

DOI: 10.11779/CJGE202107013

基于地震记录和 SSI 方法的高土石坝模态识别

王茂华^{1, 2}, 迟世春^{*1, 2}, 周雄雄³

(1. 大连理工大学海岸与近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024; 2. 大连理工大学建设工程学部水利工程学院工程抗震研究所, 辽宁 大连 116024; 3. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 采用实测地震记录来识别高土石坝的模态参数是进行大坝动力特性研究的一种可行的方式。根据地震中坝体监测点记录的数据构建协方差驱动的随机子空间模型(stochastic subspace identification, SSI), 通过构造多个不同维度的 Hankel 矩阵来形成稳定图, 可以很好地剔除虚假模态, 形成较清晰的稳定轴, 采用谱系聚类的筛选方法, 不仅可以有效地识别坝体的固有频率和阻尼比, 而且实现了物理模态参数的自动识别, 规避了人为选择引入的误差。通过两个数值算例验证了提出的随机子空间法应用于地震数据分析的有效性和精度, 并将其应用于糯扎渡心墙堆石坝的模态参数识别, 获得了合理的坝体固有频率和阻尼比, 表明该方法可以较好地识别出坝体的模态参数, 具有很好的工程应用, 可以为高土石坝抗震安全有限元分析提供一定的依据和参考。

关键词: 土石坝; 模态参数; 随机子空间; Hankel 矩阵; 稳定图; 谱系聚类

中图分类号: TU435 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)07-1279-09

作者简介: 王茂华(1994—), 男, 博士研究生, 主要从事高土石坝数值分析方面的研究工作。E-mail: wmhgryx1@163.com。

Modal identification of high earth-rock dams based on seismic records and SSI method

WANG Mao-hua^{1, 2}, CHI Shi-chun^{1, 2}, ZHOU Xiong-xiong³

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. Institute of Earthquake Engineering, School of Hydraulic Engineering, Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 3. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Using the measured seismic records to identify the modal parameters of high earth-rock dams is a feasible way to study the dynamic characteristics of dams. Constructing the covariance-driven stochastic subspace identification (SSI) based on the data recorded at the monitoring points of a dam during the earthquake and the stable graph by establishing multiple Hankel matrices with different dimensions can effectively eliminate false modes. The hierarchical clustering can effectively identify the natural frequency and damping ratio of the dam, and realize the automatic identification of physical modal parameters, avoiding the errors introduced by human selection. The effectiveness and accuracy of the proposed SSI method for seismic data analysis are verified by numerical examples. It is applied to the identification of modal parameters of Nuozhadu core-wall rockfill dam, and the reasonable frequency and damping ratio are obtained, indicating that the method can identify the modal parameters of the dam well and has a good engineering application, and it can provide a certain basis and reference for the finite element analysis of seismic safety of high earth-rock dams.

Key words: earth-rock dam; modal parameter; stochastic subspace identification; Hankel matrix; stabilization diagram; hierarchical clustering

0 引言

改革开放以来, 中国高土石坝筑坝技术的快速提升, 为满足不断增长的能源需求和改善能源结构的重要选择, 一大批大型水利工程已建成或者在建, 如糯扎渡、双江口、如美等 300 m 级高土石坝^[1], 但是这些高坝大多数位于中国西南地震强度和频率很高的区

域, 一旦遭受强震失事, 将会极大损害人民生命及财产安全^[2]。因此实时监测大坝的健康状况, 并基于大坝真实特性分析大坝抗震安全是水电行业高度关注的

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB0201001)

收稿日期: 2020-06-02

*通信作者(E-mail: schchi@dlut.edu.cn)

关键性问题，其中大坝抗震安全动力分析主要采用有限元法，而坝体的模态参数，包括频率、阻尼比等，以及动力模型中参数等反映坝体的动态特征^[3]，是更新大坝抗震分析有限元模型的重要参数，也是大坝在长期运行期间健康状况的评价指标。这些参数一般通过室内试验、现场试验或借鉴其他工程的参数确定，然而由于室内和现场条件的不确定性以及不同工程场地的差异，通过上述方法确定的参数和实际值往往会产生差异^[4]，因此这些参数的合理选择和识别对于抗震安全十分重要。

许多学者基于地震记录和强迫振动试验进行大坝的模态参数识别。Alves 等^[5]采用 MODE-ID 方法，基于地震数据确定了 Pacoima 拱坝的前两阶振动模式。Loh 等^[6-7]采用带外源输入的自回归（auto regressive eXogenous, ARX）模型算法，基于强迫振动数据和地震记录识别了翡翠拱坝的模态参数。Yang 等^[8]和李帅等^[9]基于地震数据采用 ARX 模型和频域法识别了二滩拱坝的模态参数。谯雯等^[10]和 Cheng 等^[3]基于地震数据，分别采用希伯特-黄变换方法和矢量自回归滑动平均模型模型对水口重力坝进行了模态参数识别。综上所述，可以看出模态参数的识别研究主要在于混凝土坝中，鲜有基于地震数据对土石坝进行模态识别。然而位于强震地区的一些土石坝也获得了大量的地震数据^[11-16]，充分利用这些地震资料进行土石坝的模态参数识别，对土石坝的抗震安全评价有很重要的意义。

目前，主要有频域分解法和时域类等方法应用于基于环境激励的模态参数识别中^[17]。其中在频域内容易造成个别频率丢失，而时域类方法具有较好的识别精度和鲁棒性强等优点，并且随着计算机技术的快速发展，时域内根据结构的振动响应进行模态识别得到了大量应用^[18-23]。高土石坝是一种规模宏大的工程结构，其自由度高，模态密集。时域内的协方差驱动的随机子空间（stochastic subspace identification, SSI）可以较好识别密集模态，其假定激励源为高斯白噪声，在桥梁和高层建筑等结构广泛应用^[18, 22-25]，本文将其应用于高土石坝模态参数识别，取得了较好计算精度。

本文基于高土石坝的地震观测数据，提出了一种基于协方差驱动的随机子空间模型和改进的稳定图，以及谱系聚类的模态参数自动识别方法。首先，通过假定坝体上各个测点的监测数据满足白噪声序列来构造随机子空间模型；然后，构建并计算多个不同维度的 Hankel 矩阵所对应的 SSI 模型来获得稳定图，这样可以较好地剔除虚假模态，并且可以获得较为清晰的稳定轴；最后，采用谱系聚类分析自动准识别出模态参数。通过两个数值算例对提出的模态识别方法进行了验证，获得了较好的结果，并将其应用于糯扎渡

