

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.061



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



基于改进连续隐马尔可夫模型的高拱坝 安全状态评价方法

陈深¹, 胡少伟², 李景浩¹, 郑立文¹

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 郑州大学 水利与交通学院, 郑州 450001)

摘要: 高拱坝安全评估对保障高拱坝长久安全运行具有重要意义。连续隐马尔可夫模型(CHMM)机器学习算法具有强大的处理多源融合时序性连续数据、建立数据间复杂映射关系和实时准确评估能力, 因而有实时准确评估高拱坝安全状态的巨大潜力, 但是目前尚未开展基于CHMM多变量指标分析的高拱坝超载破坏全过程安全状态评价。首先, 开展高拱坝物理模型超载试验, 监测拱坝破坏全过程的裂缝和变形时间序列, 并构建低噪、稳定的高质量CHMM数据集; 随后, 将CHMM应用于高拱坝安全评估中, 并提出状态转移矩阵排序新规则, 赋予状态标签意义, 改进CHMM的结果可读性; 最终, 根据CHMM给出最优状态序列对拱坝模型破坏全过程进行安全评估, 并与高拱坝模型破坏过程对比验证。结果表明: 基于CHMM高拱坝状态时间序列将高拱坝安全状态分为7个等级, 并与变形和裂缝时序演变历程相吻合, 进而提出高拱坝失效历程特征安全度, 将试验高拱坝失效历程分为类线性、非线性大变形、反拱效应作用和最终失稳4个阶段, 对应超载安全度分别为2、6、10和14。

关键词: 高拱坝; 物理模型试验; 连续隐马尔可夫模型(CHMM); 破坏机制; 安全评估

中图分类号: TV642.1; TV642.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(XXXX)XX-0001-15

Modified continuous hidden Markov model-based safety evaluation method of high arch dam

CHEN Shen¹, HU Shaowei², LI Jinghao¹, ZHENG Liwen¹

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. School of Water Conservancy and Transportation Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, P. R. China)

Abstract: The safety assessment is of great significance for ensuring long-term safe operation of high arch dams.

收稿日期: 2025-02-11

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC3004400); 国家自然科学基金(52130901); 泰山学者产业领军人才工程项目(tscx202306104); 河南省自然科学基金(232300421003)

作者简介: 陈深(1999-), 男, 主要从事基于机器学习的高拱坝安全评价研究, E-mail: cs15730146606@163.com。

胡少伟(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: hsw@zzu.edu.cn。

李景浩(通信作者), 男, 博士生, E-mail: 1710934891@qq.com。

Received: 2025-02-11

Foundation items: National Key Research and Development Program of China (No. 2022YFC3004400); National Natural Science Foundation of China (No. 52130901); Taishan Industry Leading Talent Project (No. tscx202306104); Natural Science Foundation of Henan Province (No. 232300421003)

Author brief: CHEN Shen (1999-), main research interest: safety assessment of high arch dams based on machine learning, E-mail: cs15730146606@163.com.

HU Shaowei (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: hsw@zzu.edu.cn.

LI Jinghao (corresponding author), PhD candidate, E-mail: 1710934891@qq.com.

The machine learning algorithm of Continuous Hidden Markov Model (CHMM) has strong capabilities in processing multi-sourced time sequential continuous data, establishing relationship between complex data, and real-time accurate evaluation. Therefore, it has great applicable potential in high arch dam safety evaluation. However, the whole-process safety evaluation of overloading failure of high arch dams via CHMM-based multivariate indices analysis has not been carried out yet. Therefore, this paper carried out an overloading test on a physical model of a high arch dam, monitored the time series of cracks and deformations throughout the dam's failure process, and constructed a high-quality CHMM dataset with low noise and stability. Subsequently, CHMM was applied to the safety assessment of high arch dams, and a new rule for state transfer matrix ordering was proposed to give meaning to the state labels, which improved the readability of the results of CHMM. Finally, the whole-process safety variation of arch dam model was evaluated by the CHMM optimized state sequence, and validated with observed results. The results indicated that CHMM-based state sequence classified the safety status of tested high arch dam into seven levels, which coincide with the time-sequential evolution of deformation and crack, and further proposed the featuring overloading safety. The failure process of tested high arch dam was categorized into quasi-linear, nonlinear of large deformation, arching effect action and complete failure stages with respective overloading safety degrees of 2, 6, 10 and 14. This study provides the new insight into safety evaluation of high arch dam and makes reference for early-warning of high arch dam.

Keywords: high arch dam; model test; continuous hidden Markov method (CHMM); failure mechanism; safety evaluation

高拱坝是关乎国计民生的国家超级战略工程,在蓄水防洪和发电领域发挥着重大作用^[1],因此,高拱坝安全状态评估极为重要。科学有效的安全评价方法能通过对坝体变形和裂缝等多源指标的监测与分析,精准判断拱坝的健康状况,并能提前察觉潜在危险,为及时采取补救措施争取时间,从而保障拱坝在设计寿命内稳定运行^[2]。

高拱坝安全监测指标本质上是随时间演变的序列,因此建立多源信息与高拱坝安全状态的复杂非线性映射关系是高拱坝安全评估模型的核心^[3-4]。机器学习算法在整合多源数据,挖掘数据间隐藏的复杂关联^[5-6],并最终建立不同工况与拱坝安全状态的映射关系方面具有重大优势和潜能,其无需依赖复杂模型假设,提高评估的准确性与效率,适应水利工程智能化管理需求^[7]。连续隐马尔可夫模型(Continuous Hidden Markov Method, CHMM)机器学习算法是时序性数据序列处理的有力工具^[8],在处理实际多维连续时间序列数据方面,CHMM可实现多维非线性监测数据融合、动态状态演化建模与实时准确预警^[9-10]。相较于同类处理时间序列的机器学习算法,CHMM计算效率高、物理意义明确,能直接建模连续数据并捕捉非线性动态响应,通过概率框架避免过拟合,量化预测不确定性,动态描述结构状态演变,弥补传统静态方法的不足,为长期安全监测与异常诊断提供高效可解释的数据驱动方法。近年来,连续 CHMM 在结构安全评价领域的应用

取得了显著进展,主要聚焦于结构损伤识别、性能退化评估和剩余寿命预测等方向。在损伤识别方面,通过分析结构响应信号的特征,利用 CHMM 强大的模式识别能力,能准确判断结构是否发生损伤以及损伤的位置和程度。在性能退化评估中,该模型可以捕捉结构性能参数随时间的变化规律,有效评估结构性能的劣化情况。对于剩余寿命预测,基于结构历史数据和当前状态,结合 CHMM 预测结构未来的性能发展趋势,从而估计剩余寿命^[11-13]。然而,在大坝领域特别是高拱坝领域,CHMM 的应用还存在一定不足。高拱坝结构复杂,受到复杂因素影响,其最终安全状态相应由多种指标综合评定,目前尚未开展基于 CHMM 多变量指标分析的拱坝安全状态评价。同时,高拱坝监测数据具有数据量大、噪声干扰强、多源异构等特点,如何对这些数据进行有效的处理和特征提取,以满足 CHMM 的输入要求,也是目前面临的挑战之一。

可采用拱坝物理模型试验构建高拱坝分析数据集来解决上述问题。通过物理模型试验,能模拟高拱坝在各种工况下的真实受力和变形情况,直观复现拱坝各种复杂工况下失效全过程,获取准确可靠的数据^[14]。同时,综合考虑多个关键物理量,能更全面地反映高拱坝的安全状态,为 CHMM 在高拱坝安全评价中的应用提供更丰富、有效的数据支持,从而提高评价的准确性和可靠性^[15-16]。

综上,笔者开展基于某实际服役高拱坝工程的

高拱坝物理模型超载试验,根据试验结果分析高拱坝在超载库水压力下变形、开裂过程,并构建位移-应变-裂缝宽度多指标训练数据集;同时提出了CHMM状态转移矩阵排序新规则,赋予状态标签意义,改进了CHMM的结果可读性。最后开展了基于CHMM多变量指标的最优状态序列,实现对拱坝模型超载破坏全过程的安全评估,并与高拱坝模型破坏过程对比验证。

1 试验与研究方法概述

1.1 拱坝物理模型超载试验

1.1.1 模型相似材料

以某实际双曲高拱坝为原型大坝设计物理模型,该原型高拱坝坝体最大高度为180 m。坝址山谷形状接近对称,且坝基由较坚硬的完整岩层构成,没有发育严重的断层及节理。

物理模型成型材料应当符合相似理论规定的若干相似比例,这对试验结果能够还原到原型大坝具有重要意义^[17]。由于试验场地限制,模型坝体高度确定为1.20 m,几何缩尺比例 $C_l=150$ 。根据相似理论对重力相似要求^[18],容重比尺 $C_\gamma=1$,应变比尺 $C_\epsilon=1$,结合 C_l 、 C_γ 和 C_ϵ ,并进一步根据平衡方程、物理方程和几何方程等约束条件^[19],可得弹模比尺

$C_E=150$,泊松比比尺 $C_\mu=1$,位移比尺 $C_\delta=150$,应力比尺 $C_\sigma=150$ 。为使筑坝模型材料满足以上相似比尺,采用微粒混凝土作为筑坝相似材料。微粒混凝土是一种由水泥、水、微骨料等材料按照合适比例配制而成的理想相似材料,具有高容重、低强度和应力-应变曲线与原型混凝土相似的优点^[20]。所用水泥型号为P·O 32.5,表面积 $350\text{ m}^2/\text{kg}$,密度 $3\,180\text{ kg/m}^3$,28 d抗压强度为 32.5 MPa ;所用骨料为天然河沙(粒径分布 $0.01\sim2.5\text{ mm}$),细度模数2.38,膨胀模量 44.80 GPa ,和剪切模量 33.60 GPa 。细微骨料和粗微骨料均为从该骨料中筛出,细微骨料粒径范围 $0.05\sim0.6\text{ mm}$,粗微骨料粒径范围 $1.0\sim2.5\text{ mm}$;所用纤维为聚丙烯纤维,掺入微粒混凝土中具有抗微裂纹产生和扩展作用,掺量占水泥质量的 5.95% 。经过多次配比调试,最终提出一种如表1所示的满足上述相似比尺要求的微粒混凝土配合比,其密度为 $2\,350\text{ kg/m}^3$,其与原型混凝土的力学参数对比见表2,由表2可知该微粒混凝土满足相似理论要求。

表1 微粒混凝土相似材料配合比

Table 1 Mass proportion of similarity materials

水泥/(kg/ m ³)	水/(kg/ m ³)	细微骨料/ (kg/m ³)	粗微骨料/ (kg/m ³)	聚丙烯纤维/ (kg/m ³)
163.2	259.2	772.8	1180.8	24.0

表2 原型混凝土与所用微粒混凝土力学性能对比

Table 2 Comparison of mechanical properties of prototype and similarity materials

类别	抗压强度	抗拉强度	实际 C_σ	弹性模量	实际 C_E	泊松比	实际 C_μ
原型混凝土	22 MPa	1.5 MPa	150	26 GPa	150	0.2	1
微粒混凝土	146.7 kPa	10.0 kPa	150	173.3 MPa	150	0.2	1

