

# 基于层次分析法-熵值法的轨道交通土建系统 风险评估体系研究\*

胡述筌<sup>1,2</sup> 李海锋<sup>1,3</sup> 刘婉怡<sup>4</sup>

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 201804, 上海; 2. 上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室, 201804, 上海; 3. 同济大学浙江学院交通运输工程系, 314051, 嘉兴;  
4. 上海市隧道工程轨道交通设计研究院, 200235, 上海//第一作者, 硕士研究生)

**摘要** 为了将轨道交通土建系统设备伤损检查、沉降监测等数据纳入风险评估体系,将土建系统分为轨道、隧道、桥梁3个子结构。分析了各子结构的危险因素,确定其扣分标准,建立了基于AHP(层次分析法)-熵值法的轨道交通土建系统风险评估体系。该体系根据专家意见计算出基于AHP的权重,以此作为该评价体系的主要权重值。在此基础上,对可连续监测的部分评价指标数据进行基于熵值法的权重计算。使用综合集成赋权法,将基于AHP、熵值法计算得到的权重融合,得到各评估项目和评估指标的最终权重。以某地铁线路2013年和2016年的监测数据为案例,利用该体系分别对这两个年度的土建设施进行风险评估,并提出了相应的养护建议。结果表明,该评估体系可为轨道交通土建系统的运营安全风险提供评估提供参考。

**关键词** 轨道交通; 土建系统; 风险评估; 层次分析法; 熵值法; 综合集成赋权法

**中图分类号** U216.9:U231

**DOI**:10.16037/j.1007-869x.2022.07.016

## Study on Risk Assessment System of Rail Transit Civil Infrastructure Based on AHP-Entropy Method

HU Shuchuan, LI Haifeng, LIU Wanyi

**Abstract** To accommodate data of rail transit civil infrastructure equipment damage inspection and settlement monitoring into the risk assessment system, the civil infrastructure system is split into three substructures: track, tunnel and bridge. The individual risk factors of each substructure are analyzed. Deduction standards are determined, and rail transit civil infrastructure risk assessment system based on AHP-entropy method is established. The system refers to professional opinions to calculate AHP weights as main weighting values. On this basis, continuous monitored data are collected to calculate

entropy method weights of some assessment factors, and combination weighting method is utilized to mix both of AHP weights and entropy method weights as final evaluation index weights for each assessment item. Taking the monitored data of certain metro line in 2013 and 2016 as an example, civil systematic risk in different years is assessed and corresponding advice of maintenance is put forward. The analytical result demonstrates that the assessment system can provide reference for operation safety risk assessment for other rail transit systems.

**Key words** rail transit; civil infrastructure system; risk evaluation; analytic hierarchy process (AHP); entropy method; combination weighting method

**First-author's address** Key Laboratory for Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, Tongji University, 201804, Shanghai, China

为了制定轨道交通土建设施合理的养护作业计划,需要评估各类伤损发生后的系统风险等级。目前针对轨道交通线路土建系统风险评估的相关研究较多,但大多仅对单一的桥梁<sup>[1]</sup>、隧道<sup>[2]</sup>、轨道<sup>[3]</sup>等设施进行风险评估,缺乏对各类设施整合的评价模型。若轨道、隧道、桥梁结构同时发生伤损,现有的风险评估体系无法判明这些病害对于整体运营风险的危害程度,也无法为其养护顺序提供合理建议。

由于轨道交通线路上各设备的伤损数据性质不同,具有离散性质的指标(如钢轨伤损等)的主要评价方式为扣分,具有连续性质的指标(如沉降量等)的主要评价方式为计算平均值、标准差等数学特征值。文献[1-2]、文献[4]对各种数据进行整合后,用以对土建设施的运营安全性进行评估,但这

\* 浙江省科技计划项目(2020C35089);嘉兴市科技计划项目(2021AZ30001)

些研究对不同土建设施间的数据整合和风险分析仍较少。本文综合考虑轨道、隧道、桥梁子结构中不同类别、不同性质的伤损指标,以期建立较为完善的适用于轨道交通土建系统的风险评价模型。

