



# 基于 3D-DIC 拼接测量的桩基 振型测试提取方法<sup>\*</sup>

庞 然<sup>1,2</sup>, 邹俊杰<sup>3</sup>, 李 昂<sup>3</sup>, 孔 超<sup>1,2</sup>, 朱瑞虎<sup>3</sup>, 王艳红<sup>4</sup>

- (1. 华能如东八仙角海上风力发电有限责任公司, 江苏 南通 226000;  
2. 华能国际电力江苏能源开发有限公司华能江苏清洁能源分公司, 江苏 南京 210009;  
3. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098; 4. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

**摘要:** 结构振型的空间分辨率对基于结构振型的损伤识别结果的精度有直接的影响。数字图像相关法 (DIC) 以其非接触、视域内全场测量的特点, 提供一种高密度测量的方法, 但受限于相机视野, DIC 方法无法直接对桩基这类大型细长结构进行完整的测试。针对这个难点, 提出基于 3D-DIC 拼接测量的桩基振型测试方法, 通过分段测试获取桩基不同区域的全场振动响应, 使用图像特征匹配方法获取各区域的空间变换矩阵, 实现具有高空间分辨率的全场模态振型的拼接融合, 结合动力指纹指标对桩基局部损伤进行识别, 并基于 3D-DIC 拼接测量方法进行物理模型试验。结果表明, 该方法识别的振型与有限元仿真结果高度吻合, 且相较于传统加速度传感器测试, 能够提供更丰富的结构细节信息。

**关键词:** 桩基; 全场测量; 数字图像相关法; 图像匹配; 高空间分辨率振型

中图分类号: U655.55; P752

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)12-0230-09

## 3D-DIC stitching measurement-based method for extracting pile foundation vibration modes

PANG Ran<sup>1,2</sup>, ZOU Junjie<sup>3</sup>, LI Ang<sup>3</sup>, KONG Chao<sup>1,2</sup>, ZHU Ruihu<sup>3</sup>, WANG Yanhong<sup>4</sup>

- (1. Huaneng Rudong Baxianjiao Offshore Wind Power Co., Ltd., Nantong 226000, China;  
2. Huaneng Jiangsu Clean Energy Branch, Huaneng International Power Jiangsu Energy Development Co., Ltd., Nanjing 210009, China;  
3. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;  
4. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** The spatial resolution of structural vibration modes directly affects the accuracy of damage identification results based on these modes. Digital image correlation (DIC), with its non-contact, full-field measurement capabilities within the field of view, offers a high-density measurement approach. However, limited by the camera's field of view, the DIC method cannot directly perform complete testing on large, slender structures such as pile foundations. To address this challenge, a 3D-DIC stitching measurement-based method for pile foundation vibration mode testing is proposed. The method involves segmented testing to obtain full-field vibration responses of different regions of the pile foundation, uses image feature matching to derive spatial transformation matrices for each region, and achieves the stitching and fusion of full-field modal vibration modes with high spatial resolution. Combined with dynamic fingerprint indicators, the method enables the identification of local damage in pile foundations, and the physical model experiments based on the 3D-DIC stitching measurement method are carried out. The results demonstrate that the vibration modes identified by this approach closely align with finite element simulation results, and provide richer structural detail information compared to traditional acceleration sensor testing.

**Keywords:** pile foundation; full-field measurement; DIC; image matching; high-spatial-resolution vibration mode

收稿日期: 2025-05-05 录用日期: 2025-07-11

\*基金项目: 华能集团科技项目 (HNKJ23-H18)

作者简介: 庞然(1982—), 工程师, 从事新能源电力项目开发、电力市场营销及行政管理等方面的工作。

海洋结构物, 如高桩码头、海上风机等结构物的桩基长期处于复杂的工作环境中, 受到侵蚀、碰撞以及复杂多变的环境荷载, 结构易发生损伤, 如不能及时发现并修复, 会危害整个结构的安全<sup>[1]</sup>。因此, 开展桩基的安全检测, 识别损伤位置对保障结构安全运营十分必要。基于动力测试的损伤识别方法通常是通过振动传感器测量振动响应获取结构动力特性, 进而结合动力指纹指标进行识别。而借助动力指纹开展识别损伤的精度受限于结构信号采集的空间密集程度, 也可称为空间分辨率, 为采集高密度的结构振动信息, 通常需要密集布设大量振动传感器, 极大增加了测试的成本和难度。

