

直流电位差计 的原理与检定

(第二版)

王珏 编著

中国计量出版社

491

2)

直流电位差计的原理与检定

(第 2 版)

王 珏 编著

中国计量出版社

内 容 提 要

本书以常用的几种电位差计为例,详细介绍了怎样分析各种类型的电位差计线路、怎样正确使用仪器以及消除误差的方法。本书还着重介绍了新的国家检定规程和国际电工委员会(IEC)颁布的 523—75 (79)《直流电位差计》标准。

本书可供从事电工仪器仪表生产、使用、检定和修理的工人、检定员、技术人员参考,并可作为有关技术培训的教学参考书。

直流电位差计的理论与使用

(第 2 版)

王 珏 编著
责任编辑 孙维强

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 6.125 字数 136 千字

1990 年 1 月第 2 版 1990 年 1 月第 4 次印刷

印数 36001—43000

ISBN 7-5026-0282-8/TB·232

定价 2.80 元



第二版前言

《直流电位差计的原理与检定》一书，自1981年9月第一次印刷出版以来，获得广大读者厚爱，分别于1984年和1987年两次重印。在此之后，国家先后颁布了直流电位差计的部颁标准和国家标准。新的国家标准与国际电工委员会(IEC) 523—75 (79)《直流电位差计》等效，并自1984年起按新的标准进行生产。为适应这一变化，原国家计量局也制定了新的直流电位差计检定规程。为了帮助读者能较好地理解并执行新的检定规程，在本书修订再版中，将介绍1983年发布、1984年实施的新国家标准的有关内容，新标准(GB 3927—83)与原部颁标准(JB 1390—74)的主要区别及即将颁布实施的直流电位差计新的检定规程中新增的检定项目、实施方法，半自动电位差计的检定方法等。

如果本修订本能够帮助大家正确执行新检定规程，成为实施新规程中读者所喜爱的参考资料，将是作者最大的欣慰。

1988年6月

目 录

第一章 直流电位差计的原理	(1)
§1.1 直流电位差计的工作原理	(1)
一、早期的电位差计	(1)
二、一般电位差计的工作原理	(3)
三、标准电池的温度补偿	(5)
§1.2 直流电位差计的分类及标志	(7)
一、按使用条件分类	(7)
二、按测量范围分类	(7)
三、按未知端钮输出电阻的大小分类	(7)
四、按测量量程的多少分类	(7)
五、按准确度等级分类	(7)
六、按测量盘的结构或补偿电压的方式分类	(8)
七、电位差计的标志、符号	(9)
§1.3 怎样看电位差计的线路	(11)
一、便携式 303 型和 UJ 23 型电位差计	(11)
二、UJ 1 型低电阻直流电位差计	(15)
三、UJ 31 型低电势直流电位差计	(20)
四、UJ 25 型高电势和 UJ 9 型高电阻直流电位差计	(24)
五、UJ 26 型低电势直流电位差计	(29)
§1.4 直流电位差计的使用和技术特性	(35)
一、选用直流电位差计及其配套设备的注意事项	(35)
二、直流电位差计的正确使用及漏电屏蔽的方法	(44)
三、主要技术指标	(57)
§1.5 直流电位差计中各种误差因素及其消除方法	(57)
一、热电势(ϵ_T)产生的误差	(57)

二、转换开关接触电阻带来的误差	(59)
三、电阻制造不准确、不稳定带来的误差	(59)
四、工作电流不稳定、不准确带来的误差	(61)
第二章 直流电位差计的检定	(62)
§2.1 检定项目	(62)
§2.2 检定装置误差	(63)
一、检定精度的确定和测量各项局部误差的分配原则	(63)
二、检定装置误差的评定	(64)
三、对检定装置和周围环境的要求	(65)
§2.3 检定程序和检定方法	(73)
一、外观检查和内部线路检查	(73)
二、绝缘电阻的测定	(76)
三、绝缘强度试验	(79)
四、调节电阻平滑性和精细度的检定	(80)
五、电源回路电阻相对变化的检查	(84)
六、内附检流计灵敏度和零位漂移的检定	(84)
七、内附电子式电源稳定性的检定	(87)
八、电位差计示值基本误差、变差的检定	(87)
九、温度补偿盘的检定	(97)
十、量限系数的检定	(99)
十一、零电势和热电势的检定	(102)
十二、检定电位差计示值基本误差的电流比较仪电位差计 法	(106)
十三、检定电位差计示值基本误差的差值法	(113)
§2.4 检定结果的处理	(122)
一、数据处理	(122)
二、判断电位差计是否合格	(123)
三、填写检定证书	(128)
四、分路盘附加更正值的计算	(129)
第三章 GB《直流电位差计》	(137)
§3.1 GB《直流电位差计》的主要技术内容	(137)

一、范围	(137)
二、主要名词术语的定义	(137)
三、分类	(139)
四、主要技术要求	(139)
§3.2 GB 3927--83 与 JB 1390--74 的主要区别	(143)
§3.3 直流电位差计新增检定项目介绍	(144)
一、测量盘之间的线性度考核	(145)
二、绝缘电阻功能试验	(147)
三、确定“共模电压影响”的方法	(148)
第四章 参考问答题	(152)
一、名词解释	(152)
二、填空	(153)
三、选择正确答案填空	(154)
四、问答题	(155)
附录一 补偿法检定电位差计的原始记录格式	(169)
附录二 各种电位差计检定结果的化整位数	(171)
附录三 常见直流电位差计主要技术特性表	(172)
附录四 半自动电位差计的检定	(182)
参考资料	(187)

第一章 直流电位差计的原理

在直流电的精密测量中，直流电位差计是发展较早、应用很广的仪器之一。它采用补偿测量法，以标准电池的电动势作为实际标准，直接测量电动势或电压，间接测量电流、电阻以及其他电和非电的量值。它的主要优点是测量时几乎不损耗被测对象的能量，测量结果稳定可靠，而且具有很高的准确度，因此为生产、科研以及计量检修部门大量使用。

§ 1.1 直流电位差计的工作原理

一、早期的电位差计

早在 1841 年就发现了电位差计的原理，当时称之为“补偿方法”。用这种方法测量电池的电动势时，可以避免从电池中输出附加电流。当时的电位差计按其工作原理可分为两类：一类是恒定工作电流的电位差计；另一类是恒定电阻的电位差计。

1. 恒定工作电流的电位差计。如图 1.1.1 所示。

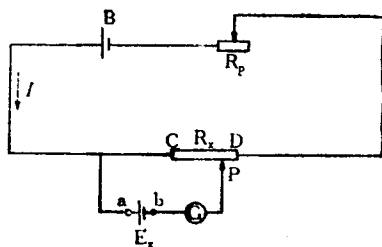


图 1.1.1 恒定工作电流的电位差计原理线路图

用标准电池替代图中未知电动势 E_x 接在 a、b 两点之间，移动触点 P 到测量电阻 R_x 的 D 端，调节 R_p （即调节工作电流 I 的大小），使检流计 G 指零，工作电流 I 就调定好了。然后保持调节电阻 R_p 的数值不变（即保持工作电流 I 为恒定），再将未知电动势 E_x 接在 a、b 两点间，移动触点 P，再次使检流计 G 指零，此时在测量回路（即由 E_x 、 R_x 、G 所组成的回路）中，被测未知电动势 E_x 由电流 I 在 R_x 的 CP 段电阻上的电压降（称为补偿电压）所补偿，即 I 在 R_x 的 CP 段上的电压降等于 E_x 值，由于 R_x 预先刻度好，所以未知电动势 E_x 值也就测得了。

用这种电位差计测量未知量 E_x 时，工作电流 I 必须保持恒定，由于工作电流 I 的大小是通过与电压数值相当稳定的标准电池进行比较来确定的，因此，它能保证有相当高的测量准确度。目前通常采用的电阻式电位差计皆属此类。

2. 恒定电阻的电位差计。如图 1.1.2 所示。

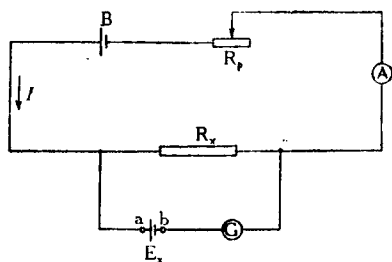


图 1.1.2 恒定电阻的电位差计原理线路图

它与恒定工作电流电位差计的区别在于测量电阻 R_x 保持不变，工作电流 I 可变。当测量回路处于平衡时， $E_x = IR_x$ ，工作电流 I 的大小，直接由电流表读取。这种方法由

于电流表精度的限制，测量精度难以提高。

应用恒定工作电流的原理，在 1861 年制成了第一台电位差计，当时称作“补偿器”。这台电位差计的测量电阻 R_x 采用了一根长 2 m 的、带有刻度的黄铜丝，它的电阻能够连续变化，但工作电流的校对部分没有单独分开，是与补偿电压合在一起的，使用时很不方便。后来经过逐步改进，到 1893 年就改为用转臂式电阻箱与滑线电阻串联来代替 2 m 的黄铜丝，使用简便多了。现在很多电阻式电位差计基本上是沿用这种方法，但已有所改进。

二、一般电位差计的工作原理

图 1.1.3 所示为现在的直流电位差计的原理性线路。由图可知，一台较完善的爱位差计，基本上由三个回路组成。

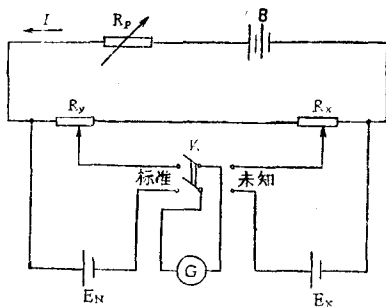


图 1.1.3 电位差计的工作原理线路图

1. 标准回路，也可叫做校准工作电流回路。由标准电池 E_N 、调定电阻 R_y 、检流计 G 和开关 K 等部件组成。

2. 测量回路。由未知电动势 E_x 、测量电阻 R_x 、检流计 G 和开关 K 等部件组成。

3. 工作电流回路，也叫电源回路。由辅助电源 B 、测量电阻 R_x 、调定电阻 R_y 和调节电阻 R_p 等部件组成。

由辅助电源 B 所建立的工作电流 I ，在调定电阻 R_y 、测量电阻（或叫补偿电阻） R_x 上产生电压降。当开关 K 倒向“标准”位置时，则在检流计 G 中将有电流流过，若调节工作电流，即调节 R_p ，总可以找到检流计 G 指零的状态，这时调定电阻 R_y 上的电压降与标准电池电动势 E_N 相互补偿了，即 $E_N = IR_y$ ，所以校准后的工作电流

$$I = \frac{E_N}{R_y} \quad (1.1.1)$$

保持电流 I 不变，再将开关 K 扳向“未知”位置，调节 R_x ，使检流计再次指在零位上，即 $I_g = 0$ ，则 I 在 R_x 上的电压降 U_x （称为补偿电压）与 E_x 值相等，即：

$$E_x = IR_x \quad (1.1.2)$$

将式 (1.1.1) 代入式 (1.1.2) 得：

$$E_x = IR_x = \frac{E_N}{R_y} R_x = \frac{R_x}{R_y} E_N = k E_N \quad (1.1.3)$$

由式 (1.1.3) 可知，如果知道比值 R_x/R_y 、标准电池电动势 E_N ，就能求出未知电动势 E_x 的值，这就是电位差计测量电压的基本原理。由此可见，电位差计是一种比例仪器，它是将已知标准电池电动势 E_N 分成连续可调而又已知的若干比例等分 kE_N ，即用已知电压 kE_N 去补偿未知电压 E_x ，从而确定未知电压的数值。所以电位差计测量电压的方法又称补偿法。一般电位差计的辅助电源 B 、检流计 G 、标准电池 E_N 等部件都是外附的，它的误差不包括标准电池 E_N 的误差，所以补偿电压 U_x 的误差取决于测量电阻 R_x 与调定电阻 R_y 的比值，也就是说电位差计是按 R_x 和 R_y 的比值进行工作的。由此可知，如果电位差计示值超差的话，那么超差的实质就是 R_x/R_y 的比值误差大了，在修理时只要设法保持比值在规定误差范围内就能使电位差计合格。

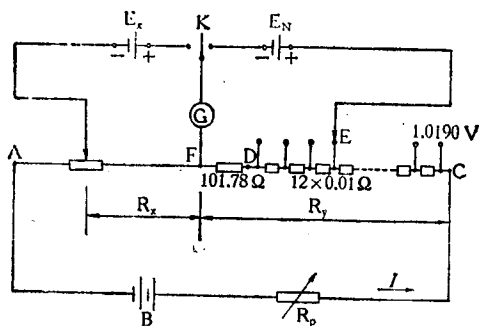


图 1.1.4 标准电池的温度补偿线路图

三、标准电池的温度补偿

目前所采用的标准电池，均为用汞及镉汞合金做的化学电池，它的电动势值十分稳定，年变化量在 $50 \mu\text{V}$ (0.005 级和 I 级) 或 $100 \mu\text{V}$ (0.01 级或 II 级) 以内。但是，它的电动势受温度的影响很大，在不同温度下，其电动势值也是不同的，在使用温度 $+5^\circ\text{C} \sim +35^\circ\text{C}$ 范围内的任一温度下，电动势值应按下式换算：

$$\begin{aligned}
 E_t &= E_{20} - 39.9 \times 10^{-6}(t - 20) - 0.94 \times 10^{-6} \\
 &\quad \times (t - 20)^2 + 0.009 \times 10^{-6}(t - 20)^3 \\
 &\approx E_{20} - (t - 20)(t + 20) \times 10^{-6}(\text{V}) \quad (1.1.4)
 \end{aligned}$$

式中： E_t ——温度为 $t^\circ\text{C}$ 时的电动势值 (V)；

E_{20} ——温度为 $+20^\circ\text{C}$ 时的电动势值 (V)；

t ——温度 ($^\circ\text{C}$)。

可见，电位差计若在 $5^\circ\text{C} \sim 35^\circ\text{C}$ 环境温度下使用，则标准电池的电动势值将在 $(E_{20} + 375 \mu\text{V}) \sim (E_{20} - 825 \mu\text{V})$ 之间变化，即有 1.2 mV 的变化。为了克服温度变化带来的工作电流 I 的变化，现有电位差计一般都有温度

补偿盘，图 1.1.4 中的 R_{DC} 就是温度补偿盘电阻。因为

$$I = \frac{E_N}{R_y}$$

为了要使 I 为某一恒定值，则只要使 E_N 、 R_y 同时按同样的倍数变化即可。

例如：在校准工作电流 I 的回路内

$$R_y = R_{FC} = R_{FD} + R_{DC}$$

当温度在 $5^\circ\text{C} \sim 35^\circ\text{C}$ 变化时， E_N 可能在 $1.01780 \sim 1.0190 \text{ V}$ 之间，如果取 $I = 10 \text{ mA}$ ，则此时 R_y 的变化相应为：

$$R_y \text{ 在 } \frac{1.01780 \text{ V}}{10 \text{ mA}} \sim \frac{1.0190 \text{ V}}{10 \text{ mA}}$$

之间，即 $101.78 \Omega \sim 101.90 \Omega$

取 $R_{FD} = 101.78 \Omega$ ， $R_{DC} = 12 \times 0.01 \Omega = 0.12 \Omega$

则 $R_{FC} = R_{FD} + R_{DC} = 101.78 \Omega + 0.12 \Omega = 101.90 \Omega$

设 $E_{20} = 1.018600 \text{ V}$ ，当 $t = 35^\circ\text{C}$ 时，

$$\begin{aligned} E_{35} &\approx E_{20} - (t - 20)(t + 20) \times 10^{-6} \\ &= 1.018600 - (35 - 20)(35 + 20) \times 10^{-6} \\ &= 1.018600 - 825 \times 10^{-6} \\ &= 1.017775 \approx 1.0178(\text{V}) \end{aligned}$$

电刷 E 可放在 D 点，此时

$$I = \frac{1.0178 \text{ V}}{101.78 \Omega} = 10 \text{ mA}$$

当 $t = 5^\circ\text{C}$ 时

$$\begin{aligned} E_5 &\approx 1.018600 - (5 - 20)(5 + 20) \times 10^{-6} \\ &= 1.018600 + 375 \times 10^{-6} \\ &= 1.018975 \approx 1.0190(\text{V}) \end{aligned}$$

电刷 E 可放在 C 点，此时

$$I = \frac{1.0190 \text{ V}}{101.90 \Omega} = 10 \text{ mA}$$

可见, 如果 R_{DC} 等分得足够细, 在温度变化时, 将温度补偿盘电刷 E 放在相应的位置, 就可补偿标准电池受温度变化而产生的影响, 使工作电流 I 无论在任何温度下均可调定为 10 mA 。

§ 1.2 直流电位差计的分类及标志

一、按使用条件分类

1. 实验室型。主要在实验室条件下供精密测量用。
2. 携带型。主要在生产现场供一般测量用, 并具有内附检流计、工作电源、标准电池 (或标准稳压源)。

二、按测量范围分类

1. 高电势电位差计。第 I 测量盘的步进电压 $\Delta U_1 \geq 0.1\text{ V}$ (时第 I 测量盘为百步进盘时, 则 $\Delta U_1' \geq 0.01\text{ V}$), 能配用分压箱测量电压, 并具有泄漏和静电屏蔽。
2. 低电势电位差计。第 I 测量盘步进电压 $\Delta U_1 \leq 0.01\text{ V}$

三、按未知端钮输出电阻的大小分类

1. 高阻电位差计。电位差计输出电阻 $\geq 1000\ \Omega$, 一般用于高电势电位差计。
2. 低阻电位差计。电位差计输出电阻 $\leq$ 几百欧。高电势和低电势电位差计都可适用。

四、按测量量限的多少分类

1. 单量限电位差计。
2. 多量限电位差计。

五、按准确度等级分类

1. 实验室型: 0.0001 级; 0.0002 级; 0.0005 级; 0.001 级; 0.002 级; 0.005 级; 0.01 级; 0.02 级; 0.05 级。
2. 携带型: 0.02 级; 0.05 级; 0.1 级; 0.2 级。

按 GB 3927—83 国家标准规定, 电位差计按准确度等级作如下分类:

电位差计准确度等级分类表

a	0.000 1	0.000 2	0.000 5	0.001	0.002
b	1 ppm	2 ppm	5 ppm	10 ppm	20 ppm
c	1×10^{-6}	2×10^{-6}	5×10^{-6}	1×10^{-5}	2×10^{-5}
a	0.005	0.01	0.02	0.05	0.1
b	50 ppm	100 ppm	200 ppm	500 ppm	1 000 ppm
c	5×10^{-5}	1×10^{-4}	2×10^{-4}	5×10^{-4}	1×10^{-3}

电位差计的等级指数可用: a. 以百分数表示或用 b. 以百万分之几表示或用 c. 以科学标记法表示. 如果电位差计有几个测量量程, 各量程可以有各自的等级指数。

六、按测量盘的结构或补偿电压的方式分类

1. 简单分压式线路: 测量电阻是由简单的分度十进盘和附加的滑线电阻盘组成的, 如 303、UJ 23 等。

2. 串联代换式线路: 测量电阻是由代换十进盘组成的, 如 308、UJ 9、UJ 25、UJ 24 等。

3. 并联分路式线路: 测量电阻是由分路十进盘组成的, 如 UJ 14、UJ 1 等。

4. 十进电流叠加线路: 测量电阻是按十进电流叠加线路组成, 补偿电压 (又叫测量电压) 是由几个互成十进关系的电流在同一列测量电阻上产生十进位的补偿电压, 如 UJ 5、UJ 26、P 306 等。

5. 电压叠加式线路: 补偿电压是由不同工作电流在不

同测量电阻上产生的补偿电压串联叠加而成，如 UJ 30 等。

6. 桥式线路：补偿电压由两个方向相反的工作电流分别在两部分电阻上的电压降之差产生的，如 KJL-48、3589 R、UJ 35、UJ 32 等。

7. 双电源及多电源电位差计：电位差计由几个电压回路组成。每个电压回路由一个辅助电源供电，补偿电压由这几个回路的补偿电压相加而成，如 UJ 30、英国的 5400、44248 等。英国生产的电位差计，一般是给出 1 V 这一点的相对误差作为电位差计的相对误差，而且是在条件最理想时的数值，这一点应当特别注意，千万不能误认为是电位差计每个示值的相对误差。这与我国的规定是不相同的。

8. 直流比较仪式线路。测量电压是利用改变比较仪中测量线圈匝数的方法来改变固定电阻上的电流而产生，如 UJ 42 型直流比较仪电位差计。这种电位差计是应用磁调制原理和自动调节原理，已摆脱了电阻式电位差计的概念，不属于电阻仪器的范围。

七、电位差计的标志、符号

1984 年颁布实施的部颁标准 (ZB Y 163—83) 和国家标准 (GB 3927—83) 对标志电位差计用的符号作了规定，如 1.2.1 表所示。

请看电位差计的标志示例 1.2.2

在此示例中的标志表示：

直流电位差计，由 NN 制造，序号为 12345，型号为 A、B、C、D

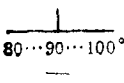
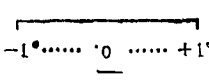
量程因数为 1 时：

有效量程为 $(0 \cdots 1.1 \text{ V}) \times 1$ ，分辨率为 $10 \mu\text{V}$ ，

量程因数为 0.1 时：

有效量程为 $(0, \cdots 1.1 \text{ V}) \times 0.1$ ，分辨率为 $1 \mu\text{V}$ 。

表1.2.1 标志电位差计用的符号

符 号	含 义	符 号	含 意
	试验电压 500 V		以科学标记法表示误差的等级指数为 1×10^{-4}
	试验电压 2 kV		以百分数表示误差的等级指数为 0.01
	未经过电压试验的仪器		以百万分之几表示误差的等级指数为 100 ppm
	电位差计使用时与其支撑面垂直		静电屏蔽
	电位差计使用时与其支撑面水平		接地端
	电位差计使用时使支撑面与水平面成一斜倾角度(如 60°)		参考另给的文件
	电位差计使用时与其支撑面垂直, 标称使用范围 80°.....100°		电位差计使用时与其支撑面水平, 标称使用范围 -1°.....+1°

等级指数: 1×10^{-4}

温度的参考值: 23℃

标称使用范围从 13~33℃

更详细的内容在另给的文件中给出。

试验电压为 500 V。