

基于云模型与信息融合的渡槽安全评价方法

王仁超,王世龙,赵鹏远

(天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室,天津 300072)

摘要: 在南水北调工程中,渡槽是关键长距离输水建筑物之一,其运行安全关系到整个跨流域输水系统的稳定。针对渡槽的工作性态评价,以渡槽监测数据的建模分析成果为基础,采用不确定性问题研究常用的云模型与数据融合方法进一步处理,提出了一种基于云模型理论与多个测点预测分析结果相融合的渡槽安全综合评价方法,该方法依靠渡槽安全预测模型的分析结果来对渡槽运行情况作出评价,有效避免了评价过程的主观性。结果表明:该方法依据预测模型的分析结果可以准确评价渡槽的工作性态,为渡槽的安全综合评价提供了一种新的方法。

关键词: 渡槽; 信息融合; 云模型; 安全评价; 预测模型

中图分类号:TV68

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2023)03-0109-07

Aqueduct safety evaluation method based on cloud model and information fusion

WANG Renchao, WANG Shilong, ZHAO Pengyuan

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Aqueduct is an important long-distance water conveyance structure in the South-to-North Water Diversion Project, and its operation safety is crucial to the stability of the whole trans-basin water conveyance system. Aiming at the aqueduct performance evaluation, based on the modeling and analysis results of the monitoring data of an aqueduct, a comprehensive evaluation method of the aqueduct safety based on the fusion of the cloud model theory and the prediction and analysis results of several monitoring points was proposed by the cloud model and data fusion method commonly used in the study of uncertainty problems. When evaluating the performance of an aqueduct, this method relies on the analysis results of the aqueduct safety prediction model, which effectively avoids the subjectivity of the evaluation process. Experimental results show that this method can accurately evaluate the working behavior of the aqueduct according to the analysis results of the prediction model, so it can provide a new approach for the comprehensive safety evaluation of aqueducts.

Key words: aqueduct; information fusion; cloud model; safety evaluation; prediction model

1 研究背景

近年来随着计算机技术的兴起,各类机器学习算法开始与大坝的安全监测研究相互结合,催生了一大批融合机器学习算法的监测分析模型与评价模型,但对于渡槽这种大型输水建筑物的安全监测数据的分析相对较少,对监测数据分析的手段大多是传统的方法,并且渡槽的安全评价方法多为由专家打分确定各评价指标属性,这些方法过于依赖专家经验,主观性较强,没有充分考虑渡槽监测数据的客观性来分析渡槽的工作性态,因此有必要建立一种以渡槽的监测数

据为基础的渡槽工作性态评价方法,通过渡槽的各定量监测数据来描述渡槽定性的工作性态。

本文以吴中如^[1]、何金平^[2]对大坝安全监控和评价方法的相关研究成果为基础,融合机器学习算法与研究不确定性问题的云模型理论,开展了对大型渡槽结构的评价方法研究。目前针对渡槽的工作性态评价常用的方法主要有:可靠度理论、模糊理论、熵权法、层次分析法(analytical hierarchy process, AHP)、D-S(Dempster-Shafer)证据理论、云模型等或将以上的方法进行组合来对水工建筑物进行安全评价。王梦雅等^[3]基于可拓理论建立了一种结

收稿日期:2022-10-07; 修回日期:2023-02-08

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC0406902)

