

基于两步优化的介电谱特征参数辨识方法及其应用

徐志钮¹, 张翼¹, 胡志伟¹, 胡世勋¹, 律方成¹, 金虎²

(1. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 河北 保定 071003;

2. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广东 广州 510663)

摘要:为了能够通过拟合介电谱的方式获得绝缘材料的绝缘状态,在 Cole-Cole 模型下提出了基于两步优化的绝缘材料介电谱特征参数辨识方法。根据绝缘材料的普适弛豫定律,推导形成了一套较为完整的 Cole-Cole 模型初值获取方法;采用与拟合误差情况更匹配的目标函数,提出基于全局搜索与局部搜索相结合的两步优化对各特征参数进行优化计算,有效地解决了传统辨识方法容易陷入局部极小点甚至发散的问题。运用 3 种典型的介电谱特征参数辨识方法和所提方法,对数值产生和实测的介电谱进行计算,验证了所提方法的优越性。实验测量了低密度聚乙烯(LDPE)样本直流加压注入空间电荷后的介电谱,运用所提方法辨识不同去极化时刻 LDPE 介电谱的特征参数。结果表明:不同去极化时间下,通过所提方法均能较好地逼近实测介电谱,且随着频率的升高,复介电常数的实部、虚部的减小速度存在下降的趋势。

关键词:绝缘;介电谱;Cole-Cole 模型;特征参数辨识;两步优化;低密度聚乙烯

中图分类号:TM 21

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.07.024

0 引言

介电响应法是一种简便、有效、无损的绝缘检测方法^[1],可分为时域和频域方法。其中,基于频域的介电谱法抗干扰能力强,在电力设备绝缘无损诊断中应用尤其广泛^[2]。准确地诊断故障需要提取介电谱曲线中与故障密切相关的特征量,而这些量可以根据一定的模型采用拟合方式获得。Debye 模型^[3-4]虽应用广泛但仅适用于无(或弱)相互作用的偶极子体系^[5],在频域的研究中使用较少。K S Cole 和 R H Cole 依据诸多电介质的 Cole-Cole 图呈现圆弧的特点在 Debye 模型的基础上引入参数 α ,形成了适用范围更广的 Cole-Cole 模型^[6]。同时,低频处直流电导会对介电谱产生明显的影响,这就需要在 Cole-Cole 弛豫模型的基础上引入直流电导。A K Jonsher 提出,低频弥散在诸多材料中非常常见,其主要影响介电谱的低频部分,在电介质系统中表现为跳跃电子或离子载流子的响应^[7]。现阶段国内外多将介电谱法用于油浸电力变压器、电机、电缆绝缘的监测^[8-11],且研究开展得较为广泛。目前,介电谱特征参数多通过拟合 Cole-Cole 模型的方式提取,其过程主要包括初值获得、目标函数建立和算法优化。

目前,仅有少数文献提及介电谱拟合中相关特征参数初值的获取问题。如文献[12-13]虽然通过迭代优化进行参数辨识,但并未明确给出具体的参数初值获取方法;文献[14]中虽给出了参数初始值的取值范围,但该范围只能适用于部分材料,适用范

围有限;文献[15]根据油纸绝缘材料实测介电谱特征给出了 Cole-Cole 模型的初值计算公式,但并没有从理论层面解释各公式,且其只针对油纸绝缘,能否应用到其他绝缘材料尚不明确。目前应用较多的是采用最小二乘法进行拟合,其中比较常见的方法之一是针对介电谱实部和虚部分别建立目标函数后拟合^[14],该方法较为简单而且直观,但其弊端是会得到 2 组结果,且 2 组结果很可能存在明显差异,给模型参数的最终确定带来了困难。为了解决该问题,文献[16]同时考虑了复介电常数的实部和虚部,但并未详细给出目标函数中某些变量的取值,其实用价值有待提高。针对现有文献的调研发现,目前的优化方案均采用单步优化方法^[15],常常容易陷入局部极小点,给实际应用带来困难。

综上所述,尽管针对介电谱法的拟合方法已经开展了一些研究,但现有的几种介电谱特征辨识方法中对初值获得、算法优化未进行系统研究,也没有对方法之间的性能进行比较,影响了这些方法在介电谱测量中的应用。本文基于绝缘材料的普适弛豫定律,对 Cole-Cole 模型中各变量的初值获取方法进行了探究,并在选定目标函数的基础上,针对算法优化环节中现有单步优化方法存在收敛能力不足的问题,探究了具有较好收敛能力的两步优化方法。同时,运用该方法对低密度聚乙烯 LDPE (Low-Density PolyEthylene) 试样直流加压后,在去极化不同时段测量的介电谱特征参数进行辨识,研究了不同去极化时间下空间电荷对介电谱测量结果和绝缘特征参数辨识结果的影响。

1 频域 Cole-Cole 模型

考虑跳跃电导的作用,较为完备的 Cole-Cole 模型可表述为:

收稿日期:2018-09-17;修回日期:2019-06-27

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2019MS090,2019MS085,2017MS196)

Project supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities(2019MS090,2019MS085,2017MS196)

$$\varepsilon_r^*(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\Delta\varepsilon}{1+(j\omega\tau)^n} + \frac{\sigma_{dc}}{j\varepsilon_0\omega} + \frac{\xi}{\varepsilon_0(j\omega)^m} \quad (1)$$

其中, ω 为角频率; ε_0 为真空介电常数; $\Delta\varepsilon = \varepsilon_s - \varepsilon_\infty$ 为静态极化率, ε_s 和 ε_∞ 分别为静态介电常数和高频介电常数; τ 为弛豫时间常数; n 为弛豫时间分布参数, $0 < n < 1$; σ_{dc} 为直流电导参数; ξ 和 m ($0 < m < 1$) 为与跳跃电导过程相关的常数, 主要影响低频段的介电谱形状^[17]。