心墙堆石坝模态参数识别，验证了所提出的方法在工程应用上的可靠性和有效性，可以为高土石坝抗震安全评价提供有效的动力计算依据。

1 协方差驱动的随机子空间算法

1.1 离散型随机状态空间模型

对于一个 n 维自由度系统，其离散型随机状态空间模型为

$$\left. \begin{array}{l} \mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{Ax}_k + \mathbf{w}_k, \\ \mathbf{y}_k = \mathbf{Cx}_k + \mathbf{v}_k. \end{array} \right\} \quad (1)$$

式中 $\mathbf{x}_k \in \mathbf{R}^{n \times 1}$, $\mathbf{y}_k \in \mathbf{R}^{l \times 1}$ 分别为系统离散时间的状态矢量 \mathbf{x} 和输出矢量 \mathbf{y} 在 k 时刻的值, l 为系统输出的数目; $\mathbf{A} \in \mathbf{R}^{n \times n}$, $\mathbf{C} \in \mathbf{R}^{l \times n}$ 分别为系统状态空间方程的状态矩阵和输出矩阵; $\mathbf{w}_k \in \mathbf{R}^{n \times 1}$, $\mathbf{v}_k \in \mathbf{R}^{l \times 1}$ 分别为系统建模过程噪声 \mathbf{w} 和测量噪声 \mathbf{v} 在 k 时刻的值，其亦为均值为零的白噪声。

定义输出协方差矩阵 \mathbf{R}_i :

$$\mathbf{R}_i = E[\mathbf{y}_{k+i} \cdot \mathbf{y}_k^T], \quad (2)$$

定义状态-输出协方差矩阵 \mathbf{G} :

$$\mathbf{G} = E[\mathbf{x}_{k+1} \cdot \mathbf{y}_k^T], \quad (3)$$

可证明如下关系成立:

$$\mathbf{R}_i = \mathbf{CA}^{i-1}\mathbf{G}. \quad (4)$$

式 (1) ~ (4) 详细推导见文献[19]。

1.2 求解状态矩阵及输出矩阵

定义 Hankel 矩阵 $\mathbf{Y}_p \in \mathbf{R}^{l \times j}$, $\mathbf{Y}_f \in \mathbf{R}^{l \times j}$ 为

$$\mathbf{Y}_p = \frac{1}{\sqrt{j}} \begin{bmatrix} \mathbf{y}_0 & \mathbf{y}_1 & \mathbf{y}_2 & \cdots & \mathbf{y}_{j-1} \\ \mathbf{y}_1 & \mathbf{y}_2 & \mathbf{y}_3 & \cdots & \mathbf{y}_j \\ \mathbf{y}_2 & \mathbf{y}_3 & \mathbf{y}_4 & \cdots & \mathbf{y}_{j+1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \mathbf{y}_{i-1} & \mathbf{y}_i & \mathbf{y}_{i+1} & \cdots & \mathbf{y}_{i+j-1} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\mathbf{Y}_f = \frac{1}{\sqrt{j}} \begin{bmatrix} \mathbf{y}_i & \mathbf{y}_{i+1} & \mathbf{y}_{i+2} & \cdots & \mathbf{y}_{i+j} \\ \mathbf{y}_{i+1} & \mathbf{y}_{i+2} & \mathbf{y}_{i+3} & \cdots & \mathbf{y}_{i+j+1} \\ \mathbf{y}_{i+2} & \mathbf{y}_{i+3} & \mathbf{y}_{i+4} & \cdots & \mathbf{y}_{i+j+2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \mathbf{y}_{2i-1} & \mathbf{y}_{2i} & \mathbf{y}_{2i+1} & \cdots & \mathbf{y}_{2i+j-1} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$\mathbf{Y}_{f+} = \frac{1}{\sqrt{j}} \begin{bmatrix} \mathbf{y}_{i+1} & \mathbf{y}_{i+2} & \mathbf{y}_{i+3} & \cdots & \mathbf{y}_{i+j+1} \\ \mathbf{y}_{i+2} & \mathbf{y}_{i+3} & \mathbf{y}_{i+4} & \cdots & \mathbf{y}_{i+j+2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \mathbf{y}_{2i-1} & \mathbf{y}_{2i} & \mathbf{y}_{2i+1} & \cdots & \mathbf{y}_{2i+j+1} \\ \mathbf{y}_{2i} & \mathbf{y}_{2i+1} & \mathbf{y}_{2i+2} & \cdots & \mathbf{y}_{2i+j} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

式中 i, j 分别为矩阵的行块数和列块数，理论上 $j \rightarrow \infty$; l 为通道数，在本文中为监测点的个数，假定地震激励为白噪声序列；则 \mathbf{y}_i 表示第 i 时刻各通道记录的输出信号构成的系列，即 $\mathbf{y}_i \in \mathbf{R}^{l \times 1}$ ；下标 p, f

分别表示“past”, “future”。

由(5)~(7)可得Toeplitz矩阵 $\mathbf{T}_{1|i} \in \mathbf{R}^{li \times li}$:

$$\mathbf{T}_{1|i} = \mathbf{Y}_f \mathbf{Y}_p^T, \quad (8)$$

$$\mathbf{T}_{2|i+1} = \mathbf{Y}_{f+} \mathbf{Y}_p^T. \quad (9)$$

结合式(2)中协方差矩阵的定义, 式(8)为

$$\mathbf{T}_{1|i} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_i & \mathbf{R}_{i-1} & \mathbf{R}_{i-2} & \cdots & \mathbf{R}_1 \\ \mathbf{R}_{i+1} & \mathbf{R}_i & \mathbf{R}_{i-1} & \cdots & \mathbf{R}_2 \\ \mathbf{R}_{i+2} & \mathbf{R}_{i+1} & \mathbf{R}_i & \cdots & \mathbf{R}_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{R}_{2i-1} & \mathbf{R}_{2i-2} & \mathbf{R}_{2i-3} & \cdots & \mathbf{R}_i \end{bmatrix}. \quad (10)$$

此外, 结合式(3)和(4), Toeplitz矩阵 $\mathbf{T}_{1|i}$ 可进一步改写为

$$\mathbf{T}_{1|i} = \mathbf{O}_i \mathbf{M}_i. \quad (11)$$

式中, $\mathbf{O}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{C} \\ \mathbf{C}\mathbf{A} \\ \vdots \\ \mathbf{C}\mathbf{A}^{i-1} \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{li \times n}$ 为观测矩阵, $\mathbf{M}_i = (\mathbf{A}^{i-1} \mathbf{G} \ \mathbf{A}^{i-2} \mathbf{G} \ \cdots \ \mathbf{G}) \in \mathbf{R}^{n \times la}$ 为控制矩阵。

