

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20222019

# 特高拱坝多测点时效变形的协整监控模型及其应用

刘伟琪<sup>1a,1b</sup>, 陈波<sup>1a,1b</sup>, 刘庭赫<sup>2</sup>

(1. 河海大学 a. 水利水电学院; b. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;  
2. 中水东北勘测设计研究有限责任公司, 吉林 长春 130021)

**摘要:** 实测变形资料作为特高拱坝服役性态最直观表征, 蕴藏着丰富的时空信息和演变规律。为研究特高拱坝时效变形的协整性, 利用小波分解获得大坝位移的时效分量, 考虑到特高拱坝的空间整体一致性差异, 采用FCM聚类算法实现了时效变形的区域化, 借助区域线性化思想, 将整个特高拱坝时效变形的空间非线性协整关系转化为区域内近似线性的协整关系, 建立了描述大坝不同部位时变协整发展规律的分区协整模型, 通过协整残差实现了多测点时效变形的协整发展监控和预警。

**关键词:** 特高拱坝; 时效变形; 协整理论; 监控模型

**中图分类号:** TV698.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2023)08-0126-05

## 1 引言

特高拱坝的时效变形由坝体徐变、坝基蠕变等多种因素叠加产生, 时变发展规律蕴藏着大坝服役性态转异的前兆信息<sup>[1,2]</sup>, 建立时效变形的安全监控模型对其性态分析具有重要的研究价值<sup>[3]</sup>。协整理论常用于描述两个非平稳的系统存在的长期均衡关系<sup>[4]</sup>。特高拱坝变形行为存在独特的空间区域性, 时效变形的空间协整性是其结构性态转异的关键因素, 涉及到大坝整体发展的关联性和均衡性。当大坝正常运行时, 各部位时效变形协同发展; 当大坝出现性能劣化时, 时效变形常出现异常变化, 各部位时效变形发展的协整关系发生改变。因此, 有必要以多测点时效变形的协整关系为研究对象, 建立特高拱坝时效变形的安全监控模型。本文结合聚类算法和协整理论, 建立多测点时效变形的协整监控模型, 先利用小波分解得到特高拱坝的时效变形, 基于多尺度模糊C均值(FCM)算法实现时效变形的区域化; 借助区域线性化的思想, 将整个特高拱坝时效变形的空间非线性协整关系转化成各区域内近似线性协整关系, 通过建立各区域内测点时效变形协

整方程描述大坝不同部位的时变协整发展规律, 并以协整残差实现多测点时效变形的监控和预警。

## 2 基于FCM的多测点时效变形聚类分区

### 2.1 基于小波的时效变形分离

设大坝变形时间序列为 $\{X_t\}$ , 利用小波分解将离散信号 $\{X_t\}$ 在尺度 $1, 2, 3, \dots, j$ 上进行分解, 得到从高频至低频的信息 $d_1, d_2, d_3, \dots, a_j$ , 分解层数一般通过傅里叶分析或经验确定。时间序列 $X_t$ 则包含3组成分:

$$X_t = s_t + p_t + x_t \quad (1)$$

式中,  $s_t$ 为信号高频部分, 呈明显周期性, 认为该部分变形由水压、温度引起;  $p_t$ 为信号低频部分, 呈趋势性, 由时效引起;  $x_t$ 为噪声干扰项。

### 2.2 基于FCM的时效变形聚类

时效变形的发展趋势主要取决于变形的增长速度, 且增长速度的变化直接影响最终时效变形的大小。因此, 在评判不同测点间时效变形的相似性时, 时效变形的增长速度是最有效的属性指标。假设用 $\delta_{it}$  ( $i=1, 2, \dots, N; t=1, 2, \dots, T$ )表示 $t$ 时刻测点 $i$ 的时效变形, 用 $d_{ij}$ 表示测点 $i$ 和

**收稿日期:** 2022-09-27, **修回日期:** 2022-10-24

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(52079049); 国家自然科学基金重点项目(51739003); 国家重点实验室基本科研业务费(522012272)

