

个体特征对步行通道行人最大通过量的影响

叶建红, 陈小鸿, 俞梦骁

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 选取年龄、性别、携带行李状况作为表征行人个体特征的 3 个要素. 首先分析了这 3 个要素对个体空间占用和步行速度的影响, 进而利用 Legion 仿真工具研究这三要素对行人最大通过量的作用. 研究表明, 年龄、性别和携带行李状况都对行人最大通过量有不同程度的影响. 随着行人流中个体年龄增加, 行人流的最大通过量呈下降趋势, 尤其是由老年人构成的行人流, 其最大通过量较青年人下降 23%~30%; 性别对最大通过量的影响总体较小, 在 10% 以内; 随着个体携带行李尺寸的增加, 最大通过量也显著下降, 由携带小行李组成的行人流其最大通过量较不携带行李约下降 35%, 携带中等行李较不携带行李约下降 60%, 携带大行李较不携带行李约下降 75%. 研究成果有助于加深理解行人个体特征与交通流群集移动特性的联动关系, 并为由不同个体行人组成特征下的通行能力修正提供参考依据.

关键词: 行人交通; 个体特征; 最大通过量; 仿真分析; 影响

中图分类号: U491.2⁺2

文献标志码: A

Impact Analysis of Individual Characteristics on Pedestrian Maximum Volume

YE Jianhong, CHEN Xiaohong, YU Mengxiao

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

Abstract: Age, gender and luggage-laden are selected as three factors of pedestrian individual characteristics. The influences of the three factors on personal space occupation and walking speed are analyzed. Accordingly the influence of the three factors on pedestrian maximum volume is studied by using the Legion simulation tool. The results show that age, gender and luggage-laden have different influence on pedestrian maximum volume. With the increase of individual age, the maximum volume keeps the trend of decrease, especially the elderly pedestrian flow decreases by 23%~30% compared with the youth. The gender, however, has less influence, which is within 10%. The maximum volume

has a remarkable reduction as the size of the luggage increases. The maximum volume of pedestrian flow carrying small luggage decreases by 35% compared to the pedestrian flow without luggage. Similarly, the pedestrian flow with medium luggage has a 60% reduction and the flow with large luggage has a 75% reduction compared to the pedestrian flow without luggage. Findings of this research are expected to enhance the knowledge of the relationship between pedestrian individual characteristics and pedestrian flow, and to be valuable for determining the capacity of facilities with different pedestrian compositions.

Key words: pedestrian traffic; individual characteristics; maximum volume; simulation analysis; impact

行人交通流由一个个行人个体组成, 交通流的整体运行特性是所有微观个体交通特征的聚合反映. 行人最大通过量, 即单位时间内(如 1 h)持续通过步行设施某一点或某一断面的最大人数, 是描述行人流群集移动特性的重要指标, 也是开展步行设施通行能力分析的重要依据^[1]. 显然, 行人最大通过量受微观个体特征(如行人年龄、性别、是否携带行李等)的影响. 已有对行人交通流群集移动特性的研究多侧重于对行人流量、密度、速度等基本参数的实际观测, 基于统计回归等手段建立参数间的基本关系式, 从而确定所观测步行设施的最大通过量. 如早期 Fruin^[2]对纽约市交通枢纽内水平通道、楼梯等步行设施交通流参数进行观测, 建立了行人流量-密度-速度基本关系, 其研究成果成为美国道路通行能力手册(Highway capacity manual)^[1]中关于行人交通通行能力与服务水平分析的主要依据, 也为后来更多关于行人交通流特性的实证分析^[3-7]提供了基本范式.

