

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107454

# 基于 Kramers-Kronig 变换的油纸绝缘低频介电谱分析与建模研究\*

邹阳, 何津, 金涛

(福州大学电气工程与自动化学院 福州 350108)

**摘要:**油纸绝缘低频响应对绝缘状态受潮及老化的诊断至关重要。针对目前关于低频响应数据的分析方法较为缺乏、对应的等效电路模型还不完善的问题,利用 Kramers-Kronig 变换对油纸绝缘频域介电谱中的电导、无穷频率电容和弛豫过程进行分离;引入基于多体理论的 Dissado-Hill 模型对低频弛豫过程进行拟合,并构建一种新的油纸绝缘低频响应等效电路模型。最后,对不同含水率油纸绝缘样品的低频响应数据进行建模和参数分析。实验结果表明,利用 Kramers-Kronig 变换能有效的对油纸绝缘的弛豫过程、电导过程以及无穷频率电容进行解耦;不同含水率样品低频响应模型重构谱线相对于测量谱线的拟合优度在 0.98 以上,验证了模型的准确性;低频弥散极化率幅值  $\chi_{\text{LFD}}(0)$  与微水含量之间存在指数函数关系,其拟合优度高达 0.99,可作为油纸绝缘微水含量定量评估的新特征量,为油纸绝缘受潮状态诊断提供新思路。

**关键词:**油纸绝缘;低频介电谱;Kramers-Kronig 变换;等效电路模型;低频响应模型

**中图分类号:** TH17 TM85 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

## Low frequency dielectric spectrum analysis and modeling of oil paper insulation based on Kramers-Kronig transform

Zou Yang, He Jin, Jin Tao

(College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

**Abstract:** The low frequency response of oil paper insulation is very important for the diagnosis of damp and aging of insulation. In view of the lack of analysis methods for low-frequency response data and the imperfection of the corresponding equivalent circuit model, the Kramers-Kronig transform is used to separate the conductance, infinite frequency capacitance and relaxation process in the frequency-domain dielectric spectrum of oil paper insulation. The Dissado-Hill model based on multi-body theory is introduced to fit the low-frequency relaxation process. A new oil paper insulation model is formulated, which is the equivalent circuit model of paper insulation for low frequency response. Finally, the low frequency response data of oil paper insulation samples with different moisture content are modeled and analyzed. Experimental results show that the Kramers-Kronig transform can effectively decouple the relaxation process, conductivity process and infinite frequency capacitance of oil paper insulation. The goodness of fit of reconstructed spectral lines of the low-frequency response model for samples with different moisture content is more than 0.98, which evaluated the accuracy of the model. There is an exponential function relationship between the amplitude of low-frequency diffuse polarizability  $\chi_{\text{LFD}}(0)$  and micro water content. The goodness of fit is as high as 0.99, which can be utilized as a new characteristic quantity for quantitative evaluation of moisture content of oil paper insulation. It provides a new idea for diagnosis of moisture affected state of oil paper insulation.

**Keywords:** oil paper insulation; low frequency dielectric spectrum; Kramers-Kronig transform; equivalent circuit model; low frequency response model

收稿日期: 2021-01-28 Received Date: 2021-01-28

\* 基金项目: 国家自然科学基金(51977039)、福建省自然科学基金(2019J01248)项目资助

## 0 引言

油纸绝缘是一种经典的复合绝缘结构,具有价格便宜,绝缘性能优良等优点,广泛应用于高电压、大容量变压器的内绝缘系统中。及时发现油纸绝缘状态在运行过程中发生的劣化是提高变压器可靠性的关键<sup>[1]</sup>。目前国内外学者提出许多关于油纸绝缘状态的诊断方法,有回复电压法,极化/去极化电流法和频域介电谱法(frequency-domain dielectric spectroscopy, FDS)等,其中FDS因抗干扰性强,施加电压较低,且有望实现对变压器的在线测量,成为国内外研究的热点<sup>[2]</sup>。

通过FDS测量得到的复电容曲线包含了多个介电响应过程,在一定程度上反映油纸绝缘状态,然而也对FDS曲线的微观机理解释造成困难<sup>[1]</sup>。实测油纸绝缘介电谱的复极化率实部和虚部曲线在 $10^{-3} \sim 10^{-2}$  Hz呈现随着频率增加而下降的特征<sup>[3]</sup>。对此董明等<sup>[4]</sup>用电导模型对该频段测量结果进行拟合和解释,然而电导过程无法解释低频段复极化率实部随着频率上升而下降的现象。实际上电介质的低频响应并不只有电导过程,Tian等<sup>[5]</sup>证明了各种聚合材料的响应谱中存在与电导过程重叠的低频弛豫过程,Abdelmalik等<sup>[6]</sup>研究发现油纸绝缘中带电粒子形成的“簇”会积聚在充油腔中,并通过“簇”间的相互作用力产生了低频弥散现象(low frequency dispersion, LFD)。在油纸绝缘系统中,与劣化直接相关的电导和极化损耗主要存在于低频段<sup>[7]</sup>,因此油纸绝缘低频响应介电谱对绝缘受潮及老化的诊断至关重要<sup>[8]</sup>。除了电导模型,国内外学者还建立多种等效模型对低频介电谱进行拟合分析,主要有考虑分布弛豫函数的扩展德拜等效电路模型和包括Cole-Cole模型、Davidson-Cole模型、Havriliak-Negami模型在内的经验修正模型<sup>[9-11]</sup>。以上模型虽能准确拟合介质响应谱线,却各有不足:扩展德拜模型通过分布弛豫时间函数模拟油纸绝缘的复杂极化过程,却没有考虑偶极子弛豫机构之间的相互作用;经验模型引入的修正参数虽能实现对测量曲线更好的拟合,却不具备明确物理意义<sup>[12]</sup>。油纸复合绝缘具备良好介电性能的关键在于油浸纸内部含有的众多纳米层次的微界面<sup>[6]</sup>,因此有必要建立能解释油纸绝缘系统中的多界面弛豫响应过程的等效模型。

