

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2021.02.010

基于改进 FCE 的渡槽安全综合评价

罗日洪^{1,2}, 黄锦林^{1,2}, 李兆恒^{1,2}

(1. 广东省水利水电科学研究院, 广东 广州 510635;
2. 广东省粤港澳大湾区水安全保障工程技术研究中心, 广东 广州 510635)

摘要: 针对渡槽安全评价中指标赋权和模糊综合评价法(FCE)算子优化的问题,提出基于改进 FCE 的渡槽安全综合评价方法。该方法采用基于自然指数 $e^{0/5} \sim e^{8/5}$ 标度的层次分析法(AHP),得到各个评价指标主观权重,再通过熵权法计算专家自身客观权重,将主观权重与客观权重融合得到优化后的权重,然后引进全优型合成算子计算总目标隶属度,再与对应的风险等级进行加权综合得到风险度,以此确定渡槽的安全类别。将该方法应用于具体工程的安全评价,结果表明,评价结果与主因素突出型合成算子和加权平均型合成算子的结果一致。基于改进 FCE 的渡槽安全综合评价方法降低了主观偏差,避免了算子的选择,具有较强的可操作性。

关键词: 组合优化赋权;层次分析法;熵权法;算子优化;模糊综合评价法;渡槽安全评价

中图分类号: TU122 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2021)02-0162-08

Comprehensive safety evaluation of aqueduct based on improved FCE method

LUO Rihong^{1,2}, HUANG Jinlin^{1,2}, LI Zhaocheng^{1,2}

(1. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510635, China;
2. Technical Research Center of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area's Water Safety Guarantee, Guangzhou 510635, China)

Abstract: Aiming at problems of the index weighting and the operator optimization of fuzzy comprehensive evaluation (FCE) method in the aqueduct safety evaluation, a comprehensive evaluation method of aqueduct safety based on the of improved FCE method was proposed. In the proposed method, the analytic hierarchy process (AHP) method based on the natural index of $e^{0/5}$ to $e^{8/5}$ was used to obtain the subjective weight of each evaluation index, and the objective weight of the experts was calculated by entropy weight method to optimize the subjective weight. Then the total objective membership degree was calculated by introducing the all-optimal synthesis operator, and the risk degree was obtained by the weighted synthesis with the corresponding risk grade, to determine the safety category of the aqueduct. The method was applied to the safety evaluation of a specific project, and the results show that the evaluation results were consistent with those of the principal factor protruding type composition operator and the weighted average type composition operator. This method reduces the subjective deviation, avoids the selection of operators, and has strong maneuverability.

Key words: combinatorial optimization weighting; analytic hierarchy process; entropy weight method; operator optimization; fuzzy comprehensive evaluation method; aqueduct safety evaluation

为了解决缺水问题及优化水资源配置,我国从 20 世纪 50 年代以来,修建了大量的灌溉供水渠系,并大量应用了渡槽这一结构形式来跨越河谷、河渠、溪谷、洼地、道路和建筑物进行输水。20 世纪 80 年代以前,修建的大多是中小型渡槽,流量、跨度小,且由于设计缺乏科学指导、施工质量差,加上运行后各种人为因素和自然因素综合作用,大部分渡槽出现了不同程度的老化病害问题。顾培英等^[1]统计国内 18 宗渡槽破坏的原因有地震、风致、水毁、耐久性问题(包括混凝土碳化、止水老化、冻融、腐蚀、水流冲刷、土体冻胀、不均匀沉降等)、超载破坏及设计不合理或施工质量差等。

要确保渡槽的安全运行应及时掌握渡槽的安全情况,对其状态进行科学合理的评价,进而采取针对性管

基金项目: 广东省水利科技创新基金(2017-16)
作者简介: 罗日洪(1988—),男,工程师,硕士,主要从事水利水电工程及防洪减灾研究。E-mail:715821816@qq.com
通信作者: 黄锦林,教授级高级工程师。E-mail:1657826640@qq.com
引用本文: 罗日洪,黄锦林,李兆恒. 基于改进 FCE 的渡槽安全综合评价[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(2):162-169.
LUO Rihong, HUANG Jinlin, LI Zhaocheng. Comprehensive safety evaluation of aqueduct based on improved FCE method [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2021, 49(2): 162-169.