1.1.2 拱坝物理模型

试验所用物理模型坝体采用上述微粒混凝土整体浇筑^[21];为方便成型,坝基采用C30混凝土整体浇筑^[22]。该拱坝物理模型向上下游延伸0.5倍坝高、左右两岸延伸0.3倍坝高、向下延伸0.2倍坝高,整个拱坝物理模型的长、宽、高尺寸为 $2.57\text{ m}\times1.21\text{ m}\times1.44\text{ m}$ 。该拱坝物理模型采用自主设计的“三步式整浇拱坝成型法”实现高效、快速成型,最终外观如图1所示。该拱坝物理模型的三维坐标系原点建于拱顶弧圈轴线中点,X、Y和Z轴分别沿水平、顺河向和高程方向,其正方向分别指向左岸、下游和竖直向上。

1.1.3 物理模型试验加载系统与监测系统

对拱坝物理模型开展静力超载试验以探究高拱坝在超载洪水作用下的整体结构安全性能演变^[23]。超载洪水作用通过多次逐级施加多倍倒三角静水荷载的方式模拟,采用目前最广泛应用的千斤

顶加载法,并由分油器和油表精准控制压力施加^[24]。千斤顶的布置及压力输出计算参照文献[15]。为将千斤顶施加的集中力转化为模拟水压的面力,在千斤顶和坝面之间放入高强度混凝土垫块,垫块与坝体接触的一面与坝体表面弧形相吻合。从坝体底部开始逐步向上施加荷载,以 $0.25P_0$ (为 P_0 正常水载)加载步逐级施加,直到拱坝模型整体破坏,全程观察、测试和记录拱坝模型的变位响应以及裂缝演变^[25]。试验的总体布置见于图2。

试验测量指标为坝体应变、顺河向位移和裂缝宽度。由于拱坝物理模型和荷载关于拱冠梁对称,拱坝结构响应也近乎对称,故只需在上下游坝面一半区域布置测点和传感器。拱坝模型上游面与下游面传感器布置如图3所示,在代表性位置布置应变测点^[26]。上游坝面应变片共计52片,下游面应变片74片;在代表性高程的坝端、临近拱冠及其中点位置布置了14个位移计,位移计固定在支撑架上。

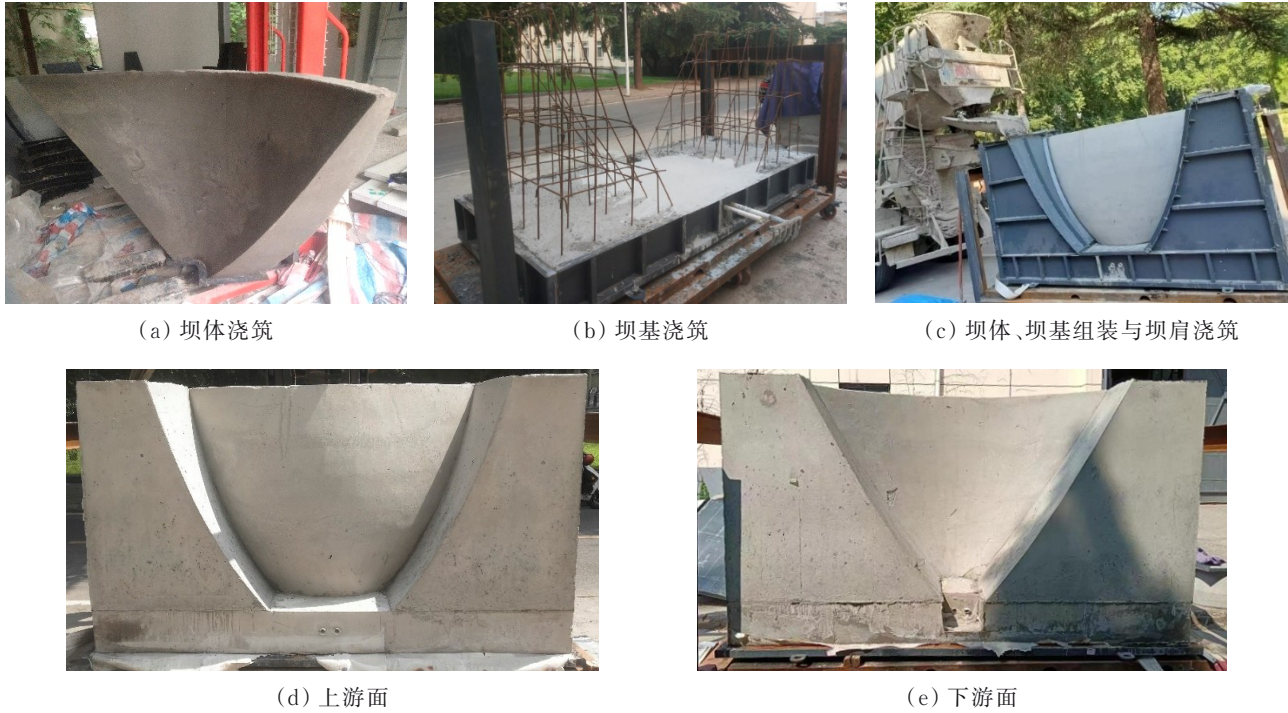


图1 试验用拱坝物理模型整体外观

Fig.1 Overview of arch dam model

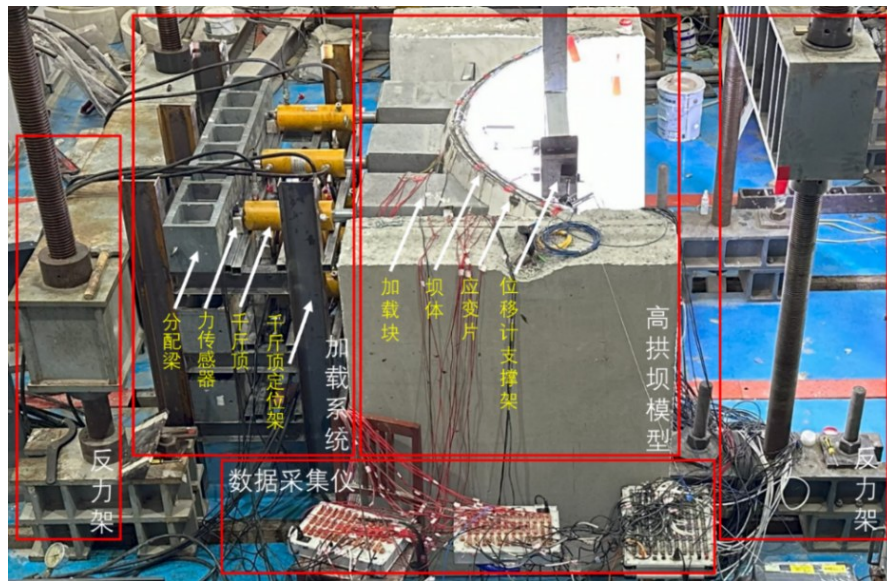


图2 高拱坝模型静力超载试验整体效果图

Fig.2 Overall layout of arch dam model test

应变片和位移计与DH3816N静态应变测试系统相连接,在试验全过程实时监测和记录拱坝变位信息。同时,采用ELB-LF100K型号裂缝测宽仪对拱坝物理模型裂缝演变及其宽度进行实时监测、记录。每次加载完成后,稳定5 min开始测试,记录数据3~5 min,最终有效加载时间累计75 min。

1.2 CHMM模型原理

1.2.1 基于CHMM模型的高拱坝安全评估流程

通过CHMM建立拱坝安全状态序列与可观察监测指标间的映射关系(如图4所示),具体步骤为:

1)拱坝物理模型超载试验变形序列数据集收集与构建。

2)CHMM模型搭建。由参数初始化、事件发生概率评估、参数学习(重估)和最优状态序列生成(解码)4个步骤实现^[27]。a)采用与混合高斯模型相关联的K-means聚类算法对参数初始化,使模型最终训练结果达到全局最优^[28];b)运行Viterbi算法^[29]求取初始参数下最优状态序列,并重新进行K-means聚类更新初始参数,直到迭代收敛为止;c)将b)中获取的最终初始化参数交给Baum-Welch算

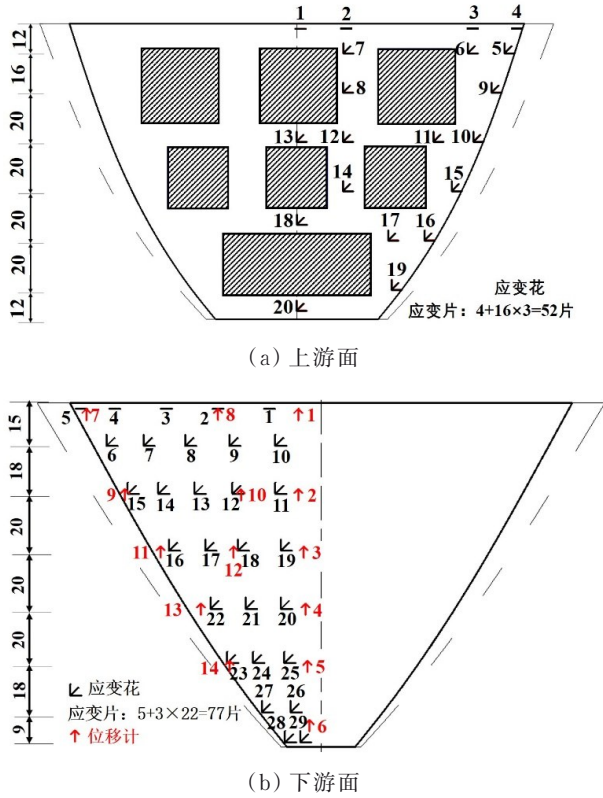


图3 拱坝物理模型传感器布置图

Fig.3 Layout of sensors on arch dam model

法^[30]进行参数训练,获得最终模型参数;d)最后基于Viterbi算法生成输入观察序列的最优状态序列。

3)拱坝变形数据集训练与状态序列输出。

4)与现有3K理论的分级结果对比验证。

1.2.2 基于K-means聚类的参数初始化

CHMM参数包括初始状态概率矩阵 π 、隐含状态转移概率矩阵 A 、观测状态转移概率矩阵 B 。CHMM的前、后向算法和Viterbi算法均与离散HMM一致,区别仅在于对参数 B 不再采用离散HMM的矩阵形式,而是通过连续概率密度函数 $b_j(o_t)$ 来表示^[31]。

$$B = \{b_j(o_t)\} = \left\{ \sum_{m=1}^{M_j} \omega_{j,m} b_{j,m}(o_t) \right\} = \left\{ \sum_{m=1}^{M_j} \omega_{j,m} G(o_t, \mu_{j,m}, \Sigma_{j,m}) \right\} \quad (1)$$

$$b_{j,m}(o_t) = G(o_t, \mu_{j,m}, \Sigma_{j,m}) = \frac{\exp\left(-\frac{1}{2}(o_t - \mu_{j,m})^T \Sigma_{j,m}^{-1}(o_t - \mu_{j,m})\right)}{\sqrt{(2\pi)^D |\Sigma_{j,m}|}} \quad (2)$$

