



# 中华人民共和国国家计量检定规程

JJG 546—2010

---

## 直流比较电桥

DC Comparison Bridges

2010—01—05 发布

2010—07—05 实施

---

国家质量监督检验检疫总局 发布

# 直流比较电桥检定规程

Verification Regulation of DC

Comparison Bridges

JJG 546—2010  
代替 JJG 546—1988

---

本检定规程经国家质量监督检验检疫总局于 2010 年 1 月 5 日批准，并自 2010 年 7 月 5 日起施行。

归口单位：全国电磁计量技术委员会

参加起草单位：中国测试技术研究院

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：**

李蜀伟（中国测试技术研究院）

侯小京（中国测试技术研究院）

**参加起草人：**

李秀芬（中国测试技术研究院）

## 目 录

1 范围 .....	(1)
2 引用文献 .....	(1)
3 概述 .....	(1)
3.1 比较电桥原理 .....	(1)
3.2 比较电桥结构 .....	(3)
4 计量性能要求 .....	(3)
4.1 准确度等级 .....	(3)
4.2 比较电桥的结构和各桥臂电阻的基本误差 .....	(4)
4.3 绝缘电阻对整体误差的影响 .....	(4)
5 通用技术要求 .....	(4)
5.1 外观及线路检查 .....	(4)
5.2 绝缘电阻 .....	(4)
5.3 介电强度试验 .....	(5)
6 计量器具控制 .....	(5)
6.1 检定条件 .....	(5)
6.2 检定项目 .....	(6)
6.3 检定方法 .....	(6)
6.4 检定结果的处理 .....	(9)
6.5 检定周期 .....	(9)
附录 A 原理公式推导 .....	(10)
附录 B 比例臂比值公式推导 .....	(13)
附录 C $\sum_{i=1}^n r_i$ 的计算 (参照表) .....	(14)
附录 D 直流比较电桥检定方法 .....	(15)
附录 E 直流比较电桥整体校验法 .....	(23)
附录 F 检定原始记录格式 .....	(24)
附录 G 检定证书内页格式 .....	(26)
附录 H 检定结果通知书内页格式 .....	(28)

## 直流比较电桥检定规程

### 1 范围

本规程适用于直流比较电桥（以下简称比较电桥）首次检定、后续检定和使用中的检验。

本规程不适用于普通单双电桥、自动电桥、半自动电桥、直流比较仪电桥、数字直流电桥及其他特殊用途电桥的检定。

### 2 引用文献

本规程引用下列文献：

JJF 1059—1999 测量不确定度评定与表示

JJF 1015—2002 计量器具型式评价和型式批准通用规范

GB/T 4793—2008 测量、控制和实验室用电气设备的安全要求

GB 3930—2008 测量电阻用直流电桥

JJG 166—1993 直流电阻器检定规程

JJG 125—2004 直流电桥检定规程

IEC 60564—1997 测量电阻用直流电桥

使用本规程时，应注意使用上述引用文献的现行有效版本。

### 3 概述

#### 3.1 比较电桥原理

比较电桥是专门为检定实验室用直流电桥和直流电阻箱等直流电阻仪器的特殊单电桥。其原理线路如图 1 所示。

图 1 中： $R_x$ ——被测电阻；

$R_N$ ——内附标准电阻，其标称值为： $1\ \Omega \sim 0.1\ \text{M}\Omega$ ；

$R_1$ ——比例臂电阻，由 6 个测量盘： $10 \times (1\ 000 + 100 + 10 + 1 + 0.1 + 0.01)\ \Omega$  组成读数盘  $M_1$ ；

$m_1$ ——等值平衡盘，由 3 个测量盘： $10 \times (1 + 0.1 + 0.01)\ \Omega$  组成；

$R_2$ ——比例臂电阻，由 6 个测量盘： $10 \times (1\ 000 + 100 + 10 + 1 + 0.1 + 0.01)\ \Omega$  组成比例臂  $M_2$ ；

$K_0$ ——换臂开关，在比较电桥等值调整时使桥臂  $R_1$  和  $R_2$  互换位置；

$K_r$ ——桥顶换接开关， $K_r$  分别在位置 1 和 2 时测量两次可求出导线电阻  $r_x$  的阻值；

$K_E$ ——电源换向开关；

$C_1$ 、 $P_1$ 、 $P_2$ 、 $C_2$ ——被测电阻  $R_x$  的电流和电压接线端钮；

$C_3$ 、 $P_3$ 、 $P_4$ 、 $C_4$ ——外接标准电阻  $R_N$  的电流和电压接线端钮；

$r_x$ ——被测桥臂与标准电阻桥臂之间的引线电阻（注：图中未标出具体位置）；

$r'_1$ 、 $r'_2$ ——分别为开关  $K_0$  在位置 1、1'（或 2、2'）时的接触电阻；

$r_1$ 、 $r_2$ ——分别为比例臂  $R_1$ 、 $R_2$  的连接导线电阻，阻值从  $K_0$  开关 1、1' 分别到  $R_N$ 、 $R_x$  的电位端。

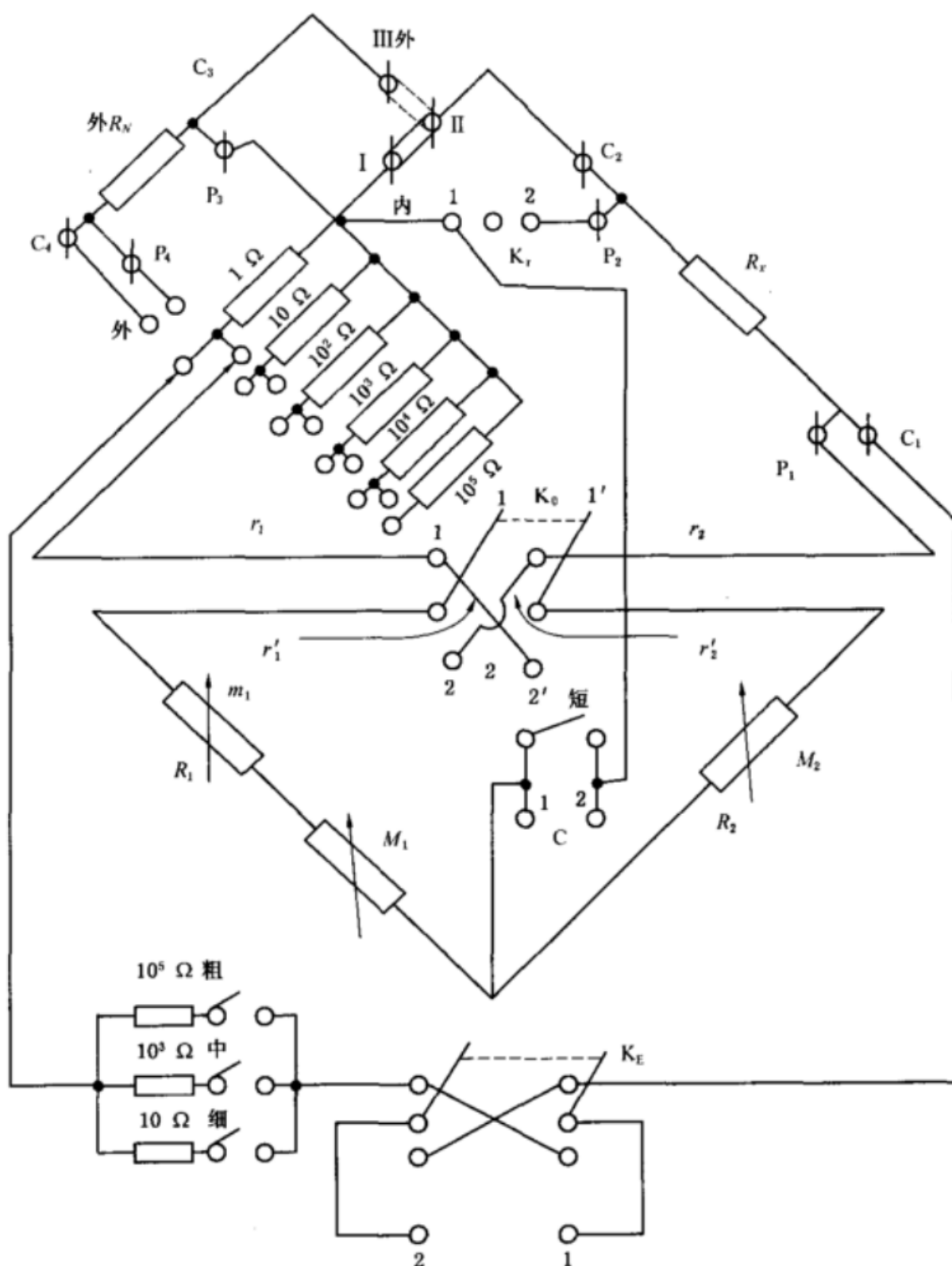


图 1 比较电桥原理线路图

比较电桥的被测电阻采用四端钮法接入被测桥臂  $R_x$  中, 与标准桥臂的标准电阻  $R_N$  或外接标准电阻进行比较。另外, 两桥臂  $R_2$  与  $R_1$  组成 0.1 到 1 的 10 个标准比例值。为消除桥臂电阻  $R_2$  和  $R_1$  的误差, 线路中设计了换臂开关  $K_0$ , 通过  $R_2$  和  $R_1$  换位, 调节等值平衡盘  $m_1$ , 实现  $R_1 = R_2$ , 使比值  $(R_2/R_1)$  为 1:1 时消除误差。为了使比值  $(R_2/R_1)$  为  $n:10$  时消除误差, 直流比较电桥  $R_2$  的  $10 \times 1\,000\ \Omega$  测量盘的 10 个电阻, 通过微调线路可将其误差调到一致, 这样  $R_2:R_1 = n:10$  比值误差将减小到可以忽略的程度。直流比较电桥装置的内附标准电阻与  $M_2$  的  $10 \times 1\,000\ \Omega$  测量盘没有微调结构, 内附标准电阻的误差与比例臂比值的误差, 需在计算过程中加以修正。