理、维护和改造措施延长渡槽的使用寿命。一些学者对渡槽的安全问题进行了深入研究:张社荣等^[2]对强震作用下渡槽排架进行了数值模拟,研究渡槽整体抗震特性;尚峰等^[3]结合现场检测和三维数值模拟对在役钢筋混凝土渡槽病害进行了评价;宋志鹏等^[4]对宁夏红柳沟渡槽采用现场检测、现场载荷试验和三维有限元结合的方法评价结构的静力和动力状态;甘磊等^[5]针对南古洞渡槽建立三维有限元模型,计算不同工况下渡槽的位移和应力分布,评估渡槽结构整体安全性。以上仅对渡槽某一问题进行了研究,存在一定的局限性。近年来,部分学者在对影响渡槽的健康状态的各类因素采用主观、客观或两者相结合的定量分析方法的基础上,对渡槽的安全进行了综合评价:夏富洲等^[6-7]采用不确定型层次分析法和模糊变权法对渡槽结构进行状态评估;王梦雅等^[8]提出了一种基于物元模型和关联函数的渡槽结构老化的可拓评价方法,实现了对渡槽老化程度的定性和定量的综合描述;张文剑等^[9]基于层次分析理论对陕西省某渡槽健康状态进行了模糊综合评价。

渡槽结构主要是由槽身、支承结构和基础等部分组成,是一个受多因素影响的不确定的、非线性的动态系统,其安全评价方法的研究一直是一个相当复杂的问题,一般数值模拟等方法难以全面反映渡槽的实际安全情况,而层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)-模糊综合评价法(fuzzy comprehensive evaluation, FCE)对于解决难以用精确的数学和力学函数来表达的复杂非线性综合评价问题有独特的优势^[10],因此也可以用于对渡槽进行综合评价。本文针对渡槽安全模糊综合评价中指标赋权和 FCE 算子优化问题,提出一种基于改进 FCE 的渡槽安全综合评价方法,并将其用于具体工程的安全评价。

1 基本原理

1.1 构建递阶层次关系

根据渡槽的结构特点和结构损伤破坏机理,建立恰当的渡槽评价层次结构。以渡槽安全作为层次分析的目标层。渡槽安全性、适用性和耐久性构成准则层。其中安全性是渡槽安全评价的最重要指标,决定渡槽是否倒塌破坏;适用性考虑了渡槽正常使用的能力;耐久性则与渡槽最终服役期限有关。根据不同渡槽的实际情况,对准则层各要素的组成再进行层次分析,确定各自的指标层。

1.2 改进 AHP-熵权法组合优化赋权

AHP 法具有系统性强、逻辑清晰、可靠性较高等特点,在各种系统决策问题中应用广泛。但对于复杂且专业性强的问题,受不完备信息和个人偏好影响,单个专家容易判断失真或误判。因此,在引进不同专业背景的专家组成群决策,通过 AHP 法得到指标主观权重的基础上,借鉴传递熵的思想,用熵表示专家给出指标权重的不确定性和各专家与理想专家的水平差异。构建专家自身客观权重熵模型,评定专家给出的信息质量,确定各专家权重的贡献度,最后融合处理主观、客观权重。这一思想是利用专家自身客观权重对基于 AHP 法的指标主观权重进行修正,提高权重的合理性和精确性。

1.2.1 基于改进 AHP 法的指标主观权重

自 Saaty 提出 AHP 法以来,该方法在决策问题上得到广泛的应用,但同时被认为 1~9 标度中各等级之间关系存在不合理性^[11-12],一些学者提出各种“互反型”和“互补型”标度,比如指数 a^n 、 a^8 标度^[13]、 $9^{n/9}$ 标度^[12]、 $0.1\sim0.9$ 标度^[14]。骆正清等^[15]对 AHP 法中的不同标度采用保序性、一致性、标度均匀性、标度可记忆性、标度可感知性、标度权重拟合性 6 个标准进行研究后,建议对精度要求较高的多准则排序问题采用基于自然指数 $e^{0/5}\sim e^{8/5}$ 的标度。表 1 为重新进行重要性描述的 1~9 标度和自然指数标度的对比。

本文采用自然指数标度计算权重,步骤如下:

a. 假设有 m 个专家,根据专家 k 意见,将评价对象同层元素 $X_1、X_2、\cdots、X_n$ 两两比较,采用 $e^{0/5}\sim e^{8/5}$ 标度进行赋值,构造出符合下列要求的判断矩阵 $A=(a_{ijk})_{n\times n}$:

$$a_{ijk}=\begin{cases}\frac{1}{a_{ijk}} & i\neq j \\ 1 & i=j\end{cases}\tag{1}$$

表 1 1~9 标度和自然指数标度对比

Table 1 Comparison between 1 to 9 scale and natural index scale

重要程度	标度	
	1~9 标度	自然指数标度
同等重要	1	$e^{0/5}$
明显重要	3	$e^{2/5}$
很重要	5	$e^{4/5}$
非常重要	7	$e^{6/5}$
极端重要	9	$e^{8/5}$

注:2,4,6,8 为 1~9 标度中两相邻判断的中值; $e^{1/5}$, $e^{3/5}$, $e^{5/5}$, $e^{7/5}$ 为自然指数标度中两相邻判断的中值。

式中: a_{ijk} ——第*i*个因素相对于第*j*个因素的重要程度的比较标度, $a_{ijk}>0$ 。

b. 归一化处理判断矩阵,将得到的矩阵按行相加得 $A=(a_{ijk})$ 矩阵的特征向量;对特征向量归一化处理,即得专家*k*的各个指标主观权重:

$$W_{ik} = \frac{w_{ik}}{\sum_{i=1}^n w_{ik}} \tag{2}$$

其中

$$w_{ik} = \sum_{j=1}^n S_{ijk}$$
$$S_{ijk} = \frac{a_{ijk}}{\sum_{l=1}^n a_{ljk}}$$

