基于快速疏散仿真的地铁车内旅客界面布局 评估研究

刘 辰¹, 向泽锐^{1,2*}, 庞世俊³, 支锦亦^{1,2}, 陈洪涛¹

¹西南交通大学工业设计系,四川 成都 ²西南交通大学人机环境系统设计研究所,四川 成都 ³中车青岛四方机车车辆股份有限公司,山东 青岛

收稿日期: 2022年1月20日; 录用日期: 2022年2月21日; 发布日期: 2022年2月28日

摘要

为了合理评估地铁列车设计方案的应急疏散效率,从A、B两型地铁列车车内旅客界面布局来研究旅客在 火灾条件下的应急疏散问题,进而基于快速疏散仿真来评估地铁车内旅客界面典型布局方案的优劣。首 先,从列车疏散位置、疏散方式、车辆因素和人员因素四个方面,构建了地铁列车应急疏散影响因素层 次模型;然后,基于PyroSim仿真模拟并分析火灾条件下影响人员疏散的三个关键因素:能见度、温度 和CO浓度,获得了三种典型布局方案的可用疏散时间;基于Pathfinder仿真模拟并分析满足额定载人数 和仅座椅满员两种条件下的三种典型布局方案的必需疏散时间;最后,通过比较可用疏散时间和必需疏 散时间来评估每种典型布局方案的疏散效率。研究结果表明:各车厢中部位置着火较两端着火更易导致 可用疏散时间变小;综合考虑可用疏散时间和必需疏散时间,座椅为纵向布局的B型车方案疏散效率最 优且更适用于市内载客量大、密度较高的地铁线路,座椅为横向布局和混合布局的A型车方案疏散效率 接近,更适用于市郊和机场线旅客密度相对不高的线路。该研究有助于从快速疏散方面为国内地铁列车 的旅客界面布局设计和车辆选型提供参考。

关键词

地铁列车,快速疏散,布局设计,仿真分析

Evaluation of the Passenger Interface Layout in Metro Train Based on Rapid Evacuation Simulation

Chen Liu¹, Zerui Xiang^{1,2*}, Shijun Pang³, Jinyi Zhi^{1,2}, Hongtao Chen¹

¹Department of Industrial Design, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan

*通讯作者。

²Institute of Design and Research for Man-Machine-Environment Engineering System, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan ³CRRC Qingdao Sifang Locomotive and Rolling Stock Co., Ltd., Qingdao Shandong

Received: Jan. 20th, 2022; accepted: Feb. 21st, 2022; published: Feb. 28th, 2022

Abstract

To reasonably evaluate the emergency evacuation efficiency of design schemes of metro train, the emergency evacuation of passengers under fire conditions was studied from the passenger interface layout in both type A and B metro trains, and then the typical passenger interface layout schemes in metro train were evaluated based on rapid evacuation simulation. Firstly, a Hierarchical model of influencing factors of metro train emergency evacuation was constructed from evacuation location of the trains, evacuation position in trains, factors of vehicles and factors of personnel. Then, based on PyroSim simulation, three key factors affecting personnel evacuation under fire conditions e.g. visibility, temperature and CO concentration were simulated and analyzed, and the ASET of three typical layout schemes was obtained. Based on Pathfinder simulation, the RSET of three schemes both at rated load and under the condition of full seats was simulated and analyzed; Finally, the evacuation efficiency of each typical layout scheme was evaluated by comparing the ASET and RSET. The results show that: The fire in the middle of each carriage is easier to cause the ASET to become smaller than that at both ends. Considering both the ASET and RSET, the evacuation efficiency of type B with longitudinal seats is the best and more suitable for metro lines with large passenger capacity and high density in the city. The evacuation efficiency of type A with transverse seats is close to the one with mixed seats, and the two are more suitable for lines with relatively low passenger density in suburban and airport lines. The findings can provide a reference for the design of passenger interface layout and train selection for domestic metro trains in terms of rapid evacuation.

Keywords

Metro Train, Rapid Evacuation, Layout Design, Simulation Analysis

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

1. 引言

地铁是一种快速、大运量的城市公共交通系统,截至 2021 年 9 月 30 日,中国内地累计有 40 个城市 开通地铁线路,累计运营线路长度达 6737.73 公里[1] [2]。作为地铁系统的核心装备,地铁列车载客量大, 运行过程中车内空间封闭,一旦发生事故或灾难,如果应急疏散不及时则会对旅客的生命财产造成不可 挽回的重大损失[3] [4]。因此,研究并进一步提升地铁的应急疏散效率,对于提升地铁列车乘坐的安全性 有着极为重要的意义。国内外与地铁列车应急疏散相关的研究主要有:在车站疏散方面,SHI 等[5]研究 提出了我国地铁车站的乘客疏散模型及安全疏散策略,这些结论将有助于指导中国地铁的安全疏散设计; 在列车隧道疏散方面,席亚军等[6]研究得出地铁火灾发生后旅客应从排风口和供风口两个方向疏散;在 列车疏散的车门选择方面,刘俐[7]提出区间隧道发生火灾的工况主要有 4 种,并指出疏散必须以列车侧 门疏散为主; 李琦等[8]提出在车厢一端双侧开启两扇车门比在车厢两端单侧开启两扇车门的平均疏散速 度慢; 在列车车门的出口流量方面, 厉志强等[9]得出影响疏散过程和总疏散时间的关键决定因素是疏散 出口的流量及有效性; FRIDOLF 等[10]实验得出了区间隧道疏散时, 宽度为 1.4 m 的列车出口的人员平 均流量。在列车的车内优化设计方面, ZARBOUTIS 等[11]采用基于代理仿真实现了地铁列车疏散方案设 计,并从人员疏散方面提出建议, 即减少人员的问题空间并增加旅客人员的适应性; QIU 等[12]研究得出 较宽的通道和合理的座椅间距有助于改善疏散效率。

列车客室的席位数量与布局,车门数量、尺寸与座椅布局等均对旅客的应急疏散具有直接的影响。 为了明确地铁车内典型座椅布局对应急疏散的影响,进一步提升地铁的应急疏散效率,以造成人员伤亡 最大的火灾事故为例,研究提出了一种基于快速疏散仿真的地铁车内旅客界面布局评估方法研究。

2. 地铁列车旅客界面与应急疏散

2.1. 旅客界面

旅客界面(Passenger interface, PI)是指在乘车过程中,旅客与列车之间存在相互作用的物理环境界面, 由车外旅客界面和车内旅客界面共同构成,是列车设计的重要内容之一[13]。本文侧重从 A 型和 B 型地 铁列车的车内旅客界面布局来研究旅客在火灾条件下的应急疏散问题。

2.2. 地铁应急疏散

应急疏散通常又称紧急疏散、安全疏散,地铁因发生事故或遭遇灾难而需要进行应急疏散的典型位置有 4 种[14] [15] [16]: 1) 车站站台; 2) 区间高架桥; 3) 区间地面; 4) 区间隧道。本文主要聚焦研究地铁列车的车站站台疏散。

人员能否安全疏散主要取决于 2 个时间,即可用安全疏散时间(Available safe egress time, ASET)和必 需安全疏散时间(Required safe egress time, RSET),且如果必需安全疏散时间(RSET)短于可用安全疏散时 间(ASET),则可以实现旅客的安全疏散[11] [17]。

3. 应急疏散影响因素及层次模型

3.1. 疏散原因

根据近年地铁运营事故统计,可将高频的事故或灾难归纳为6类[18]:火灾、脱轨事故、碰撞事故、 设备故障事故、踩踏事故、其他。

1) 火灾。"NFPA 101 Life Safety Code"指出,火灾造成生命危险的因素主要有烟、热、有毒气体。 历史上伤亡重大的地铁事故都是火灾导致的,如 1995 年阿塞拜疆巴库的地铁火灾事故中 558 人丧生,269 人受伤; 2003 年韩国大邱市地铁人为纵火事件中 198 人死亡,146 人受伤,289 人失踪[19]。地铁火灾的 主要原因包括 3 类[20]: 人为因素、设备设施故障、管理缺陷。

2) 脱轨事故。正常运行中,造成脱轨的因素包括列车速度、法兰角、曲率半径、轨道维护条件、风 压等外力;如台铁"太鲁阁号"408次列车于2021年发生出轨事故,造成了重大人员伤亡[21]。

3) 碰撞事故。碰撞事故的原因主要有[22]: 信号系统故障、在人工调度模式下人为操作出现失误、 刹车失灵。如 2009 年 12 月上海市轨道交通 1 号线发生两辆列车碰撞事故,其原因就是由于信号系统发 送错误速度码导致列车制动距离不足所引发[23]。

4) 设备故障事故。车辆在运营过程中出现的故障形式较多,仅考虑故障性质,可分为破坏性故障、 不规则性故障和劣化性故障 3 类;如 2015 年 3 月上海地铁 2 号线地铁触网设备故障,列车受电弓严重变 形,导致 500 多名旅客被疏散[24]。 5) 踩踏事故。踩踏事故诱发原因种类较多,主要涉及人的不安全行为、物的不安全状态和管理缺陷 3 类;如 2014 年 3 月广州地铁 5 号线由于两名旅客喷射催泪剂,引发大量旅客恐慌,从而涌出车厢发生 踩踏事件,最终致使 13 人受伤[25]。

6) 其他。除了上述 5 种主要事故或灾难外,还有其他一些构成旅客疏散条件的因素如:恐怖袭击、 毒气、爆炸、触电、列车解体、塌方、地震等事故,因案例较少,故不作详述。

3.2. 疏散影响因素

除了应急疏散典型位置对疏散有直接影响外,车辆因素、人员因素和疏散方式也对疏散有较大的影响。

3.2.1. 车辆因素

在我国,地铁列车分为 A 型和 B 型(B₁型、B₂型)共 2 类 3 种,通常由 2 辆端车和若干中车组成;其中,A 型车车体宽度 3000 mm,部分端车车头设有端门,车门为 2~5 组,车门宽度为 1300~1400 mm; B 型车车体宽度 2800 mm,车门为 2~4 组,车门宽度为 1300~1400 mm [16] [26] [27]。我国地铁运营列车车辆编组形式主要有: 2 辆编组、3 辆编组、4 辆编组、5 辆编组、6 辆编组、7 辆编组、8 辆编组,共7 种 [14]。如表 1 所示,A 型地铁列车车内旅客界面布局主要有 3 种:纵向座椅布局、横向座椅布局以及混合 座椅布局;而 B 型的车内旅客界面布局多为纵向布局。

Table 1. Classification of the passenger interface layout in metro trains 表 1. 地铁列车车内旅客界面布局分类

 座椅纵向布局
 座椅撮向布局
 座椅混合布局

3.2.2. 人员因素

地铁疏散过程中主要关注的人员包括:司机、巡查员和旅客3类人员。当车厢发生事故后,巡查员 或者旅客应先通过呼叫机或者紧急报警器告知地铁司机事故情况,由巡查员正确地使用车内布置的消防 设备等,帮助旅客争取逃生疏散的时间。车内的旅客则需要听从广播的指示有序地进行疏散。

旅客基础信息是旅客心理行为产生的基础,主要分为生理属性和社会心理属性[28]。本文主要聚焦于 旅客的生理属性,包括身体尺寸、运动能力、年龄和性别。结合文献[15] [17]明确了各类人员的疏散平均 步行速度,详见表2。

3.2.3. 疏散方式

除了紧急时候司机从司机室逃生窗疏散外,旅客的疏散方式包括以下 5 种[15]:端门疏散、侧门单侧 疏散、侧门单侧疏散 + 端门疏散、侧门双侧疏散、侧门双侧疏散 + 端门疏散。

3.3. 疏散影响层次模型

基于上述影响因素,构建了适用于地铁列车的应急疏散影响因素层次模型,见图1。

<mark>复2.</mark> 各类人员的疏散平均步行速度										
人员类型	水平行走速度(m/s)	楼梯下行速度(m/s)	楼梯上行速度(m/s)							
成年男性	1.25	0.90	0.67							
成年女性	1.05	0.74	0.63							
老年人和儿童	0.76	0.52	0.40							
手动/电动轮椅使用者	0.69/0.89	-	-							

Table 2. Average walking speed for evacuation of people



Figure 1. Hierarchical model of influencing factors of metro train emergency evacuation 图 1. 地铁列车应急疏散影响因素层次模型

4. 车内火灾对旅客界面布局的影响

PyroSim 是由美国国家标准与技术研究院研发的,专用于火灾动态仿真模拟的软件[29]。选择座椅横 向布局的 A 型车、座椅混合布局的 A 型车、座椅纵向布局的 B 型车作为 3 种典型布局方案,采用 PyroSim 来仿真分析火灾对不同座椅布局的旅客界面中旅客疏散所产生的影响。

4.1. 火源特性

在考虑地铁安保前提下,不法分子携带的燃料所产生的最大热值不会超过 5 kg 汽油所产生的热值 [30],而在单位面积下5kg汽油燃烧产生的热释放速率最大值为1400KW [6],每平方米的热释放速率为:

$$1400 \times \frac{4}{\pi \times D^2} \approx 616.8 \text{ KW/m}^2$$
 (1)

式(1)中, D为5kg汽油在地板上浸铺的直径, 取值1.7m[30]。

选用热释放速率为 616.8 KW/m²、面积约为 2.27 m² 的起火源来引燃车厢,依此来研究不同座椅布局 的地铁车厢的火灾蔓延规律。表3是基于文献[6] [31]设定的地铁车厢火灾危险参数限值。

可燃物燃烧产生的烟会导致车内的能见度降低,烟气层高度下降到人眼高度(取值 1.65 m [6])后会对 旅客的疏散产生极大阻碍;燃烧产生的高温(温度极限值取值 60℃, 2D 切片高度取值 1.75 m [6])可能会 灼伤旅客; 燃烧产生的 CO 到达 2500 ppm 的浓度后会使旅客造成严重伤害, 经换算: 在 25℃的温度下 2500 ppm 的 CO 约为 2862.85 mg/m³ [31] (2D 切片高度取值 1.6 m [6])。

Table 3. Key parameter limits of fire hazard 表 3. 火灾危险关键参数限值							
田妻	准	则					
凶系	极限值	选定值					
能见度(m)	≥5	5					
温度(℃)	≤80	60					
CO浓度(mg/m ³)	≤2862.85	2860					

4.2. 典型着火点

调查发现旅客行李放置点主要集中在表 4 所示的典型位置,包括:1) 立姿旅客通常放置于车厢端部 左、中或右位置,两侧门口及两侧中间位置,座椅上或座椅旁地板上;2) 坐姿旅客通常放置于座椅上、 临近坐席的地上或身上。

以常见的 6 节车厢编组列车为例,设座椅横向布局的 A 型车方案为 M1、座椅混合布局的 A 型车设 计方案为 M2、座椅纵向布局的 B 型车设计方案为 M3,且 M1、M2、M3 各方案中第 1 车和第 6 车为端 车;第 2 至第 5 车为中车。

因在 PyroSim 中无法设置圆形汽油圈,结合 3 种地铁方案车内旅客界面空间尺寸,在列车两车厢相 连的折棚过道处设置了与圆形汽油圈面积近似的矩形汽油圈,在其余车厢位置设置了与圆形汽油圈面积 近似的正方形汽油圈,M1、M2 与 M3 三个方案的汽油圈尺寸详见表 5。

Table 4. Typical location of subway passenger luggage 表 4. 地铁旅客行李放置的典型位置



 Table 5. Gasoline ring sizes at different ignition positions

 表 5. 不同着火位置汽油圈尺寸

名称	M1 (m ²)	M2 (m ²)	M3 (m ²)
方形	1.507×1.507	1.507×1.507	1.507×1.507
矩形	2.009×1.130	2.009×1.130	1.728×1.314

结合行李放置典型位置和表 5 中不同着火位置的汽油圈尺寸,构建了 3 种地铁方案端车和中车的典型着火点,详见表 6。



Table 6. Typical ignition points of leading/tail and middle cars in three schemes 表 6.3 种地铁方案中端车和中车的典型着火点

4.3. 构建 3 种典型布局的 PyroSim 列车模型

结合文献[16]和现有同类实际运营车辆,确定了3个方案的关键尺寸及额定载人数,详见表7。结合 文献[6] [32]和现有同类实际运营车辆,确定了3个方案的主要设备及材料,详见表8。综合上述确定的 参数及材料,在 PyroSim 中构建了用于仿真的3个方案模型,详见表9。

	方案名称	M1	M2	M3
	整车编组数量(节)	6	6	6
	整车座椅总数(个)	316	282	248
	整车额定载人数(人)	1548	1542	1460
	长/宽/高(m)	23.6/3/3.81	23.6/3/3.81	19.6/2.8/3.60
端车	车门数(组)	6	6	10
	座椅数/额定载人数(个)	46/256	48/256	36/230
	长/宽/高(m)	22/3/3.81	22/3/3.81	19/2.8/3.8
	车门数(组)	6	8	8
中车	第2、5车座椅数(个)/额定载人数(人)	56/259	48/259	44/250
	第3、4车座椅数(个)/额定载人数(人)	56/259	45/256	44/250

 Table 7. Key dimensions and rated load of three schemes

 表 7.3 个方案的关键尺寸及额定载人数

Table 8. Main equipment and materials of three schemes 表 8.3 个方案的主要设备及材料

14 <i>1</i> m <i>(t</i>)-	M1	M2	M3				
初件	材料						
车体		铝合金 6005A					
地板	橡胶、铝蜂窝	、聚氨酯胶、福	乐斯、不锈钢				
顶板		铝蜂窝					
灯具		PVC					
司机座椅	Ę 水	§氨酯发泡、涤约	È				
横向座椅	聚氨酯发泡、涤纶		无				
纵向座椅	无		聚酯玻璃钢、不锈钢				
座椅挡板	亚克力		铝合金 5052				
端墙		铝蜂窝					
侧墙		铝板					
扶手		铝合金 5052					
立柱及横向扶杆		铝合金 5052					
无障碍区域设施		铝合金 5052					
行李架	不锈钢		无				

 Table 9. PyroSim models of three schemes

 表 9. 构建的 PyroSim 列车模型

 方案
 PyroSim 列车模型

 M1
 Image: Colspan="2">Colspan="2">Colspan="2">Colspan="2">Colspan="2">Colspan="2">Colspan="2">Colspan="2">Colspan="2">Colspan="2">Colspan="2">Colspan="2">Colspan="2">Colspan="2"

 M2
 Image: Colspan="2">Colspan="2"

 M3
 Image: Colspan="2">Colspan="2"

4.4. PyroSim 仿真分析

1) 火源参数。"NFPA 101 Life Safety Code"将火灾的发展分为极快、快速、中速和缓慢 4 种类型。 本文设定燃烧场景为:将汽油泼洒至座椅或地板上,并将其引燃。一般火灾的初始增长阶段可以总结为 t²增长,满足下式[33]:

$$Q = at^2$$
⁽²⁾

式(2)中:Q为汽油的热释放速率,取值为616.8 KW/m²; a为火源增长系数,取值0.1878 [30]。因此,结合式(2)可得,在车厢着火点起火后约57.31 s火源达到最大热释放功率。

2) 仿真设置。3 个方案均为 6 车编组,且各方案的第 1 车与第 6 车布局相同,第 2 车与第 5 车布局 相同,第 3 车与第 4 车布局相同,因此各方案仅需对第 1 车至第 4 车进行仿真,仿真结果同样适合对称 分布的其余车厢。3 个方案的主要设备及材料按照表 8 录入。在 PyroSim 中按照表 6 设置各方案第 1 至 第 3 车的典型着火点,然后针对每种方案不同的着火点进行模拟仿真,共计模拟了 66 次。表 10 为典型 着火位置的仿真采样图片。表 11 为选定因素到达危险极限值的时间节点,即用于评估 3 个方案疏散的 ASET。由于有毒气体量在 120 s内不能到达人体承受的极限值,而 120 s的数值又远大于温度和能见度 到达极限值的时间,因此仅列出温度和能见度到达极限值的时间。



 Table 10. Pictures of ASET under typical ignition points of three schemes

 表 10.3 个方案典型燃烧位置下产生的可用安全疏散时间的仿真采样图片

DOI: 10.12677/ojtt.2022.112007



Table 11. The time of each key factor reached the dangerous limit value of fire hazard 表 11. 选定因素到达火灾危险极限值的时间节点

		火点位置	А	В	С	D	Е	F	G	Н
	1 7	温度达到极限值 60℃所需时间	56.5	58	52	54	54	57.5	70	\
	1 牛	车厢能见度达到极限值 5m 所需时间	44.5	42	38.6	38	42.3	43.2	49.6	١
М1	った	温度达到极限值 60℃所需时间	66	60	51.5	59.5	68	81.3	/	\
IVI I	2 平	车厢能见度达到极限值 5 m 所需时间	51.1	48.6	38.8	52	52.2	58.7	١	\
	2 左	温度达到极限值 60℃所需时间	68.4	63	50.5	60	65	74	\	\
	3 +	车厢能见度达到极限值 5 m 所需时间	52.3	49.9	38.2	51.4	53.7	56.7	١	\
	1车	温度达到极限值 60℃所需时间	55	55	48	49.8	51.7	55.2	67.3	\
		车厢能见度达到极限值 5 m 所需时间	41.5	42.2	39	37.9	43.7	42.9	50.3	\
МЭ	2 车	温度达到极限值 60℃所需时间	65	61	56.5	51.5	60	61.6	65.5	75
IVI2		车厢能见度达到极限值 5 m 所需时间	47.1	44.9	43.7	44	44	45.7	47	53.8
	2 t	温度达到极限值 60℃所需时间	64	60	58	52.5	60.5	61.5	66	72
	3+	车厢能见度达到极限值 5 m 所需时间	45	44.8	43.5	42	47	46.3	46.2	54.2
	1 左	温度达到极限值 60℃所需时间	52	49.8	45.5	40.8	45	48	49.5	57
	1+	车厢能见度达到极限值5m所需时间	47	44	40	38	42	43	46	53.8
M2	った	温度达到极限值 60℃所需时间	49	46.8	43.5	40	44.8	44	48	48
W13	2 平	车厢能见度达到极限值 5 m 所需时间	42.3	41.9	36	39	36.8	38.7	39.1	43
	2 15	温度达到极限值 60℃所需时间	49	45.5	44	39.5	45.8	46	50.5	53.9
	3车	车厢能见度达到极限值 5 m 所需时间	43.4	39.5	38	34.2	36.5	40	42.5	48

4.5. 结果

M1 第1 至 3 车的 ASET 分别为 38 s、38.8 s、38.2 s; M2 第1 至 3 车的 ASET 分别为 37.9 s、43.7 s、 42 s; M3 第1 至 3 车的 ASET 分别为 38 s、36 s、34.2 s (注:所有 ASET 均取仿真获得的最小值)。3 个 方案的共同点是:最短时间内使车厢能见度到达极限值的典型着火点主要为车厢中部的第 C、D 着火点。

5. 旅客界面布局对安全疏散的影响

Pathfinder 是一款基于人员进出和运动的模拟器,可以计算每个人员的独立运动并给予了一套独特的参数[29]。本文采用 Pathfinder 来研究旅客界面布局对旅客安全疏散的影响。

5.1. 构建 3 个方案的 Pathfinder 列车模型

1) Pathfinder 列车模型构建。将 3 个方案的 PyroSim 模型导入至 Pathfinder 中,根据俯视图构建车厢 内部人员站立空间及疏散通道,完成 3 个方案 1:1 比例 Pathfinder 列车模型构建。

2) 旅客、司机和巡查员数量设定。表 12 为结合文献[34]换算得出的旅客性别及年龄结构比例。表
13 是我国成年人和未成年人各年龄属性人群中人体尺寸主要百分位数的最大肩宽值[35] [36],选择各年龄属性人群人体尺寸的第 95 百分位数的最大肩宽值(注:未成年人选择 16~17 岁的对应值)。

Table	12. The percentage of gender and age of passengers
表 12.	旅客性别及年龄结构比例

年龄属性	男	女	合计
成年人(18~60岁)	48.33%	40.67%	89%
老年人(60岁以上,可含轮椅使用者一人)	4.89%	4.11%	9%
未成年人(18岁以下)	1.09%	0.91%	2%

 Table 13. The maximum shoulder width of each percentile human body in different age groups

 表 13. 各年龄属性人群中主要百分位数人体最大肩宽值

百分位数	1	5	50	95	99
成年男性最大肩宽(mm)	383	398	431	469	486
成年女性最大肩宽(mm)	347	363	397	438	458
16~17 岁未成年男子最大肩宽(mm)	371	389	426	471	513
16~17 岁未成年女子最大肩宽(mm)	357	369	397	436	458

结合表 7 和表 12,确定了 3 个方案各车厢满员情况下的旅客人员类型的具体数量,详见表 14。同理, 结合表 7 中 3 个方案各车厢的座椅数,确定了 3 个方案按照座位数应设置的旅客人员类型的具体数量。 同时,额外增加手动轮椅使用者 1 名,分别设置在 M1 的 1 车、M2 的 3 车、M3 的 3 车,详见表 15。 设定司机和巡查员为 18~60 岁男性,巡查员随机布置在车厢中。司机设定在满员人数之外,巡查员 设定在满员人数之内,均为 1 人。

方案名称	M1 第 1、 M2 第 1、3	6车厢; 、4、6车厢	M1 第 2、 M2 第	3、4、5; 2、5 车	M3 第	1、6车	M3 第 2、	3、4、5车
车厢额定载人数	250	5人	25	9人	23	0人	25	0人
设定人数情况	求值	设定(人)	求值	设定(人)	求值	设定(人)	求值	设定(人)
成年男性(48.33%)	123.72	124	125.17	125	111.16	111	120.83	121
成年女性(40.67%)	104.12	104	105.34	105	93.54	94	101.68	102
老年男性(4.89%; 含手 动轮椅使用者1人)	12.52	12	12.67	13	11.25	11	12.23	12
老年女性(4.11%)	10.52	11	10.64	11	9.45	9	10.28	10
未成年男子(1.09%)	2.79	3	2.82	3	2.51	3	2.73	3
未成年女子(0.91%)	2.33	2	2.36	2	2.09	2	2.28	2

 Table 14. Proportion of passenger types at rated load of three schemes

 表 14. 各车厢额定载人数条件下 3 个方案的旅客人员类型比例

 Table 15. Proportion of passenger types under the condition of full seats of three schemes

 表 15. 车厢座位人数满座条件下 3 个方案的旅客人员类型比例

方案名称	M1 第1	1、6车	M1 第1 4、1	2、3、 5 车	M2 第 5、6	1、2、 5 车	M2 第3	3、4车	M3 第1	し、6车	M3 第 4、:	2、3、 5 车
车厢座位人数	46	人	56	人	48	人	45	人	36	人	44	人
设定人数情况	求值	设定 (人)	求值	设定 (人)	求值	设定 (人)	求值	设定 (人)	求值	设定 (人)	求值	设定 (人)
成年男性(48.33%)	22.23	22	27.07	27	23.20	23	21.75	22	17.40	17	21.27	21
成年女性(40.67%)	18.71	19	22.78	23	19.52	20	18.30	18	14.64	15	17.90	18
老年男性(4.89%)	2.25	2 + 1	2.74	3	2.35	2	2.20	2 + 1	1.76	2	2.15	2 + 1
老年女性(4.11%)	1.89	2	2.30	2	1.97	2	1.85	2	1.48	1	1.81	2
未成年男子(1.09%)	0.50	1	0.61	1	0.52	1	0.49	1	0.39	1	0.48	1
未成年女子(0.91%)	0.42	0	0.51	0	0.44	0	0.41	0	0.33	0	0.40	0
手动轮椅使用者	第14 设1	₣额外 Ⅰ 人	١	١	١	١	第3车 设1	⊑额外 □人	١	\	第34 设计	⊑额外 □ 人

5.2. Pathfinder 仿真分析

设定列车疏散位置均为车站疏散,疏散方式均为侧门单侧疏散。点燃火源后,人员立即响应,车门 开启时间为4 s [6]。因车内人员不同的站位会导致最终的疏散时间有所差异,所以对2种载客人数条件 下的3个方案进行了5次模拟仿真。表16为额定载人数和仅座椅满员条件下,3个方案车内人员疏散过 程中的仿真采样图。图2为通过5次仿真获得的分别在额定载人数条件下和仅座椅满员条件下的3个方 案的 RSET (包含4秒车门开启时间)。

	额定载人数	
NI I	仅座椅满员	
	额定载人数	
NI2	仅座椅满员	
	额定载人数	
M3	仅座椅满员	

 Table 16. Pictures of personnel evacuation of three schemes both at rated load and under the condition of full seats

 表 16. 额定载人数和仅座椅满员条件下 3 个方案人员疏散的仿真采样图

从图 2 可以得出,在额定载人数条件下和仅座椅满员条件下,车内人员完成疏散的时间呈一致性趋势,即: M1、M2 两端的第1 车和第6 车内的人员疏散时间较长,M3 中部的第3 和第5 车内的人员疏散时间较长。



Engure 2. The RSET of three schemes **图 2.** 3 个方案的必需安全疏散时间

5.3. 结果与分析

通过比较由 PyroSim 仿真分析获得的 ASET 和由 Pathfinder 仿真分析获得的 RSET,在座椅满员条件 下 3 个方案仿真获得的 ASET 均大于 RSET,也即均可实现安全疏散;而在额定载人数条件下,仅 M3 方案的 ASET 和 RSET 接近,M1 和 M2 方案的 ASET 则远小于 RSET,如表 17 所示。根据对 3 种方案多 次人员疏散仿真视频的观察,可得到的原因主要为:M1、M2 侧门数量较 M3 少,可用有效的疏散出口 不足;M1、M2 的横向布局座椅之间的过道宽度要小于 M3 的纵向布局座椅之间的过道宽度,旅客在从 横向座椅处疏散至最近的车门时会在过道处形成一股拥堵的人流,导致疏散时间增加;M2 的纵向座椅间 过道虽然比 M3 的座椅间过道宽 200 mm,但与 M3 相比,M2 的立柱设置在疏散通道上,不利于疏散,也会导致疏散时间增加,见表 18。

座椅满员			额定载人数			
M1	ASET - DSET		M1	ASET DSET		
M2	ASET > KSET	可安全疏散	M2		不可安全疏散	
M3	ASET >> RSET		M3	ASET < RSET		

Table	17. Feasibility	of safe eva	cuation of	people	under 3	schemes	with	different	load	sizes
表17.	不同载人数	下3个方案	的人员安:	全疏散了	可行性					

Table 18. Reasons why the M1 and M2 schemes prevent the safe evacuation of people

 表 18. M1、M2 方案阻碍人员安全疏散的原因

	原因一	原因二	原因三
M1		楼白女已应达之间的过送帝帝不见	/
M2	有双的项取面口个足	· 供 问 仰 向 座 何 之 问 的 过 坦 见 反 个 止	立柱设置在疏散通道上

在安全疏散方面, M1 的横向座椅间狭窄过道是影响旅客疏散速度的主要原因; M2 的横向座椅间的 狭窄通道以及纵向座椅间的扶手立柱是减缓旅客疏散速度的主要原因; M3 的整体疏散效率最高。

6. 结论

1) 在由 5 kg 汽油燃烧所致的火灾条件下, ASET 通常是由能见度 5 m 限制所致, 温度 60℃限制所致 时间略长, 而 CO 浓度限制所致时间太长而可以忽略; 着火点在地铁列车车厢中部位置较着火点在地铁 列车车厢两端更易致能见度值快速达到限值 5 m, 从而导致 ASET 值减小。

2) 在额定载人数下, M1 的 RSET 均值为 82.8 s, M2 的 RSET 均值为 81.8 s, M3 的 RSET 均值为 50.1 s, 均大于 5 kg 汽油燃烧所致的 ASET, 理论上均难以实现该极端条件下的安全疏散;在仅座椅满员条件下, M1 的 RSET 均值为 24.9 s, M2 的 RSET 均值为 24.2 s, M3 的 RSET 均值为 14.1 s, 均小于 5 kg 汽油燃烧所致的 ASET, 理论上均能够实现该极端条件下的安全疏散。无论是额定载人数还是仅座椅满员条件下, 三种典型布局方案的 RSET 均值均远远小于 TSI 标准规定的 180 s [9]或 GB/T 33668-2017 规定的 6 min (360 s) [15],均符合要求,见表 19; 三种典型布局方案中, M3 疏散所用时间最短、疏散效率最高, M1、M2 的疏散效率相近且低于 M3。

Table	19. Evacuation times for three schemes ur	der different	conditions a	nd standard r	egulations
表 19.	不同条件及标准规定下3个方案的人员	员疏散时间			

仅座椅满员	条件下 RSET 均值	额定载人数下 RSET 均值	5 kg 汽油燃烧 所致的 ASET	TSI 标准规定	GB/T 33668-2017 规定
M1	24.9 s	82.8 s	38 s		
M2	24.2 s	81.8 s	37.9 s	180 s	360 s
M3	14.1 s	50.1 s	34.2 s		

3) M1、M2 的座椅为具有防火性能的软质聚氨酯发泡材料和涤纶材料,舒适性更佳,更适用于乘坐时间较长、停靠站数量相对较少、旅客密度相对不高的远距离市郊和机场线路; M3 的座椅为聚酯玻璃钢或不锈钢材料,且快速疏散能力较强,更适用于市内载客量大、密度较高的地铁线路。

此外,为了实现在额定载人数条件下的安全疏散,设计方面可适当增加侧门数量、适当减少立柱并 增加不碰头的高位横杆等措施,管理方面应适当限制额定载客人数,见表 20。继续考虑更多的列车疏散 位置、疏散方式、人员因素和车辆因素将是下一步开展的研究工作。

Table	Proposals to facilitate rapid evacuation of the three schemes	3
表 20.	利于3种方案的快速疏散的建议	

车型	适用运行线路	设计优化建议	管理建议
M1	乘坐时间较长、停靠站数量相对较少、旅客	话当脑加侧门粉昰。话当减小	
M2	密度相对不高的远距离市郊和机场线路	立柱并增加不碰头的高位横杆	适当限制额定载客人数
M3	市内载客量大、密度较高的地铁线路	寺捾肔	