将完整的 Cole-Cole 模型进行分解可得实部、虚部表达式分别如式(2)、(3)所示。

$$\varepsilon_r'(\omega) = \varepsilon_\infty + \operatorname{Re} \left[\frac{\Delta\varepsilon}{1+(j\omega\tau)^n} + \frac{\xi}{\varepsilon_0(j\omega)^m} \right] = \varepsilon_\infty + \frac{1+p^n \cos(n\pi/2)}{1+2p^n \cos(n\pi/2)+p^{2n}} \Delta\varepsilon + \frac{\xi \cos(m\pi/2)}{\varepsilon_0 \omega^m} \quad (2)$$

$$\varepsilon_r''(\omega) = \frac{\sigma_{dc}}{\varepsilon_0 \omega} - \operatorname{Im} \left[\frac{\Delta\varepsilon}{1+(j\omega\tau)^n} + \frac{\xi}{\varepsilon_0(j\omega)^m} \right] = \frac{\sigma_{dc}}{\varepsilon_0 \omega} + \frac{p^n \sin(n\pi/2)}{1+2p^n \cos(n\pi/2)+p^{2n}} \Delta\varepsilon + \frac{\xi \sin(m\pi/2)}{\varepsilon_0 \omega^m} \quad (3)$$

其中, $p = \omega\tau$ 。

2 绝缘材料频谱特征参数辨识方法

2.1 初值获得方法

本文根据绝缘材料介电谱特征和 Cole-Cole 模型中各成分对不同频段的影响情况来估计初值。附录 A 中的图 A1 综合考虑了弛豫极化、直流电导和跳跃电导对介电谱的影响, 依据普适弛豫定律将三者进行分解, 以实现它们与介电谱特征段的对应。下面给出各特征参数的计算公式, 详细推导过程见附录 A。

a. 参数 σ_{dc} 。 设 b 为虚部低频段 $\ln \varepsilon_r''$ 与 $\ln f$ 线性拟合的横截距, 则 σ_{dc} 的计算公式为:

$$\sigma_{dc} = \exp[\ln(2\pi\varepsilon_0) + b] \quad (4)$$

b. 参数 $\Delta\varepsilon$ 。 $\Delta\varepsilon = \varepsilon_s - \varepsilon_\infty$, 其中, ε_s 的初值直接取复介电常数实部介电谱的低频段较平处的值(如图 A1(a)所示); ε_∞ 的初值直接取复介电常数实部数据的最小值(如图 A1(a)所示)。

c. 参数 τ 。 τ 的计算公式如式(5)所示。

$$\tau = 1/\omega_p = 1/(2\pi f_p) \quad (5)$$

其中, ω_p 、 f_p 分别为复介电常数虚部介损峰处的角频率和频率。

d. 参数 n 。 虚部高频段 $\ln \varepsilon_r''$ 与 $\ln f$ 呈线性关系, 斜率为 $-n$, 故虚部高频线性段斜率的绝对值即为参数 n , 如图 A1(b)所示。

e. 参数 m 和 ξ 。

$$m = -a \quad (6)$$

$$\xi = \exp\{b - \ln[\cos(m\pi/2)/\varepsilon_0] + m \ln(2\pi)\} \quad (7)$$

以上方法依据绝缘材料的普适弛豫定律, 充分

利用了不同频率范围内的介电谱特征, 理论上具有不错的准确性, 但介电谱完备程度会对计算准确度产生影响。虽然本文提出的初值获得方法存在一定程度的误差, 但经 2.2 节方法优化后可以保障最终求解结果的准确性。

2.2 目标函数及优化算法

经过反复尝试分析后, 本文采用的目标函数为:

$$F_G = \sum \left[\frac{(\varepsilon_E' - \varepsilon_M')^2}{\max(\varepsilon_M') - \min(\varepsilon_M')} + \frac{(\varepsilon_E'' - \varepsilon_M'')^2}{\max(\varepsilon_M'') - \min(\varepsilon_M'')} \right] \quad (8)$$

其中, ε_E' 、 ε_E'' 和 ε_M' 、 ε_M'' 分别为复介电常数的实部、虚部的计算值和实测值, 优化的目标是使 F_G 达到最小。选择式(8)所示的目标函数是为了保证实测值与计算值之间的差距在介电谱曲线的有效取值范围内达到最小, 这也符合肉眼观察拟合效果时的习惯。

由于目标函数比较复杂, 现有的分别拟合方法(如文献[14]所提方法)和单步优化方法(如文献[13]所提方法)可能存在陷入局部极小点的问题, 本文提出了两步优化方法, 力求解决此类问题。值得注意的是, 文献[14]的分别拟合方法在对实部和虚部进行优化时也是采用单步优化方法。本文所提两步优化均利用 MATLAB 软件实现。

第 1 次优化采用 GlobalSearch 求解器。GlobalSearch 是一种基于 MATLAB 的 fmincon 局部优化技术的改进全局优化算法, 其主要思想是根据约束条件在以上获得的初值附近产生一系列初始解, 并经过一系列运算过滤初始解, 然后运用 fmincon 优化获得当前条件下的最优解。应特别说明的是, 优化过程应限制在各参数的约束条件(即物理意义)下进行, 见式(9)。

$$\begin{cases} 10^{-16} \text{ S/m} < \sigma_{dc} < 10^{-8} \text{ S/m} \\ 0 < n < 1 \\ 0 < m < 1 \end{cases} \quad (9)$$

其他参数由于没有严格的固有约束, 所以一般认为取值范围为 $0 \sim \infty$ 。

实际上, 第 1 次优化时为了缩短计算时间, 迭代次数往往不要求太多, 只需要将待求参数优化到初值附近即可, 这使得经过第 1 次优化的样本参数在有些情况下距离最优解还是有一定的差距。因此, 有必要进行第 2 次优化。第 2 次优化采用 fmincon 函数, 对第 1 次全局优化得到的解进行局部优化。

如果只采用全局优化算法则计算量太大, 而如果仅采用局部优化算法则可能收敛于局部极小点。本文提出的两步优化方法利用全局优化算法使待求参数快速趋于最优解附近, 然后利用局部优化算法快速收敛于最优解。这样可以有效利用全局优化和局部优化的优点而避免它们的缺点, 不仅有效缩短了