对Toeplitz矩阵 $\mathbf{T}_{1|i}$ 进行SVD分解可得

$$\mathbf{T}_{1|i} = [\mathbf{U}_1 \ \mathbf{U}_2] \begin{bmatrix} \mathbf{S}_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{S}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_1^T \\ \mathbf{V}_2^T \end{bmatrix} \approx \mathbf{U}_1 \mathbf{S}_1 \mathbf{V}_1^T, \quad (12)$$

式中, $\mathbf{U}_1 \in \mathbf{R}^{li \times n}$, $\mathbf{V}_1 \in \mathbf{R}^{li \times n}$ 均为正交矩阵, $\mathbf{S}_1 = \text{diag}[\sigma_s]$, $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \cdots \geq \sigma_n \geq 0$ 为降序排列的 n 个主奇异值对角阵。

联立式(11), (12)可求得矩阵的估计值:

$$\left. \begin{array}{l} \mathbf{O}_i = \mathbf{U}_1 \mathbf{S}_1^{1/2}, \\ \mathbf{M}_i = \mathbf{S}_1^{1/2} \mathbf{V}_1^T. \end{array} \right\} \quad (13)$$

式中, \mathbf{O}_i 的前 l 行为输出矩阵 \mathbf{C} 。由式(9), (11)可得

$$\mathbf{T}_{2|i+1} = \mathbf{O}_i \mathbf{A} \mathbf{M}_i. \quad (14)$$

将式(13)代入式(14)可得

$$\mathbf{A} = (\mathbf{O}_i)^+ \mathbf{T}_{2|i+1} (\mathbf{M}_i)^+ = (\mathbf{S}_1^{-1/2} \mathbf{U}_1^T) \mathbf{T}_{2|i+1} (\mathbf{V}_1 \mathbf{S}_1^{-1/2}), \quad (15)$$

式中, $(\bullet)^+$ 表示伪逆运算。

1.3 求解模态参数

对离散系统状态矩阵 \mathbf{A} 进行特征值分解

$$\mathbf{A} = \boldsymbol{\phi} \boldsymbol{\Lambda} \boldsymbol{\phi}^{-1}, \quad (16)$$

式中, $\boldsymbol{\Lambda} = \text{diag}(z_s)$ ($s=1, 2, 3, \dots, n$) 为由离散时间复特征值 z_s 组成的 n 阶对角矩阵, $\boldsymbol{\phi}$ 为复特征向量组成的矢量矩阵。实际的系统是连续的, 设 λ_s 为 z_s 对应的第 s 个连续时间特征值, Δt 为采样间隔, 则有 $\lambda_s = \frac{\ln z_s}{\Delta t}$ 。

系统的固有频率和阻尼比进而可以表示为

$$\left. \begin{array}{l} f_i = \frac{|\lambda_i|}{2\pi}, \\ \xi_i = \frac{-\text{Re}(\lambda_i)}{|\omega_i|}. \end{array} \right\} \quad (17)$$

式中, Re 表示取实部。

2 模态参数的自动识别

稳定图作为一种有效剔除虚假模态的工具, 假定系统有不同的阶次, 通过计算可以得到每个阶次的模态参数, 然后对各个阶次按照提前设置的条件进行参数识别, 对于某一模态频率出现次数较多的点则为稳定点, 由稳定点进而组成稳定轴。然而, 在实际工程中, 由于有时候激励源为地震波, 此外噪声的干扰和结构的复杂性, 传统的稳定图中仍会出现虚假模态, 此外计算得到稳定极点较少时, 难以获得清晰的稳定轴, 对工程人员辨识模态参数造成干扰。

为能有效地移除虚假极点, 同时避免一些稳定极点在某一维度 Hankel 矩阵中未识别到, 造成稳定轴不清楚, 本文通过构造多组不同维度的 Hankel 矩阵(根据经验, 一般取 5~10 组就可以获得较好的结果), 将不同组辨识的结果在同一阶次进行两两对比, 来剔除不稳定的极点, 主要依据是稳定极点受构造矩阵行数影响较小, 而计算模态或虚假模态受其影响较大, 基本思路: 假设有 L 组矩阵, 在系统阶次 p 时, 首先根据第 i 组($1 \leq i \leq L$)中第 m 个极点对应的模态参数组合 $(f_{p,m}^i, \xi_{p,m}^i)$, 在第 j 组($1 \leq j \leq L$)中选定与第 i 组中所选极点的固有频率最近极点 n , 其对应的模态参数组合 $(f_{p,n}^j, \xi_{p,n}^j)$, 然后按照式(18)进行计算, 在两两计算循环结束后, 满足条件式(18)最多的点作为稳定极点予以保留。

$$\left. \begin{array}{l} \left(\frac{f_m^i - f_n^j}{\Delta f} \right)^2 + \left(\frac{\xi_m^i - \xi_n^j}{\Delta \xi} \right)^2 + \left(\frac{1 - \text{MAC}(\Phi_m^i, \Phi_n^j)}{\Delta \text{mac}} \right)^2 < 1, \\ \Delta f = \min(\delta_f \max(f_m^i, f_n^j)), \\ \Delta \xi = \min(\delta_\xi \max(\xi_m^i, \xi_n^j)). \end{array} \right\} \quad (18)$$

式中 f , ξ , Φ 分别为极点处的固有频率、阻尼比和模态振型; $\text{MAC}(\Phi_m^i, \Phi_n^j)$ 为 Φ_m^i 与 Φ_n^j 模态置信准则值; δ_f 为频率相对偏差, 取值 5%; δ_ξ 为阻尼比相对偏差, 取值 10%; Δmac 为模态置信准则值绝对偏差, 取值 2%。

借助谱系聚类的方法对挑选出的稳定极点进行自动选择, 将距离在一定范围内的数据进行聚类, 认为同一类中的数据属于同一模态, 最后选择元素个数大于一定值的类作为识别结果。

步骤(1): 假设由 SSI 方法识别得到的稳定极点总数为 N , 令 N 个样本自成一类。通过计算各极点之间的距离(相似性) d_{ij} :

$$d_{ij} = \left(\frac{f_m^i - f_n^j}{\Delta f} \right)^2 + \left(\frac{\xi_m^i - \xi_n^j}{\Delta \xi} \right)^2 + \left(\frac{1 - \text{MAC}(\Phi_m^i, \Phi_n^j)}{\Delta \text{mac}} \right)^2, \quad (19)$$

即可得到初始距离矩阵 D_0 。

步骤(2): 通过判断距离矩阵 D_0 中的各数值大小来实现相同模态的聚类, 设定距离阈值为 1, 即当 $d_{ij} \leq 1$ 时, 则认为第 F_i 和 F_j 的模态为同一类, 将其合并为新的一类 F_{ij} 。并与其余类建立新的分类。

