

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

唐志国, 李 阳

(华北电力大学 高电压与电磁兼容北京市重点实验室, 北京 102206)

摘 要:由于太赫兹波穿透能力强、成像分辨率高、抗干扰能力强等优点,基于太赫兹反射成像方式的无损检测技术成为绝缘子缺陷检测领域的研究热点。本文首先介绍了介质中太赫兹波的传播特性,构建传播模型分析了存在缺陷时因介质不连续性导致缺陷界面处的太赫兹波折反射现象。然后概述了电磁波的时域有限差分法(FDTD),基于FDTD理论的电场随时间的变化方程利用全波三维电磁场仿真软件对硅橡胶材料进行几何建模仿真,发现在距离模型中心2.5 mm的观测面上观察到的太赫兹波分布情况差异可以反映内部缺陷的尺寸和位置,提供了一种理论研究仿真方法。最后综述了学术上应用太赫兹成像技术检测绝缘子内部缺陷的案例,分析了探测距离影响灵敏度、背景噪声影响成像分辨率和缺陷类型识别的问题,并针对这些问题进行了展望。

关键词:太赫兹波;复合绝缘子;时域有限差分法;缺陷成像

中图分类号:TM216 文献标志码:A 文章编号:1009-9239(2022)07-0010-07

DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2022.07.002

Application Review of Terahertz Reflectance Imaging Technique for Detection of Internal Defects in Silicone Rubber for Composite Insulators

TANG Zhiguo, LI Yang

(Beijing Key Laboratory of High Voltage & EMC, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Because the terahertz wave has strong penetrating ability, high imaging resolution, and strong anti-interference ability, the non-destructive testing technology based on terahertz reflection imaging has become a research hotspot in the field of insulator defect detection. In this paper, the propagation characteristics of terahertz wave in medium were firstly introduced, and a propagation model was constructed to analyze the terahertz wave refraction and reflection phenomena at the defect interface caused by the discontinuity of medium existing a defect. Then the finite difference time domain (FDTD) method of electromagnetic wave was elaborated, and geometric modeling and simulation of silicone rubber material was conducted by using a full wave 3D electromagnetic simulation software on the basis of the equation that electric field varies with time based on FDTD theory. It was found that the distribution difference of terahertz waves observed on the observation surface which was 2.5 mm away from the center of model, can reflect the size and location of internal defect, which provided a simulation method for theoretical studies. Finally, the academic cases of using terahertz imaging technology to detect internal defects in insulators were reviewed, and the problems that the detection distance affects the sensitivity, the background noise affects the imaging resolution, and the identification of defect types were analyzed and prospected.

Key words: terahertz wave; composite insulator; FDTD; defect imaging

收稿日期:2021-06-26 修回日期:2021-07-31

作者简介:唐志国(1977-),男(汉族),北京人,副教授,主要从事高电压与绝缘技术方面的研究;李阳(1998-),男(汉族),河北保定人,硕士生,主要从事高电压与绝缘技术方面的研究。

0 引言

复合绝缘子因其体积小、质量轻、绝缘性能好、机械强度高、防污闪能力强等优点^[1-4]在我国电网中应用越来越广泛,已经成为主流的选择。但随着运行年限的增加,环氧树脂芯棒分解产生的气体使得硅橡胶护套内部出现气隙缺陷,而复合绝缘子又处在恶劣的外界环境下,受到热胀冷缩机械应力的作用和制作工艺水平的影响,使复合绝缘子的硅橡胶护套内部产生裂纹从而损坏。这些问题使得内部芯棒与外界空气相接触,导致芯棒碳化腐朽进而断串,发生严重的电力系统事故^[5-6]。近年来,我国多地发生了这类事故,对电力系统的稳定运行造成了很大的威胁。

目前用于检测绝缘子较为成熟的方法有观察法、红外检测法、紫外检测法等^[7-11]。观察法费时费力,爬塔很不安全;红外检测法一般用于检测绝缘子的局部发热状况;紫外检测法一般用于检测绝缘子表面的局部放电。复合绝缘子内部气隙、裂纹缺陷比较隐蔽,产生时温度变化不明显,且在低场强区没有放电现象,是现有检测手段的盲区。

