

ICS 29.240.99  
CCS F 29

**DL**

# 中华人民共和国电力行业标准

DL/T 2231—2021

---

## 油纸绝缘电力设备频域介电谱测试导则

Guide for frequency domain dielectric spectrum test of Oil-paper  
insulation power apparatus

2021-01-07 发布

2021-07-01 实施

---

国家能源局 发布



## 目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 测试要求	2
5 测试方法	2
6 影响因素及注意事项	3
附录 A (规范性) 频域介电谱法测试接线方法	5
附录 B (资料性) 频域介电谱法测试原理	9
附录 C (资料性) 不同含水量的油浸绝缘纸(板)的频域介电谱数据库	10
附录 D (资料性) 设备绝缘纸中含水量估算方法	12
附录 E (资料性) 温度对频域介电谱的影响	15
附录 F (资料性) 油纸设备频域介电谱测试案例	17
参考文献	30

## 前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容有可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国电力企业联合会提出。

本文件由电力行业高压试验技术标准化技术委员会（DL/TC 14）归口并负责解释。

本文件主要起草单位：中国南方电网有限责任公司超高压输电公司、中国电力科学研究院、国网江苏省电力公司电力科学研究院、国网重庆市电力公司电力科学研究院、国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司、国网浙江省电力有限公司舟山供电公司、国网山东省电力公司电力科学研究院、国网四川省电力公司电力科学研究院、南方电网科学研究院有限责任公司、国网陕西省电力公司电力科学研究院、南方电网生技部、中国长江电力股份有限公司、蒙东电科院评价中心、广东电网有限责任公司电力科学研究院、广西电网有限责任公司电力科学研究院、贵州电网有限责任公司电力科学研究院、云南电网有限责任公司电力科学研究院、广州供电局有限责任公司、重庆大学、华北电力大学、西安交通大学、上海思源电气股份有限公司、上海辉测电气科技有限公司。

本文件主要起草人：邓军、张晋寅、周海滨、潘志城、郑丰、丁玉剑、吕金壮、陆云才、田杰、朱孟兆、王有元、齐波、程涣超、梁晨、刘熊、杨贤、刘青松、谢志成、王谦、钱国超、黎大健、张杰、余鹏、高震、赵鲲、宁鑫、袁耀、杨家辉、戴甲水、欧松松、王磊、张志华、张钰声、喇元、郭金刚、林春耀、张玉波、刘君、刘光祺、熊俊、郝建、闵道敏、宋会发、邓集瀚、段庆华。

本文件是首次发布。

本文件在执行过程中的意见或建议反馈至中国电力企业联合会标准化管理中心（北京市白广路二条一号，100761）。

# 油纸绝缘电力设备频域介电谱测试导则

## 1 范围

本文件规定了油纸绝缘设备频域介电谱测试条件、测试方法、影响因素等。

本文件适用于 10 kV 及以上油纸绝缘套管、油浸式电力变压器、油浸式电抗器、油浸式电流互感器、油浸式电压互感器、油纸绝缘电缆等油纸绝缘电力设备频域介电谱测试。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB/T 2900.19 电工术语 高电压试验技术和绝缘配合
- GB/T 2900.50 电工术语 发电、输电及配电 通用术语
- GB/T 2900.73 电工术语 接地与电击防护
- DL/T 474.3 现场绝缘试验实施导则 介质损耗因数  $\tan\delta$  试验
- DL/T 596 电力设备预防性试验规程
- DL/T 1154 高压电气设备额定电压下介质损耗因数试验导则

## 3 术语和定义

GB/T 2900.19、GB/T 2900.50、GB/T 2900.73 界定的以及下列术语和定义适应于本文件。

### 3.1

**油纸绝缘 oil-paper insulation**

采用绝缘油和绝缘纸（板）作为设备内部绝缘的一种复合绝缘系统。

### 3.2

**复电容 complex capacitance**

$C^*$

对电力设备施加交流电压，电力设备上电压矢量与电流矢量的关系。

$$C^* = \frac{I}{j\omega U}$$

### 3.3

**复电容实部 real part of complex capacitance**

$C'$

电力设备在交流电场作用下的电容特性的物理参数，单位 F。

### 3.4

**复电容虚部 imaginary part of complex capacitance**

$C''$

电力设备在交流电场作用下极化过程中的损耗特性的物理参数，单位 F。

### 3.5

**介质损耗因数 dielectric dissipation factor**

$\tan\delta$

复电容的虚部与实部之比。计算如下：

$$\tan \sigma = C'' / C'$$

### 3.6

#### 频域介电谱 frequency domain dielectric spectrum; FDS

对电力设备施加交变电压，在宽频率范围内描述电容和介质损耗因数（3.5）随频率变化的曲线。

## 4 测试要求

### 4.1 试验条件

试验宜在环境温度不低于 5℃、空气相对湿度不大于 80%的良好天气条件下进行。

### 4.2 试验仪器

试验仪器要求如下：

- a) 空载时输出电压不应低于 200 V；
- b) 输出频率范围应包含 0.001 Hz~1000 Hz；
- c) 测试系统应配备专用测试线和具有自保护功能。

