

基于原型振动测试的泄洪闸闸墩动位移反演*

李火坤¹, 杜磊¹, 梁莹¹, 魏博文¹, 黄锦林², 司丹阳¹

(1. 南昌大学建筑工程学院 南昌, 330031) (2. 广东省水利水电科学研究院 广州, 510635)

摘要 泄洪闸闸墩振动的动位移均方差是评估其振动危害程度的控制指标之一。为获取闸墩泄洪振动的整体动位移场, 从而对泄洪闸闸墩进行全面振动危害评价, 以某水电站泄洪闸为工程实例, 针对该工程泄洪闸闸墩在宣泄洪水期间发生强烈振动导致无法正常运行的情况, 开展了闸墩泄洪振动原型测试, 并基于所观测的有限测点动位移, 提出了基于粒子群优化算法 (particle swarm optimization, 简称 POS) 的闸墩整体动位移场反演方法。结果表明, 仅利用闸墩顶部 8 个测点动位移响应就实现了该闸墩结构整体动位移场的反演, 反演值与实测值拟合度较高。所提方法可为全面评价泄洪闸闸墩在宣泄洪水期间的振动安全提供有力支撑。

关键词 泄洪闸闸墩; 粒子群优化算法; 有限测点; 反演; 动位移均方差

中图分类号 TV652; TV662; TH825

引言

泄洪闸宣泄洪水时, 高速泄洪水流极易诱发闸墩结构的振动, 当振动位移均方差值或振动响应幅值超过安全允许范围时, 将严重影响结构的运行安全, 甚至造成结构破坏。近年来, 随着我国大流量、高水头泄洪建筑物的建设, 泄洪水流导致结构振动问题频发, 引起了工程界的广泛关注。关于高速泄洪水流诱发结构振动危害评价的研究, 前苏联学者提出按建筑物高度十万分之一作为“允许振幅”, 若仅从结构安全性考虑, 可将允许振幅提高到四万分之一的结构高度。泄流结构振动安全评价的主要指标是动位移均方差和最大振幅, 其中动位移均方差表示的是结构在平衡位置上的波动程度, 是反映结构振动剧烈程度的重要指标; 最大动位移振幅表示的是结构偏离平衡位置的最大位移, 由于水流诱发泄洪闸闸墩的振动可近似为各态历经的平稳随机振动过程, 所以泄洪闸闸墩的最大振幅可以用动位移均方差进行估计。因此, 分析泄洪闸闸墩整体动位移响应的均方差对于泄洪闸振动安全评价具有重要意义。泄洪闸闸墩的振动位移响应取决于孔口两侧闸墩及底板上的水流脉动压力的共同作用^[1-3], 然而原型闸墩整体水动力荷载无法通过现场测试得到, 使得通过流激振动正分析获取闸墩整体动位移场存

在困难, 因此通过布置于闸墩上有限测点的动位移响应反演闸墩整体动位移场具有重要意义。有关流激振动反演的研究, 国内学者做了大量的研究, 文献[4-5]以流激振动正分析为基础, 建立结构振动荷载的反分析方程, 结合正分析方法可计算结构动力响应分布场, 并基于水弹性模型试验, 得到计算结果与试验测试结果相吻合, 验证了该反演方法的可行性。文献[6]提出的水工结构流激振动反分析方法可由有限测点动位移响应反演出整个结构的动位移场和动应力场, 还可以对水弹性模型模拟中不相似因素进行修正, 解决了模型与原型关系问题。文献[7]基于水流脉动荷载随机分析、流激振动的正、反分析和泄洪振动振源分析, 提出了高拱坝泄洪振动的理论分析模型, 通过测量常规水利模型的泄洪脉动荷载, 即可对拱坝泄洪振动进行初步安全评价。文献[8]提出了基于小波正交算子变换的多振源反分析方法, 通过少量测点实测动位移反演了作用于拱坝上各等效荷载时程线。文献[9]基于谱分析及遗传算法反演拱坝各流激振源等效荷载, 并结合相应的水弹性模型进行了验证。文献[10]采用改进遗传算法和有限元技术通过现场实测振动数据反演了水轮机轴向动荷载。文献[11-12]结合模态叠加法, 反分析弧形闸门和拱坝动应力, 并通过与水弹性模型试验的对比分析验证了反分析结果。

笔者以某水电站泄洪闸工程为例, 在基于原型

* 国家自然科学基金资助项目 (51879126, 51469015, 51779115, 51569014); 江西省杰出青年基金资助项目 (2018ACB21018); 广东省水利科技创新基金资助项目 (2014-08)

收稿日期: 2017-03-03; 修回日期: 2017-04-30

测试有限测点动位移响应反演闸墩整体振动位移场过程中,引入粒子群优化算法优化荷载识别结果,反演得闸墩整体动位移场,且反演值与实测值拟合度较高,对于泄洪闸闸墩原型泄洪振动安全评估具有重要参考价值。

1 泄洪闸闸墩振动响应反分析方法

1.1 泄洪闸闸墩振动响应的正分析方法

将泄洪闸闸墩水动力荷载和结构自身特性作为已知量来求解闸墩振动位移时,假设作用在闸墩结构上的水流脉动荷载是一个平稳的各态历经的高斯过程,闸墩结构体系为线弹性体且水与闸墩的动力耦合相互作用是线性的,可将闸墩结构离散成具有有限多个自由度的模型,其运动微分方程^[4-5]为

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{V}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{V}} + \mathbf{K}\mathbf{V} = \mathbf{P} \quad (1)$$

