

# 大坝安全监控中的不确定性信息初探

张乾飞,王锦国,李雪红

(河海大学水利水电工程学院,江苏 南京 210098)

**摘要** 首先根据大坝安全监控研究对象不确定性的性质,将不确定性信息分为随机信息、模糊信息、灰信息、未确知信息以及盲信息等,并概述了这几种不确定性信息的表现形式及其处理方法,然后针对大坝安全监控信息采集和处理的特点,简述了不确定性信息在大坝安全监控中的具体表现形式,最后探索了不确定性信息在大坝安全监控领域中的应用前景,并提供了一种采用不确定性信息处理方法对大坝安全进行分析和评价的新的思路。

**关键词** 大坝 安全监控 不确定性信息

**中图分类号** :TV698.1

**文献标识码** :A

**文章编号** :1000-1980(2002)05-0113-05

大坝安全直接关系到下游人民生命财产的安全,其工作性态的安全监测是及时发现大坝安全隐患的有效手段和途径。在获取一定的安全监测信息之后,如何运用有效的数学方法和物理模型对之进行分析和处理,以便及时地发现大坝安全隐患以及采取合理有效的补救预防措施,是目前大坝安全监控后处理的主要工作之一。

研究信息特别是不确定性信息的表现形式和处理方法,是生产科研等众多领域中进行定量分析的重要环节。从认知的角度上讲,信息的存在改变了我们对某一复杂事物的看法和认识,使人“由不知到已知”。基于此,可将信息的数学描述定义如下<sup>[1]</sup> :

**定义1** 设  $x$  是一个欲知元,  $U$  是一个消息,  $S$  是一个经典集合。若  $U$  使人得知  $x$  在  $S$  中,则称  $U$  是  $x$  的限位消息。对于任意消息  $A \subset U$ ,称  $A$  为关于限位消息  $U$  的信息,简称信息。

如果这种“已知”是完整的、确定的,则称相应的信息为确定性信息。如果这种“已知”只是部分的、不确定的,这种信息则为不确定性信息。当然,信息完整是相对而言的,而信息不完整则是绝对的、普遍存在的。在工程理论等研究领域,除了众所周知的确定性信息外,由于所研究对象受很多偶然因素和不可预知因素的影响以及事物内外因果关系的复杂性,还存在着大量的不确定性信息。在大坝安全监控领域也是如此。那么如何研究和描述这种不确定性信息呢?为此,下面根据研究对象不确定性的性质,对不确定性信息进行分类,然后简述其在大坝安全监控中的表现形式及应用情况。

## 1 不确定性信息的类型及其研究方法

根据研究对象不确定性的差别,如所研究对象表现出的偶然性、不可预知性以及事物内外因果关系的复杂性、人们主观认识上的差异性等,常见的不确定性信息有随机信息、模糊信息、灰信息、未确知信息以及盲信息等几种表现形式<sup>[1]</sup>。

### 1.1 随机信息

**定义2** 设  $x$  是欲知元,  $S$  是非空集合(Cantor集),  $U$  为“ $x$  在  $S$  中”,  $A$  为“ $x$  在  $S$  中,且  $x$  是  $e \in S$  的可能性为  $\alpha_e$  ( $0 \leq \alpha_e \leq 1$ )”,显然  $A \subset U$ ,所以  $A$  是信息。若  $\sum \alpha_e = 1$ ,则称  $A$  为随机信息。

随机信息是研究得最早的一类不确定性信息,它是以随机试验为背景的信息,通常是用来客观地描述未来事物的。随机信息对未来事物预测的总可信度为1,即这种随机试验是以未来事物可能出现的结果完全已知为前提的,只是在试验之前不能确定哪一个结果会出现。随机信息可用随机变量及其分布函数来表达和处

理,概率统计是研究随机信息的数学表达和处理的科学,研究的是‘随机不确定’现象,着重于考察‘随机不确定’现象的历史统计规律,考察具有多种可能发生结果的‘随机不确定’现象中的每一种结果发生的可能性的

大小.  
信息论常用信息熵来描述一个随机系统的信息测度.信息熵的大小刻画了该随机信息的随机程度,其定义为

$$I = - \sum_{i=1}^n P_i \ln P_i \qquad \sum_{i=1}^n P_i = 1 \tag{1}$$

1.2 模糊信息

定义3 设  $x$  是欲知元,  $S$  是非空集合(Cantor 集),  $U$  为“ $x$  在  $S$  中”,  $A$  为“ $x$  在  $S$  中,并且  $x$  是  $e \in S$  的隶属度为  $\alpha_e (0 \leq \alpha_e \leq 1)$ ”,显然  $A \subset U$ ,所以  $A$  是信息.称  $A$  为模糊信息.取  $S$  作论域,令  $\mu(e) = \alpha_e, e \in S$ ,则以映射  $\mu$  为隶属函数确定的论域  $S$  上的模糊子集  $\bar{A}$  恰好是模糊信息  $A$  的数学表现.

