

基于CART决策树的乘客疏散行为决策影响因素研究

齐若星

西安建筑科技大学公共管理学院, 陕西 西安

收稿日期: 2024年6月18日; 录用日期: 2024年7月11日; 发布日期: 2024年7月19日

摘要

目的: 为保障乘客安全和地铁安全运营, 确保地铁突发火灾事故下乘客的有序疏散, 对乘客的疏散行为影响因素进行分析。方法: 首先, 依托行为决策理论与识别乘客疏散行为影响因素; 其次, 利用机器学习CART决策树对不同类别乘客的异质化疏散行为决策进行分类, 并对影响因素的相对重要性进行排序。随后, 根据最显著影响因素拥挤疏散路口的滞留等待时长, 构建Anylogic仿真模型, 模拟地铁突发火灾事故下的乘客疏散行为。结果及结论: 模拟结果验证了优化策略的有效性, 表明在站厅拥堵处引入疏散引导员, 能够平衡各出口疏散乘客, 显著缩短疏散时长, 抑制乘客负面情绪产生, 有效缩短疏散时间。

关键词

地铁突发火灾, 疏散行为决策, CART决策树

Research on Influencing Factors of Passenger Evacuation Behavior Decision Making Based on CART Decision Tree

Ruoxing Qi

School of Public Administration, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an Shaanxi

Received: Jun. 18th, 2024; accepted: Jul. 11th, 2024; published: Jul. 19th, 2024

Abstract

Purpose: To protect passenger safety and the safe operation of the subway, and to ensure the orderly evacuation of passengers under the subway fire accident, we analyze the factors influencing

the evacuation behavior of passengers. **Methods:** first, relying on behavioral decision-making theory to identify passengers' evacuation behavioral influencing factors; second, using machine learning CART decision tree to classify different categories of passengers' heterogeneous evacuation behavioral decisions and rank the relative importance of influencing factors. Subsequently, an Anylogic simulation model is constructed to simulate the passenger evacuation behavior under a subway fire accident based on the length of detention waiting at crowded evacuation intersections, which is the most significant influencing factor. **Results and Conclusion:** The simulation results verify the effectiveness of the optimization strategy and show that the introduction of evacuation guides at congested station halls can balance the evacuation of passengers at all exits, significantly shorten the evacuation time, inhibit the generation of negative emotions among passengers, and effectively shorten the evacuation time.

Keywords

Subway Fire Outbreak, Evacuation Behavior Decision, CART Decision Tree

Copyright © 2024 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

伴随着城市中国人口聚集特征日渐凸显[1], 地铁承载人流量日益增加, 疏散拥挤导致的人群不适应行为, 易引发恐慌情绪、现场秩序失控等情况, 亟需广泛关注。

地铁突发火灾事件属于突然发生的社会突发非常规事件, 一旦发生造成巨大负面影响。仅 2023 年中国就发生多起地铁突发事件。随着拥挤程度和等待时长的增加, 乘客的情绪会受到周围环境以及其他乘客情绪的影响而动态变化, 产生无序行为, 造成群体性恐慌[2]。疏散耗时增加、乘客心理失衡, 容易引发一系列不稳定因素的连锁反应。

目前研究集中于地铁突发事件下的外部环境脆弱性, 重点关注火灾[3]、隧道通风[4]等突发事件下的乘客疏散行为。并且从乘客这一视角, 主要研究了个体由于年龄、性别等个体属性特征[5], 以及信息搜索行为[6]等因素对处于危机状态时的个体决策的影响, 较少从乘客主观视角分析多因素对疏散行为决策的影响。因此, 本研究中, 以异质性的乘客为研究对象, 综合考虑乘客主观认知、情绪心理、环境感知特征的差异对地铁突发事件场景下疏散行为的影响。通过模拟考虑乘客差异的地铁突发火灾事件疏散行为, 以期提出能够显著缩短疏散时间的优化策略。这对于平应对突发事件造成的乘客疏散有序度差等问题具有较为重要的意义。

2. 乘客疏散行为影响因素分析

从行为科学的角度, 地铁突发火灾下的应急行为决策, 具有决策时间非常规和资源高度紧缺的特性[7]。乘客疏散行为决策受到主观认知、情绪心理、环境感知特征等多因素的综合影响。

1) 主观认知特征: 地铁疏散中有限理性的乘客疏散行为因年龄、性别、生活经历等因素影响而不同。

2) 情绪心理特征: 情绪与行为交互相应, 乘客在外界不确定性事件下的行为与信息处理能力、情绪感染能力[8], 以及个人异质性心理[9]相关。

3) 环境感知特征: 乘客疏散行为决策与光线、拥挤程度、疏散设施配备[10]等外在变量相关。

3. 研究设计

3.1. 问题描述

本研究，首先探究乘客疏散行为特征以及行为决策的多因素作用。

其次，利用 CART 决策树，筛选相对重要性较高的影响因素。

最后，运用 Anylogic 软件，再现站内突发火灾事故下乘客的疏散过程。从缩短疏散时长的角度，提出优化策略。

3.2. 数据获取

通过实地调研，累计获取有效问卷 344 份，问卷的克朗巴哈系数为 0.843，KMO 值为 0.901，均通过检验。变量的编码和赋值见表 1：

Table 1. Coding table of factors influencing passenger evacuation behavior in subway fire emergencies

表 1. 地铁火灾突发事件乘客疏散行为影响因素编码表

影响因素	编码	影响因素	编码
年龄	X0	出口设置合理度	X12
性别	X1	疏散通道合理度	X13
职业	X3	疏散向导重要度	X14
身体状况	X4	疏散信息干扰度	X15
搭乘频率	X5	危机依赖心理	X16
预案了解度	X6	搭乘方式	X17
环境熟悉度	X7	路径拥堵选择	X19
安全标志醒目度	X8	结伴同行	X20
安全员配备程度	X9	互助行为	X21
智能屏信息宣传	X10	拥挤竞争行为	X22
标识位置醒目度	X11	危机心理状态	Y

4. 基于 CART 的影响因素模型构建

4.1. 分类决策树 CART 的基本原理

决策树通过层层递归，旨在将一组无规则和顺序的数据，按照一定的分类规则进行层层划分，最终构建直观且清晰的分类结果。并进行剪枝操作，剔除冗余避免生成决策树模型的过拟合现象[11]。

本研究，采用 CART 决策树，构建乘客疏散行为影响因素模型。以基尼系数(Gini index, GI)作为节点划分的判断依据，并进行后剪枝策略。CART 算法构建流程为：

1) 分类问题中假设有 K 个类，样本点属于第 K 类的概率为 p_k ，则概率分布的基尼系数为：

$$Gini(p) = \sum_{k=1}^k p_k (1 - p_k) = 1 - \sum_{k=1}^k p_k^2 \quad (1)$$

2) 如果样本数据集 D 根据特征 A 是否取某一可能值 a 被分割为两部分，则在特征 A 的条件下，集合 D 的基尼指数定义为：

$$Gini(D,A)=\frac{|D_1|}{|D|}Gini(D_1)+\frac{|D_2|}{|D|}Gini(D_2) \tag{2}$$

基尼指数 $Gini(D)$ 表示集合 D 的不确定性，基尼指数 $Gini(D,A)$ 表示经 $A = a$ 分割后集合 D 的不确定性。基尼系数越大，样本集合不确定性也越大。

4.2. 模型结果

最终生成的分类决策树模型共四层，模型精度为 80.79%，分类结果见图 1。

说明滞留等待时间对乘客地铁疏散行为决策的相对重要性程度最大；其次分别为乘客感知地铁疏散向导员的重要程度，疏散标识熟悉度、疏散环境熟悉度、站内通行方式等。密集客流在短时间内疏散至安全域的过程中，外界环境动态变化影响乘客感知，诱发紧急状态下的心理恐惧意识。而乘客借助有效的疏散标识和站点正确的引导，选择距离安全出口最近的逃生路线，将造成距离出口最近路线的大量拥堵。

基于模型结果，本研究提出合理调配适当梳理的疏散引导员数量，以解决疏散拥堵程度较高出口，平抑乘客由于疏散滞留时间过长而产生的负面情绪，缩短拥堵时长。

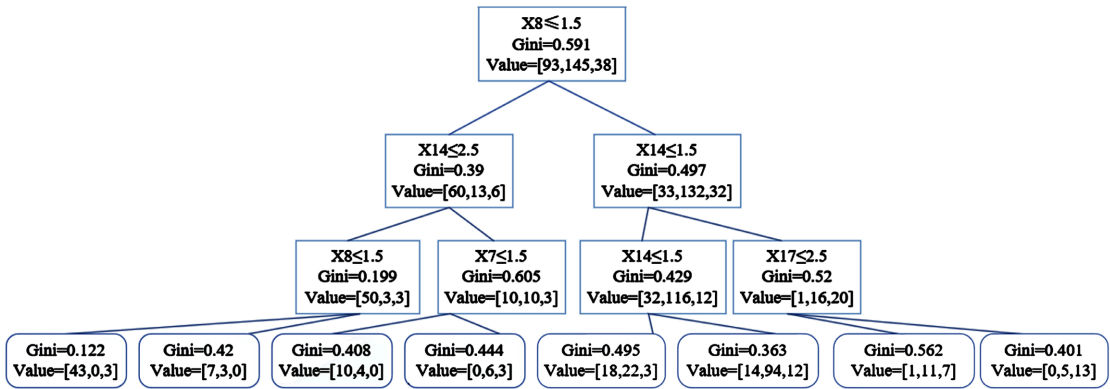


Figure 1. Decision tree model of passenger evacuation behavior in subway emergencies
图 1. 地铁突发事件乘客疏散行为决策树模型

