

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2008.05.014

# 水闸健康综合诊断的权重系数确定方法

曹邱林<sup>1,2</sup>, 吴中如<sup>1</sup>

(1.河海大学水利水电工程学院,江苏南京 210098;2.扬州大学水利科学与工程学院,江苏扬州 225009)

**摘要:**为了综合诊断水闸健康状况,建立多层次诊断指标体系,需要运用适当的方法分别确定各下层诊断指标对上层诊断指标的相对重要程度,即权重系数,然后根据各下层诊断指标的权重系数与其诊断结果逐级向上层综合,分析了水闸健康综合诊断权重系统的确定方法,着重分析了层次分析法以及考虑群组决策的改进层次分析法,提出了基于最优化准则的权重系数融合方法.实例分析表明,将多种方法确定的权重系数进行融合,可得到更合理的权重系数,从而更好地对水闸健康状况进行综合诊断.

**关键词:**水闸;健康诊断;权重系数;层次分析法;融合

**中图分类号:**TV66 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-1980(2008)05-0646-04

水闸健康综合诊断指标体系是一个多层次的复杂系统,其层次结构中的上层诊断指标受若干下层诊断指标的影响.这些下层诊断指标对上层诊断指标的健康状况影响不同,需要运用适当的方法分别确定各下层诊断指标对上层诊断指标的相对重要程度,即权重系数,然后根据各下层诊断指标的权重系数与其诊断结果逐级向上层综合,最终得出水闸的健康状况.权重系数的确定方法可分为<sup>[1]</sup>(a)基于“功能驱动”原理的赋权法(b)基于“差异驱动”原理的赋权法(c)综合集成赋权法,可分为主观赋权法、客观赋权法和主客观赋权法.权重系数的确定是水闸健康综合诊断的核心问题,系统工程中有很多确定权重系数的先进方法.由于水闸工程一般缺乏实测资料,很多依赖实测资料的客观赋权法难以应用,因此有必要根据水闸的具体情况将系统工程或其他行业中简便、适用的方法引入到水闸健康综合诊断中,并运用合适的数学方法将多种方法获得的权重进行融合,以获取最优的权重系数,对水闸健康状况进行综合诊断.本文分析了适用于水闸健康综合诊断的权重系数确定方法,并在此基础上,提出基于最优化准则的权重系数融合方法.

## 1 权重系数确定方法

### 1.1 专家调查研究法

专家调查研究法是匿名反复咨询专家的意见,经过反复多次的信息交流和反馈修正,使专家的意见逐步趋向一致,最后根据专家的综合意见,对诊断对象做出诊断的一种定量与定性相结合的诊断方法.

专家调查研究法的步骤如下:由水闸上级主管部门组织聘请有关专家,组建水闸安全鉴定专家组.要求专家在参与诊断之前,对将要诊断的内容彼此不交流意见;在掌握水闸全面情况的基础上,由主管部门以书面形式征询多位专家意见,各专家依据自己的知识、经验和综合分析能力,针对所给的信息,分析各水闸诊断指标在水闸安全中所起的作用,然后对各层诊断指标的重要程度按照百分制打分.分值越高,表示该诊断指标对上层诊断指标的影响程度越大.统计专家求得各诊断指标总分值的平均得分,将同层各诊断指标的分值进行归一化,即得到各指标的权重系数值.

专家调查研究法通俗而简便易行,具有科学性和实用性,可以避免会议讨论时随声附和,或固执己见,或因顾及权威而畏首畏尾等通病,结果基本上易被与会的专家接受,在操作上,综合意见具有一定程度的客观性.

### 1.2 层次分析法

层次分析法<sup>[2-6]</sup>是一种定性分析与定量分析相结合的分析方法,综合了定性分析与定量分析的优点,是分析多目

标、多因素、多准则复杂系统的常用方法.

层次分析法的主要步骤如下.

a. 确定层次结构 把水闸工程的工作性态这一复杂问题作为 1 个系统,建立诊断指标体系,形成不同层次,从而建立递阶层次结构,把复杂问题系统化、条理化、层次化.

b. 聘请专家构造比较判断矩阵 以  $u_i$  表示诊断指标,  $u_i \in U (i = 1, 2, \dots, m)$  标度值  $r_{ij}$  表示  $u_i$  对  $u_j (j = 1, 2, \dots, m)$  的相对重要性数值,  $r_{ij}$  的取值按标度准则进行. 其中,  $r_{ij}$  值越大,表明指标  $u_i$  的重要性越强;指标  $u_j$  跟  $u_i$  比,其标度值  $r_{ji} = 1/r_{ij}$ . 根据上述各符号的意义得到判断矩阵  $R$  :

$$R = (r_{ij})_{m \times m} \quad (i, j = 1, 2, \dots, m) \tag{1}$$

c. 计算重要性排序 根据判断矩阵  $R$  求出其最大特征值  $\lambda_{\max}$  所对应的特征向量,该特征向量即为各诊断指标的重要性排序,也就是权重系数,这是关键性的一步.

