

地铁车站站台楼扶梯设置参数对行人疏散时间影响

吴甜甜 蒲 琪

(同济大学铁道与城市轨道交通研究院, 201804, 上海)

摘 要 [目的] 地铁车站站台的楼扶梯宽度、垂直高度、运行速度等因素对行人疏散时间有重要影响, 因此需研究地铁车站站台楼扶梯设置参数对行人疏散时间的影响。[方法] 基于 DICE 人群聚集风险模型, 通过 AnyLogic 软件分别仿真分析了楼梯、自动扶梯和楼扶梯组的客流疏散时间。对所提出的模型进行了实例验证。[结果及结论] 自动扶梯运行速度对疏散时间影响程度高于自动扶梯宽度和高度对疏散时间的影响; 楼扶梯宽度对疏散时间影响程度比楼扶梯高度的大; 自动扶梯饱和状态与半走半立状态下的疏散时间存在一定比例关系, 该比例与扶梯上选择行走的行人比例有关。实例验证表明, 所提出的模型有效可行。

关键词 地铁车站; 站台; 楼扶梯; 疏散时间

中图分类号 U231.4

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2024.02.031

Impact of Metro Station Platform Staircase and Escalator Setting Parameters on Pedestrian Evacuation Time

WU Tiantian, PU Qi

(Institute of Rail Transit, Tongji University, 201804, Shanghai, China)

Abstract [Objective] Factors such as width, vertical height, and operational speed of staircases and escalators on metro station platform impact passenger evacuation time significantly, therefore it is necessary to study the impact of the platform staircase and escalator setting parameters on passenger evacuation time. [Method] Based on DICE (data integration collection environment) passenger gathering risk model, the passenger evacuation time by staircases, escalators and the combination is simulated and analyzed by AnyLogic software. The proposed model is empirically verified. [Result & Conclusion] The impact of escalator operational speed on evacuation time is greater than that of the escalator width and height. The impact of escalator and staircase width is greater than the height. There is a proportional relationship between the evacuation time under escalator saturation state and passengers half-passing half-standing state on escalator, which is related to the proportion of passengers choosing to walk on the escalator. The empirical verification shows that the proposed model is effective and feasible.

Key words metro station; platform; staircase and escalator; evacuation time

在地铁大客流背景下, 车站站台客观环境对人群疏散效率有重要影响。若不能有效疏散人群, 则会在一定聚集风险。文献[1-2]提出了以人员密度(D)、人与人的相互作用(I)、人员特性(C)和人群聚集环境(E)为基本参数的人群聚集风险模型。该模型可归纳为 DICE 模型, 具象和量化了公共场合人群聚集风险的判定标准, 有较大的适用价值。

基于 DICE 模型, 本文对地铁车站站台人群聚集环境的指标量化进行研究, 聚焦于地铁车站站台楼扶梯对人群聚集状态的影响。站台层一般通过楼扶梯或直梯与站厅层相连, 其位置和数量的设置影响乘客的集散速度, 其本身规格也对乘客集散有直接影响。本文以楼扶梯的行人疏散时间表征人群聚集环境指标, 研究楼梯、扶梯或楼扶梯组合等不同配置下的乘客疏散时间, 并以其表征疏散效率。

1 楼梯客流疏散时间

影响楼梯通行能力的主要因素有: ①楼梯宽度。行人在楼梯上行走时倾向于成列移动, 楼梯宽度决定了能同时并行的列数。②倾斜角度与垂直距离。GB 50157—2013《地铁设计规范》^[3]规定, 乘客使用的人行楼梯倾角宜设置为 $26^{\circ}34'$ 。③人流对冲情况。楼梯的设置一般是供双向通行的(高峰期单向限流除外)。楼梯上的反向客流移动时至少会占据一条通道, 将影响正向的通行能力。④行人异质性。由于个体存在生理及心理上的差异, 行人通过楼梯的速度也不相同。

