

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.02.016

基于超声导波的盆式绝缘子缺陷检测方法激励点 优化设置研究

李阳¹, 唐琰¹, 周金旺¹, 杨建峰¹, 高恩广¹, 陈科达²,
王哲², 王健²

(1. 云南电网有限责任公司丽江供电局, 云南 丽江 674100; 2. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要: 盆式绝缘子的健康状况对电网建设和运行具有重要影响。文中对超声导波检测盆式绝缘子缺陷进行有限元仿真,研究了多种缺陷情况下超声导波检测盆式绝缘子的可行性,发现当缺陷尺寸小,距离激励点远,且偏移激励点与接收点连线所在垂直平面的角度较大时,信号衰减率小,检测效果不理想。为达到更好的检测效果,文中提出了一种超声导波激励点的优化设置方案:除常用的激励点位置外,在绝缘子表面增设一组激励点位置,对于在常用激励点位置处检测效果较差的缺陷,利用绝缘子表面的激励位置进行检测。搭建实验平台对该方案进行验证,优化方案接收信号衰减率将提高10%左右,检测效果提升明显。该优化方案可为基于超声导波的盆式绝缘子缺陷检测提供参考。

关键词: 盆式绝缘子; 缺陷检测; 超声导波; 激励点

Research on Optimal Setting of Excitation Points for Defect Detection Method of Insulating Spacer Based on Ultrasonic Guided Wave

LI Yang¹, TANG Yan¹, ZHOU Jinwang¹, YANG Jianfeng¹, GAO Enguang¹, CHEN Keda²,
WANG Zhe², WANG Jian²

(1. Lijiang Power Supply Bureau of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Yunnan Lijiang 674100, China; 2. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The health condition of insulating spacer has important influence on the construction and operation of power grid. In this paper, the finite element simulation of ultrasonic guided wave detection of the insulating spacer defect is carried out to study the feasibility of ultrasonic guided wave detection of the insulating spacer under various defect cases. It is found that when the defect size is small and the distance is far from the excitation point, and the angle of the vertical plane where the offset excitation point and the receiving point are located is large, the signal attenuation rate is small and the detection effect is not ideal. For achieving better detection effect, an optimal setting scheme of ultrasonic guided wave excitation points is proposed in this paper. In addition to the commonly used excitation points, a set of excitation points are added on the insulating spacer surface. As for the defects with weak detection effect at the commonly used excitation points, the excitation position on the insulating spacer surface is used for detection. The experimental platform is set up to verify the scheme. The received signal attenuation rate of the optimized scheme will be increased by about 10% and the detection effect will be significantly improved. The optimization scheme can provide reference for the defect detection of insulating spacer based on ultrasonic guided wave.

Key words: insulating spacer; defect detection; ultrasonic guided wave; excitation point

收稿日期:2025-07-18; 修回日期:2025-10-10

基金项目:云南电网有限责任公司科技项目(051400KK52220003)。

Project Supported by Science and Technology Project of Yunnan Power Grid Co., Ltd.(051400KK52220003).

0 引言

近几十年来,气体绝缘封闭组合开关柜(GIS)在国内外电力系统中得到了广泛应用。盆式绝缘子是GIS的重要组成部分,起到了绝缘、密封、固定的作用。然而,在绝缘子生产和运行过程中,由于制作工艺或老化等原因,绝缘子会出现表面裂纹、内部气泡等损伤,降低绝缘子性能,进而导致GIS故障和缺陷,影响电力系统安全可靠运行^[1-3]。

因此,对盆式绝缘子状态进行检测,预防由盆式绝缘子缺陷引起GIS故障是非常有必要的。目前应用于盆式绝缘子检测的方法主要有微波检测法、特高频检测法、脉冲电流检测法和超声导波检测法等。微波检测法快而灵敏,但参数检测易受温度、气压影响;特高频检测法抗电磁干扰能力较强,但造价昂贵;脉冲电流法可通过检测局部放电来判断有无缺陷,但容易受到电磁干扰^[4-7]。超声导波检测法是近几年较为新型的绝缘子缺陷检测方法。通过检测超声导波在盆式绝缘子中的传播特性,可以获取绝缘子几何和物理特征,对绝缘子缺陷进行检测和定位,并且具有抗电磁干扰、衰减小、灵敏度高、传播距离远的优点^[8-10]。

超声导波检测技术常用于管道、铁轨的缺陷检测,目前对超声导波检测技术的研究已十分完善。文[11-13]在导波机理和频散现象等理论的基础上,通过数值模拟与试验研究为管道、钢轨的检测提出了理论基础和技术方案;文[14-15]仿真模拟了导波不同模态对缺陷的灵敏度,分析了利用超声导波检测绝缘子损伤的可行性。

