

地铁车厢火灾典型场景疏散仿真研究^{*}

陈 斯¹ 陶 涛¹ 周昕怡²

(1. 广州地铁集团有限公司, 510430, 广州; 2. 中南大学交通运输工程学院, 210094, 长沙//第一作者, 高级工程师)

摘 要 目的:地铁发生火灾而未得到有效控制,则容易导致严重人员伤亡和财产损失,为在有限的时间内完成高密度人群的安全疏散,应深入研究不同疏散方式的风险性,以期地铁车厢的消防安全设计提供参考。**方法**:基于数值模拟的方法,利用 Pathfinder 仿真软件进行地铁车厢全尺寸模型建模;模拟仿真地铁安全疏散时间,分析地铁座椅纵横布置、主流疏散方式等 6 种人员疏散场景对火灾时必需有的安全疏散时间的影响。**结果及结论**:必需安全疏散时间与人员载荷呈正相关,与列车距前方站台距离呈线性相关;纵向座椅排列方式相比横向座椅排列方式而言更有利于车厢人员的疏散。

关键词 地铁车厢;火灾;必需安全疏散时间;数值模拟

中图分类号 U231.96

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.12.026

Evacuation Study of Metro Compartment Fire Typical Scenarios Based on Numerical Simulation

CHEN Si, TAO Tao, ZHOU Xinyi

Abstract **Objective**: In the event of a fire in metro without effective control, there is a risk of serious casualties and property damage. To ensure the safe evacuation of a high-density crowd within a limited time, it is crucial to thoroughly investigate the risks associated with different evacuation methods, aiming to provide insights for the fire safety design of metro compartments. **Method**: Utilizing numerical simulation method, a full-scale metro compartment model is created using Pathfinder simulation software. The safe evacuation time in metro is simulated, and the impact of six different personnel evacuation scenarios, such as longitudinal and transverse arrangement of metro seats and mainstream evacuation methods, on the required safe evacuation time in a fire is analyzed. **Result & Conclusion**: The required safe evacuation time is positively correlated with passenger load and linearly correlated with the distance between the train and the platform. In comparison to transverse seat arrangement, longitudinal one is more

conductive to the evacuation of metro compartment passengers.

Key words metro compartment; fire; required safety evacuation time; numerical simulation

First-author's address Guangzhou Metro Group Co., Ltd., 510430, Guangzhou, China

0 引言

地铁运营高峰期时段常常严重超载,若发生突发事件需要疏散人员,安全疏散时间极其有限,根据 GB 51298—2018《地铁设计防火标准》,在地铁火灾事故中,允许乘客逃生的时间只有 4~6 min 左右。如何在有限的时间内完成高密度人群的安全疏散,是当前亟待解决的难题。

国内外地铁火灾安全问题的研究大多采用全尺寸试验、小尺寸模型试验及数值模拟等 3 种方法^[1]。文献[2]采用 Phoenix 软件对列车车厢火灾引发的烟气流动进行数值模拟,分析了紧急状况下烟气和温度变化对列车人员疏散的影响。文献[3]采用基于 Pathfinder 仿真软件对地铁乘客疏散风险进行了量化与分级。文献[4]研究了火灾与人员疏散的交互作用,发现延长疏散时间、限制活动范围和改变人员疏散路线这 3 个因素影响人员疏散效果。文献[5]基于 Froude 相似性原理,采用 1:10 小尺寸试验模型,研究了火源功率、纵向通风速度对隧道区间火灾时温度特性的影响。文献[6]详细分析了地铁火灾特点,并进行了地铁火灾时疏散时间的分析与计算。文献[7]利用数值模拟的方法分析了地铁火灾的烟气蔓延规律和人员的疏散情况,提出了合理的人员疏散应急方案,并利用虚拟现实技术,进行了动态仿真,验证了其可行性;其中,数值模拟主要关注火灾烟气流动特征、温度场分布、通风模式优化等,面向对危险性参数变化规律进行仿真。

^{*} 国家重点研发计划项目(2016YFB1200404)

本文利用 Pathfinder 仿真软件,基于数值模拟的方式对广州地铁 3 号线 B 型车车厢进行全尺寸模型建模;模拟仿真地铁安全疏散时间,分析地铁座椅纵横布置、主流疏散方式对火灾时疏散时间的影响,并提出必需安全疏散时间的评价指标;分析了疏散方式发生火灾的风险性,为地铁车厢的消防安全设计提供参考。

