第 1 章　渔船电子、电气基础

现实生活中，我们经常听到或说起有关电的名词、术语，也经常有很多用电方面的困惑。这些名词、术语究竟是怎样定义的？它们之间有什么关系？是什么因素导致电压的高低、电流的大小？为什么会发生由用电引发的火灾？为什么家里几个月没人住，还会产生电费？很多经常听到的，看似简单，却不容易解释清楚的问题，通过本章的学习都会有明确的答案。

1.1　直流电的基础知识

1.1.1　电学的基本物理量

1．电量

自然界中的物质都是由分子组成的，分子又是由原子组成的，而原子由带正电荷的原子核和一定数量的带负电荷的电子组成。在通常情况下，原子核所带的正电荷数等于核外电子所带的负电荷数，原子对外不显电性。但是，用一些办法，可使某一物体上的电子转移到另一种物体上。失去电子的物体带正电荷，得到电子的物体带负电荷。物体失去或得到的电子数量越多，物体所带的正、负电荷的数量也越多。

物体所带电荷数量的多少用电量来表示。电量是一个物理量，它的单位是库仑，用字母 C 表示。1C 的电量相当于物体失去或得到 6.25×1018 个电子所带的电荷总量。

2．电流

电荷的定向移动形成电流。电流既有大小，也有方向。

（1）电流的方向

人们规定正电荷定向移动的方向为电流的方向。在金属导体中，电流是电子在导体内电场的作用下定向移动的结果，电子流动的方向是负电荷的移动方向，与正电荷的移动方向相反，所以金属导体中电流的方向与电子流动的方向相反，如图 1-1-1 所示。

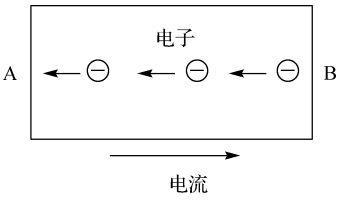


图 1-1-1　金属导体中的电流方向

（2）电流的大小

电学中用电流强度来衡量电流的大小。电流强度就是 ls 内通过导体截面的电量。电流强度用字母 I 表示，计算公式如下：

$$I=\frac{Q}{t} \qquad (1\text{-}1\text{-}1)$$

式中，I ——电流强度，单位为安培（A），简称安；

Q ——在 t 内通过导体截面的电量，单位为库仑（C）；

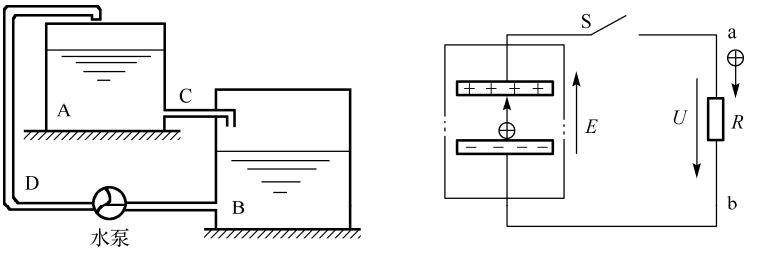
t ——时间，单位为秒（s）。

实际使用时，人们把电流强度简称为电流。如果 1s 内通过导体截面的电量为 1C，则该电流的电流强度为 1A，即电流为 1A。电流的单位除安培外，还有千安（kA）、毫安（mA）和微安（μA），它们之间的关系为

$$1\text{kA}=10^3\text{A}\ ;\ \ 1\text{A}=10^3\text{mA}\ ;\ \ 1\text{mA}=10^3\mu\text{A}$$

3．电压

为了理解电荷在导体中定向移动而形成电流的原因，我们对照图 1-1-2(a)所示水流的形成来解释。



(a) 水流的形成　　(b) 电流的形成

图 1-1-2　水流和电流形成

由图 1-1-2(a)可以看到，水由 A 槽经 C 管向 B 槽流去。水之所以能在 C 管中定向移动，是由于 A 槽水位高、B 槽水位低导致的——A、B 两槽之间的水位差即水压，是形成水流的原因。与此相似，当图 1-1-2(b)中的开关 S 闭合后，电路中就有电流。由于电源的正极电位高，负极电位低，两个极间的电位差（电压）使正电荷从正极出发，经过负载 R 移向负极形成电流。所以，电压是自由电荷发生定向移动形成电流的原因。在电路中，电场力把单位正电荷由高电位 a 点移向低电位 b 点所做的功称为两点间的电压，用 U_{ab} 表示。所以电压是 a 与 b 两点间的电位差，是衡量电场力做功本领大小的物理量。

电压用字母 U 表示，单位为伏特，电场力将 1C 电荷从 a 点移到 b 点所做的功为 1 焦耳（J），则 a、b 间的电压值就是 1 伏特，伏特简称伏，用字母 V 表示。常用的电压单位还有千伏（kV）、毫伏（mV）等。它们之间的关系为

$$1kV=10^3V；1V=10^3mV$$

电压与电流相似，不仅有大小，而且有方向。对于负载来说，电流流入端为正端，电流流出端为负端。电压的方向是由正端指向负端，也就是说，负载中电压的实际方向与电流方向一致。在电路图中，用带箭头的细实线表示电压的方向。

4．电动势、电源

在图 1-1-2(a)中，为使水在 C 管中持续不断地流动，必须用水泵把 B 槽中的水不断地泵入 A 槽，以维持两槽间的固定水位差，也就是要保证 C 管两端有一定的水压。在图 1-1-2(b)中，电源与水泵的作用相似，它把正电荷由电源的负极移到正极，以维持正、负极间的电位差，即电路中有一定的电压使正电荷在电路中持续不断地流动。

电源是利用非电力把正电荷由负极移到正极的，它在电路中将其他形式的能转换成电能。电动势就是衡量电源能量转换本领的物理量，用字母 E 表示，它的单位也是伏特（V）。

电源的电动势只存在于电源内部。人们规定电动势的方向在电源内部由负极指向正极。在电路中也用带箭头的细实线表示电动势的方向，如图 1-1-2(b)所示。当电源两端不接负载时，电源的开路电压等于电源的电动势，但二者方向相反。

