

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108185

激振-拾振距离对 220 kV 瓷支柱绝缘子 振动检测的影响研究*

宗方蕊, 万书亭, 李娜, 豆龙江

(华北电力大学 河北省电力机械装备健康维护与失效预防重点实验室 保定 071003)

摘要:为解决双节瓷支柱绝缘子的振动检测问题,以 220 kV 串联瓷支柱绝缘子为研究对象,采取 SolidWorks 软件建模并导入 ANSYS 软件中,设置模型参数计算分析;验证了通过振动声学法检测串联双节瓷支柱绝缘子的可行性,同时探究了激振-拾振距离及拾振点在下法兰底端的具体位置对绝缘子检测精度的影响,得到其一般性规律,通过搭建 220 kV 绝缘子实验台对仿真得到的规律进行验证;最终结论表明,激振-拾振距离对瓷支柱绝缘子的振动检测结果存在影响,对于双节支柱绝缘子,当激振点与拾振点位于通过下法兰中心的同一直线上时,关于下法兰中心对称的两个拾振点所采集信号表现出的频谱特征不随激振-拾振距离变化而变化,并根据实验结果得出型号为 B03.8-1 的 220 kV 双节瓷支柱绝缘子的最佳激振-拾振距离为 35 mm。

关键词:瓷支柱绝缘子;有限元分析;振动声学检测;激振-拾振距离

中图分类号: TM216 TH165+.3 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4010

Research on the influence of vibration-pickup distance on vibration detection of 220 kV porcelain post insulator

Zong Fangrui, Wan Shuting, Li Na, Dou Longjiang

(Hebei Key Laboratory of Electric Machinery Health Maintenance & Failure Prevention, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: To solve the problem of vibration detection of double-section post porcelain insulators, this study takes 220 kV series post porcelain insulators as the research object. The SolidWorks software is utilized to model and import them into ANSYS software to set the model parameter calculation and analysis. The detection feasibility of porcelain insulators with series double-section posts by vibroacoustic is verified. Meanwhile, the influence of the vibration-picking distance and the specific location of the vibration pickup point at the bottom of the lower flange on the detection accuracy of the insulators is studied. The general rules are obtained. The achieved simulation rules are verified by building a 220 kV insulator test bench. The final conclusion shows that the excitation-pickup distance has an impact on the vibration detection results of porcelain pillar insulator. For double-section post insulators, when the excitation point and the pick-up point are on the same straight line passing through the center of the lower flange, the frequency spectrum characteristics of the signals collected by the two symmetric pick-up points on the blue center do not change with the change of the excitation pick-up distance. According to the experimental results, it is concluded that the model B03.8-1 220 kV double-section porcelain pillar insulator is the best. The optimal excitation-the pick-up distance is 35 mm.

Keywords: porcelain post insulator; finite element analysis; resonance frequency; vibration-pickup distance

0 引言

支柱绝缘子是变电站中一种重要的绝缘设备,近年

来,电网系统接连发生多起运行中的支柱绝缘子事故(包括折断故障、瓷体裂纹故障及伞裙炸裂故障等),给操作人员的人身安全及电力系统的正常运行带来了很大的隐患^[1]。因此,能否有效地检测瓷支柱绝缘子中的裂纹、气

收稿日期:2021-06-30 Received Date: 2021-06-30

* 基金项目:国家自然科学基金(51777075)、中央高校基本科研业务费专项(2020MS110)项目资助

孔等机械故障,并实时更换,是能否保证瓷支柱绝缘子稳定运行的关键^[2]。

目前针对瓷支柱绝缘子裂纹检测的主流方法包括超声波检测法、红外热波检测法、紫外成像检测法及振动声学检测法等方法^[3-5]。其中,超声波检测法的检测精度最高,但由于其操作难度大、检测单根绝缘子所用时间长且必须在断电条件下作业,难以适应大范围定期巡检的实际需求^[6-7];红外热波检测法及紫外成像检测法均可在带电条件下作业,但前者检测结果易于随温度发生变化^[8-9],后者受制于其作用机理,对于瓷柱体距离高压端较远无法产生晕电压的位置存在检测盲区^[10-11]。振动声学检测法是近年来一种新兴的检测方法,其优势在于检测时间短,可带电作业,仪器设备便携且操作简单。该领域内最早由俄罗斯科学家研究出手持振动声学检测设备,通过对绝缘子法兰盘底部施加激励,利用接收端得到的频域信号生成的功率谱与完好绝缘子的功率谱对比评定绝缘子机械性能及出现裂纹的具体位置。国内学者目前针对振动声学检测法对瓷绝缘子的研究已经进行了大量的仿真和试验,多数研究仅对单节绝缘子缺陷产生的宏观位置(靠近上或下法兰盘)对振动信号频率特性的影响进行了分析^[12]。现有的关于振动声学法检测瓷支柱绝缘子检测精度影响因素的研究一般针对绝缘子所处的实际检测环境及裂纹自身特征展开^[13-15],仅有部分研究对 110 kV 单节瓷支柱绝缘子的激振-拾振距离提出过说明。

激振-拾振距离是指在声学振动检测方法中,采用单点激振、单点拾振的方案时,所选择的激振器与被测物体接触点到拾振器与被测物体接触点之间的距离。这种测量方案适用于轴类结构,对于局部微小缺陷比较敏感。文献[16]中仅考虑激励点位置对绝缘子频率特性产生的影响,将激励点选取在下法兰边缘及端面,发现当激励点位于下法兰端面中心时,无法根据响应信号的频谱特性正确判断绝缘子的机械性能^[16],这说明关于支柱绝缘子激振-拾振距离对振动信号故障特征的影响需要更深入的研究。

