

城市轨道交通车站乘客群体行为特征研究

A Study on Characteristics of Passenger Collective Behaviors on Urban Rail Transit Stations

张琦, 韩宝明

(北京交通大学, 北京 100044)

ZHANG Qi, HAN Bao-ming

(Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

摘要: 为了研究城市轨道交通车站乘客群体行为的产生机理及其变化规律,提出乘客流稳静的概念,用以描述对乘客流状态突变倾向的缓解作用。结合车站设施属性及乘客流时空分布特征,应用乘客群体行为模型,采用仿真情景试验方法,从乘客流流量、密度与速度三个方面量化研究乘客流稳静的影响因素与作用方式,从而揭示乘客流状态突变的内在机理。试验数据显示:设施相对距离对乘客流平均流率衰减具有直接作用;通道出入口设施的相对能力对通道乘客流密度具有影响作用,这种作用与乘客流规模存在内在关系;流线交叉对乘客流速度突变具有较为显著的作用,且同时伴随密度的变化。以试验研究为基础,分别针对流量、密度、速度三个方面提出合理引导、组织与控制乘客流的策略。

Abstract: To investigate the characteristics of passenger collective behaviors on urban rail transit stations, this paper introduces a concept called passenger-flow-calming to describe the relief of passenger flow instability. By analyzing the characteristics of facilities and space-time distribution of passenger flow, the study used the passenger collective behavior model and

0 引言

城市轨道交通车站内部主要包含三类交通主体:乘客、车站设施和交通工具^[1]。三类交通主体以车站的交通功能为核心,产生复杂的相互作用关系。乘客群体在城市轨道交通车站内部的行为状态除了受乘客个体之间的相互影响以外,同时受到车站设施和交通工具属性的影响,从而形成与其他场合不同的行为状态特征。

行人群体行为是具有差异的行人个体行为在不同外部条件作用下的复杂聚合表现。行人群体行为具有盲从、就近、拥挤冲突等行为特征^[2-4],加之行人的自组织行为^[5-7],往往容易诱发过度拥挤、踩踏等

simulation experiment to identify the elements that affect passenger-flow-calming from three passenger traffic flow parameters: volume, density and speed, in order to reveal the internal mechanism of sudden change of the passenger flow. The experiment results show that the relative distance between the facilities has a direct effect on the decrease of average passenger flow rate and the relative capacity of corridor entrance/exit affects passenger density, which relate to the internal passenger volume. The study also show that interweaving passenger flow clearly impacts the speed of passenger flow and the passenger flow density. Based on the above results, the paper makes

few suggestions on how to reasonably guide and control passenger flow in passenger volume, density and speed respectively.

关键词: 交通规划;轨道交通;车站;乘客流;行人仿真;稳静特征

Keywords: transportation planning; urban rail transit; stations; passenger flow; simulation; flow calming characteristics

中图分类号: U491.2⁺6

文献标识码: A

收稿日期: 2009-10-11

基金项目:国家自然科学基金项目资助(60674012)

作者简介:张琦(1982—),女,山西太原人,博士,博士后,主要研究方向:运输组织现代化与系统仿真。

E-mail:zhangqi.bjtu@163.com

不良后果。尤其是在城市轨道交通车站的复杂环境中,设施布局与交通工具到发决定了乘客流时空分布,乘客群体行为特征与乘客流时空分布产生双重作用,导致乘客流在流量、密度、速度三个方面呈现出与时间和空间要素相关联的波动趋势和变化规律,波动趋势在特定因素的作用下呈现出加剧或缓和两种相反的发展过程。激波是压力、密度或速度发生突变的断面,反映在人流中,往往就是人群发生拥挤事故的突变点^[8]。研究这类突变点的生成机理和变化规律,对于安全引导与控制车站乘客流具有重要意义。

已有行人行为或行人流的研究主要包括针对行人行为的建模研究^[9-12]、针对行人物理特性的建模研究^[8, 13-15]以及行人运动参数的关系研究^[16-17]等几个方面。采用的方法主要包括数学建模、仿真建模、实测与统计分析等。本文应用行人微观仿真方法,通过构建试验情景,研究城市轨道交通车站内部乘客流的状态表现及变化,分析状态突变的内在机理及影响因素的作用过程,提出乘客流运动状态失控的缓解策略,为制定乘客群体行为安全与效率保障措施提供依据。