实际运行中,盆式绝缘子缺陷类型较多,尺寸、位置存在多样性。文中将分析超声导波在盆式绝缘子中的传播特性,通过有限元仿真软件搭建超声导波检测盆式绝缘子模型,验证多种缺陷情况下超声导波检测盆式绝缘子损伤的可行性,发现当缺陷尺寸小,距离激励点远,且偏移激励点与接收点连线所在垂直平面的角度较大时,有缺陷和无缺陷时接收信号幅值的衰减率较小,检测效果并不理想。因此,为达到更好地检测效果,文中结合仿真结果提出了超声导波激励点的优化设置方案,并通过实验验证了该方案的可行性。

1 超声导波检测盆式绝缘子仿真平台搭建

1.1 Lamb波检测原理

超声导波是超声波在介质不连续界面之间往

复反射,并进而引起复杂干涉和几何色散而形成的机械波。Lamb波是在薄板中传播由于板上下边界的反射而形成的传播形态相对固定的声波,通常也称“板波”。在Lamb波传播过程中,遇到如裂纹等缺陷时会发生反射等现象,产生不同的缺陷回波。通过比较有无缺陷时接收信号包含的信息,如波包幅值、频率成分等可以判定缺陷的存在,或者更进一步对缺陷进行定性、定量分析,进而实现对待检测件的无损检测与评价^[16-19]。

1.2 Lamb波激励信号选择

激励信号需要激发出对微小损伤敏感的Lamb波,从而在接收信号中观测损伤引起的波形变化。常见的激励信号有单频信号、窄带信号和宽频信号^[20]。单频信号激励的Lamb波频率分量简单,但对损伤不敏感;宽带信号产生的Lamb波对损伤较敏感,但频谱成分复杂;而窄带信号是激励领域在实验中首选的激励信号^[21-23]。

因此,文中使用窄带信号进行仿真和实验。信号时域表达式见式(1),根据文[24]取 N 为5最合适。信号频率则根据绝缘子的材料、厚度等参数来选择,信号时域幅值越大,Lamb波模式较少,则该频率越适合。

$$u(t) = 20 \left[H(t) - H\left(T - \frac{N}{f_c}\right) \right] \cdot \left(1 - \cos\frac{2\pi f_0 t}{N} \right) \sin 2\pi f_0 t \quad (1)$$

式(1)中: f_0 为信号频率; $H(t)$ 为赫维赛德阶梯函数; N 为周期数。

文中仿真中使用的盆式绝缘子参数见表1。激励信号的中心频率等参数,可以通过仿真、实验来选择^[25]。文中依据多次仿真所得信号幅值和衰减率选择合适的激励信号,仿真数据见表2。

表1 盆式绝缘子参数

Table 1 Parameters of basin insulator

参数	数值
密度/(g·mL ⁻¹)	1.20
杨氏模量/GPa	3.80
泊松比	0.38
厚度/mm	40.00

60~100 Hz 频率的激励信号下,接收信号峰值见表2。当激励信号频率为100 kHz时,接收信号峰值最大,导波幅值衰减率达13.3%,易于对缺陷进行识别。

因此,文中选择用中心频率100 kHz的5周期窄带激励信号进行仿真,导波信号波形见图1。

表2 不同激励信号下峰值衰减率
Table 2 Peak attenuation rate under different excitation signals

激励频率/kHz	无缺陷信号峰值/V	有缺陷信号峰值/V	峰值衰减率/%
60	9.86×10^{-6}	8.64×10^{-6}	12.1
80	10.05×10^{-6}	8.77×10^{-6}	12.5
100	10.23×10^{-6}	8.87×10^{-6}	13.4
120	10.12×10^{-6}	8.82×10^{-6}	12.7
140	9.93×10^{-6}	8.69×10^{-6}	11.9

