

网络出版时间:2014-10-16 13:21

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.11.078

网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.11.078.html

病险水库除险加固方案决策研究

杨 杰^{1,2,3},江德军⁴,郑成成¹,乔 蓓¹,王 亮¹

(1 西安理工大学 水利水电学院,陕西 西安 710048;2 陕西省西北旱区生态水利工程重点实验室,陕西 西安 710048;
3 水资源与水电工程科学国家重点实验室,湖北 武汉 430072;4 国电大渡河公司库坝管理中心,四川 乐山 614900)

[摘 要] 【目的】针对当前病险水库大坝除险加固方案优选理论方法的缺失和不足,提出基于区间数 GRA 决策与 AHP-Entropy 主客观综合赋权的除险加固方案决策方法。【方法】考虑决策信息的模糊不确定性,采用区间数表达决策信息,结合 GRA 决策方法,求解各备选方案对理想最优方案与临界最优方案的灰色关联系数,通过建立最优化模型得出考虑理想最优与临界最优方案的综合关联系数;综合 AHP 主观赋权与 Entropy 客观赋权方法对各属性指标进行赋权,对主客观权重建立相对熵最小化优化模型,得出主客观综合权重,进而求解各指标的加权综合关联度,以此对各备选方案进行排序决策,并通过实际算例验证决策方法的合理性。【结果】建立了基于区间数 GRA 决策和 AHP-Entropy 主客观综合赋权的病险水库除险加固方案的灰色关联度优选决策方法。实例计算表明,该方法有效地解决了病险水库除险加固方案优选中属性值为区间数的灰色多属性决策及 AHP-Entropy 主客观综合赋权问题。【结论】所构建的基于区间数 GRA 与 AHP-Entropy 主客观综合赋权的除险加固方案决策方法具有一定的合理性,为水库大坝除险加固方案决策提供了一条有效途径。

[关键词] 病险水库;除险加固;方案优选;区间数 GRA;AHP-Entropy 综合权重

[中图分类号] TV698.2 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1671-9387(2014)11-0213-07

Deciding reinforcement scheme for dangerous dam

YANG Jie^{1,2,3},JIANG De-jun⁴,ZHENG Cheng-cheng¹,QIAO Bei¹,WANG Liang¹

(1 Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering,Xi'an University of Technology,Xi'an,Shaanxi 710048,China;
2 State Key Laboratory of Eco-Hydraulic Engineering in Shaanxi,Xi'an,Shaanxi 710048,China;
3 State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science,Wuhan,Hubei 430072,China;
4 Reservoir & Dam Management Center,Guodian Dadu River CO. LTD,Leshan,Sichuan 614900,China)

Abstract: 【Objective】 This study proposed a dam reinforcement scheme decision-making method based on interval numbers GRA decision-making and AHP-Entropy subjective and objective comprehensive weight to overcome the absence and insufficient of dam reinforcement program optimal selection theory. 【Method】 This method considered the fuzzy uncertainty of the decision-making information,used interval numbers to express the decision-making information,and combined the GRA decision-making method to solve the gray correlation coefficient between various alternatives and ideal optimal and critical optimal programs. It solved the comprehensive correlation coefficient considering ideal optimal and critical optimal programs by establishing an optimization model. AHP subjective weight and Entropy objective weight method were used to empower each attribute index and established a minimum relative entropy optimization model to figure out the subjective and objective comprehensive weight. These alternatives were prioritized and the

[收稿日期] 2013-08-09

[基金项目] 国家自然科学基金项目(1301597);陕西省重点科技创新团队项目(2013KCT-015)

[作者简介] 杨 杰(1971—),男,四川大邑人,教授,博士,主要从事水工结构、水库大坝安全及除险加固理论方法研究。
E-mail:yjie999@xaut.edu.cn

[通信作者] 江德军(1988—),男,陕西汉中,人,硕士,主要从事水工建筑物维护与水工水文监测研究。
E-mail:jiangdejunchaut@163.com

rationality of the decision-making method was verified by practical example.【Result】 Grey correlation degree optimization decision-making method for reinforcement scheme of dangerous dam was established based on interval numbers GRA decision-making and AHP-Entropy subjective and objective comprehensive weight. Results show that this method effectively solved the interval numbers of grey multi-criteria decision-making and decided comprehensive weights of AHP-Entropy.【Conclusion】 The established dangerous dam reinforcement scheme decision-making method based on interval number GRA and AHP-Entropy comprehensive weight was valid and practical.