**作者简介:** 刘伟琪(1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向为水工安全监控, E-mail: 945988066@qq.com

**通讯作者:** 陈波(1986-), 男, 博士、教授、博导, 研究方向为水工安全监控, E-mail: chenbohhu@126.com

测点  $j$  时效变形的相似性大小,构建相对增速距离指标(RGD):

$$d_{ij}^S(\text{RGD}) = \sum_{t=1}^T (z_{it} - z_{jt})^2 \quad (2)$$

$$\text{其中 } z_{it} = \frac{\delta_{it} - \delta_{i,t-1}}{\delta_{it}}; z_{jt} = \frac{\delta_{jt} - \delta_{j,t-1}}{\delta_{jt}} \quad (3)$$

基于相似性指标,提出时效变形的 FCM 聚类。假设共有  $n$  个变形测点,分离得到时间长度为  $T$  的时效变形数据集  $\mathbf{V}$ ,首先计算  $T$  个时间截面对应的相对增速距离作为测点属性,若聚类数目为  $c$ ,将数据集记为  $\mathbf{V} = (v_1, v_2, \dots, v_c)$ ,则第  $i$  个测点与第  $j$  类聚类中心  $v_j$  属性距离的平方和  $W_{ij}$  可表示为  $W_{ij} = (z_{ij} - \bar{z}_j)^2$ ,建立 FCM 模型的目标函数:

$$\min J_{\text{FCM}}(\mathbf{U}, \mathbf{V}) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^c u_{ij}^m W_{ij} \quad (4)$$

式中,  $\mathbf{U} = u_{ij}$  为  $k \times n$  的模糊划分矩阵;  $\mathbf{V} = (v_1, v_2, \dots, v_c)$  为  $c$  个聚类的中心向量构成的  $s \times c$  的矩阵;  $u_{ij}$  ( $u_{ij} \in [0, 1]$ ,  $\sum_{j=1}^c u_{ij} = 1$ ) 为第  $j$  个元素属于第  $i$  类的隶属度;  $m \geq 1$  为模糊系数。

聚类数目  $c$  通过轮廓系数法确定。单个测点  $x_i$  的轮廓系数  $S_i$  为:

$$S_i = \frac{p(x_i) - q(x_i)}{\max\{p(x_i), q(x_i)\}} \quad (5)$$

式中,  $p(x_i)$  为测点  $x_i$  到本类簇中其他测点的平均距离;  $q(x_i)$  为测点  $x_i$  到其他簇内所有点的最小平均距离。

轮廓系数  $S$  落在  $[0, 1]$  区间且值越大时,聚类效果越好。

基于 FCM 聚类算法的具体步骤如下。

**步骤 1** 设定模糊系数  $m$  和聚类数目  $c$ ,初始化各类中心  $\mathbf{V}^0$  和隶属度矩阵  $\mathbf{U}^0$ ;设置收敛精度  $\epsilon > 0$ 、迭代步数  $k = 0$ ;对时效变形特征值进行标准化处理以避免量纲影响。

**步骤 2** 计算聚类中心向量  $\mathbf{V}^k$ :

$$v_i = \sum_{j=1}^n u_{ij}^m x_j / \sum_{j=1}^n u_{ij}^m \quad (6)$$

**步骤 3** 建立隶属度  $\mathbf{U}^k$  更新公式并计算:

$$u_{ij} = \left[ \sum_{r=1}^c \left( \frac{d_{ij}}{d_{rj}} \right)^{2/(m-1)} \right]^{-1} \quad (7)$$

**步骤 4** 令  $k = k + 1$ ,重复步骤 2、3,直到满足算法收敛度约束条件:

$$\|\mathbf{U}^{k+1} - \mathbf{U}^k\| \leq \epsilon \quad (8)$$

### 3 多测点时效变形协整监控模型

#### 3.1 协整理论

协整理论常用于描述两个非平稳的经济系统存在的长期均衡关系,将非平稳的时间序列通过线性组合转换为平稳时间序列,从而解决对于非平稳时间序列建模存在的伪回归问题。假设  $\delta_t$  为非平稳序列,经  $d$  阶差分后成为平稳序列,则称该序列满足  $d$  阶单整,记为  $I(d)$ 。两个非平稳时间序列只有单整阶数相同时才有可能存在良好的均衡关系,因此在建立协整模型前,首先要判断两个非平稳序列是否具有相同的单整阶数。若存在序列  $\delta_t = \{\delta_{1t}, \delta_{2t}, \dots, \delta_{mt}\}$ ,其中各分量均满足一阶单整,则存在线性组合  $\beta_t = \{\beta_{1t}, \beta_{2t}, \dots, \beta_{mt}\}$ ,使  $\beta_t \delta_t$  为平稳序列,则称  $\delta_t$  各分量间存在协整关系,满足:

$$\beta_{1t} \delta_{1t} + \beta_{2t} \delta_{2t} + \dots + \beta_{mt} \delta_{mt} = \epsilon_t \quad (9)$$

式中,  $\epsilon_t$  为协整残差序列。

采用 Engle-Granger(EG)两步法,通过检验最小二乘回归残差序列是否平稳检验协整关系。

针对序列  $\delta_t = \{\delta_{1t}, \delta_{2t}, \dots, \delta_{mt}\}$ ,首先对序列中的各分量进行单位根检验,可采用增广迪基-福勒检验(ADF)法进行初步检验。若各分量的单整阶数不同,则以上分量不存在协整关系,需选择单整阶数相同的分量进行协整分析。用普通最小二乘法(OLS)建立分量的回归关系:

$$\hat{\beta}_1 \delta_{1t} + \hat{\beta}_2 \delta_{2t} + \dots + \hat{\beta}_n \delta_{nt} + \hat{\beta}_0 = 0 \quad (10)$$

式中,  $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \dots, \hat{\beta}_n$  为回归方程的估计量。

对回归方程的残差序列  $e_t$  进行平稳性检验,若残差序列平稳,说明各分量间存在协整关系。

相对应的零假设  $H_0$  和备择假设  $H_1$  为:

$$\begin{cases} H_0: \rho = 0 \\ H_1: \rho < 0 \end{cases} \quad (11)$$

当零假设  $\rho = 0$  ( $e_t$  平稳)不成立时,说明分量不存在协整关系,式(9)的回归是伪回归;反之,各分量具有长期均衡关系,式(9)可作为协整方程描述长期均衡关系。

#### 3.2 协整监控模型

在外界荷载长期作用下,特高拱坝的时效变形相互制约并协调发展,当大坝运行态发生转变时,会出现异常的时变特征,对大坝整体的协整关系造成影响,因此可利用这种关系监控大坝实时运行状态。

假设  $n$  个测点均存在  $T$  个时间截面的时效变形序列  $\{\delta_i, i = 1, 2, \dots, T\}$ ,将每一个时间截面的变形值  $\delta_i$  视为测点的一个属型特征,则共存在  $T$  维属性空间。图 1 为二维属性空间下不同测点的时效变形分布示意图。由于特高拱坝各部位

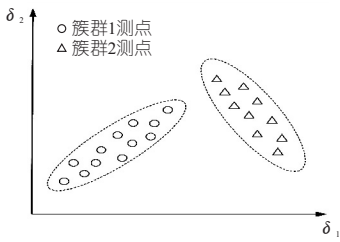


图 1 时效变形二维属性特征分布示意图

Fig. 1 Schematic diagram of two-dimensional attribute feature distribution of aging deformation

受荷载及坝基约束作用的程度不同,导致在二维属性空间内,将测点测值聚集为不同簇群,采用线性的协整方程难以统一描述不同测点时效变形的协整关系,故引入区域分割线性化的思想,按时效变形特征规律将大坝测点聚类,对各区域内的测点分别建立协整模型。根据聚类结果,区域内各测点的时效变形增速相近,表现为簇内测点呈线性协整趋势;而不同簇内测点的时效变形具有非线性的协整趋势,用线性协整模型难以满足精度要求。当出现异常时效变形测值时,选择测点隶属区域的协整方程进行判断,以残差作为监控指标,可有效识别异常情况。选择监控理论中的  $3\sigma$  准则作为协整残差的控制指标,结合  $\bar{X}$  控制图生成上限指标  $U_{UCL}$  和 下限指标  $L_{LCL}$  :

$$\begin{cases} U_{UCL} = C_L + 3\sigma \\ L_{LCL} = C_L - 3\sigma \end{cases} \quad (12)$$

