



直流电流比较仪式电桥和 测温电桥的检定

林骐 朱庆发 曲笛 田昀 王强 迪拉热·萨依然 王毅 著

直流电流比较仪式电桥 和测温电桥的检定

林骐 朱庆发 曲笛 田昀 王强 著
迪拉热·萨依然 王毅

中国质检出版社
北 京

图书在版编目 (CIP) 数据

直流电流比较仪式电桥和测温电桥的检定/林骥等著. —北京:
中国质检出版社, 2015.3

ISBN 978-7-5026-3902-0

I. ①直… II. ①林… III. ①电桥—检定 IV. ①TM938.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 238223 号

内 容 提 要

本书对直流电流比较仪式电桥(QJ55 型)及测温电桥(QJ58 型)以作者提出的测量数学模型为主线,并用全新的视角展开了对该模型涉及的三个误差影响量(匝比误差、磁平衡误差、电平衡误差)的讨论。讨论就以上三个误差影响量如何计量、检定、计算及误差合成等展开,作了详细的论证,并结合大量的实验数据进行了阐述,提出了许多颇具新意的论点。

本书可作为高等院校电测量专业的辅助教材,也可作为电测量工作者的参考资料。

中国质检出版社出版发行

北京市朝阳区和平里西街甲 2 号(100029)

北京市西城区三里河北街 16 号(100045)

网址 www.spc.net.cn

总编室:(010)64275323 发行中心:(010)51780235

读者服务部:(010)68523946

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

各地新华书店经销

*

开本 880×1230 1/32 印张 3.875 字数 99 千字

2015 年 3 月第一版 2015 年 3 月第一次印刷

*

定价 18.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换

版权专有 侵权必究

举报电话:(010)68510107

前言

国产直流电流比较仪式电桥(QJ55型)和测温电桥(QJ58型)均由原上海电表厂制造。面市已有30年,在全国许多单位使用。近10余年来,数十台QJ55型电桥送交上海兰斯汀仪表研究所改造。这一改造不仅使其性能完好如新,而且使其一些技术指标有所提高,测量阻值范围也有较大扩展。可以预计,这些电桥还能使用多年。

检定这两种电桥的计量技术文件是检定规程或校准规范。比较仪式电桥(QJ55型)的检定规程,在1988年就已制定颁布,近年也做了新的修订。而测温电桥的校准规范在近几年才开始制定,即将颁布。

本书的作者之一林骥,参与了这两个技术法规的制定,而且是测温电桥校准规范的主要起草人之一。本书的其他作者做了大量的试验工作,使起草工作有了实践的支持而不是纸上谈兵。

近10多年来,原来从事这两种电桥检定的工作者

均已退休,一批年轻的同志接替了他们的工作。在和这些年轻人的接触交往中,深深感到他们的困惑,如果仅靠产品使用说明书和计量技术文件,而没有人具体指导是难以完成这项工作的,即使勉强完成,也会有许多不明白之处。

因此,本书的四位作者认为有必要撰写一本专著,为年轻的朋友们提供有关的实际及理论知识。我们对这两种电桥在理论上的研究和大量试验认证为本书的编写提供了丰富的素材。

林骥对这两种电桥从测量原理、测量方法和过程出发,推导出一个符合实际也符合数理逻辑的测量数学模型,再借助于测量不确定度的评定方法,使我们的研究有了新的成果,即对这两种电桥的示值误差是否符合其示值准确度这一技术指标给出明确的结论,而不是仅仅对其单项误差影响量是否符合指标作出检定结论,而对这些误差影响量如何合成以及合成结果是否符合示值准确度做出评定。作者将这一成果写入本书中供电桥检定工作者参考,同时这一成果也写入测温电桥校准规范之中。

坦率地说,本书中提出的以测量数学模型为主线,对模型中三个误差影响量如何检定和计算,以及它们如何合成计算等方面的论述,可以说是全新的视角,也有一些全新的论点。虽然具有新意,但是创新总难免有不足之处,还望读者批评指正,以期进一步改进。是为祈盼!