生活中可以用测量电源端电压的方法来判断电源的状态。例如，测得工作电路中两节 5 号电池的端电压为 2.8V，说明电池电量比较充足。

5．电阻

将导体对电流的阻碍作用称为电阻，用 R 表示。电阻的单位为欧姆，简称欧，用字母Ω表示。如果导体两端的电压为 1V，通过的电流为 1A，则该导体的电阻就是1Ω。

常用的电阻单位还有千欧（kΩ）、兆欧（MΩ），它们之间的关系为

$$1k\Omega=10^3\ \Omega；\ 1M\Omega=10^3k\Omega$$

应当强调的是：电阻是导体中客观存在的，它与导体两端的电压变化情况无关，即使没有电压，导体中仍然有电阻存在。实验证明，当温度一定时，导体电阻只与导体材料及导体的几何尺寸有关。对于材质均匀、长度为 L、截面积为 S 的导体，其电阻大小可用式（1-1-2）表示：

$$R=\rho\frac{L}{S} \qquad (1\text{-}1\text{-}2)$$

式中，R——导体电阻，单位为欧（Ω）；

L——导体长度，单位为米（m）；

S——导体截面积，单位为平方毫米（mm^2）；

ρ——电阻率，单位为欧·米（Ω·m）。

电阻率是与材料性质有关的物理量。电阻率的大小等于长度为 1m、截面积为$1mm^2$ 的导体在一定温度下的电阻值，其单位为欧·米（Ω·m）。例如，铜的电阻率为 $1.7\times10^{-8}\ \Omega\cdot m$，就是指长为 1m、截面积为 $1mm^2$ 的铜线的电阻为 $1.7\times10^{-8}\ \Omega$。几种常用材料在 20 ℃时的电阻率如表 1-1-1 所示。

从表中可知，铜和铝的电阻率较小，是应用极为广泛的导电材料。以前，由于我国的铝矿藏量丰富，价格低廉，因此常用铝线作输电线。但铜线有更好的电气特性，如强度高、电阻率小，现在铜制线材被广泛应用。电动机、变压器的绕组一般都用铜材。

表 1-1-1 几种常用材料在 20℃时的电阻率

材 料 名 称	电阻率（Ω·m ）
银	1.6×10^{-8}
铜	1.7×10^{-8}
铝	2.9×10^{-8}
钨	5.3×10^{-8}
铁	1.0×10^{-7}
康铜	5.0×10^{-7}
锰铜	4.4×10^{-7}
铝铬铁电阻丝	1.2×10^{-6}

6．电功、电功率

电流通过用电器时，用电器将电能转换成其他形式的能，如热能、光能和机械能等。电能转换成其他形式的能的过程，称为电流做功的过程，所做的功称为电功，用字母 W 表示。电流通过用电器所做的功与用电器的端电压、流过的电流、所用的时间和电阻存在以下关系：

$$\begin{cases} W = UIt \\ W = I^2Rt \\ W = \left|\dfrac{U^2}{R}\right|t \end{cases} \tag{1-1-3}$$

如果在式（1-1-3）中，电压单位为伏，电流单位为安，电阻单位为欧，时间单位为秒，则电功的单位就是焦耳，简称焦，用字母 J 表示。

电流在单位时间内通过用电器所做的功称为电功率，用 P 表示。其数学表达式为

$$P = \frac{W}{t} \tag{1-1-4}$$

将式（1-1-3）代入式（1-1-4）后得到：

$$\begin{cases} P = \dfrac{U^2}{R} \\ P = UI \\ P = I^2R \end{cases} \tag{1-1-5}$$

若在式（1-1-4）中，电功单位为焦耳，时间单位为秒，则电功率的单位就是焦耳/秒。焦耳/秒又称为瓦特，简称瓦，用字母 W 表示。常用的电功率单位还有千瓦（kW）、毫瓦（mW）等。它们之间的关系为

$$1\text{kW}=10^3\text{W}；\ 1\text{W}=10^3\text{mW}$$

由式（1-1-5）可以得出如下结论。

（1）当用电器的电阻一定时，电功率与电流的平方或电压的平方成正比。若通过用电器的电流是原来电流的 2 倍，则电功率是原电功率的 4 倍；若加在用电器两端的电压是原电压的 2 倍，则电功率是原电功率的 4 倍。

（2）当流过用电器的电流一定时，电功率与电阻值成正比。对于串联电阻电路，流经各个电阻的电流是相同的，串联电阻的总功率与各个电阻的电阻值之和成正比。

（3）当加在用电器两端的电压一定时，电功率与电阻值成反比。对于并联电阻电路，各个电阻两端的电压相等，各个电阻的电功率与各电阻的阻值成反比。

在实际工作中，电功的单位常用千瓦 • 小时（kW·h）表示，也称为度。1 千瓦 • 小时是 1 度，它表示功率为 1 千瓦的用电器 1 小时所消耗的电能，即

$$1\text{kW·h}=1\text{kW}\times1\text{h}=3.6\times10^6\text{J}$$

【例题 1】 一台 42 英寸（1 英寸＝2.54 厘米）等离子电视机的功率约为 300W，平均每天开机 3 小时，若每度电的电费为 0.48 元，问一年（以 365 天计算）要交纳多少电费？

解

电视机的功率 $P=300\text{W}=0.3\text{kW}$

电视机一年开机的时间 $t=3\times365=1095\text{h}$

电视机一年消耗的电能 $W=Pt=0.3\times1095=328.5\text{kW·h}$

一年的电费为 328.5×0.48＝157.68 元

想一想　现在的电器在不工作时经常是通电的（待机状态），此时消耗的电功率（功耗）很低，一般不超过 10W（可估算为 5W）。假设家中有空调、电视机、DVD 播放器、家庭影院功放、计算机主机、计算机显示器，如果这些电器长期处在待机状态，它们一年要消耗多少电能？有没有其他问题？

