低了 19.30%, 公交企业运营成本由于公交发车次数的增加而提升了 4.95%, 系统总成本节约了 5.05%。

关键词: 城市交通; 时刻表优化; 遗传-模拟退火混合算法; 换乘需求; 候车时间

中图分类号: U491 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2025)06-2030-08

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20230931

Bus schedule optimization considering bus and metro interchange needs

LAI Yuan-wen, CHEN Yan-sheng, WANG Shu-yi, ZHANG Yu-long, ZHU Xin-yun

(College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

Abstract: An all-day bus schedule optimization method was proposed in consideration of passengers' demand between the bus and the metro. Firstly, with the goal of minimizing the cost of passenger waiting time and the operating costs of public transportation enterprises, an optimization model was constructed. Then, a genetic-simulated annealing hybrid algorithm was designed to solve the model. A case study of the upward direction of the No. 1 bus in Fuzhou was selected to verify the effectiveness and practicability of the proposed model and algorithm. After optimizing the schedule, the average waiting time cost of passengers in B-M mode, M-B mode, and non-transfer mode has been reduced by 19.30%. Public transportation enterprises' operating costs have increased by 4.95% due to increased bus departures, but the total system cost has decreased by 5.05%.

Key words: urban traffic; schedule optimization; genetic-simulated annealing hybrid algorithm; interchange needs; waiting time

收稿日期: 2023-09-03.

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(52302406).

作者简介: 赖元文(1981-), 男, 副教授, 博士. 研究方向: 公共交通运营与管理. E-mail: laiyuanwen@fzu.edu.cn

0 引言

随着城市化进程的提速,城市交通供需矛盾与拥堵问题日趋紧张,优先发展公共交通是缓解城市交通拥堵的有效手段^[1]。其中,公交作为城市公共交通的主体,在公共交通优先发展战略中具有重要地位^[2]。鉴于此,通过优化公交时刻表,缩短乘客在出行过程中的候车时间是提高城市公共交通服务水平的有效手段之一。

国内外已有研究围绕公交时刻表优化问题取得了较为丰富的成果,主要针对时刻表优化模型及求解算法开展研究。孙杨等^[3]以乘客成本最小化、运营成本最小化为目标,分别给出了区域调度模式下的区域模型与单线调度模式下的单线模型。邵国璇等^[4]以极小化乘客平均候车时间与车辆行驶公里数为优化目标,构建了基于灵活编组的市域快轨时刻表优化模型。马晓磊等^[5]提出了一种考虑乘客动态需求的调度模型,并选取拉格朗日松弛算法,在既有的时刻表基础上优化车辆到发时间。Ibarra-rojas等^[6]以在换乘站点处的公交车辆协同次数为基础,以最大化公交乘客数量与最小化系统运营总成本为目标,创建双目标混合整数规划模型。宋俪婧等^[7]建立了一种基于混合整数非线性规划的接驳公交协同优化模型,并采用数学规划求解器CPLEX求解模型。上述研究主要集中于对高峰时段的公交时刻表进行优化,鲜有对公交全天的运行时刻表进行优化。而对全天的公交时刻表优化更符合实际应用,还可以提高公交与地铁的有效衔接和乘客出行效率。

客流需求是优化公交时刻表的基础^[8],近年来,基于客流需求对公交时刻表进行优化成为研究热点。于滨等^[9]以公交系统总成本最小为上层模型目标,公交客流分配为下层模型,分别构建了优化公交发车频率和地铁列车开行方案的双层规划模型。Zhang等^[10]研究了满足不同特征时期客流需求特征的车队数量和大小,发现如果考虑全天需求,将产生与经验相反的结果。Sergio等^[11]通过加入途中站点的车辆滞站控制策略,以缩短乘客出行总时间为目标,优化单线公交时刻表。张海等^[12]基于客流需求时空分布规律,建立了城市轨道交通高峰时段基于非均匀发车间隔的大小交路时刻表优化模型,对乘客平均旅行时间及列

车发车间隔平均偏离值进行协同优化。李得伟等^[13]以乘客在站候车和出行时间的线性加权最小化为目标,对城际列车时刻表进行优化。然而,已有研究中基于公交客流需求时刻表的优化主要关注各公交站点处的客流需求,鲜有考虑公交与地铁之间的换乘需求。而对与地铁线路存在换乘关系的公交线路,公交与地铁之间的换乘需求是优化公交时刻表的关键依据。

