

DOI: 10.11779/CJGE201910023

# 考虑相互作用影响的堆石料动力参数反演

王茂华<sup>1, 2</sup>, 迟世春<sup>\*1, 2</sup>, 刘振平<sup>3</sup>

(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. 黑龙江工程学院土木与建筑工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150050)

**摘要:** 通过黏弹性人工边界及相关的等效结点力法实现了半无限域的地震动输入, 采用多种群遗传算法和径向基神经网络构建参数反演平台, 建立了考虑坝基相互作用及辐射阻尼影响的土石坝动力参数反演分析模型。多种群遗传算法优化得到坝体堆石料动力参数, 可有效避免传统遗传算法的早熟问题; 经过训练的径向基神经网络描述模型参数和加速度反应谱值之间的映射关系, 节省参数反演的计算时间。对鲤鱼潭大坝动力参数的反演结果表明, 测点加速度与实测值吻合较好。考虑相互作用的反演得到堆石料最大动剪模量系数  $C$  值最大, 刚性地基模型反演结果居中, 室内动三轴试验值最小, 工程应用时室内试验值应予以修正。

**关键词:** 相互作用; 动力参数; 反演; 黏弹性边界; 多种群遗传算法; 径向基神经网络

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)10-1967-10

**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工作。E-mail: wmhgryx1@163.com。

## Back analysis of dynamic parameters of rock-fill materials considering interaction effects

WANG Mao-hua<sup>1, 2</sup>, CHI Shi-chun<sup>\*1, 2</sup>, LIU Zhen-ping<sup>3</sup>

(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. School of Civil and Architecture Engineering, Heilongjiang Institute of Technology, Harbin 150050, China)

**Abstract:** A back analysis model considering interaction and radiation damping effects is proposed for dynamic parameters of earth-rock dams. In the model, the viscous-elastic artificial boundary combined with the equivalent node force method of ground motion input is used for achieving the wave motion input of semi-infinite site, and the multiple population genetic algorithm (MPGA) and the radial basis function neural network (RBF) are adopted. Using MPGA to optimize the dynamic parameters of the dam can effectively avoid the prematurity of the traditional genetic algorithm. The trained RBF is used to describe the mapping relationship between the model parameters and the response spectra of acceleration so as to reduce the computing time of parametric inversion. The inversion results of Liyutan dam in China show that the calculated settlements agree well with the measured data. The proposed model is feasible in back-analysis of dynamic parameters of earth-rock dams. The study shows that the dynamic shear modulus coefficient of the dam materials obtained from the rigid foundation model inversion and the indoor dynamic triaxial tests is small. The value of the indoor tests is much smaller and should be revised.

**Key words:** interaction; dynamic parameter; back analysis; viscous-elastic boundary; MPGA; RBF

## 0 引言

选用合理的堆石料动力模型计算参数, 对堆石坝的抗震稳定性能分析具有重要意义。堆石料的动力参数一般通过室内动三轴试验或现场波速测试等方法确定, 然而受室内试验条件、缩尺效应、测试方法等因素的影响, 其测定的堆石料动力模型参数有时并不能反映客观实际; 因此有必要利用有限的几次地震时坝体监测点的加速度观测值, 反演大坝堆石料的动力参数, 这样得到的模型参数更符合实际, 并为评价大坝

抗震安全性提供支撑。

岩土工程中, 常采用遗传算法<sup>[1-2]</sup>、蚁群算法<sup>[3-4]</sup>、粒子群算法<sup>[5-6]</sup>等具有全局智能优化特点的算法用于土体参数反演, 并取得了一定的成果。但以往的研究中, 土石坝堆石料参数反演分析主要是针对静力模型参数<sup>[1-9]</sup>, 堆石料动力模型参数反演方面研究成果较

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51379029)

收稿日期: 2018-06-08

\*通讯作者: (E-mail: schchi@dlut.edu.cn)

少。朱晟等<sup>[10]</sup>、汪旭等<sup>[11]</sup>利用汶川地震中的实测资料反演了紫坪铺面板堆石坝坝料的永久变形模型参数；刘振平等<sup>[12]</sup>利用鲤鱼潭大坝在集集地震中坝体测点地震动记录反演了大坝的最大动剪切模量参数；田强<sup>[13]</sup>采用正演分析得到的加速度时程，对理想堆石坝进行反演分析，得到了坝料的最大动剪切模量指数、系数。上述反演分析时采用的都是刚性边界模型，也就是坝体坐落于基岩处，地震波直接从基岩输入进行反演分析，没有考虑坝基相互作用以及地基辐射阻尼对坝体地震动响应的影响，因此其反演计算仍有待改善。

近年来，高土石坝的建设快速发展，坝体尺寸和跨度的也随之增大，尤其是 300 m 级高坝，坝体跨度可达 1000 m，基本接近甚至超过地震波中卓越周期对应的波长，导致其行波效应很明显，使得地震动输入的非一致性较明显，如果依旧采用均匀一致性输入的刚性边界模型有些粗略，在进行地震反应分析时应考虑坝体结构与地基之间相互作用影响的非一致性输入<sup>[14-15]</sup>。此外对于高土石坝河谷地基系统，河谷、地基与坝体之间存在着不同程度的相互作用，同时外行的散射波会向无限域地基辐射形成辐射阻尼效应，不少学者对大坝进行考虑坝基相互作用的抗震计算分析<sup>[16-18]</sup>，表明地基辐射阻尼对坝体地震响应幅值的降低可达 10%~50%。当对大坝进行抗震安全评价时，加速度反应是大坝抗震稳定分析的关键参数，未考虑相互作用的刚性边界模型一般会低估大坝的极限抗震能力<sup>[15, 19]</sup>。并且由于地质条件复杂，已有较多已建和待建的土石坝直接修筑于深厚覆盖层上，此时采用一致性输入，相对于考虑相互作用影响的非一致性输入会有较大的误差，也不能忽略土石坝与覆盖层之间的动力相互作用<sup>[19-20]</sup>。因此在强震作用下对于土石坝堆石料动力参数反演分析时，也有必要考虑坝基相互作用和辐射阻尼的影响。

目前大量高土石坝的投入并正常运行，将会得到较多的实测资料用于反演分析，本文主要根据已有监测资料进行了 100 m 级大坝分析。通过采用黏弹性人工边界及其相应的地震动输入方法进行土石坝的动力反应计算，利用多种群遗传算法和径向基神经网络构建反演平台，建立考虑坝基相互作用及辐射阻尼影响的土石坝动力参数反演分析模型。对鲤鱼潭大坝进行了动力参数反演分析，并与刚性边界反演结果以及室内外试验进行了对比，为现行土石坝动力参数确定方法提供一定的参考。

