

基于环境激励的厂房结构损伤诊断与安全评价*

张建伟¹, 李火坤², 练继建³, 杨敏³

(1. 华北水利水电学院水利学院 郑州, 450011) (2. 南昌大学建筑工程学院 南昌, 330031)

(3. 天津大学建筑工程学院 天津, 300072)

摘要 以“5.12”汶川地震震中某地下厂房上部结构为研究对象,进行基于环境激励的厂房结构损伤诊断与安全评价研究。根据现场实测的结构动位移时程,分别用随机子空间方法和系统特征实现方法对厂房结构的模态参数进行时域辨识,依据结构特定部位损伤会引起结构模态参数变化的原则,提出运用距离的概念对结构所属的健康状况进行量化评价的方法。研究结果表明,厂房上部结构基本完整,与现场取芯结果一致。研究成果对于类似大型水工结构的安全检测与评价具有一定的参考价值。

关键词 水工结构; 环境激励; 水电站地下厂房; 损伤诊断; 安全评价

中图分类号 TV312; TV32+3

引言

大型水工结构长期承受着高速水流、温度和冰冻等环境荷载的影响,甚至还会受到地震荷载的冲击,这样的工作条件会导致结构由于疲劳和腐蚀而发生开裂损伤,这些损伤又往往位于结构的水下部位,不易直接被发现。在高速水流的激振作用下,其破坏范围会迅速扩展,甚至可能导致整个结构功能的失效。由于高速水流、水流-结构相互耦合作用的复杂性,巨大的作用力所引起的泄水建筑物破坏事例屡见不鲜^[1],因此开展大型水工结构的流激振动研究非常必要,“5.12”汶川地震的发生使得开展堤坝等重大水工结构的动力灾变机理和健康检测研究显得尤为迫切和重要。

结构的内部物性损伤导致结构的响应发生改变,结构力学行为的变化可以归结为材料力学性质的衰退^[2]。国内、外学者利用模态参数的变化对结构内部损伤识别及结构的无损监测进行了研究。Box与Jenkins^[3]论述了用于模态参数辨识的时序分析方法。邹经湘等^[4]研究了ARMA模型与NARMA模型线性时变和非线性时不变结构系统。王超等^[5]提出了基于小波的非线性结构系统辨识方法,通过一个具有非线性刚度结构的数值模拟验证了该方法的

有效性。张建伟等^[6]对水工结构动力学的反问题进行了总结。

结构工作模态参数是结构运行状况的动态外在表现,模态参数的准确辨识是对高坝等大型水工结构进行在线动态无损检测和监测的前提。笔者以汶川地震震中某水电站地下厂房结构为研究对象,根据实测结构振动时程,分别用随机子空间方法(stochastic subspace identification,简称SSI)和系统特征实现方法(eigensystem realization algorithm,简称ERA)对厂房结构的模态参数进行时域辨识,并提出距离的概念对结构损伤的程度进行量化,进而判断结构的安全状况。

1 模态参数辨识理论

1.1 随机状态空间描述

对一个 N 自由度线性定常系统,结构振动的随机状态方程在线性离散空间内的表达式为

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A}\mathbf{x}_k + \mathbf{B}\mathbf{u}_k + \mathbf{w}_k \\ \mathbf{y}_k = \mathbf{C}\mathbf{x}_k + \mathbf{D}\mathbf{u}_k + \mathbf{v}_k \end{cases} \quad (1)$$

其中: k 为采样点序号; $\mathbf{x}_k \in R^{n \times 1}$ 为在 $k\Delta$ 时刻系统的状态向量; n 为两倍系统自由度数; Δ 为采样时间间隔; \mathbf{u}_k 为输入向量; \mathbf{y}_k 为输出向量; $\mathbf{A} \in R^{n \times n}$, $\mathbf{B} \in$

* 国家自然科学基金资助项目(编号:51009066,50909049);国家杰出青年科学基金资助项目(编号:50725929);河南省基础与前沿技术资助项目(编号:102300410037);郑州市科技攻关资助项目(编号:10PTGS507-6)

收稿日期:2011-05-17;修改稿收到日期:2011-06-30

$R^{n \times m}, C \in R^{m \times n}, D \in R^{m \times m}$ 分别为离散的系统矩阵、控制矩阵、输出矩阵和传递矩阵; ω_k, v_k 分别为系统不确定性的过程噪声和测量噪声。