三维数字图像相关法(3D-DIC)是一种使用双目相机, 拍摄结构变形过程中结构表面的纹理图像, 并采用相关函数跟踪一系列图像中具有独特特征的子集测量被测物体位移与变形的技术<sup>[2-3]</sup>。该技术以其非接触、全场测量、视场中的每个像素点均可视为一个“虚拟振动传感器”的特点, 克服了损伤识别空间精度与传感器布置密度之间的矛盾, 在结构高精度模态参数提取上具有独特的优势。但受限于相机视场, 在单视场条件下实现大型细长结构的 3D-DIC 全场测量, 势必会大幅降低传感器的空间分辨率, 难以实现高精度测量。而分区域测量是解决这个矛盾的一种方法。DIC 分区域测量方法主要有两种思路: 1) 阵列式相机同步测量方法, 通过阵列布置多部高速相机, 两两组合成双目系统, 多台相机同步拍摄测量实现试件的全区域测量。Poozesh 等<sup>[4]</sup>使用该思路, 针对风机叶片结构提出一种基于动态空间数据拼接的多相机 DIC 测量系统, 通过多台相机的同步测量实现大范围的全场动态测量。2) 移动式测量方法, 仅用一台或一组相机分段采集试件表面不同

区域的图像, 再通过图像拼接方法进行缝合重构实现全区域测量。Wu 等<sup>[5]</sup>提出一种基于可移动相机的 2D-DIC 准静态变形测量方法, 通过将相机安装在直线滑轨上, 拍摄结构不同区域的图像, 实现了在不损失分辨率的情况下对平面细长试件的变形测量。上述研究表明, 面对大型结构, 分区域开展 DIC 测量并通过图像信息融合实现结构的全场测量是可行的, 然而前者基于多相机同步测量成本过高; 后者则应用于准静态的全场变形测量。如何将该方法拓展至动力测试, 并结合桩基结构特点应用于损伤识别工作中, 还需要进一步研究。

为实现 3D-DIC 方法在桩基结构动力测试中的模态提取及应用, 本文提出一套适用于大型细长桩基结构的 3D-DIC 拼接测量方法, 并通过与有限元模拟振型、加速度计实测振型的相似性以及损伤识别效果进行对比, 验证该方法的有效性。

## 1 方法构建

### 1.1 基本策略

结构的动力参数作为结构的固有属性, 在结构系统及约束条件不变的情况下不会因为外部激励的改变而改变。因此分段测试的拼接重构时无需依赖时域信号的对齐, 对每一帧图像进行拼接, 而可以从频域角度出发<sup>[6]</sup>, 优先提取每一分段的振型, 之后通过归一化拼接获取完整振型。

该方法流程见图 1, 主要包括分段频域特征识别与整体模态重构两方面: 使用双目相机分区域开展动力测试, 采集不同区域的动力响应图像, 并独立提取每一测量区域的线振型; 通过特征匹配方法确定各测区间的空间变换坐标, 实现分段的精确拼接, 并利用小波阈值去噪处理, 获取高空间分辨率的光滑完整振型。

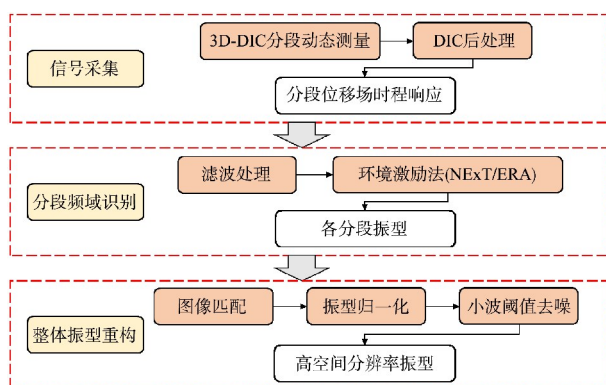


图1 方法流程

Fig. 1 Method process

## 1.2 信号采集

通过移动式拍摄方法开展 3D-DIC 分段测试, 见图 2。采用一组双目相机沿着结构表面同步移动, 测量结构表面的不同区域, 具体流程为: 1) 基于测试需求将桩身等分为若干单元, 单元交界命名为节点; 2) 每次测试时需要完整拍摄目标单元影像以及相邻单元边界区域影像(形成测区之间 10% 左右的重叠区域), 依次编号为测区 1、2 等; 3) 通过控制双目相机系统, 开展分区域测试: 首先完成测区 1 的动力测试与图像采集, 然后同步调整双目相机位置使相机视场对准测区 2 进行后续测试, 依此递推完成全桩身测量。