式中: S_{ijk} ——元素 a_{ijk} 归一化结果; w_{ik} ——归一化后的元素 S_{ijk} 按行相加的结果; W_{ik} ——归一化后的主观权重,则专家*k*的主观权重向量为 $W_k=(W_{1k},W_{2k},\cdots,W_{nk})^T$ 。

c. 分别对专家组中*m*个专家意见确定指标的主观权重向量,形成主观权重矩阵如下:

$$W=(W_1,W_2,\cdots,W_m)=\begin{bmatrix} W_{11} & \cdots & W_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ W_{n1} & \cdots & W_{nm} \end{bmatrix} \tag{3}$$

1.2.2 基于熵权法的专家自身客观权重

建立熵模型步骤如下:

a. 确定专家主观权重水平向量。假定存在一个理想的最优专家 S_* ,其主观权重向量为 $W_*=(W_{1*},W_{2*},\cdots,W_{n*})^T$ 。通过各专家主观权重结果与最优专家 S_* 主观权重结果的差异大小衡量其给出的主观权重质量的好坏,第*k*个专家的主观权重水平向量 E_k 为

$$E_k=(e_{1k},e_{2k},\cdots,e_{nk}) \quad (k=1,2,\cdots,m) \tag{4}$$

其中

$$e_{ik} = 1 - \frac{|W_{ik} - \overline{W_{ik}}|}{\max(W_{ik})} \quad (i=1,2,\cdots,n)$$

式中: $\overline{W_{ik}}$ —— W_{ik} 的平均值。

b. 建立专家自身客观权重的熵模型:

$$H_k = \sum_{i=1}^n h_{ik} \quad (k=1,2,\cdots,m) \tag{5}$$

其中

$$h_{ik} = \begin{cases} -e_{ik} \ln e_{ik} & \frac{1}{e} \leq e_{ik} \leq 1 \\ \frac{2}{e} - e_{ik} |\ln e_{ik}| & 0 \leq e_{ik} < \frac{1}{e} \end{cases}$$

式中: H_k ——专家*k*主观权重的不确定度; h_{ik} ——专家*k*对第*i*个指标的主观权重熵值。专家评价结果的不确定度 H_k 越大,说明该专家评价结果的可信度越低;反之,则越高。

c. 确定专家自身客观权重。专家客观权重 c_k 可表示为

$$c_k = \frac{1/H_k}{\sum_{k=1}^m 1/H_k} \quad (k=1,2,\cdots,m) \tag{6}$$

c_k 越大,表示专家*k*的意见在评价结果中比重越大。

1.2.3 改进 AHP-熵权法组合优化赋权

采用改进 AHP 法计算的主观权重矩阵为 W ,采用熵权法计算的专家权重向量为 $C=(c_1,c_2,\cdots,c_m)^T$,基于加权融合获得的组合优化权重为

$$\beta^* = W \cdot C = (\beta_1^*,\beta_2^*,\cdots,\beta_n^*)^T \tag{7}$$

1.3 基于全优型合成算子的模糊评价法

由于渡槽属于复杂系统,对其评价需要考虑多重因素,因此需要进行多层次模糊评价。步骤如下:

- a. 首先把评价因素按属性划分 n 个子集 $U = \{U_1, U_2, \dots, U_n\}, U_i \cap U_j = \emptyset (i \neq j)$ 。
- b. 根据评价目标要求,建立 s 个评语集 $V = \{V_1, V_2, \dots, V_s\}$ 。
- c. 按单层次模糊评价,子集 U_i 中每个因素 u_{ij} 相对于子集 U_i 的权重为根据式(7)获得的权重向量 $\beta^* = (\beta_1^*, \beta_2^*, \dots, \beta_n^*)^T$,其单因素评价矩阵为 $\tilde{R}$,则子集 U_i 的单因素模糊综合评价结果 B_i 为

$$B_i = \beta^* \circ \tilde{R} = (b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{is}) \tag{8}$$

式中: $\circ$ ——模糊算子。

- d. 综合评价。每一个子集 U_i 看成为一个综合因素, B_i 为其单因素评价结果,则隶属关系矩阵 R 为
- $$R = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & \cdots & b_{1s} \\ \vdots & & \vdots \\ b_{n1} & \cdots & b_{ns} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1s} \\ \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & \cdots & r_{ns} \end{bmatrix} \tag{9}$$

式中: r_{ij} ——因素对应的隶属度。

则模糊综合评价结果为

$$\beta^* \circ R = (\beta_1^*, \beta_2^*, \dots, \beta_n^*) \circ \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1s} \\ \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & \cdots & r_{ns} \end{bmatrix} \tag{10}$$

