

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2009.01.007

模糊可拓模型在坝体变形评价中的应用

远 近¹,郑东健¹,李 波¹,赵 斌²

(1. 河海大学水利水电工程学院,江苏 南京 210098 ; 2. 国网电力科学研究院/南京南瑞集团公司,江苏 南京 210003)

摘要 :基于坝体各种变形实测资料 ,构造了坝体变形综合评价的经典域物元和节域物元 ,应用物元和可拓集合中的关联函数 ,结合变形监控模型 ,实现了坝体多种变形量的集成描述 ,建立了大坝变形性态综合评估的模糊可拓模型。实例分析表明该方法切实可行 ,分析结果综合反映了坝体各种变形监测量的变化性态 ,符合实际情况。

关键词 :坝体变形 ;评估模型 ;可拓理论

中图分类号 :TV64 文献标识码 :A 文章编号 :1006-7647(2009)01-0023-03

The application of fuzzy extension model in dam deformation evaluation //YUAN Jin¹ ,ZHENG Dong-jian¹ ,LI Bo¹ ,ZHAO Bin² (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China ; 2. State Grid Electric Power Research Institute / NARI Corporation , Nanjing 210003 , China)

Abstract : Based on various deformation data , the classical and limited matter elements of dam deformation comprehensive evaluation are set up. Various deformation amounts are described synthetically by applying the correlation function of matter elements and extension sets with a monitoring model of deformation. A fuzzy extension model evaluating dam deformation is established. A case study shows that the method is practical , and that the analysis results reflect the variation characteristics of the dam deformation monitoring quantities , and corresponds with the actual situation.

Key words : dam deformation ; evaluation model ; extension theory

在大坝安全诊断中 ,坝体变形是判断大坝工作性态的主要诊断指标之一。坝体变形包括坝体水平位移、垂直位移、挠度倾斜等诸多方面 ,其中每一方面又与水压力、温度、渗流、施工、地基以及周围环境等因素有关 ,各项因素存在许多随机性、不确定性和模糊性 ,使得人们对坝体变形的判读评价受到限制。目前进行综合评估的主要方法有模糊综合评估、属性识别、灰色聚类分析等 ,如文献 [1] 提出了基于突变理论的大坝实测性态模糊综合分析评判方法 ; 文献 [2] 运用系统识别理论实现了大坝结构性态的综合评价 ; 杨燕春 [3] 、蔡文 [4] 等创立了可拓学 , 引进了由事物、特征及其量值构成的“物元”这一概念作为解决问题的逻辑细胞 , 其理论基础为物元理论和可拓集合理论。与其他评估方法相比 , 可拓理论具有统一的评估模型 , 拓展了关联函数值域范围 , 可更全面地集成分析评估对象。近年来 , 可拓学已初步应用于围岩稳定性判别 [5] 、大坝工作性态评估 [6] 等多属性决策问题 , 并取得了一定的效果。笔者应用

模糊可拓评估理论 , 结合变形监控模型 , 对坝体变形性态进行了综合评价。

1 坝体变形评估的物元模型

1.1 评估等级标准

根据国内外专家经验和常用分级标准 , 设定坝体变形评估等级 I_p 为 5 级 , 即正常 I_1 , 基本正常 I_2 , 轻度异常 I_3 , 异常 I_4 , 险情 I_5 。依据评估指标度量方法 , 将评估指标规格化为 [0 , 1] 区间上的模糊隶属度值 , 按照数值越小对安全越有利的原则 , 分级标准设定如下 [6] :

$$I_p = \{ I_1 , I_2 , I_3 , I_4 , I_5 \} = \{ 0.0 \sim 0.2 , 0.2 \sim 0.4 , 0.4 \sim 0.6 , 0.6 \sim 0.8 , 0.8 \sim 1.0 \} \quad (1)$$

1.2 诊断物元

物元模型用如下有序三元组表示 :

$$R = (I , C , \mu)$$

式中 : I 为事物的名称 , 即研究对象 ; C 为特征的名

基金项目 : 国家自然科学基金重点基金(50539010) ; “ 十一五 ” 国家科技支撑计划(2006BAC14B03) ; 中国水电顾问集团公司科技项目(CHC-KJ-2007-02)

