

ICS 29.040.10

E 38

备案号: 63157-2018

DL

中华人民共和国电力行业标准

DL/T 474.3 — 2018

代替 DL/T 474.3 — 2006

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 test

杭 州 高 电

专业高试铸典范

Professional high voltage test

高压测量仪器智造 | 电力试验工程服务

2018-04-03 发布

2018-07-01 实施

国家能源局

发 布

目 次

前言 25

1 范围 26

2 规范性引用文件 26

3 术语和定义 26

4 测量仪器及主要技术参数 27

5 电力设备介质损耗因数 $\tan\delta$ 的现场测试 28

6 现场测量的干扰影响和消除方法 39

附录 A（资料性附录） 电场干扰影响的消除方法 40

前 言

DL/T 474《现场绝缘试验实施导则》共包括下列 5 个部分：

- 绝缘电阻、吸收比和极化指数试验；
- 直流高电压试验；
- 介质损耗因数 $\tan\delta$ 试验；
- 交流耐压试验；
- 避雷器试验。

本部分是 DL/T 474《现场绝缘试验实施导则》的第 3 部分。

本部分是对 DL/T 474.3—2006 进行的修订。与 DL/T 474.3—2006 相比，主要修改内容如下：

- 整体格式编写参照 GB/T 1.1—2009《标准化工作导则 第 1 部分：标准的结构和编写》的要求，修改了部分排序，增加了“术语和定义”。
- 规范性引用文件中，增加了 DL/T 962《高压介质损耗测试仪通用技术条件》。
- 增加“4.2 主要技术参数”。
- 对变压器、高压套管的试验结果判断及标准进行了修改。
- 删除了目前没有应用的“多油断路器”条款。

本部分由中国电力企业联合会提出。

本部分由电力行业高压试验技术标准化技术委员会（DL/TC 14）归口。

本部分起草单位：华北电力科学研究院有限责任公司、云南电网有限责任公司电力科学研究院、国网北京电力公司电力科学研究院、中国电力科学研究院。

本标准起草人：马继先、郝震、郭绍伟、钱国超、冯义、李昊扬、蔡巍、龙凯华、宋楠、赵媛、王建伟、丁玉剑、卢毅、郭亮、甘景福、杨大伟、赵铁军、钱欣。

本部分代替 DL/T 474.3—2006。

本部分历次版本发布情况为：

- DL/T 474.3—1992、DL/T 474.3—2006。

本部分在执行过程中的意见或建议反馈至中国电力企业联合会标准化管理中心（北京市白广路二条一号，100761）。

现场绝缘试验实施导则

介质损耗因数 $\tan\delta$ 试验

1 范围

本部分提出了高压电力设备绝缘介质损耗因数 $\tan\delta$ 和电容量的测量方法、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。

本部分适用于发电厂、变电站现场和修理车间、实验室等条件下，测量高压电气设备绝缘的介质损耗因数 $\tan\delta$ 和电容量。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 19749.1—2016 耦合电容器及电容分压器 第1部分：总则

