

基础篇



第 1 章 电路的基本概念、定律和分析方法

随着电力工业和现代科学技术的日益发展，电能已成为人们生产、生活中不可缺少的能源，我们的世界几乎是一个电的世界，所以掌握一定的电工基础知识就显得十分重要。电工与电子技术的应用离不开电路，电路由电路元件构成。本章介绍电路的基本概念、基本定律、分析电路的基本方法以及电工常用工具与仪表的使用知识。

1.1 电路的基本概念

1.1.1 电路、理想元件和电路模型

1.1.1.1 电路

为了完成某种功能，将实际的电气设备与元件按照一定的方式组合连接而成的整体称为电路。通常组成一个简单电路，至少要有电源、连接导线、开关和负载。负载、连接导线和开关称为外电路，电源内部的电路称为内电路。电路的基本组成包括以下四部分：

(1) 电源（供能元件）：为电路提供电能的设备和器件，如电池、发电机等。

电源就是把非电能转换为电能的一种能量转换装置。例如：干电池是把化学能转换为电能的装置；发电机是把机械能转换为电能的装置。直流电还可以通过交流电得到，其整个过程包括变压、整流、滤波、稳压。

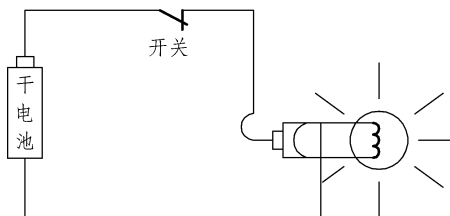
(2) 负载（耗能元件）：电路中吸收电能或输出信号的元件，如灯泡等用电器。

(3) 控制器件：控制电路工作状态的器件或设备，如开关等。

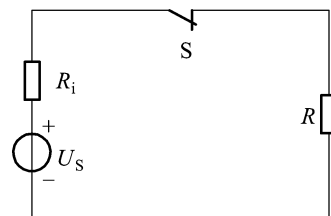
(4) 连接导线：将电气设备和元器件按一定方式连接起来的导线，如各种铜、铝电缆线等。

由于电路中的电压、电流是在电源的作用下产生的，因此电源又称为激励；由激励在电路中产生的电压、电流称为响应。有时，根据激励与响应之间的因果关系，把激励称为输入，响应称为输出。

如图 1-1-1 (a) 中，干电池为电源，小灯泡为负载，导线和开关为传输控制元件。



(a) 手电筒实际电路



(b) 手电筒电路模型

图 1-1-1 手电筒实际电路与电路模型

1.1.1.2 电路理想元件

为了便于对复杂的实际电路进行分析和综合，我们有必要在满足实际工程需要和假设的条件下，抓住实际电路中发生的主要现象和表现出来的主要矛盾，将实际电路中发生的物理过程或物理现象理想化，这就得到了理想电路元件，简称理想元件。

理想元件是电路元件理想化的模型，简称为电路元件。

电阻元件是表示只消耗电能的元件，简称电阻。

电感元件是表示其周围空间存在着磁场而可以储存磁场能量的元件，简称电感。

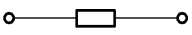

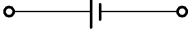



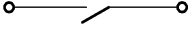
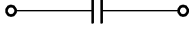


电容元件是表示其周围空间存在着电场而可以储存电场能量的元件，简称电容。

具有两个引出端的元件，称为二端元件；具有两个以上引出端的元件，称为多端元件。

1.1.1.3 电路模型

实际电路可以用一个或若干个理想电路元件经理想导体连接起来模拟，这便构成了电路模型。用理想电路元件或它们的组合模拟实际元件就是建立其模型，简称建模。建模时必须考虑工作条件，并按不同准确度的要求把给定工作情况下的主要物理现象和功能反映出来。常用理想元件及符号如表 1-1-1 所示。

