

可变模糊集对立统一一定理在土石坝安全评价中的应用

刘亚莲, 胡建平

(广东水利电力职业技术学院, 广州 510635)

摘要: 应用可变模糊集对立统一一定理, 在分析土石坝安全影响因素的基础上, 参照大坝安全评价导则, 构建了大坝安全评价指标体系及其评价等级标准, 建立了基于可变模糊集对立统一一定理的土石坝安全评价模型。利用该模型对工程实例进行了分析, 并与集对分析方法得到的结果进行了比较。结果表明, 该模型评价结果与集对分析方法得到的结论一致, 但基于可变模糊集对立统一一定理的评价方法概念更清晰、计算更简便, 优于基于集对分析的土石坝安全评价方法。

关键词: 可变模糊集; 对立统一; 土石坝; 安全评价

中图分类号: TV 314 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672 1683(2013) 05-0155-04

Application of Opposite and Unity Theorem of Variable Fuzzy Sets in Evaluation of Dam Safety

LIU Ya lian, HU Jiann ping

(Guangdong Technical College of Water Resources and Electric Engineering, Guangdong 510635, China)

Abstract: The paper applies the opposite and unity theorem of variable fuzzy sets to develop a dam safety evaluation model with the establishment of the evaluation index system of dam safety and its classification criterion based on the analysis of influence factors of dam safety and evaluation guide rules of dam safety. The model was used to analyze the engineering samples and the evaluation results were compared with those obtained from the set pair analysis method. The results showed that the both methods generate similar conclusions, but the evaluation method based on the opposite and unity theorem of variable fuzzy sets is clearer and easier for calculation, and therefore it is better than the set pair analysis method in evaluation of dam safety.

Key words: variable fuzzy set; opposite and unity; earth rock dam; safety evaluation

土石坝因就地取材、施工技术简单、对地形地质条件要求低等优点, 而被广泛采用。据统计, 已建大坝中 90% 以上为土石坝。但是, 由于土石坝是由土、石等散粒体材料建筑而成, 加上当时施工时没有严格控制施工质量问题, 随着坝龄的增长, 相当一部分土石坝存在安全隐患。因此, 目前土石坝安全评价问题已成为水利工程领域研究的热点问题, 常用的评价方法有: 层次分析法^[1]、风险概率方法^[2]、可靠度理论分析方法^[3,4]、模糊层次分析法^[5]、模糊数学法^[6]、集对分析法^[7]等, 这些方法都能从某一方面对土石坝安全进行评价, 但各有局限性, 如: 层次分析法当指标过多时数据统计量大, 且权重难以确定, 因为层次分析法的两两比较是用 1 至 9 来说明其相对重要性, 如果有越来越多的指标, 对每两个指标之间的重要程度的判断可能就出现困难了, 甚至会对层次单排序和总排序的一致性产生影响, 使一致性检验不能通过; 而集对分析方法用同异反模糊联系度计算评价指标对于

各评价等级的相对隶属度, 进而定量化评定样本的安全类别, 因其将“同一”与“对立”看成确定的, 而将“差异”看成不确定的, 即“中介不确定性”, 此理论不符合中介值是确定的质量互变定理。基于此, 本文将陈守煜在文献[8,9]中提出的基于可变模糊集的对立统一一定理应用于土石坝安全评价中, 为土石坝安全评价提供一种新思路。

1 可变模糊集对立统一一定理简介

对立统一定理是唯物辩证法三大基本规律: 对立统一、质量互变、否定之否定之一^[8], 定理简要如下。

设论域上的一个模糊概念(现象、事物) \underline{A} , 对 U 中的任意元素 $u(u \in U)$, 在相对隶属函数的连续统数轴任一点上, u 对表示吸引属性 \underline{A} 的相对隶属度为 $\mu_{\underline{A}}(u)$, 表示排斥属性 \underline{A}^c 的相对隶属度为 $\mu_{\underline{A}^c}(u)$, $0 \leq \mu_{\underline{A}}(u) \leq 1, 0 \leq \mu_{\underline{A}^c}(u) \leq 1$ 。且

$$\mu_{\underline{A}}(u) + \mu_{\underline{A}^c}(u) = 1 \quad (1)$$

收稿日期: 2013-03-14 修回日期: 2013-08-16 网络出版时间: 2013-08-23
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20130823.1608.019.html>
基金项目: 广东省科技计划项目(2011B061300114)
作者简介: 刘亚莲(1966-), 女, 湖南桃江人, 教授, 博士, 主要从事水利水电工程与岩土工程研究。E-mail: liuyula306@163.com

