

软基水闸底板脱空动力学反演模型构建与试验验证

李火坤¹, 余杰¹, 王刚¹, 魏博文^{1*}, 黄伟¹, 黄锦林^{2,3}

(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;

3. 河口水利技术国家地方联合工程实验室, 广州 510635)

摘要: 软基水闸极易因地基不均匀沉降、渗透变形等发生底板脱空现象, 传统的无损检测方法难以在水下探测底板脱空, 且不具实时性, 其应用还存在一定局限性。该研究基于软基水闸室内物理模型, 提出了一种软基水闸底板脱空动力学反演方法。首先, 基于多参数变量的底板脱空范围数学模型, 改进了反映软基水闸底板脱空参数与水闸动力学参数(模态参数)之间非线性映射关系的数学代理模型; 其次, 以水闸多测点多阶频率和振型变化率组合作为动力学敏感特征量, 建立了软基水闸底板脱空参数反演的目标函数, 并基于遗传算法对目标函数进行求解。最后, 建立了软基水闸室内物理模型, 并在模型中设置3种不同的底板脱空工况, 采用软基水闸底板脱空动力学反演方法对软基水闸底板的脱空进行反演识别与模型验证。结果表明: 基于动力学参数反演识别的水闸底板脱空区域趋势和脱空面积与模型实际脱空情况吻合较好, 3种工况下水闸底板脱空面积反演结果与模型实际脱空面积的相对误差分别为7.47%、6.78%、6.90%, 验证了该方法的可靠性, 可望为软基水闸实际工程底板脱空隐患检测提供一种新的思路。

关键词: 模型; 试验; 反演; 软基水闸; 底板脱空; 动力学参数

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.21.018

中图分类号: TV662

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2020)-21-0145-09

李火坤, 余杰, 王刚, 等. 软基水闸底板脱空动力学反演模型构建与试验验证[J]. 农业工程学报, 2020, 36(21): 145-153.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.21.018 <http://www.tcsae.org>

Li Huokun, Yu Jie, Wang Gang, et al. Model construction of dynamic inversion and experimental verification for the void of sluice floor on the soft foundation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(21): 145-153. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.21.018 <http://www.tcsae.org>

0 引言

水闸是水利工程中应用广泛而重要的控制性建筑物, 中国建成流量超 $5\text{ m}^3/\text{s}$ 以上的水闸达10万余座, 在调控水资源、防汛抗洪、蓄水灌溉等方面发挥着重要作用, 对推动国内的农业发展具有重要影响^[1-5]。水闸经过长久运行, 极易产生各类影响水闸安全运行的病患, 特别是位于平原地区或沿海地区的水闸, 大部分建于软基上, 其存在软土厚、含水量高、压缩性高、承载力低的特点^[6-7], 闸基底部在水流作用下会出现不均匀沉降、渗透变形等问题^[8-9], 从而造成水闸底板脱空而导致水闸坍塌或闸底断裂等事故^[10-12], 严重影响水闸正常功能的发挥。目前, 在检测水闸底板病患的方法中以探地雷达法应用最为广泛, 戴呈祥等^[13-14]利用探地雷达技术探测了软基水闸闸基冲刷剥蚀程度、淘空区的位置和范围, 对其不同类型闸基隐患的雷达图形特征进行了分析, 并指出雷达图像的解译和特征分析是判别闸基隐患类型和部

位的关键; 杨松华^[15]利用探地雷达检测技术对厦门马銮水闸闸基、护坦、海漫底板下闸基等工程隐患的位置及范围进行了探测, 并根据地质钻探成果对检测结果进行了验证, 同时指出该方法易受外界干扰, 应用之前需对雷达模型进行验证; 徐云乾等^[16]应用探地雷达技术检测佛山市沙口水利枢纽引水闸底板的渗流隐患, 给出了渗流隐患区的探地雷达图像特征和隐患的定性识别方法; 吴俊姿等^[17-18]将探地雷达技术应用于水闸脱空检测之中, 探讨了探地雷达的天线选择及测线布置, 分析了水闸脱空状况与雷达图像之间的关系; 刘金涛等^[19]应用探地雷达对水闸的底板进行了检测, 有效地探测了水闸底板的厚度、渗漏通道情况及地基地层分布情况等。从上述探地雷达法的应用特点来看, 要求检测设备(如雷达或声发射探头)能够触及被测结构, 且前期需建立反射信号与各类结构或地层物理特性之间的先验模型, 以此修正实际探测图像的解译成果, 因此在实施之前, 还需进行模型验证。对于软基水闸底板而言, 其在正常运行时都是位于水下, 传统的检测设备难以触及水闸底板, 若要实现运行期水闸底板脱空的实时检测和诊断, 还需要研究新的诊断方法。软基水闸底板脱空会造成水闸整体约束边界条件改变, 从而使水闸整体模态参数发生变化, 通过建立模态参数变化与水闸底板脱空的非线性映射关系可实现软基水闸底板脱空诊断, 基于模态参数的软基水闸底板脱空诊断方法能够很好地实现实时检测。国内外关于软基水闸底板脱空动力学诊断方法的研究不

收稿日期: 2020-06-30 修订日期: 2020-10-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(52079061, 51879126, 51869011, 51779115); 江西省杰出青年基金项目(2018ACB21018, 2019ACB21022); 南昌大学研究生创新专项资金项目(CX2019117)

作者简介: 李火坤, 博士, 教授, 主要从事水工水力学与工程安全检测方面研究。Email: lihuokun@ncu.edu.cn

*通信作者: 魏博文, 博士, 教授, 主要从事水利工程安全监测方向研究。Email: bwwei@ncu.edu.cn

多, 陈鸷^[20]在国内外率先提出了基于水闸底板动力特性的变化的软基水闸底板的脱空检测思想, 将水闸底板以下的软基视为弹性地基, 采用柔度和黏性阻尼系数作为底板脱空诊断的动力学敏感特征量, 应用脉冲锤击法进行室内模态试验以验证该方法的可行性, 并进行了实际工程检验, 结果表明该方法是可行的, 但该方法需在特定的条件下进行, 即当水闸底板处于无水时传感器和激励可触及底板, 对于正常运行的水闸 (水闸底板过水) 的检测还存在一定局限性。黄锦林等^[21]基于数值模型, 采用水闸频率和振型变化率作为动力学敏感特征量, 对软基水闸的底板脱空进行识别, 进一步验证了基于动力学参数的底板脱空诊断的可行性, 但该方法仅在数值模型上开展, 在结合水闸实际物理模型或原型工程开展振动测试与模态辨识、响应面数学代理模型的精准表达等方面还需进一步改进。