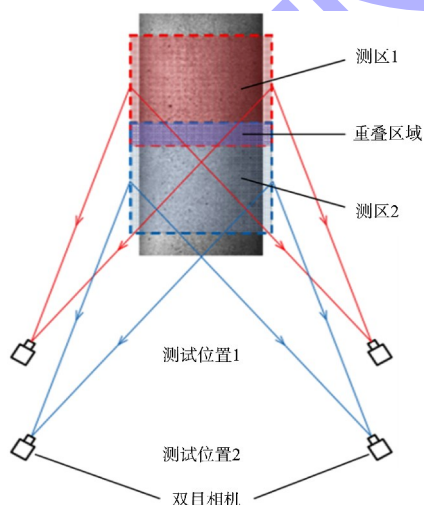


图2 分段动态测量

Fig. 2 Segmented dynamic measurement

在获取标定图像与测试图像后, 应用数字图像相关算法对各测区图像数据进行 DIC 后处理,

获取各分段的全场位移时程响应信号。

## 1.3 分段频域识别

使用 3D-DIC 测试方法开展分段动态测试, 能够获取测试区域的全场位移时程响应。由于测试对象为细长桩, 结构的横截面尺寸远小于轴向尺寸, 振动时弯曲占主导地位, 近似可用梁的平截面假设。此外, 由于大型结构的模态分析中主要关注低阶模态, 因此将测试结构从场模型简化为线模型也能够满足损伤识别的精度要求。在基于线模型确定损伤所在的位置后, 即可结合超声波、雷达等手段对具体损伤类型与损伤程度进行更加精细的诊断。

在简化过程中, 为减少图像成像、测试误差对振动数据的影响, 保证模态分析的精度, 可采用统计方法对每一帧内处于同一截面的小范围位移数据进行合并处理。具体方法为: 首先对该区域内位移值进行大小排序, 并去除其中的极大值和极小值; 然后基于正态分布概率密度函数对剩下的位移响应进行合并处理。

在简化为线模型后, 使用低通滤波器对振型信号进行处理, 去除环境噪声、相机高频振动带来的高频干扰; 之后基于环境激励法<sup>[7]</sup>(NExT/ERA)开展频域识别, 从降噪信号中提取各单元的一维振型。

## 1.4 整体振型重构

拼接重构的精度决定了归一化后全场振型的精度。相邻测量区域间的重叠区域, 是拼接重构的关键所在。基于特征点的图像匹配算法<sup>[8]</sup>是机器视觉领域的一项关键技术, 不需要在测试中对两个测区进行精确的对准, 只需对两幅图中包括角点、边缘和区块等可作为图像特征的部分进行识别, 再通过数学语言“描述子”表达这些特征, 通过匹配算法实现对相应描述子的匹配对应。选用尺度不变特征变换(ORB)<sup>[9]</sup>作为特征点, 并基于 OpenCV 视觉库快速近似最近邻(FLANN)算法对所提取的特征进行匹配, 实现重叠区域图像的匹配, 获取重叠区域中一系列匹配点在两个分段图像中的像素坐标表达。匹配流程见图 3。

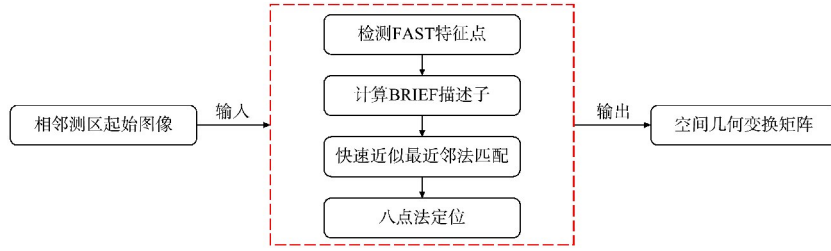


图 3 图像特征匹配算法

Fig. 3 Image feature matching algorithm

由于同一特征点在两个相邻空间的像素坐标变换既包含了平移向量, 也包含拍摄角度改变带来的旋转矩阵, 因此采用八点法<sup>[10]</sup>建立相邻测区图像的空间变换矩阵, 确定匹配点像素坐标映射关系。

由对极几何约束关系可知:

$$\mathbf{P}_d^T \mathbf{F} \mathbf{P}_u = 0 \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{P}_d$  与  $\mathbf{P}_u$  为同一特征点在两个相邻测区图像中的像素坐标;  $\mathbf{F}$  为  $3 \times 3$  的基本矩阵, 由匹配特征点求得。分别记为:

$$\mathbf{P}_d = [u, v, 1]^T \quad (2)$$

$$\mathbf{P}_u = [x, y, 1]^T \quad (3)$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & F_{13} \\ F_{21} & F_{22} & F_{23} \\ F_{31} & F_{32} & F_{33} \end{bmatrix} \quad (4)$$

将(2)~(4)代入式(1), 得到:

$$\mathbf{P}_d^T \mathbf{F} \mathbf{P}_u = [u \ v \ 1] \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & F_{13} \\ F_{21} & F_{22} & F_{23} \\ F_{31} & F_{32} & F_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (5)$$