基于上述问题,本文在考虑公交与地铁之间换乘需求的情况下,提出一种全天的公交时刻表优化方法。以最小化乘客候车时间成本和公交企业运营成本为优化目标,构建了公交时刻表优化模型,并设计了遗传-模拟退火混合算法进行求解。最后,以福州市公交1路上行方向为例,验证本文模型及算法的有效性及实用性。

1 模型构建

1.1 问题描述

公交乘客流量在不同时间段内变化较大,尤其是在早晚高峰时期,客流量显著高于平峰时段。为了更好地满足乘客需求,需要针对不同时间段制订不同的发车时刻表。与仅优化高峰时段的公交发车时刻相比,对公交全天的发车时刻进行综合优化更加符合公交系统实际运行的要求。

乘客乘坐公交换乘地铁出行,候车时间是公共交通服务水平的重要指标之一。同时,公交线路运营成本也是激发公交企业提升服务的关键因素。因此,需要在综合考虑乘客候车时间成本和公交企业运营成本的条件下,对公交时刻表进行优化。

1.2 模型假设

在构建模型之前,进行以下几点假设:①公交车沿着规定的线路行驶,公交车会在误差允许范围内在规定时间内准时出入站;②线路上的公交车均不允许越站和超车;③公交线路运营成本与公交运营里程呈正相关;④已知乘客的平均步行速度,即可知乘客在公交站与地铁站之间的行走时间;⑤到达各公交站的乘客遵循泊松分布。

1.3 目标函数

公交时刻表的发车间隔和到发时刻影响乘客的候车时间,量化为乘客候车时间成本。本文将其分为以下3种,即公交换乘地铁(Bus to metro,

B-M)模式、地铁换乘公交(Metro to bus, M-B)模式以及非换乘模式下的乘客候车时间成本。

(1) B-M 模式下的乘客候车时间成本(单位:元)

① 公交从首站行驶到换乘站点的行程时间 $t_B^{\bar{s}}$ 为:

$$t_B^{\bar{s}} = \frac{L_B^{\bar{s}}}{L_B} t_B \quad (1)$$

式中: $\bar{s}$ 为公交换乘站点; $L_B^{\bar{s}}$ 为公交线路首站与换乘站点的站间距, km; L_B 为公交线路的全程长度, km; t_B 为公交的全程行程时间, min。

② 公交从首站行驶到换乘站点的时刻 $T_B^{i,\bar{s}}$ 为:

$$T_B^{i,\bar{s}} = T_B^1 + (i-1)h_B + t_B^{\bar{s}} \quad (2)$$

式中: i 为公交编号; T_B^1 为某 1 个车次公交离开首站的时刻; h_B 为公交发车间隔, min。

③ 换乘乘客的总候车时间 $\Delta t_{BR}^{\bar{s}}$ 为:

$$\Delta t_{BR}^{\bar{s}} = \eta_{BR}^{i,j} (T_R^{j,\bar{s}} - T_B^{i,\bar{s}} - t_{BR}^{\bar{s}}) \quad (3)$$

$$t_{BR}^{\bar{s}} = \frac{L_{B-M}}{V_p} \quad (4)$$

$$\eta_{BR}^{i,j} = \begin{cases} 1, & T_R^{j-1,\bar{s}} < T_B^{i,\bar{s}} + t_{BR}^{\bar{s}} \leq T_R^{j,\bar{s}} \\ 0, & \text{其他条件} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $t_{BR}^{\bar{s}}$ 为在换乘站点的乘客从公交换乘为地铁的步行时间, min; L_{B-M} 为公交站点与地铁站点之间的步行距离, km; V_p 为乘客平均的步行速度, km/h; $\eta_{BR}^{i,j}$ 为布尔变量; $T_R^{j-1,\bar{s}}$ 为地铁到达换乘站点的时刻; $T_R^{j,\bar{s}}$ 为地铁在换乘站点的发车时刻。

④ 在换乘站点由公交换乘为地铁的乘客总候车时间成本 $C_{BR}^{\bar{s}}$ 为:

$$C_{BR}^{\bar{s}} = U_C \sum_{j=1}^{e_R^k} \sum_{i=1}^{e_B^k} \eta_{BR}^{i,j} p_{BR}^{\bar{s}} (T_R^{j,\bar{s}} - T_B^{i,\bar{s}} - t_{BR}^{\bar{s}}) \quad (6)$$