作者简介:王仁超(1963—),男,山东烟台人,博士,教授,博士生导师,研究方向为水利工程安全监测。

合以物元模型和关联函数的渡槽老化评价方法,该方法实现了对渡槽老化程度的定量与定性评估,有效降低了主观赋值法造成的误差,使得权重系数的选取更为客观。刘尚坤^[4]针对钢筋混凝土结构的渡槽,将 AHP 与模糊综合评价方法结合建立了钢筋混凝土渡槽健康诊断与安全评估模型,为渡槽的结构健康诊断与评估提供了方法。Xu 等^[5]建立基于 AHP-熵权法的渡槽状态模糊综合评价方法,对渡槽的健康状态进行了综合评价。陈文龙^[6]使用 AHP-熵权法确定了渡槽的损伤关联结构,并利用动态贝叶斯网络结合马尔科夫算法实现了对渡槽工作状态的评价。王彦磊^[7]在渡槽预测模型模拟结果的基础上,使用 D-S 证据理论建立了渡槽的多层次性态评估模型,实现了用定量数据来描述渡槽的定性状态。Cheng 等^[8]改进了多级模糊评价方法,综合考虑了随机组合的不确定性和影响因素间相互作用的模糊性。Chen 等^[9]采用数字化技术对渡槽进行安全试验和评价,丰富了渡槽的安全评价方法。何建新等^[10]通过开展充水载荷试验判断渡槽的工作状态,并引入结构承载能力评价指标对渡槽结构进行了评价。王媛等^[11]引入动态权重模型为评价指标动态赋权,并利用云模型获取评价指标隶属度,实现了指标层权重的实时变化。水工建筑物安全评价^[12-16]领域中大坝方面的相关研究也提供了一些值得借鉴的方法,何金平等^[17]利用云模型理论结合多项监测指标提出了一种大坝多层次综合评价方法,该方法通过云模型不仅可以考虑监测信息中的不确定性还可以描述大坝安全评价结果的可信度,为水工建筑物安全评价研究提供了一种新的思路。

总体来看,水工建筑物安全评价是一个复杂的、多指标的非线性问题,要考虑监测数据异常时对结构稳定性的影响,同时还要考虑到监测信息中包含的不确定性。针对上述问题,本文以渡槽应变监测、钢筋应力监测和接缝开合度监测数据为基础,由信息熵理论得到多点融合残差,采用云模型来将监测

数据传递的定量信息转化为定性概念来客观、综合地对输水建筑物进行安全性态评价。

2 数据来源与研究方法

2.1 工程概况

位于河南省新郑市的南水北调工程中线新郑段双洎河支渡槽,跨越双洎河,全长为 325 m,本文主要针对双洎河支渡槽的混凝土应变监测、钢筋应力监测和接缝开合度监测数据进行安全监测分析,并进一步对预测结果进行工作性态评价。

2.2 数据来源

本文选取南水北调中线工程新郑段中双洎河支渡槽第一跨槽身部位的 7 支钢筋应力计监测数据,使用基于 KELM(kernel based extreme learning machine)计算的预测模型对其进行初步分析,对于钢筋应力计的监测数据选取 2015 年 7 月 9 日至 2019 年 1 月 25 日的区段为训练集,同时,此段时期为评价模型的建模期;选取 2019 年 1 月 17 日至 2019 年 8 月 25 日的区段为预测集,此段时期为评价模型的评价期。并由工程检测报告可知,2015 年 7 月至 2019 年 8 月期间工程运行状况良好,并且除失效监测仪器外,各监测仪器均正常运行,数据可靠。基于云模型理论的渡槽工作性态评价模型需要长期、丰富的学习样本,选用相同时间预测期的残差来生成评价云模型,对于钢筋应力计均选取 2015 年 7 月 9 日至 2019 年 1 月 25 日区段的拟合残差来生成概念云模型,选取 2019 年 1 月 17 日至 2019 年 8 月 25 日区段的预测值与实测值的残差来生成评价云模型。分别使用钢筋应力计监测传感器的安全监测模型的数据对双洎河支渡槽第一跨槽身进行性态评价。

钢筋应力计选取 R1-2、R1-4、R1-6、R1-8、R1-10、R1-12 和 R1-17 的监测数据,监测时段为 2015 年 7 月 9 日至 2019 年 8 月 25 日,平均每周进行 1 次数据采集,每支传感器的数据为 200 个,具体数据如图 1 所示。

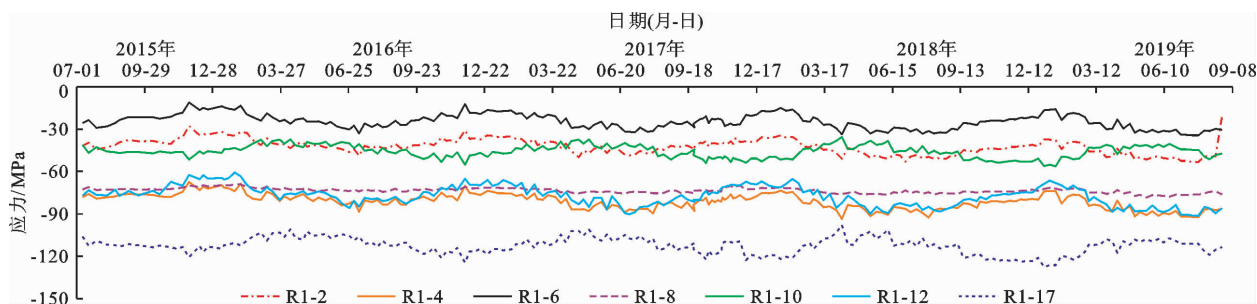


图1 2015-07-09—2019-08-25 渡槽 7 个钢筋应力计监测数据

2.3 渡槽监测数据的预测分析

渡槽的安全监测统计模型表达式的一般形式^[1]为:

$$\hat{y}(t) = \hat{y}_H(t) + \hat{y}_T(t) + \hat{y}_\theta(t) \quad (1)$$

式中: $\hat{y}(t)$ 为监测效应量在 t 时刻的预测估计值; $\hat{y}_H(t)$ 为水压分量的估计值; $\hat{y}_T(t)$ 为温度分量的估计值; $\hat{y}_\theta(t)$ 为时效分量的估计值。

在建立安全监测模型后,通过计算第 i 个测点的预测估计值与 $y(t)$ 的差值 Δ_i ,可以得到该测点的残差序列。如果差值较小,认为渡槽工作性态为正常,反之,则认为渡槽工作性态存在异常。

2.4 渡槽多测点信息融合方法

对于渡槽单测点监控模型,某一测点残差仅反映了渡槽的局部性态,可通过融合多个测点的残差对渡槽的整体性态进行评价。各个测点位于渡槽的不同位置,因其外部环境、监测传感器制造精度有所不同,导致监测模型的精度不同,各测点的残差规律性特征也有所差异。故在将多个测点残差进行融合时,需调整融合权重,在对渡槽进行整体性态评价时,对于残差序列波动较大的测点,增大其权重;反之,对于残差序列离散程度较小的,可以适当减小其权重^[18]。

对于所选取的无异常监测仪器的预测结果融合分析,可以采用基于信息熵的数据融合方法,信息熵^[19]是 Shannon 提出的用来描述序列不确定度的量,若序列的离散程度高,则其信息熵就高。对于渡槽单测点监控模型的某一测点残差序列 Δ_i ,其信息熵 e_{Δ_i} 的计算公式为:

$$e_{\Delta_i} = - \sum_{j=1}^m (p_{ij} \cdot \ln p_{ij}) \quad (2)$$

$$p_{ij} = \int_{-\infty}^{\Delta_{ij}} f(\Delta_i) d\Delta_i \quad (3)$$

式中: p_{ij} 为残差 Δ_i 中第 j 个残差 Δ_{ij} 的概率值, m 为残差序列的长度; $f(\Delta_i)$ 为 Δ_i 的概率密度函数,通常认为残差 Δ_i 服从正态分布^[13]。

由公式(2)和(3)获得各测点残差序列的信息熵可计算出残差 Δ_i 的权重 $w(\Delta_i)$:

$$w(\Delta_i) = \frac{1 - e_{\Delta_i}}{\sum_{i=1}^n (1 - e_{\Delta_i})} \quad (4)$$

由此得到多个测点的融合残差为:

$$\Delta = \sum_{i=1}^n (\Delta_i \cdot w(\Delta_i)) \quad (5)$$

2.5 渡槽不同性态概念云模型

云模型的概念可以用 3 个数字特征描述,即期

望 Ex (expected value)、熵 En (entropy) 和超熵 He (hyper entropy),以此反映概念的整体特征。如图 2 所示。

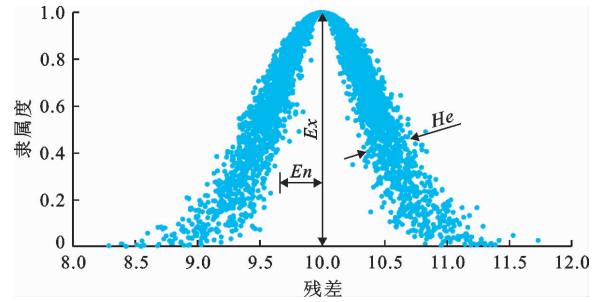


图2 云模型数字特征示意图

(1) 期望 Ex 是云滴在论域空间分布的期望。

$$Ex = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (6)$$

(2) 熵 En 反映定性概念的不确定性,熵越大,随机性和模糊性越强。

$$En = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - Ex| \quad (7)$$

(3) 超熵 He 反映熵 En 的不确定性。在图 2 中,超熵表示了云的离散程度与厚度。

$$He = \sqrt{\left| \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i) - En^2 \right|} \quad (8)$$

