

水电站机电设备调整试验丛书

高压电气设备试验

水利电力部第十一工程局



水利电力出版社

水电站机电设备调整试验丛书

高压电气设备试验

水利电力部第十一工程局

水利电力出版社

内 容 提 要

本书是《水电站机电设备调整试验丛书》之一。

书中主要内容阐述了水电站高压电气设备在交接试验时的试验项目、方法和要求,并进行了必要的分析。为便于读者参考,同时介绍了在实际工作中的一些经验和体会。所述高压电气设备包括电力变压器、高压断路器、高压套管、电流和电压互感器、电力电缆、避雷器以及接地装置等。

本书可供水电站从事电气安装调试工作的工人和技术人员阅读,也可供其他从事高压电气设备调试工作的人员参考。

水电站机电设备调整试验丛书

高 压 电 气 设 备 试 验

水利电力部第十一工程局

*

水利电力出版社出版

(北京德胜门外六铺炕)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 12 $\frac{1}{2}$ 印张 287千字

1979年10月第一版 1979年10月北京第一次印刷

印数 00001—21180册 每册 1.05元

书号 15143·3498

前 言

机电设备交接调试工作是水电站建设中一个重要环节，水电站机电设备安装之后都要经过认真的调整试验，以检查和消除在制造或运输过程中可能发生的缺陷，确保其在电力系统中长期安全运行。为提高机电设备调整试验人员的技术水平和交接试验工作的质量，由水利电力部办公厅和基建司组织有关单位共同编写《水电站机电设备调整试验丛书》，其中《高压电气设备试验》这一分册由我局负责编写。

在取材方面，着重介绍各种高压电气设备在交接试验时的试验项目、要求和方法，并进行了必要的分析，注意尽可能写得通俗一些，使初参加调试工作的同志易于掌握，而对其他同志也能有一些帮助。考虑到许多试验方法都是几种电气设备通用的，故在本书中系结合某一设备，重点介绍一个方法，其他设备再用到这个方法时就不再重复，仅作一些必要的补充。如绝缘油试验放在第一章第四节；绝缘电阻测量放在第一章第五节；绝缘的介质损失角正切值 $\tan \delta$ 测量放在第三章第一、二节；泄漏电流测量放在第六章第四节介绍等。有些在本丛书其他分册中谈过的方法，本书也不再详述，如高压设备绝缘交流耐压试验的有关问题，在《水轮发电机试验》分册中介绍。

随着我国高压电气设备制造水平的提高，某些试验方法或者试验项目也会有所发展或变化。现有的一些试验方法（如接地电阻测量）也有待继续总结和改进得更为简便、有效。

本书由我局安装大队袁森同志编写，编写过程中得到安装大队试验室同志们的帮助，还参阅了水利电力部第四工程局安装队试验室提供的部分材料，并经王冰、顾景芳同志审阅，在此向他们致谢。

书中难免存在错误或叙述不当之处，望读者批评指正。

水利电力部第十一工程局

一九七九年一月

目 录

前 言

第一章 电力变压器	1
第一节 概述	1
第二节 检查铁芯时的试验	2
第三节 确定绕组绝缘潮湿程度	4
第四节 绝缘油试验	5
第五节 绕组绝缘电阻的测量	14
第六节 绕组介质损失角正切值 $\tan \delta$ 的测量	20
第七节 判断电力变压器绝缘潮湿程度的电容法	23
第八节 主绝缘工频交流耐压试验	24
第九节 几种绝缘特性试验方法的比较	28
第十节 绕组直流电阻的测量	28
第十一节 检查单相变压器的极性和三相变压器的接线组别	34
第十二节 变压比测量	38
第十三节 空载试验	43
第十四节 短路试验	51
第十五节 测量电力变压器功率损失的基本方法	56
第十六节 电力变压器的定相试验	68
第十七节 额定电压下冲击合闸试验	70
第十八节 带负载调压装置的检查	72
第十九节 色谱分析法检测电力变压器潜伏性故障简介	75
第二章 高压断路器	77
第一节 概述	77
第二节 测量导电回路直流电阻	78
第三节 测量绝缘电阻和泄漏电流	79
第四节 测量35千伏及以上多油断路器的介质损失角正切值 $\tan \delta$	80
第五节 绝缘交流耐压试验	80
第六节 测量合闸接触器和跳闸电磁铁线圈的最低动作电压	81
第七节 断路器时间特性的测量	82
第八节 断路器速度特性的测量	88
第九节 远方操作试验	93
第三章 高压套管	95
第一节 概述	95
第二节 介质损失角正切值 $\tan \delta$ 的测量	96
第三节 在电场和磁场干扰下测量 $\tan \delta$ 的方法	98

第四节 变压器套管的热电领试验法	104
第五节 其他问题	106
第四章 电流互感器	111
第一节 电站中常用的电流互感器	111
第二节 电流互感器的工作原理及技术特性	113
第三节 电流互感器的试验	117
第五章 电压互感器	124
第一节 各种电压互感器	124
第二节 电压互感器的工作原理及技术特性	128
第三节 电压互感器的试验	132
第四节 电容式电压互感器	138
第六章 电力电缆	142
第一节 概述	142
第二节 电力电缆的绝缘特性试验	143
第三节 其他试验项目	146
第四节 测量泄漏电流的方法	150
第七章 避雷器	161
第一节 管型避雷器和阀型避雷器	161
第二节 避雷器试验	167
第三节 放电记录器	174
第八章 接地装置	177
第一节 概述	177
第二节 接地电阻的测量	178
第三节 土壤电阻率、跨步电势和接触电势的测量	182
第四节 关于测量接地电阻的方法	185
附录 1 高压断路器的主要技术数据	192
附录 2 移圈式调压器和感应调压器技术数据	197
附录 3 土壤和水的电阻率参考值	198

