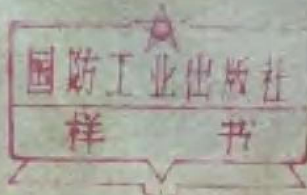


电 路 基 础

吴 大 正 编



国防工业出版社

内 容 简 介

本书讨论了电路和磁路的基本理论和分析方法,包括直流电路、线性电路的分析方法、正弦交流电路、磁路和变压器四章。书中除讨论了基本原理外,还介绍了一些实用电路的分析计算方法,并配置了大量的例题和练习题。可作为雷达、通讯、导航、电视、电测等各无线电技术专业的教学或参考用书,也可作在职职工自学用书。

电 路 基 础

吴大正 编

*

国防工业出版社出版

北京市书刊出版业营业许可證出字第 074 号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

上海商务印刷厂承排 太原印刷厂印装

*

787×1092 1/16 印张 18 3/4 478千字

1979年7月第一版 1979年7月第一次印刷 印数: 00,001—65,000册

统一书号: 15034·1818 定价: 1.95元

前 言

本书讨论了电路和磁路的基本理论和分析方法,包括直流电路、线性电路的分析方法、正弦交流电路、磁路和变压器四章,可作为雷达、通讯、导航、电视、电测等各无线电技术专业的教学或参考用书。书中除讨论了基本原理外,还介绍了一些实用电路的分析计算方法,有一些较深入的内容,这些在目录和正文中均用*号标出,其中有些是资料性的,供读者在实际工作中查阅。

本书注意了阐明基本原理的物理含意,为了便于读者掌握基本概念和分析计算方法,书中配置了大量的例题和练习题,在第四章后编有综合性和实用性较强的总习题,可作为总复习之用。为便于自学,书末附有部分习题答案。

在编写过程中,得到了西北电讯工程学院及院外有关同志的大力支持,提供了许多宝贵意见,在此表示感谢。

由于编者水平有限,书中难免有不少缺点、错误,希望读者给予批评指正。

吴大正

目 录

第一章 直流电路1	一、等效变换.....57
§ 1.1 电流.....1	二、替代原理.....59
§ 1.2 电位与电压.....3	三、电压源与电流源的等效互换.....60
一、电位.....3	*四、恒压源和恒流源的等效转移.....63
二、电压(电位差).....4	§ 2.2 三角形与星形网络的等效互换.....66
三、电动势.....6	一、三角形(Δ 形)与星形(Y形)的等效互换.....66
§ 1.3 欧姆定律.....6	*二、 Δ -Y 等效互换的证明.....68
一、欧姆定律.....7	*三、有源的 Δ -Y 变换.....70
*二、导体的电阻.....9	*四、双电桥.....72
§ 1.4 电功率.....11	§ 2.3 线性电路的叠加特性.....74
一、电功率.....11	一、齐次性.....74
二、电气设备的额定值.....12	二、叠加特性.....75
§ 1.5 基尔霍夫定律.....14	§ 2.4 等效电源定理.....77
一、电路图.....14	一、戴维南定理.....78
二、基尔霍夫第一定律.....15	二、诺尔顿定理.....78
三、电压的计算.....17	*三、等效电源定理的证明.....82
四、基尔霍夫第二定律.....19	*§ 2.5 参数变动定理.....84
§ 1.6 电阻的串联和并联.....23	一、参数变动定理.....84
一、电阻的串联.....23	二、参数变动定理的证明.....86
二、电阻的并联.....24	三、失衡电桥.....87
三、电阻的混联.....26	§ 2.6 网络方程.....90
§ 1.7 电源.....31	§ 2.7 回路电流法.....93
一、恒压源与恒流源.....31	一、回路电流.....93
二、实际电源的表示法.....31	二、回路电流法.....95
三、电路中的功率平衡.....34	§ 2.8 节点电位法.....99
四、由给定电源获得最大功率的条件.....35	第三章 正弦交流电路105
五、电源的联接.....36	§ 3.1 正弦交流电.....105
*§ 1.8 电流和电压的测量.....39	一、交流电.....105
一、电表的灵敏度和准确度.....39	二、正弦交流电.....106
二、电流表量程的扩大.....40	三、正弦交流电的有效值.....108
三、电压表及其量程扩大.....42	§ 3.2 复数和相量.....110
四、电表的使用.....43	一、复数.....110
五、数字电压表.....46	二、复数的四则运算.....110
六、电位差计.....46	三、复数的几何表示.....112
*§ 1.9 电阻的测量.....48	四、复数与相量.....114
一、欧姆表原理.....48	五、附录:复数的算尺计算法.....116
二、伏安法.....51	§ 3.3 正弦量的相量和复数表示.....122
三、比较法.....53	一、相量和复数表示.....122
四、电桥法.....53	二、同频率正弦交流电的相加.....124
第二章 线性电路的分析方法57	三、基尔霍夫定律的复数形式.....126
§ 2.1 电路的等效变换.....57	§ 3.4 电阻中的正弦电流.....127

