

文章编号: 0559-9350(2023)04-0486-11

基于非线性动力学的泵站建筑物变形性态诊断方法研究

娄本星^{1,2}, 马福恒¹, 罗翔^{1,2}

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 变形性态分析是诊断泵站建筑物健康状态的重要科学手段, 传统水工结构安全诊断方法以单测点变形分析为主, 而泵站建筑物更关注相邻测点间的协同变形性态。鉴于泵站变形时间序列表现出极强的非线性, 本文将泵站相邻测点视作两个非线性动力系统, 基于混沌理论证明了泵站变形时间序列普遍具有混沌特性; 在此基础上, 引入动力学自相关因子指数与互相关因子指数, 提出了基于非线性动力学的泵站变形性态诊断方法; 最后分别结合 Logistic 理想时间序列和南水北调工程某泵站枢纽, 验证了该方法的有效性。实例分析表明: 所提出的方法能够有效表征非线性系统的动力学结构及动力学距离, 可以从相邻测点的内在驱动因素、不均匀变形态势等方面综合诊断泵站的变形性态, 为泵站建筑物安全诊断提供了一种新方法。

关键词: 泵站建筑物; 变形; 安全诊断; 混沌特性; 非线性动力学

中图分类号: TV675

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20220751

1 研究背景

南水北调东、中线一期设计单元工程目前已全部通过竣工验收, 进入正式运行阶段。其中, 泵站枢纽是南水北调东线一期工程的主要组成部分, 在供水、防洪、排涝、灌溉等方面具有重要作用。泵站枢纽服役过程中会受到外部荷载、突发事件等多重风险威胁, 在运行期对泵站建筑物进行监测是保障工程安全运行的有效手段。变形作为最能直观体现泵站建筑物工作性态的监测项目, 合理地变形性态分析和安全诊断对工程长效服役具有重要的指导意义。

在水工建筑物安全监控领域, 结构变形监测一直是水利工程中重要的研究课题^[1-3]。现阶段关于大坝变形性态诊断方法的研究较多^[4-5], 而泵站建筑物混凝土坝的变形特性存在较大区别: 在混凝土坝变形监测中, 由于坝体受到的水压力较大, 水平位移比垂直位移更能体现混凝土坝的服役性态; 但在泵站建筑物变形监测中, 由于泵站多修建于软土地基, 相邻测点间的不均匀沉降更能体现泵站建筑物的工作运行状态。实际上, 影响泵站建筑物变形的因素十分复杂, 导致其监测序列表现出极强的非线性特征, 难以用确定性分析方法进行准确的分析和模拟。随着非线性科学的发展, 非线性动力学方法在理解复杂系统特性、揭示系统演化规律中具有显著优势^[6], 尤其是混沌时间序列分析方法被广泛应用于气候^[7]、水文^[8]、互联网^[9]等领域。近年来, 已有学者证明, 大坝变形^[10]、渗流^[11]、裂缝开度^[12-13]、水库高边坡^[14]等监测信息均具有混沌特性, 并基于动力学结构突变理论提出了相应的安全诊断方法。若泵站建筑物变形信息中也存在有混沌特性, 则可以将泵站相邻测点看作两个不同的动力系统, 进而根据非线性动力学理论深入挖掘泵站变形演变特性, 提出泵站变形异常诊断与识别方法。

鉴于当前关于泵站建筑物安全诊断的理论和方法研究较少, 而准确地辨识泵站变形性态对工程安

收稿日期: 2022-09-18; 网络首发日期: 2023-03-02

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20230301.1152.001.html>

基金项目: 江苏省水利科技项目(2021006); 国家自然科学基金联合基金重点项目(U2243223); 国家重点研发计划项目(2019YFC1510802)

作者简介: 娄本星(1996-), 博士生, 主要从事水工建筑物安全监控与预警等研究。E-mail: bxlou@hhu.edu.cn

通讯作者: 马福恒(1969-), 博士, 正高级工程师, 主要从事水工程健康诊断、监控预警与风险管理等研究。E-mail: fhma@nhri.cn

全运行具有重要的意义。为此, 本文以泵站垂直位移变形为研究对象, 首先基于混沌理论分析了泵站变形时间序列的混沌特性; 然后引入非线性动力学中自相关因子指数与互相关因子指数, 构建了泵站建筑物变形性态安全诊断方法; 最后分别结合 Logistic 理想时间序列和南水北调东线工程某泵站枢纽, 验证了所提出方法的有效性。

2 泵站变形性态诊断方法

2.1 泵站变形监测序列混沌特性识别 泵站变形监测数据为一维时间序列, 而混沌特性识别方法是建立在高维空间的基础上, 因此需要利用相空间重构技术将泵站变形时间序列映射到高维相空间中。相空间重构技术中需要确定两个关键参数: 延迟时间 τ 和嵌入维数 m 。延迟时间 τ 的计算方法有自相关法、复自相关法、互信息法等, 本文选择互信息法, 该方法以信息熵为基础, 当互信息熵第一次达到极小值所对应的延迟时间即为最佳延迟时间 τ 。嵌入维数 m 的计算方法有几何不变量法、虚假邻近点法、改进虚假邻近点法(CAO 法)等, 本文采用 CAO 法, 该方法通过不断增大嵌入维数 m , 逐渐打开混沌吸引子的轨道, 当 m 大于某一临界值 m_0 时, 吸引子轨道结构将停止变化, 相应 m_0+1 即为最小嵌入维数^[10]。

在相空间重构的基础上, 可通过计算关联维数来判断非线性系统的混沌特性。若泵站变形序列的关联维数为分数, 则认为泵站变形具有混沌特性^[15]。关联维数^[16]计算方法如下:

假设泵站变形监测序列为 $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$, 定义相空间重构后的吸引子变量为 $\mathbf{X}_i = \{x_i, \dots, x_{i+(m-1)\tau}\}$, 其中, $1 \leq i \leq N-(m-1)\tau$ 。给定临界距离 $r(r>0)$, 各吸引子变量之间距离小于 r 的比例称为自关联和, 表示为:

$$C_{XX}^m(r)' = \frac{2}{M(M-1)} \sum_{i=1}^M \sum_{j=i+1}^M H(r - \|\mathbf{X}_i - \mathbf{X}_j\|) \quad (1)$$

式中: $C_{XX}^m(r)'$ 为自关联和, 表示相空间重构后在向量 \mathbf{X}_i 的邻域 r 内找到向量 \mathbf{X}_j 的概率; $M = N - (m-1)\tau$, 表示相空间重构后的总相点数; $H(x)$ 为 Heaviside 阶跃函数; $\|\cdot\|$ 为欧氏范数。

