



油浸式电力变压器 绝缘诊断技术

蔡金锭 邹 阳 刘庆珍/著

非外借

 科学出版社

油浸式电力变压器绝缘诊断技术

蔡金锭 邹 阳 刘庆珍 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书通过电介质极化响应理论系统地探讨油浸式电力变压器绝缘诊断方法。在油纸绝缘弛豫响应介电谱测量基础上,应用扩展德拜极化等效电路分析油纸绝缘回复电压、去极化电流响应和油纸绝缘极化等效电路参数的计算方法。然后通过回复电压和去极化电流响应特征量分别提出评估油纸绝缘状况的诊断方法和识别油浸式电力变压器微水含量的判别方法。在书中最后两章分别阐述了时域介电谱测试装置的机理及模拟仿真和实现基于回复电压特征量的油纸绝缘诊断应用系统等。书中除了理论分析外,还提供了实例诊断分析供读者参考。

本书可以作为高等院校电气工程及其自动化等专业高年级本科生和研究生课程的教材,也可以供电力工程技术人员学习和参考。

图书在版编目(CIP)数据

油浸式电力变压器绝缘诊断技术 / 蔡金锭, 邹阳, 刘庆珍著. —北京: 科学出版社, 2019.4

ISBN 978-7-03-060962-5

I. ①油… II. ①蔡… ②邹… ③刘… III. ①油浸变压器-绝缘-诊断技术 IV. ①TM411.07

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第059236号

责任编辑: 吴凡洁 / 责任校对: 王萌萌
责任印制: 吴兆东 / 封面设计: 无极书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年4月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2019年4月第一次印刷 印张: 18

字数: 350 000

定价: 118.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

油浸式电力变压器绝缘诊断是一门涉及基础理论和专业知识面较广的专业技术课程，它与工程应用密切相关。本书是作者和课题组成员多年在油浸式变压器油纸绝缘老化评估研究取得的成果。在内容方面由浅入深、先理论后实践，详细阐述了油浸式变压器时域介电谱的测量，提出应用时域介电谱特征量和扩展德拜(Debye)等效电路参数值诊断油纸绝缘老化状况的各种方法和判据。全书撰写过程中注重理论与实际应用相结合。为方便读者的学习和理解，在本书各章中都列举了油浸式电力变压器绝缘诊断应用示例，并附有大量的分析诊断数据、图表和曲线，力求使读者通过学习系统领会油浸式变压器绝缘诊断方法等。

全书共 10 章，详细地阐述了油纸绝缘时域介电谱的测量方法、油纸绝缘极化等效电路响应及其电路参数的计算、油纸绝缘老化状况与等效电路特征量的关系、油纸绝缘状况的回复电压和去极化电流等特征量的诊断方法、基于多时域特征量的油纸绝缘综合诊断法和油纸绝缘微水含量的评估，在第 9 章和第 10 章中分别阐述了时域介电谱测试装置组成和机理以及基于回复电压特征量的油纸绝缘诊断系统的应用等。在内容上除了阐述油纸绝缘诊断理论和方法外，还提供大量的故障分析实例、诊断数据和图表。从知识层次和内容结构上为读者构筑一个从理论到实践的学习平台，拓宽专业技术知识面，为今后从事相关工作奠定扎实的基础。

全书由福建省新能源发电与电能变换重点实验室、福州大学蔡金锭教授撰写和审核。书中部分内容由邹阳副教授和刘庆珍副教授参与撰写。张涛博士、李安娜和谢松等同志为书中第 9 章和第 10 章做了大量补充工作；福州大学电气学院研究生叶荣、张晓燕、陈群静、林晓宁、蔡超和高浩等为本书的编辑和校对付出辛勤劳动，在此向他们致以谢意，同时向书中所引用参考文献的所有作者深表谢意。