1.2 随机子空间算法

对结构进行检测时假定有 m 个测点, 每个测点数据长度为 j 。将测点响应数据组成 $2mi \times j$ 的 Hankel 矩阵, 它包含 $2i$ 块的行和 j 列, 每块有 m 行, 根据统计序列原理, 当 j/i 足够大时, 可以认为 $j \rightarrow \infty$ 。把 Hankel 矩阵的行空间分成“过去”行空间和“将来”行空间^[7-8]

$$Y_{0|2i-1} = \frac{1}{\sqrt{j}} \begin{pmatrix} y_0 & y_1 & y_2 & \cdots & y_{j-1} \\ y_1 & y_2 & y_3 & \cdots & y_j \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{i-1} & y_i & y_{i+1} & \cdots & y_{i+j-2} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ y_i & y_{i+1} & y_{i+2} & \cdots & y_{i+j-1} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ y_{i+1} & y_{i+2} & y_{i+3} & \cdots & y_{i+j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{2i-1} & y_{2i} & y_{2i+1} & \cdots & y_{2i+j-2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_{0|i-1} \\ Y_{i|2i-1} \end{pmatrix} = \frac{Y_p}{Y_f} \quad (2)$$

其中: y_i 为第 i 时刻所有测点的响应; 下标 p 表示“过去”, 下标 f 表示“将来”; $Y_{0|i-1}$ 为 Hankel 矩阵中第 1 行的下标起始时刻为 0, 终点时刻为 $i-1$ 的所有测点组成的 Hankel 矩阵的块。

对 Hankel 矩阵进行 QR 分解数据缩减为

$$Y_{0|2i-1} = \frac{Y_p}{Y_f} = RQ^T = \begin{pmatrix} R_{11} & 0 & 0 \\ R_{21} & R_{22} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Q_1^T \\ Q_2^T \\ Q_3^T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{11} & 0 \\ R_{21} & R_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Q_1^T \\ Q_2^T \end{pmatrix} \quad (3)$$

其中: $R \in R^{2mi \times j}$ 为下三角矩阵; $Q \in R^{j \times j}$ 为正交矩阵; $R_{11}, R_{21}, R_{22} \in R^{mi \times mi}$; $Q_1^T, Q_2^T \in R^{mi \times j}$, $Q_3^T \in R^{(j-2mi) \times j}$ 。

根据投影理论, Y_f 的行空间在 Y_p 形成的行空间上的正交投影矩阵为

$$O_i = Y_f / Y_p = Y_f Y_p^T (Y_p Y_p^T)^+ Y_p \in R^{mi \times j} \quad (4)$$

其中: $(Y_p Y_p^T)^+$ 为矩阵的 Moore-Penrose 伪逆。

根据随机子空间辨识理论, 投影矩阵 O_i 可以分解为可观矩阵 Γ_i 与卡尔曼滤波状态向量 \hat{X}_i 的乘积

$$O_i = \begin{pmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^{i-1} \end{pmatrix} (\hat{x}_i \quad \hat{x}_{i+1} \quad \cdots \quad \hat{x}_{i+j-1}) = \Gamma_i \hat{X}_i \quad (5)$$

为得到可观矩阵 Γ_i 与卡尔曼滤波状态向量 \hat{X}_i , 对投影矩阵 O_i 进行奇异值分解(SVD)得到

$$O_i = USV^T = (U_1 \quad U_2) \begin{pmatrix} S_1 & 0 \\ 0 & S_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_1^T \\ V_2^T \end{pmatrix} = U_1 S_1 V_1^T \quad (6)$$

其中: $U_1 \in R^{mi \times n}$; $S_1 \in R^{n \times n}$; $S_2 = 0$; $V_1^T \in R^{n \times j}$ 。

如果系统是可观与可控的, 非零奇异值的个数即矩阵 S_1 的秩就是投影矩阵的秩。由式(5)和式(6)得到可观矩阵 Γ_i 与卡尔曼滤波状态向量 \hat{X}_i 分别为

$$\begin{cases} \Gamma_i = U_1 S_1^{\frac{1}{2}} \\ \hat{X}_i = \Gamma_i^+ O_i \end{cases} \quad (7)$$