Key words: dangerous reservoir; dam reinforcement; scheme optimization; interval number GRA; AHP-Entropy comprehensive weight

我国目前已建成各类水库大坝 8.8 万余座^[1], 由于年久失修或者设计不合理及自然灾害的影响, 其中有 4.7 万余座为病险水库, 约占水库大坝总数的 53% 左右^[2]。针对这些病险水库大坝, 我国开展了有计划分步实施的除险加固工作, 并取得了一定的成果, 但是也存在一些问题, 其中较典型的的就是除险加固方案的优选。当前除险加固工程中对方案的选择主要是通过经济技术比选, 缺乏科学合理的决策过程, 导致一些水库除险加固方案选择不合理, 从而引起水库失事, 如 2004 年新疆八一水库在除险加固还未完成就溃决失事, 2005 年青海省刚加固完成的英德尔水库溃决, 2013 年山西省洪洞县曲亭水库坝体坍塌等。众多的水库除险加固失事案例警示人们必须重视加固方案的决策, 科学合理地选择除险加固方案。实际上, 除险加固方案的优选是一个典型的多准则决策问题, 它与病险类型、病险程度、除险加固可靠度、资金、施工难易度、可持续发展等多种因素有关, 单一考虑经济技术条件具有一定的片面性。目前针对病险水库除险加固方案决策的研究不多, 一些学者对此进行了初步的探究, 如陈永贵等^[3]提出了污水库坝基防渗治理方案的模糊决策方法; 蔡守华等^[4]建立了基于 AHP-TOPSIS 方法的小型水库除险加固优化排序数学模型; 严祖文等^[5]在层次分析的基础上, 建立了灰色关联分析决策模型。这些决策方法与模型未考虑决策过程中决策指标与权重的不确定性, 无一例外地采用确定值的方式描述决策指标量值。但在实际决策过程中, 由于决策人员受到事物本身的模糊性和对事物认识的局限性的影响, 导致难于对决策信息的不确定性给出精确的判断, 从而无法在备选方案中确定最优方案。因此, 如何处理除险加固方案决策中的不确定性信息, 已成为能否做出科学决策的关键。

为此, 本研究针对已有除险加固方案决策方法中对决策信息不确定性处理的不足, 采用区间数表

达模糊决策信息, 提出将区间数与灰色理论相结合的除险加固方案决策方法, 同时利用最小相对熵原理综合主观权重与客观权重, 计算各个备选方案与临界最优和理想最优方案之间的关联度, 通过建立最优化模型得出综合关联度, 以此对各个备选方案进行排序和择优, 进而提高水库大坝除险加固方案决策的科学性与合理性。

1 区间数 GRA 决策理论

假定有 m 个可行的除险加固方案, 除险加固方案集为 $\{A_1, A_2, \dots, A_m\}$, A_i 表示第 i 个除险加固方案, $i=1, 2, \dots, m$ 。决策中考虑 n 项属性, 属性集为 $\{C_1, C_2, \dots, C_n\}$, C_j 表示第 j 项属性值, $j=1, 2, \dots, n$ 。各项属性相互独立, 属性权重向量表示为 $W = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}^T$, 其中, w_j 表示属性 C_j 的权重, 满足 $w_j \geq 0$ 且 $\sum_{j=1}^n w_j = 1, j=1, 2, \dots, n$ 。对于方案 A_i 在属性 C_j 下的属性值用非负区间灰数 $a_{ij}(\otimes)$ 表示, $a_{ij}(\otimes) \in [a_{ij}^L, a_{ij}^R]$, 其中 a_{ij}^L 表示决策者对方案 A_i 属性 C_j 的最小估计值, a_{ij}^R 表示决策者对方案 A_i 属性 C_j 的最大估计值, 从而决策矩阵可表示为 $A = [a_{ij}(\otimes)]_{m \times n}$ 。

为了消除决策矩阵中指标量纲不同对决策结果的影响并增加可比性, 需对上述决策矩阵进行归一化处理^[6]。

对于效益型属性指标, 有:

$$r_{ij}^L = \frac{a_{ij}^L}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (a_{ij}^R)^2}}, r_{ij}^R = \frac{a_{ij}^R}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (a_{ij}^L)^2}} \tag{1}$$

式中: r_{ij}^L 、 r_{ij}^R 分别为 a_{ij}^L 和 a_{ij}^R 的归一化值。

对于成本型属性指标, 有:

$$r_{ij}^L = \frac{\frac{1}{a_{ij}^R}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{1}{a_{ij}^L}\right)^2}}, r_{ij}^R = \frac{\frac{1}{a_{ij}^L}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{1}{a_{ij}^R}\right)^2}} \tag{2}$$