林骥长期从事直流电学计量检定工作,多年来在国内的一些杂志上发表了许多文章,将其中一部分收集在本书的附录中,供参考。

作者

2013 年 6 月

目 录

第一章	直流比较仪式电桥的工作原理和计量特性	1
第一节	工作原理	1
第二节	两个计量特性	2
第三节	虚零法测量的数理诠释	5
第二章	QJ55 型电桥的自检	8
第一节	绕组匝的说明	8
第二节	自检中匝(T)标准的建立	10
第三节	匝比较方法的原理和 C_{AT} 的确定	10
第四节	测量盘前三盘的检定	13
第五节	测量盘第四(IV)盘的检定	15
第六节	固定匝和偏差盘的检定	19
第七节	前后盘联系-盘间过渡系数的检定	21
第三章	QJ55 型电桥自检的计算	22
第一节	测量盘的计算	22
第二节	实例一	29
第三节	绕阻匝自检合格与否的判定	41

第四章 整体核对和检定结果的处理	44
第一节 整体核对的分析	44
第二节 电桥检定结果处理方法的讨论	46
第三节 建 议	48
第四节 对电流比较仪式电桥规程的讨论	50
第五章 测温电桥的自检和检定结果的处理	53
第一节 测温电桥绕组匝特殊之处	53
第二节 测温电桥绕组匝的检定	54
第三节 测量盘线性度的计算	60
第四节 实例二	65
第五节 C_V 和 C_{AT} 的测量	71
第六节 检定结果的合成	73
第七节 验证实验	74
附录	78
热电势和直流电位差计零电势的测量	78
直流电工仪器分项检定与数学模型、误差属性间关系的讨论	80
直流电位差计检定中量值溯源的困惑	86
UJ30 电位差计为什么会有负的零电势?	90
用 UJ32/2 电位差计检定 TJ1 型比较仪	93
TJ1 型标准电池比较仪的检定	95
谈谈直流电位差计零位电势的补偿调整	97
末盘步进为 $0.1 \mu V$ 的直流电位差计后几盘整体校验的讨论	98
一种能观察自热效应的直流分压箱的检定方法	101
高精度直流分压箱屏蔽作用的功能试验	106
低阻值四端钮直流标准电阻器的并联和计算	110
参考文献	115

第一章

直流比较仪式电桥的 工作原理和计量特性

本章以国产 QJ55 型直流比较仪式电桥和 QJ58 型直流比较仪式测温电桥为例简述其工作原理,同时引申出三个和计量检定相关的特性。

为了行文简便,以下常常将这两种仪器简称电桥和测温电桥。

第一节 工作原理

QJ55 型直流比较仪式电桥和 QJ58 型直流比较仪式测温电桥的电气原理如图 1-1 所示。

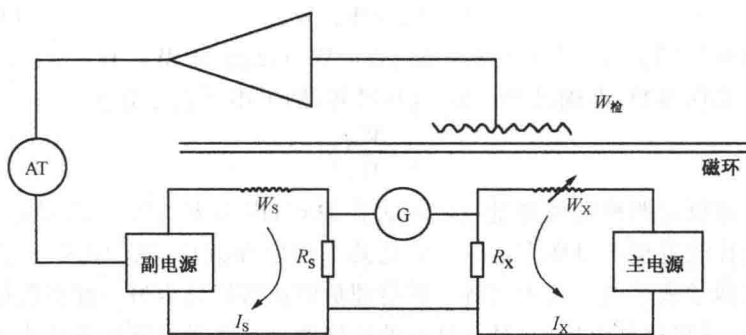


图 1-1 电气原理

图 1-1 中:

W_x ——初级(主回路)可调绕组;

W_s ——次级(副回路)固定绕组;

$W_{\text{检}}$ ——磁势检测绕组;

I_x, I_s ——初、次级(主、副)回路电流;

AT——磁势平衡(安匝平衡)指示表;

G——检流计;

R_x, R_s ——被检电阻、标准电阻。

这两种电桥的核心原理是所谓的磁势(安匝)平衡。主回路恒定电流 I_x 流经绕组 W_x 时将产生磁势 $I_x W_x$, 它将导致磁环磁化, 由检测绕组 W_s 查觉这一磁势时, 将驱动副回路电源(又称为随动伺服电源)产生电流 I_s 流经副回路绕组 W_s , 产生一个与主回路磁势 $I_x W_x$ 方向相反的磁势 $I_s W_s$, 直至二者方向相反、大小相等, 这一过程基本自动完成。