第一章 电力变压器

第一节 概 述

电力变压器是电站、变电所和用电部门最重要的电气设备之一。通过电力变压器，不同电压的电机、电器得以形成统一的电力系统。由于绝缘结构、冷却方式等的不同，电力变压器种类繁多。表 1-1 中列出了电力变压器的分类和新、旧型式的代表符号。

表 1-1 电力变压器的分类和代表符号

序 号	项 目	分 类	代 表 符 号	
			新 型 式 中	旧 型 式 中
1	相 数	单 相 三 相	D S	D S
2	绕组外绝缘介质	变 压 器 油 空 气 成 型 固 体	— G C	— K C
3	冷 却 方 式	油 浸 自 冷 空 气 自 冷 风 冷 水 冷	不 表 示 不 表 示 F W	J 不 表 示 F S
4	油 循 环 方 式	自 然 循 环 强 迫 油 导 向 循 环 强 迫 油 循 环	不 表 示 D P	不 表 示 不 表 示 P
5	绕 组 数	双 绕 组 三 绕 组	不 表 示 S	不 表 示 S
6	调 压 方 式	无 激 磁 调 压 有 载 调 压	不 表 示 Z	不 表 示 Z
7	绕组导线材料	铜 铝	不 表 示 不 表 示	不 表 示 L
8	绕组耦合方式	自 分 耦 裂	O —	O —

国内生产的电力变压器，一般均为铁芯式结构。电压在 110 千伏及以上的大型电力变压器，采用钟罩式油箱。电压为 60 千伏及以上的电力变压器采用充油套管，110 千伏及以上的采用电容套管。

三相电力变压器较之同容量的“单相变压器组”（即三台单相变压器构成的三相变压器），由于结构紧凑，制造成本较低，耗费材料较少，同时由于制造技术的提高，电力变压器发生故障的机会减少，因此，以前被认为接线机动灵活的单相变压器组的优点已经不显著，近年来绝大多数的大型电力变压器都做成三相的。大容量自耦变压器也已大量制造和使用，和

普通电力变压器比较,制造自耦变压器可以节省有色金属和硅钢片,运行损耗低而效率高。

为了节约有色金属铜,我国推广使用铝线变压器。目前,容量在26万千伏安及以下、电压在220千伏及以下的电力变压器,其绕组一般都采用铝导线。

电力变压器运到安装现场后,需要进行交接试验,以检查运输过程中其绝缘是否受潮,以及是否存在其他缺陷。

一般,在交接时对电力变压器进行下列试验:

- (1) 检查铁芯,对穿芯螺栓和轭铁梁进行绝缘试验。
- (2) 变压器绕组绝缘特性试验,包括测量绝缘电阻、泄漏电流和介质损失角正切值 $\tan\delta$,进行绝缘油试验以及对主绝缘进行工频交流耐压试验。
- (3) 测量绕组的直流电阻。
- (4) 检查单相变压器的极性及三相变压器的接线组别。
- (5) 测量变压比。
- (6) 空载试验。
- (7) 短路试验。
- (8) 定相(如与其他变压器并列运行时)。
- (9) 额定电压下冲击合闸试验。
- (10) 带负载自动调压装置检查。
- (11) 高压套管试验。
- (12) 机械冷却装置的检查和试验。
- (13) 对散热器和油箱作密封油压试验。

中、大型电力变压器投入运行前是否需要进行干燥,是施工中的重要问题之一,这也决定了施工现场变压器试验的特点——必须以绝缘特性试验为主进行细致的工作,以便判断绝缘是否受潮。当然,其他试验项目也是不可忽视的。

在制造厂出厂试验中,还对变压器进行感应电压试验,以考验其匝间绝缘强度,试验一般采用频率为100赫的倍频电源,试验电压为绕组额定电压的2倍,持续时间1分钟。采用倍频电源的目的是为了减少励磁电流。安装现场限于设备条件,一般不进行这种试验。但如发现变压器匝间绝缘有损坏现象,或者匝间绝缘经过修理时,也可用工频电源进行1.3倍额定电压的感应电压试验3分钟。不过,施加这样低的电压,对检查匝间绝缘缺陷其效果并不显著。

此外,制造厂在型式试验中,还对电力变压器进行温升试验和冲击电压试验等,以校验变压器在长时负载下的热稳定性以及抵抗大气过电压的能力。在特殊试验中,还测定噪音强度、决定效率、进行突发短路试验、测量零序阻抗等。强油循环冷却方式电力变压器,还进行冷却器冷却容量试验。

第二节 检查铁芯时的试验

检查铁芯是为了处理运输过程中可能发生的机械和绝缘结构等各方面的缺陷,及清除

制造时可能遗留的杂物等。在检查过程中应进行下列试验：

一、测量穿芯螺栓与轭铁梁对铁芯的绝缘电阻

变压器铁芯在运行中必须接地，以免蓄积静电荷而引起放电。但铁芯只应有一个接地点，穿芯螺栓或者轭铁梁对铁芯的绝缘损坏时，即构成第二个接地点，使原来互相绝缘的硅钢片被短路，以致产生很大的涡流，使铁芯过热，严重时可导致铁芯烧损。