综上所述,本文针对激振-拾振距离对 220 kV 双节瓷支柱绝缘子振动检测的影响展开研究。首先使用 SolidWorks 软件对 220 kV 瓷支柱绝缘子进行建模并导入 ANSYS 软件中实现仿真分析,探讨不同激励模式及激振-拾振距离与振动检测结果间的联系,再根据实际工况搭建试验台,获取绝缘子在锤击及白噪声激励下的振动数据样本,结合仿真研究的结果,得出激振-拾振距离对双节瓷支柱绝缘子影响的一般性规律及最佳的激振-拾振距离。

1 瓷支柱绝缘子振动声学检测的基本原理

瓷支柱绝缘子机械强度与频率特性紧密相关。在计算中将绝缘子看做一端施加固定约束,另一端为非约束态的柱装置^[17],推导可得该振动系统的固有频率与其频率特性存在相同的自变量,其中随着缺陷产生而发生显著变化的是危险截面的惯性矩,其固有振动频率可写成式(1)的形式^[18]。

$$\omega = \frac{k^2}{L^2} \cdot \frac{\sqrt{EI}}{\mu} \quad (1)$$

式中: ω 为绝缘子固有振动频率; L 为绝缘子柱装置长度; μ 为绝缘子柱装置的单位长度质量; k 为克雷洛夫方程式的根; E 为材料弹性模量; I 为绝缘子柱装置危险截面的惯性矩。

瓷绝缘子的损坏程度可表示为缺陷绝缘子与完好绝缘子的极限载荷之比如式(2)所示。

$$\frac{P_1}{P_0} = \frac{I_1}{I_0} = \left(\frac{\omega_{i1}}{\omega_{i0}} \right)^2 \quad (2)$$

式中: P_0 为完好绝缘子极限载荷; P_1 为缺陷绝缘子极限载荷; I_0 为完好绝缘子危险截面的惯性矩; I_1 为缺陷绝缘子危险截面的惯性矩; ω_{i0} 为完好绝缘子自有振动频率; ω_{i1} 为缺陷绝缘子自由振动频率。由式(1)可知,当缺陷产生时,由于危险截面惯性矩的变化,绝缘子固有频率会随之发生改变,而绝缘子的固有频率与其极限载荷之间存在式(2)所表示的关系,因此可以由检测绝缘子的固有频率变化来判断绝缘子的极限载荷是否发生变化,从而判断其机械特性是否发生改变。

2 激振-拾振距离对瓷支柱绝缘子振动检测影响的仿真研究

2.1 220 kV 瓷支柱绝缘子建模

为了更好地探究瓷绝缘子发生缺陷前后振动响应特性的变化情况,在 SolidWorks 中对两节串联型号为 B03.8-1 的 110 kV 瓷支柱绝缘子实现建模,单节绝缘子主要包含上法兰、下法兰、上下法兰的水泥胶合层及瓷体五部分。将建立好的单节绝缘子模型通过螺栓实现装配,再将两节 110 kV 绝缘通过螺栓连接实现串联,得到仿真所需的 220 kV 支柱瓷绝缘子。仿真得到的双节瓷支柱绝缘子模型如图 1 所示,对底部施加固定约束一侧的元件命名为下元件,自由端一侧的元件命名为上元件。对下元件下法兰底部 4 个螺栓孔施加固定约束,对两节绝缘子连接处的螺栓孔及下元件下法兰螺栓孔内侧面设置 2 kN 的预紧力。绝缘子各部分材料特性如表 1 所示,

设置绝缘子上、下缺陷分别在瓷柱距上、下法兰底端 20 mm 处,深度 10 mm,宽度 10 mm,具体下故障裂纹如图 2(b)所示。

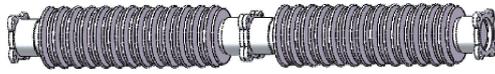


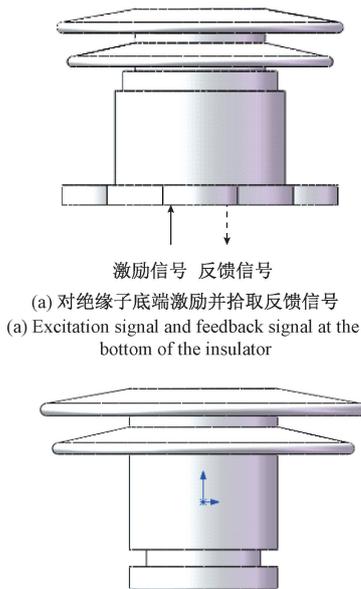
图1 双节支柱绝缘子仿真模型

Fig.1 Simulation model of the double-section post insulator

表1 绝缘子各部件材料力学特性

Table 1 Material mechanical properties of each part of insulator

材料属性	弹性模量/GPa	泊松比	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
陶瓷主体	80	0.31	2 500
上、下法兰及螺栓	200	0.30	7 800
水泥胶合层	26	0.30	2 300



(a) 对绝缘子底端激励并拾取反馈信号
(a) Excitation signal and feedback signal at the bottom of the insulator

(b) 下法兰裂纹示意图(仅瓷体)
(b) Schematic diagram of the crack of the lower flange (only the porcelain part)

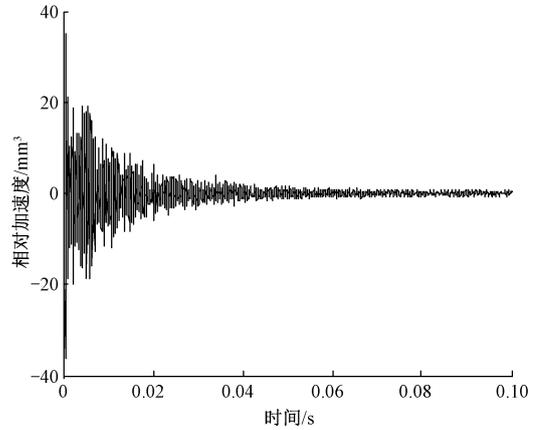
图2 下法兰底端加载及裂纹位置示意图

Fig.2 Schematic diagram of loading and crack position at the bottom of the lower flange

