工程力学
ENGINEERING MECHANICS
ISSN 1000-4750
CN 11-2595/O3
CODEN GOLIEB
E i 收 录 期 刊

变压器套管升高座区域振动特性与松动故障检测方法

汲胜昌 贾云飞 黄秀君 杨欣颐 张凡

VIBRATION CHARACTERISTICS AND LOOSENING FAULT DETECTION METHOD OF TRANSFORMER BUSHING TURRET AREA

JI Sheng-chang, JIA Yun-fei, HUANG Xiu-jun, YANG Xin-yi, ZHANG Fan

在线阅读 View online: https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2023.12.0924

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

偏心故障下动车组牵引电机转子振动特性分析

VIBRATION CHARACTERISTICS ANALYSIS OF EMU TRACTION MOTOR ROTOR UNDER ECCENTRIC FAULTS

工程力学. 2021, 38(7): 216-225 https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2020.07.0505

基于视觉分区的结构振动模态测试方法

A STRUCTURAL VIBRATION MODAL TESTING METHOD BASED ON VISION SUBAREAS

工程力学. 2022, 39(3): 249-256 https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2021.01.0058

单点激振模态参数识别渐近不确定性及实验验证

ASYMPTOTIC IDENTIFICATION UNCERTAINTY OF MODAL PARAMETERS WITH KNOWN INPUT AND ITS EXPERIMENTAL VERIFICATION

工程力学. 2023, 40(S): 6-10 https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2022.07.S047

基于解析二阶盲辨识的结构工作模态分析及真假模态区分

OPERATIONAL MODAL ANALYSIS UPON ANALYTIC SECOND-ORDER BLIND IDENTIFICATION AND DISCRIMINATION BETWEEN PHYSICAL AND SPURIOUS MODES

工程力学. 2024, 41(1): 249-256 https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2022.03.0222

基于新型振型函数的渐细变截面悬臂梁的自由振动理论与实验研究

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDY ON FREE VIBRATION OF CANTILEVER TAPERED BEAM BASE ON NEW MODAL FUNCTION

工程力学. 2020, 37(3): 28-35 https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2019.05.0260

基于贝叶斯功率谱变量分离方法的实桥模态参数识别

OPERATIONAL MODAL ANALYSIS OF BRIDGE ENGINEERING BASED ON BAYESIAN SPECTRAL DENSITY APPROACH USING A VARIABLE SEPARATION TECHNIQUE

工程力学. 2019, 36(10): 212-222 https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2018.11.0604

订阅号：面向读者

订阅号：面向作者

扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号：1000-4750(2025)08-0001-12

变压器套管升高座区域振动特性与松动故障检测方法

汲胜昌[1]，贾云飞[1]，黄秀君[1]，杨欣颐[1,2]，张 凡[1]

(1. 西安交通大学电工材料电气绝缘全国重点实验室，西安 710049；2. 中国南方电网电力调度控制中心，广州 510663)

摘 要：目前变压器套管升高座区域缺少松动故障检测手段，现有基于振动信号的结构松动检测方法往往需要较多测点。针对上述两个问题，通过仿真和实验研究了套管升高座区域这一细长悬臂梁结构的模态特征与振动分布特性，分析了松动故障对模态和振动特性的影响，提取振动特征参量，对比了各特征参量在不同测点上的故障识别准确率。结果表明，在基频 (100 Hz) 运行变形振型 (operating deflection shapes, ODS) 的波腹处通过振动信号的 100 Hz/200 Hz 幅值比对套管升高座区域松动故障的识别最准确，达 98.08%。这一特征可进一步用于其他电力设备与机械设备的松动故障检测中：对于细长结构设备，若其长期受振动作用，推荐在基频 ODS 的波腹处使用基频/二倍频振动分量比来检测设备松动故障，可降低松动故障检测方法对测点数量的需求。

关键词：套管升高座；振动；模态；松动故障；故障检测；运行变形振型

中图分类号：TH131.3 **文献标志码：**A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2023.12.0924

VIBRATION CHARACTERISTICS AND LOOSENING FAULT DETECTION METHOD OF TRANSFORMER BUSHING TURRET AREA

JI Sheng-chang[1] , JIA Yun-fei[1] , HUANG Xiu-jun[1] , YANG Xin-yi[1,2] , ZHANG Fan[1]

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an JiaoTong University, Xi'an 710049, China;
2. Power Dispatching and Control Center, CSG, Guangzhou 510663, China)

Abstract: Currently, there is a lack of loosening fault detection in the area of transformer bushing turret. Existing structural loosening detections based on vibration signals require a large number of measurement points. In order to improve the two problems, the modal and vibration distribution characteristics of the elongated cantilever beam structure in the area of the bushing turret are studied by simulations and experiments. The effect of loosening faults on modals and on vibration characteristics are analyzed. Vibration characteristic parameters are derived. The fault identification accuracy of each characteristic parameter at different measurement points is compared. The results show that the most accurate detection method of loosening faults in the area of transformer bushing turret is achieved by the 100 Hz/200 Hz vibration amplitude ratio at the antinode of 100 Hz ODS, with an accuracy of 98.08%. This characteristic parameter can also be used in the loosening fault detection of other electrical and mechanical equipment. For equipment with slender structures that is continuously vibrating, it is recommended to use the vibration ratio of the fundamental and diode frequencies at the antinode of the fundamental frequency ODS to detect loosening faults, which can reduce the required measurement points in the loosening fault detection.

Key words: bushing turret; vibration; modal; loosening fault; fault detection; operating deflection shapes analysis

收稿日期：2023-12-11；修改日期：2024-06-10

基金项目：国家自然科学基金青年科学基金项目(52007145)

通信作者：杨欣颐 (1998—)，女，广东人，硕士，主要从事电力设备振动机理及机械故障诊断研究 (E-mail: yxakahz@126.com).

作者简介：汲胜昌 (1976—)，男，山东人，教授，博士，博导，主要从事电力设备在线监测及故障诊断、振动噪声机理等研究 (E-mail: jsc@xjtu.edu.cn);

贾云飞 (1998—)，男，河南人，博士生，主要从事电力设备状态监测、变压器防爆研究 (E-mail: jiayf98@163.com);

黄秀君 (2000—)，女，海南人，硕士生，主要从事电力设备故障诊断及传感器制作研究 (E-mail: hxj_xjtu@163.com);

张 凡 (1991—)，男，陕西人，副教授，博士，硕导，主要从事交直流设备振动噪声控制及应用研究 (E-mail: zhangfanee@xjtu.edu.cn).

在电力变压器运行期间，铁芯硅钢片的磁致伸缩、铁芯接缝处的 Maxwell 应力、绕组受到的电磁力、以及油泵等设备的振动共同作用于变压器，其机械结构长期受到主频率约 100 Hz 的振动[1]。

套管升高座是变压器的载流组件和出线装置[2－4]，在承受强电场和大电流的同时，其细长的结构会放大油箱表面的振动，导致根部和转角部位的应力集中。套管升高座长期受到电-热-机的联合作用，是变压器上的机械薄弱部位之一[5－6]。套管-升高座连接处螺栓在长期振动作用下极易发生松动[7]，但目前有关变压器套管升高座区域机械状态的研究主要关注其细长结构在地震作用下的响应与破坏机理[8]，尚未有学者研究套管升高座区域在变压器本体长期振动激励下的振动特性，同时此区域的螺栓松动故障目前仅通过人工巡检的方式检测，缺少相应的在线监测方法。

近年来，基于振动信号的变压器故障监测方法得到了广泛研究[9－10]。汲胜昌等[11]研究了变压器绕组轴向振动特性随预紧力、温度、老化程度的变化规律。洪凯星等[12]将振动监测数据转换为特征图像来提取信号特征，并基于深度学习方法、在绕组故障诊断方面取得良好效果。师愉航等[13]研究了变压器的运行变形振型特性，油箱运行变形振型 (operating deflection shapes, ODS) 的相关系数可用于检测绕组松动故障。李沂新等[14]则使用振动信号基频占比检测干式变压器铁芯松动故障。

在变压器故障监测系统中，振动信号已经是主要监测参数之一，可进一步将其扩展应用于套管升高座区域松动故障的监测，具有成本低、实施便捷的优点，但目前尚缺少相应的监测方法。