从影响楼梯通行能力的几个因素出发考虑地铁车站站台楼扶梯设置参数对行人疏散效率的影响。楼梯倾角和垂直高度直接影响行人在楼梯上的行走路程, 继而影响行人疏散时间。在设计地铁站台楼扶梯时, 基于 GB 50157—2013 中人行楼梯倾角宜

设置为 $26^{\circ}34'$ 的要求,各车站根据实际小范围调整楼梯倾角,其变化幅度小,对楼梯上的走行路程影响可忽略不计。因此,选取楼梯宽度、垂直高度、行人运动速度为变量,研究这些变量与楼梯疏散时间的关系。在 AnyLogic 软件中进行仿真,以上海轨道交通 1 号线徐家汇站站台为例建立仿真模型(如图 1 所示),设定行人疏散路线为楼梯,构建楼梯疏散时间 t 与相关变量的函数关系。



图 1 上海轨道交通 1 号线徐家汇站站台模型
Fig. 1 Platform model of Shanghai Rail Transit Line 1 Xujiahui Station

通过在徐家汇站实地调研发现,高峰时段每列车到站后平均每组楼梯的疏散人数范围为[50 人, 60 人],故本文仿真试验中设置 3 组行人,行人步长为 0.50 m。

疏散人数设置为 50 人,选择楼梯宽度 d 、垂直高度 h 和行人运动速度 v 为自变量。结合调研情况,当 d 的取值范围为[1.0 m,3.5 m]时,行人步长为 0.50 m;当 h 的取值范围为[3 m,15 m]^[4]时,行人步长为 0.20 m;当 v 的取值范围为[0.25 m/s, 2.00 m/s]^[5]时,行人步长为 0.25 m。楼梯倾斜角度设置为 27° ,改变各自变量取值,进行正交试验,共进行 45 组测试,结果如表 1 所示。

表 1 楼梯疏散时间正交试验仿真数据(部分)
Tab.1 Orthogonal test simulation data of staircase evacuation time (partial)

序号	d/m	h/m	$v/(\text{m/s})$	t/s
1	1.0	3	0.25	56.95
2	1.5	5	0.25	50.86
3	2.0	7	0.25	47.68
4	2.5	9	0.25	55.77
5	3.0	11	0.25	57.79
6	1.5	3	0.50	24.20
7	1.0	5	0.50	47.65
8	2.5	7	0.50	36.96
9	2.0	9	0.50	45.55
10	1.0	11	0.50	107.40
11	3.0	13	0.50	56.47
12	2.0	3	0.75	17.85

通过散点图观察 t 与各变量的关系并初步判断均存在线性关系,借助 SPSS 软件进行分析,结果如

表 2 所示。

表 2 楼梯疏散时间仿真数据分析
Tab.2 Analysis of staircase evacuation time simulation data

变量	非标准化系数		P	VIF	R^2	调整 R^2
	β	标准误差				
常数	59.804	6.122	0.000			
v	-13.206	2.895	0.000	1.012		
h	3.756	0.418	0.000	1.014	0.784	0.769
d	-17.778	2.295	0.000	1.013		

注:VIF——变量间相关性。该值反映一个变量与其他变量的相关程度,用于检测模型中的多重共线性。该值趋于 1,表明模型不存在共线性。

综上,当疏散人数为 50 人时,相关变量中 d 的标准化系数绝对值远大于高度。分别改变疏散人数为 55、60 人继续进行仿真试验,借助 SPSS 软件分析相关变量。结果表明,当疏散人数为 55 时, d 的标准化系数为 -24.082, h 的为 5.966, v 的为 7.120;当疏散人数为 60 时, d 的标准化系数为 -30.294, h 的为 5.434, v 的为 9.516。

