

电 工 学

上 册

上海交通大学

PDG

目 录

第一章 电路概念	1
1-1 对电的初步认识	1
1-2 电路的组成	3
1-3 电位、电动势、电流、电压和电阻	3
1-4 欧姆定律和克希荷夫定律	8
1-5 电能量和电功率	12
1-6 额定值	14
1-7 电阻的串联与并联	15
1-8 电容器和电容器的充电与放电	17
1-9 正弦交流电	20
1-10 三相正弦交流电	27
练习题	31
第二章 磁的基本知识	36
2-1 对磁的初步认识	36
2-2 电流的磁效应	40
2-3 磁场的基本物理量	42
2-4 铁磁材料与磁路概念	47
练习题	57
第三章 电磁基本规律及其应用	59
3-1 电磁力	59
3-2 电磁感应	61
3-3 自感与互感	67
3-4 变压器	71

3-5 电磁铁·····	86
练习题·····	93
第四章 半导体器件基本原理及应用·····	98
4-1 半导体器件的基本知识·····	98
4-2 $P-N$ 结·····	99
4-3 晶体二极管·····	102
4-4 晶体三极管·····	107
4-5 可控硅开关作用简介·····	121
练习题·····	129
第五章 交流电动机继电接触控制的基本知识·····	131
5-1 三相异步电动机的基本结构和接线方法·····	131
5-2 三相异步电动机的转动原理和铭牌·····	134
5-3 控制电器简介·····	141
5-4 电力拖动的简单控制线路·····	155
练习题·····	163

第一章 电路概念

1-1 对电的初步认识

电工技术在工农业生产、交通运输、国防建设和人民日常生活等方面的应用日益广泛。它对于国民经济各部门和科学技术的发展都起着极为重要的作用。毛主席教导我们：“我们不能走世界各国技术发展的老路，跟在别人后面一步一步地爬行。我们必须打破常规，尽量采用先进技术，在一个不太长的历史时期内，把我国建设成为一个社会主义的现代化的强国。”为此，我们要破除电的神秘论，要发扬自力更生、艰苦奋斗的革命精神，努力学习有关电的基本知识、基本规律，尽快掌握它在工程技术上的应用，为彻底改变我国“一穷二白”面貌，赶超世界先进水平作出贡献。

毛主席教导我们：“事物发展的根本原因，不是在事物的外部而是在事物的内部，在于事物内部的矛盾性。”要揭示电的本质，就必须从物质内部去找寻。

人们通过长期实践，认识到自然界存在着两种电荷，一种叫正电荷（或阳电，以“+”号表示），另一种叫负电荷（或阴电，以“-”号表示）。从实验知道，电荷间有相互作用，同种电荷相互排斥，异种电荷相互吸引。自然界一切物质（气体、液体和固体）都是由分子组成，分子又由原子组成，原子再由一个带正电荷的原子核和若干带负电荷的电子所组成。电子有规则地分层分布在原子核周围，并且不停地一面自旋一面受原

子核的吸引绕着原子核旋转。带电物体所带电荷的数量叫做**电量**。现代知道，自然界中的最小电量是电子的电量。在实用单位制中，电量的单位叫做**库仑**，简称**库**，它等于 625 亿亿个电子所带的电量。当各层电子的总电量与原子核的电量相等时，则对整个原子来说便呈现中性，也就是说，它不显现出带电状态。当原子失去一个或几个电子时，就显现出带正电，这种带正电的粒子叫做**正离子**。反之，当原子获得额外的电子时，就显现出带负电，这种带负电的粒子叫做**负离子**。人们在不断的实践中发现可以用许多方法把原子中的正负电荷分离开，从而显现出带电状态。例如：摩擦生电（用丝绸摩擦玻璃棒或用毛皮摩擦胶木棒都可以把正负电荷分开）；光电效应和热电效应（光线照射到某种金属表面时，或把金属加热时，都能使电子从金属表面发射出来）；以及借助化学反应（如干电池）或感应作用（静电感应与电磁感应）都可以使正负电荷分离，有的可以分别聚集到两个电极上。

