

一种适应大坝健康诊断的改进云合并算法

何金平^{1,2} 高 全^{1,3}

1 武汉大学水利水电学院,湖北 武汉,430072
2 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室,湖北 武汉,430072
3 国家大坝安全工程技术研究中心,湖北 武汉,430010

摘 要:针对大坝健康诊断中普遍存在的信息不确定性以及诊断过程中诊断指标信息融合的复杂性等问题,提出了基于云滴的改进云合并算法。该算法从云模型的云滴特性出发,首先通过正向云发生器分别得到多个“原子云”的云滴,再对云滴进行加权运算实现云滴合并,然后通过逆向云发生器得到“综合云”,实现了云模型表征不确定性信息的传递和融合。以紧水滩大坝为工程实例,构建了基于改进云合并算法的大坝健康诊断模型。实例验证了改进的云合并算法的可行性和合理性,适应了大坝健康诊断多指标、多层次、异权重等特点。

关键词:云模型;大坝健康诊断;云合并;不确定性

中图分类号:P258; P208 **文献标志码:**A

大坝是一个多因素耦合作用下在时域和空域上都具有明显不确定性的复杂非线性系统。大坝监测信息是大坝健康状态的综合反映,监测信息中蕴含的不确定性决定了对大坝健康状态认知的不确定性^[1]。

目前,大坝健康诊断主要采用基于效应量与环境量因果关系的单测点监测数学模型,没有或较少考虑大坝健康诊断中普遍存在的不确定性问题。近年来,一些学者将模糊数学、数据融合等现代理论引入到大坝健康诊断研究之中^[2-3],虽然一定程度上涉及了监测信息的不确定性问题,但大多只考虑了不确定性某一方面的特性,如只考虑了不确定性中的模糊性或随机性特性^[4]。然而,大坝监测信息中蕴含的不确定性是集模糊性和随机性于一体的复合不确定性,现有方法难以描述这种复合不确定性,极大地限制了大坝健康诊断方法的研究。

李德毅等在传统模糊集理论和概率统计理论的基础上提出了云模型(cloud model)^[5],是一种专门研究复合不确定性问题的数学理论,可较好地描述概念或变量的随机性、模糊性及其关联性,实现定性定量不确定性之间的映射和转换,已在数据挖掘^[6]、智能诊断^[7]和综合评价^[8]等领域

得到了成功的应用。

大坝健康诊断是一个多指标、多层次的融合递归分析问题,其中信息不确定性的表征、传递和融合是大坝健康诊断的关键性问题,不仅涉及到采用“云滴”对单个测点、单种效应量的监测信息及其不确定性进行云概念描述(“原子云”),而且还涉及到对监测信息的多层次递归融合,以实现上层诊断指标特性的综合刻画(“综合云”),即由“原子云”向“综合云”的递归合并计算。基于此,本文在云模型基本概念的前提下,提出了一种基于云滴的改进云合并算法,实现了下层诊断指标性态“原子云”到上层诊断指标性态“综合云”的递归融合,并据此构建了大坝健康诊断模型,充分反映了概念本身的不确定以及概念不确定性信息的传递,使融合过程更合理有效,诊断结果更富有内涵。

1 云模型理论

1.1 云模型的概念

设 U 是一个用精确数值表示的定量论域, C 是 U 上的定性概念,若定量数值 $x \in U$ 是定性概念 C 的一次随机实现, x 对 C 的确定度 $\mu(x) \in$

$[0,1]$ 是一组有稳定倾向的随机数,表示为^[5]:

$$\mu:U \rightarrow [0,1], \forall x \in U, x \rightarrow \mu(x) \quad (1)$$

则 x 在论域 U 上的分布称为云模型,简称云 (cloud),记为 $C(x)$;每一个 x 称为一个云滴 (cloud drop)。

一个云滴是定性概念在数量上的一次随机实现,其确定度是模糊集合意义下的隶属度,同时满足概率意义下的随机分布,也能体现随机性与模糊性之间的关联性。云由大量的云滴组成,一定数量的云滴的整体分布特性体现着云映射的模糊性和随机性;云滴越多,定性概念的整体特征越能得到完整的反映。

云模型用期望 Ex 、熵 En 和超熵 He 这 3 个数字特征来整体表征一个概念及其不确定性,记作 $C(Ex, En, He)$ 。图 1 为由 1 000 个云滴组成的定性概念“坝体沉降 20 mm 左右”的云图。其中,期望 Ex 是云滴在论域空间分布的中心值,是最能代表“坝体沉降 20 mm 左右”这一定性概念的数字特征。熵 En 是对定性概念不确定性的量度,由概念的随机性和模糊性共同决定,它主要描述观测成果在可靠性上的不确定性,如观测误差的程度等; En 越小,概念集中程度越高,表示观测成果越可靠。超熵 He 是对熵的不确定性的量度,即熵的熵,它主要反映了造成观测误差因素的不确定性,如观测仪器精度的不确定性等; He 越小,云滴凝聚程度越高,表示外界因素对观测成果中误差不确定性的影响越小。

