第 52 卷 第 7 期：3287-3301 高电压技术 Vol.52, No.7: 3287-3301
2026 年 7 月 31 日 High Voltage Engineering July 31, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20250483

基于视觉增强的油浸式电抗器振动特性测量方法

祝令瑜[1]，张玉焜[1]，李金宇[2]，汲胜昌[1]，赵振杰[1]，李志立[1]
（1.电工材料电气绝缘全国重点实验室(西安交通大学)，西安 710049;
2. 中国电力科学研究院有限公司，武汉 430074）

摘　要：视觉测量方法可直接获取高空间分辨率和时间同步的振动图像，在油浸式电抗器振动图像同步测量和机械状态评估中具有广阔应用前景。由于电抗器振动幅度仅为微米级，现有的三维数字图像相关技术(3D digital image correlation，3D-DIC)在识别精度上存在不足。为此，将视觉相位运动放大算法(vision phase motion magnification,VPMM)与 3D-DIC 相结合，提出了一种基于视觉增强的油浸式电抗器振动特性测量方法。首先，验证了 VPMM 对单频微振动信号提取的有效性，测量结果与实际振幅之间的误差小于 0.7 μm，同时该方法在信息掌握方面具有更高的空间分辨率和时间同步性。其次，验证了基于视觉增强的振动特性测量方法对电抗器多频微振动信号提取的准确性，相较于 3D-DIC，VPMM+3D-DIC 对微振动信号及频谱的提取具备更高的还原度。最后，视觉测量了不同激励电压和机械状态下电抗器油箱振型(operational deflection shape, ODS)，发现 ODS 在电压波动条件下保持稳定(结构相似性指数(structural similarity index measure，SSIM)>0.85)，对松动缺陷敏感(SSIM<0.09)。研究结果表明，该方法测得的振动响应不仅达到了高精度要求，而且所获取的基频振型既能反映电压波动的稳定性，又对机械状态具有较高敏感性。

关键词：电抗器；数字图像相关；视觉相位运动放大；视觉增强；振动

Measurement Method for Vibration Characteristics of Oil-immersed Reactors Based on Visual Enhancement

ZHU Lingyu[1], ZHANG Yukun[1], LI Jinyu[2], JI Shengchang[1], ZHAO Zhenjie[1], LI Zhili[1]
(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment(Xi'an Jiaotong University), Xi'an 710049, China;
2. China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract：Visual measurement methods can be adopted to directly obtain vibration images with high spatial resolution and time synchronization, and have broad application prospects in synchronous measurement of vibration images and mechanical condition evaluation of oil-immersed reactors. Due to the fact that the vibration amplitude of power reactors is only at the micron level, existing 3D digital image correlation (3D-DIC) techniques suffer from limited accuracy in identifying such small-scale motions. To address this issue, this paper proposes a vibration measurement method for oil-immersed reactors based on visual enhancement by integrating vision phase motion magnification (VPMM) with 3D-DIC. First, the effectiveness of VPMM in extracting single-frequency micro-vibration signals is validated, showing a deviation of less than 0.7 μm between the measured amplitude and the actual value. Meanwhile, the method demonstrates higher spatial resolution and temporal synchronization. Second, the accuracy of the visual-enhancement-based method in capturing multi-frequency micro-vibration signals of the reactor is verified. Compared with traditional 3D-DIC, the combined VPMM+3D-DIC approach achieves higher fidelity in reconstructing micro-vibration signals and their spectral content. Finally, the operational deflection shape (ODS) of the reactor tank under different excitation voltages and mechanical conditions are measured. The results show that the ODS remains stable under voltage fluctuations (SSIM>0.85) and is sensitive to loosening defects (SSIM<0.09). Overall, the proposed method achieves high-precision vibration response measurements, and the extracted fundamental mode shapes not only reflect the stability under voltage variations but also exhibit high sensitivity to mechanical conditions.

Key words：reactor; digital image correlation; vision phase motion magnification; visual enhancement; vibration

基金资助项目：国家重点研发计划(2023YFB2406900)。
Project supported by National Key R&D Program of China(2023YFB2406900).

0 引言

油浸式电抗器作为超/特高压远距离输电工程的核心设备，在维持电力系统无功功率平衡、限制故障电流等方面具有不可替代的作用[1-3]。统计数据显示[4-6]，机械故障约占电抗器总故障率的 50%，其振动特征与绕组松动、紧固螺栓松动等机械缺陷存在显著关联[7-10]。现有机械特性测量主要依赖接触式振动传感阵列或扫描式激光测振仪，但前者存在空间分辨率受限与附加质量效应问题[11]，后者则受制于逐点扫描模式导致的时间异步性缺陷[12]，难以满足复杂激励环境下电抗器三维振动场的同步测量需求。

近年来，三维数字图像相关(3D digital image correlation, 3D-DIC)技术因其非接触、全场测量优势受到广泛关注。该技术通过高速相机捕捉被测表面散斑图案，结合亚像素级图像匹配算法实现三维振动位移场的重构[13-15]。理论上而言，3D-DIC 技术可突破传统测量方法的空间-时间分辨率矛盾，但实际应用中，图像传感器噪声与算法误差导致其位移分辨率通常限制在 0.1 像素以上。值得注意的是，根据标准规定油浸式电抗器振动位移峰-峰值须控制在 200 μm 以内[16]，这意味着现有 3D-DIC 技术在低激励工况或局部微幅振动区域将面临显著的测量精度不足问题。

为突破微米级振动检测瓶颈，视觉相位运动放大(vision phase motion magnification, VPMM)算法通过频域相位解调实现了亚像素级运动增强[17-18]。现有研究已证实该技术在悬臂梁模态分析[19-20]、桥梁索力监测[21]等场景的有效性，但存在两个关键局限性：(1)现有实验对象多局限于单振源激励的简单结构，缺乏对多物理场耦合作用下电力设备复杂振动特征的适应性验证；(2)研究重点集中于时频特征提取，对空间振动场的还原度缺乏系统性评估。这导致现有视觉测量方法对多频激励、非线性传递特性的结构振动场表征准确性缺乏研究。

基于现有振动测量手段的不足，本文结合 VPMM 和 3D-DIC 在捕捉图像空间信息的优势方面提出了一种基于视觉增强的油浸式电抗器振动特性测量方法。研究过程中，首先通过拍摄单一激励源下的板型结构振动，验证了该方法在微小振动识别方面的优势；随后，对实体电抗器油箱进行测量，进一步验证了其在多激励、多频分量振动信号提取方面的有效性，并探讨了不同激励电压和不同机械状态下的振动响应情况。与传统的振动特性测量方法(接触式传感阵列、扫描式激光测振仪)相比，本文方法能够获得更加全面的空间振动信息，并为多激励源下复杂电力设备的非接触式振动直接同步感知提供了可行路径。

1 视觉振动测量系统及算法原理

1.1 系统构成

视觉振动测量系统由双目高速相机、图像采集卡、光源、信号传输线以及包含立体标定、VPMM 和 3D-DIC 处理模块的计算机端组成，系统结构如图 1 所示。在进行测量任务时，需根据具体需求调整相机的高度和拍摄视角，以保证感兴趣区域(region of interest，ROI)位于两台相机的视角范围内，并实现两台相机的同步触发采集。系统的计算机端主要包含立体标定、VPMM 处理和 3D-DIC 分析模块，其原理在 1.2、1.3 和 1.4 节中介绍。

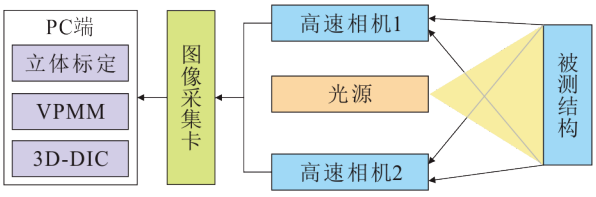


图 1 视觉振动测量系统

Fig.1 Visual vibration measurement system

视觉振动测量系统的处理步骤如图 2 所示，在对被测结构进行拍摄之前，利用已知特征的标定模板(如棋盘格标定板)进行系统标定，计算双视角相机的内外参数矩阵，并确定相机对的内参矩阵和外参矩阵，以建立统一的三维测量坐标系。随后，双目高速相机同步采集待测结构的图像序列，为后续振动分析提供数据支持。

VPMM 模块用于提取微小振动信息，提高系统对亚像素级振动的感知能力。该模块通过频域滤波方法分离不同空间尺度和不同方向的振动模式，并利用复可操作金字塔提取振动图像的实部与虚部信息。随后，基于相位变化分析计算每帧图像的相位差，并通过设定放大因子增强小幅位移。3D-DIC 模块基于双目相机的立体视觉原理，在双视角下同步计算测量目标表面各像素点的振动位移场。该方法首先在参考图像中选取子区域，并在变形后的图像中搜索最优匹配区域，以亚像素精度计算目标区

