

李文倩, 陈紫佳, 双喆, 等. 地震灾害背景下地铁运营安全风险模糊综合评价研究[J]. 华南地震, 2023, 43(3): 110–121. [LI Wenqian, CHEN Zijia, SHUANG Zhe. Research on Fuzzy Comprehensive Evaluation of Subway Operation Safety Risk Under the Background of Earthquake Disasters [J]. South China journal of seismology, 2023, 43(3): 110–121]

地震灾害背景下地铁运营安全风险 模糊综合评价研究

李文倩, 陈紫佳, 双 喆

(天津城建大学 经济与管理学院, 天津 300384)

摘要: 地震灾害具有明显的突发性和破坏性特征, 对于地铁工程而言极易带来事故甚至灾害的风险, 在地震灾害背景下地铁运营期的风险评估与管控问题越来越受到学术界的关注。此文以某地震频发城市地铁线为研究对象, 在地铁运营期安全风险理论基础上进行地铁运营事故分析, 采用模糊评价法开展了地铁运营期的安全风险评价研究, 并对地铁运营安全风险提出对策。研究揭示了地铁运营期存在的安全风险类型及其影响因素, 并提出了运营期安全隐患的改进意见, 提高地铁运营期的安全风险管理水平, 为地震背景下地铁运营安全风险提供指导借鉴。

关键词: 地震灾害; 地铁运营; 安全风险评价; 模糊综合评价; 风险管理对策

中图分类号: X45

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662(2023)03-0110-12

DOI: 10.13512/j.hndz.2023.03.13

Research on Fuzzy Comprehensive Evaluation of Subway Operation Safety Risk Under the Background of Earthquake Disasters

LI Wenqian, CHEN Zijia, SHUANG Zhe

(School of Economics and Management, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China)

Abstract: Because earthquake disasters, which have obvious sudden and destructive characteristics, is easy to bring the risk of accidents and even disasters to subway projects, the risk assessment and management of subway operation during the operation period have attracted more and more attention from the academic community under the background of earthquake disasters. Taking one subway line in an earthquake-prone city as the research object, the subway operation accidents analysis is carried out on the basis of the safety risk management theory during the subway operation period. Further, the fuzzy evaluation method is used to carry out the safety risk evaluation research during the subway operation period, and the countermeasures for the safety risk of the subway operation

收稿日期: 2022-10-12

基金项目: 天津市哲学社会科学规划项目“双重嵌入视角下突发事件政府应急决策机制及效能提升研究”(TJGLQN20-004)

作者简介: 李文倩(1986-), 女, 讲师, 主要从事地震灾害应急避难与安全评价研究。

E-mail: bxqe@163.com

are put forward. The research reveals the types of safety risk and their influencing factors during the subway operation period, and puts forward some suggestions on the improvement of safety risk during the operation period, so as to improve the level of safety risk management in subway operation period and provide the necessary guidance for safety risk management of subway operation considering the earthquake influence.

Keywords: Earthquake disaster; Subway operation; Safety risk assessment; Fuzzy comprehensive evaluation; Risk management strategy

0 引言

随着我国地下工程技术的成熟与城市便利交通的广泛需求,地铁工程建设近年来获得了迅猛的发展。目前我国在超过36个城市建有地铁线路,总长已经超过了6000 km,未来规划拥有地铁的城市数量可达44个。我国是地震、洪涝等灾害频发的国家,地铁站在运营过程中如发生重大自然灾害易引起突发安全事件,如设备故障、电力事故、地铁火灾、人员伤亡等。特别是2021年7月的郑州特大洪水,造成地铁5号线内500余人被困、12人遇难的惨剧,突发自然灾害导致地铁站内安全事故问题理应引起我们的重视与深思。

地铁站作为典型的城市地下工程,突发地震灾害会对站内结构安全以及地铁正常运营带来巨大影响,表1列出了近20年来国内外发生的地震灾害引起地铁运营安全事故。我国是一个地震灾害频发的国家,根据中国地震台网中心提供数据统计仅2022年发生5级以上地震41次,其中在拥有地铁城市及周边发生地震7次。同时,我国地铁运营具有人员密集、流动性大、设备控制要求高、风险因素多等特点,在运营期内若发生地震灾害则存在极大的诱发安全事故危险。目前亟待对地震灾害背景下地铁运营安全风险进行更为深入的研究,并对现行地铁运营安全风险管理提出改善建议,以实现全面、科学的地铁运营风险评价和高效决策。

表1 地震灾害引起地铁运营安全事故表
Table 1 Safety accidents of subway operation caused by earthquake disaster

年份	地点	地震级别	事故原因及损失
1995	日本神户	—	车站发生坍塌,侧墙出现开裂破坏
1996	日本东京	7.2	车站隧道受到破坏
2006	日本宫城	7.2	仙台市地铁发生中止运行
2015	印度新德里	7.8	地铁出现停驶并有人员被困
2019	中国台湾	6.7	台北市地铁全线停止运营2小时
2021	中国台湾	6.3	地铁延误,南港至左营全部停驶
2022	日本福岛	7.4	地铁运行时发生剧烈晃动

