

# 基于居民出行行为分析的公交线路调度研究

李章维 郭冰冰 明洁 张贵军  
(浙江工业大学信息工程学院 杭州 310023)

**摘要** 针对居民出行高峰时段的交通拥堵问题,建立了以居民的出行行为分析为基础的公交线路调度模型。该模型运用生存分析理论对居民出行时间的影响因素进行分析,科学划分城市居民出行时段区间,进而针对该地区高峰时段的公交发车间隔构造非线性规划模型函数。模型函数综合考虑乘客时间成本和公交公司运营成本,加入权重系数并利用粒子群算法求解,从而得到最佳发车间隔时间。结合杭州某地区市民出行数据,通过实证研究得出优化后的调度时刻表,验证了模型的可行性和有效性。

**关键词** 出行行为,生存分析理论,公交线路调度,发车间隔,粒子群算法

中图分类号 TP301 文献标识码 A

## Bus Line Scheduling Research Based on Residents' Travel Behavior Analysis

LI Zhang-wei GUO Bing-bing MING Jie ZHANG Gui-jun

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

**Abstract** On a city bus for residents travel peak pressure, we established the bus line scheduling model which is mainly based on residents' travel behavior analysis. The model uses survival analysis theory to analyze the influence factors of residents travel time, find out the urban residents travel time interval science tumble, and construct nonlinear programming model function on bus headway of the peak time in the region. Model function includes the time cost of passengers and the bus company operating costs, introduces weighting factor, and uses particle swarm algorithm to get the best grid interval. On the basis of Hangzhou citizens travel data in a given area, the article derived optimized scheduling schedule from empirical studies, verified the feasibility and validity of the model.

**Keywords** Travel behavior, Survival analysis theory, Bus dispatching, Departure interval, Particle swarm optimization

## 1 引言

随着我国经济的快速发展、城市规模的不断扩大,机动车数量迅速增长,人们的出行需求也以前所未有的速度增长着,但日益突出的交通供求矛盾制约着城市的发展。公共交通承担着解决城市交通拥挤问题的重任,在大力发展我国公共交通的过程中,以居民的出行行为为基础,坚持了以人为本的理念,改善公交运营,缓解交通压力。

Gunina Carlsson<sup>[1]</sup>对出行链的影响因素进行了研究,证实了不同的出行个体在公交出行链中选择的结构是有显著差异性的。Bhat<sup>[2]</sup>等通过对离散和持续时间的出行时间进行研究,发现通勤出行者对于活动发生时间和活动持续时间之间的联系并不是很密切,在需求预测中需要对两个变量分别进行建模研究分析。李志纯<sup>[3]</sup>等人研究了弹性需求下的组合出行行为,利用网路均衡和超级网路方法,提出了与均衡条件等价的变分不等式模型,该模型可描述人们的组合出行行为,有助于合理规划与布局停车换乘设施以及协调发展多种交通方式。王怡璇<sup>[4]</sup>运用随机效用理论建立了假日小汽车出行行为

的非集计模型,运用 SPSS 软件对模型进行标定,得出对假日小汽车出行行为的影响因素。随着人们的出行频率越来越高,对交通的需求越来越迫切,对公交车辆发车时刻的公交调度研究也越来越多。Furth<sup>[5]</sup>等提出了利用数学规划的方法来确定公交的发车频率和行车时间表。Leandro Margulis<sup>[6]</sup>等对飓风疏散决策支持的公交调度模型进行了研究,该模型具有可扩展和灵活的确定性疏散决策支持。曹丽雅<sup>[7]</sup>从公交乘客利益和公交企业利益角度出发,建立了以客流需求为基础数据,以乘客候车满意度、车上舒适度和企业满意度为目标的公交调度多目标优化模型,采用幂加权法将多目标问题转化为单目标问题,并用改进遗传算法对问题进行求解。

