

# 重庆大学“挑战式”研究性实验报告



## 专题:三用电表的设计、制作与校正 (反方)

班 级:

组 长:

小组成员:

2021 年 12 月 20 日

# 目录

1 引言.....	1
1.1 实验意义.....	1
2 原理和方案.....	1
2.1 实验原理.....	1
2.1.1 表头内阻的测定和三用电表的设计.....	1
1. 三用电表的构成.....	1
2. 表头内阻的测定.....	2
3. 电表的基本误差与校正.....	3
2.1.2 三用电表的组装与校正.....	4
1. 直流电流挡的设计.....	4
2. 直流电压挡的设计.....	5
3. 欧姆挡的设计.....	5
2.2 实验步骤.....	7
2.2.1 表头内阻的测定和三用电表的设计.....	7
2.2.2 三用电表的组装与校正.....	8
3 数据处理.....	9
3.1 实验计算.....	9
3.1.1 直流电流挡设计电阻计算.....	9
3.1.2 直流电压挡设计电阻计算.....	9
3.2 实验结果.....	9
3.2.1 电流表校正.....	9
3.2.2 电压表校正.....	10
3.3 数据分析.....	10
3.3.1 电流表校正.....	10
3.3.2 电压表校正.....	11
3.3.3 欧姆表测量标准电阻误差分析.....	11
4 实验思考与拓展.....	12
4.1 欧姆表尺最佳段范围.....	12
4.2 使用三用电表测量功率.....	12
4.3 数字万用表介绍.....	13
参考文献.....	15

# 1 引言

## 1.1 实验意义

在实验室使用的电流表或电压表一般都是磁电式电表，它具有灵敏度高、功率消耗小、防外界磁场影响强、刻度均匀、读数方便等优点。未经改装的电表，由于灵敏度高，满度电流（电压）很小，它的表头一般只允许通过微安量级的电流，因此只能用它测量很小的电流或电压。如果用它来测量较大的电流和电压，就必须进行改装以扩大测量范围，这种改装过程称为电表的扩程。

万用电表是一种多功能、多量程的电学仪表，它可在几个不同量程测量直流电流、直流与交流电压，还可测电阻等。由于它功能较多，在实验中获得广泛应用。但也有不足就是准确度较低。

任何一件仪器（尤其是自行组装的仪器）在使用前都应进行校准，特别是在进行精密测量之前，校准是必不可少的。因此校准是实验技术中一项非常重要的技术。按国家标准（GB/T 7676.2—1998）电流表和电压表应按下列等级指数表示的准确度等级分级：0.05，0.1，0.2，0.3，0.5，1.0，1.5，2.0，2.5，3.0，5.0，共分 11 个等级。

## 2 原理和方案

### 2.1 实验原理

#### 2.1.1 表头内阻的测定和三用电表的设计

##### 1. 三用电表的构成

万用电表功能虽多，但归纳起来主要有三个：测电流、测电压、测电阻，本实验所制作的三用电表是以一个磁电型微安表（亦称表头）为核心组装而成的。上述三种功能如果分开设计是比较容易的，如图 2.1.1(a)～(c)所示。由图 2.1.1 可知，设计直流电流计就是计算分流电阻  $R$  之值；设计直流电压计就是计算串联电阻  $R'$  之值；欧姆计就是直流电压计加一直流电源，当在欧姆计两端 A、B 接入

