

文章编号: 2095-2163(2023)11-0202-06

中图分类号: U491.1+7

文献标志码: A

# 公交停靠站多线路换乘协同调度

赵新标<sup>1</sup>, 刘心雨<sup>1</sup>, 夏晓梅<sup>1</sup>, 项俊平<sup>2</sup>, 赵靖<sup>1</sup>

(1 上海理工大学 管理学院, 上海 200093; 2 连云港杰瑞电子有限公司, 江苏 连云港 222006)

**摘要:** 城市公交运行过程中, 当在同一站点的多条线路之间相互换乘的需求都较大时, 常规调度方式无法满足此需求。因此本研究提出对公交车辆在换乘站点的驻站时间进行控制, 延长先到站车辆在换乘站点的驻站时间, 促使先到站车辆可在换乘站点等待有换乘关系车辆, 从而使得非同时到站车辆依然可以实现多线路乘客相互换乘。本研究首先以乘客平均行程时间最小为优化目标, 考虑发车间隔以及驻站时间的限制, 提出非线性规划模型, 对多线路公交的发车频率以及在换乘站点的驻站时间进行优化。其次, 设计了分步优化算法, 考虑发车间隔组合不同时, 可行解结构不一致的情况。从约束条件出发, 首先生成可行解集, 再依据发车间隔组合的不同, 将解集分成多个子集, 运用邻域搜索算法分别对每个子集进行搜索, 从而避免搜索过程中对可行解结构进行重复判断。最后基于算例验证模型与算法的有效性, 结果表明, 与常规调度策略相比, 本研究提出的调度策略可使乘客平均行程时间减少 11.23%。

**关键词:** 城市交通; 多线路调度; 驻站时间控制; 分步优化算法

## Coordinated scheduling of multi-line transfers at bus stops

ZHAO Xinbiao<sup>1</sup>, LIU Xinyu<sup>1</sup>, XIA Xiaomei<sup>1</sup>, XIANG Junping<sup>2</sup>, ZHAO Jing<sup>1</sup>

(1 Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2 Lianyungang JARI Electronics Co., Ltd, Lianyungang Jiangsu 222006, China)

**Abstract:** During the operation of urban public transportation, when there is a large demand for mutual transfer between multiple lines at the same station, the conventional scheduling method cannot meet this demand. Therefore, this study proposes to control the dwell time of public transportation vehicles at transfer stations. The main approach is to extend the dwell time of first arriving vehicles at the transfer station, so that first arriving vehicles can wait for vehicles with transfer relationships at the transfer station. This makes it possible for non-simultaneously arriving vehicles to enable multi-line passengers to transfer. Firstly, the optimization goal is to minimize the average travel time of passengers. Considering the constraints of departure intervals and dwell time, a nonlinear programming model is proposed to optimize the departure frequency of multi-line buses and the stop time at transfer stations. Secondly, a step-by-step optimization algorithm is designed. When the combinations of departure intervals are different, the feasible solution structures are inconsistent. Therefore, the feasible solution set is firstly generated under the condition of satisfying the constraints. Then, based on the different combinations of departure intervals, the solution set is divided into multiple subsets. And neighborhood search algorithms are used to search each subset separately to avoid repeated judgments on the feasible solution structure during the search process. Finally, the validity of the model and algorithm is verified based on a numerical example. The results show that, compared with the conventional scheduling strategy, the scheduling strategy proposed in this study can reduce the average travel time of passengers by 11.23%.

