

中文引用格式:潘寒川,刘丹阳,张煜睿,等. 基于组合赋权-可拓云的城市轨道交通线路运营安全评价[J]. 中国安全科学学报, 2024,34(4):160-166.

英文引用格式: PAN Hanchuan, LIU Danyang, ZHANG Yurui, et al. Urban rail transit line operation safety evaluation based on combined weighting-extension cloud method[J]. China Safety Science Journal, 2024,34(4):160-166.

基于组合赋权-可拓云的城市轨道交通 线路运营安全评价*

潘寒川¹副教授, 刘丹阳¹, 张煜睿¹, 刘志钢¹教授, 尚斌^{**2}副教授

(1 上海工程技术大学 城市轨道交通学院, 上海 201620; 2 上海建桥学院 商学院, 上海 201306)

中图分类号: X951

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.04.2513

基金项目: 国家自然科学基金面上项目资助(72371154, 52072235); 中国博士后科学基金资助(2021M692413)。

【摘要】 为解决城市轨道交通运营安全评价指标缺乏时效性和部分安全评价模型忽略评价等级的模糊界限等问题, 重新构建城市轨道交通线路的运营安全评价指标体系, 包括员工对传染性疾病预防措施的执行力度、相关单位的配合程度、防控设备的完备程度等新指标; 其次运用基于离差最小化的最优最劣法(BWM)和反熵权法对各指标进行组合赋权; 然后应用可拓云确定城市轨道交通线路运营安全评价等级; 最后以上海地铁17号线为例进行实例分析。结果表明: 上海地铁17号线运营安全评价各指标的各级云关联度低于0.5且置信度高于0.99, 其中, 人员因素、线路因素、管理因素的置信度均为1, 仅设备因素的置信度为0.998; 结合每个二级指标的灵敏度值分析, 得出车站运营设备的可靠性对线路实际运营安全影响最大; 在实际运营中, 乘客对车站传染性疾病预防的配合程度越高, 对综合评价的提升也越大; 该评价指标体系和评价模型能够准确地反映城市轨道交通线路运营安全水平, 且更加适用于目前城市轨道交通线路的运营情况。

【关键词】 组合赋权; 可拓云; 城市轨道交通; 线路运营; 安全评价; 传染性疾病预防

Urban rail transit line operation safety evaluation based on combined weighting-extension cloud method

PAN Hanchuan¹, LIU Danyang¹, ZHANG Yurui¹, LIU Zhigang¹, SHANG Bin²

(1 School of Urban Railway Transportation, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China; 2 Business School, Shanghai Jian Qiao University, Shanghai 201306, China)

Abstract: In order to solve the problems of lack of timeliness in the evaluation indicators of urban rail transit operation safety and some safety evaluation models ignoring the fuzzy boundaries of evaluation levels, a new evaluation index system for the operation safety of urban rail transit lines was reconstructed, including new indicators such as the implementation of infectious disease prevention and control measures by employees, the degree of cooperation between relevant units, and the completeness of prevention and control equipment. Secondly, the combination weighting of various indicators was carried out using the

* 文章编号: 1003-3033(2024)04-0160-07; 收稿日期: 2023-11-05; 修稿日期: 2024-01-11

** 通信作者: 尚斌(1982—), 男, 吉林长春人, 博士, 副教授, 主要从事交通管理与控制、交通优化等方向的研究。E-mail: shangbin@gench.edu.cn。

Best Worst Method (BWM) based on the minimization of dispersion and the anti-entropy weighting method. Then, the extension cloud was applied to determine the safety evaluation level of urban rail transit line operation. Finally, take Shanghai Metro Line 17 as an example for analysis. The results indicate that the comprehensive cloud correlation degrees of various indicators for the operational safety assessment of Shanghai Metro Line 17 are below 0.5, with a confidence level exceeding 0.99, among which the confidence levels for personnel factors, line factors, and management factors are all 1. This suggests that the employed indicator system and evaluation model are closely aligned with the current operational conditions of urban rail transit, accurately reflecting the safety levels of urban rail transit operations. Further analysis of the sensitivity of indicator values reveals that the reliability of station operational equipment has the most significant impact on the actual operational safety of the line. In practical operations, the degree of passenger cooperation in preventing and controlling infectious diseases at stations has the greatest potential to improve the indicator. It can help subway companies establish a more scientific and effective safety evaluation system to ensure the safety of daily line operations.

