



上海交通大学
Shanghai Jiao Tong University 科技园

QS30II 型高精密高压电容电桥

使用说明书



上海舒佳电气有限公司

TEL: 021-54358329 FAX: 021-54011883 <http://www.sh-sjdq.cn> Email: h5117@163.com

目 录

1. 概述	(2)
1.1 简介	(2)
1.2 性能	(2)
1.3 结构	(2)
1.4 技术指标	(2)
2. 安装	(4)
2.1 验收检查	(4)
2.2 安装	(4)
3. 操作	(4)
3.1 外形结构介绍	(4)
3.2 电容测试	(6)
3.2.1 准备工作	(6)
3.2.2 电容及损耗角正切值 $\text{tg } \delta$ 的三端测量	(6)
3.2.3 电容及损耗角正切值 $\text{tg } \delta$ 的四端测量	(7)
3.2.4 电压变压器(或互感器)的校验	(9)
3.2.5 电感测量	(10)
3.2.6 仪器自校	(11)
4. 工作原理	(12)
4.1 电流比较仪	(12)
4.2 电容电桥	(13)
4.3 电感测量	(17)
4.4 内部数据处理	(18)
5. 仪器成套性	(19)
6. 保管与免费修理期限	(19)

[返回目录](#)

1. 概述

1.1 简介

本说明书是 QS30I 型高精密高压电容电桥的安装和使用说明书。(包括 QS30-3 型量程扩展器及 SP-A 型打印机)。

QS30-II 型高精密高压电容电桥有如下特点。主电桥主要采用电流比较仪的原理并结合计算机数据处理, 具有操作方便可靠、测量精度高、读数位数多、线性度好, 不受环境湿度影响, 仪器内部的计算机能自动对测试数据进行处理, 直接在面板上显示电容值及介损值 $\text{tg } \delta$ 和测试电压及流经标准电容的电流 (I_s), 并可通过打印机将测试结果打印出来或通过 RS232 接口将测试结果传给电脑等优点, 它不仅能测电容器的电容量、介损量, 还能测量电抗器的电感量和 Q 值是目前国内精度较高、稳定性好、操作方便、用途广泛的高压电桥。

1.2 性能

QS30-II 型高压电桥为实验室用高精密高压电桥。主要采用电流比较仪的原理, 使它在测量上具有较高的比率精度和稳定性, 这是一般西林电桥不能达到的。再加上计算机数据处理, 使测量更加直观。本电桥可与各类高压标准电容器配合组成高压电容电桥, 适宜于在高电压下测量电力电缆、高压套管、电力电容器、互感器等高压电力设备的电容量及损耗角正切值 $\text{tg } \delta$, 以及各种固体或液体绝缘材料的介电常数 (ϵ) 及损耗角正切值, 也可测量高压变压器或电压互感器的比差和角差。电桥可外接电流互感器以扩大量程, 测量大电容时本电桥为四端测量具有引线补偿装置, 使测量精度提高, 消除接线电阻引起的附加误差。本电桥还可测量电抗器的电感量及 Q 值。QS30 I-3 型量程扩展器 (供选购) 能使主桥体的电容比从 1000: 1 扩大到 10^6 : 1。

1.3 结构

本电桥放在一个金属箱体内, 指零仪安放在适宜人眼观察的水平位置。灵敏度调节开关在表头的旁边, 桥体安放在指零仪下面, 电容比值和介质损耗角正切值读数调节开关固定在面板上。在主桥体与指零仪的之间, 是被测试品的电容量量、介损量、测试电压或测试电流的显示窗, 在其旁边是电容量的预置盘。电桥本体的环形电流比较仪装在一个磁屏蔽盒内, 它的铁芯采用超高导磁材料卷绕成环形, 对内外磁场有较好的抗干扰性能, 具有很高精度的比差和角差。主运算放大器、引线补偿放大器及微机处理器都在箱体内部一个金属屏蔽盒内, 电桥工作电源采用了开关电源, 具有很宽的工作范围, 也安装在金属屏蔽盒内。

连接标准电容器与被测试品的插座在仪器背部, 接地端钮前后共有两处, 外接线采用屏蔽电缆, 电桥装置箱体作为静电屏蔽以免干扰。

1.4 主要技术指标

- 电桥电容比 C_x/C_s (当额定比率为 1: 1 时) 为 0 到 1.111110, 步级 0.000001, 倍率 (K) 变化范围为 1000、500、200、100、50、20、10、5、2、1 共十档, 电容的测量范围取决于标准电容器 C_s 的大小电容值, 即 $C_x=C_s \cdot K \cdot (C_x/C_s)$
- 电容比率值的测量准确度: 电容比率读数第一只盘为满度时应不大于
当 $\text{tg } \delta < 3 \times 10^{-3}$ 为 ± 0.00005
 $\text{tg } \delta \geq 3 \times 10^{-3}$ 为 $\pm 0.00005 \pm 0.005 \times \text{tg } \delta_x$
- 电桥 $\text{tg } \delta$ 范围为 -0.111110 到 +0.111110, 步级为 0.000001。
- $\text{tg } \delta_x$ 测量准确度不大于 $\pm 0.5\% \text{ tg } \delta_x \pm 5 \times 10^{-5}$
- 被测电容量显示: $C_x = (0.1 \sim 1111.1110) C_n$

[返回目录](#)

显示为被测电容量的前 6 位有效数字。

- 被测电容介损显示： $\text{tg } \delta = -1.11 \times 10^{-1}$ 到 1.11×10^{-1} 显示为被测电容介损的前 3 位有效数字并结合科学记数法。
- 电容量及介损显示精度：电容量： $\pm 0.5\% \times \text{tg } \delta \times \pm 0.00005$ 。介损： $\pm 0.5\% \text{tg } \delta \times \pm 5 \times 10^{-5}$
- 电桥最大工作电流：电桥标准臂最大允许电流为 15mA。通过被测臂最大电流与倍率位置有关，见表 1。

表 1

倍率	最大允许电流
1	15mA
2	30mA
5	75mA
10	150mA
20	300mA
50	750mA
100	1.5A
200	2A
500	2A
1000	2A

注意：被测最大不超过 2A，如测试需要则需外接电流互感器。

- 分辨率：当通过标准电容器的电流为 0.1mA 时，且电容比率读数第一只盘为满度时，在电桥完全平衡时，其电容比及介损盘的分辨率均为 5×10^{-5} 。
- 标准电容量预置范围：0000.00 到 1999.99pF。
- 电桥内有过电压保护措施，氖泡起辉电压不超过交流 30 伏。
- 试验电压显示：范围 0 到 499kV 分辨率为 0.1kV。
- 电桥内附指零仪，其主要技术特性如下：
 1. 电压零敏度 $2 \mu\text{V}/\text{格}$ 。
 2. 输入阻抗 $80\text{k}\Omega$ 。
 3. 三次谐波抑制 -60dB 。
 注：以上的所有技术指标都是在基本测试频率 $50 \pm 0.2\text{Hz}$ 下的。
- 电源电压为 220V 允差 10%，频率为 $50 \pm 2\text{Hz}$ 消耗功率约 40W。
- RS232 接口：按一个键就可将测试数据传输给电脑，便于数据统计与存储。
- 外形尺寸：560（宽）*410（深）*390（高）毫米。
- 重量：约 35 公斤。
- SP-A 打印机的主要技术指标：
 1. 打印宽度：40 字符/行。
 2. 打印速度：0.4 行/秒。
 3. 打印纸：57.5mm 宽，40mm 直径的普通白纸纸圈。
 4. 外形尺寸：111×62×128（mm）。