2.2 激励模式对振动检测结果影响分析

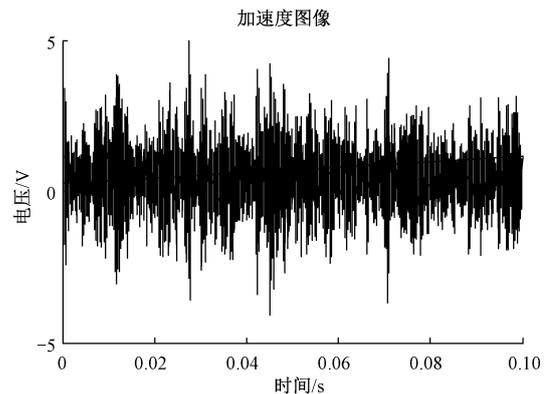
为了更直观地得到缺陷绝缘子频率特征的变化,首先对双节绝缘子模型实现模态分析,再将模态分析的结果导入 workbench 中的瞬态分析模块进行下一步处理。此处采用单点激励、单点测量的方案进行分析,激励方式分为模拟锤击的脉冲信号激励和白噪声激励,两种仿真

下完好双节绝缘子的加速度时域图如图 3 所示。其中模拟锤击的力设置为 200 N,模拟白噪声带宽为 40 dB。分析步长均设置为 0.000 02 s,时长 0.1 s,采样频率 50 kHz,采样点数 5 000 点,所选取的拾振点距离激振点 55 mm,激振点和拾振点均位于下法兰边缘。



(a) 模拟锤击激励时域图

(a) Time-domain diagram of simulated hammering excitation



(b) 模拟白噪声激励时域图

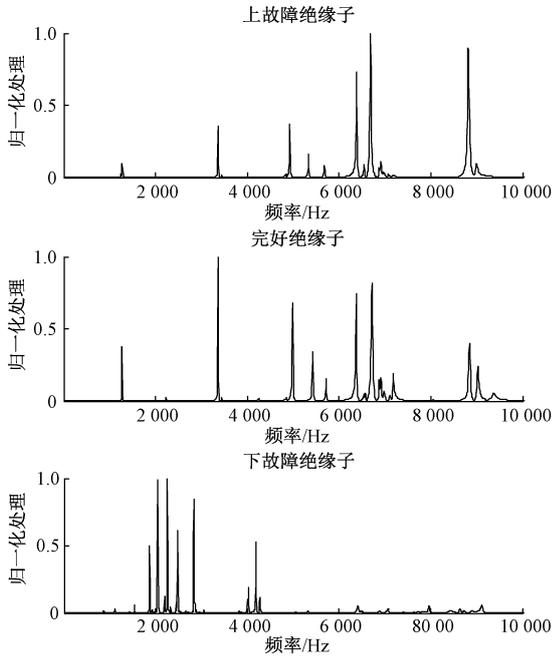
(b) Time-domain diagram of simulated white noise excitation

图3 完好绝缘子的两种振动信号时域图

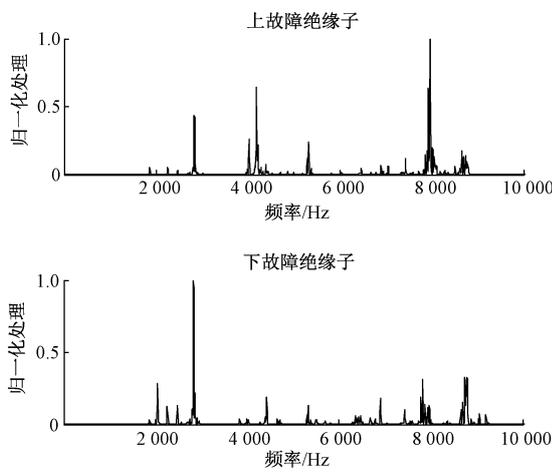
Fig.3 Time-domain diagrams of two vibration signals of intact insulators

图 4 为经过归一化处理后的功率谱结果,分析可得: 1)模拟锤击的仿真条件下,激励下元件下法兰底侧边缘得到的完好双节瓷支柱绝缘子的固有频率为 3 720 Hz;同时当故障位于下元件下法兰附近时,双节瓷支柱绝缘子的固有频率左移至 2 000 Hz 附近,波峰较为杂乱,位于 3 720 Hz 附近的峰值降低但未完全消失;当故障位于上元件上法兰附近时,固有频率右移至 6 680 Hz,位于 3 720 Hz 的峰值几乎完全消失,同时在 8 820 Hz 附近出现略低于最高峰的峰值。2)模拟白噪声激励的条件下,激励下元件下法兰底侧边缘得到的完好双节瓷支柱绝缘子的固有频率为 4 126 Hz,同时在 4 012 Hz 附近存在一个超过主峰 1/2 的较低峰值;当下元件下法兰附近出现

故障时,固有频率峰值左移至 2 430 Hz 附近;当上元件上法兰附近出现故障时,与对完好绝缘子检测到的功率谱密度图相比,最高峰峰值右移至 8 019 Hz。



(a) 模拟锤击得到的功率谱密度图
(a) Power spectral density diagram obtained by simulated hammering



(b) 模拟白噪声得到的功率谱密度图
(b) Power spectral density map obtained by simulating white noise

图 4 模拟锤击及白噪声激励下元件下法兰得到的功率谱密度图

Fig. 4 Power spectrum density graph obtained by simulating hammering and white noise excitation of the lower flange of the component