式中: U_C 为乘客单位候车时间价值, 元/min; e_R^k 为地铁线路 R 的发车数, 辆; e_B^k 为公交线路 B 的发车数, 辆; $p_{BR}^{\bar{s}}$ 为在换乘站点由公交换乘为地铁的乘客总人数, 人。

⑤ 在所有换乘站点的乘客总候车时间成本 C_{BR} 为:

$$C_{BR} = U_C \sum_{\bar{s}=1}^{e_i} \sum_{j=1}^{e_R^k} \sum_{i=1}^{e_B^k} \eta_{BR}^{i,j} p_{BR}^{\bar{s}} (T_R^{j,\bar{s}} - T_B^{i,\bar{s}} - t_{BR}^{\bar{s}}) \quad (7)$$

(2) M-B 模式下的乘客候车时间成本(单位:元)

① 换乘乘客的总候车时间 $\Delta t_{RB}^{\bar{s}}$ 为:

$$t_{RB}^{\bar{s}} = \frac{L_{M-B}}{V_p} \quad (8)$$

$$\Delta t_{RB}^{\bar{s}} = \eta_{RB}^{i,j} (T_B^{i,\bar{s}} - T_R^{j,\bar{s}} - t_{RB}^{\bar{s}}) \quad (9)$$

式中: $t_{RB}^{\bar{s}}$ 为在换乘站点的乘客从地铁换乘为公交的步行时间, min; L_{M-B} 为地铁站点与公交站点之间的步行距离, km。

② 在换乘站点由地铁换乘为公交的乘客总候车时间成本 $C_{RB}^{\bar{s}}$ 为:

$$C_{RB}^{\bar{s}} = U_C \sum_{i=1}^{e_B^k} \sum_{j=1}^{e_R^k} \eta_{RB}^{i,j} p_{RB}^{\bar{s}} (T_B^{i,\bar{s}} - T_R^{j,\bar{s}} - t_{RB}^{\bar{s}}) \quad (10)$$

式中: $p_{RB}^{\bar{s}}$ 为在换乘站点由地铁换乘到公交的乘客总人数, 人。

③ 在所有换乘站点的乘客总候车时间成本 C_{RB} 为:

$$C_{RB} = U_C \sum_{\bar{s}=1}^{e_i} \sum_{i=1}^{e_B^k} \sum_{j=1}^{e_R^k} \eta_{RB}^{i,j} p_{RB}^{\bar{s}} (T_B^{i,\bar{s}} - T_R^{j,\bar{s}} - t_{RB}^{\bar{s}}) \quad (11)$$

(3) 非换乘模式下的乘客候车时间成本(单位:元)

① 乘客候车时间设定为发车间隔的一半^[14], 非换乘乘客在公交站点处的候车时间成本 $C_B^{i,s}$ 为:

$$C_B^{i,s} = \frac{1}{2} U_C \gamma_B^s (h_B)^2 \quad (12)$$

式中: γ_B^s 为公交站点 s 的非换乘乘客数, 人。

② 所有公交站点处的非换乘乘客的候车时间成本 C_B 为:

$$C_B = \sum_{s=1}^{e_i} \sum_{i=1}^{e_B} C_B^{i,s} \quad (13)$$

(4) 公交企业运营成本 C_P (单位:元)

公交企业运营成本由公交总运营里程数乘以单位里程的运营成本得到, 即:

$$C_P = U_p L_B e_B \quad (14)$$

式中: U_p 为公交线路单位里程的运营成本, 元/km; L_B 为公交线路的全程长度, km; e_B 为公交线路的发车数, 辆。

(5) 系统总成本 C_S (单位:元)