针对上述不足,本文以油纸绝缘低频响应为研究对象( $10^{-3} \sim 10^0$  Hz),首先利用Kramers-Kronig变换对介电谱进行分解,从而确定电导和无穷频率电容参数并深入分析低频介电谱特性。其次,引入基于多体理论的Dissado-Hill模型对油纸绝缘的多界面弛豫极化过程进行建模,结合电导模块和无穷频率电容模块,构建低频介电响应等效电路模型。最后对不同含水率的油纸绝

缘样品FDS测试数据以及相对应的模型参数进行分析,提取低频弥散极化率幅值 $\chi_{LFD}(0)$ 作为油纸绝缘微水含量评估新特征量,可为油纸绝缘受潮状态诊断提供参考依据。

## 1 频域介电谱特性

### 1.1 复电容、复介电常数和复极化率

在交变电场中,绝缘介质同时存在电荷的传导过程和结合过程,即电导过程和极化过程<sup>[13]</sup>。随着电场频率的变化,介质内部发生不同程度的电导和极化响应,因此材料中输出电流的相位和幅度也会发生变化。复电容是关于电流和电压的函数,因此常用来反映宏观水平上的电荷的传导和极化,用式(1)表示。

$$C(\omega) = C'(\omega) - iC''(\omega) = \frac{I(\omega)}{i\omega U(\omega)} \quad (1)$$

其中, $I(\omega)$ 和 $U(\omega)$ 是响应复电流和施加的复电压, $C'(\omega)$ 和 $C''(\omega)$ 是复电容 $C(\omega)$ 的实部和虚部,分别反映了介电响应过程中电荷的储存和能量的损耗。测量电介质介电响应的过程即测量电介质复电容的过程。此外,复电容还可以用复介电常数和复极化率来表示:

$$C(\omega) = \varepsilon_0 A \varepsilon(\omega) = \varepsilon_0 A (\varepsilon'(\omega) - i\varepsilon''(\omega)) = \varepsilon_0 A (\chi'(\omega) - i\chi''(\omega) + \varepsilon_\infty) \quad (2)$$

式中: $\varepsilon_0$ 是真空复介电常数; $A$ 是仅和介质样品的结构大小相关的形状系数; $\varepsilon(\omega)$ 是复介电常数; $\varepsilon_\infty$ 是无穷频率相对介电常数; $\chi'(\omega)$ 和 $\chi''(\omega)$ 分别表示复极化率 $\chi(\omega)$ 的实部和虚部。

### 1.2 Kramers-Kronig 变换

电介质的复极化率定义为交变电场下介质的响应函数 $f(t)$ 的傅里叶变换,表达式如下:

$$\chi(\omega) = \int_0^\infty f(t) \exp(-i\omega t) dt \quad (3)$$

式中:响应函数 $f(t)$ 描述的是电介质中参与弛豫极化的微观粒子在交变电场的作用下的滞后过程。从式(3)可以看出,复极化率的实部和虚部是由同一个介质的响应函数分离出来的,因此它们之间有不可切割的联系,二者互为Hilbert变换,且满足Kramers-Kronig关系<sup>[14]</sup>。在因果律成立的前提下,Kramers-Kronig关系可以表示为:

$$\chi'(\omega) = \frac{2}{\pi} P \cdot V \cdot \int_0^\infty \frac{u \chi''(u)}{u^2 - \omega^2} du \quad (4)$$

$$\chi''(\omega) = -\frac{2\omega}{\pi} P \cdot V \cdot \int_0^\infty \frac{\chi'(u)}{u^2 - \omega^2} du \quad (5)$$

其中, $P \cdot V \cdot$ 表示柯西主值积分。Kramers-Kronig关系清晰的揭示了某一特定频率点的复极化率实部可以由整个频率范围内的复极化率虚部积分计算得到,反之亦然。因此,若已知复极化率实部(虚部),则可以通过Kramers-

Kronig 变换 计算得到复极化率虚部(实部)。结合式(2),可以得知 Kramers-Kronig 关系可直接应用于对复电容和复介电常数的分析计算。

实际测量得到复电容中包含无穷频率电容的贡献或者电导的贡献时,复电容的实部和虚部不满足 Kramers-Kronig 关系<sup>[14]</sup>。由于电导仅对虚部有贡献,无穷频率电容仅对实部由贡献,因此同时利用式(4)和(5)对测量复电容的实部和虚部谱线进行分析,可以有效剥离复电容中电导和无穷频率电容的贡献,并提取出极化过程谱线,从而确定电导和无穷频率电容参数并深入分析低频介电谱特性<sup>[15-16]</sup>。

