

基于 MYCIN 与直觉模糊的桥梁拆除方案优选

陈金州<sup>1,2</sup>, 张 月<sup>3</sup>, 钟 正<sup>3</sup>, 夏 飞<sup>1</sup>

(1. 中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430056; 2. 武汉理工大学 交通学院, 湖北 武汉 430063; 3. 华中师范大学 国家数字化学习工程技术研究中心, 湖北 武汉 430079)

**摘 要:** 为科学合理优选桥梁拆除方案, 针对已有评价方法中评价指标模糊处理过于简化以及 AHP 确定指标权重主观性强的问题, 首次构建了包含 5 项一级指标和 17 项二级指标的桥梁拆除方案评价指标体系; 在 AHP 确定指标权重的基础上, 创新性地运用直觉模糊理论和 MYCIN 不确定因子, 融合不确定因子证据信息和权重, 根据实质不确定因子最大化原则来进行最佳桥梁拆除方案的决策优选。最后, 结合沌阳大道高架桥拆除实例应用验证了该评估优选方法的可靠性, 并在北翟高架桥快速拆除项目上示范应用。

**关键词:** 桥梁拆除; 方案优选; MYCIN; 直觉模糊

**中图分类号:** U445.6      **文献标识码:** A      **文章编号:** 2095-0985(2020)03-0034-05

Optimum Selection of Bridge Demolition Scheme  
Based on MYCIN and Intuitionistic Fuzzy

CHEN Jin-zhou<sup>1,2</sup>, ZHANG Yue<sup>3</sup>, ZHONG Zheng<sup>3</sup>, XIA Fei<sup>1</sup>

(1. CCCC Second Highway Consultants Co Ltd, Wuhan 430056, China;  
2. School of Transportation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;  
3. National Engineering Research Centre for E-learning, Central China Normal University, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** In order to optimize the bridge demolition scheme scientifically and reasonably, aiming at the problem that the fuzzy treatment of the evaluation indexes in the existing evaluation methods is too simplified and the weight of the indexes determined by AHP is subjective, the evaluation index system of the bridge demolition scheme including 5 first-class indexes and 17 second-class indexes is constructed for the first time. On the basis of AHP to determine the index weight, the intuitionistic fuzzy theory and the MYCIN uncertain factors are creatively used to integrate the evidence information and weight of uncertain factors, and the decision-making of the best bridge demolition scheme is optimized according to the principle of maximizing the substantial uncertain factors. Finally, the reliability of this method is verified by the application of Zhuanyang Avenue viaduct demolition, and it is demonstrated in the rapid demolition project of Beizhai viaduct.

**Key words:** bridge demolition; scheme optimization; MYCIN; intuitionistic fuzzy

在役桥梁结构受车辆荷载作用(尤其是超载车辆)、使用条件及环境侵蚀等因素的影响,将会不同程度地发生不可逆的材料老化和结构损伤,日积月累将导致结构性能劣化、承载能力下降和耐久性降低,造成越来越多的桥梁需要适时拆除、加固、扩建或重建<sup>[1]</sup>。而目前关于桥梁拆除决策方案的研究主要针对具体项目制定可实施的拆除方案,不涉及多种方案的评估优选,或简单参考最大变形和应力模拟值,根据管理者的意愿或专家意见等主观经验定性分析拆除方案优劣。因此,

收稿日期: 2019-09-06    修回日期: 2019-10-25

作者简介: 陈金州(1979-),男,湖北荆州人,高级工程师,博士研究生,研究方向为桥梁结构理论、信息技术评估(Email: Bridge5209@126.com)

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0806000;2017YFC0806008)

基于桥梁拆除方案呈现多样化和多元化等特征,有必要引入模糊数学中的决策分析模型科学合理地桥梁拆除方案进行优选,有效提高拆除效率、降低决策风险和施工风险。

数学决策方法辅助方案评估,常见的有 AHP (层次分析法)和灰色关联分析法等<sup>[2]</sup>。如:刘沐宇等<sup>[3]</sup>基于 AHP 和熵权法,开展了桥梁火灾风险的多级模糊综合评价;杨雅勋等<sup>[4]</sup>基于改进 AHP 法和熵值法,采用灰色关联法优选桥梁加固方案。这些方法虽然为桥梁工程施工方案的决策提供了不少思路,但忽略了决策者在评价方案时的犹豫度问题<sup>[5]</sup>。在此引入直觉模糊数的思想,让决策者能更好地表达自身对备选方案各指标优劣的模糊性和不确定性,使桥梁拆除方案的评价优选更加科学准确。