DL/T 596 电力设备预防性试验规程

DL/T 962 高压介质损耗测试仪通用技术条件

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

介质损耗 dielectric loss

绝缘材料在电场作用下，由于介质电导和介质极化的滞后效应，在内部引起的能量损耗。

3.2

高压介质损耗测试仪 high-voltage dielectric loss detector

简称介损仪，是指采用高压电容电桥的原理，应用数字测量技术，对介质损耗因数和电容量进行自动测量的仪器。

3.3

正接线方式 measurement of ungrounded test objects

一种用于测量不接地试品的方法，测量时介损仪测量回路处于地电位。

3.4

反接线方式 measurement of grounded test objects

一种用于测量接地试品的方法，测量时介损仪测量回路处于高电位。

3.5

自激法方式 measurement of capacitive voltage transformer

一种用于测量无中间电压引出端子的叠装式电容式电压互感器的方法，测量时使用互感器的电磁单元作为试验电源。

3.6

异频法 differ-frequency method

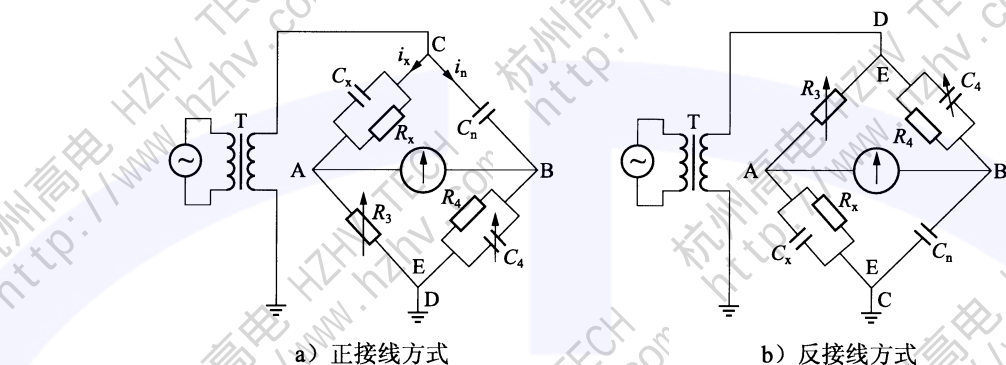
通过改变试验电源的频率 [47.5Hz 和 52.5Hz (或 45Hz 和 55Hz)]，利用高压电桥原理，并运用离散傅里叶变换等算法，将 50Hz 干扰信号从测试信号中分离。

4 测量仪器及主要技术参数

4.1 测量仪器

4.1.1 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。



元件：

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。

4.1.2 高压介质损耗测试仪

高压介质损耗测试仪是指应用数字测量技术并用计算机控制和处理，从而实现介质损耗和电容量的自动测量。

主要测量方法有零值比较法（用变压器比例臂代替普通阻抗比例臂）、实部和虚部分离法、快速傅里叶变换分析法（FFT）、相位差法等。

新型高压介质损耗测试仪一般具有全自动抗干扰功能，抗干扰主要采用异频法，启动测量后高压设定值送到变频电源，变频电源用 PID 算法将输出缓慢调整到设定值，测量电路将实测高压送到变频电源，微调低压，实现准确高压输出。根据正/反接线和内/外标准电容的设置，测量电路根据试验电流自动选择输入并切换量程，测量电路采用傅里叶变换滤掉干扰，分离出信号基波，对标准电流和试品

电流进行矢量运算，幅值计算电容量，角差计算 $\tan\delta$ 。反复进行多次测量，根据算法得到最终测量结果。测量结束，测量电路发出降压指令，变频电源缓速降压到 0V。

注：高压介质损耗测试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 2 所示。

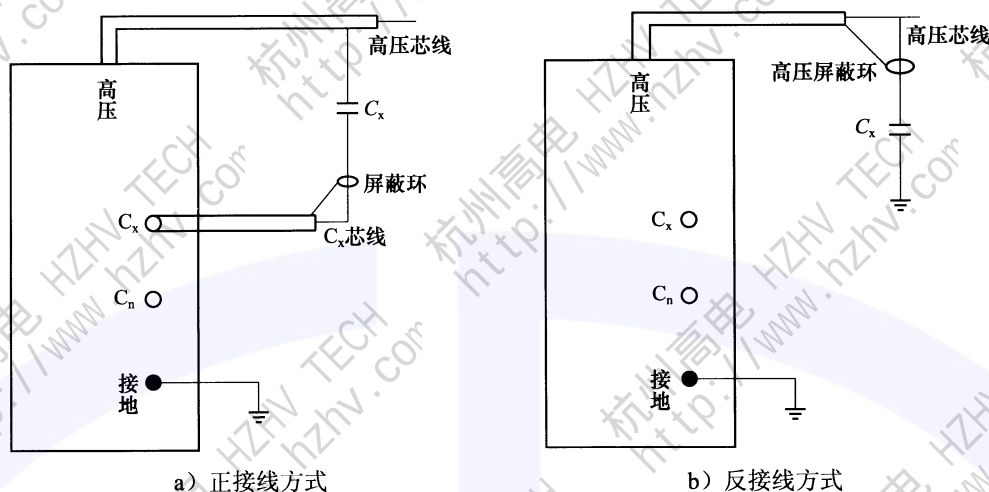


图 2 高压介质损耗测试仪原理接线图

4.2 主要技术参数

4.2.1 示值误差

介质损耗仪的具体技术参数，如测量范围、示值重复性、最小分辨率和内附高压电源技术参数等参照标准 DL/T 962。

在 200% 干扰（即 $I_{gr}/I_{sp} \leq 2$ ）下，损耗因数最大允许误差：±（1%×读数+0.0004）；电容量最大允许误差：±（1%×读数+1pF）；频率：±0.01Hz。