7．电流的热效应

电流通过导体使导体发热的现象称为电流的热效应。电流的热效应是电流通过导体时电能转换成热能的效应。

电流通过导体产生的热量，用焦耳–楞次定律表示如下：

$$Q=I^2Rt \qquad (1\text{-}1\text{-}6)$$

式中，Q——热量，单位为焦耳（J）；

I——通过导体的电流，单位为安培（A）；

R——导体电阻，单位为欧姆（Ω）；

t——导体通过电流的时间，单位为秒（s）。

焦耳–楞次定律的物理意义是：电流通过导体所产生的热量与电流强度的平方、导体的电阻及通电时间成正比。

在生产和生活中，应用电流热效应可以制作各种电器，如白炽灯、电烙铁、电烤箱、熔断器、电吹风、电褥子等。但是电流的热效应也有其不利的一面，如电流的热效应能使电路中不需要发热的地方（如导线）发热，导致绝缘材料老化，甚至烧毁设备，导致火灾，是一种不容忽视的潜在祸因。

【例题 2】 已知通过一台电烤箱的电阻丝的电流为 5A，电烤箱每分钟可释放 1.2×10^6 J 的热量，求这台电烤箱的电功率及电阻丝工作时的电阻值。

解

根据式（1-1-4），电烤箱的电功率为

$$P=\frac{W}{t}=\frac{Q}{t}=\frac{1.2\times10^6}{60}20\text{kW}$$

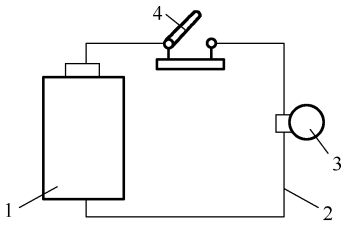
电阻丝工作时电阻值为

$$R=\frac{P}{I^2}=\frac{20\,000}{25}=800\Omega$$

1.1.2 电路

1．电路的组成和作用

电流流过的路径称为电路。它是由电源、负载、开关和连接导线 4 个基本部分组成的，如图 1-1-3 所示。电源是把非电能转换成电能并向外提供电能的装置。常见的电源有干电池、蓄电池和发电机等。负载是电路中用电器的总称，它将电能转换成其他形式的能。例如，电灯将电能转换成光能，电烙铁将电能转换成热能，电动机将电能转换成机械能。开关属于控制电器，用于控制电路的接通或断开。连接导线将电源和负载连接起来，担负着电能的传输和分配的任务。



1–电源；2–连接导线；3–负载；4–开关

图 1-1-3 电路的组成

电路的电流方向是由电源正极经负载流到电源负极，在电源内部，电流由负极流向正极，形成一个闭合通路。

2．电路图

在设计、安装或维修各种实际电路时，经常要画出表示电路连接情况的图。图 1-1-3 所示

的实物连接图，虽然直观，但很麻烦，因此表示电路连接情况时很少使用实物图，而是使用电路图。电路图就是用国家统一规定的符号来表示电路连接情况的图。图 1-1-4 是图 1-1-3 所示电路的电路图。表 1-1-2 给出了几种常用的电工符号。

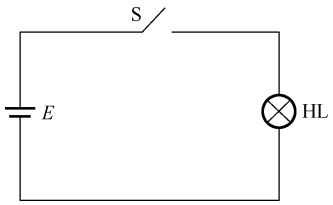


图 1-1-4　电路图

表 1-2　几种常用的电工符号

名　称	符　号	名　称	符　号
电池		电流表	
导线		电压表	
开关		熔断器	
电阻		电容	
照明灯		接地	

3．电路的三种状态

电路有三种状态：通路、开路、短路。

通路是指电路处处接通，也称为闭合电路，简称闭路。只有在通路的情况下，电路才有正常的工作电流。开路是指电路中某处断开，没有形成通路。开路也称为断路，此时电路中没有电流。短路是指电源或负载两端被导线连接在一起，分别称为电源短路和负载短路。电源短路时，电源提供的电流要比通路时提供的电流大很多倍，通常是有害的，也是非常危险的，所以一般不允许电源短路。

1.1.3　欧姆定律

1．一段电阻电路的欧姆定律

所谓一段电阻电路是指不包括电源在内的外电路，如图 1-1-5 所示。实验证明，一段电阻电路的欧姆定律为，流过导体的电流强度与这段导体两端的电压成正比，与这段导体的电阻成反比。其数学表达式为

$$I=\frac{U}{R} \tag{1-1-7}$$

式中，I——导体中的电流（A）；

U——导体两端的电压（V）；

R——导体的电阻（Ω）。

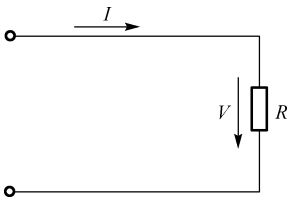


图 1-1-5　一段电阻电路

在式（1-1-7）中，已知其中两个量，可以求出第三个未知量；式（1-1-7）又可写成另外两种形式。

（1）已知电流、电阻，求电压：

$$U = IR \tag{1-1-8}$$

（2）已知电压、电流，求电阻：

$$R = \frac{U}{I} \tag{1-1-9}$$

【例题 3】 一台直流电动机励磁绕组在 220V 电压的作用下，通过绕组的电流为 0.427A，求绕组的电阻。

解

已知电压 $U = 220\text{V}$，电流 $I = 0.427\text{A}$，由式（1-1-9）得

$$R = \frac{U}{I} = \frac{220}{0.427} = 515.2\Omega$$

2．全电路欧姆定律

全电路是指含有电源的闭合电路。全电路是由各段电路连接成的闭合电路。如图 1-1-6 所示，电路包括电源内部电路和电源外部电路，电源内部电路简称内电路，电源外部电路简称外电路。在全电路中，电源电动势 E、电源内电阻 r、外电路电阻 R 和电路电流 I 的关系为

