

# 电工与电子技术 （第二版）

陶恒齐 编



华中科技大学出版社



## 内 容 简 介

本书是高等学校“21世纪电气信息学科立体化系列教材”之一。根据教育部颁发的高等学校“电工技术”和“电子技术”两门课程的基本要求,本着“加强基础、注重实用、精简内容、创新思维”的原则编写而成。主要内容包括电路基本概念与定律、电路分析方法、正弦交流电路、三相电路、线性电路的暂态分析、变压器与电动机、半导体二极管及其应用、三极管及其放大电路、集成运算放大器及其应用、直流稳压电源、组合逻辑电路、时序逻辑电路等。各章均有内容提要、小结和精选的练习题。

本书既可作为高等学校理工科非电类各专业及相关课程的本科教材,也可作为相关专业工程技术人员的阅读参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

电工与电子技术(第二版)/陶恒齐 主编. —武汉:华中科技大学出版社,2012.9  
ISBN 978-7-5609-4865-2

I. 电… II. 陶… III. ①电工技术-高等学校-教材 ②电子技术-高等学校-教材  
IV. ①TM ②TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 135643 号

电工与电子技术(第二版)

陶恒齐 主编

策划编辑:王红梅

责任编辑:王红梅

封面设计:秦茹

责任校对:朱玢

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)81321915

录排:武汉佳年华科技有限公司

印刷:武汉科利德印务有限公司

开本:787mm×960mm 1/16

印张:23.5 插页:2

字数:474千字

版次:2012年9月第2版第4次印刷

定价:39.80元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换  
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务  
版权所有 侵权必究

# 目 录

## 上篇 电工技术

<b>1 电路模型与基本定律</b> .....	(1)
1.1 电路的基本概念 .....	(1)
1.2 电路模型与电路元件 .....	(4)
1.3 电路的基本状态 .....	(8)
1.4 基尔霍夫定律 .....	(13)
1.5 电阻的串联与并联及其等效电路 .....	(15)
本章小结 .....	(18)
习题 1 .....	(19)
<b>2 电阻电路的分析方法</b> .....	(21)
2.1 电压源与电流源的等效变换 .....	(21)
2.2 支路电流法 .....	(26)
2.3 节点电压法 .....	(27)
2.4 叠加定理 .....	(29)
2.5 等效电源定理 .....	(31)
本章小结 .....	(37)
习题 2 .....	(38)
<b>3 正弦稳态交流电路分析</b> .....	(41)
3.1 正弦交流电的基本概念 .....	(41)
3.2 正弦电路的相量表示法 .....	(45)
3.3 单一电路元件的正弦交流电路 .....	(51)
3.4 混合电路元件的正弦交流电路 .....	(58)
3.5 正弦交流电路的功率因数及其提高 .....	(68)
3.6 正弦交流电路的频率特性 .....	(71)
本章小结 .....	(78)



习题 3 .....	(79)
<b>4 三相交流电路及其应用 .....</b>	<b>(83)</b>
4.1 三相电源 .....	(83)
4.2 三相负载 .....	(86)
4.3 三相功率 .....	(91)
4.4 安全用电 .....	(92)
本章小结 .....	(94)
习题 4 .....	(95)
<b>5 电路的暂态分析 .....</b>	<b>(97)</b>
5.1 暂态分析的基本概念 .....	(97)
5.2 RC 电路的暂态响应 .....	(102)
5.3 一阶线性电路暂态分析的三要素法 .....	(109)
5.4 RL 电路的暂态响应 .....	(110)
5.5 电路暂态过程的应用与预防 .....	(112)
本章小结 .....	(116)
习题 5 .....	(116)
<b>6 变压器与电动机 .....</b>	<b>(119)</b>
6.1 磁路的基本概念 .....	(119)
6.2 变压器 .....	(124)
6.3 电动机 .....	(130)
6.4 电气控制电路 .....	(146)
本章小结 .....	(155)
习题 6 .....	(155)

## 下篇 电子技术

<b>7 半导体二极管及其应用 .....</b>	<b>(157)</b>
7.1 半导体的基本特性 .....	(157)
7.2 半导体二极管 .....	(161)
7.3 二极管应用电路 .....	(167)
本章小结 .....	(170)
习题 7 .....	(170)