**Key words:** urban traffic; multi-line scheduling; dwell time control; step-by-step optimization algorithm

## 0 引言

随着城市交通的不断发展, 出行需求和公交方式逐渐多样化, 使得公交网络呈现多模式层级化结构。然而, 在多线路公交运行过程中, 当在同一站点

的不同线路之间相互换乘的需求都较大时, 常规调度策略难以同时满足该站点所有线路的乘客换乘需求, 从而导致乘客换乘候车时间长, 公交服务水平低, 最终造成公交分担率下降的现象。因此, 高效合理的多线路协调调度策略是提高公交服务水平的必

**基金项目:** 上海市科技创新行动计划项目(23692112200); 上海市浦江人才计划(21PJC085); 上海市曙光计划(22SG45)。

**作者简介:** 赵新标(1999-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 公交运营调度; 夏晓梅(1976-), 女, 讲师, 硕士生导师, 主要研究方向: 交通运输规划与管理; 项俊平(1982-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向: 模式识别、智能交通系统; 赵靖(1983-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 交通系统设计、交通控制与管理、公共交通。

**通讯作者:** 刘心雨(1995-), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向: 公交运营控制研究。Email: liuxinyu@usst.edu.cn

收稿日期: 2023-02-28

要条件。

公交多线路协同调度问题一直是交通领域的一个研究热点,国内外许多学者都进行了深入的探讨与研究。国外学者对此研究相对较早,2012 年 Ibarra-Rojas 等学者<sup>[1]</sup>提出了一个重要的观点,研究认为 2 辆公交车行程到达换乘点时间的差值在给定时间窗口内,则即可认为这 2 个行程是同步的。自此以后,关于最大化多线路换乘同步次数的研究多是基于此观点,并在此基础上不断创新。2016 年, Wu 等学者<sup>[2]</sup>认为对现有发车时刻表进行较大的修改,不仅破坏乘客习惯的出行计划,还导致后续调度任务的大量重新计算。因此,提出一种多目标方法,允许决策者考虑在每个特定的时刻表同步水平上可以接受的与现有线路发车时间的偏差。2022 年, Renzo 等学者<sup>[3]</sup>用 Virtual Savant 新型软计算方法,将机器学习和优化相结合,解决了最大化公交同步次数的问题。研究还将节点不仅仅考虑为固定的公交车站,而是整个换乘区。2023 年, Ansarilari 等学者<sup>[4]</sup>将公交容量约束纳入换乘时间优化模型,获得更现实的解决方案。国内学者同样对此展开了深入研究,在 2003 年邹迎等学者<sup>[5]</sup>已经分析了单线调度模式存在的弊端,提出多线路运营组织与调度的基本设想,并深入探讨了区域调度应用的可行性及具体实施框架。随后,2007 年石琴<sup>[6]</sup>及 2014 年黄义<sup>[7]</sup>等以最大化不同公交线路车辆在换乘站点的总相遇次数为目标,从而实现线路间乘客的同步换乘。直至 2016 年,杨信丰等学者<sup>[8]</sup>同样提出在公交调度过程中很难做到有换乘关系的车辆同时到达换乘站点,而乘客在一个允许的时间区间内实现换乘与实际更相符。2018 年,洪豆<sup>[9]</sup>对公交共线路段上的运力资源配置问题展开了研究,提出考虑共线路段的公交调度模型更具实用价值。2020 年,高姝敏<sup>[10]</sup>着重考虑了车辆容量限制,并对因容量限制而未能上车的乘客进行分析,分情况讨论滞站乘客类型及其额外候车时间。2020 年,赵靖等学者<sup>[11]</sup>将需求响应型公交行车调度运用至社区公交中,提出一种新的响应型社区公交,统筹考虑需求起讫点、需求等级、动态需求,有效减少了乘客的等待时间以及步行距离。2022 年,韩印等学者<sup>[12]</sup>将快速公交车辆调度与沿线交叉口信号配时进行了协同优化,并基于客流时空分布不均衡的特征,综合考虑了全程车、大站快车、区间车等多种调度模式。2023 年,赵靖等学者<sup>[13]</sup>利用车牌识别数据,根据不同流向,提取了不受信号延误影响的车辆路段行程时间分布,