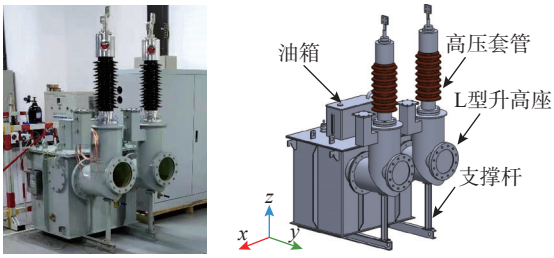
螺栓松动故障会改变机械结构的模态参数，进而影响振动响应[15]。在机械工程行业，基于振动信号的螺栓松动故障检测方法已较为成熟[16]。王慧等[17]提出了基于振动响应相关函数矩阵及卷积神经网络的结构健康监测方法，实现了典型航空加筋壁板的螺栓松动监测。BRØNS 等[18]分析了双螺栓结构中的耦合作用，若两螺栓的张力和边界刚度存在差异，则可视为两个独立的系统，从而可以根据振动估算螺栓张力。NGUYEN 等[19]提出了基于振动和阻抗响应的风力涡轮机塔架结构中螺栓松动故障检测方法。HUDA 等[20]提出在螺栓附近一点激励、通过测量周围几点的振动响应来检测松动故障。LUO 等[21]将深度学习引入结构损伤/松动的检测中，通过结构多处的振动信号来判别结构的损伤程度。张敏照等[22]以振动响应为原始信号，提出了基于内积矩阵及卷积自编码器的螺栓松动检测方法，并分析了测点数量对该方法的影响规律。

但上述基于振动信号的螺栓松动故障检测方法往往需要多个测点才能反映出整体结构的松动，一定程度上限制了其应用，有必要针对变压器套管升高座区域这一细长结构中的松动故障开展测点和特征参量的优化。

综上，针对变压器套管升高座区域振动特性研究空白、考虑基于振动信号的松动故障检测方法对降低测点数量的需求，本文搭建套管升高座区域模态和振动实验平台，围绕其振动特性与松动故障检测方法开展研究。首先分析正常紧固状态下的模态与振动特征；然后研究松动故障对模态和振动的影响；最后提取振动特征参量、开展测点优化。本文一方面针对变压器套管升高座区域建立了松动故障检测方法，对保障变压器运行安全具有重要意义；另一方面，针对长期受振动影响的细长结构设备，提出在基频 ODS 振型的波腹处使用基频/二倍频振动分量比来检测设备松动故障，可显著降低基于振动信号的松动故障检测方法对测点数量要求。

1 实验平台

本文针对一台具有 L 型升高座结构的 35 kV 试验变压器开展仿真与实验研究。变压器整体结构如图 1 所示。



(a) 实物 (b) 模型

图 1 试验变压器

Fig. 1 Test transformer

图 1 中，变压器油箱侧壁为两个 L 型升高座及电容屏套管，油箱与升高座、升高座与套管之间均为通过法兰相互连接，由紧固螺栓连接固定。在两个 L 型升高座下方各有一支撑杆，对套

管升高座整体结构进行支撑加固。

基于图 1 所示的试验变压器，搭建如图 2 所示实验平台，可满足后续模态和振动实验测量需求。图 2 中，10 个振动加速度传感器沿 z 轴方向自上而下固定于变压器的套管升高座表面，用于测量模态与振动实验过程中套管升高座区域沿 y 轴方向上的一维加速度信号。

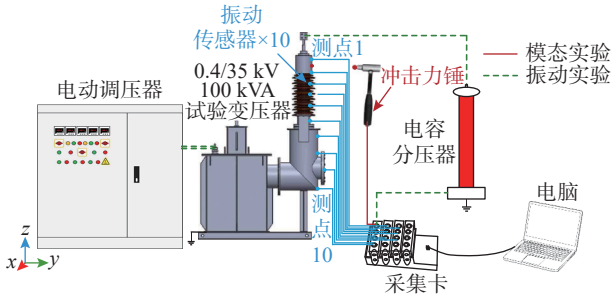


图 2　模态与振动测量平台

Fig. 2　Modal and vibration measurements

模态实验中，使用力锤敲击套管顶部将军帽的测点 1、2 之间以激发模态，使用采集卡获取 10 个加速度传感器的输出信号与力锤敲击的激励信号，并进一步开展模态分析。

振动实验中，使用一台 300 kVA 的 0 V~500 V 调压器向试验变压器供电，并实现电压调节；电容分压器与套管顶部相连，用于测量试验变压器的输出电压；使用采集卡同时采集振动信号与电压信号，并进一步开展结构的振动分布与后续频谱分析。

2　正常紧固状态下的模态与振动特征

本节探究正常紧固状态下变压器套管升高座区域的模态振型与表面振动分布特性，通过仿真与实测得到套管升高座在正常工况下的模态与振动特征。

2.1　模态仿真

变压器油箱内部充满变压器油，液体介质对油箱模态的影响不可忽略。建立了如图 3 所示的模态有限元仿真模型。

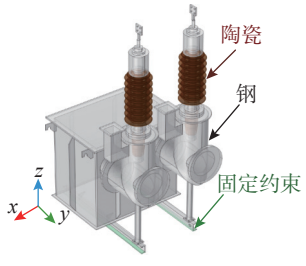
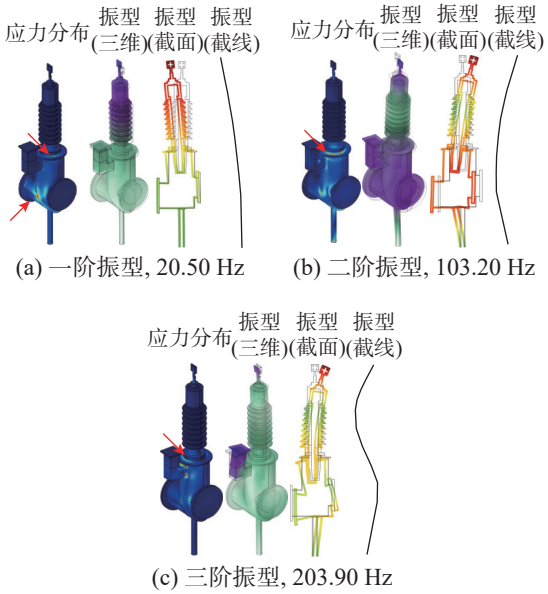


图 3　模态有限元仿真模型

Fig. 3　Finite element simulation model of modal

在图 3 所示的模型中，考虑到仿真计算效率，做如下简化：忽略油箱内部绕组和铁芯结构，仅关注套管升高座区域的振型；套管为电容屏式套管，忽略套管内部直径约 8 cm 的多层油纸绝缘芯子，将套管内部视为中空结构，内部填充为变压器油，中部固结有金属法兰。材料设置上，套管伞裙材料为陶瓷，变压器油箱材料均为钢，均为线弹性材料。变压器底部撑条设置为固定约束，重力方向为-z 轴方向。油箱内部和套管内部材料设置为变压器油，油箱内壁面上设置声固耦合条件。

由于模态仿真是对变压器整体求解，为便于与后续模态实验结果对比分析，进一步提取升高座及套管区域在 y 方向上的主要振型，前三阶振型及所对应固有频率和应力分布如图 4 所示。



(a) 一阶振型, 20.50 Hz　(b) 二阶振型, 103.20 Hz

(c) 三阶振型, 203.90 Hz

图 4　前三阶振型及表面应力分布

Fig. 4　The first three modes and surface stress distributions

根据图 4，变压器套管升高座这一细长结构的振型与典型悬臂梁结构的振型形态相似，随模态阶数的增加，振型的节点数增加，第 n 阶振型有 n−1 个节点，对应振型由一阶时的单摆形态逐渐过渡为高阶时的波浪形态。套管升高座区域前三阶振型的固有频率分别为：20.50 Hz、103.20 Hz、203.90 Hz，其中，103.20 Hz 与变压器的 100 Hz 主要振动频率最接近，是正常运行过程中套管升高座区域最容易被激发的振型。