式(1)和式(2)中的 $i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n$ 。规范化的决策矩阵记为 $\mathbf{R}=[r_{ij}(\otimes)]_{m \times n}$, 其中 $r_{ij}(\otimes) \in [r_{ij}^L, r_{ij}^R]$ 。记 $r_j^+ = \max_{0 \leq i \leq m} \{r_{ij}^L\}$, $r_j^- = \min_{0 \leq i \leq m} \{r_{ij}^L\}$, $r_j^{R+} = \max_{0 \leq i \leq m} \{r_{ij}^R\}$, $r_j^{R-} = \min_{0 \leq i \leq m} \{r_{ij}^R\}$, $j=1,2,\dots,n$ 。称 n 维区间灰数向量 $r^+(\otimes)=(r_1^+(\otimes), r_2^+(\otimes), \dots, r_n^+(\otimes))$ 为理想最优方案属性值向量, 其中 $r_j^+(\otimes) \in [r_j^{L+}, r_j^{R+}]$, $j=1,2,\dots,n$; 称 n 维区间灰数向量 $r^-(\otimes)=(r_1^-(\otimes), r_2^-(\otimes), \dots, r_n^-(\otimes))$ 为临界最优方案属性值向量, 其中 $r_j^-(\otimes) \in [r_j^{L-}, r_j^{R-}]$, $j=1,2,\dots,n$ 。

标准化后即可求解各指标与相应理想最优及临界最优方案的关联系数, 可认为越接近理想最优且远离临界最优的方案越好, 关联系数越大。对此目前很多文献只关注了指标对理想最优方案的接近程度, 认为接近理想最优方案一定就远离临界最优方案^[7-9], 但实际在多维空间中这并不完全正确, 本研究同时考虑可行方案对理想最优与临界最优方案的综合关联系数^[10], 即:

$$\xi_{ij}^+ = \frac{\min_{1 \leq i \leq m} \min_{1 \leq j \leq n} \{L_{ij}^+\} + \rho \max_{1 \leq i \leq m} \max_{1 \leq j \leq n} \{L_{ij}^+\}}{L_{ij}^+ + \rho \max_{1 \leq i \leq m} \max_{1 \leq j \leq n} \{L_{ij}^+\}} \quad (3)$$

$$\xi_{ij} = \mu_{ij} \xi_{ij}^+ + (1 - \mu_{ij}) \xi_{ij}^- \quad (4)$$

式中: ξ_{ij} 为最优方案的综合关联系数; ξ_{ij}^+ 、 ξ_{ij}^- 分别为可行方案对理想最优方案和临界最优方案的关联系数, ξ_{ij}^- 的计算方法与 ξ_{ij}^+ 的计算方法相同; μ_{ij} 为对 ξ_{ij}^+ 的重视程度, 即第 i 个方案隶属于理想最优方案的程度; ρ 为分辨系数, $\rho \in [0, 1]$, 一般取 0.5; L_{ij}^+ 为可行方案属性区间值与理想最优方案属性区间值间的距离, 即

$$L_{ij}^+(r_{ij}(\otimes), r_j^+(\otimes)) = \frac{1}{\sqrt{2}} [(r_{ij}^L - r_j^{L+})^2 + (r_{ij}^R - r_j^{R+})^2]^{\frac{1}{2}}。$$

越接近理想最优方案并越远离临界最优方案的可行方案越优, 综合关联系数 ξ_{ij} 越大, 由此可建立最优化模型为:

$$\max F(\mu_{ij}) = (\mu_{ij} \xi_{ij}^+)^2 + [(1 - \mu_{ij}) \xi_{ij}^-]^2 \quad (5)$$

式中: ξ_{ij} 为综合关联系数; μ_{ij} 为第 i 个方案隶属于理想最优方案的程度。对此优化模型求导, 令 $\frac{dF(\mu_{ij})}{d\mu_{ij}} = 0$, 可得 $\mu_{ij} = \frac{(\xi_{ij}^-)^2}{(\xi_{ij}^+)^2 + (\xi_{ij}^-)^2}$, 将其代入(4)式可得综合灰色关联系数为:

$$\xi_{ij} = \frac{\xi_{ij}^{+2} (\xi_{ij}^-) + (\xi_{ij}^-)^2 \xi_{ij}^-}{(\xi_{ij}^+)^2 + (\xi_{ij}^-)^2} \quad (6)$$

若各属性权重向量表示为 $\mathbf{W} = \{\omega_1, \omega_2, \dots,$

$\omega_n\}^T$, 则各可行方案的灰色关联度为:

$$\xi_i = \sum_{j=1}^n \xi_{ij} \omega_j, i=1,2,\dots,m, j=1,2,\dots,n。 \quad (7)$$

由此按照 ξ_i 的大小对决策方案进行排序, ξ_i 越大的方案越优。

2 AHP-Entropy 主客观综合赋权

在实际决策过程中, 不同的属性对决策的重要性程度不同, 故需要对属性赋予不同的权重。目前的权重确定方法主要有主观赋权法和客观赋权法。主观赋权方法包括层次分析法、环比分析法、最小平方和法、二项系数法、比较矩阵法等; 客观赋权方法包括主成分分析法、熵技术法、多目标规划法、离差最大化法等。但是单纯的主观赋权方法受人为影响大, 而客观赋权方法有时又偏离实际^[11-12], 故本研究提出一种基于 AHP-Entropy(层次分析-熵值法)的主客观综合赋权方法。