式中,  $C_L$  为协整残差的平均值;  $\sigma$  为协整残差的标准差。

## 4 应用

### 4.1 工程概况

某特高拱坝最大坝高 305.0 m,正常蓄水位 1 880 m,目前处于稳定运行阶段。为监测坝体变形,分别在 # 5、# 9、# 11、# 13、# 16、# 19 坝段不同高程布置垂线测点见图 2。收集近 5 年的水平径向位移监测数据为研究对象。

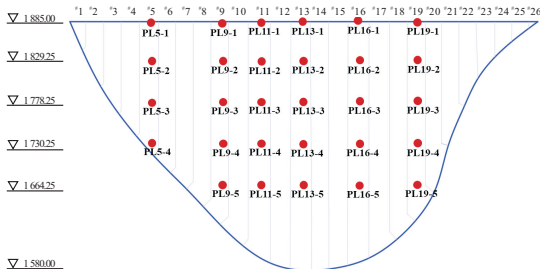


图 2 某特高拱坝正垂线测点布置图

Fig. 2 Layout of normal vertical measuring points of an extra-high arch dam

### 4.2 时效变形小波分解

以 PL13-1 为例,采用小波分解分离出测点的时效变形。经过 FFT 变换可知,采用 db6 小波函数将原始信号分解至 9 层较合适,其中剩余部分 a9 即为时效变形序列,用原始序列减去时效变形序列及 d1、d2 噪声干扰序列可分离出周期性高频分量,见图 3。小波分解得到的时效变形抓住了实测变形数据自身特点,呈非单调性,局部存在起伏变化,可能包含水位变化引起的可恢复徐变,也可能是由山体挤压等多种因素叠加作用所致,符合实际的时效发展特征。

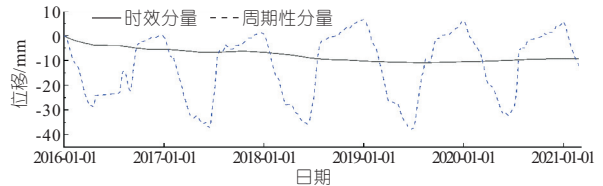


图 3 PL13-1 测点变形时间序列小波分解结果

Fig. 3 Wavelet decomposition result of deformation time series of PL13-1 measuring point

### 4.3 基于 FCM 的时效变形聚类分区

分别计算聚类数目 3~8 的轮廓系数,见图 4。由图 4 可知,当聚类数目  $c=3$  时,轮廓系数  $S$  最大聚类效果较优,故确定聚类数目为 3。

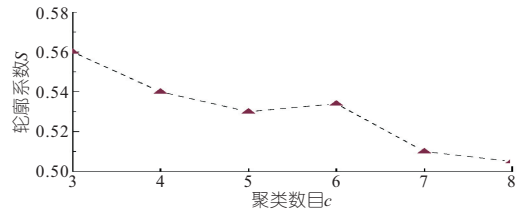


图 4 轮廓系数  $S$  与聚类数目  $c$  的关系

Fig. 4 Relationship between silhouette coefficient  $S$  and number of clusters  $c$

将各测点时效变形序列转换为相对增速属性,将 29 个测点聚类划分为三个区域,见图 5。由图 5 可知, I 区测点集中在拱坝的较高部位, II 区测点主要分布在拱坝的中部, III 区测点分布在拱坝低高程部位及两岸。聚类结果能反映各测点时效变形的空间分布特征,拱梁方向上按高程分