借鉴各学者在居民出行行为和公交调度方面的研究成果以及针对现有成果存在的不足,本文对居民的出行行为进行分析,得出居民的出行时间规律及各影响因素对出行时间的影响,以时间费用最小化为目标建立公交调度模型。该模型可以有效地指导交通管理,合理进行公交线路调度,在一定程度上缓解交通拥堵的问题。

本文受国家自然科学基金(61075062),浙江省自然科学基金(LY13F030008, Y1100891),国家大学生创新计划项目(201210337033),杭州市产学研合作项目(20131631E31),浙江工业大学重中之重学科开放基金(20120811)资助。

李章维(1967—),男,博士,副教授,主要研究方向为智能公交系统和优化调度;张贵军(1974—),男,博士,教授,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)。

## 2 居民的出行行为和出行时间

城市居民的出行行为研究内容一般包括出行目的、出行距离、出行方式、出发时间等。其中居民的出行时间客观上反映了城市居民的生活节奏和交通需求在时间上的分布。居民的个体特征、出行特征和出行方式特征是影响居民出行时间段的重要因素。运用生存分析理论分析居民出行时间的规律,定量地分析影响居民出行时间的相关因素,建立该区域的居民出行行为模型,并对模型进行求解,进而指导该地区的公交优化调度。

### 2.1 居民的出行时间分析

生存函数<sup>[8]</sup>是对事件生存时间分布进行描述的函数,本文利用 Kaplan-Meier 方法对时间的累积生存率进行分析。累积生存率为一阶梯状函数,在开始时,其值为 1,随研究的进行呈阶梯状下降,每一阶梯的下降代表事件的发生,直到最后一个事件发生时,其值为 0。阶梯高度是对应时刻累积生存概率的估计,它实际是对应时刻的生存概率与此前所有时刻生存概率的连乘积。

令  $i$  表示事件发生的顺序,  $t_i$  表示事件发生的时刻,  $d_i$  表示在时刻  $t_i$  事件发生的个数,  $n_i$  表示在时刻  $t_i$  之前事件未发生的个数,则 Kaplan-Meier 生存函数的估计方法表示为:

$$S(t) = \left(1 - \frac{d_1}{n_1}\right) \times \left(1 - \frac{d_2}{n_2}\right) \times \cdots \times \left(1 - \frac{d_i}{n_i}\right) = \prod_{t_i < t} \left(1 - \frac{d_i}{n_i}\right) \quad (1)$$

### 2.2 公交车乘客出行时间的影响因素分析

利用公交数据将居民的个体特征和出行特征与居民出发时间相关联,分析居民出行的出发时间分布,探究不同时间居民出行的差异性。同时,在分析居民出行时间时,根据出行者个体属性、家庭属性等的不同,选取了性别、年龄、职业、出行距离、出行目的属性,其具体取值情况如表 1 所列。

表 1 出行时间的影响因素分析表

影响因素类别	影响因素名称	备注
个体特征	性别	1:女,0:男
	年龄	1:18 岁以下; 0:18 岁以上(含 18 岁)
	职业	1:有,0:无
出行特征	出行距离	1:3km 以下(近距离); 0:3km 以上(远距离)
	出行目的	1:生活性出行(娱乐、购物); 0:义务性出行(工作、上学);

## 3 基于出行时段划分的公交线路调度

通过对居民出行分析,我们可以从居民出行时间规律确定公交需求高峰时间段。对于出行个体有无职业、出行距离和出行目的,也是公交调度中需要考虑的重要因素。结合居民出行的比例风险模型结果,对出行客流进行时段划分,以乘客的等车时间最小化和车辆的载客率最大化为目标,建立公交调度模型。最终对高峰段的公交发车时间进行调整,从而在一定程度上改善交通拥堵状况。

### 3.1 公交线路客流特征

考虑分析问题常常是由繁到简,在此对实际问题进行简化,建立相关假设:(1)所有公交车按正常时间准时到站和出站,无超车或越车,不考虑道路突发情况的影响。(2)在同一时间段内的发车间隔相同。(3)所有在车站候车的乘客在班

