

基于模态空间分析的GIS振动源定位和动载荷重构方法

丁德炜, 李宇航, 严英杰, 刘亚东, 江秀臣

(上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

摘要: 针对气体绝缘金属封闭开关设备GIS(gas-insulated switchgear)内部机械缺陷难以通过外部振动信号实现定量识别的问题,开展了面向三维薄壳壳体的振动源定位与动载荷重构研究。构建以模态空间为核心的联合反演框架,利用物理信息高斯过程PIGP(physics-informed gaussian process)并结合由有限元振型组成的空间形状字典,对模态力进行鲁棒重构;在振源寻优中引入基于模态能量分布的物理约束,联合遗传算法GA(genetic algorithm)实现载荷作用位置的全局搜索。基于GIS壳体有限元模型与真型实验平台,在不同激励路径、背景振动及噪声条件下获取加速度响应数据,对定位误差和载荷时程重构结果进行对比分析。结果表明,该联合反演方法在稀疏测点和多源干扰条件下仍能稳定识别内部激励位置及其主导时程特征,可为GIS机械缺陷的物理溯源与定量评估提供有效技术途径。

关键词: 气体绝缘金属封闭开关设备; 振动源定位; 动载荷重构; 模态空间反演; 物理信息高斯过程; 遗传算法

Vibration Source Localization and Dynamic Load Reconstruction Method for GIS Based on Modal Space Analysis

DING Dewei, LI Yuhang, YAN Yingjie, LIU Yadong, JIANG Xiuchen

(School of Electric Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: To address the difficulty of quantitatively identifying internal mechanical defects in gas-insulated switchgear(GIS) through external vibration signals, a study on vibration source localization and dynamic load reconstruction for three-dimensional thin enclosures is performed. A joint inversion framework centered on modal space analysis is constructed, in which a physics-informed Gaussian process(PIGP) combined with a finite-element-mode-based spatial shape dictionary is used to perform constrained reconstruction of modal forces. In the vibration source optimization, a physical constraint based on modal energy distribution is introduced and integrated with a genetic algorithm(GA) to achieve global optimization of the load application position. Based on a GIS enclosure finite element model and a full-scale experimental platform, the acceleration response data is acquired under different excitation paths, background vibrations, and noise conditions, and the localization accuracy as well as the reconstructed load time histories are comparatively analyzed. The results show that the proposed joint inversion method can still stably identify internal excitation locations and their dominant temporal characteristics under sparse measurement points and multi-source interference, providing an effective technical approach for physical tracing and quantitative evaluation of GIS mechanical defects.

Key words: gas-insulated switchgear; vibration source localization; dynamic load reconstruction; modal-space inversion; physics-informed Gaussian process; genetic algorithm

收稿日期:2025-09-02; 修回日期:2025-11-23

基金项目:国家自然科学基金项目(52207166)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(52207166).

0 引言

气体绝缘金属封闭开关设备 GIS(gas-insulated switchgear)具有结构紧凑、绝缘性能优良及运行可靠性高等优势,在现代输变电系统中得到广泛应用^[1-5]。在长期运行过程中, GIS 易受到螺栓松动、导体偏心、触头磨损及弹簧疲劳等机械因素影响^[6-8],并表现出异常振动特征,可能诱发局部放电、绝缘退化甚至击穿事故^[9-10]。统计数据显示,机械类缺陷约占 GIS 故障总量的 60%以上^[11],已成为威胁电网安全稳定运行的重要隐患。因此,实现对 GIS 机械故障的及时、准确诊断,是保障设备长期安全运行的关键需求。

围绕 GIS 机械缺陷的检测与识别,国内外学者开展了大量研究工作,主要基于外部振动信号的特征提取与模式识别展开。通过构建多测点振动特征、能量谱与主成分特征等,并结合卷积神经网络、支持向量机及集成学习模型,相关研究已能够对触头接触不良、结构松动等典型机械缺陷实现较高精度的识别与分类^[12-18]。但此类方法本质上依赖外部响应表征,缺乏对结构特性及振动传播机理的显式建模;在测点有限、传播路径复杂的 GIS 工况下,难以建立内部激励与外部响应之间清晰的物理对应关系,从而难以满足机械故障机理解析与量化评估的需求^[19-20]。

为克服上述局限,反问题思想逐步引入电力装备状态评估,通过外部稀疏测量反演不可直接观测的内部物理状态,实现机械异常的可视化与机理化表征^[21]。现有研究在变压器热源参数反演与故障定位、开关柜三维温升场域重建及缺陷热源反演以及 GIS 等效阻尼参数反演与故障诊断等方面取得了积极进展^[22-24],验证了反演框架在内部异常源辨识中的可行性。然而,仅确定异常源的位置仍不足以刻画其力学影响程度;动态载荷作为反映激励强度、结构应力水平与损伤累积的重要物理量,在结构安全评估与寿命预测中起着关键作用^[25-27]。因此,构建能够同时识别振动源位置并重构动态载荷时程的反演方法,已成为 GIS 机械故障诊断由“信号识别”向“物理溯源与量化评估”升级的重要发展方向。

在结构动力学领域,基于反问题的动态载荷识别与振动源反演方法已形成较为系统的理论体系,为电气装备机械故障的机理研究提供了重要参考。相关工作提出了基于模态力重构、贝叶斯正则化、改进 Kalman 滤波以及人工神经网络—贝叶斯概率框架等多种动态载荷识别方法,在未知载荷位置

与时程条件下实现了结构响应与激励之间的解析或统计关联^[27-29]。同时,物理信息高斯过程(physics-informed Gaussian process, PIGP)及基于模态力的联合反演方法被引入模态域与频域的载荷反演中,通过先验协方差或优化过程中嵌入动力学算子与模态信息,进一步提升了含噪与稀疏观测条件下的重构精度与鲁棒性^[30-31]。然而,上述研究多针对梁、板等理想边界结构展开,难以充分反映 GIS 三维薄壁壳体在环向—轴向多尺度耦合、复杂边界与背景激励共存条件下的振动传播特性^[6-7,19-20],且通常聚焦于模态力或载荷幅值的单一重构,尚难满足工程场景中对振源位置与激励强度联合识别的需求。

针对 GIS 壳体振动传播多尺度耦合及测点布置受限等工程挑战,文中在现有模态空间反演思想基础上进行了针对性扩展:一方面,引入由有限元振型构成的空间形状字典,通过形状感知核函数显式刻画壳体环向—轴向耦合规律,从而提升 PIGP 在三维薄壳结构中的物理一致性与抗噪声能力;另一方面,在振源定位中融入基于模态能量分布的物理信息约束,提高遗传算法(genetic algorithm, GA)对主导激励模式的敏感性及其全局寻优的稳定性。基于上述改进,文中构建了适用于 GIS 壳体的联合反演框架,可在统一模态空间中同时实现内部振动源位置识别与动态载荷时程的高精度重构,为 GIS 机械故障由传统“信号层诊断”向“结构动力学层物理溯源与量化评估”转变提供方法支撑。

1 GIS 振动源反演的理论基础与方法

1.1 GIS 壳体模型与动力学方程

为在保证计算精度与提升计算效率之间取得平衡,文中对 GIS 壳体结构进行了合理简化,仅保留对整体刚度和质量分布具有主导作用的圆筒壳体、中心导杆及法兰盘,将其建模为两端固支的薄壁圆柱壳体^[7,24]见图 1。GIS 壳体几何尺寸与材料参数见表 1。

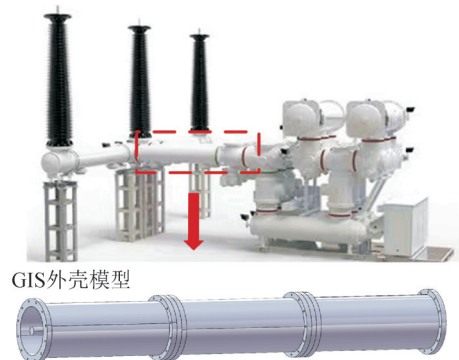


图 1 GIS 壳体几何模型

Fig. 1 Geometric model of the GIS shell

表1 GIS壳体几何尺寸和材料

Table 1 Geometric dimensions and material parameters

参数	数值
壳体总长度 L/mm	1 600
壳体外径 D_{out}/mm	200
壳体内径 D_{in}/mm	180
盆式绝缘子厚度 t/mm	20
法兰厚度 t/mm	20
导杆外径 D/mm	40
密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	2 700
杨氏模量 E/GPa	71
内部气体压力 P_{in}/Pa	1.013×10^5
泊松比	0.33

