

基于行人轨迹数据的城市轨道交通车站 单向通道行人跟随行为特性研究*

方 勇 魏万旭 胡 华 郝妍熙 刘志钢

(上海工程技术大学城市轨道交通学院, 201620, 上海)

摘 要 [目的] 提升乘客服务水平、保障安全是城市轨道交通车站设施布局及运营管理的核心, 车站设施的科学设计需研究行人跟随行为的基本特性及其规律。[方法] 结合行人轨迹提出行人跟随行为描述模型及其表征参数, 设计可控试验模拟城市轨道交通车站单向通道行人跟随行为, 采集视频数据提取行人跟随轨迹, 深入分析跟随行为发生时行人跟随速度差、跟随时距、横纵向间距等表征参数的特征和规律, 研究行人密度、通道宽度、性别和熟悉环境四个因素对单向通道行人跟随行为特性的影响。[结果及结论] 行人流密度越低, 平均跟随速度差与平均跟随时距均越小; 通道宽度对跟随行为表征参数无显著影响; 异性间跟随比同性间跟随的表征参数值均较大; 不熟悉环境者相对熟悉环境者表征参数值离散程度较大。

关键词 城市轨道交通; 单向通道; 行人跟随行为; 表征参数; 特性分析

中图分类号 U293.13

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.06.004

Characteristics of Pedestrian Following Behavior in One-way Passage of Urban Rail Transit Stations Based on Pedestrian Trajectory Data

FANG Yong, WEI Wanxu, HU Hua, HAO Yanxi, LIU Zhigang

(School of Urban Rail Transit, Shanghai University of Engineering Science, 201620, Shanghai, China)

Abstract [Objective] Improving the service level to the passengers and ensuring safety are the core purpose of the facility layout and operation management of urban rail transit station. To design the station facility scientifically, the basic characteristics and patterns of the pedestrian following behavior need to be studied. [Method] Based on the pedestrian trajectory, a description model of pedestrian following behavior and its characteristic parameters are proposed, and a controllable experiment is designed to simulate the pedestrian following be-

havior in one way passage of the urban rail transit station. The pedestrian following trajectory is extracted from the collected video data, and the characteristics and patterns of the parameters such as pedestrian following speed difference, time interval, horizontal and longitudinal spacing are deeply analyzed when the following behavior occurs. The effects of the four factors i. e. pedestrian density, passage width, gender and familiarity to the environment on the pedestrian following behavior are studied. [Result & Conclusion] The lower the pedestrian density, the smaller the average following speed difference and the shorter the average following time distance. The passage width has no significant effect on the following behavior characteristic parameters. All the values of the characteristic parameters of the opposite sex are larger than those of the same sex. The values of the characteristic parameters of the pedestrians who are not familiar with the environment are more discrete than those familiar with the environment.

Key words urban rail transit; one-way passage; pedestrian following behavior; characteristic parameter; characteristic analysis

行人受自身、他人及周边环境的影响, 其行为复杂多样, 行人个体行为包括常见的走行行为、跟随行为、超越行为、避让行为等。文献[1]认为, 行人更喜欢跟随其他行人制定自己的路径, 城市轨道交通车站跟随行为是常见的典型行人行为, 由于行人自身因素或车站设施不合理设计等原因可能产生不当的跟随行为, 易降低设施的通行效率, 甚至导致踩踏等安全事故的发生。

对于行人跟随行为, 文献[2]定义了一种测量行人跟随时距的方法。文献[3]采用可控试验, 分析了行人跟随行为与狭窄通道通行能力之间的关系。文献[4]通过单列行人运动试验, 获得了人头时距-速度数据, 并借鉴汽车跟驰模型的思想, 以速

* 国家自然科学基金项目(51608387, 52072235)

度-人头时距关系为基本最优速度函数来研究行人跟随行为。也有学者基于行人微观模型研究行人跟随行为,文献[5]提出了一个由认知科学驱动并以经验数据为基础的跟随模型,并设计3个相关试验验证模型有效性。文献[6]研究跟随行为对平交口双向过街行人的影响,建立行人过街的跟随行为模型、冲突避让模型,分析行人过街速度与事故可能发生的规律。文献[7]考虑在能见度受限下熟悉环境行人与不熟悉环境行人,对其跟随行为特性进行建模与模拟。关于地铁站行人跟随行为,文献[8]对乘客跟随行为的特征进行了调研分析并界定了跟随行为定义,以问卷调查、现场视频采集以及数学模型构建为手段,深度解析了乘客跟随行为造成的客流压缩、激波、超越状态机理。文献[9]根据实地调研,分析了地铁站站台行人走行与跟随行为特征,并改进文献[10]的行人跟随行为仿真模型且验证了其有效性。

