

ICS 29.080

K 04

备案号: 17674-2006

DL

中华人民共和国电力行业标准

DL/T 474.3 — 2006

代替 DL 474.3 — 1992

现场绝缘试验实施导则 介质损耗因数 $\tan\delta$ 试验

Guide for insulation test on site
Dielectric dissipation factor test

2006-05-06 发布

2006-10-01 实施

中华人民共和国国家发展和改革委员会 发布

目 次

前言.....	24
1 范围.....	25
2 规范性引用文件.....	25
3 测量仪器.....	25
4 电力设备介质损耗因数 $\tan\delta$ 的现场测试.....	27
5 现场测量的干扰影响和消除方法.....	36

前 言

本标准是根据《国家发展和改革委员会关于印发 2005 年行业标准项目计划的通知》（发改办工业〔2005〕739 号）文的安排，对 DL 474.3—1992 进行的修订。

本标准中的试验结果判断标准主要引自 DL/T 596，对 DL/T 596 中未规定的，本标准中提出的推荐值供参考。

本标准与原标准的主要差别是：

- 按 GB/T 1.1 标准要求修改了条目名称；
- 近年来增加了许多新的 $\tan\delta$ 试验仪器设备和试验方法，因此增加 3.4 条内容；
- 各被试设备电容和介损试验的判断标准根据 DL/T 596—1996 等新的标准及新的试验方法作了较多修改和补充。

本标准实施后代替 DL 474.3—1992。

本标准由中国电力企业联合会提出。

本标准由电力行业高电压试验技术标准化委员会归口并负责解释。

本标准主要起草单位：云南省电力试验研究院（集团）有限公司、华北电力科学研究院有限责任公司。

本标准主要起草人：郑增泰、李明、邓春。

本标准 1992 年 11 月 3 日首次发布，本次为第一次修订。

现场绝缘试验实施导则

介质损耗因数 $\tan\delta$ 试验

1 范围

本标准提出了测量高压电力设备绝缘介质损耗因数 $\tan\delta$ 和电容的方法，试验接线和判断标准，着重阐述现场测量的各种影响因素、可能产生的误差和减少误差的技术措施。

本标准适用于发电厂、变电所现场和修理车间、试验室等条件下，测量高压电力设备绝缘的介质损耗因数 $\tan\delta$ 和电容。

2 规范性引用文件

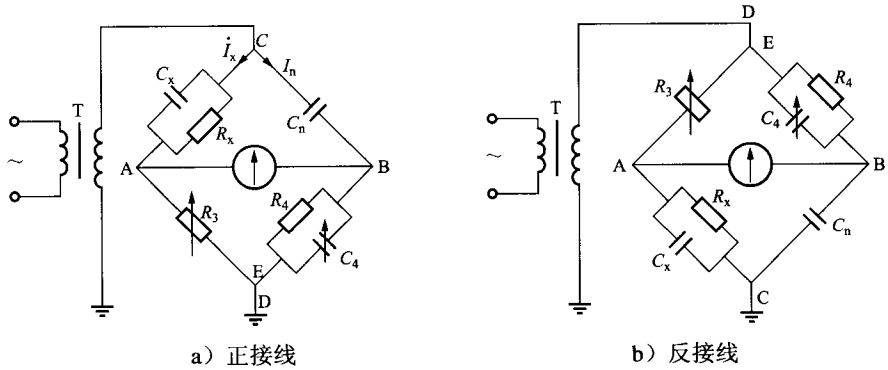
下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件，其随后所有的修改单（不包括勘误的内容）或修订版均不适用于本标准，然而，鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本标准。

DL/T 596 电力设备预防性试验规程
JB/T 8169—1999 耦合电容器及电容分压器

3 测量仪器

3.1 西林电桥

西林电桥的四个桥臂由四组阻抗元件所组成，其原理接线如图 1 所示。



C_x —被试品等值电容； R_x —被试品介质损耗等值电阻； C_n —标准电容；
 R_3 —无感可调电阻； C_4 —可调电容； R_4 —无感固定电阻；T—电源变压器

图 1 西林电桥原理接线图

电桥平衡时：

$$C_x = C_n \frac{R_4}{R_3} \quad (1)$$

$$\tan \delta_x = \omega C_4 R_4 \quad (2)$$

以上式中各符号的含义同图 1。

在工频试验电压下，式（2）中 $\omega = 2\pi f = 100\pi$ ，取 R_4 为 $10000/\pi = 3184\Omega$ ，则 $\tan\delta_x = C_4$ ，即 C_4 的微法值就是 $\tan\delta_x$ 值。

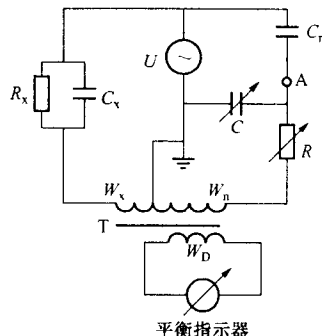
3.2 电流比较型电桥

图 2 是电流比较型电桥原理接线图。当电桥平衡时，由安匝平衡原理可得：

$$C_x = C_n \frac{W_n}{W_x} \quad (3)$$

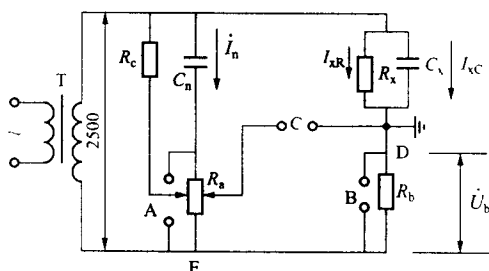
$$\tan\delta_x = \omega RC \quad (4)$$

式（4）中， $\omega = 100\pi$ ， C 分别等于 $1/\pi \times 10^{-6}\text{F}$ 和 $0.1/\pi \times 10^{-6}\text{F}$ 。



C_n —标准电容； C_x —被试品的电容； R_x —被试品介质损耗等值电阻； U —试验电压； R —十进可调电阻箱； C —可调电容； W_n 和 W_x —分别为电流比较型电桥标准臂和被测臂匝数； T —变压器； W_D —平衡指示器匝数

