

改进熵权法与 AHP 法在防波堤设计方案中的应用

张 方¹, 曹 龙², 智树丽³

(1. 资阳市雁江区水务局, 四川 资阳 641300; 2. 河南华安水利工程有限公司, 河南 郑州 450000;
3. 河南正航建设工程有限公司, 河南 郑州 450000)

摘要: 采用改进的熵权法对防波堤堤型设计方案中的质量、投资、工期、安全 4 个目标为指标进行客观权重求解, 结合指数标度的 AHP 得出的权重构成设计方案的综合权重。采用 AHP 对递阶层次结构模型中各层次因素的相对重要性进行合理的量化分析, 最终确定相对于目标层的重要性次序。结果表明, 混合式防波堤的堤型设计方案最佳。

关键词: 改进的熵权法; 指数标度 AHP; 综合权重; 堤型设计

中图分类号: TV87+1 **文献标识码:** B **文章编号:** 1007-7839 (2016) 09-0024-05

Application of improved entropy weight method and AHP method in the design of breakwater

ZHANG Fang¹, CAO Long², ZHI Shuli³

(1. Yanjiang District of Ziyang Water Affair Bureau, Ziyang 641300, Sichuan;
2. Henan Huaan Water Conservancy Engineering Co., Ltd., Zhengzhou 450000, Henan;
3. Henan Zhenghang Construction Engineering Co., Ltd., Zhengzhou 450000, Henan)

Abstract: The improved entropy weight method is used for solving the objective weight of quality, investment, time limit, safety in breakwaters design scheme. The comprehensive weights are constituted with weights calculated by index scale AHP. Reasonable quantitative analysis of relative importance of all factors in hierarchical structure model is carried out by AHP. The order of importance relative to the target layer is ultimately determined. The results show that the composite breakwater design scheme is the best.

Key words: improved entropy weight method; index scale AHP; comprehensive weight; embankment design

0 引言

防波堤用来围护港池, 挡御波浪, 维持港内水域的平稳, 以保证船舶在港内安全停靠、系泊的水工建筑物, 除此之外, 防波堤还可起到防止港池淤积和波浪冲蚀岸线的作用。防洪堤的堤型结构型式的设计方案比选尤为重要, 常见的防波堤结构型式按其迎水坡通常可分为斜坡式、直立式和混合式等型式^[1]。

层次分析法是对多个方案、多个指标系统进行分析的一种层次化、结构化的决策方法。该方

法把复杂的问题分解成各个组成因素, 又将这些因素分组形成梯阶层次结构, 通过两两比较的方式确定各因素的权重, 而后进行一致性检验, 最后确定决策方案。吕跃进等对指数标度的理论进行完善, 得出指数标度是计算结果可行、优良的标度, 并根据指数标度在参数的情况下, 计算对应的 1 ~ 13 阶随机一致性检验标准值^[2-4]。本文采用改进的熵权法对防波堤的 4 个指标进行客观权重计算, 并结合指数标度的 AHP 求得权重构成综合权重, 而后对防波堤的 3 种堤型设计方案进行分析, 得到最优堤型结构设计方案。

收稿日期: 2016-07-06

作者简介: 张方 (1987-), 女, 硕士, 主要从事水利工程设计及水土保持工作。

1 改进的熵权法确定震后水库除险加固方案权重的步骤

熵权法是一种客观赋权法, 它利用信息论中熵值的概念反映不同指标中信息无序化的程度, 缩小了极值对权重的影响。同时熵权法能够保证在原始信息不损失的情况下, 根据原始数据中各因素所含信息量的大小确定权重, 具有客观性, 避免主观因素对权重分配的影响^[5]。

(1) 原始数据矩阵标准化

设有 m 个评价对象, n 个评价指标构成的多指标评价矩阵:

$$R = (r_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix}$$

原始数据按照标准化方法进行变换:

$$X'_{ij} = (X_{ij} - \bar{X}_j) / S_j \tag{1}$$

式中:

- \bar{X}_j —指标 j 取值的均值;
- S_j —指标 j 取值的标准差。

(2) 评价指标熵值

将各个指标归一化, 计算 X'_{ij} 在 j 项指标的比重:

$$f_{ij} = \frac{X'_{ij}}{\sum_{i=1}^m X'_{ij}} \tag{2}$$

确定评价指标的熵值为:

$$H_j = -\frac{1}{Ln} \sum_{i=1}^m f_{ij} Ln f_{ij} \tag{3}$$

计算差异系数为:

$$G_j = 1 - H_j \tag{4}$$

当 X'_{ij} 值相差越大, H_j 越小, G_j 越大, 该指标权重越大。反之, G_j 越小时, 指标越不重要。

(3) 评价指标的权值

$$\omega_j = G_j / \sum_{i=1}^n G_j \tag{5}$$

当熵值 H_j 越小时, 权值 ω_j 越大, 该评价指标越重要; 反之, 该指标越不重要。

为了较全面的反应评价指标的客观性, 本文将指数标度AHP法得到的权重 β 与权重 ω 相结合, 最终确定各指标的权重为:

$$\gamma_i = \beta_i \omega_i / \sum_i \beta_i \omega_i \tag{6}$$

2 指数标度的层次分析法

2.1 指数标度

指数标度是依据心理学的韦伯 - 费希纳定律的公式 $S = k \cdot \log R$ (S 是人的主观感觉量, R 是客观刺激量, k 是韦伯常数)。通过建立“等距分级, 等比赋值”的一种权重标度方法, 通式为:

$$u = a^n \ (n=0, 1, 2 \cdots \cdots) \tag{7}$$

式中:

- n —重要性程度划分等级;
- a —待定参数。

首先将判断等级分为: 同等重要、稍微重要、明显重要、强烈重要、极端重要 5 个等级。一般情况下重要性程度等级分为 9 级为宜, 即 $n=8$, 通过公式 $a=9$, $a=\sqrt[8]{9}$ 确定 $a=1.316$, 则指数标度公式: $u = a^n = 1.316^n \ (n=0, 1, 2 \cdots \cdots)$, 确定指数标度中的权重标度^[5], 见表 1。

2.2 基于指数标度的层次分析法的基本方法和步骤

表 1 指数标度数量标度

标度	比较重要度程度	定义
0	1.316 ⁰ =1 同等重要	表示两个因素相比, 具有相同重要性
2	1.316 ² =1.732稍微重要	表示两个因素相比, 前者比后者稍微重要
4	1.316 ⁴ =3 明显重要	表示两个因素相比, 前者比后者明显重要
6	1.316 ⁶ =5.194强烈重要	表示两个因素相比, 前者比后者重要得多
8	1.316 ⁸ =9 极端重要	表示两个因素相比, 前者比后者极端重要
1, 3	反比较	介于中间的状况1、3、5、7按照1.316 ⁿ 计算, $a_{ji} = 1/a_{ij}$
5, 7		

- (1) 分析系统中各因素之间的关系, 建立系统的递阶层次结构;
- (2) 对同一层次的各元素关于上一层次中某一准则的重要性进行两两比较, 依据指数标度构造评定指标两两判断矩阵 $A=(a_{ij})_{n \times n}$;
- (3) 求判断矩阵的 $A=(a_{ij})_{n \times n}$ 的最大特征值 λ_{\max} , 并进行一致性检验, 如能满足要求进行第四步。否则, 调整判断矩阵, 直到满足要求为止;
- (4) 由判断矩阵计算被比较元素对于该准则的权重 ω , 由最大特征值 λ_{\max} 求出对应的特征向量, 归一化得出评定指标的权重 ω_i ;
- (5) 计算各层元素对系统目标的权重, 并结合改进的熵权法的权重构成综合权重, 最后对方案进行排序。

2.3 一致性检验

吕跃进对指数标度与 1-9 标度互不相容及其比较研究确定指数标度是一个优良的结果可靠的标度^[6], 并重新计算指数标度下判断矩阵的一致性检验法, 统计出 1-13 阶正互反矩阵计算 1000 次得到的平均 RI 值, 见表 2, 进一步完善了指数标度系统^[4]。

