

文章编号:1005-0523(2015)02-0046-08

突发事件下地铁网络乘客出行行为仿真模型

李 伟,徐瑞华

(同济大学道路与交通工程教育部重点实验室,上海 201804)

摘要:城市轨道交通突发事件会对乘客出行行为造成一定影响,同时还将影响网络客流分布。首先分析了突发事件对轨道交通网络客流出行行为选择的影响,建立了乘客Agent和列车Agent模型及系统要素间的交互机制,利用多智能体仿真方法构建仿真模型,对城市轨道交通网络突发情况下的乘客出行行为进行仿真研究。最后通过实验网络进行仿真验算,结果与传统方法对比验证本仿真模型的有效性和实用性。研究可为城市轨道交通网络客流分布计算提供基础,也可城市轨道交通应急指挥、列车运行方案调整等提供辅助决策依据。

关键词:城市交通;系统仿真;多智能体;突发事件;乘客行为

中图分类号:U231.92

文献标志码:A

随着城市轨道交通的日益发展,其舒适、安全、准时、便利等众多优点明显,致使城市居民出行对轨道交通的依赖性逐步提升,逐渐吸引更多交通客流。但由于轨道交通网络结构庞大、列车运行方式多样、客流时空分布复杂等特点,一旦发生列车延误等突发事件,大量乘客的出行将受到影响,其出行行为的选择也将产生变化。此时的网络客流分布与正常运营相比存在很大的差异,相关车站和断面的客流量及构成均会明显不同,从而造成安全隐患。为保证运营秩序和客运安全应立即生成高效的城市轨道交通应急指挥决策,而作为应急决策的核心依据,突发事件发生后乘客的出行行为分析是当前具有重要意义的研究课题。

突发事件背景下,网络乘客的出行行为变得更加复杂。传统的客流分布预测方法已经不再适用于该情况^[1-4],有必要专门针对突发事件条件下的客流特征进行分析,掌握事件影响在路网中的传播扩散情况。部分学者通过解析方法量化突发事件条件下乘客的期望延误时间^[5-7],但是城市轨道交通是一个复杂系统,采用解析模型较难准确把握和描述网络客流的动态变化过程,尤其是在突发事件中的客流变化。而仿真方法是研究复杂问题较好的替代方法,它能够将复杂系统的个体微观行为通过涌现与系统整体特性有机结合。姚向明^[4]建立了城市轨道交通网络客流分布动态仿真模型研究正常情况下网络客流的分布情况,Jiang^[8]和Li^[9]通过仿真方法研究了列车延误对客流的影响,但并没有考虑到延误会对乘客的出行选择产生影响从而进一步改变网络客流分布。

研究首先分析突发事件对轨道交通网络客流出行行为产生的影响,随后建立乘客Agent和列车Agent模型,讨论Agent与环境、系统要素之间的交互机制,利用多智能体系统仿真方法构建仿真模型,对城市轨道交通网络突发情况的乘客出行行为进行仿真研究,通过大量Agent的出行来宏观展现路网客流的时空分布特征。

收稿日期:2014-12-05

基金项目:国家自然科学基金(51408323)

作者简介:李伟(1989—),男,博士研究生,研究方向为交通运输规划与管理。

通讯作者:徐瑞华(1963—),男,教授,博士生导师,研究方向为交通运输规划与管理。

1 突发事件影响下乘客出行选择模型

1.1 乘客出行路径

突发事件条件下,城市轨道交通网络客流可分为两种:正常客流和受影响的客流。正常情况下,乘客的出行路径可以从有效路径集中产生,路径阻抗和选择概率可从轨道交通运营部门采用的清分比例表获得。清分比例表中的各路径出行阻抗表示为 $\varphi_k^{o,d}(t)$, k 为路径编号,一般小于5条,阻抗由时间单位(s)表示。

但是当突发事件发生后,路网上部分出行路径将受到影响,造成乘客原本选择的有效路径不可行,此时乘客会根据自身所获得的实时信息(例如车站广播,大屏幕展示等)做出相应的决策。为获得突发事件条件下乘客出行行为,进行一次实地问卷调查,见图1(时间:2014年2月21日—28日;地点:上海轨道交通;样本量:434份),问卷调查显示,突发事件下乘客出行意愿包括原路径等待、选择路网中其他路径以及退出轨道交通系统,主要与影响时长有关。

