

# 电 路 理 论 基 础

补 充 教 材 (一)

成 都 电 讯 工 程 学 院

一 大 队 编

一 九 七 二 年 五 月

# 目 录

## 一、万用表的基本原理与实验安装

第一节	电表的量程和内阻	(2)
	〔实验一〕测量表头的量程	(4)
	〔实验二〕测量表头的内阻	(4)
第二节	安培表的原理	(5)
	〔实验三〕将表头改装成毫安表	(7)
第三节	伏特表的原理	(8)
	〔实验四〕将表头改装成伏特表	(10)
第四节	欧姆表的原理	(11)
	〔实验五〕设计和安装欧姆表	(19)
第五节	万用表线路分析	(20)
	〔实验六〕设计和安装万用表	(27)
附录1	交流测量	(31)
附录2	欧姆表的刻度 $R_x$ 与电流 $I_x$ 的对应值	(33)

## 二、常用电工测量仪表简介

第一节	一般介绍	(33)
第二节	磁电式测量机构	(35)
第三节	电磁式测量机构	(36)

第四节

电流表和电压表 ----- (37)

第五节

用电桥法测量电阻 ----- (38)

# 毛主席语录

读书是学习，使用也是学习，而且是更重要的学习。

## 设计和安装万用电表

在直流电路基础这一章里，我们学习了有关直流电路的基本知识，初步掌握了一些基本理论。毛主席教导我们：“认识从实践始，经过实践得到了理论的认识，还须再回到实践去”。现在我们安排作一个综合的实验，要求学员将学习的基本理论应用到实践中去，自己设计和安装一支万用电表。

万用电表的特点是一表多用，它运用一支表头，通过范围选择开关的转换，而能够进行直流电流、直流电压、直流电阻、交流电流、交流电压……等多种测量。由于要用同一支表头进行多种测量，万用电表的内部结构就比单个的电表略为复杂一些，但是它的原理用本章学习的理论完全是可以掌握的。遵照毛主席关于由浅入深，由简到繁，由片面到更多的方面的教导，我们将这个实验的内容分为六次来作。希望学员在自己钻研的基础上，互相帮助，协同工作，设计和安装好一个万用电表。

顺便说明一下，“万用电表”是一个习惯的名称，实际上只是将一支表头多一些测量范围的“多”用电表，并非真是万能的！又因我们现在只学习了直流电路，还没有学到交流电路，所以目前只设计和安装测量直流电流、直流电压和直流电阻三个部分。

# 第一节 电表的量程和内阻

## 1. 磁电式电表的工作原理

磁电式电表的主要部份如图 1-1 所示：M 是一块马蹄形永久磁铁，磁铁的北极和南极之间的空隙里有一个线框 a，线框是长方形的，它的框架用很轻的铝材料作成，铝框架上面是一个很细的漆包线绕制的通电流的线圈。线框装在转轴 L 上，轴 L 的两端用坚硬的宝石轴承（图中未画出）支撑着。轴 L 上又装有一对弹簧游丝 c 和一根指针 d。指针尖端下面装有一块圆弧形的刻度尺 e。

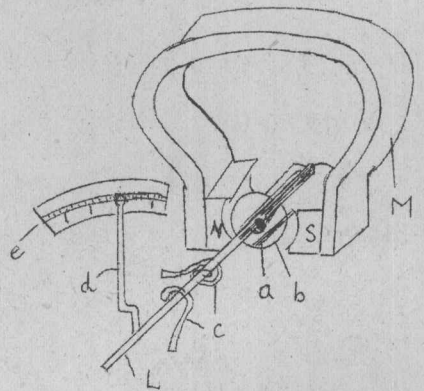


图 1-1 磁电式电表的基本部份

当线圈中有电流通入时，线圈受到磁铁的作用力矩而转动，线圈转动时带动轴转动，同时也就使弹簧游丝扭旋和使指针偏转。我们知道弹簧游丝扭旋时要产生机械的弹性力矩，弹性力矩的方向和磁力矩的方向是相反的。因此当弹性力矩的数值和磁力的数值大小相等时转动就停止了。这时指针 d 偏转了一个固定的角度，其数值可以从指针在刻度尺上的指示直接读出来。实践和理论都已证明，磁电式电表指针偏转的读数是和它的线圈中流过的电流强度成正比的。设流经电表线圈的电流强度为 I，指针偏转的读数为 d，则