同理, 由式(5)得到下一时刻的投影为

$$O_{i-1} = Y_{(i+1)|2(i-1)} / Y_{0|i} = \Gamma_{i-1} \hat{X}_{i+1} \in R^{m(i-1) \times j} \quad (8)$$

相应的卡尔曼滤波状态向量为

$$\hat{X}_{i+1} = \Gamma_{i-1}^+ O_{i-1} \quad (9)$$

由式(7)和式(9)得到卡尔曼滤波状态向量 \hat{X}_i 和 \hat{X}_{i+1} , 此时的状态空间方程为

$$\begin{pmatrix} \hat{X}_{i+1} \\ Y_{i|i} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A \\ C \end{pmatrix} \hat{X}_i + \begin{pmatrix} W_i \\ V_i \end{pmatrix} \quad (10)$$

其中: $Y_{i|i} \in R^{m \times j}$ 为只有一个块行的 Hankel 矩阵; W_i, V_i 为残差。

由于卡尔曼滤波状态向量和输出已知, 且残差矩阵与估计序列 \hat{X}_i 不相关, 通过最小二乘求解式(10)线性方程组得到系统矩阵 A 和输出矩阵 C

$$\begin{pmatrix} A \\ C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{X}_{i+1} \\ Y_{i|i} \end{pmatrix} \hat{X}_i^+ \quad (11)$$

对系统的状态矩阵 A 进行特征值分解

$$A = \Psi \Lambda \Psi^{-1} \quad (12)$$

其中: $\Lambda = \text{diag}(\lambda_i) \in C^{n \times n}, i = 1, 2, \dots, n$; λ_i 为离散时间的特征值; Ψ 为系统的特征向量矩阵, $\Psi \in R^{n \times n}$ 。

离散时间系统与连续时间系统的特征值关系为

$$\lambda_{ci} = \frac{\ln \lambda_i}{\Delta t} \quad (13)$$

模态特征值 $\lambda_{ci}, \lambda_{ci}^*$ 与系统固有振动圆频率 ω 、阻尼比 ξ 的关系为

$$\lambda_{ci}, \lambda_{ci}^* = -\xi_i \omega_i \pm j \omega_i \sqrt{1 - \xi_i^2} \quad (14)$$

模态振型可表示为

$$\Phi = C \Psi \quad (15)$$

由系统矩阵 A 和输出矩阵 C 可以提取出结构的模态参数。

2 工程实例

某水电站位于汶川地震震中位置,该厂房为地下厂房,埋深约200 m,厂房尺寸为87.3 m×20.0 m×39.5 m(长×宽×高)。主厂房内安装3台单机容量为45 MW的水轮发电机组,发电机组与吊装室之间用永久缝隔开,二者相互独立。厂房洞室内直墙段高为9.85 m(从发电机层888.6 m高程起算),钢筋混凝土衬砌厚为0.5 m。

2.1 振动测试与模态参数辨识

以厂房吊车的匀速运行作为结构振动测试的激励源,对其进行振动测试,厂房结构柱网布置示意图如图1所示,传感器布置示意图如图2所示。其中,传感器方向全为顺流向布置,上面一排布置于牛腿上部(奇数编号),距离吊车梁0.5 m,下面一排测点(偶数编号)距离发电机层面2 m。试验采用具有耐冲击和高稳定度的DP型地震式低频振动传感器(DSP-0.35-20-V)进行测试,共计24个通道。

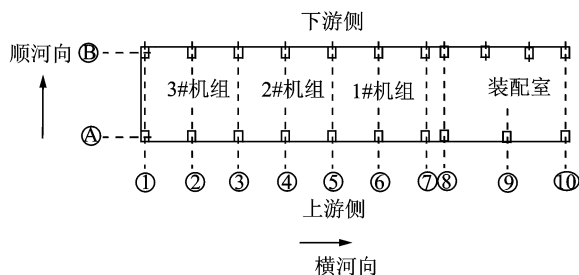


图1 地下厂房结构布置

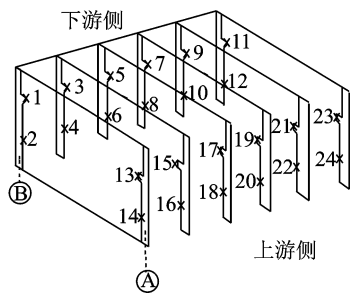


图2 测点布置

选取典型工况下的检测数据,采样频率为100 Hz,采样点数为1 024,典型测点小波消噪后的位移时程如图3所示。结构模态阶次的确定由图4所示的奇异熵增量谱可知,当奇异熵增量 $\Delta E_i \leq 0.08$,即系统阶次 $i=20$ 时,奇异熵增量就已经缓慢增长并趋于平稳,说明信号的有效特征信息量已经趋于饱和,根据