有关地铁安全风险评价与决策方面的研究,随着地铁工程的建设而广泛发展起来。国外学者主要对地铁运营风险管理流程与运营风险管理对策进行研究,评估了地铁运营安全风险以减少地铁运营对居民生命财产安全构成的威胁。Boehm^[1]提出了风险评估(包括风险辨识、风险分析、风险排序)和风险控制(包括风险管理计划、风险处置、风险监控)两个阶段组成的项目风险管理过程。Hapman Ward^[2]构造了一个由9个阶段组成的项目风险管理过程。Kampmann^[3]运用风险评估技术提出了40种灾害中包含的10种风险类型以及48个规

避风险措施。Burland^[4]总结了环境对地下空间项目影响的评估方法并编制了具体的计算方法。Van Hasselt等^[5]研究了阿姆斯特丹南北地铁线路在投资、工期和工程质量三方面的设计和施工中的问题,列出主要风险因素和预防措施,并通过及时实施预防措施和规划备用措施,实现持续降低风险的预期效果。

国内有关地铁安全风险评价与决策方面研究起步较晚。贾水库等^[6]利用层次分析法对地铁运营系统中的管控人员进行分析,认为人员因素是影响地铁安全运行的最大风险因素,地铁运营安全

性要基于有效的人员培训和合理的管理。黄宏伟等^[7]通过对主要国际地铁事故的统计,分析了地铁安全风险事故高频发生的直接影响因素,并建立国内外大型城市地铁运营风险管理系统以分析地铁运营期的风险管理特点,提出合理性风险管理措施。夏利华等^[8]从地铁灾害及传统防灾管理的思路切入,结合RAMS工作的特点与地铁建设和运营的实际情况,提出了基于地铁建设和服务运营的防灾管理理念。杜洋洋^[9]通过降低城市地铁运营期安全事故发生率,尽可能减少事故造成的经济损失,对城市地铁运营期不稳定性进行分析。刘婷婷等^[10]建立了符合客观实际的多层次、多指标的评价指标体系及多层次模糊综合评价模型,应用多层次模糊综合评价法对地铁车站设施设备运营安全进行评价。万欣^[11]认为地铁运行安全事故的高频发生主要源自乘客不安全的行为,并指出这些行为均发生于地铁车站内且为获得地铁车站管理层因的重视。侯靖宇^[12]采用将熵权法和可拓理论相结合的数学综合方法,建立基于模糊综合评价方法的地铁运营安全评价模型,并以北京某地铁为例,对该评价模型的评价可靠性进行了验证。崔艳萍等^[13]提出通过综合指挥调度中心建立地铁运营管控系统,并罗列出安全管控系统的内部结构和无线信息传递等核心技术,从而保证地铁安全运营管控系统的分部构成稳健工作。郭庶等^[14]采用专家打分法与层次分析法,探讨地铁运营期间多指标体系下的安全风险,建立了合理的评价指标体系,对地铁运营期的安全风险进行评估。尉强^[15]建立了多层次地铁应急能力的评价体系,再运用模糊综合评价法对南京市地铁应急管理能力进行了评价。杨苏等^[16]以青岛地铁2号线为例,构建了模糊综合评价模型体系,分别进行单因素和整体模糊综合评价,根据评价结果提出了切实可行的建议与措施。

综上可知,目前考虑地震灾害及人员受灾情绪与心理对地铁运营安全风险影响的研究较少。针对地震背景下地铁运营风险评价和高效决策问题,本文归纳总结了国内外地铁运营期内常见的问题及影响因素,并以某城市地铁线为研究对象,基于模糊综合评价方法开展了地铁安全风险评价,考虑地震灾害影响明确了地铁运营期间所面临的安全风险并提出了相应改善措施,以期促进地铁运营期安全风险管理的实现。

1 地铁运营期安全影响因素分析

1.1 地铁运营事故分析

地震灾害对地铁正常运营危害性极大,可能在短时间内造成地铁站内出现突发火灾、设备故障、地铁相撞、地铁脱轨、人员逃生拥挤踩踏等情况,而上述事件也正是地铁正常运营过程中较常出现的安全事故,表2列出了国内外1993—2014年已发生的地铁事故^[7]。

由表2可知,国内外出现的38起典型地铁运营安全事故中(如图1所示),地铁相撞与地铁脱轨所占比例最大为42.10%,设备故障事故所占比例为26.32%,突发火灾所占比例为18.42%,拥挤踩踏所占比例为13.16%。上述事故虽然多数不是在地震背景下发生的,但对各个国家地铁线路的正常运营已经造成了严重影响。而地震灾害具有破坏性强、波及范围广、次生与伴生灾害多等特点,其突发会使得地铁运营事故危害程度更加显著,带来更加不可估量的经济财产损失,甚至是人身生命损害。

