

软基水闸底板脱空反演中的传感器优化布置方法

李火坤,方静,黄伟,万子豪,涂源,刘双平

(南昌大学工程建设学院,江西南昌 330031)

摘要:为更好地使软基水闸底板脱空检测传感器系统达到监测成本和监测性能指标之间的最佳平衡,同时为解决传统的有效独立法和损伤灵敏度法不能兼顾模态线性独立和损伤敏感性的问题,提出了一种结合有效独立法和损伤灵敏度法的多目标传感器优化布置方法。为解决模态数据冗余问题引入节点相似度函数,从动力学上探究水闸底板脱空对模态参数的影响,认为模态柔度为软基水闸底板脱空敏感特征量。以 Fisher 信息矩阵 2-范数最大为目标,采用 MAC 矩阵非对角元最大值为评价指标,实现测点优化布置,并将测点优化结果应用于水闸底板脱空反演。结果表明:传感器优化布置后的水闸底板脱空参数识别值相对误差的平均值分别从 28.3%、15.8%、39.3% 降低至 1%、1.9%、15.9%,验证了该方法的可靠性。

关键词:软基水闸;底板脱空;传感器优化布置;有效独立法;损伤灵敏度法;模态柔度

中图分类号:TV662 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2022)05-0045-07

Optimal sensor arrangement method of sluice floor voiding inversion on soft foundation//LI Huokun, FANG Jing, HANG Wei, WAN Zihao, TU Yuan, LIU Shuangping (School of Infrastructure Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: To better make the sensor system of sluice floor voiding monitoring on soft foundation to achieve the best balance between costs and performance index, at the same time to solve the problem of traditional effective independence method and damage sensitivity method that cannot consider both modal linear independence and damage sensitivity, a multi-objective approach combined with effective independence method and damage sensitivity method is proposed to optimize the sensor arrangement. To solve the problem of modal data redundancy, the node similarity function is introduced. The influence of the sluice floor voiding on the modal parameters is explored from the aspect of hydrodynamics, and the modal flexibility is determined as the voiding sensitive characteristic quantity. Taking the maximum 2-norm of the Fisher information matrix as the goal, the maximum off-diagonal element of the MAC matrix is used as the evaluation index. The optimal arrangement of measuring points is then realized, and the results of the measuring points have been applied to the voiding inversion of the sluice floor. The results show that the meanrelative error of the recognition accuracy after the sensor optimization is decreased from 28.3%, 15.8%, 39.3% to 1%, 1.9%, 15.9%, respectively, indicating that the reliability of the method is verified.

Key words: sluice on soft foundation; floor voiding; optimal sensor arrangement; effective independence method; damage sensitivity method; modal flexibility

目前,我国已建成的水利枢纽工程位居世界第一,水闸是水利枢纽的重要组成部分,其长期服役于复杂和特殊的工作环境,易产生各种病患,而闸基病患是影响水闸安全的重要因素之一。闸基底部在上、下游水位差的作用下,会产生强渗透带和闸基脱空区,从而导致水闸坍塌事故,如福清市棉亭盐场水闸曾在 1984 年发生闸基渗漏引起底板掏空,使闸室产生倾斜和裂缝;福清市海口前村水闸曾在 2006 年发

生闸基渗漏导致水闸底板严重掏空,造成下游护坦、消力池和边墙坍塌等。因此,加强水闸底板运行状态的安全监测,实现对水闸健康状况的实时监测,对保证水闸的长期安全运行具有重大意义。基于模态参数的水闸底板脱空监测方法可在无损条件下识别底板脱空的范围和程度,很好地实现对水闸底板脱空区域实时监测,以便及时采取补救措施,减少人力和财力的损失^[1-4]。在水闸底板脱空监测环节中,传感器

基金项目:国家自然科学基金(52079061,51879126,51909115);江西省自然科学基金(20192BAB216038);江西省水利厅科技项目(202123YBKT04);江西省研究生创新专项(YC2021-S052)

作者简介:李火坤(1981—),男,教授,博士,主要从事水工水力学与工程安全检测研究。E-mail: lihuokun@ncu.edu.cn

通信作者:黄伟(1990—),男,讲师,博士,主要从事水工水力学研究。E-mail: huangwei0214@ncu.edu.cn

系统是最重要的一个环节,传感器的布置不仅直接影响结构动力特征参数测试的精度,更是水闸底板脱空区域识别成功与否的关键一步。现有的水闸传感器布置方法以工程经验为主,缺乏理论支撑,因此系统构建水闸传感器优化布置方法具有重大意义^[5-6]。

