

基于改进可拓物元法的地铁车站运营安全评价方法^{*}

任 刚^{1,2,3} 陈佳洁^{1,2,3} 高瑾瑶^{1,2,3} 王 义^{1,2,3} 袁春强⁴ 姜秋耘⁴

(1. 东南大学江苏省城市智能交通重点实验室, 211189, 南京;

2. 现代城市交通技术江苏高校协同创新中心, 211189, 南京;

3. 东南大学交通学院, 211189, 南京; 4. 南京地铁运营有限责任公司, 210012, 南京//第一作者, 教授)

摘 要 我国大中城市的地铁建设和运营已进入规模化、网络化阶段。地铁车站的安全运营是整个地铁系统运营安全的重要保障。对地铁车站运营安全风险因素进行梳理与凝练, 科学合理地选取出风险评价指标, 并采用综合赋权法确定指标权重系数, 将德尔菲法、专家咨询法与可拓物元法相结合, 提出了改进可拓物元法, 提高了地铁车站运营安全风险评价的时效性和科学性。结合南京地铁大行宫站的实地调查数据, 对模型进行实例验证, 以说明实施步骤和应用效果。

关键词 地铁车站; 运营安全风险评价; 评价指标体系; 改进可拓物元法

中图分类号 U298:U231.4

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2020.03.031

Safety Assessment of Metro Station Operation Based on Improved Extension and Matter Element Method

REN Gang, CHEN Jiajie, GAO Jinyao, WANG Yi, YUAN Chunqiang, JIANG Qiuyun

Abstract Since metro construction and operation in large and medium-sized Chinese cities have entered the scale and network stage, metro station safe operation becomes increasingly the important guarantee for the safety of whole metro system. In this paper, risk factors that influence metro station operation are sorted out and refined for scientific selection of the assessment indicators. Then, combination weights are used to determine weight coefficients of the indicators, an improved extension and matter element method is proposed by combining the Delphi method, the original extension and matter element method, so as to improve the timeliness and scientific value for metro station operation risk assessment. The field survey data of Daxinggong Station of Nanjing metro are used to verify the above-mentioned methods, the implementation steps and application effect of which are explained.

Key words metro station; operation risk assessment; evalu-

ation index system; improved extension and matter element method

First-author's address Jiangsu Provincial Key Laboratory of Urban ITS, Southeast University, 211189, Nanjing, China

地铁作为一种日益普及的客运方式, 已成为缓解城市交通拥堵的重要手段。地铁的网络化发展意味着地铁系统的复杂度增加, 车站作为地铁网络的锚固点, 是地铁系统客运服务最重要的基础设施, 地铁车站的运营安全是整个轨道交通系统运营安全的重要保障, 清楚地认识和评价地铁车站中存在的不安全因素, 可为决策者提供更好的风险管理依据。

现阶段关于地铁车站运营安全风险评价的研究中较多依赖主观数据^[1-4], 需要提供详细的车站风险源统计数据, 其实时性和适应性较差, 也不便于推广和更新。所以, 亟需一种客观、准确、全面的地铁车站运营安全风险评价方法。本文将德尔菲法、专家咨询法与可拓物元法相结合, 提出了一种改进的可拓物元法。

1 评价指标体系构建与权重系数确定

1.1 评价指标体系构建

遵循全面性、科学性、系统性、可操作性的原则, 综合系统论和 4M 理论的观点, 对影响车站运营安全的主要风险因素进行梳理、分解、凝练、融合, 最终确定一级指标 4 个、二级指标 7 个、三级指标 25 个, 如表 1 所示。

1.2 指标权重系数确定

通过层次分析法和熵权法计算出指标的权重, 并采用综合赋权法综合确定指标综合权重系数 λ_i :

$$\lambda_i = \eta \varphi_i + (1 - \eta) \gamma_i \quad (1)$$

式中:

^{*} 江苏省重点研发计划(社会发展)项目(2016YFE0206800)

- φ_i ——由层次分析法确定的第 i 个指标的客观权重系数;
- γ_i ——由熵权法确定的第 i 个指标的主观权重系数;
- η ——客观权重所占的比值,一般取 0.55。

2 地铁站运营安全评价方法

2.1 可拓物元法优势与不足

可拓物元评价方法能够兼顾多层次、多数量的风险因素指标之间的关系,解决评价对象内容不相容的问题,从而全面且准确地评价地铁站运营过程中存在的风险^[5-6],具有一定的优越性。然而,传统的可拓物元评价方法在评价地铁站运营安全风险时存在以下几个问题:

- 1) 时效性滞后:当车站风险评价指标水平等级的判定滞后时,会使得整个风险评价的结果具有偏差。
- 2) 适用性不足:不同地域的衡量标准不同,各标准之间可比较性较差,会导致评价结果不准确。
- 3) 一致性较差:在评价多层次的评价指标时,无法兼顾上下两个层级之间的评价结果,使得不同层级的风险评价结果之间可能存在一致性偏差。

表 1 地铁站运营安全风险评价指标体系		
一级指标	二级指标	三级指标
人员指标 A	客流指标 A_1	站台饱和度 A_{11}
		通道拥挤度 A_{12}
		超高峰系数 A_{13}
		客流最大波动系数 A_{14}
		楼梯拥挤度 A_{15}
	员工指标 A_2	学历优秀率 A_{21}
职称优秀率 A_{22}		
平均工龄 A_{23}		
技术考核达标率 A_{24}		
操作违反劳动纪律率 A_{25}		
		指挥操作违反规章率 A_{26}
设备设施指标 B	设备指标 B_1	设备故障率 B_{11}
		设备更新率 B_{12}
		设备维修保养合格率 B_{13}
环境指标 C	内部环境指标 C_1	噪声控制符合规定率 C_{11}
		空气指标符合规定率 C_{12}
		引导标志合理性 C_{13}
	外部环境指标 C_2	外部极端天气频率 C_{21}
		车站救援便捷性 C_{22}
管理指标 D	规章制度指标 D_1	安全规章制度完善性 D_{11}
		安全规章制度落实性 D_{12}
	事前预防水平指标 D_2	安全技术人员配备率 D_{21}
		员工应急排演频率 D_{22}
		应急预案水平 D_{23}
员工应急培训情况 D_{24}		

2.2 改进可拓物元风险评价方法

针对传统可拓物元评价方法存在的问题,本文将德尔菲专家咨询法与传统的可拓物元评价模型进行融合,形成了改进可拓物元风险评价方法。该方法中专家可以根据每一轮的评价结果是否合理来调整各层级指标风险评价等级水平,直到各位专家的结论趋于一致且对评价结果感到满意为止,克服了传统可拓物元评价模型存在的不足。

设风险等级域 $N = \{N_j, j = 1, 2, 3, 4\}$ 分别表示安全、比较安全、临界危险、危险 4 个等级;待评价指标集 $C = \{c_i, i = 1, 2, \dots, n\}$ 。改进的可拓物元风险评价方法流程如图 1 所示。

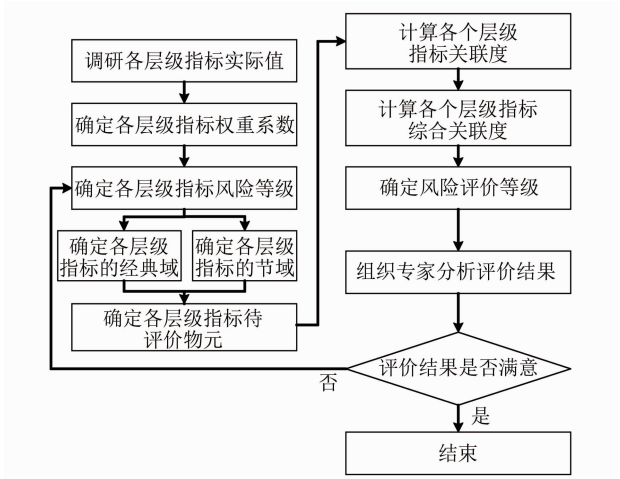


图 1 改进可拓物元风险评价方法流程

- 1) 步骤 1:调研各层级指标实际值。按照表 1 中列出的地铁站运营安全风险评价三级指标,实地调研车站中各指标的实际值。
- 2) 步骤 2:确定各层级风险评价指标权重系数。根据 1.2 节中的综合赋权法来确定风险评价指标权重系数。
- 3) 步骤 3:确定各层级评价指标风险等级。按照三级指标、二级指标、一级指标的顺序将地铁站运营安全风险评价指标按照安全、比较安全、临界危险、危险 4 个维度划分风险等级。
- 4) 步骤 4:确定各层级的指标经典域和节域。

$$R_j = (N_j, C, V_j) = \begin{bmatrix} N_j & c_1 & v_{j1} \\ & c_2 & v_{j2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_{jn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_j & c_1 & (a_{j1}, b_{j1}] \\ & c_2 & (a_{j2}, b_{j2}] \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & (a_{jn}, b_{jn}] \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:

R_j ——待评价指标集在风险等级为 N_j 时的经典域物元矩阵;

N_j ——第 j 个风险等级;

c_j ——待评价指标集 C 中的第 j 个指标;

v_{ji} ——经典域, 风险等级为 N_j 时指标 C_i 的取值范围, 取 $(a_{ji}, b_{ji}]$;

V_j —— $V_{ji}(i = 1, 2, \dots, n)$ 的集合。

$$R_N = (N, C, V_N) =$$

$$\begin{bmatrix} N & c_1 & v_{N1} \\ & c_i & v_{Ni} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_{Nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N & c_1 & (a_{N1}, b_{N1}] \\ & c_i & (a_{Ni}, b_{Ni}] \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & (a_{Nn}, b_{Nn}] \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:

R_N ——待评价指标集的节域物元矩阵;

v_{Ni} ——表示节域, 为指标 c_i 在各风险等级取值范围的并集 $(a_{Ni}, b_{Ni}]$;

V_N —— $v_{Ni}(i = 1, 2, \dots, n)$ 的集合。

在确定经典域和节域时应该从最后一个层级的风险评价指标开始, 将同属于上一个层级的指标组合在一起, 成为一组评价车站运营安全风险的经典域。

5) 步骤 5: 确定各层级指标的待评价物元矩阵 $R_j(C)$ 。

$$R_j(C) = \begin{bmatrix} N_j & c_1 & v'_{j1} \\ & c_i & v'_{ji} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v'_{jn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中:

v'_{ji} ——指标 c_i 在风险等级 N_j 的量值, 即通过调查或计算得到的待评价指标的具体数据。

6) 步骤 6: 计算各指标关联度矩阵 $K = (k_{ij})_{n \times 4}$ 。定义值 x_0 和区间 $X = (x_1, x_2)$, 则 x_0 与 X 的距离 $\rho(x_0, X)$ 的计算公式如下:

$$\rho(x_0, X) = \left| x_0 - \frac{x_1 + x_2}{2} \right| - \frac{x_2 - x_1}{2} \quad (5)$$

$$k_{ij} = \frac{\rho(v'_{ji}, v_{ji})}{\rho(v'_{ji}, v_{Ni}) - \rho(v'_{ji}, v_{ji})} \quad (6)$$

式中:

k_{ij} ——第 i 个指标在 j 个安全等级的关联度。

7) 步骤 7: 计算每个层级指标的综合关联度向量 $Z = [z_1, z_2, z_3, z_4]$, 其中, z_j 的计算公式如下:

$$z_j = \sum_{i=1}^n (\lambda_i \times k_{ij}) \quad (7)$$

式中:

z_j ——评价指标集 C 对应的上一层级指标对风险等级 j 的综合关联度。

关联度的计算需要按照上述方法从最下层至最上层逐层进行计算。综合关联度的值直接影响到后续各指标层级的风险等级的判断。

8) 步骤 8: 确定每层指标的风险评价等级。

$$z_{j, \text{normal}} = \frac{z_j - \min Z}{\max Z - \min Z} \quad (8)$$

式中:

$z_{j, \text{normal}}$ ——对 z_j 进行标准化后的值。

向量 Z 中最大值对应的下标值 j , 即为待评价指标集 C 对应的上一个层级指标的风险评价等级。

9) 步骤 9: 召集专家。所召集的专家应对我国地铁运营有深刻认识, 同时熟悉安全风险管理的先进理念, 包括大学教授、地铁运营公司安保部人员、地铁站站长等。

10) 步骤 10: 组织专家分析评价结果。对所有的评价指标进行综合风险等级评价后, 将结果汇总表分别发放给各位专家, 各专家独立对评价结果进行审阅。若所有专家对评价结果感到满意, 则评价工作结束; 如有专家对评价结果不满意, 那么专家针对结果有出入的风险指标提供相应的风险等级水平修改意见。随后再将各位专家的修改意见进行汇总整理, 反馈给所有专家共同商讨修改, 并再次进行步骤 3, 直到所有专家都对评价结果感到满意。

3 案例分析

3.1 具体操作步骤

本文采用提出的改进可拓物元模型对南京地铁大行宫站的运营情况进行安全风险评价。通过基础数据调研, 按照 2.2 节提出的流程进行第一轮风险评级, 结果见表 2。

组织专家对表 2 的结果进行分析, 发现在设备设施指标层中, 一、二级的风险评价结果均为临界危险; 而第三级指标中, 设备故障率处于临界危险状态, 设备更新率和设备维修保养合格率却处于安全状态, 这说明基于现有的分析结果, 出现故障的设备均被维修保养过, 设备的更新也处于较好的状态, 这与指标层处在临界危险状态相矛盾。因而对第三级指标不同风险等级阈值进行调整, 结果见表 3。再次计算得到第二轮评价结果, 仍见表 2。将结