### 1 轨道交通土建系统的结构风险因素分析

目前部分轨道交通项目建有完善的土建系统

伤损数据库<sup>[5-6]</sup>,因此本文依照现有的设备检查方式,直接采用这些数据库中各类伤损的年度统计数据,并建立其风险评估体系。

如表 1 所示,轨道交通土建系统的风险评估体系在第一层次上分为轨道、隧道、桥梁 3 个评估子结构,各子结构下设第二层次的评估项目和第三层次的评估指标。

表 1 轨道交通土建系统的风险评估体系指标

Tab.1 Risk assessment system index of rail transit civil infrastructure system multivariate data fusion

第一层次(评估子结构 A)	第二层次(评估项目 B)	第三层次(评估指标 C)	指标 C 扣分的具体内容
轨道子结构 A1	轨道设备病害 A1-B1	病害情况 A1-B1-C1	钢轨、轨枕、道床、联结零件等轨道结构发生各类病害
	轨道几何形位 A1-B2	超限 A1-B2-C2	钢轨爬行量
	钢轨爬行 A1-B3	爬行量 A1-B3-C3	动态几何不平顺指标
	钢轨波磨 A1-B4	幅值 A1-B4-C4	峰峰值、幅值超限个数
隧道子结构 A2	隧道设备病害 A2-B1	病害情况 A2-B1-C1	隧道发生衬砌裂缝、衬砌变形、渗漏水
	隧道结构沉降 A2-B2	年均沉降量 A2-B2-C2	年平均沉降量
		沉降速率 A2-B2-C3	沉降速率
		每米高程差 A2-B2-C4	每米差异沉降量
	隧道内径变化 A2-B3	每米内径差 A2-B3-C5	每米内径差
桥梁子结构 A3	桥梁设备病害 A3-B1	病害情况 A3-B1-C1	桥面结构、桥下结构、附属设施等桥梁结构各部位发生各类病害
	桥梁结构沉降 A3-B2	年均沉降量 A3-B2-C2	年平均沉降量
		沉降速率 A3-B2-C3	沉降速率

本文采用的病害数据库记录了表 1 中各种设备病害、几何形位改变、设备位移与沉降的频次及程度。在此基础上,本文参考了 JGJ 8—2007《建筑变形测量规范》、GB 50157—2013《地铁设计规范》、DB11/T 718—2016《城市轨道交通设施养护维修技术规范》、DG/TJ 08-109—2017《城市轨道交通设计规范》、GB/T 50299—2018《地下铁道工程施工质量验收标准》、CJJ/T 289—2018《城市轨道交通隧道结构养护技术标准》等规范,制定了相关的病害扣分标准。其中:桥梁与隧道沉降数据、隧道内径变化的扣分标准需根据现场实际监测的数据变化趋势进行调整,应将采集到的所有监测数据进行统计后,剔除其极端值,并取上四分位数作为扣分标准,建立了基于 AHP(层次分析法)-熵权法的轨道交通土建系统风险评估体系。

### 2 AHP-熵权法风险分析体系建立

#### 2.1 AHP-熵权法风险分析的计算流程

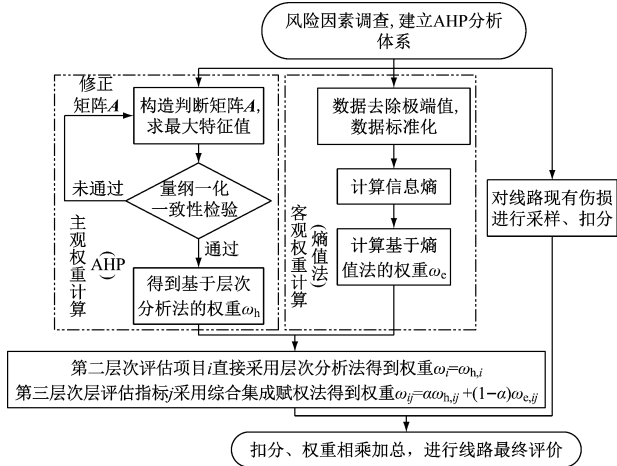
目前评估轨道交通土建设备系统的运营风险

分析大多采用 AHP 及相关理论的延伸<sup>[7-9]</sup>,其优点为考虑了不同指标间评价基准的差异性,其缺点为不能充分描述评估指标间统计性质的差异性,易受主观性影响等。若改为采用结合熵值计算权重的 AHP 进行分析,可充分考虑各评价指标的统计特征,相关文献亦表明该方法具有较好的可靠性<sup>[10]</sup>。因此,本文建立了轨道交通土建系统的 AHP-熵权法风险分析体系,其计算流程如图 1 所示。