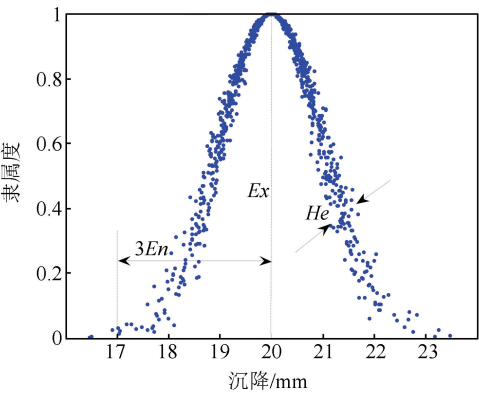


图 1 由 1 000 个云滴组成的概念“坝体沉降 20 mm 左右”的云图

He^2),且 x 对 C 的确定度满足:

$$\mu(x) = e^{-\frac{(x-Ex)^2}{2En'^2}} \quad (2)$$

则称 $C(x)$ 为正态云。

云发生器 (cloud generator, CG) 是云模型中定性概念与定量数据之间相互转换的特定算法。正向云发生器是从定性到定量的映射,实现定性概念 (概念云) 到定量数值 (云滴) 的转换,正向正态云发生器如图 2 所示;逆向云发生器是从定量到定性的映射,实现定量数值 (云滴) 到定性概念 (概念云) 的转换,逆向正态云发生器如图 3 所示。正态云建立在高斯分布和钟形隶属函数的基础上,兼具二者的适用性,在概念表征中具有普适性。

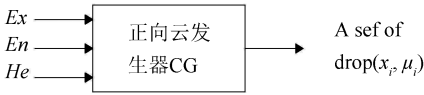


图 2 正向正态云发生器

Fig.2 Forward Normal Cloud Generator



图 3 逆向正态云发生器

Fig.3 Backward Normal Cloud Generator

2 改进的云合并算法

在大坝健康诊断中,一般遵循由监测测点到监测效应量、由局部性态到整体性态的多指标多层次递归诊断分析原则。因此,在采用云模型理论诊断大坝健康状态时,需要使用合适的递归运算算法,将表征下一级诊断指标 (单个测点、单种效应量) 的监测信息特征的“原子云”合并为表征上一级诊断指标特征的“综合云”。

2.1 现有云合并算法存在的不足

云合并就是将多个“原子云”合成为一个新云模型“综合云”的过程,其中“原子云”为某概念不同方面属性的表征结果或者为多个相似概念的表征结果。现有的云合并算法主要以云数字特征为基础,采取不同方法计算“原子云”数字特征的合并因子系数,再通过代数运算得到“综合云”的数字特征,达到云合并的目的。这些算法仅针对云数字特征进行代数运算,没有考虑特征值的内在联系和云模型的整体特性,存在着以下局限性:算术运算合并法^[9]直接对两个“原子云”的云数字特征进行代数运算,将造成“综合云”概念不确定性的不合理放大;“软或”合并法^[10]合并对象局限于

1.2 正态云发生器

最基本、最典型的云模型类型是正态云模型。根据式(1),设 $X \subseteq U$, C 是 U 上的定性概念,若在 U 中的定量值 $x(x \in X)$ 是 C 的一次随机实现且满足条件 $x \sim N(Ex, En'^2)$,其中 $En' \sim N(En,$

两个相似云概念,合并因子系数缺乏合理解释,“综合云”的超熵简单采用取大原则,将造成信息传递不全;权重合并法^[11]利用权重系数对各云数字特征进行独立运算,忽视了云数字特征的不确定性意义;“综合云”合并法^[12]利用云概念的重叠情况计算“截断熵”作为合并系数进行合并,局限于两重叠的云概念,而多云逐一合并时“综合云”的结果会受合并顺序的影响。现有的云合并算法没有考虑云模型概念表征的内涵和云数字特征的不确定性意义,难以实现多个不同权重的“原子云”的有效合并,也难以保证“原子云”到“综合云”合并过程中信息传递的稳定性。

2.2 基于云滴的改进云合并算法

大坝健康诊断中,云合并具有其特殊性,如诊断指标存在定量与定性的差异,会使得概念表征方式不一致;诊断指标存在隶属层级,需要进行递归运算;诊断指标的相对重要度存在差异,需要考虑指标的属性权重等。因此,有必要对现有的云合并算法进行改进,以适应大坝健康诊断中多层次递归运算的需要。

