1 变压器的基础知识

1.1 变压器的基本原理

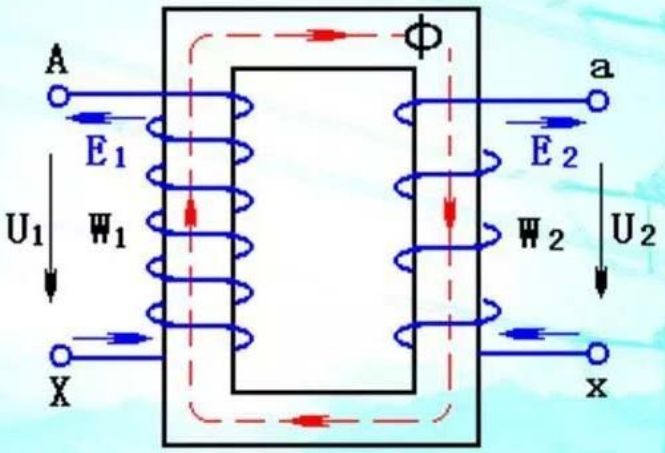


图1.1 变压器的基本原理

变压器在电力系统中主要用于电源的升压和降压、配电等。变压器主要部件是线圈和铁心。线圈中的感应电势E(伏)与铁心中磁通的最大值Φ_m(麦克斯威)、线圈的匝数W(匝)、电源频率f (赫芝)、铁心的截面积S(平方厘米)和磁通密度的最大值B_m（高斯）有如下关系：

$$E = 4.44 f \Phi_m W \times 10^{-8}$$

$$= 4.44\, f\, B_m S W \times 10^{-8} \qquad (1.1)$$

在不考虑变压器阻抗时可认为电势E等于电压U。

从公式（1.1）可知，当电压升高时，如果频率不变，磁通就会增加。铁心磁路中的磁通到达一定数值后就会饱和，励磁电流会急剧增加，如图1.2所示。变压器设计时为了充分利用材料，减小体积，通常都把额定电压下的磁通密度选择在磁化典线的拐弯点。在做变压器的感应耐压试验时，施加的电压要比额定电压大得多，为了防止铁心饱和(限制励磁电流)，可以提高试验电源频率。

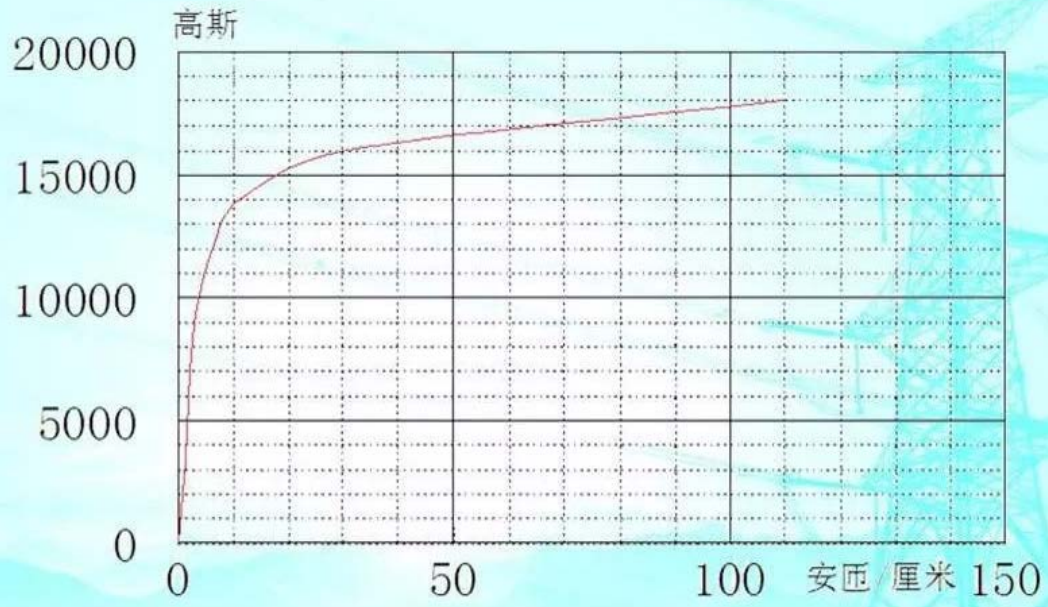


图1.2　典型的铁心磁化曲线

1.2 变压器的变比

当在一个磁路上有几个绕组时，由于穿过线圈的磁通是一样的，所以感应的电压就与线圈的匝数成正比，它们的比值K称为变比：

$$K = \frac{U_1}{U_2} = \frac{W_1}{W_2} \qquad (1.2)$$

1.3 绕组端子的极性和标号

1.3.1 绕组的极性

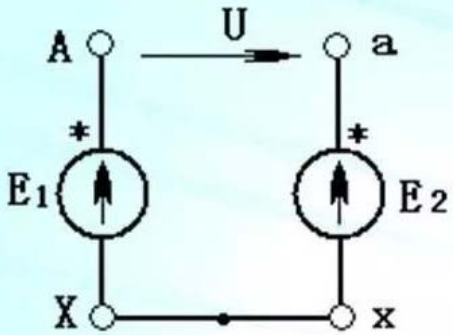
在同一个磁路上如果有两个以上的绕组，当磁路中的磁通发生变化时，各个绕组上感应电压极性相同的端子称为同极性端或称为同名端。也可以说，在同极性端施加同一极性的直流电流时，它们在磁路中产生的磁力线方向是相同的，如图1.1中A和a是同名端；X和x也是同名端。在电路图中同名端用“·”或“*”表示。

1.3.2 绕组的标号

绕组端子的标号用以区分接线端子，比如在半绝缘结构的变压器中，用A表示高压绕组的高压端子，X表示高压绕组的低压端子，用a表示低压绕组的高压端，用x表示低压绕组的低压端，它们可以承受的对地电压是不一样的，但是在变压器中并不规定A和a一定是同极性端子。

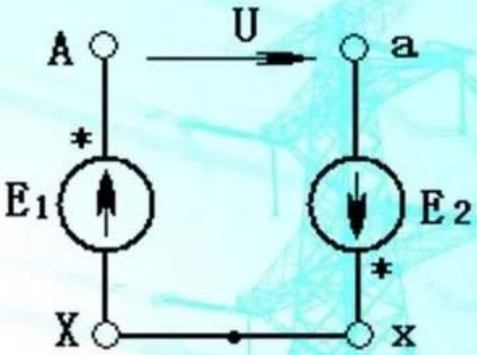
1.4 加极性和减极性

当把变压器的X和x端子连在一起，用电压表测量A和a之间的电压，会有两种情况：当A和a是同极性端子时，测出的电压是U1－ U2的值，这种标号就是减极性的，减极性说明两个绕组的感应电压是同相位的；如果A和x是同极性端子，测量的电压是U1＋U2的值，这两个绕组就是加极性的，这说明两个绕组的感应电压是反相的。



$U=E_1-E_2$

a　减极性



$U=E_1+E_2$

b　加极性

图1.3　变压器绕组的减极性和加极性

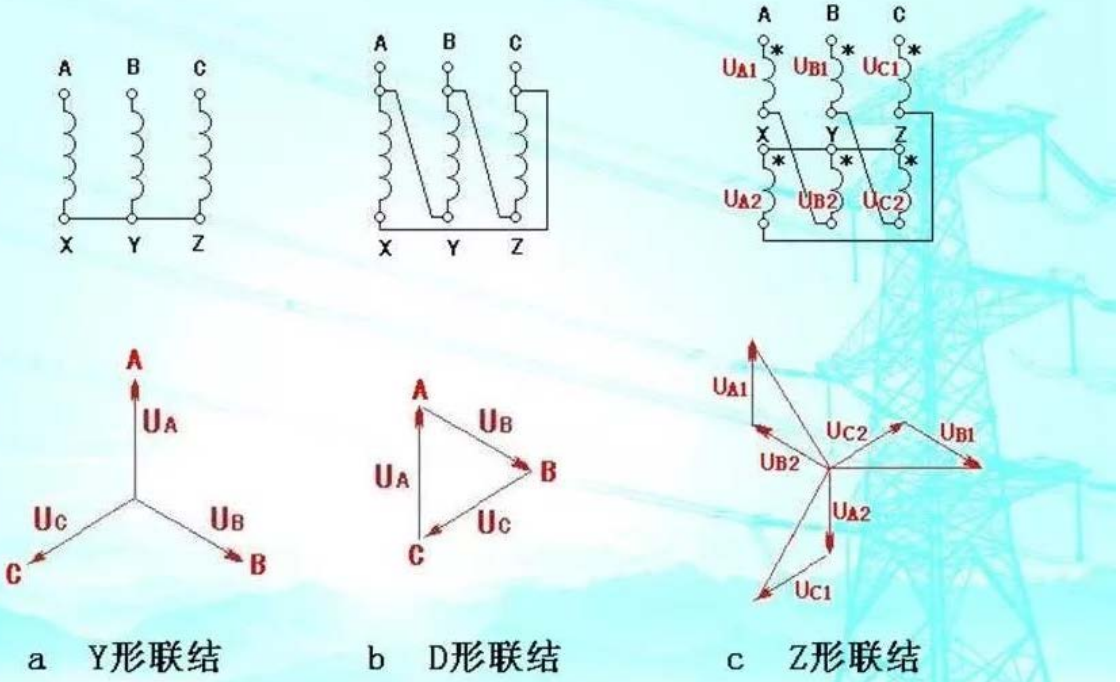
1.5 三相变压器

三相变压器可以由三台单相变压器组成，这种结构主要用于特大容量的变压器或运输困难的场合。大部分三相变压器是采用一体化结构。

1.6 三相变压器的联结组标号

三相变压器的联结组标号包含两个内容：

1）说明三相绕组的联结方法。最常用的三种联结是星形、三角形和曲折形联结，分别用**Y**、**D**、**Z**（高压绕组）或**y**、**d**、**z**（中、低压绕组）表示，对有中性点引出的星形和曲折形联结则用**YN**、**yn**、**ZN**、**zn**表示。实际接线见图**1.4**。采用**Z**联结时，当零序的雷电流入侵时，每个铁心柱上、下两个绕组产生的磁通大小相等，方向相反，正好互相抵消，避免了在绕组中感应出雷电过电压。



a　Y形联结　　b　D形联结　　c　Z形联结

图1.4　三相绕组的联结方式

2）说明高低压侧线电压的相位关系。通常将高压绕组的AB相线电压作为分针定在时钟的12点方向，将低压或中压绕组ab相的线电压作为时针，时钟上的12个钟点每个钟点之间相差30度，按照电工学中相量逆时针方向旋转为正方向，当低压绕组ab线电压超前高压绕组AB线电压30度时，相当于时针指在11点，联结组数就是11，如图1.5。Y和D组合的绕组可接成奇数联结组(即1、3、5、7、9、11)，而Y和Y或D和D组合的只能接出偶数联结组(即2、4、6、8、10、12)。

