

城市轨道交通线路维保施工安全效能评价指标体系的构建及应用

贾清天¹ 金 忠¹ 赵晶晶¹ 沈 杰¹ 王子意²

(1. 上海地铁维护保障有限公司, 200235, 上海; 2. 天津大学建筑工程学院, 300072, 天津)

摘 要 [目的] 目前, 已投运城市轨道交通线路维保施工的安全性评价研究相对较少。为减少城市轨道交通线路运营的安全风险, 应对城市轨道交通线路维保施工的安全水平进行综合评估, 以指导运营生产及管理。[方法] 以上海轨道交通线网内 4 条线路的 19 个维护工区为研究对象, 建立了具有 4 层架构的城市轨道交通线路维保施工安全效能评价指标体系。基于线路维保施工指标的实际情况, 对熵权法进行了改进, 并与突变级数理论相结合, 提出了基于改进熵权-突变级数的线性组合评价方法。采用此评价方法对 19 个维护工区的维保施工安全效能进行评价分析。[结果及结论] 基于改进熵权-突变级数的线性组合评价方法通过了一致性检验, 其评价结果稳定、可靠。该方法有效扩大了熵权法与突变级数理论在城市轨道交通维保施工评价中的适用性, 实现了城市轨道交通线路维保施工领域的动态综合评价。

关键词 城市轨道交通; 线路维保施工; 安全评价指标体系; 安全效能评价方法; 熵权法; 突变级数法

中图分类号 U239.5

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.09.028

Construction and Application of Index System for Safety Effectiveness Evaluation of Urban Rail Transit Line Maintenance Construction

JIA Qingtian¹, JIN Zhong¹, ZHAO Jingjing¹, SHEN Jie¹, WANG Ziyi²

(1. Shanghai Metro Maintenance Support Co., Ltd., 200235, Shanghai, China; 2. School of Civil Engineering, Tianjin University, 300072, Tianjin, China)

Abstract [Objective] At present, there are relatively few studies on the safety assessment of maintenance and construction of urban rail transit operation lines. In order to reduce the operation safety risk of urban rail transit lines, the safety level of urban rail transit line maintenance construction should be comprehensively evaluated to guide the operation production and management. [Method] Targeting the 19 maintenance

work areas on 4 lines in Shanghai rail transit network, a 4 hierarchy-structured safety effectiveness evaluation index system for urban rail transit line maintenance and construction is established. Based on the actual situation of line maintenance construction indexes, the entropy weight method is improved and combined with the mutation progression theory, and a linear combination evaluation method based on improved entropy weight and mutation progression is proposed as the result. The safety effectiveness of maintenance construction in 19 maintenance work areas is evaluated and analyzed with this method.

[Result & Conclusion] The linear combination evaluation method based on improved entropy weight-mutation level passes the consistency test, and the evaluation results are stable and reliable. This method effectively expands the applicability of entropy weight method and mutation level theory in the evaluation of urban rail transit maintenance construction, and realizes the dynamic comprehensive evaluation in the field of rail transit line maintenance construction.

Key words urban rail transit; transit line maintenance construction; safety evaluation index system; safety effectiveness evaluation method; entropy method; mutation progression method

线路维保施工质量不良或管理水平低下, 均会影响城市轨道交通设施设备运行的可靠性, 且存在一定的安全风险隐患。因此, 有必要定期对线路维保工作开展安全评价分析。

目前, 城市轨道交通领域的安全风险评价已有学者做了一些研究工作, 并取得了一定成果。例如, 文献[1]通过层次分析法和熵权法相结合的方式, 实现了对城市轨道交通车站的安全评价。文献[2]基于车站、线路和线路的需求, 构建了多层次的轨道交通安全评价指标体系。通过梳理相关研究发现, 城市轨道交通领域的安全风险评价大多集中在建设期施工管控及运营期车站管理上, 针对已投运的城市轨道交通线路维保施工安全性评价的研

究相对较少。

本文以上海轨道交通线网中多条线路的维保施工及管理过程为研究对象,对其安全效能影响指标进行分析,建立了上海轨道交通线路维保施工安全效能评价指标体系。在此基础上,引入突变级数理论,基于改进熵权法-突变级数法,建立了城市轨道交通线路维保施工安全效能评价方法。