## 1 堆石料的静、动力本构模型

### 1.1 静力本构模型

堆石料的应力应变关系的非线性采用邓肯-张

E-B 本构模型来表征。其切线弹性模量  $E_t$  和体积模量  $B_t$  表达式为

$$E_t = K p_a \left( \frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \left[ 1 - \frac{R_f (\sigma_1 - \sigma_3) (1 - \sin \varphi)}{2c \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi} \right]^2, \quad (1)$$

$$B_t = K_b p_a \left( \frac{\sigma_3}{p_a} \right)^m, \quad (2)$$

式中，

$$\varphi = \varphi_0 - \Delta \varphi \lg(\sigma_3 / p_a) \quad (3)$$

式中  $K, n$  分别为切向模量系数和指数； $R_f$  为破坏比； $\sigma_1, \sigma_3$  分别为三轴压缩试验时的垂直压力和围压； $K_b, m$  分别为体积模量系数和指数； $p_a$  为标准大气压； $c$  为黏聚力； $\varphi$  为考虑围压影响的内摩擦角。

### 1.2 动力本构模型

堆石料的动力计算采用基于黏弹性模型的等效线性分析方法<sup>[21]</sup>，该模型利用等效剪切模量  $G$  和等效阻尼比  $\lambda$  来间接反映土体动应力应变关系的非线性和滞回性。对堆石料进行室内动三轴试验，可以得到动阻尼比  $\lambda$  和动剪切模量比  $G/G_{\max}$  与动剪切应变幅  $\gamma$  的变化关系曲线，许多学者对堆石料的动三轴试验结果进行大量统计分析，得到了这两条关系曲线的表达式以及相关参数统计资料<sup>[22-23]</sup>，可以直接在动力参数反演分析中采用。

根据大量的试验结果，堆石料的最大动剪切模量  $G_{\max}$  可表示为

$$G_{\max} = C p_a \left( \frac{\sigma'_m}{p_a} \right)^n, \quad (4)$$

式中， $p_a$  为大气压， $\sigma'_m$  为平均有效应力， $C, n$  分别为材料的最大动剪切模量系数和指数。

其中最大动剪切模量系数  $C$  和指数  $n$  在常规计算时可以根据动三轴试验得到，在本文中作为反演分析的研究对象。

## 2 黏弹性人工边界及地震动输入方法

### 2.1 黏弹性人工边界及相关地震动输入方法

为了模拟地震波在半无限域中的传播，本文在截断边界上施加二维一致黏弹性人工边界，使地震波透过边界不反射回来影响内部计算。实现方法为，通过在截取边界上设置一层无厚度单元作为人工边界，如图 1 (a)。无厚度的人工边界单元 B 由连续均匀的并联弹簧和阻尼元件构成，如图 1 (b)，边界单元 B 上的切向和法向的弹簧刚度和阻尼系数可以表示为<sup>[24]</sup>

$$\begin{cases} K_{BN} = \alpha_N \frac{G}{R}, C_{BN} = \rho c_p, \\ K_{BT} = \alpha_T \frac{G}{R}, C_{BT} = \rho c_s. \end{cases} \quad (5)$$

式中  $K_{BN}$ ,  $K_{BT}$  分别为弹簧法向和切向的刚度系数;  $C_{BN}$ ,  $C_{BT}$  分别为阻尼器法向和切向的阻尼系数;  $G$  为材料的剪切模量;  $c_p$  和  $c_s$  分别为 P 波和 S 波的波速;  $\rho$  为材料密度;  $R$  为波源到人工边界单元形心的距离;  $\alpha_N$  和  $\alpha_T$  分别为弹簧刚度法向和切向的修正系数。大量数值计算说明, 黏弹性人工边界具有良好的鲁棒性<sup>[24]</sup>, 修正系数  $\alpha_N$  和  $\alpha_T$  在一定的范围内取值均能给出良好的分析结果, 本文根据文献[20]的推荐值,  $\alpha_N$  和  $\alpha_T$  分别为 1.0, 0.5。

地震动输入采用等效节点力方法, 将输入的地震动转化为直接作用于人工边界单元上的等效节点荷载<sup>[25]</sup>, 边界上某一节点  $b$  的等效节点荷载可以表示为

$$\begin{cases} F_{bn} = (R_{bn}^{ef} + C_{bn}\dot{u}_{bn}^{ef} + K_{bn}u_{bn}^{ef})A_b, \\ F_{bt} = (R_{bt}^{ef} + C_{bt}\dot{u}_{bt}^{ef} + K_{bt}u_{bt}^{ef})A_b. \end{cases} \quad (6)$$

式中  $F_{bt}$ ,  $F_{bn}$  分别为边界单元上切向和法向的等效节点荷载;  $A_b$  为节点  $b$  的影响面积; 阻尼系数  $C_b$  和弹簧刚度系数  $K_b$  可由式 5 确定;  $\dot{u}_b^{ef}$ ,  $u_b^{ef}$  和  $R_b^{ef}$  分别表示自由场分析中人工边界节点处的速度、位移和应力, 可以通过地震计算程序 EERA<sup>[26]</sup> 计算得到。

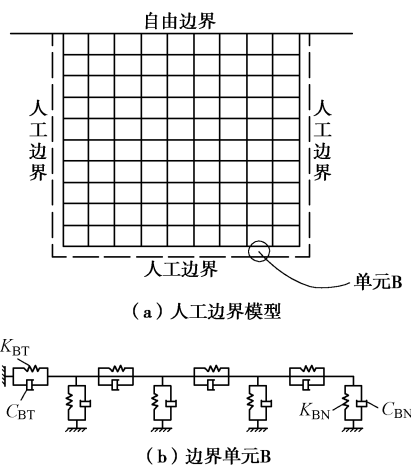


图 1 二维一致黏弹性人工边界及边界单元

Fig. 1 2D consistent viscous-spring artificial boundaries and boundary units

## 2.2 算例验证

方法实现过程: 首先根据边界节点位置, 求得节点影响面积  $A_b$ , 计算散射波源到人工边界的距离  $R$ 。由地表已知的地震波 (记为已知解), 进行自由场反演计算, 获得的人工边界底部地震动作为基岩层输入。然后采用地震计算程序 EERA<sup>[26]</sup>, 输入覆盖层 (若需要) 及弹性基岩等材料参数, 在基岩面输入反演得到地震动, 进而求得模型各边界节点处对应材料的等效剪切模量  $G$ 、等效 S 波、P 波波速  $c_s$  和  $c_p$ 、速度  $\dot{u}^{ef}$ 、位移  $u^{ef}$  和自由场应力  $R^{ef}$ , 根据式 (5) 求得阻尼和弹簧刚度系数, 式 (6) 求得等效荷载, 进而完成地震动输入。