表 1-1-1 常用理想元件及符号

名称	符号	名称	符号
电阻		电压表	
电池		接地	
电灯		熔断器	
开关		电容	
电流表		电感	

在不同的工作条件下，同一实际元件可能采用不同的模型。模型取得恰当，对电路进行分析计算的结果就与实际情况接近；模型取得不恰当，就会造成很大误差甚至导致错误的结果。模型取得太复杂则会造成分析困难，而取得太简单则可能无法反映真实的物理现象。如图 1-1-1 (b) 所示，将干电池简化为理想电源 U_s 和内阻 R_i ，小灯泡简化为电阻 R ，基本符合实际电路的物理现象和满足准确度的要求。

本书中，如无特殊说明，电路元件均指理想电路元件，电路均指电路模型。

1.1.2 电路的基本物理量

1.1.2.1 电流、电压与电位

1. 电流

电流是电路中带电粒子在电源作用下有规则地移动形成的。规定正电荷移动的方向为电流的实际方向。

在电路中获得持续电流，一是要有自由电荷，二是要有电位差，且电路一定要闭合。

1) 直流电流

如果电流的大小及方向都不随时间变化，即在单位时间内通过导体横截面的电量相等，则称之为稳恒电流或恒定电流，简称为直流 (Direct Current)，记为 DC 或“—”。直流电流要用大写字母 I 表示。

2) 交流电流

如果电流的大小及方向均随时间变化，则称为交流电流。对电路分析来说，一种最为重要的交流电流是正弦交流电流，其大小及方向均随时间按正弦规律作周期性变化，将之简称为交流 (Alternating Current)，记为 AC 或“~”。交流电流的瞬时值要用小写字母 i 或 $i(t)$ 表示。

电流的大小用电流强度 (简称电流) 来表示，其数值等于单位时间 t 内通过导体截面的电荷量 Q ，通常用符号 I 表示。

直流电路中，电流的大小表示为

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

式中电流强度 I 的单位为安培 (A)，电荷量 Q 的单位为库仑 (C)，时间 t 的单位为秒 (s)。

交流电路中，电流的大小表示为

$$i = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt} \quad (1-1-2)$$

在国际单位制 (简称 SI 制) 中，电流的单位是安培 (A)，以及千安 (kA)、毫安 (mA)、微安 (μA) 等，其换算关系为

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

而在进行电路分析计算时，电流的实际方向有时难以确定，为了分析和计算电路，常假设一个电流的方向，这个假设的方向称为参考方向 (正方向)，在电路图中用箭头表示，如图 1-1-2 所示。

规定了参考方向以后，电流就是一个代数量了，若电流的实际方向与参考方向一致 [见图 1-1-2 (a)]，则电流为正值；若两者相反 [见图 1-1-2 (b)]，则电流为负值。这样就可以利用电流的参考方向和正负值来判断电流的实际方向。

应该注意的是，在未规定参考方向时，电流的正负是没有意义的。

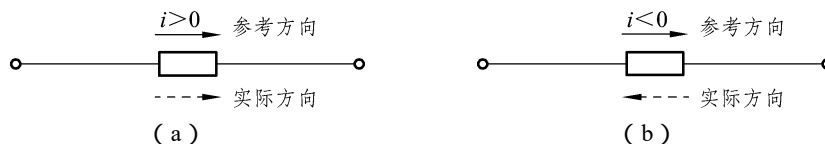


图 1-1-2 电流的参考方向箭头表示

例如，在图 1-1-3 中，图 (a) 中电流的大小为 5 A，为正值，电流的实际方向与参考方向一致；图 (b) 中电流的大小为 -5 A，电流的实际方向与参考方向相反。