模糊信息是由于没有严格的界限划分而使得很难用精确的尺度来刻画的一种不确定性信息,它广泛存在于客观世界中.模糊信息可用模糊集合来表达和处理.模糊数学创始人 L. A. Zadeh 创立的模糊数学就是表达和处理模糊信息的数学理论和方法.模糊数学着重研究‘认知不确定’问题,其研究对象具有‘内涵明确,外延不明确’的特点,模糊数学中常用模糊度来刻画一个模糊信息的模糊程度,模糊熵作为一种特殊的模糊度,则是信息论中熵概念的延伸.

应该注意的是,随机信息中提到的欲知元‘ $x$  是  $e \in S$  的可能性为  $\alpha_e$ ’与模糊信息中提到的欲知元‘ $x$  是  $e \in S$  的隶属度为  $\alpha_e$ ’在意义上是不同的.模糊信息的隶属度  $\alpha_e$  是指  $e$  实实在在有(整体的)  $\alpha_e$  部分属于  $x$ ,并且不受条件  $\sum \alpha_e = 1$  的限制,允许大于 1 而  $x$  是  $e \in S$  的可能性为  $\alpha_e$ ,仅仅指可能而已,并非指  $e$  必定有  $\alpha_e$  部分属于  $x$ .比如一次试验,  $x$  出现的可能性为 0.99,但这并不说明这次试验  $x$  必定发生,并且此处  $\alpha_e$  严格满足条件  $\sum \alpha_e = 1$ .

1.3 灰信息

定义4 设  $x$  是欲知元,  $S$  是非空集合(Cantor 集),  $S' \subset S$ ,  $U$  为“ $x$  在  $S$  中”,  $A$  为“ $x$  在  $S'$  中”,显然  $A \subset U$ ,所以  $A$  是信息.称信息  $A$  为灰信息.令

$$\bar{\mu}(x) = \begin{cases} 1, & x \in S' \\ 0, & x \notin S' \text{ 且 } x \in S \end{cases} \qquad \underline{\mu}(x) \equiv 0, x \in S \tag{2}$$

则以  $\bar{\mu}(x)$  和  $\underline{\mu}(x)$  为上下隶属函数确定的论域  $S$  上的灰子集  $\bar{A}$  刚好是灰信息  $A$  的数学表现.

灰信息是部分已知、部分未知的不确定性信息,即信息不完全,是‘不确定性最强’的一种不确定性信息.灰信息可用灰集合和灰数进行数学表达.邓聚龙教授所创立的灰色数学和灰色系统理论则是处理灰色信息的数学理论和方法,它们着重研究‘外延明确、内涵不明确’的对象,以解决‘小样本、贫信息不确定’问题.如常见的区间灰数  $\otimes \in [a, b], a < b$ ,外延十分明确(该数的大小介于  $a$  到  $b$  之间),内涵却不明了(该数具体是多少还不得而知,即‘灰’).灰数是系统行为特征的一种表现形式,灰数的信息含量反映了人们对灰色系统的认识程度.灰色数学中常用灰数白化值来代表这个灰数参加建模和运算,并用灰度来刻画灰信息的灰色程度.设灰数  $\otimes \in [a, b], a < b$ ,则灰度可定义为

$$g(x) = \frac{l(\otimes)}{|\hat{\otimes}|} \tag{3}$$

式中:  $l(\otimes)$  ——  $\otimes$  的定义信息域的长度;  $\hat{\otimes}$  ——  $\otimes$  的均值白化数.

1.4 未确知信息

在定义2中,若  $\sum \alpha_e < 1$ ,则称  $A$  为未确知信息.未确知性是由王光远院士首先提出的,它是不同于随机性、模糊性和灰性的又一种不确定性,这种不确定性不是由于事物本身造成的,而是由于决策者的主观认识所造成的.不管客观事物是确定还是不确定,是已发生还是未发生,只要决策者不能完全把握事物的真实状态和数量关系,那么它在决策者心目中就是“不确定的”,这种主观的认识上的不确定性即为‘未确知性’<sup>[1,2]</sup>.随机信息是以随机试验为背景的,未确知信息则以盲动试验为背景.盲动试验与随机试验的差别在于它的一切试验结果不全是已知的,亦即它对未来事物预测的总可信度小于 1.