本文基于软基水闸室内物理模型, 提出一种软基水闸底板脱空动力学反演方法, 基于多参数变量的底板脱空范围数学模型, 改进反映软基水闸底板脱空参数与水闸动力学参数 (模态参数) 之间非线性映射关系的数学代理模型; 以水闸多测点多阶频率和振型变化率组合作为动力学敏感特征量, 建立水闸底板脱空反演的目标函数, 并基于遗传算法对目标函数进行求解, 以实现底板脱空的动力学反演。

1 软基水闸底板脱空动力学反演理论方法

1.1 脱空模式及脱空范围的参数化数学模型

以文献[21]所提出的软基水闸底板脱空模式分类为参考, 本文以相邻侧型和相对侧型脱空为例开展模型试验研究, 将水闸底板相邻侧型和相对侧型脱空范围分别以 5 个和 10 个脱空参数变量 d 进行数学描述, 并确定基于多参数的相邻侧型和相对侧型底板脱空范围数学模型, 其数学模型表达可参考文献[21]。

1.2 软基水闸底板脱空反演的数学代理模型

本文软基水闸底板脱空的反演方法属于模型修正方法^[22-25]的一类, 其中响应面法是一种能够通过构造具有显性的多项式来表达隐式的非线性函数的可靠手段, 为准确表达水闸模态参数与底板脱空参数之间的非线性映射关系, 构建响应面数学代理模型并代替有限元模型, 本文以底板脱空参数作为模型的自变量, 选择水闸模态参数 (频率、振型) 作为因变量, 采用多项式函数来表达模态参数与脱空参数之间非线性映射关系, 其非线性映射关系可表示为

$$f(d) = f(d_1, d_2, \dots, d_n) \quad (1)$$

$$\varphi(d) = \varphi(d_1, d_2, \dots, d_n) \quad (2)$$

式中 $f(d)$ 、 $\varphi(d)$ 分别表示水闸的固有频率、节点振型值; d 表示脱空参数值; n 表示脱空参数个数。可将方程式 (1) 和 (2) 用 Taylor 级数公式展开, 在准确表达水闸脱空参数和模态参数之间的非线性函数关系下充分考虑计算效率, 本文采用三阶多项式响应面模型, 相较于文献[21]中的三阶多项式响应面模型, 增加了考虑脱空参数之间

相关性的二次交叉项, 使得该响应面模型能够更加准确地描述水闸底板脱空参数与模态参数之间的非线性数学关系, 具体形式为

$$f_p(d_i) = \alpha_p + \sum_{i=1}^n \alpha_{pi} d_i + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \alpha_{pij} d_i d_j + \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n \alpha_{pii} d_i^2 + \sum_{i=1}^n \alpha_{piii} d_i^3$$

$$\varphi_{pq}(d_i) = \beta_p + \sum_{i=1}^n \beta_{pi} d_i + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \beta_{pij} d_i d_j + \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n \beta_{pii} d_i^2 + \sum_{i=1}^n \beta_{piii} d_i^3$$

式中 $f_p(d_i)$ 、 $\varphi_{pq}(d_i)$ 分别为软基水闸在不同脱空范围下的第 p 阶固有频率和第 p 阶的第 q 个测点振型, $d_i \in [d_i^l, d_i^u]$ 为待反演识别的脱空参数, d_i^l 、 d_i^u 为脱空范围取值的上下限, α 和 β 为响应面方程待定系数。

响应面数学代理模型确定基本方法为: 采用拉丁超立方抽样法^[26-27]在脱空参数取值范围内来生成合理的脱空参数样本 d_i (2 000 组以上), 以此作为软基水闸基淮有限元模型模态计算的脱空参数输入, 计算不同脱空组合下的模态参数并得到对应的固有频率和节点振型值, 采用多元回归分析方法对上述方程进行求解并拟合待定系数 α 和 β , 从而确定数学代理模型。

在拟合响应面方程时, 响应面精度评价是检验响应面模型是否符合要求的重要指标, 通过响应面模型与有限元模型之间的相对误差来反映响应面模型的回归精度, 以此衡量拟合的响应面模型能否有效地替代有限元模型。本文通过有限元模型计算的及响应面模型输出的固有频率 f_p 和节点振型值 φ_{pq} 来计算响应面模型的精度:

$$e = \frac{y_{RS}(pq) - y_{FEM}(pq)}{y_{FEM}(pq)} \quad (5)$$

式中 e 表示响应面模型的精度, 响应面模型精度控制在 5% 以内^[28]; y_{RS} 表示响应面模型模态参数的输出值, y_{FEM} 表示有限元模型模态参数的计算值。

1.3 软基水闸底板脱空反演的目标函数

基于数学代理模型和动力学敏感特征量, 构建底板脱空参数反演的最优化数学模型, 通过建立目标函数 J^* 来反映水闸振动测试识别的动力学敏感特征量与代理模型 (响应面模型) 计算得到动力学敏感特征量的相对偏差, 将脱空参数的反演表达为最优化求解问题。以软基水闸多测点多阶频率和振型相对变化率组合作为动力学敏感特征量, 构造的目标函数为:

$$J^* = \sum_{p=1}^M \left(\frac{f_p^* - f_p}{f_p^*} \right)^2 + \sum_{p=1}^M \sum_{q=1}^N \left(\frac{\varphi_{pq}^* - \varphi_{pq}}{\varphi_{pq}^*} \right)^2 \quad (6)$$

式中 f_p^* 、 f_p 分别表示水闸第 p 阶频率振动测试识别值和响应面模型计算值, φ_{pq}^* 、 φ_{pq} 分别表示水闸测点 q 的第 p 阶振型测试识别值和响应面方程计算值, N 为水闸振动响应测试的测点个数, M 为所识别的模态阶数。

在式 (6) 中, f_p^* 、 φ_{pq}^* 为可通过软基水闸振动测试模型试验识别的水闸模态参数, 采用基于奇异熵

定阶的随机子空间法和稳定图法识别水闸振动模态参数，其基本理论方法和过程可参考文献[29]。采用遗传算法对式（6）所示的目标函数进行最优求解，以获得底板脱空参数的反演结果，其基本过程可参考

