

地铁火灾风险评价指标体系研究

聂传婷¹ 池秀文² 谢 宇²

(1. 武汉理工大学安全科学与应急管理学院, 430070, 武汉;

2. 武汉理工大学资源与环境工程学院, 430070, 武汉//第一作者, 硕士研究生)

摘 要 目的: 为建立更加科学、合理的地铁火灾风险评价指标体系, 应进一步提高地铁车站火灾风险评价的科学性, 以提升地铁安全管理的水平。方法: 收集了 1969—2021 年国内外地铁线路发生的 78 起火灾案例, 基于案例分析法从时间和空间两个维度总结地铁火灾事故的发生规律。考虑火灾事故致因的相互关联性, 对火灾要因进行整理分析, 绘制出地铁火灾事故致因风险因素鱼骨图。从主、客观两个维度统计和提取事故致因关键词, 确定了地铁火灾事故的致因, 建立了包含 8 项二级指标、21 项三级指标的地铁火灾风险评价指标体系。基于事故致因统计频率, 进一步量化了地铁火灾风险评价指标体系中各指标的权重。应用本指标体系与鱼骨图, 对 1995 年阿塞拜疆首都巴库市某地铁车站火灾事故进行了分析。结果及结论: 安全管理、电气系统和乘客行为在地铁火灾风险评价指标体系中权重值排名前三位, 这 3 项指标对地铁火灾事故发生率的影响高达 59.3%。采用鱼骨图分析地铁火灾事件, 有助于清晰、直观地找出火灾事故的根源和致因链。应有针对性地加强地铁火灾高频影响因素的管控力度, 以确保地铁线路的安全运营。

关键词 地铁; 火灾事故; 风险评价指标体系; 事故致因; 案例分析法

中图分类号 U231.96

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.11.027

Research on Subway Fire Risk Evaluation Index System

NIE Chuanting, CHI Xiuwen, XIE Yu

Abstract Objective: In order to establish a more scientific and reasonable subway fire risk assessment index system, the scientific nature of subway station fire risk assessment should be further improved to enhance the level of subway traffic management. Method: 78 fire cases in subways at home and abroad from 1969 to 2021 are collected, and the rules of subway fire accident occurrence s are summarized from time and space dimensions based on the case analysis method. Considering the correlation between the causes of fire accidents, the fire causes are sorted out and analyzed, and the fishbone diagram of the risk factors caused by subway fire accidents is drawn. The key

words of accident causes are counted and extracted from the subjective and objective dimensions to determine the causes of subway fire accidents, and a subway fire risk evaluation index system containing 8 secondary indicators and 21 tertiary indicators is established. Based on the statistical frequency of accident causes, the weight of each index in the subway fire risk evaluation index system is further quantified. Using this index system and fishbone diagram, the 1995 fire accident of a metro station in Baku, the capital of Azerbaijan, is analyzed. Result & Conclusion: Safety management, electrical system and passenger behavior ranked among the top three weights in the subway fire risk evaluation index system, and the impact of these three indicators on the incidence of subway fire accidents is as high as 59.3%. Using fishbone diagrams to analyze subway fire incidents helps to clearly and intuitively identify the root cause and causal chain of fire accidents. Consequently, the control of high-frequency factors of subway fires should be strengthened in a targeted manner to ensure the safe operation of subway lines.

Key words subway; fire accident; risk evaluation index system; accident cause; case study method

First-author's address School of Safety Science and Emergency Management, Wuhan University of Technology, 430070, Wuhan, China

地铁车站空间封闭狭小、客流密集, 一旦发生火灾, 若消防力量无法及时介入, 将给站内人群疏散带来巨大压力。为此, 全面考虑地铁火灾事故的成因, 探寻其发展规律, 对提高地铁车站的管理效率意义重大。

学者们对地铁火灾事故做了大量调查分析工作。文献[1]统计了国内外典型的地铁火灾事故, 对火灾原因和发展规律进行了分析梳理, 找出地铁车站常见安全隐患并提出了科学的预防建议。在地铁火灾风险分析方面, 研究方法综合化的趋势日益明显。文献[2]从多方面分析了地铁火灾的成因