未知知性既不同于只是针对未来将要发生的事物的随机性,又不同于由于不可能给某事物以明确定义和评定标准而形成的某域上的模糊性,也不同于灰性. 相对于随机性和模糊性而言,未知知性为‘弱’不确定性,未知知性的‘弱’表现在两个方面. 首先,当未知知性与随机性和模糊性共存时,它被后二者所掩盖或包含. 其次,当未知知性单独存在时,它可以用主观概率和主观隶属度来表达,也就是说可采用随机性和模糊性的表达方式来表达<sup>[2]</sup>.

未知知性与灰性在性质上有很大的 consistency,都是部分已知部分未知,但二者又有重要的区别,其区别在于灰量的已知部分少于未知量的已知部分,也就是说未知知信息的信息量要多于灰信息的信息量. 比如,只知道一个数落在区间 $[a, b]$ 上,那么这是一个区间灰数,如果同时还知道它在该区间上的某种分布,这才是一个未知知数.

未知知信息可用未知知数(量)来进行数学表达,而未知知数学则是研究和处理未知知信息的数学理论和方法. 未知知有理数是最基本、最简单、应用最广泛、使用方便的未知知数,它是实数的推广,其定义如下<sup>[1]</sup>.

定义 5 对任意闭区间 $[a, b]$ ,  $a = x_1 < x_2 < \cdots < x_n = b$ , 若函数  $\varphi(x)$  满足

$$\varphi(x) = \begin{cases} \alpha_i, & x = x_i (i = 1, 2, \cdots, n) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \tag{4}$$

且  $\sum_{i=1}^n \alpha_i = \alpha, 0 < \alpha_i, \alpha \leq 1$ , 则称 $[a, b]$ 和  $\varphi(x)$ 构成一个  $n$  阶未知知有理数,记作 $[[a, b], \varphi(x)]$ ,称  $\alpha$ ,  $[a, b]$ 和  $\varphi(x)$ 分别为该未知知有理数的总可信度、取值区间和可信度分布密度函数. 由此定义可以看出,当  $n = 1$  且  $\alpha = 1$  时,未知知有理数退化为实数,即实数是特殊的一阶未知知有理数.

### 1.5 盲信息

上面提到的随机信息、模糊信息、灰信息、未知知信息都只是信息的一种,统称为单式信息. 但是,客观上信息的不确定性往往不是单一的,常是多种不确定性的混合体. 如凡是有行为因素参与同时包含状态因素的任何体系呈现的信息,都至少存在两种上面提到的不确定性. 因为行为因素必导致未知知性,而状态因素将导致随机性、模糊性、灰性或兼而有之. 借助‘几何混沌’的概念,称任意复杂的信息为‘信息混沌’<sup>[4]</sup>. 在信息混沌类中凡具有随机性、模糊性、灰性、未知知性中两种或两种以上不确定性的信息称为盲信息.

盲信息可用盲数来进行数学表达. 实际上,盲数是未知知有理数的扩展,当未知知有理数  $\varphi(x)$  的定义域从  $R$  扩展到区间型灰数集  $g(I)$  后,  $\varphi(x)$  则从未知知有理数扩展为一个新的函数  $f(x)$ . 由此,可定义盲数如下<sup>[1]</sup>:

定义 6 设  $a_i \in g(I), \alpha_i \in [0, 1], i = 1, 2, \cdots, n, f(x)$  为定义在  $g(I)$  上的灰函数,且

$$f(x) = \begin{cases} \alpha_i, & x = a_i (i = 1, 2, \cdots, n) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \tag{5}$$

若当  $i \neq j$  时有  $a_i \neq a_j$ , 且  $\sum_{i=1}^n \alpha_i = \alpha \leq 1$ , 则称函数  $f(x)$  为一个盲数. 其中  $\alpha_i$  为  $f(x)$  的  $a_i$  值的可信度,  $\alpha$  为  $f(x)$  的总可信度,  $n$  为  $f(x)$  的阶数. 由此定义可以看出,盲数包含区间型灰数和未知知有理数,在满足适当的条件下,盲数可以退化为区间灰数或者未知知有理数,甚至实数.

