

第 3 章

电工技术实验



3.1 节视频

3.1 直流电路中电位的测量

3.1.1 实验目的

- (1) 掌握直流电路中电位和电压的测量方法,加深对电位与电压间关系的理解。
- (2) 用实验证明直流电路中电位的相对性、电压的绝对性。
- (3) 学会直流电路电位图的绘制方法。

3.1.2 实验原理

1. 参考点

参考点实际上是一个公共点,通常把这一点作为测量其他各点电压的基准,称为“接地点”。所谓的“接地”并非真与大地相接。参考点的电位一般指定为零,因此也叫零点。

2. 电位

电路中某点的电位等于该点与参考点之间的电压值。电路中各点的电位会随参考点的不同而发生变化,即电位是一个相对的物理量,电位的大小和极性与所选的参考点有关。电路的参考点选定后,电路中其他各点的电位也就随之而定。若电路结构和参数不变,选择不同的参考点,则电路中各点的电位也随之改变。

3. 电压

电压指电路中任意两点间的电位差值。电压的大小和极性与参考点的选择无关,也就是说一旦电路的结构与参数确定,电压的大小和极性就随之确定。

4. 等电位点

在电路中电位相等的点称为等电位点。若用导线将任意两个等电位点短接,因其两端没有电位差,导线中不会有电流流过,故对电路不产生任何影响。而电阻两端有电位差是电流流通的必要条件,故在此两点间接入任何电阻元件对电路无影响。

5. 电位图

若以电路中的电位值作纵坐标,电路中各被测点作横坐标,在该坐标平面上标出各点电位,并用直线把各点按顺序连接起来,即可得到电路的电位图。每一段线段表示该两点间电位的变化情况。

3.1.3 实验仪器与设备

- (1) 直流稳压电源。
- (2) 万用表。
- (3) 基础电路实验板。

3.1.4 实验内容及步骤

(1) 将 E_1 、 E_2 两路直流稳压电源分别调至 $E_1=6\text{ V}$ 、 $E_2=3\text{ V}$,然后按电路图 3-1 连线。

(2) 以图 3-1 中的 c 点作为电位的参考点,分别测量 a、b、c、d、e 各点的电位及相邻两点之间的电压值 U_{ab} 、 U_{bc} 、 U_{cd} 、 U_{de} 及 U_{ea} ,将测量的数据记入表 3-1 中。

(3) 以 e 点作为参考点,分别测量 a、b、c、d、e 各点的电位及相邻两点之间的电压值 U_{ab} 、 U_{bc} 、 U_{cd} 、 U_{de} 及 U_{ea} ,将测量的数据记入表 3-1 中。

(4) 寻找等电位点,在 e 点和 f 点(R_1 的滑动端)之间接入直流电压表,调节电位器 R_1 ,使直流电压表的读数为零,即 $U_{ef}=0\text{ V}$,这时 e 点和 f 点就是等电位点。以 f 点作为参考点,分别测量 a、b、c、d、e 各点的电位及相邻两点之间的电压值 U_{ab} 、 U_{bc} 、 U_{cd} 、 U_{de} 及 U_{ea} ,并用万用表的电阻挡测量 c 点和 f 点之间的电阻值,将测量的数据记入表 3-1 中。

(5) 在 e 点和 f 点之间接入直流电流表,观察电流是否为 0 A 。

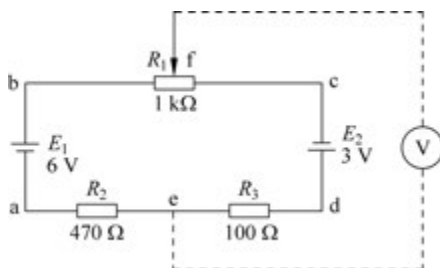


图 3-1 电位测量电路图

表 3-1 电位的测量实验数据记录表

参考点	U_a /V	U_b /V	U_c /V	U_d /V	U_e /V	U_{ab} /V	U_{bc} /V	U_{cd} /V	U_{de} /V	U_{ea} /V	$\sum U$ /V
c											
e											
f											
	$R_{cf} = \quad \Omega$										