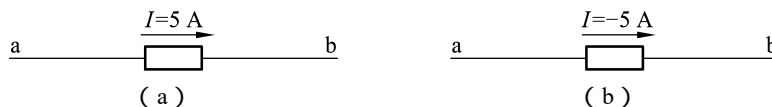


图 1-1-3 电流的参考方向

电流强度 I 可用电流表测量，测量时应将电流表串联在被测电路中。

2. 电压与电位

1) 电压

带电体的周围存在电场，电场对处在电场中的电荷有力的作用，称之为电场力。电压是衡量电场力做功能力的物理量。电压的定义为：电路中两点 a、b 之间的电位差 U_{ab} （简称为电压），在大小上等于电场力把单位正电荷从 a 点移动到 b 点所做的功。

如果电压的大小及方向都不随时间变化，则称之为稳恒电压或恒定电压，简称为直流电压，用大写字母 U 表示。

如果电压的大小及方向随时间变化，则称为变动电压。对电路分析来说，一种最为重要的变动电压是正弦交流电压（简称交流电压），其大小及方向均随时间按正弦规律作周期性变化。交流电压的瞬时值要用小写字母 u 或 $u(t)$ 表示。

在直流电路中，电压为一恒定值，即

$$U = \frac{W}{Q} \quad (1-1-3)$$

式中， W 为电场力所做的功，单位一般取焦耳（J）。

在变动电流电路中，电压为一变值，即

$$u = \frac{dW}{dq} \quad (1-1-4)$$

在国际单位制（SI）中，电压的单位是伏特（Volt），简称伏，用字母 V 表示，即电场力将 1 库仑（C）正电荷由 A 点移至 B 点所做的功为 1 焦耳（J）时，A、B 两点间的电压为 1 V。有时也需用千伏（kV）、毫伏（mV）或微伏（ μ V）作为电压的单位，其换算关系为

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

与需要为电流指定参考方向一样，在电路分析中，也需要为电压指定参考方向。在元件或电路中两点间可以任意选定一个方向作为电压的参考方向。电路图中，电压的参考方向一般用实箭线表示，也可用双下标 u_{AB} （电压参考方向由 A 点指向 B 点）或“+”“-”极性表示（电压参考方向由“+”极性指向“-”极性），如图 1-1-4 所示。

当电压的实际方向与它的参考方向一致时，电压值为正，即 $u > 0$ ；反之，当电压的实际方向与它的参考方向相反时，电压值为负，即 $u < 0$ 。

电压的参考方向与实际方向（电路图中用虚箭线表示）的关系如图 1-1-5 所示，在图 1-1-5（a）中， $u > 0$ ；在图 1-1-5（b）中， $u < 0$ 。

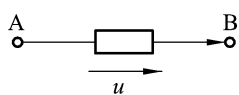


图 1-1-4 电压的参考方向表示法

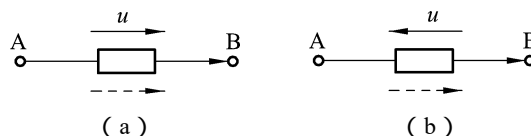


图 1-1-5 电压的实际方向与参考方向

电压的实际方向也是客观存在的，它决不因该电压的参考方向选择的不同而改变。由此可知： $u_{AB} = -u_{BA}$ 。

若电压与电流的参考方向一致，称为关联参考方向，否则，称为非关联参考方向。如图 1-1-6 所示，在图 1-1-6 (a) (b) 中，电压与电流为关联参考方向；在图 1-1-6 (c) 中，电压与电流为非关联参考方向。

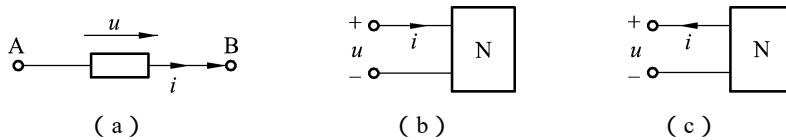


图 1-1-6 关联参考方向与非关联参考方向

电压可用电压表来测量，测量时应将电压表并联在被测电路中。

【例 1.1】 计算图 1-1-7 所示电路中电流源的端电压 U_1 ， $5\ \Omega$ 电阻两端的电压 U_2 和电流源、电阻、电压源的功率 P_1 、 P_2 、 P_3 。