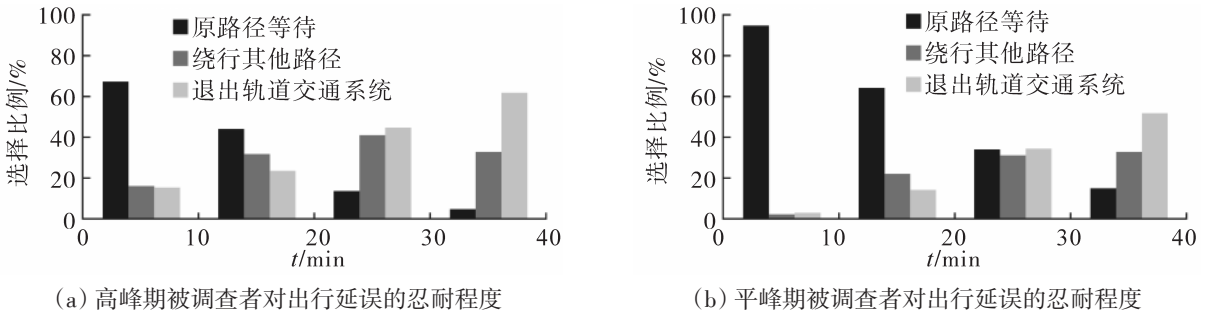


图1 问卷调查结果

Fig.1 Survey result

根据调查,乘客可能采取的替代出行方式有:① 选择路网中其他可行路径替代;② 按原路径等待直到列车恢复运营;③ 出站采用其他交通方式。用 r 表示乘客原本选择的受影响的路径,则乘客在突发事件发生后的各替代路径出行阻抗可描述如下。

1) 选择绕行其他可行路径

$$\varphi_k^{o,d^1}(t) = \varphi_k^{o,d}(t) \quad \forall k \neq r \quad (1)$$

需要说明的是,上述替代路径中可能不存在或者存在不只1条可行路径,这取决于 od 之间有效路径的数量与这些路径是否被突发事件所影响有关,用 q 表示替代绕行路径数量。

2) 等待直至恢复正常运行

$$\varphi_r^{o,d^2}(t) = \varphi_r^{o,d}(t) + t_{\text{wait}} \quad (2)$$

3) 选择其他交通方式(本文仅考虑采用公交替代)

$$\varphi_r^{o,d^3}(t) = \sigma_{\text{bus}} \left(\frac{\bar{v}_{\text{rail}}}{\bar{v}_{\text{bus}}} T^{o,d} \right) \quad (3)$$

式中: t 表示当前时刻; $\bar{v}_{\text{rail}}$, $\bar{v}_{\text{bus}}$ 分别表示轨道交通,公交车的平均运行速度; t_{wait} 表示乘客的等待时间; σ_{bus} 表示改用公交出行的惩罚系数; $T^{o,d}$ 表示轨道交通从车站 o 到 d 的运行时分。

由于将乘客个体认为是具有独立判断的智能体,因此将乘客的选择考虑时间及路径2中的等待不耐烦行为也考虑在内。

乘客的选择考虑时间是指乘客由于临时受到突发事件影响,而选择原本不熟悉的路径以继续完成出行所需要的考虑时间。我们认为考虑时间 $\varphi_{\text{consider}}$ 与乘客的可选路径数量 q 有关

$$\varphi_{\text{consider}} = \tau(q + 2) \quad (4)$$

式中: τ 为常数,数据可通过交通调查获得,本文取5 s。

乘客的等待不耐烦行为是指在原路径等待中,乘客会由于等待时间过长而最终放弃等待,从而选择替代方式①或方式③出行。这里我们认为乘客的忍耐上限是所有可选路径中的最大阻抗值 $\max\{\varphi^{o,d}\}$ 。

$$\varphi^{o,d^2}(t) = \varphi_r^{o,d}(t) + t_{\text{wait}}^* \leq \max\{\varphi^{o,d}\} \quad (5)$$