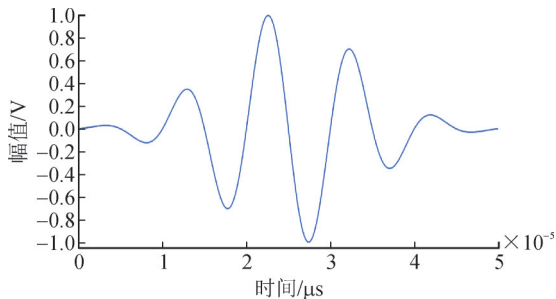


图1 导波信号波形

Fig. 1 Waveforms of guided wave signals

2 基于 Comsol 的超声导波检测盆式绝缘子缺陷仿真

2.1 基于超声导波的盆式绝缘子检测模型

使用有限元软件 Comsol 对超声导波检测盆式绝缘子进行仿真。经过简化的盆式绝缘子模型见图2,该简化不影响仿真结果。

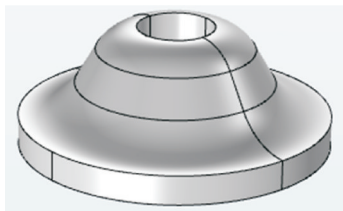


图2 盆式绝缘子模型

Fig. 2 Basin insulator model

设置A点为Lamb波信号激励点,设置B点为导波信号接收点,见图3。

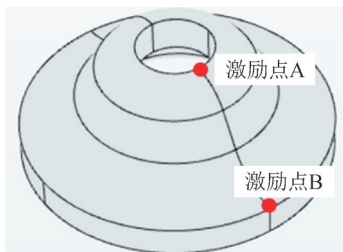


图3 导波激励点和接收点

Fig. 3 Excitation point and receiving point of guided wave

首先对Lamb波在无缺陷盆式绝缘子中的传播特性进行仿真,不同时刻Lamb波的传播情况见图4,

Lamb信号以激励点A为圆心向周围扩散,导波经过多次折反射后到达接收点B。

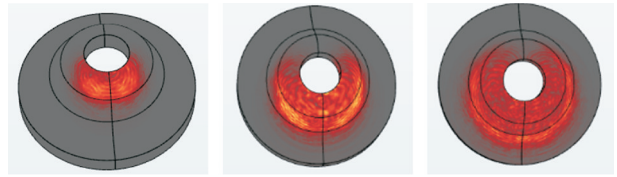


图4 50、80、100 μs 导波传播特性图

Fig. 4 Propagation characteristics of guided wave of 50 μs, 80 μs and 100 μs

接收点B处获得的导波信号波形见图5。利用传播距离和时间计算得到波速为1 000 m/s,计算可知第1个波包即为导波到达接收点的时间。第1个波包的幅值为10.2 μV。

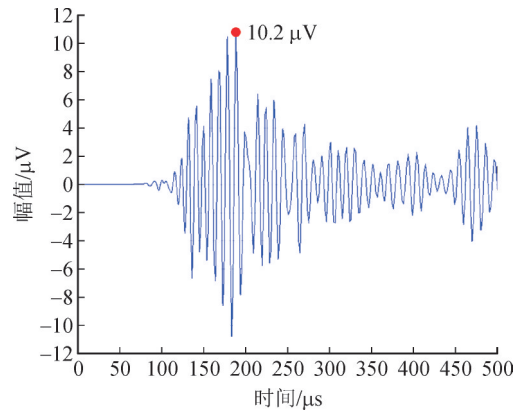
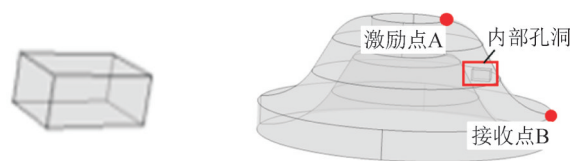


图5 完整盆式绝缘子接收信号

Fig. 5 Signal of complete basin insulator receiver

2.2 超声导波检测盆式绝缘子缺陷仿真

在盆式绝缘子内部设置17 mm×6.3 mm×5 mm的内部缺陷,见图6。



(a) 内部空洞模型

(b) 盆式绝缘子内部缺陷

图6 盆式绝缘子内部空洞模型

Fig. 6 Internal hole of basin insulator

重复上述仿真过程,在A点激励导波信号,在B点接收,得到导波信号波形见图7,峰值为8.92 μV。

经计算,导播幅值的衰减率为12.5%,说明当Lamb波传播路径上存在缺陷时,接收信号的能量会发生明显衰减,验证了超声导波检测盆式绝缘子缺陷的可行性,为实验提供了参考。

3 多种缺陷情况下超声导波检测的可行性仿真

第2节的仿真中,盆式绝缘子缺陷的位置和尺

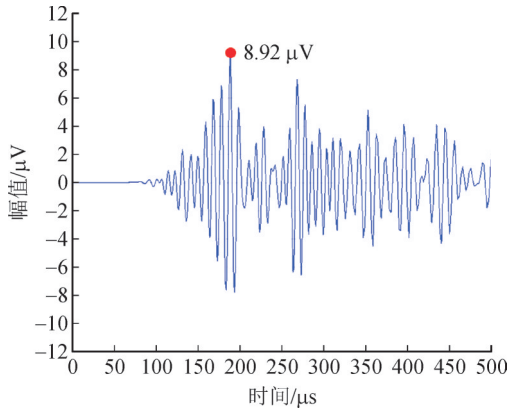


图7 内部孔洞盆式绝缘子B点接收到的信号

Fig. 7 Signal received at point B of the internal pot-type insulator

寸变化较单一。实际情况中盆式绝缘子的缺陷类型更为多样,比如表面裂纹和内部孔洞的尺寸、内部孔洞的位置及缺陷偏移激励点与接收点连线所在垂直平面的角度等充满不确定性。本节将对此进行仿真,以探究多种缺陷情况下超声导波检测盆式绝缘子的可行性。

3.1 裂纹和内部孔洞尺寸对超声导波检测效果的影响

分别在盆式绝缘子表面设置如图8裂纹和如图6内部孔洞,并多次改变盆式绝缘子表面裂纹和内部孔洞的尺寸进行仿真,得到信号衰减结果见表3,随着内部孔洞尺寸的增大,超声导波信号衰减率从12.5%增至32.4%,随着表面裂纹尺寸的增大,衰减率从7.14%增至33.6%。随着缺陷尺寸的增大,超声导波信号衰减率增大且变化明显,进一步验证了超声导波检测盆式绝缘子缺陷的可行性,体现出超声导波信号对盆式绝缘子缺陷的敏感性。

