

# 多模式公交组合调度优化模型

明洁 张贵军 刘玉栋

(浙江工业大学信息工程学院 杭州 310023)

**摘要** 针对站点不同时刻的客流需求,系统地探讨了乘客出行时间和公交公司运营管理的有机联系,研究了全程车、区间车和大站快车3种发车模式组合及发车间隔。以系统总时间成本最优为目标,在相同决策间隔下选择不同决策模式,建立了发车频率不定的公交组合调度模型。同时,针对调度模型组合优化的NP难特点,利用差分进化优化算法对模型求解。结果表明,在决策间隔为4min的情况下,首站发车间隔有4min、8min、12min 3种可能;考虑到区间车和大站快车超车的情况,各站点乘客的候车时间为0.8min~12min不等。与原先分时段单一调度相比,多模式公交组合调度能减少公交车发车次数,有效降低系统时间成本。

**关键词** 组合调度,发车间隔,超车,差分进化算法,多模式公交

**中图分类号** TP301 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.9.051

## Combinatorial Optimization Model of Multi-modal Transit Scheduling

MING Jie ZHANG Gui-jun LIU Yu-dong

(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

**Abstract** To satisfy the traffic demand on each station at different time, the connection between passenger travelling time and the operation management of bus company was systematically probed, meanwhile, the combination of three different departure modals—normal bus, zone bus and express bus—and the departure interval were also deeply investigated. Aiming at optimal time cost, a combined model of bus scheduling was established based on the principle of selecting different decision-making models over the same decision interval. Due to the typical NP-hard problem in bus scheduling, differential evolution algorithm was used to solve the model. The results of the experiment indicate that with a 4min decision-making interval, there are three possible departure interval at the origin station—4min, 8min, 12min. Taking the overtaking of zone bus and express bus into account, the waiting time at different stations is 0.8min to 12min. Compared to the traditional bus modulation, the multi-modal bus combination leads to less departure and thus the whole system time cost is lower.

**Keywords** Mixed scheduling, Headway, Overtake, Differential evolution algorithm, Multi-modal transit

## 1 引言

目前广泛采用的常规公交调度<sup>[1]</sup>形式单一,只通过改变发车频率来解决线路上的客流拥挤问题。对于客流分布不均匀的线路站点,如线路中有一部分站点乘客较多而另一部分路段站点乘客较少,采用这种调度方法的效果较差,不能保证大客流路段的服务水平,也不能避免小客流路段上运能的浪费。因此,有必要根据线路客流在时空上的不均衡性合理配置运力<sup>[2]</sup>,通过发车频率的改变和车辆形式的组合调度,满足不同站点的客流需求。

常规公交调度主要确定公交的发车频率或者发车间隔<sup>[3]</sup>问题,也有一些关于公交换乘<sup>[4]</sup>的研究。采用全程车、区间车和大站快车等多种组合调度形式是当前公交调度<sup>[5]</sup>的一个研究热点和难点。Scheele<sup>[6]</sup>针对给定公交线路上的乘客出行短

阵,提出最小乘客出行时间费用的公交线路发车频率优化模型,利用迭代算法求解该模型,结果表明乘客出行对公交运营有重要意义;Furth<sup>[7]</sup>构建了关于空车发出及中途载客等放车调度策略的区间车调度优化模型;Ceder<sup>[8]</sup>对采用大站快车或区间车策略下的公交调度模型进行了研究,通过对短的回程线路进行优化设计得到公共运输车辆减少的时间表;为满足规定的公交时间表,Vijayaraghavan<sup>[9]</sup>探讨了基于大站快车和区间车调度策略下的车辆分配、组织和调度问题;Eberlein<sup>[10]</sup>根据线路双向客流的不均衡性,对公交运营控制中的越站问题进行了研究;Sun等<sup>[11]</sup>提出以乘客乘车费用和车辆运营费用最小为目标的快速公交发车间隔优化模型;Codina等<sup>[12]</sup>充分考虑了站点候车乘客的最大数量和巴士站的排队可用空间,建立了衔接地铁和快速公交线路的模型,实例证实该模型能有效辅助公交服务;林培群等人<sup>[13]</sup>针对快速公交车

