

太赫兹波技术在电网设备绝缘材料检测中的应用

周志成¹, 张中浩², 刘建军¹, 梅红伟², 高嵩¹, 王黎明²

(1. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 南京 211103; 2. 清华大学深圳研究生院, 广东 深圳 518055)

摘要: 太赫兹波在绝缘介质中具有良好的穿透性、直线性、抗干扰性,且对人体无害,随着太赫兹波发射和探测技术的成熟,在材料无损检测、光谱分析、航空、医学等领域开始广泛应用。文中阐述了太赫兹波的产生、探测原理,以及太赫兹透射波、反射波在绝缘介质检测中的探测方式;分析了基于时域、频域信号的特征参量对被测物体进行太赫兹成像的原理;最后,综合阐述了太赫兹波在电网设备绝缘材料检测中的应用场景和技术可行性。

关键词: 太赫兹; 绝缘设备; 无损检测; 成像; 光谱分析

Application of Terahertz Wave Technology in Insulation Detection of Grid Equipment

ZHOU Zhicheng¹, ZHANG Zhonghao², LIU Jianjun¹, MEI Hongwei², GAO Song¹, WANG Liming²

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China;

2. Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Guangdong Shenzhen 518055, China)

Abstract: Terahertz wave has good penetrability, linearity and anti-interference property in insulating medium, and it is harmless to human body, therefore it has been widely applied to many fields, such as nondestructive testing of material, spectrum analysis, aviation, and medicine. In this paper, the generation and detection principles of terahertz wave, as well as the detection modes of terahertz transmitted wave and reflected wave, are described. The terahertz imaging principle of measured object based on the characteristic parameters of signals in time domain and frequency domain is analyzed. Application scenarios and technical feasibility of terahertz wave in the insulation material detection of power grid equipment are described.

Key words: terahertz; insulated equipment; nondestructive testing; imaging; spectrum analysis

0 引言

太赫兹波(THz)是一种频率介于红外波和微波之间的电磁波,其频率在0.1~10 THz内(1 THz=10¹² Hz),波长范围在30 μm~3 mm,在其低频区可以用麦克斯韦电磁理论分析,高频区可以用量子理论分析,在交叉区域的太赫兹波不完全适用于电磁学或光子学^[1-3]。THz在上世纪初已经有了初步概念,但由于发射和检测技术不够成熟,该波段未得到足够的研究。近年随着飞秒激光技术的迅速发展,为THz

激发提供了可靠的光源^[4-5],并且THz的检测技术也日益进步因此在很多领域开始应用。太赫兹波具有以下突出特点^[6-8]:

1)穿透能力强:能以很小的衰减穿透如陶瓷、脂肪、碳板、布料、塑料等物质,还可无损穿透沙尘烟雾。

2)探测安全性高:太赫兹波是一种不电离的射线,1 THz频率的光子能量只有约4 meV,不会破坏被检测物质。

3)物质识别能力好:太赫兹波频带很宽,许多生物大分子的振动和转动能级,常规电介质、半导体、

收稿日期:2019-03-24; 修回日期:2019-05-25

基金项目:国家重点研发计划(2017YFB0902702);国网江苏省电力有限公司科技项目(J2017042)。

Project Supported by the National Key Research and Development Program of China(2017YFB0902702), Science and Technology Project of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd.(J2017042).

超导、薄膜等材料的声子振动能级均落在其波段范围,因此具有良好的物质识别能力。

4)成像能力强:通过对样品太赫兹波的反射波振幅或相位信息进行处理和分析,可实现样品的THz成像。

5)抗干扰能力强:THz波的典型脉宽在皮秒量级,利用取样测量技术,可以有效地抑制背景辐射噪声的干扰。

6)大容量、高保密的宽带信息载体:太赫兹波方向性好,散射小、频带宽、测量信噪比高,适合于大容量与高保密的数据传输。

基于太赫兹的这些技术特点,其在无损检测、光谱分析、成像等多面迅速发展,在生物医学、航空航天、安检防恐、化学化工、物理等领域应用广泛。电网设备具有运维成本高、运输难度大、检修不方便等特点,探索合理高效的无损检测手段一直是电网领域的研究热点,而目前针对电网设备绝缘材料(如硅橡胶、环氧树脂等高分子材料)的无损检测手段有X射线检测、超声波探测、红外、紫外检测等,这些检测手段在内部微米级小缺陷的检测中存在精度不够的问题,而高电压设备绝缘材料内部微米级的小缺陷可能导致击穿等故障。根据太赫兹波的技术特点,其在绝缘设备的微米级缺陷无损识别中有较大的应用潜力,因此探索基于太赫兹波的检测手段具有重要意义。

根据太赫兹波与电网设备绝缘材料检测的技术相关性,文中重点介绍太赫兹波光谱技术、基于脉冲时域太赫兹波成像这两方面技术在电网设备检测中的应用,探讨太赫兹技术的应用前景。

1 太赫兹波的研究现状

目前太赫兹技术的应用障碍主要在于缺少大功率、便携、低价的太赫兹光源。在快速光子学、激光学、材料学的研究中,许多光源具有成为太赫兹光源的潜力,这些光源可根据发光机理分为3类:不相干的热辐射源、宽频段的太赫兹脉冲源和窄频段的连续波源。