在已有研究中,大多建立相关模型、微观仿真研究行人跟随行为,由于实际数据缺少且数据处理较困难,对跟随行为缺乏更深入的微观特性研究。行人运动轨迹能够清楚表示行人行为过程,已有研究已证明通过视频采集行人走行轨迹和提取跟随行为微观表征参数的方法切实可行^[11]。因此,本文基于行人运动学建立跟随行为描述模型并提出各项表征跟随行为的特征参数,基于可控的单向通道行人走行试验,结合视频数据挖掘分析单向通道行人跟随行为特性及其相关规律。

1 行人跟随行为描述模型

1.1 跟随行为定义

行人跟随行为是指在一定客流密度环境下,行人有共同明确的行走目的或方向,在行走过程中受到视野范围内其他行人或障碍物的影响,改变其期望走行路径和走行速度,而跟随前方行人走行的行为。在地铁站通道区域,一般跟随行为会在行人走行时受前人影响且避免发生碰撞而跟随。低密度情况下不易发生跟随行为;中高密度情况下,行人会发生自组织现象,通道会明显形成跟随行为特征的客流流线。

1.2 跟随行为表征参数

跟随行为最重要的运动特性就是跟随者的行走自由受到一定限制而跟随前方行人行走,前方行人对跟随者影响的大小与其空间或时间维度上的

距离有关,距离越近则影响越大,距离越远则影响越小。基于跟随者和被跟随者运动轨迹从行走速度、方向、距离三个方面可提出跟随行为的表征参数,因此本文采用跟随速度差、跟随距离(横纵向间距)、跟随时距、速度方向夹角作为跟随行为表征参数。

1) 跟随速度差 基于视频提取的行人走行轨迹以时间及位置坐标为基础数据,被跟随行人*i*与跟随行人*j*瞬时速度 $v_{i,j}$ 及跟随速度差 Δv 分别为:

$$v_{i,j,k} = \frac{\sqrt{(x_{i,j,k+1} - x_{i,j,k})^2 + (y_{i,j,k+1} - y_{i,j,k})^2}}{t_{i,j,k+1} - t_{i,j,k}} \quad (1)$$

$$\Delta v = v_{i,k} - v_{j,k} \quad (2)$$

式中:

k ——视频播放帧序号;

$x_{i,j,k}$ ——被跟随行人*i*、跟随行人*j*的*X*坐标(通道宽度方向);

$y_{i,j,k}$ ——被跟随行人*i*、跟随行人*j*的*Y*坐标(通道长度方向);

$v_{i,k}$ ——被跟随行人*i*在*k*帧序号的速度;

$v_{j,k}$ ——跟随行人*j*在*k*帧序号的速度。

2) 跟随距离 被跟随行人*i*与跟随行人*j*的跟随距离 $d_{i,j}$ 为:

$$d_{i,j} = \sqrt{(x_{i,k} - x_{j,k})^2 + (y_{i,k} - y_{j,k})^2} \quad (3)$$

3) 跟随时距 被跟随行人*i*与跟随行人*j*的跟随时距 Δt 为两人头部经过同一断面的时间间隔,则有:

$$\Delta t = \frac{D_v}{v_{j,k}} \quad (4)$$

其中, D_v 为*i*与*j*之间的纵向间距。

4) 速度方向夹角 单个行人走行方向一般表示为速度方向夹角 $\theta_{i,j,k}$,有:

$$\theta_{i,j,k} = \arctan \frac{y_{i,j,k+1} - y_{i,j,k}}{x_{i,j,k+1} - x_{i,j,k}} \quad (5)$$

被跟随行人*i*与跟随行人*j*速度方向夹角 $\theta_{i,j}$ 变化可以表示两行人走行方向是否渐渐趋于一致,即:

$$\theta_{i,j} = \theta_{i,k} - \theta_{j,k} \quad (6)$$

式中:

$\theta_{i,k}$ ——被跟随行人*i*在第*k*帧的走行方向;