在物理坐标系下, GIS壳体的振动行为可由经典二阶动力学方程描述^[32]

$$\begin{cases} \mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{x}(t) = \mathbf{F}(t) \\ \mathbf{F}(t) = \mathbf{F}_b(t) + \mathbf{F}_s(t) \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: \mathbf{M} 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{K} 分别为系统的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; $\ddot{\mathbf{x}}(t)$ 、 $\dot{\mathbf{x}}(t)$ 、 $\mathbf{x}(t)$ 分别是加速度、速度、位移响应向量; $\mathbf{F}(t)$ 为外载荷向量, 包括由电磁力引起的背景激励 $\mathbf{F}_b(t)$ 以及由螺栓松动、触头冲击等机械异常产生的附加载荷 $\mathbf{F}_s(t)$ 。其中, 阻尼矩阵采用瑞利形式 $\mathbf{C} = \alpha\mathbf{M} + \beta\mathbf{K}$, 以表征材料阻尼和连接界面耗能效应。

为求解式(1)所描述的大型耦合微分方程组, 引入模态叠加法进行解耦。通过求解广义特征值问题可得前 r 阶模态振型 Φ , 并利用其关于质量矩阵和刚度矩阵的正交性, 将物理坐标下的方程变换至模态空间, 在模态振型按质量归一化条件下, 系统可进一步分解为一组独立的单自由度模态方程

$$\ddot{q}(t) + 2\Xi\Omega\dot{q}(t) + \Omega^2 q(t) = p(t) \quad (2)$$

式(2)中: $q(t)$ 为模态坐标向量; $\Xi = \text{diag}(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_r)$ 为阻尼比矩阵; $\Omega = \text{diag}(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_r)$ 为固有频率矩阵; $p(t)$ 为模态力向量。

其中模态力向量 $p(t)$ 与物理空间中 K 个潜在振源位置 $s = [s_1, \dots, s_K]$ 处的物理载荷 $\mathbf{F}(t)$ 存在明确的映射关系, 即

$$p(t) = \Phi^T(s)\mathbf{F}(t) = \mathbf{W}(s)\mathbf{F}(t) \quad (3)$$

式(3)中, $\mathbf{W}(s) \in \mathbb{R}^{r \times K}$ 为载荷—模态映射矩阵, 其元素 $W_{ik} = \phi_i(s_k)$ 表征了第 k 个物理载荷对第 i 阶模态的激励贡献度, 反映了振源位置的空间敏感性。

同时, 布置在壳体表面的 N 个加速度测点的响应向量 $\ddot{\mathbf{x}}_{\text{meas}}(t)$ 可由模态加速度线性叠加得到

$$\ddot{\mathbf{x}}_{\text{meas}}(t) = \Phi_{\text{meas}}(x)\ddot{q}(t) = \mathbf{W}_{\text{meas}}(x)\ddot{q}(t) \quad (4)$$

式(4)中, $\mathbf{W}_{\text{meas}}(x) \in \mathbb{R}^{N \times r}$ 为模态—测点映射矩阵, 表征了各阶模态对测点加速度的贡献权重。

综上所述, 式(2)-(4)构成了完整的动力学传导链: 外部物理载荷首先经过振型映射 $\mathbf{W}(s)$ 转化为模态力, 模态力再驱动各阶模态响应, 最终由测点振型矩阵 $\mathbf{W}_{\text{meas}}(x)$ 映射为可观测的加速度响应。文中即旨在反向求解该映射链, 实现从“加速度响应→模态加速度→模态力→物理载荷”的逐层反演, 从而在统一框架下同时识别振源位置 s 并重构载荷时程 $\mathbf{F}_s(t)$ 。

1.2 物理信息高斯过程的模态力重构

模态力 $p(t)$ 是连接外部测量与内部激励源的关键中间量, 而工程条件下无法直接获取。若由加速度响应 $\ddot{\mathbf{x}}_{\text{meas}}(t)$ 进行数值微分或代数反演, 常会受到噪声放大、模态耦合及测点稀疏等因素影响, 使问题呈现不稳定性并导致求解不稳定。为提高模态力反演的精度与鲁棒性, 引入物理信息高斯过程 (physics-informed Gaussian process, PIGP) 在模态空间中实现统计推断与动力学约束的联合建模^[27,30]。

首先, 假设第 i 阶模态位移 $q_i(t)$ 服从零均值的高斯过程

$$q_i(t) \sim GP[0, k_i(t, t')] \quad (5)$$

其中时间核 k_i 可生成模态速度与模态加速度的协方差。结合模态动力学方程式可将 $\{q, \dot{q}, \ddot{q}, p\}$ 纳入统一的GP框架。同时, 由式可知测点加速度可由模态加速度经振型矩阵映射得到。

然而, GIS壳体属于典型三维薄壳结构, 其环向与轴向振动具有耦合特性, 单纯依赖时间核难以准确刻画空间相关性。为此, 在时间核基础上引入由有限元振型构成的空间形状基底 $\Phi(x, z)$, 构建时空可分核函数

$$k_q^{(s,t)}[(x, z, t), (x', z', t')] = \Phi(x, z)\Phi(x', z')^T k_i(t, t') \quad (6)$$

式(6)中, (x, z) 与 (x', z') 为壳体任意两点在轴向与环向方向的空间坐标。该核函数在时间上保持平滑相关性, 在空间上遵循薄壳振型的分布特征, 从而更真实地反映GIS壳体的耦合振动特性。

基于上述核结构, 可建立测点加速度与模态力的联合高斯过程先验

$$\begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{x}}_{\text{meas}} \\ p \end{bmatrix} \sim GP\left(0, \begin{bmatrix} K_{xx} + \sum_n K_{xp} & K_{xp} \\ K_{px} & K_{pp} \end{bmatrix}\right) \quad (7)$$

式(7)中: K_{xx} 、 K_{xp} 、 K_{pp} 分别为对应测点加速度之间、测点加速度与模态力、模态力之间的协方差项, 均由式(2)-(6)所定义核函数及其线性算子推导而来, 从统计层面显式编码了动力学方程约束, Σ_n

为测量噪声协方差。

在获得测点加速度观测后,通过条件高斯过程即可求得模态力的后验分布,其后验均值为

$$\hat{p}(t) = K_{px}(K_{xx} + \Sigma_n)^{-1} x_{meas}(t) \quad (8)$$

式(8)求解的同时,可以得到后验协方差用于不确定性量化,实现了动力学约束、核函数建模与噪声处理的统一,使模态力在稀疏测点与含噪条件下仍可稳定重构,为后续振源定位与动载荷反演提供可靠基础。

1.3 基于遗传算法的振源定位与动载荷重构

在通过PIGP获得高精度模态力 $\hat{p}(t)$ 后,振源反演的目标在于求解载荷的实际作用位置 s 以及对应的载荷时程 $F(t)$,由式(3)可知模态力满足

$$\hat{p}(t) = W(s)F(t) \quad (9)$$

式(9)中, $W(s)$ 为各候选位置的振型值构成,是表征位置敏感性的空间映射算子。由于载荷位置与模态力之间呈高度非线性、非凸且多峰的映射关系,无法通过代数方式直接求解。传统基于梯度的优化方法易陷入局部极小,因此本研究采用无需梯度信息且具有全局搜索能力的遗传算法(genetic algorithm, GA)对位置参数进行寻优^[31]。

对于给定位置 s , 其对应的载荷时程 $F(t)$ 可由式的最小二乘意义下求得,使预测模态力尽可能接近PIGP重构结果,其表达为

$$F_s(t) = \arg \min_p \| \hat{p}(t) - W(s)F(t) \|_2^2 \quad (10)$$

将该载荷代入式(9)后,可计算该位置下的预测模态力。为了消除弱模态中噪声的影响,并增强高

能量模态对优化过程的主导作用,引入基于模态能量分布的权重向量 ω_i , 构建GA的适应度函数

$$J(s) = \sum_{i=1}^r \omega_i \int \hat{p}_i(t) - \phi_i(s)F(t) \Big|^2 dt \quad (11)$$