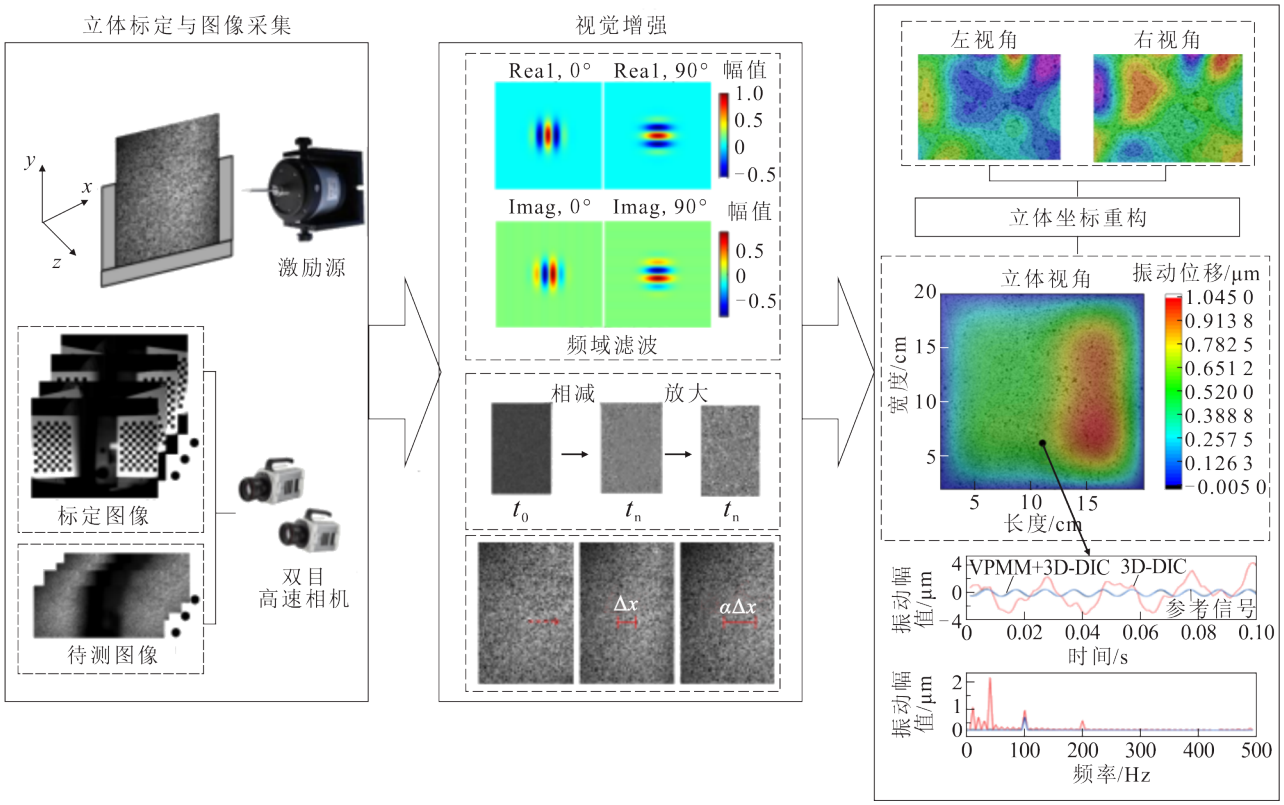


图 2 视觉振动测量系统处理过程

Fig.2 Processing process of visual vibration measurement system

域的位移和应变信息。最终，通过立体匹配重建物体的三维形变场，并采用伪彩色映射可视化位移分布。

1.2 立体标定原理

在双目相机的立体标定过程中，通过记录双视角下的标定板坐标，可获得相机内部参数与外部参数。通过相机内部参数，可用来矫正镜头带来的畸变误差；对于相机外部参数，一方面可以得到世界坐标系与像素坐标系之间的尺度因子，另一方面是用来明确双目视角之间的相对位置，从而为振动可视化结果提供世界坐标系下的三维重构坐标[22-24]。以图 3 所示模型表示被测结构在双目视角下的坐标关系，其中 Q_w 为被测结构表面在世界坐标系中的坐标点(X_w,Y_w, Z_w)，O_{c1} 和 O_{c2} 分别为左、右视角相机在世界坐标系中的位置，O_1 和 O_2 分别为左、右视角的像素中心位置，即 O_{c1} O_1 与 O_{c2} O_2 分别为左、右视角相机焦距，可分别表示为 f_1、f_2。假设左视角相机的位置坐标即为世界坐标系的原点，则对于左视角相机而言，Q_w 在左视角的像素坐标系下坐标与左相机坐标系下坐标之间的关系可表示为：

$$s_1\begin{bmatrix}u_1\\v_1\\1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1/\mathrm{d}X & 0 & u_{01}\\0 & 1/\mathrm{d}Y & v_{01}\\0 & 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}f_1 & 0 & 0 & 0\\0 & f_1 & 0 & 0\\0 & 0 & 1 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}X_w\\Y_w\\Z_w\\1\end{bmatrix} \tag{1}$$

而 Q_w 在右视角的像素坐标系下坐标与右相机坐标系下坐标之间的关系可表示为：

$$s_2\begin{bmatrix}u_2\\v_2\\1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1/\mathrm{d}X & 0 & u_{02}\\0 & 1/\mathrm{d}Y & v_{02}\\0 & 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}f_2 & 0 & 0 & 0\\0 & f_2 & 0 & 0\\0 & 0 & 1 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}X_{c2}\\Y_{c2}\\Z_{c2}\\1\end{bmatrix} \tag{2}$$

式中：s_1 和 s_2 分别为尺度因子；u_{01} 和 v_{01} 分别为左视角的像素坐标与左相机坐标之间的平移位置；u_{02} 和 v_{02} 分别为右视角的像素坐标与右相机坐标之间的平移位置；$\mathrm{d}X$ 和 $\mathrm{d}Y$ 分别为水平、竖直方向上的像元尺寸。再由左、右视角相机之间的相对位置可知：

$$\begin{bmatrix}X_{c2}\\Y_{c2}\\Z_{c2}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{R} & \boldsymbol{T}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}X_w\\Y_w\\Z_w\\1\end{bmatrix} \tag{3}$$

其中 $\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$，$\boldsymbol{T}=\begin{bmatrix} t_1 & t_2 & t_3 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$，分别表示右相机坐标系经左相机坐标系进行的旋转过程与平移过程。结合式(1)—式(3)，再根据左视角相机位置(O_{c1})与被测坐标位置 $Q_w(X_w, Y_w, Z_w)$之间的关系可知：

$$\begin{cases} X_w = \dfrac{\left(t_1 f_2 - t_3 \mathrm{d}X\left(x_2-u_{02}\right)\right)\left(x_1-u_{01}\right)\mathrm{d}X}{\left(\mathrm{d}X^2\left(x_2-u_{02}\right)r_{31}-\mathrm{d}Xf_2 r_{11}\right)\left(x_1-u_{01}\right)+\left(\mathrm{d}X\mathrm{d}Y\left(x_2-u_{02}\right)r_{32}-\mathrm{d}Yf_2 r_{12}\right)\left(y_1-v_{01}\right)+\mathrm{d}X\left(x_2-u_{02}\right)r_{33}f_1-f_1 f_2 r_{13}} \\ Y_w = \dfrac{\left(t_1 f_2 - t_3 \mathrm{d}X\left(x_2-u_{02}\right)\right)\left(y_1-v_{01}\right)\mathrm{d}Y}{\left(\mathrm{d}X^2\left(x_2-u_{02}\right)r_{31}-\mathrm{d}Xf_2 r_{11}\right)\left(x_1-u_{01}\right)+\left(\mathrm{d}X\mathrm{d}Y\left(x_2-u_{02}\right)r_{32}-\mathrm{d}Yf_2 r_{12}\right)\left(y_1-v_{01}\right)+\mathrm{d}X\left(x_2-u_{02}\right)r_{33}f_1-f_1 f_2 r_{13}} \\ Z_w = \dfrac{f_1\left(t_1 f_2 - t_3 \mathrm{d}X\left(x_2-u_{02}\right)\right)}{\left(\mathrm{d}X^2\left(x_2-u_{02}\right)r_{31}-\mathrm{d}Xf_2 r_{11}\right)\left(x_1-u_{01}\right)+\left(\mathrm{d}X\mathrm{d}Y\left(x_2-u_{02}\right)r_{32}-\mathrm{d}Yf_2 r_{12}\right)\left(y_1-v_{01}\right)+\mathrm{d}X\left(x_2-u_{02}\right)r_{33}f_1-f_1 f_2 r_{13}} \end{cases} \tag{4}$$

式中：x_1 和 y_1 表示被测点在左视角图像中的像素坐标；x_2 和 y_2 表示被测点在右视角图像中的像素坐标；$r_{i,j}$ 为旋转矩阵 $\boldsymbol{R}$ 中第 i 行第 j 列的元素，t_1、t_2 和 t_3 为平移向量 $\boldsymbol{T}$ 在三维坐标方向上的分量。立体标定过程获取了双目相机的相对位置参数，结合双目相机的焦距与像素坐标点，即可得到被测点在世界坐标系下的三维振动情况。

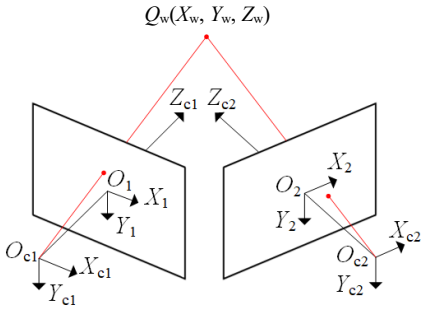


图 3 双目视角坐标系

Fig.3 Binocular perspective coordinate system

1.3 视觉相位运动放大算法

在像素坐标下，结构表面的瞬态振动位移 $\delta(x,t)$ 和 $\delta(y,t)$对应前后两帧图像在 t 和 t+1 时刻下的像素强度可分别表示为 $I(x,y,t)$和 $I(x+\delta(x,t),y+\delta(y,t))$，其中$(x,y)$为像素点坐标。VPMM 算法首先针对视频中每帧图像进行二维傅里叶变换，得到图像中每个像素点的实部与虚部信息，采用复可操作金字塔对每帧复数图像进行分解。复可操作金字塔是一种分层次、多尺度的图像表示方法，通过逐层对图像进行降采样或滤波，构建一系列不同分辨率的图像[20]。同时可从中获得图像的幅值(描述图像纹理等信息)和相位信息(描述图像中的形状和位置等信息)[25-27]。复可操作金字塔对复数图像的分解结果是将包含不同尺度和方向的二维小波函数(2D-Gabor)与每帧图像进行卷积[21]，2D-Gabor 表示为：

$$g(x,y,\lambda,\theta,\psi,\sigma,\gamma)=\exp\left(-\frac{x_\theta^2+\gamma^2 y_\theta^2}{2\sigma^2}\right)\exp\left(\mathrm{i}\left(2\pi\frac{x_\theta}{\lambda}+\psi\right)\right) \tag{5}$$

式中：x 和 y 表示像素坐标；λ、ψ、σ 分别表示波长、复指数函数的相移以及高斯包络的标准偏差；γ 为控制 2D-Gabor 函数形状的比例系数；θ 为待提取图像的信息方向，由像素坐标(x, y)和信息方向 θ 可得到旋转坐标 x_θ 和 y_θ，表示如下：

$$\begin{cases} x_\theta = x\cos\theta + y\sin\theta \\ y_\theta = -x\sin\theta + y\cos\theta \end{cases} \tag{6}$$

以金字塔其中一层的处理过程为例，假设需要提取图像中水平方向上的振动信息，则 θ 设为 0°。在 t 时刻图像被 2D-Gabor 滤波器提取到的特征可表示为：

$$\begin{aligned} G(x,y,t) &= \iint_{-\infty}^{+\infty} I(u,v,t)\mathrm{e}^{\left(-\frac{(x-u)^2+\gamma^2(y-v)^2}{2\sigma^2}\right)}\cdot\mathrm{e}^{\mathrm{i}\left(2\pi\frac{x-u}{\lambda}+\psi\right)}\mathrm{d}u\mathrm{d}v = \\ &\mathrm{e}^{\mathrm{i}\left(-2\pi\frac{x}{\lambda}\right)}\iint_{-\infty}^{+\infty} I(u,v,t)\mathrm{e}^{\left(-\frac{(x-u)^2+\gamma^2(y-v)^2}{2\sigma^2}\right)}\cdot\mathrm{e}^{\mathrm{i}\left(2\pi\frac{u}{\lambda}+\psi\right)}\mathrm{d}u\mathrm{d}v = \\ &A(x,y,t)\mathrm{e}^{\mathrm{i}\left(-2\pi\frac{x}{\lambda}\right)} \end{aligned} \tag{7}$$