d. 检验 求得的权重系数是否合理,需要对判断矩阵进行一致性检验.

$$C_R = \frac{C_1}{R_1} \quad C_1 = \frac{\lambda_{\max} - m}{m - 1} \tag{2}$$

式中:  $C_R$ ——判断矩阵的随机一致性比率;  $C_1$ ——判断矩阵的一般一致性指标;  $R_1$ ——判断矩阵的平均随机一致性指标. 当  $C_R < 0.1$  时,即认为判断矩阵具有满意的一致性,说明权重系数分配合理,否则就需要调整判断矩阵,直到取得满意的一致性为止.

层次分析法中,专家给出的判断矩阵是否科学合理将直接影响诊断指标权重系数的分配结果.

### 1.3 改进层次分析法

层次分析法有三大难点<sup>[7]</sup>:(a)判断矩阵的一致性检验非常复杂而困难;当安全诊断指标划分得很细时,阶数  $m$  很大,精确计算最大特征值的工作量将非常巨大.(b)当判断矩阵不具有 consistency 时,需要调整判断矩阵的标度值,直至其具有一致性为止.这个过程不但繁琐,而且将浪费专家极大的精力和时间.在重复性的若干次调整中,专家的原先判断准则重心将不知不觉发生偏移而失去判断权重系数的正确度.(c)目前用来检验判断矩阵一致性的标准  $C_R < 0.1$  仅仅是一个经验数据,尚且缺乏科学证明.

本文基于传统的层次分析法思想,借鉴模糊数学方法,考虑群组决策的实际情况,建立基于模糊一致矩阵的改进层次分析法<sup>[8-11]</sup>.

#### 1.3.1 确定层次结构

把水闸工程的工作性态这一复杂问题作为 1 个系统,建立诊断指标体系,形成不同层次,从而建立递阶层次结构,把复杂问题系统化、条理化、层次化.

#### 1.3.2 聘请专家构造模糊矩阵

设矩阵  $R = (r_{ij})_{m \times m}$ ,若满足  $0 \leq r_{ij} \leq 1 (i, j = 1, 2, \dots, m)$ ,则称  $R$  是模糊矩阵.

若模糊矩阵  $R = (r_{ij})_{m \times m}$  满足  $\forall i, j, k$  有  $r_{ij} = r_{ik} - r_{jk} + 0.5$ ,则称模糊矩阵  $R$  是模糊一致矩阵.该矩阵具有以下性质:(a)  $r_{ii} = 0.5 (i = 1, 2, \dots, m)$ ;(b)  $r_{ij} + r_{ji} = 1 (i, j = 1, 2, \dots, m)$ ;(c)  $r_{ij} = r_{ik} - r_{jk} + 0.5 (i, j, k = 1, 2, \dots, m)$ ;(d)  $\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m r_{ii} = \frac{m^2}{2} (i, j = 1, 2, \dots, m)$ .

以  $u_i$  表示诊断指标,  $u_i \in U (i = 1, 2, \dots, m)$  标度值  $r_{ij}$  表示  $u_i$  对  $u_j (j = 1, 2, \dots, m)$  的相对重要性数值;  $r_{ij}$  的大小是诊断指标  $u_i$  比  $u_j$  重要程度的度量.当  $0 < r_{ij} < 0.5$  时,表示诊断指标  $u_j$  比  $u_i$  重要,且  $r_{ij}$  越趋向于 0,  $u_j$  就比  $u_i$  越重要;反之,当  $0.5 < r_{ij} < 1$ ,表示诊断指标  $u_i$  比  $u_j$  重要,且  $r_{ij}$  越趋向于 1,  $u_i$  就比  $u_j$  越重要.由此得判断矩阵式(1).

#### 1.3.3 对判断矩阵 $R$ 按行求其平均值

$$R_i = \frac{\sum_{k=1}^m r_{ik}}{m} \quad (i = 1, 2, \dots, m)$$

#### 1.3.4 确定模糊一致矩阵 $A$ 及诊断指标的权重系数向量集

a. 将求得的判断矩阵平均值按照式(3)进行数学变换,得到模糊一致矩阵  $A$  :

$$a_{ij} = \frac{R_i - R_j}{2} + 0.5 \quad (i, j = 1, 2, \dots, m) \tag{3}$$

$$A = (a_{ij})_{m \times m} \quad (i, j = 1, 2, \dots, m)$$

(4)

b. 将模糊一致矩阵  $A$  的每一列向量归一化,得

$$\tilde{w}_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}}$$

(5)

c. 对  $\tilde{w}_{ij}$ 按行求和,即

$$\tilde{w}_i = \sum_{j=1}^n \tilde{w}_{ij} \quad \tilde{w} = (\tilde{w}_1, \tilde{w}_2, \dots, \tilde{w}_m)^T$$