一电阻  $R$  时，表头指针偏转的大小来测量待测电阻  $R_x$  之值。

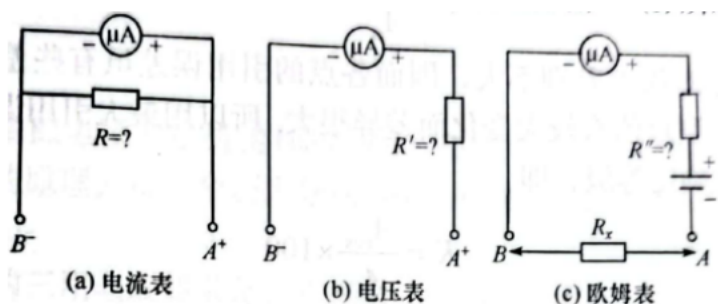


图 2.1.1

## 2. 表头内阻的测定

要正确设计、制作三用表，首先要准确测定表头的内阻。测表头内阻的方法较多、常用的有半值法与替代法，线路如图 2.1.2 和图 2.1.3 所示。

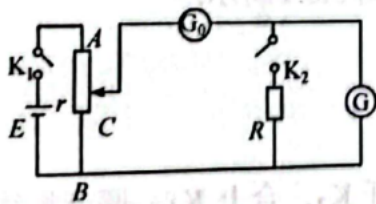


图 2.1.2 半值法

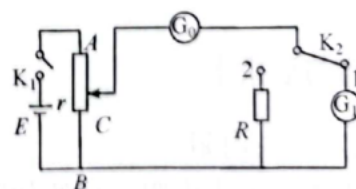


图 2.1.3 替代法

采用半值法测量表头内阻的线路如图 2.1.2 所示，图中  $G$  是待测量的表头（ $100\mu A$ ）， $G_0$  是监控电表（ $0\sim 150\mu A$ ）， $r$  是滑线电阻， $R$  是电阻箱， $E$  是直流稳压电源。合上开关  $K_1$ ，断开  $K_2$ ， $G_0$  与  $G$  是串联回路，此时调滑线电阻器，滑动头  $C$  逐渐向  $A$  点移动（使输出电压增大），使  $G$  满度（或某一个定值）。显然，流过  $G$  与  $G_0$  的电流相等，记下它们的读数后合拢  $K_2$ ，此时整个电路的电阻发生变化， $G_0$  与  $G$  表的读数不会相等，调节滑线电阻的大小，使  $G_0$  的读数保持原值不变，同时调节电阻箱  $R$  的大小，使  $G$  的读数为原值的一半。这时，流过电阻箱  $R$  上的电流与流过表头  $G$  的电流相等，则电阻箱  $R$  的值  $=R_g$ 。

替代法测表头内阻的线路如图 2.1.3 所示，先将开关  $K_2$  倒向 1 端，再合拢  $K_1$ ，调节  $C$  点位置，使  $G$  满度（或某一定值），此时记下  $G_0$  的读数，尔后把  $K_2$  倒向 2 端（先调  $R$ ，使  $R$  约为  $5000\Omega$ ）、再调  $R$  的值，使  $G_0$  保持原值不变，此时电阻箱读数  $R=R_g$ 。

### 3. 电表的基本误差与校正

用任何电表测量都会产生误差，电表误差常用绝对误差、相对误差和最大引用误差（又称电表的基本误差）等表示。

绝对误差是电表示值  $A_i$  与被测量的实际值  $A_0$ （一般用电表准确度等级较高的标准表的示值给出）的差值，即  $\Delta_i = A_i - A_0$ ；相对误差是绝对误差与  $A_0$  的比值，通常是以百分数表示。

引用误差  $\eta$  是绝对误差与电表量限  $A_m$  的比值，即

$$\eta = \frac{\Delta_i}{A_m} \times 100\% \quad (2.1.1)$$

电表上各点的绝对误差差别不大，因而各点的引用误差虽有些差异，但其差异较小，各点的相对误差由于测量值有较大变化而差异很大。所以用最大引用误差比用相对误差更有利于表示电表的准确度等级，即

$$K = \frac{\Delta_{\max}}{A_m} \times 100\% \quad (2.1.2)$$

电表经过改装或长期使用后，必须进行校正，其方法是将待校电表和一个准确度等级较高的标准表同时测量一定的电流或电压，令待校表各刻度值为  $A_i$ ，标准表所对应的值为  $A_0$ ，则各刻度的绝对误差  $\Delta_i = A_i - A_0$ ，找出其中最大的绝对误差  $\Delta_{\max}$ ，可利用公式（2.1.2）计算出待校电表的准确度等级  $K$ 。

如果以  $A_i$  为横坐标，以  $\Delta_i$  为纵坐标，可画出电表的校正曲线，两个校正准点之间用直线连接，整个图形是折线状，如图 2.1.4 所示。

