



西安交通大学 本科“十二五”规划教材
“985”工程三期重点建设实验系列教材

电气绝缘实验与分析

于钦学 任文娥 编著



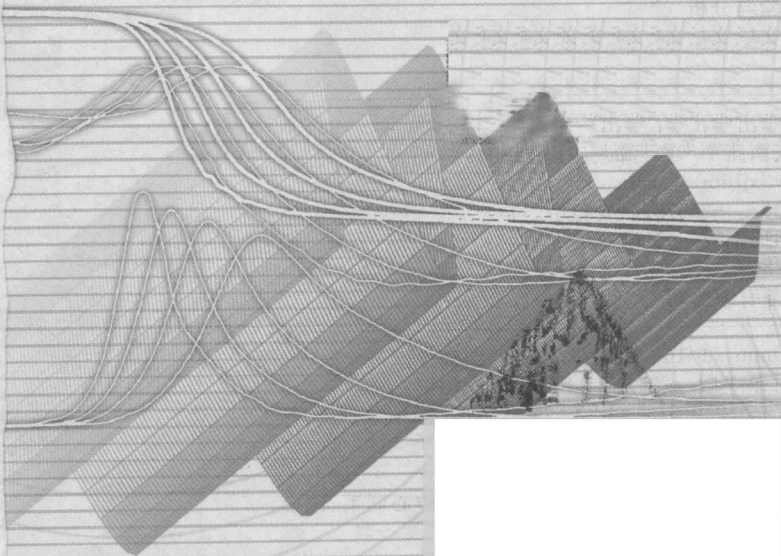
西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS



西安交通大学 本科“十二五”规划教材
“985”工程三期重点建设实验系列教材

电气绝缘实验与分析

于钦学 任文娥 编著



 西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书主要包括:介电参数的测试、局部放电的测量、介质的热刺激电流原理及其应用、热分析技术及其应用、导热系数测量技术、热膨胀系数测量技术、红外热像仪及其应用、材料的力学性能试验、转矩流变仪及其应用、界面张力测量技术、粉体粒度的测量与分析、纳米粒子和Zeta电位的测量、液体介质理化性能参数的测量、光谱法及其应用、气相色谱法及其应用、材料显微结构分析技术。本书重点论述了测量的基本原理、仪器结构、实验方法和分析技术。

本书可作为本科生和研究生的教材,也可作为科研院校及从事电工、电子产品设计、制造试验以及电力系统运行相关人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电气绝缘实验与分析/于钦学,任文娥编著. —西安:
西安交通大学出版社,2013.11
西安交通大学“十二五”实验系列教材
ISBN 978-7-5605-5731-1

I. ①电… II. ①于… ②任… III. ①电气设备-绝
缘实验(电)-高等学校-教材 IV. ①TM210.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 226065 号

书 名 电气绝缘实验与分析
编 著 于钦学 任文娥
责任编辑 李慧娜

出版发行 西安交通大学出版社
(西安市兴庆南路 10 号 邮政编码 710049)
网 址 <http://www.xjtupress.com>
电 话 (029)82668357 82667874(发行中心)
(029)82668315 82669096(总编办)
传 真 (029)82668280
印 刷 西安明瑞印务有限公司

开 本 727mm×960mm 1/16 印张 13 字数 237 千字
版次印次 2013 年 11 月第 1 版 2013 年 11 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5605-5731-1/TM·87
定 价 24.00 元

读者购书、书店添货、如发现印装质量问题,请与本社发行中心联系、调换。

订购热线:(029)82665248 (029)82665249

投稿热线:(029)82668254 QQ:8377981

读者信箱:lg_book@163.com

版权所有 侵权必究

Foreword 前言

本书是西安交通大学本科“十二五”规划实验系列教材,是为“电气绝缘技术训练”实验课程教学而编写的。本书2007年完成初稿,作为讲义已经有六届本科生使用过。

电气绝缘材料的发展往往带来电力设备的更新换代,高性能的电力设备是电力系统高效、安全和环保运行的基础。在电能产生、变换、传输和应用的各个环节,毫无疑问均涉及到电气绝缘材料性能(电气、耐温、机械等)的优劣;新型电气绝缘材料的开发与应用也是为了获得能满足电力设备所需要的高性能材料。因此,掌握电气绝缘实验与分析技术对于新型绝缘材料和电力设备的开发,以及电力设备的状态监测与寿命管理具有重要意义。

