

跨坐式单轨交通区间乘客疏散救援仿真分析

陈柏坤

(中铁第一勘察设计院集团有限公司, 710043, 西安)

摘要 [目的] 跨坐式单轨交通制式独特, 在高架线路上进行疏散救援时不同于常规的城市轨道交通疏散救援形式, 因此有必要对该制式下区间乘客疏散救援方式与疏散效率等进行深入研究。[方法] 建立跨坐式单轨交通区间乘客疏散救援仿真模型, 研究典型的三种不同区间乘客疏散救援方式的影响因素, 探究疏散效率较高的救援措施; 针对横向及垂向疏散救援场景, 提出达到最佳疏散效率的救援设施设置位置与数量的确定方法; 提出了更加科学合理的跨坐式单轨交通区间乘客疏散救援建议。[结果及结论] 疏散影响因素方面, 疏散救援设备放置位置与数量影响横向救援时间; 消防云梯倾斜角度影响垂向疏散救援时间; 工作人员的引导作用对跨坐式单轨交通区间乘客疏散救援有积极作用。在疏散效率方面, 横向、纵向及垂向疏散救援方式中应当优先考虑横向救援方式; 横向及垂向疏散救援设备放置位置应尽量使每块横向救援渡板上的疏散人数相同; 采用垂向疏散救援时, 疏散效率随着消防云梯倾斜角度的增加先减少后增加。

关键词 跨坐式单轨交通; 区间; 乘客疏散救援

中图分类号 U232

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.08.017

Simulation Analysis of Passenger Evacuation and Rescue in Straddle Monorail Transit Intervals

CHEN Baikun

(China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., 710043, Xi'an, China)

Abstract [Objective] Due to the unique characteristics of straddle monorail transit system, evacuation and rescue forms on its elevated lines differ from conventional urban rail transit. Therefore, it is necessary to conduct an in-depth study of interval passenger evacuation and rescue methods and evacuation efficiency for this system. [Method] A simulation model for passenger evacuation and rescue in straddle monorail transit intervals is established. The influencing factors of three typical interval passenger evacuation and rescue methods are studied and the rescue measures with higher evacuation efficiency are explored. For both horizontal and vertical evacuation and rescue scenarios, methods to determine the placement and quantity of rescue facilities for optimal evacuation efficiency are pro-

posed. More scientific and reasonable suggestions for passenger evacuation and rescue in straddle monorail transit intervals are provided. [Result & Conclusion] Research results indicate that: in terms of evacuation influencing factors, the placement and quantity of evacuation and rescue equipment affect horizontal rescue time; the inclination angle of fire ladder affects vertical evacuation and rescue time; the guidance from staff positively impacts passenger evacuation and rescue in straddle monorail transit intervals. In terms of evacuation efficiency, horizontal rescue should be prioritized over longitudinal and vertical evacuation and rescue methods. The placement of horizontal and vertical evacuation and rescue equipment should ensure equal distribution of evacuees on each horizontal rescue board. For vertical evacuation and rescue, evacuation efficiency initially decreases and then increases with fire ladder inclination angle increasing.

Key words straddle monorail transit; interval; passenger evacuation and rescue

跨坐式单轨交通具有独特的制式, 相比于传统的城市轨道交通, 在乘客疏散救援时面临更为特殊的挑战。因此, 有必要对跨坐式单轨交通区间乘客疏散救援进行研究。

本文采用微观仿真软件 Vissim 建立了跨坐式单轨交通区间乘客疏散救援分析模型, 对典型的区间乘客疏散救援方案中的疏散时间以及相关工程技术参数进行了分析, 提出了受横向及垂向疏散救援设备放置位置及其数量影响的最佳疏散效率的计算方法。基于仿真分析结果与相关规范, 提出更加科学合理的跨坐式单轨交通区间乘客疏散救援建议, 可为工程实践提供参考。

1 跨坐式单轨交通区间乘客疏散救援概述

跨坐式单轨交通区间乘客疏散救援方式包括横向疏散救援、纵向疏散救援、垂向疏散救援、纵向连挂救援及疏散平台救援等 5 种方式。其中: 纵向连挂救援方式为采用可调度救援列车将故障列车

