

# 基于 ISM-ANP-Fuzzy 算法的地铁车站火灾安全韧性评价体系<sup>\*</sup>

黄亚江<sup>1,2</sup> 康 飞<sup>3\*\*</sup> 易 杰<sup>1</sup> 鹿鑫月<sup>1</sup> 王雅姝<sup>1</sup> 李锦博<sup>1</sup>

(1. 天津仁爱学院经济与管理学院, 301636, 天津; 2. 天津财经大学管理科学与工程学院, 300222, 天津;  
3. 北京建筑大学城市经济与管理学院, 102616, 北京//第一作者, 讲师)

**摘 要** 目的: 为了减少地铁车站火灾事故的发生, 需更深入地探究地铁车站火灾安全韧性的形成机理。方法: 简要介绍了韧性及安全韧性的概念, 建立了地铁车站火灾安全韧性模型。建立了基于 ISM(解释结构模型)-ANP(网络分析法)-Fuzzy(模糊综合评价)算法的地铁车站火灾安全韧性评价体系, 利用 ISM 法确定了各指标间相互影响关系, 采用 ANP 计算得到各指标的权重, 采用 Fuzzy 法对指标进行定量分析, 以消除专家打分的主观性。最后以上海轨道交通线网的人民广场换乘站为案例, 对该评价体系的适用性进行评估。结果及结论: 该体系具有较强的适用性, 可有效测量地铁火灾的安全韧性。提高抵御能力和适应能力的韧性等级, 是提升地铁车站消防体系火灾应对能力的有效途径。提升火灾自动报警系统及喷灭火系统的质量, 通过培训来提高车站安全管理人员的能力水平和专业程度, 是提高地铁车站火灾安全韧性的有效措施。

**关键词** 地铁车站火灾; 安全韧性; 评价指标体系; 解释结构模型法; 网络分析法; 模糊综合评价法

中图分类号 U231.96

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2023.11.006

## Evaluation System for Fire Safety Resilience of Subway Stations Based on ISM-ANP-Fuzzy Algorithm

HUANG Yajiang, KANG Fei, YI Jie, LU Xinyue, WANG Yashu, LI Jinbo

**Abstract** Objective: In order to reduce the occurrence of subway station fires, it is necessary to delve deeper into the formation mechanism of subway safety resilience. Method: With a brief introduction to the concept of resilience and safety resilience, a subway fire safety resilience model is established, with its evaluation system based on ISM (interpretative structural modeling)-ANP (analytic network process)-Fuzzy (fuzz-

y comprehensive evaluation) algorithm. ISM is used to determine the internal relationship between indicators, ANP calculation is used to find the weight of indicators, and Fuzzy is carried out to analyze quantitatively the indicators, and eliminate the subjectivity of expert scoring. Finally, taking the People's Square Transfer Station of Shanghai rail transit network as a case study, the applicability of this evaluation system is assessed. Result & Conclusion: Improving the resiliency level to enhance the ability to resist and adapt is an effective way to improve the subway fire-fighting system's ability to respond to fires. Effective measures to increase the fire safety resiliency of subway stations include improving the quality of fire automatic alarm systems and sprinkler systems, and enhancing the competence and professionalism of station safety management personnel through training.

**Key words** subway station fire; safety resilience; evaluation index system; interpretative structural modeling; analytic network process; fuzzy comprehensive evaluation

**First-author's address** School of Economics and Management, Tianjin Renai College, 301636, Tianjin, China

地铁车站往往具有内部空间狭窄、结构复杂且人员十分密集的特点。车站内一旦发生火灾, 特别容易造成大量的人员伤害。因此, 对地铁车站进行安全韧性评价, 建立地铁车站火灾的安全韧性提升系统, 具有重要意义。

目前研究地铁火灾的方法主要有模糊综合评价法、BP(反向传播)神经网络评价法及熵权物元法等, 主要采用单一评价方法对地铁火灾进行安全评价。文献[1]基于多级可拓评价法从管理水平、设备水平、消防设计水平及人员能力 4 个方面对地铁车站进行风险评价。文献[2]根据安全评

\* 国家自然科学基金项目(71571130)