由于油浸式电力变压器绝缘诊断与测试技术涉及的理论知识面较广，限于作者的水平难免在书中出现遗漏和不妥之处，恳请读者谅解和批评。

作 者

2019 年 1 月于福州大学

目 录

前言	
第 1 章 油纸绝缘弛豫响应介电谱的测量	1
1.1 油纸绝缘劣化过程	1
1.2 油纸绝缘介质极化过程	3
1.2.1 电介质极化形式	3
1.2.2 电介质弛豫响应特性	4
1.3 时域介电谱的测量	7
1.3.1 回复电压极化谱测量	7
1.3.2 极化、去极化电流测量	11
1.4 频域介电谱测量法	14
1.5 影响回复电压测量的主要因素	16
1.6 极化电压对回复电压的影响	20
1.6.1 极化电压对回复电压最大值影响	22
1.6.2 极化电压对回复电压初始斜率影响	22
1.6.3 极化电压对峰值时间的影响	23
1.7 不同充电放电时间比对极化谱特征量的影响	23
1.7.1 充放电时间比对回复电压最大值的影响	25
1.7.2 充放电时间比对回复电压初始斜率影响	26
1.7.3 充放电时间比对回复电压峰值时间的影响	26
第 2 章 油纸绝缘极化等效电路及其响应	29
2.1 油纸绝缘极化等效电路模型	29
2.2 扩展德拜极化等效电路模型	33
2.3 扩展德拜等效电路的时域响应	35
2.4 扩展德拜混联电路时域响应	38
2.4.1 混联等效电路回复电压响应	38
2.4.2 改进的混联电路回复电压响应	41
2.5 扩展德拜等效电路极化、去极化电流响应	49
2.6 扩展德拜等效电路频域响应	51
第 3 章 油纸绝缘极化等效电路参数计算	53
3.1 极化等效电路参数计算方程式	53

3.2	极化等效电路支路数的确定	55
3.2.1	基于回复电压解谱的极化支路数判断	56
3.2.2	去极化电流解谱的极化支路数判断	63
3.3	基于改进粒子群算法的参数计算	69
3.3.1	建立求解非线性方程组的目标函数	69
3.3.2	标准粒子群优化算法	70
3.3.3	改进粒子群优化算法	71
3.4	应用改进粒子群算法求解扩展德拜电路参数	73
3.5	极化等效电路回复电压计算	74
3.5.1	单极化支路回复电压计算公式	75
3.5.2	多极化支路回复电压计算通式	77
3.5.3	等效电路中几何电阻 R_g 的求解	78
3.6	等效电路参数计算准确性分析	78
3.7	去极化电流三次微分的等效电路参数计算	79
3.8	极化等效电路参数计算示例	84
3.9	基于频域介电谱的混联等效电路参数计算	87
3.9.1	混联极化等效电路参数与频域介电谱关系	87
3.9.2	求解混联等效电路参数目标函数	89
3.9.3	混联等效电路参数计算示例	89
第4章	油纸绝缘状态与等效电路特征量关系	94
4.1	油纸绝缘状况实验测试分析	94
4.1.1	测试平台和实验操作过程	94
4.1.2	实验分析结果	96
4.2	油纸绝缘变压器回复电压极化谱分析	102
4.2.1	绝缘油处理前后测试结果分析	102
4.2.2	刚投运变压器测试结果分析	103
4.2.3	检修前后测试结果分析	105
4.3	油纸绝缘状况与弛豫机构的关系	107
4.3.1	油纸绝缘老化程度与极化支路数关系	107
4.3.2	油纸绝缘老化程度与弛豫时间常数关系	111
4.3.3	实例分析和验证	114
4.4	去极化电流的弛豫响应参数分析	116
4.4.1	换油处理前后变压器的弛豫参数分析	117
4.4.2	更换低压绕组前后变压器的弛豫参数分析	118
4.4.3	不同绝缘状况变压器的弛豫参数分析	120

第 5 章 基于回复电压特征量的油纸绝缘诊断	124
5.1 基于弛豫机构数的油纸绝缘诊断	124
5.1.1 弛豫子谱线与绝缘老化的关系	124
5.1.2 油纸绝缘诊断分析	125
5.2 等值弛豫极化强度老化评估法	131
5.2.1 电介质极化强度	131
5.2.2 油纸绝缘诊断分析	133
5.3 基于回复电压极化谱特征量的绝缘诊断	139
5.3.1 采用回复电压极化谱特征值的油纸绝缘诊断	139
5.3.2 油纸绝缘诊断分析	140
5.3.3 含有弛豫因子的油纸绝缘诊断	142
5.4 非标准回复电压极化谱的绝缘诊断	145
5.4.1 非标准极化谱的绝缘诊断方法	145
5.4.2 油纸绝缘诊断分析	146
第 6 章 基于去极化电流特征量的油纸绝缘诊断	149
6.1 去极化电流微分峰谷点的绝缘诊断	149
6.1.1 基于峰谷点数的绝缘劣化程度判据	149
6.1.2 油纸绝缘诊断分析	150
6.2 基于弛豫损耗与去极化能量的油纸绝缘诊断	153
6.2.1 弛豫损耗	153
6.2.2 去极化弛豫能量	154
6.2.3 油纸绝缘诊断分析	155
6.3 基于陷阱密度谱特征量的油纸绝缘诊断	157
6.3.1 去极化电流陷阱密度及其特征量	157
6.3.2 S_{gmax} 和 t_{gmax} 在油纸绝缘评估中应用	158
6.3.3 油纸绝缘诊断分析	162
6.4 含有弛豫线型因子的油纸绝缘诊断	165
6.4.1 极化支路数与绝缘老化的联系	166
6.4.2 弛豫线型因子与绝缘老化的联系	171
第 7 章 基于时域介电谱特征量的油纸绝缘综合诊断	173
7.1 基于模糊粗糙集理论的油纸绝缘诊断	173
7.1.1 油纸绝缘特征量的模糊划分	173
7.1.2 可辨识矩阵的属性约简	174
7.1.3 基于模糊粗糙集的油纸绝缘诊断	176
7.2 基于多元回归法的油纸绝缘诊断	183
7.2.1 回复电压时域特征量分析	183