穿芯螺栓和轭铁梁的绝缘结构形式之一如图1-1(a)所示。应该指出的是，常常由于绝缘套3和绝缘垫圈6的交接部分脏污或遗留铁屑而使螺栓接地，经拆卸清扫后绝缘即能恢复。图1-1(b)是大型电力变压器穿芯螺栓和轭铁梁绝缘的另一种结构形式，从图中可以看到在螺栓绝缘套和轭铁梁之间有一个钢座套8，有时由于该钢座套尺寸较长，同时铁芯硅钢片的边缘可能向外翘起，二者在箭头@处相碰，使轭铁梁与铁芯短接。

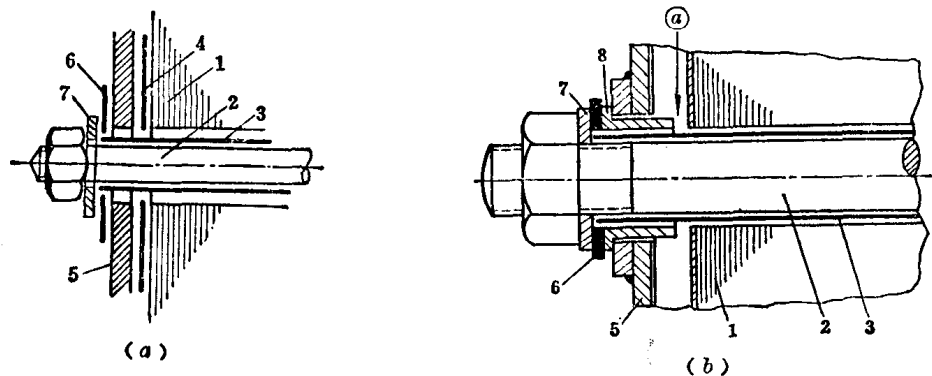


图 1-1 穿芯螺栓和轭铁梁的绝缘

(a)结构形式之一；(b)结构形式之二

1—铁芯；2—穿芯螺栓；3—绝缘套；4、6—绝缘垫圈；5—轭铁梁；7—钢垫圈；8—钢座套

穿芯螺栓和轭铁梁的绝缘电阻可用电压为2500伏或者1000伏的兆欧表进行测量，绝缘电阻值一般均很高。如果个别螺栓的绝缘电阻值较其余显著降低，应查明原因进行处理。

测量轭铁梁绝缘时，须先将铁芯的接地软片拆开，测量以后再恢复。

二、穿芯螺栓绝缘的耐压试验

穿芯螺栓的绝缘在运行中实际上并不承受电压，因此，只要所测绝缘电阻数值较高，就可不必做耐压试验。交接试验标准也不要求进行耐压。所以，仅对有怀疑的螺栓绝缘，例如有外伤的或者绝缘电阻特别低的，才考虑以耐压试验的方法进行考验或鉴别。耐压试验可以用1000伏工频交流电源，也可以用2500伏兆欧表代替交流电源。

三、测量绕组的绝缘电阻以初步检查变压器的绝缘状况

测量时使用2500伏的兆欧表。对不装套管运到工地的大型电力变压器，这是第一次检查绕组绝缘，因在吊芯前变压器的出线均封在外壳里面。在常温、无油情况下所测得的绝缘电阻通常很高，大都接近兆欧表的上限。

四、检查分接开关的接触电阻

一般情况下不作接触电阻测量，仅用塞尺检查其接触情况合格即可。当绕组直流电阻不合格或者分接开关经修理后，作为一种判断缺陷的检查方法才测量其接触电阻，分接开关

每一触点的接触电阻，不论电力变压器容量大小均不应超过 500 微欧，一般大、中型电力变压器可能仅数十微欧。试验时可通入 10~20 安直流电流，以低量程毫伏表或简易电位差计测量压降，然后换算为微欧数。

第三节 确定绕组绝缘潮湿程度

电力变压器的绝缘大部分由 A 级绝缘材料如绝缘纸、棉纱、纸板等组成，这种材料容易吸收潮气，其吸湿性一般达到 10% 甚至更高。当含湿率不同时，绝缘的寿命也不同。以绝缘纸为例，在含湿率较大同时受到氧化作用时，将使其寿命大为缩短。曾有人做过对比试验：同样在 90℃ 温度下，绝缘纸放在含湿率很低的真空中，其寿命估算为 350 年；放在干燥的空气中，其寿命为 140 年；放在含湿率为 1.4% 的空气中时则寿命降低为 30 年。

一般，绝缘材料中总含有一定的水分，这并不影响其正常运行，也能保证一定的寿命。例如大型电力变压器中绝缘纸的含湿率，如能控制在 2% 以下便很好。实际运行中绝缘纸含湿率可能达到 4% 以上。绝缘油的含湿率较绝缘纸为小，工作中变压器油的含湿率一般不超过万分之三。

因为电力变压器的绝缘主要靠绝缘油，如果仅仅绕组绝缘一定程度受潮，除去寿命缩短外，并不明显降低其绝缘水平。

由于绝缘材料含湿率与寿命的关系尚缺乏充分的和定量的研究，同时含湿率的测量还没有找到简便的方法。所以，目前评定电力变压器绝缘湿度的方法，还得靠密封情况检查和绝缘特性试验。

