

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2011.04.010

基于安全监测系统的大坝安全多层次模糊综合评判方法

郑付刚^{1 2 3} 游强强^{1 3}

(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.河海大学水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心,江苏 南京 210098;

3.河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098)

摘要:为了更科学合理地对大坝工作状态进行评判,从系统的角度把大坝作为一个模糊整体,充分结合大坝已有的监测设施,考虑由于监测仪器运行状态给评判带来的影响,综合分析大坝的工作性态,提出了一个基于大坝安全监测系统的大坝安全多层次模糊综合评判方法.以某大坝为例,对大坝的工作状态进行了综合评判,结果表明应用本方法可充分体现监测数据可靠性对结果的影响,评判结果科学合理,更符合实际情况.

关键词:大坝安全;监测系统;模糊综合评判;层次分析法

中图分类号:TV143+.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2011)04-0407-08

大坝安全评判是一个多层次、多指标的综合评判过程,其评判方法也具多样性^[1-2].近些年,随着模糊数学的发展,其在大坝安全监控指标的拟定方面也取得了成功的应用^[3-10].吴中如院士等^[1-2,7-8]把由监测资料整理得到的效应量(如沉陷、应力、裂缝、扬压力等)作为评价因子进行大坝安全的评判,得到大坝所属的安全等级.但是国内多数学者在效应量获取的过程中忽略了监测仪器的监测精度和运行状态对数据可靠性和准确性的影响,从而使得评判结果偏离了实际情况.大坝安全监测系统的工作性态综合反映了各种因素对大坝的影响,可以根据仪器运行情况全面地考虑大坝各部位监测数据的可靠性,从而对监测数据进行有效的取舍,使其及时正确地反应变形、渗流、应变应力等物理量的变化^[11],因此基于大坝安全监测系统进行大坝安全的评判,具有重要的理论价值和实用意义.由于大坝安全评判是一个多因素且伴有很多难以量化指标的模糊综合评判过程,本文采用多层次模糊综合评判方法^[12-13],充分考虑监测仪器本身限制引起的影响,综合考虑影响大坝安全的各项指标,提出了一个多层次模糊评判方法,该方法采用模糊变换原理,从低级到高级层层量化,最后得到一个较符合实际的评判结果.

1 模糊综合评判原理及模型

大坝模糊综合评判应用模糊变换原理考虑与被评判目标相关的各个因子,建立一个科学合理的综合评判体系,然后按一定的数学方法对每一个评判因子进行度量,利用数学模型将度量结果进行综合,最终得到大坝的安全评判结果.

1.1 模糊综合评判原理

多层次模糊综合评判的基本原理为模糊变换.设给定两个有限论域:

$$U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\} \quad V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\} \quad (1)$$

式中: U ——因素集; V ——评语集.如果 A 是 U 上的模糊子集, B 是 V 上的模糊子集,模糊变换可以表示为: $A \circ R = B$,其中“ $\circ$ ”为模糊算子, R 为评判矩阵.

1.2 模糊综合评判模型

在模糊变换的合成运算中,模糊算子(“ $\circ$ ”)选取的不同会有不同的计算结果,特别是广义模糊算子公理化

收稿日期:2010-11-16

基金项目:国家自然科学基金(51079046,50909041,50809025,50879024);“十一五”国家科技支撑计划(2006BAC14B03,2008BAB29B03);河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室专项基金(2009586012,2010585212)

作者简介:郑付刚(1987—),男,山东临沂人,博士研究生,主要从事水利水电工程安全监控理论及应用研究.E-mail:zhfg@hhu.edu.cn

结构的提出,使得合成运算针对具体的问题有了更灵活的选择.几种常见的综合评判的计算模型中,如主因素决定型、主因素突出型等,都涉及到取大取小的运算,从而造成很多有效信息的流失.大坝安全评判是一个结合各项评判因子的综合评判过程,它应该充分体现已有信息,融合所有评判因子,故本文采用比较适合评判整体性质的加权平均型:

$$b_j = \sum_{i=1}^n a_i r_{ij}$$

(2)

式中: b_j ——评判结果; a_i ——评判因素的权重; r_{ij} ——评判矩阵因子.

2 大坝安全多层次模糊综合评判方法

大坝安全多层次模糊综合评判是分别对各级评判因子运用模糊综合评判,将结果作为上级评判运算的已知量,层层递进的评判过程.与一级评判相比,除多出一个多层评判结构体系外,其他主要内容和一级评判一致,包括评判因子集、评语集、评判矩阵和权重系数 4 个方面的研究内容.

