

太赫兹信号在老化硅橡胶中的传播特性 仿真研究

师 涛¹, 罗康顺¹, 李传秋¹, 史玉清¹, 吴振升², 宿振业²

(1. 云南电网有限责任公司玉溪供电局, 云南 玉溪 653100; 2. 北京交通大学电气工程学院, 北京 100044)

摘要: 绝缘是影响电力系统稳定运行的重要因素, 但大多数情况下电气设备很难拆卸, 对其绝缘老化程度的检测较为困难。太赫兹波具有可以轻易穿透绝缘材料等非金属材料特性, 这对于硅橡胶复合绝缘子的无损检测具有重要意义。分析了太赫兹信号在理想介质与有损介质中传播的特性, 从理论上阐述了其在非理想材料中可能发生的损耗, 进而指出可以通过检测太赫兹回波损耗变化来反映硅橡胶介电常数的变化及其老化程度。之后在 CST 仿真软件上搭建仿真模型, 改变材料的相对介电常数以及太赫兹信号的频率, 研究其对回波损耗造成的影响, 最后得出的结论可以更效率地指导实际实验的进行。

关键词: 太赫兹; 无损检测; 回波损耗; 硅橡胶绝缘子

Simulation study on propagation characteristics of terahertz signal in aging silicone rubber

SHI Tao¹, LUO Kangshun¹, LI Chuanqiu¹, SHI Yuqing¹, WU Zhensheng², SU Zhenye²

(1. Yuxi Power Supply Bureau of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Yuxi 653100, China;

2. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Insulation is an important factor affecting the stable operation of power system, but it is difficult to disassemble electrical equipment in most cases, and it is difficult to detect the aging degree of insulation. Terahertz wave can easily penetrate non-metallic materials such as insulating materials, which is of great significance for nondestructive testing of silicone rubber composite insulators. The propagation characteristics of terahertz signal in ideal and lossy medium are analyzed, and the possible loss of terahertz signal in non-ideal materials is described theoretically. Furthermore, it is pointed out that the change of permittivity and aging degree of silicone rubber can be reflected by detecting the change of terahertz return loss. After that, the simulation model was built on the CST simulation software, and the relative dielectric constant of the material and the frequency of the terahertz signal were changed to study the influence on the return loss. Finally, the conclusion could guide the actual experiment more efficiently.

Key words: terahertz; nondestructive testing; return loss; silicone rubber insulator

0 引言

在变配电设备固体外绝缘中, 绝缘子对于

保证电力系统的高效、安全和稳定运行具有重要意义。硅橡胶复合绝缘子具有较轻的质量以及良

国家重点研发计划项目 (no. 2018YFB2100104) 资助

好的机械性能,而与其他绝缘材料相比又具有更好的憎水性、抗老化性和抗腐蚀性,因而硅橡胶绝缘子广泛应用在变电站中。但是,由于使用年限的增加及外部环境的影响,复合绝缘子的一些缺陷也都显露出来。在微观上,硅橡胶表面的分子链发生断裂,致使硅橡胶表面结构及疏水性被破坏,绝缘子的性能逐渐发生劣化乃至失效。宏观上,伞裙机械强度不断上升,褪色、粉化及龟裂,表面憎水性下降,伞裙的破损或脱落会降低绝缘子的爬电距离,影响其闪络电压,给电力系统的正常运行带来极大的危害^[1-2]。由于硅橡胶复合绝缘子材料的老化失效将直接导致电气设备出现系列故障和缺陷,严重威胁了电力系统的安全稳定运行,因此及时对运行线路绝缘子进行跟踪测试,在对绝缘子老化程度的判断与发现潜在的劣化复合绝缘子方面具有重大意义^[3-5]。

由于电网设备在大多数情况下都不易拆卸,运输维修成本较高,检测不方便,因此绝缘材料的无损检测技术一直是研究的热点。目前针对绝缘材料的检测,主要有X射线检测^[6]、超声波探测^[7]、红外技术^[8]和紫外检测等方法手段,在现场作业时,目视检查、红外检测与紫外检测是作业人员最常用的检测手段,这些方法的结合可以对很多情况下的绝缘子故障造成的事故提前作出预警,同时,也有局部放电检测、红外测温、超声波测量和微波技术来辅助检测,这些技术手段优缺点各异,但是都不能满足安全有效地进行无损检测复合绝缘子内部微小缺陷的要求^[9]。