以渡槽历史监测资料预测模型计算的融合残差 Δ 为评价依据,使用云模型构建渡槽的整体性态评价模型时,需要确定融合残差 Δ 的定性概念数量以及概念云。在坝工领域中,通常将水工建筑物性态^[2]划分为 3 级或者 5 级。本文借鉴坝工领域的相关研究成果划分渡槽的安全性态,因此本文中渡槽的整体性态评价标准由 3 种概念云定性概念组成,即“正常云”“基本正常云”和“异常云”。

相关文献表明,各测点的单点监控模型的残差以及融合残差应近似服从正态分布^[20],融合残差 Δ 概率密度函数($f(\Delta)$) 曲线如图 3 所示。坝工领域的安全监控理论认为,某时刻预测模型得到的残差值 Δ 在区间 $[-2\sigma, 2\sigma]$ 之间的概率达 95.5%,这部分残差属于正常残差;残差值在 $[-3\sigma, -2\sigma]$ 和 $(2\sigma, 3\sigma]$ 之间的概率为 4.2%,属于正常残差与异常残差的过渡值,将这部分残差定为基本正常残差;残差位于 $[-\infty, 3\sigma)$ 和 $(3\sigma, +\infty]$ 范围内的概率为 0.3%,这部分残差属于异常残差,其中 σ 为预测模型的标准差。对于各个区间范围内残差的云数字特征,本文中采用逆向云生成器提取该参数,进而通过正向云发生器构建对应性态的概念云,构建的渡槽

评价性态概念云可以充分体现各区间范围内残差的真实特征。

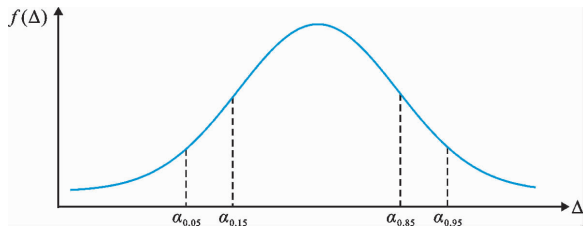


图3 融合残差 Δ 概率密度曲线及下分位点位置示意图

样本容量对云数字特征具有一定影响,位于基本正常与异常残差区间的比例太小,只有 4.2% 和 0.3%,在这种情况下计算得到的云数字特征,会受到较高的离散型与随机性的影响,进而降低概念云的可靠度。为防止该问题的发生,本文采取了调整残差区间范围的方法,以 α 表示下分位点,即残差落入 $(-\infty, \mu_\alpha)$ 区间内的概率。

(1) 融合残差 Δ 中位于 $[\mu_{0.15}, \mu_{0.85})$ 区间内的数量占总体的 70%,该区间内残差规定为正常残差。

(2) 融合残差 Δ 中位于 $[\mu_{0.05}, \mu_{0.15})$ 与 $[\mu_{0.85}, \mu_{0.95})$ 区间内的数量占总体的 20%,该区间内残差规定为基本正常残差。

(3) 融合残差 Δ 中位于 $(-\infty, \mu_{0.05})$ 与 $[\mu_{0.95}, +\infty)$ 区间内的数量占总体的 10%,该区间内残差规定为异常残差。

区间内残差的样本容量增多,可以增大计算所得云数字特征参数的可信度。由图 3 可知,本文将正常残差区间缩小,从而扩大了基本正常和异常残差区间的比例,并由此改进了小概率阈值,也提高了工程安全。

将区间范围划分完成后,各性态区间范围中的残差特征参数可通过公式(6)与(7)获得,并构建对应的云模型,即可获取渡槽各性态评价的概念云,各评价概念云区间范围的特征见表 1。

表1 渡槽工作性态评价概念云

概念云	概念云状态	概念云区间
C_1	异常	$(-\infty, \mu_{0.05})$
C_2	基本正常	$[\mu_{0.05}, \mu_{0.15})$
C_3	正常	$[\mu_{0.15}, \mu_{0.85})$
C_4	基本正常	$[\mu_{0.85}, \mu_{0.95})$
C_5	异常	$[\mu_{0.95}, +\infty)$