在一定范围内, 通过选择不同的 m 作出 $\ln r - \ln C_{XX}^m(r)$ 曲线, 随着嵌入维数的增加, 曲线中无标度区的斜率将收敛于一饱和值 D_2 , 那么其关联维数就等于 D_2 。其中, 关联维数越大, 说明描述泵站变形特征所需的独立变量数越多, 测点系统内部结构也越复杂; 反之, 关联维数越小, 则说明测点系统内部结构越简单。

2.2 Q 指数和 R 指数 泵站建筑物运行过程中会受到荷载、环境、人为等因素的影响, 当遭受外部因素的干扰过大时, 会导致泵站建筑物运行性态发生改变。在非线形动力学中, 这些变化特征表现为混沌时间序列的吸引子由原始吸引子过渡为新的吸引子, 即混沌吸引子的内在演化方程发生了变化。为了能够准确地描述和分辨泵站变形序列的动力学特征, 本文引入动力学中自相关因子指数和互相关因子指数^[17]以鉴别泵站变形序列的动力学属性变化。

根据式(1)可知, 自关联和表示同一吸引子集中在向量 \mathbf{X}_i 的邻域 r 内找到向量 \mathbf{X}_j 的概率。为了对不同吸引子集 X 和 Y 进行比较, 定义 X 和 Y 的交互关联和为:

$$C_{XY}^m(r)' = \frac{1}{M(M-1)} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M H(r - \|\mathbf{X}_i - \mathbf{Y}_j\|) \quad (2)$$

式中 $C_{XY}^m(r)'$ 为交互关联和, 表示在向量 \mathbf{X}_i 的邻域 r 内找到向量 \mathbf{Y}_j 的概率。

在描述混沌信息时, $C_{XX}^m(r)'$ 与 $C_{XY}^m(r)'$ 在一定程度上具有区分潜在动力学特性的能力, 但并不是衡量混沌时间序列异同性的最有效指标。相比之下, 动力学自相关因子指数 Q' 和互相关因子指数 R' 能够更好地反映出混沌时间序列之间的内在动力学结构差异, 其定义如式(3)和式(4)所示^[17]。

$$Q' = \lim_{r \rightarrow 0} \left| \ln \frac{C_{XX}^m(r)'}{C_{YY}^m(r)'} \right| \quad (3)$$

$$R' = \lim_{r \rightarrow 0} \left| \ln \frac{C_{XY}^m(r)'}{\sqrt{C_{XX}^m(r)'} \sqrt{C_{YY}^m(r)'}} \right| \quad (4)$$

由式(1)和式(2)可知,在 $C_{XX}^m(r)'$ 和 $C_{XY}^m(r)'$ 的计算中均采用了 Heaviside 阶跃函数,由于 Heaviside 阶跃函数在 $x=0$ 处为刚性边界,当相点处于边界附近时, r 值轻微的变化会导致 Q' 和 R' 发生明显变化,甚至造成动力系统间的相似性信息丢失。为了解决上述问题,本文在计算 $C_{XX}^m(r)'$ 与 $C_{XY}^m(r)'$ 时采用 Sigmoid 函数替代 Heaviside 阶跃函数,能够将 $x=0$ 处的刚性边界转变为模糊区间边界,使 $C_{XX}^m(r)'$ 和 $C_{XY}^m(r)'$ 的计算值更加稳定。则改进后自关联和 $C_{XX}^m(r)$ 、交互关联和 $C_{XY}^m(r)$ 的表达式定义为:

$$C_{XX}^m(r) = \frac{2}{M(M-1)} \sum_{i=1}^M \sum_{j=i+1}^M S(r - \|X_i - X_j\|) \quad (5)$$

$$C_{XY}^m(r) = \frac{1}{M(M-1)} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M S(r - \|X_i - X_j\|) \quad (6)$$

式中 $S(x) = \frac{1}{1+e^{-kx}}$ 。将 Heaviside 阶跃函数替换为 Sigmoid 函数后,可以通过参数 k 的取值调整模糊区间的宽度,本文取 $k = 10/r$ 。则改进后的动力学自相关因子指数(简称 Q 指数)和互相关因子指数(简称 R 指数)的表达式分别为:

$$Q = \lim_{r \rightarrow 0} \left| \ln \frac{C_{XX}^m(r)}{C_{YY}^m(r)} \right| \quad (7)$$

$$R = \lim_{r \rightarrow 0} \left| \ln \frac{C_{XY}^m(r)}{\sqrt{C_{XX}^m(r)} \sqrt{C_{YY}^m(r)}} \right| \quad (8)$$

根据以上定义, Q 指数表示两组序列间的关联维数差异,即测点间内在驱动因素的复杂性差异; R 指数表示将一维时间序列映射到高维相空间后,任意一个相点与邻域内所有相点的平均模糊异同性,能够准确地衡量两组序列在相点分布结构上的远近程度。结合泵站变形监测特点,本文首先利用 Q 指数从内在驱动因素的角度识别相邻测点的变形规律异常,再利用 R 指数鉴别相邻测点的相对位移态势,进而实现泵站变形性态的安全诊断。

2.3 泵站变形转异显著性水平 为了对泵站变形性态进行诊断,需要确定 Q 指数和 R 指数的分布密度函数以及转异显著性水平。最大熵原理^[18]求得的概率分布是在所有可能的概率分布中找出使信息熵最大的分布,所获得的解偏差最小且最客观。因此,本文采用最大熵原理求解 Q 指数和 R 指数的分布密度函数。最大熵原理求解概率分布是在已知样本数据信息的约束条件下,求解出使熵 $H(x)$ 最大的概率分布。其目标函数为:

$$\max H(x) = - \int f(x) \ln f(x) dx \quad (9)$$

式中 $f(x)$ 为变量 x 的分布函数。

约束条件为:

$$\int f(x) dx = 1; \int x^i f(x) dx = \mu_i \quad (10)$$

式中 μ_i 为第 i 阶原点矩 ($i=1, 2, \dots, N$), N 为总阶数。

采用拉格朗日乘子法求解出最大熵概率分布函数的解析形式为:

$$f(x) = \exp \left(\lambda_0 + \sum_{i=1}^N \lambda_i x^i \right) \quad (11)$$

式中 λ_i 为拉格朗日乘子 ($i=0, 1, \dots, N$)。

在给定显著性水平 α 下,可以得出预警指标 Q_α 和 R_α , 满足以下条件:

$$P[Q_\alpha] = \int_0^{Q_\alpha} f(Q) dQ = 1 - \alpha; P[R_\alpha] = \int_0^{R_\alpha} f(R) dR = 1 - \alpha \quad (12)$$

式中 Q 指数和 R 指数均大于 0, 因此其积分下限为 0。

2.4 泵站变形性态诊断模式 如图 1 所示, 泵站变形测点分布在各底板的边角处, 目的是测量相邻测点之间的协同工作状态和不均匀变形情况。在理想情况下, 相邻测点应处于协同变形状态, 但在实际