近年来,国内外学者针对结构监测中的传感器优化布置方法做出了大量研究,Cobb等^[7]最早以结构损伤可识别为目的进行了传感器优化布置研究,探究了结构损伤对模态参数的影响,确定模态信息是限制结构损伤识别程度的关键因素。Vincenzi等^[8]基于信息熵理论考虑了框架与桥结构中模态误差的影响,将距离和模态预测误差相关性矩阵作为目标函数实现传感器优化布置的综合性能,用于解决桥梁振动中的传感器优化布置问题。李火坤等^[9]提出了一种结合QR分解(正交三角分解)和MAC准则(模态置信度准则)的逐步累积法,用于解决泄流激励下高拱坝振动测试中的传感器布置问题。吴子燕等^[10]结合有效独立法和运动能量法,提出了有效独立-驱动点残差法的优化布置方法,用于解决桁架结构的传感器布置问题。谢强等^[11]提出了一种基于模型减缩和线性模型估计理论的传感器优化布置方法,用于解决建筑结构中的传感器布置问题。滕军等^[12]提出了基于模态能量和自适应遗传算法的传感器优化布置方法,用于解决大跨空间结构中模态测试时的传感器优化布置。范恒承等^[13]融入多能量参数对有效独立法进行改进,用于空间桁架结构监测中的传感器布置问题。高博等^[14]提出了一种基于模态置信度准则的自适应引力算法,用于解决桥梁监测中的传感器布置问题。

综上所述,软基水闸底板脱空反演中的传感器优化布置研究不多,本文提出了一种结合有效独立法(effective independence, EI)和损伤灵敏度法(damage sensitivity, DS)的传感器优化布置方法,同时采用模态柔度及节点相似度改善测点敏感性和模态冗余度,以Fisher信息矩阵2-范数最大为目标实现测点优化,并将该方法运用于软基水闸底板脱空反演,通过比较测点优化前后的MAC矩阵非对角元素最大值和软基水闸底板脱空区域识别结果以验证该方法的有效性,以期能为软基水闸底板脱空检测传感器优化布置提供参考。

1 软基水闸底板脱空传感器优化布置方法

1.1 EI-DS法

一个自由度为 n 的动力系统无阻尼自由振动方程为

$$(\mathbf{K} - \lambda_i \mathbf{M}) \boldsymbol{\Phi}_i = 0 \quad (1)$$

式中: \mathbf{K} 为刚度矩阵; \mathbf{M} 为质量矩阵; λ_i 为系统的第 i 个特征值,即第 i 阶模态频率; $\boldsymbol{\Phi}_i$ 为特征向量,即第 i 阶模态振型。

根据摄动有限元法,假设损伤时结构的刚度只发生扰动,不考虑阻尼和质量的变化,则系统振动方程可表示为

$$[(\mathbf{K} + \Delta \mathbf{K}) - (\lambda_i + \Delta \lambda_i) \mathbf{M}] (\boldsymbol{\Phi}_i + \Delta \boldsymbol{\Phi}_i) = 0 \quad (2)$$

式中 $\Delta \mathbf{K}$ 、 $\Delta \lambda_i$ 、 $\Delta \boldsymbol{\Phi}_i$ 分别为结构刚度、特征值和特征向量的变化值。

忽略二阶项^[16],式(2)可表示为

$$(\mathbf{K} - \lambda_i \mathbf{M}) \Delta \boldsymbol{\Phi}_i = \Delta \lambda_i \mathbf{M} \boldsymbol{\Phi}_i - \Delta \mathbf{K} \boldsymbol{\Phi}_i \quad (3)$$

由于各阶模态相互独立,则第 i 阶模态振型的变化量 $\Delta \boldsymbol{\Phi}_i$ 表示为原系统模态振型的线性组合:

$$\Delta \boldsymbol{\Phi}_i = \sum_{k=1}^n d_{ik} \boldsymbol{\Phi}_k \quad (4)$$

式中: d_{ik} 为第 k 阶模态振型的振型变化参与系数; n 为模态总数。

将式(4)代入式(3),两边同时乘以 $\boldsymbol{\Phi}_r^T (r \neq i)$ 可得

$$\sum_{k=1}^n d_{ik} \boldsymbol{\Phi}_r^T (\mathbf{K} - \lambda_i \mathbf{M}) \boldsymbol{\Phi}_k = \Delta \lambda_i \boldsymbol{\Phi}_r^T \mathbf{M} \boldsymbol{\Phi}_i - \boldsymbol{\Phi}_r^T \Delta \mathbf{K} \boldsymbol{\Phi}_i \quad (5)$$

根据振型的正交化原理,由式(5)可得

$$d_{ik} = \frac{\boldsymbol{\Phi}_r^T \Delta \mathbf{K} \boldsymbol{\Phi}_i}{\lambda_i - \lambda_r} \quad (6)$$

对于 $r=i$ 的情况,当系统质量矩阵不变时,利用正交关系 $\boldsymbol{\Phi}_i^T \mathbf{M} \boldsymbol{\Phi}_i = 1$,式(6)可表示为

$$\Delta \boldsymbol{\Phi}_i = \sum_{\substack{r=1 \\ r \neq i}}^n \frac{\boldsymbol{\Phi}_r^T \Delta \mathbf{K} \boldsymbol{\Phi}_i}{\lambda_i - \lambda_r} \boldsymbol{\Phi}_r \quad (7)$$

