

# 基于激光超声峰值重建算法的盆式绝缘子缺陷检测研究

王伟<sup>1</sup>, 刘宏<sup>1</sup>, 董理科<sup>1</sup>, 徐玉东<sup>1</sup>, 吴海飞<sup>2,3</sup>, 夏慧<sup>2,3</sup>, 沈中华<sup>4</sup>

(1. 国网山西省电力公司电力科学研究院, 山西 太原 030001; 2. 中国科学院大学  
电子电气与通信工程学院, 北京 100190; 3. 中国科学院电工研究所, 北京 100190;  
4. 南京理工大学理学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 基于激光超声技术研究了一种表面波的峰值重建算法, 搭建二维激光激励扫描式激光超声检测盆式绝缘子的实验平台, 对人工制作的气泡、杂质、裂纹缺陷进行检测研究, 并对实际现场应用中带有裂纹故障的盆式绝缘子进行离线检测。结果表明: 基于激光超声峰值重建算法重建的峰值图像能够较好地反映扫描区间盆式绝缘子的缺陷信息, 证实了该方法可以实现对盆式绝缘子表面裂纹缺陷的离线检测。

**关键词:** 盆式绝缘子; 激光超声; 峰值重建算法; 无损检测

中图分类号: TM216 DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2023.01.015

## Research on basin insulator defect detection based on laser ultrasonic peak reconstruction algorithm

WANG Wei<sup>1</sup>, LIU Hong<sup>1</sup>, DONG Like<sup>1</sup>, XU Yudong<sup>1</sup>, WU Haifei<sup>2,3</sup>, XIA Hui<sup>2,3</sup>, SHEN Zhonghua<sup>4</sup>

(1. State Grid Shanxi Electric Power Research Institute, Taiyuan 030001, China; 2. School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;  
3. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;  
4. School of Science, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** On the basis of laser ultrasonic technology, a peak reconstruction algorithm of surface wave was studied, and an experimental platform of two-dimensional laser excitation scanning laser ultrasonic detection for basin insulators was built. Then the artificial bubble, impurity, and crack defects were detected and studied, and the basin insulator with crack fault in practical field application was carried out off-line detection. The results show that the reconstructed peak image based on laser ultrasonic peak reconstruction algorithm can better reflect the defect information of basin insulator in scanning interval, which proves that this method can realize the off-line detection of surface crack defect on the basin insulator.

**Key words:** basin insulator; laser ultrasonic; peak reconstruction algorithm; nondestructive testing

## 0 引言

气体绝缘金属封闭开关(gas insulated metal-enclosed switchgear, GIS)设备由于其集成化结构、可靠性高、维护方便、占地面积小等优点, 广泛应用于我国的电力系统中<sup>[1-5]</sup>。盆式绝缘子是GIS中不可缺少的重要部件, 起到绝缘、隔离气室、支撑和固定的作用, 主要由金属嵌件、外法兰和环氧树脂材料组成<sup>[6-7]</sup>。绝缘子的安全性能决定着整个GIS设备能否稳定安全运行, 当其结构有损伤时, 会出现局部放电的现象, 甚至导致绝缘击穿, 危及电力系统安全, 严重时会造成大面积停电事故, 导致不可估量的损

失<sup>[8-10]</sup>。因此对于盆式绝缘子的缺陷检测对保证电力系统的安全运行、延长电力设备的使用寿命有着重大意义。

目前对于盆式绝缘子的缺陷检测方法主要分为电学检测法和非电学检测法<sup>[11-14]</sup>, 电学检测法主要包括脉冲电流法和超高频法, 非电学检测法主要有局部超声检测法, 出厂检测也常用X光成像技术检测<sup>[15-17]</sup>。脉冲电流法可以对局部放电进行定量检测, 但容易受到外界电磁干扰, 因此该方法主要用于实验室中; 超高频法是通过检测放电量间接反映缺陷情况, 检测灵敏度虽然可达0.5 pC, 而且能够有效避开外界电磁干扰的影响, 但对检测人员的熟练程度依赖性很强, 不仅消耗大量人力物力, 在测试精度和效率方面也存在很大劣势, 而且无法发现微

基金项目: 国家电网有限公司总部管理科技项目(520530190008)