其中,基于光学效应产生太赫兹脉冲的方法有:产生宽带亚皮秒辐射的光电导(D. H. Auston 和 D. Grischkowsky 等在 20 世纪 80 年代利用天线辐射原理设计)、光整流(1992 年,张希成等研制)、等离子体四波混频(21 世纪初期, M. Kress 等在空气等离子体产生太赫兹波的基础上,利用 BBO 晶体诱导激发四波混频效应产生太赫兹辐射),以及太赫兹波参量

源、太赫兹气体激光器等。

基于电子学的太赫兹辐射源有返波振荡器(20 世纪 80 年代末期, P. Guidee 等首次实现了 850 GHz ~ 1 THz 的可调谐太赫兹辐射,平均辐射功率达到 2 mW)、量子级联激光器(2002 年,英国和意大利合作研制)、自由电子激光器(2002 年, M. C. Martin 等获得 1 W/cm² 的太赫兹辐射功率密度)、回旋管(2003 年, M. Kuntze 等获得了千瓦级峰值功率的太赫兹连续辐射)等^[9]。太赫兹辐射源分类见图 1。

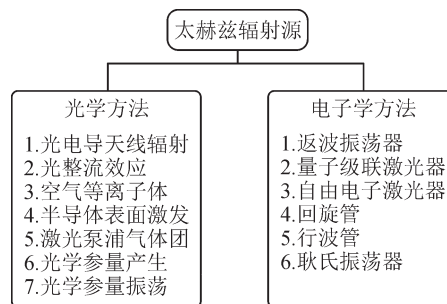


图1 太赫兹辐射源分类

Fig. 1 Terahertz radiant source classification

太赫兹探测也是太赫兹技术中的关键环节,由于目前太赫兹波的功率较低,需要具有高灵敏度、高信噪比的探测技术才能对携带检测对象特性信息的太赫兹波信号进行采集。根据太赫兹波的类型,探测波形分为连续型波和脉冲型波两种。连续太赫兹波的探测有热辐射探测器(测辐射热计、高莱探测器、热释电探测器)和窄带探测器(肖特基二极管、场效应晶体管)。脉冲太赫兹波的探测方法有光电导取样(20 世纪 80 年代, Auston 等利用多种不同结构的偶极天线首次探测到脉冲太赫兹信号)和电光取样(1996 年,张希成等利用自由空间电光采样技术对太赫兹脉冲信号进行了测量),两种方法是应用最广的相干探测 THz 脉冲的方法。相干探测法是指探测时,产生信号的激光与太赫兹脉冲叠加,通过计算相对时间延迟,可得到太赫兹波的相位信息。此外还有空气探测太赫兹波脉冲,该方法是在外置偏置电场下,探测光电离空气,并在太赫兹波作用下产生二次谐波,通过该二次谐波实现探测。太赫兹探测分类见图 2。

2 太赫兹时域光谱技术

2.1 太赫兹时域光谱原理

太赫兹时域光谱技术(terahertz time-domain Spectroscopy, THz-TDS)是 20 世纪 80 年代由 AT&T、Bell 实验室和 IBM 公司研究中心研究出的一种光谱技术。由于许多分子(如氢键)的转动、振动能级和

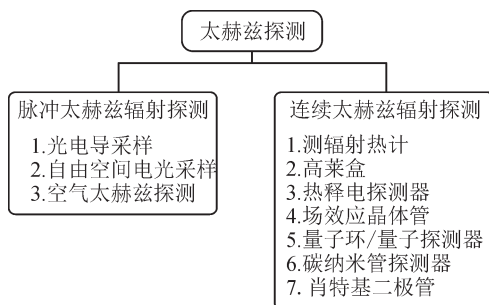


图2 太赫兹探测分类

Fig. 2 Terahertz detection classification

分子间的弱相互作用能级位于太赫兹波段^[10],因此如果建立物质成分、分子结构与对应吸收谱的关系,便可以通过太赫兹光谱分析物质材料的性质^[11]。THz-TDS系统结构见图3。其中包括了透射和反射波测量方法。

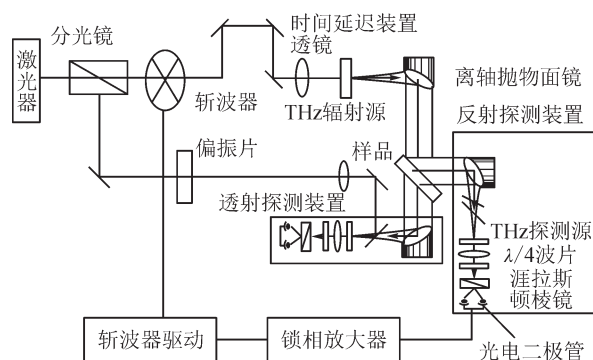


图3 太赫兹时域光谱系统

Fig. 3 Terahertz time-domain spectral system

该系统主要由飞秒激光器、THz产生装置、THz探测装置和时延控制系统组成。飞秒激光器产生的光脉冲通过分束镜后分为一路泵浦光和一路探测光,泵浦光经过时延系统在光电导天线或半导体晶体中激发THz辐射,探测光和产生的THz脉冲一起入射到THz检测器件上,通过调整探测光和THz脉冲间的时间延迟,可以对THz脉冲的整个波形进行探测。由于THz脉冲峰值功率高,通过相干探测可获取THz脉冲的实时功率,因此其信噪比较高^[12]。通过快速傅里叶变化处理测量信号与原始信号,可以求得样品的折射率、吸收系数等。平板样品中太赫兹波反射波频域波形见图4。从图4中可看出,不同频率对应的功率谱密度。