其中: \mathbf{M} 为质量矩阵,是结构质量矩阵和水附加质量矩阵之和; \mathbf{C} 为结构阻尼矩阵; \mathbf{K} 为结构刚度矩阵; $\ddot{\mathbf{V}}, \dot{\mathbf{V}}, \mathbf{V}$ 分别为加速度、速度、位移矢量; \mathbf{P} 为随机荷载分量。

采用振型叠加法求解式(1)

$$\mathbf{V} = \boldsymbol{\varphi}\boldsymbol{\delta} \quad (2)$$

其中: $\boldsymbol{\varphi}$ 为模态矩阵; $\boldsymbol{\delta}$ 为振型广义的位移向量。

原型测试表明,泄洪闸闸墩振动主要以低频振动为主,计算时只取闸墩前 q 阶低阶振型,将式(1)分解成 q 个相互独立的单自由度体系随机振动方程

$$\mathbf{M}_j\ddot{\delta}_j + \mathbf{C}_j\dot{\delta}_j + \mathbf{K}_j\delta_j = F_j(t) \quad (j=1, 2, \dots, q) \quad (3)$$

其中: $\mathbf{M}_j, \mathbf{K}_j, \mathbf{C}_j$ 分别为广义质量、广义刚度、广义阻尼。

将式(3)两边同除 \mathbf{M}_j 可得

$$\ddot{\delta}_j + 2\xi_j\omega_j\dot{\delta}_j + \omega_j^2\delta_j = F_j(t)/\mathbf{M}_j \quad (4)$$

其中: ω_j 为闸墩第 j 阶圆频率; ξ_j 为闸墩第 j 阶阻尼比; $F_j(t)$ 为闸墩第 j 阶振型所受随机激励作用分量。

$F_j(t)$ 的表达式为

$$F_j(t) = \boldsymbol{\varphi}_j^T \mathbf{P} = \sum_{i=1}^n \varphi_{ij} P_i(t) \quad (5)$$

其中: φ_{ij} 为 i 节点第 j 阶振型模态值; $P_i(t)$ 为作用于 i 节点的随机荷载分量; n 为结构节点个数。

由式(4)求解第 j 阶闸墩振型的瞬态反应解

$$\delta_j(t) = \int_0^t h_j(t-\eta) F_j(\eta) d\eta \quad (6)$$

其中: $h_j(t)$ 为单位脉冲响应函数。

$h_j(t)$ 的表达式为

$$h_j(t) = \begin{cases} \frac{1}{\mathbf{M}_j\omega_{dj}} e^{-\xi_j\omega_j t} \sin\omega_{dj}t & (t > 0) \\ 0 & (t < 0) \end{cases} \quad (7)$$

其中: $\omega_{dj} = \omega_j \sqrt{1 - \xi_j^2}$ 。

综上可知闸墩任意节点 k 的动位移时程为

$$V_k(t) = \sum_{j=1}^q \varphi_{kj} \sum_{i=1}^n \varphi_{ij} \int_0^t h_j(t-\eta) P_i(\eta) d\eta \quad (8)$$

对任意节点 k 的动位移响应的自相关函数进行傅里叶变换,可得其动位移响应的功率谱密度函数

$$S_{V_k}(\omega) = \sum_{j=1}^q \sum_{i=1}^n \varphi_{kj}^2 \varphi_{ij}^2 S_{P_{ii}}(\omega) |H_j(\omega)|^2 \quad (9)$$

$$H_j(\omega) = \frac{1}{(\omega_j^2 - \omega^2 + 2i\xi_j\omega_j\omega)\mathbf{M}_j} \quad (10)$$

其中: $S_{P_{ii}}(\omega)$ 为作用节点 i 的随机荷载功率谱; $i = \sqrt{-1}$ 。

k 点动位移均方差值为

$$\sigma_k = \sqrt{\int_0^\infty S_{V_k}(\omega) d\omega} \quad (11)$$

上述即为泄洪闸闸墩振动响应的正分析过程,在已知泄洪闸闸墩水动力荷载和结构特性的前提下,可求得结构动位移响应,该过程是本研究反演计算的基础。由于泄洪水流作用在泄洪闸闸墩上的随机水动力荷载只能通过模型试验获取,无法在原型测试中得到,因此笔者依据原型测试所得闸墩有限测点位移时程进行闸墩水动力荷载反演,然后基于反演的等效荷载谱进行正分析计算,即可得到泄洪闸闸墩整体动位移场。

1.2 泄洪闸闸墩振动响应的反分析方法

假设已知 K 个实测节点的动位移值,需求解 N 个等效荷载,将式(9)展开可得

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^q |H_j(\omega)|^2 \varphi_{kj}^2 \varphi_{1j}^2 S_{P_{11}}(\omega) + \\ \sum_{j=1}^q |H_j(\omega)|^2 \varphi_{kj}^2 \varphi_{2j}^2 S_{P_{22}}(\omega) + \dots + \\ \sum_{j=1}^q |H_j(\omega)|^2 \varphi_{kj}^2 \varphi_{Nj}^2 S_{P_{NN}}(\omega) = S_{V_k}(\omega) \end{aligned} \quad (k=1, 2, \dots, K) \quad (12)$$

可将式(12)改写成如下形式

$$\mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{B} \quad (13)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} A_{11}(\omega) & A_{12}(\omega) & \dots & A_{1N}(\omega) \\ A_{21}(\omega) & A_{22}(\omega) & \dots & A_{2N}(\omega) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ A_{K1}(\omega) & A_{K2}(\omega) & \dots & A_{KN}(\omega) \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\mathbf{x} = \begin{cases} S_{P_{11}}(\omega) \\ S_{P_{22}}(\omega) \\ \vdots \\ S_{P_{NN}}(\omega) \end{cases} \quad (15)$$

$$\mathbf{B} = \begin{cases} S_{V_1}(\omega) \\ S_{V_2}(\omega) \\ \vdots \\ S_{V_K}(\omega) \end{cases} \quad (16)$$