展开为齐次线性方程, 记为:

$$\mathbf{w}_i^T \mathbf{f} = [ux \ vx \ x \ uy \ vx \ y \ u \ v \ 1] \begin{bmatrix} F_{11} \\ F_{12} \\ F_{13} \\ F_{21} \\ F_{22} \\ F_{23} \\ F_{31} \\ F_{32} \\ F_{33} \end{bmatrix} = 0 \quad (6)$$

将 8 对匹配特征点代入该矩阵方程, 可描述为:

$$\mathbf{W} \mathbf{f} = 0 \quad (7)$$

式中:  $\mathbf{W} = [\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \dots, \mathbf{w}_8]^T$ , 通过输入 8 对匹配特征点像素坐标求解基本矩阵, 得到两个相邻空间的像素空间几何变换矩阵, 并由变换矩阵即可找到重叠区域内任一点在相邻段图像中的像素坐标位置。

对所有分段进行匹配, 从而实现所有单元节点在图像中的匹配。由于不同单元的测试需要重新标定, 这使得每个单元之内的结构振型具有连续性而不同单元之间的结构振型不连续。因此需要进行单元间的归一化, 从而实现结构整体振型的拼接重构。

在基于 3D-DIC 的动力测试中, 得益于其高空间分辨率的特性, 能够获取密集采样的全场位移响应数据, 获取丰富的空间模态信息。然而, 测试过程中不可避免地会受到随机噪声的干扰, 导致提取的振型出现局部高频“毛刺”畸变。这种噪声引起的振型畸变会显著影响结构特征参数的准确性, 特别是在计算模态曲率等对噪声敏感的二阶导数指标时, 可能造成误判。因此, 在振型层面开展小波阈值去噪, 通过消除局部“毛刺”获取平滑振型, 减小噪声的干扰。

## 2 方法应用

### 2.1 高桩码头模型及工况设置

为验证构建测试方法的测试效果, 基于高桩码头物理模型进行应用, 并与有限元计算和传统加速度传感器测试结果进行对比, 模型见图 4。模



型基本尺度为长 2.05 m、宽 0.9 m、高 1.65 m，共设 3 跨，排架间距 0.65 m。码头模型前沿及中间桩基为单直桩，后方为一对叉桩，桩身采用直径 0.06 m、壁厚 2 mm 的钢管桩，码头上部结构均采用混凝土浇筑。根据以往的试验结果与有限元模拟来看<sup>[11-12]</sup>，由于土体的限制，高桩码头入土部分的振动位移非常小（几乎为零），目前的动力损伤识别主要考虑土体以上的振型，故将桩基底部分简化为固定约束，上部自由桩身长度为 1.3 m。为方便后续的描述以及保持物理试验与有限元模型坐标的一致，定义如下三维坐标系： $x$  轴为平行于纵梁的方向， $y$  轴为直桩桩基轴线方向， $z$  轴为平行于横梁的方向。



图 4 高桩码头模型

Fig. 4 Pile-supported wharf model

取码头前沿从左至右第 3 根桩为研究对象，将桩身分 13 个单元，见图 5。DIC 测试设备基于拼接测试方法进行布置，同时在节点位置布设加速度传感器作为对照组开展同步测量。采用 DH5920 动态信号采集分析系统进行加速度信号采集与模态分析，采样频率为 1 kHz，传感器的拾振方向为  $x$  轴方向，测试设备布置见图 6。

由于在实际工程中码头桩基的损伤多集中于浪溅区，即 4~6 号段间，因此桩基损伤设置在 5 号段。通过切割桩截面减小结构段刚度的方式模拟损伤程度<sup>[13]</sup>。损伤程度分别设置为 10%、20%、30%，破损长度为 0.01 m，破损宽度根据截面惯性矩缩减 10%、20%、30% 计算，相应的破损宽度及试验工况见表 1。

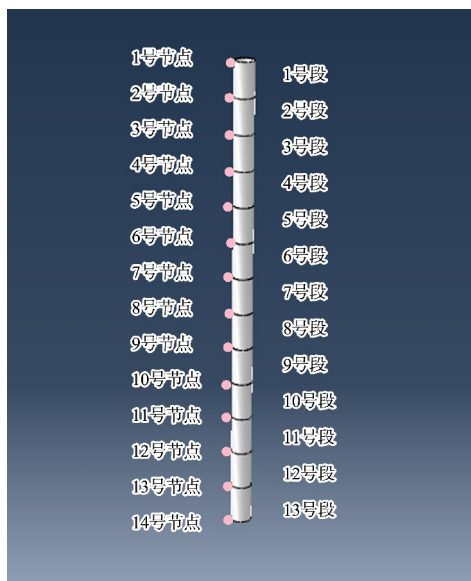


图 5 桩基单元编号

Fig. 5 Number of pile foundation unit



图 6 测试设备布置

Fig. 6 Test equipment layout

表 1 试验工况

Tab. 1 Test conditions

工况	工况名称	损伤情况	破损宽度/mm
1	无损工况	无损伤	0
2	损伤工况 1	5 号单元破损 10%	8
3	损伤工况 2	5 号单元破损 20%	15
4	损伤工况 3	5 号单元破损 30%	21