$$I = \frac{E}{R + r} \tag{1-1-10}$$

式中，I——电路电流（A）；

E——电源电动势（V）；

R——外电路电阻（Ω）；

r——电源内电阻（Ω）。

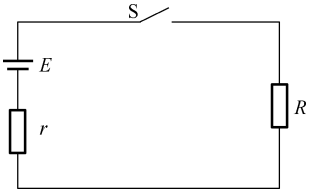


图 1-1-6　简单的全电路

式（1-1-10）即为全电路欧姆定律。该定律说明电路中的电流强度与电源电动势 E 成正比，与整个电路的电阻 $R+r$ 成反比。

将式（1-1-10）变换后，得到

$$E = IR + Ir = U + Ir \qquad (1\text{-}1\text{-}11)$$

式中，U ——外电路电压；

Ir ——内电路电压（也称电源内阻电压）。

外电路电压是指电路接通时电源两端的电压，又称为路端电压，简称端电压。这样，式（1-1-11）的含义又可表述为：电源电动势在数值上等于闭合回路的各部分电压之和。根据全电路欧姆定律，研究全电路处于三种状态时，全电路中电压与电流的关系如下。

（1）当全电路处于通路状态时，由式（1-1-11）可以得出端电压为

$$U = E - Ir$$

由上式可知，随着电流的增大，外电路电压减小。电源内阻越大，外电路电压减小得越多。当电路中有直流负载时需要恒定电压供电，所以总是希望电源内阻越小越好。

（2）当全电路处于断路状态时，相当于外电路电阻值趋于无穷大，此时电路电流为零。开路时，内电路电阻电压为零，外电路电压等于电源电动势。

（3）当全电路处于短路状态时，外电路电阻值趋近于零，此时电路电流称为短路电流。由于电源内阻很小，所以短路电流很大。短路时外电路电压为零，内电路电阻电压等于电源电动势。

全电路处于三种状态时，电路中电压与电流的关系如表 1-1-3 所示。通常电源电动势和内阻在短时间内基本不变，且电源内阻又非常小，所以可近似认为电源的端电压等于电源电动势。今后不特别指出电源内阻时，就表示其阻值很小，可忽略不计。但对于电池来说，其内阻随电池使用时间延长而增大。当电池内阻增大到一定值时，电池的电动势就不能使负载正常工作了。如旧电池开路时两端的电压并不低，但装在收音机里，却不能使收音机发声，这就是由电池内阻增大所致。

表 1-1-3　电路中电压与电流的关系

电路状态	负载电阻	电路电流	外电路电压
通路	$R=$常数	$I=\dfrac{E}{R+r}$	$U=E-Ir$
开路	$R\to\infty$	$I=0$	$U=E$
短路	$R\to 0$	$I=\dfrac{E}{r}$	$U=0$

【例题 4】 如图 1-1-6 所示的电路，电源电动势 $E=24\text{V}$，电源内阻 $r=4\,\Omega$，负载电阻 $R=20\,\Omega$。求电路中的电流、电源的端电压、负载电压和电源内阻电压。

解

根据式（1-1-10），电路中的电流

$$I=\frac{E}{R+r}=\frac{24}{20+4}=1\text{A}$$

根据式（1-1-11），电路中电源的端电压

$$U=E-Ir=24-1\times 4=20\text{V}$$

根据式（1-1-8），电路中的负载电压

$$U=IR=1\times 20=20\text{V}$$

根据式（1-1-8），电路中电源内阻电压

$$U_r=Ir=1\times 4=4\text{V}$$

1.1.4 电阻的串联、并联电路

1．电阻的串联电路

在一段电路上，将几个电阻首尾依次相连所构成的一个没有分支的电路，称为电阻的串联电路，如图 1-1-7(a)所示。图 1-1-7(b)是图 1-1-7(a)的等效电路。电阻的串联电路有以下特点。

（1）串联电路中流过各个电阻的电流都相等，即

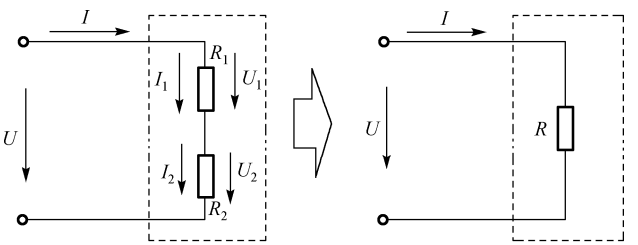
$$I=I_1=I_2=I_3=\cdots=I_n \qquad (1\text{-}1\text{-}12)$$

（2）串联电路两端的总电压等于各个电阻两端的电压之和，即

$$U=U_1+U_2+\cdots+U_n \qquad (1\text{-}1\text{-}13)$$

（3）串联电路的总电阻（即等效电阻）等于各串联电阻的阻值之和，即

$$R=R_1+R_2+\cdots+R_n \qquad (1\text{-}1\text{-}14)$$



(a) 电阻的串联电路　　(b) 等效电路

图 1-1-7　电阻的串联电路及等效电路

根据欧姆定律有 $U_1 = IR_1$，$U_2 = IR_2$，…，$U = IR$，可以得出

$$\frac{U_1}{R_1} = \frac{U_2}{R_2} = \cdots \frac{U}{R} \tag{1-1-15a}$$

或者

$$\frac{U_1}{U} = \frac{R_1}{R}，\quad \frac{U_2}{U} = \frac{R_2}{R}$$

上式表明，在串联电路中，电阻的阻值越大，该电阻所分配到的电压越大；反之，电压越小。即电阻上的电压分配与电阻的阻值成正比。该结论是电阻串联电路中最重要的结论，用途极其广泛。例如，用串联电阻的方法来扩大电压表的量程。