$$I = Kd \quad (1-1)$$

式中比例常数 K 叫做电流计常数，它的意义是：使电表指针偏转一格时，必须流过电表线圈的电流强度之值，以 [安/格] 或 [毫安/格] 为单位。很明显，K 的数值越小，电表越灵敏。

## 2. 表头的量程和内阻

上面我们介绍了一切磁电式电表都共有的最主要的一部份，以后我们把这一部份叫做表头。没有电流通过表头线圈时，表头的指针静止在刻度尺左边的零点，如图1-2所示。当有电流从表头正的一端（图中A点）流入线圈时，指针即向右方偏转，流入电流越大，指针偏转越多。

我们将指针从零点偏转到右边最大刻度处必须流过表头线圈的电流强度的数值，叫做表头的量程，并用符号  $I_g$  表示。量程  $I_g$  也叫做表头的满格偏转电流，这个数值越小，表头越灵敏，电流计数也越小。使用表头必须注

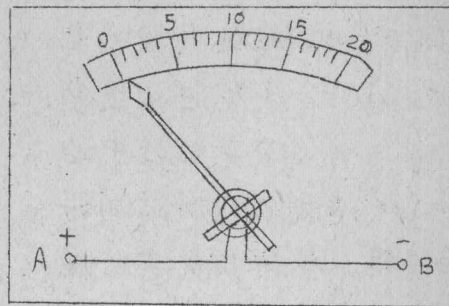


图1-2 表头指针在零点位置

意两个问题：一是流经表头的电流数值不能超过它的量程  $I_g$ ，如果电流大于  $I_g$ ，则指针偏转超过表头刻度尺的长度，使指针碰在表头右边把指针打弯，甚至可能因表头线圈发热过多而烧毁；二是电流只能从表头正的一端流入线圈，（即直流电流，电压仪表都有极性，使用时必须注意），如果电流从负的一端流入线圈，指针就要向左偏转，这样不但不能读数，而且也有打弯指针的危险。

表头内部有一定的电阻称为表头的内阻，用符号  $R_g$  表示，这个内阻主要是表头线圈的电阻，它的大小由绕制线圈的导线材料、线圈的面积以及线圈的匝数决定。一般地说，表头量程越小，线圈用的漆包线越细，绕的匝数越多，表头的内阻越大。

表头的量程  $I_g$  和内阻  $R_g$  是两个最重要的参数，装制万用电表时必须知道它们的准确数值。下面介绍一种简便适用的测量  $I_g$  和  $R_g$  的方法。

## [实验一] 测量表头的量程

电路连接如图1-3所示，图中E是电源，R是可变电阻，Y是固定电阻，K是开关。将一个准确度较高的标准表和待测量程 $I_g$ 的表头串联在电路中。当开关K闭合时，流经待测表的电流和流经标准表的电流是相同的。实验时调整电阻R的大小，改变电路中的电流，使待测表的指针刚好满格偏转，从标准表读出此时的电流数值，这就是待测表的量程 $I_g$ 之值。

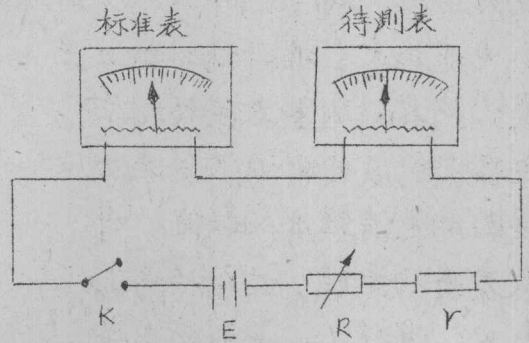


图1-3 测量表头量程的电路

- [问题] 1. 图1-3中为什么要接一个固定电阻Y，不接不可以？
2. 估计待测表的量程为 $100\mu A$ ，设用 $E = 1.5$ 伏的电源，向R和Y应选用多大的电阻？标准表应选多大的量程？