图 2 电流比较型电桥原理接线图



T —电源变压器； R_x 和 C_x —被试品介质损耗等值电阻和等值电容； R_b —被试支路无感电阻； R_c —极性判别支路电阻； C_n —标准电容； R_a —标准支路电阻

图 3 M 型介质试验器原理接线图

3.3 M 型介质试验器

M 型介质试验器是一种不平衡交流电桥，图 3 表示其原理接线，它包括 C_n 、 R_a 标准支路， C_x 、 R_x 及无感电阻 R_b 被试支路， R_c 极性判别支路，电源和测量回路等五部分。

介质损耗因数 $\tan\delta_x$ 可由下式计算：

$$\tan\delta_x = \frac{P}{S} \quad (5)$$

式中：

P ——有功功率，mW；

S ——视在功率，mVA。

R_b 远小于被试品阻抗，由图 3 可知，串联后不影响 I_x 的大小和相位。

在 B 位置上测出 R_b 上的压降 $I_x R_b$ （乘以有关常数）可代表试品的视在功率 S 。

将电压表接到 C 位置，调 R_a 的可动触点，当读数为最小时，两个回路的电容电流分量的电压降可

完全抵消，故电压表读数可代表试品的有功功率 P 。

R_c 极性判别支路是用来判别外界干扰的极性。

3.4 介质损耗因素 $\tan\delta$ 测量技术的新方法——数字化测量仪

- 1) 数字式自动平衡电桥：它仍采用零值比较法原理，但用变压器比例臂代替普通阻抗比例臂，并用计算机控制和处理，从而实现自动平衡和测量。
- 2) 实部和虚部分离测量法：它是根据实部和虚部分离法研制的一种全自动测量电桥，分别接在标准电容器和试品通道的矢量电压表把流经的电流转换为电压，然后把各自得到的电压分为实部和虚部，利用微机对这些数据进行分析计算即可得到电容 C_x 和 $\tan\delta$ 。
- 3) 数字采样波形分析系统：它是一种智能化系统，包括两大部分，一是采样系统，负责将试品上的电压及电流连续信号转化成离散化的数字量；二是数据处理系统，主要由计算机组成，将采样到的电压、电流信号进行快速付里叶变换（FFT），求出信号基波分量的幅值和相位，最后得到 $\tan\delta$ 值和试品电容值。
- 4) 便携式测量仪（相位差法）：它采用相位差法（或称方波整形法），由加在试品上的电压和流过试品中的电流的夹角 φ 求出 $\tan\delta$ 。从试品上取得的电压和电流信号分别经过滤波、限幅放大、过零比较电路变成方波信号，最后一起通过异或门变为相位脉冲，该相位脉冲经过与门后就填充了时标脉冲，最后送给单片机计数、处理和显示。系统还在信号提取、零点漂移以及量化误差等方面采取措施，使测量更准确。

注：数字化测量仪的使用方法按各仪器的使用说明书进行，其基本原理接线如图 4 所示。

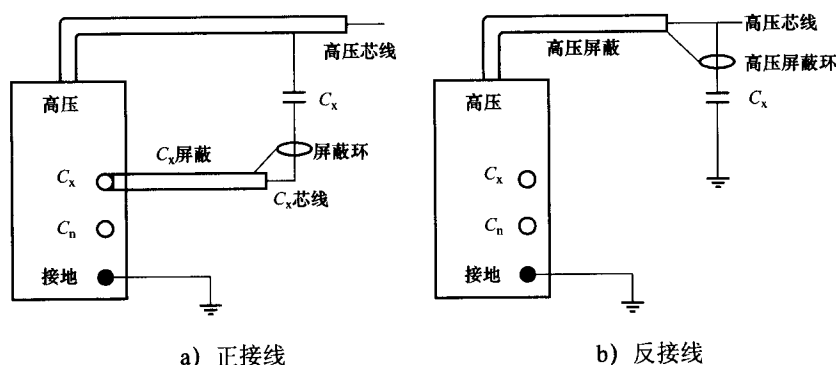


图 4 数字化测量仪原理接线图

4 电力设备介质损耗因素 $\tan\delta$ 的现场测试

4.1 试验条件及准备

4.1.1 试验条件

本试验应在良好的天气，试品及环境温度不低于 $+5^{\circ}\text{C}$ 和空气相对湿度不大于 80% 的条件下进行。

4.1.2 准备

测试前，应先测量试品各电极间的绝缘电阻。必要时可对试品表面（如外瓷套或电容套管分压小瓷套，二次端子板等）进行清洁或干燥处理。了解充油电力设备绝缘油的电气、化学性能（包括油的 $\tan\delta$ ）的最近试验结果。

4.2 电力变压器

4.2.1 试验接线

因变压器的外壳直接接地，所以现场测量时采用交流电桥反接法（或用 M 型介质试验器等其他仪器）进行。为避免绕组电感和励磁损耗给测量带来的误差，试验时需将测量绕组各相短路，非测量绕组各相短路接地（用 M 型介质试验器时接屏蔽）。电力变压器试验接线如表 1 所示。

表 1 电力变压器试验接线

顺 序	双 绕 组 变 压 器		三 绕 组 变 压 器	
	加压绕组	接地部位	加压绕组	接地部位
1	低压	高压和外壳	低压	高压、中压和外壳
2	高压	低压和外壳	中压	高压、低压和外壳
3			高压	中压、低压和外壳
4	高压和低压	外壳	高压和中压	低压和外壳
5			高压、中压和低压	外壳
注：表中 4 和 5 两项只对 16000kVA 及以上的变压器进行测定。试验时，高、中、低三绕组两端都应短接。				

4.2.2 试验结果的判断

变压器的 $\tan\delta$ 在大修及交接时，相同温度下比较，不大于出厂试验值的 1.3 倍，历年预防性试验比较，数值不应有显著变化，大修及预防性试验结果按照 DL/T 596 规定进行综合判断。

