

# 基于多智能体的公交运行服务仿真模型

安 健<sup>1</sup>, 杨晓光<sup>1</sup>, 滕 靖<sup>1</sup>, 刘好德<sup>2</sup>

(1. 同济大学 交通运输工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 分析了 APTS(advanced public transport system)环境下公交运行服务特性、乘客的出行特性及其相互作用机理. 采用多智能体建模方法, 对信息条件下乘客的认知方式以及出行行为规则进行解析, 建立了考虑容量限制的公交运行服务仿真模型. 基于开发的 SimCUBE 仿真平台进行了仿真实验分析, 并就仿真过程中乘客认知的收敛特性得出了相应的结论.

**关键词:** 交通工程; 公交运行服务仿真; 多智能体

**中图分类号:** U 491.1

**文献标识码:** A

## Multi-agent-based Simulation of Transit Service Process

AN Jian<sup>1</sup>, YANG Xiaoguang<sup>1</sup>, TENG Jing<sup>1</sup>, LIU Haode<sup>2</sup>

(1. College of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** An analysis was made of the characteristics of both transit service and passengers with traveler information system, and also the way they affected each other in the service process. A model was established about passengers' way of cognition and their travel behavior in response to both physical service and multivariate information. Finally, the architecture of the multi-agent-based simulation system, SimCUBE, was introduced and analysis of simulation results was made correspondingly.

**Key words:** traffic engineering; transit service simulation; multi-agent

微观交通仿真模型多以道路交通为主要研究对象, 以车辆个体为基本单元, 以描述车辆在道路上的跟驰、变道等微观行为为手段, 目的在于真实反映现实世界中交通流的演化规律, 为道路的规划、设计以

及交通控制策略的制定提供决策依据<sup>[1-2]</sup>. 作为城市交通发展的战略方向以及公共服务事业的重要内容, 公共交通的规划、管理与营运同样需要一套有效的方法和工具, 用以科学地考评特定内外部条件下能够实现的服务水平. 这不仅是公交行业监管方法体系面临的重要课题, 也是公交营运企业在优化营运策略、改善服务水平、论证改善措施对于服务提升的实际效用和边界效用等方面亟待解决的难题. 从乘客感知的角度出发, 对公交运行服务质量进行评价, 符合公共服务绩效考核理论实践的基本原理和方向<sup>[3]</sup>, 近年来也在国内外受到了广泛重视<sup>[4-8]</sup>. 但是有关在特定的服务特性条件下量化乘客对于服务质量的认知与感知, 预测信息条件下公交乘客的出行时间选择行为, 以及基于这一行为对公交服务质量进行评价等问题, 相关的研究尚不多见.

公交运行服务系统中存在较多不确定因素, 乘客的出行目的、对于公交服务认知方式、敏感程度以及决策行为等均存在较大差异, 导致解析模型较难准确地把握和描述这一复杂过程. 而基于多智能体(Multi-Agent)的建模和仿真方法, 能够将复杂系统(特别是存在个人决策的交通系统)的个体微观行为通过涌现与系统整体特性有机结合. 因此, 认为有必要通过这一方法, 在分析公交服务特性与乘客特性的基础上, 建立公交运行服务系统仿真模型, 从更新的视角出发, 为公交行业监管和企业营运优化提供决策支持.

## 1 公交运行服务系统建模

基于对现实中公交服务过程的分析, 认为公交运行服务仿真模型的主要构成应以车辆运行服务、乘客及信息为主. 运行服务是在给定的运行通道条件、设施设备条件、行车作业计划以及动态调度管理

收稿日期: 2009-03-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(70631002, 50908173); 国家“九七三”重点基础研究发展计划资助项目(2006CB705505)

作者简介: 安 健(1982—), 男, 博士生, 主要研究方向为智能公交系统. E-mail: Marlin\_tree@163.com

杨晓光(1959—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为智能交通系统. E-mail: yxgits@vip.sina.com

等前提下所形成的车辆运行时空轨迹. 乘客是具备差异性本质特性与出行需求特性的服务客体, 是公交运行服务的主要参与者与服务水平的评判主体. 信息不仅能够影响乘客的出行决策, 也是其感知公交服务水平的重要参照之一, 有别于 ATIS (advanced traveler information system, 先进的出行者信息系统) 当中关于信息的定义. 本研究认为, 单线路公交运行服务中的信息, 不仅包含有服务主体发布的出行前信息和途中信息, 还应包含出行经验.