评定绕组绝缘潮湿程度的目的是要决定电力变压器是否需要干燥，应该仔细地进行多种检查试验，全面地分析比较，做出结论，以免造成不必要的人工、材料的浪费。

电力变压器，由于其结构上的特点，常常不能用单一的办法判断绝缘是否受潮，而必须以各种试验，例如测量绕组绝缘电阻、介质损失角以及做绝缘油试验、检查密封等进行综合判断，不能以某一项绝缘指标不合格便断定绝缘受潮。必须根据各种试验方法的特点、根据测试时可能受到的外界影响，根据试验标准的规定及比较历次试验的结果（特别是与制造厂的试验数据进行比较）以及根据同型号、同容量设备的试验数据，全面地加以分析，然后得出结论。

为了比较各次试验的结果，要特别注意变压器油对其他绝缘特性的影响、温度测量的准确性和试验方法是否相同等。

绝缘油的质量好坏对几项绝缘指标（如绝缘电阻、介质损失角）都有显著的影响，因此，应该首先做油的击穿试验、化学分析和测定油的介质损失角正切值 $\tan \delta$ ，证明油的质量良好后，其他试验结果才有价值。在电力变压器试验中不止一次遇到过由于绝缘油不良而导致错误判断的例子，例如某变电所一台 110 千伏、20000 千伏安电力变压器，经长时干燥后，绝缘电阻仍远低于出厂试验数据。后来查明系绝缘油老化所致，换上合格的绝缘油，变压器的绝缘电阻就正常了，如表 1-2 所示。

温度变化对试验结果的影响绝不能忽视，但是测得试验当时的准确温度有时是比较困

表 1-2 一台110千伏、20000千伏安三绕组电力变压器换油前后绝缘变化情况

测量时间	测量位置及绝缘电阻值(兆欧)						油温 (°C)
	高一壳	中一壳	低一壳	高一中	中一低	低一高	
出厂试验	1200	950	800	1500	—	1500	20
换油前	570	580	700	500	500	700	20.5
换油后	1200	1050	1150	1100	860	1500	22

注 高、中、低、壳,各指电力变压器的高压、中压、低压绕组和外壳。

难的。在电力变压器不加热情况下,一般可以用油面温度代表绕组绝缘的温度,但如电力变压器处于室外,还应同时照顾到日照、气流等的影响以及环境温度变化的速度。在电力变压器加温过程中,就难于测得准确的温度,因为这时除去温度随时间的变化以外,还有温度空间分布的问题,特别是大容量电力变压器或三绕组电力变压器以外部或铁损方法加热时,内外温度短时间内不易达到平衡,故应避免在温度变化过程中进行试验。测量绕组的直流电阻以换算平均温度的方法,虽然操作麻烦些,但较准确,必要时可以采用。

绝缘温度低于10℃时,应将电力变压器加温后再行测量绝缘特性,因为在低温下所测得的某些数据不可靠,不能作为依据。

另外,我们知道,不论是绝缘电阻或介质损失角正切值 $\tan\delta$,将测量值按温度进行换算并不能保证得出准确的结果。为了便于互相比,最好能将温度维持在与前次试验相同或接近的水平上,只在不得已时才利用某些系数进行换算。

不同试验方法的测量结果也有差别,例如测量变压器绝缘电阻时如果接线方式不同就可能得到不同的测量结果。

对于大容量电力变压器,各项绝缘指标的测量应特别慎重,如常温下试验结果不合格,还应升温(至制造厂试验温度)重行试验。如仍不合格,但与规定标准差别不大,则可进行有控制的轻度干燥,即将上层油温控制为70~80℃的带油干燥,干燥时间不应超过48小时。如当温度达到70~80℃并持续24小时而绝缘性能还不满足要求时,可适当延长时间。仍达不到标准规定时,则应进行无油干燥。因轻度干燥系带油进行,故油应是干燥的,否则油中水分可能侵入绕组绝缘,使受潮程度加重。

按照一九七七年十二月水利电力部颁发的《电气设备交接和预防性试验标准》(以下简称《交接试验标准》)关于新装电力变压器绝缘潮湿程度的评定试验的项目、标准和不经干燥投入运行的条件的规定,如试验结果满足所规定的条件,则允许不经干燥投入运行。否则应根据受潮程度,选择适当的方式进行干燥。

第四节 绝缘油试验

电力变压器中充注的绝缘油,除起绝缘作用外,同时也是冷却的媒质。绝缘油的质量不但决定着电力变压器绝缘的电气强度,而且也影响它的使用寿命。油中机械杂质可能沉淀于绕组绝缘上,减弱冷却效果,产生局部过热,并容易引起沿绝缘表面的闪络。油中如

果含有极少量的水分，就会大大影响其击穿强度。变压器油长期与空气接触，受到氧化作用，在油中产生不溶于水的酸及水溶性酸（这个过程在高温如120℃以上时，进行得十分迅速），后者对绝缘材料起腐蚀作用。

新运到工地的绝缘油必须按规程规定进行化学分析试验。随设备（装入变压器）运到现场的绝缘油，除去检查制造厂的试验资料外，还须取样进行简化分析和测量介质损失角正切值 $\tan\delta$ ，简化分析指闪光点、绝缘强度、酸价、酸碱反应、游离碳、水分和机械混合物等七项。