返回目录



2.1 验收检查

在出厂前，仪器进了彻底的机械和电气检查，其中包括一段时间的老化，最后经过严格的检验，合格后才出厂的。所以在收到仪器时，仪器不应该有损伤和故障。然而，由于运输过程中可能会发生问题，故用户在收到仪器后应首先检查是否有结构上的损伤，并尽快的进行电气试验。如发现问题，用户应马上与本公司联系，切勿自行开机处理。

2.2 安装

将电桥安放在牢固的操作台上，首先将电桥的接地端与大地可靠的连接好，然后把仪器的电源线插到适合的电源上。

2.3 初步试验

- 将标准电容器预置盘调整到目前所使用的标准电容量的数值。
- 将电源开关打开，指零仪的指针会向上摆动一下，然后再回到另位。同时显示窗口会有显示、打印机会发出马达的声音，然后打印机的在线指示灯会亮。
- 调节电容比率盘到 0.555555，介损盘到 0.005555，此时电容显示窗应显示标准电容量预盘的数值与电容比率盘的乘积的前 6 位有效数字；介损显示窗应显示：“5.55-3”。
- 观察实验电压显示窗：应为“000.0”，按下 DC 按钮，应显示“00.00”。

3. 操作

3.1 外形结构介绍(见图 1)

1. 电源插座：220V/50Hz
2. 保险丝：2A
3. 接地端钮（背面上 2 只）：使用时要确保可靠的大地连接，保证操作安全。
4. Cs 插孔：接标准电容器。
5. Cxp 插孔：被测 Cx 电位插孔，四端测量大电容时为被测电位端。
6. CxI 插孔：被测 Cx 电流插孔，三端测量时为被测端，四端测量时为被测电流端。
7. Cx 放电管：起辉电压不大于交流 30 伏。
8. 试验电压显示微调电位器：在试验时如发现显示的试验电压与实际电压误差过大，可通过调节此电位器，来调整所显示的电压值，倘若有一些误差不会影响测量精度，一般情况在出厂时已调整，故操作人员可不用调整。
9. DC 电平：此按钮是选择在试验电压显示窗是显示试验电压还是流经标准电容器的电流 I_{cs} 。
10. Cx 微调按钮。
11. Cx 微调电位器：当四端测量需消除引线影响时，按下“Cx 微调按钮”，调节电位器，使指零仪指示尽可能小，具体使用可见后章。
12. 标准电容器选择开关：共有两档，100pF 和 1000pF，当四端测量时，并需要引线补偿时，选用 100pF 作标准时置于“100pF”，若选用 1000pF 作标准时置于“1000pF”。
13. 测量形式选择开关：当三端测量时置于“3”，当四端测量时置于“4”。

返回目录

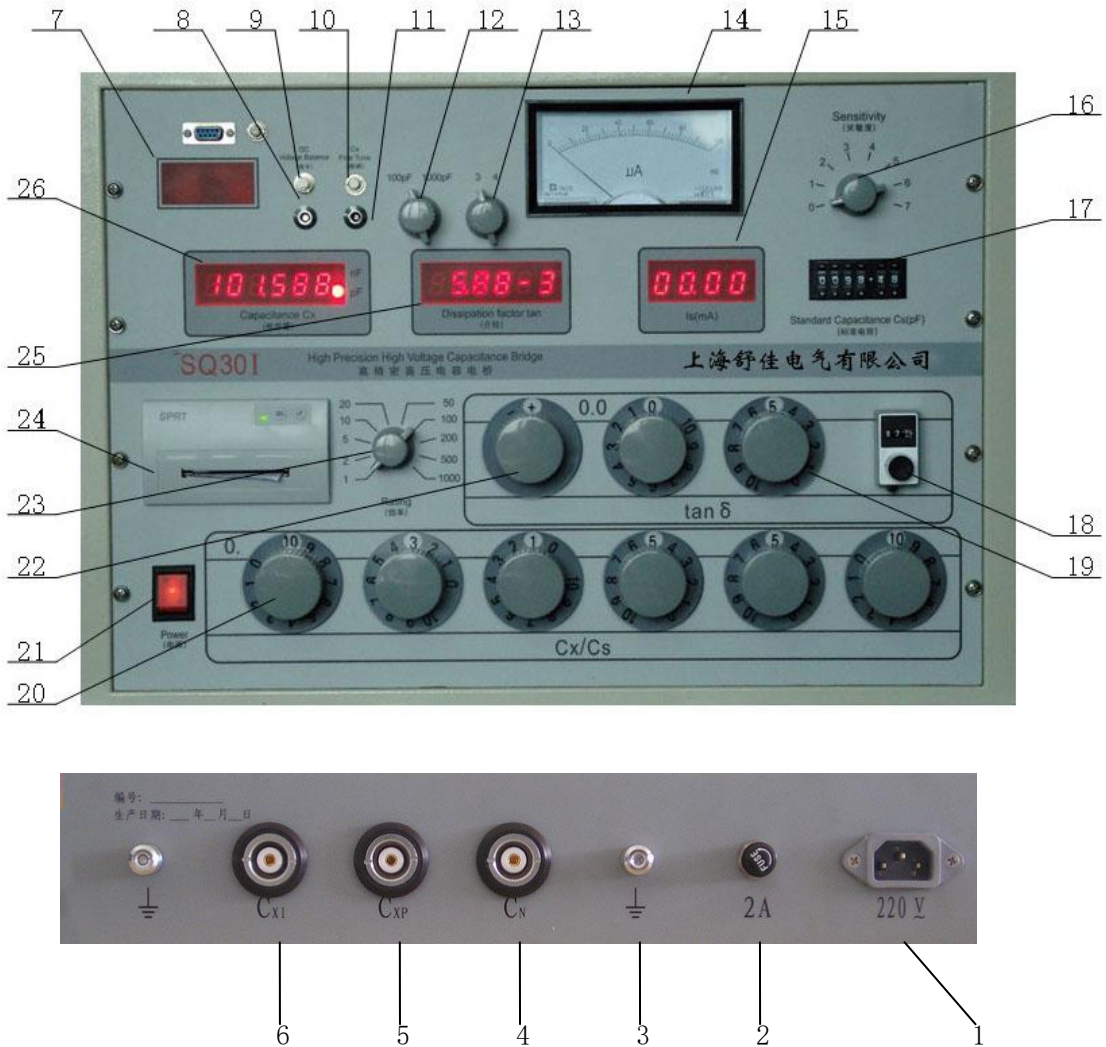


图 1

14. 指零仪表头：平衡时表针指零，使用时不要使表头指针超满偏，以免损坏。在测量接线完毕后，缓慢升起电压，如接线的屏蔽、接地良好，那么指零仪的灵敏的开关在零位时，指针指示也应该为零。通过此可检查屏蔽和接地是否良好，如发现指针与试验电压一起在升高，必须马上切断高压，检查测量回路接线，倍率开关位置是否合适。
15. 试验电压显示窗：能在高压试验时显示试验电压，单位为 kV。在 DC 电平按下时，还可显示流经标准电容器的电流单位为 mA，本电桥通过标准电容器的电流最大为 15mA。
16. 灵敏度转换开关：共有 7 档，调节平衡时逐渐增大灵敏度，直到所需要的读数分辨率为止。
17. 标准电容量预置盘：电桥内部的计算机将通过这里给定的标准电容量的值，对所测试的结果进行数据处理，然后在显示窗上显示出被测试品的电容量及介质损耗值。
18. 损耗角正切 $\text{tg } \delta$ 平衡调节电位器。