1 数据来源与预处理

1.1 数据来源

选取上海轨道交通线网的11号线、13号线、16号线及18号线,收集了这4条线路所辖的近600 km钢轨及600多组道岔的运营基础数据。为便于线路日常维保施工精细化管理,通过对线路划分区段的方式建立维护工区,按照线路维护施工管理规定,将这4条线路的设施划分为19个维护工区。本次评价的基础数据来源于这19个维护工区范围内设施设备、业务管理水平的各类指标验收评分结果,这些数据符合上海申通地铁集团有限公司制定的Q/SD-WBZ-FB-SS-J40—2021《轨道设备维护规程》相关验收标准的要求。

1.2 数据预处理

本次评价的基础数据中,不同指标数据间存在量纲差异。为了保证各评价指标量级一致,先对这些数据进行量纲一化处理。指标分类一般分为正向型(即指标越大越好型)与逆向型(指标越小越好

型)两类。为了保证基础数据量纲一化后的一致性,将本文第*i*个工区第*j*项指标的原始数据 x_{ij} 进行正向型处理, x_{ij} 量纲一化的计算式为:

$$c_{ij} = \frac{x_{ij} - \min x_j}{\max x_j - \min x_j} \quad (1)$$

式中:

c_{ij} ——第*i*个工区第*j*项指标量纲一化后的数据;

x_j ——第*j*项指标的原始数据。

2 线路维保施工的安全效能评价指标体系

在城市轨道交通线路日常维保施工中,设施设备本身所处的施工环境、现场作业水平、安全管理规定等均会对设施设备的安全状态产生影响。因此,在本次线路维保施工安全效能评价中,应从多个维度筛选评价指标,指标选取过程应遵循科学性、综合性、可比性等原则,以综合反映施工安全效能水平。

在查阅了大量相关研究成果后,本文结合上海轨道交通线路维保日常施工的特点,设定了线路维保施工的安全效能评价指标体系,如图1所示。该指标体系分为4层,分别为W层、Z层、Y层、X层。其中,Y层共有6个评价指标(Y_1 — Y_6),X层共有17个评价指标(X_1 — X_{17}),这些指标均是影响线路维保施工安全效能的主要类型及因素。

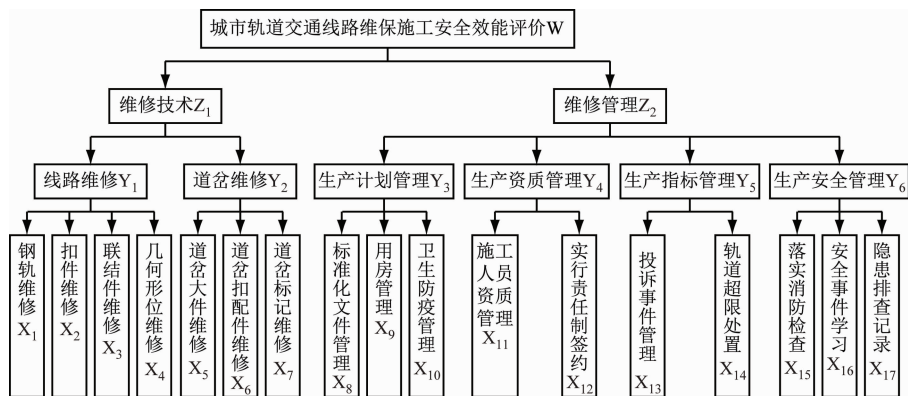


图1 城市轨道交通线路维保施工安全效能评价指标体系

Fig.1 Safety effectiveness evaluation index system for urban rail transit line maintenance and construction

3 线路维保施工安全效能评价方法

3.1 突变级数理论

突变级数法又称突变模糊隶属函数法,目前已

应用于大型工程多目标评价决策、城市轨道交通换乘效率评价^[3]等领域。设*x*为状态变量,突变级数以系统势函数*f(x)*形成的空间曲面为研究对象,该空间曲面上某点的状态发生跃迁时,表明系统平衡