4.3 高压套管

4.3.1 试验接线

测量装在三相变压器上的任一只电容型套管的 $\tan\delta$ 和电容时，相同电压等级的三相绕组及中性点（若中性点有套管引出者），必须短接加压，将非测量的其他绕组三相短路接地。否则会造成较大的误差。现场常采用高压电桥正接线或 M 型介质试验器测量，将相应套管的测量用小套管引线接至电桥的 C_x 端，或 M 型介质试验器的 D 点（见图 3），一个一个地进行测量。

4.3.2 影响测量的因素

- 抽压小套管绝缘不良，因其分流作用，使测量的 $\tan\delta$ 值产生偏小的测量误差。
- 当相对湿度较大（如在 80% 以上）时，正接线使测量结果偏小，甚至 $\tan\delta$ 测值出现负值；反接线使测量结果往往偏大。

潮湿气候时，不宜采用加接屏蔽环，来防止表面泄漏电流的影响，否则电场分布被改变，会得出难置信的测量结果。有条件时可采用电风吹干瓷表面或待阳光曝晒后进行测量。

- 套管附近的木梯、构架、引线等所形成的杂散损耗，也会对测量结果产生较大影响，应予搬除。套管电容越小，其影响也越大，试验结果往往有很大差别。
- 自高压电源接到试品导电杆顶端的高压引线，应尽量远离试品中部法兰，有条件时高压引线最好自上部向下引到试品，以免杂散电容影响测量结果。

4.3.3 判断及标准

套管测得的 $\tan\delta$ （%）按 DL/T 596 进行综合判断。

判断时应注意：

- $\tan\delta$ 值与出厂值或初始值比较不应有显著变化。
- 电容式套管的电容值与出厂值或初始值比较一般不大于 $\pm 10\%$ ，当此变化达 $\pm 5\%$ 时应引起注意，500kV 套管电容值允许偏差为 $\pm 5\%$ 。

4.4 电容器

4.4.1 试验接线

现场使用高压电桥测量耦合电容器（包括断路器的断口均压电容器）的 $\tan\delta$ 和电容时，宜采用正接线测量；反接线测量误差较大，有时由于湿度或其他因素的影响会出现偏大的试验结果。

4.4.2 判断标准

判断标准如表 2 所示。

表 2 耦合电容器和断路器电容器 $\tan\delta$ 和电容值判断标准

序号	项目	耦合电容器		断路器电容器	
		交 接	运行后	交接	运行后
1	电容值偏差	1) 在额定值的-5%~+10%内; 2) 电容器叠柱中任两单元的电容值之比与这两单元额定电压之比值的倒数之差 $\geq 5\%$	1) 投运 1 年内在额定值的-5%~+10%内; 2) 投运 1~3 年, 大于 102%时应缩短试验周期; 3) 一相中任两节其值相差 $\geq 5\%$	在额定值的 $\pm 5\%$ 内	投运 1~3 年及断路器大修后, 其值在额定值的 $\pm 5\%$ 内
2	$\tan\delta$	应符合产品技术条件的规定 ^a	投运 1 年内及 1~3 年周期, 10kV 下的 $\tan\delta$ 值不大于下列值: 油纸绝缘: 0.005 膜纸复合绝缘: 0.002	应符合产品技术条件的规定	投运 1~3 年及断路器大修后, 10kV 下的 $\tan\delta$ 值不大于下列值: 油纸绝缘: 0.005 膜纸复合绝缘: 0.0025
^a 或按 JB/T 8169—1999 第 6.4 条规定: 电容器的 $\tan\delta$ 应在耐压试验后在 $(0.9\sim 1.1)U_N$ 的电压下用能排除由于谐波和测量电路内的附件所引起的误差的方法进行测量。测量准确度应不低于 20%。按 5.2.4 条规定, 在第 6.4 条测得的 $\tan\delta$ 值在 20℃下不大于下列值: 纸介质电容器: 0.0040; 膜纸复合介质电容器: 0.0015。					

4.5 电流互感器

4.5.1 油浸链式和串级式电流互感器

4.5.1.1 试验接线

35kV~110kV 级的电流互感器, 多数为油浸链式(如 LCWD—110 型)和串级式(如 L—110 型)结构。这类电流互感器现场测量可按一次对二次绕组用高压电桥正接线测量, 也可按一次对二次绕组及外壳用高压电桥反接线测量。

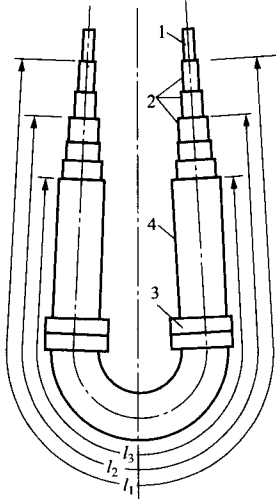
4.5.1.2 判断和标准

电流互感器的 $\tan\delta$ (%) 值, 按 DL/T 596 规定进行综合判断, 且与出厂及历年数据比较, 不应有显著变化。

4.5.2 电容型电流互感器

4.5.2.1 试验接线

电容型电流互感器的结构如图 5 所示, 最外层有末屏引出。试验时可采用高压电桥正接线进行一次绕组对末屏的 $\tan\delta$ 及电容的测量。电流互感器进水受潮以后, 水分一般沉积在底部, 最容易使底部和末屏绝缘受潮。采用反接线测量末屏对地的 $\tan\delta$ 和电容, 加压在末屏与油箱座之间, 另外将一次绕组接到电桥的“E”端屏蔽, 试验时施加电压根据末屏绝缘水平和测量灵敏度选用, 一般可取 2kV。



1—一次绕组; 2—电容屏; 3—二次绕组及铁芯; 4—末屏

图 5 电容型电流互感器结构原理图

4.5.2.2 判断和标准

电容型电流互感器一次绕组对末屏 $\tan\delta$ 的试验结果判断标准应不大于表 3 中的数值, 电容量与初始值或出厂值差别超出 $\pm 5\%$ 范围时应查明原因; 当末屏绝缘电阻小于 $1000\text{M}\Omega$ 时应测量末屏对地的 $\tan\delta$, 其值不大于 2% 。