## 5 测试方法

### 5.1 测试准备

测试前被试设备应处于停运状态并将设备充分放电。宜拆除与被试设备端部相连的所有引线，清除设备周围的杂物，必要时对设备绝缘表面进行清洁或干燥处理。了解被试设备的电气、化学性能的最近试验结果。测试期间设备内部绝缘介质的温度保持稳定。

### 5.2 测试接线

待测试设备和测试仪器连接，可参照 DL/T 474.3、DL/T 596、DL/T 1154 中电气设备介质损耗因数试验接线方法，连接待测试设备和测试仪器，屏蔽线就近连接设备外壳接地端。所有接线均应稳定、可靠。各类被试设备接线应满足附录 A 的要求。频域介电谱法测试原理见附录 B。

### 5.3 测试步骤

测试步骤如下：

- a) 开始测试前记录试品温度与环境温度。
- b) 设定测试电压和测试频率，频率范围宜包含 0.001 Hz~1000 Hz。
- c) 开始测试，记录并保存测试得到的不同频率下的介质损耗因数和电容量，宜保留 0.001 Hz 和 0.01 Hz 下的测试数据。
- d) 测试完毕，关闭仪器电源，用专用接地放电棒对被试品充分放电，然后拆除试验接线。

### 5.4 测试结果的判断

#### 5.4.1 横向比较

对比运行工况相似的同一制造厂、同型号设备的频域介电响应特性曲线，判断设备内部绝缘受潮和老化状态，应排除对比设备存在相近受潮和老化程度的可能。

#### 5.4.2 纵向比较

对同一台设备、同一测试接线、不同时期的频域介电响应特性曲线进行比较，判断设备内部绝缘

受潮和老化状态，需要预先获得设备原始的频域介电响应特性曲线，并应排除因检测条件变化造成的影响。

### 5.4.3 绝缘判断分析

5.4.3.1 频域介电谱测试异常可包括下列情况：

- a) 绝缘纸（板）受潮；
- b) 绝缘油电导率升高；
- c) X 蜡、游离碳、腐蚀性硫等化学污染。

5.4.3.2 油浸纸绝缘电力设备绝缘判断可采用下列方法：

- a) 对于套管、互感器、电力电缆等少油设备，状态良好的绝缘局部最低介质损耗频率点小于 50 Hz，绝缘较差的局部最低介质损耗频率点高于 50 Hz。绝缘缺陷原因应结合其他电气试验和理化试验综合判断。
- b) 对于变压器、电抗器等多油设备，绝缘缺陷类型应通过频域介电谱测试结果换算出的绝缘纸水含量和绝缘油的电导率（介质损耗）综合判断（见附录 C、附录 D），出现油泥、腐蚀性硫、酸等化学污染时，应通过横向和纵向对比判断并结合其他电气试验和理化试验综合判断。

## 6 影响因素及注意事项

### 6.1 温度影响

测试频域介电谱过程中，应保持试品温度稳定。温度对频域介电谱测试结果影响见附录 E。

### 6.2 外绝缘表面泄漏影响

在相对湿度大于 80% 的潮湿天气下试验时，应按图 1 所示进行接线，在被试品引出线套管上装设屏蔽环，并连接到仪器屏蔽端子，屏蔽环应靠近仪器电压输出端所接的引出线套管端子，远离接地部分。

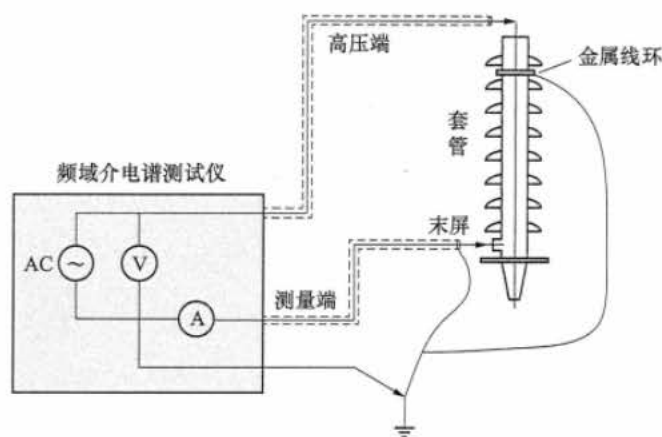


图 1 金属带屏蔽电流示意图

### 6.3 静电感应影响

测试前宜拆除被试设备出线端子连接引线。当静电感应对测试结果有影响时，可施加外置放大器，宜采用外置输出电压为 2000 V 的电压放大器。连接外置放大器时，测试前应核查线路接线。电压