1 乘客群体行为模型

定义乘客运动所处的空间为二维网格平面,考虑拥挤环境下乘客平均占用面积,定义每个单元格为 $0.45\text{ m} \times 0.45\text{ m}$ 。每个单元格可以为空,可以被一名乘客占据,也可以被设施等物体占据。乘客群体行为模型将乘客抽象为 $0.45\text{ m} \times 0.45\text{ m}$ 范围内不可发生形变和交叉重叠的实体,见图1。运动环境中存在高差的部分可通过设置二维网格属性以及该范围内乘客属性加以处理,所有乘客的行为通过同步刷新,实现过程的连续推进。

定义环境势能场^[18]抽象描述城市轨道交通车站环境中设施与交通工具的作用,即针对具有不同行为目的(进站、出站、换乘等)的乘客,在其行为网格环境中定义并生成与其目的对应的潜在量场。环境势能场以物理环境中所有网格位置的相对势能为作用手段,各点的势能值代表由该点移动至势能参照点(目标位置)的消耗量(如距离)。乘客在势能场的作用下,实现由高势能向低

势能位置的移动。具体的势能场生成与作用方式在文献[19]中有详细描述。

2 乘客流稳静的概念

城市轨道交通车站内部乘客流状态突变是拥挤事故或局部疏散功能失效的诱因。本文把对乘客流状态突变倾向的缓解作用定义为乘客流稳静,即通过调整设施布设、组织方式,合理有效地引导、组织与控制乘客流,保障车站内部的乘客安全与效率。

乘客流状态可以从流量、密度与速度三个方面予以衡量。这三个方面是乘客个体之间交互作用的主要表现,同时,结合车站的交通功能,这三个方面分别对应于乘客流对车站设施的冲击力、对车站功能区域的占有程度,以及对车站功能区域的单位时间占用面积。

3 流量稳静特征

乘客群体行为的特征之一是对空间的占用与冲击作用,这种作用在不同的乘客流到达分布条件下具有不同的表现特性。以乘客流的冲击持续时间与平均流率为衡量参数,研究乘客流率的变化特征,分析乘客流流量的波动机理。如图2所示,假设ab, cd和ef三个截面为研究参照面,乘客群体在某空间内从初始位置开始持续向右运动。定义冲击持续时间为第一名乘客通过截面ab或cd时开始至最后一名乘客通过时截止的时间。定义平均流率为单位时间(每秒)通过截面ab或cd的乘客数量。以乘客流对ab, cd两截面的冲击持续时间和平均流率为统计量,考察截面ef距截面

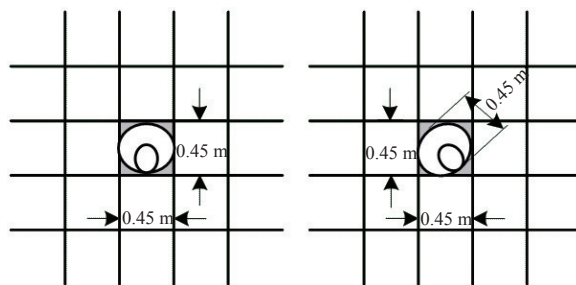


图1 乘客与运动空间

Fig.1 Passengers and movement space

ab的平均距离 L 、截面ab与cd的距离 T 的变化规律。

假设输入条件为：乘客流规模 $Q=480$ 人，以 $2.4\text{人}\cdot\text{s}^{-1}$ 的流率从截面ef出发；设定乘客期望速度分布比例为： $1.35\text{m}\cdot\text{s}^{-1}:0.9\text{m}\cdot\text{s}^{-1}:1.8\text{m}\cdot\text{s}^{-1}=80\%:10\%:10\%$ (参考元胞自动机(CA)模型中对乘客期望速度的分布比例^[19]，并结合北京市地铁复兴门车站2号线站台实地采集数据^[18])；乘客初始分布平均距离 L 分别为 $l, 2l, 3l, 4l$ ($l=30\text{m}$)。