Keywords: combination weighting; extension cloud model; urban rail transit; line operation; safety evaluation; infectious diseases

0 引言

城市轨道交通作为居民的主要出行方式,其地铁车站和列车车厢相对封闭、人员密集、客流流动性大,一旦有急性传染病通过城市轨道交通进行传播,将造成严重危害。关于急性传染病应急方案的城市轨道交通线路运营安全评价,能有效提升防控管理,降低传播风险,对城市轨道交通运营具有重要意义。

在城市轨道交通运营安全评价方面,苏旭明等^[1]采用改进后的事故模式及影响分析法(Improved Failure Mode and Effects Analysis, IFMEA),评价城市轨道交通运营并寻找潜在风险;王艳辉等^[2]结合层次分析法和熵值法,综合评价城市轨道交通运营线路运营;姜林林^[3]建立改进神经网络评价模型,并使用大量样本训练该模型以提高评价结果的精确度。黎新华^[4]与鹿颖^[5]等研究中的评价指标体系缺乏时效性,未涉及到传染病给城市轨道交通运营带来的变化,同时,任刚等^[6]的评价模型忽略评价等级,造成界限模糊。

鉴于此,笔者拟综合考虑国家政策及城市轨道交通的运营特点,从人员-设备-线路-管理的框架重新构建关于急性传染病应急方案的城市轨道交通运营安全评价指标体系,结合最优最劣法(Best Worst Method, BWM)、反熵权法等^[7],并以上海地铁17号线为例,验证该模型的可靠性与可操作性,以期准确反映城市轨道交通线路运营安全水平,为防控宣传、传染病防控的实施与调整提供理论依据。

1 线路运营安全评价指标体系

1.1 构建评价指标体系

通过查阅城市轨道交通运营安全评价和传染性疾病方面的相关研究^[8],再结合《地铁设计规范》^[9],并与行业内有关专家访谈,最终确定人员因素、设备因素、线路因素、管理因素4个一级指标,其下又延伸出17个二级指标,如图1所示。其中,变化最大的是人员因素。主要包含车站的员工、乘客及防控的相关单位,其执行情况和配合程度将直接影响到城市轨道交通线路的运营安全。而在以往文献中该因素相关的指标很少涉及到紧急情况下传染性疾病预防的相关执行措施,管理因素也是影响城市轨道交通线路运营安全的重要因素,它主要涉及轨道公司内部传染性疾病预防的应急预案、员工的日常培训以及对外的防控宣传力度等方面。设备因素主要有车站运营所涉及的设施设备、车辆系统、信号系统、供电系统及各车站新增的疾病防控设备,设备故障将会对城市轨道交通线路运营安全产生一定影响。线路因素考虑了外部环境和内部环境(超高峰系数、突发大客流频次及线路运输组织的稳定性)对城市轨道交通线路运营安全造成的影响。

1.2 定量指标的评价原则

在该评价指标体系中, B_2 、 B_6 、 B_7 、 B_8 、 B_9 、 B_{10} 、 B_{11} 、 B_{12} 及 B_{14} 为定量指标,其基础数据来源于抽查某条线路中部分车站的运营数据和实地调研结果。采用以下公式计算这些定量指标:

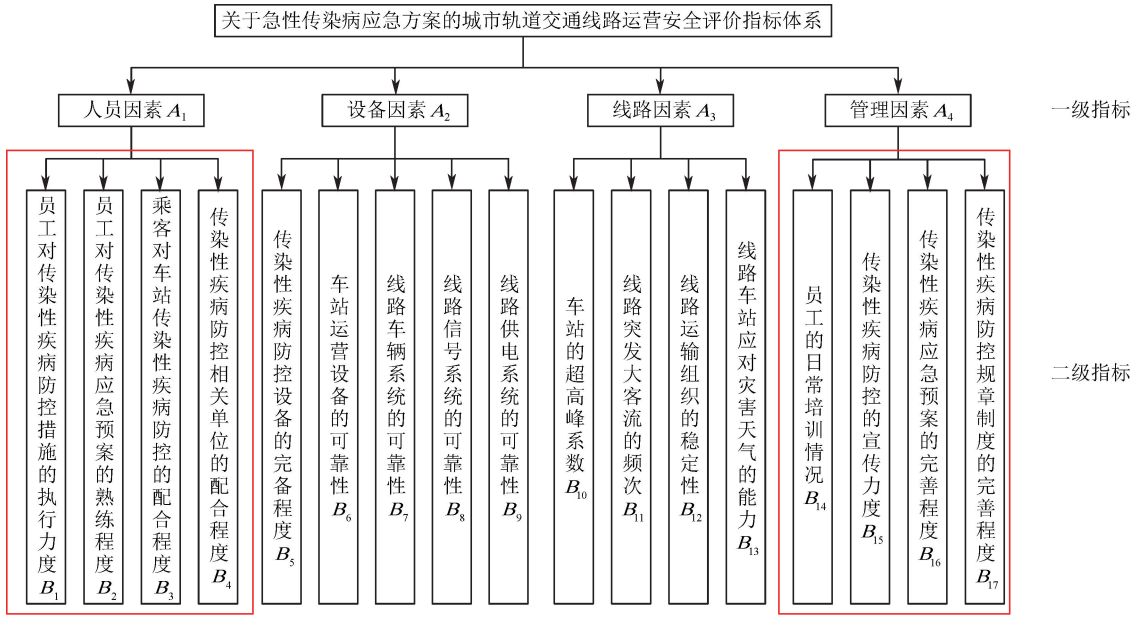


图1 关于急性传染病应急方案的城市轨道交通线路运营安全评价指标体系

Fig. 1 A safety evaluation index system for urban rail transit line operation in emergency response plans for acute infectious diseases

$$\eta = \frac{T_s}{T_L} \quad (1)$$

式中： η 为某设备或系统的可靠性； T_s 为某设备或系统的实际运行时间，min； T_L 为无故障情况下某设备或系统的理论运行总时间，min。以上为与指标 B_6 、 B_7 、 B_8 、 B_9 相关的变量。

$$\gamma = \frac{\sum_{a=1}^z w_a \gamma_a}{\sum_{a=1}^z w_a} \quad (2)$$

式中： γ 为某车站员工总体的评价情况； z 为某车站参与评价的员工总数； γ_a 为第 a 个员工的评价情况； w_a 为第 a 个员工所占的权重。以上均为指标 B_2 相关连的变量。

$$Q = \frac{N_{yd}}{N_{yz}} \cdot \frac{T_{yd}}{T_{yz}} \cdot \frac{T_{fd}}{T_{fd}} \cdot \frac{S_{jd}}{S_{jz}} \cdot \frac{L_{mz}}{L_{md}} \quad (3)$$

式中： Q 为线路某天的运输组织稳定性； N_{yd} 为当天车站开发数量； N_{yz} 为正常情况下车站开放数量； T_{yd} 为当天运营时间段，h； T_{yz} 为正常情况运营时间段； T_{fd} 为当天平均发车间隔，h/列； T_{fd} 为正常情况平均发车间隔，h/列； S_{jd} 为当天准点率； S_{jz} 为正常情况准点率； L_{md} 为当天列车满载率； L_{mz} 为正常情况列车满载率。以上均为与指标 B_{12} 相关连的变量。

1.3 定性指标的评价原则

在该评价指标体系中， B_1 、 B_3 、 B_4 、 B_5 、 B_{13} 、 B_{15} 、

B_{16} 及 B_{17} 为定性指标，由专家组根据线路的运营数据、运营情况等，结合自身经验及参照评价依据给出该项指标的评价等级。

2 组合赋权-可拓云评价模型

评价具体流程如图 2 所示。

2.1 基于 BWM-反熵权的组合赋权

2.1.1 BWM 法确定主观权重

BWM 法的具体步骤如下：

1) 由专家组对所有指标进行同级比较打分，采用 1—9 标度法，9 表示最重要，1 表示最不重要。由此选出同级指标的最优指标 C_B 和最劣指标 C_U 。

2) 请专家组根据专业知识和工作经验，用最优指标 C_B 与所有同层级指标比较打分以及所有同层级指标与最劣指标 C_U 比较打分，从而得到 2 组比较打分值 ξ_{B_0} 和 ξ_{U_0} 。