## [实验二] 测量表头的内阻

如图1-4接线，图中E是电源， $K_2$ 是单刀开关， $K_1$ 是单刀双掷开关，R是可变电阻，Y是固定电阻。实验时先将开关 $K_2$ 掷向1点，使待测表接入电路，调节R使标准表指在某一个读数，设为 $I_0$ ；然后将开关 $K_2$ 掷向2点，使待测表断开而可变电阻 $R_2$ 接入电路，调节 $R_2$ （注意此时R，不能变动！）使标准表指在与前相同的读数 $I_0$ 。记下可变电阻 $R_2$ 的读数，这就是待测表的

内阻  $R_g$  之值。

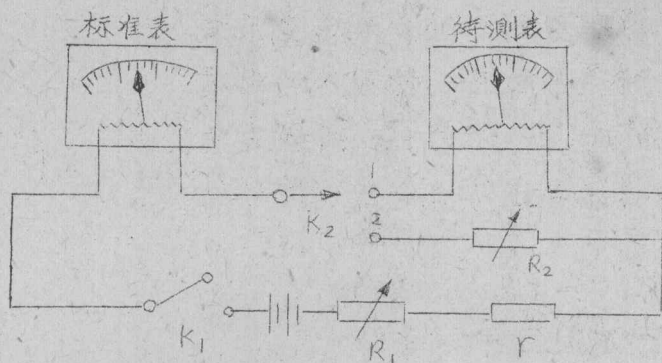


图 1-4 测量表头内阻的电路

## 第二节 安培表的原理

前面讲到有电流通过表头线圈时表头的指针即偏转。如果将表头刻度尺按通过线圈的电流强度的安培数分度，则表头指针在刻度尺上指示出的，就是通过表头的电流强度的具体数值，这样的电表叫做安培表，常用符号  $\text{---} \textcircled{A} \text{---}$  表示。同样，若刻度尺按通过线圈的电流强度的毫安数或微安数分度，就分别叫做毫安表或微安表，常用符号  $\text{---} \textcircled{mA} \text{---}$  或  $\text{---} \textcircled{\mu A} \text{---}$  表示。安培表用来测量通过电路中的电流强度的数值，因此应当串联入电路中使用；而且要求它的内阻小，串联入电路后对电路中的电流没有太大的影响；这是安培表的一个特点。其次，磁电式表头都很灵敏，量程都很小，一般在几十微安到几个毫安之间，接入电路中使用时通过的电流不能超过它的量程。如果要把量程为 1 毫安（甚至更小）的表头，用作量程为 1 安的安培表时，就出现了一个表头量程“小”和测量电流“大”的矛盾，这是安培表的又一个特点。怎样解决这一对“小”和“大”的矛盾呢？方法很简单，只要在表头线圈上并联一支分流电阻就行了，其原理可用图 1-5 说明。

在内阻为  $R_g$  的表头线圈上并联一支分流电阻  $R_s$ ，使流入的电流  $I_0$  分为两路，一路为  $I_g$  流经表头，一路为  $I_s$  流经分流电阻，按欧姆定律

$$I_g R_g = I_s R_s$$

或 
$$I_g R_g = (I_0 - I_g) R_s$$

则 
$$R_s = \frac{I_g}{I_0 - I_g} R_g$$

$$= \frac{1}{\frac{I_0}{I_g} - 1} R_g$$

令  $N = \frac{I_0}{I_g}$ ，即得到

$$R_s = \frac{1}{N - 1} R_g \quad (1-2)$$

式中  $N$  称为量程扩大倍率，它表示加了用公式 (1-2) 计算得的分流电阻  $R_s$  之后，量程为  $I_g$  的表头改成了量程为  $I_0$  的安培表。安培表的量程  $I_0$  较表头的量程  $I_g$  扩大了  $N$  倍。