此外，在图 4 套管升高座前三阶振型下表面应力分布图中，通过红色箭头标注了表面应力分布图中应力较为集中的区域，可以看出：不同振

型下，套管与升高座连接处始终为应力较为集中的区域，在长时间振动作用下最为可能出现螺栓松动故障。除套管与升高座连接处法兰外，在一阶振型下 L 形升高座的拐角处应力也较为集中，尽管此处为焊缝，但在长期振动的影响下可能会出现结构失效。

2.2 模态及振动试验

基于图 2 所示实验平台，首先开展了变压器套管及升高座区域的模态实验。

通过计算各个传感器在力锤激励下产生的加速度响应，得到每个测点的频响曲线，综合 10 个传感器的频响曲线可得到套管升高座整体结构在激励下的频响曲线如图 5 所示。

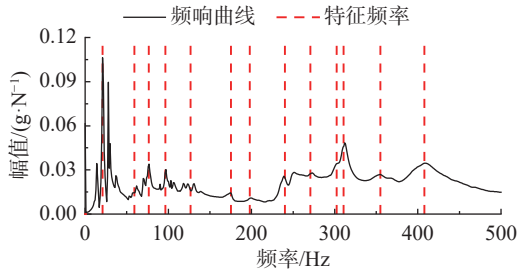


图 5 正常紧固状态下的频响曲线

Fig. 5 Frequency response curve at normal tightening

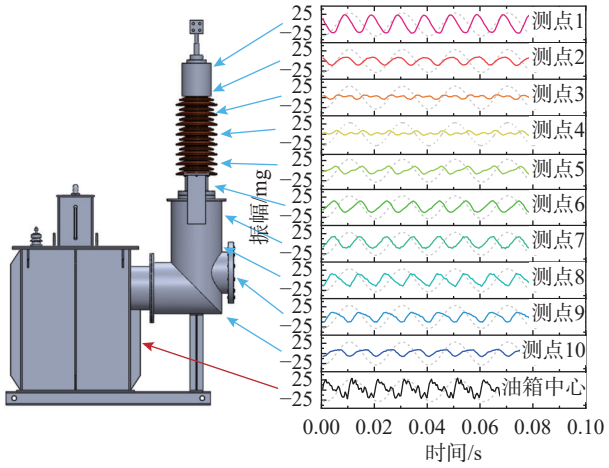
频响曲线峰值对应的频率为结构的固有频率。根据仿真得到的前三阶特征频率：20.50 Hz、103.20 Hz、203.90 Hz，模态实验中与其最为接近的固有频率分别为：21.09 Hz、96.56 Hz、197.79 Hz。

在模态实验基础上，进一步测量了变压器套管升高座区域的时域振动信号分布。额定工作电压、正常紧固状态时，套管升高座表面各测点的振动信号及频谱如图 6 所示。

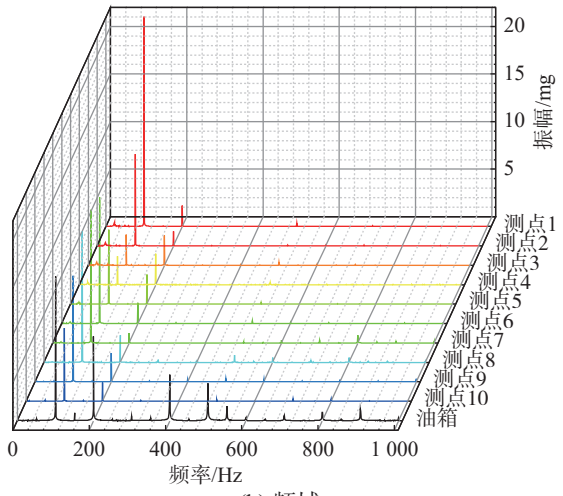
由图 6(a) 所示的时域振动信号可知，不同测点振动均主要以 100 Hz 分量为主，幅值和相位存在明显差异。进一步对时域信号开展谐波分析，结果如图 6(b) 所示，测点 1~10 的 100 Hz 基频分量振幅随测点位置呈现先减小后增大再减小的波动变化，这一变化规律与 100 Hz 附近振型的形态有关。

此外，套管表面测点 1~10 的频谱中，22 Hz 附近均存在一个尖峰，且越靠近套管顶部的测点 22 Hz 分量振幅越大。结合模态振型分析认为，22 Hz 分量振幅是在变压器本体振动激励下套管升高座的一阶振型被激发导致的结果。

由图 6 可以看出，套管升高座区域不同频率分量的振幅随测点位置的变化具有一定规律性。对于结构表面不同频率振动分量分布的变化规律，学者们提出了 ODS 的概念[23]。ODS 是从时域振动信号中按频率分离得到的结构在某一频率下的运动形态，体现了该频率下结构表面多个点之间的相对运动状况和整体结构的实际形变程度，其形态与结构自身的模态振型和结构所受到的外部激励有关[24]。ODS 可以直观地显示出套管升高座区域在变压器本体振动激励下所产生的响应，并进一步得到不同频率下套管升高座表面的振幅分布与变化趋势。



(a) 时域



(b) 频域

图 6 正常紧固状态下的振动信号

Fig. 6 Vibration signals at normal tightening

因此，为进一步探究套管表面振动信号的分布规律，在时域振动信号的基础上研究了套管升高座表面的 ODS 振型分布。以套管顶部的测点 1 为参考点，计算不同频率下，当测点 1 最大值时，其余各测点的振幅与相对相位差，可得到套管升高座区域在 22 Hz、100 Hz、200 Hz 附近频率的 ODS。由于实验中使用的是一维振动加速度传

感器，模态振型和 ODS 振型分布的实测结果中仅反映其在 y 方向上的振动。为能更好地与实测结果进行比较，在仿真模型中传感器粘贴的相同位置共取 10 个三维节点，得到仿真中 y 方向上振型。仿真和实测得到的套管升高座区域前三阶模态振型及其 ODS 振型分布如图 7 所示。

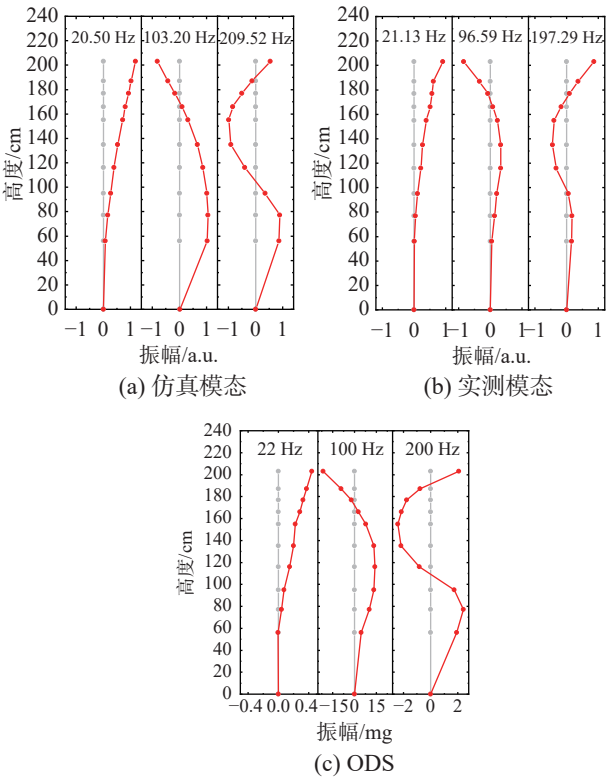


图 7　套管升高座区域前三阶模态及其 ODS

Fig. 7　The first three modals and ODS in the area of transformer bushing turret

由图 7 可见，仿真与实测得到套管升高座区域的前三阶模态振型均与典型悬臂梁振型相符，验证了模态仿真与实验结果的准确性。

套管升高座区域在 22 Hz、100 Hz、200 Hz 的 ODS 与其在附近频率模态的振型类似。模态中 100 Hz 附近振型的节点位于测点 3 和测点 4 之间，与图中 100 Hz ODS 振幅最小的测点位置相符；测点 10 接近底部的固定端，因此其 ODS 振型的振幅也较小。