由上述条件得到截面ab处的冲击持续时间与平均流率，见图3。可以看出，乘客流规模一定的条件下， L 对冲击持续时间与平均流率分别具有正向与反向的作用。随着 L 增加，具有速度差异的乘客在运动方向上逐渐拉开间距，导致对截面ab的冲击持续时间逐渐延长。平均流率集中体现了乘客流的冲击强度，随平均距离的变化呈现不均匀的特征：1)平均距离为 $l\sim 2l$ 时，平均流率衰减不明显，原因可能是 L 小于某水平时，没有充分的时间体现乘客步行差异；2)平均距离为 $2l\sim 3l$ 时，平均流率迅速减小，体现了距离对流量稳静的主要作用范围；3)平均距离为 $3l\sim 4l$ 时，平均流率衰减较弱，原因可能是 L 大于某水平后，乘客因速度差异已充分拉开间距，对截面ab的冲击趋缓。

保持乘客流规模与属性不变，调整截面ab与cd之间的距离 T ($t=55\text{m}$)，得到截面cd与ab平均流率的差值变化情况，见图4。在 L 值一定的条件下，乘客平均流率的衰减程度随 T 的增大而加剧。随着 L 增加， T 值的改变对平均流率衰减的作用趋缓。

针对乘客流流量的试验结果显示：距离对乘客流的稳静具有影响作用，其显著程度与距离的变化范围相关。但同时，距离直接影响乘客的步行时间，距离延长将直接导致换乘时间增加。合理布设车站设施的相对位置，利用乘客行为的个体差异性，可以控制集中生成的乘客流对车站空间的冲击作用。

4 密度稳静特征

依据行人流波动理论，当人群密度较低时，行人流不具备连续介质的基本特点，人群中的任

何扰动都不可能以波的形式传播；人群密度较高时则具备连续介质的特征，人群中局部的密度变化将以波的形式传播。同时由于个体差异性，将导致波发生非线性畸变^[6]。

车站内部可以依据承担的交通功能进行区域划分，不同的功能区域在运营过程中承担不同的乘客流密度分布。乘客流密度对功能区域交通功能的影响作用随时空条件呈现规律性变化，功能区域间密度水平的分布情况对枢纽服务水平产生不同程度的影响。乘客流密度的区域性特征表现为平均密度以及密度水平的时间分布。乘客流密度的主要影响因素包括：1)车站内部功能区域交通功能决定的乘客停留时间；2)车站内部功能区域出入口设施的属性；3)车站内部功能区域的可利用面积；4)相邻功能区域的交通功能及其属性。

下面以乘客流平均密度与密度水平的时间分布为衡量参数，研究乘客流密度的变化特征，分析乘客流密度的波动机理。如图5所示，乘客群体在某空间内从初始位置开始持续向右运动，通过长度为 L 、宽度为 W 的通道，通道入口端与出口端的宽度分别为 I 和 O 。以通道平均密度为统计

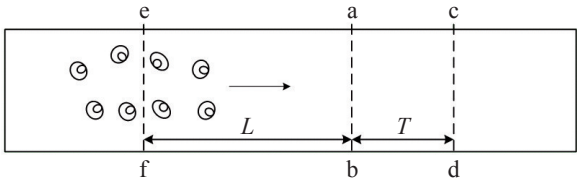


图2 流量稳静试验空间示意图
Fig.2 Flow calming experiment

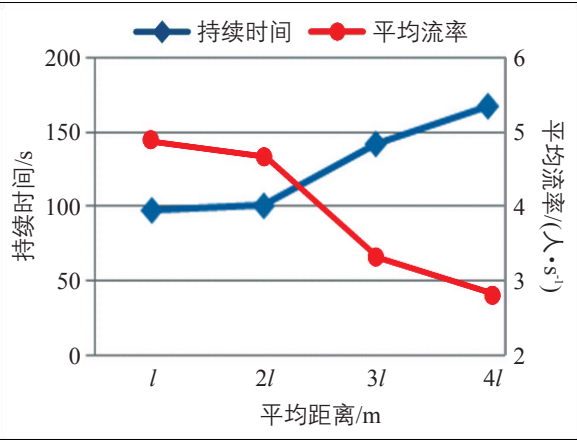


图3 乘客流对截面ab的冲击持续时间和平均流率
Fig.3 The impact of passenger flow on section ab in duration and flow rate