车到达时均能上车,即车容量足够大。

居民选择乘坐公交出行时,出行站数主要集中在某个范围,当乘坐到一定站数时,在该站下车的概率最大,而当相对于上车站点的距离过长或过短时,其下车的概率相对较小。这种概率一般应服从一定的分布规律,这里设定公交乘客的到达服从泊松分布,即乘客的到达是一个泊松过程。

设公交线路共有  $n$  站,用  $a_{ij}$  表示在一定发车间隔  $t$  内从  $i$  站点到  $j$  站点的乘客人数。由客流 OD 矩阵可得:

$$\text{第 } k \text{ 站的上车人数: } U_k = \sum_{j=k+1}^n a_{kj};$$

$$\text{第 } k \text{ 站的下车人数: } D_k = \sum_{i=1}^{k-1} a_{ik};$$

$$\text{第 } k \text{ 站公交离开时车内人数: } B_k = \sum_{k=0}^n (U_k - D_k)。$$

$a_{ij}$  是一个服从泊松分布的随机变量,且  $a_{ij}$  之间相互独立。泊松分布具有的一个重要性质是:两个相互独立的服从泊松分布的随机变量之和仍服从泊松分布,其参数为这两个随机变量参数之和。因此,  $U_k, D_k, B_k$  均是服从泊松分布的随机变量,设它们的参数分别是  $\lambda_u, \lambda_d, \lambda_b$ 。在实际交通调查分析时,通常没有从  $i$  站点到  $j$  站点的乘客人数  $a_{ij}$  的数据。数据大多用以确定时段内某站点的上车人数  $U_k$ 、下车人数  $D_k$ 、断面流量  $B_k$ 。所以,在具体计算时,根据泊松分布的性质采用矩法估计,即用一个时间段内站点的上车人数、下车人数、断面流量除以时间的长度得到  $\lambda_u, \lambda_d, \lambda_b$  估计值。

### 3.2 公交调度模型

发车间隔是一个比较复杂的过程,乘客肯定希望获得更快捷的服务,以减少其等车费用,但是公交企业则总是希望发车频率尽量大,以降低其可变运营费用。只有兼顾运营者和乘客双方的利益,才能使城市公交系统获得最大的社会效益。本文以乘客时间费用和公交企业的运营费用总和最小化为目标,同时引入相应权值系数,调节乘客和公交企业的不同比重,建立发车间隔模型的目标函数。

#### 3.2.1 常量、变量及符号说明

$n$ : 车辆编号 ( $n=1, 2, \dots$ );

$k$ : 站点编号 ( $k=1, 2, \dots$ );

$q_k$ : 到达  $k$  站点时的下车率;

$a_o$ : 公交运行费用转换系数 (元/min);

$\lambda_u^k$ : 单位时间内  $k$  站的上车人数 (人/min);

$B_k^n$ : 第  $n$  车离开  $k$  站时所载的乘客数;

$a_w, a_r$ : 乘客等车、乘车费用转换系数 (元/(人·min));

$a_k^n, d_k^n$ : 第  $n$  车到达、离开  $k$  站点的时间;

$\mu_1, \mu_2$ : 单位乘客上下车的时间 (min/人);

$t_{\min}, t_{\max}$ : 线路上最小、最大停车时间;

$T_{\min}, T_{\max}$ : 线路上最小、最大发车间隔。

#### 3.2.2 发车间隔模型

与运营调度相关的乘客时间费用  $C_p$  主要由乘客等车和乘车两部分费用构成。其中,等车时间费用  $C_p^w$  指乘客到达站点后等待公交车的时间费用,通常用乘客数与平均期望等车时间的乘积表示。

$$C_p^w = a_w \sum_n \sum_k \frac{(a_k^n - a_k^{n-1})^2}{2} \lambda_u^k \quad (2)$$

乘车时间费用  $C_p^r$  主要指乘客在车内所耗费的时间费用,主要由乘客从第  $k-1$  站到第  $k$  站的车内时间以及车辆到达第  $k$  站时不下车的乘客必须在车上等待的车内时间两部分