式(11)中, ω_i 按模态能量比例设定,使优化过程更加聚焦于主振动模态,从而提升定位精度与收敛稳定性。

在此基础上,GA通过编码候选位置、计算适应度、执行选择、交叉与变异等操作,使群体在迭代过程中逐渐向全局最优位置收敛。最终得到的最优位置 s^* 代回式(10)即可求得对应的最优载荷时程 $F^*(t)$ 。

文中提出的“PIGP-GA”联合反演框架的协同工作机制见图2。该框架遵循“统计推断—物理寻优”的分层策略:首先,PIGP作为内层核心算法,利用物理感知核函数处理稀疏测点数据的非适定性,在模态空间中重构出统计最优且含噪较小的参考模态力 $\hat{p}(t)$,为后续反演提供高可信度的先验参照;随后,GA作为外层搜索驱动,在物理空间全局寻优潜在振源位置 s ,通过最小二乘法计算该位置对应的理论载荷,并以候选模态力与PIGP参考模态力之间的一致性(即适应度函数 $J(s)$)作为物理约束来驱动种群进化。这种协同机制利用PIGP的抗噪能力解决了“反演不适定”的问题,利用GA的全局搜索能力解决了“位置未知”的问题,从而在统一框架下实现了振动源位置与动载荷时程的高精度联合重构。

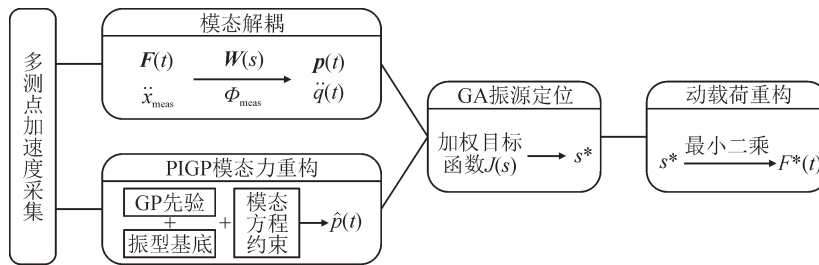


图2 PIGP-GA 振动源与动载荷联合反演流程框图

Fig. 2 Flowchart of the PIGP-GA joint inversion of vibration source and dynamic load

2 数值仿真验证

为在可控条件下验证所提出“PIGP-GA”反演框架的理论合理性与数值性能,本章节构建GIS壳体高保真有限元模型,并设置典型机械故障特征的振动工况。在无噪声与不同噪声水平下,对振源定位精度及动载荷重构效果进行定量评估,为方法的工程可行性提供支撑。

2.1 有限元模型建立与模态分析

基于Ansys建立了包含圆筒壳体、法兰、盆式绝

缘子及中心导杆等关键部件的GIS三维有限元模型,几何尺寸与材料参数与表1一致。模型采用SOLID186实体单元离散,整体网格尺寸控制在5 mm以内,经网格划分,模型共包含35 229个节点,对应系统总自由度98 163个,以兼顾运算效率与动力学求解精度。同时,模型设置内部气体压力为标准大气压(1.013×10^5 Pa),与实验工况保持一致。

为获取反演计算所需的结构动态特性,利用Ansys对有限元模型进行模态分析,提取了前10阶

固有频率(0~1 500 Hz)(见图3)及前6阶主要振型(见图4)。为了量化评估各阶模态对结构整体振动的贡献度并确定截断阶数,文中引入模态有效质量参与系数作为评价指标。

考虑到仿真模型沿Y轴水平放置,且实际工况下主要关注壳体表面的径向振动(对应全局坐标系的X、Z方向),因此重点考察X方向的有效质量分布。统计了前10阶独立模态在径向(X方向)上的有效质量参与系数及其累积占比见表2。

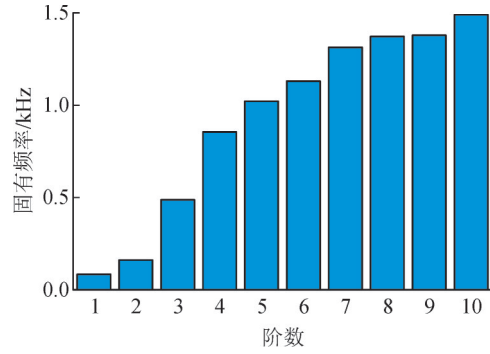


图3 GIS壳体有限元模型前10阶固有频率

Fig. 3 First 10-order natural frequencies of the GIS shell finite element model

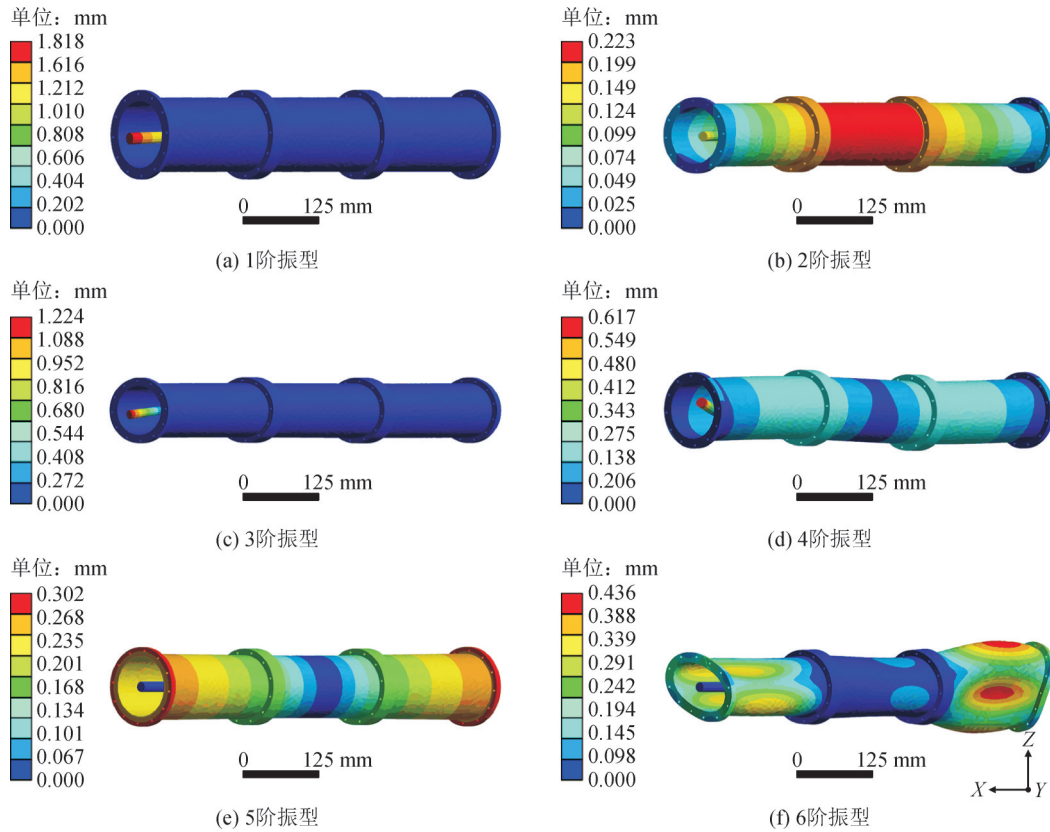


图4 前6阶振型

Fig. 4 First six mode shapes

表2 GIS壳体前10阶独立模态有效质量参与系数统计表
Table 2 Statistics of effective mass participation factors for the first 10 independent modes of GIS shell

模态阶数	固有频率/Hz	累计参与系数/%
1	82.23	62.54
2	161.75	76.75
3	486.80	84.60
4	856.90	88.92
5	1 021.20	91.07
6	1 130.21	92.30
7	1 315.02	93.15
8	1 372.50	93.77
9	1 380.24	94.22
10	1 490.54	94.53