$\theta_{j,k}$ ——跟随行人*j*在第*k*帧的走行方向。

5) 横、纵向间距 调研结果表明,在城市轨道交通车站站台区域内,行人的纵向搜索距离最大为

6 m, 横向搜索距离最大为 $1 \text{ m}^{[6]}$ 。横向间距 D_h 和纵向间距 D_v 是分析跟随行为的重要特征参数, 分别为:

$$D_h = |x_{i,k} - x_{j,k}| \quad (7)$$

$$D_v = |y_{i,k} - y_{j,k}| \quad (8)$$

2 行人跟随行为试验设计

通道设施行人跟随行为特性会受行人流状态、通道自身条件、人群组成和外界环境等影响。行人流状态定性包括自由流、稳定正常流、拥堵流; 通道自身条件包括宽度、单双向等; 人群组成考虑性别、年龄、负重及环境熟悉程度等; 外界环境包括照明情况及引导标识设置情况等。本文主要研究行人密度、通道宽度、行人性别及环境熟悉程度 4 个因素对单向通道行人跟随行为特性的影响规律。通过设计考虑 4 个影响因素的单向通道行人行为试验来采集数据, 模拟地铁站内真实通道场景, 对跟随行为的表征参数进行统计分析, 从而研究跟随行为特性。

利用正交试验法针对行人跟随行为的影响因素进行研究。各影响因素对应的正交试验水平见表 1。

表 1 各影响因素对应的正交试验水平表

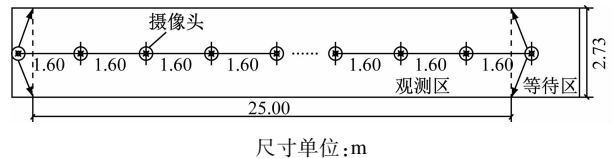
Tab. 1 Orthogonal experimental levels corresponding to each influencing factor

影响因素	水平划分
行人密度/($\text{m}^2/\text{人}$)	$3.7 \sim 5.6$; $2.2 \sim < 3.7$; $1.4 \sim < 2.2$
通道密度/ m	2.73 ; 2.00
性别	男跟男; 男跟女; 女跟男; 女跟女
环境熟悉程度	熟悉; 不熟悉

对应文献[12]中针对通行类设施行人服务水平, 行人密度 $\geq 5.6 \text{ m}^2/\text{人}$ 时行人按照期望路径行走, 不会因其他行人而改变走行路径, 跟随行为发生概率非常低; 行人密度 $< 1.4 \text{ m}^2/\text{人}$ 时, 行人基本处于排队、停滞不前的状态, 没有必要研究微观跟随行为。以 B、C、D 服务水平等级划分本文行人密度。选择的通道宽度为试验场地本身宽度 2.73 m (允许 3~4 列行人走行)、 2.00 m (允许 2 列行人走行)。

试验场地如图 1 所示, 为单向直通道, 通道内铺设 $0.8 \text{ m} \times 0.8 \text{ m}$ 地砖, 以方便人工校对后续提取的数据。主试验区域长 20 m , 辅助试验区域长为 5

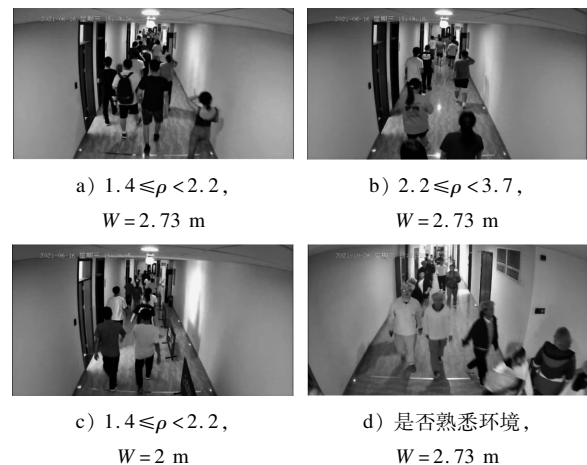
m 。摄像头 (型号为 TPLINK) 布设位置如图 1 所示, 共 20 台, 其中最外侧 2 台分别倾斜拍摄以保证能够观测到完整跟随行为, 其余摄像头垂直俯拍并完全覆盖试验区域。所有试验均由年龄 20 岁左右的大学生完成, 熟悉环境者头戴蓝色头套, 以与不熟悉环境者区分。部分试验过程如图 2 所示。



