

# 电学元件伏安特性的测量

电路中有各种电学元件，如碳膜电阻、线绕电阻、半导体二极管和三极管，以及光敏和热敏元件等等。人们常需要了解它们的伏安特性，以便正确地选用它们。伏安特性的测量中所用的实验方法、仪器以及用到的分压器线路都是电学实验中最基本的，因此做这个实验可以作为电学实验的基本训练。

## 1. 实验目的

- (1) 了解分压器电路的调节特性；
- (2) 掌握测量伏安特性的基本方法、线路特点及伏安法测电阻的误差估算；
- (3) 学习按回路接线的方法；
- (4) 初步了解戴维南定理的内容。

## 2. 实验原理

### (1) 分压电路及其调节特性

#### ① 分压电路的接法

如图 1 所示，将变阻器  $R$  的两个固定端  $A$  和  $B$  接到直流电源  $E$  上，而将滑动端  $C$  和任一固定端（ $A$  或  $B$ ，图中为  $B$ ）作为分压的两个输出端接至负载  $R_L$ 。图中  $B$  端电位最低， $C$  端电位较高， $CB$  间的分压大小  $U$  随滑动端  $C$  的位置改变而改变， $U$  值可用电压表来测量。变阻器的这种接法通常称为分压器接法。分压器的安全位置一般是将  $C$  滑至  $B$  端，这时分压为零。

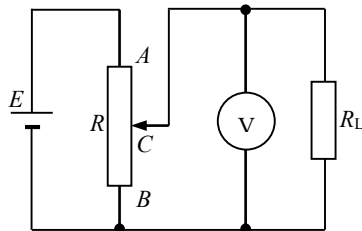


图 1 分压电路

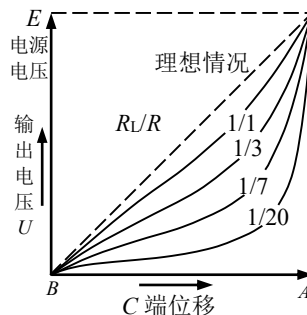


图 2 分压电路输出电压与滑动端位置的关系

#### ② 分压电路的调节特性

如果电压表的内阻大到可忽略它对电路的影响，那末根据欧姆定律很容易得出分压为

$$U = \frac{R_{BC}R_L}{RR_L + R_{BC}(R - R_{BC})} E \quad (1)$$

从上式可见，因为电阻  $R_{BC}$  可以从零变到  $R$ ，所以分压  $U$  的调节范围为零到  $E$ ，分压  $U$  与负载电阻  $R_L$  的大小有关。理想情况下，即当  $R_L \gg R$  时， $U = ER_{BC} / R$ ，分压  $U$  与阻值  $R_{BC}$  成正比，亦即随着滑动端  $C$  从  $B$  滑至  $A$ ，分压  $U$  从零到  $E$  线性地增大。

当  $R_L$  不是比  $R$  大很多时，分压电路输出电压就不再与滑动端的位移成正比了。实验研究和理论计算都表明，分压与滑动端位置之间的关系如图 2 的曲线所示。 $R_L / R$  越小，曲线越弯曲，这就是说当滑动端从  $B$  端开始移动，在很大一段范围内分压增加很慢，接近  $A$  端时分压急剧增大，这样调节起来不太方便。因此作为分压电路的变阻器通常要根据外接负载的大小来选用。必要时，还要同时考虑电压表内阻对分压的影响。

#### (2) 电学元件的伏安特性

在某一电学元件两端加上直流电压，在元件内就会有电流通过，通过元件的电流与其端电压之间的关系称为电学元件的伏安特性。一般以电压为横坐标和电流为纵坐标作出元件的电压—电流关系曲线，称为该元件的伏安特性曲线。

对于碳膜电阻、金属膜电阻、线绕电阻等电学元件，在通常情况下，通过元件的电流与加在元件两端的电

压成正比关系变化，即其伏安特性曲线为一通过原点的直线。这类元件称为线性元件，如图 3 所示。至于半导体二极管、稳压管、热敏电阻等元件，通过元件的电流与加在元件两端的电压不成线性关系变化，其伏安特性为一曲线。这类元件称为非线性元件，图 4 所示为一例。