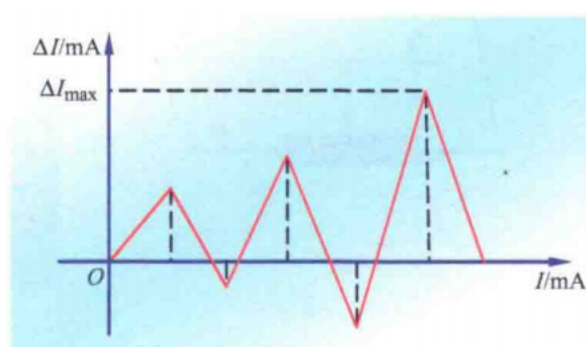


图 2.1.4

按国家标准（GB/T 7676.2—1998）的规定，电流表和电压表应按下列等级指数表示的准确度等级分级：0.05，0.1，0.2，0.3，0.5，1.0，1.5，2.0，2.5，3.0，5.0，共分 11 个等级。例如，1.0 级表示电表的标称误差不大于 1.0%，其余类推。如果电表经校准后，求得的标称误差不是正好为上述值，根据误差取大不取小的

原则，该表的等级应定低一级。例如，电表校准后求得标称误差为 1.8%，它在 1.5 级与 2.0 级之间，则该表应定为 2.0 级。电表的等级常标在电表的表头上。注意在使用电表时，对长期使用或经过修理的电表都要经过校准后才能使用。

## 2.1.2 三用电表的组装与校正

三用电表主要由磁电型测量机构（即表头）和转换开关控制的测量电路组成。实际上，它是根据改装电表的原理，将一个表头分别连接各种测量电路而改成多量程的电流表、电压表与欧姆表。

本实验三用电表设计组装的要求是：直流电流 3 挡，直流电压 3 挡，欧姆表 1 挡。设计的参考电路如图 2.1.5 所示。

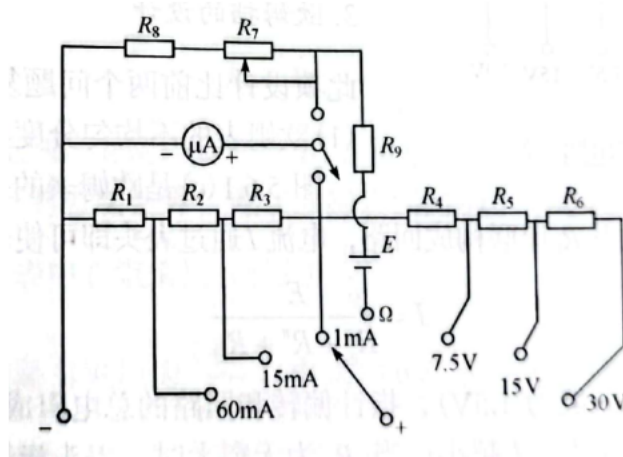


图 2.1.5

### 1. 直流电流挡的设计

图 2.1.5 中表头的量程为  $100\mu\text{A}$ ，现在将量程扩大到 1mA、15mA、60mA，从图中摘出与这三个量程有关的电路，如图 2.1.6 所示。对于量程为 60mA 的电流表设计，我们把电路改绘成如图 2.1.7 所示的电路。设通过表头的电流是满量程电流  $I_0$ ，则通过  $R_1$  的电流为  $0.06 - I_0$ ，于是

$$I_0(R_3 + R_2 + R_g) = (0.06 - I_0)R_1 \quad (2.1.3)$$

对于量程 1mA 的电流表设计，依照上述情况可画类似的如图 2.1.8 所示的电路图，同样可得出如下的方程：

$$I_0 R_g = (0.001 - I_0)(R_1 + R_2 + R_3) \quad (2.1.4)$$

对于 15mA 的量限，也可列出如下的方程：

$$I_0(R_g + R_3) = (0.015 - I_0)(R_1 + R_2) \quad (2.1.5)$$

上面三个方程联立，即可获得  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  之值。

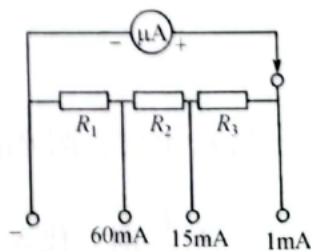


图 2.1.6

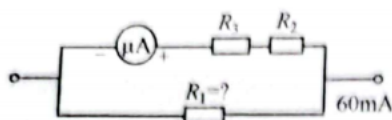


图 2.1.7

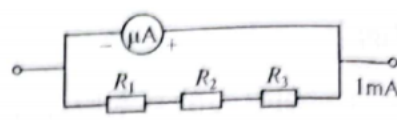


图 2.1.8

## 2. 直流电压挡的设计

从图 2.1.5 中摘出测量电压的电路如图 2.1.9 所示。 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  已经算出，故可以把虚线框看成一个等效表头的内阻，因为等效表头的总电流为 1mA，这样，据扩程的电压量程，可分别算出  $R_4$ 、 $R_5$  与  $R_6$  之值。