裂纹;局部超声检测法是通过外置超声传感器对盆式绝缘子进行检测,属于一种接触式检测方法,且超声换能器激励受检测目标表面粗糙度和形状的影响,因此对现场盆式绝缘子进行检测存在一定的局限性。激光超声是一种非接触式无损检测方法,具有宽带、高灵敏度和高空间分辨率等优点,被广泛应用于检测表面和内部缺陷<sup>[18-19]</sup>。考虑到激光超声的宽带和低频特征,理论上可以检测毫米级甚至微米级的缺陷,与高速扫描相结合,可以实现超声波的可视化,突显缺陷信息<sup>[19-21]</sup>。

激光超声技术通过脉冲激光照射到材料表面,由于受热膨胀产生弹性波,在材料表面产生的表面波有很强的指向性,可对材料表面裂纹进行检测。曾伟<sup>[22]</sup>采用扫查式激光超声检测技术对奥氏体不锈钢及铝合金材料中存在的缺陷进行可视化检测,利用纵波检测技术提取纵波最大峰值实现了对不同宽度、不同深度表面缺陷的定量检测,并提出了Wigner-Ville分析算法和基于快速离散的正弦变换算法对材料缺陷的尺寸分布进行检测。李海洋等<sup>[23]</sup>根据激光超声在表面缺陷处的透射/反射阈值现象,提出了基于临界频率测量表面缺陷深度的方法,实现了铝合金材料的表面波激发与接收,并采用临界频率法实现了样品表面缺陷的深度检测。贾广福<sup>[24]</sup>对金属表面缺陷深度的定量表征方法和缺陷的定位及可视化方法进行研究,提出了基于反射回波中心频率、反射回波小波包频带能量和透射波频域畸变特征的缺陷深度定量表征3种分析方法,实现了对金属表面缺陷深度的信息定量评价。

目前关于激光超声技术对表面缺陷检测的研究主要集中在金属材料,对复合材料的缺陷检测研究较少,对GIS盆式绝缘子的激光超声检测研究更少。本文针对盆式绝缘子用复合材料,研究一种激光超声表面波峰值重建算法,以实现盆式绝缘子缺陷的定量表征。

## 1 激光超声理论基础

激光超声检测的物理过程如图1所示,为实现被测物体的无损检测,高强短脉冲激光照射到被测物体表面,由于激光脉冲与被测物体表面的瞬时热作用,通过热弹效应在物体表面产生应变和应力场,进而在被测材料内部产生超声波。其物理过程可以用热源函数 $Q(\mathbf{r},t)$ 进行等效,激发过程可用传热方程(式(1))和考虑热效应的位移场方程(式(2))表示。

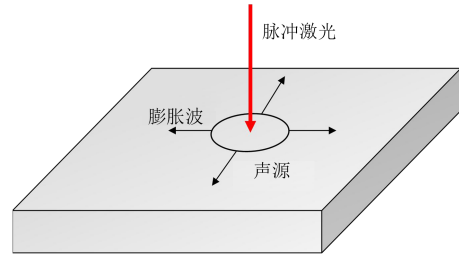


图1 激光超声激发机制

Fig.1 Laser ultrasonic excitation mechanism

$$\rho C \frac{\partial T(\mathbf{r},t)}{\partial t} = \nabla \cdot (\kappa \nabla T(\mathbf{r},t)) + Q(\mathbf{r},t) \quad (1)$$

$$\mu \nabla^2 \mathbf{u} + (\lambda + \mu) \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}) = \rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} + (3\lambda + 2\mu) \alpha \nabla T \quad (2)$$

式(1)~(2)中: $\rho$ 为固体密度; $C$ 为比热容; $T(\mathbf{r},t)$ 为温度场; $\kappa$ 为固体的热传导率; $Q(\mathbf{r},t)$ 定义为单位体积、单位时间吸收的激光能量; $\mathbf{r}$ 为空间变量; $t$ 为时间变量; $\lambda$ 、 $\mu$ 为材料的拉梅常数; $\mathbf{u}$ 为位移场; $\alpha$ 为热膨胀系数。

