



中华人民共和国国家标准

GB/T 1409—2006
代替 GB/T 1409—1988

测量电气绝缘材料在工频、音频、高频 (包括米波波长在内) 下电容率和介质损耗因数的推荐方法

Recommended methods for the determination of the permittivity
and dielectric dissipation factor of electrical insulating materials
at power, audio and radio frequencies including meter wavelengths

(IEC 60250:1969, MOD)

2006-02-15 发布

2006-06-01 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局 发布
中国国家标准化管理委员会

前 言

本标准修改采用 IEC 60250:1969《测量电气绝缘材料在工频、音频、高频(包括米波波长在内)下电容率和介质损耗因数的推荐方法》(英文版)。

本标准根据 IEC 60250:1969 重新起草。在附录 B 中列出了本标准章条编号与 IEC 60250:1969 章条编号的对照一览表。

考虑到我国国情,在采用 IEC 60250:1969 时,本标准做了一些修改。有关技术性差异已编入正文中并在它们所涉及的条款的页边空白处用垂直单线标识。

为便于使用,本标准做了下列编辑性修改:

- a) 删除国际标准的目次和前言;
- b) 用小数点‘.’代替作为小数点的逗号‘,’;
- c) 引用的 IEC 60247,由“Measurement of relative permittivity, dielectric dissipation factor and d. c. resistivity of insulating liquids”即“液体绝缘材料相对电容率、介质损耗因数和直流电阻率的测量”代替“Recommended Test cells for Measuring the Resistivity of Insulating Liquids and Methods of cleaning the cells”即“测量绝缘液体电阻率的试验池及清洗试验池的推荐方法”;
- d) 用“ ϵ_r ”代替“ ϵ_r ”;
- e) 增加了“术语”;
- f) 增加公式中符号说明;
- g) 图按 GB/T 1.1—2000 标注。

本标准与 GB/T 1409—1988 的相比,主要变化如下:

- 1) 增加“规范性引用文件”(本标准第 2 章);
- 2) 增加“电介质用途”(本标准 4.1);
- 3) 删去导电橡皮;
- 4) 增加“石墨”(本标准 5.1.3);
- 5) 增加“液体绝缘材料”(本标准 5.2)。

本标准代替 GB/T 1409—1988《固体绝缘材料在工频、音频、高频(包括米波长在内)下相对介电常数和介质损耗因数的试验方法》。

本标准的附录 A、附录 B 为资料性附录。

本标准由中国电器工业协会提出。

本标准由全国绝缘材料标准化技术委员会归口。

本标准起草单位:桂林电器科学研究所。

本标准主要起草人:王先锋、谷晓丽。

本标准所代替标准的历次版本发布情况为:

- GB/T 1409—1978;
- GB/T 1409—1988。

测量电气绝缘材料在工频、音频、高频 (包括米波波长在内) 下电容率和介质损耗因数的推荐方法

1 范围

本标准规定了在 15 Hz~300 MHz 的频率范围内测量电容率、介质损耗因数的方法,并由此计算某些数值,如损耗指数。本标准中所叙述的某些方法,也能用于其他频率下测量。

本标准适用于测量液体、易熔材料以及固体材料。测试结果与某些物理条件有关,例如频率、温度、湿度,在特殊情况下也与电场强度有关。

有时在超过 1 000 V 的电压下试验,则会引起一些与电容率和介质损耗因数无关的效应,对此不予论述。

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。

IEC 60247:1978 液体绝缘材料相对电容率、介质损耗因数和直流电阻率的测量

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本标准。

3.1

相对电容率 relative permittivity

ϵ_r

电容器的电极之间及电极周围的空间全部充以绝缘材料时,其电容 C_x 与同样电极构形的真空电容 C_0 之比:

$$\epsilon_r = \frac{C_x}{C_0} \dots\dots\dots (1)$$

式中:

ϵ_r ——相对电容率;

C_x ——充有绝缘材料时电容器的电极电容;

C_0 ——真空中电容器的电极电容。

在标准大气压下,不含二氧化碳的干燥空气的相对电容率 ϵ_r 等于 1.000 53。因此,用这种电极构形在空气中的电容 C_a 来代替 C_0 测量相对电容率 ϵ_r 时,也有足够的精确度。

在一个测量系统中,绝缘材料的电容率是在该系统中绝缘材料的相对电容率 ϵ_r 与真空电气常数 ϵ_0 的乘积。

在 SI 制中,绝对电容率用法/米(F/m)表示。而且,在 SI 单位中,电气常数 ϵ_0 为:

$$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m} \approx \frac{1}{36\pi} \times 10^{-9} \text{ F/m} \dots\dots\dots (2)$$

在本标准中,用皮法和厘米来计算电容,真空电气常数为:

$$\epsilon_0 = 0.088\ 54\ \text{pF/cm}$$

3.2

介质损耗角 dielectric loss angle

δ

由绝缘材料作为介质的电容器上所施加的电压与由此而产生的电流之间的相位差的余角。

3.3

介质损耗因数¹⁾ dielectric dissipation factor

$\tan\delta$

损耗角 δ 的正切。

3.4

[介质]损耗指数 [dielectric] loss index

ϵ_r''

该材料的损耗因数 $\tan\delta$ 与相对电容率 ϵ_r 的乘积。

3.5

复相对电容率 complex relative permittivity

$\underline{\epsilon_r}$

由相对电容率和损耗指数结合而得到的：

$$\underline{\epsilon_r} = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\epsilon_r' = \epsilon_r \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\epsilon_r'' = \epsilon_r \tan\delta \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\tan\delta = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} \quad \dots\dots\dots (6)$$

式中：

$\underline{\epsilon_r}$ ——复相对电容率；

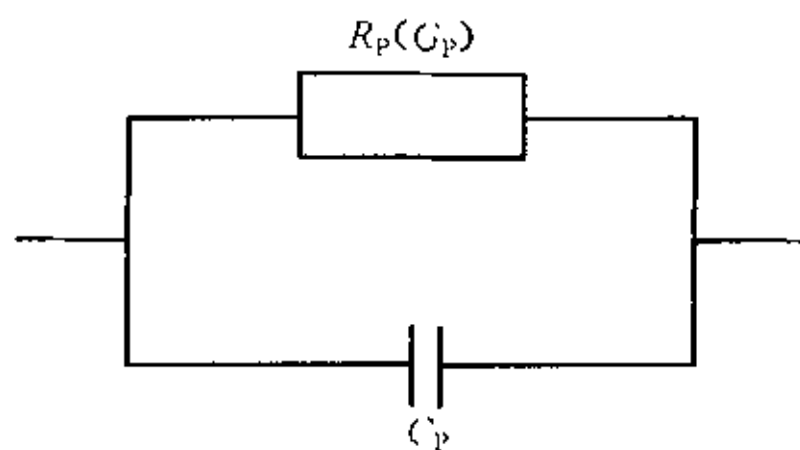
ϵ_r'' ——损耗指数；

ϵ_r', ϵ_r ——相对电容率；

$\tan\delta$ ——介质损耗因数。

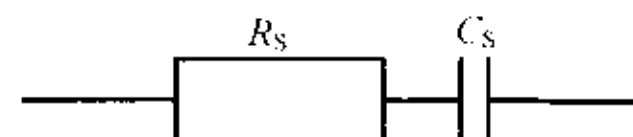
注：有损耗的电容器在任何给定的频率下能用电容 C_s 和电阻 R_s 的串联电路表示，或用电容 C_p 和电阻 R_p (或电导 G_p) 的并联电路表示。

并联等值电路



$$\tan\delta = \frac{1}{\omega C_p R_p} = \frac{G_p}{\omega C_p} \quad \dots\dots\dots (7)$$

串联等值电路



$$\tan\delta = \omega C_s R_s \quad \dots\dots\dots (8)$$

式中：

C_s ——串联电容；

R_s ——串联电阻；

1) 有些国家用“损耗角正切”来表示“介质损耗因数”，因为损耗的测量结果是用损耗角的正切来报告的。

C_P ——并联电容；

R_P ——并联电阻。

虽然以并联电路表示一个具有介质损耗的绝缘材料通常是合适的，但在单一频率下，有时也需要以电容 C_S 和电阻 R_S 的串联电路来表示。

串联元件与并联元件之间，成立下列关系：

$$C_P = \frac{C_S}{1 + \tan^2 \delta} \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$R_P = \frac{1 + \tan^2 \delta}{\tan^2 \delta} R_S \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$\omega C_S R_S = \frac{1}{\omega C_P R_P} \quad \dots\dots\dots (11)$$

式(9)、(10)、(11)中： C_S 、 R_S 、 C_P 、 R_P 、 $\tan \delta$ 同式(7)、(8)。

无论串联表示法还是并联表示法，其介质损耗因数 $\tan \delta$ 是相等的。

假如测量电路依据串联元件来产生结果，且 $\tan^2 \delta$ 太大而在式(9)中不能被忽略，则在计算电容率前必须先计算并联电容。

本标准中的计算和测量是根据电流($\omega = 2\pi f$)正弦波形作出的。

4 电气绝缘材料的性能和用途

4.1 电介质的用途

电介质一般被用在两个不同的方面：

用作电气回路元件的支撑，并且使元件对地绝缘及元件之间相互绝缘；

用作电容器介质。

4.2 影响介电性能的因素

下面分别讨论频率、温度、湿度和电气强度对介电性能的影响。

4.2.1 频率

因为只有少数材料如石英玻璃、聚苯乙烯或聚乙烯在很宽的频率范围内它们的 ϵ_r 和 $\tan \delta$ 几乎是恒定的，且被用作工程电介质材料，然而一般的电介质材料必须在所使用的频率下测量其介质损耗因数和电容率。

电容率和介质损耗因数的变化是由于介质极化和电导而产生，最重要的变化是极性分子引起的偶极子极化和材料的不均匀性导致的界面极化所引起的。

4.2.2 温度

损耗指数在一个频率下可以出现一个最大值，这个频率值与电介质材料的温度有关。介质损耗因数和电容率的温度系数可以是正的或负的，这取决于在测量温度下的介质损耗指数最大值位置。

4.2.3 湿度

极化的程度随水分的吸收量或电介质材料表面水膜的形成而增加，其结果使电容率、介质损耗因数和直流电导率增大。因此试验前和试验时对环境湿度进行控制是必不可少的。

注：湿度的显著影响常常发生在 1MHz 以下及微波频率范围内。

4.2.4 电场强度

存在界面极化时，自由离子的数目随电场强度增大而增加，其损耗指数最大值的大小和位置也随此而变。

在较高的频率下，只要电介质中不出现局部放电，电容率和介质损耗因数与电场强度无关。

5 试样和电极

5.1 固体绝缘材料

5.1.1 试样的几何形状

测定材料的电容率和介质损耗因数，最好采用板状试样，也可采用管状试样。

在测定电容率需要较高精度时,最大的误差来自试样尺寸的误差,尤其是试样厚度的误差,因此厚度应足够大,以满足测量所需要的精确度。厚度的选取决定于试样的制备方法和各点间厚度的变化。对1%的精确度来讲,1.5 mm的厚度就足够了,但是对于更高精确度,最好是采用较厚的试样,例如6 mm~12 mm。测量厚度必须使测量点有规则地分布在整個试样表面上,且厚度均匀度在 $\pm 1\%$ 内。如果材料的密度是已知的,则可用称量法测定厚度。选取试样的面积时应能提供满足精度要求的试样电容。测量10 pF的电容时,使用有良好屏蔽保护的仪器。由于现有仪器的极限分辨能力约1 pF,因此试样应薄些,直径为10 cm或更大些。

需要测低损耗因数时,很重要的一点是导线串联电阻引入的损耗要尽可能地小,即被测电容和该电阻的乘积要尽可能小。同样,被测电容对总电容的比值要尽可能地大。第一点表示导线电阻要尽可能低及试样电容要小。第二点表示接有试样桥臂的总电容要尽可能小,且试样电容要大。因此试样电容最好取值为20 pF,在测量回路中,与试样并联的电容不应大于约5 pF。

5.1.2 电极系统

5.1.2.1 加到试样上的电极

电极可选用5.1.3中任意一种。如果不用保护环,而且试样上下的两个电极难以对齐时,其中一个电极应比另一个电极大些。已经加有电极的试样应放置在两个金属电极之间,这两个金属电极要比试样上的电极稍小些。对于平板形和圆柱形这两种不同电极结构的电容计算公式以及边缘电容近似计算的公式由表1给出。