### 1.1 公交运行服务特性分析及建模

公交车辆的运行轨迹是公交服务的物理载体, 每一条轨迹表示 1 辆公交车自首站出发到达末站的全程时空记录. 用  $T$  表示一个工作日中所有轨迹 Agent (智能体) 的集合, 则对于当日服务第  $k$  班次的车辆 Agent 的轨迹采用  $T_k (T_k \in T)$  表示, 该车辆从站点  $j$  出发的时间为  $T_{k,j}$ . 假设某条线路车队采用的车辆为同一类型, 载客容量恒定; 令  $p_{k,j,B}$  和  $p_{k,j,A}$  分别为第  $k$  班车辆 Agent 到达站点  $j$  后的实际上下车人数;  $V_{k,j}$  表示第  $k$  班车辆 Agent 在到达站点  $j$  之前的车内人数;  $C_v(k, j)$  为进行第  $k$  班服务的车辆 Agent 在到达站点  $j$  并释放下车乘客后的车内未占用客位. 则当该班车辆到达站点  $j$  之前站台候车乘客为  $K_j$  时,  $K_j - C_v(k, j)$  为不能顺利登乘而需等待下一班次的乘客人数, 有

$$C_v(k, j) = V_{k,j} - p_{k,j,A} \quad (1)$$

区别于轨道交通, 常规公交不具备独立运行通道, 车辆在线路的断面运行时间受道路物理条件、交通状况以及气候等外部因素的影响; 发车间隔除了外因影响, 也会由于行车作业计划编排和调度水平的差异而表现出不同程度的不确定性. 公交服务中的诸多不确定性正是公交服务水平不高, 吸引力差的主要原因. 为了揭示这一不确定性对于乘客出行的影响, 有必要建立模型描述这一不确定特性.

就车辆在站点的停泊时间, Ceder<sup>[7]</sup> 已经给出了基本表述公式. 本研究在借鉴的同时, 结合我国公交运能阶段性紧张的特点, 以前门上车、后门下车为主要乘降模式, 给出了考虑车内人数的站点停泊时间模型. 令  $t_{\text{dwell}}(k, j)$  为第  $k$  班车辆在站点  $j$  的停泊时间, 有

$$t_{\text{dwell}}(k, j) = d_b + \max\{\Delta_B(C, V_{k,j}) \cdot p_{k,j,B}, \Delta_A(C, V_{k,j}) \cdot p_{k,j,A}\} \quad (2)$$

式中:  $d_b$  为基本停泊时间 (包括了加减速与开关门时间);  $\Delta_B$  和  $\Delta_A$  分别为乘客单位乘、降时间, 且均为载客容量  $C$  与车内人数  $V_{k,j}$  的函数.

$t_a(k, j), t_d(k, j) (\forall k | T_k \in T)$  分别为进行第  $k$  班服务的车辆到达站点  $j$  的时间以及从该站出

发的时间, 两者的递推关系为

$$t_d(k, j) = t_a(k, j) + t_{\text{dwell}}(k, j) \quad (3)$$

$$t_a(k, j+1) = t_d(k, j) + [t_{\text{rt}}(j, j+1, \tau)]_{\text{MTC}} \quad (4)$$

式中:  $t_{\text{rt}}(j, j+1, \tau)$  为车辆在时段  $\tau$  内从  $j$  站出发, 到达  $j+1$  站的运行时间;  $[\ ]_{\text{MTC}}$  表示根据历史 AVL (automatic vehicle location) 数据进行分布规律分析, 采用 Monte Carlo 方法依据统计特征随机生成的运行时间.

### 1.2 乘客特性分析及建模

以往相关研究中, 将乘客分为通勤和非通勤的划分方式较为多见. 然而, 通过对乘客自身特性与出行特性的分析, 发现如下特征:

(1) 就出行频率特性而言, 乘客可分为日常出行与非日常出行, 两者对于公交服务水平的认知方式存在差异.

(2) 就出行时间特性而言, 乘客无外乎 3 类——①对于到达时间有不同程度的强制性要求 (on time compulsory, OTC), 需要根据这一要求预测行程时间并进行出发时间决策; ②出行产生时间相对稳定, 无需出发时间决策; ③出行产生时间随机, 对于到达目的站点时间无特殊要求. 对到达目的站点的时间具有强制性要求的乘客与不具备这一特性的乘客对于公交服务可靠性的感知方式存在着差异.

根据上述特性, 定义如下 4 个类型的乘客集合: ①日常出行且对到达目的站点时间有期望的乘客 (daily arrival scheduled passengers, DASP)  $X_{\text{das}}$ ; ②日常出行且出行时间较为恒定的乘客 (daily departure scheduled passengers, DDS)  $X_{\text{dds}}$ ; ③随机到达且对到达目的站点时间有期望的乘客  $X_{\text{sas}}$ ; ④随机产生的乘客  $X_s$ . 令  $X_d$  和  $X_{\text{as}}$  分别为日常出行乘客集合, 以及对到达目的站点时间有期望的乘客集合. 以上集合间关系如下:

$$X = \{X_{\text{das}}, X_{\text{dds}}, X_{\text{sas}}, X_s\} \quad (5)$$

$$X_d = X_{\text{das}} \cup X_{\text{dds}} = \overline{X_{\text{sas}} \cup X_s} \quad (6)$$

$$X_{\text{as}} = X_{\text{das}} \cup X_{\text{sas}} = \overline{X_{\text{dds}} \cup X_s} \quad (7)$$

对于乘客  $x_i (\forall i | x_i \in X)$ ,  $O_i, D_i, T_{i,o}$  以及  $T_{i,d}$  分别为该乘客的起、讫站点和到达起讫站点的时间. 乘客  $x_i$  在满足条件  $T_{i,o} \leq T_{k,j} (\forall i | O_i = j)$  的条件下应当登乘服务第  $k$  班次的车辆. 当  $K_j - C_v(k, j) > 0$  时, 滞留乘客继续等待后续班次直至成功登乘.  $\lambda_{\text{nt}}(x_i)$  为  $x_i$  的候车忽略阈值, 当  $x_i$  的候车时间  $< \lambda_{\text{nt}}(x_i)$  时, 这一经历将被忽略, 不计入对于服务水平感知的考虑.