1)根据表 1,参考相关规范制定设备的伤损扣分标准,并计算各层次评估项目和评估指标的权重。其中,第一层次不计算权重,3 个子结构视为同等重要。

2)将第二层次评估项目、第三层次评估指标按其 对 土 建 系 统 安 全 性 的 影 响 进 行 排 序,在参考专家意见后确定第二层次各评估项目的相对重要性,其权重值采用 AHP 进行计算。

3)第三层次评估指标采用综合集成赋权法计算权重。对于具有连续性的评估指标,用熵值法提取相应的信息特征,最后取 AHP、熵值法权重的加



注:  $\alpha$ ——综合集成赋权法中基于 AHP 的权重占比;  $\omega_{h,i}$ —— $i$  基于 AHP 的权重;  $\omega_{h,ij}$ —— $i$  下的  $j$  基于 AHP 的权重;  $\omega_{e,ij}$ —— $i$  下的  $j$  基于熵值法的权重;  $\omega_i$ —— $i$  的最终计算权重;  $\omega_{ij}$ —— $j$  的最终计算权重。

图 1 基于 AHP-熵值法的轨道交通土建系统风险体系计算流程

Fig. 1 Calculation process of rail transit civil infrastructure risk assessment system based on AHP-entropy method

权平均数。

4) 评估指标的扣分值乘以对应的评估指标  $j$  权重  $\omega_{ij}$ , 再乘以该指标所对应的上一个层次评估项目  $i$  的权重  $\omega_i$ , 可得到该评估指标的加权扣分值。将子结构内所有评估指标的加权扣分进行累加, 可得到该子结构的加权扣分值, 进而得到轨道交通土建系统的总扣分值, 通过总扣分值的变化趋势来评估该土建系统的风险等级。

## 2.2 权重计算

### 2.2.1 基于 AHP 的权重计算

AHP 属于主观赋权法, 其原理为将复杂的评估对象排列成递阶层次结构, 对评估因素两两比较后给定相对重要性标度, 并据此计算权重。本文中各评估因素相对重要性标度的确定采用比例标度法, 其标度范围为 1~9。若  $i$  下的指标  $j$  比指标  $k$  极端重要, 则标度为 9; 若指标  $j$  和指标  $k$  同等重要, 则标度为 1。相对重要性标度完成后, 依照指标编号进行排序, 分别建立对应的判断矩阵  $A$ , 并设同一层次项目对应的  $A$  为  $A_1$ 、同一层次指标对应的  $A$  为  $A_F$ 。按照式(1)~(6), 将  $A_1$  转换为量纲一化矩阵  $B_1$ 、 $A_F$  转换为量纲一化矩阵  $B_F$ , 并计算  $\omega_{h,i}$  及其特征值  $\lambda_i$ , 以及  $\omega_{h,ij}$  及其特征值  $\lambda_{ij}$ 。

$$b_{ip} = \frac{a_{ip}}{\sum_i a_{ip}} \quad (1)$$

$$\omega_{h,i} = \frac{\sum_i b_{ip}}{\sum_i \sum_p b_{ip}} \quad (2)$$

$$\lambda_i = \frac{1}{m} \sum_i \frac{\sum_p a_{ip} \omega_{h,p}}{\omega_{h,p}} \quad (3)$$

$$b_{jk} = \frac{a_{jk}}{\sum_j a_{jk}} \quad (4)$$

$$\omega_{h,ij} = \frac{\sum_j b_{jk}}{\sum_j \sum_k b_{jk}} \quad (5)$$

$$\lambda_{ij} = \frac{1}{n} \sum_j \frac{\sum_k a_{jk} \omega_{h,k}}{\omega_{h,k}} \quad (6)$$