公式 (1-2) 是否正确呢？毛主席教导我们：“判断认识或理论之是否真理，不是依主观上觉得如何而定，而是依客观上社会实践的结果如何而定。”让我们自己按图 1-6 的电路作一个实验。

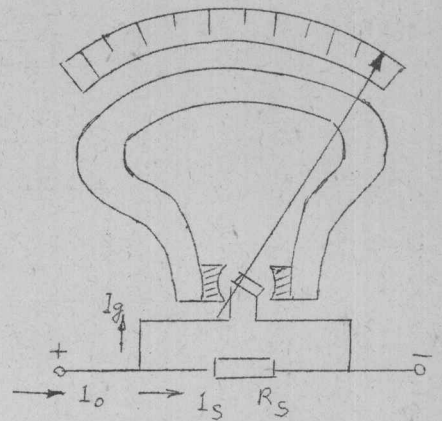


图 1-5 安培表的原理

## [实验三] 将表头改装成毫安表

如图 1-6 接线，E 是电源，K 是开关，R 是可变电阻，Y 是固定电阻，mA 是标准毫安表，这些仪器的规格由要改装的表头的情况选择。虚线方

框内就是改装成的毫安表，其中 G 是表头，它的量程  $I_g$  已在实验一测出，内阻  $R_g$  已在实验二测出；AB 是一根电阻丝，长度可以改变。很显然，表头 G 是和电阻丝 AB 并联的，AB 的电阻就是表头的分流电阻。实验步骤如下：

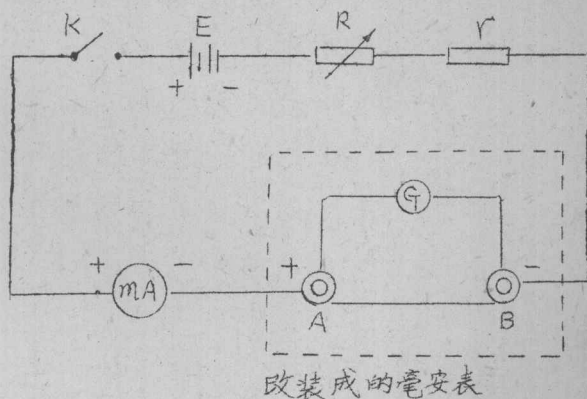


图 1-6 改装毫安表的电路

- (1) 照图接好电路，将 R 放在最大的电阻值，开关 K 不要接通。
- (2) 取一根长约 100 厘米的电阻丝，先将约 20 厘米并联在表头 G 上。然后闭合开关 K，减小 R，使毫安表 mA 的读数为 20 毫安。再改变电阻丝 AB 的长度，使表头 G 的读数恰为 20 格。
- (3) 再减小 R，使毫安表 mA 的读数依次为 40、60、80、100 格。若表头的读数与毫安表 mA 的读数不完全符合，可以略为调整并联电阻丝 AB 的长度来修正，最后尽可能调到毫安表为 20、40、60、80、100 毫安时表头偏转为 20、40、60、80、100 格。
- (4) 将调节好的电阻丝 AB 段剪下（略留长一点），绕在一个绝缘塑料板上，两端焊接好，作成分流电阻，再并联在表头上。然后再将表头与毫安表 mA 比较，应当是毫安表读数为 100 毫安时表头偏转 100 格，若有误差就要调整一下所作分流电阻的大小。

(5) 取下作好的分流电阻，用惠斯登电桥测出它的电阻值。(惠斯登电桥用法见附录3)

(6) 用公式(1-2)计算出分流电阻的理论值，与实验作的结果比较，求出实验误差。

[问题] 1. 表头G没有并联好电阻丝AB时，能不能接通图1-6中的开关K?