<b>8 半导体三极管放大电路基础</b> .....	(173)
8.1 半导体三极管及其放大作用 .....	(173)
8.2 共发射极放大电路的静态分析 .....	(179)
8.3 共发射极放大电路的动态分析 .....	(186)
8.4 共集电极放大电路——射极输出器 .....	(192)
8.5 工程实用放大电路及其特性 .....	(195)
8.6 场效应晶体管及其放大电路 .....	(207)
本章小结 .....	(211)
习题 8 .....	(212)
<b>9 集成运算放大器及其应用</b> .....	(217)
9.1 集成运算放大器概述 .....	(217)
9.2 集成运算放大电路的负反馈 .....	(222)
9.3 集成运算放大器构成的信号运算电路 .....	(228)
9.4 集成运算放大器构成信号处理电路 .....	(234)
9.5 集成运放构成正弦波振荡电路 .....	(239)
本章小结 .....	(243)
习题 9 .....	(243)
<b>10 直流稳压电源</b> .....	(247)
10.1 单相整流电路 .....	(248)
10.2 滤波电路 .....	(251)
10.3 直流稳压电源 .....	(254)
本章小结 .....	(261)
习题 10 .....	(262)
<b>11 逻辑门与组合逻辑电路</b> .....	(265)
11.1 数字电路基本概念 .....	(265)
11.2 数字逻辑代数基础 .....	(269)
11.3 基本逻辑门电路 .....	(281)
11.4 组合逻辑电路的分析和设计 .....	(291)
11.5 常用组合逻辑集成器件 .....	(294)
本章小结 .....	(306)
习题 11 .....	(306)

<b>12 触发器与时序逻辑电路</b> .....	(311)
12.1 双稳态触发器 .....	(311)
12.2 寄存器 .....	(322)
12.3 计数器 .....	(324)
12.4 单稳态和无稳态触发器 .....	(336)
本章小结 .....	(340)
习题 12 .....	(340)
<b>附录</b> .....	(345)
附录 A 电路仿真软件 EWB-Multisim 简介 .....	(345)
附录 B 常用半导体分立器件的参数 .....	(356)
附录 C 部分模拟集成电路主要参数 .....	(358)
附录 D 部分数字集成电路品种型号 .....	(360)
附录 E 习题部分参考答案 .....	(361)
<b>参考文献</b> .....	(366)

## 电路模型与基本定律

本章将以物理概念为基础,结合电路基本理论,介绍了电路元件与电路模型的概念,重点讨论电路元件的电压和电流的参考方向、电路的基本状态和基尔霍夫定律等,这些内容都是分析和计算电路的基础,应当给予足够的重视。

### 1.1 电路的基本概念

#### 1.1.1 电路的作用与组成

电路是指为了实现某个目的而将相应的电路元器件按照一定的原则要求组合起来、并通以电流作用的路径。

虽然电路的使用目的和结构形式多种多样、千差万别,但根据电路的功能,其作用大致可以分为两个方面:电能的传输和转换、信号的传递和处理。

##### 1. 电能的传输和转换

用于电能传输与转换的电路的特征是电压较高且电流较大,习惯上称这样的电路为强电电路,其电路示意图如图 1-1 所示。它由电源、负载和中间环节三个部分组成,主要的功能是实现电能的传输和转换。因此,要求这种电路在输送和转换电能的过程中具有尽可能高的效率。

电源,是指能将其他形式的能量转换成电能的设备。如化学能电池、太阳能电池、水力发电机、汽轮发

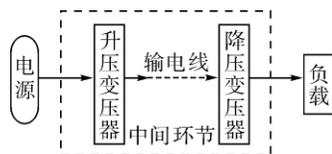


图 1-1 电力系统电路示意图

电机、核能发电装置等。

中间环节,是指将电源和负载连接起来的部分,包括导线、变压器、开关、仪表和保护设备等。

负载,是指能将电能转换成其他形式能量的设备,如电灯、电炉、电动机等。

## 2. 信号的传递和处理

用于信号传递与处理的电路的特征是电压较低且电流较小,习惯上称这样的电路为弱电电路,其电路示意图如图 1-2 所示。它由信号源、中间环节和负载三个部分组成,主要功能是实现信息的传递和处理。因此,要求此种电路在传递和处理信息的过程中必须具有较高的保真度。

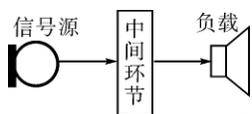


图 1-2 扩音机电路示意图

信号源是指能将语言、文字、图像、音乐和数据等信息转换为相应电信号的设备,如扩音机的话筒、收音机和电视机的天线、DVD 机等。

中间环节是指能将接收的信号进行传递和处理的电路,如调谐、变频、检波、放大和分频电路等。

负载是指能将电信号还原为原始信息的设备,如扬声器可将电信号还原为语言和音乐,显示器可将电信号还原为文字、数据和图像等。

因为电源和信号源的电压、电流能使电路发生作用,故称作电路的激励(原因);由于激励的作用而在电路中产生的电压和电流称为电路的响应(结果)。

电路分析是指在已知电路结构的条件下,讨论激励和响应之间的关系。

### 1.1.2 电路的基本物理量及其参考方向

无论是强电还是弱电,其电流  $I$ 、电压  $U$ 、电位  $V$ 、电动势  $E$ 、电荷  $Q$  和磁通  $\Phi$ ,以及电功率  $P$ 、电能  $W$  均为电路的基本物理量。由于它们在电路中不仅有作用大小的区别,还有作用方向的区别,因此在分析电路时必须在电路图上标注它们的方向或极性,只有这样才能正确地列出电路的代数方程。