由矢量分析中亥姆霍兹定理可知,一个矢量场可以写成一个标量场的梯度和一个矢量场的旋度之和,因此位移场 $\mathbf{u}(\mathbf{r},t)$ 可以写成式(3)<sup>[25]</sup>。

$$\mathbf{u} = \nabla \Phi + \nabla \times \Psi \quad (3)$$

式(3)中: $\Phi$ 为标量位移势; $\Psi$ 为矢量位移势,显然 $\Phi$ 和 $\Psi$ 不唯一,即 $\Psi$ 增加一个旋度为零的矢量场不影响 $\mathbf{u}(\mathbf{r},t)$ 的大小。将式(3)代入式(2)中,忽略热效应可得式(4)。

$$\nabla \left[ (\lambda + 2\mu) \nabla^2 \Phi - \rho \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} \right] + \nabla \times \left( \mu \nabla^2 \Psi - \rho \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} \right) = 0 \quad (4)$$

由式(4)可知, $\Phi$ 和 $\Psi$ 分别满足式(5)~(6)关系。

$$(\lambda + 2\mu) \nabla^2 \Phi - \rho \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} = 0 \quad (5)$$

$$\mu \nabla^2 \Psi - \rho \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} = 0 \quad (6)$$

定义 $c_L = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}$ , $c_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$ ,其中下标L表示

纵波(longitudinal wave),S表示横波(shear wave)。则式(5)、式(6)可以改写为式(7)~(8)。

$$\nabla^2 \Phi - \frac{1}{c_L^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} = 0 \quad (7)$$

$$\nabla^2 \Psi - \frac{1}{c_S^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} = 0 \quad (8)$$

式(7)、(8)均为固体声场的波动方程,式(7)为纵波波动方程,传播速度为纵波波速;式(8)为横波波动方程,传播速度为横波波速,位移偏振方向与传播方向垂直。与金属材料相比,盆式绝缘子为环

氧树脂材料,其高频声衰减系数大<sup>[26]</sup>,传播速度慢。经测试,纵波波速大约为3 500 m/s,表面波波速大约为1 750 m/s,为获取高分辨率的缺陷信息,需采用MHz的高频超声探头作为接收探头,但考虑高频超声在盆式绝缘子内部的高衰减特性,因此本研究采用100 kHz低频超声探头与激光脉冲激励扫描相结合方式实现盆式绝缘子检测。

## 2 实验装置与图像重建算法

### 2.1 实验系统

图2所示为激光超声检测实验系统,整个系统均由计算机进行控制,控制激光器的发射部分可改变激光的能量、扫描频率等参数,通过控制二维扫描镜能够改变激光扫描区域的位置和大小,采集卡收集到的数据通过计算机进行处理能够得到直观的重建图像。

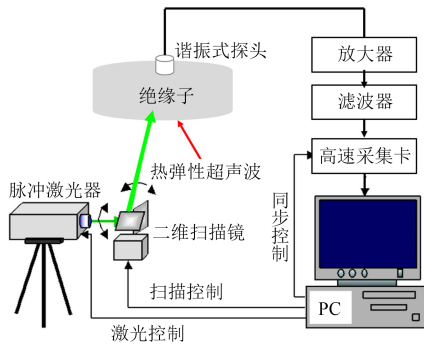


图2 激光超声检测实验系统

Fig.2 Experimental system of laser ultrasonic detection principle

该系统主要由3部分组成:激光发射单元、超声信号接收单元和信号处理与控制单元。激光发射单元采用的激光源是美国 Photonics Industries 公司 DS 系列的空冷二极管泵浦调 Q 固态 Nd:YLF 激光器,利用激光腔内锁模、激光器阵的定时激发、Bragg 声光调制技术,通过调节偏振控制器实现脉冲的波长调谐,并采用光纤相阵技术实现波长为 1 064 nm、最大重复频率为 3 kHz、脉宽为 30 ns 的激光脉冲,二维扫描镜用于实现绝缘子表面的区域扫描,超声接收单元采用日本富士公司的 FUJICERA-AE104S 型谐振频率为 100 kHz 的低频超声探头;信号处理及控制单元一方面用于实现对激光器和二维扫描镜的同步控制,另一方面利用前置放大器和滤波模块实现接收信号的高信噪比采集。实际检测中接收探头固定,激光扫描区域为被检测目标的整个区域,理论上该方法不会存在漏扫情况,但是为了提高检测信号的信噪比,扫描区域与接收探头之间的