在无损检测领域,微波反射无损检测是目前一种新颖的检测复合绝缘子内部缺陷的方法。清华大学王黎明等^[12-14]通过搭建微波检测平台进行实验和CST仿真验证了微波反射法检测绝缘子的可行性。近些年随着研究的推进,太赫兹波光谱检测技术成为一种受欢迎的检测方法。太赫兹波是一种电磁波,其频率为0.1~10 THz,在安防、航空、军事、生物、材料等诸多领域得到广泛应用^[15-17]。电网中的设备常使用复合材料实现电气绝缘,太赫兹电磁波在这些电介质中传播时衰减较小,准直性强,而且太赫兹波波长很短,在成像可视化方面具有较高的分辨率,具有很高的工程应用价值。近年来国内外研究人员利用太赫兹波摸索了无损检测技术,在电缆的检测中,R SATO等^[18]通过分析太赫兹波的反射信息,使微米级的电树枝和水树枝缺陷变得可视化;M KOMATSU等^[19]利用太赫兹波时域成像和光谱测量对电力电缆金属屏蔽层的腐蚀缺陷进行无损检测,具有一定的可行性;S TAKAHASHI等^[20]使用太赫兹反射波对绝缘聚合物屏蔽的铜缆断丝缺陷进行了成像;谢声益等^[21]利用太赫兹波成像实验直观地观测到气隙缺陷,证明了基于太赫兹时域光谱(THz-TDS)系统对XLPE隐藏气隙缺陷无损检测的新方法的可行性。在变压器检测中,S B KANG等^[22]通过太赫兹时域光谱检测发现老化前后矿物绝缘油的太赫兹响应具有明显差异,可以作为一种诊断技术来监测变压器绝缘状况;WANG L等^[23]初步

证明太赫兹时域光谱技术能够有效评价矿物绝缘油的状态;李猛^[24]将太赫兹时域光谱技术与化学计量学方法相结合对变压器绝缘油进行分析。在复合材料缺陷检测中,I S LEE等^[25]使用太赫兹时域光谱技术对纤维素纸板进行无损检测,确定了电介质的完整性,得出了内部绝缘强度;郭小弟等^[26]通过透射式THz-TDS系统和返波振荡器(BWO)成像系统对玻璃纤维样品缺陷进行无损检测,提取样品分层缺陷的太赫兹时域光谱,进而判断缺陷特征。上述无损检测能力,使得太赫兹反射成像技术可以应用于复合绝缘子硅橡胶的检测,当复合绝缘子界面存在缺陷时,太赫兹反射波会发生明显变化,可以此作为缺陷诊断的依据^[27]。另外,太赫兹波在电介质材料中具有良好的穿透性,可以从其反射波的时域或者频域信号中提取到与缺陷特征相关的信息^[28-30]。因此,太赫兹波成像检测技术成为检测复合绝缘子硅橡胶内部缺陷的研究热点。

1 介质中太赫兹波传播理论

1.1 太赫兹波传播特性分析

折射率、透射率、介电常数、吸收系数等是用于描述电磁波与物质作用的重要物理量,借助于这些物理量可以清晰地分析电磁波在物质中的传播过程。L DUVILLARET等^[31]提出的太赫兹波传播模型如式(1)所示。

$$E_2(\omega) = E_1(\omega) \cdot p(\omega, d) \quad (1)$$

式(1)中: $E_1(\omega)$ 为太赫兹波初始电场; $E_2(\omega)$ 为太赫兹波传输到距离 d 后的电场; $p(\omega, d)$ 为太赫兹波在介质传播过程中的传播系数,其表达式如式(2)所示。

$$p(\omega, d) = \exp\left(\frac{-i\tilde{n}(\omega)\omega d}{c}\right) \quad (2)$$

式(2)中: ω 为电磁波频率; d 为太赫兹波在介质中的传播距离; c 为光速; i 为复数单位; $\tilde{n}(\omega)$ 为复折射率,其计算如式(3)所示。

$$\tilde{n}(\omega) = n(\omega) - i\kappa(\omega) \quad (3)$$

式(3)中: $n(\omega)$ 为实折射率,代表样本的色散程度; $\kappa(\omega)$ 为消光系数,代表样本的吸收特性。将传播系数中的复折射率展开后得到式(4)。

$$p(\omega, d) = \exp\left(\frac{-\kappa(\omega)\omega d}{c}\right) \cdot \exp\left(\frac{-in(\omega)\omega d}{c}\right) \quad (4)$$

