

导体电阻率的测定

电阻按阻值大小可分为高电阻（ $100\text{k}\Omega$ 以上）、中电阻（ $1\Omega \sim 100\text{k}\Omega$ ）和低电阻（ 1Ω 以下）三种。不同阻值的电阻，应采用不同的测量方法。因为导体的电阻值较小，使用欧姆表、惠斯登电桥等普通仪器测其阻值，会受到附加电阻（导线电阻和接触电阻）的影响而无法测准。例如，在电气工程中，需要测量金属的电阻率、分流器的电阻、电机和变压器绕组的电阻以及其它小阻值的电阻。所以，对导体这类低值电阻的测量，通常采用直流双臂电桥来完成。

【实验目的】

1. 了解双臂电桥的结构特点及测量低值电阻的工作原理。
2. 学习使用双臂电桥测低值电阻的方法。
3. 测量金属导体的电阻率。

【实验仪器】

QJ44 型直流双臂电桥、待测电阻（金属棒）、螺旋测微器、米尺等。

【实验原理】

1. 导体电阻率的测量原理

通常状况下，导体的电阻与其材料的物理性质和几何形状有关。由实验可知，导体的电阻 R 与其长度 L 成正比，与其横截面 S 成反比，有关系式

$$R = \rho \cdot \frac{L}{S}$$

式中，比例系数 ρ 为导体的电阻率。若导体为圆柱体，其直径为 d ，长为 L ，则

$$\rho = R \cdot \frac{S}{L} = R \cdot \frac{\pi d^2}{4L}$$

2. 直流双臂电桥的结构特点及测量原理

双臂电桥亦称开尔文电桥，是测 10Ω 以下低值电阻的常用仪器。在测量低值电阻时，必须考虑附加电阻（即接触电阻和导线电阻，一般约为 0.001Ω ）的影响。用惠斯登电桥测低值电阻时，由于附加电阻构成桥臂的一部分，并且其阻值接近甚至超过被测阻值，则会导致很大的误差，甚至使测量毫无价值。直流双臂电桥是对惠斯登电桥加以改进而成的，它能消除附加电阻对测量结果的影响，能较精确地测得低值电阻的阻值。双臂电桥的原理如图 1 所示。图中 R_x 是待

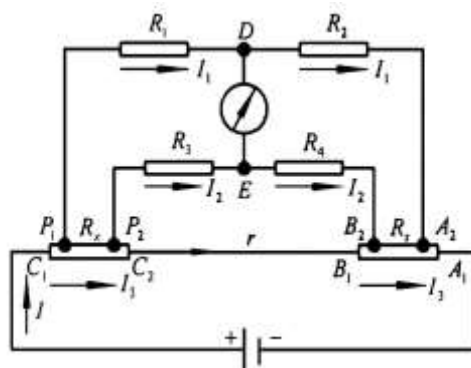


图 10.1 双臂电桥原理图

测低值电阻。与单臂电桥不同的是，双臂电桥在接有检流计 G 的下端增加了附加桥臂 R_3 和 R_4 ，并设计使 R_1, R_2, R_3, R_4 的阻值远比 R_x 和 R_s 的大。电源的两端分别与 R_x 和 R_s 相接，将每个连接端分为两个接点，如图 1 中的 C_1 和 P_1, A_1 与 A_2 。这样就把 A_1, C_1 点的接触及连接电阻归入到电源内阻中，使该附加电阻被排除在桥路之外，对测量没有影响。 P_1, A_2 点的接触及连线电阻被分别归入两个大阻值的桥臂电阻 R_1 和 R_2 中，其影响可忽略。同样，将连接 R_x 与 R_s 的两端分为 C_2, P_2 和 B_1, B_2 接点。 P_2, B_2 点的接触及连线电阻归入至附加桥臂的大阻值电阻 R_3, R_4 中。将 C_2, B_1 两点用粗导线相连，设导线与两接点的总阻值记为 r ，在设计中适当选择 R_1, R_2, R_3 和 R_4 的阻值，即可消去附加电阻 r 对测量的影响。如此设计，既可以把附加电阻的影响排除于 R_x 与 R_s 两个低值桥臂之外，使电桥可测低值电阻，又由于用粗导线连接 C_2 与 B_1 ，使通过 R_x 与 R_s 的电流较大，其上的压降也较大，二者获得电源的大部分电压，因而 R_x 与 R_s 阻值的变化对桥路中 E 点的电位影响显著，从而可提高双臂电桥的测量灵敏度。