病险水库的除险加固受制因素较多, 各项指标的权重大小与具体工程实际的相关性较大, 权重确定较为困难。层次分析法(AHP)通过构造层次分析结构, 形成两两比较的判断矩阵, 符合人类思考问题的过程, 故本研究对主观权重采用层次分析法确定。首先构造判断矩阵 $\mathbf{C}=(c_{ij})_{n \times n}$, 如表 1 所示。

表 1 病险水库除险加固方案
各属性的 AHP 判断矩阵

Table 1 AHP judgement matrix of each attribute of dangerous dam reinforcement scheme

属性指标 Attribute index	C_1	C_2	...	C_n
C_1	c_{11}	c_{12}	...	c_{1n}
C_2	c_{21}	c_{22}	...	c_{2n}
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
C_n	c_{n1}	c_{n2}	...	c_{nn}

矩阵中元素有以下性质: ① $c_{ij} > 0$; ② $c_{ij} = 1/c_{ji}$; ③ $c_{ii} = 1$ 。上述数值判断矩阵常依据 1~9 标度法进行取值, 各标度的含义及赋值见表 2。

求得判断矩阵后, 可按照如下方法计算主权重, 即:

$$\omega_j^{(1)} = \frac{\sqrt[n]{\prod_{i=1}^n c_{ij}}}{\sum_{i=1}^n \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n c_{ij}}} \quad (8)$$

则 $\omega^{(1)} = (\omega_1^{(1)}, \omega_2^{(1)}, \dots, \omega_n^{(1)})^T$ 即为各指标的主观权重向量, 也是判断矩阵的特征向量。然后需对判断矩阵进行一致性检验, 求出判断矩阵的最大特征根 $\lambda_{\max}$ 、一致性系数 CI 及随机一致性比率 CR 。其表达式分别为:

$$\lambda_{\max}=\frac{1}{n}\sum_{j=1}^n\frac{(CW^{(1)})_j}{w_j^{(1)}}.$$

(9)

$$CI=\frac{\lambda_{\max}-n}{n-1}.$$

(10)

$$CR=\frac{CI}{RI}.$$

(11)

式中: C 为判断矩阵; $\lambda_{\max}$ 为判断矩阵的最大特征根; $W^{(1)}$ 为各指标的主观权重向量; n 为判断矩阵阶数; RI 为随机平均一致性指标,对于 1~9 阶判断矩阵可通过表 3 查取。当 $CR<0.1$ 则满足一致性要求,否则需进行调整。

表 2 1~9 标度法的标度值及其含义

Table 2 Values and meanings of 1-9 scaling method

C_i 与 C_j 相比的重要程度 Importance of C_i compared with C_j	c_{ij} 取值 Value of c_{ij}	c_{ji} 取值 Value of c_{ji}
前者与后者相比,两者同样重要 Both are equally important	1	1
前者与后者相比,前者稍微重要 C_i is slightly more important	3	1/3
前者与后者相比,前者明显重要 C_i is obviously more important	5	1/5
前者与后者相比,前者强烈重要 C_i is strongly more important	7	1/7
前者与后者相比,前者极端重要 C_i is extremely more important	9	1/9
前者与后者相比,重要程度分别介于上述等级之间 The important degrees were between above grades	2,4,6,8	1/2,1/4,1/6,1/8

表 3 1~9 阶判断矩阵的随机平均一致性指标

Table 3 Random average consistency index of judgment matrix with orders of 1-9

1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

从各决策属性本身考虑,若不同的可行方案对于同一属性的属性值离散程度越大,信息熵越小,则该属性越重要,应该赋予较大的权重系数。基于此观点,可构建基于 Entropy (熵值法) 的赋权方法^[12-14]。但是由于在此问题中决策属性值为区间灰数,无法直接计算熵,故对熵值法作如下改进:将区间值的熵看作是由 2 部分内容输出,一部分由区间上限的差异性输出,一部分由区间下限的差异性输出。区间值上下限的信息熵越小,则不同方案间该属性值的离散程度越大,表明该属性越重要,应该赋予较大的权重。

设规范化后的决策矩阵为 $R=[r_{ij}(\otimes)]_{m\times n}$,其中 $r_{ij}(\otimes)\in[r_{ij}^L,r_{ij}^R]$,则根据上述观点,属性 C_j 下的信息熵为:

$$E_j=\lambda[-(\ln m)\sum_{i=1}^nr_{ij}^L\ln r_{ij}^L]+(1-\lambda)\times$$
$$[-(\ln m)\sum_{i=1}^nr_{ij}^R\ln r_{ij}^R].$$

(12)