分析表2中数据可知,结构的振动能量主要集中在低频段,随着模态阶数增加,累积参与系数逐渐上升。当截取至前6阶时,其在X方向的累积有效质量参与系数已达到92.30%,表明前6阶模态已包含绝大部分的结构动力学特征,能够覆盖后续工况的主要响应频带。因此,文中选取前6阶模态作为反演求解的基础模态空间,以在保证模型精度的同时兼顾计算效率。

2.2 仿真工况设计

为验证反演方法在不同激励路径下的适用性,设计两类具有代表性的冲击工况。有限元模型的边界条件、振源位置及测点布局见图5。壳体两端法兰施加固定约束,以模拟实验台架通过地脚螺栓

刚性连接于基础平台的实际约束状态,其余外表面按自由边界处理,不施加约束,以模拟GIS安装状态下的实际力学约束特性。

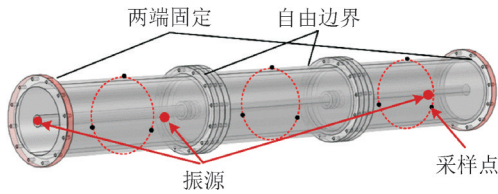


图5 仿真模型的边界条件与测点布局示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the boundary conditions and measurement point layout in the simulation model

为构造与工程现场一致的运行背景,在中心导杆位置处施加 100 Hz、50 N 的正弦稳态载荷,该频率对应于中国 50 Hz 工频电网下电磁力诱发的主导振动频率(倍频),旨在模拟GIS最典型的稳态运行环境。其中,文中提出的反演方法主要利用机械缺陷冲击信号的宽频模态响应特征,其有效性并不受限于特定的背景振动频率。同时,在壳体外表面选取两个典型节点作为未知冲击载荷作用位置,分别构成“靠近激励源(工况1)”与“远离激励源(工况2)”两类激励路径。冲击载荷采用半正弦脉冲形式,用以模拟在稳态振动叠加下可能出现的瞬态机械冲击事件。

测点布置主要依据结构有限元模态分析结果与反问题求解的可观测性原则制定。为获取高信噪比的响应信息并确保仿真验证流程与后续实验的可比性,模型在壳体外表面沿轴向布置了3圈测点(每圈3个,共9个)。在物理层面,该布局优先锁定文中2.1节所述前6阶主导弹性模态的振型幅值较大区域(即波腹邻域)——即沿轴向选取的壳体1/4处、跨中及3/4处3个特征截面;配合周向120°的均布策略,能够有效覆盖低阶弯曲模态与呼吸模态的空间差异特征,防止关键模态信息的缺失。在数学层面,从反演求解的代数条件来看,选取的9个测点满足了观测矩阵列满秩的必要条件($N \geq M$),在实现模态解耦的同时提供了测量冗余,有助于提升反演算法在最小二乘意义下的鲁棒性。

基于上述配置,模型开展瞬态动力学分析,时间步长设为 $1 \times 10 \mu\text{s}$,总时长 0.1 s,输出各测点在两种冲击工况下的加速度时程数据,并以 10 kHz 采样率提取作为反演输入。需要特别指出的是,相对于2.1节所述的近10万维有限元模型空间,文中仅利用9个测点的极低信息占比($<0.01\%$)重构系统状态,构成了典型的稀疏观测下的欠定反问题工况。

2.3 反演结果与分析

将两类工况下采集的加速度响应作为反演输入,依据“PIGP-GA”框架分别开展振源定位与动载荷重构。为定量评估反演精度,引入峰值相对误差PRE(peak relative error)、相对均方根误差REE(relative root mean square error)。

PRE用于衡量载荷峰值幅度的偏差,定义为

$$e_{\text{PRE}} = \frac{|\max(F_{\text{rec}}) - \max(F_{\text{true}})|}{\max(F_{\text{true}})} \times 100\% \quad (12)$$

式(12)中, F_{rec} 、 F_{true} 分别为重构力、真实力。

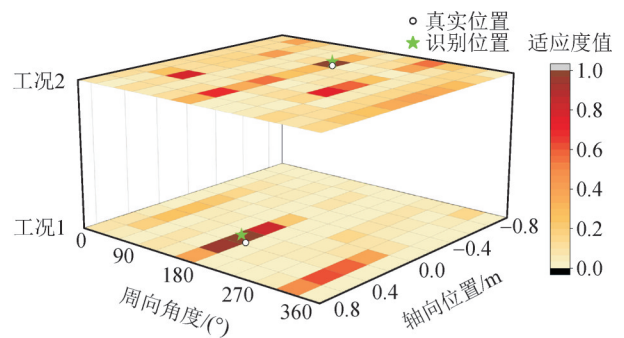
REE表征重构时程的整体能量差异,定义为

$$e_{\text{REE}} = \frac{\|F_{\text{rec}} - F_{\text{true}}\|_2}{\|F_{\text{true}}\|_2} \quad (13)$$

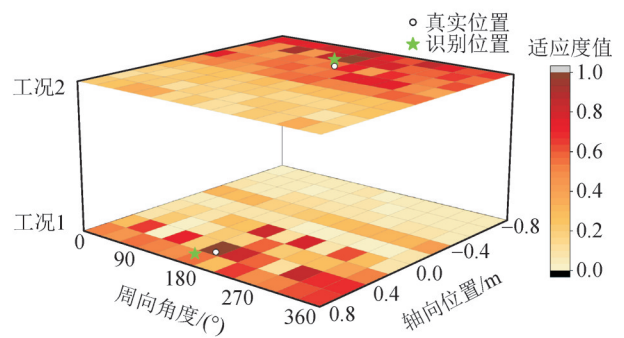
基于上述指标,对两类工况的定位精度与载荷重构效果进行分析,用以评价在不同激励路径条件下所提出反演框架的鲁棒性与准确性。

2.3.1 振动源定位与动载荷重构结果分析

在上述两类典型工况下,对“PIGP-GA”框架进行振源定位与动载荷重构验证。给出了两类仿真工况下的振源定位结果见图6(a)。图6中适应度值由式(11)对应的加权残差函数归一化得到,数值越接近1,表明对应位置越接近真实振源。



(a) 数值仿真振动源定位结果



(b) 实验振动源定位结果

图6 仿真与实验工况下的振动源定位结果对比

Fig. 6 Comparison of vibration source localization results under simulation and experimental conditions

从图6(a)可见,两类工况的高适应度区域均高度集中于真实冲击位置(图中星号所示)附近,定位热点呈现显著的单峰聚焦特征,未出现多峰干扰。经量化计算,工况1的轴向/周向误差分别为3 mm/2°,工况2分别为7 mm/1°,识别结果与真实位置高度吻合,验证了在不同激励传播路径下该算法定位的准确性与收敛性。