在用比较电桥检定仪器的过程中, 被检仪器的开关接触电阻与被测电阻同时接入, 不用单独的电位引线, 实现了电阻按元件检定, 保证了检定状态与实际使用状态的一致。

比较电桥分为直流比较电桥装置和直流比较电桥。直流比较电桥装置和直流比较电桥原理是一样的, 但各端钮符号, 各桥臂符号的表示不同, 使用公式时需要注意, 本规程中的符号均采用直流比较电桥。

### 3.2 比较电桥结构

#### 3.2.1 比较电桥比例臂

比较电桥比例臂  $M_2$  (或  $M_3$ ) 由 6 个十进盘  $10 \times (1\,000 + 100 + 10 + 1 + 0.1 + 0.01)\ \Omega$  组成, 对  $M_2$  (或  $M_3$ ) 的  $\times 1\,000\ \Omega$  盘 10 个电阻要求年变化一致, 不一致性小于  $5 \times 10^{-6}$ , 电阻温度系数相互间差值小于  $5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。这十个电阻应具有按元件检定的结构和措施 (即单独电位引线)。直流比较电桥装置的比例臂电阻  $M_2$  的  $10 \times 1\,000\ \Omega$  是固定电阻, 不可调; 直流比较电桥  $M_2$  的  $10 \times 1\,000\ \Omega$  盘的 10 个电阻做成可调, 调节范围 0.02%, 调节细度 0.000 1%。

#### 3.2.2 内附标准电阻

直流比较电桥装置的内附标准电阻组是不可调的固定电阻, 该比较电桥没有设外接标准电阻的端钮; 直流比较电桥的内附标准电阻组是可微调的, 调节范围 0.02%, 调节细度 0.000 1%, 该比较电桥设有外接标准电阻的端钮。

直流比较电桥设有外接标准电阻的端钮, 且使用时应使连接  $P_1$  端钮的接线电阻小于  $0.005\ \Omega$ 。

比较电桥内附标准电阻组的额定功率为 0.05 W。

## 4 计量性能要求

### 4.1 准确度等级

4.1.1 比较电桥准确度等级为 0.002 级。

4.1.2 比较电桥的测量范围、基本误差符合表 1 的规定。

4.1.3 比较电桥的内附标准电阻。

内附标准电阻组由  $1\ \Omega$ 、 $10\ \Omega$ 、 $100\ \Omega$ 、 $1\ \text{k}\Omega$ 、 $10\ \text{k}\Omega$  和  $100\ \text{k}\Omega$  六只标准电阻组成, 其计量性能应符合 JJG 166—1993《直流电阻器检定规程》中二等标准电阻的要求。

表 1 测量范围及基本误差

名 称	测量范围/ $\Omega$	基本误差/%
比较电桥	$10\sim 10^5$	$\pm 0.002$
	$0.1\sim 10$	$\pm 0.02$
	$0.001\sim 0.1$	$\pm 0.2$

## 4.2 比较电桥的结构和各桥臂电阻的基本误差

4.2.1 比较电桥比例臂电阻  $M_2$ 、 $M_1$  和  $m_1$  各测量盘基本误差不超过表 2 的规定。

## 4.2.2 内部连接导线电阻

比较电桥的内部连接导线电阻  $r_1$ 、 $r_2$  和开关  $K_0$  的接触电阻  $r'_1$ 、 $r'_2$  都应符合  $r_1 + r'_1 \approx r_2 + r'_2 \leq 0.01 \Omega$  和  $r_1 + r'_1 + (M_2)_0 \approx r_2 + r'_2 + (M_2)_0 \leq 0.02 \Omega$ 。

## 4.3 绝缘电阻对整体误差的影响

表 2  $M_2$ 、 $M_1$  和  $m_1$  各测量盘基本误差

桥臂电阻		$\times 1\,000 \Omega$	$\times 100 \Omega$	$\times 10 \Omega$	$\times 1 \Omega$	$\times 0.1 \Omega$	$\times 0.01 \Omega$
直流比较电桥 装置	$M_1$ ( $m_1$ )	$2 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-2}$	$1 \times 10^{-1}$
	$M_2$	$3.5 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-2}$	$1 \times 10^{-1}$
直流比较电桥	$M_1$ ( $M_2$ )	$2 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-2}$	$1 \times 10^{-1}$
	$M_3$	$1 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-2}$	$1 \times 10^{-1}$

4.3.1 比较电桥上的任意一个端钮（除非制造厂规定该端钮不允许接地外）与外壳（外壳必须接地，若比较电桥的外壳是绝缘材料，则比较电桥应放在金属板上，金属板再接地）连接时，引起指零仪偏转而产生的变差不应大于比较电桥允许基本误差的  $1/10$ 。

## 5 通用技术要求

## 5.1 外观及线路检查

## 5.1.1 外观、标志及结构

比较电桥面板上端钮应有明显的使用标志，开关和接线柱端钮应标明功能。并且不应有引起测量错误的、影响准确度等级的缺陷。

## 5.1.2 比较电桥的面板及铭牌应包含：

产品名称、型号、出厂编号、制造厂名称或商标；  
准确度等级；  
试验电压。

## 5.1.3 线路检查

比较电桥各桥臂测量盘线路不应有断路、短路或电阻值不正常的现象，各开关电刷应完好无损。

## 5.2 绝缘电阻



比较电桥线路对与线路无电气连接的任意点之间的绝缘电阻不小于 100 MΩ。

5.3 介电强度试验

将比较电桥的所有接线端钮连接在一起，与参考接地端之间进行介电强度试验时，应承受如表 3 规定的电压值情况下进行电压试验，历时 1 min，无击穿或飞弧现象。

表 3 试验电压（采用过压类别 II）

工作电压/V	试验电压/V	
	交流有效值 50/60 Hz 1 min	直流或交流峰值 50/60 Hz 1 min
600	2 200	3 100

6 计量器具控制

包括：首次检定、后续检定和使用中检验。

6.1 检定条件

6.1.1 比较电桥的环境条件

比较电桥的检定和使用应在表 4 规定的环境条件下进行。

表 4 比较电桥温度、湿度要求

名 称	等级指数 /（%）	检定环境条件		使用环境条件	
		温度/℃	相对湿度	温度/℃	相对湿度
直流比较电桥装置	0.002	20±1	(40~60)%	20±3	(25~75)%
直流比较电桥	0.002	20±1		20±2	

比较电桥的等级指数、参考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 4 的规定。

6.1.2 检定装置

6.1.2.1 检定比较电桥时，由标准器、辅助设备及环境条件等所引起的测量扩展不确定度应不超过被检比较电桥允许误差的 1/3。

6.1.2.2 比较电桥内附标准电阻检定的测量扩展不确定度，应满足 JJG 166—1993《直流电阻器检定规程》中二等标准电阻器的要求。

6.1.2.3 检定比较电桥比例臂比值  $K_{(n/10)}$  的测量扩展不确定度，不应超过被检比较电桥等级指数的 1/10。对  $M_2$  的  $10 \times 1\,000\,\Omega$  同标称值电阻测量装置，其测量扩展不确定度不应超过被检比较电桥等级指数的 1/20。

6.1.2.4 检定比较电桥各桥臂测量盘的允许误差时，流过标准电阻的电流均不应超过它们的允许值。如果对此没有明确规定，则不应超过相当于 0.05 W 功率，但不得大于 0.5 A。