随着太赫兹光源研发技术的提高,太赫兹技术慢慢走进人们视野,太赫兹波的主要特征是太赫兹波长比较特殊,可以轻易穿透复合材料和非金属材料,且由于频率较高、波长短,使得一些细小的缺陷材料内部的裂缝在太赫兹信号下可精确反映出来^[10-11]。目前太赫兹对硅橡胶的检测主要在于通过测量太赫兹样品回波损耗和插入损耗,进而判断硅橡胶样品状态。检测时太赫兹频率、样品老化程度等实验变量的微小变化都可能带来太赫兹传播参数检测误差增大,现有硅橡胶材料太赫兹波传播参数检测实验因实验变量带来

的影响多种多样,需要进行大量重复实验,工作量较大,成本较高,检测效率低下。

针对上述问题,本文运用有限元方法,在CST仿真平台上建立仿真模型,模拟太赫兹信号在硅橡胶绝缘子中的传输过程,使之用于指导实验进行,有效缩短硅橡胶材料太赫兹波传播参数检测实验流程,降低检测成本。

1 太赫兹检测技术

太赫兹波 (THz) 是一种频率介于红外波和微波之间的电磁波,所以太赫兹波经常也被称为亚毫米波,其频率在0.1~10 THz内,波长范围在30 μm~3 mm之间,因此有着很多特殊的物理与化学性质,引起了人们对太赫兹领域广泛的关注。低功率太赫兹波对生物组织完全无害,其辐射可以穿透多种非导电材料,包括塑料、聚合物和陶瓷等物质,经过在材料中的传播,太赫兹波的时域与频域特性将会发生变化,通过分析在样品中反射及投射后得到的太赫兹波形可以得到被检测材料的折射率及介电常数等参数。与传统的无损检测手段相比,太赫兹光谱技术主要有以下优势:

1) 相干性高。太赫兹波段包含了丰富的物理和化学信息,通过解析其中包含的信息可以对被检测材料的老化程度作出精确的判断。

2) 透射能力强。太赫兹波对不同的材料和物质有穿透能力,并且还能够对不同的材料形成透视成像。

3) 探测安全性高。太赫兹射线不发生电离,其能量大约只有X射线的1%。在具体的应用过程中不会产生对组织有害的化学物质,即不会对被检测对象造成破坏。

4) 分辨率比较高。大多数极性分子和生物大分子的振动和转能级跃迁都处在太赫兹波段,因此采用太赫兹检测可以使检测的内部图像更加清晰。

5) 检测方便。太赫兹检测法不需要接触样品表面,因此可以将其用于很多不可拆卸的电气设备上的检测。

6) 测量准确。可以精确定位样品缺陷的位置及测量相对较大缺陷的尺寸。

根据不同的辐射原理,可大致将太赫兹成像技术分为连续波太赫兹与脉冲波太赫兹成像技术。连续波太赫兹发射源发出的信号是连续的,其发射源可以提供相对脉冲发射源更高的辐射强度。当太赫兹波照射绝缘子时,硅橡胶内部的缺陷或表面损坏会发生散射效应,进而影响太赫兹波的强度分布,根据接收到衰减程度不同的信号,就可以对被测试物品进行成像,并根据灰度值推断绝缘子内部的结构、缺陷或损坏位置。所以一般连续太赫兹波成像在根本上是对信号强度的成像。连续太赫兹波系统结构相对简单,价格低廉,且能在较短的时间内成像,具有广阔的应用前景。脉冲太赫兹波成像是在一个信号周期内,仅在一定的时间内发出信号,此信号被脉冲式太赫兹接收器获取,再经过处理后即可成像。与连续波太赫兹成像技术不同,由于系统采用逐点扫描的成像方法,图像中每个像素点都对应一个时域波形,因此其信息量非常庞大,这样就会使得太赫兹波谱能够提供更多更精确的信息,以得到该点的相位幅值信息,进而可以分析样件的内部空间分布并进行成像。虽然脉冲太赫兹方法更加精确,但也造成了成像时间过长的问題,因此该方法更适用于小体积的精确成像^[12]。