质态已发生改变,此过程称为突变^[4]。

常见的突变级数有折叠型、尖点型、燕尾型、蝴蝶型及棚屋型 5 种形式。以尖点型为例,其势函数 $f_{jd}(x_{jd})$ 的计算式为:

$$f_{jd}(x_{jd}) = x_{jd}^4 + u_{jd}x^2 + v_{jd}x_{jd} \quad (2)$$

式中:

x_{jd} ——尖点型势函数的状态变量;

u_{jd} ——尖点型势函数的参数变量 1,与突变类型有关;

v_{jd} ——尖点型势函数的参数变量 2,与突变类型有关。

$f_{jd}(x_{jd})$ 一阶求导后可得到平衡曲面,二阶求导后可得到平衡曲面的奇点集。二者联立为方程组,可求出 $f_{jd}(x_{jd})$ 分解形式的分歧方程,其计算式为:

$$\begin{cases} u_{jd} = -6x_{jd}^2 \\ v_{jd} = 8x_{jd}^3 \end{cases} \quad (3)$$

将式(3)量纲一化后,设 $x_{u,jd}$ 为 u_{jd} 的量纲一化运算结果, $x_{v,jd}$ 为 v_{jd} 的量纲一化运算结果,则有:

$$\begin{cases} x_{u,jd} = u_{jd}^{1/2} \\ x_{v,jd} = v_{jd}^{1/3} \end{cases} \quad (4)$$

其他 4 种突变类型势函数及量纲一化公式推导过程本文不再赘述,可查阅文献[5]相关内容。

与一般的评价方法相比,突变级数法消除了采用人为赋予权重时主观因素的影响,但在同一类别、同一层次的指标中,指标重要性程度仍需要自主排序,进而在一定程度上削弱了突变级数法评价

结果的客观性。为避免受主观因素影响,本文利用改进的熵权法计算各指标的权重,并对指标权重进行排序,以保证指标重要度顺序的一致性。

3.2 改进的熵权法

熵权法评价的客观性特点^[6]、确定各指标重要度的方法及指标排序等内容本文不再赘述,仅根据城市轨道交通线路维保施工中影响安全的指标特点,提出熵权法的改进算法。

3.2.1 对熵权法进行改进的原因

城市轨道交通线路维保施工安全效能评价指标体系中,定义第 i 个工区第 j 个指标的熵为 e_{ij} ,其计算式为:

$$e_{ij} = -k \sum_{j=1}^n f_{ij} \ln f_{ij}, i = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

式中:

f_{ij} ——第 i 个维护工区第 j 个指标评分值在所有评价工区验收总评分值中的占比;

m ——维护工区总数;

n ——该层级的指标总数;

k ——熵权系数, $k = 1/(\ln n)$ 。

Q/SD-WBZ-FB-SS-J40—2021 中,线路钢轨焊缝维修验收标准及常见验收得分如表 1 所示。由表 1 可看出:钢轨维护施工对焊缝外观的验收要求较高,该指标在实际的施工验收中扣分较为普遍,常因施工验收不合格导致得分为 0。因此,式(5)中 f_{ij} 的取值范围不能完全适用于线路维保施工安全效能评价指标体系,需要采用改进的熵权法。

表 1 线路钢轨焊缝维修验收标准及常见验收得分

Tab. 1 Acceptance criteria and common acceptance scores for line rail weld repair

检查内容	验收要求	扣分标准	常见的验收得分
轨头外观	焊缝处轨顶面高差为 0 ~ 0.3 mm	超过验收要求时,每一处扣 20 分	0 分
轨颞外观	焊缝处轨颞高差为 -0.5 ~ 0.5 mm,焊缝平顺无毛刺	超过验收要求时,每一处扣 20 分	0 分
轨腰外观	焊缝处轨腰高差为 -0.5 ~ 0.5 mm	超过验收要求时,每一处扣 20 分	0 分
轨底外观	焊缝处轨底高差为 0 ~ 0.5 mm	超过验收要求时,每一处扣 20 分	0 分

注:验收要求中的高差均为被检测钢轨廓形与标准廓形的高度差。

3.2.2 基于改进熵权法确定各指标的权重

设 $f_{ij,new}$ 为采用改进熵权法中第 i 个维护工区第 j 个指标评分值在所有评价工区验收总评分值中的占比,其计算式为:

$$f_{ij,new} = \frac{f_{ij} + 0.1}{\sum_{j=1}^n (f_{ij} + 0.1)} \quad (6)$$

由式(5)进一步计算得到采用改进熵权法后第

i 个工区第 j 个指标的熵值 $e_{ij,new}$ 。由此,第 i 个维护工区第 j 个指标的权重 l_{ij} 为:

$$l_{ij} = \frac{1 - e_{ij,new}}{n - \sum_{j=1}^n e_{ij,new}} \quad (7)$$

3.3 基于突变级数的改进熵权法技术流程

本文将改进熵权法与突变级数法相结合,提出了基于突变级数的改进熵权法。采用此评价方法

对城市轨道交通线路维保施工的安全效能展开评价,其技术流程如下:

步骤1 指标值量纲一化处理。考虑到各类维护施工科目的验收规范要求不同,原始数据中具有不同的量纲,应先对原始数据进行量纲一化处理。

步骤2 熵权重要度排序。基于式(7)确定各个层级内所有指标的权重,并根据各权重值进行重要度排序。

步骤3 确定级数类型及突变量。根据突变级数法原理,只有 $f(x)$ 空间曲面上的某点从上叶跃至下叶,或从下叶跃至上叶时,系统才有可能突变,因此, $f(x)$ 满足分歧方程要求。突变系统分互补型和非互补型两类,互补型突变系统是指在同一系统内各控制变量能够相互弥补,非互补型突变系统指同一系统内各控制变量无法相互弥补。因此,运用突变级数时,需要根据指标特性确定其级数类型。

设 c_1, c_2, \dots, c_q 为突变系统量纲一化运算结果, q 为控制变量个数。对于互补型突变系统,每层指标的突变量 c_{hb} 应取下一层指标量纲一化计算的平均数,其计算式为:

$$c_{hb} = (c_1 + c_2 + \dots + c_q) / q \quad (8)$$

对于非互补型突变系统,每层指标的突变量 c_{mb} 应取最小值,其计算式为:

$$c_{mb} = \min(c_1, c_2, \dots, c_q) \quad (9)$$

步骤4 采用突变级数法计算指标突变量。根据步骤2中的指标排序结果确定突变级数指标重要度,依据步骤3的级数类型及突变量原则,利用式(8)或式(9)计算每层指标的突变量。依次向上一层指标进行迭代,进而得到W层的隶属度,即本次评价的最终结果。

4 评价结果与分析

4.1 评价数据处理

为验证本评价方法的有效性,对选取的19个维护工区开展安全评价效能研究。根据式(5)—式(7),计算得到X层、Y层指标的熵值与权重,其结果如表2所示。

4.2 突变级数分析

将 Y_1 下一层的4个指标($X_1—X_4$)作为控制变量, $X_1—X_4$ 构成蝴蝶型突变级数,且为互补型突变系统。通过熵权法求得 $X_1—X_4$ 的权重值并组成列向量,与 c_{ij} 量纲一化后的各工区指标矩阵对应相乘,对结果依次排序。将此时对应的控制参数变量

表2 X层和Y层指标的熵值与权重

Tab.2 Entropy values and weights of layers X and Y index

Y层指标			X层指标	
序号	熵值	权重	序号	权重
Y_1	0.999 7	0.090 2	X_1	0.004 4
			X_2	0.036 4
			X_3	0.004 1
			X_4	0.045 3
Y_2	0.999 3	0.153 9	X_5	0.080 3
			X_6	0.069 6
			X_7	0.004 0
			X_8	0.040 2
Y_3	0.999 8	0.043 1	X_9	0.001 2
			X_{10}	0.001 7
			X_{11}	0.006 0
			X_{12}	0.012 6
Y_4	0.999 9	0.018 6	X_{13}	0.199 6
			X_{14}	0.422 4
			X_{15}	0.018 0
			X_{16}	0.030 3
Y_5	0.995 6	0.622 0	X_{17}	0.023 9

1、参数变量2、参数变量3、参数变量4分别设为 u_{hd} 、 v_{hd} 、 w_{hd} 、 t_{hd} ,根据蝴蝶型突变形式对控制变量进行量纲一化。计算得到各维护工区 Y_1 的4个控制变量量纲一化后的计算结果,如表3所示。由表3可知: $X_1—X_4$ 间存在关联性,即满足互补型原则。

根据式(7),得到 Y_1 的4个控制指标突变量。同理可求出Y层所有指标($Y_1—Y_6$)的突变量,其结果如表4所示。 $Y_1—Y_6$ 的突变形式分别为: Y_1 为蝴蝶型; Y_2 、 Y_3 、 Y_6 为燕尾型; Y_4 、 Y_5 为尖点型。