6.1.2.5 按元件检定比较电桥的比例臂电阻  $M_1$ 、 $m_1$  和  $M_2$  时，可按 0.02 级直流电桥

的测量盘要求检定各测量盘电阻，其测量误差、基本误差、选用标准电阻准确度等级应满足表 5 的要求。

6.1.2.6 按元件检定比较电桥时，采用替代法或其他方法时，测量时所用仪器引起的误差不应超过被检比较电桥电阻元件允许误差的  $1/10$ 。

6.1.2.7 检定比较电桥时，指零仪灵敏度阀引起的误差不应超过被检元件允许误差的  $1/10$ 。

表 5 比较电桥各测量盘电阻测量误差、基本误差

测量盘/ $\Omega$		基本误差	测量误差	修约位数	标准电阻
$M_1$ ( $M_2$ )	$\times 1\,000$	$2 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$	二等
	$\times 100$	$2 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-5}$
	$\times 10$	$5 \times 10^{-4}$	$1.6 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-5}$
	$\times 1$	$1 \times 10^{-3}$	$3 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-4}$	/
	$\times 0.1$	$1 \times 10^{-2}$	$3 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-3}$	/
	$\times 0.01$	$1 \times 10^{-1}$	$3 \times 10^{-2}$	$1 \times 10^{-2}$	/
$m_1$	$\times 1$	$1 \times 10^{-3}$	$3 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-4}$	/
	$\times 0.1$	$1 \times 10^{-2}$	$3 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-3}$	/
	$\times 0.01$	$1 \times 10^{-1}$	$3 \times 10^{-2}$	$1 \times 10^{-2}$	/

6.1.2.8 检定比较电桥的检定装置中残余电势、开关接触电阻变差、连接导线电阻、绝缘电阻引起的泄漏及静电等因素所引起的误差，都不应超过被检比较电桥允许误差的  $1/20$ 。

6.1.2.9 在保证测量扩展不确定度的条件下，允许采用其他误差分配方法。

### 6.1.3 绝缘电阻检定

采用直流电压值为 500 V 的 10 级绝缘电阻表。

### 6.1.4 用于介电强度试验的耐压试验仪的要求

6.1.4.1 耐电压测试仪准确度等级不低于 5 级。

6.1.4.2 输出电压的调节应连续、平稳；电压调节细度小于 100 V。

6.1.4.3 为避免瞬态跳变，电压应在 10 s 以内逐步升到规定值。然后保持 1 min。

## 6.2 检定项目

比较电桥检定项目见表 6。

## 6.3 检定方法

### 6.3.1 检定前准备

比较电桥应在检定环境条件下，稳定放置时间不少于 24 h。

### 6.3.2 外观及线路检查

6.3.2.1 比较电桥外观及铭牌检查

用目测的方法检查比较电桥铭牌和外壳上的标志,应符合 5.1.1 和 5.1.2 的规定。对使用中的比较电桥,如发现有严重影响比较电桥计量性能的缺陷时,应在修复后再检定。

表 6 检定项目一览表

类型检定 检定项目	首次检定	后续检定	使用中检验
外观及线路检查	+	+	+
绝缘电阻	+	—*	—
绝缘电阻对整体误差影响	+	+	—
介电强度试验	+	—*	—
内附标准电阻基本误差	+	+	+
比值 $K_{n/10}$ 基本误差	+	+	+
桥臂各测量盘基本误差	+	+	+
$r_1+r'_1+(M_2)_0$	+	+	+
$r_2+r'_2+(M_2)_0$	+	+	+
注:①“+”表示检定;“—”表示可不检定。②*电桥经修理后,工频耐压试验需检定。			

6.3.2.2 比较电桥线路检查

用电阻表检查比较电桥内部各桥臂测量盘电阻元件和开关状态,不应有开路、短路或电阻值不正常的现象。比较电桥实际线路应和铭牌上的线路(或使用说明书上的线路)相符合。如发现有不正常时,应查明原因,修复后再检定。

6.3.2.3 比较电桥元件检定接线方式

根据比较电桥线路,按四端式连接方法找出电桥的节点(又称顶点),确定检定时的接线位置。检定比较电桥时的接线方式,如表 7。

表 7 检定比较电桥接线方式

检定用标准电桥	端钮位置		$C_1$	$P_1$	$P_2$	$C_2$
被检电桥	直流比较电桥	测 $R_1$ 端钮位置	$P_1 (R_2=0)$	$G_2$	$P_1 (K_0 \text{ 置“1”})$ 开关 $R_N$ “外接”	$P_1 (K_0 \text{ 置“1”})$ 开 $R_N$ “外接”
		测 $R_2$ 端钮位置	$P_1 (M_1=0, m_1=0)$ 开关 $R_N$ “外接”	$G_2$	$P_1 (K_0 \text{ 置“1”})$	$P_1 (K_0 \text{ 置“1”})$
	直流比较电桥装置	测 $R_2$ 端钮位置	$E_L$ (开关 $K_E$ “+” 开关 $K_0$ “2”)	$G_F$	$P_2 (R_3=0)$	$P_2 (R_3=0)$
		测 $R_3$ 端钮位置	$E_L$ (开关 $K_E$ “+” 开关 $K_0$ “1”)	$G_F$	$P_2 (R_2=0)$	$P_2 (R_2=0)$

### 6.3.3 绝缘电阻检定

在外观及线路检查后,在使用环境条件下放置不小于 24 h。可开展绝缘电阻及其他检定项目。

#### 6.3.3.1 绝缘电阻测量

按 6.1.3 的要求,选择绝缘电阻表,按 5.2 规定的测量部位,测量其绝缘电阻,绝缘电阻表上的读数应在电压施加后 (1~2) min 之间进行。

#### 6.3.3.2 绝缘电阻对整体误差影响的检定

a) 将被检比较电桥外壳接地,在比较电桥测量端钮处,接上数值等于比较电桥测量上限值的电阻,调节测量盘使比较电桥平衡,此时,测量装置的灵敏度不应低于 1 分格 (即  $10^{-6}$ )。随后另取一根接地线分别接到被检比较电桥各接线端钮 (制造厂规定不允许接地的端钮除外),观察检流计的偏转所引起的变差,若不大于比较电桥允许基本误差的 1/10,则认为该比较电桥的绝缘电阻对整体误差影响试验合格。

#### b) 泄漏电流屏蔽线路对整体误差影响的检定

由于比较电桥带有泄漏电流屏蔽线路,在测量大电阻时,泄漏电流会给测量带来影响。接上数值等于比较电桥测量上限值的电阻,首先根据制造厂提供的测量线路接好泄漏电流屏蔽线路,调节测量盘使比较电桥平衡,测量装置的灵敏度不应低于 1 分格 (即  $10^{-6}$ )。然后断开泄漏电流屏蔽线路,观察检流计的偏转所引起的变差,若不大于比较电桥允许基本误差的 1/10,则认为该比较电桥的绝缘电阻对整体误差影响试验合格。

### 6.3.4 介电强度试验

按 6.1.4 的要求,选择耐压试验仪,将被检比较电桥所有接线端钮用裸铜线连接在一起,与参考接地端之间 (试验用的参考接地端应包括所有与此线路无电气连接的金属部件,作为参考接地端) 进行工频耐压测试,试验电压应符合 5.3 的技术要求,试验应无击穿或飞弧现象。

### 6.3.5 基本误差的检定

比较电桥的检定方法采用元件检定法,利用标准仪器设备去测量比较电桥的各电阻元件的实际值。

#### 6.3.5.1 各桥臂测量盘基本误差的检定

各桥臂测量盘基本误差的检定可参照本检定规程附录 E 的方法,也可参照 JJG 125—2004《直流电桥检定规程》附录中的方法。

#### 6.3.5.2 内附标准电阻的检定及调整

比较电桥内附标准电阻的检定及调整,应根据 JJG 166—1993《直流电阻器检定规程》中二等标准电阻器的要求进行检定。

比较电桥内附标准电阻的检定在调整前后分别进行,调整前的检定值作为观察年变化用,调整后的检定值作为本次检定结果。调整后的检定必须待电阻稳定后进行。

#### 6.3.5.3 比较电桥比例臂比值 $K_{(n/10)}$ 的检定

检定方法见本规程附录 D。

#### 6.3.5.4 比较电桥开关 $K_0$ 接触电阻及连接导线电阻的检定

$r_1 + r'_1 + (M_2)_0$  及  $r_2 + r'_2 + (M_2)_0$  的检定方法见本规程附录 D。

6.3.5.5 对自行组装的比较电桥，在检定时可参照本规程。

6.3.5.6 在保证 6.1.2.1 条所提出的测量扩展不确定度的条件下，允许采用本规程以外的方法进行检定。如有争议时，应以本规程规定的方法为准。

#### 6.4 检定结果的处理

6.4.1 比较电桥的检定结果应该以内附标准电阻  $R_N$  的误差与比例臂比值  $K_{(n/10)}$  的误差代数和的最大值作为比较电桥的误差。

6.4.2 内附标准电阻  $R_N$  与比例臂比值  $K_{(n/10)}$  的检定数据应修约到  $1 \times 10^{-6}$ ，对比例臂  $M_1$ 、 $M_2$ 、 $m_1$  各测量盘的检定数据应按表 5 进行修约。数据修约时应采用四舍五入及偶数法则，修约到允许误差的  $1/10$ 。在判断比较电桥合格或不合格时，一律以修约后的数据为准。