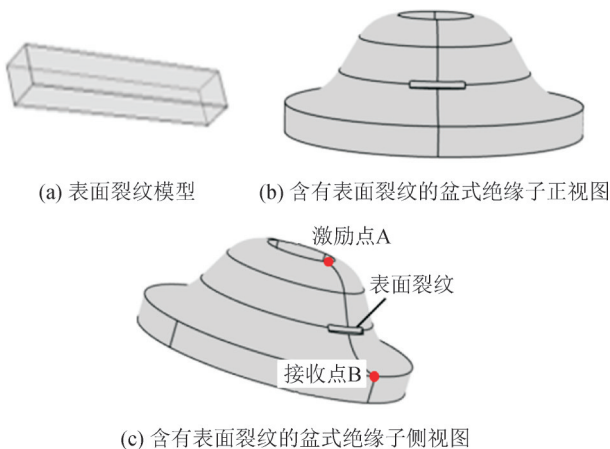


图8 表面裂纹

Fig. 8 Surface crack

为探究超声导波检测方法检测盆式绝缘子裂纹深度的精度,在盆式绝缘子表面设置如图8所示的表面裂纹,长×宽×深为50 mm×8 mm×4 mm,并多次改变裂纹深度进行仿真,得到结果见表4。

表3 不同缺陷下信号衰减率

Table 3 Signal attenuation rate under different defects

缺陷类型	缺陷尺寸 (长×宽×深)/mm	导波信号衰减率/%
内部孔洞	17.0×6.3×5.0	12.50
	17.0×7.0×5.0	21.60
	17.0×7.7×5.0	32.40
表面裂纹	60.0×8.0×2.0	33.60
	50.0×5.0×2.0	7.14

表4 不同裂纹深度下信号衰减率

Table 4 Signal attenuation rate at different crack depths

表面裂纹深度/mm	衰减率/%
0.5	2.8
1.0	6.3
2.0	17.8
4.0	24.8
6.0	29.1
9.0	49.4

分析表4结果发现,当裂纹深度浅至0.5 mm时,导波信号衰减率低至2.8%,导波检测效果严重下降;当导波深度大于1 mm时,导波信号衰减较为明显,检测效果较好,且随裂纹深度增加,超声导波检测效果越来越好。由此可知,当裂纹深度大于1 mm时,导波衰减率大于6.3%,超声导波检测效果相对明显。

3.2 缺陷至激励点距离对超声导波检测效果的影响

绝缘子内部缺陷到超声导波信号激励点的距离也可能影响超声导波检测效果,见图9,在绝缘子内部Q₁-Q₃这三个点分别设置除位置外完全相同的内部孔洞缺陷,距离导波信号激励点位置由近及远,对每个位置分别进行仿真,得到结果见表5。

由表5可知,缺陷尺寸不变,Q₁-Q₃超声导波信号衰减率下降,检测效果下降,这表明若缺陷距离激励点较远,则超声导波在传播过程损耗的能量增多,超声导波检测效果下降。

3.3 缺陷偏移角度对超声导波检测效果的影响

前面的仿真中,盆式绝缘子缺陷的中心均设置在超声导波激励点与接收点连线所在的垂直平面上,见图10。但在实际情况中盆式绝缘子各种缺陷的位置是随机的,且大部分情况下盆式绝缘子缺陷与该平面之间有偏移角度。以激励点为中心,缺陷在同一高度上,激励点到缺陷的距离不变,设置缺陷偏移角度从0°增至50°,分别进行仿真,见图11。