假定损伤后的结构刚度为每个单元刚度矩阵乘以损伤系数的总和,则单元刚度的变化为

$$\Delta \mathbf{K} = \sum_{l=1}^N \alpha_l \mathbf{K}_l \quad (-1 \leq \alpha_l \leq 0) \quad (8)$$

式中: N 为结构单元总数; \mathbf{K}_l 和 α_l 分别为第 l 个单元刚度矩阵和损伤系数。

将式(8)代入式(7),第 i 阶模态振型的变化可表示为各损伤对结构模态振型贡献的总和:

$$\Delta \boldsymbol{\Phi}_i = \sum_{l=1}^N (\alpha_l \sum_{\substack{r=1 \\ r \neq i}}^n \frac{\boldsymbol{\Phi}_r^T \mathbf{K}_l \boldsymbol{\Phi}_i}{\lambda_i - \lambda_r} \boldsymbol{\Phi}_r) = \mathbf{F}(\mathbf{K}) \delta \mathbf{A} \quad (9)$$

其中

$$\mathbf{F}(\mathbf{K}) = \left(\sum_{\substack{r=1 \\ r \neq i}}^n \frac{\boldsymbol{\Phi}_r^T \mathbf{K}_1 \boldsymbol{\Phi}_i}{\lambda_i - \lambda_r} \boldsymbol{\Phi}_r, \right. \\ \left. \sum_{\substack{r=1 \\ r \neq i}}^n \frac{\boldsymbol{\Phi}_r^T \mathbf{K}_2 \boldsymbol{\Phi}_i}{\lambda_i - \lambda_r} \boldsymbol{\Phi}_r, \dots, \sum_{\substack{r=1 \\ r \neq i}}^n \frac{\boldsymbol{\Phi}_r^T \mathbf{K}_N \boldsymbol{\Phi}_i}{\lambda_i - \lambda_r} \boldsymbol{\Phi}_r \right)$$

$$\delta \mathbf{A} = \{\alpha_1 \quad \alpha_2 \quad \dots \quad \alpha_N\}$$

式中: $\mathbf{F}(\mathbf{K})$ 为第 i 阶模态对结构损伤的灵敏度; $\Delta\mathbf{A}$ 为各单元损伤向量。

根据模态叠加原理可知, 结构出现损伤后的动力响应为

$$\begin{aligned} u_s &= (\Phi + \Delta\Phi)q + k' = \\ &(\Phi\mathbf{F}(\mathbf{K}))(\mathbf{q}\mathbf{e}\mathbf{q})^T + k' = \mathbf{S}\theta + k' \end{aligned} \quad (10)$$

其中 $\theta = (\mathbf{q}\mathbf{e}\mathbf{q})^T$
 $\mathbf{S} = (\Phi\mathbf{F}(\mathbf{K})) \quad \mathbf{e} = \text{diag}(\Delta A_1, \dots, \Delta A_i)$

式中: \mathbf{e} 为对角矩阵; \mathbf{q} 为模态向量坐标; k' 为高斯白噪声; \mathbf{S} 为灵敏度矩阵。

在实际结构测试中, 不能保证所有候选点都布置传感器, 为使有限个传感器获得尽可能多的线性无关的振动数据, 需要获得 θ 的最佳状态估计。根据协方差矩阵最小获得模态坐标 θ 的无偏估计, 则待识别参数估计偏差的协方差矩阵为

$$\mathbf{P} = E[(\theta - \bar{\theta})(\theta - \bar{\theta})^T] = \left[\frac{1}{\sigma^2} \mathbf{S}^T \mathbf{S} \right]^{-1} = \frac{1}{\sigma^2} \mathbf{Q}^{-1} \quad (11)$$

式中 \mathbf{Q} 为 Fisher 信息矩阵, $\mathbf{Q} = \mathbf{S}^T \mathbf{S}$, 当 \mathbf{Q} 取极大值时可使 \mathbf{P} 最小, θ 就能获得最佳无偏估计。

当不考虑各自由度对结构损伤的灵敏度信息时, 信息矩阵为 $\Phi^T \Phi$, 即有效独立法^[15]中的 Fisher 信息矩阵; 若只考虑结构损伤对模态的影响, 则信息矩阵为 $\mathbf{F}(\mathbf{K})^T \mathbf{F}(\mathbf{K})$, 即损伤灵敏度法^[16]中的灵敏度信息矩阵。因此, 信息矩阵 \mathbf{Q} 不仅反映了自由度对目标模态线性独立的贡献, 同时包含了对结构损伤的灵敏度信息。