距离应保持在激光超声传输信号可接收的信号信噪比范围内,同时对于已知目标体的检测可以利用无缺陷的绝缘子作为背景信号,与被测目标绝缘子差分消除环境噪声的影响。

### 2.2 峰值重建算法

本研究最大振幅峰值重建算法是基于逐列扫描激励方式提出的,图3为激光超声激励检测示意图,具体扫描方式如图4所示:从左下角处以(1,1)(1,2)(1,3)……(1, $N_y$ )坐标向上扫描,再向右移动,依次以(2,1)、(2,2)……(2, $N_y$ )坐标向上扫描,如此循环一直扫描到( $N_x$ , $N_y$ )坐标,向上移动间隔为  $dy$ ,向右移动间隔为  $dx$ ,可得到总的扫描区域内, $x$ 方向长度为  $xL = (N_x - 1)dx$ , $y$ 方向长度为  $yL = (N_y - 1)dy$ ,总扫描的点数为  $N = N_x \times N_y$ 。

谐振式探头放置在绝缘子表面,并利用耦合剂与被测绝缘子进行耦合,探头在固定位置检测。实验前对整个扫描区域进行粗扫,确定探头能够接收到扫描区域内各个激励点产生的超声波信号,探头接收到的信号通过放大、滤波处理,得到扫描区域中每个激励点的信号波形,当扫描区域内存在缺陷时,接收到的波形峰值会发生变化,根据声学互易性,激励点位置处激光激发的超声波被探头接收,与探头位置激发的超声波被激光激励点位置接收到的超声波可以等效,理论上每个激励位置点在检测位置处提取的超声信号可以视为检测探头位置处单点激发的超声波,被扫描区域内不同激励点位置处的探头接收,对接收到的超声波信号依据扫描区间的扫描坐标提取有效范围内的峰值信号,即可得到被扫描区间的峰值图像,此图像可反映缺陷信息。因此理论上当扫描区间覆盖整个被测目标表面时,就不会存在漏检现象。

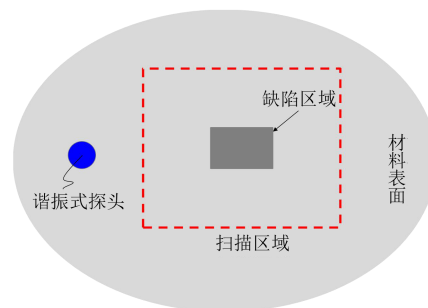


图3 激光超声激励检测示意图

Fig.3 Schematic diagram of laser ultrasonic excitation detection

## 3 人工故障盆式绝缘子检测研究

图5为由河北平高电气股份有限公司绝缘分厂

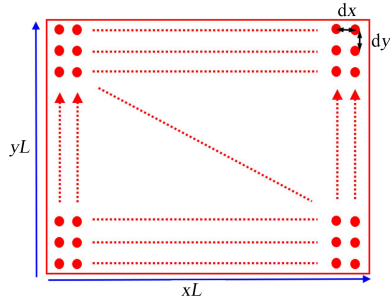


图4 逐列扫描方式

Fig.4 Scanning mode by column

生产的电压等级为 220 kV 的 GIS 盆式绝缘子实物图,为验证激光超声检测绝缘子表面缺陷的可行性,本研究在盆式绝缘子表面制作了不同类型的缺陷,用于模拟现场运行盆式绝缘子中产生的缺陷,如图 6 所示,其中图 6(a)为直径约为 1 mm 的气泡缺陷,图 6(b)为直径约为 2 mm 的杂质缺陷,图 6(c)为宽度为 5 mm、长度为 20 mm、深度为 5 mm 的裂纹缺陷。