7.2.2	融合多特征量的油纸绝缘诊断	186
7.3	融合多特征量的油纸绝缘定量诊断	190
7.3.1	油纸绝缘定量诊断方法和判据	191
7.3.2	绝缘诊断示例分析	194
7.4	油纸绝缘系统分类诊断	196
7.4.1	油和纸评估指标选取及绝缘等级划分	196
7.4.2	确定油纸绝缘状态分级的诊断规则	196
7.4.3	油纸绝缘状态分类分级诊断	200
第 8 章	油纸绝缘变压器微水含量的诊断方法	203
8.1	单特征量的油纸绝缘微水含量诊断	203
8.1.1	回复电压极化谱特征量与微水含量的关系	203
8.1.2	RVM 初始斜率与微水含量的关系	204
8.1.3	微水含量诊断分析	204
8.2	基于弛豫等效电路参数的微水含量诊断	206
8.2.1	大时间常数支路参数与微水含量的关系	207
8.2.2	等效电路电阻、电容与微水含量的关系	209
8.2.3	变压器的微水含量诊断分析	212
8.3	基于去极化电流解谱的微水含量诊断	213
8.3.1	去极化电流峰值点与微水含量的关系	213
8.3.2	微水含量诊断分析	214
8.4	基于去极化电量的微水含量判别	217
8.4.1	去极化电流弛豫电量	217
8.4.2	基于去极化电量的绝缘微水含量判别	217
8.4.3	诊断示例分析	218
8.5	油纸绝缘微水含量多指标综合诊断	219
8.5.1	油纸绝缘微水含量多指标熵权关联诊断	219
8.5.2	油纸绝缘微水含量诊断分析	222
8.5.3	油纸绝缘微水含量可拓诊断法	223
第 9 章	时域介电谱测试装置机理及其仿真	228
9.1	时域介电谱测试装置框架图	228
9.2	高压直流电源模块	229
9.3	开关控制模块	236
9.4	信号采集模块	240
9.5	仪器显示模块	242

第 10 章 基于回复电压特征量的绝缘诊断系统	251
10.1 回复电压测试诊断系统框图	251
10.2 诊断系统软件安装	252
10.3 诊断系统设置说明	252
10.4 RVM 系统程序安装和软件使用说明	254
10.4.1 系统登录	255
10.4.2 数据管理	256
10.5 RVM 诊断系统应用分析	260
10.6 报表管理	267
10.7 用户管理	268
10.8 系统设置	270
参考文献	273

第1章 油纸绝缘弛豫响应介电谱的测量

1.1 油纸绝缘劣化过程

油纸绝缘变压器在长期运行过程中，内部绝缘系统受到电、热、机械力及周围环境因素，如电磁场、大气压力、温度、湿度和脏污等的影响和作用下，使绝缘系统内部的绝缘油和绝缘纸等发生了一系列复杂的变化和反应(图 1-1)^[1]，导致绝缘系统内部材料产生老化产物，这些老化产物又会进一步促进绝缘介质的老化反应，加快绝缘介质的不断劣化。绝缘介质的老化反应严重影响了变压器内部绝缘系统的绝缘性能和机械性能，给变压器安全稳定运行埋下了隐患。

