

交流电桥法原理

阮永顺 编著

内 容 提 要

本书讨论交流电桥测量法的原理、结构及其实用线路。全书共分四章，前两章为基础部分，详细介绍了交流电桥的原理并进行了必要的引伸，概括了近代的新型电桥。对电桥的主要部件，如标准器、比例器及调节装置的结构及特性作了详细的介绍。后两章为实际应用部分，按照作者提出的新的分类方法，系统地介绍各种常用交流电桥线路的特点及适用范围，集中讨论了交流电桥的误差及防止干扰的方法。

本书可供计量测试工作者、交流阻抗测量仪器设计及制造的工程技术人员及大专院校测量技术与仪器制造专业师生参考。

交 流 电 桥 法 原 理

阮永顺 编著

责任编辑 刘宝兰

—*—

计量出版社出版

(北京和平里11区7号)

北京计量印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

—*—

开本 787×1092 1/32 印张 14 3/8

字数 335 千字 印数 1—7000

1986年3月第一版 1986年3月第一次印刷

统一书号 15210·485

定价 3.30元

目 录

第一章 交流电桥的原理

第一节 概 论	(1)
第二节 交流电桥的特点及定义	(4)
一、交流电桥的特点	(4)
二、交流电桥的定义	(5)
第三节 交流阻抗器的定义	(10)
一、无屏蔽的两端阻抗(器)的定义	(11)
二、两电极阻抗(器)的定义	(14)
三、三电极导纳(器)的定义	(20)
四、两端口导纳的定义	(24)
五、五端阻抗(器)的定义	(32)
六、四端口阻抗的定义	(34)
第四节 平衡过程中的基本问题	(37)
一、交流电桥的灵敏度	(38)
二、电桥平衡过程的轨迹图	(52)
三、交流电桥的收敛性	(66)
四、分别平衡的原则	(70)
五、分别直接读数的原则	(72)

第二章 交流电桥的基本部件

第一节 标准器	(75)
一、标准电容器	(77)
二、标准电感器	(107)
三、交流标准电阻器	(118)
四、互感线圈	(140)

五、组合元件标准器	(142)
第二节 比例器	(151)
一、电阻器和电容器组成的比例器	(152)
二、感应式电压比例器	(155)
三、感应式电流比例器	(181)
四、有源比例器	(192)
第三节 平衡调节装置	(197)
一、逐位平衡调节装置	(197)
二、微差调节装置	(213)
第四节 指零仪及电源	(221)
一、指零仪(指示器)	(221)
二、交流电桥的电源	(224)

第三章 交流电桥的分类及基本线路

第一节 分类的方法与原则	(232)
第二节 阻抗比例器式电桥	(234)
一、 (C/C) 型电桥	(234)
二、 (L/L) R/R 型电感电桥	(242)
三、 (R/R) R/R 型电桥	(244)
四、 (C/L) R/R 型电桥	(246)
五、 T 型电桥	(258)
六、 Γ 型谐振线路	(263)
第三节 变压器电桥	(265)
一、变压器电桥的特性与优点	(265)
二、 $(C/C)VT$ 型电桥	(267)
三、五端电容变压器电桥	(280)
四、 $(R/R)VT$ 型电桥	(284)
五、 $(L/L)VT$ 型电桥	(287)
六、 $(C/L)VT$ 型电桥	(288)
第四节 感应式电流比较仪电桥	(291)

一、电流比较仪电桥的特点	(291)
二、 $(C/C)CT$ 型电桥	(292)
三、 $(R/R)CT$ 型电桥	(298)
四、 $(C/L_P)CT$ 型电桥	(300)
第五节 等功率测量电桥	(303)
一、简单的三端导纳等功率电桥	(304)
二、测量五端阻抗的等功率电桥	(306)
三、 (C/L) 等功率电桥	(308)
四、测量中值阻抗的等功率电桥	(310)
第六节 有源比例器电桥	(313)
一、 $(CR/L)OP$ 有源比例器电桥	(313)
二、 $(C/R)OP$ 型电桥	(316)
三、 $(C/M)OP$ 型及 $(R/M)OP$ 型电桥	(320)
第七节 微差补偿式电桥	(323)
一、半微差补偿电桥	(327)
二、两端口导纳微差电桥	(331)
三、四端阻抗比较仪	(336)
四、四端口导纳微差补偿电桥	(340)
第八节 不完全平衡电桥	(349)
一、不完全平衡电桥的特点	(349)
二、电源幅值波动对读数的影响	(350)
三、不平衡电桥的非线性问题	(352)
四、有两个可变元件的交流不平衡电桥	(360)
五、模拟式 LCR 测量仪	(361)
第九节 交流自动电桥	(364)
一、机械模拟式自动交流电桥	(365)
二、模拟式自动平衡电桥	(365)
三、微差式数字电桥	(375)
第十节 数字式阻抗测量仪	(379)