由表 1 可知,将根据在 $(-\infty, \mu_{0.05})$ 与 $[\mu_{0.95}, +\infty)$ 区间内残差的云数字特征生成的云模型定义

为“异常云”;将根据在 $[\mu_{0.05}, \mu_{0.15})$ 与 $[\mu_{0.85}, \mu_{0.95})$ 区间内残差的云数字特征生成的云模型定义为“基本正常云”;将根据在 $[\mu_{0.15}, \mu_{0.85})$ 区间内残差的云数字特征生成的云模型定义为“正常云”;将根据在评价期内残差的云数字特征生成的云模型定义为“评价云”。

2.6 云相似度计算

云相似度是用来衡量云模型之间相似性的度量,在使用云模型生成渡槽各性态概念云的基础上,利用评价期的监测资料生成渡槽的评价云,计算评价云与渡槽各性态的概念云的云相似度,通过最大隶属度原则得到最终的评价结果,云相似度的计算方法有很多,传统的云模型相似度计算方法是基于特征向量或云滴的距离值进行相似度比较^[21],文献[22]通过云模型的期望曲线和最大边界曲线来计算云模型之间的相似度能更为客观地衡量云模型之间的相似性,文献[23]考虑距离和形状的因素计算云相似度为云模型数据挖掘提供了新的方法,此外还有考虑云模型外包络线的重叠面积来计算云相似度的方法^[18],该方法需要计算云模型外包络线的交点,并通过积分计算重叠面积,计算较为复杂,考虑到决定渡槽工作性态评价概念云模型与评价云模型所处性态区间的主要影响因素是云数字特征的期望,本文参考文献[17]的方法选择计算余弦距离的方式来衡量不同云模型之间的相似度。

设云向量分别为:

$$\vec{V}_i = V_i(Ex_i, En_i, He_i) \quad (9)$$

$$\vec{V}_j = V_j(Ex_j, En_j, He_j) \quad (10)$$

则余弦云相似度为 $CS(i, j)$, 即:

$$CS(i, j) = \cos(\vec{V}_i, \vec{V}_j) = \frac{\vec{V}_i \cdot \vec{V}_j}{\|\vec{V}_i\| \cdot \|\vec{V}_j\|} \quad (11)$$

将得到的评价云模型按照公式(11)分别求得与渡槽各性态概念云的云相似度,最大云相似度所对应的评价状态即为渡槽性态的评价结果。

3 结果与分析

3.1 渡槽监测数据分析结果的信息融合

表 2 为钢筋应力计各测点的平均绝对误差(MAE)、均方根误差(RMSE)和平均绝对百分比误差(MAPE)的分析结果。从表 2 中可以看到, KELM 预测模型在所选 7 个钢筋应力计的预测中, MAE 与 RMSE 均维持在较低的水平,其中 MAE 最小为 0.713 MPa,最大仅为 2.227 MPa;而 RMSE 最小为 0.916

MPa,最大为 2.771 MPa。

表 2 钢筋应力监测模型预测分析结果

监测仪器编号	MAE/MPa	RMSE/MPa	MAPE/%
R1-2	1.727	2.019	3.756
R1-4	1.875	2.417	2.206
R1-6	1.765	2.227	7.016
R1-8	0.713	0.916	0.951
R1-10	1.756	2.123	3.808
R1-12	2.227	2.771	2.649
R1-17	2.079	2.493	1.828

使用渡槽单测点安全预测模型对双洎河支渡槽第一跨槽身中的钢筋应力计进行了预测分析,得到钢筋应力计 R1-2、R1-4、R1-6、R1-8、R1-10、R1-12 和 R1-17 各测点的残差序列,经 Kolmogorov - Smirnov 检验得到各测点残差序列均服从正态分布,钢筋应力计评价期内每个测点的融合权重通过公式

(2)~(4)计算,如表 3。

表 3 各钢筋应力计各测点残差融合权重

R1-2	R1-4	R1-6	R1-8	R1-10	R1-12	R1-17
0.144	0.164	0.153	0.042	0.150	0.179	0.167

由表 3 可见,在钢筋应力计各测点的残差融合权重中,R1-2、R1-8 测点融合权重均较小,分别为 0.144、0.042,因为在表 2 中,这几个测点的 MAE 值与 RMSE 值相对较小,说明其残差序列的波动相对较小,规律性好。而 R1-4、R1-12 和 R1-17 测点的融合权重均较大,分别为 0.164、0.179、0.167,说明了其残差序列波动相对较大,离散程度相对较大,所以其信息熵较高,获得了更大的权重。