步骤(3): 通过最短距离法得到新的距离矩阵 $D_1^{[20]}$, 然后跳转步骤(2), 重复计算并合并, 当 D_k 的最小分量超过 1, 算法停止, 此时将 N 个样本分成了 k 类。

步骤(4): 统计每一类中聚类元素的个数, 并设定聚类数目阈值 X , 若每一类中元素个数大于 X , 则判定为稳定极点, 予以保留, 并将其绘制于稳定图中。最后采用每一类中统计均值作为最终的模态参数估计值。其中, $X=N/3$, N 为系统阶数。

3 算例验证

为了讨论随机子空间法和模态参数自动识别方法的可靠性, 本文采用一个双自由度系统和一个均质堆石坝在非平稳随机激励下的动力反应进行模态参数识别两个算例。

3.1 双自由度模型

双自由度模型如图 1 所示, 利用 Newmark- β 方法求解地震情况下各质点的反应。模型参数分别为^[26]: 质量 $m_1 = 0.050 \text{ t} \cdot \text{s}^2 / \text{cm}$, $m_2 = 0.055 \text{ t} \cdot \text{s}^2 / \text{cm}$; 刚度 $k_1 = k_2 = 120 \text{ t/cm}$; 阻尼系数 $c_1 = 1.0 \text{ t} \cdot \text{s} / \text{cm}$, $c_2 = 0.6 \text{ t} \cdot \text{s} / \text{cm}$ 。根据模型参数, 通过特征值法计算系统的理论模态参数, 结构的固有频率分别为 $f_1=4.653 \text{ Hz}$, $f_2=12.458 \text{ Hz}$; 振型阻尼比 $\xi_1 = 0.107$, $\xi_2 = 0.234$ 。地面输入的非平稳激励为 EI Centro 波南北向地震动记录, 如图 2 所示。

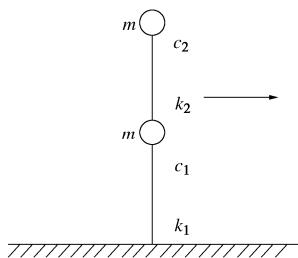


图 1 双自由度系统模型

Fig. 1 Two degrees of freedom system model

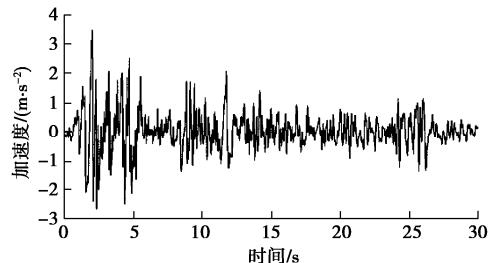


图 2 EI Centro 地震波

Fig. 2 EI Centro seismic waves

为满足协方差驱动的随机子空间法的识别需求, 模型 Hankel 矩阵的行数 $i > N/l$, 且列数 $j > 20i^{[17]}$ 。在算例中, 构造协方差的振动数据是两个质点的水平向的加速度, 因此通道数 $l=2$ 。分析时最大阶次为 100, 则 Y_p 矩阵的最小行数 i_{\min} 为 50。假定每个通道信号的总采样长度为 L , 则利用所有数据点来构造矩阵 Y_p 和 Y_{p+1} 的列数为 $j=L-2i$, 输入的非平稳激励是 EI centro 地震波前 30 s 数据, 其采用长度 $L=400 \text{ Hz} \times 30 \text{ s}=12000$, 取构造矩阵行数 $i=60$, 则 $j=11880$, 利用随机子空间识别方法, 得到传统稳定图如图 3 所示。由图 3 可以看出, 存在较多的虚假极点, 并且出现了虚假的稳定轴。采用第 2 节提出的方法对虚假极点进行剔除生成清晰的稳定图, 并自动识别模态参数, 分析时构造 5 组不同行数的 Hankel 矩阵, 矩阵的行数为 $i=50+\text{randn}(50, 5)$, 获得的稳定图如图 4 所示, 可以看出虚假极点基本被剔除, 并且相对于原始稳定图来说稳定轴更为连续, 较好地避免了稳定极点的在某一组计算时的丢失; 为了较好看出各个频率下的阻尼比关系, 并以频率和阻尼比建立簇分析图, 如图 5 所示, 稳定点被聚集到 2 个簇中; 采用参数统计均值法计算模态结果, 如表 1 所示, 可以看出识别得到的频率值和阻尼比与理论值十分接近, 说明本文方法对激励源为地震波情况下的结构进行模态参数识别具有较好的精度。

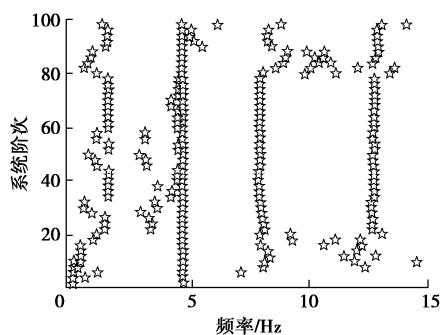


图 3 原始稳定图 ($i=60$)

Fig. 3 Original stable graph

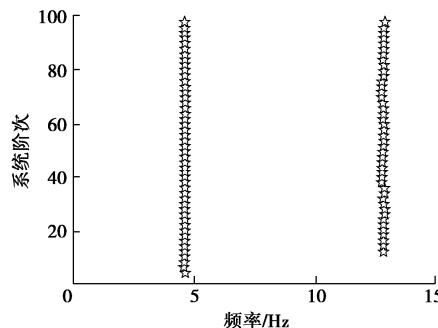


图 4 删除虚假极点后稳定图

Fig. 4 Stable graph after removing false polar modes

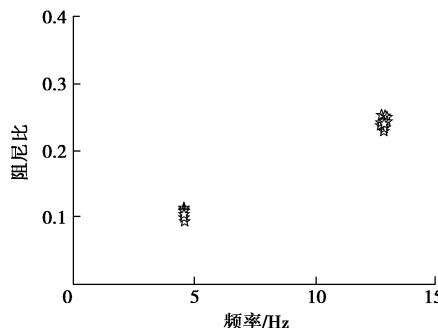


图 5 频率 - 阻尼比簇分析图

Fig. 5 Cluster analysis chart of frequency-damping ratio

表 1 双自由度模态参数识别结果

Table 1 Identified model parameters of two degrees of freedom system model

振型	频率/Hz		阻尼比	
	理论值	计算值	理论值	计算值
1 阶	4.653	4.614	0.107	0.105
2 阶	12.458	12.856	0.234	0.246