和危害,以西安地铁为例,用模糊综合评判法计算结果和 Pathfinder 软件模拟结果相比较的方法,实现了地铁车站火灾状况预测和风险评估。文献[3]将评价指标体系按照因果关系转化为贝叶斯网络结构。文献[4]基于可拓理论,构建了密集人群下地铁火灾的多因素评价体系,基于 Matlab 软件进行风险评价,并对其中的危险因素给予了详细建议。

综上,业界对地铁火灾安全评价指标的构建已作了大量研究,但这些评价指标均未充分利用以往的历史案例信息,缺乏经验和知识的有效积累。为弥补这方面的不足,本文通过文献收集、互联网检索和数据库查询等途径,以 1969 年 11 月—2021 年 1 月的 78 起地铁火灾案例为研究对象,首先深入分析了地铁火灾案例的事故类型、风险因素、时间及空间分布规律,然后用鱼骨图展示地铁火灾的致因风险因素,建立一套地铁火灾风险评价指标体系。最后基于概率分析法量化评价该体系的指标权重,

使结论更具客观性和实用性。

1 火灾事故案例调查及分析

案例分析法将理论和实践相结合,通过对相关行业内的典型事件和案例进行深入分析及总结,能启发对问题的研究与思考,进而有效挖掘案例价值,使结论更具针对性、普遍性^[5]。本文采用国内外文献调研、历史新闻事故检索、互联网数据库查阅这 3 种方法获取了地铁火灾事故的基础数据,运用案例分析法分析总结出地铁车站火灾事故的致因及发展规律。

1.1 地铁车站火灾案例统计

本文收集了 1969—2021 年国内外地铁线路发生的 78 起火灾案例,并选取了其中具有代表性的 10 起案例,这 10 起火灾事件的发生时间、地点、起火原因、起火位置及火灾后果等基础信息如表 1 所示。

表 1 10 起地铁火灾事故案例的基础信息
Tab. 1 Basic information on 10 subway fire accident cases

序号	发生时间	城市名	事故致因	事故后果
1	1974 年 1 月	蒙特利尔	列车废旧轮胎引起电线短路	9 列列车及 300 m 长度的电缆被烧毁
2	1987 年 11 月	伦敦	自动扶梯上丢弃未熄灭的火柴	32 人死亡、100 人受伤,2 部电梯受损
3	1991 年 8 月	纽约	列车脱轨	5 人死亡、155 人受伤,10 节车厢受损
4	1995 年 10 月	巴库	列车电路故障	558 人死亡、269 人受伤
5	2000 年 11 月	萨尔茨堡	列车上的空调和电暖器过热	155 人死亡、18 人受伤
6	2003 年 2 月	大邱	列车内人为纵火	198 人死亡、146 人受伤、298 人失踪
7	2013 年 6 月	莫斯科	电线故障	52 人受伤,约 4 500 名乘客紧急疏散
8	2014 年 7 月	釜山	集电装置过热引发空调着火	5 人受伤、400 人疏散
9	2019 年 11 月	伦敦	列车内出现烟雾	多列列车延误,乘客疏散
10	2021 年 1 月	墨西哥城	变压器故障	1 人死亡、30 多人受伤

1.2 地铁火灾事故案例分析

1.2.1 地铁火灾事故的空间分布

在 78 起火灾事故中,除了 3 起事故起火位置不详外,其余 75 起均发生在地铁车站的站台及站厅、出入口和扶梯及邻近建筑等位置,以及区间隧道、车站或区间内的列车、车站附近的变电所等场所。其起火位置占比统计结果如图 1 所示。

由图 1 可知:起火位置在列车上的事件有 42 起,占比高达 54%。其原因主要包括:某些较旧地铁列车的内部装饰和座椅设备未采用防火材料;乘客非法携带易燃、易爆物品进入车厢;车厢内设备老化引发电线故障,导致列车客室起火。