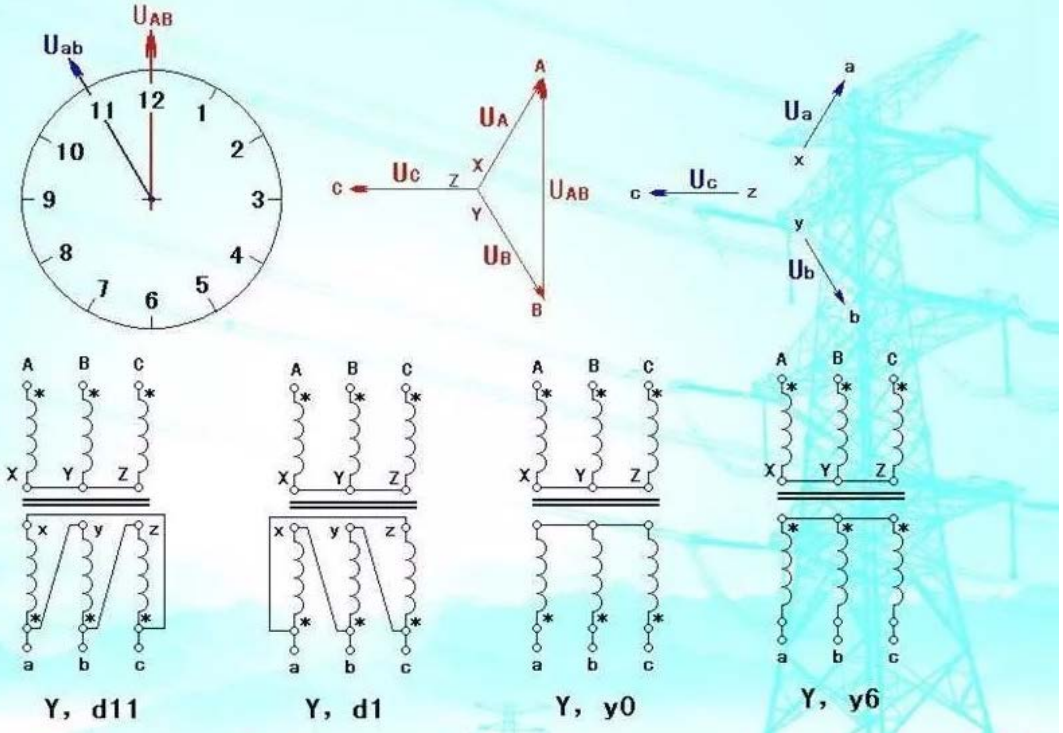


图1.5　三相变压器的联结组数

1.7 分裂绕组变压器

将普通双绕组变压器的低压绕组分成两个完全对称的绕组，分别独立供电，其目的是限制短路电流，并可以降低断路器的额定电流。现在大型电厂的启动变压器和高压厂用变压器一般都采用分裂绕组变压器。

1.8 变压器的绝缘结构

变压器内部绝缘由主绝缘和纵绝缘构成：

1）主绝缘：包括绕组间绝缘、相间绝缘、引线绝缘、分接开关绝缘；

2）纵绝缘：包括同一绕组中的不同线饼间、层间、线间及绕组对静电环间的绝缘、同一绕组各引出线间的绝缘、分接开关各部分间的绝缘。

按绕组首端和尾端绝缘水平可划分为：

1）全绝缘结构：绕组的首端和尾端的绝缘水平相同。按照我国的标准，66kV以下的变压器均为全绝缘结构。

2）分级绝缘结构：又称为半绝缘结构，它是指变压器的绕组在靠近中性点部分的主绝缘水平比绕组端部的绝缘水平较低的一种结构。分级绝缘的变压器中性点的绝缘水平又分为直接接地和不直接接地两种，220kV及以上的变压器中性点直接接地的，其额定外施耐受电压均为85kV；不直接接地的，额定外施耐受电压较高，并与变压器的额定电压有关。

采用分级绝缘可减小变压器的几何尺寸，节约材料，并使工艺简化，降低变压器的造价。但分级绝缘的变压器在投运或在运行中进行操作时，中性点一定要在接地的情况下进行。

1.9 电抗器

1.9.1 电抗器概念

电抗分为感抗和容抗，比较科学的归类是感抗器（电感器）和容抗器（电容器）统称为电抗器，然而由于过去先有了电感器，并且被称谓电抗器，所以现在人们所说的电容器就是容抗器，而电抗器专指电感器。

1.9.2 电抗器分类：

1) 按结构及冷却介质：分为空心式、铁心式、干式、油浸式等

2) 按接法：分为并联电抗器和串联电抗器。

3) 按功能：分为限流和补偿电抗器。

4) 按用途：电力网中常见的电抗器有以下几种。

并联电抗器： 用于无功补偿或改善长输电线路上的电压分布

串联电抗器： 串联电抗器主要用来限制线路短路电流或电容器的合闸涌流，也有在滤波器中与电容器串联或并联用来限制电网中的高次谐波。

消弧线圈：消弧线圈广泛用于10kV-6kV级的接地系统，用于补偿接地点电容电流，达到消弧的目的。

平波电抗器：平波电抗器用于整流以后的直流回路中，抑制整流后直流电压中的纹波。

通信电抗器：又称阻波器。串联在兼作通信线路用的输电线路中，用以阻挡载波信号，使之进入接收设备。

2 变压器（电抗器）试验项目（高压试验）

2.1 预防性试验项目

① 绕组直流电阻
② 绕组绝缘电阻吸收比或极化指数
③ 绕组连同套管的交流耐压试验（干式变压器）
④ 绕组连同套管的tanδ测量
⑤ 电容型套管的tanδ测量
⑥ 铁芯及夹件的绝缘电阻
⑦ 有载分接开关试验部分项目
⑧ 变压器套管试验
⑨ 绝缘油试验
⑩ 红外测温

2.2 交接及大修试验项目

a) 绕组连同套管的交流耐压试验

b) 穿芯螺杆、铁轭夹件、绑扎钢带、铁芯、线圈压环及屏蔽等的绝缘电阻

c) 绕组泄漏电流

d) 绕组所有分接头的电压比

e) 校核三相变压器的组别或单相变压器极性

f) 空载电流和空载损耗

g) 阻抗电压和负载损耗

h) 绕组变形（频率响应）测量

i) 局部放电试验

j) 有载分接开关试验

k) 套管中的电流互感器试验

l) 全电压下空载合闸试验

m) 变压器相位检查

n) 零序阻抗测量

3 绕组直流电阻测量

3.1 测量目的

1）检查绕组焊接质量；

2）检查绕组导体或引出线是否存在断股或开路问题；

3）检查层、匝间有无短路的现象；

4）检查分接开关接触是否良好。

3.2 测量方法

目前基本上是采用直流电阻测试仪进行测量，测量接线见图3.1。

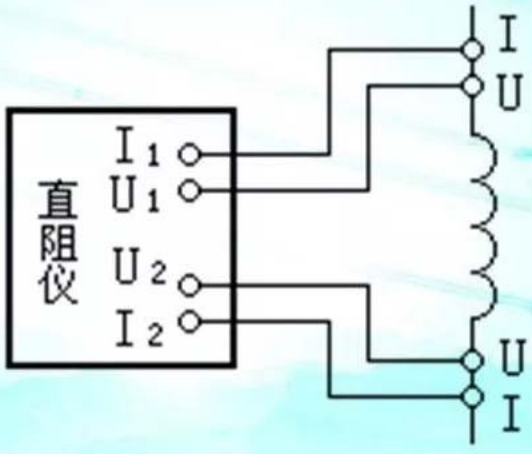


图3.1 绕组直流电阻测量接线

3.3 注意事项

3.3.1 测量前

1) 记录变压器绕组温度和绝缘油温度；

2) 测量端子应接触良好，必要时应打磨测点表面；

3) 调节无载分接开关时，应来回转动几次触头，使触头接触良好；

4）测量时非被测绕组不宜短路，各绕组间也不能通过接地开关与大地形成短路；

5）当测量线的电流引线和电压引线分开时，应将电流引线夹于被测绕组的外侧，电压引线夹于被测绕组的内侧，这样才能避开接触电阻的影响。如图3.1所示

3.3.2 测量中

1）对于中小型的变压器，要注意测量电流不宜超过变压器额定电流的20%，以免线圈发热造成直流电阻增加；

2）测量大型变压器低压绕组的直流电阻时，宜选择50A～100A的测量电流，以免测量时间太长；

3）由于变压器电感大，数据的稳定需要一段时间，必须等待数据稳定后才能读数；

3.3.3 测量后

1）测量结束后，应待测量回路电流衰减到零后方可拆开测量接线，严禁未放电或放电不完全就断开测量回路，以免感应过电压损坏变压器或测量仪器，因为变压器中的感应电压是由下式决定的：

$$u = L\frac{di}{dt} \qquad (3.1)$$

即感应电压与电感L和电流的变化率成正比，如果电流不为零，突然切断电流相当于dt 等于零，电流的变化率为无穷大，理论上感应电压也是无穷大。

2）将测量结果换算到同一温度下，与历年试验数据或交接试验数据进行比较，换算公式如下：

铜绕组：
$$R_2 = R_1\frac{235 + t_2}{235 + t_1} \qquad (3.2)$$

铝绕组：
$$R_2 = R_1\frac{225 + t_2}{225 + t_1} \qquad (3.3)$$

3）当发现测量结果异常时，应首先排除测量过程的原因，比如测量部位接触不良、测量接线不正确（未按图3.1接线）、分接开关触头氧化、仪器工作不正常、由于电感影响读数尚未稳定等等，只有将外部因素排除后才能下结论。