一、电流电压关系	127	*§ 3.13 元件参数的测量	205
二、瞬时功率和平均功率	128	一、交流电路中的实际元件	205
§ 3.5 交流电路中的自感	129	二、交流电桥原理	206
一、感应电动势	129	三、交流电桥的特性	210
二、自感	130	四、匝数比电桥	214
三、正弦电流通过自感	131	第四章 磁路和变压器	216
四、自感中的无功功率	132	§ 4.1 物质的磁性	216
§ 3.6 交流电路中的电容	136	一、磁场的基本概念	216
一、电容	136	二、铁磁材料的磁化	217
二、电容上的正弦电压	137	三、磁性材料	218
三、电容中的无功功率	138	§ 4.2 磁路	219
§ 3.7 阻抗和导纳	141	一、磁路欧姆定律	219
一、RLC 串联电路的阻抗	142	二、磁路基尔霍夫定律	220
二、RLC 并联电路的导纳	143	三、磁路的特点	221
三、阻抗与导纳	145	§ 4.3 恒定磁通磁路的估算	222
四、负载的串联和并联	147	一、无分支磁路	222
§ 3.8 交流电路中的功率	156	*二、有分支磁路	226
一、平均功率与视在功率	156	*三、永久磁铁	227
二、复功率	157	*§ 4.4 交变磁通磁路	230
三、由电源获得最大功率的条件	161	一、概述	230
§ 3.9 交流电路中的互感	162	二、磁化电流	231
一、互感	162	三、铁心损耗	232
二、互感电压	163	*§ 4.5 铁心线圈和变压器	235
三、互感线圈的 T 形等效电路	167	一、铁心线圈	235
四、互感耦合回路	169	二、铁心变压器	237
五、全耦合互感线圈与理想变压器	171	三、滤波阻流圈	241
§ 3.10 谐振	176	*§ 4.6 小型电源变压器的设计	244
一、串联谐振	176	一、设计原理	244
二、谐振时的能量关系	178	二、举例	248
三、并联谐振	179	三、整流电源变压器	255
*四、串并联电路中的谐振	182	总习题	260
§ 3.11 线性电路的分析方法(实用电路 举例)	184	附录	267
一、叠加特性	184	附录 I 电路图符号	267
二、等效电源定理	185	附录 II 元件	269
*三、 Δ -Y 变换	187	一、电阻器、电容器型号命名方法	269
*四、电源的互换和转移	189	二、电阻器	271
*五、回路电流法和节点电位法	192	三、电容器	274
*六、互易特性(互易定理)	194	四、电感线圈	278
*§ 3.12 三相交流电	197	附录 III 铁心标准尺寸	284
一、三相电源的联接	198	附录 IV 漆包铜线规格表	287
二、负载的星形联接	199	部分习题答案	289
三、负载的三角形联接	201		
四、不对称的三相电路	203		

第一章 直流电路

§ 1.1 电 流

在生产实践和日常生活中,我们遇到过许多电气设备。当合上电源开关后,电灯就会发光,电炉就会发热,电动机就会转动。这是由于在电灯、电炉和电动机中有电流通过的缘故。图 1.1-1 就是电灯的电路,灯泡用两根金属导线经过开关与电源相联接。当将开关 K 闭合后,经过开关、导线、灯泡和电源构成一个电流的通路,电路中有电流通过,灯泡发光。如果把开关 K 断开,电流的通路被切断,电路中就没有电流流通,因而灯泡熄灭。电流是一种客观存在的物理现象,虽然不能用肉眼看到它,但是可以通过它的各种表现,例如热效应(灯泡的发光、电炉的发热),电磁效应(电动机转动)等而被人们所觉察。

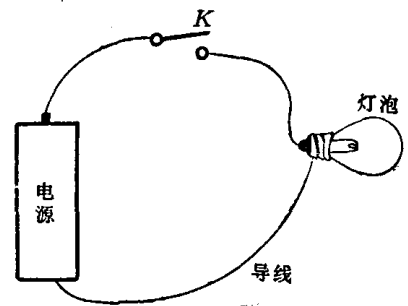


图 1.1-1

什么是电流呢?让我们从物质结构说起。自然界中的一切物体都由分子组成,而分子又由原子组成。原子由原子核和环绕着原子核作高速运动的电子组成,原子核带正电,电子带负电。带电物体所带电荷的多少称为电量或电荷量,通常用字母 Q 或 q 表示,它的单位是库仑,简称库,用字母 C 表示。一个电子所带的负电量约为 1.60×10^{-19} 库。由于原子核所带的正电量和电子所带的负电量相等,所以原子对外不呈现带电的性质,即从外部看来,整个原子是中性的。

各种原子虽然都由原子核和核外电子组成,但它们的结构和特性也有很大差别。像铝、铜、银等金属,导电性能良好,称为导体。这些金属的原子中,其最外层的电子受原子核的束缚力较小,容易从原子中挣脱出来,而在整个金属导体内部自由地运动,这种电子称为自由电子。金属导体中大量的自由电子,在电场力的作用下,会向电场的反方向移动,这就形成了电流。在另一类导体中,如酸、碱、盐等类化合物的水溶液中,这些化合物分解为带正电荷和带负电荷的微粒,称为正、负离子,在电场力的作用下,正离子顺着电场方向移动,负离子逆着电场方向移动,从而形成电流。总之,电荷(自由电子、正、负离子等)在电场力的作用下有规则地定向运动,就形成电流。

从以上讨论可见,在同一电场力的作用下,正电荷顺着电场的方向移动,而负电荷逆着电场方向运动,那末如何确定电流的方向呢?习惯规定,正电荷运动的方向为电流的实际方向。这样,负电荷(如金属中的自由电子)的运动可以看作是有等量的正电荷作相反方向的运动,这样做对我们研究(理论的或实验的)各种问题没有任何影响。

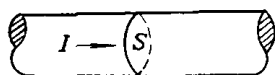


图 1.1-2

为了从数量方面衡量电流的大小,规定在单位时间内通过导体横截面的电量(参看图 1.1-2),称为电流强度,也简称电流。所以电流这个词既代表一种物理现象,也代表一种物理量。电流强度常用符号 I 或 i 表示。如果在 Δt 时间内,流过导体

横截面 S 的电量为 Δq , 则通过该导体的电流强度

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} \quad (1.1-1)$$

电流强度的单位是安培(简称安), 用字母 A 表示。如果每秒钟通过导体横截面的电量为 1 库, 则电流就是 1 安。有时用安作电流的单位嫌太大, 常用单位还有毫安(mA)和微安(μA)。

$$1 \text{ mA} = 10^{-3} \text{ A}$$

$$1 \mu\text{A} = 10^{-3} \text{ mA} = 10^{-6} \text{ A}$$

如果电流强度 I 不随时间变化, 就称为直流或恒定电流。如果电流随时间变化, 可以将式(1.1-1)中的时间 Δt 取得无限短促, 当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, 得这一瞬时的电流

$$i = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt} \quad (1.1-2)$$

电流 i 是随时间变化的, 即它是时间的函数, 称为电流的瞬时值, 常用 i 或 $i(t)$ 表示。以后, 不随时间变化的量, 用大写字母表示; 随时间变化的量, 用小写字母表示。

