

DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20221118002

文章编号: 1672-9331(2023)05-0171-10

引用格式: 卢毅, 胡琦伟, 徐家瑜. 基于SEM-物元-云模型的地铁站运营安全评价[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2023, 20(5): 171-180.

Citation: LU Yi, HU Qiwei, XU Jiayu. Operation safety evaluation of subway stations based on SEM-matter element-cloud model[J]. J Changsha Univ Sci Tech(Nat Sci), 2023, 20(5): 171-180.

基于SEM-物元-云模型的地铁站运营安全评价

卢毅, 胡琦伟, 徐家瑜

(长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要:【目的】探索地铁站运营安全等级评价方法,更好地保障乘客的生命安全。【方法】从客流、设备、环境、管理4个方面,建立地铁站运营安全评价体系。首先,运用结构方程模型(structural equation model, SEM),采取问卷调查的方式对评价体系进行验证性因子分析(confirmatory factor analysis, CFA),从而计算出指标权重;然后,构建基于物元理论与云模型的地铁站运营安全评价模型,按综合关联度最大原则确定评价等级。【结果】对某地铁站进行运营安全评价,该地铁站评价等级为安全,与实际情况一致。按各影响因素的影响程度的大小从大到小依次排列为客流因素(一般危险)、管理因素(一般危险)、设备因素(安全)、环境因素(安全)。其中,指标层指标站台饱和率的关联度评价向量为(0,0,0.000 42,0.116 40),处于危险等级,是地铁站运营安全等级提升的关键。另外,安全制度落实性的关联度评价向量为(0,0,0.804 90,0.003 75),处于一般危险等级且有向危险等级发展趋势,也不容忽视。【结论】该模型能量化指标之间的相互影响,以便较好地确定指标权重,适用于解决具有模糊性与不确定性的复杂问题。

关键词: 地铁站;运营安全;物元理论;云模型;关联度

中图分类号: U291.69

文献标志码: A

0 引言

地铁站因其客流量大、环境复杂、各有差异等特点直接影响人们的生命安全^[1]。对地铁站运营安全做出科学评价和改进非常重要。

国内外学者对地铁站运营安全评价展开了一系列研究。SOONS等^[2]在社会可接受的安全条件下,针对地铁的运营特点构建了实际数据定量分析运营风险的评价框架。XU等^[3]基于运营安全风险管理体系的相关案例,提出了北京市轨道交通网络化运营安全评价模型。LU等^[4]将实际案例检索与案例表示融入地铁运营安全评价分析中,提出了案例推理的方法。LIU等^[5]通过事故参数函数及蒙特卡罗方法生成模拟随机事件,并构建了地铁风险概率模型。张尚毅等^[6]通过贝叶斯网络构建了基于经营成本、乘客密度、管理费用等

的地铁站风险评价体系。

上述研究都采用以往案例或实际数据进行评价,缺少了对人的理性主观判断等相关定性因素的分析。地铁站的运营安全与其内部的管理因素是息息相关的,而管理因素无法量化,需要用定性指标表示。随着研究的深入,汪益敏等^[7]建立了共55个指标的风险评价体系,包括踩踏、恐怖袭击、地震等风险类型,运用层次分析法确定各个指标的权重,用以对人员密集型地铁站进行风险评价。王建波等^[8]为建立地铁站火灾管控模型,提出用物理-事理-人理方法论构建安全评价的逻辑结构。曾明华等^[9]基于解释结构模型探究了地铁站的人、设备以及环境之间的关系。这些研究虽融入了管理方面的定性因素,但不能与实际定量信息进行结合,容易受个人主观情绪的影响。

定性指标代表管理层,定量指标代表操作层,两者相辅相成,不可或缺。上述研究没有同时对

收稿日期:2022-01-07;修回日期:2022-11-18;接受日期:2023-02-08

基金项目:湖南省交通运输厅科技项目(201944)

通信作者:卢毅(1964—)(ORCID:0000-0001-9737-9333),男,教授,主要从事交通运输工程项目建设与运营管理方面的研究。E-mail:2985086508@qq.com

定性指标与定量指标进行评价,且权重的确定无法统一,因而往往存在一定的片面性。另外,这些综合方法只能描述整体服务水平,而对于各个具体评价指标的优劣程度缺乏详细而直观的研究。结构方程模型(structural equation model, SEM)能够同时考虑多个变量之间的因果关系,能够对定性指标与定量指标的状态通过分值统一表示,便于计算。云模型能够有效地处理所收集信息的模糊性、随机性和不确定性问题,物元理论将定量和定性两种因素相结合,能够在一定程度上解决指标间的矛盾和不相容情况。另外,物元理论与云模型相结合能够以区间等级的形式描述事物的状态,这样不仅可以呈现综合评价水平,而且能直观显示所有指标的优劣程度,便于迅速找出关键影响因素及其等级状态,及时给出解决方法。

SEM-物元-云模型在其他领域运用较多,但在地铁站运营安全等级评价中的应用较少。本研究利用SEM对评价指标体系进行验证性因子分析(confirmatory factor analysis, CFA),从而计算出权重,解决了定性与定量指标权重无法统一的问题。将物元理论与云模型相结合,通过关联度计算将各个指标及综合服务水平以区间等级的形式清晰表达出来。以M市某地铁站为例,验证该模型的可靠性与可操作性。

