第 50 卷 第 1 期：194-209　　高电压技术　　Vol.50, No.1: 194-209
2024 年 1 月 31 日　　High Voltage Engineering　　January 31, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20232250

电气设备复合绝缘结构的太赫兹无损检测综述

李帅兵，李天耕，淡嘉豪，康永强，董海鹰
（兰州交通大学新能源与动力工程学院，兰州 730070）

摘　要：在电气设备复合绝缘结构检测方面，基于声、光、电、磁等物理量、化学组分和微观特征的检测方法得到广泛应用，但难以实现无损可视化表征。相比之下，太赫兹检测技术利用太赫兹波的光学和电磁学特性可以有效反演出被测物的结构特征和介电特性，较传统检测方法具有无损可在线测量的明显优势。为此，该文总结了当前太赫兹无损检测技术在电气设备复合绝缘结构检测方面的研究现状。首先，系统介绍了太赫兹检测方法的原理及系统，并与传统检测手段进行了比较；其次，重点总结了太赫兹时域和频域光谱及其成像技术在复合绝缘材料老化和缺陷检测中的实际应用，包括缺陷的识别和定位、组分鉴定及老化状态评估等；最后，对太赫兹无损检测技术在该领域的发展前景进行了展望。希冀该综述可帮助相关研究人员快速了解太赫兹无损检测技术在电气设备状态诊断方面的研究和应用情况，并对同类问题提供解决思路。
关键词：电气设备；复合绝缘结构；太赫兹；无损检测；太赫兹时域光谱；太赫兹频域光谱；太赫兹成像

Review of Terahertz Non-destructive Testing of Composite Insulation Structures for Electrical Equipment

LI Shuaibing, LI Tiangeng, DAN Jiahao, KANG Yongqiang, DONG Haiying
(School of New Energy and Power Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In the detection of composite insulation structures in electrical equipment, detection methods based on physical quantities, chemical components, and microscopic characteristics such as sound, light, electricity, and magnetism have been widely applied; however, it is difficult to achieve non-destructive visual characterization. In contrast, terahertz detection technology utilizes the optical and electromagnetic properties of terahertz waves to effectively reverse the structural and dielectric characteristics of the tested object, which has significant advantages over traditional detection methods in terms of non-destructive and online measurement. Therefore, this paper summarizes the current research status of terahertz non-destructive testing technology in the detection of composite insulation structures in electrical equipment. Firstly, the principle and system of terahertz detection method were systematically introduced, and a comparison was made between terahertz detection method and traditional detection methods. Secondly, the practical applications of terahertz time-domain and frequency-domain spectroscopy and imaging techniques in the aging and defect detection of composite insulation materials were summarized, including defect identification and localization, component identification, aging state evaluation, etc. Finally, the development prospects in terahertz non-destructive testing technology in this field were discussed. The authors hope this review can help relevant researchers quickly understand the research and application of terahertz non-destructive testing technology in electrical equipment condition diagnosis, and provide solutions to similar problems.
Key words: electrical equipment; composite insulation structure; terahertz; non-destructive detection; terahertz time-domain spectroscopy; terahertz frequency domain spectroscopy; terahertz imaging

0　引言

在电力系统中，电气设备和器件承担着电能发-输-变-配-用的重要任务，其运行状态关乎系统的安全与稳定。随着我国电网规模不断扩大和用电需求与日俱增，设备的负荷水平不断提升，其绝缘系统的耐久性和运行可靠性面临诸多挑战[1]。在电力系统外，部分高、低压电气设备还需要长时间在如空间站、航天飞行器、航海船舶、高速列车、桥梁、隧道、海底、风机等复杂、极端的场景下工作，受到高低温交替、潮湿、过电压、过电流及振动和扭转等多因素、多应力叠加的作用[2]，极易导致内部

基金资助项目：国家自然科学基金 (52167018)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (52167018).

产生缺陷[3-6]，加速绝缘材料老化，降低设备使用寿命和运行可靠性[7-10]。多领域极端应用环境对高压电气设备的设计、制造和运维提出了更高的要求。

复合绝缘结构作为电气设备中最典型的绝缘结构形式之一，承担着电气设备绝缘防护的重要任务。在电气设备中，具有复合绝缘结构的设备有电缆本体、电缆终端、电缆接头、绝缘子、绝缘管型母线、电机线圈等。这些电气设备所使用的绝缘材料主要包括橡胶(硅橡胶、氯丁橡胶、乙丙橡胶等)、塑料(聚氯乙烯、聚丙烯、交联聚乙烯、聚苯乙烯等)、陶瓷(氧化铝、氮化铝、硅酸镁、氧化铍等)、玻璃纤维(石英砂、石灰石)、树脂类材料(环氧树脂)和以聚酰亚胺为代表的有机高分子材料等。上述电气设备或器件，在本质上属于平板型或圆柱形层状复合绝缘结构。这种结构在电、热、机械等应力作用单独或共同作用，以及其他环境因素的影响下，在不同绝缘介质的交界面易因应力松弛而出现气隙、分层、裂纹等缺陷，以及因密封不严导致的受潮，严重时会因局部应力场集中引起电/热击穿或机械撕/断裂，甚至丧失绝缘能力，从而导致各种故障发生，严重影响电气设备的安全稳定运行。因此，电气设备复合绝缘结构的缺陷检测及老化状态评估一直是本领域的研究热点。

虽然目前应用于缺陷和老化状态检测的技术和方法众多，但受检测条件限制只能从单一角度对缺陷和老化情况进行定性表征，而关于在线无损检测方法的介绍较为有限。相比之下，太赫兹波中具有丰富的物理和化学信息，且检测具有无损性，自20 世纪 70 年代开始萌芽，在近十年内已有大量相关技术成果和丰富的应用案例。目前已广泛应用于航空航天、生物医疗、材料科学等领域，并逐渐在电气设备复合绝缘结构的缺陷检测中得到应用。

为此，本文从太赫兹无损检测技术的基本原理、常用检测方法及手段入手，全面总结了太赫兹技术在复合绝缘电气设备检测中的应用。首先，回顾了传统检测方法在电气设备复合绝缘结构缺陷检测方面的优劣；其次，介绍了太赫兹无损检测方式以及时频域光谱检测和成像检测两种不同的应用角度解析太赫兹检测原理，并对比太赫兹检测技术与其他常用电气设备状态检测方法的区别和联系；然后，分别探讨了太赫兹时域光谱和太赫兹频域光谱在层状复合绝缘结构的电气设备中的结构缺陷检测、受潮检测、成分鉴定及老化状态评估等方面的检测原理；接着，介绍了太赫兹成像模式及其在缺陷识别方面的研究现状；最后，通过总结太赫兹无损检测技术在电气设备复合绝缘结构缺陷和老化检测等方面的研究，分析了该技术目前存在的一些问题，并对其今后的研究方向和应用前景进行了展望。

1 电气设备复合绝缘结构的传统检测方法

为有效诊断图 1 所示绝缘子、发电机线圈、绝缘栅双极晶体管(insulate-gate bipolar transistor，IGBT)、气体绝缘全封闭组合电器(gas insulated switchgear，GIS)终端及交联聚乙烯电缆终端等层状复合绝缘结构类电气设备内部及层间的缺陷，研究人员开展了大量研究并在实际工程中得到广泛应用。常见的检测方法和手段包括：局部放电测量(高频电流检测、声发射检测法等)、X 射线检测、超声检测等。图 2 给出了部分检测方法的基本原理图[11-14]，表 1 总结了各种检测方法的优缺点。

从表 1 可以看出，现有针对电气设备内部缺陷的检测方法主要以局部放电测量为主[15-22]，对设备或器件内部气隙、分层缺陷及绝缘老化检测较为有效。常用的无损检测方法中，X 射线检测或数字影像技术虽然也对气隙、分层两类缺陷检测灵敏可靠，

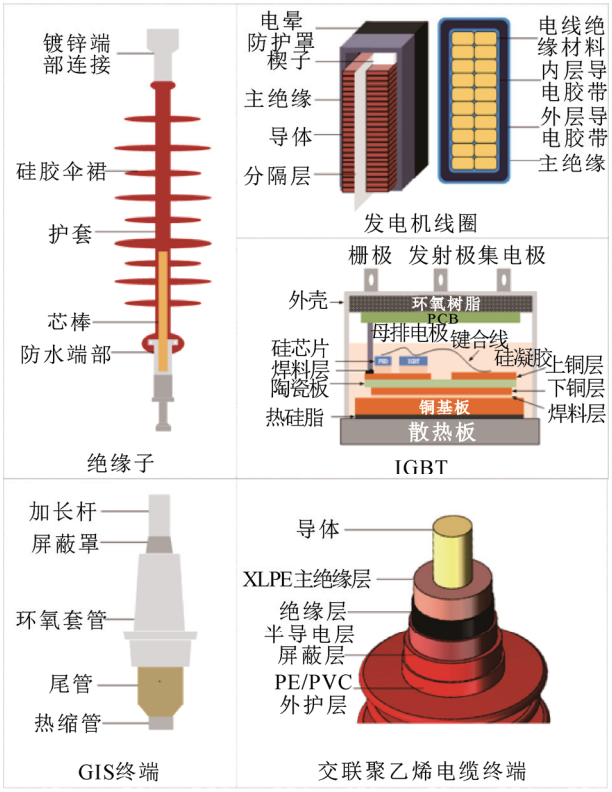
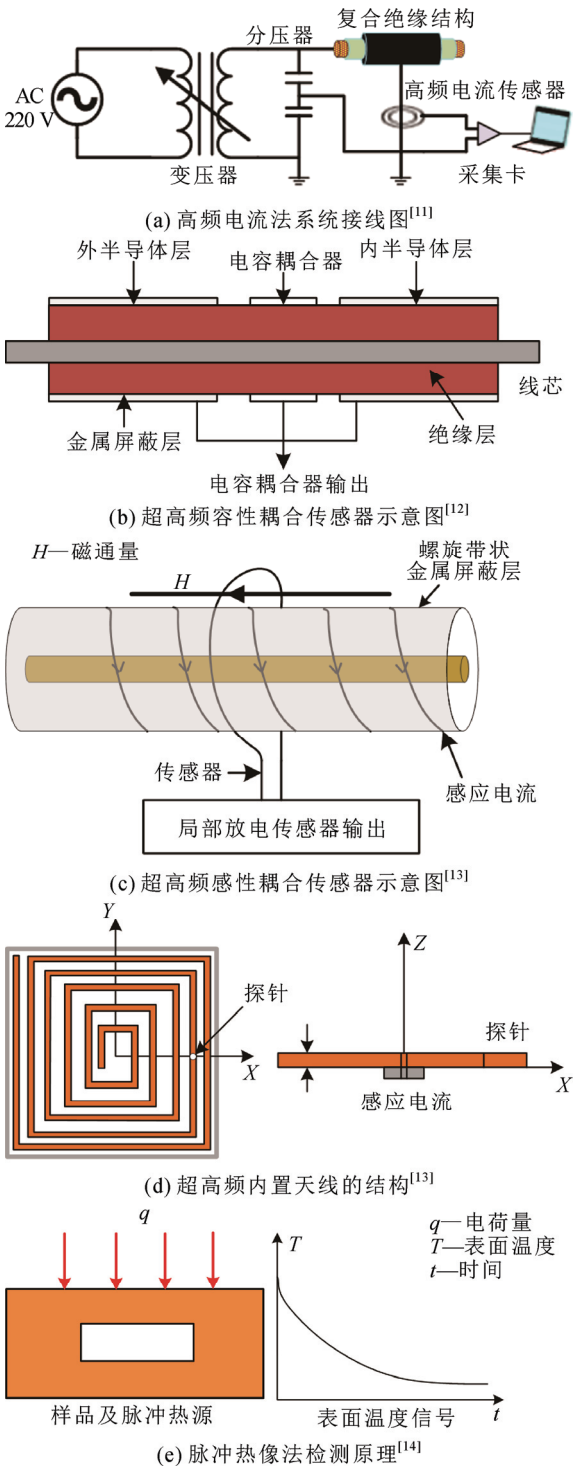


