

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2013.02.013

小型水电站引水建筑物模糊综合安全评价

戴双喜^{1,2}, 蔡新^{1,2,3}, 徐锦才⁴, 舒静⁴, 李益^{1,2}

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学力学与材料学院, 江苏 南京 210098; 3. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 4. 水利部农村电气化研究所, 浙江 杭州 310012)

摘要:针对小型水电站(简称小水电)引水建筑物的特点,根据安全评价指标构建原则,提出由安全性、适用性和耐久性3个子目标及其指标集组成的引水建筑物安全评价体系。为有效挖掘引水建筑物安全评价体系中主、客观评价信息,克服传统赋权法的不足,引入基于指标重要性分值与传递熵相结合的融合权重。在对模糊理论中隶属函数的确定、模糊评价结果的集化等模糊综合安全评价问题分析的基础上,建立小水电引水建筑物模糊综合安全评价模型,设计模糊综合评价流程。实例分析结果表明,小水电引水建筑物模糊综合安全评价方法可行、有效,具有通用性。

关键词:小水电;引水建筑物;模糊综合评价;模糊理论;传递熵

中图分类号:TV143+.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2013)02-0161-05

Fuzzy comprehensive safety evaluation of diversion structures at small hydropower stations

DAI Shuangxi^{1, 2}, CAI Xin^{1, 2, 3}, XU Jincai⁴, SHU Jing⁴, LI Yi^{1, 2}

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
4. National Research Institute for Rural Electrification, Hangzhou 310012, China)

Abstract: According to the characteristics of diversion structures at small hydropower stations, a diversion structure safety assessment system, composed of safety, applicability, and durability indicators, was developed based on the safety evaluation principles. In order to reveal the subjective and objective evaluation factors in the diversion structure and overcome the disadvantages of the conventional weighting method, a coupled weighting method consisting of the index importance value and transference entropy is introduced in this paper. Based on comprehensive analysis of the membership function determination and result evaluation in the fuzzy theory, a safety evaluation model and fuzzy evaluation procedures were established. Application examples show that the safety evaluation method proposed in this study is feasible, effective, and can be widely applied to safety management of small-sized hydropower stations.

Keywords: small hydropower; diversion structure; fuzzy comprehensive evaluation; fuzzy theory; transference entropy

小型水电站(简称小水电)作为一种清洁可再生能源的载体,在我国经济建设、社会发展和环境保护等方面效益显著。引水建筑物是小水电的重要组成部分,其安全运行是小水电发挥作用的前提。因此,小水电引水建筑物安全评价研究十分重要。

对当前水利工程安全评价而言,人们在现代大坝工程建设中已经意识到溃坝的潜在风险,将其融入设计准则、方法和施工质量控制中去^[1]。因此,对一座新建小水电的安全调研主要包括独立的设计复核和观测

资料分析。早期建设的小水电从设计到施工都难以保证质量,存在工程防洪标准低、工程建设不配套、工程质量差、抗震不达标、泄洪设施不健全等隐患。随着水电站运行时间延长,水电站各种设备不断老化造成水电站发电效率低,影响节能减排,且存在不同程度的安全隐患,威胁公共安全。与大坝安全评价相比,国内对小水电引水建筑物的安全评价研究较少,目前还没有建立一套较为完整的、针对小水电特点的引水建筑物安全评价系统^[2-4]。模糊综合评价法是一种以模糊数学为基础的定量评价方法,与传统方法相比,模糊综合评价法评价结果更符合客观实际,提供的信息更丰富。多级模糊综合评判能进一步减少主客观差异,使主观评价更准确。基于此,针对小水电引水建筑物特点,结合国内已有的水库大坝安全研究^[5-14],笔者提出小水电引水建筑物模糊综合安全评价方法。