式(4)中: $\exp(-\kappa(\omega)\omega d/c)$ 表征太赫兹波幅值进行了衰减; $\exp(-in(\omega)\omega d/c)$ 表征太赫兹波相位发生了变化。根据菲涅尔(Fresnel)公式可以计算出透射系数和反射系数,如式(5)所示。

$$\begin{cases} t_{12}(\omega) = \frac{2\tilde{n}_1(\omega)\cos\beta}{\tilde{n}_2(\omega)\cos\theta + \tilde{n}_1(\omega)\cos\beta} \\ r_{21}(\omega) = \frac{\tilde{n}_2(\omega)\cos\theta - \tilde{n}_1(\omega)\cos\beta}{\tilde{n}_2(\omega)\cos\theta + \tilde{n}_1(\omega)\cos\beta} \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中: t_{12} 和 r_{21} 分别为太赫兹波在介质中传输的透射系数与反射系数; $\tilde{n}_1(\omega)$ 、 $\tilde{n}_2(\omega)$ 分别为太赫兹波在空气和介质中的复折射率; θ 和 β 分别为太赫兹波的入射角与折射角。但是在一般情况下,太赫兹波在绝缘介质中传播为弱吸收情况,即 $\kappa(\omega) \ll n(\omega)$,因此在计算时可以用实折射率代替复折射率进行简化计算,简化后如式(6)~(7)所示。

$$t_{12} = \frac{2n_1(\omega)}{n_1(\omega) + n_2(\omega)} \quad (6)$$

$$r_{21} = \frac{n_2(\omega) - n_1(\omega)}{n_1(\omega) + n_2(\omega)} \quad (7)$$

对于实折射率可以通过透射式太赫兹时域光谱的时延特性进行计算,从而计算出透射系数与反射系数。通过式(1)、(2)、(4)的推导,可以得出:太赫兹波在介质传播时发生损耗,使得幅值下降的同时相位也发生变化。通过式(6)、(7)可以初步得出:绝缘介质存在气隙、裂纹缺陷的实折射率会发生变化,从而改变透射系数和反射系数,因此可以通过太赫兹波检测绝缘介质中是否存在缺陷。对于复合绝缘子,用于电压等级为110 kV的绝缘子杆径大概为30 mm,其结构外部是一层硅橡胶护套,内部是环氧玻璃芯棒,绝缘介质厚度较大、层数较多,使用透射方式在传播过程中需要透过多个交界面。每次穿过交界面时都会发生反射导致幅值衰减,使得太赫兹波透射信号较弱不易分析,此外,使用透射的方式需要在一侧安装发射探头,另一侧安装接收探头,操作不便捷。对于反射的方式可以在单侧完成,信号幅值强度和可操作能力优于透射模式,因此使用太赫兹波反射的方式检测复合绝缘子的缺陷效果较好。

1.2 太赫兹波在复合绝缘子缺陷传播分析

太赫兹波在复合绝缘子的传播相当于在A-B-A型的复合结构介质中传播,A为空气,B为硅橡胶。太赫兹波在完好硅橡胶中的理想传播规律如图1所示,其 ϵ_0 和 ϵ_1 分别为空气和硅橡胶的介电常数。绝缘子硅橡胶中的气隙、裂纹缺陷可以看成复合硅橡胶-空气-复合硅橡胶的三层结构,其理想传播规律如图2所示。

通过对比有无缺陷的硅橡胶中太赫兹波的传播规律,可以看到太赫兹波在带有气隙、裂纹缺陷

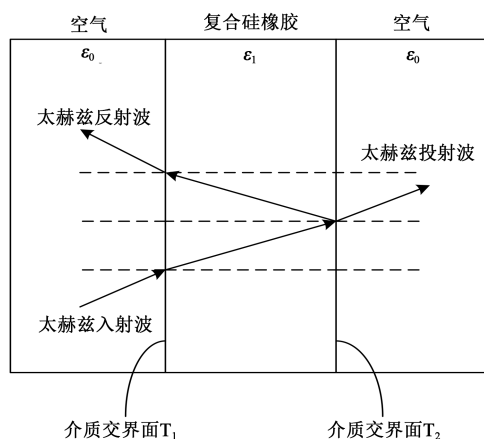


图1 太赫兹波在完好硅橡胶中的理想传播规律

Fig.1 The ideal propagation law of terahertz wave in intact silicone rubber

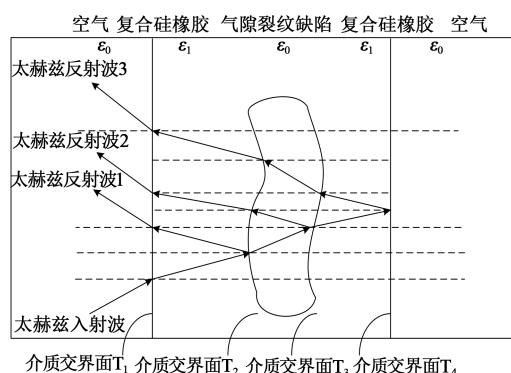


图2 太赫兹波在缺陷硅橡胶中的理想传播规律

Fig.2 The ideal propagation law of terahertz wave in defective silicone rubber

的硅橡胶传播过程中多数经历了 T_2 和 T_3 两个交界面,这两个交界面代表了气隙、裂纹前后表面,太赫兹波在此处发生反射,太赫兹反射波1由于光程的原因产生时间比其他情况下要短,幅值衰减小,且包含了内部缺陷的信息,与无缺陷情况下的差异最为显著,这是一个很明显的特征;此外空气的折射率小于复合硅橡胶材料,对于缺陷部分,空气替代了绝缘介质,使得其传播光程缩短,从而使得太赫兹反射波的幅值和相位发生变化。

