

高压输电线路复合绝缘子硅橡胶内部缺陷超声检测

梁进祥, 徐偲达, 张 虎

(中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

摘 要:本研究提出使用超声波技术检测高压输电线路复合绝缘子硅橡胶内部缺陷的方法,以不同内部缺陷的复合绝缘子硅橡胶试样为研究对象,选择透声层厚度为1/4波长的相控阵超声探头,通过直接接触法对试样进行多角度扫描、无损检测,通过ANSYS软件构建试样的二维截面有限元模型,分析缺陷情况。然后通过降低盲区和旁瓣影响、提升分辨率,提高复合绝缘子硅橡胶内部缺陷检测的准确性。结果表明:存在缺陷硅橡胶试样的超声波形与正常硅橡胶试样的超声波形差异较大,通过超声波技术可以有效检测复合绝缘子硅橡胶内部破损或结构贯穿缺陷,并准确定位缺陷的具体位置;复合绝缘子上的金属配件会影响超声检测的准确性。

关键词:高压输电线路;复合绝缘子;硅橡胶;内部缺陷;超声检测

中图分类号:TM216 DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2024.01.010

Ultrasonic testing of internal defects of composite insulator silicone rubber for high voltage transmission lines

LIANG Jinxiang, XU Sida, ZHANG Hu

(China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100192, China)

Abstract: In this study, a method of using ultrasonic technology to detect the internal defects of composite insulator silicone rubber for high-voltage transmission lines was proposed. Taking composite insulator silicone rubber samples with different internal defects as the research object, a phased array ultrasonic probe with 1/4 wavelength of sound transmission layer thickness was selected, and the samples were conducted multi-angle scanning and non-destructive testing by direct contact method. A two-dimensional cross-section finite element model of samples was constructed by ANSYS software to analyze the defects. Then, the detection accuracy of internal defects of composite insulator silicone rubber was improved by reducing the influence of blind spots and sidelobes and improving the resolution ratio. The results show that the ultrasonic waveforms of defective silicone rubber samples differ greatly from that of normal silicone rubber sample. The internal damage or structural penetration defects of composite insulator silicone rubber can be effectively detected by the ultrasonic technology, and the location of defects can be accurately located. The metal fittings on composite insulators will affect the accuracy of ultrasonic detection.

Key words: high-voltage transmission line; composite insulator; silicone rubber; internal defects; ultrasonic testing

0 引言

复合绝缘子在高压输电线路中发挥着重要作用,一方面复合绝缘子能够维护高压输电线路的安全性,另一方面复合绝缘子还起着支撑并隔离输电线路的作用^[1-2]。近年来,随着高压输电技术水平的不断提高,复合绝缘子经过不断优化改进,体积逐渐减小、质量逐渐减轻、后续维修的程序也更少、不容易发生污染现象,同时其耐高温、耐紫外线能力不断提高,成为了高压输电线路不可或缺的部件^[3-4]。

复合绝缘子外部包覆的硅橡胶能够有效提升复合绝缘子的绝缘性能,而且硅橡胶的憎水性与憎水迁移性较强,能够提升复合绝缘子的耐污性能,

同时还能对复合绝缘子起到保护作用^[5]。但是由于高压输电线路使用的复合绝缘子主要在自然环境中工作,受到人为因素、环境因素的影响,复合绝缘子硅橡胶会产生微小缺陷,其中表面的脱粘、损伤可以通过肉眼或者机械设备进行检测,但是如果其内部出现损伤,则需要采取特殊手段进行检测^[6-7]。王怡欣等^[8]提出使用激光诱导击穿光谱技术检测复合绝缘子内部的损伤。首先检测复合绝缘子上某些特殊部位铝元素和硅元素的含量,然后用元素含量浅深比表征绝缘子的损伤情况,结果表明该方法在检测复合绝缘子硅橡胶表面损伤时精度较高,但是对于硅橡胶内部损伤的检测效果并不明显,因此该方法仍旧需要优化改进;涂彦昕等^[9]提出

使用电磁感应热成像技术对复合绝缘子硅橡胶内部的损伤情况进行检测,该方法实际上是使用图像技术实现硅橡胶内部缺陷的检测,对于图像采集设备的依赖程度较高,成本也较高。

超声波检测技术是一种通过声束扫描获得被检测对象的图形,识别出缺陷位置详细情况的无损检测技术,具备检测迅速、检测精度高及灵敏度高优势。本研究提出高压输电线路复合绝缘子硅橡胶内部缺陷超声检测方法,以不同内部缺陷的复合绝缘子硅橡胶试样为研究对象,选择透声层厚度为1/4波长的相控阵超声探头,对试样进行多角度扫描、无损检测,然后通过ANSYS软件构建试样的二维截面有限元模型,分析缺陷情况,最后通过模拟试验分析检测效果。