\*\* 通信作者

价指标的不完整性和模糊性,构建了基于 ISM(解释结构模型)法二维云模型的应急管理协同度评价方式。文献[3]提出基于 ISM-CRITIC(权重)法的通用航空可控飞行撞地影响因素分析方法。文献[4]首次引入 D-S 证据理论,建立了包含“人、机、管、环”4 个方面的地铁安全评估理论模型。文献[5]引入主成分分析法对指标体系进行降维的研究思路,对地铁火灾进行风险评估。以上方法大多聚焦在火灾风险方面,缺少基于韧性视角的安全韧性评价体系。

为此,本文基于 ISM 法、ANP(网络分析法)及 Fuzzy(模糊综合评价)法等多种方法,建立安全韧性模型,对地铁车站进行安全韧性评估,以便为地铁安全管理部门提供有效的火灾防控建议。

# 1 地铁火灾韧性的安全韧性模型

## 1.1 韧性与安全韧性

文献[6]最早将韧性的概念与生态系统领域相交叉。文献[7]基于韧性的角度,提出了不确定环境下的韧性风险评估,改变了传统的风险管理理念。文献[8]从系统性能的 4 个方面探究了影响土耳其城市轨道交通运营的原因。文献[9]首次提出了安全韧性的定义,即:系统在一定的时间和空间内面对风险的冲击及扰动时维持、恢复和优化系统安全状态的能力,并重点分析了维持、应对、恢复

和优化 4 个阶段的系统安全韧性能力。文献[10]首次建立了韧性评估框架,其中包括了系统要素识别、系统脆弱性分析、系统客观背景、决策者认知及系统韧性等 5 个方面内容。

## 1.2 地铁车站火灾安全韧性模型

地铁火灾本身具有致灾因素的复杂性、致灾后果的严重性、灾害的多发性等特性,本文基于韧性评估框架,建立了地铁车站火灾安全韧性模型,如图 1 所示。基于地铁火灾事故的文献梳理,可采用抵御能力、吸收能力、适应能力及恢复能力 4 个系统要素作为一级指标。在此基础上,选取了 12 个二级指标,构建了地铁车站火灾安全韧性评价体系,各指标的说明如表 1 所示。

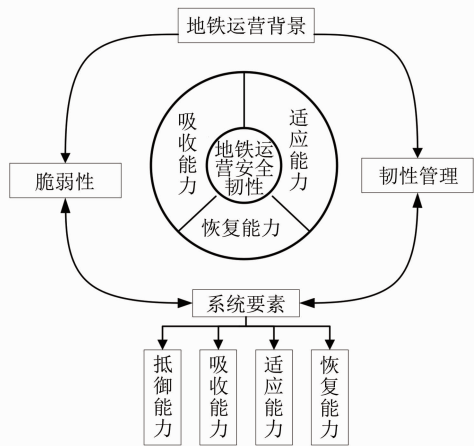


图 1 地铁车站火灾安全韧性模型

Fig. 1 Subway station fire safety resilience model

表 1 地铁车站火灾安全韧性评价体系的指标说明

Tab. 1 Interpretation of evaluation indicators for subway station fire safety resilience

一级指标	一级指标释义	二级指标	二级指标说明
抵御能力 $A_1$	受到火灾侵害时抵御火灾的能力	与最近消防站的距离 $B_1^{[1]}$	该距离决定消防队奔赴火场时间能否及时展开灭火救援工作
		防火分区和防火间距 $B_2^{[10]}$	为防止火势蔓延,建筑物之间应保持一定间距,并采用防火墙等把建筑划为若干区域
		车站火灾载荷 $B_3^{[10]}$	建筑物内所有可燃物由于燃烧可能释放出的总能量
吸收能力 $A_2$	及时应对火灾的能力及吸收火灾所带来外部伤害的能力	乘客及工作人员的防火安全意识 $B_4^{[1]}$	包括违禁品查除率、火灾发生原因的认知度及违禁品的认知度等
		乘客及工作人员的应急自救能力 $B_5^{[10]}$	包括安全疏散路线的熟悉度、火灾报警的认知度及应急施救技巧掌握程度等
		车站人员的消防技能 $B_6^{[1]}$	消防器材的正确使用以指挥乘客安全撤离的正确性
适应能力 $A_3$	基础结构应对火灾的能力	火灾自动报警系统及喷灭火系统 $B_7^{[1]}$	包括探头、报警器的布置合理性、火灾联动装置的可靠性等
		机电设备系统 $B_8^{[9]}$	包括设备的阻燃性达到国家标准、设备在使用年限内使用的比例
		水消防系统 $B_9^{[1]}$	包括水对燃烧物冷却降温的有效程度、细小水雾粒子稀释燃烧物周围氧气质量浓度的有效性等
恢复能力 $A_4$	火灾发生后,安全系统修复并减少火灾隐患的能力	火灾安全宣传教育和普及 $B_{10}^{[1]}$	包括火灾安全教育形式、宣传周期及受众人数等
		火灾应急预案的制定 $B_{11}^{[1]}$	包括预案的合理性及有效性、响应级别的合理性、预案的演练与及时调整等
		消防管理制度的制定与落实 $B_{12}^{[1]}$	包括制度健全程度、消防安全职责落实度、操作程序的合理性及档案的规范性等