组成。乘客时间费用函数的具体形式为：

$$C_p = \alpha_r \sum_n \sum_k [(a_k^n - d_{k-1}^n) B_{k-1}^n + (1 - q_k) B_{k-1}^n \max(\mu_1 \lambda_k (a_k^n - a_k^{n-1}), \mu_2 B_{k-1}^n q_k)] \quad (3)$$

公交企业的运营费用  $C_o$  主要由公交运营时间决定。

$$C_o = \alpha_o \sum_n \sum_k (a_k^n - d_{k-1}^n) \quad (4)$$

乘客总时间费用最小和公交运营费用最小在某种程度上是相互矛盾的,要使整个系统的成本费用最小,需要找出两个优化的平衡点,采用一种线性加权法来整合两个目标,得到优化目标如下:

$$\begin{aligned} \min C &= d(C_p^w + C_p) + (1-d)C_o \\ \text{s. t. } &\begin{cases} t_{\min} \leq d_k^n - a_k^n \leq t_{\max} \\ T_{\min} \leq a_k^n - a_k^{n-1} \leq T_{\max} \end{cases} \quad \forall k, n \end{aligned} \quad (5)$$

控制权重  $d(0 \leq d \leq 1)$  用来调节两个目标的权重。要使整个公交线路效益达到最优,关键是在乘客时间费用和公交公司运营成本之间寻求一个博弈平衡点,引入的权重系数随着双方利益在总效益中的重要程度变化而变化。

为了使构造出的模型更具实用性,以发车间隔  $T$  即  $T = a_k^n - a_k^{n-1}$  作为决策变量。具体时段内行车次数为  $60/T$ , 车辆行驶时间固定为  $\tau$ , 特定时段内第  $k$  站乘客的到达率  $B_k^n$  的值取决于第  $k$  站乘客的到达率  $B_{k-1}^n$  和到达  $k$  站点时乘客的下车率  $q_k$ , 而与第  $n$  车辆无关, 所以  $B_k = B_{k-1}(1 - q_k) + \lambda_k T$ 。因此简化的目标函数为:

$$\begin{aligned} \min C &= 30d\alpha_w T \sum_k \lambda_k + 60(1-d)\alpha_o \tau / T + \frac{60d\alpha_r}{T} \sum_k [(1 - q_k) B_{k-1} \max(\mu_1 \lambda_k T, \mu_2 B_{k-1} q_k) + \tau_k B_{k-1}] \\ \text{s. t. } &\begin{cases} t_{\min} \leq \max(\mu_2 B_{k-1} q_k, \mu_1 \lambda_k T) \leq t_{\max} \\ T_{\min} \leq T \leq T_{\max} \end{cases} \quad \forall k \end{aligned} \quad (6)$$

针对这个模型的目标函数特性,采用粒子群算法<sup>[16]</sup>求解最优值。①粒子群初始化:粒子的维数由变量  $d, T$  的维数决定,设定  $d$  的步长为 0.05, 而发车间隔通常为 0.5 的倍数, 所以  $T$  的步长为 0.5。②设计粒子群的适应度和确定群体最好位置。③进化粒子速度和位置:经过  $d, T$  速度和位置的更新和进化,生成新的粒子群体。④更新粒子最好位置和全局最好位置:在搜索的过程中,不断通过适应度来比较好的位置,不断更新,以致求出  $d, T$  对应的最优解。

## 4 实例分析

### 4.1 杭州市某区居民的出行方式调查

杭州市某区居民的出行方式中,公交车占 37.2%, 电动自行车占 15.6%, 自行车占 12.6%, 私家车占 21.7%, 其他交通方式占 12.9%, 如图 1 所示。