3.1.5 注意事项

(1) 实验电路连接完成后,应先对电路进行检查,确认无误后方可接通电源。注意用电安全,严格遵守“先接线,后通电;先断电,后拆线”的操作原则。

(2) 使用直流稳压电源时,其输出电压值必须用万用表或电压表进行校对,电压值以测量仪表的显示为准。

(3) 电压表的内阻很大,在使用时必须按正确极性并联在被测电路的两端;电流表的内阻很小,在使用时必须按正确极性串联接入电路。

(4) 各种仪表在使用中,必须注意其量程的选择。量程选大了将增加测量误差,选小了则可能损坏仪表。在无法确定合适量程时,按照从大到小的原则,先采用最高量程,然后根据测量结果适当改变至合适量程进行测量。

(5) 测量电位时,将万用表调至相应的电压量程,黑色表笔接参考电位点,红色表笔接被测点,若读出数值为正,则表明该点电位高于参考点电位;若读出数值为负,则表明该点电位低于参考点电位。

3.1.6 思考题

- (1) 以实验数据说明电路中电位的相对性、电压的绝对性。
- (2) 实验结果中电压与电位出现负值,其含义是什么?
- (3) 计算 $\sum U = U_{ab} + U_{bc} + U_{cd} + U_{de} + U_{ea}$, 该结果验证了哪条电路定律?
- (4) 不同电位参考点的电位图是否相同? 如何利用电位图求出各点的电位和任意两点之间的电压?

3.2 叠加定理和基尔霍夫定律

3.2.1 实验目的

- (1) 通过实验验证线性电路中的叠加定理,加深对线性电路叠加性和齐次性的认识和理解。
- (2) 验证基尔霍夫定律,加深对基尔霍夫定律、参考方向概念的理解。
- (3) 进一步掌握常用直流仪器和仪表的使用。

3.2.2 实验原理

1. 叠加定理与齐次性

叠加定理: 在有多个独立源共同作用下的线性电路中,通过每一个元件的电流或其两端的电压可以看成是由每一个独立源单独作用时在该元件上所产生的电流或电压的代数和。

齐次性: 线性电路中,当激励信号(某独立源的值)增大或减小 K 倍时,电路的响应(即在电路中各电阻元件上所建立的电流和电压值)也将增大或减小 K 倍。

应当注意的是,叠加定理和齐次性只适用于线性电路。线性电路指完全由线性元件、独立源或线性受控源构成的电路,其输入、输出之间的关系可以用线性函数表示。独立源单独作用,是指当某个独立源单独作用时,其余的电压源作短路处理,内阻保留在原电路中;电流源作开路处理。

2. 基尔霍夫定律

基尔霍夫电流定律(KCL): 在任一时刻, 流入电路任一节点的电流总和等于从该节点流出的电流总和。运用这条规律时必须注意电流的参考方向, 可设定流入节点的电流为正, 则流出节点的电流为负(或规定流出节点的电流为正, 流入节点的电流为负)。则该定律又可叙述为: 流入电路任一节点的电流的代数和为零。

基尔霍夫电压定律(KVL): 在任一时刻, 沿闭合回路电压降的代数和等于零。通常规定凡支路或元件电压的参考方向与回路绕行方向一致者取正号, 反之取负号。

基尔霍夫定律与电路中元件的性质无关, 因此, 无论是线性电路还是非线性电路, 都遵循此定律。

3.2.3 实验仪器与设备

- (1) 直流稳压电源。
- (2) 万用表。
- (3) 基础电路实验板。

3.2.4 实验内容及步骤

(1) 将 E_1 、 E_2 两路直流稳压电源分别调至 $E_1 = 6\text{ V}$ 、 $E_2 = 4\text{ V}$, 然后按电路图 3-2 连线。