其中: $A_{11}(\omega) = \sum_{j=1}^q |H_j(\omega)|^2 \varphi_{1j}^2 \varphi_{1j}^2$; $A_{21}(\omega) =$

$$\sum_{j=1}^q |H_j(\omega)|^2 \varphi_{2j}^2 \varphi_{1j}^2$$
; $A_{KN}(\omega) = \sum_{j=1}^q |H_j(\omega)|^2 \varphi_{Kj}^2 \varphi_{Nj}^2$ 。

当 $K > N$ 时,即已知测点个数大于反演的荷载个数,此种情况下方程组没有严格意义的解,只能求得近似解,可通过线代中最小二乘问题求得该近似解。

实践表明,泄洪闸闸墩等效荷载可进行如下等效:如图1所示,该3个荷载相互独立, P_1 为泄洪闸下泄洪水时高速水流对泄洪闸底板的等效荷载; P_2 为下泄水流直接作用于左侧闸墩上的侧向等效荷载; P_3 为下泄水流直接作用于右侧闸墩上的侧向等效荷载。泄洪闸闸墩的振动主要是该3个等效荷载共同作用的结果。

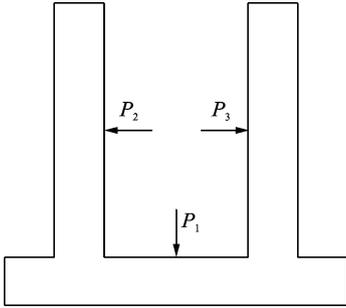


图1 泄洪闸闸墩等效激振源荷载示意图

Fig.1 Vibration source schematic diagram on flow-induced vibration of sluice pier

某泄洪闸闸墩振动位移原型测试中2#闸孔左右闸墩共布置了10个测点,本次闸墩整体动位移场反演研究选取的实测测点个数为8,大于3,即 $K > N$,对式(13)的求解可以归结为求解 $\mathbf{x}^T = \{S_{P_{11}}, S_{P_{22}}, \dots, S_{P_{NN}}\}$,即使动位移谱的计算值 $S_{V_k}(\omega)$ 与实测点的谱值 $S_{V_k}^*(\omega)$ 误差的加权平方和最小,即

$$S = \sum_{k=1}^K \theta_k (S_{V_k}(\omega) - S_{V_k}^*(\omega))^2 \rightarrow \epsilon \quad (17)$$

其中: θ_k 为各测点的权重系数,本研究取 $\theta_k = 1$ 。

根据极小值要求 $\partial S / \partial S_{P_{ii}} = 0$,可得如下方程组

$$\mathbf{A}'\mathbf{x} = \mathbf{B}' \quad (18)$$

其中: $\mathbf{A}'_{rs} = \sum_{k=1}^K \theta_k A_{kr} A_{ks}$; $\mathbf{B}'_r = \sum_{k=1}^K \theta_k A_{kr} S_{V_k}^*$; $r, s = 1, 2, \dots, N$ 。

将式(18)对圆频率 ω 遍历,可求得各等效荷载的功率谱,转入正分析过程,可得到泄洪闸闸墩整体的动位移场。基于上述闸墩振动响应反分析方法,笔者在闸墩等效荷载反演过程中引入了粒子群优化算法。

2 粒子群优化算法求解

原观测点所采集的动位移响应存在噪声的影响,使得式(18)得不到满意解。鉴于此种情况,笔者在反演荷载时,引入粒子群智能算法优化荷载识别结果。对昆虫等动物的群体性行为的研究演变而来的粒子群算法,可进行全局性的优化求解。在算法模型中,每个个体(解空间中的1个解)代表1个粒子,各粒子以其空间位置与速度向量表示,求解问题时,各粒子依据自身的当前位置、亲身所经历的最佳位置(个体最优)和整个粒子群的最佳位置(群体最优)来决定自己的飞行方向和速度,即通过向个体最优和群体最优飞行,以期粒子收敛到最优解^[13]。

数学定义:当搜索空间为 n 维时,假定群体含有 m 个粒子,即 $\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_m)^T$ 。群体中第 i 个粒子的速度和位置分别为 $\mathbf{v}_i = (v_{i,1}, v_{i,2}, \dots, v_{i,n})^T$ 和 $\mathbf{x}_i = (x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,n})^T$ 。用个体极值 $\mathbf{P}_i = (P_{i,1}, P_{i,2}, \dots, P_{i,n})^T$ 表示个体粒子当前的最佳位置(个体适应值最小点位置),全局极值 $\mathbf{P}_g = (P_{g,1}, P_{g,2}, \dots, P_{g,n})^T$ 表示种群当前的最佳位置(种群中适应值最小点位置),将每个粒子带入目标函数得到适应值,找到当前个体极值和全局极值后按式(19)和式(20)更新速度和位置,然后循环迭代直至满足终止条件得到最优解。在优化求解时,粒子根据保持自身惯性、参考自身最佳位置、参考群体最佳位置3个方面变换速度和位置

$$\mathbf{v}_{i,d}^{k+1} = \mathbf{v}_{i,d}^k + c_1 \text{rand}() (p_{i,d}^k - x_{i,d}^k) + c_2 \text{rand}() (p_{g,d}^k - x_{i,d}^k) \quad (19)$$

$$x_{i,d}^{k+1} = x_{i,d}^k + v_{i,d}^{k+1} \quad (20)$$

其中: c_1, c_2 为学习因子; $\text{rand}()$ 取(0,1)之间的随机数; $v_{i,d}^k, x_{i,d}^k$ 为粒子 i 第 k 次迭代中第 d 维的速度和位置; $P_{i,d}^k$ 为粒子 i 第 d 维的个体适应值最小点位置; $P_{g,d}^k$ 为群体第 d 维的种群适应值最小点位置。