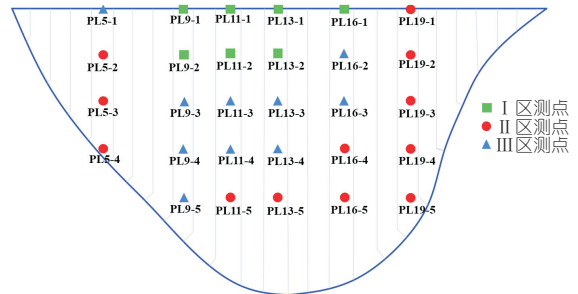


图 5 时效变形聚类分区结果

Fig. 5 Clustering results of aging deformation

割成台阶式分布,拱圈方向上两岸测点基本被聚为一类,也能反映两岸测点时效变形与其他部位分布规律的差异性。

### 4.4 多测点协整监控

#### 4.4.1 协整检验

基于聚类结果,分别对各区测点的时效变形开展协整分析。以 I 区测点为例,给出协整模型的建立过程及监控结果。首先,对时效变形进行 ADF 检验,设定显著性水平 5%,当满足  $P < 0.05$  时,认为时间序列平稳,结果见表 1。由表 1 可知,该区域内测点均为非平稳时间序列,经一阶差分后,为平稳时间序列,故各测点的时效变形序列均为一阶单整,满足协整关系存在的条件。

表 1 I 区测点时效变形 ADF 检验结果

Tab. 1 Results of ADF test for aging deformation of measuring points in area I

变量	P 值	是否平稳	变量	P 值	是否平稳
$\delta_{PL9-1}$	0.99	否	$\Delta\delta_{PL9-1}$	0.000 2	是
$\delta_{PL9-2}$	1.00	否	$\Delta\delta_{PL9-2}$	0	是
$\delta_{PL11-1}$	0.11	否	$\Delta\delta_{PL11-1}$	0	是
$\delta_{PL11-2}$	0.29	否	$\Delta\delta_{PL11-2}$	0.020 0	是
$\delta_{PL13-1}$	1.00	否	$\Delta\delta_{PL13-1}$	0	是
$\delta_{PL13-2}$	1.00	否	$\Delta\delta_{PL13-2}$	0	是
$\delta_{PL16-1}$	0.98	否	$\Delta\delta_{PL16-1}$	0	是

建立各测点间的协整模型,并采用 EG 检验法对协整关系进行进一步检验。

建立各测点时效变形的 OLS 方程,并对残差序列进行检验,发现测点 PL9-1、PL9-2、PL11-1、PL11-2、PL13-1、PL13-2、PL16-1 相关系数达 0.9 以上,建模精度较高,且残差序列通过了平稳性检验( $P=0.008 9$ ),说明该回归为有效回归, I 区各测点间存在协整关系。

确定协整方程 1 为:

$$-0.04 + \delta_{PL11-1} - 0.57\delta_{PL11-2} - 0.88\delta_{PL13-1} + 0.45\delta_{PL13-2} - 0.21\delta_{PL16-1} + 0.06\delta_{PL9-1} + 0.18\delta_{PL9-2} = 0 \quad (13)$$

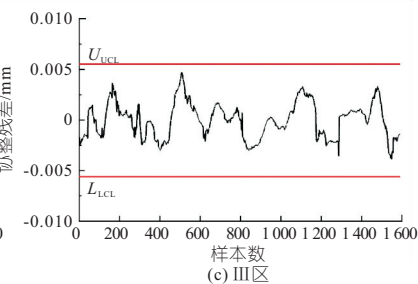
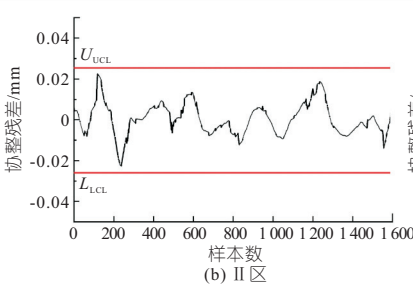
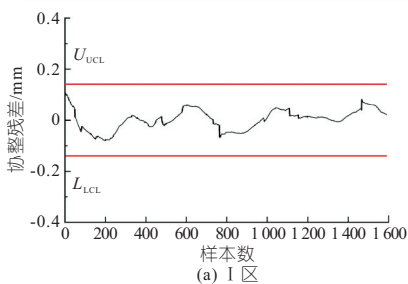


图 6 各区时效变形的协整性监控结果

Fig. 6 Co-integration monitoring results of aging deformation in each area

II、III 区测点亦采用本文方法进行协整检验,其中 II 区测点 PL5-3 未通过单位根检验,不满足一阶单整,故予以剔除。各区域协整建立的协整模型精度见表 2。