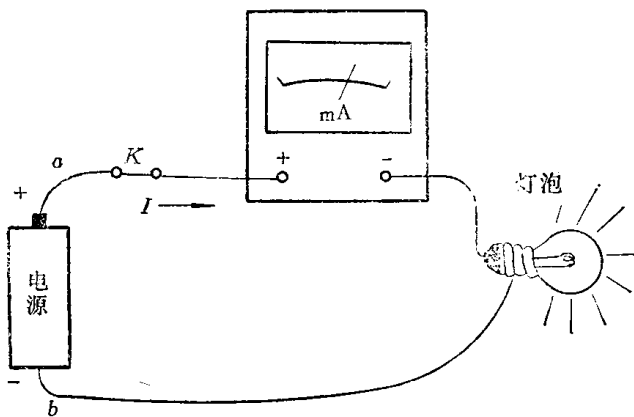


图 1.1-3

测量直流电流的仪表有安培表、毫安表和微安表等, 并用符号 A、mA、 μA 标明在相应电表的表面上。在使用时, 应根据被测电流的大小选择合适的电流表。测量时, 电流表应串接于电路中, 使被测电流由电表的“+”端流入电表, 而从“-”端流出, 如图 1.1-3 所示。这样联接电表, 它的指针才会正确偏转。如果把电表的“+”“-”

端接反了, 电表指针将向相反方向偏转, 并且容易损坏电表, 使用时应特别注意。至于电流表串联在灯泡的前面或后面是没有关系的, 这是因为电流具有连续性。在这里电流的连续性表现为: 一方面电流只能在闭合的电路中流动, 另一方面, 在只有一个闭合通路的电路中, 各处的电流是同一个电流。

顺便指出, 在一个复杂的电路中要事先正确地判断电流的实际方向, 往往很困难。这时我们在分析问题以前可任意假定电流的方向, 这个假定方向称为正方向。尔后我们按正方向对电路进行分析和计算, 如果计算结果电流得正值, 它表明电流的正方向与其实际方向一致, 如果计算结果电流得负值, 则表明正方向与实际方向相反。由此我们可按电流的正方向以及电流的正负值来决定电流的实际方向。今后, 在电路图中我们只标明电流的正方向, 而不标实际方向, 以免混淆。

练 习 题

1.1-1 如在 4 秒钟内通过导线横截面的电量是 12 库仑, 电流是多少?

1.1-2 试换算下列的单位

(1) $0.025 \text{ A} = \quad \text{mA} = \quad \mu\text{A}$

(2) $320 \text{ mA} = \quad \text{A}$

§ 1.2 电位与电压

当我们把物体由低处移到高处时,外力需克服地球的引力(重力)做功,这时物体的位置升高,位能增大;当物体由高处下落时,重力将做功,物体的位置降低,位能减小。由于只当物体沿重力的方向移动时,重力才作了功,所以将物体从高处 a 降到低处 b 时(参看图 1.2-1),无论沿着什么路径,重力作的功是相同的,并等于 $mgh_a - mgh_b$, 其中 m 为物体质量, g 为重力加速度, h_a 和 h_b 分别为 a 点和 b 点的高度。若选地面是位能为零的基准点,则物体在 a 处的位能为 mgh_a , 物体在 b 处的位能为 mgh_b , 即质量为 m 的物体在离地面为 h 高处所具有的位能等于把物体从该处移至地面时,重力所作的功。

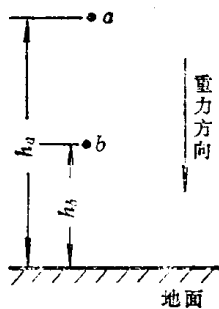


图 1.2-1

我们目前所涉及的电场中,电荷受力从某 a 点沿不同路径移动到另一 b 点时,电场力作的功也与路径无关[⊖],这与重力场的情形相仿。

一、电位

如图 1.2-2, 设有一个正电荷 Q , 在它周围有电场存在。这时若有另一个电荷 q_0 (我们称它为试验电荷)位于电场中,它将受电场力的作用。这里可仿照重力场的情形在电场中引入电位能的概念。我们这样认为,试验电荷在电场中的任何位置都具有一定的电位能。为了比较电场中各点电位能的高低,象重力场一样,也需要选择一个参考点 o (也就是基准点),并设该点的电位能为零(例如,在讨论电场的问题时,常选离电荷无限远处为参考点)。这样,电场中 a 点的电位能 W_a 就等于将试验电荷 q_0 从 a 点移到参考点,电场力所作的功。

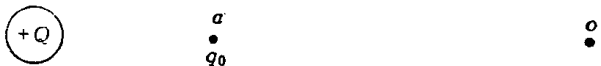


图 1.2-2

试验电荷 q_0 在电场中某一点所具有的电位能与试验电荷的电量 q_0 成正比,而电位能与 q_0 的比值 $\frac{W_a}{q_0}$ 却是一个恒量,它只与电场中指定的点 a 的位置有关,而与 q_0 无关,我们把这个量称为电位,用字母 φ 表示,即电场中 a 点的电位

$$\varphi_a = \frac{W_a}{q_0} \quad (1.2-1)$$

若令 $q_0 = +1$ 库,则 $\varphi_a = W_a$, 即电场中某点的电位等于单位正电荷从该点沿任意路径移至参考点,电场力所作的功。

如果功的单位是焦耳,电荷的单位是库仑,则电位的单位是伏特,简称伏,用字母 V 表示。

$$1(\text{伏}) = \frac{1(\text{焦耳})}{1(\text{库仑})}$$

除伏特外,常用单位还有千伏(kV)、毫伏(mV)和微伏(μV)