仿真结果见表6,随着偏移角度的增大,导波信号衰减率逐渐减小,检测效果逐渐下降。仿真结果

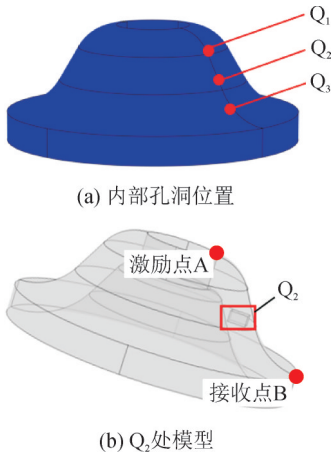


图9 缺陷位置

Fig. 9 Defect location

表5 Q₁-Q₃导波衰减率

Table 5 Attenuation rate of Q₁-Q₃ guided wave

缺陷位置	衰减率/%
Q ₁	36.5
Q ₂	18.1
Q ₃	9.9

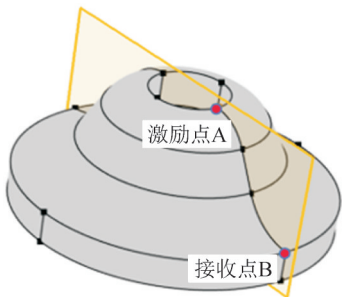


图10 AB连线所在垂直平面

Fig. 10 Vertical plane of AB line

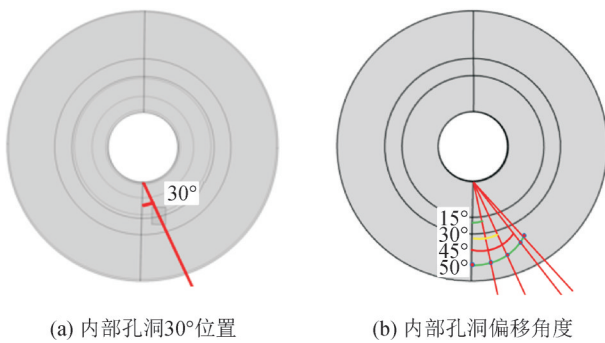


图11 缺陷偏移角度

Fig. 11 Defect offset angle

表明在激励点一定范围之外,导波信号检测效果将大大减小。

4 仿真结果分析

由第3节对多种缺陷情况下超声导波检测盆式绝缘子的仿真结果可知,当缺陷尺寸较小,缺陷距

表6 不同偏移角度下信号衰减率

Table 6 Signal attenuation rate under different offset angles

缺陷偏移角度/(°)	衰减率/%
0	21.8
15	17.8
30	11.9
45	4.9
50	0.9

离激励点较远或偏移角度较大时,超声导波信号在抵达缺陷前,能量在传播过程中损失较多,超声导波检测效果将会下降。

因此,文中考虑通过设置恰当的激励点位置来增大检测范围,减小导波在传播过程中的能量损耗,提高检测效果。

结合以上仿真结果,并经过多次仿真和实验改进,文中设置了的激励点优化方案见图12,分别设置A组导波激励点和D组导波激励点各4个。经过多次仿真发现,设置4个A组激励点,以每个A类激励点为中心,可检测到90°扇形范围内所有缺陷,但距离A组激励点较远,尺寸较小,偏移激励点与接收点连线所在垂直平面的角度越大的缺陷,检测效果将会下降;为此,设置4个D组激励点,以每个D组激励点为中心进行激励,可检测尺寸较小,距离A组激励点较远,且偏移激励点与接收点连线所在垂直平面的角度较大的缺陷,弥补A组激励点的不足,与A组激励点检测范围形成互补,可对盆式绝缘子内部所有缺陷实现全面检测。为了检验上述方案的可行性,搭建实验平台进行验证。

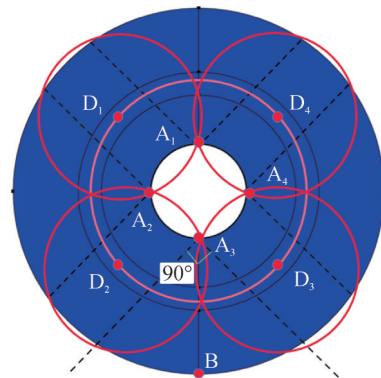


图12 导波激励点优化方案

Fig. 12 Setting of excitation point of guided wave

5 优化方案实验验证

5.1 实验装置

实验装置见图13,主要设备包括超声导波检测

仪,上位机以及若干压电传感器。压电传感器谐振频率与仿真时相同,为100 kHz,检测方式为单发单收。

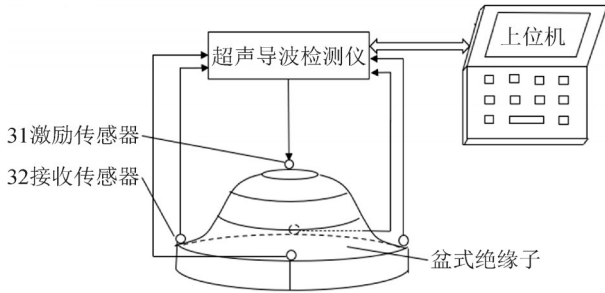


图 13 盆式绝缘子缺陷检测实验装置

Fig. 13 Experimental device of basin insulator defect detection

5.2 实验分析

设置传感器和缺陷分布见图 14,在激励点 A_3 和 D_2 分别进行激励,传感器 B 进行接收,C 点为缺陷位置。

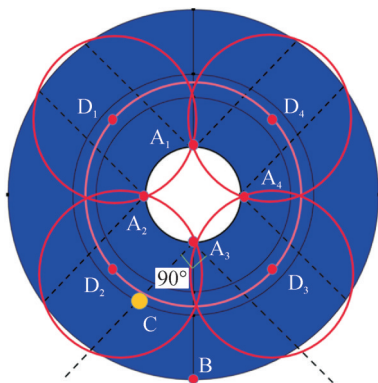


图 14 传感器与缺陷位置

Fig. 14 Sensor and defect location

首先在激励点 A_3 进行激励,传感器 B 进行接收,在无缺陷情况下进行实验,接收信号的波形见图 15,幅值为 $223.5 \mu V$ 。然后在 C 点设置表面裂纹进行实验,接收信号的波形见图 16,幅值为 $186.1 \mu V$ 。