式中: M_j 为隐状态 s_j 下高斯分量数目, $G(o_t, \mu_{j,m}, \Sigma_{j,m})$ 为高斯概率密度函数。在隐状态 s_j 下, $\omega_{j,m}$ 、 $\mu_{j,m}$ 和 $\Sigma_{j,m}$ 分别为第 m 个高斯分布的权值、均值向量和协方差矩阵,因此CHMM参数可记为 $\lambda = (\pi, A, \omega, \mu, \Sigma)$ 。

K-means聚类方法生成初始化CHMM参数的步骤如下:1)随机赋值参数 π 和 A ;2)将所有观测向量按照相互距离最大的原则划分为 $N \times M$ 组,则状态 S_i 下第 m 个高斯分量 $X_{i,m}$ 的参数 $\omega_{i,m}$ 、 $\mu_{i,m}$ 、 $\Sigma_{i,m}$ 初值为

$$\omega_{i,m} = N(X_{i,m})/N(S_i) \quad (3)$$

$$\mu_{i,m} = \bar{X}_{i,m} \quad (4)$$

$$\Sigma_{i,m} = C_{ov}(X_{i,m}) \quad (5)$$

式中: $N(X_{i,m})$ 为分量 $X_{i,m}$ 中的观测向量数, $N(S_i)$ 为状态 S_i 下的观测向量数; $\bar{X}_{i,m}$ 为分量 $X_{i,m}$ 的均值向量; $C_{ov}(X_{i,m})$ 为分量 $X_{i,m}$ 的协方差矩阵。

1.2.3 维特比(Viterbi)解码算法

Viterbi算法在已知观测序列 O 和参数 λ ,采用动态规划寻求概率最大的路径,计算与此观测序列最匹配的隐状态序列 $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$ 。Viterbi算法求解步骤如下:

1)定义辅助变量及其初始化

$$\begin{cases} \delta_1(i) = \pi_i b_i(o_1) \\ \phi_1(i) = 0 \end{cases}, 1 \leq i \leq N \quad (6)$$

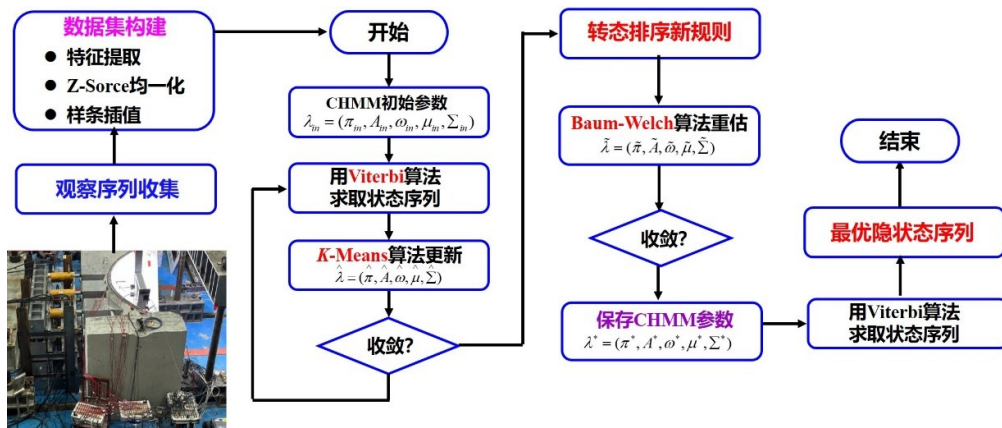


图4 基于CHMM算法的高拱坝安全状态评估流程图

Fig.4 Flow chart of safety state assessment of high arch dam based on CHMM algorithm

2)递归

$$\begin{cases} \delta_t(j) = \max_{1 \leq i \leq N} [\delta_{t-1}(i) a_{ij}] b_j(o_t) \\ \psi_t(i) = \arg \max_{1 \leq i \leq N} [\delta_{t-1}(i) a_{ij}] \end{cases}, 2 \leq t \leq T, 1 \leq j \leq N \quad (7)$$

3)结束

$$\begin{cases} P^* = \max_{1 \leq i \leq N} [\delta_T(i)] \\ q_T^* = \arg \max_{1 \leq i \leq N} [\delta_T(i)] \end{cases} \quad (8)$$

4)最优路径回溯:

$$q_t^* = \psi_{t+1}(q_{t+1}^*), t = T-1, T-2, \dots, 1 \quad (9)$$

最终求得最优路径 $Q = \{q_1^*, q_2^*, \dots, q_T^*\}$ 。

1.2.4 CHMM 参数重估

Baum-Welch 算法是一种非监督学习算法,在已知观测序列 O 和初始模型 λ 下,重估参数 λ ,使该观察序列发生概率 $P(O|\lambda)$ 最大,对参数 π 、 A 和 ω 、 μ 、 Σ 的训练步骤为:

1)引入辅助变量 $\xi_t(i, j)$ 、 $\gamma_t(j, m)$ 。

$$\begin{aligned} \xi_t(i, j) &= \frac{\alpha_t(i) a_{ij} b_j(o_{t+1}) \beta_{t+1}(j)}{P(O|\lambda)} \\ &= \frac{\alpha_t(i) a_{ij} b_j(o_{t+1}) \beta_{t+1}(j)}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \alpha_t(i) a_{ij} b_j(o_{t+1}) \beta_{t+1}(j)} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \gamma_t(j, m) &= \frac{\alpha_t(j) \beta_t(j)}{\sum_{i=1}^N \alpha_t(i) \beta_t(i)} \times \\ &\quad \frac{\omega_{j,m} G(o_t, \mu_{j,m}, \Sigma_{j,m})}{\sum_{n=1}^{M_j} \omega_{j,n} G(o_t, \mu_{j,n}, \Sigma_{j,n})} \end{aligned} \quad (11)$$

式中: $\xi_t(i, j)$ 和 $\gamma_t(j, m)$ 分别为在给定 λ 和 O 的情况下,在 t 时刻,从状态 s_i 转移到 s_j 的联合概率,和处于隐状态 s_j 下第 m 个高斯分布的联合概率。 $\alpha_t(i)$ 和 $\beta_t(i)$ 为模型处于隐状态 s_i 下前向变量和后向变量,产生观测序列 $\{o_1, o_2, \dots, o_t\}$ 和 $\{o_{t+1}, o_{t+2}, \dots, o_T\}$ 的概率,由前向算法和后向算法计算得到^[32]。

2)参数重估

K-means 聚类方法自动将输入观察序列分为 K 条相互独立的子观察序列,根据式(10)、(11),最终生成估计参数需分别计算各子观测序列 $\xi_t^{(k)}(i, j)$ 、 $\gamma_t^{(k)}(j, m)$,再求和、求均值,得到参数 π 、 A 和 ω 、 μ 、 Σ 重估公式

$$\bar{\pi}_i = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \gamma_1^{(k)}(i, m) \quad (12)$$

$$\bar{a}_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^{T_k-1} \xi_t^{(k)}(i, j)}{\sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^{T_k-1} \sum_{m=1}^{M_i} \gamma_t^{(k)}(i, m)} \quad (13)$$

$$\bar{\omega}_{j,m} = \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^{T_k} \gamma_t^{(k)}(j, m)}{\sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^{T_k} \sum_{n=1}^{M_j} \gamma_t^{(k)}(j, n)} \quad (14)$$

$$\bar{\mu}_{j,m} = \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^{T_k} \gamma_t^{(k)}(j, m) o_t^{(k)}}{\sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^{T_k} \gamma_t^{(k)}(j, m)} \quad (15)$$

$$\bar{\Sigma}_{j,m} =$$

$$\frac{\sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^{T_k} \gamma_t^{(k)}(j, m) (o_t^{(k)} - \mu_{j,m})(o_t^{(k)} - \mu_{j,m})^T}{\sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^{T_k} \gamma_t^{(k)}(j, m)} \quad (16)$$

3)收敛并终止。

重复步骤 1)~2),不断更新模型参数 $\bar{\lambda}$,最终得到最优模型参数 $\bar{\lambda}$ 满足收敛条件

$$\lambda^* = \arg \max_{\lambda} \prod_{k=1}^K P_k = \arg \max_{\lambda} \prod_{k=1}^K (P(O^{(k)}|\lambda)) \quad (17)$$

式中: $P_k = (O^{(k)}|\lambda)$ 为在参数 λ 的条件下,产生第 k 个观测序列 $O^{(k)}$ 的概率。

2 结果与讨论

2.1 高拱坝破坏机制

2.1.1 高拱坝破坏过程

高拱坝物理模型最终破坏形态见于图 5,高拱坝坝体上游面主要裂缝为位于坝踵、两岸临近坝肩的拱端通长裂缝;下游面主要裂缝是位于拱冠梁区域的竖向通长裂缝,该通长裂缝加载到一定程度贯



(a) 上游坝面破坏形态



(b) 下游坝面破坏形态

图 5 拱坝破坏形态

Fig.5 Situ failure modes of arch dam model

穿至上游面,整个拱坝-地基系统稳定性较好,试验结果与同类拱坝物理模型试验结果规律一致^[33-34]。

高拱坝物理模型破坏过程如图6所示,图中数字表示开裂时超载倍数。

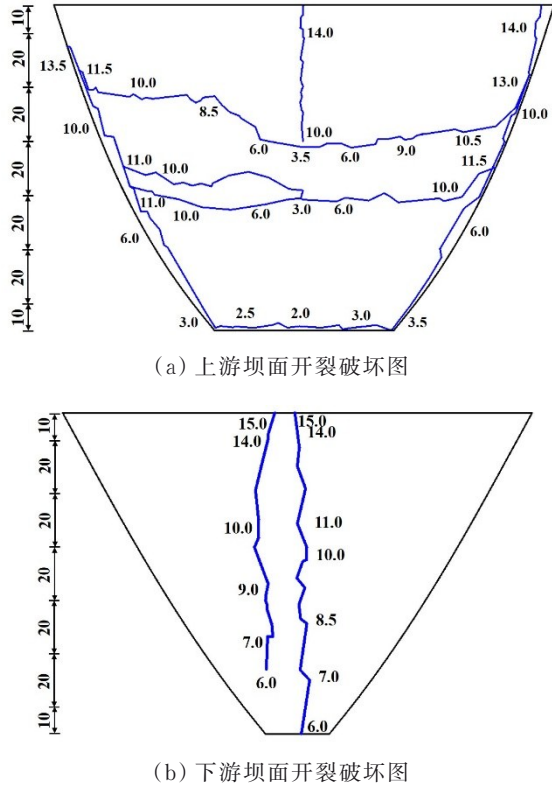


图6 拱坝破坏过程示意图

Fig.6 Schematic diagram of arch dam failure process

上游坝面破坏过程:1)当 $K=1.0$ 时,坝体未出现开裂;2)当 $2.0 < K \leq 3.0$ 时,坝踵首先开裂,由坝踵中部沿水平方向向两侧扩展;3)当 $3.0 < K \leq 6.0$ 时,在-110 cm高程,两岸均出现开裂,并沿着坝端-坝肩交界向上延伸;同时在-50 cm和-70 cm高程,拱冠出现新的水平裂缝;4)当 $6.0 < K \leq 10.0$ 时,现有裂缝获得较大程度扩展,两岸裂缝已延伸至-50 cm高程,两条水平裂缝则扩展至距两岸拱端约1/3半拱圈的位置,并在-50 cm高程拱冠梁处形成了一条竖向垂直向上延伸的裂缝,施加荷载逐渐困难。5)当 $10.0 < K \leq 14.0$ 时,裂缝发展速度相较于4)有所变缓,裂缝基本成形,并相互交会贯通,两条水平裂缝左岸裂缝扩展至-5 cm高程处,右岸裂缝与拱冠梁的竖向裂缝扩展到坝顶。6)加载至 $15.0P_0$ 时,坝体变形急剧失控,彻底失去承载力。