## 2.2 有限元模拟

使用 Abaqus 根据物理模型尺寸，采用实体单元进行网格划分建立高桩码头有限元模型，高桩

码头上部结构材料为 C30 混凝土, 桩基为钢材料, 桩基与上部结构之间有桩帽连接, 各部分之间假定为完全刚性连接。

对码头模型振型进行有限元分析。经计算, 结构在工况 1 下的一阶模态频率为 10.498 Hz, 振型云图见图 7。可以观察到在一阶振型中, 码头结构主要表现为  $x$  轴方向的摆动。

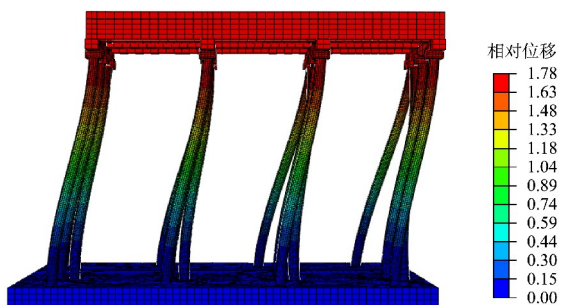
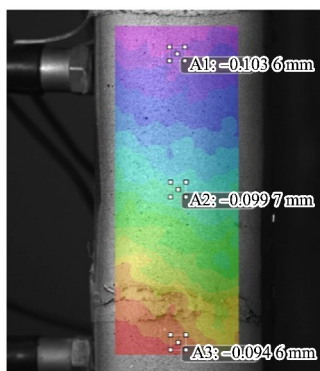
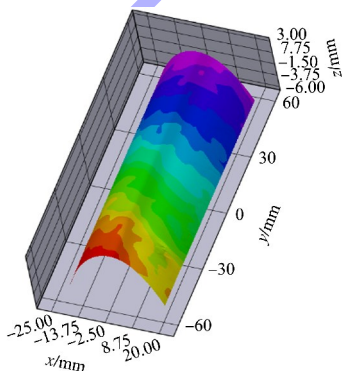


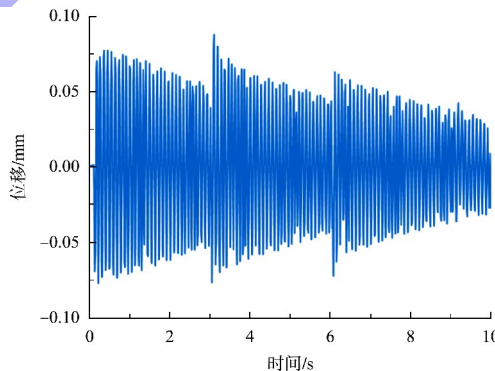
图 7 无损工况一阶振型云图  
Fig. 7 First order vibration modes cloud map under non-destructive conditions



a) 某时刻位移场(2D视图)



b) 某时刻位移场(3D视图)



c) 某点主振方向时程响应

图 8 DIC 后处理结果

Fig. 8 DIC post processing results

## 2.4 振型对比

由于结构刚度的变化会带来结构振型的改变, 因此分析振型在损伤前后的变化可以有效识别损伤位置。基于 3D-DIC 动力测试采集获取各工况的完整振型, 将各损伤工况振型与无损工况进行作差, 见图 9。可以看出, DIC 测试获取的振型能够有效反映损伤带来的变化, 各损伤工况的峰值均

## 2.3 基于 3D-DIC 拼接测量的动力测试与数据处理

根据分段测量方法, 自上而下依次对桩身 3~7 号段进行动力测试, 每次测量区域包含一个完整分段及相邻段预留的重叠区域。之后使用 VIC-3D 软件对测试中采集的图像数据进行后处理, 通过相关性分析有效计算各时刻框定区域位移场, 得到 3 号桩各测量段的主振方向位移数据, 见图 8。

基于构建的 3D-DIC 测量方法提取完整振型, 处理流程为: 1) 基于特征点降维策略获取一维振型, 每个单元沿桩基轴向每隔 0.5 mm 取一个统计特征点, 每个单元共取 21 个, 通过环境激励法识别一阶振型。2) 通过图像匹配获取单元节点在相邻段图像中的像素坐标位置, 从而实现特征点的拼接与振型归一化, 最终获取 3~7 单元上共 101 个特征点的归一化振型, 并通过小波阈值去噪消除“毛刺”。