本文首先借助 AHP 构建桥梁结构拆除方案的评价指标体系,并计算各指标的单目标权重;再使用直觉模糊数构建决策矩阵,确定 MYCIN 不确定因子,进一步运用灰色关联分析指标的实质不确定因子矩阵,最后根据不确定因子矩阵融合推导公式<sup>[6]</sup>、结合 AHP 计算确定的各指标权重,整合实质不确定因子评判方案优劣。

### 1 桥梁拆除方案评价指标体系

在桥梁拆除过程中,伴随着桥梁自身的体系转换、预应力解除和支撑边界的变化及温度影响,其结构受到许多不确定因素和复杂环境的影响,不同拆除工艺和拆除顺序对结构的受力和安全等影响较大<sup>[7]</sup>。因此,在吸取以往桥梁拆除经验的基础上,将评价指标分为安全、经济、工期、交通和环保 5 项一级指标,安全因素  $P_1$  是评估桥梁拆除方案优劣的基础;经济因素  $P_2$  体现拆除工程成本控制能力;工期  $P_3$  的管理直接关系到工程的经营效益;交通影响  $P_4$  衡量施工点周边的通畅度;环保因素  $P_5$  反映桥梁工程绿色施工理念,这五大类指标共同构成了评估指标体系。

同时,在“人、材料、机械设备、方法、环境”施工五要素的指导下,对一级指标进行细化,设计了 17 个二级详细指标,如环保因素要求桥梁拆除方案在保证质量和安全的前提下,最大限度地节约资源、保护环境:在工程施工过程中经常会产生光、噪声与扬尘污染  $X_{14}$ ,拆除方案应采取措施实现对光、噪声和扬尘的有效控制,如控制高功率照明灯的光线范围,采用环保固态照明光源,尽量使用低噪声、低振动的机械等;材料用量  $X_{15}$  体现施

工方案规划的科学性,合理分配钢材、混凝土以及工具式定型模板等材料能降低原材料和资源的浪费,也能节约成本;机械设备能源消耗  $X_{16}$  衡量施工过程中柴油、汽油或电力的消耗情况;废料与废弃物数量  $X_{17}$  体现污染物排放以及固体废弃物的产生情况。最终形成评价指标体系如表 1 所示。

表 1 拆除方案评价指标体系

类别	指标
安全因素 $P_1$	施工危险源风险评估 $X_1$
	安全保障评估 $X_2$
	监控和预警系统 $X_3$
	应急救援设备 $X_4$
经济因素 $P_2$	启动资金 $X_5$
	直接工程费 $X_6$
	材料重复利用率 $X_7$
工期 $P_3$	工期长度 $X_8$
	工艺成熟度 $X_9$
	施工设备能力 $X_{10}$
交通影响 $P_4$	桥址地形地貌复杂度 $X_{11}$
	封闭交通对公共交通影响 $X_{12}$
	允许施工封闭交通时间长 $X_{13}$
环保因素 $P_5$	光、噪声与扬尘污染 $X_{14}$
	材料用量 $X_{15}$
	机械设备能源消耗 $X_{16}$
	废料与废弃物数量 $X_{17}$

### 2 桥梁拆除方案优选模型

#### 2.1 直觉模糊集

Zadeh<sup>[8]</sup>创立模糊集理论,将仅能取值为 0 或 1 的特征函数扩展到区间  $[0,1]$  中取任意值的隶属函数,但其单一的隶属度取值不能有效反映决策者的犹豫取值。Atannassov<sup>[9]</sup>扩展模糊集理论,提出直觉模糊集的概念,包含隶属度、非隶属度和犹豫度三个方面的信息,在处理模糊性和不确定性方面更具有优势。主要定义如下:

定义 1:直觉模糊集  $A = \{ \langle x, u_A(x), v_A(x) \mid x \in X \rangle \}$  中,隶属度  $u_A(x)$ ,非隶属度  $v_A(x)$  和犹豫度  $\pi_A(x) = 1 - u_A(x) - v_A(x)$  分别表示对  $x$  属于  $A$  支持、反对和中立这三种证据的程度。其中,  $u_A(x), v_A(x)$  组成的有序对  $\langle u_A(x), v_A(x) \rangle$  称为直觉模糊数,记作  $\alpha = \langle u_\alpha, v_\alpha \rangle$ 。

