



中华人民共和国国家计量检定规程

JJG 487—1987

三次平衡双电桥

Three Steps Balance Double Bridge

1987-03-09 发布

1988-01-09 实施

国家计量局 发布

三次平衡双电桥检定规程

**Verification Regulation of The
Three Steps Balance Double Bridge**

JJG 487—1987

本检定规程经国家计量局于 1987 年 03 月 09 日批准，并自 1988 年 01 月 09 日起施行。

归口单位：中国测试技术研究院

起草单位：中国测试技术研究院

本规程技术条文由起草单位负责解释

本规程主要起草人：

崔广英 （中国测试技术研究院）

目 录

一	概述	(1)
二	技术要求	(2)
三	检定条件	(3)
四	检定项目	(4)
五	检定方法	(4)
六	检定结果的处理和检定周期	(11)

三次平衡双电桥检定规程

本规程适用于新生产、使用中和修理后的三次平衡双电桥的检定。

本规程不适用于普通双电桥的检定。

一 概 述

三次平衡双电桥是用于精密比较 $10^{-3} \sim 10^2 \Omega$ 范围内同标称值标准电阻的仪器。通过电桥的三次平衡调节，可以有效地消除标准电阻的电位引线电阻、连接导线电阻和端钮接触处的过渡电阻等对测量小电阻的影响，达到高精度标准电阻的比较。三次平衡双电桥的原理线路如图 1 所示。

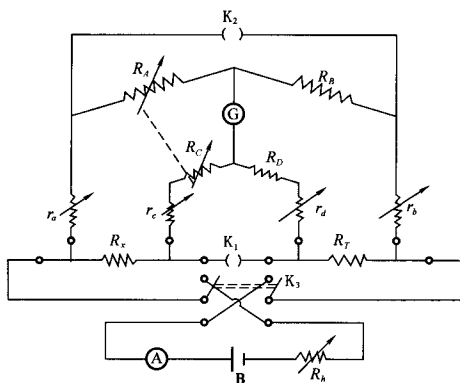


图 1 三次平衡双电桥原理线路图

R_A (R_C) —— 外 (内) 比较臂电阻；

R_B (R_D) —— 外 (内) 比例臂电阻；

r_a (r_c) —— 外 (内) 比较臂辅助平衡电阻；

r_b (r_d) —— 外 (内) 比例臂辅助平衡电阻；

R_x , R_T —— 被检臂和辅助臂电阻；

K_1 , K_2 —— 内、外跨线短路开关；

K_3 —— 电源电流换向开关；

G —— 检流计；

R_h —— 电源电路内调节电阻；

B , A —— 直流电源和电流表

三次平衡双电桥比较标准电阻的过程如下。

在所有情况下，桥臂参数的选择都应满足下列条件：

$$\frac{R_A}{R_B} = \frac{R_C}{R_D} = \frac{R_x}{R_T} = \frac{r_a}{r_b} = \frac{r_c}{r_d}$$