在如图 1-1-7(a)所示的电路中，将 $R = R_1 + R_2$ 代入式（1-1-15a）中，有

$$\begin{cases} U_1 = \dfrac{R_1}{R_1 + R_2} U \\ U_2 = \dfrac{R_2}{R_1 + R_2} U \end{cases} \tag{1-1-15b}$$

利用式（1-1-15b）可以直接计算出每个电阻从总电压中分得的电压值，习惯上把这两个公式称为分压公式。

电阻串联的应用极为广泛，主要有以下几种。

（1）用几个电阻串联来获得阻值较大的电阻。

（2）用串联电阻组成分压器，使用同一电源获得几种不同的电压。如图 1-1-8 所示，由 R_1～R_4 组成的串联电路，使用同一电源，可以输出 4 种不同数值的电压。

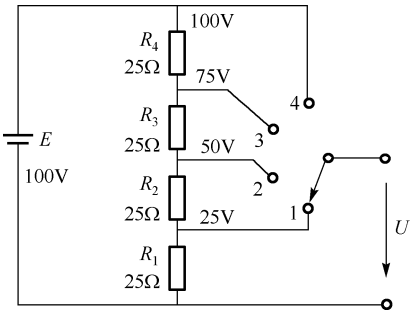


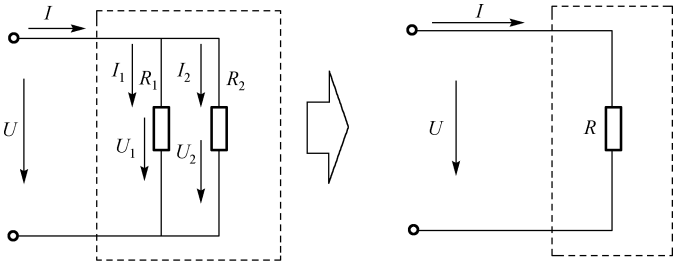
图 1-1-8　电阻分压器

（3）当负载的额定电压（标准工作电压值）低于电源电压时，采用电阻与负载串联的方法，使电源的部分电压分配到串联电阻上，以满足负载正常使用的额定电压值。例如，一个指示灯的额定电压为 6V，电阻为 6Ω，若将它接在 12V 电源上，则必须串联一个阻值为 6Ω 的电阻，指示灯才能正常工作。

（4）用电阻串联的方法来限制、调节电路中的电流。在电工测量中，普遍用电阻串联法扩大电压表的量程。

2．电阻的并联电路

将两个或两个以上的电阻两端分别接在电路中相同的两个节点之间，这种连接方式称为电阻的并联电路。如图 1-1-9(a)所示是电阻的并联电路，图 1-1-9(b)是图 1-1-9(a)的等效电路。



(a) 电阻的并联电路　　(b) 等效电路

图 1-1-9　电阻的并联电路及等效电路

电阻的并联电路有如下特点。

（1）并联电路中各个支路两端的电压相等，即

$$U = U_1 = U_2 = \cdots = U_n \tag{1-1-16}$$

（2）并联电路中总的电流等于各支路中的电流之和，即

$$I = I_1 + I_2 + \cdots + I_n \tag{1-1-17}$$

（3）并联电路的总电阻（即等效电阻）的倒数等于各并联电阻的倒数之和，即

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots + \frac{1}{R_n} \tag{1-1-18}$$

若两个电阻并联，则根据式（1-1-18）可求得并联后的总电阻为

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \tag{1-1-19}$$

根据式（1-1-l6）及欧姆定律可以得出

$$\begin{cases} \dfrac{I_1}{I_n} = \dfrac{R_n}{R_1} \\ \dfrac{I}{I_n} = \dfrac{R_n}{R} \end{cases} \tag{1-1-20}$$

式（1-1-20）表明，在并联电路中，电阻的阻值越大，该电阻所分配到的电流越小；反之越大。即电阻上的电流分配与电阻的阻值成反比。这个结论是电阻并联电路特点的重要推论。

电阻并联的应用也十分广泛，主要有以下几种。

（1）并联电阻的总阻值小于并联电路中的任意一个电阻阻值，因此，可以用电阻并联的方法来获得阻值较小的电阻。

（2）由于并联电阻各个支路两端电压相等，因此，工作电压相同的负载可以并联使用。任何一个负载的工作状态既不受其他负载的影响，也不影响其他负载。在并联电路中，负载的个数增加，电路的总电阻减小，电流增大，负载从电源取用的电能增多，负载变重；负载个数减少，电路的总电阻增大，电流减小，负载从电源取用的电能减少，负载变轻。因此，人们可以根据工作需要启动或停止并联使用的负载。

（3）在电工测量中，应用电阻并联的方法组成分流器，用于扩大电流表的量程。

1.2　交流电的基础知识

18 世纪中叶，瑞士数学家欧拉在前人研究的基础上，取得了非常多的研究成果，共写下了 886 本书籍和论文，其中分析、代数、数论占 40%，几何占 18%，物理和力学占 28%，天文学占 11%，弹道学、航海学、建筑学等占 3%。数学家拉格朗日、拉普拉斯都把他当作导师。欧拉首次提出很多现在还在使用的基本概念，如 sin、cos、tan、Δx、$f(x)$。

欧拉提出的正弦函数在当今的电气技术中有广泛的应用。现如今几乎到处都能找到以正弦方式表示的电能。

1.2.1　正弦交流电的产生

1．正弦交流电的特点

1.1 节直流电路中所讨论的直流电，其电流及电压、电磁势的大小和方向是不随时间变化的。但是在生产实际中，除直流电外，还广泛地应用交流电。交流电的电流及电压、电动势的大小和方向是随时间的变化而变化的。交变电流、交变电压和交变电动势统称为交流电。通常将交流电分为正弦交流电和非正弦交流电两大类。正弦交流电是指电流及电压、电动势随时间按正弦规律变化。