4.3 校验周期

校验周期一般不得超过 1 年。使用频繁的高压介损仪，应当适当缩短校验周期。

仪器检验时，应对仪器最小测量电压和最大测量电压同时进行校验。

5 电力设备介质损耗因数 $\tan\delta$ 的现场测试

5.1 试验条件及准备

5.1.1 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℃ 和空气相对湿度不大于 80% 的条件下进行。

5.1.2 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。

5.2 电力变压器

5.2.1 试验接线

因电力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线方式（或用 M 型介质试验器等其他仪器）进行。试验电压规定见表 1。

表 1 电力变压器试验电压

被试品电压等级	试验电压
绕组电压 10kV 及以上	10kV
绕组电压 10kV 以下	U_R
注：用 M 型试验器时试验电压自行规定； U_R ：额定电压。	

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。电力变压器试验接线见表 2。

表 2 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 及以上的电力变压器进行测定。试验时，高、中、低三绕组两端都应短接。				

5.2.2 试验结果判断及标准

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。具体如下：

- 110kV 或 16000kVA 及以上变压器的 $\tan\delta$ 宜在 10℃～40℃ 范围内测量，测量结果的比较不宜进行温度换算。
- 当 110kV 或 16000kVA 及以上变压器的 $\tan\delta$ 大于初始值的 1.3 倍时，应结合绝缘油的 $\tan\delta$ 、微水等试验结果进行综合判断。
- 应注意电容量的分析比较，当电容值与出厂值或初始值比较变化达 ±5% 时，应结合变压器绕组变形试验结果进行综合判断。

5.3 高压套管

5.3.1 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。现场应采用高压电桥正接线，将相应套管的测量用小套管引线接至电桥的 C_x 端，逐一进行测量。

末屏对地的 $\tan\delta$ 采用反接线测量，加压在末屏与油箱座之间，另外将一次端子（连同短接绕组）接到电桥的 E 端屏蔽，将非测量的其他绕组三相短路接地，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。

5.3.2 试验结果判断及标准

套管的 $\tan\delta$ 按 DL/T 596 进行综合判断。判断时应注意：

- a) $\tan\delta$ 值与出厂值或初始值比较不应有显著变化；
- b) 电容式套管的电容值与出厂值或初始值比较一般不超过 $\pm 5\%$ 。
- c) 当末屏绝缘电阻小于 $1000M\Omega$ 时应测量末屏对地的 $\tan\delta$ 。其值不大于 2%。

5.4 电容器

5.4.1 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。

5.4.2 试验结果判断及标准

判断标准见表 3。

表 3 耦合电容器和断路器断口均压电容器 $\tan\delta$ 和电容值判断标准

序号	项目	耦合电容器		均压电容器	
		交接	运行后	交接	运行后
1	电容值偏差	1) 在额定值的 $-5\% \sim 10\%$ 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值比值的倒数之差大于 5%	1) 投运 1 年内在出厂值或初始值的 $-5\% \sim 10\%$ 内； 2) 投运 1 年~3 年，大于 102% 时应缩短试验周期； 3) 一相中任两节其值相差不大于 5%	在出厂值或初始值的 $\pm 5\%$ 内	投运 1 年~3 年及断路器大修后，其值在出厂值或初始值的 5% 内
2	$\tan\delta$	应符合产品技术条件的规定	投运 1 年内及 1 年~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 年~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

注：或按 GB/T 19749.1—2016 中 2.6 的规定。

5.5 电流互感器

5.5.1 油浸链式和串级式电流互感器

5.5.1.1 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。

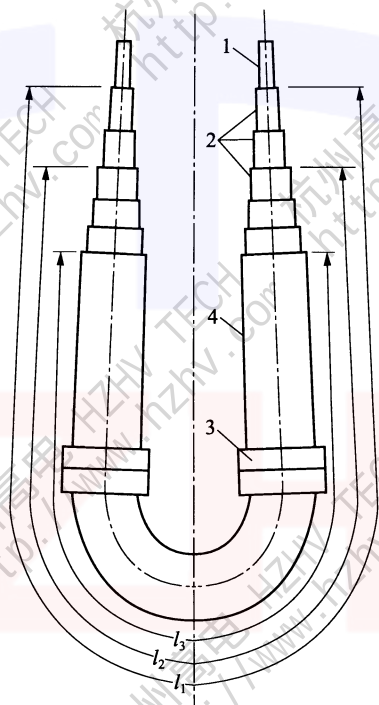
5.5.1.2 试验结果判断及标准

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。

5.5.2 电容型电流互感器

5.5.2.1 试验接线

电容型电流互感器的结构如图 3 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。



说明：

- 1——一次绕组；
- 2——电容屏；
- 3——二次绕组及铁芯；
- 4——末屏。

图 3 电容型电流互感器结构原理图

5.5.2.2 试验结果判断及标准

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 4 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 4 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	—	0.001	0.007	0.006
	胶纸绝缘	0.025	0.002	—	—

