



中华人民共和国国家计量检定规程

JJG 441—2008

交 流 电 桥

Alternating Current Bridge

2008-04-23 发布

2008-10-23 实施

国家质量监督检验检疫总局 发布

交流电桥检定规程

Verification Regulation of
Alternating Current Bridge

JJG 441 2008
代替 JJG 441 1986

本规程经国家质量监督检验检疫总局于 2008 年 4 月 23 日批准，并自 2008 年 10 月 23 日起施行。

归口单位：全国电磁计量技术委员会

起草单位：中国计量科学研究院

本规程委托全国电磁计量技术委员会负责解释

本规程主要起草人：

王晓超（中国计量科学研究院）

阮永顺（中国计量科学研究院）

参加起草人：

陆 青（中国计量科学研究院）

目 录

1 范围	(1)
2 引用文献	(1)
3 概述	(1)
4 名词术语	(1)
5 计量性能要求	(2)
5.1 交流电桥主参量和副参量的基本误差	(2)
5.2 交流电桥的准确度等级	(2)
5.3 灵敏度	(2)
5.4 绝缘电阻	(2)
5.5 绝缘强度	(2)
5.6 影响量的参考条件及允许变差	(3)
6 通用技术要求	(3)
6.1 外观及线路	(3)
6.2 标记	(3)
6.3 屏蔽及连接方式	(3)
6.4 技术文件	(3)
7 计量器具控制	(3)
7.1 检定条件	(3)
7.2 检定用设备	(4)
7.3 检定项目和检定方法	(5)
7.4 检定结果的处理	(11)
7.5 检定周期	(11)
附录 A 组合式损耗因数标准器及品质因数标准器	(12)
附录 B 若干典型交流电桥的具体检定步骤实例	(14)
附录 C 原始记录格式	(16)
附录 D 附表	(18)
附录 E 检定证书内页格式	(19)

交流电桥检定规程

1 范围

本规程适用于交流电桥的首次检定、后续检定和使用中的检验。交流电桥的工作频率限于 20Hz 至 100kHz 范围内, 工作电压不大于 500V; 准确度范围 0.001 级及以下。

本规程不适用于高压电桥、LCR 阻抗测量仪和自动平衡电桥的检定。

2 引用文献

JJF 1001—1998《通用计量术语及定义》

JJG 2073—1990《损耗因数计量器具检定系统》

JJG 2075—1990《电容计量器具检定系统》

JJG 2076—1990《电感计量器具检定系统》

JJG 183—1992《标准电容器检定规程》

JJG 726—1991《标准电感器检定规程》

IEC 477-2—1979《实验室用交流电阻器》

使用本规程时, 应注意上述引用文献的现行有效版本。

3 概述

交流电桥是用差值测量法比较两个交流阻抗的原理, 测量阻抗元件的主参量和副参量的装置。交流电桥由比例器、标准器、正弦波电源、指示器(指零仪)、调节装置及被测阻抗元件构成。

按平衡原理, 可分为等电流、等电压和等功率电桥。按被测对象(用途), 可分为电容电桥、电阻电桥、电感电桥和万用电桥。按平衡方式, 可分为完全平衡与不完全平衡两类电桥。

4 名词术语

主参量 major parameter

交流阻抗元件“电感器”、“电容器”和“电阻器”的 L 、 C 和 R 量值。

副参量 sacont parameter

交流阻抗元件“电感器”、“电容器”和“电阻器”的正交分量 Q 、 D 和 τ 量值。

基本测量范围 intrinsic measuring range

电桥测量范围内, 允许误差最小的测量范围。

扩展测量范围 expanded measuring range

电桥测量范围内, 除去基本测量范围以外的其他测量范围。

基本误差 intrinsic error (IEC 311-03-08)

电桥在参考条件下、基本测量范围内的示值误差。

基本准确度 intrinsic accuracy 或 basic accuracy

电桥在参考条件下, 在基本测量范围内的准确度。

灵敏度 sensitivity

通常用最小量程的一个最小显示单位值表示, 或用给定量限的测量上限与最小显示值之比来表示。

换位法 permuting method

将两只标准器依次分别接入电桥的标准端和被测端, 分别取得两次接入电桥平衡时的测量差值数据的测量方法。

5 计量性能要求

受检交流电桥应符合下列计量特性:

5.1 交流电桥主参量和副参量的基本误差

定义为:

$$\delta_{X_{\text{lim}}} = \pm A \left(1 + \frac{R_N}{KX} \right) \% \quad (1)$$

$$\Delta X_{\text{lim}} = \pm \frac{A}{100} \left(X + \frac{R_N}{K} \right) \quad (2)$$

$$\Delta Y_{\text{lim}} = \pm \frac{B}{100} (Y + Y_0) \quad (3)$$

式中 $\delta_{X_{\text{lim}}}$ ——主参量允许的相对误差极限;

ΔX_{lim} ——主参量允许的绝对误差极限, 单位为 Ω , H, F;

ΔY_{lim} ——副参量允许的绝对误差极限;

A、B——分别为主参量、副参量的准确度等级指数;

K——系数, 一般取 $K \geq 10$;

X、Y——分别为主参量、副参量的电桥示值;

Y_0 ——电桥本身副参量固有的绝对误差;