量,考察乘客流密度随 I 和 O 相对量值的变化规律。假设输入条件为:乘客流规模 $Q=64$ 人;乘客期望速度分布比例为 $1.35\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}:0.9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}:1.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}=80\%:10\%:10\%$;通道长度 $L=13.5\text{ m}$,宽度 $W=4.5\text{ m}$; I 与 O 的相对量值关系为:1) $I=O=2.7\text{ m}$; 2) $I=0.5O=2.7\text{ m}$; 3) $I=2O=5.4\text{ m}$ 。得到三种乘客流规模水平下通道密度随时间的变化曲线,见图6。可以看出:

1) 相同乘客流规模条件下,以通道入口与出口能力相等($I=O$)的曲线为参照,则入口端能力相对较高时通道平均密度较高,但通道占用的持续时间较短;入口端能力相对较低时通道平均密度较低,但通道占用的持续时间较长。

2) 不同乘客流规模对 $I=2O$ 条件下通道密度的最高水平影响最显著,对 $I=0.5O$ 条件下通道密度的最高水平影响最不显著。

图7是乘客流规模为 $4Q$ 时密度水平的时间比例分布图。以通道入口与出口能力相等的分布情况为参照,入口端能力相对较高时通道高密度($>0.6\text{ 人}\cdot\text{m}^{-2}$)持续时间较短,入口端能力相对较低时通道呈现持续低密度($<0.4\text{ 人}\cdot\text{m}^{-2}$)水平。

因此,对于乘客流密度特征较为明显的车站区域,应当采取主动性措施实施密度稳静,以保

证乘客安全、提高乘客集散效率。针对密度波动的影响要素,实施密度稳静可以考虑以下要点:1)提高功能区域的服务效率,缩减乘客停留时间;2)协调功能区域乘客入口与出口设施的属性,主动控制乘客进入与离开区的流率;3)合理估算乘客流密度水平的临界点,调整功能区域可利用面积;4)对重点区域进行密度稳静时必须估计对关联区域可能造成的影响。

5 速度稳静特征

乘客在城市轨道交通车站中的时效性是车站服务水平的衡量标准之一。乘客步行速度受乘客流规模、目的、设施条件等影响。在低于临界密度的条件下,乘客流速度波动可能对乘客流动产生负面影响;拥堵条件下,乘客流速度波动易诱发过度拥挤,严重时甚至发展为踩踏事故。行人流波动理论对这一现象的解释是:拥挤人群中某些个体突然加快速度或突然出现紧急障碍^[7]等都将对乘客流造成扰动,使局部密度增加,从而以波的形式进行传播。一旦形成激波,则可能诱发事故。

乘客流速度特性表现为速度量值与速度方向两个方面。以乘客平均速度及对应的乘客流密度水平变化为衡量参数,研究流线交叉条件下乘客速度的变化特征,分析乘客流速度的波动机理。如图8所示,在 $25\text{ m}\times 25\text{ m}$ 的空间内,两个乘客群体流线呈 90° 交叉的运动状态。假设输入条件为:两个群体乘客流规模相等,各为300人;乘客期望速度分布比例为 $1.35\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}:0.9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}:1.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}=80\%:10\%:10\%$ 。图9为同步记录乘客运动过程中流线交叉区域的平均速度与密度随时间的变化曲线。两个乘客群体交错之前($0\sim 15\text{ s}$),密度持续增加,平均速度基本保持期望速度水平;约 20 s 时平均速度骤然减小,密度持续增加并逐渐升至最高点,体现了不同方向乘客的交叉干扰作用;平均速度达到较低水平后,随着交错运动状态的逐渐结束,密度逐渐减小,平均速度逐渐增大。流线交叉对乘客流平均速度的影响较为显著,是限制乘客群体正常运动的因素之一。