式中:

$m$ ——同一层级的评估项目总数;

$a_{ip}$ —— $A_1$  中第  $i$  行第  $p$  列的元素;

$b_{ip}$ —— $B_1$  中第  $i$  行和第  $p$  列的元素;

$n$ ——同一层次的评估指标总数;

$a_{jk}$ —— $A_F$  中第  $j$  行第  $k$  列的元素;

$b_{jk}$ —— $B_F$  中第  $j$  行第  $k$  列的元素。

由于相对重要性标度可能会相互矛盾, 因此需进行一致性检验。若一致性检验未通过, 需要重新调整相对重要性标度。可通过式(7)~(10)进行一致性检验。

$$I_{Cl,i} = \frac{\text{avg}(\lambda_i) - m}{m - 1} \quad (7)$$

$$I_{Cl,ij} = \frac{\text{avg}(\lambda_{ij}) - n}{n - 1} \quad (8)$$

$$I_{CRR,i} = \frac{I_{Cl,i}}{I_{RI,i}} \quad (9)$$

$$I_{CRR,ij} = \frac{I_{Cl,ij}}{I_{RI,ij}} \quad (10)$$

式中:

$I_{Cl,i}$ —— $i$  对应的一致性指标;

$I_{Cl,ij}$ —— $i$  下的  $j$  对应的一致性指标;

$I_{RI,i}$ —— $i$  对应的平均随机一致性指标;

$I_{RI,ij}$ —— $i$  下的  $j$  对应的平均随机一致性指标;

$I_{CRR,i}$ —— $i$  的一致性比值;

$I_{CRR,ij}$ —— $i$  下的  $j$  的一致性比值。

当  $I_{CRR,i} < 0.1$  时, 代表对应判断矩阵  $A_1$  的不一致程度可接受, 一致性检验通过。  $I_{CRR,ij}$  判别方式亦同。

$I_{RI,i}$  和  $I_{RI,ij}$  统称为  $I_{RI}$ , 其取值可参照表 2。将各

评估项目判断矩阵  $A_I$  中所有特征值的平均值设为  $\text{avg}(\lambda_i)$ , 各评估指标判断矩阵  $A_F$  所有特征值的平均值设为  $\text{avg}(\lambda_{ij})$ 。 $\text{avg}(\lambda_i)$  和  $\text{avg}(\lambda_{ij})$  统称为  $\text{avg}(\lambda)$ ,  $I_{CI,i}$  和  $I_{CI,ij}$  统称为  $I_{CI}$ ,  $I_{CRR,i}$  和  $I_{CRR,ij}$  统称为  $I_{CRR}$ , 则基于 AHP 的权重检验结果如表 3 所示。

表 3 基于 AHP 的权重检验结果

Tab.3 Inspection result of weight values based on AHP method

评估项目、评估指标		$\text{avg}(\lambda)$	$I_{CI}$	$I_{RI}$	$I_{CRR}$
评估项目	A1-B1、A1-B2、A1-B3、A1-B4	4.03	0.010 0	0.90	0.011 1
	A2-B1、A2-B2、A2-B3	3.02	0.009 2	0.58	0.015 8
	A3-B1、A3-B2	2.00			
评估指标	A2-B2-C2、A2-B2-C3、A2-B2-C4	3.02	0.009 2	0.58	0.015 8
	A3-B2-C2、A3-B2-C3	2.00			

2.2.2 基于熵值法的权重计算

熵值法属于客观赋权法,其原理为通过计算熵值来判断各指标的离散程度。离散程度越大,则该指标对综合评价的影响越大。该法可充分利用数据的统计特征,具有较高的精确度,但对样本的依赖性比较大,若无丰富现场工务经验的专家或技术人员对权重值的设定进行指导,可能会导致熵值法权重计算结果无法真实反映评估指标的重要性。因此,本文仅使用熵值法对第三层中具有数据连续性的评估指标进行权重计算,如隧道结构沉降 A2-B2-C2、A2-B2-C3、A2-B2-C4 及 A2-B3-C5,以及桥梁结构沉降 B2 下的评估指标 A3-B2-C2、A3-B2-C3。