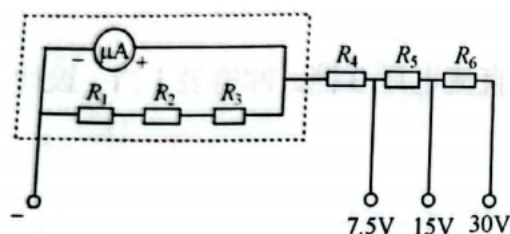


图 2.1.9

## 3. 欧姆挡的设计

(1) 欧姆表的不均匀分度与中心阻值。

图 2.1.1 (c) 是欧姆表的基本原理图。表头、电池  $E$ 、可变电阻  $R''$  及待测电阻  $R_x$  串联构成回路，电流  $I$  通过表头即可使表头指针偏转，其值为



$$I = \frac{E}{R_g + R'' + R_x} \quad (2.1.6)$$

当  $E$  一定的条件下（一般为  $1.5V$ ），指针偏转和回路的总电阻成反比。当  $R_x$  改变时，电流就变化，被测电阻  $R_x$  越大， $I$  越小；当  $R_x$  为无穷大时，表头指针为零，因此，欧姆表的标尺刻度与电流表、电压表的标尺刻度相反，由于  $I$  与被测电阻  $R_x$  不成正比关系，所以电阻的标度尺的分度是不均匀的。

令  $R_g + R'' = R_{内}$ ，则式（2.1.6）可改写为

$$I = \frac{E}{R_{内} + R_x} \quad (2.1.7)$$

当  $R_x = 0$  时，调  $R_{内}$  使表头指针在满刻度  $I_0$  处，令此时的  $R_{内} = R_K$ ，则  $I_0 = \frac{E}{R_K}$ 。

当  $I = \frac{I_0}{2}$  时，代入式（2.1.7），可得  $R_K = R_x$ ，此时，指针刚好位于度盘中心，因而将此阻值称为欧姆表的中心阻值，记作  $R_K$ （又称欧姆中心），它是欧姆表的一个重要参量。

欧姆表的中心阻值  $R_K$  称为这个欧姆表的内阻，由于欧姆表测量电阻时主要用度盘右半边和中心附近，因而中心阻值  $R_K$  就是这个欧姆表的最大测量范围（即量限）。

（2）调零电阻  $R_7$  与限流电阻  $R_9$ 。

图 2.1.10 是从总图中摘出的测量电阻的电路。

欧姆表中电源为一节干电池，其电动势在  $1.5V$  左右，新的可能接近  $1.65V$ ，旧的要低些，在这里设计中取电压最低值为  $1.25V$ ，为了适应电池电压变化以及在  $R_x = 0$  时，表头指针指向满刻度，图中设置了调零电阻  $R_7$  与限流电阻  $R_9$ 。

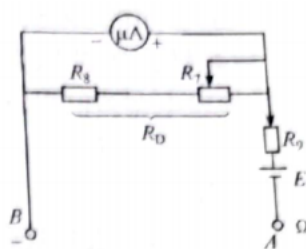


图 2.1.10

（3） $R_7$ 、 $R_8$  与  $R_9$  的计算。

设 A、B 两端短接（即  $R_x = 0$ ）时，表头指针在满度（即  $I_0$ ）位置。忽略电池



内阻，则有下列式：

$$\frac{E}{R_K} = I_0 + \frac{I_0 R_g}{R_D} \quad (2.1.8)$$

$$R = \frac{I_0 R_g R_K}{E - I_0 R_K}, \text{ 式中 } R_0 = R_7 + R_8$$

当待测电阻  $R_x = R_K$  (欧姆表中心阻值) 时，表头指针恰好在  $\frac{I_0}{2}$  处，同理有下列式：

$$\frac{E - \frac{I_0 R_g}{2}}{R_9 + R_K} = \frac{I_0}{2} + \frac{I_0 R_g}{R_D} \quad (2.1.9)$$