在金属材料（如银、铜、铝等）的原子中，其外层电子因受原子核的吸引力较弱，在其它原子的影响下，它们有可能脱离原子核的吸引在金属中自由运动，这些电子叫做**自由电子**，这类物体容易导电，叫做**导体**。一些酸、碱和盐的水溶液中存在着可以自由移动的正负离子，所以它们也是容易导电的。大地、潮湿土壤和炭也都是导电的。有些材料（如胶木、有机玻璃、塑料等）其原子中的电子受原子核的吸引力较强，不容易脱离原子而自由运动，这类物体的导电性很差，叫做**绝缘体**。再如锗、硅、硒和氧化铜等材料，它们的导电性能介于绝缘体与导体之间，并且随着外界条件（如加热等）的改变其导电性能有显著的变化，这类物体叫做**半导体**。

1-2 电路的组成

电流所通过的路径叫做**电路**。最简单的电路是由电源、负载、联接导线（简称导线）和开关等按一定方式组成的。电源是将化学能或机械能等非电能转换成电能的设备，如电池、直流发电机等都是直流电源，交流发电机是交流电源，在电路中电源是提供电能的。负载就是用电的设备，电炉、电灯和电动机等都可以作为电路中的负载，它们把所接受的电能转换成热能、光能和机械能等其它形式的能量，以适应生活上或生产上的需要。电源和负载之间用导线联接起来用以使电源的电能传送到负载中去。开关用作控制电路的通断，当它闭合时可以作为导线的一部分。最简单的电路如图 1-1 所示，图中电源是电池。

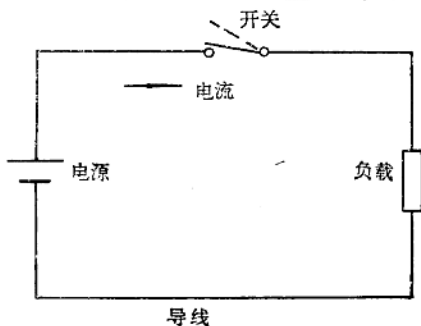


图 1-1 最简单的电路

1-3 电位、电动势、电流、电压和电阻

大家知道，在重力场中高处的位能高，低处的位能低。例如，高处的水位高，低处的水位低，高处与低处之间存在着水位差。习惯上规定海平面高度为零，通常选择它作为参考标准。与重力场中的位能相似，电场（电荷周围存在着的物质）中各点的**电位**也有高有低。通常以大地的电位规定为零（零电位），我们也选择它作为参考标准。物体带有正电荷时，它的

电位就比大地高（正电位），物体带有负电荷时，它的电位就比大地低（负电位）。电场中某点的电位就是该点与零电位点之间的电位差，它在数值上等于电场力（电场对于场内电荷的作用力）把单位正电荷从该点移到零电位点所做的功。由于零电位点是可以任意选择的，所以电位的数值只是相对的，它随着零电位点的不同而改变。电场中 a 点的电位用符号 U_a 表示。在实用单位制中，电位的单位是伏特，简称伏，伏也用字母 V 表示。

电源所提供的电能是由其它形式的非电的能量所转换而来的，那些非电的能量使电源中存在着一种外力，这种外力不断地使导体的中性原子或分子分离为正、负电荷并把它们推移到电源导体的两端，于是便形成了电源的正极和负极。在电路中电源正极的电位最高，负极的电位最低。

在电源中外力把单位正电荷从电源的负极移到正极所做的功，就是电源的**电动势**，用字母 E 表示，在实用单位制中，电动势的单位也是伏 (V)。在电源中电动势的方向是由负极指向正极，也就是，在电源中电动势的方向是从低电位指向高电位。

如果电路闭合，电场力驱使正电荷从电源正极通过负载向负极作有规律的定向运动便形成**电流**。它的大小（电流强度，用字母 I 表示）就是在单位时间内通过导线横截面的电量的多少。如用公式表达便是

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

式中 q 为 t 秒内通过导线横截面的电量。

在实用单位制中，每秒钟通过导线横截面的电量为 1 库仑时，则电流就是 1 安培，安培简称安，也用字母 A 表示。根据需要，电流也可用千安 (kA)、毫安 (mA) 或微安 (μA) 为

单位

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

在闭合电路中，电场力使单位正电荷从电源正极通过负载向负极移动时，必须付出能量而对正电荷做功，这就是电源两端的电压，用字母 U 表示，它也就是电源正负极两端之间的电位差。在电路中，电压的方向是由正极指向负极，也就是电压的方向是从高电位指向低电位。在实用单位制中，电压的单位也是伏 (V)。根据需要，电压也可用千伏 (kV)，毫伏 (mV)、微伏 (μV) 为单位。