表 2 不同区域协整模型

Tab. 2 Co-integration models of different regions

区域	协整方程	相关系数
I 区	$-0.04 + \delta_{PL11-1} - 0.57\delta_{PL11-2} - 0.88\delta_{PL13-1} + 0.45\delta_{PL13-2} - 0.21\delta_{PL16-1} + 0.06\delta_{PL9-1} + 0.18\delta_{PL9-2} = 0$	0.998 4
II 区	$-0.006 + 0.16\delta_{PL13-5} + 0.73\delta_{PL16-4} - 1.83\delta_{PL16-5} - 0.96\delta_{PL19-1} + 1.3\delta_{PL19-2} - 0.71\delta_{PL19-3} + 0.86\delta_{PL19-4} + 1.34\delta_{PL19-5} + 0.19\delta_{PL5-2} - 0.26\delta_{PL5-3} + \delta_{PL11-5} = 0$	0.999 0
III 区	$-0.0017 - 1.03\delta_{PL11-4} - 0.17\delta_{PL13-3} + 0.01\delta_{PL13-4} - 0.04\delta_{PL16-2} + 0.12\delta_{PL16-3} - 0.03\delta_{PL5-1} - 0.58\delta_{PL9-3} + 0.50\delta_{PL9-4} + 0.79\delta_{PL9-5} + \delta_{PL11-3} = 0$	0.999 6

#### 4.4.2 协整监控

利用建立的协整方程可得到协整残差序列,结合 X-Bar 控制图监控研究时段内各区测点时效变形协整关系,结果见图 6。由图 6 可知,协整残差序列是均值为 0 的平稳白噪声序列,说明各区域测点时效变形协整关系存在。从协整残差的量级来看,III 区协整残差最小, I 区最大,说明 III 区测点时效变形的协整残差最平稳, II 区次之;而 I 区测点时效变形协整残差虽在数值上相对较大,但均在指标范围内。由此可知,该特高拱坝目前时效发展稳定,协整关系良好。

为比较不同协整方法对时变异常趋势的识别结果,选择 I 区拱冠坝顶部位 PL13-1 测点、II 区右岸 PL19-5 测点、III 区 PL11-3 测点建立协整模型,三个测点的时效变形分离结果见图 7。由图 7 可知,三个测点时效变形的发展规律存在较大差异性。协整模型的建模相关系数仅为 0.84,模型精度较低。协整残差的 X-Bar 控制图见图 8。由图 8 可知,跨区域建立的线性模型难以消除非线性的影响,残差序列具有一定的趋势性,且局部出现较大波动,接近预警指标的上限,以此建立的协整监控模型不正确,容易出现误报,这也进一步说明本文提出的聚类与协整相结合方法的必要性。

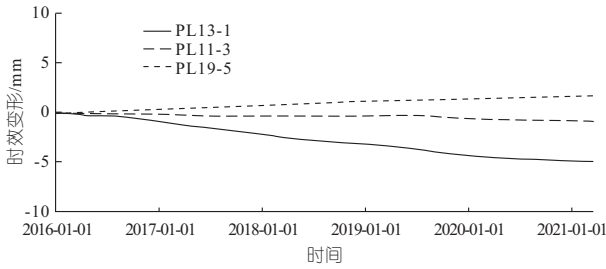


图 7 PL13-1、PL19-5、PL11-3 测点时效变形序列

Fig. 7 Aging deformation sequences of PL13-1, PL19-5 and PL11-3 measuring points

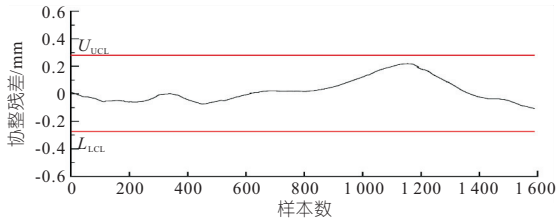


图 8 跨区域协整模型监控结果

Fig. 8 Monitoring results of the cross-regional co-integration model

## 5 结论

a. 利用小波分解得到时效变形, 提出描述各测点时效变形间相似程度的相对增速距离指标,

# Co-integration Monitoring Model for Aging Deformation of Multi-measuring Points of Extra-high Arch Dam and Its Application