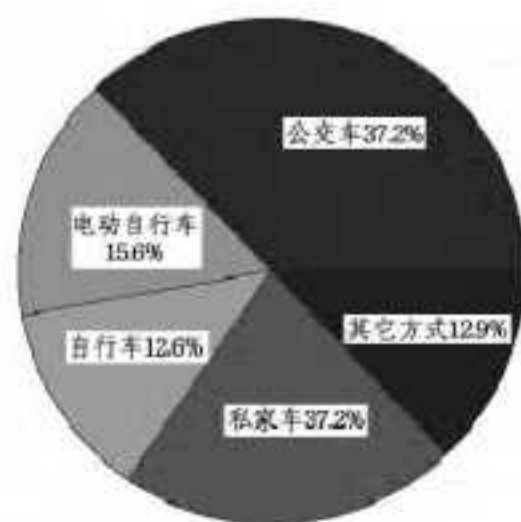


图 1 杭州市某区居民交通出行方式分布

本文在杭州市某区居民出行方式统计数据的基础上,分

析得出公交车是该地区居民出行的主要交通方式。

### 4.2 基于出行行为的回归分析

针对调查区域的居民出行情况,利用 SPSS 软件分析得到了该区居民出行的连续累计概率图,由图 2 可以看出居民的出发时间主要集中在 7:00—8:00。

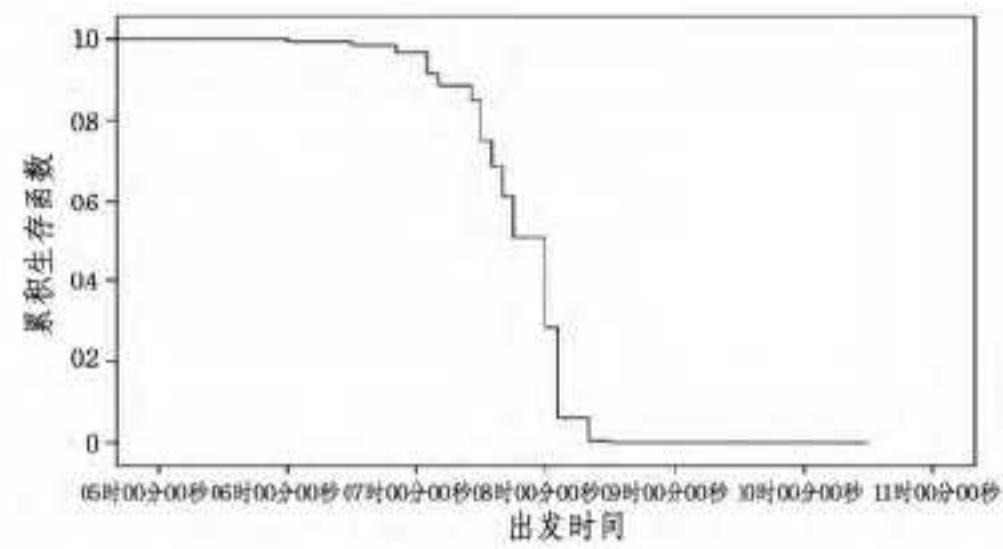


图 2 居民出发时间累计概率图

同时又进一步研究了该区域某确定公交线路的乘客出行,线路如图 3 所示。



图 3 杭州某公交线路

影响居民出行时段的因素表现出不同的比重,根据表 2 的统计结果,可分析出各因素对出发时刻选择的影响,如性别的偏回归系数为 -0.075, 则男性对于女性的相对风险率为  $\exp(-0.075) = 0.928$ , 表明在其它条件不变的情况下,女性在该时刻出发的概率是男性的 0.928 倍,即说明女性在家中持续的时间较短,上午出行出发时间晚于男性居民。

表 2 居民出行时间选择模型回归结果

影响因素	回归系数 $\beta$	标准差 Sig.	EXP( $\beta$ )
性别	-0.075	0.028	0.928
年龄	0.007	0.001	1.007
职业	0.078	0.031	1.081
出行距离	0.157	0.018	1.170
出行目的	-0.034	0.015	0.996

### 4.3 早高峰发车间隔的确定

在早高峰时段[7:00,8:00],调查了各站的上下客流量,考虑在高峰时段乘客平均上下车时间为 3s/人,发车间隔区间[3,8]min,各站点停车时间变化[0.3,1.5]min,如图 4 所示。利用粒子群算法,求解出最佳发车间隔对应的各站断面流量  $B_k$ 。