6.4.3 所有检定项目合格时，判定该比较电桥合格，出具检定证书；若有一项不合格则判为不合格，出具检定结果通知书，并注明不合格情况。检定证书或检定结果通知书均应给出数据。

6.4.4 初次送检（包括缺少上一年检定证书的、超周期送检的和刚修理过的）比较电桥检定结果合格的，出具检定证书，但不予定级，并在检定证书上注明：“基本误差合格，年稳定度未经考察暂不定级”。

#### 6.5 检定周期

直流比较电桥的检定周期不超过 1 年。

## 附录 A

## 原理公式推导

以直流比较电桥（以 QJ 48 为例）检定被测某一盘的操作步骤为例，原理线路如图 1 所示。

第一步：等值平衡

桥臂选择： $R_x$  置  $10^4 \Omega$ ， $R_N$  置  $10^4 \Omega$ ， $M_1$  置  $10^4 \Omega$ ， $M_2$  置  $10 \times 10^3 \Omega$ ，即：

$$R_1 = (M_1)_{10} + m_1 + (M_1)_0 + (m_1)_0 + r_1 + r'_1$$

$$R_2 = (M_2)_{10} + (M_2)_0 + r_2 + r'_2$$

调  $m_1$  直至开关  $K_0$  换向置“1”，“2”时，使得检流计指针指在同一位置上。由等值平衡得：

$$(M_1)_{10} + m_1 + (M_1)_0 + (m_1)_0 = (M_2)_{10} + (M_2)_0$$

又因为： $r_1 + r'_1 \approx r_2 + r'_2$

$$\text{则：} R_1 = R_2 \quad (\text{A. 1})$$

$$\text{故将式：} K_{(n/10)} = \frac{(M_2)_n + (M_2)_0 + r_2 + r'_2}{(M_1)_{10} + m_1 + (M_1)_0 + (m_1)_0 + r_1 + r'_1}$$

$$\begin{aligned} \text{改写成：} K_{(n/10)} &= \frac{(M_2)_n + (M_2)_0 + r_2 + r'_2}{(M_2)_{10} + (M_2)_0 + r_1 + r'_1} \\ &= \frac{\sum_{i=1}^n R_i^1 + (M_2)_0 + r_2 + r'_2}{\sum_{i=1}^{10} R_i^1 + (M_2)_0 + r_1 + r'_1} \quad (\text{A. 2}) \end{aligned}$$

式中： $(M_1)_{10}$ —— $M_1$  置  $10^4 \Omega$ ；

$(M_2)_n$ —— $M_2$  的  $\times 1\,000 \Omega$  盘置  $n$ （指  $n \times 1\,000 \Omega$ ）；

$$\sum_{i=1}^n R_i^1 = (M_2)_n;$$

$m_1$ ——测量盘  $m_1$  的示值；

$(m_1)_0$ ——测量盘  $m_1$  的残余电阻；

$R_i^1$ —— $M_2$  的  $\times 1\,000 \Omega$  盘的第  $i$  个电阻值。

第二步：零位平衡

桥臂选择： $R_x$  和  $M_2$  先置零， $R_N$  置与被检测量盘的满度值的同标称值， $M_1$  标称值不变。

调节  $R_x$  或  $M_2$  直至使电桥平衡，得：

$$\frac{R_N}{\sum_{i=1}^{10} R_i^1 + (M_2)_0 + r_1 + r'_1} = \frac{(R_x)_0 + r_x + r'_0}{(M_2)_0 + r_2 + r'_2} \quad (\text{A. 3})$$

式中： $(R_x)_0$ —— $R_x$  臂的零电阻；

$r_0$ ——零位平衡时的调整值。

第三步：测量

桥臂选择：对该盘检完为止不要动零位平衡时的调整值  $r_0$ ， $R_N$  与  $M_1$  值保持不变，

当被测量值置  $\sum_x^n R_{xi}$  时， $M_2$  的  $\times 1\,000\ \Omega$  测量盘也置  $n$ （指  $n \times 1\,000\ \Omega$ ）。

调节  $M_1$  直至电桥平衡得：

$$\frac{R_N}{\sum_1^{10} R_i^I + [(M_2)_0 + r_1 + r'_1 + \delta']} = \frac{\sum_1^n R_{xi} + (R_x)_0 + r_x + r_0}{\sum_1^n R_i^I + (M_2)_0 + r_2 + r'_2} \quad (\text{A. 4})$$

因为  $\sum_1^{10} R_i^I + [(M_2)_0 + r_1 + r'_1] + \delta' \approx \sum_1^{10} R_i^I + [(M_2)_0 + r_1 + r'_1]$ ，由式 (A. 3)

与式 (A. 4) 中可知，利用比例性质，可以写成：

$$\begin{aligned} \frac{R_N}{\sum_1^{10} R_i^I + [(M_2)_0 + r_1 + r'_1] + \delta'} &= \frac{\sum_1^n R_{xi}}{\sum_1^n R_i^I} \quad (\text{A. 5}) \\ \sum_1^n R_{xi} &= \frac{\sum_1^n R_i^I}{\sum_1^{10} R_i^I + [(M_2)_0 + r_1 + r'_1] + \delta'} R_N \\ &= \frac{n \times 1\,000 + \Delta \sum_1^n R_i^I}{10 \times 1\,000 + \Delta \sum_1^n R_i^I + [(M_2)_0 + r_1 + r'_1] + \delta'} R_{NH} (1 + \delta_N) \\ &= \frac{n \left( 1 + \frac{1}{n} \Delta \sum_1^n R_i^I \times 10^{-3} \right) R_{NH} (1 + \delta_N)}{10 \left[ 1 + \frac{1}{10} \Delta \sum_1^n R_i^I \times 10^{-3} + [(M_2)_0 + r_1 + r'_1] \times 10^{-4} + \delta' \times 10^{-4} \right]} \\ &= R_{NH} \frac{n}{10} \left[ 1 + \frac{1}{n} \Delta \sum_1^n R_i^I \times 10^{-3} - \frac{1}{10} \Delta \sum_i^{10} R_i^I \times 10^{-3} \right. \\ &\quad \left. - [(M_2)_0 + r_1 + r'_1] \times 10^{-4} + \delta_N - \delta_1 \right] \\ &= \frac{R_{NH}}{10} \left[ n + \Delta \sum_1^n R_i^I \times 10^{-3} - \frac{n}{10} \Delta \sum_1^n R_i^I \times 10^{-3} \right. \\ &\quad \left. - n [(M_2)_0 + r_1 + r'_1] \times 10^{-4} + n (\delta_N - \delta_1) \right] \\ &= R_{XH} + \frac{R_{NH}}{10} \left[ \Delta \sum_1^n R_i^I \times 10^{-3} - \frac{n}{10} \Delta \sum_1^{10} R_i^I \times 10^{-3} \right. \\ &\quad \left. - n [(M_2)_0 + r_1 + r'_1] \times 10^{-4} + n (\delta_N - \delta_1) \right] \end{aligned}$$

$$= R_{XH} + \frac{R_{NH}}{10} \left[ \sum_1^n r_i + n(\delta_N - \delta_1) \right]$$

$$\text{则:} \quad \Delta \sum_1^n R_x = \frac{R_{NH}}{10} \left[ \sum_1^n r_i + n(\delta_N - \delta_1) \right] \quad (\text{A. 6})$$

式中:  $\delta_1 = \delta' \times 10^{-4}$ ;

$\delta'$ ——电桥平衡调整值;

$$\sum_1^n r_i = \Delta \sum_1^n R_i^1 \times 10^{-3} - \frac{n}{10} \Delta \sum_1^{10} R_i^1 \times 10^{-3} - n[(M_2)_0 + r_1 + r_1'] \times 10^{-4}。$$

结论:

(1) 公式 (A. 6) 为被测电阻的修正值计算公式。

(2) 由公式 (A. 1) 可知, 等值平衡使得当  $R_1 : R_2 = 1 : 1$  时消除了比值的误差。

(3) 由公式 (A. 3)、(A. 4)、(A. 5) 可知, 零位平衡消除了残余电阻和引线电阻对  $R_2$  臂和  $R_x$  臂的影响, 则可以说, 零位平衡消除了残余电阻和引线电阻的影响。

(4) 公式 (A. 6) 中的  $\sum_1^n r_i$  与  $\delta_N$  值:

直流比较电桥装置每年周期检定时测出该值。该电桥在使用时, 在计算的过程中进行修正。

直流比较电桥每年周期检定时, 对  $R_N$  与  $M_2$  的  $10 \times 1\,000\ \Omega$  盘进行调整, 使得  $\sum_1^n r_i$  与  $\delta_N$  值小到可以忽略的程度。

总之, 比较电桥  $R_x$  与  $R_N$  按照四端电阻接法接线。采用零位平衡方法消除引线电阻的影响, 等值平衡和调整或计算方法消除了比例臂比值和比较臂误差, 从而使精度提高。