[⊖] 在有些电场中,电荷受力沿不同路径移动时,电场力所作的功与路径有关,这类问题属于电磁场问题。其中有些问题,在一定条件下,也可用电路理论近似的分析。

$$1 \text{ kV} = 10^3 \text{ V}$$

$$1 \text{ mV} = 10^{-3} \text{ V}$$

$$1 \mu\text{V} = 10^{-3} \text{ mV} = 10^{-6} \text{ V}$$

[例 1.2-1] 如图 1.2-3, 在一段导体中, 如有 2 库仑的正电荷在电场力作用下, 由 a 点经 b 点向 c 点移动, 已知由 a 点至 b 点电场力作功为 6 焦耳, 由 b 点至 c 点电场力作功为 4 焦耳。

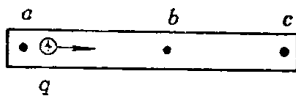


图 1.2-3

1. 若以 c 为参考点, 试求 a 点和 b 点的电位;
2. 若以 b 为参考点, 试求 a 点和 c 点的电位。

[解]

1. 以 c 点为参考点, 就是假设 c 点的电位为零, 即 $\varphi_c = 0$ 。

根据式(1.2-1), b 点的电位 φ_b 是电场力将单位正电荷由 b 移至参考点 c , 电场力所作的功, 即

$$\varphi_b = \frac{W_b}{q} = \frac{4}{2} = 2\text{V}$$

a 点的电位 φ_a 是将单位正电荷由 a 移至参考点 c 时, 电场力所作的功, 它应等于电场力将电荷由 a 移至 b 所作的功与由 b 移至 c 所作的功之和, 即

$$\varphi_a = \frac{6+4}{2} = 5\text{V}$$

2. 以 b 点为参考点, 即设 $\varphi'_b = 0$ 。

根据式(1.2-1), a 点的电位

$$\varphi'_a = \frac{6}{2} = 3\text{V}$$

c 点的电位是电场力将单位正电荷由 c 移至参考点 b 所作的功, 但由题意知, 电场力将 2 库的电荷由 b 移至 c , 作功为 4 焦耳, 现在运动的方向相反, 故功应取负值, 即电荷由 c 移至 b 时, 电场力作负功(实际上应是外力作功), 所以 c 点的电位

$$\varphi'_c = \frac{-4}{2} = -2\text{V}$$

由上例可见, 某点的电位是相对的, 只有确定了电位为零的参考点后, 某点的电位才有确定的数值。参考点不同, 同一点的电位数值也不相同。这一点很象高度, 对于节日升空的采色气球来说, 你从楼顶上去测量它的高度和从地面上测量它的高度, 显然是不一样的。

单位正电荷由 a 移到 c 电场力所作的功大于由 b 移到 c 电场力所做的功, 因而 a 点的电位 φ_a 比 b 点的电位 φ_b 高。由此可见, 在电场力的作用下, 正电荷将从高电位的点移向低电位点。

电位是个代数量, 它可能是正值, 也可能是负值。某点的电位为正值, 表明该点电位比参考点高, 另一点电位为负值, 表明该点的电位比参考点低。

二、电压(电位差)

在研究电路问题时, 用电位差的概念比用电位更加方便。电位差是指两点间的电位之差, 电位差也叫电压, 用符号 U 或 u 表示, 例如 a 点与 b 点之间的电压

$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b \quad (1.2-2)$$

由于电位 φ_a 是电场力将单位正电荷由 a 沿任意路径移至参考点所作的功, 电位 φ_b 是

电场力将单位正电荷由 b 点沿任意路径移至参考点所作的功, 因而电压(电位差) U_{ab} 是电场力将单位正电荷由 a 点沿任意路径移至 b 点所作的功。

电压的单位与电位相同, 也是伏。

[例 1.2-2] 在例 1.2-1 中已求得, 当以 c 点为参考点时, a 点和 b 点的电位分别为 $\varphi_a = 5V$, $\varphi_b = 2V$; 而以 b 点为参考点时, a 点和 c 点的电位分别为 $\varphi'_a = 3V$, $\varphi'_c = -2V$ 。

1. 试求两种情况下的 U_{ab} 和 U_{bc} ;

2. 试求 U_{ba} 和 U_{cb} 。

[解]

1. 根据式(1.2-2), 当以 c 为参考点时, $\varphi_c = 0$, 电压

$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b = 5 - 2 = 3V$$

$$U_{bc} = \varphi_b - \varphi_c = 2 - 0 = 2V$$

当以 b 为参考点时, $\varphi'_b = 0$, 电压

$$U_{ab} = \varphi'_a - \varphi'_b = 3 - 0 = 3V$$

$$U_{bc} = \varphi'_b - \varphi'_c = 0 - (-2) = 2V$$

2. 根据式(1.2-2), 电压

$$U_{ba} = \varphi_b - \varphi_a = 2 - 5 = -3V$$

$$U_{cb} = \varphi_c - \varphi_b = 0 - 2 = -2V$$

前面说过, 某点电位的数值与参考点选取有关。由上例可见, 两点之间的电压与参考点的选择无关。事实上, 电位也是电位差(电压), 只是电位是指某点与参考点之间的电压而已。

应该注意的是, 所谓 a 、 b 两点之间的电压 U_{ab} 与 b 、 a 两点之间的电压 U_{ba} 是不同的, 前者指电场力将单位正电荷由 a 移至 b 所作的功, 而后者指电场力将单位正电荷由 b 移至 a 所作的功。因此 b 、 a 两点之间的电压

$$U_{ba} = \varphi_b - \varphi_a = -(\varphi_a - \varphi_b) = -U_{ab} \quad (1.2-3)$$

这也就是电压的正方向问题。用双下标表示电压的正方向常感到不便。在电路图中[如图 1.2-4 (a) 所示]通常用“+”号表示高电位端(起点 a), 用“-”号表示低电位端(终点 b)。也有的用箭头表示的, 如图 1.2-4 (b) 所示, 电压 U 表示 U_{ab} 。在对电路进行分析计算时, 应先标明电压的正方向, 若计算结果电压为正值, 表明电压的正方向与实际方向一致; 若计算结果为负值, 表明图中所标的电压正方向与实际方向相反。