1 模糊综合安全评价方法

1.1 引水建筑物模糊综合安全评价模型

设某小水电引水建筑物安全评价体系为 $\{x(l,i,k) \mid l=1 \sim L; i=1 \sim N_l; k=1 \sim K\}$,则该小水电引水建筑物模糊综合评价模型为

$$R = W' \circ R' = \sum_{l=1}^L (w'_l R'_l) = \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^{N_l} [w'_l (w''_{li} R''_{li})]$$

(1)

式中: L ——安全评价体系子目标数; N_l ——第 l 个子目标所含基础指标数; K ——安全等级; $R=(r_1,\cdots,r_K)$ ——总目标隶属度向量; $W'=(w'_1,\cdots,w'_L)$ —— L 个子目标的权重向量; $\circ$ ——模糊加权平均算子; $R'=[R'_1,\cdots,R'_L]$ —— l 个子目标的隶属度矩阵; w'_l ——第 l 个子目标相对于总目标的权重; $w''_{li} R''_{li}$ ——第 l 个子目标的隶属度向量; w''_{li} ——第 l 个子目标中第 i 个基础指标相对于该子目标的权重; $R''_{li}=[r''_{li1},\cdots,r''_{liK}]$ ——第 l 个子目标下第 i 个基础指标的隶属度向量, $r''_{lik}=\mu_{lik}(x_{li})$; r''_{lik} ——第 i 个基础指标隶属于第 k 个安全等级的隶属度; x_{li} ——第 l 个子目标下第 i 个基础指标的专家评分值。

为使评价的最终结果意义明确,需对 R 精确化或称为反模糊化,以确定总目标的安全级别。笔者采用重心法进行反模糊化计算,各评语等级区间的重心为: $q=(q_1,\cdots,q_K)$ 。则小水电引水建筑物的安全评价精确值为

$$Q_l = R \circ q^T = \sum_{k=1}^K r_k q_k$$

(2)

小水电引水建筑物安全评价是一个多层次、多指标结构体系。本文通过建筑物安全监测、水文观测和人工巡视检查,结合专家意见确定各指标的评分值,利用加权融合法为各评价指标赋权,最后提出了基于多级模糊综合评价的小水电引水建筑物安全综合评价方法,其流程如图1所示。

1.2 引水系统模糊综合安全评价模型

引水建筑物起着连结水库与发电系统的作用,且种类繁多、复杂。各引水建筑物形成一串联、弱联结系统,系统中任何一个节点的失效都可能影响水电站的安全运行。

小水电引水系统包含 T 个建筑物,按照小水电的功用得出各个引水建筑物的权重 w_t ,通过引水建筑物安全评价模型得出各引水建筑物的安全评价价值 Q_t ,则小水电引水系统模糊综合安全评价模型为

$$Q' = \sum_{t=1}^T (w_t Q_t)$$

$(t=1,2,\cdots,T)$

(3)

1.3 评价算法的隶属函数确定

隶属度的确定及隶属函数关系的选取需要符合客观规律,目前无法用理论来证明隶属函数选择效果的

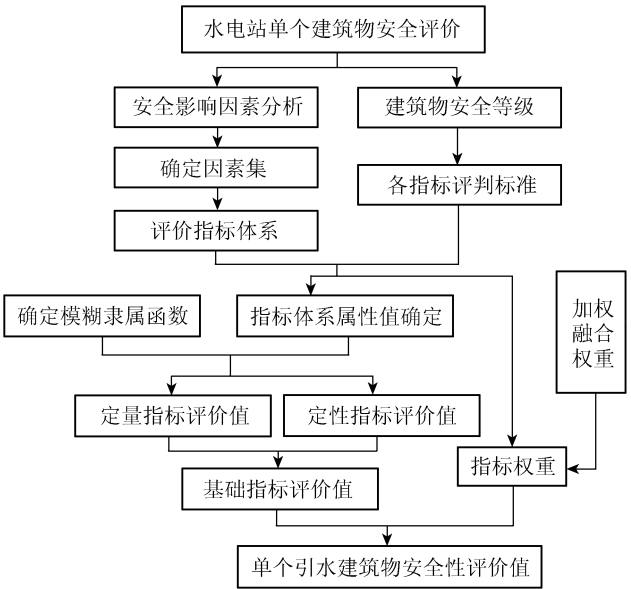


图1 小水电引水建筑物安全评价流程

Fig. 1 Flow chart of fuzzy comprehensive safety evaluation of diversion structures at small hydropower stations