工程中，由于地质条件、荷载、施工等因素的影响，相邻测点间难免会出现不均匀变形，主要包括结构缝和混凝土底板的不均匀变形两大类。鉴于泵站服役过程中对于不同型式的不均匀变形容许度不同，在安全诊断中需要对预警指标进行区分。为此，根据泵站建筑物运行荷载、失效方式等特点，将不均匀变形模式分为三种(见图 2)：(a)错开式变形，主要发生在结构缝处，此类不均匀变形过大会导致分缝处止水受挤压变形甚至失效。(b)拧扭式变形，主要发生在泵房的上游侧或下游侧，此类不均匀变形过大易导致底板混凝土开裂。(c)倾倒式变形，主要原因是受水推力的影响，泵房的上游侧抬升、下游侧下沉，此类不均匀变形过大会导致站身失稳。相应的，将泵站相邻测点集分为三种：结构缝两侧的相邻测点集 A、泵房(站身与岸墙)底板上游侧或下游侧的相邻测点集 B、泵房底板上下游相邻测点集 C。

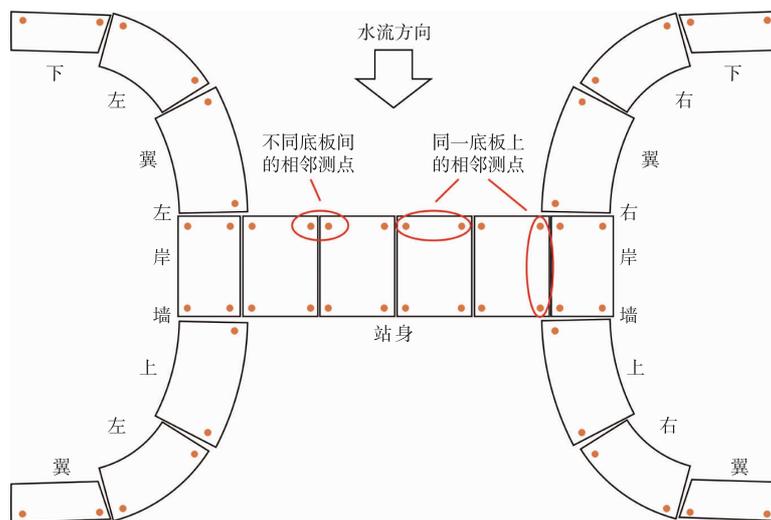


图 1 泵站变形测点位置分布

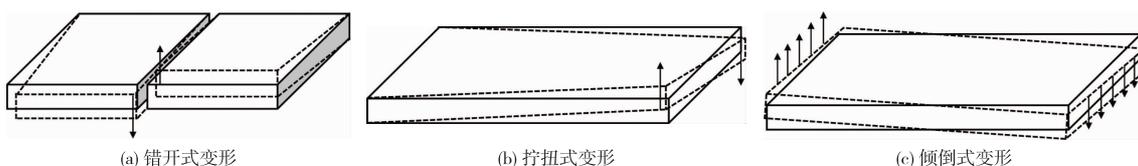


图 2 不均匀变形的三种模式

根据 2.1—2.3 节的内容，结合泵站变形特点，所构建的泵站变形性态诊断模式如图 3 所示，具体步骤如下：(1)输入泵站相邻测点(集 A、B 或 C)的变形监测序列。(2)通过计算延迟时间和嵌入维数进行相空间重构，并判断监测序列的混沌特性。(3)根据泵站历史监测数据分别拟定出集 A、B、C 的预警指标 Q_a 和 R_a 。(4)计算相邻测点的 Q 指数，比较计算值 Q 与 Q_a 的大小。若 $Q \leq Q_a$ ，表示两组测点的动力学结构相似，监测序列变化规律相近，进而转至步骤(5)；若 $Q > Q_a$ ，表示两组测点的动力学结构差异较大，影响测点变形的驱动因素出现了较大差异，此时判定测点变形异常。(5)在 $Q \leq Q_a$ 的前提下，计算相邻测点的 R 指数，比较计算值 R 与 R_a 的大小。若 $R \leq R_a$ ，表示两组测点的不均匀变形较小，进而转至步骤(6)；若 $R > R_a$ ，表示两组测点的不均匀变形较大，易导致止水失效、站身失稳、混凝土开裂等问题，测点处于异常状态。(6)在 $R \leq R_a$ 的前提下，通过计算不同长度 n 下 R 指数子序列的重标极差 $(r/s)_n$ ，然后拟合得出 R 序列的 Hurst 指数 H 以评判不均匀变形的收敛状态^[19-20]。若 R 指数已经收敛，说明不均匀变形发展稳定，测点处于安全状态；若 R 指数还未收敛，说明不均匀变形还在持续发展，需要加强观测。

综上，本文所建立的泵站变形异常诊断模式主要从动力学结构层次(内在驱动因素)、动力学距离(不均匀变形态势)两个方面对泵站变形性态进行评判。

2.5 Q 指数和 R 指数的有效性验证 为了检验 Q 指数和 R 指数的有效性，本文将该方法应用于

Logistic 理想时间序列。Logistic 时间序列是一种简单的一维动力系统，其表达式如下：

$$x_{n+1} = ux_n(1-x_n) \quad (13)$$

式中： x_n 为第 n 次迭代后的映射值； u 为常数，该系统的动力学状态随着参数 u 的改变而改变。

首先利用计算机模拟生成两组 Logistic 时间序列 X_1 和 X_2 。序列 X_1 取初值 $x_0 = 0.6$ ，参数 $u = 3.5$ ，进行 500 次迭代，去掉前面 100 个暂态点，得到由 400 个数据组成的时间序列，如图 4(a) 所示。序列 X_2 取初值 $x_0 = 0.6$ ，参数 u 分别取 3.5、3.6、3.74，在每种 u 值下分别计算 300、200、200 次迭代，去掉前面 100 个暂态点，得到由 400 个数据组成的时间序列，如图 4(b) 所示。其中，为了模拟时间序列的数值突变，在 101—200 处人为设置了一个突变量，但系统结构不变。可以看出，该序列动力学状态突变点分别发生在 101、201、301 处。取滑动窗口长度为 30，嵌入维数 $m = 3$ ，延迟时间 $\tau = 1$ ， r 值取序列 X_2 的标准方差，以计算两组序列间的 Q 指数和 R 指数。

图 5 为 X_1 和 X_2 间的 Q 指数和 R 指数曲线。可以看出，当两系统间的动力结构发突变时，对应的 Q 指数在局部表现为极大值，分别在 101、201、303 处达到极大值，与理论值极为接近，可见利用 Q 指数检测系统间动力学结构突变的精度较高。此外，在 15—85 处， X_1 和 X_2 完全相同，对应的 Q 指数和 R 指数均为 0；在 115—185