文献[28]。

1.4 软基水闸底板脱空反演基本流程

综合以上，本文软基水闸底板脱空动力学反演流程如图 1 所示。

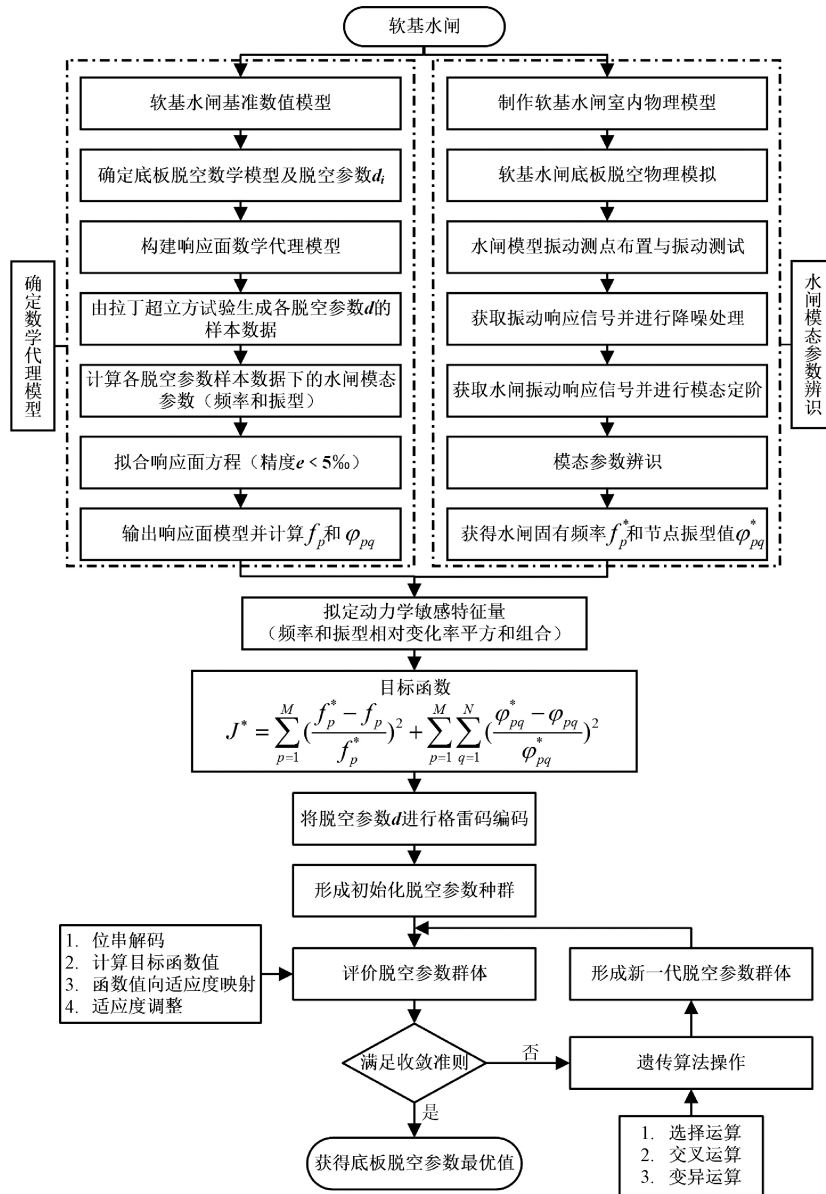


图 1 软基水闸底板脱空动力学反演流程

Fig.1 Flowchart of dynamic inversion method for the floor void of sluice on the soft foundation

2 模型试验验证

2.1 软基水闸物理模型的制作

为验证本文方法的可靠性，以江西信江水闸工程为背景实例，制作一单孔软基水闸室内物理模型，模型比尺为 1:10，模型基本尺寸为：水闸底板顺水流方向长 1.44 m，横河向宽 1.36 m，底板前后设有齿槽，水闸底板厚 0.16 m，闸墩高 1.6 m、厚 0.16 m，水闸前、后部工作桥宽分别为 0.32 和 0.4 m，厚 0.04 m，水闸模型示意图如图 2a 所示。为保证在进行动力测试过程中振动波传播介质与原型水闸的一致性，水闸结构模型采用与原型一致的钢筋混凝土材料，软基的材料模拟也与原型水闸地基

材料基本保持一致，即采用细沙、砾石与黏土按一定界限填充压实来模拟软土地基，其中，软土地基最底部细沙与砾石层厚 0.3 m，往上为黏土层厚 0.08 m，最上部为水闸底板凹槽处黏土层厚 0.16 m。试验制作完成的软基水闸物理模型如图 2b 所示。

2.2 软基水闸模型底板脱空的模拟及脱空工况设置

基于水闸物理模型，采用人工掏空的方式对水闸模型底板进行相邻侧型脱空和相对侧型脱空的随机模拟，并测量脱空纵深，如图 3 所示；在底板脱空范围的数学模型中，采用 5 个参数描述相邻侧脱空（即 $n=5$ ），采用 10 个参数描述相对侧型脱空（即 $n=10$ ）。脱空模拟设置共分为 3 种工况：工况一和工况二均为水闸底板上游相

邻侧型脱空, 工况三为水闸底板相对侧型脱空, 不同脱空工况下的脱空参数 d (即脱空纵深) 如表 1 所示。

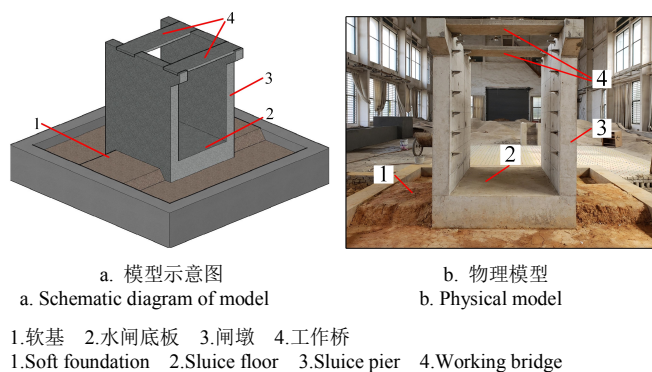
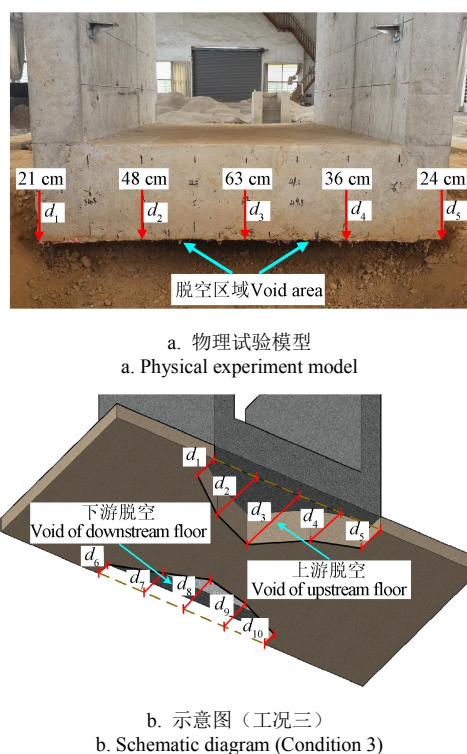