3) 最优指标权重为 w_B ，最劣指标权重为 w_U ，实际指标权重为 w_0 ，实际比较打分所产生的误差为 ε ，以此建立模型。

4) 求解模型得到 ε ，按式 (5) 计算检验系数 C_R 。当 $C_R < 0.1$ ，即通过置信度检验，即可得到各指标的主观权重 w_0 。

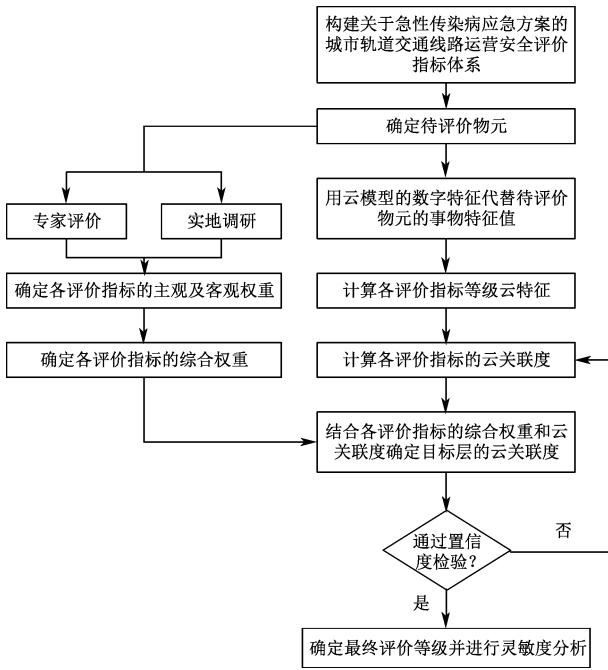


图 2 关于急性传染病应急方案的城市轨道交通线路运营安全的评价流程

Fig. 2 Evaluation process for operational safety of urban rail transit lines regarding emergency plans for acute infectious diseases

$$\min Z = \varepsilon$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} \left| \frac{w_B}{w_o} - \xi_{B_o} \right| < \varepsilon \\ \left| \frac{w_o}{w_U} - \xi_{U_o} \right| < \varepsilon \\ \sum_{o=1}^n w_o = 1 \\ w_o > 0, o = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (4)$$

式中 n 为同级下的指标数量。

$$C_R = \frac{\varepsilon}{C_1} \quad (5)$$

式中: C_1 为一致性系数, 其取值由 ξ_{B_o} 和 ξ_{U_o} 中的最大值 C_{BU} 确定, 具体见表 1。

表 1 一致性系数

Tab. 1 Consistency Index table

C_{BU}	1	2	3	4	5	6	7	8	9
C_1	0.00	0.44	1.00	1.63	2.30	3.00	3.73	4.47	5.23

2.1.2 反熵权法确定客观权重

使用反熵代替熵对各层级指标的客观权重进行赋值^[10], 能够避免传统熵权法对指标权重赋值时因指标差异程度敏感性较大而产生极端权重情况的发生。具体步骤如下:

1) 设有 e 个评价专家, f 个评价指标, 评价分值为 x_{ij} , 按下式对各项指标进行标准化处理。

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min\{x_{ij}\}}{\max\{x_{ij}\} - \min\{x_{ij}\}} \quad (6)$$

2) 对标准化处理后的评价分值 y_{ij} 再进行归一化处理, 得到 z_{ij} 。

$$z_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sum_{j=1}^f y_{ij}} \quad (7)$$

3) 根据下式计算各指标的反熵 h_j 。

$$h_j = - \sum_{i=1}^e z_{ij} \cdot \ln(1 - z_{ij}) \quad (8)$$

4) 通过下式计算各指标的客观权重 w_{bj} 。

$$w_{bj} = \frac{h_j}{\sum_{j=1}^f h_j} \quad (9)$$

2.1.3 基于离差最小化的组合赋权

为使主观赋权和客观赋权结果的一致性更强, 引入 m_i , 表示第 i 个专家的主客观评价信息的偏离系数。偏离系数 m_i 越小, 说明评价指标的主客观评价信息越一致, 因此, 该问题等价于单目标规划问题:

$$\min M = \sum_{i=1}^e m_i = \sum_{i=1}^e \sum_{j=1}^f (\alpha z_{ij} w_{oj} + \beta z_{ij} w_{bj})^2 \quad (10)$$

式中: M 为所有偏离系数的和; w_{oj} 为第 j 个指标的主观权重; w_{bj} 为反熵权法得到的第 j 个指标的客观权重; α 与 β 分别为最终权重中主观权重的系数和客观权重的系数, $\alpha, \beta \geq 0; \alpha + \beta = 1$ 。