然而, 基于实测的交通流参数关系分析往往只能针对某一特定的(即被观测到的)行人交通流个体

组成给出其最大通过量,实际情况下行人交通流的个体组成随步行场所和外部环境的变化而不同。如在机场、火车站等对外交通枢纽地区,行人个体大多会携带一定数量的行李;在老年活动集聚区,行人个体中老年人比例通常较其他区域显著增加。如何考虑不同个体行人组成特征下的交通流移动特性、建立行人最大通过量与微观个体特征间的关联解析,从而因地制宜地对步行设施通行能力取值进行适当修正,目前还缺乏足够的研究。

为此,本文开展个体特征对步行设施行人最大通过量影响机制与影响程度研究,以建立行人个体特征与交通流群集移动特性的联动关系,进而为从本质上揭示行人流群集移动现象和规律提供基础。

1 数据采集与分析方法

1.1 个体特征要素

考虑的行人个体特征主要包括 3 个要素:行人年龄、性别、携带行李状况。其中,年龄分为青年(15~40 岁)、中年(40~60 岁)和老年(60 岁以上)3 个组;性别分为男性与女性 2 类;携带行李分为无行李(不带行李或携带随身小包)、小行李(公文包或类似)、中等行李(中等行李箱或类似)和大行李(大行李箱、2 个中等行李箱或类似)4 种情况。

1.2 个体特征对行人最大通过量影响的分析方法

首先,由行人流量-密度-速度基本关系可知,行人最大通过量与平均密度、平均速度有关。而行人流的平均密度、平均速度又分别取决于每个行人个体的空间占用和步行速度。因此,为分析个体特征要素对行人最大通过量的影响,首先需要分析个体特征要素对行人空间占用和步行速度的影响。

其次,行人个体特征的 3 个要素按照不同取值可以构成 24 种(即 $3 \times 2 \times 4$)组合。若通过传统的实证分析方法研究各要素对行人最大通过量的影响,必须观测和建立每一种个体特征要素组合下的行人流量、密度、速度参数值与基本关系式模型。而现实的行人交通很难提供完整的 24 种要素组合情景用于参数观测。因此,基于参数观测的实证分析不能满足本文的研究需求;相反,基于场景模拟的仿真分析却能够提供所有要素组合下的交通流基本参数分析条件。故而本文研究个体特征对行人最大通过量影响的主要手段是仿真分析。同时,鉴于 Legion 软件在当前行人仿真领域应用的广泛性(曾应用于国际上多个城市地铁站行人仿真以及悉尼奥运会、北京

奥运会、上海世博会等大型活动游客交通仿真,其仿真结果在不同国家(地区)得到了较好的验证,可信度高)^[8],叶建红^[9]也利用上海轨道站内水平通道的行人交通实测数据,对 Legion 软件进行了验证分析,通过对比实测与模拟的水平通道流量-密度-速度关系,得到仿真输出的交通流参数关系散点图与实测的交通流参数关系图相似,且仿真得到的最大通行能力值($75 \text{ 人} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$)与最佳密度($1.5 \text{ 人} \cdot \text{m}^{-2}$)均与实测分析值($70 \text{ 人} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$, $1.53 \text{ 人} \cdot \text{m}^{-2}$)接近。因此,本研究也利用 Legion 软件开展具体的仿真分析工作。

最后,为准确评估某一个体特征要素对行人最大通过量的影响,必须排除其他因素的干扰作用。譬如,为分析年龄对行人个体空间占用、步行速度及最大通过量影响,须排除性别、携带行李等因素的作用。为此,在分析某一要素影响程度时均保持其他要素不变,即在同等条件下比较某一要素不同取值水平对行人最大通过量的作用。