达到这一磁势平衡的理想状态可用下式表示:

$$I_x W_x = I_s W_s \quad (1-1)$$

当调节 W_x 时, I_x 值不变, 但磁势 $I_x W_x$ 随 W_x 发生改变, 为保持磁势平衡, I_s 将随 W_x 的变化而变化, 使下式成立:

$$I_x R_x = I_s R_s \quad (1-2)$$

从而使检流计指零, 称为电势平衡。

当这两个平衡同时达到, 即式(1-1)和式(1-2)同时成立, 可以推导出下式:

$$R_x / R_s = W_x / W_s \quad (1-3)$$

即电阻比(R_x / R_s)等于绕组匝比(W_x / W_s), 绕组匝 W_x, W_s 原则上是一个几何参数, 准确已知。 R_s 也是已知, 则可用下式计算 R_x :

$$R_x = \frac{W_x}{W_s} R_s \quad (1-4)$$

这就是两种电桥测量电阻的工作原理, 因为 R_x, R_s 是外接电阻, 就其比较电桥本身而言, 式(1-3)是其工作原理方程, 或者说是工作原理的数学表达式。它表明将一种物理量的比较转化为另一种物理量的比较, 这里就是匝比, 它具有极高的准确度。这也是电流比较仪式电桥最大的特点。

第二节 两个计量特性

从对这两种电桥的计量检定角度考虑, 我们对式(1-3)的理解是:

由于 R_x 、 R_s 是外接电阻,仪器本身提供的是一个比值,一个可调的、十分准确的由绕组匝构成的比值。借助这一比值去测量两个电阻间的比值。

这类仪器被称为比例器,如同常见的天平一样,但电桥可取的比值更广。

我们不妨稍加展开讨论,比例器这类仪器,在直流电学计量器具中还有直流分压箱和不内含标准电池的电阻式直流电位差计等。

直流分压箱的工作原理:

$$\frac{V_{x\lambda}}{V_{s\text{出}}} = \frac{R_\lambda}{R_{\text{出}}} \quad (1-5)$$

电位差计的工作原理:

$$\frac{E_x}{E_N} = \frac{R_x}{R_N} \quad (1-6)$$

式(1-5)和式(1-6)表明,它们也是比例器,可用已知电阻比来测量电压比。

比例器的准确度是考核其比值的准确度,而不是一定要考核组成比值的单个元素的单个值的准确度,这是比例器的第一个特性。这不仅给仪器制造者提供了方便,也给计量工作者提供了新的理念和检测方法。

对于这类仪器的检定,完全可以不引入外部的量值作传递,或者说无须量值溯源,就可以完成。这样的检定方式称为自检,这就是比例器的第一个特性。

下面从理论的角度对这一特性作进一步阐述。以比较仪式电桥为例,可任选电桥某一绕组 W_N 作为标准匝,通过某种比较测量技术,可以获取下面两式表述的结果:

$$W_x = a W_N \quad (1-7)$$

$$W_s = b W_N \quad (1-8)$$

$$\text{则} \quad \frac{W_x}{W_s} = \frac{a W_N}{b W_N} = \frac{a}{b} \quad (1-9)$$

以上推导表明,从理论上讲比值 $\frac{a}{b}$ 和 W_N 的选取无关,所以我们对

W_N 从理论上说不提出任何量值准确度的要求。故式(1-9)即为比例器可作自检,即可作不引入外部标准的溯源检定的理论依据。

通过下面的例子可以说明这一计量特性:一个长方形的长宽之比是否符合黄金分割这一美学法则。我们可以用一个米制刻度的尺去量,也可以用一个市制刻度的尺去量,甚至可以自行制定一个既非米制、也非市制的尺去量,三者得出的 a 、 b 之数自然不同,但在不考虑测量误差的前提下, a/b 这一比值应相同,这是完全不用怀疑的,这一比值是客观的,不会因用不同制的尺而改变,也就是说法定的量值传递在这里不是必须的。

对于比较仪电桥,也根本不存在一个法定的匝的标准,如果没有这一特性,就无法开展检定了。

还有一个和比例器相关的计量特性。即在做 1:1 的测量时,标准和被测二电阻名义值相同,且误差均不是很大时,可以很方便的用换位法检定出此时仪器的比例误差。这一方法在电桥检定时作为整体核验的手段。下面作具体说明。

取 R_1 、 R_2 名义值相同的两个标准电阻,例如:10 Ω ,0.01 级标准电阻,先以 R_1 为被检(R_X), R_2 为标准(R_S),按正常操作得出值:

$$\frac{R_1}{R_2} = 1 + \delta_1 \quad (1-10)$$

然后以 R_2 为被检, R_1 为标准,按正常操作得出值得出:

$$\frac{R_2}{R_1} = 1 + \delta_2 \quad (1-11)$$

这两次测量的比值名义值为 1, δ_1 、 δ_2 为比值实际值之相对修正值。式(1-10)与式(1-11)相乘可得:

$$1 = (1 + \delta_1)(1 + \delta_2) = 1 + \delta_1 + \delta_2 + \delta_1\delta_2$$

