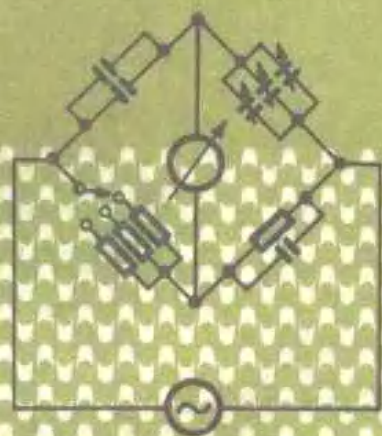


计量检定参考丛书

交流电桥检定 与测试技术

阮永顺 迈淑琴 王晓超 编著



中国计量出版社

1919-0.11

R.57-2

351542

计量检定参考丛书

交流电桥检定与测试技术

阮永顺 迈淑琴 王晓超 编著



中国计量出版社

7107/53

内 容 提 要

本书是检定规程参考资料系列书之一，主要根据《JJG 441—86交流电桥检定规程》编写。鉴于交流电桥的原理和结构较复杂，而且用量大，使用面广，在检定人员中存在许多各种各样的问题。本书作者在多次使用的学习班教材的基础上，结合各方面反映的问题编写了这本书。全书共分七章：1.交流电桥的基础知识；2.交流电桥的组成；3.交流电桥的基本线路；4.检定交流电桥所需的设备；5.交流电桥检定；6.数据处理及电桥准确度等级评定；7.电磁干扰对交流电桥的影响及其抑制方法。每章及书后还有复习题、总复习题和题解。

本书可作为计量及电力、工业等各部门从事交流电桥检定、制造、使用、调修的工作人员指导用书，也可作为培训班教材以及考核、定级升级的指导书。



中国计量出版社出版

北京和平里西街2号

中国计量出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

—#—

开本 787×1092/32 印张 11.876 字数 254 千字

1991 年 5 月第 1 版 1991 年 5 月第 1 次印刷

印数 1-7000

ISBN 7-5026-0405-7/TB·327

定价 6.00 元

序

交流电桥是广泛应用于电工测量、电子测量及很多非电量测量中的重要计量器具。为了按照我国计量法对交流电桥进行检定、管理，原国家计量局颁布了《JJG 441—86 交流电桥检定规程》。在贯彻执行该规程的过程中，各地从事与交流电桥检定、使用和设计制造有关工作的许多单位和个人反映，鉴于交流电桥是一种用途广、种类多，原理和结构复杂的仪器，有必要组织编写一本系统阐述交流电桥基础知识、检定方法的书，以利于对检定规程内容的统一理解和正确贯彻，同时帮助提高交流电桥检定、调修人员的技术水平。为此，该规程主要起草人阮永顺等同志，以编写规程过程中积累的大量资料，在为宣讲、贯彻该规程而编写的、经过多次使用和修改补充的讲稿的基础上着力编写了本书。因此，我们相信，本书具有良好的实用性。

国家技术监督局计量司
量值传递处

编 者 的 话

本书是交流电桥检定规程 (JJG 441—86) 的参考资料。结合检定规程, 系统介绍交流电桥的原理、结构和实用线路; 着重介绍检定和测试交流电桥各项性能的具体方法、所需的标准器具、实验设备及条件。对检定结果的不确定度分析、实验数据处理方法及电磁干扰的抑制方法也作了详细叙述。

本书根据 1988 年交流电桥检定规程宣贯会资料和 1989 年学习班教材, 并根据与会同行专家们的宝贵意见进行修改, 增加了必要的图表、习题和题解, 三易其稿而成。

在本书编写过程中, 得到许多同行专家的帮助和支持, 技术监督局量传处罗振之同志审定了编写大纲, 金士杰同志主审定稿, 在此一并表示衷心感谢。

本书第二、三章由王晓超编写; 第四、五章由迈淑琴编写; 其余各章由阮永顺编写, 最后由金士杰审校。

编 者

1989 年 12 月

目 录

第一章 交流电桥的基础知识

§ 1.1 交流电桥的工作原理	(1)
一、交流电桥的定义	(2)
二、平衡条件	(3)
三、交流电桥的灵敏度	(4)
四、交流电桥的收敛性和收敛角	(9)
五、调节参数选择的原则	(16)
六、交流电桥的辅助接地支路	(17)
§ 1.2 交流电桥常用的术语	(18)
§ 1.3 交流电桥的误差分析	(20)
一、交流电桥的基本误差	(20)
二、附加误差	(29)
习题一	(34)
题解	(35)

