

基于Pathfinder的地铁列车安全疏散仿真研究

姜亮¹, 鲁晓涛¹, 兰永霞¹, 支锦亦^{2,3}, 向泽锐^{2,3*}

¹中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东 青岛

²西南交通大学设计艺术学院, 四川 成都

³西南交通大学人机环境系统设计研究所, 四川 成都

收稿日期: 2022年9月3日; 录用日期: 2022年10月28日; 发布日期: 2022年11月15日

摘要

地铁列车的安全疏散直接影响司乘人员的安全出行。本文结合计算机模拟技术提出了基于Pathfinder的地铁列车安全疏散仿真分析约束, 并以成都地铁(4编组)车辆为例进行了人员安全疏散仿真分析研究: 首先根据地铁列车的设计方案构建虚拟仿真模型; 然后通过设置相关参数, 使疏散人群中每个个体的疏散路径走向进行图形化的虚拟演练, 从而准确计算出每个个体的疏散时间; 最后基于仿真数据来评估危险工况逃生的安全性。案例研究表明: 该多人员构成的安全疏散仿真分析能够有效评估多工况条件下地铁列车设计方案的安全疏散能力, 可为设计研发具有良好安全疏散特性的地铁列车提供参考依据。

关键词

地铁列车, 安全疏散, 仿真

Research on Simulation of Safety Evacuation of Subway Vehicles Based on Pathfinder

Liang Jiang¹, Xiaotao Lu¹, Yongxia Lan¹, Jinyi Zhi^{2,3}, Zerui Xiang^{2,3*}

¹CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao Shandong

²School of Design, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan

³Institute of Design and Research for Man-Machine-Environment Engineering System, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan

Received: Sep. 3rd, 2022; accepted: Oct. 28th, 2022; published: Nov. 15th, 2022

Abstract

The safe evacuation of subway vehicles directly affects the safe travel of drivers and passengers.

*通讯作者。

文章引用: 姜亮, 鲁晓涛, 兰永霞, 支锦亦, 向泽锐. 基于 Pathfinder 的地铁列车安全疏散仿真研究[J]. 交通技术, 2022, 11(6): 428-440. DOI: 10.12677/ojtt.2022.116044

Combined with computer simulation technology, this paper puts forward the simulation and analysis constraint conditions of subway vehicle safety evacuation based on Pathfinder, and takes Chengdu subway (4-group) vehicles as an example to carry out the simulation and analysis of personnel safety evacuation: first, building a virtual simulation model according to the design scheme of subway vehicles; Then, by setting the relevant parameters, the movement of each individual in the evacuation crowd is simulated graphically, so as to accurately calculate the evacuation time of each individual; Finally, the safety of escape in case of danger is evaluated based on the simulation results. The case study shows that: The safe evacuation simulation analysis of multi-personnel composition can effectively evaluate the safety evacuation ability of the design schemes of subway vehicles under multiple working conditions, and can provide a reference for the design and development of subway vehicles with good safety evacuation characteristics.

Keywords

Metro Vehicles, Safe Evacuation, Simulation

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/>



Open Access

1. 引言

随着我国城市建设与发展, 市民通勤距离不断增加, 城市出行矛盾日益突出[1]。科学构建包括地铁在内的都市区轨道交通体系能够有效解决城市出行矛盾, 同时也是交通强国建设的内在要求[2]。《中国城市轨道交通智慧城轨发展纲要》[3]指出: 需在线网运营调度(应急)指挥中心, 部署智能城轨线网运输组织辅助决策系统, 而该系统应实现突发事件下的大客流快速、安全疏散, 提高运输指挥和应急响应能力。因此, 我国在大力建设发展地铁的同时, 也应注重安全疏散问题。地铁运营过程一旦发生事故或故障, 人员被及时疏散是保障乘客生命安全、减少财产损失的关键之一[4]。因地铁事故的试验研究具有试验时间长、所需试验人员多和成本高等缺点, 因此计算机仿真技术常用于研究地铁事故中的人员疏散[5]。人员逃生研究源于上世纪初, 初期多采用观察描述、访问研究等定性分析的方法; 上世纪 70 年代开始, 研究主要集中在群集恐慌行为研究、人的逃生行动能力研究等; 上世纪 80 年代, 开始借助实验等手段进行动力学研究及计算机模拟; 从上世纪 90 年代开始, 逐渐发展到逃生疏散随机行为规律的定量研究[6][7]。目前国外较为权威的文献有“SFPE handbook of fire protection engineering (fifth edition)” [8], 我国城市轨道交通领域则有《地铁安全疏散规范》[9]。在地铁疏散仿真研究方面, 董书衡[10]使用 Pathfinder 仿真模拟软件对不同条件下的地铁站应急疏散过程进行仿真模拟, 发现不同人群因为年龄、性别、经历的不同, 对火灾消防以及逃生疏散的反应时间、熟悉程度均有不同。张立茂等[11]针对三种不同地铁车站内工况下的人员疏散进行了研究, 借助 FDS 和 Pathfinder 对地铁火灾情况下的人员疏散进行研究, 验证发现仿真环境与真实情况契合度较高。刘辰等[12]通过使用 PyroSim 和 Pathfinder 对三种典型座椅布局的地铁列车进行火灾情况下的仿真模拟分析, 得出在额定载人数下, 三种地铁车型的 RSET 均大于 5 kg 汽油导致的火灾事故中的 ASET。本文结合国内外研究成果, 构建了面向我国的地铁列车人员安全疏散约束, 基于多人员构成和多工况进行了案例分析研究, 为从人员安全疏散仿真视角为评估地铁列车设计方案的安全疏散质量提供了参考。