式中: λ 为决策矩阵下限熵与上限熵的平衡系数, $\lambda\in[0,1]$,一般可取为 0.5。

属性的熵权 $w_j^{(2)}$ 可按照下式计算:

$$w_j^{(2)}=\frac{1-E_j}{\sum_{j=1}^n(1-E_j)},j=1,2,\cdots,n.$$

(13)

式中: E_j 为属性 C_j 下的信息熵。

为了从一定程度上避免单独的主、客观赋权的不足,对主、客观权重进行组合,假定最终的综合权重为 $W=(w_1,w_2,\cdots,w_n)$,则应满足综合权重向量与主观权重向量和客观权重向量的差距最小。本研

究借用相对熵的概念来衡量其差别大小,相对熵 H 越小,则 2 个状态的差别越小,故可建立如下的优化模型:

$$\min H=\theta\sum_{j=1}^nw_j\ln\frac{w_j}{w_j^{(1)}}+(1-\theta)\sum_{j=1}^nw_j\ln\frac{w_j}{w_j^{(2)}},$$
$$\text{s. t. }\sum_{j=1}^nw_j=1,w_j\geq 0,j=1,2,\cdots,n.$$

(14)

式中: θ 为对主观权重的重视程度, $\theta\in[0,1]$; w_j 为主客观综合权重; $w_j^{(1)}$ 为主观权重; $w_j^{(2)}$ 为客观权重。

根据上述模型,构造 Lagrange 函数,得:

$$F(w_j,k)=\theta\sum_{j=1}^nw_j\ln\frac{w_j}{w_j^{(1)}}+(1-\theta)\times$$
$$\sum_{j=1}^nw_j\ln\frac{w_j}{w_j^{(2)}}+k(\sum_{j=1}^nw_j-1).$$

(15)

式中: k 为 Lagrange 乘子。

对上式求偏导,由极值存在条件可求出 w_j (限于篇幅具体推导过程略)为:

$$w_j=\frac{[w_j^{(1)}]^\theta[w_j^{(2)}]^{1-\theta}}{\sum_{j=1}^n[w_j^{(1)}]^\theta[w_j^{(2)}]^{1-\theta}}.$$

(16)

故公式(16)所求出的就是依据相对熵最小原理求得的最优化组合权重。将公式(16)的最优组合权重结果带入公式(7),可求得加权灰色关联度 ξ_i ,即可按照 ξ_i 的大小对方案进行排序, ξ_i 越大说明方案越优。

3 算 例

以海南省某水库除险加固工程为例进行实际的

除险加固方案决策分析。该水库大坝为均质土坝,最大坝高 87.30 m。限于修建时的技术水平和条件并经过多年运行,该水库大坝出现了以下安全问题:①坝体碾压密实度不够,渗透性强;②坝体与坝基存在接触冲刷现象;③坝基浅层土渗透性高,存在坝基渗漏;④输水涵管周围存在接触冲刷;⑤临时溢洪道未做衬砌,损毁严重,影响行洪。针对以上问题,初步拟定了以下 4 个备选加固方案:

方案 A₁:帷幕灌浆(坝基)+高压旋喷灌浆(坝身);方案 A₂:帷幕灌浆(坝基)+砼槽孔防渗墙(坝身);方案 A₃:截渗槽(坝基)+复合土工膜(坝身);方案 A₄:帷幕灌浆(坝基)+(高压摆喷灌浆+复合

土工膜)(坝身)。
进行方案决策时考虑 6 项指标:(1)加固成本 C₁, (2)加固可靠度 C₂, (3)工期 C₃, (4)施工难易程度 C₄, (5)施工安全度 C₅, (6)可持续发展 C₆。各备选方案在各项属性指标下的区间值通过直接计算或专家打分获得。决策指标 C₁ 通过投资估算求得,指标 C₃ 通过施工组织安排求得,其他指标属性值通过专家打分方式获得。专家群由 5 位专家组成,均为水利工程专业副教授以上级别人员,通过综合专家的群体意见对拟定的 4 个备选方案进行择优。首先生成决策矩阵如表 4 所示。

表 4 某水库除险加固工程备选方案的决策矩阵表 A

方案 Scheme	C ₁ /万元	C ₂ /分	C ₃ /d	C ₄ /分	C ₅ /分	C ₆ /分
A ₁	190.3	[75,85]	105	[77,86]	[68,73]	[60,65]
A ₂	208.5	[78,86]	125	[62,74]	[84,91]	[63,67]
A ₃	189.7	[58,65]	91	[72,81]	[77,85]	[73,78]
A ₄	198.9	[73,81]	110	[59,67]	[69,75]	[57,63]

注:表中[,]表示的属性值为区间灰数。表 5 同。
Note:The attribute values in [,] are interval grey number. The table 5 is the same.