**DL/T 2231—2021**

放大前后发生相位偏移时，应对测量结果修正。

#### **6.4 测试电压影响**

电力设备频域介电谱测试结果横向对比和纵向对比应在相同或相近测试电压下分析判断确定。



附录 A  
(规范性)  
频域介电谱法测试接线方法

### A.1 油浸式套管

套管的测试接线如图 A.1 所示，频域介电谱测试仪的高压端（电压输出端）连接至套管的导杆，电流测量端连接至被测套管末屏，接地线可就近与套管外壳金属部分进行电气连接。

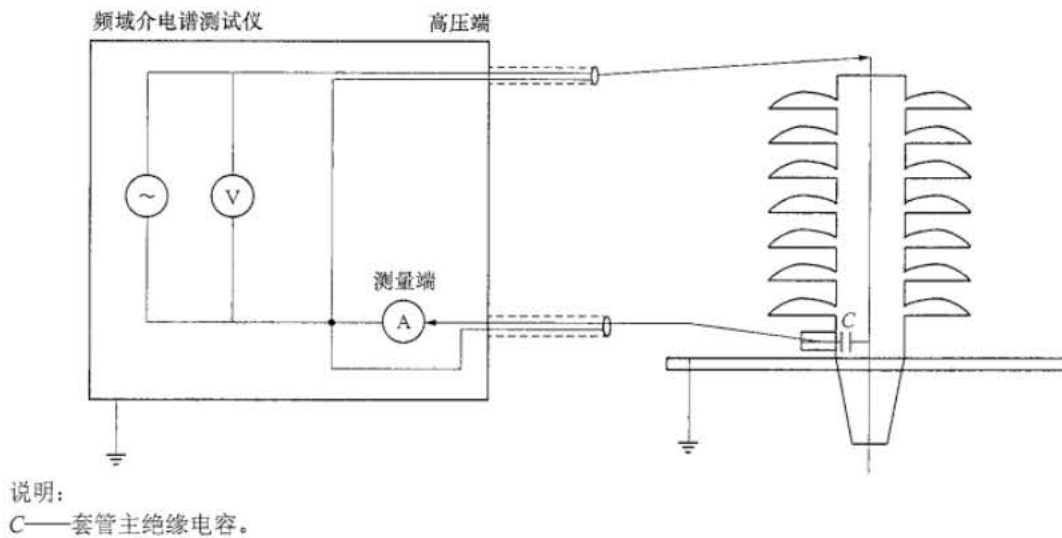


图 A.1 套管测试接线图

### A.2 油浸式电力变压器

单相双绕组油浸式电力变压器的测试接线如图 A.2 所示，低压套管短接后连接至频域介电谱测试仪的高压端（电压输出端），高压套管短接后连接至电流测量端，接地线可就近与变压器的金属外壳进行电气连接。

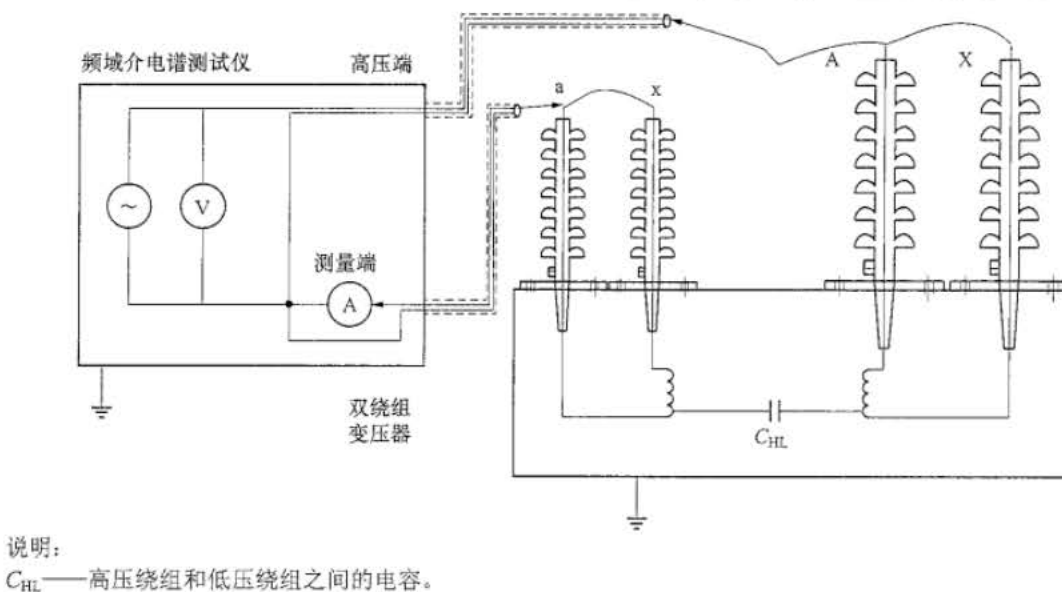
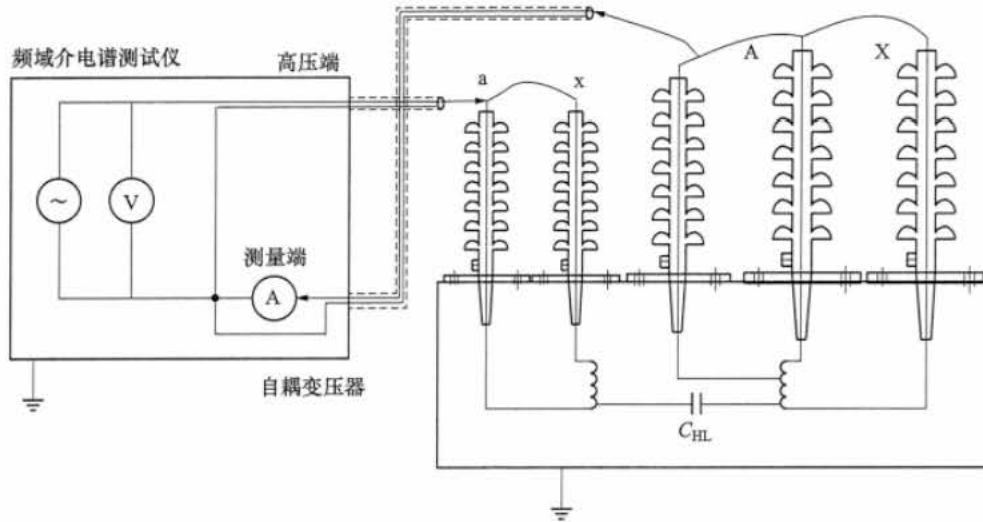


图 A.2 单相双绕组油浸式电力变压器测试接线图

单相双绕组自耦变压器绝缘频域介电谱测试，高压绕组、中压绕组及中性点短接连接至频域介电谱测试仪的测量端，低压绕组连接至介电响应测试仪的高压端，屏蔽线连接至变压器外壳。测试接线如图 A.3 所示。



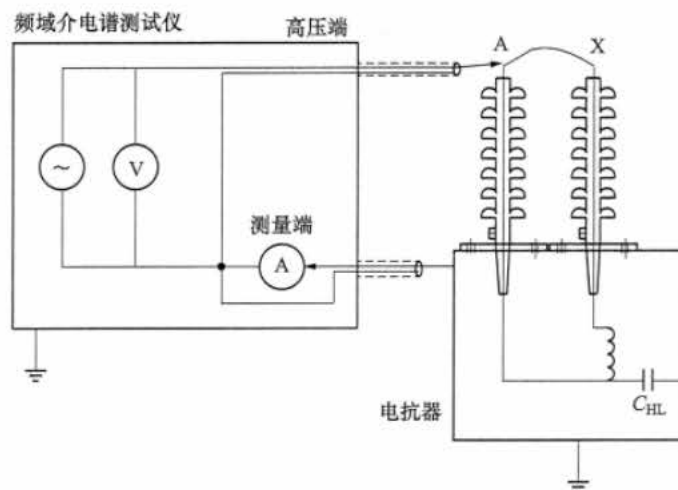
说明：

$C_{HL}$ ——双绕组变压器绕组间电容。

图 A.3 单相双绕组自耦变压器测试接线图

### A.3 油浸式电抗器

油浸式电抗器的测试接线如图 A.4 所示。频域介电谱测试仪的测量端连接至外壳，绕组短接并连接至频域介电谱测试仪的高压端（输出端）。



说明：

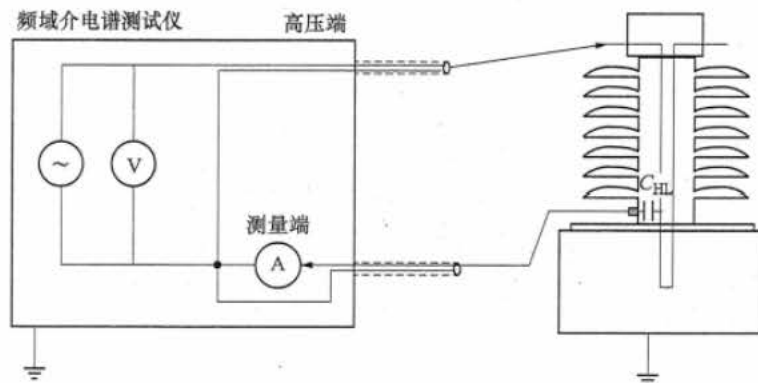
$C_{HL}$ ——电抗器绕组对地电容。

图 A.4 油浸式电抗器测试接线图

### A.4 油浸式电流互感器

带末屏的油浸式电流互感器的测试接线如图 A.5 所示。频域介电谱测试仪的输出端（高压端）接

一次导杆，频域介电谱测试仪的测量端接至末屏。

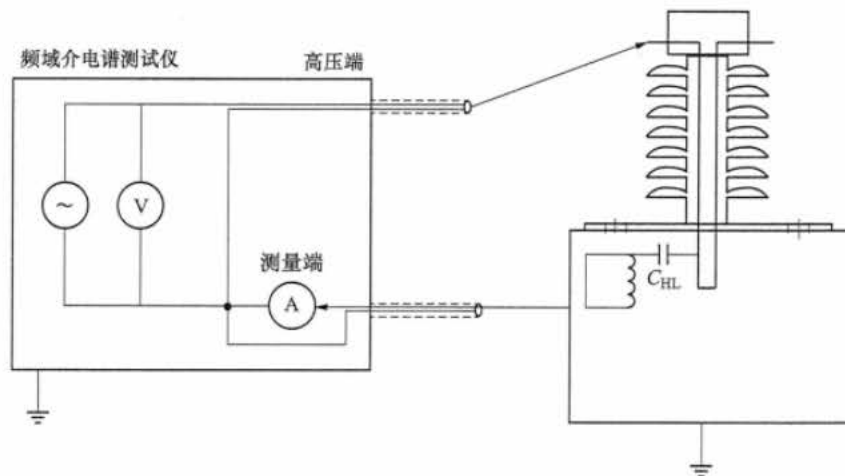


说明：

$C_{HL}$ ——电流互感器主绝缘电容。

图 A.5 带末屏油浸式电流互感器测试接线图