电力设备的安全可靠运行及其使用寿命与电气绝缘材料的性能和变化密切相关。因此,无论在科学研究还是工程技术应用与开发中,需要采用有效的实验方法,准确检测电气绝缘材料的各种宏观与微观性能参数,结合对材料的微观和介观结构进行分析,加深人们对材料性能及其变化规律的认识。

电工产品在研究、设计、制造和运行中,对原材料、半成品、成品是否合格,都要进行一系列电、热、机械性能试验。对所用的原材料、工艺过程、半成品、成品性能进行优劣的鉴定,达到选用合适的材料、生产出优良产品的目的。

本书主要包括:电气绝缘材料的电学性能、热学性能、力学性能、理化性能、光谱分析、气相色谱分析、微观结构分析以及材料结构与性能关系的表征等方面的测试技术。每章在介绍各种被测参数物理概念的基础上,重点论述测量原理和方法、所用测量仪器设备的用途、技术参数、操作步骤,以及如何提高测量的灵敏度和准确性等。

本书共有16章,由于钦学和任文娥编写完成,其中于钦学编写第1,2,3,5,6,7,8,9,13,16章,并负责全书的统编,任文娥编写第4,10,11,12,14,15章。

本书由西安交通大学钟力生教授主审,他在本书编写过程中提出了许多宝贵

意见,谨致以衷心感谢!

在本书的编写过程中,查阅参考了许多相关文献资料,在此谨向这些作者以及在本书编写过程中给予帮助的电气绝缘研究中心的同事和研究生表示衷心的感谢!

限于编者的水平及时间仓促,本书存在的不妥之处,敬请批评指正。

编者

2013年8月于西安

Contents 目录

第 1 章 介电参数的测试	(001)
1.1 相对介电常数和损耗因数的测量	(001)
1.2 绝缘电阻与电阻率的测量	(014)
1.3 电气强度试验	(016)
思考题.....	(019)
第 2 章 局部放电的测量	(020)
2.1 概 述	(020)
2.2 数字式局部放电测量仪 LDS-6	(023)
2.3 SuperB 紫外成像仪在电气设备电晕放电检测中的应用	(027)
思考题.....	(028)
第 3 章 介质的热刺激电流原理及其应用	(029)
3.1 概 述	(029)
3.2 热刺激电流测试仪	(033)
思考题.....	(034)
第 4 章 热分析技术及其应用	(035)
4.1 概 述	(035)
4.2 DSC822° 型热差示扫描量热仪	(040)
4.3 TGA/SDTA851 型热重分析仪	(053)
4.4 动态力学基本理论	(060)
4.5 DMA-861 型动态力学分析仪	(065)
思考题.....	(067)
第 5 章 导热系数测量技术	(068)
5.1 概 述	(068)
5.2 闪光导热仪 LFA 原理及测试技术	(071)
思考题.....	(078)
第 6 章 热膨胀系数测量技术	(079)
6.1 概 述	(079)
6.2 L75V 热膨胀仪	(081)
思考题.....	(085)

第 7 章 红外热像仪及其应用	(086)
7.1 概 述	(086)
7.2 红外热像仪 Ti55	(089)
思考题	(090)
第 8 章 材料的力学性能试验	(091)
8.1 概 述	(091)
8.2 拉伸试验	(093)
8.3 弯曲试验	(096)
8.4 冲击试验	(098)
思考题	(100)
第 9 章 转矩流变仪及其应用	(101)
9.1 概 述	(101)
9.2 转矩流变仪	(103)
思考题	(107)
第 10 章 界面张力测量技术	(108)
10.1 概 述	(108)
10.2 K100C 型表面张力测量仪	(112)
思考题	(114)
第 11 章 粉体粒度的测量与分析	(115)
11.1 概 述	(115)
11.2 SA-CP3 型粒度分析仪	(124)
思考题	(127)
第 12 章 纳米粒子和 Zeta 电位的测量	(128)
12.1 概 述	(128)
12.2 纳米粒子测量原理	(130)
12.3 Zeta 电位分析仪	(136)
思考题	(138)
第 13 章 液体介质理化性能参数的测量	(139)
13.1 粘度计	(139)
13.2 831 型水分滴定仪	(141)
13.3 848 电位滴定仪	(144)
13.4 PLD-0201 油液颗粒度计数仪	(146)
13.5 油流动带电度的微静电测量原理和方法	(151)
思考题	(155)