R_N ——引用值, 常为最大读数盘的 10 或 1 的示值, 单位为 Ω , H, F。

对于多频率及宽测量范围的电桥, 一般只列出基本量程和主频率下的准确度等级指数, 其他频率和量程用公式或曲线图表示, 低于最佳准确度。

5.2 交流电桥的准确度等级

0.001, 0.002, 0.005, 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 5。

5.3 灵敏度

测量主参量 (L, C, R) 时的灵敏度, 对测量结果的影响应不大于对应主参量基本误差的 1/5~1/10。测量副参量 (Q, D, τ 等) 时的灵敏度, 对测量结果的影响可放宽为对应副参量基本误差的 1/3~1/5。

5.4 绝缘电阻

电桥线路与屏蔽外壳绝缘电阻不小于 100M Ω 。

5.5 绝缘强度

电桥线路与屏蔽外壳或可接触的金属部件之间应能承受 3 倍额定工作电压 (50 Hz),

历时 1 min, 无击穿或飞弧现象 (当电桥有直流电源及线路直接接地线时, 应先断开直流电源及接地点)。

5.6 影响量的参考条件及允许变差

电桥的技术文件中, 应明确标出检定时影响量的参考条件及其允许变差, 应符合本规程检定参考条件的规定 (见表 1), 若不符合 (例如 23℃ 下校准), 则应列出修正系数。

6 通用技术要求

6.1 外观及线路

电桥及其配套器件外观应完好, 线路转换开关或按键定位清晰准确, 接插件接触良好。

6.2 标记

符合国家标准文件有关规定。其中应包括: 电桥的名称、型号、生产厂 (或商标)、出厂日期、出厂编号、开关、接线端及按键的标记。

6.3 屏蔽及连接方式

受检电桥的技术文件中, 应指明检定时的连接方式及屏蔽方式, 如: 三端、两端、四端 (五端), 同轴电缆的允许长度等。

6.4 技术文件

技术资料完整。

6.4.1 技术指标, 包括: 测量范围、准确度等级

6.4.2 基本工作原理介绍

6.4.3 操作手册

7 计量器具控制

计量器具控制包括: 首次检定、后续检定和使用中检验的检定条件、检定用设备、检定项目、检定方法、检定结果的处理和检定周期的规定。

7.1 检定条件

包括: 首次检定、后续检定和使用中检验。

在确定基本误差时, 各影响量的参考条件列于表 1。

表 1 影响量的参考条件和允许变差

影响量	电桥等级	参考条件及允许变差
环境温度	0.001~0.002	20℃±0.5℃
	0.005~0.05	20℃±1.0℃
	0.1~5	20℃±2.0℃ ^a
相对湿度	0.001~0.002	(50%±10%)RH
	0.005~0.05	(50%±15%)RH
	0.1~5	(50%±30%)RH

表 1 (续)

影响量	电桥等级	参考条件及允许变差
外磁场	0.01~5	$(0 \pm 0.5) \text{ mT}^{\text{②}}$
频率	0.01~5	额定值 $\pm 2\%$ ^③
电压	0.01~5	额定值 $\pm 10\%$
注：①若生产厂规定不符合本参考温度（如 23℃，27℃），应给出温度系数，否则仍以 20℃下判断其基本误差。 ②电感电桥，按 JJG 2076—1990 的要求。 ③与频率有关的被测参量（如 D 值），按标准器要求。		

7.2 检定用设备

标准计量器具的最大允许误差应不超过表 2 的规定。

表 2 标准计量器具的最大允许误差

受检电桥的准确度等级指数/(%)	标准器具的最大允许误差与受检电桥的最大允许误差之比	
	主参量 (R、L、C)	副参量 (D、Q、 τ)
0.01, 0.02, 0.05, 0.1~5	$\leq \frac{1}{4}$	$\leq \frac{1}{3}$; (当 $D > 2 \times 10^{-4}$, 或 $Q < 100$)
0.001, 0.002, 0.005	$\leq \frac{1}{3}$	$\leq \frac{1}{2}$; (当 $D < 2 \times 10^{-4}$, 或 $Q > 100$)

标准器的接头和屏蔽方式应与被检电桥测试端相匹配，否则应进行修正，修正值的附加误差应小于被检电桥最大允许误差的 1/5~1/10。

7.2.1 标准电容器、电容箱

按照表 1 的规定，选择合适的标准电容器或电容箱。其量值及频率特性应能覆盖被检电桥量程及频率范围。

7.2.2 标准电感器、电感箱

按照表 1 的要求，选择合适的标准电感器（箱）。标准器的量程应覆盖被检电桥在 1kHz（或 100Hz）下的量程。

7.2.3 交流标准电阻器、电阻箱

参照 IEC 477—1979 文件的技术指标，在使用频率范围内选择。

7.2.4 损耗因数标准器

用组合电容损耗因数标准器的容量值应为：100pF~0.1μF；损耗因数 D 值为： $10^{-1} \sim 10^{-4}$ ，允许误差为： $\pm (2\% D + 5 \times 10^{-5})$ 。组合标准器中的各元件允许误差及频率误差，应小于组合标准器 D 值允许误差的 1/5。