4.3 结果分析及检验

4.3.1 评价结果分析

通过突变级数分析过程,确定Z层指标的各类突变类型, Z_1 的突变形式为尖点型; Z_2 的突变形式为蝴蝶型。对级数进行迭代,得到各维护工区 Z_1 、 Z_2 的突变级数。其结果如表5所示。

为量化各维护工区的施工及管理水平情况,利用突变值划分象限区间,直观反映各维护工区在象限区间上分布情况。

取 Z_1 、 Z_2 突变量最小值作为突变隶属度区间的下限,取 Z_1 、 Z_2 突变量最大值作为突变隶属度区间的上限,取 Z_1 、 Z_2 的平均值作为突变隶属度区间的

表3 Y_1 的4个控制变量量纲一化后的计算结果

Tab.3 Calculation results of the 4 control variables of

 Y_1 after dimensional normalization

维护工区名称	$x_{u,hd}$	$x_{v,hd}$	$x_{w,hd}$	$x_{t,hd}$
安亭	0.233 1	0.373 1	0.474 0	0.555 8
嘉定新城	0.233 1	0.377 1	0.480 1	0.555 8
F1 赛车场	0.233 1	0.377 1	0.476 4	0.550 2
南翔	0.233 1	0.382 3	0.481 3	0.555 8
江苏路	0.233 1	0.369 1	0.477 7	0.555 8
浦三	0.233 1	0.365 0	0.481 3	0.555 8
迪士尼	0.208 5	0.382 3	0.477 7	0.555 8
川杨河	0.233 1	0.370 5	0.478 9	0.555 8
金运路	0.233 1	0.382 3	0.481 3	0.555 8
世博大道	0.233 1	0.367 7	0.476 4	0.555 8
北翟路	0.233 1	0.377 1	0.481 3	0.550 2
龙阳路	0.216 2	0.382 3	0.477 7	0.555 8
新场	0.226 0	0.382 3	0.481 3	0.555 8
华夏中路	0.233 1	0.354 9	0.475 2	0.555 8
惠南	0.223 6	0.375 8	0.481 3	0.550 2
书院	0.218 7	0.371 8	0.477 7	0.555 8
航头	0.233 1	0.373 1	0.478 9	0.555 8
康桥	0.233 1	0.378 4	0.481 3	0.555 8
江浦路	0.233 1	0.375 8	0.480 1	0.555 8

注: $x_{u,hd}$ 、 $x_{v,hd}$ 、 $x_{w,hd}$ 、 $x_{t,hd}$ 分别为 u_{hd} 、 v_{hd} 、 w_{hd} 、 t_{hd} 量纲一化后的变量表述。

临界阈值。将处于临界阈值以上的指标值定义为“指标水平高”,临界阈值及以下的指标值定义为“指标水平低”。Z 层指标水平区间划分的结果如表6所示。该结果可根据各维护工区的情况采取不同的整改措施,以确保维保施工质量或提高维护工区管理水平。

进一步分析各维护工区 Z_1 、 Z_2 的结果,绘制了19个维护工区 Z 层指标评价四象限分布图,如图2所示。如图2所示:19个维护工区分别被划分到A、B、C、D空间内。其中:①10个维护工区处于D象限中,D象限的含义为维护技术水平高、维护管理水平高,且评价结果分布较为集中,这说明位于D象限的维护工区既有较高的维护技术水平,也有较强的维护管理水平;②7个维护工区处于A象限中,A象限的含义为维护技术水平低、维护管理水平高;③2个维护工区处于C象限内,C象限的含义为维护技术水平高、维护管理水平低。

Z_1 、 Z_2 构成尖点型突变级数,且 Z_1 、 Z_2 为互补

表4 Y 层指标体系中 Y_1 — Y_6 的突变量Tab.4 Mutation values for Y_1 — Y_6 in layer Y index system