电荷在电场力作用下有规则地运动形成电流,衡量电流大小的物理量是电流强度,简称为电流。电流大小等于单位时间内通过导体横截面的电荷量,即

$$i = \frac{dQ}{dt} \quad (1-1)$$

在国际单位制中,电流的基本计量单位是安培,简称安(A),还有千安(kA)、毫安(mA)和微安( $\mu\text{A}$ ),它们的换算关系是:1 kA=10<sup>3</sup> A;1 mA=10<sup>-3</sup> A;1  $\mu\text{A}$ =10<sup>-6</sup> A。

大小和方向随时间变化而变化的电流称为变动电流或交流电流,用小写字母  $i$  表示;大小和方向都不随时间变化而变化的电流则称为恒定电流,简称直流,用大写字母  $I$  表示。

习惯上规定,正电荷运动的方向为电流的实际流动方向。电流在导线中流动方

向只有两种可能,如图 1-3 所示。然而,在分析或计算复杂电路时,一般不可能预先确定电流流动的实际方向。为此,可先在电路图上任意选定某一方向作为电流的假定正方向,或称为电流的参考方向,一般采用箭标或双下标(如  $I_{ab}$ )来表示参考方向。当电流的实际方向与选定的参考方向一致时,则电流为正值(见图 1-3(a));反之,则电流为负值(见图 1-3(b))。因此,只有在参考方向选定之后,电流才有正、负值之分。

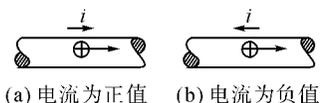


图 1-3 电流的参考方向

电路中之所以产生电荷的定向移动(即电流),其基本原因是电路中存在电位差,这种电位的差别是由电动势提供的。为分析方便,电路中也常使用电位这一物理量。基本方法是:选定电路中任意一点作为电位参考点,而把电路中其他点到参考点之间的电压称作该点的电位,用  $V$  表示,并设参考点电位为零伏。如图 1-4 所示,  $b$  点的电位为  $V_b$ ,  $a$  点的电位为  $V_a$ ,若选择  $b$  点为电位参考点,则  $b$  点的电位  $V_b = 0$ 。习惯上将参考点  $b$  用接地符号“ $\perp$ ”表示,此连接仅表示该点电位为零,并非与大地直接相连。根据上述电位的概念,电路中任意两点间的电压,可表示为这两点的电位之差,即

$$U_{ab} = V_a - V_b \quad (1-2)$$

因此,电场力将单位正电荷从  $a$  点移到  $b$  点所做功的数值就是  $a$  点到  $b$  点间的电压  $U_{ab}$ 。习惯上规定,电压的实际极性是由高电位(“+”极性)端指向低电位(“-”极性)端,即为电位降落的方向。

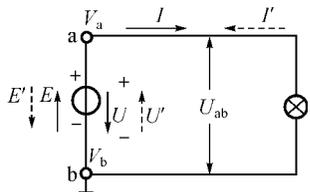


图 1-4 电位和电压的参考方向

电源动力在电源内部将单位正电荷从  $b$  点移到  $a$  点所做功的数值就是电源的电动势,用符号  $E_{ba}$  表示,其中,下标  $ba$  表示电动势的正方向,如图 1-4 所示。习惯上规定,电动势的实际极性是在电源内部由低电位(“-”极性)端指向高电位(“+”极性)端,即为电位升高的方向。

在国际单位制中,电压、电位和电动势的基本计量单位都是伏特,简称伏(V),还有千伏(kV)、毫伏(mV)和微伏( $\mu\text{V}$ )。它们之间的换算关系是:  $1 \text{ kV} = 10^3 \text{ V}$ ;  $1 \text{ mV} = 10^{-3} \text{ V}$ ;  $1 \mu\text{V} = 10^{-6} \text{ V}$ 。

同样,在分析或计算复杂电路时往往也不可能预先确定电压和电动势的实际极性,为此,应先在电路图上任意选定电压和电动势的假定正极性(方向),或称作参考极性(方向),一般是采用双下标或箭标来表示参考极性(方向),如  $U_{ab}$ 。当电压和电动势的实际极性与选定的参考极性一致时,电压和电动势为正值;反之,则电压和电动势为负值。因此,在参考极性或方向选定之后,电压和电动势也就有了正、负值之分。