返回目录



19. 损耗角正切 $\text{tg } \delta$ 平衡调节盘。
20. 电容比率调节平衡盘 (C_x/C_s): 共 6 位读数, 平衡后直读电容比率值。
21. 电源按钮开关: 按下接通电源, 红灯亮。
22. 介质损耗角正切值 $\text{tg } \delta$ “+” “-” 选择开关: 当被测 $\text{tg } \delta$ 大于标准 $\text{tg } \delta$ 时置于“+”; 当被测 $\text{tg } \delta$ 小于标准 $\text{tg } \delta$ 时或测电抗器时置于“-”。
23. C_x 倍率转换开关 (K): 共有十档量程。
24. 打印机: 可打印出测试结果, 具体操作详见附录。
25. 被测试品介质损耗显示窗。
26. 被测试品电容量显示窗。

注意:

在试验前, 电桥必须可靠与大地连接, 灵敏度开关必须回零位, 否则在试验时电

桥会发生过大的不平衡, 造成指零仪的指针过分偏转而损坏。一般可在外回路没有施加任何电压的条件下, 进行初次平衡。因为本仪器的高灵敏度能使系统在周围始终存在的电磁场下得到利用。

流经标准电容器及被测电容器的电流必须符合技术指标的要求。以防止电流比较仪的线路损坏。

3.2 电容测试

3.2.1 准备工作: 预置

先将此盘示值调节到所使用的标准电容器实际电容量值。然后将接地端钮与大地可靠连接, 电源线接到合适的电源上, 指零仪的灵敏度开关置零。最后按下按钮接通电源, 红灯亮。

3.2.2 电容与损耗角正切值 $\text{tg } \delta$ 的三端测量

- (1) 在标准电容侧的最大电流不得超过 15mA (特殊订货可达 30mA), 在试验时应引起注意。为了获得最大的分辨率, I_{cs} 不应小于 1mA。
- (2) 用专用测量电缆线将标准电容接到电桥背面 C_s 插座, 被测试品接到 $C_x I$ 插座见图 9。
- (3) 将倍率开关置于相应的位置上, 再将 C_x 测量型式开关 (图 1 序 13) 置于“3” (三端测量)。
- (4) 接线完后, 缓慢升起电压, 如接线的屏蔽、接地良好, 那么指零仪的灵敏度开关在零位时, 指针指示也应该为零。通过此可检查屏蔽和接地是否良好, 如发现指针与试验电压在一起升高, 必须马上切断高压, 检查测量回路接线、倍率开关位置是否合适。
- (5) 在未加试验电压之前, 逐渐增加灵敏度, 利用电桥的高灵敏度而进行初步平衡, 寻找出一接近平衡的数值, 以避免施加试验电压后由于极大不平衡而造成的困难。当 I_{ns} 指示 1mA 时即当 $C_s=100\text{pF}$ 试验电压为 30kV 时, 本电桥分辨率无论是电容比值或 $\text{tg } \delta$ 均能达到 1×10^{-6} , 倍率选择可按表 2 所示预置。若标准电容为 1000pF 则被测相应增大 10 倍。

例 1 如果 $C_x=400\text{pF}$ $C_s=100\text{pF}$ 倍率“K”置于“5”;
则测量盘 C_x/C_s 读数为 0.800000

例 2 如果 $C_x=30\text{pF}$ $C_s=100\text{pF}$ 倍率“K”置于“1”
则测量盘 C_x/C_s 读数为 0.300000

如果被测电容器的值不知道, 开始时最好将测量计数盘置于 0.500000 的位置, 然后改变倍率 K, 使指零仪指向较小的偏转, 增大灵敏进一步调节读数盘使电桥逐步平衡, 然后计得被测值, 若要获六位读数按此被测容量值, 选择适当的倍率 K。

返回目录



表 2

Cx (pF)	Cs (pF)	倍率 (K)
100	100	1
200	100	2
500	100	5
1000	100	10
2000	100	20
5000	100	50
10000	100	100
20000	100	200
50000	100	500
100000	100	1000

(6) 施加试验电压逐渐增大灵敏度，反复调节 Cx/Cs 读数盘及 tg δ 读数盘直到指零仪表头指针置于零点。此时电桥达完全平衡，只需满足使用者所需要的读数能分辨即可，不一定要将灵敏度置于最大“7”档。此时容量及介损显示窗将显示被测的容量及介损值。也可以用打印机将有关数据打印出来。打印格式如下：

```

U-TEXT: xxx.x    kV
Ics: xx.xx      mA
Cn: xxxxxx      pF
Cx: xxxxxx      pF
Tan: xxxxxx
    
```

打印单说明：U-TEXT：打印时的测试电压

Ics：流经标准电容器的电流

Cn：面板上“Cn”所置的标准容量值

Cx：被测试品的容量。（与 Cn 所置的量有关）

tg δ：被测试品的介损值。

还可根据电桥的测量盘示值来计算。

被测电容值按下式计算：

$$C_x = K (C_x / C_s) C_s \dots\dots\dots (1)$$

其中：K——倍率开关指示值

Cx/Cs——电桥读数

Cs——标准电容实际值

电桥 tg δ 盘读数即为被测试品的 tg δ 值，但更精确的数值应按下式计算：

$$\text{tg } \delta_x = A \text{ tg } \delta (\text{读}) + \text{tg } \delta_s \dots\dots\dots (2)$$

式中：tg δ (读)——电桥读数值

tg δ s ——标准电容的自身介损值

A —— f' / f (f'：为实际频率、f：50Hz)

3.2.3 电容及损耗角正切值 tg δ 的四端测量

测量大电容时，电容器的阻抗很小，因此接线阻抗不能忽略。标准电容器的接线阻抗低于标准电容器阻抗的 1×10^{-7} ，电流比较仪绕组的内部阻抗则为标准电容器阻抗的百万分之几。为了能在测量大容量时，保证测量精度，引线阻抗必须补偿。其接法如图 2 所示。

补偿引线调零步骤如下：

- (1) 标准电容Cs的低压测量端用专用导线接到电桥Cs插座。

[返回目录](#)



标准电容 C_s 高压端用另一专用导线（此导线将作为 C_x 电位端的引线）接到接到 C_{xp} 插座。

- 按下电桥电源按钮，电桥 C_x/C_s 数盘置于“10”，倍率开关置于相应的位置。电桥被测 C_x 测量形式开关置于“4”，标准电容 C_s 选择开关置于与所选用标准电容量相一致的位置（例如使用 1000pF 作标准电容时，此开关置于“1000pF”）。指零仪灵敏度置于“4”，然后按下 C_x 微调按钮，并用螺丝批调节下面小孔内的微调，使指零仪指针指于零（或最小），此时调零补偿引线结束。

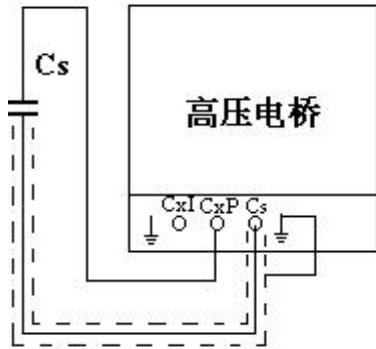


图 2

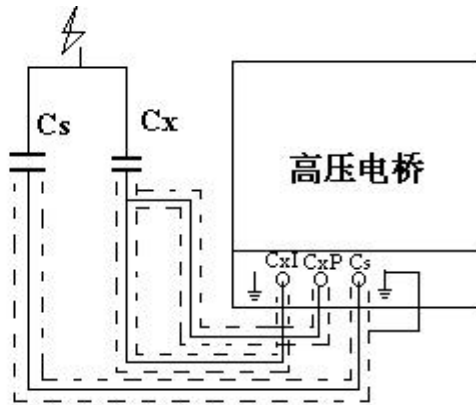


图 3

注意：

当标准电容器的值为 100pF 或 1000pF 这两个数值时，才能进行四端接线补偿。
当标准电容器为其他数值时，只能进行三端测量。

- 按图 3 所示连接被测电容或按图 4 所示连接外接互感器及被测电容。

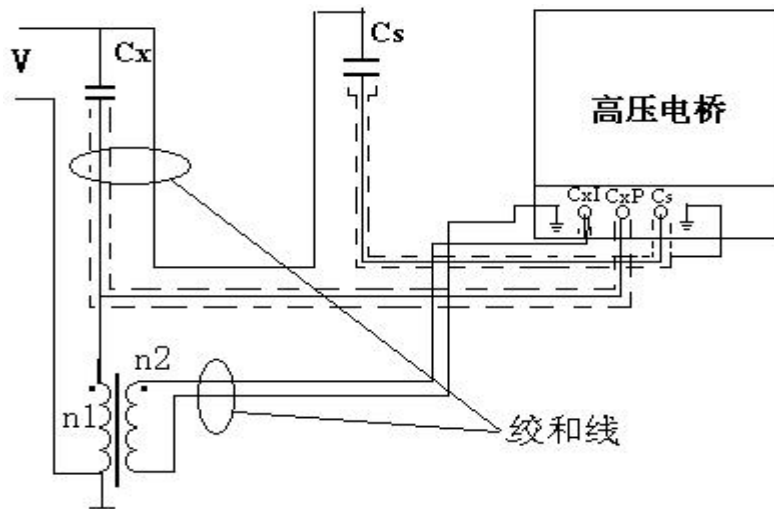


图 4

被测电容电流端接互感器初级，另一端接大地，CT 次级接到电桥的 C_{xI} 插座及地端钮，为了减小互感的影响可采用绞合线或同轴线，被测电容的高压电位端接于标准电容器的高压端，低压端接到电桥的 C_{xp} 插座，注意外接 CT 初、次级必须是同相端引入，否则电桥不能平衡。

当使用外接 CT 扩展量程的范围可参考下述表 3

如果外接 CT 采用串芯绕组，则串芯线应足够粗，使它于通过被测电容器的电流相符，使用外接 CT，一般电桥倍率位置不能低于“200”，否则产生误差。

- 按上述步骤完毕后，检查接线是否正确，然后接通试验电压可逐步增加到

所需要的电压。

[返回目录](#)

(5) 逐渐增大灵敏度到足够分辨读数为止，反复调节 C_x/C_s 及 $tg \delta$ 盘，使电桥平衡，被测电容的容量式 (16) 计算即：

$$C_x = C_x' \cdot n \dots\dots\dots (3)$$

式中 C_x' —— 电容显示窗所显示的容量值

n —— 外接电流互感器的匝数比

被测 $tg \delta$ 仍显示窗直接读得，倘若要求测量精度高则需引入外接电流互感器的比差及角差，前者附加到电容读数，后者 $tg \delta$ 读数，最后也可以将测试结果打印出来。

表 3

$C_x \max$		电桥倍率 (K)	外接 CT、N2/N 比值	初级流过最大 电流 A
$C_s=100pF$	$C_s=1000pF$			
0.2 μF	2 μF	$\times 200$	10	10A
0.5 μF	5 μF	$\times 500$	10	10A
1 μF	10 μF	$\times 1000$	10	10A
2 μF	20 μF	$\times 200$	100	100A
5 μF	50 μF	$\times 500$	100	100A
10 μF	100 μF	$\times 1000$	100	100A
20 μF	200 μF	$\times 1000$	200	200A
50 μF	500 μF	$\times 1000$	500	500A
100 μF	1000 μF	$\times 1000$	1000	1000A

3.2.4 电压变压器（或互感器）的校验

(1) 按图 5 所示连接被测电压变压器和二只 $tg \delta \leq 1 \sim 2 \times 10^{-5}$ 的标准空气(或充气)电容器。试验电压施加在被测电压变压器的低压端（初级），而被测电压变压器的高压端（次级）接到二只标准电容器的高压端，其中一只标准电容 (C_{s1}) 接至 QS30 电桥 C_{xI} 端，另一只标准电容接至 QS30 电桥 C_s 端，接好大地线。

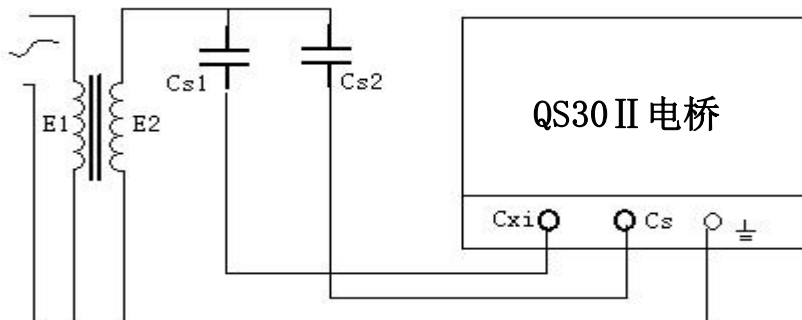


图 5

(2) 如本章 3.2 测量电容的方法平衡电桥测得电容比值及 $tg \delta$ 值，记下倍率与电容比值读数 T1 值及 $tg \delta$ 读数 D1 值。

(3) 再按图 6 所示重新连接电路

被测电压变压器初级接标准 C_{s2} 高压端， C_{s2} 测量接至 QS30 电桥 C_{xI} 端。被测电压变压器次级接标准 C_{s1} 高压端， C_{s1} 测量端接至 QS30 电桥 C_s 端，接好大地。

[返回目录](#)

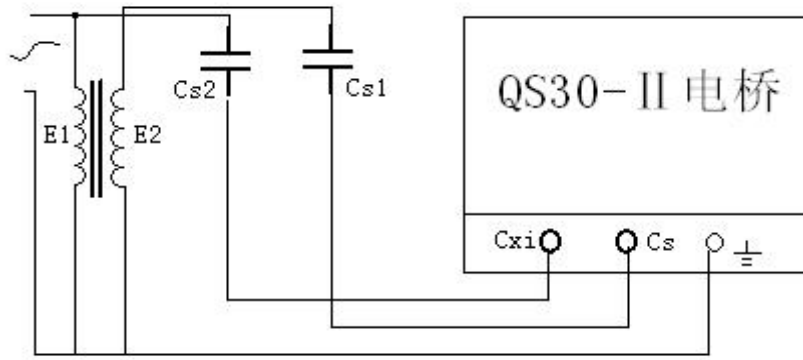


图 6

(4) 如本章 3.2 测量电容的方法平衡电桥，得到读数，记下倍率与电容比值读数值 T2 及 $\text{tg } \delta$ 读数 D2 值。

(5) 测量计算式：

$$\text{电压比值 } E2/E1=1/(T1 T2) \dots\dots\dots (4)$$

即变压器次级与初级之电压比为二次读数乘积的倒数。

$$\text{电压相位差: } \Delta D=D1+D2 \dots\dots\dots (5)$$

即为二次读数之和。

注意：

在二次测量中 Cs1 和 Cs2 电容器位置互换，一般来说 Cs2 等于或大于 Cs1。为了要能读到六位读数较大的电容必须接在电桥 Cx 一端，从而能使倍率在适当的位置获得足够的分辨率。

在按 (4) 式计算时，应考虑到 Cs2 的电压系数，这对于高精度测量是需要的。

测量电压变压器比值的典型范围如表 4 所示

表 4

变压器比率	Cs2 (pF)	Cs1 (pF)	电桥倍率 (第一次测量)	电桥倍率 (第二次测量)
1	1000	1000	1	1
1000	1000	1000	1	1000
10	1000	100	10	1
10000	1000	100	10	1000
100	5000	50	100	1
100000	5000	50	100	1000

3.2.5 电感测量

带有量程扩展器的电桥能用来测量电抗器（将量程扩展器初级中的电流反向）。当外接电流互感器反相连接时，通过它的感性电流与通过标准电容器的容性电流在相位上同相，调节等值电容比率 C_x/C_s 读数盘能使电桥平衡，而通过被测电抗器的电流有功分量也被反向了，因此它的等值损耗值为负值，即在平衡有功分量时应将图 1 中 22 项 $\text{tg } \delta$ 选择开关置于“-”。

被测电感接于外接电流互感器初级反相端（非星标端），另一端接大地。互感器次级星标端接 QS30-II 型 CxI 端，另一端接大地。标准电容器低压端接 QS30-II 型 Cs 端。电桥接地接好，损耗读数置于“一”，选择适当的倍率（按图 7 所示连接），接线连接无误后开启电源，按本说明书所述步骤平衡电桥，得到读数后按式 (28) (32) 计算被测电感值及 Q 值。

电感的测量范围，在工频电压下参照表 5 所示。

表 5

Cs (pF)	电桥倍率	外接电流互感器比率	电感最小测量值
1000	100	10	9H
1000	1000	1000	9mH
100	100	10	90H
100	1000	1000	90mH

如要测量小于 9mH 的电感值，必须增大标准电容器的电容量 Cs。
被测电感的 Q 值必须大于 10，否则不能平衡到零。

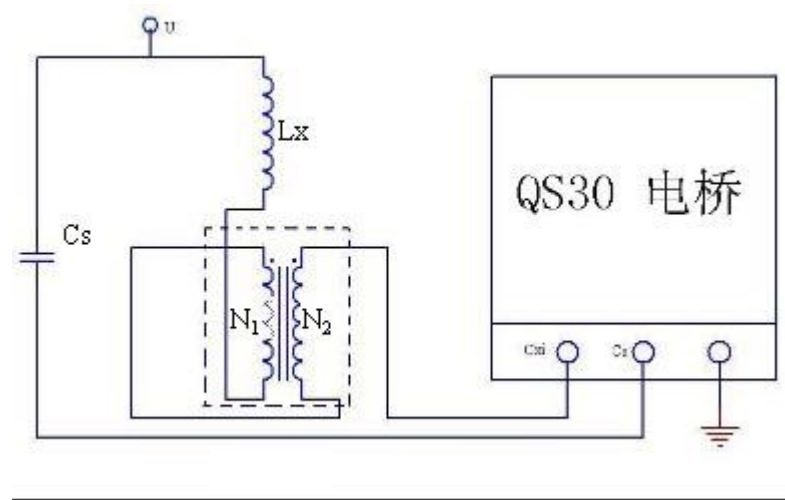


图 7

注意：在上述测量中，千万不要忘记电桥本体接地可靠，以免产生危险！

3.2.6 仪器自校

本电桥为高精度电桥，当使用本电桥时对测量数据有怀疑，可对本电桥进行自校，以确定电桥的测量结果是否可靠，同时确定整个系统（包括高压回路）的系统误差。

两只同名义值的标准电容器 100pF（或 1000pF），其中一只 Cs1 接于 QS30 I 型高压电桥标准 Cs 插座，另一只 Cs2 接于电桥 CxI 插座（如图 8 示），QS30 I 高压电桥倍率置于“1”，然后按本说明书三端测量的步骤平衡电桥，取得读数 $(C_x/C_s)_1$ 及 $\text{tg } \delta_1$ 。然后将 Cs1 及 Cs2 互换，即 Cs2 接 Cs 插座，而 Cs1 接电桥 CxI 插座，电桥比率仍置于“1”，并且与第一次测量同样的电压下再次平衡电桥，取得读数 $(C_x/C_s)_2$ 及 $\text{tg } \delta_2$ 。

二次读数按下式公式计算整个系统的系统误差。

$$\xi = \{ [2 - [(C_x/C_s)_1 + (C_x/C_s)_2] / 2] \times 100\% \dots\dots\dots (6)$$

$$\Delta \text{tg } \delta = (\text{tg } \delta_1 + \text{tg } \delta_2) / 2 \dots\dots\dots (7)$$

例 1：二只 100PF 的标准电容器，在 2KV 下进行自校

第一次读数 $(C_x/C_s)_1 = 0.999941$ $\text{tg } \delta_1 = +4.9 \times 10^{-5}$

被测与标准互换后第二次读数 $(C_x/C_s)_2 = 1.000058$ $\text{tg } \delta_2 = -4.9 \times 10^{-5}$

则： $\xi = \{ [2 - [0.999941 + 1.000058] / 2] \times 100\% = 0.00005\%$

$$\Delta \text{tg } \delta = (\text{tg } \delta_1 + \text{tg } \delta_2) / 2 = [+4.9 \times 10^{-5} + (-4.9 \times 10^{-5})] / 2 = 0$$

例 2：二只 100PF 的标准电容器，在 10KV 下进行自校

第一次读数 $(C_x/C_s)_1 = 1.000728$ $\text{tg } \delta_1 = -3.6 \times 10^{-5}$

返回目录



被测与标准互换后第二次读数 $(C_x/C_s)_2=0.999372$

$\text{tg } \delta_2=-2.0 \times 10^{-5}$

则: $\xi = \{ [2 - [1.000728 + 0.999372] / 2] \times 100\% = 0.005\%$

$$\Delta \text{tg } \delta = (\text{tg } \delta_{1_1} + \text{tg } \delta_{2_2}) / 2 = [-3.6 \times 10^{-5} + (-2.0 \times 10^{-5})] / 2 = -2.8 \times 10^{-5}$$

这就意味着所测得的 $\text{tg } \delta$ 值应校入更正值 $+2.8 \times 10^{-5}$, 也就是说第一次测量以 C_{s1} 为标准测 C_{s2} 的 $\text{tg } \delta$ 为 -0.8×10^{-5} (C_{s2} 的 $\text{tg } \delta$ 值比 C_{s1} 要小 0.8×10^{-5}), 第二次测量以 C_{s2} 作标准测 C_{s1} 的 $\text{tg } \delta$ 值为 $+0.8 \times 10^{-5}$, 这样二次测量的结果都是 C_{s2} 的 $\text{tg } \delta$ 比 C_{s1} 的小 0.8×10^{-5} 。