对以上结果进行分析可得,在相同的激励方案下,不同的激励方式对同一绝缘子激励得到的固有频率的特征值基本一致,相差在几百 Hz 以内,符合误差范围,且均表

现为相对于完好绝缘子,下故障时共振频率带左移,上故障时共振频率带右移的现象,不影响对绝缘子故障特性的判定;即绝缘子的故障情况可以通过频率特性反映。在后续对测振-激振距离的仿真分析中首先选择锤击作为主要激励方式。

2.3 测振-激振距离对振动检测影响分析

下面将激励点选取在下法兰边缘,取激振-拾振距离由 20 mm 依次递加 30 mm 到 140 mm,共选择 5 组拾振点并采集信号。拾取点与激励点在通过下法兰中心的同一条直线上,激振方案如图 5 所示,其中拾取点 1 与点 5、点 2 与点 4 关于下法兰中心对称,点 3 位于下法兰中心,模拟锤击激励得到的结果如图 6 所示。

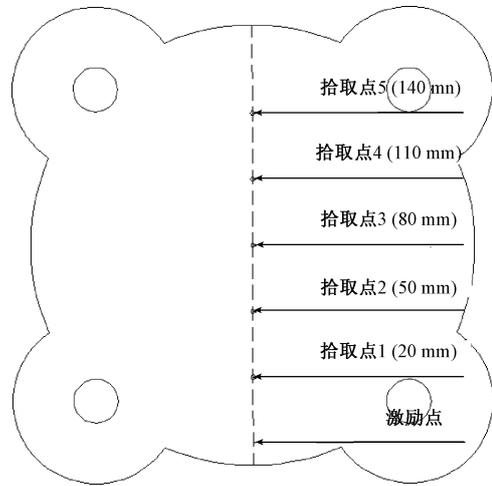
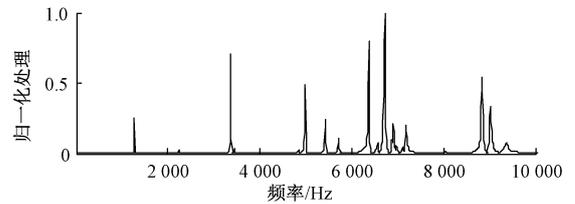
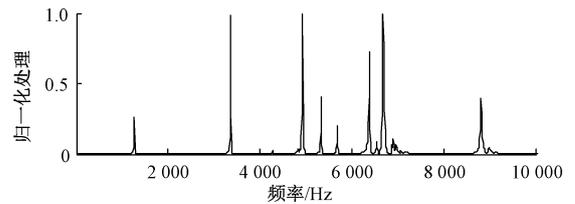


图 5 不同激振-拾振距离的拾取点

Fig. 5 Pick-up points for different excitation-pickup distances



(a) 激振-拾振距离 20 mm
(a) Excitation-vibration pickup distance 20 mm



(b) 激振-拾振距离 50 mm
(b) Excitation-vibration pickup distance 50 mm

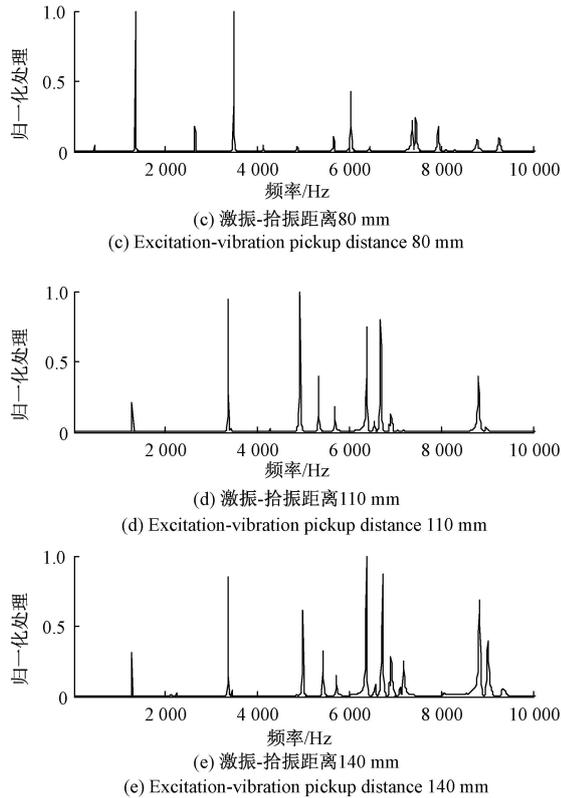


图6 不同激振-拾振距离下仿真模拟锤击完好绝缘子结果对比

Fig. 6 Comparison of simulation results of hammering intact insulators under different excitation-pickup distances

分析图6中所得仿真结果可发现:1)当激振-拾振距离为50和110 mm时,拾取点所采集到的加速度信号经MATLAB计算功率谱密度后所得到的结果近似;而激振-拾振距离分别为20和140 mm的拾取点所得到的功率谱密度图近似;这两组点表现出的共同特征是:分别关于下法兰中心对称并位于通过下法兰中心的同一直线上,且相对螺栓的距离一致。2)当拾取点在中心时,由拾取点3所得结果可发现,相较其相邻拾振点,功率谱密度图显示在1 279 Hz处出现新的峰值,检测结果的性质发生改变。3)比较拾取点1和拾取点2的结果可发现,当拾取点由边缘向中心移动时,位于3 360和4 930 Hz处的峰值明显上升,可初步判断是由于拾取点与下法兰中心的相对位置导致的频谱特征变化,即对于双节支柱绝缘子,当激振点与拾振点位于通过下法兰中心的同一直线上,改变激振-拾振距离但两个测振点关于下法兰呈中心对称关系时,所采集信号表现出的频谱特征几乎不发生变化。