太赫兹波在绝缘介质中的传播过程符合光的反射定律,在两介质交界面传播时,由于两侧介质折射率的差异,会使之产生反射波与折射波,一般在用太赫兹检测绝缘子时是垂直入射,为让演示更清晰,使之略有角度,如图1所示。

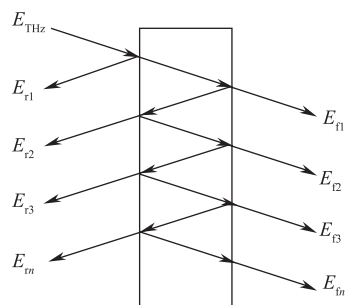


图1 太赫兹波在介质中传播模型

Fig. 1 A model of terahertz wave propagation in a medium

图1中, $E_{ri}(i=1, 2, 3, \dots, n)$ 为多次反射产生的反射波; $E_{ti}(i=1, 2, 3, \dots, n)$ 为多次反射产生的透射波^[13-14]。

任何复杂的电磁波都可以分解成许多均匀电磁波,而太赫兹信号是其中一种较高频率的电磁波,波矢量是描述电磁波传输特性的一个重要参数^[15]。波在理想介质中的传输有

$$\vec{k} = \vec{e}_n k = \vec{e}_n \omega \sqrt{\mu \epsilon} \quad (1)$$

式中, $\vec{e}_n$ 为波传播方向的单位矢量;波矢量的大小为波数 k ,波矢量可表征电磁波的相位、相速、波长以及衰减等参数。

当波在理想介质中传输时,由式(1)可知,波的幅值不会发生衰减。若电磁波在有损耗介质中传播,波矢量则表示为

$$\vec{k}_c = \vec{e}_n \omega \sqrt{\mu \epsilon_c} = \vec{e}_n \omega \sqrt{\mu \left(\epsilon - j \frac{\sigma}{\omega} \right)} \quad (2)$$

可以看出,当介质的电导率不为零时,介质变为有损耗介质,相比理想介质而言,波在该介质中传输将发生波形的衰减。同时,当波从一种媒介入射到另一媒介时,在介质分界面上波会发生反射,反射系数与波阻抗有关,有损介质中的波阻抗 η 可表示为

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \left[1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon} \right)^2 \right]^{-1/4} e^{j \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon} \right)} \quad (3)$$

当电磁波在分界面上从介质1垂直入射到介质2时,若它们的波阻抗分别为 η_1 和 η_2 ,则反射系数 Γ 有

$$\Gamma = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1} \quad (4)$$

透射系数有

$$\Gamma = \frac{2\eta_2}{\eta_2 + \eta_1} \quad (5)$$

由上式可知,当把太赫兹波垂直射入硅橡胶中时,波在硅橡胶中将会有一定的能量损耗,且会造成最后的反射波和入射波幅值与相位不同,信号在绝缘介质中传播时将发生多次折反射,更加剧了信号在介质中的传输损耗。

反映信号在介质中的传输损耗特性可用S参

数来表示, 又叫Scatter参数, 即散射参数, 它用来描述传输通道在高频信号励磁下的电气特性并以频域的形式表现出来。当传输介质不同时, 测量到的反射波和透射波大小会不同, 即不同特性的传输介质会对相同的输入信号表现出不同的散射程度, 这种不同的散射程度就可以用来描述该介质的特性, S 参数中常用到的是 S_{11} 参数和 S_{21} 参数, 分别称为回波损耗 (Return Loss) 和插入损耗 (Insert Loss), 表达式可写为

$$S_{11} = \frac{b_1}{a_1} \quad (6)$$

$$S_{21} = \frac{b_2}{a_1} \quad (7)$$

式中, a_1 为输入功率; b_1 为反射功率; b_2 为透射功率。

由于 S 参数是以比值的形式表示, 因此 S 是一个小于1的正数, 为了对比起来更方便, 常以dB的形式描述, 二者转换关系如下

$$S_{dB} = 20 \lg S \quad (8)$$

因此, 在相同的入射功率下, 随着绝缘子老化程度的增加, 信号在其中传输的损耗越大, 回波损耗和透射损耗也越大。因此, 通过比较不同绝缘子太赫兹波的 S 参数, 可进一步判断绝缘子的老化状态。