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

当电路闭合时，电场力驱使正电荷通过负载，它所减少的能量，便转换成其它形式。由于电源中具有外力的作用，正负极上的电荷仍能不断得到补充。如果外力一旦消失，则正电荷由于电场力的作用立即在电源内部与负电荷中和而成为中性原子或分子，于是电源就不再具有正、负两极，不再显现带电状态。

导体(如导线等)一方面具有导电的能力，但另一方面它又有阻碍电流通过的作用，这种阻碍作用，叫做导体的电阻。用字母 R 或 r 表示，单位为欧姆，通常用符号 Ω 表示。

不同的金属导体具有不同的电阻。同一种导体的电阻与导体的长度 l 成正比，与导体的横截面积 S 成反比。可用下式表示：

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (1-2)$$

式中 ρ 是导体的电阻率，它表示某种物质制成的长 1 米，横截面积 1(毫米)² 的导体所具有的电阻。不同的导体， ρ 的大小不同(例如 $\rho_{Cu} = 0.0175 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ， $\rho_{Al} = 0.029 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)，同一导体 ρ 的大小与温度有关。 l 的单位为米， S 的单位为(毫米)²。在电子线路中，电阻常以千欧 ($k\Omega$) 或兆欧 ($M\Omega$) 为

单位。

$$1\text{ k}\Omega = 1000\ \Omega = 10^3\ \Omega; \quad 1\text{ M}\Omega = 1000000\ \Omega = 10^6\ \Omega$$

实验证明，在 $0^\circ \sim 100^\circ\text{C}$ 范围内金属材料的电阻变化可以近似地认为与温度的变化成正比即

$$R_2 = R_1 [1 + \alpha(t_2 - t_1)] \quad (1-3)$$

式中 R_1 、 R_2 分别为 t_1 和 t_2 时的电阻， α 叫做电阻温度系数，它是温度变化 1°C 时电阻变化的相对数值（例如 $\alpha_{\text{Cu}} = 0.0038/^\circ\text{C}$ ， $\alpha_{\text{Al}} = 0.0040/^\circ\text{C}$ ）。

例 1-1 图 1-2(a)、(b)，它们分别在负载的二端 b 点和 a 点接地。

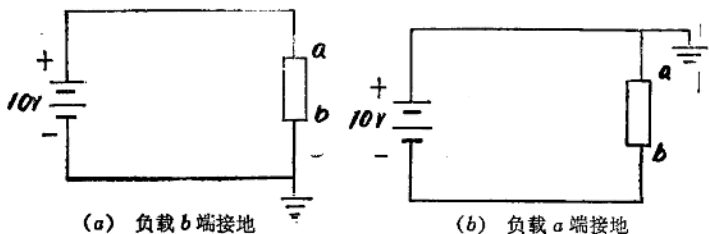


图 1-2 例 1-1 的电路图

- (1) 试分别分析负载的 a 点和 b 点的电位；
- (2) 分别计算 a 、 b 两点之间的电压。

解：(1) 在图 1-2(a) 中，由于 b 点与电源负极共同接地，它们均为零电位；由于 a 点与电源正极相联而同电位，所以 a 点电位为 10V 。即

$$U_a = 10\text{V}$$

$$U_b = 0\text{V}$$

在图 1-2(b) 中，由于 a 点接地，于是 a 点电位为零。电源正极与 a 点的电位将是 0V ；电源负极与 b 点的电位将是 -10V 。即

$$U_a = 0\text{V}$$

$$U_b = -10V$$

(2) 在图 1-2(a) 中, a 、 b 两点间的电压为 a 、 b 两点间的电位差 U_{ab} , 即

$$U = U_{ab} = U_a - U_b = 10V$$

在图 1-2(b) 中, a 、 b 两点间的电压同样也是 a 与 b 两点间的电位差 U_{ab} , 即

$$U = U_{ab} = U_a - U_b = 0 - (-10) = 10V。$$

从例 1-1 可知, 电路中的电位与接地参考点的位置有关, 所以电位的数值只具有相对的意义, 而电压与接地参考点的位置无关, 所以它的数值便具有绝对的意义。

例 1-2 若用直径为 2 mm 的锰铜丝绕制一只 1.46Ω 的电阻, 试求需用锰铜丝要多少长? (已知锰铜丝的 $\rho = 0.45 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ 。)

解: 已知 $\rho = 0.45 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$, $R = 1.46 \Omega$, 锰铜丝直径 D 为 2 mm, 则

$$S = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi \cdot 2^2}{4} = 3.14 \text{ mm}^2$$