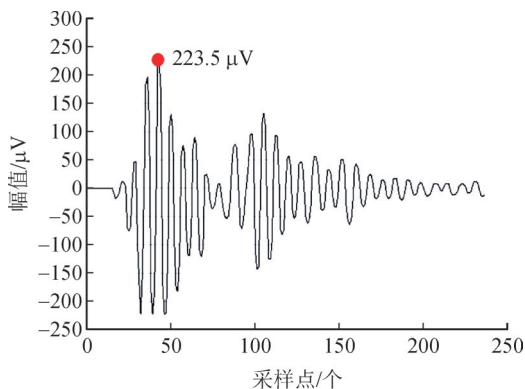


图 15 A_3 激励无缺陷时接收信号

Fig. 15 Signal received when excitation at A_3 point is not defective

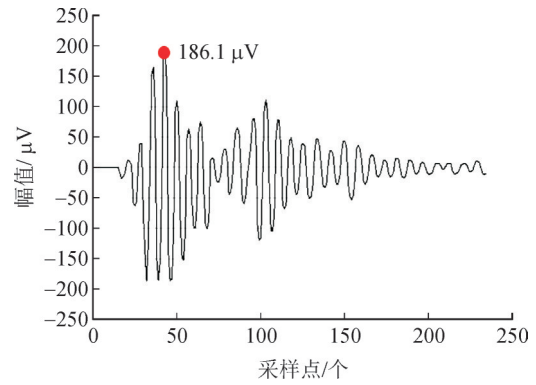


图 16 A_3 激励有缺陷时接收信号

Fig. 16 Signal received when excitation at A_3 point is defective

接着在激励点 D_2 进行激励,传感器 B 进行接收,在无缺陷情况下进行实验,接收信号的波形见图 17,幅值为 $255.3 \mu V$ 。然后在 C 点设置相同的裂纹缺陷进行实验,接收信号的波形见图 18,幅值为 $183.6 \mu V$ 。

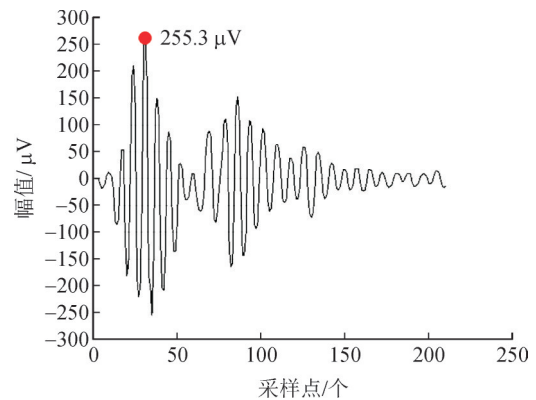


图 17 D_2 激励无缺陷时接收信号

Fig. 17 Signal received when excitation at D_2 point is not defective

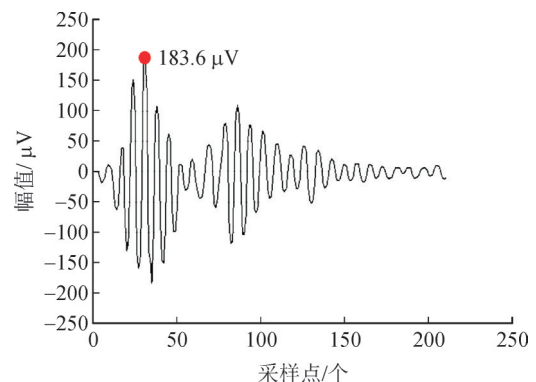


图 18 D_2 激励有缺陷时接收信号

Fig. 18 Signal received when excitation at D_2 point is defective

实验接收信号幅值及衰减率见表 7。由表 7 可得,在传感器 A_3 进行激励时接收信号的衰减率为 16.3%,而在传感器 D_2 进行激励时,接收信号的衰减

率为27.87%,衰减率提高了10%左右。

表7 接收信号幅值及衰减率

Table 7 Amplitude and attenuation rate of received signal

激励点	无缺陷接收信号幅值/ μV	有缺陷接收信号幅值/ μV	衰减率/%
A ₃	223	186	16.30
D ₂	255	183	27.87

对于同一表面裂纹缺陷C,在激励点D₂进行激励时的检测效果远远超过激励点A₃,验证了该激励点优化方案的可行性和准确性。

6 结论

1)搭建了盆式绝缘子仿真模型,分别对完整和含有缺陷的盆式绝缘子进行仿真,通过比较有无缺陷时接收信号的能量,即幅值衰减率,可以有效判断盆式绝缘子是否存在缺陷。

2)对含有不同尺寸和类型缺陷的盆式绝缘子进行多次仿真,仿真结果表明,超声导波可以检测多种盆式绝缘子缺陷,且有以下结论:①缺陷尺寸越大,超声导波信号衰减率越大,检测效果越好;②随着缺陷距离激励点越远,超声导波检测效果下降;③缺陷偏移激励点与接收点连线所在垂直平面的角度越大,衰减率越小,检测效果下降。