指数标度判断矩阵的一致性检验步骤:

- (1) 计算判断矩阵 $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$;
- (2) 查找对应的随机一致性指标 RI 值;
- (3) 计算一致性比例 $CR = \frac{CI}{RI}$, 当 $CR < 0.1$ 时, 判断矩阵的一致性是可以接受的; 当 $CR > 0.1$ 时, 应对判断矩阵作适当修正。

3 应用实例

3.1 防波堤堤型设计方案比选

某防波堤工程位于浅海滩地, 年平均水深在 2.0 m 左右。该工程级别为 2 级, 相应穿堤涵闸为 2 级建筑物, 新建防波堤全长约 6.4 km。本工程设计防潮(洪)标准为 50 年一遇, 排涝标准为 10 年一遇 24 h 暴雨所产生的径流量 1 d 内排干。根据当地的地形地质、水文、材料施工条件等多方面因素, 按照经济适用、安全、方便施工的原则, 在满足堤身稳定的条件下, 对本工程拟定的斜坡式、直立式和混合式 3 个方案进行比选, 详见表 3。

3.2 建立阶梯层次结构模型

根据防波堤工程实际情况, 分析模型中各元

表 2 指数标度随机一致性检验指标

定义		定义赋值											
指数标度阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
n	0	0	0.36	0.58	0.72	0.82	0.88	0.93	0.97	0.99	1.01	1.03	1.04

表 3 防波堤堤型设计方案对比表

方案编号	防波堤堤型设计方案
方案一 斜坡式防波堤	由堤身和反压平台组成, 堤顶迎水侧设置具有放浪曲面的混凝土防浪墙, 堤顶路面宽 7 m, 堤防迎水坡、背水坡均为 1:3。堤身和反压平台用开山混合料填筑, 干砌石块石护坡; 堤身两侧设 20 ~ 40 m 不同长度的反压平台, 堤身和反压平台末端加设抛石棱体。其优点是对地基土层承载力的要求不高, 适合软弱地基; 抗台风稳定性好; 在临海坡面平缓, 防浪效果好; 护面结构及堤身施工便于机械化施工。缺点是护坡坡缓, 计算的波浪爬高值偏大; 堤身沉降差较大。
方案二 直立式防波堤	由墙身、基床和胸墙组成, 基床和胸墙采用混凝土沉箱结构, 坚固耐用, 适用于波浪及水深均较大而地基较好的情况。堤身和反压平台用开山混合料填筑, 干砌石块石护坡, 堤顶路面宽 7 m, 堤身两侧的海测和陆侧分别设 15 ~ 35 m 不同长度的反压平台, 堤身和反压平台末端加设抛石棱体。其优点是节省工程量, 每延米可节省填筑料 32 m ³ , 陆侧反压平台较斜坡式防波堤方案短 5 m。缺点是波浪在墙身前反射, 消波效果较差。
方案三 混合式防波堤	采用较高的明基床, 是直立式上部结构和斜坡式堤基的综合体, 适用于水较深的情况。堤身和反压平台用开山混合料填筑, 干砌石块石护坡, 堤身两侧设 20 ~ 40 m 不同长度的反压平台, 堤身和反压平台末端加设抛石棱体。其优点是堤基与地基接触面较小, 沉降差较小, 波浪爬高较小, 抵御台风能力较强。缺点是抛石量较大, 防波堤边坡转折处, 波流紊乱, 结构易遭破坏。

素之间的联系,建立递阶层次结构:目标层、准则层和方案层。判断的准则是质量、投资、工期、安全;方案层是3种堤型设计方案,见图1。

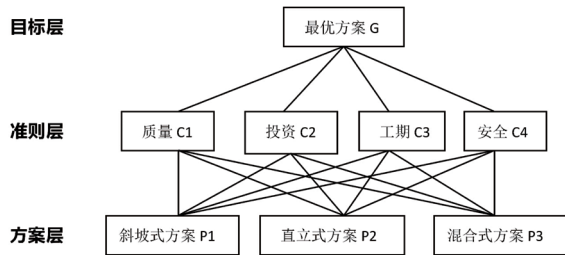


图1 阶递层次模型

3.3 改进的熵权法确定权重

本文在勘探试验、类似工程资料的分析基础上,结合当地施工条件等方面,确定了“质量、投资、工期、安全”等评价指标,工作组中的7位专家对上述4个评价指标中的各因素按照百分制进行评分,而后采用加权平均求得4个指标的分值,汇总后得到如下评价矩阵:

$$X = \begin{bmatrix} 78 & 81 & 71 & 93 \\ 77 & 80 & 76 & 88 \\ 81 & 73 & 67 & 86 \\ 80 & 78 & 72 & 85 \\ 86 & 75 & 69 & 91 \\ 82 & 82 & 68 & 90 \\ 84 & 76 & 79 & 92 \end{bmatrix} \rightarrow$$

$$\begin{bmatrix} 0.638 & 1.329 & 0.957 & 0.838 \\ 0.523 & 1.224 & 1.260 & 1.469 \\ 0.984 & 0.491 & 0.714 & 0.585 \\ 0.869 & 1.015 & 1.017 & 0.459 \\ 1.559 & 0.701 & 0.835 & 1.216 \\ 1.099 & 1.434 & 0.775 & 1.090 \\ 1.329 & 0.806 & 1.442 & 1.343 \end{bmatrix}$$

按照改进的熵权法的公式(2)~(3)得出: $H_1=0.9700$, $H_2=0.9717$, $H_3=0.9849$, $H_4=0.9652$

由公式(4)得出: $G_1=0.0300$, $G_2=0.0283$, $G_3=0.0151$, $G_4=0.0348$

由公式(5)得出各指标的权重:

$$\beta = (0.2774 \ 0.2615 \ 0.1394 \ 0.3217)。$$

3.4 构造准则层的基于指数标度的两两比较判断矩阵

采用专家调查法建立关于质量、投资、工期、安全重要性的两两比较的判断矩阵。对同一层次的各元素关于上一层中某一因素的重要性进行两两比较的判断矩阵 $A=(a_{ij})_{n \times n}$, 其中 a_{ij} 就是元素 i 和元素 j 相对于准则 c 的重要性关系的比例标度。

比例标度采用指数标度,详见表2。依据指数标度建立准则层相对于目标层的判断矩阵 $A=(a_{ij})_{n \times n}$ 。构造准则层相对于目标层的判断矩阵:

$$G = \begin{bmatrix} 1 & 1.732 & 2.279 & \frac{1}{1.732} \\ \frac{1}{1.732} & 1 & 1.732 & \frac{1}{2.279} \\ \frac{1}{2.279} & \frac{1}{1.732} & 1 & \frac{1}{3} \\ 1.732 & 2.279 & 3 & 1 \end{bmatrix} \rightarrow$$

$$\begin{bmatrix} 0.267 & 0.310 & 0.284 & 0.246 \\ 0.154 & 0.179 & 0.216 & 0.187 \\ 0.117 & 0.103 & 0.125 & 0.142 \\ 0.462 & 0.408 & 0.374 & 0.426 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 0.277 \\ 0.184 \\ 0.122 \\ 0.417 \end{bmatrix}$$

计算得特征向量 $\omega=(0.277 \ 0.184 \ 0.122 \ 0.417)$

计算结果表明,在工程方案的选择中主要考虑工程的安全,其权重为0.417,其余的依此是质量(权重为0.277)、投资(权重为0.184)、工期(权重为0.122)。

3.5 层次单排序及其一致性检验

(1)在计算单准则下排序向量时,要进行一致性检验:

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{\sum_{i=1}^n a_{ij} \omega_j}{\omega_i} = 4.0189,$$

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = \frac{4.0189 - 4}{3} = 0.0063$$

(2)计算一致性比率 $CR = \frac{CI}{RI}$ 式中, RI 为平均随机一致性指标,详见表2,查得 $RI=0.58$

$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0.0063}{0.58} = 0.0109 < 0.1$, 则该判断矩阵通过一致性检验。