结合图 6 和图 7 可以看出，套管升高座区域振动信号幅值分布与其 ODS 振型相似。ODS 振型的波节对应于该频率下振动幅值分布最小值的测点，ODS 振型的波腹对应于该频率下振动幅值分布最大值的测点。各频率分量的幅值分布变化规律与该频率下 ODS 振型绝对值的分布相同，因此，后续实验可以通过测量 22 Hz、100 Hz、200 Hz 的频率分量分布变化，得到 ODS 振型变化情况。

3　松动状态下的模态与振动信号特征

根据第 2 节的分析可知，在正常紧固状态下套管升高座区域的前三阶振型中，套管与升高座连接处始终为应力较为集中的区域，长期运行过程中最易发生螺栓松动故障。因此，本节进一步研究套管与升高座连接处螺栓在不同拧紧力矩作用、不同松动螺栓数量下的模态振型、特征频率和振动信号变化规律。

3.1　不同拧紧力矩的影响

试验变压器的升高座与套管连接处法兰使用 4 颗材料强度等级为 8.8 级的 M20 螺栓，螺栓的屈服强度为 640 MPa。考虑许用应力的要求，螺栓的最大预紧力应小于其材料对应屈服强度的 80%，根据公制螺栓拧紧力矩标准，为安全起见，乘以 0.5~0.7 的安全系数。本文所用螺栓的拧紧力矩计算方法如下[25]：

$$T=\frac{kF_0d}{1000}=\frac{k(0.5\sim0.7)\sigma_sA_sd}{1000} \tag{1}$$

式中：T/(N/m) 为拧紧力矩；F_0/N 为螺栓预紧力；k 为拧紧力系数；σ_s/MPa 为屈服强度；A_s/mm² 为危险截面的面积；d/mm 为公称直径。

本文中，一般加工表面螺栓的拧紧力系数 k 取 0.2，屈服强度 σ_s 为 640 MPa，M20 螺栓的截面积 A_s 为 245 mm²，螺栓公称直径 d 为 20 mm，计算得到所对应的拧紧力矩为 313 N·m~439 N·m。在本文的后续研究中认为，当拧紧力矩达到 360 N·m 时，螺栓处于完全紧固状态。

将升高座与套管连接处四颗螺栓的拧紧力矩由 360 N·m 依次降低至 0 N·m，得到套管升高座区域模态的频响曲线变化如图 8 所示，特征频率已在图中使用红线标注。

从图 8 可以看出，在 360 N·m~30 N·m 范围内，频响曲线变化不明显；当拧紧力矩小于 30 N·m 后，频响曲线明显变缓，特征频率左移，且在 100 Hz 范围附近密集的响应峰几乎完全消失。

螺栓松动故障会导致套管升高座区域的 0 Hz~500 Hz 模态响应明显变化，特征频率数量减少、频率下移、响应降低，进一步改变结构的 ODS 振型，最终造成振动信号各频率分量分布变化。

将升高座与套管连接处四颗螺栓的拧紧力矩由 360 N·m 依次降低至 0 N·m，提取每测点振动信号的同一频率分量幅值。在额定电压下运行

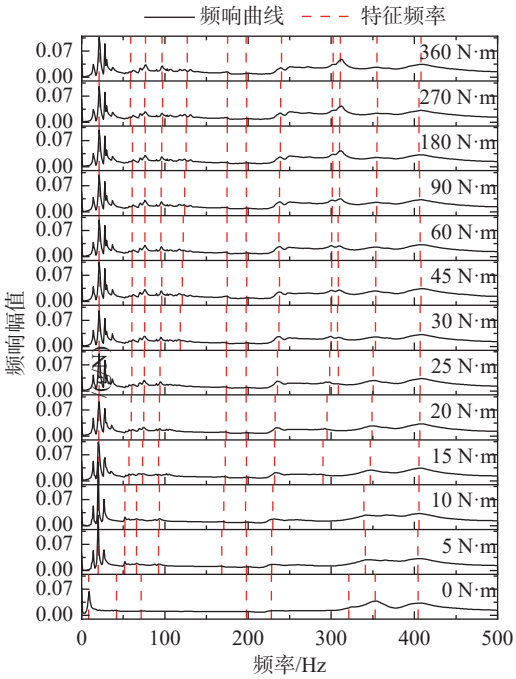


图 8 不同拧紧力矩下的频响曲线

Fig. 8 Frequency response curves at different tightening torques

时，不同拧紧力矩下的 22 Hz、100 Hz、200 Hz 频率分量幅值分布如图 9 所示。

图 9 所示的振动频率分量分布图实际上是 ODS 的绝对值，可以清晰地分辨出波节和波腹。在正常紧固状态下，22 Hz 振动频率分量分布图中存在一个固定节点、不存在波节；100 Hz 振动频率分量分布图中存在 1 个固定节点、1 个波节；200 Hz 振动频率分量分布图中存在 1 个固定节点、2 个波节。

基于图 9 得到每个测点的三个频率分量幅值与拧紧力矩之间的关系如图 10 所示。结合图 9、图 10 可以看出，随拧紧力矩的降低，各频率分量整体幅值下降。当拧紧力矩小于 30 N·m 时，各频率分量分布图变化明显，尤其是接近完全松动的 0 N·m 和 5 N·m，波节和波腹会发生明显变化。

图 10 通过曲线颜色与线形对各频率分量随拧紧力矩的变化规律进行了区分。实线表示该点幅值随拧紧力矩的降低显著减小；虚线表示该点幅值随拧紧力矩的降低而明显增大；点划线表示该点幅值在不同拧紧力矩下基本不变。

随拧紧力矩的下降，大部分测点下的 22 Hz 振动分量逐渐降低，其中，顶部自由端附近测点明显降低、底部接近固定端的测点基本不变；大部分测点下的 100 Hz 振动分量逐步降低，其中，顶部自由端和中间波腹附近测点的幅值明显降低，中间波节附近测点的幅值略有增大，底部接

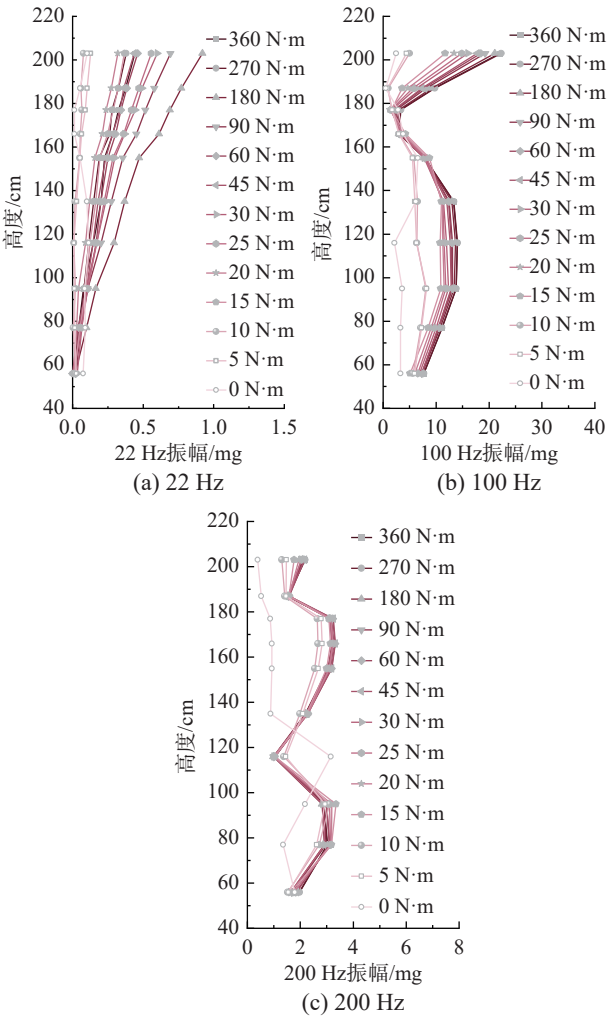


图 9 额定电压、不同拧紧力矩下的振动分布

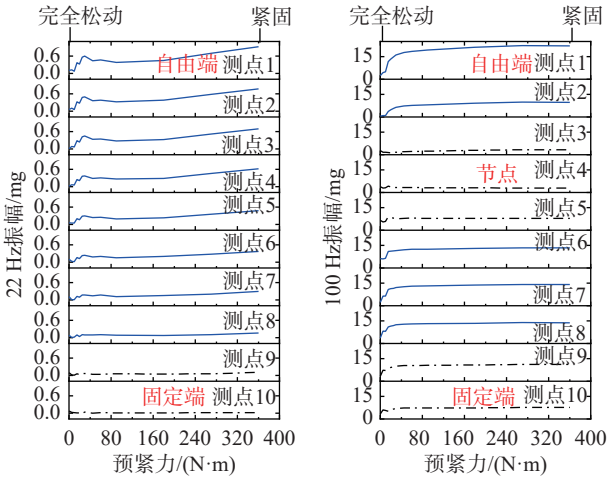
Fig. 9 Vibration distributions at rated voltage and different tightening torques