出现在 5 号单元及其附近, 且峰值与损伤程度均呈正相关关系。

将 DIC 实测振型与加速度计实测振型、有限元模拟振型进行相似性比较, 见图 10。并计算实测振型与有限元模拟振型的统计坐标模态保证准则(MAC)与最大节点误差, 见表 2。

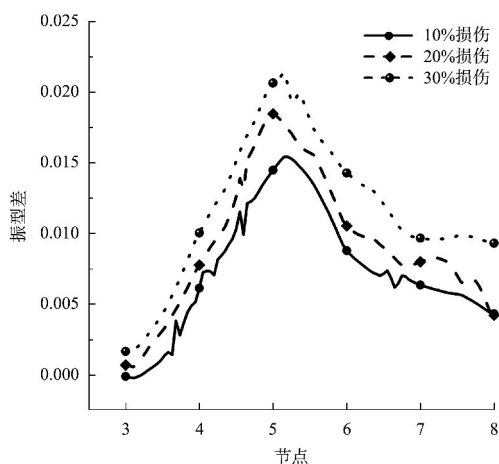


图9 振型差

Fig. 9 Vibration mode differences

表2 DIC、加速度计实测振型与有限元对比

Tab. 2 Comparison of DIC and accelerometer between measured vibration modes and finite element method

工况	MAC		最大节点误差/%	
	DIC	加速度计	DIC	加速度计
1	0.999 9	0.999 5	1.918 7	4.007 4
2	0.999 9	0.998 9	1.405 6	9.383 1
3	1.000 0	0.998 7	1.172 7	10.258 6
4	0.999 9	0.996 2	1.446 3	17.824 8

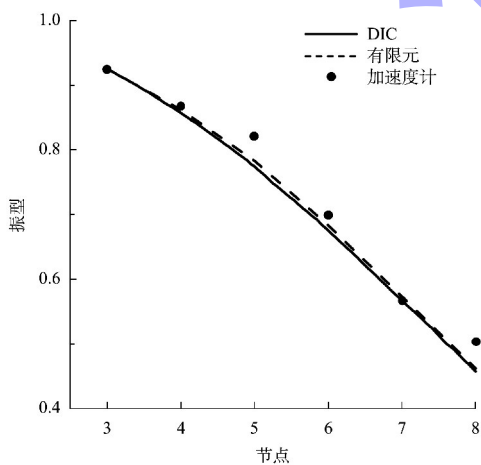


图10 3种方法一阶振型对比

Fig. 10 Comparison of first-order vibration modes of three methods

对比分析结果表明,基于DIC密集测试获得的振型呈现良好的平滑特性,与有限元仿真结果贴近,相较于传统加速度传感器仅能获取离散节点信号的局限性,DIC方法展现出显著的优势:从整体趋势上看,各工况下DIC振型与有限元振型的MAC值均接近1,均高于加速度计振型;从

节点误差上看,各工况下DIC振型的最大节点相对误差均控制在2%以内,而加速度计振型的最大节点误差则达到17.8%的误差水平。这表明DIC振型相较于有限元振型的整体吻合度高于加速度传感器测试振型,同时得益于全场高密度采集特性,DIC振型在有效采集更丰富的结构信息的同时,表现出更优的噪声抑制能力。

## 2.5 损伤识别

由于桩结构在发生损伤时,局部抗弯刚度的下降会导致曲率模态发生显著变化。因此,通过分析曲率模态的变化,可以准确定位损伤位置,评估损伤程度。曲率模态面积差分比<sup>[14]</sup>指标对各单元曲率面积差平方进行归一化处理,以单个单元面积差平方占有所有单元面积差平方和的比例作为损伤识别依据,增强了损伤引起的曲率特征变化。其计算公式如下:

$$R_j = \frac{\Delta A_j^2}{\sum_{j=1}^m \Delta A_j^2} \quad (8)$$

式中: $R_j$ 为结构中第 $j$ 与 $j+1$ 个节点间的面积差方比参数; $\Delta A_j^2$ 为损伤前后第 $j$ 个单元的模态曲率面积差的平方; $\sum_{j=1}^m \Delta A_j^2$ 为损伤前后所有单元的模态曲率面积的平方和。

模态曲率面积差的平方 $\Delta A_j^2$ 可表示为:

$$\Delta A_j^2 = \left[ \int_{x_j}^{x_{j+1}} \ddot{\phi}_d(x) dx - \int_{x_j}^{x_{j+1}} \ddot{\phi}_u(x) dx \right]^2 \quad (9)$$