5. 疏散仿真参数设定及模型构建

5.1. 疏散场景概况

本研究以西安市科技路站作为仿真场景。站台结构为 T 字形站厅三层岛式站台，地下一层为站厅层，地下二层为三号线的站台层，地下三层为六号线的站台层。

5.2. 模型假设

在地铁突发火灾事件下，站点乘客不进不出。正常运行的其他轨道班次，均不在该站点停靠；疏散总人数仅为突发事件瞬时状态下，站厅内候车及在该点停靠时乘车的全部乘客，乘客疏散路径遵循就近原则，迅速逃离。疏散中，出站闸机口全部为开放状态，故不考虑乘客在闸机口处的等待时长。此外，为避免次生事故发生关闭所有直梯，乘客仅选择自动扶梯和楼梯两种疏散策略。

5.3. 参数设定

- 1) 人员构成：根据西安市城市轨道交通数据公开获取，选择 2023 年 11 月 3 日周五晚高峰客流量进

行模拟。

本研究假设站点瞬时总客流能达到 2000 人，通过模拟乘客在高峰时段下的乘客疏散，以确保该站点在客流量最大阈值情境下安全有序疏散。

2) 乘客特征：依据 GB10000-88 中国成年人人体尺寸标准，设定乘客参数见表 2：

Table 2. Passenger characterization parameters

表 2. 乘客特征参数表

特征	参数
舒适速度(m/s)	Uniform= (1.0~1.2)
初始速度(m/s)	Uniform= (0.3~0.7)
直径(m)	Uniform= (0.4~0.5)

3) 布局设施：通过实地观测，科技路站点的进出站口为 5 个，楼扶梯数量见表 3：

Table 3. Number of escalator statistics for metro buildings

表 3. 地铁楼扶梯统计数量表

位置	楼梯/部	扶梯/部
站厅至 3 号线	2	2
站厅至 6 号线	0	2
3 号线至 6 号线	2	0

6. 结果分析与优化策略

6.1. 仿真结果分析

本研究根据决策树所得的影响因素重要度排序，探究引入疏散引导员并按照站点人员配备动态调整人员数量，以优化突发火灾事件下的乘客在疏散拥堵路口的滞留等待时长，改善乘客等待负面情绪，平衡各出口疏散人数。结果见表 4：

Table 4. Evacuation policy optimization data table

表 4. 疏散策优化数据表

	优化前	优化后
右侧离开/人	535	479
左侧离开/人	100	411
A 口 离开人	952	439
C 口 离开/人	216	538
H 口 离开/人	328	235
整体疏散时长/分钟	6'44"	5'40"

根据仿真结果未引入疏散员时，乘客整体疏散速度为 6 分 44 秒，乘客集中于从右侧 GF 出口和 A 口疏散。导致了疏散时间增加，人群的高度密集。当从各个楼梯出口处增设疏散引导员时，整体疏散耗时

显著缩短 1 分钟，优化后达标《地铁安全疏散规范》中关于疏散时间的要求；并且疏散引导员平衡各出口疏散客流，A 出口经优化后由 952 人的高度密集降低为 439 人，有效缓解疏散压力，缩短乘客疏散滞留时间，仿真结果见图 2、图 3。

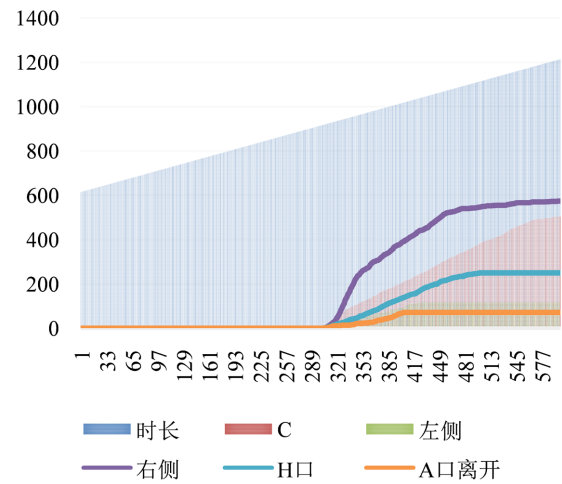


Figure 2. No guide set up
图 2. 未设置引导员

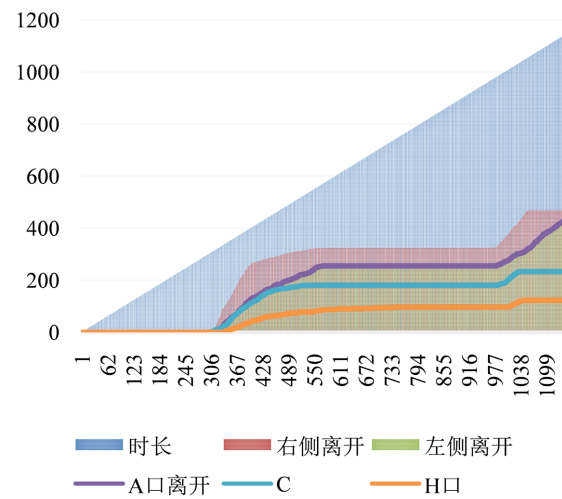


Figure 3. Introduction of guide evacuation
图 3. 引入引导员疏散

6.2. 措施建议

为有效应对地铁日程通勤的密集客流，保障有序运营的地铁系统，实践中地铁疏散调度员，通常分布在站台各个车厢进出口处，通过喇叭等设备，设置人为因素进行客流疏散。因此，当地铁站点本身存在无法避免的大客流时，为有效缩短各个固定出入口的疏散时间。提出两点优化建议。第一：站台应设置并动态调配疏散引导人员，引导乘客均匀使用各换乘站点中各楼层的楼梯扶梯疏散，避免乘客大规模聚集在个别楼扶梯区域，出现拥挤和长时间等待。第二：设计动态简便的疏散标识，提高乘客的空间认知，避免由于紧急事态下的慌乱无措，无法对于疏散标志和疏散路线指引具有更为清晰的认知，增加非理智疏散行为的发生概率。

7. 结论与展望

本研究基于行为决策理论对差异化乘客的地铁突发事件下疏散行为决策的影响因素进行识别, 构建了 22 个因素的影响因素体系。随后, 运用决策树确定影响乘客疏散行为决策的主要因素, 并通过 Anylogic 进行乘客疏散仿真, 主要结论如下:

1) 选择 CART 算法构建决策树, 结果表明乘客选择的站内通行方式为决策树根节点即最显著影响因素。

2) Anylogic 仿真模型结果表明, 采用在站厅内疏散路线中最拥堵出口位置增设疏散引导人员, 可有效缩短时长, 平衡各疏散出口乘客人数。

后续研究可根据 CART 决策树的分类结果, 设置不同间距的疏散人员, 用以探究站厅突发事件下, 引导员位置对各类比人群疏散负面情绪的抑制作用, 深入研究决策主体乘客的地铁突发火灾事故疏散行为决策规则。

参考文献

- [1] Hu, Q., Li, R., Wu, H. and Liu, Z. (2022) Construction of a Refined Population Analysis Unit Based on Urban Forms and Population Aggregation Patterns. *International Journal of Digital Earth*, **15**, 79-107. <https://doi.org/10.1080/17538947.2021.2013963>
- [2] Cornes, F.E., Frank, G.A. and Dorso, C.O. (2019) Fear Propagation and the Evacuation Dynamics. *Simulation Modelling Practice and Theory*, **95**, 112-133. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2019.04.012>
- [3] 张彤彤, 曹笛. 火灾环境下超高层建筑标准层人员疏散模拟与空间优化策略[J]. 建筑学报, 2022(2): 16-21.
- [4] Wen, Y., Leng, J., Shen, X., Han, G., Sun, L. and Yu, F. (2020) Environmental and Health Effects of Ventilation in Subway Stations: A Literature Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **17**, Article 1084. <https://doi.org/10.3390/ijerph17031084>
- [5] 王莉. 基于 PATHFINDER 的公共场所人员疏散行为规律及仿真模拟[J]. 西安科技大学学报, 2017, 37(3): 358-364.
- [6] 李俊岭, 刘庆顺, 闫建超. 应急动态决策的行为过程与模式研究[J]. 河北学刊, 2008, 28(5): 146-150.
- [7] Williamson, K.A. and Thulin, E. (2022) Leveraging Emotion-Behavior Pathways to Support Environmental Behavior Change. *Ecology and Society*, **27**, Article 27. <https://doi.org/10.5751/es-13363-270327>
- [8] Mao, Y., Fan, Z., Zhao, J., Zhang, Q. and He, W. (2019) An Emotional Contagion Based Simulation for Emergency Evacuation Peer Behavior Decision. *Simulation Modelling Practice and Theory*, **96**, Article ID: 101936. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2019.101936>
- [9] 王立晓, 于江波, 孙小慧. 考虑心理异质性的地铁应急疏散行为决策建模[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(10): 119-126.
- [10] 那艳玲, 李伟, 尹昀朗, 等. 动态照明标识对地铁乘客视觉感知度影响研究[J]. 铁道工程学报, 2023, 40(8): 103-108.
- [11] Sharma, H. and Kumar, S. (2016) A Survey on Decision Tree Algorithms of Classification in Data Mining. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, **5**, 2094-2097.