3.4 不同连接方式绕组直流电阻的测量及计算

1）星形连接的绕组且有中性点引出时，分别测量三相绕组的直流电阻，即R_{AO}、R_{BO}、R_{CO}；

2）三角形连接或无中性点引出线的星形连接绕组，测量线间直流电阻，即R_{AB}、R_{BC}、R_{CA}；

3）必要时，可按以下公式将线间电阻换算为相电阻：

当变压器绕组为星形连接时（图3.2）

$$r_a = \frac{R_{AB} + R_{CA} - R_{BC}}{2} \qquad (3.4)$$

$$r_b = \frac{R_{AB} + R_{BC} - R_{CA}}{2} \qquad (3.5)$$

$$r_c = \frac{R_{BC} + R_{CA} - R_{AB}}{2} \qquad (3.6)$$

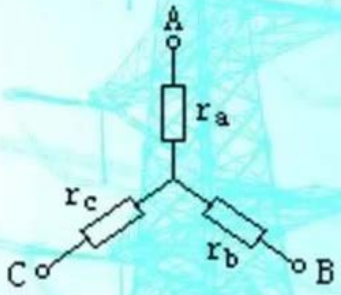


图3.2 星形连接绕组

当变压器绕组为三角形连接时（图3.3）

$$r_a = (R_{AB} - R_P) - \frac{R_{CA} \times R_{BC}}{R_{AB} - R_P} \qquad (3.7)$$

$$r_b = (R_{BC} - R_P) - \frac{R_{AB} \times R_{CA}}{R_{BC} - R_P} \qquad (3.8)$$

$$r_c = (R_{CA} - R_P) - \frac{R_{AB} \times R_{BC}}{R_{CA} - R_P} \qquad (3.9)$$

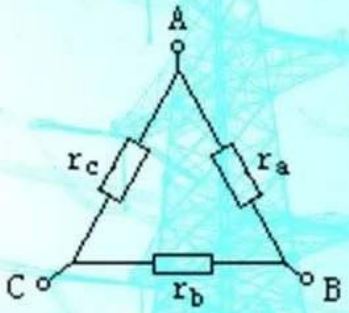


图3.3 三角形连接绕组

式中：$R_P = \frac{R_{AB} + R_{BC} + R_{CA}}{2}$ (3.10)

4 绕组绝缘电阻及极化指数测量

4.1 概述

本项目主要是检查变压器的绝缘是否有受潮、脏污以及贯穿性的集中缺陷。在测量变压器的绝缘电阻时宜待其上、下层油温基本一致后，再进行测量。

4.2 一次引线全部拆开时的试验

拆开各侧绕组连线，按规程规定选择兆欧表的测量电压，非测量线圈和变压器外壳接地。测量线圈和接地部位见表4.1。

表4.1 测量线圈和接地部位（双圈变压器）

序号	测量线圈	接地部位
1	低压	高压线圈和外壳
2	高压	低压线圈和外壳
3	高压和低压	外壳

续表4.1 测量线圈和接地部位（三圈变压器）

序号	测量线圈	接地部位
1	低压	高压、中压线圈和外壳
2	中压	高压、低压线圈和外壳
3	高压	中压、低压线圈和外壳
4	高压和中压	低压线圈和外壳
5	高压、中压和低压	外壳

4.3 不拆开一次引线时的试验

由于现场条件限制或为了缩短停电时间，试验中只拆开中性点连接线和低压绕组连接线，不拆开高、中压绕组的连接线，在测量高、中压绕组对低压绕组及地的绝缘电阻时会把外部瓷瓶、避雷器、CVT等设备的绝缘电阻包括进去，测量的数据不能真实地反映变压器绕组内部的绝缘状况。为了避开外部绝缘对高、中压侧绕组的影响，应采用特殊的测量方法，即测量高、中压绕组对低压绕组及铁芯和夹件的绝缘电阻。而低压绕组可以测量对地绝缘电阻。

1）准备工作

拆开高、中压绕组中性点连线，拆开低压绕组连线，打开铁芯和夹件的接地线。

2）测量接线

不同的兆欧表其屏蔽端子G对接地端子E的电压不一样，为了避免铁芯和夹件承受高电压，在不拆开一次引线试验时兆欧表电压不宜超过2500V。

表4.2　测量变压器绕组绝缘电阻时兆欧表接线

测量项目	兆欧表端子接线部位		
	L（－）	E（＋）	G
高压绕组对中、低压绕组及铁芯和夹件	高压绕组	中、低压绕组和铁芯及夹件	地（外壳）
中压绕组对高、低压绕组及铁芯和夹件	中压绕组	高、低压绕组和铁芯及夹件	地（外壳）
低压绕组对高、中压绕组及地	低压绕组	高、中压绕组及铁芯、夹件和地（外壳）	空

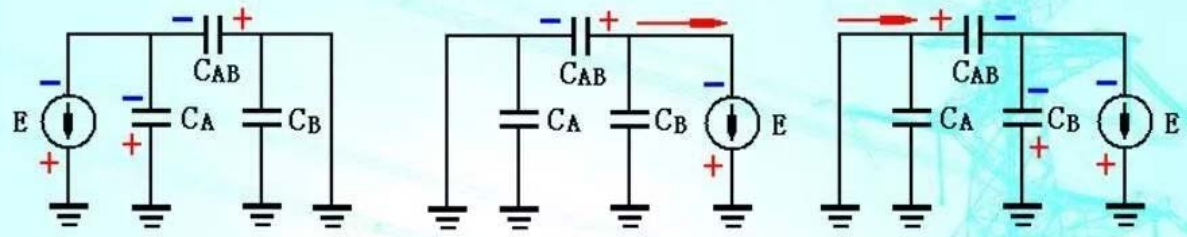
3）测量方法

按表4.2要求接好试验线。启动兆欧表后，分别读取15s、1min的数据，以便计算吸收比。当需要测量极化指数时，应读取1min和10min 的数据。

4.4 注意事项

1) 使用2500V或5000V（220kV及以上变压器）兆欧表进行测量，不拆一次引线时兆欧表电压不宜超过2500V，对于220kV及以上的变压器，兆欧表的短路电流最好不小于3mA，每次测量应采用同一型号的兆欧表；
2) 测量引线应绝缘良好；
3) 测量前、后应充分放电；
4) 测量另一相或同一相进行重复测量时，应将三相对地短路放电5分钟以上再测量，以消除吸收电流的影响。

如果不充分放电，三相测量结果可能会出现严重的不平衡现象。由于相对地和相间都存在分布电容，如果放电不充分，当对同一相连续测量时，相当于对同一个电容器连续充电，电容上的残余极化电势与兆欧表电压是串联相减的关系，充电电流必定是越充越小，所以绝缘电阻的测量结果是偏大；而换相时，由于接地端变换，相间电容的残余极化电势与兆欧表的电压是串联相加的关系，使电容的起始充电电流增加，导至绝缘的测量结果偏小。



a. 换相前　　b. 换相后-电荷释放　　b. 换相后-极化

绕组相间电容对绝缘电阻测量的影响

5）测量吸收比或极化指数时，如果因为异常原因造成测量中断，必须将被测量绕组重新短路对地充分放电后再重新开始测量。

6）如果怀疑套管脏污造成绝缘电阻偏低时，可用软铜线在套管适当位置（与测量端相隔2～3个瓷裙即可）绕一个屏蔽电极，与兆欧表的屏蔽端子连接，消除套管泄漏电流的影响。

4.5 测量结果的判断

通常有几种测量结果：

1）绝缘电阻和吸收比都很小，说明绝缘存在受潮或脏污的问题；

2）绝缘电阻偏小，但吸收比很大，通常是绝缘油绝缘电阻偏低或介质损耗偏大所造成，当吸收比不小于1.3时，绝缘电阻只要不小于前次试验值的70%，均认为合格，或与绝缘油的试验结果综合判断；

3）绝缘电阻很大，但吸收比较小，是绝缘良好的表现。规程规定1分钟绝缘电阻达到10000MΩ时，吸收比和极化指数只作为参考。

4）绝缘电阻上升到一定数值后突然下降，并有规律地反复出现，这种情况说明绝缘中某些部位存在局部放电现象，应读取绝缘电阻的最大值。

5 绕组连同套管的交流耐压试验

5.1 概述

交流耐压试验主要是考核变压器的主绝缘强度。对于油浸式变压器，必须在变压器充满合格的绝缘油并静止一定时间后才能进行试验，一般110kV以下变压器注油后要静止24小时以上，220kV变压器静止时间应大于48小时，500kV变压器静止时间应大于72小时。变压器的交流耐压应在绝缘电阻合格后方可进行。

5.2 试验接线

当变压器绕组对地电容较小，所需的试验设备容量不大时，可以采用常规的试验方法。试验接线见图**5.1**，被试绕组应首尾短接，目的是防止非加压端产生容升；其它绕组应短路接地，防止可能产生的悬浮高电压。

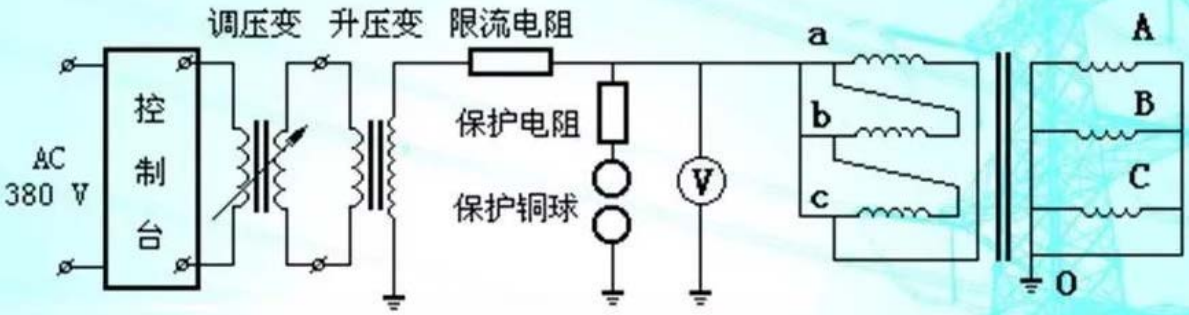
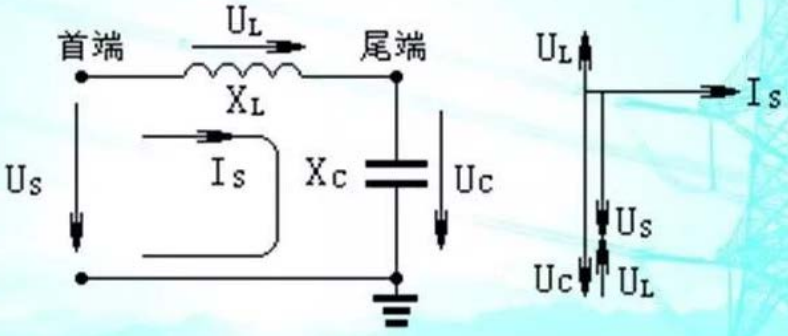