第四章 交流电桥的误差及屏蔽防护

第一节 交流电桥的误差	(390)
一、交流电桥的固有(基本)误差	(390)
二、交流电桥的附加误差	(397)
第二节 交流电桥的屏蔽防护	(402)
一、防护的原则和分析方法	(402)
二、消除寄生电耦合影响的方法	(404)
三、消除寄生磁耦合的方法	(432)
四、消除外界电磁场影响的方法	(434)
五、消除引线压降及负载影响的方法	(434)

第一章 交流电桥的原理

第一节 概 论

用交流电桥测定电路参数及比例，是最常用的方法之一。电桥测量法属于比较（差值）测量法，它比直接测量法有更高的准确度。所以广泛地应用于电子工业、电气工程及非电量电测量技术中。

交流电桥是从直流电桥引伸而发展起来的，因此从电桥原理至桥臂称呼，均沿用直流电桥。1865年麦克斯韦（Maxwell）用直流单臂电桥测量电感，是第一台交流电桥。先在直流下平衡电桥，然后利用开关反复接通或断开电源，由于电感中的电流变化，在电感上的感应电势为：

$$e = -L \frac{di}{dt}$$

使得检流计偏转，如果检流计的冲击特性已刻度，则可算出电感值。但是脉动电流引入的误差，使测量结果的准确度及重复性均很差。

第一台具有近代交流电桥特点的电桥，是在1891年由维恩（Max, Wien）提出，不久他又进行了改进^(1,2)，采用了小型电机提供近似的正弦波电压，如图1-1是以电感作标准、测量电感的电桥。由于使用了振动式检流计和准正弦波电源，使测量准确度和灵敏度均有所提高。

初期的交流电桥，直接用裸铜线连接各元件，元件本身也无屏蔽，所以测量误差大而且重复性亦差。1904年Camp-

bell 介绍了带屏蔽的交流电桥。而更完善的屏蔽电桥由

Ferguson 在 1929 年实现。瓦格纳 (Wagner)^[3] 在 1911 年采用了辅助接地支路, 用来消除端钮对屏蔽(地)的寄生泄漏误差。而对该理论的进一步完善则在 1929 年由 Ogaw 完成^[4]。

简单的屏蔽系统与辅助接地支路结合使用, 使交流电桥的测量精度进一步提高。几乎成为 1960 年以前精密交流电桥的共同特征。

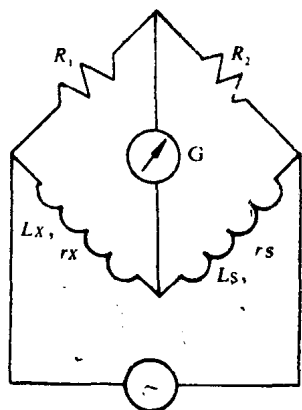


图 1-1 维恩电桥

由于采用了频率稳定、波形纯净的正弦波振荡器及改进了指示器, 使交流电桥的测量误差可小于 10^{-3} , 在此期间, 对交流电桥原理进行了系统深入的研究, 设计出很多电桥线路。

但是, 这些电桥共同的特点是用阻抗元件做比例臂, 人们现在把这类电桥通称为“经典电桥”。

1956 年, A. M. Thompson 成功地用变压器电桥测量微小电容^[5], $10:1$ 的比例误差小于 10^{-6} 。用感应分压器作为电桥的比例臂, 具有比例准确稳定、抗干扰能力强的优点, 得到了重视与推广。