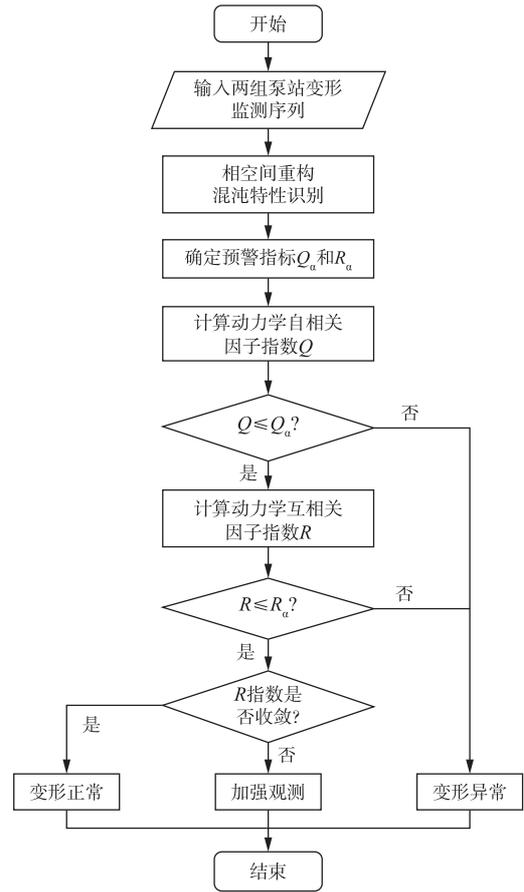


图 3 泵站变形状态安全诊断模式

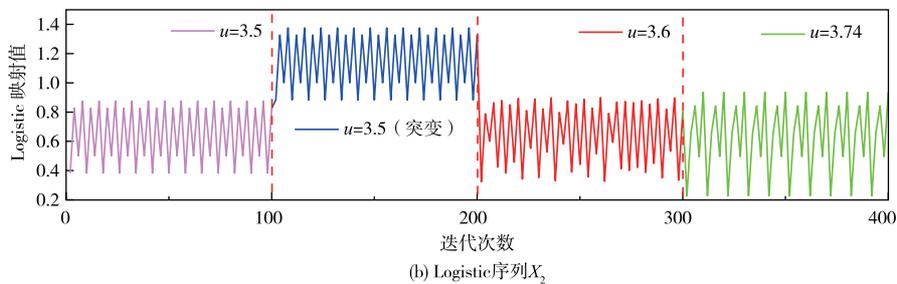
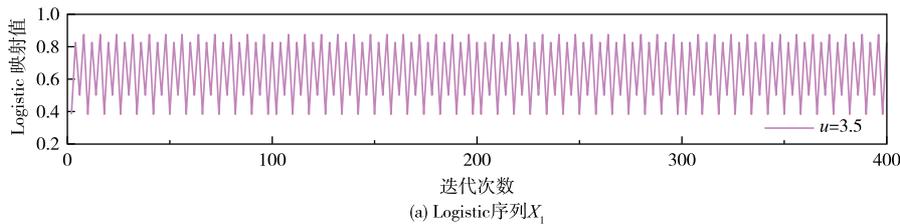


图 4 Logistic 映射数据序列 X_1 和 X_2

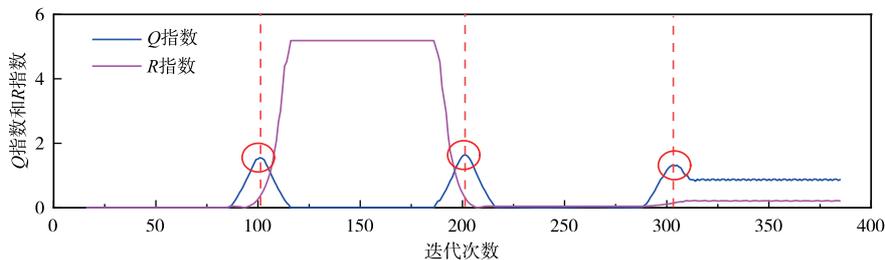


图 5 序列 X_1 和 X_2 间的 Q 指数和 R 指数曲线

处, X_1 和 X_2 动力学结构一样, 但 X_2 发生了数值突变, 此时 $Q=0, R>0$ 。当 u 值从 3.5 增加至 3.74 时, Logistic 时间序列将从四周期逐渐变为五周期状态, 动力学结构也逐渐发生改变; 在 215—285 处, X_1 和 X_2 的动力学结构差异还不显著, 对应的 Q 指数和 R 指数均大于 0, 但处于很低的水平; 在 315—385 处, 四周期序列 X_1 与五周期序列 X_2 的动力学结构明显不同, 此时的 Q 指数和 R 指数较 215—285 处也较大。可以看出利用 Q 指数和 R 指数可以有效地反映出系统间动力学结构差异和动力学距离。

3 工程案例

3.1 工程概况 本文以南水北调东线工程某泵站枢纽为例, 该泵站枢纽由泵站、挡洪闸、进水闸、引河等工程设施组成, 主要功能为联合调水及区域排涝。泵站设计流量 $150 \text{ m}^3/\text{s}$, 调水期设计扬程 6.0 m, 排涝期设计扬程 6.6 m, 安装立式全调节混流泵 5 台, 单机设计流量 $37.5 \text{ m}^3/\text{s}$, 配套电机功率 3550 kW, 总装机容量 17 750 kW。其中, 泵站共设有 44 个垂直位移变形测点, 分别位于站身、岸墙、上下游翼墙、南侧挡墙等位置, 如图 6 所示。监测时间为 2014 年 1 月—2021 年 12 月, 监测频率为每季度一次, 监测数据共 32 组。