定义 2:Chen 和 Tan<sup>[10]</sup>引入记分函数  $S(\alpha) = u_\alpha - v_\alpha$  反应直觉模糊数的大小,其意义是表示支持程度与反对程度的差值,即当  $S(\alpha) = 1$  时,表示完全赞成该方案;当  $S(\alpha) = 0$  时,表示赞成程度与反对程度相同,表现为中立态度或弃权态度;

当  $S(\alpha) = -1$  时,表示完全反对该方案。

2.2 MYCIN 不确定因子

Shortliffe 和 Buchanan<sup>[11]</sup> 在确定性理论的基础上,结合贝叶斯推理提出 MYCIN 不确定性推理模型,并率先在医疗专家咨询系统 MYCIN 中取得成功。MYCIN 不确定因子  $CF(H,E)$  表示在证据  $E$  为真的条件下,假设  $H$  为真的信任度,取值范围为  $[-1,1]$ 。当  $CF(H,E) = 1$  时,表示假设  $H$  在证据  $E$  下为真;当  $CF(H,E) = -1$  时,表示假设  $H$  在证据  $E$  下为假;当  $CF(H,E) = 0$  时,表示假设  $H$  在证据  $E$  下不确定;其中,证据  $E$  为确定值。

然而,当存在证据  $E$  不确定为真时,即  $E$  的信任度  $CF(E)$  不确定的情况,此时引入实质不确定因子  $CF_T(H,E)$  的概念,用来表征证据  $E$  的信任度  $CF(E)$  不确定的前提下,对假设  $H$  为真的信任度,计算公式为:

$$CF_T(H,E) = CF(H,E)CF(E)$$

(1)

由于 MYCIN 不确定因子和记分函数意义非常相似,本文使用记分函数  $S(\alpha) = u_\alpha - v_\alpha$  将矩阵  $D$  转化成区间记分函数矩阵  $S = (s_{ij})_{m \times n}$ ,取  $CF(H,E) = s_{ij}$ ,表示方案  $M_j$  在指标  $X_i$  下为最优方案的信任度。

2.3 实质不确定因子

要求得实质不确定因子  $CF_T(H,E)$ ,由式(1)易知,须先求每个证据  $E$  的信任度  $CF(E)$ 。运用灰色关联分析求取不确定度,其基本思想是利用序列曲线的相似程度判断序列间的关联程度,比较曲线与参考数据,曲线越近,关联度越大<sup>[12]</sup>。理论上讲,若某个指标相较于其他指标,与指标体系的平均指标信息关联度越高,则说明该指标的不确信度越低,信任度越高,故可将平均指标信息定为参考数据列。根据灰色关联分析,指标  $X_j$  的不确信度为:

$$\left\{ \begin{aligned} DOI(X_j) &= \frac{1}{m} \left( \sum_{i=1}^m r_{ij}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \\ r_{ij} &= \frac{\min_i |s_{ij} - \bar{s}_i| + \xi \max_i |s_{ij} - \bar{s}_i|}{|s_{ij} - \bar{s}_i| + \xi \max_i |s_{ij} - \bar{s}_i|} \end{aligned} \right. \quad (2)$$

式中: $r_{ij}$ 为灰色均值关联度,  $j = 1, 2, \dots, n$ ;  $\xi$  为分辨系数,一般取值 0.5;  $\bar{s}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n s_{ij}$  为指标体系的平均指标信息。

在求得指标不确信度  $DOI(X_j)$  的基础上,易得指标  $X_j$  的可信度为:

$$CF(E_j) = 1 - DOI(X_j)$$

(3)

则实质不确定因子  $CF_T(H,E) = CF(H,E)CF(E) = s_{ij}(1 - DOI(X_j))$ 。

2.4 建立桥梁拆除方案优选模型

步骤 1: AHP 法确定指标权重

首先建立拆除方案决策的层次结构模型,包括目标层、准则层和方案层。目标层是桥梁拆除方案的决策优选,准则层为表 1 确定的 5 个一级指标和 17 个二级指标,方案层为备选的桥梁拆除方案。对同一层级的因素,构造指标重要程度判断矩阵,并检验它的相容性,在相容性通过的前提下求得权重向量,将一级和对应的二级指标权重相乘得到各指标的单目标权重。