2. 计算出改装成的毫安表的内阻，与图1-6中的电阻R和Y相比较，认识一下电路中串接了毫安表时，对电路中的电流有多大影响。

### 第三节 伏特表的原理

我们已经懂得了，将表头并联一支分流电阻就可以改装成安培表，就能用来测量通过一条电路的电流强度的数值。在生产实践中又提出了这样的问题：能不能用一支表头来测量电路上两点之间的电压？能够的。举一个具体例子来说明。如图1-7，将一支量程  $I_g = 100 \mu a$ ，内阻  $R_g = 1000 \Omega$  的表头，跨接在电路的A、B两点上，A、B间的电压为  $U_A - U_B = U_{AB}$ 。如果这时表头刚好满格偏转，则由欧姆定律知道

$$U_{AB} = I_g R_g = 100 \times 10^{-6} \times 1000 = 0.1 \text{ 伏}$$

可见，当表头满格偏转流过  $100 \mu a$  的电流时，A、B间的电压应当是 0.1 伏。如果AB之间电压较小，流过表头的电流只有  $80 \mu a$ ，则

$$U_{AB} = 80 \times 10^{-6} \times 1000 = 0.08 \text{ 伏}$$

依次类推，流过表头的电流为  $60 \mu a$   $20 \mu a$  时，A、B间

的电压为 0.06、0.04、0.02 伏，我们在表头刻度尺 20、40、60、80、100  $\mu\text{A}$  的刻线外，标写出 0.02、0.04、0.06、0.08、0.1 伏，那么从刻度尺上直接就可以读出 A、B 间电压的伏特数来，这样的电表就叫做伏特表，通常以符号  $\text{V}$  表示。同样，若以毫伏刻度就叫做毫伏表，以符号  $\text{mV}$  表示。

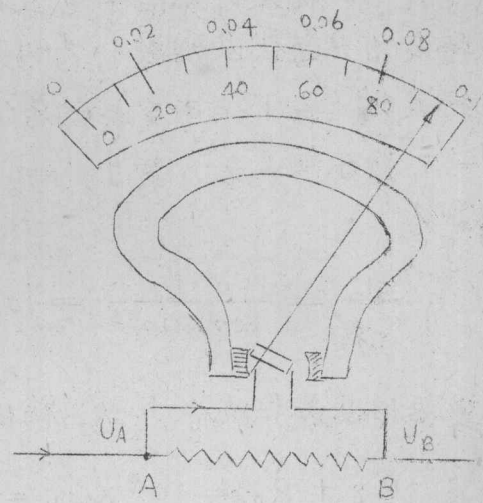


图 1-7 将表头跨接在 AB 两点测电压

应当注意，磁电式表头的量程很小，内阻也不太大，直接用一支表头作伏特表，它可以测量的伏特数是很小的，像上述例子，表头的  $I_g = 100 \mu\text{A}$ ,  $R_g = 1000 \Omega$ ，最大只能测量 0.1 伏。实际上工作中要测几十伏或几百伏的电压怎么办呢？这又是一对“小”与“大”的矛盾。解决这个矛盾仍然是用附加电阻的方法。

如图 1-8，在表头线圈上串联一个电阻  $R_p$ ，叫做倍率电阻，使欲测的电压在  $R_p$  上降去一部份，按欧姆定律

$$U = I_g (R_p + R_g)$$

式中  $U$  就是加上倍率电阻  $R_p$  之后表头指针满格偏转时的电压读数，解出  $R_p$  得

$$R_p = \frac{U}{I_g} - R_g \quad (1-3)$$

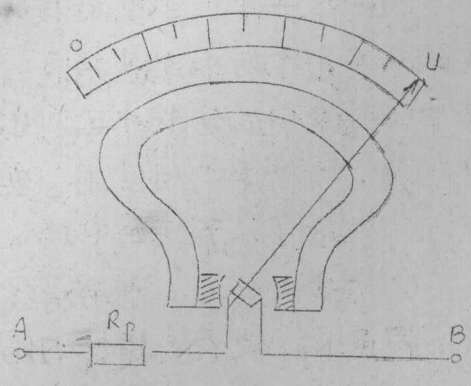


图 1-8 倍率电阻的原理

式(1-3)就是计算倍率电阻  $R_p$  的普通公式, 式中  $1/I_g$  称为伏特表的“每伏欧姆数”, 它的意义是: 量程为  $I_g$  的表头改装成伏特表时, 每1伏所需要的总内阻 ( $R_g + R_p$ ) 之值。例如在图1-7所示的表头, 其  $I_g = 100 \mu\text{a}$ ,  $R_g = 1000 \Omega$ , 则每伏欧姆数为