并在此基础上,建立了考虑行程时间波动的干线信号协调控制鲁棒优化模型,有效提高了绿波带宽。

目前,在最大化公交多线路同步次数方面具有较为丰硕的成果,但若是仅关注公交多线路同步次数,确实可以提高乘客换乘效率,缩短乘客换乘时间,却也忽略了无需换乘的乘客的出行需求,公交多线路同步次数的增加,并不意味着乘客平均行程时间会减少。此外,面对多线路互相换乘的需求较大的情况,现有学者所提出的多线路同步方法,即促使两辆公交车到达换乘点时间的差值在给定时间窗口内,是无法满足多线路乘客相互换乘的需求的。原因在于一旦 2 条线路的公交车离开换乘站点存在先后顺序,就仅有先到站的公交车辆上的乘客可以换乘成功,而后到站的公交车辆上的乘客则需等待换乘目标线路的下一辆车辆。因此,基于上述问题,本研究以乘客平均行程时间最小为目标,考虑发车间隔与驻站时间的限制,对车辆的发车间隔以及在换乘站点的驻站时间进行优化,延长先到站车辆在换乘站点的驻站时间,促使先到站车辆可在换乘站点等待有换乘关系车辆,使得两辆非同时到达换乘站点的公交车依然可以同时离开站点,实现多线路乘客相互换乘。

## 1 模型建立

### 1.1 模型构建

本研究旨在对公交的发车间隔以及在换乘站点的驻站时间进行优化,提高换乘效率,缩短乘客出行时间,因此以乘客平均行程时间最小为优化目标,包括候车时间和车内时间,如式(1)所示:

$$\min T = (T_1 + T_2 + T^{(b)})/P \quad (1)$$

其中,  $T_1$  表示无需换乘的乘客候车时间,当乘客均匀到达时,候车时间为候车乘客数与车头时距的一半的乘积,如式(2)所示:

$$T_1 = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J_i} \sum_{k=1}^{K_i} \beta_{1,k} b_{i,j,k} \frac{H_{i,j,k}}{2} \quad (2)$$

其中,  $T_2$  表示需要换乘的乘客的候车时间,主要包括 2 个部分,即第一次候车时间以及换乘候车时间,在第一次候车时,乘客为均匀到达,因此计算方式与无需换乘的乘客一致。而在换乘候车时,乘客同时到达换乘站点,计算方式为换乘乘客数与车头时距的乘积,如式(3)所示:

$$T_2 = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J_i} \sum_{k=1}^{K_i} \left( \beta_{2,k} b_{i,j,k} \frac{H_{i,j,k}}{2} + \beta_{2,k} b_{i,j,k} H_{i,j,K^{(tr)}}^{(tr)} \right) \quad (3)$$

式(1)中,  $T^{(b)}$  表示车内时间, 计算方式为车辆从站点  $k-1$  至站点  $k$  时, 在车乘客数与站点  $k-1$  至站点  $k$  之间的车辆行程时间的乘积, 如式(4)所示:

$$T^{(b)} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J_i} \sum_{k=1}^{K_i} Z_{i,j,k} (T_{i,j,k} - T_{i,j,k-1}) \quad (4)$$

$P$  表示研究时段内公交车运送乘客总数, 即所有上车的乘客数, 如式(5)所示:

$$P = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J_i} \sum_{k=1}^{K_i} b_{i,j,k} \quad (5)$$

式(1)~式(5)中,  $i$  为公交线路编号;  $j$  为公交班次编号;  $k$  为公交站点编号;  $K^{(tr)}$  为换乘站点编号;  $\beta_{1,k}$  为站点  $k$  无需换乘乘客占所有乘客的比例;  $\beta_{2,k}$  为站点  $k$  需要换乘乘客占所有乘客的比例;  $b_{i,j,k}$  为线路  $i$  班次  $j$  在站点  $k$  的上车乘客数;  $H_{i,j,k}$  为线路  $i$  在站点  $k$  班次  $j-1$  与班次  $j$  的车头时距;  $H_{i,j,K^{(tr)}}$  为线路  $i$  在换乘站点  $K^{(tr)}$  班次  $j$  与最近的上一班换乘线路  $i'$  班次  $j'$  的车头时距;  $Z_{i,j,k}$  为线路  $i$  班次  $j$  到达站点  $k$  时的车厢总人数;  $T_{i,j,k}$  为线路  $i$  班次  $j$  到达站点  $k$  的时间, 当  $k=0$  时,  $T_{i,j,0} = 0$ 。