维护工区名称	Y 层指标的突变量					
	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6
安亭	0.409 0	0.239 3	0.221 2	0.306 3	0.303 8	0.233 8
嘉定新城	0.411 5	0.239 3	0.234 6	0.305 1	0.309 9	0.233 8
F1 赛车场	0.409 2	0.220 7	0.221 2	0.303 1	0.303 8	0.221 8
南翔	0.413 1	0.236 9	0.228 0	0.302 7	0.258 3	0.233 8
江苏路	0.408 9	0.230 8	0.228 0	0.302 7	0.241 5	0.233 8
浦三	0.408 8	0.227 0	0.234 6	0.300 0	0.303 3	0.233 8
迪士尼	0.406 1	0.219 4	0.221 2	0.301 3	0.302 5	0.221 8
川杨河	0.409 6	0.229 5	0.228 0	0.302 7	0.309 9	0.221 8
金运路	0.413 1	0.232 0	0.228 0	0.302 5	0.309 9	0.221 8
世博大道	0.408 3	0.211 4	0.221 2	0.300 0	0.303 8	0.233 8
北翟路	0.410 4	0.233 3	0.234 6	0.301 3	0.309 9	0.233 8
龙阳路	0.408 0	0.227 0	0.234 6	0.298 1	0.309 4	0.233 8
新场	0.411 4	0.208 7	0.221 2	0.300 0	0.306 6	0.221 8
华夏中路	0.404 8	0.239 3	0.234 6	0.300 0	0.308 5	0.221 8
惠南	0.407 7	0.234 5	0.228 0	0.305 1	0.308 5	0.233 8
书院	0.406 0	0.223 2	0.247 3	0.305 2	0.308 5	0.233 8
航头	0.410 3	0.234 5	0.228 0	0.303 2	0.309 9	0.221 8
康桥	0.412 2	0.236 9	0.234 6	0.300 0	0.303 8	0.233 8
江浦路	0.411 2	0.232 0	0.228 0	0.300 0	0.309 9	0.233 8

表5 Z 层指标体系中 Z_1 — Z_2 的突变量Tab.5 Mutation values for Z_1 — Z_2 in layer Z index system

维护工区名称	Z 层指标的突变量	
	Z_1	Z_2
安亭	0.857 4	0.815 6
嘉定新城	0.857 8	0.817 4
F1 赛车场	0.853 6	0.813 7
南翔	0.857 6	0.810 3
江苏路	0.855 6	0.808 1
浦三	0.854 9	0.816 0
迪士尼	0.852 8	0.813 3
川杨河	0.855 5	0.815 0
金运路	0.856 6	0.815 0
世博大道	0.851 5	0.814 7
北翟路	0.856 4	0.816 9
龙阳路	0.854 7	0.816 4
新场	0.851 4	0.813 6
华夏中路	0.856 6	0.815 2
惠南	0.856 2	0.816 6
书院	0.853 6	0.818 5
航头	0.856 6	0.815 1
康桥	0.857 4	0.816 0
江浦路	0.856 3	0.816 1

表 6 Z 层指标水平阈值标准

Tab. 6 Threshold criteria for index level in layer Z

指标序号	指标名称	突变隶属度区间	对应的指标水平
Z ₁	维修技术	(0.855 3,0.857 7]	维护技术水平高
		[0.851 4,0.855 3]	维护技术水平低
Z ₂	维修管理	(0.814 9,0.818 4]	维护管理水平高
		[0.808 1,0.814 9]	维护管理水平低

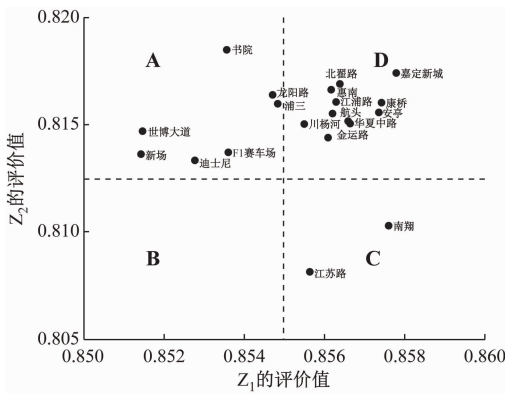


图 2 各维护工区 Z 层指标评价四象限分布图
Fig. 2 Four-quadrant distribution diagram of layer Z index evaluation values for each maintenance area

型突变系统,进而可求得 W 层的总隶属度。

在评价的过程中,对改进熵权法、基于改进熵权的突变级数法的安全效能分别开展评价。为削弱单一评价方法可能带来的误差,进一步将这 2 种评价方法以线性加权(组合系数均取 0.5)方式作为第 3 种评价方法,最终构建了改进熵权-突变级数的线性组合评价法,并对第 3 种评价方法的安全效能开展评价。3 种评价方法下各维护工区线路维保施工的安全效能评价结果如表 7 所示。