在电路图中标注的  $I$ 、 $U$ 、 $E$  的方向,一般表示为参考方向(假定正方向),它们是取正值还是取负值,均要根据参考方向而定。

在同一段电路中,当电压和电流的参考方向选择一致时,称为关联的参考方向;否则,参考方向相反时,称为非关联的参考方向。

应特别指出的是:对于同一个电源而言,电动势与端电压的极性相反。即提供电能作用(或发出功率)的电源的端电压与其电流的方向为非关联的参考方向。

在图 1-4 所示的各个电量的参考方向中,a 点为高电位,b 点为低电位。根据  $I$ 、 $U$ 、 $E$  实际方向(极性)的规定,有  $I=I_{ab}>0$ 、 $U=U_{ab}>0$ 、 $E=E_{ba}>0$ ;若  $I$ 、 $U$ 、 $E$  参考方向的选取与图中所示的相反,则  $I'=I_{ba}<0$ 、 $U'=U_{ba}<0$ 、 $E'=E_{ab}<0$ ;并且,对于同一段电路,当选取的参考方向相反时,则  $I_{ab}=-I_{ba}$ 、 $U_{ab}=-U_{ba}$ 、 $E_{ba}=-E_{ab}$ ,即绝对值相等,而符号相反。

电路的物理量是电路分析的基础,在分析过程中,一定要注意正确使用,包含其计量单位。

## 1.2 电路模型与电路元件

### 1.2.1 电路模型

实际应用的电路,均是由起不同作用的各种电路元器件按照一定的要求组成的,每一个元器件所起的作用都比较复杂。例如,具有典型意义的绕线型电阻器,其主要作用是消耗电能,即主要是电阻的性质;但同时由于绕线又具有一定的电感特性,两者相比较,电阻的作用远远大于电感的作用。因此,主要考虑绕线型电阻器的电阻作用,而忽略次要的电感作用,可认为绕线型电阻器就是一个纯电阻,即实际元件理想化处理,使实际电路的分析和计算既简便又实用。由理想元件构成的电路称为实际电路的电路模型。使用电路模型的主要目的是便于分析、计算。实践证明,采用电路模型分析完全可以满足一般条件下的工程要求。

理想电路元件(简称元件)及参数主要有电阻元件  $R$ 、电感元件  $L$ 、电容元件  $C$ 、电源元件电动势  $E$ (或恒流源  $I_S$ )和内电阻(简称内阻) $R_0$  等。

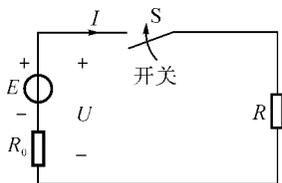


图 1-5 手电筒的电路模型

手电筒的电路模型如图 1-5 所示。整个电路包括干电池电动势  $E$  和内电阻  $R_0$ 。(为分析和计算的需要,常将它们分开),负载为电珠  $R$ ,开关  $S$  和金属体(无电阻的)构成中间环节。本书所分析的电路(在无特殊说明时)都是指电路模型,简称电路。在电路图中,各种电路元件都用规定的图形符号来表示。

### 1.2.2 电压源和电流源

电源是为电路提供能源的特殊元件,通常又称为有源元件。根据电源的外特

性,分为电压源和电流源两种。

### 1. 电压源

目前使用的绝大部分电源,无论是交流的还是直流的,当外接电阻  $R_L$  变化时,电源的输出端电压即电路端电压  $U$  波动较小,通常,将具有此种特性的电源称为电压源。发电机、稳压电源、电池以及各种信号源,其内部都含有电动势为  $E$  的理想电压源和内阻  $R_0$ ,这类电源的内阻  $R_0$  比较小。在分析和计算电路时,往往将它们分开画出,即由电动势为  $E$  的理想电压源和阻值为  $R_0$  的内阻串联而成的电路模型,如图 1-6 所示,即电压源模型,简称电压源。

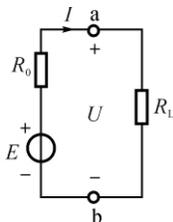


图 1-6 电压源电路模型

### 2. 电流源

另外,还有一种电源,当外接的电阻  $R_L$  变化时,电源的输出电流  $I$  波动较小,通常将具有此种特性的电源称为电流源,如光电池等。其电路模型是:内部含有理想电流源  $I_s$  和内阻  $R_0$ 。一般情况下,这类电源的内阻  $R_0$  比较大,在分析和计算电路时,往往是将它们分开画出,即由理想电流源  $I_s$  和阻值为  $R_0$  的内阻并联而成的电路模型,如图 1-7 所示的即为电流源模型,简称电流源。

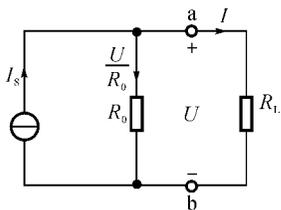


图 1-7 电流源电路模型

## 1.2.3 电阻、电感和电容元件

电阻、电感和电容这三种理想元件在电路中不提供能源,因而都被称为理想无源元件。但是,它们的特性及其在电路中的作用各不相同。

### 1. 电阻元件

电阻元件被表征为电路中消耗电能的理想元件,具有阻碍电流的特性,当电流经过时,在电阻两端将产生电压。电阻元件上电压和电流的参考方向如图 1-8 所示,根据欧姆定律可得电阻元件的参数

$$R = \frac{u}{i} \quad \text{或} \quad u = iR \quad (1-3)$$

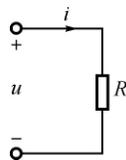


图 1-8 电阻元件

式中: $R$  为电阻元件的参数,简称电阻,它是具有对电流起阻碍作用的物理量。如果电阻两端的电压与通过的电流成正比,这说明电阻是一个常数,不随电压或电流的变化而变化,这种电阻称为线性电阻;如果电阻不是一个常数,而是随着电压或电流的变化而变化,这种电阻称为非线性电阻。