3.1 计算步骤

步骤 1:应用(1)式、(2)式对上述决策矩阵进行

规范化处理,处理后的决策矩阵 $R=[r_{ij}(\otimes)]_{m \times n}$ 见表 5。

表 5 某水库除险加固工程备选方案的规范化决策矩阵表 R

方案 Scheme	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆
A ₁	0.52	[0.47,0.60]	0.50	[0.39,0.49]	[0.42,0.49]	[0.44,0.51]
A ₂	0.47	[0.49,0.60]	0.42	[0.45,0.61]	[0.52,0.61]	[0.46,0.53]
A ₃	0.52	[0.36,0.46]	0.58	[0.41,0.53]	[0.47,0.57]	[0.53,0.61]
A ₄	0.49	[0.46,0.57]	0.48	[0.50,0.64]	[0.42,0.50]	[0.42,0.50]

步骤 2:求理想最优方案和临界最优方案。

理想最优方案 $r^+(\otimes)=(0.52,[0.49,0.60],0.58,[0.50,0.64],[0.52,0.61],[0.53,0.61])$;
临界最优方案 $r^-(\otimes)=(0.47,[0.36,0.46],0.42,[0.39,0.49],[0.42,0.49],[0.42,0.50])$ 。

步骤 3:求各可行方案对理想最优与临界最优方案的灰色关联系数 ξ_{ij}^+,ξ_{ij}^- ,其中分辨系数 ρ 取 0.5,并按照(6)式计算综合安全系数,结果如下:

$$\xi = \begin{bmatrix} 0.895 & 0.776 & 0.500 & 0.932 & 0.862 & 0.921 \\ 0.895 & 0.865 & 0.933 & 0.598 & 0.912 & 0.612 \\ 0.877 & 0.924 & 0.933 & 0.651 & 0.609 & 0.917 \\ 0.778 & 0.650 & 0.528 & 0.923 & 0.804 & 0.917 \end{bmatrix}^{\circ}$$

步骤 4:采用 AHP 方法求取指标的主观权重。建立如下判断矩阵:

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 2 & 5 & 4 & 3 \\ 1 & 1 & 3 & 5 & 4 & 4 \\ 1/2 & 1/3 & 1 & 4 & 3 & 3 \\ 1/5 & 1/5 & 1/4 & 1 & 1/2 & 1/2 \\ 1/4 & 1/4 & 1/3 & 2 & 1 & 2 \\ 1/3 & 1/4 & 1/3 & 2 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}^{\circ}$$

根据(8)式可得主观权重为:
 $W^{(1)}=(0.291,0.326,0.176,0.048,0.086,0.072)^T$ 。

根据(9)、(10)式计算出判断矩阵的最大特征根 $\lambda_{\max}$ 、一致性系数 CI 分别为 6.18 和 0.035。

此例中判断矩阵为 6 阶,通过查表 3 可知随机平均一致性指标 $RI=1.24$,故由(11)式可得随机一致性比率 $CR=0.028<0.10$,判断矩阵满足一致性要求。

步骤 5:应用改进的区间数熵值法计算指标的客观权重。根据(12)式计算各属性下的信息熵,其

中决策矩阵下限熵与上限熵的平衡系数 λ 取为0.5,则有:

$E=(1.920,1.888,1.909,1.879,1.902,1.904)$ 。
应用(13)式计算各属性指标的熵权,结果如下:
 $W^{(2)}=(0.170,0.164,0.168,0.163,0.167,0.167)^T$ 。
步骤6:利用式(16)求解综合权重,对主观权重的重视程度 θ 取为0.5,则综合权重的大小为:

$W=(0.235,0.245,0.182,0.094,0.127,0.116)^T$ 。
步骤7:计算各可行方案的综合加权灰色关联度,并按照关联度从大到小排序。
经计算 $\xi_1=0.772,\xi_2=0.836,\xi_3=0.848,\xi_4=0.734$,排序为: $\xi_3>\xi_2>\xi_1>\xi_4$ 。故方案 A_3 为理想的加固方案,这与该工程最终采用的方案一致。

3.2 决策结果的分析

为了验证和说明本研究所提出的区间数 GRA

决策方法以及 AHP-Entropy 主客观综合赋权方法决策结果的合理性,表 6 给出了采用传统的综合关联度以及主客观综合权重对同一算例的决策结果。传统的综合关联度考虑的线性综合关联度为 $\xi_{ij}=\phi\xi_{ij}^{+}+(1-\phi)(1-\xi_{ij}^{-})$,其中 ϕ 为对 ξ_{ij}^{+} 的重视程度,取值为 $[0,1]$,限于篇幅本研究仅取 ϕ 等于0.3,0.5及0.7 3组数据进行对比;传统的主客观综合权重方法考虑的线性加权权重为 $w_j=\eta w_j^{(1)}+(1-\eta)w_j^{(2)}$,其中 η 为对主观权重的重视程度,取值为 $[0,1]$,限于篇幅本研究仅取 η 等于0.3及0.5 2组数据进行对比。运用上述公式所得各备选方案的排序结果见表 6。从表 6 可以看出,改进的区间数灰色多属性决策以及 AHP-Entropy 主客观综合赋权方法得出的决策结果与传统方法大致相近,说明本研究提出的方法是合理可行的。