系统总成本由 B-M 模式、M-B 模式、非换乘模式下的乘客候车时间成本与公交企业运营成本共同组成。本文以最小化乘客候车时间成本与公交企业运营成本为目标, 即:

$$\min C_S = C_{BR} + C_{RB} + C_B + C_P \quad (15)$$

1.4 约束条件

约束1 公交的发车间隔应在最小发车间隔与最大发车间隔之间,即:

$$h_{B,\min} \leq h_B \leq h_{B,\max} \quad (16)$$

式中: $h_{B,\min}$ 为公交最小发车间隔; $h_{B,\max}$ 为公交最大发车间隔。

约束2 从时段 T 的起始时间到第一个公交车次的发车时间应不超过该时段的最大发车间隔,即:

$$T_B^1 \leq h_{B,\max} \quad (17)$$

式中: T_B^1 为第一个公交车次的发车时间。

约束3 在时段 T 内的最后一个公交车次的发车时间应在该时段的终止时间之内,即:

$$T_B^F \leq T \quad (18)$$

式中: T_B^F 为最后一个公交车次的发车时间; T 为一个时间段。

约束4 公交的发车次数应满足实际运营情况,即:

$$1 \leq e_B \leq K \quad (19)$$

式中: K 为公交线路的最大发车次数,次。

目标函数 $\min C_s$ 与约束条件式(16)~(19)构成了公交时刻表优化模型。

2 遗传-模拟退火混合算法设计

对于复杂的非线性优化问题,遗传算法通常能搜索出全局可行解,但在进行全局搜索时容易过早收敛而陷入局部最优,导致效率性不高^[15]。针对上述问题,本文基于遗传算法并结合模拟退火算法在全局搜索上的优势,设计了遗传-模拟退火混合算法。

2.1 算法流程

遗传-模拟退火混合算法步骤如下:

Step 1 设置遗传-模拟退火混合算法运行参数。包括遗传算法的种群规模 popsize 、交叉概率 P_c 、变异概率 P_m 、进化次数 $G_{\max}$ 等参数。模拟退火算法的初始温度 $F_{\max}$ 、终止温度 $F_{\min}$ 和温度冷却系数 α 等参数。

Step 2 初始种群生成。在优化时段内生成随机初始解,计算其初始适应度值,并对迭代计数变量进行设定。

Step 3 寻找初始极值。分别计算初始个体的适应度值,再选择若干个适应度值较小的个体。

Step 4 迭代寻优。由交叉、变异概率分别对个体进行交叉、变异操作,产生新一代的种群。

Step 5 选择最优个体当作模拟退火部分的初始解,在 $F_{\max}$ 下进行退火降温操作,根据蒙特卡洛准则判断个体是否更新。

Step 6 检验新解是否满足最大迭代次数。若满足,则执行下一步;否则,继续执行Step 4。

Step 7 判断当前温度是否满足退火操作的终止条件。若满足,则终止算法,输出最优解;否则执行降温操作,返回到Step 3。

2.2 仿真实验

选取3个算法测试常用标准函数,验证混合算法的寻优性能,选取函数为:

$$f_1(x) = \left(\frac{3}{0.05 + (x_1^2 + x_2^2)} \right)^2 + (x_1^2 + x_2^2) \quad (20)$$

$$f_2(x) = - \left\{ \sum_{i=1}^5 i \cos[(i+1)x_1 + i] \right\} \cdot \left\{ \sum_{i=1}^5 i \cos[(i+1)x_2 + i] \right\} \quad (21)$$

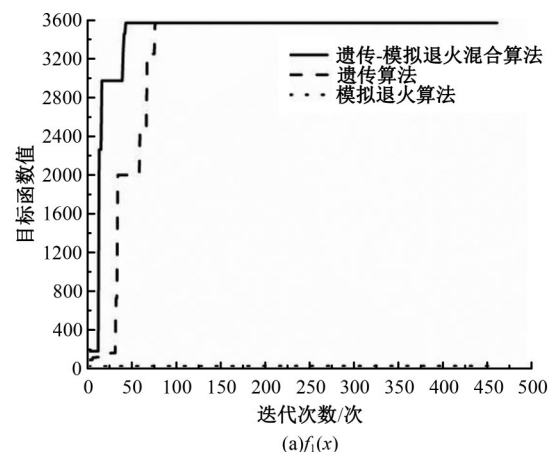
$$f_3(x) = \frac{0.5 - \sin^2 \sqrt{x_1^2 + x_2^2}}{[1 + 0.001(x_1^2 + x_2^2)]^2} - 0.5 \quad (22)$$

式中: x_1 、 x_2 为自变量。

测试函数具体参数见表1,迭代结果如图1所示。由图1可知,遗传-模拟退火混合算法未陷入

表1 测试函数属性

测试函数	搜索范围	理论最优值	目标精度
$f_1(x)$	$(-10, 10)$	3 600	e^{-5}
$f_2(x)$	$(-10, 10)$	186.73	e^{-5}
$f_3(x)$	$(-10, 10)$	0	e^{-5}