$$\frac{1}{I_g} = \frac{1}{100 \times 10^{-6}} = 10^4 \text{ 欧姆/伏}$$

如果要将此表头改作10伏满格的伏特表, 则它的总内阻应为

$$R_g + R_p = 10^4 \times 10 = 10^5 \text{ 欧姆}$$

因此应加的倍率电阻  $R_p$  为

$$\begin{aligned} R_p &= 10^5 - R_g \\ &= 100000 - 1000 = 99000 \text{ 欧姆} \end{aligned}$$

判断公式(1-3)是否正确, 仍然应以实践为标准。

## [实验四] 将表头改装成伏特表

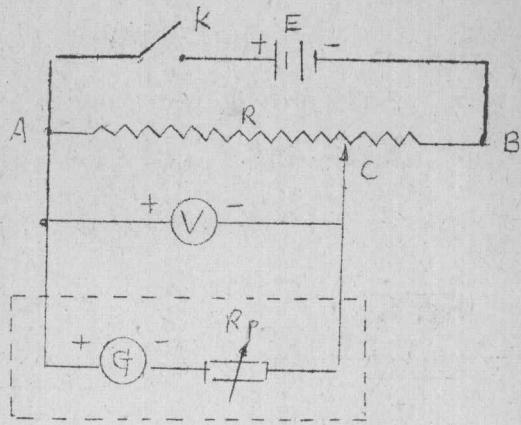
用图1-9所示电路接线,  $E$  是电源,  $K$  是开关,  $R$  是滑线电阻,  $V$  是用作标准的伏特表。虚线方框内就是改装成的伏特表, 其中  $G$  是在前面实验中已测出的  $I_g$  和  $R_g$  的表头;  $R_p$  是一个电阻箱, 作倍率电阻使用。实验步骤是:

- (1) 照图1-9接好电路, 将  $R_p$  放在最大值, 开关  $K$  断开。
- (2) 闭合开关  $K$ , 滑动滑线电阻  $C$  点, 使伏特表的读数为0.2伏, 调节  $R_p$  使表头指针的偏转为20格。
- (3) 滑动  $C$  点, 使伏特表的读数依次为0.4、0.6、0.8以及1伏, 同时表头指针的偏转应该为40、60、80及100格。若表头指针偏转与伏特表读数不符合, 应略为调整  $R_p$  之值修正, 最后要尽可

能调到伏特表读数为 0.2、0.4、0.6、0.8、1 伏时表头的偏转为 20、40、60、80、100 格。

(4) 记下电阻箱  $R_p$  之值，这就是实验得出的倍率电阻大小。

(5) 用公式 (1-3) 计算出  $R_p$  之理论值，与实验所得结果比较，求出误差。



改装成的伏特表

图 1-9 改装伏特表的电路

[问题] 1、总结一下安培表和伏特表有些什么共同点，有些什么不同点，使用时各应注意一些什么问题。

2、改装成伏特表时，表头的  $I_g$  大些好还是小些好，为什么？

## 第四节 欧姆表的原理

### 1. 欧姆的基本原理

将安培表串联入电路中可以测量电流强度的数值，将伏特表并联在电路上的两点可以测量这两点的电压。但应注意，在作这种测量时，被测电路本身是有电流和电压存在的，所以将表头装制成安培表或伏特表时，不需要另加电源。现在提出一个新的问题：若有一支电阻，在它本身没有电压，也没有电流，能不能利用一支表头测量出它的电阻值来呢？不同质的矛盾，用不同的方法去解决，利用一支表头测量电阻时，必须另外加上电源。我们将加有电源用来测量电阻欧姆数的电表叫做欧姆表，它的基本原理如下所述。