隧道、站台及站厅是排名并列第二的火灾高发位置,占比均为 13%。这是由于在隧道内开展消防救援工作的难度非常大,因此对区间隧道火灾应急

预案的制定提出了更高要求。车站因电气设施众多,且存在危险品被带入的可能性,因此也是火灾的高发区域。此外,地铁车站部分“死角”区域的火灾防范也不容忽视。

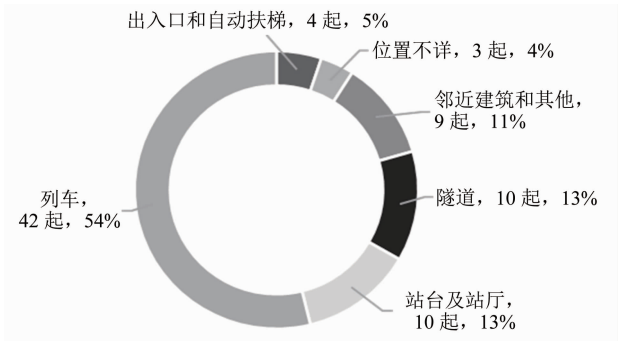


图 1 地铁火灾事故案例着火点的空间位置占比统计
Fig. 1 Statistics on the proportion of spatial location of fire points in subway fire accident cases

1.2.2 地铁火灾事故的时间分布

参照我国 2015 年印发的《国家城市轨道交通运营突发事件应急预案》，对地铁车站火灾事故进行分级，以直观、清晰地判断火灾事故后果的严重性，如表 2 所示。

表 2 中，地铁特别重大火灾（Ⅲ级）和重大火灾（Ⅳ级）事故往往会引发悲剧。例如，2003 年 2 月

18 日韩国大邱市的地铁火灾事故导致 198 人死亡、146 人受伤、298 人失踪。该线路单节车厢的造价以人民币 610 万元计算，1 列 6 节编组列车烧毁损失约合人民币 3 660 万元。此外，该火灾还造成了受害者身心不适，引发了社会舆论和不良影响。因此，有必要对Ⅲ级和Ⅳ级的 20 例地铁火灾事故进行深入探讨，得到进一步的分析结果如图 2 所示。

表 2 地铁火灾事故等级
Tab. 2 Subway fire accident levels

级别	死亡人数/人	受伤人数/人	直接经济损失/万元	连续中断行车时长/h
I 级：地铁特别重大火灾	[30,+∞)	[100,+∞)	[10 000,+∞)	
Ⅱ 级：地铁重大火灾	[10,30)	[50,100)	[5 000,10 000)	[24,+∞)
Ⅲ 级：地铁较大火灾	[3,10)	[10,50)	[1 000,5 000)	[6,24)
Ⅳ 级：地铁一般火灾	[0,3)	[0,10)	[50,1 000)	[2, 6)

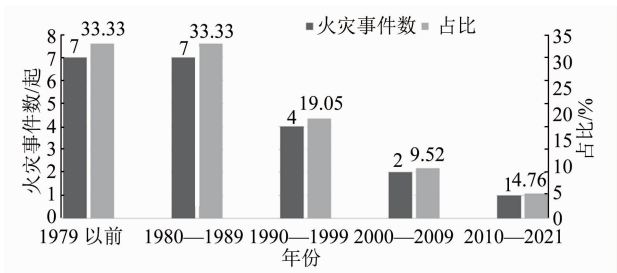


图 2 地铁重大火灾和地铁特别重大火灾事故的发生数及占比
Fig. 2 The number and proportion of major fires and particularly serious fire accidents in the subway

在早期建成的列车中，由于设备老化和安全投入（人力、物力、财力等）不足^[6]，因设备过热和其他故障引发的火灾事故时有发生，因此，在Ⅲ级和Ⅳ级

的 20 例地铁火灾事故中，2000 年以前发生的事故占比高达 85.7%。2000 年之后，随着车辆及设施设备的工艺设计水平大幅提升^[7]，Ⅲ级和Ⅳ级地铁火灾事故的发生频率明显降低。

2 事故致因风险因素鱼骨图

分析事故的发生原因，将各种原因进行整理归纳后用简单的文字和箭头表示出来，即可得到风险因素鱼骨图。本文以历史案例为依据，结合我国地铁现行的相关安全标准，将事故致因归纳为 8 个方面，在此基础上找出存在地铁火灾风险的 21 个关键因素，绘制出地铁火灾事故致因风险因素鱼骨图，如图 3 所示。

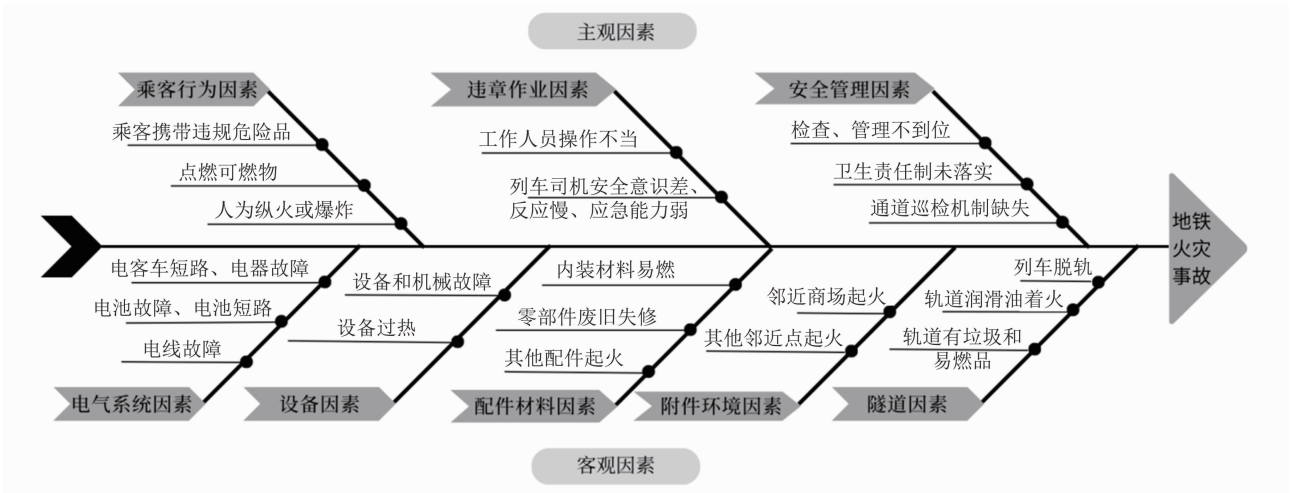


图 3 地铁火灾事故致因风险因素鱼骨图
Fig. 3 Fishbone diagram of risk factors caused by subway fire accidents

3 地铁火灾风险评价指标体系及指标权重

3.1 地铁火灾风险评价指标体系的建立

为了全面客观地评价可能引发地铁火灾风险的指标,必须确定一套科学、合理的评价指标体系。本文通过对 78 起案例致因关键词的提取和频次统计,结合图 3 的鱼骨图,构建了地铁火灾风险评价指

标体系,如图 4 所示。该体系包含了 4 个层级,自上而下依次为:总目标层(地铁火灾风险)、一级指标层(含 2 项指标)、二级指标层(含 8 项指标)和三级指标层(含 21 项指标)。一级评价层 2 项指标分别表示为 P 、 Q ;二级指标层 8 项指标分别为 A — H ;三级指标 21 项指标依次为 A_1 — A_3 、 B_1 — B_2 、 C_1 — C_3 、 D_1 — D_3 、 E_1 — E_2 、 F_1 — F_3 、 G_1 — G_2 、 H_1 — H_3 。

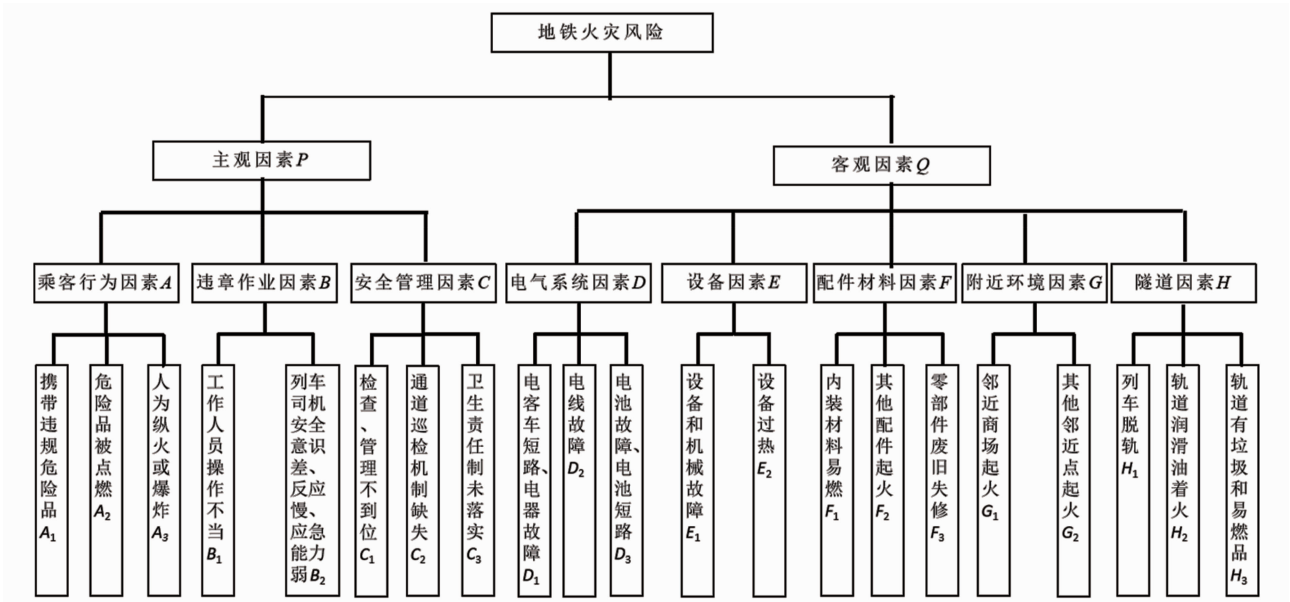


图 4 地铁火灾风险评价指标体系

Fig.4 Subway fire risk evaluation index system

3.2 地铁火灾风险评价指标体系各指标权重值的确定

权重系数代表影响因素的频率和重要程度。设 i ($i=1,2,3$) 代表评价指标的级别,如 $i=1$ 为一级指标; j 代表各级别对应的评价指标; $f_{i,j}$ 为 i 级的评价指标 j 出现的频次。

设 n 为各项三级指标的频次, $\omega_{i,j}$ 为地铁火灾事故的权重系数,具体计算式如下:

$$\omega_{i,j}=f_{i,j}/n \tag{1}$$

例如,三级指标 A_1 的出现频次为 3 次,21 项三级评价指标的累计频次 $n=108$,由式(1)可得 A_1 的权重系数为 0.028,其他三级指标权重值的求解类同。各二级评价指标的权重由对应的三级指标权重求和得到,如 A_1 的权重系数为 0.028, A_2 的权重系数为 0.037, A_3 的权重系数为 0.102,则二级指标 A 的权重系数 0.167,其余二级指标权重值的求解类同。同理,由二级指标相加可求出相应的一级评价指标的权重值。最终得到地铁火灾风险评价指标体系中各指标的权重值,如表 3 所示。

由表 3 可知:地铁火灾风险评价指标体系的二级指标中,权重值最高的指标为安全管理 C ,其次是电气系统 D 及乘客行为 A ,这 3 项二级指标的合计权重值高达 59.3%。其余二级指标的风险影响较低。

4 实例应用

4.1 阿塞拜疆巴库某地铁车站火灾概况

1995 年 10 月 28 号晚,阿塞拜疆首都巴库市某地铁车站因电客车电路故障引发车厢内部着火。事发后,经验不足的司机将列车停在隧道内,车厢燃烧产生了大量的烟雾和有毒气体,导致 558 人死亡、269 人受伤。

4.2 案例原因分析

从主观、客观两个角度分析该火灾事故的原因,绘制得到该事故致因风险因素鱼骨图,如图 5 所示。

由图 5 可知,本次事件应在以下 2 个方面提高地铁火灾风险防范水平:

表 3 地铁火灾风险评价指标体系各指标的权重值

Tab. 3 Weight value of each index for subway fire risk evaluation index system					
一级指标		二级指标		三级指标	
名称	权重值	名称	权重值	名称	$f_{i,j}$ /次 权重值
主观因素 P	0.472	乘客行为因素 A	0.167	携带违规危险品 A_1	3 0.028
				危险品被点燃 A_2	4 0.037
				人为纵火或爆炸 A_3	11 0.102
		违章作业因素 B	0.074	工作人员操作不当 B_1	4 0.037
				列车司机安全意识差、反应慢、应急能力弱 B_2	4 0.037
		安全管理因素 C	0.231	检查、管理不到位 C_1	17 0.157
				通道巡检机制缺失 C_2	5 0.046
				卫生责任制未落实 C_3	3 0.028
		电气系统因素 D	0.195	电客车短路、电器故障 D_1	6 0.056
				电线故障 D_2	14 0.130
电池故障、电池短路 D_3	1 0.009				
客观因素 Q	0.528	设备因素 E	0.102	设备和机械故障 E_1	6 0.056
				设备过热 E_2	5 0.046
		配件材料因素 F	0.093	内装材料易燃 F_1	2 0.019
				其他配件起火 F_2	5 0.046
				零部件废旧失修 F_3	3 0.028
		周边环境因素 G	0.055	邻近商场起火 G_1	4 0.037
				其他邻近点起火 G_2	2 0.018
		隧道因素 H	0.083	列车脱轨 H_1	2 0.018
				轨道润滑油着火 H_2	2 0.019
				轨道有垃圾和易燃品 H_3	5 0.046

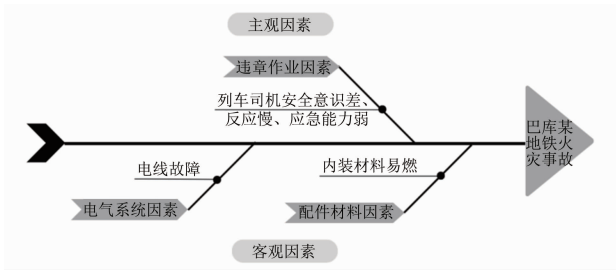


图 5 1995 年巴库某地铁站火灾事故致因风险鱼骨图
Fig. 5 Fishbone diagram of the risk caused by a subway station fire accident in Baku in 1995

- 1) 应制定完善的应急预案,提高火灾应急处置能力。开展消防应急演练是应对地铁火灾事件的有效手段,不仅能提高职工的应急抢险技能,还能加强车站全体人员的安全意识和自救能力,保障生命安全。
- 2) 应健全安全责任制,强化地铁安全管理。做好车站各区域人、物和列车内外各部位安全隐患排查工作,明确工作标准,落实工作责任,建立安全管控的分级监督机制,努力营造一个安全、稳定、可控的良好乘车环境。

5 结语

本文采用案例分析法,从时间和空间两个角

度,深入分析了地铁火灾事故的原因。相比于地铁车站的站台、站厅和轨道区间等区域,在列车上发生火灾的概率最大,其事故损失也最大。对地铁火灾风险评价指标体系的权重进行量化后,发现安全管理、电气系统和乘客行为在二级指标中的权重值排名前三。应重点关注这三部分指标,依靠更先进、更完善的技术提升火灾风险防范水平。此外,还应健全地铁的安全管理机制,加强站内人、物和环境状况监管体系的建设。本文的创新点在于用事故致因统计频率来量化地铁火灾风险评价指标体系中各指标的权重,这能避免采用模糊综合评价等常用方法时存在信息丢失和不全面的可能性,克服了基于专家打分法所得的指标权重不够客观的问题。

参考文献

[1] 王敏,代宝乾,张岚,等. 国内外典型地铁火灾事故案例分析及预防措施[J]. 安全, 2015, 36(6): 34.
WANG Min, DAI Baoqian, ZHANG Lan, et al. Case analysis and preventive measures of typical subway fire accidents at home and abroad[J]. Safety, 2015, 36(6): 34.
[2] 张源勇. 西安地铁火灾风险性评估方法研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011.