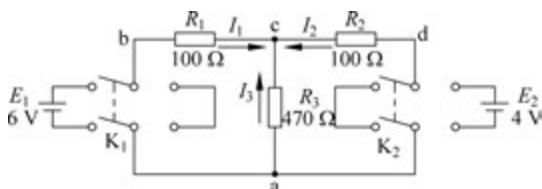


图 3-2 叠加定理电路图

(2) 令电源 E_1 单独作用, 将开关 K_1 接通电源 E_1 侧, 开关 K_2 投向短路侧, 用万用表测量各支路电流及各电阻元件两端的电压, 数据记入表 3-2。

表 3-2 叠加定理测量数据

实验内容及步骤	E_1/V	E_2/V	I_1/mA	I_2/mA	I_3/mA	U_{bc}/V	U_{cd}/V	U_{ca}/V
E_1 单独作用								
E_2 单独作用								
叠加结果(计算)								
E_1 和 E_2 共同作用								

(3) 令电源 E_2 单独作用, 将开关 K_1 投向短路侧, 开关 K_2 接通电源 E_2 侧, 用万用表测量各支路电流及各电阻元件两端的电压, 数据记入表 3-2。

(4) 令电源 E_1 和 E_2 共同作用, 将开关 K_1 接通电源 E_1 侧, 开关 K_2 接通电源 E_2 侧, 用万用表测量各支路电流及各电阻元件两端的电压, 数据记入表 3-2。

(5) 在电源 E_1 和 E_2 共同作用时,用测得的各支路电流验证基尔霍夫电流定律,数据记入表 3-3。

表 3-3 基尔霍夫电流定律测量数据

I_1/mA	I_2/mA	I_3/mA	$\sum I/\text{mA}$

(6) 在电源 E_1 和 E_2 共同作用时,在图 3-2 中取两个回路 abca 和 acda,用测得的电压值验证基尔霍夫电压定律,数据记入表 3-4。

表 3-4 基尔霍夫电压定律测量数据

回路 abca	U_{ab}/V	U_{bc}/V	U_{ca}/V	$\sum U/\text{V}$
回路 acda	U_{ac}/V	U_{cd}/V	U_{da}/V	$\sum U/\text{V}$

3.2.5 注意事项

(1) 实验电路连接完成后,应先检查电路,确认无误后方可接通电源。注意用电安全,严格遵守“先接线,后通电;先断电,后拆线”的操作原则。

(2) 使用直流稳压电源时,其输出电压值必须用万用表或电压表进行校对。

(3) 测量电压或电流时,应注意仪表的极性,及数据表格中“+”“-”的记录。

(4) 叠加定理实验中,每个电源单独作用时,不作用的电流源应从电路中撤掉,并保持该支路开路状态;不作用的电压源应从电路中撤掉,并保持该支路短路状态。

3.2.6 思考题

(1) 测量电压或电流时,如何判断数据前的正、负号? 负号的意义是什么?

(2) 进行叠加定理实验时,不作用的电压源、电流源怎样处理?

(3) 如电源含有不可忽略的内阻,实验中应如何处理?

(4) 各电阻所消耗的功率能否用叠加定理计算得出? 试用上述实验数据进行计算并作出结论。

3.3 戴维南定理

3.3.1 实验目的

(1) 通过实验验证戴维南定理,加深对戴维南定理的理解。

(2) 学习线性有源二端网络等效电路参数的测量方法。



3.3 节视频

3.3.2 实验原理

1. 戴维南定理

任何一个线性有源二端网络对外部电路的作用都可用一个理想电压源与一个电阻串联来等效代替,如图 3-3 所示。该理想电压源的电动势等于这个有源二端网络的开路电压 U_{OC} ,所串联的电阻等于该有源二端网络中各电源均置零时(电压源短路,电流源开路)所得到的无源二端网络的等效电阻 R_0 。