图 1 基于层状复合绝缘结构的典型电气设备和器件

Fig.1 Typical electrical equipment and devices based on layered composite insulation structure



(a) 高频电流法系统接线图[11]

(b) 超高频容性耦合传感器示意图[12]

(c) 超高频感性耦合传感器示意图[13]

(d) 超高频内置天线的结构[13]

(e) 脉冲热像法检测原理[14]

图 2 电气设备内部缺陷常见诊断方法

Fig.2 Common diagnostic methods for internal defects in electrical equipment

但因 X 射线对人体有害且成本较高，不适宜大规模应用[23]；涡流探伤技术虽然测量精度高、检测快速高效，但对缺陷的探测深度有限，对被测物的导电性要求较高[24]；微波全息技术可以获得目标微波图像的全息摄影，可同时对目标外观或介质内部的结构成像，也可以对空间电磁场分布进行直观显示，但因微波经空中传送，易受干扰，在同一微波电路上不能使用多个相同频率的微波在同一方向同时传播[25]；相控阵超声探伤具有检测精度和效率高且操作简单，但需要的传感器数量多、且对环境要求高，检测结果易受温湿度及电磁场的影响[26]；计算机断层扫描(computed tomography，CT)可有效反映材料内部结构信息，具有高分辨率、无创伤性的特点，在许多领域尤其是医学诊断中应用广泛，但该检测方法需要笨重且昂贵的设备，且检测成本较高，长时间的实验会对人体产生严重损伤[27]。此外，部分预防性试验需停电离线检测，且其中的交、直流耐压试验属于有损检测，而直流电阻试验、变比试验、回路电阻试验、介质损耗角试验等虽然无损，但因离线测试，与实际运行特性存在差异[28]。此外，频域介电谱测试、极化/去极化电流法和回复电压法均对老化和受潮缺陷比较敏感，近年来在现场检测中得到应用[29-33]。

不难看出，针对基于层状复合绝缘结构的典型电气设备和器件的检测方法中，虽然目前应用于缺陷和老化状态检测的方法很多，但通常受检测条件限制，仅能从单一角度对缺陷和老化情况进行定性或定量表征，还没有方法能同时实现内部气隙、分层及受潮缺陷乃至老化状态的同时检测。这也导致现场应用过程中对同一电气设备需要不同检测设备多次测量才能确定其状态。因此，若某种检测方法能对气隙(或分层)、受潮和老化同时检测，且能实现在线及无损测量，则能在不影响电气设备或器件正常运行的情况下缩短检测时间，提高检测效率。

基于上述背景，基于太赫兹波的检测技术近来受到广泛关注。太赫兹波兼具光学和电磁学特征，包含丰富的物理和化学信息，且检测具有无损性，自 20 世纪 70 年代开始萌芽到现在为止，在航空航天、医疗、通讯和安防领域已有大量成熟案例和技术成果[34-36]。在电工材料、高/低压电气领域，已有部分学者开始尝试使用太赫兹技术开展绝缘材料、电气设备及部件的检测。研究发现，利用太赫兹时域光谱技术不仅可以有效检测绝缘材料内部的结构缺陷，还可以通过太赫兹频域特性参数对材料老化程度甚至材料种类进行有效评估；同时，借助太赫兹成像技术能够将材料内部的缺陷可视化并进一步判断缺陷的类型和大小。这些优点使得太赫兹技术在电气设备状态检测领域具有优异的工程实用价值和推广应用前景。

表 1　电气设备内部缺陷的常用检测方法及其特点

Table 1　Internal defect detection methods and characteristics of electrical equipment

检测方法		优缺点	适用对象	可检测缺陷类型	检测频率区间
局部放电测量[15-16]	高频电流检测[17]	HFCT 安装方便、信号可调整；对完全屏蔽的结构不适用	各类大型电气设备、开关设备，包括：电缆及其附件、功率器件、变压器、电抗器、GIS 终端、旋转电机和发电机绕组等	气隙、分层杂质、老化	100 kHz~500 MHz
	超高频电流检测[18]	检测频率高、抗干扰能力强、灵敏度高；衰减快、难以实现长距离检测			300 MHz~3 GHz
	超声检测[19-20]	系统简单、成本低、受外部电磁噪声影响小；衰减快，难以实现长距离检测			20~200 kHz
	声发射检测[21]	抗干扰性强、操作简单；接收信号弱、灵敏度较低			50 Hz~300 kHz
	振荡波测试[22]	检测准确、可实现设备内外部全面检测；检测时间长、受环境干扰影响大			30 Hz~1 kHz
无损检测方法	X 射线(数字影像)[23]	结果直观、成像速度快；存在辐射	复合绝缘材料及低密度金属	气隙、分层	30 PHz~300 EHz
	微波全息技术[25]	高分辨率高、贯穿能力强、传输性能强；成像时间长、过程复杂、易受环境干扰	复合绝缘材料及各类金属	裂纹、孔洞	300 MHz~300 GHz
	相控阵超声探伤[26]	成像精度高、可定量表征缺陷尺寸信息；穿透深度有限、依赖操作人员技能	复合绝缘材料及各类金属	分层、冲蚀、异物	2~10 MHz
	涡流探伤技术[24]	精度高、检测快速高效；探测深度有限、对被测物导电性要求高	电路板器件、金属屏蔽层、金属导线等导电材料	金属裂痕、焊缝	10 Hz~10 MHz
	CT 扫描技术[27]	应用广泛、检测快速便捷、具有无损性、分辨率高；设备及检测成本高、辐射性高	复合绝缘材料及各类金属	杂质、异物、孔洞	100 Hz~10 MHz
其他检测方法	回复电压法[33]	操作简单、含丰富介电特性；误判率较高、对电导率和极化特性要求高	电缆绝缘层、绝缘油纸、电机绕组等绝缘材料	老化	≤10 kHz
	频域介电谱测试[29-30]	含丰富介电特性、宽频测量范围；对样品尺寸及形状要求高、对温度和湿度要求高	电缆绝缘层、绝缘油纸、电机绕组等绝缘材料	老化、受潮	0.001 Hz~10 kHz
	极化/去极化电流法[31-32]	灵敏度高、检测速度快、含丰富介电特性；对电导率和极化特性要求高、检测深度受限	电缆绝缘层、绝缘油纸、电机绕组等绝缘材料	老化	0.1 Hz~10 kHz
	预防性试验[28]	效果显著、标准多样；部分实验条件苛刻、数据处理复杂、成本高	各类电气设备	各类缺陷	/

2　太赫兹无损检测技术

2.1　太赫兹波的传播原理

太赫兹波早期称之为远红外射线或 T 射线，是指频率介于 0.1~10 THz、波长范围在 0.03~33 mm 之间的电磁波，介于微波与红外之间，如图 3 所示。2005 年前后，美、日等国将太赫兹技术评为“改变未来世界的十大技术”和“国家支柱十大重点战略目标”。我国也于同期开展相关研究工作，尤其是在利用太赫兹对航天材料内部缺陷检测、安防安检和生物医疗方面开展了许多开拓性的工作。

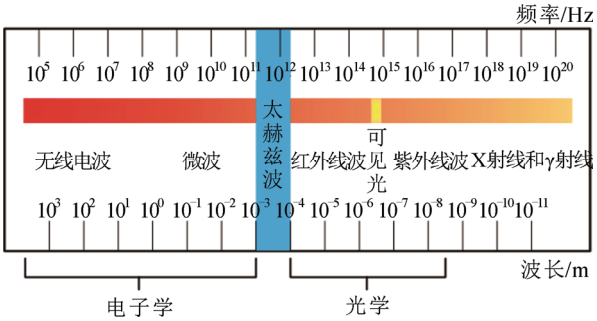


图 3　太赫兹波的频率及波长

Fig.3　The frequency and wavelength of terahertz waves

太赫兹波既有毫米波的波动性，又有红外线光的粒子性，而太赫兹无损检测技术是利用太赫兹波在非金属和非极性材料中的折、反射及电磁传导特性进行缺陷识别的无损检测技术。太赫兹波不仅可以透过不透明材料检测材料内部的杂质、位错、微烈纹、纤维分层、纤维与基体界面开裂、纤维卷曲、富胶或贫胶、孔洞、脱较以及化等缺陷，还可代替红外应用在绝热材料和热敏感材料的检测中。并且

由于太赫兹波的低能性，不会对被检材料造成结构上的破坏，也不会产生对人体有害的辐射。相较于其他检测方法而言，该方法突破了单一检测方法的技术局限性，能够对绝缘结构典型内部缺陷进行定性、定量分析和更多角度表征。

太赫兹波在介质中的传播原理可根据 T. D. Dorney 提出的传播模型进行解释[37]。以图 4 所示三层平板复合介质为例，第一、二层为非金属层，第三层为金属层。假设 $E_0(\omega)$为太赫兹入射波的能量，太赫兹发射器与被测样品表面的距离为 s_0，样品每层材料厚底分别为 d_1、d_2。由菲涅尔公式可得太赫兹波在各介质传播的反射系数和透射系数为：

$$r_{i,i+1}(\omega)=\frac{\tilde{n}_{i+1}(\omega)\cos\theta-\tilde{n}_i(\omega)\cos\beta}{\tilde{n}_{i+1}(\omega)\cos\theta+\tilde{n}_i\cos\beta},\ i=0,1 \tag{1}$$

$$t_{i,i+1}(\omega)=\frac{2\tilde{n}_i(\omega)\cos\beta}{\tilde{n}_{i+1}(\omega)\cos\theta+\tilde{n}_i\cos\beta},\ i=0,1 \tag{2}$$

式中：$r_{01}(\omega)$为空气与第一层非金属表面的反射系数；$t_{01}(\omega)$为空气与第一层非金属表面的透射系数；$r_{12}(\omega)$为第一、二层非金属表面的反射系数；$t_{12}(\omega)$为第一、二层非金属表面的透射系数；θ 为入射角；β 为折射角；$\tilde{n}_0(\omega)$ 为空气的折射率；$\tilde{n}_1(\omega)$ 为第一层非金属的折射率；$\tilde{n}_2(\omega)$ 为第二层非金属的折射率。

由几何关系可得太赫兹波在进入每层介质后的传播距离为：

$$s_i=\frac{d_i}{\cos\beta_i},\ i=1,2 \tag{3}$$

式中：s_1、s_2 分别代表太赫兹波在第一层介质和第二层传播距离；d_1、d_2 分别代表第一层介质和第二层介质厚度；β_1、β_2 分别代表穿过第一层介质和第二层介质的折射角大小。