因为很多实际问题的取值背景都是针对某一观测量或者输出值落在某个小区间上的可信度而言的,所以盲信息的应用前景更为广泛.

## 2 大坝安全监控中的不确定性及其处理方法

大坝系统是一个不确定性系统,在大坝安全监控中存在着大量的不确定性信息,主要表现在以下几个方面.

### 2.1 随机性

在数据采集过程中,由于观测人员、仪器设备以及外界环境条件的影响,采集样本不可避免地含有误差,这种误差通常表现出一定的随机性. 在大样本的数据分析、统计和安全监控模型的建立中,观测数据常表现出一定的统计规律,传统的建模原理就是在此基础上进行的. 采用回归分析或逐步回归分析的方法,假设残

差服从正态分布,由此建立大坝安全监控的统计模型.这也是目前大坝安全监控中应用得最多的监控模型.此外,还有确定性(结构计算)和不确定性(统计分析)相结合的混合模型等.

## 2.2 模糊性

模糊性也广泛存在于大坝安全监控的信息中.如大坝安全监控的日常评判准则中提到的‘过大变形’<sup>[3]</sup>就是模糊概念.实际上很多定性的观测和描述成果、结论评价都具有明显的模糊性.

另一方面,模糊性还表现在各效应量和环境量、结构性态的关系上.尽管原型观测资料真实地反映了建筑物各观测物理量的实际情况,但是它们之间的关系是极为复杂的,往往很难用物理力学方法和先进的数值计算方法来确定,即它们之间是一种模糊关系.

在大坝安全监控中,可用聚类分析法、似然推理法和综合评判法对大坝的变形及安全度进行分析并建立预测模型,最后还可利用模糊数学理论对大坝原型结构进行模糊可靠度分析.

## 2.3 灰性

大坝是一个复杂的灰色系统,其结构性态、变形状况、各种力学参数等都是难以确定的,且具有明显的灰性.影响大坝变形行为的因素也是极其复杂的,其中弹性部分主要受水压、温度等因素的影响,而其中随时间变化的时效部分除了受混凝土、基岩的徐变及坝基的裂隙、节理等已知因素的影响外,还受混凝土老化和施工质量等许多未知因素的影响,由此可见,大坝的变形是灰色的.

另一方面,由于既不明瞭有哪些因素作用于坝体,也不明瞭它们的作用方式,因而采用不适当的系统描述而使模型与原型产生了质的偏差等,它们均表现为系统结构或参数关系的可变与非惟一性以及模型的不适应性<sup>[4]</sup>.从灰色系统的观点看,可以把这种不确定性归因于系统的灰结构和灰参数.实际上,可以将整个大坝系统看成一个‘灰箱’,其行为方式便是在一定的灰输入作用下所产生的灰输出.

在大坝安全监控中,为了适应‘小样本、贫信息’的特点,克服对客观事物认识的不确定性以及统计信息的不完全性等缺陷,可将大坝安全监控模型中的参数和实测数据均视为灰色,利用灰色系统方法对灰参数进行辨识,并对大坝的监测效应量进行灰色区间预报.另外,还可通过建立灰色过程模型来分析大坝的一些结构特征和稳定性,通过灰色聚类对大坝的安全度进行灰色综合评判等<sup>[4]</sup>.

就大坝安全监控模型而言,一般的统计模型更有利于数据的拟合和各分量的分离,而模型的预报功能则相对较弱.根据概率论中的大数定律和中心极限定理,统计模型的建立只有在大样本的条件下才具有普遍意义,这给模型的建立及预报带来一定困难.而灰色系统理论则认为,影响系统行为效果的原因是灰的,系统输出的统计数据本身是这种灰因素综合作用的结果,这种结果必然蕴涵着系统本身某种内在的规律,通过数据列的生成处理,可以挖掘和发现这种内在规律.灰色预测通过数据列的多次累加生成变换,使变换后的非负数据序列最终总可以用指数曲线拟合,使原始数据列变换为具有较强规律性的数据列,然后按生成的数据列建立模型.这种灰色模型可以有效地克服统计模型存在的问题.这就是说,从理论上讲,按灰色系统理论建立系统模型更符合系统变化的实际情况.从预报角度看,灰色模型有其独特的优越性.

## 2.4 未确知性

未确知性介于随机性和灰性之间.实际上,大坝安全监控中的许多信息既不完全具有随机性,也不完全具有灰性.比如,对某一监测量而言,根据大坝的物理性态和结构模型,我们能够大概估计出其数值范围(灰性)及其分布形式(随机性),但又不能完全确定其分布形式,其总可信度小于1(未确知性).