解：
 $U_2 = 5 \times 2 = 10(\text{V})$
 $U_1 = U_2 + U_3 = 10 + 3 = 13(\text{V})$

电流源的电流、电压选择为非关联参考方向，所以

$$P_1 = U_1 I_S = 13 \times 2 = 26(\text{W})(\text{发出})$$

电阻的电流、电压选择为关联参考方向，所以

$$P_2 = 10 \times 2 = 20(\text{W})(\text{接收})$$

电压源的电流、电压选择为关联参考方向，所以

$$P_3 = 2 \times 3 = 6(\text{W})(\text{接收})$$

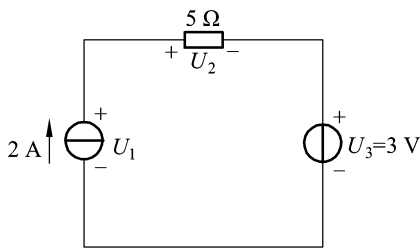


图 1-1-7 例 1.1 图

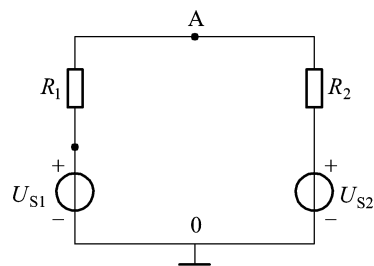


图 1-1-8 电位的表示

2) 电位

在电路中，经常用电位的概念来分析电路。所谓电位，是指在电路中任选一点作为参考点，即该点电位为 0。某点与参考点的电压差叫作该点的电位。电位用 V 表示，电路中 A 点的电位可表示为 V_A ，如图 1-1-8 所示。电位的单位和电压的单位一样，用伏特 (V) 表示。

图 1-1-8 中，已知 A、B 两点的电位分别为 V_A 、 V_B ，则此两点间的电压为

$$U_{AB} = U_{A0} - U_{B0} = V_A - V_B$$

即

$$U_{AB} = V_A - V_B \quad (1-1-5)$$

由上述分析可知，在电路中取不同参考点，电路各点的电位可能会发生变化，但两点之间的电压是确定的，两点之间的电压等于两点的电位之差。

1.1.2.2 电动势

衡量电源的做功能力大小及其方向的物理量叫作电源的电动势。

电动势通常用符号 E 或 $e(t)$ 表示， E 表示大小与方向都恒定的电动势（即直流电源的电动势）， $e(t)$ 表示大小和方向随时间变化的电动势，也可简记为 e 。电动势的国际单位制单位为伏特，记作 V。

电动势的大小等于电源力（非电场力）把单位正电荷从电源的负极经过电源内部移到电源正极所做的功。如果设 W 为电源中非静电力（电源力）把正电荷量 q 从负极经过电源内部移送到电源正极所做的功，则电动势大小为

$$E = \frac{W}{q} \quad (1-1-6)$$

电动势的方向规定为从电源的负极经过电源内部指向电源的正极，即与电源两端电压的方向相反。

在不接外电路时，电源两极间电压的大小等于电动势。在近代电路理论中，逐步淡化了电动势这个物理量，而用电压标注电源的电动势。

1.1.2.3 电功率和电能

1. 电功率

电功率（简称功率）所表示的物理意义是电路元件或设备在单位时间内吸收或发出的电能。两端电压为 U 、通过电流为 I 的任意二端元件（可推广到一般二端网络）的功率大小为

$$P = UI \quad (1-1-7)$$

功率的国际单位制单位为瓦特（W），常用的单位还有毫瓦（mW）、千瓦（kW），它们与瓦特（W）的换算关系是

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

一个电路最终的目的是电源将一定的电功率传送给负载，负载将电能转换成工作所需要的一定形式的能量。即电路中存在发出功率的器件（供能元件）和吸收功率的器件（耗能元件）。