称,即评估指标 μ 为事物关于某一特征的量值,即 I 关于 C 所取的特征值^[4]。

本文以坝体变形为事物,以水平位移、垂直位移、挠度倾斜等诊断指标为特征,以指标规格化值为特征值,则大坝水平位移诊断物元可用下式来描述:

$$R = (I, C, \mu) = \begin{bmatrix} I & c_1 & \mu_1 \\ & & \\ & & \\ & c_n & \mu_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{坝体变形, 水平位移, } c_1 \text{ 特征值} \\ & & \\ & & \\ \text{挠度倾斜, } c_n \text{ 特征值} \end{bmatrix} \quad (2)$$

1.3 评估模型的经典域和节域

1.3.1 经典域物元

经典域物元为

$$R_i = (I_i, C, \mu_i) = \begin{bmatrix} I_i & c_1 & \mu_{i1} \\ & & \\ & & \\ & c_n & \mu_{in} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_i & c_1 & a_{i1}, b_{i1} \\ & & \\ & & \\ c_n & a_{in}, b_{in} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: R_i 为坝体变形的第 i 级别($i = 1, \dots, m$), m 为所划等级数,文中 $m = 5$; c_j 为坝体变形的第 j 个特征($j = 1, 2, \dots, n$), n 为坝体变形的特征数; $\mu_{ij} = a_{ij}, b_{ij}$ 表示级别 i 第 j 个特征 c_j 规格化后的量值域,即各等级关于对象评估指标所取的经典域。

1.3.2 节域物元

节域物元为

$$R_p = (I_p, C, \mu_p) = \begin{bmatrix} I_p & c_1 & \mu_{p1} \\ & & \\ & & \\ & c_n & \mu_{pn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_p & c_1 & a_{p1}, b_{p1} \\ & & \\ & & \\ c_n & a_{pn}, b_{pn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: I_p 为坝体变形所分级别的全体; μ_{pj} 为特征 c_j 的值域,即 I_p 的节域, $\mu_{pj} = a_{pj}, b_{pj}$ 。由于规格化处理后的各特征值均为 $[0, 1]$,于是可得节域 $R_p = (I_p, C, [0, 1])$ 。

1.3.3 现状物元

现状物元为

$$R_t = (K(t), C, \mu(t)) = \begin{bmatrix} K(t) & c_1 & \mu_1(t) \\ & & \\ & & \\ & c_n & \mu_n(t) \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: $K(t)$ 为物元系统中待评对象; $\mu_j(t)$ 为某时刻 t 评估指标 c_j 的规格化取值。

1.4 确定关联函数

1.4.1 单指标关联度

将大坝工作性态物元中待评对象 I 的第 j 个特征关于第 i 级别的关联函数记为 $K_i(\mu_j(t))$,其中 $i = 1, 2, \dots, m$, $j = 1, 2, \dots, n$,其计算过程如下^[7]:

a. 当 $\mu_j(t) \notin [a_{ij}, b_{ij}]$ 时,关联函数为

$$K_i(\mu_j(t)) = \frac{\rho(\mu_j(t), a_{ij}, b_{ij})}{\rho(\mu_j(t), a_{pj}, b_{pj}) - \rho(\mu_j(t), a_{ij}, b_{ij})} \quad (6)$$

$$\text{其中 } \rho(\mu_j(t), a_{ij}, b_{ij}) = \left| \mu_j(t) - \frac{a_{ij} + b_{ij}}{2} \right| - \frac{b_{ij} - a_{ij}}{2} \quad (7)$$

$$\rho(\mu_j(t), a_{pj}, b_{pj}) = \left| \mu_j(t) - \frac{a_{pj} + b_{pj}}{2} \right| - \frac{b_{pj} - a_{pj}}{2} \quad (8)$$

b. 当 $\mu_j(t) \in [a_{ij}, b_{ij}]$ 时,关联函数为

$$K_i(\mu_j(t)) = - \frac{\rho(\mu_j(t), a_{ij}, b_{ij})}{b_{ij} - a_{ij}} \quad (9)$$

1.4.2 权系数及多指标综合关联度

每个评估指标的权系数由下式计算:

$$\lambda_{ij} = \frac{\mu_j(t)}{\sum_{j=1}^n \frac{\mu_j(t)}{b_{ij}}} \quad (10)$$