乘客  $x_i (\forall i | x_i \in X_{as})$  具备以下内在特性: ① 目标到达时间  $T_{dt}(x_i)$ , 用来表述  $x_i$  期望到达目的站点的时间; ② 准点期望水平  $\lambda_{otci}(x_i)$ , 该变量为一个介于 0 与 1 之间的数值, 用以表述  $x_i$  对于执行到达目的地时间  $T_{dt}(x_i)$  愿望的强烈性, 当需要严格执行时,  $\lambda_{otci}(x_i)$  取值 1, 反之为 0; ③ 可接受延误阈值  $\lambda_{tdl}(x_i)$ , 表示乘客  $x_i$  对于延误到达目的地时间的可以接受的上限; ④ 出行结果, 另  $s_{i,\kappa}$  为  $x_i$  第  $\kappa$  日出行的结果, 用于标定出行成功与否 (成功为 0, 反之为 1), 并对其第  $\kappa + 1$  日的出行决策产生影响, 计算模型如下:

$$s_{i,\kappa} = \begin{cases} 0 \Leftarrow (T_{i,d} - T_{dt}(x_i) \leq 0) \\ 1 \Leftarrow (T_{i,d} - T_{dt}(x_i) > 0) \end{cases},$$

$$\forall i | (x_i \in X_{as}) \cap (\lambda_{otci}(x_i) = 1) \quad (8)$$

$$s_{i,\kappa} = \begin{cases} 0 \Leftarrow (T_{i,d} - T_{dt}(x_i) \leq 0) \cup \\ \left(1 - \frac{|T_{i,d} - T_{dt}(x_i)|}{\lambda_{tdl}(x_i)} \geq \lambda_{otci}(x_i)\right), \\ 1 \Leftarrow \left(1 - \frac{T_{i,d} - T_{dt}(x_i)}{\lambda_{tdl}(x_i)} < \lambda_{otci}(x_i)\right) \end{cases}$$

$$\forall i | (x_i \in X_{as}) \cap (\lambda_{otci}(x_i) < 1) \quad (9)$$

对于乘客  $x_i (\forall i | x_i \in X_{das})$  而言, 采用经验池的方式存储其经历过的车内时间与候车时间 (需要保证池内存留的经验为成功出行经验, 即  $s_{i,\kappa} = 0$ ), 用于认知服务系统以及进行次日出行决策 (图 1).

决策所需的依据以及决策结果都将被记录在经

$$I_{rt,\nu} = \begin{bmatrix} I_{rt}(0, 1, \tau, \nu) & \cdots & I_{rt}(0, N-2, \tau, \nu) & I_{rt}(0, N-1, \tau, \nu) \\ 0 & \cdots & I_{rt}(1, N-2, \tau, \nu) & I_{rt}(1, N-1, \tau, \nu) \\ \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & I_{rt}(N-2, N-1, \tau, \nu) \end{bmatrix} \quad (10)$$

同样, 采用  $I_{wt}(j, \tau)$  表示乘客  $x_i$  在时段  $\tau$  内到达站点  $j$  可能花费的候车时间, 则存在对应的集合  $I_{wt}$  (同  $I_{rt,\nu}$ ), 这里不作赘述.

对于  $x_i (\forall i | x_i \in X_d)$  而言, 个人经验在出行决策过程中同样发挥着重要作用, 因此本研究将个人经验与基于 AVL 的出行前信息共同作为出行决策的依据, 使得信息条件的定义被赋予了更为丰富的内涵.

#### 1.4 系统要素交互机制研究

##### 1.4.1 乘客 Agent 的认知规则 (乘客与信息交互)

对于乘客认知规则的解析是本研究中最为重要的建模环节, 需要回答以下问题: ① 乘客是如何利用信息的? ② 乘客行为是如何根据每次的出行结果, 随仿真过程的推进不断演化的? ③ 乘客是如何认知公交服务可靠性的?

回答问题①: 信息对乘客行为影响主要体现为

验池当中, 用以评价服务质量, 其中涉及的一些概念在后文中做详细解释.

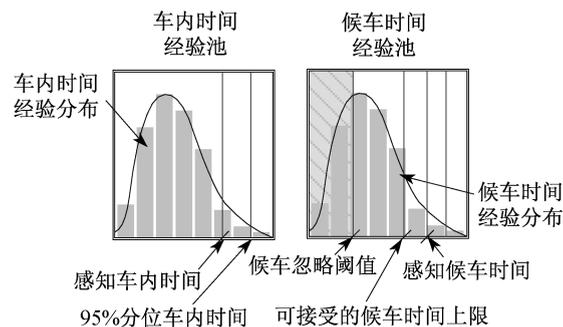


图 1 乘客经验池模型

Fig. 1 Passenger experience pool model

##### 1.3 信息条件建模

APTS (advanced public transport system) 环境下的公交出行信息来源更加多元化, AVL 数据不仅能够对车辆运行进行在线监控, 而且可用于线路服务特性的时空分布规律分析. 除路径信息外, APTS 条件下的出行信息还应涵盖候车时间、运行时间等方面. 定义  $I_{rt}(j, j+n, \tau, \nu)$  表示时段  $\tau$ , 起始站点  $j, j+n$  以及参照方式  $\nu$  所对应的运行时间.  $\nu = 0$  时, 表示决定在时段  $\tau$  内出发所需参照的运行时间;  $\nu = 1$  则表示期望在时段  $\tau$  内到达所需花费的车内时间. 系统中的乘客 Agent 会根据自身类别合理选择信息进行参照, 系统中的运行时间信息集合  $I_{rt,\nu}$  为