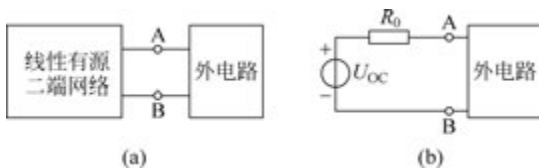


图 3-3 线性有源二端网络及其等效电路

(a) 线性有源二端网络; (b) 等效电路

所谓等效,是指它们的外部特性相同,即有源二端网络的两个端子 A 和 B 如果接上相同的负载,则流过该负载的电流相同。

2. 线性有源二端网络等效电路参数的测量方法

1) 开路电压 U_{OC} 的测量方法

(1) 直接测量法

当线性有源二端网络的等效电阻 R_0 与电压表内阻 R_V 相比可以忽略不计时,可直接用电压表测量其开路电压 U_{OC} 。

(2) 补偿测量法

补偿电路实际上是一个分压器电路,如图 3-4 所示。使用该方法测量电压时,可以排除仪表内阻对测量结果的影响。

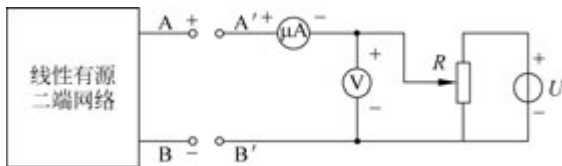


图 3-4 补偿测量法测量电路

在测量电压 U_{AB} 时,先将 A' 、 B' 端子与 A、B 端子对应相接,调节分压器电压,使微安表的指示为 $0 \mu A$,此时,补偿电路的接入不影响被测电路的工作状态。在电路中,A 端子和 A' 端子的电位相等,所以电压表的读数等于被测电压。

2) 等效电阻 R_0 的测量方法

测量线性有源二端网络等效电阻 R_0 的方法有多种:

(1) 直接测量法

先将线性有源二端网络的各电源置零(电压源短路,电流源开路),然后用万用表电阻挡

直接测量端口 A、B 处的电阻,即为等效电阻 R_0 。

(2) 二次电压测量法(带载法)

测量电路如图 3-5 所示,第 1 次测量出线性有源二端网络的开路电压 U_{OC} 后,在 A、B 端口处接一已知阻值的负载电阻 R_L ,然后第 2 次测出负载电阻的端电压 U_{R_L} 。根据 $\frac{U_{R_L}}{R_L} = \frac{U_{OC}}{R_0 + R_L}$,推导得出等效电阻 $R_0 = \frac{R_L(U_{OC} - U_{R_L})}{U_{R_L}}$ 。

(3) 短路电流法

测量线性有源二端网络的开路电压 U_{OC} 和短路电流 I_{sc} ,根据欧姆定理可知 $R_0 = \frac{U_{OC}}{I_{sc}}$ 。这种方法最简便,但是对于不允许将外部电路直接短路的网络(例如有可能因短路电流过大而损坏网络内部的器件时),不能采用此方法。

(4) 外加电压测量法

测量电路如图 3-6 所示。把线性有源二端网络中的所有独立电源置零,然后在 A、B 端口外加一个给定电压 U ,测得流入端口的电流 I ,则 $R_0 = \frac{U}{I}$ 。

(5) 半电压法

测量电路如图 3-7 所示。当负载电阻电压等于被测线性有源二端网络开路电压的一半时,负载电阻的大小即等于被测网络的等效电阻。实验中,在 A、B 端口处接一电位器 R_p ,调节其阻值,当电压表的读数为开路电压 U_{OC} 的一半时,此时电位器的阻值 R_p 即为所求的等效电阻 R_0 。

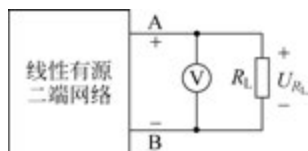


图 3-5 二次电压测量法



图 3-6 外加电压测量法

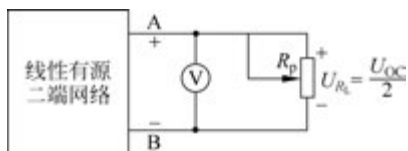


图 3-7 半电压法

3.3.3 实验仪器与设备

- (1) 直流稳压电源。
- (2) 万用表。
- (3) 基础电路实验板。

3.3.4 实验内容及步骤

1. 测量线性有源二端网络的外部伏安特性

将直流稳压电源调至 $E = 5\text{ V}$,然后按图 3-8 接线。根据表 3-5 提供的负载电阻阻值,测量通过电阻 R_L 的电流和其两端的电压,将测量结果填入表 3-5。