步骤 2: 构建直觉模糊决策矩阵

假设桥梁拆除方案决策问题有  $m$  个可行方案  $M_1, M_2, \dots, M_m$ , 有  $n$  个评价指标  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , 可行方案  $M_i$  在评价指标  $X_j$  下的属性值为区间直觉模糊数  $d_{ij}$ , 构建直觉模糊决策矩阵  $D = (d_{ij})_{m \times n}$ 。

步骤 3: 计算记分函数矩阵,得到 MYCIN 不确定因子矩阵

根据记分函数  $S(\alpha) = u_\alpha - v_\alpha$ ,将矩阵  $D$  转化成区间记分函数矩阵  $S = (s_{ij})_{m \times n}$ 。比较 MYCIN 不确定因子和记分函数可以发现,两者在意义上非常相似,且计算思路也相同,故取  $CF(H,E) = s_{ij}$ ,用于表示方案  $M_j$  在指标  $X_i$  下为最优方案的信任度。

步骤 4: 利用灰色关联分析法得到实质不确定因子矩阵<sup>[13]</sup>

根据式(2),运用灰色关联分析计算指标的不确信度  $DOI(X_j)$ ,进一步由式(3)得到指标的实质不确定因子  $CF_T(H,E)$ ,由此构建实质不确定因子矩阵  $CF_T = (CF_T(H,E))_{m \times n}$ 。

步骤 5: 结合权重融合实质不确定因子,选择最优方案

将实质不确定因子矩阵  $CF_T$  的每一行与 AHP 法确定的权重中对应指标的单目标权重相乘,得到加权实质不确定因子矩阵,进一步对各方案在不同指标下的实质不确定因子进行证据融合,本文采用以下推论融合实质不确定因子:

$$CF_T(H, (E_1, E_2, \dots, E_n)) = \frac{CF_T(H, (E_1, E_2, \dots, E_{n-1})) + CF_T(H, E_n)}{1 + CF_T(H, (E_1, E_2, \dots, E_n))CF_T(H, E_n)} \quad (4)$$

由此可以根据实质不确定因子最大化原则选择最佳方案,即融合后的实质不确定因子越大,说明支持率越高,方案越优<sup>[6]</sup>。



3 应用案例

沌阳高架桥位于武汉市经济技术开发区,地处交通拥挤地带,横跨 5 个十字路口,桥长 3476.5 m,于 1997 年采用预制拼装法建成,单片板宽 1.0 m,为装配式预应力混凝土简支空心板梁。由于武汉经济迅速发展,车流量剧增,原有双向 4 车道无法满足交通载量,需拆除重建。

经对该桥梁结构与拆除方法库的对抗性分析,得到推荐的 3 种拆除待选方案如下:

控制爆破法方案一  $M_1$ :预先在桥梁结构合理位置打孔装微量炸药,进而定点延时爆破,使爆破的声响、震动、飞石、倾倒方向、破坏区域以及破碎物的散坍范围在规定限度以内。

整孔驮移法方案二  $M_2$ :采用自行式移梁车配合辅助支架来对既有桥梁进行整孔顶升,驮运驶离桥址,整体运移至指定位置,继而下放破碎或用于低等级道路。

单片移除法方案三  $M_3$ :将预制装配式空心板采用大型汽车吊、履带吊、龙门吊等吊机分片依次移除,并借助平板车等运至指定位置,继而破碎或再次组拼用于低等级道路。

3.1 确定指标权重

该桥梁是城市主干道,封闭交通对交通流量影响极大;桥梁总长度长,桥下管网丰富,施工环境复杂,对拆除技术要求高;同时,桥梁地处城区,对施工环保性也有一定要求,应尽量减少光、噪声与扬尘污染。采用德尔斐法邀请 5 位在桥梁拆除方面具有丰富经验的施工人员和专家作为决策者共同协商,参照 Satty<sup>[14]</sup>提出的 1~9 模糊标度法,对各项指标两两比较同一层级的指标重要程度,构造指标体系中目标层对应于准则层的判断矩阵