## 2 基于 ISM-ANP-Fuzzy 算法的地铁车站火灾安全韧性评价体系的构建

ISM 法是 1973 年美国的 Warfield J N 教授为了分析复杂的社会经济结构所开发的一种方法,该法广泛应用于现代系统工程<sup>[2]</sup>。ANP 是 1996 年美国的 Thomas L. Saaty 教授<sup>[3]</sup>提出的一种适用于存在内部依存和反馈关系的复杂决策系统,是基于 AHP(层次分析法)发展而成的一种新的实用决策方法,该法可确定指标对应的权重。Fuzzy 法是 1965 年美国自动控制专家 Lottie Asker Zadeh 教授提出的一种基于模糊数学的综合评价方法。本文建立基于 ISM-ANP-Fuzzy 算法的地铁车站火灾安全韧性评价体系的分析流程,如图 2 所示。

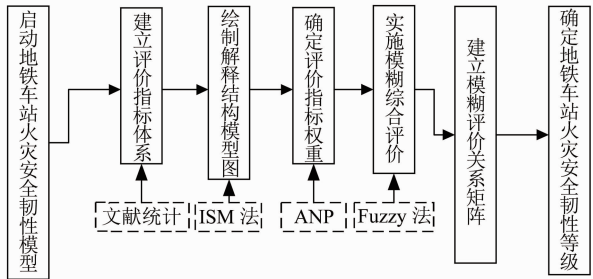


图 2 基于 ISM-ANP-Fuzzy 算法的地铁车站火灾安全韧性评估模型分析流程

Fig. 2 Analysis process of subway station fire safety resilience assessment model based on ISM-ANP-Fuzzy