图5 220 kV 单相盆式绝缘子

Fig.5 220kV single-phase basin insulator



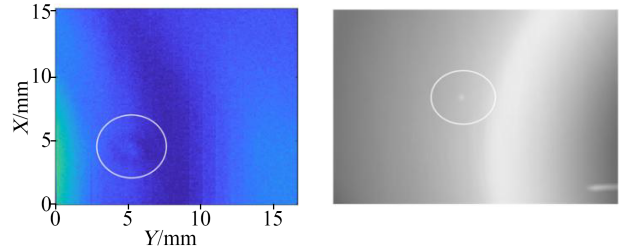
(a)气泡缺陷 (b)杂质缺陷 (c)裂纹缺陷

图6 盆式绝缘子表面不同类型的缺陷实物图

Fig.6 Physical photographs of different types of defects on the surface of basin insulators

分别对不同类型绝缘子缺陷进行激光扫描检测,利用耦合剂将 100 kHz 谐振式探头与盆式绝缘子表面耦合,并保持探头固定,将激光器能量设置为 2 mJ,重复频率设置为 1 kHz,当缺陷位于矩形扫描区域时,得到包含缺陷信息的扫描区间峰值图像。

图 7(a)为激光扫描区间包含气泡缺陷时得到的峰值图像,图 7(b)为相应的 X 射线扫描图像。从图 7 可以看出,如果能精确获取扫描区间的坐标,则可

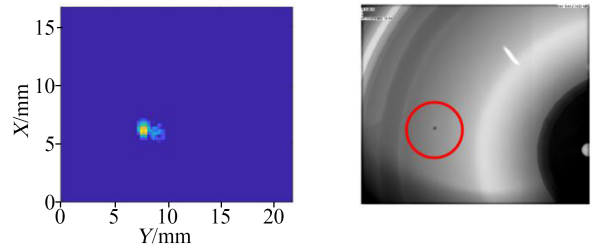


(a)气泡缺陷的峰值图像 (b)X射线扫描图像

图7 盆式绝缘子表面的气泡缺陷峰值重建图像

Fig.7 Peak reconstruction image of bubble defect on the surface of basin insulator

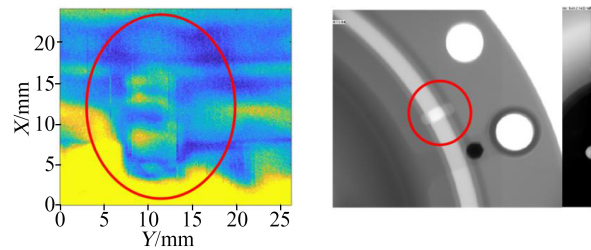
实现扫描范围内缺陷信息的精确定位,与 X 射线图像对比,虽然对比度还有待提高,但是作为一种无损且无辐射技术,通过提高激光能量,有望获得更高对比度的图像。图 8(a)为激光扫描区间包含杂质缺陷时得到的峰值图像,该图像是与相同位置无缺陷时获得的超声波信号进行差分处理后获得的,与图 7(a)对比,图像的质量明显提高。图 9(a)和图 7(a)中的峰值图像都是没有经过任何处理的原始图像,虽然能反映出缺陷信息,但是其直达波的干扰却很明显,图 9(a)受干扰尤为明显。对图 7(a)、8(a)、9(a)中重建的峰值图像尺寸与实际缺陷尺寸进行对比,结果如表 1 所示。从表 1 可以看出,图像检测结果显示气泡缺陷的直径约为 1.3 mm,杂质缺陷的直径约为 2.5 mm,裂纹缺陷宽度约为 6 mm、长度约为 17



(a)杂质缺陷的峰值图像 (b)X射线扫描图像

图8 盆式绝缘子表面的杂质缺陷峰值重建图像

Fig.8 Peak reconstruction image of impurity defect on the surface of basin insulator



(a)裂纹缺陷的峰值图像 (b)X射线扫描图像

图9 盆式绝缘子表面的裂纹缺陷峰值重建图像

Fig.9 Peak reconstruction image of crack defect on the surface of basin insulator

mm, 其中裂纹和杂质缺陷检测结果的相对误差均小于 30%。气泡缺陷的相对误差为 30%, 气泡缺陷检测的相对误差较大, 主要原因在于当超声信号经过气泡缺陷时受到气泡缺陷边界曲面以及气泡与绝缘子材料声阻抗差异性的影响, 导致误差增大。

表 1 盆式绝缘子不同缺陷的峰值重建图像尺寸与实际尺寸对比

Tab.1 Comparison of peak reconstruction image size and actual size of different defects of basin insulators