推拉或牵引至邻近车站后疏散乘客,不属于区间救援研究范畴;在实际工程应用中部分线路未设置疏散平台。本研究主要针对横向、纵向及垂向疏散救援等3种方式进行分析。

1.1 横向疏散救援

当跨坐式单轨交通区间为双线线路时,可通过横向疏散救援的方式疏散乘客。救援列车从平行线路运行至与故障列车平齐处,通过两车车门间放置的横向救援渡板将乘客疏散至救援列车。

1.2 纵向疏散救援

同一条跨坐式单轨交通线路的救援列车靠近故障列车进行连挂,即通过司机室之间搭建的纵向救援渡板将乘客疏散至救援列车。该救援方式常用于单线线路。

1.3 垂向疏散救援

当跨坐式单轨交通线路距地面高度较小且地面具有疏散条件时,可采用垂向疏散救援方式。一般采用充气滑梯、消防云梯等将乘客从高架桥列车疏散至地面。考虑到实际工程中老人、儿童、孕妇等不宜使用充气滑梯,本研究选用消防云梯的疏散方式。

2 跨坐式单轨交通区间乘客疏散救援仿真模型

2.1 跨坐式单轨交通列车模型

基于行人微观仿真软件 Vissim,建立跨坐式单轨交通区间乘客疏散救援仿真模型,见图1。该模型采用6节编组,其中:2节Mc(带司机室动车),4节M(动车)。Mc长度为14 800 mm,M长度为13 900 mm,车体宽度为2 900 mm,每节车厢两侧各设2对有效宽度为1 300 mm的双开式内藏拉门。

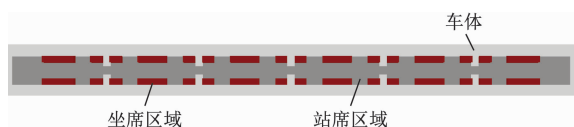


图1 跨坐式单轨交通区间乘客疏散救援仿真模型

Fig.1 Simulation model of passenger evacuation and rescue in straddle monorail transit interval

2.2 疏散乘客参数标定

疏散人数采用 GB 50458—2008《跨坐式单轨交通设计规范》中规定的列车定员人数(站立标准6人/m²),Mc定员151人,M定员165人,待疏散人群总数为962人。

跨坐式单轨交通车辆内乘客类型包括成年男士、成年女士、老人(60岁以上)及儿童(15岁以下)等四类。根据文献[1-3],考虑车厢连接处速度折减系数取0.75^[4],得到四类乘客的占比以及紧急状态下乘客的平均行走速度及车厢连接处行走速度。仿真中不同类型乘客的参数根据 GB 10000—1988《中国成年人人体尺寸》取值。疏散乘客参数如表1所示。

表1 疏散乘客参数

Tab.1 Evacuation passenger parameters

类型	占比/%	乘客平均行走速度/(m/s)	车厢连接处乘客行走速度/(m/s)	胸厚/m	肩宽/m
成年男士	54	1.51	1.16	0.237	0.460
成年女士	37	1.39	1.04	0.230	0.428
老人	4	1.00	0.75	0.199	0.397
儿童	5	0.80	0.60		0.302

由于车厢内乘客密度较大,且乘客密度对其疏散速度影响也较大。文献[5]提出紧急状态下乘客平均疏散速度的计算公式为:

$$v = -0.000\ 01\rho^5 + 0.000\ 80\rho^4 - 0.017\ 40\rho^3 + 0.154\ 20\rho^2 - 0.647\ 60\rho + 1.415\ 00 \quad (1)$$

$$\rho = \frac{W}{2S} \quad (2)$$

式中:

v ——紧急状态下乘客的平均疏散速度,单位m/s;

ρ ——乘客密度,单位人/m²;

W ——车辆载客数,单位人;

S ——车厢内乘客站立面积,单位m²。

将上述相关数值代入式(1)和式(2),得到乘客在车厢内的疏散速度为0.435 m/s。

3 跨坐式单轨交通区间乘客疏散救援仿真分析

3.1 横向疏散救援分析

影响横向救援疏散时间的因素为横向救援渡板的数量及其放置位置。出于安全考虑,车厢侧门不能完全打开,且打开宽度应与横向救援渡板宽度相同。本研究采用的横向救援渡板宽度为800 mm,长度为2 500 mm,线间距采用3 700 mm。将6节编组列车按某一方向进行编号,车厢编号及横向救援渡板放置位置如图2所示。对不同横向救援渡板数时的疏散时间及其相关技术参数进行分析。