表 4（续）

电压等级 kV		20~35	66~110	220	330~500
运行中	油纸绝缘	—	1.0	0.008	0.007
	胶纸绝缘	0.03	2.5	—	—

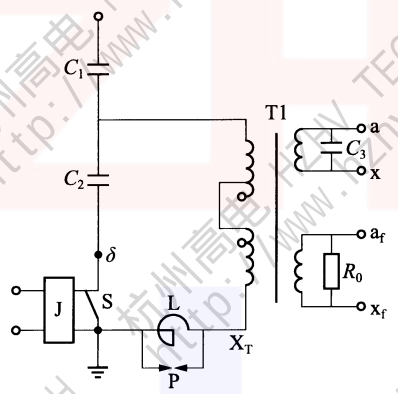
注：油纸电容型 $\tan\delta$ 一般不进行温度换算，当 $\tan\delta$ 值与出厂值或上次试验比较有明显增长时，应综合分析 $\tan\delta$ 与温度、电压的关系，当 $\tan\delta$ 随温度明显变化或试验由 10kV 升到 $U_m/\sqrt{3}$ 时（ U_m 是设备最高运行电压）， $\tan\delta$ 增量超过 $\pm 0.3\%$ ，不应继续运行。

5.6 电压互感器

5.6.1 电容式电压互感器

5.6.1.1 结构原理

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 4 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。



- 说明：
- C_1 ——主电容；
 - C_2 ——分压电容；
 - L ——电抗器；
 - P ——保护间隙；
 - $T1$ ——中间变压器；
 - R_0 ——阻尼电阻；
 - C_3 ——防振电容器；
 - S ——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；
 - ax_r —— $T1$ 的二次剩余电压绕组。

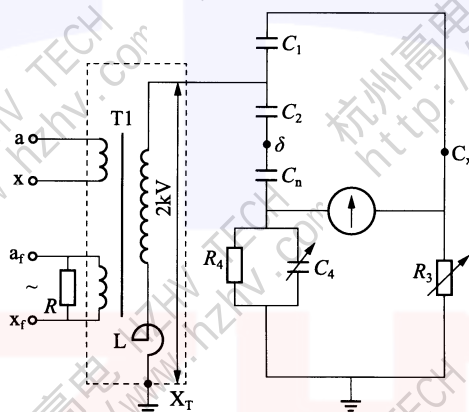
图 4 电容式电压互感器结构原理图

5.6.1.2 试验接线

5.6.1.2.1 主电容的 C_1 和 $\tan\delta_1$ 的测量

对于 220kV 级以上等级的 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 5 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。



说明：

C_n ——标准电容；

其他符号的含义同图 4。

图 5 测量 C_1 、 $\tan\delta_1$ 接线图

5.6.1.2.2 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 6 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。

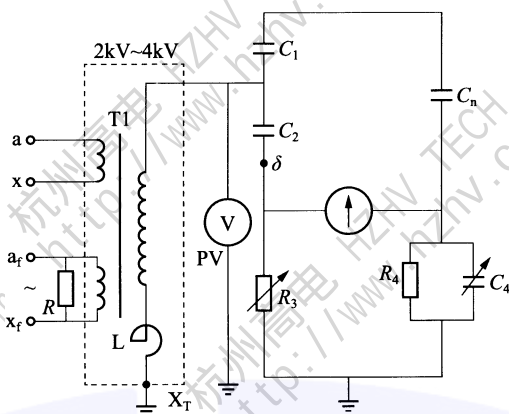
试验时应注意下列事项：

- 试验电压应大于电桥不确定度要求的最低电压。
- 试验电流不宜超过加压绕组额定电流，避免波形畸变影响数据准确性。
- 试验时加压绕组一般选择额定输出容量最大的二次绕组，必要时可两个二次绕组并联加压。