7.2.5 频率计

测量范围：1 Hz~1 MHz；

允许误差： $\pm (1 \times 10^{-5})$ 。

7.2.6 数字多用表

频率范围：20Hz~100kHz；

测量电压范围：10mV~1kV；

允许误差：±(0.5%~2%)。

7.2.7 绝缘电阻表

允许误差：<20%；

测量范围： $\geq 500\text{M}\Omega$ ；

额定电压：1 000V。

7.3 检定项目和检定方法

首次检定、后续检定和使用中检验的项目如表 3 所示。

表 3 检定项目表

检定项目	首次检定	周期检定	使用中检验
外观检查	+	+	+
绝缘电阻	+	+	+
绝缘强度	+	—	—
测试频率	+	—	+
测试电压	+	—	—
主参量示值误差	+	+	+
副参量示值误差	+	+	—

注：“+”表示该项目检定；“—”表示该项目可不检定；修理后检定按首次检定执行。

7.3.1 外观检查

7.3.1.1 应按制造厂的技术说明书，检查电桥的完整性。

7.3.1.2 电桥接线端钮完好，标记应清晰。

7.3.1.3 电桥的旋钮定位正确、刻度清晰、接触应良好，否则应修复后再检定。

7.3.2 安全性能试验

7.3.2.1 绝缘电阻试验

按 5.4 条规定，施加 500V~1 000V 直流电压，持续 1 min 电阻值保持不小于 100M Ω 。

7.3.2.2 绝缘强度试验

按 5.5 条规定，试验电压应平稳地升到规定的电压，保持 1 min，然后平稳地降到零。在电压试验中不出现击穿或放电现象。

7.3.3 设置准确度检查

7.3.3.1 设置频率的检查

用频率计测量电桥设定的频率量值，测量频率的误差引入主、副参量的误差，应小于被检电桥允许误差的 1/10。

7.3.3.2 设置电压的检查

用电压表测定电桥设定的电压标称值，电压示值误差引入主、副参量示值的误差，

应小于被检电桥允许误差的 1/10。

7.3.4 电桥示值误差的检定

7.3.4.1 检定条件的选择

检定时，应按下列项目正确选择检定条件。

7.3.4.1.1 工作频率的选择

在被检电桥技术条件所规定的校准频率下检定。若被检电桥没有具体规定，按下列测量范围选择检定频率：

主参量量限为 $0.1\text{fF}\sim 1\mu\text{F}$ ， $10\text{pH}\sim 0.1\text{H}$ ， $10\text{m}\Omega\sim 10\text{M}\Omega$ 时，检定频率选择 1kHz 。

主参量量限为 $\geq 1\mu\text{F}$ ， $\geq 1\text{H}$ ， $> 10\text{M}\Omega$ 时，检定频率选择 100Hz 。

7.3.4.1.2 基本量程的选择

宽测量范围的电桥往往分成几个子量程，应按该电桥技术文件规定，主要检定基本量程的基本误差（有时可有几个基本量程，则各基本量程均应检定）。若该电桥无此规定时，则选择准确度最高的量程或比例器的比值为 1 时的量程。

7.3.4.1.3 电桥工作电压的选择

当用标准器检定电桥时，所选取的工作电压应兼顾标准器和被检电桥两者的规定，选择其中较小的量值。

7.3.4.1.4 屏蔽及接头匹配选择

交流电桥和相应的标准器以三端（三电极）测量方式为主，若采用其他屏蔽连接方式，应按电桥规定的屏蔽方式进行检定。若标准器的屏蔽方式或结构与电桥不匹配，应采用转换器或特殊连接方式进行连接，并修正由此引入的附加误差（附录 A）。

7.3.4.1.5 电缆长度的选择

按被检电桥的说明书中规定的长度选择测量线，若不能完全按照规定要求，则需对电缆连接线引入的附加误差进行修正。

7.3.4.1.6 放置时间

被检电桥检定前应存放在表 1 所示的环境条件下足够的时间。一般应满足下列规定：

0.001~0.05 级 存放 8 小时以上

0.1~5 级 存放 4 小时以上

7.3.4.2 整体检定法

整体检定法是在参考条件下，用相应的标准器作为电桥的被测量对象，确定被检电桥的示值误差的方法。一般采用两种方法进行：

(1) 电桥读数法：接入相应的标准（电容、电阻、电感、损耗因数）器（箱）。将标准器盘（位）对应被检电桥十进读数盘示值 S ，除被测十进盘外，其余主要十进盘均置于零位。通过调节被检电桥读数盘使电桥平衡。并记录电桥对应标准器的显示值。

(2) 标准器读数法：接入被检电桥的标准（电容、电阻、电感、损耗因数）箱的十进盘位数应多于被检电桥读数盘位数，将电桥被检参量的十进盘（位）置于 X ，其余十进盘位均置于零位。通过调节标准箱的末位盘和被检电桥的正交参量读数盘，使电桥平衡。并记录标准器对应电桥的示值 S 。

7.3.4.2.1 电桥主参量示值的检定

电桥主参量示值的检定按整体检定法进行,记录其主参量的读数。

电桥示值的基本误差按下式计算:

$$\text{绝对误差: } \Delta = X - S \quad (4)$$

$$\text{相对误差: } \delta = \frac{X - S}{S} \quad (5)$$

式中 X ——被检电桥(显)示值;