目标函数计算的关键是确定公交运行过程中车辆和乘客状态, 即每个班次车辆到达各站点的时刻及驻站时间, 其中驻站时间与站点上下车乘客数量相关。

### 1.1.1 公交车辆状态的确认

对于非换乘站的车头时距, 即为同一线路中前一个班次  $j-1$  与当前班次  $j$  到达站点的时间差, 如式(6)所示:

$$H_{i,j,k} = T_{i,j,k} - T_{i,j-1,k} \quad (6)$$

而换乘站的车头时距为线路  $i$  班次  $j$  与目标换乘线路  $i'$  班次  $j'$  的时间差, 如式(7)所示:

$$H_{i,j,K^{(tr)}} = T_{i,j,K^{(tr)}} - T_{i',j',K^{(tr)}} \quad (7)$$

其中,  $T_{i,j,k}$  为线路  $i$  班次  $j$  到达站点  $k$  的时间。

公交到达每个站点的时刻都可由其到达前一个站点的时刻递推得到, 即公交到达上一站的时间与在上一站的驻站时间以及在站点间的行程时间的加和, 如式(8)所示:

$$T_{i,j,k} = T_{i,j,k-1} + s_{i,j,k-1} + \frac{d_{i,k}}{v} \quad (8)$$

其中,  $s_{i,j,k-1}$  为线路  $i$  班次  $j$  在站点  $k-1$  的驻站时间;  $d_{i,k}$  为线路  $i$  中站点  $k$  与上一站  $k-1$  的站间距, 单位为  $m$ ;  $v$  为设计车速, 单位为  $m/s$ 。这里, 公交站间行程时间由站间距离与设计车速的比值得到。

当  $k=1$  时, 公交车在站点 1 的离站时刻由各线路第一班公交车的发车时刻与发车间隔的累加和组

成, 如式(9)所示:

$$T_{i,j,1} = F_{i,1} + \sum_{j'=0}^{j-1} h_{i,j'} \quad (9)$$

其中,  $F_{i,1}$  为线路  $i$  第 1 个班次的发车时间;  $h_{i,j}$  为线路  $i$  班次  $j$  与班次  $j-1$  的发车间隔。

公交在站点的驻站时间与上下车乘客数量有关, 可由式(10)计算:

$$s_{i,j,k} = \begin{cases} \max(b_{i,j,k} d_{pb}, a_{i,j,k} d_{pa}) + \psi, & k \neq K^{(tr)} \\ \max(b_{i,j,k} d_{pb}, a_{i,j,k} d_{pa}) + \psi + \alpha_{i,j} H_{i,j,K^{(tr)}}, & k = K^{(tr)} \end{cases} \quad (10)$$

其中,  $b_{i,j,k}$  为线路  $i$  班次  $j$  在站点  $k$  的上客数, 单位为  $per$ ;  $d_{pb}$  为乘客平均上车时长, 单位为  $s$ ;  $a_{i,j,k}$  为线路  $i$  班次  $j$  在站点  $k$  的下客数, 单位为  $per$ ;  $d_{pa}$  为乘客平均下车时长, 单位为  $s$ ;  $\psi$  为车辆进站减速和出站加速所花费的时间, 单位为  $s$ ;  $\alpha_{i,j}$  为 0-1 变量;  $H_{i,j,K^{(tr)}}$  为线路  $i$  班次  $j$  在换乘站  $K^{(tr)}$  与目标换乘线路  $i'$  班次  $j'$  的时间差, 单位为  $s$ 。