在 t+1 时刻图像被 2D-Gabor 滤波器提取到的特征可表示为：

$$\begin{aligned} G(x,y,t+1) &= \iint_{-\infty}^{+\infty} I\left(u+\delta_x,v+\delta_y,t+1\right)\mathrm{e}^{-\frac{(x-u-\delta_x)^2+\gamma^2(y-v-\delta_x)^2}{2\sigma^2}}\cdot \\ &\mathrm{e}^{\mathrm{i}\left(2\pi\frac{x-u-\delta_x}{\lambda}+\psi\right)}\mathrm{d}\left(u+\delta_x\right)\mathrm{d}\left(v+\delta_y\right) = \\ &\mathrm{e}^{\mathrm{i}\left(-2\pi\frac{x+\delta_x}{\lambda}\right)}\iint_{-\infty}^{+\infty} I\left(u+\delta_x,v+\delta_y,t+1\right)\mathrm{e}^{-\frac{(x-u-\delta_x)^2+y^2(y-v-\delta_x)^2}{2\sigma^2}}\cdot \\ &\mathrm{e}^{\left(2\pi\frac{u}{\lambda}+\psi\right)}\mathrm{d}\left(u+\delta_x\right)\mathrm{d}\left(v+\delta_y\right) = \\ &B(x,y,t+1)\mathrm{e}^{\mathrm{i}\left(-2\pi\frac{x+\delta_x}{\lambda}\right)} \end{aligned} \tag{8}$$

式中：u 和 v 表示 2D-Gabor 卷积核的积分变量；

$A(x,y,t)$和 $B(x,y,t+1)$分别表示 2D-Gabor 在 t 时刻和 $t+1$ 时刻对图像提取的局部响应幅值；δ_x为结构在像素坐标下的水平位移。

前后两帧特征之间的相位差为：

$$\phi_{G(x,y,t+1)}-\phi_{G(x,y,t)}=2\pi\frac{\delta_x}{\lambda} \tag{9}$$

由此可得到像素点在水平方向上的位移与相位差之间的关系。若对式(9)两边乘上放大因子 α，即对两帧图像的相位差进行放大，相应地增强了像素中所呈现的结构振动位移的视觉效果。VPMM 计算流程如图 4 所示，为了清晰区分各环节的处理结果，图 4 中采用形状规则的柱形结构作为示范。经过视觉效果增强得到的重构视频，为后续的 3D-DIC 计算过程提供输入特征。

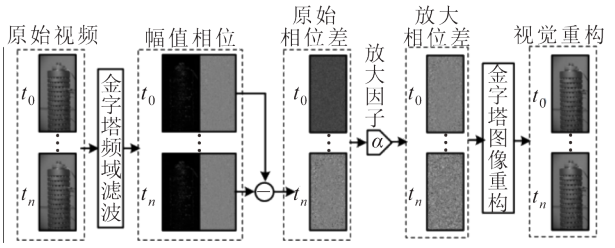


图 4 视觉相位运动放大流程图

Fig.4 Flowchart of vision phase motion magnification

1.4 数字图像相关原理

在 3D-DIC 的计算过程中，首先需要在测量对象的感兴趣区域内选取目标参考点，并以该测点为几何中心构建参考子区域。随后，采用整像素搜索算法在下一帧图像中进行初步匹配，以确定该子区域的整像素位移场，并将其作为后续迭代计算的初始值[13]。接下来，基于形函数构建亚像素匹配模型，利用子区域搜索策略进一步优化位移与形变场的计算精度，从而实现对结构的非接触式位移及形变测量[28]。以当前帧中像素子区域范围内的某个像素点$(x_i^{\mathrm{cur}},y_j^{\mathrm{cur}})$为例，假设该点是由参考帧中像素点$(x_i^{\mathrm{ref}},y_i^{\mathrm{ref}})$映射得到，则两者关系可表示为：

$$\begin{cases}x_i^{\mathrm{cur}}=x_i^{\mathrm{ref}}+u_{\mathrm{rc}}+\dfrac{\partial u}{\partial x_{\mathrm{rc}}}\left(x_i^{\mathrm{ref}}-x_{\mathrm{c}}^{\mathrm{ref}}\right)+\dfrac{\partial u}{\partial y_{\mathrm{rc}}}\left(y_j^{\mathrm{ref}}-y_{\mathrm{c}}^{\mathrm{ref}}\right)\\ y_j^{\mathrm{cur}}=y_j^{\mathrm{ref}}+v_{\mathrm{rc}}+\dfrac{\partial v}{\partial x_{\mathrm{rc}}}\left(x_i^{\mathrm{ref}}-x_{\mathrm{c}}^{\mathrm{ref}}\right)+\dfrac{\partial v}{\partial y_{\mathrm{rc}}}\left(y_j^{\mathrm{ref}}-y_{\mathrm{c}}^{\mathrm{ref}}\right)\end{cases} \tag{10}$$

式中：u_{rc}、v_{rc}分别为像素子区域范围内的中心像素点$(x_{\mathrm{c}}^{\mathrm{ref}},y_{\mathrm{c}}^{\mathrm{ref}})$沿着水平和竖直方向上的位移分量；$\dfrac{\partial u}{\partial}$、$\dfrac{\partial v}{\partial}$分别为一阶变形梯度，表示像素子区域范围内每个像素点沿水平和竖直方向的位移分量。

已知参考图像中像素的横向坐标分量$\boldsymbol{x}_{\mathrm{ref}}^{\mathrm{T}}$、纵向坐标分量$\boldsymbol{y}_{\mathrm{ref}}^{\mathrm{T}}$，参考点到目标点的相对坐标差$\Delta\boldsymbol{x}_{\mathrm{ref}}^{\mathrm{T}}$和$\Delta\boldsymbol{y}_{\mathrm{ref}}^{\mathrm{T}}$，像素子区域内各像素点的位移和变形可表示为：

$$\boldsymbol{\xi}_{\mathrm{ref}}+\boldsymbol{w}\left(\Delta\boldsymbol{\xi}_{\mathrm{ref}}\boldsymbol{p}_{\mathrm{rc}}\right)=\begin{bmatrix}\boldsymbol{x}_{\mathrm{ref}}^{\mathrm{T}}\\ \boldsymbol{y}_{\mathrm{ref}}^{\mathrm{T}}\\ 1\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}1+\dfrac{\partial u}{\partial x} & \dfrac{\partial u}{\partial y} & \boldsymbol{u}_{\mathrm{rc}}\\ \dfrac{\partial v}{\partial x} & 1+\dfrac{\partial v}{\partial y} & \boldsymbol{v}_{\mathrm{rc}}\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta\boldsymbol{x}_{\mathrm{ref}}^{\mathrm{T}}\\ \Delta\boldsymbol{y}_{\mathrm{ref}}^{\mathrm{T}}\\ 1\end{bmatrix} \tag{11}$$

式中：$\boldsymbol{\xi}_{\mathrm{ref}}$为参考帧中的像素坐标向量；$\Delta\boldsymbol{\xi}_{\mathrm{ref}}$为参考帧中的像素坐标的变化量；$\boldsymbol{P}_{\mathrm{rc}}$表示用于控制坐标变形的参数向量；$\boldsymbol{w}$表示映射像素子区域在当前帧与参考帧之间的形函数。令$f(x,y)$、$g(x',y')$分别表示参考子区和变形子区对应位置的灰度值，$\overline{f}$和$\overline{g}$表示其平均灰度值，对于$(2M+1)\times(2M+1)$像素的正方形参考子区，差值平方和函数常用的为零均值归一化差值平方和函数(zero-mean normalized sum squared difference, ZNSSD)[29]，表示为：

$$C_{\mathrm{ZNSSD}}=\sum_{\Delta x=-M}^{M}\sum_{\Delta y=-M}^{M}\left(\frac{f(x,y)-\overline{f}}{\sqrt{\sum_{i=-M}^{M}\sum_{j=-M}^{M}\left(f(x,y)-\overline{f}\right)^2}}-\frac{g(x',y')-\overline{g}}{\sqrt{\sum_{i=-M}^{M}\sum_{j=-M}^{M}\left(g(x,y)-\overline{g}\right)^2}}\right)^2 \tag{12}$$

通过对后续不同帧的映射像素子区进行搜索，并根据式(12)的相关函数在变形图像中找到与参考子区最为接近的变形子区，同理，3D-DIC 中则是在同帧的双视角图像中搜索到与参考子区最为接近的变形子区，根据各像素点的位移状态即可绘制出 ROI 在每帧图像中的位移云图。

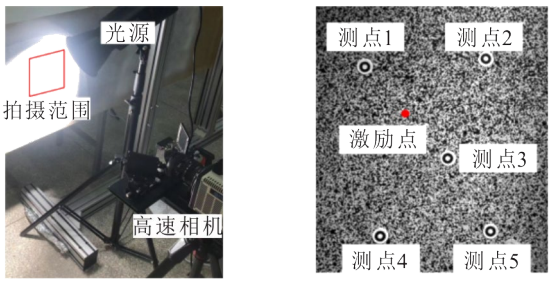
2 板型结构振动测量验证

2.1 板型结构振动模拟平台

考虑到油浸式电抗器振动来源复杂、传播路径多变，其表面振动响应难以直接控制，本研究首先选用质地均匀、机械性能稳定的环氧树脂板作为振动模拟平台，从而为方法初步验证提供简化而理想的实验环境，振动激励采用单一的振源激励方式。

激振器型号为 JKZ-5，其最大振幅可达±7.5 mm，激励频率最高可达 3 kHz，能够覆盖电抗器稳态运行条件下的振动工况。实验中采用的高速相机型号为 SH6-504，其最大分辨率为 2 560×2 016，最大拍摄速度可达 50 000 帧/s。镜头焦距设置为 50 mm，拍摄距离为 0.6 m，确保在所测场景内获得足够分辨率和清晰度。

图 5(a)为实验测量场景及板面拍摄范围。图中可见高速相机与光源相对位置布置紧凑，保证了良好的照明条件和 ROI 较大的有效视场。图 5(b)展示了拍摄范围内的图像纹理及所选定的 5 个测点。为在实验过程中获取可靠的基准数据，在这 5 个测点上均安装了接触式振动传感器，实时记录振动位移信号。接触式传感器与视觉测量数据的对比可用于定量评估所提方法的准确性和稳定性。



(a) 振动测量平台实物图 (b) 激振点与测点分布

图 5 振动测量平台

Fig.5 Vibration measurement platform

结合 1.2 节所述的像素匹配标定原理(标定图像见图 6)，计算得到右视角相机相对于左视角相机的旋转矩阵和位移向量为：

$$\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix} 0.913\,5 & 0.015\,1 & -0.406\,5 \\ -0.006\,2 & 0.999\,7 & 0.023\,2 \\ 0.406\,7 & -0.018\,7 & 0.913\,4 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{T}=\begin{bmatrix} 232.665\,0 & -1.860\,6 & 21.586\,6 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$