1 地铁站运营安全评价指标体系的构建

1.1 地铁站运营安全评价指标

本文依据科学性、系统性、可行性、可比性原则,在中国知网与万方数据上,同时以“地铁站运营安全”“地铁站运营风险”为题名或关键词进行检索,共获得78篇文献,剔除研究方法不明确的文献,共获得37篇有效文献。对文献中的影响因素进行总结与归纳,初步建立了地铁站运营安全评价因素专家意见咨询表。通过德尔菲法向专家发放2轮咨询表,请专家使用李克特5级量表对指标的可获取性及重要程度等方面进行打分,同时对不足之处发表自己的修改意见。发放并回收第1轮专家咨询表,去掉平均分低于3.00分的指标,对问卷进行完善。然后发放并回收第2轮专家咨询表,再剔除平均分低于3.50分的指标。最终将地铁站运营安全评价指标作为目标层指标,将客流因素、设备因素、环境因素、管理因素作为准则层

指标^[10],然后再细分出18个指标层指标,具体如图1所示。

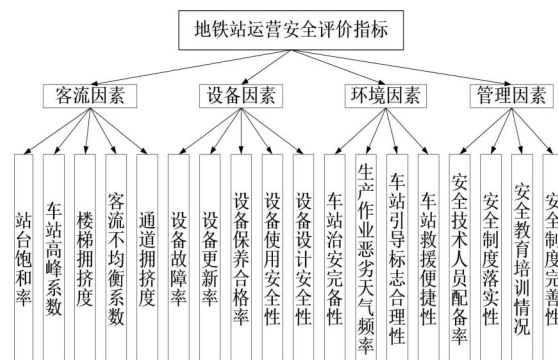


图1 地铁站运营安全评价指标

Fig. 1 Safety evaluation index of subway station operation

1.2 基于SEM的地铁站运营安全评价指标赋权

SEM利用观测变量对不可直接测量的潜变量进行衡量,该模型凭借变量的协方差矩阵分析变量间的相互影响,并允许自变量与因变量均可含有测量误差^[11]。本文采用SEM对各项指标进行验证性因子分析,通过查阅文献、咨询专家,对相关影响因素进行归纳,最终得到评价指标体系。将地铁运营安全评价分为4个等级(安全、比较安全、一般危险、危险)。该评价的主要调查对象是乘客、从事地铁站运营服务的相关工作人员及部分地铁站运营安全研究领域的专家,通过手机填写电子问卷、现场填写纸质问卷等方式进行调查。共发放调查问卷340份,回收问卷300份,回收率88.2%,剔除无效问卷22份,最终得到278份有效问卷,有效率92.7%。

利用SPSS 26.0对问卷进行信度、效度检验分析,验证问卷的可靠性与有效性。检验结果显示,克隆巴赫系数(Cronbach's α)为0.885,大于0.800;抽样适合性检验值(Kaiser-Meyer-Olkin, KMO)为0.910,大于0.700;巴特利特球形检验(bartlett test of sphericity)的显著性为0.000,小于0.001。表明问卷符合条件^[12],适合做CFA。

AMOS是一个利用SEM探究变量之间相互关系的软件。通过AMOS 24.0可得地铁站运营安全评价的一阶CFA。模型输出结果显示,指标层各指标与准则层各指标的残差均为正值;指标层各指标的标准化路径系数在0.500~0.720之间,满足其应在0.500~0.950范围内的要求;准则层各指标的标准化路径系数在0.600~0.800之间,说明可能存在更加高阶的因素对其产生影响。各项拟合指标^[13-15]及其可接受范围如表1所示。其中,卡方自

由度比 H 为 1.229, 调整后的配适度指数 L 为 0.923, 适配度指数 Q 为 0.942, 比较适配指数 S 为 0.979, 非规准适配数 A 为 0.971, 增值适配指数 O 为 0.975, 渐进残差均方和平方根 P 为 0.029。上述指标均符合标准。模型适配性良好, 因此可对其进行二阶 CFA。

图 2 表明, 在二阶 CFA 模型中, F 表示地铁站运营安全评价指标, 指标层各指标 ($C_1 \sim C_{18}$) 的残差 ($e_1 \sim e_{18}$) 均为正值, 准则层各指标 ($U_1 \sim U_4$) 的残差 ($e_{19} \sim e_{22}$) 也均为正值; 指标层各指标的标准化路径系数满足要求; 准则层各指标的标准化路径系数分别为 0.89、0.82、0.84、0.80, 在 0.500~0.900 之间, 也满足在 0.500~0.950 范围内的要求。另外可以通过软件拟合运行分析得: H 值为 1.265, L 值为 0.920, Q 值为 0.939, S 值为 0.975, A 值为 0.971, O 值为 0.975, P 值为 0.031。上述指标均符合标准, 模型适配性良好。

表 1 拟合指标
Table 1 Fitting indexes

拟合指标	指标名称	值	可接受范围
H	卡方自由度比	1.229	(1.000~3.000)拟合良好
L	调整后的配适度指数	0.923	>0.800 拟合较好
			>0.900 拟合良好
Q	适配度指数	0.942	>0.800 拟合较好
			>0.900 拟合良好
S	比较适配指数	0.979	>0.900 拟合良好
A	非规准适配数	0.971	>0.900 拟合良好
O	增值适配指数	0.975	>0.900 拟合良好
P	渐进残差均方和平方根	0.029	<0.050 拟合良好
			<0.080 拟合较好
			<0.100 拟合一般

根据已有的研究^[16], 对各项指标层指标的赋权计算公式如下所示:

$$W_i = \eta_i / \sum_{i=1}^n \eta_i$$

(1)