## 附录 B

## 比例臂比值公式推导

$$\begin{aligned}
K_{(n/10)} &= \frac{(M_2)_n}{(M_2)_{10} + [(M_2)_{10} + r_1 + r'_1]} = \frac{\sum_1^n R_i^I}{\sum_1^{10} R_i^I + [(M_2)_0 + r_1 + r'_1]} \\
&= \frac{n \times 1\,000 + \Delta \sum_1^n R_i^I}{10 \times 1\,000 + \Delta \sum_1^{10} R_i^I + [(M_2)_0 + r_1 + r'_1]} \\
&= \frac{n \left( 1 + \frac{1}{n} \Delta \sum_1^n R_i^I \times 10^{-3} \right)}{10 \left[ 1 + \frac{1}{10} \Delta \sum_1^{10} R_i^I \times 10^{-3} + [(M_2)_0 + r_1 + r'_1] \times 10^{-4} \right]} \\
&= \frac{n}{10} \left[ 1 + \frac{1}{n} \Delta \sum_1^n R_i^I \times 10^{-3} - \frac{1}{10} \Delta \sum_1^{10} R_i^I \times 10^{-3} - [(M_2)_0 + r_1 + r'_1] \times 10^{-4} \right]
\end{aligned}$$

由此可见：

$K_{(n/10)}$  的绝对修正值为：

$$\Delta K_{(n/10)} = \frac{n}{10} \left[ \frac{1}{n} \Delta \sum_1^n R_i^I \times 10^{-3} - \frac{1}{10} \Delta \sum_1^{10} R_i^I \times 10^{-3} - [(M_2)_0 + r_1 + r'_1] \times 10^{-4} \right]$$

$K_{(n/10)}$  的相对修正值为：

$$\delta_K = \frac{1}{n} \Delta \sum_1^n R_i^I \times 10^{-3} - \frac{1}{10} \Delta \sum_1^{10} R_i^I \times 10^{-3} - [(M_2)_0 + r_1 + r'_1] \times 10^{-4}$$

显然公式 (A.6) 中

$$\sum_1^n r = \Delta \sum_1^n R_i^I \times 10^{-3} - \frac{n}{10} \Delta \sum_1^{10} R_i^I \times 10^{-3} - n [(M_2)_{10} + r_1 + r'_1] \times 10^{-4}$$

## 附录 C

 $\sum_1^n r_i$  的计算 (参照表)

$M_2$ 的 $\times 1\,000\ \Omega$ 盘每个电阻值 (测得的值)	每个电阻 的读数相 对修正值	$\sum_1^n r_i$
		$\Delta \sum_1^n R_i^I \times 10^{-3} - \frac{n}{10} \Delta \sum_1^{10} R_i^I \times 10^{-3} - n[(M_2)_0 + r_1 + r'_1] \times 10^{-4}$
$1\,000 + \Delta R_1^I$	$\Delta R_1^I \times 10^{-3}$	$\Delta R_1^I \times 10^{-3} - \frac{1}{10} \Delta \sum_1^{10} R_i^I \times 10^{-3} - [(M_2)_0 + r_1 + r'_1] \times 10^{-4}$
$1\,000 + \Delta R_2^I$	$\Delta R_2^I \times 10^{-3}$	$(\Delta R_1^I + \Delta R_2^I) \times 10^{-3} - \frac{2}{10} \Delta \sum_1^{10} R_i^I \times 10^{-3} - 2[(M_2)_0 + r_1 + r'_1] \times 10^{-4}$
$1\,000 + \Delta R_3^I$	$\Delta R_3^I \times 10^{-3}$	$\Delta \sum_1^3 R_i^I \times 10^{-3} - \frac{3}{10} \Delta \sum_1^{10} R_i^I \times 10^{-3} - 3[(M_2)_0 + r_1 + r'_1] \times 10^{-4}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$1\,000 + \Delta R_n^I$	$\Delta R_n^I \times 10^{-3}$	$\sum_1^n R_i^I \times 10^{-3} - \frac{n}{10} \Delta \sum_1^{10} R_i^I \times 10^{-3} - n[(M_2)_0 + r_1 + r'_1] \times 10^{-4}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$1\,000 + \Delta R_{10}^I$	$\Delta R_{10}^I \times 10^{-3}$	$\sum_1^{10} R_i^I \times 10^{-3} - \frac{10}{10} \Delta \sum_1^{10} R_i^I \times 10^{-3} - 10[(M_2)_0 + r_1 + r'_1] \times 10^{-4}$

## 附录 D

## 直流比较电桥检定方法

D.1 比例臂  $M_2$ ,  $M_1$  和  $m_1$  的检定

## D.1.1 十进盘替代法

## D.1.1.1 原理

用后一盘的 10 个步进值电阻同前一盘的每一个步进值电阻在被检比较电桥比例臂  $R_2$  上作替代比较, 后一盘的 10 个步进值电阻由二等标准电阻器来标定, 通过计算求出前一盘每一个步进值电阻的实际值, 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。

## D.1.2 线路

a) 检定比例盘  $M_2$  的原理线路如图 D.1 所示,  $K_0$  开关置于位置 1。

b) 检定读数盘  $M_1$  和等值平衡盘  $m_1$  的原理线路如图 D.1 所示,  $K_0$  开关置于位置 2。

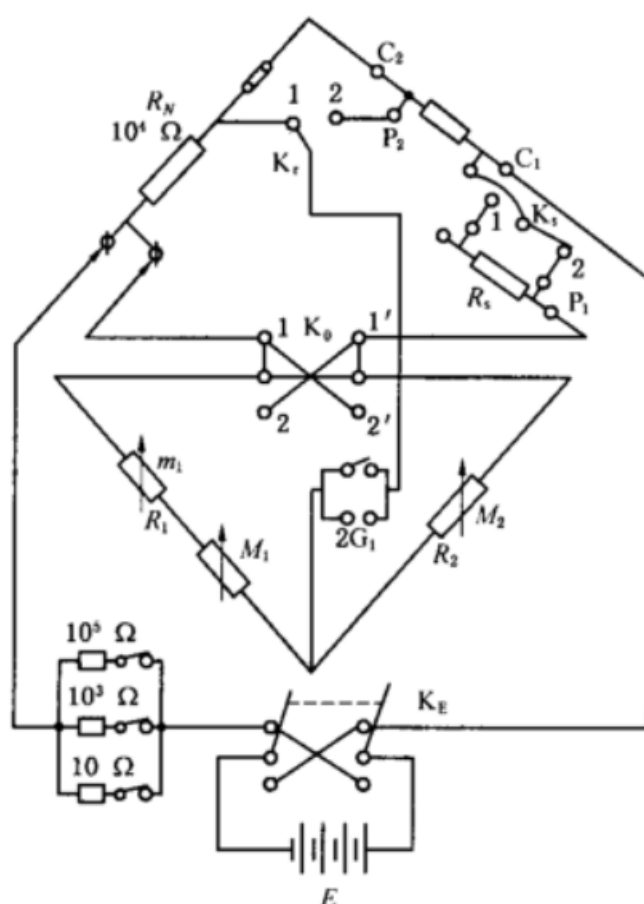


图 D.1 比较电桥比例臂检定原理线路图

D.1.3 比例盘  $M_2$  的检定过程比例盘  $M_2 \times 1\,000\ \Omega$  盘的检定过程

## (1) 电桥参数选择

比较臂  $R_N$ : 选择  $10^4\ \Omega$  内附标准电阻;测量臂  $R_x$ : 选 0.01 级或 0.02 级电阻箱的  $\times 1\,000\ \Omega$  盘;比例臂  $R_1$ : 选  $M_1$  示值置  $10\,000\ \Omega$ ,  $m_1$  的  $\times 1\ \Omega$  盘示值置 5, 其余盘置零;开关  $K_r$ 、 $K_0$  均置 1;在比较电桥比例臂  $R_2$  的  $P_1$  端接进  $10^3\ \Omega$  二等标准电阻  $R_s$ 。

## (2) 检定步骤

a) 将  $M_2$  所有十进盘示值置零,  $R_x \times 1\,000\ \Omega$  盘示值置 1, 其余盘示值置零, 开关  $K_s$  置 1, 接通电源  $E$ , 调节  $M_1$  十进盘使电桥平衡, 记录  $M_1$  的示值为  $a_s$ 。

b) 开关  $K_s$  置 2, 置  $M_2 \times 100\ \Omega$  盘示值为 10, 调节  $M_1$  使电桥平衡, 记录  $M_1$  示值为  $b_1^I$ 。