近固定端的测点略有减小；对于 200 Hz 振动分量，顶部自由端测点的幅值明显降低，中间两个波腹附近测点的幅值略有降低，中间两个波节附近的 2 号测点基本不变、7 号测点增大，底部固定端附近测点幅值基本不变。上述现象的原因在于：当拧紧力矩逐渐降低、螺栓逐渐松动时，原本稳定的 ODS 振型变得“松弛”，导致原本应该振动明显的自由端和波腹的响应降低、原本应该基本不振动的波节发生了振动。

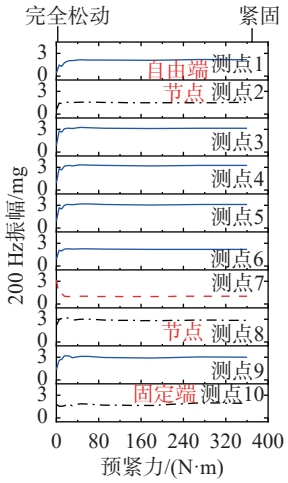
综上，在套管与升高座连接处螺栓发生松动故障时，随着拧紧力矩的降低、松动故障逐渐严重，各阶 ODS 中的自由端、波腹附近测点的振动幅值明显降低，波节附近的振动幅值基本不变或升高。

3.2 不同螺栓松动数量的影响

在实际套管装配、变压器长期运行过程中，也可能出现只有部分螺栓松动的情况。因此本小



(a) 22 Hz　(b) 100 Hz



(c) 200 Hz

图 10　不同拧紧力矩下的振动频率分量变化

Fig. 10　Variation of vibration frequency components with different tightening torques

节研究当升高座与套管连接处分别松动 1 颗~4 颗螺栓时的振动信号变化规律。不同螺栓松动数量下，套管升高座区域模态的频响曲线如图 11 所示。

从图 11 可以看出，松动螺栓数量越多，频响曲线在 0 Hz~500 Hz 范围内的响应越平缓，特征频率的数量不断较少，频率下移。当松动 4 颗螺栓时，即对应于前文中拧紧力矩为 0 N·m 的完全松动情况，套管模态与正常紧固状态下差异较大。

变压器额定电压下，不同螺栓松动数量下 22 Hz、100 Hz、200 Hz 振动频率分布如图 12 所示。由图可见，随松动螺栓数量的增加，不同测点上 22 Hz、100 Hz、200 Hz 频率分量幅值逐渐降低，当四颗螺栓全部松开，套管与升高座完全失去连接、仅存在重力影响，振型发生显著变化。

进一步对比各测点振幅在不同螺栓松动数量与不同拧紧力矩下的变化情况。由前文分析可

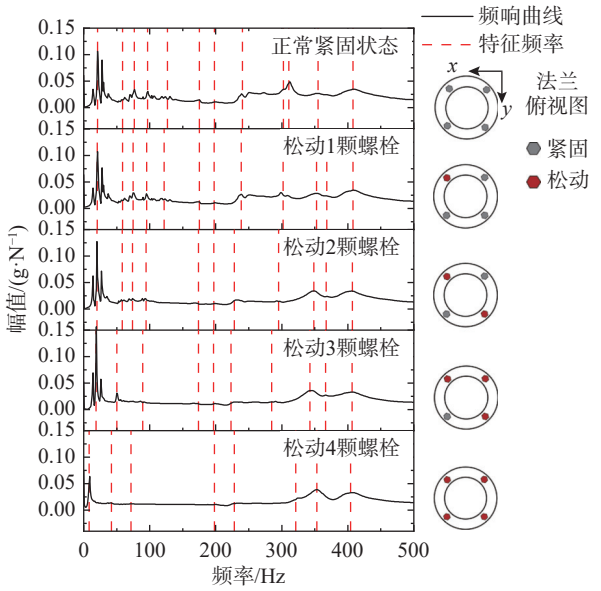
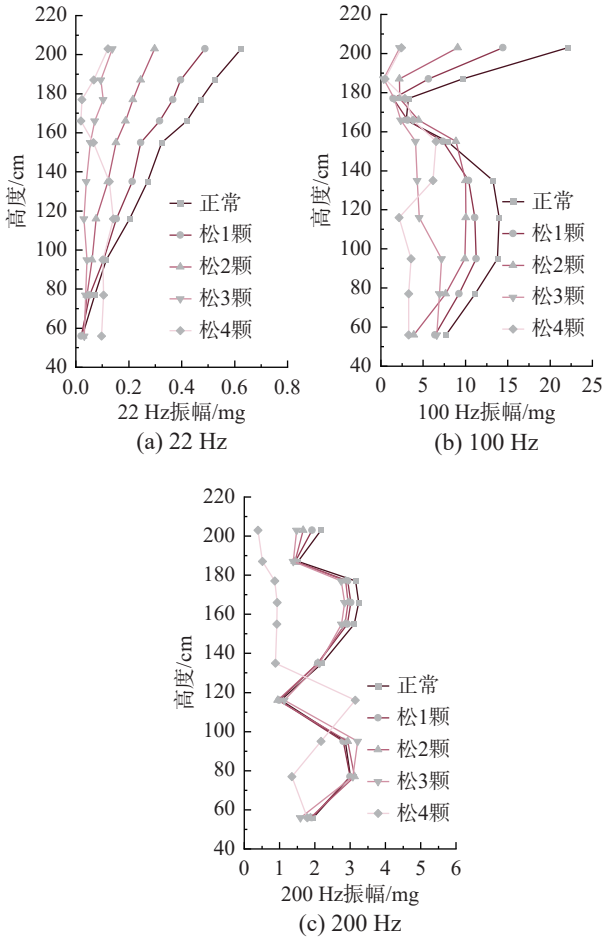


图 11　不同螺栓松动数量时的频响曲线

Fig. 11　Frequency response curves with different number of loosening bolts



(a) 22 Hz　(b) 100 Hz

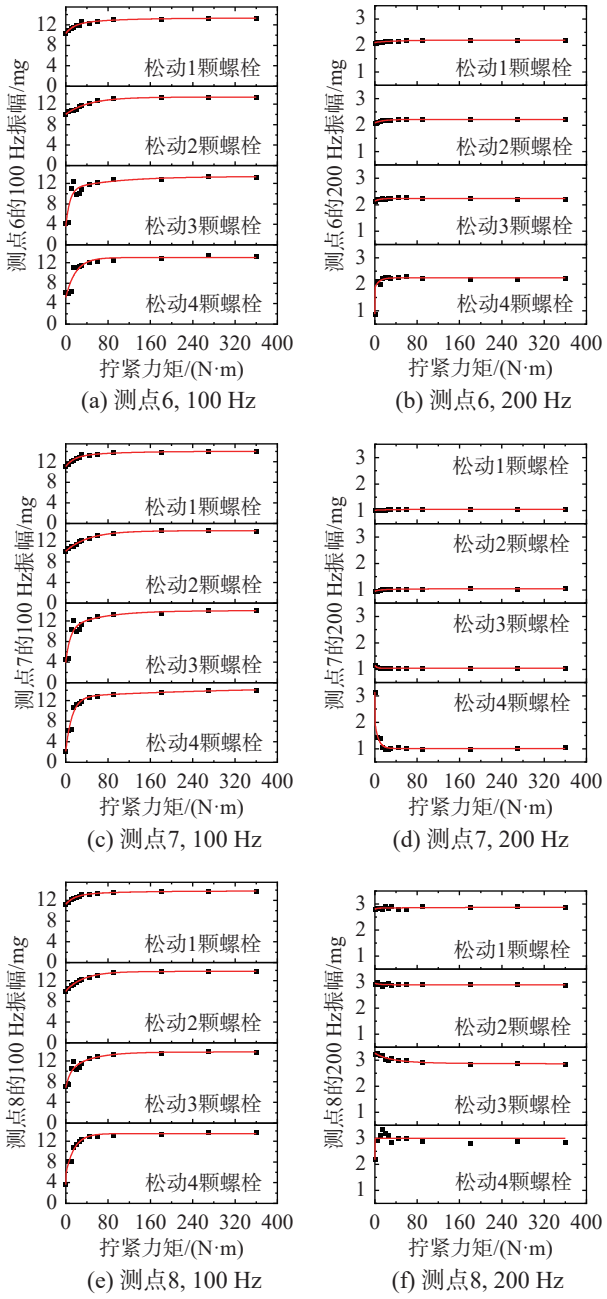
(c) 200 Hz

图 12　额定电压、不同螺栓松动数量下的振动分布

Fig. 12　Vibration distributions with rated voltage and different numbers of loosening bolts