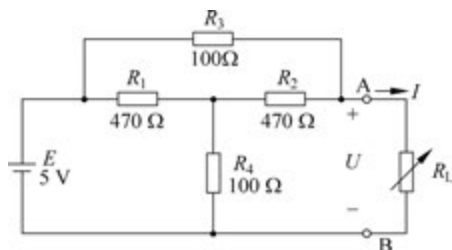


图 3-8 线性有源二端网络

表 3-5 线性有源二端网络外部伏安特性

R_L/Ω	0	10	470	1 k	∞
I_{R_L}/mA					
U_{R_L}/V					

2. 测量线性有源二端网络的开路电压

用直接测量方法测量线性有源二端网络的开路电压 U_{OC} , 将测量结果填入表 3-6。

表 3-6 开路电压数据

测量方法	U_{OC}/V
直接测量法	

3. 测量线性有源二端网络的等效电阻

分别使用直接测量法、二次电压测量法、短路电流法、外加电压测量法、半电压法测量线性有源二端网络的等效电阻 R_0 , 将测量结果填入表 3-7。

表 3-7 等效电阻数据

测量方法	测量数据	R_0/Ω
直接测量法	—	
二次电压测量法	$R_L = \Omega$ $U_{R_L} = \text{V}$	
短路电流法	$I_{sc} = \text{mA}$	
外加电压测量法	$U = \text{V}$ $I = \text{mA}$	
半电压法	$1/2U_{OC} = \text{V}$	

4. 验证戴维南定理

(1) 按图 3-9 构成戴维南等效电路, 测量它的外部伏安特性。其中, 电压源通过调节直流稳压电源输出电压, 使之等于开路电压 U_{OC} , 等效电阻 R_0 用电位器代替, 在 A、B 端接入负载电阻 R_L , 按表 3-8 提供的电阻阻值, 测量通过电阻的电流和其两端的电压, 将测量结果填入表 3-8。

(2) 比较表 3-5 和表 3-8, 验证戴维南定理。

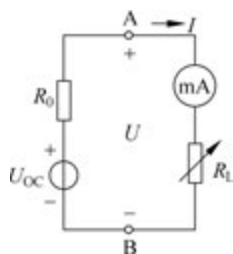


图 3-9 戴维南等效电路

表 3-8 戴维南等效电路伏安特性数据

R_L/Ω	0	10	470	1 k	∞
I_{R_L}/mA					
U_{R_L}/V					

3.3.5 注意事项

(1) 实验电路连接完成后,应先检查,确认无误后方可接通电源。注意用电安全,严格遵守“先接线,后通电;先断电,后拆线”的操作原则。

(2) 使用直流稳压电源时,其输出电压值必须用万用表或电压表进行校对。

(3) 采用直接测量法测量等效电阻时,应将网络中的电压源置零,此时注意应先关掉直流稳压电源的开关,并将其从电路中断开,再用一根导线将断开的两端相连。

3.3.6 思考题

(1) 对于图 3-4 所示电路,如果在测量时 A' 与 B 相接, B' 与 A 相接,是否达到用补偿法测量电压 U_{OC} 的目的? 请说明原因。

(2) 在求解线性有源二端网络等效电路中的 R_0 时,如何理解“原网络中所有独立电源为零值”? 实验中怎样将独立电源置零?

(3) 设线性有源二端网络是封闭的,对外只伸出两个端口,并且两个端口之间不允许短路。试问:如何确定该网络的等效电路?