出发时刻选择行为, 影响对象主要是  $x_i (\forall i | x_i \in X_{as})$ .  $T_{i,o}$  为其决定到达起始站点的时间, 并由下式计算:

$$T_{i,o} = T_{dt}(x_i) - t_e(x_i) \quad (11)$$

式中  $t_e(x_i)$  是  $x_i$  对于全程时间的估算, 对于  $x_i (\forall i | x_i \in X_{das})$  而言有

$$t_e(x_i) = \alpha_i (t_{ive}(x_i) + t_{we}(x_i)) + (1 - \alpha_i) (t_{ivi}(x_i) + t_{wi}(x_i)) + \delta_i \quad (12)$$

式中:  $t_{ive}(x_i)$  和  $t_{we}(x_i)$  分别为  $x_i$  根据个人经验估算的车内时间与候车时间;  $t_{ivi}(x_i)$  和  $t_{wi}(x_i)$  分别表示  $x_i$  根据出行前信息获得车内时间参照值与候车时间参照值;  $\alpha_i$  为  $x_i$  的经验值依赖系数, 用于描述其对于个人经验的信赖程度;  $\delta_i$  为调整系数, 根据前次出行结果调整本次出行的时间参照.

现以  $t_{we}(x_i)$  为例说明建模与求解过程. 定义

$f(t)$ 为 $x_i$ 的候车时间经验分布密度函数;令 $t_{j,wt}(x_i)(\forall j|t_{j,wt}(x_i)\in P_{wt}(x_i))$ 表示 $x_i$ 候车时间经验池 $P_{wt}(x_i)$ 中的 $j$ 元素.通过下式(13)–(15)可求出 $t_{we}(x_i)$ :

$$\int_0^{\lambda_{nt}(x_i)} f(t)dt + \int_{\lambda_{nt}(x_i)}^{t_{we}(x_i)} f(t)dt + \int_{t_{we}(x_i)}^{\max\{t_{j,wt}(x_i)\}} f(t)dt = 1 \quad (13)$$

$$\frac{\int_{\lambda_{nt}(x_i)}^{t_{we}(x_i)} f(t)dt}{\int_{\lambda_{nt}(x_i)}^{t_{we}(x_i)} f(t)dt + \int_{t_{we}(x_i)}^{\max\{t_{j,wt}(x_i)\}} f(t)dt} = \lambda_{otci}(x_i) \quad (14)$$

$$C(P_{i,wt}) > N_{ss} \quad (15)$$

式中, $C(\cdot)$ 为求集合 $\cdot$ 中元素的数量,全文同.

模拟迭代初期,系统处于不稳定状态,乘客 $x_i(\forall i|x_i\in X_d)$ 的经验池中样本量小,不具备统计特征,采用公式 $C(P_{wt}(x_i))\leq N_{ss}$ 中的 $N_{ss}$ 作为迭代次数阈值,确保在经验池中的样本量足够大的情况下采用上述方法,对于小样本量则进行如下运算:

$$t_{we}(x_i) = \begin{cases} \lambda_{nt}(x_i) \Leftarrow \forall j | (t_{j,wt}(x_i) \leq \lambda_{nt}(x_i)) \\ \min\{t_{j,wt}(x_i)\} + \lambda_{otci}(x_i) (\max\{t_{j,wt}(x_i)\} - \min\{t_{j,wt}(x_i)\}) \Leftarrow \exists j | \cap \\ (t_{j,wt}(x_i) > \lambda_{nt}(x_i)) \end{cases} \quad (16)$$

回答问题②:公式(12)中的调整系数 $\delta_i$ 用来体现乘客前日出行结果对于次日出行时刻选择行为的影响,在建模的过程中不仅考虑了延误与提前到达在影响乘客行为上的差异性,而且考虑了过小提前到达易被忽略的现实状况,令实际到达时间 $T_{i,d}$ 比预期到达迟到时间 $t_{i,1} = T_{i,d} - T_{dtt}(x_i)$ ,有

$$\delta_i = \begin{cases} \omega_e \cdot t_{i,1} & \Leftarrow (t_{i,1} \leq 0) \cap (\|t_{i,1}\| \geq \lambda_{aet}(x_i)) \\ 0 & \Leftarrow (t_{i,1} \leq 0) \cap (\|t_{i,1}\| < \lambda_{aet}(x_i)) \\ \omega_l \cdot t_{i,1} & \Leftarrow t_{i,1} > 0 \end{cases} \quad (17)$$

式中: $\lambda_{aet}(x_i)$ 为 $x_i$ 的提前到达忽略阈值,当实际到达时间比预期到达时间提前小于 $\lambda_{aet}(x_i)$ 时, $x_i$ 在次日出行时不做时间调整; $\omega_e$ 与 $\omega_l$ 分别为提前到达参数与延误参数,需根据实际调研获得.