图1-10 a, 将一支量程  $I_g$  内阻  $R_g$  的表头, 和一个电动势  $E = 1.5$  伏的电池, 一个限流电阻  $R$ , 串联在一起, 就构成了欧姆表, 在接线端  $X_1$  和  $X_2$  上接上红黑两根测量棒 (或称表棒), 就可以测量电阻。如果将电池的内阻忽略不计, 则欧姆表自身  $X_1$ ,

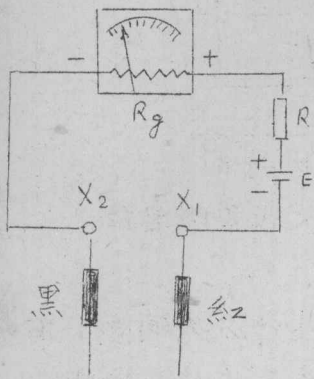


图1-10 a

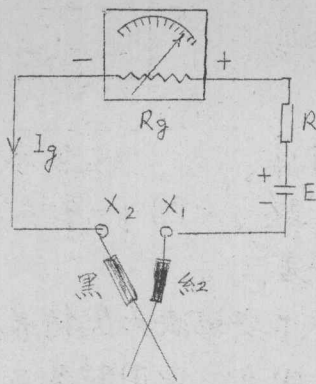


图1-10 b

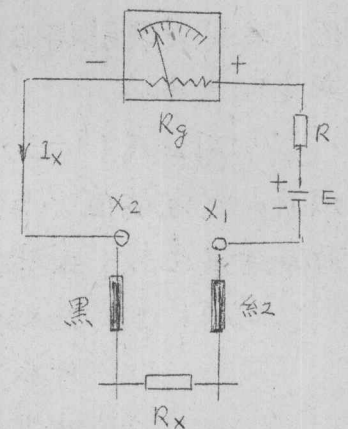


图1-10 c

$X_2$  之间, 有一定电阻  $R_g + R$ , 这个电阻数值用  $R_i$  表示 (即  $R_i = R_g + R$ ),  $R_i$  叫做欧姆表的输入电阻, 或者叫做欧姆表的中值电阻。

如图1-10 b, 将红黑两根测量棒碰在一起, 让电池  $E$ 、电阻  $R$  和表头构成闭合电路, 并恰当选择  $R$  的大小, 使表头指针刚好满格偏转。这时, 通过表头的电流刚好等于表头的量程  $I_g$ , 并有

$$I_g = \frac{E}{R_g + R} = \frac{E}{R_i} \quad (*)$$

而红黑两表棒之间的电阻则等于零,  $R_x = 0$ 。

如图1-10 c, 保持电阻  $R$  不变, 将红黑两表棒接到一个待测电阻  $R_x$  的两端, 显然, 通过表头的电流减小了, 指针只能转一个较小的角度, 达不到满格偏转。设此时指针读数为  $I_x$ , 则