2 自动扶梯客流疏散时间

影响自动扶梯通行能力的主要因素有:①几何布置。包括自动扶梯的倾斜度、垂直高度、宽度和运行速度。②行人运动状态。行人在自动扶梯上的运动状态主要有全部站立和半走半站立两种。半走半立状态一般右侧站立左侧流动。全部站立情况下自动扶梯的利用率较半走半立状态高,但仍未达到 100%。GB/T 39078.2—2022《自动扶梯和自动人行道安全要求》^[6]规定,提升高度超过 6 m 时,自动扶梯的倾斜角度不应大于 30° 。GB 50157—2013 规定,站厅与站台层间应设上行自动扶梯,车站出入口自动扶梯的倾斜角度不应大于 30° ,站台至站厅自动扶梯的倾斜角度应为 30° 。GB 16899—2011《自动扶梯和自动人行道的制造与安装安全规范》^[7]规定,自动扶梯常用额定速度有 0.50 m/s、0.65 m/s 和 0.75 m/s。

因此,根据自动扶梯通行能力的影响因素,选取自动扶梯宽度 d_0 、自动扶梯垂直高度 h_0 、行人运动速度 v 和自动扶梯运行速度 v_0 为自变量,通过仿真得到不同参数下行人疏散时间 t_0 。仿真模型及疏散人数设置不变。

2.1 饱和状态

行人全部站立,与自动扶梯不存在相对位移,

此时行人运动速度 v 为 0。根据调研,当车站自动扶梯处于饱和状态时,多成双列状态(单列扶梯除外)。因此,在高峰时期,自动扶梯上两队列行人数量相近。

通常情况下, d_0 为 1 m,根据相关标准,当 d_0 的取值范围为 $[0.6\text{ m}, 1.0\text{ m}]^{[4]}$ 时,行人步长为 0.20 m;当 h_0 的取值范围为 $[3\text{ m}, 15\text{ m}]$ 时,行人步长为 0.20 m;当 v_0 的取值范围为 $[0.50\text{ m/s}, 0.75\text{ m/s}]$ 时,行人步长为 0.05 m。在疏散人数取 50 人、自动扶梯倾斜角度设置为 30° 情况下,改变各自变量的取值,进行 42 组正交试验,得到疏散时间。自动扶梯饱和状态下行人疏散时间 $t_{\text{饱和}}$ 为:

$$t_{\text{饱和}} = 128.354 - 95.278v_0 + 1.676h_0 - 20.072d_0 \quad (1)$$

改变疏散人数取值为 55、60 人,对数据进行分析表明,自动扶梯宽度的标准化系数绝对值明显高于高度的,低于自动扶梯运行速度的。

2.2 半走半立状态

根据我国乘客习惯,上行的双列自动扶梯右侧

行人站立,左侧用于行走,即半走半立。文献[8]通过试验指出,自动扶梯疏散能力与行人到达自动扶梯入口处的离散性有关。本文研究高峰期行人疏散时间,因此,假设行人连续到达自动扶梯入口有序排队,进入自动扶梯不存在离散性。一般情况下,行人在自动扶梯左侧的速度大于右侧的,半走半立状态下自动扶梯上行人疏散时间取决于较慢队列的疏散时间。故半走半立状态下自动扶梯通行能力还与行人的走行比例 ω 有关。在模型中设置一台双列自动扶梯, ω 取中间值 0.5。通过对数据进行分析,得到自动扶梯半走半立状态下的行人疏散时间 $t_{\text{半走半立}}$ 为:

$$t_{\text{半走半立}} = 134.207 - 100.232v_0 + 1.839h_0 - 24.012d_0 \quad (2)$$

由式(2)可见,行人运动速度对疏散时间影响作用可忽略不计。为进一步分析自动扶梯半走半立状态下行人运动速度的意义,分别提取仿真模型中左侧行走队列和右侧站立队列开始出现行人和全部行人消失的时间点,结果如表 3 所示。

表 3 自动扶梯半走半立状态下左、右队列疏散时间点(部分)

Tab.3 Evacuation time points of left and right queues under half-passing half-standing state on escalator (partial)