2.2 太赫兹光谱分析材料特性

太赫兹波在平板介质中的传播见图5。

太赫兹波在介质中经过多次折反射后入射到接收端, E_n 表示接收端接收的第 n 次透射波的信号。设 E_{ref} 为没有样品时的太赫兹信号,从而得出复传输函数^[13],即

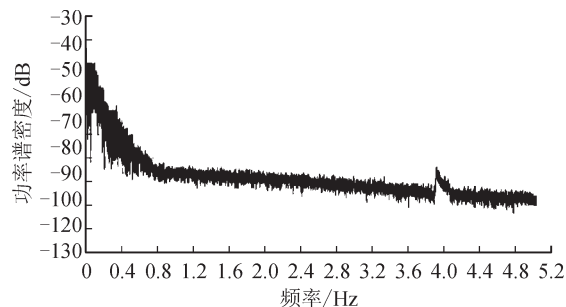


图4 太赫兹反射波频域波形

Fig. 4 Frequency domain waveform of terahertz

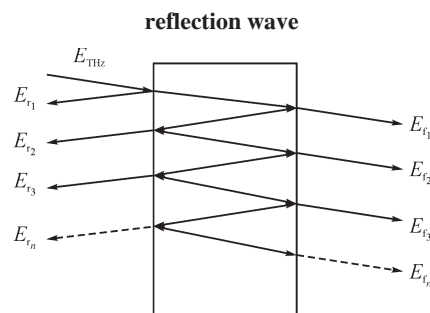


图5 太赫兹波传播模型

Fig. 5 Terahertz wave propagation model

$$H(\omega) = \frac{E_{f_n}}{E_{ref}} = \frac{4n}{(1+n^2)} \left(\exp \left\{ \frac{-jd[n(\omega)-1]\omega}{c} \right\} FP(\omega) \right) \quad (1)$$

$$FP(\omega) = \frac{1 - \left(\frac{1+n}{1-n} \right)^{2m+2} \exp[-j(2m+2)n(\omega)d\omega]}{1 - \left(\frac{1+n}{1-n} \right)^2 \exp[-j2n(\omega)d\omega]} \quad (2)$$

式(1)、(2)中: $H(\omega)$ 为复传输函数; $FP(\omega)$ 为多次反射引起的变化因子; M 为透射次数; $n(\omega)$ 为复折射率。当样品厚度较大,透射次数可视为1。

根据复传输函数和复折射率的相量形式为

$$H(\omega) = \rho(\omega) \exp[-j\phi(\omega)] \quad (3)$$

$$n(\omega) = n(\omega) - j\kappa(\omega) \quad (4)$$

$$\rho(\omega) = \frac{4[n^2(\omega) + \kappa^2(\omega)]^{1/2}}{[n^2(\omega) + 1]^2 + \kappa^2(\omega)} \exp \left[-\frac{\kappa(\omega)d\omega}{c} \right] \quad (5)$$

$$\phi(\omega) = \frac{[n(\omega)-1]\omega d}{c} + \arctan \left[\frac{\kappa(\omega)}{n^2(\omega) + n(\omega) + \kappa^2(\omega)} \right] \quad (6)$$

复折射率可根据迭代法求出,进而可求得介电常数^[12]。

使用美国 Advance Photonix, Inc(API)公司生产的太赫兹探测系统对室温和高温两种条件下固化的环氧树脂胶平板的光谱特性进行的研究显示,低温固化样品的太赫兹能量透过率在0.6~1.5 THz区间,且随着厚度增加而减小,低温固化样品的吸收系数大于高温固化的样品^[14]。表明可以用太赫兹波的吸收系数来分析环氧树脂固化温度的差异。

对高频层压板(聚四氟乙烯玻璃纤维增强材料)和环氧玻璃布层压板测试了透射光谱。经过离散傅里叶变换得到透射信号的频域信号,进而求得幅度和相位,结合牛顿迭代法可求解得到复折射率,并求得介电常数和损耗。对高频层压板测试表明,相对介电常数随频率保持稳定,太赫兹频段的损耗较低频段有所增多。表明可通过太赫兹波对材料介电常数、频谱特性进行分析。

对高、低阻硅材料进行了测试,高阻硅在太赫兹频段损耗极低,损耗随频率增加呈单调上升趋势,低阻硅在该频段损耗较高。表明高阻硅可用在太赫兹光学器件中。

通过测试煤岩介质的透射光谱,分析了其频域的的吸收谱、折射率,根据文[15]中的公式(7),求得太赫兹频段下煤岩的介电常数。

$$\begin{cases} n_i = \alpha\lambda/4\pi \\ \varepsilon_i = \alpha n_r \lambda/2\pi \\ \varepsilon_r = n_r^2 - n_i^2 \\ \varepsilon(\omega) = (n_r + in_i)^2 \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中: α 表示吸收系数; n_r 表示复折射率实部; n_i 表示复折射率虚部; ε_r 表示复介电常数实部; ε_i 表示复介电常数虚部。