由公式 (1-2) 得

$$l = \frac{RS}{\rho} = \frac{1.46 \times 3.14}{0.45} = 10.19 \text{ m}。$$

例 1-3 有一台电动机在运行前测得其铜质线圈的电阻为 4.2Ω , 当时室温为 25°C ; 运行了一段时间以后, 电动机的温度上升, 停止运行再测其线圈的电阻已增加为 4.6Ω , 求这时线圈的温度 t_2 ($\alpha_{Cu} = 0.0038/^\circ\text{C}$)

解: 已知 $R_1 = 4.2 \Omega$, $t_1 = 25^\circ\text{C}$, $R_2 = 4.6 \Omega$, $\alpha = 0.0038/^\circ\text{C}$ 。将这些数值代入 (1-3) 式中得:

$$R_2 = 4.6 = 4.2[1 + 0.0038(t_2 - 25)]$$

于是

$$t_2 = 50^\circ\text{C},$$

1-4 欧姆定律和克希荷夫定律

欧姆定律、克希荷夫定律都是电路的基本定律，这些定律虽然是用欧姆或克希荷夫的名字来命名，这是由于过去历史原因，我们不应理解为这个科学成就的功绩归之于他们个人的奋斗。毛主席教导我们：“人民，只有人民，才是创造世界历史的动力。”所以这些电路的基本定律，实际上是劳动人民大量实践的总结，是劳动人民智慧的结晶。

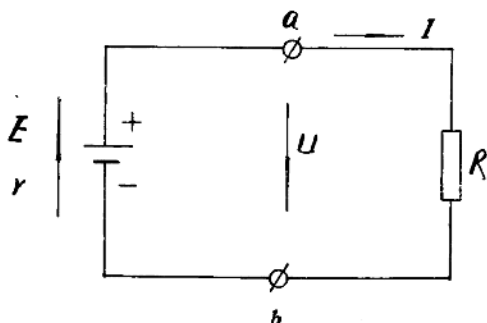


图 1-3 欧姆定律

实验证明：图 1-3 中 a 、 b 两端以右的一段电路中的电流 I 与这段电路两端的电压 U 成正比，而与这段电路的电阻 R 成反比。这就是一段电路欧姆定律。用公式表示：

$$I = \frac{U}{R} \quad (1-4a)$$

式中 U 的单位是伏 (V)， R 的单位是欧 (Ω)， I 的单位是安 (A)。(1-4a) 式可以写成以下的形式

$$U = IR \quad (1-4b)$$

上式表示，电流 I 通过电阻 R 所形成的电压降（又称电阻电压降），等于电流与电阻的乘积。

需要指出，图 1-3 中（或一般电路中）的各联接导线中的电阻都已考虑在负载电阻 R 中。

就图 1-3 整个电路来说，电流 I 与电源的电动势 E 成正比，而与电路中电阻的总值成反比。这就是全电路欧姆定律。用公式表示：

$$I = \frac{E}{R+r} \quad (1-5a)$$

式中 r 为电源的内电阻； $(R+r)$ 为电路中总电阻。单位都是欧 (Ω)。(1-5a) 式也可以写成以下形式

$$E = I(R+r) = U + U_n \quad (1-5b)$$

或
$$U = E - Ir = E - U_n \quad (1-5c)$$

式中 $U_n = Ir$ 表示电源内电阻 r 上所形成的内部电压降。 U 既是负载两端的电压，也是电源两端的电压，通常把它叫做端电压。

图 1-4 表示电源电压 U 与电流 I 在一定范围内变化时的外特性曲线。在电动势 E 与内电阻 r 不变时，如果负载电阻 R 减少，电流 I 增加，内部电压降要稍有增加，所以端电压就会小于电动势而略有下降。由于电源的内部电压降 U_n 与电流 I 成正比，所以电流在一定变化范围内，外特性曲线是一条直线。如果电路打开，这时叫开路，于是电流 I 等于零，那末端电压就等于电动势。