金属导体的电阻  $R$  与导体的截面积  $S$ 、长度  $L$  及导体材料的导电性能有关,即

$$R = \frac{\rho l}{S} \quad (1-4)$$

式中: $\rho$  为电阻率。在国际单位制中,电阻的单位是欧姆,简称欧( $\Omega$ ),其他还有千欧( $k\Omega$ )和兆欧( $M\Omega$ ),它们之间的换算关系是: $1 M\Omega = 10^3 k\Omega = 10^6 \Omega$ 。

在式(1-3)两边同乘以  $i$  时,则电阻  $R$  吸收的功率为  $ui = Ri^2$ 。再对功率积分,即得到电阻从电源获得的能量,用  $W_R$  表示,计量单位为焦耳(J)。电阻在一定时间内所消耗的能量为

$$W_R = \int_0^t ui dt = \int_0^t Ri^2 dt \quad (1-5)$$

式(1-5)表明,电阻将电能转换为热能而消耗掉了,这是一个不可逆的转换过程。

## 2. 电感元件

由物理学可知,流过线圈的电流产生磁场,而磁场的变化又感应出电场,所以,电路中的线圈被称为电感线圈(或电感元件),简称电感。一个有  $N$  匝线圈的空芯线圈,如图 1-9(a)所示。作为理想电感元件,图中, $i$ 、 $\Phi$ 、 $e_L$  的极性或参考方向,遵循右手螺旋法则,同时符合电动势与电流的方向。

设电流通过一匝线圈所产生的磁场通量(或称磁通)为  $\Phi$ ,则相同的电流通过  $N$  匝线圈所产生的总磁通(也称磁链)为  $N\Phi$ ,记作  $\Psi$ 。实验表明,在空芯线圈中,总磁通  $\Psi$  与电流  $i$  呈正比例关系,即总磁通  $\Psi$  与电流  $i$  的比值为一常数,用  $L$  表示,有

$$\Psi = N\Phi = iL \quad \text{或} \quad L = \frac{\Psi}{i} = \frac{N\Phi}{i} \quad (1-6)$$

式中: $L$  为电感线圈的参数,称为电感值,也常称为自感系数,简称电感。这一比例常数说明: $N$  匝空芯线圈的电感值与电流无关,只与电感元件自身的结构和材料有关。当线圈的  $N$  越大(匝数越多)时, $L$  就越大;或线圈中单位电流  $i$  产生的  $\Psi$  越大(线圈中加入导磁材料)时, $L$  也越大。在国际单位制中,电感的单位有亨利(H)、毫亨(mH)和微亨( $\mu H$ )。它们的换算关系是: $1mH = 10^{-3} H$ ,  $1\mu H = 10^{-6} H$ 。

根据电磁感应定律:当流过电感线圈的电流  $i$  发生变化时,将在电感线圈中产生变化的磁通  $\Delta\Psi$ ,变化的磁通将产生自感电动势  $e_L$ ,其大小与电流的变化率成正比,

$e_L$  的极性(方向)也随  $i$  的改变而变化,且具有反抗  $i$  (或  $\Psi$ ) 的变化的特性,即

$$e_L = -\frac{d\Psi}{dt} = -\frac{d(N\Phi)}{dt} = -\frac{d(Li)}{dt} = -L \frac{di}{dt} \quad (1-7)$$

式(1-7)中的负号是由楞次定律决定的,表示自感电动势  $e_L$  的方向与线圈电流  $i$  或者磁通变化的方向相反。

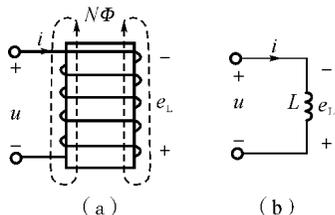


图 1-9 电感元件及其电路符号

根据图 1-9 中的参考方向可得电感电压为

$$u = -e_L = L \frac{di}{dt} \quad \text{即} \quad u = L \frac{di}{dt} \quad (1-8)$$

当线圈中通过恒定电流(直流)时,电流对时间的导数为零,故其上的电压为零,视其为短路。因此,直流电路中,暂不讨论电感电路。

将式(1-8)两边乘以  $i$ ,并对之积分,则可得电感的储能为

$$W_L = \int_0^i ui dt = \int_0^i iL \frac{di}{dt} dt = \int_0^i Li di = \frac{1}{2} Li^2 \quad (1-9)$$