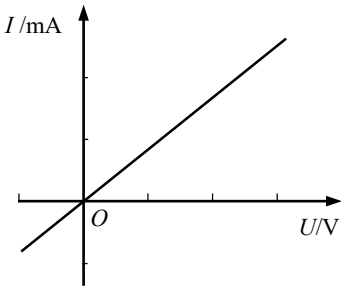


图 3 线性元件的伏安特性

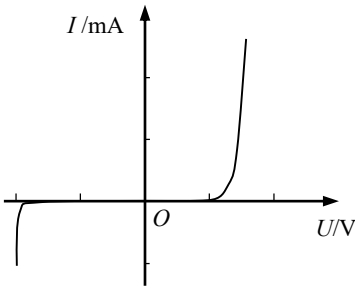


图 4 某非线性元件的伏安特性

在设计测量电学元件伏安特性的线路时，必须了解待测元件的规格，使加在它上面的电压和通过的电流均不超过元件允许的额定值。此外，还必须了解测量时所需其他仪器的规格（如电源、电压表、电流表、滑线变阻器等规格），也不得超过仪器的量程或使用范围。同时还要考虑，根据这些条件所设计的线路，应尽可能将测量误差减到最小。

### (3) 实验线路的比较与选择

用伏安法测量电阻  $R$  的伏安特性的线路中，常有两种接法，即图 5 (a) 中电流表内接和图 5 (b) 中电流表外接两种方法。电压表和电流表都有一定的内阻（分别设为  $R_V$  和  $R_I$ ）。简化处理时可直接用电压表读数  $U$  除以电流表读数  $I$  来得到被测电阻值  $R$ ，即  $R=U/I$ ，但这样会引进一定的系统性误差。当电流表内接时，电压表读数比电阻端电压值大，应有

$$R = \frac{U}{I} - R_I \tag{2 a}$$

在电流表外接时，电流表读数比电阻  $R$  中流过的电流值大，这时应有

$$\frac{1}{R} = \frac{I}{U} - \frac{1}{R_V} \tag{2 b}$$



(a) 电流表内接 (b) 电流表外接

图 5 测量电阻伏安特性的线路

显然，如果简单地用  $U/I$  值作为被测电阻值，电流表内接法的结果偏大，而电流表外接法的结果偏小，都有一定的系统性误差。在需要做这样简化处理的实验场合，如果为了减小上述系统性误差，测电阻的方案就可这样选择：比较  $\lg(R/R_I)$  和  $\lg(R_V/R)$  的大小（比较时  $R$  取粗侧值或已知的约值），前者大则选电流表内接法，后者大则选用电流表外接法（选择原则 1）。

由于本实验中所用的电压表和电流表均为指针式磁电系仪表，量程和准确度等级一定时，可以按讲义《II-2 电磁学实验基本仪器》所述方法估算电压（或电流）的测量不确定度  $\Delta_U$  ( $\Delta_I$ )。这样，用  $R=U/I$  简化计算时有下式。

$$\frac{\Delta_R}{R} = \sqrt{\left(\frac{\Delta_U}{U}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_I}{I}\right)^2} \quad (3)$$

可见要使电阻测量的准确度高，线路参数的选择应使电表读数尽可能接近满量程（选择原则 2）。

当电压表（电流表）的内阻值  $R_V(R_I)$  及其不确定度大小  $\Delta_{R_V}(\Delta_{R_I})$  已知时，可用（2 a）或（2 b）式更准确地求得被测电阻值  $R$ ， $R$  的不确定度  $\Delta_R$  可分别按下式计算

$$\text{电流表内接时: } \frac{\Delta_R}{R} = \sqrt{\left(\frac{\Delta_U}{U}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{R_I}}{R_I}\right)^2 \left(\frac{R_I}{U/I}\right)^2} \left/ \left[1 - \frac{R_I}{U/I}\right] \right. \quad (4a)$$

$$\text{电流表外接时: } \frac{\Delta_R}{R} = \sqrt{\left(\frac{\Delta_U}{U}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{R_V}}{R_V}\right)^2 \left(\frac{U/I}{R_V}\right)^2} \left/ \left[1 - \frac{U/I}{R_V}\right] \right. \quad (4b)$$

用（2a）或（2b）式来得到电阻值  $R$  时，线路方案及参数的选择应使  $\Delta_R/R$  最小（选择原则 3）。在一些情况下，分别从（4 a）和（4 b）二式求得的  $\Delta_R/R$  是相差不大的。