绝缘油的电气指标——击穿电压和 $\tan\delta$ 的测量是两项重要的试验。特别是油的介质损失角正切值 $\tan\delta$ 这个指标，常常未能引起人们足够的重视，即使是未经运行过的新油，因制造中净化不彻底或长期贮存不当，也可能使其 $\tan\delta$ 增大，影响电力变压器的绝缘降低，导致对试验结果的不正确判断。

以下分别介绍一下绝缘油的取样方法、击穿电压试验和介质损失角正切值 $\tan\delta$ 的测定等。

一、取样方法

对于绝缘油击穿试验来讲，取油样的工作十分重要。由于取样方法不正确，能使试验得出错误的结论，可能把好油当成坏油，或者延长了滤油时间，造成人力、物力的浪费。因此取样工作必须严格按照规定。即使如此，当发现油的击穿电压不合理地降低时，仍应重新取样，进一步核实试验结果。

油样应盛在具有磨沙瓶塞的广口玻璃瓶中。取油的数量可这样考虑：全分析试验时需要1.5公升，简化分析时需要0.8公升，仅做击穿电压试验时0.5公升已够用。

油样瓶每次使用前均须用纯净的汽油、无水酒精或苯仔细清洗，最后再用干净的蒸馏水冲洗数次，随即放到温度为100~110℃的恒温箱中进行烘烤，约经两小时，待温度降下，盖好瓶塞以备使用。

从设备中取油样时，应从其下部的专用油样阀门取出，并先放出1~2公升的油以冲洗阀门油道附近的积污，然后用油冲洗油样瓶两次，随即令油流稳定地流入油样瓶中，充满后盖上瓶塞，贴上标签，注明油样来源。如果油样系送往外地试验或需保存较长时间，可用干净牢固的纸将瓶口包好，外面用蜡封上。

从散装运到工地的油桶中取样时，应从5%（不少于2桶）的桶中取出，经混合后装入油样瓶中。从油桶取样可用直径约2厘米、长约半米的玻璃管，分别从所选的桶中抽取。取前先将油桶滚动或摇动，以使其混合均匀，然后将玻璃管插入油中，再用拇指堵住玻璃管上口，油即可被带出。玻璃管在使用前也应经过清洗和干燥。

取样时还要注意油样瓶的温度应接近油的温度，最好略高于油温数度。因热油注入冷瓶时常会使附近空气中的水分在瓶的内壁结露，使油样受潮。取油样时最好戴上口罩，不要对着瓶说话，以免呵气喷入油中。

二、击穿电压试验

在试油杯内，当加于两个电极之间的电压逐渐升高达到一定数值时，电极间的油遂被击穿，此时的电压称为油的击穿电压。每厘米绝缘油的击穿电压称为油的击穿强度，以 E

表示

$$E = \frac{U}{d} \text{ (千伏/厘米)} \quad (1-1)$$

式中 U ——击穿电压有效值(千伏);

d ——电极间距离(厘米)。

我国规定使用直径为25毫米的平板形标准电极进行绝缘油击穿试验,极间距离规定为2.5毫米。试验结果用击穿电压表示,不需要换算为击穿强度。

绝缘油的击穿过程大致如下:当电压逐渐升高,处于电极附近油中的纤维、水分等杂质(它们的介电常数 ϵ 都比油的要大)便向电场强度较大处移动,并顺着电场的方向在电极间逐渐构成一个“小桥”,当电压升到一定值时即沿此小桥放电。

影响绝缘油击穿电压的因素很多,对现场工作有意义的主要是水分、温度、杂质和升压速度。

水分对绝缘油击穿强度的影响最大,在干燥的油中即使加入万分之一的水,就可能使其击穿电压降低约8倍。而且,越是干燥的油,吸收潮气的速度越快,有时对着油杯呵一口气也能使击穿电压降低。可见水分对绝缘油击穿强度的影响之严重,做试验时应该引起充分注意。

油中如含有纤维、碳粒等杂质,也会使油的击穿电压降低,因为它们是构成“小桥”的材料。有时,纤维的来源是压滤机中不符合要求的滤纸。

受潮的油其击穿电压受温度的影响比较明显,如图1-2所示的曲线,在零下5~10℃时击穿强度有极小值,而60~70℃时出现极大值。极小值是由于此时水分已成为水的结晶体,容易构成小桥。温度高于0℃后,所含的水分还大都处于乳化状态,油的击穿强度较低,随温度继续升高,乳化状态的水逐渐溶解于油中,转变为分子状态的水,遂使击穿强度升高。击穿电压达到最大值以后又渐降低,则是由于水分开始汽化的缘故。可见水分在油中的状态不同,影响击穿电压的程度也不同。对于干燥的油,温度的影响并不明显,可以认为在100℃以前击穿电压大致是不变的,图1-3可表明这种情况。

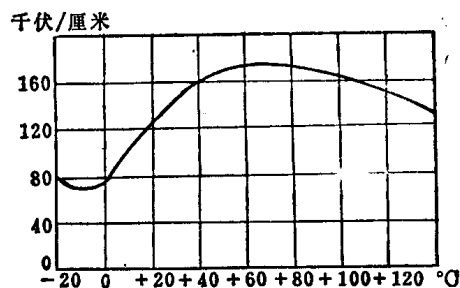


图 1-2 油中含有水分时击穿强度与温度的关系

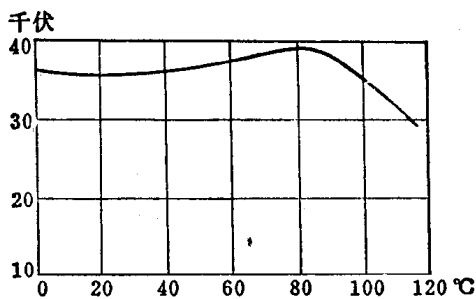


图 1-3 干燥的油击穿电压与温度的关系
(间隙0.75毫米)