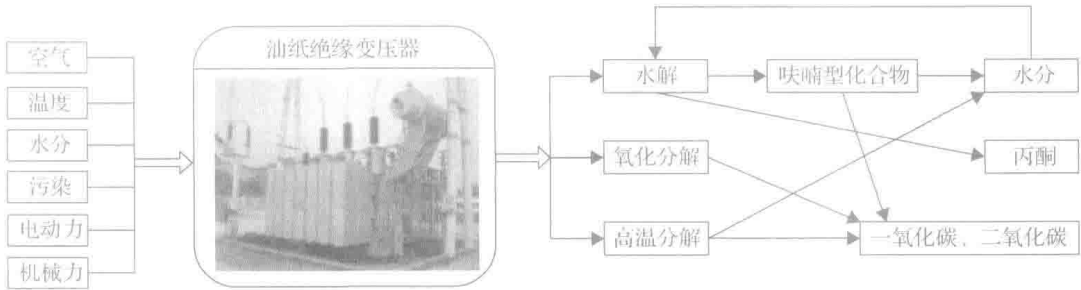


图 1-1 外界因素对变压器绝缘变化的影响

油纸绝缘变压器的老化主要可以分为两大方面：一是绝缘油的劣化；二是绝缘纸的老化。现分别简要介绍这两种绝缘介质的老化过程。

1. 绝缘油的劣化

变压器绝缘油的主要化学成分是由芳香烃、环烷烃和烷烃等碳氢化合物组成的一种混合物，它们所占的百分比是^[1]：烷烃一般在 50%以上，芳香烃和环烷烃分别不超过 15%和 40%。油纸绝缘变压器在正常运行情况下，绝缘油的温差在可控的范围内。因为它还没有达到油中混合物的降解温度，所以绝缘油的劣化基本上是油中溶解含有的氧气产生的氧化反应过程^[2]。随着油纸绝缘变压的运行年限不断增加，绝缘油不断地被氧化并产生醛、酮等酸性物质，同时还会生成一氧化碳、二氧化碳、氢气、甲烷等烃类气体。由于绝缘油劣化后产生的酸性物质易对设备运行时的散热系统造成阻碍，使变压器油纸绝缘系统内部温度升高。当温度上升到足够高的数值时，绝缘油中的碳氢化合物将会开始高温裂解，生成甲烷等

气体从而促进和加快绝缘油的劣化过程，并不断发生恶性循环。正如文献[3]描绘出的油纸绝缘系统中的油和纸发生劣化反应产生的产物相互作用，并受到外部各种因素的影响和作用产生一系列的循环变化过程，如图 1-2 所示^[4,5]。

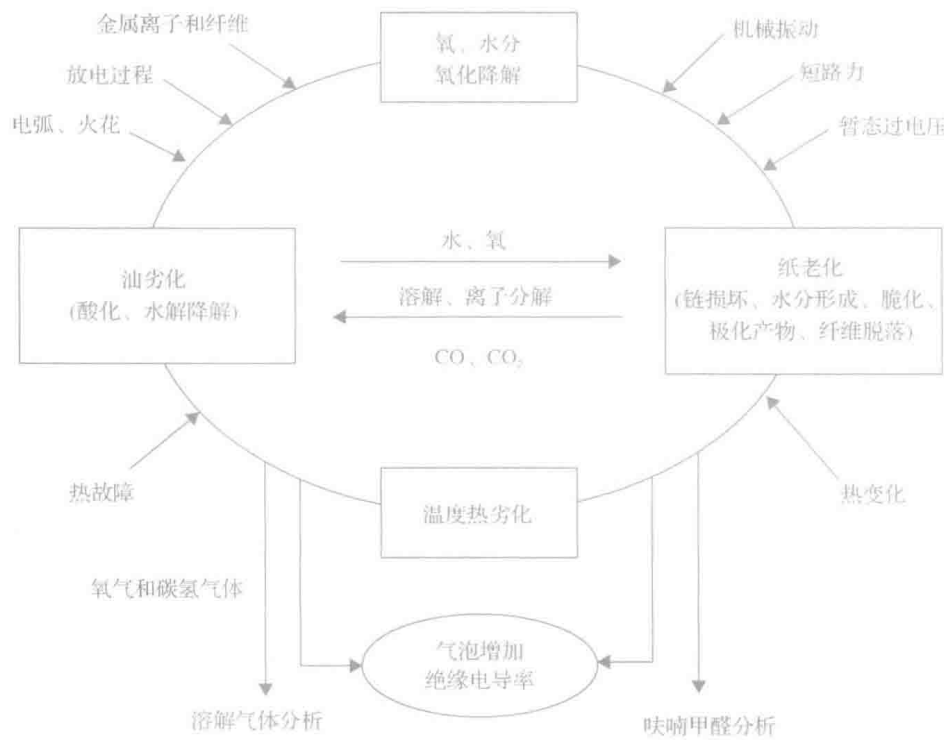


图 1-2 油纸绝缘系统老化机理

2. 绝缘纸的劣化^[5]