S ——标准器的实际(示值)值。

对于多位十进盘示值的电桥,各盘的误差分配见附录 D。

7.3.4.2.2 电桥副参量示值误差的检定

被检电桥损耗因数(D)、品质因数(Q)及时间常数(τ)示值误差的检定。应用相应的 D 、 Q 或 τ 标准器作为被测对象,按整体检定法进行检定(见附录 A)。

组合式标准器中的主参量值(C 、 L 、 R)应在被检电桥的基本量程内,并且只在1kHz下定值及检定。

7.3.4.2.2.1 对于能分别读出主参量和副参量的交流电桥,按整体检定法,用相应的标准器直接检定副参量的示值误差。

7.3.4.2.2.2 对于只给出主分量的准确度指标,而未给出副参量的准确度指标的被检电桥,副参量只用于调节平衡时,则可不检定副参量的示值误差。

7.3.4.2.2.3 电桥副参量示值误差的检定,应逐盘逐点检定示值误差。

D 、 Q 、 τ 的示值误差常用绝对误差表示,可按式(4)计算。

7.3.4.2.3 非基本量程,电桥示值误差的检定

比例的比值(K)不等于1的对应量程为非基本量程。

有两种检定方法:部分示值抽查法和测定各量程系数(K_i)法。

7.3.4.2.3.1 部分示值抽查法

对基本量程的示值已全部检定后的电桥,不需要示值的修正值时,可只选基本量程中出现正、负号误差最大的两个示值,在量程系数置于 K_i ,用相应示值的标准器进行抽检。用下式计算其示值误差:

$$\left. \begin{aligned} \delta_i^+ &= \frac{K_i X_g^+ - S}{S} \leq \delta_{lim} \\ \delta_i^- &= \left| \frac{K_i X_g^- - S}{S} \right| \leq |\delta_{lim}| \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中 δ_i^+ —— K_i 量程中可能的示值最大正误差;

δ_i^- —— K_i 量程中可能的示值最大负误差;

δ_{lim} —— K_i 量程对应的允许误差极限;

X_g^+ ——对应基本量程中,正误差最大的点在 K_i 时的示值;

X_g^- ——对应基本量程中,负误差最大的点在 K_i 时的示值;

K_i ——量程系数,取标称值(如0.1, 10, 100等);

S ——与 $K_i X$ 同标称值的标准器实际值。

7.3.4.2.3.2 测定各量程系数(K_i)法

对非基本量程亦需给出示值的实际值（或修正值）时，将量程系数置于 K_i （即比例器倍率），在第一个（最大）十进盘内取三个示值，测出该三个示值的实际值，用它们的“增量比”来确定量程系数的实际值，如式（7）所示：

$$\left. \begin{aligned} K' &= K_0 \frac{P_{mi} - P_m}{P_{m0} - P_{r0}} \\ K'' &= K_0 \frac{P_{ni} - P_n}{P_{n0} - P_{r0}} \\ K''' &= K_0 \frac{P_{ri} - P_r}{P_{r0} - P_{r0}} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$K_i = \frac{K' + K'' + K'''}{3}$$

式中 K_i ——待求的第 i 量程的系数实际值；
 P_{mi}, P_n, P_{ri} ——第 i 量程下，第 1 个盘上按大至小排列的 m, n, r 三个示值的实际值；
 P_{m0}, P_{n0}, P_{r0} ——基本（全检）量程的对应的 m, n, r 三个示值的实际值；
 K_0 ——基本量程的系数实际值。

按式（7）求得的三个量程的系数 K', K'', K''' 之间的分散度应 $\leq \frac{1}{3} A\%$ （ A 为准确度等级指数）。

若 K' 与 K'' 数据重合良好，这时亦可简化为只测两个量程的系数。

当被检电桥没有可取代内附标准器的外接端钮时， K_0 则取其标称值。

若需列出被检电桥非基本量程示值的实际值或修正值，可按式（8）计算：

$$P_{gi} = (P_{g0} - P_{00}) \frac{K_i}{K_0} + P_{0i} \quad (8)$$

式中 P_{gi} ——第 i 量程，第一盘 g 示值的实际值；
 P_{g0} ——基本量程，第一盘 g 示值的实际值；
 P_{00} ——基本量程的零位值；
 P_{0i} ——第 i 量程的零位值；
 K_i ——第 i 量程的量程系数实际值；
 K_0 ——基本量程的量程系数实际值（若无法得到其实际值时，用标称值替代）。

7.3.4.2.4 非基本频率，示值误差的检定

多个工作频率点的被检电桥，一般只在基本频率下检定。

若需要其他频率的示值误差，可按整体法在相应频率下检定，按式（9）计算：

$$|\delta_f| = \frac{|X_f - S_f|}{S_f} \quad (9)$$

式中 X_f ——频率为 f 时，电桥的示值；
 S_f ——频率为 f 时，标准器的实际值；
 δ_f ——频率为 f 时，被检电桥示值相对误差。

7.3.4.3 半整体检定法

在被检电桥正常工作状态下，用相应的外接标准器测出被检电桥的内附标准器及比

例器的比差和角差的示值误差, 再对误差进行合成, 得到被检电桥的示值误差, 称为半整体检定法。

7.3.4.3.1 内附标准器检定

当被检电桥只有一只内附标准器时, 则选择量程系数为 1, 用同标称值的标准器作为被测对象, 调节被检电桥读数盘使电桥平衡, 被检电桥内附标准器的相对误差可按式 (10) 计算:

$$\delta_{\text{内}} = \frac{X - S}{S} - \delta_K \quad (10)$$

式中 $\delta_{\text{内}}$ ——内附标准器相对误差 (内附标准器的相对误差与式 (5) 电桥示值误差反号);