将被检标准电阻用替代法轮流地接到被检臂 R_x 中，按下列步骤进行电桥的平衡*：

第一次平衡：闭合 K_1 ，断开 K_2 ，接通 K_3 ，调节 R_A (R_C) 使电桥平衡。

第二次平衡：闭合 K_1 和 K_2 ，调节 r_a 或 r_b 使电桥平衡。

第三次平衡：断开 K_1 和 K_2 ，调节 r_c 或 r_d 使电桥平衡。

重复一、二、三次平衡步骤，直至完全三次平衡为止，得到如下等式：

$$R_x = \frac{R_A}{R_B} R_T \quad (1)$$

式 (1) 是三次平衡双电桥测量标准电阻的基本计算公式，它具有与单电桥测量电阻完全一样的形式。

同标称值标准电阻的高精度比较，一般不采用电桥直接法测量电阻，而是采用能够消除电桥系统误差的替代法，这样被检电阻 R_{x_1} 的实际值按下式计算：

$$R_{x_1} = R_{N_2} + (A_x - A_N) R_{AH} \quad (2)$$

式中 R_{x_1} ， R_{N_2} ——被检的和标准的标准电阻在温度分别为 t_1 和 t_2 时的电阻实际值；

A_x ， A_N ——被检的和标准的标准电阻分别在电桥平衡时， R_A 臂上的相对读数；

R_{AH} —— R_A 臂电阻的标称值。

二 技术要求

1 外观及标志

1.1 三次平衡双电桥的铭牌或外壳上应标明：

1.1.1 产品名称、型号和出厂编号；

1.1.2 制造单位或商标；

1.1.3 有效量程和等级指数；

1.1.4 标准温度和标称使用温度范围；

1.1.5 试验电压；

1.1.6 使用位置（无位置符号表示该电桥可在任意位置使用）。

1.2 三次平衡双电桥面板上的开关和接线柱端钮应标明功能和符号。

2 三次平衡双电桥的等级指数、标准温度和相对湿度范围，标称使用温度和相对湿度范围应符合表 1 的规定。

3 三次平衡双电桥在标称使用温度和相对湿度范围内，由标准条件到标称使用条件引起的允许变差不应超过表 1 的规定。

* 电桥平衡系指电流正反向时，检流计处在同一标尺位置，即虚零位法，下同。

表 1

等级指数			标准条件		标称使用条件及允许变差*			
%	ppm ($\times 10^{-6}$)	科学 标记法	温度 /℃	相对湿度 / (%)	温度 /℃	允许 变差	相对湿度 / (%)	允许 变差
0.000 05	0.5	5×10^{-7}	20 ± 0.02	40 ~ 60	20 ± 0.05	100%	25 ~ 75	20%
0.000 1	1	1×10^{-6}	20 ± 0.5	40 ~ 60	20 ± 1	100%	25 ~ 75	20%
0.000 2	2	2×10^{-6}	20 ± 1	40 ~ 60	20 ± 2	100%	25 ~ 75	20%

* 允许变差以等级指数的百分数表示。

4 三次平衡双电桥在标准条件下, 比较臂和比例臂电阻的实际值相对偏差不应超过 0.01% 或比较臂与比例臂电阻的实际比值不应超过 0.02%。

5 三次平衡双电桥 (用替代法测量时) 外比较臂测量盘的线性极限误差即最大算术值线性误差与最小算术值线性误差之差不应超过相应等级指数。

6 三次平衡双电桥各调节盘电阻的调节范围应满足表 2 的规定:

表 2

(Ω)

等级指数 %	R_A (R_C)	r_a (r_c)	r_b (r_d)
0.000 05	$\times 10^{-1} \sim \times 10^{-5}$	$\times 10^{-2} \sim \times 10^{-6}$	$\times 10^{-1} \sim \times 10^{-3}$
0.000 1	$\times 10^{-1} \sim \times 10^{-4}$	$\times 10^{-2} \sim \times 10^{-5}$	$\times 10^{-1} \sim \times 10^{-2}$
0.000 2	$\times 10^{-1} \sim \times 10^{-4}$	$\times 10^{-3} \sim \times 10^{-5}$	$\times 10^{-1} \sim \times 10^{-3}$

7 三次平衡双电桥各辅助平衡调节盘的电阻应保证以最小步进值连续可调。

8 在标称使用条件下, 三次平衡双电桥的线路和与线路无电气连接的任意导电部件之间的绝缘电阻不应小于 100MΩ。

9 三次平衡双电桥的线路与外壳或与线路无电气连接的任意导电部件之间应能承受频率为 45 ~ 65Hz 的实际正弦交流电压 500 ($1 \pm 10\%$) V (具有控温装置的三次平衡双电桥, 试验电压为 1 500V), 历时 1min 的耐压试验, 应无击穿或无飞弧现象。