变压器电桥的原理及应用早在 1928 年由 Blumlein^[6] 提出, 并设计了用自耦式分压器作为比例臂的交流电桥。在此以后 30 年中, 陆续有文章报导了这方面的工作^[7,8,9], 主要用于从工频扩展到音频下使用, 即利用感应分压器抗干扰能力强的特点, 而其比例误差在 10^{-4} 左右^[10], 即与阻抗式比例器的误差不相上下。由于其价格较贵、体积也较电阻元件

大，所以应用较少。随着理论研究和认识的深入，材料和工艺的进展，尤其是精密测量阻抗的需要，如用计算电容法绝对测定阻抗的需要^[11,12,13]，变压器电桥才日益推广。目前，测量误差小于 1×10^{-4} 的交流电桥，几乎都采用变压器电桥或电流比较仪式电桥，而且正在被推广用于非电量电测法中^[14,15,16,17,18,19,20,21]。

在此同时，由于电子技术的进展，负反馈放大器不但用于消除线路中的误差，而且作为有源比例器、有源元件、与感应式比例器一起组合出许多新颖的电桥线路。它们有很多新的特点是“经典电桥”不具备的。例如等功率测量及分别平衡的原则，微差补偿式电桥线路等等。

这些新型电桥为自动电桥提供了条件。1966年以后，交流自动电桥逐渐增多，但是，几乎很快就被数字式电桥所取代。80年以后生产的低精度电桥（1%—0.1%）大多数是带有内附微处理机的数字电桥，使得在测试方式、设计原则上均引起很大的改变。

如上所述，交流电桥的迅速进展，不但在线路形式上已不同于四臂电阻电桥的对称“桥式图形”，更主要的是对经典电桥的一些原则与结论需要修改或扩充。

本书在第一章中，首先讨论并约定交流电桥的定义，在遵重习惯、继承原先已成体系的理论的前提下，对定义进行部分修改，使之适应新的进展及各种新型交流电桥。

其次讨论了交流阻抗的定义，在测量阻抗时，必须根据其结构、性质及使用状态来选择线路，为了保证测量及使用状况的一致性，改善测量结果的重复性，需要对各种不同结构的阻抗元件规定明确的定义。实际上，随着测量准确度提高及量限向两端急剧扩展，目前已出现各种名称的定义，很不统一。而经典电桥的理论中，没有脱离直流电桥的约束，

主要按两端阻抗来考虑，仅在电桥线路中考虑静电屏蔽的作用。而近来出现的各种阻抗的定义，又都分散在各种专门的文章中，没有系统地归纳与整理。

关于交流电桥的平衡过程及灵敏度等，也在本章中进行了分析，提出实现分别平衡的原则与条件。

第二节 交流电桥的特点及定义

一、交流电桥的特点

交流电桥的特点主要是指它与直流电桥的区别：

(1) 交流电桥的电源是纯净的正弦波电源，所以在分析与计算时仅对基波而言。而高次谐波的影响，在误差分析中考虑。

(2) 交流电桥可以有几个电源，但它们的比例保持不变或准确可知。

(3) 交流电桥可以用线性电路的方法来分析，但对非线性元件及有源元件，需进行线性化处理（如规定频率、工作电流、工作电压及直流偏置电流、电压等，使得在规定的条件下为常量）。

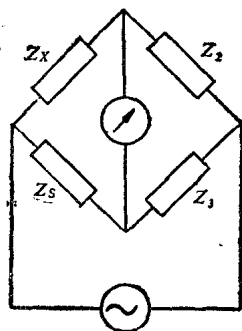


图 1-2 交流电桥基本电路

(4) 线路繁多，为了系统地研究它们，需要进行分类。因为即使是最简单的四臂电桥，各个桥臂可以由电阻、电容、电感元件不同的组合构成。

(5) 交流电桥至少需要有两个可调的参数，才能使电桥平衡。而且需满足一定的条件。

如图 1-2 所示的基本电路, 当电桥平衡时, 与直流电桥一样, 可用对臂阻抗的乘积相等这一简单规则, 得出电桥的平衡方程式:

$$Z_X Z_3 = Z_S Z_2 \quad (1-1)$$

将复数写成模及相角的形式:

$$\left. \begin{aligned} |Z_X| &= \left| \frac{Z_2}{Z_3} \right| \cdot |Z_S| \\ \theta_X &= \theta_2 + \theta_S - \theta_3 \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