一定数量的云滴分布反映了定性概念的整体特征,并体现了云映射的模糊性和随机性,基于云滴的云合并能较好地表现这一性质,保持概念信息传递的延续性。为此,本文提出了一种基于云滴的改进云合并算法,主要思路为:先将多个“原子云”分别用正向云发生器生成相同数量的云滴,对云滴进行排序;再根据“原子云”概念的属性权重进行云滴加权合并运算,得到“综合云”的云滴;然后通过逆向云发生器生成“综合云”。

基于云滴的改进云合并的输入为 m 个“原子云” $C_i(E x_i, E n_i, H e_i)$ ($i=1,2 \cdots m$),对应概念的属性权重为 w_i 。

基于云滴的改进云合并的输出为“综合云” $C(E x, E n, H e)$ 。

基于云滴的云合并算法可表示为:

$$C(E x, E n, H e)=\coprod_{i=1}^m C_i^{w_i}(E x_i, E n_i, H e_i) \mid_N$$

(3)

式中, \coprod 表示基于云滴的云合并算法; m 为“原子云”个数; $C_i(E x_i, E n_i, H e_i)$ 为第 i 个“原子云”; w_i 为“原子云” C_i 对应的属性权重,其中 $w_i \geqslant 0$, $\sum_{i=1}^m w_i=1$; N 为要求生产的云滴数; $C(E x, E n, H e)$ 为“综合云”。云滴数 N 对合并的计算结果影响较大,尤其对熵和超熵的影响较为显著, N 的取值越大,计算精度越高。实际应用中,一般要求 N 不小于 1 000。

基于云滴的改进云合并算法步骤为:

1)利用正向云发生器,根据 m 个“原子云”的云数字特征,分别对应生成 N 个云滴,保存云滴的横坐标值,表示为:

$$\begin{aligned} D_1(i) &=C\left(E x_1, E n_1, H e_1 ; N\right) \\ D_2(i) &=C\left(E x_2, E n_2, H e_2 ; N\right) \\ &\vdots \\ D_m(i) &=C\left(E x_m, E n_m, H e_m ; N\right) \end{aligned}$$

2)分别对 m 组云滴 $\left\{D_1, D_2 \cdots D_m\right\}$ 的横坐标按从小到大排序,得到:

$$\begin{aligned} S\left(D_1\right) &=\left\{x_1^1, x_2^1 \cdots x_N^1\right\} \\ S\left(D_2\right) &=\left\{x_1^2, x_2^2 \cdots x_N^2\right\} \\ &\vdots \\ S\left(D_m\right) &=\left\{x_1^m, x_2^m \cdots x_N^m\right\} \end{aligned}$$

其中,每组云滴的横坐标满足 $x_1^i \leqslant x_2^i \leqslant \cdots \leqslant x_N^i$ ($i=1,2 \cdots m$)。

3)根据云模型对应的属性权重 w_i ,进行加权运算得到“综合云”的 N 个云滴:

$$S(D)=\left\{x_1, x_2 \cdots x_N\right\}=\left\{\sum_{i=1}^m x_1^i \cdot w_i,\right. \\ \left.\sum_{i=1}^m x_2^i \cdot w_i \cdots \sum_{i=1}^m x_N^i \cdot w_i\right\}$$

4)根据“综合云”的云滴,通过逆向云发生器得到“综合云”的数字特征值 $E x, E n, H e$ 。

5)输出“综合云” $C(E x, E n, H e)$ 。

基于云滴的云合并算法,首先,从云模型最根本的云滴属性出发,考虑了云模型的整体特性和云数字特征的内在联系,符合云模型概念表征的基本要求;其次,利用云滴合并实现了云模型合并,确保了云合并过程中不确定性信息传递的延续性和有效性,其计算结果也不受合并顺序的影响;最后,通过引入权重系数,较好地解决了概念刻画中各方面属性权重不同的问题。

3 实例与分析

本文以紧水滩拱坝为例,通过分析监测资料获取诊断指标的“原子云”,采用基于云滴的改进云合并算法得到“综合云”,对该拱坝健康状态进行综合诊断。

紧水滩水电站位于浙江省瓯江流域龙泉溪干流,工程等别为Ⅰ等,大坝为混凝土双曲拱坝,最大坝高 102 m。该拱坝在坝体及坝基、两岸坝肩和近坝区等部位布置了比较完整的变形、渗流、应力应变及温度等监测项目。

3.1 诊断指标体系的构建

在实施健康诊断前,应根据该拱坝的结构特点和监测布置情况,构建健康诊断指标体系。诊断指标体系的建立一般以监测效应量为底层指标,以大坝整体健康性态为诊断目标,遵循由监测效应量性态诊断监测项目性态、由监测项目性态

诊断监测部位性态、由监测部位性态(局部性态)诊断大坝整体健康性态的多层次递归诊断原则。参照文献[1],根据诊断指标体系构建的一般原则,结合紧水滩拱坝的具体监测布置情况,构造如图 4 所示的紧水滩拱坝健康诊断指标体系。