文献中可通过对太赫兹波的频域信号进行处理,获取不同材料的介电常数;通过光学常数与介电常数、电导率的关系求得复电导率、介质损耗角正切等电气参数^[16-21],这些参数的变化与材料的运行性能密切相关,常能作为材料性能是否满足需要的判断依据。通过分析不同材料中参数与频率变化的规律性,对材料的受潮特性、密度特性、介电特性等进行分析,可在绝缘材料的性能评价、老化评估、寿命分析中有应用价值。

2.3 太赫兹光谱分析材料缺陷

文[22]使用透射式光谱对玻璃纤维样品的分层缺陷进行检测,试验样品有含分层缺陷的玻璃纤维夹杂聚四氟乙烯样品、夹杂金属缺陷和受热损伤的玻璃纤维样品,样品均为平板状。通过对透过样品的时域太赫兹波形进行快速傅里叶变换,求得不同样品中太赫兹波的折射率和吸收系数可见式(8)。经对比,含杂质、分层缺陷的样品在特定的频率处存在特征吸收峰,因此对于薄样品,可通过透射式太赫兹波光谱分析对样品中的缺陷进行诊断。

$$\begin{cases} n(\omega) = \phi(\omega)c/(\omega d) + 1 \\ \alpha(\omega) = \frac{2\kappa(\omega)\omega}{c} = \frac{2}{d} \ln \frac{4n(\omega)}{A(\omega)[n(\omega) + 1]^2} \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中: $\alpha(\omega)$ 为吸收系数; $k(\omega)$ 为消光系数; $A(\omega)$

为接收信号与参考信号的幅值比; $\Phi(\omega)$ 为接收信号与参考信号的相位差。

此外,反射光谱与透射光谱在光路结构上的区别是,反射光谱接收反射脉冲波,由于样品在摆放时微小的角度差都会造成光路的改变,经过理论和试验表明,折射系数的测量误差与频率成线性关系,折射系数较大时误差也越大。反射光谱测量存在一定的误差性,因此目前透射光谱用的更多^[23]。文[24]测试了含内部孔洞的聚合物的太赫兹光谱特性,尽管孔隙的介电常数与聚合物相差不大,但是仍会导致在频谱特性上有差异,进而可据此作为内部缺陷检测的依据。文[25]研究了太赫兹波在透射过缺陷后的光谱特性,可以有效检测材料内的孔洞,结合有限元仿真对比了不同频率波在透射过缺陷后的分散性。在对毫米级缺陷检测时,由于波的衍射极限效应,需要频率1 THz以上的太赫兹波才能避免明显的衍射。

综合以上文献中对太赫兹光谱测试材料特性的分析,主要通过对太赫兹信号进行傅里叶变换,在频域研究材料的光谱特性,获取吸收谱、折射率等参数,并结合相关公式求得太赫兹频段的材料介电常数、介质损耗角正切、复电导率等参数。

3 太赫兹成像技术

3.1 太赫兹成像研究背景

1995年,M. C. Nuss等第一次利用太赫兹时域光谱系统实现了太赫兹光谱成像,此后各种太赫兹成像技术逐步发展起来。目前主要有实时成像、近场成像、层析成像、连续波成像、脉冲反射波成像5种成像。

实时成像是太赫兹波透射过样品后,被高密度聚乙烯透镜聚焦在电光晶体上,之后通过Pockels效应,由探测脉冲将图像信号转换为光频信号,并由CCD相机呈现;太赫兹层析成像是利用太赫兹反射脉冲延迟时间和强度的不同,通过层析重构算法得出样品的内部形态。

太赫兹近场成像是在距离样品波长甚至亚波长范围内成像,目前主要通过4类方法实现:利用亚波长物理孔径或虚拟孔径局域的太赫兹波、基于针尖的亚波长成像、激光聚焦后产生亚波长太赫兹波、微纳结构的太赫兹波。近场成像可以突破传统成像受到光学衍射的限制,但是需要样品放置位置在距辐射源亚波长范围中。

另外太赫兹计算机层析和衍射层析是根据透射测定法分析物体内部结构,提取透射波中的信息

实现层析处理。

太赫兹连续波成像是以逐点扫描的方式,通过记录透过样品或反射后连续太赫兹波的强度信息进行成像,由于采集的是强度信息,所以在各扫描点无需暂停,同时由于光束孔径较大,扫描较大,但成像分辨率相对较低,为毫米级。

脉冲反射波成像是通过扫描方式获取被测物体的点阵数据,逐点提取时域或频域的成像信息,进而形成整体成像。

对于电网绝缘设备,由于其内部亚毫米级的缺陷可能会造成严重的内绝缘故障,因此需要使用精度较高的成像法进行检测,考虑到透射式存在光路角度偏差难以控制的情况,近场成像对样品的摆放要求高、现场应用困难,连续波成像精度较低,因此太赫兹脉冲反射波成像可能是应用潜力较大的一种方案,需要重点对该方法的研究进展进行分析。