测量两点之间电压的电表有伏特表、毫伏表等, 并常用符号 V 、 mV 标明在相应电表的表

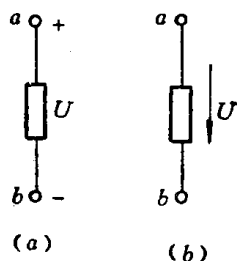


图 1.2-4

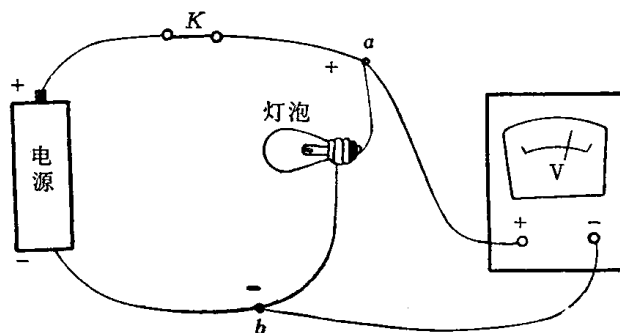


图 1.2-5

面上。在使用时应根据被测电压的大小选择合适的电压表。在测量时，电压表跨接在被测电压的两点之间，并且电压表的“+”端应接至两点之一的高电位端，电压表的“-”端接至低电位端，不能接反，否则易损坏电表。图 1.2-5 绘出了测量 a 、 b 两点之间电压时电压表的正确接法。由此可见，在测量电压时最好事先知道两点之间电压的大概数值及其高低电位端，以便正确的选择和使用电压表。

三、电动势

如有两个极板 a 和 b ，其中 a 带有正电荷， b 带负电荷，于是在 a 、 b 之间就有电位差。

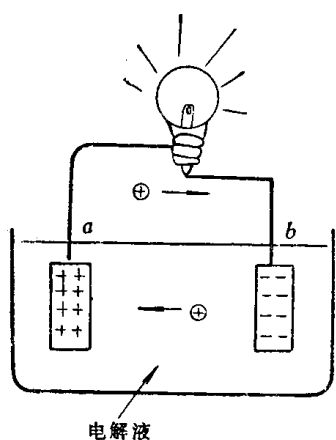


图 1.2-6

如果用导体将 a 与 b 连通，则在电场力的作用下，正电荷由高电位端 a 经导体向低电位端 b 运动，于是就形成电流（参看图 1.2-6）。如果极板上的电荷没有补充，则两极板上的电荷不断中和，从而逐渐减少，直到两极板上所带电量全部中和达到平衡为止。也就是说，在这种情况下，电流不能长久的维持下去。

要想使电流持续不断地流动，就必须有外力把正电荷由低电位处（极板 b ）搬回到高电位处（极板 a ），这样电荷便可以在闭合的路径上周而复始地流动着。这个任务是由电源来完成的。

当正电荷受电源中的外力作用，由低电位处移向高电位处时，外力也要作功（目前我们所涉及的电场力只能使正电荷由高电位处移向低电位处），我们把在电源中使单位正电荷由 b 移到 a 所作的功称为电源的电动势，用符号 E 或 e 表示。

由电动势的定义可见，它也是电位差，这里只是强调了该电位差是由外部原因产生的。电动势与电压的单位相同，也是伏。

在电路中，直流电动势用长短划表示，如图 1.2-7 所示，长划代表“+”极，即高电位端，短划代表“-”极，即低电位端 \ominus 。为了明确起见，也常在电动势两端标以“+”“-”号。

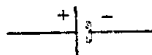


图 1.2-7

有时为了说明问题方便，常用指出电动势的方向来说明电源是怎样连接的。所谓电动势的方向是指从电动势负极经电源内部指向正极的方向，即指电位升高的方向。因此电动势也可称为电位升，而电压则称为电位降（因为电压的方向是指电位降低的方向）。

练 习 题

1.2-1 什么叫电位？什么叫参考点？什么叫电压？当参考点改变时，电场中各点的电位是否改变？任意两点间的电压是否改变？

1.2-2 如图是某电路的一部分，若以 a 为参考点，测得 $\varphi_b = 3V$ ， $\varphi_c = 1V$ ， $\varphi_d = 6V$ ，若以 b 为参考点， a 、 c 、 d 各点的电位是多少？



题 1.2-3 图

1.2-3 求上题中的电压 U_{bc} 、 U_{bd} 、 U_{da} 。

§ 1.3 欧姆定律

前面介绍了电流和电压的概念，这里讨论电流与电压之间的关系。

⊖ 有的书刊上，用长划代表电动势的负极，短划代表电动势的正极，请读者注意。

一、欧姆定律

如果在一段导体的两端有电位差(电压),那么导体中就有电流从高电位端流向低电位端。

导体两端的电压(电位差) U 与通过该导体的电流 I 之间的关系,可用实验方法进行研究。如图1.3-1的电路中,用电压表测量导体两端的电压 U ,用电流表测量流过该导体的电流 I 。调节直流电源的输出电压,测量导体两端的电压 U 和流经该导体的电流 I 的数值。下表是某导体测量结果的数据,图1.3-2是根据它作出的该导体的 U 与 I 的关系曲线(常称为伏安特性)。