对于介质损耗因数的测量,这种类型的电极在高频下不能满足要求,除非试样的表面和金属板都非常平整。图1所示的电极系统也要求试样厚度均匀。

5.1.2.2 试样上不加电极

表面电导率很低的试样可以不加电极而将试样插入电极系统中测量,在这个电极系统中,试样的一侧或两侧有一个充满空气或液体的间隙。

平板电极或圆柱形电极结构的电容计算公式由表3给出。

下面两种型式的电极装置特别合适。

5.1.2.2.1 空气填充测微计电极

当试样插入和不插入时,电容都能调节到同一个值,不需进行测量系统的电气校正就能测定电容率。电极系统中可包括保护电极。

5.1.2.2.2 流体排出法

在电容率近似等于试样的电容率,而介质损耗因数可以忽略的一种液体内进行测量,这种测量与试样厚度测量的精度关系不大。当相继采用两种流体时,试样厚度和电极系统的尺寸可以从计算公式中消去。

试样为与试验池电极直径相同的圆片,或对测微计电极来说,试样可以比电极小到足以使边缘效应忽略不计。在测微计电极中,为了忽略边缘效应,试样直径约比测微计电极直径小两倍的试样厚度。

5.1.2.3 边缘效应

为了避免边缘效应引起电容率的测量误差,电极系统可加上保护电极。保护电极的宽度应至少为两倍的试样厚度,保护电极和主电极之间的间隙应比试样厚度小。假如不能用保护环,通常需对边缘电容进行修正,表1给出了近似计算公式。这些公式是经验公式,只适用于规定的几种特定的试样形状。

此外,在一个合适的频率和温度下,边缘电容可采用有保护环和无保护环的(比较)测量来获得,用所得到的边缘电容修正其他频率和温度下的电容也可满足精度要求。

5.1.3 构成电极的材料

5.1.3.1 金属箔电极

用极少量的硅脂或其他合适的低损耗粘合剂将金属箔贴在试样上。金属箔可以是纯锡或铅,也可以是这些金属的合金,其厚度最大为100 μm ,也可使用厚度小于10 μm 的铝箔。但是,铝箔在较高温度

下易形成一层电绝缘的氧化膜,这层氧化膜会影响测量结果,此时可使用金箔。

5.1.3.2 烧熔金属电极

烧熔金属电极适用于玻璃、云母和陶瓷等材料,银是普遍使用的,但是在高温或高湿下,最好采用金。

5.1.3.3 喷镀金属电极

锌或铜电极可以喷镀在试样上,它们能直接在粗糙的表面上成膜。这种电极还能喷在布上,因为它们不穿透非常小的孔眼。

5.1.3.4 阴极蒸发或高真空蒸发金属电极

假如处理结果既不改变也不破坏绝缘材料的性能,而且材料承受高真空时也不过度逸出气体,则本方法是可以采用的。这一类电极的边缘应界限分明。

5.1.3.5 汞电极和其他液体金属电极

把试样夹在两块互相配合好的凹模之间,凹模中充有液体金属,该液体金属必须是纯净的。汞电极不能用于高温,即使在室温下用时,也应采取措施,这是因为它的蒸气是有毒的。

伍德合金和其他低熔点合金能代替汞。但是这些合金通常含有镉,镉象汞一样,也是毒性元素。这些合金只有在良好抽风的房间或在抽风柜中才能用于 100℃ 以上,且操作人员应知道可能产生的健康危害。

5.1.3.6 导电漆

无论是气干或低温烘干的高电导率的银漆都可用作电极材料。因为此种电极是多孔的,可透过湿气,能使试样的条件处理在涂上电极后进行,对研究湿度的影响时特别有用。此种电极的缺点是试样涂上银漆后不能马上进行试验,通常要求 12 h 以上的气干或低温烘干时间,以便去除所有的微量溶剂,否则,溶剂可使电容率和介质损耗因数增加。同时应注意漆中的溶剂对试样应没有持久的影响。

要使用刷漆法做到边缘界限分明的电极较困难,但使用压板或压敏材料遮框喷漆可克服此局限。但在极高的频率下,因银漆电极的电导率会非常低,此时则不能使用。

5.1.3.7 石墨

一般不推荐使用石墨,但是有时候也可采用,特别是在较低的频率下。石墨的电阻会引起损耗的显著增大,若采用石墨悬浮液制成电极,则石墨还会穿透试样。

5.1.4 电极的选择

5.1.4.1 板状试样

考虑下面两点很重要:

- 不加电极,测量时快而方便,并可避免由于试样和电极间的不良接触而引起的误差。
- 若试样上是加电极的,由测量试样厚度 h 时的相对误差 $\Delta h/h$ 所引起的相对电容率的相对误差 $\Delta\epsilon_r/\epsilon_r$ 可由下式得到:

$$\frac{\Delta\epsilon_r}{\epsilon_r} = \frac{\Delta h}{h} \quad \dots\dots\dots(12)$$

式中:

$\Delta\epsilon_r$ ——相对电容率的偏差;

ϵ_r ——相对电容率;

h ——试样厚度;

Δh ——试样厚度的偏差。

若试样上加电极,且试样放在有固定距离 $S>h$ 的两个电极之间,这时

$$\frac{\Delta\epsilon_r}{\epsilon_r} = \left(1 - \frac{\epsilon_r}{\epsilon_t}\right) \cdot \frac{\Delta h}{h} \quad \dots\dots\dots(13)$$

式中:

$\Delta\epsilon_r$ 、 ϵ_r 、 h 、 Δh 同式(12)。

ϵ_r ——试样浸入所用流体的相对电容率,对于在空气中的测量则 ϵ_r 等于 1。

对于相对电容率为 10 以上的无孔材料,可采用沉积金属电极。对于这些材料,电极应覆盖在试样的整个表面上,并且不用保护电极。对于相对电容率在 3~10 之间的材料,能给出最高精度的电极是金属箔、汞或沉积金属,选择这些电极时要注意适合材料的性能。若厚度的测量能达到足够精度时,试样上不加电极的方法方便而更可取。假如有一种合适的流体,它的相对电容率已知或者能很准确地测出,则采用流体排出法是最好的。

5.1.4.2 管状试样

对管状试样而言,最合适的电极系统将取决于它的电容率、管壁厚度、直径和所要求的测量精度。一般情况下,电极系统应为一个内电极和一个稍为窄一些的外电极和外电极两端的保护电极组成,外电极和保护电极之间的间隙应比管壁厚度小。对小直径和中等直径的管状试样,外表面可加三条箔带或沉积金属带,中间一条用作为外电极(测量电极),两端各有一条用作保护电极。内电极可用汞,沉积金属膜或配合较好的金属芯轴。

高电容率的管状试样,其内电极和外电极可以伸展到管状试样的全部长度上,可以不用保护电极。

大直径的管状或圆筒形试样,其电极系统可以是圆形或矩形的搭接,并且只对管的部分圆周进行试验。这种试样可按板状试样对待,金属箔、沉积金属膜或配合较好的金属芯轴内电极与金属箔或沉积金属膜的外电极和保护电极一起使用。如采用金属箔做内电极,为了保证电极和试样之间的良好接触,需在管内采用一个弹性的可膨胀的夹具。

对于非常准确的测量,在厚度的测量能达到足够的精度时,可采用试样上不加电极的系统。对于相对电容率 ϵ_r 不超过 10 的管状试样,最方便的电极是用金属箔、汞或沉积金属膜。相对电容率在 10 以上的管状试样,应采用沉积金属膜电极;瓷管上可采用烧熔金属电极。电极可像带材一样包覆在管状试样的全部圆周或部分圆周上。

5.2 液体绝缘材料

5.2.1 试验池的设计

对于低介质损耗因数的待测液体,电极系统最重要的特点是:容易清洗、再装配(必要时)和灌注液体时不移动电极的相对位置。此外还应注意:液体需要量少,电极材料不影响液体,液体也不影响电极材料,温度易于控制,端点和接线能适当地屏蔽;支撑电极的绝缘支架应不浸沉在液体中,还有,试验池不应含有太短的爬电距离和尖锐的边缘,否则能影响测量精度。

满足上述要求的试验池见图 2~图 4。电极是不锈钢的,用硼硅酸盐玻璃或石英玻璃作绝缘。图 2 和图 3 所示的试验池也可用作电阻率的测定,IEC 60247:1978 对此已详细叙述。

由于有些液体如氯化物,其介质损耗因数与电极材料有明显的关系,不锈钢电极不总是最合适的。有时,用铝和杜拉铝制成的电极能得到比较稳定的结果。

5.2.2 试验池的准备

应用一种或几种合适的溶剂来清洗试验池,或用不含不稳定化合物的溶剂多次清洗。可以通过化学试验方法检查其纯度,或通过一个已知的低电容率和介质损耗因数的液体试样测量的结果来确定。当试验池试验几种类型的绝缘液体时,若单独使用溶剂不能去除污物,可用一种柔和的擦净剂和水来清洁试验池的表面。若使用一系列溶剂清洗时则最后要用最大沸点低于 100℃ 的分析级的石油醚来再次清洗,或者用任一种对一个已知低电容率和介质损耗因数的液体测量能给出正确值的溶剂来清洗,并且这种溶剂在化学性质上与被试液体应是相似的。推荐使用下述方法进行清洗。

试验池应全部拆开,彻底地清洗各部件,用溶剂回流的方法或放在未使用溶剂中搅动反复洗涤方法均可去除各部件上的溶剂并放在清洁的烘箱中,在 110℃ 左右的温度下烘干 30 min。

待试验池的各部件冷却到室温,再重新装配起来。池内应注入一些待试的液体,停几分钟后,倒出此液体再重新倒入待试液体,此时绝缘支架不应被液体弄湿。

在上述各步骤中,各部件可用干净的钩针或钳子巧妙地处理,以使试验池有效的内表面不与手接触。

注 1: 在同种质量油的常规试验中, 上面所说的清洗步骤可以代之为在每一次试验后用没有残留纸屑的干纸简单地擦擦试验池。

注 2: 采用溶剂时, 有些溶剂特别是苯、四氯化碳、甲苯、二甲苯是有毒的, 所以要注意防火及毒性对人体的影响, 此外, 氯化物溶剂受光作用会分解。

5.2.3 试验池的校正

当需要高精度测定液体电介质的相对电容率时, 应首先用一种已知相对电容率的校正液体(如苯)来测定“电极常数”。

“电极常数” C_c 的确定按式(14):

$$C_c = \frac{C_n - C_0}{\epsilon_n - 1} \quad \dots\dots\dots(14)$$

式中:

C_c ——电极常数;

C_0 ——空气中电极装置的电容;

C_n ——充有校正液体时电极装置的电容;

ϵ_n ——校正液体的相对电容率。

从 C_0 和 C_c 的差值可求得校正电容 C_g :

$$C_g = C_0 - C_c \quad \dots\dots\dots(15)$$

并按照公式

$$\epsilon_x = \frac{C_x - C_g}{C_c} \quad \dots\dots\dots(16)$$

来计算液体未知相对电容率 ϵ_x 。

式中:

C_g ——校正电容;

C_0 ——空气中电极装置的电容;

C_c ——电极常数;

C_x ——电极装置充有被试液体时的电容;

ϵ_x ——液体的相对电容率。

假如 C_0 、 C_n 和 C_x 值是在 ϵ_n 是已知的某一相同温度下测定的, 则可求得最高精度的 ϵ_x 值。

采用上述方法测定液体电介质的相对电容率时, 可保证其测得结果有足够的精度, 因为它消除了由于寄生电容或电极间隙数值的不准确测量所引起的误差。

6 测量方法的选择

测量电容率和介质损耗因数的方法可分成两种: 零点指示法和谐振法。

6.1 零点指示法适用于频率不超过 50 MHz 时的测量。测量电容率和介质损耗因数可用替代法; 也就是在接入试样和不接试样两种状态下, 调节回路的一个臂使电桥平衡。通常回路采用西林电桥、变压器电桥(也就是互感耦合比例臂电桥)和并联 T 型网络。变压器电桥的优点: 采用保护电极不需任何外加附件或过多操作, 就可采用保护电极; 它没有其他网络的缺点。

6.2 谐振法适用于 10 kHz~几百 MHz 的频率范围内的测量。该方法为替代法测量, 常用的是变电抗法。但该方法不适合采用保护电极。

注: 典型的电桥和电路示例见附录。附录中所举的例子自然是不全面的, 叙述电桥和测量方法报导见有关文献和该种仪器的原理说明书。

7 试验步骤

7.1 试样的制备

试样应从固体材料上截取, 为了满足要求, 应按相关的标准方法的要求来制备。

应精确地测量厚度,使偏差在 $\pm(0.2\% \pm 0.005 \text{ mm})$ 以内,测量点应均匀地分布在试样表面。必要时,应测其有效面积。

7.2 条件处理

条件处理应按相关规范规定进行。

7.3 测量

电气测量按本标准或所使用的仪器(电桥)制造商推荐的标准及相应的方法进行。

在 1 MHz 或更高频率下,必须减小接线的电感对测量结果的影响。此时,可采用同轴接线系统(见图 1 所示),当用变电抗法测量时,应提供一个固定微调电容器。

8 结果

8.1 相对电容率 ϵ_r

试样加有保护电极时其相对电容率 ϵ_r 可按公式(1)计算,没有保护电极时试样的被测电容 C'_x 包括了一个微小的边缘电容 C_e ,其相对电容率为:

$$\epsilon_r = \frac{C'_x - C_e}{C_0} \dots\dots\dots(17)$$

式中:

ϵ_r ——相对电容率;

C'_x ——没有保护电极时试样的电容;

C_e ——边缘电容;

C_0 ——法向极间电容;

C_0 和 C_e 能从表 1 计算得来。

必要时应对试样的对地电容、开关触头之间的电容及等值串联和并联电容之间的差值进行校正。

测微计电极间或不接触电极间被测试样的相对电容率可按表 2、表 3 中相应的公式计算得来。

8.2 介质损耗因数 $\tan\delta$

介质损耗因数 $\tan\delta$ 按照所用的测量装置给定的公式,根据测出的数值来计算。

8.3 精度要求

在第 5 章和附录 A 中所规定的精度是:电容率精度为 $\pm 1\%$,介质损耗因数的精度为 $\pm(5\% \pm 0.000 5)$ 。这些精度至少取决于三个因素:即电容和介质损耗因数的实测精度;所用电极装置引起的这些量的校正精度;极间法向真空电容的计算精度(见表 1)。

在较低频率下,电容的测量精度能达 $\pm(0.1\% \pm 0.02 \text{ pF})$,介质损耗因数的测量精度能达 $\pm(2\% \pm 0.000 05)$ 。在较高频率下,其误差增大,电容的测量精度为 $\pm(0.5\% \pm 0.1 \text{ pF})$,介质损耗因数的测量精度为 $\pm(2\% \pm 0.000 2)$ 。

对于带有保护电极的试样,其测量精度只考虑极间法向真空电容时有计算误差。但由被保护电极和保护电极之间的间隙太宽而引起的误差通常大到百分之零点几,而校正只能计算到其本身值的百分之几。如果试样厚度的测量能精确到 $\pm 0.005 \text{ mm}$,则对平均厚度为 1.6 mm 的试样,其厚度测量误差能达到百分之零点几。圆形试样的直径能测定到 $\pm 0.1\%$ 的精度,但它是以平方的形式引入误差的,综合这些因素,极间法向真空电容的测量误差为 $\pm 0.5\%$ 。

对表面加有电极的试样的电容,若采用测微计电极测量时,只要试样直径比测微计电极足够小,则只需要进行极间法向电容的修正。采用其他的一些方法来测量两电极试样时,边缘电容和对地电容的计算将带来一些误差,因为它们的误差都可达到试样电容的 $2\% \sim 40\%$ 。根据目前有关这些电容资料,计算边缘电容的误差为 10% ,计算对地电容的误差为 25% 。因此带来总的误差是百分之几十到百分之几。当电极不接地时,对地电容误差可大大减小。

采用测微计电极时,数量级是 0.03 的介质损耗因数可测到真值的 $\pm 0.000 3$,数量级 0.000 2 的介

质损耗因数可测到真值的 $\pm 0.000\ 05$ 。介质损耗因数的范围通常是 $0.000\ 1\sim 0.1$,但也可扩展到 0.1 以上。频率在 $10\ \text{MHz}$ 和 $20\ \text{MHz}$ 之间时,有可能检测出 $0.000\ 02$ 的介质损耗因数。 $1\sim 5$ 的相对电容率可测到其真值的 $\pm 2\%$,该精度不仅受到计算极间法向真空电容测量精度的限制,也受到测微计电极系统误差的限制。

9 试验报告

试验报告中应给出下列相关内容:

绝缘材料的型号名称及种类、供货形式、取样方法、试样的形状及尺寸和取样日期(并注明试样厚度和试样在与电极接触的表面进行处理的情况);

试样条件处理的方法和处理时间;

电极装置类型,若有加在试样上的电极应注明其类型;

测量仪器;

试验时的温度和相对湿度以及试样的温度;

施加的电压;

施加的频率;

相对电容率 ϵ_r (平均值);

介质损耗因数 $\tan\delta$ (平均值);

试验日期;

相对电容率和介质损耗因数值以及由它们计算得到的值如损耗指数和损耗角,必要时,应给出与温度和频率的关系。

表 1 真空电容的计算和边缘校正

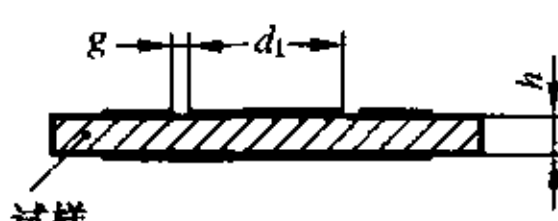
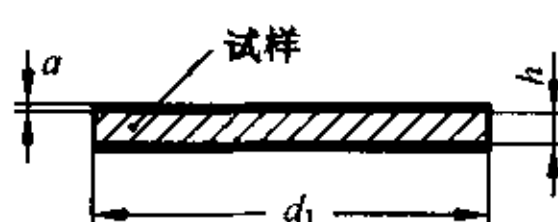
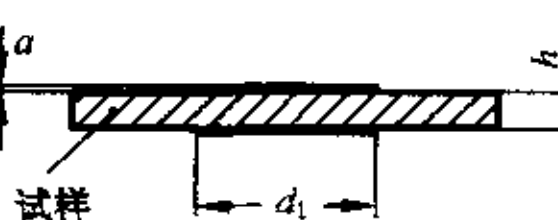
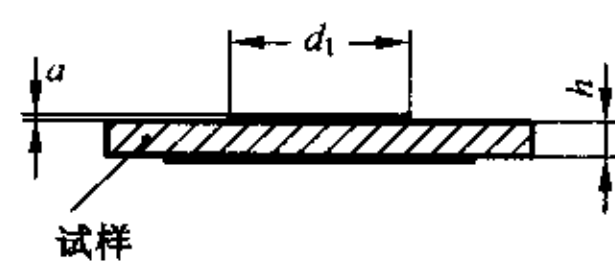
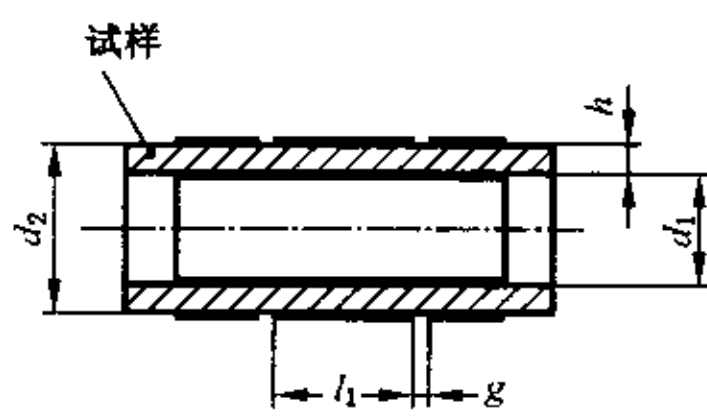
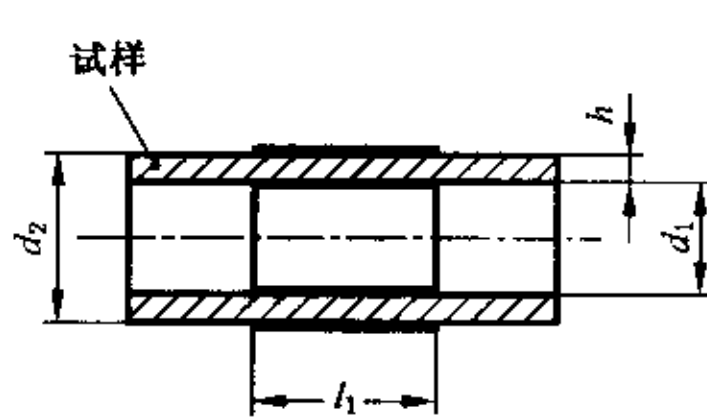
(1)	极间法向电容 (单位:皮法和厘米)	边缘电容的校正 (单位:皮法和厘米)
1. 有保护环的圆盘状电极		
	$C_0 = \epsilon_0 \cdot \frac{A}{h} = 0.088\ 54 \cdot \frac{A}{h}$ $A = \frac{\pi}{4} (d_1 + g)^2$	$C_e = 0$
2. 没有保护环的圆盘状电极		
a) 电极直径=试样直径 	$C_0 = \epsilon_0 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \frac{d_1^2}{h} = 0.069\ 54 \frac{d_1^2}{h}$	当 $a \ll h$ 时 $\frac{C_e}{P} = 0.029 - 0.058 \lg h$ $P = \pi d_1$
b) 上下电极相等,但比试样小 		$\frac{C_e}{P} = 0.019 \epsilon_r - 0.058 \lg h + 0.010$ $P = \pi d_1$ 其中: ϵ_r 是试样相对电容率的近似值,并且 $a \ll h$

表 1(续)

(1)	极间法向电容 (单位:皮法和厘米) (2)	边缘电容的校正 (单位:皮法和厘米) (3)
c) 上下电极不等 	$C_0 = \epsilon_0 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \frac{d_1^2}{h} = 0.069\ 54 \frac{d_1^2}{h}$	$\frac{C_e}{P} = 0.041\epsilon_r - 0.077\lg h + 0.045$ $P = \pi d_1$ 其中: ϵ_1 是试样相对电容率的近似值,并且 $a \ll h$
3. 有保护环的圆柱形电极		
	$C_0 = \epsilon_0 \frac{2\pi(L_1 + g)}{\ln d_2/d_1}$ $= 0.241\ 6 \frac{L_1}{\lg d_2/d_1}$	$C_e = 0$
4. 没有保护环的圆柱形电极		
	$C_0 = \epsilon_0 \frac{2\pi L_1}{\ln d_2/d_1} = 0.241\ 6 \frac{L_1}{\lg d_2/d_1}$	若 $\frac{h}{h + d_1} < \frac{1}{10}$ $\frac{C_e}{2P} = 0.019\epsilon_1 - 0.058\lg h + 0.010$ $P = \pi(d_1 + h)$ 其中: ϵ_1 是试样相对电容率的近似值

试样的相对电容率: $\epsilon_r = \frac{C'_x - C_e}{C_0}$

其中:

C'_x ——电极之间被测的电容;

ln——自然对数;