## 2 低频介电响应等效电路模型

油纸绝缘属于具有众多微界面的多孔介质结构,介质中水分子和杂质离子在纤维素孔隙中积聚形成充油腔,在电场的作用下腔内的偶极子或载流子通过库仑力、机械力以及电荷传输来影响相邻的偶极子或载流子<sup>[17]</sup>。因此本文引入基于多体理论的 Dissado-Hill 模型来描述油纸绝缘的低频弛豫过程,提出油纸绝缘低频响应等效电路模型,如图 1 所示。

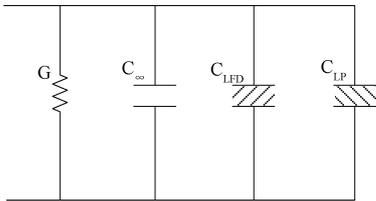


图 1 油纸绝缘低频响应等效电路模型

Fig. 1 The equivalent circuit model of low-frequency response of oil-paper insulation

在图 1 中,4 个电气模块分别表征油纸绝缘在低频电场下的 4 种不同的介电响应过程,其中  $G = \epsilon_0 A \chi_c(\omega)$ , 表示电导模块;  $C_\infty = \epsilon_0 \epsilon_\infty A$ , 表示无穷频率电容模块;  $C_{LFD} = \epsilon_0 A \chi_{LFD}(\omega)$ , 表示低频弥散电容模块;  $C_{LP} = \epsilon_0 A \chi_{LP}(\omega)$ , 表示弛豫峰型电容模块。下文详述各电气模块的物理意义以及建模流程。

### 2.1 电导模块

电导过程的物理实质是电介质内部载流子在外电场作用下定向移动而形成电流。在低频范围内( $10^{-3} \sim 10^0$  Hz),电导的特性可以表示为<sup>[18]</sup>:

$$\chi_c(\omega) = \chi''_c(\omega) = \frac{G}{\epsilon_0 A \omega} \quad (6)$$

由式(6)可以看出,电导损耗正比于  $\omega^{-1}$ , 频率越低,电导对极化率虚部的贡献越大。

### 2.2 无穷频率电容模块

无穷频率电容的物理含义是在测量频率范围内没有出现弥散现象的所有响应过程的总和<sup>[19]</sup>,其表达式如下:

$$C_\infty = \epsilon_0 \epsilon_\infty A \quad (7)$$

### 2.3 弛豫峰型响应模块

Dissado 教授考虑电介质中参与介电响应过程的偶极子和载流子,提出了“簇”理论,通过弛豫峰型响应模块和低频弥散响应模块来描述与束缚电荷偶极子簇和潜在的移动电荷簇相关的两类不同弛豫过程<sup>[20-22]</sup>。电介质中由偶极子主导的弛豫峰型响应是由簇内偶极子的相互作用和簇间偶极子的相互作用所确定的。具体而言,弛豫峰型响应指的是电介质中束缚电荷偶极子簇中的一组相关偶极子作为协作实体发生位移,与相邻簇之间的偶极子产生交互运动,导致频域介电谱弛豫峰的出现,该响应的极化率表示式如下<sup>[22]</sup>:

$$\chi_{LP}(\omega) = \chi_{LP}(0) \cdot \frac{\Gamma(1+m-h)}{\Gamma(2-h)\Gamma(m)} \cdot \left(1 + i \frac{\omega}{\omega_p}\right)^{h-1} \cdot {}_2F_1\left(1-h, 1-m; 2-h; \left(1 + i \frac{\omega}{\omega_p}\right)^{-1}\right) \quad (8)$$

式中:  $\Gamma(*)$  是伽马函数,  ${}_2F_1(a, b; c; z)$  是高斯超几何函数,  $\chi_{LP}(0)$  表示弛豫峰型极化率幅值,反映极化过程中参与弛豫峰型响应的偶极子的浓度,  $\omega_p$  表示弛豫峰特征频率,参数  $m$  表征的是电荷的簇间运动特性,参数  $h$  表征的是电荷的簇内运动特性,二者取值范围都在 0 和 1 之间。

### 2.4 低频弥散响应模块

在介电响应测量中复介电常数的实部和虚部谱线在低频区随频率降低而增大的现象,称为低频弥散<sup>[23]</sup>,其物理实质是电介质中载流子在交变电场下沿着某些有限的路径上较为自由的跳跃,随着频率降低,载流子的运动时间和移动距离增大,导致复介电常数增大<sup>[19]</sup>。Dissado-Hill 模型中的描述由载流子主导的低频弥散型介电响应的极化率表达式如下<sup>[21]</sup>:

$$\chi_{LFD}(\omega) = \chi_{LFD}(0) \cdot \frac{\Gamma(1-P-n)}{\Gamma(1-n)\Gamma(1-P)} \cdot \left(1 + i \frac{\omega}{\omega_c}\right)^{n-1} \cdot {}_2F_1\left(1-n, 1+p; 2-n; \left(1 + i \frac{\omega}{\omega_c}\right)^{-1}\right) \quad (9)$$