(6)

d. 计算归一化的诊断指标权重系数向量集

$$w = (w_1, w_2, \dots, w_m)^T \quad w_i = \tilde{w}_i / \sum_{i=1}^m \tilde{w}_i$$

(7)

1.3.5 群组决策处理

水闸工程进行健康综合诊断时,与会的专家人数按照规定必须有 5~11 人.对同 1 个诊断指标层将获得多个判断矩阵,因此,有必要对多个决策(即群组决策)进行处理,采用的方法为排序向量的加权平均法.即可得权重系数向量集为  $w^{(k)}(k=1, 2, \dots, n)$  ( $k$  为与会的专家总人数),故该诊断指标层的权重系数向量集为  $w = \{w^{(k)}\}$ .

改进层次分析法既能满足判断思维过程的一致性要求,又不需要对矩阵进行一致性检验<sup>[12]</sup>,可直接通过数学转化后得到的模糊一致矩阵元素来计算诊断指标的权重系数.

2 权重系数融合方法

当水闸健康综合诊断某指标层的指标较多,或指标对水闸健康状况影响较为明显时,仅用一种方法难以得到较为合理的权重系数,因此,需要将多种方法确定的权重系数进行融合处理<sup>[13]</sup>.设采用  $K$  种方法确定水闸健康综合诊断指标  $i$  的权重系数,记对诊断指标  $i$  采用第  $k$  种方法确定的权重系数为  $W_{ki}(k=1, 2, \dots, K)$ .同时,假设融合权重系数中第  $k$  种方法的加权系数为  $\omega_k(k=1, 2, \dots, K)$ ,并且满足归一化约束条件:

$$\sum_{k=1}^K \omega_k = 1.$$

记诊断指标  $i$  的融合权重系数结果为  $W_i$ ,取最优化准则为

$$\min J_i = \sum_{k=1}^K \omega_k (W_i^p - W_{ki}^p)^2 \quad (p \neq 0)$$

(8)

即 
$$\frac{\partial J_i}{\partial W_i} = 0 \Rightarrow \sum_{k=1}^K 2\omega_k (W_i^p - W_{ki}^p) \times p W_i^{p-1} = 0 \quad (p \neq 0, W_i \neq 0) \Rightarrow W_i^p \sum_{k=1}^K \omega_k - \sum_{k=1}^K \omega_k W_{ki}^p = 0$$

由归一化约束条件式,推出融合权重系数的模型为

$$W_i = \left( \sum_{k=1}^K \omega_k W_{ki}^p \right)^{\frac{1}{p}}$$

(9)

式中: $K$ ——确定诊断指标权重系数的方法数目; $p$ ——模型的可调参数, $p \neq 0$ .不同  $p$  值对应的方法和模型见表 1.

3 实 例

某节制闸顶层指标为“稳定性”“抗渗稳定性”“抗震能力”“消能防冲能力”“过水能力”“混凝土结构”“闸门、启闭机”,设其权重集为  $A = \{\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5, \omega_6, \omega_7\}$ .采用层次分析法和专家调查研究法分别计算顶层指标权重系数.

层次分析法采用 1~9 标度,构造判断矩阵如式(10).

按层次分析法计算流程计算,  $C_R = C_1/R_1 = 0.079 < 0.1$ ,满足一致性检验,权重系数  $\omega_{\text{层}} = (0.552, 0.339, 0.129, 0.089, 0.714, 0.206, 0.058)$ .专家调查研究法确定权重系数  $\omega_{\text{专}} = (0.194, 0.177, 0.102, 0.092, 0.201, 0.163, 0.070)$ .认为这 2 种权

表 1 不同  $p$  值对应的权重系数融合方法和数学模型

| Table 1 Weight-syncretizing methods and mathematical models with different $p$ values |            |                                                              |
|---------------------------------------------------------------------------------------|------------|--------------------------------------------------------------|
| $p$ 值                                                                                 | 融合方法名称     | 数学模型                                                         |
| 1                                                                                     | 简单加权算术平均法  | $W_i = \sum_{k=1}^K \omega_k W_{ki}$                         |
| 2                                                                                     | 简单加权平方和平均法 | $W_i = \sqrt{\sum_{k=1}^K \omega_k W_{ki}^2}$                |
| 1/2                                                                                   | 简单架以平方根平均法 | $W_i = \left( \sum_{k=1}^K \omega_k \sqrt{W_{ki}} \right)^2$ |
| -1                                                                                    | 简单加权调和平均法  | $W_i = 1 / \sum_{k=1}^K \frac{\omega_k}{W_{ki}}$             |