常用的 Fuzzy 合成算子有主因素决定型 $M(\wedge, \vee)$ 、主因素突出型 $M(\cdot, \vee)$ 、不均衡平均型 $M(\wedge, \oplus)$ 、加权平均型 $M(\cdot, \oplus)$ ^[16]。其中 $M(\wedge, \vee)$ 、 $M(\cdot, \vee)$ 、 $M(\wedge, \oplus)$ 可以突出最不利因素,但容易忽略其他信息,而 $M(\cdot, \oplus)$ 对所有因素依据权重大小均衡兼顾,但同时也会削弱一些起决定作用的不利因素的影响。因此,需要对 Fuzzy 合成算子进行改造,根据郭瑞等^[17]提出的全优型合成算子,可同时考虑主因素突出型合成算子 $M(\cdot, \vee)$ 和加权平均型合成算子 $M(\cdot, \oplus)$,还可以避免计算时需考虑选择不同合成算子的问题,因为在取隶属度最大值的过程中暗含了对主因素突出型合成算子和加权平均型合成算子的选择过程。其综合决策向量的元素表达式如下:

$$b_j = \max \left(\frac{\sum_{i=1}^n \beta_i^* r_{ij}}{\sum_{j=1}^s (\sum_{i=1}^n \beta_i^* r_{ij})}, \frac{\bigvee_{i=1}^n \beta_i^* r_{ij}}{\sum_{j=1}^s (\bigvee_{i=1}^n \beta_i^* r_{ij})} \right) \tag{11}$$

式中: $\sum_{i=1}^n \beta_i^* r_{ij} / \sum_{j=1}^s (\sum_{i=1}^n \beta_i^* r_{ij})$ ——采用加权平均型合成算子 $M(\cdot, \oplus)$ 得到的评价对象归一化的综合隶属度; $\bigvee_{i=1}^n \beta_i^* r_{ij} / \sum_{j=1}^s (\bigvee_{i=1}^n \beta_i^* r_{ij})$ ——采用主因素突出型合成算子 $M(\cdot, \vee)$ 得到的评价对象归一化的综合隶属度。

在渡槽风险模糊综合评价中,全优型合成算子可以避免有利因素对整体评价成果起到决定性的影响,同时还突出不利因素的影响,能够真实反映渡槽安全的特点,从而得到准确的评价结果。

1.4 渡槽安全综合评定

在渡槽安全评价标准制定方面,至今没有相关国家或行业标准,仅有广东和浙江发布了渡槽安全评价的地方标准^[18-19],两者均参照 SL 258—2017《水库大坝安全评价导则》,以质量、水力、地基承载、结构安全等单项评价等级来确定渡槽类别,没有考虑各个安全影响要素之间存在的相互作用和紧密联系,存在容易忽略一些影响因素的问题。而本文基于改进 FCE 综合评价法全面考虑了渡槽质量、水力、地基承载、结构安全等因素的综合影响,确定各个安全因素对总的的目标综合影响程度,更能反映渡槽的实际安全状况,为最终评价渡槽安全状况提供了更为科学的依据。

参考 DB44/T 2041—2017《渡槽安全鉴定规程》和相关学者对渡槽安全鉴定方法的研究成果^[20],根据运用指标和损坏程度将渡槽评价等级划分为一类、二类、三类、四类 4 个等级,在此基础上,引入风险概念,不同安全类别用不同的风险等级及其对应的风险度来表示(表 2)。

表2 渡槽安全评价分类

Table 2 Classification of aqueduct safety assessment

渡槽安全类别	评定标准	风险等级	风险度区间	风险描述
一类	运用指标能达到设计标准,无影响正常运行的缺陷,按常规养护即可保证正常运行	低风险	[0,1)	风险水平可以接受,不必采取额外措施
二类	运用指标基本达到设计标准,工程存在一定损坏,经维修后,可实现正常运行	一般风险	[1,2)	风险水平有条件接受,工程需进一步实施预防措施以提升安全性
三类	运用指标达不到设计标准,工程存严重损坏,经除险加固后,才能实现正常运行	较大风险	[2,3)	风险水平有条件接受,必须实施消减安全风险的对应对措施,并需要准备应急计划
四类	运用指标无法达到设计标准,工程存严重安全问题,需降低标准运用或报废重建	重大风险	[3,4]	风险水平不可接受,必采取降低风险水平,应对措施的代价超出承受能力

按上述综合评价法确定决策向量后,一般由最大隶属度原则,根据渡槽安全总目标隶属度向量中最大值的位置直接对应渡槽的安全类别;针对不同情况,也可先采用加权平均原则来确定渡槽的风险度单值,再根据风险等级对应的安全类别进行评定。

2 工程实例

通过对渡槽安全进行评价,确定相应的安全等级或类别,可及时掌握其运行状况和安全状态。通过对渡槽进行结构破损、变形、承载力的检测和复核,能够发现问题并及时采取有效措施,避免发生事故,延长使用寿命。目前针对渡槽安全状态的研究成果大多无法直接用于确定渡槽的安全等级,与现有渡槽安全相关规范联系不紧密,难以操作实施。因此,本文将 AHP-FCE 用于实际渡槽的安全综合评价中,利用风险理论,结合文献[18]中安全类别的划分确定渡槽的实际安全类别,以便安排后续渡槽运行管理、维修等活动的实施。