为了提升搜索能力,在式(19)中引入惯性权重 ω ,得到如下标准粒子群算法的速度更新公式

$$v_{i,d}^{k+1} = \omega v_{i,d}^k + c_1 \text{rand}() (p_{i,d}^k - x_{i,d}^k) + c_2 \text{rand}() (p_{g,d}^k - x_{i,d}^k) \quad (21)$$

本研究采用标准粒子群算法进行闸墩整体振动位移场反演,该算法参数少,具有流程简单、易于实现、有深刻智能背景等优点,可优化荷载识别结果。

3 泄洪闸闸墩原型整体动位移场的反演实例

3.1 某泄洪闸闸墩原型振动测试

本研究以某水电站泄洪闸工程为例^[3],该泄洪闸工程位于汉江上游,为二等大(2)型水电站枢纽工程。泄洪闸设计洪水位为百年一遇,设计流量为 30 000 m³/s;校核洪水位为千年一遇,校核流量为 38 100 m³/s。泄洪闸坝段布置于水电站右侧,共 5 孔,从左至右依次为 1#~5#泄洪孔,泄洪闸孔口宽为 13 m,高为 23.8 m,堰顶高程为 193.50 m,闸室长为 54.0 m,闸墩厚为 4.5 m,其中最左侧闸墩与导墙结合设计,顶部厚度为 14 m,工程枢纽如图 2 所示。泄洪闸闸墩原型振动测试以 2# 闸孔为测试对象,传感器布置如图 3 所示。传感器型号为 DP 型地震低频振动动位移传感器,频率范围为 0.5~200 Hz,灵敏度为 5 mV/ μm ,测量垂直水流方向(y 向)动位移。采用 DASP 测试分析系统对采集数据进行处理,采样频率为 50 Hz。选取原型振动测试中 2# 闸孔左闸墩测点 H_2, H_3, H_4, H_6 及右闸墩 H_7, H_8, H_9, H_{10} 共 8 个测点在工况 10 下测得的动位移响应反演泄洪闸闸墩振动位移场,上下游水位分别为 215.86 m 和 202.34 m。



图 2 水电站枢纽工程
Fig. 2 Shuhe hydropower station

反演分析选取的 8 个测点动位移统计均方差及振动频率成分如表 1 所示,选取典型测点 H_2, H_6, H_7 和 H_{10} 时程线及功率谱如图 4~图 7 所示。由

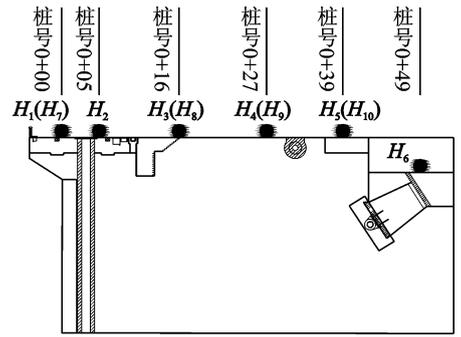


图 3 闸墩传感器布置图

Fig. 3 Sensors arrangement for sluice pier dynamic test

表 1 可知,2# 闸孔左右闸墩动位移均方差顺水流方向逐渐增大,即顺水流方向闸墩振动越来越剧烈,分析得到左右闸墩振动能量主要在 5 Hz 以内,其中左侧闸墩测点 H_3, H_4, H_6 振动能量主频为 2.43 Hz,测点 H_2 振动能量主频为 2.44 Hz,测点 H_4 和 H_6 在低频段 0~2.5 Hz 能量较大,且测点 H_6 有多峰分布情况;右侧闸墩测点 H_7, H_8, H_9 和 H_{10} 振动能量主频均为 2.44 Hz,且右侧闸墩振动频率成分相对左侧闸墩较多,如测点 H_7 振动能量在 2.44, 2.82, 4.30 和 4.76 Hz 均有分布,测点 H_9 和 H_{10} 在低频段 0~2.5 Hz 能量较大,均出现多峰分布情况。2# 闸孔闸墩下游测点在低频段 0~2.5 Hz 均出现能量较大的情况,这是由于闸墩泄洪水流紊动强烈,荷载脉动能量大所造成。

表 1 2# 闸墩测点动位移均方差及频率成分

Tab. 1 Mean square error and frequency components of 2# sluice pier measuring point

测点	均方差/ μm	第 1 阶 频率/Hz	第 2 阶 频率/Hz	第 3 阶 频率/Hz	第 4 阶 频率/Hz
H_2	15.9	2.44	—	—	—
H_3	46.1	2.43	—	—	—
H_4	65.1	2.43	—	—	—
H_6	105.4	2.43	—	—	—
H_7	10.5	2.44	2.82	4.30	4.76
H_8	29.1	2.44	2.70	—	4.76
H_9	62.4	2.44	2.70	—	—
H_{10}	89.8	2.44	2.70	—	—

3.2 泄洪闸闸墩整体动位移场的反演

3.2.1 泄洪闸模态分析有限元模型

由泄洪闸闸墩测点功率谱图可知,闸墩振动主要以低阶为主,本研究建立的某泄洪闸三维有限元模型如图 8 所示。在式(4)~式(10)的计算过程中,通过对有限元模型进行模态分析,提取泄洪闸闸墩前 10 阶模态作为计算模态获取自振频率 ω_j 、模态振型 ϕ_j 、刚度矩阵 K_j 及质量矩阵 M_j 。泄洪闸有限