X ——电桥示值;

S ——外接标准器的实际值;

δ_K ——1:1 的比例误差。

当被测电桥有多个内附标准器时, 则应在 1:1 比例下逐个检定, 并将未被检的其余内附标准器置于零位或两端同时接地。

当电桥有“—”读数并可自校时, 则只需检定并调准其中一只内附标准器, 其余内附标准器可逐盘自调准。究竟选择哪一个标称值的标准器作为内部的参考标准器及自校方法按被检电桥说明书规定进行。

7.3.4.3.2 比例值的检定

只检定感应分压器 (或感应分流器) 的 10^n 次幂 ($n = \pm 1, \pm 2, \dots$) 比例误差, 当它们的误差小于允许误差时, 则其他比例值不再检定。

7.3.4.3.2.1 1:1 比例误差检定

用两只同标称值的标准器, 用换位法进行检定。即在电桥的外接标准端及被测端分别接入标准器 A_1 及 A_2 , 调节电桥使其平衡并记下读数 δ_1 及 D_1 , 然后把 A_1 及 A_2 互换位置, 重新使电桥平衡并记下读数 δ_2 及 D_2 , 则可按式 (11) 计算比例误差:

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= -\frac{1}{2}(\delta_1 + \delta_2) \\ \beta &= -\frac{1}{2}(D_1 + D_2) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中 α ——为比例 1:1 时比差 (相对误差);

β ——为比例 1:1 时角差 (绝对误差, 用 rad 表示);

δ_1 、 δ_2 ——电桥同相分量的相对增量读数;

D_1 、 D_2 ——电桥正交分量两次读数值 (绝对值)。

7.3.4.3.2.2 10:1 (或 100:D) 比例误差检定

10:1 比例误差检定: 用两只标称值为十倍关系的高准确度外部标准器 A (如 100pF 和 10pF 标准电容器), 分别接入被检电桥的标准端 S 及被测端 X 进行相互比较, 可得出下式

$$A_x = KA_S + \Delta \quad (12)$$

式中 A_S ——接入标准端标准器实际值;

A_x ——接入被测端标准器实际值;

K ——电桥被测比例值；

Δ ——电桥读数值。

当 A_x 、 A_s 及 K 用它们的标称值及对应的相对误差来表示时，由式 (12) 可得：

$$\left. \begin{aligned} \delta_k &= \delta_x - \delta_s - \frac{\Delta}{KA_s} \\ \delta_{10} &= \delta_x - \delta_s - \frac{\Delta_{10}}{10A_s} \\ \delta_{0.1} &= \delta_x - \delta_s - \frac{10\Delta_{0.1}}{A_s} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中 δ_k ——待求比例值的相对误差；

δ_{10} —— $K=10$ 时的比差；

$\delta_{0.1}$ —— $K=0.1$ 时的比差；

δ_x —— A_x 的实际值与标称值的相对偏差（调整误差）；

δ_s —— A_s 的实际值与标称值的相对偏差（调整误差）；

Δ_{10} —— $K=10$ 时，（即 10:1），电桥读数值（单位为 pF）；

$\Delta_{0.1}$ —— $K=0.1$ 时，（即 1:10），电桥读数值（单位为 pF）。

待求的比例值可按式 (14) 计算：

$$\left. \begin{aligned} K_{10} &= 10(1 + \delta_{10}) \\ K_{0.1} &= 0.1(1 + \delta_{0.1}) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

100:1 比例误差检定参照 10:1 比例误差检定执行。

7.3.4.3.2.3 非十进比例误差检定

用 $n+1$ 只同名义值标准器 A_i ，检定电桥比例 K_n 的示值误差。在电桥比例 $K=n$ 时，将其中一个标准器接入标准端，将 n 个标准器接入被测端，调节电桥平衡，记录读数 α_i ；将 $n+1$ 个标准器依次接入电桥标准端，及其他 n 个标准器依次接入被测端，并在每次电桥平衡后记录读数 α_i 。采用轮换法检定电桥比例为 $n:1$ 时的比例误差，比例误差如式 (15) 所示：

$$\left. \begin{aligned} \delta_n &= -\frac{1}{n+1} \sum_{i=1}^{n+1} \alpha_i \\ \beta_n &= -\frac{1}{n+1} \sum_{i=1}^{n+1} \Delta D_i \\ K_n &= n(1 + \delta_n + j\beta_n) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