回答问题③: $X_d$ 与 $\overline{X_d}$ 两类乘客在感知方式上有各自的特点,且对车内时间感知与候车时间感知的方式也不一样.令 $t_{sw}(x_i)$ , $t_{siv}(x_i)$ 分别为 $x_i$ 实际花费的候车时间与车内时间,则其感知候车时间 $t_{pw}(x_i)$ 与感知车内时间 $t_{piv}(x_i)$ 为

$$t_{pw}(x_i) = \begin{cases} \alpha_i t_{we}(x_i) + (1 - \alpha_i) t_{wi}(x_i) \\ \Leftarrow (\forall i | x_i \in X_d) \\ t_{sw}(x_i) \Leftarrow (\forall i | x_i \in \overline{X_d}) \cap \\ (t_{sw}(x_i) > \lambda_{nt}(x_i)) \\ t_{wi}(x_i) \Leftarrow (\forall i | x_i \in \overline{X_d}) \cap \\ (t_{sw}(x_i) \leq \lambda_{nt}(x_i)) \end{cases} \quad (18)$$

$$t_{piv}(x_i) = \begin{cases} \alpha_i t_{ive}(x_i) + (1 - \alpha_i) t_{ivi}(x_i) \\ \Leftarrow (\forall i | x_i \in X_d) \\ \max\{t_{ive}(x_i), t_{ivi}(x_i)\} \\ \Leftarrow (\forall i | x_i \in \overline{X_d}) \end{cases} \quad (19)$$

#### 1.4.2 容量限制条件建模(乘客间以及与轨迹交互)

容量限制是现实世界中服务瓶颈的真实写照,一直以来是交通运输系统建模过程中的一个重要问题.在处理公交车容量限制条件下的乘客登乘问题时,采用登乘欲望指数 $\lambda_{b,i}$ 来描述乘客对于登乘车辆并接受服务这一需求的迫切性.

定义 $X(j,k)$ 为在站点 $j$ 等候第 $k$ 班车的乘客集合,这一集合中包含2部分乘客:①在第 $k-1$ 班车与第 $k$ 班车之间到达的所有乘客;②在第 $k-1$ 班之前到达,由于能力限制未能顺利登乘并接受服务的滞留乘客.在 $C_v(k,j)$ 小于 $X(j,k)$ 集合中元素数量的情况下,需要根据 $X(j,k)$ 集合中乘客的登乘欲望 $\lambda_{b,i}$ 来模拟决定成功接受服务的个体. $\lambda_{b,i}$ 主要受到如下几方面因素的影响:①准点期望水平(on time compulsory index, OTCI) $\lambda_{otci}(x_i)$ ,由于要求准点到达的出行相比不具备目标到达时间的出行,因此经验上认为 $\lambda_{b,i}$ 与 $\lambda_{otci}(x_i)$ 成正比;②滞留经历,即当前仿真日中该乘客被滞留的次数 $\lambda_i$ ,且认为 $\lambda_{b,i}$ 随着 $\lambda_i$ 的增加而递增;③乘客认知差异性所导致的欲望随机性.由此,登乘欲望 $\lambda_{b,i}$ 由下式得出:

$$\alpha_{otc}(x_i) = \begin{cases} 1 \Leftarrow \forall i | x_i \in (X_{as} \cap X(j,k)) \\ 0 \Leftarrow \forall i | x_i \in (\overline{X_{as}} \cap X(j,k)) \end{cases} \quad (20)$$

$$\lambda_{b,i} = \lambda_b + \lambda_{otci}(x_i) \alpha_{otc}(x_i) + (e^{\lambda_i} - 1) + \epsilon_i \quad (21)$$

式中: $\lambda_b$ 为基本登乘欲望; $\lambda_{otci}(x_i) \alpha_{otc}(x_i)$ 表示候车乘客登乘的附加欲望,取决于该乘客的准点期望水平; $(e^{\lambda_i} - 1)$ 为由于滞留造成的附加登车欲望; $\epsilon_i(\epsilon_i \sim U(0,1))$ 则体现登乘欲望的随机性.令 $j$ 站点候车的乘客 $x_i$ 能够成功登乘当日通过该站的第 $k$ 班车辆的概率为 $p_{i,j,k}$ ,有

$$p_{i,j,k} = \left( \lambda_{b,i} / \sum_{\forall i | x_i \in X(j,k)} \lambda_{b,i} \right) \times 100\% \quad (22)$$

随后,在集合 $X(j,k)$ 中,根据各乘客的 $p_{i,j,k}$

随机选择登乘,直至达到车辆容量限制.

## 2 仿真过程设计

基于上述对于车辆运行轨迹、信息以及乘客的建模,设计系统仿真模型如图2.系统演化步长为1 d,每天的模拟过程包含3部分内容:首先,根据实际调研输入需求的时空分布,在系统中产生并初始化各Agent的相关特性;其次,采用Monte Carlo方法进行服务过程仿真;最后,输出相应的仿真结果.