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，做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 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。



说明:

C_n ——标准电容;

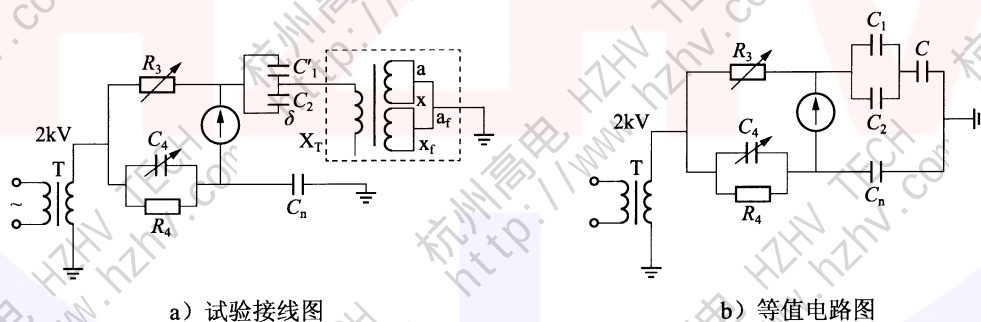
PV ——电压表;

其他各符号的含义同图 4。

图 6 测量 C_2 、 $\tan\delta_2$ 的接线图

5.6.1.2.3 中间变压器的 C 和 $\tan\delta$ 测量

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测量。由于 δ 点绝缘水平限制, 外施交流电压 2kV, 其试验接线和等值电路如图 7 所示。



a) 试验接线图

b) 等值电路图

说明:

C_n ——标准电容;

T ——电源变压器;

其他各符号的含义同图 4。

图 7 测量中间变压器 $\tan\delta$ 和电容的接线和等值电路

5.6.1.3 试验结果判断及标准

电容分压器的试验标准见表 3 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 7 b) 中 $(C_1 + C_2) \gg C_T$, 因此按图 7 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 。

5.6.2 电磁式(油浸)全绝缘电压互感器

5.6.2.1 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 点的正接线方式来测量 $\tan\delta$ 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，其二次绕组均短路直接接地的反接线方式。