3.2 均质堆石坝模型

均质堆石坝断面有限元网格如图 6 所示, 坎高 150 m, 上下游坝坡均为 1:2。为获得动力计算需要的初始应力场, 采用邓肯-张 E-B 模型进行静力填筑计算, 模型参数^[27]: $\rho=2.2 \text{ g/cm}^3$, $\varphi_0=51.8^\circ$, $\Delta\varphi=10.4^\circ$, $K=1100$, $n=0.35$, $R_f=0.82$, $K_b=600$, $m=0.1$ 。动力计算采用等效黏弹性模型, 计算参数: $K=3000$, $n=0.5$ 。堆石料的归一化动剪应变和阻尼比与动剪应变的关系采用孔宪京等^[28]建议的平均值, 其中阻尼比在小应变 10^{-5} 时约为 0.02。有限元计算得到的大坝前四阶频率见表 2。地面输入的非平稳激励仍为 EI Centro 波南北向地震动记录, 由于堆石坝在弱震时近似线弹性变化, 因此调整峰值为 0.05 m/s^2 进行动力计算。

坝体下游坝坡按照等高设置 3 个测点, 利用 3 个测点的水平向加速度记录作为输入, 构造 Hankel 矩阵, 通道数 $I=3$, 每个通道长度为 30 s, 频率为 400 Hz, 矩阵行数 $i=100$, $j=11800$, 通过协方差驱动的随机子空间法可以获得图 7 所示的稳定图, 可以看出原始的稳定图中出现了较多的虚假极点, 采用第 2 节提出的

剔除虚假极点和谱系聚类筛选法, 分析时构造 5 组不同行数的 Hankel 矩阵, 矩阵的行数为 $i=100+\text{randn}(100, 5)$, 获得图 8 所示的稳定图, 可以看出不仅剔除了虚假极点, 还使稳定图中的稳定轴相对于原始稳定图更为清晰连续。图 9 是频率和阻尼比的簇分析图。最终的模态参数统计均值如表 2 所示。识别得到的结果和有限元计算值十分接近, 说明本文方法对激励源为地震波情况下的堆石坝进行模态参数识别也具有较好的精度。

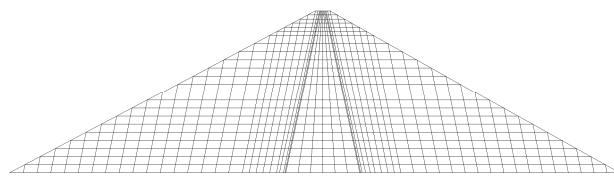


图 6 堆石坝网格图

Fig. 6 FEM mesh of rockfill dam

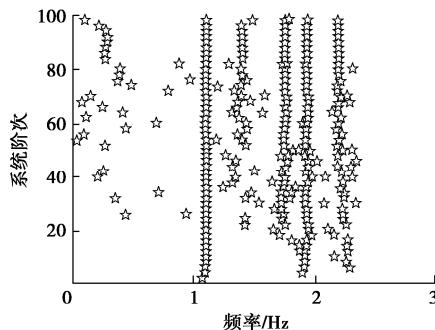
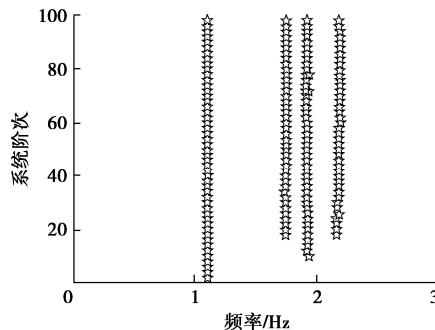
图 7 原始稳定图 ($i=100$)Fig. 7 Original stable graph ($i=100$)

图 8 删除虚假极点后稳定图

Fig. 8 Stable graph after removing false polar modes

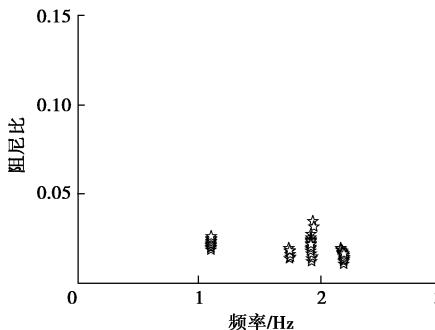


图 9 频率 - 阻尼比簇分析图

Fig. 9 Cluster analysis chart of frequency-damping ratio

表 2 均质堆石坝模态参数识别结果

Table 2 Identified model parameters of homogeneous rockfill dam

振型	频率/Hz		阻尼比	
	计算值	FEM	计算值	FEM
1 阶	1.11	1.09	0.023	0.020
2 阶	1.75	1.76	0.016	0.020
3 阶	1.93	1.96	0.022	0.020
4 阶	2.20	2.24	0.015	0.020

4 糯扎渡心墙堆石坝模态参数识别

4.1 工程概况

糯扎渡水电站位于澜沧江下游普洱市思茅区和澜沧县交界处, 坝址区位于青藏地震区的滇西南地震带, 区内地震活动比较强烈, 其地震基本烈度为Ⅶ。该工程主体挡水结构为高 261.5 m 的心墙堆石坝, 是目前国内已建成的最高的土石坝。坝顶高程 824.1 m, 坝顶长 630 m, 宽 18 m, 上游坡度比为 1.9:1, 下游坡度比为 1.8:1, 大坝水库正常蓄水位 812 m。为了监测大坝受地震情况下的影响, 根据结构物对地震的反应特征, 在大坝典型断面安置了若干个强震监测仪,

坝体典型断面及强震仪布置如图 10 所示, 在典型断面坝顶是 T2 测点, 下游坝坡 780 高程处是 T6 测点, 下游坝坡高程 701 高程处是 T7 测点, 下游坝坡高程 626 高程处是 T8 测点, 这些测点在 2014 年 10 月 7 日发生的 6.6 级景谷地震中均测到并记录了完整的加速度时程, 图 11 给出了各个测点顺河向的地震动记录。

4.2 基于 SSI 的坝体模态参数识别

选取坝体上 4 个测点的顺河向加速度记录作为输入, 构造 Hankel 矩阵, 通道数 $I=4$, 每个通道长度为 35 s, 采用频率为 400 Hz, 矩阵行数 $i=60$, $j=13880$, 通过协方差驱动的随机子空间法可以获得图 12 所示的稳定图, 可以看出原始的稳定图中出现了较多的虚假极点, 对于模态识别增加了干扰。采用第 2 节提出的剔除虚假极点和谱系聚类筛选法, 分析时构造 5 组不同行数的 Hankel 矩阵, 矩阵的行数为 $i=50+randn(50, 5)$, 获得图 13 所示的稳定图, 在 0~4 Hz 范围内, 有 4 类模态参数被识别出来。图 14 是频率和阻尼比的簇分析图, 可以清楚地看出不同阶次下频率和阻尼比的分布情况。最终的模态参数统计均值如表 3 所示。此外并和有限元分析结果对比, 分别采用相互作用模型和刚性边界有限元模型进行分析, 相互作