综合上述分析,可以使用太赫兹波照射绝缘子,采集反射波的幅值、相位等特征参量信息,然后对数据进行处理及图形构建,从而以图像的方式直观地展现出复合绝缘子内部的缺陷。

2 时域有限差分法(FDTD)及仿真

2.1 FDTD理论计算

在学术领域,关于电磁波的计算方法并很多,通常分为时域方法、频域方法和高频方法。随着技

术的进步和理论的完善,由K S YEE提出的FDTD法逐渐成为一种较为成熟、应用广泛的方法。电磁波有电场和磁场两个分量,FDTD法对这两个物理量在时间维度和空间维度上采取交替抽样的离散方式。每个电场物理量周围有4个磁场物理量围绕,同理每个磁场物理量周围有4个电场物理量围绕,应用这种离散方式将含有时间变量的Maxwell方程转化为一组差分方程,并以时间为变量按步长推进求解空间电磁场。这是一种时域求解的方法,其中时域Maxwell旋度方程为式(8)。

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} - J_m \quad (8)$$

式(8)中: E 为电场强度; B 为磁感应强度; $J_m = \sigma_m H$,其中 σ_m 代表磁导率, H 代表磁场强度,将其代入式(8)并转换为直角坐标如式(9)所示。

$$\begin{cases} \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} = -\mu \frac{\partial H_x}{\partial t} - \sigma_m H_x \\ \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} = -\mu \frac{\partial H_y}{\partial t} - \sigma_m H_y \\ \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} = -\mu \frac{\partial H_z}{\partial t} - \sigma_m H_z \end{cases} \quad (9)$$

在FDTD离散中如图3所示的电场与磁场的分布方式就是所谓的Yee元胞。另外,电场与磁场以彼此间隔为半个时间步长的时间抽样方式交错抽样,这样设置会使Maxwell旋度方程经离散处理解构为显式差分方程,以致在时间上迭代求解,从而得到式(9)的FDTD差分离散形式为式(10)~(11)。

$$CA(m) = \frac{\frac{\varepsilon(m)}{\Delta t} - \frac{\sigma(m)}{2}}{\frac{\varepsilon(m)}{\Delta t} + \frac{\sigma(m)}{2}} = \frac{1 - \frac{\sigma(m)\Delta t}{2\varepsilon(m)}}{1 + \frac{\sigma(m)\Delta t}{2\varepsilon(m)}} \quad (10)$$

$$CB(m) = \frac{1}{\frac{\varepsilon(m)}{\Delta t} + \frac{\sigma(m)}{2}} = \frac{\Delta t}{\varepsilon(m) \left(1 + \frac{\sigma(m)\Delta t}{2\varepsilon(m)}\right)}$$

$$E_z^{n+1}\left(i,j,k + \frac{1}{2}\right) = CA(m) \cdot E_z^n\left(i,j,k + \frac{1}{2}\right) CB(m) \cdot \left[\frac{H_y^{n+1/2}\left(i + \frac{1}{2},j,k + \frac{1}{2}\right) - H_y^{n+1/2}\left(i - \frac{1}{2},j,k + \frac{1}{2}\right)}{\Delta x} - \frac{H_x^{n+1/2}\left(i,j + \frac{1}{2},k + \frac{1}{2}\right) - H_x^{n+1/2}\left(i,j - \frac{1}{2},k + \frac{1}{2}\right)}{\Delta y} \right] \quad (11)$$