$U(\text{V})$	0	1	2	3	4	5
$I(\text{mA})$	0	5	10	15	20	25

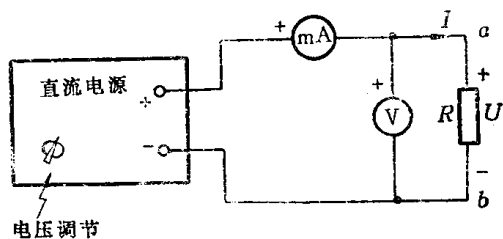


图 1.3-1

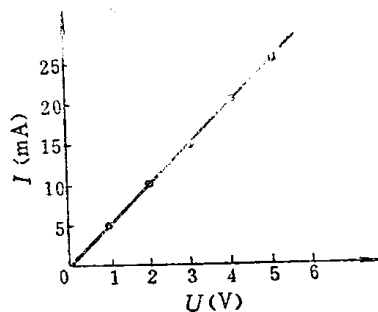


图 1.3-2

实验结果表明,通过导体的电流 I 与导体两端的电压 U 成正比,故有

$$I = GU \quad (1.3-1)$$

式中 G 是一个比例常数,称为该导体的电导。通常用 G 的倒数 R 来表示上述关系,即令

$$R = \frac{1}{G} \quad (1.3-2)$$

于是

$$I = \frac{U}{R} \quad (1.3-3)$$

R 称为导体的电阻。它的数值由导体的材料、长短、粗细等决定。

式(1.3-3)表明,通过导体的电流 I 与该导体两端的电压(电位差) U 成正比,而与导体的电阻 R 成反比,这就是欧姆定律。它还可以根据需要写成如下的形式

$$U = RI \quad (1.3-4)$$

$$R = \frac{U}{I} \quad (1.3-5)$$

电阻的单位是欧姆,简称欧,用字母 Ω 表示。如电流的单位用A,电压的单位用V,则

$$1(\Omega) = \frac{1(\text{V})}{1(\text{A})}$$

电阻数值很大时,常用千欧($\text{k}\Omega$)或兆欧($\text{M}\Omega$)为单位。

$$1 \text{ k}\Omega = 10^3 \Omega$$

$$1 \text{ M}\Omega = 10^3 \text{ k}\Omega = 10^6 \Omega$$

电导的单位通常用姆欧,它是欧姆的倒数,用符号 σ 表示。在国际单位制中,电导的单位用西门子,用字母 S 表示,目前它尚未普遍采用。

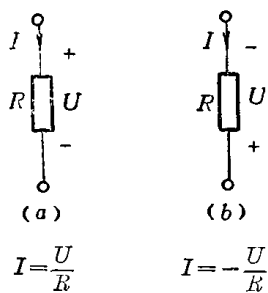


图 1.3-3

需要强调指出,欧姆定律的表示式(式 1.3-3、1.3-4、1.3-5 以及 1.3-1) 在电流和电压的正方向一致(即电流从电压的“+”端流入,从“-”流出)的条件下才是正确的,如图 1.3-3(a)所示。如果在分析计算电路问题时,把电流和电压的正方向规定成图 1.3-3(b)那样,很显然,由于电流应该从高电位端流向低电位端,所以图(b)中的电流应为负值,即

$$I = -\frac{U}{R}$$

在运用欧姆定律时,应注意电流电压正方向的规定。

[例 1.3-1] 如图 1.3-4 是电路的一部分,若需要测量流过 R_2 的电流,但手头又没有电流表,只有一只电压表。设 $R_1 = 50\Omega$, 测得 R_1 两端的电压 $U_1 = 2V$, 问通过 R_2 的电流是多少?

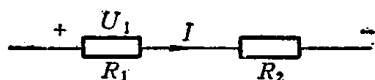


图 1.3-4

[解] 由于 R_1 和 R_2 在同一条路径上,所以流过 R_1 的电流也就是流过 R_2 的电流,因此只要求得流过 R_1 的电流就行了。根据欧姆定律式(1.3-3), 流过 R_1 的电流

$$I = \frac{U_1}{R_1} = \frac{2}{50} = 0.04 \text{ A} = 40 \text{ mA}$$

故流过 R_2 的电流也是 40 mA。

由于用电流表测量电流时,需要将电路断开,然后将电流表接入才能进行测量,而用本例的方法可以不必断开电路,因而测量较为方便,这是检查电路中电流的一种常用方法。

[例 1.3-2] 有一只 $0 \sim 100 \mu\text{A}$ 的微安表,已测得它的电阻是 $1.5 \text{ k}\Omega$, 问当用微安表测量电流时,它两端的电压是多少?

[解] 当通过微安表的电流为 $100 \mu\text{A}$ 时,根据式(1.3-4)得它两端的电压

$$U = RI = 1.5 \times 10^3 \times 100 \times 10^{-6} = 0.15 \text{ V}$$

所以在用该微安表进行测量时,它两端的电压在 $0 \sim 0.15 \text{ V}$ 之间。

[例 1.3-3] 一台直流电机的绕组在 220 V 电压的作用下,通过绕组的电流为 0.44 A 。求绕组的电阻。

[解] 根据式(1.3-5)得绕组的电阻

$$R = \frac{U}{I} = \frac{220}{0.44} = 500 \Omega$$

线性电阻与非线性电阻

多数金属电阻的阻值是不随电压和电流而改变的常数,把两端的电压 U 与通过它的电流 I 绘在直角坐标图中,其伏安特性(即 U 与 I 的关系曲线)是通过原点的直线,如

图 1·3-2 所示。这样的电阻称为线性电阻或欧姆电阻。

还有另一类电阻，通过它的电流与它两端的电压不成正比，即电阻的数值不是常数，而是随电流或电压的变动而变化的，这类电阻称为非线性电阻。由于这类元件不满足欧姆定律，通常不能用准确的函数式表示，而只能通过实验结果用伏安特性来表示。图 1·3-5 画出了半导体二极管和钨丝灯泡的伏安特性。

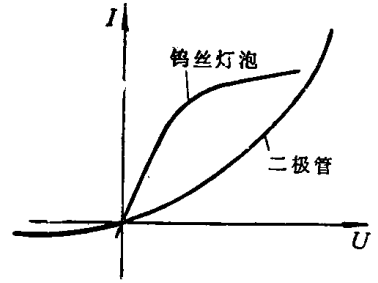


图 1·3-5

仅由电源和线性元件构成的电路称为线性电路，本书仅研究线性电路。

*二、导体的电阻

导体的电阻不仅和导体的材料有关，而且与导体的尺寸有关。实验证明，对于同一材料，导体的电阻与导体的截面积成反比，而与导体的长度成正比。导体的截面积愈大，电阻愈小；导体愈长，电阻愈大。用公式表示为