尺寸单位: m

图 1 试验场地摄像头布设

Fig. 1 Camera layout on test site



注: ρ 为行人密度, 单位 $\text{m}^2/\text{人}$; W 为通道宽度, 单位 m 。

图 2 部分试验过程

Fig. 2 Part of the experimental process

3 数据提取

本文数据提取采用倾斜视频结合俯拍视频提取的方法。由于俯拍视频多数无法较快定位到连续跟随行为, 故首先由人工从倾斜视频中定位到一组跟随行为后, 以相应的连续俯拍视频提取行人速度、位移、速度方向角等基本运动参数, 再计算特征参数。本文采用 Tracker 追踪软件对俯拍视频行人运动参数进行提取, 提取过程如图 3 所示。由于软件追踪过程中存在难以识别的行人, 会造成提取结果出现明显问题, 在数据提取完成后剔除视频中追踪效果较差、误差较大的跟随行为数据, 共筛选出 326 个稳定跟随行为样本用于本文分析。其中, 行人密度 $3.7 \sim < 5.6 \text{ m}^2/\text{人}$ 条件下有 75 个、 $2.2 \sim < 3.7 \text{ m}^2/\text{人}$ 条件下有 144 个、 $1.4 \sim < 2.2 \text{ m}^2/\text{人}$ 条件下有 107 个。

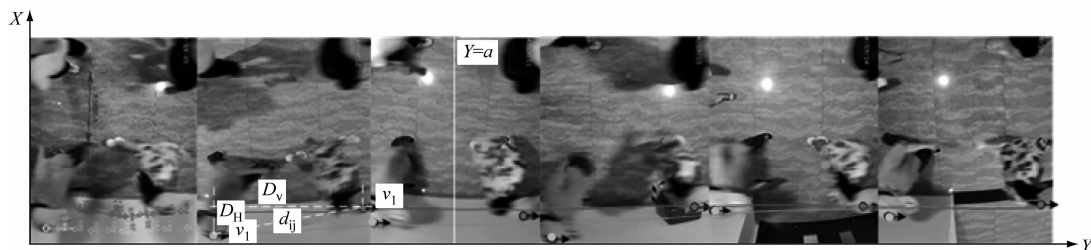


图3 一组跟随行为表征参数提取

Fig. 3 A set of following behavior characteristic parameters extraction

4 数据分析

4.1 跟随速度差

跟随速度差反映了跟随者与跟随者作为一个运动单元的动态稳定性。跟随速度差越小说明行人行走越稳定,越大可能会对行人流的稳定性扰动越大。不同行人密度所允许的最大跟随速度差不同。

4.1.1 单因素分析

从统计结果可以看出:

1) 同一通道宽度条件下,不考虑行人自身特性,行人密度越低,跟随过程平均速度差越小。行人密度为 $1.4 \sim <2.2 \text{ m}^2/\text{人}$ 时,跟随速度差 25% 分位值是 0.011 m/s , 75% 分位值是 0.036 m/s , 平均跟随速度差为 0.029 m/s ; 行人密度为 $2.2 \sim <3.7 \text{ m}^2/\text{人}$ 时,跟随速度差 25% 分位值是 0.017 m/s , 75% 分位值是 0.049 m/s , 平均跟随速度差为 0.038 m/s ; 行人密度为 $3.7 \sim <5.6 \text{ m}^2/\text{人}$ 时,跟随速度差 25% 分位值是 0.018 m/s , 75% 分位值是 0.060 m/s , 平均跟随速度差为 0.043 m/s 。表 2 密度因素显著性检验表明,人流密度条件差距较大时跟随速度差存在显著差异,人流密度条件差距较小时跟随速度差无显著差异。

2) 同一行人密度条件 ($1.4 \sim <2.2 \text{ m}^2/\text{人}$) 下,通道宽度差异对跟随速度差的影响不显著。通道宽度为 2.00 m 时,跟随速度差 25% 分位值是 0.014 m/s , 75% 分位值是 0.033 m/s , 平均跟随速度差为 0.024 m/s ; 通道宽度为 2.73 m 时,跟随速度差 25% 分位值是 0.011 m/s , 75% 分位值是 0.036 m/s , 平均跟随速度差为 0.029 m/s 。

3) 不考虑行人密度和通道宽度条件,发现女性跟随同性与跟随异性的平均速度差存在显著差异,男性则无显著差异;同性之间平均跟随速度差也无显著差异。不熟悉环境者跟随时速度差比熟悉环

境跟随者离散程度较大,说明熟悉环境者相对不熟悉环境者跟随行为更稳定。

表 2 基于跟随速度差的行人密度因素显著性检验

Tab. 2 Significance test of pedestrian density factors based on following speed difference