到稿日期:2014-09-14 返修日期:2015-02-02 本文受国家自然科学基金(61075062,61379020),浙江省自然科学基金(LY13F030008),浙江省科技厅公益项目(2014C33088),浙江省重中之重学科开放基金(20120811),杭州市产学研合作资助项目(20131631E31)资助。

明洁(1990-),女,硕士生,主要研究方向为智能公交优化调度;张贵军(1974-),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为智能交通系统和优化调度、智能信息处理、生物信息学,E-mail:zgj@zjut.edu.cn(通信作者);刘玉栋(1989-),男,硕士生,主要研究方向为智能优化调度。

站排队问题,提出了车站组的线路停靠组合优化模型。然而,大部分文献都是以一个统计时间段(如1小时)作为模型的基本对象,得出该时间段内的均匀发车间隔。显然,这忽略了整个时间段内的数据变化。公交车的发车间隔和发车模式是组合公交调度模型的核心问题,直接决定着公共系统的服务质量以及公交运营公司的收益。在合适的时间间隔发合适的车,在满足乘客出行需求的前提下,尽可能提高公交公司的收益,具有极大的社会和经济意义。

针对一天中不同时刻不同站点的乘客量,文中以单条公交线路为研究对象,建立以社会总体效益最优(综合乘客耗时间成本及公交企业运营时间成本最小)为目标,对发车模式(全程车、区间车和大站快车)组合优化的调度模型。组合调度问题是一个典型的 NP-Hard 优化问题<sup>[14]</sup>,求解难度较大。为求其有效近似结果,结合实例采用差分进化算法对模型进行求解,与初始的单一调度进行了对比,分析了发车次数和时间成本的差异,验证了模型的有效性和优越性。

## 2 多模式公交车辆运行模式

公交车辆运行模式主要有全程车、区间车和大站快车3种,如图1所示。常规公交采用的基本调度形式多为全程车,即车辆从线路起点发车直到终点站为止,沿线按固定车站停靠,并驶完全程。大站快车和区间车为长距离出行和重点区域内的乘客出行服务。区间车是仅在线路上客流量高的路段或区段的车站停靠的一种调度形式。大站快车是仅在沿线乘客集散量较大的公交站停靠的调度形式。

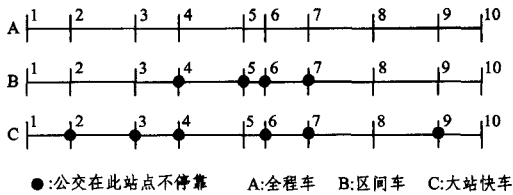


图1 公交停靠模式

车站停车是公交线路运行时间的重要构成,若提供的运载能力能很好地适应乘客流量,将3种公交车辆运行模式组合,则不同出行目的的乘客能得到分类服务,降低相互影响,减少出行中的停留时间,缩短总出行时间;对于运营企业,停站次数减少,运营速度提高,车辆周转时间缩短,能有效降低系统运营成本。

## 3 多模式公交组合调度模型

### 3.1 基本假设

本文将研究一天内公交车辆的不同发车间隔和发车的模式组合(全程车、区间车和大站快车),即间隔多久发一班什么模式的车辆能使得总时间成本费用最低。为了更好地进行研究,在此对实际问题作出相关假设:

- (1) 全程车、区间车和大站快车拥有相同的车型,站与站之间的运行时间相同;
- (2) 乘客到达率服从均匀分布<sup>[15]</sup>;
- (3) 车辆在站点等待上下客的时间确定;
- (4) 车辆容量不受限制。