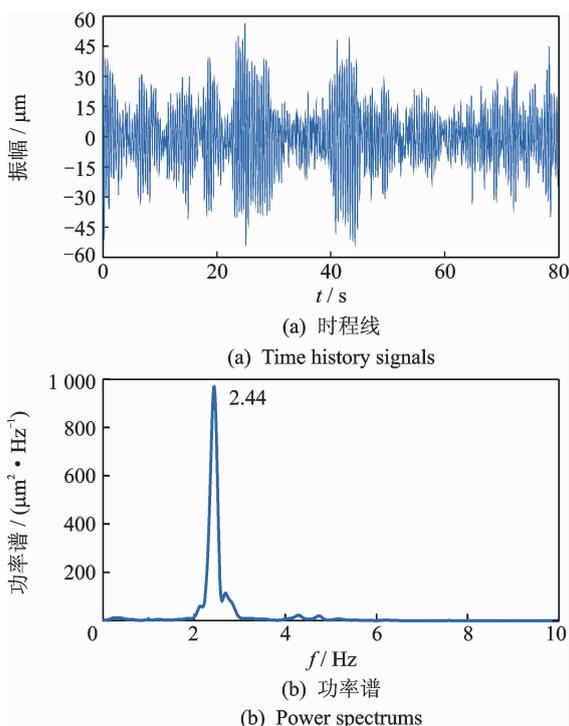


图 4 H_2 测点实测信号

Fig. 4 Measured signals of H_2 displacement

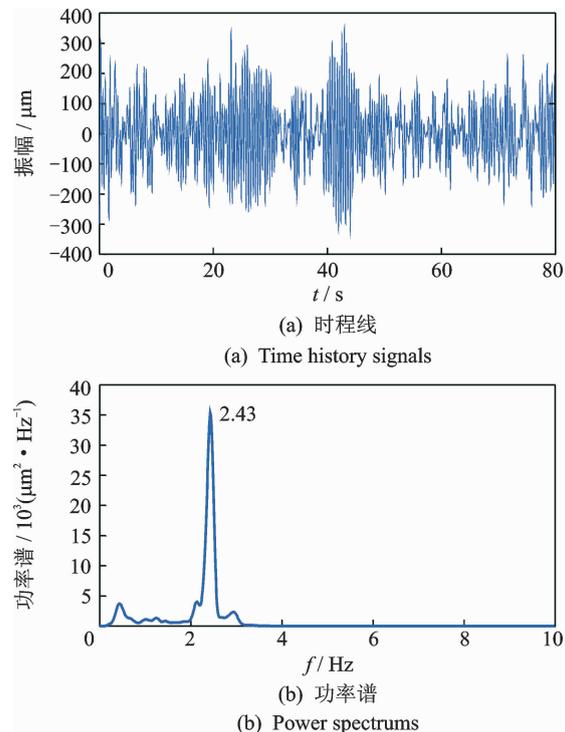


图 5 H_6 测点实测信号

Fig. 5 Measured signals of H_6 displacement

元模型材料参数如表 2 所示,地基模拟范围如下:深度为 50 m,上下游长度为 50 m,宽度为 33 m;闸门处设置有门机轨道梁,梁与闸墩之间为摩擦接触,摩擦因数为 0.3。水体和闸墩之间的流固耦合作用通过附加质量 M_w 实现,采用修正 Westergaard 公式进行计算

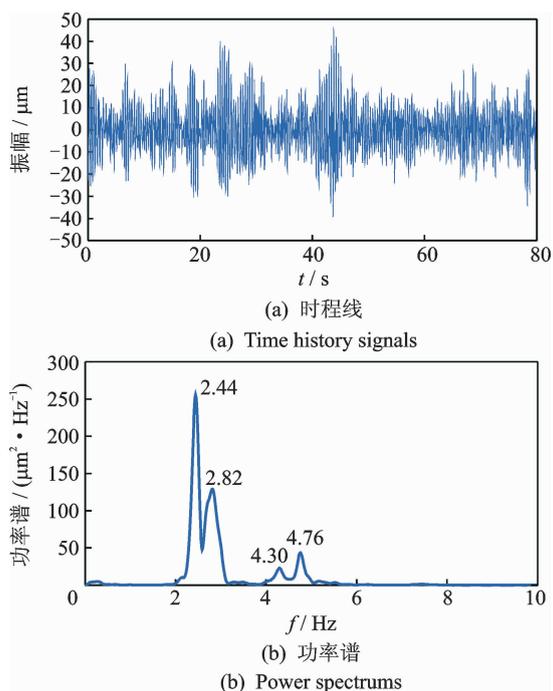


图 6 H_7 测点实测信号

Fig. 6 Measured signals of H_7 displacement

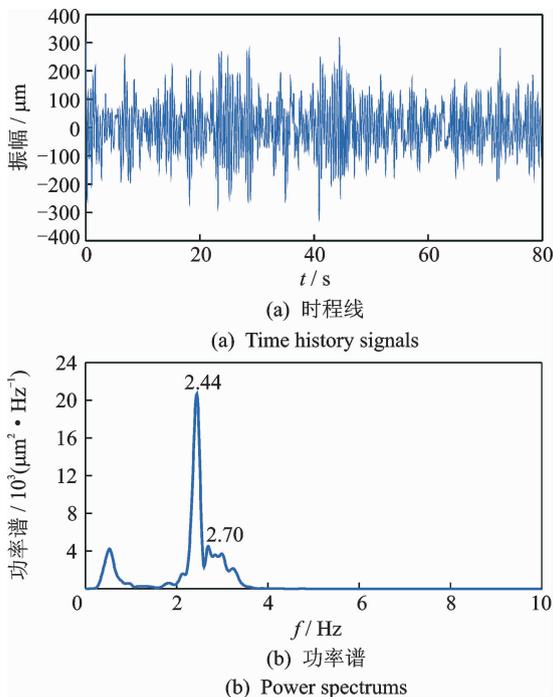


图 7 H_{10} 测点实测信号

Fig. 7 Measured signals of H_{10} displacement

表 2 泄洪闸有限元模型材料参数

Tab. 2 The material parameter of shuhe sluice pier finite element model

参数	重度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/GPa	泊松比
底板	24.50	28.0	0.167
门机轨道梁	24.50	32.5	0.167
牛腿	24.50	32.5	0.167
闸墩	24.50	30.0	0.167
地基	27.90	2.0	0.310