三 检 定 条 件

10 检定三次平衡双电桥基本误差时, 标准温度和相对湿度应符合表 1 的规定。对具有自动控温装置的三次平衡双电桥, 其温度的控制应符合生产厂的规定。

11 三次平衡双电桥绝缘电阻的测量和电压的试验, 应在表 1 所规定的标称使用温度和相对湿度范围内进行。

12 检定三次平衡双电桥基本误差的总不确定度不应超过被检电桥相应等级指数的 1/3。

12.1 检定装置中, 标定测量盘电阻所用的标准电阻引起的误差不应超过被检电桥相应等级指数的 $1/10$ 。

12.2 检定装置中, 测量仪器引起的误差不应超过被检电桥相应等级指数的 $1/10$ 。

12.3 检定装置中, 检流计灵敏度不够引起的误差不应超过被检电桥相应等级指数的 $1/10$ 。

12.4 检定装置中, 其它原因(包括开关的热电势变差、接触电阻变差、绝缘不良引起的漏电、静电感应和环境条件等)引起的误差不应超过被检电桥相应等级指数的 $1/10$ 。

13 测量比较臂和比例臂电阻的实际值或比值的不确定度应小于 1×10^{-5} 。

14 测量绝缘电阻的仪器, 测量误差应小于 30%。

15 电压试验所用的高压试验台应有足够的输出容量(应大于 0.25kVA)和电压连续可调。

四 检定项目

16 三次平衡双电桥的检定项目, 应按表 3 的规定进行。

表 3

检定类型 检定项目	出厂时	修理后	周期检定
外观及线路	+	+	+
绝缘电阻	+	+	-
电压试验	+	+	-
测量盘线性误差	+	+	+
比较臂和比例臂电阻	+	+	-
辅助调节盘连续性	+	+	-
注: “+”表示应检定, “-”表示不检定。			

五 检定方法

17 外观检查

检查三次平衡双电桥铭牌或外壳上的标志应符合技术要求。

对新生产的三次平衡双电桥, 要求完好无损。对使用中的或修理后的三次平衡双电桥, 如发现有严重影响电桥的计量性能的欠缺时, 应在修复后再进行检定。

18 线路检查

用万用表的欧姆挡检查三次平衡双电桥线路, 如发现有不正常时, 应查明原因, 修复后再进行检定。

19 绝缘电阻的测量

用高阻计或绝缘电阻测量仪进行测量,如发现绝缘电阻不能满足要求时,应查明原因,修复后再进行检定。

20 电压的试验

在高压试验台上进行,试验电压以 100 V/s 的速度平稳地上升至所规定的试验电压,历时 1 min 的耐压试验,无击穿或无飞弧现象为合格,否则为不合格。然后将电压平稳地降到零。

21 比较臂和比例臂电阻实际值的测量

用电桥法或电位差计补偿法进行同标称值电阻的测量或用被检三次平衡双电桥的被检臂电阻与辅助臂电阻交换位置进行比较臂与比例臂电阻比值的测量。

22 辅助调节盘电阻连续性的检查

选两只 $1\ \Omega$ 标准电阻,一个接在被检端,另一个接在辅助臂,选择合适的检流计灵敏度逐个检查辅助平衡调节盘电阻的连续性。

23 测量盘线性度误差的检定

根据三次平衡双电桥测量盘的结构特点和等级指数,按表 4 的规定选择检定方法。

表 4

等级指数 / (%)	检 定 方 法
0.000 05	按元件检定法
0.000 1	按元件检定法或十进盘替代法
0.000 2	十进盘替代法或整体检定法

23.1 按元件检定法

三次平衡双电桥的测量盘是采用十进分路式微调盘结构。电阻元件多数是由非十进电阻值组成,每个元件设有电位端,可以按元件测量微调盘的分路电阻,通过并联电阻公式计算,求出每盘步进电阻值及其误差。这种方法测量精度高,适用于 0.000 05、0.000 1 级三次平衡双电桥测量盘的检定。

23.1.1 用直流电流比较仪式电位差计(简称电流比较仪电位差计)进行三次平衡双电桥测量盘分路电阻的按元件检定。

原理线路如图 2 所示。

电流比较仪电位差计法测量非十进电阻具有准确度高、测量迅速、使用方便等特点,非常适用于微调盘分路电阻的测量。

测量过程:

(1) 按图 2 接好线路,根据被测电阻选择与其相近的标准电阻 R_N 和相应的标准电阻等级指数。

(2) 用 $\times 0.1$ 量程,按标准电阻 R_N 的实际值放置电流比较仪电位差计的测量盘示值,将转换开关 K 置向标准,调节分流电阻 R_S ,使其电流比较仪电位差计平衡。

(3) 将转换开关 K 置向被测,分别测量微调盘的分路电阻,电流比较仪电位差计

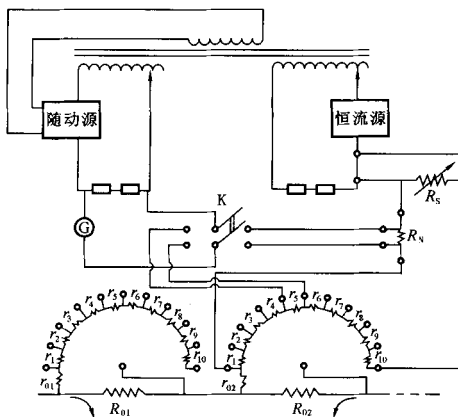


图2 用电流比较仪电位差计测量分路电阻原理线路图

R_s ——分流电阻； R_N ——标准电阻；K——切换开关；G——检流计；

$r_0, r_1, \dots, r_{10}$ ——分路电阻； $R_{01}, R_{02}, \dots$ ——主分路电阻

上的平衡示值即为被测分路电阻的实际值。

(4) 根据测得的分路电阻实际值，按并联电阻计算公式计算等效电阻值、步进电阻值和步进值的误差。

23.1.2 用万能比例臂电桥进行测量盘分路电阻的按元件检定。

原理线路如图3所示。

用万能比例臂电桥测量分路电阻必须按四端电阻接法进行测量，也可以将十个分路电阻元件串接在万能比例臂电桥的被测端，分别测出每个电阻元件电位端在万能比例臂电桥上的两个平衡读数，记作 R_1 和 R_2 ；标准电阻 R_N 电位端上的两个平衡读数，记作 R_3 和 R_4 。按下式进行被测电阻值的计算：

$$R_x = \frac{R_2 - R_1}{R_4 - R_3} R_N \quad (3)$$

式中， R_x ， R_N 分别为被测电阻和标准电阻的实际值。

23.2 十进盘替代法

如果测量盘分路电阻不设有电位端时，按元件检定法已不适用，必须采用十进盘替代法进行检定。

23.2.1 十进盘替代法原理

基本原理是用后一盘的十个步进值电阻同前一盘的每一个步进值电阻在电桥装置上作替代比较，最后一个十进盘的每一个步进值电阻由检流计的偏格来确定。只需对其中一个十进盘的电阻值进行电阻标定，整个十进盘电阻步进值的实际电阻值就可以通过计算得到。