第二章 交流电桥的组成

§ 2.1 交流电桥的电源和指示器	(42)
一、交流电桥的电源	(42)
二、交流指示器	(43)
§ 2.2 交流电桥的比例器	(44)
一、阻抗式比例器	(45)

二、感应式比例器	(46)
§ 2.3 交流电桥的标准器与被测元件	(56)
一、内附标准电容器	(57)
二、内附标准电感器	(64)
三、内附交流标准电阻器	(64)
四、被测元件	(69)
五、交流电桥的调节装置及平衡方式	(74)
习题二	(76)
题解	(77)

第三章 交流电桥的基本线路

§ 3.1 电容电桥	(84)
一、测量中值电容的电桥	(84)
二、测量小容量的电容电桥	(103)
三、测量大电容的电桥	(118)
§ 3.2 电感电桥	(121)
一、测量空心电感的电桥	(121)
二、测量铁心电感的电桥	(128)
§ 3.3 电阻电桥	(133)
一、电阻比例臂(R/R) R/R 型电阻电桥	(133)
二、电流比较仪式电阻电桥	(135)
§ 3.4 万用电桥	(136)
§ 3.5 自动数字式交流电桥	(138)
一、双正弦数字电源自动电桥	(139)
二、用程控感应分压器的自动音频电容电桥	(141)
三、程控电流比较仪自动工频电容电桥	(144)
四、自动交流电位差计式阻抗测量仪	(146)
五、高频数字式阻抗测量仪	(147)
六、低频数字式阻抗测量仪	(151)

习题三	(153)
题解	(154)

第四章 检定交流电桥所需的设备

§ 4.1 选择标准器的原则	(161)
一、按准确度等级选择所需的标准器	(161)
二、按照电桥的量程选择标准器	(162)
三、检定时参考条件的选择	(163)
四、工作电压(或电流)的选择	(164)
五、按照被检电桥的屏蔽方式选择标准器	(164)
六、标准器等效线路的选择	(165)
§ 4.2 电容标准量具	(166)
一、标准电容器	(166)
二、可变电容器	(169)
三、标准电容箱	(170)
四、标准大电容箱	(171)
§ 4.3 标准电感量具	(172)
一、标准电感器	(172)
二、标准电感箱	(179)
§ 4.4 交流标准电阻器	(179)
一、单值交、直流电阻器	(181)
二、多十进盘步进式交流/直流电阻箱	(181)
§ 4.5 损耗因数标准器	(183)
一、串联式电容损耗因数标准器	(183)
二、并联式损耗因数标准器	(184)
§ 4.6 电阻时间常数标准器	(185)
习题四	(186)
题解	(187)

第五章 交流电桥检定

§ 5.1 检定的任务、意义及规程适用范围	(192)
§ 5.2 交流电桥的技术要求	(193)
§ 5.3 检定时的参考条件及标称使用范围	(196)
一、检定时的参考条件	(196)
二、标称使用范围极限及允许变差	(197)
三、附加的电气与机械性能要求	(198)
§ 5.4 检定项目及测试方法	(200)
一、附加机械及一般电气性能的检查	(200)
二、测定电桥的基本误差	(202)
三、测定电桥的附加误差	(203)
§ 5.5 确定基本误差的方法	(203)
一、整体检定法	(203)
二、按元件检定法	(218)
三、按部件检定法	(218)
§ 5.6 部分型号电桥的检定举例	(221)
一、变压器比例臂电桥的检定	(221)
二、C3020/RT 电桥的检定	(232)
三、AC1100型万用电桥的检定	(238)
习题五	(244)
题解	(245)