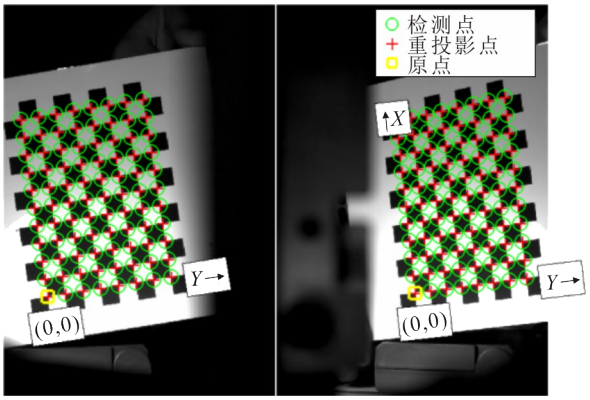


图 6 双目视角标定

Fig.6 Binocular calibration

将旋转矩阵 $\boldsymbol{R}$、位移向量 $\boldsymbol{T}$ 以及像元尺寸等相机参数代入式(4)中，可以将两个不同视角下的图像数据统一到同一三维空间中，从而准确测量目标物体的法向位移及其动态变化。

采用激振器在被测板激励点施加频率为 100 Hz 的持续载荷，并逐步调整激振器的载荷幅值，以模拟不同工况下的振动响应。实验中，接触式传感器用于实时采集振动信号，作为参考标准。随后，利用 3D-DIC 从拍摄图像中提取振动位移信息，实现对被测板表面振动响应的三维重构。

为对比视觉提取结果与接触式传感器数据之间的匹配程度，本文采用多种指标对时域和频域信号进行定量评估。在时域方面，引入皮尔逊相关系数(Pearson correlation coefficient，PCC)和互信息(mutual information，MI)，用于衡量两组振动信号之间的线性和非线性相关性。PCC 值反映了两信号之间的线性相关程度，数值越接近 1 表示线性相关性越强；而 MI 则能够捕捉信号中潜在的非线性依赖关系，数值越大表明两信号的信息共享越多。PCC 和 MI 具体表示如下：

$$\rho_{xy}=\frac{\operatorname{cov}(x,y)}{\sigma_x\sigma_y} \tag{13}$$

$$I(X;Y)=\sum_{x\in X}\sum_{y\in Y}p(x,y)\lg\left(\frac{p(x,y)}{p(x)\,p(y)}\right) \tag{14}$$

式中：cov(x,y)为协方差；σ_x 和 σ_y 分别为信号 x 和 y 的标准差；$p(x,y)$为两个信号的联合概率分布；$p(x)$和 $p(y)$为各自的边际概率分布。

在频域方面，为评估重构振动信号的频谱准确性，采用频谱角距离(spectral angle mapper，SAM)和归一化频谱交集(normalized spectrum intersection，NSI)。SAM 指标通过计算两频谱向量间的夹角来度量其相似性，夹角越小表明频谱形状越接近；NSI 则衡量两频谱在能量分布上的重叠程度，数值越大表示两者在频谱特征上的一致性越高。两项指标的表达方式为：

$$P_{\mathrm{SAM}}=\arccos\left(\frac{\sum_{i=1}^{N}P_{\mathrm{S1}}(f_i)P_{\mathrm{S2}}(f_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}P_{\mathrm{S1}}(f_i)^2}\cdot\sqrt{\sum_{i=1}^{N}P_{\mathrm{S2}}(f_i)^2}}\right) \tag{15}$$

$$P_{\mathrm{NSI}}=\frac{\int_{f_{\min}}^{f_{\max}}\min\left(P_{\mathrm{S1}}(f_i),P_{\mathrm{S2}}(f_i)\right)\mathrm{d}f}{\int_{f_{\min}}^{f_{\max}}\max\left(P_{\mathrm{S1}}(f_i),P_{\mathrm{S2}}(f_i)\right)\mathrm{d}f} \tag{16}$$

式中：$P_{\mathrm{S1}}(f_i)$和 $P_{\mathrm{S2}}(f_i)$分别为信号的频谱值；min 和

max 函数分别表示两个频谱在每个频率上的最小值和最大值；N 为频率最大值。

2.2 测量方法验证

以距离激励点最远的测点 5 为例，图 7 展示了在不同峰-峰值条件下的振动信号及其频谱，其中矩形符号表示由 3D-DIC 提取的振动信号，圆形符号表示参考信号，表 1 为 3D-DIC 重构结果与参考信号之间的定量对比指标。可以看出，随着激振器载荷逐步降低，板面法向位移峰-峰值从 189.9 μm 依次下降至 10.1 μm，振动信号的主频依旧集中在 100 Hz，但其幅值和信噪比显著降低。

在高激励条件下(189.9 μm 与 164.6 μm)，如图 7(a)和(b)所示，振动波形近似标准正弦，频谱中主频成分突出，杂散频率成分较弱。对应的 PCC 分别高达 0.993 8 和 0.975 0，MI 也达到了 2.145 0 和 1.438 0，表明 3D-DIC 与参考信号在时域上具有极高的线性与非线性相关度。在此激励水平下，成像过程中板面纹理位移较为明显，像素灰度变化信息充分，视觉上能够较好地捕捉到目标运动。当峰-峰值降至 88.7 μm 和 45.6 μm 时，如图 7(c)和(d)所示，振动波形仍能反映 100 Hz 的主频成分，但在时域上出现一定程度的波动和噪声，PCC 和 MI 相比前两种激励水平有所下降。值得注意的是，虽然 100 Hz 峰值在频谱中依然清晰可见，但在较低的位移幅值下，灰度变化信号的对比度降低，图像噪声和算法误差开始对测量精度产生影响。进一步降低至 22.8 μm 和 10.1 μm 时，如图 7(e)和(f)所示，信号呈现出更加明显的噪声干扰，主频成分虽然仍能在频域上被捕捉到，但时域波形已无法保持标准正弦形态。此时，PCC 显著下降，最低值仅为 0.217 4，MI 也降至 0.070 0，说明随着激励幅值的持续减小，3D-DIC 在时域上对微小振动信号的还原度显著降低。随着激励幅值降低，3D-DIC 识别的振动信号在时域和频域方面的重构精度均呈下降趋势。当振动幅值较小时，板面像素灰度变化不够显著，且噪声在采集与处理过程中占据更高的比例，导致视觉难以准确匹配与跟踪微小位移。进一步证实了高信噪比成像和足够的空间分辨率对于准确获取微振动信号的关键性。

当被测结构的峰-峰位移较小(如≤10 μm)时，板面像素灰度变化极其微弱，传统 3D-DIC 受噪声影响，难以精确识别微振动信息。为增强微小位移在图像中的可见度，引入 1.3 节所述的 VPMM 算法，对 100 Hz、峰-峰位移约 6 μm 的振动信号进行

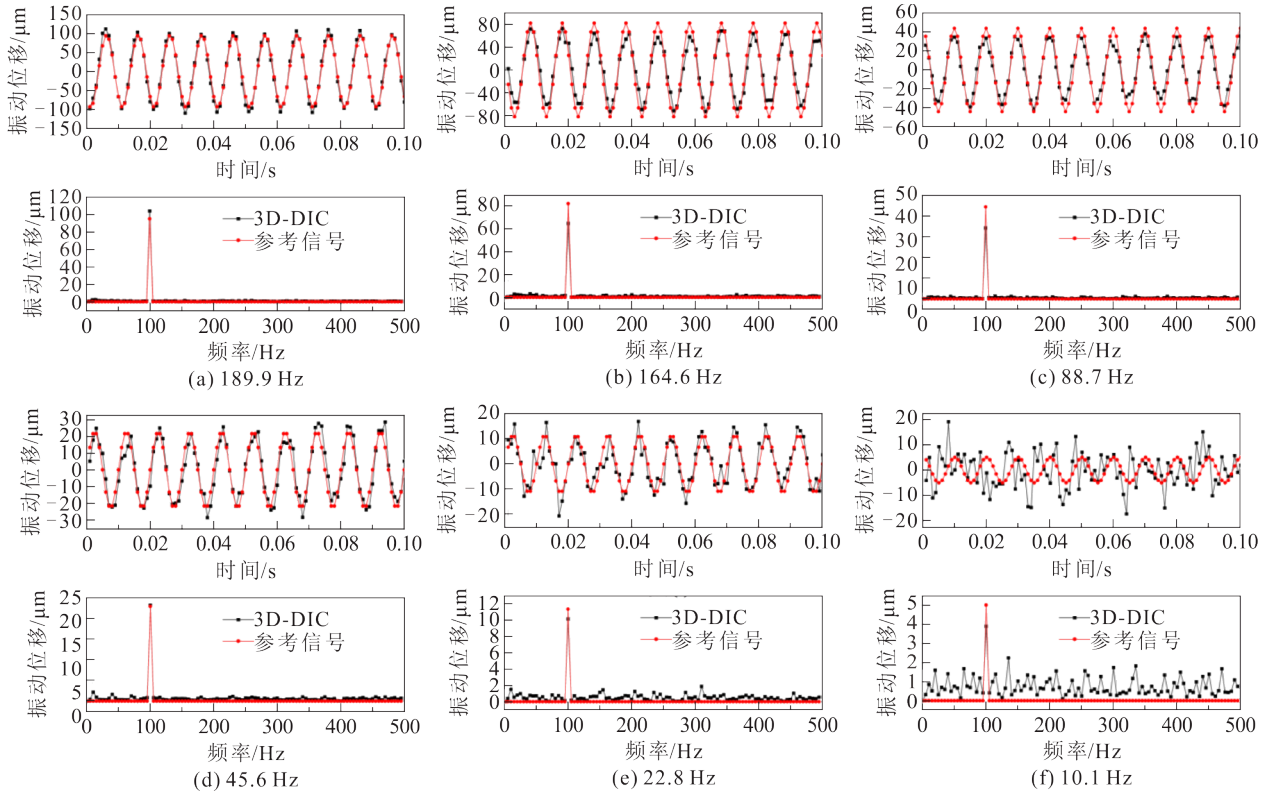


图 7 3D-DIC 振动测量结果

Fig.7 Vibration measurement results based on 3D-DIC

25 倍放大后，再利用 3D-DIC 提取各测点的振动位移。完成测量后，将放大后的振动结果再归一化回原始量级，以达到与接触式传感器结果的可比性。图 8 给出了 5 个测点在 VPMM+3D-DIC 处理后得到的振动信号(矩形符号)与接触式传感器测量结果(圆形符号)，两者在时域上高度相符；通过快速傅里叶变换(FFT)可以看到，主频均集中在 100 Hz，并且相较于直接应用 3D-DIC 时，VPMM+3D-DIC 提取的信号在频域上噪声抑制效果更佳，主频成分更为清晰。