可见要使电桥平衡, 既要满足幅值平衡, 又要使相角平衡。

二、交流电桥的定义

交流电桥一直沿用直流电桥的定义, 然后再考虑在交流情况下的特点。由于近 20 多年以来, 交流电桥得到了很大的进展, 使得有必要重新考虑交流电桥的定义。

对比经典的四臂电桥, 图 1-3 好象缺少了一半, 有的文章称它为“半电桥”或“非电桥”法。其实还是交流电桥, 它符合电桥法的基本原理与特点。当指零仪指零时, 在 D 点的电流相量和为零。这时, 由 $\Sigma I_D = 0$ 可得:

$$V(j\omega C_X + G_X) = VK_O j\omega C_S(1 + \alpha) + VK_G G_S(1 + \delta) \quad (1-3)$$

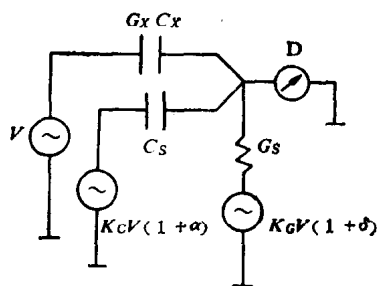


图 1-3 用“半电桥”法测量电容的原理图

C_X, G_X —被测电容器的电容值及并联电导;

K_O, K_G —实数比值;

α, δ —微差调节装置的读数

虚部与实部分别相等，则，

$$\left. \begin{aligned} C_x &= K_G C_S (1 + \alpha) \\ G_x &= K_G G_S (1 + \delta) \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

由式(1-4)可见，被测参数 C_x 及 G_x 的表达式中，没有参考电源 V 的数值，即测量结果与 V 的状态无关。同时，选择比例值 K_G 、 K_G 及调节 α 、 δ ，使指示器指零的过程是比较流过 C_x 及 C_S 的电流，符合“差值测量法”的原理。这两个特点正是电桥测量法的本质，因此，图1-3所示的半电桥线路，仍然是交流电桥线路。

但是，已和直流电桥的定义有不小的差别。首先，现在有三个工作电源，打破了传统电桥只有一个电源的限制；其次，电桥的比例器可以不用辅助的电阻构成；第三，原理性线路已与直流四臂电桥的对称图案很不一样。

为了澄清目前一些文献中称呼的混乱，下面用定义的形式说明交流电桥的性质。

1. 交流电桥的定义

交流电桥是用差值测量法比较两个交流电压或两个阻抗的线路。它是由正弦波电源、指示器、比例器、调节装置及进行比较的阻抗（或电压）组成的网络。

其中，比例器、指示器及调节装置组成测差环节，当测差环节所测的差值为零时，即电桥达到平衡，这时电桥的测量结果与参考电源的电压幅值无关。其特征是只有一个参考电源。

2. 交流电桥定义的进一步说明

(1) 电桥测量法是差值法中的一个独立的部分。

电气测量中可分成如下三种方法：直接读数法、平衡法（又分为差值法及零值法）及重合法。

直接读数法，指被测的量或由它所产生的效应直接用测

量仪表或量具来读数,如用伏特表或欧姆表测量电压或电阻。此方法决定于测量仪表的准确度,因而测量的准确度低。

差值法是采用已知的标准量 S , 与被测量 X 进行比较, 用仪表测出它们的差值。如:

$$\frac{X - S}{S} = 0.1\%$$

甚至用 1% 准确度的仪表来读数, 则所求得的 X 值, 其误差为 10^{-5} 。

用差值法测量的误差, 与标准及被测元件之间的差值 ($\Delta = X - S$) 大小有关, 当 Δ 很大, 则测量误差增加。如果能准确地把标准量值放大或缩小 K 倍, 然后再与 X 比较, 使得下式中

$$\frac{X - KS}{KS} = \delta$$

的 δ 数值很小, 那么用较低的准确度测定 δ , 仍可以准确地测定 X 的值。它仅取决于比例值 K 及已知标准量值 S 本身的误差。电桥测量法正是为了解决这个问题的方法, 所以电桥法是差值法中的一种。当 $\delta \rightarrow 0$ 时, 则电桥的指示器只是为了判断 δ 是否为零, 而没有刻度准确度的要求, 故一般称为平衡指示器或简称指零仪。这时称平衡电桥。