第六章 数据处理及电桥准确度等级评定

§ 6.1 数据处理	(253)
一、检定记录	(253)
二、对已知系统误差进行修正	(253)

三、随机误差的估算及粗大误差剔除	(258)
四、检定结果不确定度的计算	(258)
五、测量数据的有效数字	(262)
六、电桥各十进盘示值检定结果的有效数字位数选择	(265)
§ 6.2 电桥准确度等级的评定	(267)
一、根据被检电桥示值误差评定基本误差	(268)
二、交流电桥稳定性规定	(276)
三、调整误差与准确度等级的关系	(278)
四、检定周期	(278)
习题六	(280)
题解	(280)

第七章 电磁干扰对交流电桥的 影响及其抑制方法

§ 7.1 概述	(285)
一、抑制电磁干扰的重要性	(285)
二、电磁干扰的来源及传播方式	(285)
三、感应电磁场干扰的分类	(288)
§ 7.2 抑制干扰电磁场的方法	(289)
一、抑制电场耦合的方法	(289)
二、抑制干扰磁场的方法	(291)
§ 7.3 屏蔽防护的原理	(295)
一、屏蔽的作用及分类	(295)
二、电屏蔽	(295)
三、磁屏蔽	(300)
四、电磁屏蔽	(302)
§ 7.4 阻抗元件及其连接导线的屏蔽	(307)

一、单极屏蔽	(308)
二、等电位屏蔽 (线路屏蔽)	(310)
三、多重屏蔽	(314)
四、引线的屏蔽	(314)
§ 7.5 屏蔽对阻抗元件的影响	(315)
一、屏蔽对电阻元件的影响	(315)
二、屏蔽对电容元件的影响	(318)
三、屏蔽对电感元件的影响	(319)
§ 7.6 对称接地辅助支路的应用	(319)
一、对称性在交流电桥防护中的作用	(319)
二、对称接地辅助支路的原理	(322)
§ 7.7 接地	(324)
一、选择接地点的原则	(324)
二、感应耦合比例器电桥的接地点选择	(324)
三、阻抗比例臂电桥接地点选择	(325)
§ 7.8 隔离和隔离变压器的应用	(326)
§ 7.9 交流电桥的屏蔽与防护举例	(327)
一、指零仪处于地电位的电桥的屏蔽防护	(327)
二、指零仪支路不等于地电位时的屏蔽	(329)
习题七	(331)
题解	(332)
总复习题	(335)
题解	(341)

第一章 交流电桥的基础知识

§ 1.1 交流电桥的工作原理

交流电桥是从直流电桥引伸发展起来的，因此，从电桥的原理到名词术语，很多均沿用直流电桥。图 1-1 所示为最简单的四臂交流电桥线路。

由图 1-1 可见，把直流四臂电桥的四个电阻臂换成阻抗臂，用正弦波电源及交流指示器替换直流电源及检流计，可组成最简单的交流电桥。当指示器两端的电位相等（即 Z_x 及 Z_s 上电压相等，故又称等电压电桥）、指示器指零时，电桥平衡。因此可得出

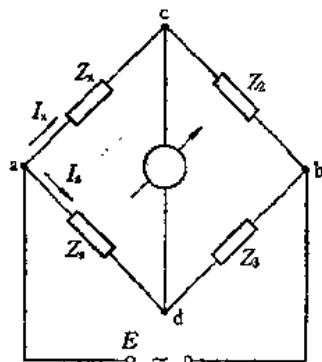


图 1-1 交流电桥基本线路

$$U_x = U_s^*$$

即

$$I_x Z_x = I_s Z_s \quad (1-1)$$

当指示器（又称指零仪）的灵敏度足够高时，可认为指示器支路电流为零，则

*本书中的电参量用黑体表示为矢量，如 U 、 E 、 I 等为有效值电压、电势、电流矢量，而 Z 、 Y 均按习惯表示为复数阻抗和导纳。比例 K 表示复数，而 k 为其实数部分（简称倍率或比值）。

$$I_s = \frac{U}{Z_x + Z_2} \quad (1-2)$$

$$I_s = \frac{U}{Z_s + Z_1} \quad (1-3)$$

把式 (1-2) 及式 (1-3) 代入式 (1-1) 可得

$$Z_x Z_s = Z_1 Z_2 \quad (1-4)$$

式 (1-4) 称为交流电桥的平衡方程式，亦称电桥的平衡条件。所以，交流四臂电桥与直流四臂电桥有相似的平衡方程式，即电桥相对臂的阻抗乘积相等。以后可不再进行平衡公式推导，而直接用这一规律。但是，上面仅指形式上相似，实际上有较大的差别，下面将分别叙述。