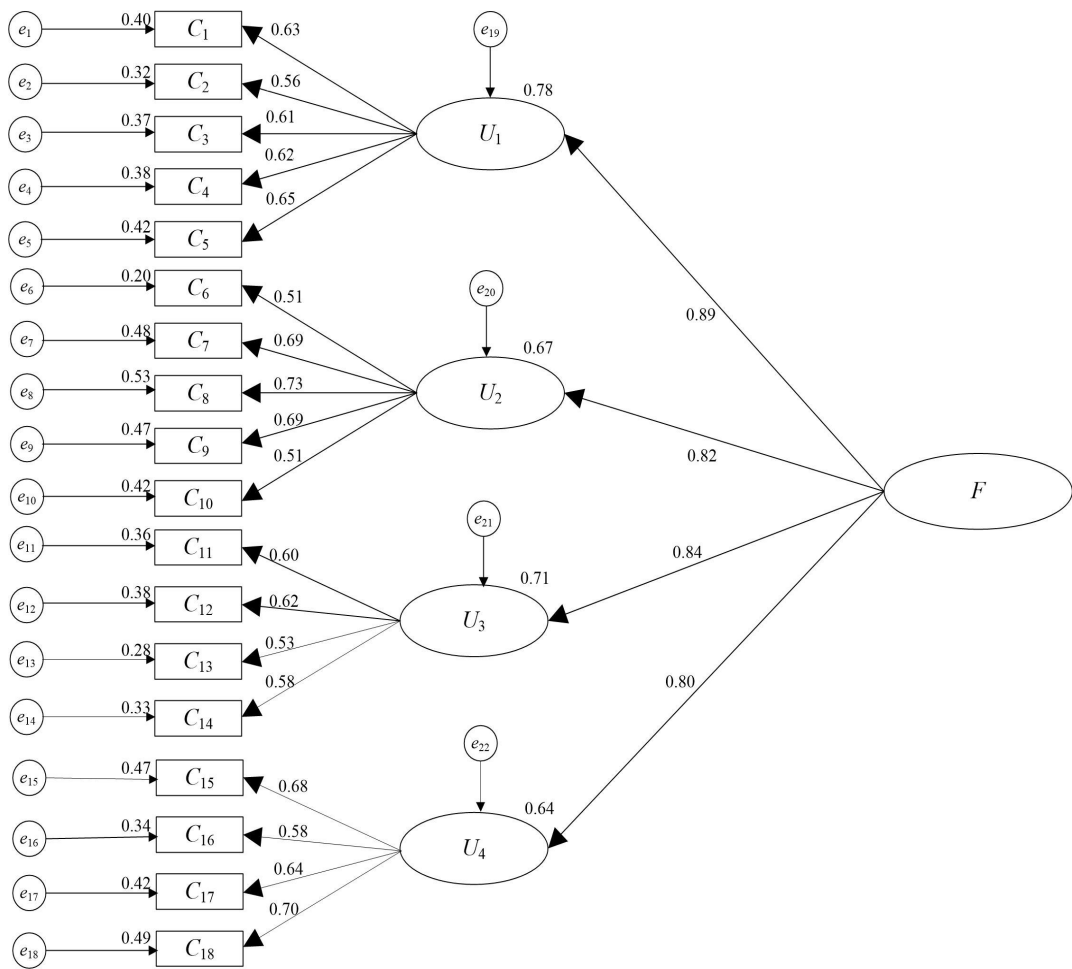


图 2 二阶 CFA 模型
Fig. 2 Second-order CFA model

式中: W_i 为指标层第 $i(i=1, 2, \dots, n)$ 个指标的权重系数; η_i 为指标层第 i 个指标的路径系数; n 为同一准则层体系下指标的个数。依此类推, 可得准则层指标的权重。根据图2, 计算各指标对应的权重系数, 如表2所示。

表2 指标权重
Table 2 Index weights

准则层	权重	指标层	权重
客流因素 U_1	0.265	站台饱和率 C_1	0.206
		车站高峰系数 C_2	0.184
		楼梯拥挤度 C_3	0.197
		客流不均衡系数 C_4	0.202
		通道拥挤度 C_5	0.211
设备因素 U_2	0.244	设备故障率 C_6	0.156
		设备更新率 C_7	0.212
		设备保养合格率 C_8	0.223
		设备使用安全性 C_9	0.210
		设备设计安全性 C_{10}	0.199
环境因素 U_3	0.252	车站治安完备性 C_{11}	0.257
		生产作业恶劣天气频率 C_{12}	0.267
		车站引导标志合理性 C_{13}	0.227
		车站救援便捷性 C_{14}	0.249
管理因素 U_4	0.239	安全技术人员配备率 C_{15}	0.261
		安全制度落实性 C_{16}	0.223
		安全教育培训情况 C_{17}	0.247
		安全制度完善性 C_{18}	0.269

2 基于物元-云的地铁站运营安全评价模型

2.1 物元理论

物元理论主要是研究物元及其变化规律, 用物元变换来解决事物不相容性问题, 促使事物进行转化的一种理论。物元理论的基本单位是物元, 它是以事物的名称、事物的特征、该特征对应的量值所组成的三元组。本研究将准则层看待评价物元 R , 不同特征由相应的指标描述, 不同量值由相应的指标值描述, 则物元 R 可表示为:

$$R = \begin{bmatrix} N & C_1 & V_1 \\ & C_2 & V_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & V_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: N 为待评价事物的名称, 即地铁站的名称; $C=(C_1, C_2, \dots, C_n)$ 为待评价事物的特征, 即指标层指标; $V=(V_1, V_2, \dots, V_n)$ 为待评价事物特征的量值, 即