在对上、下故障的绝缘子进行仿真时,本文所述激振-拾振距离对绝缘子振动特性的影响规律仍成立。采用的缺陷参数为:上、下缺陷分别在瓷柱距上、下法兰底端20 mm处,深度10 mm,宽度10 mm。改变裂纹特征继

续进行仿真时的情况分为两组:1)在仿真中不改变缺陷形状及宽度,设置缺陷深度为20~50 mm按照缺陷深度每10 mm递增,采用同一组激励方案进行锤击仿真,得到的功率谱密度图中固有频率峰值所在位置不变,仅峰值高度发生变化,缺陷深度增加时峰值高度也会增加,但固有频率数值不发生改变。2)在仿真中不改变缺陷形状及深度,设置缺陷宽度为20~50 mm按照缺陷深度每10 mm递增,采用同一组激励方案进行锤击仿真,得到的功率谱密度图中固有频率峰值所对应频率会发生改变,当缺陷宽度增加时,下故障绝缘子固有频率峰值左移,上故障绝缘子固有频率峰值右移,得到的检测结果随着缺陷宽度的增加更为明显。但在以上提到的裂纹特征变化后,本文所述激振-拾振距离对绝缘子振动特性的影响规律仍成立。

在仿真过程中发现,当拾取点与激励点不位于下法兰中心圆的同一半径上时,如图7中拾取点6所在位置激励得到的结果与图6中(a)、(e)并非完全近似,考虑到可能是该拾取点与拾取点1、拾取点5相比,与螺栓孔的相对距离不同,受螺栓预紧力的影响不同;则此一般性规律成立的前提是这两个拾取点相对其附近螺栓孔的距离一致。

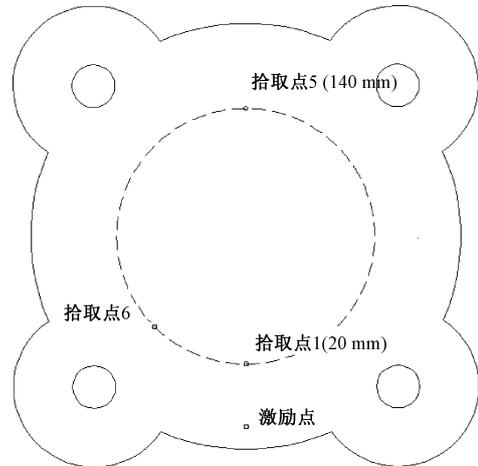


图7 选择同一激励点对到下法兰边缘距离相等的拾取点激励示意图

Fig. 7 The same excitation point pair selection to the pick-up point excitation diagram with the same distance from the edge of the lower flange

3 激振-拾振距离对瓷支柱绝缘子振动检测影响的试验研究

3.1 试验平台搭建

为了验证瓷支柱绝缘子在锤击模拟的阶跃信号激励下,拾取点与激励点距离对实验结果影响的一般性规律,

搭建双节瓷支柱绝缘子平台,如图 8(a)所示。实验系统包括白噪声信号发生器(Tektronix-3022B)、压电式加速度传感器、手持压电陶瓷激励装置、东华信号测试仪(DH5922 N),采用与采集仪配套的信号分析软件,该软件可将通过加速度传感器采集到的信号数据显示并导出。具体实验流程分为两组,区别是激励方式的不同:1)用力锤激励绝缘子下法兰边缘,压电式加速度传感器采集反馈信号后,通过动态信号测试仪将信号传输至计算机上的频谱分析软件,完成后处理得到绝缘子功率谱密度图。2)白噪声信号发生器将白噪声信号传递至压电陶瓷激励装置,通过压电陶瓷激励装置上的探针式传感器接收到反馈信号后,通过动态信号测试仪将信号传输至计算机上的频谱分析软件,完成后处理得到绝缘子功率谱密度图。动态信号测试仪设置采样频率为 50 000 Hz,采样点数 15 000,提取 1~10 kHz 频率范围内的信号采集结果进行分析。



(a) 双节瓷支柱绝缘子 (左)
(a) Double-section post insulator (left)



(b) 压电陶瓷激励装置
(b) Piezoelectric ceramic excitation device



(c) 白噪声信号发生器
(c) White noise signal generator



(d) 信号采集仪及力锤
(d) Signal acquisition instrument and hammer



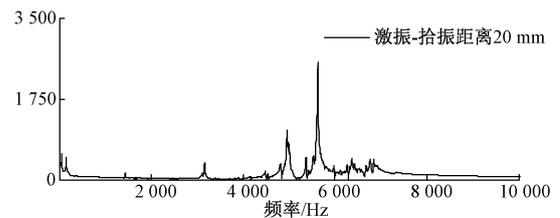
(e) 压电式加速度传感器
(e) Piezoelectric acceleration sensor

图 8 实验系统组成

Fig. 8 Experimental system composition

3.2 激振-拾振距离对瓷支柱绝缘子振动影响分析

首先根据图 5 中的方案,验证激振点到拾振点的距离对接收信号的影响,试验中采集的加速度数据经 MATLAB 处理后最终得到功率谱结果如图 9 所示。其中,随着激振-拾振距离的增加,功率谱密度图中最高峰值的变化规律与仿真结果基本一致,如图 10 所示,图中实线代表实验结果,虚线代表仿真结果。考虑到在实际锤击实验过程中手持力锤锤击的力的大小及入波角度难以保证每次测量时完全相同,因而距激励点较远端的拾振点得到的图像质量较差,但其最高峰值的变化规律与仿真结果是相符的。