行人密度/ ($\text{m}^2/\text{人}$)	跟随速度差/(m/s)		t 检验 P 值	比较结果
	均值	标准差		
$1.4 \sim <2.2$	0.028 56	0.028 91	0.060 8	$P > 0.05$ 无显著性 差异
$2.2 \sim <3.7$	0.038 43	0.033 33		
$2.2 \sim <3.7$	0.038 43	0.033 33	0.381 97	$P > 0.05$ 无显著性 差异
$3.7 \sim <5.6$	0.043 10	0.036 91		
$3.7 \sim <5.6$	0.043 10	0.036 91	0.016 36	$P < 0.05$ 有显著性 差异
$1.4 \sim <2.2$	0.028 56	0.028 91		

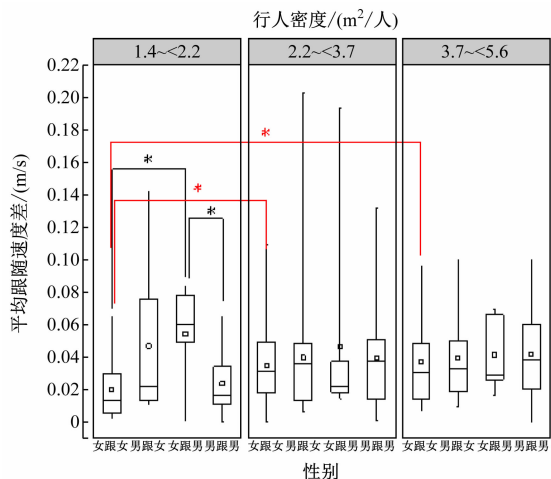
注:t 检验是一种用来检验两组样本均值是否有显著差异的方法;P 值为观测到的结果或更极端结果出现的概率。

4.1.2 多因素分析

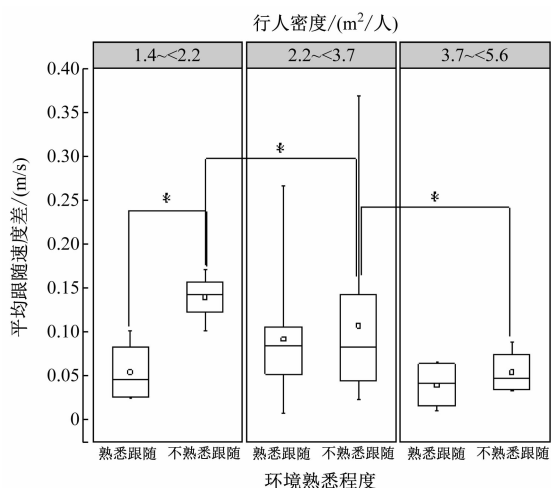
分析行人密度与性别因素、行人密度与环境熟悉程度因素对平均跟随速度差是否有显著影响。如图 4 a) 所示,与只考虑性别因素对平均跟随速度差不同,女性在跟随同性和跟随异性、被跟随者为男性的平均速度差只在低密度情况下存在显著差异,中高密度时性别因素对其无显著影响;女性跟随女性在低密度与中密度条件下、低密度与高密度条件下存在显著差异;其余条件均无显著差异。如图 4 b) 所示,行人密度对熟悉环境者跟随行为发生时速度差无显著影响,不熟悉环境者在不同密度条件下存在显著差异,低密度时是否熟悉环境对跟随速度差存在显著影响。

4.2 跟随时距

跟随时距可以通过跟随速度和距离的指标获得,跟随时距越小,遇到突发事件时,如某行人停滞时发生拥挤踩踏事故的概率越大。



a) 不同的行人密度、性别因素



b) 不同的行人密度、环境熟悉程度因素

注: 均值; * 显著差异。

图4 多因素影响下的平均跟随速度差箱形图

Fig. 4 Box diagrams of average following speed difference under the influence of multiple factors

4.2.1 单因素分析

从统计结果可以看出:

1) 行人密度越低,跟随过程中平均跟随时距越小。行人密度 $1.4 \sim <2.2 \text{ m}^2/\text{人}$ 时,跟随时距 25% 分位值是 0.86 s,75% 分位值是 1.20 s,平均跟随时距为 1.05 s;行人密度 $2.2 \sim <3.7 \text{ m}^2/\text{人}$ 时,跟随时距 25% 分位值是 0.97 s,75% 分位值是 1.54 s,平均跟随时距为 1.28 s;行人密度 $3.7 \sim <5.6 \text{ m}^2/\text{人}$ 时,跟随时距 25% 分位值是 1.19 s,75% 分位值是 1.66 s,平均跟随时距为 1.46 s。表3 行人密度因素显著性检验表明,不同行人密度条件下跟随时距均存在显著差异。