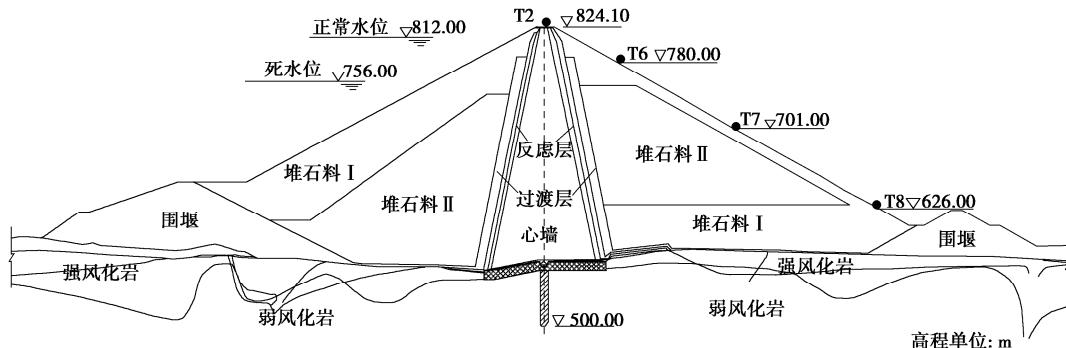


图 10 坝体典型断面及强震仪布置图

Fig. 10 Typical cross-section with material zones in Nuozhadu core-wall rockfill dam

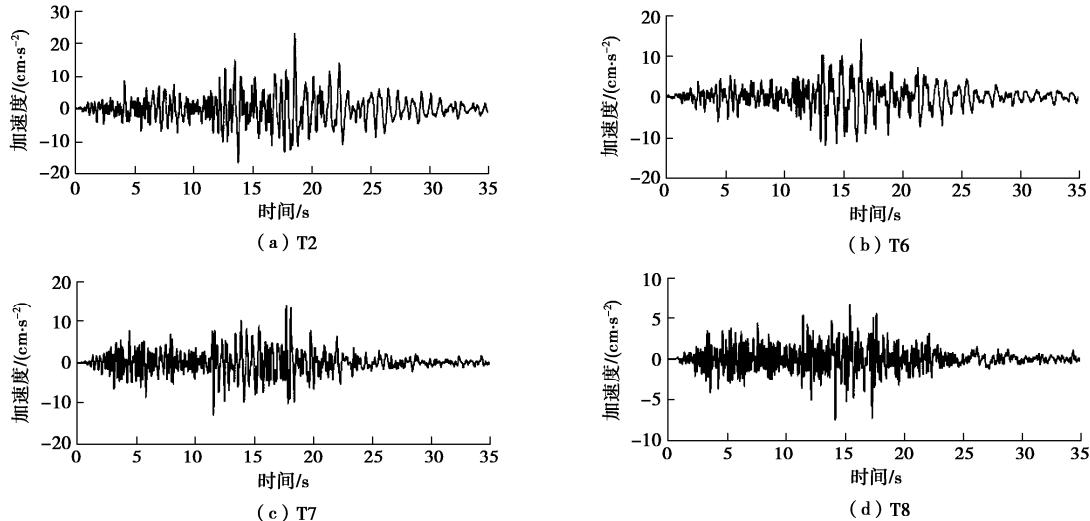


图 11 坝体 T2、T6、T7、T8 测站的顺河向加速度记录

Fig. 11 Downstream acceleration records of dam body at monitoring points T2, T6, T7 and T8

用模型如图 15 所示, 刚性边界模型为图中去除地基部分模型, 并采用文献[12]根据坝体实测响应反演得到的坝料参数, 采用“直接滤频法”求解特征方程, 得到坝体的前四阶坝体频率, 如表 3 所示。

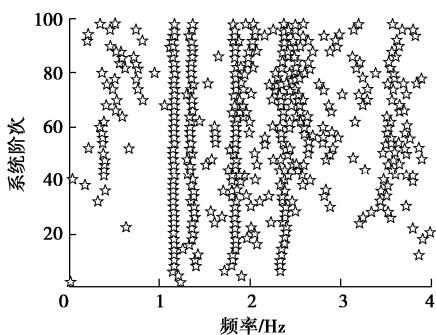


图 12 糯扎渡大坝原始稳定图

Fig. 12 Original stable graph of Nuozhadu dam

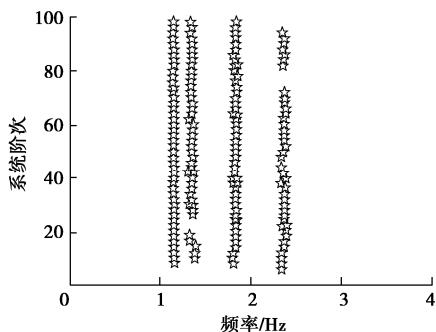


图 13 糯扎渡大坝剔除虚假极模态后稳定

Fig. 13 Stable graph after removing false polar modes

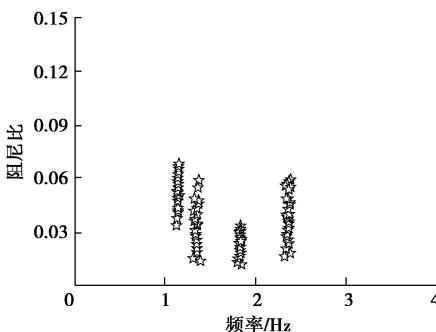


图 14 糯扎渡频率 - 阻尼比簇分析图

Fig. 14 Cluster analysis chart of frequency-damping ratio

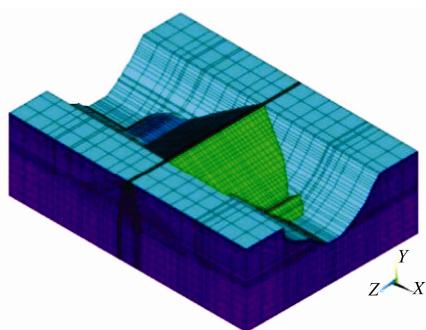


图 15 糯扎渡大坝三维有限元模型

Fig. 15 3D FEM of Nuozhadu dam

表 3 糯扎渡大坝模态参数识别结果

Table 3 Identified model parameters of Nuozhadu dam

振型	频率/Hz		阻尼比		
	计算值	FEM1	FEM2	计算值	FEM
1 阶	1.15	1.10	1.22	0.051	0.04
2 阶	1.35	1.27	1.42	0.034	0.04
3 阶	1.83	1.54	1.73	0.027	0.04
4 阶	2.37	1.74	1.96	0.043	0.04