绝缘纸的主要成分是纤维素，它在绝缘纸的化学分析中占相当大的比重。纤维素是一种线状高分子碳氢化合物，通过苷键将葡萄糖基链结而构成的。 $(C_6H_{10}O_5)_n$ 是纤维素的化学分子式，其下标 n 表示该物质的聚合度 DP。当绝缘纸中的纤维素在温度、氧气和水作用下分别发生热降解、氧化和水降解，同时产生一些酸性物质，它会降低纤维素中苷键链结所需要的活化能，从而加快促进绝缘纸的老化进程^[6]。随着绝缘纸的纤维素分子式中苷键的不断断裂和分解，它的聚合度 DP 值也随之不断减少。比如投入运行的油纸绝缘变压器或绝缘良好的变压器，其聚合度 DP 值在 1000 以上，随着运行年限不断增加，聚合度 DP 值也随之下降。当聚合度 DP 值下降到 250 及以下时，则变压器绝缘严重劣化，寿命已进入晚期^[5-7]。此外，绝缘纸中的纤维素材料在高温裂解过程中，在绝缘油中含有与老化有关的特有物质——糠醛分子。它具有较好的溶解度且在油中不易挥发。根据《电力设备预防性试验规程》(DL/T596—1996)规定，油纸绝缘变压器油中糠醛含量若大于

或等于 4mg/L 时，油纸绝缘系统整体绝缘老化严重，寿命已进入晚期。

此外，水分对绝缘油、绝缘纸的老化反应影响也较大，它促进了绝缘油的劣化反应和绝缘纸的降解反应。油纸绝缘变压器的绝缘系统在劣化过程中也会产生水分，又参与和促进油与纸的不断劣化。绝缘纸的吸水性比绝缘油强得多，在常温下，绝缘油和绝缘纸中水分含量所占配比约为 1：1000，因此水分绝大部分存在于绝缘纸中，它加速了绝缘纸的水降解和氧化降解过程，从而加快老化速率。由此可见，电力变压器的绝缘纸劣化速度与微水含量存在较大关系。绝缘纸中的微水含量能够增大绝缘纸的电导率和介质损耗因素，使绝缘纸的电气强度快速降低，从影响绝缘纸的绝缘性能。

由此可见，水分在油纸绝缘系统的老化过程中扮演着一个重要的角色。为了防止外部水分渗透到油纸绝缘变压器的绝缘系统内部，在变压器安装、运行和检修等各阶段都必须重视对绝缘系统的干燥脱水和防潮处理等工作。

1.2 油纸绝缘介质极化过程

1.2.1 电介质极化形式

绝缘电介质时域响应实质上是介质的极化与去极化的弛豫响应过程。由于绝缘电介质在外电场的持续作用下，绝缘系统的电介质产生极化反应，内部产生偶极矩，介质界面产生束缚电荷^[7,8]。根据电介质弛豫响应的特点，电介质极化过程可以分为四种形式^[8-16]：电子位移极化、离子位移极化、偶极子转向极化和界面极化。

油纸绝缘变压器内部绝缘系统主要是由绝缘油、绝缘纸、油隙、隔板和撑条等组成的，如图 1-3 所示。它属于复合介质，其极化并不只包含一种类型，而是含有多种极化形式。

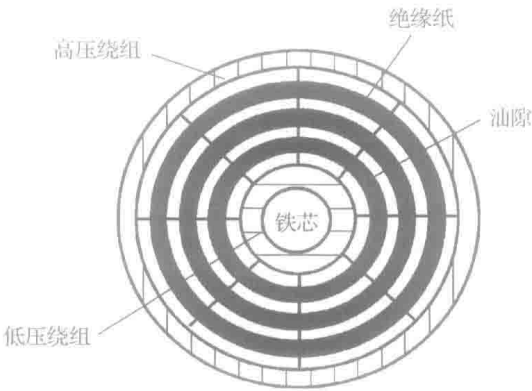


图 1-3 油纸绝缘变压器绝缘系统结构

由图 1-3 可见，电力变压器的主要绝缘材料是绝缘纸和绝缘油两种材料。其中绝缘油在外加电压作用下以电子极化为主，只出现微小的弱极性分子，即固有偶极矩；绝缘纸是固体绝缘，它的成分主要是纤维素。纤维素分子在电场作用下时以偶极子转向极化为主^[16]。由于绝缘油、绝缘纸和部分杂质等不同极化特性的物质同时存在，它们在电场作用下在这些物质的分界面上形成复杂的界面极化过程。因此在油纸绝缘系统中，绝缘油的介质极化以电子极化、各类界面极化和绝缘纸的极化以转向极化为主^[5]。随着绝缘老化的不断加深，介质微观结构随之发生变化，产生的新物质使得油纸绝缘系统内部极化特性变得更为复杂。