1.2 地铁运营事故因素分析

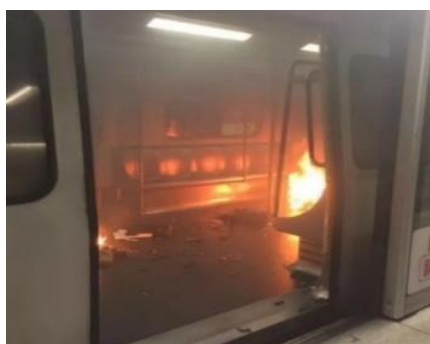
通过1.1节中的事故分析可知,突发火灾、设备故障、地铁相撞、地铁脱轨、人员逃生拥挤踩踏等对地铁正常运营的影响最为显著。而为了防止地震灾害背景下上述事故的发生或降低事故发生对地铁线造成的影响,地铁站需要从人员因素、设施因素、环境因素与管理因素等四个方面采取措施以保证地铁运营安全^[17-19],主要体现如下:

(1)人员因素。人员因素有两个方面,外部因素主要来自地铁乘客自身的不安全行为与因灾害恐慌导致的不良情绪,比如在人员疏散过程中的拥挤、推搡、恐慌滞留等。而内部因素则可归结为地铁工作人员操作失误,例如在地震灾害预报或感知后,操作员因紧张、害怕等情绪出现错误或激进操作从而可能引起列车事故、设备故障瘫痪等。

(2)设施因素。主要包括地铁供电系统、地铁机车系统、地铁运营控制设施系统、地铁路线轨道系统、地铁通信设备、地铁运营公共应用工程及辅助设备的潜在不良因素。上述设备或系统是保障地铁线正常运营的关键因素,然而在地震背景下其极易受到影响发生失效甚至破坏。

表2 国内外地铁运营安全事故汇总表
Table 2 Summary of metro operation safety accidents

时间/年	地点	损失	事故原因
1992	德国柏林	地铁站着火,有18人重伤	突发火灾
1998	俄罗斯莫斯科	地铁站着火,有伤3人	
1999	韩国首尔	地铁站着火,死50余人	
2001	巴西圣保罗	地铁站着火,有伤亡人员	
2003	英国伦敦	列车撞向月台引起火灾,32人伤亡	
2005	中国北京	发生火灾,地铁停运50 min	
2012	日本大阪	发生火灾,地铁停运超过1 h	
2000	美国华盛顿	地铁运营电线短路,地铁运营迫停	设备故障
2001	中国台北	台风导致设备故障,地铁瘫痪	
2003	英国伦敦	运营设备损坏,伤32人	
2004	俄罗斯莫斯科	地铁站发生爆炸,有伤亡人员	
2005	中国香港	电力系统发生故障,地铁运营中断	
2005	波兰	地铁运营时突然停电,约25万人被困	
2005	中国广州	触电网故障,运营中断数小时	
2007	中国南京	触电网中断,运营中断	
2013	中国北京	制动不急缓造成地铁停运	
2014	中国北京	无牵引无制动现象造成地铁停运	
1993	英国伦敦	地铁相撞,有伤亡人员500余人	地铁相撞
1994	德国科隆	地铁相撞,伤50余人	
1995	泰国曼谷	地铁相撞。伤200余人	
1997	委内瑞拉	地铁相撞,死1人,伤10余人	
2000	美国纽约	地铁相撞,死9人,伤70余人	
2004	巴西圣保罗	地铁相撞,伤40余人	
2007	意大利罗马	地铁相撞,死1人,伤236人	
2012	中国北京	地铁信号故障导致列车追尾,有伤亡	
1991	美国纽约	地铁偏离轨道,死6人,伤100余人	地铁脱轨
2002	美国华盛顿	地铁偏离轨道,伤80余人	
2003	日本	地铁偏离轨道,有伤亡人员40余人	
2004	波兰	地铁偏离轨道,伤30余人	
2006	西班牙	地铁偏离轨道,死41人,伤47人	
2006	韩国	地铁偏离轨道,有伤亡人员600余人	
2010	美国华盛顿	地铁偏离轨道,伤3人	
2012	阿根廷	地铁脱轨,死49人,伤600余人	
2003	中国上海	扶梯因客流量大导致发生故障	拥挤踩踏
2008	中国北京	扶梯发生故障,踩踏有伤亡人员	
2009	中国广州	扶梯逆行,有伤20余人	
2010	中国深圳	电梯故障,有200余乘客无法通行	
2011	中国上海	扶梯故障,有死伤29人	



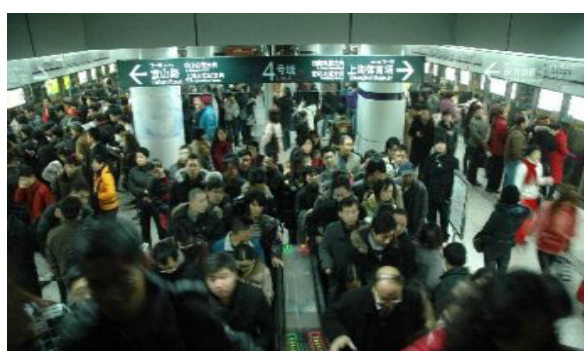
(a) 突发火灾



(b) 设备故障



(c) 地铁相撞及脱轨



(d) 拥挤踩踏

图1 地铁事故现场图

Fig.1 Pictures of subway accident scene

(3)环境因素。地铁运营的环境会影响到地铁的运营,其包括有地铁运营自然环境、地铁运营社会环境、地铁运营内部环境等。在地震灾害的大背景下,自然环境会对地铁线运营带来极为显著的影响,而社会环境与内部环境出现恶化也会带来事故风险。