1 高压输电线路复合绝缘子硅橡胶内部缺陷检测

本研究在利用相控阵超声技术的基础上,结合有限元软件实现高压输电线路复合绝缘子硅橡胶内部缺陷的检测。先借助耦合剂使用相控阵超声检测技术深入复合绝缘子硅橡胶试样内部完成多角度扫描、无损检测,然后通过ANSYS软件构建试样的二维截面有限元模型,清晰呈现出试样内部的缺陷状态。

1.1 超声波检测

使用超声波技术检测复合绝缘子硅橡胶内部缺陷实际上就是通过声束扫描获得被检测物质的图形,识别出内部缺陷的位置^[10]。该技术通过控制发射超声波和接收超声波物体之间的相位变化,改变声束位置,合成不同的相控波束,实现成像扫描。本研究所使用的相控阵超声检测技术以惠耿思原理作为基础,以数个不相连的压电晶片相互连接构建一个整体阵列,单一晶片都是一个独立的单元,设定固定时序,利用电子系统触发各个单元发射出超声波,多个超声波混叠构建得到超声波阵面。各个超声波阵元均有单独的收发通路,计算机通过连接电子系统实现对各个换能器的控制,从而调整超声波发射和接收过程中聚焦方形、焦点的位置,完成聚焦和超声声束的偏转设置,便于快速完成复合绝缘子硅橡胶内部缺陷的检测。该技术在检测过程中不需要调整超声探头就能实现多角度扫描检测^[11]。

声强全透射的前提是换能器中厚度为1/4波长的换能器晶片在透声层状态下透射系数达到极值。为实现准确检测,本研究选择透声层厚度为1/4波

长的相控阵超声探头,使用直接接触法,然后添加耦合剂进行检测。将耦合剂(选取密度为950 kg/m³、声阻抗率和声速分别为1.29 MPa·s/m和1.40 km/s的机油作为耦合剂)涂在复合绝缘子硅橡胶试样与超声检测探头接触的位置^[12],帮助超声检测探头探入复合绝缘子硅橡胶试样内部尽量深的位置,避免第一界面之中出现声强反射损失。

在检测复合绝缘子硅橡胶内部缺陷时,需要提前调整超声检测设备的焦距、晶片量以及偏转角度等参数,以确保超声波能够准确地穿透并传播到目标检测区域^[5]。超声检测设备能够自动实现时间延迟计算,并将计算结果用作控制超声设备检测时的动作依据,从而确保检测过程中的精准性和精确性。调整参数之后,在耦合剂上放置超声探头,保持探头与材料之间的接触不存在缝隙,以固定扫描方式控制探头移动,实现绝缘子硅橡胶内部的全方位检测。

1.2 复合绝缘子硅橡胶试样准备

使用实际复合绝缘子硅橡胶试样作为试验对象,虽然试验是在模拟软件中开展,但是仍旧需要采集实际复合绝缘子硅橡胶试样的相关参数^[13-14]。本研究的复合绝缘子硅橡胶试样长度为1 500 mm,外径为330 mm,内径为300 mm,厚度为3 mm,密度为1.2 g/m³,泊松比与弹性模量分别为0.49和1.3。

由于高压输电线路复合绝缘子硅橡胶内部缺陷类型较多,本研究准备对多种不同内部缺陷的复合绝缘子硅橡胶试样开展试验^[11]。

1.3 二维截面有限元模型

结合超声检测方法与涂层厚度情况,使用ANSYS软件构建复合绝缘子硅橡胶试样的二维截面有限元模型,用来分析其内部缺陷的情况。

由于复合绝缘子硅橡胶是一种弹性材料,在该材料内部缺陷进行检测时需要考虑弹性扰动。构建模型计算速度-应变弹性控制方程如式(1)所示。

$$F_v = \rho(\partial v / \partial t) - (\nabla S \times C)^T \times E \quad (1)$$

式(1)中: ρ 、 v 与 t 分别表示复合绝缘子硅橡胶材料的密度、弹性速度与时间; ∇S 表示应力张量; C 表示弹性张量; T 表示时间导数; E 表示弹性模量; F 表示应变。