当油纸绝缘老化时将会生成醛、醇、酮、有机酸、水分、二氧化碳、一氧化碳、氢气以及甲烷、乙烷、乙烯、乙炔等低分子烃类气体。为了分析油纸绝缘老化对其极化特性的影响，表 1-1 列出油纸及其老化产物在不同温度情况下的介电常数，如表 1-1 所示^[8,12]。

表 1-1 油纸及其老化产物的介电常数

参数	水	绝缘纸	绝缘油	甲酸	糠醛	甲醇	乙醇	丙酮	焦炭
温度/℃	20	20	20	16	20	25	25	20	—
介电常数	81	4~6.5	2.2	58.5	41.9	32.6	24.3	21.45	1.1~2.2

由表 1-1 可以看出，绝缘油、绝缘纸和焦炭的相对介电常数都远小于水、糠醛、甲酸、醇和丙酮等老化产物，而二氧化碳、一氧化碳和氢气等气体的极化强度也很小。因此，水、糠醛、甲酸、醇和丙酮等老化产物将是引起油纸绝缘介质极化特性改变的主要物质，最终影响介质弛豫响应建立的时间。

1.2.2 电介质弛豫响应特性

电介质极化响应可根据外接激励源的不同，分为时域介质响应和频域介质响应。时域介质响应是以阶跃函数为激励信号，而频域介质响应以周期函数变化的正弦波为激励。

1. 时域响应基本公式

电介质由于受到外加恒定电场的作用，其内部的电荷发生偶极子转向和弹性位移，最终在电介质表面积聚。如果将外电场 E 施加到各向同性的介质材料时，根据 Maxwell 定理，这时介质中会同时产生两种电流，即传导电流和位移电流。那么介质中电流密度 $j(t)$ 是传导电流密度和位移电流密度两者的总和，如式 (1-1) 所示^[10,11]：

$$j(t) = \sigma E(t) + \frac{dD(t)}{dt} \quad (1-1)$$

式中, σ 是电介质的直流电导率; $D(t)$ 表示电位移。各向同性介质电位移与绝缘材料的极化强度 $P(t)$ 有关。电位移 $D(t)$ 与极化强度 $P(t)$ 之间的关系如式(1-2)所示^[8]:

$$D(t) = \varepsilon E(t) + P(t) = \varepsilon_0 \varepsilon_r E(t) + P(t) \quad (1-2)$$

式中, ε_r 、 ε_0 、 ε 分别表示相对介电常数、真空介电常数和介质的介电常数。

电介质在极化过程中, 由于瞬时极化所需要的时间极短, 则瞬时极化强度可以忽略不计, 而偶极子转向极化和界面极化等要经过相当长的时间才能达到稳定状态。所以极化强度可以近似用式(1-3)表示^[8,12]:

$$P = P_r(t) = \varepsilon_0 \int_0^t f(\tau) E(t - \tau) d\tau \quad (1-3)$$

式中, ε_0 为真空介电常数; $P_r(t)$ 是弛豫极化强度; τ 是与时间 t 有关的中间变量; $f(\tau)$ 是介质响应函数, 且是单调递减函数, 它描述在外加电场作用下绝缘介质的极化行为^[15]; $E(t)$ 是介质中的恒定电场强度。

若将式(1-3)代入式(1-2)后, 然后再代入式(1-1), 对电位移 $D(t)$ 微分后, 得到各向同性介质中的电流密度 $j(t)$ 表达式

$$\begin{aligned} j(t) &= \sigma E(t) + \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{d}{dt} E(t) + \varepsilon_0 \frac{d}{dt} \left\{ \int_0^t f(t - \tau) E(\tau) d\tau \right\} \\ &= \sigma E(t) + \varepsilon_0 (\varepsilon_r \delta(t) + f(t)) E(t) \end{aligned} \quad (1-4)$$

式中, $\delta(t)$ 为冲激函数。由式(1-4)可见, 总的电流密度由三部分组成: 第一部分 $\sigma E(t)$ 是由材料电导产生的电流密度, 第二部分 $\varepsilon_0 \varepsilon_r \delta(t) E(t)$ 是介质在快速极化过程产生的瞬时电流密度, 第三部分 $\varepsilon_0 f(t) E(t)$ 是介质缓慢极化过程中产生的电流密度。

在式(1-4)中, 介质电导率、相对介电常数和介质响应函数等特征量难以直接单独测量获得。因此, 一般需要通过测量其他相关特征量来研究介质的极化特性。例如, 根据不同的测试方法, 分别测量出绝缘材料的极化电流、去极化电流和回复电压等宏观特征量, 然后再透过这些宏观特征量与介质参数之间的关系, 探讨如何应用这些特征量判断油纸绝缘系统的老化状况。