(4)管理因素。地震背景下地铁运营安全制度的指定与完善,对地铁健康的运营管理起到了非常重要的作用。一方面,不完善的安全制度体系容易导致工作人员失误,特别是在灾害背景下人员情绪和心态极易产生波动,增加了地铁线管理水平的控制难度。另一方面,地铁运营管理是一项复杂的系统工程,除核心管理系统外还包括众多的子系统。由于受到地震灾害的影响,会使得地铁管控系统中的各子系统协调不充分,就容易导致整个管理系统出现紊乱的现象,影响正常运营效果。

2 地铁安全风险的模糊综合评价

2.1 模糊综合评价法

2.1.1 确定评价等级

模糊综合评价是对被评价要素对于评价集的隶属度状况的一项综合评价。评价等级通过与常用的评价经验相结合,假设评价等级集合为 $K = (K_1, K_2, \dots, K_l)$, 其中 l 表示评价等级的总数。

2.1.2 确定指标权重

确定指标权重的步骤如下^[12]:

(1)确定准则层集合 $A = (A_1, A_2, \dots, A_n)$, 其中 n 为准则层指标的总数。准则层第 i 个指标 $A_i = (A_{i1}, A_{i2}, \dots, A_{im})$, 其中 m 表示准则层第 i 个指标在指标层中包含指标的个数。

(2)采用专家打分法得出指标的得分,用 Y 表示准则层的得分矩阵,则准则层指标权重的得分矩阵为 $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$; 用 Y_j 表示准则层某一指标下,对应指标层第 j 个指标相对评价等级的得分矩阵, y_{jk} 表示指标层第 j 个指标相对假设评价等级的得分,则 $Y_j = (y_{j1}, y_{j2}, \dots, y_{jl})$ 。

(3)对各项指标得分矩阵进行归一化处理,用 b_i 表示准则层第 i 个指标的权重,用 b_{jk} 表示准则层某一指标下,对应指标层第 j 个指标相对评价等级的权重,其计算公式可分别表示为:

$$b_i = \frac{y_i}{\sum_{i=1}^n y_i} \quad (1)$$

$$b_{jk} = \frac{y_{jk}}{\sum_{k=1}^l y_{jk}} \quad (2)$$

2.1.3 确定模糊算子

在模糊合成中,模糊合成表示在模糊综合评估中使用的模糊变换运算,在模糊综合评估中,利用 P 进行模糊合成,在一般的模糊合成中存在4种类型,分别是 $M(\wedge, \vee)$ 算子, $M(\cdot, \vee)$ 算子, $M(\wedge, \otimes)$ 算子, $M(\cdot, \otimes)$ 算子。

2.1.4 构建模糊关系矩阵

通过具有一定的专业技能、行业代表性的专家打分,并归一化处理后,可建立模糊关系矩阵。利用衡量两个指标层之间的关联性的指标权重及其模糊关系的矩阵,则准则层第 i 个指标的综合得分向量可运用计算公式如下:

$$P_i = (\omega_{i1}, \omega_{i2}, \dots, \omega_{im}) \begin{bmatrix} b_{i11} & \cdots & b_{i1l} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{im1} & \cdots & b_{iml} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$= (c_{i1}, c_{i2}, \dots, c_{il})$$

上式中, ω_{im} 为准则层第 i 个指标中指标层第 m 个指标的权重。根据上式分别计算各准则层指标的综

合得分向量,并将每个指标的得分向量按顺序排列。由此可知目标层关系矩阵为:

$$Z = \begin{bmatrix} c_{11} & \cdots & c_{1l} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{n1} & \cdots & c_{nl} \end{bmatrix} \quad (4)$$

2.1.5 模糊综合评价

将准则层各指标权重和各指标层的得分向量相结合,从而可以得到准则层的综合得分向量为:

$$P = (b_1, b_2, \dots, b_n) \begin{bmatrix} c_{11} & \cdots & c_{1l} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{n1} & \cdots & c_{nl} \end{bmatrix} = (c_1, c_2, \dots, c_l) \quad (5)$$

根据划分评价几何等级 B_k 的临界值 b_k ,设评价等级对应的划分临界值向量为 $\beta = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_l)$,则目标层的综合得分可以表示 $f = (c_1, c_2, \dots, c_l) \times (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_l)^T$,为了实现评价的完整性,计算标准层、各项指标层的指标计算得分如下:

$$f_i = (c_{i1}, c_{i2}, \dots, c_{il}) \cdot (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_l)^T \quad (6)$$

$$f_{ij} = (b_{ij1}, b_{ij2}, \dots, b_{ijl}) \cdot (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_l)^T \quad (7)$$