表 3 指标不确定度、信任度及实质不确定因子

指标	直觉模糊数			MYCIN 因子			DOI( $X_j$ )	CF( $E_j$ )	CF <sub>T</sub>		
	$M_1$	$M_2$	$M_3$	$M_1$	$M_2$	$M_3$			$M_1$	$M_2$	$M_3$
$X_1$	<0.6,0.3>	<0.5,0.3>	<0.5,0.3>	0.3	0.2	0.2	0.462	0.538	0.161	0.108	0.108
$X_2$	<0.6,0.3>	<0.6,0.2>	<0.6,0.3>	0.3	0.4	0.3	0.206	0.794	0.238	0.318	0.238
$X_3$	<0.6,0.3>	<0.6,0.3>	<0.5,0.3>	0.3	0.3	0.2	0.237	0.763	0.229	0.229	0.153
$X_4$	<0.6,0.3>	<0.5,0.3>	<0.5,0.3>	0.3	0.2	0.2	0.257	0.743	0.223	0.149	0.149
$X_5$	<0.6,0.4>	<0.6,0.5>	<0.6,0.3>	0.2	0.1	0.3	0.299	0.701	0.140	0.070	0.210
$X_6$	<0.5,0.3>	<0.5,0.4>	<0.4,0.4>	0.2	0.1	0	0.434	0.566	0.113	0.057	0.000
$X_7$	<0.3,0.6>	<0.5,0.3>	<0.6,0.4>	-0.3	0.2	0.2	0.257	0.743	-0.223	0.149	0.149
$X_8$	<0.7,0.3>	<0.5,0.3>	<0.4,0.5>	0.4	0.2	-0.1	0.283	0.717	0.287	0.143	-0.072
$X_9$	<0.4,0.3>	<0.6,0.2>	<0.6,0.3>	0.1	0.4	0.3	0.272	0.728	0.073	0.291	0.218
$X_{10}$	<0.6,0.2>	<0.6,0.3>	<0.5,0.2>	0.4	0.3	0.3	0.206	0.794	0.318	0.238	0.238
$X_{11}$	<0.6,0.2>	<0.5,0.3>	<0.5,0.2>	0.4	0.2	0.3	0.229	0.771	0.308	0.154	0.231
$X_{12}$	<0.5,0.3>	<0.3,0.5>	<0.5,0.4>	0.2	0.2	0.1	0.309	0.691	0.138	-0.138	0.069
$X_{13}$	<0.6,0.2>	<0.4,0.4>	<0.3,0.4>	0.4	0	-0.1	0.404	0.596	0.238	0.000	-0.060
$X_{14}$	<0.4,0.6>	<0.5,0.3>	<0.6,0.3>	-0.2	0.2	0.3	0.261	0.739	-0.148	0.148	0.222
$X_{15}$	<0.5,0.5>	<0.5,0.3>	<0.6,0.3>	0	0.2	0.3	0.389	0.611	0.000	0.122	0.183
$X_{16}$	<0.3,0.6>	<0.4,0.3>	<0.4,0.2>	-0.3	0.1	0.2	0.296	0.704	-0.211	0.070	0.141
$X_{17}$	<0.4,0.6>	<0.4,0.3>	<0.5,0.4>	-0.3	0.1	0.1	0.342	0.658	-0.132	0.066	0.066

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 1/2 & 1/2 & 1/3 \\ 1/2 & 1 & 1/3 & 1/2 & 2 \\ 2 & 3 & 1 & 2 & 3 \\ 2 & 2 & 1/2 & 1 & 2 \\ 1/2 & 1/2 & 1/3 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}。$$

为避免决策者主观经验的干扰,导致判断矩阵出现误差,需要检验判断矩阵的不相容性。计算得  $\lambda_{\max} = 5.1571$ ,  $CR \approx 0.035 < 0.1$ , 满足相容性要求,可接受。则确定权重矩阵为:  $W = [0.183, 0.125, 0.360, 0.237, 0.094]$ 。

同理,可得各指标层的权重系数,进一步计算得各指标相对于目标层的单目标权重,如表 2 所示。

表 2 桥梁拆除方案优选指标权重

准则层	权重	指标层	权重	单目标权重
$P_1$	0.183	$X_1$	0.141	0.026
		$X_2$	0.330	0.060
		$X_3$	0.199	0.036
		$X_4$	0.330	0.060
$P_2$	0.125	$X_5$	0.311	0.039
		$X_6$	0.494	0.062
		$X_7$	0.196	0.025
$P_3$	0.360	$X_8$	0.448	0.161
		$X_9$	0.283	0.102
		$X_{10}$	0.164	0.059
		$X_{11}$	0.106	0.038
$P_4$	0.237	$X_{12}$	0.667	0.158
		$X_{13}$	0.333	0.079
$P_5$	0.094	$X_{14}$	0.224	0.021
		$X_{15}$	0.321	0.030
		$X_{16}$	0.321	0.030
		$X_{17}$	0.134	0.013