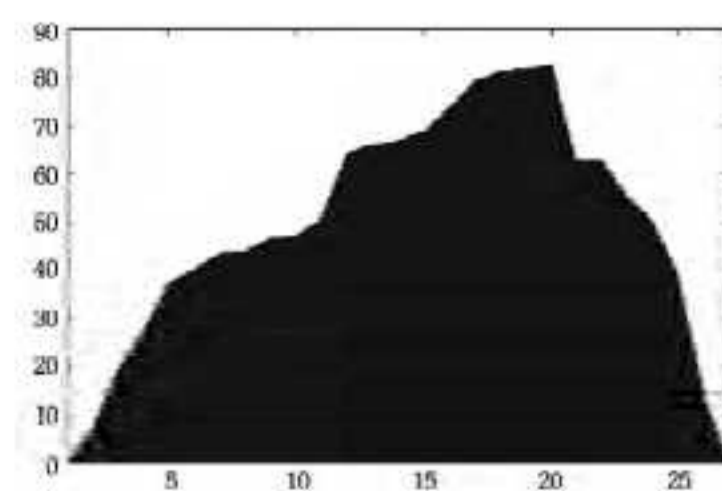


图 4 最佳发车间隔的断面流量值

为计算乘客的等车时间总成本  $C_p$ , 需要确定时间价值系

数  $\alpha_r, \alpha_w$ 。从表 2 中的  $EXP(\beta)$  值可以看出,在早高峰阶段有职业的出行者约占总出行者的一半,18 岁以下的出行者约占总出行者的一半。对于有职业的出行者,时间价值系数由隐性成本和显性成本两部分组成;对于学生,其时间价值系数可看成有职业者的  $1/3$ 。隐性成本按 15 元/(人 $\times$ min) 计算,显性成本为 0.28 元/min(3000/(22 $\times$ 8 $\times$ 60)),设定乘客中含隐性成本的人数比例为 5%,则时间价值系数  $\alpha_r, \alpha_w$  为 0.593 元/(人 $\times$ min)(0.5 $\times$ 0.5 $\times$ 1/3+0.5) $\times$ (15 $\times$ 5%+0.28 $\times$ 95%)。公交企业运营费用为 3.8 元/min。

考虑最佳发车间隔的约束范围 [3,8]min,模型计算中以 0.5min 的速度逐渐增大,对应不同的权值系数产生不同的总时间费用成本。经模型计算,依据最小总费用成本确定对应权重因子,结果见表 3。根据实际公交线路的乘客时间费用和运营者费用的比例调查值,确定最佳权重取值为 0.4,从而得出最优发车间隔为 5.5min,此时总时间成本最小。

表 3 不同时间间隔和权重因子的调度模型结果

权重因子	最佳发车间隔	总费用	权重因子	最佳发车间隔	总费用
d	T	C	d	T	C
0.25	8.0	1992.3	0.3	7	2113
0.35	6.5	2203.7	0.4	5.5	2269.7
0.45	5.0	2309.6	0.5	4.5	2327.3
0.55	4.0	2323.8	0.6	4	2294.1
0.65	3.5	2239.6	0.7	3	2160.8

结束语 出发时间的选择是居民最基本的出行行为选择之一。本文利用生存分析理论确定了居民出行时间高峰时段,并对其影响出行时间的因素进行了分析,以最小发车间隔为决策变量建立优化模型,对乘客与公交公司的时间费用成本添加权重,并综合考虑各种约束。经过实际案例分析,该模型可以有效平衡乘客和企业双方的利益,减少总费用,提高服务水平,对于指导城市区域的公交调度、缓解交通压力有重要意义。

## 参考文献

[1] Carlsson G. Travelling by urban public transport: Exploration of usability problems in a travel chain perspective[J]. Scandinavian Journal of Occupational Therapy, 2004, 11(2): 78-89

(上接第 82 页)