故：

$$R_9 = R_K - \frac{I_0 R_g R_K}{E}$$

先取  $E=1.5V$ ， $R_K$  已知 (由设计要求给出)，可求  $R_9$ ，然后由式 (2.1.8) 求出  $R_D$ 。

$R_7$  的计算：用以下的方法估算，先求欧姆表回路的工作电流，因为  $E=1.5V$ ，而欧姆表的内阻为  $R_K$  (即欧姆表中心阻值)，所以  $I = \frac{1.5}{R_K}$ 。

先取  $E=1.65V$ ，回路总电流为  $\frac{1.65}{R_K}$ ，由式 (2.1.8) 求得  $R_D$  的最小值  $R_{Dmin}$ 。

又取  $E=1.25V$ ，回路总电流为  $\frac{1.25}{R_K}$ ，由式 (2.1.8) 求得  $R_D$  的最大值  $R_{Dmax}$ 。

取  $R_g = R_{Dmin}$ ， $R_7 = R_{Dmax} - R_{Dmin}$ 。

## 2.2 实验步骤

### 2.2.1 表头内阻的测定和三用电表的设计

(1) 测定表头内阻。

用半值法测表头内阻，接线如图 2.1.2 所示，先断开  $K_2$ ，合上  $K_1$ ，调节滑线变阻器  $r$  使  $G$  满度，记下  $G_0$  与  $G$  的读数，尔后合上  $K_2$ ，调节电阻箱  $R$  的阻值，并同时调节  $r$  的大小，使  $G_0$  保持原值，而  $G$  的读数为原值的一半，此时  $R=R_g$ 。

注意：表头所能通过的电流是微小的，因此，在调节  $r$  时，滑动表头  $C$  要先放在输出电压最小 (滑动头  $C$  应放在  $B$  端) 处，尔后慢慢增大，不能使电流超过额定值，更不允许电流反向。

由于表头内阻对三用电表的组装影响大，建议用另一种方法测表头内阻，最

后取满意的值或平均值作为设计值。

(2) 参阅本实验的参考电路(图 2.1.6)以及有关电路进行设计。设计时,要看懂电路图;要了解实验室提供的表头的主要性能(内阻、量限等);尔后逐个计算各个 R 值。