序号	左侧开始 时间点/s	左侧结束 时间点/s	右侧开始 时间点/s	右侧结束 时间点/s	序号	左侧开始 时间点/s	左侧结束 时间点/s	右侧开始 时间点/s	右侧结束 时间点/s
1	0.87	68.57	0.17	70.57	7	1.74	72.29	0.88	70.41
2	0.43	60.61	0.93	61.01	8	0.47	62.07	0.73	60.92
3	0.55	72.96	0.91	74.62	9	1.21	68.33	0.65	70.93
4	0.70	63.30	0.43	64.69	10	0.99	70.23	0.15	68.23
5	0.53	70.45	1.07	73.48	11	0.27	69.01	0.49	67.71
6	1.50	73.60	0.86	72.30	12	1.19	58.28	0.31	59.24

由表 3 可见,当 ω 为 0.5 时,自动扶梯中两队列第一个人出现和最后一个人离开的时间点分别接近。基于半走半立状态疏散时间与自动扶梯上行人首先出现和最后消失的时间点相关,改变 ω 的取值,提取不同 ω 下自动扶梯行人出现的始末时间点,分析对应自动扶梯疏散时间。不同 ω 下自动扶梯疏散时间如图 2 所示。

由图 2 可见,当 ω 小于 0.7 时,自动扶梯疏散时间与 ω 呈近似线性关系。

半走半立状态下,由于自动扶梯左侧用于行走耗费一半空间,用于站立的空间只有右侧一半,若相同数量的行人选择站立上行,半走半立状态下右侧疏散人数约为饱和状态右侧的 2 倍。又因存在一

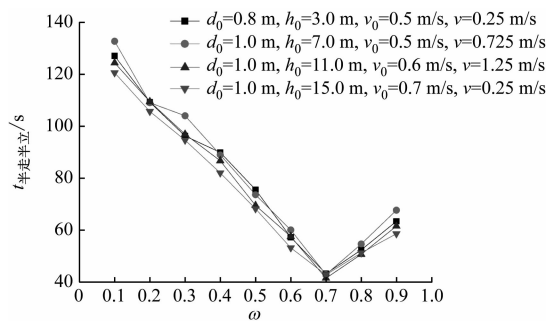


图 2 不同 ω 下自动扶梯疏散时间

Fig.2 Evacuation time by escalator with different ω

定比例 ω 的行人左侧行走,故半走半立状态时右侧疏散人数为饱和状态下右侧人数的 $2(1 - \omega)$ 倍。由此推测,当 ω 小于 0.7 时,车站同一部自动扶梯

(可站双列),一定数量行人在饱和状态和半走半立状态下疏散的时间存在一定比值关系,且该比值与选择自动扶梯左侧行走的行人比例 ω 有关,一般可表示为:

$$t_{\text{半走半立}} = 2(1 - \omega)t_{\text{饱和}}$$

(3)

由图 2 可知,当 ω 大于 0.7 时,行人疏散时间开始增加,结合仿真过程发现,当左侧行走行人比例较高(ω 大于 0.7)时,左侧队列持续疏散行人的时间较右侧的更长,且该时间为自动扶梯整体疏散时间。故当 ω 大于 0.7 时,自动扶梯疏散时间增加。根据调研,发现即使是高峰期,选择自动扶梯左侧行走的行人优先考虑时间性,当后到达的时间优先行人排队等待左侧队列行进时,扶梯上右侧站立队列队尾会出现空位,时间优先的行人会移动到右侧站立队列,故 ω 的值不会太大,一般不超过 0.5。在 AnyLogic 软件中调整 ω 为极限情况进行分析,如 ω 取 0.9 等较大值,但在实际中,高峰时期 ω 的值会在 0.5 上下浮动。