得，测点 6~测点 8 处于正常紧固状态下 100 Hz 模态振型的波腹附近，在当发生不同程度松动故障后振

幅变化最大 (图 9)；振动信号频谱中 100 Hz、200 Hz 分量占比最大 (图 6)。因此，以测点 6~测点 8 处的 100 Hz、200 Hz 频率分量变化情况为例，得到不同螺栓松动数量与不同拧紧力矩下各测点振幅变化情况如图 13 所示。



(a) 测点6, 100 Hz (b) 测点6, 200 Hz

(c) 测点7, 100 Hz (d) 测点7, 200 Hz

(e) 测点8, 100 Hz (f) 测点8, 200 Hz

图 13 不同松动数量和不同拧紧力矩下的振动变化

Fig. 13 Vibration variations with different numbers of loosening bolts and different tightening torques

在不同松动螺栓数量下，当拧紧力矩在 360 N·m~30 N·m 范围内时，各测点上的不同频率振幅在不同松动数量下均基本保持不变；在拧紧力矩小于 30 N·m 后，对于同一测点的同一频率分量，其受拧紧力矩降低的变化趋势基本相同，但松动螺栓数量的增加会加剧这一变化，例如：测点 7 的 100 Hz 振动分量在松动 1 个螺栓时，拧紧力矩从 360 N·m 降低至 0 N·m 会导致 100 Hz 振动分量由 14 mg 降低至 11 mg，但松动 2 个、3 个和 4 个螺栓时，则分别会降低至 10 mg、4 mg 和 2 mg。

总体而言，套管与升高座连接处螺栓的松动程度在其拧紧力矩小于 30 N·m 后会对整体结构的振动信号分布产生明显影响。各阶 ODS 的自由端和波腹附近的振动降低、波节节点附近的振动不变或增加，螺栓松动数量增多会加剧这一变化。

4 松动故障检测方法与测点优化

机械松动故障会导致套管升高座区域模态与振动分布变化，本节根据不同松动程度下套管升高座区域的 ODS 振型变化程度，将已有振动数据区分为正常和故障 2 组，提出 4 种用以表征频谱变化程度的特征量与相应的故障判定阈值，并比较四种特征量在不同测点上的松动识别准确度，优化套管升高座区域松动故障的判别方法和测点位置。

4.1 基于 ODS 振型相关系数的数据分类

由前文分析可知，当套管与升高座连接处发生松动时，会对整体结构的 ODS 产生明显影响。因此，可根据不同松动程度下的 ODS 变化将已有数据分为正常和故障 2 类，以便之后故障识别特征量的提取和阈值的确定。

将套管与升高座表面 10 个测点的 ODS 频率分量幅值按测点编号顺序构成一维数组，以正常紧固状态下 (拧紧力矩为 360 N·m) 为标准向量，计算不同拧紧力矩和不同螺栓松动程度下 ODS 幅值向量与标准向量的振型相关系数。不同螺栓松动数量和不同拧紧力矩下，套管升高座表面各测点 22 Hz、100 Hz、200 Hz 的 ODS 振幅与正常紧固状态下 (拧紧力矩为 360 N·m)ODS 振幅的相关系数结果如图 14 所示。

由图 14 可知，随螺栓松动数量增加，22 Hz、100 Hz、200 Hz 的 ODS 相关系数明显降低；在拧紧力矩小于 60 N·m 时，ODS 相关系数迅速降低。

若以相关系数小于 0.98(变化超过 2%) 作为松动的分类判据，当发生 1 颗螺栓松动时，只有 100 Hz 的 ODS 变化超过 2%，对应拧紧力矩为 9 N·m，可根据这一阈值将松动 1 颗螺栓的数据分为正常和故障两类。当发生 2 颗螺栓松动时，100 Hz 和

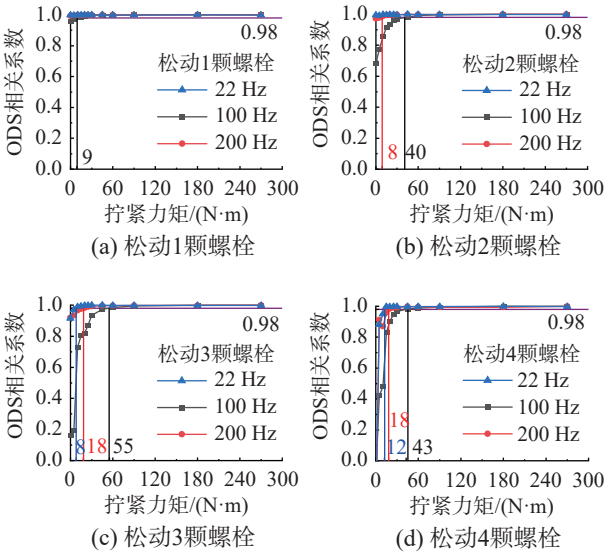


图 14　不同松动程度下的 ODS 相关系数

Fig. 14　ODS correlation coefficients with different loosening degrees

200 Hz 的 ODS 变化超过 2%，对应拧紧力矩分别为 40 N·m 和 8 N·m，当拧紧力矩在 40 N·m~8 N·m 之间时，尽管只有 100 Hz 的 ODS 变化超过 2%，但仍然可认为此时已经发生了较严重的松动故障，因此应取两者最大值为这组数据的分类阈值，即 40 N·m。相应地，松动 3 颗螺栓和松动 4 颗螺栓的故障分类阈值分别为 55 N·m 和 43 N·m。

基于上述方法可将不同松动螺栓数量、不同拧紧力下的振动数据分为正常和故障 2 类数据集。

4.2　松动故障识别特征量的选取

变压器套管升高座区域螺栓的不同松动程度会导致其 ODS 振幅分布变化。因此，本文在现有振动分析法中常用特征量的基础上，优化并提出了 4 种用以区分正常紧固状态与松动故障的特征参量，分别为振动熵、偶次振动熵、谐波畸变率和 100 Hz/200 Hz 幅值比，并分别探究了四种特征参量在不同测点上对套管松动故障的识别准确率。

振动熵 (vibration entropy, VE) 是研究变压器多频振动特征的常用参量[26]。振动熵表征了振动信号的频谱多样性，频谱中频率数量越多、功率越分散，振动熵越大。设振动信号在 0 Hz~1000 Hz 范围内的 50 Hz 第 i 次倍频的振幅有效值分别为 V_1、V_2、…、V_{20}，则该振动信号的振动熵计算公式为[26]：

$$\mathrm{VE}=\left|\sum_{i=1}^{20}A_i\log_{20}(A_i)\right|,\quad A_i=\frac{V_i^2}{\sum\limits_{i=1}^{20}V_i^2} \tag{2}$$

偶次振动熵 (even order vibration entropy, EVE) 是基于套管升高座区域的振动规律对振动熵的优化。偶次振动熵的意义与计算公式与振动熵类似，但主要关注于变压器铁芯和绕组振动所主要激励的 100 Hz 振动及其倍频 (即 50 Hz 的偶数次倍频)。基于式 (2)，偶次振动熵的计算公式为：

$$\mathrm{EVE}=\left|\sum_{i=1}^{10}A_{2i}\lg(A_{2i})\right|,\quad A_{2i}=\frac{V_{2i}^2}{\sum\limits_{i=1}^{10}V_{2i}^2} \tag{3}$$