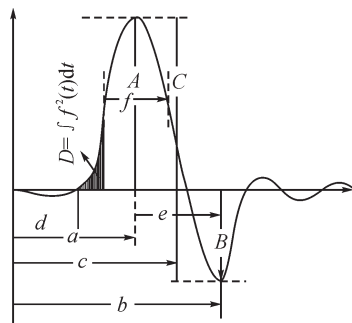
3.2 THz脉冲反射波成像原理

脉冲式太赫兹系统中应用较多的是THz时域光谱技术(TDS),该系统通过光电导或光整流产生宽频带THz脉冲,THz时域光谱系统结构见图1。THz-TDS系统对THz的探测为单点探测,通过逐点测试,可得到二维矩阵点的反射波信息。成像原理有时域信号成像和频域信号成像两种方法,其中时域信号成像是由于该反射波中携带了相位、幅值等信息,通过对时域信号的峰峰值、信号平均强度等进行处理可得到样品的二维图像;频域信号成像是通过对频谱峰值、峰值对应频率等频域信息进行处理而形成二维图像^[26]。此外,还可以结合层析成像的方式,对样品进行三维内部结构的重建,由于目前高精度光学位移平台技术的进展,可以实现微米精度的步进控制,考虑了衍射极限后,THz脉冲仍实现对百微米级缺陷的探测。

3.3 THz脉冲反射波成像技术

目前THz的成像主要是利用时域及频域波形中的特征参量,两种波形中目前可以提取的特征参量见图6、7^[27]。

通过控制步进载物台的平移,对被测样品二维扫描,通过对信号的强度和相位进行提取,依据图6或图7中时域频域信号的特征参量对每一个成像点进行灰度值设定,从而可呈现太赫兹图像。由于每个采样点需要耗时50 ms,要采集较高精度的数据需要消耗几十分钟的时间。结合图像降噪等图像处理办法可以增强图像的清晰度^[27]。文[28]对航空泡沫—铝复合结构的缺陷检测进行了研究,人工在样品中制作了孔洞、裂纹、脱粘、夹杂等的缺陷,通



A—信号峰值; B—信号谷值; C—峰峰值;
D—能量积分值; a—信号峰值时刻; b—信号谷值时刻;
c—信号过零时刻; d—预过零时刻; e—峰值和谷值时刻差;
f—峰值时宽。

图6 THz-TDS时域成像参量

Fig. 6 THz-TDS time domain imaging parameters

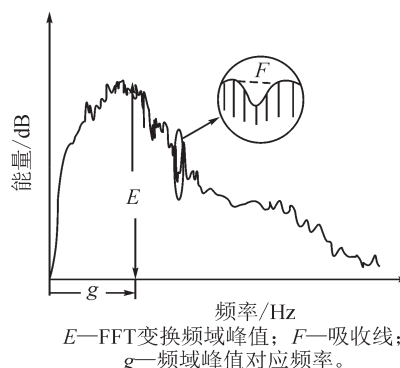


图7 THz-TDS频域成像参量

Fig. 7 THz-TDS imaging parameters in frequency domain

过时域信号和频域信号分别进行成像分析,脱粘的程度与反射波的波前峰的变化有关,杂质和脱粘缺陷成像差异较小,可以通过反射波的相位区分,孔洞对太赫兹波谱的散射较为强烈,导致成像中孔洞的边缘较暗、中心亮度较高,裂纹缺陷的时域谱特征是反射波振幅减小。文中提出基于吸收系数的成像方法,可以提高成像对比度。此外,通过对多帧图像进行超分辨率重建,可以有效提升图像的清晰度。文[29]对比了时域和频域的多种不同成像方式的效果,分析了在不同情况下如何选取成像模型,可以有效提升成像质量。对脉冲成像数据的处理算法进行了列举和分析,由于脉冲波形中会有背景噪声,通过带通滤波器可有效抑制试验中的噪声。根据信号中相位与时延的关系,采用相位成像,可以获取被测样品的厚度。此外,对反射波信号进行频域处理,结合样品介电常数可重构样品的三维图像。文[30]对比了脉冲成像和连续波成像,脉冲成像能够携带光谱、深度、折射信息,成像应用前景更广,但成像速度、成本目前仍有一定的不足。文[31]对比了太赫兹和红外中波段被动成像的区别,太赫兹成像的精度依靠空间分辨率的提高,

红外热成像的精度取决于热成像仪的精度。两种成像均可以探测被织物遮挡的物体。文[32]展示了根据太赫兹波飞行时间对聚合物材料进行断层成像,从而可以在聚合物生产过程中检测内部缺陷,提高品控。文[33]测试了太赫兹波在聚乙烯片材水树中的传播特性,由于水分对太赫兹波有较强的吸收效果,试验中太赫兹反射波对应的能量分布位置与水树位置一致,之后成功对水树进行了成像。

3.4 THz成像图像处理

使用图像降噪增强、滤波可以使原始太赫兹图像的信噪比提高,目标物更突出,为了进一步提升图像质量,可以采用对多幅太赫兹图像进行高分辨率复原和重构的方法,提升了太赫兹成像的分辨率^[26]。典型的太赫兹图像处理的流程见图8。