但考虑到最终目的, 为实现绝缘子老化的现场检测, 因此对绝缘子使用反射测量较为合适, 而透射测量则不合实际且不利于现场测试。表示反射数据的方式为回波损耗, 回波损耗可理解为反射信号与入射信号之间的dB差值, 从单位dB角度来看, 当阻抗完全匹配时, 回波损耗为0 dB。

2 太赫兹在硅橡胶绝缘子中的模拟仿真分析

本节拟通过模拟太赫兹信号在硅橡胶绝缘子中的传输, 探究材料老化程度与太赫兹传播特性的规律。仿真平台选择德国CST公司开发的CST Studio Suite, 中文名称为CST工作室套装, 为有效计算太赫兹波在硅橡胶材料内的投射反射情

况, 软件计算采用的是有限积分法, 适用于宽带频谱的仿真计算。

在硅橡胶绝缘子模型厚度设定上, 考虑到厚度过大会造成太赫兹波的过量衰减, 过薄则达不到测量所需信噪比, 在做硅橡胶绝缘子老化实验时一般将厚度设置为2~4 mm。因此在仿真模型搭建时取硅橡胶厚度为3 mm, 图2为在CST中建立的硅橡胶切片示意图, 使用太赫兹脉冲射线垂直入射, 考虑到手持式太赫兹检测仪大多为低频太赫兹, 因此将射线频率设为0.17~0.22 THz, 脉冲波形如图3所示。

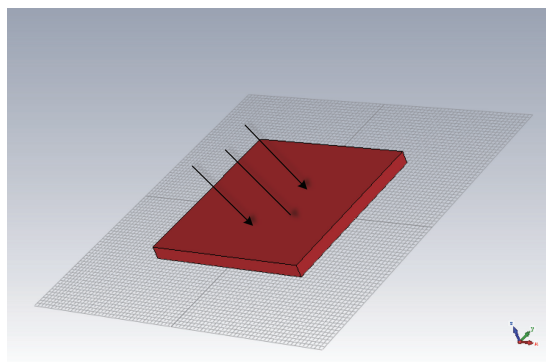


图2 太赫兹模拟入射示意图

Fig. 2 Schematic diagram of terahertz simulated incidence

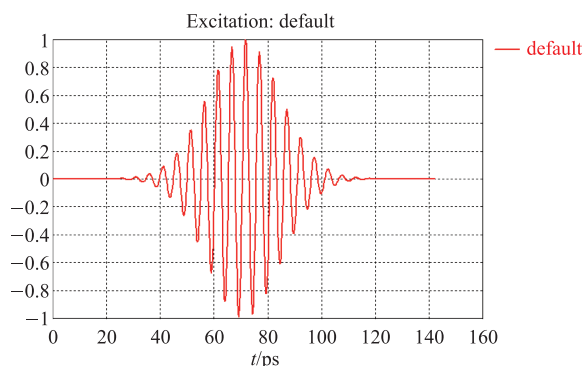


图3 太赫兹脉冲信号

Fig. 3 Terahertz pulse signal

设定硅橡胶材料为均匀介质, 为了简化计算, 模型大小设置为0.5 mm×0.5 mm×3 mm, 在介质分界面上分别设置探针来记录时域波形。整个模型的背景材料设置为普通类型, 材料设置为真空, 计算并记录不同 ε 下太赫兹信号传播的 S 参数以供后续分析。

设置硅橡胶复合绝缘子的介电常数为2.209 71, 令太赫兹信号入射硅橡胶绝缘子薄片, 记录透射波与反射波, 如图4与图5所示。

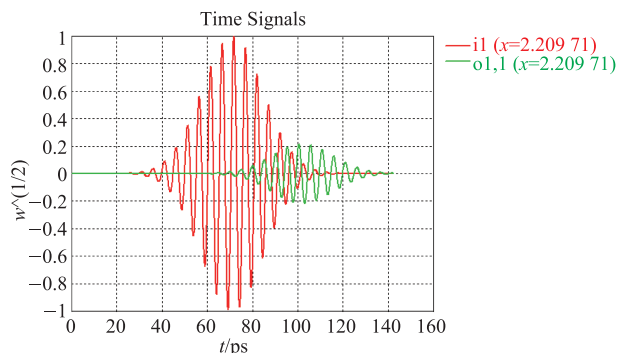


图4 入射波与反射波

Fig. 4 Reflected wave and incident wave

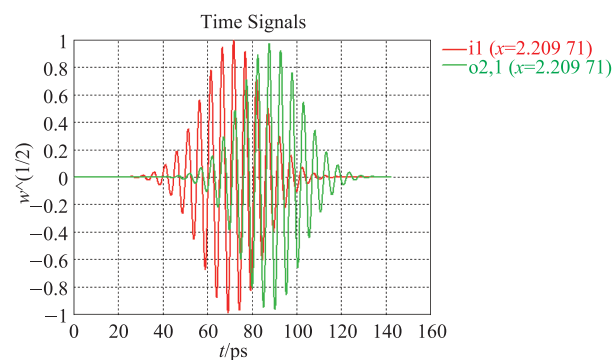


图5 入射波与透射波

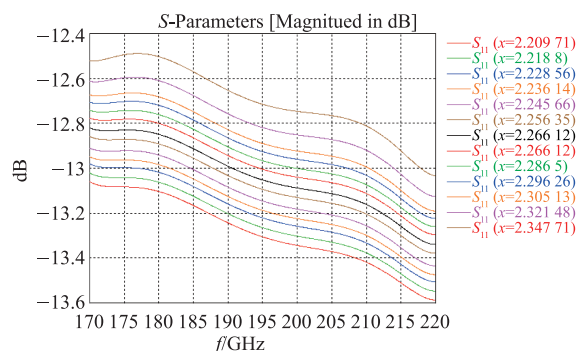
Fig. 5 Transmitted wave and incident wave

从图4、图5可以看出, 在硅橡胶中, 太赫兹信号的反射波和透射波相比于入射波而言均有一定的延迟。由相位关系可以看出, 反射波相位在透射波之后, 说明反射波是由太赫兹信号已经进入绝缘介质之后, 在另一侧的绝缘介质与空气交界面上反射得到的。由波形形状看出, 反射波的幅值较低, 约占入射波幅值的20%, 而透射波幅值较高, 约占入射波幅值的95%。

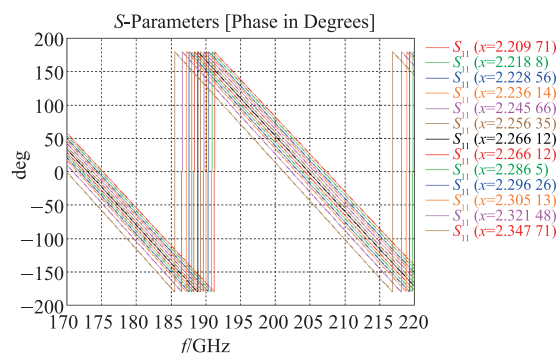
之后改变介电常数 ϵ , 并将时域的数据变换到频域, 比较不同相对介电常数对于回波损耗 S_{11} 参数的影响, 如图6所示。

纵向来看, 当介电常数从2.209 71逐渐增加到2.347 71时, S_{11} 参数也随之增加, 绝对值逐渐减小, 这说明了太赫兹信号在介质中的传播确实受到材料相对介电常数的影响; 而横向来看, 每条代