人们经常用图形表示电流及电压、电动势随时间变化的规律，这种图形称为波形图，如图 1-2-1 所示。

图中横坐标表示时间，纵坐标表示不同时刻的交流量（电流、电压、电动势）值。从如图 1-2-1(b)所示的波形图中可以看出，正弦交流电（如无特别说明都简称交流电）具有以下特点。

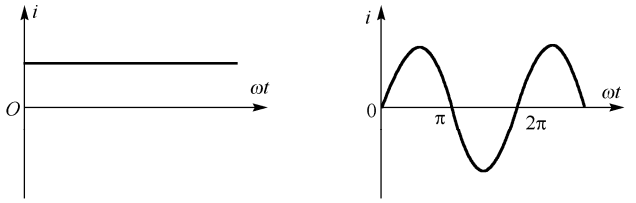
（1）变化的瞬时性。正弦交流电的大小和方向时时刻刻都在变化。

（2）变化的周期性。正弦交流电每隔一定时间又做重复的变化。

（3）变化的规律性。正弦交流电是随着时间按正弦规律变化的。

与直流电相比，正弦交流电更便于远距离传输和分配，且在使用时，交流发电机的结构

简单、运行可靠、维修方便、节省材料、具有更低的电磁干扰。因此，正弦交流电在工农业生产及日常生活中有着广泛的应用。



(a) 直流电波形图　　(b) 正弦交流电波形图

图 1-2-1　直流电及正弦交流电波形图

2．正弦交流电的产生

正弦交流电是由交流发电机产生的。图 1-2-2(a)所示的是最简单的交流发电机，它由定子和转子组成。定子由 N、S 两个固定磁极组成，转子是一个可以转动的钢质圆柱体，其上紧绕着一匝导线。导线两端分别接到两个相互绝缘的铜环上，铜环与连接外电路的电枢相接触。

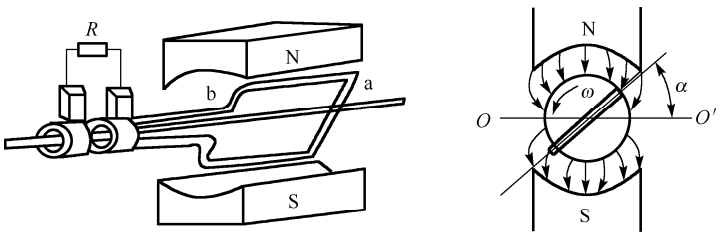
当用原动机（如水轮机或汽轮机）拖动电枢转动时，由于运动导线切割磁感应线，线圈中产生感应电动势。为了得到正弦波形的感应电动势，应采用特定形式的磁极，使磁极与电枢之间的空隙中的磁感应强度按以下规律分布：

① 磁感应线垂直于电枢表面；

② 磁感应强度 B 在电枢表面按正弦规律分布。

如图 1-2-2(b)所示，在磁极中心位置处的磁感应强度最大，用 B_{m} 表示；在磁性分界面处的磁感应强度为零。磁感应强度等于零的平面称为中性面，如图 1-2-2(b)中的 OO' 水平面。如线圈所在位置的平面与中性面成 α 角，此处电枢表面的磁感应强度为

$$B = B_{\mathrm{m}} \sin\alpha \qquad (1\text{-}2\text{-}1)$$



(a) 交流发电机　　(b) 磁感应强度的大小

图 1-2-2　最简单的交流发电机示意图

当电枢在磁场中从中性面开始，以角速度 ω 匀速逆时针转动时，单匝线圈的 a、b 边在磁场内切割磁感应线产生感应电动势。单匝线圈中产生的磁感应电动势为

$$e = 2Bl\upsilon = 2B_{\mathrm{m}}l\upsilon\sin\alpha \tag{1-2-2}$$

如果线圈有 N 匝，则总的感应电动势为

$$e = 2NB_{\mathrm{m}}l\upsilon\sin\alpha$$

当 $\alpha = 90°$ 或 $\alpha = 270°$ 时，感应电动势具有最大值，即

$$E_{\mathrm{m}} = 2NB_{\mathrm{m}}l\upsilon \tag{1-2-3}$$

式中，E_{m} ——感应电动势的最大值（V）；

N ——线圈的匝数；

B_{m} ——最大磁感应强度（$\mathrm{Wb/m^2}$）；

l ——线圈的有效长度（m）；

υ ——导线的运动速度（m/s）。

考虑单匝线圈的情况，将式（1-2-3）代入式（1-2-2）后，得

$$e = E_{\mathrm{m}}\sin\alpha \tag{1-2-4}$$

由于电枢在磁场中以角速度 ω 做匀速转动，在任意时刻线圈平面与中性面的夹角 α 等于角速度 ω 与时间 t 的乘积，即

$$\alpha = \omega t$$

因此，感应电动势的数学式又可以写成

$$e = E_{\mathrm{m}}\sin\omega t \tag{1-2-5}$$

这样就把感应电动势随角度变化转换为随时间变化，为今后研究交流电正弦量提供了便利。同理，交流电压、交流电流可表示为

$$\begin{cases} u = U_{\mathrm{m}}\sin\omega t \\ i = I_{\mathrm{m}}\sin\omega t \end{cases} \tag{1-2-6}$$