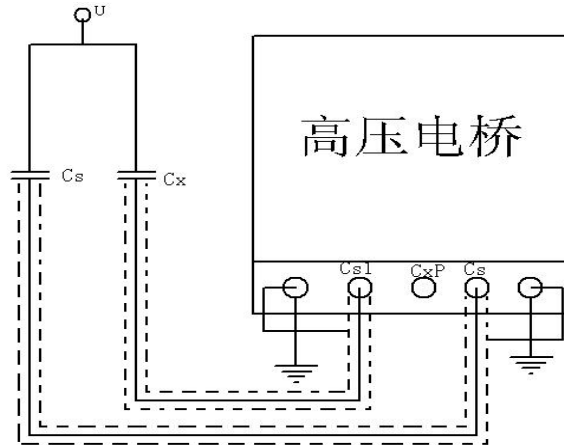


图 8

4. 工作原理

4.1 电流比较仪

电流比较仪是本电桥的“心脏”，它是一只多绕组的环形变压器（见图 9）。取自于同一电源来的 i_1 、 i_2 分别 N_x 和 N_s 绕组，在铁芯内相应的将产生磁通，当二个绕组的安匝数相等且方向相反时，在铁芯内的总磁通为零，此时在检测绕组 N_D 无感应电势，一个高灵敏度的检测器检测这一感应电势，感应电势为零，检测器表头指零。

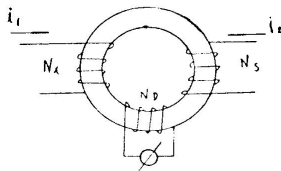


图 9

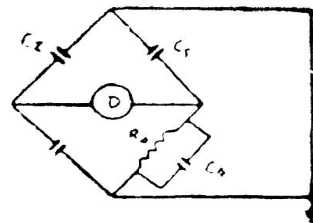


图 10

返回目录

4.2 电容电桥

电压高于 100V 时，通常测量电容及 $\text{tg } \delta$ 是使用经典的高压西林电桥（见图 10）。它容量的测量准确度基本上与低压部分的两个电阻（R3 和 R4）之比的准确度有关，而“ $\text{tg } \delta$ ”测量的准确度与二个电阻的时间常数有关，若在西林电桥上要使小容量的标准电容与一只大容量的电容器相比较就必须要有大的电阻比，这二个电阻之间要继续保持时间常数相等是相当困难的。

电流比较仪电容电桥用匝数比来代替电阻比，它有一个相当稳定的 10^{-5} 数量级的准确度，在比率高达 1000: 1 时仍能保持这一准确度。

4.2.1 电容的测量(测量电容的原理如图 4)

同一电压 U 馈送到二只被比较的电容器上，改变 N_s 绕组的匝数直到 N_s 的安匝数与 N_x 的安匝数相等且方向相反，在检测绕组上显示出零磁通，指零仪指示为零。由于铁芯内没有磁通， N_x 和 N_s 绕组的阻抗为零，因此绕组电阻与电容器的电抗相比是可以忽略的。

I_x 和 I_s 电流可按下式计算：

$$I_x = j u \omega C_x \dots\dots\dots (8)$$

$$I_s = j u \omega C_s \dots\dots\dots (9)$$

$$\text{由于安匝平衡则：} I_x \times N_x = I_s N_s \dots\dots\dots (10)$$

将 (8) (9) 代入 (10) 式：

$$j u \omega C_x \times N_x = j u \omega C_s \times N_s$$

$$C_x = C_s \times (N_s / N_x) \dots\dots\dots (11)$$

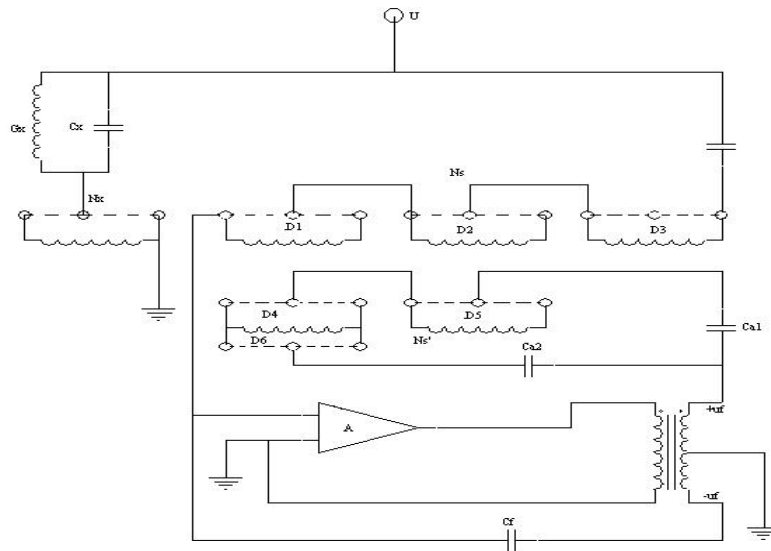


图 11

为了使电桥有宽广的量限，使 N_x/N_s 与电容比 C_x/C_s 在宽量限内相等。将 N_x 绕组按 1、2、5 系数抽头，采用这种方法使比率从 1: 1 扩展到 1000: 1，电桥具有六位读数，直接调节 N_s 绕组的匝数，实际上仅保持在前三位（D1、D2、D3），也就是选择 $\times 100$ 、 $\times 10$ 、 $\times 1$

返回目录

的绕组。如要得到六位读数就需要用分数匝，那是不可能的。后三位读数在本电桥中是采用一只比例运算放大器，使它产生一个与试验电压 U 成比例且同相位的低电压 U_f ，这个低电压 U_f 馈送给低压电容器 $Ca1$ 和 $Ca2$ （统称 Ca ），产生一个电流 I_{a1} 和 I_{a2} （统称 I_a ）。在 N_s' 绕组中同样产生安匝数，调节 $D4$ 、 $D5$ 、 $D6$ ，使他们的安匝数与 N_x 安匝数的余数相等。

$$u_f = (C_s/C_f) u \quad \dots\dots\dots (12)$$

通过 N_s' 绕组电流为：

$$I_a = j u_f \omega C_a \quad \dots\dots\dots (13)$$

将 (12) 代入 (13) 式：

$$I_a = j u \omega C_s (C_a/C_f) \quad \dots\dots\dots (14)$$

这就意味着，安匝数被 (C_a/C_f) 的比率所缩小。

整个电容的平稳等式为：

$$C_x = (C_s/N_x) \cdot [N_s + (C_a/C_f) \cdot N_s'] \quad \dots\dots\dots (15)$$

使 C_a/C_f 设计为一适当的十进制，等式 (15) 中的 N_s' 项成为 N_s 较低项，这样使电桥具有六位数。

4.2.2 介质损耗正切值 $\tan \delta$ 的测量

被测电容损耗的等值电导 G_x 的测量，是通过前述运算放大器对电导 G 注入一个同相电流（见图 12），在 N_a 绕组中产生的安匝数与 N_x 绕组的安匝数平衡，而且 G_a 选择适当的阻值，使 $\tan \delta$ 在 50Hz 频率下直接读数。

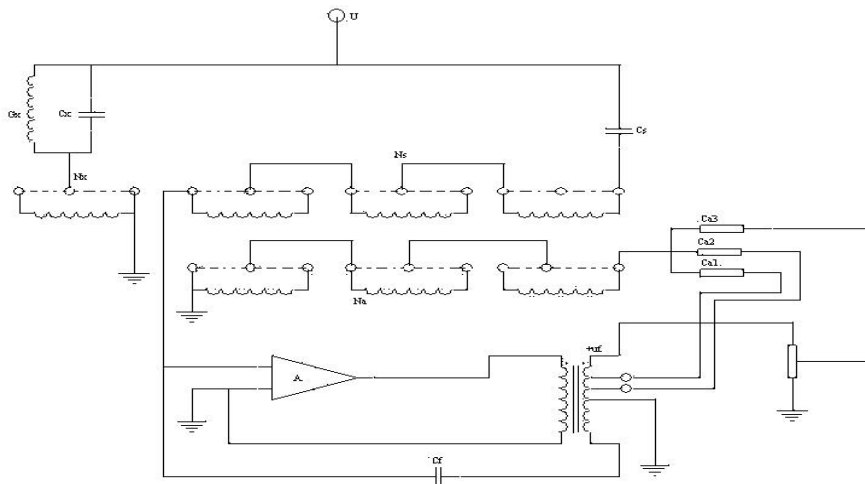


图 12

$$I_{Ga} = \alpha u_f G_a \quad \dots\dots\dots (16)$$

式中 α 是运算放大器输出变压器的十进抽头是 U_f 电压的系数，将 (12) 式代入 (16) 式得到：

$$I_{Ga} = u (C_s/C_f) \alpha G_a \quad \dots\dots\dots (17)$$

[返回目录](#)