调节电桥平衡的过程，就是调节电阻 R_1, R_2, R_3, R_4 和 R_s ，使检流计中的电流 $I_g = 0$ 的过程。当电桥平衡时，通过 R_1 和 R_2 的电流相等，通过 R_3 和 R_4 及通过 R_x 和 R_s 的电流也分别相等。图 10.1 中分别以 I_1, I_2 和 I_3 表示。因 D, E 两点等电位，故有

$$I_1 R_1 = I_3 R_x + I_2 R_3$$

$$I_1 R_2 = I_2 R_4 + I_3 R_s$$

$$(I_3 - I_2) r = I_2 (R_3 + R_4)$$

联立以上三式得

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} \cdot R_s + \frac{r R_4}{R_3 + R_4 + r} \left(\frac{R_1}{R_2} - \frac{R_3}{R_4} \right) \quad (10.1)$$

设计使 $R_1 = R_3, R_2 = R_4$ 或者 $R_1/R_2 = R_3/R_4$ ，则上式右边的第二项为 0，从而得到双臂电桥平衡时，待测电阻为

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_s \quad (10.2)$$

为保证 $R_1/R_2 = R_3/R_4$ 关系式在使用电桥过程中始终成立，通常将两对比例臂 (R_1/R_2) 和 (R_3/R_4) 做得分别相等，并能进行同步调整，即在仪器的相应旋钮的任一位置处都能保证 $R_1 = R_3$ 及 $R_2 = R_4$ ，这样在电桥平衡时，既保证了式 (2) 的成立，又消除了附加电阻 r 对测量结果的影响。

R_1/R_2 的值由电桥倍率读数开关的示数给出， R_s 的值由电桥步进读数开关与滑线读数盘的示数给出。调节以上旋钮，可使电桥平衡。此时将倍率开关读数和步进开关与滑线盘读数的和相乘，就得到被测电阻 R_x 的值。

应指出，在双臂电桥中，低值电阻 R_x 和 R_s 各有 4 个接线端，这种电阻称为四端电

阻，此种接线方式称为四端接线法。显然，测得 R_x 的阻值应是 P_1 与 P_2 接点内侧的电阻阻值。在四端电阻中，由于流经 R_x 的两接点 C_1 、 C_2 的电流比较大，常称接点 C_1 、 C_2 为电流端；另两接点 P_1 、 P_2 则称为电压端。采用四端连接法可大大减少附加电阻对测量的影响。

总之，双臂电桥能测低值电阻的主要原因在于：增加了附加桥臂（电阻为 R_3 和 R_4 ）， R_x 和 R_s 采用了四端连接，并设计加大了通过 R_x 和 R_s 的电流。

【实验内容】

1. 将待测金属导体棒如铜、铝、铁等分别联成四端电阻，如图 10.2 所示，并按照四端连接法将其连接在电桥的对应接线柱上，如图 10.3 所示。 P_1 、 P_2 两点之间的导体棒为被测电阻 R_x 。

