文章编号:1672-3031(2017)03-0227-07

大坝工作性态监测评估的云模型及其应用

范鹏飞
(山西省水利水电工程建设监理有限公司,山西 太原 030002)

摘要:大坝工作性态评估是水库大坝安全管理急需解决的重大问题之一。基于云模型理论探讨了大坝工作性态评价的新模型,从变形性态、渗流性态及环境因素3个方面来构建指标体系,建立基于云模型和组合赋权法的大坝工作性态能力评估模型,该模型依据大坝工作性态评价因子分类标准,计算各评价因子隶属于不同大坝工作性态等级的云数字特征,并结合评价因子权重和正向正态云发生器,得到待评样本的综合确定度,以确定大坝安全级别。实例应用结果及与其它评价方法对比结果表明,该模型应用于大坝工作性态分类是有效可行的,且具有计算过程简便,结果可靠的优点,也为其他类似问题分析提供了参考。

关键词:云模型;组合赋权;大坝;监测评估
中图分类号:TV698.1 **文献标志码**:A **doi**:10.13244/j.cnki.iwhr.2017.03.011

1 研究背景

水库大坝在防洪、发电、灌溉、供水、航运和渔业等方面发挥了极其重要的作用,为国民经济发展和保障人民群众的生命财产安全做出了重要贡献,但水库一旦发生漫顶、溃决等失稳破坏,会造成巨大的人身财产损失[1],因此,大坝工作性态评估研究具有重要的社会意义。近年来,许多学者分别从大坝的变形性态[2]、渗流性态[3]以及环境因素[4]等方面阐述了其对大坝工作性态的影响。但是水库大坝的安全问题涉及变形、渗流、抗震和温控等多个方面,仅从一个侧面考虑,难以理清相互之间的逻辑关系,也不可能透彻地分析水库大坝病险问题的症结所在,所以有必要采用系统分析的方法,从单一大坝安全评价及风险评估指标入手,围绕水库大坝的安全状态及风险排序,探索水库大坝病险问题的深层原因,以寻求最终解决途径。这方面许多学者进行了深入研究,相继提出了人工神经网络[5]、约束型ME-PP模型[6]、模糊可拓评估模型[7]和模糊综合评判[8]。但是各种评估方法都有其优缺点,在实际运用中并不是十分合理,很少同时考虑模糊性和随机性两者对大坝工作性态安全评估的影响,而这与实际大坝工作性态评估问题是不吻合的,在实际应用存在一定缺陷,如模糊数学方法实际应用中隶属度函数难于确定问题,人工神经网络方法则存在知识获取瓶颈问题。文献[9-10]在模糊集理论上提出了云模型的概念,经过论证认为云模型是一种新的认知型模型,对于解决不确定性问题具有很好的普适性;沈进昌等[11]引入云模型理论构建了一种模糊综合评价方法,并结合食品安全监测数据运用上述方法进行了验证,认为云模型的模糊评价方法具有很大的优势。本文基于云模型理论,以探讨大坝工作性态评估的新模型,实现综合考虑评价过程中存在的模糊性与随机性,并以实例验证该方法的可行性和有效性,该方法亦可用于其它水利工程、边坡工程的安全评价中。

2 大坝工作性态评估的指标体系

某水电站大坝为混凝土重力坝,坝顶长1080.0 m,最大坝高91.7 m,坝顶高程为267.7 m,为监

收稿日期:2016-03-12
基金项目:水利部公益性行业科研专项(201501030);水利部中央水利前期工作项目(2010518)
作者简介:范鹏飞(1987-),男,山西太原人,工程师,主要从事水利水电工程及大坝安全评价研究。
E-mail:syf48575848@qq.com

测大坝安全，该大坝在坝体及坝基部位分别设置了位移、渗流、应力应变和巡视检查等观测项目，并积累了较长系列的观测资料，包括水平位移、表面变形、内部变形、坝基深部变形、应力、应变、上下游水位、扬压力、渗透压力、渗漏量、绕坝渗流、裂缝和环境温度等。根据已有的原型观测资料结合该水电站的特征，选取变形、渗流及环境量3个部分共9个安全评价指标，具体见图1。本文选取的安全评价指标具有一定的模糊性和随机性，而云模型恰好是一种兼具随机性和模糊性的数学模型，因此运用云模型进行安全评价更加符合实际。表1为对应评价指标的评价标准。