(a) 激振-拾振距离 20 mm
(a) Excitation-vibration pickup distance 20 mm

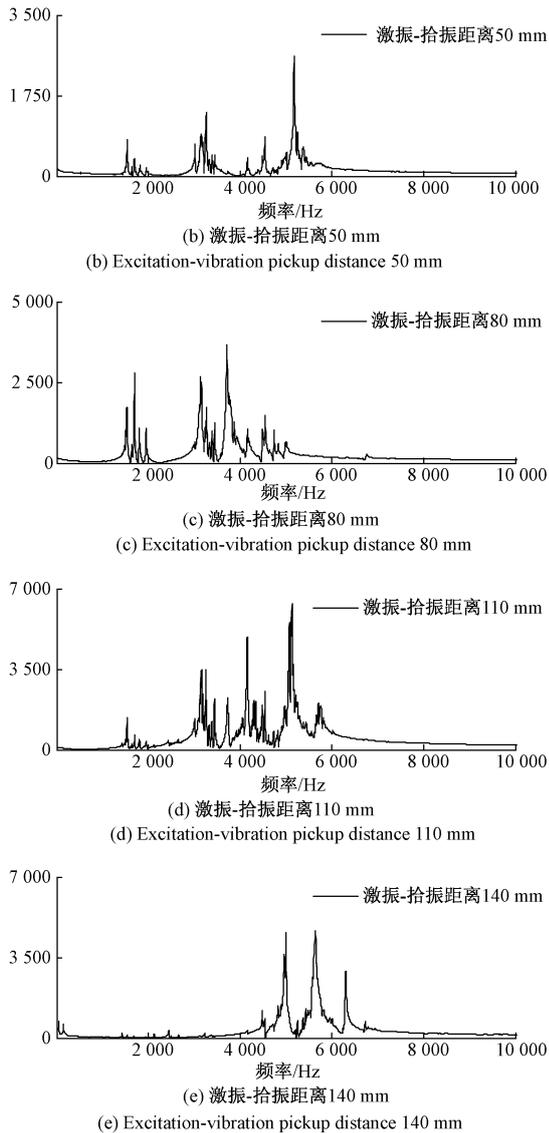


图9 不同激振-拾振距离下实验模拟锤击完好绝缘子结果对比

Fig.9 Comparison of experimental simulation results of hammering intact insulators under different excitation-pickup distances

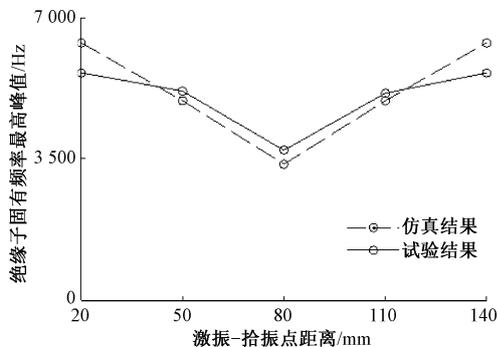


图10 不同激振-拾振距离下仿真及试验结果对比
Fig.10 Comparison of simulation and test results under different excitation-picking distances

值得注意的是,当拾取点位于下法兰中心时,如图9(c)所示,在1 693 Hz处出现新的较为明显的峰值,如果未考虑到激振-拾振方案对检测结果的影响,则可能根据图4(a)中的结果错误判定该绝缘子下法兰附近存在故障,这与仿真得到的结果是一致的。

3.3 激振-拾振最优距离

接下来对220 kV双节瓷支柱绝缘子的最佳激振-拾振距离进行探究,激振方案如图11所示,拟采集激振-拾振距离为35、45、55、65及75 mm时的频率响应信号,为排除拾取点与下法兰中心的相对位置对实验结果的影响,设置激振点、拾振点到下法兰边缘距离均为20 mm,将激振-拾振距离作为单一自变量进行探究。

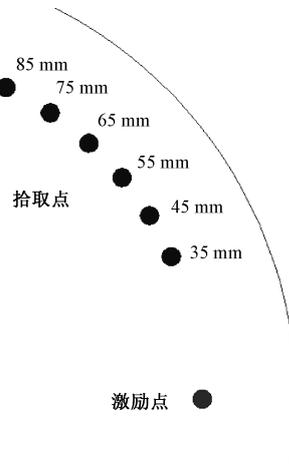


图11 不同激振-拾振距离的拾取点示意图

Fig.11 Schematic diagram of pick-up points for different excitation-pickup distances

考虑到上一节由于锤击激励的过程中锤击力的大小及入波角度难以保持一致对实验结果造成的影响,此处采用压电陶瓷激励装置,对绝缘子底部施加电压范围在±5 V的白噪声激励。由于压电式加速度传感器的探头与绝缘子表面具有一定的接触面积(约15 mm²),相邻10 mm的测量点采集到的数据近似,只选取激振-拾振距离在35、55及75 mm时采集到的反馈信号进行分析。

激振-拾振距离在35、55及75 mm时,上元件上法兰故障的220 kV瓷绝缘子功率谱响应曲线如图12所示,3组功率谱密度图中均在高频率区段(6~10 kHz)内出现明显波峰。其中,当激振-拾振距离为35 mm时,(3~6 kHz)频率区间内的峰值明显降低,接收信号反馈绝缘子上故障的效果最好,而当激振-拾振距离为75 mm时,(3~6 kHz)峰值较高,仅根据功率谱密度图很容易将该绝缘子判定为下故障。综合图13及表2中对下故障及完好绝缘子的检测结果,可确定该220 kV双节瓷支柱绝缘子的最佳激振-拾振距离为35 mm。