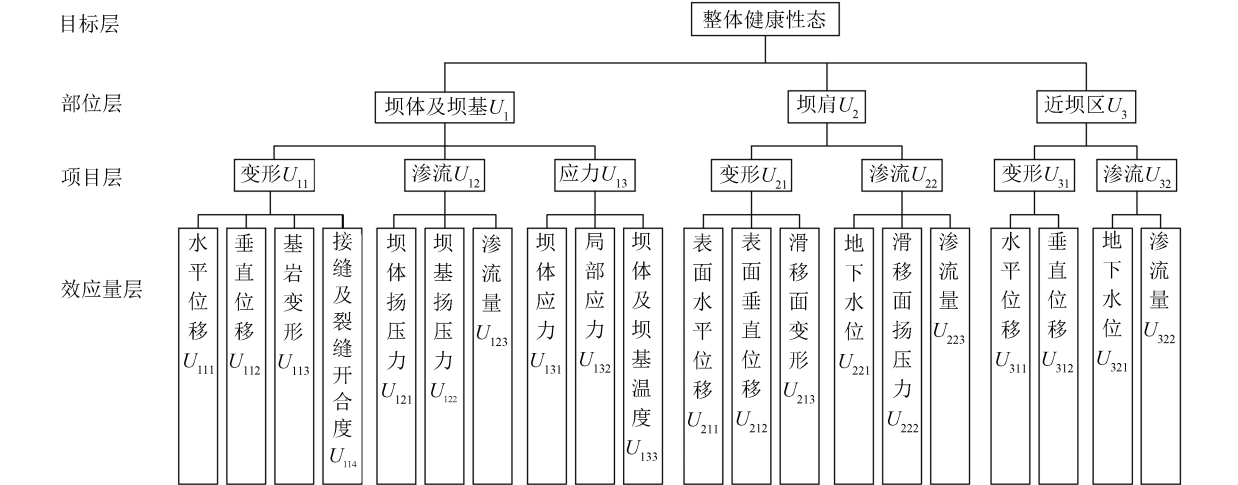


图 4 紧水滩拱坝健康诊断指标体系

Fig.4 Health Diagnosis Index System for Jinshuitan Arch Dam

3.2 “变形 U_{11} ”性态诊断

不失一般性,以图 4 中“坝体及坝基 U_1 ”的下层指标“变形 U_{11} ”为例,采用本文提出的基于云滴的云合并算法对“变形 U_{11} ”的性态进行综合诊断。

3.2.1 “基准云”的确定

根据已有的研究成果^[1],本文采用 5 级诊断集,即 $V = \{V_1, V_2, V_3, V_4, V_5\} = \{\text{正常, 基本正}$

常,轻度异常,重度异常,恶性异常}。采用黄金分割率的云生成方法^[13],在健康状态论域 $[1, 0]$ 范围内,确定诊断集中各状态等级的“基准云”;“基准云”的云数字特征及其在 x 轴上的范围如表 1 所示,其中各状态等级在 x 轴上的范围为 $[Ex_i + 3En_i, Ex_i - 3En_i]$,且在论域 $[1, 0]$ 范围内。

表 1 对应诊断等级的“基准云”及其在 x 轴上的范围

Tab.1 Corresponding Diagnosis Levels for the Reference Clouds and Their Ranges on the x Axis

项目	诊断等级				
	正常(V_1)	基本正常(V_2)	轻度异常(V_3)	重度异常(V_4)	恶性异常(V_5)
“基准云”模型	(1.0,103,0.013 1)	(0.691,0.064,0.008 1)	(0.50,0.031,0.005)	(0.309,0.064,0.008 1)	(0, 0.103,0.013 1)
x 轴范围	[1,0.691]	[0.883,0.499]	[0.593,0.407]	[0.501,0.117]	[0.309,0]

3.2.2 “原子云”的获取

在大坝健康诊断中,“原子云”的获取方法主要有监测资料分析法和专家咨询法^[1]。监测资料分析法以单测点的定性和定量分析成果为依据,主要从效应量的数值表现和趋势表现两方面进行描述;专家咨询法以专家评分为依据,由不同专业的多位专家根据大坝的实际情况独立给出评分。但无论是监测资料分析法还是专家咨询法都存在较大的主观性,因而“原子云”在区间 $[1, 0]$ 上的取值都充满着不确定性,取值大小在表征具体概念上具有一定的模糊性,而在取值上又具有一定的随机性。为克服上述缺陷,可采用云模型进行定

性与定量的表征转换。云模型将每一个诊断值视为一个云滴。以底层诊断指标“水平位移(含挠度) U_{111} ”为例,在监测资料分析的基础上,以诊断指标 U_{111} 传统意义上的模糊隶属度 $\mu_V(U_{111})$ 作为中心值。根据云滴贡献原则,一般取中心值所在云朵的有效论域区间的 $1/6$ 左右为熵值 En ,取熵值 En 的 $1/10$ 左右为超熵 He 。在云模型中,中心值 μ_V 、熵值 En 和超熵 He 的取值不需要很精确,只需在所判断的大致范围内选取即可,这也是云模型的优越性之一。根据初拟的中心值 μ_V 、熵值 En 和超熵 He ,