计算时间,也抑制了算法局部收敛或不收敛的情况。

3 绝缘材料频谱特征参数辨识方法有效性验证

目前,提及 Cole-Cole 模型介电谱特征参数辨识的典型文献为文献[13-15],但是它们对拟合方法的介绍均不够详细。文献[13]并未指出其具体采用的优化算法,根据其在约束范围内目标函数求最小值,且考虑到 fmincon 函数比较适合该文献中所给目标函数的优化,运用其提出的目标函数结合 fmincon 函数实现文献[13]方法。文献[14]提及分别拟合实部和虚部获得特征参数的方法,该方法较为简单直观,且符合主观思维,所对应的目标函数属于非线性最小二乘问题,因此,本节采用非线性最小二乘方法(MATLAB 的 lsqnonlin 函数)实现文献[14]方法。文献[15]的目标函数可能由于撰写或其他原因出现了错误,无法在本文中实现,但其初值获得方法在现有文献中最为可靠和详实,文献[13]方法和文献[14]方法的实现均采用文献[15]方法获取初值,这样实现的算法在性能上应该优于原文献对应的算法。其中,文献[13]和文献[14]的拟合方法均为单步优化方法,本文方法为两步优化方法。下面,通过数值产生与实验数据对以上3种方法进行对比,验证本文两步优化算法的有效性。

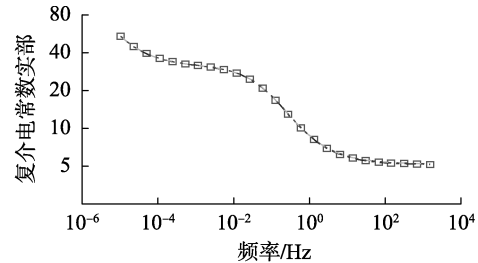
a. 案例1:在 $10^{-5} \sim 10^3$ Hz 范围内按对数坐标取25个对数等间隔点,利用表1中的真值数值产生1组数据点,并利用3种方法进行介电谱拟合,得到的结果如表1和图1所示。其中,文献[14](实部)和文献[14](虚部)分别为文献[14]方法仅拟合实部和仅拟合虚部所得的辨识结果。

表1中各计算结果一致,图1中各方法拟合得到的介电谱基本完全重合,且与数值产生的谱线吻合较好。这表明,在无噪声的情况下,3种方法拟合效果相近,均可获得较为准确的参数辨识结果,介电谱曲线的拟合情况均较好,即在无噪声情况下各方法均有效。这是因为在无噪声情况下,初值获得方法准确性较高,且数值产生数据与模型的吻合度较高,迭代最终可以自然地收敛于真值。

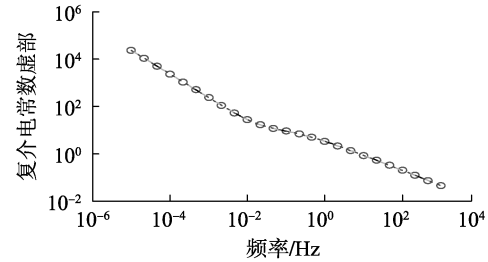
表1 案例1中3种方法的辨识结果(无噪声)

Table 1 Identification results of three methods in Case 1, without noise

方法	$\sigma_{dc}/$ ($\text{pS} \cdot \text{m}^{-1}$)	$\Delta\epsilon$	τ/s	n	$\xi/$ ($\text{pS} \cdot \text{m}^{-1}$)	m	ϵ_{∞}
真值	13	25	2.3	0.64	0.5	0.7	4.2
本文	13	25	2.3	0.64	0.5	0.7	4.2
文献[13]	13	25	2.3	0.64	0.5	0.7	4.2
文献[14] (实部)	—	25	2.3	0.64	0.5	0.7	4.2
文献[14] (虚部)	13	25	2.3	0.64	0.5	0.7	—



(a) 复介电常数实部



(b) 复介电常数虚部

○, □ 数值产生(无噪声), — 本文方法(两步优化)
-- 文献[13]方法(单步优化), ... 文献[14]方法(单步优化)

图1 案例1中3种方法拟合结果(无噪声)

Fig.1 Fitting results of three methods in Case 1, without noise

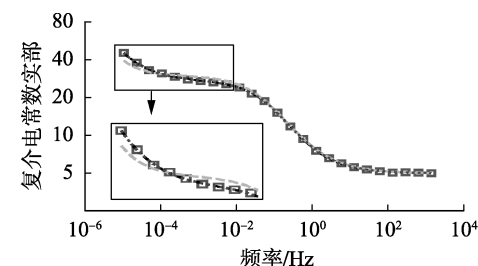
考虑到实际情况中噪声通常难以避免,对表1所示真值产生的数据加入一定量的随机噪声(信噪比为 19.02 dB)后再进行计算,得到的结果如表2和图2所示。

从表2和图2可以看出,在有噪声情况下,本文方法的拟合效果较好,辨识结果与真值相差均较小;文献[14]方法实部拟合效果与辨识结果较好,但虚部的效果不佳;文献[13]方法似乎具有不错的拟合效果,但在实部低频段的拟合结果与真实值有一定的差距,这也导致了表2中参数辨识结果存在明显误差,即陷入局部极小点。如果不仔细观察拟合结果往往容易误以为文献[13]方法的拟合效果较好,导致误判。综上所述,该有噪声案例中仅本文方法有效。导致以上问题的原因为,在有噪声的情况下,数据与模型的吻合度有所降低,且考虑到目标函数较为复杂,往往会导致局部极小点众多,如果再加上初值计算准确度不够,会使初值偏离最优解较远,文献[13-14]方法的迭代结果易陷于局部极小点甚至发散。而本文方法的初值计算准确度较高,且采用

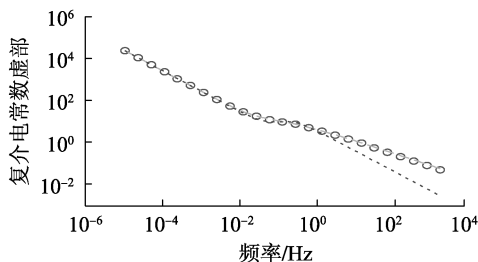
表2 案例1中3种方法辨识结果(有噪声)