表2 大行宫站各层级指标风险评价等级表

一级指标	二级指标	三级指标
A(2)(2)	A ₁ (4)(4)	A ₁₁ (4)(4)
		A ₁₂ (3)(3)
		A ₁₃ (3)(3)
		A ₁₄ (2)(2)
		A ₁₅ (3)(3)
	A ₂ (2)(2)	A ₂₁ (1)(1)
B(3)(3)	A ₂ (2)(2)	A ₂₂ (3)(3)
		A ₂₃ (3)(3)
		A ₂₄ (1)(1)
		A ₂₅ (2)(2)
		A ₂₆ (2)(2)
	B ₁ (3)(3)	B ₁₁ (3)(3)
C(1)(1)	B ₁ (3)(3)	B ₁₂ (2)(3)
		B ₁₃ (2)(3)
		C ₁₁ (1)(1)
		C ₁₂ (1)(1)
		C ₁₃ (2)(2)
	C ₂ (2)(2)	C ₂₁ (3)(3)
D(2)(2)	C ₂ (2)(2)	C ₂₂ (1)(1)
		D ₁₁ (1)(1)
		D ₁₂ (2)(2)
		D ₂₁ (1)(1)
		D ₂₂ (2)(2)
	D ₂ (1)(1)	D ₂₃ (2)(2)
		D ₂₄ (1)(1)

注：()内数字为风险等级,1代表安全,2代表比较安全,3代表临界危险,4代表危险;例如 B₁₂(2)(3)代表第1轮评价比较安全,第2轮评价临界危险

果反馈给各位专家,专家一致认为此时大行宫站各层级指标风险评价结果较为合理。

3.2 评价结果分析

根据评价结果可知大行宫站整体运营处于临界危险状态。客流指标处于比较危险的状态,在车站的运营管理中,应加大对大客流的引导和管理;设备故障率、设备更新率、设备维修保养合格率均处于临界危险状态,加大力度对设备进行故障排检是今后地铁车站运营工作的重点;车站外部极端天气频率处于临界危险状态,在面对极端天气时,应做好相应的应急处理工作。

4 结语

改进的可拓物元评价模型克服了传统可拓物元评价模型时效性滞后的问题,专家根据每一轮的风险评价结果,对上一轮的相关风险评价数据进行调整,使其更具有时效性和科学性。同时,改进的可拓物元评价模型方法充分体现专家的经验,克服了地域差异和评价标准不全的问题,有很好的适用性,能更准确地识别风险因素,从而可更有效地提高地铁的运营安全水平。

表3 调整后设备设施指标不同风险水平分级表

一级指标	二级指标	三级指标	不同风险等级			
			安全	比较安全	临界危险	危险
B	B ₁	B ₁	0< · ≤0.10	0.10< · ≤0.20	0.20< · ≤0.30	0.30< · ≤1.00
		B ₂	0.35< · ≤1.00	0.15< · ≤0.35	0.05< · ≤0.15	0< · ≤0.05
		B ₃	0.95< · ≤1.00	0.90< · ≤0.95	0.75< · ≤0.90	0< · ≤0.75

参考文献

[1] 王洪德,潘科,姜福东.基于 AHP 的影响城市地铁运营安全的
危害分析及预防对策[J].铁道学报,2007(2): 27.
[2] 王志华.地铁车站运营安全风险评价研究[D].北京:北京交
通大学,2012.
[3] SOONSA C J,BOSCH J W,AREND S G.Framework of a quan-
titative risk analysis for the fire safety in metro systems[J].Tun-
nelling and Underground Space Technology,2006(3): 281.

[4] LU Y,LI Q M,XIAO W J.Case-based reasoning for automated
safety risk analysis on subway operation: Case representation
and retrieval[J].Safety Science,2013,57: 75.
[5] 蔡文.物元模型及其应用[M].北京:科学技术文献出版社,
1994: 21-159.
[6] 潘科,王洪德,石剑云.多级可拓评价方法在地铁运营安全评
价中的应用[J].铁道学报,2011(5): 14.

(收稿日期:2018-05-02)

《城市轨道交通研究》欢迎投稿

投稿网址:tougao.umat1998.com