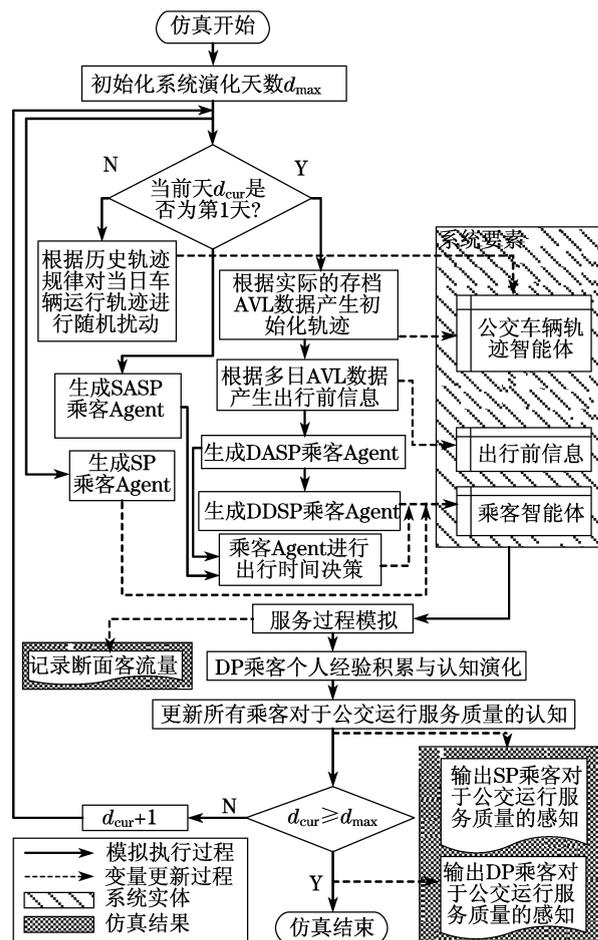


图2 系统模拟流程

Fig.2 Flow chart of simulation

但是由于难以判定何时乘客对于系统认识能够演化到相对稳定的阶段,因此在系统输入中需要给定仿真演化的天数,当到达这天后结束仿真,而最终得到的乘客感知服务质量就是该线路服务水平的重要体现和依据.

## 3 数值仿真及分析

本研究以上海某典型常规公交线路为背景,通过实地调查标定相关参数,根据上述基于Agent方

法的系统建模,采用C++语言,设计构建了公交运行服务仿真平台SimCUBE,并进行模拟实验分析,得出如下结论:

(1) 根据标定的乘客结构与需求时空分布进行模拟实验的结果表明,乘客Agent的产生基本与实地调查结果分析反推的结果吻合.

需求总量达到5 000人后,高峰班次出现明显的断面流量饱和,这一状况会随着总量的增加向后传播(图3),且断面流量会在特定站点骤减(图3d),对于

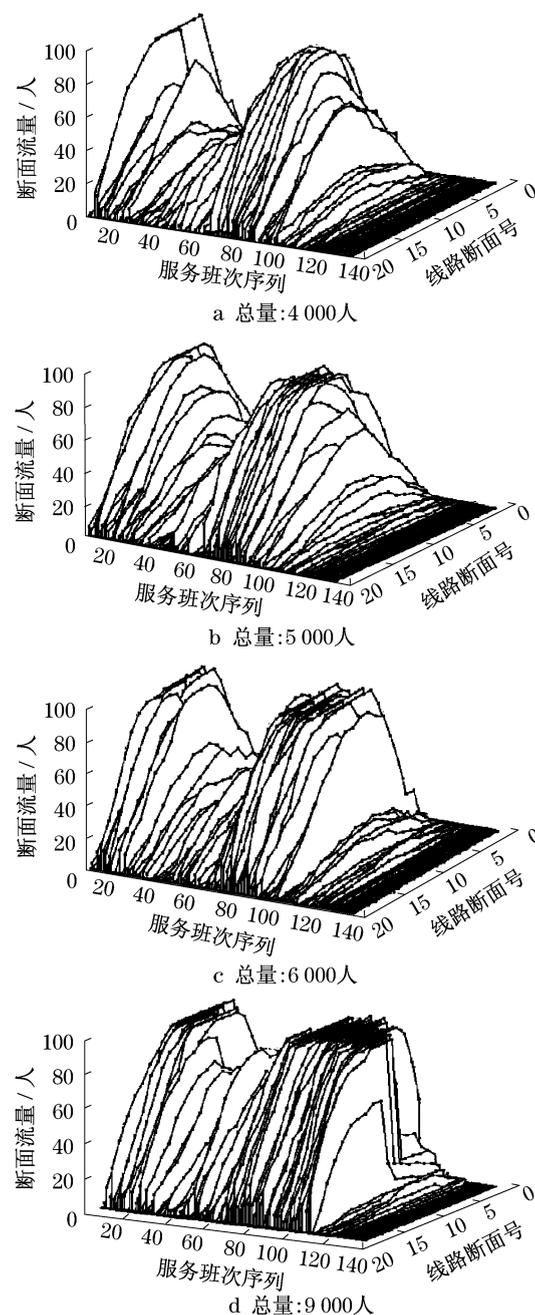


图3 断面流量对比

Fig.3 Comparison of passenger load

这一规律的深度把握将为公交运能过饱和情况下行车作业计划优化和实时车辆调度提供重要的方法支撑。

(2) 需求与供给失衡较为严重的服务系统中乘客行为更为复杂,由此本研究采用4000人的需求总量进行认知收敛分析.从感知时间均值与方差的演化情况来看,在200个工作日演化完成之前, $X_{dp}$ 乘客对于候车时间的认知基本上能够收敛到相对稳定的状态(图4)。