Table 2 Identification results of three methods in Case 1, with noise

方法	$\sigma_{dc}/$ ($\text{pS} \cdot \text{m}^{-1}$)	$\Delta\epsilon$	τ/s	n	$\xi/$ ($\text{pS} \cdot \text{m}^{-1}$)	m	ϵ_{∞}
真值	13.00	25.00	2.30	0.64	0.50	0.70	4.20
本文	13.24	25.23	2.24	0.64	0.50	0.71	4.28
文献[13]	10^{-4}	28.89	2.98	0.62	13.31	1.00	4.27
文献[14] (实部)	—	25.32	2.29	0.64	0.47	0.72	4.29
文献[14] (虚部)	13.26	15.65	1.03	1.00	3.10×10^{-4}	7.90×10^{-5}	—



(a) 复介电常数实部



(b) 复介电常数虚部

○, □ 数值产生(有噪声), -- 本文方法(两步优化)
-- 文献[13]方法(单步优化), ... 文献[14]方法(单步优化)

图 2 案例 1 中 3 种方法的拟合结果(有噪声)

Fig.2 Fitting results of three methods in Case 1, with noise

两步优化,在一定程度上能有效抑制易陷入局部极小点甚至发散的情况,因而可以取得较佳的效果。

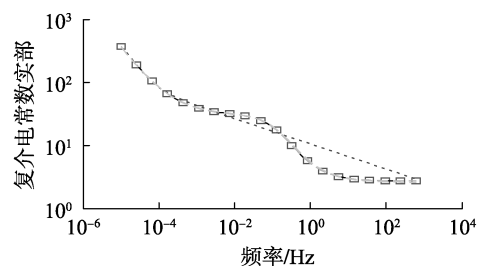
b. 案例 2: 为了增加比较结果的说服力,增加介电谱特征更为显著的案例 2。在 $10^{-5} \sim 10^3$ Hz 范围内按对数坐标取 20 个对数等间隔点,利用表 3 中的真值数值产生 1 组数据点,并利用 3 种方法进行介电谱拟合,得到的结果如表 3 和图 3 所示。

从表 3 和图 3 可知,无噪声情况下,本文方法和文献[13]方法的拟合结果较准确,但文献[14]方法的拟合结果却出现了发散的现象。为了提高文献[14]方法的性能,同时检验本文所提出的初值获取方法的效果,将本文初值获取方法用于文献[14]方法中用于提取初值,可得到较准确结果(见表 3 和图 3 中文献[14]方法(2)对应的结果),即针对案例 2 运用较准确的初值后,文献[14]方法可以得到较好的拟合结果。这也说明,运用最小二乘法进行拟合

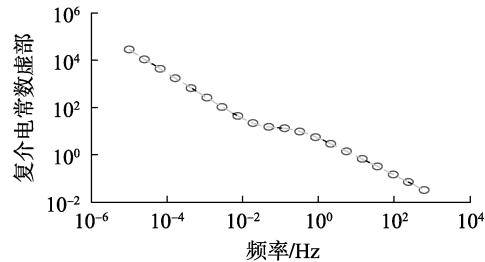
表 3 案例 2 中 3 种方法的辨识结果(无噪声)

Table 3 Identification results of three methods in Case 2, without noise

方法	$\sigma_{dc}/$ ($\text{pS} \cdot \text{m}^{-1}$)	$\Delta \varepsilon$	τ/s	n	$\xi/$ ($\text{pS} \cdot \text{m}^{-1}$)	m	ε_{∞}
真值	15.10	28.60	1.20	0.80	4.20	0.80	2.71
本文	15.10	28.60	1.20	0.80	4.20	0.80	2.71
文献[13]	15.10	28.60	1.20	0.80	4.20	0.80	2.71
文献[14] (实部)	—	446.53	1.28×10^{-4}	0.92	142.40	0.20	0
文献[14] (虚部)	15.10	28.62	1.20	0.80	4.12	0.80	—
文献[14] (2)(实)	—	28.60	1.20	0.80	4.20	0.80	2.71
文献[14] (2)(虚)	15.10	28.60	1.200	0.80	4.20	0.80	—



(a) 复介电常数实部



(b) 复介电常数虚部

○, □ 数值产生(无噪声), -- 本文方法(两步优化)
-- 文献[13]方法(单步优化), ... 文献[14]方法(单步优化)
-- 文献[14]方法(2)(单步优化)

图 3 案例 2 中 3 种方法的拟合结果(无噪声)

Fig.3 Fitting results of three methods in Case 2, without noise

对初值的要求较高,若初值的准确性不高,极有可能陷入局部极小点或发散,这同时也验证了 2.1 节中提出的初值获取方法较现有方法更加准确。

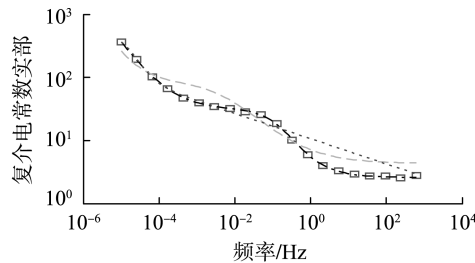
对表 3 所示样本参数产生的介电谱加入一定量的随机噪声(信噪比为 18.71 dB)后再进行计算,得到的结果如表 4 和图 4 所示。从表 4 和图 4 中可以看出,有噪声情况下,案例 2 中仅本文方法能够得到较好的拟合效果和辨识结果;文献[13]和文献[14]方法均拟合失败,结果发散。

为了检验实测数据下 3 种方法的拟合效果,本文选用介电谱研究中常用的油纸绝缘试样进行介电谱测量获得实测数据,实验电压 200 V_{peak} (V_{peak} 为峰值电压),并运用 3 种方法进行计算,辨识结果与拟合效果分别见表 5 和图 5。从表 5 和图 5 中可见,本文方法的拟合效果较好,相对误差绝对值之和较小,为 2.00,则可认为本文方法所求结果基本能反映真实情况。文献[13]方法的虚部拟合效果较好,但是实部低频段的拟合效果较差,从其辨识结果来看,文献[13]方法仅在低频段的相关辨识参数上与本文方