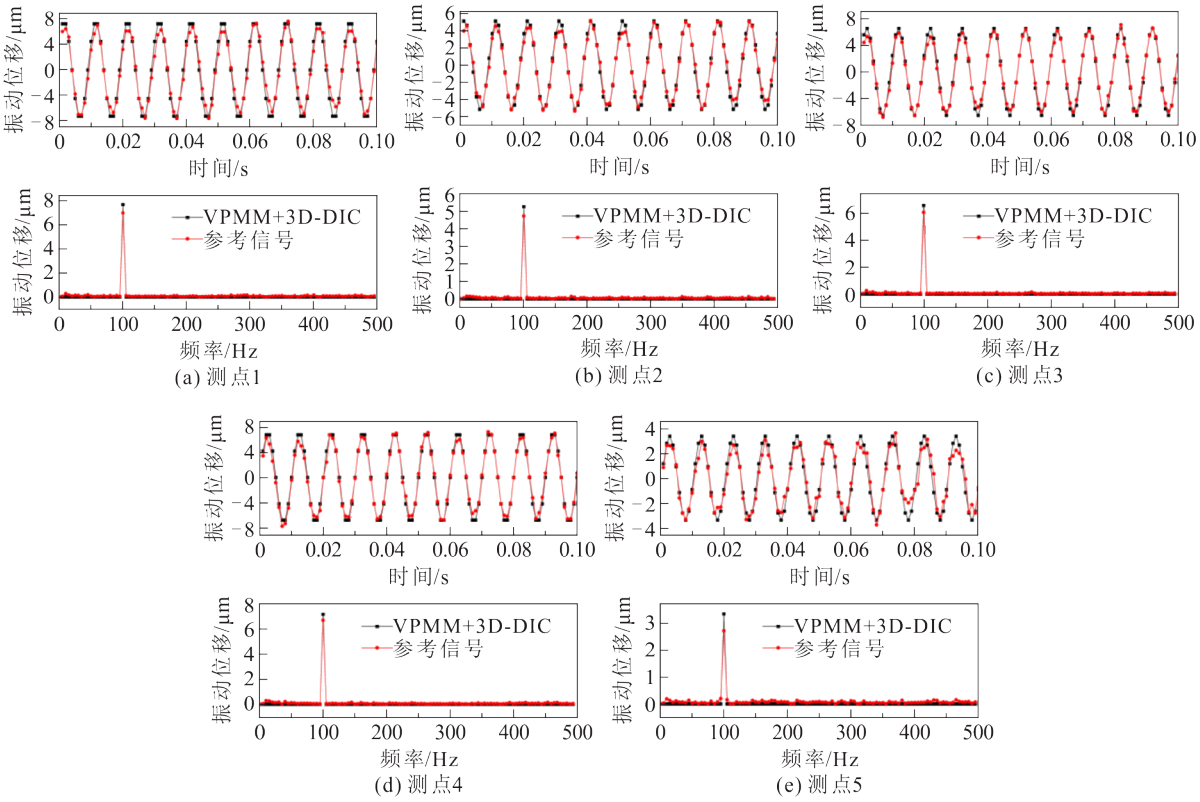


图 8 VPMM+3D-DIC 振动测量结果

Fig.8 Vibration measurement results based on VPMM+3D-DIC

表 2 列出了不同测点在 VPMM+3D-DIC 测量下的时域与频域还原度指标。可以发现，测点 5 的运动信息经处理后，PCC、MI 和 NSI 3 项指标均显著提升，而 SAM 大幅降低，说明 VPMM+3D-DIC 有效改善了时域和频域信号的还原度。此外，对于测点 1 至测点 4，在 10~15 μm 的峰-峰位移范围内，4 项指标表现均明显优于表 1 中 3D-DIC 对更大峰-峰值(如 88.7 μm 和 164.6 μm)信号的还原结果。这一现象验证了 VPMM 对微振动分量的放大与去噪能力，即在幅值极小的振动场景下，其算法对关键振动模式进行增强，从而提升 3D-DIC 对亚像素级位移的匹配精度。需要指出的是，测点 4 相较测点 2 在相似激励距离的条件下表现出略高的位移量，主要原因在于环氧树脂板右侧通过支架固定，而左侧为自由边界，使板面振动在水平方向分布不对称。

表 1 3D-DIC 对振动信号的还原度

Table 1 Restoration degree of vibration signals by 3D-DIC

峰-峰值/μm	PCC	MI	SAM	NSI
189.9	0.993 8	2.145 0	0.070 4	0.517 1
164.6	0.975 0	1.438 0	0.158 9	0.360 5
88.7	0.973 2	1.402 6	0.169 0	0.364 2
45.6	0.934 7	0.991 1	0.273 7	0.287 6
22.8	0.855 8	0.676 7	0.540 6	0.163 3
10.1	0.217 4	0.070 0	1.147 9	0.050 1

表 2 不同测点信号经 VPMM+3D-DIC 的还原度

Table 2 Restoration degree of signals from different measurement points by VPMM+3D-DIC

测点	PCC	MI	SAM	NSI
1	0.984 4	1.665 5	0.128 1	0.452 8
2	0.989 4	1.832 9	0.137 4	0.435 8
3	0.993 7	2.059 8	0.111 4	0.500 0
4	0.992 0	1.981 6	0.123 9	0.482 1
5	0.949 1	1.113 6	0.279 6	0.272 7

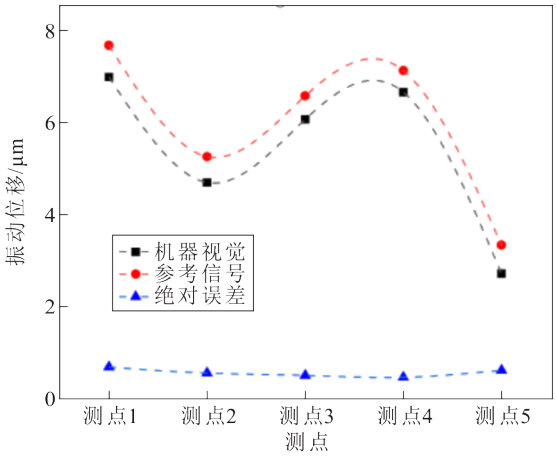


图 9 基于 VPMM+3D-DIC 的振动分布

Fig.9 Vibration distribution based on VPMM+3D-DIC

板型结构在固有模态下会形成固定的波节线区域，因此结构表面展现出局部区域同步振动的特征，且该区域振幅因分布位置不同而存在差异。图 9 展示了板型结构上 5 个测点在 VPMM+3D-DIC 与接触式传感器两种测量方式下的振动主频幅值分布，同时也对比了两者之间的绝对误差。虽然 VPMM+3D-DIC 与传感器在各测点的绝对振幅值上存在微小差异(均小于 0.7 μm)，但两组数据的整体分布趋势高度一致，即振动幅值随测点位置的变化规律在两种测量手段下均能得到保持。这表明所提方法不仅能有效增强微小振动在视频中的可视化效果，而且能够准确还原结构表面的振动分布特征。

3 电抗器箱壁振动分析

3.1 电抗器振动测量平台

在 2.2 节中，基于对简单板型结构振动的测量实验，逐步验证了本研究所提出的视觉振动测量方法的有效性与适用性。板型结构实验能够在较为理想化的条件下排除复杂结构因素所带来的影响，但电抗器因其内部激励源的耦合效应，振动特性更为复杂。为进一步评估所提方法在真实工程场景中的应用可行性，本研究针对一台油浸式铁芯电抗器进行振动测量实验，并从多指标评估的角度对测量结果进行对比分析。

图 10 为本研究搭建的电抗器振动激励及测量平台。电抗器激励作用通过一台三相调压器(10 kVA)实现电压持续可调，再由升压变压器(0.4 kV/10 kV，100 kVA)对电抗器(10 kV，76 kvar)进行激励，同时由 6 台电容器(11 kV，50 kvar)进行电流补偿。在振动测量方面，拍摄系统采用两台分别布置在不同角度的高速相机，双目相机的基线与电抗器油箱平面平行，相机光路与拍摄区域处于同一水平高度，如图 11 所示。由于电抗器箱壁振动的主要能量集中在基频分量，为准确捕捉 0~400 Hz 范围内的振动响应，实验将相机的采样速度设置为 4 000 帧/s，并将拍摄区域限定在箱壁表面 20 cm×20 cm 大小的区域内，以在高采样率条件下兼顾足够的空间分辨率。光源配置方面，为保证图像亮度及纹理对比度，实验采用高亮 LED 面光源从两台高速相机中间位置对拍摄区域进行均匀照明，以避免图像模糊和阴影干扰，确保后续图像处理过程中特征点提取的准确性。

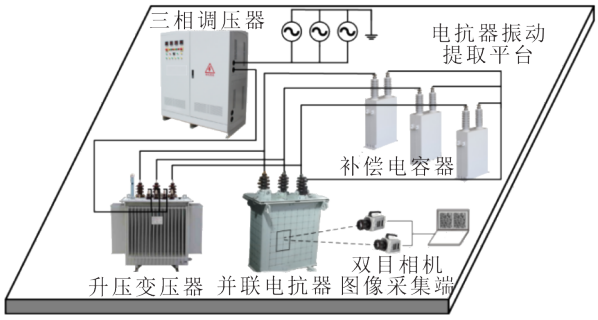


图 10 电抗器振动测量平台示意图

Fig.10 Schematic diagram of reactor vibration measurement platform

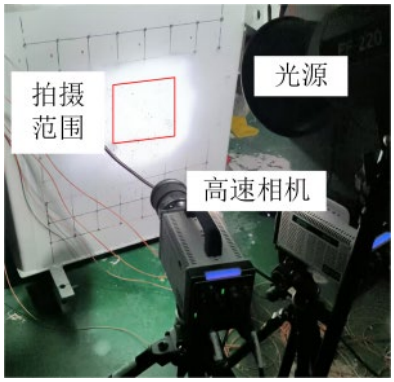


图 11 电抗器振动测量场景

Fig.11 Reactor vibration measurement scenario

3.2 电抗器箱壁振动测量验证

在该测量场景中，箱壁法向位移分辨率主要取决于相机参数(如镜头焦距、基线距离、拍摄物距等)。理论计算表明，本实验条件下视觉测量对油箱法向振动位移分辨率为 1.5 μm。然而通过接触式传感器预先测得该电抗器箱壁不同位置的振动位移幅值处于 0.5~2 μm 范围内，其中存在低于视觉分辨率