从二维半无限空间中截取  $738 \text{ m} \times 200 \text{ m}$  的有限范围, 如图 2, 用四边形单元进行离散, 其底面和 2 个侧面拓展一层无厚度单元作为一致黏弹性边界。材料弹性模型为 10 GPa, 泊松比为 0.25, 质量密度为  $2.5 \text{ g/cm}^3$ 。地表已知的地震动为集集地震中鲤鱼潭大坝坝基廊道处测点的顺河向和竖向加速度记录, 分别记为 A 波和 B 波。按上述方法进行自由场计算得到地表质点振动的数值解。

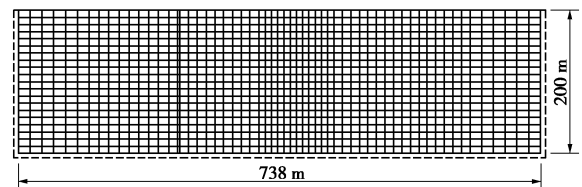
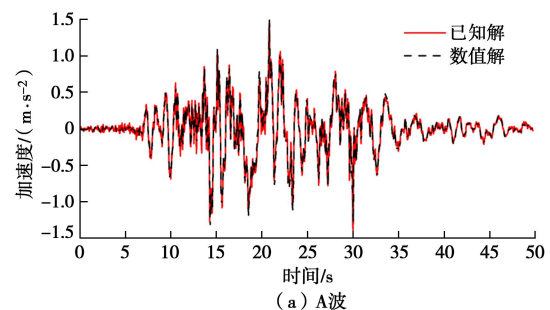


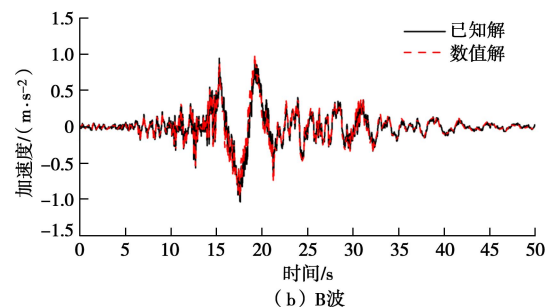
图 2 自由场有限元模型

Fig. 2 FEM of free field

图 3 给出了地震波垂直入射时地表中心控制点振动的加速度时程。与已知解对比分析, 可以发现地表控制点加速度时程的数值解与已知解的变化趋势一致, 数值大小也基本吻合, 表明了本文黏弹性人工边界和相关的地震动输入方法的计算程序的准确性和合理性, 验证了黏弹性人工边界可以很好地模拟地震波在半无限域中的传播, 并可以采用该方法进行坝基系统相互作用的地震动响应分析。



(a) A波



(b) B波

图 3 垂直入射地表加速度时程

Fig. 3 Ground surface accelerations due to vertical incidence

## 3 基于 MPGA-RBF 网络的反演方法

### 3.1 多种群遗传算法

遗传算法<sup>[27]</sup> (genetic algorithm, GA) 是一种借



鉴生物界自然选择和遗传机制的随机搜索算法, 将问题的求解转化为种群中“个体”的适者生存过程, 反复进行选择、交叉和变异等操作, 不断进化, 从而使群体最终搜索到“最适应环境的个体”, 即求得问题的最优解。

但 GA 在应用中存在早熟、收敛慢等问题, 为了避免这一问题。根据自然界物种迁徙能保持种群多样性的启示, 本文采用多种群遗传算法<sup>[28]</sup> (multiple population genetic algorithm, MPGA)。算法初始采用多个种群同时进行 GA 优化搜索, 每个种群采用不同的交叉、变异概率等控制参数进行相对独立演化; 在进化过程中采用移民算子将各种群出现的最优个体每隔一定代数引入到其他的种群中, 实现不同种群之间的协同进化并提高种群的多样性; 通过增加人工选择算子保存各种群每代进化中的最优个体, 并作为判断收敛的依据。

在应用 MPGA 算法时需要设定的参数主要有: ①初始种群个数  $M$ ; ②每个种群的个体数  $P$ ; ③GA 的个体长度  $n$ , 表示个体的二进制数的个数; ④变异概率  $P_m$  和交叉概率  $P_c$  的取值范围; ⑤精华种群中的最优值保持代数  $MP$ 。

### 3.2 RBF 神经网络

径向基神经网络 (radial basis function, RBF) 是一种前馈反向传播网络, 能够以任意精度逼近任意连续函数, 具有较强的逼近能力, 为目前广泛使用的神经网络模型之一<sup>[3, 7, 11]</sup>。网络结构如图 4 所示, 是一种三层前向网络, 输入层起到传输信号到隐含层的作用; 隐含层为径向基函数层, 对隐含层神经元传递函数的参数进行调整, 采用的是非线性优化策略; 输出层是采用线性优化策略对输入模式的作用做出响应; 相邻层之间通过权值、阈值和传递函数相互联系<sup>[29]</sup>。

神经网络的传递函数一般采用高斯函数:

$$\phi(x) = \exp\left(\frac{-x^2}{2\delta^2}\right), \quad (7)$$

式中,  $\delta$  为径向基函数的扩展系数, 其值越大基函数越平滑。

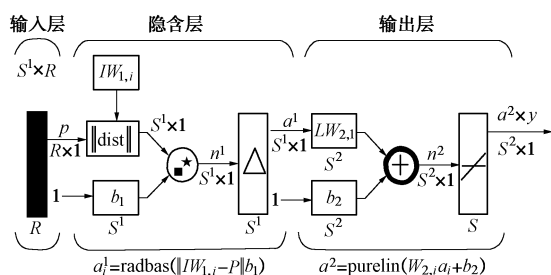


图 4 RBF 神经网络结构图

Fig. 4 Structure of RBF

### 3.3 反演分析目标函数

堆石料力学参数反演实质就是寻求一组参数使计算值最佳逼近实测值。本文目标函数采用监测点的加速度反应谱为拟合值, 利用反演得到的动力参数进行正演计算, 使计算的加速度反应谱值与实测结果相差最小, 其数学表达式如下:

$$\begin{cases} \text{Min} F(\mathbf{X}) = \sum_i^N \sum_j^L \sum_k^T |s_{ijk} - s_{ijk}^*| / |s_{ijk}^*|, \\ \text{st. } \mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{F}, \\ x_d^{\min} \leq x_d \leq x_d^{\max} \quad (d=1, 2, 3, \dots, D). \end{cases} \quad (8)$$