(3) 对照三用电表插线板,初步了解各元件位置,转换形状的作用。以及线图布置

(4) 写出设计报告。

## 2.2.2 三用电表的组装与校正

(1) 将  $100\mu\text{A}$  表头改装成如下规格的三用电表。

直流电流:  $1\text{mA}$ 、 $15\text{mA}$ 、 $60\text{mA}$ 。

直流电压:  $7.5\text{V}$ 、 $15\text{V}$ 、 $30\text{V}$ 。

欧姆表: 中心阻为  $12\text{k}\Omega$ 。

参照有关电路,算出  $R_1\sim R_9$  的阻值。

(2) 选择符合上述计算值的电阻(一般均能在插线板上找到),若找不到合适的,可用可变电阻(即电位器)调成所需的阻值。

(3) 参照图 2.1.5,将各元件及表头引线插到九孔接线板上,连好电路。

(4) 检验直流电流、直流电压挡。

检验电路自己设计。

校验时,以整数刻度(各个量程都要)校验 5 个点,被校表选整数读数,读出标准表的相应读数。

(5) 求组装表(电流、电压各 2 挡)的准确度等级。

(6) 检验调零电阻的效果。

(7) 以电阻箱为准,检查欧姆表中心阻值是多少,是否符合设计要求(求百分误差)。

(8) 讨论与评价你的设计和制作工作。

## 3 数据处理

### 3.1 实验计算

#### 3.1.1 直流电流挡设计电阻计算

表头量程  $I_0=100\text{mA}$ ,  $R_g=2300\ \Omega$

$$I_0(R_3 + R_2 + R_g) = (0.06 - I_0)R_1$$

$$I_0R_g = (0.001 - I_0)(R_1 + R_2 + R_3)$$

$$I_0(R_g + R_3) = (0.05 - I_0)(R_1 + R_2)$$

解得:  $R_1=4.26\ \Omega$ ,  $R_2=12.8\ \Omega$ ,  $R_3=238\ \Omega$

#### 3.1.2 直流电压挡设计电阻计算

表头内阻为  $R_g/(R_1 + R_2 + R_3) = 0.1R_g$ ,  $I'_0 = 1\text{mA}$

$$I'_0(0.1R_g + R_4) = 7.5$$

$$I'_0R_5 = 7.5$$

$$I'_0R_6 = 75$$

解得:  $R_4=7270\ \Omega$ ,  $R_5=7.5\text{K}\ \Omega$ ,  $R_6=15\text{k}\ \Omega$

### 3.2 实验结果

#### 3.2.1 电流表校正

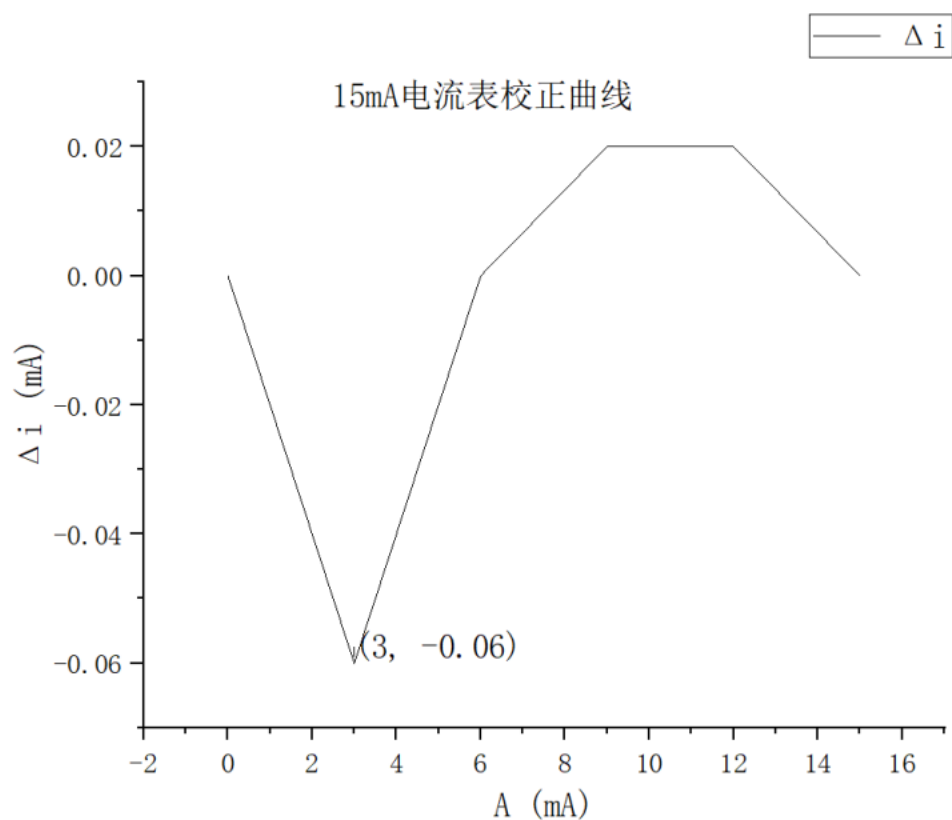
$I_{\text{改}}(\text{mA})$	0	3.00	6.00	9.00	12.00	15.00
$I_{\text{标}}(\text{mA})$	0	3.06	6.00	8.98	11.98	15.00
$\Delta I(\text{mA})$	0	-0.06	0	0.02	0.02	0

### 3.2.2 电压表校正

$U_{\text{改}}(\text{V})$	0	3.00	6.00	9.00	12.00	15.00
$U_{\text{标}}(\text{V})$	0	3.02	5.98	8.98	12.00	15.00
$\Delta U(\text{V})$	0	-0.02	0.02	0.02	0	0