式中 δ_n —— $n:1$ 比例值的相对误差；

α_i ——第 i 次测量时电桥对标称示值增量的相对读数（即 A_i 与其余 n 只标准器并联相比较时，电桥对标称示值增量的相对读数）；

β_n —— $n:1$ 比值（倍率）时的角差（rad）；

ΔD_i ——第 i 次测量时，电桥正交参量读数；

K_n ——待测的 $n:1$ 的比例（复数）。

若不需要，可不进行此项检定。

7.3.4.3.2.4 大比例误差的检定

比例误差大于等于 100 : 1, 可用过渡法进行检定。

用电桥已检的比例作过渡, 可得到更大的比例值的示值误差。

设标准器 $\frac{A_1}{A_2} = n_{12}$, $\frac{A_2}{A_3} = n_{23}$, $D_1 - D_2 = \Delta D_{12}$, $D_2 - D_3 = \Delta D_{23}$

$$\text{则} \quad \frac{A_1}{A_3} = \frac{A_1}{A_2} \cdot \frac{A_2}{A_3} = n_{12} \cdot n_{23} = n_{13} \quad (16)$$

$$D_1 - D_3 = D_1 - D_2 + D_2 - D_3 = \Delta D_{12} + \Delta D_{23} \quad (17)$$

若不需要, 可不进行此项检定。

7.4 检定结果的处理

7.4.1 检定结果数据处理

7.4.1.1 对测量原始数据进行必要的数据处理, 必要时加入标准器的修正值或温度修正值等。

7.4.1.2 检定记录的数据经计算后, 还应对数据进行修约, 要求所引入的修约误差不超过该电桥级别所规定的基本误差的 1/10。

7.4.1.3 根据修约后的数据, 出具被检电桥示值的修正值表或实际值表。并以修约后的数据为依据, 判断电桥是否合格。

7.4.1.4 根据修正值表计算电桥在基本量程内的最大误差, 对于基本量程, 可按附录 D 的表 D1 来检查, 对其余的量程可按式 (18) 计算:

$$\begin{aligned} \delta' &= \delta_1^- + \delta_K^+ \\ \delta'' &= \delta_1^+ + \delta_K^- \end{aligned} \quad (18)$$

式中 δ_1^- 、 δ_1^+ ——全检量程下, 电桥读数盘的正号最大相对误差与负号最大相对误差;

δ_K^+ 、 δ_K^- ——在其余量程下, 量程 (比例) 系数正号最大相对误差及负号最大相对误差。

在 $|\delta'|$ 与 $|\delta''|$ 中选择较大的一个来判断被检电桥是否超出允许误差。

7.4.2 检定证书和检定结果通知书

从首次检定的日期起的 1 年内, 电桥示值基本误差, 经检定, 判定是否符合其准确度等级规定。根据不同的检定结果, 出具相应的检定证书。

7.4.2.1 经检定满足本规程全部要求, 所确定的误差不超过该电桥的最大允许误差, 判定被检电桥合格, 发给检定证书, 并根据基本误差给出其相应的准确度等级。

7.4.2.2 根据检定结果, 超出电桥的最大允许误差, 判定为不合格的电桥, 发给检定结果通知书, 并指明不合格项目。

7.4.2.3 根据检定结果, 不合格的电桥允许降级使用。在降到下一级时, 必须符合该级别的各项要求。

7.5 检定周期

检定周期一般不超过 1 年。

附录 A

组合式损耗因数标准器及品质因数标准器

在检定交流电桥时,可采用标准电容器或电感器以及随频率变化很小的金属膜电阻器组成损耗因数或品质因数标准器,用来检定电桥 D 或 Q 示值的误差。

A.1 标准电感器与电阻器串联组成等效品质因数标准器 (见图 A1)

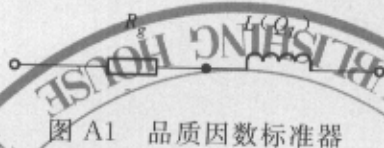


图 A1 品质因数标准器

如图 A1 所示,组合的品质因数 Q_e 可按式 (A1) 计算:

$$Q_e = \frac{Q_L}{1 + R_s \frac{Q_L}{\omega L}} \quad (\text{A1})$$

式中 Q_L ——标准电感器本身的 Q_L 值 (证书值);

L ——标准电感器电感;

R_s ——附加的串联电阻器 (封闭式金属膜电阻器) 功率 $\geq \frac{1}{4} \text{ W}$;

ω ——使用角频率的实际值。

要求组合标准器的实际 Q 值的误差应小于被检电桥 Q 值允许误差的 5%。

A.2 用电阻及标准电容器串联或并联组成等效的损耗因数标准器

(1) 串联式损耗因数标准器

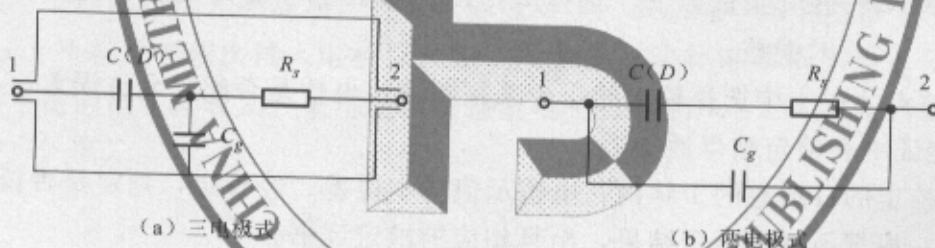


图 A2 串联式损耗因数标准器

如图 A2 所示的串联式损耗因数标准器的 D_e 可用下式计算:

$$D_e = D + \omega R_s (C + C_g) \quad (\text{A2})$$

式中 D_e ——组合标准器的损耗因数;

C 、 D ——标准电容器的电容及损耗因数实际值;

R_s ——金属膜或微细导线电阻值 (密封结构);

C_g —— C 及 R_s 共同结点对屏蔽的电容 (三电极式) 或端钮间并联电容值 (两电极式);

ω ——角频率,用测得的实际值。

(2) 并联式损耗因数标准器 (见图 A3)