注:图中数字为车厢编号;↓为救援渡板放置位置。

图 2 车厢编号及横向救援渡板放置位置

Fig. 2 Compartment number and placement position of lateral rescue board

3.1.1 横向救援渡板数为 1

将 6 块横向救援渡板分别放置于 1~6 号车厢前侧车门,且每个车门处 1 块,此工况下的乘客疏散时间,如表 2 所示。

表 2 横向救援渡板数为 1 时的乘客疏散时间

Tab. 2 Passenger evacuation time when the number of lateral rescue board is 1

救援渡板摆放处 车门编号	1	2	3	4	5	6
疏散时间/s	1 458	1 241	1 163	1 171	1 296	1 485

由表 2 可知:横向救援渡板的放置位置将显著影响疏散时间,当横向救援渡板放置在列车中部车厢处时效率最高,所用时间分别为 1 163 s 和 1 171 s。疏散时间根据横向救援渡板放置位置的不同而呈现一定的前后对称性。

3.1.2 横向救援渡板数为 2

每个车门处放置的横向救援渡板数为 2 时的位置工况,如表 3 所示。

表 3 横向救援渡板数为 2 时的位置工况

Tab. 3 Positions in each working condition when the number of lateral rescue boards is 2

工况	一	二	三	四	五	六	七	八	九
位置	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	2,3	2,4	2,5	3,4

注:表中位置行的数字代表车门编号;余类同。

表 5 横向救援渡板数为 3 时的位置工况

Tab. 5 Positions in each working condition when the number of lateral rescue boards is 3

工况	一	二	三	四	五	六	七	八	九	十
位置	1,2,3	1,2,4	1,2,5	1,2,6	1,3,4	1,3,5	1,3,6	1,4,5	2,3,4	2,3,5

表 6 横向救援渡板数为 3 时的乘客疏散时间

Tab. 6 Passenger evacuation time when the number of lateral rescue boards is 3

工况	一	二	三	四	五	六	七	八	九	十
疏散时间/s	958	736	617	610	585	446	429	440	488	429

表 7 横向救援渡板数为 4 时的位置工况

Tab. 7 Positions in each working conditions when the number of lateral rescue boards is 4

工况	一	二	三	四	五	六	七	八	九	十
位置	1,2,3,4	1,2,3,5	1,2,3,6	1,2,4,5	1,2,4,6	1,2,5,6	1,3,4,5	1,3,4,6	1,4,5,6	2,3,4,5

由于横向救援渡板数大于 1,乘客疏散时会有不同的选择,若乘客在疏散时未得到有效引导,则可能会出现横向疏散救援渡板利用率差别较大的情况。在仿真模型中设定局部路径选择方法以模拟工作人员对乘客疏散的引导作用。横向救援渡板数为 2 时的乘客疏散时间,如表 4 所示。

表 4 横向救援渡板数为 2 时的乘客疏散时间

Tab. 4 Passenger evacuation time when the number of lateral rescue boards is 2

项目	不同工况下的救援时间/s								
	一	二	三	四	五	六	七	八	九
有引导	1 233	950	670	614	706	924	611	545	662
无引导	1 254	1 011	787	750	816	974	738	584	698

由表 4 可知:当横向救援渡板放置于 2 号和 5 号车厢(工况八)时,乘客疏散时间最少,为 545 s;当其中一个横向救援渡板位置固定,另一个横向救援渡板位于列车对称侧的车厢时的疏散效率较高。值得注意的是,工作人员的引导作用对跨坐式单轨区间乘客疏散救援有积极作用。

3.1.3 横向救援渡板数为 3

每个车门处放置的横向救援渡板数为 3 时的位置工况,如表 5 所示。

横向救援渡板数为 3 时的乘客疏散时间如表 6 所示。由表 6 可知:工况七或工况十下乘客疏散时间最短,约为 429 s。

3.1.4 横向救援渡板数为 4

每个车门处放置的横向救援渡板数为 4 时的位置工况,如表 7 所示。

横向救援渡板数为 4 时的疏散时间如表 8 所示。由表 8 可知:工况八下的乘客疏散时间最少,为

表 8 横向救援渡板数为 4 时的乘客疏散时间

Tab. 8 Passenger evacuation time when the number of lateral rescue boards is 4

工况	一	二	三	四	五	六	七	八	九	十
疏散时间/s	710	572	574	510	432	426	505	337	535	501

337 s,且与其他工况相比,乘客疏散效率提升较为明显。究其原因为该工况下乘客的疏散流线最好,不会出现乘客在车厢内相向运动的情况,保证了疏散效率,且每块横向救援渡板承担的乘客疏散量较为平均。