式中  $F(\mathbf{X})$  为目标函数;  $\mathbf{X} = \{x_1, x_2, \dots, x_d, \dots, x_D\}$  为待反演参数,  $D$  为待反演参数的个数;  $N, L, T$  分别为测点数、加速度方向维数、反应谱周期的点数,  $s_{ijk}$ ,  $s_{ijk}^*$  分别为测点计算和实测的反应谱值;  $\mathbf{M}$  为质量矩阵,  $\mathbf{C}$  为阻尼矩阵,  $\mathbf{K}$  为刚度矩阵;  $\mathbf{u}$ ,  $\dot{\mathbf{u}}$ ,  $\ddot{\mathbf{u}}$  分别为位移、速度和加速度向量;  $\mathbf{F}$  为地震动输入的等效荷载向量。

## 4 鲤鱼潭心墙堆石坝动力参数反演

### 4.1 工程概况

鲤鱼潭黏土心墙堆石坝坝顶高程为 306 m, 最大坝高为 96 m, 坝顶宽度为 10 m, 上下游坝坡分别为 1:3, 1:2.5, 在集集地震发生时, 上游水位高程 270 m, 图 5 为大坝典型剖面 and 坝体主要材料分区。为了监测大坝在正常运行, 在坝体上布置若干个强震监测仪, 其中测站 T2、T4 和 T5 分别设置在河谷剖面下游坡顶、下游坡中部、以及坝基灌浆廊道内, 并且在集集地震中都监测到了完整的地震动加速度时程。

简化后的大坝有限元模型如图 6, 分为 1 区心墙黏土料, 下游 2 区半透水料 (溢洪道和坝基开挖料), 上游 3A 区 3B 区分别为精选河床料、台地砾石料。其中为了考虑坝基相互作用以及地基辐射阻尼的影响, 向上下游分别截取一倍坝高, 竖向截取两倍坝高计算分析, 在截取地基两侧及底边界施加一致黏弹性人工边界。

### 4.2 有限元正分析

地基计算采用线弹性模型, 材料弹性模型为 10 GPa, 泊松比为 0.25, 质量密度为 2.5 g/cm<sup>3</sup>。堆石料的静力计算采用邓肯-张 E-B 模型, 为模拟大坝施工和蓄水过程分 27 级逐级加载, 计算时采用中点增量法, 进而获得大坝地震发生前的初始应力状态。

由鲤鱼潭大坝 T4 测点在集集地震中监测到的加速度, 按第 2 节所述方法, 获得黏弹性人工边界节点的地震动等效荷载, 然后利用等效线性法进行土石坝动力计算。反演分析中比较的是坝顶 T2 和坝坡 T5 测点计算的和实测的加速度时程。

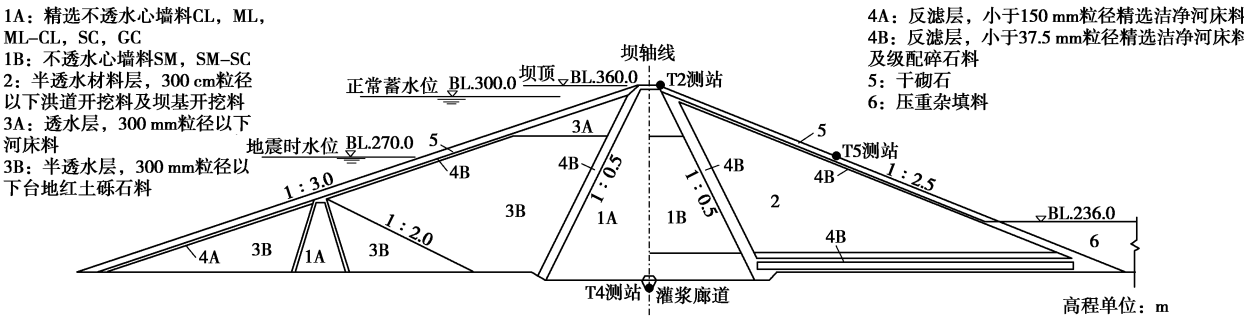


图 5 鲤鱼潭大坝典型剖面及测震仪布置图

Fig. 5 Typical section and arrangement of seismometers of Liyutan dam

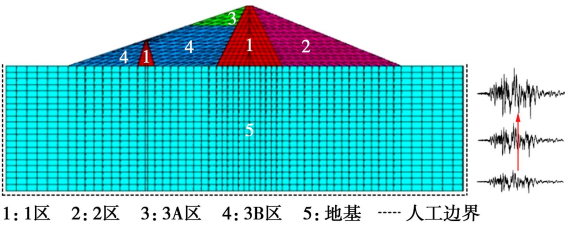


图 6 鲤鱼潭大坝有限元模型

Fig. 6 FEM of Liyutan dam

4.3 RBF 神经网络训练

本文分析中神经网络的输入层参数为有限元计算的坝料动力参数  $C$  和  $n$ , 输出层参数为有限元计算得到的测点加速度反应谱值, 建立两者之间的映射关系, 用来替代耗时的土石坝动力有限元计算。

为了保证网络映射值更好地逼近有限元计算值, 采用多个网络, 每个网络只有一个输出<sup>[9]</sup>, 即每个网络输入神经元相同, 都是堆石料的动力参数, 而输出神经元各自代表某一测点上不同方向的不同周期点的反应谱值。

神经网络输入的最大动剪模量系数  $C$  的取值范围在文献[12]反演结果的基础上进行取值, 心墙料为 1000~3000, 2 区为 2300~4300, 3A 区为 2900~4900, 3B 为 1600~3600。最大动剪模量指数  $n$  的取值范围都是 0.3~0.6。

首先根据正交试验设计生成 81 组样本, 同时为了保持样本的多样性与随机性添加一些随机样本, 共 400 组样本, 训练样本数占总样本数的 75%, 测试样本数占 25%, 样本集见表 1。

本文采用精确的 RBF 神经网络<sup>[29]</sup>, 分别利用训练样本集和测试样本集对 RBF 神经网络进行训练和检验, 使网络误差满足要求以建立堆石体动力模型参数和坝体监测点加速度反应谱值之间的非线性映射关系。其中测试样本 1 的 RBF 拟合效果见图 7, 可知所有网络总和均平方根误差的平均值 RMSE=0.0417, 图中可以看出除了在峰值附近有略小的差别以外, 整体训练的神经网络能够很好地反映两者的映射关系。