1.2 模态柔度

采用动力学诊断方法进行结构安全监测时, 一般利用振动响应的模态参数变化确定结构损伤位置, 早期常用的模态信息主要是结构固有频率和振型, 其对结构损伤的灵敏度不高^[17]。Pandey 等^[18-19]提出了一种基于结构柔度矩阵变化的结构损伤识别方法, 仅采用低阶固有频率和质量归一化的振型便能准确计算出结构的柔度矩阵, 并借助梁模型进行柔度方法验证, 试验表明该方法可对结构损伤进行识别和定位。Zhao 等^[20]对固有频率、模态振型和模态柔度的灵敏度分析比较得出模态柔度对结构的损伤更为敏感。由于实际测试中, 高阶模态难以获取, 模态刚度与模态柔度互为逆矩阵, 而模态柔度受低阶模态的影响较大, 因此本文选取模态柔度作为水闸底板脱空的敏感特征量进行初始点的选取, 柔度矩阵 \mathbf{H} 参见文献^[21]。柔度矩阵内的单个元素 $H_{ej} = \sum_{r=1}^n \frac{\varphi_{r,e} \varphi_{r,j}}{w_r^2}$ (w 为结构的频率; $\varphi_{r,e}$ 为结构 e 节点的第 r 阶振型), 代表的物理意义是结构 j 点

施加单位集中力在 e 点产生的位移, 即模态柔度。根据柔度矩阵对角线的物理意义可知, 对角元素对结构刚度的变化比较敏感, 因此通过柔度矩阵对角元素的变化构造损伤指标。

1.3 节点相似度及模态置信准则

对于大型结构, 节点繁多会造成模态测试数据的冗余问题, 因此引入两节点模态向量的相似度降低数据冗余程度, 两节点模态向量的相似度函数参考文献^[22], 如果两节点模态向量的差异度很小, 则两节点模态向量的相似度值接近 1, 反之, 如果两节点模态差异度很大, 则两节点模态向量的相似度值接近 0。同时, 本文采用模态置信度准则(MAC)反映两个空间向量的相关性, MAC 矩阵的非对角元素表示不同模态向量的交角情况, 非对角元素越小, 反映的结构特性越强, MAC 矩阵的表达式参见文献^[22]。

1.4 软基水闸底板脱空传感器优化布置步骤

a. 利用 ANSYS 计算水闸底板脱空前后的频率和振型, 计算水闸底板脱空前各自由度的模态柔度。

b. 计算各自由度模态柔度的变化率 $\Delta H_{ij}, \Delta H_{ji} = \frac{|H_{ij}^{\text{脱空前}} - H_{ij}^{\text{脱空后}}|}{H_{ij}^{\text{脱空前}}}$, 将自由度按 ΔH_{ij} 大小进行排序。

c. 采用节点相似度函数计算 ΔH_{ij} 最大的节点与周围节点的相似度, 将相似度较大的节点确定为同一区域, 然后按照模态柔度变化率的排序依次类推进行分区, 且每个区域中模态柔度变化率最大节点为传感器的初始选取测点。

d. 构造信息矩阵 \mathbf{Q} , 并在所选初始测点中以信息矩阵 \mathbf{Q} 的 2-范数最大作为优化目标^[23], 从而确定传感器的数量。

2 算例验证

2.1 软基水闸有限元模型

为验证本文水闸底板脱空传感器优化布置方法的可靠性, 以某工程为背景, 建立了软基水闸有限元模型, 如图 1 所示, 模型比例为 1 : 10, 水闸底板顺

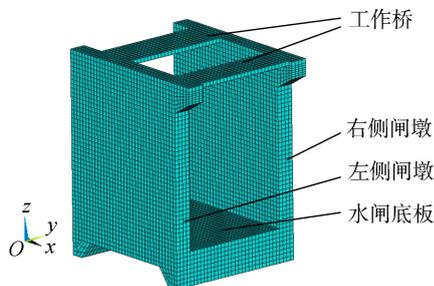


图 1 软基水闸有限元模型

水流方向长 1.44 m,垂直水流方向宽 1.36 m,水闸底板厚度为 0.16 m,闸墩高为 1.6 m,厚 0.16 m。选用 solid65 单元建模,有限元模型所选取的材料参数参考文献[24]。

2.2 传感器优化布置方案

振动传感器不能布置于结构水下部位,故本文只考虑左右闸墩内侧大约 1/5 以上为传感器可布置区域,并通过闸墩的模态参数变化反映水闸底板脱空情况。两侧闸墩共有 2170 个节点可布置,每个节点有 3 个自由度(分别为 x 、 y 、 z),即水闸的振动有 x 、 y 、 z 共 3 个方向,具体方向见图 1 中三维坐标轴方向。由于模态柔度对低阶模态较为敏感,且与频率的平方成反比,因此本文选择前两阶模态柔度作为目标进行测点优化布置,软基水闸低阶振型主要是两侧闸墩的纵向振动,因此只考虑水闸的纵向振型(y 方向),考虑到水闸结构节点繁多且距离相近,采用模态柔度和节点相似度函数进行传感器优化布置的初始选点,设置两种单侧脱空工况和一种相对侧脱空工况进行传感器优化布置,水闸底板脱空示意图如图 2 所示,本文通过 ANSYS 软件设置水闸底板脱空参数 d_i ($i=1, \dots, n$) 并将 d_i 线性连接来控制脱空区域的范围,共设置 3 种脱空工况,各工况水闸底板脱空参数理论值见表 1^[24]。