$$R = \begin{bmatrix} 1.000 & 3.000 & 5.000 & 6.000 & 0.333 & 4.000 & 7.000 \\ 0.333 & 1.000 & 3.000 & 4.000 & 0.500 & 3.000 & 6.000 \\ 0.200 & 0.333 & 1.000 & 3.000 & 0.250 & 0.333 & 2.000 \\ 0.167 & 0.250 & 0.333 & 1.000 & 0.200 & 0.250 & 3.000 \\ 3.000 & 2.000 & 4.000 & 5.000 & 1.000 & 5.000 & 7.000 \\ 0.250 & 0.333 & 3.000 & 4.000 & 0.200 & 1.000 & 4.000 \\ 0.143 & 0.167 & 0.500 & 0.333 & 0.143 & 0.250 & 1.000 \end{bmatrix} \tag{10}$$

重系数确定方法具有同等重要性,采用简单加权平方和平均法确定融合权重系数,可调参数  $p = 2$ ,融合权重加权系数为  $1/2$ ,计算模型为

$$\omega = \sqrt{\omega_{\text{专}}^2/2 + \omega_{\text{层}}^2/2}$$

得该闸顶层指标融合权重系数为  $\omega = (0.423 \ 0.269 \ 0.108 \ 0.079 \ 0.539 \ 0.173 \ 0.054)$ .

4 结 论

水闸健康综合诊断的权重系数确定的方法很多,选择是否得当直接影响诊断结果.本文在分析水闸健康综合诊断权重系数确定方法的基础上,提出基于最优化准则,将多种方法确定的权重系数进行融合,得到某诊断指标的融合权重系数,避免了单一方法的缺点,可以更好地对水闸健康状况进行综合诊断.

参考文献：

[ 1 ] 郭亚军.综合评价理论与方法[ M ].北京:科学出版社,2002:3-10.  
[ 2 ] SAATY T L. Modeling unstructured decision problems-the theory of analytical hierarchies[ J ]. Math Comput Simulation ,1978 ,20 :147-158.  
[ 3 ] 吴中如,顾冲时.水工建筑物安全监控理论及其应用[ M ].南京:河海大学出版社,1990:175-190.  
[ 4 ] 乔润德.水闸、溢洪道老化病害评估的层次分析[ J ].安徽水利科技,199( 1 ):2-9.  
[ 5 ] 李荣钧.模糊群决策分析[ J ].华南理工大学学报:自然科学版,2002,3( 9 ):6-9.  
[ 6 ] SAATY T L. The analytic hierarchy process[ M ]. New York :McGraw Hill ,Inc ,1980.  
[ 7 ] 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.  
[ 8 ] 王中兴,李桥兴.依据主客观权重集成最终权重的一种方法[ J ].应用数学与计算数学学报,2006,20( 1 ):87-91.  
[ 9 ] 左军.层次分析法中判断矩阵的间接给出法[ J ].系统工程,1998,16( 6 ):56-63.  
[ 10 ] 赵文才.层次分析法中的连续标度方法[ J ].岱宗学刊,1997( 7 ):36-41.  
[ 11 ] 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.  
[ 12 ] 陶余会.如何构造模糊层次分析法中模糊一致判断矩阵[ J ].四川师范学院学报:自然科学版,2002,23( 3 ):282-285.  
[ 13 ] 张琳琳.重大水工混凝土结构健康诊断综合分析理论和方法[ D ].南京:河海大学,2003.

Method for determining weight coefficients of sluice health comprehensive diagnosis

CAO Qiu-lin<sup>1,2</sup>, WU Zhong-ru<sup>1</sup>

( 1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China ;  
2. College of Hydraulic Science and Engineering , Yangzhou University , Yangzhou 225009 , China )

**Abstract** : The multi-hierarchy comprehensive diagnosis index system for sluice health was established to diagnose the health status of a sluice. It is necessary to determine the relative importance ( weight coefficient ) of each lower layer diagnosis index influencing the upper layer index with proper methods. Then , the health status of a sluice is diagnosed gradually according to the lower layer weight coefficients and diagnosis results. The determination of weight coefficients is a core issue in the comprehensive diagnosis of sluice health. The methods of determining the weight coefficients of sluice health diagnosis were analyzed , and the analytic hierarchy process ( AHP ) and the improved AHP considering group decision-making were emphatically analyzed. A weight-syncretizing method was proposed based on the optimization criteria. A case study shows that more reasonable weight coefficients can be obtained by syncretizing the weight coefficients determined from different methods , so as to better diagnose health status of a sluice.

**Key words** : sluice ; health diagnosis ; weight ; analytic hierarchy process ( AHP ) ; syncretism