指标值。

2.2 云模型

云模型是对定性与定量之间进行转换的模型。本文针对应用最成熟的正态云模型进行分析。正态云模型的3个基本特征表示为 $(D, G, I)^{[18]}$, 其中, D 表示期望, 代表地铁站运营安全评价指标分类等级概念的点; G 表示熵, 刻画地铁站运营安全评价等级划分的模糊性, 同时表达评估样本获取时的随机性; I 表示超熵, 体现熵的不确定性程度^[19], 超熵越大, 地铁站运营安全评价样本的离散程度就越大。

在用物元理论进行建模计算时, 各项特征值都是以具体的量化值来确定表示的, 因而往往忽略了事物本身的模糊性和随机性^[17]。因此, 利用物元理论与云模型形成物元-云模型, 将物元理论中的量值 V 用正态云 (D, G, I) 替换, 则式(2)可表示为:

$$R = \begin{bmatrix} N & C_1 & (D_1, G_1, I_1) \\ & C_2 & (D_2, G_2, I_2) \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & (D_n, G_n, I_n) \end{bmatrix} \quad (3)$$

2.3 等级标准云评价

根据相关专家建议, 结合实际及参照《地铁设计规范》(GB 50157—2013)、《城市轨道交通运营技术规范》(GB/T 38707—2020)、《地铁运营安全评价标准》(GB/T 50438—2007)确定等级界限, 如表3所列。将地铁站运营安全评价等级界限看作一个双约束空间 $[T_{\min}, T_{\max}]$, 则可根据以下公式计算指标层任意一个指标对应的 D, G, I :

$$D = (T_{\max} + T_{\min})/2 \quad (4)$$

$$G = (T_{\max} - T_{\min})/6 \quad (5)$$

$$I = g \quad (6)$$

式中: T_{\max} 为指标评价等级区间的上临界值; T_{\min} 为指标评价等级区间的下临界值; g 为常数, 一般为经验确定, 可适当调整。

2.4 关联度评价

物元-云模型是两种理论方法的融合。将任意一个指标层指标 C_i 的指标值 V_i 视为一个云滴, 由 D, G 共同决定, 生成正态随机数, 则该指标的物元-云模型关联度的计算公式为^[20]:

$$K(V_i) = \exp\left[-(V_i - D)^2/2B^2\right] \quad (7)$$

式中: $K(V_i)$ 为指标层指标 C_i 对应指标值 V_i 时的物元-云模型关联度; B 为生成的正态随机数。

各评价等级的 D 、 B 各不相同,根据式(4)~(7)可计算出指标层指标在4个评价等级下的物元-云模型关联度:

$$Z = \begin{bmatrix} K_1(V_1) & K_2(V_1) & K_3(V_1) & K_4(V_1) \\ K_1(V_2) & K_2(V_2) & K_3(V_2) & K_4(V_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ K_1(V_n) & K_2(V_n) & K_3(V_n) & K_4(V_n) \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: Z 为同一准则层体系下指标层指标的物元-云模型关联度矩阵; $K_1(V_i)$ 、 $K_2(V_i)$ 、 $K_3(V_i)$ 、 $K_4(V_i)$ 为指标层指标 C_i 对应指标值 V_i 时,分别在安全、比较安全、一般危险、危险4个等级的关联度。

因此,可得出:

$$E = WZ \quad (9)$$

式中: E 为准则层指标的物元-云模型关联度评价向量,即其在4个评价等级下的物元-云模型关联

度; $W=(W_1, W_2, \dots, W_n)$ 为同一准则层体系下指标层指标的权重向量。

依此类推,可求出目标层指标的物元-云模型关联度评价向量,得出各等级的综合关联度,并依据综合关联度最大原则,确定该地铁站的运营安全等级。

3 实例分析

以M市某地铁站为例,邀请专家、工作人员参加评价调查,结合该地铁站的相关数据得到各项指标的值,经过整理如表4所示。

3.1 等级标准云的确定

MATLAB是用于数据分析、网络建模、深度学习的数学软件。根据式(4)~(6),利用MATLAB计算各个评价指标的物元-云模型数字特征值,进而得到地铁站运营安全等级标准云模型,如表5所列。再结合表5与式(7)运行算法,模拟生成评价云图,由于篇幅有限,仅给出站台饱和率与设备使用安全性云图,如图3~4所示。

表3 等级评价指标界限

Table 3 Limits of grade evaluation indexes

指标	安全	比较安全	一般危险	危险	指标	安全	比较安全	一般危险	危险
C_1	(0.00, 1.00]	(1.00, 2.00]	(2.00, 4.00]	(4.00, 6.00]	C_6	(0.00, 0.10]	(0.10, 0.20]	(0.20, 0.40]	(0.40, 1.00]
C_2	(1.00, 1.20]	(1.20, 1.35]	(1.35, 1.50]	(1.50, 1.80]	C_7	(0.05, 1.00]	(0.03, 0.05]	(0.01, 0.03]	(0.00, 0.01]
C_3	(0.00, 4.00]	(4.00, 6.00]	(6.00, 8.00]	(8.00, 10.00]	C_8	(0.80, 1.00]	(0.60, 0.80]	(0.40, 0.60]	(0.00, 0.40]
C_4	(1.00, 1.20]	(1.20, 1.40]	(1.40, 1.60]	(1.60, 2.00]	C_9	(0.80, 1.00]	(0.60, 0.80]	(0.40, 0.60]	(0.00, 0.40]
C_5	(0.00, 2.00]	(2.00, 4.00]	(4.00, 6.00]	(6.00, 8.00]	C_{10}	(0.80, 1.00]	(0.60, 0.80]	(0.40, 0.60]	(0.00, 0.40]
C_{11}	(0.90, 1.00]	(0.80, 0.90]	(0.70, 0.80]	(0.00, 0.70]	C_{15}	(0.80, 1.00]	(0.60, 0.80]	(0.40, 0.60]	(0.00, 0.40]
C_{12}	(0.00, 0.40]	(0.40, 0.60]	(0.60, 0.80]	(0.80, 1.00]	C_{16}	(0.90, 1.00]	(0.80, 0.90]	(0.70, 0.80]	(0.00, 0.70]
C_{13}	(0.80, 1.00]	(0.60, 0.80]	(0.40, 0.60]	(0.00, 0.40]	C_{17}	(0.90, 1.00]	(0.80, 0.90]	(0.70, 0.80]	(0.00, 0.70]
C_{14}	(0.95, 1.00]	(0.85, 0.95]	(0.75, 0.85]	(0.00, 0.75]	C_{18}	(0.80, 1.00]	(0.60, 0.80]	(0.40, 0.60]	(0.00, 0.40]