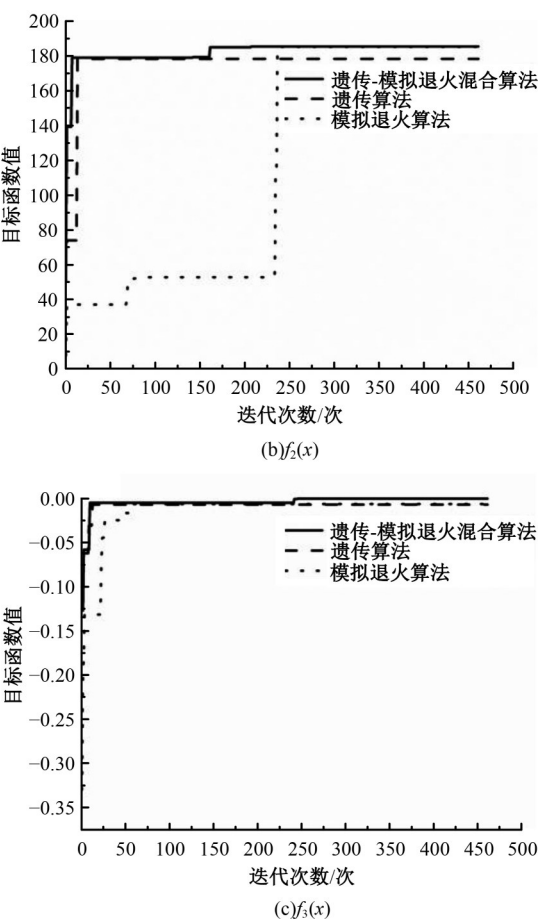


图 1 迭代结果

Fig. 1 Iteration results

局部最优解,在较少的迭代次数下逼近全局最优解,具备求解全局最优的能力,传统遗传算法的缺陷得到改善。因此,采用遗传-模拟退火混合算法求解公交时刻表优化模型是可行的。

3 案例分析

3.1 案例说明

以福州市公交1路上行方向为例,验证本文模型及算法的有效性及实用性。与公交1路存在换乘关系的地铁线路为1号线,公交1路全线公交站点数为22个,工作日期间运营时段为5:00~23:00。文献[16]表明:地铁站点的最大步行接驳距离为770 m。因此,将距离地铁站点770 m内的公交站点判定为换乘站点。公交1路的12个公交站点与地铁1号线的7个地铁站点存在换乘关系,具体见表2。

选取某工作日公交1路的刷卡数据、到离站数据与地铁自动售检票系统(Automatic fare collection, AFC)数据进行处理,得到公交1路各换

乘站点处的换乘需求(见表2)和各公交站点处的非换乘人数(见表3)。

根据公交与地铁的发车间隔变化和平高峰期间客流量大小,将公交1路上行方向全天的运行时间划分为8个时段,时段划分见表4。其中,7:00~9:00为早高峰时段,17:00~19:00为晚高

表 2 各换乘站点处的换乘需求(以 7:00~9:00 为例)

Table 2 Number of transfers at each transfer station

公交换乘站点	地铁换乘站点	换乘模式	换乘人数/人
白湖亭站	白湖亭站	B-M	15
		M-B	33
盖山路口站	白湖亭站	B-M	23
		M-B	33
三叉街站	三叉街站	B-M	46
		M-B	55
三叉街口站	三叉街站	B-M	34
		M-B	24
埔顶站	上藤站	B-M	10
		M-B	17
桥南站	上藤站	B-M	27
		M-B	36
台江后洲站	达道站	B-M	15
		M-B	29
达道站	达道站	B-M	31
		M-B	39
茶亭站	茶亭站	B-M	30
		M-B	19
南门站	南门兜站	B-M	61
		M-B	43
道山路口站	南门兜站	B-M	58
		M-B	33
南街站	东街口站	B-M	39
		M-B	29