下游坝面破坏是两条竖向主裂缝演变:1)当 $K < 4.5$ 时,下游坝面未产生裂缝。2)当 $4.5 \leq K \leq 6.0$ 时,坝趾处产生一条竖向裂缝并向上延伸;随后拱冠梁左部约-100 cm高程处,出现另一条竖向裂缝。3)当 $6.0 < K \leq 10.0$ 时,两条竖向裂缝以极快

速度发展到坝体中部高程。4)当 $10 < K \leq 14.0$ 时,以相对较快速度向上扩展到-20 cm高程处。5)当 $14.0 < K \leq 15.0$ 时,两条裂缝迅速延伸到坝顶,结构变形过大,拱坝完全破坏。拱坝物理模型由于坝基(含坝肩)的约束条件较好,拱坝极限承载力相较于一般同类试验更高。

2.1.2 坝体位移分析

拱冠梁和拱圈梁上各测点的顺河向位移随超载过程演变曲线如图7所示。

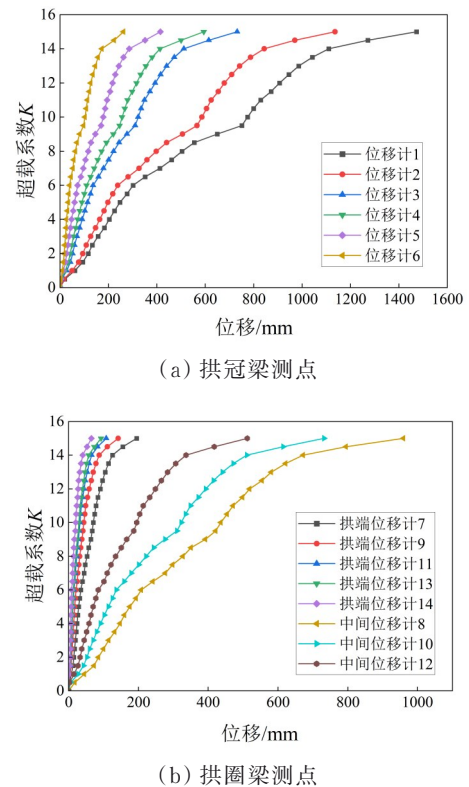


图7 坝体顺河向位移随超载变化过程曲线

Fig.7 Variation curves of river-direction displacements versus overloads

由图7可知,拱坝下游坝面各测点区域的位移变形随超载演变规律一致,均在 $K=6.0$ 和 10.0 时产生拐点。 $K \leq 6.0$ 时,坝体位移基本线性增长; $6.0 < K \leq 10.0$ 后,拱冠梁的位移变化速率明显加快,呈现出明显的非线性,这点在上部高程测点位移表现更为显著; $10.0 < K \leq 14.0$ 时,荷载-位移曲线显示位移增长相对变缓,推测是由于坝肩的反拱作用力帮助坝体承担荷载,抑制了变形和裂缝发展; $14.0 < K \leq 15.0$ 时,变形急速增大,裂缝贯穿至上游,拱坝彻底破坏。同时,坝体位移分布规律也符合一般性规律:同一高程,拱冠处位移最大,并向坝底逐渐减小;拱冠梁上部位移最大,并向坝底逐渐减小^[35]。

综上所述,自下游坝趾区域破坏后拱坝非线性变形加快,标志着拱坝进入非线性阶段,因此坝趾

区是反映坝体安全状况的代表性区域,作为拱坝安全评估选定区域。

2.1.3 坝体应变分析

因试验中坝趾区域部分 X 向应变片在裂缝产生时受损,而 Y 向应变片较为完整,故采用该区域的 Y 向应变序列作为训练数据集,其随超载演变曲线见于图 8,各应变片演变规律相同,且与已有研究一致^[36]。坝体下游主要承受压应变^[37],且在靠近 $K=6.0$ 和 10.0 时,各应变曲线都存在不同程度转折,在转折点前后各阶段的应变发展规律与上述顺河向位移基本吻合。

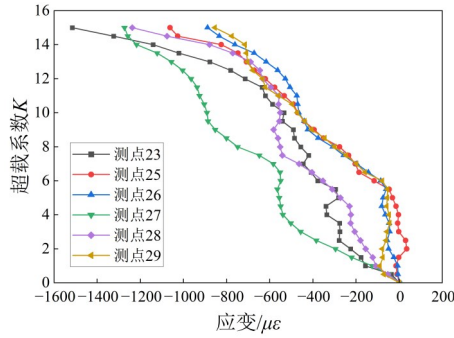


图 8 下游坝面代表性测点 Y 向应变超载变化过程曲线

Fig.8 Variation curves of Y-direction strains of representative measuring points on downstream surface

2.1.4 坝体裂缝宽度分析

选取坝趾区域序号 25 和 29 两个代表性测点的裂缝宽度进行分析。从图 9 中可以看出,下游裂缝始于 $K=4.5$ 时刻的坝趾,从 $K=6.0$ 附近开始,裂缝宽度开始随着超载倍数增加而显著增大,其中, $K=10.0$ 和 14.0 附近均有不同程度转折。

根据以上试验结果分析得出整体安全系数:上游坝踵首先出现裂缝,故起裂安全系数 $K_1=2.0$;当 $K=5.0\sim 6.0$ 时,下游面竖向裂缝出现,坝体变形非线性明显增大,因此,非线性大变形起始安全系数

$K_2=5.0\sim 6.0$;当 $K=14.0\sim 15.0$ 时,坝体大变形,彻底丧失承载力,故极限承载安全系数 $K_3=14.0$ 。此外,在 $K=10.0$,试验拱坝存在一定的变形抑制,结合前面的分析,命名为“反拱作用显著点”。

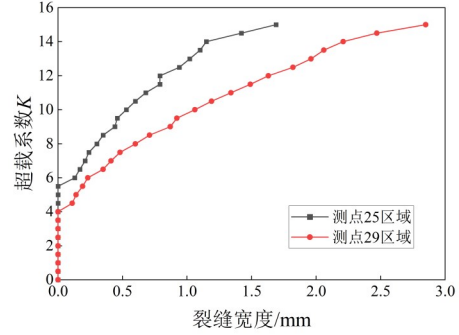


图 9 下游坝面测点 25、29 区域的裂缝宽度超载变化曲线

Fig.9 Crack widths evolution on measuring points 25 and 29 versus overloading factor K

2.2 基于 CHMM 的高拱坝安全状态评估

2.2.1 数据选择及预处理

位移、裂缝及应变是宏-微观层次上拱坝安全最直观的表征,拱坝状态改变最终均会通过这 3 种变形指标体现出来,对拱坝安全度评估具有重要作用^[38]。采用 3 种数据序列共同输入 CHMM 中,以实现拱坝安全状态综合评估。根据以上试验结果分析,下游坝趾区域作为全坝的关键受力部位,该区域的力学响应可有效表征大坝整体安全状态。该区域与其他区域测点数据存在内在关联,其中测点 25 和 29 的位移、应变和裂缝宽度数据变化趋势与大坝整体变形、应力分布规律具有一致性,因此作为 CHMM 训练数据集。设置采样周期为 5 s 对位移和应变特征提取采样,另对裂缝宽度采用三次样条插值法对裂缝数据插值填充以增强数据连续性^[39],最终每个测点包含 895 组数据,如图 10 所示,可以看出该数据集包含坝体全过程状态变化特征。

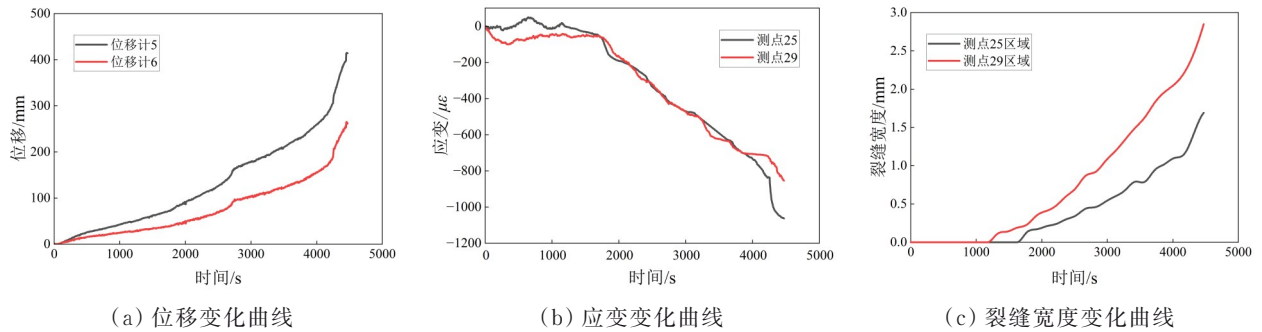


图 10 CHMM 训练数据集的位移、应变和裂缝宽度的时间序列

Fig.10 Time series of displacement, strain and crack width for CHMM training dataset

为降低由于数据类别差异而影响模型性能的风险,采用 Z-Sorce 方法^[40]对数据进行归一化处理。

该方法通过 StandardScaler 标准化方式处理^[41],其计算公式为

$$X' = \frac{X - \mu}{\sigma} \quad (18)$$

式中: μ 为平均值, σ 为标准差。

CHMM 无需人为设置每种数据指标权重, 通过均值和协方差等参数 (其均值表示指标在某一状态下的典型期望值, 协方差体现了指标间的相关性) 自适应地调整指标权重。

2.2.2 基于状态排序新规则改进 CHMM 参数训练结果

1) CHMM 参数 N 和 M 设置

为解决随着模型参数增多而导致的复杂度增加和过拟合问题, 采用贝叶斯信息准则 (Bayesian Information Criterion, BIC) 引入对参数训练和考虑样本数量的惩罚因子^[42], BIC 的定义为

$$\text{BIC} = -2\ln L + k \ln N \quad (19)$$

式中: L 是拟合似然值; k 是参数数量; N 是样本数量, 通常最佳模型的 BIC 值最小。

采用 Jupyter Notebook 操作平台对数据集训练后求得不同 CHMM 参数的似然值和 BIC 值, 如表 3 所示, 可知 $N=7, M=2$ 时 CHMM 效果最优。传统大坝安全等级只有 3~5 级, 因此 CHMM 可在保证准确率前提下克服安全等级划分过少的局限。