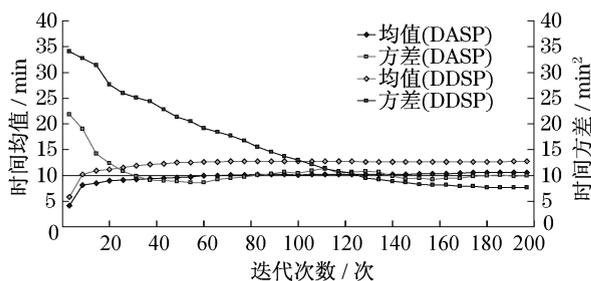


图4 DP乘客感知候车时间统计特征演化  
Fig.4 Statistical characteristics evolution of perceived waiting time

(3) 随着乘客Agent对于系统认知的逐步收敛, $X_{dasp}$ 乘客延迟(实际到达时间与目标到达时间之差)分布峰度呈现出明显的增长趋势(图5).针对DASP类型的乘客进行了实地调查问卷,统计结果显示其延迟分布与仿真结果吻合程度较好。

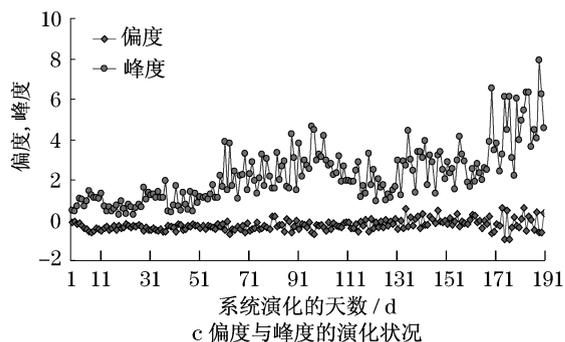
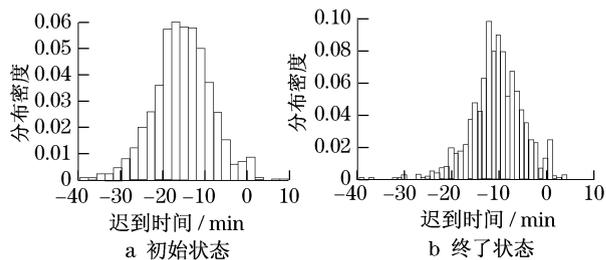


图5 DASP乘客延迟迭代演化  
Fig.5 Evolution of DASP's lateness

(4) 虽然该选定线路的车内运行时间的时段差异性较大,首末站运行时间在晚高峰时段的波动可

达近40 min(图6a),但是高质量的出行前信息与乘客个人经验的积累演化导致绝大多数日常出行乘客对车内时间的感知与实际经历之间的偏差浮动始终维持在 $\pm 4$  min之内(图6b)。

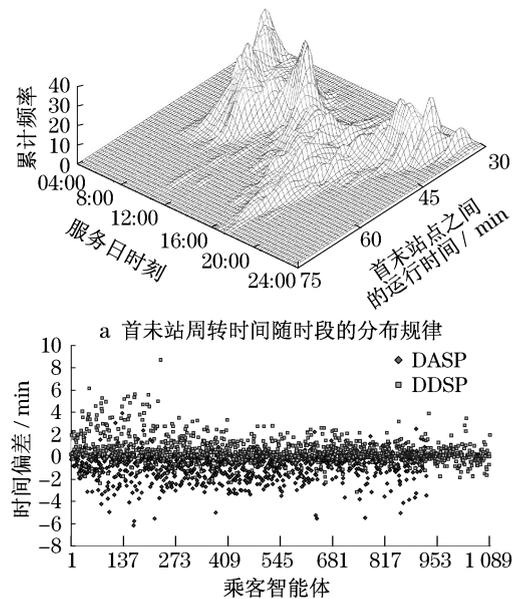


图6 周转时间分布与感知车内时间偏差

Fig.6 Distribution of running time and passengers' cognition of in-vehicle time

## 4 结语

本研究提出了基于多智能体的公交运行服务仿真模型,基于C++语言开发了SimCUBE仿真平台,旨在真实反映公交运行服务过程,探索信息条件下公交乘客出行行为演化规律,揭示公交运行服务特性与乘客行为特性的相互作用机理.该方法可为公交运营企业优化运营策略,改善服务水平,论证改善措施对于服务提升的实际效用和边界效用提供决策支持。