表 3 各公交站点处的非换乘人数

Table 3 Number of non-transfers at each bus stop

站点编号	站点名称	非换乘人数/人	站点编号	站点名称	非换乘人数/人
1	白湖亭站	36	12	文化宫站	80
2	盖山路口站	49	13	省人民医院站	29
3	三叉街新村站	37	14	洋头口站	64
4	三叉街站	76	15	茶亭站	50
5	三叉街口站	47	16	南门站	74
6	埔顶站	44	17	道山路口站	51
7	桥南站	85	18	南街站	63
8	闽江之心站	49	19	鼓楼站	96
9	台江天华站	52	20	福三中队	90
10	台江后洲站	64	21	西湖站	36
11	达道站	93	22	西门站	20

表 4 时段划分
Table 4 Time segmentation

时段编号	时段	时长/min
1	5:00~7:00	120
2	7:00~9:00	120
3	9:00~12:00	180
4	12:00~14:00	120
5	14:00~17:00	180
6	17:00~19:00	120
7	19:00~21:00	120
8	21:00~23:00	120

峰时段,其余时段为平峰时段。

3.2 模型求解与时刻表生成

已知公交 1 路运行时间被划分为 8 个时段,则实数编码根据 8 个时段设置为 $X=(x_1,x_2,x_3,x_4,x_5,x_6,x_7,x_8)$ 。遗传-模拟退火混合算法其余的各项参数设置见表 5。

采用 Python 语言编程实现遗传-模拟退火混合算法,设置初始种群规模为 100,交叉概率为 0.8,变异概率为 0.1,最大迭代次数为 200,迭代结果如图 2 所示。

由图 2 可知:①当迭代次数为 90 次左右时,遗传-模拟退火混合算法最先进入收敛状态并得到最优解;②遗传-模拟退火混合算法在求解结果及寻优效率上均优于传统遗传算法及模拟退火算法,模拟退火算法虽然在反复迭代下逼近全局最优解,但寻优效率要低于遗传算法,验证了遗传-模拟退火混合算法在算法性能上的优越性。

进一步地,在得到最优解时的 8 个时段的发

表 6 公交 1 路上行方向发车时刻表

Table 6 Departure schedule in the onward direction of bus route 1

时段编号	发车时刻	发车间隔/min
1	05:00;05:12;05:24;05:36;05:48;06:00;06:12;06:24;06:36;06:48;07:00	12
2	07:08;07:16;07:24;07:32;07:40;07:48;07:56;08:04;08:12;08:20;08:28;08:36;08:44;08:52;09:00	8
3	09:10;09:20;09:30;09:40;09:50;10:00;10:10;10:20;10:30;10:40;10:50;11:00;11:10;11:20;11:30; 11:40;11:50;12:00	10
4	12:11;12:22;12:33;12:44;12:55;13:06;13:17;13:28;13:39;13:50	11
5	14:02;14:14;14:26;14:38;14:50;15:02;15:14;15:26;15:38;15:50;16:02;16:14;16:26;16:38;16:50	12
6	17:02;17:11;17:20;17:29;17:38;17:47;17:56;18:05;18:14;18:23;18:32;18:41;18:50;18:59	9
7	19:12;19:25;19:38;19:51;20:04;20:17;20:30;20:43;20:56	13
8	21:11;21:26;21:41;21:56;22:11;22:26;22:41;22:56	15

3.3 优化结果分析

由表 6 可知,优化后的福州市公交 1 路上行方向全天最小发车间隔和最大发车间隔分别为 8 min 和 15 min,且全天运营时段内发车 100 趟。优化

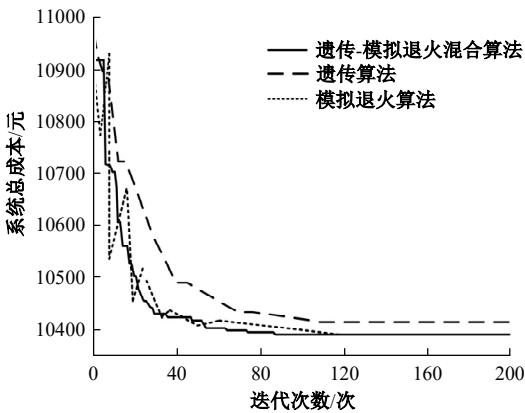


图 2 迭代结果

Fig. 2 Iteration results

车间隔即 8 个最优个体。最终,优化后的公交 1 路上行方向的发车时刻表如表 6 所示。

表 5 模型及算法参数

Table 5 Model and algorithm parameters

参数符号	参数属性	参数取值	参考文献
$h_{B,min}$	公交最小发车间隔/min	5	—
$h_{B,max}$	公交最大发车间隔/min	60	—
U_p	公交线路单位里程的运营成本/(元·km ⁻¹)	5.97	—
K	公交线路的最大发车次数/(次·h ⁻¹)	12	—
V_p	乘客的平均步行速度/(km·h ⁻¹)	4.4	[17]
U_c	乘客单位候车时间价值/(元·min ⁻¹)	0.37	[18]
P_c	交叉概率	0.8	[19]
P_m	变异概率	0.01	[19]
P	种群规模	100	[19]
G_{max}	最大进化次数	20	[19]
α	冷却系数	0.99	[20]