由物理知识可知,式(1-9)表示磁场能量,这说明,当电流增加时,电感从电源获取电能后转换为磁能储存起来,没有变为热能耗散,这是一个可逆的转换过程。当电流减小时,又将磁能转换为电能,返还给电源,完成一个能量交换过程。可见,理想电感元件不消耗能量,只储存磁场能量,是储能元件。

### 3. 电容元件

电容元件及其电路符号如图 1-10 所示,其基本结构是由两个相互绝缘的金属极板组成。由静电学知识可知,当电容两端加上电压后,两个极板上分别感应出等量异号的电荷,电荷与电压的极性相同。对于一个理想的电容器,其极板上聚集的电荷只与两极间的电压成正比,即

$$q = Cu \quad \text{或} \quad C = \frac{q}{u} \quad (1-10)$$

式(1-10)中,比例常数  $C$  就是电容元件的参数,称为电容值,简称电容。此常数表明:一个电容元件的电容值  $C$  与电荷及电压无关,只与其自身的材料和结构有关。例如,平板电容器的电容量  $C$  与  $\epsilon S$  成正比,与  $d$  成反比,即

$$C = \frac{\epsilon S}{d} \quad (1-11)$$

式中: $S$  为平行的金属极板的面积; $\epsilon$  为两平行极板间绝缘介质的介电常数; $d$  为两极板间的距离。在国际单位制中,电容  $C$  的单位有法拉(F)、微法拉( $\mu\text{F}$ )和皮法拉(pF)。它们之间的换算关系为:  $1\text{F} = 10^6 \mu\text{F}$ ,  $1\mu\text{F} = 10^6 \text{pF}$ 。

当电容上的电荷量  $q$  或两端电压  $u$  发生变化时,电路中便引起电流。当选择图 1-10 所示的端电压  $u$  和电流  $i$  的参考方向( $i$  为电容器充电电流)时,则有

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt} \quad (1-12)$$

式(1-12)表明,电容上的电流与电压成微分关系。当电容两端加上恒定电压(即直流)时,电压对时间的导数为零,则其上的电流  $i$  为零,视其为开路。因此,直流电路中也暂不讨论电容电路。

将式(1-12)两边均乘以  $u$ ,并对之积分,则得电容的储能为

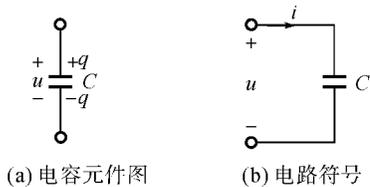


图 1-10 电容元件及其电路符号

$$W_C = \int_0^t u i dt = \int_0^t u C \frac{du}{dt} dt = \int_0^u C u du = \frac{1}{2} C u^2 \quad (1-13)$$

根据物理学知识可知,式(1-13)表示电容电场的能量,这说明,当电压增加时,电容从电源获取电能(即充电)后转为电场能储存下来,没有变为其他能量消耗,这也是一个可逆转换过程。当电压降低时,电容又将电场能通过电流形式返还给电源(即放电),也就完成了一次能量交换过程。可见,理想电容元件不消耗能量,只是储存电场能量,也是储能元件。

电阻、电感和电容都有线性和非线性之分,当 $R$ 、 $L$ 和 $C$ 为常数时即为线性元件,否则,为非线性元件。

### 1.3 电路的基本状态

电路的基本状态包括电源的有载工作、开路和短路等三种状态,下面将讨论在不同状态下,电路的电流 $I$ 、电压 $U$ 和功率 $P$ 所具有的特征。

#### 1.3.1 有载工作状态

电路的有载工作状态即电路的正常工作状态。在图1-11中,当开关 $S$ 闭合时,电源与负载形成一个闭合电路,电路中将产生电流 $I$ ,这一状态称为电路的有载工作状态。下面将讨论关于有载的几个问题。

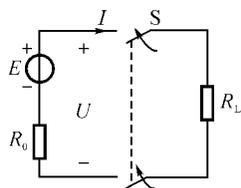


图 1-11 有载工作状态

##### 1. 电压与电流

应用全电路(含有电源的)欧姆定律可知

$$I = \frac{E}{R_0 + R_L} \quad (1-14)$$

应用部分电路(不含电源)欧姆定律,可知负载电阻 $R_L$ 两端的电压,即电源的端电压

$$U = R_L I \quad (1-15)$$

根据式(1-14)、式(1-15)可得

$$U = E - R_0 I \quad (1-16)$$

式(1-16)表明,含有内阻 $R_0$ 的电源,其输出端(或称路端)电压 $U$ 将随电流 $I$ (即负载)的加大而减小,如图1-12所示,路端电压下降的程度(即斜率)与内阻 $R_0$ 有关。表示电源端电压 $U$ 与输出电流 $I$ 之间关系的曲线,称为电源的外特性曲线。电源内阻一般都比较小,当 $R_0 \ll R$ 时,则有