这里得到了电场随时间的变换关系,其他维数与参数的计算与计算流程类似。本文通过模拟电

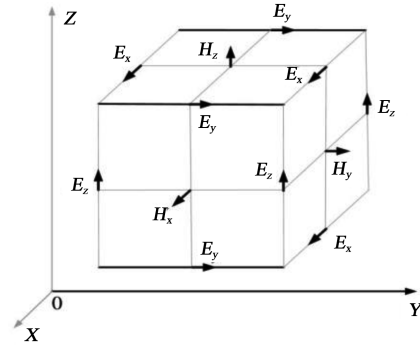


图3 Yee元胞

Fig.3 Yee cell

场与时间的关系,观察平面采集电场幅值,以图像的方式检测内部缺陷。

2.2 FDTD模拟仿真

本文模型仿真基于全波三维电磁场仿真(xfdtd)软件,该软件能够自定义材料、波形、采集类型等。仿真的首要步骤是建立材料模型,文献[31]给出了硅橡胶的介电常数、电导率等。为了能够简化模型,更好地研究太赫兹波检测绝缘子硅橡胶护套气隙、裂纹缺陷的机理,本文建立如图4所示模型,圆柱形状的模型保留了复合绝缘子护套外观弧形特点,左边模型相当于截取了具有缺陷的复合绝缘子硅橡胶保护套的一小部分,其实际为半径为2 mm、高为4 mm的圆柱,圆柱的内部设置一个半径为0.5 mm、高为2 mm的小圆柱来模拟毫米级气隙、裂纹缺陷,右边为完好的硅橡胶模型。

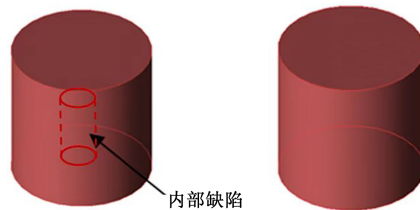


图4 硅橡胶仿真模型

Fig.4 Silicone rubber simulation model

然后需要考虑太赫兹波源,太赫兹波源频率的选取需要考虑缺陷的尺寸,本文气隙裂纹缺陷为毫米级,为了能够将缺陷的尺寸和位置较为精确地展现出来,所用太赫兹波的波长需要在1 mm以下,即频率在0.3 THz以上,但由于FDTD法的限制,频率越高划分网格越多,占用计算资源越大,因此本文选取频率为0.5 THz、幅值为1 V/m的平面高斯波为激励源对模型进行照射。为了更好地模拟绝缘子所处环境,给模型的6个面设置Absorbing吸收边界和Berenger完全匹配层吸收边界(PML)吸收类型,

该边界条件的关键点是在FDTD仿真区域内形成一种特殊介质层,以使入射波无反射地穿过分界面进入PML层,其原理是在截断边界处将电磁场分量区域分裂,此处的波阻抗与相邻介质波阻抗完全匹配进行吸收,从而实现绝缘子处在一个无限大的区域。

最后是电场幅值的提取和网格的剖分,为了更好地提取数据和分析结果,该仿真在离模型中心2.5 mm处左侧放置一个观察点和一个观察面,观察点与缺陷的中心位于同一水平线,且观察点在观察面上,如图5所示,观察点用于展现太赫兹时域光谱图,对比有无缺陷的电场幅值的变化,观察面用于采集反射波的幅值对缺陷成像。时间步长与网格大小有关,如式(12)所示。

$$\Delta t = \frac{1}{c} \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2} \right)^{-1/2} \quad (12)$$

网格剖分应满足库伦法则(网格不能大于波长的1/10),为了使时间步长变小,计算结果更精细,使用亚网格对模型进行二次剖分,剖分大小为0.025 mm,完整的仿真如图5所示。

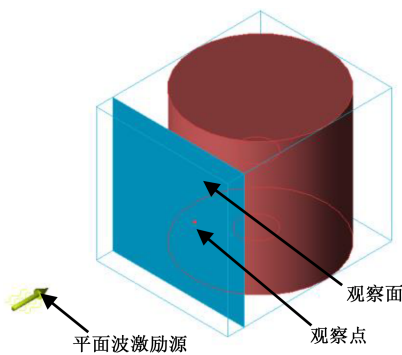


图5 完整仿真图

Fig.5 Complete simulation diagram

3 仿真分析

为了对有无缺陷的两种情况进行对比,本文设置了两组仿真,一组为完整模型,一组设置缺陷。本文1.2节已经分析出,存在缺陷时,第一次太赫兹反射波的特征最为明显,因此根据这一特征进行比较分析,观察点采集到的电场幅值均为从仿真开始到发生图2提到的太赫兹反射波1的情况,如图6所示。

在仿真中激励源的设定位置为无限远处,平面波会穿过传感器,因此在数据采集过程中有、无缺陷两种情况均会出现第一个波峰 A_1 的情况。随着时间的推移,太赫兹波照射到绝缘子模型,在空气-