车站环境中针对乘客流速度稳静的策略以乘

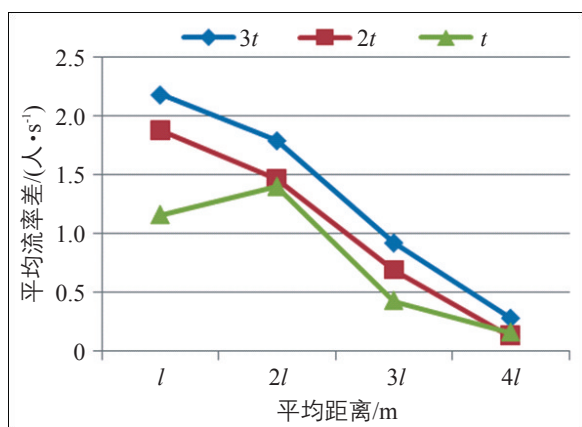


图4 乘客平均流率衰减

Fig.4 Decrease of average passenger flow rate

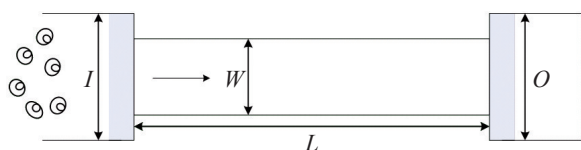


图5 密度镇静试验空间示意图

Fig.5 Density calming experiment

客步行安全、顺畅为目标，集中于速度量值稳静和速度方向稳静两个方面。对于乘客流线混杂的车站区域，应当避免时间分布集中的不同方向流线的交叉，防止速度方向不同造成乘客步行效率下降及安全隐患。