$$M_w = 0.5\rho_0\sqrt{h_0l} \quad (22)$$

其中: ρ_0 为水的密度; h_0 为水的深度; l 为计算点到水面的距离。

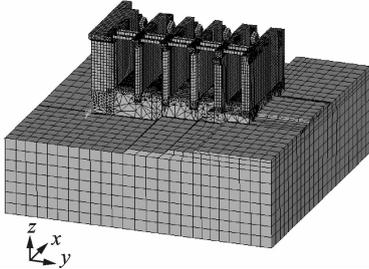
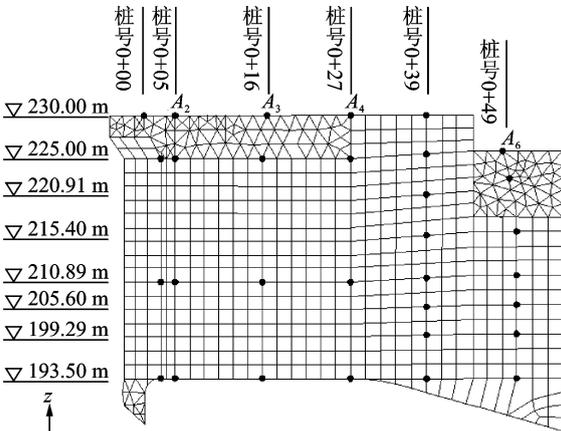


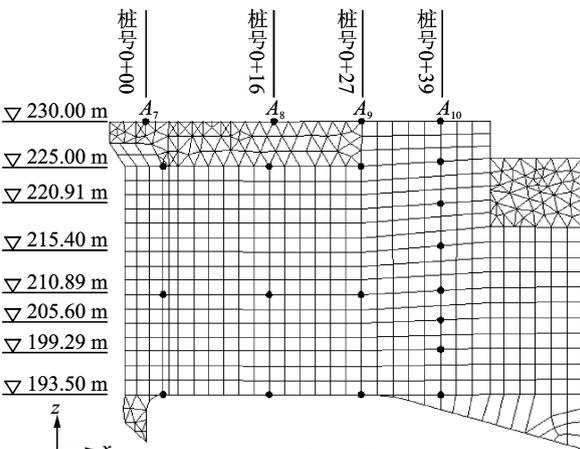
图 8 蜀河泄洪闸有限元模型

Fig. 8 The finite element model of Shuhe sluice pier

基于选取的原型观测 8 个测点动位移响应及模态分析提取的结构特性信息反演泄洪闸闸墩整体振动响应,为了便于分析闸墩整体动位移场分布特性及比较动位移反演误差,笔者提取了 2# 闸孔左右闸墩共 51 个节点垂直水流方向 (y 方向) 动位移。节点选取如图 9 所示,其中左闸墩 31 个节点,节点



(a) 2# 闸孔左闸墩
(a) 2# sluice hole left pier



(b) 2# 闸孔右闸墩
(b) 2# sluice hole right pier

图 9 闸墩有限元网格及动位移节点

Fig. 9 The finite element mesh and dynamic displacement nodes of sluice pier

A_2, A_3, A_4, A_6 对应原型测试测点 H_2, H_3, H_4, H_6 ; 右闸墩 20 个节点,节点 A_7, A_8, A_9, A_{10} 对应原型测试 H_7, H_8, H_9, H_{10} 测点。

泄洪闸闸墩动位移场反演流程如图 10 所示。

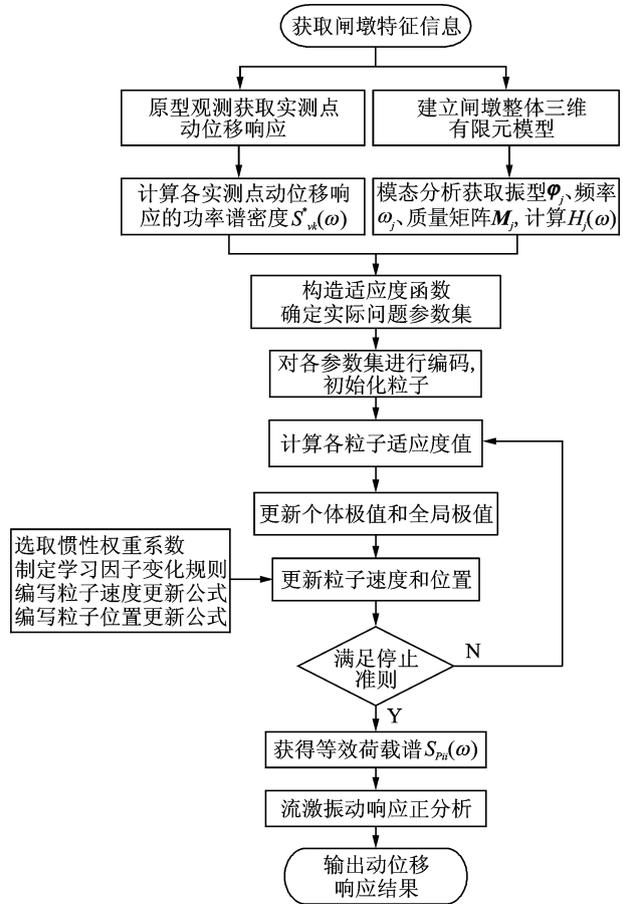


图 10 泄洪闸闸墩动位移场反演流程图

Fig. 10 The flowchart of the back analysis algorithm for sluice pier dynamic displacement field