### 3.2 建立模型

公交运营公司每隔一段时间间隔  $h$  对首站发车情况作出决策  $l$ ; 不发车、全程车、区间车和大站快车。设起始时刻为 0, 首站第  $i$  次决策车辆  $\delta_i^l$  离开  $j$  站的时刻为  $a_{initial, i, j}$ 。由于决策车辆的模式不同, 首站第  $i$  次决策车辆在离开  $j$  站时车辆次序会存在差异, 根据离站时间, 对离开  $j$  站的车辆进行排序  $new(i), j$ , 则离开  $j$  站的第  $i$  辆车与上一辆离开车辆的时间间隔为  $h_{i, j}$ , 在此等待去往  $k$  站的乘客人数为  $W_{i, jk}$ , 车辆离开后继续等车人数为  $S_{i, j}$ 。以综合成本  $Z$  为目标函数, 考虑乘客的等车时间成本  $C_1$ 、在车时间成本  $C_2$  和公交公司的运营时间成本  $C_3$ , 发车间隔不定的组合公交调度模型如式(1)所示。

$$\min Z = \min(C_1 + C_2 + C_3) \quad (1)$$

#### 3.2.1 乘客出行时间成本

乘客出行时间成本即乘客从出发地到目的地所耗费的时间成本, 主要考虑乘客等车时间和在车时间。乘客的等车时间成本  $C_1$  主要由两部分组成: 车辆到站的时间间隔内新到达的乘客等待的时间成本和未被上一辆车载走的乘客继续等待的时间成本, 即

$$C_1 = \alpha \sum_i \sum_j \sum_{k=j+1}^N [q_{i, jk} h_{i, j} \cdot (h_{i, j} / 2) + S_{i-1, jk} \cdot h_{i, j}] \quad (2)$$

假设乘客到达率服从均匀分布, 则乘客的等待时间为发车间隔的一半<sup>[15]</sup>。经过  $j$  站的第  $i-1$  辆车离开后新到达的乘客数为  $q_{i, jk} \cdot h_{i, j}$ , 乘以平均等待时间  $h_{i, j} / 2$ , 即为新到达乘客的等待时间成本  $(q_{i, jk} \cdot h_{i, j}) \cdot (h_{i, j} / 2)$ 。当部分乘客去往特定站点, 区间车或大站快车无法满足需求时, 乘客需继续等待, 产生的等待时间成本为  $S_{i-1, jk} h_{i, j}$ , 即经过  $j$  站的第  $i-1$  辆车(非全程车)离开后仍需等待的去往  $k$  站的乘客量乘以等待到达  $j$  站的第  $i$  辆车的时间。

乘客的在车时间成本  $C_2$  主要考虑车上乘客的站间运行时间和站点停靠时间。经过  $j$  站的第  $i$  辆车到达后, 在站点等待的去往  $k$  站的乘客数为  $W_{i, jk}$ , 他们从  $m-1$  站到  $m$  站耗费的时间为  $T_m$ , 在  $m$  站等待乘客上下车所耽误的时间为  $\delta_{i, jm}^l T_w$ 。则

$$C_2 = \beta \sum_i \sum_j \sum_{k=j+1}^N [W_{i, jk} \cdot \sum_{m=j+1}^k (T_m + \delta_{i, jm}^l T_w)] \quad (3)$$

#### 3.2.2 车辆运营时间成本

车辆运营时间成本  $C_3$  主要考虑车辆的运行时间和在站点停靠等待的时间。当首站第  $i$  次决策车辆调度模式为不发车( $\delta_i = 0$ )时, 不会产生车辆运营时间成本; 调度模式为全程车、区间车或大站快车( $\delta_i = 1$ )时, 车辆运营时间成本主要由车辆在各个车站之间的运行时间和在站点等待乘客上下车的时间决定, 即