图5.1　变压器交流耐压试验接线图

如果试验时首尾不短接，在绕组的电感和分布电容的作用下可能会使非加压端产生容升的现象，图5.2是首端加压尾端产生容升的原理图（假定分布电容集中在尾端）。

由于线圈电感上的电压降与电容上的电压降方向相反，所以分布电容上的电压U_C等于试验电压U_S与电感压降U_L之和，使尾端电压比首端电压升高了U_L值，这就是所谓的容升现象。



a. 分布电容集中在尾端等值电路　　b. 相量图

图5.2　交流耐压中容升产生的原理

实际上绕组对地及绕组间的电容呈分布状态，如图5.3所示，但产生容升的原理是一样的。

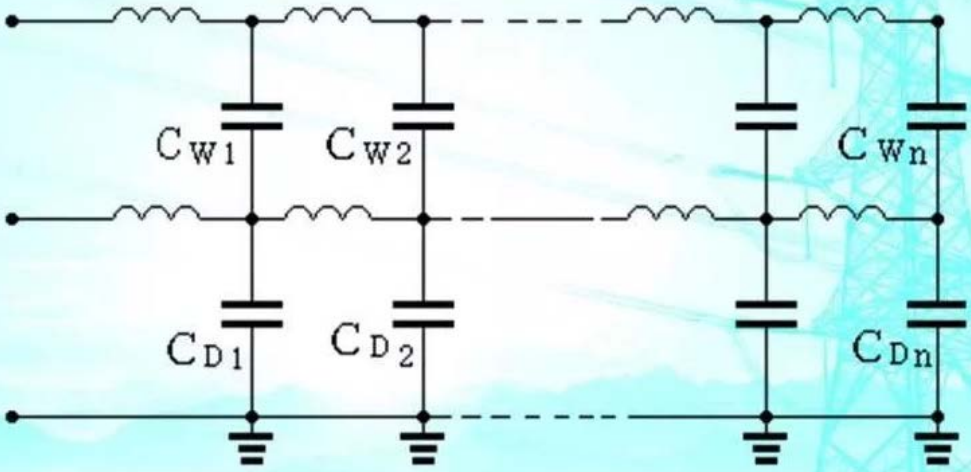


图5.3　绕组的分布电容

5.3 注意事项

1）电压表的高压端子必须直接接在被试品的高压端子上；

2）升压速度在试验电压的75%以下时不规定升压速度，但从75%试验电压升到100%试验电压则要求升压速度为每秒2%，即在12.5秒左右升到100%试验电压值，避免在接近规定试验电压附近停留太久的时间。

3）试验前后要做好高压试验的安全措施。

6 绕组的tanδ(介质损耗因数)测量

6.1 测量目的

检查主绝缘及绝缘油是否存在受潮、劣化等缺陷。

6.2 一次引线全部拆开时的测量方法

一次引线全部拆开时，可以测量绕组对地的tanδ，宜采用反接线的测量方法。测量部位和接地部位与表4.1相似。

6.3 不拆开高、中压引线时的测量方法

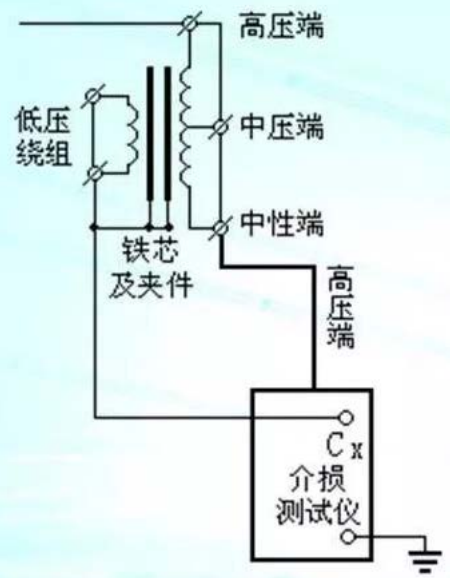
1）在不拆开高、中压引线的情况下，为了避开外部设备的影响，宜测量高、中压绕组对低压绕组及铁芯和夹件的tanδ（不宜测量对地的tanδ）。在测量前必须先打开铁心和夹件的接地端子，具体接线参考表6.1及图6.1。

2）被试绕组和非被试绕组的首尾端应短接，防止电感对测量的影响；

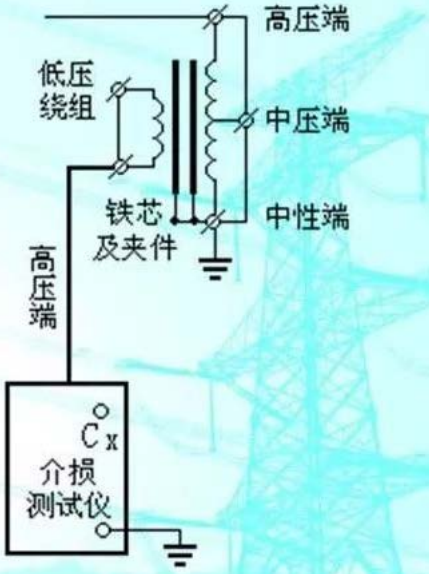
3）仪器外壳应可靠接地；

4）测量引线应绝缘良好，高压引线和低压引线之间应保持足够的电气距离；

5）测量完成后立即切断仪器上的高、低压电源，并拉开电源箱上的电源刀闸，在高压端上挂上地线后方可改换接线。



a 测量中、高压绕组 tanδ



b 测量低压绕组 tanδ

图6.1 不拆开高压侧一次引线时测量tan δ 的接线

表6.1 不拆开高压引线时测量变压器绕组tan δ 的接线

测量项目	接线法	tanδ测试仪端子接线部位		接地部件
		高压端	Cx端	
高、中压绕组对低压绕组及铁芯和夹件	正接法	高、中压绕组	低压绕组及铁芯和夹件	外壳
低压绕组对高、中压绕组及地	反接法	低压绕组	—	高、中压绕组及铁芯和夹件、外壳

6.4 测量注意事项

1) 一旦发现测量数据异常，应首先检查接线是否正确，是否存在接地线、测量引线接触不良的问题，试品套管外部是否脏污，测量引线绝缘是否良好，只有排除外部影响因素后才能下结论。

2） 对于110kV及以上的变压器，不少厂家为了避免变压器铁心棱角在运行中因局部场强过于集中而产生放电，在铁心柱上用铜带包一层屏蔽，该屏蔽层可以通过夹件接也可以通过铁心接地，所以也称为地屏，如图6.2所示。如果测量绕组对铁心的介损偏大，电容量很小（只有几十pF），就很有可能是地屏在变压器内部已经接地，使绕组对铁心的电流被屏蔽掉。当出现这种情况时，应改用反接法测量绕组对地的介质损耗。

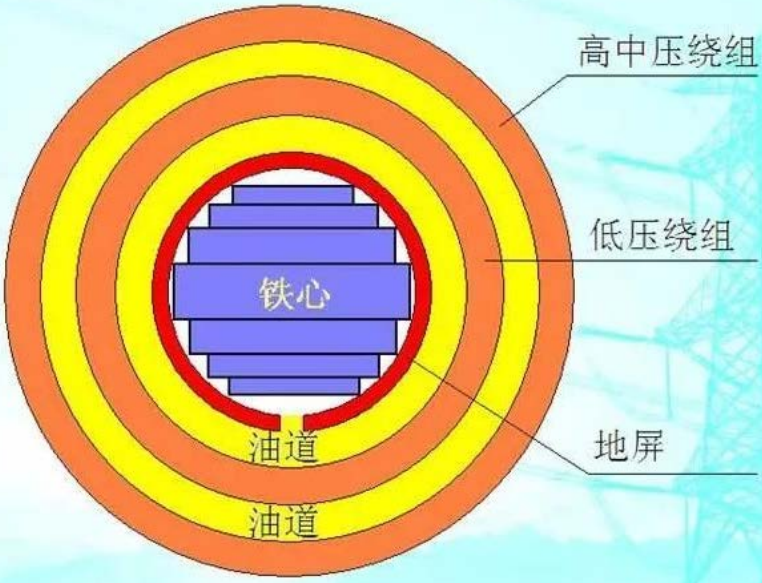


图6.2 地屏、线圈排列示意图

7 绕组泄漏电流测量

7.1 测量目的

检查变压器纯瓷套管是否存在开裂的局部缺陷。

7.2 测量接线

当一次引线全部拆开时，可以测量绕组对地的泄漏电流。当不拆开高压侧引线时，由于与前述相同的原因，测量中、高压绕组的泄漏电流时，只测量绕组对铁芯和夹件的泄漏电流，具体接线参考图7.1。

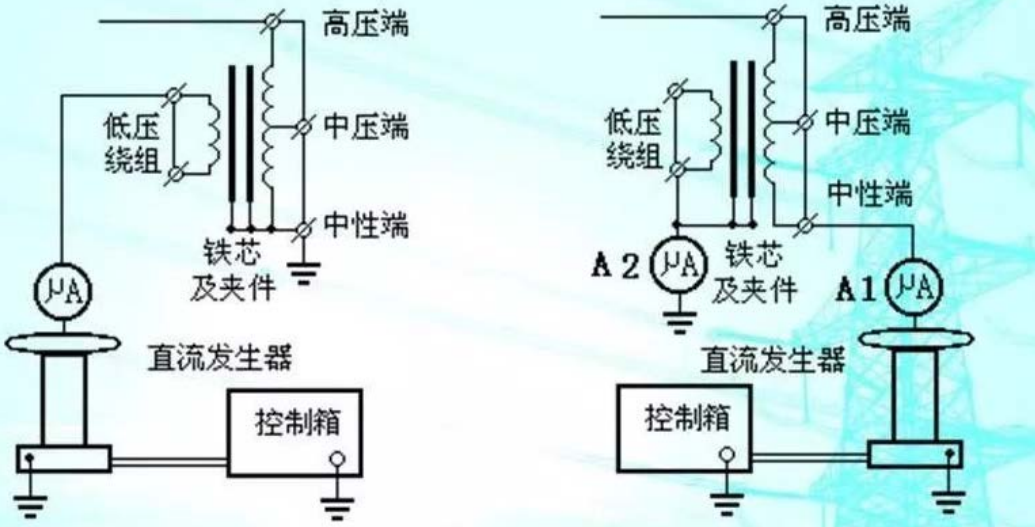


图7.1 不拆开高压引线时测量绕组泄漏电流接线图

7.3 测量方法

1) 按试验要求接好试验线路，仪器外壳应良好接地；

2) 确认直流发生器电压调节旋钮在零位后合上直流发生器电源开关；

3) 试验电压符合表7.1的规定；

4) 施加试验电压达到1min后，读取泄漏电流值。测量绕组对外壳的泄漏电流时，可直接读取高压侧微安表的示值；测量绕组对铁芯的泄漏电流时，应在铁芯、夹件与外壳之间外接一块微安表，读取外接的微安表示值。