4.3.2 评价方法的一致性检验

借助 Kendall 协调系数^[7]对上述 3 种评价方法进行一致性检验。假设 H_0 表征评价方法间不具有-一致性, H_1 表征评价方法间具有一致性, ξ 为自由度, α 为显著水平。构造统计量 χ^2 ,且 $\chi^2 \sim \chi^2(\xi - 1)$,则一致性检验的计算式为:

$$\chi^2(\xi - 1) > \chi^2_{\alpha/2}(\xi - 1) \tag{10}$$

若满足式(10),则拒绝 H_0 ,接受 H_1 ,此时表明当显著水平为 α 时,本文 3 种评价方法具有一致性。反之,3 种评价方法不具有-一致性。

取 $\alpha = 1\%$,上文可知 $\xi = 19$,可得 $\chi^2(\xi - 1) = 38.00$ 。查 χ^2 分布表可知 $\chi^2_{0.005}(18) = 37.16 < 38.00$,即:在 1% 的显著水平上拒绝 H_0 ,接受 H_1 ,3 种评价方法结果之间具有一致性。

表 7 3 种评价方法下各维护工区维保施工的安全效能评价结果

Tab. 7 Safety effectiveness evaluation results of maintenance construction in each maintenance area under three evaluation methods

维护工区名称	改进熵权法		基于改进熵权-突变级数法		改进熵权-突变级数的线性组合评价法	
	总隶属度	排名	总隶属度	排名	总隶属度	排名
安亭	0.051 8	17	0.836 5	4	0.444 1	13
嘉定新城	0.055 2	5	0.837 6	1	0.446 4	1
F1 赛车场	0.052 5	15	0.833 7	15	0.443 1	14
南翔	0.040 0	18	0.834 0	14	0.437 0	18
江苏路	0.039 6	19	0.831 9	19	0.435 8	19
浦三	0.053 9	11	0.835 4	12	0.444 7	12
迪士尼	0.052 7	14	0.833 0	17	0.442 9	15
川杨河	0.055 2	4	0.835 3	13	0.445 3	9
金运路	0.054 8	7	0.835 8	10	0.445 3	7
世博大道	0.052 3	16	0.833 1	16	0.442 7	17
北翟路	0.055 5	1	0.836 6	3	0.446 1	2
龙阳路	0.055 0	6	0.835 6	11	0.445 3	8
新场	0.053 2	13	0.832 5	18	0.442 9	16
华夏中路	0.054 6	9	0.835 9	8	0.445 2	10
惠南	0.054 6	10	0.836 4	5	0.445 5	5
书院	0.054 7	8	0.836 0	7	0.445 4	6
航头	0.055 4	3	0.835 9	9	0.445 6	4
康桥	0.053 3	12	0.836 7	2	0.445 0	11
江浦路	0.055 4	2	0.836 2	6	0.445 8	3

Kendall 协调系数一致性验算结果说明,熵权法可与突变级数法组合使用,二者组合后的评价方法能有效扩大熵权法在城市轨道交通维护施工评价中的适用性。本文最终采用改进熵权-突变级数组合评价法,确定了 19 个维护工区的安全效能评价排名,实现了城市轨道交通线路维保施工领域的动态综合评价。

5 结语

本文以上海轨道交通线网内 4 条线路的 19 个维护工区为研究对象,提出了城市轨道交通线路维保施工安全效能的指标体系及评价方法。指标体系 4 层架构设置合理,设定的指标均符合城市轨道交通线路维保施工的要求。在改进熵权法的基础上,本文进一步构建了基于突变级数的改进熵权

(下转第 170 页)

高损耗、无冗余的不利因素,且单点设备或供电故障不会造成设备供电中断,其高安全、可靠特性可以满足市域快线信号系统应用需求。

参考文献

- [1] 宁滨,刘朝英.中国轨道交通列车运行控制技术及应用[J].铁道学报,2017,39(2):1.
NING Bin, LIU Chaoying. Technology and application of train operation control system for China rail transit system[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(2): 1.
- [2] 华晟,苏阿峰.地铁信号系统轨旁无线设备供电可靠性分析[J].城市轨道交通研究,2017,20(7):27.
HUA Sheng, SU Afeng. Reliability analysis of TRE power supply of metro signal system[J]. Urban Mass Transit, 2017, 20(7): 27.
- [3] 王同俊,陈刚.直流远供技术应用探讨[J].通信与信息技术,2013(2):60.
WANG Tongjun, CHEN Gang. Discussion on application of DC remote power supply technology[J]. Communication & Information Technology, 2013(2): 60.