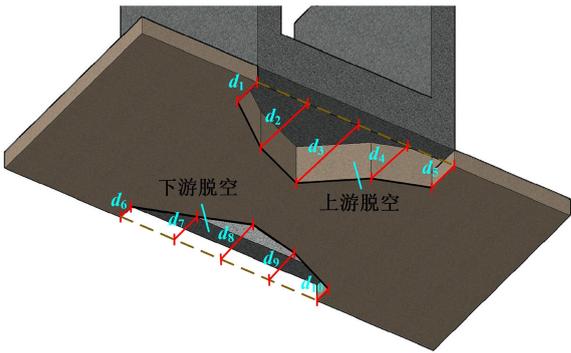
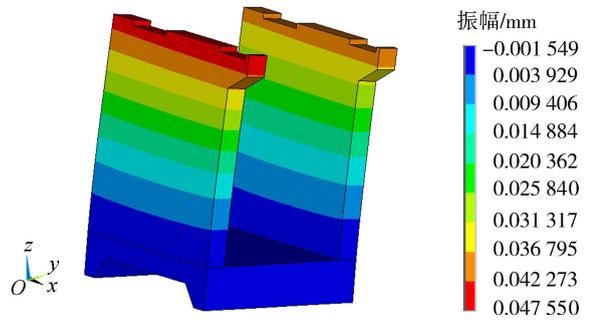
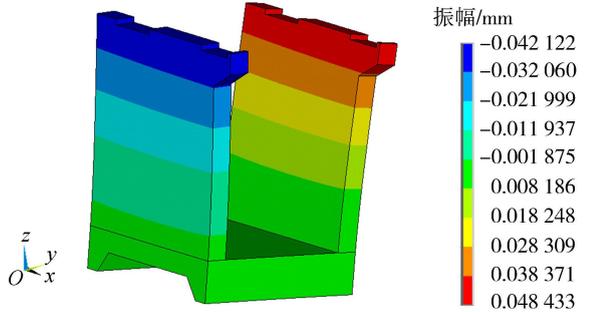


图 2 软基水闸底板脱空示意图

利用 ANSYS 对水闸各工况进行模态分析,得出水闸底板未脱空时模态振型云图(图 3),其前两阶振动频率分别为 22.739 Hz 和 24.366 Hz。根据频率和振型计算可测点的模态柔度并按水闸底板脱空前后可测点的模态柔度变化率的大小进行排序,然后对模态柔度变化率最大的测点采用节点相似度函数计算与周围测点的相似度,选取相似度大于 0.5 的测点作为区域 1,再对区域 1 外的可测点模态柔度变化



(a) 第一阶振型云图



(b) 第二阶振型云图

图 3 水闸底板未脱空时振型云图

率进行排序,区域 2~20 的分区计算方法均与区域 1 相同,每个区域内模态变化率最大的测点为可选初始测点。水闸为对称结构,则左右闸墩分区相同,如图 4 所示,限于篇幅,只给出区域 1~4 各节点与模态柔度变化率最大节点的模态相似度,如图 5 所示。

- 分区区域
- 区域内模态柔度变化率最大节点
- 未分区区域为不可布置区域

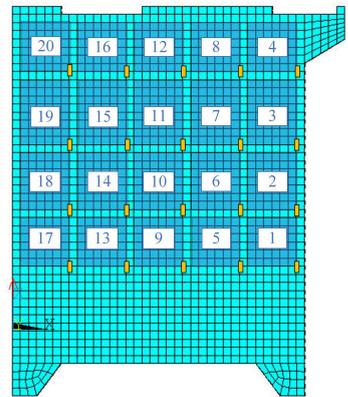


图 4 右侧闸墩分区

由图 5 可知,节点模态向量相似度均大于 0.5,说明区域内的节点模态均可达到同样的监测效果。本文根据各区域模态变化率最大节点的排列顺序选

表 1 软基水闸底板脱空工况及脱空参数

单位:m

工况	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	d_8	d_9	d_{10}
工况一	0.21	0.31	0.48	0.35	0.18					
工况二	0.21	0.48	0.63	0.36	0.24					
工况三	0.21	0.48	0.63	0.36	0.24	0.11	0.23	0.36	0.28	0.12