2.2 基于模糊评价的城市地铁安全评估

2.2.1 评价指标体系

本文评价对象为某地震频发城市的地铁线,该城市地铁线路全长54.47 km,共设37座车站和3座车辆段,日平均客运量超过120万人次。根据1.2节可知,影响地铁运营安全的主要因素包括人员、设施、环境、管理等方面,基于此可建立多因素协同影响的地震背景下地铁运营安全风险评价体系中的指标体系^[18-20],如图2所示。

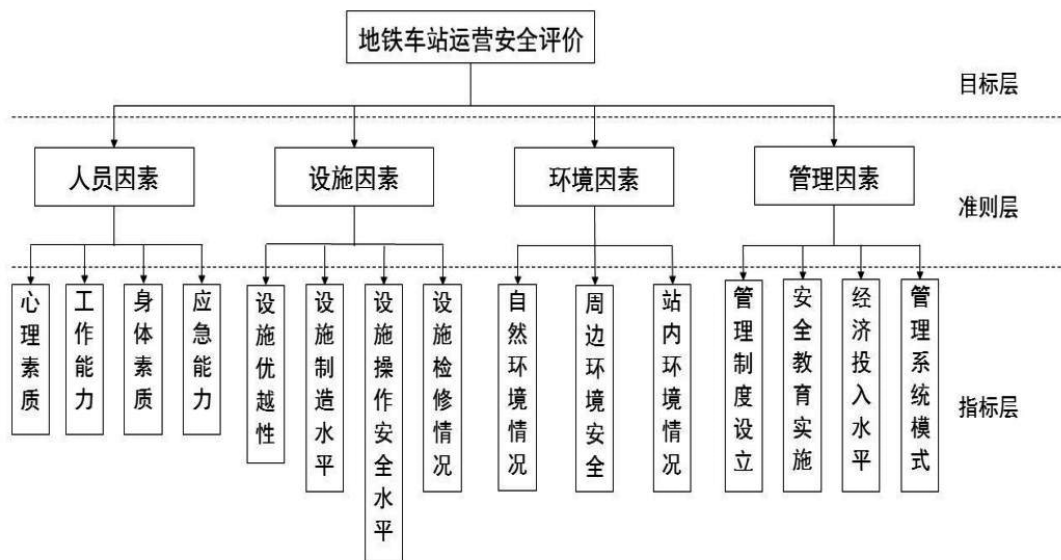


图2 地铁运营安全风险评价指标体系

Fig.2 Evaluation index system of subway operation safety risk

2.2.2 确定评价等级

取评价等级为5，设评价等级集合为 $K=\{K_1, K_2, K_3, K_4, K_5\}$ ，其中 K_1 表示地铁运营安全， K_2 表示地铁运营较安全， K_3 表示地铁运营一般安全， K_4 表示地铁运营不太安全， K_5 表示地铁运营不安全。评价定量分级标准如表3所列。

由上述数据，确定评价指标就是确定评价对象的因素集。从人员因素、设施因素、环境因素、管理因素4个因素构成4个一级评价指标以及15个二级地铁运营安全评价指标构成体系。各指标权重分布见表4所列。

表3 评价定量分级标准表
Table 3 Quantitative classification standard of evaluation

评价值	评语	定级
5	安全	K_1
4	较安全	K_2
3	一般安全	K_3
2	不太安全	K_4
0	不安全	K_5

表4 各层指标权重分布表
Table 4 The weight distribution of the indicators at each level

准则层	准则层权重	指标层	指标层权重
人员因素	0.3	心理素质	0.25
		工作能力	0.25
		身体素质	0.25
		应急能力	0.25
设施因素	0.3	设施优越性	0.4
		设施制造水平	0.2
		设施操作安全水平	0.3
		设施检修情况	0.1
环境因素	0.2	自然环境情况	0.4
		周边环境安全	0.3
		站内环境情况	0.3
管理因素	0.2	管理制度设立	0.2
		安全教育实施	0.3
		经济投入水平	0.2
		管理系统模式	0.3

2.2.3 确定指标权重

设定准则层和指标层权重的最高分为5分，最低分为0分，其中5分表示该指标因素地铁运营状态安全，4分表示地铁运营较安全，3分表示地铁运营一般安全，2分表示地铁运营不太安全，0分表示地铁运营不安全。邀请5位具有专业知识的专

家对某城市地铁线进行打分，指标权重由专家组设定，对5位专家打分情况进行汇总得到专家打分见表5所列。

2.2.4 归一化矩阵

根据表5数据计算各级模糊综合评价向量。得到各影响因素安全等级评价结果见表6~表9所列。

表5 专家打分表
Table 5 Expert grading scale

准则层	指标层	A	B	C	D	E
人员因素	心理素质	5	4	4	4	4
	工作能力	4	3	3	4	4
	身体素质	5	3	4	4	4
	应急能力	3	4	4	3	4
设施因素	设施优越性	4	4	5	3	3
	设施制造水平	3	3	4	4	3
	设施操作安全水平	3	4	4	4	3
	设施检修情况	2	3	3	2	3
环境因素	自然环境情况	4	4	5	4	5
	周边环境安全	4	3	4	3	4
	站内环境情况	5	4	5	4	4
管理因素	管理制度设立	5	4	4	4	4
	安全教育实施	4	4	3	3	2
	经济投入水平	4	3	3	4	3
	管理系统模式	2	3	3	2	3