不带末屏的油浸式电流互感器频域介电谱测试接线如图 A.6 所示。频域介电谱测试仪的输出端（高压端）接一次导杆，二次绕组短接接至频域介电谱测试的测量端。



说明：

$C_{HL}$ ——一次绕组和二次绕组之间的电容。

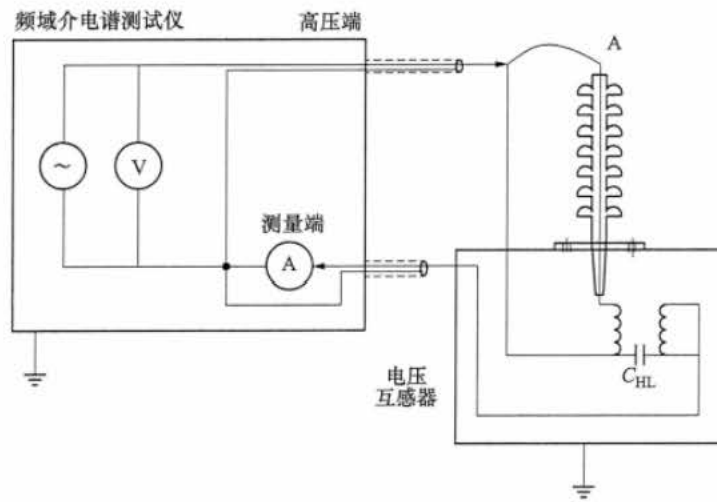
图 A.6 不带末屏油浸式电流互感器频域介电谱测试接线图

#### A.5 油浸式电压互感器

电磁式电压互感器测试接线如图 A.7 所示。一次侧绕组短接接至高压端（输出端），二次侧绕组短路并连接至频域介电谱测试仪的测量端。

#### A.6 油浸式电力电缆

油浸式电力电缆测试接线如图 A.8 所示。被测相接至高压端（输出端），其他两相短接接地并连接至频域介电谱测试仪的测量端。



说明:

$C_{HL}$ ——电压互感器一次绕组和二次绕组之间的电容。

图 A.7 电磁式电压互感器测试接线图

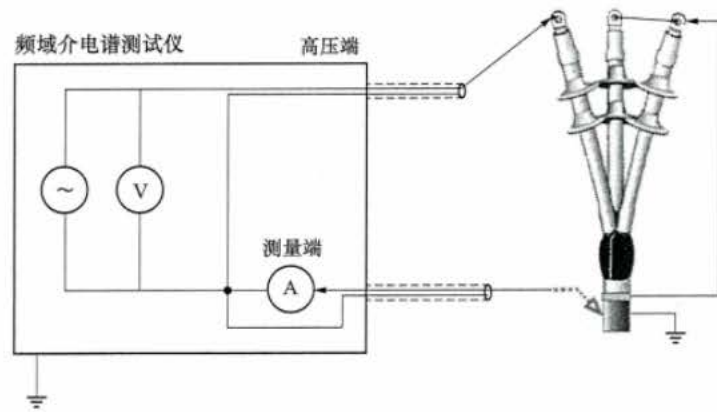


图 A.8 油浸式电力电缆测试接线图

## 附录 B

(资料性)

## 频域介电谱法测试原理

频域介电谱法测试是指对试品施加不同频率的交流电压，获得流过试品的电流幅值与相位，进而计算得到试样的复电容实部、复电容虚部、介质损耗角正切值  $\tan\delta$  等与频率相关的介电参数。