表不同相对介电常数的曲线在整个170~220 GHz频段区域内变化趋势几乎一致。在170~180 GHz频段中回波损耗变化较小, 此后在180~200 GHz频段内回波损耗开始大幅度下降, 且不同相对介电常数的下降速率都相差不大。在200~210 GHz频段, 其下降速率稍微平缓, 但在210~220 GHz频段内下降速率再次增大, 所有曲线整体上随着频率增加, 其回波损耗逐渐下降。

图6 不同介电常数下 S_{11} 幅值曲线Fig. 6 S_{11} amplitude curve under different dielectric constants

以上为 S_{11} 参数在幅值上的体现, S_{11} 参数的相位曲线如图7所示, S_{11} 参数的相位表示反射波与入射波相位之差, 观察可得, 随着相对介电常数的变化, 不同曲线之间的变化规律与 S_{11} 的幅值变化相同。以 $\epsilon=2.209 71$ 时的曲线为例, 在整个频段内, 相位从 57.7° 开始随频率减小, 在190 GHz时减小到 -180° , 随后从 180° 开始继续减小直至在220 GHz时的 -140.28° 。随着介电常数的增加, 曲线可看作是在整个频段内向左平移, 变化得越大, 曲线向左平移得越多。

图7 不同介电常数下 S_{11} 相位曲线Fig. 7 S_{11} phase curve under different permittivity

将图6中的 S_{11} 曲线在整个频段内各取均值，得出随着相对介电常数的增加，太赫兹信号 S_{11} 参数平均值的变化曲线，如图8所示。

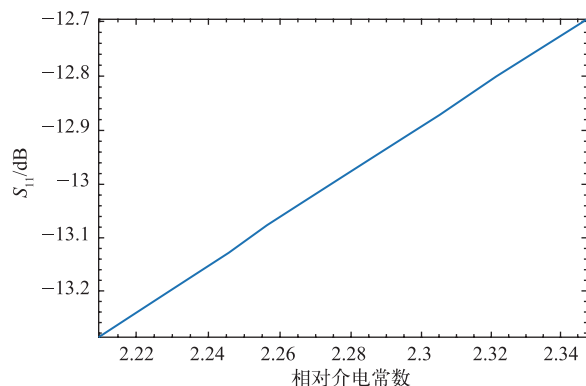


图8 S_{11} 随相对介电常数的变化曲线

Fig. 8 S_{11} change curve with relative permittivity

从图8中可以看出，随着硅橡胶材料相对介电常数的增加，太赫兹信号在其中传输的 S_{11} 参数近似线性增加，即相对介电常数与 S_{11} 参数呈正比例关系。由此可知，当在实际实验中，由于绝缘子老化特性由多种复合因素决定，其中主要因素为分子链断裂带来的机械性能和绝缘性能的降低，而微观上分子链长度与分子相对介电常数相关联，呈反比关系，因此可以将介电常数作为硅橡胶老化特性的评估标准，而相对介电常数又与回波损耗相关联，则只需要检测太赫兹信号在硅橡胶绝缘子中的回波损耗即可判断其老化程度。