3.6 建立方案层对准则层的比较矩阵

准则层和方案层是隶属关系,建立方案层对准则层的比较矩阵,针对3个方案,从质量、工期、投资、安全等4个目标指标进行一下判断。

$$C1 = \begin{bmatrix} 1 & 1.732 & \frac{1}{1.732} \\ \frac{1}{1.732} & 1 & \frac{1}{2.279} \\ 1.732 & 2.279 & 1 \end{bmatrix} \rightarrow w_1 = \begin{bmatrix} 0.311 \\ 0.197 \\ 0.492 \end{bmatrix}$$

$$C2 = \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{1.732} & 1.732 \\ 1.732 & 1 & 3 \\ \frac{1}{1.732} & \frac{1}{3} & 1 \end{pmatrix} \rightarrow w_2 = \begin{pmatrix} 0.303 \\ 0.523 \\ 0.174 \end{pmatrix}$$

$$C3 = \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{2.279} & \frac{1}{1.732} \\ 2.279 & 1 & 3 \\ 1.732 & \frac{1}{3} & 1 \end{pmatrix} \rightarrow w_3 = \begin{pmatrix} 0.191 \\ 0.558 \\ 0.251 \end{pmatrix}$$

$$C4 = \begin{pmatrix} 1 & 1.732 & \frac{1}{1.732} \\ \frac{1}{1.732} & 1 & \frac{1}{2.279} \\ 1.732 & 2.279 & 1 \end{pmatrix} \rightarrow w_4 = \begin{pmatrix} 0.311 \\ 0.197 \\ 0.492 \end{pmatrix}$$

同理,运用上述方法对各判断矩阵逐一计算,均通过了一致性检验。

3.7 层次总排序

以上仅仅是一组元素对其上一层元素的权重向量,根据准则层之间的权重向量以及准则层对方案层的权重向量,计算各种方案的综合权重向量

(1) 确定各指标的综合权重为 γ_i :

$$\gamma_i = \frac{\beta_i \omega_i}{\sum_i \beta_i \omega_i} = (0.2783 \ 0.1743 \ 0.0616 \ 0.4859)$$

(2) 确定方案的层次总排序:

$$(0.2783 \ 0.1743 \ 0.0616 \ 0.4859) \times$$

$$\begin{pmatrix} 0.311 & 0.197 & 0.492 \\ 0.303 & 0.523 & 0.174 \\ 0.191 & 0.558 & 0.251 \\ 0.311 & 0.197 & 0.492 \end{pmatrix} = (0.3023 \ 0.2760 \ 0.4217)$$

经以上计算,斜坡式挡墙方案的综合权重为 0.4217,这说明通过“重要性”层层比较,综合分析,选择混合式挡墙更有利于实现最优的总目标,实际上最终选择该方案。

4 结语

改进的熵权法能够较客观的对防波堤堤型设计比选方案的各个指标进行赋权,与指数标度的层次分析法通过判断矩阵获得的权重构成综合权重,能够更加合理的对比选方案进行最后的层次排序。通过指数标度的层次分析法建立梯阶结构模型,并对判断矩阵进行一致性检验,确保计算结构的准确,为方案比选提供新的方法。本文采用的指数标度 AHP 和改进的熵权法的最佳设计方案的选择与实际情况相符,说明该方法的实用性和合理性。

参考文献:

- [1] 雷松林,郑永来.防波堤结构型式及其应用探讨[J].中国水运,2007,07(6),131~132
- [2] 吕跃进,张维.指数标度在 AHP 标度系统中的作用[J].系统工程学报,2003,18(5),452~456
- [3] 杨纶标,高英仪,凌卫新.模糊数学原理及应用[M].广州:华南理工大学出版社,2011.
- [4] 吕跃进.指数标度判断矩阵的一致性检验方法[J].统计与决策,2006(9):31-32
- [5] 田林钢,靳聪聪.基于改进的熵权-TOPSIS 法的震损水库最佳除险加固方案选择[J].水电能源科学.2013,31(9):68~71
- [6] 吕跃进,张维,曾雪兰.指数标度与 1-9 标度互不相容及其比较研究[J].工程数学学报,2003,20(8),77~81

(责任编辑:王宏伟)