依照 ANP 的原理对地铁车站火灾安全韧性评价指标进行分析,建立各指标之间相互依存、相互反馈的网络结构图,如图 3 所示。

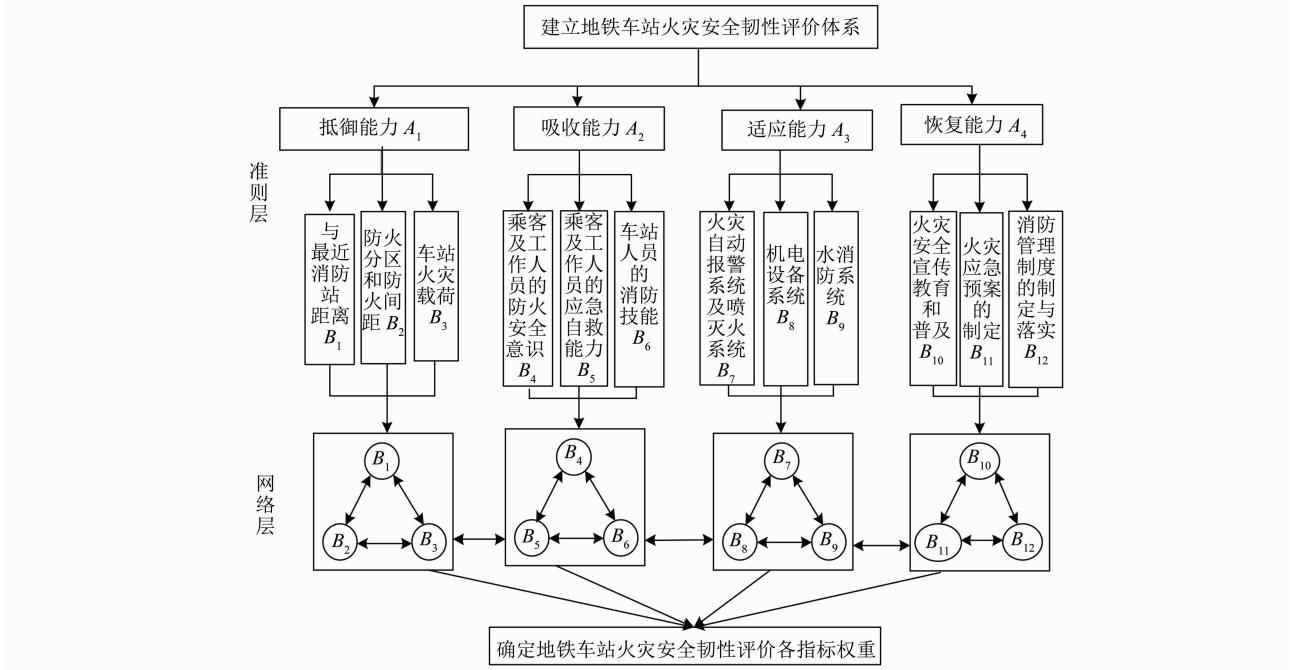


图 3 地铁车站火灾安全韧性评价体系网络结构图

Fig. 3 Network structure diagram of subway station fire safety resilience evaluation system

## 3 地铁车站火灾安全韧性评价体系的应用案例

### 3.1 案例车站概况

上海轨道交通人民广场站是上海轨道交通 1 号线、2 号线及 8 号线的三线换乘站,也是该轨道交通线网中日均客运量最大的车站,2023 年“五一”期间日均客流 35.7 万人次。为了更好地保障人民广场换乘站的安全性,验证本文所建地铁车站火灾安全韧性评价体系的适用性,对该站的火灾安全韧性进

行模拟计算并分析其计算结果。

### 3.2 基于 ISM 法分析各指标间关系

邀请 11 名地铁火灾行业的专家进行访谈,请专家们判断本文所建的地铁车站火灾安全韧性评价体系各二级指标间的关系。根据专家访谈得出各二级指标间关联情况的邻接矩阵。通过 Matlab 7.0 软件对邻接矩阵进行计算,得到可达矩阵。对可达矩阵进行区域分解,得到可达集合、先行集合及两个集合的交集表,将地铁车站火灾安全评价韧性评价体系的二级指标顺序进行编号( $B_1, \dots, B_{12}$ )。利