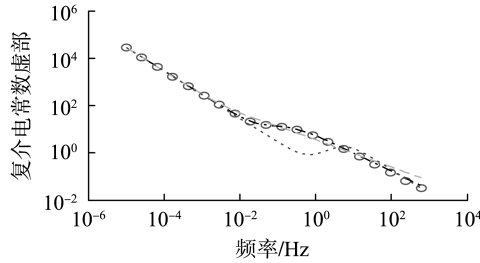
表 4 案例 2 中 3 种方法辨识结果(有噪声)

Table 4 Fitting results of three methods in Case 2, with noise

方法	$\sigma_{dc}/$ ($\text{pS} \cdot \text{m}^{-1}$)	$\Delta \varepsilon$	τ/s	n	$\xi/$ ($\text{pS} \cdot \text{m}^{-1}$)	m	ε_{∞}
真值	15.10	28.60	1.20	0.8	4.20	0.80	2.71
本文	15.44	29.31	1.17	0.78	4.13	0.80	2.59
文献[13]	1.01×10^{-4}	84.02	25.72	0.58	16.64	1	4.34
文献[14] (实部)	—	3.73×10^2	1.01×10^4	0.97	1.43×10^2	0.20	0
文献[14] (虚部)	15.99	3.47	0.03	1.00	1.6×10^{-3}	2.4×10^{-5}	—



(a) 复介电常数实部



(b) 复介电常数虚部

○, □ 数值产生(有噪声), -- 本文方法(两步优化)
-- 文献[13]方法(单步优化), ... 文献[14]方法(单步优化)

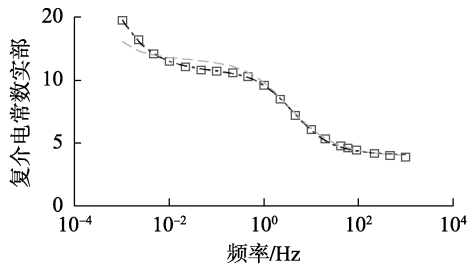
图 4 案例 2 中 3 种方法的拟合结果(有噪声)

Fig.4 Fitting results of three methods in Case 2, with noise

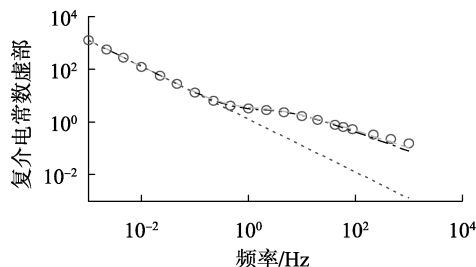
表 5 3 种方法的实测数据辨识结果

Table 5 Identification results of three methods, with experimental data

特征参数	$\sigma_{dc}/$ ($\text{pS} \cdot \text{m}^{-1}$)	$\Delta \varepsilon$	τ/s	n	$\xi/$ ($\text{pS} \cdot \text{m}^{-1}$)	m	ε_{∞}	相对误差绝对值之和
本文方法	69.00	6.81	0.06	0.74	4.19	0.85	4.37	2.00
文献[13]	10^{-4}	8.35	0.08	0.68	71.43	1.00	4.32	2.50
文献[14] (实部)	—	6.68	0.06	0.76	4.16	0.81	4.38	10.77
文献[14] (虚部)	70.90	0.02	0.01	4.60×10^{-13}	2.18×10^{-7}	5.09×10^{-13}	—	



(a) 复介电常数实部



(b) 复介电常数虚部

○, □ 数值产生(无噪声), -- 本文方法(两步优化)
-- 文献[13]方法(单步优化), ... 文献[14]方法(单步优化)

图 5 3 种方法的实测数据拟合结果

Fig.5 Fitting results of three methods, with experimental data

法出入较大,这主要是因为其获取初值时对低频段相关特征的利用不甚合理且 fmincon 函数在初值不准确的情况下易收敛于局部极小点,其相对误差绝对值之和尽管不大,但明显看出所求结果非最优解,即收敛于局部极小点。文献[14]方法的实部拟合效果较好,但虚部出现了明显的拟合不佳,介电谱实部和虚部相对误差绝对值之和为 10.77,远大于本文方法。

综上所述,文献[13]方法能够在无噪声情况下获得较好的拟合结果,但在部分有噪声和实测数据情况下有陷入局部极小点甚至发散的可能性,若不仔细观察很容易导致误判;文献[14]方法利用最小二乘进行拟合,对参数初值的要求较高,诸多情况下实部、虚部无法同时收敛于理想的结果;而本文方法能有效地抑制收敛于局部极小点和发散的情况,在实验与仿真情况下均能得到较好的拟合和参数辨识结果。因此,本文提出的介电谱特征参数辨识方法更为有效。

4 绝缘材料频谱特征参数辨识方法的应用

本节以本文所提出的两步法为基础,对注入空间电荷的 LDPE 试样介电谱进行拟合和参数辨识,研究空间电荷对 LDPE 介电谱测量结果的影响。

4.1 测量平台

测量平台如图 6 所示。实验仪器采用美国 Glassman High Voltage 公司生产的 PS/FJ60R02.0-22 型高压直流发生器,美国 Megger 公司生产的 IDAX300 绝缘诊断分析仪和自制三电极(铜电极,高、低压电极直径分别为 80 mm 和 27 mm)。

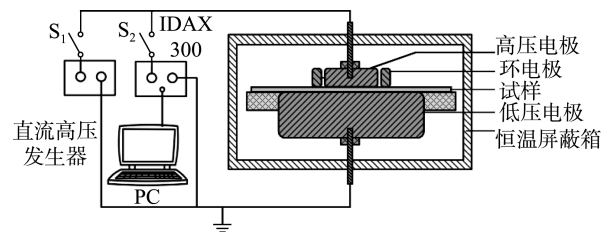


图 6 测量平台

Fig.6 Measurement platform

4.2 实验流程

(1) 纯 LDPE 试样采用瑞典 Borealis AB 生产的 0.5 mm LDPE 颗粒为原料,利用 Brabender 公司生产的 Extruder 19/25D 型单螺杆挤出机制作而成。