做油的击穿电压试验时,如果升压速度太快,将使试验结果不正常地偏高,因在电场作用下需要一定的时间才能形成极间的“小桥”,升压速度太快会使这种“小桥”来不及形成。

此外，击穿试验所用电极的形状对击穿电压也有影响，以平板形和球形电极为例（图1-4），前者极间电场分布均匀，易于使油中杂质连成“小桥”，故击穿电压较 大程度上决定于杂质的多少；后者由于球间电场强度比较集中，杂质有较多的机会碰到球面，接受电荷后又被强电场斥去，故不容易构成“小桥”。因此，若为检查油中的水分等杂质时，宜用平板电极；而为了试验油本身的击穿强度，则宜用球形电极。前已指出，我国规定以平板电极作为标准试验电极，如图1-4(a)所示。

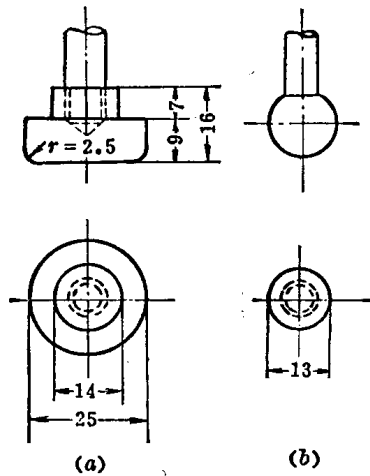


图 1-4 绝缘油击穿电压试验所用电极（单位：毫米）
(a) 平板电极；(b) 球形电极

绝缘油击穿电压试验步骤如下：

(1) 清洗和干燥试油杯、标准量规、搅拌用的玻璃棒和作为杯盖的玻璃板（与清洗、干燥油样瓶的方法相同）。

(2) 待油样的温度接近室温后，将油样瓶慢慢颠倒两次，使之混合均匀（而不产生泡沫）。用油样再将试油杯、量规等冲洗两三次。

(3) 调好电极间隙为2.5毫米，令油样顺搅拌用的玻璃棒缓缓流下，直到油面超过电极不少于15毫米（见图1-5），盖上玻璃盖，静置15分钟。

(4) 接通电源，以大约每秒2000伏至3000伏的速率平稳升压，直到杯中发生击穿，开关自动跳闸，即可降回调压把手，切断电源，并记录击穿前达到的最高电压值，即击穿电压。

(5) 用直径为2毫米的玻璃棒驱除电极间因击穿而产生的炭粒，搅拌时不要产生泡沫，同时不要用手接触油，搅拌后静置5分钟。

(6) 重复(4)和(5)项中所述操作，共得六个击穿电压数据，取后五次的平均值作为此油样的击穿电压值。其第一次击穿电压值常偏高，故舍去不用。应注意任一次击穿电压值与五次平均值比较，相差不得超过25%。个别数据偏离平均值过多说明系偶然因素的影响，这次试验即作废，需另取油样，重新试验。

绝缘油的击穿电压试验应在5~35℃的环境温度下进行。新绝缘油的击穿电压标准如表1-3所示。

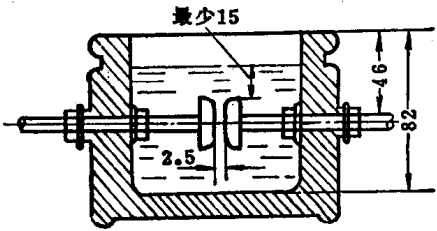


图 1-5 绝缘油击穿电压试验用油杯（单位：毫米）

表 1-3 新绝缘油击穿电压标准

充油设备的额定电压(千伏)	15及以下	20~35	44~220
最低允许击穿电压(千伏)	25	35	40

做绝缘油击穿电压试验的设备，现场最常用的是专门设计的“油耐压试验器”，这种成套装置只要使用前将外壳可靠接地，对操作人员是比较安全的。采用其他型式的试验变压器进行击穿试验时，如果高压部分暴露在外面，应特别注意高压工作的保安制度。

击穿试验所用的黄铜电极，其极面应光滑无伤痕，在使用中因放电而遗留炭迹时，可用柔软的绒布擦净。为了防止击穿时电极间的电弧产生大量炭粒和气体，可在试验变压器的高压侧串以1~5兆欧的电阻以限制电流。串电阻后应重新调整过流保护。

试完后的绝缘油可以留在杯中，并将油杯置于干燥处，以防止油杯受潮。下次使用如相隔时间不久，且上次所试油样是合格的油，则油杯可只用新油样冲洗数次，不需再进行干燥。

三、绝缘油的介质损失角测量

老化了的绝缘油其介质损失角正切值 $\tan\delta$ 比之新绝缘油可能增大数十倍以至上千倍，可见绝缘油的 $\tan\delta$ 是判断油质和老化程度的灵敏指标。随设备运至工地的绝缘油，如仅做简化分析，则应加测 $\tan\delta$ 。

