

城市轨道交通出站楼梯处乘客排队机理

曹守华^{1,2},袁振洲¹,赵丹¹

(1. 北京交通大学 城市交通复杂系统理论与技术教育部重点实验室, 北京 100044; 2. 北京交科公路勘察设计研究院, 北京 100088)

摘要:在实测数据的基础上,分析了轨道交通出站乘客的出站规律,拟合了出站乘客在通道内和楼梯上的流量-密度曲线。在所得流量-密度曲线的基础上,研究了两个不同出站通道宽度条件下楼梯处乘客的排队机理。研究表明,拥堵产生时,通道和楼梯上乘客的水平速度近似相等,但楼梯上乘客的密度小于通道内乘客的密度,楼梯的通行能力低于通道的通行能力,从而产生乘客排队现象。

关键词:交通运输系统工程;城市轨道交通;出站乘客;排队机理

中图分类号:U12 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5497(2009)06-1463-06

Queuing mechanism of passengers at exit stairs of urban rail transit

CAO Shou-hua^{1,2}, YUAN Zhen-zhou¹, ZHAO Dan¹

(1. MOE Key Laboratory for Urban Transportation Complex Systems Theory and Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. RIOH Transport Consultants Ltd., Beijing 100088, China)

Abstract: Based on the surveyed data, the arrival behavior of the exiting passengers and the relationship between the pedestrian flow and the density in the passage and at the stairway have been analyzed. According to the regressed flow-density curve, the queuing mechanism of the passenger at the exit stairway was studied when the passage has the two different widths relative to the stairway. It was showed that the horizontal speed of the passenger at stairway is approximately equal to that in the passage when the jam occurs, but the passenger density at the stairway is lower than that in the passage. The capacity of the stairway is lower than that of the passage, thus the queue occurs.

Key words: engineering of communications and transportation system; urban rail transit; exiting passenger; queuing mechanism

楼梯是轨道交通车站中主要的升降设施之一,在客流高峰时段,轨道交通出站客流具有高强度、高密度、周期性等特点,而楼梯的通过能力有限,大量的乘客将会在楼梯入口处形成排队,造成乘客出站时间延长,降低了设施的实际通行能力及服务水平,限制了列车的发车间隔,进而影响到轨道交通的运输能力。所以研究乘客在楼梯处排

队产生的机理,有助于优化楼梯的设计,提高设施服务水平。

德国的 Helbing 在试验的基础上分析了行人的交通特性,指出体育场、剧院等处的行人通道,设计成距离出口越近、通道宽度越宽的形式,能够增加通道的通行能力^[1];美国学者 Fruin 以及 HCM2000 标准对楼梯及通道的服务水平进行了

收稿日期:2008-01-30.

基金项目:国家自然科学基金项目(50778016);“863”国家高技术研究发展计划项目(2006AA11Z201).

作者简介:曹守华(1976-),男,博士研究生.研究方向:城市轨道交通. E-mail: caoshouhua2003@163.com

研究,提出了楼梯、通道等设施的服务水平的划分标准^[2-4];HCM2000 对通勤者、学生等通道内的流量-个人空间曲线进行了总结^[4];Hankin 和 Wright 对地铁处的行人交通流进行了研究,提出了行人的速度-密度的非线性关系模型^[5]。Jodie 等对香港地铁出入口设施的服务水平进行了研究,为出入口楼梯设计的优化起到指导作用^[6]。

我国《地铁设计规范》(GB05157—2003)中规定了楼梯及通道的最小宽度,且出口设置需满足紧急疏散的要求^[7],但在紧急情况下,乘客在楼梯处会形成排队现象甚至发生踩踏事故^[1],楼梯的通行能力受到很大的影响。饶雪平等在假设乘客的走行速度相同,下车乘客均匀分布于每节车厢的前提下,利用排队论建立了轨道交通车站楼梯和自动扶梯处客流延时模型^[8]。

上述分析表明,以往的研究主要围绕楼梯或者通道的通行能力以及服务水平等进行,而未对出站乘客在楼梯处排队产生的机理进行分析。本文在实测数据的基础上,分析乘客出站特性,并对出站乘客在楼梯口的排队形成机理进行研究,旨在揭示出站乘客排队形成的原因,提高楼梯的利用率,为优化轨道交通站的楼梯出口提供理论支持。

1 轨道交通内乘客出站规律

作者于 2007 年 9 月 19 日晚客流高峰(18 : 03~18 : 13)时对北京市西直门地铁站的出站客流进行了调查,选取的位置为出站口通道及楼梯处,如图 1 所示。观测周期内,共有 4 趟车到达,到达时刻分别为时刻 21 s(即 18 时 03 分 21 秒)、时刻 206 s、时刻 345 s、时刻 438 s。

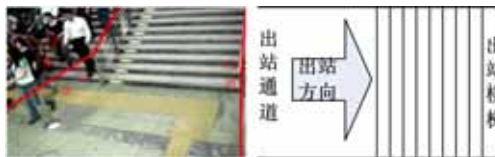


图 1 出站客流观测位置

Fig. 1 Location of surveying exiting passengers

通过观测,共采集到通道有效数据 172 组。经过数据处理、挖掘,得到出站流量-时间、速度-时间、密度-时间分布图,如图 2~图 4 所示。图中的起始时刻为时刻 18 : 03。

采集到出站楼梯上的有效数据 174 组。经过数据处理、挖掘,得到出站楼梯流量-时间、速度-时间、密度-时间分布图,如图 5~图 7 所示。此处楼梯上乘客的走行速度指水平方向的速度。

根据实际观测及图 2~图 7 可以得到如下乘客出站规律:

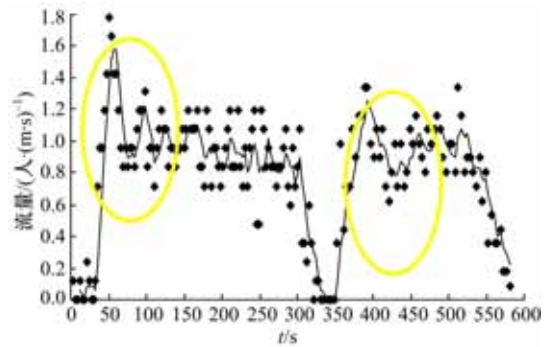


图 2 出站客流通道内的流量-时间分布图

Fig. 2 Flow-time distribution of exiting passengers in passage

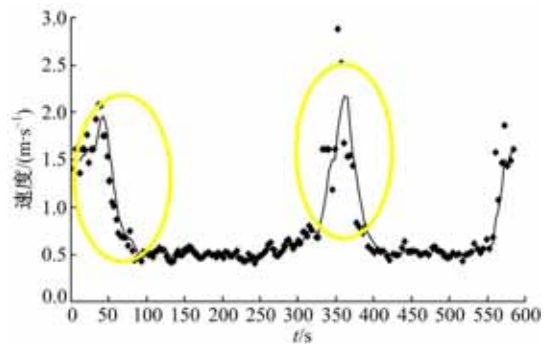


图 3 出站客流通道内的速度-时间分布图

Fig. 3 Speed-time distribution of exiting passengers in passage

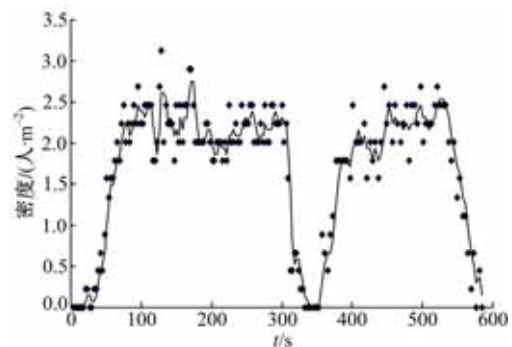


图 4 出站客流通道内的密度-时间分布图

Fig. 4 Density-time distribution of exiting passengers in passage

(1)出站客流呈现明显的周期特性。当列车到达时,乘客在短时间内积聚并逐渐消散,但客流量较大且排队形成后,楼梯或通道的客流量具有随时间的推移逐渐降低的趋势。若前一趟车的乘客未能及时疏散,后一趟车的乘客再次到达时,客流疏散的周期将加大,且实际通过的客流量降低的趋势更加明显。

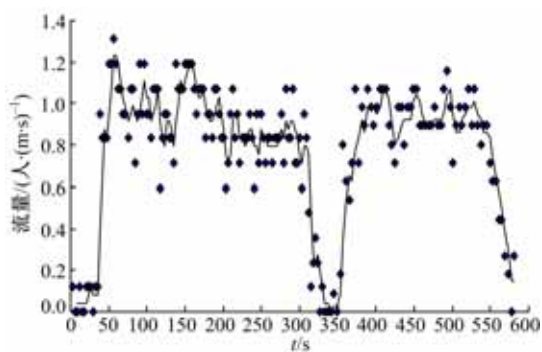


图 5 出站客流楼梯上的流量-时间分布图

Fig. 5 Flow-time distribution of exiting passengers at stairs

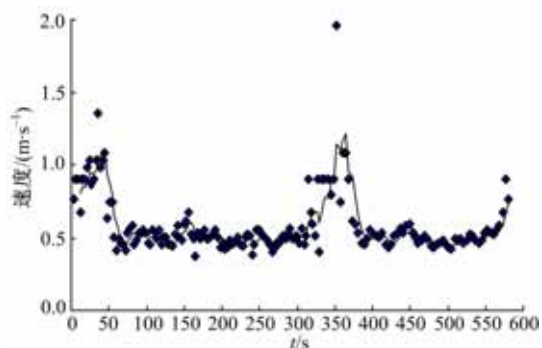


图 6 出站客流楼梯上的速度-时间分布图

Fig. 6 Speed-time distribution of exiting passengers at stairs

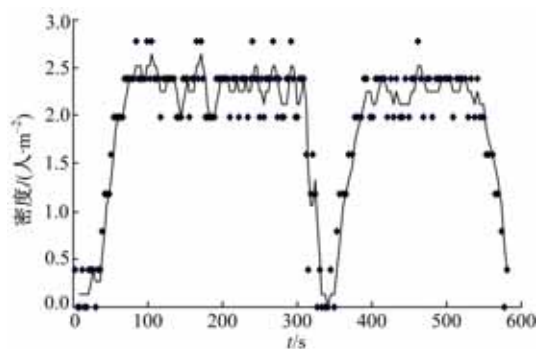


图 7 出站客流楼梯上的密度-时间分布图

Fig. 7 Density-time distribution of exiting passengers at stairs

(2) 出站客流强度高。列车到达时,大量的出站乘客在短时间内积聚。如图 2 所示的第一个周期内,到达客流量为 760 人,第二个周期到达的客流量为 540 人。

(3) 在乘客密度较低时,出站乘客的速度较大。如图 3 所示的通道内,在客流量较小时,出站客流的速度达到了 2.0 m/s 左右,甚至有的速度达到了 2.9 m/s。如图 6 所示的楼梯上,出站客流的速度达到 1.2 m/s 左右,实测最高速度为

1.96 m/s。

(4) 乘客排队形成时客流密度高。在此次调查中,出站客流在 78% 的时间内客流密度大于 1.0 人/m²,依照 HCM2000 的服务水平的划分标准^[2-4],达到 E 级以下的服务水平。测得的最高乘客密度达到 3 人/m²。

(5) 高峰时段内列车到达时,人行通道内流量在短时间内从零迅速增加并增大到最大通行能力,而后通行能力有所降低并维持在某一个值,直至乘客疏散完毕,如图 2 椭圆所示。

(6) 出站乘客排队现象明显。观测周期内,出站乘客分别在第 65 s、390 s 左右形成排队。随着到达乘客数量的增加,排队逐渐加剧,且行走速度急剧降低、密度快速增大,后面乘客没有机会超越前面的乘客,只能紧挨着前面的乘客跟随出站。

(7) 出站乘客排队形成时乘客行走速度缓慢,且速度趋于一致。实测发现,在出站乘客排队形成时(取时间段为 100~250 s、400~500 s),通道内的乘客行走速度与楼梯上乘客的水平行走速度趋于相同,其平均速度分别为 0.508 m/s、0.511 m/s,如图 3、图 6 所示。

(8) 客流较大时,尽管乘客的水平行走速度相差不大,但通道内乘客的实际通行能力稍大于楼梯上乘客的实际通行能力,如图 2、图 5 所示,实测通道内乘客的流量维持在 1.05 人/(m·s)⁻¹,而楼梯上乘客的流量维持在 1.01 人/(m·s)⁻¹。

2 通道和楼梯的流量-密度关系

国外学者提出的行人流量-密度关系模型有多种^[7-13],其规律为:流量随密度的增大而增大,在密度达到某个值时,行人的流量达到最大值,而后随着密度的增加,行人的流量逐渐降低。为研究的方便,不妨借用 Greenshield 提出的二次曲线模型^[14]对出站通道内及楼梯上乘客的流量-速度关系进行研究。

2.1 出站乘客在通道内的流量-密度关系

根据实际观测,选取不受楼梯影响时通道的流量、密度数据,依照 Greenshield 模型进行曲线拟合。拟合得到的曲线为: $Q=1.468 K-0.389 K^2$, $R^2=0.852$ 。由此可得,出站通道内的乘客自由流速度为 1.468 m/s,最大流量为 1.385 人/(m·s⁻¹),达到最大流量时,乘客行走速度为 0.734 m/s,密度为 1.886 人/m²。把测得的流量-密度数据与拟合曲线绘于同一坐标系中,如图 8

所示。

2.2 出站乘客在楼梯上的流量-密度关系

根据测得的出站楼梯上的流量、密度数据,依照 Greenshields 模型进行曲线拟合。拟合得到的曲线为: $Q=1.295 K-0.342 K^2, R^2=0.801$ 。由此可求得出站楼梯上的乘客自由流速度为 1.295 m/s,最大流量为 $1.22 \text{ 人}/(\text{s} \cdot \text{m})^{-1}$,达到最大流量时,乘客走行速度为 0.65 m/s,密度为 $1.893 \text{ 人}/\text{m}^2$ 。把测得的流量-密度数据与拟合曲线绘于同一坐标系中,如图 8 所示。

由图 8 可以看出,在楼梯和通道的宽度相同时,若楼梯与通道的乘客密度相同,且楼梯与通道互不影响,则通道所能通过的乘客流量大于楼梯所能通过的客流量。

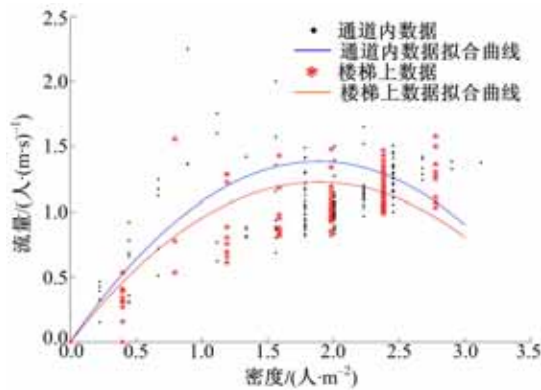


图 8 出站通道内、楼梯上乘客的流量-密度关系图

Fig. 8 Passengers flow-density curve in passages and at stairs

3 出站楼梯处的乘客排队产生机理

简单地说,到达的顾客不能立即得到服务即产生了排队。出站乘客在出站楼梯处形成排队时,乘客走行迟缓、密度较大,后面的乘客不能随意超越前面的乘客只能跟随前行。本文以行人的流量-密度基本关系作为切入点,研究出站通道与楼梯的宽度相同时,出站乘客在楼梯处排队产生的机理及出站楼梯宽度不同对出站排队的影响。

3.1 出站楼梯处的乘客排队机理

由于站台宽度的限制,通常出站楼梯的宽度不超过站台出站通道的宽度,从而决定了楼梯的最大通行能力不大于通道的最大通行能力。当乘客到达流量较小时,不会在楼梯处形成乘客排队现象;随着客流量的增加,到达客流量超过楼梯的最大通行能力时,必然形成楼梯处的乘客排队现象。

设通道、楼梯的流量-密度曲线模型分别为:

$Q_T = \alpha_T K_T + \beta_T K_T^2, Q_S = \alpha_S K_S + \beta_S K_S^2$,其中: Q_T 为通道流量; Q_S 为楼梯流量; $\alpha_T, \beta_T, \alpha_S, \beta_S$ 为模型系数; K_T, K_S 分别为通道内及楼梯上乘客密度。则有 $\alpha_T > \alpha_S > 0; \beta_T < 0, \beta_S < 0$ 。设 Q_{Tmax} 和 Q_{Smax} 分别为通道和楼梯的最大通行能力,可知 $Q_{Smax} < Q_{Tmax}$,即 $\alpha_T^2/\beta_T < \alpha_S^2/\beta_S$,则本文根据 $Q < Q_{Smax}, Q = Q_{Smax}, Q > Q_{Smax}$ 三种情况研究楼梯处的乘客排队机理。楼梯和通道的流量-密度曲线图如图 9 所示。

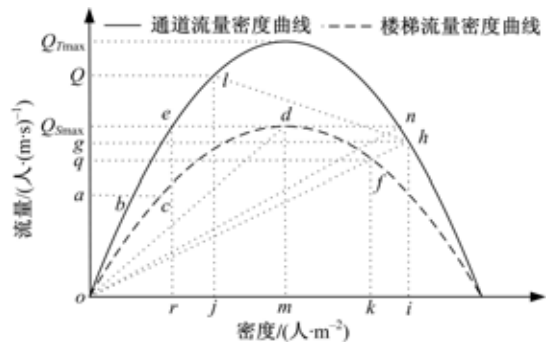


图 9 楼梯出口乘客排队产生机理示意图

Fig. 9 Queuing mechanism of exiting passenger at exit stairs

(1) 当 $Q < Q_{Smax}$ 时

由通道的流量-密度模型可知,通道内的乘客

密度为: $K_T = \frac{-\alpha_T + \sqrt{\alpha_T^2 + 4\beta_T Q}}{2\beta_T} < -\frac{\alpha_T}{2\beta_T}$,即通道

内乘客密度小于最大流量时的密度,处于自由流状态;同理,楼梯上乘客的密度 $K_S =$

$-\frac{\alpha_S + \sqrt{\alpha_S^2 + 4\beta_S Q}}{2\beta_S} < -\frac{\alpha_S}{2\beta_S}$,也处于自由流状态,

此时, $K_T < K_S; V_T = Q/K_T > Q/K_S = V_S$,即通道内乘客的密度小于楼梯上乘客的密度,但通道内乘客的速度大于楼梯上乘客的速度。可见,到达的乘客能够及时疏散,在楼梯处不形成排队。如图 9 所示,不妨设乘客到达流量为 Q_d ,通道内的乘客走行速度为直线 ob 的斜率,楼梯上乘客的水平方向走行速度为直线 oc 的斜率,直线 ob 的斜率大于直线 oc 的斜率,即通道内的乘客速度大于楼梯上的乘客速度,同时通道内的乘客密度小于楼梯上的乘客密度,此时不会形成拥堵。

(2) 当 $Q = Q_{Smax}$ 时

随着到达的客流量的增加,楼梯上的流量首先达到了其最大的通行能力 Q_{Smax} ,又由于通道的通行能力大于楼梯的通行能力,所以此时通道仍未达到通行能力 Q_{Tmax} 。当 $Q = Q_{Smax}$ 时, $K_T = \frac{-\alpha_T + \sqrt{\alpha_T^2 + 4\beta_T Q}}{2\beta_T} <$

$\frac{\alpha_T}{2\beta_T}$,即通道内乘客密度小于通道最大流量时的密度,处于自由流状态;然而,楼梯上乘客的密度 $K_S = -\frac{\alpha_S}{2\beta_S}$,根据楼梯的流量-密度模型,可求得 $\frac{dQ}{dK} = 2\beta_S K + \alpha_S$,而此处 $K_S = -\frac{\alpha_S}{2\beta_S}$,故 $\frac{dQ}{dK} = 0$ 。由此可见,楼梯的实际流量的微小变动,会造成密度 K 的剧烈变化,所以,该状态是不稳定的,当任何偶然因素的影响使得楼梯的实际流量有小的变化时,必然造成交通流向密度高的方向发展,这就产生了交通拥堵,乘客排队初步形成。此时, $K_T < K_S; V_T = Q/K_T > Q/K_S = V_S$,即通道内乘客的密度小于楼梯上乘客的密度,如图 9 中直线 edn 所示,通道内的乘客行走速度为直线 oe 的斜率,密度为 r ;楼梯上乘客的行走速度为直线 od 的斜率,密度为 m 。根据楼梯的流量-密度曲线,排队一旦产生,将使得楼梯的实际通行能力进一步降低,而乘客的到达流量依然为 $Q = Q_{Smax}$,故拥堵开始加剧,排队长度逐渐增大。

(3) 当 $Q > Q_{Smax}$ 时

随着客流量的持续增加,楼梯上的客流量将继续向更加拥堵的状态转化。根据乘客的流量-密度关系模型,在拥堵产生的初期,通道内的乘客密度仍然小于通道最大流量时的密度,处于自由流状态;尽管此刻通道的客流量还未达到其通行能力,但由于受楼梯上的通行能力的限制,通道内的乘客不得不在通道内积聚,乘客流的密度由最初的 $K_T = \frac{-\alpha_T + \sqrt{\alpha_T^2 + 4\beta_T Q}}{2\beta_T}$ 剧增到 $K_T = \frac{-\alpha_T - \sqrt{\alpha_T^2 + 4\beta_T Q}}{2\beta_T}$,但楼梯上的通行能力不能满足需求,导致乘客密度继续增加,直至 $K_T = \frac{-\alpha_T + \sqrt{\alpha_T^2 + 4\beta_T Q_{Smax}}}{2\beta_T}$ 。相应地通道内乘客的速度由自由流状态的 $V_T = \frac{2\beta_T Q}{-\alpha_T + \sqrt{\alpha_T^2 + 4\beta_T Q}}$ 急剧降为 $\frac{2\beta_T Q_{Smax}}{-\alpha_T + \sqrt{\alpha_T^2 + 4\beta_T Q_{Smax}}}$,流量由 Q 急剧降为 Q_{Smax} 。尽管此时楼梯的通行能力与通道的通行能力相等,但由于楼梯的实际流量的微小变化,势必造成楼梯客流密度的急剧增加,从而引起楼梯通行能力的再次下降,而由 $dK = \frac{dQ}{2\beta_S K + \alpha_S}$ 可以看出,随着密度的增加,密度的变化对流量的变化

逐渐不敏感,这将使客流达到某个相对稳定的值,相应地通道的实际通行能力也被迫随之降低,此时,通道内乘客的行走速度与楼梯上乘客的水平行走速度相等,恰如第 2 节中数据分析所示。

由图 9 可以看出,当流量 Q 由 Q_{Smax} 逐渐增大到 $Q > Q_{Smax}$ 时,通道内的乘客流状态由状态 e 转变到 n 再到 h ,在这个转变过程中,通道内的乘客的通行能力由 Q_{Smax} 急剧增大到某一个较大的值,然后流量降为 g (如图 2 椭圆内的曲线所示);与此同时,通道内乘客的速度急剧降低,即由直线 oe 的斜率急速降为直线 oh 的斜率,如图 3 椭圆内的曲线所示。不妨假设在楼梯上达到拥堵状态 f ,则楼梯上乘客的密度为 k ,速度为直线 of 的斜率,由于受楼梯通过能力的限制,使得通道内乘客的行走速度与楼梯上乘客的水平行走速度趋于相同,故通道内乘客的拥堵状态为 h ,密度为 i 。达到该状态时,通道内乘客流量 g 稍大于楼梯上的乘客流量 q (如第 2 节中数据分析所示)。而在排队的队尾,乘客的到达率 $Q > Q_{Smax}$,产生了人流的集散波。由图中可以看出,人流集散波的传播速度为直线 lh 的斜率的绝对值,即 $W = \frac{Q-g}{i-j}$,且该乘客波是后退波,即排队长度逐渐增大。

3.2 不同宽度的出站楼梯对乘客排队的影响

在楼梯宽度和通道的宽度不同时,为了在同一坐标系中表示乘客在楼梯与自动扶梯上的流量密度关系,不妨把密度定义为单位长度上的人数,单位为人/m,流量定义为单位时间内通过的人数,单位为人/s,则不同宽度的楼梯和通道的流量-密度曲线可用图 10 来表示^[15]。

由于站台宽度的限制,通常出站楼梯的宽度不超过站台出站通道的宽度。本文在通道宽度不

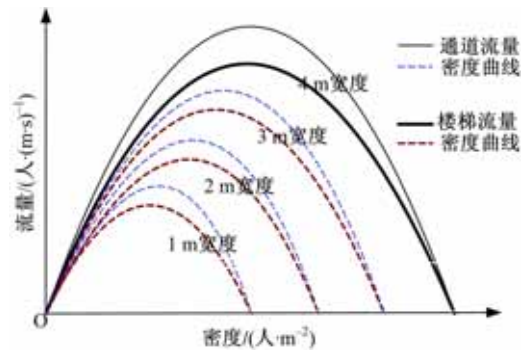


图 10 不同宽度条件下通道与楼梯的流量-密度曲线图
Fig. 10 Flow-density curves of passages and stairs with different width

变的前提下,分析不同楼梯宽度对出站排队的机理。通道宽度一定,而楼梯宽度不同时的流量-密度曲线如图 11 所示。

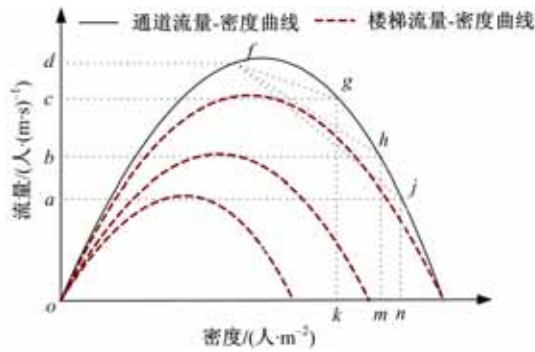


图 11 楼梯宽度不同对出站乘客排队的影响示意图

Fig. 11 Influence on exiting passengers queue with different stairs width

在楼梯宽度不断加宽时,楼梯的最大通行能力逐渐增大,图 11 中楼梯的最大通行能力由 a 逐渐增大到 c 。不妨假设乘客的到达流量为 d ,则楼梯宽度不同时,通道内乘客的排队程度不同。随着楼梯宽度的增加,乘客流集散波的传播速度由直线 fj 的斜率逐渐降为 fg 的斜率。由于客流集散波是后退波,若楼梯的宽度过窄,则客流集散波沿通道向上游传播的速度很快,即出站乘客的排队队长增加得很快,而设施的通行能力较低,这势必造成大量乘客滞留站台。此时,如果列车到达间隔较小,则在到达周期内站台上的乘客不能及时疏散,下一个周期乘客的到达将更加加剧站台上乘客的滞留,进而产生“大客流爆满”现象^[16]。