表4 指标值

Table 4 Index values

指标	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9
指标值	4.30	1.48	4.56	1.56	5.40	0.13	0.65	0.76	0.94
指标	C_{10}	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{14}	C_{15}	C_{16}	C_{17}	C_{18}
指标值	0.96	0.91	0.30	0.64	0.86	0.94	0.74	0.52	0.45

表5 等级评价标准云模型
Table 5 Cloud model of grade evaluation standard

指标	安全	比较安全	一般危险	危险
C_1	(0.500,0.166 7,0.010 0)	(1.500,0.166 7,0.010 0)	(3.000,0.333 3,0.010 0)	(5.000,0.333 3,0.010 0)
C_2	(1.100,0.033 3,0.001 0)	(1.275,0.025 0,0.001 0)	(1.425,0.025 0,0.010 0)	(1.650,0.050 0,0.010 0)
C_3	(2.000,0.666 7,0.010 0)	(5.000,0.333 3,0.010 0)	(7.000,0.333 3,0.010 0)	(9.000,0.333 3,0.010 0)
C_4	(1.100,0.033 3,0.010 0)	(1.300,0.033 3,0.010 0)	(1.500,0.033 3,0.010 0)	(1.800,0.066 7,0.010 0)
C_5	(1.000,0.333 3,0.010 0)	(3.000,0.333 3,0.010 0)	(5.000,0.333 3,0.010 0)	(7.000,0.333 3,0.010 0)
C_6	(0.500,0.016 7,0.000 1)	(0.150,0.016 7,0.000 1)	(0.300,0.033 3,0.000 1)	(0.700,0.100 0,0.000 1)
C_7	(0.525,0.158 3,0.000 1)	(0.040,0.003 3,0.000 1)	(0.020,0.003 3,0.000 1)	(0.005,0.001 7,0.000 1)
C_8	(0.900,0.033 3,0.001 0)	(0.700,0.033 3,0.001 0)	(0.500,0.033 3,0.001 0)	(0.200,0.066 7,0.001 0)
C_9	(0.900,0.033 3,0.001 0)	(0.700,0.033 3,0.001 0)	(0.500,0.033 3,0.001 0)	(0.200,0.066 7,0.001 0)
C_{10}	(0.900,0.033 3,0.001 0)	(0.700,0.033 3,0.001 0)	(0.500,0.033 3,0.001 0)	(0.200,0.066 7,0.001 0)
C_{11}	(0.950,0.016 7,0.001 0)	(0.850,0.016 7,0.001 0)	(0.750,0.016 7,0.001 0)	(0.350,0.116 7,0.001 0)
C_{12}	(0.200,0.066 7,0.010 0)	(0.500,0.033 3,0.010 0)	(0.700,0.033 3,0.010 0)	(0.900,0.033 3,0.010 0)
C_{13}	(0.900,0.033 3,0.001 0)	(0.700,0.033 3,0.001 0)	(0.500,0.033 3,0.001 0)	(0.200,0.066 7,0.001 0)
C_{14}	(0.975,0.008 3,0.001 0)	(0.900,0.016 7,0.001 0)	(0.800,0.016 7,0.001 0)	(0.375,0.125 0,0.001 0)
C_{15}	(0.900,0.033 3,0.001 0)	(0.700,0.033 3,0.001 0)	(0.500,0.033 3,0.001 0)	(0.200,0.066 7,0.001 0)
C_{16}	(0.950,0.016 7,0.001 0)	(0.850,0.016 7,0.001 0)	(0.750,0.016 7,0.001 0)	(0.350,0.116 7,0.001 0)
C_{17}	(0.950,0.016 7,0.001 0)	(0.850,0.016 7,0.001 0)	(0.750,0.016 7,0.001 0)	(0.350,0.116 7,0.001 0)
C_{18}	(0.900,0.033 3,0.001 0)	(0.700,0.033 3,0.001 0)	(0.500,0.033 3,0.001 0)	(0.200,0.066 7,0.001 0)