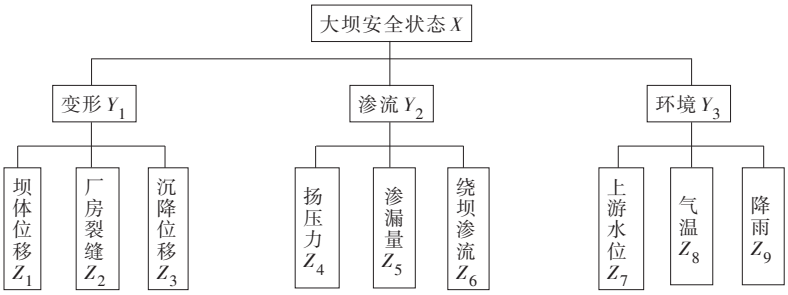

图1　大坝安全评价指标体系

表1　大坝安全评价指标标准

指标	低风险	较低风险	中等风险	较高风险	高风险
Z_1/mm	0，20	20，60	60，100	100，140	140，200
Z_2/mm	0，0.4	0.4，0.8	0.8，1.2	1.2，4.0	4.0，10
Z_3/m	0，1	1，2	2，3	3，5	5，10
Z_4	0，0.2	0.2，0.4	0.4，0.6	0.6，0.8	0.8，1.0
Z_5/(L/s)	0，5	5，20	20，40	40，80	80，200
Z_6/(L/s)	0，−0.5	−0.5，−2	−2，−4	−4，−8	−8，−15
Z_7/m	−20，−10	−10，1	1，3	3，4	4，5
Z_8/℃	0，5	5，10	10，20	20，30	30，50
Z_9/(mm/d)	0，2	2，4	4，10	10，20	20，50

表1中，对于扬压力指标Z_4，本次采用帷幕折减系数，该系数可高效判别防渗帷幕的防渗效果，从而判别扬压力是否出现异常；对于上游水位指标Z_7，由于该指标是一定范围内的一个波动值，因此上游水位指标Z_7采用实际运行水位减去正常蓄水位850 m；对于气温指标Z_8，根据工程设计提供的温度资料，该工程的年平均气温14~17 ℃，因此本文采用实际气温减去15 ℃作为评价指标；对于降雨指标Z_9，由于降雨的影响具有滞后效应，前期降雨影响一般在15 d以内，因此采用观测日前期降雨量的均值作为评价指标。上述评价指标标准的拟定并没有一个明确的范围，主要以工程类比、专家建议以及结合实际工程情况予以确定。因此上述评价标准都具有一定的模糊性，而云模型是一种兼具随机性和模糊性的数学模型，对于解决该类问题更符合实际。

3　大坝安全评价模型

3.1　云模型理论　云的定义：设X是一个用定量数值表示的集合，$X=\{x\}$称为论域。在论域X中定义模糊集合A，若A对于元素$x\in X$都有一个有稳定倾向的随机数μ，则称为元素x对A的隶属度。如果X中的元素x是简单有序的，则隶属度在论域上的分布称为隶属云；如果X中的元素x是无序的，则可由一定的法则f将论域X映射到某一有序的论域X'上，隶属度μ在X'上的分布称为隶属云。

发生器是最基本的云算法，它可以实现从语言值表达的定性信息中获取定量的范围和分布规律。云发生器主要分为正向云发生器和逆向云发生器。由定性概念到定量表示的转换过程称为正向云发生器；由定量表示到定性概念的转换过程称为逆向云发生器。正向云发生器根据云的数字特征

产生云滴正向云。逆向云发生器则可以将一定数量的精确数据转换为以数字特征表示的定性概念。

本文采用的是具有普适性的正向正态云发生器，正态云定义如下：设U是一个由确定数值表示的集合，称之为论域，对于论域U上边坡是否稳定这一定性概念C，若C对应论域U上的每一个元素x都有$x\sim N\left(E_x,\ E'^{2}_n\right)$，且元素$x$满足$\mu=\mathrm{e}^{-\left(x-E_x\right)^2/\left(2E'^{2}_n\right)}$，其中，$\mu$为$x$对定性概念$C$的确定度，就称$x$在$U$上的分布正态云。