1.3 相关数据采集

需实际观测的数据主要是不同个体特征要素下的步行速度和空间占用。对于速度观测,选取上海轨道交通 1 号线人民广场站的一段水平通道(图 1)作为观测设施。该通道两侧有固定边界(墙体),无横向穿越干扰。同时,为保证被观测行人以自由流速度行走,排除其他行人的干扰,速度观测在低密度环境(行人密度低于 $0.2 \text{ 人} \cdot \text{m}^{-2}$)下进行。事先在该通道上作好距离标记(图 1 中水平通道上的方格为边长为 60 cm 的正方形)。对步行设施进行摄像记录,获取低密度环境下的行人交通视频。继而利用视频播放软件提供的时间信息(精确到帧,1 帧为 0.04 s)可得到行人个体通过观测设施长度(L)所需的时间(T)。通过 $V=L/T$ 计算得到个体行人步行速度。对于空间占用观测,一方面利用我国现有规范中对人体尺寸数据的采集结果得到不同年龄分布和性别条件下的个体空间占用值;另一方面也结合小样本整群抽样调查分析携带行李对人体尺寸数据的修正。选择了 6 名研究生(包括 4 名男性和 2 名女性)作为受试者,测量他们在单肩背包、双肩背包、一手提包、双手提包、拉杆箱、双肩背包与一手提包、拉杆箱与一手提包等 7 种典型行李携带方式下人体横向水平尺寸与纵向水平尺寸的增量,进而算得不同行李条件对应的个体空间占用值。具体观测与计算方法可参阅文献[10]。



图 1 步行速度观测设施

Fig.1 The facility for the walking speed observation

2 实证分析:个体特征对空间占用和步行速度的影响

2.1 个体特征对空间占用的影响

人均占用空间(即平均密度的倒数)是影响行人交通流运行状态的决定性指标.一般将个体行人占用空间模拟为一个长轴为人体“最大肩宽”值、短轴为“胸厚”值的投影椭圆(图 2),椭圆面积即为个体占用的空间大小.因此,分析年龄、性别、携带行李对最大肩宽与胸厚的作用,即可得到其对空间占用的影响.

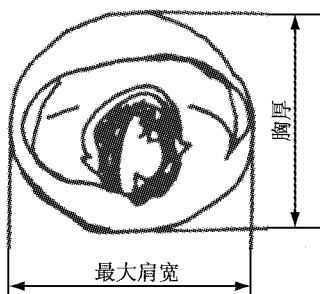


图 2 人体投影椭圆图

Fig.2 Ellipse projection of human's body

(1) 年龄、性别对空间占用的影响. 根据国家标准《中国成年人人体尺寸(GB-10000—1988)》中不同成年人类型(不含老年人)的最大肩宽与胸厚值(取 95%分位数),利用人体椭圆计算得到个体空间占用如表 1 所示. 中国成年人人体占用空间约为 0.08~0.09 m². 就性别对空间占用的影响来看,女青年较男青年空间占用下降 9.2%,女中年较男中年下降 5.8%;就年龄对空间占用的影响来看,中年男性较青年男性空间占用上升 5.9%,中年女性较青年女性上升 9.8%. 即:同等条件下女性较男性空间占用平均小 5.8%~9.2%(其中中年为 5.8%,青年为 9.2%),中年人较青年人平均增加 5.9%~9.8%

(其中男性为 5.9%,女性为 9.8%).

表 1 年龄与性别对个体空间占用的影响

Tab.1 The influence of age and gender on personal space occupation

行人类型	人体尺寸 95%分位数		空间占用面积/m ²
	最大肩宽/cm	胸厚/cm	
男性青年	46.9	24.1	0.089
男性中年	47.3	25.3	0.094
女性青年	43.5	23.6	0.081
女性中年	44.9	25.1	0.089

(2) 携带行李对空间占用的影响. 携带行李对个体占用空间的影响主要取决于行李本身的尺寸:随着行李尺寸增加,所需占用的空间也越大. 基于文献[10]开展的小样本抽样调查可以得到:携带小行李(如单肩包、双肩包、一手提包)较不携带行李空间占用约多出 46%~70%;携带大件行李(如拉杆箱和手提包)较不携带行李空间占用可多出 500%以上.

2.2 个体特征对步行速度的影响

除人均占用空间外,个体步行速度也是影响行人交通流运行状态的重要指标. 文献[11]将行人年龄、性别、携带行李 3 个要素按不同取值水平构建了 22 类要素组合(表 2),通过在图 1 所示的步行设施上选取近 1 000 个速度样本进行实测分析,分别得到同等条件下年龄、性别和携带行李对步行速度的影响. 主要结论如下:

(1) 中年人步行速度较青年人小 6%~8%,老年人较青年人小 18%~24%.