$$C_3 = \gamma \sum_i \sum_j \delta_i (T_j + \delta_{i, j}^l T_w) \quad (4)$$

#### 3.3 模型参数关系说明

$a_{i, j}$  是首站的第  $i$  次决策车辆离开  $j$  站的时刻。设定公交公司首次发车时刻为 0, 当决策调度车辆为发车时, 到达各站点的时刻为首站的发车时刻加上站点间的运行时间以及站点停靠时间; 当决策调度车辆为不发车时, 假想为一辆不载客的全程车驶过线路各站点。如图2所示, 放大区域为首站各次决策车辆离开第7站点的时刻。

$$a_{i,j} = (i-1)h + \delta'_i \sum_{k=2}^j (T_k + \delta'_{i,k} T_w) + |\delta'_i - 1| \sum_{k=2}^j (T_k + T_w) \quad (5)$$

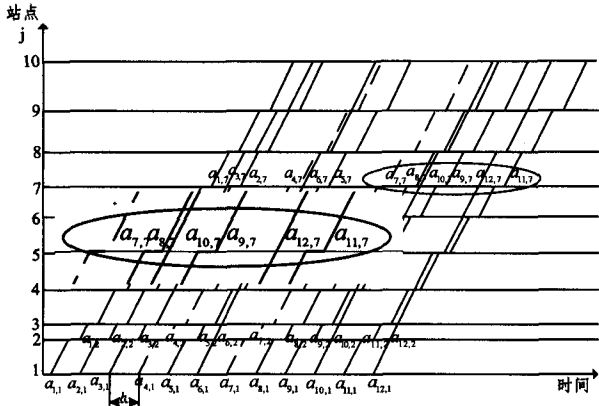


图2 首站*i*次决策车辆离开站点的时刻

$h_{i,j}$ 是经过*j*站的第*i*辆车与上一辆车到达此站的时间间隔,如图3所示。区间车和大站快车在部分站点不停靠,首站第*i*次的决策车辆在经过*j*站时可能被第*i*+1次决策的非全程车超越,成为到达*j*站的第*i*+1辆车。依据车辆离开*j*站的时间,对车辆的离开次序进行重排  $new(i), j$ ,如图3中站点7的离开时间  $a_{new(i),7}$ 所示,所选区域与图2一致。由于时间间隔计算中以离开站点时刻为顺序,图3中对离开站点的次序重排。则:

$$h_{i,j} = a_{new(i),j} - a_{new(i-1),j} \quad (6)$$

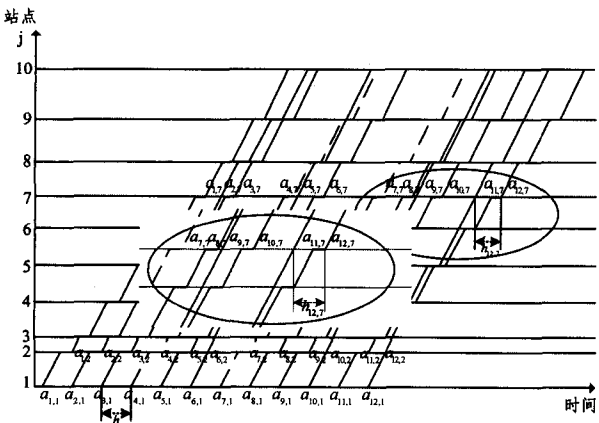


图3 不同站点车次的时间间隔

$S_{i,j,k}$ 为经过*j*站的第*i*辆车离开后,站台上去往*k*站的乘客量。它由到达此站点的第*i*-1辆车留下的乘客数量和等待第*i*次车辆到达*j*站的时间间隔内新到达的乘客量决定,即

$$S_{i,j,k} = S_{i-1,j,k} \cdot (1 - \delta'_{i,j,k}) + q_{i,j,k} \cdot h_{i,j} \cdot (1 - \delta'_{i,j,k}) \quad (7)$$