(2) 将干燥后的试样放入三电极的高、低压电极之间,并将装置好的三电极测量系统放入恒温屏蔽箱内,控制温度为 25℃;闭合开关 S_1 ,按 20 kV/mm 的电场强度施加直流电压注入电荷,持续 12 h。

(3) 注入电荷结束后,先打开开关 S_1 ,然后闭合开关 S_2 ,分别在加压结束的 1、2、4、8、12 h 时间点测量介电谱。考虑到测量时间限制,测量频率范围选

择在 0.01~1 000 Hz 之间,施加电压为 200 V_{peak}。注意,不测量介电谱时三电极中的高压和低压电极由 IDAX300 内部构成去极化回路。

4.3 实验结果分析

加压注入空间电荷后的 LDPE 发生的极化为空间电荷极化,属于弛豫极化的范畴。5 次实验测量数据见附录 B 中的图 B1,考虑到测得介电谱特征不包括跳跃电导特征段,因此忽略跳跃电导作用,利用 5 个待优化参数的 Cole-Cole 模型,运用本文所提出的介电谱特征参数辨识方法对测量数据进行处理,辨识结果如表 6 所示,拟合结果见图 B1。在中低频段,介电谱的下降情况较为明显,选择对数坐标上均匀分布的 4 个频率,计算单位时间内测量结果减小速度以表征去极化过程中介电谱的变化速度,见图 7。

表 6 实验测量数据的特征参数辨识结果

Table 6 Identification results of characteristic parameters of experimental data

去极化 时间/h	$\sigma_{dc}/$ (fS·m ⁻¹)	$\Delta\epsilon$	$(\tau-0.2)/s$	$m-0.5$	$\epsilon_{\infty}-1.55$
1	2.3	4.40×10^{-2}	8.94×10^{-2}	2.53×10^{-2}	5.1×10^{-3}
2	2.1	4.26×10^{-2}	7.97×10^{-2}	1.71×10^{-2}	4.1×10^{-3}
4	2.0	4.10×10^{-2}	5.99×10^{-2}	1.35×10^{-2}	3.6×10^{-3}
8	1.9	3.98×10^{-2}	4.43×10^{-2}	1.19×10^{-2}	3.1×10^{-3}
12	1.8	3.87×10^{-2}	4.08×10^{-2}	7.10×10^{-3}	3.1×10^{-3}

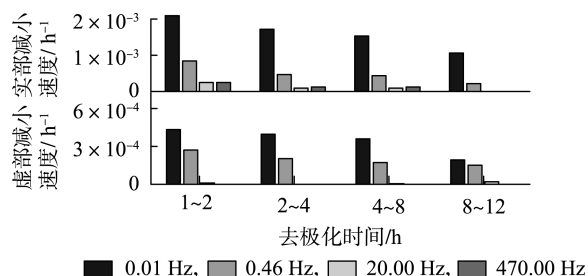


图 7 不同频率下测量结果的减小速度

Fig.7 Descent speed of results at different frequencies

由图 B1、图 7 可知,直流加压停止后随着时间的增加,复介电常数的实部和虚部均缓慢下降,下降速度随时间增加而减慢。这是因为随着去极化的进行,极化程度逐渐下降,而下降速度逐渐减慢则与去极化电流测量时(去极化较长时间后主要以空间电荷去极化过程为主)电流幅值随时间逐渐下降吻合。空间电荷导致材料极化,同时空间电荷导致材料内部场强增加以及 LDPE 电导的非线性均会导致其等效电导的下降,随着放电结束后时间的增加、电荷的释放,空间电荷效应逐渐下降且下降速度逐渐减慢,这与通过拟合得到的表 6 中 σ_{dc} 、 $\Delta\epsilon$ 随时间变化的规律吻合。同时,由图 7 也可以看出,相同去极化时间段内,随着频率的升高,介电常数实、虚部的相对减小速度存在下降的趋势,推测这可能是由于随着频率的增加,空间电荷极化程度下降,进而空间电荷

数量减少,接地放电时去极化速度也随之减慢。

5 结论

本文提出了 Cole-Cole 模型下基于两步优化的介电谱特征参数辨识方法,在用数值产生和实测介电谱情况下,将其与现有的辨识方法进行了系统比较,并运用该方法研究了不同去极化时间后注入空间电荷对 LDPE 介电谱测量的影响,主要结论如下。

(1) 依据普适弛豫定律,通过理论分析,提出了普适性较强的 Cole-Cole 模型初值获取方法;给出了根据实际介电谱特征完备情况构建 Cole-Cole 模型的依据。

(2) 采用了较为合理的优化目标函数,形成了具备全局搜索能力的两步优化算法。针对数值产生和实测介电谱的特征参数辨识结果表明,本文提出的方法在不同情况下均可以收敛于较优的结果,很大程度上抑制了现有算法可能收敛于局部极小点甚至发散的问题。

(3) 将本文方法应用于注入空间电荷后的 LDPE 介电谱特征参数辨识,结果表明,不同去极化时间情况下通过本文方法均能较好地逼近实测介电谱,且随着频率的升高,介电常数实、虚部的减小速度存在下降的趋势。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 刘捷丰,张懿议,徐建建,等. 扩展 Debye 模型大时间常数与变压器油纸绝缘老化的定量关系研究[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(3): 197-202.
LIU Jiefeng, ZHANG Yiyi, XU Jianjian, et al. Quantitative relationship between aging condition of transformer oil-paper insulation and large time constant of extend Debye model[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(3): 197-202.
- [2] 黎成林,曹保江,孙健翔,等. 基于 FDS 的变压器油浸纸老化程度与水分含量评估方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(1): 217-223.
LI Chenglin, CAO Baojiang, SUN Jianxiang, et al. FDS-based assessment of aging degree and moisture content for oil-paper in transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1): 217-223.
- [3] 李军浩,司文荣,姚秀,等. 油纸绝缘变压器老化状态评估的极化/去极化电流技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(12): 2605-2611.
LI Junhao, SI Wenrong, YAO Xiu, et al. Study of polarization and depolarization current measurements for assessment of aging state of oil-paper insulated transformers[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(12): 2605-2611.
- [4] 陈汉城,蔡金铤. 基于多时域特征参量的变压器油纸绝缘状态综合评估[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(7): 184-190.
CHEN Hancheng, CAI Jinding. Synthetic insulation state evaluation based on multiple time-domain characteristic parameters for transformer oil-paper[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(7): 184-190.
- [5] 殷之文. 电介质物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 556-568.
- [6] COLE K S, COLE R H. Dispersion and absorption in dielectrics I.