表 3 不同 CHMM 模型的似然值及 BIC 值

Table 3 Likelihood and BIC values of different CHMM models

隐状态数 N	高斯分布数 M	似然值 L	BIC
2	2	10 551.081 3	-20 334.121 5
2	3	11 715.254 1	-22 281.845 1
3	2	12 139.406 9	-23 102.963 3
3	3	13 681.406 0	-25 616.028 3
4	2	13 276.911 5	-24 956.569 4
4	3	14 851.420 0	-27 344.342 1
5	2	14 455.911 5	-26 879.572 8
5	3	14 954.296 5	-26 924.787 5
6	2	15 031.203 6	-27 581.566 6
6	3	15 819.270 4	-28 015.833 8
7	2	15 710.299 0	-28 477.573 4
8	2	10 507.106 1	-17 595.409 9

2) CHMM 隐状态排序新规则

CHMM 参数训练时, 状态未被赋予任何意义, 结果可解释性差。为使状态标签与安全等级相对应, 需根据实际对参数排序。重新排序不会改变模型本身参数结构, 却能赋予状态标签含义。排序规则可以根据均值或状态转移矩阵来排序, 提出图 11 所示的状态转移矩阵新排序规则, 实现将状态标签按照安全度从高到低的顺序排列。

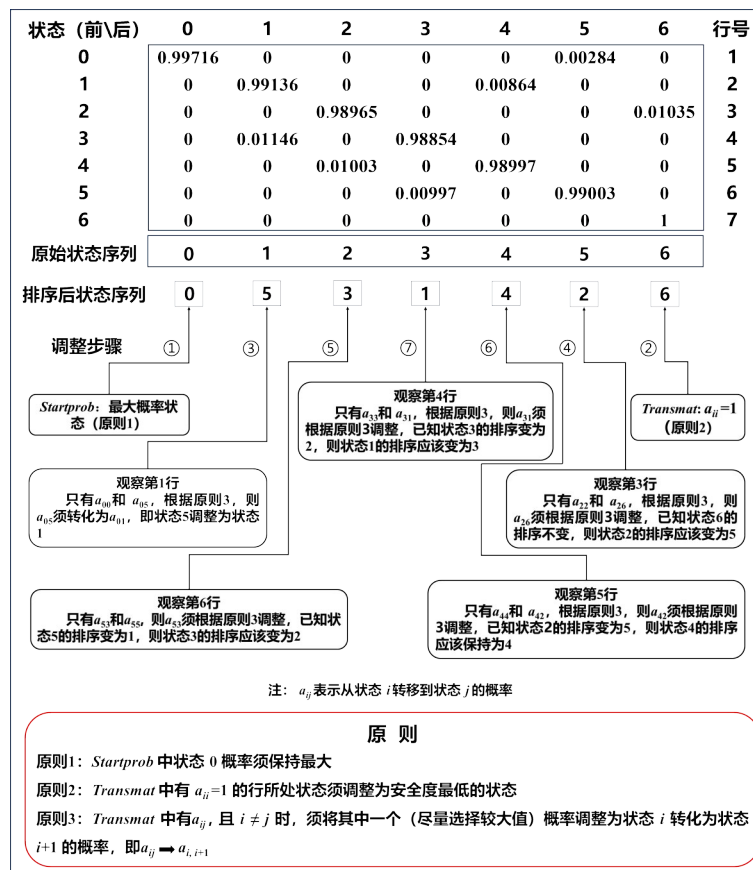


图 11 状态转移矩阵排序逻辑图

Fig.11 Logistic diagram of state transition matrix

3) 状态顺序调整后 CHMM 参数

(a) 隐状态排序调整结果为

调整前:0, 1, 2, 3, 4, 5, 6;调整后:0, 5, 3, 1, 4, 2, 6

(b) 起始概率: [1.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0]

0.0, 0.0]

(c) 状态转移矩阵如图 12 所示

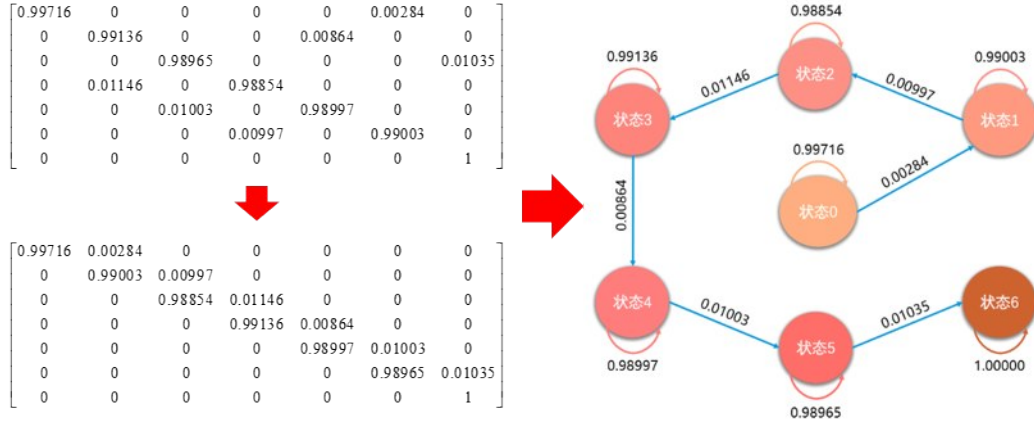


图 12 马尔可夫链隐状态转移图

Fig.12 A demonstration diagram for transition between CHMM hidden states

(d) 均值

$\begin{bmatrix} -0.97168 & 0.96229 & -0.99872 & -0.90695 & 1.01526 & -1.06097 \\ -0.80358 & 0.99480 & -0.71049 & -0.88017 & 0.90431 & -0.71366 \\ 0.18801 & -0.44778 & 0.34235 & 0.14670 & -0.40480 & 0.39094 \\ 0.49441 & -0.66937 & 0.51507 & 0.43129 & -0.57190 & 0.56090 \\ 1.46285 & -1.44548 & 1.19244 & 1.41769 & -1.29589 & 1.21272 \\ 1.72405 & -1.49156 & 1.59121 & 1.66906 & -1.57942 & 1.57408 \\ -0.21896 & 0.07656 & -0.19905 & -0.22845 & 0.08567 & -0.12306 \\ 0.02220 & -0.18718 & 0.00721 & -0.00318 & -0.18470 & 0.08344 \\ 0.85116 & -1.08113 & 0.71950 & 0.79442 & -0.82974 & 0.76646 \\ 1.17877 & -1.25991 & 0.92183 & 1.05942 & -1.06301 & 0.96579 \\ -0.45834 & 0.47406 & -0.40818 & -0.44121 & 0.34267 & -0.34494 \\ -0.63007 & 0.84734 & -0.56419 & -0.56252 & 0.55142 & -0.52754 \\ 2.34004 & -1.91751 & 2.86342 & 2.67451 & -2.37812 & 2.67932 \\ 2.02853 & -1.66169 & 2.37043 & 2.19704 & -2.16016 & 2.20090 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.97168 & 0.96229 & -0.99872 & -0.90695 & 1.01526 & -1.06097 \\ -0.80358 & 0.99480 & -0.71049 & -0.88017 & 0.90431 & -0.71366 \\ -0.45834 & 0.47406 & -0.40818 & -0.44121 & 0.34267 & -0.34494 \\ -0.63007 & 0.84734 & -0.56419 & -0.56252 & 0.55142 & -0.52754 \\ -0.21896 & 0.07656 & -0.19905 & -0.22845 & 0.08567 & -0.12306 \\ 0.02220 & -0.18718 & 0.00721 & -0.00318 & -0.18470 & 0.08344 \\ 0.18801 & -0.44778 & 0.34235 & 0.14670 & -0.40480 & 0.39094 \\ 0.49441 & -0.66937 & 0.51507 & 0.43129 & -0.57190 & 0.56090 \\ 0.85116 & -1.08113 & 0.71950 & 0.79442 & -0.82974 & 0.76646 \\ 1.17877 & -1.25991 & 0.92183 & 1.05942 & -1.06301 & 0.96579 \\ 1.46285 & -1.44548 & 1.19244 & 1.41769 & -1.29589 & 1.21272 \\ 1.72405 & -1.49156 & 1.59121 & 1.66906 & -1.57942 & 1.57408 \\ 2.34004 & -1.91751 & 2.86342 & 2.67451 & -2.37812 & 2.67932 \\ 2.02853 & -1.66169 & 2.37043 & 2.19704 & -2.16016 & 2.20090 \end{bmatrix}$
---	---

(e) 混合系数

$\begin{bmatrix} 0.66967 & 0.33033 \\ 0.47169 & 0.52831 \\ 0.58478 & 0.41522 \\ 0.61237 & 0.38763 \\ 0.58527 & 0.41473 \\ 0.70862 & 0.29138 \\ 0.51594 & 0.48406 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.66967 & 0.33033 \\ 0.70862 & 0.29138 \\ 0.61237 & 0.38763 \\ 0.47169 & 0.52831 \\ 0.58527 & 0.41473 \\ 0.58478 & 0.41522 \\ 0.51594 & 0.48406 \end{bmatrix}$
---	---

协方差矩阵: $7 \times 2 \times 6 \times 6$ 的矩阵,表示有 7 个 CHMM 隐状态(含状态 0),每个隐状态有 2 个高斯分布数(对应两个测点),每个高斯分布下对应 6×6 的协方差矩阵(每一时刻的观测值是一个 6 维向量),完整协方差矩阵见附录。

2.2.3 基于 CHMM 解码的高拱坝安全状态评价

代入调整后参数得到 CHMM 最优隐状态序列及其与拱坝模型超载全过程位移、裂缝宽度和应变演变对照如图 13 所示,各隐状态间递进时刻见于表 4。

从图 13 中看出,隐状态发展与拱坝物理模型各监测指标演变时序图发展规律呈现高度吻合性^[43]。各隐状态转换时刻精确对应于某个试验拱坝特征时刻及其结构性态和变形拐点。隐状态 0 持续最久,其间荷载随时间近乎线性增加,表明此阶段拱坝处于类弹性状态。隐状态 0 持续到 1 755 s,此时 $K=6.0$,荷载、位移、应变和裂缝宽度各指标均发生转折,以坝趾发生破坏为特征拱坝开始进入非线性阶段,因此进一步确定试验拱坝 $K_2=6.0$ 。标号 0~2 的 3 个隐状态持续时间在依次减少,隐状态 3 的持续时间出现反增(通过图 14 也可反映),此刻对应于各指标随时间演变的第 2 个拐点($K=10.0$),坝体非线性仍在较快发展,但一定程度得到抑制,体现出坝体自身反拱作用的承载优势。直到继续加载至 4 255 s($K=14.0$),拱坝进入隐状态 6,此刻依然对应于各指标曲线表征拱坝进入最后失稳破坏的拐点,因此确认 $K_3=14.0$ 。根据 CHMM 隐状态结