3.1.5 横向救援渡板数为 5 和 6

每个车门处放置的横向救援渡板数为 5 时的位置工况及疏散时间,如表 9 所示。由表 9 可知:工况三下的乘客疏散时间为 318 s,疏散效率较高。

表 9 横向救援渡板数为 5 时的位置工况及乘客疏散时间

Tab. 9 Positions and evacuation time in each working condition when the number of lateral rescue boards is 5

工况	一	二	三
位置	1、2、3、4、5	1、2、3、4、6	1、2、3、5、6
疏散时间/s	481	426	318

当横向救援渡板数为 6 时,乘客疏散时间为 217 s。

3.1.6 横向救援渡板放置位置分析

为了得到横向救援渡板的最佳放置位置,假设每节车厢内乘客数量为定值,则每块横向救援渡板疏散的乘客数量以横向救援渡板为圆心,以所有疏散乘客中距离最远的两个乘客之间的距离差为直径的圆来确定。得到第 m 块横向救援渡板放置的车辆编号 n_m 的计算方法为:

$$n_m = \left\lceil \frac{(2m-1)N}{2M} \right\rceil \quad (3)$$

式中:

N ——车辆编组总数,取 6;

M ——横向救援渡板总数;

$\lceil x \rceil$ ——不小于 x 的最小整数。

根据式(3)计算横向救援渡板的最佳放置位置,如表 10 所示。

由表 10 可知:除横向救援渡板数为 3 的工况外,其他工况的计算结果与仿真结果基本一致;工况六与效率最高的工况(工况七或工况十)乘客疏散时间差较短,为 17 s。

表 10 横向救援渡板数的最佳放置位置

Tab. 10 Best placement position for different lateral rescue board numbers

横向救援渡板数	位置	与仿真结果的一致性
1	3	一致
2	2、5	一致
3	1、3、5	不一致
4	1、3、4、6	一致
5	1、2、3、5、6	一致
6	1、2、3、4、5、6	一致

3.2 纵向疏散救援分析

由于跨坐式单轨列车端门宽度为 800 mm,疏散时仅可通过一人,故横向救援渡板宽度对纵向救援疏散时间的影响较小,纵向救援疏散时间仿真值为 1 974 s。

3.3 垂向疏散救援分析

采用消防云梯进行垂向救援时,影响疏散时间的因素包括消防云梯的放置位置(即疏散车门编号)、数量及搭设倾斜角度等。其中,消防云梯的放置位置和数量对垂向疏散救援时间的影响与横向疏散救援一致。此次研究消防云梯倾斜角度对垂向疏散救援时间的影响。参考文献[6],采用消防云梯疏散时,最佳倾斜角度处于 30° 和 45° 之间。本文以 2.5° 为间隔,分析消防云梯倾斜角度对疏散时间的影响。垂向疏散救援工况设置为 7 种。消防倾斜角度的增大可能会造成乘客疏散走行时心理恐惧等,导致疏散速度下降。参考文献[7-9],总结出 7 种不同倾斜角度下的乘客疏散速度,如表 11 所示。采用单一消防云梯从 3 号车门处疏散,垂向救

表 11 消防云梯不同倾斜角度下的乘客疏散速度

Tab. 11 Passenger evacuation speed at different fire ladder inclination angles

工况	倾斜角度/ $^\circ$	疏散速度/(m/s)
一	30.0	0.85
二	32.5	0.78
三	35.0	0.71
四	37.5	0.64
五	40.0	0.58
六	42.5	0.51
七	45.0	0.44

援疏散时间随消防云梯倾斜角度变化曲线如图3所示。

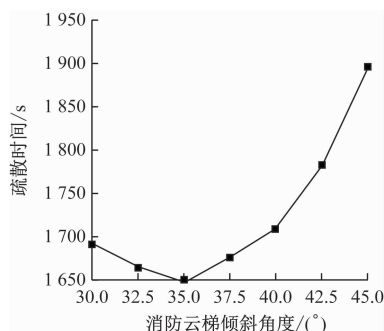


图3 垂向救援疏散时间随消防云梯倾斜角度变化曲线

Fig.3 Curve of vertical rescue evacuation time changing with fire ladder inclination angle