2. 安全疏散仿真技术

2.1. 计算机仿真

20 世纪 90 年代, 加拿大学者 Palus 指出人员疏散行为是疏散运动和人在紧急状态下的各种行为反应的结合, 使得计算机仿真技术在人员疏散领域得到了广泛的应用[13]。之后随着计算机技术的发展, 研究者们逐渐地采用建模加仿真的方法去描述和观察行人疏散过程和特性, 以解决突发情况下行人的疏散问题[14]。国内外学者对地铁应急疏散问题的仿真研究, 主要聚焦在仿真模型的选取构建以及仿真参数的选择上, 他们结合实际案例, 选择或建立合适的仿真模型, 并尽可能选择具有代表性的仿真参数输入模型, 以期仿真过程尽可能与实际情况相符合[15]。

2.2. 基于 Pathfinder 的人员安全疏散仿真技术

目前, 在列车人员安全疏散方面的主要评判研究思路是: 通过计算机模拟, 分析计算列车达到危险的时间(即疏散可利用时间 ASET, Available safe egress time)与人员疏散所需时间(即所需安全疏散时间 RSET, Required safe egress time)来评估危险时逃生的安全性[7]。

公共场所逃生系统的研究和应用相当广泛, 在商业、银行、交通、信息等领域均需要进行大量仿真模拟。Pathfinder 是由美国 Thunderhead engineering 公司进行研究推出的人员紧急疏散模拟软件, 它利用计算机图形仿真和游戏角色邻域的技术, 通过设置相关参数, 使疏散人群中每个个体的移动进行图形化的虚拟演练, 从而准确计算出每个个体的疏散时间, 且能观察每个个体的疏散过程, 可为列车在紧急情况下的人员疏散提供评估依据[11][12]。基于 Pathfinder 软件的优越性, 本文选择它为应用平台来进行地铁列车安全疏散的仿真分析研究。

3. 构建地铁列车人员安全疏散仿真约束

3.1. 可用安全疏散时间(ASET)的确定

目前, 国内外均无关于地铁列车车内人员安全疏散时间的规定, 因此缺少用于评估可用安全疏散时间(ASET)的依据。“Commission Regulation (EU) No. 1302/2014” [16]提出, 车门的数量和尺寸应能够使未携带行李的乘客在 3 分钟内全部疏散。一般地铁列车运营于地下, 列车线路外面一般是相对宽敞的站台, 因此分析过程中, 将乘客离开列车即视为到达安全区域。本文以文献[16]为依据, 将可用安全疏散时间(ASET)确定为 3 min (180 s)。

3.2. 人员安全疏散时间的判据图

图 1 是常用的人员安全疏散时间判据图, 所需安全疏散时间(RSET)包括灾情探测报警时间 t_{alarm} , 预动作时间 t_{pre} 和人员疏散运动时间 t_{move} , 其中预动作时间又包括觉察时间 t_{reg} 和反应时间 t_{resp} 两部分, 其关系可以用以下公式表达[7]:

$$RSET = t_{\text{alarm}} + t_{\text{pre}} + t_{\text{move}} = t_{\text{alarm}} + (t_{\text{reg}} + t_{\text{resp}}) + t_{\text{move}}$$

3.2.1. 报警时间(t_{alarm})

我国地铁列车装有烟雾探测报警装置, 停车状态下一旦火灾发生并形成烟雾, 会立即被侦测并联动开启侧门。因此灾情探测报警时间 t_{alarm} 往往受限于列车车门的开启时间。基于长期从事地铁研制的工程经验, 确定了侧门开启时间如下:

- 1) 客室侧门。一般地铁列车客室侧门开关门延时时间 1.3 s, 开关门时间 3 ± 0.5 s。共计 4.8 s。

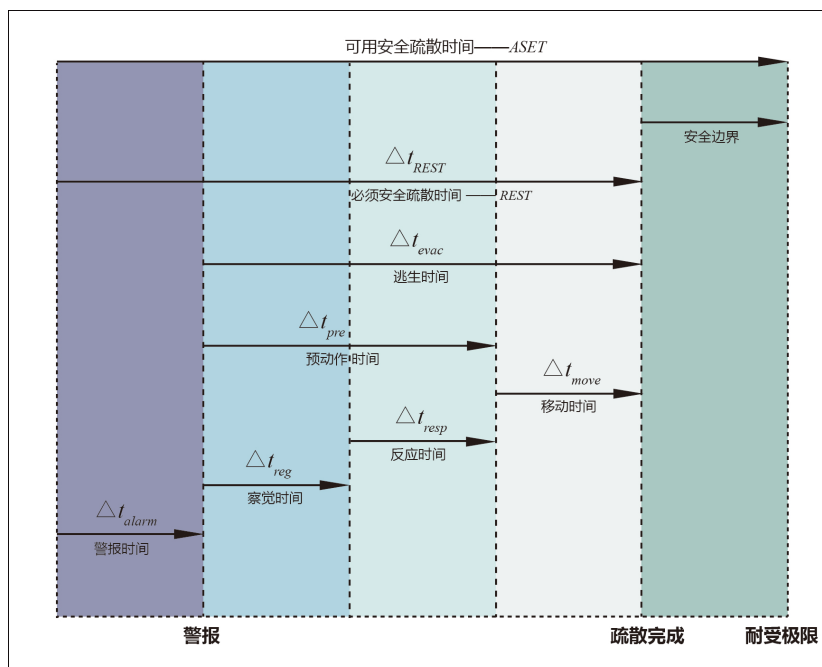


Figure 1. Criterion diagram of safe evacuation time
图 1. 人员安全疏散时间判据图

- 2) 司机室侧门。司机室侧门开关门延时时间 0.1 s，开关门时间 3 ± 0.5 s。共计 3.6 s。
- 3) 司机室后端门。司乘人员和乘客区间的门可从司乘人员区打开，无需钥匙。故设定司机室后端门人工开门时间为 2 s。

3.2.2. 预动作时间($t_{reg} + t_{resp}$)

