基于多目标系统模糊决策理论的污水库坝防渗方案优选

陈永贵[1]，张可能[2]，周　罕[3]

（1. 长沙理工大学岩土工程研究所，湖南 长沙 410076；2. 中南大学地学与环境工程学院，湖南 长沙 410083；3. 昆明理工大学建筑工程学院，云南 昆明 650224）

摘　要：从多目标系统模糊决策基本理论出发，根据酸性污水库坝防渗加固工程的要求，选择治理可靠性、安全性、工程投资、施工工期、施工难易程度以及对环境的影响等六个指标，建立了防渗加固方案优选的评价体系；根据工程评价特点，采用变异系数法和专家调查法相结合的方法确定评价指标的权重，构造出酸性污水库坝防渗加固方案优选的决策与评价模型。利用该模型对矿山酸性污水库坝的防渗加固方案进行多目标优选决策，所得结果与实际建设一致，表明了该方法的可行性和有效性。

关键词：模糊数学；决策；酸性污水库；坝；防渗；优选

作者简介：陈永贵(1976－)，男，博士，副教授，主要从事环境岩土工程、注浆加固与防渗技术方面的研究。

0　引　　言

目前全国病险水库约3万座，占水库总数的36%，其中大中型水库的病险率接近30%，小型水库的病险率更高[1]。近年来，国家积极开展了以病险水库除险加固为主的水工程治理工作，国内外亦有许多学者对此进行了深入研究[2-7]，它是一项综合性很强的系统工程。防渗体系的优劣将直接影响到整个工程的成败。在实际工程中，往往同时有几个方案可供选择，这时就有必要对它们进行对比分析和评价，从中选出最优方案。对水库防渗加固方案的确定应考虑坝体的特点、地质条件、施工条件、治理效果及工程投资等诸多因素。如果用单一的目标进行评价和方案选择，有失客观性。

本文根据矿山酸性污水库坝的渗漏特点和治理需要，建立了防渗加固方案优选的综合评价指标体系；根据工程评价特点，采用变异系数法和专家调查法相结合的方法综合确定评价指标的权重，引入模糊数学决策理论[8-10]，建立了污水库坝防渗加固方案优选的决策与评价模型，并通过实例分析验证了该方法的合理性和有效性，为污水库坝防渗加固方案的综合优化决策，提供了一条新的途径。

1　评价指标体系的选择

1.1　多目标系统模糊优选原理

由模糊数学理论，多目标系统模糊决策可用 $A \cdot R=T$ 模式进行描述。其中，A 为输入的参评因子权重集；R 为模糊变换器，即由各单因子评价行矩阵组成 $m \times n$ 阶模糊关系矩阵（n 为评价级别数），T 为输出，即综合评价结果。

因此，多目标系统的模糊决策过程就是对拟评判的对象选定一些主要因素，首先通过两两比较建立方案论域上的模糊优先关系矩阵，并将定性指标转化为定量指标，构成模糊一致关系矩阵 R，再考虑诸因素在总评判中的地位（即权重集 A），求取 R 和 A 的合成过程。得到整体优属度 T 后，可以对各方案进行比较排序，从而筛选出合理、可行的方案。

1.2　防渗方案优选评价指标体系

影响防渗方案选择的因素众多，在各影响因素中，影响程度也有很大的差异。对于矿山酸性污水库坝的渗漏治理，由于它在规模大小、施工条件、工程投资和对环境的影响等诸多方面与一般的水利工程大坝防渗有所不同。因此，在进行防渗方案选择影响因素分析及建立评价指标体系时，应选择那些对方案影响较明显的评价因素，突出主要指标，略去次要的、影响小的因素，而且选择的指标因素应具有普遍性和可操作性。

根据污水库坝自身的特点，通过查阅相关资料、现场调查并征求专家意见，建立酸性污水库坝优选综合评价指标体系见图1，指标集表达为：$U=\{U_1, U_2, U_3, U_4, U_5, U_6\}$={治理可靠性，安全性，工程投资，施工工期，施工难易程度，对环境的影响}。