根据表 3 钢筋应力计各测点残差融合权重,由公式(5)分别计算钢筋应力计监测数据的融合残差。图 4 为双洎河支渡槽第 1 跨槽身 7 个钢筋应力计的融合残差过程线。

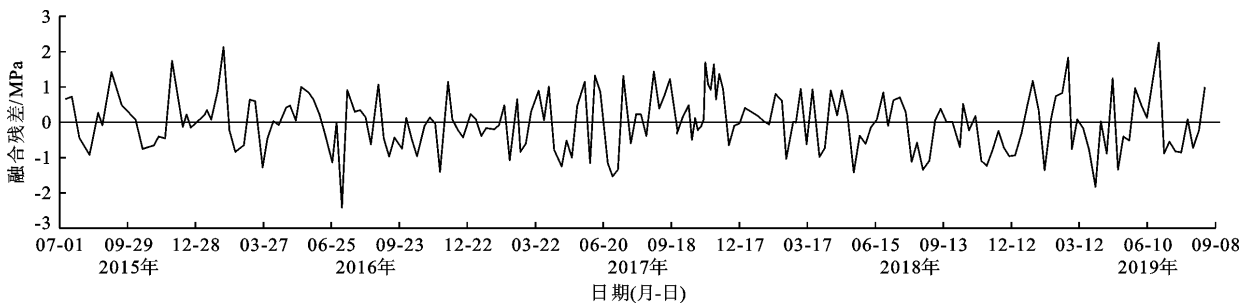


图 4 7 个钢筋应力计融合残差过程线

3.2 基于信息融合与云模型的渡槽安全评价

采用核密度函数估计钢筋应力监测数据融合残差概率密度曲线 $f(x)$,表达式如下式:

$$f(x) = - \frac{1}{0.77 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-0.01)^2}{2 \times 0.77^2}} \tag{12}$$

式中: x 为渡槽钢筋应力计监测数据融合残差中的残差值。

绘制出 $f(x)$ 函数曲线,并将 $f(x)$ 划分为 3 个区间,分别代表“异常”“基本正常”和“正常”,得到其概率分布与特征分位点如图 5 所示。计算建模期内各个区间内的残差,并对各性态区间内残差的云模型特征进行计算,如表 4 所示。根据表 4 中钢筋应力计监测数据融合残差不同性态区间的云模型特征参数,利用正向云发生器生成渡槽的评价标准概念云,包含了“正常云” C_3 、“基本正常云” C_2 和 C_4 以及“异常云” C_1 和 C_5 。

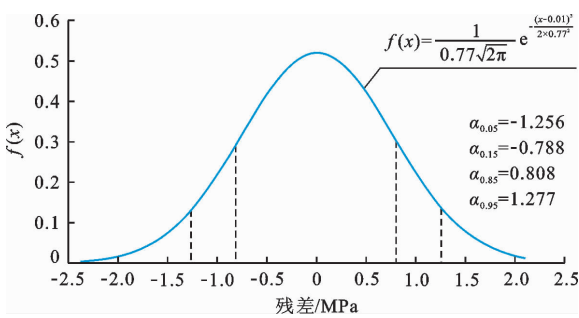


图 5 应力计融合残差概率分布与分位点图

表 4 钢筋应力计概念云特征参数

概念云	概念云状态	概念云区间	Ex	En	He
C_1	异常	$(-\infty, \mu_{0.05})$	-1.535	0.318	0.242
C_2	基本正常	$[\mu_{0.05}, \mu_{0.15})$	-1.041	0.125	0.037
C_3	正常	$[\mu_{0.15}, \mu_{0.85})$	-0.013	0.432	0.111
C_4	基本正常	$[\mu_{0.85}, \mu_{0.95})$	0.980	0.125	0.041
C_5	异常	$[\mu_{0.95}, +\infty)$	1.562	0.267	0.019