的区域，因此仅依靠 3D-DIC 技术难以有效提取拍摄区域内的微小振动信息。

基于实验对噪声与失真度的权衡，将 VPMM 放大倍数确定为 20 倍，以在提高微振动信号可见度的同时维持图像质量与算法稳定性。为了在空间分布上系统考察箱壁振动特征，如图 12 所示，在 20 cm×20 cm 的拍摄区域内以 5 cm 的间隔布设了 9 个测点(从左到右、从上到下依次编号)，并对各测点的振动信号及其频谱进行分析。为了验证对电抗器进行视觉测量的准确性，采用轻型振动传感器对 9 个测点进行测量，并作为参考信号。

箱壁上测点 1 至测点 9 的时域和频域信号如图 13 所示，矩形符号表示由 VPMM+3D-DIC 得到的

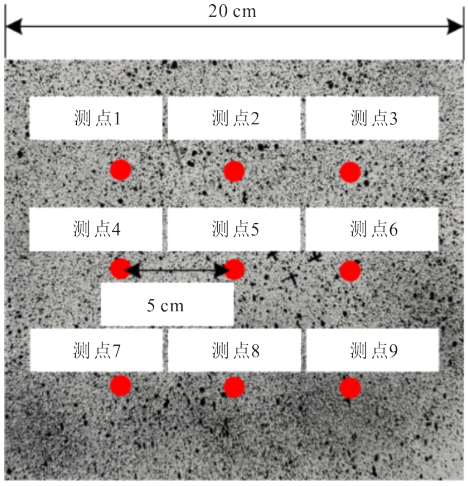


图 12 箱壁振动测点

Fig.12 Vibration measurement points on the tank

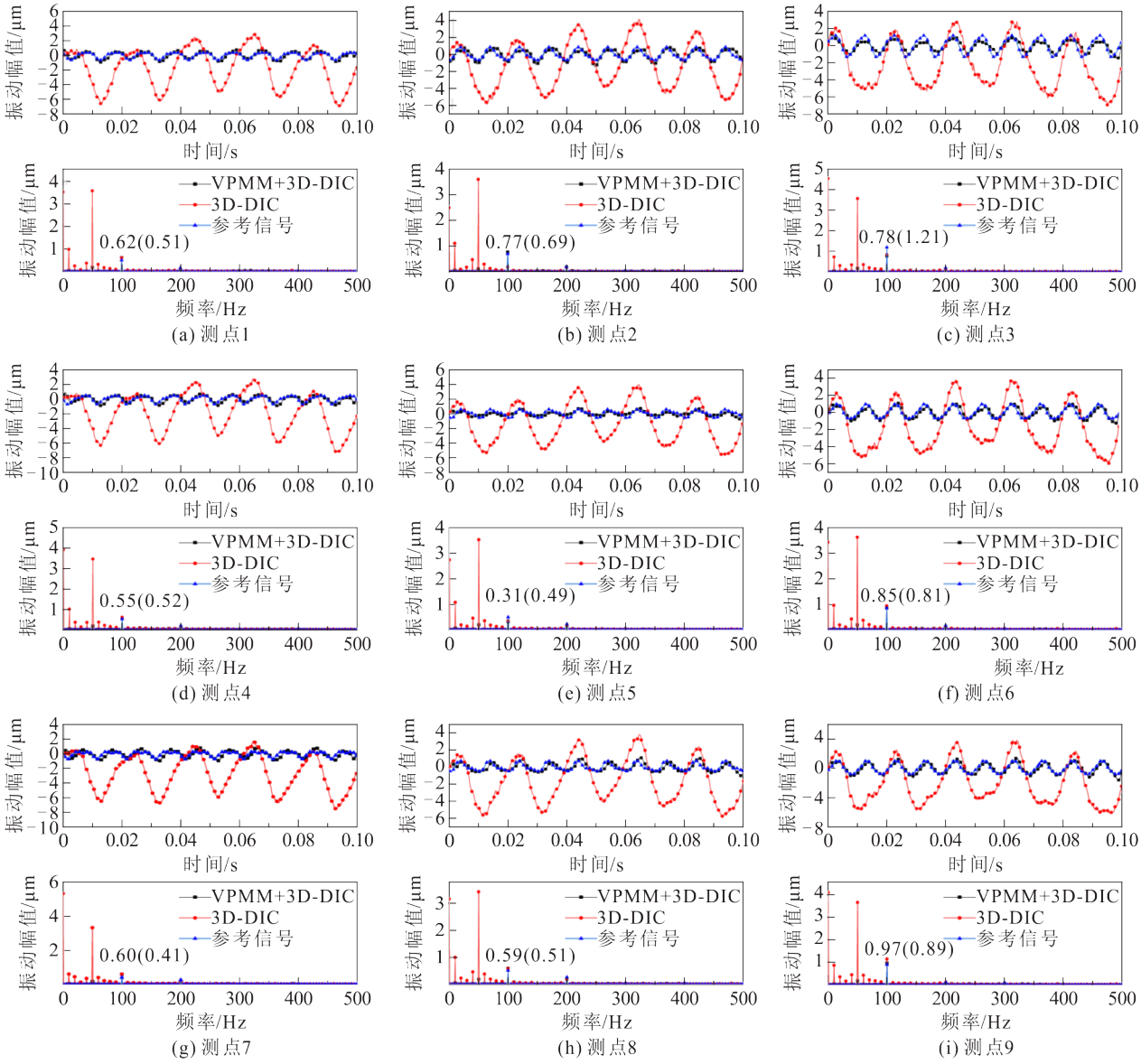


图 13 电抗器箱壁振动测量结果

Fig.13 Vibration measurement results of reactor tank

振动信号，圆形符号表示由 3D-DIC 得到的振动信号，三角符号则表示参考信号。仅采用 3D-DIC(下文称之为方法 2)得到的振动频谱中出现了 100 Hz 之外的低频成分；而基于 VPMM+3D-DIC(下文称之为方法 1)得到的振动信号则相对纯净，主频集中在 100 Hz，与电抗器振动机理相符合。为进一步量化两种方法对电抗器箱壁振动信号的还原度，根据 PCC、MI、SAM 和 NSI 4 项指标对测量结果进行评估，具体数据如表 3 所示。方法 1 的 PCC 均超过 0.5，最高达 0.87(测点 9)，而方法 2 的 PCC 值仅为 0.03～0.26，表明方法 1 的时域波形还原能力显著优于方法 2。同时，方法 1 的 MI 值普遍高于方法 2，尤其在测点 2 中，方法 1 的 MI 值达到 0.92，约为方法 2(0.28)的 3.3 倍，进一步验证了信号关键特征的高保真性。在 SAM 方面，方法 1 的数值范围(0.24～0.62)远低于方法 2(1.37～1.52)，说明其频谱误差更小；NSI 指标中，方法 1 的 NSI 值较方法 2 均有大幅提升，进一步佐证了其在频域能量分布的精确匹配能力。综上所述，VPMM+3D-DIC 在微小振动信号提取中具备高保真度和高可靠性，为准确捕捉电抗器箱壁微振动特征提供了有力技术支撑。

单点振动信号在一定程度上可以反映电力设备的运行状态，而油箱表面的振型分布则提供了更为全面的机械状态信息。根据文献[28-29]的研究，电抗器箱壁的基频振型(100 Hz)中包含的机械状态信息已十分丰富，相比倍频振型(200 Hz、300 Hz、…)，基频振型更加稳定，既不受电压波动的影响，又对机械状态的变化具有强敏感性。因此，接下来选择基频振型作为主要可视化目标。考虑到油浸式电抗器运行于并联线路中，因此考虑其激励电压波动于额定电压(U_N)的±5%，图 14 展示了电抗器在 0.95U_N、U_N 及 1.05U_N 工况下箱壁的基频振型。随着电压从 0.95U_N 上升到 1.05U_N，振动幅值呈现逐渐增大的趋势，振动最大幅值从 0.894 μm 升高到 1.305 μm，高振幅区域集中稳定在 ROI 右侧，即位于箱壁中心，与电压波动不影响基频振型分布的结论一致。

表 3 不同视觉测量手段下的振动信号还原度

Table 3 Restoration degree of vibration signals under different visual measurement methods

测点	PCC		MI		SAM		NSI	
	方法 1	方法 2	方法 1	方法 2	方法 1	方法 2	方法 1	方法 2
1	0.867 0	0.159 3	0.778 0	0.238 6	0.438 9	1.451 6	0.263 2	0.055 8
2	0.833 5	0.031 7	0.923 5	0.280 0	0.244 7	1.522 6	0.394 0	0.035 7
3	0.821 9	0.201 1	0.749 1	0.217 2	0.370 0	1.425 5	0.278 0	0.073 7
4	0.703 1	0.143 1	0.588 7	0.211 0	0.494 1	1.455 7	0.270 1	0.059 4
5	0.543 8	0.067 9	0.418 5	0.190 7	0.622 2	1.488 2	0.246 5	0.052 3
6	0.848 3	0.221 0	0.764 8	0.281 8	0.307 7	1.389 0	0.360 9	0.083 5
7	0.611 1	0.127 1	0.416 3	0.124 1	0.497 6	1.477 7	0.242 5	0.048 7
8	0.665 2	0.121 3	0.492 0	0.245 2	0.434 5	1.449 2	0.310 0	0.069 0
9	0.868 2	0.264 8	0.866 2	0.374 7	0.292 9	1.369 1	0.337 4	0.080 9

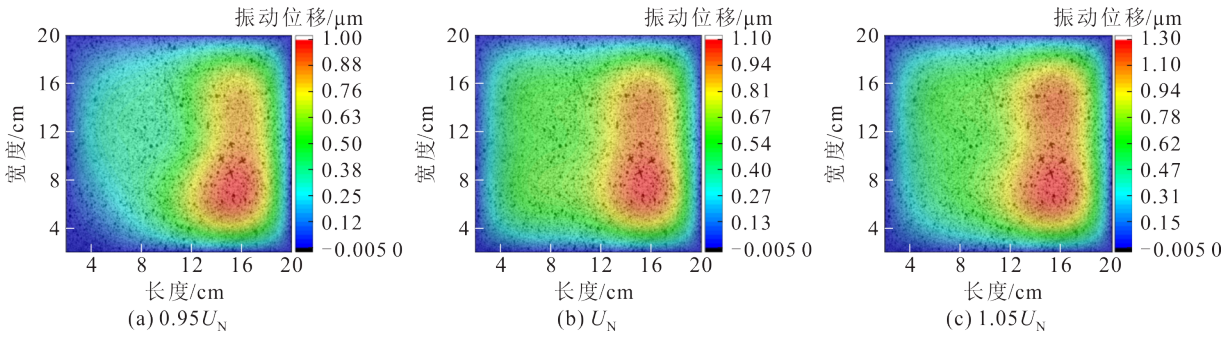


图 14 不同电压下的箱壁基频振型分布

Fig.14 Distribution of fundamental shapes of the tank under different voltages

通过对各像素点的振动信号提取谐波分量，可形成不同倍频分量下的振型分布，额定电压下的倍频振型分布如图 15 所示。随着频率的增大，振动片区存在逐步增多的趋势，该现象符合板型结构振动特性。对实验电抗器内部结构设置不同机械状态(绕组松动、螺杆松动、铁轭松动)，设置部位可见图 16，其中绕组处于完全松动状态，螺杆和铁轭分别为初始预紧力的 90%。通过 VPMM+3D-DIC 提取不同机械状态下的箱壁基频振型分布，可见图 17。从中可看出，相较于正常状态下的基频振型，结构松动状态下的振动片区发生明显转移，同时节线形状也发生了不同程度的变化。正常状态下，绕组、铁芯、铁轭及各紧固件均处于良好紧固与配合状态，油箱整体刚度均匀，振动能量在油箱壁面上相对均匀地传递和分布，箱壁振型分布中的振动片区(红色区域)较为集中。当油箱内部结构出现不同的机械状