图 2 软基水闸示意图及物理模型

Fig.2 Schematic diagram and physical model of sluice on the soft foundation



注: $d_1 \sim d_5$ 为水闸底板上游脱空参数, $d_6 \sim d_{10}$ 为水闸底板下游脱空参数。
Note: $d_1 \sim d_5$ are the void parameters of upstream floor, $d_6 \sim d_{10}$ are the void parameters of downstream floor.

图 3 软基水闸模型底板脱空物理试验模型及示意图

Fig.3 Physical simulation and schematic diagram of the floor void of sluice on the soft foundation

表 1 水闸物理模型底板脱空工况及脱空参数

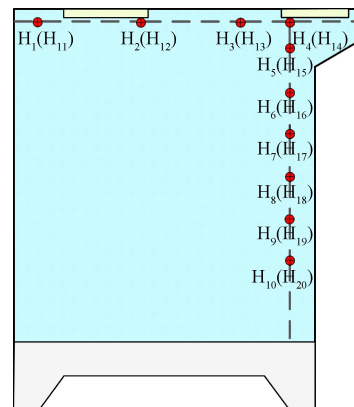
Table 1 Floor void conditions about the floor void and void parameters for physical model of sluice

脱空参数 Void parameters	工况一 Condition 1	工况二 Condition 2	工况三 Condition 3
d_1/m	0.21	0.21	0.21
d_2/m	0.31	0.48	0.48
d_3/m	0.48	0.63	0.63
d_4/m	0.35	0.36	0.36
d_5/m	0.18	0.24	0.24
d_6/m	/	/	0.11
d_7/m	/	/	0.23
d_8/m	/	/	0.36
d_9/m	/	/	0.28
d_{10}/m	/	/	0.12

2.3 软基水闸模型振动测试及模态参数辨识

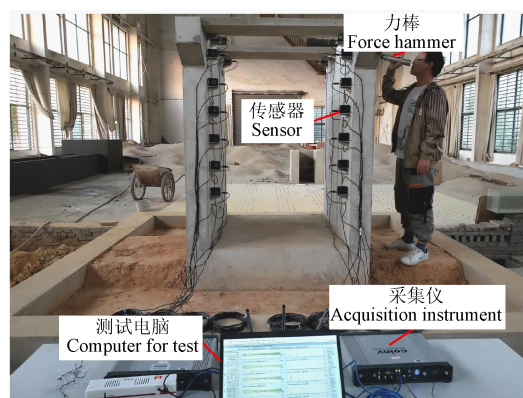
2.3.1 软基水闸模型振动测试

水闸模型振动测试传感器布置如图 4a 所示, 共布置 20 个水平向振动传感器, 振动传感器采用 BY-S07 型高精度振动传感器。传感器布置方式如下: 在水闸模型左右两侧沿闸墩水流方向依次对称布置 8 个振动传感器 ($H_1 \sim H_4$ 为右闸墩测点、 $H_{11} \sim H_{14}$ 为左闸墩测点), 在左右闸墩沿高度方向依次对称布置 12 个振动传感器 ($H_5 \sim H_{10}$ 为右闸墩测点、 $H_{15} \sim H_{20}$ 为左闸墩测点)。水闸振动测试的测振物理量为速度, 采样频率为 500 Hz, 采用 DASP 智能数据采集系统^[30]进行数据采集与预处理; 本次模型振动测试以人工力棒瞬时脉冲激励的方式对水闸进行激励并使其产生振动, 如图 4b 所示, 典型工况 (工况三) 代表性测点振动响应时程线及功率谱如图 5 所示; 根据所采集的各工况下的振动响应时程进行模态辨识即可获取各脱空工况下的水闸模态参数。



a. 传感器布置示意图

a. Schematic diagram of sensors arrangement



b. 软基水闸模型振动测试

b. Model vibration test of sluice on the soft foundation

注: $H_1 \sim H_{10}$ 为布置在水闸右侧闸墩测点, $H_{11} \sim H_{20}$ 为布置在水闸左侧闸墩测点。下同。

Note: $H_1 \sim H_{10}$ are the measuring points on the right pier of sluice, $H_{11} \sim H_{20}$ are the measuring points on the left pier of sluice. The same below.

图 4 传感器布置示意图及软基水闸模型振动测试

Fig.4 Schematic diagram of sensors arrangement and model vibration test of sluice on soft foundation

2.3.2 各脱空工况下的水闸模型模态辨识结果

根据水闸模型各底板脱空工况下测点的振动响应, 采用基于奇异熵定阶的随机子空间法及稳定图法对水闸

模型进行模态参数识别。在人工脉冲激励下，水闸模型共被激发出 4 阶模态，工况一识别得到的前 4 阶频率分别为：20.26、24.81、53.31 和 69.72 Hz；工况二识别得到的前 4 阶频率分别为：20.24、24.80、52.20 和 69.58 Hz；工况三识别得到的前 4 阶频率分别为：20.23、24.65、48.42 和 69.77 Hz。分析不同脱空工况下水闸模态频率的变化趋势可知：随着水闸脱空区域的逐渐增大，水闸整体频率逐渐变小，且对于该水闸模型，底板发生脱空对第三阶频率影响最大，该阶频率变化对底板脱空敏感性最强，主要是第三阶的振动在底板附近较大，而其他阶次的振动在底板附近极小，当水闸底板脱空使底板约束边界条件发生改变时，第三阶的振动变化较其他阶次更大，即第三阶频率变化对底板脱空敏感性最强。