## 参考文献:

- [1] 于泉,石建军.基于Agent的交通流微观仿真系统框架研究[J].计算机仿真,2006,23(1):210.  
YU Quan, SHI Jianjun. Frame of micro traffic flow simulations system based on agent [J]. Computer Simulation, 2006, 23 (1):210.
- [2] 缪海青,汤淑明,王飞跃.基于对等计算的人工交通系统设计[J].交通运输系统工程与信息,2006,6(2):83.  
MIAO Haiqing, TANG Shuming, WANG Feiyue. Design of artificial transportation system based on JXTA[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information

- Technology, 2006, 6(2): 83.
- [3] 于小千, 段安安, 曹学明, 等. 公共服务绩效考核理论探索与实践经验[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2008.
- YU Xiaoqian, DUAN An'an, CAO Xueming, et al. Performance assessment in public services: theory and practice[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2008.
- [4] 黄婷, 焦海贤, 李秀丽, 等. 基于乘客观点的公交服务质量评价体系及方法研究[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2008, 27(1): 781.
- HUANG Ting, JIAO Haixian, LI Xiuli, et al. Research on transit quality of service measure system and method based on passenger's perspective [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2008, 27(1): 781.
- [5] 金宁, 隽志才. 基于顾客满意度的城市公交服务水平[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2008, 38: 63.
- JIN Ning, JUAN Zhicai. Public transport service level based on customer satisfaction[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2008, 38: 63.
- [6] Balcombe R, Mackett R, Paulley N, et al. The demand for public transport: a practical guide [R]. Wokingham U K: TRL Limited, 2004.
- [7] Ceder A. Public transit planning and operation: theory, modeling and practice[M]. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2007.
- [8] Kittelon P B, Quade K, Hunter Zaworskikm. Transit capacity and quality of service manual, report 100 [R]. Washington D C: Transportation Research Board, 2003.

(上接第 831 页)

## 4 结论

本文提出了模型预测路由诱导控制方法, 控制任务被描述为一个动态的、离散时间和空间的、带有约束控制变量的最优控制问题, 采用宏观的、确定型的、离散时间、空间、适合基于模型预测的交通控制的宏观动态交通模型来构建网络交通过程模型. 对于每一个控制周期, 通过在未来较长的时段内求解最优问题来实现反馈控制. 仿真结果表明, 模型预测路由诱导控制方法效果显著, 可为先进的交通管理系统构建提供依据.

### 参考文献:

- [1] 上海市市政工程管理处, 同济大学. 上海市高架道路交通监控方案研究总报告[R]. 上海: 上海市市政工程管理处, 2000.
- Shanghai Municipal Engineering Administration Department, Tongji University. Study on Shanghai expressway transportation management system [R]. Shanghai: Shanghai Municipal Engineering Administration Department, 2000.
- [2] Papageorgiou M, Blosseville J M, Haj-Salem H. Modelling and real-time control of traffic flow on the southern part of Boulevard Peripherique in Paris: part I: modelling [J]. Transportation Research Part A, 1990, 24A(5): 345.
- [3] 徐天东, 郝媛, 孙立军. 城市快速路交通诱导和匝道控制集成仿真模型[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(23): 13.
- XU Tiandong, HAO Yuan, SUN Lijun. Simulation model of integrated traffic guidance and ramp control on urban expressway network [J]. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(23): 13.
- [4] 上海市交通信息中心, 同济大学. 上海市快速路先进交通管理系统研究总报告[R]. 上海: 上海市交通信息中心, 2008.
- Shanghai Municipal Transportation Information Center, Tongji University. Key technologies of VMS-based advanced expressway transportation management system in Shanghai [R]. Shanghai: Shanghai Municipal Transportation Information Center, 2008.
- [5] Gartner N H. Development of demand-responsive strategies for urban traffic control[C]// Proceeding of the 11th IFIP conf Syst Modeling and Optimize. New York: Springer-Verlag, 1994: 166-174.
- [6] Bellemans T. Model prediction control with repeated model fitting for ramp metering[C]// Proceedings of the IEEE 5th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC'02). Singapore: [s. n.], 2002: 236-241.
- [7] 钱积新. 预测控制[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 10-30.
- QIAN Jixin. Prediction control[M]. Beijing: Chemistry Industry Press, 2007: 10-30.
- [8] Kotsialos A, Papageorgiou M, Diakaki C, et al. Traffic flow modeling of large-scale motorway networks using the macroscopic modeling tool METANET[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2002, 3(4): 282.
- [9] Messmer A, Papageorgiou M. Route diversion control in motorway networks via nonlinear optimization [J]. IEEE Transportation Control Systems Technology, 1995, 3(1): 144.
- [10] 徐天东, 孙立军, 郝媛. 不同交通信息下网络交通动态路径选择行为[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2009, 37(8): 1029.
- XU Tiandong, SUN Lijun, HAO Yuan. Influence of different traffic information on drivers' dynamic route choice behavior in urban road network level [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2009, 37(8): 1029.
- [11] 徐天东, 孙立军, 郝媛. 城市快速路实时交通状态估计和行程时间预测 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2008, 36(10): 1355.
- XU Tiandong, SUN Lijun, HAO Yuan. Real time traffic state estimation and travel time prediction on urban expressway [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2008, 36(10): 1355.