利用正向云发生器,生成 1 000 个随机云滴;再利用逆向云发生器,将 1 000 个随机云滴转化为一个由期望 E_x 、熵 E_n 和超熵 He 这 3 个数值表征诊断指标“水平位移(含挠度) U_{111} ”特性的“原子云” $C_V(U_{111})$ 。

上述方法扩大了样本数,相当于专家咨询法中邀请 1 000 名专家对诊断指标进行评分,虽然

评分结果不完全一致,但总体趋势基本一致,云数字特征基本相同。

对于属性权重 w_i ,可采用已有的主观赋权法或客观赋权法确定。本文参照文献[1],根据各诊断指标在综合诊断中的重要程度来确定。

“变形 U_{11} ”各下层诊断指标的“原子云”及对应的指标权重如表 2 所示。

表 2 “变形 U_{11} ”的诊断指标、指标属性权重及其状态“原子云”

Tab.2 Diagnosis Index, Index Weight and Atom Cloud for the Deformation U_{11}		
“变形 U_{11} ”的诊断指标	指标属性权重 w_i	“原子云” $C_i(E_{x_i}, E_{n_i}, He_i)$
水平位移(含挠度) U_{111}	0.35	$C_{111}(0.760\ 8, 0.068\ 9, 0.004\ 3)$
垂直位移 U_{112}	0.20	$C_{112}(0.854\ 1, 0.055\ 6, 0.013\ 8)$
基岩变形 U_{113}	0.20	$C_{113}(0.685\ 4, 0.049\ 0, 0.006\ 5)$
接缝及裂缝开合度 U_{114}	0.25	$C_{114}(0.702\ 2, 0.066\ 0, 0.013\ 2)$

3.2.3 “综合云”的生成

根据 § 2.2 对“变形 U_{11} ”性态的 4 个下层诊断指标的“原子云”进行合并,得到表征“变形 U_{11} ”性态的“综合云”。

利用表 2 的基础数据,按照式(3),取 $N = 1\ 000$,则“变形 U_{11} ”的“综合云”计算过程为:

$$C_{11}(Ex_{11}, En_{11}, He_{11}) =$$
$$C_{111}^{w_{111}} \amalg C_{112}^{w_{112}} \amalg C_{113}^{w_{113}} \amalg C_{114}^{w_{114}} \mid_{1\ 000} =$$
$$C_{111}^{0.35}(0.760\ 8, 0.068\ 9, 0.004\ 3) \amalg C_{112}^{0.20}(0.854\ 1,$$
$$0.055\ 6, 0.013\ 8) \amalg C_{113}^{0.20}(0.685\ 4, 0.049\ 0, 0.006\ 5)$$
$$\amalg C_{114}^{0.25}(0.702\ 2, 0.066\ 0, 0.013\ 2) \mid_{1\ 000} =$$
$$C_{11}(0.750\ 3, 0.060\ 7, 0.004\ 8)$$

上述计算得到了表征“变形 U_{11} ”性态的“综合云”为 $C_{11}(0.750\ 3, 0.060\ 7, 0.004\ 8)$,绘制各诊断指标“原子云”递归融合的云合并过程,如图 5 所示。

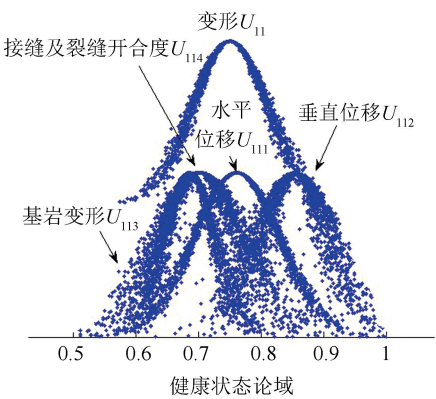


图 5 “变形 U_{11} ”的诊断指标云合并示意图
Fig.5 Diagram of Cloud Fusion of Diagnosis Index for the Deformation U_{11}