表 3 电容型电流互感器 $\tan\delta$ (%) 的标准

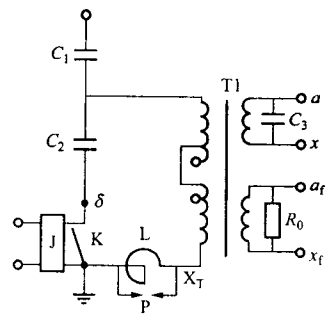
电压等级 kV		20~35	66~110	220	330~500
交接和大修后	油纸绝缘	—	1.0	0.7	0.6
	胶纸绝缘	2.5	2.0	—	—
运行中	油纸绝缘	—	1.0	0.8	0.7
	胶纸绝缘	3.0	2.5	—	—

注: 油纸电容型 $\tan\delta$ 一般不进行温度换算, 当 $\tan\delta$ 值与出厂值或上次试验比较有明显增长时, 应综合分析 $\tan\delta$ 与温度、电压的关系, 当 $\tan\delta$ 随温度明显变化或试验由 10kV 升到 $U_m/\sqrt{3}$ 时, $\tan\delta$ 增量超过 $\pm 0.3\%$, 不应继续运行。

4.6 电压互感器

4.6.1 电容式电压互感器

电容式电压互感器由电容分压器、电磁单元（包括中间变压器和电抗器）和接线端子盒组成, 其原理接线如图 6 所示。有一种电容式电压互感器是单元式结构, 分压器和电磁单元分别为一单元, 可在现场组装, 另有一种电容式电压互感器为整体式结构, 分压器和电磁单元合装在一个瓷套内, 无法使电磁单元同电容分压器两端断开。

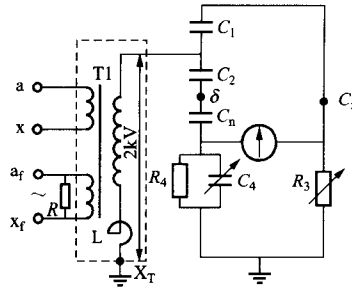


C_1 —主电容; C_2 —分压电容; L —电抗器; P —保护间隙; T_1 —中间变压器;
 R_0 —阻尼电阻; C_3 —防振电容; K —接地开关; J —载波耦合装置; δ — C_2 分压电容低压端;
 X_T —中间变压器低压端; ax —中间变压器二次测量绕组; $a_f x_f$ — T_1 的二次剩余电压绕组

图 6 电容式电压互感器结构原理图

4.6.1.1 试验接线

a) 主电容的 C_1 和 $\tan\delta_1$ 的测量。对于 220kV 及以上电压等级的 CVT, 其主电容大多是多节串联的, 对于上面 C_1 各节, 应用正接线测量。下面重点说明与电磁单元连接的部分的测量。
测量主电容的 $\tan\delta_1$ 和 C_1 的接线如图 7 所示。由中间变压器励磁加压, 加压绕组一般选择额定输出容量最大的二次绕组。 X_T 点接地, 分压电容 C_2 的 “ δ ” 点接高压电桥的标准电容器高压端, 主电容 C_1 高压端接高压电桥的 “ C_x ” 端, 按正接线法测量。由于 “ δ ” 点绝缘水平所限, 试验电压不超过 2kV 。此时 C_2 与 C_n 串联组成标准支路。一般 C_n 的 $\tan\delta \approx 0$, 而 $C_2 \gg C_n$, 故不影响测量结果。



C_n —标准电容；其他各符号的含义同图 6

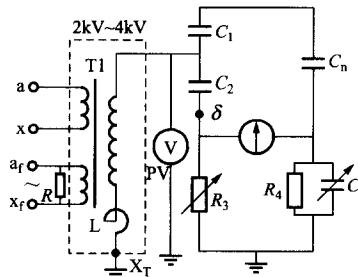
图 7 测量 C_1 、 $\tan\delta_1$ 接线图

b) 分压电容 C_2 和 $\tan\delta_2$ 的测量。测量分压电容 C_2 和 $\tan\delta_2$ 的接线图如图 8 所示。由中间变压器励磁加压。 X_T 点接地，分压电容 C_2 的“ δ ”点接高压电桥的“ C_x ”端，主电容 C_1 高压端与标准电容 C_n 高压端相接，按正接线法测量。试验电压应在高压侧测量。此时， C_1 与 C_n 串联组成标准支路。

若在测量 C_2 和 $\tan\delta_2$ 时，电桥电压升到 10kV，由于 C_2 电容量较大，作试验电源用的中间变压器 T1 绕组中的电流值，可能超过其最大热容量。因此只要求试验电压能满足电桥测量灵敏度即可，一般 2kV~4kV 可达到要求。

试验时加压绕组一般选择中间变压器 T1 的额定输出容量最大的二次绕组，在测量 C_2 和 $\tan\delta_2$ 时， C_2 和 T1 绕组及补偿电抗器 L 电感会形成谐振回路，从而出现危险的过电压，因此应在加压绕组间接上阻尼电阻 R。

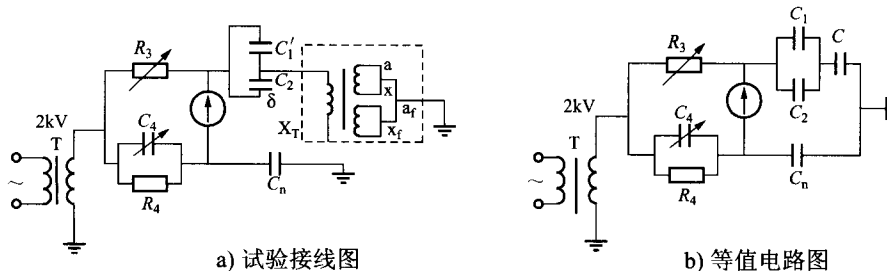
目前，某些型号的自动介损仪能通过一次试验接线完成主电容的 C_1 和分压电容 C_2 的电容量和介损测量，具体接线参考其仪器说明书。