研究中, 在换乘站时, 对公交驻站时间进行控制, 使得其可在站点等待目标换乘车辆到站。

### 1.1.2 乘客状态的确定

公交车到达站点  $k$  时的车厢总人数为第 1 站至第  $k-1$  站所有站点上车人数与下车人数之差的累加和, 如式(11)所示:

$$Z_{i,j,k} = \sum_{k'=1}^{k-1} (b_{i,j,k'} - a_{i,j,k'}) \quad (11)$$

其中,  $b_{i,j,k}$  为线路  $i$  班次  $j$  在站点  $k$  的上客数, 单位为  $per$ ;  $a_{i,j,k}$  为线路  $i$  班次  $j$  在站点  $k$  的下客数, 单位为  $per$ 。

研究假设乘客到达率已知, 且乘客是均匀到达的, 对于从  $k$  站上车的乘客数量可由式(12)计算:

$$b_{i,j,k} = \sum_{k'=k+1}^{K_i} \lambda_{i,kk'} H_{i,j,k} \quad (12)$$

按先到先服务原则, 将上车乘客的最晚到达时刻设为车辆到站时刻。对于下车的乘客数量可由式(13)计算, 即线路  $i$  班次  $j$  中从第 1 站至第  $k-1$  站所有到达站点  $k$  的乘客数:

$$a_{i,j,k} = \sum_{k'=1}^{k-1} \lambda_{i,kk'} H_{i,j,k'} \quad (13)$$

式(12)~(13)中,  $\lambda_{i,kk'}$  为线路  $i$  从站点  $k$  至站点  $k'$  的乘客到达率;  $H_{i,j,k}$  为线路  $i$  在站点  $k$  班次  $j-1$  与班次  $j$  的车头时距。

## 1.2 约束条件

研究中考虑到车上其他乘客的出行时间, 因此先到站车辆在换乘站等待目标线路车辆的时间不可



超过 3 min, 如式 (14) 所示:

$$0 \leq H_{i,j,K}^{(r)} \leq 3 \quad (14)$$

此外, 由于公交运营成本和运营车辆数的限制, 公交发车间隔也应受到最小间隔与最大间隔约束, 如式 (15) 所示:

$$h_{i,\min} < h_i < h_{i,\max} \quad (15)$$

其中,  $h_{i,\min}$  为线路  $i$  的最小发车间隔;  $h_{i,\max}$  为线路  $i$  的最大发车间隔。

## 2 求解算法

### 2.1 优化思想

考虑到多线路不同发车间隔组合下, 可满足式 (14) 的班次  $j$  也不同, 若单纯地采用遗传算法等经典启发式算法进行运算, 则在运算过程中极易生成不可行解, 使得运算效率较低。本研究从约束条件出发, 设计分步优化算法, 首先生成可行解集, 再依据发车间隔组合的不同, 将解集分成多个子集, 运用邻域搜索法对每个子集进行搜索, 最后筛选出最优解。

算法的主要内容为, 首先, 在不同的发车间隔组合下, 生成各自线路中满足式 (14) 约束的班次  $j$  集合  $J_i^{(h_1, h_2)}$ , 一个发车间隔组合下的所有可行解即构成一个子集; 其次, 采用实数编码的方式, 针对所有的发车间隔组合, 从其对应的子集  $J_i^{(h_1, h_2)}$  中各自随机选取一个可行解; 随后, 以此可行解作为邻域搜索的初始位置, 并基于轮盘赌策略对相应的子集进行搜索; 重复多次, 直至满足最大迭代要求, 并筛选出最优解。

本研究所提出的算法具有以下特色:

- (1) 基于约束确定可行解集, 避免生成初始解时, 出现不可行解, 提高初始解集的质量;
- (2) 在发车间隔组合不变的条件下, 进行邻域搜索操作, 避免在搜索过程中对可行解结构进行重复判断, 提高搜索效率。