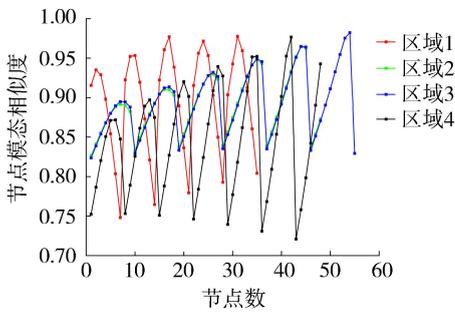


图5 各区域节点与模态柔度变化率最大节点间的模态相似度

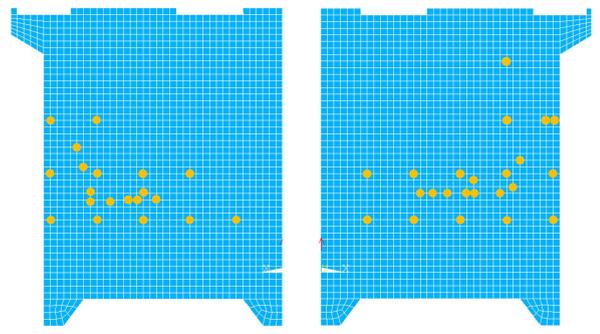
取前 20 个测点作为优化后的初始测点,并将最终优化布点的结果与从所有可测点中随机选取 20 个测点结果进行对比。各工况初始测点的传感器编号按其重要性排列结果以及随机选取的测点见表 2,表 2 中测点编号对应的闸墩所在位置如图 6 所示,结合有效独立法-损伤灵敏度法,初始传感器布点编号对应的 Fisher 信息矩阵的 2-范数变化趋势如图 7 所示。根据 Fisher 信息矩阵 2-范数的变化趋势可知,对于工况一和工况二,选取前 14 个编号作为传感器布点;对于工况三,选取前 20 个编号作为传感器布点。则 3 种工况优化后的测点布置如图 8 所示。根据模态置信度准则,3 种工况随机选取的测点 MAC 矩阵非对角元素最大值分别为 0.999 8、0.578 3、0.167 9,优化后的 MAC 矩阵非对角元素最大值分别为 0.272 7、0.196 2、0.131 5,由此可见,优化后的 MAC 矩阵非对角元素最大值均有降低。

表 2 各工况随机选取和优化后传感器位置对应的节点号

传感器编号	随机选取 (工况一、二、三)	优化布置后初始测点	
		工况一、二	工况三
1	8 057	16 680	8 040
2	8 191	8 040	16 680
3	8 227	16 904	8 264
4	8 240	8 264	16 904
5	8 292	17 128	8 488
6	8 420	16 673	17 128
7	8 452	8 488	8 712
8	8 516	8 033	17 352
9	8 580	16 897	8 936
10	8 644	8 257	8 033
11	8 418	17 352	17 576
12	16 797	8 712	16 673
13	16 831	17 121	8 257
14	16 867	16 665	16 897
15	16 868	8 481	8 481
16	16 932	8 025	17 121
17	17 060	16 889	8 705
18	17 092	8 249	17 345
19	17 123	17 345	8 929
20	17 156	8 705	8 025

2.3 软基水闸底板脱空反演结果验证

基于传感器位置随机选取以及优化后的传感器



(a) 左侧闸墩 (b) 右侧闸墩

图6 传感器编号对应的分布位置

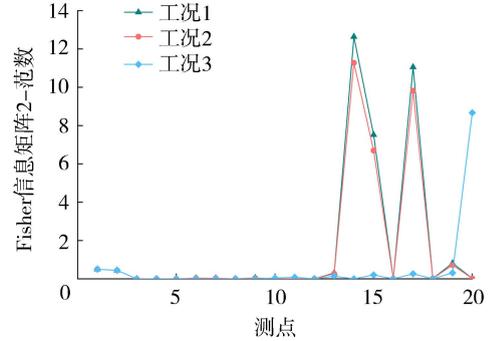
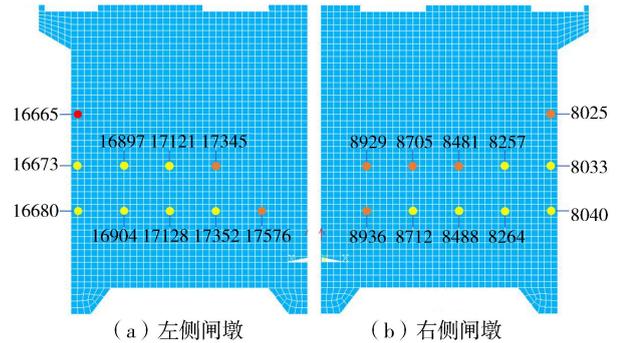


图7 Fisher 信息矩阵的 2-范数变化趋势

- 工况3测点
- 工况1、工况2测点
- 工况1、工况2、工况3测点



(a) 左侧闸墩 (b) 右侧闸墩

图8 优化后的测点布置

布置进行软基水闸底板脱空动力学反演对比验证,具体软基水闸底板脱空动力学反演过程可参考文献[24]。本文在反演过程中的模态参数采用模态柔度,传感器随机选取以及优化后各工况反演得到的软基水闸底板脱空参数与有限元模型底板脱空参数实际值对比结果及相对误差如见表 3。为了使结果更直观,不同工况下脱空参数反演识别值与实际值对比如图 9 所示。采用随机选取测点以及优化后水闸底板脱空参数及脱空区域面积反演识别值与实际值的相对误差值为评价指标,各工况传感器优化布置前后脱空区域面积识别的相对误差值见表 4。