好坏,因此根据专家实践经验,本文选取高斯型隶属函数确定指标隶属度^[15]:

$$\mu(x)=\exp\left[-\left(\frac{x-\alpha}{\sigma}\right)^2\right]$$

(4)

式中: α ——函数曲线中心; σ ——函数曲线陡度。确定各指标各安全等级的 α,σ 值,建立各指标各安全等级隶属函数,如图 2 所示。

2 小水电引水建筑物安全评价体系

2.1 指标体系建立

在对小水电安全检测信息整理、分析的基础上,根据水电站各类引水建筑物的设计规范、管理标准分析安全影响因素;针对小水电安全性概念的层次化和动态化等特点,采用定性和定量指标进行描述,确定安全评价指标;并根据安全评价指标体系构建原则,构建小水电引水建筑物安全评价指标体系^[16-19]。表 1 为引水建筑物中引水渠的安全评价指标体系。

2.2 引水建筑物安全评价等级

根据安全评价指标体系,结合水电专业多年的实际安全检测与评价经验,并参考文献[13],将安全等级分为{安全[100,80)、较安全[80,60)、较不安全[60,40)、不安全[40,0)}4 个等级($K=4$)。

2.3 引水建筑物安全评价指标权重

层次分析法确定权重时,采用 1~9 标度法构建成对比矩阵,由于标度判断差异不明显,使用中常出现成对比矩阵不满足一致性要求的问题;同时,受不完备信息、评价所需时间、个人偏好和对目标识别程度等不确定性因素的影响,专家构建的判别矩阵差别很大。为解决上述问题,并充分利用专家集体智慧,引入熵值法弥补单一主观权重的不足,采用基于指标重要性分值和熵值法的改进层次分析法来计算指标权重。

2.3.1 基于指标重要性分值的指标主观权重

为避免层次分析法中成对比矩阵不满足一致性要求的问题,按照文献[3]中的指标重要性分值标准组织专家对指标重要性进行评分。对指标重要性分值进行两两对比运算,构建指标成对比矩阵,进而根据层次分析法,确定指标权重向量 $w_s=(w_{s1},\cdots,w_{sN})$;综合所有专家给出的指标权重,得到指标权重矩阵 W_s 。

2.3.2 基于熵值法的专家自身权重

熵值法^[14]是根据评价对象的实际数据进行赋权的一种客观赋权法,借鉴传递熵的思想,用熵表示专家评价结果的不确定性和各专家的水平差异,建立基于熵的专家权重模型:

$$w_{om}=\frac{\frac{1}{H_m}}{\sum_{m=1}^M\frac{1}{H_m}}\quad(m=1,\cdots,M)$$

(5)

其中

$$H_m=\sum_{n=1}^N h_{mn}\quad(n=1,\cdots,N)$$

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

$$e_{mn}=1-\frac{|\alpha_{mn}-\bar{\alpha}_{mn}|}{\max\alpha_{mn}}$$

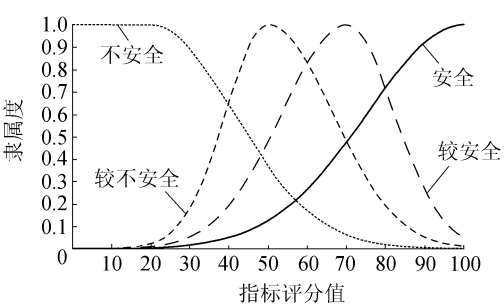


图 2 指标隶属函数

Fig. 2 Membership function of qualitative indices

表 1 引水渠安全评价指标价体系
Table. 1 Safety evaluation index system for flume

总指标	子指标	基础指标
引水渠	安全性	渠基稳定
		渠道边坡稳定
		潜在地质灾害
	适用性	引水渠差异沉降
		渗漏量
		渠内水质
	耐久性	渠上附属设施
		衬砌裂缝
		衬砌剥蚀
		规章制度
	安全检测	
	应急系统	