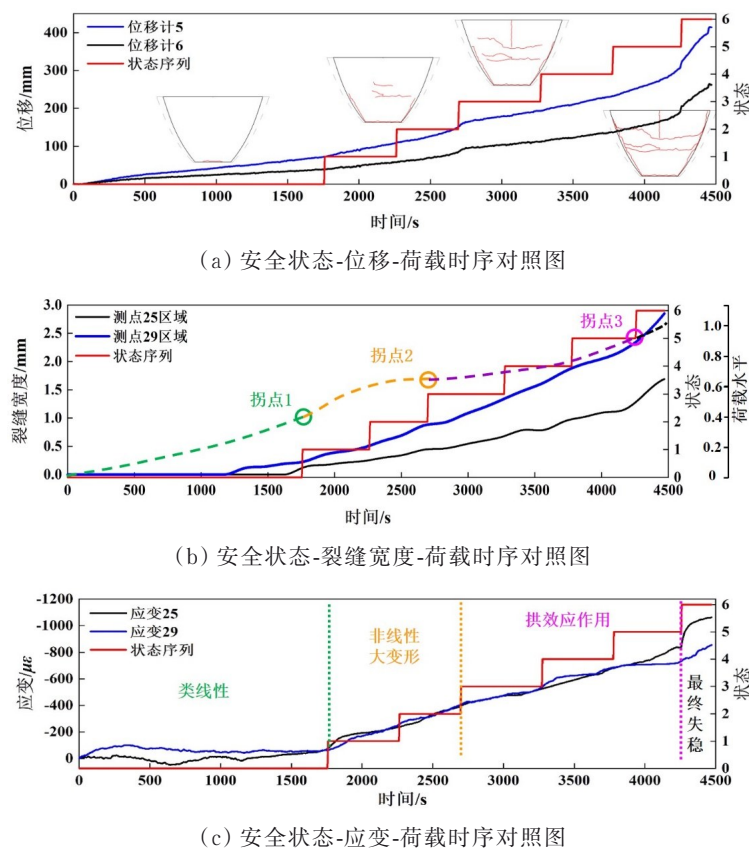


图 13 坝体状态变化图

Fig.13 Variation diagram of dam status

表 4 状态转换时刻

Table 4 Time of state transfer

状态	时间/s						
	隐状态0	隐状态1	隐状态2	隐状态3	隐状态4	隐状态5	隐状态6
起始	0	1 750	2 250	2 695	3 265	3 765	4 255
结束	1 750	2 250	2 695	3 265	3 765	4 255	4 470

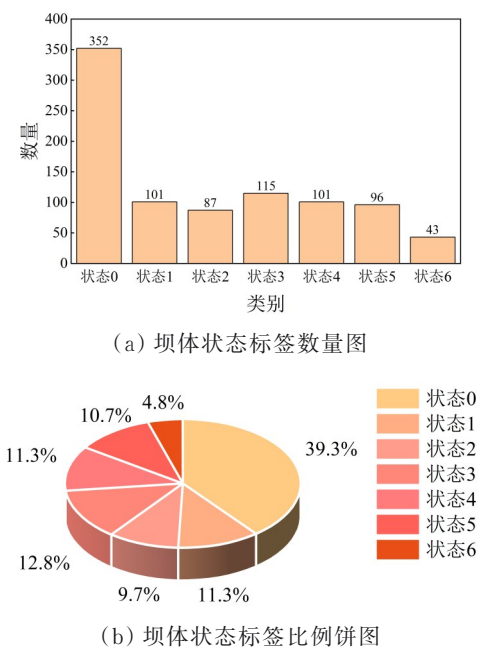


图 14 拱坝安全状态比例图

Fig.14 Scale diagram of dam states

果,试验高拱坝破坏过程大致可分为类弹性、大变形非线性、拱效应作用和最终失稳4个阶段。最终,结合模型试验中拱坝超载破坏全过程的材料性能、力学机制演变(尤其是典型破坏性态)与CHMM安全分级,对拱坝安全等级赋予相关含义,见于表5。

为验证CHMM的稳健性与有效性,首先将BIC值较低且接近的几组参数(隐状态数 $N=4、5、6$,高斯分布数 $M=2、3$)代入CHMM进行安全评估;然后,采用传统的K-means聚类算法将位移、应变和裂缝宽度时间序列进行聚类分析,并对比CHMM的评估结果。各模型识别结果见表6所示。

从表6可以看出,除了 $N=6、M=3$ 的模型对状态识别的结果较为接近前文CHMM的识别结果外,其余模型均未识别出拱效应作用安全系数 K_t ,而 $N=6、M=3$ 的模型识别出的各系数时刻未完全对应上准确时刻,精度较低。特别要说明的是,K-means模型仅关注数值相似性,忽略了动态状态的转变,导致该模型识别结果与CHMM的识别结果

表 5 CHMM 解码拱坝超载全过程安全状态分级及其物理意义

Table 5 CHMM-decoded arch dam safety categorization and corresponding physical significance

状态序号	物理意义	安全等级描述
状态 1	坝体变形基本处于线弹性状态。随着荷载增加,坝踵处的拉应力逐渐增大并最先开裂。但坝体应力-应变关系仍近似线性,拱坝整体安全性能良好。	正常
状态 2	随荷载继续增加,坝趾处的压应力和剪应力不断增大,最终导致坝趾出现压剪破坏。此时坝体内部结构开始出现损伤,坝体变形开始呈现明显的非线性特征。	异常
状态 3	随荷载继续增加,塑性区域逐渐扩大,坝体内部损伤继续发展,坝体的非线性变形显著增大。拱坝整体刚度有所下降,承载能力增长减缓。	严重异常
状态 4	坝体内空隙由于持续受荷被压密,反拱作用开始显著,在一定程度上弥补了坝体刚度损失,坝体变形增速有所减缓,提升了承载能力,改善了坝体整体性能。	轻微险情
状态 5	随着荷载持续增加,坝体内部的损伤仍在发展,反拱效应已无法完全弥补损伤带来的刚度损失。坝体变形再次加速增长,原有裂缝扩展并产生新的裂缝。	中度险情
状态 6	坝体内部损伤严重,裂缝大量扩展并相互贯通,形成宏观的破坏面。反拱效应逐渐减弱,变形迅速增大,坝体的整体刚度急剧下降,坝体承载能力接近极限。	恶性险情
状态 7	坝体达到承载能力极限,无法再承受任何额外荷载,拱坝整体失稳破坏。	破坏

表 6 不同模型的识别结果

Table 6 Recognition results of different models

模型	K_2 识别时刻/s	K_1 识别时刻/s	K_3 识别时刻/s
$N=4, M=2$	1 720	未识别	4 175
$N=4, M=3$	1 655	未识别	未识别
$N=5, M=2$	1 750	未识别	4 165
$N=5, M=3$	1 695	未识别	4 305
$N=6, M=2$	1 745	未识别	4 170
$N=6, M=3$	1 795	2 605	4 270
K-means	1 800	未识别	未识别
CHMM	1 750	2 695	4 255

相差甚远,后两个系数都未识别到。

综上所述,CHMM 隐状态划分等级数比从各指标时程曲线可观察到拐点更多、更为细致,可见 CHMM 具有高效敏锐的信息捕捉和数据隐藏关系挖掘能力,因此能够更加直观详细可靠地描述拱坝安全状态演变,这对拱坝预警和保障拱坝长久稳定运行具有重要意义。

作为无监督机器学习算法,CHMM 模型不需依赖建立输入影响因素数据集(例温度变化、渗流、长期徐变等)与输出目标效应(例变形)的映射关系,不需额外引入评判判据,而直接对效应数据集进行数据结构划分和状态评级,因此,其在考虑复杂环境耦合环境因素和极端荷载(如地震、洪水等)工况下的高拱坝变形序列的安全状态分级仍具有适用性,未来将开展相关研究。

3 结论

提出了一种基于改进 CHMM 模型的高拱坝安全评估方法,开展了高拱坝物理模型超载试验,监测拱坝破坏全过程及其裂缝和变形时间序列并构建 CHMM 数据集。训练 CHMM 后得出最优状态

序列,并与高拱坝模型结果对比,从而对高拱坝破坏全过程进行安全评估,主要结论如下:

1)通过高拱坝物理模型试验得到高拱坝破坏全过程状态及其变形演变。高拱坝的最终破坏集中于坝体上游坝踵及两河岸通长裂缝和下游拱冠梁区域的竖向通长裂缝。典型测点的裂缝宽度、应变和位移演变规律与已有同类研究结果一致。

2)将 CHMM 应用于高拱坝安全评估中,并提出状态转移矩阵排序新规则,赋予状态标签意义,突破了传统大坝安全等级划分的限制,改进了 CHMM 的结果可解读性,基于 CHMM 高拱坝状态时间序列将高拱坝安全状态分为 7 个等级,并与变形和裂缝时序演变历程相吻合。

3)对比 CHMM 最优状态序列和拱坝物理模型失效过程,验证了 CHMM 能够实时合理评估高拱坝安全状态变化。根据两个结果,得出高拱坝失效经历了类线性、非线性大变形、拱效应作用和最终失稳 4 个阶段,拱坝起裂安全系数 $K_1=2.0$ 、整体非线性变形起始安全系数 $K_2=6.0$ 、拱效应作用安全系数 $K_1=10$ 、极限承载安全系数 $K_3=14.0$ 。

4)证实了 CHMM 应用于高拱坝安全状态评估的可行性及有效性。CHMM 能够处理多源融合多维非线性时间序列,建立高拱坝的监测序列与安全状态的强关联性状态演化模型,为高拱坝安全评价提供了新思路,对高拱坝安全预警具有参考意义。

参考文献

[1] 李庆斌, 马睿, 胡昱, 等. 大坝智能建造研究进展与发展趋势[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62(8): 1252-1269.
LI Q B, MA R, HU Y, et al. A review of intelligent dam construction techniques [J]. Journal of Tsinghua