1 必需安全疏散时间

人员疏散时间主要包括可用安全疏散时间 (ASET) 和必需安全疏散时间。火灾发展和人员安全疏散的关系如图 1 所示,即所有人员必须在火灾进入充分发展期之前完成疏散,并预留一定的安全余量。

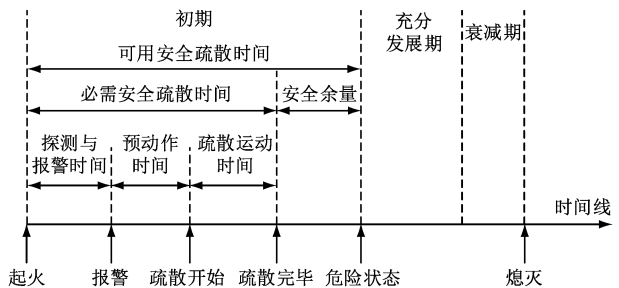


图 1 火灾发展和人员安全疏散的关系图
Fig. 1 Relationship diagram between fire development and personnel safety evacuation

必需安全疏散时间的计算方法根据场景的不同应有所差别,主要与列车在地铁隧道中所处的位置密切相关。因场景比较多、情况复杂,本研究仅选取一般场景下(即站台疏散)和短距离($\leq 500\text{ m}$)地铁隧道场景下的人员疏散时间进行研究,其他场景不在本研究中阐述。

必需安全疏散时间的计算时间结构图如图 2 所示。

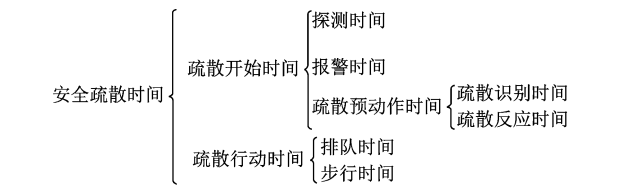


图 2 必需安全疏散时间的计算时间结构图
Fig. 2 Calculation time structure diagram of required safe evacuation time

根据英国 BS DD 240:1997 *Fire Safety Engineering in Buildings* 给出的不同疏散人员特性和报

警方式下人员预动作时间的数值,来设定疏散开始时间。预动作时间的数值如表 1 所示。

表 1 预动作时间的数值
Tab. 1 Value of pre-action time

疏散人员特性	各种报警方式的预动作时间/min		
	现场直播	提前录制广播	报警装置报警
疏散人员清醒且熟悉所处环境及报警系统和疏散措施	<1	3	>4
疏散人员处于清醒状态且不熟悉所处环境及报警系统和疏散措施	<2	3	>6
疏散人员处于昏睡状态并且熟悉所处环境及报警系统和疏散措施	<2	4	>5
有相当数量的人员需要帮助	<3	5	>6

由于地铁车厢的人员大部分属于上班通勤人员,对地铁车厢的结构比较熟悉,同时车厢的报警预警系统完备,一般采用现场直播的形式进行火情的播报,所以车厢人员疏散的预动作时间应该小于 1 min。

疏散开始时间目前没有定量的判定方法,只能靠定性分析。由于地铁站的管理水平比较高,因此,根据 GB 50157—2013《地铁设计规范》将疏散时间设置如下:

假定人员处于清醒状态,探测时间 + 报警时间为 1 min,预动作时间为 0.5 min,故疏散开始时间为 1.5 min。

2 模型建立

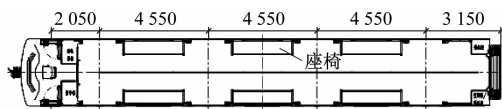
2.1 地铁车厢几何参数

地铁车型通常分为 A、B、C 3 种车型,本研究模型的构建选用地铁 B 型车;车体外车厢最长限度为 19 730 mm,宽为 2 800 mm,高为 2 660 mm;每侧有车门 4 个,座椅 3 个;车厢中部设有 3 根立柱,每根立柱直径为 38 mm。图 3 为地铁 B 型车纵向座椅排列方式下的几何参数图。图 4 为地铁 B 型车立柱示意图。图 5 为地铁 B 型车厢座椅几何参数图。图 6 为地铁 B 型车厢横断面图。地铁 B 型车车厢内每条座椅长为 2 580 mm,宽为 558 mm,高为 660 mm;车厢侧门宽度为 1 400 mm;司机客室车门宽为 1 300 mm,高为 1 900 mm。