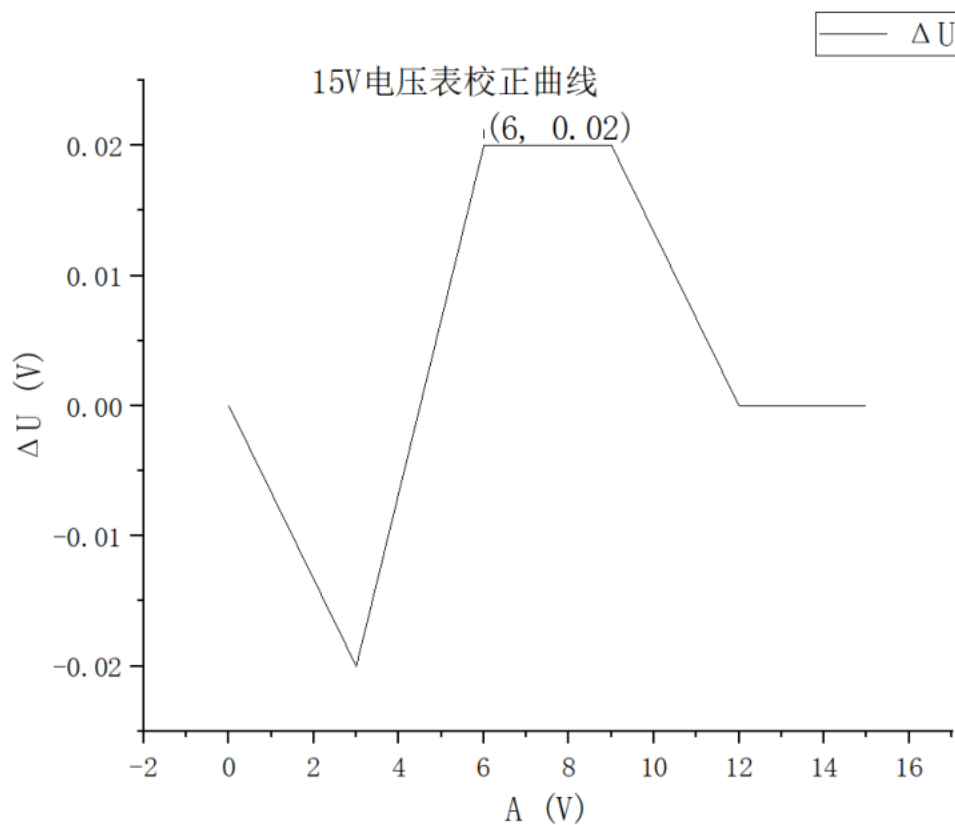
## 3.3 数据分析

### 3.3.1 电流表校正



$$K_i = \frac{\Delta_{i\max}}{\Delta_{im}} \times 100 + K_{i\text{标}} = \frac{0.06\text{mA}}{15.00\text{mA}} \times 100 + 1.0 = 1.4 \approx 1.5$$

### 3.3.2 电压表校正



$$K_V = \frac{\Delta U_{max}}{\Delta U_m} \times 100 + K_{U_{标}} = \frac{0.02V}{15V} \times 100 + 1.0 = 1.1 \approx 1.5$$

### 3.3.3 欧姆表测量标准电阻误差分析

使用欧姆表测量标准电阻阻值:

$R_{标}=3k\Omega$  ,  $I_g=48.3\mu A$  ,  $R_g=2300\Omega$  ,  $E=3V$

$$\frac{I_g R_g}{R_T} + I_g = I$$

$$I = \frac{E}{R_{内} + R_{测}}$$

解得:  $R_{内} + R_{测} = 6286\Omega$      $R_{测} = 2874\Omega$

$$E_r = \frac{|R_{标} - R_{测}|}{R_{标}} \times 100\% = \frac{|3000 - 2874|}{3000} \times 100\% = 4.2\%$$

## 4 实验思考与拓展

### 4.1 欧姆表尺最佳段范围

对于欧姆表尺的最佳段范围，在大学物理实验书中多指“合理”（或“有效”）使用范围为“ $(1/5 \sim 5) R_{\text{中}}$ ”（ $R_{\text{中}}$ 为中值电阻等于电表内阻）；也有提“ $(1/4 \sim 4) R_{\text{中}}$ ”（或刻度弧线“ $1/5 \sim 4/5$ ”）；更有经定量推证得近“ $(1/3 \sim 3) R_{\text{中}}$ ”，但未计调零误差。

根据测算， $\Omega$ 表尺最佳段范围  $R_{\text{段}}$  和相应电流刻度  $I_{\text{段}}$ （亦表尺弧线段）分别写为：

$$R_{\text{段}} = (3.8 \sim 0.38) R_{\text{M}}, \quad I_{\text{段}} = (0.21 \sim 0.73)$$