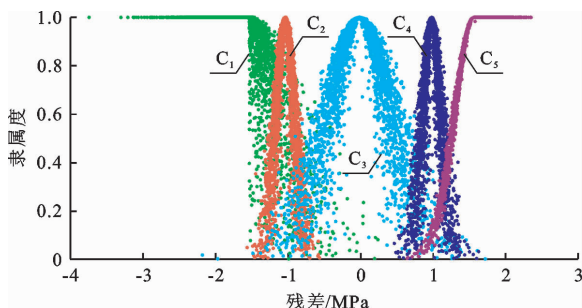


图6 渡槽性态评价概念云

根据钢筋应力计监测融合残差生成的不同性态的概念云,开展对双泊河支渡槽第1跨槽身的整体性态评价。计算评价期内双泊河支渡槽第1跨槽身内钢筋应力计表征的渡槽性态评价云数字特征参数,如表5所示,其评价云可使用正向云发生器获得,如图7所示。

表5 应力计表征的渡槽性态云特征参数

评价云	E_x	E_n	H_e
C	-0.028	0.978	0.098

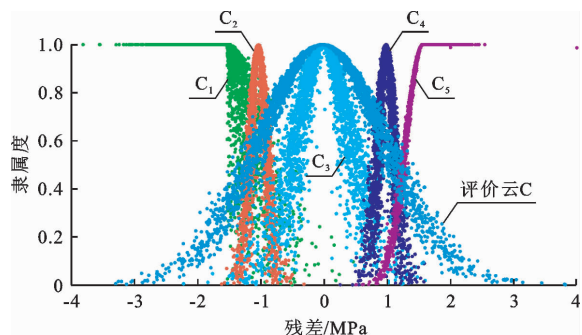


图7 应力计融合残差表征的渡槽评价云

计算应力计融合残差表征的评价云与各个概念云的云相似度 $CS(C, C_i)$, 得出 $CS(C, C_1)$ 、 $CS(C, C_2)$ 、 $CS(C, C_3)$ 、 $CS(C, C_4)$ 、 $CS(C, C_5)$ 的云相似度分别为0.242、0.151、0.988、0.101、0.140。根据最大相似度准则,由钢筋应力计评价的融合残差表征的双泊河支渡槽第1跨槽身内钢筋应力情况的性态评定为“正常”。

4 讨论

单测点模型中的测点残差仅可对局部性态作出评价,选用多测点的预测模型残差进行融合,可以得到能够反映渡槽整体安全性态的融合残差,同时多测点中单个测点的残差序列异常或残差序列中某个残差异常均会对融合残差造成影响,结合云模型理论以及最大相似度准则进行评价,体现出了评价过

程的模糊性。

在使用渡槽单测点安全预测模型对钢筋应力计进行预测分析时,得到了钢筋应力计各测点的残差序列,并经检验得到各测点残差序列均近似服从正态分布,此处借鉴了文献[20]的结论并验证了本文中得到的残差序列近似服从正态分布,残差序列是否服从其他概率分布则需要进一步探讨,此问题与本文主要研究方向不同,故此处未作进一步研究。

对比应力计融合残差表征的评价云与各概念云的相似度可知,评价云C与 C_1, C_2, C_4, C_5 的相似度远远小于与 C_3 的相似度,且与 C_3 的相似度接近1,表明本文采用方法具有良好的评价结果,可以清晰、准确地反映出渡槽的工作性态。对比采用模糊理论、熵权法、层次分析法等常用方法的研究,通过计算相似度进行整体性态评价,具有一定的模糊性,同时确保了评价结果的定量性与客观性。由于本文着重考虑评价方法的适用性,准确性与客观性,选择融合全部测点残差以获得准确的评价结果,在将来的研究中可获取更多数据并按照时间关系分段研究,以对比获得渡槽不同生命周期内的性态变化规律,得到更系统的结论。

本文以渡槽安全监测模型的分析结果为基础,将多个测点的预测模型残差基于信息熵理论进行数据层的信息融合,得到多个测点的融合残差,将融合残差划分为不同性态区间,通过云模型提取了各性态区间内的云特征参数,并生成了相应概念云来对渡槽的安全性态进行评价,评价结果与工程实际一致,并具有较好的准确性和客观性。

5 结论

根据本文所提出的渡槽安全评价方法,对渡槽的安全性态进行评价,得到如下主要结论:

(1)在采用融合权重对多个测点残差进行分析时,对于残差序列波动较大、规律性较差的测点,增大其权重,对于残差序列波动较小、离散程度较小的,可适当减小其权重,进而提升整体性态评价结果的可靠性。