2.2.2.1 去除极端值

为了减少极端数据对熵计算的影响,在参考现场调研报告后,确定筛选极端值准则为:若单一样本的数据值在整体数据求和后总值中的占比超过 20%,则该数据值被视为极端值并去除。此外,去除极端值的样本总数需不高于样本总数的 2%。

2.2.2.2 数据标准化

熵值需要进行对数计算,故在去除极端值后参照式(11)采用临界值法将数据进行标准化。

$$y_{j,l} = \frac{x_{j,l} - \min x_j}{\max x_j - \min x_j}$$

(11)

式中:

- $x_j$ ——原始评估指标  $j$  的监测数据集;
- $x_{j,l}$ ——监测数据集  $x_j$  内的第  $l$  个数据;
- $y_{j,l}$ ——去除极端值后的评估指标  $j$  数据集  $y_j$  内的第  $l$  个数据。

表 2 不同  $m,n$  对应的  $I_{RI}$  值

Tab.2  $I_{RI}$  values with different  $m,n$

$m,n$	1	2	3	4	5	6
$I_{RI}$	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24

2.2.2.3 熵值计算

将去除了极端值后的标准化数据集代入式(12)~(13),可计算得到  $\omega_{e,ij}$ 。

$$H_j = \frac{-\sum_{l=1}^L \frac{y_{j,l}}{\sum_{l=1}^L y_{j,l}} \ln \left( \frac{y_{j,l}}{\sum_{l=1}^L y_{j,l}} \right)}{\ln n}$$

(12)

$$\omega_{e,ij} = \frac{1 - H_j}{\sum_j (1 - H_j)}$$

(13)

式中:

- $L$ —— $y_{j,l}$ 去除极端值后的样本总数;
- $H_j$ ——评估指标  $j$  对应的熵值。

2.2.3 最终计算权重确定

根据上文 AHP、熵值法计算得到的权重结果,第二层次各评估项目最终计算权重  $\omega_i$  直接采用 AHP 权重,第三层次各评估指标最终计算权重  $\omega_{ij}$  利用综合集成赋权法进行计算。其计算式如图 1 所示。

本文以现有轨道交通土建系统的数据标定熵值法权重,并结合样本数据可信度情况和专家建议,确定  $\alpha$  取 0.4,最终得到的权重计算结果如表 4~5 所示。

3 轨道交通土建系统风险评估体系的应用案例分析

本文以某地铁线路 2013 年、2016 年的检测数据为例,利用上文构建的轨道交通土建系统风险评估体系对这两个年度的风险趋势变化进行分析。将该线路分为 3 个区段,各区段的长度及需评估的

子结构如表 6 所示。

表 4 第二层次各评估项目的最终计算权重  
Tab.4 Final calculated weight values of second layer assessment items

评估项目编号	$\omega_i$
A1-B1	0.47
A1-B2	0.10
A1-B3	0.16
A1-B4	0.28
A2-B1	0.17
A2-B2	0.44
A2-B3	0.39
A3-B1	0.25
A3-B2	0.75

表 5 第三层次各评估指标的最终计算权重  
Tab.5 Final calculated weight values of third layer assessment index

评估指标编号	$\omega_{h,ij}$	$\omega_{e,ij}$	$\omega_{ij}$
A1-B1-C1	1.00		1.00
A1-B2-C2	1.00		1.00
A1-B3-C3	1.00		1.00
A1-B4-C4	1.00		1.00
A2-B1-C1	1.00		1.00
A2-B2-C2	0.17	0.05	0.10
A2-B2-C3	0.39	0.10	0.22
A2-B2-C4	0.44	0.85	0.68
A2-B3-C5	1.00		1.00
A3-B1-C1	1.00		1.00
A3-B2-C2	0.33	0.30	0.31
A3-B2-C3	0.67	0.70	0.69

注：因部分指标不具有连续性，其基于熵值法的权重值  $\omega_{e,ij}$  缺省。

表 6 评估案例线路各区段长度及涵盖的子结构  
Tab.6 Length and substructure of assessment case line sections