太赫兹波在不同介质中的传播因子为：

$$p_i(\omega,s_i)=\exp\left(\frac{\mathrm{j}\tilde{n}_i(\omega)\omega s_i}{c}\right),\ i=0,1,2 \tag{4}$$

式中：c 为光在真空中的传播速度(3×10^8 m/s)；ω 为太赫兹波频率；$p_0(\omega,s_0)$为太赫兹波在空气中的传播因子；$p_1(\omega,s_1)$为太赫兹波在第一层介质中的传播因子；$p_2(\omega,s_2)$为太赫兹波在第二层介质中的传播因子。

太赫兹波在经过空气到达第一层介质表面反射的能量为：

$$E_{r1}(\omega)=E_0(\omega)p_0(\omega,s_0)r_{01} \tag{5}$$

太赫兹波在经过第一层介质后到达第二层介质上表面反射回波的能量为：

$$E_{r2}(\omega)=E_0(\omega)p_0^2(\omega,s_0)t_{01}p_1^2(\omega,s_1)r_{12}t_{10} \tag{6}$$

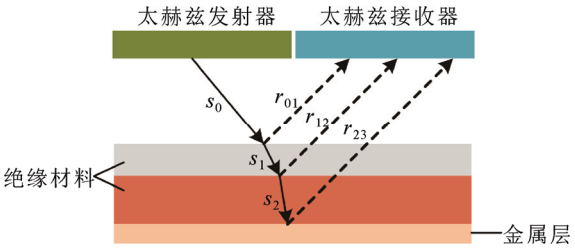


图 4 太赫兹检测示意图

Fig.4 Schematic diagram of terahertz detection

式中：t_{10} 为第一层介质与空气的透射系数。

太赫兹波在经过两层非金属介质到达金属层反射回波的能量：

$$E_{r3}(\omega)=E_0(\omega)p_0^2(\omega,s_0)t_{01}^2p_1^2(\omega,s_1)t_{12}^2p_2^2(\omega,s_2) \tag{7}$$

所以在图 4 太赫兹经正常的三层结构反射后，接收器所接收到的总能量：

$$E_{\mathrm{R}}(\omega)=E_{\mathrm{r1}}(\omega)+E_{\mathrm{r2}}(\omega)+E_{\mathrm{r3}}(\omega) \tag{8}$$

通过上述推导[38]可以发现，对于待测物，在已知太赫兹探测波的入射角、频率、初始能量的情况下，可对不同介质层的透射系数、反射系数和折射率以及太赫兹波在各介质层的传播因子进行计算，进一步可得到各层太赫兹反射回波的能量，最后依据太赫兹特性参数之间的数值关系，根据实验要求可对能量信号进行转化得到被测物的时频域介电特性参数和物理参数。

2.2 太赫兹时域光谱检测技术

通常，太赫兹时域光谱(terahertz time-domain spectroscopy，THz-TDS)是指将太赫兹脉冲与样品发生相互作用，测量作用后的太赫兹电场强度随时间的变化曲线。THz-TDS 的测量由图 5 所示 THz-TDS 系统得到，该系统主要由飞秒激光器、发射器、光延迟线和探测器组成，根据检测方式的不同分为反射式和透射式系统，这两种模式信号的产生和探测过程基本相似，区别在于光路不同[39]。

由图 5 可见，飞秒激光器产生的激光脉冲经过分光镜被分成泵浦光和探测光，泵浦光经光学延迟后入射到太赫兹发射器件上使其产生太赫兹脉冲；另一束探测光作为探针经多次反射后到达探测端，该系统通过调节时间延迟来控制泵浦脉冲和探测脉冲之间的时间差，从而获得太赫兹电场强度的时域波形[40-42]。其中，太赫兹脉冲的产生方式有：光导天线技术和光整流技术，根据探测原理的不同探测器可分为光电、热、电子学效应等多种类型[43]。

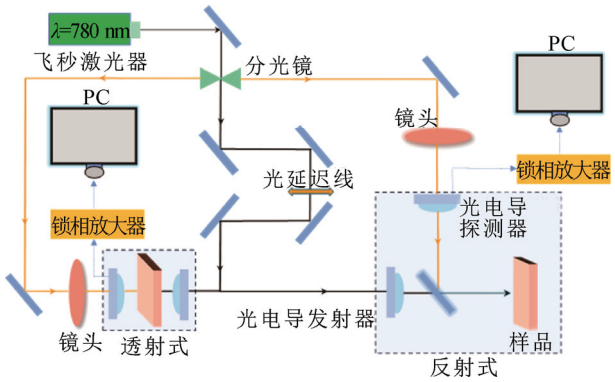


图 5　THz-TDS 系统原理图

Fig.5　THz-TDS system schematic diagram

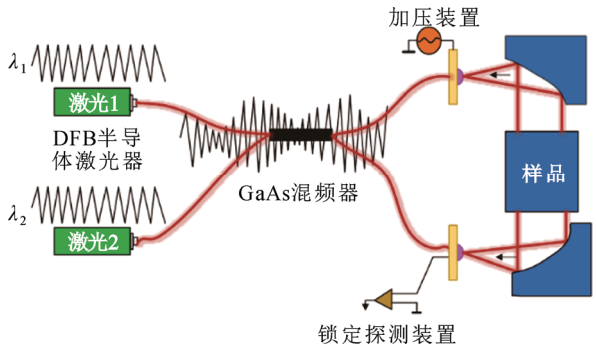


图 6　太赫兹频域光谱仪实验装置图[48]

Fig.6　THz-FDS experimental setup diagram[48]

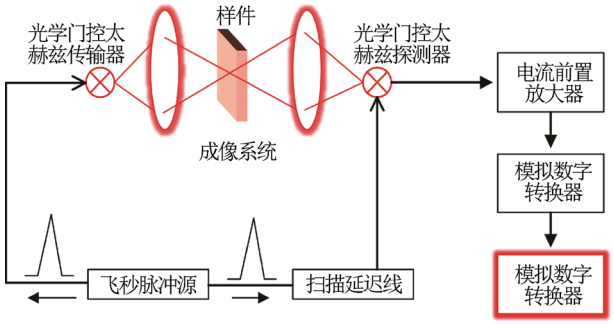


图 7　二维透射式太赫兹光谱成像系统示

Fig.7　Schematic diagram of 2D transmission THz spectral imaging system

2.3　太赫兹频域光谱检测技术

太赫兹频域谱(terahertz frequency-domain spectroscopy，THz-FDS)也是太赫兹研究领域的重要手段，其可以对诸多材料的内部缺陷、杂质成分及状态评估等进行定性表征与分析[44-48]。通常有两种方式可得到 THz-FDS：一是对太赫兹时域谱进行傅里叶变换后可得太赫兹频域谱[49]；二是借助图 6 所示 THz-FDS 系统可直接得到试验所需的频域结果。目前所用的太赫兹频谱仪主要以非线性光学混频技术与混频器为结构基础[50]。

图 6 所示太赫兹频域光谱仪主要由分布式反馈激光器(distributed feedback beam，DFB)、GaAs 混频器、锁定探测装置、加压装置等组成。由 DFB 半导体激光器产生的两束波长分别为 λ_1、λ_2 的激光脉冲经汇合后再分束，一束辐射至有加压偏置的 GaAs 混频器后产生太赫兹波，太赫兹波经过样品后与另一束激光汇合在作为探测器的混频器上，经混频后产生出可以探测的电流信号。由于是相干探测，该系统能同时探测到太赫兹频域谱的相位和幅度。

2.4　太赫兹成像技术

太赫兹波经过待测样品，通过分析样品的反射或透射信号中所包含的振幅、相位、强度信息而得到样品的太赫兹图像[51-52]。根据辐射源的不同，成像方式可分为脉冲式太赫兹成像和连续式太赫兹成像。前者成像速度较慢，难以对大尺寸样品进行成像；后者只能得到样品的图像信息，但成像速度较快[53]。图 7 为透射式脉冲 THz 光谱成像系统，该系统是在 THz-TDS 系统中添加样品二维可移动扫描平台，样品可以在该平台上实现在垂直于太赫兹传播方向 *X*-*Y* 面移动，从而使太赫兹波可以扫描到样品上的不同点，得到样品不同位置的太赫兹透射时域信号后进一步利用各个像素点的时域信息(飞行时间、时域最大值等)构建出样品的太赫兹图像[50]，反射式成像系统与透射式成像系统的原理相同，只有接收信号的方式有区别[54]。

3　基于 THz-TDS 的电气设备复合绝缘检测

THz-TDS 反映太赫兹信号在不同时间点的振幅和波形特征。通过对 THz-TDS 形进行傅里叶变换可直接得到样品的吸收系数、折射率等参数。因此，利用 THz-TDS 不仅可以判断缺陷是否存在，还可以准确测量缺陷的几何信息并定量表征缺陷的严重程度。目前，THz-TDS 在电气设备绝缘分层、脱粘检测与缺陷几何尺寸量测方面得到了初步应用。

3.1　气隙缺陷及分层缺陷检测

基于层状复合绝缘结构的典型电气设备和器件通常由两个或多个层状材料通过粘合、压合、热缩等方式制作而成。由于长期经受高低温、强应力载荷及过电压、过电流等极端工况，各层接触界面会产生气隙、分层质等问题。当层状复合结构内部出现气隙或分层缺陷时，局部电场和热分布情况将

发生改变，导致电场力和热应力的集中，并随着时间的推移逐渐丧失绝缘能力[55-56]。因此，THz-TDS 可以利用太赫兹波在穿过不同层间材料和缺陷的光路和时差来准确判断缺陷的发生及影响程度。

图 8 给出了绝缘材料内部不含/含缺陷的 THz-TDS 测试结果，其中图 8(a)和(b)分别为完整样品与含缺陷样品的太赫兹波反射光路示意图，图 8(c)和(d)为对应于图 8(a)和(b)的典型气隙缺陷下太赫兹时域光谱。从图 8(a)可以看出太赫兹光线在穿过层状结构的样品时会呈现多次反射脉冲波，其中 A_1 和 B_1 为太赫兹第一次到达样品表面时的主脉冲波，A_4 和 B_4 为脉冲的系统回波。根据图 8(b)，对比 A_2 和 B_2、B_3 处的曲线可以看出，在样品内部存在缺陷的情况下，气隙表面会产生额外的反射，得到 B_3 缺陷特征脉冲。由于太赫兹波在穿过存在空气的界面时是从光稀材料传播到光密的材料中，因此其界面的反射系数由正变负，进而 B_3 会呈现反方向的波动特征。通过上述现象可以推断出脉冲与界面的对应关系：反射系数的不同导致会导致脉冲的相位发生变化，而层间大小决定了脉冲的幅值。

目前，已与学者应用太赫兹技术研究了层状复合材料的结构和缺陷特征。针对绝缘子层间气隙，刘文通等制作了橡胶-环氧树脂板层间气隙缺陷样件，对含有层间气隙缺陷样件波形进行了分析，并计算得到层间气隙的厚度，经验证太赫兹检测准确率达到 95.61%[57]。张中浩等研究了硅橡胶-环氧玻纤板界面存在气隙时的太赫兹检测方法，与界面无气隙相比，有气隙时反射波形呈现反相和幅值增大的双重特性[58]。L. Cheng 等研究发现，当复合绝缘子内部存在微小缺陷时，太赫兹波形中会出现新的振幅较大的反射峰，反射峰的位置由材料的厚度决定[59]。如果内部缺陷已经发展到一定的尺寸，便可通过分析时域波形准确地获得其几何尺寸。