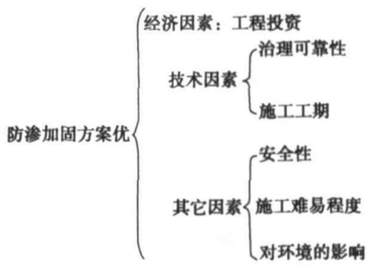


图1 综合评价指标体系

2　数学模型的建立

设可选择的决策方案数量集：

$P=(P_1, P_2, \ldots, P_m)$，

$i=1, 2, \ldots, m$；m 为决策总数。

基金项目：教育部高等学校骨干教师资助计划项目（教技司[2000]65号）

收稿日期：2006－07－30

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

设优选系统有 n 个综合评价指标组成对数量集 P 的评价指标集 U：

$U=\{U_1, U_2, \ldots, U_n\}$，

n 为评价指标总数。

2.1 构造模糊判断矩阵

模糊判断矩阵 B 是方案论域 $P=\{P_1, P_2, \ldots, P_m\}$ 上的一个 m 阶矩阵 $B=(b_{ij})_{m\times m}$。其中 b_{ij}^k 表示在目标下 U_k，方案 P_i 优于方案 P_j 的程度。矩阵元素 b_{ij} 则可按下述方法确定

$$b_{ij}\begin{cases}1, & \text{表示}P_i\text{优于}P_j,\\ 0.5, & \text{表示}P_i\text{优于}P_j,\\ 0, & \text{表示}P_i\text{优于}P_j。\end{cases}$$

则由此建立模糊判断矩阵为

$$B_k\begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1m}\\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2m}\\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots\\ b_{m1} & b_{m2} & \cdots & b_{mm}\end{bmatrix}_{m\times m}，(k=1, 2, \ldots, N)。$$

2.2 构成模糊一致矩阵

其具体方法如下[11]：

首先对模糊判断矩阵 $B_k=(b_{ij}^k)_{m\times m}$ 按行求和，记为：$r_i=\sum b_{ij}^k$，$(i=1, 2, \ldots, m)$。

并施之如下数学变换

$$r_{ij}^k=\frac{r_i-r_j}{2m}+0.5。$$

则由此建立的矩阵 $R_k=(r_{ij}^k)_{m\times m}$ 是模糊一致的

$$R_k\begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1m}\\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2m}\\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots\\ b_{m1} & b_{m2} & \cdots & b_{mm}\end{bmatrix}_{m\times m}。$$

2.3 建立多目标相对优属度矩阵

根据模糊一致矩阵 $R_k=(r_{ij}^k)_{m\times m}$，运用方根法计算多目标相对优属度矩阵 S 中的元素，即方案 P_i 在目标 U_k 下的相对优属度 S_i^k [12]

$$S_i^k=\frac{\overline{S}_i}{\sum_{i=1}^{m}\overline{S}_i},$$

$$\overline{S}_i=(\prod_{i=1}^{m}r_{ij}^k)^{\frac{1}{m}}，(j=1, 2, \ldots, m)。$$

2.4 多目标总排序

权向量取为 $A=(a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6)$，则加权后的决策矩阵为

$$T=S\cdot A^T=(S_{ij})_{m\times n}\cdot(a)_{1\times n},$$

$$T_i=\sum_{k=1}^{n}a_kS_i^k。$$

按 T_i 大小对各方案进行比较，得到最优方案。

3 实例分析

3.1 工程地质概况

永平铜矿南部 10 号污水坝设计为一粘土斜墙防渗的土石坝，迎水面采用块石护坡，坝高 26 m，坝顶高程 130 m，沟底高程 104 m，蓄水高程 126.22 m，设计洪水位 127.5 m，坝轴线长 160 m。从观测到的渗流现象来看，大坝存在的主要问题有 3 个方面：一是坝体、坝肩渗漏；二是坝基渗流；三是粘土防渗斜墙失效和反滤层堵塞。场地工程地质情况为：