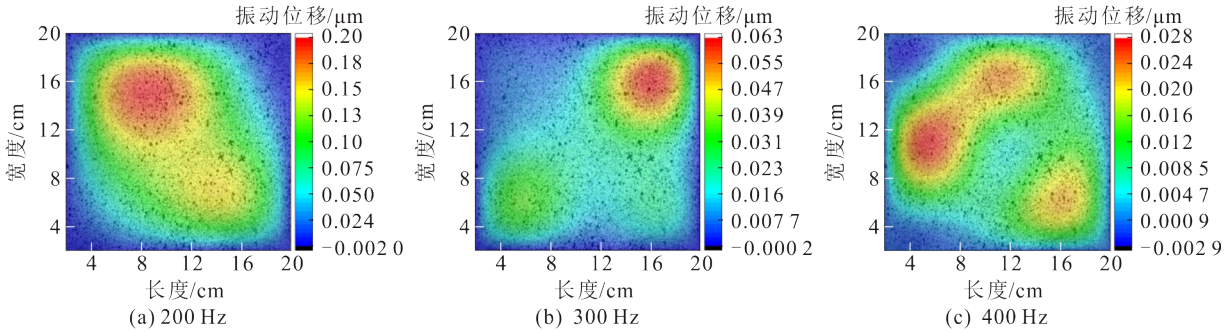


图 15 不同倍频分量下的箱壁振型分布

Fig.15 Distribution of tank vibration shapes under different harmonic components

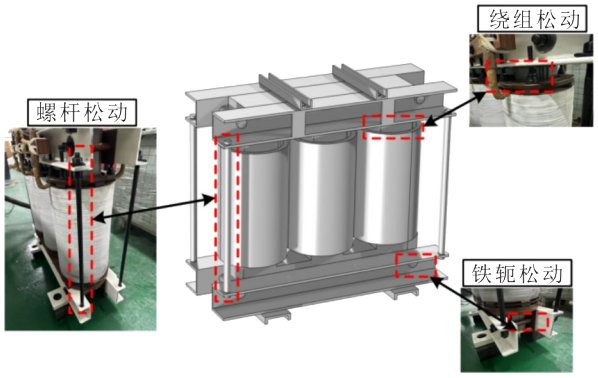


图 16 电抗器松动部位

Fig.16 Loose parts of the reactor

态，导致电抗器本体结构之间的局部接触刚度下降，在交变电磁力作用下容易产生相对运动，并通过紧固夹件或绝缘油传递至油箱表面。因此松动导致的相对位移在相应区域形成新的振动耦合路径，表现为在箱壁出现更多高振动片区，原本的片区振动能量不再集中。

通过提取箱壁振型的关键特征并与历史参考振型比对，可判断油箱内部机械状态[11,28-29]。为此，本文以额定电压下振型为参考，采用图像处理领域中常用的结构相似性指数(structural similarity index measure，SSIM)衡量油箱内部是否发生结构松动，电抗器在不同运行状态下振型的稳定程度如表 4 所示，经过 SSIM 的量化，从中可看出机械状态对振型造成显著影响。由于振动响应由激励大小和传递函数共同决定，因此表 4 中考虑了激励程度和机械状态两种因素。

由此可见，结合 VPMM 和 3D-DIC 的视觉振动测量方法在电抗器振动特性检测方面具备有效性，既保证了对油浸式电抗器微振动进行直接同步测量，又能够直观反映其内部机械状态是否发生变化。

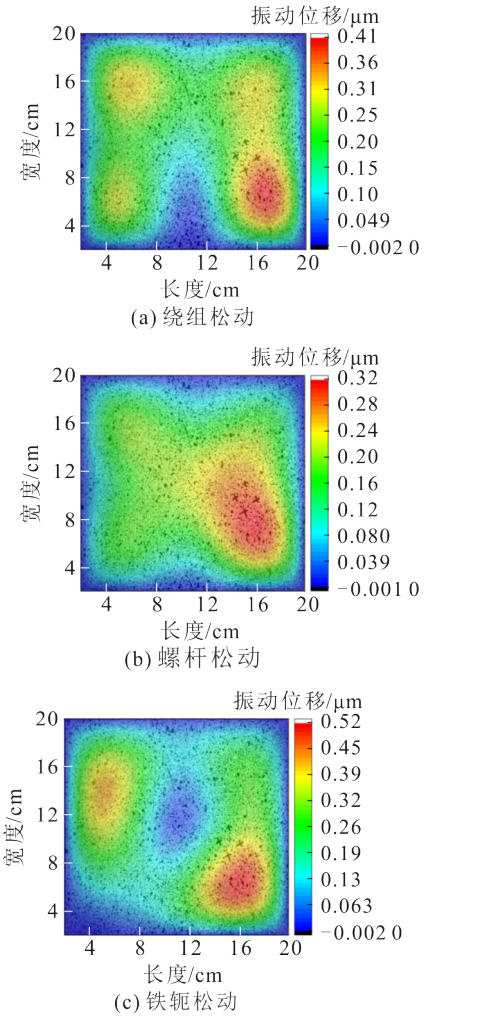


图 17 不同机械状态下的箱壁振型分布

Fig.17 Distribution of tank vibration shapes under different mechanical conditions

相较于传统接触式测量方法，突破了空间信息上的局限性，避免了附加质量对振动造成的影响；相较于扫描式激光测量方法，避免了因非同步性测量造成的振型还原误差；相较于传统视觉测量方法，解决了 3D-DIC 对电力设备微振动测量精度不足的问题。

表 4 振型稳定程度

Table 4 Stability level of vibration shape

运行状态	激励程度			机械状态		
	U_N	$0.95U_N$	$1.05U_N$	绕组松动	螺杆松动	铁轭松动
SSIM	1	0.961 7	0.850 9	0.081 2	0.080 9	0.082 0

3.3 不同放大倍数对振动测量结果的影响

前文验证了视觉增强在微振动测量中的有效性，但考虑到像素频谱响应的不均匀性，运动信息并不能被过度放大。在利用 VPMM 对视频处理的步骤中，首先对图像进行多尺度分解，并在每个尺度上进行多方向的频域滤波，随后对相位分布进行线性放大。相较于低频分量，由于高频分量对相位放大因子更为敏感，二者在放大过程中难以实现完全同步，从而导致图像细节出现畸变。图 18 展示了将放大倍数分别设置为 25、50、100 和 200 倍时的重构图像对比，可以直观地观察到：随着放大倍数的提升，图像变得逐渐模糊，边缘及细节部分出现明显失真，尤其在 200 倍放大条件下，环形标识的形变已十分显著。为定量评估放大倍数对图像质量的影响，本研究引入均方根误差(root mean square error, RMSE)P_{RMSE} 和信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)P_{SNR} 两项指标对重构图像进行评估，其计算式如下：

$$P_{\mathrm{RMSE}}=\frac{1}{MN}\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}(g(i,j)-f(i,j)) \tag{17}$$

$$P_{\mathrm{SNR}}=10\lg\frac{\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}g(i,j)^2}{\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}\left(g(i,j)-f(i,j)\right)^2} \tag{18}$$

式中：$g(i,j)$为视觉相位运动放大后的像素灰度值；$f(i,j)$为原始视频的像素灰度值；(i,j)为像素坐标位置，M 和 N 分别为像素的宽度和高度。结果表明，随着放大倍数的增加，RMSE 呈上升趋势，而 SNR 则随之下降。这说明在较大放大倍数下，图像灰度值偏离原始图像越明显，且噪声对图像的干扰越显著，导致细节信息被噪声掩盖，不利于后续振动信号的精确提取。

以电抗器油箱表面的测点 1—测点 5 为例，基于 3D-DIC 技术对不同放大倍数(25、50、100 倍)的振动测量结果如图 19 所示，柱状图上的数字表示对应的放大倍数，分析后发现：在放大倍数不超过

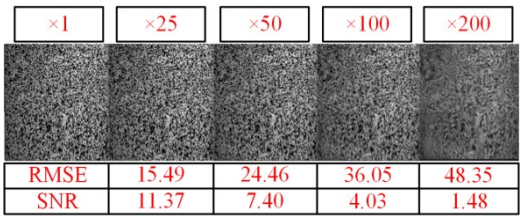


图 18 不同放大倍数对图像质量的影响

Fig.18 Effect of different magnifications on image quality

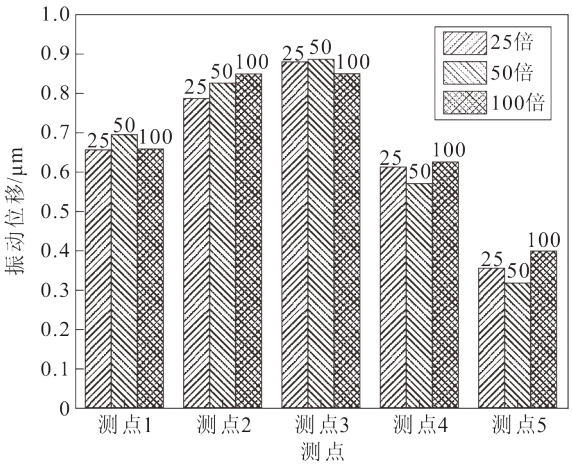


图 19 不同放大倍数下的振动幅值(原始量级)

Fig.19 Vibration amplitude at different magnifications(original magnitude)

100 倍的范围内，VPMM+3D-DIC 与接触式传感器的测量结果在幅值与分布趋势方面保持较高的一致性。

为了进一步揭示振幅与放大倍数之间的关系，本研究对 VPMM+3D-DIC 计算得到的振幅值进行了拟合，得到如图 20 所示的变化趋势。从中可以看到，在 25~100 倍放大范围内，振幅随放大倍数呈线性增长。然而放大倍数超过 100 倍后，图像的局部细节变得不可识别。上述现象表明，适度放大有助于增强微小振动的可观测性，而过度放大则会引入过多失真与噪声，从而破坏测量精度。