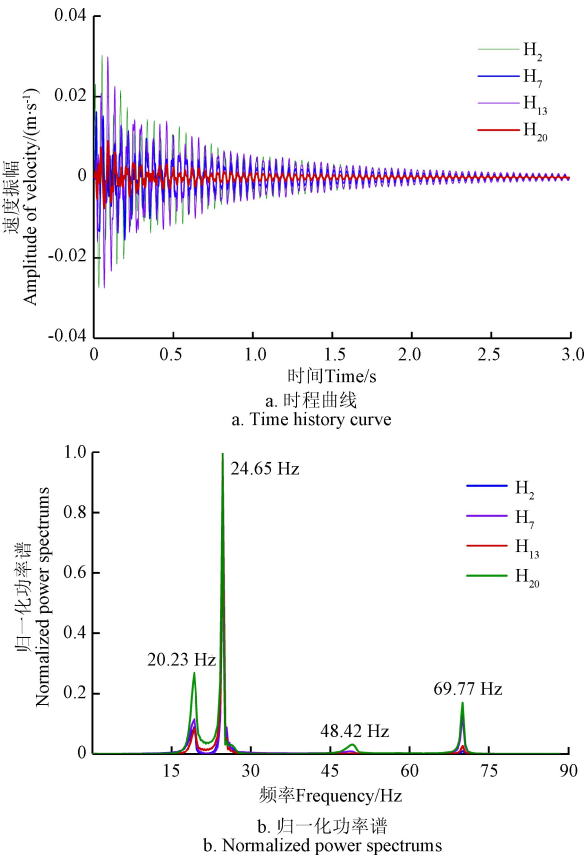


图 5 典型测点振动响应时程线和归一化功率谱

Fig.5 Time history signals and normalized power spectrums of typical measuring points

2.4 响应面数学代理模型的建立

本文响应面数学代理模型的建立以有限元数值模型为基准，根据上述室内物理模型对比建立相应的软基水闸 ANSYS 有限元模型。水闸有限元数值模型采用六面实体单元进行网格划分(图 6)，共有 20 036 个单元与 24 455 个节点。在有限元数值模型中，采用温克尔地基模型模拟软基，定义 Surface154 单元附着于水闸底板（即底板与地基接触面）并通过设置弹性地基刚度（Elastic foundation stiffness, EFS）值来模拟温克尔地基。针对水闸数值模型的脱空部分，可将 EFS 值置为零来实现底板脱空的模拟。有限元模型中的材料参数通过与物理模型进行对比修正获得，如表 2 所示。

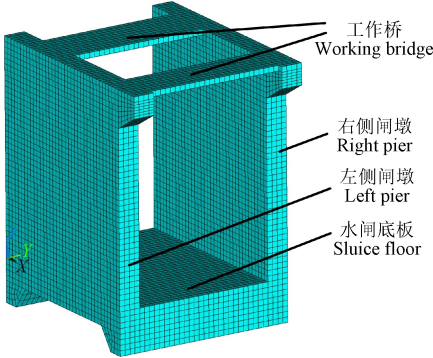


图 6 软基水闸有限元网格划分

Fig.6 Finite element mesh of sluice on the soft foundation

表 2 有限元模型材料参数

Table 2 Material parameters of finite element model				
参数 Parameters	水闸底板 Sluice floor	左闸墩 Left pier	右闸墩 Right pier	软基 Soft foundation
弹模 Elastic modulus E/GPa	21.49	19.02	20.19	/
密度 Density $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	2598	2498	2506	/
泊松比 Poisson's ratio μ	0.15	0.15	0.15	/
弹性地基刚度 Elastic foundation stiffness $(\text{N}\cdot\text{m}^{-3})$	/	/	/	1.498×10^9

水闸底板相邻侧型脱空和相对侧型脱空分别采用 5 个、10 个脱空控制参数对水闸底板脱空区域进行数学描述。采用拉丁超立方抽样法来随机生成 2 000 组脱空控制参数样本，其中工况一和工况二中 5 个脱空控制参数取样范围为 0~0.65 m；工况三中上游侧和下游侧的 10 个脱空控制参数取样范围分别为 0~0.65 和 0~0.4 m。将随机生成的 2 000 组脱空控制参数以程序设计的方式输入所建立的软基水闸基淮有限元模型，并进行有限元模态计算，提取各组对应脱空状态下的前四阶频率与振型，根据式（3）、（4）拟合响应面方程的待定系数 α 和 β ，并将拟合后的响应面模型替代有限元模型。经拟合，3 个工况下的响应面方程均满足精度要求（均在 5‰以内），限于篇幅，本文以工况三为典型代表给出频率和典型测点振型响应面精度，如图 7 和 8 所示。

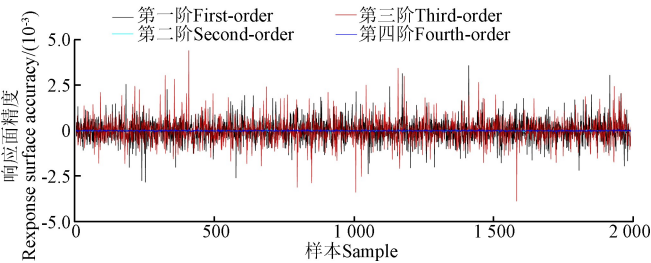


图 7 工况三前 4 阶频率响应面精度

Fig.7 Response surface accuracy of previous four-order frequencies on condition 3

2.5 软基水闸底板脱空反演结果与验证

根据图 1 所示反演流程，得到水闸底板不同脱空工况下的脱空控制参数 d 与模型脱空实际值对比如表 3 所示，反演识别脱空区域面积与实际脱空区域面

积相对误差如表 4 所示,不同脱空工况下脱空面积与趋势反演识别结果与实际脱空结果对比如图 9 所示。从反演识别的结果来看,本文所提出的方法所反演识别的底板脱空区域趋势和脱空面积与模型实际脱空