LIU Wei-qi<sup>1a,1b</sup>, CHEN Bo<sup>1a,1b</sup>, LIU Ting-he<sup>2</sup>

(1a. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering; 1b. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. China Water Northeastern Investigation, Design & Research Co., Ltd., Changchun 130021, China)

**Abstract:** The measured deformation data contain rich temporal and spatial information and evolution laws of dam deformation. To study the co-integration relationship of the aging deformation of extra-high arch dams, wavelet decomposition was firstly used to obtain the aging component of the dam displacement. Considering the weak spatial integrity of extra-high arch dams, the FCM clustering algorithm was utilized to realize the regionalization of aging deformation. With the help of the idea of regional linearization, the spatial nonlinear co-integration relationship of the whole dam aging deformation was transformed into several approximate linear co-integration relationships within different regions. The zonal co-integration model was established to describe the development law of time-varying co-integration in different regions of the dam. The co-integration development monitoring and early warning of multi-measuring points aging deformation were realized by co-integration residual.

**Key words:** extra-high arch dam; aging deformation; co-integration theory; monitoring model

(上接第 191 页)

# Detection of Abnormal Sound of Hydroelectric Unit Based on Combination of Deep Convolutional Neural Network and Gaussian Mixture Model

ZHANG Yong<sup>1</sup>, YUAN Wen-zhi<sup>1</sup>, DUAN Gui-jin<sup>1</sup>, WANG Bo-yu<sup>1</sup>, LIU Hao-rui<sup>2</sup>

(1. Yalong River Hydropower Development Company, LTD., Chengdu 610051, China; 2. Tsinghua AI Plus, Beijing 100084, China)

**Abstract:** In order to realize the safe monitoring of the operation status of hydroelectric units and solve the problem of automated watch keeping, based on speech recognition technology, the normal status model of measurement points based on the operation monitoring information of generating units was established to implement abnormality detection. Firstly, the experimental data of the bearings of Western Reserve University were used to verify the correctness of the selected modeling method of deep convolutional neural network (CNN) and Gaussian mixture model (GMM). Secondly, a total of forty-two measurement points were arranged for the turbine set, and ten sensitive measurement points were selected for position classification based on the rise rate of RMS before and after overspeed. Then some data were selected as training data to get CNN model and unit sound features. The GMM model was obtained by further training. Finally, the scoring results of the test data were used to determine the machine operation status, i. e., the degree of deviation from the normal status was determined to achieve abnormal status detection. The experimental scheme was confirmed by manual annotation, thus verifying the feasibility of the method, which realizes the design of sound-based abnormality detection algorithm for hydropower units.

**Key words:** hydroelectric unit; deep convolutional neural network; Gaussian mixture model; abnormal detection; spectrogram

并基于 FCM 聚类算法实现了时效变形的区域化分析, 并将时效变形空间非线性协整关系转化为区域线性协整关系。

b. 在聚类分区的基础上, 建立了多测点时效变形的协整监控模型, 以协整残差作为时效变形协整关系的监控指标。并以某特高拱坝为例, 检验各区域内测点时效变形的协整关系, 验证了同区域内时效变形协整关系成立的可能性; 建立了各区域测点时效变形的协整方程, 发现协整残差尚未出现异常, 各区域时效变形稳定均衡发展。

## 参考文献:

- [1] 胡波, 刘观标, 吴中如. 基于原型监测的小湾特高拱坝首蓄期坝基变形特性分析[J]. 水电自动化与大坝监测, 2012, 36(5): 14-20.
- [2] 王少伟, 包腾飞. 特高混凝土坝变形时变效应特征分析[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2018, 30(6): 79-86.
- [3] 顾冲时, 苏怀智, 王少伟. 高混凝土坝长期变形特性计算模型及监控方法研究进展[J]. 水力发电学报, 2016, 35(5): 1-14.
- [4] 郑泓, 段忠东. 考虑非线性环境因素影响的结构损伤预警方法研究[J]. 振动工程学报, 2021, 34(6): 1101-1111.