由式(11)、式(12)可解出 α 与 β , 然后再代入式(13), 就可以得到各指标的最终权重 w_{ij} 。

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^e \sum_{j=1}^f w_{bj} z_{ij}^2 (w_{oj} + w_{bj})}{\sum_{i=1}^e \sum_{j=1}^f z_{ij}^2 (w_{oj} + w_{bj})^2} \quad (11)$$

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^e \sum_{j=1}^f w_{oj} z_{ij}^2 (w_{oj} + w_{bj})}{\sum_{i=1}^e \sum_{j=1}^f z_{ij}^2 (w_{oj} + w_{bj})^2} \quad (12)$$

$$w_{ij} = \alpha w_{oj} + \beta w_{bj} \quad (13)$$

2.2 基于可拓云的评价模型

2.2.1 可拓云理论

可拓云理论将一组基本物元记为 $R = (N, C, V)$, 其中, N 为事物名称、 C 为事物特征、 V 为事物特

征值。在传统可拓物元法中, V 是一个确定数值, 而城市轨道交通线路运营安全评价存在着随机性与模糊性, 其等级界限也存在着随机性与模糊性, 因此, 使用云模型数字特征 (E_x, E_n, H_e) 替原事物特征值 V , 其中, E_x 为期望值, E_n 为熵值, H_e 为超熵值, 从而实现评价过程中随机性和模糊性的数学描述。可拓云表示为

$$R = \begin{pmatrix} N & C_1 & (E_{x1}, E_{n1}, H_{e1}) \\ & C_2 & (E_{x2}, E_{n2}, H_{e2}) \\ & \vdots & \vdots \\ & C_l & (E_{xl}, E_{nl}, H_{el}) \end{pmatrix} \quad (14)$$

式中 l 为事物特征的数量, 在文中为评价等级, $l = (1, 2, \dots, 5)$ 。

将城市轨道交通线路运营安全评价等级划分为很差、较差、合格、良好、优秀, 分别对应为 I - V 级, 将等级界限视为双约束空间 $[C_{\min}, C_{\max}]$, 利用转换式 (15) 计算得到等级界限云模型的数字特征。

$$\begin{cases} E_x = \frac{C_{\max} + C_{\min}}{2} \\ E_n = \frac{C_{\max} - C_{\min}}{6} \\ H_e = s \end{cases} \quad (15)$$

式中: C_{\min} 为等级界限的下限; C_{\max} 为等级界限的上限; s 为常数, 可结合指标的模糊性、离散性、随机性和实际情况进行调整, 文中 s 取 0.05。

2.2.2 计算可拓云的云关联度

将指标评价价值视为一个云滴, 然后再生成一个期望为 E_n , 标准差为 H_e 的正态随机数 E_m 。最后根据式 (16) 计算出评价指标值 x_j 与各评级等级之间的云关联度 k_{jl} , 得到城市轨道交通线路运营安全综合评价判断矩阵 K 。

$$k_{jl} = \exp \left[- \frac{(x_j - E_x)^2}{2(E_{nn})^2} \right] \quad (16)$$

表 2 关于急性传染病应急方案的城市轨道交通运营安全评价指标的特征参数

Tab. 2 Characteristic parameters of safety evaluation indicators for urban rail transit operation in emergency response plans for acute infectious diseases

评价指标	I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级
B_1	(0.40, 1.133, 0.05)	(1.20, 1.133, 0.05)	(2.00, 1.133, 0.05)	(2.80, 1.133, 0.05)	(3.60, 1.133, 0.05)
B_2	(30.00, 10.000, 0.05)	(65.00, 1.167, 0.05)	(75.00, 1.167, 0.05)	(85.00, 1.167, 0.05)	(95.00, 1.167, 0.05)
B_3	(0.40, 1.133, 0.05)	(1.20, 1.133, 0.05)	(2.00, 1.133, 0.05)	(2.80, 1.133, 0.05)	(3.60, 1.133, 0.05)
B_4	(0.40, 1.133, 0.05)	(1.20, 1.133, 0.05)	(2.00, 1.133, 0.05)	(2.80, 1.133, 0.05)	(3.60, 1.133, 0.05)
B_5	(0.40, 1.133, 0.05)	(1.20, 1.133, 0.05)	(2.00, 1.133, 0.05)	(2.80, 1.133, 0.05)	(3.60, 1.133, 0.05)
B_6	(40.00, 13.333, 0.05)	(82.50, 0.833, 0.05)	(87.50, 0.833, 0.05)	(92.50, 0.833, 0.05)	(97.50, 0.833, 0.05)
B_7	(40.00, 13.333, 0.05)	(82.50, 0.833, 0.05)	(87.50, 0.833, 0.05)	(92.50, 0.833, 0.05)	(97.50, 0.833, 0.05)