2) 不同通道宽度条件下,同一行人密度条件

表3 基于跟随时距的行人密度因素显著性检验

Tab.3 Significance test of pedestrian density factors based on following time interval

行人密度/ ($\text{m}^2/\text{人}$)	跟随时距/s		t 检验 P 值	比较结果
	均值	标准差		
1.4 ~ <2.2	1.05	0.266 11	$6.336\ 88 \times 10^{-5}$	$P < 0.05$ 有显著性 差异
2.2 ~ <3.7	1.28	0.380 62		
2.2 ~ <3.7	1.28	0.380 62	0.003 72	$P < 0.05$ 有显著性 差异
3.7 ~ 5.6	1.46	0.429 52		
3.7 ~ 5.6 1.4 ~ <2.2	1.46	0.429 52	$3.659\ 06 \times 10^{-9}$	$P < 0.05$ 有显著性 差异

时,通道宽度差异对跟随时距的影响同样不显著。通道宽度为 2 m 时,跟随时距 25% 分位值是 0.78 s,75% 分位值是 1.22 s,平均跟随时距为 1.03 s;通道宽度为 2.73 m 时,跟随时距 25% 分位值是 0.86 s,75% 分位值是 1.20 s,平均跟随时距为 1.05 s。不考虑其他因素情况下,不同性别之间平均跟随时距无显著差异,且跟随者与被跟随者均为异性的跟随时距平均值大于跟随者与被跟随者为同性时。行人是否熟悉环境对跟随时距也不存在显著差异性。

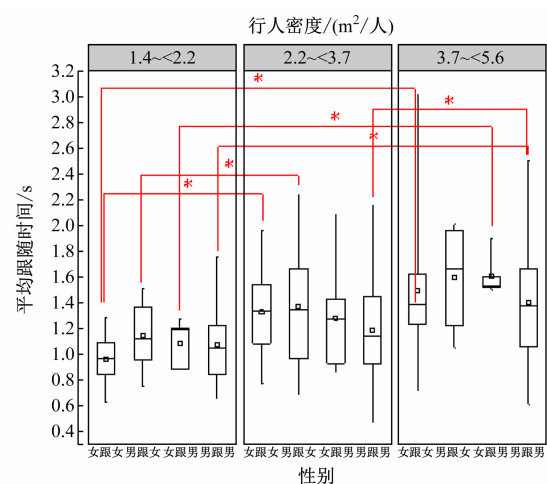
4.2.2 多因素分析

现分析多因素对平均跟随时距是否有显著影响。如图 5 a) 所示,在同一密度条件下性别对行人平均跟随时距无显著影响,且在密度差别较低即中、低密度时,被跟随者为女性时存在显著差异;在密度相差较大时即低、高密度情况下,跟随者与被跟随者为异性与女性跟随女性存在显著差异。如图 5 b) 所示,行人密度对熟悉环境者跟随行为发生时的跟随时距无显著影响,不熟悉环境者在中、高密度条件下存在显著差异。

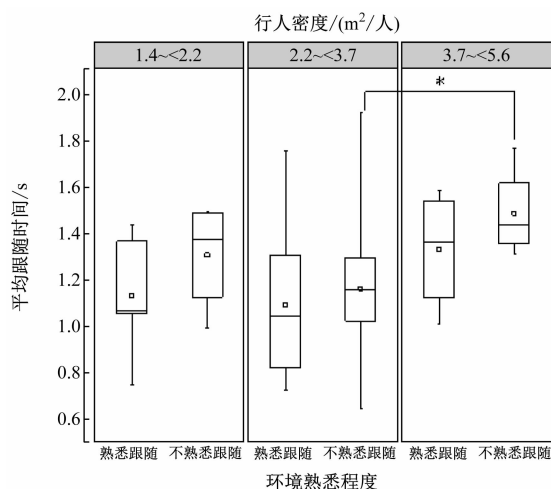
4.3 纵向间距

跟随过程中跟随者会根据自身心里空间需求和正常行走所需空间,与前方行人保持一个相对稳定的距离。

在同一通道宽度条件下(通道宽度为 2.73 m),不同行人密度条件的纵向间距累积频率曲线如图 6 a) 所示。其行人密度 $1.4 \sim <2.2 \text{ m}^2/\text{人}$ 、行人密度 $2.2 \sim <3.7 \text{ m}^2/\text{人}$ 和行人密度 $3.7 \sim <5.6 \text{ m}^2/\text{人}$ 的 3 条纵向间距累积频率曲线线型的 85% 分位值(151 cm、182 cm、203 cm)均差异较大。