缺陷参数	实际尺寸	检测尺寸	相对误差/%
气泡直径/mm	1.0	1.3	30
杂质直径/mm	2.0	2.5	25
裂纹长度/mm	20.0	17.0	15
裂纹宽度/mm	5.0	6.0	20

#### 4 现场故障盆式绝缘子离线验证

实际运行 GIS 盆式绝缘子发生故障的主要原因之一是裂纹缺陷, 如某 500 kV GIS 发生事故就是由于内部裂纹导致盆式绝缘子击穿, 从而影响电力系统的运行<sup>[26]</sup>。裂纹的形成原因比较复杂, 包括在生产固化过程中温度发生变化、运输过程中受力不均匀或者运输环境的温差变化以及使用过程中外界机械的挤压导致绝缘子的内部承受应力突变等都可能产生内部裂纹<sup>[27]</sup>, 因此对于盆式绝缘子的裂纹缺陷检测至关重要。

图 10 为山西省太原市某变电站 220 kV 故障盆式绝缘子实物图, 该盆式绝缘子因使用过程中外部受力不均匀导致其表面产生一条宽度约为 0.8 mm 的长裂纹, 裂纹缺陷造成了严重的放电现象。现场拆卸后在实验室中对该盆式绝缘子进行激光超声扫描实验, 当扫描区域包含裂纹时, 扫描检测后重建的峰值图像如图 11 所示。由于裂纹导致超声波在扫描区域裂纹两侧的幅值相差较大, 最大振幅图中出现的颜色分界线即为裂纹。对重建的裂纹图像进行测量, 测得重建裂纹宽度约为 1 mm, 但因为



图 10 故障盆式绝缘子实物图

Fig.10 Physical photograph of faulty basin insulator

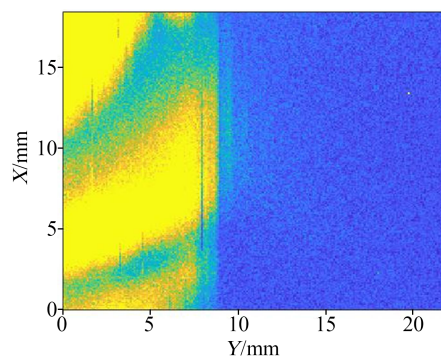


图 11 故障盆式绝缘子裂纹缺陷的峰值重建图像

Fig.11 Peak reconstruction image of a crack defect on a basin insulator

采用的是平面超声探头, 而且激励的激光能量只有 2 mJ, 所以超声探头接收到的有效信号主要是表面波信号, 导致检测到的仅为扫描区域的表面缺陷信息。对于宽度只有 0.8 mm 的裂纹, 考虑到表面波波速大约为 1 750 m/s, 若采用传统的超声回波法要实现 0.8 mm 的分辨率, 超声频率至少要达到 1 MHz, 而本研究采用微米扫描步长的激励激光和 100 kHz 的谐振式探头相结合方式即可实现了对 0.8 mm 级别缺陷的检测。

#### 5 结论

(1) 利用实验室人工缺陷进行实验, 验证了激光超声峰值重建算法的可行性, 该算法可以重建盆式绝缘子表面的气泡、杂质、裂纹等缺陷, 重建的图像误差不大于 30%。

(2) 对实际现场应用中带有裂纹故障的盆式绝缘子进行离线检测验证, 结果表明基于激光扫描激励与谐振式超声探头固定检测相结合的激励检测模式, 利用峰值图像算法能够较好地反映盆式绝缘子扫描区域的缺陷。