根据表 1,绘制“变形 U_{11} ”性态的“综合云”与诊断评语集“基准云”的云图分布关系,如图 6 所示。

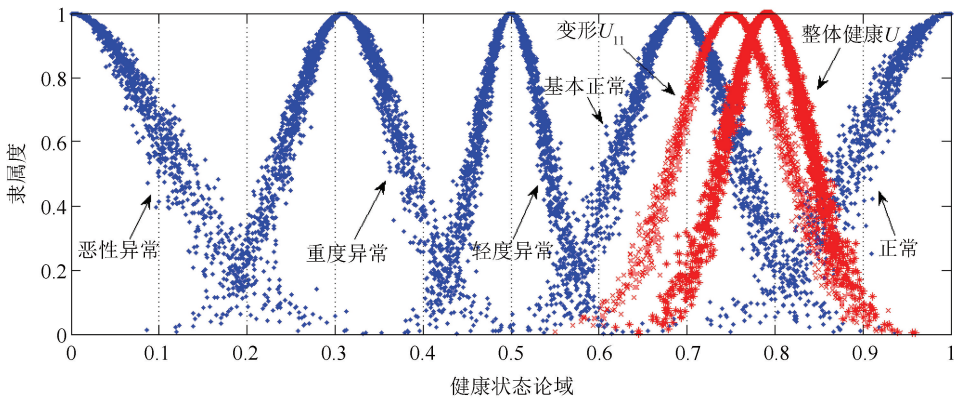


图 6 诊断指标性态“综合云”与诊断“基准云”的云图分布关系

Fig.6 Diagram of Distribution Relations Between the Synthetic Diagnosis Cloud for the Diagnosis Index and the Reference Clouds of Diagnosis Items

根据文献[14],采用基于期望曲线的正态云相似度计算方法计算“综合云”与“基准云”的相关

性,结果见表 3。

表 3 “综合云”与“基准云”的相关性

项目	诊断等级				
	正常(V_1)	基本正常(V_2)	轻度异常(V_3)	重度异常(V_4)	恶性异常(V_5)
“基准云”模型	$C(1,0.103,0.013\ 1)$	$C(0.691,0.064,0.008\ 1)$	$C(0.50,0.031,0.005)$	$C(0.301,0.064,0.008\ 1)$	$C(0,0.103,0.013\ 1)$
“变形 U_{11} ”的相关性	0.100 8	0.460 4	0.001 8	0.000 2	0

3.2.4 诊断结果分析

1)利用基于云滴的改进云合并算法进行云合并计算,实现了由下层诊断指标“原子云”到上层诊断结果“综合云”的有效跃升,得到的云合并结果稳定,具有较好的延续性。

2)考察“综合云”的诊断结果。由云数字特征,“变形 U_{11} ”性态诊断结果的期望值 Ex 为 0.750 3,由表 1 可以看出,其落在“正常”和“基本正常”的重叠区域,则可以判定该坝“变形 U_{11} ”的性态处在“正常”和“基本正常”之间;由图 6“综合云”与“基准云”的云图分布关系,“变形 U_{11} ”的性态为“基本正常”偏于“正常”;由表 3“综合云”与“基准云”的相关性,根据最大相关性原则判定“变形 U_{11} ”的性态为“基本正常”。

3)分析诊断结果的不确定性。“变形 U_{11} ”性态诊断结果的熵值 En 为 0.060 7,数值较小,表明本次诊断结果的可信度较高;超熵值 He 为 0.004 8,数值也较小,表明监测信息的不确定性对本次诊断结果带来的不确定性影响较小,诊断结果的稳定性较高。此外,根据超熵与熵的比值 $He/En=0.079$,远小于 1,说明“综合云”的雾化程度较低,也表明综合诊断结果的概念共识度较高。

由以上分析可知,本文提出的基于云滴的云

合并算法是合理、可信的,紧水滩拱坝“变形 U_{11} ”性态的诊断结果为“基本正常”,诊断结果较为可靠,监测信息的不确定性对诊断结果带来的不确定性影响较小。

3.3 紧水滩拱坝整体健康状态综合诊断

按照本文提出的基于云滴的云合并算法,采用上述对紧水滩拱坝“变形 U_{11} ”性态综合诊断的方法,分别对图 4 中其他诊断指标的性态进行递归诊断,即可得到紧水滩拱坝整体健康状态的综合诊断结果(见图 7),整体健康状态的综合云图显示在图 6 中。

由图 7 可知,紧水滩拱坝整体健康状态的“综合云”为 $C(0.791\ 5,0.048\ 2,0.004\ 8)$ 。其中,期望值 Ex 为 0.791 5,对照表 1, Ex 处于“正常”和“基本正常”的重叠区域,则紧水滩拱坝整体健康状态介于“正常”和“基本正常”之间;根据图 6“综合云”与“基准云”的云图分布关系,则紧水滩拱坝整体健康状态为“基本正常”偏于“正常”;上述诊断结果与采用文献[1]的传统模糊综合评价方法对紧水滩拱坝安全状态进行评价的结论是一致的。整体健康状态“综合云”的熵值 En 和超熵值 He 均较小,表明诊断结果的可信度和稳定性均较高。