因为 δ_1 、 δ_2 在 10^{-4} 量级乃至更小,故 $|\delta_1\delta_2| \leq 4 \times 10^{-8}$,可以忽略。这样应有:

$$\delta_1 + \delta_2 = 0 \quad (1-12)$$

但实际测量结果并不能很好满足式(1-12), $\delta_1 + \delta_2$ 的值一般在 $10^{-7} \sim 10^{-6}$ 量级上存在,这是为什么? 查其原因,是我们认为式(1-10)

和式(1-11)绝对成立,或者说在 10^{-8} 以上成立,认为 δ_1 、 δ_2 完全反映 R_1 、 R_2 的比值误差。完全没有考虑仪器在测量这一比值时也存在一定的误差 $\delta_{\text{仪}}$,考虑到 $\delta_{\text{仪}}$ 的存在,式(1-10)与式(1-11)应作如下改写:

$$\frac{R_1}{R_2} = 1 + \delta_1 + \delta_{\text{仪}} \quad (1-13)$$

$$\frac{R_2}{R_1} = 1 + \delta_2 + \delta_{\text{仪}} \quad (1-14)$$

式(1-13)和式(1-14)相乘得:

$$1 = (1 + \delta_1 + \delta_{\text{仪}})(1 + \delta_2 + \delta_{\text{仪}}) = 1 + \delta_1 + \delta_2 + 2\delta_{\text{仪}}$$

同样略去高阶小量得:

$$\delta_{\text{仪}} = -\frac{1}{2}(\delta_1 + \delta_2) \quad (1-15)$$

这样,我们就用换位法获得仪器此时的误差,这一方法也与溯源无关,这就是比例器作 1:1 测量时相关的第二个计量特性。

第三节 虚零法测量的数理诠释

为了给后续相关章节的讨论内容提供理论方面的支撑,在本节对虚零法测量作较为深入的讨论。比较仪式电桥在实际测量工作中,均采用虚零法测量技术。所谓虚零法测量技术是在电桥安匝平衡调节达到最佳状态时,再调节测量盘在电流正反时使检流计光点位置相互接近,最终达到正反电流时光点重合,这一光点重合点,即为虚零点,这一方法即为虚零法。

一般认为虚零法的目的是消除检流计零位的漂移和回路固定热电势的影响,这种方法虽好,但从理论上作明确而又清晰的分析笔者尚未一见,故在这里提供个人意见以供参考。

比较仪式电桥的原理方程表明,电桥误差仅由匝比误差构成,这自然是不符合实际的,还应存在磁势平衡误差和电势平衡误差,所以在式(1-3)推导时,认为磁势和电势是理想平衡状态,自然也未考虑在电流正反时虚零法测量对这两个平衡的影响。

下面就上述因素作详细的数理表述,也就是虚零法测量的表述。

令电流正反时安匝平衡表偏转为 $\alpha_{AT}^{\pm}$, 检流计光点偏转为 $\alpha_V^{\pm}$, 测量盘绕组匝 W_X 在电流正反时不断调节, 使其检流计光点趋于重合, 故记为 $W_X^{\pm}$ 。而副回路 W_S 不随电流方向而改变, 无需加右上角标注, 右上角标注仅是指其在电流正反向时取值, 不表示是正还是负。

这样, 电流正向时磁势平衡应作如下表示:

$$I_X W_X^+ = I_S W_S + C_{AT} \alpha_{AT}^+ \quad (1-16)$$

电流反向时, 同理:

$$-I_X W_X^- = -I_S W_S + C_{AT} \alpha_{AT}^- \quad (1-17)$$

电势平衡电流正向时有:

$$I_X R_X = I_S R_S + C_V (\alpha_V^+ - \alpha_0) \quad (1-18)$$

电流反向时有:

$$-I_X R_X = -I_S R_S + C_V (\alpha_V^- - \alpha_0) \quad (1-19)$$

式(1-16)~式(1-19)中, C_{AT} 为安匝平衡表分度值(微安匝/格)。 C_V 为检流计分度值(V/mm)。 α_0 为检流计光点在 $I_X = I_S = 0$ 时所处位置, 它由两个因素决定, 一是检流计自身零点未调整好, 二是回路存在热电势引起的偏转, 二者共同作用导致检流计光点作与测量信息无关的偏转。