- alternating current characteristics[J]. Journal of Chemical Physics, 1941, 10(2): 98-105.
- [7] JONSCHER A K. 普适弛豫定律[M]. 西安:西安交通大学出版社, 2008: 130-150.
- [8] 廖瑞金, 杨丽君, 郑含博, 等. 电力变压器油纸绝缘热老化研究综述[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 1-12.
LIAO Ruijin, YANG Lijun, ZHENG Hanbo, et al. Reviews on oil-paper insulation thermal aging in power transformers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 1-12.
- [9] 赵赢峰, 周利军, 吴广宁, 等. 基于改进回复电压法的XLPE电力电缆绝缘水树老化评估[J]. 绝缘材料, 2012, 45(6): 51-55.
ZHAO Yingfeng, ZHOU Lijun, WU Guangning, et al. Water-treed assess of XLPE power cable insulation based on improved recovery voltage method[J]. Insulating Materials, 2012, 45(6): 51-55.
- [10] 王兵. 汽轮发电机主绝缘多因子老化的介电响应特性研究[D]. 成都:西南交通大学, 2016.
WANG Bing. Research on characteristics of multi-factor aging in generator stator insulation based on dielectric response[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [11] FARAHANI M, BORSI H, GOCKENBACH E. Dielectric response studies on insulating system of high voltage rotating machines[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006, 13(2): 383-393.
- [12] 刘骥. 基于PDC分析的时频混合绝缘诊断方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学, 2014.
LIU Ji. Investigation of time-frequency hybrid insulation diagnosis method based on PDC analysis[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2014.
- [13] 梁贵书, 王雁超. 考虑频变参数的油浸式变压器绕组分数阶传输线模型[J]. 电工技术学报, 2016, 31(17): 178-186.
LIANG Guishu, WANG Yanchao. Fractional transmission line model of oil-immersed transformer winding considering frequency dependent parameters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(17): 178-186.
- [14] GROSSE C. A program for the fitting of Debye, Cole-Cole, Cole-Davidson, and Havriliak-Negami dispersions to dielectric data[J]. Journal of Colloid & Interface Science, 2014, 419(4): 102-106.
- [15] 杨丽君, 齐超亮, 邓帮飞, 等. 采用修正 Cole-Cole 模型提取油纸绝缘频域介电谱的特征参量方法[J]. 高电压技术, 2013, 39(2): 310-317.
YANG Lijun, QI Chaoliang, DENG Bangfei, et al. Application of modified Cole-Cole model to extract characteristics of frequency dielectric spectroscopy of oil-paper insulation[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(2): 310-317.
- [16] TUNCER E, GUBANSKI S M. Electrical properties of filled silicone rubber[J]. Journal of Physics Condensed Matter, 2000, 12(8): 1873.
- [17] BANDARA K, EKANAYAKE C, SAHA T K. Analysis of frequency domain dielectric response of pressboard insulation impregnated with different insulating liquids[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(4): 2042-2050.
- [18] DONG M, REN M, WEN F, et al. Explanation and analysis of oil-paper insulation based on frequency-domain dielectric spectroscopy[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(5): 2684-2693.

作者简介:



徐志钮

徐志钮(1979—),男,浙江苍南人,副教授,博士,主要研究方向为介电响应法在绝缘材料状态检测中的应用、光纤分布式传感技术及在电气设备状态监测和故障诊断中的应用(E-mail: wzcjxx@sohu.com);

张翼(1994—),男,山东枣庄人,硕士研究生,主要研究方向为介电响应法在绝缘材料状态检测中的应用(E-mail: dlgc_zy@163.com)。

Dielectric spectrum characteristic parameter identification method based on two-step optimization and its application

XU Zhiniu¹, ZHANG Yi¹, HU Zhiwei¹, HU Shixun¹, LÜ Fangcheng¹, JIN Hu²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. Electric Power Research Institute of GSG, Guangzhou 510663, China)

Abstract: In order to obtain the insulation condition of insulating materials by the way of dielectric spectrum fitting, based on two-step optimization and Cole-Cole model, a dielectric spectrum characteristic parameter identification method is proposed for insulating materials. According to the universal relaxation law of insulating materials, a relatively complete initial value acquisition method of Cole-Cole model is formed by derivation. The objective function that better consistent with fitting error is adopted. The two-step optimization combining global search and local search is proposed and used to optimize the characteristic parameters, which effectively solves the problem that the traditional identification methods easily fall into the local minima or even diverge. Three existing typical methods and the proposed method are used to calculate the numerically generated and measured dielectric spectra, and the superiority of the proposed method is verified by the calculation results. The dielectric spectrums of LDPE (Low-Density Polyethylene) samples injected with space charge by DC voltage are measured, and the characteristic parameters of LDPE dielectric spectrum at different depolarization times are identified by the proposed method. The results reveal that all the measured dielectric spectra with different depolarization times can be fitted well by the proposed method, and the descent speeds of real and imaginary parts of complex permittivity decrease with the increase of frequency.