区段范围	区段总长度/m	区内涵盖的子结构
A01—A09	11 364.70	轨道、桥梁
A09—A10	1 303.30	轨道、隧道、桥梁
A10—A25	19 233.54	轨道、隧道

注：A01—A02 为区段内的一个线路区间。

将 3 个区段内各区间子结构第二层次评估项目、第三层次评估指标进行扣分，分别乘以相应的权重后再进行求和，最终得到各区间各类子结构的风险评估加权总扣分值，其计算式为：

$$D_s = \sum_i \omega_i \left( \sum_j d_{s,ij} \omega_{ij} \right) \quad (14)$$

式中：

$D_s$ ——某个区间子结构  $s$  的加权总扣分；

$d_{s,ij}$ ——子结构  $s$  下的评估项目  $i$  评估指标  $j$  的扣分值。

基于得到的总扣分值划分各区段线路区间的风险等级。参照现有评估规范，本文的风险等级划分按照以下原则实施：各线路区段按扣分情况将线路区间划分为Ⅲ级、Ⅱ级、Ⅰ级。其中：①Ⅲ级区间为风险评估加权总扣分不小于 40 分或单项评估子结构的扣分大于 25 分的评估区间；②Ⅱ级区间为风险评估总扣分小于 40 分且不小于 25 分的评估区间；③Ⅰ级区间为风险评估总扣分小于 25 分的评估区间。

该线路各区间的风险评估结果如图 2 所示。由图 2 可以看出，该线桥梁区段的风险源主要来自于轨道子结构，其加权扣分值也高于隧道区段轨道子结构的加权扣分值；隧道区段的风险源则较平均。由此可知，桥梁区段应针对轨道子结构强化监控、养护作业，隧道区段的轨道子结构、隧道子结构皆应强化监控、养护作业。

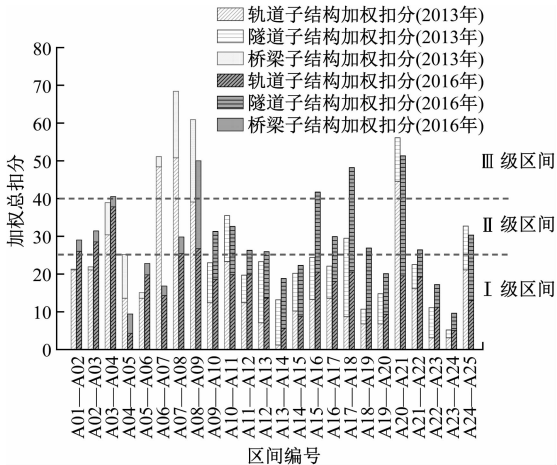


图 2 案例线路各线路区间的风险评估结果  
(2013 年、2016 年)

Fig.2 Risk assessment result of case line intervals in 2013 and 2016

如表 7 所示，对该线路 2013 年、2016 年Ⅲ级、Ⅱ级、Ⅰ级区间个数进行统计后可知：2013 年Ⅰ级区间的占比为 62.5%，2016 年Ⅰ级区间的占比下降至 33.3%；Ⅲ级区间的占比则由 2013 年的 20.8% 上升到 2016 年的 33.3%。这表明了在日常运营下，该线土建系统的风险有逐年升高的趋势，建议强化全线的养护作业。

表 7 案例线路区间的风险等级统计(2013 年、2016 年)

Tab.7 Statical result of case line intervals at different risk grades in 2013 and 2016

风险等级	各风险等级下的区间数/个		各风险等级下的区间数占比/%	
	2013 年	2016 年	2013 年	2016 年
I	15	8	62.5	33.3
II	4	8	16.7	33.3
III	5	8	20.8	33.4

4 结语

本文所建立的轨道交通土建系统风险评估模型可同时用于评估轨道、隧道、桥梁等线路土建设施的运营风险。结合现有的工务设备伤损扣分标准及线路上的监测数据,先以 AHP 量化专家群确定的不同伤损类别相对重要性并计算得到主观权重,再以熵值法将线路上连续监测数据转化为部分评估指标的客观权重,最后结合两者的计算结果,采用综合集成赋权法计算出各评估项目和评估指标的最终权重。