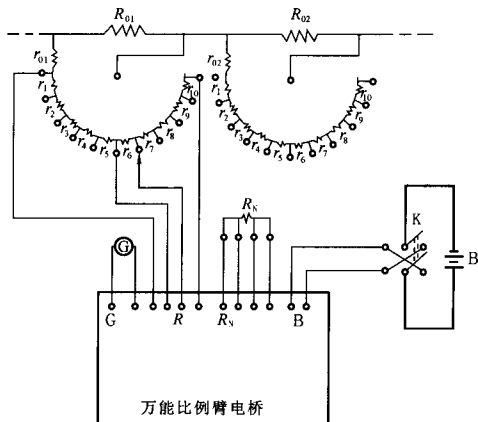


图3 用万能比例臂电桥测量分路电阻的原理线路图

R_x ——被测电阻； R_N ——标准电阻；B——电源；
K——电源电流换向开关；G——检流计

23.2.2 十进盘替代法检定线路

用 QJ-25 型直读比例臂微调电阻箱当作被测电阻，进行三次平衡双电桥测量盘线性度误差的检定，其原理线路如图 4 所示。

23.2.3 测量过程

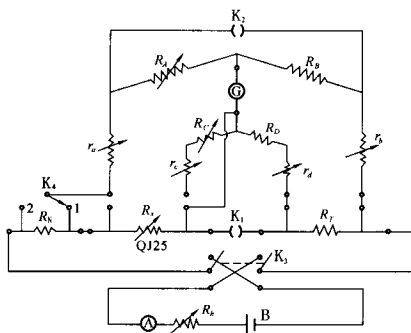


图4 三次平衡双电桥测量盘线性度误差的检定原理线路图

R_x ——QJ25 型直读比例臂微调电阻箱（简称 QJ25）；
 R_N ——标定用标准电阻； K_x ——换接开关

(1) 测量盘线性度的检定步骤

(a) 选择 R_x 和 R_T 的标称电阻值为 $100\ \Omega$, 按图 4 接好线路, R_A 和 QJ25 全部示值置零, K_4 置 1, 闭合 K_1 。

(b) 闭合 K_2 , 调节 r_a 或 r_b 使电桥平衡。

(c) 断开 K_2 , 调节 QJ25 使电桥平衡。

(d) 重复 (b) 和 (c) 步骤, 直至完全平衡为止。

(e) 将 R_A 第一盘置于 1, 末盘置于 5, 其余盘置于零, QJ25 与 R_A 第一盘对应盘置于 1, 其余盘不动, 调节 R_A 末盘使电桥平衡, 记录 R_A 末盘的示值为 a_1^I 。

(f) QJ25 保持不变, R_A 第一盘示值退回到零, 第二盘示值由零进到 10, 调节 R_A 末盘使电桥平衡, 记录 R_A 末盘的示值为 b_1^I 。

步骤 (e) 和 (f) 实现了 R_A 第一盘第 1 个步进电阻值 R_1^I 与第二盘十个步进电阻值 $\sum_{i=1}^{10} R_i^{II}$ 的比较, 其差值 Δ_1^I 为:

$$\Delta_1^I = R_1^I - \sum_{i=1}^{10} R_i^{II} = b_1^I - a_1^I \text{ 或 } R_1^I = \sum_{i=1}^{10} R_i^{II} + \Delta_1^I$$

(g) 将 R_A 第一盘进到 2, 第二盘退回到零, QJ25 与 R_A 第一盘对应盘也进到 2, 其余盘不动, 调节 R_A 末盘使电桥平衡, 记录 R_A 末盘的示值为 a_2^{II} 。

(h) QJ25 保持不变, R_A 第一盘示值退回到 1, 第二盘示值由零进到 10, 调节 R_A 末盘, 使电桥平衡, 记录 R_A 末盘的示值为 b_2^I 。

步骤 (g) 和 (h) 实现了 R_A 第一盘第 2 个步进电阻值 R_2^I 与第二盘十个步进电阻值 $\sum_{i=1}^{10} R_i^{II}$ 的比较, 其差值 Δ_2^I 为:

$$\Delta_2^I = R_2^I - \sum_{i=1}^{10} R_i^{II} = b_2^I - a_2^I \text{ 或 } R_2^I = \sum_{i=1}^{10} R_i^{II} + \Delta_2^I$$

依此类同, 可得到:

$$\Delta_i^I = R_i^I - \sum_{i=1}^{10} R_i^{II} = b_i^I - a_i^I \text{ 或 } R_i^I = \sum_{i=1}^{10} R_i^{II} + \Delta_i^I \quad (4)$$

式中 Δ_i^I ——第一盘第 i 个步进电阻值与第二盘十个步进电阻值的差值;

R_i^I ——第一盘第 i 个步进电阻值;

$\sum_{i=1}^{10} R_i^{II}$ ——第二盘十个步进电阻值。

同理, 对于其他盘有:

$$\Delta_i^j = R_i^j - \sum_{i=1}^{10} R_i^{j+1} = b_i^j - a_i^j \text{ 或 } R_i^j = \sum_{i=1}^{10} R_i^{j+1} + \Delta_i^j \quad (5)$$

式中 Δ_i^j ——第 j 盘第 i 个步进电阻值与第 $j+1$ 盘十个步进电阻值的差值;