表 1 样本集

Table 1 Sample sets

样本	$C_1$	$C_2$	$C_{3A}$	$C_{3B}$	$n_1$	$n_2$	$n_{3A}$	$n_{3B}$
样本 1	1000	2300	2900	1600	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000
样本 2	1000	2550	4650	1850	0.6000	0.3750	0.5250	0.4500
样本 3	1000	2800	4150	2100	0.4500	0.3375	0.4125	0.4875
.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
样本 399	2822	3451	3706	3564	0.5655	0.4962	0.5280	0.5889
样本 400	1796	3095	4691	3239	0.4003	0.5202	0.4813	0.5483

注: 下标 1, 2, 3A, 3B 分别为坝体 4 种材料编号。

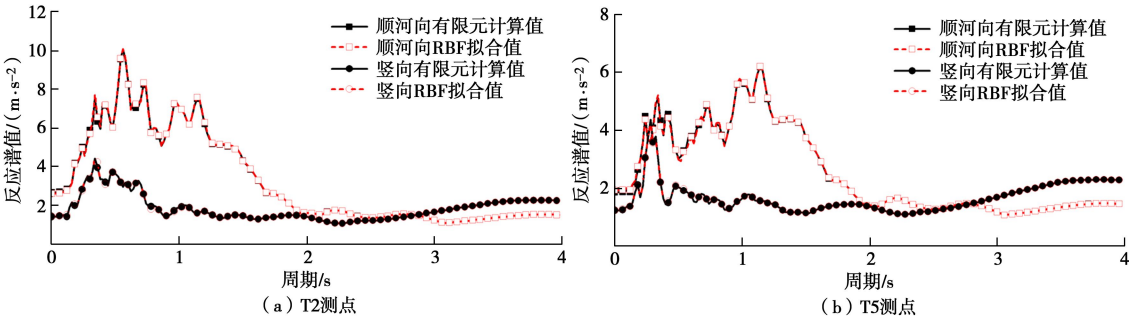


图 7 测试样本 1 的 RBF 网络拟合效果

Fig. 7 Fitting effects of RBF network of test sample 1

4.4 参数反演分析

本文采用多种群遗传算法对鲤鱼潭心墙堆石坝进行动力参数优化反演分析。算法参数如下：种群个数  $M=10$ ，种群大小  $P=40$ ，个体长度  $n=10$ ，交叉概率  $P_c$  范围为  $0.7\sim 0.9$ ，变异概率  $P_m$  为  $0.01\sim 0.05$ ，最优值保持代数  $MP$  为 8。图 8 为堆石料动力参数反演计算的目标函数收敛过程。参数反演的结果如表 2 所示。

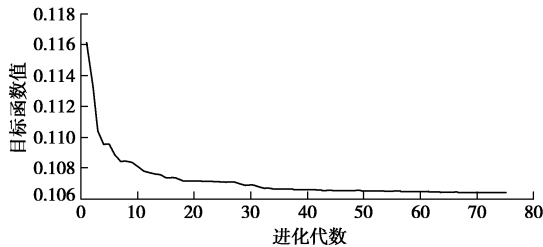


图 8 反演计算收敛过程

Fig. 8 Iteration process of parametric inversion

表 2 动力参数反演结果与其他成果

动力参数		坝料分区			
		心墙料 1 区	下游 2 区	上游 3A 区	上游 3B 区
最大动剪 模量系数 $C$	本文反演值	2021	3469	4588	3243
	现场波速测试 反算值	第一次 1664/第二次 1729			
	室内动三轴 试验值	828	1364		
	刘振平等 <sup>[12]</sup>	2003	3283	3893	2567
最大动剪 模量系数 $n$	本文反演值	0.498	0.524	0.485	0.510
	刘振平等 <sup>[12]</sup>	0.454	0.480	0.467	0.450

根据反演得到的动力模型参数对鲤鱼潭堆石坝正

演动力分析。图 9 和图 10 分别是坝顶 T2 测点和坝坡 T5 测点的实测与计算的加速度时程和反应谱。从加速度时程曲线上来看，T2 和 T5 测点的水平向时程曲线与实测值基本一致，竖向时程曲线在  $10\sim 20\text{ s}$  之间，计算值比实测值偏小。从反应谱曲线来看，T2 和 T5 测点水平向反应谱曲线都基本一致；T2 测点竖向反应谱曲线变化趋势相似，在周期  $0\sim 0.3\text{ s}$  之间，计算值比实测值偏小；T5 测点竖向反应谱曲线在长周期基本一致，在短周期的部分计算值偏小。加速度时程峰值大小比较见表 3，从表中可以看出加速度峰值误差基本上在允许范围内。整体来看加速度时程的计算值和实测值在数值和趋势上吻合的较好，说明了反演分析所得参数的正确性和合理性。

表 3 T2 和 T5 测点实测和计算的加速度峰值

Table 3 Calculated and recorded acceleration peaks of station T2 and T5

类型	加速度峰值/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ )			
	T2 测点		T5 测点	
	顺河向	竖向	顺河向	竖向
实测值	2.46	1.46	1.93	1.36
计算值	2.55	1.42	1.88	1.23
误差	3.7%	-2.7%	-2.6%	-9.6%

图 11 是正演动力计算得到的坝体加速度分布图，可以看出当考虑相互作用时，坝体加速度分布规律符合一般心墙堆石坝的动力反应规律。

为了进一步验证反演参数的合理性，对比分析了 T4 测点实测和计算的加速度时程曲线，如图 12 所示，从图中可以看出除了在峰值附近有略小的误差，整体趋势较为一致。这也说明反演输入的地震动获取方法