由式(5)可得能够等待的最长时间是 t_{wait}^* 。超过此等待时间,乘客将选择其他方式继续出行。

1.2 出行路径决策

乘客的路径选择决策是基于路径效用,他们会选择自认为效用最大者,也就是选择阻抗最小的路径。尤其是在突发事件情况下,乘客的原本出行被打乱,又急于到达目的地,因而每位乘客的状态都将是“自私的”。

对于每一位乘客智能体,我们可以定义乘客的选择行为,简称为突发决策行为。

Step 1: 未受到影响的乘客按照原本出行路径出行;

Step 2: 受到影响的乘客,首先计算可替代的路径,由式(1)一式(3)得出,根据可替代路径的数量计算乘客的考虑时间,由式(4)得出;

Step 3: 经过考虑时间,乘客从可替代路径中选择出行阻抗最小的路径出行;

Step 4: 若乘客选择替代方式②,原路径等待,则还需要考虑“乘客的等待不耐烦”,当满足式(5)后,乘客选择方式①和方式③替代路径出行。

2 基于多智能体的乘客分布仿真

城市轨道交通系统是一个复杂动态系统,乘客、列车等构成的各部分要素之间处于不断动态交互过程,网络客流分布情况难以采用全局数学模型描述,但是从微观层面来看,网络客流分布就是城市轨道交通网络上每个乘客出行路径叠加的结果。因此本文构建基于多智能体的城市轨道交通乘客行为仿真,通过大量乘客智能体的行为作用来宏观展现网络客流分布情况。

2.1 多智能系统

作为人工智能领域的核心概念,Agent是具备感知、分析、学习等智能行为,可与所处环境及其他实体动态交互、综合决策、调整自我状态的实体。多智能体系统(multi-agent system, MAS)则是由多个Agent组成的集合,是一个有序有组织的智能体群体。每个智能体根据环境信息完成各自的工作,并在系统中进行交互,使系统足以展现出宏观行为。用软件Agent模拟现实系统中的乘客行为和它们彼此间相互作用的关系,进而模拟出系统的整体性质和演化过程,这种研究思路与复杂系统研究所面对的“由部分到整体”的现象非常吻合,因此多智能体仿真是目前研究复杂系统问题最有效的方法之一^[10-11]。

针对城市轨道交通网络问题,系统主要包括城市轨道交通网络、列车运行图、乘客、列车等要素,其中乘客和列车具有主动交互和适应环境能力,可作为智能Agent,城市轨道交通网络和列车运行图不为活动主体,代表环境和资源。因此城市轨道交通突发事件乘客出行行为仿真可以通过上述多个乘客Agent、列车Agent及资源环境构成的多智能体系统完成,不同Agent之间,Agent与环境之间进行感知、反馈、决策。

2.2 列车Agent分析

对城市轨道交通列车,可抽象出列车Agent类,用以代表城市轨道交通网络上的列车,它是乘客Agent完成路网出行的主要载体。列车Agent在区间内的运行时间由列车运行图控制,当列车Agent到达车站并停下,乘客根据需求进行上下车作业,直至列车Agent从车站驶离。对列车Agent做出如式(6)的形式化定义,其中Code为列车的车次号;State为列车的当前状态,表示运行还是停止;Capacity为列车的定员;PasList表示列车上拥有的乘客Agent集合;Nextstation为列车的下一个停站目的地;Path代表列车的计划运行线,

是列车将要经过的车站的到发时间的集合。

$$Train:Agent(Code,State,Capacity,PasList,Nextstation,Path) \quad (6)$$

2.3 乘客 Agent 分析

对城市轨道交通乘客,可抽象出乘客 Agent 类,乘客 Agent 不仅能实时感知外界环境的变化,还拥有独立的知识,能够根据外界的情况进行出行行为的调整,具备复杂的决策判断能力。乘客 Agent 个体拥有单独的出行起点、终点和出发时间,正常情况下,他能够从有效路径集中选择一条路径用以出行,但是当出行路径受到突发事件的影响时,乘客 Agent 能够根据实际情况进行调整,改变出行策略。对乘客 Agent 做出如式(7)所示的形式化定义,其中 ID 为乘客的编号;Origin 为乘客的出行起始点;Destination 为乘客的出行终到点;Location 为乘客的当前位置;Impact 为乘客是否受突发事件影响;Route 为乘客的选择路径;Nextaction 表示乘客的下一步动作,后三个属性主要由突发决策行为决定。

$$Passenger:Agent(ID,Origin,Destination,Location,Impact,Route,Nextstation) \quad (7)$$