R_i^j ——第 j 盘第 i 个步进电阻值;

$\sum_{i=1}^{10} R_i^{j+1}$ ——第 $j+1$ 盘十个步进电阻值。

(i) R_A 的最后一盘可采用检流计偏格法进行检定, 即变化 R_A 最后一盘的全部示值, 使其检流计偏转 100 格, 记录每一步进电阻值变化时检流计的偏转格数 α_i , 末盘每一步进电阻值 R_i^* 为:

$$R_i^* = \frac{\sum_1^{10} R_i^*}{100} \alpha_i \quad (6)$$

式中 R_i^* ——末盘第 i 个步进电阻值;

$\sum_1^{10} R_i^*$ ——末盘十个步进电阻值。

(2) 测量盘电阻的标定公式

假定 $\sum_1^{10} R_i^{\text{II}}$ 为已知, 各测量盘步进电阻的累加值分别为:

$$\sum_1^i R_i^{\text{I}} = i \sum_1^{10} R_i^{\text{II}} + \sum_1^i \Delta_i^{\text{I}} \quad (7)$$

$$\sum_1^i R_i^{\text{II}} = \frac{i}{10} \left(\sum_1^{10} R_i^{\text{II}} - \sum_1^{10} \Delta_i^{\text{II}} \right) + \sum_1^i \Delta_i^{\text{II}} \quad (8)$$

$$\sum_1^i R_i^{\text{III}} = \frac{i}{100} \left(\sum_1^{10} R_i^{\text{II}} - \sum_1^{10} \Delta_i^{\text{II}} \right) - \frac{i}{10} \sum_1^{10} \Delta_i^{\text{III}} + \sum_1^i \Delta_i^{\text{III}} \quad (9)$$

$$\sum_1^i R_i^{\text{IV}} = \frac{i}{1000} \left(\sum_1^{10} R_i^{\text{II}} - \sum_1^{10} \Delta_i^{\text{II}} \right) - \frac{i}{100} \sum_1^{10} \Delta_i^{\text{III}} - \frac{i}{10} \sum_1^{10} \Delta_i^{\text{IV}} + \sum_1^i \Delta_i^{\text{IV}} \quad (10)$$

如果第五盘为末盘, 则有:

$$\begin{aligned} \sum_1^i R_i^{\text{V}} = & \frac{\sum_1^i \alpha_i}{100} \times \left[\frac{1}{1000} \left(\sum_1^{10} R_i^{\text{II}} - \sum_1^{10} \Delta_i^{\text{II}} \right) \right. \\ & \left. - \frac{1}{100} \sum_1^{10} \Delta_i^{\text{III}} - \frac{1}{10} \sum_1^{10} \Delta_i^{\text{IV}} \right] \end{aligned} \quad (11)$$

也可以假定其他一个测量盘十个步进电阻值为已知, 则有另外一些公式表示, 而计算结果应该是一致的。

(3) 测量盘电阻的标定方法

测量盘线性度检定完成后, 应该对测量盘电阻进行标定, 即对假定 $\sum_1^{10} R_i^{\text{II}}$ 的已知电阻进行求值。

标定方法是用已知的标准电阻作为标定电阻串联在被测电阻 R_x 上, 用图 4 线路进行接线和测量。 R_x 的增量必定是 R_A 的增量, 由此标定出测量盘第二盘十个步进电阻值。

(a) 标定电阻的选择原则

对测量盘第二盘十个步进电阻值进行标定要选择与它相对应的变化阻值, 如 R_A 第二盘步进电阻值为 $\times 10^{-2} \Omega$, 则应选择标定电阻 R_N 为 0.1Ω 的 0.01 级标准电阻。