2.2 车厢人员疏散模型建立

利用 Pathfinder 仿真软件的快速建模工具,可

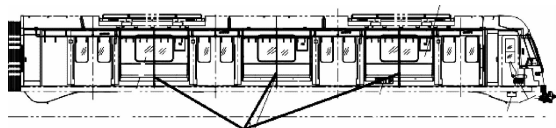
以根据 CAD(计算机辅助设计)图纸的几何参数进行建模。为了建模精准,可将 Pathfinder 仿真软件



尺寸单位: mm

图 3 地铁 B 型车座椅布置图

Fig. 3 Seat layout plan of B-type metro train



每节车 3 根立柱扶手(直径为 38 mm)

图 4 地铁 B 型车车厢立柱设置图

Fig. 4 Compartment column setting diagram of B-type metro train

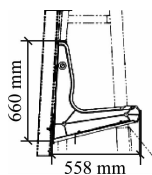


图 5 地铁 B 型车座椅几何参数图

Fig. 5 Seat geometrical parameter diagram of B-type metro train

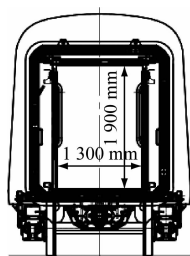


图 6 地铁 B 型车横断面图

Fig. 6 Cross section of B-type metro train

的界面调整为 2D 视图界面,此时界面出现 0.5 m 间隔的网格,可便于绘制精确长度的图形。建模完成后可以将软件界面调整为 3D 视图,便于观察模型部件的几何空间位置是否准确。其建模步骤如下:

1) 绘制内地板。依据导入的 CAD 图纸,构造了一个长为 19 000 mm、宽为 2 800 mm 的矩形区域。在内地板的四周绘制 4 个长为 3 180 mm、宽为 180 mm 的矩形区域表示车载设备。这 4 个矩形区域是无法供乘客站立的,因此在内地板上挖去这 4 块区域。

2) 绘制车厢客室侧门。车厢两端留出 780 mm

的空间,侧门宽度设置为 1 400 mm,每扇车门相隔 3 160 mm。根据位置不同分别命名 door1, door2, door3, door4, door5, door6, door7, door8。本研究列车采用 ABCCBA 的编组方式,车厢贯通并以中线呈对称形式。为节约计算成本,本研究以前 3 节车厢为例,车厢联结处设置长为 1 000 mm,宽为 2 440 mm 的房间,并使用合并命令使之与车厢地板相连成为一个整体。

3) 绘制座椅。地铁车厢座椅也可以看作是一个长为 2 580 mm,宽为 558 mm 的矩形房间,长边添加一扇长为 2 580 mm 的门,B 型车厢两侧各分布 3 条座椅。

4) 绘制立柱。在 CAD 图纸立柱对应位置绘制一个直径为 38 mm 的地板空洞,相邻立柱的间隔为 1 500 mm。设置在车厢纵向中心线上 3 条座椅中线均对应一根立柱,共 3 根。立柱对车厢乘客的疏散具有一定的阻碍作用。

某 B 型地铁列车前 3 节车厢的人员疏散模型图如图 7 所示。



图 7 B 型车模型图

Fig. 7 Model diagram of B-type metro train

2.3 短距离地铁隧道区间的人员疏散模型

当着火列车位于短距离隧道区间时,即隧道着火列车距车站最近站台的距离 $L \leq 500$ m 时,应该将列车驶入就近站台进行车厢人员疏散,车厢进入站台立即打开单侧车门进行人员疏散,此时可以将车厢外部空间看成一个无限大的空间,认为当所有乘客通过单侧车门离开车厢即视为车厢人员疏散完成,故人员疏散时间为车厢内最后一位乘客从车厢内离开的时间。

2.4 地铁疏散人员参数设置

2.4.1 地铁车厢人员数量设置

GB 50157—2013 规定将车厢人员载荷分为 3 个等级:AW1、AW2、AW3。其中,AW1 指车厢人员满座的情况;AW2 指列车定员载荷的情况,按照立席密度 6 人/ m^2 计;AW3 指列车超员载荷的情况,按照立席密度 9 人/ m^2 计。立席密度指每平方米有效空余地板面积站立的人数。有效空余地板面积指客室地板总面积减去座椅垂向投影面积和立柱投影及其他障碍物投影面积后留下的总面积。地

铁不同车厢与人员载荷的关系如表 2 所示。

表 2 不同工况下地铁不同车厢的载容量
Tab.2 Passenger capacity of different comartments under different working conditions

工况	单节车厢定员/(人/车)			3 节编组列车定员/(人/列)
	A 车	B 车	C 车	
AW0	0	0	0	0
AW1	36	46	44	126
AW2	230	250	250	730
AW3	327	350	350	1 027