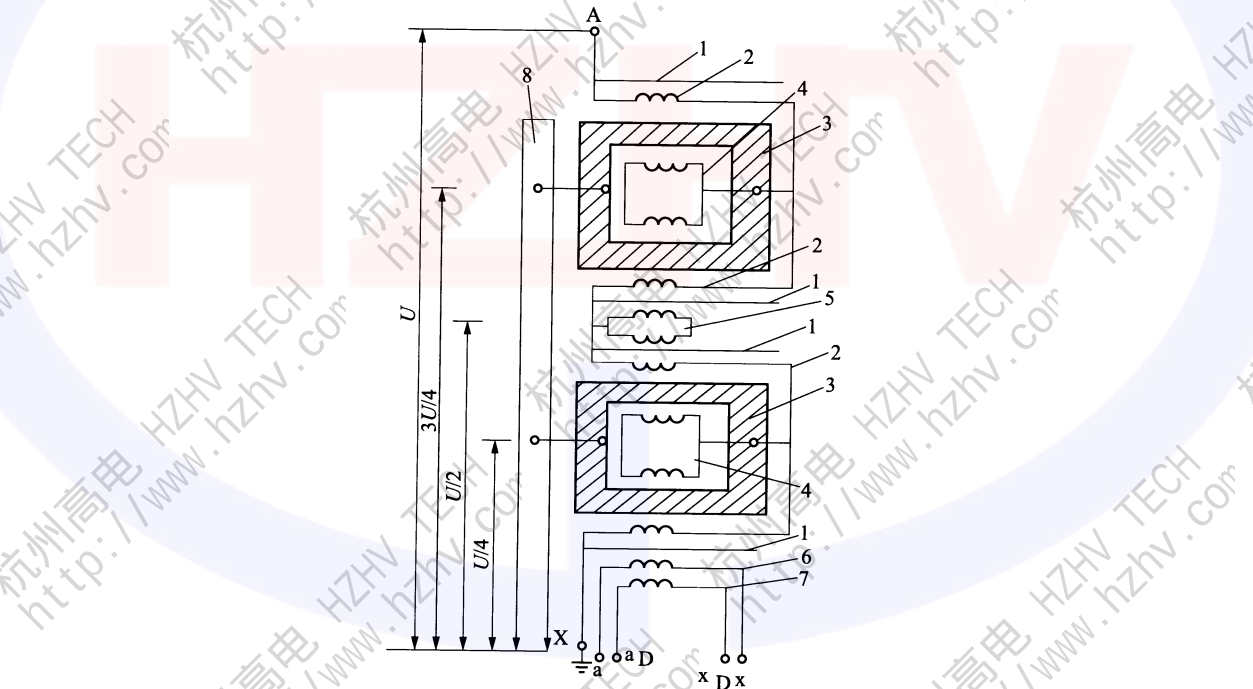
5.6.2.2 试验结果判断及标准

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。

5.6.3 串级式（油浸）电压互感器

5.6.3.1 结构原理

图 8 为 220kV 串级式电压互感器原理接线图。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 $a_D x_D$ 。“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。



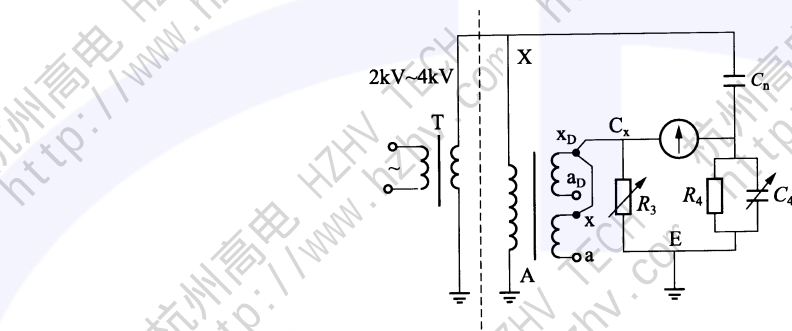
- 说明：
- 1——静电屏蔽层；
 - 2——一次绕组（高压）；
 - 3——铁芯；
 - 4——平衡绕组；
 - 5——连耦绕组；
 - 6——二次绕组；
 - 7——剩余二次绕组；
 - 8——支架。

图 8 220kV 串级式电压互感器原理接线图

5.6.3.2 试验方法和接线

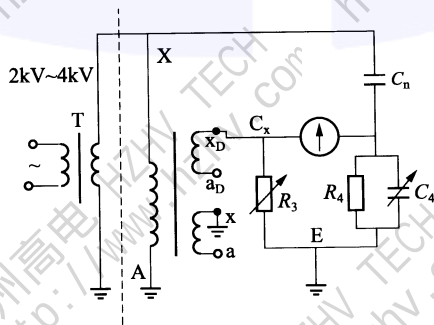
5.6.3.2.1 测量串级式电压互感器 $\tan\delta$ 和电容的主要方法有：末端加压法、末端屏蔽法、常规试验法和自激法。末端加压法采用较广，它的优点是电压互感器 A 点接地，抗电场干扰能力较强，不足之处是存在二次端子板的影响，且不能测绝缘支架的 $\tan\delta$ 值；末端屏蔽法“X”接屏蔽能排除端子板的影响，能测出绝缘支架的 $\tan\delta$ 值，电压互感器的预防性试验规定，必须增加对绝缘支架的介质损失值的测试项目，因此 DL/T 596 建议采用末端屏蔽法试验。自激法抗干扰力差，一般较少采用。

5.6.3.2.2 试验接线和方法如图 9～图 14 和表 5 所示。



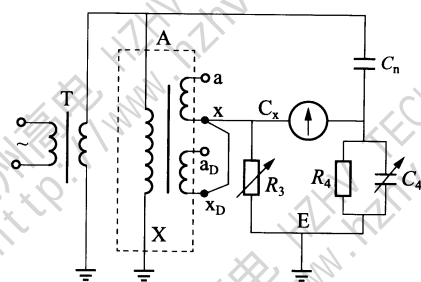
- 说明：
- AX —— 高压绕组端子；
 - ax —— 二次绕组端子；
 - a_Dx_D —— 剩余二次绕组端子；
 - C_x —— 电容电桥端子；
 - E —— 电桥接地端子；
 - R_4 —— 电桥固定电阻；
 - C_4 —— 电桥可调电容；
 - C_n —— 标准电容；
 - R_3 —— 电桥可调电阻。