情况吻合较好,3 种工况下水闸底板脱空面积反演结果与模型实际脱空面积的相对误差分别为 7.47%、6.78%、6.90%,相对误差较小,验证了本方法的可靠性。

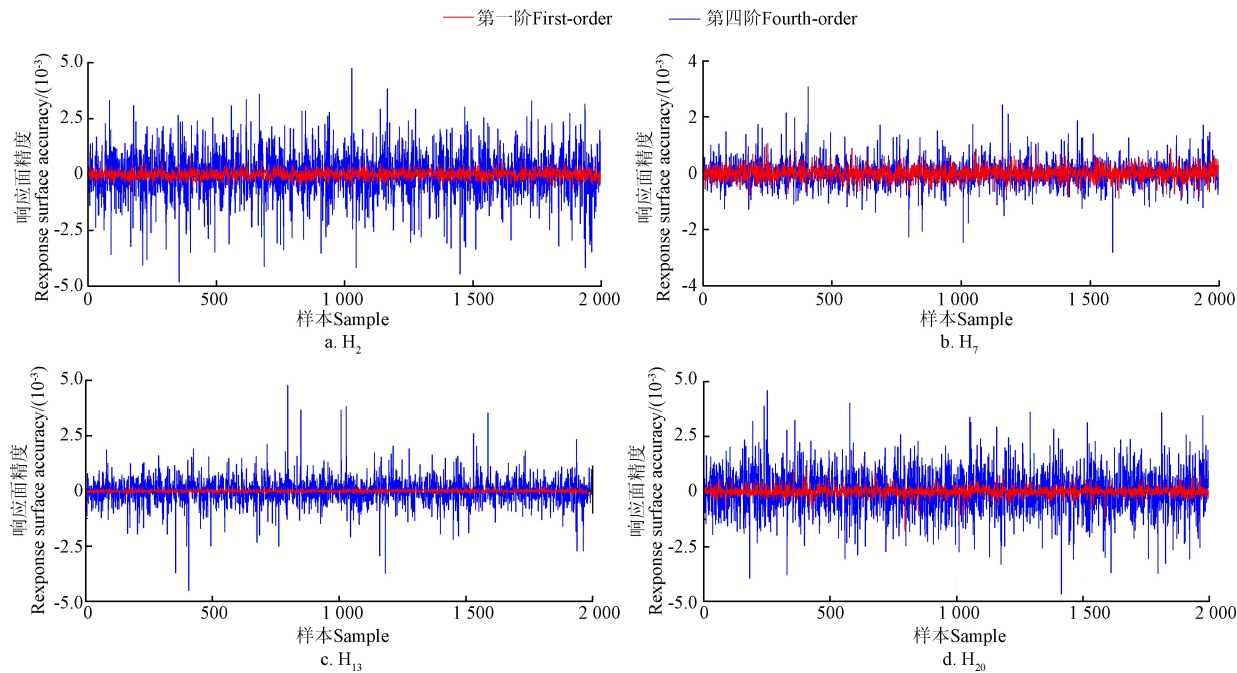


图 8 工况三典型测点振型响应面精度

Fig.8 Response surface accuracy of mode shapes of typical measuring points on condition 3

表 3 不同工况下脱空参数反演结果

Table 3 Inversion results of void parameters on different conditions

脱空参数 Void parameters	工况一 Condition 1		工况二 Condition 2		工况三 Condition 3	
	实际值 Actual values/m	反演值 Inversion values/m	实际值 Actual values/m	反演值 Inversion values/m	实际值 Actual values/m	反演值 Inversion values/m
d_1	0.21	0.14	0.21	0.28	0.21	0.22
d_2	0.31	0.29	0.48	0.34	0.48	0.44
d_3	0.48	0.65	0.63	0.64	0.63	0.62
d_4	0.35	0.35	0.36	0.35	0.36	0.43
d_5	0.18	0.15	0.24	0.22	0.24	0.29
d_6	/	/	/	/	0.11	0.12
d_7	/	/	/	/	0.23	0.31
d_8	/	/	/	/	0.36	0.36
d_9	/	/	/	/	0.28	0.24
d_{10}	/	/	/	/	0.12	0.30

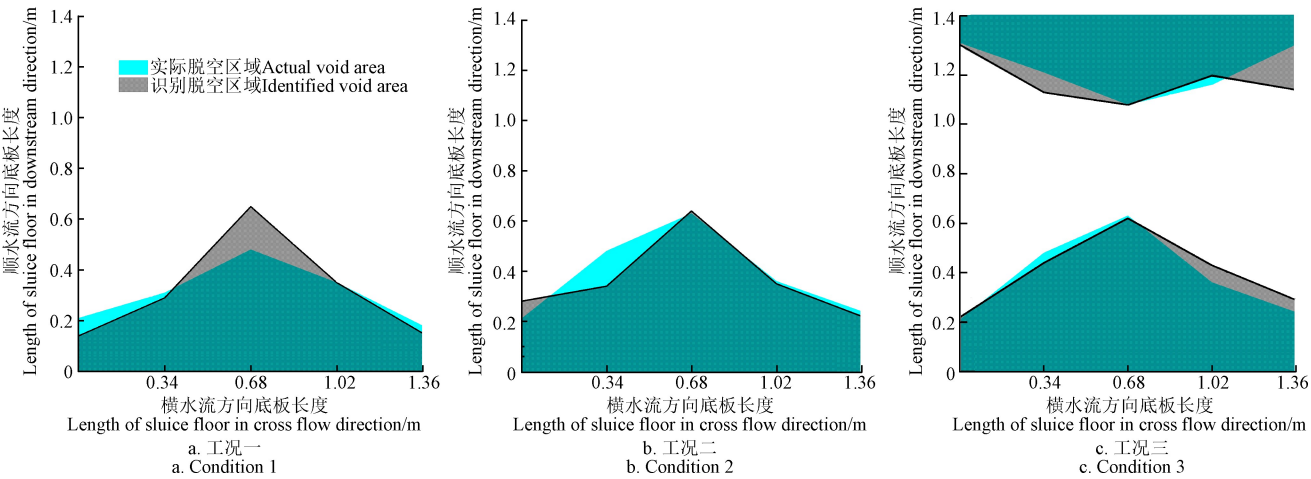


图 9 不同工况下脱空面积和趋势识别结果与实际脱空值对比

Fig.9 Comparison of the void area and trend between the identified and actual results at different conditions

表 4 反演识别脱空面积与实际脱空面积相对误差

Table 4 Relative error between the identified and actual void area

工况 Conditions	实际脱空面积 Actual void area/m ²	识别脱空面积 Identified void area/m ²	相对误差 Relative error/%
工况一 Condition 1	0.453 9	0.487 9	7.47
工况二 Condition 2	0.576 3	0.537 2	6.78
工况三 Condition 3	0.911 2	0.974 1	6.90

3 结论与建议

1) 改进了反映软基水闸底板脱空参数与水闸动力学参数之间非线性映射关系的响应面数学代理模型, 以水闸多测点多阶频率和振型变化率组合作为动力学敏感特征量, 建立了水闸底板脱空反演的目标函数, 并给出了脱空参数的反演流程。