2.1 工程概况

新桥渡槽建于1960年,位于广东省湛江市遂溪河支流西溪河上,是鹤地水库灌区最大的渠系建筑物,渡槽底宽5.5 m,槽身高3.2 m,全长1 206 m,共40跨,双悬臂支承双柱式槽墩,槽墩由浆砌石砌成。渡槽由槽身、槽墩、栏杆、工作桥、人行道组成,设计过水流量12.75 m³/s。主要建筑物级别为2级,防洪标准为50年一遇,地震烈度按7度设防。渡槽现主要为湛江市工、农业及生活供水。渡槽运行期间多次出现险情。渡槽在建成运行后,由于受到气候、氧化、腐蚀等因素的影响而自然老化,存在开裂、露筋、漏水等严重的安全隐患,降低了渡槽结构的安全性和耐久性。现场调查发现渡槽内部混凝土剥落,钢筋出露,止水橡胶老化、漏水,槽底板冲刷严重,人行道不同程度缺损,部分槽身分缝漏水严重,还有些槽墩长满植物。为确保渡槽安全运行,需对其安全状态作出科学评价,以采取相应措施,提高渡槽的安全性,延长其使用寿命。

2.2 评价指标的确定

根据工程实际情况和有关文献^[21-22],渡槽安全状态为总目标A,准则层为安全性B₁、适用性B₂、耐久性B₃,其中安全性B₁划分为渡槽整体稳定性C₁、槽墩地基承载力C₂、抗震安全C₃、槽身承载力C₄;适用性细化为过流能力C₅、不均匀沉降C₆、结构破损C₇;耐久性划分为混凝土裂缝C₈、相对寿命C₉、分缝漏水C₁₀、钢筋锈蚀C₁₁、碳化深度C₁₂、混凝土强度C₁₃、钢筋保护层厚度C₁₄、磨损和空蚀C₁₅,建立如图1所示渡槽安全状态综合评价体系。

2.3 指标权重计算

首先邀请5位专家进行标度打分,以准则层指标为例,专家1对安全性、适用性和耐久性的主观权重计算结果见表3,然后进行层次一致性检验,得到随机一致性比率C_R=0.02<0.1,通过检验。其余4位专家的打分意见同样按改进的AHP法进行计算。准则层主观权重结果见表4。然后以表4计算的主观权重为基础,根据前述熵权法计算专家自身客观权重,结果见表5。

将改进的AHP法计算的主观权重和熵权法计算的专家自身客观权

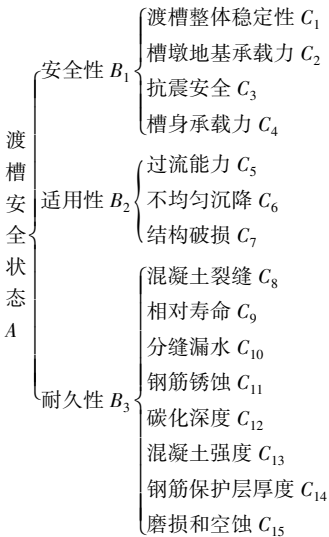


图1 渡槽安全综合评价体系

Fig.1 Comprehensive evaluation system of aqueduct safety

重按式(7)进行组合优化,得到准则层 B_1 、 B_2 、 B_3 组合优化权重分别为 0.43、0.23 和 0.34。同理,按照改进 AHP-熵权法计算得到底层指标组合优化权重,其中 B_1 的底层指标 $C_1 \sim C_4$ 组合优化权重分别为 0.30、0.30、0.23 和 0.17; B_2 的底层指标 $C_5 \sim C_7$ 组合优化权重分别为 0.15、0.47 和 0.38; B_3 的底层指标 $C_8 \sim C_{15}$ 组合优化权重分别为 0.17、0.14、0.12、0.11、0.09、0.16、0.13 和 0.08。

表 4 准则层主观权重

Table 4 Subjective weights of criterion layer

指标	主观权重				
	专家 1	专家 2	专家 3	专家 4	专家 5
B_1	0.42	0.43	0.4	0.45	0.47
B_2	0.22	0.27	0.25	0.21	0.20
B_3	0.36	0.30	0.35	0.34	0.34

2.4 确定底层指标隶属度

参考文献[9,8]和 DL/T 5251—2010《水工混凝土建筑物缺陷检测和评估技术规程》^[23],对各评价指标的状态划分评价标准。为了与总的目标协调一致,各个指标根据状态不同,同样划分为四类(表 6)。同时,根据现场检测及结构复核情况^[24],参照各指标的定性或定量评价标准,确定底层指标隶属度(表 7)。