解决中国中小城市交通控制问题的一个好办法。

把各种先进的控制技术相互集成,达到对路口控制参数进行调整的目的,从而实现在整个城市范围内对交通进行动态协调控制,满足交通需求的需要,使交通道路与交通需要达到新的动态平衡,为城市交通提出科学的、系统的控制体系。

## 参考文献

[1] Warberg A, Larsen J, Jørgensen RM. Green wave traffic optimization—A survey [R]. IMM-Technical Report-2008-01. Danmarks Tekniske Universitet, 2008

[2] Markos P. Traffic control[J]. Handbook of Transportation Science, 2003, 56(3): 243-277

[3] Camponogara E, Kraus W Jr. Distributed learning agents in urban traffic control[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2003, 2902: 324-335

[4] Mirchandani P, Head L. A real-time traffic signal control sys-

[2] Pendyala R M, Bhat C R. An exploration of the relationship between timing and duration of maintenance activities[J]. Transportation, 2004, 31(4): 429-456

[3] 李志纯, 黄海军. 弹性需求下的组合出行模型与求解算法[J]. 中国公路学报, 2005, 18(3): 94-98

[4] 王怡璇. 假日小汽车出行行为分析与建模[J]. 公路与汽运, 2012, 5: 0-16

[5] Furth P G, Wilson N M. Setting frequencies on bus routes: Theory and practice [J]. Transportation Research Record, 1981, 818: 1-7

[6] Margulis L. Hurricane Evacuation Decision-Support Model for Bus Dispatch[C] // Fourth LACCEI International Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCET' 2006). Mayaguez, Puerto Rico, 2006: 1-9

[7] 曹丽雅. 公交调度优化模型及其解法研究[J]. 实验科学与技术, 2011, 9(4): 27-30

[8] 欧舟. 城市居民出行行为及特征研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2012

[9] 陈团生. 通勤者出行行为特征与分析方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2007

[10] Yu Q Q. A note on the proportional hazards model with discontinuous data [J]. Statistics & Probability Letters, 2007, 77(7): 735-739

[11] Small K A. The scheduling of consumer activity work trips [J]. The American Economic Review, 1982, 72: 467-479

[12] 胡晓健, 王炜, 陈淑燕. 一路一线直行式公交系统的信号配时与车辆调度优化方法[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2011, 41(4): 866-870

[13] 张倩, 王振晔, 董亚非. 分子算法在公交网络问题中的应用[J]. 计算机科学, 2012, 39(2): 258-267

[14] Gentile, Guido, Sang N, et al. Route choice on transit networks with online information at stops [J]. Transportation Sci. 2005, 39(3): 289-297

[15] 纪震, 廖惠连, 吴青华. 粒子群算法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009

[16] 李发智, 肖蕾, 杨东援. 公交发车间隔模型研究[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2013(1): 92-96

tem; Architecture, algorithms, and analysis[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2001, 9(6): 415-432

[5] 徐杨, 张玉林, 孙婷婷, 等. 基于多智能体交通绿波效应分布式协同控制算法[J]. 软件学报, 2012, 29(11)

[6] 李灵犀, 等. 两相邻路口交通信号的协调控制[J]. 自动化学报, 2003, 29(6)

[7] 高俊侠, 等. 城域单交叉口的模糊控制及仿真探讨[J]. 交通与计算机, 2004, 2(22)

[8] 李静. 单交叉口交通灯信号模糊控制及其仿真[J]. 微计算机信息, 2006, 3-1: 33-35

[9] 成卫, 等. 基于模糊理论的信号交叉口控制研究[J]. 昆明理工大学学报, 2004, 29(3)

[10] 沈国, 等. 基于相序优化的多相位模糊交通控制[J]. 控制与决策, 2002, 17

[11] 邓宜阳. 用 PLC 实现道路十字路口交通灯的模糊控制[J]. 成都大学学报, 2001, 29(6)

[12] 蒋珉, 等. 城市干线交通信号模糊控制及仿真[J]. 东南大学学报, 2004(2)