2.1 大坝安全多层次模糊综合评判结构体系

大坝安全监测系统提供大坝安全评判的原始数据,每个正常工作的监测仪器所得到的监测数据都是在特定位置反应坝体不同响应量的数值体现,都应该作为安全评判的影响因子,但由于监测仪器的运行状态存在差异,从而不同仪器对评判结果的影响也存在差异.对大坝安全监测仪器运行好坏的度量主要包括仪器布置的设计合理性、仪器的工作环境、仪器的设计精度、测值的可靠性、测值长期稳定性和测值的有效测次等方面的内容.正是由于以上因素的影响,使得监测仪器提供给安全分析的数据在可信程度上也有所不同.以坝体水平位移和垂直位移为例,在大坝监测中,水平位移监测可以由视准线、引张线和正倒垂等监测设施实现,坝体垂直沉陷监测普遍采用人工水准仪观测法实现,然而用于水平位移监测的引张线和正倒垂的精度都高于规范要求,用于垂直位移监测的水准仪的监测精度则偏低,因此在数据可靠性和精度上垂直位移的监测数据要低于水平位移的监测数据.即使对同一监测项目的不同监测方法也存在同样的问题,以上面提到的水平位移监测为例,视准线观测受天气和人主观随机性因素干扰大,并且观测频次在每周 1 次左右,引张线受天气等外界因素的影响较小,且能做到随时都能取得测值,但是只能将监测点布置在坝顶,正倒垂则可以把测点遍及坝体和坝基,且监测精度较高,它们所得到的水平位移监测数据在可靠性和精度上也存在差别.所以根据地址、坝型等条件得出的水平和垂直位移的理论权重,不能很好地表征两者之间的实际权重,还需要依据监测仪器运行状态的情况对权重进行调整.

针对上面的分析,本文提出的大坝安全多层次模糊综合评判方法包括两方面的评判:一是监测仪器运行状态的评判;另一个则是各层次的大坝安全评判.由大坝安全监测系统得到的原始数据可以整理成反应大坝各种性质的效应量,用于大坝的安全层次分析,同时也可以评判监测仪器的运行状态.正如前面的分析,正确表达仪器运行状态是评判大坝安全状态的重要方面,而得到的仪器评判结果一方面影响由仪器本身提供给效应量分析的数据可信程度,另一方面则影响大坝安全评判各层次评判因子的权重,作为理论权重的一种调整从而影响评判结果.总体结构体系见图 1.

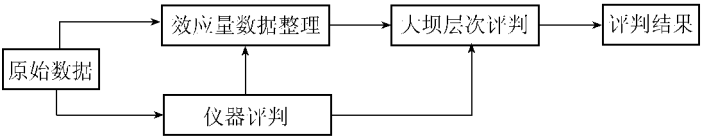


图 1 大坝安全多层次模糊综合评判结构
Fig. 1 Structure of multi-level fuzzy comprehensive dam safety evaluation system

2.2 评判因子集 U 的建立

2.2.1 监测仪器运行状态的评判因子选择

评判仪器运行情况的因子有很多,归纳起来可以分为:仪器布置的设计合理性、仪器的工作环境、仪器的设计精度、测值的可靠性、测值的长期稳定性和测值有效测次 6 个方面,用 $U_{\text{仪器}}$ 表示为

$$U_{\text{仪器}} = \{u_{\text{布置}}, u_{\text{环境}}, u_{\text{精度}}, u_{\text{可靠性}}, u_{\text{稳定性}}, u_{\text{有效测次}}\}$$

(3)

2.2.2 大坝安全评判各级因子的选择

依据 DL/T 5178—2003《混凝土坝安全监测技术规范》,大坝监测范围包括坝体、坝基、坝肩以及对大坝有重大影响的近坝岸坡等.在实际的安全监测系统中,坝体和坝基的监测是互相联系、融为一体的,而近坝区的

监测中多以坝肩和潜在滑坡体为主要监测对象,故本文评判大坝安全的一级评判因子为大坝结构体安全状态(包括坝体和坝基)和近坝区安全状态。

大坝的工作性态,主要体现在变形、渗流、应力应变等物理量中,这些物理量的变化综合反映了各种因素对大坝工作性态的影响,是评判大坝安全的主要依据,故监测较为全面的大坝在大坝结构体和近坝区中都可以分为 3 个二级评判因子:变形、渗流和内观。把二级评判因子的具体监测项目作为三级评判因子,则变形包括水平位移、垂直位移和位移体倾斜;渗流的观测有扬压力、渗流量和地下水位的监测;内观则分为温度、裂缝和应力应变。为了更好地利用大坝监测资料信息,将构成大坝安全监测系统的各项监测设施都作为相应监测项目下的四级评判因子。为了衡量监测设施所测得数据反映出的大坝安全程度,监测仪器下设有 4 个五级评判因子:数据整体规律性(包括测值范围、变化幅度、大坝整体运行规律等)、相邻测点的规律性(不均匀沉降、突变等)、复相关系数(统计学中可以用来检验回归效果)、时效分量的变化(趋于稳定或者收敛)。以上评判因子构成评判大坝安全各级评判因子,具体见图 2。