表 6 指标评价标准

Table 6 Evaluation criteria of indicators

类别	C_1	C_2	C_3	C_4	$C_5/(m^3 \cdot s^{-1})$	$C_6/(^{\circ})$	C_7	C_8
一类	≥ 1.2	≥ 1.2	≥ 1.2	≥ 1.2	≥ 15	$[0,1]$	无损坏、脱落	龟裂或细微裂缝
二类	$[1.0,1.2)$	$[1.0,1.2)$	$[1.0,1.2)$	$[1.0,1.2)$	$[10,15)$	$(1,2]$	轻微损坏、脱落	表面或浅层裂缝
三类	$[0.9,1.0)$	$[0.9,1.0)$	$[0.9,1.0)$	$[0.9,1.0)$	$[5,10)$	$(2\sim 3]$	中度损坏、脱落	深层裂缝
四类	$[0,0.9)$	$[0,0.9)$	$[0,0.9)$	$[0,0.9)$	$[0,5)$	>3	严重损坏、脱落	贯穿裂缝

类别	C_9	C_{10}	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{14}	C_{15}
一类	$[0,0.2)$	无老化、无漏水	无锈蚀	无碳化	≥ 1	≥ 1	无磨损
二类	$[0.2,0.5)$	轻微老化、无漏水	轻微锈蚀	轻微碳化	$[0.95\sim 1)$	$[0.95\sim 1)$	轻微磨损与空蚀
三类	$[0.5,0.8)$	中度老化、轻微漏水	中度锈蚀	一般碳化	$[0.85\sim 0.95)$	$[0.85\sim 0.95)$	中度磨损与空蚀
四类	≥ 0.8	严重老化、明显漏水	严重锈蚀	严重碳化	$[0,0.85)$	$[0,0.85)$	严重磨损与空蚀

表 7 底层指标隶属度

Table 7 Membership degree of underlying indicators

指标	隶属度	指标	隶属度	指标	隶属度
C_1	$(1, 0, 0, 0)$	C_6	$(0, 1, 0, 0)$	C_{11}	$(0, 0.300, 0.475, 0.225)$
C_2	$(0.86, 0.14, 0, 0)$	C_7	$(0, 0.35, 0.45, 0.20)$	C_{12}	$(0, 0, 1, 0)$
C_3	$(0, 0, 1, 0)$	C_8	$(0, 0.30, 0.55, 0.15)$	C_{13}	$(0, 0, 0.25, 0.75)$
C_4	$(0, 0.67, 0, 0.33)$	C_9	$(0, 0, 0, 1)$	C_{14}	$(1, 0, 0, 0)$
C_5	$(1, 0, 0, 0)$	C_{10}	$(0, 0, 0.55, 0.45)$	C_{15}	$(0, 0.20, 0.55, 0.25)$

2.5 渡槽安全综合评价

根据上述确定的底层指标权重及隶属度,根据式(9)计算准则层隶属度,结果见表 8,再用 2.3 节计算的准则层权重与该隶属度模糊计算得到总目标隶属度矩阵,其中加权平均型合成算子、主因素突出型合成算子、全优型合成算子 3 种方法计算的总目标隶属度矩阵分别为 $(0.34, 0.22, 0.28, 0.16)$ 、 $(0.37, 0.22, 0.22, 0.19)$ 、 $(0.35, 0.21, 0.26, 0.18)$ 。本工程采用加权平均型和全优型合成算子计算的总目标隶属度矩阵结果相差不大,而主因素突出型合成算子由于突出了最不利因素,其计算的总目标隶属度矩阵中,安全类别为一类的隶属度是 0.37,比其他两种方法偏大;安全类别为三类的隶属度是 0.22,比其他两种方法偏小。

表 3 根据专家 1 意见计算的准则层主观权重
Table 3 Subjective weight of criterion layer calculated on basis of expert No. 1's opinion

指标	标度			权重
	B_1	B_2	B_3	
B_1	1	$e^{4/5}$	1	0.42
B_2	$\frac{1}{e^{4/5}}$	1	$\frac{1}{e^{3/5}}$	0.22
B_3	1	$e^{4/5}$	1	0.36

表 5 专家自身客观权重计算结果

Table 5 Objective weight calculation results of expert's opinion

专家	专家主观权重水平向量	不确定度	权重
专家 1	$(0.978, 0.951, 0.935)$	0.132	0.22
专家 2	$(0.988, 0.856, 0.909)$	0.232	0.13
专家 3	$(0.931, 0.919, 0.970)$	0.174	0.17
专家 4	$(0.972, 0.943, 0.994)$	0.089	0.33
专家 5	$(0.925, 0.881, 0.991)$	0.193	0.15

分别采用最大隶属度原则和加权综合原则对总目标隶属度进行风险评定,结果见表9。可以看到3种模糊算子采用最大隶属度原则判定渡槽安全类别均为一类,而采用加权综合原则得到风险度单值后再进行评定,仅风险度略有区别。其中采用全优型合成算子的风险度介于加权平均型和主因素突出型合成算子的风险度之间,风险等级按照表2均确定为三级,安全类别也均为三类。采用3种算子对渡槽进行风险综合评价的结果一致,即:运用指标达不到设计标准,工程存在严重损坏,经除险加固后,才能实现正常运行,与文献[24]中该渡槽安全鉴定的结果是一致的。根据所确定的安全鉴定类别,建议渡槽严禁满槽运行,过流量不要超过加大流量,对渡槽内壁进行修复,更换分缝止水,重建人行道和护栏。因此,采用全优型合成算子进行渡槽的安全综合评价的结果是可信的。本例中由于属于一类和三类的隶属度差别不明显,所以评判结果若采用最大隶属度原则易出现较大偏差。