上述步骤 a) 和 b), 进行了  $M_2 \times 100\ \Omega$  盘的十个步进电阻值  $\sum_1^{10} R_i^{\text{II}}$  与标准电阻  $R_s$  的比较, 其差值  $\Delta_0$  为:

$$\Delta_0 = \sum_1^{10} R_i^{\text{II}} - R_s = \frac{1}{10}(b_1^I - a_s)$$

$$\sum_1^{10} R_i^{\text{II}} = R_s + \Delta_0 = R_s + \frac{1}{10}(b_1^I - a_s) \quad (\text{D.1})$$

c) 将  $M_2 \times 100\ \Omega$  盘示值由 10 退回到零,  $M_2 \times 1\,000\ \Omega$  盘示值由零进 1, 调节  $M_1$  使电桥平衡, 记录  $M_1$  的示值为  $a_1^I$ 。

步骤 b) 和 c) 进行了  $M_2 \times 1\,000\ \Omega$  盘第 1 个电阻元件值  $R_1^I$  与  $M_2 \times 100\ \Omega$  盘 10 个步进电阻值  $\sum_1^{10} R_i^{\text{II}}$  的比较, 其差值  $\Delta_1^I$  为:

$$\Delta_1^I = R_1^I - \sum_1^{10} R_i^{\text{II}} = \frac{1}{10}(a_1^I - b_1^I)$$

$$R_1^I = \sum_1^{10} R_i^{\text{II}} + \Delta_1^I = R_s + \frac{1}{10}(a_1^I - a_s) \quad (\text{D.2})$$

d) 将  $R_x \times 1\,000\ \Omega$  盘示值由 1 进到 2,  $M_2 \times 100\ \Omega$  盘示值由零到 10,  $M_2 \times 1\,000\ \Omega$  盘示值仍为 1, 调节  $M_1$  使电桥平衡, 记录  $M_1$  的平衡示值  $b_2^I$ 。

e) 将  $M_2 \times 100\ \Omega$  盘示值由 10 退到零,  $M_2 \times 1\,000\ \Omega$  盘示值由 1 进到 2, 调节  $M_1$  使电桥平衡, 记录  $M_1$  的平衡示值  $a_2^I$ 。

步骤 d) 和 e) 进行了  $M_2 \times 1\,000\ \Omega$  盘第 2 个电阻元件值  $R_2^I$  与  $M_2 \times 100\ \Omega$  盘 10 个步进电阻值  $\sum_1^{10} R_i^{\text{II}}$  的比较, 其差值  $\Delta_2^I$  为:

$$\Delta_2^I = R_2^I - \sum_1^{10} R_i^{\text{II}} = \frac{2}{10}(a_2^I - b_2^I)$$

$$R_2^I = \sum_1^{10} R_i^{\text{II}} + \Delta_2^I = R_s + \frac{2}{10}(a_2^I - b_2^I) + \frac{1}{10}(b_1^I - a_s) \quad (\text{D. 3})$$

类同 a)~e), 可得:

$$\Delta_i^I = R_i^I - \sum_1^{10} R_i^{\text{II}} = \frac{i}{10}(a_i^I - b_i^I) \quad (\text{D. 4})$$

$$R_i^I = \sum_1^{10} R_i^{\text{II}} + \Delta_i^I = \sum_1^{10} R_i^{\text{II}} + \frac{i}{10}(a_i^I - b_i^I) \quad (\text{D. 5})$$

累积可得:

$$\sum_1^n R_i^I = n \sum_1^{10} R_i^{\text{II}} + \sum_1^n \Delta_i^I \quad (\text{D. 6})$$

式中:  $\sum_1^{10} R_i^{\text{II}} = R_s + \frac{1}{10}(b_1^I - a_s)$

$$\Delta_i^I = \frac{i}{10}(a_i^I - b_i^I)$$

(3)  $M_2$  后几盘的检定

a) 电桥桥臂参数选择, 参照表 D. 1。

表 D. 1 电桥桥臂参数选择表

被 检 测 量 盘	各 桥 臂 参 数	
$i \times 100$	$R_N: 10^4$	$R_x: i \times 10^2$
	$M_1: 10^4, m_1: 5$	$M_2: i \times 10^2$
$i \times 10$	$R_N: 10^4$	$R_x: i \times 10$
	$M_1: 10^4, m_1: 5$	$M_2: i \times 10$
$i \times 1$	$R_N: 10^4$	$R_x: i \times 10$
	$M_1: 10^3, m_1: 0$	$M_2: i \times 1$
$i \times 0.1$	$R_N: 10^4$	$R_x: i \times 10$
	$M_1: 10^2, m_1: 0$	$M_2: i \times 0.1$
$i \times 0.01$	$R_N: 10^4$	$R_x: 10^3$
	$M_1: 10^4, m_1: 5$	$M_2: 10^3 + i \times 0.01$

b) 对与  $M_2$  的第二、三、四、五盘的检定, 类同第一盘。例如: 表 D. 2 中列入了检定第二盘的数据,  $\sum_1^{10} R_i^{\text{II}}$  接入或被  $R_i^{\text{II}}$  替代的顺序, 以及被测电阻值的计算公式。

由表 D. 2 可见, 第二盘电阻实际值计算公式为:

$$\sum_1^n R_i^{\text{II}} = \sum_1^{10} R_i^{\text{II}} + \sum_1^n \Delta_i^{\text{II}} \quad (\text{D. 7})$$

表 D.2 十进制替代法计算公式表

$R_i^I$ 示值	$\sum_1^{10} R_i^{\text{II}}$ 示值	电桥的读数		差值 $\Delta_i^I$ $\Delta_i^I = R_i^I - \sum_1^{10} R_i^{\text{II}}$	被测盘每个步进值 $R_i^I$ 的计算公式	被测的实际值 $\sum_1^N R_i^I$ 的计算公式
		$M_i$	$K = \frac{R_x}{R_N}$			
0	1	$b_1^{\text{II}}$	$\frac{1}{100}$	$\Delta_1^I = R_1^I - \sum_1^{10} R_i^{\text{II}} = \frac{1}{100}(a_1^{\text{II}} - b_1^{\text{II}})$	$R_1^I = \sum_1^{10} R_i^{\text{II}} + \Delta_1^I$	$R_1^I = \sum_1^{10} R_i^{\text{II}} + \Delta_1^I$
1	0	$a_1^{\text{II}}$				
1	1	$b_2^{\text{II}}$	$\frac{2}{100}$	$\Delta_2^I = R_2^I - \sum_1^{10} R_i^{\text{II}} = \frac{2}{100}(a_1^{\text{II}} - b_2^{\text{II}})$	$R_2^I = \sum_1^{10} R_i^{\text{II}} + \Delta_2^I$	$\sum_1^2 R_i^I = 2 \times \sum_1^{10} R_i^{\text{II}} + \sum_1^2 \Delta_i^I$
2	0	$a_2^{\text{II}}$				
2	1	$b_3^{\text{II}}$	$\frac{3}{100}$	$\Delta_3^I = R_3^I - \sum_1^{10} R_i^{\text{II}} = \frac{3}{100}(a_1^{\text{II}} - b_3^{\text{II}})$	$R_3^I = \sum_1^{10} R_i^{\text{II}} + \Delta_3^I$	$\sum_1^3 R_i^I = 3 \times \sum_1^{10} R_i^{\text{II}} + \sum_1^3 \Delta_i^I$
3	0	$a_3^{\text{II}}$				
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$i-1$	1	$b_i^{\text{II}}$	$\frac{i}{100}$	$\Delta_i^I = R_i^I - \sum_1^{10} R_i^{\text{II}} = \frac{i}{100}(a_i^{\text{II}} - b_i^{\text{II}})$	$R_i^I = \sum_1^{10} R_i^{\text{II}} + \Delta_i^I$	$\sum_1^i R_i^I = i \times \sum_1^{10} R_i^{\text{II}} + \sum_1^i \Delta_i^I$
$i$	0	$a_i^{\text{II}}$				
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
8	1	$b_9^{\text{II}}$	$\frac{9}{100}$	$\Delta_9^I = R_9^I - \sum_1^{10} R_i^{\text{II}} = \frac{9}{100}(a_i^{\text{II}} - b_9^{\text{II}})$	$R_9^I = \sum_1^{10} R_i^{\text{II}} + \Delta_9^I$	$\sum_1^9 R_i^I = 9 \times \sum_1^{10} R_i^{\text{II}} + \sum_1^9 \Delta_i^I$
9	0	$a_9^{\text{II}}$				
9	1	$b_{10}^{\text{II}}$	$\frac{10}{100}$	$\Delta_{10}^I = R_{10}^I - \sum_1^{10} R_i^{\text{II}} = \frac{10}{100}(a_{10}^{\text{II}} - b_{10}^{\text{II}})$	$R_{10}^I = \sum_1^{10} R_i^{\text{II}} + \Delta_{10}^I$	$\sum_1^{10} R_i^I = 10 \times \sum_1^{10} R_i^{\text{II}} + \sum_1^{10} \Delta_i^I$
10	0	$a_{10}^{\text{II}}$				