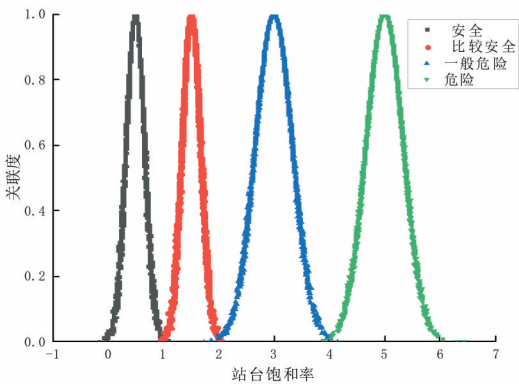


图3 站台饱和率指标评价云
Fig. 3 Evaluation cloud of platform saturation rate index

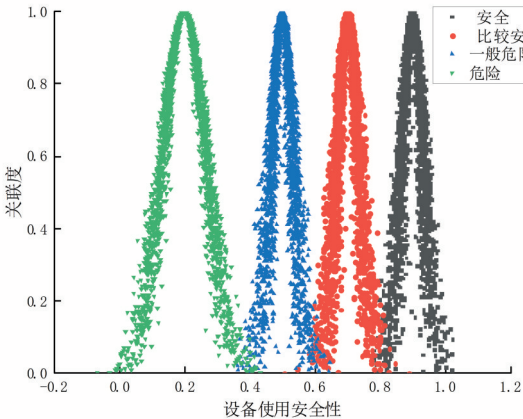


图4 设备使用安全性指标评价云
Fig. 4 Cloud evaluation of device use security indicators

3.2 等级关联度的确定

结合表4、表5及式(7),运用MATLAB编程确定指标层各指标的关联度,结果如表6所列。

表6 指标层各指标的关联度
Table 6 The degree of relevance of metrics at the metric layer

指标	安全	比较安全	一般危险	危险
C_1	0.000 00	0.000 00	0.000 42	0.116 40
C_2	0.000 00	0.000 00	0.108 40	0.002 12
C_3	0.000 00	0.392 40	0.000 69	0.000 00
C_4	0.000 00	0.000 00	0.143 70	0.002 15
C_5	0.000 00	0.000 00	0.477 40	0.000 00
C_6	0.000 00	0.484 80	0.000 00	0.000 00
C_7	0.731 30	0.000 00	0.000 00	0.000 00
C_8	0.108 70	0.190 20	0.000 00	0.000 00
C_9	0.485 70	0.000 00	0.000 00	0.000 00
C_{10}	0.214 40	0.000 00	0.000 00	0.000 00
C_{11}	0.041 76	0.001 18	0.000 00	0.000 00
C_{12}	0.338 20	0.000 00	0.000 00	0.000 00
C_{13}	0.000 00	0.000 23	0.193 10	0.000 00
C_{14}	0.000 00	0.090 42	0.002 34	0.000 00
C_{15}	0.483 50	0.000 00	0.000 00	0.000 00
C_{16}	0.000 00	0.000 00	0.804 90	0.003 75
C_{17}	0.000 00	0.000 00	0.000 00	0.349 60
C_{18}	0.000 00	0.000 00	0.001 18	0.307 30

3.3 等级的评价

根据表2的权重以及表6的关联度及式(9),即可计算出准则层指标的关联度评价向量,进而再求出目标层指标的关联度评价向量,得出各等

级的综合关联度,结果如表7所列。根据综合关联度最大原则,该地铁站的运营安全等级为安全,与该地铁站的实际情况一致。

表7 综合关联度与评价等级

Table 7 Comprehensive correlation degree and evaluation grade

准则	安全	比较安全	一般危险	危险	Max	等级
U_1	0.000 000 0	0.077 302 8	0.149 926 8	0.024 802 4	0.149 926 8	一般危险
U_2	0.323 938 3	0.118 043 4	0.000 000 0	0.000 000 0	0.323 938 3	安全
U_3	0.101 031 7	0.022 869 4	0.044 416 3	0.000 000 0	0.101 031 7	安全
U_4	0.126 193 5	0.000 000 0	0.179 810 9	0.169 850 2	0.179 810 9	一般危险
综合关联度	0.134 661 2	0.055 050 9	0.093 898 3	0.047 166 8	0.134 661 2	安全

3.4 评价结果分析

该地铁站运营安全等级为安全,通过关联度的计算,可得以下结果:

客流因素 U_1 的评价等级为一般危险,低于该地铁站整体运营安全等级,有向比较安全等级发展的趋势。在指标层指标中,站台饱和率 C_1 的关联度评价向量为(0,0,0.000 42,0.116 40),处于危险等级,有非常大的发展空间。

管理因素 U_4 的评价等级也为一般危险,有向危险等级发展的趋势。在指标层指标中,安全技术人员配备率 C_{15} 处于安全等级,说明该指标完善情况较好。安全制度落实性 C_{16} 处于一般危险等级,有向危险等级发展的趋势。安全教育培训情况 C_{17} 与安全制度完善性 C_{18} 都处于危险等级。

设备因素 U_2 与环境因素 U_3 处于安全等级,与整体等级相匹配,但环境因素 U_3 有向一般危险等级发展的趋势。按指标层指标的待完善重要性进行排序,依次为车站引导标志合理性 C_{13} 、车站救援便捷性 C_{14} ,需按照重要性排序依次进行加强。

4 讨论

该地铁站虽然处于安全等级,但有向低级发展的趋势。针对客流因素 U_1 ,主要是降低站台饱和率,可以缓解整体等级降低的趋势。针对管理因素 U_4 ,需要加强重视。提高安全制度落实性 C_{16} 需要地铁站坚决落实安全生产制度,追责到人,落实到位;对于安全教育培训情况 C_{17} 与安全制度完善性 C_{18} ,加强地铁工作人员安全教育培训,定时召开相关安全会议,并编制完善各种紧急突发事件