(2) 交流电桥不仅用于比较两个阻抗, 也适用于比较两个电势。

把图 1-2 所示线路中的两个阻抗 Z_x 及 Z_s 用等效电势来替代 (详见图 2-43), 这样对分析含有有源元件的电桥及自动电桥更为方便。

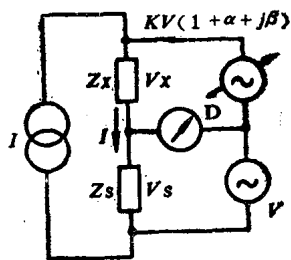


图 1-4 等电流法测量低阻抗的电桥

I —电流源; D —指零仪;
 V , $KV(1 + \alpha + j\beta)$ —电势源;
 α , β —可调电势源的同相分量及正交分量;
 V_x , V_s —分别对应 Z_x 及 Z_s 上的压降

当调节 α 及 β 使电桥平衡时, Z_x 与 Z_s 流过同一电流 I , 则只要求出 V_x 与 V_s 的比例, 就可得出 Z_x 的数值。即

$$\frac{Z_x}{Z_s} = \frac{IZ_x}{IZ_s} = \frac{V_x}{V_s} = \frac{KV(1+\alpha+j\beta)}{V} \quad (1-5)$$

由上式可得:

$$Z_x = K(1+\alpha+j\beta)Z_s \quad (1-6)$$

由式 (1-5) 及式 (1-6) 可见: 若 Z_x 及 Z_s 的比例已知时, 亦可测定两个未知电势的比例。如果其中一个电势已知, 进一步还可求出被比较的另一个电势, 这是对偶的。所以图 1-4 也可以看成是两个分压器进行比较, 脱离了经典电桥中比例臂必须用阻抗元件组成的限制 (参看图 3-61)。

(3) 交流电桥只有一个参考电源

如图 1-3 及图 1-4 等所示, 交流电桥可以有几个工作电源, 只要这些工作电源的比例准确已知。即各工作电源, 随着一个公共的参考电源作同步变化时, 电桥的平衡方程式中没有参考电源的电压幅值的因子。即不影响测量结果。故交流电桥必须和只有一个参考电源。

(4) 当电桥平衡时, 测量结果与参考电源的电压无关

在直流电桥法中已指出: 当差值为零, 即电桥平衡时, 测量结果与电源状态无关。但是在交流电桥中, 电源的“状态”所包括的含义较广, 如电源的频率、波形失真、电压 (包括幅值及相位) 等。对于与频率有关的电桥, 当频率变化、波形失真时, 会直接影响测量的结果, 但与电源电压无关。

对于与频率无关的电桥, 则可认为测量结果与电源的状态无关。

(5) 关于电桥的比例器说明

在直流电桥中均称为比例臂, 而且由电阻元件组成。经

典的交流电桥中，只是把电阻元件换成阻抗元件。但是对新型的交流电桥，如变压器电桥、有源比例器电桥及自动电桥等，用比例器的名称更确切，因它们在电桥线路中的作用是提供电流比或电压比的比例器，它可以是有源的乘法器、除法器、比例运算放大器或感应式比例器等。最近还采用数字合成得到的电压比例器，图 1-5 所示为数字化双正弦波振荡器电桥^[25]。

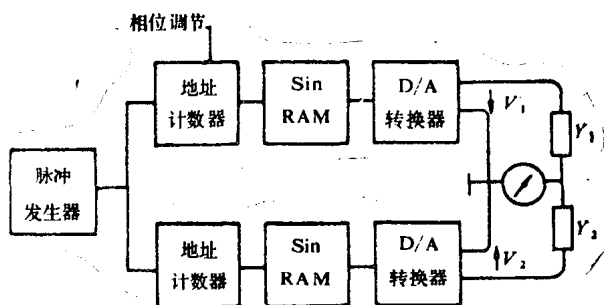


图 1-5 数字化双正弦波振荡器电桥

由图 1-5 可见，和经典的电桥线路相比，在形式上已大不一样，现在由随机存贮器 (RAM) 的数字信息，经数模转换器 (D/A) 给出相位及幅值均可精确调节的两个电压。因此可以比较任意性质的阻抗，可调电压 V_1 及 V_2 的频率稳定性可达 7×10^{-7} 。