式中:  $\chi_{LFD}(0)$  表示低频弥散极化率幅值,反映极化过程中参与低频弥散响应的载流子的浓度。  $\omega_c$  表示特征频率,当频率高于特征频率,载流子与偶极子束缚在一起,仅产生弱弥散现象,当频率低于特征频率,载流子可以沿着受限制的路径自由行动,表现出明显的弥散现象<sup>[6]</sup>。参数  $p$  取决于电荷簇间传输路径的几何形状,参数  $n$  反映的是电荷的簇内运动特性。

### 2.5 低频介电响应等效电路模型的建立

由于设备的限制,实际测量中只能获得有限频率范围内的离散测量值,因此利用 Kramers-Kronig 变换计算电导和无穷频率电容参数以及提取极化过程谱线之前,需要以插值拟合等方式对离散数据进行处理。具体建模步骤为:

1) 对油纸绝缘样品进行 FDS 测量,获得复电容离散点数据。以  $f_1$  ( $f_n$ ) 表示最低(高)频率,则  $C'(f_1)$ 、 $C'(f_2)$ 、 $\dots$ 、 $C'(f_n)$  表示测量复电容实部离散点。

2) 测量频域范围外数据进行外延和截断处理。在双对数坐标系中,介电响应曲线在特征频率范围外呈现为直线<sup>[24]</sup>,因此以最小二乘直线对  $C'(f_1)$  和  $C'(f_2)$  ( $C'(f_{n-1})$  和  $C'(f_n)$ ) 进行插值,并外延一个数量级得到  $C'(0.1f_1)$  ( $C'(10f_n)$ )。以同样方式对复电容虚部进行外延。由于某一特定频率点的复电容实部(虚部)主要是由该频率点附近的频率范围的复电容虚部(实部)决定<sup>[15]</sup>,而复电容实部存在无穷频率电容,因此对截断频域( $(0, 0.1f_1)$ ,  $(10f_n, +\infty)$ )的复电容实部赋值,分别为  $C'(0.1f_1)$  和  $C'(10f_n)$ ;而复电容虚部存在弛豫峰,因此对截断频域的复电容虚部赋值为 0。

3) 测量频域范围内数据进行插值处理。介电响应数据在双对数坐标系下是非常平滑的<sup>[25]</sup>,因此使用抛物线对剩余测量点每 3 个点之间进行插值。

4) 调整插值步长,根据式(4)和(5)对以上步骤计算得到的各频率范围内进行积分求和计算,直到两次计算结果之差小于测量分辨率,得到计算复电容实部和虚部。

5) 将测量复电容实部减去计算复电容实部,即得到无穷频率电容谱线;将测量复电容虚部减去计算复电容虚部,即得到电导谱线;剩余谱线为极化过程谱线。

6) 根据低频弥散特征和弛豫峰型特征对极化过程谱线分析,确定等效电路模型中表征极化过程的电气模块。

7) 根据步骤 6) 得到的电导谱线和无穷频率电容谱线进行数值计算,得到电导模块和无穷频率电容模块参数;对极化过程谱线进行拟合,得到低频弥散响应模块参数和弛豫峰型响应模块参数,完成低频响应等效电路模型的建立。

## 3 实验设置

### 3.1 样品制备

为验证低频响应模型以及建模方法的可行性和准确性,本文采用厚度为 1 mm 的普通纤维绝缘纸板和 25 号环烷基矿物油制备多组油浸纸样品。首先将绝缘纸板裁剪为多块 100 mm×80 mm 大小合适的长方形,绝缘油等

量分成多组放入可密封玻璃容器中。接着,根据 IEC 60641-2 的要求,将绝缘纸和绝缘油分别放在 105°C 的恒温干燥箱中干燥 24 h,确保水分充分析出。然后,将干燥处理过的绝缘纸样品放置于高精度电子天平上,进行自然吸潮直至满足目标试验质量。最后,将受潮的绝缘纸板浸入绝缘油中 48 h,确保绝缘油充分的浸润多孔绝缘纸板的空腔,并将油纸绝缘样品密封在专用容器中,以防止水分进入。为了模拟处于不同绝缘状态水平的油纸绝缘介质,本文制备了 4 组不同含水率的油纸绝缘样品,分别为 0.244%、1.58%、2.77%、3.63%。

### 3.2 FDS 测量

本文选择奥地利 Omicron 公司的频域介电谱分析仪 DIRANA 进行 FDS 测试。将制备好的油纸绝缘样品置于图 2 的 FDS 测量电极系统中,连接介电响应分析仪 DIRANA,连接电源线至 220 V 交流电压,并连接介电响应分析仪的数据线到带有配套 DIRANA 软件的 PC 端采集数据。由于本文旨在对油纸绝缘样品的低频介电响应进行分析建模,考虑测量设备测试周期以及分析计算需要,因此将实验的测试频率范围设置为  $10^{-3} \sim 10^1$  Hz。