被测的有功电流: $I_{gx}=u G_x$ (18)

当平衡时, 检测绕组的磁通为零, 安匝平衡则:

$$I_{gx}N_x=I_{ga}N_a \quad \dots\dots\dots (19)$$

将 (18) 和 (17) 式代入:

$$u G_xN_x=u (C_s/C_f) \alpha G_aN_a$$

$$G_x=\alpha G_a (C_s/C_f) (N_a/N_x) \quad \dots\dots\dots (20)$$

在实际测量中希望得到 $\text{tg } \delta$, 而 $\text{tg } \delta =G_x/(\omega C_x)$

由式 (11) 和 (20) 得:

$$\text{tg } \delta =\alpha G_a (C_s/C_f) (N_a/N_x) (N_x/\omega C_sN_s)$$

$$\text{tg } \delta =(G_a/\omega C_f) (N_a/N_s) \quad \dots\dots\dots (21)$$

结构上使 N_s 和 N_a 绕组的转换开关连动, 并使 N_a/N_s 比率值保持为一常数, 本电桥此常数为 0.1, 选择适当的 C_f 值也在 50Hz 时的 G_a 值, 这样 $\text{tg } \delta$ 就只有与 α 有关, 通过调节加在电导 G 上的 U_f 电压系数 α 来平衡被测 $\text{tg } \delta$, 如此可在 α 上直接读得被测的 $\text{tg } \delta$ 值。

本电桥加在电导 G_{a1} 及 G_{a2} 上的电压系数 α_1, α_2 为变压器上十进抽头, 而加在 G_{a3} 上的电压系数为 α_3 为一多圈电位器, 在读数计数结构上此电位器由三位读数, 在调节小 $\text{tg } \delta$ 平衡时显得更为方便。

本电桥运算放大器输出电压除 $+u_f$ 之外还有 $-u_f$, 是完全对称的, 通过一只转换开关使 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 全部接在 $-u_f$ 端, 这能读得 $-\text{tg } \delta$ 值, 当被测的 $\text{tg } \delta$ 值小于标准电容器的 $\text{tg } \delta$ 值时, 能很方便的读到被测 $\text{tg } \delta$ 值, 这对于比较二个标准电容器时是有必要的。

4.2.3 外接精密电流互感扩大量程

电桥电容比值最大为 1000: 1, 当测大电容 (如电力电容器) 时这一比率值显得不够, 则可外接精密电流互感器 (CT), 其原理示于图 13, 它的电容平衡等式为:

$$C_x=C_s (N_s/N_x) \cdot (N_2/N_1) \quad \dots\dots\dots (22) \quad \text{返回目录}$$

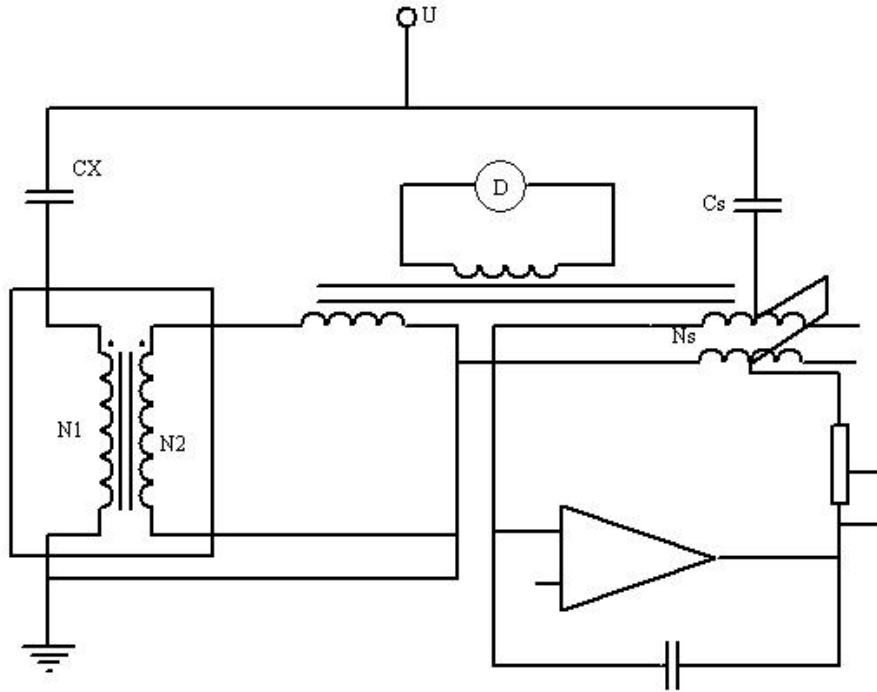


图 13

(N_2/N_1) 为外接电流互感器的变比值， $\text{tg } \delta$ 值及电容比值仍然是直读而电流互感器的比差及相差是测量电容及 $\text{tg } \delta$ 附加误差，应尽量选用高精度的电流互感器以提高测量准确度。当选用 1000: 1 (N_2/N_1) 的电流互感器，电容比值最大可达 $10^6: 1$ ，因此当标准电容容量为 1000pF 时，最大被测电容量可达 1000 μF ，而它的最大电流可达 1000A。

在选用电流互感器抽头时，应考虑到被测电容量，例被测电容为 100 μF 时，而标准电容为 100pF 时，应选用 1000: 10 的电流互感器（其变比为 100: 1）被测端电流互感器绕组，由于通过较大的电流，一端应接大地，切勿通过电桥接线柱再接大地，否则将引起误差。

4. 2. 4 引线阻抗的补偿

当测量大电容时，电容的阻抗值很小，引线电阻、接触电阻等不能再被忽略，例对于 300 μF 电容器它的阻抗值在 50Hz 时约为 10.6 Ω ，倘若引线电阻为 3m Ω ，将会产生约为 3×10^{-4} 的 $\text{tg } \delta$ 附加误差，这对于高精度测量电力电容器，尤其是测量薄膜电容器（它的 $\text{tg } \delta$ 的 10^{-4} 数量级）是不允许的，必须采用电流端电位端的四端法测量消除电阻的影响。

本电桥引线补偿的原理示于图 14

其中 Z_1 、 Z_2 ——被测 C_x 电流端引线阻抗

Z_3 、 Z_4 ——被测 C_x 电位端引线阻抗

[返回目录](#)