材料边界反射会影响材料内部缺陷检测的准确性,由于超声波在材料内部的传播是一种瞬间状态,在进行超声检测时,需要同时考虑纵波与横波的传播速度,以便更准确地识别材料内部缺陷。横波与纵波的传播速度计算式如式(2)~(3)所示。

$$v_p = \sqrt{\left(\frac{E}{\rho}\right) \times (1 - \sigma) / \left[(1 + \sigma) \times (1 - 2\sigma)\right]} \quad (2)$$

$$v_s = \sqrt{\mu/\rho} \quad (3)$$

式(2)~(3)中： v_p 与 v_s 分别代表纵波和横波的传播速度； σ 和 μ 分别代表泊松比与切变弹性系数。

1.4 提升检测准确性方法

(1)降低盲区影响

在检测过程中与超声探头较近的位置存在一个盲区，盲区直径约为1 mm，这种盲区的存在导致检测结果不够准确，因此需要控制超声探头可能存在的余震，解决检测上的盲区，同时可以在材料中添加同样为硅橡胶的模块，以减少检测过程中盲区的影响。

(2)降低旁瓣影响

超声设备在发射主波束信号的同时还伴随部分旁瓣信号。在超声检测过程中由于数个晶元同时发射检测信号，如果邻近的晶元出现阶梯式相位延迟时，就会出现较为明显的相位量化误差，从而直接造成旁瓣信号出现。这种信号是一种较为明显的干扰信号，会导致超声检测生成的图像清晰度不足。为解决这个问题，利用幅度加权变换方法把比较大的加权系数赋值在中心晶元之中，沿着超声波横、纵波方向递减加权系数。同时，提高超声波发射时两端晶元的激励强度，使得旁瓣信号降低，这也能够使得检测后生成的图像更加清晰^[15]。

(3)提升分辨率

超声检测时，需要对反射回波声束进行处理才能获得最终的检测图像。本研究使用的超声检测技术包含数字声束合成技术，能够对超声波束进行A/D转换，合成多声束并且完成动态聚焦，使得图像分辨率更高，提升检测的精度与稳定性，同时可以灵活地控制检测设备。

2 缺陷检测结果

2.1 超声检测图像分析

使用超声技术检测高压输电线路复合绝缘子硅橡胶内部缺陷时会结合有限元软件输出一个扇形扫描图。其中检测出贯穿缺陷和起皮破损缺陷的示意图如图1所示。

(1)内部破损检测

选择内部无缺陷和内部存在直径约为5 mm起皮破损缺陷的复合绝缘子硅橡胶试样，利用超声检测技术和有限元软件输出无破损状态的硅橡胶试样图像以及存在内部破损的硅橡胶试样图像，结果如图2所示。从图2可以看出，对于无破损的复合

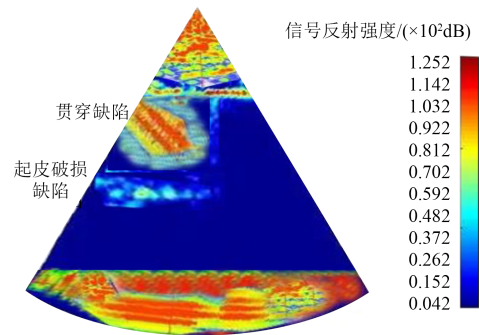


图1 贯穿缺陷和起皮破损缺陷示意图

Fig.1 Schematic diagram of penetrating defects and peeling damage defects

绝缘子硅橡胶试样，使用超声检测技术只会检测出材料的盲区以及材料的底面回波情况，没有出现其他明显变化。对于内部存在破损的试样，使用超声检测技术能够检测出材料的破损气孔，而且检测结果较为明显，尺寸较为清晰，对于破损周围较小的磨损也能够准确检测。

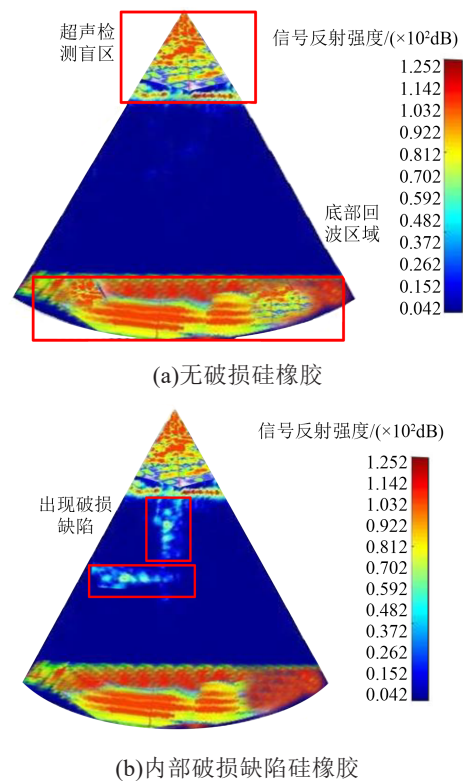


图2 硅橡胶试样有无破损的超声检测结果

Fig.2 Ultrasonic testing results of silicone rubber samples with and without damage

