排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2013 年 1 月 Jan. 2013 | 第 31 卷 第 1 期 Vol. 31 No. 1

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.2013.01.009

泵站建筑物遗传模糊安全评价模型

曹邱林，许文婷
（扬州大学水利科学与工程学院，江苏 扬州 225009）


曹邱林

摘要：为了更加准确地对泵站建筑物进行安全评价，利用标准遗传算法、层次分析法和模糊评价方法研究泵站建筑物的安全综合评价方法. 首先采用从定性到定量的综合集成的方法，结合专家知识、检测数据和各种信息，分析得到安全评价值从而建立模糊综合评价矩阵；然后利用标准遗传算法、层次分析法建立的遗传层次分析法确定评价指标的权重向量；最后利用模糊综合评价模型进行模糊合成，得到泵站建筑物的安全评价结果. 对临洪西泵站工程建筑物进行了安全综合评价，模糊综合评价结果向量 $\boldsymbol{S}$ 为(0.313 6,0.356 2,0.247 1,0.083 1)，根据最大隶属度原则，S_{max} 为 0.356 2 对应第 2 个评语，则综合评价结果为基本安全，属于二类建筑物. 结果表明：临洪西泵站工程建筑物总体上达到设计标准，满足安全运用的要求. 评价结果与通常方法评价结果一致，说明遗传模糊安全评价模型的可行性.

关键词：泵站建筑物；临洪西泵站；安全综合评价；遗传层次分析法；模糊综合评价模型
中图分类号：S277.9；TV6　**文献标志码**：A　**文章编号**：1674-8530(2013)01-0041-05

水利水电工程

Fuzzy comprehensive evaluation model for pumping station buildings based on GA-AHP

Cao Qiulin, *Xu Wenting*
(College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225009, China)

Abstract: A comprehensive method for evaluating pumping station buildings safety was studied by using the standard genetic algorithm (GA), analytic hierarchy process (AHP) and fuzzy evaluation method so as to assess the buildings more precisely. Firstly, the numerical values for evaluating pumping station buildings safety were obtained and then a fuzzy comprehensive evaluation matrix was established by using the comprehensive integration method from qualitative to quantitative and by considering expert knowledge, inspection data and all other information. Secondly, the weight vector to evaluate index was determined with the standard genetic algorithm and AHP. Finally, the fuzzy comprehensive evaluation model was generated, through which a result of pumping station buildings safety evaluation could be worked out. For the buildings in Linhong west pumping station, the fuzzy comprehensive evaluation resultant vector is $\boldsymbol{S}$ = (0.313 6, 0.356 2. 0.247 1, 0.083 1); according to the maximum membership degree principle, S_{max} is 0.356 2, which corresponds to the 2nd comment-safe basically, thus the buildings in that station fall into the 2nd Class. This suggests that the buildings of that station meet the design standards and the safety requirements for operation as a whole. This conclusion is consistent with the one obtained by using usual evaluation methods, indicating the fuzzy comprehensive evaluation model is feasible.

Key words: pumping station buildings; Linhong west pumping station; safety comprehensive evaluation; genetic algorithm-analytic hierarchy process; fuzzy comprehensive evaluation model

收稿日期：2012-07-19
基金项目：江苏省教育厅指导性项目(10KJD570001)
作者简介：曹邱林(1965—)，男，江苏南通人，副教授(cqlshy@163.com)，主要从事水工建筑物安全评价研究.
许文婷(1986—)，女，江苏宿迁人，硕士研究生(xuwenting8671@163.com)，主要从事水工建筑物安全评价研究.

目前,我国大型灌排泵站由于设计标准低、运行时间长、管理不到位等多方面的原因,普遍存在建筑物和设备老化、年久失修、功能减退、效益衰减等突出问题,严重影响着泵站的安全[1]. 为了能够保证泵站的安全运行,发挥其效益,因此有必要对泵站进行安全综合评价. 而目前对大型泵站安全综合评价的常规评价方法偏向于经典数学方法,很难结合或利用专家在系统评价和判断过程中所蕴含的经验、知识和智慧[2].