(4) 对比测量线性有源二端网络开路电压及等效电阻的几种方法,说明其优缺点及适用范围。

3.4 一阶电路过渡过程

3.4.1 实验目的

- (1) 研究一阶 RC 电路的零状态响应、零输入响应和全响应的变化规律和特点。
- (2) 掌握一阶 RC 电路时间常数 τ 的测量方法,了解电路参数对时间常数的影响。
- (3) 通过实验加深对积分电路和微分电路的理解。

3.4.2 实验原理

1. 一阶 RC 电路的零状态响应(充电过程)

电路在零初始状态(动态元件初始储能为零)下由外施激励引起的响应称为零状态响应。

一阶 RC 电路如图 3-10 所示。设开关 S 在位置 2 时,电容 C 无初始储能,电路处于零状态。当 $t=0$ 时,开关 S 由位置 2 转到位置 1,电源 U_S 经电阻 R 向电容 C 充电。此时电容电压 u_C 随时间变化的规律,称为零状态响应。其表达式为

$$u_C(t) = U_S(1 - e^{-t/\tau}), \quad t \geq 0 \quad (3-1)$$

式中, $\tau = RC$, 具有时间的量纲, 称为电路的时间常数, 它是反映电路过渡过程快慢的物理量。 τ 越大, 暂态响应所持续的时间越长, 即过渡过程的时间越长; 反之, τ 越小, 过渡过程的时间越短。 $u_C(t)$ 的波形如图 3-11 所示, 当 $t = \tau$ 时, $u_C = 0.632U_S$, 即 u_C 上升到稳态值的 63.2%。

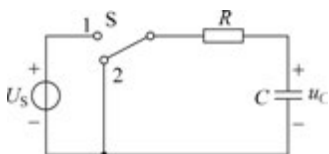


图 3-10 一阶 RC 电路

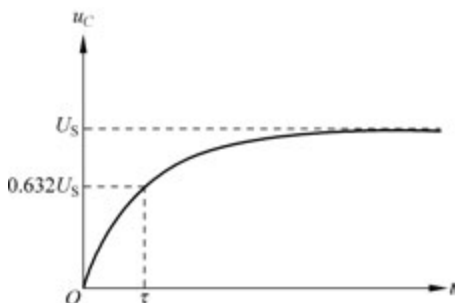


图 3-11 零状态响应的波形图

2. 一阶 RC 电路的零输入响应(放电过程)

电路在没有外施激励时, 由电路中动态元件的初始储能引起的响应称为零输入响应。

在图 3-10 所示电路中, 设开关 S 在位置 1 时, 电路处于稳态, 即电容 C 充电完成, 电容电压 $u_C = U_S$ 。当 $t = 0$ 时, 开关 S 由位置 1 转到位置 2, 电容 C 通过电阻 R 开始放电, 此时电容电压 u_C 随时间变化的规律, 称为零输入响应。其表达式为

$$u_C(t) = U_S e^{-t/\tau}, \quad t \geq 0 \quad (3-2)$$

$u_C(t)$ 的波形如图 3-12 所示, 当 $t = \tau$ 时, $u_C = 0.368U_S$, 即 u_C 下降到初始稳态值的 36.8%。

3. 一阶电路的全响应

当一个非零初始状态的一阶电路受到激励时, 电路的响应称为全响应。

如图 3-13 所示的电路, 当 $t = 0$ 时合上开关 S, 则描述电路的微分方程为

$$u_C + RC \frac{du_C}{dt} = U_S \quad (3-3)$$

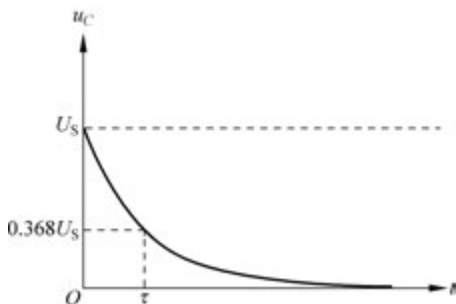


图 3-12 零输入响应的波形图

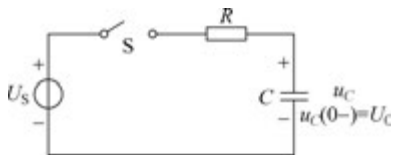


图 3-13 一阶 RC 电路的全响应

由于初始值 $u_C(0_-) = U_0$, 可以得出全响应为