(2) 男性步行速度较女性高 5%~7%,但性别对老年人步行速度无显著影响.

(3) 携带小行李较不携带行李时的步行速度下降 2%~3%,携带中等行李下降 5%~8%,携带大行李下降 10%~14%,携带拉杆箱下降 3%~8%.

3 仿真分析:个体特征对行人最大通过量的影响

在分析年龄、性别、携带行李三要素对个体空间占用与步行速度影响基础上进一步利用交通仿真分析方法研究这 3 个要素对行人最大通过量的影响.

3.1 仿真情景设置

仿真输入参数包括 3 个方面:人种选择、携带行李条件选择以及个体步行速度分布. 本研究以中国人为分析对象,考虑行人不携带行李、携带小行李、中等行李、大行李以及拉杆箱(大行李的一个特例)等 5 种行李条件. Legion 软件中行人携带不同行李

表 2 个体特征对步行速度的影响

Tab.2 The influence of individual characteristics on walking speed

组合	性别	年龄	行李	步行速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)		实测样本/个	正态分布检验概率
				均值	标准差		
1	男	青年	无行李	1.51	0.17	50	0.975
2	男	青年	小行李	1.46	0.14	50	0.953
3	男	青年	中行李	1.39	0.13	50	0.962
4	男	青年	大行李	1.31	0.12	50	0.583
5	男	青年	拉杆箱	1.39	0.15	34	0.891
6	男	中年	无行李	1.39	0.14	50	0.963
7	男	中年	小行李	1.36	0.10	50	0.851
8	男	中年	中行李	1.30	0.12	50	0.950
9	男	中年	大行李	1.25	0.10	50	0.444
10	男	中年	拉杆箱	1.35	0.12	28	0.867
11	男	老年	无行李	1.14	0.17	50	0.823
12	女	青年	无行李	1.40	0.15	50	0.788
13	女	青年	小行李	1.36	0.16	50	0.905
14	女	青年	中行李	1.33	0.11	50	0.872
15	女	青年	大行李	1.20	0.11	50	0.801
16	女	青年	拉杆箱	1.28	0.12	39	0.718
17	女	中年	无行李	1.32	0.10	50	0.452
18	女	中年	小行李	1.29	0.13	50	0.964
19	女	中年	中行李	1.25	0.12	47	0.718
20	女	中年	大行李	1.15	0.11	40	0.685
21	女	中年	拉杆箱	1.26	0.10	19	0.736
22	女	老年	无行李	1.14	0.14	50	0.869

时所占用的等效空间值如表 3 所示。可以看到,携带小行李较不携带行李空间占用增加 57%,携带大行李较不携带行李空间占用增加 571%。这与文献[10]的小样本抽样调查分析结果较为一致。因此,在本次仿真分析时直接采用了 Legion 软件中行人携带行李的空间占用设置。同时,将表 2 中实测的 22 种(年龄、性别和行李条件)组合下个体步行速度分布输入仿真软件。

表 3 Legion 软件中携带不同行李时个体占用空间值

Tab.3 The personal space occupation with different luggage-laden in Legion software

行李大小	等效的空间占用半径/m	等效的空间占用面积/ m^2	较无行李的空间占用增加比例/%
无行李	0.15	0.07	0
小行李	0.19	0.11	57
中等行李	0.30	0.28	300
大行李	0.39	0.47	571

以单向水平通道为例分析行人最大通过量,设置仿真场景如图 3 所示。水平通道(两侧有固定边界,与图 1 所示的实测设施类似)上 2 股单向行人流分别由 A、B 向 C 行进。在人流交汇处 D 下游选择一段观测区域(选择该位置是为了尽可能获取较完整的交通流特征数据,尤其是高密度的交通流数据[12]),长 5 m,宽 5 m。在 A、B 处设置足够大的交通需求使观测区域行人交通可达到饱和状态,分析通

过断面 I 的行人流量(Q)、观测区域内的平均密度(K)以及通过观测区域的行人流平均速度(V)等交通流参数。参数观测间隔取 30 s^[13],具体参数计算方法可参见文献[6]。

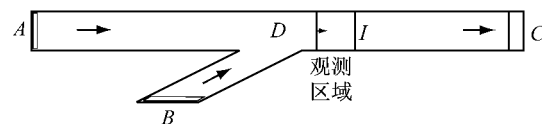


图 3 仿真场景设置示意

Fig.3 Schematic of the simulation scene

3.2 仿真结果

以男青年无行李组合为例,Q、K、V 随时间变化关系如图 4 所示。在仿真时段 8:16:30—8:38:30 内(图 4 中虚线围合段),观测区域内行人交通达到饱和状态(图 5),行人流以相对恒定的流量、速度、密度通过该观测区域。因此,取该时段的流量、密度、速度平均值作为组合 1 的行人最大通过量、最佳密度(最大通过量处的密度)与最佳速度(最大通过量处的速度)。类似地,可以得到其余 21 种组合的行人最大通过量、最佳密度与最佳速度,汇总如表 4 所示。

4 讨论

基于年龄、性别、携带行李对个体空间占用与步

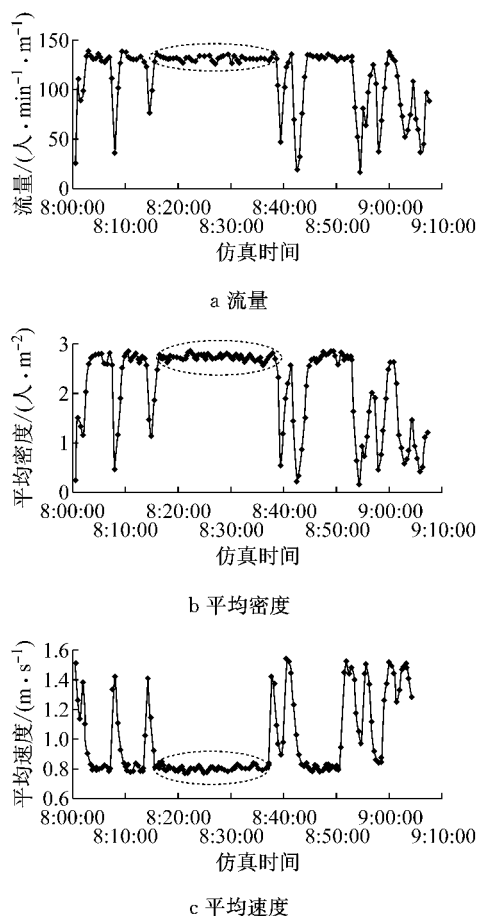


图 4 男青年无行李组合流量、密度、速度随时间变化

Fig.4 The variation of volume, density and speed for pedestrian flow of young male without luggage

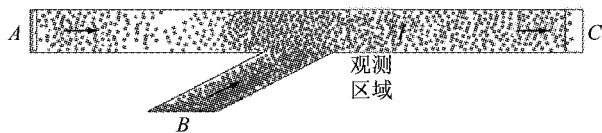


图 5 仿真时段 8:16:30—8:38:30 内行人交通运行状态

Fig.5 The traffic status of pedestrian in simulation time 8:16:30—8:30:30

行速度的作用以及个体空间占用、步行速度与行人流群集移动特征之间的关联效应,分析个体特征要素对行人最大通过量的影响如下。

4.1 年龄与性别对行人最大通过量的影响

不考虑携带行李因素(即“无行李”),分析年龄与性别对行人最大通过量的影响,如图 6 所示。需要说明的是,由于在仿真环境中年龄、性别对个体空间占用的影响不能体现,因此本文得到的年龄、性别对最大通过量的影响主要是由于这 2 个要素对个体步行速度的作用导致。同等条件下年龄与性别对最大通过量影响如下:

(1) 随着个体行人年龄的增长,行人最大通过

表 4 22 种个体特征组合下的行人最大通过量及其平均密度、平均速度

Tab. 4 Pedestrian maximum volume, average density and average speed for 22 groups of individual characteristics

组合	最大通过量/ (人·h ⁻¹ ·m ⁻¹)	最大通过量处平均 密度/(人·m ⁻²)	最大通过量处 平均速度/(m·s ⁻¹)
1	7 860	2.71	0.81
2	5 160	1.70	0.84
3	3 060	0.98	0.86
4	1 920	0.62	0.86
5	2 040	0.62	0.90
6	7 200	2.62	0.76
7	4 800	1.64	0.82
8	2 880	0.96	0.83
9	1 860	0.61	0.85
10	1 980	0.62	0.88
11	5 460	2.31	0.65
12	7 200	2.58	0.77
13	4 740	1.65	0.80
14	2 940	0.97	0.84
15	1 860	0.60	0.85
16	1 920	0.62	0.86
17	7 140	2.58	0.77
18	4 560	1.60	0.79
19	2 820	0.94	0.83
20	1 800	0.59	0.84
21	1 920	0.61	0.87
22	5 520	2.27	0.68

量呈下降趋势。由中年人组成的行人流其最大通过量较青年人下降约 10%,但由老年人组成的行人流最大通过量下降显著,达到 23%~30%。这是由于随着年龄增长,个体步行速度下降,特别是对于老年人,其步行速度下降幅度大,导致了最大通过量下降幅度也非常高。

(2) 总体上女性行人流的最大通过量较男性低,尤其对于青年人,女性最大通过量较男性低 8% 左右;但老年女性最大通过量与老年男性无显著差异,甚至较男性稍高。这与性别对个体步行速度的影响也是一致的。

4.2 携带行李对行人最大通过量的影响

固定年龄与性别要素,考虑携带不同行李对行人流最大通过量的影响,如图 7 所示。随着行李尺寸的增加,最大通过量快速下降。由携带小行李组成的行人流其最大通过量较不携带行李约下降 35%,携带中等行李较不携带行李约下降 60%,携带大行李(包括拉杆箱)较不携带行李约下降 75%。

与无行李相比,携带行李一方面会增加个体的空间占用,另一方面又会降低个体步行速度,且随着行李尺寸的增大,空间占用和速度下降的程度越大。

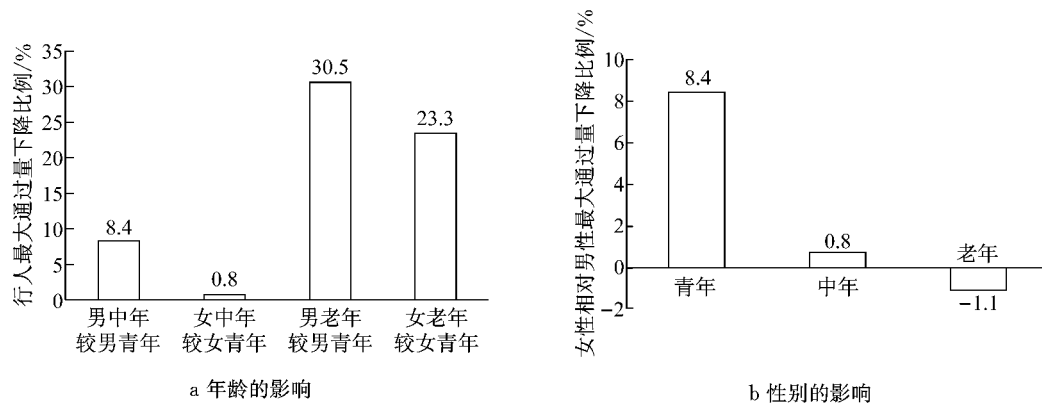


图 6 年龄与性别对行人最大通过量的影响

Fig. 6 The influence of age and gender on pedestrian maximum volume

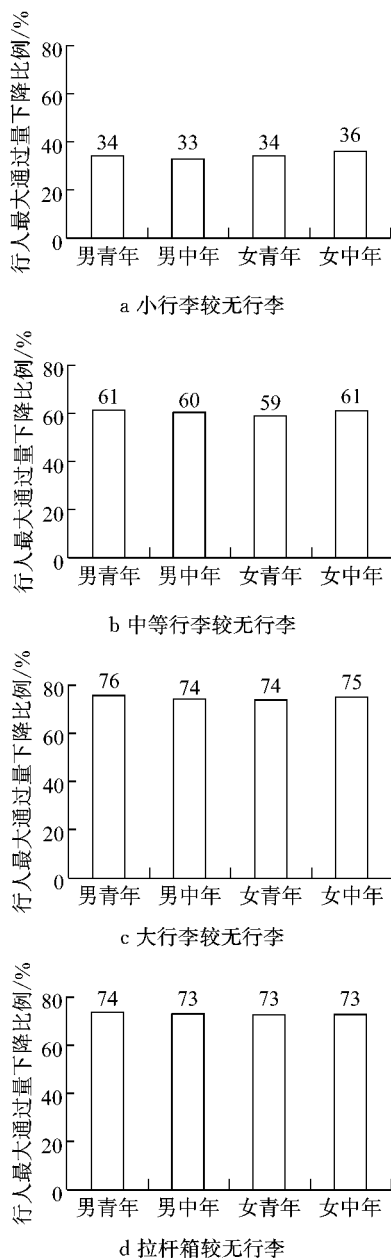


图 7 携带行李对行人最大通过量的影响

Fig. 7 The influence of luggage-laden on pedestrian maximum volume

这就导致了行人流达到饱和状态时携带小行李、中等行李和大行李的最佳密度远远小于不携带行李时的密度(表 4)。相应的,最大通过量较不携带行李显著下降。携带拉杆箱的最大通过量略大于携带一般大行李,这是因为携带拉杆箱的步行速度大于一般大行李,在空间占用特征相似的条件下,达到饱和状态时携带拉杆箱的最佳速度大于一般大行李(表 4),故而其最大通过量值也较一般大行李略高。

5 结论与展望

行人个体特征是影响行人流群集移动特性的本源。本文选取年龄、性别与携带行李 3 个重要的个体特征要素,在分析这些要素对行人空间占用与步行速度作用的基础上,利用仿真手段研究得到三要素对行人流最大通过量的影响,形成了关联行人个体特征与交通流群集移动特征的定量解析方法,主要结论如下:

(1) 年龄对行人最大通过量的影响。随着行人流中个体年龄增加,行人流最大通过量保持下降趋势。与青年人相比,由中年人构成的行人流,其最大通过量下降幅度在 10% 以内;由老年人构成的行人流,其最大通过量下降幅度可达 23%~30%。

(2) 性别对行人最大通过量的影响。性别对最大通过量的影响总体较小,青年女性最大通过量较男性低 8.4%;中年女性最大通过量较中年男性、老年女性最大通过量较老年男性均无显著差异。

(3) 携带行李对行人最大通过量的影响。随着个体携带行李尺寸的增加,行人流最大通过量显著下降。最大通过量较不携带行李时相比,由携带小行李组成的行人流,约下降 35%,携带中等行李约下降 60%,携带大行李(包括拉杆箱)约下降 75%。

实际行人流通常由年龄、性别、携带行李按照各种不同的比例混合而成。因此,在本文基础上可采用类似方法进一步分析由不同年龄、性别、携带行李要素构成的典型交通情景(譬如可在对外交通枢纽、城市内部交通站点、商业步行街等代表性场所调查获取个体特征要素的典型组成)下步行设施的行人最大通过量,进而为这些情景下的步行设施通行能力修正及相应的规划设计标准提供参考依据。另外,还可进一步研究其他个体特征要素(如步行习惯、成群结伴行走等)对包括楼梯、坡道等在内的多种步行设施行人最大通过量的影响,完善个体特征与行人流群集移动特性的耦合解析。

参考文献:

- [1] Transportation Research Board. Highway capacity manual 2010 [M]. Washington D C: TRB, National Research Council, 2010.
- [2] Fruin J J. Pedestrian planning and design [M]. Mobile: Elevator World, 1987.
- [3] Virkler M R, Elayadath S. Pedestrian speed-flow-density relationships[J]. In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1994, 1438(1): 51.
- [4] Sarkar A K, Janardhan K S V S. Pedestrian flow characteristics at an intermodal transfer terminal in Calcutta [J]. World Transport Policy & Practice, 2000, 6(3): 32.
- [5] Lam W H K, Cheung C. Pedestrian speed/flow relationships for walking facilities in Hong Kong [J]. Journal of Transportation Engineering, 2000, 126(4): 343.
- [6] Chen X, Ye J, Jian N. Relationships and characteristics of pedestrian traffic flow in confined passageways [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2010, 2198(1): 32.
- [7] 方正,袁建平,王晓刚,等.火车站客流密度与移动速度的观测研究[J].消防科学与技术,2007,26(1):12.
FANG Zheng, YUAN Jianping, WANG Xiaogang, et al. An investigation of the pedestrian density and travel speed for a railway station [J]. Fire Science and Technology, 2007, 26(1): 12.
- [8] Berrou J L, Beecham J, Quaglia P, et al. Calibration and validation of the Legion simulation model using empirical data [C]//Pedestrian and Evacuation Dynamics 2005. Springer: Berlin, 2007: 167-181.
- [9] 叶建红.行人交通行为与交通流特性研究[D].上海:同济大学,2009.
YE Jianhong. Research on walking behavior and pedestrian traffic flow characteristics[D]. Shanghai: Tongji University, 2009.
- [10] 叶建红,陈小鸿,刘莹.行人交通人体设计尺寸研究[J].武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2009,34(1):10.
YE Jianhong, CHEN Xiaohong, LIU Ying. Human dimensions for pedestrian traffic design[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering, 2009, 34(1): 10.
- [11] Ye J, Chen X, Jian N. Impact analysis of human factors on pedestrian traffic characteristics [J]. Fire Safety Journal, 2012, 52: 46.
- [12] Hall Fred L. Traffic stream characteristics. Revised monograph on traffic flow theory [EB/OL]. [2014-09-01]. <http://www.tfhrc.gov/its/tft/tft.htm>.
- [13] Ye J, Chen X. Optimal measurement interval for pedestrian traffic flow modeling [J]. Journal of Transportation Engineering, 2011, 137(12): 934.
- [14] 赵建明,刘文,赵鸿铎.大型军用飞机多轮荷载作用下水泥混凝土道面结构响应分析[J].土木工程学报,2007,40(4):60.
LING Jianmin, LIU Wen, ZHAO Hongduo. Mechanical responses of rigid airport pavement to multiple-gear military aircraft loadings[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(4): 60.
- [14] 赵鸿铎.适应大型飞机的沥青道面交通荷载分析方法及参数的研究[D].上海:同济大学,2006.
ZHAO Hongduo. New generation large aircraft oriented load analysis method and parameters for asphalt pavement design [D]. Shanghai: Tongji University, 2006.
- [15] 王辉,李雪连,张起森.高温重载作用下沥青路面车辙研究[J].土木工程学报,2009,42(5):139.
WANG Hui, LI Xuelian, ZHANG Qisen. Rutting in asphalt pavement under heavy load and high temperature[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(5): 139.
- [16] 庄传仪.基于加速加载响应的柔性基层沥青路面设计指标与参数研究[D].西安:长安大学,2012.
ZHUANG Chuanyi. Structural design indexes and parameters for flexible base asphalt pavement based on accelerated pavement testing[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.
- [17] 姚祖康.沥青路面结构设计[M].北京:人民交通出版社,2011.
YAO Zukang. Structural design of asphalt pavements[M]. Beijing: China Communications Press, 2011.

(上接第1828页)

DONG Zhonghong, XU Quanliang, LU Pengmin. Dynamic response of semi-rigid base asphalt pavement based on accelerated pavement test[J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(2): 1.