1.2.2　正弦交流电的三要素

1．周期、频率、角频率

由如图 1-2-1(b)所示的正弦交流电波形图可以看出，电流从零开始随时间逐渐增大至最大值，然后逐渐减小到零；接着，由零开始反向增大至最大值，然后再减小到零。这样，交流电流就变化一次。交流电就按照这样的规律做周而复始的变化，变化一次称为一周。交流电变化一周所需要的时间称为周期，用 T 表示，单位是秒（s），较小的单位有毫秒（ms）和微秒（μs）。它们之间的关系为

$$1\mathrm{s} = 10^3\mathrm{ms} = 10^6\mu\mathrm{s}$$

周期的长短表示交流电变化的快慢，周期越短，说明交流电变化一周所需的时间越短，交流电变化得越快；反之，交流电变化得越慢。

频率是指在 1s 内交流电变化的次数，用 f 表示，单位为赫兹（Hz），简称赫。当频率很高时，可以使用千赫（kHz）、兆赫（MHz）、吉赫（GHz）等。它们之间的关系为

$$1\text{kHz}=10^3\text{Hz}$$

$$1\text{MHz}=10^3\text{kHz}$$

$$1\text{GHz}=10^3\text{MHz}$$

频率和周期一样，是反映交流电变化快慢的物理量。它们之间的关系为

$$\begin{cases} f=\dfrac{1}{T} \\ T=\dfrac{1}{f} \end{cases} \tag{1-2-7}$$

我国农业生产及日常生活中使用的交流电标准频率为 50Hz。通常把 50Hz 的交流电称为工频交流电。

交流电变化的快慢除了可以用周期和频率表示，还可以用角频率表示。角频率就是交流电每秒钟变化的角度，用 ω 表示，单位是弧度/秒（rad/s）。

周期、频率和角频率的关系是

$$\omega=\frac{2\pi}{T}=2\pi f \tag{1-2-8}$$

2．瞬时值、最大值和有效值

正弦交流电（简称交流电）的电动势、电压和电流，在任意瞬间的数值称为交流电的瞬时值，分别用小写字母 e、u 和 i 表示。

最大的瞬时值称为最大值，也称为振幅或峰值。在波形图中，曲线的最高点对应的纵轴值即为最大值。分别用 E_m、U_m 和 I_m 表示电动势、电压和电流的最大值。瞬时值与最大值之间的关系为

$$\begin{cases} e=E_\text{m}\sin\omega t \\ u=U_\text{m}\sin\omega t \\ i=I_\text{m}\sin\omega t \end{cases} \tag{1-2-9}$$

由式（1-2-9）可知，交流电的大小和方向是随时间变化的，瞬时值在零与最大值之间变化，没有固定的数值。如果选用最大值，就夸大了交流电的做功能力，因为交流电在绝大部分时间内都比最大值要小，因此，不能随意用一个瞬时值来反映交流电的做功能力。这就需要选用一个数值，能等效地反映交流电做功的能力。为此，引入了交流电的有效值这一概念。

正弦交流电的有效值是这样定义的：如果某一交流电在时间 T 内通过电阻 R 所产生的热量与某一直流电在相同时间内通过同一电阻产生的热量相等，那么该交流电的有效值在数值上等于这个直流电的电流值，正弦交流电的电动势、电压、电流的有效值分别用字母 E，U 和 I 表示。通常所说的交流电的电动势、电压和电流的大小都是指它的有效值，交流电气设备铭牌上标注的额定值、交流电仪表所指示的数值也都是有效值。今后在谈到交流电的数值时，若无特殊注明，均为有效值。

有效值与最大值之间的关系为

$$\begin{cases} E = \dfrac{E_{\mathrm{m}}}{\sqrt{2}} = 0.707E_{\mathrm{m}} \\ U = \dfrac{U_{\mathrm{m}}}{\sqrt{2}} = 0.707U_{\mathrm{m}} \\ I = \dfrac{I_{\mathrm{m}}}{\sqrt{2}} = 0.707I_{\mathrm{m}} \end{cases} \tag{1-2-10}$$

3．相位、初相和相位差

如图 1-2-3 所示，两个相同的线圈 AX 和 BY 固定在同一个旋转轴上，它们相互垂直，以角速度 ω 逆时针旋转。在 AX 和 BY 线圈中产生的感应电动势分别为 e_1 和 e_2，如图 1-2-4 所示。

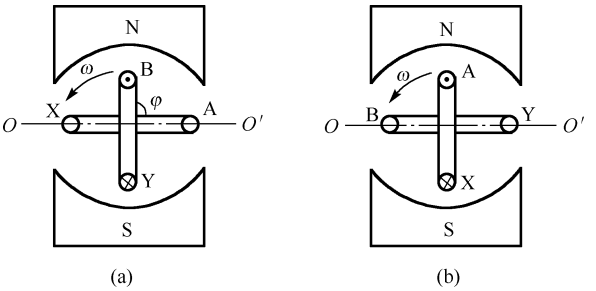


图 1-2-3　两个线圈中的电动势感应情况

当 $t=0$ 时，AX 线圈平面与中性面之间的夹角 $\varphi_1=0°$，BY 线圈平面与中性面之间的夹角 $\varphi_2=90°$。在任意时刻两个线圈的感应电动势分别为

$$\begin{aligned} e_1 &= E_{\mathrm{m}}\sin(\omega t+\varphi_1) \\ e_2 &= E_{\mathrm{m}}\sin(\omega t+\varphi_2) \end{aligned} \tag{1-2-11}$$

式中，$\omega t+\varphi_1$ 和 $\omega t+\varphi_2$ 表示交流电变化过程中与中性面的夹角，称为交流电的相位或相角，它决定了交流电在某一瞬间所处的状态。$t=0$ 时的相位称为初相位或初相，它是交流电在初始时刻的电角度，反映了交流电的初始值。例如，AX、BY 线圈的初相分别是 $\varphi_1=0°$、$\varphi_2=90°$。

在 $t=0$ 时，两个线圈的电动势分别为 $e_1=0$、$e_2=E_{\mathrm{m}}$。两个频率相同的交流电的相位之差称为相位差。令上述 e_1 的初相位 $\varphi_1=0°$，e_2 的初相位 $\varphi_2=90°$，则两个电动势的相位差为

$$\Delta\varphi=(\omega t+\varphi_2)-(\omega t+\varphi_1)=\varphi_2-\varphi_1=\frac{\pi}{2} \tag{1-2-12}$$