注: FEM1 为相互作用有限元模型, FEM2 为刚性边界模型。

从表 3 中可以看出, SSI 法识别的前三阶模态频率基本上是一致的, 第四阶模态频率较大。分析产生的原因可能是在弱震情况下, 很难激发坝体的某些高阶振型, 对于土石坝这种密频结构在坝体响应中未能完整体现。进一步计算刚性边界有限元模型较高阶频率, 得到第 5 阶频率为 2.13 Hz, 第 6 阶频率为 2.30 Hz, 对比可以发现在景谷地震中未能识别出实际的第 4 和 5 阶振型。但是在土石坝进行抗震稳定性分析时, 一般比较关心的前两阶频率, SSI 方法可以较好地识别出坝体基频和第二阶频率, 可以为大坝抗震安全性评价提供一定的依据。此外有限元模拟时阻尼比计算采用的是糯扎渡大坝室内动三轴试验得到的阻尼比与动剪应变幅值之间的关系曲线, 根据试验曲线在动剪应变幅值为 10^{-5} 时堆石料阻尼比约为 0.04, 心墙料阻尼比约为 0.03^[29], 考虑到堆石料占大坝主要部分, 认为大坝在弱震情况下阻尼比为 0.04。对比识别的模态参数, 坝体前几阶的阻尼比都在 0.05 左右, 和室内试验值也较为接近, 符合坝体在弱震情况下的一般规律, 也说明景谷地震对坝体的影响不大, 处于弹性范围内。

楚金旺等^[30]通过考虑三维河谷效应对国内外 20 余座土石坝的实测基本自振周期资料进行了统计分析, 提出了大坝一阶自振周期计算公式, 根据此公式糯扎渡大坝的一阶自振频率约为 1.1 Hz。毛文娟^[31]对不同坝坡和河谷地形因素研究指出 300 级均质坝自振频率在 0.84~1.06 Hz, 由于其所采用地震工况峰值为 0.2g, 地震时坝体进入非线性使得自振频率偏小。杨玉生等^[32]对 300 m 级双江口心墙堆石坝模型试验研究指出双江口原型坝在弱震情况下一阶自振频率在 0.8~1.2 Hz。通过对以上学者研究, 本文识别得到的糯扎渡心墙堆石坝的自振频率在合理范围内, 这也说明本文提出的高土石坝模态参数识别方法是合理的。

5 结语

本文利用地震情况下坝体测点反应构建协方差驱动的随机子空间模型, 通过构造多组不同维度的 Hankel 矩阵, 不仅可以很好地剔除虚假模态, 同时也避免了稳定极点的在某一组计算时的丢失, 采用谱系聚类的筛选方法, 可以有效的识别坝体的固有频率和

阻尼比，并且实现了物理模态参数的自动获取，规避了人为选择引入的误差，保障了识别结果的稳定性。

在两个数值算例中，改进后的稳定图很好地剔除了虚假极点，也使得稳定轴较为清晰，并且获得的模态参数与模型的实际模态分析结果较为一致，说明在利用地震波的非平稳环境激励下，本文方法仍可以获得较好的模态参数识别精度。

根据景谷地震的地震监测数据，将其应用于糯扎渡心墙堆石坝的模态参数识别，较好地识别坝体的固有频率和阻尼比，可以进一步根据模态参数来识别坝体动力参数，为土石坝抗震安全评价提供一种新的方法。

随着大坝高度向 300 m 级建设，在强震情况下大坝的监测在水利工作中受到很大的关注，在本文的基础上进一步研究基于强震记录的大坝模态识别方法，可以为大坝运行期的健康监测和抗震安全分析提供基础，也具有重要的理论意义和工程应用价值。

参考文献：

- [1] 李红军, 朱凯斌, 赵剑明, 等. 基于设定地震场地相关反应谱的高土石坝抗震安全评价[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(5): 934 - 941. (LI Hong-jun, ZHU Kai-bin, ZHAO Jian-ming, et al. Safety evaluation of high rock-fill dams subjected to earthquakes based on the site-related response spectra[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(5): 934 - 941. (in Chinese))
- [2] 朱亚林, 孔宪京, 邹德高, 等. 河谷地形对高土石坝动力反应特性影响的分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(9): 1590 - 1597. (ZHU Ya-lin, KONG Xian-jing, ZOU De-gao, et al. Effect of valley topography on dynamic response properties of high earth-rockfill dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(9): 1590 - 1597. (in Chinese))
- [3] CHENG L, ZHENG D J. The identification of a dam's modal parameters under random support excitation based on the Hankel matrix joint approximate diagonalization technique[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2014, 42(1/2): 42 - 57.
- [4] 王茂华, 迟世春, 刘振平. 考虑相互作用影响的堆石料动力参数反演[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(10): 1967 - 1976. (WANG Mao-hua, CHI Shi-chun, LIU Zhen-ping. Back analysis of dynamic parameters of rock-fill materials considering interaction effects[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(10): 1967 - 1976. (in Chinese))
- [5] ALVES S W, HALL J F. System identification of a concrete arch dam and calibration of its finite element model[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2006, 35(11): 1321 - 1337.
- [6] LOH C H, WU T C. System identification of Fei-Tsui arch dam from forced vibration and seismic response data[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2000, 4(4): 511 - 537.
- [7] LOH C H, WU T S. Identification of Fei-Tsui arch dam from both ambient and seismic response data[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1996, 15(7): 465 - 483.
- [8] YANG J, JIN F, WANG J T, et al. System identification and modal analysis of an arch dam based on earthquake response records[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2017, 92: 109 - 121.
- [9] 李 帅, 潘坚文, 罗广衡, 等. 溪洛渡拱坝模态参数识别[J]. 水力发电学报, 2020, 39(3): 86 - 95. (LI Shuai, PAN Jian-wen, LUO Guang-heng, et al. Modal parameter identification for Xiluodu arch dam[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2020, 39(3): 86 - 95. (in Chinese))
- [10] 齐 雯, 罗 佩, 刘国明. 基于自然激励技术和 HHT 变换的重力坝模态分析[J]. 水力学报, 2014, 45(8): 958 - 966. (QIAO Wen, LUO Pei, LIU Guo-ming. Modal parameter identification of gravity dam based on natural excitation technique and Hilbert-Huang transform[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(8): 958 - 966. (in Chinese))
- [11] 何蕴龙, 刘俊林, 熊 垒. 汶川地震冶勒大坝动力响应规律分析[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2009, 41(3): 157 - 164. (HE Yun-long, LIU Jun-lin, XIONG Kun. Seismic response of Yele dam during Wenchuan earthquake[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2009, 41(3): 157 - 164. (in Chinese))
- [12] 孔宪京, 周 扬, 邹德高, 等. 汶川地震余震记录及紫坪铺面板堆石坝余震反应研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(5): 673 - 678. (KONG Xian-jing, ZHOU Yang, ZOU De-gao, et al. Aftershock records of Wenchuan Earthquake and seismic response of Zipingpu Concrete Face Rock-fill Dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(5): 673 - 678. (in Chinese))
- [13] 苗 君, 何蕴龙, 曹学兴, 等. 芦山地震冶勒大坝强震监测资料分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(1): 225 - 232, 256. (MIAO Jun, HE Yun-long, CAO Xue-xing, et al. Analysis of strong motion seismograph data at rockfill Yele dam during Lushan earthquake[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(1): 225 - 232, 256. (in Chinese))
- [14] 刘振平, 迟世春, 赵显波, 等. 鲤鱼潭大坝坝料动力参数反演[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(4): 761 - 768. (LIU Zhen-ping, CHI Shi-chun, ZHAO Xian-bo, et al. Back analysis of dynamic parameters of Liyutan dam materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(4): 761 - 768. (in Chinese))