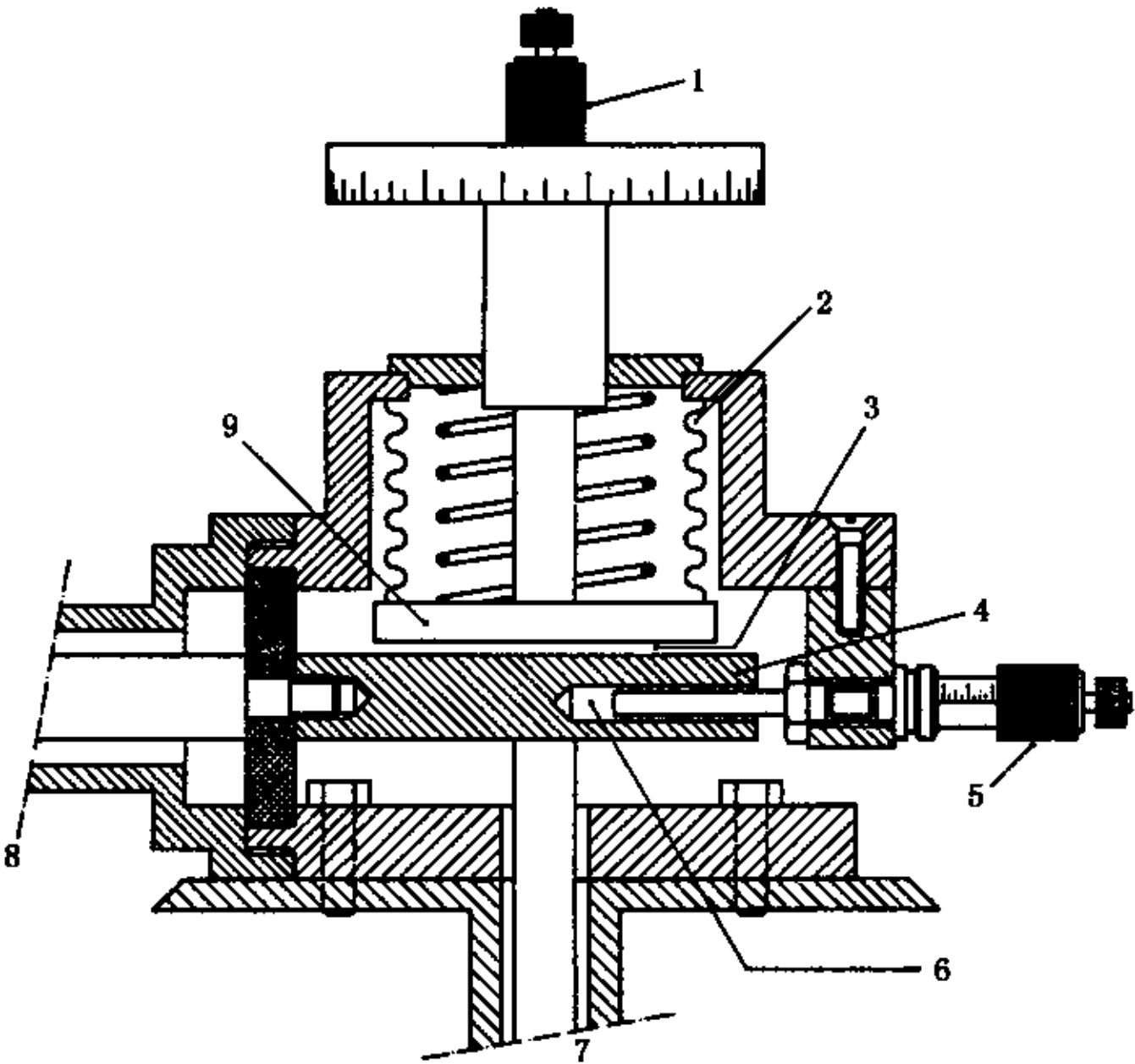
lg——常用对数。

表 2 试样电容的计算——接触式测微计电极

试 样 电 容	注	符 号 定 义
1. 并联一个标准电容器来替代试样电容		C_p ——试样的并联电容
$C_p = \Delta C + C_{or}$	试样直径至少比测微计电极的直径小 $2r$ 。在计算电容率时必须采用试样的真实厚度 h 和面积 A 。	ΔC ——取去试样后,为恢复平衡时的标准电容器的电容增量
2. 取去试样后减少测微计电极间的距离来替代试样电容		C_r ——在距离为 r 时,测微计电极的标定电容
$C_p = C_s - C_r + C_{or}$	试样直径至少比测微计电极的直径小 $2r$ 。在计算电容率时,必须采用试样的真实厚度 h 和面积 A 。	C_s ——取去试样后,恢复平衡,测微计电极间距为 s 时的标定电容
3. 并联一个标准电容器来替代试样电容		C_{or}, C_{oh} ——测微计电极之间试样所占据的,间距分别为 r 或 h 的空气电容。可用表 1 中的公式 1 来计算
	当试样与电极的直径同样大小时,仅存在一个微小的误差(因电极边缘电场畸变引起 0.2%~0.5% 的误差),因而可以避免空气电容的两次计算。	r ——试样与所加电极的厚度
$C_p = \Delta C + C_{oh}$	试样直径等于测微计电极直径,施于试样上的电极的厚度为零。	h ——试样厚度
		相对电容率: $\epsilon_r = \frac{C_p}{C_{oh}}$

表 3 电容率和介质损耗因数的计算——不接触电极

相对电容率 (1)	介质损耗因数 (2)	符号意义 (3)
1. 测微计电极(在空气中)		ΔC ——试样插入时电容的改变量(电容增加时为+号) C_1 ——装有试样时的电容 C_f ——仅有流体时的电容,其值为 $\epsilon_f \cdot C_0$ C_0 ——所考虑的区域上的真空电容,其值为 $\epsilon_0 \cdot A/h_0$ A ——试样一个面的面积,用厘米 ² 表示(试验的面积大于等于电极面积时) ϵ_f ——在试验温度下的流体相对电容率(对空气而言 $\epsilon_f=1.00$) ϵ_0 ——电气常数用皮法/厘米表示 $\Delta \tan \delta$ ——试样插入时,损耗因数的增加量 $\tan \delta_c$ ——装有试样时的损耗因数 $\tan \delta_x$ ——试样的损耗因数的计算值 d_0 ——内电极的外直径 d_1 ——试样的内直径 d_2 ——试样的外直径 d_3 ——外电极的内直径 h_0 ——平行平板间距 h ——试样的平均厚度 M —— $h_0/h-1$ $\lg$ ——常用对数 注:在二流体法的公式中,脚注 1 和 2 分别表示第一种和第二种流体。
$\epsilon_r = \frac{1}{1 - \frac{\Delta C}{C_1} \cdot \frac{h_0}{h}}$ 若 h_0 调到一个新值 h'_0 , 而 $\Delta C = 0$ 时 $\epsilon_r = \frac{h}{h - (h_0 - h'_0)}$	$\tan \delta_x = \tan \delta_c + M \cdot \epsilon_r \cdot \Delta \tan \delta$	
2. 平板电极——流体排出法		
$\epsilon_r = \frac{\epsilon_f}{1 + \tan^2 \delta_x} \cdot \left\{ \frac{(C_f + \Delta C)(1 + \tan^2 \delta_c)}{C_f + M[C_f - (C_f + \Delta C)(1 + \tan^2 \delta_c)]} \right\}$	$\tan \delta_x = \tan \delta_c + M \cdot \Delta \tan \delta \cdot \left\{ \frac{(C_f + \Delta C)(1 + \tan^2 \delta_c)}{C_f + M[C_f - (C_f + \Delta C)(1 + \tan^2 \delta_c)]} \right\}$	
当试样的损耗因数小于 0.1 时,可以用下列公式:		
$\epsilon_r = \frac{\epsilon_f}{1 - \frac{\Delta C}{\epsilon_f \cdot C_0 + \Delta C} \cdot \frac{h_0}{h}}$	$\tan \delta_x = \tan \delta_c + M \frac{\epsilon_r}{\epsilon_f} \cdot \Delta \tan \delta$	
3. 圆柱形电极——流体排出法(用于 $\tan \delta_x$ 小于 0.1 时)		
$\epsilon_r = \frac{\epsilon_f}{1 - \frac{\Delta C}{C_1} \cdot \frac{\lg d_3/d_0}{\lg d_2/d_1}}$	$\tan \delta_x = \tan \delta_c + \Delta \tan \delta \frac{\epsilon_r}{\epsilon_f} \left[\frac{\lg d_3/d_0}{\lg d_2/d_1} - 1 \right]$	
4. 二流体法——平板电极(用于 $\tan \delta_x$ 小于 0.1 时)		
$\epsilon_r = \epsilon_{f1} + \frac{\Delta C_1 \cdot C_2 (\epsilon_{f2} - \epsilon_{f1})}{\Delta C_1 \cdot C_2 - \Delta C_2 \cdot C_1}$	$\tan \delta_x = \tan \delta_{c1} + \frac{\epsilon_r C_0 - C_1}{\Delta C_2} \cdot \Delta \tan \delta_2$	