式中: w_{om} ——第 m 个专家在专家组中的权重; H_m ——专家评分的传递熵; M ——专家总数; N ——指标总数; e_{mn} ——反映第 m 个专家对第 n 个目标所做评价结论的水平; α_{mn} ——第 m 个专家对第 n 个目标的评分值。

2.3.3 加权融合权重

对基于指标重要性分值的指标主观权重向量 $\mathbf{W}_s$ 和基于熵值法的专家自身权重向量 $\mathbf{W}_0$ 进行加权融合,得出更为合理的评价指标权重向量 $\mathbf{W}=\mathbf{W}_s^T\mathbf{W}_0=(w_1,w_2,\cdots,w_N)$ 。

3 实例分析

建于1959年12月的浙江省某小水电是以发电为主的无压引水式水电站,拥有进水口、明渠(含渡槽)、日调节池、压力前池、压力钢管等引水建筑物。根据水利部农村电气化研究所的水电站检测资料,该水电站存在引水渠失修、压力管道老化锈蚀、安全生产制度不健全、对安全隐患排查治理力度不大等安全隐患。

组织6位专家根据现场调查情况对该水电站引水建筑物的指标重要性及基础指标进行评分。以该小水电引水系统中引水渠的安全评价为例,专家给出的各级指标重要性分值矩阵(f_1 为引水渠安全性指标下4个基础指标相对重要性的专家评分值, f_2 为引水渠适用性指标下3个基础指标相对重要性的专家评分值, f_3 为引水渠耐久性指标下5个基础指标相对重要性的专家评分值, f_4 为3个子目标相对重要性的专家评分值)以及引水渠基础指标的安全现状评价向量 $\mathbf{D}$ 分别为

$$f_1 = \begin{bmatrix} 90 & 95 & 90 & 85 & 85 & 80 \\ 80 & 80 & 90 & 80 & 90 & 85 \\ 85 & 90 & 85 & 75 & 80 & 85 \\ 75 & 70 & 75 & 85 & 65 & 60 \end{bmatrix}$$

$$f_2 = \begin{bmatrix} 85 & 80 & 75 & 80 & 85 & 80 \\ 60 & 50 & 55 & 75 & 45 & 60 \\ 65 & 60 & 65 & 65 & 65 & 50 \end{bmatrix}$$

$$f_3 = \begin{bmatrix} 85 & 80 & 80 & 80 & 80 & 75 \\ 80 & 80 & 75 & 75 & 85 & 70 \\ 65 & 70 & 50 & 65 & 75 & 60 \\ 80 & 75 & 75 & 80 & 65 & 65 \\ 60 & 55 & 80 & 55 & 50 & 45 \end{bmatrix}$$

$$f_4 = \begin{bmatrix} 80 & 95 & 90 & 95 & 90 & 90 \\ 75 & 70 & 65 & 75 & 70 & 85 \\ 55 & 45 & 45 & 45 & 45 & 45 \end{bmatrix}$$

$\mathbf{D}=(80,80,80,80,0.2\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{d}),70,80,2.5\text{ mm},70\text{ mm},50,45,40)$

由基于指标重要性及熵值法的指标权重确定方法,得出各评价指标权重如表2所示。

表2 引水渠各指标主观权重及专家自身权重计算结果

Table 2 Calculated results of subjective weight of indices and experts' own weight in flume