由于 $\ddot{\phi}(x) = \frac{d[\dot{\phi}(x)]}{dx}$ ,则式(9)可以写为:

$$\begin{aligned} \Delta A_j^2 &= [\dot{\phi}_d(x_{j+1}) - \dot{\phi}_d(x_j) - \dot{\phi}_u(x_{j+1}) + \dot{\phi}_u(x_j)]^2 \\ &= [\Delta \dot{\phi}(x_{j+1}) - \Delta \dot{\phi}(x_j)]^2 \end{aligned} \quad (10)$$

式中: $\phi_u(x_j)$ 、 $\phi_d(x_j)$ 分别为损伤前、后第 $j$ 个节点的位移振型值; $\dot{\phi}_u(x_j)$ 、 $\dot{\phi}_d(x_j)$ 分别为损伤前、后第 $j$ 个节点的转角模态。

将式(10)代入式(8)得到:

$$R_j = \frac{[\Delta \dot{\phi}(x_{j+1}) - \Delta \dot{\phi}(x_j)]^2}{\sum_{j=1}^m [\Delta \dot{\phi}(x_{j+1}) - \Delta \dot{\phi}(x_j)]^2} \quad (11)$$

为了使最终结果更加直观,且减少单个节点处出现的误差对整体结果的影响,对测试单元内

部每个节点间的  $R_j$  进行求和, 计算整个单元的面积差方比参数:

$$R_k = \sum_{j=1}^m R_j \quad (12)$$

式中:  $R_k$  为结构中第  $k$  个单元的面积差方比参数之和。

基于 DIC 振型获取的曲率面积差方比结果见图 11。可以看出, 动力指纹变化量的峰值出现在 5 号单元, 表明 5 号单元及其附近的动力特性在损伤前后发生了最大的变化, 该指纹对损伤位置进行了有效识别; 观察不同损伤工况的变化量峰值, 可以看出峰值与损伤程度均呈正相关关系, 表明测试结果能够定性反映损伤程度。

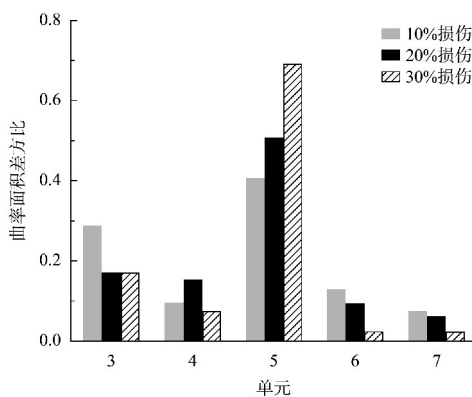


图 11 基于动力指纹的损伤识别结果

Fig. 11 Damage identification results based on dynamic fingerprints

### 3 结论

1) 本文采用移动式 3D-DIC 测量系统, 通过单组双目相机实现了高桩码头桩基的全场动力测试。该方法在保证高空间分辨率信号获取的同时降低了 DIC 测试成本, 为大型细长结构动力测试提供了新的方案。

2) 本文结合降维处理、特征点匹配、小波阈值去噪方法构建振型提取流程, 获取了完整的桩基全场振型。与有限元模拟和传统加速度传感器测试结果对比表明, DIC 测试方法不仅有效适用于高桩码头桩基动力测试中, 且获取振型的空间分辨率大幅高于传统传感器采集方法。

3) 基于 DIC 提取振型, 本文应用曲率面积差方比指标开展高桩码头桩基损伤识别研究。结果

表明, 通过 DIC 测量获取的振型在该指标下能够准确定位损伤所在位置, 且损伤前后的变化量峰值与损伤程度呈正相关关系, 能够定性反映结构损伤程度。

### 参考文献:

- [1] 栾宏, 高刚刚, 沈龙清, 等. 基于 EMD-VMD-LSTM 预测算法的高桩码头结构安全预警方法[J]. 水运工程, 2024(7): 35-41.  
LUAN H, GAO G G, SHEN L Q, et al. Safety early warning method for high-piled wharf structures based on EMD-VMD-LSTM prediction algorithm [J]. Port & waterway engineering, 2024(7): 35-41.
- [2] SUTTON M A, HILD F. Recent advances and perspectives in digital image correlation[J]. Experimental mechanics, 2015, 55: 1-8.
- [3] 晏班夫, 寇宇航, 秦筵越, 等. 基于 DIC 方法的混凝土结构裂缝开展全局识别与重构[J]. 中国公路学报, 2024, 37(3): 283-297.  
YAN B F, KOU Y H, QIN Y Y, et al. Detection and measurement method for full-field crack propagation of concrete structure based on DIC technology [J]. China journal of highway and transport, 2024, 37(3): 283-297.
- [4] POOZESH P, BAQERSAD J, NIEZRECKI C, et al. Large-area photogrammetry based testing of wind turbine blades[J]. Mechanical systems and signal processing, 2017, 86: 98-115.
- [5] WU W B, ZHAO D, ZHAO J. Removable camera based 2D digital image correlation for planar slender area quasi-static deformation measurement [J]. Optik, 2021, 226(6): 165952.
- [6] PATIL K, SRIVASTAVA V, BAQERSAD J. A multi-view optical technique to obtain mode shapes of structures[J]. Measurement, 2018, 122: 358-367.
- [7] 孙熙平, 王元战, 赵炳皓. 环境激励下高桩码头模态参数识别及损伤诊断[J]. 海洋工程, 2013, 31(5): 62-68.  
SUN X P, WANG Y Z, ZHAO B H. Modal identification and damage diagnosis of the high-piled wharf under ambient excitation [J]. The ocean engineering, 2013, 31(5): 62-68.
- [8] JIA J, TANG C K. Image stitching using structure