(上接第165页)

法、改进熵权-突变级数的线性组合评价法,这3种方法均通过了一致性检验。推荐采用改进熵权-突变级数的线性组合评价法,该组合评价法具有一定的动态性,可以有效降低单一评价方法的不足,保证评价结果的客观、稳定。

参考文献

- [1] 潘丽莎,陈龙,刘兰,等.基于层次分析法和熵值法的城市轨道交通车站安全评价[J].城市轨道交通研究,2015,18(9):48.
PAN Lisha, CHEN Long, LIU Lan, et al. Evaluation of urban rail transit station security based on ahp and entropy method[J]. Urban Mass Transit, 2015, 18(9): 48.
- [2] 张建平,张凌翔,张宁,等.目标导向的多层次城市轨道交通运营安全风险评价指标体系[J].都市快轨交通,2018,31(2):135.
ZHANG Jianping, ZHANG Lingxiang, ZHANG Ning, et al. Goal-oriented safety risk evaluation system of multi-level urban rail transit operation[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2018, 31(2): 135.
- [3] 彭金栓,方媛,徐磊.基于突变模型的轨道换乘效率评价[J].都市快轨交通,2017,30(4):50.
PENG Jinshuan, FANG Yuan, XU Lei. Rail transfer efficiency evaluation based on catastrophe model[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2017, 30(4): 50.
- [4] 潘海泽,贺建,陈梦捷,等.基于突变级数法的地铁车站基坑施工风险研究[J].地下空间与工程学报,2017,13(3):840.

- [4] 徐娜,张姣姣.直流远程供电在监控系统改造中的应用[J].中国交通信息化,2016(2):133.
XU Na, ZHANG Jiaojiao. Application of DC remote power supply in the transformation of monitoring system[J]. China ITS Journal, 2016(2): 133.
- [5] 魏意.基站直流远供系统工程设计[J].电信快报,2018(12):36.
WEI Yi. Engineering design of remote DC power feeding system[J]. Telecommunications Information, 2018(12): 36.
- [6] 彭维英.直流远供电源在既有铁路GSM-R改造工程的应用研究[J].铁路通信信号工程技术,2018,15(4):28.
PENG Weiying. Application of DC remote power supply in GSM-R reconstruction project of existing railways[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2018, 15(4): 28.

· 收稿日期:2022-06-06 修回日期:2022-11-14 出版日期:2024-09-10
Received:2022-06-06 Revised:2022-11-14 Published:2024-09-10
· 通信作者:景龙刚,工程师,jinglonggang@gmdi.cn
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

- PAN Haize, HE Jian, CHEN Mengjie, et al. Research about construction risk of foundation pit of subway station based on catastrophe progression method[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(3): 840.
- [5] 姜安民,董彦辰,刘霁.基于突变级数法的地铁站施工风险预测模型研究[J].安全与环境学报,2020,20(3):832.
JIANG Anmin, DONG Yanchen, LIU Ji. Probe into the risk prediction model for the metro station construction based on the catastrophe series method[J]. Journal of Safety and Environment, 2020, 20(3): 832.
- [6] 汪瑞琪,张纓.城市轨道交通网络拥堵易发点的识别及评价[J].城市轨道交通研究,2021,24(8):165.
WANG Ruiqi, ZHANG Ying. Identification and evaluation of congestion-prone points in urban rail transit network[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(8): 165.
- [7] 范德成,宋志龙.基于Gini准则的客观组合评价方法研究:以高技术产业技术创新能力评价为例[J].运筹与管理,2019,28(3):148.
FAN Decheng, SONG Zhilong. A combinational evaluation method based on Gini criterion[J]. Operations Research and Management Science, 2019, 28(3): 148.

· 收稿日期:2022-05-11 修回日期:2022-09-18 出版日期:2024-09-10
Received:2022-05-11 Revised:2022-09-18 Published:2024-09-10
· 通信作者:贾清天,工程师,13029818701@163.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license