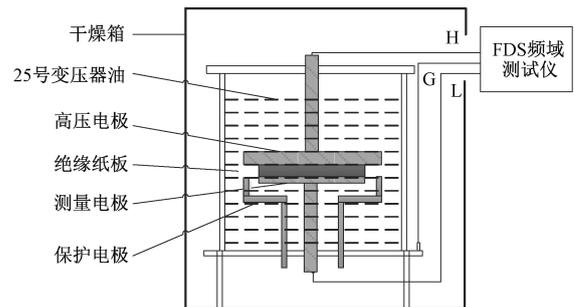


图 2 油纸绝缘 FDS 测试系统

Fig. 2 Oil-paper insulation FDS test system

## 4 数据分析与模型验证

通过实验获得了 4 组不同含水率的油纸绝缘样品测量复电容数据。首先利用 Kramers-Kronig 变换将介电谱中的电导过程、无穷频率电容和弛豫极化过程一一分离。然后,对弛豫极化谱线进行特征分析,确定弛豫极化过程的类型,并利用低频弥散响应模块和弛豫峰型响应模块进行曲线拟合。最后分析油纸绝缘样品中水分对模型参数的影响。

### 4.1 油纸绝缘样品频域响应测量曲线分析

由于篇幅有限,本节仅以一组含水率为 0.244% 的样品测量复电容数据为例,展开频域介电谱分解分析。含水率为 0.244% 的油纸绝缘样品频域测量复电容结果如图 3 所示。

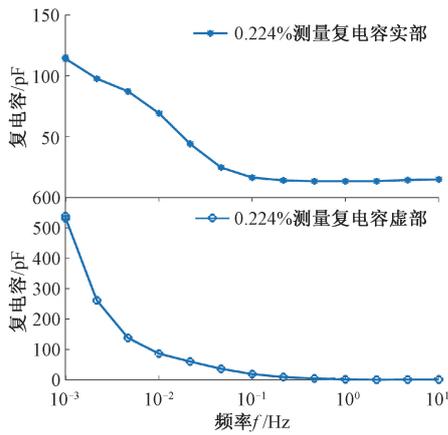


图 3 油纸绝缘样品复电容测量曲线

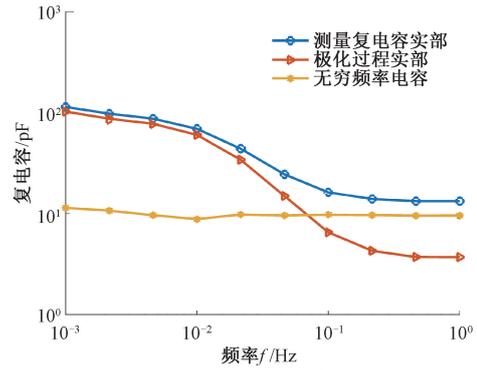
Fig. 3 Complex capacitance measurement curve of oil paper insulation sample

由图 3 可知复电容实部在  $10^{-1} \sim 10^1$  Hz 的谱线近乎是平坦的直线,可以判断出油纸绝缘介电响应中存在无穷频率电容。复电容虚部在  $10^{-3} \sim 10^{-2}$  Hz 范围的谱线呈现直线下降的趋势,可以判断出存在电导过程。测量复电容的实部和虚部在低频段都随着测量频率的升高而减小,实部在  $10^{-2} \sim 10^{-1}$  Hz 呈“阶梯”式下降,因此可能存在低频弥散响应和弛豫峰型响应<sup>[9]</sup>。然而因为低频范围内极化过程和电导过程耦合在一起,甚至出现将虚部的弛豫峰“掩盖”的情况。故有必要剔除电导和无穷频率电容的影响,将弛豫极化谱线单独分离出来讨论。

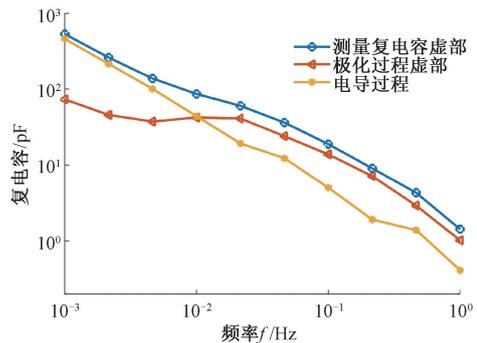
#### 4.2 油纸绝缘低频介电谱解耦

分别对复电容谱线的实部和虚部进行解谱,得到低频范围内极化过程谱线、电导过程谱线和无穷频率电容谱线,如图 4 所示。

观察图 4 中剔除了电导和无穷频率电容影响的极化过程谱线,可以清晰的看出,极化过程虚部谱线在  $10^{-2} \sim 10^{-1}$  Hz 出现弛豫峰,具备弛豫峰型响应特征;而当频率小于  $10^{-2}$  Hz 时,实部和虚部都随着频率的减小而增大,呈现出低频弥散响应特征。绝缘油中的载流子主要是离子和带电胶粒,绝缘纸中的载流子主要是杂质离子,在外电场作用下,载流子沿着纤维路径进行定向迁移<sup>[4]</sup>。绝缘纸属于多孔性稀疏结构,浸油后孔的边界对离子的运动产生限制作用,形成了束缚电荷偶极子簇<sup>[26]</sup>。因此在图 4 所示的频率范围内,油纸绝缘样品的极化过程应包含低频弥散响应和弛豫峰型响应。以上分析表明,油纸绝缘低频介电响应中包含了电导过程、无穷频率电容、低频弥散现象以及弛豫峰现象,与本文提出的低频响应模型中的电导模块、无穷频率电容模块、低频弥散模块以及弛豫峰型模块相吻合。