6 结语

乘客在城市轨道交通车站内的行为表现方式体现在流量、密度与速度三个方面。本文应用乘客群体行为模型，通过构建情景实施仿真试验，

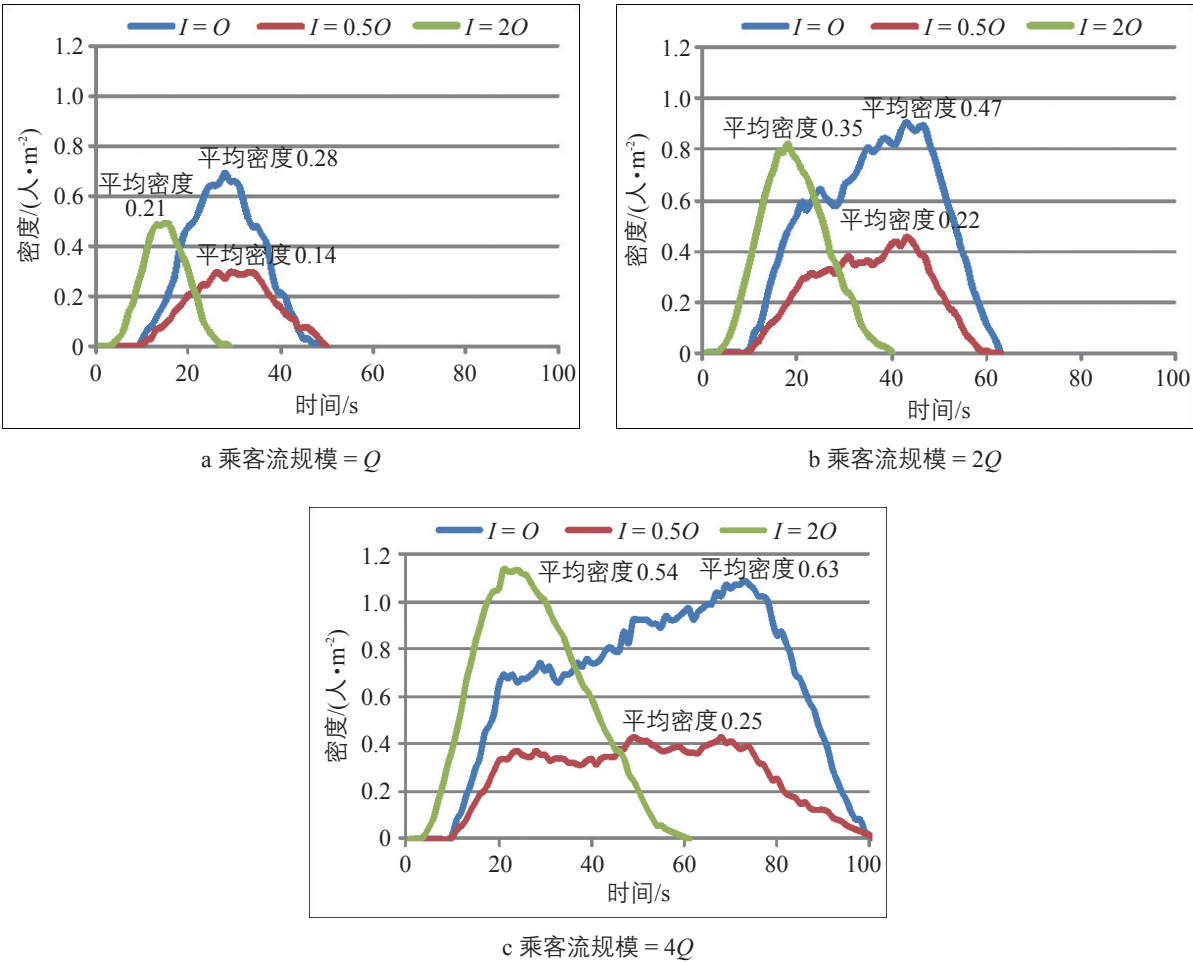


图6 通道密度随时间的变化曲线
Fig.6 Corridor density changes over time

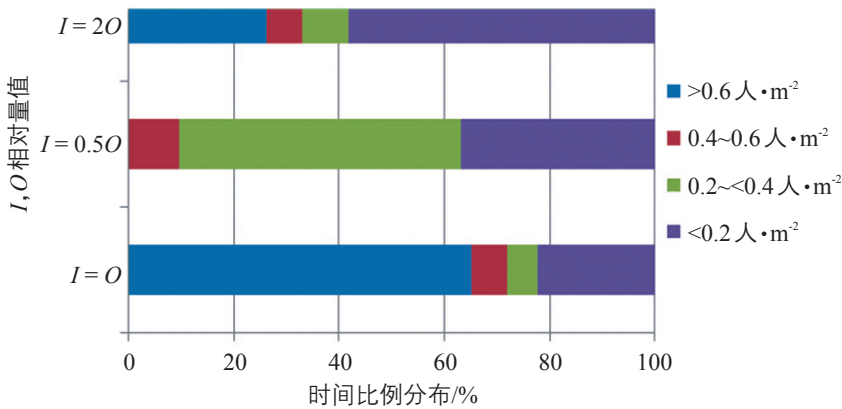


图7 通道密度水平时间比例分布
Fig.7 Corridor density distribution by time

量化研究了设施相对距离、通道出入口设施的相对能力和流线交叉对乘客流流量、密度和速度的稳静作用。研究表明: 1) 乘客流对某设施或区域的冲击作用与设施的相对距离有关; 2) 车站通道内乘客流密度受出入口设施相对能力的影响; 3) 乘客流速度分布易受流线交叉的影响。

通过设置、调整车站内部设施时空属性, 能够实现对乘客流流量、密度与速度突变倾向的控制, 即实施稳静作用, 从而实现对车站状态的主动控制。在进一步工作中, 可以结合具体的车站条件, 发掘行人群体行为特性的有机联系, 丰富与完善行人流稳静理论, 以完善公共场所设计标准, 优化行人组织方法。