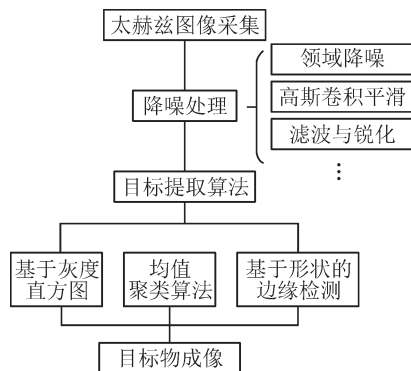


图8 太赫兹图像处理流程举例

Fig. 8 Example of terahertz image processing

文[34]提出太赫兹焦平面阵列器成像系统,是通过焦平面阵列探测器对太赫兹波的辐射能量进行探测,从而进行成像,并通过图像处理方法、硬件优化设计提升成像质量。文[35]提出一种太赫兹成像用于安检的应用,通过改进的区域k-均值聚类算法实现了违禁物品的目标识别。文[36]通过结合灰度直方图和灰度等值线,实现了覆盖物的检测。

4 结论

4.1 基于太赫兹光谱的材料分析

目前太赫兹波在介质中的传播特性研究开展较多,也有相对较多的理论分析,太赫兹波目前的应用热点在于光谱特性分析和成像方面,其中这两方面都包含了无损检测。与电网设备绝缘材料检测紧密相关的有以下几方面。

1)材料成分结构分析。太赫兹光谱频带较宽,通过测试绝缘材料的太赫兹光谱特性,可以分析材料化学键、结构成分的情况。通过在频域求取一些电气性能参数,可用于表征材料的性能变化。不同于相对较为成熟的傅里叶红外光谱分析,目前太赫

兹光谱分析仍有特征吸收峰对应不明、应用场景不明确的情况,需要通过大量样本分析光谱特性与材料成分的对应关系,提升太赫兹光谱分析的实用价值。

2)材料性能参数分析。经过对太赫兹信号傅里叶频谱变换可以测得吸收谱,结合公式可求得吸收系数、折射率、太赫兹波段介电常数、介质损耗角正切值等参数。据此分析材料的性能参数。

4.2 基于太赫兹波的设备无损检测

与其他无损检测技术相比,太赫兹检测技术在检测非金属材料内部缺陷方面具有独特优势。太赫兹波可以穿过不透明的材料,检测到可见光探测不到的内部缺陷。它还可以用于绝热材料,对于这种材料热成像失效。和X射线相比,它对人体不构成辐射危害,还能为软材料提供更好的对比度。与超声波相比,它可以根本不接触物体表面便实现成像,而且在有些材料中声波极度衰减,太赫兹波对于这些材料却适用。

鉴于太赫兹反射脉冲能够携带相位和幅值信息,目前有许多针对反射脉冲波的特性及成像研究,这些研究思路为太赫兹波脉冲用于绝缘材料无损检测指明了研究方向。研究重点主要有:

1)无损检测特征量选取。在绝缘材料的检测中,由于不同设备中不同缺陷的本身几何结构、电学参数有差异,其反射的太赫兹波特征会有不同,因此需要对不同缺陷和设备预设特征参量^[37-40];此外,目前太赫兹提取的特征信息多为直观的频域或时域波形中体现的数据量,仍有新的特征量可作为检测依据。结合数学方法^[41],对时域或频域数据进行二次处理,凸显绝缘设备中缺陷等信息的“异常性”,可进一步挖掘太赫兹脉冲波中的深度信息。

2)针对绝缘材料的太赫兹成像方面,可在以下几方面开展研究:①结合文1中的特征量改进成像方法^[42-44]。②图像处理优化。图像处理是发展较为成熟的领域,针对太赫兹图像的特点,针对性地选取算法,提升信噪比,是太赫兹成像的一个重要研究方向。③层析成像。根据太赫兹波时间信息,对被测物进行层析分析,对被检样品的内部结构进行建模^[45]。④制定不同绝缘设备及材料的成像策略,由于不同绝缘设备本身结构的差异,如柱状、平板状,因此太赫兹成像装置的结果、工作方式也因此发生变化,需要提供针对性的成像方案。

参考文献:

- [1] 张存林. 太赫兹感测与成像[M]. 北京:国防工业出版社, 2008.