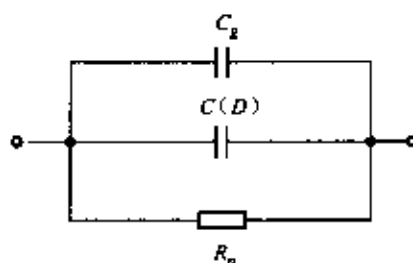


图 A3 三电极或两电极并联式损耗因数标准器

由图 A3 所示的等效线路, 其损耗因数 D_e 可用下式计算:

$$D_e = D + \frac{1}{R_p \omega (C + C_k)} \quad (\text{A3})$$

式中 C 、 D ——标准电容器的电容值及损耗因数;

R_p ——并联电阻值;

C_k ——端钮间电容及 R_p 的等效并联电容之和。

对组合标准器中的各元件允许误差及频率误差, 应小于组合 D_e 标准器允许误差的 1/5。组合 D 标准器的标称值为 10^{-1} 、 10^{-2} 、 10^{-3} 及 10^{-4} , 误差为 $2\% D + 5 \times 10^{-5}$ 。所以在检定更精密的交流电桥时, 对于组合式标准器应在选定的频率下, 用专门的装置进行整体检定, 并用证书给定实际值。

附录 B

若干典型交流电桥的具体检定步骤实例

(一) AC 1100 型万用电桥、AC 1105 型电感电桥采用整体检定法的检定步骤
 B.1 首先进行外观检查及通电试验 (见图 B1)。

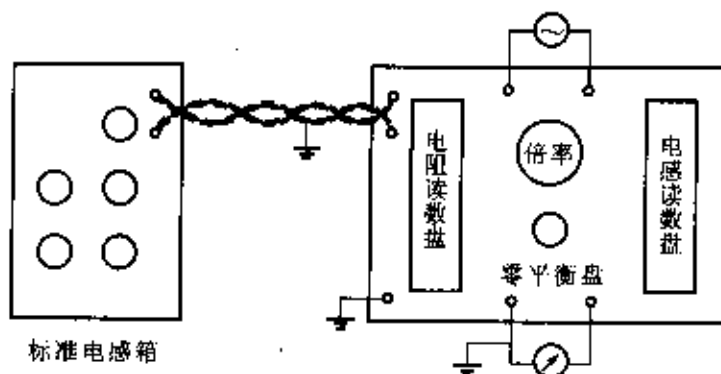


图 B1 检定 AC 1100 (或 AC 1105) 型电桥接线示意图

B.2 在测量振荡器的频率时,若频率误差超过了 JJG 726·1991《标准电感器检定规程》,规定的频率误差要求时,则该交流电桥不予检定。

B.3 标准电感盘的检定

B.3.1 选用 $0.1\mu\text{H}\sim 1\text{H}$,误差不超过 $\pm 0.03\%$ 的标准电感箱,测量结果必须引用标准量具实际值。

B.3.2 将标准量具 (电感箱) 接入电桥的被测端钮,电桥的量程盘置于基本量程位置 ($K=1$)。

B.3.3 进行零位平衡,将电桥的电感读数盘全部放在零位,只调节电桥的零位平衡盘及电阻读数盘,使电桥平衡。这样,电感箱的零位电感及引线电感、电桥内部的杂散电感就存储在零位平衡盘上了。

B.3.4 对欲检的标准电感读数盘进行逐盘、逐点检定。将待检的盘放在待检的示值上,调节电感箱上的十进盘及电桥上的电阻盘,使电桥达到平衡后,电感箱上的读数就是电桥该盘被测点的实际值。

B.3.5 改换另一盘的检定时,需重新进行零位平衡。最后三个标准电感盘及一个可变盘全部检定完。

B.4 比例器的检定

对 0.01、0.1、10、100 四个比例值进行检定。

B.4.1 将 K 放在待测的系数上,在电桥最大盘的 3、6、9 三点示值上进行电桥平衡,在电感箱上读出相应的实际值,按本规程式 (7) 进行计算,求出待测量程系数的实际值。