- deformation[J]. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 2008, 30(4): 617-631.
- [9] RUBLEE E, RABAU D V, KONOLIGE K, et al. ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF [C]//IEEE International Conference on Computer Vision. New York: IEEE, 2011: 2564-2571.
- [10] 谭竞扬. 基于像素阈值改进八点法的室内视觉定位算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- TAN J Y. Research on vision-based localization using pixel threshold based eightpoints algorithm[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [11] 王启明, 朱瑞虎, 王宁, 等. 基于模态柔度的高桩码头桩基损伤识别[J]. 水运工程, 2020(10): 46-51.
- WANG Q M, ZHU R H, WANG N, et al. Damage detection of pile foundation in high-pile wharf based on modal flexibility [J]. Port & waterway engineering, 2020(10): 46-51.
- [12] HOU C Y, XU X B, ZHENG Y L, et al. Investigation of dynamic responses of various bent structures in offshore high-pile wharfs subjected to impact loading[J]. Ocean engineering, 2025, 337: 121876.
- [13] ZHU R H, WANG Q M, ZHENG J H, et al. Damage detection of foundation pile in high-pile wharf based on statistical high-order moment of dynamic response under regular wave excitation [J]. Ocean engineering, 2023, 283: 115180.
- [14] 吴桐, 唐亮, 周丰力, 等. 融合加速度与计算机视觉实测车致响应的梁桥损伤识别方法[J]. 中国公路学报, 2024, 37(2): 152-167.
- WU T, TANG L, ZHOU F L, et al. Beam bridge damage identification by data fusion of accelerometers and computer vision measurements of moving vehicle-induced responses[J]. China journal of highway and transport, 2024, 37(2): 152-167.

(本文编辑 王璁)

(上接第 191 页)

- [6] 浙江省水利河口研究院. 京杭运河浙江段三级航道整治工程八堡船闸口门治理方案深化研究报告[R]. 杭州: 浙江省水利河口研究院, 2016.
- Zhejiang Institute of Hydraulics and Estuary. Deepening study report on the regulation scheme of Babao ship lock Entrance of the class III waterway regulation project of the Zhejiang section of the Beijing - Hangzhou Canal [R]. Hangzhou: Zhejiang Institute of Hydraulics and Estuary, 2016.
- [7] 胡友安, 王孟. 水工钢闸门数值模拟与工程实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
- HU Y A, WANG M. Numerical simulation and engineering practice of hydraulic steel gates [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2010.
- [8] 船闸闸阀门设计规范: JTJ 308—2003[S]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- Code for design of lock gates and valves of shiplocks: JTJ 308-2003[S]. Beijing: China Communications Press, 2003.
- [9] 金国强, 史英标, 李浙江, 等. 京杭运河沟通钱塘江八堡船闸口门综合整治方案[J]. 水运工程, 2022(12): 98-105.
- JIN G Q, SHI Y B, LI Z J, et al. Comprehensive regulation scheme for entrance area of Babao ship lock connecting Grand Canal and Qiantang River [J]. Port & waterway engineering, 2022(12): 98-105.
- [10] 罗家安, 孙保虎, 黄亚栋, 等. 中高水头大型三角闸门静力数值分析[J]. 水运工程, 2011(12): 127-130.
- LUO J A, SUN B H, HUANG Y D, et al. Static numerical analysis of large-scale sector lock gate with medium and high water head [J]. Port & waterway engineering, 2011(12): 127-130.
- [11] 李浙江, 金国强, 范大林, 等. 京杭运河沟通钱塘江八堡船闸设计综述[J]. 中国水运, 2025(7): 100-102.
- LI Z J, JIN G Q, FAN D L, et al. Overview of design of Qiantang River Babao ship lock in communication of Beijing-Hangzhou Grand Canal [J]. China water transport, 2025(7): 100-102.

(本文编辑 王璁)