注:  $\sum_1^N R_i^I = n \sum_1^{10} R_i^{\text{II}} + \sum_1^N \Delta_i^I$  ...这是第二盘计算公式。其中:  $\sum_1^{10} R_i^{\text{II}} = \frac{1}{10}(\sum_1^{10} R_i^I - \sum_1^{10} \Delta_i^I)$ ;  $\Delta_i^I = \frac{i}{100}(a_i^{\text{II}} - b_i^{\text{II}})$

## JJG 546—2010

$$\text{式中: } \sum_1^{10} R_i^{\text{III}} = \frac{1}{10} \left( \sum_1^{10} R_i^{\text{II}} + \sum_1^{10} \Delta_i^{\text{II}} \right)$$

$$\Delta_i^{\text{II}} = \frac{i}{100} (a_i^{\text{II}} - b_i^{\text{II}})$$

以此类推, 第三盘电阻实际值计算公式为:

$$\sum_1^n R_i^{\text{III}} = n \sum_1^{10} R_i^{\text{II}} + \sum_1^n \Delta_i^{\text{II}} \quad (\text{D. 8})$$

$$\text{式中: } \sum_1^{10} R_i^{\text{IV}} = \frac{1}{10} \left( \sum_1^{10} R_i^{\text{III}} - \sum_1^{10} \Delta_i^{\text{III}} \right)$$

$$\Delta_i^{\text{III}} = \frac{i}{1\,000} (a_i^{\text{III}} - b_i^{\text{III}})$$

第四盘电阻实际值计算公式为:

$$\sum_1^n R_i^{\text{IV}} = n \sum_1^{10} R_i^{\text{II}} + \sum_1^n \Delta_i^{\text{II}} \quad (\text{D. 9})$$

$$\text{式中: } \sum_1^{10} R_i^{\text{V}} = \frac{1}{10} \left( \sum_1^{10} R_i^{\text{IV}} - \sum_1^{10} \Delta_i^{\text{IV}} \right)$$

$$\Delta_i^{\text{IV}} = \frac{i}{1\,000} (a_i^{\text{IV}} - b_i^{\text{IV}})$$

第五盘电阻实际值计算公式为:

$$\text{式中: } \sum_1^{10} R_i^{\text{II}} = \frac{1}{10} \left( \sum_1^{10} R_i^{\text{I}} + \sum_1^{10} \Delta_i^{\text{II}} \right)$$

$$\Delta_i^{\text{II}} = \frac{i}{100} (a_i^{\text{II}} - b_i^{\text{II}})$$

以此类推, 第三盘电阻实际值计算公式为:

$$\sum_1^n R_i^{\text{III}} = n \sum_1^{10} R_i^{\text{II}} + \sum_1^n \Delta_i^{\text{III}} \quad (\text{D. 8})$$

$$\text{式中: } \sum_1^{10} R_i^{\text{II}} = \frac{1}{10} \left( \sum_1^{10} R_i^{\text{III}} - \sum_1^{10} \Delta_i^{\text{III}} \right)$$

$$\Delta_i^{\text{III}} = \frac{i}{1\,000} (a_i^{\text{III}} - b_i^{\text{III}})$$

第四盘电阻实际值计算公式为:

$$\sum_1^n R_i^{\text{IV}} = n \sum_1^{10} R_i^{\text{III}} + \sum_1^n \Delta_i^{\text{IV}} \quad (\text{D. 9})$$

$$\text{式中: } \sum_1^{10} R_i^{\text{III}} = \frac{1}{10} \left( \sum_1^{10} R_i^{\text{IV}} - \sum_1^{10} \Delta_i^{\text{IV}} \right)$$

$$\Delta_i^{\text{IV}} = \frac{i}{1\,000} (a_i^{\text{IV}} - b_i^{\text{IV}})$$

第五盘电阻实际值计算公式为:

$$\sum_1^n R_i^{\text{V}} = n \sum_1^{10} R_i^{\text{IV}} + \sum_1^n \Delta_i^{\text{V}} \quad (\text{D. 10})$$

$$\text{式中: } \sum_1^{10} R_i^{\text{IV}} = \frac{1}{10} \left( \sum_1^{10} R_i^{\text{V}} - \sum_1^{10} \Delta_i^{\text{V}} \right)$$

$$\Delta_i^{\text{V}} = \frac{i}{1\,000} (a_i^{\text{V}} - b_i^{\text{V}})$$

c)  $M_2$  的最后一盘步进电阻值可采用检流计偏格法进行检定, 即变化  $M_2$  最后一盘的十个示值, 使其检流计偏转 100 格, 记录每变化一个步进电阻时检流计的偏转格数  $a_i$ , 末盘阻值的修正值计算公式为:

$$\sum_1^{10} R_i^{\text{V}} = \frac{\sum_1^n a_i}{100} \sum_1^{10} R_i^{\text{IV}} \quad (\text{D. 11})$$

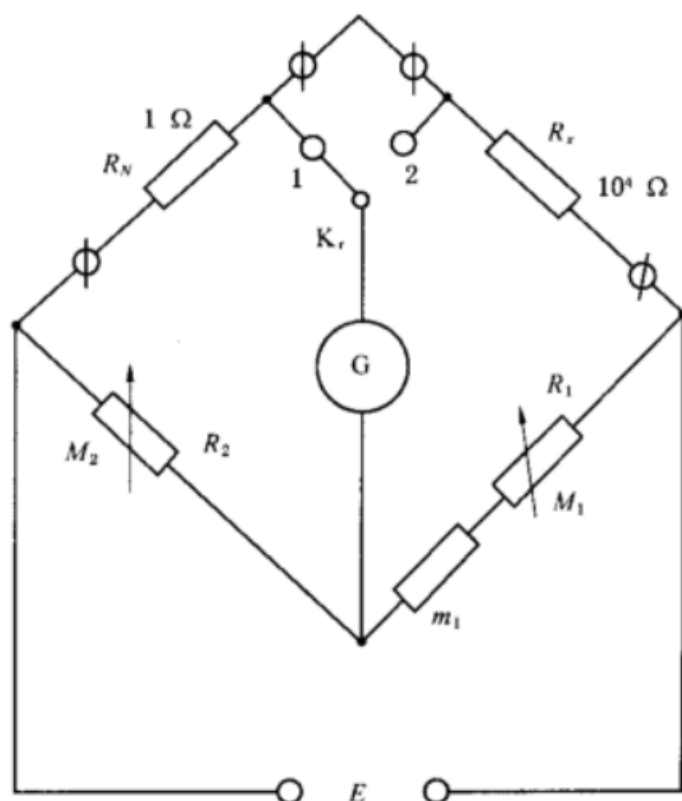
#### D.1.4 $M_1$ ( $m_1$ ) 的检定过程

- 将换臂开关  $K_0$  置 2 的位置, 在  $M_2$  上读数, 其检定方法与  $M_2$  的检定完全相同。
- $m_1$  盘的检定可以用  $M_1 \times 1\ \Omega$  盘及以下各盘相同的方法进行检定。

### D.2 测量 $r_1 + r'_1 + (M_2)_0$ 电阻

#### D.2.1 线路及桥臂参数

检定  $r_1 + r'_1 + (M_2)_0$  电阻的原理线路如图 D.2 所示。

图 D.2 测量  $r_1 + r'_1 + (M_2)_0$  电阻的原理线路

用被检比较电桥线路，内附标准电阻臂  $R_N$  放置  $1\ \Omega$ ，被测臂  $R_x$  接 0.01 级  $10^4\ \Omega$  标准电阻， $M_1$  作为读数盘， $M_2$  盘所有示值置零， $K_r$  置 1， $K_0$  置 2。

#### D.2.2 测量过程

接通电源和检流计，调节  $M_1$  盘使电桥平衡，记录  $M_1$  盘的平衡示值为  $M$ ，则  $r_1 + r'_1 + (M_2)_0$  电阻值为：

$$r_1 + r'_1 + (M_2)_0 = M \times 10^{-4} (\Omega)$$

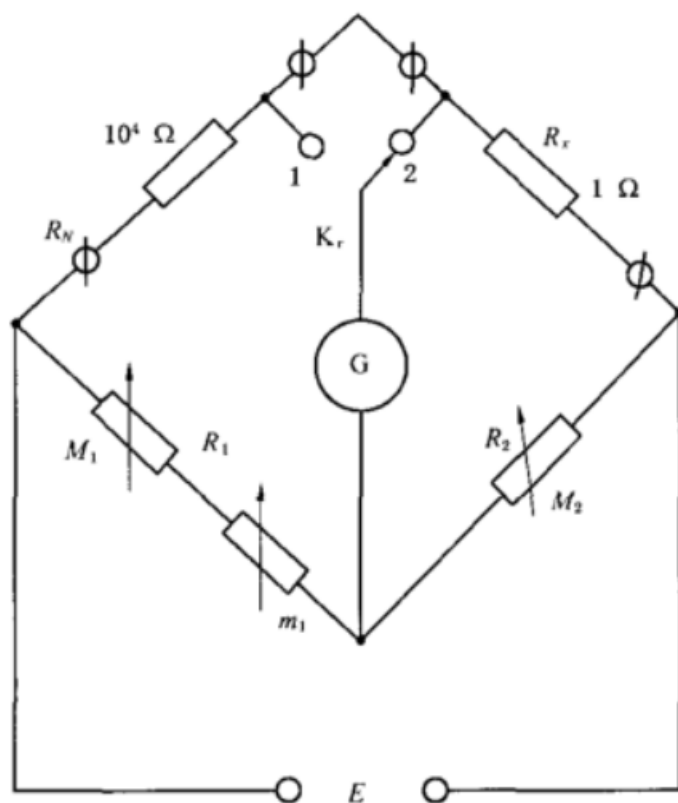
#### D.3 测量 $r_2 + r'_2 + (M_2)_0$ 电阻

##### D.3.1 线路及桥臂参数

检定  $r_2 + r'_2 + (M_2)_0$  电阻的原理线路如图 D.3 所示。

用被检比较电桥线路，内附标准电阻臂  $R_N$  放置  $10^4\ \Omega$ ，被测臂  $R_x$  接 0.01 级  $1\ \Omega$  标准电阻， $M_1$  作为读数盘， $M_2$  盘所有示值置零， $K_r$  置 2， $K_0$  置 1。