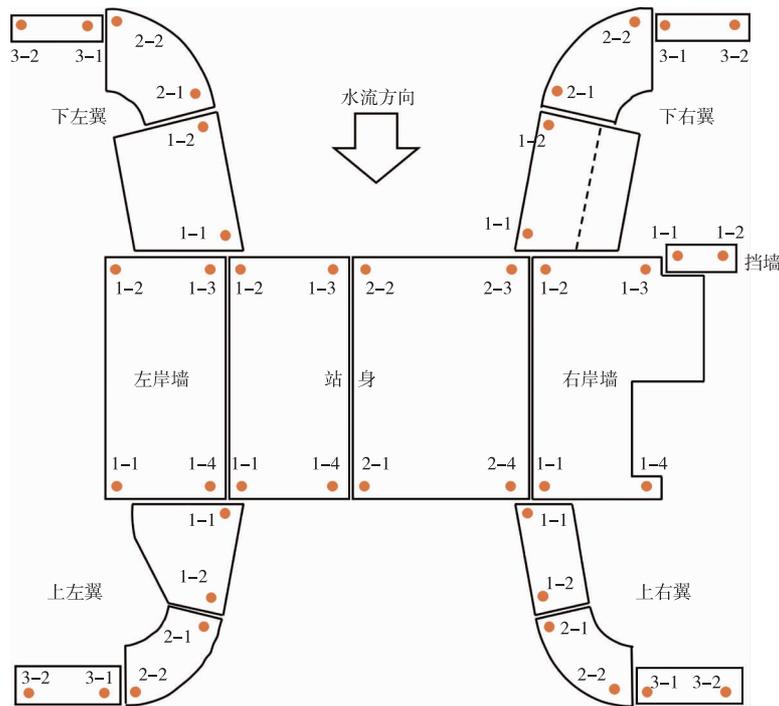


图 6 泵站垂直位移测点布置示意

3.2 泵站变形监测序列混沌特性识别 选取泵站左岸墙 1-1 测点作为典型测点对其监测序列进行混沌特性识别, 该测点历年监测序列如图 7(a) 所示(下沉为正, 上浮为负)。首先利用互信息法求延迟时间, 如图 7(b) 所示, 当互信息熵第一次达到极小值时, 所对应的横坐标即为最佳延迟时间 $\tau=1$; 然后利用 CAO 法计算嵌入维数, 如图 7(c) 所示, 定义嵌入维数 $m+1$ 和 m 时的邻近点平均距离之比为 $E(m)$, 当参数 $E(m)$ 的值基本不再变化时, 所对应的横坐标为 $m_0=4$, 则嵌入维数为 $m=m_0+1=5$ 。

取延迟时间 $\tau=1$, 嵌入维数 m 分别取 1, 2, ..., 8, 计算并绘制该监测序列的 $\ln r - \ln C_{XX}^m(r)$ 曲线(见图 7(d))。可以看出, 当嵌入维数 $m \geq 5$ 时, 无标度区的斜率基本不再发生变化, 此时认为斜率已经趋于饱和, 得出该测点监测序列的关联维数为 4.70。由关联维数可以判定, 该测点变形序列存在奇异吸引子, 具有混沌特性。

类似的, 通过对该泵站其它测点进行分析, 结果表明泵站变形测点普遍具有混沌特性, 其关联维数在 2.89~4.95 范围内。除挡墙 1-1 测点和 1-2 测点的关联维数分别为 2.90 和 2.89, 其余测点的关联

维数均大于3。挡墙测点关联维数较小的原因是，相较于其它位置的测点，挡墙距离引水渠道较远，影响其变形的因素比较单一。此外，由图8也可以看出挡墙1-1测点和1-2测点监测序列的非线性复杂程度明显弱于左岸墙1-1测点，说明关联维数越小，泵站变形序列的复杂程度越低。

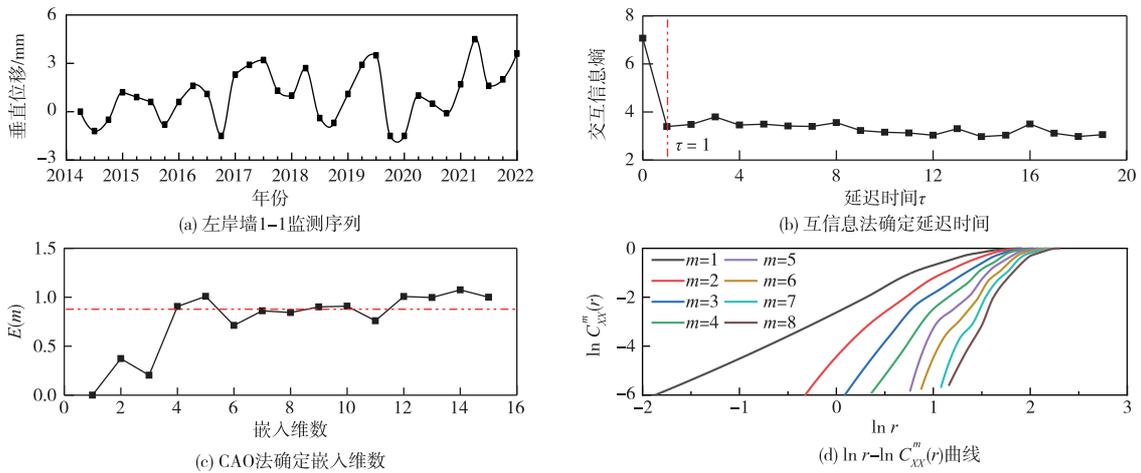


图7 泵站变形监测序列混沌特性识别

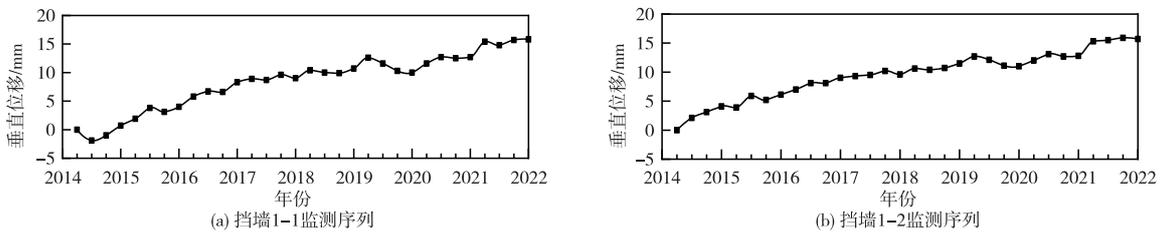


图8 挡墙测点变形监测序列

3.3 预警指标拟定 根据2.4节中划分的变形模式，分别对三种测点集的历史监测数据进行了计算，相应的 Q 指数、 R 指数平均值与标准差如表1所示。可以看出， Q 指数、 R 指数的大小与泵站变形特点密切相关。其中，集A的 R 均值最大，这是因为结构缝吸收了由于温度、荷载等产生的不均匀变形，导致相对位移较大；集C的 R 均值也比较大，其原因是泵房底板上下游跨度较大，在水推力的作用下，轻微倾斜导致的不均匀变形会被泵房底板大幅度放大；集B的 Q 均值与 R 均值最小，主要是因为泵房底板同侧测点受到混凝土协同变形的约束作用较大。

三种测点集的 Q 指数和 R 指数的分布形式如图9所示。可见，由于测点的荷载、位置等因素不同，三种变形模式下 Q 指数和 R 指数的分布形式、数值范围等差异明显。求出 Q 指数和 R 指数的分布函数后，还需要确定泵站变形转异显著性水平 α 。显著性水平即小概率事件发生的可能性，在统计学中小概率事件可认为是不可能发生的事件，如果该事件发生，则认为是异常的。在水工建筑物监控指标拟定中显著性水平一般取0.01~0.05^[21]，为了保守起见，本文选取泵站变形转异显著性水平 $\alpha=0.05$ ，进而拟定得出该泵站的预警指标 Q_α 和 R_α (见图9)。当 Q 指数或 R 指数大于预警指标时，则认为泵站变形转异。