(1) 坝壳填土以碎石质亚粘土为主，碎石含量约占 20%，平均渗透系数 2.0×10^{-4} cm/s。

(2) 坝基岩石为震旦－寒武系混合岩。强风化混合岩主要分布在两侧坝基，厚度 4.7～13.8 m，平均渗透系数 4.7×10^{-4} cm/s；中风化混合岩裂隙发育，厚度 2.0～4.3 m，平均渗透系数 2.7×10^{-4} cm/s；微风化地层的平均渗透系数 1.0×10^{-4} cm/s。

(3) 防渗斜墙填土为黄红色粘土，密实度为 78.34%，平均渗透系数为 3.6×10^{-5} cm/s。

(4) 反滤层由砂和砂砾石填筑，棱体被堵塞，反滤体透水性不好，导渗效果较差。

3.2 拟采用的防渗加固方案

根据场区的工程地质和水文地质条件，从坝高、坝体安全性、施工可行性以及对下游居民的影响等方面综合考虑，拟采用如下方案：方案一（P_1）：粘土铺盖＋静压注浆；方案二（P_2）：深层搅拌桩；方案三（P_3）：高压摆喷＋静压注浆；方案四（P_4）：深孔注浆。根据调查所得数据及相关资料得出各个指标因素的逻辑评语集，见表 1。

表 1 各加固方案的逻辑评语

防渗加固方案影响因素	粘土铺盖＋静压注浆(P_1)	深层搅拌桩(P_2)	高压摆喷＋静压注浆(P_3)	深孔注浆(P_4)
治理可靠性(U_1)	高	较高	很高	较高
安全性(U_2)	很高	很高	很高	高
工程投资(U_3)	高	低	一般	高
施工工期(U_4)	较长	长	短	长
施工难易程度(U_5)	容易	一般	容易	难
对环境的影响(U_6)	很大	一般	小	大

3.3 建立模糊判断矩阵

该污水坝拟采用 4 种防渗加固方案 P_i（$i=1, 2, 3, 4$）在 6 个目标 U_k（$k=1, 2, \ldots, 6$）下进行多目标决策方案优选，通过对表 2 进行比较，建立 6 个模糊判断矩阵：

$$B_1=\begin{bmatrix}0.5 & 1.0 & 0 & 1.0\\ 0 & 0.5 & 0 & 0.5\\ 1.0 & 1.0 & 0.5 & 1.0\\ 0 & 0.5 & 0 & 0.5\end{bmatrix},\quad B_2=\begin{bmatrix}0.5 & 0.5 & 0.5 & 1.0\\ 0.5 & 0.5 & 0.5 & 1.0\\ 0.5 & 0.5 & 0.5 & 1.0\\ 0 & 0 & 0 & 0.5\end{bmatrix},$$

$$B_3=\begin{bmatrix}0.5 & 0 & 0 & 0.5\\ 1.0 & 0.5 & 1.0 & 1.0\\ 1.0 & 0 & 0.5 & 1.0\\ 0.5 & 0 & 0 & 0.5\end{bmatrix},\quad B_4=\begin{bmatrix}0.5 & 1.0 & 0 & 1.0\\ 0 & 0.5 & 0 & 0.5\\ 1.0 & 1.0 & 0.5 & 1.0\\ 0 & 0.5 & 0 & 0.5\end{bmatrix},$$

$$B_5=\begin{bmatrix}0.5 & 1.0 & 0.5 & 1.0\\ 0 & 0.5 & 0 & 1.0\\ 0.5 & 1.0 & 0.5 & 1.0\\ 0 & 0 & 0 & 0.5\end{bmatrix},\quad B_6=\begin{bmatrix}0.5 & 0 & 0 & 0\\ 1.0 & 0.5 & 0 & 1.0\\ 1.0 & 1.0 & 0.5 & 1.0\\ 1.0 & 0 & 0 & 0.5\end{bmatrix}。$$