未确知数学在大坝安全监控中的应用较少,但有一点可以肯定,采用未确知数学及其他数学手段和方法相结合来处理大坝安全监控中的未确知信息,可以更精确地描述大坝的行为状态及其变化过程.比如,对运行多年的大坝,在其时效变形已基本稳定的情况下,其变形性态主要受环境量变化的影响(但又不完全是),亦即在一定的环境量作用下,其变形应该落在一定的区间内,但其总可信度小于1,即从模型预报的角度上讲,其变形还有可能是其他值,这样一种变形行为可用未确知有理数来描述,并可由此建立大坝变形的安全监控和预报模型.

同理,还可用未确知数学的方法来拟定大坝的安全监控指标,对自动化监测数据进行数字滤波,以提高自动化监测系统的抗干扰性等.

## 3 结 语

不确定性广泛存在于各种具有行为因素和状态因素的客观系统中,根据各种不确定性的内在本质,本文

对不确定性信息进行了分类和数学描述,并论述了处理各种不确定性信息的数学理论和方法.最后结合大坝安全监控中的实际情况,简述了各种不确定性在大坝系统中的表现方式及其在大坝安全监控中的应用情况.总体而言,不确定性信息已在大坝安全监控中得到了广泛运用,特别是模糊数学、灰色系统理论的迅猛发展,使大坝安全监控中的模糊信息、灰信息得到了有效处理和体现,而未确知数学在大坝安全监控中的应用,尚处于起步和萌芽阶段,还有待进一步研究.

#### 参考文献:

- [1] 刘开第,吴和琴,庞彦军,等.不确定性信息数学处理及应用[M].北京:科学出版社,1999.4~13,44~46,161~163.
- [2] 王光远.未确知信息及其数学处理[J].哈尔滨建筑工程学院学报,1990(4):1~3.
- [3] 吴中如,顾冲时.大坝安全综合评价专家系统[M].北京:北京科学技术出版社,1997.41.
- [4] 周晓贤.大坝安全监控的灰色综合评价模型研究[D].南京:河海大学,2001.

## Study on indefinite information in dam safety monitoring

ZHANG Qian-fei, WANG Jin-guo, LI Xue-hong

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

**Abstract:** The indefinite information in dam safety monitoring is classified into random information, fuzzy information, grey information, unascertained information, and blind information, and their forms of expression and mathematical treatment methods are generalized. The specific forms of indefinite information are briefly discussed according to the characteristics of information acquisition and treatment in dam safety monitoring. Finally, the prospect of application of indefinite information to dam safety monitoring is probed, and a new train of thought is provided for analysis and appraisal of dam safety based on the indefinite information treatment method.

**Key words:** dam; safety monitoring; indefinite information

## 欢迎订阅 2003 年《南京林业大学学报(自然科学版)》

CN32-1161/S ISSN 1000-2006 国内外公开发行 邮发代号 28-16

《南京林业大学学报(自然科学版)》创刊于 1958 年.主要刊登生物学、森林地学、林学基础理论、森林培育学与经营管理、森林资源与环境、森林与自然保护、水土保持与荒漠化防治、木材工业与技术科学、林业机械与电子工程、林产化学与工业、园林植物与风景园林、林业经济与管理、森林工程、土木工程等以及有关边缘学科的研究成果.每期设置专栏集中报道重点项目、基金项目及重大课题的研究成果.

该版本学报是国家科技部中国科技论文统计源期刊、中国科学引文数据库来源期刊、中国学术期刊综合评价数据库来源期刊、中国自然科学核心期刊、《中国学术期刊(光盘版)》首批入编期刊、万方数据系统入编科技期刊群,被《CA》、《FA》、《FPA》、《中国林业文摘》、《中国生物学文摘》、《竹类文摘》等著名检索刊物收录.

该版本学报大 16 开本,双月刊,逢单月末出版.国内定价:每期 6.00 元.邮发代号 28-16.国外总发行:中国国际图书贸易总公司(北京 399 信箱),发行代号 352Q.

可通过全国非邮发中心联合征订服务部办理订阅手续.天津市大寺泉集北里别墅 17(邮编:300381);也可直接与编辑部联系:南京市龙蟠路南京林业大学学报编辑部(邮编:210037),电话:025-5428247,025-5427018.

E-mail: xuebao@njfu.edu.cn 或 journal@njfu.edu.cn