(a) Decomposition of complex capacitance real part



(b) Decomposition of complex capacitance imaginary part

图 4 油纸绝缘低频响应介电谱分解

Fig. 4 Low-frequency response dielectric spectrum decomposition of oil-paper insulation

通过最小二乘直线对计算无穷频率电容谱线和计算电导谱线进行拟合以及数值计算,如表 1 所示。

表 1 直线拟合公式和电导计算结果

Table 1 Straight line fitting formula and conductance calculation results

参数	拟合公式	计算结果
电导/pS	$\lg(y) = -0.9895 \times (\lg x) - 1.8427$	3.0237
无穷频率电容/pF	$\lg(y) = -0.0118 \times (\lg x) + 2.2599$	9.5532

由表 1 可知,电导拟合公式在双对数坐标系的斜率约等于-1,无穷频率电容拟合公式的斜率约等于 0,与各自的频域特性相一致,验证了本文提出的频谱分解方法的有效性和准确性。

#### 4.3 不同含水率样品的等效模型建立和验证

为了进一步验证图 1 等效模型的准确性和可靠性,本文根据不同含水率油纸绝缘样品频域响应测量数据的建立低频响应模型,并计算模型复电容与测量复电容之间拟合优度  $R^2$ ,如表 2 所示。

由表 2 可知,不同含水率样品的弛豫峰型响应模块的参数  $m$  和  $h$  约等于 1 和 0.1,表明所制备的油纸绝

表2 不同含水率样品的等效模型参数和拟合优度  
Table 2 Equivalent model parameters and goodness of fit for samples with different moisture content %

等效模型参数		含水率			
		0.244	1.58	2.77	3.63
电导模块	$G/\text{pS}$	3.023	7.457	10.195	11.318
无穷频率电容模块	$C_{\infty}/\text{pF}$	9.553	10.50	13.398	17.831
低频弥散响应模块	$\chi_{\text{LFD}}(0)$	0.074	0.116	0.882	3.313
	$\omega_c/\text{Hz}$	6.51	6.54	6.90	6.92
	$p$	0.55	0.55	0.71	0.89
	$n$	0.62	0.55	0.70	0.78
弛豫峰型响应模块	$\chi_{\text{LP}}(0)$	3.350	4.227	6.580	6.783
	$\omega_p/\text{Hz}$	0.10	0.11	0.09	0.09
	$m$	0.98	1	1	1
	$h$	0.1	0.1	0.1	0.1
拟合优度 $R^2$		0.990	0.986	0.989	0.986

缘样品中簇与簇之间的排列较为无序,簇间的耦合作用弱,簇内微观粒子结构排列规律,簇内偶极子相互作用大<sup>[18]</sup>。低频弥散模块的参数  $n$  表明在大于特征频率的电场下极化率实部和虚部均存在较弱的弥散现象,而当含水率较低时,油纸绝缘样品中的 LFD 现象较弱,参数  $p$  较小,当含水率较高时,载流子通过油隙在电荷簇之间传输,使得  $p$  达到 0.7,接近理想的簇结构<sup>[21]</sup>。随着样品中微水含量的增加,油纸绝缘样品的导电性增强,电导增大,且随着油纸绝缘样品受潮饱和,水分子自身解离出  $\text{H}_3\text{O}^+$  和  $\text{OH}^-$  以及溶解于水分子的杂质离子逐渐达到最大值,电导也趋于饱和。微水含量是油纸绝缘样品中离子浓度的决定因素<sup>[26]</sup>,同时水分子为极性分子,含水率增加,参与低频弥散过程的载流子增加,参与弛豫峰型过程的束缚电荷偶极子也增加,这与模型参数  $\chi_{\text{LFD}}(0)$   $\chi_{\text{LP}}(0)$  的增加相一致。此外,不同含水率等效模型的拟合优度都达到 0.98 以上,证明了本文提出的等效模型的准确性和可靠性。

将本文模型与广泛应用的扩展德拜模型进行对比。应用不同弛豫机构数的扩展德拜模型对以上油纸绝缘样品测量数据进行建模,并计算拟合优度  $R^2$ ,如表 3 所示。

表3 不同弛豫机构数  $N$  的扩展德拜模型拟合优度  $R^2$   
Table 3 The goodness of fit  $R^2$  of the extended Debye model with different relaxation configurations  $N$

含水率/%	$R^2(N=1)$	$R^2(N=2)$	$R^2(N=3)$
0.244	0.909	0.979	0.978
1.580	0.874	0.971	0.993
2.770	0.869	0.982	0.982
3.630	0.900	0.960	0.968

由表 3 可知,扩展德拜模型需要用 2~3 个的弛豫机构才能较好的拟合曲线,这是由于该模型忽略了低频弥散介电响应过程,因此只能通过增加弛豫机构数来达到曲线拟合的目的,然而这与实际上该频率范围只含有一个弛豫峰不相符。相比于扩展德拜模型,本文提出的模型既反映油纸绝缘的实际响应过程,而且对测量谱线拟合优度也较高,具有一定的优越性。