现将式(1-16)~式(1-19)改写如下:

$$I_X W_X^+ = I_S W_S [1 + C_{AT} \alpha_{AT}^+ / IW] \quad (1-20)$$

$$-I_X W_X^- = -I_S W_S [1 - C_{AT} \alpha_{AT}^- / IW] \quad (1-21)$$

$$I_X R_X = I_S R_S [1 + C_V (\alpha_V^+ - \alpha_0) / U_R] \quad (1-22)$$

$$-I_X R_X = -I_S R_S [1 - C_V (\alpha_V^- - \alpha_0) / U_R] \quad (1-23)$$

式中, IW 为 $I_X W_X$ 、 $I_S W_S$ 的名义值, U_R 为 $I_X R_X$ 、 $I_S R_S$ 的名义值。

由式(1-20)和式(1-22)可得:

$$\frac{W_X^+}{R_X} = \frac{W_S}{R_S} [1 + C_{AT} \alpha_{AT}^+ / IW - C_V (\alpha_V^+ - \alpha_0) / U_R]$$

整理得:

$$\frac{R_X}{R_S} = \frac{W_X^+}{W_S} [1 - C_{AT} \alpha_{AT}^+ / IW + C_V (\alpha_V^+ - \alpha_0) / U_R] \quad (1-24)$$

由式(1-21)和式(1-23)可得:

$$\frac{W_X^-}{R_X} = \frac{W_S}{R_S} [1 - C_{AT} \alpha_{AT}^- / IW + C_V (\alpha_V^- - \alpha_0) / U_R]$$

整理得：

$$\frac{R_X}{R_S} = \frac{W_X^-}{W_S} [1 + C_{AT} \alpha_{AT}^- / IW - C_V (\alpha_V^- - \alpha_0) / U_R] \quad (1-25)$$

操作中首先调节磁平衡使 α_{AT}^+ 和 α_{AT}^- 尽可能接近乃至重合。然后不断在电流正反向时调节 W_X^+ 、 W_X^- 使 α_V^+ 和 α_V^- 相互接近乃至重合，此时 $W_X^+ = W_X^- = W_X$ ，式(1-16)和式(1-17)在电流正反方向时同时成立。则式(1-24)和(1-25)两式相加除以 2 得：

$$\begin{aligned} \frac{R_X}{R_S} = \frac{W_X}{W_S} [1 - C_{AT} (\alpha_{AT}^+ - \alpha_{AT}^-) / 2IW + C_V (\alpha_V^+ - \alpha_V^-) / 2U_R] = \\ \frac{W_X}{W_S} [1 - C_{AT} \Delta\alpha_{AT} / 2IW + C_V \Delta\alpha_V / 2U_R] \end{aligned} \quad (1-26)$$

式中， $\Delta\alpha_{AT} = \alpha_{AT}^+ - \alpha_{AT}^-$ ， $\Delta\alpha_V = \alpha_V^+ - \alpha_V^-$ 。

这样固定的 α_0 就消除了，电流正反向能消除固定热电势和零漂，在此作了理论上的证明。

$$\begin{array}{ll} \text{理想的情况是: } \alpha_{AT}^+ = \alpha_{AT}^- & \Delta\alpha_{AT} = 0 \quad (\alpha_{AT} \text{ 重合}) \\ & \alpha_V^+ = \alpha_V^- \quad \Delta\alpha_V = 0 \quad (\alpha_V \text{ 重合}) \end{array}$$

则式(1-26)转化成(1-3)，即理想式。但实际情况是：由于种种原因，并不能达到理想状态，例如调节细度不够，漂移和噪声乃至视差等原因，使 $\Delta\alpha_{AT}$ 和 $\Delta\alpha_V$ 在一定程度上存在，不能够绝对为零。这样它们就构成了两个误差影响量，故式(1-26)才是符合实际的数学模型，在后面的章节里还将用这一公式作进一步讨论。

虚零法的应用得出式(1-26)可以说是比较仪式电桥的又一个重要计量特性。

第二章

QJ55 型电桥的自检

第一章对比较仪式电桥的三个计量特性作了介绍,特别是推导了式(1-26)这一可作不确定度评定的测量数学模型,该模型涉及三个误差影响量。但从原理上说,主要误差还是匝比误差,即式(1-26)中 $\frac{W_x}{W_s}$ 所引入的误差。对于这一误差的检定,我们称为自检,又因为 W_x 是一个七盘步进绕组匝,呈十进递减,对它的自检又称为测量盘线性度自检。自检的理论依据第一章已阐明,本章就自检的方法、步骤作一介绍。