2.4 系统要素交互机制研究

由于多智能体仿真系统(MAS)的实现必须通过多个 Agent 之间的协作和 Agent 与资源环境的交互完成,因此有必要考虑系统要素(各 Agent 和资源环境)的交互机制。针对城市轨道交通而言,列车和环境的交互:列车到发站;乘客和环境的交互:乘客进出站、换乘等;乘客和列车之间的交互:乘客候车和上下车等,这些就是系统要素交互机制问题。

2.4.1 列车和环境的交互

列车是乘客在路网中移动的载体,而列车的运动是按照列车运行图规定的时刻进行。列车运行图是列车运行时间与空间关系的图解,其记录的最主要信息是列车到达各车站的到点和发点,本文研究假设除被突发事件影响的列车外,其余列车均严格按照计划运行图运动。用 $S_{li}^j(A_{li}^j, D_{li}^j)$ 表示第 j 次列车在线路 l 上的车站 S_{li} 的到达时刻 A_{li}^j 和发车时刻 D_{li}^j ,则列车 j 的运行轨迹可表示为 $\{S_{li}^j(A_{li}^j, D_{li}^j) | \forall i \in l\}$,列车运行图即为所有列车的运行轨迹的集合。

仿真中,对于第 j 次列车 Agent,如果当前时刻 t 等于到达时刻 A_{li}^j ,列车在车站 S_{li} 停下,更改 Agent 属性 State 为“停止”,办理乘客上下车作业,乘客 Agent 上车则添加到 PasList 集合中,乘客 Agent 下车则从 PasList 中删除;若当前时刻 t 等于出发时刻 D_{li}^j ,列车停止办理乘客上下车作业,并从车站 S_{li} 出发,更改 Agent 属性 State 为“运行”,并更新下一停站目的地 Nextstation,其余时间列车在区间中运行,不与环境发生交互。

2.4.2 乘客和环境的交互

乘客是网络中运动的主要智能体,从客流原始 OD 数据中可以构建基本的乘客 Agent,赋值起始点 Origin 和终到点 Destination。如果当前时刻 t 等于该乘客的进站时刻时,该乘客 Agent 进入仿真系统,并将其分配到对应的进站车站上,更新 Location 属性,随后该乘客 Agent 通过网络环境感知和判断,选用突发决策行为,判断是否受到突发事件影响,更新乘客的 Impact 属性,并选择适合的路径 Route,设置乘客的下一步动作 Nextaction 属性。若有换乘,则在换乘站需再判断一次突发决策行为。上述一系列活动最终结束于乘客到达目的地,并将乘客 Agent 从仿真系统中删除。

2.4.3 乘客和列车之间的交互

乘客和列车之间的交互是城市轨道交通乘客出行仿真的核心。正常情况下,乘客 Agent 根据自身选择的路径完成候车、上车、下车、换乘(如果存在)并最终出站,其中上下车为乘客和列车之间直接的交互。本

文假设车站站台容量无限制,乘客可自由下车;但由于列车容量有限制,乘客上车会受到列车上人数的影响,当列车满员,即满足函数

$$\text{Train:Agent.function()}\{\text{PasList.Count} = \text{Capacity}\} \quad (8)$$

后续乘客无法继续上车,只能等待后续列车,产生“留乘”情况。乘客的上车次序满足先进先出(FIFO)的排队规则。在突发事件情况下,由于列车Agent无法按时到达车站,会造成受影响站台的客流滞留,乘客的出行行为的选择发生改变,适用突发决策行为。