如图 1 所示。

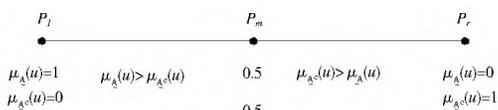


图 1 对立统一定理的连续统表示

Fig. 1 Representation of continuum in the opposite and unity theorem

事物或现象从 P_l 点 ($\mu_A(u) = 1, \mu_{Ac}(u) = 0$) 变化到 P_r 点 ($\mu_{Ac}(u) = 0, \mu_A(u) = 1$), 其间必经过中介点 P_m ($\mu_A(u) = \mu_{Ac}(u) = 0.5$)。 P_m 点称为渐变式质变点, 即对立统一矛盾性质的渐变式转化点, P_l 与 P_r 称为突变式质变点。

可变模糊集理论^[10-12]是在 1965 年 Zadeh 提出的静态模糊概念的基础上发展起来的, 它以相对差异函数、相对比例函数为基础, 用严密的数学理论表达了唯物辩证法三大基本定理——对立统一、质量互变、否定之否定定理。可变模糊集理论在水资源评价、水质评价、水库调度与防洪评价、灾情评价、径流预报、水利工程土地适用性评价等多指标、多属性、多级别评价中有广泛应用。土石坝安全评价也是属于多指标、多属性、多级别评价, 本文用可变模糊集理论对立统一定理对土石坝安全进行评价。

2 基于可变模糊集对立统一定理的土石坝安全综合评价

2.1 土石坝安全评价指标及标准值

影响土石坝安全的因素很多, 如: 洪水、坝坡尺寸、坝体结构、防洪调度与运行管理等。2000 年 12 月 29 日国家水利部签发了《水库大坝安全评价导则》(SL 258 2000), 将水库大坝安全评价分为“工程质量评价、大坝运行管理评价、防洪标准复核、结构安全评价、渗流安全评价、抗震安全评价、金属结构安全评价”等七个专项, 要求根据七个专项的结论对大坝安全进行综合评价。《导则》将大坝工程性状各专项安全性分为 A、B、C 三级, 大坝综合安全分为“一类坝, 二类坝, 三类坝”三级。其划分原则是如下。

(1) 对于规范中给出定量安全指标的, 若为一范围值, 则复核结果大于等于其上(或下)限的为 A 级, 小于下(或上)限的为 C 级, 处于中间的为 B 级; 若为一单值, 则大于等于(或小于等于)其值的为 A 级或 B 级, 反之为 C 级。

(2) 对于无量纲安全指标的, 其检查或复核结果无安全问题的为 A 级, 存在直接危及大坝安全问题的为 C 级, 两者之间的为 B 级。

(3) 对于三类坝, 采用一票否决的办法, 即只要有一项为 C 级的, 便定为三类坝; 有一至两项为 B 级的为二类坝, 其余为三类坝。

本文参照《导则》, 选取工程质量、运行管理、抗御洪水重现期、坝坡稳定安全系数、渗流安全、抗震安全和金属结构安全为土石坝安全评价指标。其标准值也参照《导则》, 将各指标安全等级分为 A、B、C 三级, 大坝综合安全分为“一类坝, 二类坝, 三类坝”三级, 分别代表“大坝安全可靠, 能按设计正常运行; 大坝基本安全, 可在加强监控下运行; 不安全, 属病险水库大坝”。

分级标准: 对于抗御洪水重现期、坝坡稳定安全系数等定量指标, 依据《导则》中各标准, 例如: 根据《导则》中表 B 1, 3 级土石坝防洪大坝安全分级标准为: [A: 洪水重现期(年) ≥ 1000]、[B: $500 \geq$ 洪水重现期(年) < 1000]、[C: 洪水重现期(年) < 500]; 对于工程质量、运行管理等定性指标, 先由专家根据《导则》中标准打分, 然后按照 85 分以上为 A、60~85 分为 B、60 分以下为 C 的标准进行评价。

2.2 土石坝安全系统待评对象 u 对级别 h 的指标相对隶属度

(1) 构建评价指标标准值矩阵。

根据已知的多个级别 $h(h = 1, 2, \dots, c, c$ 为级别个数) 和多个指标 $i(i = 1, 2, \dots, m, m$ 为评价指数总数) 构建指标标准值矩阵:

$$Y = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \dots & y_{1c} \\ y_{21} & y_{22} & \dots & y_{2c} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{m1} & y_{m2} & \dots & y_{mc} \end{bmatrix} = (y_{ih}) \quad (2)$$