通过以上结论发现:当缺陷尺寸较小,缺陷距离激励点较远或偏移角度较大时,超声导波信号在抵达缺陷前,在传播过程中会损失较多能量,则超声导波检测效果将会大大下降。

3)提出了一种Lamb波激励点优化设置方案:分别设置4个A组导波激励点和4个D组导波激励点,对尺寸较小,距离A组激励点较远,偏移激励点与接收点连线所在垂直平面上角度较大的缺陷,可用D组激励点进行检测,与A组激励点形成互补,实现对盆式绝缘子的全面检测。

搭建实验平台对该方案进行实验验证,利用该优化方案对同一缺陷进行检测,信号衰减率可提高10%左右,超声导波检测效果得到有效提升。该优化方案可为基于超声导波的盆式绝缘子缺陷检测提供参考。

参考文献:

[1] 王芳红,张明达,孙益辉,等.复合绝缘子超声波探伤信号识别分类方法研究[J].电力学报,2019,34(6):571-577.
WANG Fanghong, ZHANG Mingda, SUN Yihui, et al. Study on identification and classification of ultrasonic flaw detection signal for composite insulator[J]. Journal of Electric Power, 2019, 34(6):

571-577.
[2] 王碧霞,田铭兴,冯婷娜,等. GIS盆式绝缘子典型缺陷对其电场分布的影响[J].高压电器,2022,58(11):197-204.
WANG Bixia, TIAN Mingxing, FENG Tingna, et al. Influence of typical defects of GIS insulating spacer on its electric field distribution[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(11): 197-204.
[3] 高晋文,叶严军,于卓琦,等.含有裂纹缺陷的GIS盆式绝缘子的静力特性及其影响因素分析[J].高压电器,2020,56(12):251-256.
GAO Jinwen, YE Yanjun, YU Zhuoqi, et al. Static force characteristics and influencing factors analysis of GIS basin-type insulator with cracks[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(12): 251-256.
[4] 张东东,常泽中,万武艺,等.基于局部电场的零值绝缘子检测技术研究[J].电力工程技术,2024,43(4):193-201.
ZHANG Dongdong, CHANG Zezhong, WAN Wuyi, et al. Zero-value insulator detection technology based on local electric field[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(4): 193-201.
[5] 孙曙光,陆俭国,俞慧忠,等.基于超高频法的典型GIS局部放电检测[J].高压电器,2012,48(4):7-12.
SUN Shuguang, LU Jianguo, YU Huizhong, et al. Detection of typical GIS partial discharge based on UHF method[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(4): 7-12.
[6] 王卫东,赵现平,王达达,等. GIS局部放电检测方法的分析研究[J].高压电器,2012,48(8):13-17.
WANG Weidong, ZHAO Xianping, WANG Dada, et al. Analysis on the method of GIS partial discharge detection[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(8): 13-17.
[7] 梅红伟,陈洁,高嵩,等.全尺寸复合绝缘子内部缺陷微波无损检测研究[J].高压电器,2020,56(3):87-93.
MEI Hongwei, CHEN Jie, GAO Song, et al. Research on microwave-based non-destructive testing for internal defect detection of full-size composite insulator[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(3): 87-93.
[8] 邓红雷,何战峰,陈力.复合绝缘子脱粘缺陷的超声导波检测[J].高电压技术,2019,45(1):196-202.
DENG Honglei, HE Zhanfeng, CHEN Li. Inspection of debonding defects of composite insulators by ultrasonic guide wave[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(1): 196-202.
[9] 马君鹏,李硕,孙兴涛,等.基于超声导波的盆式绝缘子缺陷检测技术可行性研究[J].南方电网技术,2018,12(10):7-13.
MA Junpeng, LI Shuo, SUN Xingtao, et al. Feasibility research of defect testing for basin insulator based on ultrasonic guided wave[J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(10): 7-13.
[10] 周琛,何建,胡暮平,等.基于L(0,2)超声导波的管段结构损伤定位研究[J].仪器仪表学报,2020,41(12):181-191.
ZHOU Chen, HE Jian, HU Muping, et al. Research on damage location of pipe section based on L(0,2) ultrasonic guided wave[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(12): 181-191.
[11] 刘贺晨,胡如法,刘云鹏,等.220kV退役复合绝缘子芯棒整体回收再利用可行性研究[J].电工技术学报,2024,39(11):3433-3443.
LIU Hechen, HU Rufa, LIU Yunpeng, et al. Feasibility of the overall recycling of 220 kV retired composite insulator core rods[J].

- Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(11): 3433-3443.
- [12] 余祖俊, 许西宁, 史红梅, 等. 钢轨中超声导波激励响应计算方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(9): 2068-2075.
YU Zujun, XU Xining, SHI Hongmei, et al. Study on the computation method for the response of ultrasonic guided waves in the rail under sinusoidal excitation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(9): 2068-2075.
- [13] 周长义, 孙 伟. 基于声发射检测的钢轨断裂实时监测及定位方法研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(1): 232-238.
ZHOU Changyi, SUN Wei. Study on real-time detection and location method for rail broken based on acoustic emission[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(1): 232-238.
- [14] 罗更生, 谭建平, 卢 超, 等. L(0, 2)模态导波检测弯管缺陷的数值模拟和实验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(9): 3029-3036.
LUO Gengsheng, TAN Jianping, LU Chao, et al. Numerical simulation and testing research for defect detection in bend pipes using longitudinal mode L(0, 2)[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(9): 3029-3036.
- [15] DENG Honglei, HE Zhanfeng, CHEN Li. Ultrasonic guided wave-based detection of composite insulator debonding[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(6): 3586-3593.
- [16] GOPALAKRISHNAN S. Lamb wave propagation in laminated composite structures[J]. Journal of the Indian Institute of Science, 2013, 93(4): 699-713.
- [17] 刘增华, 冯雪健, 陈洪磊, 等. 基于波数分析的激光 Lamb 波缺陷检测试验研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(18): 23-32.
LIU Zenghua, FENG Xuejian, CHEN Honglei, et al. Experimental research on defect detection of laser-induced Lamb waves based on wavenumber analysis[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(18): 23-32.
- [18] 傅贵武, 王宇华. 基于单方向周向兰姆波超声换能器铝管的缺陷定位[J]. 机械设计与研究, 2020, 36(2): 143-147.
FU Guiwu, WANG Yuhua. Research on Aluminum tube defect location based on single directional circumferential Lamb wave EMAT[J]. Machine Design & Research, 2020, 36(2): 143-147.
- [19] 王高平, 陈 云, 李 波, 等. 基于 Lamb 波的铝板损伤定位检测方法[J]. 武汉工程大学学报, 2022, 44(2): 190-196.
WANG Gaoping, CHEN Yun, LI Bo, et al. Detection method of damage localization in Aluminum plates based on Lamb waves[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2022, 44(2): 190-196.
- [20] 王 强, 袁慎芳. 主动 Lamb 波结构健康监测中信号增强与损伤成像方法[J]. 航空学报, 2008, 29(4): 1061-1067.
WANG Qiang, YUAN Shenfang. Amplifying signal and imaging damage method for active Lamb wave structure health monitoring [J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2008, 29(4): 1061-1067.
- [21] 李富才, 孟 光. 窄频带 Lamb 波频散特性研究[J]. 物理学报, 2008, 57(7): 4265-4272.
LI Fucui, MENG Guang. Dispersion analysis of Lamb waves with narrow frequency bands[J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(7): 4265-4272.
- [22] 祝伟光, 关立强, 李义丰. 应用非线性 Lamb 波识别三维铝板中的微裂纹方向的研究[J]. 声学技术, 2020, 39(2): 161-168.
ZHU Weiguang, GUAN Liqiang, LI Yifeng. Research on the application of nonlinear Lamb wave to identifying the directions of micro-cracks in three-dimensional Aluminum plate[J]. Technical Acoustics, 2020, 39(2): 161-168.
- [23] 陈洪磊, 刘增华, 吴 斌, 等. 基于密集阵列的参数化 Lamb 波检测技术研究[J]. 机械工程学报, 2021, 57(20): 20-28.
CHEN Honglei, LIU Zenghua, WU Bin, et al. Parametric Lamb waves detection technology based on compact array[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(20): 20-28.
- [24] 杜伯学, 姚 航, 梁虎成, 等. 时变温差工况下直流 GIL/GIS 盆式绝缘子动态电场畸变抑制[J]. 电工技术学报, 2024, 39(9): 2851-2859.
DU Boxue, YAO Hang, LIANG Hucheng, et al. Electric field relaxation of basin spacer under variable temperature gradient in DC - GIL/GIS[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(9): 2851-2859.
- [25] 邱 雷, 袁慎芳, 张道越, 等. 基于 Shannon 复数小波的复合材料结构时间反转聚焦多损伤成像方法[J]. 复合材料学报, 2010, 27(2): 101-107.
QIU Lei, YUAN Shenfang, ZHANG Xiaoyue, et al. Shannon complex wavelet and time reversal focusing based multi-damage imaging method on composite structures[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2010, 27(2): 101-107.

李 阳(1989—), 男, 助理工程师, 主要从事绝缘子缺陷检测技术的研究工作(E-mail: ly13688795325@163.com)。

陈科达(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事直流气体绝缘装备、电气设备绝缘缺陷在线监测的研究工作(通信作者)(E-mail: 2962139047@qq.com)。