Key words: insulation; dielectric spectrum; Cole-Cole model; characteristic parameter identification; two-step optimization; low-density polyethylene

附录 A

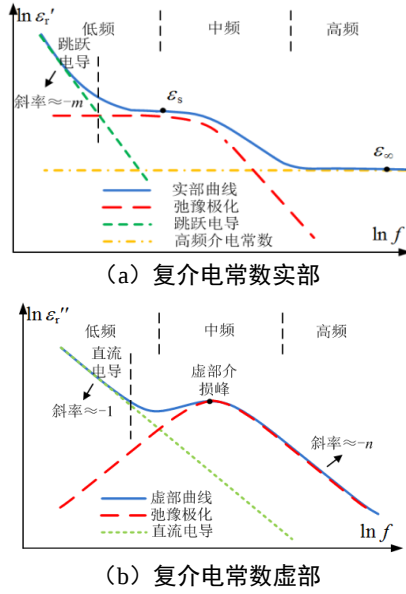


图 A1 Cole-Cole 模型初值提取示意图

Fig.A1 Initial value extraction diagram for Cole-Cole model

(1) σ_{dc} : 如图 1A (b) 所示, 介电常数虚部低频段会出现斜率为-1 的部分^{错误! 未找到引用源。}, 此时极化和跳跃电导对它的贡献很少, 多数情况下主要是直流电导的贡献。所以将虚部的极化和跳跃电导作用忽略后, 则正文中的式 (4) 可表达为:

$$\ln \varepsilon_r'' \approx \ln \left(\frac{\sigma_{dc}}{\varepsilon_0 \omega} \right) = -\ln f + \ln \sigma_{dc} - \ln 2\pi \varepsilon_0 \quad (A1)$$

设 b 为虚部低频段 $\ln(\varepsilon_r'')$ 与 $\ln(f)$ 线性拟合的横截距, 则有:

$$\sigma_{dc} = \exp[\ln(2\pi \varepsilon_0) + b] \quad (A2)$$

(2) $\Delta \varepsilon$: $\Delta \varepsilon = \varepsilon_s - \varepsilon_\infty$, 其中 ε_s 的初值直接取复介电常数实部介电谱的低频段较平处的值 (如图 1A (a) 所示); ε_∞ 的初值直接取复介电常数实部数据的最小值 (如图 1A (a) 所示)。

(3) τ : 在介电常数虚部峰值附近, 通常极化过程占主导 (如图 1A (a) 所示), 故可只考虑极化过程, 此时复介电常数虚部为:

$$\varepsilon_r''(\omega) \approx -\operatorname{Im} \left(\frac{\Delta \varepsilon}{1 + (j\omega\tau)^n} \right) = \frac{(\omega\tau)^n \sin(n\pi/2)}{1 + 2(\omega\tau)^n \cos(n\pi/2) + (\omega\tau)^{2n}} \Delta \varepsilon \quad (A3)$$

令上式一阶导数为 0, 可得 $\omega\tau = 1$, 即

$$\tau = 1/\omega_p = 1/(2\pi f_p) \quad (A4)$$

其中, ω_p 、 f_p 分别为在虚部介损峰处的角频率和频率。

(4) n : 由图 A1 可知, 在虚部高频段介电谱由极化损耗主导^[7], 此时近似有:

$$\varepsilon_r^*(\omega) - \varepsilon_\infty \approx \frac{\Delta \varepsilon}{1 + (j\omega\tau)^n} \quad (A5)$$

进一步近似为^[7]:

$$\frac{\Delta \varepsilon}{1 + (j\omega\tau)^n} \approx \Delta \varepsilon (j\omega\tau)^{-n} = \Delta \varepsilon [\cos(n\pi/2) - j\sin(n\pi/2)](\omega\tau)^{-n} \quad (A6)$$

因 ε_∞ 对介电谱虚部并不产生作用, 所以式 (A6) 的虚部可表达为:

$$\varepsilon_r'' \approx \Delta \varepsilon \sin(n\pi/2)(\omega\tau)^{-n} \quad (A7)$$

用 $\omega = 2\pi f$ 替换, 并对式 (11) 两边求自然对数则可看出高频段 $\ln(\varepsilon_r'')$ 与 $\ln f$ 呈线性关系, 斜率为 $-n$ 。故虚部高频线性段斜率的绝对值即为参数 n 。

(5) m 和 ξ : 由图 A1 (a) 可知, 低频段介电谱实部高于 ε_s 的斜线性段部分是因跳跃电导作用产生的, 此时弛豫极化作用和高频介电常数 ε_∞ 对介电常数的贡献趋于 ε_s , 故式 (3) 可表达为:

$$\ln(\varepsilon' - \varepsilon_s) \approx \ln[\xi \cos(m\pi/2)/(\varepsilon_0 \omega^m)] \quad (A8)$$

用 $\omega = 2\pi f$ 替换, 并将式 (A8) 展开, 可看出 $\ln(\varepsilon' - \varepsilon_s)$ 与 $\ln f$ 呈线性关系, 设线性拟合得到结果为:

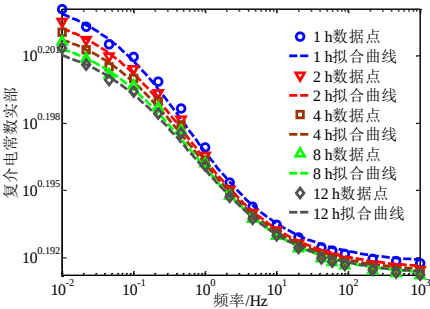
$$\ln(\varepsilon' - \varepsilon_s) = a \ln f + b \quad (A9)$$

则有:

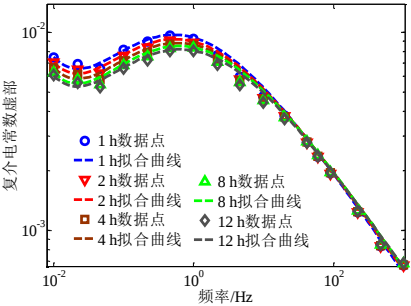
$$m = -a \quad (A10)$$

$$\xi = \exp\{b - \ln[\cos(m\pi/2)/\varepsilon_0] + m \ln(2\pi)\} \quad (A11)$$

附录 B



(a)复介电常数实部



(b)复介电常数虚部

图 B1 LDPE 介电谱测量拟合结果
Fig.B1 Fitting results of LDPE dielectric spectrums