第 14 章 光谱法及其应用	(156)
14.1 概 述	(156)
14.2 红外光谱法原理及其应用	(158)
14.3 IRpresitge - 21 型红外光谱仪	(164)
14.4 紫外/可见/近红外光谱法及其原理	(165)
14.5 UV - 3600 型紫外/可见/近红外分光光度计	(170)
思考题	(173)
第 15 章 气相色谱法及其应用	(174)
15.1 概 述	(174)
15.2 气相色谱的分离过程和常用术语	(180)
15.3 气相色谱分析技术	(183)
15.4 变压器油的气相色谱分析	(184)
15.5 6890N 型气相色谱仪	(186)
思考题	(187)
第 16 章 材料显微结构分析技术	(188)
16.1 概 述	(188)
16.2 BX51 - P 偏光显微镜	(190)
16.3 扫描电子显微镜 VE9800	(194)
思考题	(197)
参考文献	(198)

第1章 介电参数的测试

1.1 相对介电常数和损耗因数的测量

1. 相对介电常数和损耗因数

介质损耗因数(亦称介质损耗角正切)和相对介电常数(亦称电容率)是绝缘体的两个主要特性参数,也是绝缘材料的本征参数,它们与绝缘体的几何形状无关。相对介电常数是描述电介质极化的宏观参数,在不同的应用场合下,要求也不相同,用于储能元器件如电容器时,要求相对介电常数要大,使得单位体积内储存的能量比较大;但用于一般电气设备时,要求相对介电常数要小,以减小流过的容性电流即无功分量。在一般电气设备中使用的电绝缘体,都要求损耗因数小,因为损耗因数大,不但消耗浪费电能,而且使绝缘体发热,容易造成电气设备绝缘的老化或损坏,因此为检验评估电气设备、元器件以及绝缘材料的性能,就必须对相对介电常数和损耗因数进行测量。另外,通过相对介电常数和损耗因数的测量,可以判断电气设备中绝缘的老化程度、含湿量、是否有杂质、是否有放电等。

定义相对介电常数 ϵ_r 是在同一电极结构中电极周围充满介质时的电容 C_x 与电极周围充满真空时的电容 C_0 之比,即

$$\epsilon_r = \frac{C_x}{C_0} \quad (1.1)$$

ϵ_r 叫相对介电常数,是大于 1 的纯数(无量纲),而电介质与绝缘体的绝对介电常数为 $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$, 单位 F/m。 $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ F/m 为电力转换常数,在工程中,绝缘材料通常使用相对介电常数 ϵ_r 。

介质的等效电路如图 1.1 所示。



图 1.1 介质试样的等效电路

定义介质损耗因数是在交流电压下试样所消耗的有功功率与无功功率的比值。

当等效电路为并联时,

$$\tan\delta = \frac{P_r}{P_c} = \frac{u I_r}{u I_c} = \frac{1}{\omega C_p R_p} \quad (1.2)$$

当等效电路为串联时,

$$\tan\delta = \frac{P_r}{P_c} = \frac{u_r I}{u_c I} = \omega C_s R_s \quad (1.3)$$

式中 C_s 、 C_p ——分别为串联、并联等效阻抗中的电容, pF;

R_s 、 R_p ——分别为串联、并联等效阻抗中的电阻, Ω ;

ω ——电源角频率, rad/s。

无论用何种等效电路, 损耗因数完全相等, 可以得出 $R_p = (1 + \frac{1}{\tan^2\delta})R_s$ 一般情况下 $C_x = C_p$, 只有在 $\tan\delta < 1$ 时, $C_x = C_p \approx C_s$ 。

2. 影响相对介电常数与介质损耗因数的因素

影响介质相对介电常数与损耗因数的因素有: 电压幅值、频率、温度、湿度等。

极性介质的相对介电常数与损耗因数随频率和温度的变化如图 1.2、1.3 所示; 非极性介质的相对介电常数与介质损耗因数随频率的变化如图 1.4 所示; 介质损耗因数随电场强度的变化如图 1.5 所示。