待评对象 I 关于等级 i 的关联度为

$$K_i(I) = \sum_{j=1}^n \lambda_{ij} K_i(\mu_j(t)) \quad (11)$$

1.5 对待测样本所属类别的判定

若 $K_i = \max K_i(I)$,其中 $i = 1, 2, \dots, m$,则判定样本 I 属于 i 类。

2 评估指标的原始数据规格化方法

为了与整体变形诊断标准对应,把评价指标值(实测效应量)划分为5个区域。水平位移等评价指标测值过大或过小时均为非正常表现,在分区时,以 $\hat{y}$ ($\hat{y} = f(x)$)是根据数学模型求出的拟合值)为中心在其上下两边考虑观测值的偏离程度来划分区域,其中 y 为效应量观测值, S 为模型剩余标准差^[8,9],则评价指标值可进行如下区域划分:①A区 $y_{\min} \leq y \leq y_{\max}$,且 $\hat{y} - 2S \leq y \leq \hat{y} + 2S$;②B区 $y_{\min} \leq y \leq y_{\max}$,且 $\hat{y} + 2S \leq y \leq \hat{y} + 3S$ 或 $\hat{y} - 3S \leq y \leq \hat{y} - 2S$;③C区 $y_{\min} \leq y \leq y_{\max}$,且 $y \geq \hat{y} + 3S$ 或 $y \leq \hat{y} - 3S$;④D区 $y > y_{\max}$ 或 $y < y_{\min}$,且 $y \leq \hat{y} + 3S$ 或 $y \geq \hat{y} - 3S$;⑤E区 $y > y_{\max}$ 或 $y < y_{\min}$,且 $y > \hat{y} + 3S$ 或 $y < \hat{y} - 3S$ 。

设某一时刻 t ,由监控模型求得大坝变形的计算拟合值 $\hat{y}$ 与该时刻实测值 y 进行比较,得到 $y - \hat{y}$ 。根据概率统计理论, $|y - \hat{y}|$ 落入 $[0, 2S]$ 的概率为95.5%,落入 $[0, 3S]$ 的概率为99.7%。据此,只需对上述分区区域A、B、C、D进行隶属函数的定性描述就可以达到一般工程要求。

根据评价指标的划分等级,利用线性插值的方法模拟其边界的模糊性,将评估指标的原始数据规格化为[0,1]区间上的模糊隶属度值,其隶属度函数如图1所示。

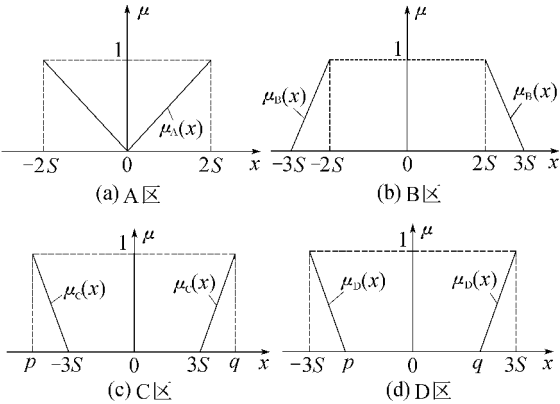


图1 效应量观测值的隶属度函数
(令 $x = y - \hat{y}$, $p = y_{\min} - \hat{y}$, $q = y_{\max} - \hat{y}$)

3 工程应用实例

以某重力坝坝体变形形态分析为例,验证文中所述方法的合理性和有效性。

该重力坝最大坝高22.5m,长66.42m,坝基为白垩系宣南统红层。该坝于1973年4月开始施工,1977年5月蓄水发电,期间经过多次加固补强,1991年达到设计要求,投入正常运行。该坝使用引张线、垂线监测坝体水平位移,并在坝顶、坝内廊道等处布置了垂直位移监测点。

该坝运行期间库水位变化不大,温度高时坝体变形量大,温度低时坝体变形量小,故选取温度较高的2006年8月22日的各项监测值进行评估。取该日坝体水平左右向位移、水平上下游向位移、坝顶沉陷、廊道沉陷分别为 c_1, c_2, c_3, c_4 ,用各测点中最大值进行计算,具体数据如表1所示。