2. 插上外接电源，灵敏度调节居中，选择适当的倍率 M 。

3. 按下 G 钮（接通检流计），再跃按 B 钮（接通电源），调节步进和滑线读数盘，使指针示零，此时电桥平衡。记录下阻值 R_s 。

$$R_s = \text{步进盘读数} + \text{滑线盘读数}$$

$$\text{则 } R_x = M R_s$$

4. 用螺旋测微器测出圆柱形金属棒在 3 个不同位置处的直径 d ，取平均值 \bar{d} 。

5. 用米尺测量 P_1 、 P_2 之间的金属棒长度 L ($L \approx 40\text{cm}$)。

6. 计算导体的电阻率 ρ 。

7. 计算测量的基本误差 $\Delta R_x = R_{\max} \cdot S \%$

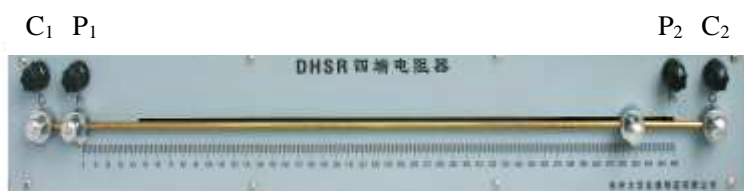


图 10.2

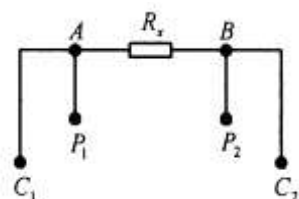


图 10.3

【仪器介绍】

QJ44 型直流双臂电桥，是携带型测 $0.0001 \sim 11 \Omega$ 电阻的双臂电桥，各工作部件位置如图 4 所示。通过仪器标牌（如图 5 所示）可以更好地了解其结构和功能。全量程由 $\times 100$ ， $\times 10$ ， $\times 1$ ， $\times 0.1$ ， $\times 0.01$ 五个倍率和步进读数盘（十进盘）及滑线读数盘组成。内附晶体管指零仪，灵敏度可以调节。在测量未知电阻时，为保护指零仪不被打坏，指零仪的灵敏度调节旋钮应放在最低位置，使电桥初步平衡后再增加指零仪灵敏度。指零仪的偏转大于等于一个分格，就能满足测量准确度的要求。灵敏度不要过高，否则不易调节平衡，使测量时间过长。通常，用具有滑线盘的双臂电桥测电阻时，基本测量误差 ΔR_x 按以下方法估算。



图 10.4 QJ44 型直流双臂电桥面板

1.倍率旋钮 2.电源按键 B 3.指零仪按键 G 4.步进读数盘 5.滑线读数盘 6.读数标致线 7.电源指示 8.指零仪灵敏度调节 9.指零仪表头 10.表头调零 11.外接指零仪插座 12.待测电阻接线端电流端 C₂ 13.电压端 P₂ 14.电压端 P₁ 15.电流端 C₁

当准确度等级 $S = 0.05, 0.1$ 时

$$\Delta R_x = \pm k_r (R_s \cdot S \% + \Delta R)$$

式中, k_r 为电桥的倍率比例系数; ΔR 是滑线盘的最小分度值。

当 $S = 0.2, 0.5, 1, 2$ 时

$$\Delta R_x = R_{\max} \cdot S \% \quad (10.3)$$

式中, R_{\max} 是电桥在某一倍率下的最大量程。QJ44 型电桥的倍率, 有效量程, 准确度等级示于下表。

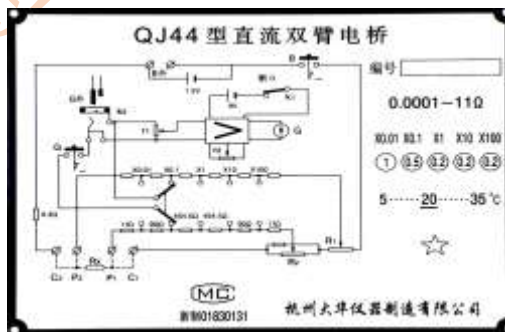


图 10.5 QJ44 型直流双臂电桥标牌

倍率 (M)	有效量程 (Ω)	准确度等级 (S)
$\times 100$	1~11	0.2
$\times 10$	0.1~1.1	0.2
$\times 1$	0.01~0.11	0.2
$\times 0.1$	0.001~0.011	0.5
$\times 0.01$	0.0001~0.0011	1

双臂电桥的使用方法和注意事项与单臂电桥基本一样, 可参阅“热敏电阻温度系数的测定”实验。

双臂电桥为了削减附加电阻，待测电阻采取了四端接法，当待测电阻较长时，可利用四根粗导线一端分别接于电桥的电流端 C_1 、 C_2 和电压端 P_1 、 P_2 ，另一端于待测电阻良好接触，四个接点的顺序要正确，不能接错。另外，为了保证有较多的有效数字位数，步进盘读数不能为零。

【数据记录及处理】

表 10.1

待测量 导体	d (mm)				L (cm)	M	$R_s(\Omega)$	$R_x(\Omega)$	$\rho(\Omega m)$	$\Delta R_x(\Omega)$
	d_1	d_2	d_3	\bar{d}						
铜										
铝										
碳素钢										

【注意事项】

1. 连接导线应短且粗。各接点必须洁净，以保证接触良好。
2. 通过低值电阻的 R_x 的电流较大，会使电阻发热而致其阻值变化，产生测量误差；同时大电流也使仪器受损，故应跃按 B 钮，使通电时间短暂。
3. 测量完毕，应松开 B 与 G 按钮，断开电源开关。

【思考题】

1. 直流双臂电桥与惠斯登电桥有那些异同之处？
2. 双臂电桥电路为什么可用来测低值电阻？它是如何消除附加电阻对测量之影响的？采用何种措施提高测量灵敏度的？

【应用提示】

1. 四端接法

四端接法是低值电阻测量的关键，通过外侧的电流端给待测电阻加上大电流，使低阻值的电阻上有较大的电压；通过里侧的电压端获取待测电阻上两电压端间部分的电压。当比较臂电阻很大时，比较臂上电流很小，这样，比较臂上的附加电阻（包括比较臂与待测电阻的触点）上压降远小于待测电阻上的压降。因此，对于低值电阻的测量，当没有双臂电桥时，仍可用高内阻电压表采用四端接法进行测量。

2. 钢筋混凝土的电阻率

钢筋在混凝土中的锈蚀是一种电-化学过程，在这个过程中存在一个使钢材分解的电流，这个腐蚀性电流经周围的混凝土越早，钢筋在其遭受锈蚀的区段上的钢材损失量就越大。因此，为了查清钢筋有无锈蚀可能，测定混凝土的电阻是十分重要的，这个因素可通过电阻率（其单位是 Ωcm ）来加以测定。

由于现场条件不相同，混凝土的电阻率在整个结构上是不断变化的，每当我们对某一有怀疑的表面进行检测时，实测的结果可以画成图，从图上就能确定最有可能锈蚀的

区域，电阻率的复核（复查）也很重要，因为借此可评估长期锈蚀情况。

一般的规则是：混凝土的电阻率越低，钢筋锈蚀的几率越高，密实的混凝土的电阻率可高达 $100000\Omega\text{cm}$ ，而劣质的混凝土则只有 $1000\Omega\text{cm}$ 。

采用一种加压电表面耦合剂，保证了每个探头尖和混凝土之间具有良好的电接触。在外侧的探头之间流过一个恒定的交流电流信号，使混凝土内部产生一个电场，测定内侧探头之间的电压，就可以得到混凝土的电阻率值。

就导电性而言，材料可以是绝缘体、半导体和导体。对绝缘体来说，通常要测其体积电阻率。通过对其测量不仅可控制材料的质量，还可用来考核材料的均匀性、检测影响材料电性能的微量杂质的存在。当有可以利用的相关数据时，绝缘电阻或电阻率的测量可以用来指示绝缘材料在其他方面的性能，例如介电击穿、损耗因数、含水量、固化程度、老化等。

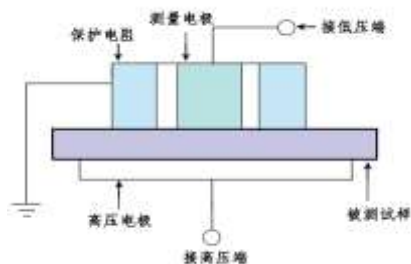


图 10.6



图 10.7

体积电阻：在试样的相对两表面上放置的两电极间所加直流电压与流过两个电极之间的稳态电流之商；**体积电阻率：**绝缘材料里面的直流电场强度与稳态电流密度之商，即单位体积内的体积电阻。影响体积电阻率和表面电阻率测试的主要因素是温度和湿度、电场强度、充电时间及残余电荷等。为准确测量体积电阻和表面电阻，一般采用三电极系统，圆板状三电极系统。测量体积电阻 R_v 时，保护电极的作用是使表面电流不通过测量仪表，并使测量电极下的电场分布均匀。此时保护电极的正确接法见图 10.6。

工业上已发展形成体积电阻率测定仪，可广泛应用于电力、石油、化工等行业及部门，专业测定绝缘油、抗燃油等介质的体积电阻率和电阻。如图 10.7 所示。

电阻率用于混凝土性能的特征：

高性能混凝土应该具有高的电阻率，因为混凝土电阻率太低可能影响钢筋保护效果。对于成熟期为 6 个月的高性能混凝土湿试件，电阻率在 $470\sim 530\Omega\cdot\text{m}$ 范围之内，比普通混凝土高 10 倍。当电阻率 $> 500\Omega\cdot\text{m}$ 时，可大大抑制钢筋锈蚀。因此，为了查清钢筋有无锈蚀可能，测定混凝土的电阻是十分重要的。

利用测量电阻率判断混凝土质量的主要优点：①电阻率的测量方法相对比较简单和快速，还可进行长期在线监控，甚至无线远程监测；②可无损检测范围；③可以进行反复多次的测量，提高测量的准确度和有效性；④不需要借助大型仪器，测量成本较低。