用可达矩阵进行级间分解,以确定各二级指标所在的层级,进而绘制地铁车站火灾安全韧性评价体系二级指标的解释结构模型图,如图 4 所示。由图 4

可知:地铁车站火灾安全韧性评价体系是一个由具有 3 个层级递阶结构组成的复杂系统,反映了地铁车站火灾安全韧性各影响因素之间的逻辑关系。

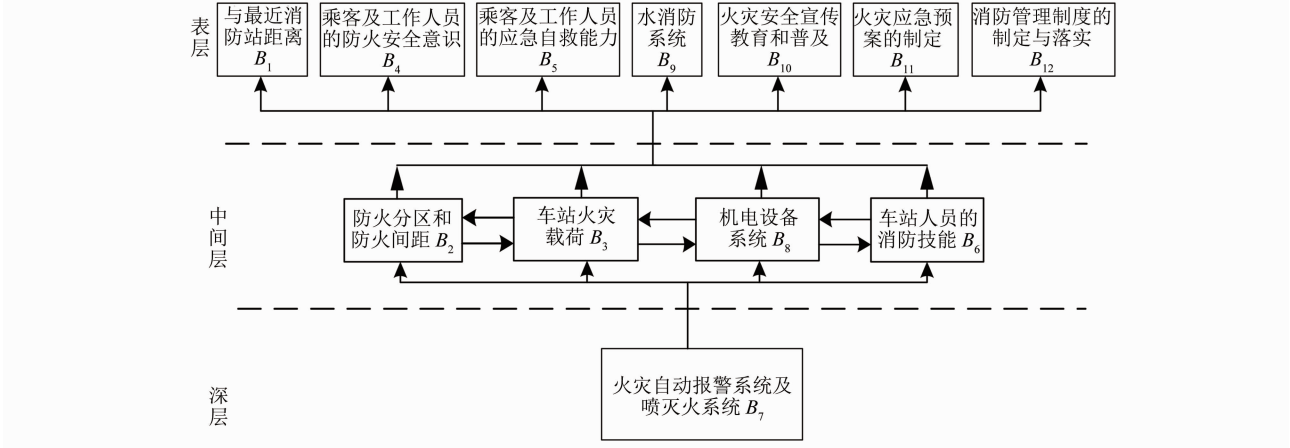


图 4 地铁车站火灾安全韧性评价体系二级指标的解释结构模型图

Fig. 4 Interpretation structure model diagram of secondary indicators for subway station fire safety resilience evaluation system

3 个层级对地铁车站火灾安全韧性的影响分析如下:

- 1) 表层的 7 个二级指标是影响地铁车站火灾安全韧性的直接原因。
- 2) 中层的 4 个二级指标间接对地铁火灾的安全韧性造成影响。这 4 个指标之间相互影响,进而影响表层的 7 个二级指标。

- 3) 深层的二级指标为火灾自动报警系统及喷灭火系统。该因素对中层的 4 个二级指标有重大影响。

### 3.3 运用 ANP 计算各指标的权重

根据指标之间的相互影响关系,利用 Super Decisions 软件进行地铁车站火灾安全韧性评价体系模拟,并计算各个指标的权重,其权重结果如表 2 所示。

表 2 地铁火灾安全韧性评价体系中各指标的权重

Tab. 2 The weights of various indicators in the evaluation system for subway fire safety resilience

一级指标	权重	二级指标	组内权重	客观权重	排序
抵御能力 $A_1$	0.421 283	与最近消防站距离 $B_1$	0.011 07	0.004 663	12
		防火分区和防火间距 $B_2$	0.473 47	0.199 464	4
		车站火灾载荷 $B_3$	0.515 46	0.217 156	3
吸收能力 $A_2$	0.065 895	乘客及工作人员的防火安全意识 $B_4$	0.180 48	0.011 893	9
		乘客及工作人员的应急自救能力 $B_5$	0.190 29	0.012 539	8
		车站人员的消防技能 $B_6$	0.629 23	0.041 462	2
适应能力 $A_3$	0.437 272	火灾自动报警系统及喷灭火系统 $B_7$	0.836 88	0.365 943	1
		机电设备系统 $B_8$	0.131 05	0.057 304	10
		水消防系统 $B_9$	0.032 07	0.014 026	11
恢复能力 $A_4$	0.075 550	火灾安全宣传教育和普及 $B_{10}$	0.298 65	0.022 563	6
		火灾应急预案的制定 $B_{11}$	0.295 09	0.022 294	7
		消防管理制度的制定与落实 $B_{12}$	0.406 26	0.030 693	5

注:组内权重指该二级指标在一级指标中的权重;客观权重指该二级指标在整个指标体系中的权重。

由表 2 可知:一级指标中,适应能力  $A_3$  的权重为 0.437 272,抵御能力  $A_1$  的权重为 0.421 283,这 2 个指标分别列第一位和第二位,对于提升地铁车站火灾安全韧性非常重要。进一步对二级指标在组

内的权重进行分析,在适应能力  $A_3$  中,火灾自动报警系统及喷灭火系统  $B_7$  的组内权重为 0.836 88;在抵御能力  $A_1$  中,车站火灾载荷、防火分区和防火间距的组内权重较大。因此,从事地铁车站安全的管

理部门应当在建设地铁车站时更加注意提升火灾自动报警系统及喷灭火系统的质量,采购高质量的火灾报警系统及喷灭火系统。在吸收能力  $A_2$  和恢复能力  $A_4$  的评价结果中,车站人员的消防技能、消防管理制度的制定与落实占主导位置,因此应通过对员工培训来提高消防技能水平,还应注意完善安全管理制度,提高火灾处理的应急能力。

3.4 对一级指标进行模糊综合评价

为消除构造判断矩阵求解权重过程中专家打分的主观性,并对结果进行定量分析,本文采用 Fuzzy 法对权重结果作进一步处理。设地铁火灾安全韧性等级评估的评语集为  $V = \{\text{高韧性, 较高韧性, 中韧性, 较低韧性, 低韧性}\}$ 。对地铁车站有工作经验的 20 名业内人士进行调研,得出二级指标对应的等级评价总次数。整合二级指标的组内权重矩阵,计算其模糊隶属度矩阵。将两者进行模糊运算,可得到二级指标的模糊综合评价结果。采用该技术路线将以上运算结果进行汇总,得到人民广场换乘站地铁火灾安全韧性评价指标体系一级指标的安全韧性评价结果,如表 3 所示。