表1 各特征值具体数据

特征名称	y	$\hat{y}$	$y_{\min}$	$y_{\max}$	S
c_1	2.54	2.4263	-3	2.89	0.2939
c_2	-2.43	-2.0970	-3.56	1.77	0.2695
c_3	-4.29	-2.7767	-6	6.46	1.2820
c_4	4.92	5.4384	-4.12	6.33	0.7707

3.1 确定经典域、节域物元

根据式(1)给出的分级标准,坝体变形评估经典域物元为

$$R = \begin{bmatrix} I_1 & I_2 & I_3 & I_4 & I_5 \\ c_1, & 0.0, 0.2 & 0.2, 0.4 & 0.4, 0.6 & 0.6, 0.8 & 0.8, 1.0 \\ c_2, & 0.0, 0.2 & 0.2, 0.4 & 0.4, 0.6 & 0.6, 0.8 & 0.8, 1.0 \\ c_3, & 0.0, 0.2 & 0.2, 0.4 & 0.4, 0.6 & 0.6, 0.8 & 0.8, 1.0 \\ c_4, & 0.0, 0.2 & 0.2, 0.4 & 0.4, 0.6 & 0.6, 0.8 & 0.8, 1.0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

节域物元为

$$R_p = \begin{bmatrix} I_p, & c_1, & 0.0, 1.0 \\ & c_2, & 0.0, 1.0 \\ & c_3, & 0.0, 1.0 \\ & c_4, & 0.0, 1.0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

3.2 确定现状物元

$c_1, c_2, c_3, c_4 \in A$ 区,依据图1所示的隶属度函数,对评估指标原始数据规格化,得坝体变形的现状物元为

$$R_t = (K(t), C, t(t)) = \begin{bmatrix} K(t), & c_1, & 0.19 \\ & c_2, & 0.62 \\ & c_3, & 0.59 \\ & c_4, & 0.34 \end{bmatrix} \quad (14)$$

3.3 关联度计算及评估结果

以 $i = 1, j = 1$ 为例,用式(6)~(10)计算 $K_i(x_1)$ 和 λ_{11} 。

$\mu_1(t) = 0.19, a_{11} = 0.0, b_{11} = 0.2, b_{12} = b_{13} = b_{14} = 0.2, \mu_1(t) \in [a_{11}, b_{11}]$, 则

$$K_i(x_1) = - \frac{\rho(\mu_1(t), a_{11}, b_{11})}{b_{11} - a_{11}} = 0.05 \quad (15)$$

$$\lambda_{11} = \frac{\mu_1(t)}{\sum_{j=1}^4 \frac{\mu_j(t)}{b_{1j}}} = 0.36 \quad (16)$$

类似于以上计算过程,分别计算待评对象 I 的第 j 个特征关于第 i 级别的关联函数值,对应结果如下:

$$K_i(\mu_j(t)) = \begin{bmatrix} K_1(x_1) & \dots & K_5(x_1) \\ \vdots & & \vdots \\ K_1(x_4) & \dots & K_5(x_4) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.05 & -0.050 & -0.525 & -0.683 & -0.7625 \\ -0.525 & -0.367 & -0.050 & -0.1000 & -0.3210 \\ -0.4875 & -0.317 & -0.050 & -0.024 & -0.3390 \\ -0.292 & -0.300 & -0.150 & -0.433 & -0.5750 \end{bmatrix} \quad (17)$$

各评估指标的权系数计算结果如下:

$$\lambda_{ij} = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \dots & \lambda_{51} \\ \vdots & & \vdots \\ \lambda_{14} & \dots & \lambda_{54} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.36 & 0.36 & 0.36 & 0.36 & 0.36 \\ 0.17 & 0.17 & 0.17 & 0.17 & 0.17 \\ 0.18 & 0.18 & 0.18 & 0.18 & 0.18 \\ 0.29 & 0.29 & 0.29 & 0.29 & 0.29 \end{bmatrix} \quad (18)$$

(下转第34页)