4 结论

1）本文方法能够实现对板型结构微米级单频振动信号测量，测量结果与实际振幅之间的误差小于 0.7 μm。相较于传统单点式振动测量方法，该方法在振动信息获取方面具有更高的空间分辨率和时间同步性。

2）本文方法能有效提取电抗器微米级多频振

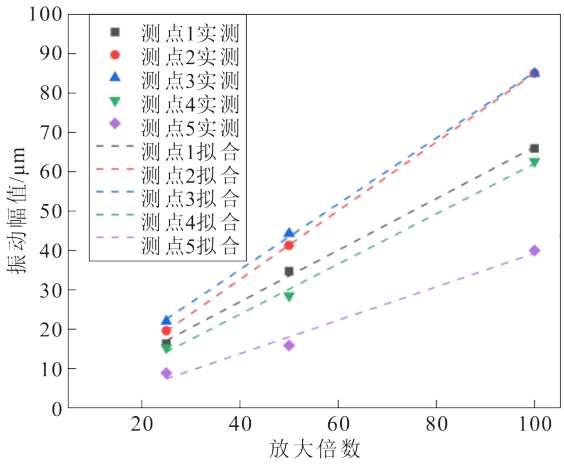


图 20 振动幅值(当前量级)随放大倍数的变化趋势

Fig.20 The trend of vibration amplitude (current magnitude) changing with magnifications

动信号，相较于 3D-DIC，VPMM+3D-DIC 对微振动信号及频谱的提取具备更高的还原度。然而，过高的放大倍数(应不高于 100 倍)会导致图像细节失真，影响后续 3D-DIC 的匹配精度和信号提取效果。

3）随着激励频率的增大，电抗器振型中振动片区逐步增多。视觉测量得到的振型在电压波动条件下保持稳定(SSIM>0.85)，对松动缺陷敏感(SSIM<0.09)，不同机械状态下振动波峰位置和节点形状均出现不同程度的变化。

这表明，该方法在复杂激励条件下不仅具备高精度的振动信号提取能力，还能揭示结构在不同运行状态下的动态特性。本文所提出的振动测量方法有望为现场电抗器及类似油浸式电力设备的健康监测提供可靠的技术支撑。未来研究需重点突破测量系统在现场复杂环境中的工程适配性，包括安装方案优化与多源干扰抑制。

参考文献 References

[1] 郭佳熠，沙叶楠，刘云鹏，等. 油浸式并联电抗器铁芯振动下的悬浮放电特性[J]. 高电压技术，2025，51(5)：2485-2493.
GUO Jiayi, SHA Yenan, LIU Yunpeng, et al. Suspension discharge characteristics of oil-immersed shunt reactor under vibration[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(5): 2485-2493.

[2] 袁发庭，张仁杰，颜智威，等. 考虑材料磁致伸缩特性的铁芯电抗器振动特性分析及分层优化策略[J]. 高电压技术，2025，51(3)：1464-1475.
YUAN Fating, ZHANG Renjie, YAN Zhiwei, et al. Analysis of vibration characteristics of ironcore reactor considering magnetostrictive characteristics properties of materials and hierarchical optimization strategy[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(3): 1464-1475.

[3] 李鹏，李金忠，崔博源，等. 特高压交流输变电装备最新技术发展[J]. 高电压技术，2016，42(4)：1068-1078.
LI Peng, LI Jinzhong, CUI Boyuan, et al. Achievements in the newest technology of UHV AC power transmission equipment[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(4): 1068-1078.

[4] 王梦云，薛辰东. 1995～1999 年全国变压器类设备事故统计与分析[J]. 电力设备，2001(1)：11-19.
WANG Mengyun, XUE Chendong. Nation-wide statistics and analysis on power transformers faults in 1995~1999[J]. Electrical Equipment, 2001(1): 11-19.

[5] 王梦云. 2002-2003 年国家电网公司系统变压器类设备事故统计与分析(二)[J]. 电力设备，2004(11)：22-26.
WANG Mengyun. Faults statistics and analysis for equipments of transformer' s type in SG system in 2002-2003[J]. Electrical Equipment, 2004(11): 22-26.

[6] 王伟，韩金华，李德志，等. 河南电网 500 kV 并联电抗器运行状况分析[J]. 高压电器，2009，45(4)：82-85.
WANG Wei, HAN Jinhua, LI Dezhi, et al. Analysis of the 500 kV shunt reactors operation condition in Henan power grid[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(4): 82-85.

[7] 曹辰，路敦林，徐博文，等. 基于弹性力学-热力学的变压器铁芯磁致伸缩振动模型与松动故障诊断方法[J]. 高电压技术，2024，50(5)：2146-2157.
CAO Chen, LU Dunlin, XU Bowen, et al. Magnetostrictive vibration model and loosening fault diagnosis method of transformer core based on elastodynamics-thermodynamics[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(5): 2146-2157.

[8] 吴书煜，汲胜昌，孙建涛，等. 在运换流变压器振动监测及其变化规律[J]. 高电压技术，2022，48(4)：1561-1570.
WU Shuyu, JI Shengchang, SUN Jiantao, et al. Vibration monitoring and variation law of converter transformer in operation[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(4): 1561-1570.

[9] 刘云鹏，来庭煜，刘嘉硕，等. 特高压直流换流阀饱和电抗器振动声纹特性与松动程度声纹检测方法[J]. 电工技术学报，2023，38(5)：1375-1389.
LIU Yunpeng, LAI Tingyu, LIU Jiashuo, et al. Vibration voiceprint characteristics and looseness detection method of UHVDC converter valve saturable reactor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(5): 1375-1389.

[10] LI S M, ZHANG Y K, WANG W S, et al. Incident analysis of excessive acetylene from a 1 000 kV shunt reactor due to transient operations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2024, 39(4): 2092-2100.

[11] 师愉航，汲胜昌，张凡，等. 变压器油箱表面运行变形振型特性研究[J]. 电工技术学报，2019，34(5)：1088-1095.
SHI Yuhang, JI Shengchang, ZHANG Fan, et al. Research on vibration morphology characteristics of transformer tank surface[J]. Journal of Electrical Engineering Technology, 2019, 34(5): 1088-1095.

[12] 高璐，汲胜昌，祝令瑜，等. 高压换流站干式空心电抗器的振动产生机理及影响因素研究[J]. 中国电机工程学报，2022，42(16)：5960-5970.
GAO Lu, JI Shengchang, ZHU Lingyu, et al. Study on vibration mechanism and impact factors of dry-type air-core reactor in HVDC converter stations[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(16): 5960-5970.

[13] 刘阳. 三维数字图像相关方法误差分析与应用研究[D]. 合肥：中国科学技术大学，2022.
LIU Yang. Research on the uncertainty analyse and applications of three-dimensional digital image correlation method[D]. Hefei, China: University of Science and Technology of China, 2022.

[14] MOLINA-VIEDMA A J, FELIPE-SESÉ L, LÓPEZ-ALBA E, et al. 3D mode shapes characterisation using phase-based motion magnification in large structures using stereoscopic DIC[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 108: 140-155.

[15] 修晟，张愿，单伽锃. 基于视觉和振动监测数据融合的结构动态位移识别及其试验验证[J]. 工程力学，2023，40(11)：90-98.
XIU Cheng, ZHANG Yuan, SHAN Jiazeng. Vision and vibration data fusion-based structural dynamic displacement measurement with test validation[J]. Engineering Mechanics, 2023, 40(11): 90-98.

[16] IEC. Power transformers - part 6: reactors: IEC 60076-6[S]. Geneva, Switzerland: IEC, 2007.

[17] WU H Y, RUBINSTEIN M, SHIH E, et al. Eulerian video magnification for revealing subtle changes in the world[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2012, 31(4): 65.

[18] WADHWA N, RUBINSTEIN M, DURAND F, et al. Phase-based video motion processing[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2013, 32(4): 80.

[19] ZHOU J W, LI H G, ZHANG L, et al. Vibration measurement with video processing based on alternating optimization of frequency and phase shifts[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 5020113.

[20] ZANG Z D, YANG X Z, ZHANG G, et al. Phase-based vibration frequency measurement from videos recorded by unstable cameras[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 5018714.

[21] ZHANG G, YANG X Z, ZANG Z D, et al. Phase-based bridge cable vibration frequency measurement in complex background[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73: 5005216.

[22] 王凯，李得睿，向升，等. 基于光斑投影 3D-DIC 的动态液面波高场测量方法研究[J]. 力学学报，2023，55(10)：2427-2438.
WANG Kai, LI Derui, XIANG Sheng, et al. Dynamic liquid surface wave height field measurement method based on speckle projection 3D-DIC[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2023, 55(10): 2427-2438.

[23] 胡小亮. 数字图像相关方法的图像影响因素与应用研究[D]. 重庆：重庆大学，2021.
HU Xiaoliang. Research on image influencing factors and applications of digital image correlation[D]. Chongqing, China: Chongqing University, 2021.

[24] ATKINSON D, BECKER T H. Stereo digital image correlation in MATLAB[J]. Applied Sciences, 2021, 11(11): 4904.

[25] 曾聪. 基于机器视觉的微小振动测量方法及实验研究[D]. 南京：南京航空航天大学，2020.
ZENG Cong. Research on vibration measurement based on machine vision[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020.

[26] SOLAV D, SILVERSTEIN A. DuoDIC: 3D digital image correlation in MATLAB[J]. Journal of Open Source Software, 2022, 7(74): 4279.

[27] LIANG Z H, ZHANG Y X, YUE L. Experimental investigation: vibration measurement of a rotating blade with digital image correlation and blade tip-timing[J]. Micromachines, 2022, 13(12): 2156.

[28] ZHU L Y, ZHANG Y K, ZHAN C, et al. Mechanical condition diagnosis method of high-voltage reactor using its oil tank operation deflection shape[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2023, 17(21): 4781-4793.

[29] SHI Y H, JI S C, ZHANG F, et al. Application of operating deflection shapes to the vibration-based mechanical condition monitoring of power transformer windings[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(4): 2164-2173.



祝令瑜(通信作者)
1988—，男，博士，教授，博导
主要从事电力设备振动噪声、直流输电设备状态监测、高频变压器设计等方面的研究工作
E-mail: zhuly1026@xjtu.edu.cn

ZHU Lingyu
Ph.D., Professor
Corresponding author



张玉焜
1995—，男，博士生
主要从事电力设备振动测量、状态监测及故障诊断等方面的研究工作
E-mail: zhangyk0512@stu.xjtu.edu.cn

ZHANG Yukun
Ph.D. candidate

收稿日期 2025-04-10 在线出版日期 2025-06-27 编辑 曹昭君