式中 k_{jl} 为第 j 个指标评价价值 x_j 属于 l 等级界限云的相关度。

$$K = \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots & k_{1l} \\ k_{21} & k_{22} & \dots & k_{2l} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ k_{gl} & k_{g2} & \dots & k_{gl} \end{pmatrix} \quad (17)$$

式中 g 为二级指标个数, $g = 17$ 。

2.2.3 综合评价等级的计算及验证

将组合权重向量 W 和综合评价判断矩阵 K 相乘得到综合云的关联度 $D = WK$, 按照最大关联度原则, 城市轨道交通线路运营安全综合评价等级 $d = \max D(d_1, d_2, \dots, d_5)$ 。

由式 (16) 可知: 计算指标 x_j 正态云之间的云关联度 k_{jl} 的过程中存在随机因素, 因此, 通过 P 次计算对综合评价结果进行可信度检验, 引入置信度因子 θ 为:

$$\theta = \frac{\max p_l}{P} \quad (18)$$

式中 p_l 为城市轨道交通线路运营安全评价结果为 l 等级的次数。

由式 (18) 可知: θ 值越大, 表示评判结果的分散度越小, 可信度越高。当 $\theta \geq 0.995$ 时, 将评价结果视作可靠。

3 线路运营安全评价实例分析

以上海地铁 17 号线为例, 应用组合赋权的可拓云来评价该线路的运营安全。该实例中的各项评价指标数据值由专家问卷调查和实地调研测得。

3.1 确定可拓云特征参数

邀请专家根据线路实际情况、历史运营数据与《地铁设计规范》来划分各评价指标的等级界限, 按照式 (15) 计算各等级界限的云模型数字特征, 其结果见表 2。

续表 2

评价指标	I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级
B_8	(40.00, 13.333, 0.05)	(82.50, 0.833, 0.05)	(87.50, 0.833, 0.05)	(92.50, 0.833, 0.05)	(97.50, 0.833, 0.05)
B_9	(40.00, 13.333, 0.05)	(82.50, 0.833, 0.05)	(87.50, 0.833, 0.05)	(92.50, 0.833, 0.05)	(97.50, 0.833, 0.05)
B_{10}	(1.50, 0.033, 0.05)	(1.35, 0.017, 0.05)	(1.25, 0.017, 0.05)	(1.15, 0.017, 0.05)	(1.05, 0.017, 0.05)
B_{11}	(10.00, 0.667, 0.05)	(6.50, 0.500, 0.05)	(4.00, 0.333, 0.05)	(2.00, 0.333, 0.05)	(0.50, 0.167, 0.05)
B_{12}	(30.00, 10.000, 0.05)	(65.00, 1.167, 0.05)	(75.00, 1.167, 0.05)	(85.00, 1.167, 0.05)	(95.00, 1.167, 0.05)
B_{13}	(0.40, 1.133, 0.05)	(1.20, 1.133, 0.05)	(2.00, 1.133, 0.05)	(2.80, 1.133, 0.05)	(3.60, 1.133, 0.05)
B_{14}	(10.00, 3.333, 0.05)	(30.00, 3.333, 0.05)	(50.00, 3.333, 0.05)	(70.00, 3.333, 0.05)	(90.00, 3.333, 0.05)
B_{15}	(0.40, 1.133, 0.05)	(1.20, 1.133, 0.05)	(2.00, 1.133, 0.05)	(2.80, 1.133, 0.05)	(3.60, 1.133, 0.05)
B_{16}	(0.40, 1.133, 0.05)	(1.20, 1.133, 0.05)	(2.00, 1.133, 0.05)	(2.80, 1.133, 0.05)	(3.60, 1.133, 0.05)
B_{17}	(0.40, 1.133, 0.05)	(1.20, 1.133, 0.05)	(2.00, 1.133, 0.05)	(2.80, 1.133, 0.05)	(3.60, 1.133, 0.05)

3.2 确定各项指标的权重

按照式(4)一式(9)分别计算各项指标的主客观权重,再由式(10)一式(13)计算主客观权重的分配系数,解得 $\alpha=0.4265, \beta=0.5735$ 各指标的权重值见表3。