由图中可见阻抗 Z1 被认为是电源阻抗的一部分，因此可忽略它。又由于通过 Cs 的电流相当小，所以 Z3 的影响也可忽略。

如果放大器 A 具有较高的输入阻抗和低的输出阻抗特性，则当电桥平衡时： $I_x N_x =$

$$(I_s + I_s') N_s$$

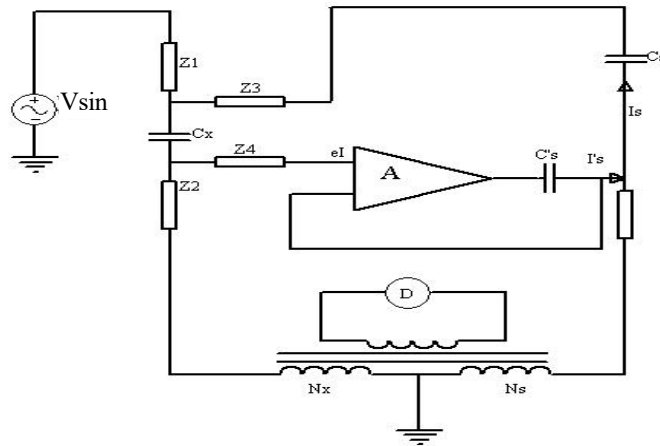
$$(E - e_1) j \omega C_x N_x = (E - e_2) j \omega \cdot C_s N_s + (e_0 - e_2) j \omega C_s' N_s'$$

$$C_x = C_s (N_s / N_x) \{ [E - e_2 (1 + C_s' / C_s) + e_0 C_s' / C_s] / (E - e_1) \} \quad \dots\dots (23)$$

与 (11) 式相比较，需使 (23) 式中后面一项等于 1。即：

$$\{ [E - e_2 (1 + C_s' / C_s) + e_0 C_s' / C_s] / (E - e_1) \} = 1$$

$$e_0 = -e_1 (C_s / C_s') + e_2 (1 + C_s / C_s') \quad \dots\dots\dots (24)$$



图七

因此只要满足 (24) 式条件，即能消除引线引起的误差，它实际上是一只双相输入的运算放大器，使 (24) 式成立必需使 Cs' 可调，一个可调的电容器比较麻烦，实际电路中采用电阻作为可调元件，一般在测量大电容是标准电容 Cs 总选择 1000pF 或 100pF，因此 Cs' 也有二档 100pF 及 1000pF，这样使电阻可调范围比较小一些。

4.3 电感的测量

4.3.1 概述

本电桥配上外接电流互感器，使通过电流互感器初级 N1 的电流相反，可测量电抗器的电感值及 Q 值，其原理图示于图 15。

返回目录

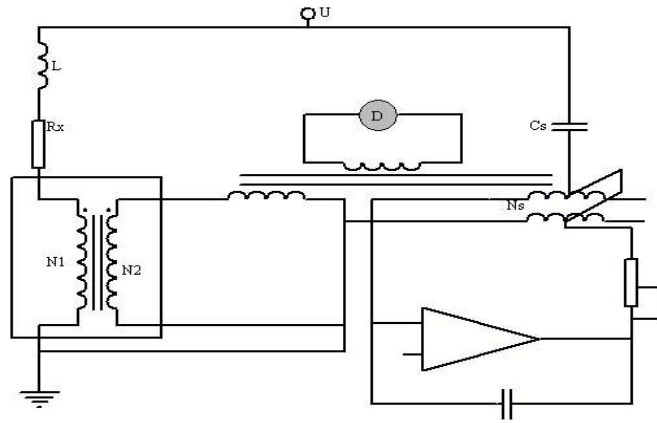


图 15

当外接电流互感器反相连接时，通过它的感性与通过标准电容器的容性电流在相位上同相，调节等值电容比率 C_x/C_s 读数盘能使电桥平衡，而通过被测电抗器的有功分量也被反相了，因此它的等值损耗值为负值，即在平衡有功分量时应将图 1 中第 22 项选择开关置于“-”。

4.3.2 计算方法

电感值：平衡时电感值是以 C_x/C_s 盘的等值 C_x 来表示，而 C_x 从 (22) 式整理后得到：
 $C_x = K \times n \times (C_x/C_s \text{ 读数}) \times C_s$ (25)

其中 K ——电桥倍率读数

n ——外接电流互感器比率值 N_2/N_1 (见图 13)

C_s ——标准电容器容量

C_x/C_s ——电容电桥比读数

若令 $M = K \cdot n$

$r = C_x/C_s$ 读数值

则 $C_x = M \cdot r \cdot C_s$ (26)

C_x 的等值电抗等于被测电抗器电感的电抗值

即 $X_{Lx} = X_{Cx}$

$\omega L_x = 1/\omega C_x$ (27)

以 (27) 式代入 (26) 式：

$\omega L_x = 1/\omega M r C_s$

$L_x = 1/\omega^2 M r C_s$ (28)

(28) 式即为平衡读数后的计算电感值的公式，电容比 r 的读数的准确度与电容电桥相同，但在计算电感值时与供电频率有关。

4.3.3 品质因数“Q”

在平衡时被测电感的导纳是以等值电容的导纳来表示（并考虑到电流反相）

$G + j\omega C = -1/(R_x + j\omega L)$

$= -R_x/(R_x^2 + \omega^2 L^2) + j\omega L/(R_x^2 + \omega^2 L^2)$

分开实部与虚部：

$G = -R_x/(R_x^2 + \omega^2 L^2)$ (29)

$\omega C = \omega L/(R_x^2 + \omega^2 L^2)$ (30)

(29) 式与 (30) 式相除：

$G/\omega C = -R_x/\omega L$ (31)

而损耗角正切值： $\text{tg } \delta = G/\omega C$

返回目录

品质因数： $Q = \omega L/R_x$

代入 (31) 式： $Q = -1/\operatorname{tg} \delta$ (32)

此即 Q 值计算式，电桥 $\operatorname{tg} \delta$ 读数倒数数值取负即为 Q 值。

4.4 内部数据处理

4.4.1 原理

数据通过测量与调节开关同步采样，从而避免了采样和实际测量之间的误差。电路上采

用了电子模拟开关，分别对每个调节盘所处位置进行采样，并通过高速 A/D 转换器件，将调节盘的位置输入计算机，再由软件对数据进行处理，并将计算结果在显示屏上显示出来。而且根据需要还可将测量结果打印出来。

4.4.2 软件

软件根据硬件所提供的信号，进行译码，使计算机能知道每个调节盘目前所处的位置，然后根据公式，对当前的数据进行处理，数据处理采用了浮点数运算，从而确保了计算精度。最后再将处理的结果通过硬件显示、打印出来，通过 RS232 接口将测试结果传给电脑。

5. 仪器的成套性

- ① QS30-II 型高压电桥装置 1 台
- ② 电源线 1 根
- ③ 测量用导线(20 米) 3 根
- ④ 专用接线盒 1 只
- ⑤ 电桥使用说明书 1 份
- ⑥ 小型打印机使用说明书 1 份

备注：可供配套附件（按用户需要订货供应）

- ① QS30-3 型量程扩展器（最大比率 1000：1）
- ② 类标准电容。（包括不同电压等级及不同的电容量）
- ③ 5kVA 以内的调压电源。
- ④ 各类升压器

6. 保管及免费修理期限

本电桥为高精度实验室高压电桥，应注意保管，其环境温度为 0°C 为 40°C ，相对湿度不超过 85%，且空气中不应含有足以引起会腐蚀的有害物质。产品自制造厂发货日期起 18 个月内，当用户在完全遵守使用说明书中所规定的使用及保管规则下，发现产品质量问题和不能正常工作时，制造厂应负责免费给予修理或更换。

[返回目录](#)

上海舒佳电气有限公司

地址:上海龙吴路 1500 号(交大科技园)

电话:021-54358329 15601723658

传真:021-54011882 转 8002

<http://www.s5117.com>

E-mail:h5117@163.cnm