7.4 注意事项

1) 试验前应将套管外表面擦拭干净，防止外部脏污影响测量的准确性；

2) 升压速度应平缓均匀，在升压过程注意微安表的示值，发现异常情况应停止试验，查明原因；

3) 读取数据后，降下试验电压，切断电源开关，用专用放电棒对试品进行充分的放电。

表7.1 油浸式电力变压器直流泄漏试验电压标准

绕组额定电压(kV)	6～10	35	220	500
直流试验电压(kV)	10	20	40	60

注：分级绝缘变压器仍按被试绕组电压等级的标准。

8 铁芯和夹件绝缘电阻测量

8.1 铁心和夹件的接地方式

变压器在运行中，线芯及其夹件等金属部件，均处在强电场之中，由于静电感应而在钱芯及金属部件上产生悬浮电位，可能在某些地方引起放电，这是不允许的，为此铁芯及其夹件都必须正确，可靠的接地。如果有两点或多点接地，在接地点之间便形成了闭合回路，当变压器运行时，其主磁通穿过此闭合回路时，就会产生环流，将会造成铁芯的局部过热，甚至烧毁某个金属部件及其绝缘。所以变压器不能多点接地。

8.2 测量目的

检查铁芯和夹件是否存在多点接地，防止多点接地产生环流。

8.3 测量方法

使用2500V兆欧表（对于运行年久的变压器可用1000伏兆欧表，分别测量铁芯对地、夹件对地、铁芯对夹件的绝缘电阻 。

8.4 运行中的检查方法

1)气相色谱法

当存在铁心多点接地故障时,气相色谱分析结果将反映存在700℃～1000℃的过热性故障，由于分接开关或引线接触不良、硅钢片局部短路也会产生局部过热的故障，应在退出运行后检查铁心的绝缘电阻进行确认。

2）接地电流检查法

用钳表检查铁心和夹件接地线的接地电流，一般不应超过0.3A。

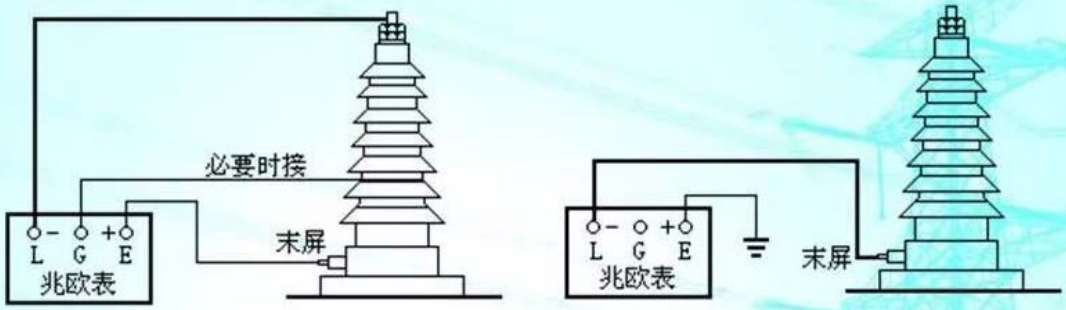
9 套管绝缘电阻测量

9.1 目的

检查套管是否存在受潮现象。

9.2 测量方法

采用2500V兆欧表测量，分别测量导电杆对末屏、末屏对地的绝缘电阻。试验接线见图9.1。



a 测量导电杆对末屏的绝缘电阻　　b 测量末屏对地的绝缘电阻

图 9.1 套管绝缘电阻测量

9.3 注意事项

1）测量前应打开末屏的接地，使末屏处于测量状态。

如果测量结果是末屏的对地绝缘电阻为零，应首先检查末屏的接地端子是否已经打开。典型的末屏接地方式如图9.2所示。

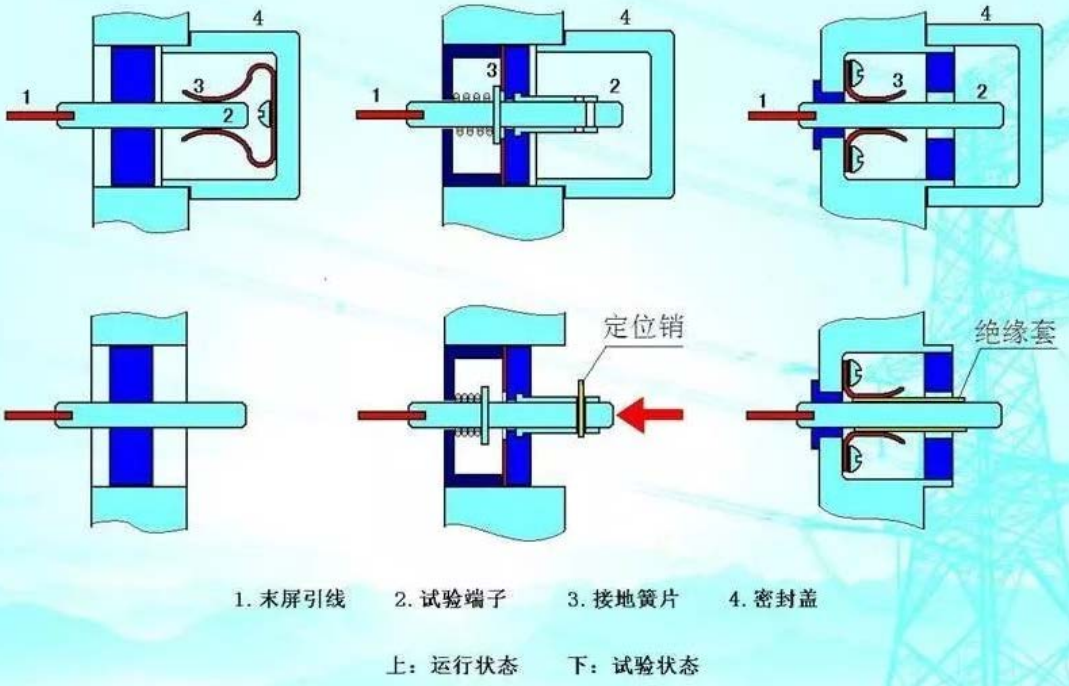


图9.2 末屏的几种接地方式

10 套管tanδ测量

10.1 测量目的

检查套管是否存在受潮现象。

10.2 测量接线和注意事项

1) 采用正接法测量导电杆对末屏的tanδ，测量接线见图10.1，试验电压为10kV；

2）与套管连接的绕组以及其它绕组应短接，防止电感影响测量结果；

3）套管外表以及末屏小套管应擦拭干净 。

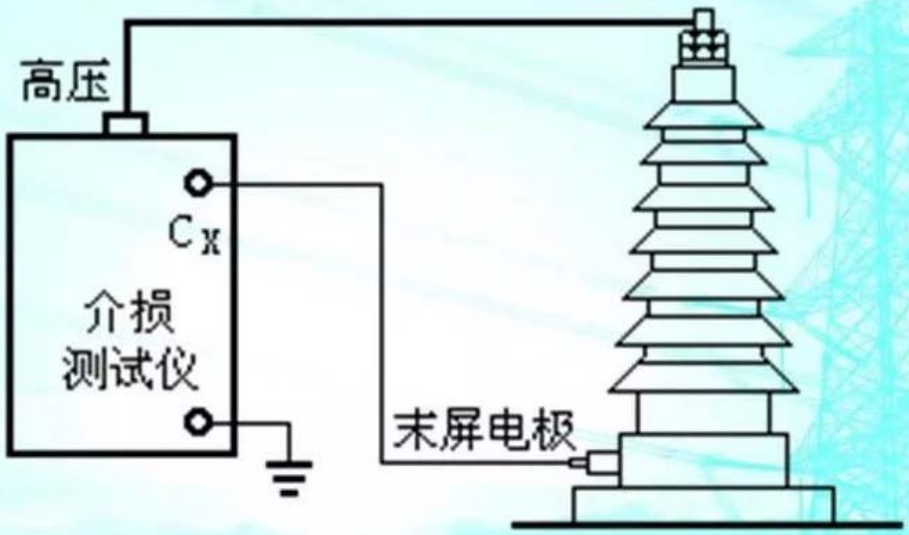


图10.1 套管tan δ 测量接线

11 绝缘油试验

11.1 试验目的

检查绝缘油是否存在劣化或污染,并判断设备内部是否存在潜伏性故障。

11.2 取油样

1）试样瓶要用洗衣粉等洗干净，用洁净水冲洗数次，烘干；

2）取油时油瓶及油的温度要高于或等于周围气温；

3）要在相对湿度低于75%的干燥天气下取油；

4）打开放油阀后，先放掉污油，然后用放出的干净油冲洗油瓶2次；

5）简化试验油样无特殊要求时取油量为1000ml，将油样注入油瓶，塞紧瓶口；色谱分析、含水量、含气量油样用100ml玻璃注射器密封取样80ml。

6）在瓶外贴上标签，注明何时、何处、何设备（何相）。

11.3 电气强度试验

11.3.1 试验方法

使用专用油杯和交流耐压装置进行试验或采用成套绝缘油试验装置进行试验。

11.3.2 试验步骤及注意事项

1) 试验条件：室温应在15～35℃，相对湿度不高于75%；

2) 清洗油杯：将油杯冲洗干净并烘干（洗涤时用干净的丝绢，不可用布和棉纱），电极表面有烧伤痕迹的不可再用，用规尺将电极距离调好为2.5mm；

3) 油样处理：油样应在实验室放置一段时间，使其温度与实验室温度接近；

4) 油杯注油：先用油样将油杯和电极冲洗两、三次，然后将油沿着杯壁徐徐注入油杯，尽可能不要产生气泡，然后盖上玻璃罩，静置10min；

5) 加压试验：按约每秒3kV的升压速度进行试验（升压速度过快时会造成击穿电压偏高，太慢则击穿电压偏低），记录击穿电压。每次击穿后要对电极间的油进行充分的搅拌，并静置5min后再重复试验；；