图 9 末端加压法测量接线



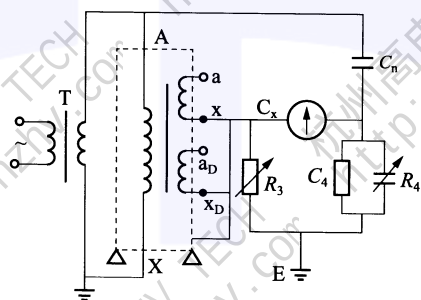
注：各符号的含义同图 9。

图 10 末端加压法测量对剩余二次绕组端部 $\tan\delta$ 的接线



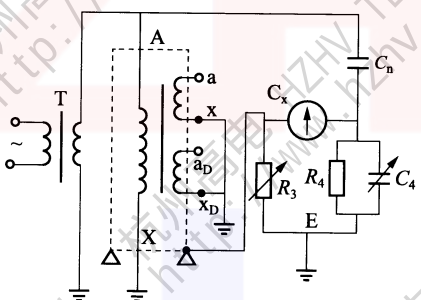
注：各符号的含义同图 9。

图 11 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 $\tan\delta_a$ ）



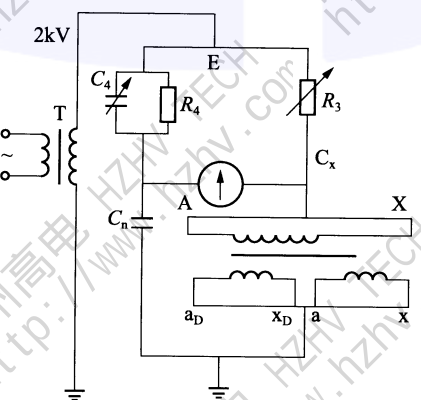
注：各符号的含义同图 9。

图 12 末端屏蔽法：电压互感器底座接地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 9。

图 13 末端屏蔽法直接测量支架 $\tan\delta$ 接线



注：各符号的含义同图 9。

图 14 常规法（反接线）接线

表 5 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	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	三次端子	
1	末端加压法	图 9	正接线	x, x_D	地	X 加 2~3kV	A	a_D, a	接地	√		√	√	
2		图 10		x_D	地		A, X	a_D, a	接地	√		√	√	
3	末端屏蔽法	图 11	正接线	x, x_D	地	A 加 10kV 货值绕组额定电压 (限于 C_n)	X	a_D, a	接地	√				$C_a, \tan\delta_a$
4		图 12		x, x_D 底座	地		X	a_D, a	绝缘	√	√			$C_b, \tan\delta_b$
5		图 13		底座	地		X, x, x_D	a_D, a	绝缘		√			$C_c, \tan\delta_c$
6	常规法	图 14	正接线	$ax, a_D x_D$	地	AX 加 10kV			绝缘	√	√	√	√	
7				$ax, a_D x_D$	地				接地	√		√	√	
8				ax	$a_D x_D$, 地				接地	√		√		
9				$a_D x_D$	ax , 地				接地	√	√		√	
10				底座	$ax, a_D x_D$ 地		$ax, a_D x_D$		绝缘		√	√		
11			反接线	AX	加压	经 E 加 2~3kV	$ax, a_D x_D$		接地	√	√	√	√	
注 1: 表中“√”为做此试验。 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: $C_x = \frac{1}{k} \times \frac{R_4}{R_3} C_n$ 式中, k 是试验时二次绕组 (ax, a_D, x_D) 所在铁芯的电位与试验电压的比值, 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, $k=1/2$; 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, $k=1/2$ 。														

5.6.3.2.3 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 10pF~25pF), 因此按图 13 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 11 和图 12 两次测量后, 用式 (3) 计算出绝缘支架的电容 C_c 和介质损耗因数 $\tan\delta_c$, 即

$$C_c = C_b - C_a$$

$$\tan\delta_c = \frac{C_b \tan\delta_{bn} - C_a \tan\delta_a}{C_b - C_a} \quad (3)$$

式中:

C_a 及 $\tan\delta_a$ ——按图 11 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 12 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 14 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 $R_1 = R_4/n$ ($n=1, 2, 3, \dots, 9$)。此时, 被试的 $\tan\delta$ 值等于 C_4 的微法值除以 n , 即 $\tan\delta = C_4/n$ 。

5.6.3.3 试验结果判断及标准

串级式 (分级绝缘) 电压互感器 20℃ 时的 $\tan\delta$ 值应不大于表 6 中数值。

表 6 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		交接大修后 %	运行中 %
66kV~220kV	常规试验法		2.0	2.5
	末端 加压法	按图 9 接线	2.5	3.5
		按图 10 接线	3.5	5.0
	末端 屏蔽法	本体, 按图 11 接线	3.5	5.0
		绝缘支架, 按图 11、12 或图 13 接线	6.0	6.0
	自激法		2.5	3.5