预动作时间是指在接到报警信息后，采取具体疏散行动之前所需要的时间，包括信息确认时间、行为反应时间。预动作时间的长短与采取的报警设备形式紧密相关。另外还与人员的心理行为特征、人员的年龄、对车辆环境的熟悉程度、人员的灵敏性甚至人员的集群特征密切相关[17]。对于客运列车，一般采用现场广播的方式进行报警，加之不同的功能区域都设有定数量的管理人员，所以人员的响应时间较短。

英国消防安全工程技术委员会发布的“DD 240: Part 1: 1997 Fire Safety Engineering in Buildings” [18] 给出了不同火灾广播系统时的人员预动作时间。由于车辆上采用的是现场广播系统，而且车辆内部配备一个管理人员，乘员能够较为清楚地发现和识别就近的疏散口，因此搭乘地铁列车的人员预动作时间选择为 1 min (60 s)。

3.2.3. 疏散运动时间(t_{move})

疏散运动时间是指从人员开始做出疏散行动到疏散至安全区域的时间，即发生灾情车辆内人员从车厢经由通道、出口疏散到车厢外。该时间根据各项约束和人员构成，通过 Pathfinder 仿真分析可以获得。

3.3. 旅客疏散速度

人员在灾情中的行为是十分复杂的，不同年龄、性别、对灾情的认知程度不同则人员的逃生行为有很大差别，而这个差别主要体现在疏散速度上[19]。本文结合文献[8]、GB/T33668 [9]、Q/SF 71-189-2021 [20]设定了各年龄段人员比例及疏散的步行速度，详见表 1 和表 2。

Table 1. Average walking speed for evacuation of people of all ages
表 1. 各年龄段人员的疏散平均步行速度

类别	水平疏散行走速度 m/s
4 岁~12 岁	0.76
13 岁~17 岁(身高已达 1.6 m 可按照成年女性步行速度计算)	1.05
女 18 岁~55 岁	1.05
男 18 岁~60 岁	1.25
女 > 55 岁; 男 > 60 岁	0.76
轮椅使用者	0.58

Table 2. Proportion of people of all ages
表 2. 各年龄段人员比例

年龄	人员比例		
	男性	女性	总比例
≤18 岁	6%	4%	10%
18 岁~女 55 岁(男 60 岁)	48%	32%	80%
≥女 55 岁(男 60 岁)	6%	4%	10%
合计	60%	40%	100%

3.4. 司机疏散速度

目前,我国的轨道车辆均采用单司机驾驶,因此在逃生过程中,其疏散速度与乘客逃生速度有一定的区别。TB/T 3091 [21]对我国铁路机车司机的身体健康状态均有明确规定,所有执行驾驶任务的司机均属于身心健康的人员,由于长期从事驾驶任务,因此对列车的逃生线路比较熟悉;并规定了铁路机车司机身高应 ≥ 160 cm,体重等其他身体参数则未作具体要求。考虑到列车内的空间较一般建筑的空间狭窄,因此本次分析采用 P10 成年男性的身高 1.604 m,肩宽 35.1 cm [22],平均步行速度 1.25 m/s 作为司机的身高及疏散平均速度。

司机逃生路线分为两种工况,工况 1 司机逃生路线:司机室侧门逃生;工况 2 司机逃生路线:通过司机室后端门进入客室,从客室侧门逃生。

综合考虑到上述各项因素,从各逃生出口离开仿真对象的时间总和小于 3 min (180 s)视为设计方案满足安全疏散要求。即仿真获得的人员疏散所需时间(RSET)满足下式:

$$RSET \leq 180 \text{ s}$$

$$\text{也即: } t_{\text{alarm}} + (t_{\text{reg}} + t_{\text{resp}}) + t_{\text{move}} \leq 180 \text{ s}$$

$$\text{其中,乘客: } t_{\text{alarm}} = 4.8 \text{ s;}$$

$$\text{工况 1 司机: } t_{\text{alarm}} = 3.6 \text{ s;}$$

$$\text{工况 2 司机: } t_{\text{alarm}} = 2 \text{ s} + (4.8 - 2 \text{ s}) = 4.8 \text{ s;}$$

$$t_{\text{reg}} + t_{\text{resp}} = 60 \text{ s}$$

因此,乘客 $t_{\text{move}} \leq 115.2 \text{ s}$ 即合格。

工况 1 司机 $t_{\text{move}} \leq 116.4 \text{ s}$ 即合格;

工况 2 司机 $t_{\text{move}} \leq 115.2$ s 即合格。

3.5. 设计方案关键参数

地铁列车设计方案总长 95.8 m，头车车辆长度 25.1 m，中间车辆长度 22.8 m，车间距 920 mm，车体最大宽度 3000 mm，车体高度 3500 mm，客室内净高度 ≥ 2100 mm。列车采用 3 动 1 拖 4 辆编组型式。列车载客量信息详见表 3。案例研究所用仿真分析模型即为基于这些关键参数构建。

Table 3. Passenger capacity of train

表 3. 列车载客量表

载客量	单位：人		
	带司机室的头车	中间车	4 辆编组
坐席(AW1)	45	48	186
定员(AW2, 站席 6 人/m ²)	246	256	1004
超员(AW3, 站席 9 人/m ²)	348	360	1416

4. 地铁列车的安全疏散仿真分析

本次仿真分析按照列车 AW2\AW3 载客量进行模拟，在软件中对人员的速度、身高、肩宽、占比等特征值进行设定，模型中车厢内阻碍人员疏散运动的座椅、配电柜、大件行李架、立柱等物件，通过矩形障碍物的方式进行展现。据国标 GB10000 [22]和 GB/T 26158 [23]的身体尺寸，以及综合考虑成都轨道交通工程地铁列车运行线路的人员情况，确定了列车仿真人员的特性参数如表 4 所示。考虑到两侧门疏散不符合现实情况，本研究仅作乘客从一侧车门疏散的情况。

Table 4. Characteristic parameters of train simulator

表 4. 列车仿真人员的特性参数

年龄段	占比	速度(m/s)	身高(m)	肩宽(m)
4~6 岁	2%	0.76	1.111	24.5
7~10 岁	2%	0.76	1.313	28.5
11~12 岁	2%	0.76	1.477	32.0
13~15 岁	2%	1.05	1.606	35.0
16~17 岁	2%	1.05	1.648	36.7
P50 成年女性 18 岁~55 岁	32%	1.05	1.570	35.1
P50 老年女性 >55 岁	4%	0.76	1.570	35.1
P50 成年男性 18 岁~60 岁	46%	1.25	1.678	37.5
P50 老年男性 >60 岁	6%	0.76	1.678	37.5
合计	100%	/	/	/

4.1. 车辆在不同工况下的安全疏散仿真分析

对车辆的 CAD 文件进行处理, 去除多余的标注、文字、线条等, 仅保留模型的基本结构。客室共有 16 扇车门(宽度约 1400 mm), 左右各四扇对称分布。司机室后端门 2 扇(约 650 mm), 司机室侧门 4 扇(约 530 mm)。此处分析乘客从一侧门疏散的情况。绘制完成后出口在模型中的颜色显示为绿色, 如图 2 所示。

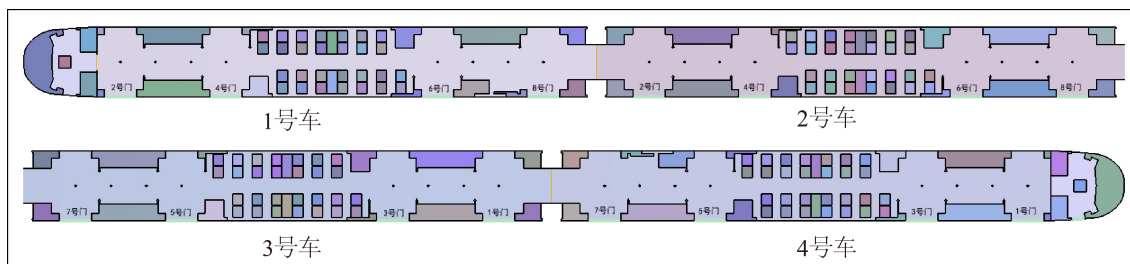


Figure 2. Draw the side door of the vehicle

图 2. 绘制车辆一位侧车门

绘制完车辆的基本模型结构后, 根据表 3 和表 4 的数据对车辆不同载客工况下人员的特性参数及人员比例进行设置。

AW2 工况: 1 号车乘客 291 人; 2 号车乘客 304 人; 3 号车乘客 304 人; 4 号车乘客 291 人; 司机 2 人。整列车辆共计人员 1192 人。详见图 3(a)所示。

AW3 工况: 1 号车乘客 392 人; 2 号车乘客 408 人; 3 号车乘客 408 人; 4 号车乘客 392 人; 司机 2 人。整列车辆共计 1604 人。详见图 3(b)所示。

由于列车中乘客疏散只有一种行为方式, 所以采用默认的行为模式(从任何出口疏散)即可。1 号车司机从司机室后端门客室经 2 号门疏散, 4 号车司机直接从司机室侧门疏散。

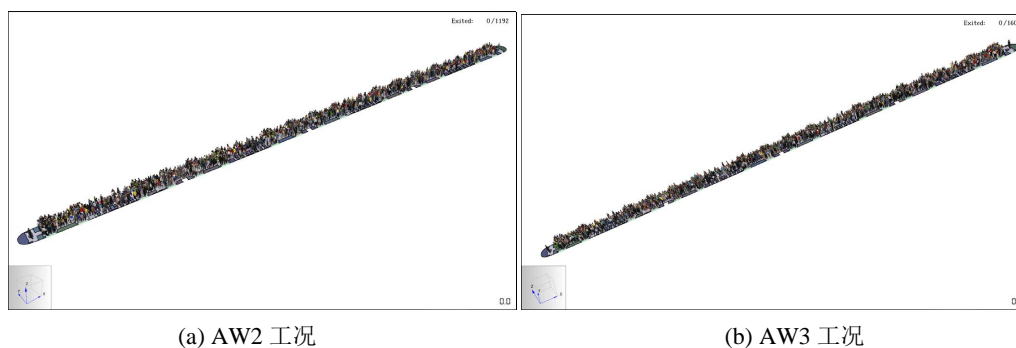


Figure 3. Vehicle personnel placement under different working conditions

图 3. 不同工况下车辆人员安置情况

完成上述模型绘制后启动模拟运行求解。AW2 工况仿真结果如图 4(a)所示, 整车 1192 人(包含司机 2 人)从一侧车门全部疏散到安全出口外共耗时 64.8 s。AW3 工况仿真结果如图 4(b)所示, 整车 1604 人(包含司机 2 人)从一侧车门全部疏散到安全出口外共耗时 78.5 s。

AW2 工况下, 整车 1192 人全部疏散并离开列车的时间为: $t_{\text{move}} = 64.8 \text{ s}$, $64.8 \text{ s} < 115.2 \text{ s}$ 。AW3 工况下, 整车 1190 名乘客全部疏散并离开列车的时间为: $t_{\text{move}} = 78.5 \text{ s}$, $78.5 \text{ s} < 115.2 \text{ s}$ 。因此, AW2 和 AW3 两种工况下, 乘客疏散设计符合要求。

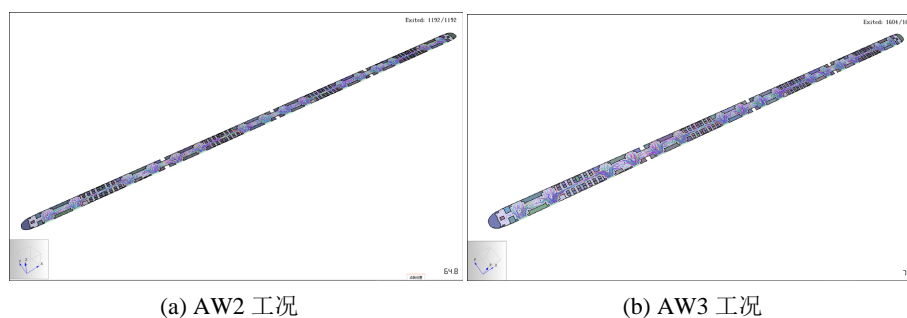


Figure 4. Emergency evacuation route and time of vehicle personnel under different working conditions
图 4. 不同工况下整车人员紧急疏散路径和时间

4.2. 车辆在不同工况下的安全疏散仿真分析

选取设置有无障碍区域的 1 号车和 4 号车, 在空载、AW2 和 AW3 工况下对轮椅使用者进行安全疏散分析。手动轮椅的平均速度为 0.58 m/s。通常认为如果速度最慢的手动轮椅使用者满足疏散要求, 则其他轮椅使用者均满足疏散要求。下面分别对这三种情况进行仿真分析。

4.2.1. 空载下单独轮椅使用者安全疏散仿真分析

1 号车和 4 号车单独轮椅使用者从就近出口疏散。轮椅安置后其效果如图 5 所示。

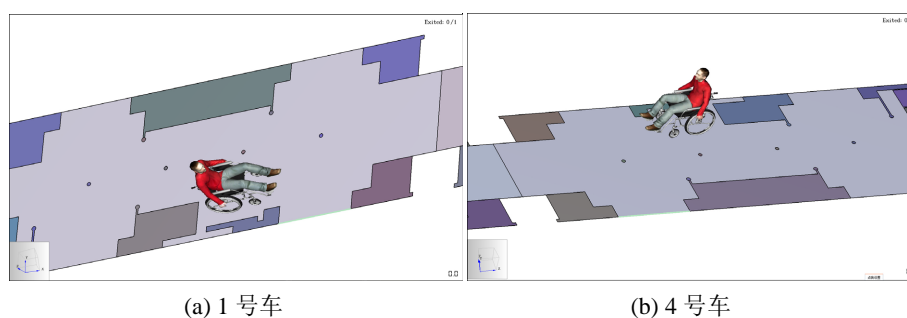


Figure 5. Wheelchair user position
图 5. 轮椅使用者位置

利用 Pathfinder 软件对空载情况下单独手动轮椅使用者疏散进行安全疏散分析, 图 6(a)显示了 1 号车手动轮椅使用者疏散到安全出口外共耗时 4.8 s。图 6(b)显示了 4 号车手动轮椅使用者疏散到安全出口外共耗时 10 s。

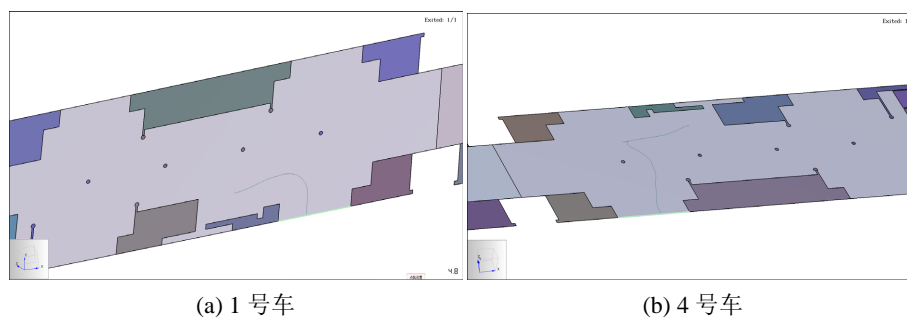


Figure 6. Wheelchair user evacuation route and time
图 6. 轮椅使用者疏散路线和时间

1 号车单独手动轮椅使用者疏散时, 离开列车的时间为: $t_{\text{move}}=4.8\text{ s}$, $4.8\text{ s} < 115.2\text{ s}$ 。4 号车单独手动轮椅使用者疏散离开列车的时间为: $t_{\text{move}}=10\text{ s}$, $10\text{ s} < 115.2\text{ s}$ 。因此, 空载时车辆无障碍区域单独手动轮椅使用者的疏散设计符合标准要求。

4.2.2. AW2 工况下轮椅使用者安全疏散仿真分析

AW2 工况下, 1 号车、4 号车无障碍区分别设置手动轮椅使用者一名, 就近出口进行疏散。利用 Pathfinder 软件进行仿真分析, 1 号车手动轮椅使用者安全疏散到安全出口共耗时 41.8 s (292 人中第 268 人完成疏散, 包括 1 名司机), 如图 7(a)所示; 4 号车手动轮椅使用者安全疏散到安全出口共耗时 38.9 s (292 人中第 258 人完成疏散, 包括 1 名司机), 如图 7(b)所示。

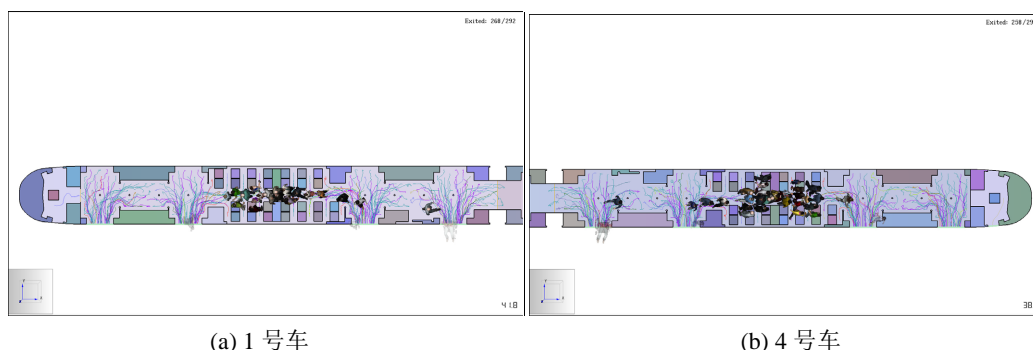


Figure 7. Evacuation route and time of wheelchair users under AW2 working condition
图 7. AW2 工况下轮椅使用者的疏散路径及时间

AW2 工况下 1 号车手动轮椅使用者疏散并离开列车的时间为: $t_{\text{move}}=41.8\text{ s}$, $41.8\text{ s} < 115.2\text{ s}$ 。

4 号车手动轮椅使用者疏散并离开列车的时间为: $t_{\text{move}}=38.9\text{ s}$, $38.9\text{ s} < 115.2\text{ s}$ 。因此 AW2 载客该情况下车辆中无障碍区域手动轮椅使用者疏散设计符合要求。

4.2.3. AW3 工况下轮椅使用者安全疏散仿真分析

AW3 工况下, 1 号车、4 号车无障碍区分别设置手动轮椅使用者一名, 就近出口进行疏散。利用 Pathfinder 软件进行仿真分析, 1 号车手动轮椅使用者安全疏散到安全出口共耗时 48.5 s (394 人中第 339 人完成疏散, 包括 1 名司机), 如图 8(a)所示。4 号车手动轮椅使用者安全疏散到安全出口共耗时 48.1 s (394 人中第 339 人完成疏散, 包括 1 名司机), 如图 8(b)所示。

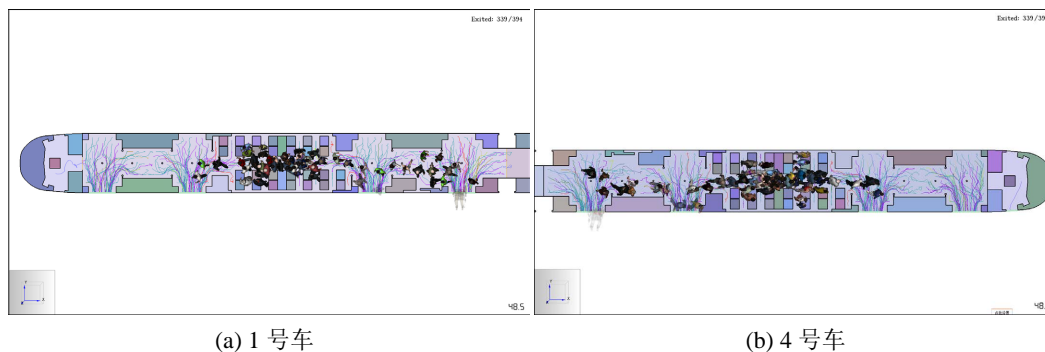


Figure 8. Evacuation route and time of wheelchair users under AW3 working condition
图 8. AW3 工况下轮椅使用者的疏散路径及时间

AW3 工况下 1 号车手动轮椅使用者疏散并离开列车的时间为: $t_{\text{move}} = 48.5 \text{ s}$, $48.5 \text{ s} < 115.2 \text{ s}$ 。4 号车手动轮椅使用者疏散并离开列车的时间为: $t_{\text{move}} = 48.1 \text{ s}$, $48.1 \text{ s} < 115.2 \text{ s}$ 。因此, AW3 载客情况下车辆中无障碍区域手动轮椅使用者疏散设计符合要求。

4.3. 司机安全疏散仿真分析

司机室通常仅有 1 名司机, 在遇到紧急情况时, 司机可以通过司机室侧门或者经过后端门由客室侧门疏散。本次分析采用成年男性的平均步行速度 1.25 m/s , 作为司机的疏散平均速度, 选取 P10 男性身高和肩宽(1.604 m , 35.1 cm)为司机身体尺寸。下面分别对这两种情况进行仿真分析。

4.3.1. 司机室侧门安全疏散仿真分析

图 9 是利用 Pathfinder 软件对司机从 4 号车司机室一侧车门疏散进行分析的结果(由于两侧对称分布, 因此分析一侧即可), 通过仿真可以得出, 司机从座椅处到司机室侧门处耗时 2 s 。

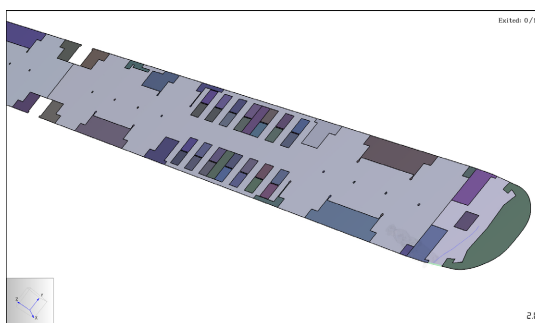


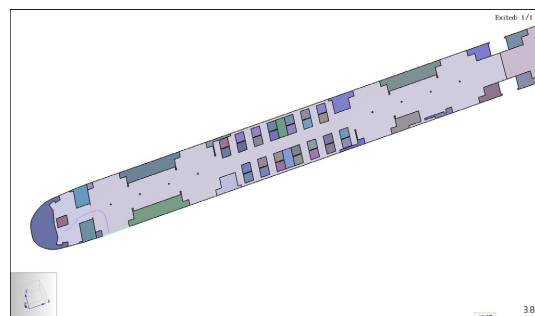
Figure 9. Evacuation route and time at cab side door
图 9. 司机室侧门处的疏散路径及时间

因此, 司机从司机室的侧门疏散并离开列车的时间为: $t_{\text{move}} = 2 \text{ s}$, $2 \text{ s} < 116.4 \text{ s}$, 则该情况下司机的疏散设计符合要求。

4.3.2. 司机室后端门经客室侧门安全疏散仿真分析

司机从后端门经客室侧门疏散可以分为两种情况, 一是客室空载, 司机经过后端门后由客室侧门直接疏散; 二是客室内 AW2 和 AW3 工况下, 司机经过后端门处和乘客一起由客室侧门疏散。

利用 Pathfinder 软件对司机经过司机室后端门, 由客室侧门疏散进行仿真分析, 通过仿真可以得出: 车辆空载时, 司机从座椅处到安全出口外共耗时 3.8 s , 详见图 10(a); AW2 工况下, 司机从座椅处到安全出口外共耗时 24 s (292 人中第 176 人完成疏散), 详见图 10(b); AW3 工况下, 司机从座椅处到安全出口外共耗时 21.9 s (394 人中第 159 人完成疏散), 详见图 10(c)。



(a) 空载

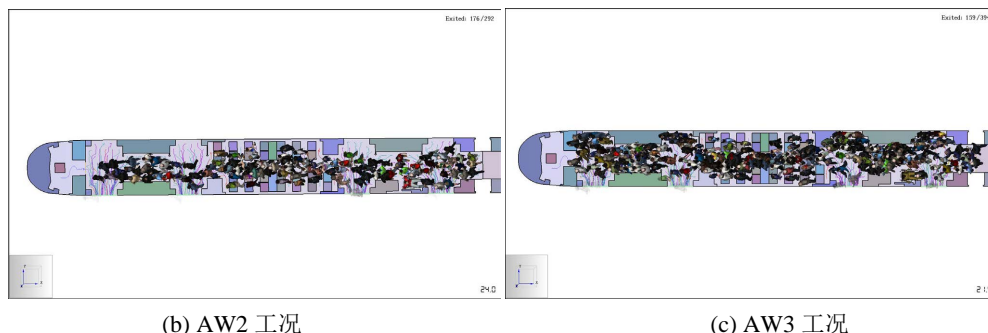


Figure 10. Evacuation route and time of the driver from the rear door of the cab to the side door of the passenger compartment

图 10. 司机从司机室后端门经客室侧门的疏散路径及时间

因此,空载时,司机经过通道门由客室车门疏散并离开列车的时间为: $t_{\text{move}} = 3.8 \text{ s}$, $3.8 \text{ s} < 115.2 \text{ s}$; AW2 工况下,司机经过通道门由客室车门疏散并离开列车的时间为: $t_{\text{move}} = 24 \text{ s}$, $24 \text{ s} < 115.2 \text{ s}$; AW3 工况下,司机经过通道门由客室车门疏散并离开列车的时间为: $t_{\text{move}} = 21.9 \text{ s}$, $21.9 \text{ s} < 115.2 \text{ s}$ 。因此,各种工况下,司机疏散设计符合要求。

4.4. 仿真结果

4.4.1. 乘客

车辆开启一侧车门时,定员 AW2 (6 人/m^2)工况下,1192 名乘客(包含 2 位司机)疏散时间为 64.8 s; 超员 AW3 (9 人/m^2)工况下,1604 名乘客(包含 2 位司机)疏散时间为 78.5 s。

$$t_{\text{alarm}} + (t_{\text{reg}} + t_{\text{resp}}) + t_{\text{move}} \leq 180 \text{ s};$$

AW2 工况下: $4.8 \text{ s} + 60 \text{ s} + 64.8 \text{ s} = 129.6 \text{ s}$, 且满足 $129.6 \text{ s} < 180 \text{ s}$;

AW3 工况下: $4.8 \text{ s} + 60 \text{ s} + 78.5 \text{ s} = 143.3 \text{ s}$, 且满足 $143.3 \text{ s} < 180 \text{ s}$ 。

AW2 工况和 AW3 工况下的乘客疏散时间均小于标准要求的 180 s, 则该列车乘客的疏散设计符合要求。

4.4.2. 轮椅使用者

当车辆客室一侧门开启时,1 号车空载时单独手动轮椅使用者的疏散时间为 4.8 s; 4 号车空载时单独手动轮椅使用者的疏散时间为 10 s。1 号车定员 AW2 (6 人/m^2)工况下,手动轮椅使用者的疏散时间为 41.8 s; 4 号车定员 AW2 (6 人/m^2)工况下,手动轮椅使用者的疏散时间为 38.9 s。1 号车定员 AW3 (6 人/m^2)工况下,手动轮椅使用者的疏散时间为 48.5 s; 4 号车定员 AW3 (9 人/m^2)工况下,手动轮椅使用者的疏散时间为 48.1 s。

$$t_{\text{alarm}} + (t_{\text{reg}} + t_{\text{resp}}) + t_{\text{move}} \leq 180 \text{ s};$$

1 号车单独轮椅: $4.8 \text{ s} + 60 \text{ s} + 4.8 \text{ s} = 69.6 \text{ s}$, 且满足 $69.6 \text{ s} < 180 \text{ s}$;

4 号车单独轮椅: $4.8 \text{ s} + 60 \text{ s} + 10 \text{ s} = 74.8 \text{ s}$, 且满足 $74.8 \text{ s} < 180 \text{ s}$;

1 号车 AW2 工况下: $4.8 \text{ s} + 60 \text{ s} + 41.8 \text{ s} = 106.6 \text{ s}$, 且满足 $106.6 \text{ s} < 180 \text{ s}$;

4 号车 AW2 工况下: $4.8 \text{ s} + 60 \text{ s} + 38.9 \text{ s} = 103.7 \text{ s}$, 且满足 $103.7 \text{ s} < 180 \text{ s}$;

1 号车 AW3 工况下: $4.8 \text{ s} + 60 \text{ s} + 48.5 \text{ s} = 113.3 \text{ s}$, 且满足 $113.3 \text{ s} < 180 \text{ s}$;

4 号车 AW3 工况下: $4.8 \text{ s} + 60 \text{ s} + 48.1 \text{ s} = 112.9 \text{ s}$, 且满足 $112.9 \text{ s} < 180 \text{ s}$ 。

上述时间均小于 180 s, 则该车辆轮椅使用者的疏散设计符合要求。

4.4.3. 司机

司机从司机室侧门直接疏散的时间为 2 s。空载时, 司机从司机室后端门经客室侧门安全疏散的时间为 3.8 s; 定员 AW2 (6 人/m²) 工况下, 司机从司机室后端门经客室侧门安全疏散的时间为 24 s; 超员 AW3 (9 人/m²) 工况下, 司机从司机室后端门经客室侧门安全疏散的时间为 21.9 s。

$$t_{\text{alarm}} + (t_{\text{reg}} + t_{\text{resp}}) + t_{\text{move}} \leq 180 \text{ s};$$

司机室侧门: $3.6 \text{ s} + 60 \text{ s} + 2 \text{ s} = 65.6 \text{ s}$, 满足 $65.6 \text{ s} < 180 \text{ s}$;

AW2 工况下司机室后端门→客室侧门: $4.8 \text{ s} + 60 \text{ s} + 24 \text{ s} = 88.8 \text{ s}$, 满足 $88.8 \text{ s} < 180 \text{ s}$;

AW3 工况下司机室后端门→客室侧门: $4.8 \text{ s} + 60 \text{ s} + 21.9 \text{ s} = 86.7 \text{ s}$, 满足 $86.7 \text{ s} < 180 \text{ s}$ 。

综上, 上述时间均小于 180 s, 该车辆乘客(包括轮椅使用者)及司机的疏散设计符合标准要求, 所以该列车设计方案具有较好的人员疏散质量。

5. 结语

本文通过地铁列车安全疏散仿真的技术特征、常用人员疏散软件和应用领域的分析, 提出了基于 Pathfinder 地铁司乘人员安全疏散仿真分析的流程。基于该流程对成都某地铁列车进行了动态司乘人员的安全疏散仿真分析与评估, 内容包括不同载客工况下的乘客、轮椅使用者和司机的安全疏散仿真分析。通过 Pathfinder 模拟仿真实验的输出结果, 得出地铁车内司乘人员的疏散总时间均小于标准规定的 180 s, 表明该地铁设计方案在紧急情况下, 能够满足司乘人员安全疏散的要求, 可为司乘人员的安全出行提供有力的保障, 适用于中国城市轨道交通智慧城轨的发展建设。

基金项目

西南交通大学新型交叉学科培育基金项目(YG2022006)。

参考文献

- [1] 何磊. 昆明市域(郊)轨道交通网络及建设时机分析[J]. 公路, 2020, 65(3): 184-191.
- [2] 中共中央. 国务院印发《交通强国建设纲要》[EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/2019-09/19/content_5431432.htm, 2019-09-19.
- [3] 中国城市轨道交通协会. 中国城市轨道交通协会关于印发《中国城市轨道交通智慧城轨发展纲要》的通知[EB/OL]. https://mp.weixin.qq.com/s/q-B1gE2_biuLfqVRPgp_Ag, 2020-03-12.
- [4] 原颖. 公交车发生火灾时如何逃生?[J]. 人民公交, 2016(5): 68-69.
- [5] 汪海. 地铁火灾人员疏散仿真分析及其应对措施[J]. 中国高新技术企业, 2012(4): 44-46.
- [6] 贾彩清, 刘朝, 向廷海, 曾丹苓. 火灾时人员疏散开始时间范围的研究[J]. 火灾科学, 2002(3): 176-179+122.
- [7] 王大鹏, 赵志铎, 杨帅, 等. 动车组列车司机安全疏散评估研究[J]. 交通技术, 2018, 7(4): 229-236.
- [8] Hurley, M.J., Gottuk, D.T., Hall, J.R., et al. (2016) SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 5th Edition, Society of Fire Protection Engineers, Gaithersburg. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2565-0>
- [9] 全国公共安全基础标准化技术委员会. GB/T 33668-2017. 地铁安全疏散规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [10] 董书衡. 地铁疏散人员行为特征及应急疏散仿真[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 郑州大学, 2017.
- [11] 张立茂, 吴贤国, 李博文, 等. 基于火灾模拟器和 Pathfinder 的地铁车站人员疏散[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(4): 203-209.
- [12] 刘辰, 向泽锐, 庞世俊, 支锦亦, 陈洪涛. 基于快速疏散仿真的地铁车内旅客界面布局评估研究[J]. 交通技术, 2022, 11(2): 74-89. <https://doi.org/10.12677/ojtt.2022.112007>
- [13] Pauls, J. (1999) A Personal Perspective on Research, Consulting and Codes/Standards Development in Fire-Related

Human Behaviour, 1969-1999, with an Emphasis on Space and Time Factors. *Fire and Materials*, **23**, 265-272.

[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1018\(199911/12\)23:6<265::AID-FAM698>3.0.CO;2-O](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1018(199911/12)23:6<265::AID-FAM698>3.0.CO;2-O)

- [14] 冯涛. 基于 Anylogic 的突发情况下地铁站行人疏散风险管理研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2021.
- [15] 王付宇, 王骏. 突发事件情景下地铁站人员应急疏散问题综述[J]. 计算机应用研究, 2018, 35(10): 2888-2893.
- [16] The European Commission (2014) Commission Regulation (EU) No. 1302/2014—Concerning a Technical Specification for Interoperability Relating to the “Rolling Stock-Locomotives and Passenger Rolling Stock” Subsystem of the Rail System in the European Union.
- [17] 李俊梅, 胡成, 李炎峰, 等. 不同类型疏散通道人员密度对行走速度的影响研究[J]. 建筑科学, 2014(8): 122-129.
- [18] Technical Committee Fire Safety Engineering (1997) DD 240: Part 1: 1997 Fire Safety Engineering in Buildings.
- [19] 郭零. 地铁站火灾乘客应急疏散行为及能力研究[D]: [硕士学位论文]. 湘潭: 湖南科技大学, 2012.
- [20] 中车青岛四方机车车辆股份有限公司. Q/SF 71-189-2021. 轨道车辆疏散设计[S]. 青岛: 中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 2021.
- [21] 国家铁路局. TB/T 3091-2019. 铁路机车车辆驾驶人员健康检查规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- [22] 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.
- [23] 全国人类工效学标准化技术委员会. 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.