在对玻璃纤维复合材料的缺陷检测方面，郭小弟等基于 THz-TDS 系统检测玻璃纤维的分层缺陷，得到了太赫兹时域波形，发现无缺陷样品信号的幅值约为参考信号的 2%，时间延迟 37 ps，而有缺陷的样品信号的幅值约为参考信号的 2%，时间延迟 41 ps，样品信号相对于空气信号有一定的幅值衰减和时间延迟[60]。

在绝缘材料胶层和粘连缺陷的检测方面，潘钊等定性分析了陶瓷纤维复合材料脱粘缺陷特性与时域光谱波形之间关系，判断了粘接层缺陷存在[61]。

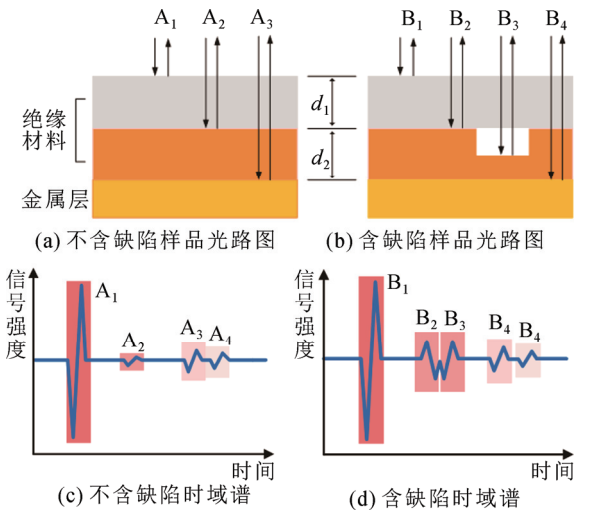


图 8 绝缘材料内部不含/含缺陷的 THz-TDS 测试结果

Fig.8 Terahertz time-domain spectrogram of complete composite insulation materials containing defects

此类研究结果对于采用复合绝缘护套的电气设备具有参考意义。王家天等采用太赫兹时域光谱飞行时间成像法对胶层区域的均匀性进行定性分析，通过计算获得实验样件的飞行时间相对标准差，实现了胶层均匀性的定量评价[62]。顾健等构建了薄涂层粘接缺陷的太赫兹传播仿真模型，发现随着涂层粘接缺陷厚度的变化，太赫兹二次回波信号的形态也将发生改变，随着缺陷厚度的增加，回波的飞行时间增加且脉宽增加[63]。

3.2 绝缘层和缺陷层的厚度测量及缺陷定位

针对多层复合材料，层间缺陷的位置及厚度判断也十分重要[64]。由于复合材料的层状结构特点，太赫兹波在穿过层状样品时会在层间截面进行多次的漫反射，当太赫兹接收器接收到不同反射信号或透射信号后，便可依据光程差计算出特定的绝缘层的厚度。依据太赫兹光谱中的回波特征和对缺陷厚度的测量，可以进一步对材料的分层状况进行评估，并通过判断各层间厚度和回波出现的位置及所对应的太赫兹飞行时间，定量表征缺陷的发生。

根据太赫兹的光学特性，以图 8 为例，太赫兹反射波 B_2 和 B_3 的传输时延为：

$$\Delta t = \frac{2dn}{c} \tag{9}$$

进而层间厚度 d 可由式(10)确定：

$$d = \frac{\Delta t \cdot c}{2n} \tag{10}$$

式中：Δt 为太赫兹波的传输时间；n 为介质的平均实折射率。样品的折射率同样可以依据太赫兹检测

得到，而其传输时间可以依据得到的太赫兹时域谱波形的变化判断缺陷回波的时域范围计算得到。

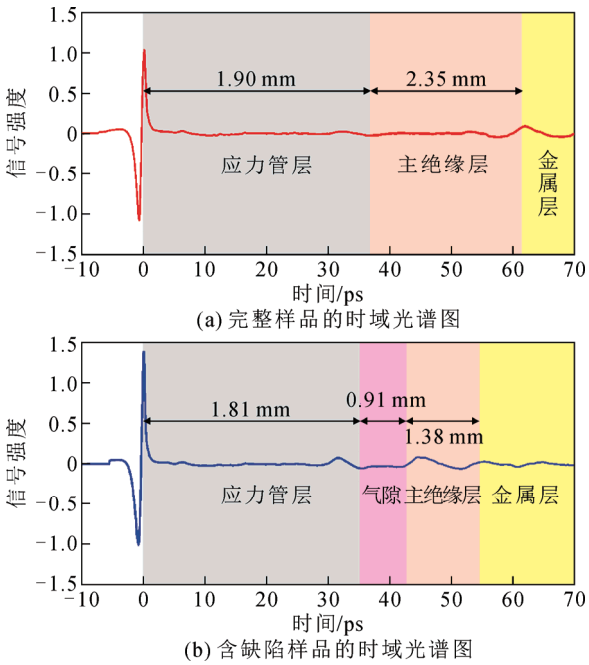
针对车载电缆终端内部的分层缺陷检测，文献[65]通过对模拟制作的三层复合绝缘结构进行缺陷检测实验，得到了正常样品与气隙缺陷样品的太赫兹时域光谱图，光谱图如图 9 所示。

研究发现当太赫兹波穿过缺陷样品时会出现更加明显的回波，且具有更明显的幅值变化。随后，通过宽带太赫兹波的幅度变化计算被测样品中太赫兹波的光程差，并根据式(10)对被试样品的气隙缺陷的厚度进行定量估计，得到测试样品各层计算厚度，与真实结果的最大误差仅为 5%。

在检测橡胶材料的产品缺陷和厚度检测方面，通过对测试数据中各点时域波形的飞行时间信息进行处理，可通过 THz-TDS 在已知折射率的前提下通过绘制试样橡胶部分的二维厚度分布，实现厚度分布信息的直观表达，证明反射式 THz-TDS 技术可以有效检测橡胶材料的分层缺陷和厚度分布[66]。根据太赫兹波振幅在介质中的传播衰减特性和太赫兹传输波和反射波的特性，可推算得到传输模式和反射模式下延时与厚度的关系[38]。此外，通过分析太赫兹反射时域信号的脉冲幅度和极性，利用时域振幅成像原理，可计算得到缺陷的大小、位置等重要信息[67]；同样，也有研究通过明确碳纤维复合材料的太赫兹光谱特性与缺陷深度的关系，根据得到的光谱图和缺陷深度之间的线性关系，实现对未知深度缺陷的预测[68]。

4 基于 THz-FDS 的电气设备复合绝缘检测

THz-TDS 和 THz-FDS 之间存在着傅里叶变换关系，根据傅里叶变换原理，一个信号的时域和频域表示互为傅里叶变换对，意味着 THz-TDS 和 THz-FDS 可相互转换，并且包含相同信息。因此，可通过对 THz-TDS 进行傅里叶变换得到 THz-FDS，反之亦然。太赫兹脉冲光源与传统光源相比具有诸如瞬态性、宽带性、相干性、低能性等很多独特的性质，利用太赫兹脉冲可以分析材料的性质。在特定的频段内，太赫兹波会与某些物质发生共振，如果将这一频段的光谱现象以特定手法描述出来(如透射率、消光系数)就可得到物质的太赫兹频域光谱图[45]。因此通过得到的太赫兹频域谱图，可以反映被测物体的理化特性，并以此来判断绝缘材料受老化作用导致的结构和成分变化。



(a) 完整样品的时域光谱图

(b) 含缺陷样品的时域光谱图

图 9 完整样品与含缺陷样品的太赫兹时域光谱图[65]

Fig.9 THz-TDS of complete and defective samples[65]

4.1 化学组分与含水量/受潮检测

基于太赫兹技术的成分定量检测是主要基于光谱测量提取材料的物理和介电参数来实现的，包括吸收系数、折射率、消光系数和复介电常数等。通过绘制太赫兹频域特性曲线，利用谱线变化规律和有效特征频段的物理和介电参数进行定量分析，对于在太赫兹波段存在特征吸收峰的样品，可通过研究特征吸收峰峰值并结合数据拟合方法进行定量解析。

进行太赫兹光学参数计算时一般不考虑多次回波的影响，仅截取主脉冲之前的信号进行研究。以图 4 为例，设太赫兹脉冲波穿过样品的某一层后得到时域信号，经过傅里叶变换后得到含有振幅和相位信息的频域信号 $E_{\mathrm{ref}}(\omega)$、$E_1(\omega)$，通过二者求比值可得理论传递函数 $H(\omega)$：

$$H(\omega)=\frac{E_1(\omega)}{E_{\mathrm{ref}}(\omega)}=\frac{4\tilde{n}(\omega)}{(1+\tilde{n}(\omega))^2}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{\omega d}{c}(\tilde{n}(\omega)-1)}=\rho(\omega)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\varphi(\omega)} \tag{11}$$

式中：$\rho(\omega)$、$\varphi(\omega)$分别代表传递函数的幅值和相位。考虑到橡胶样品对太赫兹脉冲的吸收很弱，因此测试的折射率远远大于消光系数，则实折射率 $n(\omega)$和消光系数 $\kappa(\omega)$的计算式如下：

$$n(\omega)=\varphi(\omega)\frac{c}{\omega d}+1 \tag{12}$$

$$\kappa(\omega)=\frac{c}{\omega d}\ln\left(\frac{4n(\omega)}{\rho(\omega)(1+n(\omega))^2}\right) \tag{13}$$

由于消光系数和吸收系数满足下式关系：

$$\kappa(\omega)=\alpha(\omega)c/2\omega \tag{14}$$

因此吸收系数可表示为：

$$\alpha(\omega)=\frac{2\omega\kappa(\omega)}{c}=\frac{2}{d}\ln\left(\frac{4n(\omega)}{\rho(\omega)\left(1+n(\omega)\right)^2}\right) \tag{15}$$

进一步地，透射率可以通过式(16)计算得到：

$$L(\omega)=-\frac{2}{d}\ln\left(\frac{4n(\omega)}{\rho(\omega)\left(1+n(\omega)\right)^2}\right) \tag{16}$$

根据折射率、消光系数等光学参数可以获得实验样品的介电常数，其中复介电常数的实部和虚部以及复介电常数如式(17)—式(19)所示。

$$\varepsilon_{\mathrm{r}}(\omega)=n^2(\omega)-\kappa^2(\omega) \tag{17}$$

$$\varepsilon_{\mathrm{i}}(\omega)=2n(\omega)\kappa(\omega) \tag{18}$$

$$\tilde{\varepsilon}(\omega)=\varepsilon_{\mathrm{r}}(\omega)+\mathrm{j}\varepsilon_{\mathrm{i}}(\omega) \tag{19}$$

基于式(11)—式(19)描述的太赫兹频域特性参数与材料介电特性参数之间的数值关系[45]，可通过THz-FDS 测试，得到固定频段的太赫兹吸收谱和折射率谱，从而实现对物质成分的检测和分析。