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (1.3-6)$$

式中 R ——导体的电阻，单位是 Ω ；

l ——导体长度，单位是 m ；

S ——导体截面积，单位是毫米²，即 mm^2 ；

ρ ——导体的电阻率，单位是欧·毫米²/米，即 $\Omega \cdot mm^2/m$ 。

电阻率 ρ 是长 1 米，截面为 1 平方毫米的导体的电阻值。几种常用材料在 20°C 时的电阻率，列在表 1-1 中。

表 1-1 材料的电阻率和电阻温度系数^①

用途	材料名称	电阻率 ρ [20°C] ($\Omega \cdot mm^2/m$)	平均电阻 温度系数 [0~100°C] α (1/°C)
导电材料	银	0.0165	0.0036
	铜	0.0175	0.004
	铝	0.0283	0.004
	低碳钢	0.13	0.006
电阻材料	碳	35	-0.0005
	锰铜	0.43	0.00001
	康铜	0.49	0.000005
	镍铬铁	1.0	0.00015
	铝铬铁	1.2	0.00008
	铂	0.106	0.00389

① 表 1-1 中给出的是近似值。这些数值随着材料的纯度和成分的不同而有所变化。

导体的电阻值不仅和材料种类和尺寸有关，而且与温度有关。银、铜、铝等金属的电阻值随温度升高而增大，而碳的电阻值随温度增高而减小。

为了计算导体材料在不同温度下的电阻值，我们把导体温度每增高 1°C 时，它的电阻增大的百分数叫做电阻的温度系数，用符号 α 表示。表 1-1 中列出了几种材料的平均电阻温度系数。

在平常温度下(0~100°C), 在温度为 $t^\circ\text{C}$ 时, 导体的电阻

$$R_t = R_{20}[1 + \alpha(t - 20)] \quad (1.3-7)$$

式中 R_{20} ——温度为 20°C 时的电阻值, 单位为 Ω ;

R_t ——温度为 $t^\circ\text{C}$ 时的电阻值, 单位为 Ω ;

t ——温度, 单位是 $^\circ\text{C}$ ($^\circ\text{C}$ 表示摄氏温度);

α ——温度系数, 单位是 $1/^\circ\text{C}$ 。

由表 1-1 可见, 在这些常用的导电材料中, 除银以外, 铜的电阻率最小, 导电性能良好, 铝次之, 这两种材料常用来制造各种导线。由于我国铝的储藏量很丰富, 价格又比铜低的多, 所以目前输电线多采用铝线。

电阻率较高的材料主要用来制造各种电阻元件, 例如镍铬合金(镍铬铁)电阻率较高, 并能长期承受高温, 故常用来制造电热器(如电炉)的发热电阻丝。常见的丝绕电阻和金属膜电阻也多半是用镍铬合金制造的。碳可以制造电机的电刷以及常见的碳膜电阻。康铜和锰铜的电阻温度系数很小, 常用来制造精密电阻元件, 如标准电阻、电阻箱、仪表中的分流器等。铂的电阻温度系数较大, 可用来制造电阻温度计, 将它放在待测的电气设备中(例如发电机的定子和转子铁心中)通过测量它的电阻值的变化, 就可以知道设备的工作温度。

[例 1.3-4] 如有一长 100 m 的铜导线, 其截面积为 0.1 mm^2 , 求其在 50°C 时的电阻值。

[解] 由表 1-1 查得铜的电阻率 $\rho = 0.0175 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$, 根据式(1.3-6)得 20°C 时的电阻

$$R_{20} = \rho \cdot \frac{l}{S} = 0.0175 \cdot \frac{100}{0.1} = 17.5 \Omega$$

由表 1-1 查得铜的电阻温度系数为 $\alpha = 0.004/^\circ\text{C}$, 根据式(1.3-7)得 50°C 时的电阻值

$$\begin{aligned} R_{50} &= R_{20}[1 + \alpha(t - 20)] \\ &= 17.5[1 + 0.004(50 - 20)] \\ &= 19.6 \Omega \end{aligned}$$

[例 1.3-5] 某电机厂对电机进行试验, 设在室温 20°C 时, 测得电机绕组(铜线)的电阻为 1.8Ω , 电机运行一定时间后, 停机测得其绕组电阻为 2.4Ω , 求电机绕组的工作温度。

[解] 根据式(1.3-7)

$$R_t = R_{20}[1 + \alpha(t - 20)]$$

从上式中解出温度

$$t = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{R_t}{R_{20}} - 1 \right) + 20$$

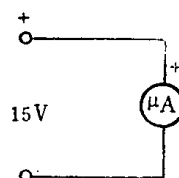
由表 1-1 查得铜的电阻温度系数 $\alpha = 0.004/^\circ\text{C}$, 由已知条件 $R_{20} = 1.8 \Omega$, $R_t = 2.4 \Omega$, 将它们代入上式得

$$t = \frac{1}{0.004} \left(\frac{2.4}{1.8} - 1 \right) + 20 = 103.3^\circ\text{C}$$

练 习 题

1.3-1 已知一电热器的电阻是 $44\ \Omega$ ，使用时通过它的电流是 $5\ \text{A}$ ，试求供电线路的电压。

1.3-2 一个量程为 $100\ \mu\text{A}$ (即它能测量的最大电流为 $100\ \mu\text{A}$) 的微安表，其内阻为 $1.25\ \text{k}\Omega$ 。如有人误将微安计直接接到电源上 (如图)，当电源电压为 $15\ \text{V}$ 时，流过微安表的电流是多少？将发生什么后果。



题 1.3-2 图

1.3-3 若有一个电阻器，测得当其两端电压为 $6\ \text{V}$ 时，通过它的电流是 $24\ \text{mA}$ ，它的电阻值是多少？什么是电导？上述电阻器的电导值是多少？

*1.3-4 某工地需要安装照明线路，用电处至电源的距离为 $100\ \text{m}$ ，若用截面为 $4\ \text{mm}^2$ 的铝导线，问此导线电阻是多少？