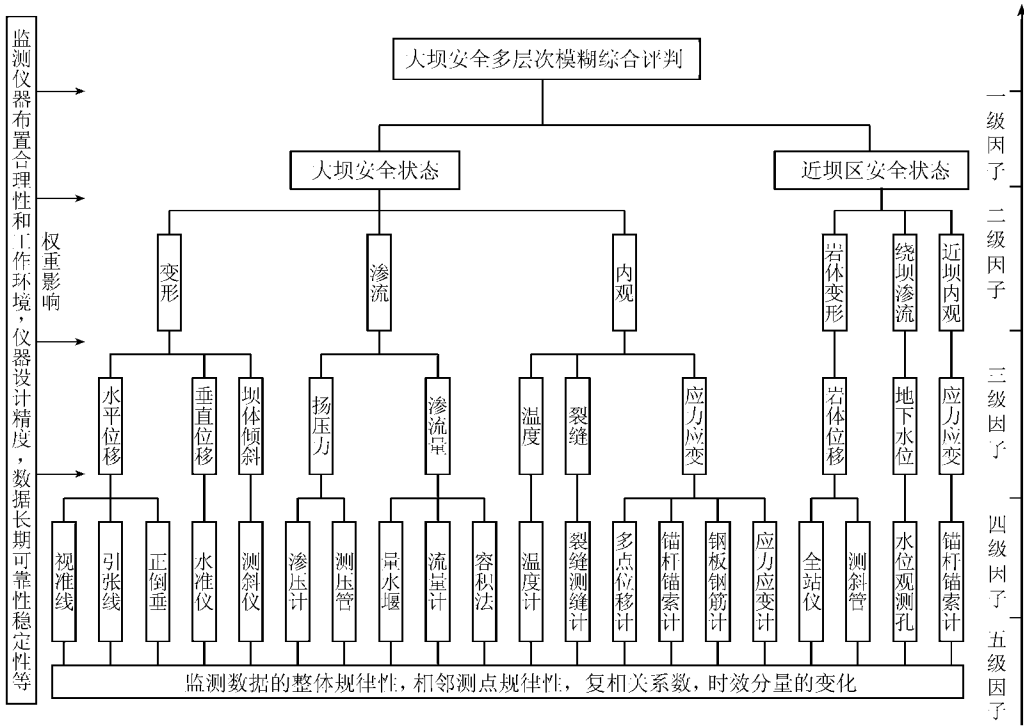


图 2 大坝安全多层次模糊综合评判因子层次关系

Fig. 2 Hierarchical graph of multi-level fuzzy comprehensive dam safety evaluation index system

2.3 评语集 V 的建立

- a. 监测仪器工作状态评语. 根据监测仪器工作状态的好坏,将仪器评语集选为 5 个等级,表示为
- $$V_{\text{仪器}} = \{\text{很好, 好, 一般, 不好, 很不好}\} \tag{4}$$
- b. 大坝安全状态评语. 根据不同的标准和方法,大坝安全综合评判论域的选择也有不同的划分. 本文根据文献 1-2 的工作,从实践经验和人类心理出发,将大坝工作综合状态的安全程度共分为 5 个等级,即评语集为
- $$V_{\text{坝}} = \{\text{很安全, 安全, 较安全, 不安全, 很不安全}\} \tag{5}$$

2.4 评判矩阵

2.4.1 监测仪器隶属度的获得

由于监测仪器的运行状态很难量化,难以得到切实可行的隶属函数,因此本文采用专家评估的模糊权重法,即给出评语得分的隶属度并由专家评估其安全等级得到隶属各评语的隶属度. 根据文献 3 中的建议,将评判仪器工作好坏情况离散为一定数值区域中的不同的评语得分,本文离散到 $[0, 1]$ 之间: $C_{\text{仪器得分}} = (0, 0.25, 0.5, 0.75, 1)$,得分值越大表示运行状态越好,而评判仪器工作状态的隶属度函数就可以简单地用这些

不同评语得分下的隶属度向量表示,见表1.仪器运行状态的评判因子集 $U_{\text{仪器}}$ 中运行好坏(重要)程度的隶属度目前还没有完整详细的评判标准,本文参考文献[4]并结合大量工程实际情况,采用表2来确定评判矩阵.具体步骤如下:

- a. 根据仪器的实际运行情况得到评判仪器运行好坏的6个因子的不同评语得分隶属度向量 $p_{\text{因子}}$.
- b. 得到每个评判因子评语得分隶属度向量后,由表征仪器运行6个方面的向量组成评判矩阵: $M_{\text{仪器}}=(p_{\text{布置}}, p_{\text{环境}}, p_{\text{精度}}, p_{\text{可靠性}}, p_{\text{稳定性}}, p_{\text{有效测次}})^T$.

c. 运用模糊评判原理,得到仪器整体运行的评语得分隶属度向量: $p_{\text{仪器}}=W_{\text{仪器}} \circ M_{\text{仪器}}$,其中 $W_{\text{仪器}}$ 为仪器评判因子的权重向量.

d. 得到仪器整体运行的评语得分隶属度后,根据离散的评语得分,可以由 $S_{\text{仪器}}=C_{\text{仪器得分}} \circ p_{\text{仪器}}^T$ 计算得到监测仪器总的运行评语得分.

表2 监测仪器运行状态评判因子

Table 2 Evaluation indexes of operational state of monitoring facilities						
评语	监测仪器布置的设计合理性	监测仪器的运行条件	监测仪器的设计精度	测值的可靠性	测值的长期稳定性	测值的有效测次率/%
很好	监测布局设计很合理,监测仪器能全面涉及整个坝体,重点部位精度超过规范	仪器运行条件优越,监测设施能很好地维护,周围环境良好	超过规范精度,并且检测性能良好	监测方法准确,抗干扰性强,数据处理及时	仪器基本无故障,过程线规律明显,平稳光滑	>90
好	监测布局设计范围合理,重点部位的监测仪器满足规范要求	仪器运行条件良好,监测设施能经常维护,周围环境良好	超过规范精度,监测性能一般	监测方法正确,受外界影响较小,数据处理及时	仪器故障少,过程线规律明显,略有突变	>80~90
一般	监测布局的设计能正确反映监测目的,重点部位埋设监测仪器	仪器运行条件一般,周围环境一般,仪器能定期维护	达到规范精度,监测性能一般	监测方法正确,数据受外界影响不大	仪器故障少,过程线能反应大坝运行状况	>70~80
不好	监测布局设计范围不全面,只在重点部位埋设监测仪器	仪器运行条件差,周围环境恶劣,维护设施少	精度勉强达到规范精度,监测性能差	监测方法落后,数据处理落后	仪器平均工作时间不长,过程线规律不明显,突变量较大	>60~70
很不好	监测布局设计极不合理,监测范围很不全面,重点部位无监测仪器	仪器运行条件很差,周围环境恶劣,无维护设施	仪器埋设时间较早,设计精度达不到要求	监测方法不正确,易受外界影响	仪器经常故障,数据缺失严重并且过程线杂乱无章,突变量大	≤60

2.4.2 大坝评判因子隶属度的获得

在大坝安全多层次评判中,上级评判矩阵都由次级评判因子提供,故合理得到五级评判因子的安全隶属度是整个评判过程中的关键.由于大坝五级评判指标同样很难量化,故采用2.4.1节中的做法得到隶属各评语得分的隶属度,然后经过逐层评判后得到大坝安全评语得分的隶属度,最后求得大坝安全评语得分来评判安全程度.这种方法在一定程度上能消除人过大的主观影响,使得判断更加科学合理.在大坝安全评判中将评语得分值离散到 $[-2, 2]$ 之间: $C_{\text{大坝得分}}=(-2, -1, 0, 1, 2)$.计算步骤和2.4.1节一致,简化表示为:

- a. 首先依据大坝安全评语隶属关系,由专家评估得到各评判因子的评语得分隶属度向量,组成评判矩阵,从而由 $p_i=W_{i+1} \circ M_{i+1}$ 得到上级评判向量,式中 p_i 为第 i 层大坝安全的评语得分隶属度向量; W_{i+1} 为第 $i+1$ 层(及上层)的评判因子权重向量,见2.5.2节; M_{i+1} 为第 $i+1$ 层评判矩阵.本文大坝不同评语得分的隶属度见表3,而评判向量根据很多工作者的研究,采用表4的评判依据.

b. 经过从低层因子到高层因子的评判后,最后得到评判第一层的大坝安全评语得分的隶属度向量 p_1 ,经过计算得到大坝安全得分: $S=C_{\text{大坝得分}} \circ p_1^T$.由 S 综合表示大坝安全运行状态.