表 3 车厢人员基本特征设置
Tab.3 Basic characteristics setting of personnel

人员基本特征	人员分类						
	儿童	少年	青年男性	青年女性	中年男性	中年女性	老年人
年龄/岁	≤10	(10,15]	(16,40]	(16,40]	(41,60]	(41,60]	>60
所占比例/%	1.6	2.9	38.1	25.2	15.8	12.9	3.5
肩宽/m	0.30	0.32	0.46	0.39	0.44	0.41	0.40
行走平均速度/(m/s)	0.80	1.10	1.51	1.45	1.47	1.39	1.00

以人流量为基础,不考虑人员之间的影响)模式和 Steering(考虑人员之间的互相影响)模式 2 种。相比之下,Steering 模式使用路径规划、指导机制和碰撞处理相结合的手段来控制行人运动,人员之间的距离和最近点的路径超过某一阈值的时候,即人员在疏散出口发生拥堵时会选择另外的疏散出口,最终的仿真结果更加接近于真实情况,故选择将人员疏散模式设置为 Steering 模式。

3 地铁车厢人员疏散仿真分析

地铁车厢人员疏散不同于一般的人员疏散:一般的人员疏散场景下人员疏散的路线简单且方向明确,而着火车厢内人员疏散运动受人员载荷、车厢内设施布局和疏散方式等因素的影响。现设置了 6 种疏散情景来研究这几种因素对人员疏散的影响。具体场景设置如表 4 所示。其中,探究人员载荷对人员疏散的影响时,疏散方式设置为站台疏散方式,座椅排列方式为纵向,场景 3 为试验组,场景 1、2 为对照组;探究不同座椅排列方式对人员疏散的影响时,人员载荷为超载 AW3,疏散方式为站台疏散方式,场景 3 为试验组,场景 4 为对照组;探究不同疏散方式对人员疏散时间的影响时,座椅排列方式为纵向,人员载荷为 AW3,场景 3 为试验组,场

2.4.2 地铁车厢人员基本特征设置

Pathfinder 仿真软件可以设置车厢人员的基本特征,包括性别、年龄、行走平均速度和肩宽等。根据问卷调查和相关参考文献的调研结果,具体人员参数如表 3 所示。

将具体的人员参数输入到 Pathfinder 仿真软件中,将座椅人员安置完毕后,再将剩下人员随机安置在车厢内地板上。

2.4.3 地铁车厢人员疏散模式设置

仿真软件中,人员疏散的运动模式按照疏散运动规则的不同,可分为 SFPE(消防工程协会模式,

景 5 和场景 6 为对照组。

表 4 地铁人员疏散 6 种场景设置
Tab.4 Six scenarios for subway personnel evacuation

场景	疏散方式	座椅排列方式	工况	组别
1	站台疏散	纵向	AW1	对照组
2	站台疏散	纵向	AW2	对照组
3	站台疏散	纵向	AW3	实验组
4	站台疏散	横向	AW3	对照组
5	A 车疏散	纵向	AW3	对照组
6	疏散平台疏散	纵向	AW3	对照组

3.1 人员载荷对人员疏散的影响

根据必需安全疏散时间的计算规则,不同载荷下人员疏散时间如表 5 所示。对于人员载荷分为 AW1、AW2 和 AW3 的 3 种情况进行车厢人员疏散仿真,得到的运行仿真结果如图 8 所示。

表 5 不同载荷下人员疏散时间
Tab.5 Evacuation time of personnel under different loads

场景	疏散方式	座椅排列方式	工况	疏散行动时间/s	必需安全疏散时间/s
1	站台疏散	纵向	AW1	9.57	99.57
2	站台疏散	纵向	AW2	35.00	125.00
3	站台疏散	纵向	AW3	46.78	136.78

由图 8 可知,在 AW1 载荷下,人员疏散十分迅速,全车厢人员可以在 10 s 之内完成疏散。

AW2 载荷下的人员疏散的初期和末期人员疏散速率较为平缓,而在疏散开始 3 s 后人员疏散速率显著增强。这是由于坐在座椅上的人员在车厢

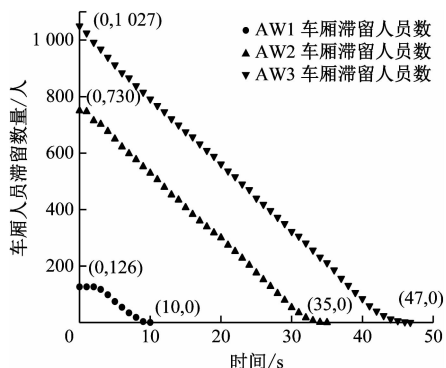


图 8 站台疏散方式下不同人员载荷下疏散时间

Fig. 8 Evacuation time under different personnel loads by platform evacuation methods