(6) 交流平衡电桥的平衡表达式

交流电桥的平衡表达式，可用式 (1-6)' 所示的普遍公式表示：

$$Y_X = (K_I \cdot K_V) Y_S \quad (1-6)'$$

$$Z_X = (K_V \cdot K_I) Z_S \quad (1-6)''$$

式中： K_I ——电流比例器的比例（为复数）；

K_V ——电压比例器的比例（为复数）。

当 $K_I = 1$ 时，为等电流测量电桥，即标准和被测元件上流过同一电流。如变压器电桥等等。当 $K_V = 1$ 时，为等电压电桥，即标准及被测元件上加同一电压。如电流比较仪电桥等。而当 $K_V = K_I$ 时，则为等功率测量电桥，即电桥平衡时，标准及被测元件上的“视在功率”相等。

第三节 交流阻抗器的定义^[26,27]

在电工学中，根据复数形式的欧姆定律，对交流阻抗已有明确的定义：

$$Z = \frac{\dot{V}_{HL} \bullet}{I} \quad (1-7)$$

式中： $\dot{V}_{HL}$ ——元件两端的有效值电压相量（以后用 V_{HL} 表示）；

I ——流过元件的有效值电流相量（以后用 I 表示）；

Z ——复数阻抗， $Z = r + jX$

但是，对于一个阻抗器（元件），由于不可避免地存在对周围物体（地）的寄生导纳，使得流入元件端钮的电流 I_H 与流出另一端钮的电流 I_L 不一致。如图 1-6 所示：在元件各截面上通过的电流并不相等，那么式（1-7）中， I 究竟应取 I_H 还是 I_L 呢？

在测量准确度很低时，可以不区分 I_H 及 I_L 的差别。但

● $\dot{V}_{HL}$ 、 I 表示相量有效值电压和电流，由于本书只研究交流电桥的线路，规定电源为正弦波电源、桥路中的元件为线性元件（若有非线性元件，设已线性化处理），因此本书中所有的电参量如： E 、 V 、 I 等均表示相量，用大写斜体表示，而不再在上面打“圆点”，这样，不但与 IEC 及英文资料一致，而且不易发生书写及印刷差错。而电路参数 Z 、 Y 均按习惯表示复数。如果有直流电量则加角标表示，如 V_{DO} 等。

现代的交流电桥，由于测量的准确度提高，量限向高、低两端急剧扩展，频率范围从20Hz—1MHz。必须把上述的不确定因素加以固定或消除。因此，精度较高的阻抗器，均具有屏蔽保护。只有精度较低的元件，才不带屏蔽。

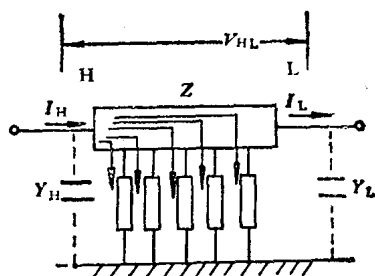


图 1-6 存在寄生导纳时的两端阻抗

由于量值大小、频率范围及使用情况不同，目前存在很多结构不同的阻抗器（主要指屏蔽连接方式及端钮结构不同），使得有必要对不同结构的阻抗器进行规定。如果测量与使用状态能按同一规定，则可使测量准确度及重复性大大提高。

一、无屏蔽的两端阻抗(器)的定义

如图 1-6 所示的无屏蔽两端阻抗器，把均匀分布的对地导纳等效成为两个端钮对地的导纳 Y_H 及 Y_L 。则端钮间的阻抗为：

$$Z_{HL} = \frac{Y_H + Y_L}{Y_H + Y_L + Y_H Y_L Z} \cdot Z \quad (1-7)'$$

公式 (1-7)' 即为无屏蔽的两端阻抗(器)的定义。由此可见： Z_{HL} 的数值与 Y_H 及 Y_L 的大小有关，如果元件的位置不固定，随着它对地或四周物体的位置改变， Y_H 与 Y_L 也随之变化。可见首先需把 Y_H 及 Y_L 的数值固定，其次把它们的影响降低到允许误差之内。这些寄生参数对电容器的影响更为显著，如图 1-7 所示。