表1 监测仪器运行状态评语得分隶属度

Table 1 Score membership of monitoring facility state					
评语	不同得分的隶属度				
	0	0.25	0.5	0.75	1
很好	0	0	0	0.33	0.67
好	0	0	0.25	0.5	0.25
一般	0	0.25	0.5	0.25	0
不好	0.25	0.5	0.25	0	0
很不好	0.67	0.33	0	0	0

表3 大坝评语得分隶属度

Table 3 Score membership of dam state					
评语	不同得分的隶属度				
	-2	-1	0	1	2
很安全	0	0	0	0.33	0.67
安全	0.25	0	0.25	0.5	0.25
较安全	0	0.25	0.5	0.25	0
不安全	0.25	0.5	0.25	0	0
很不安全	0.67	0.33	0	0	0

表 4 大坝评判因子
Table 4 Evaluation indexes of dam safety

评语	数据整体规律性	相邻测点规律性	复相关系数	时效分量变化
很安全	全部数据在安全范围内无突变,波动幅度满足要求,整体能很好地符合大坝工作规律	相邻测点规律一致性好,符合空间规律,并且不出现不均匀突变现象	> 0.9	随时间减小
安 全	数据的范围和变化幅度在大坝承载力内并符合整体规律性,无突变或突变值较小	相邻测点规律性一致,符合空间规律,数值的差异在一定范围内	> 0.8 ~ 0.9	初期变化较快,后变化平稳,对时间的导数接近于零
较安全	数据基本处于安全范围内,并能较合理地反映大坝的整体规律性,带有突变	相邻测点规律相似,能体现空间规律,有数值差异但突变量较小	> 0.7 ~ 0.8	对时间的导数大于零,但是随时间变幅减小
不安全	个别数据超出大坝的允许或承载能力,不能很好地表现整体规律性	测点之间联系不好,数值差异量较大,并带有突变	> 0.5 ~ 0.7	持续增长
很不安全	大量数据超出允许范围并带有大的突变台阶,不符合大坝整体规律性	测点之间基本无联系,测值在数值上和空间分布上突变大	≤ 0.5	持续增长并伴有突增大的现象

2.5 评判因子权重

2.5.1 仪器评判因子权重的确定

$W_{\text{仪器}}$ 中选择的 6 个评判因子是从 6 个角度对监测仪器的验证,在评判角度上应该具有相同的权重:
 $W_{\text{仪器}}=(1/6,1/6,1/6,1/6,1/6,1/6)$.

2.5.2 大坝评判各层次权重的确定

a. 五级评判因子权重的选择. 五级评判因子是从 4 个方面是从不同侧重点和角度对安全的评判,因此获得该因子评判矩阵后应按同等权重来评判仪器运行的安全情况,即采用 $W_5=(1/4,1/4,1/4,1/4)$.

b. 四级评判因子权重的确定. 作为相同监测项目下的不同监测方法,四级评判因子权重的不同归因于监测仪器本身的局限性. 故在得到同一监测项目下所有表示仪器运行好坏的评语得分后,形成监测仪器得分向量($S_{\text{仪器}1}, S_{\text{仪器}2}, \dots, S_{\text{仪器}k}$),其中 k 为监测该同一项目的不同监测仪器类型的个数. 经过归一化后得到所需要的权重矩阵 W_4 .

c. 三级及以上层次评判因子权重的求解. 三级以及三级以上评判因子都是表征大坝安全的不同划分形式,因此根据坝型并结合大坝实际运行的条件,会体现出不同的权重. 可以由下面步骤求得:

第 1 步: 计算初始权重 $w_{\text{初}}$. 为了尽可能地减小人的主观因素影响,本文采用改进的层次分析法^[14-16]. 根据文献^[16],传统的层次分析法常用的 A. L. Satty 的 1-9 标度在很多实际应用中并不合理,特别是对于评判大坝安全情况. 在评判大坝安全中评判因子两两比较时,一般不会出现十分重要和极其重要的情况. 因此,改进的层次法只设置两个等级,即两评判因子相同或相比稍微大,然后以此作为基础递进乘积得到其他等级,简称为指数标度法. 具体做法为相同的标度取为 1,稍微大的标度值取为 $9^{1/9}=1.277$,当评判因子相对重要性比稍微大还要稍微大时,标度可取为 $9^{2/9}=1.277 \times 1.277=1.631$,依此类推. 其具体标度见表 5.