中部人员撤离一部分后开始起身撤离,车厢撤离人员增加,人员疏散速率升高。人员疏散末期人员疏散速率放缓的原因是由于人员疏散即将完成,只有少数几个人在车门处逗留,故人员疏散速率降低。

AW3 车厢人员疏散速率从疏散时刻开始速率最高并保持较大速率撤离,是因为当车厢超载人员密度为 9 人/ m^2 时,车厢十分拥挤,一旦车门打开,车厢人员迅速撤离,坐在座椅上的人员数量对于整体人员疏散速率的影响可以忽略。疏散末期同样因为人群逐渐撤离的原因,人员疏散速率和侧门的人员流率均有轻微幅度的下降。

通过对不同人员载荷量与车厢人员疏散时间的比较,经计算得到,每增加 1 名人员疏散时间大约增加 0.04 s。

3.2 车厢布局对人员疏散仿真结果的影响分析

目前,车厢的布局基本固定,统一按照 GB 50157—2013 建造,包括门宽、座椅尺寸和立柱设置方式等,但是座椅排列方式不固定,常见的座椅排列方式有横向排列和纵向排列两种,在国内的各大地铁线路均有所应用,由于纵向排列方式的座椅占地面积较小可以容纳更多的乘客,故在城市轨道交通系统中应用较多。但是,有些列车设计时考虑到站间距离较远,区间客运量较少,可以适当增加座椅的占地面积来提高乘客旅途的舒适性,因此横向座椅排列方式也有应用,典型的地铁线路有成都地铁 10 号线、上海轨道交通 11 号线等。

3.2.1 纵向座椅排列方式对人员疏散的影响

工况 3 和工况 4 研究了座椅排列方式对人员疏散的影响,疏散方式为站台疏散,并将人员载荷设置成 AW3,即超员载荷 350 人/车,这是因为超员载荷下着火车厢的人员疏散极为困难,因此研究该载荷下的人员疏散时间意义更为重大。根据 GB 50157—2013 可知,纵向排列方式座椅长度为 3 000 mm,宽度为 750 mm,每条座椅可以容纳 7~8 人。设置座椅上的人数与 AW1 满座载荷下人员数量相同,即 46 人,剩下 304 人设置在车厢地板和车厢连接处。

仿真结果显示,当座椅排列方式为纵向时,3 节车厢 1 027 位人员全部从车厢撤离共耗时 47.53 s,对应的人员必需安全疏散时间为 137.53 s。座椅纵向排列时滞留人员数量-时间变化曲线如图 9 所示。

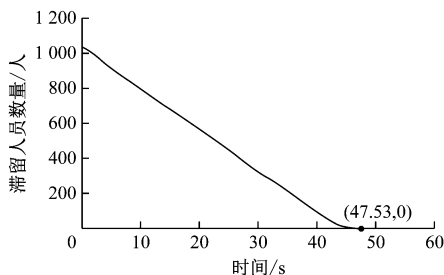


图 9 座椅纵向排列滞留人员数量-时间变化图

Fig. 9 Figure of changes in the number of stranded personnel-time in the longitudinal arrangement of seats

3.2.2 横向座椅排列方式对人员疏散的影响

根据 GB 50157—2013,横向座椅排列方式的座椅长度为 557 mm,宽度为 500 mm,每条座椅可以容纳 1~2 人。前后座椅间距为 60 mm,以方便乘客出入。每 5 条座椅为 1 组,每组座椅间距设置为 6 800 mm。座椅横向排列时滞留人员数量-时间变化图如图 10 所示。

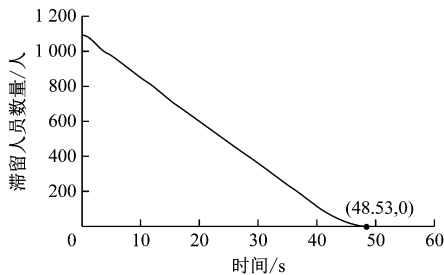


图 10 座椅横向排列时滞留人员数量-时间变化图

Fig. 10 Figure of changes in the number of people arranged horizontally in the seats