文中在研究遗传算法、层次分析法、模糊数学方法等智能方法的基础上,提出基于遗传层次分析法的泵站建筑物模糊综合评价模型;并以临洪西泵站建筑物安全状态为例,应用该评价模型进行安全综合评价.

1 评价体系的建立

要对泵站建筑物进行安全综合评价,需建立一套完整的综合评价体系. 其中评价指标的拟定是否恰当,直接关系到评价结果是否准确、可靠. 评价指标不是越多越好,也不是越少越好. 应将尽量少的、主要的、具有代表性的评价指标用于安全综合评价中[3]. 根据《泵站安全鉴定规程》(SL 316—2004)与《泵站设计规范》(GB 50265—2010)等有关标准,确定泵站建筑物的安全综合评价指标体系层次结构.

泵站建筑物安全状态评价目标下一般包括站身稳定、进水闸墩、出水闸墩、站身混凝土结构、上游翼墙和下游翼墙等一级评价指标. 这些一级评价指标又包括抗滑稳定、地基承载力、地基应力不均匀系数、抗渗稳定、抗浮稳定、混凝土强度等级、碳化深度、保护层厚度和结构病害等二级评价指标. 部分二级指标下又包括三级指标. 具体的泵站建筑物安全综合评价指标体系层次结构如图1所示.

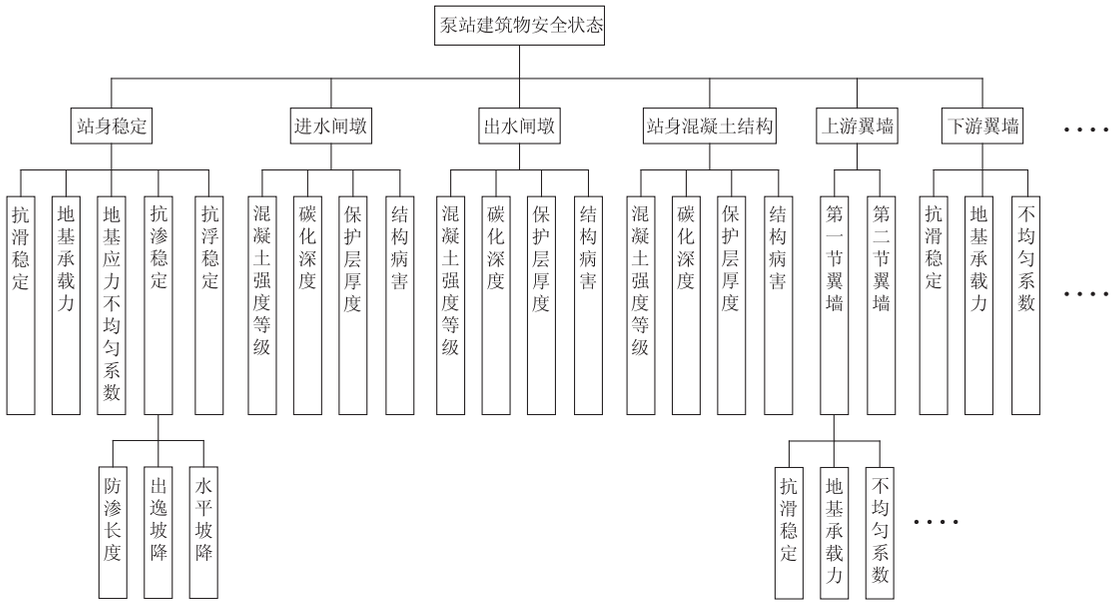


图1 影响泵站建筑物安全状态因素层次结构图

Fig. 1 Level structure of factors influencing pumping station building safety state

2 基于遗传算法的权重系数确定方法

遗传算法[4]是一种基于生物遗传和进化机制的适合于复杂系统优化的自适应概率优化技术,为求解复杂系统优化问题提供了通用框架;它不依赖于问题具体的领域,对问题的种类有很强的鲁棒性,能够应用于许多学科. 遗传算法的基本思想是把1族随机生成的可行解的编码(字符串)作为父代群体,把适应度函数(目标函数或它的一种变换形式)作为父代个体适应环境能力的度量,经选择操作和杂交操作生成子代个体,后者再经变异操作,优胜劣汰;如此反复进化迭代,使个体的适应能力不断提高,优秀个体不断向优化问题的最优点逼近[5].

权重系数的确定是综合评价中的核心问题,它的合理与否直接关系到评价结果的可信程度. 目前在确定权重系数的方法中,层次分析法因是一种定性与定量分析相结合的多准则决策方法,而被广泛应用. 该法判断矩阵排序权值的最常用方法是特征

值法,把判断矩阵的最大特征根所对应的归一化特征向量作为排序权值,在权值计算时没有考虑判断矩阵的一致性条件,权值计算和判断矩阵的一致性检验是分开进行的,判断矩阵一旦确定,权值和一致性指标值就随之确定、无法改善,因此是一种“被动”方法[6].

为此,提出将判断矩阵的一致性问题归结为一个非线性优化问题,利用遗传算法检验判断矩阵一致性并同时计算层次分析中的排序权值,则可以很好地解决特征值法的不足[7],此法即为遗传层次分析法.

设某层各要素的单排序权值为 $w_k(k=1,2,\cdots,m)$,且满足 $w_k>0$ 和 $\sum_{k=1}^{m} w_k=1$. 根据一致性矩阵 $\boldsymbol{B}$ 的定义,理论上有

$$b_{ij}=w_i/w_j,\ i,j=1,2,\cdots,m. \tag{1}$$

于是有

$$\sum_{k=1}^{m}(b_{ik}w_k)=\sum_{k=1}^{m}(w_i/w_k)w_k=mw_i,i=1,2,\cdots,m, \tag{2}$$

$$\sum_{i=1}^{m}\left|\sum_{k=1}^{m}(b_{ik}w_k)-mw_i\right|=0. \tag{3}$$

显然,式(3)左端的值越小,则判断矩阵 $\boldsymbol{B}$ 的一致性程度就越高. 当式(3)成立时,则判断矩阵 $\boldsymbol{B}$ 具有完全的一致性. 基于此,某层各要素的单排序及其一致性检验问题可以归结为式(4)的优化问题.

$$\begin{cases}\min \mathrm{CIF}(m)=\sum_{i=1}^{m}\left|\sum_{k=1}^{m}(b_{ik}w_k)-mw_i\right|/m,\\ \text{s.t. } w_k>0,\ k=1,2,\cdots,m,\ \sum_{k=1}^{m}w_k=1,\end{cases} \tag{4}$$

式中:CIF(m)为一致性指标函数;$w_k(k=1,2,\cdots,m)$为优化变量;其余符号同前.

针对式(4)这一非线性优化问题,可编制 M 文件通过 Matlab 遗传算法工具箱实现问题的求解.

3　安全综合评价模型的构建

模糊综合评价方法是对受多种因素影响的事物作出全面评价的一种十分有效的多因素评价方法,其特点为评价结果不是绝对的肯定或否定,而是以 1 个模糊集合来表示[8].

将模糊综合评价方法用于大型泵站建筑物的安全综合评价,可以综合考虑影响泵站系统的诸多因素,根据各因素的重要程度和对它的评价结果,把原来的定性评价定量化,因此可较好地处理系统多因素、模糊性及主观判断等问题[9]. 模型构建步骤如下:

1) 步骤 1:确定评价因素集. 影响泵站建筑物安全状态 U 的主要因素如图 1 所示,第 1 级因素包括站身稳定、进水闸墩、出水闸墩、站身混凝土结构、上游翼墙和下游翼墙等 6 个因素,记为$\{U_1,U_2,U_3,U_4,U_5,U_6\}$. 再将第 1 级因素细分得第 2 级因素,例如站身稳定 $U_1=\{u_{11},u_{12},u_{13},u_{14},u_{15}\}=\{$抗滑稳定,地基承载力,地基应力不均匀系数,抗渗稳定,抗浮稳定$\}$,等等. 部分第 2 级因素还可再分得第 3 级因素,例如抗渗稳定 $u_{14}=\{u_{141},u_{142},u_{143}\}=\{$防渗长度,出逸坡降,水平坡降$\}$. 故泵站建筑物安全综合评价模型为多因素多级模糊综合评价模型[2].

2) 步骤 2:确定评语集或评价等级集. 评语集是评价者对评价对象做出的各种评价结果所组成的集合,记作 V. 根据 SL 316—2004《泵站安全鉴定规程》,在泵站安全评估中,大多将泵站建筑物安全类别划分成 4 类,即一类建筑物、二类建筑物、三类建筑物、四类建筑物. 参照上述规范,将泵站建筑物安全评价各层评价指标和最终评价目标安全状况划分为“安全”、“基本安全”、“较安全”、“不安全”等 4 个等级,分别用符号 v_1,v_2,v_3,v_4 表示,则评语集或评价等级集为 $V=\{v_1,v_2,v_3,v_4\}=\{$安全,基本安全,较安全,不安全$\}$[2].

3) 步骤 3:建立模糊综合评价矩阵. 对于评价因素集中的每 1 个因素 $u_i(i=1,2,\cdots,m)$,分析其对于评价等级集 $v_j(j=1,2,\cdots,n)$ 的隶属度 r_{ij},得出第 i 个因素的单因素评价结果为 $r_i=r_{i1},r_{i2},\cdots,r_{in}$. 为了分析的需要,通常情况下,$r_{ij}>0$ 且将 r_i 进行归一化,即使 $\sum_{j=1}^{4} r_{ij}=1$. 对于 m 个因素,单因素评价结束后,将 r_i 作为第 i 行,形成 1 个综合了 m 个因素 n 个评价等级的模糊矩阵 $\boldsymbol{R}$[10].

$$\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n}\\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n}\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn}\end{bmatrix}. \tag{5}$$

4) 步骤 4:确定权重向量. 通常而言,反映被评价对象的因素之间并不是同等重要的,因此有必要根据因素对被评价对象的贡献程度给予相应的

权重.

应用遗传层次分析法确定评价因素之间的权重向量为

$$\boldsymbol{W}=(w_1,w_2,\cdots,w_m). \tag{6}$$

5）步骤5：进行模糊合成. 在模糊矩阵和权重向量已经确定的基础上，用权重向量对矩阵进行综合，即可得到被评价对象对各评价等级的隶属程度. 记模糊综合评价结果向量 $\boldsymbol{S}=(s_1,s_2,\cdots,s_n)$，根据前面的叙述，$\boldsymbol{S}$ 是由模糊矩阵 $\boldsymbol{R}$ 和权重向量 $\boldsymbol{W}$ 通过模糊运算所得：

$$\boldsymbol{S}=\boldsymbol{W}\circ\boldsymbol{R}, \tag{7}$$

式中：∘为模糊算子符号，类似于矩阵乘积.

式(7)是单级模糊综合评价模型. 对多因素多层次系统的综合评价方法是，首先按最低层次的各个因素进行评价，然后再按上1层次的各因素进行综合评价；依次向更上1层评价，直到最高层次，得出总的综合评价结果.

4 工程应用

4.1 工程概况

临洪西泵站位于连云港市北郊10 km处的301国道北侧、临洪闸下游西堤800 m乌龙河下游入临洪河口处，距入海口12 km. 临洪西泵站于1976年12月动工兴建，1979年7月建成投产，是一座大(二)型泵站. 主要作用是解决新沭河扩大行洪7 000 m^3/s后沭南地区的洪涝矛盾，排除原属于乌龙河流域的197 km^2范围内五年一遇的内涝，确保4×10^4 hm^2农田不受灾. 加固改造前的泵站建筑物主要存在的问题：部分构件强度复核不能满足设计要求，上部框排架梁板柱结构混凝土碳化严重、胀裂、钢筋锈蚀等.

4.2 确定模糊综合评价矩阵和权重向量

根据工程实际和专家评价确定模糊综合评价矩阵. 二级指标模糊综合评价矩阵为

$$\boldsymbol{R}_1=\begin{bmatrix}1.000 & 0 & 0 & 0\\ 1.000 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0.963 & 0.037 & 0\\ 0.867 & 0.133 & 0 & 0\\ 1.000 & 0 & 0 & 0\end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{R}_2=\begin{bmatrix}0 & 0 & 0.613 & 0.387\\ 0 & 0.952 & 0.048 & 0\\ 0 & 0.923 & 0.077 & 0\\ 0 & 0.767 & 0.233 & 0\end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{R}_3=\begin{bmatrix}0 & 0.467 & 0.533 & 0\\ 0 & 0.286 & 0.714 & 0\\ 0 & 0 & 0.822 & 0.178\\ 0 & 0.933 & 0.067 & 0\end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{R}_4=\begin{bmatrix}0 & 0.985 & 0.015 & 0\\ 0 & 0 & 0.857 & 0.143\\ 1.000 & 0 & 0 & 0\\ 0.267 & 0.733 & 0 & 0\end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{R}_5=\begin{bmatrix}0.372 & 0.087 & 0.293 & 0.248\\ 0.345 & 0.114 & 0.288 & 0.253\end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{R}_6=\begin{bmatrix}0 & 0 & 0.583 & 0.418\\ 0.927 & 0.073 & 0 & 0\\ 0.800 & 0.200 & 0 & 0\end{bmatrix}.$$

用遗传层次分析法(genetic algorithm-analytic hierarchy process，GA-AHP)赋权方法来确定各级指标相对于上1级指标的权重值. 首先建立适应度函数M文件；第2步设置遗传参数，包括种群类型、种群尺度、适应度测量、算子设置等；第3步使用Matlab遗传算法工具箱求解.

二级指标的权重向量为

$\boldsymbol{W}_1=(0.298\,1,0.298\,1,0.158\,1,0.158\,1,0.087\,5)$，

$\boldsymbol{W}_2=(0.456\,0,0.263\,1,0.140\,4,0.140\,4)$，

$\boldsymbol{W}_3=(0.456\,0,0.263\,1,0.140\,4,0.140\,4)$，

$\boldsymbol{W}_4=(0.456\,0,0.263\,1,0.140\,4,0.140\,4)$，

$\boldsymbol{W}_5=(0.500\,0,0.500\,0)$，

$\boldsymbol{W}_6=(0.541\,0,0.296\,6,0.162\,4)$；

一级指标的权重向量为

$\boldsymbol{W}=(0.311\,2,0.170\,3,0.170\,3,0.170\,3,0.089\,5,0.089\,5)$.

4.3 模糊综合评价

利用式(7)计算得到评判向量为

$$\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix}w_1\circ R_1\\ w_2\circ R_2\\ w_3\circ R_3\\ w_4\circ R_4\\ w_5\circ R_5\\ w_6\circ R_6\end{bmatrix}=$$

$$\begin{bmatrix}0.820\,8 & 0.173\,3 & 0.005\,8 & 0\\ 0 & 0.487\,7 & 0.335\,7 & 0.176\,5\\ 0 & 0.419\,2 & 0.555\,7 & 0.025\,0\\ 0.177\,9 & 0.552\,1 & 0.232\,3 & 0.037\,6\\ 0.358\,5 & 0.100\,5 & 0.290\,5 & 0.250\,5\\ 0.404\,9 & 0.054\,1 & 0.315\,4 & 0.226\,1\end{bmatrix},$$

$\boldsymbol{S} = \boldsymbol{W} \circ \boldsymbol{R} = [0.313\ 6, 0.356\ 2, 0.247\ 1, 0.083\ 1]$.

根据最大隶属度原则,由 $S_{max} = 0.356\ 2$ 对应第 2 个评语,因此,临洪西泵站的建筑物安全状态被综合评价为基本安全,即属于二类建筑物,说明临洪西泵站工程建筑物总体上达到设计标准,结构完整,技术状态完好,无影响安全运行的缺陷,满足安全运用的要求.

5　结　论

泵站建筑物遗传模糊安全评价模型将遗传算法和模糊综合评价法相融合,应用到泵站建筑物的安全评价模型中,较好地解决了检验判断矩阵一致性和系统多因素、模糊性等问题,有利于为泵站工程的改造和主管部门的决策提供正确的评估依据和参考指标,具有较高的研究价值和较为广阔的实用前景.

将该评价模型应用于临洪西泵站的安全评价,确定该泵站属于二类建筑物,技术状态完好,无影响安全运行的缺陷,满足安全运用的要求. 结论与实际情况基本一致.

参考文献(References)

[1] 陈坚,李琪,许建中,等. 中国泵站工程现状及"十一五"期间泵站更新改造任务[J]. 水利水电科技进展,2008,28(2):84 - 88.
Chen Jian, Li Qi, Xu Jianzhong, et al. Current status of pump stations in China and their renovation and rebuilding according to the 11th Five-Year Plan[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2008, 28(2):84 - 88. (in Chinese)

[2] 曹邱林,李贝. 大中型泵站安全评价权重融合方法研究[J]. 水电能源科学,2011,29(7):105 - 107.
Cao Qiulin, Li Bei. Research on weighted fusion method of safety evaluation for large and medium-sized pumping stations[J]. Water Resources and Power, 2011, 29(7):105 - 107. (in Chinese)

[3] Estes Allen C, Frangopol Dan M, Foltz Stuart D. Updating reliability of steel miter gates on locks and dams using visual inspection results[J]. Engineering Structures, 2004,26(3):319 - 333.

[4] 金菊良,魏一鸣. 复杂系统广义智能评价方法与应用[M]. 北京:科学出版社,2007.

[5] Xiao Chun, Shao Dongguo, Yang Fengshun. An integrated model for water resources allocation in the river basin based on different allocation principles[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 212/213: 113 - 116.

[6] Cao Qiulin, Wang Xinghua. An appliateion of fuzzy fault tree analysis for large and medium-sized pumping stations[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012,170/171/172/173:1977 - 1982.

[7] Yun Ruan. Comparative analysis of genetic algorithms and particle swarm optimization algorithms for optimal reservoir operation[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011,90/91/92/93:2727 - 2733.

[8] 包志炎,肖刚,高飞,等. 基于实例推理的个性化产品评价方法[J]. 农业机械学报, 2011,42(9):197 - 201.
Bao Zhiyan, Xiao Gang, Gao Fei, et al. Evaluation method of individualized products based on case reasoning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(9):197 - 201. (in Chinese)

[9] Suzuki T, Ohtsu M. Quantitative damage evaluation of structural concrete by a compression test based on AE rate process analysis[J]. Construction and Building Material, 2004,18(3):197 - 202.

[10] 仇锦先, 程吉林, 张仁田,等. 基于 DPSA 传统分解聚合模型的并联泵站优化[J]. 排灌机械工程学报, 2011,29(6):497 - 502.
Qiu Jinxian, Cheng Jilin, Zhang Rentian, et al. Application of traditional decomposition-amalgamation method based on DPSA in optimal regulation of parallel pumping stations[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011,29(6):497 - 502. (in Chinese)

(责任编辑　张文涛)