6 现场测量的干扰影响和消除方法

6.1 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，其受电场干扰的情况也不同，电场干扰影响的具体消除方法参见附录 A。

6.2 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。

6.3 其他影响因素及消除方法

6.3.1 其他影响因素

其他影响因素如下：

- 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。
- 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。套管电容越小，其影响也越大，试验结果往往有很大差别。
- 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。

6.3.2 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。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。有条件时可采用电吹风吹干瓷表面或待阳光暴晒后进行测量。

被试物周围的杂物应予清除。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。

附录 A

(资料性附录)

电场干扰影响的消除方法

A.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。

A.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:

$$\tan\delta_x = \frac{R_{32} \tan\delta_1 - R_{31} \tan\delta_2}{R_{31} - R_{32}} \quad (\text{A.1})$$

$$C_x = \frac{C_n R_4}{2} \times \frac{R_{32} + R_{31}}{R_{31} R_{32}} \quad (\text{A.2})$$

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。

A.3 干扰平衡法

A.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,可以达到消除干扰对电桥平衡和对测量的影响。

图 A.1 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。

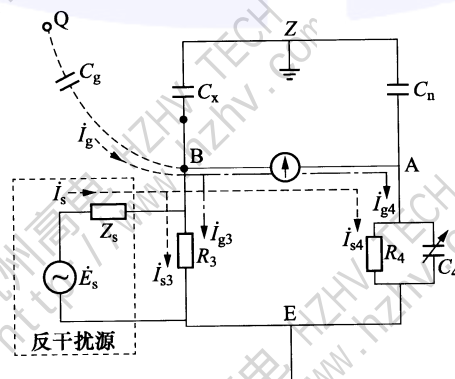


图 A.1 R_3 臂加反干扰源原理图

在西林电桥的 R_3 臂并联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， $|Z_s| \gg |R_3|$ ，反干扰源的并联，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。

A.3.2 操作步骤

操作步骤如下：

- 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 1500 Ω 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。

A.4 移相法

电桥采用移相电源，如图 A.2 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 ，如图 A.3 所示。设在开关 S 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：

$$C'_x = C_n \frac{R_4}{R'_3} \times \frac{1}{1 + \tan^2\delta} \approx C_n \frac{R_4}{R'_3} \quad (A.3)$$

$$C''_x = C_n \frac{R_4}{R''_3} \times \frac{1}{1 + \tan^2\delta} \approx C_n \frac{R_4}{R''_3} \quad (A.4)$$

它们分别正比于 I_{Cx} 和 I''_{Cx} 。

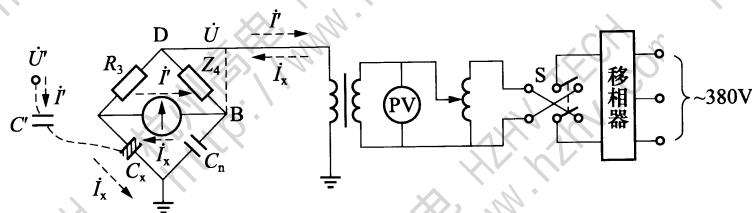


图 A.2 用移相电源消除干扰

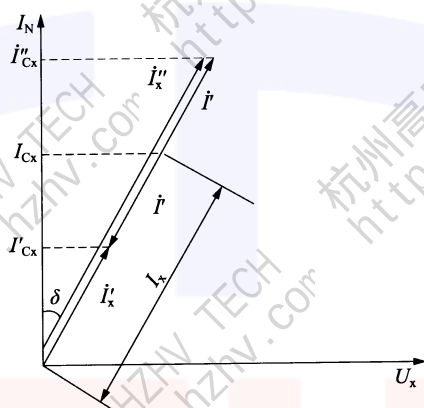


图 A.3 用移相电源时的电流相量图

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 A.2 中将 B 与 D 短接，并将 R_3 放在最大，此时干扰电流 I' 、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 S 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。

A.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，并运用离散傅里叶变换等算法，将 50Hz 干扰信号从测试信号中分离。

A.6 其他

还可利用光纤传递信号、隔离高压、抗外电场干扰等其他方法。