#### 4.4 微水含量评估新特征量提取

根据以上对不同含水率绝缘样品的等效模型参数分析可知,电导  $G$  和低频弥散极化率幅值  $\chi_{\text{LFD}}(0)$  均随着含水率的增加而增大,二者和微水含量  $M_c$  之间均存在密切的联系。由于电导可能存在饱和的情况,因此提取低频弥散极化率幅值  $\chi_{\text{LFD}}(0)$  作为油纸绝缘微水含量评估新特征量,其物理意义为油纸绝缘系统中参与低频弥散介电响应过程的载流子浓度。

根据实验获得的不同含水率样品的低频弥散极化率幅值  $\chi_{\text{LFD}}(0)$ ,利用最小二乘法进行拟合,量化微水含量和新特征量之间的关系。由图 5 可以看出,  $\chi_{\text{LFD}}(0)$  与  $M_c$  存在拟合优度较高的指数关系,拟合公式以及拟合优度如表 4 所示。

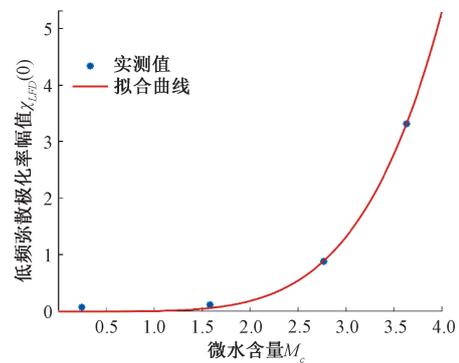


图5 低频弥散极化率幅值  $\chi_{\text{LFD}}(0)$  与  $M_c$  拟合曲线

Fig. 5 The fitting curve of low frequency diffuse polarizability amplitude  $\chi_{\text{LFD}}(0)$  and  $M_c$

表4 新特征量拟合公式以及拟合优度

Table 4 New feature fitting formula and goodness of fit

特征量	拟合公式	拟合优度 $R^2$
$\chi_{\text{LFD}}(0)$	$\chi_{\text{LFD}}(0) = 0.006424 \times M_c^{4.844}$	0.9987

由表 4 可以看出,低频弥散极化率幅值  $\chi_{\text{LFD}}(0)$  和微水含量  $M_c$  的拟合优度  $R^2$  达到了 0.9987,依据二者的拟合公式可建立特征量与微水含量的量化表征关系,可为油纸绝缘受潮诊断提供有效依据。

## 5 结 论

本文根据多组不同含水率油纸绝缘样品的频域测量介电谱建立低频响应等效电路模型,分析低频响应模型参数变化规律,得到以下结论:

1)利用Kramers-Kronig关系能有效的将复测量介电谱分解成电导谱线、无穷频率电容谱线和弛豫极化谱线,对于研究弛豫极化过程有重要意义。

2)不同含水率油纸绝缘样品的低频响应模型的拟合优度在0.98以上,验证了模型的准确性。

3)低频响应模型参数能有效反映油纸绝缘样品的受潮状态,其中低频弥散极化率幅值 $\chi_{LFD}(0)$ 和微水含量 $M_c$ 存在指数函数关系,可作为微水含量评估新特征量。

### 参考文献

- [1] 林朝明,叶荣,吴国兰.油纸绝缘混合极化的频域谱模型及参数辨识[J].仪器仪表学报,2019,40(4):172-178.  
LIN CH M, YE R, WU G L. Frequency domain spectral model and parameter identification of mixed polarization of oil paper insulation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019,40(4):172-178.
- [2] XU Y, SHAWN N, GERARD L. Frequency domain spectroscopy measurements of oil-paper insulation for energized transformers [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(3):1657-1664.
- [3] 李长云,郝爱东.机-热协同老化对纤维素绝缘纸频域介电谱特性的影响[J].电工技术学报,2019,34(17):3705-3712.  
LI CH Y, HAO AI D. Influence of the mechanical-thermal aging on the frequency-domain dielectric spectroscopy of cellulose insulation paper [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(17):3705-3712.
- [4] 董明,刘媛,任明,等.油纸绝缘频域介电谱解释方法研究[J].中国电机工程学报,2015,35(4):1002-1008.  
DONG M, LIU Y, REN M, et al. Explanation study of frequency-domain dielectric spectroscopy for oil-paper insulation system [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(4):1002-1008.
- [5] TIAN F, OHKI Y. Electric modulus powerful tool for analyzing dielectric behavior[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(3):929-931.
- [6] ABDELMALIK A A, DODD S J, DISSADO L A, et al. Charge transport in thermally aged paper impregnated with natural ester oil [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(5):2318-2328.
- [7] 武康宁,黄雨薇,王子悦,等.电介质的衍生对导数介电分析方法及其应用[J].高电压技术,2020,46(2):640-647.  
WU K N, HUANG Y W, WANG Z Y, et al. Application of extended derivative method in analyzing dielectric responses of dielectrics [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(2):640-647.
- [8] HAQUE N, DALAI S, CHATTERJEE B, et al. Studies on the effects of moisture and ageing on charge de-trapping properties of oil-impregnated pressboard based on IRC measurement [J]. High Voltage, 2019, 4(2):151-157.
- [9] XIE J, DONG M, HU Y, et al. Modeling oil-paper insulation frequency domain spectroscopy based on its microscopic dielectric processes [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(6):1788-1796.
- [10] 杨峰,唐超,周渠,等.基于等效电路的油纸绝缘系统受潮状态分析[J].电工技术学报,2020,35(21):4586-4596.  
YANG F, TANG CH, ZHOU Q, et al. Analyzing the moisture state of oil-paper insulation system using an equivalent circuit model [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(21):4586-4596.
- [11] 杜林,杨峰,蔚超,等.基于频域介电谱的油纸绝缘宽频等效模型参数辨识研究[J].电工技术学报,2018,33(5):1158-1166.  
DU L, YANG F, WEI CH, et al. Parameter Identification of the wide-band model of oil-impregnated paper insulation using frequency domain spectroscopy [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(5):1158-1166.
- [12] 高岩峰,梁曦东,CHALASHKANOV N M,等.等效电路模型分析介电响应的方法、意义及应用[J].中国电机工程学报,2018,38(1):300-308.  
GAO Y F, LIANG X D, CHALASHKANOV N M, et al. Application and significance of the equivalent circuit method in the analysis of dielectric response [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(1):300-308.
- [13] 雷清泉,刘关宇.如何理解工程电介质中极化与电导两个基本物理过程及其测量的科学原理与方法[J].中国电机工程学报,2018,38(23):6769-6789.  
LEI Q Q, LIU G Y. How to understand the two basic physical processes of polarization and conductance in engineering dielectrics and scientific principles and