#### 参考文献:

- [1] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京: 中国经济出版社, 2005.
- [2] 刘荣海, 臧春艳, 杨迎春, 等. 盆式绝缘子开裂故障的无损检测技术研究[J]. 高压电器, 2019, 55(3): 139-143.
- [3] 蒋兴良, 潘杨, 汪泉霖, 等. 基于等效直径的复合绝缘子覆冰特性与结构参数分析[J]. 电工技术学报, 2017, 32(7): 190-196.
- [4] 张倩, 王建平, 李帷韬. 基于反馈机制的卷积神经网络绝缘子状态检测方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(16): 3311-3321.
- [5] 吕玉坤, 赵伟萍, 庞广陆, 等. 典型伞型瓷及复合绝缘子积污特性模拟研究[J]. 电工技术学报, 2018, 33(1): 209-216.
- [6] 邱志斌, 姚文君, 李慧慧, 等. 高压隔离开关支柱瓷绝缘子机械特性研究[J]. 绝缘材料, 2013, 46(5): 37-42.
- [7] 郭瑞, 郭奇军, 韩燕飞, 等. 126kV GIS 盘式绝缘子金属法兰开孔的电场仿真分析[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(15): 27-31.
- [8] GAO W, ZHAO D, DING D, et al. Investigation of frequency

- characteristics of typical PD and the propagation properties in GIS [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015,22(3):1654-1662.
- [9] 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.
- [10] 王浩然,郭子豪,张丝钰,等.缺陷对特高压交流盆式绝缘子电场分布的影响[J].高电压技术,2018,44(3):982-992.
- [11] 肖燕,郁惟铺.GIS中局部放电在线监测研究的现状与展望[J].高电压技术,2005,31(1):47-49.
- [12] 郭翠娟,杨明珠,荣锋,等.基于振动响应分析的盆式绝缘子损伤检测系统[J].传感技术学报,2016,29(10):1606-1612.
- [13] 汪泓,廖平军,黄俊,等.含污秽薄层的高压复合绝缘子表面电场计算新方法[J].电工技术学报,2016,31(10):77-84.
- [14] 律方成,刘宏宇,汪佛池,等.高速气流条件下污秽颗粒在复合绝缘子表面的沉积判据[J].电工技术学报,2017,32(1):206-213.
- [15] 许焕清,马君鹏,王成亮,等.GIS设备典型缺陷的X射线数字成像检测技术[J].电网技术,2017,41(5):1967-1972.
- [16] TEHLAR D, RIECHERT U, BEHRMANN G. Pulsed X ray induced partial discharge diagnostics for routine testing of solid GIS insulators[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2013,20(6):2173-2178.
- [17] YOSHIDA M, KOJIMA H, HAYAKAWA N. Evaluation of UHF method for partial discharge measurement by simultaneous observation of UHF signal and current pulse waveforms[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2011,18(2):425-431.
- [18] TIAN F, HAO Y, ZOU Z, et al. An ultrasonic pulse-echo method to detect internal defects in epoxy composite insulation[J]. Energies,2019,12(24):1-17.
- [19] LI C H, LI S N, WEI C. et al. A comparison of laser ultrasound measurements and finite element simulations for evaluating the elastic properties of tissue mimicking phantoms[J]. Optics & Laser Technology,2012,44(4):866-871.
- [20] 马保全,周正干.航空航天复合材料结构非接触无损检测技术的进展及发展趋势[J].航空学报,2014,35(7):1787-1803.
- [21] 沈中华,袁玲,张宏超,等.固体中的激光超声[M].北京:人民邮电出版社,2015.
- [22] 曾伟.扫查式激光超声技术及其在表面缺陷检测中的应用研究[D].江苏:南京航空航天大学,2016.
- [23] 李海洋,李巧霞,王召巴,等.基于激光超声临界频率的表面缺陷检测与评价[J].光学学报,2018,436(7):134-142.
- [24] 贾广福.基于激光超声的金属表面缺陷定量及可视化方法研究[D].太原:中北大学,2020.
- [25] 张海澜.理论声学[M].北京:高等教育出版社,2012.
- [26] 汪晓明,何萍,刘衍,等.一起500 kV HGIS事故的分析及处理[J].高压电器,2014,50(1):129-132.
- [27] 田方园,郝艳捧,邹舟诣奥,等.环氧复合绝缘表面微裂纹检测的超声临界折射纵波法[J].广东电力,2019,32(12):106-112.

收稿日期:2022-01-06 修回日期:2022-03-07

作者简介:王伟(1989-),男(汉族),山西太原人,工程师,主要从事高压与大型设备故障诊断、在线识别等方面的研究工作;通信作者:夏慧(1981-),女(汉族),山东禹城人,副研究员,博士,研究方向为基于激光超声的无损检测。