表1 Q 指数与 R 指数的平均值与标准差

类型	集A		集B		集C	
	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差
Q 指数	0.184	0.207	0.175	0.140	0.368	0.205
R 指数	0.623	1.680	0.185	0.151	0.617	0.584

3.4 有效性分析 在确定 Q 指数和 R 指数的预警指标后，可以根据2.4节中构建的方法对测点变形进行健康诊断。以下选取几种典型测点来验证该方法的有效性：如图10所示，从监测数据上来看，站

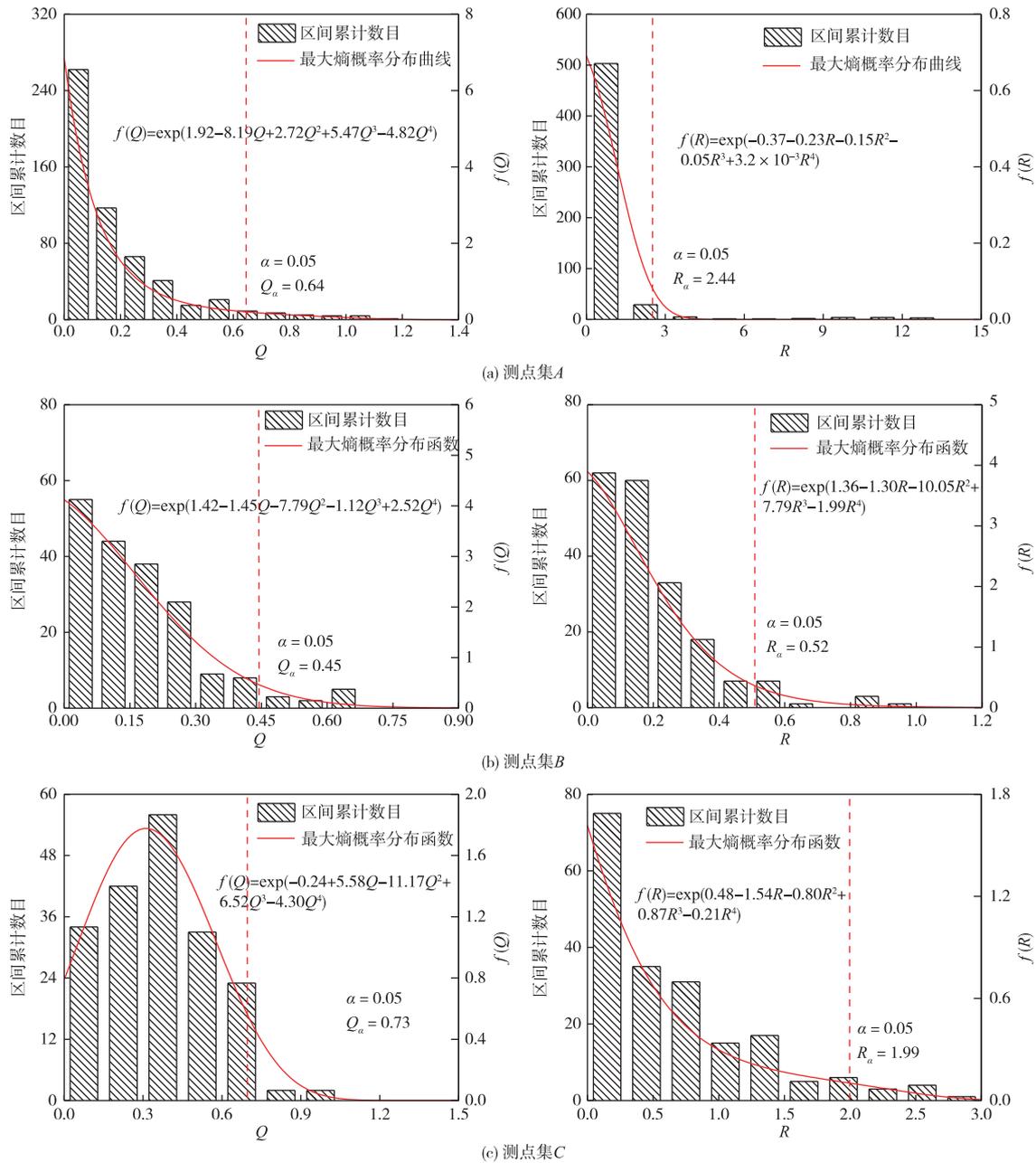


图9 Q指数和R指数直方图及分布函数

身2-1与站身2-4测点间协同变形性能较好，相应的Q指数和R指数也一直处于较低的水平，从动力学角度可以判定该测点处于正常状态。如图11所示，通过Q指数可以检测出站身1-2与下左翼1-1测点间的变形在2018年时处于异常状态；类似的，对站身1-2、下左翼1-1及左岸墙1-3测点两两进行分析，结果表明，左岸墙1-3与下左翼1-1测点间的Q指数在2018年时也存在异常现象，而站身1-2与左岸墙1-3测点间的Q指数和R指数一直处于正常范围内，说明站身1-2与左岸墙1-3测点处于协同工作状态，很可能是下左翼1-1测点变形出现异常。结合工程资料，发现在2018年期间，由于泵站引河护坡塌陷修复、监测设施改造等项目施工，在翼墙平台放置了大量的建筑材料，致使翼墙承受荷载增大，出现向下沉降的现象；在施工结束后，下左翼1-1测点变形逐渐恢复正常，与站身1-2、左岸墙1-3测点变形规律保持一致。可以看出，当测点的变形驱动因素发生突变时，Q指数能够从动力学角度上有效识别出测点间的发展规律异常。此外，由图11(c)可见，虽然站身1-2与下左翼1-1测点间的R指数一直处于较低的水平，但在2019年后R指数序列略有上升，说明外部驱动因素发生突变可能是不均匀变形增大的初始特征。