- 1——测微计头；

2——连接可调电极(B)的金属波纹管；

3——放试样的空间(试样电容器 M_1)；

4——固定电极(A)；

5——测微计头；
- 6——微调电容器 M_2 ；

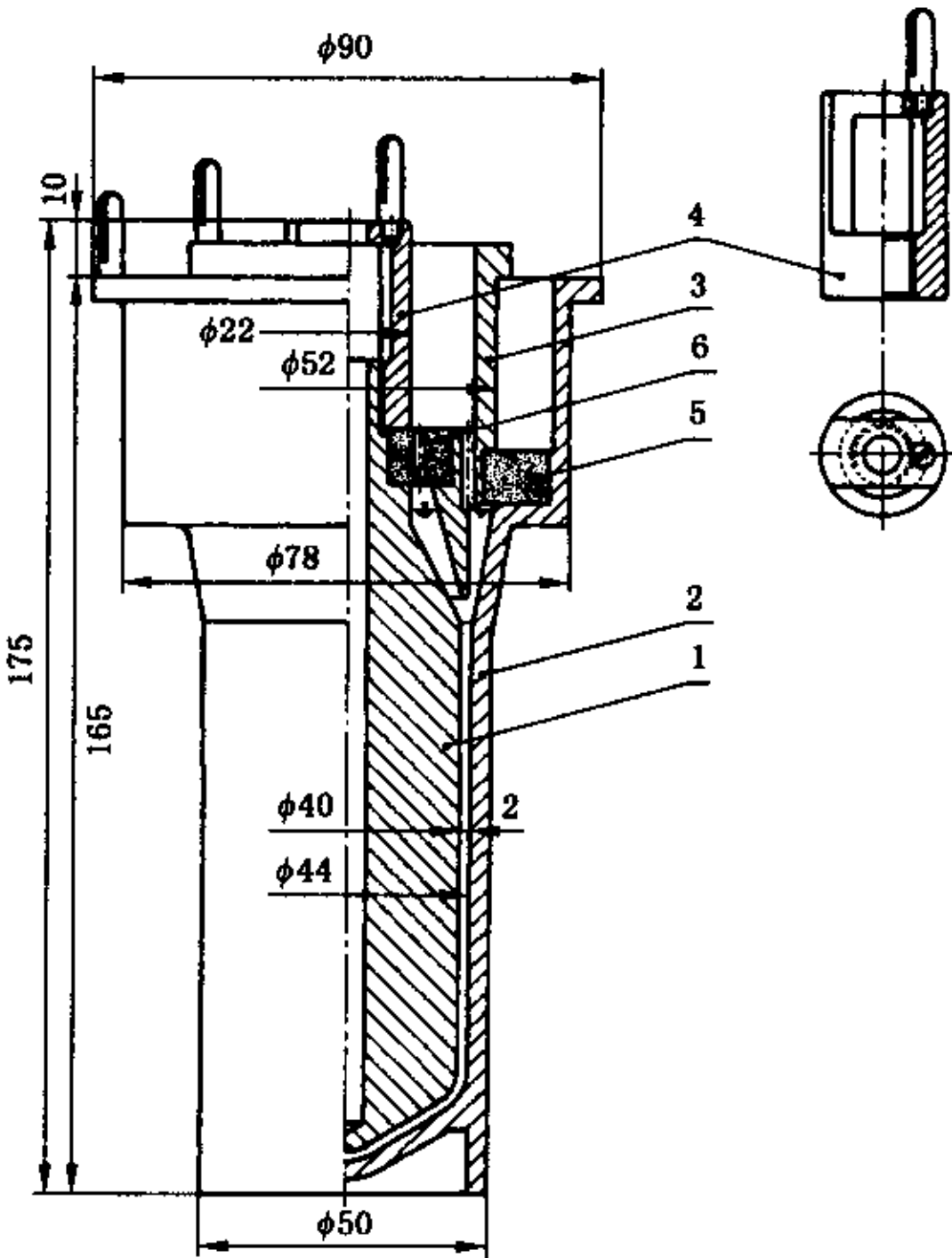
7——接检测器；

8——接到电路上；

9——可调电极(B)。

图 1 用于固体介质测量的测微计——电容器装置

单位为毫米



- 1——内电极；

2——外电极；

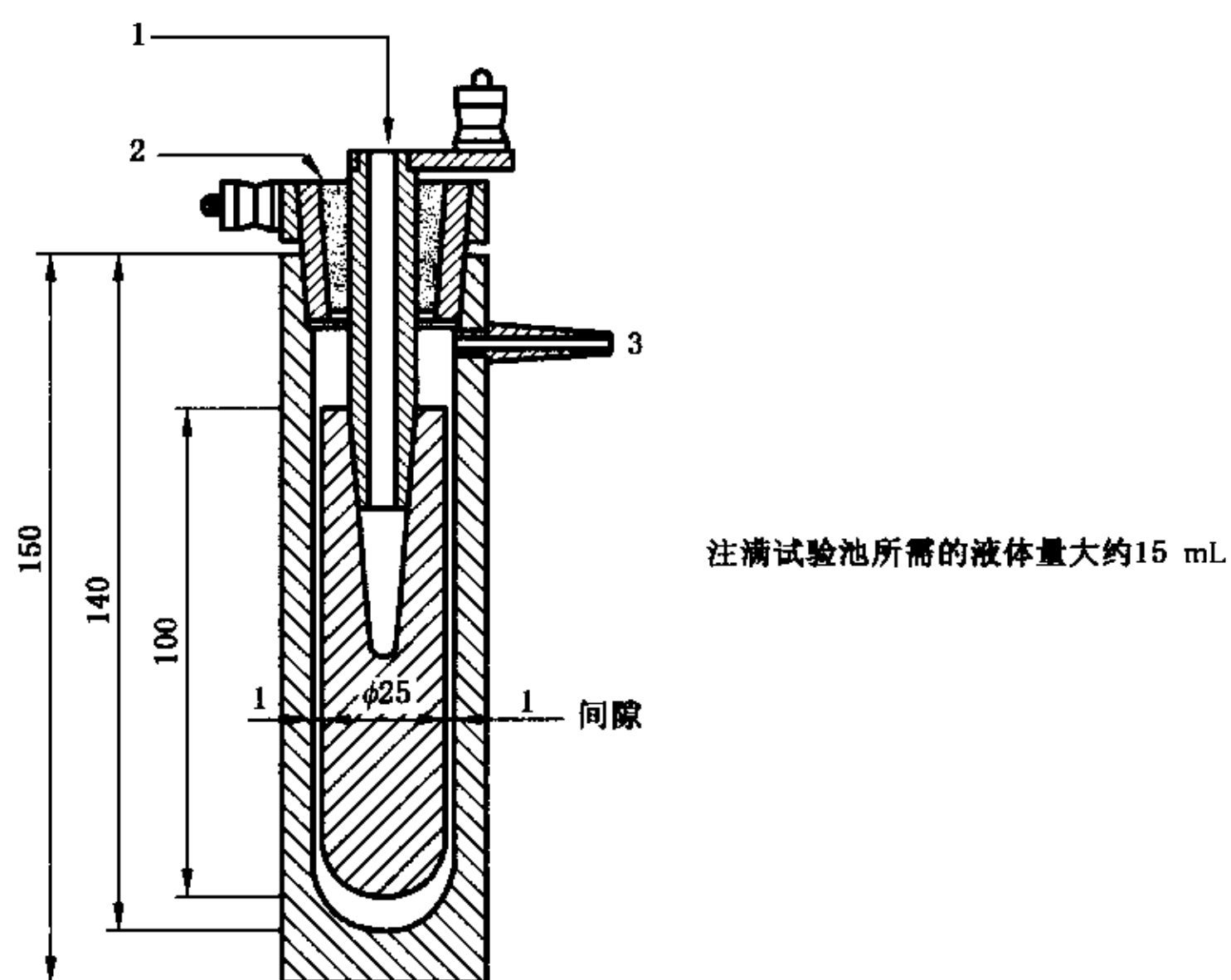
3——保护环；
- 4——把柄；

5——硼硅酸盐或石英垫圈；

6——硼硅酸盐或石英垫圈。

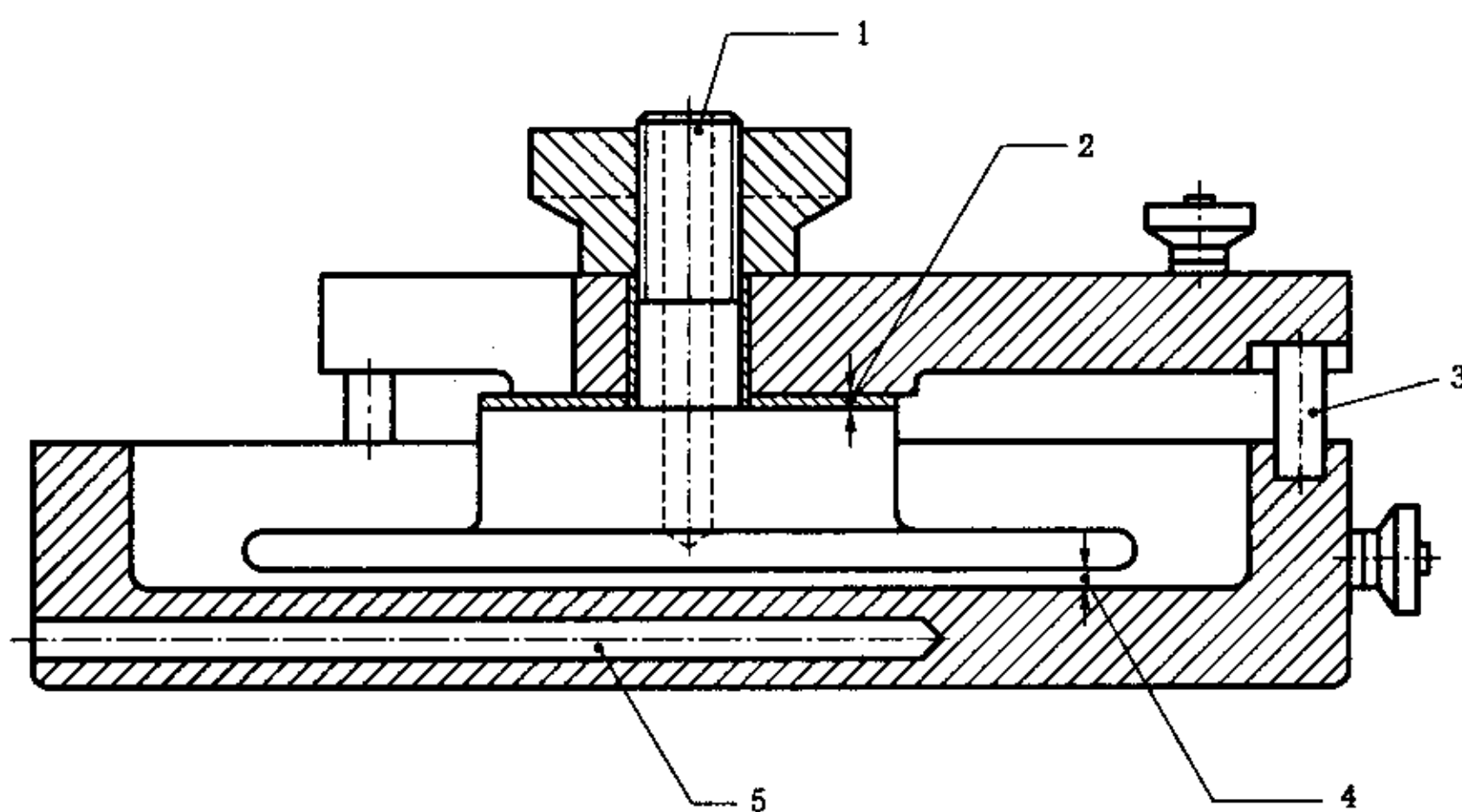
图 2 液体测量的三电极试验池示例

单位为毫米



- 1——温度计插孔；
2——绝缘子；
3——过剩液体溢流的一个出口。

图 3 测量液体的两电极试验池示例



- 1——温度计插孔；
2——1 mm 厚的金属板；
3——石英玻璃；
4——1 mm 或 2 mm 的间隙；
5——温度计插孔。

图 4 液体测量的平板两电极试验池

附录 A (资料性附录) 仪 器

A.1 西林电桥

A.1.1 概述

西林电桥是测量电容率和介质损耗因数的最经典的装置。它可使用从低于工频(50 Hz~60 Hz)直至 100 kHz 的频率范围,通常测定 50 pF~1 000 pF 的电容(试样或被试设备通常所具有的电容)。

这是一个四臂回路(图 A.1)。其中两个臂主要是电容(未知电容 C_X 和一个无损耗电容 C_N)。另外两臂(通常称之为测量臂)由无感电阻 R_1 和 R_2 组成,电阻 R_1 在未知电容 C_X 的对边上,测量臂至少被一个电容 C_1 分流。一般地说,电容 C_1 和两个电阻 R_1 和 R_2 中的一个是可调的。

如果采用电阻 R_S 和(纯)电容 C_S 的串联等值回路来表示电容 C_X ,则图 A.1 所示的电桥平衡时导出:

$$C_S = C_N \cdot \frac{R_1}{R_2} \quad \dots\dots\dots (A.1)$$

和 $\tan\delta_X = \omega C_S R_S = \omega C_1 R_1 \quad \dots\dots\dots (A.2)$

如果电阻 R_2 被一个电容 C_2 分流,则 $\tan\delta$ 的公式变为:

$$\tan\delta_X = \omega C_1 R_1 - \omega C_2 R_2 \quad \dots\dots\dots (A.3)$$

由于频率范围的不同,实际上电桥构造会有明显的不同。例如一个 50 pF~1 000 pF 的电容在 50 Hz 时的阻抗为 60 M Ω ~3 M Ω ,在 100 kHz 时的阻抗为 3 000 Ω ~1 500 Ω 。

频率为 100 kHz 时,桥的四个臂容易有相同数量级的阻抗,而在 50 Hz~60 Hz 的频率范围内则是不可能的。因此,出现了低频和(相对)高频两种不同形式的电桥。

A.1.2 低频电桥

一般为高压电桥,这不仅是由于灵敏度的缘故,也因为在低频下正是高电压技术特别对电介质损耗关注的问题。电容臂和测量臂两者的阻抗大小在数量级上相差很多,结果,绝大部分电压都施加在电容 C_X 和 C_N 上,使电压分配不平衡。上面给出的电桥平衡条件只是当低压元件对高压元件屏蔽时才成立。同时,屏蔽必须接地,以保证平衡稳定。如图 A.2 所示。屏蔽与使用被保护的电容 C_X 和 C_N 是一致的,这个保护对于 C_N 来说是必不可少的。

由于选择不同的接地方法,实际上形成了两类电桥。

A.1.2.1 带屏蔽的简单西林电桥

桥的 B 点(在测量臂边的电源接线端子)与屏蔽相连并接地。

屏蔽能很好地起到防护高压边影响的作用,但是增加了屏蔽与接到测量臂接线端 M 和 N 的各根导线之间电容,此电容承受跨接测量臂两端的电压。这样会引入一个通常使 $\tan\delta$ 的测量精度限于 0.1% 数量级的误差,当电容 C_X 和 C_N 不平衡时尤为显著。

A.1.2.2 带瓦格纳(Wagner)接地电路的西林电桥

图 A.2 示出了使电桥测量臂接线端与屏蔽电位相等的方法。这种方法是通过使用外接辅助桥臂 Z_A 、 Z_B (瓦格纳接地电路),并使这两个辅助桥臂的中间点 P 接到屏蔽并接地。调节辅助桥臂(实际为 Z_B)以使在 Z_A 和 Z_B 上的电压分别与电桥的电容臂和测量臂两端的电压相等。显然,这个解决方法包括两个桥即主桥 AMNB 和辅桥 AMPB(或 ANPB)同时平衡。通过检测器从一个桥转换到另一个桥逐次地逼近平衡而最终达到二者平衡。用这种方法精度可以提高一个数量级,这时,实际上该精度只决定于电桥元件的精密度。

必须指出,只有当电源的两端可以对地绝缘时才使用上述特殊的解决方法。如果不可能对地绝缘,则必须使用更复杂的装置(双屏蔽电桥)。

A.1.3 高频西林电桥

这种电桥通常在中等的电压下工作,是比较灵活方便的一种电桥;通常电容 C_N 是可变的(在高压电桥中电容 C_N 通常是固定的),比较容易采用替代法。

由于不希望电容的影响随频率的增加而增加,因此仍可有效使用屏蔽和瓦格纳接地线路。

A.1.4 关于检测器的说明

当西林电桥的 B 点接地时,必须避免检测器的不对称输入(这在电子设备中是常有的)。

然而这样的检测器只要接地输入端总是连接于 P 点,就能与装有瓦格纳接地线路的电桥一起使用。

A.2 变压器电桥(电感比例臂电桥)

A.2.1 概述

这种电桥的原理比西林电桥简单。其结构原理见图 A.3。

当电桥平衡时,复电抗 Z_X 和 Z_M 之间的比值等于电压矢量 U_1 和 U_2 间的比值。如果电压矢量的比值是已知的,便可从已知的 Z_M 推导出 Z_X 。在理想电桥中比例 U_1/U_2 是一个系数 K ,这样 $Z_K = KZ_M$,实际上 Z_M 的幅角直接给出 δ_X 。

变压器电桥比西林电桥有很大的优点,它允许将屏蔽和保护电极直接接地且不需要附加的辅助桥臂。

这种电桥可在从工频到数十 MHz 的频率范围内使用。比西林电桥使用的频率范围宽。由于频率范围的不同,桥的具体结构也不相同。

A.2.2 低频电桥

通常是一个高压电桥(更精密,电压 U_1 是高压, U_2 是中压),这种电桥的技术与变压器的技术有关。可采用两类电源:

- 1) 电源电压直接加到一个绕组上,另一个绕组则起变压器次级绕组的作用。
- 2) 将电源加到初级绕组上(见图 A.3),而电桥的两个绕组是由两个分开的次级线路组成或是一个带有中间抽头能使获得电压 U_1 和 U_2 的次级绕组组成。

与所有的测量变压器一样,电桥存在误差(矢量比 U_1/U_2 与其理论值之间的差)。这种误差随负载而变化。尤其是 U_1 和 U_2 之间的相位差,它会直接影响 $\tan\delta$ 的测量值。

因此,必须对电桥进行校正,这可以用一个无损耗电容 C_N (与在西林电桥中使用的相似)代替 Z_X 进行。如果 C_N 与 C_X 的值相同,这实际上是替代法,测试前应校正。但由于 C_N 很少是可调的,因此负载的变化对 C_X 不再有效。电桥在恒定负载下工作是可能的,如图 A.4 所示:当测量 C_N 时,用一个转换开关把 C_X 接地,反之亦然。这时对于高压绕组来说两个负载的总和是恒定的。(严格地说,低压边也应该用一个相似的装置,但由于连在低压边的负载很小,尽管采用这样处理很容易,但意义小。)

另外,若用并联在电压 U_1 上的一个纯电容 C_N 校正时,承受电压 U_2 的测量阻抗 Z_M 组成如下:

- 1) 如果 U_2 和 U_1 是同相的(理想情况),则用一个纯电容 C_M 组成。
- 2) 如果 U_2 超前 U_1 ,则用一个电容 C_M 和一个电阻 R_M 组成。
- 3) 如果 U_2 滞后于 U_1 ,则电阻 R_M 应变成负的。这就是说,为了重新建立平衡必须在 U_1 一边并入一个电阻形成电流分量。其实并不存在适用于高压的可调高电阻,因此通常阻性电流分量是用一个辅助绕组来获得的,这个辅助绕组提供一个与 U_1 同相的低电压 U_3 (图 A.5)。

注:不可在 C_N 上串接一个电阻。因为如果将电阻接在电容器后面会破坏 C_N 测量极和保护极间的等电位;如果将电阻接到 C_N 前面的高压导线上,则电阻(内)电流也将包括保护电路的电流,这就可能无法校正。

这些论述同样适用于上述第二种情况的电阻 R_M 。但在低压边容易将三个电阻 R_1 、 R_2 和 R' 以星形联接来

得到一个与电容并联的可调高值电阻。如图 A.5 下面的虚线所示。这时有：

$$R_M = R_1 + R_2 + \frac{R_1 R_2}{R'} \quad \dots\dots\dots (A.4)$$

但是,可调测量电容 C_M 必须是纯电容性的或已知其损耗低(在西林电桥中的测量电容 C_1 不需满足这些苛刻要求)。

A.2.3 高频电桥

上面的一些叙述也同样适用于高频电桥。但由于它不再是一个高压电桥,因此承受电压 U_1 的臂能容易地引入可调元件;替代法在此适用。

还应指出,带有分开的初级绕组的电桥允许电源和检测器互换位置。其平衡与在次级绕组中对应的安匝数的补偿相符。

A.2.4 关于检测器的说明

由于测量臂的一端接地的,因此不必要使用对称输入的检测器。

A.3 并联 T 型网络

在并联 T 型网络桥路中,从振荡器经过两个 T 形网络流向检测器的两股电流在检测器输入处是大小相等而方向相反的。在这个电路中,振荡器和检测器都能有一端接地;且在有些可能电路中试样和用于平衡的每一个可变元件也有一端接地。

图 A.6 出示了只使用电阻和电容的最简单的并联 T 型网络。测量电介质材料最常用的电路的原理如图 A.7 所示。这种电路的平衡条件如下(在开路的 X、X 端子之间)。

$$\frac{1}{C_A} + \frac{1}{C_N} + \frac{1}{C_B} = \frac{1}{\omega^2 C_A C_N L} \quad \dots\dots\dots (A.5)$$

$$R_T \left(1 + \frac{C_H}{C_B}\right) = \frac{1}{\omega^2 C_A C_N R_F} \quad \dots\dots\dots (A.6)$$

实际上是将一个可变电容器接到 X、X 端,且其电容 C_V 和它的电导改变了 L 和 R_F 的表观值,使电路达到平衡;然后再将试样接到 X、X 端,通过调节电容 C_V 和 C_H 恢复电桥平衡。

此时:

- 1) 试样电容等于 C_V 的减少量 ΔC_V ;
- 2) 试样的电导 G :

$$G = \frac{\omega^2 C_A C_N R_T}{C_B} \cdot \Delta C_H \quad \dots\dots\dots (A.7)$$

- 3) 试样的损耗因数 $\tan\delta$:

$$\tan\delta = \frac{\omega C_A \cdot C_N \cdot R_T}{C_B} \cdot \frac{\Delta C_H}{\Delta C_V} \quad \dots\dots\dots (A.8)$$

式中:

ΔC_H —— C_H 的增量。

在 50 kHz 到 50 MHz 的频率范围内能方便地设计这种网络,这种网络也容易有效地屏蔽。但其缺点是平衡随频率的变化太灵敏,以致于电源频率的谐波很不平衡。为了能拓宽频率范围,必须改变或换接电桥元件,在较高频率下接线和开关阻抗(若使用开关时)会引入很大的误差。

A.4 谐振法(Q 表法)

谐振法或 Q 表法是在 10 kHz 到 260 MHz 的频率范围内使用。它的原理是基于在一个谐振电路中感应一个已知的弱小电压时,测量在该电路出现的电压。图 A.8 表示这种电路的常用形式,在线路中通过一个共用电阻 R 将谐振电路耦合到振荡器上,也可用其他的耦合方法。

操作程序是在规定的频率下将输入电压或电流调节到一个已知值,然后调节谐振电路达到最大谐

振,观察此时的电压 U_0 。然后将试样接到相应的接线端上,再调节可变电容器使电路重新谐振,观察新的电压 U_1 的值。

在接入试样并重新调节线路时,只要 $R_L G \ll 1$ (见图 A. 8) 其总电容几乎保持不变。试样电容近似于 ΔC , 即是可变电容器电容的变化量。

试样的损耗因数近似为:

$$\tan \delta \approx \frac{C_t}{\Delta C} \left(\frac{1}{Q_1} - \frac{1}{Q_0} \right) \quad \dots\dots\dots (A. 9)$$

式中:

C_t ——电路中的总电容,包括电压表以及电感线圈本身的电容;

Q_1 、 Q_0 ——分别为有无试样联接时的 Q 值。

测量误差主要来自两台指示器的标定刻度以及在连线中尤其是在可变电容器和试样的连线中所引入的阻抗。对于高的损耗因数值, $R_L G \ll 1$ 的条件可能不成立,此时上面引出的近似公式不成立。

A. 5 变电纳法(变电抗法)

图 1 所示的测微计电极系统是哈特逊(Hartshorn)改进的,被用于消除在高频下因接线和测量电容器的串联电感和串联电阻对测量值产生的误差。在这样的系统中,是由于在测微电极中使用了一个与试样连接的同轴回路,不管试样在不在电路中,电路中的电感和电阻总是相对地保持恒定。夹在两电极之间的试样,其尺寸与电极尺寸相同或小于电极尺寸。除非试样表面和电极表面磨得很平整,否则在试样放到电极系统里之前,必须在试样上贴一片金属箔或类似的电极材料。在试样抽出后,调节测微计电极,使电极系统得到同样的电容。

按电容变化仔细校正测微计电极系统后,使用时则不需要校正边缘电容、对地电容和接线电容。其缺点是电容校正没有常规的可变多层平板电容器那么精密且同样不能直接读数。

在低于 1MHz 的频率下,可忽略接线的串联电感和电阻的影响,测微计电极的电容校正可用与测微计电极系统并联的一个标准电容器的电容来校正。

在接和未接试样时电容的变化量是通过这个电容器来测得。

在测微计电极中,次要的误差来源于电容校正时所包含的电极的边缘电容,此边缘电容是由于插入一个与电极直径相同的试样而稍微有所变化。实际上只要试样直径比电极直径小 2 倍试样厚度,就可消除这种误差。

首先将试样放在测微计电极间并调节测量电路参数。然后取出试样,调节测微计电极间距或重新调节标准电容器来使电路的总电容回到初始值。

按表 2 计算试样电容 C_p 。

损耗因数为:

$$\tan \delta_1 = \frac{(\Delta C_1 - \Delta C_0)}{2C_p} \quad \dots\dots\dots (A. 10)$$

式中:

ΔC_1 ——接入试样后,在谐振的两侧当检测器输入电压等于谐振电压的 $\sqrt{2}/2$ 时可变电容器 M_2 (图 1) 的两个电容读数之差。

ΔC_0 ——在除去试样后与上述相同情况下的两电容读数差。

值得注意的是在整个试验过程中试验频率应保持不变。

注:贴在试样上的电极的电阻在高频下会变得相当大,如果试样不平整或厚度不均匀,将会引起试样损耗因数的明显增加。这种变得明显起来的频率效应,取决于试样表面的平整度,该频率也可低到 10 MHz,因此,必须在 10 MHz 及更高的频率下,且没有贴电极的试样上做电容的损耗因数的附加测量。假设 C_w 和 $\tan \delta_w$ 为不贴电极的试样的电容和损耗因数,则计算公式为:

$$\tan\delta = \frac{C_p}{C_w} \tan\delta_w \dots\dots\dots (A.11)$$

式中：
C_w——带电极的试样电容。

A.6 屏蔽

在一个线路两点之间的接地屏蔽,可消除这两点之间的所有的电容,而被这两个点的对地电容所代替。因此,导线屏蔽和元件屏蔽可任意运用在那些各点对地的电容并不重要的线路中;变压器电桥和带有瓦格纳接地装置的西林电桥都是这种类型的电路。

从另一方面来说,在采用替代法电桥里,在不管有没有试样均保持不变的线路部分是不需要屏蔽的。

实际上,在电路中将试样、检测器和振荡器的连线屏蔽起来。并尽可能将仪器封装在金属屏蔽里,可以防止观察者的身体(可能不是地电位或不固定)与电路元件之间的电容变化。

对于 100 kHz 数量级或更高的频率,连线应可能短而粗,以减小自感和互感;通常在这样的频率下即使一个很短的导线其阻抗也是相当大的,因此若有几根导线需要连接在一起,则这些导线应尽可能的连接于一点。

如果使用一个开关将试样从电路上脱开,开关在打开时它的两个触点之间的电容必须不引入测量误差。在三电极测量系统中,要做到这点,可以在两个触点间接入一个接地屏蔽,或是用两个开关串联,当这两个开关打开时,将它们之间的连线接地,或将不接地且处于断开状态的电极接地。

A.7 电桥的振荡器和检测器

A.7.1 交流电压源

满足总谐波分量小于 1% 的电压和电流的任一电压源。

A.7.2 检测器

下列各类检测器均可使用,并可以带一个放大器以增加灵敏度:

- 1) 电话(如需要可带变频器);
- 2) 电子电压表或波分析器;
- 3) 阴极射线示波器;
- 4) “电眼”调节指示器;
- 5) 振动检流计(仅用于低频)。

在电桥和检测器中间需加一个变压器,用它来匹配阻抗或者因为电桥的一输出端需接地。

谐波可能会掩盖或改变平衡点,调节放大器或引入一个低通滤波器可防止该现象。对测量频率的二次谐波有 40 dB 的分辨率是合适的。

A.8 频率范围

方 法	频率的推荐范围	试样形式	注
1. 西林电桥	0.10 MHz 及以下	板或管	
2. 变压器电桥	15 Hz~50 MHz		
3. 并联 T 型网络	50 kHz~30 MHz		
4. 谐振法	10 kHz~260 MHz		
5. 变电纳法	10 kHz~100 MHz		