在获得最优位置后,将其代回式(1)可求得对应的载荷时程。两类仿真工况的重构结果分别见图

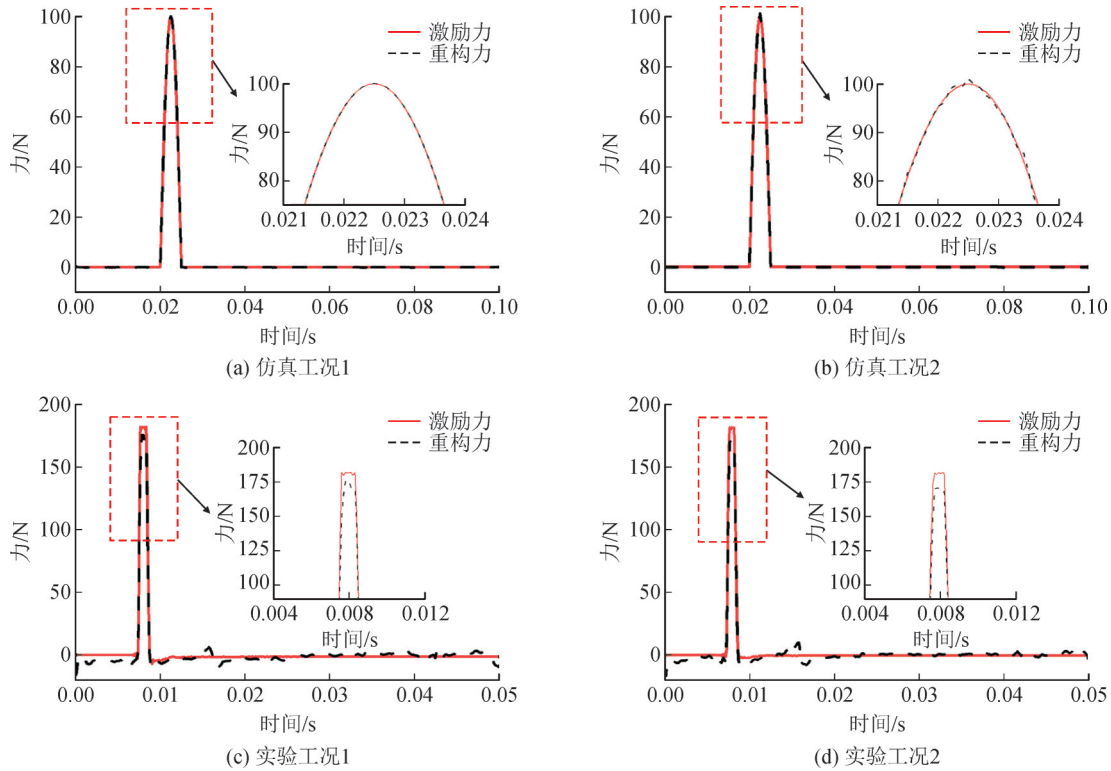


图7 仿真与实验工况下的冲击力重构结果对比

Fig. 7 Comparison of impact force reconstruction results under simulation and experimental conditions

2.3.2 噪声鲁棒性讨论

为评估反演框架在含噪条件下的稳定性,以工况1为例,在理想加速度响应上叠加不同强度的高斯白噪声及少量脉冲毛刺,并以信噪比SNR(signal-to-noise ratio)定量表征噪声水平

$$SNR = 10 \lg\left(\frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{noise}}}\right) \quad (14)$$

式(14)中, P_{signal} 和 P_{noise} 分别为信号与噪声的有效功率。本节设置SNR=30、20、10 dB 3类噪声场景,并与无噪声工况进行对比。

不同信噪比条件下的载荷重构时程对比见图8。观察可知,在30 dB与20 dB条件下,重构脉冲的峰值、持续时间与主波形均保持稳定,仅出现轻微的高频扰动;在10 dB强噪声下,时域曲线出现较明显随机起伏,但主峰幅值与脉冲宽度仍能准确识别,说明

该框架在强干扰条件下仍具备一定反演能力。

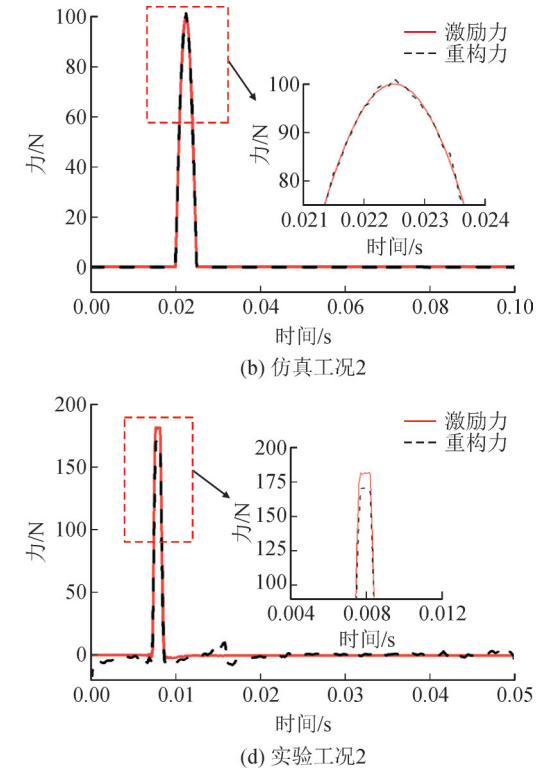


图8 不同信噪比条件下反演性能的对比分析

Fig. 8 Comparative analysis of inversion performance under different signal-to-noise ratios

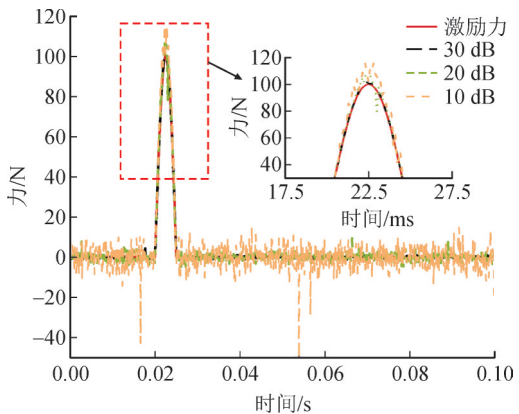


图8 不同信噪比条件下反演性能的对比分析

不同噪声水平下的误差结果见表3。由表3可

见随着噪声增强,定位误差及载荷重构误差呈温和上升趋势,30 dB与20 dB条件下仍处于工程可接受范围;当SNR降至10 dB时,误差显著增大,但未出现反演失效。

表3 不同信噪比下的仿真反演结果

Table 3 Simulation inversion results under different signal-to-noise ratios

工况类型/dB	定位误差	$e_{PRE}/\%$	$e_{REE}/\%$
无噪声	(3 mm, 2°)	0.78	0.71
30	(6 mm, 3°)	4.32	5.10
20	(18 mm, 6°)	12.40	14.20
10	(45 mm, 25°)	26.70	31.50

综合图8、表3的结果表明,提出的“PIGP-GA”框架在常见测量噪声条件($SNR \geq 20$ dB)下能够同时保证振源定位与动载荷重构的准确性;在信噪比较

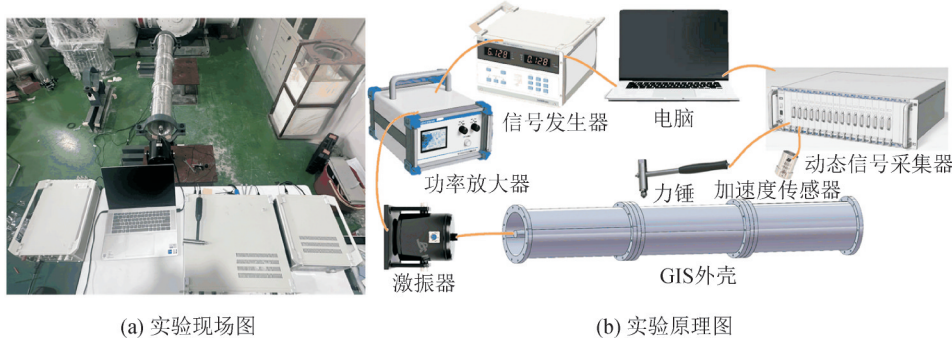
低时虽存在误差增大,但反演过程仍保持可用,表明该方法具备较强的噪声鲁棒性。

3 实验验证

为进一步评估所提出PIGP-GA反演框架在接近GIS实际运行环境下的工程适用性,本章搭建了GIS振动测试平台,并在存在稳态背景振动与测量噪声的条件下,对振源定位与动载荷重构性能进行实测试验验证。

3.1 实验平台与测试系统

实验平台见图9。由GIS物理样机、复合激励系统以及多通道振动采集系统构成,可实现“稳态背景+瞬态冲击”的典型运行环境,并实现高保真振动信号采集。



(a) 实验现场图

(b) 实验原理图

图9 实验装置与测试系统原理图

Fig. 9 Experimental setup and schematic diagram of the test system

为模拟设备运行中的正常振动,通过连接在中心导杆端部的电磁激振器施加背景激励,其中,在数值仿真中该背景被简化为理想的单频正弦激励(100 Hz, 50 N),而在物理实验中,受限于激振器与导杆接触界面的非线性耦合特性,实际施加的激励力表现为具有一定“周期性脉动”特征的类正弦信号,其主频控制在100 Hz附近,用以模拟电磁力引起的稳态响应,并在反演中作为已知输入。瞬态冲击由内置力传感器的LC02力锤施加,峰值控制在150~200 N,力锤同步记录冲击力用于后续对比。