C_n —标准电容；PV—电压表；其他各符号的含义同图 6

图 8 测量 C_2 、 $\tan\delta_2$ 的接线图

c) 测量中间变压器的 C 和 $\tan\delta$ 用反接线法。将 C_2 末端 δ 与 C_1 首端相连， X_T 悬空，中间变压器各二次绕组均短路接地按反接线法测量。由于 δ 点绝缘水平限制，外加交流电压 2kV，其试验接线和等值电路见图 9。



a) 试验接线图

b) 等值电路图

C_n —标准电容；T—电源变压器；其他各符号的含义同图 6

图 9 测量中间变压器 $\tan\delta$ 和电容的接线和等值电路

4.6.1.2 判断和标准

电容分压器的试验标准见表 2 的规定，中间变压器的试验标准按 DL/T 596 电磁式电压互感器规定判断。图 9 (b) 中 $(C_1+C_2) \gg C_T$ ，因此按图 9 试验接线图测得的 $\tan\delta$ 近似认为是 $\tan\delta_T$ ，测得的 C 近似认为是 C_T 。

4.6.2 电磁式全绝缘电压互感器

4.6.2.1 试验接线

可以采用将一次绕组短路加压，各二次绕组均短路，接西林电桥 C_x 点的正接法来测量 $\tan\delta$ 及电容值；也可以采用对电桥的 E 点加压，将一次绕组短路，接 QS_1 电桥的 C_x 点，其各二次绕组均短路直接接地的反接法。

4.6.2.2 判断和标准

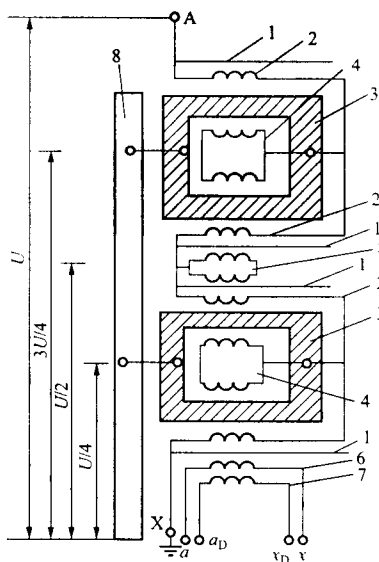
电磁式电压互感器在交接试验时，35kV 油浸式的 $\tan\delta$ (%) 可参照 DL/T 596 规定判断。35kV 以上的，在试验电压为 10kV 时，按制造厂试验方法测得的 $\tan\delta$ 值不应大于出厂试验值的 130%。

运行中电磁式电压互感器的 $\tan\delta$ (%) 值按 DL/T 596 规定判断。

4.6.3 串级式电压互感器

4.6.3.1 绕组结构

图 10 为 220kV 串级式电压互感器的绕组及结构布置图。一次绕组分成 4 段，绕在两个铁芯上；两个铁芯被支撑在绝缘支架上，铁芯对地分别处于 $3/4$ 和 $1/4$ 的工作电压，一次绕组最末一个静电屏（共有 4 个静电屏）与末端“X”相连接，“X”点运行中直接接地。末电屏外是二次绕组 ax 和剩余二次绕组 a_Dx_D 。“X”与 ax 绕组运行中的电位差仅 $100/\sqrt{3}$ V，它们之间的电容量约占整体电容量的 80%。110kV 级的绕组及结构布置与 220kV 级类似，一次绕组共分 2 段，只有一个铁芯，铁芯对地电压为 $1/2$ 的工作电压。



1—静电屏蔽层；2—一次绕组（高压）；3—铁芯；4—平衡绕组；
5—连耦绕组；6—二次绕组；7—剩余二次绕组；8—支架

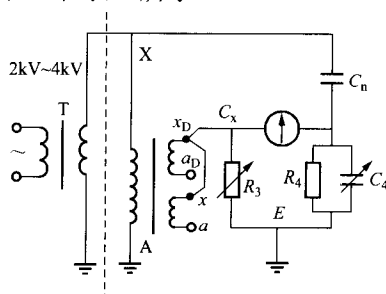
图 10 220kV 串级式电压互感器原理接线图

4.6.3.2 试验方法和接线

测量串级式电压互感器 $\tan\delta$ 和电容的主要方法有：末端加压法、末端屏蔽法、常规试验法和自激法。末端加压法采用较广，它的优点是电压互感器 A 点接地，抗电场干扰能力较强，不足之处是存在二次端子板的影响，且不能测绝缘支架的 $\tan\delta$ 值；末端屏蔽法“X”接屏蔽能排除端子板的影响，能测出绝缘

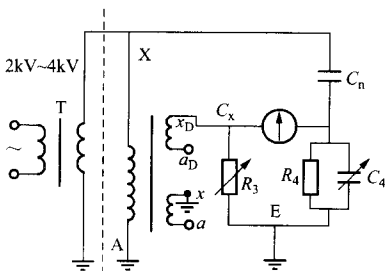
支架的 $\tan\delta$ 值。电压互感器的预防性试验规定，必须增加对绝缘支架的介质损失值的测试项目，因此 DL/T 596 建议采用末端屏蔽法试验。自激法抗干扰力差，一般较少采用。

a) 试验接线和方法如图 11~图 15 和表 4 所示。



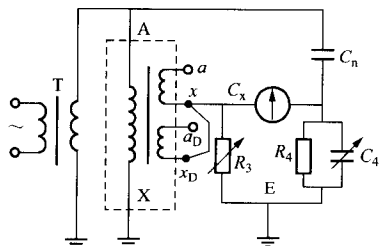
AX—高压绕组端子；ax—二次绕组端子；aDxD—剩余二次绕组端子；Cx—电容电桥端子；E—电桥接地端子；R4—电桥固定电阻；C4—电桥可调电容；Cn—标准电容；R3—电桥可调电阻