表 3 人民广场换乘站地铁火灾安全韧性评价指标体系一级指标的安全韧性评价结果

Tab.3 Safety resilience evaluation results of the primary indicators in the subway fire safety resilience evaluation system at People's Square Transfer Station

一级指标	不同安全韧性等级下的一级指标权重					综合评价结果
	高韧性	较高韧性	中韧性	较低韧性	低韧性	
抵御能力 $A_1$	0	0.299 1	0.498 7	0.202 2	0	中韧性
吸收能力 $A_2$	0.200 0	0.539 5	0.224 4	0.036 1	0	较高韧性
适应能力 $A_3$	0.193 6	0.245 4	0.361 0	0.200 0	0	中韧性
恢复能力 $A_4$	0.059 7	0.799 3	0.141 0	0	0	较高韧性

3.5 评估结果分析及对策

地铁火灾安全韧性可反映地铁车站火灾安全管理系统对火灾事故的韧性能力,提升系统韧性对提高地铁车站安全管理水平有重要作用。由表 3 进一步计算可得到人民广场换乘站的综合隶属度如下:高韧性为 0.102 3,较高韧性为 0.329 3,中韧性为 0.393 4(在评估集各元素中权重值最高),较低韧性为 0.017 5。根据最大隶属度原则,可以确定人民广场换乘站的安全韧性等级为“中韧性”,即该站的安全韧性水平为中等,需加以改进。

未来可通过建筑信息模型运维系统提高火灾自动报警系统及喷灭火系统的质量,通过消防演练

加强车站人员的消防技能,可以采用灾害机器人技术提升危机处理能力,并不断完善消防管理制度。特别需要提升车站高层管理人员危机意识,以便有效传递火灾安全压力,进而使得地铁车站安全管理组织不断优化,提升地铁车站的安全管理能力及火灾安全韧性能力。

4 结语

本文基于韧性理论的特点,提出了地铁车站火灾安全韧性概念,建立了基于 ISM-ANP-Fuzzy 算法的地铁车站火灾安全韧性评价体系。研究结果表明,该评价体系具有较强的适用性,可有效评估地铁车站的安全韧性;提高地铁车站火灾抵御能力及适应能力的韧性等级,是提升地铁消防体系火灾应对能力的有效途径。此外,提升火灾自动报警系统及喷灭火系统的质量,增加该系统的检查频率,并通过培训来提高车站安全管理人员的能力水平和专业程度,也是提高地铁车站火灾安全韧性的有效措施。

参考文献

[1] 宋仲仲,宋文波,林立. 基于多级可拓评价法的地铁车站火灾风险评估[J]. 制造业自动化, 2018, 40(12): 26.  
SONG Zhongzhong, SONG Wenbo, LIN Li. Fire risk assessment of subway station based on multi-level extension evaluation method[J]. Manufacturing Automation, 2018, 40(12): 26.

[2] 王景春,林佳秀,张法. 基于 ISM 二维云模型的应急管理协同度研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(1): 38.  
WANG Jingchun, LIN Jiaxiu, ZHANG Fa. Research on coordination degree of emergency management based on ISM two-dimensional cloud model[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2019, 15(1): 38.

[3] 孙瑞山,占欣. 基于 ISM—CRITIC 法的通用航空可控飞行撞地影响因素分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2018, 14(1): 129.  
SUN Ruishan, ZHAN Xin. Analysis on influence factors of controlled flight into terrain of general aviation based on ISM-CRITIC method[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2018, 14(1): 129.

[4] 吴贤国,李铁军,林净怡,等. 基于粗糙集和贝叶斯网络的地铁盾构施工诱发邻近桥梁安全风险评价[J]. 土木工程与管理学报, 2016, 33(3): 9.  
WU Xianguo, LI Tiejun, LIN Jingyi, et al. Safety risk assessment of metro shield tunnel-induced adjacent bridge damage based on rough set and Bayesian network[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2016, 33(3): 9.

