

绝缘介质损耗与

带电测试

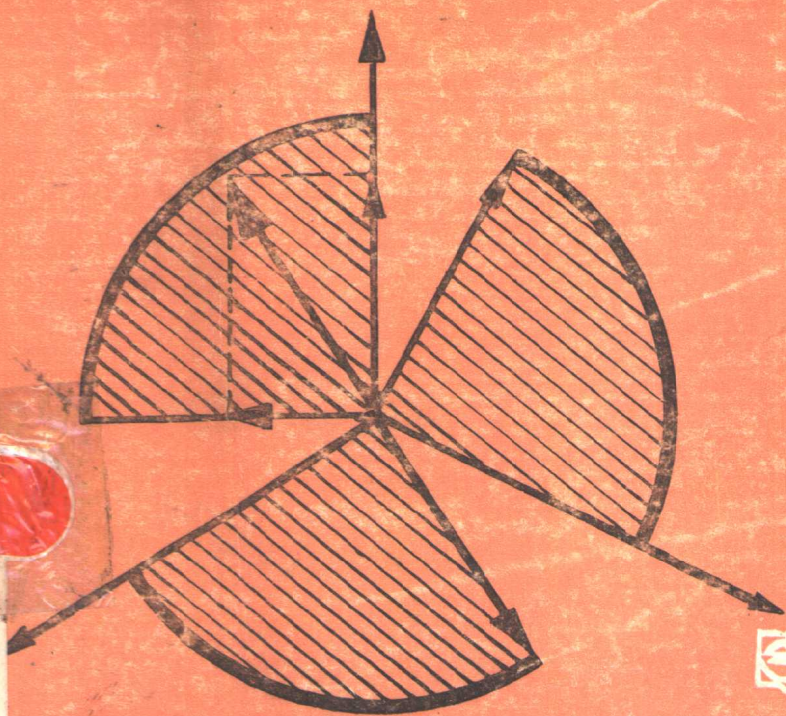
JUE YUAN

JIE ZHI

SUN HAO

YU DAI DIAN

CE SHI



绝缘介质损耗与带电测试

汪宏正 何志兴 张古银 编著

安徽科学技术出版社

责任编辑：杨家骧

封面设计：方天德

绝缘介质损耗与带电测试

汪宏正 何志兴 张古银 编著

*

安徽科学技术出版社出版

(合肥市金寨路233号)

新华书店经销 合肥杏花印刷厂印刷

*

开本：787×1092 1/32 印张：14.5 字数：310,000

1988年3月第1版 1988年8月第1次印刷

印数：00,001—7,000

ISBN7—5337—0157—7/T·16 定价：3.80元

TM855
3131

88258
— 62

454

前 言

高压电气设备绝缘介质损耗($\text{tg}\delta$)试验,是绝缘试验中主要项目之一,可以有效地监测出绝缘缺陷。但是,随着高压电气设备电压等级的不断提高,现场大量试验结果表明,如果不能正确地进行测量和分析,往往易于造成误判断。这样,既可能危及高压电气设备的安全运行,又可能造成不必要的检修和更换。

根据电力系统的实际需要,我们在现场与我省广大电气绝缘试验工程技术人员、工人进行了大量的试验,并从电力系统的发展和提高绝缘监测有效性和运行的实际情况出发,开展了高压电气设备绝缘参数的带电测试研究工作,取得了一定的成绩,得到了从事电气绝缘试验工作同志的普遍欢迎和支持。

本书从实际出发,对基础理论、物理概念的陈述力求简明,以利于广大试验人员学习、理解并用于实际试验工作;对试验方法的介绍力求详细、具体,以便在现场试验中推广使用。

本书是在作者撰写的《电气绝缘试验方法汇编》和《工作电压下高压电气设备的绝缘监测》的基础上,经过修改、充实、提高,并参阅了国内外有关资料写成。全书由张古银同志执笔整理。

在本书写作过程中,得到了省电力局和省电力试验研究所有关领导的支持和关怀,并给予具体的帮助和指导;合肥供电

ABE 29/01

局、淮南供电局的同志对本书的写成付出了辛勤的劳动。本书附录四由本所电测室张建华同志撰写。在此一并表示衷心感谢。

鉴于水平有限，时间仓促，书中谬误和不当之处在所难免，热忱希望广大读者给予批评指正。

作 者

目 录

第一章 电介质损耗($\text{tg}\delta$)的概念	(1)
§1-1 概 述	(1)
§1-2 介质损的物理意义	(3)
§1-3 介质损的表达式	(8)
§1-4 影响 $\text{tg}\delta$ 的因素	(17)
第二章 介质损 $\text{tg}\delta$ 的测量	(33)
§2-1 测量 $\text{tg}\delta$ 的基本原理	(33)
§2-2 $-\text{tg}\delta$ 的测量	(52)
§2-3 测量的灵敏度与准确度	(58)
§2-4 瓦特表法测量 $\text{tg}\delta$	(68)
§2-5 杂散电流及其防护	(71)
第三章 测量误差的分析	(77)
§3-1 分流电阻对 $\text{tg}\delta$ 的影响	(77)
§3-2 标准电容器 $\text{tg}\delta_N$ 的影响	(80)
§3-3 桥臂杂散阻抗的影响	(85)
§3-4 试品杂散阻抗的影响	(90)
§3-5 测量电极分路阻抗的影响	(99)
第四章 高压电气设备绝缘 $\text{tg}\delta$ 的测量及其误差分析	(104)
§4-1 变压器线圈及套管的 $\text{tg}\delta$ 测量	(104)
§4-2 35~110kV 电流互感器 $\text{tg}\delta$ 测量误差的分析	(115)

§4-3	电容式套管的 $\text{tg}\delta$ 测量及误差分析	(118)
§4-4	耦合电容器的 $\text{tg}\delta$ 测量及异常结果的分析	(129)
§4-5	YDR型电容式电压互感器 $\text{tg}\delta$ 的测量	(134)
§4-6	串级式电压互感器 $\text{tg}\delta$ 的测量	(144)
第五章 电场干扰下的$\text{tg}\delta$的测量		(191)
§5-1	一般概念	(191)
§5-2	电场干扰下的 $\text{tg}\delta$ 测量	(203)
§5-3	倒相法几种测量结果的分析	(226)
§5-4	电场干扰下 $\text{tg}\delta$ 的测量误差统计分析	(228)
第六章 电容型试品的带电测试		(240)
§6-1	耦合电容器的带电测试	(242)
§6-2	220kV电流互感器的带电测试	(275)
§6-3	电容式套管的带电测试	(289)
§6-4	YDR型电容式电压互感器的带电测试	(310)
第七章 三相电容型试品的带电测试		(315)
§7-1	绝缘介质特性	(315)
§7-2	试验方法	(324)
§7-3	测量误差的分析	(339)
§7-4	集中和连续监测装置	(346)
第八章 避雷器的带电测试		(354)
§8-1	FZ35-220J的带电测试	(354)
§8-2	磁吹避雷器的带电测试	(373)
§8-3	FS型避雷器的带电测试	(381)
第九章 电磁式电压互感器与少油开关的带电测试		(387)
§9-1	JCC型电压互感器的带电测试	(387)
§9-2	电流互感器的带电测试	(393)
§9-3	高压少油开关的带电测试	(395)

附录一	QS1型西林电桥的主要技术特性和有关参数…	(401)
附录二	耦合电容器带电测试用表……………	(406)
附录三	220kV电流互感器带电测量用表……………	(444)
附录四	选频电压表工作原理……………	(448)

第一章 电介质损耗($\text{tg}\delta$)的概念

§1-1 概 述

任何电介质(绝缘材料)在电压作用下,都有能量损耗。介质损耗(以下简称介质损)会使温度上升,损耗愈大,温升愈高。如果介质温度高达使绝缘体熔化、烧焦,那么就会失去绝缘性能而造成所谓热击穿。例如,高压电容型绝缘结构的电气设备——电容式套管、耦合电容器、电容式电压互感器等运行中发生爆炸事故,主要是由于电容型绝缘中局部受潮或放电,聚积大量能量形成热击穿,从而使电气设备内部压力不断增加而超过外瓷套的强度造成的。因此,介质损的大小在电气设备的绝缘监测中是衡量绝缘水平的一项重要指标。

绝缘材料的介质损,按其物理性质有以下几种基本形式。

一、漏电导损耗

任何电介质总有一定导电能力。因此,在电压作用下电介质中流过泄漏(电导)电流,造成能量损耗。这种损耗在交、直流电压作用下都存在。一般情况下,漏电导损耗是很小的。在直流电压下绝缘的介质损耗仅有漏电导损耗,所以这时介质损很小。

二、极化损耗

电介质在交流电压作用下,发生周期性极化。此时介质中

带电质点(主要是离子)在交变电场作用下,作往复有限位移并重新排列。这样,质点需要多次克服相互作用力(分子间的内摩擦力),损耗很多能量。这种损耗称为极化损耗。如果电源频率增加,质点往复运动的频率也增加,极化损耗增大。在交流电压作用下,电介质(指不均匀的)的夹层极化反复引起电荷重新分布(吸收电流),¹⁸这个过程也要消耗能量。

三、局部放电损耗

常用的固体绝缘材料中总有气隙(或油隙)。我们知道,绝缘材料各层的电场强度几乎与该层材料的相对电容率(介电系数) ϵ 成反比。气体的介电系数较固体绝缘材料低得多,所以气隙部分的电场强度较大。但是,气隙的耐压强度却远低于固体绝缘材料。因此,当外施电压足够高时,气隙首先发生局部放电(游离、电晕)。气隙放电中的电荷在外施电场 E_0 的作用下,移到气隙壁上而形成反电场 E (图1-1)。反电场 E 与外施电场 E_0 方向相反,从而削弱了气隙中的电场,而且可能使气隙放电不

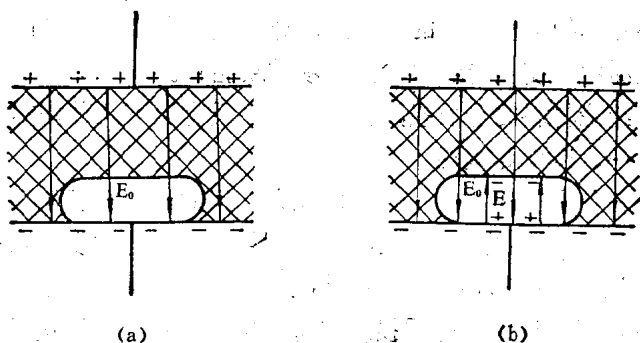


图1-1 固体绝缘中气隙放电前后的电场示意图

(a) 气隙放电前; (b) 气隙放电后

E_0 . 外施电场; E . 气隙放电后电荷形成的电场

再继续下去。但如果外施的是交流电压，半周后外施电场 E 反向，正好与前半周气隙中电荷形成的反电场方向相同，这就加强了气隙中的电场强度，使气隙放电提前发生。所以，交流电压下电介质内部的局部放电及电介质损耗远较直流电压下强烈。油纸电容器、电缆、套管等设备在设计、制造及运行中，都必须注意到这一点。原用于交流电压的一般油浸纸电容器(或电缆)，若改用于直流电压时，长期工作电压能提高到原交流额定电压的四五倍，而不是 $\sqrt{2}$ 倍，其原因就在于此。

既然直流电压下介质损主要是漏电导损耗，那么用绝缘电阻或泄漏电流就足以表示其大小了。由此可见，在同样电压作用下，交流电压在介质中所产生的损耗较直流电压要大。一般所谓介质损，是笼统的指介质在一定电压作用下所产生的一切损耗。这些损耗中，究竟哪一部分是由电导引起的，哪一部分是由吸收现象形成的，没有明确区别。