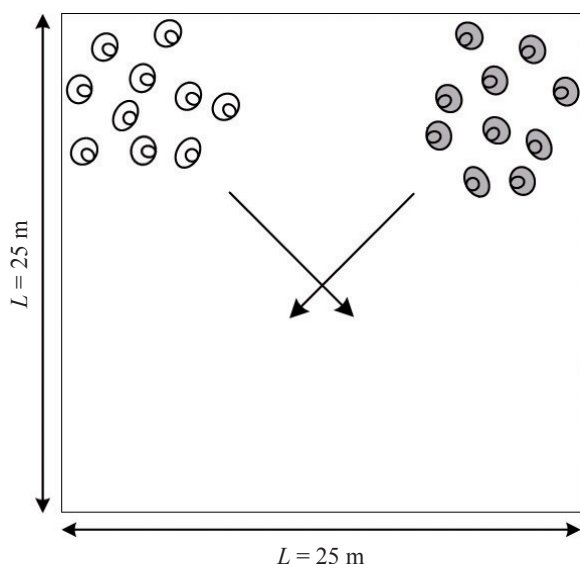


图8 流线交叉试验空间示意图

Fig.8 Interweaving passenger flow experiment

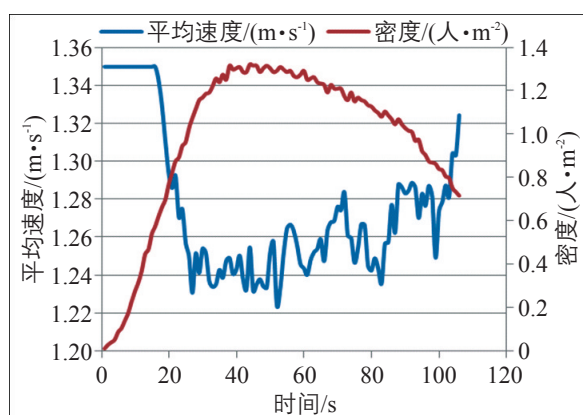


图9 乘客流线交叉状态下平均速度与密度变化曲线

Fig.9 Average speed and density curve under the condition of interweaving passenger flow

参考文献:

References:

- [1] ZHANG Qi, HAN Bao-ming, LU Fang. Simulation Model of Passenger Behavior in Transport Hubs[C] // LUO Qi, ZHOU Qi-hai. 2009 International Conference on Industrial Mechatronics and Automation, Changsha: IEEE, 2009: 220 - 224.
- [2] Reynolds C W. Steering Behavior for Autonomous Characters[EB/OL]. 2008[2009 - 11 - 08]. <http://www.red.com/cwrl>.
- [3] Reynolds C W. Flocks, Herds and Schools: A Distributed Behavior Model[J]. Computer Graphics. 1987, 21(4): 25 - 34.
- [4] Zheng M, Kashimori Y, Kambara T. A Model Describing Collective Behaviors of Pedestrians with Various Personalities in Danger Situations[C] // Lip Wan, Jagath C Rajapakse, Kunihiro Fukushima, et al. Neural Information Processing, Japan: IEEE, 2002: 2083 - 2087.
- [5] Helbing D, Molnar P, Farkas I J. Self-organizing Pedestrian Movement[J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 2001, 28(3): 361-383.
- [6] Helbing D. Self - organizing Pedestrian Movement: Experiments, Simulation and Design Solutions[J]. Transportation Science, 2005, 39(1): 1 - 24.
- [7] Hoogendoorn S P, Daamen W. Pedestrian Behavior at Bottlenecks[J]. Transportation Science, 2005, 39 (2): 147 - 159.
- [8] 卢春霞. 人群流动的波动性分析[J]. 中国安全科学学报, 2006, 16(2): 30 - 34.
- [9] LU Chun-xia. Analysis on the Wave of Pedestrians[J]. China Safety Science Journal, 2006, 16(2): 30 - 34.
- [9] Daamen W. Modeling Passenger Flows in Public Transport Facilities[D]. The Netherlands: Delft University, 2004.
- [10] Helbing D, Molnar P. Social Force Model of Pedestrian Dynamics[J]. Physical Review E, 1995, 51(5): 4282 - 4286.
- [11] Hoogendoorn S, Bovy P. Gas-kinetic Modeling and Simulation of Pedestrian Flows[J]. Transportation Research Record, 2000, 1710(4): 28 - 36.

(下转第66页)