图 D.3 测量  $r_2 + r'_2 + (M_2)_0$  电阻的原理线路

## D.3.2 测量过程

接通电源和检流计，调节  $M_1$  盘使电桥平衡，记录  $M_1$  盘的平衡示值为  $M$ ，则  $r_2 + r'_2 + (M_2)_0$  电阻值为：

$$r_2 + r'_2 + (M_2)_0 = M \times 10^{-4} (\Omega)$$

D.4 比值  $K_{(n/10)}$  的检定及调整

D.4.1 直流比较电桥  $M_2$  的  $10 \times 1\,000\ \Omega$  盘电阻的检定，应在调整前后都进行。调整前的检定值只是作为观察年变化用，调整后的检定值作为此次检定的结果。调整后的检定必须是待电阻稳定后进行，调整的方法同内附标准电阻。

D.4.2 直流比较电桥装置  $M_2$  的  $10 \times 1\,000\ \Omega$  盘只进行一次检定。

## D.4.2.1 元件测量法

用单电桥替代法检定  $M_2$  的  $10 \times 1\ \text{k}\Omega$  盘每一个电阻元件的电阻值（可用制造厂配套的专用插头），测得的值分别为  $R_1^I, R_2^I, R_3^I, \dots, R_{10}^I$ ，则比值  $K_{(n/10)}$  为：

$$K_{0.1} = \frac{R_1^I}{(R_1^I + R_2^I + R_3^I + \dots + R_{10}^I) + [(M_2)_0 + r_1 + r'_1]}$$

$$K_{0.2} = \frac{R_1^I + R_2^I}{R_1^I + R_2^I + \dots + R_{10}^I + [(M_2)_0 + r_1 + r'_1]}$$

$$\begin{aligned}
K_{(n/10)} &= \frac{\sum_1^n R_i^I}{\sum_1^{10} R_i^I + [(M_2)_0 + r_1 + r'_1]} \\
&= \frac{n}{10} + \frac{1}{10} \left[ \Delta \sum_1^n R_i^I \times 10^{-3} - \frac{n}{10} \Delta \sum_1^n R_i^I \times 10^{-3} \right. \\
&\quad \left. - n[(M_2)_0 + r_1 + r'_1] \times 10^{-4} \right] \quad (\text{D. 12})
\end{aligned}$$

式中,  $[(M_2)_0 + r_1 + r'_1]$  的检定为比例臂  $M_2$  零电阻测量方法, 见本规程附录 D. 2. 1 条款。

#### D. 4. 2. 2 十进替代法

原理和检定方法已在 D. 1. 1 条款中叙述, 将由式 (D. 6) 中得到的  $\Delta_i^I$  值代入下式中可计算出  $K_{(n/10)}$  比值:

$$K_{(n/10)} = \frac{n}{10} + \frac{1}{10} \left\{ \sum_1^n \Delta_i^I \times 10^{-3} - \frac{n}{10} \sum_1^{10} \Delta_i^I \times 10^{-3} - n[(M_2)_0 + r_1 + r'_1] \times 10^{-4} \right\} \quad (\text{D. 13})$$

## 附录 E

## 直流比较电桥整体校验法

整体校验是借助于过渡电阻来实现的，取  $11 \times 1 \text{ k}\Omega$  和  $11 \times 10 \text{ k}\Omega$  两只过渡电阻。以一等标准电阻为标准，用替代法测出过渡电阻每一个的实际值。然后将过渡电阻接入比较电桥上，再用比较电桥测出过渡电阻的实际值。两者之差的相对误差应小于  $2 \times 10^{-4}$ 。测量过程应注意在相同的环境条件下进行。

## 附录 F

## 检定原始记录格式

一、测量盘基本误差 ( $\Omega$ )

盘序数		$\times 1\ 000$	$\times 100$	$\times 10$	$\times 1$	$\times 0.1$	$\times 0.01$	
$M_1$	1							
	2							
	3							
	4							
	5							
	6							
	7							
	8							
	9							
	10							
$M_2$	1							
	2							
	3							
	4							
	5							
	6							
	7							
	8							
	9							
	10							
盘序数		$\times 1$	$\times 0.1$	$\times 0.01$	$\times 0.001$			
$m_1$	1							
	2							
	3							
	4							
	5							
	6							
	7							
	8							
	9							
	10							
测量盘 $M_1$ : 第一次 $R_0 =$		$\Omega$	第二次 $R_0 =$		$\Omega$	第三次 $R_0 =$		$\Omega$
测量盘 $M_2$ : 第一次 $R_0 =$		$\Omega$	第二次 $R_0 =$		$\Omega$	第三次 $R_0 =$		$\Omega$
$r_1 + r'_1 + (M_2)_0 =$		$\Omega$	$r_2 + r'_2 + (M_2)_0 =$		$\Omega$			

二、比例臂比值 ( $K_{(n/10)}$ )

次数 位置	1	2	3	4	5	平均值	$\sum_1^n R_i^I$	$n \frac{1}{10} \sum_1^n R_i^I$	$K_{(n/10)} (\times 10^{-6})$
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
$\frac{1}{10} \sum_1^n R_i^I =$									
温度:        °C                      湿度:        %									

## 三、其他

外观及线路检查		绝缘电阻	
介电强度试验			

附录 G

检定证书内页格式

一、测量盘

示值	测量盘	实 际 值/ $\Omega$					
		$\times 1\ 000$	$\times 100$	$\times 10$	$\times 1$	$\times 0.1$	$\times 0.01$
$M_2$							
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
$M_1$							
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							

二、 $m_1$  测量盘

示值 测量盘	实 际 值/ $\Omega$			
	$\times 1$	$\times 0.1$	$\times 0.01$	$\times 0.001$
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

三、比值 ( $K_{(n/10)}$ )

修正值 位置	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$K_{(n/10)} (\times 10^{-6})$										
$r_1 + r'_1 + (M_2)_0 = \qquad \qquad \qquad \Omega \qquad \qquad \qquad r_2 + r'_2 + (M_2)_0 = \qquad \qquad \qquad \Omega$										
温度: $^{\circ}\text{C}$ 湿度:        %										

注：1. 上述检定数据的扩展不确定度为允许基本误差的：\_\_\_\_\_。

2. 下次送检时必须带此证书。

附录 H

检定结果通知书内页格式

一、测量盘

示值	测量盘	实 际 值/ $\Omega$					
		$\times 1\ 000$	$\times 100$	$\times 10$	$\times 1$	$\times 0.1$	$\times 0.01$
$M_2$							
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
$M_1$							
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							



二、 $m_1$  测量盘

示值 \ 测量盘	实 际 值/ $\Omega$			
	$\times 1$	$\times 0.1$	$\times 0.01$	$\times 0.001$
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

三、比值 ( $K_{(n/10)}$ )

修正值 \ 位置	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	$K_{(n/10)} (\times 10^{-6})$									
$r_1 + r'_1 + (M_2)_0 = \quad \Omega \qquad r_2 + r'_2 + (M_2)_0 = \quad \Omega$										
温度: $^{\circ}\text{C}$ 湿度:        %										

四、不合格项目

注：1. 上述检定数据的扩展不确定度为允许基本误差的：\_\_\_\_\_。  
2. 下次送检时必须带此证书。

\_\_\_\_\_

中华人民共和国  
国家计量检定规程

直流比较电桥

JJG 546—2010

国家质量监督检验检疫总局发布

\*

中国计量出版社出版

北京和平里西街甲2号

邮政编码 100013

电话(010)64275360

<http://www.zgjl.com.cn>

北京市迪鑫印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

版权所有 不得翻印

\*

880 mm×1230 mm 16开本 印张2.25 字数42千字

2010年4月第1版 2010年4月第1次印刷

印数1—1 000

统一书号155026—2487 定价:34.00元