频域介电谱测量方法与常规的工频介质损耗测量类似，只是将测量频率拓宽。由于电介质自身的介电特性，在不同频率下具有不同的极化和弛豫过程，因此介质损耗不同。其测试基本原理如图 B.1 所示。

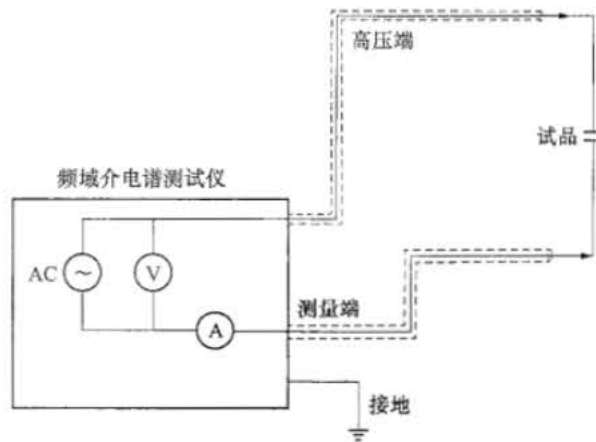


图 B.1 频域介电谱法测试基本原理图

如图 B.1 所示，若对试品电容施加正弦电压为  $\dot{U} = U\angle 0$ ，测得电介质电流信号为  $\dot{I} = I\angle\varphi$ ， $\varphi$  为电流信号超前于电压信号的相位，阻抗的模  $Z = U/I$ ，介质损耗角  $\delta = \frac{\pi}{2} - \varphi$ ，角频率  $\omega = 2\pi f$ ，则阻抗可表示为：

$$Z^* = \dot{U} / \dot{I} = Z\angle -\varphi = Z\cos\varphi - jZ\sin\varphi \quad \text{..... (B.1)}$$

复电容为：

$$C^* = \frac{1}{j\omega Z^*} = \frac{1}{\omega Z}(\sin\varphi - j\cos\varphi) \quad \text{..... (B.2)}$$

复电容的实部和虚部分别为：

$$C'(\omega) = \text{Re}(C^*) = \frac{\sin\varphi}{\omega Z} \quad \text{..... (B.3)}$$

$$C''(\omega) = -\text{Im}(C^*) = \frac{\cos\varphi}{\omega Z} \quad \text{..... (B.4)}$$

通过上述公式可计算出不同频率下的介质损耗正切值 ( $\tan\delta$ ) 和复电容等参数值。

附录 C  
(资料性)