3 楼扶梯组客流疏散时间

站台层更多通过楼扶梯组和直梯与站厅层相连,因此需要考虑楼扶梯组的客流疏散时间。假设乘客下车后选择走楼梯和自动扶梯的比例分别为 w_1 和 w_2 ,比例之和为 1,楼扶梯组的人群疏散时间取决于楼梯和自动扶梯时间中的较大值。

实际情况中,行人选择楼梯走行的比例与楼梯高度有关。通常情况下,楼梯高度越高,选择楼梯的行人越少。高峰时期时,影响行人选择楼梯的因素还有排队时间等。文献[9]通过视频数据采集,统计得到不同楼梯高度与行人选择的比例关系,可表示为:

$$w_1 = -0.0125h + 0.25$$

(4)

由此可得到楼扶梯组自动扶梯饱和状态下、自动扶梯半走半立状态下和楼梯状态下的行人疏散时间 $t_{\text{自动扶梯,饱和}}$ 、 $t_{\text{自动扶梯,半走半立}}$ 、 $t_{\text{楼梯}}$ 分别为:

$$t_{\text{自动扶梯,饱和}} = w_2(128.354 - 95.278v_0 + 1.676h_0 - 20.072d_0)$$

(5)

$$t_{\text{自动扶梯,半走半立}} = w_2(134.207 - 100.232v_0 + 1.839h_0 - 24.012d_0)$$

(6)

$$t_{\text{楼梯}} = w_1(59.804 - 13.206v + 3.756h - 17.778d)$$

(7)

因此,楼扶梯组的行人疏散时间 $t_{\text{楼扶梯组}}$ 为:

$$t_{\text{楼扶梯组}} = \max(t_{\text{自动扶梯,饱和}}, t_{\text{自动扶梯,半走半立}}, t_{\text{楼梯}})$$

(8)

4 实例验证

以上海市轨道交通 2 号线江苏路站(楼扶梯组合)、11 号线曹杨路站上行方向站台(自动扶梯)为例,分别将车站站台楼扶梯参数代入对应计算模型。

实地统计各车站站台高峰期每 50 人的疏散时间,在每个地铁站采集 5 组数据,如表 4 所示。其中序号 0 组数据为模型计算所得。

表 4 地铁站行人疏散时间

Tab. 4 Metro station passenger evacuation time

序号	曹杨路站疏散时间/s	江苏路站疏散时间/s
0	62.12	13.71
1	64.17	10.63
2	61.94	12.25
3	66.09	11.94
4	63.88	12.82
5	58.70	11.17

曹杨路站 11 号线上行方向站台的自动扶梯垂直高度较高,50 人通过一部扶梯疏散所需时间较长。观测统计数据与计算所得数据间的最大相对误差不超过 4%,可以认为模型有效。

江苏路站高峰时期,客流量较大,每一组楼扶梯需要疏散的乘客数量多于 50 人。调研发现,江苏路站 2 号线站台楼扶梯垂直高度约为 5 m,高峰时段楼扶梯行人密度接近且均为较高值,由于楼梯更宽,根据楼扶梯宽度比将选择楼梯的乘客比例设为 0.75。从统计数据来看,5 组数据与计算所得数据间相对误差较大,但相差时间基本小于 3 s。楼梯疏散时间误差较大的原因:楼梯上的行人受自身行走速度、行李质量和他人影响较大;由于实际疏散人数多于 50 人,因此统计 50 人疏散时间时存在一定误差。

本文研究站台楼扶梯组合自身因素对行人疏散时间的影响,用于判定行人聚集安全风险。仿真拟合得到的楼梯疏散时间计算模型基于行人保持舒适间距的前提所得,实际高峰时段下,楼梯上行人间距更小,疏散时间相应减少。可以认为仿真模型计算所得时间有一定松弛性,作为评价人群聚集风险环境指标的定量分析模型,可以认为适用。