(下转第 156 页)

2) 后建隧道对先建隧道水平位移的影响主要表现为后建隧道开挖后,先建隧道在左右拱腰处朝后建隧道方向有一定的水平收敛。

3) 与方案一相比,方案二更优,更有利于改善隧道结构承载性能,控制塑性区范围,降低支护结构失稳破坏风险。

参考文献

- [1] 王猛,石梦晓,许满吉,等. 四孔小间距重叠暗挖隧道施工顺序研究[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(3): 139.
WANG Meng, SHI Mengxiao, XU Manji, et al. Study on construction sequence of four overlapped bored tunnels with small-spacing [J]. Modern Tunnelling Technology, 2019, 56(3): 139.
 - [2] 杜德持,王渭明,刘鹏,等. 小净距隧道群稳定性判定因素及施工顺序优化研究[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(4): 109.
DU Dechi, WANG Weiming, LIU Peng, et al. Determinant factors of stability and optimization of construction sequence in tunnel group with small clear distance[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35(4): 109.
 - [3] 谢耀耀,牛俊涛,杨国伟,等. 重叠隧道盾构施工对先建隧道影响模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(10): 2061.
XIE Xiongyao, NIU Juntao, YANG Guowei, et al. Model test for effects of construction of shield tunnelling in overlapping tunnels on existing tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(10): 2061.
 - [4] 丁祖德,汪伟伟,文锦诚,等. 考虑开挖应力路径的浅埋偏压隧道施工顺序探讨[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2020, 45(6): 140.
DING Zude, WANG Weiwei, WEN Jincheng, et al. A study on construction sequence of shallow buried bias tunnel considering excavation stress path[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science), 2020, 45(6): 140.
 - [5] 王薇,邹江海,潘文硕,等. 不同施工顺序对陡坡偏压小净距隧道围岩稳定性的影响研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(8): 28.
WANG Wei, ZOU Jianghai, PAN Wenshuo, et al. Study on influence to stability of surrounding rock by different construction sequence for bias tunnel with small interval and steep slope [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2016, 12(8): 28.
 - [6] 袁腾文. 陡坡条件下小净距隧道不同开挖顺序的安全性与破坏模式分析[J]. 公路, 2018, 63(6): 309.
YUAN Tengwen. Analysis of safety and failure mode for excavation of tunnel with interval and steep slope based on strength reduction[J]. Highway, 2018, 63(6): 309.
 - [7] YANG Z, DING Y, JIANG Y, et al. Study of the construction sequence of overlapping tunnels by the shield tunneling method: a case study of the longest overlapping tunnel in China[J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 2020: 1.
 - [8] LIU X, FANG Q, ZHANG D, et al. Behavior of existing tunnel due to new tunnel construction below[J]. Computers and Geotechnics, 2019, 110: 71.
- (收稿日期:2021-04-22)
-
- (上接第 151 页)
- ZHANG Yuanyong. Study on risk assessment approaches in subway fire of Xi'an[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2011.
 - [3] 李会宁. 基于贝叶斯网络的地铁车站应急疏散能力评价模型研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
LI Huining. Research on the model of emergency evacuation capability evaluation for subway station based on Bayesian network [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.
 - [4] 汪益敏,罗跃,于恒,等. 人员密集型地铁车站安全风险评价方法[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(5): 198.
WANG Yimin, LUO Yue, YU Heng, et al. Evaluation method of security risk on crowded metro station[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(5): 198.
 - [5] 陈震,王俊峰,李剑刚. 基于案例分析法的山西煤矿事故分析[J]. 山西煤炭, 2010, 30(5): 32.
CHEN Zhen, WANG Junfeng, LI Jiangang. Case study on mine accidents in Shanxi Province[J]. Shanxi Coal, 2010, 30(5): 32.
 - [6] 徐田坤. 城市轨道交通网络运营安全风险理论评估理论与方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
XU Tiankun. Study on risk assessment theory and methods on urban rail transit network operation[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.
 - [7] 梁琦,陈兴华. 基于 RAMS 的城市轨道交通车辆设计安全研究[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2017, 39(4): 397.
LIANG Qi, CHEN Xinghua. Study of city rail transit vehicles safety design based on the RAMS[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Information & Management Engineering), 2017, 39(4): 397.
- (收稿日期:2021-07-27)