结果表明,结合有效独立法和损伤灵敏度法可使水闸底板脱空参数识别值相对误差的平均值降低至 15.9%,脱空识别面积相对误差减小到 5% 以内,

表3 不同工况优化布置后脱空参数反演结果及相对误差

参数	工况一				工况二				工况三			
	随机反演值/m	$E_1/\%$	优化反演值/m	$E_2/\%$	随机反演值/m	$E_1/\%$	优化反演值/m	$E_2/\%$	随机反演值/m	$E_1/\%$	优化反演值/m	$E_2/\%$
d_1	0.15	29.6	0.21	0	0.16	2.4	0.21	0	0.32	52.4	0.17	19
d_2	0.34	9.7	0.31	0	0.5	4.2	0.47	2.1	0.15	68.8	0.46	4.2
d_3	0.45	6.3	0.49	2.1	0.63	0	0.65	3.2	0.65	3.2	0.6	4.8
d_4	0.55	57.1	0.34	2.9	0.53	47.2	0.36	0	0.24	33.3	0.3	16.7
d_5	0.11	38.9	0.18	0	0.18	25	0.23	4.2	0.36	50	0.29	20.8
d_6									0.15	36.4	0.05	54.5
d_7									0.27	17.4	0.24	4.3
d_8									0.01	97.2	0.37	2.8
d_9									0.33	17.9	0.26	7.1
d_{10}									0.1	16.7	0.15	25

注: E_1 、 E_2 分别为随机反演、优化反演的相对误差。

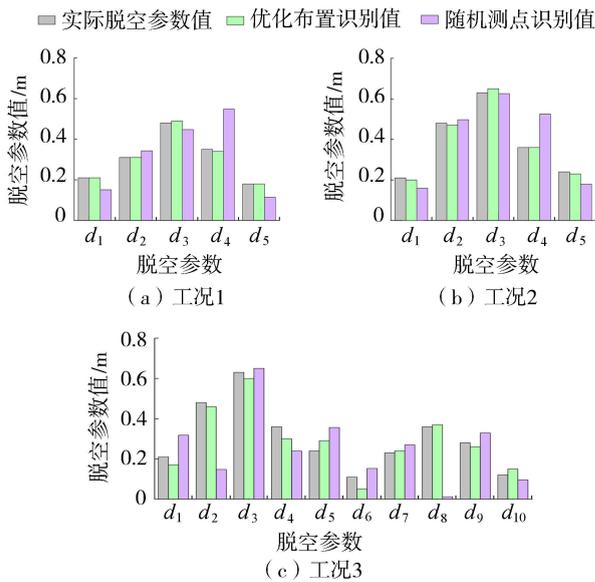


图9 不同工况下脱空参数识别值与实际值对比

表4 反演识别脱空面积与实际脱空面积相对误差

工况	实际脱空面积/ m^2	随机选取		优化布置	
		识别脱空面积/ m^2	相对误差/ $\%$	识别脱空面积/ m^2	相对误差/ $\%$
工况一	0.4539	0.4998	10.11	0.4539	0.00
工况二	0.5763	0.6220	7.93	0.5763	0.00
工况三	0.9112	0.7181	21.19	0.8704	4.50

达到很好的底板脱空反演效果,同时初始测点的选取验证了模态柔度对底板脱空相对敏感,从优化后所选点的MAC矩阵非对角元素值来看,此方法在保证底板脱空识别的同时,也可以使MAC矩阵的非对角元素值较小,满足模态置信度准则,验证了本文方法的有效性和可行性。

3 结论

a. 本文提出的结合有效独立法和损伤灵敏度法的多目标传感器优化布置方法,可同时包含模态线性独立信息和损伤灵敏度信息。

b. 考虑节点模态数据冗余性,确定模态柔度为

软基水闸底板脱空敏感特征量,同时引入节点相似度函数,解决了复杂结构节点繁多问题。

c. 传感器优化布置后,3种工况水闸底板脱空参数及脱空面积的反演精度均明显提高,脱空参数识别值相对误差的平均值分别从28.3%、15.8%、39.3%降低至1%、1.9%、15.9%,且脱空面积识别值的相对误差降低至4.5%,为水闸底板脱空测点布置提供了理论依据。

参考文献:

[1] 王正中,张雪才,刘计良.大型水工钢闸门的研究进展及发展趋势[J].水力发电学报,2017,36(10):1-18. (WANG Zhengzhong, ZHANG Xuecai, LIU Jiliang. Advances and developing trends in research of large hydraulic steel gates [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36(10): 1-18. (in Chinese))

[2] 何杨杨,苏怀智.考虑规范分级的水闸安全云评价方法[J].水利水电科技进展,2020,40(2):29-35. (HE Yangyang, SU Huaizhi. Cloud assessment method of sluice safety considering specification classification [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(2): 29-35. (in Chinese))

[3] 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(3):429-433. (DAI Chengxiang, WANG Shien. Feature analysis on radar pictures for detecting hidden danger of floodgate base [J]. Progress in Geophysics, 2003 (3): 429-433. (in Chinese))

[4] 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))

- [5] 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. Destruction forms and reinforcement countermeasures of sluices in coastal areas [J]. Water Conservancy Science and Technology, 2009(3):59-61. (in Chinese))
- [6] 杨辰. 结构健康监测的传感器优化布置研究进展与展望[J]. 振动与冲击, 2020, 39 (17) : 82-93. (YANG Chen. Advances and prospects for optimal sensor placement of structural health monitoring [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39 (17) : 82-93. (in Chinese))
- [7] COBB R G, LIEBST B S. Sensor location prioritization and structural damage location using minimal sensor information [J]. AIAA, 2014, 35(2) : 369-374.
- [8] VINCENZI L, SIMONINI L. Influence of model errors in optimal sensor placement [J]. Journal of Sound & Vibration, 2017, 389: 119-133.
- [9] 李火坤, 马斌, 练继建. 泄流激励下高拱坝原型动力测试的传感器优化布置与参数识别研究 [J]. 水利水电技术, 2011, 42 (10) : 44-49. (LI Huokun, MA Bin, LIAN Jijian. Study on optimal layout and parameter identification of sensors for prototype dynamic test on high arch dam under flood discharge excitation [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2011, 42 (10) : 44-49. (in Chinese))
- [10] 吴子燕, 简晓红, 张彬, 等. 振动测试中多目标传感器优化配置研究 [J]. 机械强度, 2008, 30(6) : 888-892. (WU Ziyang, JIAN Xiaohong, ZHANG Bin, et al. Multi-objective optimal sensor placement methodology for vibration test [J]. Mechanical Strength, 2008, 30 (6) : 888-892. (in Chinese))
- [11] 谢强, 薛松涛. 结构健康监测传感器优化布置的混合算法 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2006(6) : 20-25. (XIE Qiang, XUE Songtao. A hybrid algorithm for optimal sensor placement of structural health monitoring [J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2006(6) : 20-25. (in Chinese))
- [12] 滕军, 朱焰煌. 大跨空间钢结构模态参数测试传感器优化布置 [J]. 工程力学, 2011, 28 (3) : 150-156. (TENG Jun, ZHU Yanhuang. Optimal sensor placement for modal parameters test of large span spatial steel structural [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28 (3) : 150-156. (in Chinese))
- [13] 范恒承, 余岭. 一种传感器优化布置的多能量参数改进有效独立法 [J]. 振动与冲击, 2020, 39 (24) : 25-31. (FAN Hengcheng, YU Ling. An improved effective independent method based on multi energy parameters for optimal sensor placement [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(24) : 25-31. (in Chinese))
- [14] 高博, 柏智会, 宋宇博. 基于自适应引力算法的桥梁监测传感器优化布置 [J]. 振动与冲击, 2021, 40(6) : 86-92. (GAO Bo, BAI Zhihui, SONG Yubo. Optimal placement of sensors in bridge monitoring based on an adaptive gravity search algorithm [J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(6) : 86-92. (in Chinese))
- [15] KAMMER D C, TINKER M L. Optimal placement of triaxial accelerometers for modal vibration tests [J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2004, 18 (1) : 29-41.
- [16] SHI Z Y, LAW S S, ZHANG L M. Optimum Sensor Placement for Structural Damage Detection [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2000, 126(11) : 1173-1179.
- [17] SALEHI M, RAD S Z, GHAYOUR M, et al. A non model-based damage detection technique using dynamically measured flexibility matrix [J]. Iranian Journal of Science & Technology Transaction B Engineering, 2011, 35(M1) : 1-13.
- [18] PANDEY A K, BISWAS M. Damage detection in structures using changes in flexibility [J]. Journal of Sound and Vibration, 1994, 169(1) : 3-17.
- [19] PANDEY A K, BISWAS M. Experimental verification of flexibility difference method for locating damage in structures [J]. Journal of Sound and Vibration, 1995, 184 (2) : 311-328.
- [20] ZHAO Jun, DEWOLF J T. Sensitivity study for vibrational parameters used in damage detection [J]. Journal of Structural Engineering, 1999, 125(4) : 410-416.
- [21] 荆龙江, 项贻强. 基于柔度矩阵法的大跨斜拉桥主梁的损伤识别 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2008, 42 (1) : 164-169. (JING Longjiang, XIANG Yiqiang. Damage identification of main girders for long span cable-stayed bridge based on flexibility matrix [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science Edition), 2008, 42 (1) : 164-169. (in Chinese))
- [22] 封硕. 结构监测的传感器优化布置与损伤识别研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
- [23] 李世龙, 马立元, 李永军, 等. 一种多目标传感器优化布置方法及其应用 [J]. 振动、测试与诊断, 2016, 36(6) : 1196-1203. (LI Shilong, MA Liyuan, LI Yongjun, et al. Impact and locating method research on satellite's typical composite honeycomb structure panel [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2016, 36(6) : 1196-1203. (in Chinese))
- [24] 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. (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, 2020, 36 (21) : 145-153. (in Chinese))

(收稿日期: 2021 - 10 - 30 编辑: 刘晓艳)