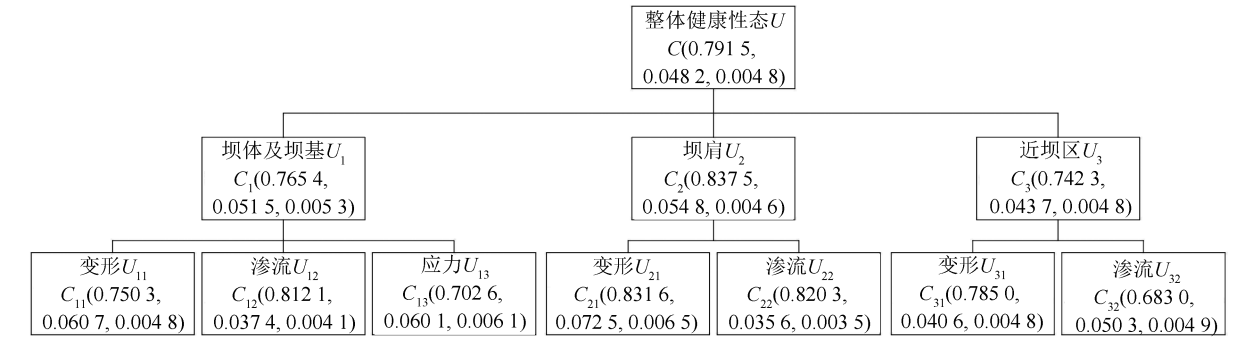


图 7 紧水滩拱坝整体健康状态递归综合诊断图

Fig.7 Recursive Synthesis Graph of the Entire Health Diagnosis of Jinshuitan Arch Dam

3.4 与其他评价方法的比较

不失一般性,仍以“变形 U_{11} ”为例进行比较和分析。

3.4.1 与权重合并法的比较

以本文实例中的基础数据为依据,采用文献[11]的权重合并法,得到“变形 U_{11} ”的“综合云”

为 $C_{11}(0.749\ 7,0.060\ 9,0.008\ 9)$;利用本文提出的改进云合并算法,得到“变形 U_{11} ”的“综合云”为 $C_{11}(0.750\ 3,0.060\ 7,0.004\ 8)$ 。两者的云数字特征值相对其变化量依次为 $\epsilon(Ex)=-0.08\%,\epsilon(En)=0.26\%,\epsilon(He)=45.85\%$ 。其中,两者的期望和熵的计算结果基本一致,而本文

算法的超熵计算结果更稳定,说明本文基于云滴的云合并算法是合理的,而且更有效。

3.4.2 与传统模糊综合评价方法的比较

以本文实例中的基础数据为依据,采用文献[1]的传统模糊综合评价法,对“变形 U_{11} ”的性态进行评价。参照文献[1],取评价指标 U_{111} 、 U_{112} 、 U_{113} 、 U_{114} 的权重分别为 0.35、0.20、0.20、0.25,得到该拱坝“变形 U_{11} ”性态相对于大坝安全状态论域 $[1,0]$ 的隶属度为 0.749 7。由于大坝安全状态 5 个评价等级的隶属度区间划分为 $\{[1,0.8], (0.8,0.6], (0.6,0.4], (0.4,0.2], (0.2,0]\}$, 则该拱坝“变形 U_{11} ”性态的评价结果为“基本正常”。

上述评价结果与本文得到的该拱坝“变形 U_{11} ”性态的评价结果一致,说明本文评价方法是合理、可信的。此外,本文算法的综合评价不仅给出了评价结果的期望值,还给出了评价结果的可信度和稳定性,比传统的模糊综合评价给出的信息更丰富,因而评价结果更有效,评价方法更优越。

4 结 语

本文基于云模型的云滴特性提出了云合并算法,从云滴的角度进行云模型合并,实现了不确定性信息的表征、传递和融合。该算法顾及大坝健康诊断中的信息不确定性,克服了现有算法的不足,适应了诊断指标的层级性、差异性及异权重性等特点。

1)采用云模型进行诊断指标量度,重点考虑信息不确定性中的模糊性和随机性及其复合不确定性,实现了监测信息到诊断状态的不确定性映射。

2)基于云滴的改进云合并算法,从云滴特性出发,充分考虑各云数字特征的意义,实现了多个不同权重“原子云”的有效递归融合。

3)从云数字特征、诊断云图、云相关性等方面对诊断结果及其不确定性进行综合分析,诊断结果丰富有内涵,符合人类认知特点,满足大坝健康诊断的发展要求。同时,该算法具有一定的普适性,也可应用于其他复杂的综合评价领域。

参 考 文 献

[1] He Jinping. Theory and Application of Dam Safety Monitoring [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2010(何金平.大坝安全监测理论与应用[M].北京:中国水利水电出版社,2010)

[2] Wu Zhongru, Xu Bo, Gu Chongshi, et al. Comprehensive Evaluation Methods for Dam Service Status [J]. *Sci China: Tech Sci*, 2012, 42(11): 1 243-1 254(吴中如,徐波,顾冲时,等.大坝服役状态的综合评判方法[J].中国科学:技术科学,2012,42(11): 1 243-1 254)