- University (Science and Technology), 2022, 62(8): 1252-1269. (in Chinese)
- [2] CHEN X D, GUAN J Y, XU Y, et al. Health diagnosis of concrete dams with continuous missing data for assessing structural deformation based on tSNE-AHC algorithm and deep transfer learning [J]. Structures, 2023, 57: 105134.
- [3] 唐和生, 王泽宇, 陈嘉缘. 基于数字孪生和深度学习的结构损伤识别[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2024, 46(1): 110-121.
- TANG H S, WANG Z Y, CHEN J Y. Structural damage identification based on digital twin and deep learning [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2024, 46(1): 110-121. (in Chinese)
- [4] YUAN D Y, GU C S, WEI B W, et al. A high-performance displacement prediction model of concrete dams integrating signal processing and multiple machine learning techniques [J]. Applied Mathematical Modelling, 2022, 112: 436-451.
- [5] 陈湘生, 曾仕琪, 韩文龙, 等. 机器学习方法在盾构隧道工程中的应用研究现状与展望[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2024, 46(1): 1-13.
- CHEN X S, ZENG S Q, HAN W L, et al. Review and prospect of machine learning method in shield tunnel construction [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2024, 46(1): 1-13. (in Chinese)
- [6] TIAN K, YANG J, CHENG L. Deep learning model for the deformation prediction of concrete dams under multistep and multifeature inputs based on an improved autoformer [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2024, 137: 109109.
- [7] 张钟壬, 马睿, 胡昱, 等. 大坝智能建造智能化程度评价方法探讨[J]. 水力发电学报, 2023, 42(12): 108-118.
- ZHANG Z R, MA R, HU Y, et al. Evaluation method of intelligence degree for intelligent construction of dams [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2023, 42(12): 108-118. (in Chinese)
- [8] 董晗拓. 基于隐马尔可夫模型的结构损伤识别研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- DONG H T. Structural damage identification based on hidden Markov model [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. (in Chinese)
- [9] 伍林峰, 冯早, 朱雪峰. 基于优化 VMD 和连续隐马尔可夫模型的管道堵塞状态评估[J]. 振动与冲击, 2020, 39(22): 214-222, 233.
- WU L F, FENG Z, ZHU X F. Pipeline blocking state assessment based on optimized VMD and continuous hidden Markov model [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(22): 214-222, 233. (in Chinese)
- [10] ZHU K P, LI X, LI S S, et al. Physics-informed hidden Markov model for tool wear monitoring [J]. Journal of Manufacturing Systems, 2024, 72: 308-322.
- [11] YU J L. Online learning system for English speech automatic recognition based on hidden Markov model algorithm and conditional random field algorithm [J]. Entertainment Computing, 2024, 51: 100729.
- [12] 何知纯, 谢敏, 黄莹, 等. 基于连续隐马尔可夫模型的风水火联合低碳检修优化[J]. 南方能源建设, 2023, 10(4): 43-56.
- HE Z C, XIE M, HUANG Y, et al. Wind power, hydropower and thermal power combined low-carbon maintenance optimization based on continuous hidden Markov model [J]. Southern Energy Construction, 2023, 10(4): 43-56. (in Chinese)
- [13] MIAO P Y, ZHOU C J, WU Y R, et al. Enhancing bridge performance assessment with a hybrid attention-based long short-term memory and hidden Markov model using sparse inspection data [J]. Structures, 2025, 71: 107995.
- [14] 湛建霖, 丁选明, 吴琪, 等. ECC 混凝土桩板墙支挡边坡抗震性能振动台模型试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2023, 45(5): 81-93.
- SHEN J L, DING X M, WU Q, et al. Shaking table model test on seismic performance of retaining slope with ECC anti-sliding sheet pile wall [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2023, 45(5): 81-93. (in Chinese)
- [15] LI G C, CHENG L, ZHANG A N, et al. Model test research on arch dam displacement monitoring based on distributed strain sensing [J]. Measurement, 2023, 223: 113795.
- [16] WANG S G, LIU Y R, ZHOU H W, et al. Experimental study on failure process of arch dam based on acoustic emission technique [J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 97: 128-144.
- [17] 张宇, 冯新, 齐晗兵, 等. 拱坝-库水相互作用的振动台破坏试验研究[J]. 水利学报, 2020, 51(10): 1299-1306.
- ZHANG Y, FENG X, QI H B, et al. Experimental study on impact of dam-reservoir interaction on dynamic failure mechanism of arch dam [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(10): 1299-1306. (in Chinese)
- [18] 张宇, 冯新, 侯爽, 等. 结构缝对高碾压混凝土拱坝地震破坏机理影响的试验研究[J]. 水利学报, 2015, 46(10): 1222-1232.
- ZHANG Y, FENG X, HOU S, et al. Experimental study of the impact of structural joints on seismic failure mechanism of large Roller Compacted Concrete arch dam [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(10): 1222-1232. (in Chinese)
- [19] 林皋, 朱彤, 林蓓. 结构动力模型试验的相似技巧[J]. 大连理工大学学报, 2000, 40(1): 1-8.
- LIN G, ZHU T, LIN B. Similarity technique for

- dynamic structural model test [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2000, 40(1): 1-8. (in Chinese)
- [20] 刘畅, 郝玮, 孙巧珍, 等. 微粒混凝土力学性能影响因素及调整方法的试验研究[J]. 建筑科学, 2021, 37(5): 92-98.
- LIU C, HAO W, SUN Q Z, et al. Experimental study on the influencing factors and adjustment methods for the mechanical properties of microconcrete [J]. Building Science, 2021, 37(5): 92-98. (in Chinese)
- [21] 谭立立. 有纵缝的高混凝土重力坝动力模型试验研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2018.
- TAN L L. Dynamic model tests of high concrete gravity dam with longitudinal joints [D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2018. (in Chinese)
- [22] XIONG J W, LU W B, WANG G H, et al. Vertical crack identification of arch dam under underwater explosion based on mode transition [J]. Structures, 2024, 59: 105671.
- [23] WANG B S, HE Z C. Crack detection of arch dam using statistical neural network based on the reductions of natural frequencies [J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 302(4/5): 1037-1047.
- [24] LIN P, SHI J, ZHOU W Y, et al. 3D geomechanical model tests on asymmetric reinforcement and overall stability relating to the Jinping I super-high arch dam [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 102: 28-41.
- [25] 蒋昱州, 姜小兰, 王瑞红, 等. 乌东德双曲拱坝三维地质力学模型试验研究[J]. 长江科学院院报, 2014, 31(10): 139-145.
- JIANG Y Z, JIANG X L, WANG R H, et al. Geomechanical model test on global stability of wudongde double-curvature arch dam [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2014, 31(10): 139-145. (in Chinese)
- [26] 杨宝全, 熊科, 陈媛, 等. 地质力学模型试验中的变位信息监测及其在工程中的应用[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2015, 47(4): 14-21.
- YANG B Q, XIONG K, CHEN Y, et al. Deformation monitoring information of geo-mechanical model test and its application in engineering [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2015, 47(4): 14-21. (in Chinese)
- [27] 王东宇, 刘宏昭, 任慧. 改进连续隐马尔可夫模型的有杆抽油故障诊断[J]. 机械科学与技术, 2023, 42(12): 1959-1966.
- WANG D Y, LIU H Z, REN H. Fault diagnosis of sucker rod pumping system using improved continuous hidden Markov model [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2023, 42(12): 1959-1966. (in Chinese)
- [28] CHEN X D, GUO H D, HU S W, et al. Dynamic cluster zoning of arch dam deformation considering changing working conditions [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2024, 2024(1): 8813251.
- [29] 张慧娟, 齐金平, 李鸿伟, 等. 基于隐马尔科夫模型的牵引变压器油纸绝缘剩余寿命预测[J]. 绝缘材料, 2024, 57(3): 96-101.
- ZHANG H J, QI J P, LI H W, et al. Residual life prediction of oil-paper insulation for traction transformers based on hidden Markov model [J]. Insulating Materials, 2024, 57(3): 96-101. (in Chinese)
- [30] 李韵仪, 沈艳霞. 基于连续隐马尔可夫模型的变工况风机齿轮箱性能退化评估[J]. 机械设计与研究, 2021, 37(4): 106-109, 114.
- LI Y Y, SHEN Y X. Gearbox performance degradation assessment under variable operating conditions based on continuous hidden Markov model [J]. Machine Design & Research, 2021, 37(4): 106-109, 114. (in Chinese)
- [31] 杨志强, 朱家伟, 穆蕾, 等. 基于高斯混合隐马尔科夫模型的自由换道识别[J]. 计算机系统应用, 2022, 31(8): 388-394.
- YANG Z Q, ZHU J W, MU L, et al. Recognition of free lane change based on Gaussian mixture hidden Markov model [J]. Computer Systems and Applications, 2022, 31(8): 388-394. (in Chinese)
- [32] TANG W, YANG H, PI J X, et al. Network virus propagation and security situation awareness based on Hidden Markov Model [J]. Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences, 2023, 35(10): 101840.
- [33] ZHANG Y, LIU Y R, TAO Z F, et al. Fractal characteristics and failure analysis of geomechanical model for arch dam based on acoustic emission technique [J]. International Journal of Geomechanics, 2019, 19(11): 04019119.
- [34] WANG X W, LIU Y R, TAO Z F, et al. Study on the failure process and nonlinear safety of high arch dam and foundation based on geomechanical model test [J]. Engineering Failure Analysis, 2020, 116: 104704.
- [35] TAO Z F, LIU Y R, YANG Q, et al. Study on the nonlinear deformation and failure mechanism of a high arch dam and foundation based on geomechanical model test [J]. Engineering Structures, 2020, 207: 110287.
- [36] 陈建叶. 锦屏一级高拱坝坝肩稳定三维地质力学模型破坏试验研究[D]. 成都: 四川大学, 2004.
- CHEN J Y. Stability study of high arch dam abutment of Jinping I hydro-power station by three-dimensional geomechanics breakage model test [D]. Chengdu: Sichuan University, 2004. (in Chinese)
- [37] PAN X H, WANG G H, LU W B, et al. The effects of initial stresses on nonlinear dynamic response of high

- arch dams subjected to far-field underwater explosion [J]. Engineering Structures, 2022, 256: 114040.
- [38] WANG S W, GU C S, LIU Y, et al. Displacement observation data-based structural health monitoring of concrete dams: A state-of-art review [J]. Structures, 2024, 68: 107072.
- [39] 朱广平, 李萌, 王成, 等. 三次样条插值参量阵激励信号预调制算法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2025, 46(3): 513-520.
- ZHU G P, LI M, WANG C, et al. Premodulation algorithm for excitation signals of parametric array based on cubic spline [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2025, 46(3): 513-520. (in Chinese)
- [40] ABEDIN M Z, HAJEK P, SHARIF T, et al. Modelling bank customer behaviour using feature engineering and classification techniques [J]. Research in International Business and Finance, 2023, 65: 101913.
- [41] 梁诗敏. 重庆地区普通病房病人热感觉及其预测模型

研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2022.

- LIANG S M. Study on thermal sensation characteristics and prediction model of ordinary patients in Chongqing [D]. Chongqing: Chongqing University, 2022. (in Chinese)
- [42] 牛樱晓, 崔晓东, 胡海洋, 等. 基于贝叶斯信息准则的多波束海底底质非监督分类[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2023, 42(2): 22-32, 43.
- NIU Y X, CUI X D, HU H Y, et al. Unsupervised classification of multibeam seafloor sediment based on Bayesian information criterion [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2023, 42(2): 22-32, 43. (in Chinese)
- [43] WANG S G, LIU Y R, TAO Z F, et al. Geomechanical model test for failure and stability analysis of high arch dam based on acoustic emission technique [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 112: 95-107.