复模态理论,剔除系统的非模态项(非共轭根)和共轭项(重复项)之后,系统的模态阶次为 $[i/2]=10$ 阶,利用改进稳定图方法剔除噪声引起的虚假模态影响,辨识出结构的前6阶模态频率和阻尼比,频率稳定图如图5所示,同时与系统特征实现方法^[9]辨识结果进行对比,结果见表1。

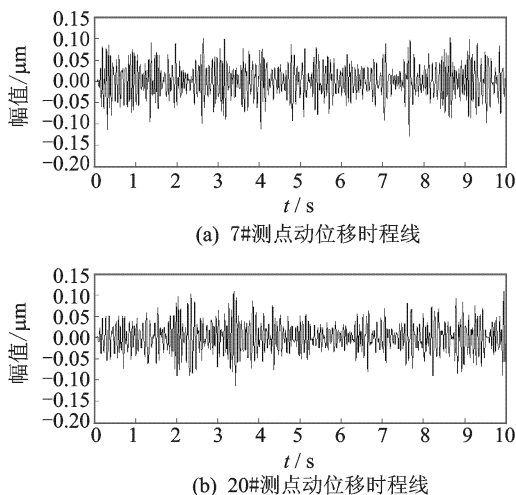


图3 典型测点动位移时程

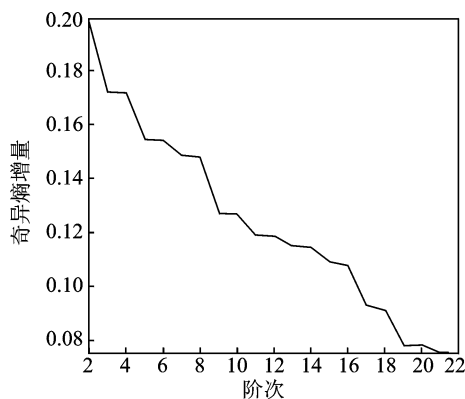


图4 奇异熵增量随奇异谱阶次变化曲线

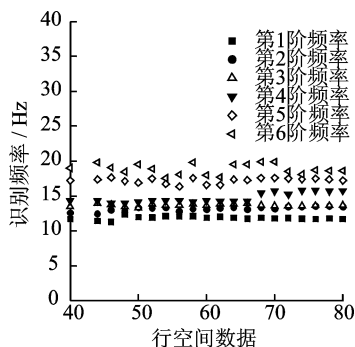


图5 频率稳定图

时域ERA法与SSI法辨识结果基本一致,只是

由于辨识方法的不同,ERA法辨识出结构的第1,3,5,6阶频率及阻尼比,SSI法辨识出结构的前6阶频率及阻尼比,两种方法具有较好的相互对比性。

表1 厂房上部结构模态参数辨识结果

| 方法 | 阶次 | f/Hz | 阻尼比/% |
|-----|----|---------------|-------|
| ERA | 1 | 11.40 | 5.86 |
| | 2 | — | — |
| | 3 | 13.42 | 4.25 |
| | 4 | — | — |
| | 5 | 16.98 | 3.01 |
| | 6 | 18.53 | 3.89 |
| SSI | 1 | 11.84 | 6.26 |
| | 2 | 13.16 | 3.54 |
| | 3 | 13.67 | 3.48 |
| | 4 | 14.72 | 3.64 |
| | 5 | 17.21 | 2.50 |
| | 6 | 18.86 | 4.21 |

2.2 厂房结构损伤评估

结构中特定部分的质量和刚度损失引起的模态参数的变化都将在模态测试中有所体现。当系统的模态测试结果与完好结构系统的模态值之间出现差异时表明结构出现了一定的损伤,可以确定损伤的位置及程度。为了确定厂房结构损伤评估样本库,笔者对厂房结构完好情况下以及不同损伤部位和损伤程度下的动力特性进行数值模拟,结合厂房结构震后的模态参数辨识结果进行综合评估。

厂房结构计算材料参数如下:混凝土材料弹性模量 $E=24\text{ GPa}$,泊松比 $\mu=0.167$,材料密度 $\rho=2\,400\text{ kg/m}^3$ 。为了全面模拟厂房上部结构,根据该厂房结构实际情况及文献[10],厂房上部结构有限元模型始于母线层,主要包括厂房构架、发电机层楼板、风罩及梁柱体系。其中,牛腿柱及风罩与厂房下部大体积混凝土结构固结。考虑厂房顶部拱顶对厂房上部结构的约束作用,厂房顶部采用垂直于墙体的法向约束。采用Ansys单元库中的Solid45单元对厂房结构进行有限元划分;吊车梁及吊车重量用质量单元Mass21来模拟,即用附加质量的方法考虑吊车梁及吊车自重对厂房上部结构自振特性的影响;屋架及屋顶由于通过钢吊顶和混凝土拱顶连接,这部分结构对牛腿柱的影响可忽略不计。整体结构模型如图6所示。

损伤工况的模拟主要考虑在厂房发电机层楼板与牛腿柱连接部位存在不同位置和不同程度的损伤,共计24种工况,限于篇幅,仅列举3种工况做以说明:

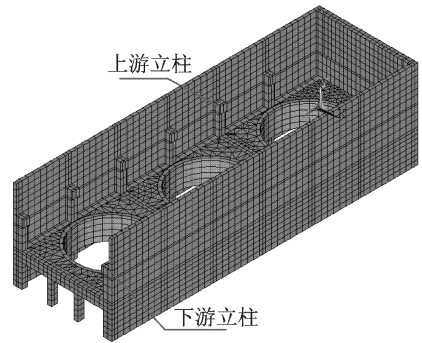


图6 厂房有限元模型

a. 损伤位于上游侧④~⑦轴线的立柱根部,裂缝发展深度为0.5 m;b. 损伤位于上游侧②~⑦轴线的立柱根部,裂缝发展深度为0.5 m;c. 损伤位于上、下游侧②~⑦轴线的立柱根部,裂缝发展深度为0.5 m。典型工况计算结果如表2所示。研究表明,随着结构损伤程度的加深,厂房结构各阶频率均逐渐减小,且低频频率变化较为明显,这与实际情况符合。

表2 典型工况计算结果

| 阶次 | 辨识结果 (括号内为 平均值) | 有限元计算 | | | Hz |
|----|------------------------|-------|-----------|-----------|-----------|
| | | 无损伤 | 损伤 工况1 | 损伤 工况2 | 损伤 工况3 |
| 1 | 11.40~11.84 (11.62) | 11.72 | 11.02 | 10.71 | 9.80 |
| 2 | 13.16 (13.16) | 13.21 | 12.83 | 12.04 | 11.02 |
| 3 | 13.42~13.67 (13.54) | 14.02 | 13.62 | 12.98 | 12.11 |
| 4 | 14.72 (14.72) | 14.69 | 14.02 | 13.66 | 12.96 |
| 5 | 16.98~17.21 (17.10) | 17.22 | 16.85 | 16.02 | 15.21 |
| 6 | 18.53~18.86 (18.69) | 18.93 | 18.13 | 17.68 | 16.54 |

辨识结果平均值与各种工况下的计算结果如图7所示,可知辨识结果位于无损伤与损伤工况1之间。应用距离的概念判断辨识结果与损伤工况的贴近程度,计算公式为

$$\text{dist} = |f(x_1) - f(x_2)| \quad (16)$$

其中: $f(x_1)$ 为参数辨识结果; $f(x_2)$ 为各种损伤工况下的计算结果。

为便于计算,将式(16)加以改进

$$\text{dist} = \sum_{i=1}^n (f(x_1) - f(x_i))^2 \quad (17)$$

其中: n 为模态阶数。

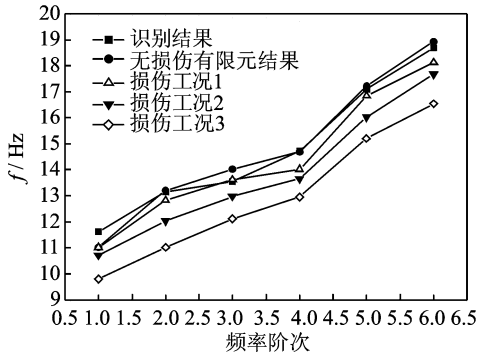


图7 辨识结果与各工况下的频率图

通过计算,辨识结果与各种损伤工况下结果之间的距离分别为:辨识结果与无损伤有限元结果之间的距离 $\text{dist}_1=0.67$;辨识结果与损伤工况1结果之间的距离 $\text{dist}_2=1.34$;辨识结果与损伤工况2结果之间的距离 $\text{dist}_3=5.71$;辨识结果与损伤工况3结果之间的距离 $\text{dist}_4=21.23$ 。

综上所述,频率辨识结果更接近于结构无损伤情况下的计算结果,可以确定厂房上部结构基本完整,整体性能良好,同时为了验证该无损检测方法的有效性,在现场同时进行了取芯实验,二者结果一致。

3 结束语

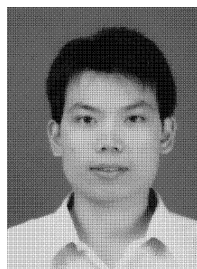
随着高水头、大流量泄水建筑物的兴建,开展基于振动测试的水工结构损伤诊断与健康监测研究对于保障泄流结构的安全运行具有现实意义。研究表明,以数据驱动为基础的随机子空间算法是当前利用环境激励进行模态参数辨识最为精确的方法之一,该方法为总体辨识,直接作用于时域数据,可以对大型水电站厂房结构进行模态参数辨识。时域ERA法与SSI法辨识结果基本一致,具有较好的相互对比性,在辨识结果的精度与可靠度方面有较好保证。提出应用距离的概念对结构物健康状况进行量化分析,判断辨识结果与损伤工况的贴近程度,通过汶川地震震中某灾后重建工程验证了本研究方法的实用性和有效性。

参 考 文 献

- [1] 练继建,杨敏.高坝泄流工程[M].北京:中国水利水电出版社,2008:89-94.
- [2] 李国强,李杰.工程结构动力检测理论与应用[M].北

京:科学出版社,2002:1-3.

- [3] Box G E P, Jenkins G M. Times series analysis, forecasting and control[M]. 2nd ed. University of Michigan; Holden-Day, 1976:1-19.
- [4] 邹经湘,于开平,杨炳渊.时变结构的参数识别方法[J].力学进展,2000,30(3):370-377.
Zou Jingxiang, Yu Kaiping, Yang Bingyuan. Methods of time-varying structural parameter identification[J]. Advances in Mechanics, 2000, 30 (3): 370-377. (in Chinese)
- [5] 王超,任伟新,黄天立.基于小波的非线性结构系统识别[J].振动与冲击,2009,28(3):10-13.
Wang Chao, Ren Weixin, Huang Tianli. System identification of a nonlinear structure based on wavelet transformation[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009,28(3):10-13. (in Chinese)
- [6] 张建伟,练继建,王海军.水工结构泄流激励动力学反问题研究进展[J].水利学报,2009,40(11):1326-1332.
Zhang Jianwei, Lian Jijian, Wang Haijun. Progress of research on backward problems of hydraulic structure dynamics induced by flow excitation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009,40(11): 1326-1332. (in Chinese)
- [7] Overschee P V, Moor B D. Subspace algorithms for the stochastic identification problem[C]//Proceedings of the 30th Conference on Decision and Control Brighton, England:[s. n.],1991:1321-1326.
- [8] Overschee P V, Moor B D. Subspace identification for linear systems: theory, implementation, applications [M]. Dordrecht, the Netherlands: Kluwer Academic Publishers,1996:57-73.
- [9] 练继建,张建伟,李火坤,等.泄洪激励下高拱坝模态参数识别研究[J].振动与冲击,2007,26(12):101-105.
Lian Jijian, Zhang Jianwei, Li Huokun, et al. Study on modal parameter identification of high arch dam under flood discharge excitation[J]. Journal of Vibration and Shock,2007,26(12):101-105. (in Chinese)
- [10] 胡志刚.大型水电站地下厂房结构振动计算研究[D].天津大学,2004.



第一作者简介:张建伟,男,1979年3月生,博士,副教授。主要研究方向为水利水电工程的研究与教学。曾发表《水工结构泄流激励动力学反问题研究进展》(《水利学报》2009年第40卷第11期)等论文。

E-mail: zjwcivil@126.com