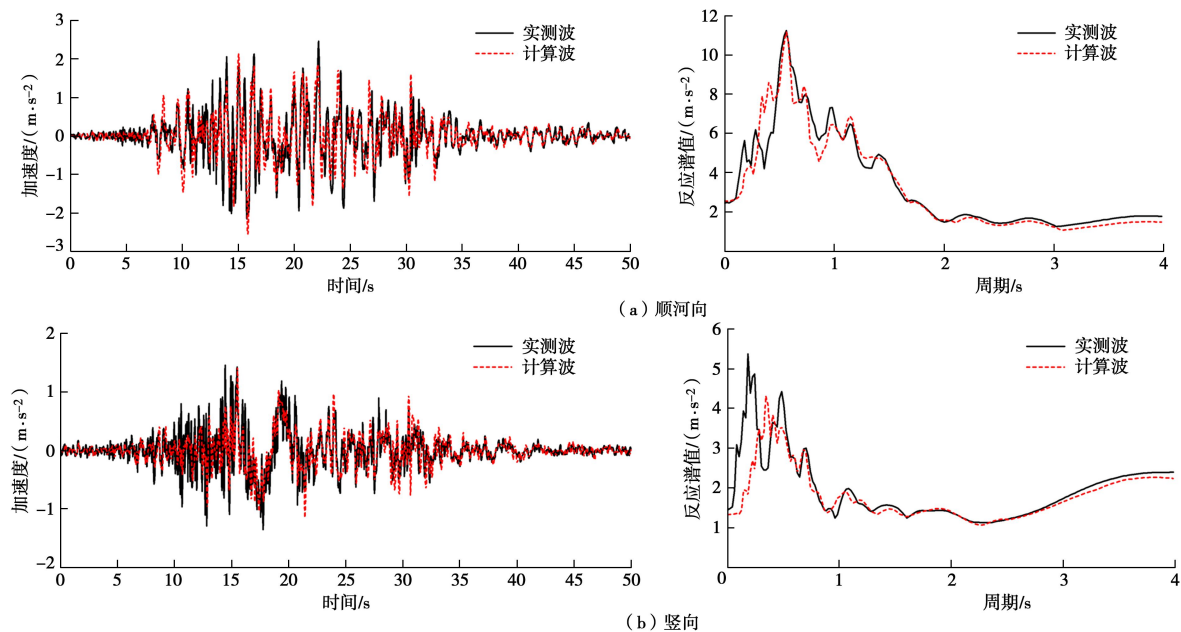


图 9 坝顶 T2 测站实测和计算的加速度时程和反应谱

Fig. 9 Calculated and recorded acceleration time-histories and their response spectra at station T2 of Liyutan dam



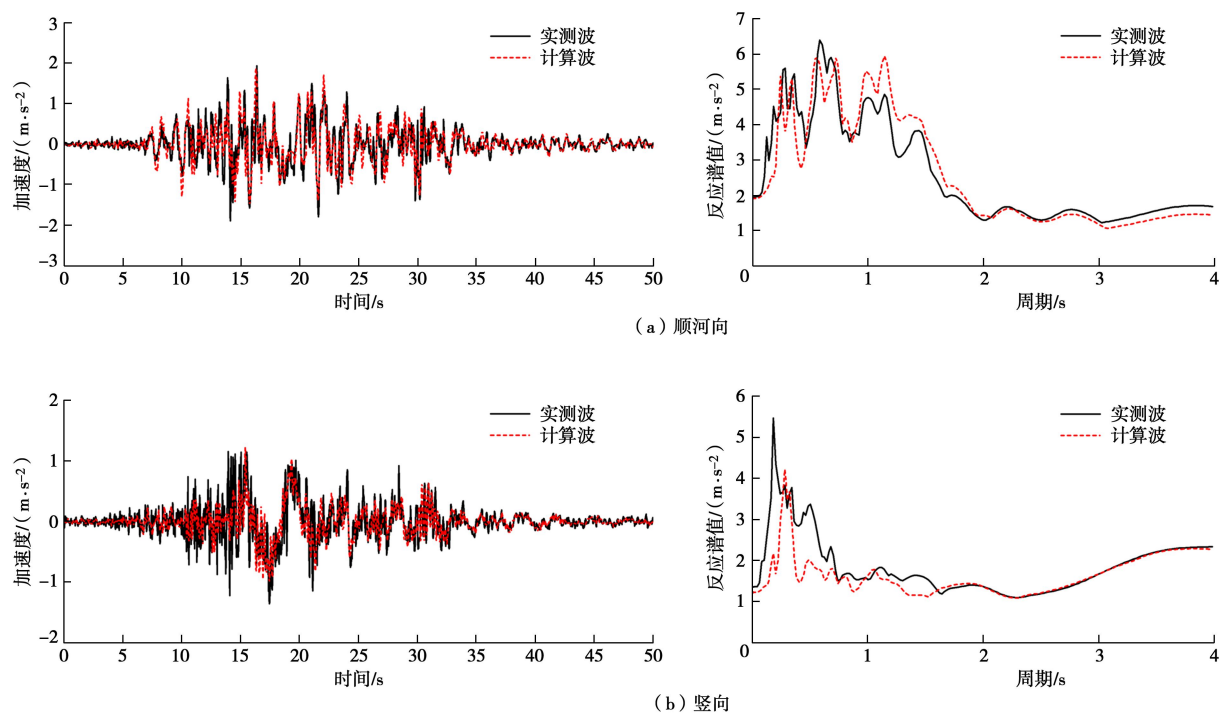


图 10 坝坡 T5 测站实测和计算的加速度时程和反应谱

Fig. 10 Calculated and recorded acceleration time-histories and their response spectra at station T5 of Liyutan dam



图 11 坝体加速度分布

Fig. 11 Distribution of acceleration of Liyutan dam

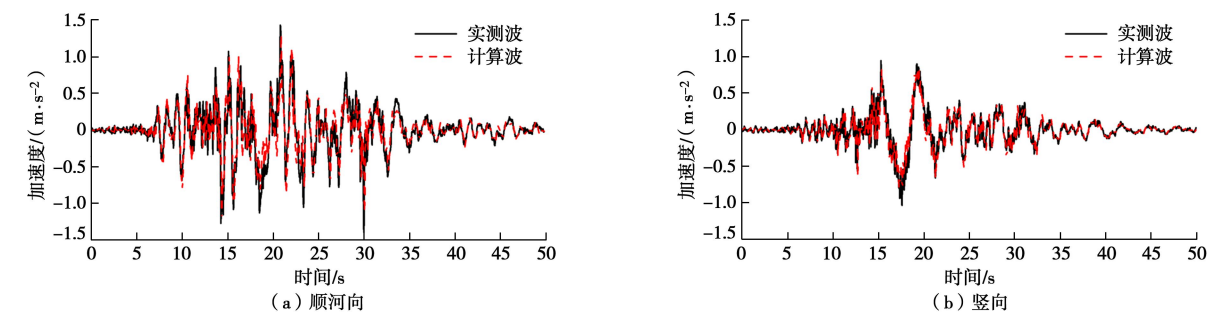


图 12 坝基廊道 T4 测站实测和计算的加速度时程

Fig. 12 Calculated and recorded acceleration time-histories at station T4 of Liyutan dam

可以满足精度的要求。

综上所述，本文所提出的考虑相互作用影响的反演分析方法是可行的。

4.5 与其他成果对比分析

在鲤鱼潭大坝的建设过程中，分别对心墙料和下游 2 区半透水料进行了室内动三轴试验<sup>[30]</sup>，得到两种坝料的最大剪切模量系数  $C$  值分别为 828 和 1364，本文反演结果分别为 2021 和 3469，分别为室内试验值