B.4.2 改换另一量程系数检定时,需重新进行零位平衡。将四个量程系数全部检完。

B.5 正交分量——电阻盘的检定

用交流电阻箱，对电桥的电阻盘进行逐盘、逐点检定。由于该电桥通常用于检定电感器，对电阻值没有准确度要求，所以在周期检定时不进行检定。

(二) C3020/RT 型电容电桥的检定方法及步骤

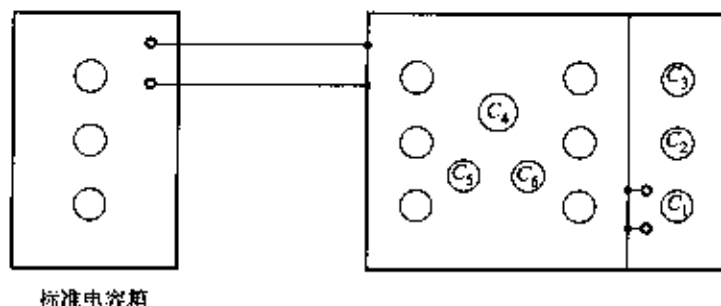


图 B2 检定 C3020/RT 型电桥接线示意图

B.1 直接法检定电桥（见图 B2）

B.1.1 外观检查及通电试验；

B.1.2 信号源频率误差的检定；

B.1.3 标准电容读数盘的检定

(1) 选用标准器：1pF~1μF，误差不超过±0.02%的电容箱（测量结果必须引用标准量具的实际值）；

(2) 将标准电容箱接入电桥被测端；

(3) 将电桥的量程系数置于基本量程位置（ $K=1$ ）；

(4) 零位平衡：将标准电容箱及电桥所有电容读数盘的位置均置于零位，调节电桥的损耗因数盘和零位平衡盘，使电桥平衡；

(5) 对电桥五个读数盘进行逐盘、逐点检定。调解电容箱读数盘及损耗因数盘，使电桥平衡。电容箱上的读数就是电桥该盘被测点的实际值。

B.1.4 比例器的检定

最直接的方法是分别测量两个电阻臂的电阻值，然后通过计算可得到量程系数的实际值。

对 C3020/RT 型电桥，可按四端电阻测试法确定桥臂的电阻值，从而完成了对比例器的检定（在直流测试电阻值时所通过的电流应当大体上和电桥工作时所通过的交流电流一致）。

B.1.5 损耗因数的检定步骤

对 C3020/RT 型电桥，其损耗因数读数盘的单位是弧度（和频率有关）。

(1) 调节信号源频率，使它和读数盘上相应的频率值（通常为 1 000 Hz）之间的差异在±0.1%以内。

(2) 选择一空气电容器（电容值为 1 000 pF 左右），把它和无感电阻箱串联起来，接入 C_x 臂，具体组合方式见附录 A 图 A2。

(3) 将 R 置于零，被检损耗角读数盘的示值为零，平衡电桥。

(4) 对每一被检损耗角读数盘的示值增量，调节 R 盘及电容读数盘，重新平衡电桥，根据每次 R 的值，按式 $\tan\delta = \omega RC$ 计算相应的 $\tan\delta$ ，从而确定损耗角读数盘的误差。

2. 副参量检定数据

里程 (K) _____ × _____ 盘

[illegible]

3. 主參量倍率（比例）檢定數據

[illegible]

附录 D

附表

表 D1 电桥各十进盘误差分配及数据化整

被检电桥级别		0.001		0.002		0.005		0.01		0.02		0.1	0.5
盘序	盘数	七盘	六盘	七盘	六盘	七盘	六盘	六盘	五盘	六盘	五盘	四盘	四盘
1	允许误差	5×10^{-6}		1×10^{-5}		2×10^{-5}		5×10^{-5}		1×10^{-4}		5×10^{-4}	2×10^{-4}
	允许误差	1×10^{-5}		2×10^{-5}		5×10^{-5}		1×10^{-4}		2×10^{-4}		1×10^{-4}	2×10^{-4}
2	允许误差	1×10^{-5}		2×10^{-5}		5×10^{-5}		1×10^{-4}		2×10^{-4}		10^{-3}	10^{-3}
	允许误差	2×10^{-5}		5×10^{-5}		1×10^{-4}		2×10^{-4}		1×10^{-4}			
3	允许误差	1×10^{-4}	2×10^{-4}	2×10^{-4}	5×10^{-4}	2×10^{-4}	5×10^{-4}	2×10^{-4}	10^{-3}	5×10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-2}
	允许误差	2×10^{-5}	2×10^{-5}	5×10^{-5}	1×10^{-4}	1×10^{-4}	1×10^{-4}	1×10^{-4}		2×10^{-4}			
4	允许误差	2×10^{-4}	10^{-3}	5×10^{-4}	10^{-3}	5×10^{-4}	10^{-3}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	10^{-1}
	允许误差	2×10^{-5}		5×10^{-5}		1×10^{-5}							
5	允许误差	10^{-4}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-2}	10^{-1}	10^{-2}	10^{-1}	—	—
6	允许误差	10^{-2}	10^{-1}	10^{-2}	10^{-1}	10^{-2}	10^{-1}	10^{-1}	—	10^{-1}		—	—
7	允许误差	10^{-1}	—	10^{-1}	—	10^{-1}	—	—	—			—	—

表 D2 电桥量程系数允许误差

被检电桥级别	允许误差	化整误差
0.001	3×10^{-5}	1×10^{-5}
0.002	5×10^{-5}	2×10^{-5}
0.005	1×10^{-4}	2×10^{-4}
0.01	3×10^{-4}	5×10^{-4}
0.02	5×10^{-4}	1×10^{-3}
0.05	1×10^{-3}	2×10^{-3}
0.1	3×10^{-3}	5×10^{-3}
0.2	5×10^{-3}	1×10^{-2}
0.5	1×10^{-2}	2×10^{-2}

附录 E

检定证书内页格式

一、检查结果

1. 外观
2. 绝缘强度
3. 频率设置
4. 电压设置

二、检定结果

1. 主参量

电桥参量	电桥量程 K	电桥盘序	最大误差/(%)	允许误差/(%)
		1		
		2		
x		3		
		4		
		•		
		•		
		•		

2. 副参量

电桥参量	电桥量程 K	电桥盘序	最大误差/(%)	允许误差/(%)
		1		
		2		
x		3		•
		4		
		•		

3. 主参量倍率（比例）

电桥参量	电桥量程 K	最大误差/(%)	允许误差/(%)