§1-2 介质损的物理意义

各种电介质在外电场作用下，由于介质电导和极化滞后效应，其内部有能量损耗。因此，对介质施加一正弦电压 U 时，通过介质的电流不是超前于电压 $\pi/2$ 而是 φ 角度。这个电流由电导电流(I_g)、纯电容电流(I_c)和反映介质吸收过程的吸收电流(I_M)三部分组成。而吸收电流又可分解为有功分量(I_{XP})和无功分量(I_{XP})两部分。表征介质这一物理过程的等值回路如图1-2所示。其相应的向量图为图1-3。

由于介质极化滞后效应，吸收电流 I_M 不是超前于外施电压 $\pi/2$ 而仅是 ψ 角度。因此，在电压 U 作用下，流过介质的电流 I_x 的无功分量 I_{XP} 包括瞬时完成的极化电流 I_c 和吸收电流 I_M 的无功

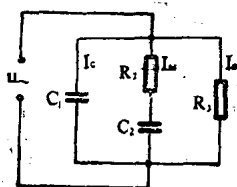


图1-2 电介质的等值回路

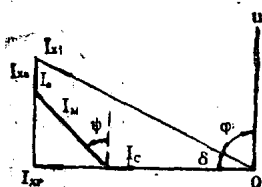


图1-3 介质损的向量图

分量； I_x 的有功分量包括泄漏电导电流 I_c 和吸收电流的有功分量。

由图1-3可知，在交流电压 U 作用下，介质中的有功损耗：

$$P = UI_x \cos \varphi = UI_x \sin \delta \quad (1-1)$$

当 δ 角很小时， $\sin \delta \approx \tan \delta$ ，则(1-1)式可变为：

$$P \approx UI_x \tan \delta \quad (1-2)$$

式中 U ——电压的有效值；

I_x ——电流的有效值

由图1-3可知， $\delta + \varphi = \pi/2$ ， δ 角是功率因数角 φ 的余角，称为介质损耗角，也叫做损耗因数角。 $\cos \varphi$ 称为功率因数，而 $\tan \delta$ 称为损耗因数。

应该指出，(1-2)式的介质损包括交流电压下介质中的一切损耗。即不仅包括泄漏电导（即图1-2中绝缘电阻 R_2 ）所决定的损耗，还包括由介质极化产生的有功损耗。

我们曾在温度接近 60°C 时测量一台变压器线圈的绝缘状况。测得其电容量为 $C_x = 6600 \text{ pF}$ ，绝缘电阻 $R_2 = 250 \text{ M}\Omega$ ，则计算得介质损（泄漏电导所决定的介质损）为：

$$\tan \delta_R = \frac{1}{\omega C_x R_2} \approx 2 \times 10^{-3}$$

而测量交流电压作用下的 $\tan \delta = 1.5 \times 10^{-2}$ 。由此可知，泄漏电

导所决定的等值介质损仅为交流电压作用下介质损(包括泄漏电导和极化损耗)的1/7左右。

在交流电压作用下,流过介质中的电流可分为有功和无功两部分。因此,图1-2可简化为图1-4(a)。简化的等值电路的介质损应与实际介质损相等。简化的等值电路中的电容 C_x 为理想无损电容,而电阻 R 则为有功电阻。

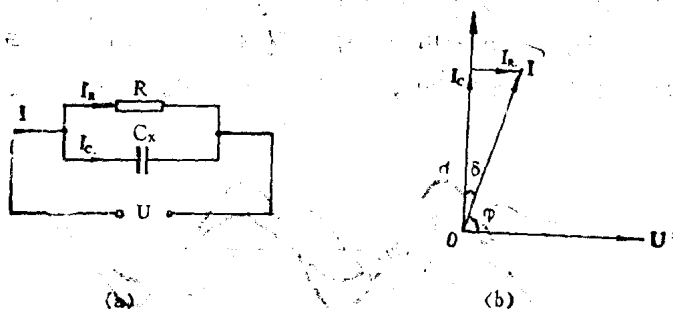


图1-4 介质的并联等值电路及向量图

(a)等值电路图, (b)向量图

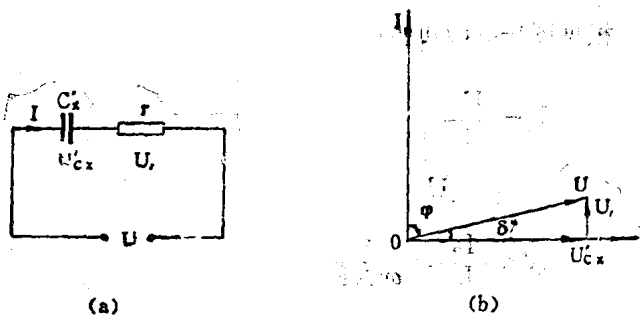


图1-5 介质的串联等值电路及向量图

(a)等值电路图, (b)向量图

向量图图1-4(b)的物理意义可扼要地分析如下：在此并联等值电路中，流过电阻 R 的电流 I_R 与外施电压同相；流过理想电容 C_X 的电容电流 I_C 与外施电压 U 随时间的变化率(du/dt)成正比。其波形如图1-6所示。在图1-6中，b或d瞬间电压 U 最大，电流 I_R 也最大，而在a或c电压过零， I_R 也为零。在b或d瞬间电压 U 的绝对值虽最大，但变化率 $du/dt=0$ ，此瞬间流过 C_X 的电容电流 I_C 也为零。在a或c瞬间，电压 U 虽等于零，但是变化率 du/dt 却最大，电容电流 I_C 的绝对值也最大。因此， I_C 与 U 相差（即 I_C 超前于电压 U ） 90° ，如图1-4(b)所示。

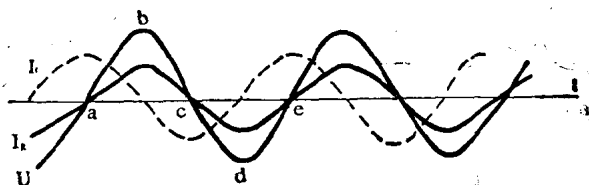


图1-6 并联等值电路中电压、电流的波形

根据图1-4(a)可得：

$$\left. \begin{aligned}
 I_R &= \frac{U}{R} \\
 I_C &= \omega C_X U \\
 \operatorname{tg} \delta &= \frac{I_R}{I_C} = \frac{1}{\omega C_X R} \\
 P &= \omega C_X U^2 \operatorname{tg} \delta
 \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

根据图1-5(a)可得：

$$\left. \begin{aligned} U_r &= Ir \\ U_c &= \frac{I}{\omega C'_x} \\ \operatorname{tg} \delta &= \omega C'_x r \\ P = I^2 r &= \frac{\omega C'_x U^2 \operatorname{tg} \delta}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

根据不同等值电路有功损耗和介质损 $\operatorname{tg} \delta$ 相等的原则，由(1-3)、(1-4)两式可以求得：

$$C_x = \frac{C'_x}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} \quad (1-5)$$

$$R = r(1 + \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \delta}) = \frac{r(1 + \operatorname{tg}^2 \delta)}{\operatorname{tg}^2 \delta} \quad (1-6)$$

一般情况下， $\operatorname{tg}^2 \delta \ll 1$ ，则 $C_x \approx C'_x$ ，而 $R \gg r$ 。一般高压电气设备多选择并联等值电路进行计算，而较少选用串联等值电路。

应该指出，上述等值电路只不过是一种简便的近似的表示方式，都不能完全反映在交流电压作用下介质的物理过程，不足以对实际介质作物理解释。等值电路的选择是为了方便计算。

由式(1-3)、(1-4)可知：

$$P = \frac{\omega C'_x U^2 \operatorname{tg} \delta}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} \approx \omega C'_x U^2 \operatorname{tg} \delta \quad (\operatorname{tg} \delta \ll 1)$$