为了将横向与纵向座椅排列方式下随时间变化的人员疏散数量作比较,2 种座椅排列方式下人员疏散时间对比图如图 11 所示,具体数值如表 6 所示。

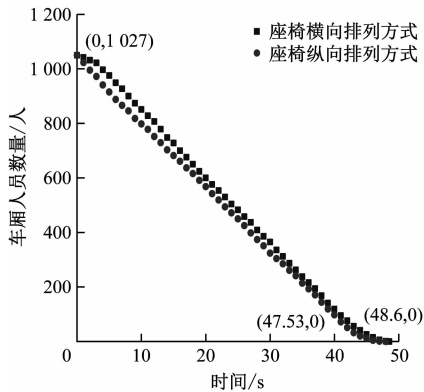


图 11 2 种座椅排列方式下人员疏散时间对比图

Fig. 11 Comparison of personnel evacuation time under 2 seat arrangements

表 6 2 种座椅排列方式下人员疏散时间					
Tab.6 Evacuation time under 2 seat arrangements					
排列方式	采用人员/人	总计拥堵时间/s	最大拥堵持续时间/s	疏散行动时间/s	必需安全疏散时间/s
纵向	1 027	35.98	35.53	47.53	137.53
横向	1 027	37.45	36.40	48.60	138.60

图 11 的结果显示:横向座椅布局下,地铁车厢人员疏散共耗时 48.60 s,比纵向座椅布局下疏散时间增加了 1.07 s,疏散效率降低了 2.2%。

通过对比横纵座椅排列方式的人员路径图发现,横向座椅排列方式下人员疏散路径更为杂乱,路径重复率更高,人员疏散时间更长,说明纵向座椅排列比横向座椅排列更加有利于车厢人员的疏散。这是由于横向座椅排列方式座椅占地面积更大,预留给站立人员的行动空间更小,人员出入车门行动不便。建议地铁车厢设计多采用纵向座椅排列方式。

3.3 疏散方式对人员疏散仿真结果的影响分析

3.3.1 车站疏散对人员疏散的影响

为了排除其他因素对人员 REST 的影响需要对处人员疏散方式以外的变量进行控制,设定人员载荷为 AW3,根据上述研究结果,座椅排列方式为纵向时更有利于人员疏散,故将座椅排列方式都设置为纵向排列。

3.3.2 A 车疏散对人员疏散的影响

A 车疏散也称车头疏散,即打开司机客室的应急疏散车门进行疏散,当地铁隧道没有设置疏散平

台时,车厢人员只能通过司机客室的门进行逃生,是地铁列车在隧道发生紧急制动时最常用的人员疏散方式。根据图 6 地铁 B 型车横断面图可知,司机客室车门宽为 1 300 mm,高为 1 900 mm,同时司机客室车门与隧道地面通常有 0.5 ~ 1.0 m 的高度差,在现实疏散过程中需要搭建司机门到隧道疏散平台的楼梯。在列车的车头部分设置一个宽为 1 300 mm,高为 0.7 m 的楼梯,放置楼梯的时间大约为 3 s,在得到的人员疏散时间结果上加上放置楼梯的时间。隧道疏散要求将人员疏散到就近的站台或者联络通道,设置联络通道最短距离为 160 m,那么人员最远需要步行 80 m 到达安全区域。A 车疏散模型如图 12 所示。



图 12 A 车疏散模型图

Fig. 12 Evacuation model diagram of A-type metro train

车厢人员数量变化仿真图如图 13 所示。由图 13 可知,用 A 车疏散方式总耗时为 231.4 s,加上放置楼梯时间 3.0 s,总时间变为 234.3 s;前 45 s 左右人员数量几乎没有改变。这是由于车厢内人员都向车头开始聚集,而第一位人员走出车头司机客室车门逃离并经过狭长的隧道到达安全区域大约需要 45 s;随后人员数量开始缓缓下降,仿真观察发现,滞留人员数量随时间的变化几乎呈线性。这是由于司机客室的车门较小,一次只允许少部分人通过,同时通过狭长区域的缓冲作用,后续人员排队有序撤离。人员疏散路径重叠率非常高,车头和隧道狭长区域几乎完全被不同的人员路径覆盖。该种疏散方式比站台疏散时间长 96.77 s,效率比较低。因此,不推荐使用这种疏散方式来进行紧急情况的车厢人员疏散。