油的 $\tan\delta$ 与其击穿电压没有内在联系， $\tan\delta$ 值很大的油其击穿电压可能反而很高。击穿电压主要反映油的染污情况（如水分、纤维等杂质），而 $\tan\delta$ 则表征油的质的变化，这是二者根本不同之处。

酸价大的油， $\tan\delta$ 值也高，但酸价与 $\tan\delta$ 也不是简单的直线关系。常遇到酸价合格而 $\tan\delta$ 大大超过标准的绝缘油。

油的 $\tan\delta$ 随温度升高而增大，越是老化的油其 $\tan\delta$ 随温度的变化也越快。例如，老化了的油在20℃时的 $\tan\delta$ 值仅相当于新油 $\tan\delta$ 值的2倍，在100℃时可能相当20倍。也会遇到这样的情况，20℃时油的 $\tan\delta$ 值不大，而70℃时所测 $\tan\delta$ 又远远超过标准。因此应尽量在高温时测量油的 $\tan\delta$ 值，《交接试验标准》规定必须在70℃温度下测量。

油的 $\tan\delta$ 还随电场强度的大小而变化，一般规定在电极间隙中施加的电压为每毫米1000伏。电场强度再增大时测量的 $\tan\delta$ 值也相应增大，特别是在温度较高时。

油的 $\tan\delta$ 并随施加电压的时间而变化，故应在施加电压一定时间后再精确平衡电桥，而不可一经升起电压便忙着读数。

图1-6(a)和1-6(b)是两种不同型式的测量油的 $\tan\delta$ 的油杯，杯体用黄铜或不锈钢制成，铜制杯体的表面最好镀镍或铬。电极表面应尽量光滑，优质的油杯能达到V9的光洁度。空杯电容不宜小于50微微法。上述油杯的工作电压均为2000伏，试验电压为4000伏。油杯具有插温度计的测温孔。

测量绝缘油的介质损失角正切值 $\tan\delta$ 时，最好采用QS3型高压电桥，这种电桥所测 $\tan\delta$ 值的范围较广（从0.01%到100%），准确度也较高。在施工现场，为了初步判明油的质量，也可使用QS1型高压电桥，它的精确度虽不高，但因新油和老化油的 $\tan\delta$ 相差很大，所以，QS1型电桥测得的近似结果，也可以说明问题。此外，当具有M型介质损失角试验器时，也可用以测量油的 $\tan\delta$ 。

现以QS3型电桥和图1-6(b)所示油杯为例，说明绝缘油介质损失角正切值 $\tan\delta$ 的测量步骤：

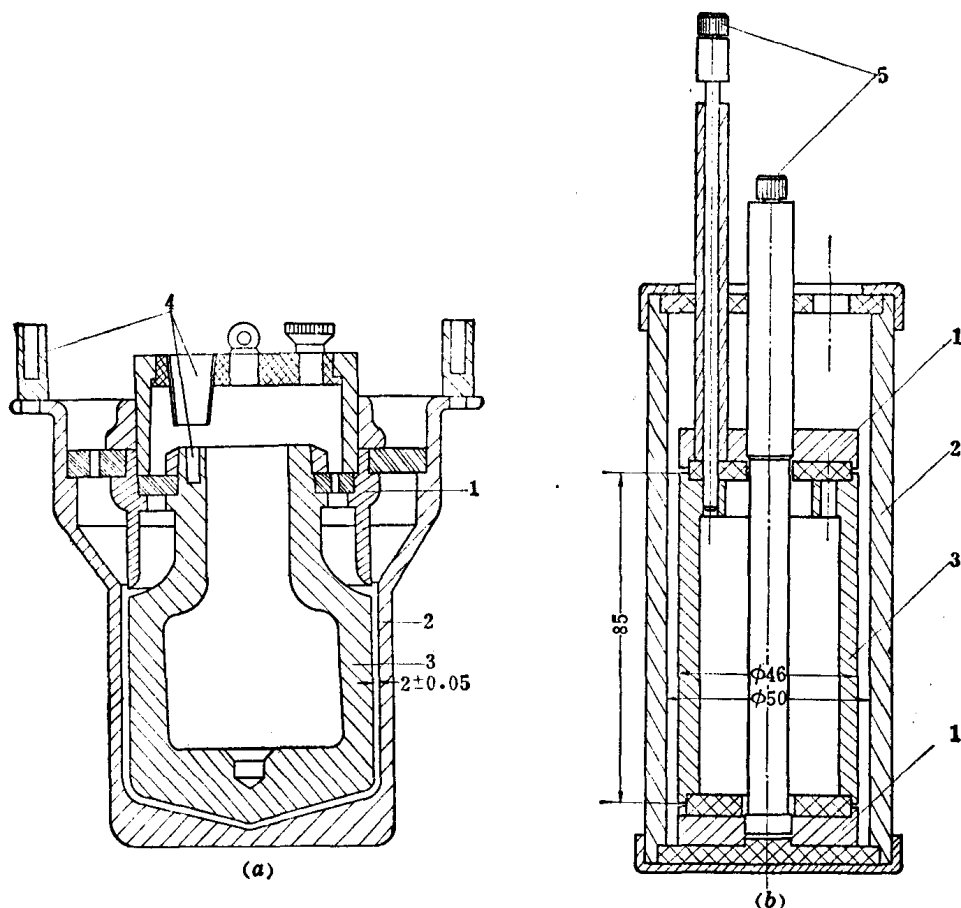


图 1-6 绝缘油的介质损失角正切值 $\tan\delta$ 测量杯(单位:毫米)