表3 安全评价指标的权重值

Tab.3 Weight values of safety evaluation index

一级指标	权重系数	二级指标	BWM 法权重	反熵权法权重	综合权重
A_1	0.248	B_1	0.097	0.070	0.081
		B_2	0.024	0.048	0.038
		B_3	0.113	0.062	0.084
		B_4	0.027	0.058	0.045
A_2	0.364	B_5	0.038	0.055	0.048
		B_6	0.205	0.054	0.117
		B_7	0.087	0.066	0.075
		B_8	0.061	0.055	0.058
		B_9	0.087	0.050	0.066
A_3	0.184	B_{10}	0.010	0.083	0.052
		B_{11}	0.012	0.069	0.045
		B_{12}	0.022	0.050	0.038
		B_{13}	0.048	0.050	0.049
A_5	0.204	B_{14}	0.034	0.045	0.040
		B_{15}	0.016	0.066	0.045
		B_{16}	0.043	0.050	0.047
		B_{17}	0.076	0.069	0.072

3.3 评价结果分析

将通过专家问卷调查和实地调研得到的城市轨道交通线路运营安全评价指的数据代入式(16)一式(18),利用数学软件计算1000次,即可得到各指标关于I—V级的云关联度和置信度,其结果见表4。

由表4及最大关联度原则可知:全部评价结果都通过了置信度检验。上海地铁17号线运营安全综合评价等级为IV级,其一级指标人员因素、设备因

表4 上海地铁17号线运营安全评价的云关联度和置信度

Tab.4 Cloud correlation degree and confidence degree of operation safety evaluation of Shanghai Metro Line 17

评价指标	I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级	置信度 θ
A_1	0	0	0.002 1	0.427 8	0	1
A_2	0.000 2	0	0.074 9	0.091 4	0.109 5	0.998
A_3	0	0	0.002 8	0.139 2	0.007 5	1
A_4	0	0	0.035 1	0.279 3	0.000 1	1
综合评价	0.000 1	0	0.035 1	0.218 0	0.041 2	1

素、线路因素及管理因素的评价结果分别为IV、V、IV、IV级。这表明:上海地铁17号线总体运营安全表现良好,其中设备方面表现优秀,人员、线路、管理表现结果均为良好。

分析当前各项指标值对评价结果的灵敏度,即可通过弥补短板的方式快速地提升城市轨道交通线路运营安全评价等级。设所有指标值在0~30%范围内变化(B_{10} 、 B_{11} 为负向指标,在-30%~0%范围内变化),评价结果量化指标为 s ,量化公式为式(19),在该变化范围内评价结果的最大差异值 $\max \Delta s$ 为灵敏度值,其计算结果如图3所示。

$$s = \sum_{l=1}^5 d_l \cdot l \quad (19)$$

式中 d_l 为综合评价与 l 等级界限云的关联度。

通过图3可知:上海地铁17号线运营安全评价指标的灵敏度顺序为 $B_6 > B_7 > B_3 > B_{17} > B_9 > B_{10} > B_{13} > B_{12} > B_2 > B_{14} > B_{16} > B_8 > B_5 > B_1 > B_{15} > B_4 > B_{11}$,其中,因设备因素评价已为优秀,对其进行改进虽然能提升综合评价等级,但不会提升设备因素的评价等级,且17号线设备设施实际运营数据良好,相较其他指标能够提升的程度不大,所以,建议指标的改善顺序为 $B_3 > B_{17} > B_{10} > B_{13} > B_{12} > B_2 > B_{14} > B_{16} > B_1 > B_{15} > B_4 > B_{11}$ 。

结合评价结果和指标灵敏度分析,建议做好以

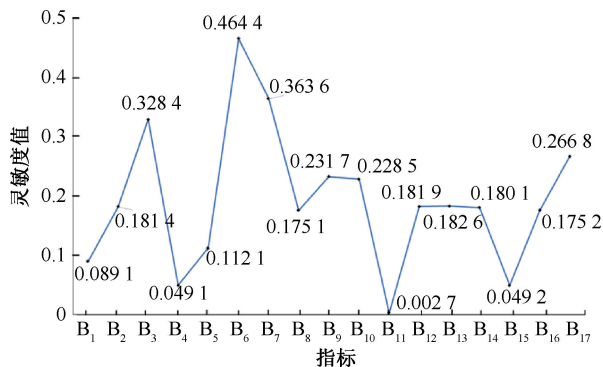


图3 上海地铁17号线运营安全评价指标的灵敏度值

Fig. 3 Sensitivity value of operation safety evaluation index of Shanghai Metro Line 17