3.2 MYCIN 不确定因子矩阵计算

根据决策者们对备选拆除方案的指标打分,利用统计方法得到方案  $M_i$  对指标  $X_j$  的支持程度以及反对程度,记为直觉模糊数  $d_{ij}$ ,构建决策矩阵  $D$ 。直觉模糊决策矩阵  $D$  以及 MYCIN 不确定因子矩阵的数据计算结果如表 3 所示。

3.3 确定实质不确定因子矩阵

根据式(2)计算指标  $x_j$  的不确信度  $DOI(X_j)$ ,由式(3)得到各指标的信任度  $CF(E_j)$ ,在此基础上根据式(1)构建实质不确定因子矩阵  $CF_T$ ,数据如表 3 所示。

3.4 融合实质不确定因子

由表 2 已确定各指标的单目标权重数值过小,而一级指标分为 5 大类,根据融合经验将其扩大 5 倍后与实质不确定因子矩阵对应的指标行数数据相乘,得到加权矩阵  $E$ :

$E=$

0.021	0.014	0.014
0.072	0.096	0.072
0.042	0.042	0.028
0.067	0.045	0.045
0.027	0.014	0.041
0.035	0.017	0.000
-0.027	0.018	0.018
0.231	0.116	-0.058
0.037	0.148	0.111
0.094	0.070	0.070
0.059	0.029	0.044
0.109	-0.109	0.055
0.094	0.000	-0.024
-0.016	0.016	0.023
0.000	0.018	0.028
-0.032	0.011	0.021
-0.008	0.004	0.004

。

根据式(4)融合实质不确定因子为:  
方案  $M_1$ : $CF_T(H_1,(E_1,E_2,\cdots,E_{17}))=0.670$ ;  
方案  $M_2$ : $CF_T(H_1,(E_1,E_2,\cdots,E_{17}))=0.501$ ;  
方案  $M_3$ : $CF_T(H_1,(E_1,E_2,\cdots,E_{17}))=0.457$ 。

依据实质不确定因子最大化原则,拆除方案的综合优越度依次为:0.670,0.501,0.457,则方案优劣顺序为: $M_1,M_2,M_3$ ,即控制爆破法方案  $M_1$  为推荐方案。继而按照控制爆破法完成了施工组织设计评审与现场施工。

2018 年 4 月在北翟高架桥预应力混凝土连续箱梁桥拆除工程上成功推荐了整孔驮移法,并获得实施,起到了很好的示范作用;2019 年 8 月在开阳高速 13 座跨线天桥等拆除工程上获得推广应用。

4 结 论

(1)基于 MYCIN 与直觉模糊多属性法评估桥梁拆除方案,是桥梁工程领域方案优选的新方

法。基于 AHP 构建分析模型,运用直觉模糊多属性综合决策理论计算各指标的不确定因子,继而从信息融合的视角,融合 MYCIN 实质不确定因子和 AHP 权重,决策出最适合的拆除方案。

(2)根据桥梁拆除的特点,将影响拆除方案的因素分为安全、经济、工期、交通影响和环保 5 个一级指标,并结合施工五要素细化为 17 个典型的二级指标,建立评估模型。该模型将桥梁拆除方案的影响因素按照层级排列,进而对同一层级的因素重要程度两两对比求取权重,评估思路清晰,步骤直观简单,因素间关系也一目了然,是科学合理的指标赋权方法。

(3)在计算得到各指标目标单权重的基础上,对参选方案进行直觉模糊计算,并结合权重得出最终的方案优越度值。该决策方法针对桥梁拆除方案的评估优选,引入数学决策模型,避免定性分析的主观性;同时,也同样适用于桥梁工程其他领域如桥梁加固方案、桥型方案选择和桥梁建造方法选择等的评估决策。

参 考 文 献

[1] 李亚民. 跨高速连续梁主跨整体拆除施工技术[J]. 世界桥梁, 2018, 46(5): 74-79.

[2] 贾布裕, 余晓琳, 颜全胜. 基于离散动态贝叶斯网络的桥梁状态评估方法[J]. 桥梁建设, 2016, 46(3): 74-79.

[3] 刘沐宇, 黄 根, 卢志芳. 桥梁火灾风险模糊综合评价方法[J]. 土木工程与管理学报, 2018, 35(2): 8-14.