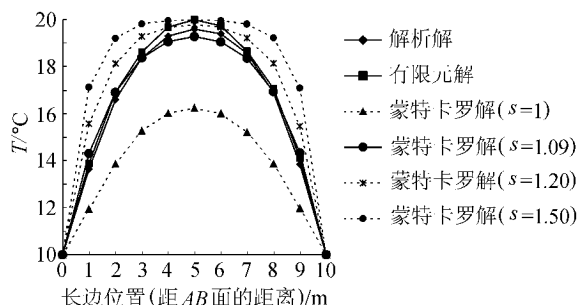


图5 第20d计算结果对比

3 结论

运用蒙特卡罗法求解大体积混凝土不稳定温度场,给出了相应的随机游动模型。通过计算和分析得到以下结论:

a. 利用蒙特卡罗法解决不稳定温度场问题是将其应用于新领域的一种尝试,与其他数值方法相比,该法计算简单、系统占用量少,而且可以对域内的任意结点在任意时层进行求解;蒙特卡罗法主要是通过质点的随机游动来求解问题,因此二维和三维的求解没有根本的差别,只需在原有程序中增加少量语句即可实现,程序编制较一般数值方法简单。

(上接第25页)

根据以上确定的各类别的关联度和因子的权系数,用式(11)计算待评对象5个等级的关联度,结果如下: $K_1(\mu) = -0.244$, $K_2(\mu) = -0.05$, $K_3(\mu) = -0.232$, $K_4(\mu) = -0.359$, $K_5(\mu) = -0.557$ 。

从以上结果可知,待测样本I属于第二等级,为基本正常。

4 结语

坝体变形是坝体水平位移、垂直位移等诸多单项监测指标的综合反映,且各单项指标间相互联系,所以单一指标的分析评价难以描述坝体变形整体的工作性态。本文应用可拓学理论评估方法,基于坝体各种变形实测资料,实现了多监测量的集成评估,获得了较为合理的评估结果。此方法理论严谨、计算简单、模型统一,进行简单改变可应用于坝体渗流、裂缝以及大坝整体的安全评估。可拓学理论评估方法在多层次多指标的复杂系统工程分析中具有较好的实用性,有广泛的推广前景。

参考文献:

[1] 何金平,李珍照.基于突变理论的大坝安全动态模糊综合分析与评价[J].系统工程,1997,15(5):39-43.

b. 蒙特卡罗法由于将求解域看作一个包括时间维数的时空域,在求解时每一结点、每一时层的计算都是独立的,具有天然的并行性,可以很容易地实现“分区异步长”计算。

c. 蒙特卡罗法可以快速高效地求解特定时段大体积混凝土局部区域的温度场,但在对整个区域逐时段进行求解时,其求解速度比有限单元法慢。

d. 蒙特卡罗法计算时其定解初、边值条件具有时空性,对于实现环境温度波动的模拟较之有限单元法要容易得多。

参考文献:

[1] 朱伯芳.大体积混凝土温度应力与温度控制[M].北京:中国电力出版社,1999.
[2] 陈铂,唐新军,凤炜.大体积混凝土稳定温度场的蒙特卡罗解[J].新疆农业大学学报,2006,29(1):83-86.
[3] 陈铂,唐新军,凤炜.大体积混凝土不稳定温度场的蒙特卡罗解[J].新疆农业大学学报,2006,29(4):73-76.
[4] 朱伯芳.有限单元法原理与应用[M].北京:水利电力出版社,1979.

(收稿日期:2008-03-25 编辑:方宇彤)

[2] 何金平,李珍照,关良宝.基于属性识别理论的大坝结构性态综合评价[J].武汉水利电力大学学报,1998,31(3):1-4.
[3] 杨春燕,蔡文.可拓工程研究[J].中国工程科学,2000,2(12):90-96.
[4] 蔡文.物元模型及其应用[M].北京:科学技术文献出版社,1999.
[5] 谢全敏,夏元友.岩体边坡稳定性的可拓聚类预测方法研究[J].岩石力学与工程学报,2003,28(3):438-441.
[6] 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.
[7] 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.
[8] 仲琳.碾压混凝土坝安全监控模型及其应用研究[D].南京:河海大学,2005.
[9] 吴中如,顾冲时.重大水工混凝土结构病害检测与健康诊断[M].北京:高等教育出版社,2005.

(收稿日期:2008-06-25 编辑:方宇彤)