谐波畸变率 (total harmonic distortion ratio, THD) 是判断变压器振动状态的常用指标[27]。谐波畸变率表征了振动信号中高次谐波含量的大小，可以直观地体现波形相对于基波的畸变程度。谐波畸变率的值越高，说明谐波功率占比越大，越低则表明基波功率占比大。谐波畸变率由 50 Hz~1000 Hz 范围内各次谐波功率值之和与 100 Hz 基波功率之比开方得到，具体计算公式为[27]：

$$\mathrm{THD}=\sqrt{\frac{\sum\limits_{i=1}^{20}V_i^2-V_2^2}{V_2^2}} \tag{4}$$

100 Hz/200 Hz 幅值比则是根据本文实验得到的不同松动程度下套管升高座区域振动规律所提出的特征参量，表征了振动信号中 100 Hz、200 Hz 振幅的相对变化程度。由前文分析中可知，100 Hz 与 200 Hz 是套管升高座区域振动信号的频谱中幅值最大的两个频率，对比图 7(c) 中的 100 Hz、200 Hz 频率分量分布可以看出，正常紧固状态下的 100 Hz 振型波腹在升高座侧壁上的测点 7 附近，位置与 200 Hz 振型的波节点相对应。当发生松动故障时，该区域附近的 100 Hz 振幅会显著减小，200 Hz 振幅保持不变或有所增大，二者相对变化最为显著。因此，可以通过 100 Hz 与 200 Hz 振幅比值的变化来判断松动严重程度。

4.3　阈值确定与测点优化

根据所提出的四种特征量分别计算正常与故障数据集中振动数据的特征值，在不同测点上的结果如图 15 所示。

图 15 中，三角点和圆点儿分别是正常和故障数据集计算得到的特征量。可以看出，不同测点上，正常与故障数据集的四种特征参量均有较为明显的分界。以故障识别准确率为优化目标，通过 Matlab 查找各测点、各特征参量的识别阈值，阈值已在图中使用横线标注，并给出了准确率。四种特征参量在各测点的识别准确率如图 16 所示。

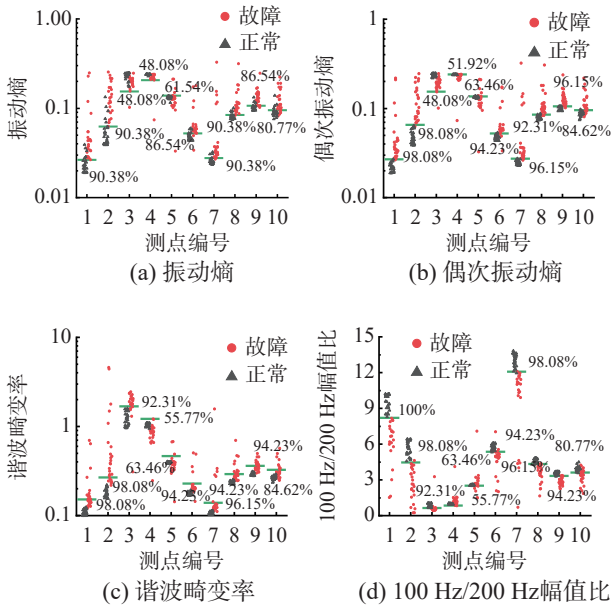


图 15 不同测点上的特征值

Fig. 15 Characteristic parameters at different measurement points

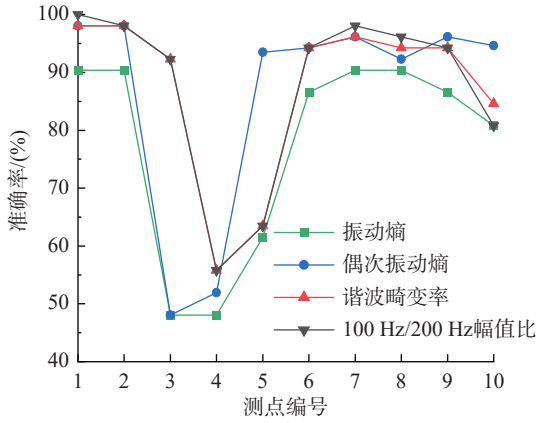


图 16 各测点不同特征量的识别准确率对比

Fig. 16 Comparison of detection accuracies of different characteristic parameters at each measurement point

图 16 中，各特征参量在测点 3~5 的准确率相对较差，分析其原因是紧固状态下这几个测点处于 100 Hz 附近振型的波节，100 Hz 振幅本就较小，导致松动故障前后其特征参量变化不明显。各特征参量在测点 1~2、6~8 的准确率较好，推测是因为测点 1~2 处于结构的自由端、测点 6~8 处于 100 Hz ODS 的波腹，因而松动故障导致的 ODS 变化会在这些测点上有显著的体现。

四种特征参量中，振动熵的平均识别准确率最低，为 77.31%。偶次振动熵、谐波畸变率、100 Hz/200 Hz 幅值比的识别准确率相对较好，分别为：86.31%、87.12%、87.31%，其中 100 Hz/200 Hz 幅值比的识别准确率最高。在测点 1、2、7 上，偶次振动熵、谐波畸变率、100 Hz/200 Hz 幅值比的识别准确率均超过 95%。但考虑到测点 1 和 2 位于套管顶部，在实际应用中其振动信号的采集相对困难。测点 7 位于正常紧固状态下套管升高座区域 100 Hz ODS 的波腹、200 Hz ODS 的波节，松动故障会导致振型变化，使原振型波腹的振动幅值降低、波节的振动幅值不变或增高，即：振动在测点 7 的 100 Hz 频率分量降低、200 Hz 频率分量不变或增高，造成 100 Hz/200 Hz 幅值比这一特征参量的显著降低，有利于松动故障的识别。

综上，在测点 7 使用 100 Hz/200 Hz 幅值比这一特征量最适合用于识别套管升高座区域的松动故障，阈值选取为 12 时的准确率为 98.08%。

进一步地，对于其他细长结构设备，若其长期受振动作用，推荐在基频 ODS 振型的波腹处使用基频/二倍频振动分量比来检测设备松动故障。这是因为松动故障会使结构刚度降低，原本稳定的 ODS 振型变得“松弛”，导致各阶 ODS 波腹的响应降低、原本不振动的波节发生了振动，即基频 ODS 振型波腹处的振动降低，二倍频 ODS 振型波节处的振动增加，而基频 ODS 振型的波腹又与二倍频 ODS 振型的波节位置接近，此处的基频/二倍频振动分量之比受松动故障影响最为显著。

5 结论

本文针对变压器套管升高座区域的振动特性及其松动故障检测方法，研究了正常紧固状态与不同松动程度下套管升高座区域的模态与振动信号的特征和变化规律，基于不同频率分量分布随松动程度的变化规律，优化了特征参量和测点位置，实现了螺栓松动故障的识别。主要结论如下：

(1) 变压器套管升高座区域的细长结构在力学分析中可视为悬臂梁模型，其振型分布和变化规律与典型悬臂梁结构类似。在变压器自身振动激励下，本文所研究的试验变压器套管升高座区域 ODS 的频率主要为 22 Hz、100 Hz 和 200 Hz。

(2) 当升高座和套管连接处发生松动故障时，0 Hz~500 Hz 内的模态特征频率数量减少、频率下移、响应降低，进一步改变了 ODS 响应，最终造成振动振幅分布变化：随着拧紧力矩的降低、螺栓松动数量的增加，各阶 ODS 中的自由端、波腹附近测点的振动幅值明显降低，波节附近的振动幅值基本不变或升高。

(3) 探究了振动熵、偶次振动熵、谐波畸变率、100 Hz/200 Hz 幅值比共四种振动频谱特征参量在各测点上的故障识别准确率；其中，升高座侧壁的测点 7 位于正常紧固状态下套管升高座区域 100 Hz ODS 的波腹、200 Hz ODS 的波节，此处通过 100 Hz/200 Hz 幅值比识别松动故障最准确，准确率达 98.08%。