图2为一标准的正态云模型示意图，其中期望E_x=0，熵E_n=4，超熵H_e=0.4，云滴数量n=1000，从图2可更方便、直观的理解云模型的3个数字特征值的含义。

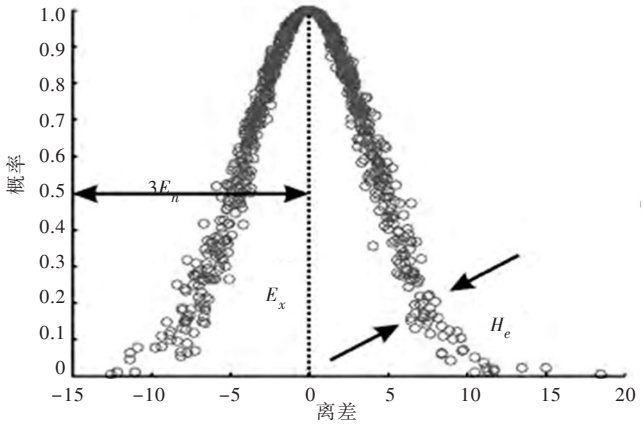

图2　正态云图

一维正态云模型算法有两种，对于从语言值表达的定性信息中获得定量信息的实现，应用正向云发生器，这是最基本的算法，也是一个前向的、直接的过程，即针对正态分布情况，给定云的3个数字特征，产生正态云模型的若干二维点，即云滴。采用云模型正向发生器实现大坝安全评价的定量-定性-定量转换，具体步骤如下：(1)根据期望值E_x和超熵H_e，在Matlab平台生成正态随机数E'_n；(2)根据期望值E_x和正态随机数$\left|E'_n\right|$，在Matlab平台生成正态随机数x；(3)根据得到的E'_n，x，计算$\mu=\mathrm{e}^{-\left(x-E_x\right)^2/2\left(E'_n\right)^2}$，$\mu$表示确定度；(4)跳到步骤(1)，经过重复计算得到足够多的云滴。

3.2　基于组合赋权的大坝安全评价指标权重确定　进行大坝工作性态分析时，各评价指标的权重较为重要，直接影响着评估结果的准确性及有效性。在现有的评价模型中，常用的权重确定方法有主观赋权法和客观赋权法。实际操作时，主观赋权法，如专家经验法、模糊评价法等由于人的主观因素会对评价结果产生影响。同样，客观赋权法，如熵权法等可能会因各指标数据所提供的信息量而造成偏差。为了既反映对大坝工作性态的直观认识，又兼顾客观调查数据的规律，本文选取投影寻踪法和Delphi法进行权重求解，最后采用组合赋权确定最终权重结果，其中投寻踪分析的权重具体计算过程参阅文献[12]，Delphi法的权重具体计算过程参阅文献[13]。

采用PPA和Delphi分别计算出各指标所占的权重后，为了充分利用主、客观权重的优势，本文采用组合赋权法计算其综合权重，既可以避免主观权重的随意性，也可避免客观权重的盲目性。

若有m种方法对n个评价指标赋权，得到权重矩阵如下：

$$W_l=\left(w_{l1},\ w_{l2},\ \cdots,\ w_{ln}\right)\quad\left(l=1,\ 2,\ \cdots,\ m\right)\tag{1}$$

上述权重矩阵的一种组合赋权为：

$$\boldsymbol{W}=\sum_{l=1}^{m}\alpha_l\boldsymbol{W}_l\tag{2}$$

因此，只要得到系数α_l使组合权重最佳即可。本文采用博弈论，构造α_l的约束方程如下：

$$\min\left\|\sum_{l=1}^{m}\alpha_l\boldsymbol{W}_l^{\mathrm{T}}-\boldsymbol{W}_k^{\mathrm{T}}\right\|\quad\left(k=1,\ 2,\ \cdots,\ m\right)\tag{3}$$

由矩阵的微分思想，对式(3)进行推导，得到约束方程如下：

$$\sum_{l=1}^{m}\alpha_l \boldsymbol{W}_k \boldsymbol{W}_l^{\mathrm{T}} = \boldsymbol{W}_k \boldsymbol{W}_k^{\mathrm{T}} \quad (k=1,\ 2,\ \cdots,\ m) \tag{4}$$

根据式(4)可得到最优组合系数$\alpha_l\,(l=1,\ 2,\ \cdots,\ m)$，对其归一化：

$$\alpha_l^{*} = \alpha_l \Big/ \sum_{l=1}^{m}\alpha_l \tag{5}$$

代入式(2)有：

$$\boldsymbol{W}^{*} = \sum_{l=1}^{m}\alpha_l^{*}\boldsymbol{W}_l \tag{6}$$

式中：$0 \leqslant w_l \leqslant 1$，$\sum_{i=1}^{m} w_l = 1$，表示大坝安全评价指标体系中第$l$个指标所占的最优权重。

3.3　基于组合赋权–正态云的大坝安全评价模型　本文构建的基于组合赋权的大坝安全评价云模型首要问题是确定各评价指标的综合权重，采用组合赋权法确定综合权重既可以避免客观权重的片面性，又可以避免主观权重的随意性，高效的融合了上述方法的优势。现将其步骤叙述如下。

(1)确定评价指标集$\boldsymbol{Z}=\{z_1,\ z_2,\ \cdots,\ z_\eta\}$，确定评价指标标准集$\boldsymbol{S}=\{s_1,\ s_2,\ \cdots,\ s_\eta\}$。

(2)由组合赋权法确定评价指标的综合权重集$\boldsymbol{W}=\{w_1,\ w_2,\ \cdots,\ w_\eta\}$。

(3)确定正态云模型的特征值$(E_{xij},\ E_{nij},\ H_{eij})$。假设$(x_{ij}^{1}、x_{ij}^{2})$为某一评价指标$c_i\,(i=1,\ 2,\ \cdots,\ \eta)$对应的评价等级$s_j\,(j=1,\ 2,\ \cdots,\ \gamma)$的范围，那么有：

$$E_{xij} = \left(x_{ij}^{1} + x_{ij}^{2}\right)/2 \tag{7}$$

x_{ij}^{1}、x_{ij}^{2}作为一个范围的边界值，可同时隶属于相邻的评价等级，即在相邻的评价等级中隶属度相同。

$$\exp\left\{-\frac{\left(x_{ij}^{1}-x_{ij}^{2}\right)^{2}}{8\left(E_{nij}\right)^{2}}\right\} = 0.5 \tag{8}$$

对式(8)做变换：

$$E_{nij} = \frac{x_{ij}^{1}-x_{ij}^{2}}{2.355} \tag{9}$$

(4)确定H_{eij}，本文采用经验值。

(5)特征值$(E_{xij},\ E_{nij},\ H_{eij})$确定后，由云模型正向发生器计算各评价指标在相应评价等级下的隶属度，构建隶属度矩阵$\boldsymbol{T}=\left(t_{ij}\right)_{\eta\times\gamma}$，为了结果更为可信，重复计算$N$次。

$$t_{ij} = \sum_{k=1}^{N} t_{ij}^{k} \Big/ N \tag{10}$$

(6)计算评价标准集$\boldsymbol{S}$上的模糊子集$\boldsymbol{F}$。

$$\boldsymbol{F} = \boldsymbol{W}\cdot\boldsymbol{T} = \left(f_1,\ f_2,\ \cdots,\ f_\gamma\right) \tag{11}$$

式中，$f_j = \sum_{i=1}^{\eta} w_i\, z_{ij}\,(j=1,\ \cdots,\ \gamma)$，为评价结果在第$j$个评价等级下的隶属度，根据最大隶属度原则即可确定最终评价结果。

4　工程实例

根据表1中的大坝安全评价标准，由云模型的定义，根据式(7)、式(9)及式(10)得到特征参数E_x、E_n和H_e，结果见表2。

表2　土石坝坝安全评价指标标准

指标	低风险	较低风险	中等风险	较高风险	高风险
Z	（10，8.493，1）	（40，16.985，1）	（80，16.985，1）	（120，16.985，1）	（170，25.478，1）
Z_2	（0.2，0.17，0.1）	（0.6，0.17，0.1）	（1，0.17，0.1）	（2.6，1.189，0.1）	（7，2.548，0.1）
Z_3	（0.5，0.425，1）	（1.5，0.425，1）	（2.5，0.425，1）	（4，0.849，1）	（7.5，2.123，1）
Z_4	（0.1，0.085，0.1）	（0.3，0.085，0.1）	（0.5，0.085，0.1）	（0.7，0.085，0.1）	（0.9，0.085，0.1）
Z_5	（2.5,，2.123，0.5）	（12.5，6.369，0.5）	（30，8.493，0.5）	（60，16.985，0.5）	（140，50.955，0.5）
Z_6	（−0.25，0.212，0.01）	（−1.25，0.64，0.01）	−（−3，0.85，0.01）	（−6，1.699，0.1）	（−11.5，2.97，0.1）
Z_7	（−15，4.246，1）	（−4.5，4.671，1）	（2，0.849，1）	（3.5，0.425，1）	（4.5，0.425，1）
Z_8	（2.5，2.123，0.1）	（7.5，2.123，0.1）	（15，4.246，0.4）	（25，4.246，0.4）	（40，8.493，0.5）
Z_9	（1，0.849，0.1）	（3，0.849，0.1）	（7，2.548，0.1）	（15，4.246，0.5）	（35，12.739，1）

根据计算得到的大坝安全评价云模型特征参数E_x、E_n和H_e，在Matlab软件中编制程序计算大坝安全评价指标的隶属度矩阵$\boldsymbol{T}$并绘制相应的正态云图，见图3，在计算隶属度矩阵时，由于云模型具有一定的随机性，可重复计算3 000次，以其期望值作为评价依据，具体结果见表3。

根据组合赋权法计算大坝各安全评价指标的综合权重为：

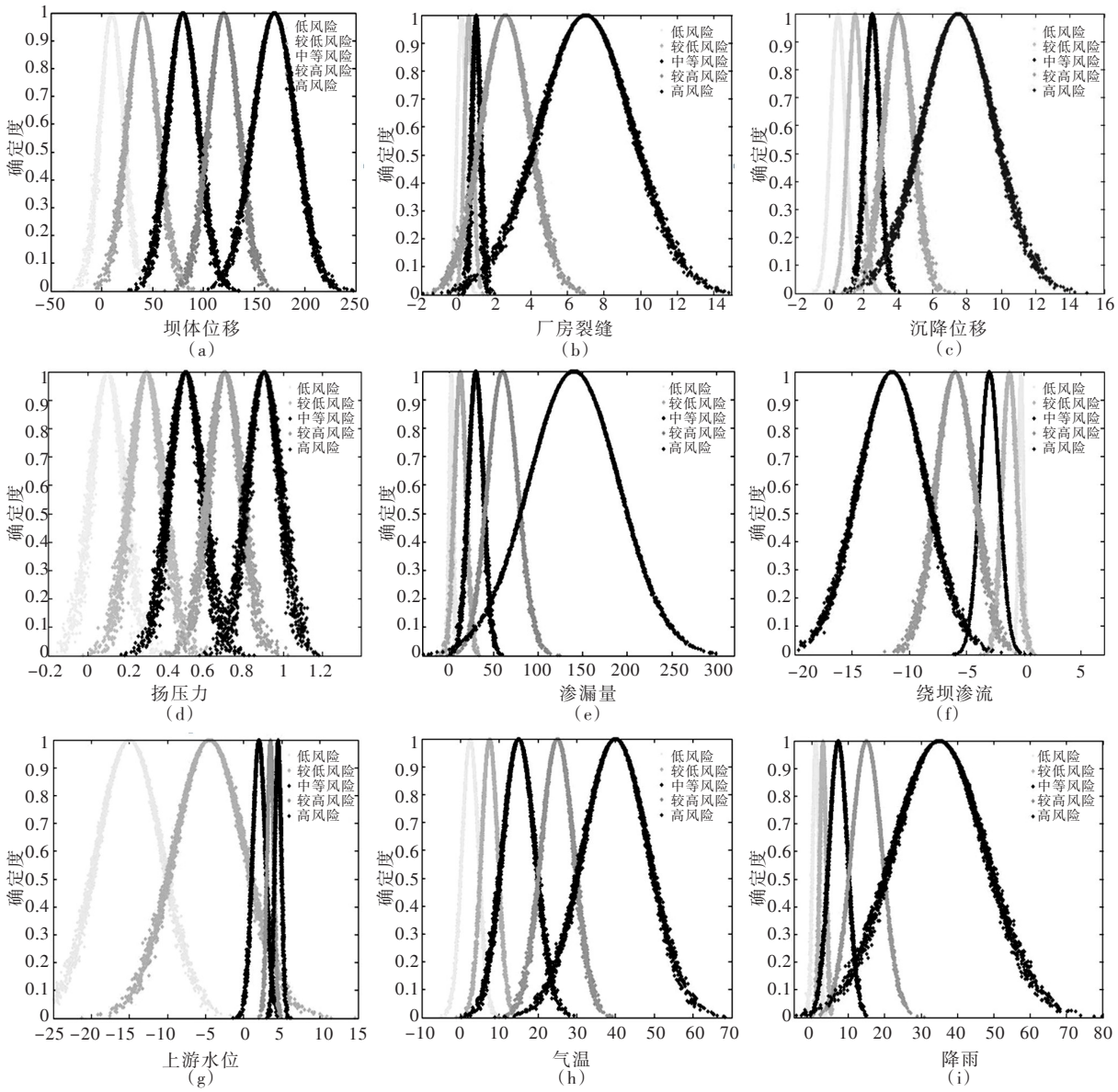

图3　大坝安全评价分级云图

表3　云模型平均综合评估值

指标	低风险	较低风险	中等风险	较高风险	高风险
Z_1	0.659	0.332	0.01	0	0
Z_2	0.725	0.431	0	0	0
Z_3	0.698	0.532	0	0	0
Z_4	0.711	0.214	0	0	0
Z_5	0.732	0.126	0	0	0
Z_6	0.811	0.211	0	0	0
Z_7	0.795	0.196	0	0	0
Z_8	0.698	0.228	0.02	0.01	0
Z_9	0.821	0.192	0	0	0

$$\boldsymbol{W}=\{0.114,\ 0.121,\ 0.098,\ 0.089,\ 0.126,\ 0.114,\ 0.114,\ 0.091,\ 0.133\} \tag{12}$$

计算出大坝安全评价指标综合权重 $\boldsymbol{W}$ 和隶属度矩阵 $\boldsymbol{T}$ 后，根据式(11)可计算评价标准域 $\boldsymbol{S}$ 上的模糊子集 $\boldsymbol{F}$，$\boldsymbol{F}=\left(f_1,\ f_2,\ \cdots,\ f_\gamma\right)$，$f_j=\sum_{i=1}^{\eta}w_i z_{ij}$，$j=1,\ \cdots,\ \gamma$，$f_j$ 为该水电站各安全评价等级下的隶属度。根据最大隶属度原则即可确定该水电站的评价等级。结果见表4。

表4　大坝安全评价结果

云模型隶属度					风险等级	
低风险	较低风险	中等风险	较高风险	高风险	正态云模型	模糊物元法[13]
0.743	0.270	0.003	0	0	低风险	低风险

由表4可知，本文模型分类结果为低风险，与其他方法结果吻合，表明应用基于云模型评价大坝工作性态是有效可行的。同时可知，大坝工作性态是一个定性概念，且分类过程中受诸多不确定因素影响与控制，故应用云数字特征表示此概念的不确定性具有优越性，利用以正态分布和正态隶属函数为基础的正态云发生器，可将稳定性的模糊性和随机性转化为确定度这个定量值，充分揭示大坝工作性态评价过程中的模糊性和随机性之间的关联，且结果便于工程应用。另外，大坝工作性态评估指标的实际分布形式对评价结果是有影响的，显然基于正态分布形式，构建相应的云模型和云发生器将取得最佳效果。

本文在此仅探讨了工程中广泛应用和参数常分布的正态分布形式下的边坡稳定性分类云模型，如何基于实测指标的统计分布形式构建云模型尚有待深入研究和完善。

5　结论

(1)针对评价中各指标权重难以确定的问题，提出了一种组合赋权方法。将投影寻踪计算值和主观赋权值相结合，并引入博弈论，使得主、客观权重之间和偏好系数间的差异程度一致，较合理地获得大坝工作性态分析中各指标的综合权重。(2)该大坝工作性态评估模型是基于概率理论，通过算法自动生成样本对概念的隶属度，避免了主观给定确定的隶属度值缺陷，并可建立随机性与模糊性的关联。实例应用结果表明，基于云综合评判的大坝工作性态评估模型较其它分析方法应用过程更加方便，且结果可靠。(3)基于云模型理论及组合赋权法建立的大坝工作性态评估模型，其预测的精度及可靠性取决于主要影响因素的选取、隶属函数的构建方法和评价指标权重的确定，若能较合理地解决这些问题势必会进一步提高大坝工作性态评估结果的精度。因此，本文建立的评估模型只是初步尝试，有些问题仍有待进一步研究。

参　考　文　献：

[1] 贾金生，袁玉兰，郑璀莹，等．中国2008年水库大坝统计、技术进展与关注的问题简论[C]// 第一届堆石坝国际研讨会论文集．北京：中国水利水电出版社，2009．

[2] 魏迎奇，孙玉莲．大坝沉降变形的灰色预测分析研究[J]．中国水利水电科学研究院学报，2010，7(1)：25-29．

[3] 魏迎奇，张申．基于偏最小二乘回归法的大坝渗漏分析与预测[J]．中国水利水电科学研究院学报，2011，8(3)：205-208，215．

[4] 刘若秀．大坝水环境对坝体混凝土的腐蚀评价[J]．东北水利水电，2015(11)：33-35，72．

[5] 吴云芳，李珍照，徐帆．BP神经网络在大坝安全综合评价中的应用[J]．河海大学学报：自然科学版，2003，31(1)：25-28．

[6] 贾军，黄铭，郭丹丹．约束型ME-PP模型在大坝安全评价中的应用[J]．水电能源科学，2014，32(5)：67-70．

[7] 苏怀智，吴中如，顾冲时．大坝工作性态模糊可拓评估的基本原理[J]．岩土力学，2006，27(11)：1967-1973．

[8] 江沛华，汪莲．基于变权的多层次模糊综合评判在大坝安全评价中的应用[J]．中国农村水利水电，2010，(4)：112-114．

[9] LI D，LIU C，GAN W．A new cognitive model：cloud model[J]．International Journal of Intelligent Systems，2009，24(3)：357-375．

[10] LI D，CHEUNG D，SHI X，et al．Uncertainty reasoning based on cloud models in controllers[J]．Computers & Mathematics with Applications，1998，35(3)：99-123．

[11] 沈进昌，杜树新，罗祎．基于云模型的模糊综合评价方法及应用[J]．模糊系统与数学，2012，26(6)：115-123．

[12] 王迎超，孙红月，尚岳全，等．基于特尔菲－理想点法的隧道围岩分类研究[J]．岩土工程学报，2010，32(4)：651-656．

[13] 苏怀智，吴中如，顾冲时．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．

Dam safety evaluation based on normal cloud model

FAN Pengfei

(*Shanxi Water Resources & Hydropower Construction Supervision Co.，Ltd，Taiyuan* 030002，*China*)

Abstract：To evaluate dam safety monitoring system accurately and reasonably，a model based on combination weight method and normal cloud model has been established to evaluate risk degree of dam. Three assessment indexes were considered，namely，deformation risk，seepage risk，and environmental risk in the process of safety evaluation of dam. Parameters of the cloud model and safety evaluation of dam risk grade were calculated with the chosen assessment indicators，membership matrix of assessment indicators was generated by normal cloud model generator based on dam monitoring data，and the combination weight method was used to compute the assessment indicator's comprehensive weights. Finally，the membership of dam under each safety evaluation grade was computed by weight matrix and membership matrix of assessment indicators. The result indicates that this method can reach a better evaluation conclusion.

Keywords：cloud model；combination weight method；dam；safety evaluation

（责任编辑：王冰伟）