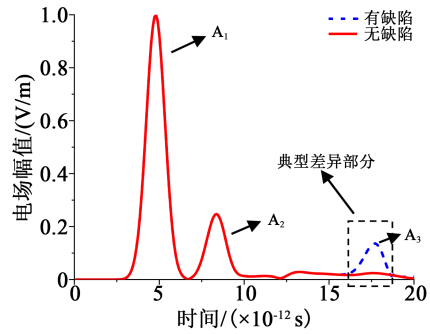


图6 两种情况太赫兹波谱图像

Fig.6 Two cases of terahertz wave image

硅橡胶介质交界处发生反射和折射,太赫兹波折射进入绝缘子模型内部,太赫兹反射波被观察点采集,这是有、无缺陷两种情况下出现的第二个波峰 A_2 ,直到此时二者均无差异。太赫兹折射波在模型内部继续传播,对于无缺陷的情况,太赫兹波不发生反射,观察点采集不到电场,因此表现在图6上是电场幅值接近于0且变化缓慢的曲线;对于有缺陷的情况,太赫兹波传播到气隙、裂纹缺陷时经过硅橡胶-空气介质交界面并在此交界面进行反射被观察点采集,表现在图6上为第3个波峰 A_3 ,此时绝缘子有、无缺陷情况下采集的电场幅值出现差异,如图6虚线框所示。

为了便于分析,将观察点采集的有、无缺陷电场幅值通过观察面以图像的方式展现出来。在图6中,两种情况下在第3个波峰时差异最为明显,气隙、裂纹缺陷的存在导致出现第3个波峰,因此在观察点采集有无缺陷太赫兹波谱图像出现典型差异的时刻,利用此处电场幅值的差异对幅值数据进行处理成像,缺陷成像如图7所示。图7中成像的区域尺寸为4 mm×4 mm,图中虚线框对应实际缺陷的位置和尺寸。从定性上分析,通过对图像观察,太赫兹反射波清晰地表现出硅橡胶内部的缺陷尺寸

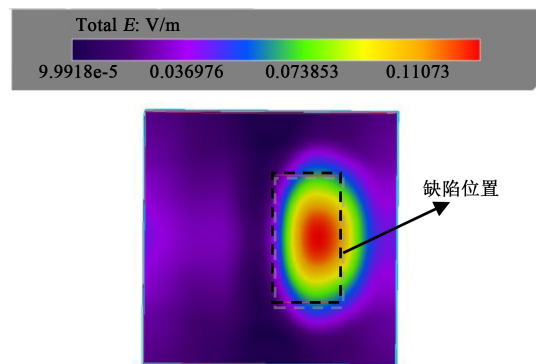


图7 缺陷成像

Fig.7 Defect imaging

和位置,与模型缺陷几乎吻合,只是在横向上存在一些偏差。从定量上分析,缺陷的尺寸为 $2\text{ mm}\times 1\text{ mm}$,图像上缺陷的尺寸为 $1.94\text{ mm}\times 1.12\text{ mm}$,其纵向误差为6%,横向误差为12%。

4 试验案例分析

文献[32]利用太赫兹时域光谱系统对绝缘子进行了透射式检测和反射式检测,表明太赫兹时域光谱技术能够检测气隙、裂纹缺陷,且反射探测方式的检测效果要优于透射探测方式。文献[27]利用太赫兹时域光谱系统对含有人工气孔的复合绝缘子试样进行检测,通过分析太赫兹反射波时域幅值和与参考曲线的时延发现了缺陷。文献[33]使用太赫兹时域光谱系统(如图8所示)对绝缘子蚀损缺陷进行检测,缺陷成像如图9所示。该图像是利用太赫兹反射时域波形波峰差值的平方和进行数据处理,形成二维的图像,图中红色区域的贯穿带状表示缺陷,与实际相符,并且在数值分布上从中心向两端递减,不仅展现了缺陷的位置,还表明了绝缘子的缺陷严重情况。

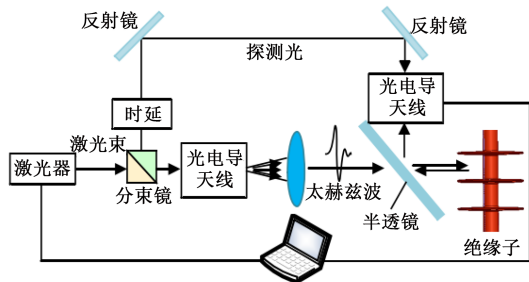


图8 太赫兹时域光谱系统

Fig.8 The THz-TDS system

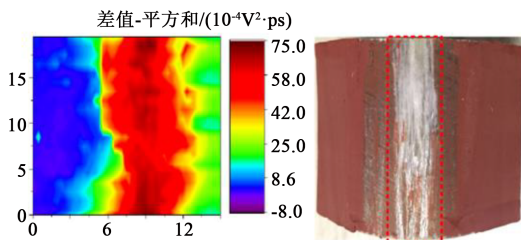


图9 缺陷成像

Fig.9 Defect imaging

5 问题分析与展望

5.1 现存问题

由于太赫兹波穿透能力强、成像分辨率高、抗干扰能力强等优点,基于太赫兹反射成像方式的无损检测技术成为绝缘子缺陷检测领域的研究热点,但其目前停留在实验室阶段,将太赫兹反射成像技