$$U \approx E$$

上式表明,电路电流(负载)的变动对路端电压基本

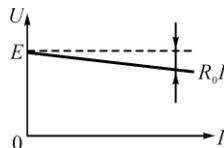


图 1-12 电源的外特性曲线

没有影响,据此说明此电源带负载的能力较强。

## 2. 功率与功率平衡

将  $U = E - IR_0$  各项乘以电流  $I$ , 则电压方程变为功率平衡式

$$UI = EI - R_0 I^2 \quad \text{或} \quad P = P_E - \Delta P \quad (1-17)$$

式中:  $P_E = EI$  是电源产生的功率;  $\Delta P = R_0 I^2$  是电源内阻上损耗的功率;  $P = UI$  是电源输出的功率, 即负载上获得的功率。

在国际单位制中, 功率的单位是瓦特(W)或千瓦(kW), 其换算关系为  $1 \text{ kW} = 10^3 \text{ W}$ 。

**【例 1-1】** 如图 1-13 所示,  $U = 220 \text{ V}$ ,  $I = 5 \text{ A}$ , 内阻  $R_{01} = R_{02} = 0.6 \Omega$ 。(1) 试求电源的电动势  $E_1$  和负载的反电动势  $E_2$ ; (2) 试说明功率的平衡关系。

**【解】** (1) 电源

$$U = E_1 - \Delta U_1 = E_1 - R_{01} I$$

$$E_1 = U + R_{01} I = (220 + 0.6 \times 5) \text{ V} = 223 \text{ V}$$

负载

$$U = E_2 + \Delta U_2 = E_2 + R_{02} I$$

$$E_2 = U - R_{02} I = 220 \text{ V} - 0.6 \times 5 \text{ V} = 217 \text{ V}$$

(2) 由(1)中两式可得

$$E_1 = E_2 + R_{01} I + R_{02} I$$

等号两边同乘以  $I$  时, 则有

$$E_1 I = E_2 I + R_{01} I^2 + R_{02} I^2$$

$$223 \times 5 \text{ W} = (217 \times 5 + 0.6 \times 5^2 + 0.6 \times 5^2) \text{ W}$$

$$1115 \text{ W} = (1085 + 15 + 15) \text{ W}$$

式中,  $E_1 I = 1115 \text{ W}$ , 是由电源  $E_1$  所提供的功率, 即在单位时间内由其他形式的能转换成电能的价值;  $E_2 I = 1085 \text{ W}$ , 是负载取用的功率, 即在单位时间内由电能转换成的其他形式的能的价值。这里的  $E_2$  原本是电源(蓄电池), 但此时不仅没有为电路提供功率, 反而从电路中取用功率, 即对蓄电池进行充电(取用电能转换成化学能储存起来), 由于其作用与负载相当, 因此, 此时的  $E_2$  被称作负载。

$R_{01} I^2 = 15 \text{ W}$  和  $R_{02} I^2 = 15 \text{ W}$  分别表示电源内阻和负载电阻上所取用(消耗)的功率。

综上所述, 在这个电路中, 电源所提供的功率和负载所取用的功率是平衡的。

## 3. 电源与负载的判别

在分析电路时, 有时由于电路中各元件的作用不是特别明显, 因此, 还需要判别哪个电路元件是电源(或起电源的作用), 哪个是负载(或起负载的作用), 如图 1-14 所示。

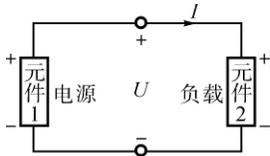


图 1-14 电源与负载的判别

一般可根据  $U$  和  $I$  的实际方向来确定。电源:  $U$  和  $I$  的实际方向相反, 电流从“+”端流出, 提供功率。

负载:  $U$  和  $I$  的实际方向相同, 电流从“+”端流入, 取用

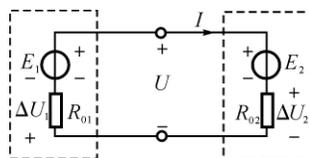


图 1-13 例 1-1 的电路

功率。那么,根据判定,图中元件 1 是电源,而元件 2 则是负载。

#### 4. 额定值与实际值

从以上分析可知,负载在运行(即工作)时,必须从电源取用功率。负载所取用的电功率为  $P=UI=I^2R$ ,即当负载( $R$ )为一定值时,其取用电功率的大小就随电压  $U$  或电流  $I$  的不同而不同。负载所取用的电功率用于能量转换,例如转换为热能、机械能、光能和声能等。如果负载取用的电功率大于负载自身的转换能力,那么,负载将会被烧毁。因此,生产厂家为使电器产品能在给定的工作条件下正常、安全运行,规定了一个正常允许值,即额定值,包括额定电压  $U_N$ 、额定电流  $I_N$  和额定功率  $P_N$  等额定数据。例如,一盏电灯的电压为 220 V,功率为 40 W,这就是它的额定值。若将该电灯接入 380 V 的电源,它将立即被烧毁;若将它接入 110 V 的电源,发光将严重不足。电气设备或元件的额定值通常标在产品的铭牌上或写在其说明中,在使用时必须注意额定数据。