a) 行人密度、性别因素



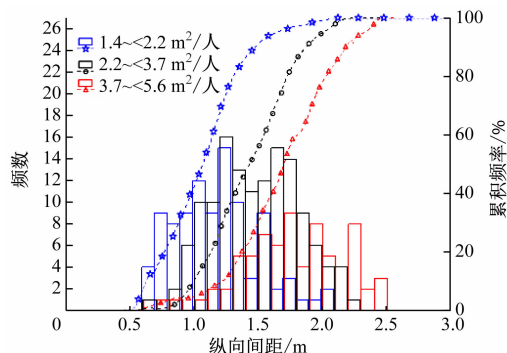
b) 行人密度、环境熟悉程度因素

□均值; * 显著差异

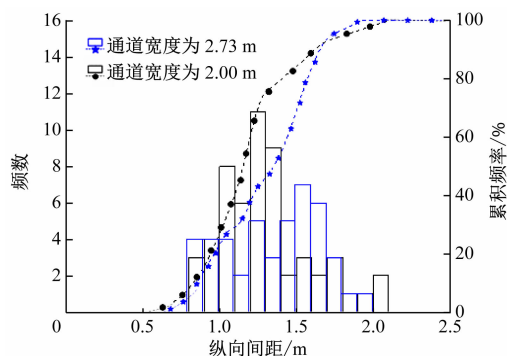
图5 多因素影响下的平均跟随时距箱型图

Fig. 5 Box diagrams of average following time interval under the influence of multiple factors

同一行人密度条件下(行人密度 $1.4 \sim < 2.2 \text{ m}^2/\text{人}$),不同通道宽度条件的纵向间距累积频率曲线如图6 b)所示。其通道宽度等于 2.00 m 和 2.73 m 的2条纵向间距累积频率曲线线型的85%分位值(163 cm , 160 cm)均较为接近。说明同一行人密度条件下,通道宽度对跟随过程中行人与前方行人保持相对稳定的心理空间和正常行走所需距离无显著影响。通道宽度越宽,能允许同时经过同一横断面的人数越多,在同一行人密度条件下,通道越宽,行人在遇到前方行人阻碍时更倾向于超越前方行人行走;如果选择跟随前方行人,行人在纵向维度的特性不会有显著差异。



a) 不同行人密度条件下



b) 不同通道宽度条件下

图6 行人纵向间距累积频率曲线

Fig. 6 Cumulative frequency curve of pedestrian longitudinal spacing

5 结语

本文结合相关研究对行人跟随行为进行了界定并提出其表征指标,利用可控试验获得了单向通道的行人空间运动数据并分析了不同条件下的行为特性。

1) 行人密度越低,平均跟随速度差与平均跟随时距均越小;通道宽度对跟随行为表征参数无显著影响;异性间跟随比同性间跟随的表征参数均较大;不熟悉环境者相对熟悉环境者表征参数值的离散程度较大。在行人仿真模型中通常需要引入行人基本运动属性和事先假定好的行为机理以满足分析需要,本文的研究结果可为跟随模型参数标定提供参考。