(2) 计算相对隶属度。

根据物理概念分析, 土石坝安全评价指标标准值矩阵即为级别 h 指标 i 相对隶属度等于 1 的指标特征值矩阵, 而级别 h 与级别 $(h+1)$ 构成对立的概念或对立基本模糊属性, 根据对立统一定理, 有:

$$\mu_h(u) + \mu_{i(h+1)}(u) = 1 \quad (3)$$

式中: $\mu_h(u)$ 、 $\mu_{i(h+1)}(u)$ 分别为待评对象 u 中指标 i 对级别 h 和 $(h+1)$ 的相对隶属度。

设指标 i 的特征值 x_i 落入标准值区间 $[y_{ih}, y_{i(h+1)}]$ 内, 则 x_i 对 h 级的相对隶属度为:

$$\mu_h(u) = \frac{y_{i(h+1)} - x_i}{y_{i(h+1)} - y_{ih}}, h = 1, 2, 3, \dots, c \quad (4)$$

由式(3)可得: $\mu_{i(h+1)}(u) = 1 - \mu_h(u)$

当指标标准值矩阵为区间矩阵:

$$Y = \begin{bmatrix} \langle a_{12} & [a_{12}, b_{12}] & \rangle b_{12} \\ \rangle a_{22} & [a_{22}, b_{22}] & \langle b_{22} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \langle a_{m2} & [a_{m2}, b_{m2}] & \rangle b_{m2} \end{bmatrix} \quad (5)$$

时, 可将区间矩阵式(5)转化为标准值矩阵(2)的类型, 令:

$$\begin{cases} y_{i1} = a_{i2} \\ y_{ih} = \frac{a_{ih} + b_{ih}}{2} \\ y_{ic} = b_{i(c-1)} \end{cases} \quad (6)$$

式中: a_{ih} 、 b_{ih} 分别为级别 h 指标 i 标准值区间的上、下限值。

式(5)第一行相当于越小越优型指标, $a_{1h} < b_{1h}$ 。对越小越优型指标, 当 $x_i < a_{22}$ 时, $\mu_{i1}(u) = 1$; 当 $x_i > b_{i(c-1)}$ 时, $\mu_{ic}(u) = 1$ 。

式(5)第二行相当于越大越优型指标, $a_{2h} > b_{2h}$ 。对越大越优型指标, 当 $x_i > a_{22}$ 时, $\mu_{i1}(u) = 1$; 当 $x_i < b_{i(c-1)}$ 时, $\mu_{ic}(u) = 1$ 。

(3) 计算待评对象 u 对级别 h 的综合相对隶属度。

设 P_i 点是指标 i 在对立统一定理所示的图 1 中所处的点位, P_i 点与 P_l 点和 P_r 点的广义权距离可表示为:

$$\begin{cases} d_h(P_l, P_i) = \left(\sum_{i=1}^m [w_i (1 - \mu_{ih}(u))]^p \right)^{\frac{1}{p}} \\ d_h(P_i, P_r) = \left(\sum_{i=1}^m [w_i \mu_{ih}(u)]^p \right)^{\frac{1}{p}} \end{cases} \quad (7)$$

式中： p 为距离参数， $p=1$ 为海明距离， $p=2$ 为欧式距离。

待评对象 u 对级别 h 的多指标综合相对隶属度可用下式计算：

$$v_h(u) = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_h(P_1, P_i)}{d_h(P_i, P_r)} \right)^\alpha} \quad (8)$$

式中： α 为优化准则参数。若取 $\alpha=1, p=1$ ，式(8)可简化为：

$$v_h(u) = \sum_{i=1}^m \omega_i \cdot \mu_h(u) \quad (9)$$

式中： ω_i 为各评价指标的权重，本文采用层次分析法确定各评价因素权重。

2.3 土石坝安全系统待评对象 u 的级别特征值与综合相对隶属度

按下式计算级别特征值：

$$H(u) = \sum_{h=1}^c v^0(u) \cdot h \quad (10)$$

待评对象 u 的综合相对隶属度计算公式为：

$$\mu_H(u) = \frac{c - H(u)}{c - 1} \quad (11)$$

3 工程实例分析

引用文献[7]的工程实例资料，土石坝断面见图2。水库大坝为均质土坝，坝顶总长度 126 m，坝顶宽 5.0 m，坝顶高

程 81.7 m，最大坝高 42.7 m，上游坡为干砌石护坡，下游坡为草皮护坡并设有排水滤体。工程等别为 0 等，主要建筑物级别为 3 级。工程于 1964 年 6 月动工兴建，至次年 4 月大坝按设计基本建成，并开始渠系配套，于 1972 年基本完成。现场检查的问题有：右坝头上游坡严重漏水、溢洪道底板伸缩缝漏水、涵管严重漏水。