注:(专家分别用A、B、C、D、E表示)

表6 人员因素各项统计表
Table 6 Statistical tables of personnel factors

项目		安全	较安全	一般安全	不太安全	不安全
心理素质	人数	1	4	0	0	0
	归一化	0.2	0.8	0	0	0
工作能力	人数	0	3	2	0	0
	归一化	0	0.6	0.4	0	0
身体素质	人数	1	3	1	0	0
	归一化	0.2	0.6	0.2	0	0
应急能力	人数	0	3	2	0	0
	归一化	0	0.6	0.4	0	0

表7 设施因素各项统计表
Table 7 Statistical table of facilities factors

项目		安全	较安全	一般安全	不太安全	不安全
设施优越性	人数	1	2	2	0	0
	归一化	0.2	0.4	0.4	0	0
设施制造水平	人数	0	2	3	0	0
	归一化	0	0.4	0.6	0	0
设施操作安全水平	人数	0	3	2	0	0
	归一化	0	0.6	0.4	0	0
设施检修情况	人数	0	0	3	2	0
	归一化	0	0	0.6	0.4	0

表 8 环境因素各项统计表
Table 8 Statistical table of environmental factors

项目		安全	较安全	一般安全	不太安全	不安全
自然环境情况	人数	2	3	0	0	0
	归一化	0.4	0.6	0	0	0
周边环境安全	人数	0	3	2	0	0
	归一化	0	0.6	0.4	0	0
站内环境情况	人数	2	3	0	0	0
	归一化	0.4	0.6	0	0	0

表 9 管理因素各项统计表
Table 9 Statistical table of management factors

项目		安全	较安全	一般安全	不太安全	不安全
管理制度设立	人数	1	4	0	0	0
	归一化	0.2	0.8	0	0	0
安全教育实施	人数	0	2	2	1	0
	归一化	0	0.4	0.4	0.2	0
经济投入水平	人数	0	2	3	0	0
	归一化	0	0.4	0.6	0	0
管理系统模式	人数	0	0	3	2	0
	归一化	0	0	0.6	0.4	0

2.2.5 模糊关系矩阵

通过5名专家分别对某城市地铁线的15个指标进行评价，得到某城市地铁线的安全评价结果。根据公式(1)与公式(2)可分别计算出准则层4个指标对应的模糊关系矩阵为：

$$Q_1 = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.8 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.6 & 0.4 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.6 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0 & 0.6 & 0.4 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$Q_2 = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.4 & 0.4 & 0 & 0 \\ 0 & 0.4 & 0.6 & 0 & 0 \\ 0 & 0.6 & 0.4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.6 & 0.4 & 0 \end{bmatrix}$$

$$Q_3 = \begin{bmatrix} 0.4 & 0.6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.6 & 0.4 & 0 & 0 \\ 0.4 & 0.6 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$Q_4 = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.8 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.4 & 0.4 & 0.2 & 0 \\ 0 & 0.4 & 0.6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.6 & 0.4 & 0 \end{bmatrix}$$

2.2.6 模糊综合评价

选用 $M(\bullet, \otimes)$ 算子对某城市地铁线进行模糊综合评价，根据公式(3)计算如下：

(1)人员因素的综合得分向量为：

$$P_1=(0.25, 0.25, 0.25, 0.25) \times \begin{bmatrix} 0.2 & 0.8 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.6 & 0.4 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.6 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0 & 0.6 & 0.4 & 0 & 0 \end{bmatrix}=(0.1, 0.65, 0.25, 0, 0)$$

同理，设施与设备影响因素的综合得分向量为：

$$P_2=(0.4, 0.2, 0.3, 0.1) \times \begin{bmatrix} 0.2 & 0.4 & 0.4 & 0 & 0 \\ 0 & 0.4 & 0.6 & 0 & 0 \\ 0 & 0.6 & 0.4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.6 & 0.4 & 0 \end{bmatrix}=(0.08, 0.42, 0.46, 0.04, 0)$$

环境因素的综合得分向量为：

$$P_3=(0.4, 0.3, 0.3) \times \begin{bmatrix} 0.4 & 0.6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.6 & 0.4 & 0 & 0 \\ 0.4 & 0.6 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}=(0.28, 0.6, 0.12, 0, 0)$$

运营管理系统因素的综合得分向量为:

$$P_4=(0.2, 0.3, 0.2, 0.3) \times \begin{bmatrix} 0.2 & 0.8 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.4 & 0.4 & 0.2 & 0 \\ 0 & 0.4 & 0.6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.6 & 0.4 & 0 \end{bmatrix}=(0.04, 0.36, 0.42, 0.18, 0)$$