### 2.2 算法详细过程

算法主要流程图如图 1 所示。

**Step 1** 设置参数。设置种群数量、最大迭代次数、收敛标准等参数。

**Step 2** 确定可行解集  $J_i^{(h_1, h_2)}$ 。2 条不同的公交线路各取一个发车间隔  $h_1^{(r_i)}, h_2^{(r_i)}$  ( $r_i \in (1, h_{i,\max} - h_{i,\min})$ ), 组成发车间隔组合  $[h_1^{(r_i)}, h_2^{(r_i)}]$ , 将  $[h_1^{(r_i)}, h_2^{(r_i)}]$  输入至模型中, 计算 2 条线路中满足式 (14) 约束的班次  $j$ , 并加入各自的可行解集  $J_1^{(h_1, h_2)}, J_2^{(h_1, h_2)}$  中, 重复选择多个发车间隔, 生成各自对应的可行解集  $J_i^{(h_1, h_2)}$ 。

**Step 3** 编码并生成初始种群。采用实数编码

的方式, 且染色体由发车间隔与可控制班次组成, 如图 2 所示。改变发车间隔组合  $M$  次, 每次均随机生成一个初始可行解。

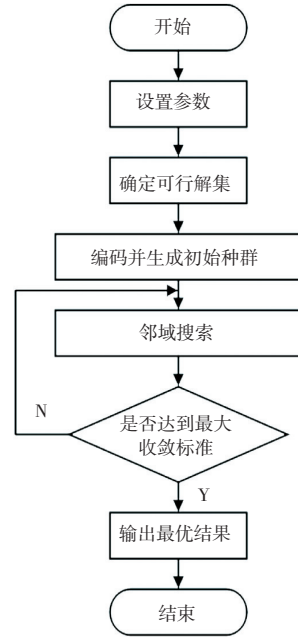


图 1 算法流程图

Fig. 1 Flowchart of the algorithm

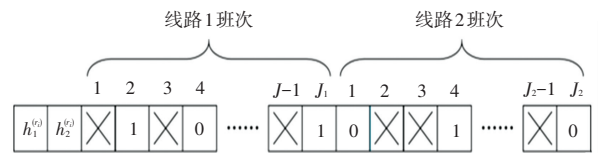


图 2 编码方式

Fig. 2 Encoding

**Step 4** 邻域搜索。取目标函数值的倒数为适应度评价函数, 保留每个子集中适应度函数值最高的解, 并作为邻域搜索时的初始位置, 计算其邻域所有解的适应度值与当前位置适应度值的差值, 基于轮盘赌策略确定下一次迭代搜索方向。

**Step 5** 重复以上操作, 重复更新所有子集, 直至满足最大迭代要求或收敛标准。

## 3 案例分析

下文通过一个案例, 将本文所提出的公交车辆驻站时间协同控制策略与无控制策略进行对比, 验证模型效益。考虑 2 条公交线路, 线路 1 单向设置 13 个站点, 线路 2 单向设置 15 个站点, 2 条线路的换乘站点分别为线路 1 的第 5 站以及线路 2 的第 7 站, 如图 3 所示。站点间距分别见表 1、表 2, 研究时段取 1 h, 各站点乘客均匀到达, 乘客 OD 分布见表 3、表 4, 其他参数设置见表 5。

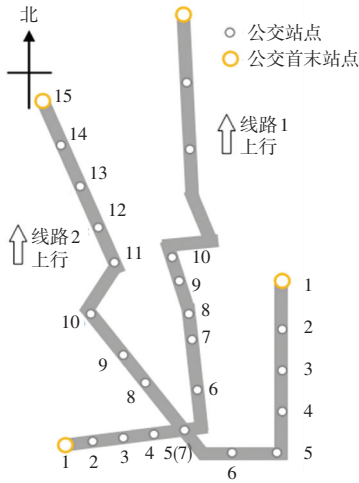


图3 公交站点位置图

Fig. 3 Bus stop location

表1 线路1 站点间距

Tab. 1 Distance between stations of line 1

站点	1	2	3	4	5	6	7
距下一站距离	1 000	700	1 000	1 200	1 100	1 000	1 000
站点	8	9	10	11	12		
距下一站距离	800	1 100	3 800	3 800	4 300		