表 6 采用传统综合关联度及主客观综合权重法的决策结果对比

Table 6 Comparison of decision-making results of the traditional comprehensive correlative degree method and the subjective and objective comprehensive weight method

η	ϕ	排序结果 Sequencing	η	ϕ	排序结果 Sequencing
0.3	0.3	$A_3>A_2>A_4>A_1$	0.5	0.3	$A_3>A_1>A_4=A_2$
	0.5	$A_3>A_2>A_4=A_1$		0.5	$A_3=A_1>A_4>A_2$
	0.7	$A_3>A_2>A_4=A_1$		0.7	$A_3>A_1=A_2>A_4$

4 结 论

基于区间数 GRA 与 AHP-Entropy 主客观综合赋权的除险加固方案决策方法充分考虑了水库大坝除险加固方案决策的复杂性以及决策专家思维的模糊性问题,摒弃传统的确定化决策信息描述方法,采用区间数表现不确定性决策信息,结合灰色决策方法,建立了改进的基于区间数的灰色综合关联度决策优选方法。同时针对主观权重受人为因素影响的缺陷,将 AHP 主观赋权方法与 Entropy 客观赋权方法相结合,构建相对熵最小优化模型,得出了基于 AHP-Entropy 主客观综合赋权的新方法。通过算例验证了将改进的区间数灰色多属性决策方法以及 AHP-Entropy 主客观综合赋权法应用于水库大坝除险加固方案决策中的合理性,同时也提高了水库大坝除险加固方案决策的科学性,为水库大坝除险加固方案决策这类复杂的不确定性决策问题的解决提供了新的思路。

【参考文献】

[1] 中华人民共和国水利部. 2011 年全国水利发展统计公报 [M]. 北京:中国水利水电出版社,2012.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of Chi-

na. 2011 statistic bulletin on China water activities [M]. Bei-jing:China Water &. Power Press,2012. (in Chinese)

[2] 陈 雷. 加大工作力度,强化监管责任,着力做好小 II 型病险水库除险加固工作 [EB/OL]. (2011-04-12) [2013-07-20]. ht-tp://www.mwr.gov.cn/slxz/slyw/201104/t20110412258432.html.

Chen L. Make every effort,strengthening building and manage-ment responsibility,try our best to do the reinforcement work of the small reservoir type II[EB/OL]. (2011-04-12)[2013-07-20]. http://www.mwr.gov.cn/slxz/slyw/201104/t20110412258432.html. (in Chinese)

[3] 陈永贵,邹银生,张可能. 坝基防渗治理的多目标模糊决策方法 [J]. 湖南大学学报:自然科学版,2008,25(3):15-17.

Chen Y G,Zou Y S,Zhang K N. Multi-objectives fuzzy deci-sion-making method for dam foundation seepage control engi-neering [J]. Journal of Hunan University:Natural Sciences E-dition,2008,25(3):15-17. (in Chinese)

[4] 蔡守华,张展羽,张 鹏,等. 基于 AHP-TOPSIS 的小型水库除险加固优化排序方法 [J]. 扬州大学学报:自然科学版,2009,12(1):71-75.

Cai S H,Zhang Z Y,Zhang P,et al. Priority decision model of small reservoirs reinforcing project based on AHP-TOPSIS [J]. Journal of Yangzhou University:Natural Science Edition,2009,12(1):71-75. (in Chinese)

[5] 严祖文,魏迎奇,李维朝. 水库除险加固技术方案关联分析与决策 [J]. 中国水利水电科学研究院学报,2012,10(2):153-159.