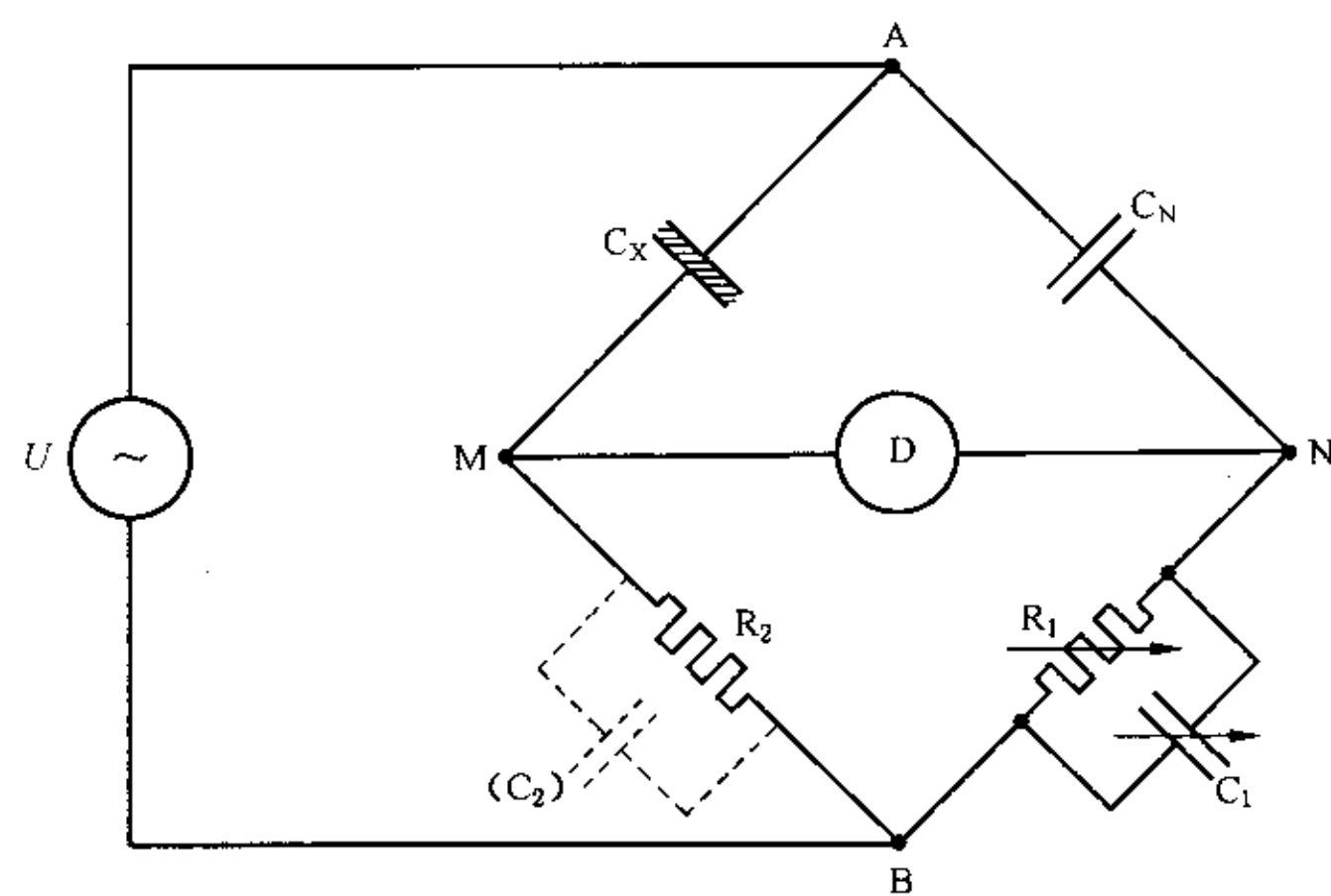


图 A.1 西林电桥电路图

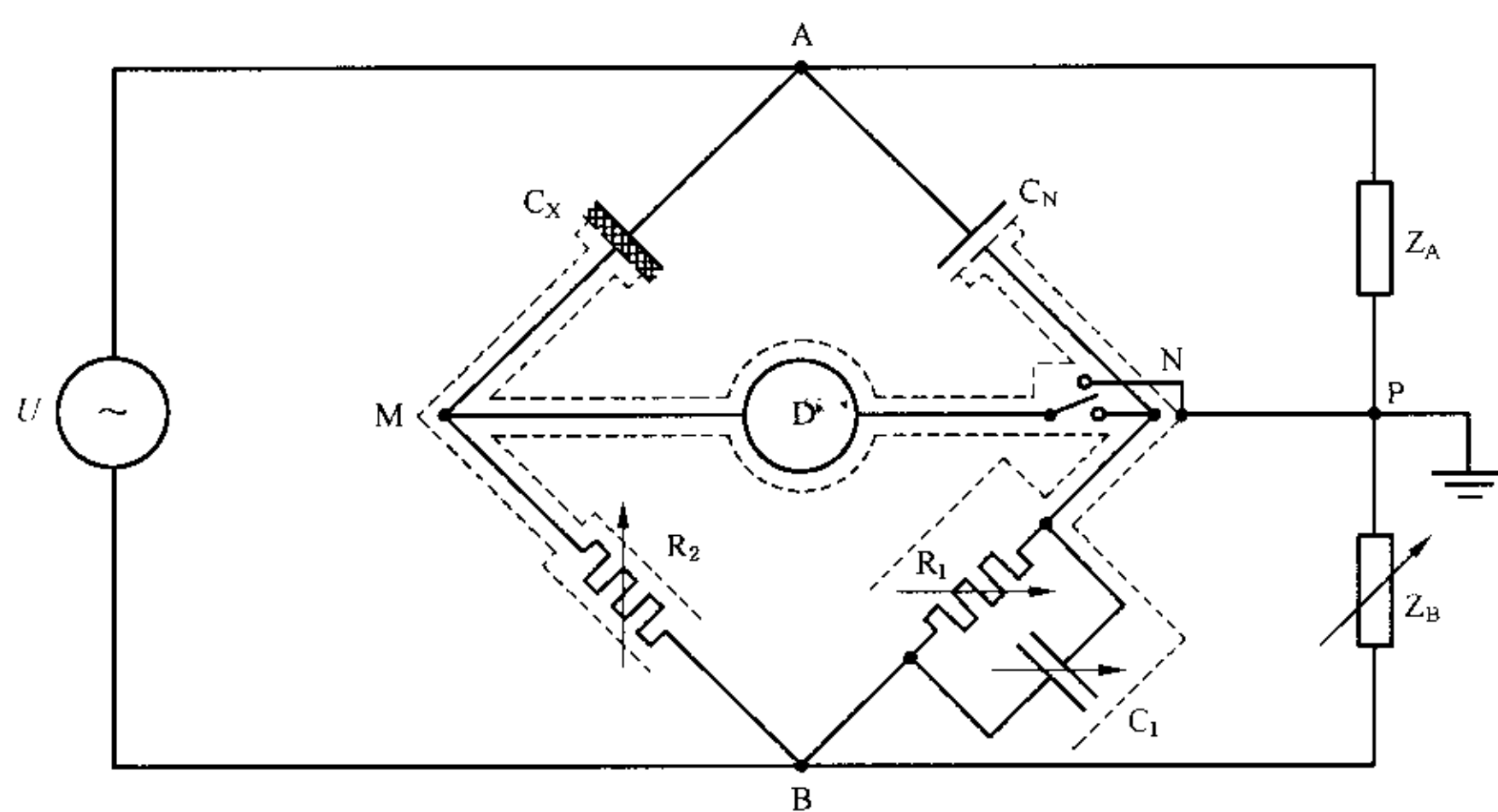


图 A.2 具有瓦格纳(Wagner)接地电路的西林电桥

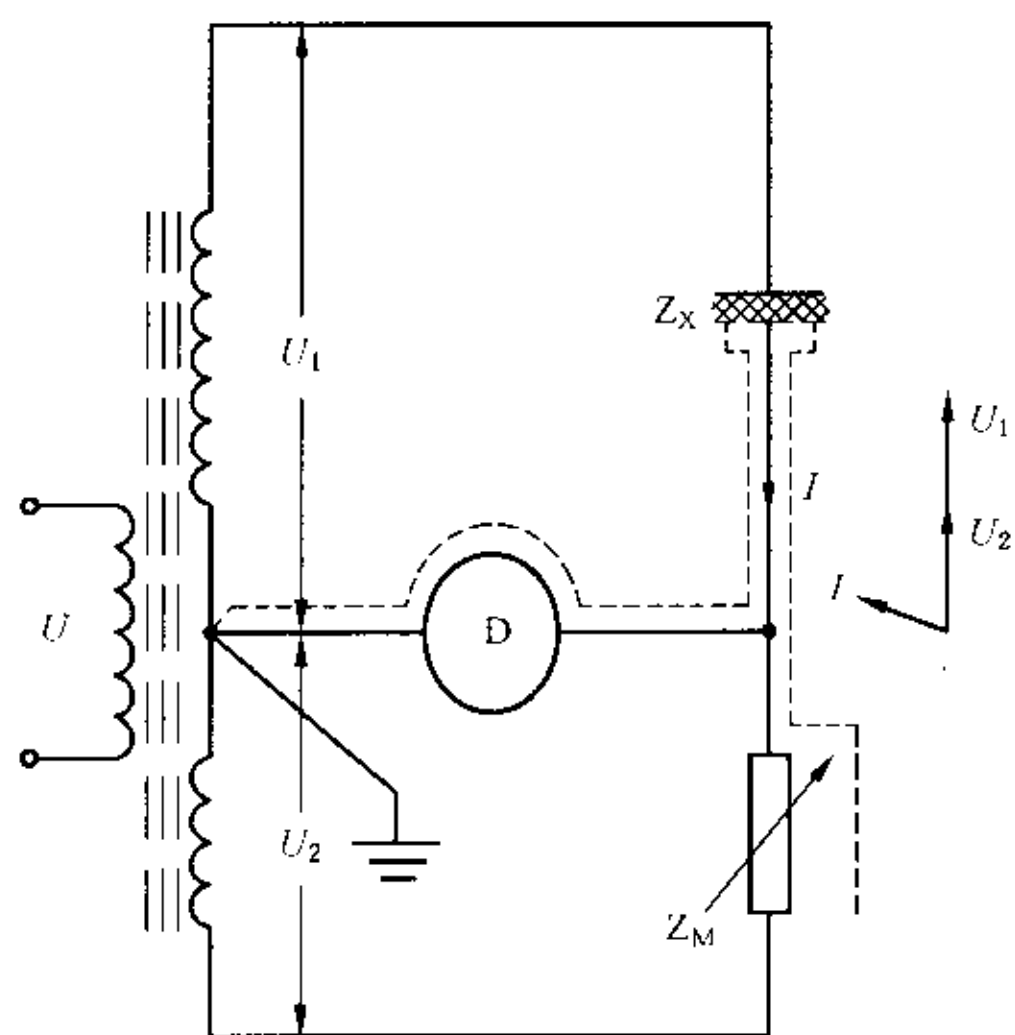


图 A.3 变压器电桥电路图

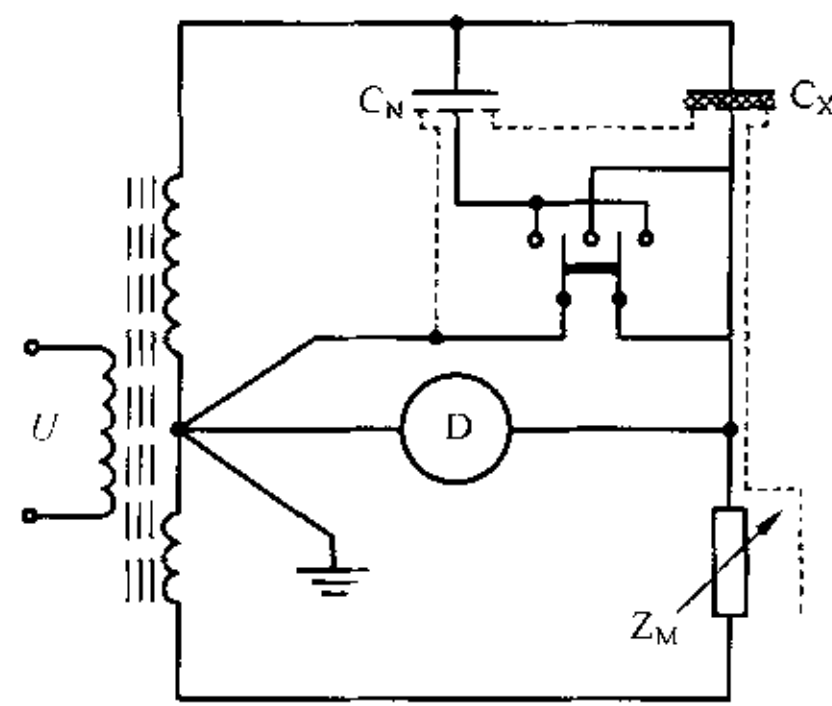
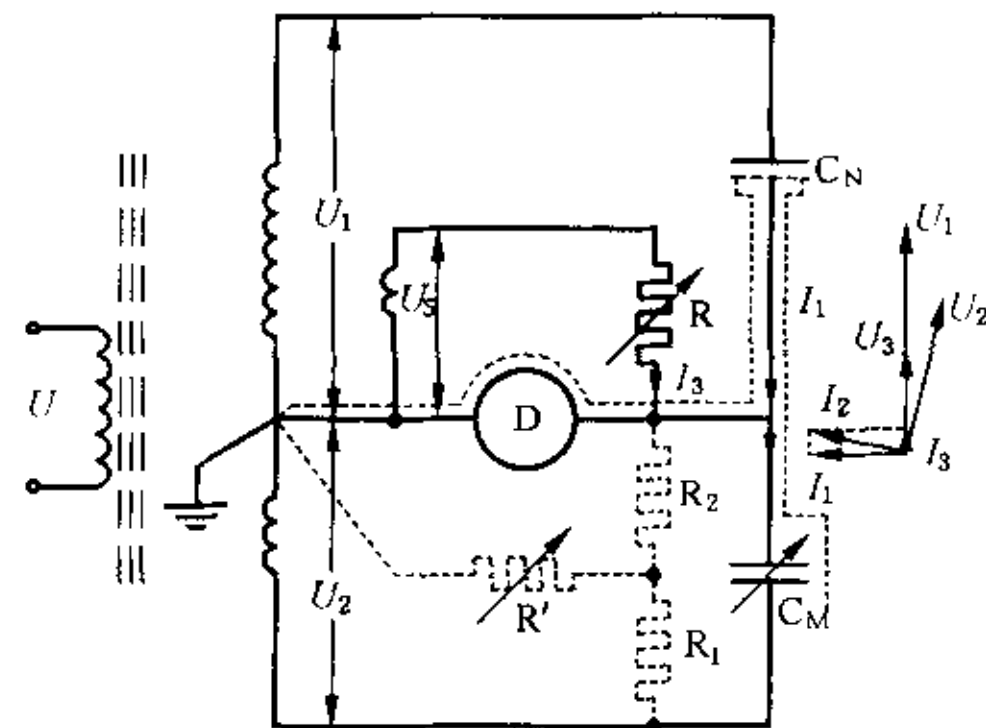