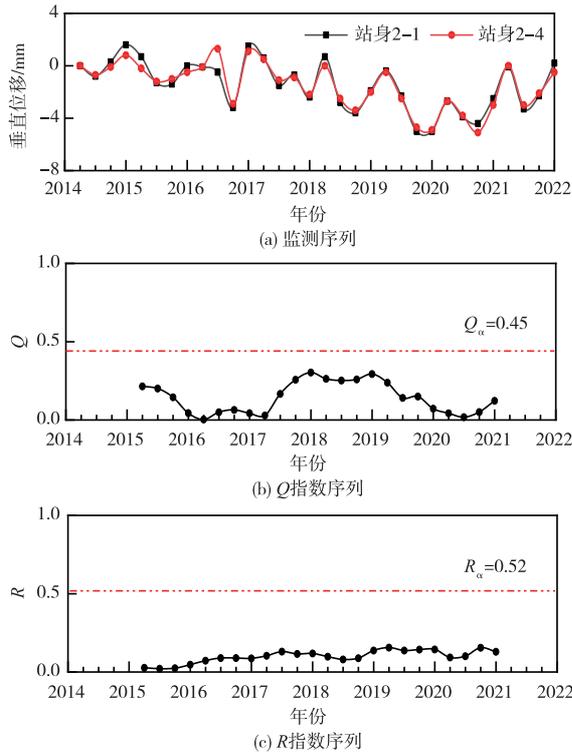


图 10 站身 2-1 与站身 2-4 测点(集 B)

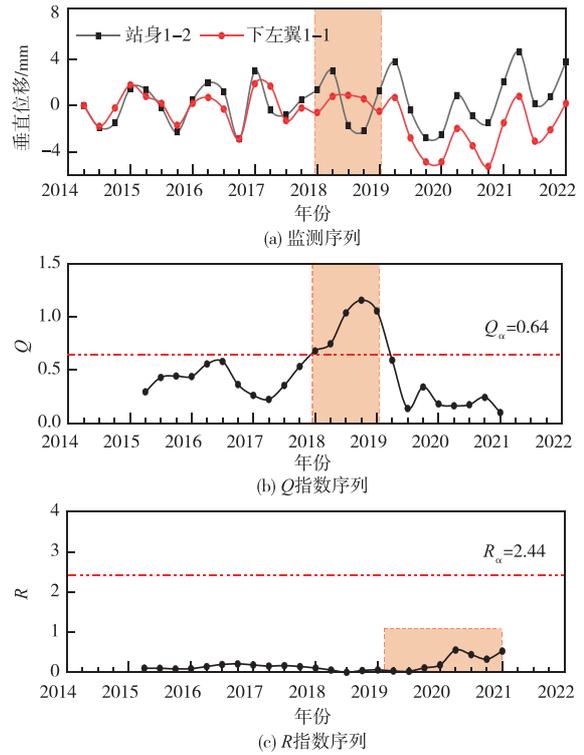


图 11 站身 1-2 与下左翼 1-1 测点(集 A)

对于相邻测点，即使在测点变形规律和驱动因素相似的情况下，其不均匀变形也可能会越来越大。如图 12 和图 13 所示，以站身 2-4 与上右翼 1-1 测点、右岸墙 1-1 与右岸墙 1-2 测点为例，虽然两组测点的 Q 指数一直处于较低的水平，但 R 指数却处于一直上升的状态，说明不均匀变形可能在进一步发展；即使 R 指数小于预警指标 R_α ，仍需要判断两组测点 R 序列的发展趋势，检验其不均匀变形是否收敛。

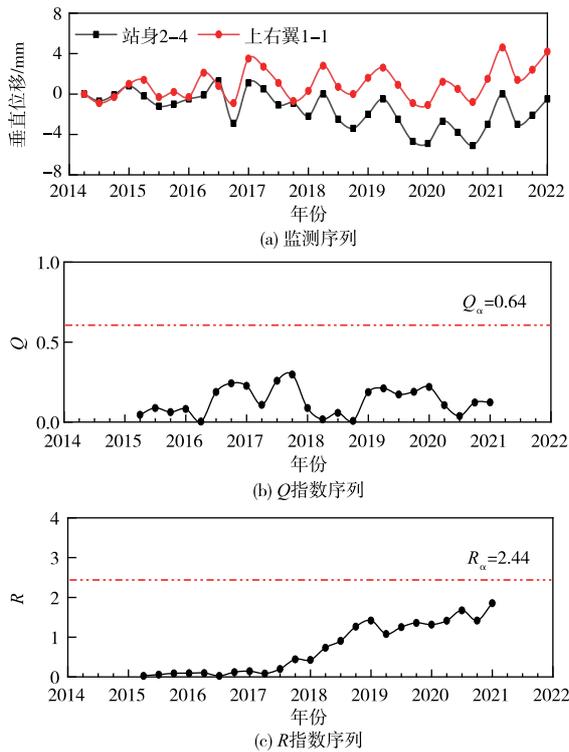


图 12 站身 2-4 与上右翼 1-1 测点(集 A)

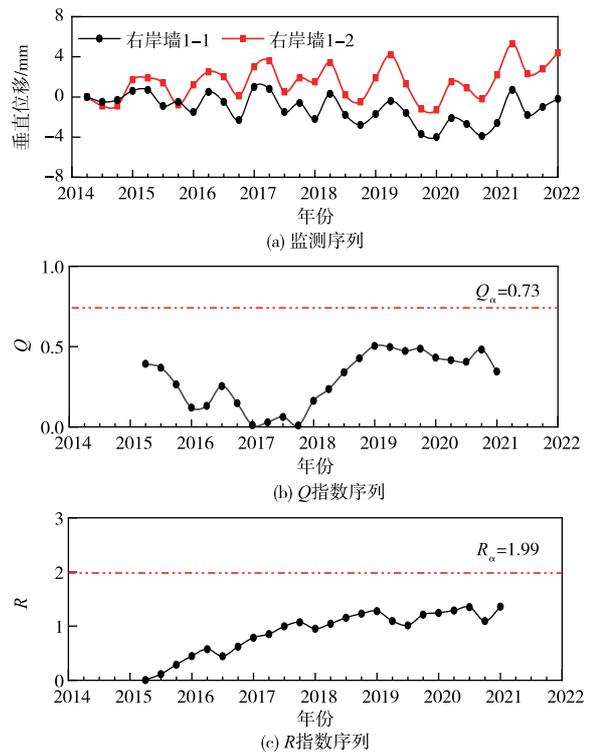


图 13 右岸墙 1-1 与右岸墙 1-2 测点(集 C)

因此,根据重标极差分析方法分别计算了两组测点 R 序列与 R 速率序列的 H 指数,计算结果如表 2 所示。当 $0 < H < 0.5$,表示序列具有反向持续性;当 $0.5 < H < 1$,表示序列具有正向持续性;当 $H = 0.5$,表示无法判断序列发展趋势。可以看出,两组测点 R 序列的 H 指数均大于 0.5,表明 R 序列具有正向持续性,即不均匀变形将继续增加。此外,站身 2-4 与上右翼 1-1 测点的 R 速率序列 H 指数略大于 0.5,说明不均匀变形速率呈增加趋势,但趋势程度较低,根据 R 速率序列发展趋势可以判断出该测点不均匀变形还未收敛,需加强对该测点的观测或采取相关措施抑制变形发展;右岸墙 1-1 与右岸墙 1-2 测点的 R 速率序列 H 指数为 0.63,说明不均匀变形速率将保持持续下降的趋势,可以判断该测点不均匀变形表现出收敛的趋势,测点处于安全状态。