(2)内部结构贯穿缺陷检测

选取内部存在贯穿破坏缺陷的复合绝缘子硅橡胶试样，利用超声检测技术进行检测，结果如图3所示。

绝缘试样的贯穿损伤位置位于伞裙下端，从图

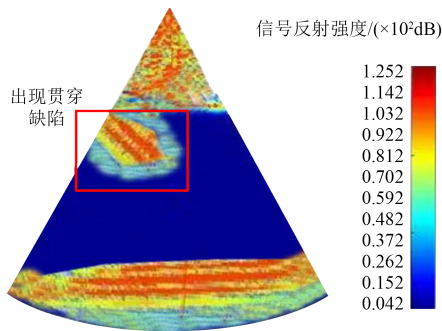


图3 内部贯穿损伤超声检测结果

Fig.3 Ultrasonic testing result of internal penetration damage

3可以看出,超声检测技术成功检出了位于复合绝缘子硅橡胶伞裙位置的贯穿损伤,该缺陷较深,已经严重影响复合绝缘子硅橡胶的使用。说明即使对于较为隐蔽的贯穿损伤也可以通过本研究的超声检测技术实现检测。

2.2 贯通性对检测准确性的影响

复合绝缘子工作时的贯通性也是影响高压输电线路复合绝缘子硅橡胶内部缺陷的重要指标,贯通性实际上是指电流从绝缘子流过时的顺畅程度。贯通性与电阻相关联,电阻小则贯通性低,电阻大则贯通性高。本研究对贯通和非贯通情况下,复合绝缘子硅橡胶试样内部的缺陷进行了超声检测。

(1)非贯通情况下检测结果

在内部起皮破损和贯穿破损的试样上分别标记12个点,其中内部起皮破损试样在点5和点6的位置存在起皮破损缺陷,贯穿破损的试样在点10和点11位置存在贯穿缺陷。在非贯通情况下使用超声检测技术检测硅橡胶内部缺陷,超声检测后微波反射电压信号强度变化如图4所示。

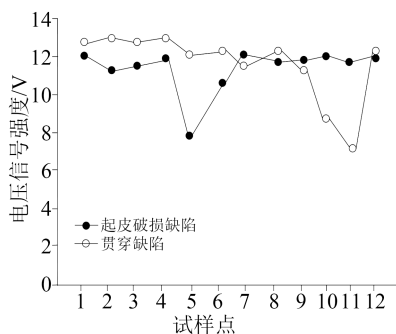


图4 非贯通情况下超声检测结果

Fig.4 Ultrasonic testing result under non penetration situation

从图4可以看出,使用超声扫描复合绝缘子硅橡胶内部时,每个位点都会出现不同程度的电压信号强度波动,这主要是由于超声波不仅会穿透硅橡胶,同样会穿透绝缘子及内部电缆。电压信号强度的波动也证明超声检测工作过程中对硅橡胶内部

实现了多角度全方位的检测。从图4还可以看出,在两种内部损伤的缺陷位置电压信号强度都会显著降低,说明在非贯通情况下能够准确实现对硅橡胶内部缺陷的检测。

(2)贯通情况下检测结果

选取标记完坐标的硅橡胶内部起皮破损和贯穿破损的试验试样,在贯通状态下使用超声检测技术检测复合绝缘子硅橡胶内部的缺陷,结果如图5所示。由图5可知,在贯通情况下,内部缺陷位置的电压信号强度变化更大,说明受到绝缘子工作环境影响,使用超声检测技术对复合绝缘子硅橡胶内部缺陷进行检测时结果会出现明显差异,因此使用超声检测技术检测高压输电线路复合绝缘子硅橡胶内部缺陷时需要处于一个良好的工作环境之中。

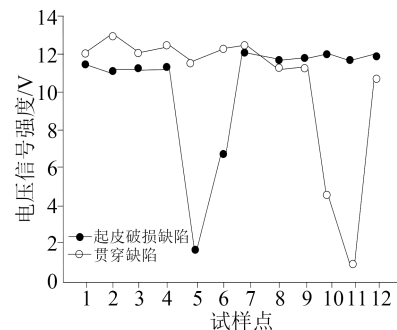


图5 贯通情况下超声检测结果

Fig.5 Ultrasonic testing result under penetration situation

2.3 超声幅值表征缺陷检测结果

通过超声检测除了能够获得被测复合绝缘子硅橡胶内部的图像外,还能获得检测过程中出现的超声幅值,根据该幅值也能确定复合绝缘子硅橡胶内部的缺陷。正常复合绝缘子及两种不同缺陷情况复合绝缘子硅橡胶试样的超声检测结果如图6所示。从图6可以看出,使用超声检测复合绝缘子硅橡胶试样时超声信号曲线具有4种不同波形,该检测结果与图1和图2中的图像结果一致。图6(a)中,无内部缺陷的复合绝缘子硅橡胶试样也会受到噪声和外部声衰减影响,检测结果中存在的杂波可以通过调整耦合剂适当降低;图6(b)中,起皮破损缺陷硅橡胶试样的超声波形与正常硅橡胶试样的超声波形差异较大,说明使用超声检测技术能够实现对复合绝缘子硅橡胶试样内部起皮缺陷的检测;图6(c)中,存在贯穿缺陷硅橡胶试样的超声波形相比于起皮缺陷硅橡胶试样更加明显,这是由于贯穿性缺陷更加严重。

2.4 绝缘子配件对检测准确性的影响

高压输电线路复合绝缘子在实际工作中为与输电线路上的其他配件相连,会在绝缘子两端安装

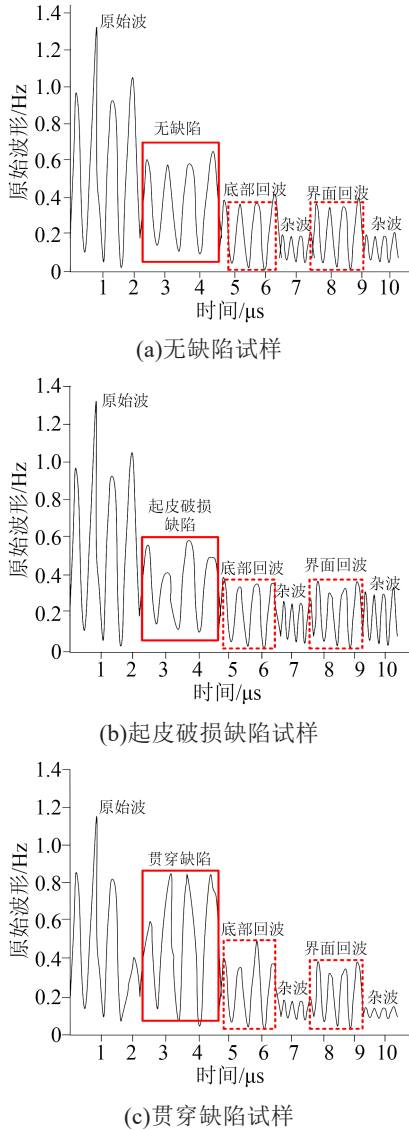


图6 超声回波检测结果

Fig.6 Ultrasonic echo testing results

金属配件,由于配件是金属材质,在使用超声检测技术检测复合绝缘子硅橡胶试样内部缺陷时会一定程度上受到干扰。本研究将复合绝缘子两端的金属配件数量进行调整,研究金属配件对于检测准确性的影响,结果如图7所示。从图7可知,受到复合绝缘子两端金属配件的影响,超声检测结果中出现较多噪声,只去掉绝缘子一侧金属配件时电压幅值会淹没在噪声中,无法实现准确检测。将复合绝缘子两端的金属配件全部去除,超声波经过一段时间放射后能够准确显示出来,有助于提升高压输电线路复合绝缘子硅橡胶内部缺陷检测的准确性。这表明复合绝缘子上的金属配件会影响超声检测的准确性。