第*i*次决策车辆离开*j*站时,需继续等待的乘客量  $S_{i,j}$ 由  $S_{i,j,k}$  叠加得到,即

$$S_{i,j} = \sum_{k=j+1}^N S_{i,j,k} \quad (8)$$

其边界值  $S_{0,j} = 0, S_{0,j,k} = 0$ 。

$W_{i,j,k}$ 为经过*j*站的第*i*辆车到达时,*j*站去往*k*站的乘客量。其值为第*i*-1次决策车辆离车站*j*时剩余到*k*站下车的乘客数量加上在等待本辆车到达时间内到达的乘客数,即

$$W_{i,j,k} = S_{i-1,j,k} + q_{i,j,k} \cdot h_{i,j} \quad (9)$$

各主要参数的关系如图4所示。

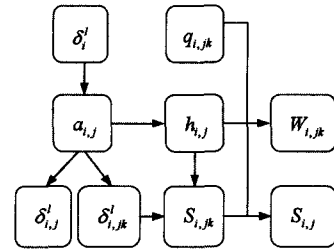


图4 参数关系示意图

## 4 组合调度优化算法设计

本文所建立的公交调度模型是在相同决策间隔下确定是否发车和发什么模式的的车,调度模式*l*涉及不发车、全程车、区间车和大站快车4种。复杂度为  $4^\lambda$ ,  $\lambda$ 是一天的决策次数,与公交车辆的运营时段和决策间隔有关。考虑到公交车调度问题的 NP-Hard 特性:变量维数高、约束条件复杂,其解空间的范围非常大,很难用传统的遗传算法<sup>[16]</sup>来解决。

根据公交车调度问题的特点,本文采用差分进化算法(DE)<sup>[17,18]</sup>对调度模型进行求解。从本质上说,差分进化算法是一种基于实数编码的、具有择优思想的贪婪遗传算法。相较于遗传算法的选择操作,差分进化算法采用一对一的淘汰机制更新种群,在变异操作方面使用差分策略实现个体变异。DE的变异方式能有效利用群体分布特性,提高算法的搜索能力,克服遗传算法中变异方式的不足。

### 4.1 个体编码及初始种群

针对工作日内的决策情况,本文采用自然数编码方法,用矢量  $(\delta'_1, \delta'_2, \dots, \delta'_i)$  表示一个个体,其中元素(基因)  $\delta'_i$  为  $[0, 3]$  之间的一个自然数。随机初始化种群  $P = [x_1, x_2, \dots, x_{N_p}]$ ,  $N_p$  为种群规模,  $x_i$  表示一天的决策车辆调度情况,  $x_i = (\delta'_1, \delta'_2, \dots, \delta'_i)$ 。

### 4.2 变异操作

子代染色体通过父代染色体的基因值差分计算产生。对第*g*代的每一个目标个体  $x_i^g$  进行变异操作,得到与其对应的变异个体  $v_i^g$ ,即

$$v_i^g = x_i^g + F(x_i^g - x_i^g) \quad (10)$$

其中,  $a, b, c \in \{1, 2, \dots, N_p\}$  为随机生成的互不相同且与*i*不同的整数;  $x_i^g$  为父代基向量,  $(x_i^g - x_i^g)$  为父代差分向量;  $F$  为增益常数,通常取 0.5。在决策车辆调度模式中,生成的染色体必须是  $[0, 3]$  之间的整数,为此需进行整数规范化:区间范围内的基因值为向下取整,范围外的基因值为原父代基因值。

### 4.3 交叉操作

为了增加群体的多样性,对群体中目标矢量个体  $x_i^g$  与变异个体  $v_i^{g+1}$  进行交叉操作,生成测试个体  $u_i^{g+1}$ ,即

$$u_{i,j}^{g+1} = \begin{cases} v_{i,j}^{g+1}, & \text{if } (\text{rand}(j) \leq CR \text{ or } j = \text{rnbr}(i)) \\ x_{i,j}^g, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

其中,  $\text{rand}(j)$  为  $[0, 1]$  之间的均匀分布随机数;  $CR$  为  $[0, 1]$  之间的交叉概率;  $\text{rnbr}(i)$  为  $\{1, 2, \dots, D\}$  之间的随机量。