专家 编号	w_{si}												w_{om}
	安全性				适用性			耐久性					
	渠基 稳定	边坡 稳定	地质 灾害	差异 沉降	渗漏量	渠内 水质	附属 设施	衬砌 裂缝	衬砌 剥蚀	规章 制度	安全 检测	应急 系统	
A	0.272 7	0.242 4	0.257 6	0.227 3	0.404 8	0.285 7	0.309 5	0.229 7	0.216 2	0.175 7	0.216 2	0.162 2	0.381 0
B	0.283 6	0.238 8	0.268 7	0.209 0	0.421 1	0.263 2	0.315 8	0.222 2	0.222 2	0.194 4	0.208 3	0.152 8	0.175 2
C	0.264 7	0.264 7	0.250 0	0.220 6	0.384 6	0.282 1	0.333 3	0.222 2	0.208 3	0.138 9	0.208 3	0.222 2	0.120 4
D	0.261 5	0.246 2	0.230 8	0.261 5	0.363 6	0.340 9	0.295 5	0.225 4	0.211 3	0.183 1	0.225 4	0.154 9	0.111 1
E	0.265 6	0.281 3	0.250 0	0.203 1	0.435 9	0.230 8	0.333 3	0.225 4	0.239 4	0.211 3	0.183 1	0.140 8	0.093 4
F	0.258 1	0.274 2	0.274 2	0.193 5	0.421 1	0.315 8	0.263 2	0.238 1	0.222 2	0.190 5	0.206 3	0.142 9	0.119 0

由基础指标的安全评价向量 $\mathbf{D}$ 及其权重值,依据模糊综合安全评价方法,得出引水渠的安全等级隶属度向量 $\mathbf{R}=(0.3205,0.4193,0.1958,0.0711)$,取 $\mathbf{q}=(90,70,50,20)$,则该小水电引水渠安全评价精确值为 $Q=72.1311$,安全级别为较安全。同理,小水电引水系统中其他引水建筑的安全性见表3。

表3 电站各引水建筑物模糊综合安全评价计算结果

Table 3 Calculated results of fuzzy comprehensive safety evaluation of diversion structures

引水建筑物	隶属度				Q_i	安全等级	w_i
	安全	较安全	较不安全	不安全			
进水口	0.477 0	0.604 3	0.361 1	0.217 6	67.717 6	较安全	0.219 2
引水渠	0.320 5	0.419 3	0.195 8	0.071 1	72.131 1	较安全	0.219 2
日调节池	0.220 3	0.352 4	0.291 1	0.136 2	63.976 9	较安全	0.137 0
压力前池	0.182 6	0.411 6	0.324 6	0.104 7	63.892 0	较安全	0.164 4
压力钢管	0.278 8	0.434 7	0.217 4	0.069 1	70.558 0	较安全	0.260 3

根据引水系统安全模糊评价模型,该小水电引水系统的安全评价结果为

$$Q' = [67.7176 \ 72.1311 \ 63.9769 \ 63.8920 \ 70.5580] \circ [0.2192 \ 0.2192 \ 0.1370 \ 0.1644 \ 0.2603] = 68.28$$

根据安全等级评分区间,评定该小水电的引水系统安全级别为较安全,表示该小水电引水系统中各引水建筑物的实际工况和各种功能基本满足现行规范、规程、标准和设计的要求,可能影响引水建筑物的正常使用,需要进行安全性调查,准备采取安全对策。

4 结 语

针对小水电引水建筑物特点,提出由安全性、适用性和耐久性 3 个子系统及其评价指标组成的小水电引水建筑物安全评价指标体系;并借鉴传递熵的思想,提出基于指标重要性分值和熵值的改进层次分析法来计算指标权重;引入模糊理论,建立了小水电引水建筑物安全模糊综合评价模型;根据浙江省某小水电的实际运行情况,应用安全模糊综合评价模型对该水电站引水建筑物安全性进行了分析。结果表明,模糊综合安全评价方法可行、有效,具有通用性,可很好地应用于小水电安全管理中。

参考文献:

[1] SARKARIA G S,崔弘毅.老坝的安全评价[J].大坝与安全,2010(3):76-79. (SARKARIA G S, CUI Hongyi. Safety appraisal of old dams: an updated perspective[J]. Dam and Safety,2010(3):76-79. (in Chinese))