表2 线路2 站点间距

Tab. 2 Distance between stations of line 2

站点	1	2	3	4	5	6	7
距下一站距离	1 000	1 100	1 000	1 200	1 100	1 000	1 000
站点	8	9	10	11	12	13	14
距下一站距离	1 500	800	1 100	800	700	800	1 000

表3 线路1 乘客 OD 分布矩阵

Tab. 3 OD distribution of line 1

O	D															合计						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	8	9		10	11	12	13	14	15
1	0	2	0	5	7	1	4	0	4	1	4	1	62	1	3	8	6	4	16	2	143	274
2	0	0	0	3	5	0	2	1	1	0	1	0	19	0	2	1	1	0	1	0	19	56
3	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	2	0	10	0	0	0	0	1	2	0	10	28
4	0	0	0	0	4	0	1	0	4	3	1	0	22	0	1	0	4	3	4	0	22	69
5	0	0	0	0	0	1	2	7	1	0	6	1	79	0	0	0	0	0	0	0	0	97
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	31	0	0	0	0	0	0	0	0	32
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	4	4	2	70	0	0	0	0	0	0	0	85
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0	0	0	0	0	0	0	0	15
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	10	1	37	0	0	0	0	0	0	0	51
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	1	44	0	0	0	0	0	0	0	53
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	42	0	0	0	0	0	0	0	44
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	10
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
合计	0	2	0	9	17	2	9	8	15	12	36	9	441	1	6	9	11	8	23	2	194	814

表4 线路2 乘客 OD 分布矩阵

Tab. 4 OD distribution of line 2

O	D													合计										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13											
1	0	2	0	0	0	8	4	2	3	1	4	2	3	1	38	1	2	0	54	1	4	1	34	165
2	0	0	0	0	1	0	1	1	4	3	6	0	1	1	7	11	1	0	10	1	0	0	25	73
3	0	0	0	4	0	16	6	1	6	1	5	1	5	6	74	1	2	5	174	0	1	0	11	319
4	0	0	0	0	0	2	2	0	4	0	0	0	0	1	7	2	1	1	80	0	0	2	15	117
5	0	0	0	0	0	0	3	1	1	0	1	0	1	0	42	3	0	0	17	1	0	0	39	109
6	0	0	0	0	0	0	0	1	7	5	2	9	0	0	19	5	10	6	8	0	0	0	24	96
7	0	0	0	0	0	0	0	0	4	2	1	1	0	1	44	0	0	0	0	0	0	0	0	53
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	6
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	4	0	2	1	29	0	0	0	0	0	0	0	39
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	10
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	57	0	0	0	0	0	0	0	0	61
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	5	14	0	0	0	0	0	0	0	28
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	23	0	0	0	0	0	0	0	0	26
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	38	0	0	0	0	0	0	0	0	38
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
合计	0	2	0	4	1	26	16	6	29	16	24	14	21	23	405	23	16	12	343	3	5	3	148	1 140

表 5 参数设置表  
Tab. 5 Parameter setting table

符号	意义	取值
$d_{pa}$	每个乘客上车平均所需时长/s	3
$d_{pb}$	每个乘客下车平均所需时长/s	3
$v$	公交在站点间的行驶车速/( $m \cdot s^{-1}$ )	10
$\psi$	车辆进站减速和出站加速所花费的时间/s	40
$h_{1,min}$	线路 1 最小发车间隔/s	5
$h_{1,max}$	线路 1 最大发车间隔/s	15
$h_{2,min}$	线路 2 最小发车间隔/s	8
$h_{2,max}$	线路 2 最大发车间隔/s	15