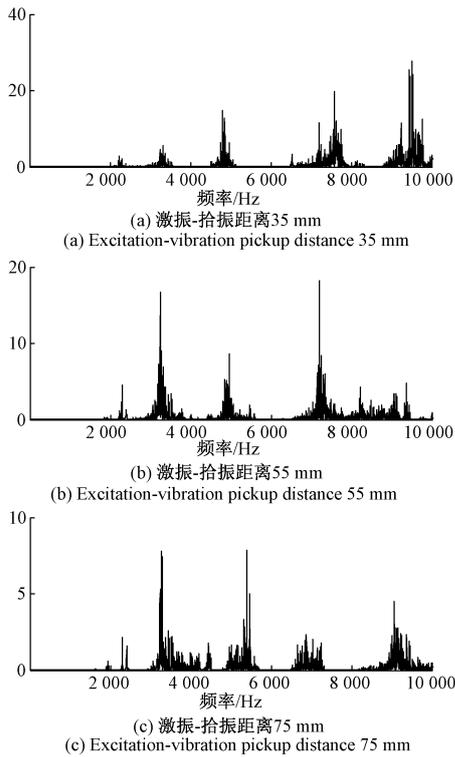


图 12 不同激振-拾振距离白噪声激励上故障绝缘子结果对比
Fig. 12 Comparison of the results of faulty insulators excited by white noise with different excitation-pickup distances

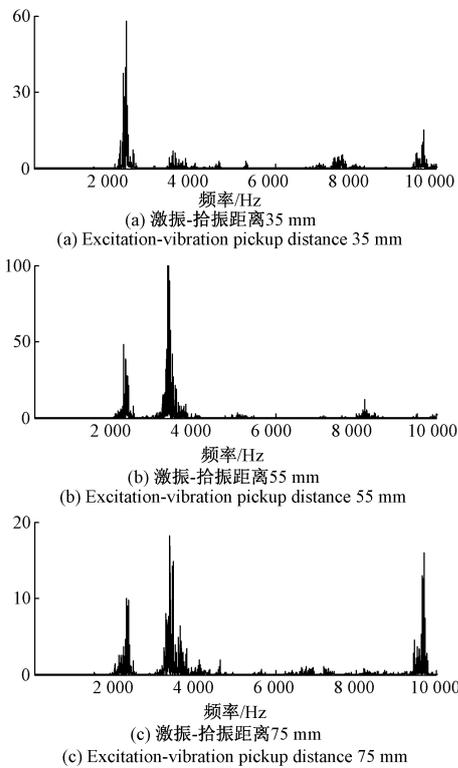


图 13 不同激振-拾振距离白噪声激励下故障绝缘子结果对比
Fig. 13 Comparison of the results of faulty insulators excited by white noise in different excitation-pickup distances

表 2 不同激振-拾振距离白噪声激励绝缘子试验结果汇总
(每种工况下至少试验 6 次,取连续 3 次相同的结果为该工况下的最终结果)

Table 2 Summary of test results of white noise excitation insulators with different excitation-pickup distances (at least six tests under each working condition, and the same result of three consecutive times is the final result under this working condition)

绝缘子机械状态	激振-拾振距离/mm	各频率区间内是否出现与最高峰之比大于 1/2 的峰值			功率谱能否正确反映绝缘子机械特性
		1~3 kHz	3~6 kHz	6~10 kHz	
上法兰故障	35	×	×	√	√
	55	×	√	√	√
	75	×	√	×	×
下法兰故障	35	√	×	×	√
	55	√	√	×	√
	75	√	√	√	×
完好	35	×	√	×	√
	55	×	√	×	√
	75	√	√	×	×

4 结 论

本文以 220 kV 串联高压瓷支柱绝缘子为研究对象,针对激振-拾振距离对绝缘子检测精度的影响进行了一系列仿真及试验的研究。

1) 对于双节支柱绝缘子,当激振点与拾振点位于通过下法兰中心的同一直线上时,关于下法兰中心对称的两个拾振点所采集信号表现出的频谱特征不随激振-拾振距离变化而变化。

2) 当拾取点位于下法兰中心时,完好绝缘子的检测结果在低频率区间(1~3 kHz)内均出现新的共振频率带,不能正确反映绝缘子机械特性。

3) 本文对型号为 B03.8-1 的 220 kV 非工作条件下的双节串联绝缘子进行了不同故障程度的仿真及实验分析,得到其最佳激振-拾振距离为 35 mm。后续可根据不同绝缘子的型号及电压等级,针对 220 kV 瓷支柱绝缘子的激振-拾振距离制定更为详细的标准。

参考文献

[1] 秦楷,赵坚. 支柱瓷绝缘子损伤检测技术的研究现状[J]. 绝缘材料,2015,48(2):6-11.
QIN K, ZHAO J. Research status of damage detection technology for pillar porcelain insulators [J]. Insulating