3 仿真过程设计

基于上述对列车Agent、乘客Agent的分析及其交互机制研究,设计系统仿真模型如图2所示,系统演化步长为1s。仿真主要步骤是:①输入列车运行图、客流需求、系统仿真参数(如进出站、换乘走行时间)等基础数据;②采用Monte Carlo方法按仿真步长(每秒)推进仿真实验;③输出相应的仿真结果。

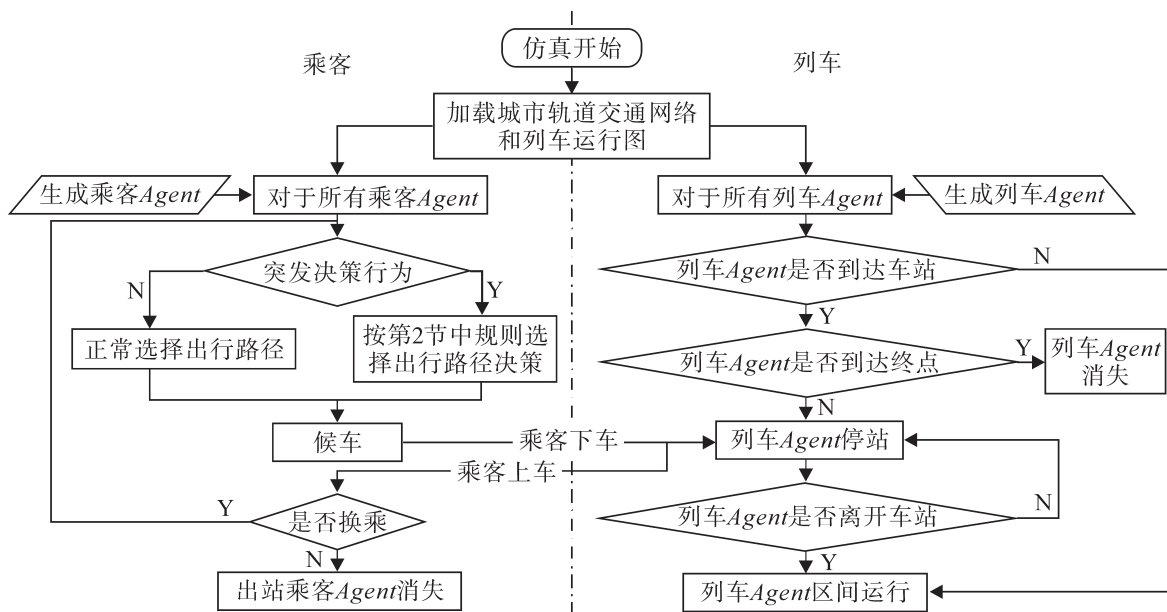


图2 仿真系统流程图

Fig.2 Flow chart of simulation

4 数值仿真及分析

本研究以从上海轨道交通网络中抽象出的简单实验网络为背景,以AFC(自动售检票系统)获取的客流需求数据和实际列车运行图数据作为输入进行数值仿真,采用C#.Net语言和Oracle数据库,设计构建突发事件下的乘客出行行为仿真平台,并进行模拟实验分析。实验中采用工作日的客流数据及运行图,并假设1号线(纵向)从08:15分开始下行方向(Downstream)有突发事件产生的20min延误,实际运行图可见图4,Upstream为上行方向,实验可得出以下结果。

1) 车站分时段客流量如图3所示,由于08:15开始1号线下行方向发生延误,沿线几个车站客流发生积压,而后08:40起恢复正常运营,但是由于之前客流积压严重,远离始发站0135的车站无法及时疏散客流,造成客流积压持续到09:30甚至10:00,部分车站(如车站0128,0131)积压乘客近3000人,无法及时疏散。长时间的站台积压客流对乘客安全,用户满意度有不利影响。在实际轨道交通网络中,该仿真系统可以就发生列车延误后,对可能发生长时间的延误进行预警,对特定积压严重的车站制定相应的应急预案,提示运营人员采用及时合理的应急对策,例如直接开行空车或备车到这些客流较大、积压严重的车站来及时疏散积压客流,并且可以控制进站闸机来缓解客流持续到达。