而不计调零时最佳段范围为：

$$R_{\text{段}} = (3.2 \sim 0.32) R_{\text{M}} \approx (3 \sim 1/3) R_{\text{M}}$$

$$I_{\text{段}} = (0.24 \sim 0.76) I_{\text{g m}} \approx (1/4 \sim 3/4) I_{\text{g m}}$$

### 4.2 使用三用电表测量功率

设负载电阻为  $R$ ，施加其两端的交流电压为  $U$ ，则电阻所吸收的功率为：

$$P = \frac{U^2}{R}$$

$$U = \sqrt{PR}$$

若基准电阻值  $R_1 = 8 \Omega$ 。据上式，用 MATLAB 语言编程计算，可求得基准电压档  $U_{1m} = 10 \text{ V}$  的功率  $P_1$  与电压  $U_1$  之间的对应的关系，如表所示：

$P_1/\text{W}$	0	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.75	1.00
$U_1/\text{V}$	0	0.894	1.265	1.549	1.789	2.000	2.450	2.828
$P_1/\text{W}$	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
$U_1/\text{V}$	3.464	4.000	5.774	4.899	5.292	5.657	6.000	6.325
$P_1/\text{W}$	6.0	7.0	8.0	9.0	10	11	12	
$U_1/\text{V}$	6.928	7.483	8.000	8.485	8.944	9.381	9.798	

按表，在表盘上划分功率刻度。若电压过高而超出量限，则需提高量限  $\alpha_1$  倍，

即  $U_2 = \alpha_2 U_1$  或  $U_3 = \alpha_3 U_1$  或.....。写成通式，第  $i$  电压档  $U_i = \alpha_i U_1$  ( $i = 2, 3, 4 \dots$ )

若被测功率的电阻值不是  $8 \Omega$ ，而是  $R_n = \frac{R_1}{\beta}$ ，可得：

$$P_i = \alpha_i^2 \beta P_1$$

其中， $\alpha_i^2$  称作功率的电压修正系数； $\beta$  称作功率的电阻修正系数。

当  $\beta = 1$  时，可计算出各档功率与电压的关系，如表所示：

序号	量程/ V	功率修正系数	功率测量范围/ W	指针指示范围/ W
$i$	$U_{im}$	$\alpha_i^2$	$P_{ia} \sim P_{ib}$	$P_{lai} \sim P_{lbi}$
1	10	1	0.48 ~ 12	0.48 ~ 12
2	50	25	12 ~ 300	0.48 ~ 12
3	250	625	300 ~ 7 500	0.48 ~ 12
4	500	2 500	7 500 ~ 30 000	3 ~ 12
5	1 000	10 000	30 000 ~ 120 000	3 ~ 12

### 4.3 数字万用表介绍

该实验设计的三用电表（万用表）为指针式，此外还有数字式万用表，部分大学物理实验可使用数字式万用表。

数字万用表主要由液晶显示屏、功能按钮、挡位开关及输入端子等部分组成，主要用于测量电压、电阻、电流及电子元件等。

（1）液晶显示屏用于显示测量值。

（2）功能按钮用于实现某些特定功能，如“HOLD”按钮为数据保持按钮，“RANGE”按钮为量程选择按钮，“REL△”按钮为测量相对值按钮，“PEAK”按钮为测量峰值按钮等。

（3）挡位开关用于选择当前测量的参数类型，如电压挡、电阻挡、电流挡、电容挡、频率挡等。对于无法自动选择量程的数字万用表，挡位开关还用于选择量程。输入端子用于连接测试表笔，黑表笔与所有测量的公共端子（COM 端子）连接，红表笔根据测量需要与相应的端子连接，具体见图上的说明。





图1 数字万用表的结构及功能

## 参考文献

- 【1】何光宏,汪涛,韩忠.大学物理实验.科学出版社.2017年6月第一版
- 【2】池红岩,王影,朱波,孙飞,武丽丽,孙杨.大学物理实验.机械工业出版社.2020年8月第一版
- 【3】潘积亭.细算调零误差,再探欧姆表尺最佳段范围——对大学物理实验书中有关提法的研讨.大学物理.第37卷第6期
- 【4】吕炳仁.指针式万用电表功率测量原理和误差分析. ELECTRONIC ENGINEERING & PRODUCT WORLD. 2021. 9
- 【5】数字万用表的功能介绍.汽车维修与修理. 2020 • 02A