(2)在渡槽安全评价中引入云模型理论,采用对比各个概念云与评价云的相似度,并根据最大相似度准则得出评定结果,体现出评价过程的客观性,且得到的云相似度值为0.988,可证明其适用性与准确性。

(3)在渡槽的监测数据的基础上,采用云模型使渡槽定量监测数据转换到渡槽运行状态的定性概

念,在考虑监测信息不确定性的同时有效避免了过于依赖专家经验导致主观性较强的缺点。

(4)本文对渡槽的监测分析与评价借鉴了大坝安全监控领域的相关研究,实际上二者在结构上存在部分差别,后续应继续研究以确定具有渡槽特征的监测效应量与影响分量间的关系式。

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, 1990.
- [2] 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.
- [3] 王梦雅, 夏富洲. 基于可拓理论的渡槽结构老化评价[J]. 武汉大学学报(工学版), 2014, 47(2): 211-216+254.
- [4] 刘尚坤. 钢筋混凝土渡槽结构健康诊断与安全评估研究[D]. 杨陵: 西北农林科技大学, 2015.
- [5] XU Lei, CHANG Mingqi, FAN Yanli, et al. Safety assessment research of aqueduct in the irrigation area[C]// 2016 International Conference on Architectural Engineering and Civil Engineering, Paris: Atlantis Press, 2016.
- [6] 陈文龙. 南水北调大型输水建筑物安全监测与损伤诊断研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
- [7] 王彦磊. 梁式渡槽应力应变预测模型及性态评估研究[D]. 天津: 天津大学, 2019.
- [8] CHENG Yu, WANG Zhengzhong, XU Cundong, et al. Safety grade evaluation of aqueduct structure based on fuzzy cloud theory analysis[J]. Technical Gazette, 2020, 27(3): 874-882.
- [9] CHEN Wenliang, CHEN Xiuliang, WU Wenda, et al. Application of digital technology in safety evaluation of Dabeishan aqueduct[C]// IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021.
- [10] 何建新, 杨志豪, 刘亮, 等. 克孜河渡槽充水载荷试验及结构承载能力评价[J]. 水资源与水工程学报, 2021, 32(5): 175-180+187.
- [11] 王媛, 张志慧, 任杰, 等. 基于动态权重-云模型的大型渡槽安全综合评价[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(2): 56-63.
- [12] 李晓超, 钟登华, 任炳昱, 等. 基于模糊 RES-云模型的坝基岩体可灌性评价研究[J]. 水利学报, 2017, 48(11): 1311-1323.
- [13] 黎良辉, 杨斌, 魏博文, 等. 基于改进层次分析法的大坝性态安全诊断云模型[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(1): 209-214.
- [14] 朱文锋, 高超丹, 庄克云, 等. 基于优化 AHP 及云模型的大坝安全综合评价[J]. 中国农村水利水电, 2019(6): 125-130.
- [15] 王晓玲, 戴林瀚, 吕鹏, 等. 基于 DSR-可拓云的渗流安全综合评价研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2019, 52(1): 52-61.
- [16] 刘可心, 李艳玲, 赵尹利, 等. 基于云模型的混凝土坝变形安全评价方法研究[J]. 中国农村水利水电, 2020(9): 248-252+256.
- [17] 何金平, 高全, 施玉群. 基于云模型的大坝安全多层次综合评价方法[J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36(11): 2977-2983.
- [18] 姜振翔, 陈辉, 陈柏全. 基于云理论的大坝整体性态评价模型[J]. 工程科学学报, 2022, 44(3): 464-473.
- [19] XU Jiantao, ZHOU Hongming, HUANG Guangbin. Extreme learning machine based fast object recognition[C]// 2012 15th International Conference on Information Fusion. Singapore: IEEE, 2012.
- [20] GAMSE S, HENRIQUES M J, OBERGUGGENBERGER M, et al. Analysis of periodicities in long-term displacement time series in concrete dams[J]. Structural Control Health Monitoring, 2020, 27(3): e2477.
- [21] 黄琼桃, 刘瑞敏. 云模型的相似性度量综述[J]. 数据通信, 2019(6): 43-49.
- [22] 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): 2561-2567.
- [23] 汪军, 朱建军, 刘小弟. 兼顾形状-距离的正态云模型综合相似度测算[J]. 系统工程理论与实践, 2017, 37(3): 742-751.