前、后的各项指标如表 7 所示。

由表 7 可知,B-M 模式、M-B 模式和非换乘模式下的乘客候车时间成本平均降低了 19.30%,公交企业运营成本由于公交发车次数

表 7 各项指标对比

Table 7 Comparison of various indicators

对比项	优化前	优化后	优化比例/%
发车次数/次	96	100	-4.17
B-M 模式下的乘客候车时间成本/元	362.10	307.30	15.13
M-B 模式下的乘客候车时间成本/元	710.20	539.60	24.02
非换乘模式下的乘客候车时间成本/元	3 511.50	2 852.60	18.76
公交企业运营成本/元	6 361.60	6 693.00	-4.95
系统总成本/元	10 945.40	10 392.50	5.05

的增加而提升了 4.95%, 系统总成本节约了 5.05%。

4 结 论

(1)目前的公交时刻优化主要集中于对高峰时段的公交时刻表进行优化,对公交全天运行时刻表的优化研究相对较少。与仅针对高峰时段的公交发车时刻进行优化相比,对整个运营时间范围内的发车时刻进行综合优化更符合公交系统的实际运行需求。同时,对与地铁线路存在换乘关系的公交线路,考虑公交与地铁之间的换乘需求是优化公交时刻表的关键依据。

(2)遗传-模拟退火混合算法在求解模型时表现出色,其在求解结果的准确性和寻优效率方面均优于传统的遗传算法和模拟退火算法。这一混合算法结合了遗传算法的全局搜索能力和模拟退火算法跳出局部最优的特点,为求解复杂的优化问题提供了一种新途径。

(3)优化后的福州市公交 1 路上行方向全天最小发车间隔和最大发车间隔分别为 8 min 和 15 min, B-M 模式、M-B 模式和非换乘模式下的乘客候车时间成本平均降低了 19.30%, 公交企业运营成本由于公交发车次数的增加而提升了 4.95%, 系统总成本节约了 5.05%。

参考文献:

- [1] Ma C, Xu X. Providing spatial-temporal priority control strategy for BRT lanes: a simulation approach[J]. Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems, 2020, 146(7): No. 04020060.
- [2] 罗孝玲, 蒋阳升. 基于公交数据挖掘的时刻表排班协同换乘优化[J]. 交通运输系统工程与信息, 2017,

17(5): 173-178.

Luo Xiao-ling, Jiang Yang-sheng. Timetable transfer-coordination optimization based on transit data mining[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2017, 17(5): 173-178.

- [3] 孙杨, 宋瑞, 何世伟. 接运公交时刻表与区域车辆调度的综合优化[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2011, 41(5): 1228-1233.

Sun Yang, Song Rui, He Shi-wei. Comprehensive optimization of feeder bus timetable and regional vehicle scheduling[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2011, 41(5): 1228-1233.

- [4] 邵国璇, 黄友能, 李春驰, 等. 基于灵活编组的市域快轨时刻表优化方法研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2023, 23(3): 195-203.

Tai Guo-xuan, Huang You-neng, Li Chun-chi, et al. An optimization method of train scheduling for urban rapid rail transit based on flexible train composition mode[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2023, 23(3): 195-203.

- [5] 马晓磊, 沈宣良, 张钊, 等. 基于拉格朗日松弛算法的自动驾驶公交调度优化研究[J]. 中国公路学报, 2019, 32(12): 10-24.

Ma Xiao-lei, Shen Xuan-liang, Zhang Zhao, et al. Optimization of autonomous bus scheduling based on lagrangian relaxation[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(12): 10-24.

- [6] Ibarra-rojas O J, Giesen R, Rios-solis Y A. An integrated approach for timetabling and vehicle scheduling problems to analyze the trade-off between level of service and operating costs of transit networks[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2014, 70: 35-46.