因此，在交流电压作用下，介质有功损耗功率 P 不仅取决于介质特性(介电系数 ϵ)和施加正弦交流电压的频率，而且还取决于介质的尺寸(形状、大小、厚度等)。但当高压电气设备制

造后，其绝缘结构就不变了，运行电压 U 、频率 f 都可以认为不变，则有功功率损耗为：

$$P = K \operatorname{tg} \delta \quad (1-7)$$

式中 $K = \omega C_X U^2$

即介质中有功损耗 P 正比于 $\operatorname{tg} \delta$ 。因此 $\operatorname{tg} \delta$ 可以反映在正弦电压作用下介质中的损耗。即可用 $\operatorname{tg} \delta$ 来评价高压电气设备的绝缘水平。

$\operatorname{tg} \delta$ 是表示介质中有功损耗功率 P 与无功功率 Q 之比。实际测量与计算时， $\operatorname{tg} \delta$ 常常用百分数来表示($\operatorname{tg} \delta\%$ 或 $100\operatorname{tg} \delta$)。

在绝缘材料中，由于介质存在有功损耗，故引起绝缘内部发热；可能在介质中绝缘薄弱的部位形成热击穿。因此测量 $\operatorname{tg} \delta$ 并观察其历次试验结果的变化，能够判断介质绝缘状况的变化。因此，测量 $\operatorname{tg} \delta$ 对判断高压电气设备的绝缘状况的好坏，有着特别重要的意义。

§1-3 介质损的表达式

工程上所用的绝缘介质，大多是不均匀介质，常由两三种或更多的成分组成，如云母板、层压布(纸)板、油浸纸绝缘等。此外，所谓均匀介质也往往会夹杂空气和水分，构成不均匀介质。因此高压电气设备的绝缘结构一般不能用式(1-3)和(1-4)简单的公式来计算。

在一般情况下，工程上所用的不均匀介质，可按其组成特点来计算不同绝缘结构整体的 $\operatorname{tg} \delta$ ，并研究整体 $\operatorname{tg} \delta$ 与绝缘结构中每一组成部分的局部介质损 $\operatorname{tg} \delta_1, \operatorname{tg} \delta_2, \operatorname{tg} \delta_3, \dots, \operatorname{tg} \delta_n$ 间的相互关系。

设施加交流电压 U 后，介质中流过电流 I_x ，则供给介质的

总功率为：

$$S = P + jQ \quad (1-8)$$

式中 S —— 总功率；

P —— 有功功率；

Q —— 无功功率

P 和 Q 都由对应于每一不均匀介质组成部分的相应有功和无功功率迭加而得。即

$$P = \sum_{i=1}^n P_i \quad (1-9)$$

$$Q = \sum_{i=1}^n Q_i \quad (1-10)$$

介质总体的 $\operatorname{tg} \delta$ 为

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{P}{Q} \quad (1-11)$$

而绝缘结构中每一组成部分的介质损为

$$\operatorname{tg} \delta_i = \frac{p_i}{q_i} \quad (1-12)$$

由每一组成部分的 $\operatorname{tg} \delta_i$ 来计算介质总体的 $\operatorname{tg} \delta$ 时，应按照绝缘结构中相应等值电路进行计算。

一、并联的介质

电介质并联时，其交界面与电场平行，通常利用并联等值电路来表示各层介质。为便于分析，现以两个介质并联为例，进行电路分析。其等值电路如图1-7所示。

并联介质总体的介质损

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \delta &= \frac{\sum p}{\sum q} = \frac{\omega C_1 U^2 \operatorname{tg} \delta_1 + \omega C_2 U^2 \operatorname{tg} \delta_2}{\omega C_1 U^2 + \omega C_2 U^2} \\ &= \frac{C_1 \operatorname{tg} \delta_1 + C_2 \operatorname{tg} \delta_2}{C_1 + C_2} \end{aligned} \quad (1-13)$$