[2] 练继建,郑杨,司春棣.输水建筑物安全运行的模糊综合评价[J].水利水电技术,2007,38(3):62-64. (LIAN Jijian, ZHENG Yang, SI Chundi. Fuzzy comprehensive evaluation on safe operation of water conveyance structures[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2007,38(3):62-64. (in Chinese))

[3] 李益,蔡新,徐锦才,等.小水电水工建筑物健康诊断灰色理论模型[J].河海大学学报:自然科学版,2011,39(5):511-516. (LI Yi, CAI Xin, XU Jincan, et al. Grey system theory model of hydraulic structure health diagnosis for small hydropower stations[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2011,39(5):511-516. (in Chinese))

[4] 江超,盛金保.农村水电站水工建筑物运行状态综合评价模型研究[J].小水电,2010(2):75-77. (JIANG Chao, SHENG Jinbao. Study on comprehensive evaluation model of hydraulic structures operating status for rural hydropower stations[J]. Small Hydropower, 2010(2):75-77. (in Chinese))

[5] 吴中如.大坝的安全监控理论和试验技术[M].北京:中国水利水电出版社,2009.

[6] 李雷,王仁钟,盛金保,等.大坝风险评价与风险管理[M].北京:中国水利水电出版社,2006.

[7] 李洪煊,蔡新,徐锦才,等.考虑时变效应的水工金属结构安全风险评价模型[J].河海大学学报:自然科学版,2010,38(6):660-664. (LI Hongxuan, CAI Xin, XU Jincan, et al. Safety risk assessment model of hydraulic metal structurals considering time-varying effect[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2010,38(6):660-664. (in Chinese))

[8] 苏怀智,顾冲时,吴中如.大坝工作性态的模糊可拓评估模型及应用[J].岩土力学,2006,27(12):2115-2121. (SU Huaizhi, GU Chongshi, WU Zhongru. Assessment model of dam behavior with fuzzy extension theory and its application[J]. Rock and Soil Mechanics,2006,27(12):2115-2121. (in Chinese))

[9] 吴威,郭兴文,王德信,等.荆江大堤安全度模糊综合评判方法研究[J].河海大学学报:自然科学版,2008,36(2):224-228. (WU Wei, GUO Xingwen, WANG Dexin, et al. Fuzzy comprehensive method for evaluation of safety of Jingjiang dyke[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences,2008,36(2):224-228. (in Chinese))

[10] 聂学军,顾冲时,严良平,等.自适应模糊系统在大坝安全监测故障诊断中的应用[J].河海大学学报:自然科学版,2005,33(4):395-398. (NIE Xuejun, GU Chongshi, YAN Liangping, et al. Application of adaptive fuzzy system to fault auto-diagnosis in dam safety monitoring[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2005,33(4):395-398. (in Chinese))

[11] YI Jiangang, CAI Xin, XU Jincan, et al. Hoist safety risk assessment model research[J]. Advanced Materials Research,2011,383/390:1225-1230.

[12] 王小群,张兴容.模糊评价数学模型在企业安全评价中的应用[J].工业安全与环保,2002,2(2):96-101. (WANG Xiaoqun, ZHANG Xingrong. The application of fuzzy mathematical evaluation model to safety estimation in enterprises[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2002,2(2):96-101. (in Chinese))

[13] 陈红.堤防工程安全评价方法研究[D].南京:河海大学,2004.

[14] 司春棣.引水工程安全保障体系研究[D].天津:天津大学,2007.

[15] 胡宝清.模糊系统与数学[M].北京:科学出版社,2010.

[16] DLT 5398—2007 水电站进水口设计规范[S].

[17] SL 281—2003 水电站压力钢管设计规范[S].

[18] GB 50071—2002 小型水力发电站设计规范[S].

[19] DL/T 5079—1997 水电站引水渠道及前池设计规范[S].