3 结论

本研究将相控阵超声检测技术与有限元软件

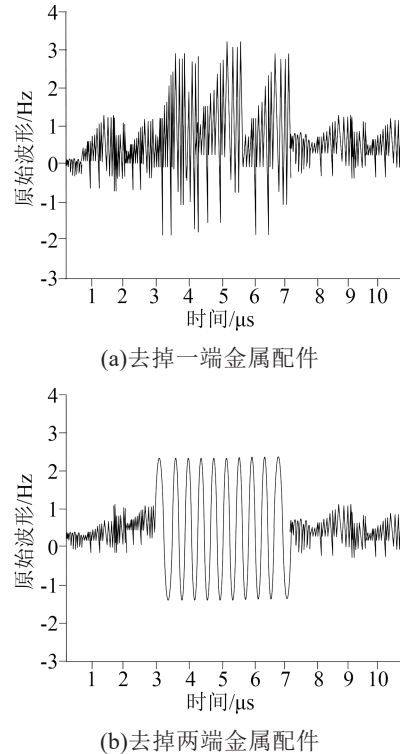


图7 金属配件对于超声检测准确性影响

Fig.7 Effect of metal fittings on ultrasonic testing accuracy

相结合,实现了高压输电线路复合绝缘子硅橡胶内部缺陷的检测,并对影响检测准确性的因素进行了研究,主要得到以下结论:

(1)相控阵超声检测技术具备操作简便的优势,借助耦合剂可深入复合绝缘子硅橡胶试样内部完成多角度扫描、无损检测,结合 ANSYS 软件构建复合绝缘子硅橡胶试样的二维截面有限元模型,能够清晰地呈现出硅橡胶试样内部的缺陷状态。

(2)针对相控阵超声检测技术检测时的盲区、旁瓣影响以及分辨率下降的问题,提出了通过超声波形检测复合绝缘子的内部缺陷,保障缺陷检测的准确性。

(3)复合绝缘子上的金属配件会使超声检测时产生噪声,影响超声检测的准确性。

参考文献:

- [1] 任重,吴海涛,肖利龙,等. 绝缘子表面放电的多物理信号比值演化特征及其诊断方法研究[J]. 绝缘材料,2020,53(4):95-102.
- [2] 王若丞,康洪玮,贺云逸,等. 电缆接头硅橡胶材料内部缺陷的超声检测研究[J]. 绝缘材料,2021,54(4):102-108.
- [3] 陈栋康康,周玉锋,张宇民,等. 超声冲击共振法检测复合材料内部缺陷及缺陷分布绘制[J]. 中南民族大学学报(自然科学版),2022,41(4):399-405.
- [4] 赵宣翔,杨昊,曹雯,等. 基于超声检测的室温硫化硅橡胶涂层内部微小缺陷识别方法研究[J]. 电工电能新技术,2022,41(6):55-63.

- [5] 唐志国,李阳. 太赫兹反射成像技术在复合绝缘子硅橡胶内部缺陷检测中的评述[J]. 绝缘材料,2022,55(7):10-16.
- [6] 梅红伟,陈洁,高高,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.
- [7] 毛兴,王路军,唐志宇. 基于带电测试技术的变压器内部绝缘子缺陷检测方法研究[J]. 水利水电技术,2020,51(12):150-160.
- [8] 王怡欣,任惠,刘杰,等. 基于激光诱导击穿光谱的复合绝缘子老化诊断方法初探[J]. 绝缘材料,2020,53(2):91-96.
- [9] 涂彦昕,刘立帅,郭晨鋈,等. 基于电磁感应热成像技术的复合绝缘子内部导通性缺陷检测方法[J]. 中国电机工程学报,2021,41(7):2565-2576.
- [10] 孙晟杰,赵梦娜,陈凤青,等. AC/ATH体系对绝缘子用硅橡胶复合材料性能的影响[J]. 绝缘材料,2023,56(1):14-17.
- [11] 郝金鹏,伍弘,刘世涛,等. 110kV输电线路复合绝缘子鸟粪闪络仿真研究[J]. 绝缘材料,2021,54(10):73-78.
- [12] 丘灵华,朱铮涛. 基于深度学习的输电线路绝缘子缺陷检测研究[J]. 计算机应用研究,2020,37(S1):358-360,365.
- [13] 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.
- [14] 于卓琦,高晋文,王克胜,等. 基于模态分析的GIS盆式绝缘子裂纹缺陷检测方法研究[J]. 电测与仪表,2020,57(16):23-27.
- [15] 马博翔,伍弘. 高压输电线路硅橡胶防鸟罩抗风性能及结构优化研究[J]. 绝缘材料,2020,53(4):64-69.

收稿日期:2023-01-02;修回日期:2023-03-28。

作者简介:梁进祥(1983-),男(汉族),湖北仙桃人,高级工程师,研究方向为高电压试验技术。