目前，在变压器油中气体组分检测及绝缘材料成分检测方面也有初步应用。D. Ding 等研究了 Cu_2S 和 Cu 的 THz-TDS 反射信号差异，实现了应用太赫兹技术对电力变压器纸包绕组硫腐蚀组分的无损检测[69]。在橡胶材料中添加剂含量的检测方面，殷贤华等通过开展 THz-FDS 测试，得到了丁腈橡胶、白炭黑、氧化锌、防老剂 H 和防老剂 MB 共 5 组添加剂成分的太赫兹吸收光谱[70]，如图 10 所示，并结合分类方法实现了多组分混合物的快速、准确的检测和成分鉴别。

另外，THz-FDS 在绝缘材料的含水率检测方面也得到应用，比较典型的案例是绝缘样品中含水量的测定和复合绝缘中受潮缺陷的检测。由于氢键组成的水分子网络在分子热运动的过程中被打乱及重排所需要的时间在皮秒或者亚皮秒级，所对应的电磁波频率范围恰好位于太赫兹波段，液态水分子对太赫兹十分敏感。通过对比样品绝缘受潮区域与正常区域的太赫兹频域谱，可以初步判断复合绝缘结构中是否存在绝缘受潮。

H. Wang 等对 10 组不同含水率 K 的变压器绝缘油纸试样进行太赫兹检测，得到了不同样品的复介电常数的频域谱图[71]，如图 11 所示。可以看出随着含水量的增加，复介电常数的实部和虚部均呈增大趋势，因此可以根据这一特性对绝缘材料含水量进行评断，并通过峰值的变化对水分子的动态极化特性进行判断。

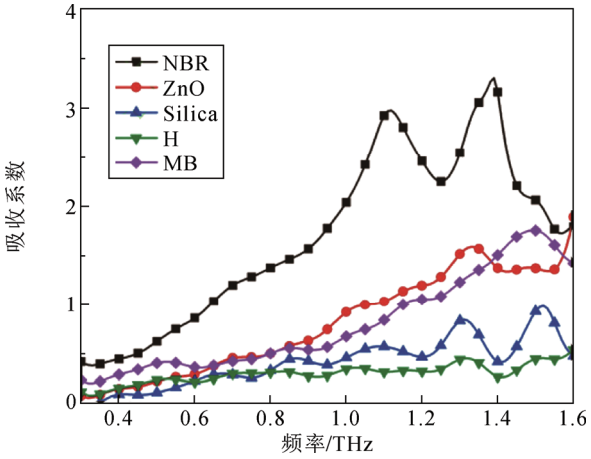
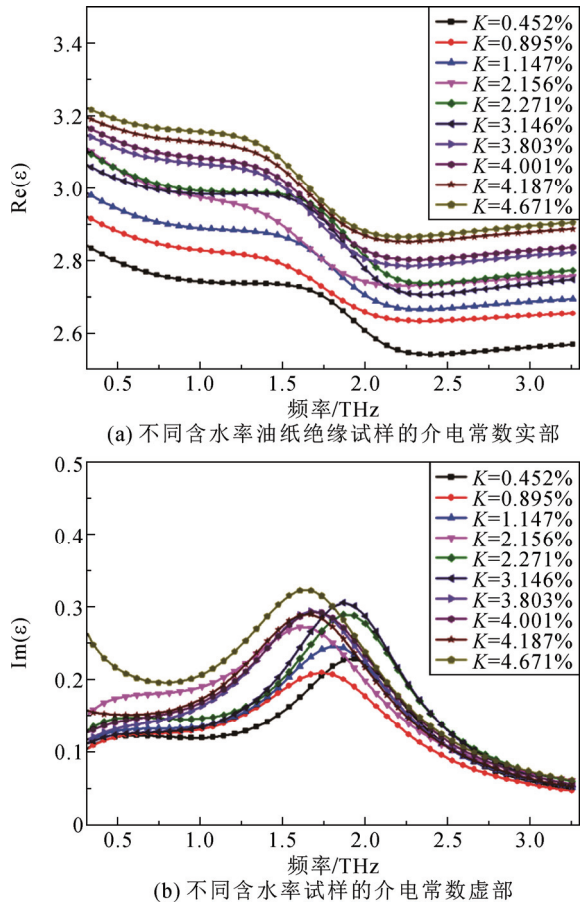


图 10 五组添加剂成分样品的太赫兹吸收光谱[70]

Fig.10 Terahertz absorption spectra of five groups of additive component samples[70]



(a) 不同含水率油纸绝缘试样的介电常数实部

(b) 不同含水率试样的介电常数虚部

图 11 不同含水率绝缘油纸的太赫兹复介电常数曲线[71]

Fig.11 Terahertz complex dielectric constant curves of Insulating oil paper with different moisture contents[71]

本课题组在实验室制作了含受潮缺陷的电缆终端试样并开展 THz-FDS 检测，结果如图 12 所示。可以看出，绝缘受潮的频域谱线变化趋势相同，但位于绝缘受潮位置的曲线与正常区域的曲线有显著不同，位于正常区域的频域谱的电场强度高于位于绝缘受潮区域的电场强度[45]。因此有受潮缺陷的样本和正常样本的频域曲线的变化规律可作为区分复合电缆终端存在绝缘受潮的依据。

4.2 电气设备绝缘材料老化状态评估

目前，以局部放电检测、频域介电谱、傅里叶红外光谱测试等为代表的检测方法已广泛应用于复合绝缘材料的老化测试，但以上传统检测方法只能从单一角度反应材料的劣化特性。随着太赫兹技术的发展，借助太赫兹检测进行材料的老化状况分析成为一项新的研究方向，已在电缆终端、聚丙烯聚合物老化检测方面得到应用。

在电缆终端材料老化检测方面，S. Li 等以车载电缆终端为样本模拟制作三层复合绝缘结构的样品，并进行了电热联合老化实验，随后对老化样品进行太赫兹无损检测，并应用吸收系数、介电常数实部、介质损耗、折射率对其老化状态进行表征[72]。图 13 给出吸收系数、介电常数实部、介质损耗的测试结果。可以看出对橡胶类绝缘材料检测得到的不同太赫兹参数具有不同的有效频段，且随老化时间均呈一定的变化规律。通过太赫兹波与物质的相互作用进行分析发现，老化会使材料的韧性下降产生裂纹，并伴随化学键的断裂，导致小分子量的增加，同时材料内部生成大量的含氧基和羰基，使外部电场的极化作用发生改变。

T. Chang 等通过对聚丙烯聚合物热老化样品进行检测，利用太赫兹折射率和消光系数频域谱对比分析了不同老化时间下材料的老化状态[73]。发现老化过程中，聚丙烯材料中产生了极性自由基，如羟基(—OH)等，使聚合物的极性增加，进而改变太赫兹波的响应特性。

上述研究表明，通过太赫兹频域特性参数可以有效地反应出复合绝缘材料的老化过程和老化机理，并对老化程度进行定量表征。

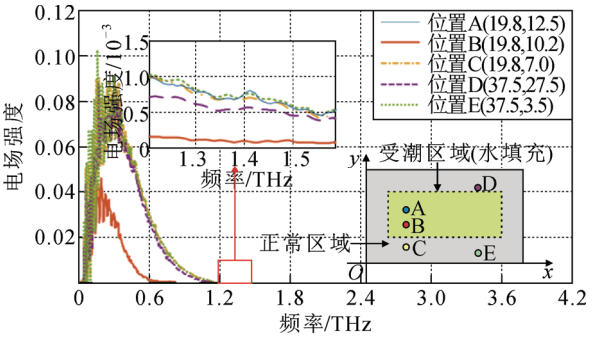
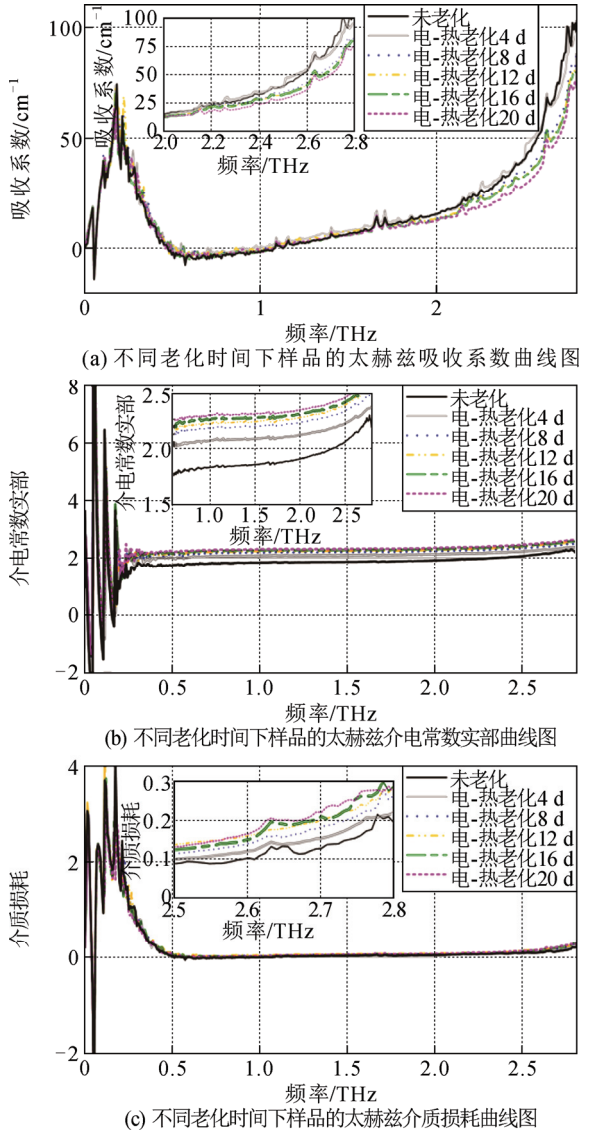


图 12 太赫兹线性频域光谱[45]

Fig.12 Terahertz complex dielectric constant curves of samples with different moisture contents[45]



(a) 不同老化时间下样品的太赫兹吸收系数曲线图

(b) 不同老化时间下样品的太赫兹介电常数实部曲线图

(c) 不同老化时间下样品的太赫兹介质损耗曲线图

图 13 不同老化时间样品的太赫兹频域特性参数曲线图[72]

Fig.13 Terahertz frequency domain characteristic parameter curves of samples under different aging times[72]

5 基于太赫兹成像的电气设备绝缘检测

5.1 太赫兹成像原理

太赫兹成像是将太赫兹波束经聚焦元件集中至空间上的某一点，随后移动被测试样进行平面内逐点扫描，提取反射或透射式太赫兹信号的特征参

数，并将电信号转化为数字信号矩阵，利用功率谱密度、太赫兹振幅谱、相位谱等多种特征参数对检测对象进行成像，进而识别各种缺陷[74-75]。

连续式太赫兹成像是一种强度成像方式，太赫兹波在经过检测样件时，检测样件会对太赫兹产生反射、散射、吸收等过程，样件内部不同位置的太赫兹波强度会发生变化。通过测量不同位置的太赫兹波强度信号来获得像素，进而构建检测样件的图像。根据成像方式不同，可以将太赫兹扫描成像分为透射成像、反射成像和衰减全反射成像。图 14 给出了一种太赫兹连续成像系统的示意图，其中图 14(a)为反射式，图 14(b)为透射式。