第一节 绕组匝的说明

为了叙述方便,在本书中用符号“T”代表“匝”这个单位,例如:1 000 T。“安匝”用“AT”表示,“微安匝”用“ μ AT”表示。在法定单位中没有匝的单位,这里借用了这个符号,以便叙述但在本书中又不会引起歧义。

QJ55 型电桥绕组见图 2-1 作以下说明:

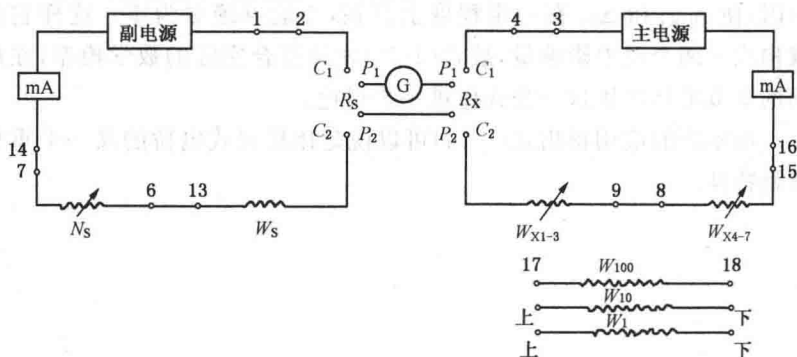


图 2-1 QJ55 型电桥绕组

1~18 为测板上接线柱编号, W_{10} 、 W_1 测板上是上下排列。

(1) 测量盘绕组 W_x 是由 7 个十进盘步进绕组匝构成, 前三盘为 $11 \times 100T$ 、 $11 \times 10T$ 、 $11 \times 1T$, 构成了从 (-1) 示值到 (10) 示值 11 个步进。 (-1) 示值的构成方式在图 2-3 中表示十分清楚, 从电流进出 (-1) 示值相应绕组和其他示值绕组的不同可知, 所谓负者是相对正者产生方向相反的磁势。

(2) 测量盘后四盘是在 $11 \times 1T$ 绕组用并联分流电阻构成, 这种线路是从电阻式电位差计上移植过来的。一些参考书上称之为电流叠加线路, 各盘分流电阻大小不同使流经该盘电流分别为总电流的 $1/10$ 、 $1/100$ 、 $1/1\,000$ 、 $1/10\,000$ 。而多余电流从旁路分流电阻流出。这样就在 $11 \times 1T$ 上产生磁势等同于原总电流在 $10^{-1}T$ 、 $10^{-2}T$ 、 $10^{-3}T$ 、 $10^{-4}T$ 上产生步进磁势。因此, 我们说分数匝是在磁势等效的意义上来讲的。

在这四个分数盘前有一个极性(±)开关, 它可以将后四盘与前三盘正串(+)或反串(-)。

(3) 副回路绕组是由一个固定绕组 W_s ($1\,000T$) 和偏差盘的步进绕组 (N_s) 构成, N_s 的第一盘由 $11 \times 1T$ 绕组构成, 完全同于 W_x 的第三盘, 而其后四盘也是电流叠加线路构成, 也完全同于测量盘后四盘。这 5 个步进盘前也有一个极性(±)开关, 它可将 N_s 与 W_s 正或反串。

为了方便, 我们依次用 I、II、III、IV、V、VI、VII 表示测量盘而用 III'、IV'、V'、VI'、VII' 表示偏差盘(注意: 没有 I'、II' 盘), 这样编号是为表明 III 与 III'、IV 与 IV' 等, 步进匝名义值相同。

(4) 为了便于计量检定, 在主回路中设置一个开关“读数、校 1、校 2、校 3”, 在读数位置时, 测量盘处于正常测量工作状态下的接线方式, 而处于“三个校”位置时, 可分别将专门用来计量检定的三个参考绕组 W_1^* ($100T$ 、 $10T$ 、 $1T$) 各自反串到前三盘中, 从而为检定这三盘提供了方便, 后面还将进一步说明。

(5) 还设置了 3 个独立的固定绕组, 分别为 W_{100} ($100T$)、 W_{10} ($10T$)、 W_1 ($1T$), 后两组绕组线径较粗, 可以通过较大电流, 用来检定低值十进电阻 ($0.01\Omega \sim 0.0001\Omega$), 特别是可以检定大功率低值电阻。它们在式(1-3)和式(1-26)中分别替代了 W_x 。