图2 坝体断面图

Fig. 2 Cross section of the dam

3.1 安全评价指标值计算

如前 2.1 中所述，选取工程质量、运行管理、抗御洪水重现期、坝坡稳定安全系数、渗流安全、抗震安全和金属结构安全等作为水库大坝安全评价指标，其中坝坡稳定安全系数采用简化毕肖普法计算，通过对定量指标计算和对定性指标采用专家打分，得出各指标值见表 1。

3.2 确定评价指标标准值

根据本工程等级，参照《导则》中有关规定，建立 7 项评价指标标准值列于矩阵 Y 。

表 1 各评价指标计算值(或评分值)

Table 1 The calculated value (or score) of each evaluation index

评价指标	工程质量评价 (评分值)	运行管理评价 (评分值)	抗御洪水 重现期/年	坝坡稳定安全系数 (正常蓄水情况)	渗流安全评价 (评分值)	抗震安全评价 (评分值)	金属结构安全评价 (评分值)
计算值 (或评分值)	80	72	1 000	1.34	58	77	65

$$Y = \begin{bmatrix} \geq 85 & [85, 60] & < 60 \\ \geq 85 & [85, 60] & < 60 \\ \geq 1000 & [1000, 500] & < 500 \\ \geq 1.43 & [1.43, 1.26] & < 1.26 \\ \geq 85 & [85, 60] & < 60 \\ \geq 85 & [85, 60] & < 60 \\ \geq 85 & [85, 60] & < 60 \end{bmatrix}$$

应用式(6)转化为标准矩阵(2)的形式为：

$$Y = \begin{bmatrix} 85 & 72.5 & 60 \\ 85 & 72.5 & 60 \\ 1000 & 750 & 500 \\ 1.43 & 1.345 & 1.26 \\ 85 & 72.5 & 60 \\ 85 & 72.5 & 60 \\ 85 & 72.5 & 60 \end{bmatrix}$$

3.3 相对隶属度的计算

应用式(4)计算指标 i 级别 h 的相对隶属度矩阵为：

$$Y = \begin{bmatrix} 0.792 & 0.208 & 0 \\ 0 & 0.96 & 0.04 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0.06 & 0.94 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0.36 & 0.64 & 0 \\ 0 & 0.4 & 0.6 \end{bmatrix}$$

3.4 待评对象 u 对级别 h 的综合相对隶属度计算

采用文献[7]用层次分析法得到的各指标的权重，各指标权重分别为：0.11、0.12、0.19、0.18、0.17、0.12、0.11。应用 $\alpha=1, p=1$ 的线性公式(9)计算待评对象 u 对各级相对隶属度的归一化向量

$$v^0(u) = (0.331, 0.428, 0.241)$$

应用级别特征值公式(10)计算的级别特征值 $H = 1.91$ ，判断该工程大坝为二类坝。

文献[7]采用集对分析法计算得该工程大坝属于“一类坝、二类坝、三类坝”的归一化后的相对隶属度分别为：0.262 6、0.498 6、0.238 8，计算得该工程的级别特征值为 2.024，判断该工程大坝为二类坝，与本文计算结果相同，说明本方法用于水库大坝安全评价是可行的，而本方法比集对分析法在数学推理上更加严密^[13]。

本工程大坝按《导则》中方法和原则为“三类坝”，是因为《导则》中规定只要一项为“C”，工程就确定为“三类坝”，《导则》中没有考虑各指标的权重，与实际情况有出入。

5 结语

本文尝试将可变模糊集对立统一定理方法应用于土石坝安全评价中，以拓宽土石坝安全评价思路。并应用于工程实例，通过实例分析获得与基于集对分析的可变模糊集评价相同的结论，而此方法模型更简洁、概念更清晰、方法更简便。

参考文献(References):