图 15 为基于倏逝波的衰减全反射(attenuated total reflection，ATR)成像系统示意图，通过理论研究成像角度对太赫兹反射信号和 ATR 穿透深度的影响，可获得适用于反射和 ATR 成像的太赫兹波成像角度，通过反射窗口和 ATR 棱镜快速切换的方式，进而实现共光路连续太赫兹反射和 ATR 双模式成像[54]。

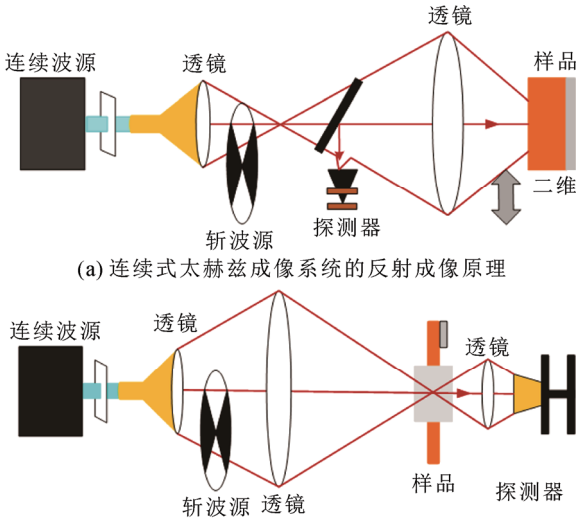
太赫兹成像方法有多种，包括时域/频域切片模式、脉冲宽度成像模式、一阶微分时间切片模式、时/频域差分切片模式、切片峰-峰值成像模式、能量积分成像模式、时域最大/小峰值成像模式、峰-峰值成像模式及最大或最小飞行时间模式等。常用太赫兹成像模式特征量所对应的时域谱波形特征如图 16 所示。

不同成像模式对应被测样品的不同太赫兹光谱特性，如峰-峰值成像能反映样品中不同物质组分对太赫兹波损耗作用的强弱；最大/最小飞行时间成像反映了太赫兹在空间中传播的光程大小，与被测样品的折射率以及厚度分布有着密不可分的相关性。因此可以依照实验目的进行成像模式的选择[76]。

5.2 电气设备内部缺陷的太赫兹成像检测

1995 年，Hu 和 Nuss 在美国贝尔实验室首次展示了脉冲太赫兹成像技术。他们通过移动物体进行逐点扫面获得其太赫兹光谱图像[77]。2005 年 H. Zhong 等成功地采用太赫兹层析成像技术对航空类塑料绝缘材料进行了研究，实现了太赫兹飞行时间(terahertz time-of-flight, THz-TOF)层析成像在塑料材料缺陷的无损识别中的应用[78]。

2011 年 R. Sato 等使用太赫兹成像技术对聚乙烯片和水树进行了观察[79]，得到图 17 所示含水树样品的太赫兹光强二维分布图，该图像效果与数码



(a) 连续式太赫兹成像系统的反射成像原理

(b) 连续式太赫兹成像系统的透射成像原理

图 14 连续式太赫兹成像系统图[51]

Fig.14 Continuous terahertz imaging system diagram[51]

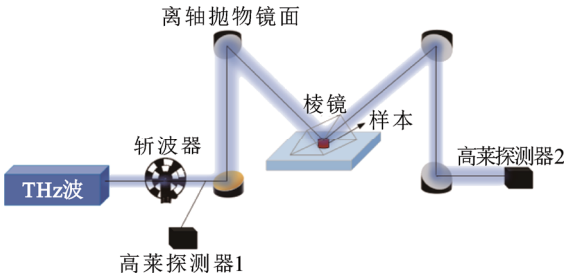


图 15 共光路连续 THz 反射和 ATR 成像系统示意图[52]

Fig.15 Schematic diagram of a common path continuous THz reflection and ATR imaging system[52]

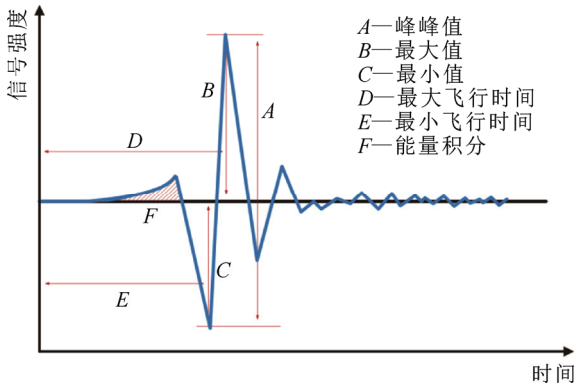


图 16 太赫兹成像模式所对应的时域谱波形特征示意图[76]

Fig.16 Schematic diagram of time-domain spectral waveform characteristics corresponding to terahertz imaging mode feature quantities[76]

相机所拍摄的原样品高度一致。可以看出，太赫兹图像不同区域的光线强度能够有效反应水成分对太

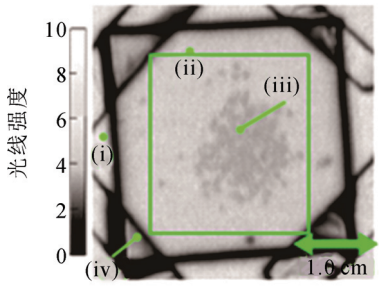


图 17　含水树样品的太赫兹成像图[79]

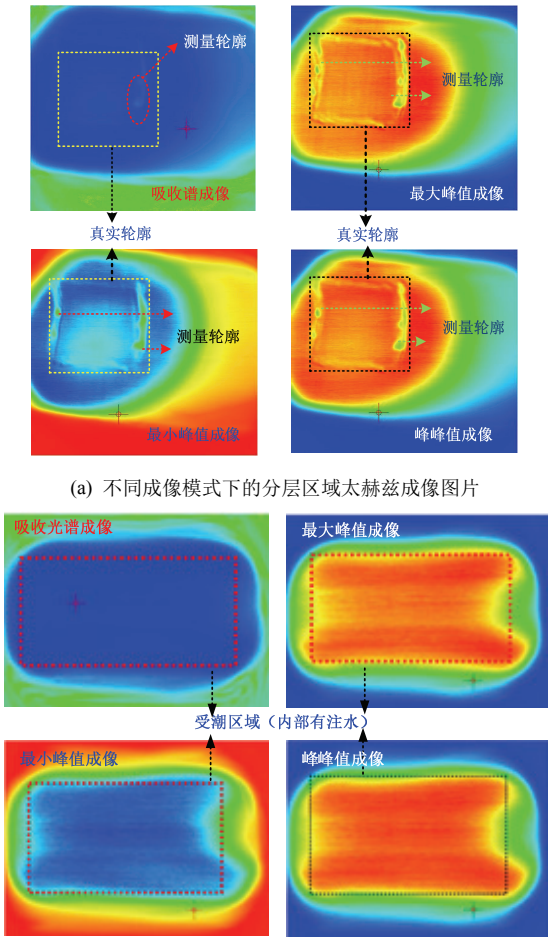
Fig.17　Terahertz imaging of water tree sample[79]

赫兹波的吸收特性，因此进一步证明了利用太赫兹成像检测聚乙烯中水树的可能性。

本团队在 2021 年实现了对车载电缆终端内部分层及受潮缺陷的太赫兹成像实验[45,65]，成像结果如图 18 所示，可以看出太赫兹波对不同类型的材料具有不同的响应频率，因此太赫兹频域成像可以反映被测样品在像素处的缺陷信息。实验结果验证了太赫兹成像技术应用于电缆终端等层状复合绝缘内部分层及受潮缺陷检测的有效性。

此外，由于每一个像素点上都对应着该点处的太赫兹脉冲波与目标材料相互作用的一个时间响应序列，因此相较于传统成像中仅有功率信息而言，太赫兹脉冲成像数据中不仅能够反映出被测物的几何形貌[80]；同时也包含了目标物对太赫兹脉冲相应的时间、相位、强度等完整信息，为目标物的分析和识别提供了更多的信息参考。

由于太赫兹波在穿过多层复合结构的电气材料时会在层间产生进行漫反射、散射和折射现象，因而导致信号发生衰减和失真。此外，由于气隙和划痕等缺陷的深度和面积不同以及反射波的传播距离不同，当太赫兹信号传播路径存在多条路径时，多径效应会导致信号的多个版本在接收端同时到达，造成干扰和失真，使返回的太赫兹信号产生误差。当检测样品太薄时，则返回的脉冲可能无法分离使得缺陷的深度和厚度难以诊断，这给缺陷厚度的谱线和成像带来困难和挑战。考虑太赫兹光谱的光学损耗特性，以及目前所应用太赫兹设备的功率，现阶段可应用近场成像方法实现最小 nm 级缺陷的识别，应用时域光谱判断分层等缺陷的厚度范围主要集中在 mm 级别，而传统检测方法如红紫外检测、X 射线、CT 扫描、局部放电检测等对于缺陷的识别只有 mm 甚至 cm 级别。此外，如何准确区分不同的缺陷，以及如何避免同一缺陷中波形差异造成



(a) 不同成像模式下的分层区域太赫兹成像图片

(b) 不同成像模式下的受潮区域太赫兹成像图片

图 18　分层及受潮缺陷样品的太赫兹成像图片[45,65]

Fig.18　Terahertz imaging pictures of delamination and moisture defect samples[45,65]

的误判，有必要借助相应的算法对测得的太赫兹光谱信号进行优化和滤波去噪，以得到缺陷的精确数据。

6　总结与展望

太赫兹检测技术因兼具光学和电磁学特性，拥有良好的指纹谱特性，且属于无损非接触测量，因此在电气设备复合绝缘结构的缺陷检测中具有广阔的应用前景。在当前研究和应用中，THz-TDS 对于电气设备复合绝缘内部或界面缺陷的测量、定位和几何尺寸计算具有明显的优势，而 THz-FDS 则适用于组分检测、受潮及老化状态评估；前者频谱范围宽、测速快，适用于对固体、液体样品进行光谱测量分析和缺陷的定量检测，后者具有频率分辨率高、不需后续复杂的数据处理等优势，则更适宜于定性评估，并且对于非极性的固体、液体和气体具有较为理想的检测效果。结合 THz-TDS 和 THz-FDS 的各自优势，通过太赫兹成像则能实现对复合绝缘结

构内部或界面缺陷的全景可视化检测和定位。

然而，受制于当前太赫兹激光器功率、频谱范围、价格和设备制造等方面的问题，在电气设备复合绝缘无损检测方面，太赫兹检测技术存在很大的提升空间。为适应现场推广应用，可从以下方面开展相关工作：

1）基于大功率太赫兹光源的检测设备研发。目前常用于太赫兹时域光谱系统的太赫兹激光器能量通常为 mW 级别。无论采用透射模式还是反射模式，其可检测的样品厚度为 mm 级，无法对 cm 级或者更大尺寸样品进行检测。因此，研发更大功率的太赫兹激光器(如 W 级)及其检测设备将更加适应于大尺寸电气设备的检测。

2）太赫兹三维层析成像技术。目前太赫兹成像结果均为二维图像，要实现缺陷的准确定位需辅以 THz-TDS 检测结果。如果利用被测样品每一个像素点的时域光谱曲线以及经傅里叶变换得到的频域特征谱线，或基于计算层析成像和飞行时间层析成像原理，利用太赫兹波对非金属电介质的穿透特性和对金属电介质的反射特性，研究用于成像的复合结构三维层析成像方法，将实现对被测物的三维可视化检测。

3）结合太赫兹测试结果与时域有限差分法(finite-difference time-domain, FDTD)仿真结果的数字孪生建模。通过太赫兹测试和 FDTD 仿真建模，构建电气设备复合绝缘结构的故障诊断数字孪生模型，即 THz-TDS 系统代替传统的传感器完成被测物中信息采集，包括时频域谱、吸收谱、像素等信息，同时基于数据驱动或模型驱动对高压复合绝缘设备完成建模，构建数字孪生模型。未来可针对电网等特定检测对象结合太赫兹无损检测技术建立高压复合绝缘结构监测、运维的数字孪生系统，实现三维可视化在线智能化监测。

4）小型轻量化的便携式太赫兹检测设备。目前常用 THz-TDS 系统结构复杂、体积尺寸大且对检测环境要求高(需要氮气仓)，因而不利于现场应用。后期可结合现场检测环境和实际需求，研发小型化便携式或手持式设备，兼具时、频域检测切换、各种成像模式切换等多模式切换功能，将更加贴合实际运检运维需求。

参考文献 References

[1] GUO C J, XU W L, CAI M M, et al. A review: application of terahertz nondestructive testing technology in electrical insulation materials[J]. IEEE Access, 2022, 10: 121547-121560.