为获得充分的结构动态信息,在壳体外表面布置3×3共9个1A111E加速度传感器,测点布局与仿真保持一致,以确保仿真与实验的可比性。所有信号由DH5922D动态采集系统同步采集,采样率为10 kHz,可覆盖瞬态冲击的宽频带特性。测点数量大于所使用的模态阶数,形成必要的冗余数据,有助于提高反演的适定性与稳定性。

3.2 模态参数辨识与有限元模型修正

由于初始模型在边界刚度、材料参数及连接条件上存在理想化处理,有限元模型需与实际样机的固有频率与振型不可避免地与实际结构存在偏差,

因此实验前对样机开展模态参数辨识,以作为模型修正依据。

通过锤击试验获取样机在0~1 200 Hz范围内的频响函数,识别前6阶固有频率及主要振型。以辨识结果为参考,对有限元模型的材料参数和端部连接刚度进行迭代校正,使修正后的固有频率在主要振动频带内与实验值保持一致。修正前后固有频率的对比见表4,修正前后6阶频率的相对误差均控制在6%以内,满足工程反演对频率一致性的要求^[33]。

表4 有限元模型修正前后的固有频率对比

Table 4 Comparison of natural frequencies before and after FE model updating

模态阶数	f/Hz			$e/\%$
	修正前	修正后	实验结果	
1	82.23	89.45	92.48	3.27
2	161.75	177.73	188.51	5.72
3	486.80	515.90	521.02	0.98
4	856.90	903.33	911.81	0.93
5	1 021.20	1 053.80	1 087.29	3.08
6	1 130.21	1 177.21	1 186.32	0.77

为进一步验证修正模型的有效性,选取样机外

表面的典型测点,在相同激励输入下对比仿真与实验的加速度时程。结果显示,两者在峰值时刻、波形形态及幅值变化上均保持高度一致(见图10),说明修正后的有限元模型能够准确反映样机的动力学行为,可作为后续振源定位与载荷重构的可靠物理先验。

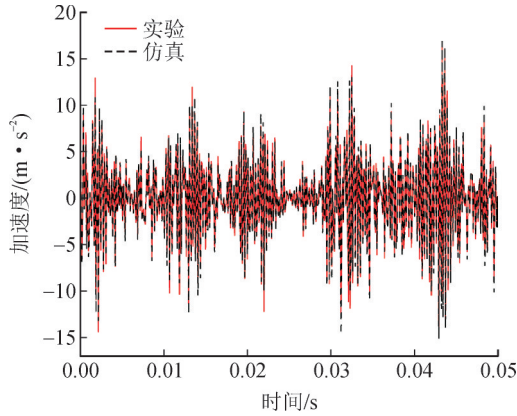


图10 实验与仿真加速度响应的对比

Fig. 10 Comparison between experimental and simulated acceleration responses

3.3 复杂工况下振源反演实验与结果分析

与仿真相同,设置两类典型冲击位置:工况1位于背景激励路径附近(近场);工况2位于相对远离激励源路径区域(远场),用于考察在强干扰与弱干扰场景下的反演性能。

复合激励下各个测点的加速度响应见图11。图11展示了9个测点的加速度响应,可见中心导杆产生的稳态振动叠加短时冲击脉冲,形成典型的混合信号输入。

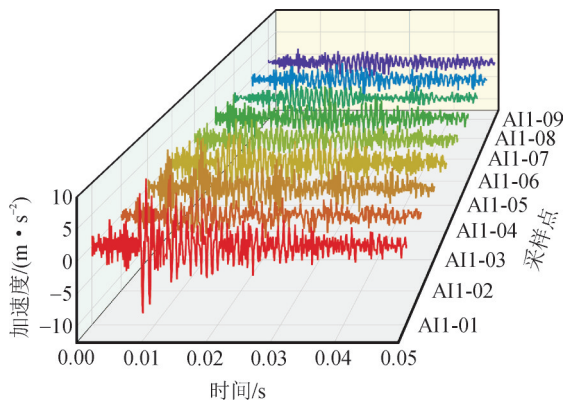


图11 复合激励下各个测点的加速度响应

Fig. 11 Acceleration responses at measurement points under combined excitation

将采集的加速度信号导入到反演框架,其中,为了最大程度减小支撑方式差异带来的模型误差,反演过程中所调用的空间形状字典 $W(s)$ 均基于3.2节中经实验数据修正后的有限元模型生成。

两类实验工况的振源定位结果见图6(b)。由图6、11可见,两者的定位热点均呈现出显著的单峰聚焦特征,表明遗传算法(GA)在复杂背景噪声及非理想边界条件下仍能保持稳定的全局收敛性能。经量化计算,工况1的轴向与周向定位误差分别为73 mm和17°,工况2分别为86 mm和8°。尽管受实际台架边界不确定性、背景激励与测量噪声的多重影响,定位误差略高于理想仿真,但总体仍严格控制在 ± 100 mm与 $\pm 20^\circ$ 的范围内。

在确定最优冲击位置后,利用式(11)反演求解动载荷时程,结果见图7(c)、(d)。将重构结果与力锤实测数据进行对比可以看出,重构力在峰值时刻、脉冲宽度及整体波形演化趋势上均与实测结果保持高度一致。虽然信号中包含背景振动干扰,但重构力的峰值绝对偏差仍小于10 N,且主脉冲形态未出现明显的畸变,充分验证了该方法在混合噪声环境下对冲击载荷特征的精准捕捉能力。

为检验所提方法在重复试验条件下的稳定性和结果重复性,对两类工况分别进行了多次独立试验,并用不同的数据输入到整个反演框架,两类工况的反演误差统计结果见图12。各指标箱体高度较小、分布区间较为集中,仅出现少量离群点,未观察到明显的系统性漂移;其中,工况1的综合定位误差主要分布在65~75 mm区间,工况2主要分布在78~88 mm区间,表明在不同工况下反演结果具有较好的稳定性与重复性。

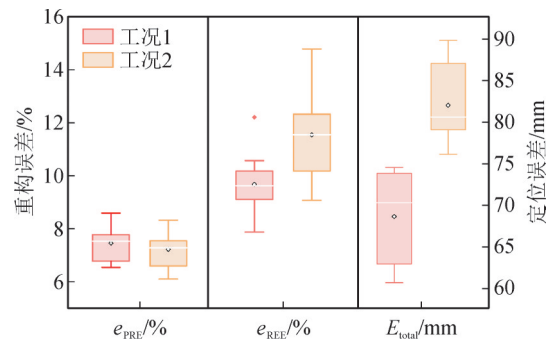


图12 两类工况的反演误差统计结果

Fig. 12 Statistical results of inversion errors for the two working conditions

3.4 讨论

综合上述实验结果可知,尽管受实验台架边界条件简化(如法兰连接刚度的非线性)、环境背景噪声以及传感器安装误差等多重非理想因素影响,导致实验反演的定位误差(约70~90 mm)和重构波形毛刺略大于理想仿真环境,但该方法在复杂工况下仍成功实现了对内部冲击振源的单峰聚焦定位与载荷主脉冲特征的高保真重构,验证了其在实际物理

系统中的鲁棒性^[34-37]。为进一步推动该方法在 GIS 实际故障诊断中的工程应用,需结合现场运维特点制定相应的实施策略。其中,在测点布置方面,工程实施时建议采用基于目标模态与振型特征的量化实施策略。其实施流程为:首先依据结构动力学分析确定待反演的主导模态截断阶数 M ,并根据反问题求解的可观测性条件($N \geq M$)设定测点数量下限;在此基础上,建议构建超定观测系统($N > M$),通过引入适量的测量冗余来提升反演算法在噪声环境下的鲁棒性(例如本研究针对前 6 阶主导模态配置了 9 个测点);最后,依据前 M 阶模态振型分布,优先选择位移响应幅值显著区域(即波腹邻域)进行布置,同时避开对测量不敏感的模态节点区域,并确保测点在轴向与周向具备足够的空间覆盖度。

在计算效率与时效性方面,本框架设计了“离线构建模态字典+在线 PIGP 快速推断”的分层策略;尽管遗传算法引入了全局迭代寻优过程,存在一定的计算开销,但通过预先解算空间形状字典,将复杂的有限元正演转化为高效的低维矩阵乘法运算,显著降低了单步评价成本。在配置为 Intel Core i7-10700 处理器、32 GB 内存及 NVIDIA GeForce RTX 2080 显卡的标准硬件上(运行环境为 MATLAB R2022b),本方法的单次联合反演平均耗时约为 8 min。这一结果表明,该算法无需依赖昂贵的高性能计算集群即可实现高效运算,具备良好的工程实用性,为工程离线分析与准在线评估提供效率参考。

最后,在系统集成层面,该反演算法可封装为高级分析模块嵌入现有的在线监测系统(IED),采用“阈值触发—深度反演”的运行机制,即仅在监测到异常冲击或能量谱越限时自动触发物理溯源流程,从而实现从单纯故障告警到精确定位的智能化升级。

4 结论

围绕 GIS 壳体内部机械激励难以通过外部振动实现定量表征的问题^[38-41],文中提出并验证了基于模态空间分析的振动源定位与动载荷反演方法,并通过有限元仿真与真型试验平台进行了系统验证,得到如下结论:

1)在 GIS 壳体振动源识别场景下,引入模态空间解耦建立独立模态方程,结合载荷振型矩阵和测点振型矩阵构建“物理载荷—模态力—模态响应—测点加速度”的映射链,有效缓解了三维薄壳结构高维耦合带来的不稳定性问题,为联合反演提供了物理上可解释的建模基础。

2)构建基于物理信息高斯过程的模态力重构方

法,并引入由有限元振型组成的空间形状字典,通过形状感知核函数刻画 GIS 壳体环向—轴向耦合特性。在稀疏测点且含噪的条件下,重构得到的关键模态力时程与正演结果保持较高一致性,显著提升了模态力识别的稳定性与抗噪性能,为动载荷反演提供了可靠中间量。

3)在振源寻优环节引入模态能量分布约束,结合遗传算法实现振动源位置与载荷时程的联合反演。数值算例表明,在不同激励路径下,定位结果均聚集于真实振源附近,载荷时程能够较好重现冲击幅值与脉冲形态;真型实验进一步验证了该方法在背景振动和测量噪声共存条件下仍具有较高的定位精度和结果重复性,在 GIS 机械缺陷的工程诊断与状态评估中具有良好的应用前景。

参考文献:

- [1] 韩先才,孙 昕,陈海波,等. 中国特高压交流输电工程技术发展综述[J]. 中国电机工程学报,2020,40(14):4371-4386.
HAN Xiancai, SUN Xin, CHEN Haibo, et al. The overview of development of UHV AC transmission technology in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(14): 4371-4386.
- [2] 盛戈峰,钱 勇,罗林根,等. 面向新型电力系统的数字化电力设备关键技术及其发展趋势[J]. 高电压技术,2023,49(5):1765-1778.
SHENG Gehao, QIAN Yong, LUO Linggen, et al. Key technologies and development trends of digital power equipment for new type power system[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(5): 1765-1778.
- [3] 何伊慧,管 霖,王 彤,等. 南方电网新型电力系统规划建设的量化评估与分析[J]. 南方电网技术,2024,18(10):40-53.
HE Yihui, GUAN Lin, WANG Tong, et al. Quantitative evaluation and analysis of planning and construction of the new power system in China southern power grid[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(10): 40-53.
- [4] 周良才,周 毅,沈维健,等. 基于深度强化学习的新型电力系统无功电压优化控制[J]. 电测与仪表,2024,61(9):182-189.
ZHOU Liangcai, ZHOU Yi, SHEN Weijian, et al. Reactive voltage optimization control of novel power system based on deep reinforcement learning[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(9): 182-189.
- [5] 王 城,万京松,本丽莉,等. 基于数字孪生的电力设备及场景数据映射分析[J]. 电子设计工程,2025,33(10):40-44.
WANG Cheng, WAN Jingsong, BEN Lili, et al. Data mapping and analysis of power equipment and scene based on digital twins[J]. Electronic Design Engineering, 2025, 33(10): 40-44.
- [6] 蒋西平,李永福,龙英凯,等. GIS 设备机械缺陷振动信号特征分析技术研究[J]. 高压电器,2025,61(2):17-25.
JIANG Xiping, LI Yongfu, LONG Yingkai, et al. Research on characteristics analysis technology of vibration signal of mechanical de-

- fects in GIS equipment[J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(2): 17-25.
- [7] 徐志钮, 郭一帆, 李先锋, 等. 机械缺陷对GIS外壳振动影响[J]. 电力工程技术, 2022, 41(5): 156-164.
- XU Zhiniu, GUO Yifan, LI Xianfeng, et al. Influence of mechanical faults on the vibration of GIS shell[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(5): 156-164.
- [8] 李国栋, 俞华, 刘宏, 等. GIS设备内外部紧固松动机械缺陷振动特性对比分析研究[J]. 高压电器, 2024, 60(5): 12-19.
- LI Guodong, YU Hua, LIU Hong, et al. Comparative analysis and research on vibration characteristics of internal and external fastening loose mechanical defects of GIS equipment[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(5): 12-19.
- [9] 尉元龙, 何柏娜, 崔荣喜, 等. 金属微粒对直流GIL盆式绝缘子电场的影响[J]. 电力工程技术, 2025, 44(5): 198-207.
- WEI Yuanlong, HE Baina, CUI Rongxi, et al. Effect of metal particles on the electric field in DC GIL basin insulator[J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(5): 198-207.
- [10] 贾文达, 曹志伟, 王继豪, 等. GIS操作电磁骚扰的三维全波仿真及电弧模型影响分析[J]. 电力工程技术, 2025, 44(6): 134-142.
- JIA Wenda, CAO Zhiwei, WANG Jihao, et al. Effect of the arc model on electromagnetic interference caused by GIS switch operations in 3D full wave simulation[J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(6): 134-142.
- [11] 丁登伟, 何良, 龙伟, 等. GIS设备运行状态下振动机理及检测诊断技术研究[J]. 高压电器, 2019, 55(11): 93-99.
- DING Dengwei, HE Liang, LONG Wei, et al. Analysis on vibration mechanisms and detection diagnosis technology of GIS in operating condition[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(11): 93-99.
- [12] 冯英, 李旭, 钟尧, 等. 基于多层融合振动数据分析的GIS设备机械缺陷诊断方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(14): 5797-5809.
- FENG Ying, LI Xu, ZHONG Yao, et al. Research on the GIS mechanical defects diagnosis method based on multi-layer fusion vibration data analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(14): 5797-5809.
- [13] 郝建, 李旭, 邵子琦, 等. 基于多图谱融合分析的GIS设备机械振动缺陷负载电流自适应诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(24): 9764-9775.
- HAO Jian, LI Xu, SHAO Ziqi, et al. Load current adaptive diagnosis method for mechanical vibration defects of GIS equipment based on multi-graph fusion analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(24): 9764-9775.
- [14] 涂嘉毅, 关向雨, 赵俊义, 等. 基于SVD-IACMD的GIS振动信号去噪算法[J]. 电力工程技术, 2024, 43(6): 163-172.
- TU Jiayi, GUAN Xiangyu, ZHAO Junyi, et al. GIS vibration signal denoising algorithm based on SVD-IACMD[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(6): 163-172.
- [15] 刘思远, 王柳丹, 陈金超, 等. ± 550 kV直流GIS多柱并联避雷器螺旋结构自生电感均流特性研究[J]. 电瓷避雷器, 2024(4): 1-9.
- LIU Siyuan, WANG Liudan, CHEN Jinchao, et al. Current sharing characteristics of self-generated inductance of spiral structure of ± 550 kV DC GIS multi-column parallel arrester[J]. Insulators and Surge Arresters, 2024(4): 1-9.
- [16] 廖景雯, 关向雨, 林建港, 等. 基于CycleGAN和CNN的GIS振动信号去噪与机械缺陷识别[J]. 电力工程技术, 2023, 42(5): 37-45.
- LIAO Jingwen, GUAN Xiangyu, LIN Jianguang, et al. GIS vibration signal denoising and mechanical defect identification based on CycleGAN and CNN[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(5): 37-45.
- [17] ZHONG Yao, HAO Jian, LIU Qingsong, et al. Novel diagnosis method for GIS mechanical defects based on an improved lightweight CNN model with load adaptive matching[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2023, 19(11): 11041-11051.
- [18] 王旭鹏, 郝建, 钟尧, 等. 基于ILPSO-LSSVM的GIS设备隔离开关机械异响振动识别方法研究[J]. 高压电器, 2023, 59(11): 172-183.
- WANG Xupeng, HAO Jian, ZHONG Yao, et al. Research on identification method of mechanical abnormal noise and vibration of disconnecter for GIS based on ILPSO-LSSVM[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(11): 172-183.
- [19] 王扬程, 关向雨, 陈志鹏, 等. 基于结构声强法的GIS机械振动传递特性[J]. 电工技术学报, 2024, 39(16): 5162-5171.
- WANG Yangcheng, GUAN Xiangyu, CHEN Zhipeng, et al. Energy transfer characteristics of GIS mechanical vibration based on structural intensity method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(16): 5162-5171.
- [20] 徐惠, 刘正阳, 罗传仙, 等. 运行状态下GIS设备振动特性差异性研究[J]. 高压电器, 2024, 60(6): 43-49.
- XU Hui, LIU Zhengyang, LUO Chuanxian, et al. Study on difference of vibration characteristics of GIS in operation[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(6): 43-49.
- [21] 刘亚东, 严英杰, 严波, 等. 电力装备内部状态反演重构研究框架与应用展望[J]. 高电压技术, 2022, 48(8): 2883-2896.
- LIU Yadong, YAN Yingjie, YAN Bo, et al. Research framework and application prospect of internal state inversion and reconstruction of power equipment[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 2883-2896.
- [22] 陈思, 刘亚东, 严英杰, 等. 10 kV油浸式变压器匝间短路故障反演与定位[J]. 高电压技术, 2023, 49(5): 1870-1881.
- CHEN Si, LIU Yadong, YAN Yingjie, et al. Inversion and localization of turn-to-turn short-circuit faults in 10 kV oil-immersed transformers[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(5): 1870-1881.
- [23] 金立军, 王飞龙, 王金宇. 基于物理信息网络的开关柜三维温升场域重建与缺陷热源反演[J]. 中国电机工程学报, 2026, 46(4): 1685-1697.
- JIN Lijun, WANG Feilong, WANG Jinyu. 3D temperature rise field reconstruction and defect heat source inversion of switchgear based on physics-informed network[J]. Proceedings of the CSEE, 2026, 46(4): 1685-1697.
- [24] LI Yuhang, LYU Yuhui, YAN Yingjie, et al. Physics-informed neural networks for robust equivalent damping parameter inversion and fault diagnosis in gas-insulated switchgear vibration systems[J]. Scientific Reports, 2025, 15(1): 24521.