5 结语

影响地铁车站站台楼扶梯疏散时间的因素较

多,本文单从楼扶梯本身考虑,研究楼扶梯宽度、高度、运行速度等基本参数对疏散时间的影响。研究表明:自动扶梯运行速度对疏散时间影响程度明显高于自动扶梯宽度、高度;楼扶梯宽度对疏散时间影响程度比高度大;一般情况下,自动扶梯饱和状态和半走半立两种状态的疏散时间存在一定比例关系,该比例与半走半立状态下选择左侧行走行人的比例有关。

仿真软件尽可能还原行人疏散行为,但实际上特别是楼扶梯上的行人是否携带行李、行人在楼梯上行走速度变化等行人异质性会直接影响到楼梯的疏散时间。本文排除行人特性、列车车厢乘客分布随机性等因素,仅考虑车站站台楼扶梯本身对行人疏散时间的影响,以此表征车站站台楼扶梯自身因素对人群聚集安全的影响。

通过仿真拟合得到不同配置楼扶梯疏散时间计算模型,由此可计算得到对应行人流动速度,该指标可作为 DICE 人群聚集风险模型的环境指标之一,表征环境扰动,参与到车站站台人群聚集风险评估工作中。

参考文献

- [1] SUN A, LIU M, LI J. Real-time crowd massing risk supervision system based on massing crowd counting in public venue[C]// IEEE. 2009 International Symposium on Computer Network and Multimedia Technology. Wuhan: IEEE, 2010: 1.
- [2] 孙燕, 李秋菊, 李剑峰. 城市重点公共区域人群聚集风险的实时定量技术[J]. 中国安全生产科学技术, 2011, 7(8): 147.
SUN Yan, LI Qiuju, LI Jianfeng. Real-time quantification technology of the crowd massing risk in urban public venues[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2011, 7(8): 147.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 地铁设计规范: GB 50157—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of metro: GB 50157—2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.
- [4] 李嘉陶. 地铁车站楼扶梯上行疏散效率研究[D]. 重庆: 重

庆大学, 2022.

LI Jiatao. Study on upward evacuation efficiency of stairs and escalators in subway stations[D]. Chongqing: Chongqing University, 2022.

- [5] 王洪臣, 张宁, 何铁军. 地铁车站行人交通的微观特性[J]. 城市轨道交通研究, 2013, 16(12): 74.
WANG Hongchen, ZHANG Ning, HE Tiejun. Microscopic characteristics of pedestrian traffic at metro stations[J]. Urban Mass Transit, 2013, 16(12): 74.
- [6] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 自动扶梯和自动人行道安全要求 第2部分: 满足基本安全要求的安全参数: GB/T 39078. 2—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
State Administration for Market Regulation of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Safety requirements for escalators and moving walks—part 2: safety parameters meeting essential safety requirements: GB/T 39078. 2—2022[S]. Beijing: Standards Press of China, 2022.
- [7] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 自动扶梯和自动人行道的制造与安装安全规范: GB 16899—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Safety rules for the construction and installation of escalators and moving walks: GB 16899—2011[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.
- [8] DALY P, MCGRATH F, ANNESLEY T. Pedestrian speed/flow relationships for underground stations[J]. Traffic Engineering and Control, 1991(2): 75.
- [9] 朱昌稳. 地铁车站通道行人楼扶梯选择及仿真模型研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
ZHU Changwen. Study on escalator selection and simulation model of subway station passage pedestrian building[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.

· 收稿日期: 2023-08-09 修回日期: 2023-11-30 出版日期: 2024-02-10
Received: 2023-08-09 Revised: 2023-11-30 Published: 2024-02-10
· 通信作者: 吴甜甜, 硕士研究生, 2133460@tongji.edu.cn
· ©《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 169 页)

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for design of outdoor wastewater engineering: GB 50014—2021 [S]. Beijing: China Planning Press, 2021.

· 收稿日期: 2023-05-22 修回日期: 2023-08-25 出版日期: 2024-02-10
Received: 2023-05-22 Revised: 2023-08-25 Published: 2024-02-10
· 通信作者: 金永乐, 高级工程师, 389730352@qq.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