术应用到工程上仍面临一些问题:

(1)探测距离与灵敏度问题。运行在高电压条件下的绝缘子存在一个最低安全检测距离,不同电压等级绝缘子要求程度不同。根据调研结果,35 kV及以上电压水平下安全距离至少4 m。目前太赫兹检测绝缘子的研究处于初步阶段,虽然方法体系已经有了明确的思路,但却受到了设备的限制,目前的试验研究主要在实验室条件下,缺乏现场研究,现场安全距离的检测要求会导致现有设备接收到太赫兹功率很低的问题,从而导致数据处理难度加大,甚至会接收不到太赫兹反射波,使得检测的灵敏度严重下降。

(2)背景噪声与成像问题。运行在高压水平下的复合绝缘子,其周围存在强烈的磁场和电场,除此之外,变电站和输电线路处在一个露天的环境下,白天阳光照射,这些因素均会干扰太赫兹波。而实验室环境条件下,电场和磁场影响较小,光照强度较低,将实验室的检测方法应用到现场可能会导致成像分辨率低的问题,干扰较大时甚至会淹没缺陷信号。

(3)缺陷类型与模式识别问题。现有的复合绝缘子太赫兹成像检测方法依托太赫兹时域光谱系统,大部分利用有无缺陷时接收太赫兹时域反射波的幅值、相位及其数学变换关系或频域波形频谱特征作为特征量对缺陷成像,这只能观察是否存在缺陷,无法判别缺陷类型从而采取有效保护措施。因为不同类型的缺陷其特征量信息不同,成像效果也有显著区别,所以现有研究缺乏依据对绝缘缺陷类型进行识别。

5.2 展望分析

太赫兹反射成像技术检测复合绝缘子硅橡胶内部缺陷在学术上已有一些研究基础,但为了更好地将该项技术应用到工程项目上,需要依据现存的问题做以下研究:

(1)太赫兹装置系统的功率和抗噪研究。实验室环境条件下探测距离较短,太赫兹系统的功率能够保证反射波有效接收,但工程上高压绝缘子存在安全距离,这就需要研制高功率的太赫兹系统保证带有缺陷信息的反射波信号被有效接收;实验室环境条件下干扰光源较少,对太赫兹波探测产生的背景噪声较小,但工程上复合绝缘子工作环境电磁环境复杂,阳光直射,产生较为强烈的背景噪声,因此需要针对太赫兹反射成像系统研制降噪算法或是多次试验找寻一个受干扰影响最小的独特的太赫兹频段。

(2)缺陷类型识别研究。现有的太赫兹反射成

像技术研究只能针对不同的缺陷将缺陷位置和尺寸以成像的方式展现出来,并不能做到缺陷类型的识别,即使检测到缺陷,也无法判别缺陷类型从而采取有效保护措施,这就需要在成像的基础上研制一个缺陷诊断方法,不同类型的缺陷(气隙、裂纹、蚀损等)其反射波时域的幅值、相位或频域频谱存在差异,导致成像的特征量不同,因此可以建立一个完备的复合绝缘子缺陷类型对应的特征库,利用支持向量机(SVM)、神经网络等算法依据特征量去识别缺陷类型,依据缺陷类型采取有效的保护措施。

参考文献:

- [1] 王家福,高岩峰,梁曦东. 复合绝缘子芯棒在表面微电流作用下的水解[J]. 高电压技术,2014,40(3):843-852.
- [2] 贾志东,马国祥,朱正一,等. 复合绝缘子在强风下的形变及应力集中程度[J]. 高电压技术,2015,41(2):602-607.
- [3] 刘瑛岩,李燕,王晶,等. 绝缘子表面对污秽颗粒的粘附力及长程吸引力[J]. 高电压技术,2014,40(4):1010-1016.
- [4] 王胜辉,刘鹏,谢堂文,等. 自然积污绝缘子表面污秽分布特性研究[J]. 电测与仪表,2017,54(8):21-27.
- [5] 戴建军,梁曦东,姚学锋. 高电压复合绝缘子的脆断行为[J]. 清华大学学报(自然科学版),2005(3):344-346.
- [6] 李超红. 复合绝缘子芯棒断裂研究现状[J]. 绝缘材料,2018,51(6):7-11.
- [7] 杨照光,李志新,张忠元,等. 紫外成像仪光谱传递函数对绝缘子电晕放电检测的影响研究[J]. 电测与仪表,2019,56(18):93-98,125.
- [8] 张晓春,欧阳广泽,何洪英,等. 基于红外图像匹配的零值绝缘子检测[J]. 电测与仪表,2019,56(6):100-105.
- [9] 李腾飞. 红外精确测温技术在电力设备状态检修中的应用[J]. 高压电器,2020,56(4):246-251.
- [10] 李艳鹏,杨冬冬,陈昱同. 电力设备缺陷红外热像特征研究与应用[J]. 绝缘材料,2015,48(9):38-41,46.
- [11] 裴少通. 基于红外紫外成像检测技术的绝缘子运行状态分析与评估[D]. 北京:华北电力大学,2019.
- [12] 王黎明,李昂,成立,等. 基于微波反射法的复合绝缘子无损检测方法[J]. 高电压技术,2015,41(2):584-591.
- [13] 王黎明,李昂,成立. 复合绝缘子微波无损检测方法的关键因素研究[J]. 高电压技术,2017,43(1):203-209.
- [14] 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.
- [15] DUVILLARET L, GARET F, COUTAZ J L. A reliable method for extraction of material parameters in terahertz time-domain spectroscopy[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics,2002,2(3):739-746.
- [16] DORNEY T D, BARANIUK R G, MITTLEMAN D M. Material parameter estimation with terahertz time-domain spectroscopy [J]. Journal of the Optical Society of America A Optics Image Science & Vision,2001,18(7):1562-1571.
- [17] 周志成,张中浩,刘建军,等. 太赫兹波技术在电网设备绝缘材料检测中的应用[J]. 高压电器,2019,55(10):216-223.
- [18] SATO R, KOMATSU M, OHKI Y, et al. Observation of water trees using terahertz spectroscopy and time-domain imaging[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2011,18(5):1570-1577.
- [19] KOMATSU M, SATO R, MIZUNO M, et al. Feasibility study on terahertz imaging of corrosion on a cable metal shield[J]. Japanese Journal of Applied Physics,2012,51(12):2405.
- [20] TAKAHASHI S, HAMANO T, NAKAJIMA K, et al. Observation of damage in insulated copper cables by THz imaging[J]. NDT & E International,2014,61(1):75-79.
- [21] 谢声益,杨帆,黄鑫,等. 基于太赫兹时域光谱技术的交联聚乙烯电缆绝缘层气隙检测分析[J]. 电工技术学报,2020,35(12):2698-2707.
- [22] KANG S B, KIM W S, CHUNG D C, et al. Degradation diagnosis of transformer insulating oils with terahertz time-domain spectroscopy[J]. Journal of the Korean Physical Society,2017,71(12):986-992.
- [23] WANG L, TANG C, ZHOU S, et al. A novel method for the deterioration state evaluation of mineral insulating oil by THz time-domain spectroscopy[J]. IEEE Access,2019,7:71167-71173.
- [24] 李猛. 基于太赫兹技术的变压器绝缘油的检测与分析[D]. 徐州:中国矿业大学,2019.
- [25] LEE I S, LEE J W. Effects of thermal aging on cellulose pressboard using terahertz time-domain spectroscopy[J]. Current Applied Physics,2019,19(11):1145-1149.
- [26] 郭小弟,王强,谷小红,等. 玻璃纤维复合材料缺陷的太赫兹光谱检测实验分析[J]. 红外技术,2015,37(9):764-768.
- [27] CHENG L, WANG L, MEI H, et al. Research of nondestructive methods to test defects hidden within composite insulators based on THz time-domain spectroscopy technology[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2016,23(4):2126-2133.
- [28] FUSE N, FUKUCHI T, TAKAHASHI T, et al. Evaluation of applicability of noncontact analysis methods to detect rust regions in coated steel plates[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science & Technology,2012,2(2):242-249.
- [29] YAKOVLEV E V, ZAYTSEV K I, DOLGANOVA I N, et al. Nondestructive evaluation of polymer composite materials at the manufacturing stage using terahertz pulsed spectroscopy[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science & Technology,2015,5(5):810-816.
- [30] AJITO K. Terahertz spectroscopy for pharmaceutical and biomedical applications[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science & Technology,2015,5(6):1140-1145.
- [31] 黎卫国,郝艳捧,熊国锟,等. 覆冰复合绝缘子电位分布有限元仿真[J]. 电工技术学报,2012,27(12):29-35.
- [32] 赵庆州,李昂,成立,等. 太赫兹电磁波检测复合绝缘子内部缺陷可行性研究[J]. 陕西电力,2015,43(3):63-66,97.
- [33] 张中浩,梅红伟,刘建军,等. 基于太赫兹波的复合绝缘子界面检测研究[J]. 中国电机工程学报,2020,40(3):989-999.