3 结 语

本文采用基于自然指数 $e^{0/5} \sim e^{8/5}$ 标度的 AHP 法确定评价指标的主观权重,在群决策的基础上引入熵模型确定各参评专家自身意见客观权重,以修正主观权重。该方法使各等级指标之间关系更合理,也减少了专家主观权重带来的偏差。引入的全优型合成算子同时考虑了主因素突出型合成算子和加权平均型合成算子,通过对渡槽进行模糊综合评价,得到的最终评价结果与主因素突出型合成算子和加权平均型合成算子的结果一致,因此在计算时可以直接采用全优型合成算子进行计算。不同分级的隶属度比较接近时,不宜用最大隶属度原则进行直接评价,而应采用加权综合原则得到综合风险度后,再与渡槽安全鉴定标准结合确定渡槽安全类别。与现有的渡槽安全评价标准相比,采用全优型合成算子计算得到的渡槽安全类别综合评定结果更能反映渡槽实际情况,且与工程安全鉴定结果一致,为渡槽工程安全评价提供了一种科学合理的解决方法。

参考文献:

[1] 顾培英,王岚岚,邓昌,等.我国渡槽结构典型破坏特征研究综述[J].水利水电科技进展,2017,37(5):1-8.(GU Peiying, WANG Lanlan, DENG Chang, et al. Review of typical failure characteristics of aqueduct structures in China[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(5):1-8. (in Chinese))

[2] 张社荣,冯奕,王高辉.强震作用下大型排架式U型渡槽的损伤破坏分析[J].四川大学学报(工程科学版),2013,45(1):37-43.(ZHANG Sherong, FENG Yi, WANG Gaohui. Seismic damage analysis of U-shaped aqueduct with the bent-type structure subjected to strong earthquake[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2013, 45(1): 37-43. (in Chinese))

[3] 尚峰,祝彦知,纠永志.在役钢筋混凝土渡槽安全评价与病害处理[J].水利水电技术,2018,49(12):208-214.(SHANG Feng, ZHU Yanzhi, JIU Yongzhi. Safety evaluation and disease treatment of reinforced concrete aqueduct in service[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49(12):208-214. (in Chinese))

[4] 宋志鹏,张爱军,杨文超,等.宁夏红柳沟渡槽结构安全性评价[J].中国农村水利水电,2015(10):151-156.(SONG Zhipeng, ZHANG Aijun, YANG Wenchao, et al. The sructural security analysis of Hongliugou Aqueduct in Ningxia[J]. China Rural Water and Hydropower, 2015(10):151-156. (in Chinese))

[5] 甘磊,马洪影,马泽锴,等.红旗渠南古洞渡槽应力变形及稳定性分析[J].水利水电科技进展,2020,40(5):70-75.(GAN Lei, MA Hongying, MA Zekai, et al. Stress deformation and stability analysis of Nangudong Aqueduct in Hongqi Canal [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(5):70-75. (in Chinese))

表8 渡槽安全评价准则层隶属度

Table 8 Membership degree of criterion layer of aqueduct safety assessment

准则层	权重	算子类型	隶属度
B_1	0.43	加权平均型	(0.55, 0.16, 0.23, 0.06)
		主因素突出型	(0.42, 0.17, 0.33, 0.08)
		全优型	(0.49, 0.15, 0.29, 0.07)
B_2	0.23	加权平均型	(0.15, 0.60, 0.17, 0.08)
		主因素突出型	(0.17, 0.54, 0.20, 0.09)
		全优型	(0.17, 0.56, 0.19, 0.08)
B_3	0.34	加权平均型	(0.13, 0.10, 0.39, 0.38)
		主因素突出型	(0.31, 0.12, 0.23, 0.34)
		全优型	(0.26, 0.10, 0.32, 0.32)

表9 渡槽安全综合评价结果

Table 9 Results of comprehensive evaluation of aqueduct safety

算子类型	安全类别判定			
	最大隶属度原则	加权综合原则		
		风险度	风险等级	类别
加权平均型	一类	2.28	三级	三类
主因素突出型	一类	2.24	三级	三类
全优型	一类	2.27	三级	三类