- ZHANG Cunlin. Terahertz sensing and imaging[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.
- [2] 牧凯军, 张振伟, 张存林. 太赫兹科学与技术[J]. 中国电子科学研究院学报, 2009, 4(3):221-230.
- MU Kaijun, ZHANG Zhenwei, ZHANG Cunlin. Terahertz science and technology[J]. Journal of China Institute of Electronic Science, 2009, 4(3): 221-230.
- [3] 刘宏翔, 姚建铨, 王与焯, 等. 太赫兹波近场成像综述[J]. 红外与毫米波学报, 2016, 35(3):300-309.
- LIU Hongxiang, YAO Jianquan, WANG Yuye, et al. A summary of terahertz near field imaging[J]. Infrared and Millimeter Wave Journal, 2016, 35(3): 300-309.
- [4] MITROFANOV O, THOMPSON R J, SIDAY T, et al. Nano-structured photoconductive terahertz detector for near-field microscopy[C]//International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves.[S.l.]:[s.n.], 2016:1-2.
- [5] 常胜利, 王晓峰, 邵铮铮. 太赫兹光谱技术原理及其应用[J]. 国防科技, 2015, 36(2):17-22.
- CHANG Shengli, WANG Xiaofeng, SHAO Zhengzheng. Terahertz spectroscopy principle and its application[J]. Defense Technology, 2015, 36(2): 17-22.
- [6] MALZ S, JAIN R, PFEIFFER U R. Towards passive imaging with CMOS THz cameras[C]//International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves.[S.l.]: IEEE, 2016:1-2.
- [7] 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 & Electrical Insulation, 2016, 23(4):2126-2133.
- [8] 郭澜涛, 牧凯军, 邓朝, 等. 太赫兹波谱与成像技术[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(1):51-56.
- GUO Lantao, MU Kaijun, DENG Chao, et al. Terahertz spectroscopy and imaging technology[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(1): 51-56.
- [9] 胡鹏, 李成钢, 陈大兵. 电缆GIS终端环氧套管开裂原因分析及对策研究[J]. 电力工程技术, 2017, 36(1): 102-105.
- HU Peng, LI Chenggang, CHEN Dabing. Analysis of causes and countermeasures of epoxy casing cracking in cable GIS terminal[J]. Power Engineering technology, 2017, 36(1): 102-105.
- [10] 何明霞, 陈涛. 太赫兹科学技术在生物医学中的应用研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(6):471-483.
- HE Mingxia, CHEN Tao. The application of Terahertz science and technology in biomedicine[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2012, 26(6): 471-483.
- [11] 王芳, 刘云飞. 迅猛发展的太赫兹—太赫兹技术在无损检测中的应用[J]. 三江高教, 2014(4):25-29.
- WANG Fang, LIU Yunfei. The rapid development of terahertz—the application of terahertz technology in NDT[J]. Sanjiang High Education, 2014 (4): 25-29.
- [12] 袁慧. 太赫兹成像技术若干问题的研究[D]. 北京:北京理工大学, 2016.
- YUAN Hui. Research on several problems of Terahertz imaging technology[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
- [13] 庄建兴, 成立, 洪伟, 等. 基于时域光谱技术的材料特性研究[J]. 微波学报, 2016, 32(2):6-10.
- ZHUANG Jianxing, CHENG Li, HONG wei, et al. Research on material properties based on time domain spectroscopy[J]. Microwave Journal, 2016, 32(2):6-10.
- [14] 张瑾, 崔洪亮, 施长城, 等. 环氧树脂胶的太赫兹光谱特性研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(4):919-923.
- ZHANG Jin, CUI Hongliang, SHI Changcheng, et al. Terahertz spectroscopic properties of epoxy resin[J]. Spectroscopy and Spectroscopic Analysis, 2016, 36 (4): 919-923.
- [15] 代秀松, 赵振宇, 何晓勇, 等. CaCu₃Ti₄O₁₂陶瓷在太赫兹频段的介电特性研究[J]. 光学学报, 2015(5):279-284.
- DAI Xiu song, ZHAO Zhenyu, HE Xiaoyong, et al. Study on dielectric properties of CaCu₃Ti₄O₁₂ ceramics in the terahertz band [J]. Optical Journal, 2015(5): 279-284.
- [16] 王昕, 苗曙光, 丁恩杰. 煤岩介质在太赫兹频段的介电特性研究[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(4):739-746.
- WANG Xin, MIAO Shuguang, DING Enjie. Study on dielectric properties of coal and rock medium in terahertz band[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2016, 45(4): 739-746.
- [17] 刘陵玉, 杨传法, 张献生, 等. 太赫兹波段煤的湿度与介电特性关系[J]. 煤炭学报, 2016, 41(2):497-501.
- LIU Lingyu, YANG Chuanfa, ZHANG Xiansheng, et al. Relationship between humidity and dielectric properties of coal in terahertz band[J]. Journal of Coal, 2016, 41(2): 497-501.
- [18] 胡大海, 赵锐, 杜刘革, 等. 太赫兹平板材料介电常数测试技术[J]. 微波学报, 2016, 32(5):1-5.
- HU Dahai, ZHAO Rui, DU Liuge, et al. Terahertz dielectric constant measurement technology[J]. Microwave Journal, 2016, 32(5): 1-5.
- [19] 葛忆, 叶明旭, 杨军, 等. 液晶介电常数在微波至太赫兹频段测试技术[J]. 电子科技, 2017, 30(4):123-127.
- GE Yi, YE Mingxu, YANG Jun, et al. Liquid crystal permittivity in microwave to terahertz band testing technology [J]. Electronic Technology, 2017, 30(4): 123-127.
- [20] GARCIA-WERNERSSON J, RODILLA H, DIAZ-BOLADO A, et al. Non-destructive density measurements of pharmaceutical products by THz imaging[C]//International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves.[S.l.]:[s.n.], 2016:1-2.
- [21] HUA Y, ZHANG H. Qualitative and quantitative detection of pesticides with terahertz time-domain spectroscopy[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2010, 58(7):2064-2070.
- [22] 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.
- GUO Xiaodi, WANG Qiang, GU Xiaohong, et al. Analysis of the test of the defects of glass fiber composites by