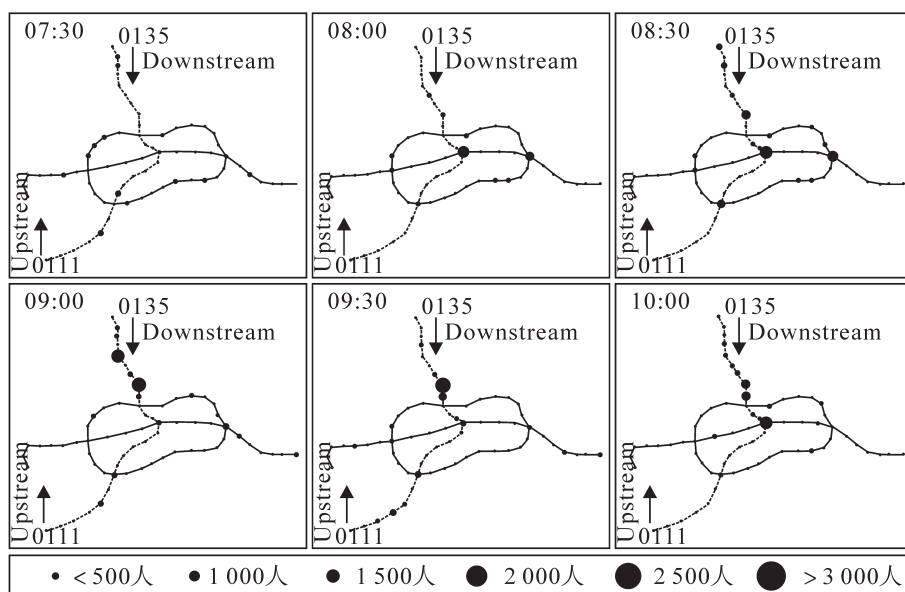


图3 车站分时段客流图

Fig.3 Passenger flow of stations at different time

2) 假设1号线列车最大容量为1 460人,用颜色代表列车满载率并绘制在列车运行图上,颜色越近红色代表列车满载率越高,越接近绿色代表满载率越低,可得如图4所示的实际满载率列车运行图。图中看出由于列车延误(Train Delay)期间站台客流无法疏散,会导致运营延误恢复后的列车过度拥挤,如图中运营恢复后4列列车在0132至0126区间内满载率达到饱和(100%),会导致靠后的车站(如0128、0130等车站)乘客无法上车,站台客流无法及时疏散。在仿真系统中可以实时输出当前所有列车的满载率,再将其与各站点及线路的输送能力相互对照,得出可能存在的薄弱环节,为轨道交通运营提供辅助决策,对这些车站及列车需要加强客流监控和管理,以保障乘客人身安全。

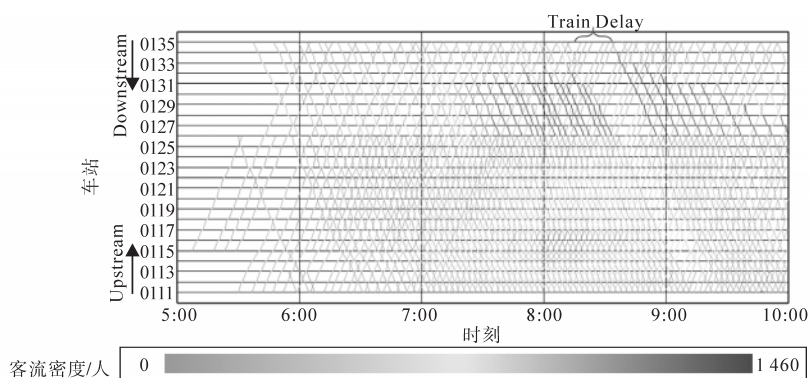


图4 实际满载率列车运行图

Fig.4 Train working diagram with actual load factor

3) 本文与传统方法最大的区别在于考虑了突发事件对乘客出行行为的影响,以1号线上的车站0128(客流较大车站)和车站0123(网络中心车站)为例,对仅考虑列车延误的传统方法URT_PDSS^[8]与本文提出仿真系统(Proposed Simulation)进行结果对比。图5说明了本文提出的仿真方法中车站内积压人数相较于传统方法较少,最大差别可达47%,主要原因是部分乘客在突发事件影响下会选择其他路径或其他交通方式出行以避免列车延误,或是等候时间太长而放弃等待,如图5(a),随着时间的增加,车站内乘客逐渐减少,当到足够时间,大量乘客选择放弃原地等待。与传统方法相比,本仿真系统对突发事件后的车站客流