2) 建立了软基水闸室内模型, 对水闸底板相邻侧脱空和相对侧脱空进行了物理模拟, 采用改进的软基水闸底板脱空动力学反演方法进行了脱空参数的反演识别并与实际脱空情况进行了对比验证, 结果表明, 反演识别的水闸底板脱空区域趋势和脱空面积与模型实际脱空情况吻合较好, 3 种工况下水闸底板脱空面积反演结果与模型实际脱空面积的相对误差分别为 7.47%、6.78%、6.90%, 验证了该方法的可靠性。

频率和各测点振型对水闸底板脱空参数的敏感性不同会对目标函数中频率和振型变化率的权重系数产生影响, 如何从灵敏度角度分析各模态参数对底板脱空敏感性并确定其权重系数, 进一步提高反演精度, 是值得深入研究的。

[参 考 文 献]

- [1] 中华人民共和国水利部. 全国水利发展统计公报[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2018.
- [2] 倪文进. 中国农村水利发展状况与科技需求[J]. 农业工程学报, 2010, 26(3): 1-8.
Ni Wenjin. Development and technology requirement of China rural water conservancy[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(3): 1-8. (in Chinese with English abstract)
- [3] 包加桐, 钱江, 张炜, 等. 基于多通道数据流在线相关分析及聚类的闸站工程安全监测[J]. 农业工程学报, 2019, 35(3): 109-116.
Bao Jiatong, Qian Jiang, Zhang Wei, et al. Safety monitoring of sluice-pump station project based on online correlation analysis and clustering of multichannel data streams[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(3): 109-116. (in Chinese with English abstract)
- [4] 汪恩良. 寒区水闸计算机辅助设计软件系统开发研究[J]. 农业工程学报, 1999, 15(2): 239-239.

Wang Enliang. Research and development of computer aided design software system for sluices in cold area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 1999, 15(2): 239-239. (in Chinese with English abstract)

- [5] 刘昉, 谷欣玉, 李文胜, 等. 动水关闭的平面事故闸门体型优化试验研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(12): 142-149.
Liu Fang, Gu Xinyu, Li Wensheng, et al. Structural optimization of emergency plate gate for closure in moving water[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(12): 142-149. (in Chinese with English abstract)
- [6] 梁民阳, 吴兴龙. 浙东海塘上水闸病害成因分析及对策[J]. 中国农村水利水电, 2006(7): 107-108.
Liang Mingyang, Wu Xinglong. Cause and countermeasures of sluice disease in east sea of Zhejiang[J]. China Rural Water and Hydropower, 2006(7): 107-108. (in Chinese with English abstract)
- [7] 张帆. 珠三角地区水闸软土基础沉降处理案例分析[J]. 西北水电, 2007(2): 50-51, 73.
Zhang Fan. Case analysis on soft foundation settlement of sluice gates in delta region around Pear River[J]. Northwest Hydropower, 2007(2): 50-51, 73. (in Chinese with English abstract)
- [8] 何金平, 曹旭梅, 李绍文, 等. 基于安全监测的水闸健康诊断体系研究[J]. 水利水运工程学报, 2018(5): 1-7.
He Jinping, Cao Xumei, Li Shaowen, et al. Analysis of sluice health diagnosis system based on safety monitoring[J]. Hydro-Science and Engineering, 2018(5): 1-7. (in Chinese with English abstract)
- [9] 钟俊纪. 水闸软土地基沉降预测的主要方法[J]. 理论与现代化, 2005(S1): 131-132.
Zhong Junji. Main methods of settlement prediction of sluice on soft foundation[J]. Theory and Modernization, 2005(S1): 131-132. (in Chinese with English abstract)
- [10] 陈富强, 杨光华, 黄致兴, 等. 某水闸桩基底板脱空案例分析及设计反思[J]. 建筑科学, 2015, 31(S2): 197-203.
Chen Fuqiang, Yang Guanghua, Huang Zhixing, et al. Case analysis and design reflection of a sluice floor void[J]. Building Science, 2015, 31(S2): 197-203. (in Chinese with English abstract)
- [11] 陈仲策. 水闸基础处理方法探讨[J]. 中国防汛抗旱, 2010(4): 59-60, 71.
Chen Zhongce. Discussion on foundation treatment method of sluice[J]. China Flood & Drought Management, 2010(4): 59-60, 71. (in Chinese with English abstract)
- [12] 关锦荣. 沿海地区水闸破坏形式与加固对策[J]. 水利科技, 2009(3): 59-61.