3.4 构成模糊一致矩阵

利用前述算法将模糊判断矩阵 B_k 构成 6 个模糊一致矩

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$R_1=\begin{bmatrix}0.5 & 0.6875 & 0.375 & 0.6875\\ 0.3125 & 0.5 & 0.1875 & 0.5\\ 0.625 & 0.8125 & 0.5 & 0.8125\\ 0.3125 & 0.5 & 0.1875 & 0.5\end{bmatrix},\quad R_2=\begin{bmatrix}0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.75\\ 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.75\\ 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.75\\ 0.25 & 0.25 & 0.25 & 0.5\end{bmatrix},$$

$$R_3=\begin{bmatrix}0.5 & 0.1875 & 0.3125 & 0.5\\ 0.8125 & 0.5 & 0.625 & 0.8125\\ 0.6875 & 0.375 & 0.5 & 0.6875\\ 0.5 & 0.1875 & 0.3125 & 0.5\end{bmatrix},\quad R_4=\begin{bmatrix}0.5 & 0.6875 & 0.375 & 0.6875\\ 0.3125 & 0.5 & 0.1875 & 0.5\\ 0.625 & 0.8125 & 0.5 & 0.8125\\ 0.3125 & 0.5 & 0.1875 & 0.5\end{bmatrix},$$

$$R_5=\begin{bmatrix}0.5 & 0.6875 & 0.5 & 0.8125\\ 0.3125 & 0.5 & 0.3125 & 0.625\\ 0.5 & 0.6875 & 0.5 & 0.8125\\ 0.1875 & 0.375 & 0.1875 & 0.5\end{bmatrix},\quad R_6=\begin{bmatrix}0.5 & 0.25 & 0.125 & 0.375\\ 0.75 & 0.5 & 0.375 & 0.625\\ 0.875 & 0.625 & 0.5 & 0.75\\ 0.625 & 0.375 & 0.25 & 0.5\end{bmatrix}。$$

3.5　建立多目标相对优属度矩阵

利用方根法计算各方案在目标 U_k 下的优属度，得到多目标相对优属度矩阵：

$$S=\begin{bmatrix}0.285 & 0.283 & 0.182 & 0.285 & 0.317 & 0.145\\ 0.182 & 0.283 & 0.352 & 0.182 & 0.217 & 0.285\\ 0.352 & 0.283 & 0.285 & 0.352 & 0.317 & 0.353\\ 0.182 & 0.152 & 0.182 & 0.182 & 0.148 & 0.217\end{bmatrix}。$$

3.6　各指标权重的确定及多目标总排序

指标权重是对每个指标在整个工程方案评价指标体系中的相对重要性的数量表示。权重确定合理与否对方案综合评价结果和评价质量将产生决定性的影响。本文根据污水库工程的特点，采用变异系数法和专家调查法相结合的方法确定评价指标的权重，基本步骤如下[13]：

(1) 求评价矩阵中第 k 个指标的均值 $\overline{r}_{ik}$ 和标准差 σ_i 及变异系数 E_i。

(2) 对 E_i 作归一化处理，求各指标的权重 ω_i：

$$\omega_i=\frac{E_i}{\sum_{i=1}^{N}E_i},\quad (i=1,\ 2,\ \ldots,\ N)。$$

(3) 求综合指标权重值。

将两种求权重的方法进行加权组合，设 ω_{1i} $(i=1,2,\ldots,N)$为第 i 项评价指标采用变异系数法得到的指标权重，ω_{2i} $(i=1,\ 2,\ \ldots,\ N)$为采用专家调查法得到的评价指标的权重，把这两种确定权重的方法相结合即可得到工程方案评价指标的综合权重。用加权求和的方法，可得综合指标权重为

$$\omega_i=\alpha\omega_{1i}+(1-\alpha)\omega_{2i},\quad (i=1,\ 2,\ \ldots,\ N)。$$

式中　$0\le\alpha\le1$。由式（4）可知，取不同的 α 值即可得到相应的指标权重；变异系数法和专家调查法分别为 $\alpha=1$ 和 $\alpha=0$ 的特殊情况。

通过调查、分析和统计计算，各影响因素的权重值见表 2。其各指标的权重集为 $A=(a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6)=(0.24,\ 0.12,\ 0.24,\ 0.20,\ 0.14,\ 0.006)$。

表 2　各影响因素及其权重

主要影响因素	治理可靠性	安全性	工程投资	施工工期	施工难易程度	对环境的影响
权重	0.24	0.12	0.24	0.20	0.14	0.06

利用 $T_i=\sum_{k=1}^{n}a_kS_i^k$ 计算出总体优属度为

$$T=S\cdot A^T=[0.256,0.246,0.323,0.175]^T。$$

4 个方案的排列顺序为：$T_3>T_1>T_2>T_4$，由此可知，最优的方案是方案三（高压摆喷＋静压注浆），该方案即为实际选用方案。

4　结　　论

(1) 本文根据污水库坝防渗加固工程的特点，建立了防渗加固方案优选的综合评价指标体系，构造出污水库坝防渗加固方案优选的决策与评价模型。

(2) 运用模糊数学方法计算时，权重的选择对计算结果影响很大，所以在选择各种影响因素的权重时，应广泛调查研究。本文采用变异系数法和专家调查法相结合的方法确定评价指标的权重，更趋科学合理。

(3) 结果表明：本文所建立的污水库坝防渗加固方案优选多目标系统模糊决策模型，层次清晰、理论严密、计算简便、结果客观可靠，说明了本研究的有效性和实用性。

参考文献：

[1] 刘　宁. 对中国水工程安全评价和隐患治理的认识[EB/OL]. 大坝安全与堤坝隐患探测国际学术研讨会，西安.

[2] 胡　强，余成学. 仙岭水库土坝渗流稳定分析及除险加固措施[J]. 岩土力学，2004，**25**(3)：168－171.

[3] 梁国钱，郑敏生，孙伯永，等. 土石坝渗流观测资料分析模型及方法[J]. 水利学报，2003，**34**(2)：85－89.

[4] 罗长军. 帷幕灌浆技术在既有土坝可溶岩坝基中的应用[J]. 岩石力学与工程学报，2004，**23**(22)：169－175.

[5] GHOBADI M H, KHANLARI G R, DJALALY H. Seepage problems in the right abutment of the Shahid Abbaspour dam, southern Iran [J]. Engineering Geology, 2005, **82**(2): 119－126.

[6] CHAI Jun-rui, LI Shou-yi. Analysis of seepage through dam foundation with closed system of grouting curtain, drainage and pumping measures[C]// Proceedings of the 4th International Conference on Dam Engineering-New Developments in Dam Engineering, 2004: 171－175.

[7] SEDAT T. Treatment of the seepage problems at the Kalecik dam (Turkey)[J]. Engineering Geology, 2003, **68**(3-4): 159－169.

[8] 陈守煜. 系统模糊决策理论与应用[M]. 大连：大连理工大学出版社，1994.

[9] 彭祖赠，孙韫玉. 模糊(Fuzzy)数学及其应用[M]. 武汉：武汉大学出版社，2003.

[10] 张　跃，邹寿平，宿　芬. 模糊数学方法及其应用[M]. 北京：煤炭工业出版社，1992.

[11] 侍克斌，白俊文，霍洪丽. 基于模糊层次分析法进行坝基防渗方案的优选[J]. 水力发电，2005，**31**(6)：26－28.

[12] 戴佑斌，张尚根，周早生，等. 模糊一致矩阵理论在地铁深基坑支护方案优选中的应用[J]. 岩土工程学报，2005，**27**(10)：1162－1165.

[13] 侯才水，刘华斌. 模糊多属性决策模型在某水电站工程方案优选中的应用[J]. 武汉大学学报(工学版)，2005，**38**(4)：25－27.

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net