习惯上，通常把耗能元件吸收的功率写成正数，把供能元件发出的功率写成负数，而储能元件（如理想电容、电感元件）既不吸收功率也不发出功率，即其功率 $P = 0$ 。

通常所说的功率 P 又叫作有功功率或平均功率。

2. 电能

电能是指在一定的时间内电路元件或设备吸收或发出的电能量，用符号 W 表示，其国际单位制单位为焦耳（J），电能的计算公式为

$$W = P \cdot t = UI t \quad (1-1-8)$$

通常电能用千瓦·小时（kW·h）来表示大小，也叫作度（电）。

$$1 \text{ 度（电）} = 1 \text{ kW} \cdot \text{h} = 3.6 \times 10^6 \text{ J}$$

即功率为 1 000 W 的供能或耗能元件，在 1 h 的时间内所发出或消耗的电能为 1 度。

【例 1.2】有一功率为 60 W 的电灯，每天使用它照明的时间为 4 h，如果平均每月按 30 天计算，那么每月消耗的电能是多少度？合为多少 J？

解：该电灯平均每月工作时间 $t = 4 \times 30 = 120$ (h)，则 $W = P \cdot t = 60 \times 120 = 7\,200$ (W · h) = 7.2 (kW · h)，即每月消耗的电能 7.2 度，约合为 $3.6 \times 10^6 \times 7.2 \approx 2.6 \times 10^7$ (J)。

3. 电气设备的额定值

为了保证电气设备和电路元件能够长期安全地正常工作，规定了额定电压、额定电流、额定功率等铭牌数据。

额定电压 电气设备或元器件在正常工作条件下允许施加的最大电压。

额定电流 电气设备或元器件在正常工作条件下允许通过的最大电流。

额定功率 在额定电压和额定电流下消耗的功率，即允许消耗的最大功率。

额定工作状态 电气设备或元器件在额定功率下的工作状态，也称满载状态。

轻载状态 电气设备或元器件在低于额定功率的工作状态，轻载时电气设备不能得到充分利用或根本无法正常工作。

过载（超载）状态 电气设备或元器件在高于额定功率的工作状态，过载时电气设备很容易被烧坏或造成严重事故。

轻载和过载都是不正常的工作状态，一般是不允许出现的。

4. 焦耳定律

电流通过导体时产生的热量（焦耳热）为

$$Q = I^2 R t$$

式中 I 通过导体的直流电流或交流电流的有效值，单位为安培 (A)；

R 导体的电阻值，单位为欧姆 (Ω)；

T 通过导体电流持续的时间，单位为秒 (s)；

Q 焦耳热，单位为焦耳 (J)。

1.1.3 电路的工作状态

电路的形式千变万化，但归纳起来不外乎两种类型：一是进行能量的转换、传输、分配；二是进行信息处理。任何一个电路都可能具有三种状态，即：通路、断路和短路。如图 1-1-9 所示。

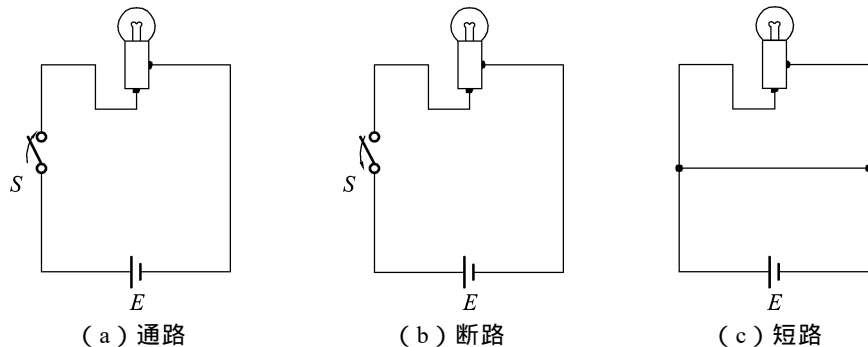


图 1-1-9 电路的三种工作状态