处理预案,以此提高这两项指标的运营安全等级。

站台饱和率是定量指标,其关联度评价向量为(0,0,0.000 42,0.116 40),根据区间等级可知其处于危险等级。安全制度落实性是定性指标,其关联度评价向量为(0,0,0.804 90,0.003 75),根据区间等级可知其处于一般危险等级。与实际案例法相比,实际案例法只能对定量指标进行评价,忽视了对安全制度落实性等定性指标的评价。与层次分析法相比,层次分析法只能解决单一定性指标的评价,无法评价站台饱和率等定量指标,容易造成影响因素不全面。而本文方法通过区间的设定可以将两种不同类型指标同时评价,扩大影响因素,提高评价精度。与综合模糊评价相比,综合模糊评价只能最终给出总体目标层及准则层指标的评价等级,而指标层各指标的评价等级状态无法测得,本文方法不仅可以得出总体的评价等级,还可清晰地看出各层所有指标所处的评价等级,便于及时捕捉不利因素。但本文方法也有一定不足:不同地铁站的衡量标准不同,标准之间可比性较差,会导致评价结果不准确;另外,地铁站安全评价等级标准过时,也会导致评价结果具有时滞性。未来,需要针对每一个地铁站明确具体的最新标准,方可评价。

5 结论

将地铁站运营安全的影响因素按影响程度的大小由大到小排序依次为:客流因素、环境因素、设备因素、管理因素。客流因素是定量指标,可以看出定量指标的重要性。因此,地铁站运营安全

评价不能单一依靠专家打分来进行评估,更多的是因地制宜,人性评估与实际数据结合才能有更高的评价准确度。

运用SEM确定权重系数。一是可以通过模型拟合指标,可以同时处理多个因变量,判断评价体系的适应性与有效性;二是能够将定性与定量指标的状态通过分值统一表示,便于计算。

将物元-云模型应用于地铁站运营安全等级的确定,不仅可以扩大评价指标的选取范围,还能实现定量与定性之间的转化,能够以区间等级的形式直观显示所有指标的优劣程度以及综合服务水平。另外物元-云模型还能解决其他具有模糊性与不确定性因素的项目评价。

[参考文献]

- [1] 李浩然,王子恒,杨起帆,等.复杂网络下地铁灾害链演化模型与风险分析[J].中国安全科学学报,2021,31(11):141-147. DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2021.11.020.
LI Haoran, WANG Ziheng, YANG Qifan, et al. Evolutionary model and risk analysis of metro disaster chain under complex network[J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(11): 141-147. DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2021.11.020.
- [2] SOONS C J, BOSCH J W, ARENDS G, et al. Framework of a quantitative risk analysis for the fire safety in metro systems [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2006, 21(3-4): 281.
- [3] XU T, LIANG Q, CHU B, et al. Security - risk management of Beijing subway network operation [C]// ICTIS 2011. Wuhan, China. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2011: 2334-2343.
- [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: 75-81. DOI: 10.1016/j.ssci.2013.01.020.
- [5] LIU K, ZHU J T, WANG M. An event - based probabilistic model of disruption risk to urban metro networks [J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2021, 147: 93-105. DOI: 10.1016/j.tra.2021.03.010.
- [6] 张尚毅,周米娜,郑先勇.新冠疫情下重庆市城市轨道交通运营风险评价[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2022,41(4):40-45. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0696.2022.04.07.
ZHANG Shangyi, ZHOU Mina, ZHENG Xianyong. Urban rail transit operation risk assessment in Chongqing under COVID - 19 [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sciences), 2022, 41(4): 40-45. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0696.2022.04.07.
- [7] 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):198-207. DOI: 10.19818/j.cnki.1671-1637.2020.05.016.
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): 198-207. DOI: 10.19818/j.cnki.1671-1637.2020.05.016.
- [8] 王建波,有维宝,刘芳梦,等.基于WSR-D-S证据理论的地铁车站火灾安全评价[J].安全与环境学报,2018,18(3):900-906. DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2018.03.014.
WANG Jianbo, YOU Weibao, LIU Fangmeng, et al. On the fire safety evaluation of the subway station based on the WSR-D-S evidence theory [J]. Journal of Safety and Environment, 2018, 18(3): 900-906. DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2018.03.014.
- [9] 曾明华,王旭,王转敏,等.基于模糊多态贝叶斯网络的地铁运营风险评估方法[J].城市轨道交通研究,2019,22(5):28-33. DOI: 10.16037/j.1007-869x.2019.05.006.
ZENG Minghua, WANG Xu, WANG Zhuanmin, et al. Risk assessment of subway operation safety based on fuzzy polymorphic Bayesian network [J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(5): 28-33. DOI: 10.16037/j.1007-869x.2019.05.006.
- [10] 中华人民共和国建设部.地铁运营安全评价标准:GB/T 50438-2007[S].北京:中国计划出版社,2008.
Ministry of Construction of the People's Republic of China. Standard for the operation safety assessment of existing metro: GB/T 50438-2007 [S]. Beijing: China Planning Press, 2008.
- [11] 傅志妍,刘柯良,黄勇,等.基于CCSI的物流配送服务顾客满意度测评模型[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2021,40(10):146-153. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0696.2021.10.17.
FU Zhiyan, LIU Keliang, HUANG Yong, et al. Customer satisfaction evaluation model of logistics distribution service based on the CCSI [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sciences), 2021, 40(10): 146-153. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0696.2021.10.17.
- [12] 王永岗,张衡,彭志鹏,等.基于结构方程模型的出租车事故影响因素分析[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2021,40(6):36-42. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0696.2021.06.06.
WANG Yonggang, ZHANG Heng, PENG Zhipeng, et al. Analysis of influencing factors of taxi accidents based on structural equation model [J]. Journal of Chongqing