但是,电气设备或元件在使用时的实际值不一定等于它的额定值。

究其原因,一是由于电源的输出电压经常波动,造成负载运行时的实际值或高或低;二是在供电时,为保证每个负载(如电灯、电炉、电动机等)均能独立正常工作,通常将负载并联运行。并联的负载越多(即增加),从电源取用的功率就越大。这不仅说明,电源输出功率和电流的大小取决于负载的大小,同时也说明,电源通常不可能工作在额定状态,但在使用时一般不应超过额定值。

**【例 1-2】** 有一额定功率值为 5 W,电阻值为 500  $\Omega$  的线绕电阻,其额定电流为多少? 在使用时电压不得超过多大的数值?

**【解】** 根据功率的计算式和已知条件,可直接求出额定电流,即

$$I = \sqrt{\frac{P}{R}} = \sqrt{\frac{5}{500}} \text{ A} = 0.1 \text{ A}$$

根据电阻的功率和电流,可知该电阻使用时的电压不得超过

$$U = RI = 500 \times 0.1 \text{ V} = 50 \text{ V}$$

若使用电压超过 50 V,由于电阻的实际耗散功率大于额定功率,该电阻将被烧毁。因此,选用电阻时不仅要确定欧姆数,还要根据电阻实际电流的大小来确定电阻的瓦数。

### 1.3.2 开路与短路状态

在图 1-15 所示的电路中,当开关 S 断开后,电路处于开路(空载)状态。由于电路断开(此时相当于  $R_L \rightarrow \infty$ ),故电路电流为零。这时,电源的端电压  $U_0$ (称为开路电压或空载电压)等于电源电动势,电源不输出电能。如上所述,电源开路时的特征可表示为

$$I = 0, \quad U = U_0 = E, \quad P = 0 \quad (1-18)$$

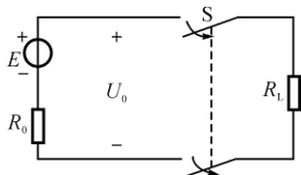


图 1-15 电路开路状态

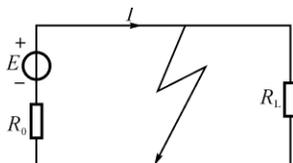


图 1-16 电路短路状态

如图 1-16 所示,当电路两端由于某种原因而直接连接在一起时,称为电路短路状态(此时相当于  $R_0=0$ ),电流有捷径通过,不再流过负载。因为此时回路中仅有阻值很小的电源内阻  $R_0$  限流,故电流很大,此电流称为短路电流  $I_S$ 。短路时电源所产生的电能全部被内阻所消耗。则  $P_E$  很大,电源将被烧毁。

如上所述,电源短路时的特征可表示为

$$\begin{cases} U=0, I=I_S=\frac{E}{R_0} \\ P_E=\Delta P=R_0 I^2, P=0 \end{cases} \quad (1-19)$$

由于短路电流具有极大的破坏性,应该尽量防范电路发生短路。通常采用的预防措施是,在电路中接入熔断器或自动空气开关来实现短路保护。

**【例 1-3】** 在图 1-15 所示的电路中,若已知其开路电压  $U_0=10\text{ V}$ 、短路电流  $I_S=20\text{ A}$ ,那么,该电源的电动势和内阻各为多少?

**【解】** 电源的电动势

$$E=U_0=10\text{ V}$$

电源的内阻

$$R_0=\frac{E}{I_S}=\frac{U_0}{I_S}=\frac{10}{20}\text{ }\Omega=0.5\text{ }\Omega$$

这是利用电源的开路电压和短路电流计算其电动势和内阻的一种方法。

### 1.3.3 电路中电位的计算

电路中的两点之间之所以有电压,是因为电路中的两点间存在电位差。对于一个比较复杂的电路,为了便于分析,常使用电位来表示电路中的电压。根据上述电位概念的规则,电路中任意两点间的电压,就等于这两点之间的电位之差。

在图 1-17 所示的电路中,当以 b 点为电位参考点时,则有

$$V_b=0, \quad V_a=U_{ab}+0=U_{ab}=8\times 5\text{ V}=40\text{ V}$$

当以 a 点为电位参考点时,如图 1-18 所示,则有

$$V_a=0, \quad V_b=0-U_{ba}=-40\text{ V}$$

由以上分析可知,当电路中某点电位设定为参考电位后,其他各点的电位都同它进行比较,比它高的为正值,比它低的为负值。正数值越大的电位越高,负数值越大的电位越低。另外,在同一电路中由于选择参考点的不同,各点的电位值将会随之