图 11 末端加压法测量接线



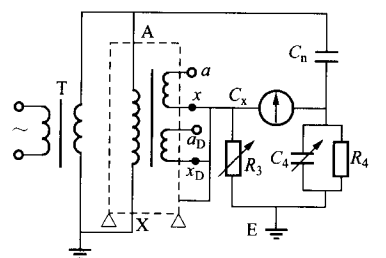
注：各符号的含义同图 11

图 12 末端加压法测量对剩余二次绕组端部 $\tan\delta$ 的接线



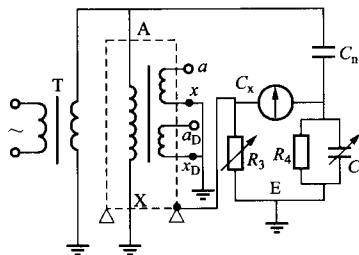
注：各符号的含义同图 11

图 13 末端屏蔽法：电压互感器底座接地测量一次对二次绕组的试验接线（测出 C_a 及 $\tan\delta_a$ ）



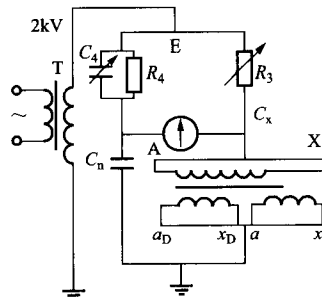
注：各符号的含义同图 11

图 14 末端屏蔽法：电压互感器底座对地绝缘测量一次对支架与二次绕组并联的试验接线（测出 C_b 及 $\tan\delta_b$ ）



注：各符号的含义同图 11

图 15 末端屏蔽法直接测量支架 $\tan\delta$ 接线



注：各符号的含义同图 11

图 16 常规法（反接线）接线

表 4 测量电压互感器 $\tan\delta$ 和电容的接线方法

序号	试验方法	图号	西林电桥接线方式			被试品接线方式				被测绝缘部位				测得结果
			接线方式	C_x 端的连接	“E”端的连接	加压端和试验电压	接地端	悬浮端	底座	绕组间	支架	二次端子	剩余二次端子	
1	末端加压	图 11	正接线	x, x_D	地	X 加 2kV~3kV	A	a_D, a	接地	√		√	√	
2		图 12	正接线	x_D	地		A, x	a_D, a	接地	√		√	√	
3	末端屏蔽法	图 13	正接线	x, x_D	地	A 加 10kV 或至绕组额定电压（限于 C_n ）	X	a_D, a	接地	√				$C_a, \tan\delta_a$ $C_b, \tan\delta_b$ $C_c, \tan\delta_c$
4		图 14	正接线	$x, x_D, \text{底座}$	地		X	a_D, a	绝缘	√	√			
5		图 15	正接线	底座	地		X, x, x_D	a_D, a	绝缘		√			
6	常规法	图 16	正接线	$ax, a_D x_D$	地	AX 加 10kV	$ax, a_D x_D$		绝缘	√	√	√	√	
7			正接线	$ax, a_D x_D$	地	AX 加 10kV			接地	√		√	√	
8			正接线	ax	$a_D x_D, \text{地}$	AX 加 10kV			接地	√		√	√	
9			正接线	$a_D x_D$	$ax, \text{地}$	AX 加 10kV			接地	√			√	
10			正接线	底座	$ax, a_D x_D, \text{地}$	AX 加 10kV			绝缘		√			
11			反接线	AX	加压	经 E 加 2~3kV	$ax, a_D x_D$	$ax, a_D x_D$	接地	√	√	√	√	
<p>注 1：表中“√”表示做此试验。</p> <p>注 2：当用末端加压法和末端屏蔽法试验时，被试电容 C_x 的计算式为：$C_x = \frac{1}{k} \times \frac{R_4}{R_3} C_n$</p> <p>式中，$k$ 是试验时二次绕组（a, x, a_D, x_D）所在铁芯的电位与试验电压的比值。</p> <p>当用末端加压法试验时，对 JCC—220 型电压互感器，$k=3/4$；JCC—110 型电压互感器，$k=1/2$；</p> <p>当用末端屏蔽法试验时，对 JCC—220 型电压互感器，$k=1/4$；JCC—110 型电压互感器，$k=1/2$。</p>														

b) 绝缘支架 $\tan\delta$ 和电容的测量。由于支架的电容量很小（一般为 $10\text{pF}\sim 25\text{pF}$ ），因此按图 15 直接法测量的灵敏度很低，在强电场干扰下往往不易测准，建议使用间接法，按图 13 和图 14 两次测量后，用式（6）计算出绝缘支架的电容 C_c 和介质损耗因数 $\tan\delta_c$ ，即：

$$C_c = C_b - C_a$$

$$\tan\delta_c = \frac{C_b \tan\delta_b - C_a \tan\delta_a}{C_b - C_a} \quad (6)$$

式中：

C_a 及 $\tan\delta_a$ ——按图 13 接线测量的一次对二次绕组的电容及介损值；

C_b 及 $\tan\delta_b$ ——按图 14 接线测量的一次对支架与二次绕组并联的电容及介损值。

按图 15 测量时，为便于电桥平衡，需要在 R_4 上再并接适当电阻，通常，取外并电阻后 $R_1=R_4/n$ ($n=1、2、3、\dots、9$)。此时，被试的 $\tan\delta$ 值等于 C_4 的微法值除以 n ，即 $\tan\delta=C_4/n$ 。

4.6.3.3 试验标准

串级式（分级绝缘）电压互感器 20°C 时的 $\tan\delta$ 值应不大于表 5 中数值。

表 5 串级式（分级绝缘）电压互感器测量 $\tan\delta$ 的试验标准

电压等级	试 验 方 法		交接及大修后 %	运行中 %
66kV~220kV	常规试验法		2.0	2.5
	末 端 加压法	按图 11 接线	2.5	3.5
		按图 12 接线	3.5	5.0
	末 端 屏蔽法	本体，按图 13 接线	3.5	5.0
		绝缘支架，按图 13、图 14 或图 15 接线	6.0	6.0
	自 激 法		2.5	3.5

4.7 多油断路器

用高压电桥测量多油断路器的 $\tan\delta$ 值，主要是检查套管和油箱内部绝缘部件（如灭弧室、提升杆、绝缘围屏和绝缘油等）的绝缘状况，现场测试可按 4.7.1 的步骤进行。

4.7.1 试验步骤

4.7.1.1 在合闸状态分别测量三相整体（包括绝缘提升杆和套管）的 $\tan\delta$ 和电容值（此项测量在需要时进行）。

4.7.1.2 在分闸状态，测量每只套管和灭弧室的 $\tan\delta$ 和电容值，当测得的 $\tan\delta$ 值超出试验标准或与以前比较显著增大时，应进行分解试验，即：

- 落下油箱或放去绝缘油（指油箱无法落下者）使灭弧室露出油面，如 $\tan\delta$ 明显下降者，则是绝缘油和油箱绝缘围屏绝缘不良；
- 如 $\tan\delta$ 无明显下降变化，则应擦净油箱内瓷套表面再试，如 $\tan\delta$ 明显下降则是套管脏污；
- 如 $\tan\delta$ 无明显变化，则可卸去灭弧室的屏罩再试，如 $\tan\delta$ 明显下降，则是屏罩受潮，否则拆卸灭弧室；
- 如拆卸灭弧室后 $\tan\delta$ 明显降低，则说明灭弧室受潮，否则说明套管绝缘不良。

4.7.1.3 使用 M 型介质试验器时，分别在合闸与分闸状态下测试有功功率（mW）的差值，以确定绝缘的部位：合闸毫瓦值与分闸同相的两套管毫瓦值的和之差，此差值为正值时，说明提升杆和导向板受潮；差值为负值时，说明灭弧室受潮或脏污。

4.7.2 试验标准

多油断路器的非纯瓷套管和断路器的 $\tan\delta$ 值 (%) 标准见 DL/T 596 规定。

按 4.7.1.3 的步骤试验时, 毫瓦差值在 $\pm 9\text{mW}$ 以内者为合格, 差值在 $\pm (9\text{mW} \sim 16\text{mW})$ 范围内时尚可使用。若差值超过 $\pm 16\text{mW}$, 则应立即处理, 不能继续使用。

5 现场测量的干扰影响和消除方法

5.1 电场干扰

被试设备周围不同相位 (如 A、B、C 三相) 的带电体与被试设备不同部位间存在电容耦合, 这些不同部位的耦合电容电流 (干扰电流) 沿被试品和电桥测量电路 (正、反、侧接线) 流过, 形成电场干扰, 对现场 $\tan\delta$ 的测量造成误差。由于被试设备结构不同, 其受电场干扰情况也不同。

5.2 电场干扰影响的消除方法

5.2.1 屏蔽

在部分停电的现场, 对可能受到邻近带电物体电场影响的被试品, 特别是直接与电桥连接的暴露的被试品电极, 在可能条件下用内侧有绝缘层的金属罩、铝箔等加以屏蔽, 屏蔽罩 (箔) 接地, 以减少电场干扰的影响。

5.2.2 选相倒相法

对于干扰电源和试验电源同频率时, 可以利用选相倒相法, 通过计算的方法消除干扰电流对被试品从高压端、中间电容屏或末端电容耦合的影响。一般情况下, 测量时将电源正、反倒相各测一次即可, 若作反接线测量, 且测得的 $\tan\delta \geq 15\%$ 时, 应将电源另选一相测试, 使 $\tan\delta \leq 15\%$ 为止。

当 $\tan\delta < 10\%$ 时, 实际 $\tan\delta_x$ 可简略地按下式计算:

$$\left. \begin{aligned} \tan\delta_x &= \frac{R_{32} \tan\delta_1 - R_{31} \tan\delta_2}{R_{31} - R_{32}} \\ C_x &= \frac{C_n R_4}{2} \times \frac{R_{32} + R_{31}}{R_{31} R_{32}} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中:

$\tan\delta_1$ 、 $\tan\delta_2$ ——倒相前后的 $\tan\delta$;

R_{31} 、 R_{32} ——倒相前后的 R_3 值。

应用选相倒相法所引起的误差在一般高压电桥允许的误差范围内。

5.2.3 干扰平衡法

5.2.3.1 原理

当干扰源特别强, 利用特制的可调电源加到桥体上, 可以消除干扰对电桥平衡和对测量的影响。

图 17 为以反接线为例在 R_3 臂上加反干扰源测量 $\tan\delta$ 的原理图。

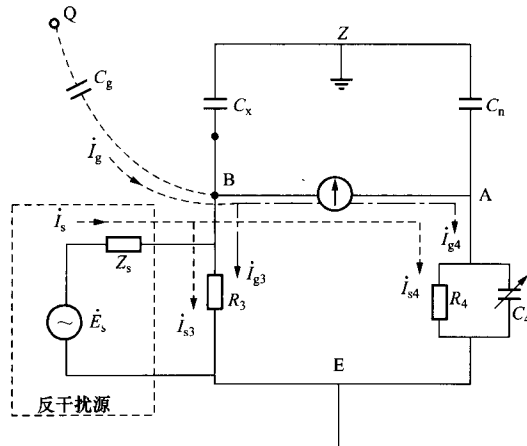


图 17 R_3 臂加反干扰源原理图

在西林电桥的 R_3 臂并接一个特制可调的电源（反干扰电源，电动势 \dot{E}_s ，内阻 Z_s ），首先， $|Z_s| \gg |R_3|$ ，反干扰源的并接，不影响干扰电流 \dot{i}_g 、 \dot{i}_{g3} 、 \dot{i}_{g4} 的分布。又因为 $\frac{1}{\omega C_x} \gg R_3$ ， $\frac{1}{\omega C_n} \gg |Z_4|$ ，所以反干扰源电流 \dot{i}_s 主要是流过 R_3 和 Z_4 臂，即：

$$\dot{i}_s = \dot{i}_{s3} + \dot{i}_{s4}$$

如果电桥 R_3 及 R_4 臂正好置于试品真实 $\tan \delta$ 对应位置，调节 E_s ，使之满足：

$$\dot{i}_{s3} + \dot{i}_{g3} = 0$$

则

$$(\dot{i}_{s3} + \dot{i}_{g3})R_3 = \Delta \dot{U}_{BE} = 0$$

因而

$$\dot{i}_{s4} + \dot{i}_{g4} = 0$$

这就表示流过检流计的干扰电流 \dot{i}_{g4} 与反干扰电 \dot{i}_{s4} 之和为零，电桥处于平衡。这时再加试验电压，电桥仍能处于平衡，即能得到较准确的 $\tan \delta$ 值。

5.2.3.2 操作步骤

- 按常规的 $\tan \delta$ 测量方法接好线（不加试验电源），将反干扰电源的两个输出端分别接入电桥的 C_x 端和 E 端（或者是 C_n 端和 E 端，或者是 C_x 端和 C_n 端）。
- 将电桥的 R_3 调整在估计的测量值位置上（例如，试品电容为 100pF 左右时可将 R_3 调整在大约为 1500Ω 的位置上）， R_3 预调得越准确，一般一次调整反干扰电源装置，即可一次平衡成功，测试数据准确。
- 合上电桥检流计电源，将检流计灵敏度放在适当位置，观察因电场干扰造成的检流计指示值，以不超过 2/3 刻度为宜。
- 合上反干扰装置的电源，先调整反干扰装置输出的反干扰电流“幅值”，后调整其相位，使检流计在灵敏度最大时，指示最小为止。
- 固定反干扰电源装置的“幅度”和“相位”，将检流计调至零位，然后合上试验电源，按常规试验方法进行 $\tan \delta$ 测量的平衡操作。
- 将试验电压降到零，反干扰装置的“幅值”与“相位”保持不变，将灵敏度调至最大位置。若检流计指示很小，所测数据即为正确值。
- 若测试数据要求相当精确时，可重复 d)、e) 两项操作或进行电源正、反相测量。

5.2.4 移相法

电桥采用移相电源，如图 18 所示。由于干扰电流 \dot{i}' 的相位在该被试设备的位置是不变的，所以调节电桥电源电压 \dot{U} 的相位， \dot{i}_x 的相位便相应的变化，于是可以改变 \dot{i}' 和 \dot{i}_x 的夹角。当调节移相器使它们的夹角为零的时候，上述 δ' 即等于 δ ，见图 19。设在开关 K 的正、反两种不同位置下将电桥调节到平衡，所得电桥读数为 C_4 、 R'_3 和 C_4 、 R''_3 ，则被试品介质损失角为：

$$\tan \delta = \omega C_4 R_4$$

电桥的两次电容测量值为：

$$C'_x = C_n \frac{R_4}{R'_3} \times \frac{1}{1 + \tan^2 \delta} \approx C_n \frac{R_4}{R'_3}$$

$$C''_x = C_n \frac{R_4}{R''_3} \times \frac{1}{1 + \tan^2 \delta} \approx C_n \frac{R_4}{R''_3}$$

它们分别正比于 I'_{cx} 和 I''_{cx} 。

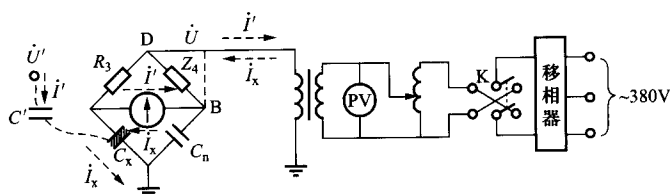


图 18 用移相电源消除干扰

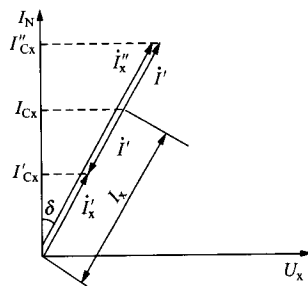


图 19 用移相电源时的电流相量图

被试品的实际电容值（正比于 I_{Cx} ）为：
$$C_x = \frac{C'_x + C''_x}{2} \approx \frac{C_n R_4}{2} \left(\frac{1}{R'_3} + \frac{1}{R''_3} \right)$$

找出相应于夹角为零的移相器位置的方法如下：在图 18 中将 B 与 D 短接，并将 R_3 放在最大，此时干扰电流 I' 及由电源供给的被试品电流 I_x 均流过检流计 G，它们的路径由图中虚线箭头所示。调节移相电源的相角和电压幅值，使检流计指示为最小，此时即表示上述夹角接近零。断开电源，保持移相电源相位，拆除 BD 短路，正式开始测量，将电压升至所需电压，若 K 在正、反位置下的 $\tan \delta$ 值相等即说明移相效果良好。

用移相法测试操作比较复杂。

5.2.5 异频法

通过改变试验电源的频率为 47.5Hz 和 52.5Hz（或 45Hz 和 55Hz），利用高压电桥原理，并运用离散付里叶变换等算法，将 50Hz 干扰信号从测试信号中分离。

5.2.6 其他

有利用光纤传递信号，隔离高压，抗外电场干扰等其他方法。

5.3 磁场干扰

当电桥靠近电抗器等漏磁通较大的设备时可能会受到磁场干扰。通常，这一干扰主要是由于磁场作用于电桥回路所引起。为了消除干扰的影响，一般可将电桥移动位置（约数米），即可移到磁场干扰较小或影响范围以外。若不可能，则也可以在检流计极性转换开关处于两种不同位置时将电桥平衡，求得每次平衡时的试品介质损失角及电容值。然后再求取两次的平均值来消除磁场干扰的影响。

5.4 其他影响因素

5.4.1 其他影响因素有：

- 电桥配套的标准电容器 BR—16 绝缘受潮；
- 电桥接线插座的屏蔽不良；
- 被试品与电桥的连接电缆（屏蔽线）长度超过 10m；
- 被试物电极的绝缘电阻和杂散电容。

5.4.2 消除方法

高压电桥应定期校验，试验时保证接线完好，不受潮；被试物周围的杂物应予清除。