(a) I、E、C型; (b) 圆柱型

1—遮蔽环(保护环); 2—外电极(高压电极); 3—内电极(低压电极); 4—接线孔; 5—接线柱

(1) 将内电极从外电极中取出, 对二电极进行清洗。如油杯的绝缘部件由有机玻璃做成, 应先用汽油清洗二~三次, 再用无水酒精洗两次, 然后用热风(如电吹风机)吹干, 或放在不超过 75°C 的烘箱中烘干。对于绝缘部件由其他耐高温材料做成的油杯, 可以应用苯或四氯化碳清洗, 然后放在 $100\sim 110^{\circ}\text{C}$ 的烘箱中干燥2小时。油杯拆开和组装时注意不要碰伤电极的工作表面。

(2) 油杯注油前测定空杯的 $\tan\delta$ 值和空杯电容值, 所测结果应符合该型油杯的标准。在油杯连续使用情况下不需测定空杯 $\tan\delta$ 和空杯电容。

(3) 用被试油样将油杯冲洗二~三次。

(4) 缓缓将油注满, 使油中气泡得以逸出。

(5) 将油杯放在绝缘板上。此板的绝缘电阻不低于2500兆欧, 能承受工频交流电压5000伏、1分钟。

(6) 试验地点应选择没有强电磁场干扰的地方。按图1-7接线, 注意电桥各部件取同相电源。放大器要提前15分钟接通电源, 以使其能稳定地工作。

(7) 油样静置10~15分钟, 然后合上电源, 升压至1.5倍试验电压, 停1分钟, 应无

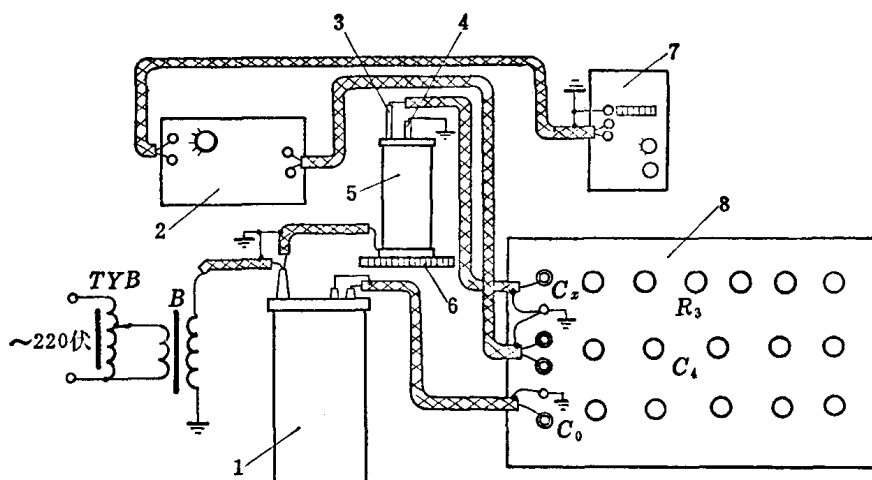


图 1-7 使用QS3型高压电桥测量绝缘油的 $\text{tg}\delta$ 之接线示意图

1—标准电容器；2—放大器；3—油杯的低压电极导电杆；4—油杯的屏蔽电极导电杆；5—油杯的高压电极；6—绝缘板；7—振动式检流计；8—QS3型电桥本体

电离现象。

(8) 按照QS3型电桥的使用说明平衡电桥，测出常温下 ($10\sim 30^\circ\text{C}$) 油的 $\text{tg}\delta$ ，所测数值应按表1-4换算至 20°C 之值。

表 1-4 变压器油 $\text{tg}\delta$ (%) 按温度换算系数

油温($^\circ\text{C}$)	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
系 数	1.38	1.35	1.31	1.27	1.24	1.20	1.16	1.12	1.08	1.04	1.00
油温($^\circ\text{C}$)	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
系 数	0.96	0.91	0.87	0.83	0.79	0.76	0.73	0.70	0.67	0.63	

《交接试验标准》规定对绝缘油只测量 70°C 温度下的 $\text{tg}\delta$ 值，其标准对新油规定为不应大于0.5%，运行中的油规定为应不大于2%。但在时间允许情况下，不妨加测常温下的 $\text{tg}\delta$ 值，以积累数据，为可能遇到的无条件加温的测量创造条件。

(9) 在恒温箱中将油加温至 $70\pm 2^\circ\text{C}$ ，再测油的 $\text{tg}\delta$ 值。

(10) 然后将油样倒掉，再注入同一批油样，进行常温和 $70\pm 2^\circ\text{C}$ 温度下的测量。

两次测量结果之差如不大于 $10\%\pm 0.0001$ ，则取两次的平均值作为测量结果。

(11) 在试验记录上应注明：油杯型式、空杯电容值、空杯 $\text{tg}\delta$ 值、试验时油温、相对湿度、高压电桥型号和测量时的试验电压。

使用携带型高压电桥 (QS1型) 进行测量时，须应用正接线，如图1-8。测量步骤可参考前述QS3型电桥部分及QS1型电桥的使用说明书。

使用M型介质损失角试验器测量油的 $\text{tg}\delta$ 时，除了由于测量时在被试回路引入无感电