可见，相位差就是两个电动势的初相差。

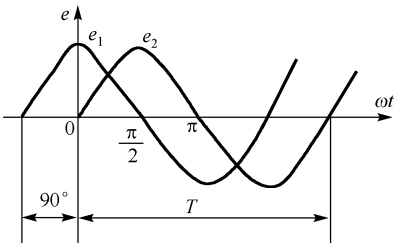


图 1-2-4　电动势波形图

由图 1-2-5 可以看出，初相分别为 φ_1 和 φ_2 的频率相同的两个电动势，其同向最大值不能在同一时刻获得，也就是说，e_1 比 e_2 超前 φ 角度达到最大值，或者说 e_2 比 e_1 滞后 φ 角度达到最大值。

综上所述，一个交流电变化的快慢用频率表示，其变化的幅度用最大值表示，其变化的起点用初相表示。

一旦交流电的频率、最大值和初相确定后，就可以准确地确定交流电随时间变化的规律。因此，频率、最大值和初相称为交流电的三要素。

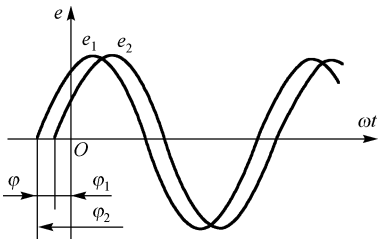


图 1-2-5　e_2 和 e_1 的相位差

【例题 1】 已知两正弦交流电 $e_1=100\sin(100\pi t+60°)$，$e_2=65\sin(100\pi t+30°)$，分别求 e_1、e_2 的最大值、频率、周期、相位、初相及相位差。

解

（1）振幅

$$E_{\mathrm{m1}}=100\mathrm{V}，\quad E_{\mathrm{m2}}=65\mathrm{V}$$

（2）频率

$$f_1 = f_2 = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{100\pi}{2\pi} = 50\text{Hz}$$

（3）周期

$$T_1 = T_2 = \frac{1}{f} = \frac{1}{50} = 0.02\text{s}$$

（4）相位

$$\varphi_1 = 100\pi t + 60^\circ$$
$$\varphi_2 = 100\pi t + 30^\circ$$

（5）初相

$$\varphi_1 = 60^\circ,\quad \varphi_2 = 30^\circ$$

（6）相位差

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = 60^\circ - 30^\circ = 30^\circ$$

1.2.3　正弦交流电的表示方法

正弦交流电的表示方法有三角函数式法和正弦曲线法两种。它们能真实地反映正弦交流电的瞬时值随时间的变化规律，同时也能完整地反映交流电的三要素。

1．三角函数式法

正弦交流电的电动势、电压和电流的三角函数式分别为

$$e = E_\text{m}\sin(\omega t + \varphi_\text{e})$$
$$u = U_\text{m}\sin(\omega t + \varphi_\text{u})$$
$$i = I_\text{m}\sin(\omega t + \varphi_\text{i})$$

若已知交流电的频率、最大值和初相，就可以用三角函数式来表示该电流，从而可以求出它在任一时刻的瞬时值。

【例题 2】 已知正弦交流电的频率 $f = 50\text{Hz}$，最大值 $U_\text{m} = 310\text{V}$，初相 $\varphi = 30^\circ$。求 $t = 1/300\text{s}$ 时的电压瞬时值。

解

电压的三角函数标准式为

$$u = U_\text{m}\sin(\omega t + \varphi_\text{u}) = U_\text{m}\sin(2\pi f t + \varphi_\text{u})$$

则其电压瞬时值表达式为

$$u = 310\sin(100\pi t + 30^\circ)$$

将 $t = 1/300\text{s}$ 代入上式，得

$$
\begin{aligned}
u &= 310\sin(100\pi t + 30^\circ) \\
&= 310\sin(100\times 180^\circ \times 1 \div 300 + 30^\circ) \\
&= 310\sin(60^\circ + 30^\circ) \\
&= 310\text{V}
\end{aligned}
$$

2．正弦曲线法（波形法）

正弦曲线法利用三角函数式相对应的正弦曲线来表示正弦交流电。

如图 1-2-6 所示，横坐标表示时间 t 或角度 ωt，纵坐标表示随时间变化的电动势瞬时值。由图可以看出，正弦交流电的初相 $\varphi=0$，e 的最大值为 E_m，周期为 T。用正弦曲线表示交流电的图也称为波形图。

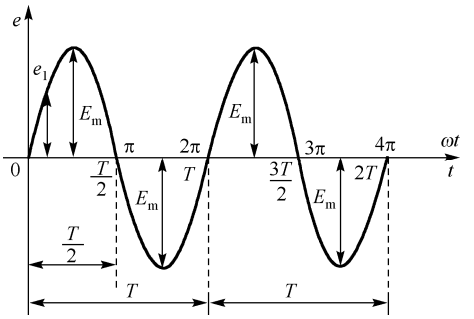


图 1-2-6　正弦曲线表示法

1.3　单相交流电路

在直流电路中，电路的参数只有电阻 R。而在交流电路中，电路的参数除了电阻 R，还有电感 L 和电容 C。它们不仅对电流有影响，而且对电压与电流的相位关系也有影响。因此，研究交流电路时，在确定电路中数量关系的同时，必须考虑电流与电压的相位关系，这是交流电路与直流电路的主要区别。本节只简单介绍纯电阻、纯电感、纯电容电路。

1.3.1　纯电阻电路

纯电阻电路是只有电阻而没有电感或电容的交流电路。如由白炽灯、电烙铁、电阻炉组成的交流电路都可以近似看成纯电阻电路，如图 1-3-1 所示。在纯电阻电路中，负载电阻对电流起阻碍作用。

加在电阻两端的正弦交流电压为 u，在电路中产生了交流电流 i，在纯电阻电路中，电压和电流的瞬时值之间的关系满足欧姆定律，即

$$i = u / R \qquad (1\text{-}3\text{-}1)$$

由于电阻值不随时间变化，因此电流与电压的变化是一致的，即电压为最大值时，电流