[2] LI S B, CAO B L, LI J, et al. Review of condition monitoring and defect inspection methods for composited cable terminals[J]. High Voltage, 2023, 8(3): 431-444.

[3] 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.

[4] 周利军，刘 源，白龙雷，等. 高寒地区车载柔性电缆终端的局部放电特性与破坏机理[J]. 高电压技术，2019，45(1)：189-195.
ZHOU Lijun, LIU Yuan, BAI Longlei, et al. Partial discharge characteristics and breakdown mechanism for locomotive cable flexible terminal in alpine area[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(1): 189-195.

[5] 祝 贺，何峻旭，郑亚松，等. 电缆终端应力锥错位缺陷时界面温度及应力分布仿真研究[J/OL]. 电工技术学报，1-12[2023-12-25]. https://doi.org/10.19595/j.cnki. 1000-6753.tces.230738.
ZHU He, HE Junxu, ZHENG Yasong, et al. Simulation study on interface temperature and stress distribution of cable terminal stress cone misalignment defects[J/OL]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1-12[2023-12-25]. https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.230738.

[6] 赵 岩，郑书生. 基于损耗电流谐波特征分析的 XLPE 电缆局部尖刺缺陷诊断[J]. 电工技术学报，2023，38(21)：5725-5737.
ZHAO Yan, ZHENG Shusheng. Diagnosis of local spike defects in XLPE cables based on analysis of loss current harmonic Characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(21): 5725-5737.

[7] 郝 建，戴锡泽，高 震，等. 基于高压频域介电响应的交流 500 kV 交联聚乙烯海缆绝缘老化状态检测与分析[J]. 电网技术，2021，45(10)：4172-4180.
HAO Jian, DAI Xize, GAO Zhen, et al. Detection and analysis of insulation aging state of AC 500 kV XLPE submarine cable based on high voltage frequency dielectric response[J]. Power System Technology, 2021, 45(10): 4172-4180.

[8] 雷 栋，孙继星，邱 磊，等. 基于陡波冲击试验的动车组车顶电缆终端绝缘热破坏过程研究[J]. 高压电器，2022，58(10)：128-135.
LEI Dong, SUN Jixing, QIU Lei, et al. Research on insulation thermal breakdown process of cable terminal of EMU roof based on steep wave impact test[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(10): 128-135.

[9] 朱梦瑶，李 欢，张瑞祥. 热老化对 XLPE 电缆本体中典型缺陷所引发的电场畸变的影响[J/OL]. 中国电机工程学报，1-12[2023-12-25]. https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.231728.
ZHU Mengyao, LI Huan, ZHANG Ruixiang. Influence of thermal aging on electric field distortion caused by typical defects in XLPE cable[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 1-12[2023-12-25]. https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.231728.

[10] 彭向阳，林宏升，王 锐，等. 硅橡胶复合绝缘子老化机理及其服役寿命预测研究综述[J]. 高压电器，2018，54(6)：1-8，15.
PENG Xiangyang, LIN Hongsheng, WANG Rui, et al. Review on aging mechanism and service life prediction of silicone rubber composite insulator[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(6): 1-8, 15.

[11] 夏 睿，谭 笑，陈 杰，等. 10 kV XLPE 电缆接头典型绝缘缺陷的局部放电特征分析[J]. 绝缘材料，2020，53(8)：95-101.
XIA Rui, TAN Xiao, CHEN Jie, et al. PD characteristics of typical insulation defects in 10 kV XLPE cable joint[J]. Insulating Materials, 2020, 53(8): 95-101.

[12] ZHANG Z Y, LI J H, SONG Y F, et al. A novel ultrasound-vibration composite sensor for defects detection of electrical equipment[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(5): 4477-4480.

[13] 王志刚，隗华荣，董长城. 电缆接头局部放电的在线检测方法及其发展方向[J]. 电工技术，2014(4)：48-50.
WANG Zhigang, WEI Huarong, DONG Changcheng. Online detection method and development direction of partial discharge in cable joints[J]. Electric Engineering, 2014(4): 48-50.

[14] 吕事桂，刘学业. 红外热像检测技术的发展和研究现状[J]. 红外技术，2018，40(3)：214-219.
LÜ Shigui, LIU Xueye. Development and research status of infrared thermal image detection technology[J]. Infrared Technology, 2018, 40(3): 214-219.

[15] LIN L, CHEN Q G, WANG X Y, et al. Decomposition mechanism of environmentally friendly insulating medium HFO1234zeE/N2 gas mixture under partial discharge[J]. High Voltage, 2022, 7(6): 1069-1079.

[16] WANG H T, HE C, GUO R C, et al. Partial discharge measurement and analysis under lightning impulse superimposed DC voltage in SF_6 gas[J]. High Voltage, 2022, 7(4): 744-752.

[17] LI J H, ZHANG X R, HAN X T, et al. A partial discharge detection method for SF_6 insulated inverted current transformers adopting inner shield case as UHF sensor[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(6): 3237-3239.

[18] ZHANG X R, SHI M X, CAI J, et al. A novel partial discharge detection method for power transformers on site adopting its component as ultra-high frequency sensor[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(6): 2269-2271.

[19] ZHENG Y, HAO Y P, LIU L, et al. An ultrasonic nondestructive testing method for density uniformity of basin-type insulators in GIS[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-8.

[20] 郝艳捧，梁学致，黄盛龙，等. GIS/GIL 绝缘子超声检测研究进展与展望[J]. 高电压技术，2023，49(9)：3596-3606.
HAO Yanpeng, LIANG Xuezhi, HUANG Shenglong, et al. Research progress and outlook on ultrasonic testing of GIS/GIL insulators[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(9): 3596-3606.

[21] NIKULIN S A, KHANZHIN V G, GONCHAROV V I, et al. Investigation of quality of high-resistive coatings of superconducting wires with acoustic emission method[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 1995, 5(2): 325-328.

[22] ZHU G Y, ZHOU K, ZHAO S L, et al. A novel oscillation wave test system for partial discharge detection in XLPE cable lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(4): 1678-1684.

[23] REID A J, ZHOU C, HEPBURN D M, et al. Fault location and diagnosis in a medium voltage EPR power cable[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(1): 10-18.

[24] BO K, CHEN J Q, JIANG Y P, et al. Research on electric conductivity of thermo-plastic composites based on eddy current loss[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2021, 31(8): 1-4.

[25] WU H L, PATEL K, AMINEH R K. Quality enhancement in holographic imaging by background property estimation[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(7): 5748-5752.

[26] PRINCIPE R, VALLEJO L M, BAILEY J, et al. Phased array ultrasonic nondestructive tests of soldered current-carrying bus-bar splices of superconducting magnets[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018, 28(4): 1-8.

[27] WANG T T, SUO C Y, GONG X, et al. Research on high voltage cable insulation on-line monitoring technology based on double differential CT method[C]// 2021 IEEE Electrical Insulation Conference. Denver, USA: IEEE, 2021: 451-456,

[28] 电力设备预防性试验规程：DL/T 596-2021[S]. 北京：国家能源局，2021.
Preventive test code for electric power equipment: DL/T 596-2021[S]. Beijing, China: National Energy Administration, 2021.

[29] YANG L J, CHEN J R, WANG S H, et al. Dielectric response measurement of oil-paper insulation based on system identification and its time-frequency-domain conversion method[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(5): 1688-1698.

[30] WANG Q, WU C, GAO Y F, et al. Non-destructive thermal ageing evaluation of P(VDF-HFP) film based on broadband dielectric response[J]. High Voltage, 2022, 7(6): 1123-1129.

[31] BANERJEE C M, BARAL A, CHAKRAVORTI S. Detrapped charge-affected depolarization-current estimation using short-duration dielectric response for diagnosis of transformer insulation[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(10): 7695-7702.

[32] FAN X H, LIU J F, ZHANG Y Y, et al. Polarization loss analysis and ageing characterization of transformer oil-immersed insulation by using decoupled frequency domain spectroscopy[J]. High Voltage, 2022, 7(3): 575-585.

[33] 蔡　超，刘庆珍，范　映，等. 基于油纸绝缘变压器回复电压法的半峰周期极化谱分析[J]. 电气技术，2020，21(03)：79-83+90.
CAI Chao, LIU Qingzhen, FAN Ying, et al. Half-peak periodic polarization spectrum analysis of oil-paper insulated transformer based on recovery voltage method[J]. Electrical Engineering, 2020, 21(03): 79-83+90.

[34] ZHANG Z H, WANG L M, MEI H W, et al. Quantitative detection of interfacial air gap in insulation equipment based on terahertz wave contrast method[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 68(12): 4896-4905.

[35] 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.

[36] SUN F S, FAN M B, CAO B H, et al. Terahertz based thickness measurement of thermal barrier coatings using long short-term memory networks and local extrema[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(4): 2508-2517.

[37] DORNEY T D, BARANIUK R G, MITTLEMAN D M, et al. Material parameter estimation with terahertz time-domain spectroscopy[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2001, 18(7): 1562-1571.

[38] HUANG Z Q, LU F, TONG Y F, et al. Technology for the detection of ablation defects in buffer layers of high-voltage cables[J]. IEEE Access, 2022, 10: 92843-92853.

[39] 唐志国，李　阳. 太赫兹技术在电气设备绝缘缺陷检测研究综述[J]. 高压电器，2022(1)：1-9.
TANG Zhiguo, LI Yang. Review of terahertz technology in electrical equipment insulation defect detection[J]. High Voltage Apparatus, 2022(1): 1-9.

[40] 王奇书，崔宗宇，任姣姣，等. 太赫兹时域光谱无损检测玻纤复合材料的干涉现象研究[J]. 光谱学与光谱分析，2023，43(10)：3031-3040.
WANG Shuqi, CUI Zongyu, REN Jiaojiao, et al. Research on interference phenomena in non-destructive testing of fiberglass composite materials by terahertz time domain spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2023, 43(10): 3031-3040.

[41] 刘海文，占　昕，任宝平. 射电天文用太赫兹三通带频率选择表面

设计[J]. 物理学报，2015，64(17)：111-117.
LIU Haiwen, ZHAN Xin, REN Baoping. Design of triple bandpass frequency selective surface in terahertz wave band for radio astronomy[J]. 2015, 64(17): 111-117.