运用本研究所提出的算法对模型进行计算, 由于线路 1 发车间隔为 5~15 min, 线路 2 的发车间隔为 8~15 min, 故所有的发车间隔组合为 88 种。在 Intel Core i3-12100 CPU (2.4 GHz) 配置的个人计算机中, 算法可以在 2 min 内收敛, 调度策略如图 4 所示, 计算结果见表 6, 最终平均乘客行程时间为 21.26 min, 在同发车间隔组合下, 比常规调度策略减少乘客平均行程时间 12.96%; 在不同发车间隔组合下, 比常规调度最优发车间隔减少乘客平均行程时间 11.23%。

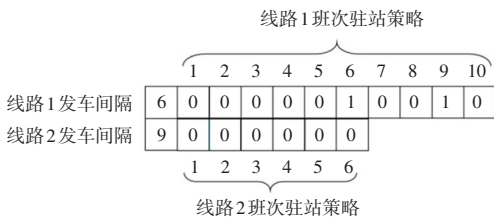


图 4 发车间隔及驻站时间控制策略

Fig. 4 Control strategy for departure interval and dwell time

表 6 结果对比表

Tab. 6 Results comparison table

调度策略	发车间隔 (线路 1, 线路 2)	乘客平均行程时间/ min
常规	(6, 9)	24.43
驻站时间控制	(6, 9)	21.26
常规	(5, 8)	23.95

## 4 结束语

本文建立了多线路公交协调调度模型, 并设计了一种优化算法, 对公交车辆在换乘站点的驻站时

间进行控制。在多线路公交协调调度优化模型中, 在已知乘客 OD 的条件下, 对发车间隔以及车辆在换乘站点的驻站时间进行优化。最终通过算例验证了模型与优化算法的有效性。通过分析, 可以得出以下结论:

(1) 本文所提出的多线路公交协调调度策略较常规策略可以减少乘客平均行程时间, 提高公交服务水平。

(2) 通过对发车间隔以及公交车辆在换乘站点的驻站时间进行优化, 可以使得多线路乘客实现相互换乘, 提高公交换乘效率。

## 参考文献

- [1] IBARRA-ROJAS O J, RIOS-SOLIS Y A. Synchronization of bus timetabling [J]. Transportation Research Part B, 2012, 46 (5): 599-614.
- [2] WU Yinghui, YANG Hai, TANG Jiafu, et al. Multi-objective re-synchronizing of bus timetable: Model, complexity and solution [J]. Transportation Research Part C, 2016, 67: 149-168.
- [3] RENZO M, SERGIO N, JONATHAN M, et al. Learning to optimize timetables for efficient transfers in public transportation systems [J]. Applied Soft Computing Journal, 2022, 119: 119.
- [4] ANSARILARI Z, NESHELI M M, BODUR M, et al. Transfer time optimisation in public transit networks: assessment of alternative models [J]. Transportmetrica A: Transport Science, 2023, 19 (3): 2056655.
- [5] 邹迎, 李建国, 杨忠伟. 北京公交区域运营组织与调度系统初探 [J]. 城市公共交通, 2003 (3): 15-18.
- [6] 石琴, 覃运梅, 黄志鹏. 公交区域调度的最大同步换乘模型 [J]. 中国公路学报, 2007 (6): 90-94.
- [7] 黄义. 考虑站点重要度的区域公交发车时刻表模型研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- [8] 杨信丰, 李引珍, 何瑞春. 多目标公交同步换乘协同调度优化及决策 [J]. 系统工程, 2016, 34 (3): 111-116.
- [9] 洪豆. 考虑公交线路重复路段的车辆配置协同优化研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.
- [10] 高姝敏. 考虑多线路间换乘选择的常规公交时刻表协调优化研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- [11] 赵靖, 葛庆红, 韩印. 考虑需求起讫点及需求等级的响应型社区公交行车调度优化 [J]. 公路交通科技, 2020, 37 (6): 128-137.
- [12] 韩印, 唐煜, 赵靖, 等. 快速公交多模式调度与沿线信号控制协同优化 [J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19 (9): 2574-2582.
- [13] 赵靖, 徐竞琪, 严佳超, 等. 考虑行程时间波动的干线信号协调控制鲁棒优化模型 [J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20 (4): 1261-1269.