[4] 杨雅勋, 李子青, 郝宪武. 组合赋权灰关联法在桥梁加固方案优选中的应用[J]. 郑州大学学报(工学版), 2006, 27(4): 84-88.

[5] 唐红祥. 基于灰色关联分析和 MYCIN 确定因子的直觉模糊软集决策方法[J]. 统计与决策, 2017, (5): 55-58.

[6] 李 鹏, 刘思峰, 朱建军. 基于 MYCIN 不确定因子和前景理论的随机直觉模糊决策方法[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(6): 1509-1515.

[7] 王 凯, 王 社. 跨航道连续梁桥顶推拆除施工监控技术[J]. 桥梁建设, 2013, 43(5): 111-116.

[8] Zadeh L A. Fuzzy sets[J]. Information and Control, 1965, 8: 338-353.

[9] Atanassov K T. Intuitionistic fuzzy sets[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1986, 20(1): 87-96.

[10] Chen S M, Tan J M. Handling multi-criteria fuzzy decision-making problems based on vague set theory[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1994, 67(2): 163-172.

参 考 文 献

[1] Poulos H G. Ground movements-a hidden source of loading on deep foundations[J]. The Journal of the Deep Foundations Institute, 2007, 1(1): 37-53.

[2] Wang W, Li Q, Hu Y, et al. Field investigation of collapse of a 13-story high-rise residential building in Shanghai[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2017, 31(4): 04017012-1-9.

[3] 张浩, 石名磊, 胡伍生, 等. 互通区跨线桥邻近路基墩柱偏移事故分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2013, 43(3): 617-623.

[4] Bransby M F, Springman S M. Selection of load±transfer functions for passive lateral loading of pile groups[J]. Computers and Geotechnics, 1999, 24: 155-184.

[5] Karim M R, Lo S C R, Gnanendran C T. Behaviour of piles subjected to passive loading due to embankment construction[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2014, 51: 303-310.

[6] Goh A T C, Teh C I, Wong K S. Analysis of piles subjected to embankment induced lateral soil movements[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997, 123(9): 792-801.

[7] Ashour M, Ardalan H. Analysis of pile stabilized slopes based on soil-pile interaction[J]. Computers and Geotechnics, 2012, 39: 85-97.

[8] Guo W D. Elastic models for nonlinear response of rigid passive piles[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2014, 38: 1969-1989.

[9] Ito T, Matsmi T. Methods to estimate lateral force acting on stabilizing piles[J]. Soils and Foundation, 1975, 15(4): 43-59.

[10] Beer E E, Wallays M. Forces Induced in Piles by Unsymmetrical Surcharges on the Soil Around the Piles[C]//Proceedings of 5th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Madrid: 1972: 325-332.

[11] Tschebotarioff G P. Foundations, Retaining and Earth Structures[M]. New York: McGraw-Hill, 1973.

[12] 竺明星, 龚维明, 何小元, 等. 堆载作用下考虑土拱效应的被动桩变形内力半解析解[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(11): 1997-2008.

[13] 张浩, 石名磊, 郭院成, 等. 不平衡堆载作用下邻近结构桩的侧向受力机制[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(12): 2226-2236.

[14] 沈珠江. 桩的抗滑阻力和抗滑桩的极限设计[J]. 岩土工程学报, 1992, 14(1): 51-56.

[15] Randolph M F, Houlsby G T. The limiting pressure on a circular pile loaded laterally in cohesive soil[J]. Géotechnique, 1984, 34(4): 613-623.

[16] Matlock H. Correlations for Design of Laterally Loaded Piles in Soft Clay[C]//Proceedings of The Second Annual Offshore Technology Conference, Houston. Texas: Offshore Technology Conference, 1970: 577-594.

[17] 张浩, 石名磊, 郭院成, 等. 边载作用下桥梁基桩-立柱的位移特征与受力分析[J]. 岩土力学, 2017, 38(9): 2683-2692.

(上接第38页)

[11] Shortliffe E H, Buchanan B G. A model of inexact reasoning in medicine[J]. Math Biosci, 1975, 23(3-4): 351-379.

[12] 邓聚龙. 灰色系统理论教程[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1990.

[13] 王璐, 水庆象, 吴群琪, 等. 基于耦合定权和模糊物元分析的高速公路改扩建方案决策[J]. 统计与决策, 2017, (19): 60-63.

[14] Satty T L. The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation (Decision Making Series)[M]. New York: McGraw-Hill, 1980.