附录: 协方差矩阵

S_1	m_1	1.30000e-09	1.72400e-07	3.97700e-07	0.00000e+00	6.90000e-09	5.04200e-07
		1.72400e-07	5.60900e-03	1.67634e-03	0.00000e+00	2.82761e-05	2.16471e-03
		3.97700e-07	1.67634e-03	1.84665e-02	0.00000e+00	2.58063e-03	2.01457e-02
		0.00000e+00	0.00000e+00	0.00000e+00	0.00000e+00	0.00000e+00	0.00000e+00
		6.90000e-09	2.82761e-05	2.58063e-03	0.00000e+00	3.68812e-03	2.73048e-03
	m_2	5.04200e-07	2.16471e-03	2.01457e-02	0.00000e+00	2.73048e-03	2.20712e-02
		5.31793e-03	-3.76916e-04	3.96326e-03	2.43726e-03	-3.99059e-03	5.05299e-03
		-3.76916e-04	2.46958e-04	-2.12240e-04	-4.40063e-04	2.57709e-04	-2.60561e-04
		3.96326e-03	-2.12240e-04	3.19836e-03	2.24360e-03	-3.19726e-03	4.02248e-03
		2.43726e-03	-4.40063e-04	2.24360e-03	4.02192e-03	2.84794e-03	2.84794e-03
S_2	m_1	5.05299e-03	2.57709e-04	-3.19726e-03	-2.64941e-03	3.39798e-03	-4.11954e-03
		5.05299e-03	-2.60561e-04	4.02248e-03	2.84794e-03	-4.11954e-03	5.17431e-03
		4.18817e-03	-3.67179e-03	3.47159e-03	3.55578e-03	-3.61787e-03	3.57930e-03
		-3.67179e-03	3.48085e-03	-3.39749e-03	-3.07998e-03	3.44686e-03	-3.51228e-03
		3.47159e-03	-3.39749e-03	4.02617e-03	2.87325e-03	-3.66121e-03	3.85528e-03
	m_2	3.55578e-03	-3.07998e-03	2.87325e-03	3.03163e-03	-2.99670e-03	2.95345e-03
		-3.61787e-03	3.44686e-03	-3.66121e-03	-2.99670e-03	3.67480e-03	-3.75262e-03
		3.57930e-03	-3.51228e-03	3.85528e-03	2.95345e-03	-3.75262e-03	3.93742e-03
		9.98683e-03	-6.11521e-03	5.05967e-03	9.29775e-03	-5.43591e-03	5.29783e-03
		-6.11521e-03	4.09268e-03	-2.95774e-03	-5.75020e-03	3.39498e-03	-3.17106e-03
S_3	m_1	5.05967e-03	-2.95774e-03	2.94818e-03	4.69709e-03	-2.67476e-03	2.79387e-03
		9.29775e-03	-5.75020e-03	4.69709e-03	8.67115e-03	-5.04843e-03	4.92421e-03
		-5.43591e-03	3.39498e-03	-2.67476e-03	-5.04843e-03	3.16083e-03	-2.86092e-03
		5.29783e-03	-3.17106e-03	2.79387e-03	4.92421e-03	-2.86092e-03	2.88698e-03
		4.99418e-03	-1.64198e-03	7.91023e-03	6.42460e-03	-4.35819e-03	7.27311e-03
	m_2	-1.64198e-03	6.56824e-04	-2.57022e-03	-2.05602e-03	1.40139e-03	-2.35996e-03
		7.91023e-03	-2.57022e-03	1.27805e-02	1.02071e-02	-6.90705e-03	1.15747e-02
		6.42460e-03	-2.05602e-03	1.02071e-02	8.37879e-03	-5.61172e-03	9.39304e-03
		-4.35819e-03	1.40139e-03	-6.90705e-03	-5.61172e-03	3.83431e-03	-6.35135e-03
		7.27311e-03	-2.35996e-03	1.15747e-02	9.39304e-03	-6.35135e-03	1.06361e-02
S_4	m_1	8.29773e-03	-1.67547e-03	1.36868e-02	1.03500e-02	-7.82925e-03	1.17513e-02
		-1.67547e-03	4.38895e-04	-2.99358e-03	-2.31990e-03	1.40784e-03	-2.47300e-03
		1.36868e-02	-2.99358e-03	2.38733e-02	1.75695e-02	-1.25147e-02	1.99522e-02
		1.03500e-02	-2.31990e-03	1.75695e-02	1.37083e-02	-9.33318e-03	1.49211e-02
		-7.82925e-03	1.40784e-03	-1.25147e-02	-9.33318e-03	7.74812e-03	-1.08968e-02
	m_2	1.17513e-02	-2.47300e-03	1.99522e-02	1.49211e-02	-1.08968e-02	1.69571e-02
		4.89840e-03	-4.54923e-03	4.03373e-03	4.17057e-03	-7.24238e-03	3.84708e-03
		-4.54923e-03	4.37268e-03	-3.73996e-03	-3.88904e-03	6.60795e-03	-3.54253e-03
		4.03373e-03	-3.73996e-03	3.54584e-03	3.42255e-03	-6.12153e-03	3.23337e-03
		4.17057e-03	-3.88904e-03	3.42255e-03	3.55555e-03	-6.12305e-03	3.26210e-03
S_5	m_1	-7.24238e-03	6.60795e-03	-6.12153e-03	-6.12305e-03	1.11680e-02	-5.84326e-03
		3.84708e-03	-3.54253e-03	3.23337e-03	3.26210e-03	-5.84326e-03	3.09919e-03
		3.87457e-03	-4.73739e-03	3.89447e-03	3.98473e-03	-2.58864e-03	3.85817e-03
		-4.73739e-03	5.94944e-03	-4.92549e-03	-4.87159e-03	3.19986e-03	-4.82972e-03
		3.89447e-03	-4.92549e-03	4.33578e-03	4.00445e-03	-2.64207e-03	4.09762e-03
	m_2	3.98473e-03	-4.87159e-03	4.00445e-03	4.09823e-03	-2.66065e-03	3.96513e-03
		-2.58864e-03	3.19986e-03	-2.64207e-03	-2.66065e-03	1.75431e-03	-2.62141e-03
		3.85817e-03	-4.82972e-03	4.09762e-03	3.96513e-03	-2.62141e-03	4.02769e-03
		4.89840e-03	-4.54923e-03	4.03373e-03	4.17057e-03	-7.24238e-03	3.84708e-03
		-4.54923e-03	4.37268e-03	-3.73996e-03	-3.88904e-03	6.60795e-03	-3.54253e-03
S_6	m_1	4.03373e-03	-3.73996e-03	3.54584e-03	3.42255e-03	-6.12153e-03	3.23337e-03
		4.17057e-03	-3.88904e-03	3.42255e-03	3.55555e-03	-6.12305e-03	3.26210e-03
		-7.24238e-03	6.60795e-03	-6.12153e-03	-6.12305e-03	1.11680e-02	-5.84326e-03
		3.84708e-03	-3.54253e-03	3.23337e-03	3.26210e-03	-5.84326e-03	3.09919e-03
		3.87457e-03	-4.73739e-03	3.89447e-03	3.98473e-03	-2.58864e-03	3.85817e-03
	m_2	-4.73739e-03	5.94944e-03	-4.92549e-03	-4.87159e-03	3.19986e-03	-4.82972e-03
		3.89447e-03	-4.92549e-03	4.33578e-03	4.00445e-03	-2.64207e-03	4.09762e-03
		3.98473e-03	-4.87159e-03	4.00445e-03	4.09823e-03	-2.66065e-03	3.96513e-03
		-2.58864e-03	3.19986e-03	-2.64207e-03	-2.66065e-03	1.75431e-03	-2.62141e-03
		3.85817e-03	-4.82972e-03	4.09762e-03	3.96513e-03	-2.62141e-03	4.02769e-03
S_7	m_1	9.40565e-03	-8.21435e-03	5.90759e-03	5.60674e-03	-7.74436e-03	5.92606e-03
		-8.21435e-03	8.28470e-03	-5.32433e-03	-6.14838e-03	6.69666e-03	-5.26725e-03
		5.90759e-03	-5.32433e-03	3.96116e-03	3.70703e-03	-4.84526e-03	3.80478e-03
		5.60674e-03	-6.14838e-03	3.70703e-03	4.84336e-03	-4.53882e-03	3.64050e-03
		-7.74436e-03	6.69666e-03	-4.84526e-03	-4.53882e-03	6.38173e-03	-4.86864e-03
	m_2	5.92606e-03	-5.26725e-03	3.80478e-03	3.64050e-03	-4.86864e-03	3.80628e-03
		8.39807e-03	-6.32934e-03	4.53185e-03	1.22944e-02	-5.70459e-03	4.08566e-03
		-6.32934e-03	5.14565e-03	-3.32801e-03	-9.31781e-03	4.48207e-03	-3.03659e-03
		4.53185e-03	-3.32801e-03	2.65297e-03	6.61752e-03	-3.00156e-03	2.23139e-03
		1.22944e-02	-9.31781e-03	6.61752e-03	1.80406e-02	-8.31959e-03	5.97782e-03
S_8	m_1	-5.70459e-03	4.48207e-03	-3.00156e-03	-8.31959e-03	4.12298e-03	-2.73135e-03
		4.08566e-03	-3.03659e-03	2.23139e-03	5.97782e-03	-2.73135e-03	2.02698e-03
		2.83885e-03	-6.11189e-03	3.51825e-03	2.85147e-03	-2.82518e-03	3.80584e-03
		-6.11189e-03	1.32602e-02	-7.60996e-03	-6.15535e-03	6.09931e-03	-8.22511e-03
		3.51825e-03	-7.60996e-03	4.90209e-03	3.67911e-03	-3.49575e-03	4.94372e-03
	m_2	2.85147e-03	-6.15535e-03	3.67911e-03	2.94931e-03	-2.83026e-03	3.90240e-03
		-2.82518e-03	6.09931e-03	-3.49575e-03	-2.83026e-03	2.82531e-03	-3.78502e-03
		3.80584e-03	-8.22511e-03	4.94372e-03	3.90240e-03	-3.78502e-03	5.26609e-03
		1.94471e-03	-3.69619e-03	1.38928e-03	1.17301e-03	-4.18881e-03	1.70857e-03
		-3.69619e-03	7.12481e-03	-2.58292e-03	-2.15461e-03	7.74331e-03	-3.20663e-03
S_9	m_1	1.38928e-03	-2.58292e-03	1.19493e-03	8.87724e-04	-3.13700e-03	1.29864e-03
		1.17301e-03	-2.15461e-03	8.87724e-04	8.53410e-04	-2.84564e-03	1.07353e-03
		-4.18881e-03	7.74331e-03	-3.13700e-03	-2.84564e-03	9.80130e-03	-3.79548e-03
		1.70857e-03	-3.20663e-03	1.29864e-03	1.07353e-03	-3.79548e-03	1.56929e-03
		1.08216e-02	-6.42587e-03	1.46519e-02	1.22711e-02	-2.91936e-03	1.40575e-02
	m_2	-6.42587e-03	4.00590e-03	-8.73407e-03	-7.31825e-03	1.74568e-03	-8.39636e-03
		1.46519e-02	-8.73407e-03	2.13338e-02	1.65999e-02	-3.94315e-03	1.99717e-02
		1.22711e-02	-7.31825e-03	1.65999e-02	1.41185e-02	-3.38695e-03	1.58203e-02
		-2.91936e-03	1.74568e-03	-3.94315e-03	-3.38695e-03	8.23575e-04	-3.74096e-03
		1.40575e-02	-8.39636e-03	1.99717e-02	1.58203e-02	-3.74096e-03	1.92059e-02