- terahertz spectroscopy[J]. *Infrared Technology*, 2015, 37(9): 764-768.
- [23] 张兴宁, 陈 稷, 周泽魁. 太赫兹时域光谱技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2005, 42(7):35-38.
ZHANG Xingning, CHEN Ji, ZHOU Zekui. Terahertz time domain spectroscopy technology[J]. *laser and optoelectronics*, 2005, 42 (7): 35-38.
- [24] RAHANI E K, KUNDU T, WU Z, et al. Mechanical damage detection in polymer tiles by THz radiation[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2011, 11(8):1720-1725.
- [25] RAHANI E K, KUNDU T, WU Z, et al. Mechanical damage detection in polymer tiles by THz radiation[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2011, 11(8):1720-1725.
- [26] 徐利民. 高分辨太赫兹图像处理[D]. 西安:中国科学院大学, 2013.
XU Limin. High resolution terahertz image processing[D]. Xi'an: University of Chinese Academy of Science, 2013.
- [27] 梁玉庆. 反射式太赫兹波谱成像技术[D]. 北京:中国科学院大学, 2011.
LIANG Yuqing. Reflective terahertz spectral imaging technique[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2011.
- [28] 邢砾云. 航空泡沫芯材及夹层结构的太赫兹无损检测研究[D]. 长春:吉林大学, 2016.
XING Liyun. Research on the terahertz nondestructive testing of air foam core and sandwich structure[D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [29] 郭田田. 太赫兹脉冲扫描成像算法及其应用[D]. 成都:电子科技大学, 2015.
GUO Tian Tian. Terahertz pulse scanning imaging algorithm and its application[D]. Chengdu: University of Electronics Technology, 2015.
- [30] 陈素果, 侯 磊, 楼 骁, 等. 太赫兹波脉冲成像和连续波成像技术研究[J]. *西安理工大学学报*, 2013, 29(2): 127-132.
CHEN Suguo, HOU Lei, LOU Xiao, et al. Terahertz pulse imaging and continuous wave imaging technology research [J]. *Journal of Xi'an University of technology*, 2013, 29 (2): 127-132.
- [31] KOWALSKI M, KASTEK M. Comparative studies of passive imaging in terahertz and mid-wavelength infrared ranges for object detection[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics & Security*, 2016, 11(9):2028-2035.
- [32] YAKOVLEV E V, ZAYTSEV K I, DOLGANOVA I N, et al. Non-destructive 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.
- [33] SATO R, KOMATSU M, OHKI Y, et al. Observation of water trees using terahertz spectroscopy and time-domain imaging[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation*, 2011, 18(5):1570-1577.
- [34] 陈伟钦. 太赫兹阵列探测器成像技术的研究与实现[D]. 成都:电子科技大学, 2016.
CHEN Weiqin. Research and implementation of Terahertz array detector imaging technology[D]. Chengdu: University of Electronic Technology, 2016.
- [35] TONG H, PEI S, JIANG L, et al. A low-power-consumption and high efficiency security system for automatic detection of concealed objects in human body[C]//Green and Sustainable Computing Conference. [S.l.]:IEEE, 2016:1-5.
- [36] SHEN X, DIETLEIN C R, Grossman E, et al. Detection and segmentation of concealed objects in terahertz images [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2008, 17(12): 2465-2475.
- [37] BRINKMANN S, VIEWEG N, GÄRTNER G, et al. Towards quality control in pharmaceutical packaging: screening folded boxes for package inserts[J]. *Journal of Infrared Millimeter & Terahertz Waves*, 2017, 38(3):1-8.
- [38] KHRIMOVA I, KUZEL P, BRENER I, et al. Near-field THz time-domain spectroscopy of anisotropic dielectric micro-particles[C]//International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. 2016:1-2.
- [39] MOTOVILOV K A, GAGKAEVA Z V, KADYROV L S, et al. Terahertz and infrared spectroscopy of bacterial nanofilaments[C]//International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves.[S.l.]:IEEE, 2015:1-2.
- [40] AJITO K. Terahertz spectroscopy for pharmaceutical and biomedical applications[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science & Technology*, 2015, 5(6):1140-1145.
- [41] HOU L, PARK H, ZHANG X C. Terahertz wave imaging system based on glow discharge detector[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2011, 17(1): 177-182.
- [42] KNIPPER R, BRAHM A, HEINZ E, et al. THz absorption in fabric and its impact on body scanning for security application[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science & Technology*, 2015, 5(6):999-1004.
- [43] 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.
ZHAO Qingzhou, LI Ang, CHENG Li, et al. Terahertz electromagnetic wave detection of internal defects in composite insulators[J]. *Shaanxi Electric Power*, 2015, 43 (3): 63-66.
- [44] 郑显华, 王新柯, 孙文峰, 等. 太赫兹数字全息术的研发与应用[J]. *中国激光*, 2014(2):24-34.
ZHENG Xianhua, WANG Xinke, SUN Wenfeng, et al. R & D and application of terahertz digital holography [J]. *China Laser*, 2014 (2): 24-34
- [45] 张宸宇, 邓 凯, 史明明, 等. 基于小波变换的直流主动配电网电压波动源辨识[J]. *电力工程技术*, 2017, 36(4): 21-24, 30.
ZHANG Chenyu, DENG Kai, SHI Mingming, et al. Identification of voltage fluctuation sources in DC active distribution network based on wavelet transform [J]. *Power Engineering Technology*, 2017, 36(4): 21-24, 30.
- 周志成(1977—), 男, 工学博士, 高工, 主要从事输变电外绝缘、防雷与接地、电力系统状态检测与评估等方面的研究工作。