日等因素,对地铁站点的进站客流变化规律和预测方法展开更为深入、系统的研究。

## 参考文献

- [1] 王夏秋,张宁,王健. 基于季节指数的城市轨道交通月度客流预测方法[J]. 城市轨道交通研究,2018,21(10):25.  
WANG Xiaqiu, ZHANG Ning, WANG Jian. Forecasting method of monthly urban rail transit passenger flow based on seasonal index[J]. Urban Mass Transit, 2018,21(10):25.
- [2] 谢倩,叶红霞. 基于支持向量机的节假日进出站客流预测方法[J]. 城市轨道交通研究,2018,21(8):26.  
XIE Qiao, YE Hongxia. Forecast for holiday passenger flow at urban rail transit station based on support vector machine model[J]. Urban Mass Transit, 2018,21(8):26.
- [3] 侯晨煜,孙晖,周艺芳,等. 基于神经网络的地铁短时客流预测服务[J]. 小型微型计算机系统,2019,40(1):226.  
HOU Chenyu, SUN Hui, ZHOU Yifang, et al. Prediction service of subway short-term passenger flow based on neural network[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2019,40(1):226.
- [4] 崔洪涛,陈晓旭,杨超,等. 基于深度长短期记忆网络的地铁进站客流预测[J]. 城市轨道交通研究,2019,22(9):41.  
CUI Hongtao, CHEN Xiaoxu, YANG Chao, et al. Forecast of subway inbound passenger flow based on DLSTM recurrent network[J]. Urban Mass Transit, 2019,22(9):41.
- [5] 傅晨琳,黄敏,沙志仁. 基于 EEMD-BP 方法的城市轨道交通进站客流短期预测[J]. 铁道运输与经济,2020,42(3):105.  
FU Chenlin, HUANG Min, SHA Zhiren. Short-term forecast of passenger flow into an urban rail transit station based on EEMD-BP[J]. Railway Transport and Economy, 2020,42(3):105.
- [6] 赵阳阳,夏亮,江欣国. 基于经验模态分解与长短时记忆神经网络的短时地铁客流预测模型[J]. 交通运输工程学报,2020,20(4):194.  
ZHAO Yangyang, XIA Liang, JIANG Xinguo. Short-term metro passenger flow prediction based on EMD-LSTM[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020,20(4):194.
- [7] 胡进宝. 基于双层分解和核函数极限学习机的城市轨道交通短时客流预测[D]. 北京:北京交通大学,2017.  
HU Jinbao. Short-term forecasting using a hybrid model based on two-layer decomposition technique and kernel-based extreme learning machine [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.
- [8] 林培群,陈丽甜,雷永巍. 基于 K 近邻模式匹配的地铁客流量短时预测[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2018,46(1):50.  
LIN Peiqun, CHEN Litian, LEI Yongwei. Short-term forecasting of subway traffic based on K-nearest neighbour pattern matching[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2018,46(1):50.
- (收稿日期:2021-06-29)
- (上接第 35 页)
- [5] 王建波,彭龙镖,李娜,等. 基于 PCA-RBF 神经网络的地铁车站火灾风险评估[J]. 工业安全与环保,2017,43(9):67.  
WANG Jianbo, PENG Longbiao, LI Na, et al. Fire risk evaluation of subway station based on PCA-RBF neural network[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2017, 43(9):67.
- [6] HOLLING C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4: 1.
- [7] LYU Wendong, ZHAO Yang, WEI Yuan. On resilient risk management-organizational management technology for coping with uncertain situations[J]. Management World, 2019, 35(9):116.
- [8] ELA B S. Urban rail operators in Turkey: organisational reform in transit service provision and the impact on planning, operation and system performance[J]. Journal of Transport Geography, 2016, 54: 464.
- [9] 黄浪,吴超,王秉. 系统安全韧性的塑造与评估建模[J]. 中国安全生产科学技术,2016,12(12):15.  
HUANG Lang, WU Chao, WANG Bing. Modeling on shaping and assessment of system safety resilience[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2016, 12(12):15.
- [10] FRANCIS R, BEKERA B. A metric and frameworks for resilience analysis of engineered and infrastructure systems[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2014, 121: 90.
- (收稿日期:2021-06-23)

欢迎订阅《城市轨道交通研究》

服务热线 021—56830728