由图3可知:7种工况下随着倾斜角度的增加,疏散时间先逐渐减少而后快速增加;倾斜角度为35°时,疏散时间为1648 s,该工况下乘客疏散效率最高。

3.4 不同疏散方式比较

采用 H_i 表示横向救援渡板数量为 i 时的横向救援疏散方式, Z 表示纵向救援疏散方式, C_d 表示采用单一消防云梯且倾斜角度为 d 时的垂向救援疏散方式。每种救援疏散方式选用疏散效率最高的工况,得到不同救援疏散方式下的乘客疏散时间,如表12所示。

表12 不同救援疏散方式下的乘客疏散时间

Tab.12 Passenger evacuation time with different rescue and evacuation methods

疏散方式	H_1	H_2	H_3	H_4	H_5	H_6	Z	C_{35°
疏散时间/s	1 163	545	429	337	298	217	1 974	1 648

由表12可见:跨坐式单轨交通三种救援疏散方式中,横向救援疏散方式用时最少,其次是垂向救援疏散方式,纵向救援疏散方式用时最多。

4 结语

1) 不同救援疏散方式之间可相互配合、相互补充,相关部门可根据实际工况选用其中一种或多种进行疏散救援。

2) 当跨坐式单轨列车因故障无法行驶,且区间为双线线路时,应优先采用横向救援疏散方式,并在救援过程中使每块救援渡板都得到充分利用,以达到最佳的疏散效率。

3) 跨坐式单轨交通区间乘客疏散时,工作人员的引导作用能提高疏散效率,因此疏散时工作人员应根据具体的救援疏散方式通过广播等方式进行

引导。

4) 当采用垂向救援进行乘客疏散时,应考虑疏散乘客中的老幼病残孕等特殊人群,选择合适的垂向救援疏散方式并及时提供必要的帮助。

参考文献

- [1] 陈绍宽,李思悦,李雪,等. 地铁站内乘客疏散时间计算方法研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2008, 8(4): 101.
CHEN Shaokuan, LI Siyue, LI Xue, et al. Modeling evacuation time for passengers from metro platforms[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2008, 8(4): 101.
- [2] 田娟荣,周孝清,郑志敏. 地铁人员疏散特征的调查分析[J]. 都市快轨交通, 2009, 22(1): 20.
TIAN Juanrong, ZHOU Xiaoqing, ZHENG Zhimin. Surveys on personnel evacuation in subways[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2009, 22(1): 20.
- [3] 刘杨. 基于Anylogic的地铁站应急疏散仿真研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2016.
LIU Yang. Simulation research on emergency evacuation in subway station based on Anylogic[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2016.
- [4] 丁明. 中低速磁浮铁路桥上疏散及应急设施研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
DING Ming. Research on evacuation and emergency facilities on the medium and low speed maglev railway bridges[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.
- [5] PREDETECHENSKII V M, MILINSKII I. Planning for foot traffic flow in buildings[M]. New Delhi: Amerind Publishing, 1978.
- [6] 沈健,杨阳,李芾,等. 悬挂式单轨系统乘客疏散救援方案研究[J]. 电力机车与城轨车辆, 2021, 44(3): 1.
SHEN Jian, YANG Yang, LI Fu, et al. Research on passenger evacuation rescue scheme of suspended monorail system[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2021, 44(3): 1.
- [7] 汤雪飞,季经纬,谢信亮,等. 坡度对疏散影响的试验研究[J]. 消防科学与技术, 2017, 36(11): 1508.
TANG Xuefei, JI Jingwei, XIE Xinliang, et al. The experimental studies on influence of slope on evacuation[J]. Fire Science and Technology, 2017, 36(11): 1508.
- [8] FUJIYAMA T, TYLER N. An explicit study on walking speeds of pedestrians on stairs[C]// Proceedings of 10th International Conference on Mobility and Transport for Elderly and Disabled People (TRANSED 2004). Hamamatu: TRANSED, 2004: 643-652.
- [9] WANG J, MA J, LIN P, et al. Pedestrian single file movement on stairway: investigating the impact of stair configuration on pedestrian ascent and descent fundamental diagram[J]. Safety Science, 2021, 143: 105409.

· 收稿日期:2022-05-26 修回日期:2022-06-20 出版日期:2024-08-10

Received:2022-05-26 Revised:2022-06-20 Published:2024-08-10

· 作者:陈柏坤,工程师,c419391945@163.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