- [7] 宋俪婧, 白同舟, 贺玉龙, 等. 基于混合整数非线性规划的接驳公交优化模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2022, 22(3): 104-111.

Song Li-jin, Bai Tong-zhou, He Yu-long, et al. Feeder bus routes and frequency optimization based on mixed integer nonlinear programming[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2022, 22(3): 104-111.

- [8] 胡金成. 考虑运行能效的公交区域时刻表优化[J]. 交通运输系统工程与信息, 2021, 21(2): 139-144.

Hu Jin-cheng. Optimization of bus regional timetable considering operating efficiency[J]. Journal of Trans-

- portation Systems Engineering and Information Technology, 2021, 21(2): 139-144.
- [9] 于滨, 杨忠振, 程春田. 公交线路发车频率优化的双层规划模型及其解法[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2006, 36(5): 664-668.
Yu Bin, Yang Zhong-zhen, Cheng Chun-tian. Bi-level programming model for optimizing bus frequencies and its algorithm[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2006, 36(5): 664-668.
- [10] Zhang W Y, Xia D Y, Liu T, et al. Optimization of Single-line bus timetables considering time-dependent travel times: a case study of Beijing, China[J]. Computers and Industrial Engineering, 2021, 158(4): No. 107444.
- [11] Sergio J, Andrés F, Antonio G. Optimal fleet size, frequencies and vehicle capacities considering peak and off-peak periods in public transport[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2017, 106(dec.): 65-74.
- [12] 张海, 吕苗苗, 倪少权. 基于非均匀发车间隔的大小交路时刻表优化模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2022, 22(6): 224-233.
Zhang Hai, Lv Miao-miao, Ni Shao-quan. Train timetable optimization model for full-length and short-turn routings with irregular departure intervals[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2022, 22(6): 224-233.
- [13] 李得伟, 丁世顺, 张琦, 等. 基于客流需求的城际列车时刻表模型改进研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2017, 17(3): 157-164.
Li De-wei, Ding Shi-shun, Zhang Qi, et al. Improved dynamic demand oriented timetabling model for intercity railway[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2017, 17(3): 157-164.
- [14] 张晓春, 高永, 于壮, 等. 基于公交GPS和IC卡数据的乘客人均候车时间估算方法研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2019, 19(5): 236-241.
Zhang Xiao-chun, Gao Yong, Yu Zhuang, et al. Passenger average waiting time estimation based on bus GPS and IC card data[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2019, 19(5): 236-241.
- [15] Vallada E, Ruiz R. A genetic algorithm for the unrelated parallel machine scheduling problem with sequence dependent setup times[J]. European Journal of Operational Research, 2011, 211(3): 612-622.
- [16] 王淑伟, 孙立山, 荣建. 北京市轨道站点吸引范围研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2013, 13(3): 183-188.
Wang Shu-wei, Sun Li-shan, Rong Jian. Catchment area analysis of Beijing transit stations[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2013, 13(3): 183-188.
- [17] 杨小露. 考虑共享单车影响的微循环公交线路优化研究[D]. 北京: 北京交通大学交通运输学院, 2021.
Yang Xiao-lu. Research on optimization of microcirculation bus route considering the influence of shared bicycles[D]. Beijing: School of Transportation, Beijing Jiaotong University, 2021.
- [18] 王子甲, 贾慧慧, 朱亚迪, 等. 基于智能卡数据的轨道与公交复合网络通勤方式选择行为研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2022, 22(1): 67-73.
Wang Zi-jia, Jia Hui-hui, Zhu Ya-di, et al. Commuting mode choice behavior in rail and bus composite network based on smart card data[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2022, 22(1): 67-73.
- [19] 邓吉浩, 宋瑞, 陈小鸿, 等. 开放式小区公交微循环站点与线网综合设计[J]. 北京交通大学学报, 2020, 44(1): 34-41.
Deng Ji-hao, Song Rui, Chen Xiao-hong, et al. Integrated design of station sites and network of bus microcirculation system in open communities[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2020, 44(1): 34-41.
- [20] 刁鸣, 邹丽. 模拟退火遗传禁忌搜索的多用户检测算法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2014, 35(3): 373-377.
Diao Ming, Zou Li. Multi-user detection based on the simulated annealing genetic Tabu search[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2014, 35(3): 373-377.