### 4.4 选择操作

DE采用“贪婪”的搜索策略,经过变异交叉操作后生成

的测试个体  $u_i^{g+1}$  与目标个体  $x_i^g$  进行竞争。对于车辆调度成本的最小化问题,选择目标函数值小的个体作为新种群的个体,即

$$x_i^{g+1} = \begin{cases} u_i^{g+1}, & \text{if } (f(u_i^{g+1}) < f(x_i^g)) \\ x_i^g, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

其中,  $f$  为目标函数,即总时间成本  $Z$ 。

## 5 算例分析

### 5.1 公交物理网络

选择杭州市公共交通总公司开行在黄龙公交中心站—里山桥的公交线路为例进行模型和算法的分析。针对线路的下行方向,共有 27 个途经站点。公交公司的营运时间为每天的 6:00—19:00,发车模式为全程车,发车间隔高峰期为 5~9min、平峰期为 10~15min。乘客在等车和乘车阶段,耗费的时间与单一的全程车模式消耗的时间正相关。根据实地调查,虽然发车间隔有平、高峰的区别,但由于全程车模式的停靠站点较多,因此车辆运营时间较长。部分大站点客流量大,运

送压力较大。

### 5.2 参数选择

研究时段为正常工作日的白天段 6:00—19:00,车站总数  $N=27$ ,决策间隔  $h$  取为 4min,一天的决策次数  $i=1+((19-6)\times 60)/4=196$ 。根据居民可支配收入的情况及居民工作时间,确定乘客在站点等车的单位时间成本  $\alpha$  为 0.16 元/min,在公交车上的单位时间成本  $\beta$  为 0.02 元/min;根据公交公司调研结果,取车辆的单位运营时间成本  $\gamma$  为 6.5 元/min。根据杭州公交的运营情况,取车辆在车站的停靠时间  $T_w$  为 1.2min。

实地调查不同站点在一天内的不同时刻对应的客流量,里山桥( $j=1$ )、石马( $j=5$ )、浙江科技学院( $j=9$ )、水口( $j=12$ )、留下北( $j=16$ )、汽车西站( $j=21$ )的客流明显高于其他相邻站点,可安排大站快车在这些站点停靠;从屏峰( $j=13$ )到天目山路花坞路口( $j=20$ )这一路段站的点客流相对较少,可安排区间车不在这些站点停靠。由此确定的车站停靠方式及邻近站点间的运行时间如表 1 所列(注:“1”代表本站停车,“0”代表本站不停)。

表 1 不同发车模式下车站停靠形式及车辆运行情况

站点编号 $j$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
全程车 $l=1$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
区间车 $l=2$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
大站快车 $l=3$	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
站间行驶时间 $T_j$	0	3.3	3.2	3.1	2.6	1.5	2.1	3.2	2.1	2.4	2.1	2.2	2.2	2.1	3	3.5	3.2	2.6	2.6	2.6	3.2	4.1	4.5	3.2	3.6	3.4	4.0

### 5.3 结果分析

组合公交调度模型主要考虑了车辆运行和等车乘客的时间成本,求解的重点在于公交的发车模式和发车间隔。本文主要利用标准差分进化算法对模型进行求解,始发站的决策间隔为 4min,调度模式  $l$  有 4 种选择:不发车(0)、发全程车(1)、发区间车(2)、发大站快车(3)。一个工作日(6:00—19:00)的组合公交调度运营情况如图 5 所示。