2. 频域极化响应基本公式

对于各向同性介质材料施加频率可调的交流电压, 在交变电场 $E(\omega)$ 的作用

下,产生的电流密度 $j(\omega)$ 通过傅里叶变换等运算得到以下公式^[13,17]:

$$j(\omega) = \sigma_0 E(\omega) + i\omega D(\omega) \quad (1-5)$$

根据电位移公式(1-2),经过傅里叶变换可得到频域电位移,如式(1-6):

$$D(\omega) = \varepsilon_0 E + P(\omega) \quad (1-6)$$

式中,极化强度 $P(\omega)$ 傅里叶变换后的关系如下:

$$P(\omega) = \varepsilon_0 \chi(\omega) E(\omega) \quad (1-7)$$

其中, $\chi(\omega)$ 定义为频域电极化率。

将式(1-7)代入式(1-6),然后再代入式(1-5),经简化后再合并可得频域电流密度式为^[5,17]

$$j(\omega) = i\omega\varepsilon_0 \{ \varepsilon'(\omega) - i\varepsilon''(\omega) \} E(\omega) \quad (1-8)$$

式中,介质材料动态相对介电常数用 $\varepsilon_r(\omega)$ 表示, ε' 和 ε'' 分别表示相对介电常数 $\varepsilon_r(\omega)$ 的实部和虚部。

在频域极化过程中,电导率 σ 、动态介电常数 $\varepsilon_r(\omega)$ 和电极化率 $\chi(\omega)$ 是表征绝缘材料介电特性的重要参数^[17]。然而,这些参数值同样很难直接通过测量获得的。因此,在频域测量时需要测试与这些参数相关的特征量,如介质损耗因素和介质材料的复电容值等。

总而言之,不管是通过时域还是频域测试获得的方程都可以通过傅里叶变换相互转换。对于时域和频域的状态方程,都是假设绝缘材料是各向同性均匀线性电介质。因此,使用时域或频域测量获得的信息它们之间都是等价的。

3. 介质响应特性

油纸变压器的绝缘介质主要由绝缘油和绝缘纸组成的,它们的介质响应特性存在一定的差异。当绝缘系统受到电场作用时,电荷将在两种材料的交界面上积聚,产生界面极化现象。因此在油纸复合绝缘材料中,介质的极化以绝缘纸的取向极化、绝缘油的电子极化和油纸界面的极化为主。

在文献[14]中,Bognar、Csepes 等学者在实验中选取两种不同绝缘状态的新、旧油浸纸进行介质极化实验,并对它们的极化特性进行比较,结果如图 1-4 所示。图 1-4 中横坐标表示频率或时间(单位:Hz 或 s),纵坐标表示微观极化率与时间的变化率, da 为微观极化率。

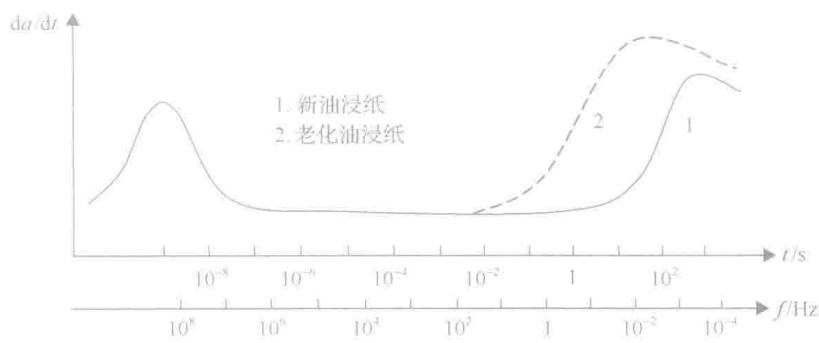


图 1-4 新、旧油纸微观极化率的变化率曲线

由图 1-4 可见，新旧两种不同绝缘状况的油浸纸，它们的极化特性各不相同。在低频段(频率小于 10^2Hz 之后)，随着频率的减小，两者的微观极化率的变化率出现非常明显的差异。这是由于，新旧两种不同绝缘状况的油浸纸在极化过程中，低频段绝缘老化的油纸内部老化产物及其响应的介质微观极化率比新的油纸的变化速率大、达到峰值的时间相对较快；在高频段(频率大于 10^2Hz)，两者的极化特性曲线是重合的，不存在任何差异。由此可见，应用介质极化响应特征量评估油纸绝缘变压器的绝缘状态，在高频段无法区分出新、旧变压器绝缘特性。它需要在低频缓慢极化作用下，才能有效区分出变压器不同绝缘状况的极化特性。