表 5 指数标度

Table 5 Exponential scales		
标度参数	含义	标度值
0	同等重要	1
1	稍微重要	1.277
3	明显重要	2.080
6	十分重要	4.327
9	极其重要	9

第 2 步: 监测仪器的运行状态对初始权重的调整. 为了全面描述评判因子,权重应体现该因子下所有监测仪器的运行情况,于是可以得到该级 i 级第 h 个评判因子的仪器整体运行评语得分为

$$S_{\text{仪器}i,h}=\sum_{j=1}^n S_{\text{仪器}i+1,j}w_{i+1,j}$$

(6)

式中: $S_{\text{仪器}i+1,j}$ ——该评判因子下的次级评判因子的仪器整体运行得分; $w_{i+1,j}$ ——该评判因子下的次级评判因子的权重; n ——组成该评判因子的所有次级评判因子的个数; $i=1,2,3$ 且当 $i=3$ 时, $S_{\text{仪器}i+1,j}$ 为 $S_{\text{仪器}j}$.

第 3 步: 最终权重的确定. 第 i 层实际权重应该反映上面两步的成果,即原始的权重值需要经过监测仪器运行状况的调整,这个过程可以用两者的乘积表示: $W_i=(w_{\text{初}i,1}S_{\text{仪器}i,1}, w_{\text{初}i,2}S_{\text{仪器}i,2}, \dots, w_{\text{初}i,h}S_{\text{仪器}i,h}, \dots, w_{\text{初}i,m}S_{\text{仪器}i,m})$ 其中 m 为该级评判因子的个数,经过归一化后就可以得到该级评判因子的最终权重向量 W_i . 这种相邻级别评判因子权重传递方式见图 3,可以很好地表征由监测仪器运行好坏给大坝安全评判带来的影响.

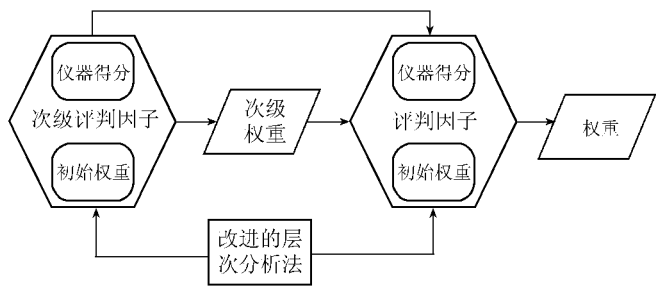


图 3 相邻评判层次权重传递

Fig. 3 Weight transfer between adjacent evaluation levels

3 实例应用

为了验证所提方法的可行性,现以某大坝为例,进行安全评判.该坝为碾压混凝土重力坝,自 2001 年底建成以来已安全运行 10 多年,建立起了较为完善的大坝安全监测系统,在现运行的大坝中具有很好的代表性.该坝主要由拦河大坝、左岸输水建筑物及地下发电厂房等建筑物组成,由左至右共分为 7 个坝段.为确保大坝及地下厂房的安全运行,在主要建筑物表面和内部布置了变形、渗流、温度、应力应变等较为全面的监测项目.大坝变形监测在坝内主要有正垂线和倒垂线,坝顶设有引张线和视准线,垂直位移监测采用水准测量,左右岸边坡设置有测斜孔来监测岩体内部变形,并且采用 TCA 全站仪测量边坡及危岩变形;渗流监测主要项目有坝基扬压力、坝体渗漏量和绕坝渗流,即在大坝中设置了渗压计和三角堰,左右岸山体设置了绕坝渗流水位观测孔,大坝及厂房内部观测项目设置也较为齐全,有坝体温度计、大坝接缝计、坝体及闸墩裂缝计,在大坝及地下厂房还分别埋设了钢板计、钢筋计、应变计、锚杆应力计、多点位移计、锚索测力计等监测仪器.

根据该坝监测仪器实际工作情况,结合监测测点布置、监测精度,并根据监测仪器的工作原理判定仪器工作性能,得到在相应监测项目下的权重见表 6.

表 6 监测仪器运行状态得分及权重

Table 6 Scores and weights of monitoring facilities

监测项目	监测方式	仪器运行 状态得分	权重	监测项目	监测方式	仪器运行 状态得分	权重
水平位移	视准线	0.583	0.26	应力应变	多点位移计	0.667	0.16
	引张线	0.778	0.34		锚杆计	0.667	0.16
	正倒垂	0.890	0.40		锚索计	0.736	0.17
垂直位移	水准仪	0.639	1		应力应变计	0.736	0.17
岩体位移	全站仪	0.583	0.44		钢板计	0.695	0.16
	测斜管	0.750	0.56		钢筋计	0.778	0.18
扬压力	渗压计	0.695	1	裂缝	裂缝测缝计	0.708	1
渗流量	三角堰	0.653	1	温度	温度计	0.736	1
地下水位	水位观测孔	0.583	1				

应用建立的评判方法进行大坝安全评判,得到观测项目以上各级评判因子权重和评判矩阵,分别见表 7 和式(7)~(10).

$$M_{\text{坝体}} = \begin{bmatrix} p_{\text{变形}} \\ p_{\text{渗流}} \\ p_{\text{内观}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0159 & 0.0502 & 0.2684 & 0.4498 & 0.2157 \\ 0.0231 & 0.1481 & 0.3519 & 0.3519 & 0.1250 \\ 0.0278 & 0.1424 & 0.3128 & 0.3412 & 0.1758 \end{bmatrix} \tag{7}$$

$$M_{\text{近坝区}} = \begin{bmatrix} p_{\text{岩体变形}} \\ p_{\text{绕坝渗流}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0.1875 & 0.4375 & 0.3125 & 0.0625 \\ 0 & 0 & 0.25 & 0.50 & 0.25 \end{bmatrix} \tag{8}$$

$$M_{\text{总}} = \begin{bmatrix} p_{\text{大坝}} \\ p_{\text{近坝区}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0217 & 0.1061 & 0.3047 & 0.3885 & 0.1790 \\ 0 & 0.1106 & 0.3606 & 0.3894 & 0.1394 \end{bmatrix} \tag{9}$$

该坝最终评判向量为

$$\begin{aligned} p_{\text{总}} &= (0.70 \ 0.30) \circ \begin{bmatrix} 0.0217 & 0.1061 & 0.3047 & 0.3885 & 0.1790 \\ 0 & 0.1106 & 0.3606 & 0.3894 & 0.1394 \end{bmatrix} = \\ & (0.0152 \ 0.1075 \ 0.3215 \ 0.3887 \ 0.1671) \end{aligned} \tag{10}$$

表 7 评判因子权重

Table 7 Weights of dam safety evaluation indexes

部 位	一级评判 初始权重	一级评判 最终权重	二级监测 项目	二级评判 初始权重	二级评判 最终权重	三级监测 项目	三级评判 初始权重	三级评判 最终权重
坝 体	0.68	0.70	变形	0.41	0.41	水平	0.44	0.49
						垂直	0.56	0.51
			渗流	0.27	0.26	扬压力	0.62	0.63
						渗流量	0.38	0.37
			内观	0.32	0.33	应力应变	0.34	0.34
近坝区	0.32	0.30				温度	0.26	0.27
						裂缝	0.40	0.39
			岩体变形	0.56	0.59	岩体位移	1	1
			绕坝渗流	0.44	0.41	绕坝渗流	1	1

因此该坝安全评判得分为

$$S = C_{\text{大坝得分}} \circ p_{\text{总}}^T = 0.585 \tag{11}$$

而表示大坝安全状态为较安全时的得分为 $S_{\text{较安全}} = C_{\text{大坝得分}} \circ p_{\text{较安全}}^T = (-2 \ -1 \ 0 \ 1 \ 2) \circ (0 \ 0.25 \ 0.5 \ 0.25 \ 0)^T = 0$,表示安全状态下的得分为 $S_{\text{安全}} = C_{\text{大坝得分}} \circ p_{\text{安全}}^T = (-2 \ -1 \ 0 \ 1 \ 2) \circ (0 \ 0 \ 0.25 \ 0.5 \ 0.25)^T = 1$.可以看出该坝运行安全情况处于较安全和安全之间并且略偏于安全 ,这和该大坝实际运行状况和最近的分析报告相符.

4 结 语

将监测仪器的运行情况和用于大坝评判的数据可靠性相结合 ,改进了评判过程中各级评判因素的权重 ,实例应用表明由大坝安全检测系统建立的评判体系来评判大坝运行安全状态是科学合理的 ,并且可行性很好 .针对大坝安全监测系统进行综合评判 ,提高各监测设施精度来改善所测数据的准确性、可靠性 ,有助于进一步深入了解大坝运行状态 ,避免事故或减小危害 ,并为病险坝的判断提供科学依据 .采用改进的层次分析法和专家评估模糊权数法 ,在考虑影响大坝安全的多重因素时可以有效消除人主观因素的影响 ,使得判断更加科学合理.