- Guan Jinrong. Damaged forms of sluices in coastal areas and the strengthening countermeasures[J]. Hydraulic Science and Technology, 2009(3): 59-61. (in Chinese with English abstract)
- [13] 戴呈祥, 王士恩. 水闸闸基隐患探测雷达图像特征分析[J]. 地球物理学进展, 2003, 18(3): 429-433.
- Dai Chenxiang, Wang Shien. Feature analysis on radar pictures for detecting hidden danger of floodgate base[J]. Progress in Geophysics, 2003, 18(3): 429-433. (in Chinese with English abstract)
- [14] 戴呈祥, 王士恩. 水闸闸基隐患类型特征分析[J]. 工程地球物理学报, 2004, 1(4): 353-357.
- Dai Chengxiang, Wang Shien. The character analysis of hidden danger types of the floodgate base[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2004, 1(4): 353-357. (in Chinese with English abstract)
- [15] 杨松华. 地质雷达检测在厦门马銮水闸安全鉴定中的应用[J]. 福建建筑, 2011, 156(6): 73-75.
- Yang Songhua. The application of ground penetrating radar examination in Xiamen maluan sluice safe appraisal[J]. Fujian Architecture & Construction, 2011, 156(6): 73-75. (in Chinese with English abstract)
- [16] 徐云乾, 杨文滨, 袁明道, 等. 水闸底板渗流隐患的探地雷达检测[J]. 无损检测, 2017, 39(9): 83-86.
- Xu Yunqiang, Yang Wenbin, Yuan Mingdao, et al. The detection of seepage hazard in sluice gate bottom plate using GPR[J]. Nondestructive Testing, 2017, 39(9): 83-86. (in Chinese with English abstract)
- [17] 吴俊姿. 探地雷达在水闸脱空检测中的应用[J]. 水利技术监督, 2018(3): 233-236.
- Wu Junzi. Application of ground penetrating radar in the detection of sluice voids[J]. Technical Supervision in Water Resources, 2018(3): 233-236. (in Chinese with English abstract)
- [18] 安铎, 陆新宇, 李经纬. 基于探地雷达技术的水闸脱空检测方法研究[J]. 人民长江, 2014, 45(2): 202-205.
- An Duo, Lu xinyu, Li jingwei. Research on detection method of sluice void based on ground penetrating radar technology[J]. Yangtze River, 2014, 45(2): 202-205. (in Chinese with English abstract)
- [19] 刘金涛, 张旭辉, 潘展钊, 等. 基于探地雷达的水闸水下结构探测[J]. 无损检测, 2019, 41(5): 61-63.
- Liu Jintao, Zhang Xuhui, Pan Zhanzhao, et al. Detection of underwater structures of a sluice based on GPR[J]. Nondestructive Testing, 2019, 41(5): 61-63. (in Chinese with English abstract)
- [20] 陈鸷. 无损动态检测闸基隐患[J]. 大坝与安全, 1994(1): 40-46.
- Chen Ying. Non-destructive dynamic detection of hidden dangers of gate base[J]. Dam & Safety, 1994(1): 40-46. (in Chinese with English abstract)
- [21] 黄锦林, 李火坤, 邓冰梅. 基于响应面理论的闸基底板脱空区域识别方法[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2018, 16(4): 249-256.
- Huang Jinlin, Li Huokun, Deng Bingmei. Identification methods of sluice floor pavement area based on the theory of response surface[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2018, 16(4): 249-256. (in Chinese with English abstract)
- [22] Girardi M, Padovani C, Pellegrini D, et al. Finite element model updating for structural applications[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2020(370): 112675.
- [23] Hofmeister B, Bruns M, Rolfes R. Finite element model updating using deterministic optimisation: A global pattern search approach[J]. Engineering Structures, 2019(195): 373-381.
- [24] Kang J, Zhang X, Cao H, et al. Research on multi-alternatives problem of finite element model updating based on IAFSA and kriging model[J]. Sensors, 2020, 20(15): 4274.
- [25] 费庆国, 韩晓林, 苏鹤玲. 响应面有限元模型修正的实现与应用[J]. 振动、测试与诊断, 2010, 30(2): 132-134.
- Fei Qingguo, Han Xiaolin, Su Heling. Response surface based finite element model updating and its application[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2010, 30(2): 132-134. (in Chinese with English abstract)
- [26] 方磊. 基于 LHS 抽样的不确定性分析方法在概率安全评价中的应用研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015.
- Fang Lei. Application Research of Uncertainty Analysis Method Based on LHS Sampling in Probabilistic Safety Valuation[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015. (in Chinese with English abstract)
- [27] Jirutitijaroen P, Singh C. Comparison of simulation methods for power system reliability indexes and their distributions[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(2): 486-493.
- [28] Li H, Wang G, Wei B, et al. Dynamic inversion method for the material parameters of a high arch dam and its foundation[J]. Applied Mathematical Modelling, 2019(71): 60-76.
- [29] Li H, Zhong Y, Wei B, et al. Beat vibration mechanism of a sluice pier under high-speed flood discharge excitation [J]. Journal of Low Frequency Noise Vibration and Active Control, 2020, 39(1): 28-43.
- [30] 贺玉龙, 张群, 陈瑞, 等. 成都地铁诱发室内结构噪声实测与分析[J]. 噪声与振动控制, 2020, 40(2): 202-206.
- He Yulong, Zhang Qun, Chen Rui, et al. Measurements and analyses of indoor ground-borne noise induced by Chengdu metro[J]. Noise and Vibration Control, 2020, 40(2): 202-206. (in Chinese with English abstract)

Model construction of dynamic inversion and experimental verification for the void of sluice floor on the soft foundation

Li Huokun¹, Yu Jie¹, Wang Gang¹, Wei Bowen^{1*}, Huang Wei¹, Huang Jinlin^{2,3}

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Nanchang University, Nanchang 330031, China;

2. Guangdong Provincial Water Conservancy Research Institute, Guangzhou 510635, China;

3. National Engineering Joint Laboratory of Estuarine Water Conservancy Technology, Guangzhou 510635, China)

Abstract: As the uneven settlement and seepage deformation of the soft foundation, the floor void is prone to occurring in the sluices built on soft foundation. The traditional non-destructive testing methods are hardly difficult to detect the floor void of the sluices under water, which are non-real time, and their applications still have certain limitations. For the floor of sluice on the soft foundation, it has been under water during the operation period, and new diagnostic methods need to be studied to realize the real-time detection and diagnosis of the floor void of sluice on the soft foundation. The floor void of sluice on the soft foundation will cause the overall constraint boundary conditions of the sluice to change, thereby changing the overall modal parameters of the sluice. The diagnosis of the floor void of sluice on the soft foundation can be realized by establishing the nonlinear mapping relationship between the modal parameters and the floor void parameters of sluice. The method of diagnosing the floor void of sluice on the soft foundation based on modal parameters can realize real-time detection well. Therefore, a dynamic inversion method of the floor void of sluice on the soft foundation is proposed on the basis of the indoor physical model of the sluice on soft foundation in this research. First, based on mathematical model of multi-parameter variables of the floor void of sluice, a mathematical proxy model reflecting the nonlinear mapping relationship between the void parameters of the sluice floor and the dynamic parameters (modal parameters) of the sluice was improved. Second, the combination of the change rate of multi-order frequency and mode shape of multiple measurement points of the sluice was took as the dynamic sensitive characteristic quantity of the parameters inversion, and an objective function for the dynamic inversion of void parameters of sluice floor was established. Then the objective function is optimized through the genetic algorithm. Finally, a physical model of the indoor sluice on soft foundation had been made, and three different conditions of floor void of sluice on the soft foundation were set in the model. The prototype vibration test of the physical sluice on soft foundation on three conditions was carried out, and the corresponding modal parameters of sluice were identified based on the vibration response signal. And the dynamic inversion method of the floor void of sluice on the soft foundation proposed in the paper was used to invert the floor void of sluice and verified by the physical model. The results showed that the trend of floor void of sluice and the void area determined by the inversion method based on dynamic parameters of sluice were in good agreement with the actual condition of the physical model. With the three different conditions, the relative errors between the calculated void area and the actual void area are 7.47%, 6.78%, and 6.90%, respectively, which can confirm the reliability and rationality of the proposed method. The proposed method can provide a new idea for safety detection of the floor void of actual sluice on the soft foundation.

Keywords: models; test; inversion; sluice on soft foundation; floor void; dynamic parameters