同时为了进一步对仿真结果进行对照，选取11组不同老化程度的硅橡胶样本进行太赫兹 S_{11} 参数测量实验。

测量得11组太赫兹样品 S_{11} 参数频谱图如图9所示。

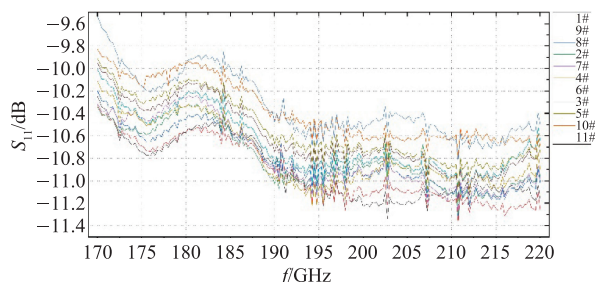


图9 太赫兹样品 S_{11} 参数频谱图

Fig. 9 Spectrum of terahertz sample S_{11} parameters

根据介电常数归一化硅橡胶老化程度之后，将仿真数据平均值与实验数据平均值进行对比，得到实验仿真 S_{11} 参数拟合对比图如图10所示。

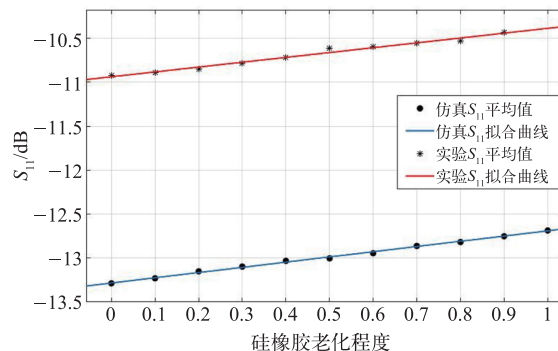


图10 实验仿真 S_{11} 参数拟合对比图

Fig. 10 Comparison diagram of parameter fitting of experimental simulation S_{11}

从图10中可以看出，虽然仿真实验数据在绝对值上略有差异，但其趋势基本相同，可以验证仿真所得硅橡胶老化程度与太赫兹 S_{11} 参数关系的有效性。

3 结束语

文中结合理论和软件仿真，分析了太赫兹信号在硅橡胶绝缘子中传播时所产生的不同的回波损耗，当材料的相对介电常数即老化程度增加时，其回波损耗即 S_{11} 参数呈正比关系增加；而当相对介电常数固定时，随频率增加，回波损耗即 S_{11} 参数会逐渐降低。

在实际实验中，影响太赫兹信号在硅橡胶绝缘子中传播特性的因素多种多样，例如入射角度、样品形态和太赫兹本身波形等，但本文只研究了相对介电常数与频率两个变量对回波损耗可能造成的影响，因此需要通过仿真的方法研究不同变量对回波损耗造成的影响，从而进一步判断相对介电常数及其绝缘子老化程度。**EA**

参考文献

- [1] 张冠军, 赵林, 周润东, 等. 硅橡胶复合绝缘子老化表征评估研究的现状与进展[J]. 高压电器, 2016, 52(4): 1-15.
- [2] 屠幼萍, 陈聪慧, 佟宇梁, 等. 现场运行复合绝

- 缘子伞裙材料的老化判断方法[J]. 高电压技术, 2012, 38(10): 2522-2527.
- [3] 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.
- [4] 周宇明. 现场运行复合绝缘子老化深度研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2018.
- [5] DU B X, XU H, LIU Y. Effects of wind condition on hydrophobicity behavior of silicone rubber in corona discharge environment[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(1): 385-393.
- [6] 徐凤. 橡胶材料太赫兹时域光谱特性及成像技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2019.
- [7] 王思静, 熊金平, 左禹. 橡胶老化机理与研究方法进展[J]. 合成材料老化与应用, 2009, 38(2): 23-33.
- [8] 李相栋, 孙盛华, 黄伟超, 等. 红外测温技术在500 kV复合绝缘子护套检测中的应用探讨[J]. 科技创新导报, 2014, 11(8): 34.
- [9] 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.
- [10] 刘荣海, 唐法庆, 耿磊昭. 太赫兹技术在电力设备检测中的应用[J]. 云南电力技术, 2018, 46(4): 53-55, 59.
- [11] 吴遵红, 徐义, 李昌胜, 等. 太赫兹波在无损检测领域的应用[J]. 科技创新与应用, 2021(9): 180-182.
- [12] TADAY P F, BRADLEY I V, ARNONE D D. Terahertz pulse spectroscopy of biological materials: L-glutamic acid [J]. Journal of Biological Physics, 2003, 29(2-3): 109-115.
- [13] 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.
- [14] 张量, 张中浩, 刘建军, 等. 太赫兹波在绝缘材料测厚中的应用[J]. 高压电器, 2020, 56(5): 175-181.
- [15] 徐立勤, 等. 电磁场与电磁波理论[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
-
- 作者简介**
- 
- 师涛 (1989—), 男, 工程师, 研究方向为电力工业及仪器仪表工业。
- (收稿日期: 2021-07-31)
- 师 涛