不同含水量的油浸绝缘纸(板)的频域介电谱数据库

温度 25 °C 下含水量 0.5%~6% 绝缘纸(板)的频域介电谱标准曲线如图 C.1~图 C.3 所示, 图中含水量的标定由称重法和卡尔费休水分测定法所得。

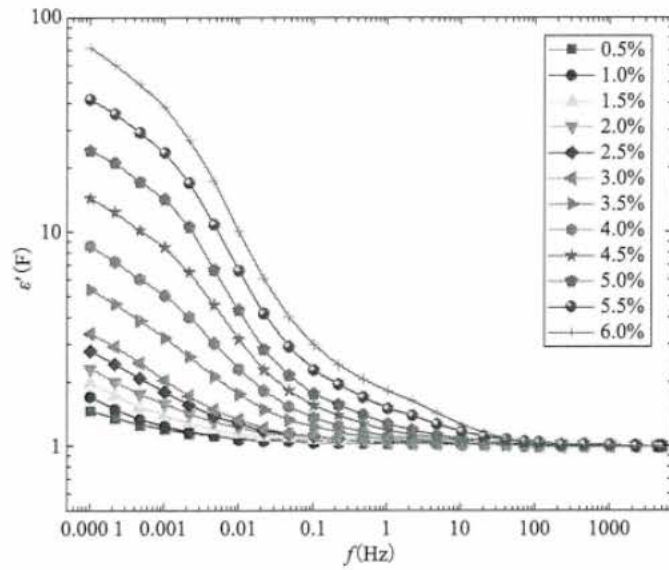


图 C.1 不同含水量绝缘纸(板)的  $\epsilon'$ - $f$  曲线

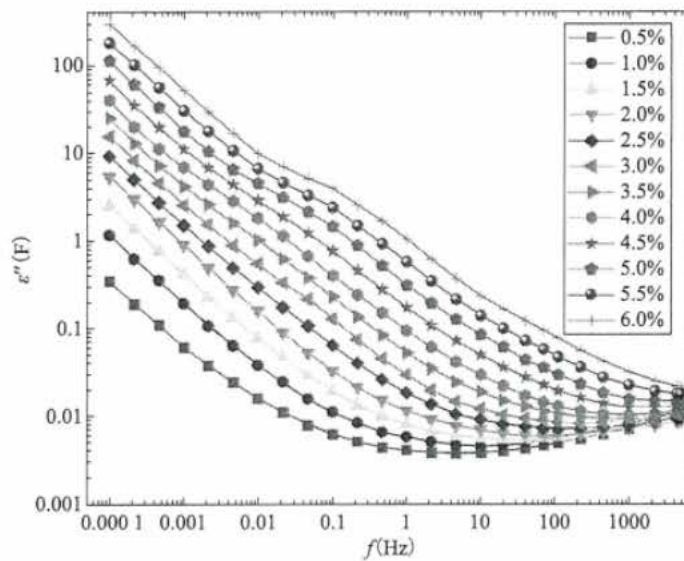


图 C.2 不同含水量绝缘纸(板)的  $\epsilon''$ - $f$  曲线

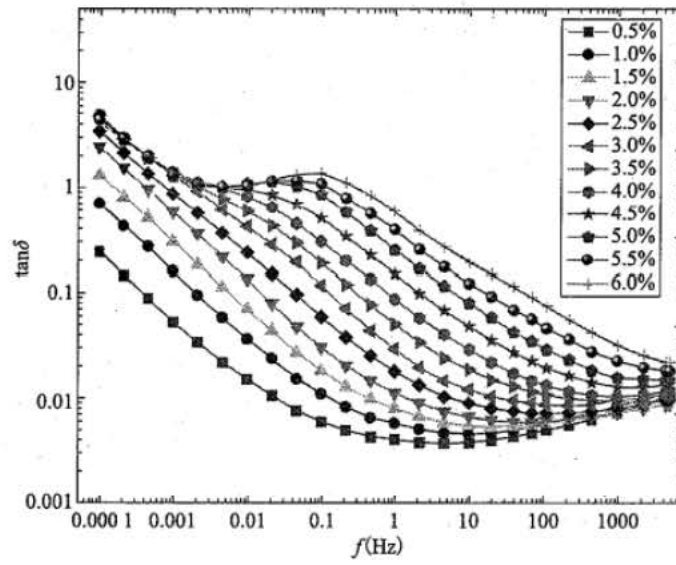


图 C.3 不同含水量绝缘纸（板）的  $\tan \delta$ - $f$  曲线

附录 D

(资料性)

设备绝缘纸中含水量估算方法

D.1 油-纸绝缘介质损耗因数随频率的关系曲线

电容型油纸绝缘设备油-纸绝缘系统的介质损耗因数  $\tan\delta$  与频率  $f$  之间呈典型的“S”形曲线，如图 D.1 所示。水分影响低频区域和高频区域。曲线的中间，斜率比较陡的部分体现了油的传导性。绝缘材料的几何形状确定了斜率较陡的左侧“突起”。

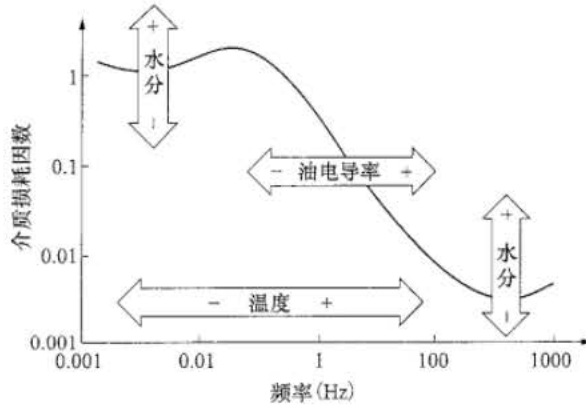
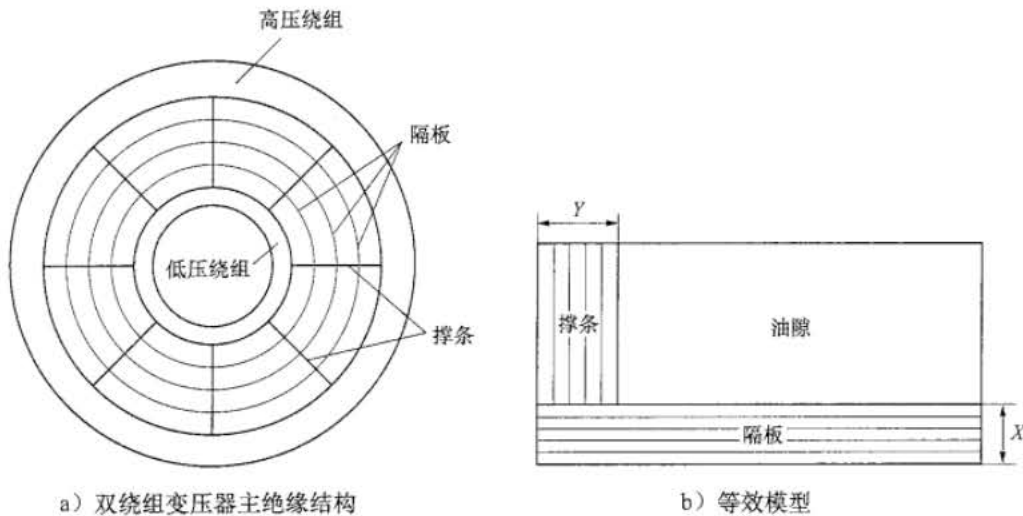