变化有了更准确的推测。

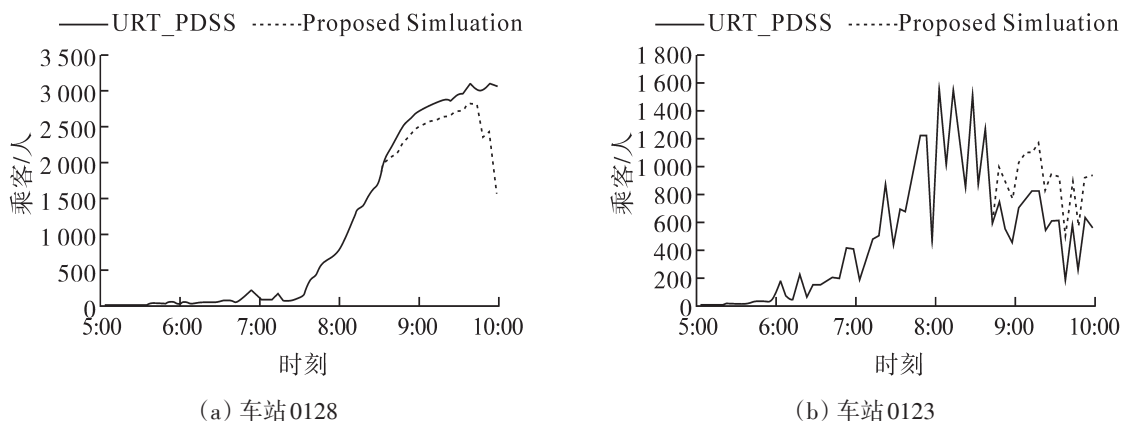


图5 延误车站客流对比

Fig.5 Compared result of passenger flow at delayed stations

4) 此外对比路网中其他换乘站车站0241(网络左边的换乘站)和车站0249(网络右边的换乘站)结果如图6所示。图中看出这两个换乘站在列车延误后的一段时间内客流均有不同程度的增加,增加幅度达到10%,造成这一现象的原因主要是部分受突发事件影响的乘客会选择路网上的其他路径出行,通过选择其他换乘站避开延误换乘站以完成本次出行。对于更加复杂的轨道交通网络,乘客能够选择的替代路径将会增多,选择路网其他路径的乘客人数也将增加,网络上的相邻换乘站客流将会突发增加,轨道交通运营部门也应当有相应的应对策略,可利用仿真提前预测网络客流分布,必要的话制定相应的应急预案。