*1.3-5 为要修复某电表，要绕制一个 $3\ \Omega$ 的电阻，如选用直径为 $0.5\ \text{mm}$ 的锰铜丝绕制，问需要多长？

§ 1.4 电 功 率

一、电功率

在许多电气设备中，所需要的并不是电流本身，而是伴随着电流、电压的电磁场能量，称为电能。当在一段导体中有电流通过时，正电荷从高电位端移向低电位端，电场力对它作了功，这个功通常叫做电流的功，简称电功。这样，当电流通过用电设备时，就将电能转换为其他形式的能量，例如电流通过电炉，将电能转换为热能，电流通过电动机，将电能转换为机械能等。

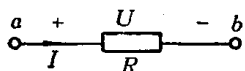


图 1.4-1

设有一用电设备的电阻是 R ，若通过它的电流是 I ，它两端的电压是 U ，其正方向如图 1.4-1 所示。根据定义，电流 I 是单位时间内通过导体横截面的正电荷的电量，故在一段时间 t 内，通过该电阻的电量为 $q = It$ ，电压 U 是将单位正电荷由高电位端 a 移到低电位端 b ，电场力所作的功，所以在一段时间 t 内，电场力所作的功为

$$A = Uq = UI t \quad (1.4-1)$$

式中若电压的单位是伏，电流的单位是安，时间的单位是秒，则电功 A 的单位是焦耳。

不仅要考虑作功的多少，还需考虑作功的快慢，例如用一只大水泵供水，10 分钟就可以把水池装满，而用一只小水泵可能需要 50 分钟。为了比较作功的快慢，更确切地说，为了衡量电能转换为其他形式能量的速率，我们把单位时间内所作的电功称为电功率，简称功率，并用字母 P 表示，即

$$P = \frac{A}{t} \quad (1.4-2)$$

将式(1.4-1)代入到上式得

$$P = UI \quad (1.4-3)$$

上式中，若电压的单位用 V ，电流的单位用 A ，则功率的单位是瓦特，简称瓦，用字母 W 表示，

$$1(\text{W}) = 1(\text{V}) \times 1(\text{A})$$

有时也用千瓦(kW)或毫瓦(mW)作单位。

功的单位也常用千瓦时表示，即以一千瓦的功率，用电一小时，电场力所作的功(或者说用电设备所消耗的电能)就是一千瓦时，

$$\begin{aligned}
 1 \text{ 千瓦小时} &= 1000(\text{瓦}) \times 1(\text{小时}) \\
 &= 1000(\text{焦耳/秒}) \times 3600(\text{秒}) \\
 &= 3600000 \text{ 焦耳}
 \end{aligned}$$

平时我们说用了多少“度”电,就是指消耗了多少千瓦小时的电能。

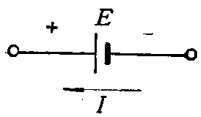
若用电设备的电阻 R 为已知,将 $U=IR$ 或 $I=\frac{U}{R}$ 代入到式(1.4-3)还可得到

$$P=UI=I^2R \quad (1.4-4)$$

$$P=UI=\frac{U^2}{R} \quad (1.4-5)$$

式(1.4-3)、(1.4-4)和(1.4-5)都可用来计算电阻 R 上的功率。

需要注意的是,用式(1.4-3)以及(1.4-4)、(1.4-5)计算功率时,其电流电压的正方向应一致(如图 1.4-1 所示),即电流从高电位端流向低电位端,这时电场力作功,因而功率 P 可称之为电阻 R 吸收的功率或消耗的功率。如果电流 I 是从低电位端流向高电位端(电源就是这种情形),如图 1.4-2 所示。很



显然,这时不是电场力在作功(因电场力只能使正电荷由高电位端移向低电位端),因而用它两端的电压 E 与通过它的电流 I 计算得的功率

$$P=EI \quad (1.4-6)$$

不是该装置消耗的功率,而是它产生的功率或发出的功率。

二、电气设备的额定值

电流通过导体就会使它发热,这种现象称为电流的热效应。这些热能是通过电流作功由电能转换而来的。由于 1 焦耳的功相当于 0.239 卡的热量,故由式(1.4-1)和(1.4-3)可得,在一段时间 t 内,电阻 R 产生的热量

$$Q=0.239 I^2 R t \quad (1.4-7)$$

式(1.4-7)称为焦耳-楞次定律。式中 Q 、 I 、 R 、 t 的单位分别是卡、安、欧、秒。

电流的热效应用途很广,利用它可制成电炉、电烙铁等电热器,电灯就是利用电流的热效应使灯丝达到高温而发光的;但也有它不利的一面,通电的导线会由于电流的热效应而温度升高,温度过高会加速绝缘材料的老化变质(如橡皮硬化,绝缘纸烧焦等),从而引起漏电,严重时甚至会烧毁电气设备。因此各种电气设备,为了安全运行,都有一定的功率限额、电压限额、电流限额,称为这些设备的额定功率、额定电压、额定电流。在使用时,不能超过这些额定值,否则会损坏设备。由于功率、电压和电流有一定的关系,所以在给定额定值时可以省略几项,例如电灯泡、电烙铁等通常只给出其额定电压和额定功率(例如 220V, 40W),固定电阻器除阻值外,只给出额定功率(如 1W、 $\frac{1}{2}$ W、 $\frac{1}{4}$ W、 $\frac{1}{8}$ W 等)。各种电气设备的额定值通常都标明在产品上。

导线通过电流要发热,为了避免过热,对于各种导线规定了允许电流,这可以从电工手册中查到。表 1-2 列出了部分铜芯和铝芯塑料绝缘导线和橡皮绝缘导线在室内明线敷设时的允许电流值,可供参考。

导体中通过电流过大,导体会由于过热而熔断,利用电流的热效应可制成熔断器作为电气设备的保护装置。当线路中由于某种原因电流过大时,熔丝最先熔断,迅速切断电路,使电气设备得到保护,所以熔丝也叫保险丝。