#### (4) 戴维南定理

戴维南定理（Thevenin theorem）是指一个含源二端网络可以用一个恒压源串联一个内阻抗所组成的等效电压源来代替。恒压源  $E_e$  为二端网络的开路电压，内阻抗  $R_e$  为含源二端网络中所有恒压源被短路并且所有恒流源被开路后网络两端的总电阻。本实验所用的网络如图 6 所示，根据戴维南定理，等效电动势  $E_e$  和内阻  $R_e$  分别为：

$$E_e = ER_2 / (R_1 + R_2) \quad (5)$$

$$R_e = R_3 + R_1 R_2 / (R_1 + R_2) \quad (6)$$

大家可以根据戴维南定理的内容，自己试着推导出这两个公式。

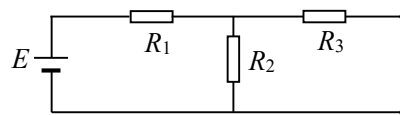


图 6 有源二端网络

### 3. 实验任务

#### (1) 半定量观察分压电路的调节特性

选用一适当阻值的变阻器  $R$  接成分压电路，以电阻箱作为外接负载  $R_L$ ，当  $R_L/R$  取不同比值时，测定并观察输出电压随滑动端位移的变化情况（只作记录，不作曲线）。

(2) 对于电阻值约为  $12k\Omega$  和  $0.1k\Omega$  的两个电阻，分别用图 5 所示的两种方法测量，详细记录实验数据。课后对实验数据进行计算、分析和比较，讨论计算结果并得出结论。

#### (3) 测定半导体二极管正反向伏安特性，并作出伏安特性曲线。

① 线路设计中应注意到：半导体二极管正向电阻很小，须加保护电阻，以防止电流超过二极管允许的正向电流值；二极管反向电阻又很大，应改换线路，同时要注意外加反向电压不得超过二极管允许的最大反向电压值。实验前应先了解被测二极管的规格。

② 实验时注意测量点的选取。当电压接近二极管的正向导通电压（锗管约为  $0.3V$ ，硅管约为  $0.7V$ ）时，电流将急剧变化，故在测量时应注意哪个量变化快，以变化快的作为自变量来选取测量点。

③ 将正反向伏安特性曲线画在同一个图上，特性曲线上反向的  $U$  和  $I$  都应取负值。

#### (4) 戴维南定理的实验验证

##### ① 步骤一

将  $9V$  电源的输出接到四端网络的输入端上，组成一个有源二端网络，如图 7 中虚线框所示。框内电路对外部电路来说，可以等效成一个电动势为  $E_e$  和内电阻为  $R_e$  相串联的简单电路，如图 8 虚线框内所示。要求用实验方法求出等效电动势  $E_e$  和等效内阻  $R_e$ 。

方法一：外接一可变负载电阻（电阻箱），测出若干组不同负载下的输出端电压  $U_i$  和电流  $I_i$  的值（电表内阻对  $U_i$  和  $I_i$  测量结果可能产生的已定系统误差应予修正），课后用最小二乘法或作图法，从直线上求出  $E_e$  和  $R_e$ 。

方法二：课内测出两组  $U_i$  和  $I_i$  的值，或由方法一的数据中选择较合适的两组数（均已修正电表内阻可能引起的已定系统误差），代入方程组  $U_i = E_e - I_i R_e$  ( $i=1, 2$ ) 求出  $E_e$  和  $R_e$ 。

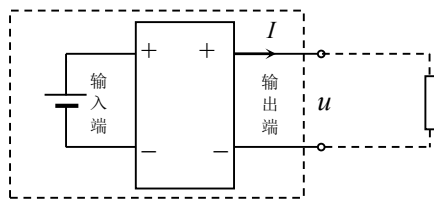


图 7 有源二端网络

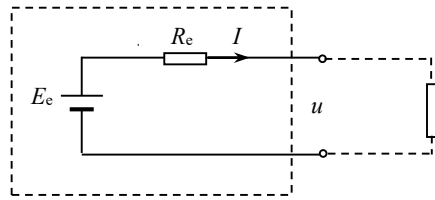


图 8 有源二端网络等效电路

### ② 步骤二

用①中方法二的实验结果，将可调电源（内阻较小，忽略其影响）的输出电动势调成  $E_e$  的值，将示值为  $R_e$  的电阻箱和  $E_e$  串联，组成等效电路（如图 8 所示），测量外电路负载电阻分别为  $200\Omega$ 、 $1k\Omega$  时的电压、电流值，得出图 7 左侧电路可否用图 8 电路来等效的结论。