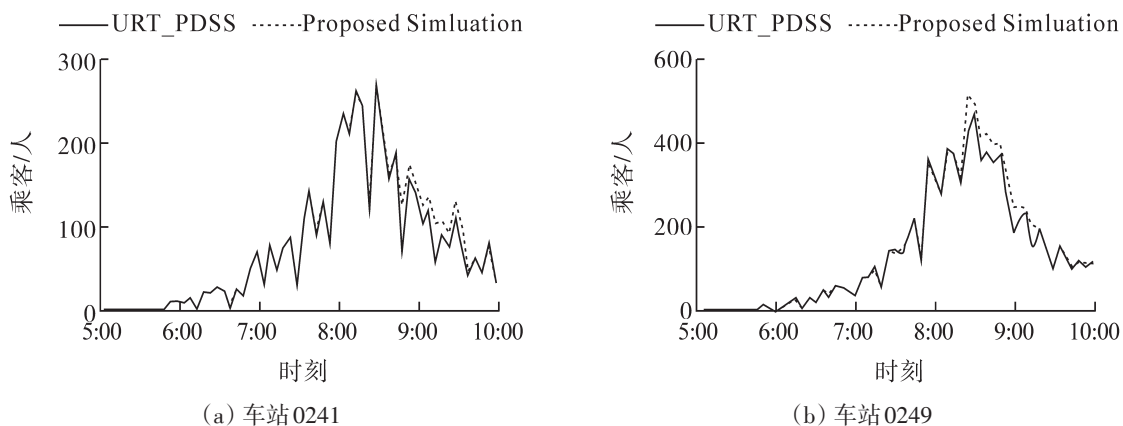


图6 网络换乘站客流对比

Fig.6 Compared result of passenger flow at key transfer stations

5 结论与展望

所建立的多智能城市轨道交通突发事件乘客出行行为仿真模型,基于C#.Net语言和Oracle数据库开发了系统仿真平台,能够较为真实地反映突发事件下城市轨道交通网络客流分布情况,可对城市轨道交通应急指挥、列车运行方案调整等提供辅助决策依据。

利用简单网络进行仿真实验,与传统仿真方法比较可揭示乘客在突发事件影响下出行行为的改变机理,结果显示仿真模型可计算并推测列车及站点的动态变化积压客流量,结合各站点的客运能力,判断是否对某站点进行疏散组织、限流控制或制定救援方案等预案措施(例如发布辅助出行信息,接驳公交数量等)。

该模型还需从以下几点进一步研究:① 突发事件发生后,列车实时调整策略对网络客流分布的影响;

② 乘客选择行为因为出行目的不同导致对各路径的偏好不同。

参考文献:

- [1] 徐瑞华, 罗钦, 高鹏. 基于多路径的城市轨道交通网络客流分布模型及算法研究[J]. 铁道学报, 2009,31(2):110-114.
- [2] 刘剑锋, 孙福亮, 柏赞, 等. 城市轨道交通乘客路径选择模型及算法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2009,9(2):81-86.
- [3] 四兵锋, 毛保华, 刘智丽. 无缝换乘条件下城市轨道交通网络客流分配模型及算法[J]. 铁道学报, 2008,29(6):12-18.
- [4] 姚向明, 赵鹏, 乔珂. 城市轨道交通网络客流分布仿真模型研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2012,12(6):52-59.
- [5] HIGGINS A, KOZAN E. Modeling train delays in urban networks[J]. Transportation Science, 1998,32(4):346-357.
- [6] NIELSEN O A, LANDEX A, FREDERIKSEN R D. Passenger delay models for rail networks[J]. Schedule-Based Modeling of Transportation Networks: Theory and Applications, 2008,46:27.
- [7] 洪玲, 高佳, 徐瑞华. 城市轨道交通网络突发事件影响客流量的计算[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2011,39(10):1485-1489.
- [8] JIANG Z, LI F, XU R H, et al. A simulation model for estimating train and passenger delays in large-scale rail transit networks[J]. Journal of Central South University, 2012,19:3603-3613.
- [9] LI F, XU R H. Simulation of passenger distribution in urban rail transit in case of emergencies[C]//Transportation Mechanical and Electrical Engineering (TMEE), 2011 International Conference on. IEEE, 2011:1933-1936.
- [10] 刘玉麟. 基于多主体仿真的城市轨道交通网络乘客出行行为研究[D]. 上海:同济大学, 2008.
- [11] 何嘉耀, 叶桢翔. 基于多智能体系统的单元城市交通需求特性研究[J]. 华东交通大学学报, 2013,30(3):5-11.

Simulation of Passenger Travel Behaviors on Urban Rail Transit in Emergency

Li Wei, Xu Ruihua

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Passengers' travel behaviors on urban rail transit will be influenced by emergency to a great extent. As a result, the passenger flow's dynamic distribution for the whole network would change significantly compared with the normal state. This paper analyzes the influence of emergency on passenger travel behaviors, and then builds up the passenger agent model and train agent model, as well as the interactive mechanism. Based on Mutil-Agent, simulation of passenger travel behaviors in emergency on urban rail transit is carried out. Numerical calculation verifies the effectiveness of the proposed simulation compared with conventional methods. The proposed method can serve as a useful and practical tool for quantitative analysis, which is beneficial for operators to deal with the problems caused by emergency, such as emergency disposal and train operation adjustment.

Key words: urban traffic; simulation system; mutil-agent; emergency; passenger behavior

(责任编辑 姜红贵)