- Materials, 2015, 48(2): 6-11.
- [2] 黄珊珊, 钱政. 智能电网中输电线路绝缘子在线检测方法综述[C]. 中国仪器仪表学会, 2010: 5.
HUANG SH SH, QIAN ZH. Overview of on-line detection methods for transmission line insulators in smart grids[C]. China Instrumentation Society, 2010: 5.
- [3] 侯宇嘉, 杨文良, 王琼, 等. 高压瓷支柱绝缘子断裂原因及缺陷检测技术分析[J]. 内蒙古电力技术, 2019, 37(1): 71-74.
HOU Y J, YANG W L, WANG Q, et al. Analysis of fracture causes and defect detection technology of high-voltage pillar porcelain insulators [J]. Inner Mongolia Electric Power Technology, 2019, 37(1): 71-74.
- [4] 刘冠辰, 王孟, 郑欣, 等. 基于振动声学对瓷支柱绝缘子强度的检测技术[J]. 高压电器, 2015, 51(9): 44-48.
LIU G CH, WANG M, ZHENG X, et al. Detection technology of porcelain pillar insulator strength based on vibro-acoustics[J]. High Voltage Electrical Apparatus, 2015, 51(9): 44-48.
- [5] 周亮, 杨浩, 何为, 等. 高压绝缘子紫外在线检测器研制[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(1): 108-113.
ZHOU L, YANG H, HE W, et al. Development of high-voltage insulator UV on-line detector [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(1): 108-113.
- [6] 蒋云, 王维东, 蔡红生, 等. 瓷支柱绝缘子及瓷套超声波检测工艺方法研究[J]. 无损探伤, 2009, 33(6): 6-13.
JIANG Y, WANG W D, CAI H SH, et al. Research on ultrasonic testing technology of pillar porcelain insulator and porcelain sleeve[J]. Nondestructive Testing, 2009, 33(6): 6-13.
- [7] 宋靖瑶. 瓷质绝缘子超声波探伤检测技术的应用[J]. 石油石化节能, 2020, 10(3): 15-17, 8.
SONG J Y. Application of ultrasonic flaw detection technology for porcelain insulators [J]. Energy Conservation in Petroleum and Petrochemical, 2020, 10(3): 15-17, 8.
- [8] 王黎明, 刘立帅, 梅红伟, 等. 基于脉冲红外热波技术的瓷支柱绝缘子无损检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(24): 7359-7366, 7450.
WANG L M, LIU L SH, MEI H W, et al. Non-destructive testing method for pillar porcelain insulators based on pulsed infrared thermal wave technology [J]. Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering, 2017, 37(24): 7359-7366, 7450.
- [9] 李佐胜, 姚建刚, 杨迎建, 等. 基于 MAP 估计的复小波域局部自适应绝缘子红外热像去噪方法[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(10): 2070-2075.
LI Z SH, YAO J G, YANG Y J, et al. Local adaptive insulator infrared thermal image denoising method based on MAP estimation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(10): 2070-2075.
- [10] 雷红才, 臧春艳, 蒋正龙, 等. 紫外成像法检测支柱绝缘子的破损缺陷[J]. 高压电器, 2009, 45(5): 87-91, 95.
LEI H C, ZANG CH Y, JIANG ZH L, et al. Ultraviolet imaging method to detect the damage of pillar insulators [J]. High Voltage Electrical Apparatus, 2009, 45(5): 87-91, 95.
- [11] MOROCUTTI T, BERG T, MUHR M. Developments of high voltage porcelain post-insulators [C]. IEEE International Symposium on Electrical Insulation (ISEI), San Juan PR, 2012: 10-13.
- [12] 张广兴. 瓷绝缘子振动声学检测方法研究及应用[D]. 保定: 华北电力大学, 2017.
ZHANG G X. Research and application of vibro-acoustic testing methods for porcelain insulators [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2017.
- [13] 张欣, 黄荣辉, 姚森敬, 等. 基于振动声学探伤技术的瓷支柱绝缘子测试方法研究[J]. 机械制造, 2014, 52(3): 73-75.
ZHANG X, HUANG R H, YAO S J, et al. Research on porcelain pillar insulator test method based on vibroacoustic testing technology [J]. Mechanical Manufacturing, 2014, 52(3): 73-75.
- [14] 焦敬品, 郑磊, 池永斌, 等. 基于随机振动响应谐振频率偏移的绝缘子无损检测方法[J]. 无损检测, 2012, 34(8): 17-21.
JIAO J P, ZHENG L, CHI Y B, et al. Non-destructive testing method for insulators based on random vibration response resonance frequency shift [J]. Non-destructive testing, 2012, 34(8): 17-21.
- [15] 闫帅, 胡冰, 王昆鹏, 等. 高压瓷支柱绝缘子仿真建模与有限元仿真分析[J]. 科技视界, 2018(29): 4-7.
YAN SH, HU B, WANG K P, et al. Simulation modeling and finite element simulation analysis of high-

voltage pillar porcelain insulators [J]. Science and Technology Vision, 2018(29): 4-7.

- [16] 张迺龙,陈大兵,方浩铭,等. 瓷支柱绝缘子的振动声学检测机理研究[J]. 红水河,2016,35(1):33-37.
ZHANG N L, CHEN D B, FANG H M, et al. Research on vibration acoustic testing mechanism of pillar porcelain insulators[J]. Hongshuihe, 2016, 35(1): 33-37.
- [17] 张欣,黄荣辉,姚森敬. 振动声学探伤方法对瓷支柱绝缘子进行检测的验证方法研究[J]. 华东电力,2013,41(9):1965-1967.
ZHANG X, HUANG R H, YAO S J. Research on the verification method of vibro-acoustic flaw detection method for porcelain pillar insulators [J]. East China Electric Power, 2013, 41(9): 1965-1967.
- [18] 张广兴,王永强,霍娜. 瓷绝缘子振动声学检测技术及应用[J]. 河北电力技术,2015,34(2):40-42,60.
ZHANG G X, WANG Y Q, HUO N. Vibro-acoustic testing technology and application of porcelain insulators[J]. Hebei Electric Power Technology, 2015, 34(2): 40-42,60.

作者简介



宗方蕊,2019 年于华北电力大学获得学士学位,现为华北电力大学机械工程系研究生,主要研究方向为输电线路工程。

E-mail: annie2012@sina.cn

Zong Fangrui received her B. Sc. degree from North China Electric Power University in 2019. She is currently a master student in the School of Mechanical Engineering at North China Electric Power University. Her main research interest is transmission line engineering.



万书亭(通信作者)分别在 1991 年、1994 年、2006 年于华北电力大学获得学士学位、硕士学位和博士学位,现为华北电力大学教授、博士生导师,主要研究方向为电气设备故障诊断。

E-mail:13582996591@139.com

Wan Shuting (Corresponding author) received his B. Sc. degree, M. Sc. degree and Ph. D. degree all from North China Electric Power University in 1991, 1994, and 2006, respectively. He is currently a professor and a Ph. D. advisor at North China Electric Power University. His main research interest is electrical equipment fault diagnosis.