1.3 时域介电谱的测量

时域介电谱测量法是一种以电介质的极化特性为基础的测试方法，是一种无损电气测试法。时域介电谱测量法包括：回复电压测量方法(RVM)和极化、去极化电流测量方法(PDC)。这种测试方法是在油纸绝缘设备的两个极性端外加直流恒定电源，使绝缘系统内部发生介质极化响应，然后通过测试仪器测量绝缘系统的极化特征量。现在分别阐述回复电压测量法和极化、去极化电流这两种测量方法。

1.3.1 回复电压极化谱测量

1. 回复电压法

回复电压的测量是以电介质极化理论为基础，对油纸绝缘系统介质外加直流恒定电压 U_0 ，在外电场作用下，介质内部偶极子以电场的方向作定向排序进行有规律的定向移动，介质发生极化现象，此时表面出现束缚电荷。当极化至一定时间后，撤去外加电压并将绝缘系统两端短接，则介质中的偶极子将慢慢转移到原本的任意方向，成为无序排列，内部释放出部分束缚电荷，称此阶段为介质去极化过程。经过一段时间的短路后，将绝缘系统两端的短接线断开，让系统处在开

路状态。此时介质内部仍继续发生去极化过程，绝缘内部未完全释放的自由电荷和原本受极化约束的束缚电荷变为自由电荷并形成一电位势，即在两极间产生一个电压，称该电压为回复电压^[15]。

用于现场测试的回复电压法是在单次测量的基础上，通过多次循环测量获得的多个回复电压值。回复电压单次测量的过程如图 1-5 所示，它包括四个阶段：充电（极化）、放电（松弛）、开路测量、松弛。通过多次循环测量，逐次改变充电时间极化，在不同充电时间 t_c 下测试出回复电压值的变化，并提取各次循环测量的回复初始斜率、峰值电压、峰值测量时间、主时间常数。最后得到不同充放电时间下的回复电压最大值与充电时间的变化曲线，即称这条曲线为回复电压极化谱。

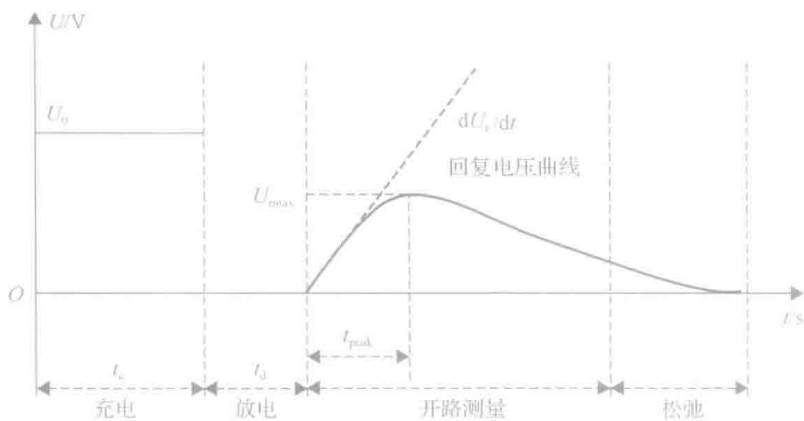


图 1-5 回复电压测试过程

从图 1-5 可以看出，在单次回复电压的测量过程中极化和松弛过程同样是基于介质极化的响应过程。当经过 t_d 时间的短路后，在 $t = t_c + t_d$ 时刻开路，然后进行回复电压测量。此时系统内部还将处在缓慢极化过程，自由电荷仍未完全松弛。但这时系统内部去极化电流已为零。因此，根据式 (1-4) 电流密度的表达可得到回复电压 U_r 的关系式^[5,12]：

$$\sigma U_r(t) + \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{dU_r(t)}{dt} + \varepsilon_0 U_0 \frac{d}{dt} \int_0^{t_c} f(t-\tau) d\tau + \varepsilon_0 \frac{d}{dt} \int_{t_c+t_d}^t f(t-\tau) U_r(\tau) d\tau = 0 \quad (1-9)$$

由式 (1-9) 可见，回复电压 U_r 的测量值是绝缘介质极化特性 (σ 、 ε_r 、 $f(t)$) 的宏观反映。通过测试不同充放电时间下的回复电压极化谱，即可以从回复电压极化谱及其特征量获取电导率、相对介电常数和随老时间变化的介质响应函数等信息。

在回复电压极化谱测试中，若获得的回复电压极化谱随着充电时间先增大而后随时间减小，且极化谱只有唯一峰值，则称曲线为标准型极化谱。若测试时受到外界环境因素（如温度、残余电荷和绝缘老化产物特性效应）的影响，造成测量