[3] He Jinping, Ma Chuanbin, Shi Yuqun. Multi-effect-quantity Fusion Model of High Arch Dam Based on Improved D-S Evidence Theory[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(12): 1 397-1 400(何金平,马传彬,施玉群.高拱坝多效应量改进型 D-S 证据理论融合模型[J].武汉大学学报·信息科学版,2012,37(12): 1 397-1 400)

[4] Sjö Dahl P, Dahlin T, Johansson S. Using Resistivity Measurements for Dam Safety Evaluation at Enemossen Tailings Dam in Southern Sweden[J]. *Environmental Geology*, 2005, 49(2): 267-273

[5] Li Deyi, Liu Changyu, Du Yi, et al. Artificial Intelligence with Uncertainty[J]. *Journal of Software*, 2004, 15(11): 1 583-1 594(李德毅,刘常昱,杜鹁,等.不确定性人工智能[J].软件学报,2004,15(11): 1 583-1 594)

[6] Qin Kun, Li Zhenyu, Du Yi. Review of Spatial Data Mining Methods Based on Concept Analysis [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2009, 11(1): 10-17(秦昆,李振宇,杜鹁.基于概念分析的空间数据挖掘研究进展[J].地球信息科学学报,2009,11(1): 10-17)

[7] Wang D, Liu D F, Ding H, et al. A Multidimension Cloud Model-Based Approach for Water Quality Assessment[J]. *Environmental Research*, 2016, 148: 24-35

[8] Liu Z, Shao J, Xu W, et al. Comprehensive Stability Evaluation of Rock Slope Using the Cloud Model-Based Approach[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2014, 47(6): 2 239-2 252

[9] Shi Y B, Zhang A, Gao X J, et al. Cloud Model and Its Application in Effectiveness Evaluation [C]. International Conference on Management Science and Engineering, California, USA, 2008

[10] Jiang Rong, Li Deyi, Fan Jianhua. Automatic Generation of Pan-concept-tree on Numerical Data[J]. *Chinese Journal of Computer*, 2000, 23(5): 470-476(蒋嵘,李德毅,范建华.数值型数据的泛概念树的自动生成方法[J].计算机学报,2000,23(5): 470-476)

[11] Chen Si, Wang Shuyan, Sun Jiaze. Trusted Software Reliability Measures Based on Cloud Model[J]. *Application Research of Computers*, 2014, 31(9): 2 729-2 731, 2 740(陈思,王曙燕,孙家泽.基于云模型的可信软件可靠性度量模型[J].计算机应用研究,2014,31(9): 2 729-2 731, 2 740)

[12] Wu Zhaocong, Qin Maoyun, Zhang Xiao. A Cloud-Model-Based Remote Sensing Image Segmentation Concerned with Geometrical Features[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008,33(9):939-942(巫兆聪,覃茂运,张潇.一种顾及几何特征的云模型遥感影像分割方法[J].武汉大学学报·信息科学版,2008,33(9):939-942)

[13] Di Kaichang.Data Mining and Knowledge Discovery [M].Wuhan: Wuhan University Press, 2003 (邸凯昌.空间数据发掘与知识发现[M].武汉:武汉大学出版社,2003)

[14] Li Hailin, Guo Chonghui, Qiu Wangren. Similarity Measurement Between Normal Cloud Models [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011,39(11):2 561-2 567 (李海林,郭崇慧,邱望仁.正态云模型相似度计算方法[J].电子学报,2011,39(11):2 561-2 567)

An Improved Algorithm of Cloud Fusion for Dam Health Diagnosis

HE Jinping^{1,2} GAO Quan^{1,3}

1 School of Water Resources and Hydropower, Wuhan University, Wuhan 430072, China
2 State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China
3 National Dam Safety Research Center, Wuhan 430010, China

Abstract: In dam health diagnosis, the information uncertainty and the information fusion of diagnosis indexes are common but difficult problems. An improved cloud fusion algorithm based on the cloud drop concept is proposed. In view of the specific features of the cloud drop in the cloud model, cloud drops from several “atom clouds” are produced with the forward cloud generator firstly. Then, the cloud integration is conducted by weighting operation. The “synthetic cloud” is finally obtained with the backward cloud generator. Thus, the transfer and fusion of the information uncertainty in the cloud model are realized. A practical dam health diagnosis example based on the improved cloud fusion algorithm is presented to verify its feasibility and reasonability. The result shows that the proposed algorithm is particularly suitable for the multi-index, multi-hierarchy and different-weight dam health diagnosis.

Key words: cloud model; dam health diagnosis; cloud fusion; uncertainty

First author: HE Jinping, PhD, professor, specializes in dam safety monitoring and health diagnosis. E-mail: whuhjp@163.com
Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos.51379162, 51079114; Water Conservancy Science and Technology Innovation Project of Guangdong Province, No.2016-06; the Fundamental Research Funds for the Central Universities, No. 2042016kf1081.