表 2 不均匀变形发展趋势评判

测点	类型	拟合公式	H	H 置信区间	历史趋势	未来趋势
站身 2-4 与上右翼 1-1	R 指数序列	$y=0.97x-0.98$	0.97	[0.95, 0.99]	上升	上升
	R 速率序列	$y=0.55x-0.13$	0.55	[0.47, 0.63]	上升	上升
右岸墙 1-1 与右岸墙 1-2	R 指数序列	$y=0.95x-0.32$	0.95	[0.93, 0.97]	上升	上升
	R 速率序列	$y=0.63x-0.18$	0.63	[0.53, 0.73]	下降	下降

注:拟合公式中 x 和 y 分别为子序列长度 n 和相应重标极差 $(r/s)_n$ 的对数,即 $x = \{\ln n\}$, $y = \{\ln(r/s)_n\}$ 。

综合以上分析,本文提出的泵站变形性状诊断方法能够从相邻测点的内在驱动因素、不均匀变形态势等方面对泵站变形性状进行综合诊断,可为泵站安全监控与预警方法提供理论依据。

4 结论

本文首先辨识了泵站建筑物变形监测序列的混沌特性,然后基于非线性动力学理论建立了泵站建筑物变形性状诊断方法,最后结合某泵站枢纽变形实测数据,验证了该方法的有效性。可得出如下结论:(1)基于混沌理论分析了泵站变形监测序列的混沌特性,证明了泵站变形监测序列普遍具有混沌特性,是一种高度复杂的非线性动力系统,为进一步利用非线性动力学理论分析泵站变形性状奠定了基础。(2)提出了基于 Q 指数与 R 指数的泵站变形性状诊断方法,将其应用于 Logistic 理想时间序列,表明该方法具有鉴别动力学系统突变的能力,可以有效地反映非线性系统间的动力学结构差异和动力学距离。(3)工程实例分析表明,本文所构建的方法能够从动力学角度上辨识相邻测点的驱动因素异常和不均匀变形态势异常,从而实现泵站建筑物变形监测信息的动态诊断,可及时快速地对工程服役性状进行评价。

参 考 文 献:

- [1] 赵二峰,顾冲时. 混凝土坝长效服役性状健康诊断研究述评[J]. 水力发电学报, 2021, 40(5): 22-34.
- [2] 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.
- [3] 徐波,夏辉. 混凝土坝裂缝性状及其危害性分析方法研究综述[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(6): 162-168.
- [4] 黄耀英,何一洋,沈振中,等. 大坝监测量最佳统计模型优选方法[J]. 水利学报, 2022, 53(2): 154-164.
- [5] 顾昊,朱延涛,顾冲时,等. 混凝土坝健康状态态势诊断方法[J]. 水利学报, 2020, 51(8): 957-966.
- [6] 韩敏,任伟杰,李柏松,等. 混沌时间序列分析与预测研究综述[J]. 信息与控制, 2020, 49(1): 24-35.
- [7] 刘群群,何文平,顾斌. 非线性动力学方法在气候突变检测中的应用[J]. 物理学报, 2015, 64(17): 428-436.
- [8] 钱龙霞,李汉霖,汪腾,等. 一种水文序列变异诊断耦合模型及其应用[J]. 工程科学与技术, 2021, 53

- (5): 98–109.
- [9] 熊伟. 基于突变理论及协同学的网络流量异常检测方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [10] 徐洪钟. 大坝动力系统的实时监控非线性分析模型研究[D]. 南京: 河海大学, 2001.
- [11] 张智铭, 陈旭东. 基于混沌理论的大坝渗流演变规律分析[J]. 水电能源科学, 2020, 38(10): 67–70.
- [12] BAO T F, QIN D, ZHOU X W, et al. Abnormality monitoring model of cracks in concrete dams[J]. Science China, 2011, 54(7): 1914–1922.
- [13] GU C S, LI Z C, XU B. Abnormality diagnosis of cracks in the concrete dam based on dynamical structure mutation[J]. Science China, 2011, 54(7): 1930–1939.
- [14] 牛景太. 基于混沌理论和突变诊断的高边坡变形预测模型[J]. 人民长江, 2012, 43(24): 86–90.
- [15] 包腾飞. 混凝土坝裂缝的混沌特性及分析理论和方法[D]. 南京: 河海大学, 2004.
- [16] GRASSBERGER P, PROCACCIA I. Measuring the strangeness of strange attractors[J]. Physica D: Nonlinear Phenomena, 1983, 9(1/2): 189–208.
- [17] 李春贵, 裴留庆. 一种识别混沌时间序列动力学异同性的方法[J]. 物理学报, 2003(9): 2114–2120.
- [18] JAYNES E T. On the rationale of maximum entropy methods[J]. Proceedings of the IEEE, 1982, 70(9): 939–952.
- [19] 郝永河, 郝永艳, 唐承忠, 等. 基于变形信息分解的大坝变形趋势判断及预测研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2021, 41(8): 841–845, 880.
- [20] 付俊生. 隧道围岩变形预测及趋势判断方法[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2019, 1(4): 103–108.
- [21] 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, 2003.

Abnormality diagnosis for deformation behavior of pump station buildings based on nonlinear dynamics model

LOU Benxing^{1,2}, MA Fuheng¹, LUO Xiang^{1,2}

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

2. College of Water Conservancy & Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Deformation behavior analysis is an important scientific means to diagnose the operating status of pump station buildings, and single measure point deformation is focused mainly in traditional safety diagnosis method, however, the cooperative deformation properties between adjacent measure points should be more concerned for the pump station. In view of the strong nonlinear characteristics of the deformation time series for pump station, the adjacent measure points of the pump station were regarded as two nonlinear dynamic systems in this paper. Based on the chaos theory, it was proved that the deformation time series of the pump station generally have chaotic characteristics. Furthermore, by introducing the dynamic autocorrelation factor and cross-correlation factor, an abnormality diagnosis approach for deformation of pump station buildings based on nonlinear dynamics model was put forward. Finally, the validity of the method proposed was verified by the examples of the Logistic time series and a pump station of the South-to-North Water Diversion Project. The results show that the method proposed can represent the dynamic structure and distance effectively between two nonlinear systems, and diagnose the deformation behavior of pump stations comprehensively from the internal driving factors and uneven deformation tendency of adjacent measure points, which provides a new approach to master the operating status of pump station buildings.

Keywords: pump station buildings; deformation; safety diagnosis; chaotic characteristics; nonlinear dynamics model

(责任编辑: 王 婧)