图 D.1 介质损耗因数与频率的关系曲线

D.2 设备绝缘纸含水量估算方法

电容型油纸绝缘设备内部绝缘由不同比例的绝缘油和绝缘纸（板）组成。以变压器为例，其内部油-纸绝缘结构由隔板、垫块、撑条、压板、匝间绝缘、层间绝缘、线段间绝缘、变压器油等构成。双绕组变压器主绝缘结构，可简化成只有一个油隙、一个隔板和一个撑条所组成的 XY 等效模型，如图 D.2 所示。



a) 双绕组变压器主绝缘结构

b) 等效模型

说明：

X ——油道中所有隔板所占的比例，即所有隔板厚度总和除以油道的总宽度；

Y ——所有撑条宽度总和除以油道的周长。

图 D.2 双绕组变压器主绝缘结构及其等效模型



XY 等效模型的复介电常数  $\varepsilon^*$  计算见公式 (D.1)。

$$\varepsilon^*(\omega, T) = \frac{Y}{\frac{1-X}{\varepsilon_1^*} + \frac{X}{\varepsilon_2^*}} + \frac{1-Y}{\frac{1-X}{\varepsilon_3^*} + \frac{X}{\varepsilon_1^*}} = Y\varepsilon_4^* + \frac{1-Y}{\frac{1-X}{\varepsilon_3^*} + \frac{X}{\varepsilon_4^*}} \quad (\text{D.1})$$

式中：

$T$  ——模型的温度；

$\varepsilon_1^*$ 、 $\varepsilon_2^*$ 、 $\varepsilon_3^*$  ——撑条、隔板和变压器油的复介电常数，其中， $\varepsilon_1^*$ 、 $\varepsilon_2^*$  近似等于  $\varepsilon_4^*$ ；

$\varepsilon_4^*$  ——绝缘纸（板）的复介电常数。

变压器油的复介电常数  $\varepsilon_3^*$  计算见公式 (D.2)。

$$\varepsilon_3^*(\omega, T) = 2.2 - j \frac{\sigma(T)}{\varepsilon_0 \omega} \quad (\text{D.2})$$

式中：

$\sigma(T)$  ——温度  $T$  时变压器油的电导率；

$\varepsilon_0$  ——真空的绝对介电常数。

### D.3 测量绝缘纸（板）含水量步骤

测量绝缘纸（板）含水量常采用曲线比对的方法，具体流程如图 D.3 所示，主要包括四个步骤：

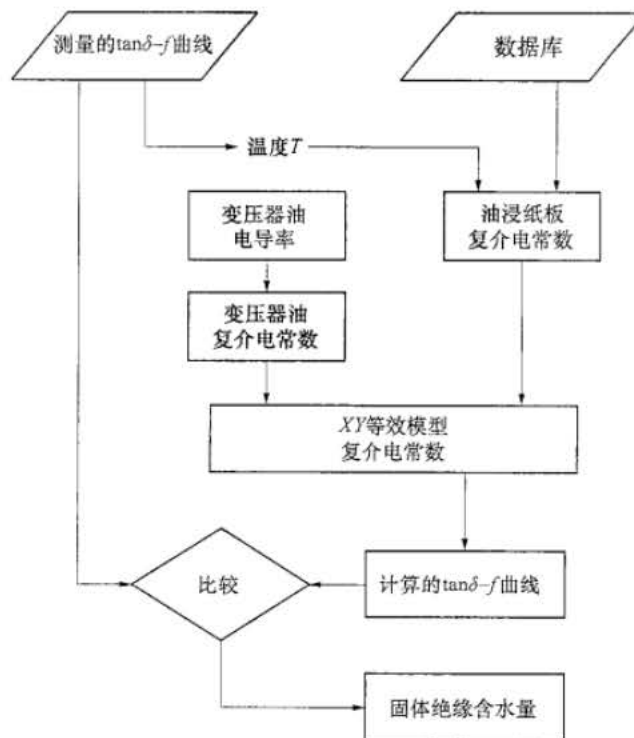


图 D.3 设备绝缘纸含水量估算流程

- 制备不同含水量的绝缘纸（板），测量各绝缘纸（板）不同温度下的复介电常数，建立不同含水量绝缘纸（板）在各温度时的复介电常数数据库。
- 测量待测试设备的  $\tan\delta-f$  曲线，记录测量时的温度  $T$ ，并根据绝缘纸（板）与油道的尺寸估算体积分数  $X$  和  $Y$ 。
- 从数据库中依次提取  $T$  温度下不同含水量绝缘纸（板）的复介电常数，并将油的电导率和绝缘纸（板）的复介电常数带入公式 (D.2)、公式 (D.1)，计算得到油-纸绝缘的  $\tan\delta-f$  介质响

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/566210151200010033>