6) 数据处理：重复试验5次，取平均值作为油的击穿电压。

11.4 tanδ测量

11.4.1 测量设备

绝缘油的tanδ测量应采用专用的恒温电极杯和分辨率不小于0.01%的交流电桥进行测量。

11.4.2 测量步骤

1）清洗油杯：用清洁剂清洗油杯并烘干，要求空杯的tanδ值小于0.01%；

2）注油：先用被试油冲洗油杯两、三次，再注入被试油，静置10min以上，使油中汽泡逸出；

3）将被试油样加热到90℃，测量tanδ值。试验时的电场强度为300～1000V/mm。对电极间隙为2mm的试验油杯，试验电压应为600～3000V。

12 电抗器试验

电抗器分为高压电抗器（简称高抗）和低压电抗器（简称低抗），低抗又分为油浸式和干式。电抗器预防性试验程序除了没有低压绕组外，其它试验项目和程序与变压器相同，因而可以参照变压器的试验进行。

需要注意的是：

1）试验前应拆开中性点连接线；

2）干式电抗器只需在运行中进行红外监测；

3）有铁芯（或夹件）接地引出线的，应测量铁芯（或夹件）对地绝缘电阻；

4）套管有末屏时，应做套管试验。

以下是变压器非常规试验项目。

13 变压器空载试验

13.1 试验目的

测量变压器的空载电流和空载损耗，检查变压器是否存在以下缺陷：

1) 硅钢片间绝缘不良。

2) 铁芯极间、片间局部短路烧损。

3) 穿心螺栓或绑扎钢带、压板、上轭铁等的绝缘部分损坏，形成短路。

4) 磁路中硅钢片松动、错位、气隙太大。

5) 铁芯多点接地。

6) 线圈有匝、层间短路或并联支路匝数不等，安匝不平衡等。

7) 误用了高耗劣质硅钢片或设计计算有误。

13.2 试验接线

进行空载试验时，通常是在低压侧施加试验电压，高压侧开路。图13.1是双瓦特表法的接线图(可采用数据采集装置）。试验前应了解变压器的铭牌数据或出厂试验数据，并作为选择试验设备规格和容量的依据。试验电压尽量按额定电压，如果电压偏离额定值，由于变压器铁芯中的磁感应强度处在磁化曲线的饱和段，空载损耗和空载电流都会急剧变化。

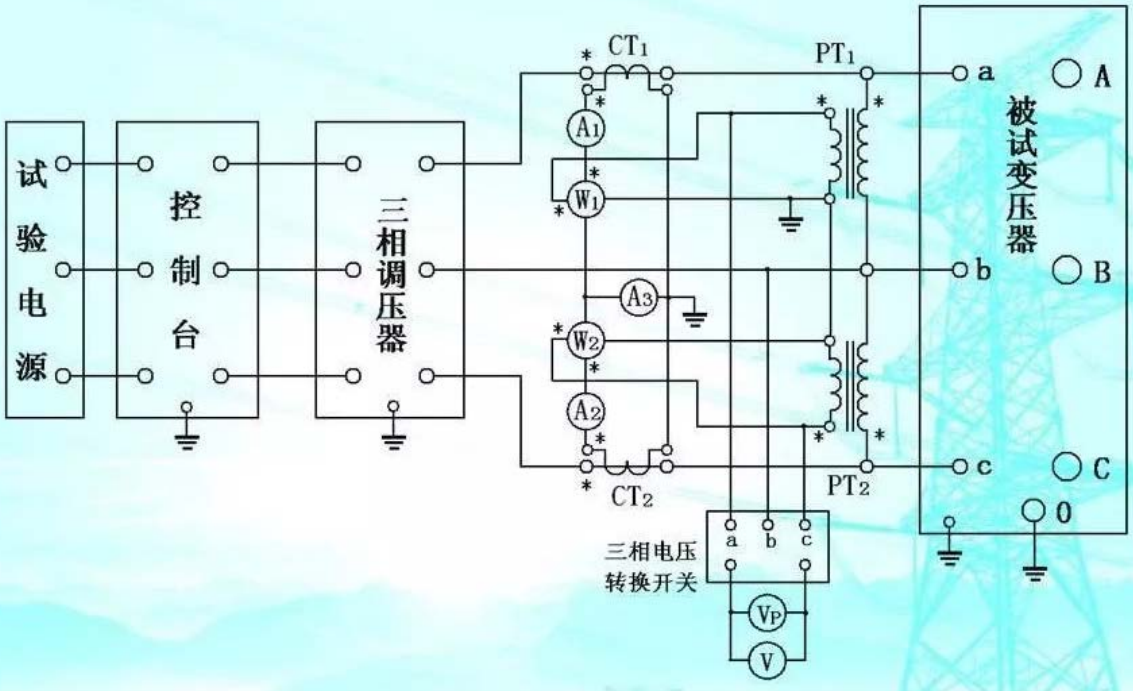


图13.1　变压器空载试验接线

接线应注意的问题：

1）根据试验电压的大小选择合适变比的PT。

2）按出厂试验数据或变压器铭牌数据估算空载电流，选择变比合适的CT。

3）图中*号为同极性端子，不能接错。

4）三相电压应同时测量平均值和有效值。

5）CT或PT的二次绕组必须有一个端子接地，这样既可以防止高压侧通过分布电容对二次测量数据的影响，也是保证试验安全的重要措施。

13.3 试验方法

试验电压应从不大于额定试验电压的三分之一开始，平缓地升高电压，观察各表计的读数是否正常，以平均值电压表的读数为依据，电压升到额定试验电压时，停留1～2分钟，待数据稳定后记录各表计数据，并记录各表计的分度和量程、表计的编号等。

如果三相电压不对称度小于2%,可按三相电压的平均值或ac相电压进行试验,如果三相电压不对称度大于2%,可分别以ab、bc、ca相电压为基准，取三次试验数据的平均值作为试验数据。

13.4 数据的处理

1）如果是采用表计测量，电流表读数乘以CT变比，电压表读数乘以PT变比，功率损耗为两块表计读数的代数和乘以CT和PT的变比。

2）如果平均值电压U_P与有效值电压U的偏差小于3%，可认为电压波形满足要求，不用进行校正。如果偏差大于3%，可按下式将测量结果P_m校正到正弦波下的空载损耗P_0：

$$P_0 = Pm \times （1 + d）\qquad (13.1)$$

$$d = （U_P - U）/U_P \qquad (13.2)$$

d通常为负值。

3）如果试验电压频率f偏离额定频率f_n，且偏差程度不超过5%，应用U代替额定频率下的额定电压U_n：

$$U = U_n \times （f / f_n）\qquad (13.3)$$

4）如果试验电压U偏离额定试验U_n，可按下式将测量的空载P_m损耗校正到额定试验电压下的空载损耗P_0：

$$P_0 = P_m \times \left(\frac{U_n}{U}\right)^K \qquad (13.4)$$

K的大小与硅钢片的材料以及额定磁通密度有关，可取其平均值3.2

5）由于磁路不对称，三相空载电流并不相等，空载电流取三相电流的平均值。

14 负载试验

14.1 试验目的

测量负载损耗和短路阻抗是否符合技术要求，检查变压器的设计和制造质量是否存在缺陷。

14.2 试验方法

试验接线与空载试验相似，见图14.1。采用三相短路的方法在绕组中产生所需的负荷电流。由于受到试验电源和试验设备的限制，大型变压器在现场试验时只能施加小于额定值的电流，一般为10%额定值左右。在工厂的形式试验中一般施加50%～100%的额定电流，不同电流下变压器的附加损耗所占的比例并不完全一样，所以根据测量结果计算出来的额定负荷下的损耗会有一定的误差，但阻抗电压在不同的短路电流下所测量的结果是很接近的，误差很小。

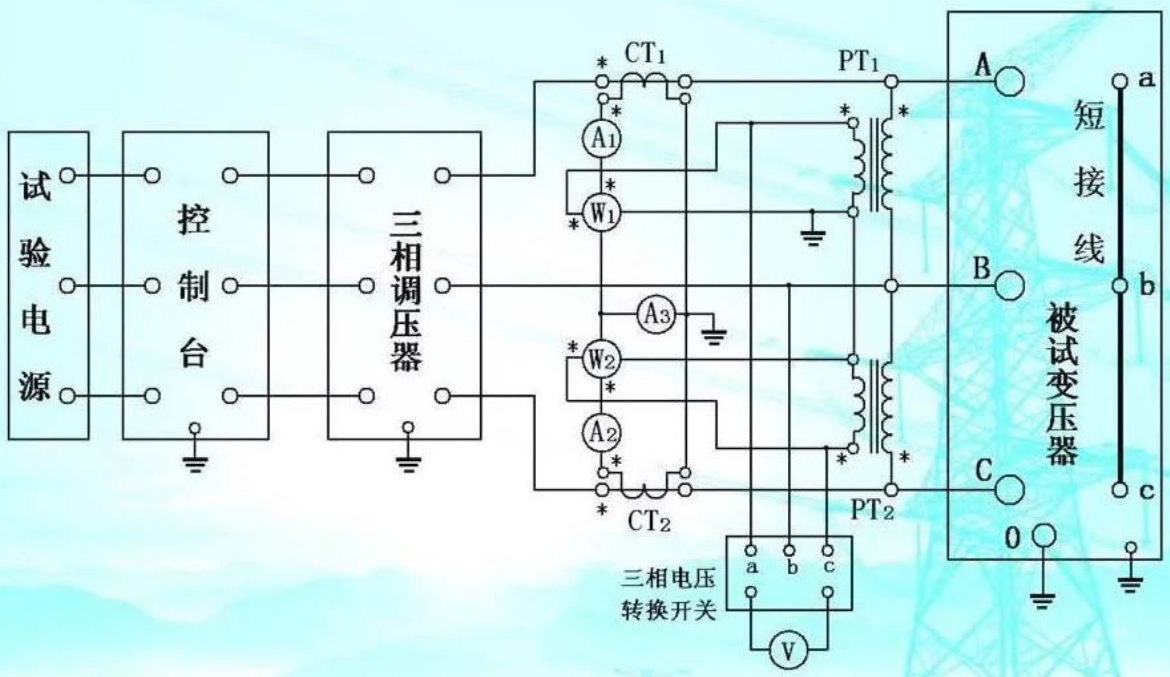


图14.1　变压器负载试验接线

与空载试验主要区别为：

1）每次进行两个绕组的试验，通常是从电压较高的绕组加压，较低电压的绕组用足够尺寸的导体短路。对三绕组的变压器，需要进行高对低、高对中、中对低三次试验。

2）负载试验时不需要读取平均值电压。

3）进行负载试验时，试验电压较低而试验电流较大，PT的变比通常比空载试验时小，而CT的变比要比空载试验时大。

4） 三相短路线截面积应足够大，接触应良好，防止短路线的损耗过大而影响测量的准确度。

5）试验时间应尽量短，以免线圈发热直流电阻增大，使测量的损耗值偏大。

6）注意记录试验时变压器的线圈温度。

14.3 试验数据的处理

1）试验结果包括两部分，即线圈直流电阻引起的损耗和漏磁引起的附加损耗。首先根据出厂试验值或铭牌数据计算出试验温度t℃下的绕组直流电阻R。

2） 按试验电流I和计算的绕组直流电阻R计算一次和二次线圈t℃下的直流电阻总损耗ΣI^2R。

ΣI^2R= (一次绕组直流电阻损耗)+(二次绕组直流电阻损耗) (14.1)