### ③ 步骤三

实验时记下网络中各个电阻的值，代入(5)和(6)两式计算出  $E_e$  和  $R_e$ ，将结果和实验结果比较，计算出它们之间的相对偏差，并简单讨论实验结果。

## 4. 数据表格

### (1) 半定量观察分压电路的调节特点

选取变阻器  $R = \underline{\hspace{2cm}} \Omega$  ( $10^2 - 10^3 \Omega$  量级)

$U(V)$ $R_L(\Omega)$	$R_{BC}/R$	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
$(R_L/R \approx 10)$							
$(R_L/R \approx 1)$							
$(R_L/R \approx 0.1)$							

### (2) 两种线路的对比研究

电流表准确度等级  $\underline{\hspace{2cm}}$ ，量程  $I_m = \underline{\hspace{2cm}} \text{mA}$ ， $R_I = \underline{\hspace{2cm}} \Omega$ ， $\Delta_{R_I} = \underline{\hspace{2cm}} \Omega$

电压表准确度等级  $\underline{\hspace{2cm}}$ ，量程  $U_m = \underline{\hspace{2cm}} \text{V}$  时， $R_V = \underline{\hspace{2cm}} \Omega$ ， $\Delta_{R_V} = \underline{\hspace{2cm}} \Omega$

量程  $U_m = \underline{\hspace{2cm}} \text{V}$  时， $R_V = \underline{\hspace{2cm}} \Omega$ ， $\Delta_{R_V} = \underline{\hspace{2cm}} \Omega$

记  录	被 测 电 阻 约 数		12k $\Omega$	0.1k $\Omega$
	a 接法 (电流表内接)	电压表量程 $U_m (V)$		
		电压读数 $U(V)$		
		电流读数 $I(\text{mA})$		
	b 接法 (电流表外接)	电压表量程 $U_m (V)$		
		电压读数 $U(V)$		
		电流读数 $I(\text{mA})$		
计  算	a 接 法	$R = U/I - R_I (\Omega)$		
		$\Delta_R / R$ [按 (4 a) 式计算]		
		简化计算误差 $(U/I - R) (\Omega)$		

	b 接 法	$R=(I/U - I/R_V)^{-1} (\Omega)$		
		$\Delta_R / R$ [按 (4b) 式计算]		
		简化计算误差 $(U/I-R) (\Omega)$		
讨 论		比较 $(U/I-R)$ , 说明简化处理时哪种方法好		
		比较 $(\Delta_R / R)$ , 说明应用哪种接法好		

(3) 测定半导体二极管正反向伏安特性 (自拟线路图和数据表格)。

(4) 戴维南定理的实验验证 (自拟数据表格)。

## 5. 思考题

(1) 如图 9 所示的分压电路中, 取滑动端  $C$  和固定端  $A$  作为分压输出端接至负载, 哪端电位高; 哪端电位低? 分压输出为零时  $C$  端应在什么位置?

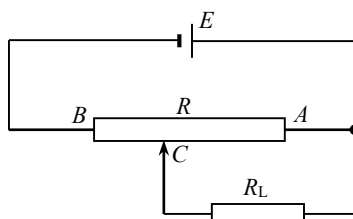


图 9 分压电路

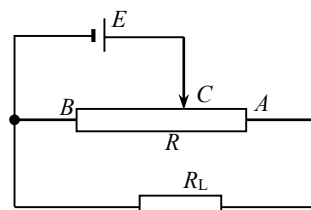


图 10 分压电路的一种错误接法

(2) 半导体二极管的正向电阻小而反向电阻很大, 在测定其伏安特性时, 线路设计中应注意些什么问题?

(3) 如果分压电路误接成图 10 所示的接法, 将会发生什么问题?

(4) 用图 11 所示的线路 ( $R$  作为一个可调限流电阻) 测量伏安特性曲线, 较之图 1 所示的用分压器接法的线路有什么区别? 各有什么特点?

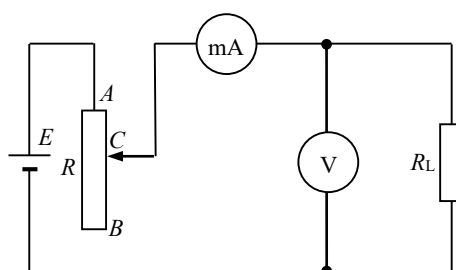


图 11 思考题 4 电路