

中低速磁浮线路高架桥上应急设施疏散能力仿真分析*

丁明^{1,2} 魏庆朝¹ 潘姿华¹ 张风河³

(1. 北京交通大学土木建筑工程学院, 100044, 北京; 2. 北京九州一轨环境科技股份有限公司智慧运维中心, 100070, 北京;

3. 山东华宇工学院校企合作与就业指导处, 253034, 德州 // 第一作者, 硕士研究生)

摘要 在分析中低速磁浮线路高架桥上事故特点的基础上, 归纳了竖向、纵向、横向等应急疏散模式, 以及既有的桥上应急设施类型。通过计算机多智能体仿真平台 Pathfinder, 建立了磁浮列车桥上人员疏散仿真模型, 计算分析了不同工况下桥上应急设施及其设计参数对人员疏散时间的影响。研究表明: 采用 Pathfinder 仿真平台可以较为真实地模拟桥上人员的疏散过程和疏散时间; 竖向疏散的独立楼梯疏散效率和安全性能较高; 疏散平台的平台宽度和栏杆间隔对人员纵向和横向疏散时间有一定影响。

关键词 中低速磁浮线路; 高架桥; 应急设施; 疏散能力; 仿真分析

中图分类号 U237; U233; U298.2

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2021.06.038

Simulation Analysis of Emergency Facilities Evacuation Capability on Medium and Low Speed Maglev Bridges

DING Ming, WEI Qingchao, PAN Zihua, ZHANG Fenghe

Abstract Based on the characteristic analysis of accidents on medium and low speed maglev bridges, vertical, longitudinal and horizontal evacuation modes and existing emergency facilities on bridges are summarized. Based on multi-agent simulation platform Pathfinder, the simulation models of passenger evacuation on maglev bridges are built and the influence of emergency facilities and design parameters in different cases on passenger evacuation time is calculated and analyzed. Research results show that Pathfinder can provide a realistic simulation of process and time for passenger evacuation on bridges. Independent staircases of vertical emergency evacuation modes are of higher efficiency and safety. And the width of walkways and railing interval affects passenger longitudinal and horizontal evacuation time to certain extent.

Key words medium and low speed maglev; viaduct; emergency facility; evacuation capability; simulation analysis

First-author's address School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, 100044, Beijing, China

中低速磁浮线路具有噪声低、爬坡能力强、转弯半径小等优点, 适用于城市机场专用线或客流相对集中的点对点线路^[1]。为了线路的跨越避让、沉降控制和方便维修, 其常采用高架桥作为下部基础结构, 这也使事故时人员疏散具有很大难度。因此, 合理设置桥上应急设施已成为确保人员安全的必要措施。

CJJ/T 262—2017《中低速磁浮交通设计规范》^[2]指出高架区间应设置纵向疏散平台, 并对其最小宽度做了规定。长沙磁浮快线设有疏散平台和独立楼梯, 北京中低速磁浮交通示范线(S1线)亦设有疏散平台。但目前针对不同桥上应急设施疏散能力的对比研究, 以及桥上应急设施的部分设计参数对其疏散能力的影响研究仍较为缺乏。多智能仿真技术在疏散行为研究中应用广泛^[3], 相比其它微观仿真模型, 该仿真技术在行为个体、个体间以及个体和环境间相互影响等方面能更真实地模拟不同场景的疏散过程^[4], 同时能避免大规模人员疏散演习的风险。

基于此, 本文利用计算机多智能仿真平台 Pathfinder, 以中低速磁浮线路高架桥上人员应急疏散为场景, 计算分析不同应急设施及其设计参数对人员疏散时间的影响, 以期国内中低速磁浮线路设计和建设提供参考。

1 中低速磁浮线路高架桥上应急疏散的特点

中低速磁浮线路桥梁属于半封闭空间^[5], 一旦发生事故, 人员不易疏散, 外部救援也难迅速进行。按照事故致因特点, 可将中低速磁浮线路高架桥上

* 北京市自然科学基金项目(8172040)

事故分为人为因素事故和非人为因素事故,具体如图1所示。桥上应急疏散主要具有以下特点:

- 1) 事故影响因素多。中低速磁浮线路桥梁需要车辆、线路、牵引供电、列车运行控制等多个子系统协同工作^[6]。此外,“人-机-环境”的整体性和协调性也是线路安全运营中所不可或缺的^[7]。中低速磁浮系统的复杂性使其事故影响因素多。
- 2) 发生事故概率大。就目前运营情况与发展

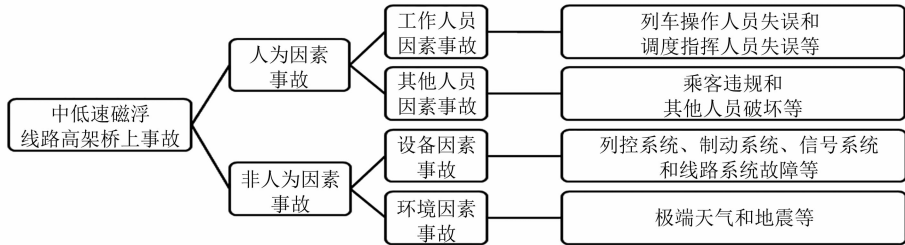


图1 中低速磁浮线路高架桥上事故分类

2 高架桥上应急疏散模式及疏散设施

2.1 高架桥上应急疏散模式

与桥梁救援定点概念^[10]相似,高架桥上应急设施是设置在桥梁上、引导人员疏散避难和方便救援工作开展等设施。

根据疏散方向,高架桥上应急设施的设置模式主要有竖向、纵向、横向以及“组合”等4种。竖向是指设置竖向疏散通道以连接桥面与地面以引导人员疏散;纵向是指设置疏散平台等引导人员沿线路方向疏散;横向是指在上下行之间设置连接通道,使得双线互为避难场所;“组合”是指将上述2种或3种疏散模式组合应用。图2为高架桥上应急设施竖向、纵向、横向疏散示意图。

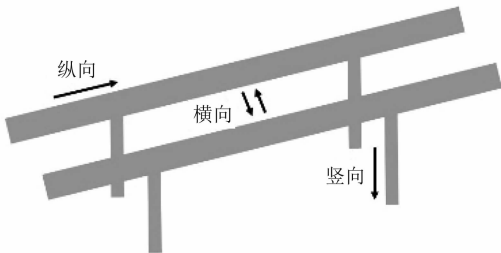


图2 高架桥上应急设施竖向、纵向、横向疏散示意图

2.2 高架桥上应急疏散设施

2.2.1 竖向应急疏散设施

竖向应急疏散设施主要包括以下4种:

- 1) 独立楼梯。独立楼梯即顶部设在桥面、梯身

趋势而言,中低速磁浮高架线路占比极高。例如,日本东部丘陵线高架线路占全线的84.3%^[8];我国长沙和北京磁浮线路也均以高架为主。事故发生时,列车位于桥上的概率大。

- 3) 人员疏散较困难。中低速磁浮线路的选线灵活,其高架桥常跨越、避让基础设施和山谷、河流等特殊地形^[9],因而陡坡桥、曲线桥较多且下部环境复杂;加之其桥梁结构特殊、位置较高、空间狭窄,事故发生时导致人员恐慌与拥挤现象严重。

由独立支柱或桥墩支撑的逃生楼梯^[10]。

- 2) 逃生电梯。逃生电梯又称逃生升降机。

- 3) 逃生滑梯。逃生滑梯较为理想,但设计与施工难度大^[11]。

- 4) 柔性滑道。柔性滑道随车置于密闭箱内,使用时固定于桥面预留的安装孔^[12]。

长沙磁浮快线梨梨站附近的独立楼梯如图3所示。



图3 高架桥上的独立楼梯

2.2.2 纵向应急疏散设施

纵向应急疏散设施主要是疏散平台。目前,应用最为普遍的设置方式主要为单线时设于一侧和双线时设在线间两种。一旦发生事故,人员可经由疏散平台步行前往临近的车站或者避难点。北京中低速磁浮交通示范线延伸至金安桥站的疏散平台如图4所示。

2.2.3 横向应急疏散设施

如列车在区间失去动力,经调度指挥由双线的



图4 磁浮线路延伸至车站的疏散平台

另一线发来列车,区间人员方能借助横向应急设施到达对线列车,并发往临近车站完成疏散。疏散平台设在线间时可充当横向应急设施;未设置疏散平台时,人员可通过随车渡板到达对线列车。



图5 高架桥上磁浮列车人员疏散模型

行走的速度为平常值的 2 倍,设置行走速度为 0.6~1.4 m/s 的均匀分布^[15]。以疏散时间为依据,考虑随机性,将每个模型分别计算 5 次,并取其平均值。

3.2 竖向疏散仿真计算

3.2.1 4 种竖向应急疏散设施的对比

根据城市轨道交通桥梁的实际情况,取不同磁浮列车距地面的高度,并按照各推荐值^[10-12]设置 4 种竖向应急疏散设施,分别建立竖向疏散模型。

对于竖向疏散,考虑人员全部离开应急设施的时间为疏散时间,计算结果如图 6 所示。由图 6 可知,随着磁浮列车距地面高度增加,各竖向应急设施疏散时间均增加,其中独立楼梯、逃生滑梯和柔性滑道疏散时间增加缓慢,而逃生电梯疏散时间增加显著。独立楼梯疏散效率和安全性能较高,因此建议推广;逃生电梯疏散效率较低,但可作为特定人员的辅助设施,建议配合使用;逃生滑梯和柔性滑道建议作为备用手段。

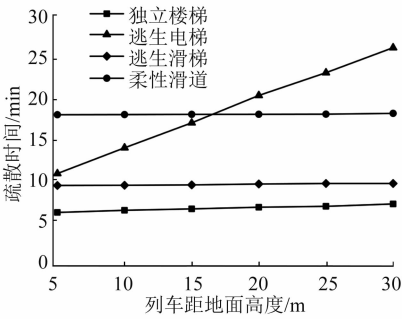


图6 磁浮列车竖向应急疏散设施的疏散时间

3 高架桥上磁浮列车人员疏散仿真分析

3.1 仿真模型的建立

Pathfinder 仿真平台可提供先进的可视化界面和三维动画效果等^[13],其 Steering 模式可以精细化设置个体的路线规划和障碍物躲避行为^[14]。参考北京中低速磁浮交通示范线,建立 6 节编组的高架桥上磁浮列车人员疏散模型,如图 5 所示。列车长 89.6 m,宽 3 m;每辆车设对开门 2 对,车门宽 1.5 m。建模时,假定人员自由疏散,且在车内均匀分布;忽略性别、年龄等因素的差异,按列车额定载客数设置人员数量。按我国成年人人体尺寸,设置肩宽为 40~45 cm 的均匀分布;紧急情况下人

3.2.2 楼梯宽度对独立楼梯的影响

通过改变独立楼梯的宽度,计算得到其对疏散时间的影响,见表 1。由表 1 可知,随着楼梯宽度增加,独立楼梯疏散时间减少。因此,在工程经济等条件允许的情况下,建议适当增加楼梯宽度。

表1 不同楼梯宽度时独立楼梯的疏散时间

楼梯宽度/m	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8
疏散时间/min	23.95	21.19	19.90	18.79	17.85	17.03	16.24

3.2.3 每次开关门时间对逃生电梯的影响

针对逃生电梯,改变每次开关门时间,计算得到其对疏散时间的影响,见表 2。由表 2 可知,随着每次开关门时间增加,逃生电梯疏散时间增加。因此,在人员安全等条件允许的情况下,建议适当减少每次开关门时间。

表2 每次不同开关门时间时逃生电梯的疏散时间

每次开关门时间/s	3.50	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00	6.50
疏散时间/min	53.40	53.94	54.16	54.37	54.62	54.93	55.16

3.3 纵向疏散仿真计算

3.3.1 单侧开门数量对疏散平台的影响

由于车门在事故中的可用数量存在不确定性,取不同单侧开门数量,分别建立纵向疏散模型。

对于纵向疏散,当人员离开事故列车即可抵达相对安全的区域,考虑人员全部离开事故列车的时间为疏散时间,计算结果见表 3。由表 3 可

知,随着列车单侧开门数量减少,离开列车途径变少,但同时也限制了平台人群密度快速增加,降低了人流冲突。

表 3 不同单侧开门数量时疏散平台的纵向疏散时间

单侧开门数量	12	10	8	6	4	2
疏散时间/min	11.24	10.81	11.01	11.18	11.06	10.96

3.3.2 平台宽度对疏散平台的影响

平台宽度和栏杆间隔均对纵向疏散时间有影响。栏杆间隔对于人员离开列车的影响类似于横向疏散时的情况。通过改变平台宽度,计算得到纵向疏散模式下其对疏散时间的影响,见表 4。由表 4 可知,当平台宽度 $\geq 600\text{ mm}$ 时,纵向疏散时间随平台宽度增加而减少,其中平台宽度由 600 mm 增加至 $1\,200\text{ mm}$ 时,疏散时间减少得更快。由此可见,增大平台宽度可以显著缩短纵向疏散时间,因此,在工程经济等条件允许的情况下,建议增加平台宽度至 $1\,200\text{ mm}$ 或更大值。

表 4 不同平台宽度时疏散平台的纵向疏散时间

平台宽度/mm	400	600	800	1 000	1 200	1 400	1 600
疏散时间/min	14.80	13.52	11.24	8.44	6.82	6.00	

3.4 横向疏散仿真计算

3.4.1 随车渡板与疏散平台的对比

横向疏散包括随车渡板和疏散平台两种方式。取不同的两车正对车门对数,分别建立横向疏散模型。

对于横向疏散,考虑人员全部进入对线列车的时间为疏散时间,计算结果如图 7 所示。由图 7 可知,当两车正对车门对数相同时,采用随车渡板的疏散时间总比采用疏散平台时要少;随着两车正对车门对数减少,两种方式下的疏散时间均增加,其中,采用疏散平台的疏散时间增加更为显著,究其原因是进入对线列车时疏散平台与车门人流易产生冲突(见图 8)。需注意,由仿真计算得到的疏散

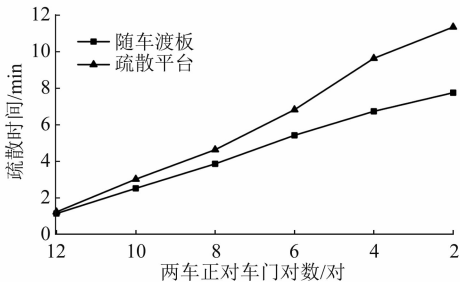


图 7 磁浮列车横向应急疏散设施的疏散时间

时间很短,但是实际中需要考虑事故严重程度、调度等因素,这些因素会影响横向疏散的可行性和疏散时间。经多方面考虑,建议优先在两线间设置疏散平台,如存在不允许设置疏散平台的地段,建议配备随车渡板。

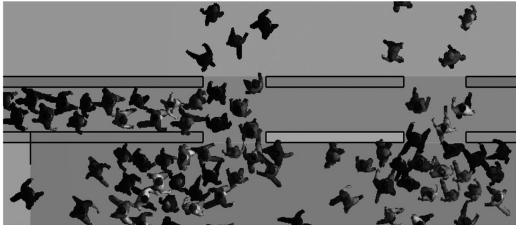


图 8 疏散平台与车门人流冲突

3.4.2 栏杆间隔对疏散平台的影响

对于人员横向走行而言,平台宽度变化对疏散时间的影响不大。通过改变栏杆间隔,计算得到不同栏杆间隔时的疏散时间,见表 5。由表 5 可知,当栏杆间隔为 $600\sim 1\,200\text{ mm}$ 时,随着栏杆间隔增加,采用疏散平台时的横向疏散时间减少;当栏杆间隔大于 $1\,200\text{ mm}$ 时,横向疏散时间减少速度略放缓。因此,在保证人员安全的情况下,建议适当增加栏杆间隔至 $1\,200\text{ mm}$ 。

表 5 不同栏杆间隔时疏散平台的横向疏散时间

栏杆间隔/mm	400	600	800	1 000	1 200	1 400	$\geq 1\,500$ (无栏杆)
疏散时间/min	2.83	2.47	2.03	1.55	1.35	1.23	

4 结论

1) 中低速磁浮线路高架桥上应急疏散模式可分为竖向、纵向、横向等,利用 Pathfinder 仿真平台可以实现对高架桥上人员多种应急疏散场景的模拟,以及对不同应急设施的不同设计参数下疏散时间的分析。

2) 疏散平台可同时作为纵向和横向应急设施,建议对其进行沿线设置。疏散平台宽度对纵向疏散时间有显著影响,建议其值取 $1\,200\text{ mm}$ 或在工程条件允许时取更大值。当疏散平台用作横向疏散通道时,建议栏杆间隔取 $1\,200\text{ mm}$ 。如线上不允许设置疏散平台,建议配备随车渡板。

3) 竖向疏散推荐采用独立楼梯和逃生电梯,通过增加楼梯宽度、减少逃生电梯单次开关门时间可缩短疏散时间。

(下转第 179 页)

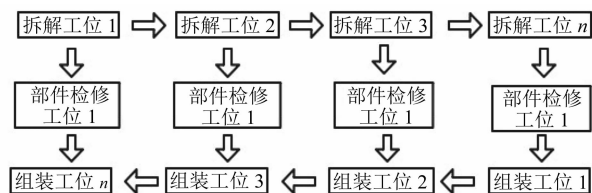


图9 转向架流水修工位布置示意图

4.2.2 定位修

定位修适合检修工作量较小的情况。定位修对检修场地、检修设备以及检修人员需求较少。但检修工位布置较集中、检修人员分工较粗、物流干扰较大、检修效率较低。转向架定位修工位布置如图10所示。