在行驶速度理想化一致的情况下,由于区间车和大站快车在部分站点不停靠,车辆会出现超车现象。如图中站点 8

(冲天庙)至 17(周家村)放大处所示,大站快车(即模式 3)在第 9 站时比前一车辆(模式 1)先离开,在站点 16(留下北)时已变成第二辆到达此站点的车辆。公交公司在首站的决策间隔为 4min,决策模式为 0 时不发车,所以发车间隔是不定的。根据各时刻站点乘客流的不同,全程车、区间车、大站快车不等间隔运行。如图 5 运营时间的放大区域 13:00 至 15:00,最小发车间隔为 4min,最大发车间隔为 12min,全程车、区间车和大站快车 3 种模式的公交车辆组合发车。

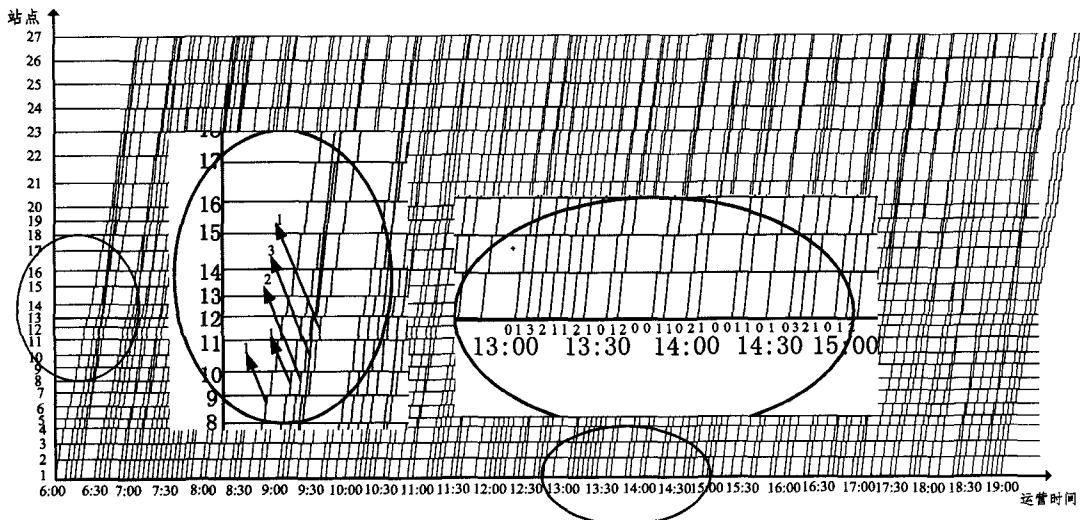


图 5 组合公交优化运营情况

原先单一的全程车转为 3 种模式车辆混合发车,减少了部分站点不必要的等待时间,如表 2 中的单程时长所列。区

间车和大站快车比全程车更快驶完全程,不同站点乘客等待时间也会不同,最小的时间差为 0.4min,两辆车近乎同时到

达;最大等车时间为最大发车间隔 12min。

表 2 优化调度前后的相关指标

指标	优化前		优化后	
	全程车	全程车	区间车	大站快车
单程时长(min)	76	76	66.4	52
发车次数	136	84	29	20
发车间隔(min)	高峰期 5~9 平峰期 10~15	按客流需求产生,4/8/12		
乘客等待 时间(min)	高峰期 5~9 平峰期 10~15	0.4/0.8/1.2/1.6/.../3.6/4/.../12		
总时间成本(元)	129786		119229	

与图 5 对应的组合公交调度模式产生的总费用为 119229 元,一天的总发车次数为 133。原先单一的全程车调度模式产生的时间成本费用为 129786 元,一天的总发车次数是 136。与单一调度相比,组合调度能有效减少乘客出行时间和系统成本,降低车辆拥挤程度,提高服务水平。

**结束语** 本文以公共交通服务为宗旨,研究了发车间隔不定的组合公交调度方法。首先通过站点客流数据建立了乘客时间成本模型,同时从运行时间角度出发,建立了公交公司的运营成本模型。充分考虑了不同模式车辆超车的问题,对到达站点的车辆次序进行重排。利用差分进化算法求解模型,对比调度前后的单线路运行时长、车辆运行次数、发车间隔以及总时间成本指标,由此说明发车间隔不定的公交组合调度模型的优越性。但公交实际出行情况复杂,乘客的出行规律有待进一步研究。