- [15] 王茂华, 迟世春, 相彪, 等. 弱震情况下高土石坝坝料动力参数反演分析[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(2): 289–298. (WANG Mao-hua, CHI Shi-chun, XIANG Biao, et al. Back analysis of dynamic parameters of high earth-rock dam materials under weak earthquakes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(2): 289–298. (in Chinese))
- [16] 李平, 薄景山, 李孝波, 等. 安宁河河谷及邛海地区土层场地对地震动的放大作用[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(2): 362–369. (LI Ping, BO Jing-shan, LI Xiao-bo, et al. Amplification effect of soil sites on ground motion in Anning River valley and Qionghai Lake area[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(2): 362–369. (in Chinese))
- [17] 章国稳. 环境激励下结构模态参数自动识别与算法优化[D]. 重庆: 重庆大学, 2012. (ZHANG Guo-wen. Modal Parameter Automatic Identification for Structures Under Ambient Excitation and Algorithm Optimization[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012. (in Chinese))
- [18] REYNNDERS E, ROECK G D. Reference-based combined deterministic-stochastic subspace identification for experimental and operational modal analysis[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2008, **22**(3): 617–637.
- [19] ZHANG L M, WANG T, TAMURA Y. A frequency-spatial domain decomposition (FSDD) method for operational modal analysis[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2010, **24**(5): 1227–1239.
- [20] 张永祥, 刘心, 褚志刚, 等. 基于随机子空间法的模态参数自动提取[J]. 机械工程学报, 2018, **54**(9): 187–194. (ZHANG Yong-xiang, LIU Xin, CHU Zhi-gang, et al. Autonomous modal parameter extraction based on stochastic subspace identification[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, **54**(9): 187–194. (in Chinese))
- [21] 汤宝平, 章国稳, 陈卓. 基于谱系聚类的随机子空间模态参数自动识别[J]. 振动与冲击, 2012, **31**(10): 92–96. (TANG Bao-ping, ZHANG Guo-wen, CHEN Zhuo. Automatic stochastic subspace identification of modal parameters based on hierarchical clustering method[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, **31**(10): 92–96. (in Chinese))
- [22] MAGALHÃES F, CUNHA Á, CAETANO E. Online automatic identification of the modal parameters of a long span arch bridge[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2009, **23**(2): 316–329.
- [23] PEETERS B, DE ROECK G. Reference-based stochastic subspace identification for output-only modal analysis[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 1999, **13**(6): 855–878.
- [24] BAKIR P G. Automation of the stabilization diagrams for subspace based system identification[J]. Expert Systems with Applications, 2011, **38**(12): 14390–14397.
- [25] HONG A L, UBERTINI F, BETTI R. New stochastic subspace approach for system identification and its application to long-span bridges[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2013, **139**(6): 724–736.
- [26] 大崎顺彦. 振动理论[M]. 谢礼立, 译. 北京: 地震出版社, 1990. (AKIHIKO O. Vibration Theory[M]. XIE Li-yi, trans. Beijing: Seismological Press, 1990. (in Chinese))
- [27] 徐斌, 邹德高, 孔宪京, 等. 高土石坝坝坡地震稳定分析研究[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(1): 139–144. (XU Bin, ZOU De-gao, KONG Xian-jing, et al. Seismic stability of slopes of high rockfill dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(1): 139–144. (in Chinese))
- [28] 孔宪京, 娄树莲, 邹德高, 等. 筑坝堆石料的等效动剪切模量与等效阻尼比[J]. 水利学报, 2001, **32**(8): 20–25. (KONG Xian-jing, LOU Shu-lian, ZOU De-gao, et al. The equivalent dynamic shear modulus and equivalent damping ratio of the rockfill for dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, **32**(8): 20–25. (in Chinese))
- [29] 中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院. 200 m级以上高心墙堆石坝坝料特性及坝料设计准则研究[R]. 昆明: 中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院, 2010. (Hydro China Kunming Engineering Corporation. Study on Dam Material Characteristics and Design Criteria of Dam Materials for High Core Wall Rockfill Dam Above 200 m[R]. Kunming: Hydro China Kunming Engineering Corporation, 2010. (in Chinese))
- [30] 楚金旺, 朱晟, 黄亚梅. 基于实际震害的土石坝永久变形估算[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2017, **15**(6): 409–417. (CHU Jin-wang, ZHU Sheng, HUANG Ya-mei. Estimation of earthquake-induced permanent deformation for earth dam based on seismic damage[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2017, **15**(6): 409–417. (in Chinese))
- [31] 毛雯娟. 强震区高土石坝三维动力反应分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2008. (MAO Wen-juan. 3-D Dynamic Analysis of High Rockfill Dam in Meizoseismal Area[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008. (in Chinese))
- [32] 杨玉生, 刘小生, 刘启旺, 等. 双江口心墙堆石坝动力特性的振动台模型试验研究[J]. 水力发电学报, 2011, **30**(1): 114–119. (YANG Yu-sheng, LIU Xiao-sheng, LIU Qi-wang, et al. Shaking table model tests on dynamic characteristics of Shuangjiangkou high earth-rockfill dam[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, **30**(1): 114–119. (in Chinese))