- [25] LIU Ruixue, DOBRIBAN E, HOU Zhichao, et al. Dynamic load identification for mechanical systems: A review[J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2022, 29(2): 831-863.
- [26] 李 隰. 分布动态载荷识别的理论与方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2018.
LI Kun. Research on theory and method of distributed dynamic load identification[D]. Changsha: Hunan University, 2018.
- [27] AUCEJO M, DE SMET O. An optimal Bayesian regularization for force reconstruction problems[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019(126): 98-115.
- [28] LIU Yaru, WANG Lei, QIU Zhiping, et al. A dynamic force reconstruction method based on modified kalman filter using acceleration responses under multi-source uncertain samples[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021(159): 107761.
- [29] LIU Yaru, WANG Lei, GU Kaixuan, et al. Artificial neural network (ANN) - Bayesian probability framework (BPF) based method of dynamic force reconstruction under multi-source uncertainties[J]. Knowledge-Based Systems, 2022(237): 107796.
- [30] TONDO G R, KAVRAKOV I, MORGENTHAL G. Efficient dynamic modal load reconstruction using physics-informed gaussian processes based on frequency-sparse fourier basis functions[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2025(225): 112295.
- [31] WANG Zhengshu, JIANG Jinhui. A novel dynamic load identification method with unknown load locations using modal force reconstruction and iterative optimization[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2025(231): 112721.
- [32] 杜志叶, 郝兆扬, 赵鹏飞, 等. 适用于声源定位的气体绝缘输电线路超声导波传播特性研究[J]. 电工技术学报, 2024, 39(3): 852-862.
DU Zhiye, HAO Zhaoyang, ZHAO Pengfei, et al. Research on propagation characteristics of gas-insulated transmission line ultrasonic guided wave for sound source localization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(3): 852-862.
- [33] LAIBLE M R, KRISTIN F, JENNIFER H, et al. International space station modal correlation analysis[C]//International Modal Analysis Conference. Orlando: NASA, 2018: 221-242.
- [34] 耿 鹏, 柳 艳. 多推荐策略下充电网络鲁棒性分析及关键节点识别[J]. 智慧电力, 2025, 53(1): 62-67.
GENG Peng, LIU Yan. Robustness analysis and key nodes identification for charging network based on multiple recommendation strategies[J]. Smart Power, 2025, 53(1): 62-67.
- [35] 陈 斌, 李泽科, 余斯航, 等. 基于CA-WOA-BP算法的调度数据网鲁棒性预测[J]. 南方电网技术, 2025, 19(2): 10-18.
CHEN Bin, LI Zeke, YU Sihang, et al. Robustness prediction of dispatching data network based on CA - WOA - BP algorithm[J]. Southern Power System Technology, 2025, 19(2): 10-18.
- [36] 张楚天, 熊 炜, 陆之洋, 等. 基于加速—鲁棒性目标级联的柔性互联微网群分层协同优化调度方法[J]. 电网与清洁能源, 2025, 41(1): 35-43.
ZHANG Chutian, XIONG Wei, LU Zhiyang, et al. A hierarchical cooperative optimal scheduling method for flexible interconnected multi-microgrids based on accelerated and robust analytical target cascading[J]. Power System and Clean Energy, 2025, 41(1): 35-43.
- [37] 屈克庆, 高 畅, 许跃成, 等. 高渗透率下计及并网逆变器动态性能的新型锁相环设计方法及鲁棒性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(14): 69-79.
QU Keqing, GAO Chang, XU Yuecheng, et al. Design method and robustness analysis of a novel phase-locked loop considering the dynamic performance of grid-connected inverters under high penetration[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(14): 69-79.
- [38] 张书琴, 张克选, 骆常璐, 等. GIS外壳绝缘隔断处的过电压分析与控制措施研究[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(11): 181-187.
ZHANG Shuqin, ZHANG Kexuan, LUO Changlu, et al. Analysis of overvoltage and control measures at the insulation partition of GIS enclosures[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(11): 181-187.
- [39] 岳 嵩, 朱 勇, 何龙寿, 等. 基于改进动态电弧模型的GIS快速暂态过电压特性研究[J]. 智慧电力, 2025, 53(8): 114-120.
YUE Song, ZHU Yong, HE Longshou, et al. Research on characteristics of very fast transient overvoltage in GIS based on an improved dynamic arc model[J]. Smart Power, 2025, 53(8): 114-120.
- [40] 贾文达, 曹志伟, 王继豪, 等. GIS操作电磁骚扰的三维全波仿真及电弧模型影响分析[J]. 电力工程技术, 2025, 44(6): 134-142.
JIA Wenda, CAO Zhiwei, WANG Jihao, et al. Effect of the arc model on electromagnetic interference caused by GIS switch operations in 3D full wave simulation[J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(6): 134-142.
- [41] 周 秀, 吴旭涛, 田 天, 等. 基于机—热—电多参量信号特征的GIS隔离开关状态评估方法[J]. 电力工程技术, 2024, 43(1): 220-228.
ZHOU Xiu, WU Xutao, TIAN Tian, et al. Condition assessment method of GIS disconnecter based on vibration-thermal-electrical multi-parameter signal characteristics[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(1): 220-228.

丁德炜(2001—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为GIS机械故障诊断及相关问题研究(E-mail: dddw1123@sjtu.edu.cn)。

刘亚东(1982—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为输配电设备故障检测与诊断方面研究(通信作者)(E-mail: lyd@sjtu.edu.cn)。