为在电桥平衡时能对应第二盘十个步进电阻值的变化, 还应选择 R_N 的实际电阻值

为大于标称值的标准电阻。

(b) 测量步骤

i 当测量盘线性度检定完成后, 将 R_A 和 QJ25 的全部示值置于零, 其中 R_A 末盘置于 5, 调节 QJ25 使电桥平衡。

ii 闭合 K_2 , 调节 r_a 使电桥平衡。

iii 断开 K_2 , 调节 R_A 末盘重新使电桥平衡, 记录电桥 R_A 末盘的平衡示值为 A 。

iv K_4 置于 2, R_A 的第二盘进到 10, 其余盘的示值不变, 重复步骤 ii 和 iii, 记录电桥 R_A 末盘的平衡示值为 B 。

v 按下式计算 $\sum_1^{10} R_i^{\text{II}}$ 的电阻实际值:

$$\sum_1^{10} R_i^{\text{II}} = R_N + A - B \quad (12)$$

23.3 整体检定法

用电流比较仪电桥准确度高、稳定性好的特点, 直接检定测量盘的线性度误差, 其原理线路如图 5 所示。

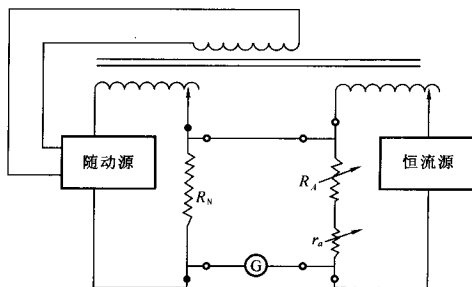


图 5 电流比较仪电桥检定测量盘线性度误差的原理线路图

R_A ——外比较臂测量盘电阻; r_a ——外比较臂辅助平衡调节盘电阻;

R_N ——二等标准电阻; G——检流计

测量步骤:

(a) 选取 R_N 和 R_A 标称值为 100Ω 的电阻, 按图 5 接好线路。

(b) 测量 $R_A + r_a$ 的起始电阻; 将 R_A 和 r_a 的全部示值置于零, R_N 的相对偏差置于电流比较仪电桥的偏差盘 R_s 上, 调节 R_x/R_s 盘使电桥平衡, 记录电桥 R_x/R_s 盘上的平衡示值为 R_0' 。

(c) 逐盘逐挡进行 R_A 的测量, 每一盘都由零增到 10, 每增加一个步进电阻值都要调节一次 R_x/R_s 盘, 使电桥平衡, 记录每次的平衡示值为 R_i' 。

(d) 每一盘步进电阻的累加值为 $\sum_1^i R_i'$;

$$\sum_1^i r_i' = R_i' - R_0' \quad (13)$$

式中 R_i' ——对第 j 盘第 i 个步进电阻值，电流比较仪电桥 R_x/R_s 盘上的平衡示值；

R_0' ——第 j 盘 R_A 全部示值为零时，电流比较仪电桥 R_x/R_s 盘上的平衡示值。

24 在保证检定总不确定度的条件下，允许采用本规程以外的其他方法进行检定。如出现有争议时，应以本规程方法为准。

六 检定结果的处理和检定周期

25 三次平衡双电桥测量盘线性度的极限误差 C_{lim} 按下式进行计算：

$$C_{\text{lim}} = \sum_1^e C_i^* - \sum_1^e C_i^{\Delta} \quad (14)$$

式中 $\sum_1^e C_i^*$ ——每一步进盘电阻值最大算术值误差之和；

$\sum_1^e C_i^{\Delta}$ ——每一步进盘电阻值最小算术值误差之和。

26 测量盘线性度的检定数据按相应等级指数的 $1/10$ 进行化整，在计算时采用四舍五入及偶数法则。

27 三次平衡双电桥检定合格与检定不合格，一律以化整后的测量盘线性度极限误差来判断，凡满足基本误差要求的为检定合格，否则为检定不合格。

28 检定合格的三次平衡双电桥发给检定证书，检定不合格的发给检定结果通知书，应注明不合格的原因。

29 初次送检的（包括缺少上一次检定证书或修理后的）三次平衡双电桥，经检定合格者发给检定证书，但不予定级，在证书上应注明年稳定性未经考查，暂不定级。

30 经二年连续检定，基本误差合格的三次平衡双电桥发给检定证书，并注明等级。

31 检定周期不得超过 1 年，连续送检二次合格者，检定周期延长，但不得超过 2 年。