- [1] 季根蔡. 基于层次分析法的水库大坝安全鉴定的综合评价[J]. 红水河, 2007, (1): 133-136. (JI Gen cai. Overall Evaluation of Dam Safety based on the AHP[J]. Hong Shui River, 2007, (1): 133-136. (in Chinese))
- [2] 姜树海, 范子武. 土石坝安全等级划分与防洪风险率评估[J]. 水利学报, 2008, 39(1): 35-40. (JIANG Shu hai, FAN Zi wu. Earth Rockfill Dam Safety Classification and Risk Rate Assessment on Flood Control[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(1): 35-40. (in Chinese))
- [3] 李雷, 盛金保. 土石坝安全度综合评价方法初探[J]. 大坝观测与土工测试, 1999, 23(4): 22-28. (LI Lei, SHENG Jin bao. Comprehensive Evaluation Method for Dam Safety Preliminary[J]. Dam Observation and Geotechnical Tests, 1999, 23(4): 22-28. (in Chinese))
- [4] 李君纯, 李雷, 盛金保, 等. 水库大坝安全评判的研究[J]. 水利水运科学, 1999, 3(1): 77-83. (LI Jun chun, LI Lei, SHENG Jin bao, et al. Dam Safety Evaluation Studies[J]. Hydraulic Research, 1999, 3(1): 77-83. (in Chinese))
- [5] 刘亚莲, 周翠英. 土石坝安全的模糊层次综合评价及其应用[J]. 水力发电, 2010, 36(5): 38-40. (LIU Ya lian, ZHOU Cai ying. Application of Fuzzy Multi-level Comprehensive Evaluation on Earth rock Dam Safety[J]. Water Power, 2010, 36(5): 38-40. (in Chinese))
- [6] 尉维斌, 李珍照. 大坝安全模糊综合评判决策方法的研究[J]. 水电站设计, 1996, 12(1): 1-8. (WEI Wei bin, LI Zhen zhao. Decision Method Studies on Comprehensive Fuzzy Judge on Dam Safety[J]. Design of Hydroelectric Power Station, 1996, 12(1): 1-8. (in Chinese))
- [7] 刘亚莲, 胡建平. 土石坝安全的集对分析-可变模糊集综合评价模型[J]. 人民长江, 2011, 42(11): 91-94. (LIU Ya lian, HU Jian ping. Set Pair Analysis - Variable Fuzzy Set Model for Safety Evaluation of Earth rock Dam[J]. Yangtze River, 2011, 42(11): 91-94. (in Chinese))
- [8] 陈守煜. 基于可变模糊集的辩证法三大规律数学定理及其应用[J]. 大连理工大学学报, 2010, 50(5): 838-844. (CHEN Shou yu. Three Mathematical Theorems of Dialectics Based on Variable Fuzzy Sets and Their Application[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2010, 50(5): 838-844. (in Chinese))
- [9] 陈守煜. 可变模糊集理论与模型及其应用[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2009. (CHEN Shou yu. Variable Fuzzy set Theory and Model and Its Application[M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2009. (in Chinese))
- [10] 王子茹. 基于可变模糊集对立统一定理的水安全评价研究[J]. 人民长江, 2011, 42(9): 1-3. (WANG Zi ru. Research on Water Security Evaluation Based on Variable Fuzzy Sets' unity of Opposites Theorem[J]. Yangtze River, 2011, 42(9): 1-3. (in Chinese))
- [11] 王文川, 徐冬梅, 陈守煜, 等. 可变模糊集理论研究进展及其在水科学中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2012, 32(5): 89-94. (WANG Wen chuan, XU Dong mei, CHEN Shou yu, et al. Research Advances and Applications in Water Science of Variable Fuzzy set Theory[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(5): 89-94. (in Chinese))
- [12] 陈守煜. 工程模糊集理论与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998. (CHEN Shou yu. Fuzzy Set Theory and Application Engineering[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998. (in Chinese))
- [13] 陈守煜. 基于辩证法三大规律数学定理的系统评价理论、模型与方法-兼论集对分析及其评价方法[J]. 黑龙江大学学报, 2010, 1(1): 11-16. (CHEN Shou yu. Based on the Dialectics Three Laws Mathematical Theorems System Evaluation Theory, Model and Method —And Concerning Set pair Analysis and Evaluation Method[J]. Journal of Engineering of Heilong University, 2010, 1(1): 11-16. (in Chinese))

• 动态 •

南水北调东线一期工程通过全线通水验收

2013年8月15日,南水北调东线一期工程通过全线通水验收,工程具备通水条件。国务院南水北调办公室副主任、南水北调东线一期工程全线通水验收委员会主任张野在徐州市主持召开验收会议。

张野代表国务院南水北调办公室党组对东线一期工程顺利通过全线通水验收,表示热烈祝贺,向多年来关心支持工程建设的国家有关部委、沿线各级党委政府、人民群众、社会各界表示衷心的感谢,向十年如一日辛勤付出的全体工程建设者致以崇高的敬意!