的 2.44 和 2.54 倍；并且对黏土心墙料进行了两次剪切波速试验<sup>[30]</sup>，得到的最大动剪切模量系数  $C$  分别为 1664 和 1729，平均值为 1696.5，本文反演结果值是两次现场波速试验平均值的 1.19 倍。

与刘振平等<sup>[12]</sup>采用刚性地基模型反演结果对比，本文反演得到心墙黏土料的最大动剪模量系数  $C$  变化不大，分析原因可能是由于黏土心墙料相对于堆石料和地基较软，其动剪切模量比与动剪应变关系变化缓

慢,并且心墙料位于坝体内部,地震过程中心墙料非线性反应相对于刚性边界模型变化不大,导致最大动剪模量系数 $C$ 相差不大。另外本文反演得到堆石料的最大动剪模量系数 $C$ 和模量指数 $n$ 的值都偏大,这是由于相对于黏土料其动剪切模量比与动剪应变关系变化较快,并且考虑相互作用及辐射阻尼的影响,地震过程中坝体向地基散射的地震波被人工边界吸收,坝体能量减小,使得堆石料的非线性反应相对刚性边界模型较弱,进而使堆石料的弹性模量偏大,导致反演动力参数偏大,符合考虑相互作用的一般规律。

朱晟等<sup>[10]</sup>根据对几个实际堆石坝工程的现场原位剪切波试验和室内动三轴试验结果对比分析后,认为堆石料的最大动剪模量系数 $C$ 取为1.5倍的室内动三轴试验值,剪切波速才与现场试验测量值基本接近。孙静等<sup>[31]</sup>对黏土的室内和现场测试最大动剪模量差别进行了研究,表明现场测试值大约是室内试验值的1.7倍。本文反演结果和前人研究结果一致,都表明室内试验得到土石料动力参数通常偏小,说明本文反演得到动力参数的合理性。

## 5 结 论

本文通过将黏弹性人工边界与多种群遗传算法和径向基神经网络相结合,提出了一种考虑坝与地基相互作用的堆石料动力参数的反演方法,并用于鲤鱼潭大坝坝料的动力参数反演分析,结果表明:

(1)考虑坝基相互作用影响的堆石料动力参数的反演方法是可行的,计算误差满足实际工程要求,为现行土石坝动力参数确定方法提供一定的参考。

(2)考虑坝-基相互作用和刚性边界的两种模型反演参数相比,前者最大动剪切模量系数和指数值都普遍偏大。并且通过对比本文反演结果、刚性地基模型和室内试验得到的最大动剪模量系数 $C$ 值,本文计算值最大,刚性地基模型结果居中,室内试验值最小。工程应用时建议对室内试验值进行适当的修正。

(3)根据已有的实际监测资料对100 m级土石坝进行了分析,验证了方法的正确性。对更高土石坝以及修筑于覆盖层上的土石坝若获得监测资料,用该方法反演动力参数,结果将更符合实际,也更有工程实际意义。

## 参考文献:

[1] 张社荣, 何 辉. 改进的遗传算法在堆石体参数反演中的应用[J]. 岩土力学, 2005, **26**(2): 182 - 186. (ZHANG She-rong, HE Hui. Application of improved genetic algorithm to back analyzing parameters of rockfill[J]. Rock

and Soil Mechanics, 2005, **26**(2): 182 - 186. (in Chinese))

- [2] 朱 晟, 张美英, 戴会超. 土石坝沥青混凝土心墙力学参数反演分析[J]. 岩土力学, 2009, **30**(3): 635 - 639. (ZHU Sheng, ZHANG Mei-ying, DAI Hui-chao. Back analysis of mechanical parameters for asphalt-concrete core earth-rock dam[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(3): 635 - 639. (in Chinese))
- [3] 康 飞, 李俊杰, 许 青. 堆石坝参数反演的蚁群聚类RBF网络模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(增刊 2): 3639 - 3644. (KANG Fei, LI Jun-Jie, XU Qing. Ant colony clustering radial basis function network model for inverse analysis of rockfill dam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(S2): 3639 - 3644. (in Chinese))
- [4] 田明俊, 周 晶. 基于蚁群算法的土石坝土体参数反演[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **25**(8): 1411 - 1416. (TIAN Ming-jun, ZHOU Jing. Inversing soil mechanical parameters of embankment dam using ant colony algorithm[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **25**(8): 1411 - 1416. (in Chinese))
- [5] 李金凤, 杨启贵, 徐卫亚. 基于改进粒子群算法CHPSO-DS的面板坝堆石体力学参数反演[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(6): 1229 - 1235. (LI Jin-feng, YANG Qi-gui, XU Wei-ya. Back analyzing mechanical parameters of rockfill based on modified particle swarm optimization CHPSO-DS[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(6): 1229 - 1235. (in Chinese))
- [6] 常晓林, 喻胜春, 马 刚, 等. 基于粒子迁徙的粒群优化算法及其在岩土工程中的应用[J]. 岩土力学, 2011, **32**(4): 1077 - 1082. (CHANG Xiao-lin, YU Sheng-chun, MA Gang, et al. Particle swarm optimization based on particle migration and its application to geotechnical engineering[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(4): 1077 - 1082. (in Chinese))
- [7] 马 刚, 常晓林, 周 伟, 等. 高堆石坝瞬变-流变参数三维全过程联合反演方法及变形预测[J]. 岩土力学, 2012, **33**(6): 1889 - 1895. (MA Gang, CHANG Xiao-lin, ZHOU Wei, et al. Integrated inversion of instantaneous and rheological parameters and deformation prediction of high rockfill dam[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(6): 1889 - 1895. (in Chinese))
- [8] 张丙印, 袁会娜, 李全明. 基于神经网络和演化算法的土石坝位移反演分析[J]. 岩土力学, 2005, **26**(4): 547 - 552. (ZHANG Bing-yin, YUAN Hui-na, LI Quan-ming. Displacement back analysis of embankment dam based on