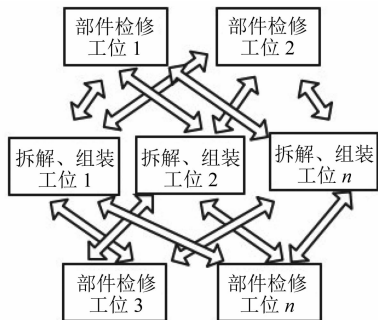


图10 转向架定位修工位布置示意图

5 结语

目前,转向架的检修主要以返厂修为主,需要

工厂提供大量备用转向架,势必造成运营单位流动资金的积压和运输成本的增加。由于该模式无法适应运营规模的增长,因此,应对转向架检修工艺进行深入研究,并研发、生产相应的工装设备,不断提高检修效率、降低检修成本,才能满足日益增长的检修需求。

参考文献

- [1] 李芾,许文超,安琪.悬挂式单轨车的发展及其现状[J].机车电传动,2014(2):16.
- [2] 李定南.国内外悬挂式单轨列车的发展与展望[J].国外铁道车辆,2017(3):1.
- [3] 蒋咏志,王月明,谢倩.一种悬挂式单轨车转向架结构方案及分析[J].机车电传动,2015(6):56.
- [4] 薄海青.悬挂式单轨交通车辆检修工艺及关键设备探讨[J].铁道标准设计,2013(1):121.
- [5] 薄海青.悬挂式单轨交通车辆检修工艺及关键设备探讨[J].铁道标准设计,2013(1):28.
- [6] 陈伟方.悬挂式单轨交通车辆基地的检修工艺研究[J].内燃机与配件,2018(9):37.
- [7] 刘莉,王伯铭.悬挂式单轨交通车辆转向架构架模态分析[J].电力机车与城轨车辆,2018(4):34.
- [8] 李梁,刘亚宁,扶巧梅.悬挂式单轨交通车辆的特点及应用[J].技术与市场,2017(12):25.
- [9] 白雪,李芾.悬挂式单轨交通车辆的应用分析[J].电力机车与城轨车辆,2015(2):1.

(收稿日期:2019-05-21)

(上接第175页)

4) 未来可考虑建立组合疏散模式下的桥上列车人员疏散模型,并对疏散设施配置等进行研究,从而提高中低速磁浮线路高架桥上人员安全疏散技术水平。

参考文献

- [1] 魏庆朝,潘姿华,臧传臻.城市轨道交通制式分类及适用性[J].都市轨道交通,2017(1):34.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部.中低速磁浮交通设计规范:CJJ/T 262—2017[S].北京:中国建筑工业出版社,2017.
- [3] 吴桂庆.基于Pathfinder的地铁站行人疏散仿真研究[J].交通科技与经济,2014(3):80.
- [4] 杜先睿.基于多智能体仿真的交通疏散问题研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006.
- [5] 张素燕,秦国栋.构建城市轨道交通安全保障体系的思考[J].北京规划建设,2007(3):90.
- [6] 魏庆朝,潘姿华,初智杰,等.事故树分析法在中低速磁浮交通运营事故分析中的应用[J].城市轨道交通研究,2019(1):31.

- [7] 王匡.基于Netlogo的磁浮铁路桥上疏散仿真研究[D].北京:北京交通大学,2018.
- [8] 魏庆朝,孔永健,时瑾.磁浮铁路系统与技术[M].北京:中国科学技术出版社,2010.
- [9] 曹玉忠,柳学发.城市轨道交通高架桥特点与设计对策[J].铁道标准设计,2007(8):60.
- [10] 项琴.高速铁路桥梁救援定优化设置理论及方法研究[D].成都:西南交通大学,2016.
- [11] 任杰,侯勇,冯超,等.高速铁路客运专线桥梁螺旋滑道式应急逃生设施:CN202096616U[P].2012-01-24.
- [12] 李茂鹏.高速铁路长大桥梁在突发事件中人员逃生模式、逃生效率及抗震能力研究[D].成都:西南交通大学,2011.
- [13] 成琳娜.基于Pathfinder的地铁站火灾应急疏散仿真研究[D].兰州:兰州交通大学,2014.
- [14] 姜子港,刘晓栋,霍非舟,等.基于Pathfinder的商场人员疏散仿真[J].火灾科学,2014(3):175.
- [15] 李艳,徐银光,叶新.中低速磁浮列车疏散能力影响因素研究[J].现代城市轨道交通,2018(3):55.

(收稿日期:2019-06-08)