$$I_x = \frac{E}{R_g + R_i + R_x} = \frac{E}{R_i + R_x} \quad (**)$$

用 (\*) 式去除 (\*\*) 式, 得出电流比值为

$$\frac{I_x}{I_g} = \frac{R_i}{R_i + R_x} \quad (1-4a)$$

由此式即可解出待测电阻  $R_x$  的大小为

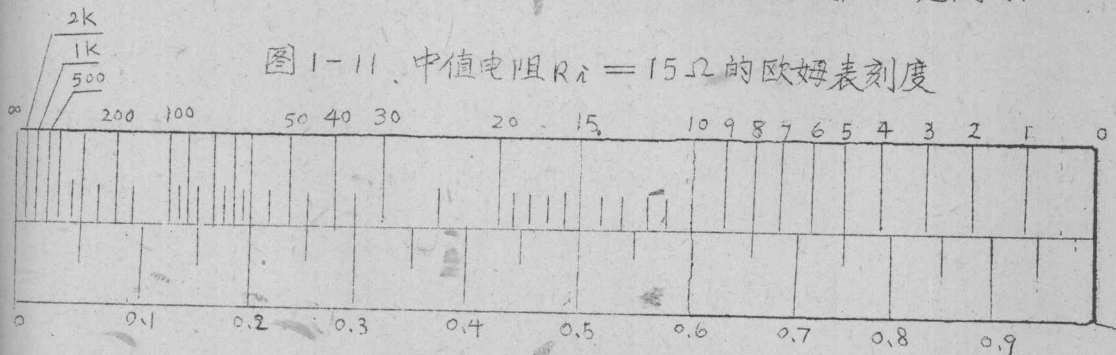
$$R_x = R_i \frac{1 - \frac{I_x}{I_g}}{\frac{I_x}{I_g}} \quad (1-4b)$$

公式 (1-4) 中  $R_i$  和  $I_g$  恒定的, 因此只要由表头指针读出  $I_x$  之值, 即可计算出待测电阻  $R_x$  之值。例如, 设中值电阻  $R_i = 15 \Omega$ , 指针偏转为满格电流的 30% (即  $\frac{I_x}{I_g} = 0.3$ ), 则所测电阻  $R_x$  为

$$R_x = 15 \times \frac{1 - 0.3}{0.3} = 35 \Omega$$

实用上欧姆表的刻度, 都是直接在相应的  $I_x$  位置处刻出  $R_x$  的数值, 这样就可以直接由表头指针的指示, 读出待测电阻  $R_x$  的大小。图 1-11 画出的是一个中值电阻  $R_i = 15 \Omega$  的欧姆表的刻度尺。对应于每一个电流值的电阻  $R_x$  的刻度数值, 见附录 2。

图 1-11 中值电阻  $R_i = 15 \Omega$  的欧姆表刻度



欧姆刻度尺上有三个特殊的点：

- ① 当  $I_x = I_g$ ，即表头指针满格偏转时， $R_x = 0$ ，即此点的欧姆读数为零。
- ② 当  $I_x = 0$ ，即表头指针未动时， $R_x = \infty$ ，即此点的欧姆读数为无穷大。
- ③ 当  $I_x = \frac{1}{2} I_g$ ，即表头指针转到刻度尺正中时， $R_x = R_i$ ，即此点的欧姆读数等于此欧姆表中值电阻的大小。这也正是“中值电阻”这个名称的由来。

## 2. 欧姆表的零点调整

上面讨论欧姆表的基本原理时，我们忽略了一个很重要的因素，就是在使用过程中，电池的电压是要变化的，新电池电压较高，大于1.5伏，用一段时间后电压降低，降到1.3伏以下时不能用，电池电压的变化，将使欧姆表的零点变动，就是说  $R_x = 0$  时，指针不再指零欧姆处，这就给测量带来很大的附加误差。电压较高时，流过表头的电流偏大，欧姆读数就偏小；电压降低时，流过表头的电流偏小，欧姆读数就偏大。

为了消除电源电压变动带来的附加误差，可采用“零点调整器”的方法。

大多数欧姆表采用图 1-12 的方法加零点调整器。它是将作零点调整器用的可变电阻  $R_2$  和表头串联在一个闭合环路内，让电流  $I$  从可变电阻  $R_2$  的滑动点流入环路，然后分为两路，一路  $I_1$  流经表头支路，另一路  $I_2$  流经和表头并联的支路。这时  $R_2$  也是分成了两部份，一部份和表头串联，另一部份则和表头并联。 $R_2$  和表头并联的部份加上固定电阻  $R_1$  就是表头的分流电阻，图中用符号  $R_s$  表示。当电源电压  $E$  增高时，总电流  $I$  增大，这时就调节  $R_2$ ，减小  $R_s$ ，使  $I_2$  增大，保持  $I_1$  等于表头的量程  $I_g$  不变，即保持了欧姆表的零点不变动。当电压  $E$  降低时，