1. 交流电桥的定义

首先介绍直流电桥的定义：“至少含三个电阻臂的组合物，加上被测电阻器就构成一个电桥网络。电桥工作时，需要一个直流电源和一个指零仪。电桥平衡时，各电阻器的阻值之间存在一个可计算的关系”。

与直流电桥类似，交流电桥的定义为：“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、比例器及进行比较的两个阻抗(或电压)组成的网络，调节比例器或内附标准器使指示器示值为零，则被比较的阻抗间存在一个可计算的关系，而与电源的电压幅值无关”。

由此可见，交流电桥与直流电桥一样，均为利用比例器使已知标准的量值扩大或缩小若干倍，使得与被测量相接近，然后测量它们的差值。因此，甚至用比较粗糙的指示器，差值法也能得到高准确度的测量结果。调节平衡装置使上述差值为零，则指示器仅用于指示零位，对其示值的刻度

准确度无要求。所以，平衡电桥为零值测量法的线路比直接测量法更精确。

二、平衡条件

由交流电桥的定义可知，当电桥平衡时，测量结果与电源的电压值无关。因此，不管电桥的具体线路如何，均可用下列关系式表示：

$$Z_x = KZ_s \quad (1-5)$$

式中 K ——电桥比例器的比例，为复数；

Z_x ——被测阻抗；

Z_s ——电桥内附标准阻抗。

把式 (1-5) 中的复数用模及相角表示，则

$$\left. \begin{aligned} |Z_x| &= |K| \cdot |Z_s| \\ \theta_x &= \theta_K + \theta_s \end{aligned} \right\} \quad (1-6)$$

由式 (1-6) 可见，要使交流电桥平衡，既要满足幅值平衡，又要满足相角平衡。因此，至少应有两个可调节元件。如图 1-1 所示的电桥线路，其平衡条件为

$$\left. \begin{aligned} |Z_x| &= \frac{|Z_2|}{|Z_3|} \cdot |Z_s| \\ \theta_x &= \theta_s + \theta_2 - \theta_3 \end{aligned} \right\} \quad (1-7)$$

式 (1-7) 与式 (1-6) 比较，可见 Z_2 及 Z_3 组成比例器，即

$$\left. \begin{aligned} |K| &= |Z_2| / |Z_3| \\ \theta_K &= \theta_2 - \theta_3 \end{aligned} \right\} \quad (1-8)$$

交流电桥的比例臂与直流电桥的比例臂相类似，但不一定由电阻器组成。交流电桥的比例臂结构形式更多样化，可由电阻比例器、电容比例器、感应式比例器或有源比例器组成。

三、交流电桥的灵敏度

交流电桥的灵敏度是指在标称电压（电流）下，平衡状态附近分辨被测阻抗微小增量的能力，可用下式定量表示：

$$S_b = \frac{\Delta L}{\Delta X} \quad (1-9)$$

式中 ΔL ——指零仪偏转的格数（或距离、角度、数字显示值等）；

ΔX ——被测阻抗的增量或调节参数的增量；

S_b ——电桥整体装置的灵敏度。

当调节量有微小增量 ΔX 引起电桥输出端失衡电压的变化量 ΔU 时，它们的比值称为电桥的线路灵敏度 S_e ：

$$S_e = \frac{\Delta U}{\Delta X} \quad (1-10)$$

而指零仪一般作为多用途的通用仪器，它的灵敏度 S_d 为

$$S_d = \frac{\Delta L}{\Delta U} \quad (1-11)$$

由上述三式可得出

$$S_b = \frac{\Delta L}{\Delta X} = \frac{\Delta U}{\Delta X} \cdot \frac{\Delta L}{\Delta U} = S_e \cdot S_d \quad (1-12)$$