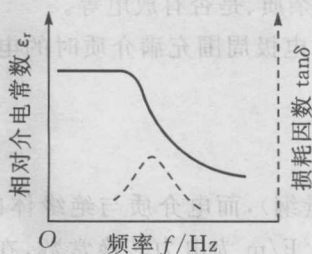


图 1.2 ϵ_r 、 $\tan\delta$ 与频率的关系

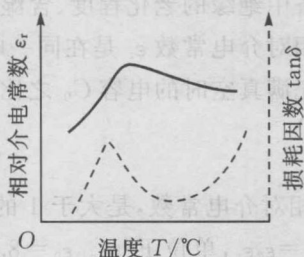


图 1.3 ϵ_r 、 $\tan\delta$ 与温度的关系

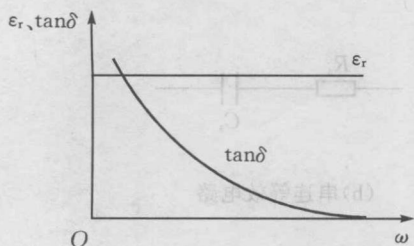


图 1.4 ϵ_r 、 $\tan\delta$ 与 ω 的关系

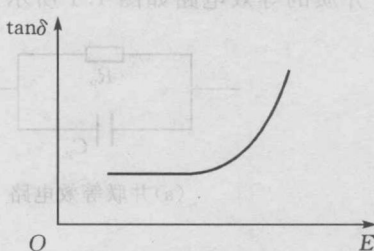


图 1.5 损耗因数与电场强度的关系

3. 电桥法测量相对介电常数和损耗因数

(1) 测量原理

在测量频率不是很高时(一般低于几兆赫兹)都可用电桥法来测 ϵ 及 $\tan\delta$ 。常用电桥有阻容电桥(四个桥臂都是由电阻电容组成的电桥)和变压器电桥(亦称电感比例臂电桥,电桥中两个桥臂由两个电感线圈组成)。

阻容电桥主要分为高压西林电桥和低压工频电桥;变压器电桥分为电流比变压器电桥和电压比变压器电桥。无论使用哪种电桥,都是应用电桥平衡原理来测量 ϵ 和 $\tan\delta$,电桥的基本电路图如图 1.6 所示。

电桥由四个桥臂组成: Z_x 为要测量的试样, Z_n 为标准无损耗电容, Z_3 和 Z_4 为另外两个桥臂,由可调节的阻容(阻容电桥)或电感线圈(变压器电桥)组成,图中 A 为电流零指示器,由放大器和电流表组成。

测量 ϵ 和 $\tan\delta$ 主要应用电桥的平衡原理,调节电桥中的 Z_3 和 Z_4 ,使电桥达到平衡,即在灵敏度最大时电流零指示器为零。当电桥平衡时,应满足

$$Z_x Z_4 = Z_n Z_3 \quad (1.4)$$

解此方程,等号两边的实部和虚部分别相等,就可以得到损耗因数和介电常数的表达式,不同的电桥得到的公式不同。下面介绍绝缘实验室的三台高精度电桥。

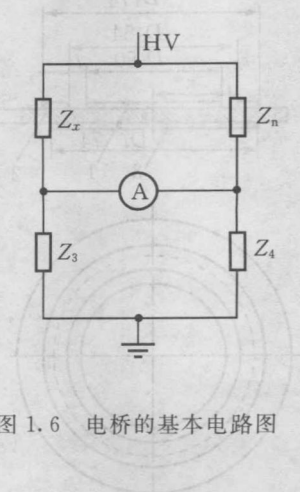


图 1.6 电桥的基本电路图

(2) 2821 型精密 ϵ 和 $\tan\delta$ 测量电桥

① 主要用途与性能参数

2821 型电桥是一台高精度高压交流阻容电桥,采用全屏蔽以及辅助电源结构,半自动平衡电桥。用于材料在 50Hz 下的介电常数和损耗因数 $\tan\delta$ 的精确测量。在电桥上可以直接读出损耗因数 $\tan\delta$,而试样电容 C_x 则为 100 除以电桥电容读数。主要性能指标如表 1.1 所示。

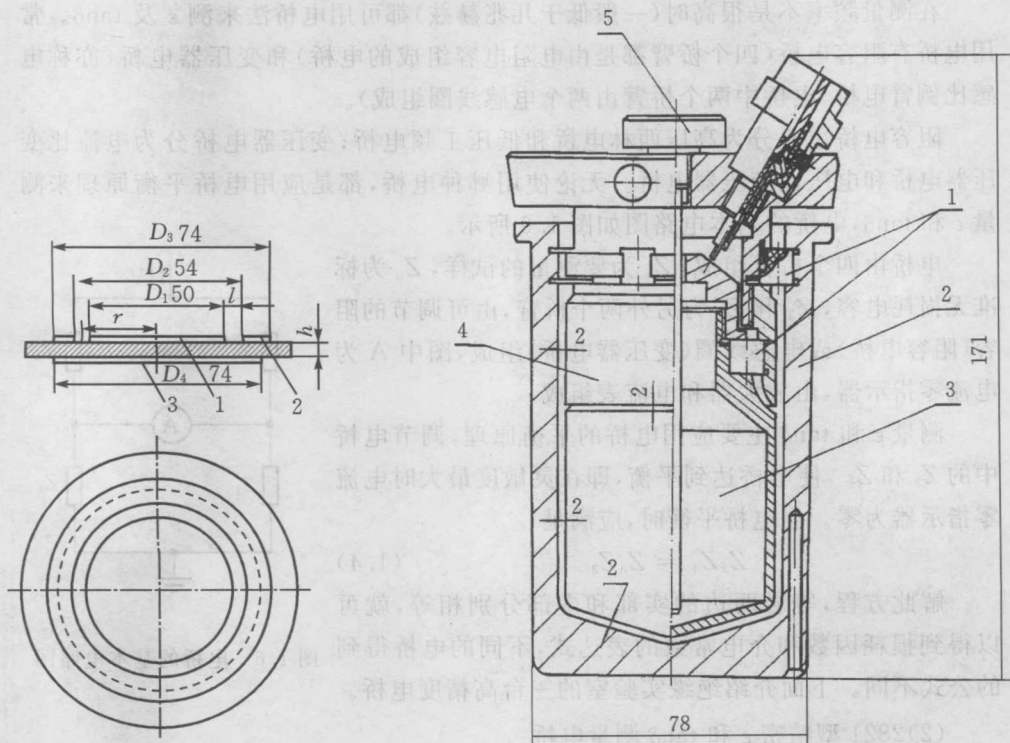
表 1.1 2821 电桥的性能指标

电容 C_x 测量范围	9~10000pF
介质损耗角正切 $\tan\delta$	$1.0 \times 10^{-5} \sim 1.0$
频率范围	50Hz
电压范围	0~2kV

② 试样与电极

固体试样的厚度一般规定不超过 4mm,方形板材采用边长为 100mm,圆形板材采用直径为 100mm,管状试样长度为 100mm。

电桥系统使用三电极系统(固体、液体、粉体三种)。图 1.7(a)为平板形试样的三电极系统,图 1.7(b)为液体试样三电极系统。



(a) 平板电极系统

(b) 液体圆锥电极系统

- 1—被保护电极(或称测量电极); 2—保护电极; 3—不保护电极;
 1—绝缘; 2—高压电极; 3—测量电极; 4—保护电极; 5—温度

图 1.7 电极系统

当电极为平板时,相对介电常数为

$$\epsilon_r = 0.144 \frac{d}{D_e^2} C_x \quad (1.5)$$

式中 d ——试样厚度, m;

D_e ——测量电极的有效直径, m; $D_e = D + g = 50 \text{ mm} + 2 \text{ mm} = 0.052 \text{ m}$;

C_x ——试样电容, 100 除以电桥上的电容读数, pF。

当电极为液体圆锥电极时,相对介电常数为 $\epsilon_r = \frac{C_x}{C_0}$, C_0 为电极周围充满真空时的电容, 2821 电桥的 C_0 为 100/1.526。

不论使用何种电极,试样的损耗因数可以从电桥上直接读取。

电极材料与装置必须满足以下要求。首先,电极本身是良好的导体,而且能够与试样紧密接触;其次,电极与试样不能有相互作用,电极应能耐腐蚀,在试验过程中,特别是在高温下,不能因有电极存在而引起试样的性能发生变化;此外,还要求电极制作方便、使用安全。一般使用铝箔和铜材作为电极材料。

③操作规程

a. 准备,检查连线,接入试样。

b. 测量,桥体转换开关置于 BRIDGE 位置,打开仪器总电源,再分别开启仪器面板上的三个电源控制开关,电压升到设定值。

c. 交替调节电桥面板上的 C 和 $\tan\delta$,使 SENSITIVITY 提高到 5 时,调节零指示仪为 0(最小值),注意先调节 C。

d. 结束,调节零指示仪 SENSITIVITY 降到 1,把电源电压降到 0,关闭电源,读取 C 和 $\tan\delta$ 的数值并记录。

④实验内容

研究变压器油的介电常数与损耗因数随温度的变化规律。将处理过的油注入液体电极,然后把电极放入油浴中,接好线路,开启加热电源和电桥的三个电源开关,进行实验。测量温度从室温到 90°C ,温度间隔 15°C ,在每个温度达到测量点后至少停留 15min(使得试样温度均匀),然后再开始测量。

将实验结果进行列表和画图,分析讨论变压器油的介电常数与损耗因数随温度的变化规律。

(3)2801 型可转换精密 ϵ 和 $\tan\delta$ 测量电桥

①主要用途与性能参数

2801 型电桥的性能参数指标如表 1.2 所示。

2801 电桥用于材料和电工产品的介电性能参数(介电常数、介质损耗角正切 $\tan\delta$)的精确测量。它是具有多种接法、多种结构和多种功能的精密电桥,对于普通绝缘材料的测量,2801 与 2821 基本一样。但是对于电容量很大的试品,如电力电容器、长电缆等,在高电压下要流过很大的电流,而精密西林电桥内电阻 R_3 的允许最大电流为 30mA,因此可能会烧坏 R_3 ,为了满足大电容试验样品测试的要求,可在 R_3 并联一个电阻分流器,如图 1.8 所示, R_N 与 R_3 并联,通过试样的电流大部分经 R_n 分流而不经过 R_3 。

当电桥平衡时,试样电容介电常数和损耗因数的计算公式如下:

$$C_x = C_n \frac{R_4}{R_3} \frac{R_N + R_3}{R_n} \quad (1.6)$$

$$\tan\delta = \omega C_4 R_4 - \omega C_n \frac{R_4}{R_3} (R_N - R_n) \quad (1.7)$$

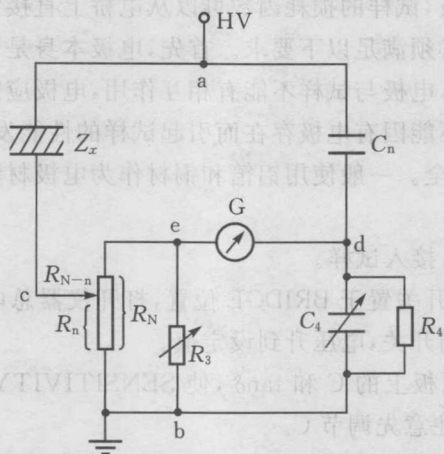


图 1.8 大电容电桥

表 1.2 2801 型可转换电桥的性能指标

电容 C_x 测量范围	0.01pF~0.1F
介质损耗角正切 $\tan\delta$	$1.0 \times 10^{-6} \sim 3.5$
测试频率	50Hz
电压范围	0~2000V, 可外接高压电源施加高压

② 操作规程

a. 准备

选择测试线路、保护电压调节器、分流器、电流互感器、选择电极、标准电容器, 根据要求接好线路, 检查线路。

b. 测量

标准电容连接到 $C_2 = C_n$ 端, 试样连接到 $C_1 = C_x$ 端, 零指示仪连接到 G 端, 电位调节单元的各端分别连接到电桥的 V、接地和 SCREEN 端, 用跨接板连接 R_3/R_4 和 0 端, 零指示仪灵敏度开关置于 MINIMAL 位置, 合上电源, 升压不超过 100V, 把 G_2 开关置于 SCREEN, 如零指示仪上读数小于 10 格, 继续试验, 否则检查仪器线路后, 重新试验。

电压升到预定值, 并调平衡电桥。平衡的标志是: G_2 在 BRIDGE 和 SCREEN 两种情况下, 及 G_1 在 $a \rightarrow b$ 和 $b \rightarrow a$ 两种情况下, 零指示仪读数在最大灵敏度时均为零。

平衡后, 把 G_2 置于 0 位置, 然后退回电压, 关闭电源, 读取数值并记录。

(4) TR-10 变压器电桥

① 主要用途与性能参数

TR-10C 型介质损耗测量仪是变压器电桥,其中两个桥臂由变压器两个绕组构成,用于材料的介电常数和介质损耗角正切 $\tan\delta$ 的频谱和温谱测量。被测试样可以是固体、液体和粉体。主要性能指标如表 1.3 所示。

表 1.3 TR-10C 变压器电桥的性能指标

电容 C_x 测量范围	1~200pF
介质损耗角正切 $\tan\delta$	$1 \times 10^{-5} \sim 0.1$
频率范围	30Hz~3MHz
温度范围	室温~+200℃

② 试样与电极

仪器配有测量固体、液体和粉体绝缘材料损耗因数和相对介电常数的三电极系统。实验时根据材料情况选择不同的电极系统;测量液体材料试样时,注意杂质和水分的影响;测量粉体材料时,注意杂质、水分、粒度、密度和压力的影响。

③ 操作规程

a. 准备,选定电极并接入试样,选定测量频率和温度,根据测量频率选用输入变压器,并选定 RATIO 为 γ_b 。

b. 合上 TRANS 盖板,将试样接到 UNKNOWN。

c. 将桥体 EARTH BAL/ BRIDGE BAL 置于 BRIDGE BAL、ZERO BAL/ MEAS 置于 ZERO BAL;调节旋钮 ZERO BAL C 和 CONDUCTANCE 使电桥平衡,即零指示器调到零,从 CONDUCTANCE 读取相应的 γ_0 。

d. 测试,调节桥体 ZERO BAL C 和 FINE 以及 CONDUCTANCE,实现电桥平衡;读取 CONDUCTANCE 数值。

e. 把 ZERO BAL/MEAS 置于 MEAS,调节旋钮 CAPACTANCE 和 CONDUCTANCE 达到电桥平衡,读取相应读数。

f. 频率高于 100kHz 时,要求 EARTH BAL/ BRIDGE BAL 两个位置上都达到精细平衡。

g. 达到平衡后,从 CAPACITANCE 和 CONDUCTANCE 转盘上读取相应的 C_x 和 γ' 值,则

$$\tan\delta = \frac{\gamma_b(\gamma' - \gamma_0)}{2\pi f C_x \times 10^{-12}} \quad (1.8)$$

$$\epsilon_r = \frac{C_x}{C_0} \quad (1.9)$$

C_0 为同样几何尺寸下周围充满真空时的电容,其余参数都是从电桥上读取的数据。

4. 数字式介质损耗因数及电容测量系统 TD-Smart

(1) 测量原理

TD-Smart 的电桥线路如图 1.9 所示,包括参考和测量两条支路。参考支路由高压参考电容 C_R 及串联的电阻性电流传感器 R 组成,测量支路由待测试样 C_M 及串联的电阻性电流传感器 M 组成。对更大的电流范围(大电容试样),可选 5Am/s 或 25Am/s 的分流器。

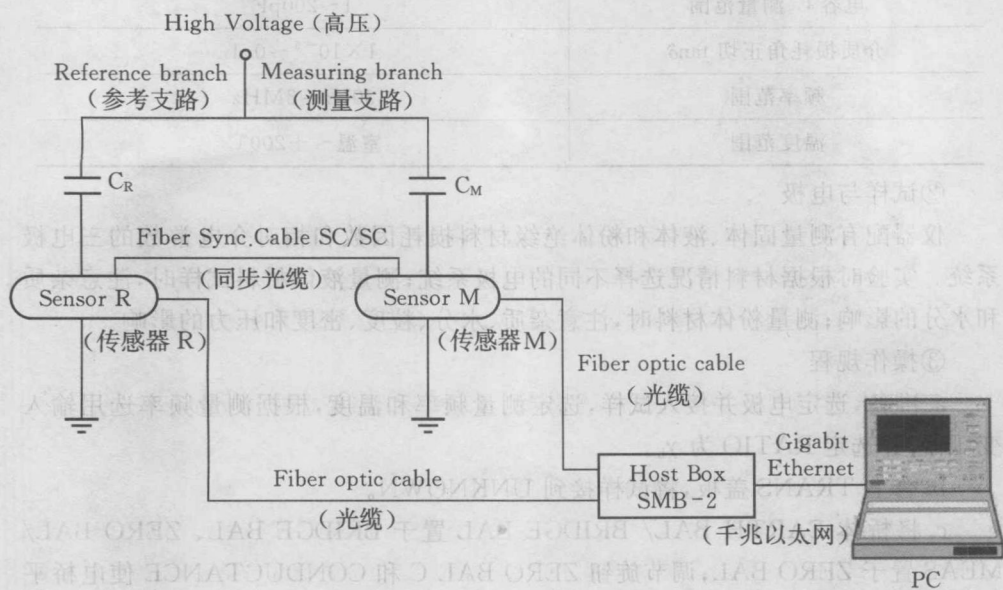


图 1.9 TD-Smart 测量原理框图

流到测量及参考分支的两个电流的振幅及相位关系会被两个高精度电阻 R 及 M 连续测量及数字化,通过两路可以测出通过试样的电流、电压以及它们的相位差。把测到的信号输入到低噪声放大器,然后再进行 A/D 转换及光电转换。这两个数字信号的进一步处理,会由 Host Box 以光纤传输到个人计算机,通过计算机算出样品的电容、损耗因数和通过样品的泄露电流。

(2) 用途及性能参数

TD-Smart 测量系统为完全自动化和计算机化的测量系统,可测量工频下材料和电工产品(可以是接地和非接地电工产品)的损耗因数、电容、试样两端施加电压和泄露电流。可显示损耗因数和电容随时间和电压的变动曲线。TD-Smart 性能参数如表 1.4 所示。

表 1.4 TD-Smart 的性能参数

损耗因数测量范围	0.00001~100000 (绝对值)
损耗因数分辨率	1×10^{-6}
损耗因数精度	$\pm 1 \times 10^{-5}$
电容测量范围	0.1pF~50 μ F
电容分辨率	0.001pF
电容精度	$\pm 0.5\%$

(3) TD-Smart 操作步骤

① 首先确定试品为接地样品还是非接地样品

确定测量支路是否需要接入分流器(估算试品电容量 C_x , 当 $I = 2\pi f C_x U$ 大于 100mA, 则需要接入分流器)。

将准备好的试样根据前面两点选择适合的接线方式接入系统中, 注意接试样前一定要将电源关闭。

检查高压引线是否连接牢固且无毛刺, 系统是否单点接地; 测量传感器与参考传感器电量是否充足(测量时, 这两个传感器不能插电源, 否则有损坏危险)。

② TD-Smart 测量步骤

- a. 先打开测量传感器开关, 再打开参考传感器开关。
- b. 打开 Host Box 电源。
- c. 启动电脑, 打开 TD 软件。
- d. 点击系统进入连接和测量界面。
- e. 在 Setting 菜单里设置相关参数或功能, 如参考电容大小、测试频率、灵敏度和趋势设置等。
- f. 打开变压器升压, 缓慢升压到预定电压大小, 观察软件界面, 并直接读取介质损耗因数、电容、电压、电流等值。
- g. 若有需要, 进入 Scope View、Trend 等菜单进行观察或分析。
- h. 测量结束后, 将调压器降压至零关闭, 用放电棒接触试品和标准电容高压端进行放电后拆下引线, 取下试样。

试验完成后, 取走试样, 关闭软件、计算机, 切断总电源, 最后锁好门。

5. 介电谱的测量

(1) 介电谱的基本概念

要了解在不同频率或不同温度下绝缘系统或介质的介电特点, 或要研究绝缘材料的分子结构形态时, 要求测量复介电常数 $\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon''$ (ϵ' 即相对数介电常数 ϵ_r , ϵ'' 即损耗指数, $\epsilon'' = \epsilon' \tan\delta$) 随频率的变化曲线(称为介电频谱, 如图 1.2、1.4