图 A.4 变压器电桥, 恒载校正



虚线: 与 C_M 并联形成一个高电阻 (当 I_2 超前于 I_1 时)

图 A.5 变压器电桥, 当 U_2 滞后于 U_1 时的补偿 (用绕组 U_3)

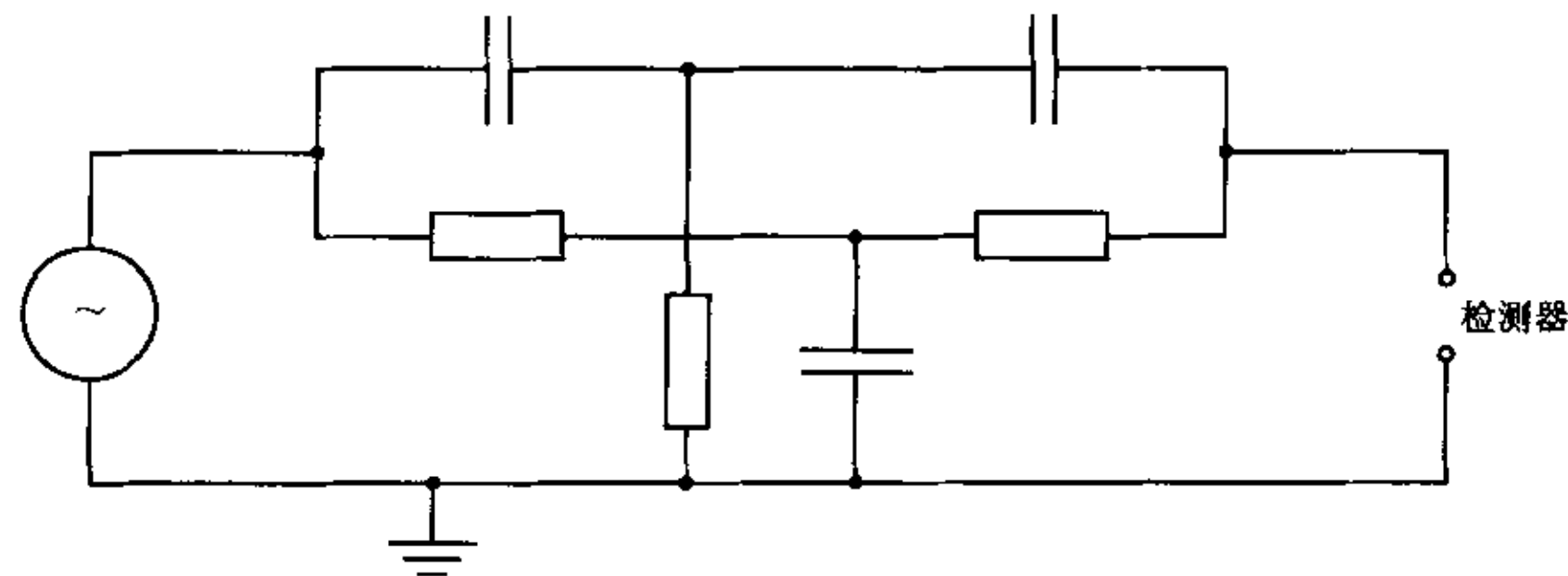


图 A.6 并联 T 型网络的电路原理图

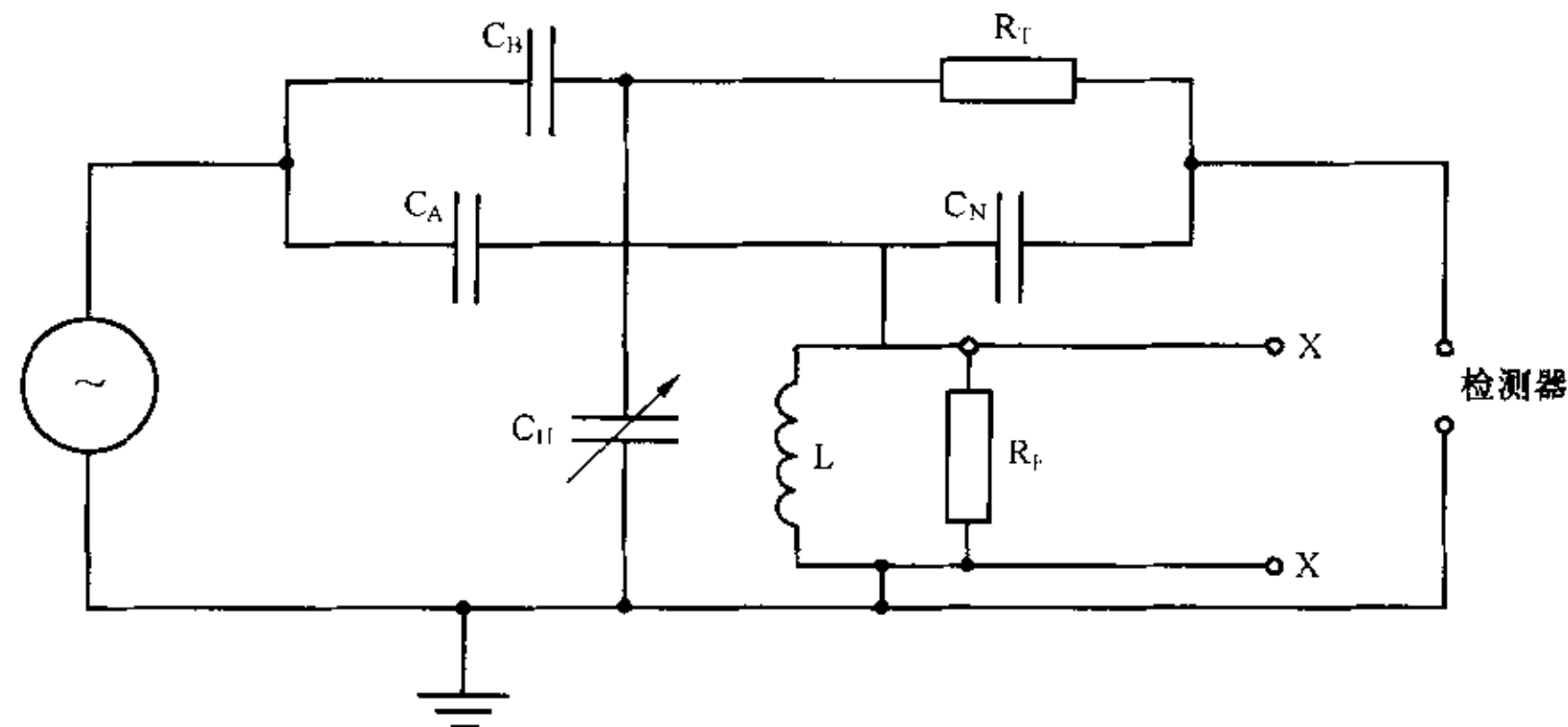


图 A.7 并联 T 型网络的实际线路图

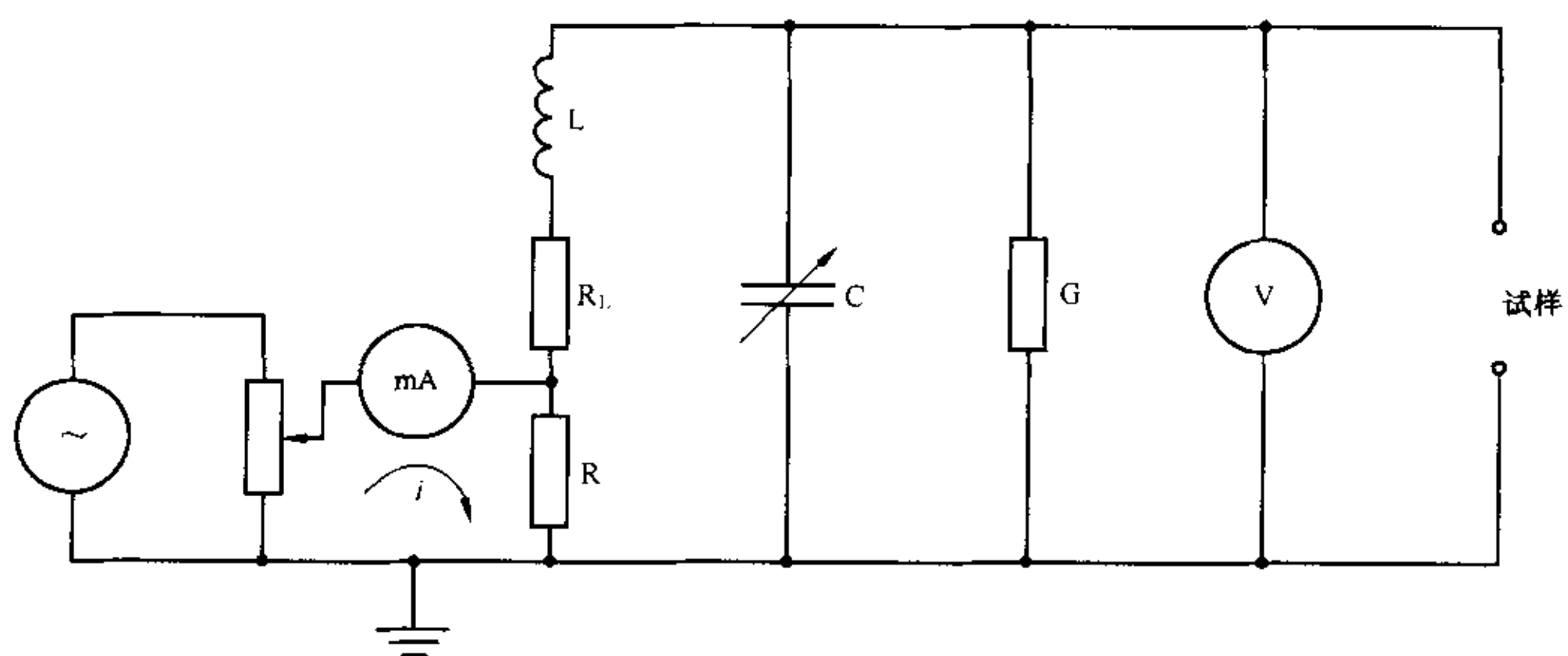


图 A.8 谐振法的电路图

附 录 B

(资料性附录)

本标准章条编号与 IEC 60250:1969 章条编号对照

表 B.1 给出了标准章条编号与 IEC 60250:1969 章条编号对照一览表。

表 B.1 本标准章条编号与 IEC 60250:1969 章条编号对照

本标准章条编号	对应的国际标准章条编号
1	1
2	—
3	2
3.1~3.5	2.1~2.5
4	3
4.1~4.2	3.1~3.2
4.2.1~4.2.4	3.2.1~3.2.4
5	4
5.1	4.1
5.1.1~5.1.2	4.1.1~4.1.2
5.1.2.1~5.1.2.2	4.1.2.1~4.1.2.2
5.1.2.2.1~5.1.2.2.2	4.1.2.2.1~4.1.2.2.2
5.1.2.3	4.1.2.3
5.1.3	4.1.3
5.1.3.1	4.1.3.1~4.1.3.7
5.1.4	4.1.4
5.1.4.1~5.1.4.2	4.1.4.1~4.1.4.2
5.2	4.2
5.2.1~5.2.3	4.2.1~4.2.3
6	5
6.1~6.2	5.1~5.2
7	6
7.1~7.3	6.1~6.3
8	7
8.1~8.3	7.1~7.3
9	8