- neural network and evolutionary algorithm[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(4): 547 - 552. (in Chinese))
- [9] 迟世春, 朱 叶. 面板堆石坝瞬时变形和流变变形参数的联合反演[J]. 水利学报, 2016(1): 18 - 27. (CHI Shi-chun, ZHU Ye. Back-analysis of instantaneous and rheological deformation parameters for concrete faced rockfill dams[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016(1): 18 - 27. (in Chinese))
- [10] 朱 晟, 杨 鸽, 周建平, 等. “5·12”汶川地震紫坪铺面板堆石坝静动力初步反演研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2010, **42**(5): 113 - 119. (ZHU Sheng, YANG Ge, ZHOU Jian-ping, et al. Back analysis on static and dynamic characteristics of Zipingpu CFRD under “5·12” Wenchuan Earthquake[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2010, **42**(5): 113 - 119. (in Chinese))
- [11] 汪 旭, 康 飞, 李俊杰. 土石坝地震永久变形参数反演方法研究[J]. 岩土力学, 2014, **35**(1): 279 - 286. (WANG Xu, KANG Fei, LI Jun-jie. Back analysis of earthquake-induced permanent deformation parameters of earth-rock dams[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(1): 279 - 286. (in Chinese))
- [12] 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))
- [13] 田 强. 土石坝动力参数的反演算法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2012. (TIAN Qiang. The research of inversion algorithms on dynamic parameters of earth-rock dam[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012. (in Chinese))
- [14] 陈厚群. 坝址地震动输入机制探讨[J]. 水利学报, 2006, **37**(12): 1417 - 1423. (CHEN Hou-qun. Discussion on seismic input mechanism at dam site[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, **37**(12): 1417 - 1423. (in Chinese))
- [15] 孔宪京, 邹德高, 刘京茂. 高土石坝抗震安全评价与抗震措施研究进展[J]. 水力发电学报, 2016, **35**(7): 1 - 14. (KONG Xian-jing, ZOU De-gao, LIU Jing-mao. Developments in seismic safety evaluation methods and aseismic measures for high rockfill dams[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, **35**(7): 1 - 14. (in Chinese))
- [16] 吴 健, 金 峰, 张楚汉, 等. 无限地基辐射阻尼对溪洛渡拱坝地震响应的影响[J]. 岩土工程学报, 2002, **24**(6): 716 - 719. (WU Jiang, JING Feng, ZHANG Chun-han, et al. Effects of radiation damping of infinite foundation on seismic response of the Xiluodu arch dam[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2002, **24**(6): 716 - 719. (in Chinese))
- [17] 李宏恩, 李同春, 田景元, 等. 黏-弹性人工边界在双江口土石坝动力分析中的应用[J]. 岩土力学, 2008, **29**(增刊 1): 193 - 196. (LI Hong-en, LI Tong-chun, TIAN Jing-yuan, et al. Application of viscoelastic artificial boundary to dynamic response analysis of Shuangjiangkou rock-fill dam[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(S1): 193 - 196. (in Chinese))
- [18] 王进廷, 潘坚文, 张楚汉. 地基辐射阻尼对高拱坝非线性地震反应的影响[J]. 水利学报, 2009, **40**(4): 413 - 420. (WANG Jing-ting, PAN Jian-wen, ZHANG Chunhan. Effect of radiation damping on nonlinear response of high arch dams[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, **40**(4): 413 - 420. (in Chinese))
- [19] 余 翔, 孔宪京, 邹德高, 等. 土石坝-覆盖层-基岩体系动力相互作用研究[J]. 水利学报, 2018, **49**(11): 1378 - 1385, 1395. (YU Xiang, KONG Xian-jing, ZOU De-gao, et al. Study on the dynamic interaction of earth dam-overburden-bedrock system[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, **49**(11): 1378 - 1385, 1395. (in Chinese))
- [20] 中国水力发电工程学会水工及水电站建筑物专业委员会. 利用覆盖层建坝的实践与发展[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009. (Professional Committee on Hydraulic and Hydropower Buildings of China Society for Hydropower Engineering. The practice and development of dam with alluvium[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2009. (in Chinese))
- [21] SEED H B, IDRIS I M. Influence of soil conditions on ground motions during earthquakes[J]. Journal of the Soil Mechanics & Foundations Division, 1969, **95**(1): 99 - 138.
- [22] 陈崇茂. 土石坝料的变参数 R-O 模型及其热力学解释[D]. 大连: 大连理工大学, 2011. (CHEN Chong-mao. R-O model with varying parameters for dam materials and its thermodynamic explanation[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011. (in Chinese))
- [23] 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(8): 20 - 25. (KONG Xian-jing, LOU Shu-lian, ZHOU Dei-gao, et al. The equivalent dynamic shear modulus and equivalent damping ratio of the rockfill for dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001(8): 20 - 25. (in Chinese))
- [24] 刘晶波, 谷 音, 杜义欣. 一致黏弹性人工边界及黏弹性边界单元[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(9): 1070 - 1075.

- (LIU Jing-bo, GU Yin, DU Yi-xin. Consistent viscous-spring artificial boundaries and viscous-spring boundary elements[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(9): 1070 - 1075. (in Chinese))
- [25] 何建涛, 马怀发, 张伯艳, 等. 黏弹性人工边界地震动输入方法及实现[J]. 水利学报, 2010, **41**(8): 960 - 969. (HE Jian-tao, MA Huai-fa, ZHANG Bo-yan, et al. Method and realization of seismic motion input of viscous-spring boundary[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, **41**(8): 960 - 969. (in Chinese))
- [26] BARDET J P, ICHII K, LIN C H. EERA: a computer program for equivalent-linear earthquake site response analyses of layered soil deposits[R]. Los Angeles: Department of Civil Engineering, University of Southern California, 2000.
- [27] 周 明, 孙树栋. 遗传算法原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999. (ZHOU Ming, SUN Shu-dong. The principle and application of genetic algorithm[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1999. (in Chinese))
- [28] POTTS J C, GIDDENS T D, YADAV S B. The development and evaluation of an improved genetic algorithm based on migration and artificial selection[J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics, 1994, **24**(1): 73 - 86.
- [29] 张德丰. MATLAB 神经网络应用设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009. (ZHANG De-feng. MATLAB neural network design[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2009. (in Chinese))
- [30] 台湾省中区水资源局. 鲤鱼潭水库施工中安全评估计划总报告书[R]. 台中: 中区水资源局, 1993. (Central Water Resources Office. The overall safety assessment report of Liyutan Reservoir during construction[R]. Taichung: Central Water Resources Office, 1993. (in Chinese))
- [31] 孙 静, 袁晓铭, 陶夏新. 室内和现场测试最大动剪切模量差别的试验研究[J]. 土木工程学报, 2012, **45**(增刊 1): 258 - 262. (SUN Jing, YUAN Xiao-ming, TAO Xia-xin. Comparative study on laboratory and field test of maximum dynamic shear modulus[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, **45**(S1): 258 - 262. (in Chinese))
- 

## 本期广告索引

- 封 2 北京筑信达工程咨询有限公司  
封 3 北京理正软件股份有限公司  
封 4 上海分元土木工程科技有限公司