对于星形（Y连接）绕组：

三相绕组直流电阻总损耗=$3I^2R_{相}$

$=1.5I^2R_{线}$ (14.2)

对于三角形(D连接)绕组：

三相绕组直流电阻总损耗=$1.5I^2R_{线}$

$=I^2R_{相}$ (14.3)

以上计算公式中I均为线电流。

3）按下式计算参考温度（75℃）下的负载损耗P_K'：

$$P_K' = \frac{P_{Kt} + (K^2 - 1)\sum I^2R}{K} \quad (14.4)$$

$$K = \frac{310}{(235+t)} = \frac{310}{(235+25)} = 1.1923 \quad (14.5)$$

式中：P_{Kt}－温度为t℃时所测得的损耗；ΣI^2R－t℃时一、二次绕组直流电阻损耗之和。

4）将计算的负载损耗P_K'换算到额定电流In下的负载损耗P_K：

$$P_K = P_K' \times (In/I)^2 \qquad (14.6)$$

5）按下式计算额定电流下的阻抗电压$U_K\%$：

$$U_K\% = \frac{U}{U_n} \times \frac{I_n}{I} \times 100(\%) \qquad (14.7)$$

U、I为试验时的电压和电流。阻抗电压可以不用进行温度换算。

15 感应耐压试验

15.1 概述

感应耐压试验的目的是：

1）考核全绝缘变压器的纵绝缘（绕组层间、匝间及段间）；

2）检查分级绝缘变压器主绝缘和纵绝缘(主绝缘是指绕组对地、相间及不同电压等级的绕组间的绝缘。)

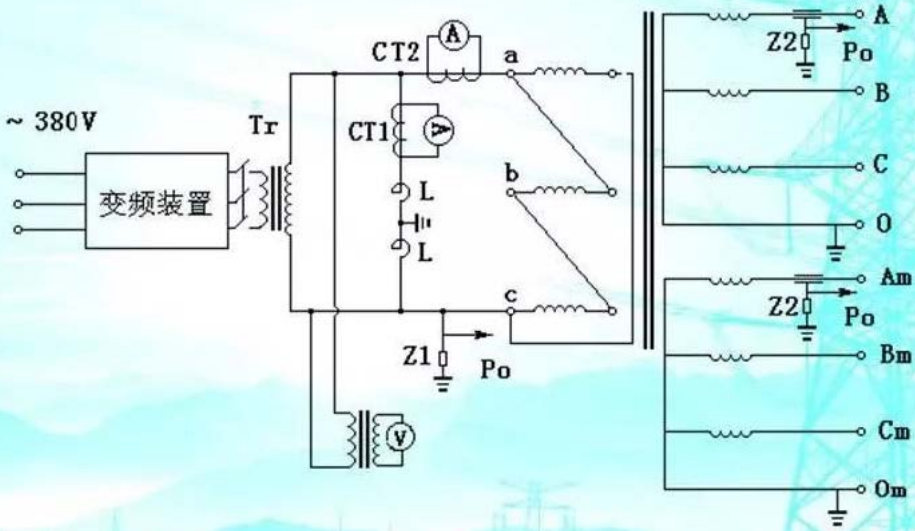
感应耐压试验可分为短时感应耐压试验(ACSD)和长时感应耐压试验(ACLD)，在考核方式上可分为逐相施加电压的试验方法和采用三相对称加压的试验方法。我国现行交接试验标准规定采用长时感应耐压试验，推荐采用逐相施加电压的试验方法，在进行长时感应耐压试验时，要求同时测量局部放电量。

如果感应耐压试验中对中性点绝缘的考核没有达到规定的电压值，应在感应耐压前对中性点进行外施电压的耐压试验。

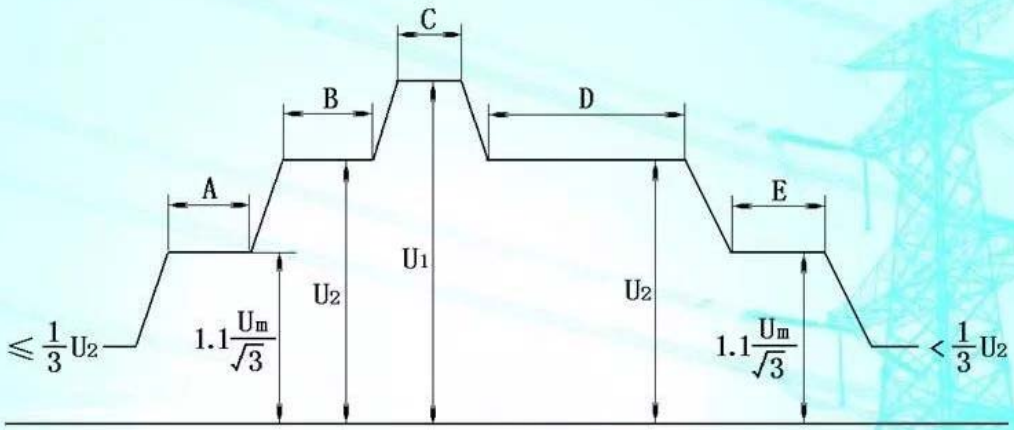
不同的试验接线直接影响到变压器绝缘水平的设计，所以用户在定货时就必须与制造厂协商好试验方法。如果用户没有指定，就必须按厂家的要求进行试验。

15.2 试验接线

典型的试验接线如图15.1所示。为了防止铁心磁路饱和，试验频率应为额定频率的两倍以上。



15.3 施加电压的时间程序



注：A=5min；B=5min；C=试验时间；D≥60min（Um＞300kV）或30min（Um＜300kV）

分级绝缘变压器单相加压时相对地试验电压：$U_1=1.7\frac{U_m}{\sqrt{3}}$ ；$U_2=1.5\frac{U_m}{\sqrt{3}}$

全绝缘变压器或分级绝缘变压器三相同时加压时相间试验电压：

Un ≤330kV时： U_1 按国标规定； $U_2=1.3U_m$ ；

Un = 500kV时： U_1 按国标规定； $U_2=1.2U_m$ ；

试验时间C的计算公式：

$$C = 120 \times \frac{\text{额定频率}}{\text{试验频率}}\ (\text{s}), \quad \text{但不少于15s} \qquad (15.1)$$

预激磁电压是模拟运行中过电压，预激磁电压激发的局部放电量不应由局部放电试验电压所延续，其目的是考核当系统上有过电压时所激发的局部放电量不会由长期工作电压所延续，也就是要求变压器局部放电起始电压与局部放电熄灭电压都能高于 Um/$\sqrt{3}$，长期工作电压下无局部放电量，保证变压器能安全运行。

15.4局部放电量测量要点

在图15.2中：

1）从阶段A到B，应测量局部放电的起始电压，在B阶段记录一个放电量数据；

2）在D阶段每5min记录一个放电量数据；

3）从D阶段到E阶段，记录局部放电的熄灭电压；

4）在E阶段记录一个局部放电量数据。

在以下相对地试验电压下，局部放电的合格标准：

$1.5U_m/\sqrt{3}$ ： ≯500pC

$1.3U_m/\sqrt{3}$ ： ≯300pC

$1.1U_m/\sqrt{3}$ ： ≯100pC

16 局部放电测量

16.1 测量原理

局部放电量Q与电容量C以及电容上的电压变化ΔU有如下关系：

$$Q = C\Delta U \tag{16.1}$$

$$\Delta U = \frac{Q}{C} \tag{16.2}$$

假如放电量是100pC，试品的电容量是1000pF，在电容上的电压变化为：

$$\Delta U = \frac{Q}{C} = \frac{100 \times 10^{-12}}{1000 \times 10^{-12}} = 0.1 \quad (V)$$