下工作来进一步提高上海地铁17号线运营安全水平:①加强防控政策透明性与一致性,提前告知并全面宣传,确保车站防控措施统一,提升乘客配合度;②及时根据国家实际政策调整、完善地铁运营的防

控政策和规章制度;③利用大数据技术精准预测客流增长,灵活调整运输组织,满足乘客需求同时保障安全高效;④强化设备维护与应急管理,定期检查更换设备,补充备品,制定并演练应急预案,确保运营持续安全。

4 结论

1) 将城市轨道交通应对传染性疾病的应对措施纳入运营安全评价范围,从人员-设备-线路-管理4个方面重新构建一个更具有时效性、更适合实际使用的城市轨道交通线路运营安全评价指标体系。

2) 文中基于组合赋权法与可拓云的城市轨道交通线路运营安全评价模型,可有效解决其他评价模型中忽略评价等级的模糊界限这一问题,使评价结果更为准确。

3) 实证分析结果证明该评价模型具备一定的可行性与可操作性。

参考文献

- [1] 苏旭明,王艳辉,祝凌曦.改进的故障模式及影响分析在城市轨道交通运营安全评价中的应用[J].城市轨道交通研究,2011,14(5):65-69.
SU Xuming, WANG Yanhui, ZHU Lingxi. Safety evaluation of urban rail transit operation based on improved fault model and effect analysis[J]. Urban Mass Transit, 2011, 14(5):65-69.
- [2] 王艳辉,黄雅坤,李曼.基于组合赋权方法的城轨线路运营安全评价[J].同济大学学报:自然科学版,2013,41(8):1243-1248.
WANG Yanhui, HUANG Yakun, LI Man. Evaluation of urban rail transit line operational safety based on combination weighting method [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2013, 41(8):1243-1248.
- [3] 姜林林.基于BP神经网络的城市轨道交通运营安全评价与设计[D].大连:大连交通大学,2014.
JIANG Linlin. Urban rail transit operation safety evaluation and design based on BP neural network[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2014.
- [4] 黎新华,李俊辉.基于DEMATEL和ISM融合的城市轨道交通车站运营安全评价方法研究[J].铁道运输与经济,2018,40(7):116-121.
LI Xinhua, LI Junhui. A study on an assessment system on safe operation of urban rail stations based on DEMATEL and ISM [J]. Railway Transport and Economy, 2018, 40(7):116-121.
- [5] 鹿颖.基于风险矩阵法的城市轨道交通运营安全评价研究[D].长春:吉林大学,2019.
LU Ying. Research on safety evaluation of urban rail transit operation based on risk matrix method[D]. Changchun: Jilin University, 2019.
- [6] 任刚,陈佳洁,高瑾瑶,等.基于改进可拓物元法的地铁车站运营安全评价方法[J].城市轨道交通研究,2020,23(3):136-139.
REN Gang, CHEN Jiajie, GAO Jinyao, et al. Safety assessment of metro station operation based on improved extension and matter element method[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(3):136-139.
- [7] 吴华文,郑金,张静.城市轨道交通运营安全评价基于改进的CRITIC方法和云模型[J].城市轨道交通运营安全评价[J].城市轨道交通运营安全评价,2020,16:1002-1006.
- [8] 张渺.G1-EW组合赋权云模型下地铁运营安全风险评价[J].中国安全科学学报,2022,32(6):163-170.
ZHANG Miao. Risk assessment of metro operation based on G1-EW combination weighting cloud model[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(6):163-170.
- [9] GB50157—2013,地铁设计规范[S].
GB50157-2013, Code for design metro [S].
- [10] 李国良,王磊,杨晓严,等.我国交通基础设施发展水平比较研究[J].公路交通科技,2021,38(11):97-105.
LI Guoliang, WANG Lei, YANG Xiaoyan, et al. Comparative study on development level of transport infrastructure in China[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2021, 38(11):97-105.

作者简介:潘寒川(1986—),男,安徽青阳人,博士,副教授,从事交通运输规划与管理、轨道交通运营优化及安全、运筹学与人工智等方面的研究。E-mail: panhanchuan@sues.edu.cn。