采用本文提出的风险评价模型对案例线路进行整体风险评估,比对案例线路评估期间土建设施性能恶化的具体状况,提出了相应的养护建议。对案例线路的应用分析结果表明,该评估体系具有一定的合理性和工程可用性,可为其他轨道交通项目土建系统的运营安全风险评估提供参考。

参考文献

[1] PARK J W, LEE K C, SIM S H, et al. Traffic safety evaluation for railway bridges using expanded multisensor data fusion[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2016, 31(10):749.

[2] 潘栋. 地铁结构变形预测模型与安全评估分析[D]. 南京:东南大学,2016.

PAN Dong. The prediction model and safety assessment analysis of subway structural deformation[D]. Nanjing: Southeast University, 2016.

[3] 马化洲. 城市轨道交通线路轨道系统安全风险评价[D]. 北京:北京交通大学, 2011.

MA Huazhou. Safety risk assessment on the track system of urban mass transit[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.

[4] LI Z, HE Q. Prediction of railcar remaining useful life by multiple data source fusion[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015,16(4):2226.

[5] 丁荣, 许玉德, 李海锋, 等. 城市轨道交通运营安全评价中土建系统数据库的设计[J]. 城市轨道交通研究, 2015(3):21.

DING Rong, XU Yude, LI Haifeng, et al. Database design in operation safety evaluation for urban rail transit construction system[J]. Urban Mass Transit, 2015(3):21.

[6] 卢野, 许玉德, 李海锋, 等. 城市轨道交通运营安全评价中土建系统典型问题分析[J]. 城市轨道交通研究, 2015(3):17.

LU Ye, XU Yude, LI Haifeng, et al. Typical problems of construction system in urban rail transit operation safety evaluation[J]. Urban Mass Transit, 2015(3):17.

[7] 许湘华. AHP 法在铁路既有混凝土桥梁综合性能评价中的应用[J]. 贵州工业大学学报(自然科学版),2003(3):89.

XU Xianghua. Application of the analytical hierarchy process in comprehensive performance evaluation of railway existing concrete bridge[J]. Journal of Guizhou University of Technology (Natural Science Edition), 2003(3):89.

[8] NYSTRÖM B, SÖDERHOLM P. Selection of maintenance actions using the analytic hierarchy process (AHP): decision-making in railway infrastructure[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2010,6(4):467.

[9] 李元韬, 曹志宇. 基于层次分析法的铁路线路安全性能分析与研究[J]. 铁道运输与经济, 2012(4):9.

LI Yuantao, CAO Zhiyu. Analysis and research of railway line safety performance based on AHP method[J]. Railway Transport and Economy, 2012(4):9.

[10] 刘润恺, 于龙, 陈德明. 基于 AHP-熵权法的高铁接触网可信性评价研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2019(8):1882.

LIU Runkai, YU Long, CHEN Deming. Research on dependability evaluation of high-speed railway catenary based on AHP-entropy method[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019(8):1882.

(收稿日期:2020-05-21)



(上接第 73 页)

LIU Dong, SHENG Wanxing, WANG Yun, et al. Key technologies and trends of cyber physical systems for power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2015(14):3522.

[5] 孙隼华, 李永福, 刘卫宁, 等. 交通信息物理系统及其关键技术研究综述[J]. 中国公路学报, 2013(1):144.

SUN Dihua, LI Yongfu, LIU Weining, et al. Research summary on transportation cyber physical systems and the challenging technologies[J]. Chinese Journal of Highway and Transport, 2013

(1):144.

[6] 靳果, 朱清智, 孟阳, 等. 基于多层极限学习机的电能质量扰动多标签分类算法[J]. 电力系统保护与控制, 2020(8):102.

JIN Guo, ZHU Qingzhi, MENG Yang, et al. Power quality disturbances multi-label classification algorithm based on a multi-layer extreme learning machine[J]. Power System Protection and Control, 2020(8):102.

(收稿日期:2021-12-21)