3.2.2 反演结果分析

按图 10 泄洪闸闸墩动位移场反演流程图进行反演。提取 2# 闸孔左右闸墩节点动位移均方差值,将节点 $A_2, A_3, A_4, A_6, A_7, A_8, A_9$ 和 A_{10} 动位移均方差反演值与实测点 $H_2, H_3, H_4, H_6, H_7, H_8, H_9$ 和 H_{10} 的实测值进行对比分析,如图 11 所示。

反演结果表明:左右闸墩动位移均方差反演值与实测值变化趋势一致且拟合度较高,2# 闸孔原型测试中左闸墩测点实测动位移均方差最大值位于 6 号测点,为 $105.4 \mu\text{m}$,反演值为 $106.7 \mu\text{m}$,误差为 1.23%;右闸墩测点实测动位移均方差最大值位于 10 号测点,为 $89.8 \mu\text{m}$,反演值为 $91.4 \mu\text{m}$,误差为 1.78%,验证了反演结果的准确性。

由于闸墩下游部位振动剧烈,笔者选取左闸墩桩号 0+39,0+49 及右闸墩桩号 0+49 铅垂方向节

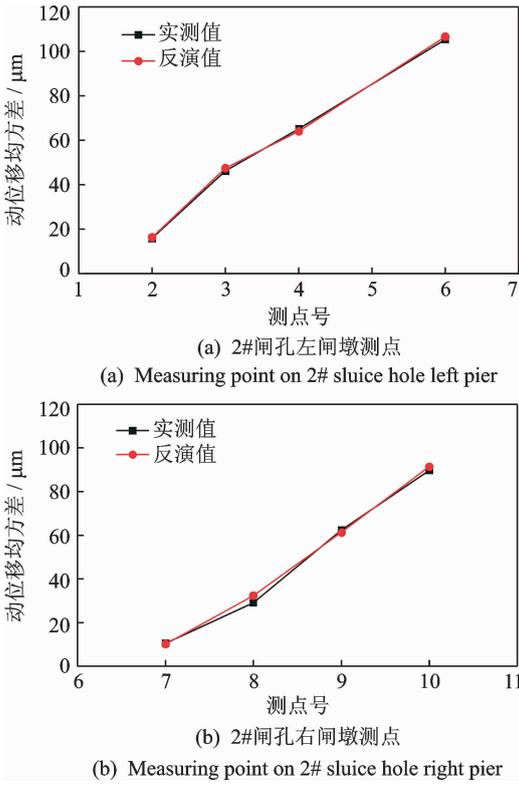


图 11 反演值与实测值比较

Fig. 11 Comparison of the inversion results and measured results

点动位移均方差反演值分析闸墩动位移随高程的变化规律,如图 12 所示。同一铅垂方向节点动位移均方差随高程的增加而增加,该变化规律与实际情况的变化规律相一致。为了分析 2# 闸孔左右闸墩整体振动特性,选取左右闸墩 4 个典型高程(230, 225, 210.89 和 193.50 m)处节点的动位移均方差反演值进行分析,其变化规律如图 13 所示。闸墩同一高程节点动位移均方差顺水流方向逐渐增大,与实测动位移均方差分布特性一致,各高程节点动位移均方差均在下游位置达到最大值。综上分析可知,泄洪闸闸墩振动最大动位移位于闸墩下游顶部位置。