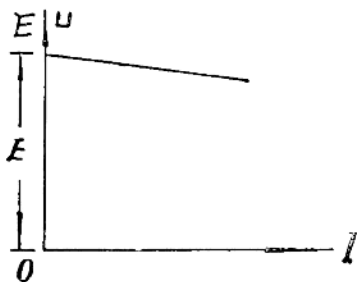


图 1-4 电源的外特性曲线

例 1-4 设在手电筒电路中，通过电珠的电流为 250 mA ，电珠两端的电压为 3 V ，求电珠的电阻。

解：已知 $U=3\text{ V}$ ， $I=250\text{ mA}=0.25\text{ A}$ 。

由欧姆定律得电珠的电阻为

$$R = \frac{U}{I} = \frac{3}{0.25} = 12\ \Omega$$

例 1-5 有一台电动机用两根导线与电源相联接，已知电源的电压为 240 V ，每根导线的电阻是 $0.58\ \Omega$ ，当电路中的电流为 20 A 时，求电动机两端的电压是多少？

解：已知 $I=20\text{ A}$ ，两根导线的总电阻 $R=2 \times 0.58=1.16\ \Omega$ ，电源电压 $U=240\text{ V}$

根据 (1-4b) 式得两根导线中总共电压降为

$$U' = IR = 20 \times 1.16 = 23.2\text{ V}$$

所以电动机两端的电压为

$$U'' = U - U' = 240 - 23.2 = 216.8\text{ V}$$

以上所讨论的是最简单的电路，而在生产上还会遇到复杂一些的电路，例如图 1-5，它表示两台 E_1 、 E_2 略有差异的直流

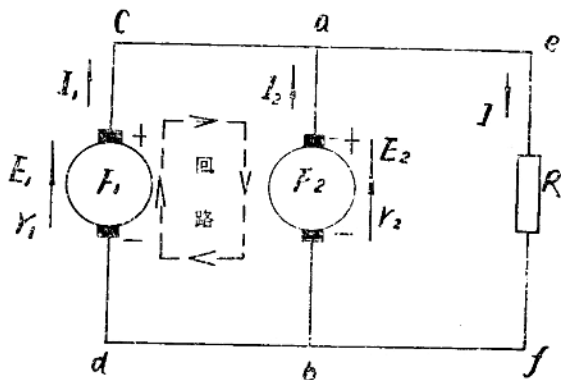


图 1-5 两个电源并联的电路

发电机 F_1 、 F_2 ，它们的正极与正极相联，负极与负极相联构成两个电源并联的电路，它们共同向负载 R 供电，图中 r_1 、 r_2 、 I_1 、 I_2 分别为发电机 F_1 、 F_2 的内电阻和电流， R 上的电流为 I 。

电路中会聚三根或更多根导线的点叫做节点；两个节点之间的电路叫做支路；由几个支路联成的闭合电路叫做回路。

根据电流连续性原理，在电路节点处不应有电荷的累积，所以从图 1-5 中可以得到，两个发电机供给负载的总电流

$$I = I_1 + I_2 \quad (1-6)$$

或
即

$$i - I_1 - I_2 = 0$$

$$\Sigma I = 0 \quad (1-6a)$$

按 (1-5c) 式可得两个发电机 F_1 、 F_2 的端电压分别为

$$U_1 = E_1 - I_1 r_1$$

与

$$U_2 = E_2 - I_2 r_2$$

由于并联后的两台发电机的端电压 U 应是相等的，即

$$U_1 = U_2 = U$$

所以

$$E_1 - I_1 r_1 = E_2 - I_2 r_2$$

移项后

$$E_1 - E_2 = I_1 r_1 - I_2 r_2 \quad (1-7)$$

通过上例的分析，我们可以总结得到克希荷夫二个定律：

1. 克希荷夫第一定律：流进节点的总电流一定等于流出节点的总电流。或者说：节点上电流的代数和等于零。

2. 克希荷夫第二定律：在电路的任意一个回路中，其所有电动势（电位升）的总和等于所有电压降（电位降）的总和，即

$$\Sigma E = \Sigma I r \quad (1-8)$$

式中符号 Σ 表示总和。应用此式时，应考虑正号与负号，其方法如下：假定了回路的方向与电流的方向后，凡是电流方向

与回路方向一致时，则在电阻上的电压降为正值，若电流方向与回路的方向相反时，则在电阻上的电压降为负值；凡是电动势的方向与回路方向一致的则为正，反之为负。

例 1-6 设图 1-5 中的 $E_1=120V$, $E_2=122V$, $r_1=r_2=0.05\Omega$, $R=1.185\Omega$, 试求发电机 F_1 、 F_2 与负载 R 中的电流以及 R 两端的电压。

解：假定电流方向如图 1-5 所示。然后根据克希荷夫定律列出以下方程来解算。

从节点 a 上得

$$I_1 + I_2 = I \quad (1)$$

从 $cabdc$ 回路得

$$E_1 - E_2 = I_1 r_1 - I_2 r_2$$

从 $aeafb$ 回路得

$$E_2 = I_2 r_2 + IR$$

将已知数代入以上二式得

$$120 - 122 = 0.05 I_1 - 0.05 I_2 \quad (2)$$

$$122 = 0.05 I_2 + 1.185 I \quad (3)$$

解之得 $I_1 = 30 A$, $I_2 = 70 A$, $I = 100 A$ 。

R 两端的电压

$$U = IR = 100 \times 1.185 = 118.5 V。$$

1-5 电能量和电功率

如果在电路中有 q 库仑正电荷通过，由公式 (1-5b) 可以得到电路中能量平衡关系为：

$$Eq = Uq + U_n q$$

由 (1-1) 式得 $q = It$ ，代入上式得

$$EIt = UI t + U_n It \quad (1-9)$$

式中 EIt 是电源发出的电能； UIt 是负载所消耗的电能； $U_n It$ 是电源内电阻上所消耗的电能。

实用单位制中，电能的单位是焦耳（即瓦秒）。较大的单位为千瓦时，1 千瓦时又叫做 1 度电。

公式 (1-9) 的两侧各除以时间 t 后，就得到电路中的电功率平衡关系为：

$$EI = UI + U_n I \quad (1-10)$$

式中 EI 是外加非电能在电源中转换成电能的速率，叫做电源功率； UI 是负载中电能转换成其它形式能量的速率，叫做负载功率，用 P 表示； $U_n I$ 是电源中损失的功率。

因为 $U = IR$ ，所以负载功率

$$P = UI = \frac{U^2}{R} = I^2 R \quad (1-11)$$

从 (1-11) 式可以看出：当负载的电压一定时，负载功率的大小与电流成正比，或与其电阻成反比，也就是说，当电压不变时，负载功率是由它的电阻决定的。负载电阻越小，负载功率越大，反之，负载功率越小。

电功率的单位是瓦特，（即焦耳/秒）简称瓦，通常用 W 来表示。1 千瓦是瓦的一千倍，用 kW 来表示。

例 1-7 一只 $220V$ 、 $100W$ 的电灯泡，在正常工作时，

- (1) 流过灯丝的电流是多少 A ？
 - (2) 灯丝的电阻是多少 Ω ？
 - (3) 若每天用电 3 小时，一个月（以 30 天计）用电多少度？
- 解：(1) 由 $P = UI$ 得到流过灯泡的电流为

$$I = \frac{P}{U} = \frac{100}{220} = 0.454 A$$

- (2) 由 $P = \frac{U^2}{R}$ ，得灯丝的电阻为

$$R = \frac{U^2}{P} = \frac{(220)^2}{100} = 484 \Omega$$

(3) 一个月用的电为

$$Pt = 100 \times 10^{-3} \times 3 \times 30 = 9 \text{ 度}$$

1-6 额 定 值

导线总是有电阻，只要有电流通过导线，由于电流的热效应，总有一部分电能要转换为热量，它与电流的平方、导体本身的电阻，以及通电时间成正比。（在1欧姆的导体中通过1安电流时每秒钟所产生的热量是0.24卡^①）这些热量固然是损失掉而降低了用电设备的效率，更重要的是如果所产生的热量太多时，可以使导线和设备的温度升高达到危险的程度。为了安全起见，在各种情况下，允许长时间连续流过导线的电流的数值总有相应的规定，只要不超过规定，那末导线的温度也不会超过允许范围。在设计时规定，允许长时间连续流过导线或设备的最大电流，叫做导线或设备的**额定电流**。用符号 I_e 表示。对于有些电路负载（如电灯、电烙铁等），只要电压不超过一定的限度，通过它的电流就不会过大，所以这类负载，标出使用电压比标出电流更为方便。设计时对负载所规定的使用电压，就是**额定电压**，用符号 U_e 表示。有些用电设备，还规定了**额定功率**，用符号 P_e 表示，它是在规定的使用条件下，负载所允许达到的最大功率。

为了保护电路，不致使电流过大而烧毁，一般在电路中都装有熔断保护器，熔断保护器是用易熔金属制成丝状或片状，

^① 1卡等于使1克水升高1℃所需的热量。