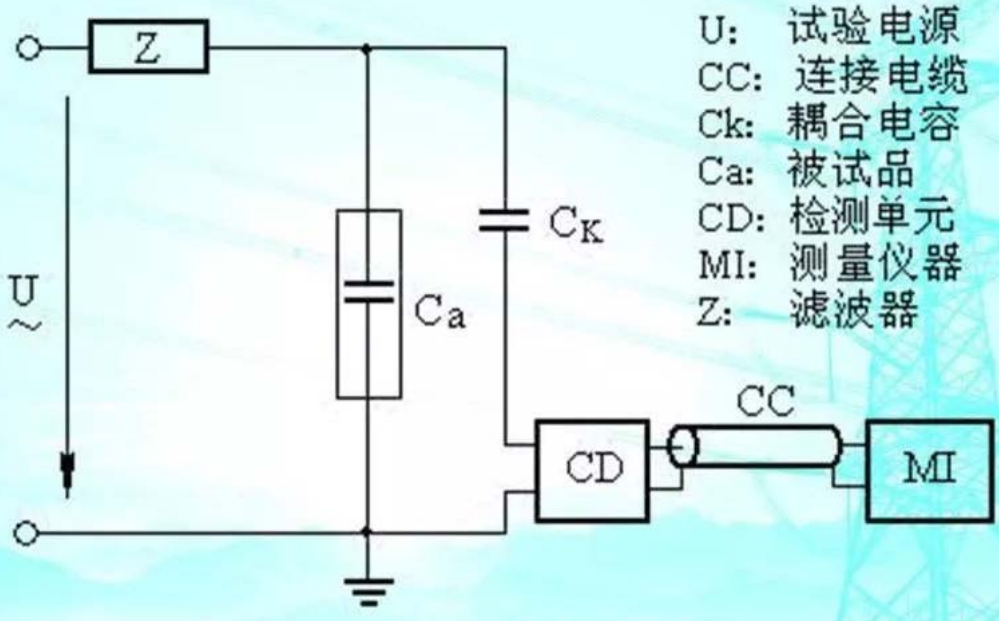


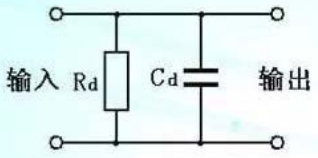
图16.1 局部放电测量原理

在变压器试验中，耦合电容C_K可以用电容型套管代替，这时检测单元C_D直接接在套管的末屏上。如果不是电容型套管，应使用无局部放电的电容器做为耦合电容。

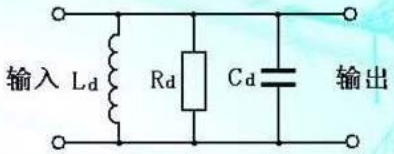
局部放电量的指示通常有指针式表头或数字式表头，并配有供波形分析用的椭圆扫描示波器，示波器所显示的波形高度也可以作为放电量的指示值，而且在现场干扰信号比较复杂的情况下，观察和分析放电脉冲的幅度更有意义。示波器的同步触发脉冲必须与试验电源同频率，所以在试验时必须从电源取一个同步触发电压

16.2 检测单元(耦合装置)

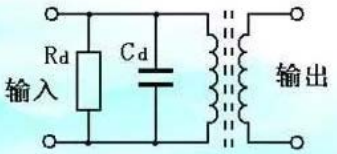
检测单元又称为检测阻抗或称为耦合装置，通常有RC型和LCR型。



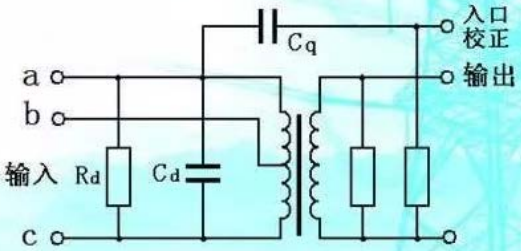
a RC型检测阻抗



b LCR型检测阻抗



c 有输出变压器的检测阻抗



d 平衡输入法检测阻抗

对于RC型检测阻抗，与耦合电容C_K组合后类似于一个分压器，检测阻抗中的电容C_d值越小所取得的信号电压越大，但为了防止过高的试验电压进入仪器，C_d必须＞＞耦合电容C_K；而检测阻抗中的R_d值越大，检测灵敏度也越高，但R_d太大时检测阻抗的时间常数也越大，造成脉冲的分辨率下降，采用RC型检测阻抗要求仪器具有宽带放大器，在制造和使用上比较困难。

对于RLC检测阻抗，C_d与耦合电容C_K、试品电容Ca所形成的等效电容C_T与L_d组成的电路具有固有振荡频率f_d或固有角频率ω_d，测量仪器的中心频率只要选择为f_d，带宽只要达到$2f_d$，就可以检测到足够的局部放电脉冲，这样的测量仪器在制造和使用上都比较容易。由于仪器的带宽基本上是固定的，所以对电容量不同的被试品要求检测阻抗中的C_d和R_d也不一样，在检测阻抗上通常都标明其适用的试品电容范围。

带有变压器的检测阻抗，由于能够实现阻抗的变换，对放大器和试品的适应性更为灵活。平衡输入法检测阻抗可以利用平衡输入法削弱外部的干扰脉冲。

16.3 放电量的校正

由于被试品的电容值有大有小，同样的放电量所产生的电压信号ΔU也是大小不一的，为了测量被试品的放电量，必须在试验前从外部输入一个标准的局部放电量（即校正脉冲），并调整测量仪器的量程和增益（即放大倍数），使测量仪器输出一个对应的数据，记录此时测量仪器的量程、分度、示值和标准脉冲的放电量，这些数据就作为正式试验时的参考标准。放电量的校正如图16.3。

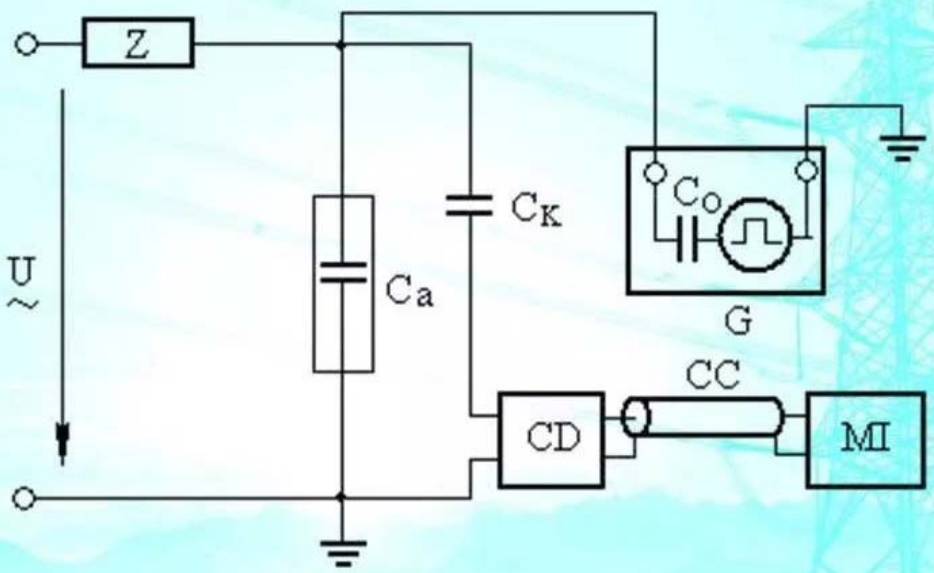


图16.3　放电量的校正

1）仪器的量程为显示值的倍率

如果校正脉冲为Q_R，量程倍率为K_1，显示值为S_1，则仪器的分度F为：

$$F = \frac{Q_R}{K_1 S_1} \tag{16.3}$$

正式试验时倍率为K_2，显示值为S_2，实际放电量应为：

$$Q = FK_2 S_2 \tag{16.4}$$

例：校正时用校正脉冲发生器输入500pC的脉冲，调节测量仪器倍率在×1000的位置，调节仪器的增益微调使放电量表头正好显示500或示波器显示的脉冲高度为20mm，则校正后仪器的分度值按式(16.3)计算为：

$$F = \frac{500}{1000 \times 500} = 0.001 \quad (\mathrm{pC})$$

或：

$$F = \frac{500}{1000 \times 20} = 0.025 \quad (\mathrm{pC/mm})$$

如果正式试验时档位K_2为×100，放电量表头显示值S_2为250或脉冲高度为10mm，按式(16.4)计算实际放电量为：

$$Q = 0.001 \times 100 \times 250 = 25 \quad (\mathrm{pC})$$

或：

$$Q = 0.025 \times 100 \times 10 = 25 \quad (\mathrm{pC})$$

2）仪器的量程为放大器的放大倍数（增益）

如果校正脉冲为Q_R，增益档位为K_1，显示值为S_1，则仪器的分度F为：

$$F = \frac{Q_R K_1}{S_1} \qquad (16.5)$$

正式试验时倍率为K_2，显示值为S_2，实际放电量应为：

$$Q = \frac{FS_2}{K_2} \qquad (16.6)$$

例：校正时用校正脉冲发生器输入1000pC的脉冲，仪器增益在×10的位置，调节仪器的增益微调使放电量表头正好显示500或示波器显示的脉冲高度为40mm，则校正后仪器的分度值为：

$$F = \frac{1000 \times 10}{500} = 20 \quad (\mathrm{pC})$$

或：

$$F = \frac{1000 \times 10}{40} = 250 \quad (\mathrm{pC/mm})$$

如果正式试验时增益档位K_2为×100，放电量表头显示值S_2为250或脉冲高度为20mm，计算实际放电量为：

$$Q = \frac{20 \times 250}{100} = 50 \quad (pC)$$

或：

$$Q = \frac{250 \times 20}{100} = 50 \quad (pC)$$

16.3 校正脉冲发生器

由于$Q=C_OU$，所以图16.3可以组合成20pC～10000pC共9个不同的标准电量。

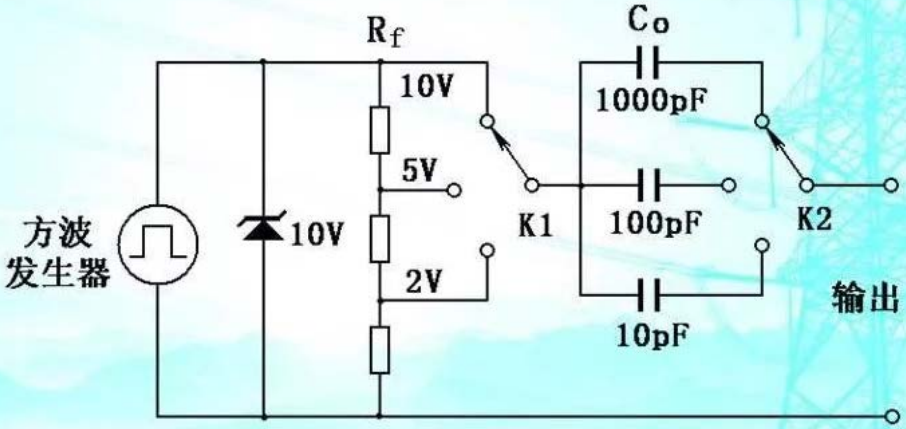


图16.4 校正脉冲发生器

需要注意的是：

只有当耦合电容C_K、C_d和被试品电容Ca的等值电容C_T值＞＞C_O时，才能认为标准放电量$Q= C_OU$，否则的话应计算等效电容C_T与C_O串联后的电容值C_{TO}，并以此电容值计算标准放电量，即：

$$Q=C_{TO}U \qquad (16.7)$$