参考文献 :

[1] 吴中如 . 水工建筑物安全监控理论及其应用 [M]. 北京 : 高等教育出版社 , 2003 .
[2] 顾冲时 , 吴中如 . 大坝与坝基安全监控理论和方法及其应用 [M]. 南京 : 河海大学出版社 , 2006 .
[3] 李洪兴 , 汪群 , 段钦治 . 工程模糊数学方法及应用 [M]. 天津 : 天津科学技术出版社 , 1993 .
[4] 陈建华 . 基于模糊数学理论的大坝安全检测系统综合评价研究 [D]. 南京 : 河海大学 , 2007 .
[5] 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 Huai-zhi , GU Chong-shi , WU Zhong-ru . Assessment model of dam behavior with fuzzy extension theory and its application [J]. Rock and Soil Mechanics , 2006 , 27(12) : 2115-2121 . (in Chinese))
[6] 顾冲时 , 汪自力 , 刘成栋 . 堤防工程安全评估专家赋权模型 [J]. 岩土力学 , 2006 , 27(12) : 2099-2104 . (GU Chong-shi , WANG Zi-li , LIU Cheng-dong . Experts ' weight model assessing embankment safety [J]. Rock and Soil Mechanics , 2006 , 27(12) : 2099-2104 . (in Chinese))
[7] 马福恒 , 吴中如 , 顾冲时 , 等 . 模糊综合评判法在大坝安全监控中的应用 [J]. 水电能源科学 , 2001 , 19(1) : 59-62 . (MA Heng-fu , WU Zhong-ru , GU Chong-shi , et al . Application of fuzzy comprehensive appraisal methods in the dam safety monitoring [J]. International Journal hydro electric energy , 2001 , 19(1) : 59-62 . (in Chinese))
[8] WU Zhong-ru , LI JI , GU Chong-shi , et al . Review on hidden trouble detection and health diagnosis of hydraulic concrete structures [J]. Science in China Series E : Technological Sciences , 2007 , 50(1) : 34-50 .
[9] 陈诚 , 花剑岚 . 改进层次分析法在土石坝安全评价中的应用 [J]. 水利水电科技进展 , 2010 , 30(2) : 58-62 . (CHEN Chen , HUA

- Jian-lan. Application of improved analytic hierarchy process method in safety assessment of earth-rockfill dam[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources 2010, 30(2): 58-62. (in Chinese))
- [10] 李益, 蔡新, 徐锦才, 等. 考虑时变效应的土石坝安全风险综合评价模型[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2010, 38(6): 655-659. (LI Yi, CAI Xin, XU Jing-cai, et al. Safety risk comprehensive evaluation model of earth-rock dams considering time-varying effect [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences 2010, 38(6): 655-659. (in Chinese))
- [11] 沈振中, 陈允平, 王成, 等. 大坝安全实时监控和预警系统的研制和开发[J]. 水利水电科技进展, 2010, 30(3): 68-72. (SHEN Zhen-zhong, CHEN Yun-ping, WANG Cheng, et al. Development of real-time monitoring and early warning system of dam safety[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources 2010, 30(3): 68-72. (in Chinese))
- [12] WANG Meng-jun, TANG Chao-xian, YANG Ya-pin. Fuzzy comprehensive evaluation model of railway design quality[C]//2009 International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering. Xi'an, China: Xi'an University of Technology, 2009: 192-195.
- [13] WU Yuan-na, HUANG Zhi-jun. Application of fuzzy comprehensive evaluation model based on variable fuzzy set method in construction enterprises' EPR project risk evaluation[C]//Risk Management and Engineering Management. Beijing: Universe Academic Press, 2008: 466-471.
- [14] ESRA A, YASEMIN C E. Using the analytic hierarchy process (AHP) to improve human performance: application of multiple criteria decision making problem[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2004, 15: 491-503.
- [15] NI Ming. Study on hybrid AHP method with its application[C]//Proceedings of 2009 IEEE Conference on Grey System and Intelligent Services. Nanjing, China: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009: 1496-1501.
- [16] REZA B K. A new method for site suitability analysis: the analytic hierarchy process[J]. Environmental Management, 1989, 13(6): 685-693.

Multi-level fuzzy comprehensive dam safety evaluation method based on dam safety monitoring systems

ZHENG Fu-gang^{1,2,3}, YOU Qiang-qiang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering,
Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. National Engineering Research Center of Water Resources Efficient Utilization and Engineering Safety,
Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. College of Water Conservancy and Hydropower, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to evaluate the status of dams scientifically and reasonably, a multi-level fuzzy comprehensive dam safety evaluation method was proposed based on the dam safety monitoring system. The method takes the influence of the operational status of monitoring facilities into account, comprehensively considers the running behavior of the dam, and regards the dam as a fuzzy entity. The method was applied to an example to evaluate the dam safety. The results show that the method takes the influence of the reliability of monitoring data on the result of dam safety evaluation into account. The evaluation results are scientific and reasonable, and accord with the facts.

Key words: dam safety; monitoring system; fuzzy comprehensive evaluation; hierarchy analysis method