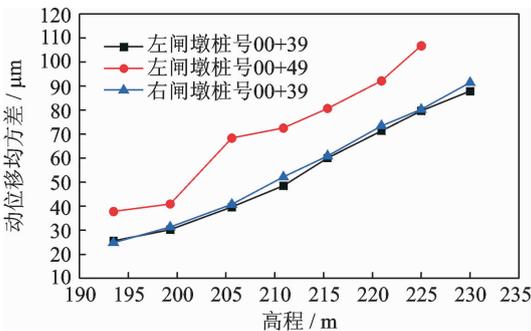


图 12 闸墩同铅垂线节点动位移均方差分布

Fig. 12 Mean square error distribution on the same vertical of sluice pier

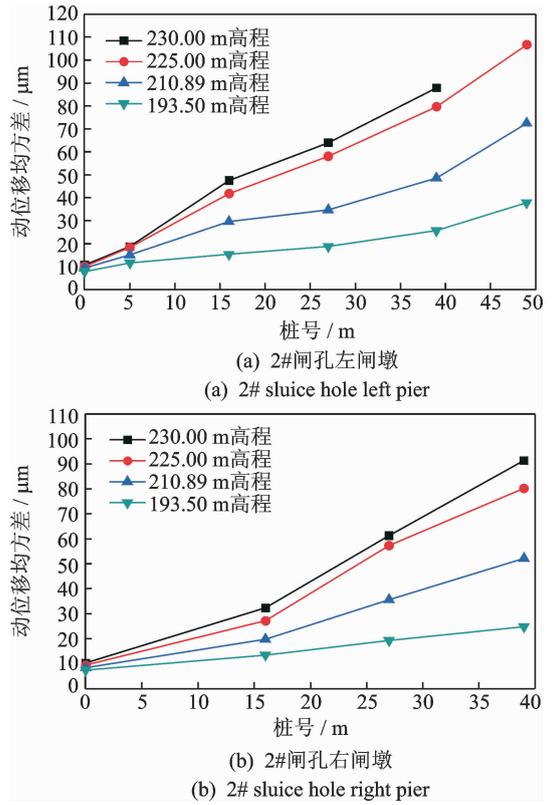


图 13 闸墩同高程节点动位移均方差分布

Fig. 13 Mean square error distribution on the same elevation of sluice pier

4 结束语

泄洪闸闸墩流激振动中,闸墩振动物位均方差反应了结构振动剧烈程度,是泄洪闸闸墩泄洪振动安全评估的重要控制指标之一。笔者以某水电站泄洪闸工程为例,选取原型振动测试中 8 个测点动位移响应,结合泄洪闸闸墩有限元模型,基于粒子群优化算法反演泄洪闸 2# 闸孔左右闸墩整体动位移场,反演值与实测值变化趋势一致且拟合度较高。分析 2# 闸孔左右闸墩整体动位移均方差分布特性得知,闸墩最大动位移位于闸墩下游顶部位置。上述结果表明,基于原型测试有限测点动位移响应可反演得到闸墩结构整体动位移场,对于泄洪闸闸墩泄洪振动安全评估具有重要参考价值。除动位移均方差外,泄洪闸闸墩动应力也是闸墩振动安全评估的控制指标之一,该方面的研究将在后续进一步深入。

参 考 文 献

[1] 练继建,崔广涛,黄锦林. 导墙结构的流激振动研究[J]. 水利学报, 1998(11):33-37.
Lian Jijian, Cui Guangtao, Huang Jinlin. Study on

- flow induced vibration of spillway guide wall[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998(11):33-37. (in Chinese)
- [2] 练继建, 杨敏. 高坝泄流工程[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2008:207-214.
- [3] 李火坤, 杨敏, 陈林, 等. 泄洪闸闸墩原型振动测试、预测与安全评价[J]. 振动、测试与诊断, 2014, 34(5):938-946.
Li Huokun, Yang Min, Chen Lin, et al. Operational safety evaluation of sluice pier[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2014, 34(5):938-946. (in Chinese)
- [4] 李火坤, 邓冰梅, 魏博文, 等. 基于有限测点的高拱坝原型整体动位移场反演研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(10):1-8.
Li Huokun, Deng Bingmei, Wei Bowen, et al. Inversion of the whole dynamic displacement field of a prototype high arch dam based on limited points measurement[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(10):1-8. (in Chinese)
- [5] 苑希民, 何玉敖, 崔广涛. 结构动力的反分析方法研究[J]. 工程力学, 1996(S):321-325.
Yuan Ximin, He Yuao, Cui Guangtao. Study on structural dynamic back analysis method[J]. Engineering Mechanics, 1996(S):321-325. (in Chinese)
- [6] 练继建, 崔广涛, 董淑芳. 水工结构流激振动响应的反分析[J]. 水利水电技术, 1998, 29(8):51-54.
Lian Jijian, Cui Guangtao, Dong Shufang. Flow-induced vibration back analysis for hydraulic structure[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1998, 29(8):51-54. (in Chinese)
- [7] 练继建, 崔广涛, 林继镛. 高拱坝泄洪振动的计算分析与验证[J]. 水利学报, 1999(12):23-32.
Lian Jijian, Cui Guangtao, Lin Jiyong. Analysis on flow-induced vibration of over flow high arch dam and its verification[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999(12):23-32. (in Chinese)
- [8] 张建伟, 崔广涛, 马斌, 等. 基于泄流响应的高拱坝振源时域识别[J]. 天津大学学报, 2008, 41(9):1124-1129.
Zhang Jianwei, Cui Guangtao, Ma Bin, et al. Time domain identification of excitation source for high arc dam based on discharge flow vibration response [J]. Journal of Tianjin University, 2008, 41(9):1124-1129. (in Chinese)
- [9] 练继建, 马斌, 李福田. 高坝流激振动响应的反分析方法[J]. 水利学报, 2007, 38(5):575-581.
Lian Jijian, Ma Bin, Li Futian. Back analysis algorithm for response of flow-induced vibration in overflow high dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(5):575-581. (in Chinese)
- [10] 王海军, 练继建, 杨敏, 等. 混流式水轮机轴向动荷载识别[J]. 振动与冲击, 2007, 26(4):123-125.
Wang Haijun, Lian Jijian, Yang Min, et al. Identification of axial dynamic load of a francis turbine [J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26(4):123-125. (in Chinese)
- [11] 彭新民, 尚宪锋, 杨敏. 基于模态叠加法的弧形闸门流激振动反分析[J]. 中国农村水利水电, 2008(1):72-74.
Peng Xinmin, Shang Xianfeng, Yang Min. Application of mode superposition method in flow-induced vibration counter analysis of arch gate[J]. China Rural Water and Hydropower, 2008(1):72-74. (in Chinese)
- [12] 王富强, 彭新民. 反分析理论在测试结构动应力中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2008(8):98-103.
Wang Fuqiang, Peng Xinmin. The application of back analysis theory to the testing dynamic stress of a structure[J]. China Rural Water and Hydropower, 2008(8):98-103. (in Chinese)
- [13] 黄平. 粒子群算法改进及其在电力系统的应用[D]. 广州:华南理工大学, 2012.



第一作者简介:李火坤,男,1981年4月生,博士、教授。主要研究方向为泄流结构动力检测与安全评估。曾发表《泄洪闸闸墩原型振动测试、预测与安全评价》(《振动、测试与诊断》2014年第34卷第5期)等论文。

E-mail: lihuokun@126.com

通信作者简介:魏博文,男,1981年10月生,博士、副教授。主要研究方向为水工建筑物安全监控与健康诊断。

E-mail: bwwei@ncu.edu.cn