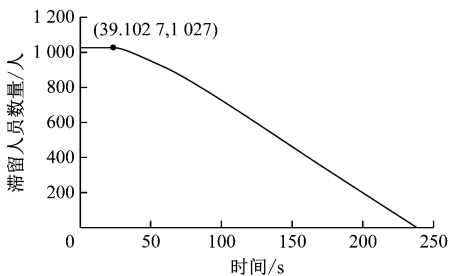


图 13 A 车疏散方式的车厢人员数量变化仿真图

Fig. 13 Simulation diagram of changes in the number of passengers in A-type metro train compartment

3.3.3 疏散平台疏散对人员疏散的影响

单侧车门疏散或者称为疏散平台疏散,也是常用的车厢人员疏散方式之一。这种疏散方式允许着火列车打开单侧车门疏散乘客,乘客不再需要聚集到司机客室车门进行逃生,而可以从人员所在车厢撤离,相较 A 车疏散大大提高了人员疏散效率,提高了人员安全疏散可靠性。单侧车门疏散模型如图 14 所示。

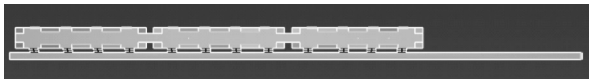


图 14 单侧车门疏散模型图

Fig. 14 Single side door evacuation model diagram

运行 Pathfinder 仿真软件得到人员数值变化仿真图如图 15 所示。

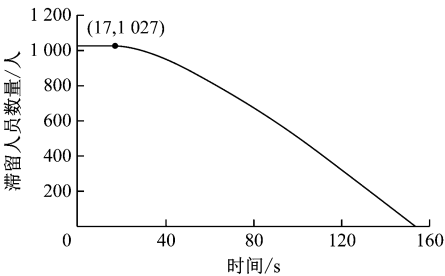


图 15 疏散平台疏散的人员数量变化仿真图

Fig. 15 Simulation diagram of changes in personnel number on evacuation platform

第一位人员通过单侧车门经过狭长疏散平台到达安全区域向的时间大概为 23 s,之后人员以一定速率疏散至安全区域,整个人员疏散过程共耗时为 158.28 s。疏散平台疏散方式比 A 车疏散方式人员疏散时间缩短了 76.02 s,人员疏散效率提高了 22.65%。由此,可以得出疏散平台疏散方式极大地提高了紧急情况下人员疏散的效率。3 种疏散方式下人员疏散时间如表 7 所示。

表 7 3 种疏散方式下人员疏散时间对照表
Tab. 7 Comparison of personnel evacuation time by three evacuation methods

疏散方式	人员载荷/人	总计拥堵时间/s	最大拥堵持续 时间/s	疏散行动 时间/s	必需安全疏 散时间/s
站台疏散	1 027	41.53	34.450	47.53	137.53
A 车疏散	1 027	201.35	120.200	234.40	335.51
疏散平台 疏散	1 027	141.30	63.325	158.28	259.39

3 种疏散方式的时间与人员数量变化图如图 16 所示。

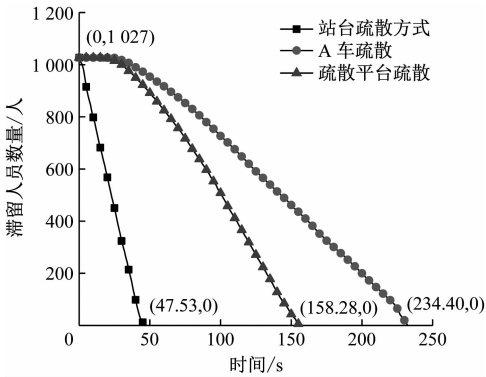


图 16 3 种疏散方式的时间与人员数量变化图

Fig. 16 Diagram of changes in personnel numbers by 3 evacuation methods

由图 16 可知,疏散方式的选择对于人员必需疏散时间的影响巨大,由此也可得 3 种疏散方式的疏散效率:站台疏散方式 > 疏散平台疏散方式 > A 车疏散方式。站台疏散方式是最高效的人员疏散方式,疏散平台次之,A 车疏散效率最低。因此,通常情况建议采用站台疏散方式,当列车只能采用隧道疏散方式时,疏散平台疏散相较 A 车疏散方式更为可靠,隧道内的疏散平台对于人员的安全疏散来说意义重大,建议长大隧道区间通过修建疏散平台来保证隧道人员的安全性,提高紧急情况下人员疏散的可靠性。

4 结语

本研究设置了 6 种人员疏散的场景,分别讨论了人员载荷(AW1、AW2、AW3)、车厢布局(座椅纵向、横向排列方式)以及疏散方式(站台疏散、A 车疏散、疏散平台疏散)3 种因素对车厢 REST 的影响,得到以下结论:

- 1) 必需安全疏散时间与人员载荷呈正相关,不同立席密度下人员疏散变化规律略有不同,每增加一名人员疏散时间大约增加 0.04 s,人员载荷对人员疏散时间有一定的影响。
- 2) 纵向座椅排列方式相比横向座椅排列方式而言更有利于车厢人员的疏散。
- 3) 不同的人员疏散方式下的仿真结果显示,疏散的必需安全疏散时间与列车距前方站台距离呈线性相关,距离越大疏散时间越长。站台疏散方式

为最优,而疏散平台疏散方式相对传统的 A 车疏散而言可以提高紧急情况下隧道人员疏散的效率,更适合离车站距离近的隧道人员疏散。

参考文献

- [1] 钟茂华,刘畅,史聪灵. 地铁火灾全尺寸实验研究进展综述[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(10): 51.
ZHONG Maohua, LIU Chang, SHI Congling. Progress of full-scale experimental study on metro fire[J]. China Safety Science Journal, 2019, 29(10): 51.
- [2] 莫善军,李子荣,周南江,等. 基于 Phoenix 列车车厢火灾烟气数值模拟研究[J]. 铁路计算机应用, 2013, 22(7): 1.
MO Shanjun, LI Zirong, ZHOU Nanjiang, et al. Research on numerical simulation of smoke movement in train compartment fire accidents based on phoenix[J]. Railway Computer Application, 2013, 22(7): 1.
- [3] 孙贵磊,王亚琪,赵欣圆,等. 基于 Pathfinder 的地铁乘客疏散风险量化与分级研究[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(11): 176.
SUN Guilei, WANG Yaqi, ZHAO Xinyuan, et al. Research on evacuation risk quantization and classification for subway passengers based on Pathfinder[J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(11): 176.

(上接第 146 页)

参考文献

- [1] 唐任远. 现代永磁电机:理论与设计[M]. 北京:机械工业出版社, 1997.
TANG Renyuan. Modern permanent magnet machines[M]. Beijing: China Machine Press, 1997.
- [2] 陈世坤. 电机设计[M]. 北京:机械工业出版社, 2000.
CHEN Shikun. Design of electrical motor[M]. Beijing: China Machine Press, 2000.
- [3] 许峻峰,李耘茏,许建平. 永磁同步电机作为机车牵引电机的应用现状及前景[J]. 铁道学报, 2005, 27(2): 130.
XU Junfeng, LI Yunlong, XU Jianping. Present situation and perspective of applying permanent magnet synchronous motors to railway locomotives[J]. Journal of the China Railway Society, 2005, 27

- [4] LI Y, WANG H, WANG C, et al. Personnel evacuation research of subway transfer station based on fire environment[J]. Procedia Engineering, 2017, 205: 431.
- [5] 易欣,范晶,马砺,等. 纵向通风对地铁区间隧道火灾温度特性影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(12): 3163.
YI Xin, FAN Jing, MA Li, et al. Effect of longitudinal ventilation on temperature characteristics in metro tunnel under fire[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(12): 3163.
- [6] 李真. 北京某地铁站的火灾和人员疏散模拟研究[D]. 北京:北京交通大学, 2017.
LI Zhen. Study on fire and safety evacuation simulation of a Beijing subway station [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.
- [7] 李冬,苏燕辰,田鑫,等. B 型地铁列车火灾安全疏散性能研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(8): 1613.
LI Dong, SU Yanchen, TIAN Xin, et al. Research on the evacuation performance of B-type subway train in the condition of fire disaster[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13(8): 1613.

(收稿日期:2021-05-19)

(2): 130.

- [4] 张欣,何家俊,吴超. 永磁同步电机电磁振动噪声抑制方法综述[J]. 微特电机, 2019, 47(7): 72.
ZHANG Xin, HE Jiajun, WU Chao. A survey of electromagnetic vibration noise suppression methods for permanent magnet synchronous motors[J]. Small & Special Electrical Machines, 2019, 47(7): 72.
- [5] 韩雪岩,李生祥,米秀峰. 正弦波供电下永磁同步电动机径向电磁力波研究[J]. 电工电能新技术, 2016, 35(4): 1.
HAN Xueyan, LI Shengxiang, MI Xiufeng. Research on radial magnetic forces of permanent magnet synchronous motor supplied by sine wave[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2016, 35(4): 1.

(收稿日期:2021-06-17)

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址:tougao. umt1998. com