- [6] 夏富洲,刘富奎,陈栋梁. 不确定型层次分析法在渡槽结构状态评估中的应用[J]. 武汉大学学报(工学版), 2012, 45(3):277-281. (XIA Fuzhou, LIU Fukui, CHEN Dongliang. Application of uncertain type AHP to aqueduct structure condition assessment[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2012, 45(3):277-281. (in Chinese))
- [7] 夏富洲,陈栋梁,刘富奎. 基于模糊变权法的渡槽可靠性评估的研究[J]. 中国农村水利水电, 2012(9): 96-100. (XIA Fuzhou, CHEN Dongliang, LIU Fukui. Research on the reliability of aqueducts base on fuzzy comprehensive evaluation and variable weight method[J]. China Rural Water and Hydropower, 2012(9): 96-100. (in Chinese))
- [8] 王梦雅,夏富洲. 基于可拓理论的渡槽结构老化评价[J]. 武汉大学学报(工学版), 2014, 47(2): 211-216. (WANG Mengya, XIA Fuzhou. Aging assessment of aqueducts structures base on extension method[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2014, 47(2):211-216. (in Chinese))
- [9] 张文剑,杜应吉,张岩. 渡槽健康状态的模糊综合评价[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(6): 89-94. (ZHANG Wenjian, DU Yingji, ZHANG Yan. Assessing the health of aqueducts using fuzzy system[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(6): 89-94. (in Chinese))
- [10] 刘鑫,李之隆,甘亮琴,等. 基于 AHP-FCE 方法的气泡混合轻质土耐久性评估[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45(4): 332-339. (LIU Xin, LI Zhilong, GAN Liangqin, et al. Durability assessment of foamed mixture lightweight soil based on analytic hierarchy process and fuzzy comprehensive evaluation (AHP-FCE) [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45(4): 332-339. (in Chinese))
- [11] 张崎,西村昂. 提高层次分析法评价精度的几种方法[J]. 系统工程理论与实践, 1997, 17(11): 30-36. (ZHANG Qi, TAKASHI Nishimura. Some methods of raising exactness of evaluation in AHP[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 1997, 17(11): 30-36. (in Chinese))
- [12] 侯岳衡,沈德家. 指数标度及其与几种标度的比较[J]. 系统工程理论与实践, 1995, 15(10): 43-46. (HOU Yueheng, SHEN Dejia. Index number scale and comparison with other scales[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 1995, 15(10): 43-46. (in Chinese))
- [13] 王莲芬,许树柏. 层次分析法引论[M]. 北京:中国人民大学出版社,1990.
- [14] 杜栋. 基于 0.1~0.9 标度的 AHP 再研究[J]. 系统工程与电子技术, 2001, 23(5): 36-38. (DU Dong. Study on 0.1~0.9 Scale in AHP[J]. Systems Engineering and Electronics, 2001, 23(5): 36-38. (in Chinese))
- [15] 骆正清,杨善林. 层次分析法中几种标度的比较[J]. 系统工程理论与实践, 2004, 24(9): 51-60. (LUO Zhengqing, YANG Shanlin. Comparative study on several scales in AHP[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2004, 24(9): 51-60. (in Chinese))
- [16] 李洪兴,汪培庄. 模糊数学[M]. 北京:国防工业出版社,1994.
- [17] 郭瑞,李同春,宁昕扬,等. 改进的模糊综合评价法在渡槽风险评价中的应用[J]. 水利水电技术, 2018, 49(4): 109-116. (GUO Rui, LI Tongchun, NING Xinyang, et al. Application of improved fuzzy synthetic evaluation method to risk assessment of aqueduct[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49(4): 109-116. (in Chinese))
- [18] 广东省质量监督技术局. 渡槽安全鉴定规程:DB44/T 2041-2017[S]. 北京:中国水利水电出版社,2017.
- [19] 浙江省水利厅. 浙江省灌区渡槽安全评价导则(试行)[S]. 杭州:浙江水利厅,2017.
- [20] 黄锦林,李兆恒,罗日洪,等. 渡槽安全综合评价方法研究[J]. 广东水利水电, 2018(12): 52-57. (HUANG Jinlin, LI Zhaoheng, LUO Rihong, et al. Research on the comprehensive evaluation method of aqueduct safety[J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2018(12): 52-57. (in Chinese))
- [21] 刘西拉. 重大土木与水利工程安全性及耐久性的基础研究[J]. 土木工程学报, 2001, 34(6): 1-7. (LIU Xila. Fundamental research on safety and durability of major structures in civil and hydraulic engineering[J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(6): 1-7. (in Chinese))
- [22] 刘柏青,周素真,雷声隆,等. 灌区混凝土建筑物老化病害评估指标及其标准的研究[J]. 中国农村水利水电, 1998(5): 16-18. (LIU Baiqing, ZHOU Suzhen, LEI Shenglong, et al. Study on evaluation indexes and criteria of concrete structures ageing in irrigation system[J]. China Rural Water and Hydropower, 1998(5): 16-18. (in Chinese))
- [23] 国家能源局. 水工混凝土建筑物缺陷检测和评估技术规程:DL/T 5251—2010[S]. 北京:中国电力出版社,2010.
- [24] 徐云乾,张旭辉,谭彩,等. 广东省湛江市雷州青年运河新桥渡槽安全鉴定报告[R]. 广州:广东省水利水电科学研究院,2015.