- methods of their measurement [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(23): 6769-6789.
- [14] 赵孔双. 介电谱方法及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.  
ZHAO K SH. The method and application of dielectric spectroscopy [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008.
- [15] 高岩峰, 卢毅, 梁曦东, 等. Kramers-Kronig 变换在介电响应分析中的数值计算方法、意义及应用[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 318-329.  
GAO Y F, LU Y, LIANG X D, et al. Numerical computational method, application and significance of the kramers-kronig transform in the analysis of dielectric response[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 318-329.
- [16] 张大宁, 刘孝为, 詹江杨, 等. 变压器油纸绝缘频域介电谱的虚部分析[J]. 电工技术学报, 2019(4): 847-854.  
ZHANG D N, LIU X W, ZHAN J Y, et al. Analysis of imaginary part of frequency domain spectroscopy for oil-paper insulation transformer [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019(4): 847-854.
- [17] 蔡金锭, 邹阳. 电力变压器智能故障诊断与绝缘测试技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2017.  
CAI J D, ZOU Y. Intelligent fault diagnosis and insulation testing technology for power transformers[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2017.
- [18] 胡一卓, 董明, 谢佳成, 等. 油纸绝缘宽频介电响应谱分析及等效模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(23): 7065-7073.  
HU Y ZH, DONG M, XIE J CH, et al. Spectrum analyzing and modeling of wide-band frequency dielectric response of oil-paper insulation [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(23): 7065-7073.
- [19] 梁曦东, 高岩峰, DISSADO L A. Dissado-Hill 模型在电介质介电响应分析中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(21): 6002-6011.  
LIANG X D, GAO Y F, DISSADO L A. Application of the Dissado-Hill model in the analysis of dielectric response [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 6002-6011.
- [20] DISSADO L A, HILL R M. Non-exponential decay in dielectrics and dynamics of correlated systems [J]. Nature, 1979, 279(5715): 685-689.
- [21] DISSADO L A, HILL R M. Anomalous low-frequency dispersion. Near direct current conductivity in disordered low-dimensional materials [J]. Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions 2: Molecular and Chemical Physics, 1984, 80(3): 291-319.
- [22] DISSADO L A, HILL R M. A cluster approach to the structure of imperfect materials and their relaxation spectroscopy [J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1983, 390(1798): 131-180.
- [23] 王东阳, 周利军, 陈雪骄, 等. 变压器油纸绝缘系统低频介电参数方程[J]. 电工技术学报, 2017, 32(17): 218-224.  
WANG D Y, ZHOU L J, CHEN X J, et al. Complex relative permittivity expressions of oil-paper insulation for low frequency domain dielectric response [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(17): 218-224.
- [24] JONSCHER A K. Dielectric relaxation in solids [M]. Shanghai: Xi'an Jiaotong University Press, 2008.
- [25] LOVELL R. Application of Kramers-Kronig relations to the interpretation of dielectric data [J]. Journal of Physics C: Solid State Physics, 1974, 7(23): 4378-4384.
- [26] ZHANG D, YUN H, ZHAN J, et al. Insulation condition diagnosis of oil-immersed paper insulation based on non-linear frequency-domain dielectric response [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(5): 1980-1988.

### 作者简介



邹阳, 2017 年于福州大学获得博士学位, 现为福州大学副教授, 主要研究方向为电气系统智能化故障诊断。

E-mail: 24001744@qq.com

**Zou Yang** received his Ph. D. degree from Fuzhou University in 2017. He is currently an associate professor at Fuzhou University. His main research interests include intelligent fault diagnosis of intelligent grid electrical system.



何津(通信作者), 2018 年于福州大学获得学士学位, 现为福州大学硕士研究生, 主要研究方向为电力设备故障诊断与绝缘状态检测。

E-mail: 1025016805@qq.com

**He Jin** (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Fuzhou University in 2018. He is currently a master student at Fuzhou University. His main research interests include power equipment fault diagnosis and insulation state detection.