Yan Z W,Wei Y Q,Li W C. Correlation analysis and decision-

- making of reinforcement alternatives for dangerous reservoir [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydro-power Research, 2012, 10(2): 153-159. (in Chinese)
- [6] Wei G W. Grey relational analysis model for dynamic hybrid multiple decision making [J]. Knowledge-Based Systems, 2011, 24: 672-679.
- [7] 杨保华, 方志耕, 周 伟, 等. 基于信息还原算子的多指标区间灰数关联决策模型 [J]. 控制与决策, 2012, 27(2): 182-186.
Yang B H, Fang Z G, Zhou W, et al. Incidence decision model of multi-attribute interval grey number based on information reduction operator [J]. Control and Decision, 2012, 27(2): 182-186. (in Chinese)
- [8] Pophali G R, Chelani A B, Dhodapkar R S. Optimal selection of full scale tannery effluent treatment alternative using integrated AHP and GRA approach [J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38: 10889-10895.
- [9] Tang X J, Cheng J. A dynamic interval decision-making method based on GRA [J]. Physics Procedia, 2012, 24: 2017-2025.
- [10] 张 雷, 常天庆, 王庆胜, 等. 一种灰色关联度的改进方法 [J]. 火力与指挥控制, 2012, 37(1): 121-124.
Zhang L, Chang T Q, Wang Q S, et al. An improvement method of grey incidence degree mode [J]. Fire Control & Command Control, 2012, 37(1): 121-124. (in Chinese)
- [11] 何金平, 李珍照, 施玉群. 大坝结构实测性态综合评价中的权重问题 [J]. 武汉大学学报: 工学版, 2001, 34(3): 13-17.
He J P, Li Z Z, Shi Y Q. Weight question about comprehensive evaluating dam safety monitoring behavior [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2001, 34(3): 13-17. (in Chinese)
- [12] 周宇峰, 魏法杰. 基于相对熵的多属性决策组合赋权方法 [J]. 运筹与管理, 2006, 15(5): 48-53.
Zhou Y F, Wei F J. Combination weighting approach in multiple attribute decision making based on relative entropy [J]. Operations Research and Management Science, 2006, 15(5): 48-53. (in Chinese)
- [13] 赵 萌, 邱莞华, 何大义. 区间型多属性决策的相对熵排序法 [J]. 系统工程, 2010, 28(8): 70-74.
Zhao M, Qiu W H, He D Y. Compositor method of relative entropy for interval multi-attribute decision-making [J]. Systems Engineering, 2010, 28(8): 70-74. (in Chinese)
- [14] 金菊良, 程吉林, 魏一鸣, 等. 确定区域水资源分配权重的最小相对熵方法 [J]. 水力发电学报, 2007, 26(1): 28-32.
Jin J L, Cheng J L, Wei Y M, et al. Minimum relative information entropy method for determining weights of region water resources allocation [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007, 26(1): 28-32. (in Chinese)

欢迎订阅 2015 年《中国农业科学》中、英文版

《中国农业科学》中、英文版是由农业部主管、中国农业科学院与中国农学会共同主办的综合性学术期刊。主要刊登农牧业基础科学和应用基础科学研究论文、综述、简报等。设有作物遗传育种·种质资源·分子遗传学;耕作栽培·生理生化·农业信息技术;植物保护;土壤肥料·节水灌溉·农业生态环境;园艺;贮藏·保鲜·加工;畜牧·兽医·资源昆虫等栏目。读者对象为国内外农业科研院(所)、大专院校的科研、教学与管理人员。

《中国农业科学》中文版为半月刊,影响因子、总被引频次连续多年居全国农业科技期刊最前列或前列位次。为北京大学图书馆 1992—2011 年连续 6 次遴选的核心期刊,位居《中文核心期刊要目总览》“农业综合类核心期刊表”的首位。1999—2008、2013—2014 年获“国家自然科学基金重点学术期刊专项基金”资助。1999 年获“首届国家期刊奖”,2003、2005 年获“第二、三届国家期刊奖提名奖”;2002—2013 年先后 11 次被中国科学技术信息研究所授予“百种中国杰出学术期刊”称号;2009 年获中国期刊协会/中国出版科学研究院“新中国 60 年有影响力的期刊”称号;2010、2013 年荣获“第二、三届中国出版政府奖期刊提名奖”,2013 年获新闻出版广电总局“百强科技期刊”称号;2012、2013 年获清华大学图书馆等“2012、2013 中国最具国际影响力学术期刊”称号。

《中国农业科学》中文版大 16 开,每月 1、16 日出版,国内外公开发行。每期 208 页,定价 49.50 元,全年定价 1 188.00 元。国内统一连续出版物号:CN11-1328/S,国际标准连续出版物号:ISSN 0578-1752,邮发代号:2-138,国外代号:BM43。

《中国农业科学》英文版(*Agricultural Sciences in China*, ASA),2002 年创刊,月刊。2012 年更名为《农业科学学报》(*Journal of Integrative Agriculture*, JIA)。2006 年 1 月起与国际著名出版集团 Elsevier 合作,全文数据在 ScienceDirect 平台面向世界发行。2009 年被 SCI 收录,2013 年 JIA 影响因子为 0.625。

JIA 大 16 开,每月 20 日出版,国内外公开发行。每期 180 页,国内订价 80.00 元,全年 960.00 元。国内统一连续出版物号:CN 10-1039/S,国际标准连续出版物号:ISSN 2095-3119,邮发代号:2-851,国外代号:1591M。《中国农业科学》中、英文版均可通过全国各地邮局订阅,也可向编辑部直接订购。

邮 编:100081;地址:北京 中关村南大街 12 号《中国农业科学》编辑部

电 话:010-82109808,82106281,82105098;传真:010-82106247

网 址:www.ChinaAgriSci.com;E-mail:zgnykx@caas.cn

联系人:林鉴非