准则层的综合得分向量为:

$$P=(0.3, 0.3, 0.2, 0.2) \times \begin{bmatrix} 0.1 & 0.65 & 0.25 & 0 & 0 \\ 0.08 & 0.42 & 0.46 & 0.04 & 0 \\ 0.28 & 0.6 & 0.12 & 0 & 0 \\ 0.04 & 0.36 & 0.42 & 0.18 & 0 \end{bmatrix}=(0.118, 0.513, 0.321, 0.048, 0)$$

(2) 采用模糊综合评分值法, 对该地铁线综合评分值进行等级评定, 先对 P_1, P_2, P_3, P_4, P 向量中各评价等级 $K=\{K_1, K_2, K_3, K_4, K_5\}$, 即{安全、较安全、一般安全、不太安全、不安全}分别赋值为 4, 3, 2, 1, 0, 即 $\beta=\{4, 3, 2, 1, 0\}$, 从而得到该地铁线运营安全管理综合评分值如表 10 所示。由表 10 可知, 该地铁线综合得分为 2.701 分, 得分均处于[较安全、一般安全]区间内, 表明该地铁线在地震背景下的整体运营水平处于运营较安全水平。

为了从各指标层中发现问题, 需对两个指标层的得分进行综合分析, 计算结果见表 11 所列。由表可知, 某城市地铁线地铁站内设施操作安全

水平、管理系统模式等得分处于[一般安全、不太安全]的水平, 上述因素会对地震背景下的地铁安全运营造成隐患, 应及时采取措施处理。而工作人员工作能力、突发情况下的应急能力等指标均处于[较安全、一般安全]的水平, 该数值表明相较于其它指标层因素, 工作人员的身体原因, 自身心理素质等因素会给地震背景下的地铁安全运营带来不利影响。因此, 某城市地铁线的管理层需提高设施操作安全水平、完善管理系统模式, 并加强对地铁工作人员身体素质、心理素质、工作状态的关注, 还需对地铁的内外部环境加强管控, 从而降低这些因素给地铁安全运营的不利影响, 使地铁运营管理更加条理和稳固。

表 10 地铁线运营总得分情况表
Table 10 Total score of subway operation

得分		隶属区间	准则层	准则层得分	隶属区间
车站	2.701	[2,3]	人员因素	2.85	[2,3]
			设施因素	2.54	[2,3]
			环境因素	3.16	[3,4]
			管理因素	2.26	[2,3]

表 11 地铁线运营安全影响因素得分表
Table 11 Scores of influencing factors of subway operation safety

准则层	准则层得分	隶属区间	指标层	指标层得分	隶属区间
人员因素	2.85	[2,3]	心理素质	3.2	[3,4]
			工作能力	2.6	[2,3]
			身体素质	3.0	[3,4]
			应急能力	2.6	[2,3]
设施因素	2.54	[2,3]	设施优越性	2.8	[2,3]
			设施制造水平	2.4	[2,3]
			设施检修情况	2.6	[2,3]
			设施操作安全水平	1.6	[1,2]

(转下表)

(接表 11)

准则层	准则层得分	隶属区间	指标层	指标层得分	隶属区间
环境因素	3.16	[3,4]	自然环境情况	3.4	[3,4]
			周边环境安全	2.6	[2,3]
			站内环境情况	3.4	[3,4]
管理因素	2.26	[2,3]	管理制度设立	3.2	[3,4]
			安全教育实施	2.2	[2,3]
			经济投入水平	2.4	[2,3]
			管理系统模式	1.6	[1,2]

3 地铁运营安全风险管理对策

针对地震背景下地铁运营安全风险的主要影响因素,提出相应管理对策如下^[18]:

(1)人员因素。加大人员培养培训力度,在地铁运营阶段由于地铁线路的增加以及地铁运营人力需求的增大,使地铁运营人力不足的现象愈发严重,部分部门由于线路扩张技术力的分散,使部门技术人员在专业技术上的盲点愈发变多,这些需要通过扩大专业人员培养培训方式来解决。

提高人员抗灾减灾水平,要注意各级管理人员的专业水平和服务水平,特别是要加强对管理人员和地铁工作人员在地震灾害影响下的情绪管理,包括在法律意识、专业水平、心理素质、应急反应等各方面的专项培训,通过定期的安全演练增强地铁站内各类人员的安全意识,从而提高地铁管理系统的整体水平。

(2)设施因素。加强设施维护维修力度,地铁线内运行人员要同时掌握地铁运营设施的核心技术与维护维修技术,在地震灾害背景下要加大对各类设施的维护力度,增加月检、年检的频次。地铁工作人员既要避免由于设备故障等因素造成的地铁运营事故,还要尽量避免由于违规行为而造成的意外,要大力对乘客和工作人员进行指导。在客流量大时要加强对电梯使用管理,必要时还要实行限流措施,避免踩踏事件的出现。

(3)环境因素。对于自然环境,地铁运营过程中会遇到各种各样的恶劣天气和气候,例如暴雨、暴雪、台风等。地铁运营时的安全状况需由地铁运营控制中心实时监控与反馈,当有例如地震灾害这种非正常情况发生时,地铁运营控制中心应及时采取措施,避免更大事故发生。对于社会环境而言,地铁运营过程中,对运营安全起到至关

重要作用和影响的是地铁运营时所处的社会环境和外部条件。伴随着生活中的各种各样问题及突发灾害的出现,应重点关注人们的心理及情绪状况变化,减少因灾害恐慌、害怕、焦虑等心理造成的事故,从而保证地铁运营安全。

(4)管理因素。地震背景下地铁风险管理应采取具有逻辑性的流程方法,要能够确立地铁运营安全风险目标、辨认地铁运营期危害、评估地铁运营安全风险、制定地铁运营安全风险方案、加强地铁运营安全风险。同时,在地铁运营期的管理方面要加强人员和系统之间的相互协助,利用物联网、大数据等先进手段在地铁管理系统中引入智能管理模式与技术^[21],并且要制定灾害突发调度出现故障时的应急措施,包括制定地铁运营应急预案、地铁外部检修管理风险控制、培养地铁内部专业技术人员、采用关键绩效指标管理方法。

4 结论

本文以某城市地铁为研究对象,采用模糊评价法开展地铁运营期的安全风险评价研究,并对地震背景下地铁运营安全风险提出对策,获得主要结论如下:

(1)在地铁运营期安全风险理论基础上进行地铁运营事故分析,确定人员因素、设施因素、管理因素、环境因素是决定地震背景下地铁运营安全风险的四大因素。

(2)通过模糊综合评价法,对某城市地铁线进行了地震背景下地铁运营安全风险评价,得出了某城市地铁线处于“地铁运营较安全”水平的结论,并提出了一些改进地铁运营期安全隐患的意见。

(3)针对地震背景下影响地铁运营安全的各因

素提出了相应管理对策,以期提高地铁运营期的安全风险管理水平,为地震背景下地铁运营安全风险的管理提供了指导借鉴。

参考文献

- [1] Anne Silla, Kallberg V P. The development of railway safety in finland[J]. Accident Analysis & Prevention, 2012 (45): 737-744.
- [2] Sitarz M, Chruzik K, Mańka I. Integrated safety management system of the railway transport[J]. Journal of Konbin, 2010 (14-15): 223-234.
- [3] Garcia-Lapresta J L, Martinez-Panero M, Meneses L C. Defining the Borda count in a linguistic decision making context [J]. Information Sciences, 2009, 179(14): 2309-2316.
- [4] Burland J B. Relationships between accident investigations, risk analysis, and safety management[J]. Journal of Hazardous Materials, 2001, 26(03): 101-102.
- [5] Snel V H. A subjective and objective integrated approach to determine attribute weights[J]. European Journal of Operational Research, 2006, 30(12): 95-96.
- [6] 贾水库,温晓虎. 地铁运营安全风险管理[J]. 城市轨道交通研究, 2008, 15(20): 189-190.
- [7] 黄宏伟. 地铁运营安全风险管理现状分析[J]. 中国安全科学学报, 2008, 33(06): 95-99.
- [8] 夏利华,魏鹏. 基于RAMS的地铁防灾管理[J]. 现代快轨交通, 2010(15): 42.
- [9] 杜洋洋. 城市地铁网络系统运行脆弱性分析[J]. 交通科技与经济, 2015, 30(32): 214-216.
- [10] 刘婷婷,魏仁辉. 基于多层次模糊综合评价法的地铁车站设施设备运营安全评价[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版, 2015, 34(2): 98-101.
- [11] 万欣. 基于乘客行为的地铁车站运行脆弱性分析与评估研究[J]. 现代安全管理, 2016, 30(01): 41-42.
- [12] 侯靖宇. 基于熵权法的地铁运营安全模糊综合评价方法研究[J]. 隧道建设, 2016, 36(12): 1465-1470.
- [13] 崔艳萍. 地铁行车安全保障系统的研究[J]. 交通企业管理, 2018, 03: 152.
- [14] 郭庶. 融合专家法与层次分析法的地铁车站风险评估[J]. 地铁运营评估, 2018, 43(07): 134-136.
- [15] 尉强. 基于ANP-SD-Fuzzy的地铁运营安全风险评估研究[D]. 兰州:兰州交通大学, 2019.
- [16] 杨苏,孙太保. 基于模糊综合评价法的地铁应急管理能力评价——以南京市地铁1号线为例[J]. 辽宁工业大学学报(自然科学版), 2021, 41(3): 195-200.
- [17] 刘双庆,尤秋菊,张世杰. 基于事故统计分析的地铁运营安全管理研究[J]. 安全, 2019, 40(1): 62-66.
- [18] 宋亮亮. 城市地铁系统运行的脆弱性仿真研究及应用[D]. 南京:东南大学, 2017.
- [19] 史倬岫. 地铁车辆安全运营评价研究[D]. 天津:天津大学, 2016.
- [20] 中华人民共和国建设部. 地铁运营安全评价标准:GB/T50438-2007 [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2008.
- [21] 傅鹤林,黄震,王慧,等. 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.