基金项目

本项目受国家自然科学基金项目(52175253)资助。

参考文献

- [1] 翟婉明, 赵春发. 现代轨道交通工程科技前沿与挑战[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(2): 209-226.
- [2] 中国城市轨道交通协会. 快报: 2021 年上前三季度中国内地城轨交通线路概况[EB/OL]. <u>https://www.camet.org.cn/xxfb/8658</u>, 2021-10-01.
- [3] 刘小明, 胡红. 应急交通疏散研究现状与展望[J]. 交通运输工程学报, 2008(3): 108-115+121.
- [4] 梁琦. 地铁隧道区间乘客紧急疏散方式分析[J]. 现代城市轨道交通, 2017(2): 51-54.
- [5] Shi, C., Zhong, M., Nong, X., *et al.* (2012) Modeling and Safety Strategy of Passenger Evacuation in a Metro Station in China. *Safety Science*, **50**, 1319-1332.
- [6] 席亚军,林建辉,苏燕辰,田鑫,李冬. 地铁车厢火灾蔓延规律及人员疏散安全性研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(3): 619-625.
- [7] 刘俐. 城市轨道交通区间疏散问题分析[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(11): 93-96.
- [8] 李琦, 王明年, 于丽. 长大铁路隧道火灾模式下人员疏散试验研究[J]. 中国铁道科学, 2015, 36(6): 78-84.
- [9] 厉志强, 崔巍, 张克姝, 王冰松, Kinsey, M., 杜璐露, 等. 某新型地铁列车的疏散模型分析[J]. 消防科学与技术, 2019, 38(11): 1538-1543.
- [10] Fridolf, K., Nilsson, D. and Frantzich, H. (2016) Evacuation of a Metro Train in an Underground Rail Transportation System: Flow Rate Capacity of Train Exits, Tunnel Walking Speeds and Exit Choice. *Fire Technology*, **52**, 1481-1518. <u>https://doi.org/10.1007/s10694-015-0471-4</u>
- [11] Zarboutis, N. and Marmaras, N. (2007) Design of Formative Evacuation Plans Using Agent-Based Simulation. Safety Science, 45, 920-940. <u>https://doi.org/10.1016/j.ssci.2006.08.029</u>
- [12] Qiu, H. and Fang, W. (2019) Train Vehicle Structure Design from the Perspective of Evacuation. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, **32**, Article No. 88. <u>https://doi.org/10.1186/s10033-019-0399-6</u>
- [13] 向泽锐, 支锦亦, 李然, 徐笑非, 徐刚. 我国城市轨道列车工业设计研究综述[J]. 西南交通大学学报, 2021, 56(6): 1319-1328.
- [14] 中华人民共和国建设部,国家发展和改革委员会.JB 104-2008.城市轨道交通工程项目建设标准[S].北京:中国计划出版社,2008.
- [15] 史聪灵, 钟茂华, 秦挺鑫, 罗燕萍, 胥旋, 王迪军, 等. GB/T33668-2017. 地铁安全疏散规范[S]. 北京: 中国标准

出版社, 2017.

- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50157-2013. 地铁设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [17] Hurley, M.J., Gottuk, D.T., Hall, J.R., et al. (2016) SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 5th Edition. Springer, New York. <u>https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2565-0</u>
- [18] 王起全,李登尧,杨鑫刚.地铁事故应急疏散模拟及优化研究[J].中国安全生产科学技术,2019,15(11):170-178.
- [19] 郝鑫鹏. 地铁站台火灾烟气流动与机械排烟模式[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2012.
- [20] 朱奥妮. 2000-2019 年国内外地铁火灾事故统计分析[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(8): 148-150.
- [21] Zhong, M., Zhang, Z., Zhang, K., et al. (2019) A Framework for Train Derailment Risk Analysis. Journal of Central South University, 26, 1874-1885. <u>https://doi.org/10.1007/s11771-019-4141-4</u>
- [22] 傅鹤林, 黄震, 王慧, 张加兵, 史越. 地铁安全事故分析及安全管理[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2019, 1(2): 59-66.
- [23] 刘山云. 典型地铁突发事件应急管理案例分析——上海地铁碰撞事故[J]. 中国社会公共安全研究报告, 2012(1): 146-159.
- [24] 许帅帅. 地铁车辆故障信息统计分析及检修策略优化[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2013.
- [25] 王瑞山, 靳澜涛. 地铁场所踩踏事故的生成特征与风险治理——2008年以来15起典型事故的考察[J]. 中国人民 公安大学学报: 社会科学版, 2016, 32(4): 141-148.
- [26] 中华人民共和国建设部. CJJ/T 114-2007. 城市公共交通分类标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [27] 梁建英,杨基宏,曹志伟,张红江,单保强,杨伟君,等. GB/T 37532-2019. 城市轨道交通市域快线 120~160 km/h 车辆通用技术条件[S]. 北京:中国标准出版社, 2019.
- [28] 李逊, 洪玲, 徐瑞华. 轨道交通车站应急疏散乘客心理行为影响因素分析[J]. 城市轨道交通研究, 2012, 15(4): 54-57.
- [29] 吕淑然,杨凯.火灾与逃生模拟仿真: PyroSim+Pathfinder 中文教程与工程应用[M].北京:化学工业出版社, 2014:2.
- [30] 史聪灵, 钟茂华, 罗燕萍, 毛宇丰. 地铁车厢汽油火灾的模拟计算与分析[J]. 中国安全科学学报, 2006, 16(10): 32-36.
- [31] 霍然,金旭辉,梁文.大型公用建筑火灾中人员疏散的模拟计算分析[J].火灾科学,1999(2):10-15.
- [32] 田鑫, 苏燕辰, 席亚军, 李冬. 地铁列车火灾安全疏散研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(31): 281-284+289.
- [33] Heskestad, G. and Delichatsios, M.A. (1979) The Initial Convective Flow in Fire. Symposium (International) on Combustion, 17, 1113-1123. <u>https://doi.org/10.1016/S0082-0784(79)80106-X</u>
- [34] 刘栋栋, 孔维伟, 李磊, 张蕊, 赵东拂, 曾杰, 等. 北京地铁交通枢纽行人特征的调查与分析[J]. 建筑科学, 2010, 26(3): 70-74+83.
- [35] 国家技术监督局. GB10000-1988 中国成年人人体尺寸[S]. 北京: 中国标准出版社, 1988.
- [36] 张欣, 冉令华, 刘太杰, 冯士雍, 郑嵘, 肖惠, 等. GB/T 26158-2010. 中国未成年人人体尺寸[S]. 北京: 中国标准 出版社, 2011.