4 结 论

- (1) 分析了客流高峰时乘客的出站特性;
- (2) 拟合了出站乘客在通道和楼梯上的流量-密度关系;
- (3) 在拟合的速度-密度曲线前提下,对出站乘客在楼梯入口处的排队机理进行了研究;
- (4) 研究了不同宽度的楼梯对排队形成的影响。

参考文献:

[1] Dirk H B, Lubos B, Anders J, et al. Self-organized pedestrian crowd dynamics: experiments, simulations, and design solutions [J]. *Transportation Science*, 2005, 39 (1): 1-24.
 [2] Fruin J J. *Pedestrian Planning and Design* [M]. New

York: Metropolitan Association of Urban Designers and Environmental Planners Inc, 1971.
 [3] Fruin J. *Pedestrian planning and design* [M]. Elevator World, Mobile, Ala, 1990.
 [4] National Research Council (NRC) [S]. *Highway Capacity Manual*, Washington D C, 2000.
 [5] Hankin B D, Wright R A. Passenger flow in subways [J]. *Operational Research Quarterly*, 1958, 9(2): 81-88.
 [6] Jodie Y S L, William H K, Lam M. Levels of service for stairway in Hong Kong underground stations [J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2003, 129 (2): 196-202.
 [7] 施仲衡, 周庆瑞, 郑晓薇. GB50157—2003《地铁设计规范》[S]. 北京: 中华人民共和国建设部, 2003.
 [8] 饶雪平. 轨道交通车站楼梯和自动扶梯处客流延时分析 [J]. *交通与运输*, 2005, 7: 13-15.
 Rao Xue-ping. An analysis of passenger delays in stairs and escalators of urban rail transit station [J]. *Traffic and Transportation*, 2005, 7: 13-15.
 [9] Fruin J J. Design for pedestrians: a level-of-service concept [J]. *Highway Research Record*, 1971, 355: 1-15.
 [10] Weidmann U. *Transporttechnik der Fußgänger* [Z]. ETH Zürich, 1993.
 [11] Virkler M R, Elayadath S. Pedestrian speed-flow-density relationships [J]. *Transportation Research Record*, 1994, 1438: 51-58.
 [12] Older S J. Movement of pedestrians on footways in shopping streets [J]. *Traffic Engineering and Control*, 1968, 10 (4): 160-163.
 [13] Sarkar A K, Janardhan K S V S. A study on pedestrian flow characteristics [C] // In CD-ROM with Proceedings, Transportation Research Board, Washington, 1997.
 [14] Tanariboon Y, Hwa S S, Chor C H. Pedestrian characteristics study in singapore [J]. *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, 1986, 112(3): 229-235.
 [15] Daaman W, Hoogendoorn P, Bovy L. First-order pedestrian traffic flow theory [C] // TRB Annual Meeting CD-ROM, Transportation Research Board National Research Council, Washington D C, 2005.
 [16] 周尚吾. *交通工程* [M]. 上海: 同济大学出版社, 1987: 21-26.
 [17] 吴正, 王昀, 沈俊彦. 地铁候车厅客流疏散时间的数学模型研究 [J]. *复旦大学学报: 自然科学版*, 2006, 45 (5): 594-598.
 Wu Zheng, Wang Yun, Shen Jun-yan. Study of the mathematical model for passenger's scatter time in subway station waiting rooms [J]. *Journal of Fudan University (Natural Science)*, 2006, 45(5): 594-598.