- Jiaotong University (Natural Science), 2021, 40 (6): 36-42. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0696.2021.06.06.
- [13] 李利华, 邓亚军, 杨舟. 基于SNA-TPB的物流集群作用路径研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(8): 2133-2141. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.t20200379.
- LI Lihua, DENG Yajun, YANG Zhou. Research on the functional route of logistics clusters based on SNA-TPB [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17 (8): 2133-2141. DOI: 10.19713/j.cnki.43 - 1423/u.t20200379.
- [14] 杨玉胜, 邹新雨. 基于结构方程模型的装配式混凝土建筑增量成本控制研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2021, 18(3): 55-61. DOI: 10.19951/j.cnki.csldgxxbzk.2021.03.007.
- YANG Yusheng, ZOU Xinyu. Research on incremental cost control of prefabricated concrete buildings based on structural equation model [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2021, 18 (3): 55-61. DOI: 10.19951/j.cnki.csldgxxbzk.2021.03.007.
- [15] 卢毅, 张欣欣. 基于SEM和模糊综合评价法的装配式建筑施工安全风险评价[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2021, 18(3): 38-44. DOI: 10.19951/j.cnki.csldgxxbzk.2021.03.005.
- LU Yi, ZHANG Xinxin. Risk assessment on construction safety of prefabricated buildings based on SEM and fuzzy comprehensive assessment method [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2021, 18 (3): 38-44. DOI: 10.19951/j.cnki.csldgxxbzk.2021.03.005.
- [16] 陈琼蓉, 蒋惠园. 基于可拓理论的湖北省公路运输适应性评价[J]. 公路与汽运, 2021(2): 20-24.
- CHEN Qiongrong, JIANG Huiyuan. Evaluation of highway transportation adaptability in Hubei Province based on extension theory [J]. Highways & Automotive Applications, 2021(2): 20-24.
- [17] 陈兴博, 靳文舟, 胡坤鹏. 基于AHP-熵权模糊物元的城乡公交一体化评价[J]. 交通科学与工程, 2018, 34(1): 74-79, 84. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43 - 1494/u.2018.01.013.
- CHEN Xingbo, JIN Wenzhou, HU Kunpeng. Evaluation of urban and rural public transport integration based on AHP-entropy method and fuzzy matter element [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2018, 34 (1): 74-79, 84. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43 - 1494/u.2018.01.013.
- [18] 周雪, 左忠义, 程伟. 基于组合赋权云模型的铁路旅客运输安全评价[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(增刊 1): 158-164. DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003 - 3033.2020.S1.028.
- ZHOU Xue, ZUO Zhongyi, CHENG Wei. Safety evaluation of railway passenger transportation based on combined weighting cloud model [J]. China Safety Science Journal, 2020, 30 (SUP1): 158-164. DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2020.S1.028.
- [19] 李林波, 郭晓凡, 傅佳楠, 等. 基于云模型的城市轨道交通乘客满意度评价[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(3): 378-385. DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.2019.03.011.
- LI Linbo, GUO Xiaofan, FU Jianan, et al. Evaluation approach of passenger satisfaction for urban rail transit based on cloud model [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2019, 47 (3): 378-385. DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.2019.03.011.
- [20] 何静, 朱双凯. 基于可拓云模型的轨道交通与接驳公交换乘综合评价研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(8): 2183-2190. DOI: 10.19713/j.cnki.43 - 1423/u.t20200983.
- HE Jing, ZHU Shuangkai. Research on the comprehensive evaluation of rail transit and feeder transit transfer based on extensible cloud model [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18 (8): 2183-2190. DOI: 10.19713/j.cnki.43 - 1423/u.t20200983.

Operation safety evaluation of subway stations based on SEM-matter element-cloud model

LU Yi, HU Qiwei, XU Jiayu

(School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: [Purposes] Explore the evaluation of subway station operation safety levels to better protect the life safety of passengers. [Methods] From the perspective of passenger flow, equipment, environment and management, establish a subway station operation safety evaluation system; Firstly, the structural equation model (SEM) is used to conduct confirmatory factor analysis (CFA) on the evaluation system by means of questionnaire survey, so as to calculate the index weight. Then, a subway station operation safety evaluation model based on the combination of matter element theory and cloud model is constructed, and the evaluation level is determined according to the principle of maximum comprehensive correlation. [Findings] The evaluation level of the subway station is safety, which is consistent with the actual situation, and the influencing factors are ranked from large to small as passenger flow factors (general danger), environmental factors (safety), equipment factors (safety), and management factors (general danger). Among them, the correlation evaluation vector of the saturation rate of the index platform at the index layer is $(0, 0, 0.000\ 42, 0.116\ 40)$, which is in the danger level and is the key to improving the safety level of subway station operation. In addition, the correlation evaluation vector of the implementation of the safety system is $(0, 0, 0.804\ 90, 0.003\ 75)$, which is in the general risk level and has a trend towards the risk level, which cannot be ignored. [Conclusions] The interaction between the energy indexes of the model can better determine the index weight, which is suitable for solving the complex problems with fuzziness and uncertainty.

Key words: subway station; operation safety; matter element theory; cloud model; degree of relevance

Manuscript received: 2022-01-07; **revised:** 2022-11-18; **accepted:** 2023-02-08

Foundation item: Project (201944) supported by Department of Transportation of Hunan Province

Corresponding author: LU Yi (1964—) (ORCID: 0000-0001-9737-9333), male, professor, mainly engaged in transportation project construction and operation management. E-mail: 2985086508@qq.com

(责任编辑:赵冰;校对:石月珍;英文编辑:刘至真)