(4) 针对变压器套管升高座区域，在 100 Hz ODS 波腹处通过 100 Hz/200 Hz 幅值比为判据对松动故障的识别最准确。进一步的，对于其他细长结构设备，若其长期受振动作用，推荐在基频 ODS 振型的波腹处使用基频/二倍频振动分量比来检测设备松动故障，可显著降低基于振动信号的松动故障检测方法对测点数量要求。

参考文献：

[1] 汲胜昌, 张凡, 师愉航, 等. 基于振动信号的电力变压器机械状态诊断方法研究综述 [J]. 高电压技术, 2020, 46(1): 257－272.
JI Shengchang, ZHANG Fan, SHI Yuhang, et al. Review on vibration-based mechanical condition monitoring in power transformers [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(1): 257－272. (in Chinese)

[2] 马凯, 章海斌, 郭振宇, 等. 一起 1000kV 油浸式变压器套管端子变形缺陷与处理 [J]. 变压器, 2022, 59(6): 70－74.
MA Kai, ZHANG Haibin, GUO Zhenyu, et al. Analysis and treatment of a 1000kV oil-immersed reactor bushing acetylene exceeding standard [J]. Transformer, 2022, 59(6): 70－74. (in Chinese)

[3] 赵莉华, 蔡维哲, 黄小龙, 等. 换流变阀侧套管振动模态及其法兰根部应力研究 [J]. 振动与冲击, 2021, 40(13): 201－209.
ZHAO Lihua, CAI Weizhe, HUANG Xiaolong, et al. Vibration mode and flange root stress of side bushing of converter transformer valve [J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(13): 201－209. (in Chinese)

[4] 陈钜栋, 江军, 杨小平, 等. 油浸式高压套管局部放电非接触式特高频检测 [J]. 电力工程技术, 2021, 40(1): 147－154.
CHEN Judong, JIANG Jun, YANG Xiaoping, et al. Non-contact partial discharge detection of high voltage oil-impregnated-paper bushing based on UHF technology [J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(1): 147－154. (in Chinese)

[5] HE C, XIE Q, ZHOU Y. Influence of flange on seismic performance of 1100 kV ultra-high voltage transformer bushing [J]. Earthquake Spectra, 2019, 35(1): 447－469.

[6] MA G L, XIE Q, WHITTAKER A. Dynamic interaction of high-voltage power transformer bushings, turrets, and tanks [J]. Earthquake Spectra, 2018, 34(1): 397－421.

[7] 赵莉华, 蔡维哲, 王仲. 换流变压器阀侧套管金属法兰疲劳寿命研究 [J]. 高电压技术, 2022, 48(12): 4842－4851.
ZHAO Lihua, CAI Weizhe, WANG Zhong. Research on fatigue life of metal flange of converter transformer's valve-side bushing [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(12): 4842－4851. (in Chinese)

[8] 孙宇晗, 程永锋, 卢智成, 等. 170 kV 中性点电抗器地震模拟振动台试验研究 [J]. 振动与冲击, 2018, 37(13): 229－234.
SUN Yuhan, CHENG Yongfeng, LU Zhicheng, et al. Earthquake simulation shaking table tests for a 170 kV neutral reactor [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(13): 229－234. (in Chinese)

[9] BAGHERI M, ZOLLANVARI A, NEZHIVENKO S. Transformer fault condition prognosis using vibration signals over cloud environment [J]. IEEE Access, 2018, 6: 9862－9874.

[10] ZOLLANVARI A, KUNANBAYEV K, BITAGHSIR S A, et al. Transformer fault prognosis using deep recurrent neural network over vibration signals [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 2502011.

[11] 汲胜昌, 张凡, 钱国超, 等. 稳态条件下变压器绕组轴向振动特性及其影响因素 [J]. 高电压技术, 2016, 42(10): 3178－3187.
JI Shengchang, ZHANG Fan, QIAN Guochao, et al. Characteristics and influence factors of winding axial vibration of power transformer in steady-state operation condition [J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(10): 3178－3187. (in Chinese)

[12] HONG K X, JIN M, HUANG H. Transformer winding fault diagnosis using vibration image and deep learning [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(2): 676－685.

[13] 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]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(5): 1088－1095. (in Chinese)

[14] 李沂新, 贾云飞, 杨欣颐, 等. 基于典型振动规律的干式变压器机械状态诊断 [J]. 电力工程技术, 2023, 42(5): 10－19.
LI Yixin, JIA Yunfei, YANG Xinyi et al. Typical vibration laws based diagnostic of dry-type transformer mechanical states [J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(5): 10－19. (in Chinese)

[15] CHELIMILLA N, CHINTHAPENTA V, KALI N, et al. Review on recent advances in structural health monitoring paradigm for looseness detection in bolted assemblies [J].

Structural Health Monitoring, 2023, 22(6): 4264 − 4304.

[16] 卓德兵, 曹晖. 基于小波时频图与轻量级卷积神经网络的螺栓连接损伤识别 [J]. 工程力学, 2021, 38(9): 228 − 238.
ZHUO Debing, CAO Hui. Damage identification of bolt connections based on wavelet time-frequency diagrams and lightweight convolutional neural networks [J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(9): 228 − 238. (in Chinese)

[17] 王慧, 王乐, 田鑫海. 基于相关函数矩阵及卷积神经网络的结构健康监测研究 [J]. 工程力学, 2023, 40(5): 217 − 227.
WANG Hui, WANG Le, TIAN Xinhai. Structural health monitoring based on correlation function matrix and convolutional neural network [J]. Engineering Mechanics, 2023, 40(5): 217 − 227. (in Chinese)

[18] BRØNS M, PLAUGMANN A, FIDLIN A, et al. Coupling effects with vibration-based estimation of individual bolt tension in multi-bolt structures [J]. Journal of Sound and Vibration, 2022, 528: 116873.

[19] NGUYEN T C, HUYNH T C, YI J H, et al. Hybrid bolt-loosening detection in wind turbine tower structures by vibration and impedance responses [J]. Wind and Structures, 2017, 24(4): 385 − 403.

[20] HUDA F, KAJIWARA I, HOSOYA N, et al. Bolt loosening analysis and diagnosis by non-contact laser excitation vibration tests [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013, 40(2): 589 − 604.

[21] LUO J Y, ZHENG F Y, SUN S L. A few-shot learning method for vibration-based damage detection in civil structures [J]. Structures, 2024, 61: 106026.

[22] 张敏照, 王乐, 田鑫海. 基于内积矩阵及卷积自编码器的螺栓松动状态监测 [J]. 工程力学, 2022, 39(12): 222 − 231.
ZHANG Minzhao, WANG Le, TIAN Xinhai. Bolt loosening state monitoring based on inner product matrix and convolutional autoencoder [J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(12): 222 − 231. (in Chinese)

[23] SCHWARZ B J, RICHARDSON M H. Introduction to operating deflection shapes [J]. CSI Reliability Week, 1999, 10: 121 − 126.

[24] SAMPAIO R P C, MAIA N M M, ALMEIDA R A B, et al. A simple damage detection indicator using operational deflection shapes [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016, 72/73: 629 − 641.

[25] 成大先. 机械设计手册 (第 2 卷) [M]. 5 版. 北京: 化学工业出版社, 2008: 69 − 71.
CHENG Daxian. Handbook of mechanical design (Vol. 2) [M]. 5th ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2008: 69 − 71. (in Chinese)

[26] 张凡, 吴书煜, 徐征宇, 等. 变压器绕组非线性动力学模型及多次短路冲击下的振动特征 [J]. 高电压技术, 2022, 48(12): 4882 − 4892.
ZHANG Fan, WU Shuyu, XU Zhengyu, et al. Nonlinear vibration model of transformer windings and their vibration characteristics during multiple short circuits [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(12): 4882 − 4892. (in Chinese)

[27] 刘胜军, 孙志鹏, 沈辰, 等. 基于振动频谱分析和总谐波畸变率的电力变压器故障诊断方法研究 [J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(3): 86 − 91.
LIU Shengjun, SUN Zhipeng, SHEN Chen, et al. Research on fault diagnosis of power transformers based on spectral analysis of vibration signals and total harmonic distortion [J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(3): 86 − 91. (in Chinese)