2) 后续研究可进一步采集不同设施、不同环境下的行人视频数据,对不同年龄分组、不同负重的行人进行跟随行为特性分析,为车站通道设施科学设计提供基础参考。

参考文献

- [1] TEKNOMO K. Application of microscopic pedestrian simulation

- model[J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 2006, 9(1): 15.
- [2] FRUIN J J. Designing for pedestrians[J]. Moving Sidewalks, 1970(1):135.
- [3] HOOGENDOORN S P, DAAMEN W. Pedestrian behavior at bottlenecks[J]. Transportation Science, 2005, 39(2): 147.
- [4] LV W, FANG Z, WEI X, et al. Experiment and modelling for pedestrian following behavior using velocity-headway relation[J]. Procedia Engineering, 2013, 62: 525.
- [5] RIO K, WARREN W H. A data-driven model of pedestrian following and emergent crowd behavior[C]//WEIDMANN U, KIRSCH U, SCHRECKENBERG M. Pedestrian and Evacuation Dynamics 2012. Cham: Springer, 2014: 561-574.
- [6] 曹宁博, 赵利英, 曲昭伟, 等. 考虑双向行人跟随行为的社会力模型[J]. 吉林大学学报(工学版), 2019, 49(3): 688.
- CAO Ningbo, ZHAO Liying, QU Zhaowei, et al. Social force model considering bi-direction pedestrian slipstreaming behavior[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2019, 49(3): 688.
- [7] 杨灿, 陈群, 陈璐. 考虑在能见度受限下行人跟随行为特性的建模与模拟[J]. 物理学报, 2019, 68(24): 87.
- YANG Can, CHEN Qun, CHEN Lu. Modeling and simulation of following behaviors of pedestrians under limited visibility[J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(24): 87.
- [8] 宫庆胜. 轨道交通乘客跟随行为状态识别与分析[D]. 北京: 北京工业大学, 2018.
- GONG Qingsheng. Identification and analysis of following behavior state of rail transit passengers[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2018.
- [9] 王雨佳. 城市轨道交通车站站台行人跟随行为仿真模型研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- WANG Yujia. The research of pedestrian following behavior simulation model in platform of urban rail transit station[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [10] YUAN Z, JIA H, LIAO M, et al. Simulation model of self-organizing pedestrian movement considering following behavior[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2017, 18(8): 1142.
- [11] 魏万旭, 方勇, 胡华, 等. 基于视频数据挖掘的城市轨道交通车站行人交通行为特征提取系统研究[J]. 铁道运输与经济, 2021, 43(8): 119.
- WEI Wanxu, FANG Yong, HU Hua, et al. Study on characteristics extraction system of pedestrian traffic behavior for subway stations based on video data mining[J]. Railway Transport and Economy, 2021, 43(8): 119.
- [12] Transportation Research Board. Highway capacity manual 2000[R]. Washington D C: National Research Council, 2000.
- 收稿日期:2021-12-29 修回日期:2022-02-07 出版日期:2024-06-10
Received:2021-12-29 Revised:2022-02-07 Published:2024-06-10
· 第一作者:方勇, 讲师, fangyong87@tongji.edu.cn
通信作者:胡华, 教授, huluhua1979@126.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 15 页)

- [8] 周刚, 王伟. 地铁线路客流分配方法与算法研究[J]. 广东公路交通, 2001, 27(4): 32.
- ZHOU Gang, WANG Wei. Research on passenger flow distribution method and algorithm of subway line[J]. Guangdong Highway Communications, 2001, 27(4): 32.
- [9] 孔繁钰, 李献忠. 弹性需求下的轨道交通客流分配模型和算法[J]. 西安工程大学学报, 2008, 22(1): 104.
- KONG Fanyu, LI Xianzhong. User equilibrium model and algorithm for rail transit under elastic demand[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2008, 22(1): 104.
- [10] 过秀成, 吕慎. 基于合作竞争类 OD 联合方式划分轨道客流分配模型研究[J]. 中国公路学报, 2000, 13(4): 91.
- GUO Xiucheng, LYU Shen. Study of URT's joint modal split assignment model on cooperative and competitive OD matrix[J]. China Journal of Highway and Transport, 2000, 13(4): 91.
- [11] 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.
- XU Ruihua, LUO Qin, GAO Peng. Passenger flow distribution model and algorithm for urban rail transit network based on multi-route choice[J]. Journal of the China Railway Society, 2009, 31(2): 110.
- [12] 赵峰, 张星臣, 刘智丽. 城市轨道交通系统运营清分方法研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2007, 7(6): 85.
- ZHAO Feng, ZHANG Xingchen, LIU Zhili. Modeling income distribution of the auto fare collection system[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2007, 7(6): 85.
- [13] 四兵锋, 高亮, 毛保华. 无缝换乘的城市轨道交通运营清分模型及算法[J]. 管理科学学报, 2009, 12(5): 36.
- SI Bingfeng, GAO Liang, MAO Baohua. Toll allocation model for urban railway traffic system under condition of seamless exchange[J]. Journal of Management Sciences in China, 2009, 12(5): 36.
- 收稿日期:2021-11-28 修回日期:2024-02-01 出版日期:2024-06-10
Received:2021-11-28 Revised:2024-02-01 Published:2024-06-10
· 作者:蔡金, 高级工程师, crtjgzx@126.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license