### 参 考 文 献

[1] Ceder A, Israeli Y. User and operator perspectives in transit network design[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1998, 1623(1): 3-7

[2] Ceder A, Hassold S, Dano B. Approaching even-load and even-headway transit timetables using different bus sizes[J]. Public Transport, 2013, 5(3): 193-217

[3] 李章维,郭冰冰,明洁,等. 基于居民出行行为分析的公交线路调度研究[J]. 计算机科学, 2014, 41(6A): 94-97  
Li Zhang-wei, Guo Bing-bing, Ming Jie, et al. Bus Line Scheduling Research Based on Residents' Travel Behavior Analysis [J]. Computer Science, 2014, 41(6A): 94-97

[4] 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, 20(6): 90-94  
Shi Qin, Qin Yun-mei, Huang Zhi-peng. Maximal synchronous transfer model of bus regional dispatching[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(6): 90-94

[5] Guihaire V, Hao J K. Transit network design and scheduling: A global review[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2008, 42(10): 1251-1273

[6] Schéele S. A supply model for public transit services[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 1980, 14(1): 133-146

[7] Furth P G, Day F B. Transit Routing and Scheduling Strategies for Heavy-Demand Corridors(Abridgment)[M]// Advances in Bus Service Planning Practices. 1985: 23-26

[8] Ceder A. Designing Transit Short-Turn Trips with the Elimination of Imbalanced Loads[M]// Computer-Aided Transit Scheduling. Springer Berlin Heidelberg, 1988: 288-303

[9] Vijayaraghavan T A S, Anantharamaiah K M. Fleet assignment strategies in urban transportation using express and partial services[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 1995, 29(2): 157-171

[10] Eberlein X J, Wilson N H M, Bernstein D. Modeling real-time control strategies in public transit operations[M]// Computer-aided Transit Scheduling. Springer Berlin Heidelberg, 1999: 325-346

[11] Sun C, Zhou W, Wang Y. Scheduling combination and headway optimization of bus rapid transit[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2008, 8(5): 61-67

[12] Codina E, Marin A, López F. A model for setting services on auxiliary bus lines under congestion[J]. Top, 2013, 21(1): 48-83

[13] 林培群,徐建闽. BRT 车站组的线路停靠组合优化模型[J]. 中国公路学报, 2011, 24(3): 93-98  
Lin Pei-qun, Xu Jian-min. Combinatorial optimization model of bus stop in BRT station-group[J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(3): 93-98

[14] Sun Chuan-jiao, Zhou Wei, Wang Yuan-qing. Scheduling Combination and Headway Optimization of Bus Rapid Transit[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2008, 8(5): 61-67

[15] 裴玉龙,申翔浩,周侃. 高铁乘客换乘常规公交平均等候时间模型[J]. 交通运输工程学报, 2013, 13(6): 76-82  
Pei Yu-long, Shen Xiang-hao, Zhou Kan. Average waiting time model for passengers transferring from high-speed railway to bus [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2013, 13(6): 76-82

[16] Omar J, Yasmin A. Synchronization of bus timetabling [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2012, 46(5): 599-614

[17] Storn R, Price K. Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces [J]. Journal of Global Optimization, 1997, 11(4): 341-359

[18] Das S, Suganthan P N. Differential evolution: A survey of the state-of-the-art[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2011, 15(1): 4-31

(上接第 252 页)

[14] Ganganwar V. An overview of classification algorithms for imbalanced datasets[J]. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 2012, 2(4): 42-47

[15] Gao S. An ensemble classifier learning approach to ROC optimi-

zation; Pattern Recognition[C]// 18th International Conference on ICPR. 2006: 679-682

[16] Hand D J, Till R J. A simple generalization of the area under the ROC curve for multiple[J]. Machine Learning, 2001, 45(2): 172-186