[42] 苗曙光，邵　丹，刘忠育，等. 基于太赫兹时域光谱技术的煤岩识别方法研究[J]. 光谱学与光谱分析，2022，42(6)：1755-1760.
MIAO Shuguang, SHAO Dan, LIU Zhongyu, et al. Study on coal-rock identification method based on terahertz time-domain spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2022, 42(6): 1755-1760.

[43] 卢雪晶，葛宏义，蒋玉英，等. 太赫兹技术在农产品检测中的应用研究进展[J]. 光谱学与光谱分析，2022，42(11)：3330-3335.
LU Xuejing, GE Hongyi, JING Yuying, et al. Application progress of terahertz technology in agriculture detection[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2022, 42(11): 3330-3335.

[44] 王　昀，秦坚源，贾生尧，等. 太赫兹频域光谱用于土壤中敌百虫的检测[J]. 光谱学与光谱分析，2020，40(6)：1791-1795.
WANG Jun, QIN Jianyuan, JIA Shengyao, et al. Detection of trichlorfon in soil using THz-TDS[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(6): 1791-1795.

[45] LI S B, CAO B L, KANG Y Q, et al. Nonintrusive inspection of moisture damp in composited insulation structure based on terahertz technology[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 6011110.

[46] 于是乎，张媛媛，何宏明，等. 热氧老化对 XLPE 太赫兹频域介电特性的影响[J]. 绝缘材料，2020，53(2)：53-58.
YU Shihu, ZHANG Yuanyuan, HE Hongming, et al. Effect of thermal-oxidative ageing on dielectric properties of XLPE in terahertz frequency domain[J]. Insulating Materials, 2020, 53(2): 53-58.

[47] ZHANG H, SFARRA S, OSMAN A, et al. An infrared-induced terahertz imaging modality for foreign object detection in a lightweight honeycomb composite structure[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(12): 5629-5636.

[48] ZHENG S, LI C, WU S Y, et al. Terahertz transmissive metasurface for realizing beam steering by frequency scanning[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(17): 5502-5507.

[49] 邹德智，李　丹，张　青，等. 太赫兹光谱法检测面粉中过氧化苯甲酰含量[J]. 食品科学，2017，38(22)：298-302.
ZOU Dezhi, LI Dan, ZHANG Qing, et al. Determination of the content of benzoyl peroxide in flour based on terahertz spectroscopy[J]. Food Science, 2017, 38(22): 298-302.

[50] 曹　灿，张朝晖，赵小燕，等. 太赫兹时域光谱与频域光谱研究综述[J]. 光谱学与光谱分析，2018，38(9)：2688-2699.
CAO Can, ZHANG Zhaohui, ZHAO Xiaoyan, et al. Review of terahertz time domain and frequency domain spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(9): 2688-2699.

[51] 王　彪，刘　伟，于　淼，等. 太赫兹成像技术的应用研究[J]. 测控技术，2021，40(11)：118-124.
WANG Biao, LIU Wei, YU Miao, et al. Application research of terahertz imaging technology[J]. Measurement & Control Technology, 2021, 40(11): 118-124.

[52] 杨振刚，刘劲松，王可嘉. 连续太赫兹成像系统对多层蜂窝样件无损检测的实验研究[J]. 光电子激光，2013，24(6)：1158-1162.
YANG Zhengang, LIU Jinsong, WANG Kejia. Experimental research on nondestructive inspection for multilayer cellular samples using continuous terahertz waves imaging system[J]. Journal of Optoelectronics & Laser, 2013, 24(6): 1158-1162.

[53] 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[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(1): 51-56.

[54] 武丽敏，徐德刚，王与烨，等. 共光路连续太赫兹反射和衰减全反射成像[J]. 物理学报，2021，70(11)：357-366.
WU Limin, XU Degang, WANG Yuye, et al. Common path continuous terahertz reflection and attenuated total reflection imaging[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(11): 357-366.

[55] 舍从东，曾福平，苏大智，等. 环保型绝缘气体 $C_5F_{10}O$ 与密封材料三元乙丙橡胶和丁腈橡胶的相容性[J]. 高电压技术，2023，49(11)：4547-4555.
SHE Congdong, ZENG Fuping, SU Dazhi, et al. Compatibility between environmentally friendly insulating gas $C_5F_{10}O$ and sealing materials EPDM and nitrile rubber[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(11): 4547-4555.

[56] 贾晓芬，于业齐，郭永存，等. 航拍绝缘子自爆缺陷的轻量化检测方法[J]. 高电压技术，2023，49(1)：294-300.
JIA Xiaofen, YU Yeqi, GUO Yongcun, et al. Lightweight detection method for self-explosion defects of aerial insulators[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(1): 294-300.

[57] 刘文通，李丽娟，任姣姣，等. 电力绝缘子层间气隙太赫兹检测与定量分析[J]. 激光与光电子学进展，2023，60(21)：165-171.
LIU Wentong, LI Lijuan, REN Jiaojiao, et al. THz detection and quantitative analysis of interlayer air gap in power insulators[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(21): 165-171.

[58] 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.
ZHANG Zhonghao, MEI Hongwei, LIU Jianjun, et al. Detection method of interfacial defects of composite insulators based on THz wave[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(3): 989-999.

[59] CHENG L, WANG L M, MEI H W, 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.

[60] 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 terahertz spectroscopic inspection experiment for glass fiber composite material defects[J]. Infrared Technology, 2015, 37(9): 764-768.

[61] 潘　钊，李宗亮，张振伟，等. 基于 THz-TDS 的陶瓷纤维复合材料缺陷检测分析[J]. 光谱学与光谱分析，2022，42(5)：1547-1552.
PAN Zhao, LI Zongliang, ZHANG Zhenwei, et al. Defect detection and analysis of ceramic fiber composites based on THz-TDS technology[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2022, 42(5): 1547-1552.

[62] 王家天，刘　闯，任姣姣，等. 多层胶接结构胶层均匀性的太赫兹时域表征方法[J]. 红外与激光工程，2022，51(6)：306-312.
WANG Jiatian, LIU Chuang, REN Jiaojiao, et al. Terahertz time domain characterization method of the adhesive layer uniformity in multiple bonding structures[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(6): 306-312.

[63] 顾　健，任姣姣，张丹丹，等. 基于多次回波数值模拟的涂层缺陷太赫兹无损检测[J]. 光学学报，2022，42(15)：111-118.
GU Jian, REN Jiaojiao, ZHANG Dandan, et al. Terahertz nondestructive testing of coating defects based on multiple echoes numerical simulation[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(15): 111-118.

[64] 许旭日，高　宇，李　敬，等. 基于等温表面电位衰减法预测不同厚度的聚乙烯纳米复合材料直流击穿场强[J]. 高电压技术，2022，48(7)：2864-2872.
XU Xuri, GAO Yu, LI Jing, et al. Prediction of DC breakdown field strength of polyethylene nanocomposites with different thicknesses based on isothermal surface potential decay method[J]. High Voltage

Engineering, 2022, 48(7): 2864-2872.

[65] LI S B, CAO B L, CUI Y, et al. Terahertz-based insulation delamination defect inspection of vehicle cable terminals[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2023, 9(1): 1765-1774.

[66] LIU J J, ZHANG Z H, WU W S, et al. Application of terahertz transmission wave in measuring the thickness of insulating medium[C]// 2018 12th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM). Xi'an, China: IEEE, 2018: 709-712,

[67] LI J J, YANG L J, HE Y X, et al. Terahertz nondestructive testing method of oil-paper insulation debonding and foreign matter defects[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2021, 28(6): 1901-1908.

[68] 徐亚军，向红星，钟 勉，等. 碳纤维复合材料不同深度缺陷的太赫兹检测研究[J]. 电子测量技术，2022，45(08)：58-63.
XU Yajun, XIANG Hongxing, ZHONG Mian, et al. Research on THz detection of CFRP with different depth defects[J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(08): 58-63.

[69] DING D, YANG L J, Yu H, et al. Characterization of the sulfur corrosion of paper-wrapped windings in the terahertz range[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2023, 30(1): 290-298.

[70] 殷贤华，陈慧聪，张 活. 基于太赫兹光谱数据融合多组分橡胶添加剂的定量检测[J]. 中国激光，2023：1-19.
YIN Xianhua, CHEN Huicong, ZHANG Huo. Quantitative detection of multi-component rubber additives based on terahertz spectral data fusion[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023: 1-19.

[71] WANG H Q, CHENG L, CHENG Z D, et al. Characterization of water-participant hydrogen bonds in oil-paper insulation investigated with terahertz dielectric spectroscopy[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(2): 640-648.

[72] 李帅兵，李天耕，杨 栋，等. 电热联合老化下车载电缆终端复合绝缘结构的太赫兹频域特征[J]. 高电压技术，2023，49(10)：4317-4326.
LI Shuaibing, LI Tiangeng, YANG Dong, et al. Terahertz frequency domain characteristics of composite insulation structure for vehicle cable terminals under combined electrical and thermal aging[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(10): 4317-4326.

[73] CHANG T Y, ZHANG X S, GUO Q J, et al. Terahertz dielectric spectroscopy based thermal aging analysis of polypropylene[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2020, 10(4): 363-369.

[74] 杨 帆，余 晓，刘 黎，等. 基于太赫兹时域光谱技术的皮肤水分含量评估[J]. 电工技术学报，2021，36(4)：777-786.
YANG Fan, YU Xiao, LIU Li, et al. Water content evaluation of skin tissue based on terahertz time domain spectroscopy[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2021, 36(4): 777-786.

[75] 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.
XIE Shengyi, YANG Fan, HUANG Xin, et al. Air gap detection and analysis of XLPE cable insulation based on terahertz time domain spectroscopy[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2020, 35(12): 2698-2707.

[76] 余 晓，杨 帆，丁雪菲. 皮肤含水量对太赫兹光谱参数的影响规律研究[J]. 光谱学与光谱分析，2021，41(03)：835-841.
YU Xiao, YANG Fan, DING Xuefei. Investigation of the influence of water content in skin tissue on terahertz spectral parameters[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, 41(03): 835-841.

[77] FUKASAWA R. Terahertz Imaging: Widespread industrial application in non-destructive inspection and chemical analysis[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2015, 5(6): 1121-1127.

[78] ZHONG H, XU J Z, XIE X, et al. Nondestructive defect identification with terahertz time-of-flight tomography[J]. IEEE Sensors Journal, 2005, 5(2): 203-208.

[79] 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.

[80] KIM K, LEE D, HAM W, et al. Adaptive compressed sensing for the fast terahertz reflection tomography[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2013, 3(4): 395-401.



李帅兵(通信作者)
1989—，男，博士，教授
主要从事电力装备检测与评估、电力设备故障诊断、新能源电力装备状态监测、综合能源系统、新能源发电与运行控制等方面的研究工作
E-mail: shuaibingli@mail.lzjtu.cn

LI Shuaibing
Ph.D., Professor
Corresponding author



李天耕
1998—，男，硕士生
主要从事电力装备检测与评估方面的研究工作
E-mail: litiangeng0207@163.com

LI Tiangeng

收稿日期 2023-12-21 修回日期 2024-01-04 编辑 卫李静