所以，电桥灵敏度 S_b 为线路灵敏度 S_e 与指零仪灵敏度 S_d 的乘积。本节只讨论线路灵敏度，因为指零仪作为外附的通用仪器，当选定一种型号的指零仪后，其灵敏度亦已确定。

如图 1-1 所示四臂交流电桥，当 Z_x 变化时，求电桥的不平衡输出电压。

设指零仪的输入阻抗为无限大，电源内阻可忽略，并令指零仪的一端（d点）为地电位，用节点电压法求得指零仪另一端c点的电位 U_c 为

$$U_c = \frac{U_a Y_x - U_b Y_2}{Y_x + Y_2} \quad (1-13)$$

因为在电桥接近平衡时， $U_c \approx U_d$ ，而且一般情况下，指零仪的输入阻抗很大（通常为 100 MΩ 与 20 pF 并联值），所以可认为指零仪支路不流过电流，可得a点及b点（参看图 1-1）的电位为

$$U_a = \frac{U_{ab} Z_2}{Z_2 + Z_3} = \frac{U_{ab} Y_3}{Y_2 + Y_3}$$

$$U_b = \frac{U_{ab} Y_1}{Y_1 + Y_2}$$

代入式 (1-13)，则

$$U_c = U_{ab} \frac{Y_x Y_3 - Y_2 Y_1}{(Y_x + Y_2)(Y_2 + Y_3)} \quad (1-14)$$

当 Y_x 有一微小增量 ΔY_x 时

$$\Delta U_c = \frac{U_{ab}}{Y_2 + Y_3} \cdot \frac{Y_3(Y_x + Y_2) - (Y_x Y_3 - Y_2 Y_1)}{(Y_x + Y_2)^2} \cdot \Delta Y_x$$

因为是求电桥平衡状态附近的增量，在电桥平衡时，由式 (1-4) 及式 (1-14) 可得

$$Y_x Y_3 - Y_2 Y_1 = 0 \quad (1-15)$$

$$\Delta U_c = \frac{U_{ab} Y_3 \Delta Y_x}{(Y_2 + Y_3)(Y_x + Y_2)} \quad (1-16)$$

由式 (1-15) 可得：

$$\frac{Y_x}{Y_2} = \frac{Y_1}{Y_3} = K$$

式中, K 即为电桥比例臂的比例 (为复数, 其实数分量称为量程因数或倍率)。

所以

$$\Delta U_0 = U_{ab} \cdot \frac{K}{(1+K)^2} \cdot \frac{\Delta Y_x}{Y_x} \quad (1-17)$$

不管哪一类电桥, 均可用式 (1-17) 来计算电桥的不平衡电压, 因此具有普遍的意义⁽¹⁰⁾。由式 (1-17) 可见, 不平衡电压 ΔU_0 由三项因子决定, 现分别讨论如下。

1. 电桥工作电压 U_{ab} 提高 U_{ab} 可以增加电桥的电压灵敏度, 但是受到被测元件的允许电压及电桥结构的限制。为了降低元件自热效应及电压系数的影响, 目前, 精密电桥均采用较低电压下进行测量, 一般低于 200V, 而数字电桥在 1~5 V 下测量。

2. 线路的相对电压灵敏度 S_v^0 式 (1-13) 中, 第二项因子称为电桥线路的相对电压灵敏度, 记作 S_v^0 , 即:

$$S_v^0 = \frac{\frac{\Delta U_0}{U_{ab}}}{\frac{\Delta Y_x}{Y_x}} = \frac{K}{(1+K)^2} \quad (1-18)$$

由式 (1-18) 可见: 线路的相对电压灵敏度是在单位工作电压下 (即 $U_{ab} = 1$ V) 的线路电压灵敏度; 也即是调节量相对变化时, 不平衡电压的相对增量 (以工作电压为参考)。

S_v^0 还与比例器的复数比例 K 有关, 令

$$K = ke^{j\theta}$$

则: