



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
(高职高专教育)

电工电子技术 简明教程

(第2版)

宋 红 主编



高等教育出版社
Higher Education Press

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
(高职高专教育)

电工电子技术简明教程

(第2版)

宋 红 主编

高等教育出版社

内容提要

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材(高职高专教育)。

本书根据计算机类专业和电子信息类专业的培养目标的要求编写而成,突出数字电子部分、适当淡化电路和模拟电子部分,为学生学习计算机组成原理、微机接口技术等后续课程准备必要的基础知识。

本书内容包括:电路的基本定律与分析方法、正弦交流电路、常用电动机与安全用电常识、常用半导体器件、基本放大电路、集成运算放大器、直流稳压电源、数制与编码、逻辑代数基础、门电路和组合逻辑电路、触发器和时序逻辑电路、存储器与可编程逻辑器件、整形与波形产生电路、数模与模数转换电路共十四章。

本书力求科学、先进,在内容上结合目前电工电子技术的发展,注重高职高专教育的实用性和针对性。

本书适合高职高专计算机类专业和电子信息类专业的学生作为教材使用,也可供电子信息等行业的广大读者阅读使用。

(附录)

图书在版编目(CIP)数据

电工电子技术简明教程/宋红主编. —2版. —北京:高等教育出版社,2008.5

ISBN 978-7-04-023663-7

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 049075 号

策划编辑 孙杰 责任编辑 孙薇 封面设计 张志奇 责任绘图 尹莉
版式设计 王艳红 责任校对 王超 责任印制 宋克学

出版发行 高等教育出版社
社址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100120
总机 010-58581000

经销 蓝色畅想图书发行有限公司
印刷 北京人卫印刷厂

开本 787×1092 1/16
印张 22.75
字数 550 000

购书热线 010-58581118
免费咨询 800-810-0598
网址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版次 2003年7月第1版
2008年5月第2版
印次 2008年5月第1次印刷
定价 28.40元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 23663-00

前 言

本书是在学习领会教育部《关于加强高职高专教育教材建设的若干意见》的精神基础上,遵照“高职高专规划教材编写的指导思想、原则和特色”编写的。本书的第1版是普通高等教育“十五”国家级规划教材(高职高专教育),本书在第1版教材的基础上修订而成,第2版书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材(高职高专教育)。

本书为高职高专计算机类专业和电子信息类专业精心打造。它把电路、模拟电子技术、数字电子技术按一定的比例整合到一起,主要任务是使学生掌握直流电路、交流电路、模拟电子电路、数字电子电路的基本分析方法,了解常用电子元件的使用,学会设计简单的电子电路。本书突出高职高专教育的特点,理论知识的讲授以应用为目的,以必需、够用为度;内容严谨、深入浅出、通俗易懂,便于教师讲授和学生自学。

本书的讲授以100学时为宜。电路部分主要讲述直流电路和交流电路,它是相关专业的理论基础。模拟电子电路部分的重点是集成运算放大器的应用。数字电子电路部分的重点是门电路和组合逻辑电路、双稳态触发器和时序逻辑电路。根据电子信息类专业培养目标的要求,本书突出数字电子部分,适当淡化电路和模拟电子部分,为学生学习计算机组成原理、微机接口技术等后续课程准备必要的基础知识。

在第1版的基础上,第2版进一步强调了应用,并对书中的一些内容结合新的发展情况作了一些修改:第一章修改第五节基尔霍夫定律的应用;第三章增加两节需了解的内容“变压器”、“三相异步电动机”;第十章第四节的标题修改为“常用组合逻辑电路部件及其应用”,强调应用,并增加了2~3个应用实例;第十一章增加了“集成计数器及其应用”一节;第十二章删除部分紫外线擦除的存储器以及通用阵列逻辑电路GAL,引入Flash器件的配置和CPLD器件的编程,同时引入SDRAM和DDRDRAM存储器以及CPLD、FPGA器件的开发软件;第十四章引入新的A/D、D/A转换技术,如 $\Delta-\Sigma$ A/D转换等。增加附录2:数字逻辑器件国标符号、曾用符号和美国符号对照图,以便与工程上实用的符号接轨,并方便学生的学习。全书内容共分十四章,每章结尾都有小结,指出本章的要点。各章均附有习题,与所讲授的内容密切配合,达到巩固基本概念、掌握分析方法等目的。

本书由太原理工大学谢克明教授、北京理工大学刘蕴陶教授审稿,由太原理工大学和太原理工大学阳泉学院(阳泉职业技术学院)多年从事教学工作的教师合作编写。本书由宋红教授担任主编并负责统稿。第一章、第七章由耿素军编写;第二章、第三章、第四章、第五章由薄新全编写;第六章、第八章、第十一章由史宝忠编写;第九章、第十章、附录1、2由余剑编写;第十二章由渠云田编写;第十三章、第十四章由谢刚编写。

由于编者水平有限,书中欠妥之处和错误在所难免,恳请广大读者批评指正,多提宝贵意见和建议,我们将不断改进和提高。

编 者

2008年1月

目 录

第一章 电路的基本定律与分析方法

第一节 电路模型及基本物理量	1
第二节 功率	4
第三节 电路元件	6
第四节 基尔霍夫定律	12
第五节 基尔霍夫定律的应用	15
第六节 电源模型的等效变换	19
第七节 叠加定理	22
第八节 戴维宁定理	24
第九节 一阶电路的瞬态过程	27
本章小结	35
本章习题	35

第二章 正弦交流电路

第一节 正弦量的三要素	38
第二节 正弦量的相量表示法	41
第三节 单一参数的交流电路	44
第四节 正弦交流电路元件的串并联	51
第五节 正弦交流电路的串并联谐振	54
第六节 正弦交流电路的功率	58
第七节 三相交流电路	62
第八节 非正弦周期电流电路的概念	69
本章小结	72
本章习题	73

第三章 常用电动机与安全

用电	76
第一节 变压器	76
第二节 三相异步电动机	84
第三节 电流对人体的伤害与触电急救	97
第四节 保护接地与保护接零	100
第五节 电器防雷、防火、防爆及防静电	101

本章小结	104
------	-----

本章习题	106
------	-----

第四章 常用半导体器件

第一节 半导体基本知识	108
第二节 PN 结与二极管	111
第三节 晶体管	115
第四节 场效应晶体管	121
本章小结	123
本章习题	123

第五章 基本放大电路

第一节 共射极放大电路的组成及工作原理	125
第二节 放大电路的静态分析	126
第三节 放大电路的动态分析	128
第四节 射极输出器	137
第五节 放大电路的频率特性	140
第六节 多级放大电路	141
第七节 差分放大电路	145
第八节 互补对称功率放大电路	149
本章小结	151
本章习题	152

第六章 集成运算放大器

第一节 集成运算放大器及其分析方法	155
第二节 放大器中的负反馈	158
第三节 集成运算放大器的应用	164
第四节 集成运算放大器的选择与使用的注意事项	174
本章小结	178
本章习题	178

第七章 直流稳压电源

第一节 单相半波整流电路	181
--------------	-----

第二节 单相桥式整流电路	183	第十二章 存储器与可编程逻辑器件	281
第三节 滤波电路	185	第一节 存储器分类	281
第四节 稳压电路	188	第二节 非易失存储器	283
第五节 串联开关式稳压电路简介	192	第三节 易失存储器	291
本章小结	195	第四节 存储器扩展	295
本章习题	195	第五节 现场可编程门阵列	297
第八章 数制与编码	197	第六节 复杂可编程逻辑器件	300
第一节 数制与转换	197	第七节 FPGA 器件的配置与 CPLD 器件的编程	305
第二节 数与字符的编码	202	第八节 FPGA 和 CPLD 器件的开发软件	306
本章小结	203	第九节 硬件描述语言	307
本章习题	204	本章小结	308
第九章 逻辑代数基础	205	本章习题	308
第一节 基本概念、公式和定理	205	第十三章 整形与波形产生电路	309
第二节 逻辑函数的化简方法	210	第一节 施密特触发器	309
第三节 逻辑函数的表示及其相互转换	217	第二节 单稳态电路	312
本章小结	221	第三节 方波发生器	315
本章习题	221	第四节 555 定时器及其应用	318
第十章 门电路和组合逻辑电路	223	本章小结	323
第一节 基本逻辑门电路	223	本章习题	323
第二节 TTL 集成门电路和 CMOS 集成门电路	225	第十四章 数模与模数转换电路	324
第三节 组合逻辑电路的分析和设计	235	第一节 数模转换器	324
第四节 常用组合逻辑电路部件及其应用	239	第二节 模数转换器	329
本章小结	249	本章小结	343
本章习题	249	本章习题	343
第十一章 触发器和时序逻辑电路	253	部分习题参考答案	344
第一节 触发器	253	附录 1 常用中、小规模基本逻辑单元引脚示意图	350
第二节 触发器逻辑功能的转换	261	附录 2 数字逻辑器件国标符号、曾用符号和美国符号对照图	355
第三节 时序逻辑电路分析	262	参考文献	356
第四节 寄存器	266		
第五节 计数器	270		
第六节 集成计数器及其应用	272		
本章小结	278		
本章习题	279		

第一章

电路的基本定律与分析方法

学习目标 掌握电压和电流的参考方向及等效的概念;掌握基尔霍夫定律及其应用;掌握运用三要素法分析计算一阶电路的方法。理解电路元件端口电压和端口电流的关系;理解叠加定理和戴维宁定理的应用。了解电路模型的概念。

学习电子信息技术,必须具备一定的电路理论基础。本章主要介绍电路的基本物理量及电流、电压的参考方向,讨论电阻、电感、电容、电压源、电流源等理想电路元件的属性,并在此基础上介绍电路分析与计算常用的几种方法。应该指出,上述方法虽然是以电阻电路为例讨论的,但它具有普遍性。在随后将学到的正弦交流电路中也同样适用。本章在最后一节,还扼要介绍了常用 RC 电路和 RL 电路的瞬态过程,以及求解一阶电路最常用的三要素法。

本章的重点是讨论电路元件端口上的电流、电压关系以及电路的基尔霍夫定律。基尔霍夫定律体现了由电路元件连接成电路整体之后,各部分电流及电压间的约束关系,它与元件的性质无关。这两种约束关系是电路分析与计算的基本依据。

第一节 电路模型及基本物理量

一、电路的基本功能和组成

电流通过的路径称为电路。电路是由许多电气元件和设备按一定的方式连接组合而成的。电路的基本功能可概括为以下两个方面。

(一) 电路能够实现电能的传输和转换

这方面的例子非常多,日常的照明用电就是白炽灯将电能转换为光能和热能,从而完成了电能的传输和转换。

(二) 电路能够实现对信号的传递和转换

这方面的例子也很普遍,例如人讲话的声音经过话筒转换成微弱的电信号,通过放大电路放

大,再将放大的电信号去驱动扬声器,使扬声器发出声来。

无论电路有多复杂,它都可以看做由电源、中间环节和负载三部分组成。

图 1.1 所示的是一个手电筒照明电路,其中图 1.1(a)是实际电路,它由一个干电池(电源)、一个小灯泡(负载)、一个开关和连接导线(中间环节)所组成。图 1.1(b)是手电筒电路的电路模型。其中 R_L 是灯泡的等效电阻, R_0 是电源的内阻, U_S 及对应的图形表示理想电压源, R_0 和 U_S 的串联代表干电池,S 是开关的代号。

电源是电路中能量的来源,是供应电能的装置,它把其他形式的能量转换为电能,如发电机将机械能转换为电能,电池将化学能转化为电能。

负载是取用电能的装置,它把电能转换为其他形式的能量,如热能、光能、机械能等。

连接导线以及开关,用来连接电源与负载,使它们构成电流通路,把电源的能量输送给负载,并根据需要控制电路的接通和关断。这一部分也称为电路的中间环节,起传输和控制电能的作用。

二、电路模型

实际的电气设备和元器件在工作时,其物理过程是非常复杂的,电路的电磁过程很难用简单的数学表达式来描述,为了研究电路的一般规律,常常需要将实际的电路和器件进行理想化处理。

将实际电路元件作理想化处理,是按能量转换的特性,突出元件主要的电磁性质,忽略其次要性质,把它近似地看做理想电路元件,用一个理想电路元件或几个理想电路元件的组合来代替一个实际电路元件。例如所有电能转换成热能的元件都抽象成电阻元件,用内电阻和理想电压源的串联来代替实际的电源,等等。在理想电路元件(今后理想两字常略去不写)中主要有电阻元件、电感元件、电容元件和电源元件。电阻、电感、电容相应的值称为电路参数。例如在图 1.1 所示的手电筒照明电路中,将小灯泡抽象成电阻元件,参数为 R_L 。干电池是电源元件,用内阻 R_0 和理想电压源 U_S 的串联组合来表示。S 为开关,连接导线的电阻值很小,一般忽略不计,用理想导线表示。 U_S 在电路中起激励作用,灯泡中的电流、功率称为电路中的响应。激励与响应的关系就是作用与结果的关系,激励与响应是电路理论中的常用概念。

用理想电路元件及其组合来代替实际电路元件,就构成了与实际电路相对应的电路模型。今后在进行理论分析时所指的电路,就是这种电路模型,简称电路。在电路图中,各种电路元件用规定图形符号表示。

三、电路的基本物理量

电路有许多的物理量,其中电压和电流是电路的基本物理量。

(一) 电流及其参考方向

电荷的定向流动形成电流。电流的实际方向习惯上指正电荷流动的方向,电流的大小用电流表示,记为 i 。电流定义为:单位时间内通过导体某一横截面的电荷。即

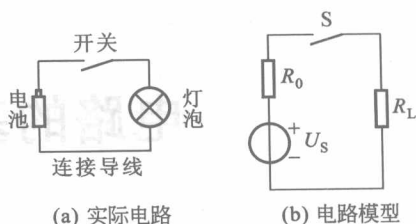


图 1.1 实际电路与电路模型

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1.1.1)$$

在国际单位制(SI)中,时间 t 的单位是 s(秒),电荷 q 的单位是 C(库[仑]),电流的单位是 A(安[培])。由式(1.1.1)可见,电流在量值上等于通过某处的电荷量与所需时间之比。式中 dq 是在极短时间 dt 内通过某处的电荷。

若 $\frac{dq}{dt} = \text{常数}$,这种电流只向一个方向流动,称其为恒定电流,简称直流(DC),用大写字母 I 来表示,式(1.1.1)可改写为

$$I = \frac{q}{t}$$

式中, q 是在时间 t 内通过某处的电荷量。

大小和方向随时间作周期性变化的电流称为交变电流,简称交流(AC)。用小写英文字母 i 表示。

特别指出,本书在讲解定理、原理时,考虑到其适用范围,如果该定理、原理对直流、交流都适用,则变量用小写字母来表示。如果特指直流电路,则各物理量用大写字母表示。

在工程和电力系统中,还常用 kA(千安)、mA(毫安)和 μA (微安)作电流单位。其换算关系为

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

在许多具体问题中,实际的电流方向事先是很难确定的,这时就需要先任意选定一个方向作为电流的参考方向,当然选定的参考方向不一定是电流的实际方向,当电流的参考方向与实际方向一致时,电流 i 为正值($i > 0$);当电流的参考方向与实际方向相反时,电流 i 为负值($i < 0$)。

采用了电流的参考方向以后,电流就变为一种代数量,电流的值就有了正负之分。图 1.2 上标示了电流的参考方向,可根据电流数值的正负知道其实际方向。显然,在未指定参考方向的情况下,电流值的正或负是没有意义的。

国标规定,电流的参考方向,用箭头符号直接标记在电流 i 通过的路径上,有时也采用双下标标记的方法。如 i_{ab} 表示电流的参考方向是由 a 指向 b。当然 $i_{ab} = -i_{ba}$,今后在电路图中只标明参考方向。

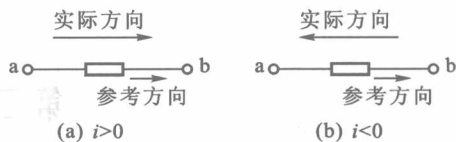


图 1.2 电流参考方向与实际方向的关系

(二) 电压及其参考方向

在电路中,将单位正电荷从 a 点移动到 b 点,电场力所作的功,记作 a、b 两点间的电压。用 u_{ab} 来表示,即

$$u_{ab} = \frac{dW}{dq} \quad (1.1.2)$$

电路中两点间的电压 u_{ab} 也可用两点间的电位差来表示

$$u_{ab} = V_a - V_b$$

V_a 和 V_b 分别为 a、b 两点的电位。电路中电位的定义为将单位正电荷从该点移至零电位参考点时,电场力所作的功。参考点是电路中任意选定的一个点,规定其电位为零,用符号“+”表示。在工程上常选择大地、设备外壳作为参考点,并统一规定参考点的电位为零。

在国际单位制中,电压的单位是 V(伏[特]),功的单位为 J(焦[耳])。电压的实际方向规定为从高电位指向低电位。在交流电路中,电压是时间的函数,电压有瞬时值、平均值和有效值之分,用小写字母 u 表示瞬时电压。如果电压的大小与方向均与时间无关,而为一常数,则称为直流电压,用大写字母 U 表示。

在复杂电路分析计算之前,或者在电压、电流方向做交替变化的电路中,无法事先知道哪点的电位高、哪点的电位低,实际的电压方向往往需要通过计算才能得知,这就需要引入电压参考方向的概念。

电压的参考方向常用一对“+”、“-”号表示。标“+”号代表高电位点,标“-”号代表低电位点。当电压的实际方向与所选的参考方向相同时,电压 u 为正值($u > 0$),反之,电压 u 为负值($u < 0$)。电压的参考方向也可用双下标或箭头表示。如 u_{ab} 表示的参考方向是 a 为高电位点, b 为低电位点, $u_{ab} = -u_{ba}$ 。箭头符号标注在元件旁边,所指的方向是参考方向,即从高电位点指向低电位点。

四、关联参考方向

电压、电流参考方向可以任意选取,因而,就有两种不同的选择方式,如图 1.3 所示。

对于一个元件或一段电路,当电流和电压参考方向一致时,称为关联参考方向。在图 1.3(a)中,电流、电压的参考方向一致,是关联参考方向;在图 1.3(b)中,电流、电压参考方向不一致,是非关联参考方向。

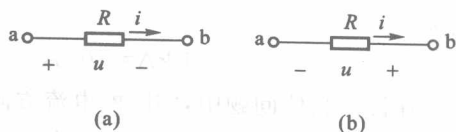


图 1.3 电压和电流方向

需要指出,在计算电路的某一电流或电压时,应先指明该电流或电压的参考方向,不指出参考方向,所求得的电流或电压的正负值就没有任何意义。

第二节 功 率

在物理学中,电功率是电流通过负载时电场力在单位时间内对电荷所作的功。数值上等于负载两端的电压与通过负载电流的乘积。即

$$p = ui \quad (1.2.1)$$

在国际单位制中,功率的单位为 W(瓦[特])。在工程上常用的功率单位还有 MW(兆瓦)、kW(千瓦)和 mW(毫瓦)。其换算关系为

$$1 \text{ MW} = 10^6 \text{ W}, \quad 1 \text{ kW} = 10^3 \text{ W}, \quad 1 \text{ mW} = 10^{-3} \text{ W}$$

在实际电路中,有些元件发出功率,有些元件吸收功率,但整个电路功率的代数和为零,遵守能量守恒定律。在电路分析计算中,要求根据计算结果就能区别元件是吸收功率还是发出功率,方法是用功率值的“+”、“-”号区别,规定以吸收功率为正,发出功率为负。由于电阻的功率 $p_R = Ri^2$,所以不管电流为正还是为负, p_R 都为正,电阻本身都是吸收功率的。

如果在电阻上电压 u 和电流 i 取关联参考方向, 电流、电压同为正或同为负, 按 $p=ui$ 计算, 必求得 $p>0$, 则电阻吸收功率; 如果电压、电流取非关联参考方向, 电流、电压正负符号相反, 按 $p=ui$ 计算结果为负值, 为了把它变为正值, 必须用 $p=-ui$ 计算, 这个原则可以推广到其他元件上。结论是:

在关联参考方向下

$$p=ui$$

非关联参考方向下

$$p=-ui$$

电流、电压的正负号如实代入, 计算结果 $p>0$ 是吸收功率; $p<0$ 是发出功率。

注意, 在直流电路中, 由于电压和电流均为恒定值。功率表达式通常写作 $P=UI$, U 和 I 是直流电压值和直流电流值。

功率的瞬时值对时间积分, 即为能量。从 t_0 到 t , 电路吸收的能量可由下式表示

$$W = \int_{t_0}^t p dt = \int_{t_0}^t ui dt \quad (1.2.2)$$

在日常生活中, 还经常用“度”来表示电能单位, 1 度电等于 $1 \text{ kW} \cdot \text{h}$ (千瓦时)。各种电气设备的电压、电流及功率等都有一个额定值。额定值是保证电气设备能安全、可靠长期运行时的允许值。当电流超过额定值时, 由于发热会使电气设备温度升高, 绝缘材料将被烧坏; 当所加的电压超过额定值过多时, 绝缘材料将被击穿。反之, 当电压和电流远低于额定值时, 就不能充分利用设备的工作能力或不能正常合理的工作。例如一个白炽灯的额定电压是 220 V , 功率是 60 W , 如电压过高、电流过大时, 灯丝将烧断; 电压过低、电流过小时, 白炽灯的亮度将降低。

应特别注意, 电气设备或元件的额定值不一定等于使用时达到的实际值。如电动机的实际输出功率受机械负载大小的影响, 很可能就达不到其标称的额定功率。

例 1.1 在图 1.4 所示的电路中, 已标出各元件电压、电流的参考方向, 已知 $I_1=3 \text{ A}$, $I_2=10 \text{ A}$, $I_3=-7 \text{ A}$, $U_1=-20 \text{ V}$, $U_2=20 \text{ V}$, $U_3=-20 \text{ V}$ 。求各方框电路吸收或发出的功率。

解: 根据直流电路的功率表达式 $P=UI$ 来计算功率。

方框 1: 因 U_1 和 I_1 是关联参考方向, 所以功率可表示为

$$P_1 = U_1 I_1 = -20 \times 3 \text{ W} = -60 \text{ W} \quad (P_1 < 0, \text{发出功率})$$

方框 2: 因 U_2 和 I_2 是关联参考方向, 所以功率可表示为

$$P_2 = U_2 I_2 = 20 \times 10 \text{ W} = 200 \text{ W} \quad (P_2 > 0, \text{吸收功率})$$

方框 3: 因 U_3 和 I_3 是非关联参考方向, 所以功率可表示为

$$P_3 = -U_3 I_3 = -(-20) \times (-7) \text{ W} = -140 \text{ W} \quad (P_3 < 0, \text{发出功率})$$

最后验证功率是否守恒:

$$P_1 + P_2 + P_3 = (-60 + 200 - 140) \text{ W} = 0$$

满足功率守恒定律, 即 $\sum P=0$, 说明计算正确。

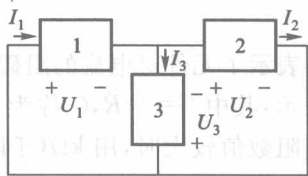


图 1.4 例 1.1 电路图

第三节 电路元件

电路元件是实际电气器件的理想化模型,熟练掌握电路元件的特性是研究电路的基础,本节重点介绍几个基本的电路元件。

一、电阻元件

电阻元件是电阻器、白炽灯、电炉等把电能转换成热能的器件的理想化模型,简称电阻。电流在电阻上转换成热能耗散掉,所以又称电阻为耗能元件。

电阻在电路中的图形符号用长方框表示,如图 1.5 所示。其中 R 是电阻的文字符号。电阻包括线性电阻和非线性电阻,这里只讨论线性电阻。

线性电阻是指电阻元件的阻值 R 是一个常数,与电阻两端电压、通过电流的大小无关。在关联参考方向下,如图 1.6(a)所示,其端电压 u 和通过的电流 i 之间成正比,即

$$R = \frac{u}{i} \quad (1.3.1)$$

这就是大家熟悉的欧姆定律。



图 1.5 电阻元件

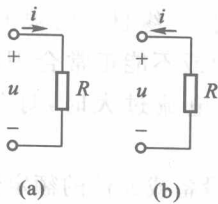


图 1.6 欧姆定律形式表示

当电压和电流参考方向相反时,如图 1.6(b)所示,欧姆定律应表示为

$$R = -\frac{u}{i}$$

R 表示了元件对电流的阻碍作用, R 称为元件的电阻值,单位为 Ω (欧[姆])。电阻的倒数用 G 来表示,其中 $G=1/R$, G 称为元件电导,单位为 S (西[门子]),电阻值和电导值都属电阻元件参数。电阻数值较大时,用 $k\Omega$ (千欧)或 $M\Omega$ (兆欧)为单位。它们之间的关系为

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

由上节可知,任何一个两端元件,当电压、电流取关联参考方向时,该元件吸收功率的瞬时表达式均可表示为

$$p = ui$$

电阻元件吸收的功率又可表示为

$$p = ui = Ri^2 = Gu^2 \quad (1.3.2)$$

从 t_0 到 t 的时间段内,电阻 R 吸收的能量可表示为

$$W = \int_{t_0}^t p(t) dt \quad (1.3.3)$$

在直流电路中, 电流不随时间变化, $i = I$ 。式(1.3.3)可简化为

$$W = P(t - t_0) = UIT = RI^2 T = \frac{U^2}{R} T \quad (1.3.4)$$

其中 $T = (t - t_0)$, I 和 U 分别表示直流电流和直流电压。

例 1.2 已知某实验室有额定电压 220 V, 额定功率 100 W 的白炽灯 8 盏。试求: 总功率、总电流和在 2 h 内消耗的总电能。

解: 因为白炽灯可以认为是纯电阻元件, 且在额定电压下工作, 所以

总功率为

$$P = 100 \times 8 \text{ W} = 800 \text{ W}$$

总电流为

$$I = \frac{P}{U} = \frac{800}{220} \text{ A} \approx 3.6 \text{ A}$$

2 h 内消耗的总电能为

$$W = Pt = 0.8 \times 2 \text{ kW} \cdot \text{h} = 1.6 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

例 1.3 如图 1.7 所示, 已知 $R = 5 \text{ k}\Omega$, $U = -10 \text{ V}$, 求电阻中流过的电流和电阻吸收的功率。

解: 由于电阻上电流、电压为非关联参考方向, 因此按欧姆定律, 其电流为

$$I = -\frac{U}{R} = -\frac{(-10)}{5 \times 10^3} \text{ A} = 2 \times 10^{-3} \text{ A} = 2 \text{ mA}$$

电阻吸收的功率为

$$P = -UI = \frac{U^2}{R} = \frac{(-10)^2}{5 \times 10^3} \text{ W} = 20 \text{ mW}$$

或者

$$P = -UI = -(-10) \times 2 \text{ mW} = 20 \text{ mW}$$

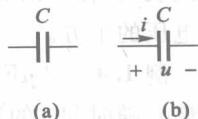
求得 $P > 0$, 所以电路吸收了电功率, 吸收的功率为 20 mW。

电阻元件的选用, 主要考虑两个参数, 一是电阻元件的阻值, 二是电阻元件的额定功率。

二、电容元件

电容器是由两块中间隔以绝缘材料电介质的金属极板构成的。电路中电容元件是实际电容器的理想化模型, 是电路中储存电场能的基本元件, 这个性质称为电容的储能特性。电容元件简称电容, 在电路图中用图 1.8(a) 所示的图形符号来表示。如果在电容器两极板上施加电压 u , 电容器的两极板将被充上等量的正负电荷, 在图 1.8(b) 所示的关联参考方向下, 其正极板上储存的电荷 q 与其两端电压 u 之间的关系可用下式表示, 即

$$q = Cu \quad (1.3.5)$$



符号 C 既表示电容元件, 又表示电容元件的参数。电容也有线性电容和

非线性电容两类, 线性电容的电容量 C 是常数, 非线性电容的电容量则随

图 1.8 电容元件表示

电压变化而变化。在本书里,只讨论线性电容。在国际单位制中,电容 C 的单位是 F(法[拉])。它是一个非常大的单位,在实际中,多采用 μF (微法)和 pF (皮法)作单位。其间的关系为

$$1\mu\text{F}=10^{-6}\text{F}, \quad 1\text{pF}=10^{-12}\text{F}$$

当加在电容两极板上的电压变化时,极板上所储存的电荷量也随之变化,即 $dq=Cdu$ 。于是在电路中将产生电流,此电流可由下面的分析得到。

将式(1.3.5)代入电流的表达式 $i=\frac{dq}{dt}$ 中,得出电容元件电压、电流在关联参考方向下的关系式为

$$i=C\frac{du}{dt} \quad (1.3.6)$$

从式(1.3.6)可知,通过电容的电流 i 与其端电压 u 的变化率成正比,即只有电压变化时才会有电流通过电容。这种特性称为电容元件的动态特性。

在直流电路中,电容元件的端电压不变,储存在极板上的电荷及介质中的电场都不随时间而变化,电路中没有电流流过,因此电容元件对直流电路而言相当于开路。

如果将电容元件接在交流电路中,当加在电容器两端电压 u 变化时,储存在极板上的电荷 q 也随着变化,电压升高时,极板上存储的电荷增加,电容被充电;当加在电容器两端电压 u 降低时,极板上存储的电荷减少,电容放电。其电压与电流之间仍满足关系式(1.3.6)。

综上所述,电容具有“隔直流通交流”的作用。

式(1.3.6)还可写为

$$du=\frac{1}{C}i dt$$

对上式从 $-\infty$ 到 t 进行积分(为避免积分上限 t 与积分变量相混,将积分变量换为 ξ)得

$$u(t)-u(-\infty)=\frac{1}{C}\int_{-\infty}^t i(\xi)d\xi \quad (1.3.7)$$

在图 1.8(b)所示的关联参考方向下,电容吸收功率的瞬时值可表示为

$$p=ui=uC\frac{du}{dt} \quad (1.3.8)$$

从 0 到 t 时间内,电容存储的电场能量可表示为

$$\begin{aligned} W_C &= \int_0^t p dt = \int_0^t uC \frac{du}{dt} dt \\ &= \int_{u(0)}^{u(t)} C u du = \frac{1}{2} C u^2(t) - \frac{1}{2} C u^2(0) = W_C(t) - W_C(0) \end{aligned}$$

当 $u(0)=0$ 即 $W_C(0)=0$ 时,对电容元件,任一时刻储存的能量可表示为

$$W_C = \frac{1}{2} C u^2 \quad (1.3.9)$$

上式表明:任一时刻,电容元件存储的电场能量正比于该时刻电压的平方。

例 1.4 $2\mu\text{F}$ 电容两端的电压波形如图 1.9 所示,画出电流 i_C 随时间 t 的波形关系,并求电容的最大储能。

解:(1) 写出电容电压 u_C 与时间 t 的函数关系式:

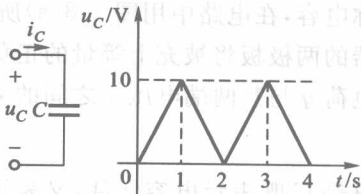


图 1.9 例 1.4 电路图

$$u_c = \begin{cases} 10t, & 0 \leq t \leq 1 \text{ s} \\ -10t + 20, & 1 \leq t \leq 2 \text{ s} \\ 10t - 20, & 2 \leq t \leq 3 \text{ s} \\ -10t + 40, & 3 \leq t \leq 4 \text{ s} \end{cases}$$

(2) 根据图 1.9 所示的参考方向和式(1.3.6)可得

$$i = C \frac{du}{dt} = 20 \mu\text{A} \quad \begin{cases} 0 \leq t \leq 1 \text{ s} \\ 2 \leq t \leq 3 \text{ s} \end{cases}$$

$$i = C \frac{du}{dt} = -20 \mu\text{A} \quad \begin{cases} 1 \leq t \leq 2 \text{ s} \\ 3 \leq t \leq 4 \text{ s} \end{cases}$$

(3) 根据上式得到的电容充放电电流 i_c 随时间 t 的波形关系如图 1.10 所示。

(4) 由电容的储能表达式 $W_c = \frac{1}{2}Cu^2$ 可知, 当电容电压最大时, 电容的储能最大, 所以

$$W_{cm} = \frac{1}{2}Cu_m^2 = \frac{1}{2} \times 2 \times 10^{-6} \times 10^2 \text{ J} = 10^{-4} \text{ J}$$

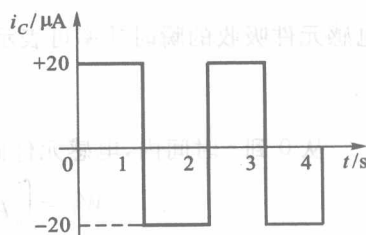


图 1.10 电容充放电的电流波形

三、电感元件

用一匝或多匝导线绕制的线圈, 其导线电阻不计的理想化模型就是电感元件, 简称电感。当有电流通过线圈时, 将在线圈中及其周围建立磁场。电感是电路中储存磁场能的基本元件。设磁通为 Φ , 线圈匝数为 N , 则与线圈相交链的磁链为

$$\Psi = N\Phi \quad (1.3.10)$$

磁链 Ψ 的方向与电流 i 方向之间满足右手螺旋定则, 如图 1.11(a) 所示。在图 1.11(b) 中, 还规定了端电压 u 和电流 i 的参考方向, 其中 u 和 i 为关联参考方向, L 为电感元件的符号。电感也分为线性电感和非线性电感两类。其中线性电感元件的磁链 Ψ 与电流 i 成正比, 比例常数也用 L 表示, 称为线圈的电感或自感。即

$$\Psi = Li \quad (1.3.11)$$

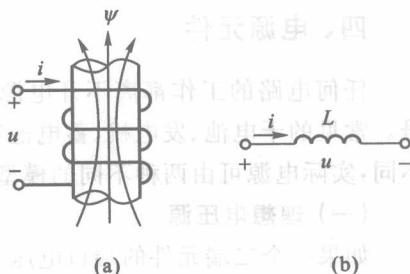


图 1.11 电感元件表示

在国际单位制中, 磁链 Ψ 的单位是 Wb(韦[伯]), 当电流的单位是 A(安[培])时, 电感 L 的单位是 H(亨利[利])。若电感比例常数 L 不是常数, 而是随电流 i 的大小而变化, 则称为非线性电感元件。常见的带铁心的线圈就是非线性电感元件。本书只讨论线性电感元件。

当交变电流通过线圈时, 根据电磁感应定律, 将在线圈中产生感生电动势。按图 1.11(a) 所示的参考方向, 则有

$$u = \frac{d\Psi}{dt} \quad (1.3.12)$$

将式(1.3.11)代入该式,按图示的方向,可得到

$$u = L \frac{di}{dt} \quad (1.3.13)$$

此式是电感元件上的电压和电流关系式。它表明,在任一时刻,线性电感的端电压 u 与该时刻流过线性电感的电流 i 的变化率成正比,而与其大小无关。

在直流电路中,由于电流不随时间变化,所以 $u=0$ 。即在直流电路中,电感元件相当于短路,所以电感元件也具备动态特性。

当线性电感的端电压和流过线性电感的电流为关联参考方向时,它们的积分关系可写为

$$i(t) - i(-\infty) = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t u(\xi) d\xi \quad (1.3.14)$$

电感元件吸收的瞬时功率可表示为

$$p = ui = Li \frac{di}{dt} \quad (1.3.15)$$

从 0 到 t 时间内,电感元件储存的磁场能量可表示为

$$\begin{aligned} W_L &= \int_0^t p dt = \int_0^t Li \frac{di}{dt} dt \\ &= \int_{i(0)}^{i(t)} Lid i = \frac{1}{2} Li^2(t) - \frac{1}{2} Li^2(0) = W_L(t) - W_L(0) \end{aligned}$$

当 $i(0)=0$ 即 $W_L(0)=0$ 时,任一时刻电感元件储存的能量可表示为

$$W_L = \frac{1}{2} Li^2 \quad (1.3.16)$$

上式表明,任一时刻,电感元件储存的磁场能量正比于该时刻电流的平方。

需要指出,实际的线圈都是有电阻的。因而,分析实际问题时,在电路中常用电阻和电感的串联组合来代表实际的线圈。当流过线圈的电流过大时,线圈会发热,有可能烧坏线圈。因此,实际选用线圈时,需要考虑线圈的额定功率和额定电流。

四、电源元件

任何电路的工作都离不开电源,电源在电路中起激励作用,它能向外电路提供电能或电信号。常见的干电池、发电机、蓄电池等都是实际电源的例子。根据电源输出的电流、电压的特征不同,实际电源可由两种不同的模型表示:一类是电压源模型;另一类是电流源模型。

(一) 理想电压源

如果一个二端元件的端口电压 u 与时间 t 总能保持一个特定的函数关系,而与通过它的电流无关,就称其为理想电压源,用 u_s 表示。理想电压源的电路图形符号如图 1.12(a) 所示。如果 u 不随时间变化,则称其为直流电压源。用 U_s 表示,如图 1.12(b) 所示。

通常,一个实际电源从空载到满载的输出电压均比较稳定,负载加大时,电压下降并不多,所以实际电源可以用理想电压源 u_s 和内阻 R_0 串联组合模型来描述,如图 1.12(c) 所示,称为实际电源的电压源模型。

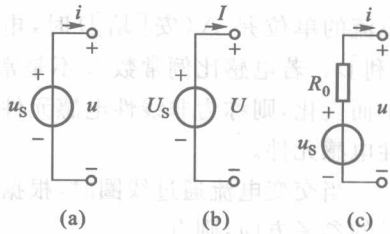


图 1.12 电压源及电源表示

电压源作为一个电路元件,它可以向外电路发出功率,也可以从外电路吸收功率,如蓄电池充电就是在吸收功率。

综上所述,理想电压源有如下的特点:

- (1) 理想电压源的端电压完全由自身的特性确定,与通过它的电流的大小和方向无关。
- (2) 理想电压源的电流为任意值,电流的大小和方向由外电路参数决定。

当实际电源用电阻 R_0 和理想电压源 u_s 的串联表示后,电源的端电压为

$$u = u_s - R_0 i$$

当外部接上负载后,端电压 u 将低于理想电压源的电压 u_s ,负载电流越大,则端电压 u 越低,即有一部分电压降到了内阻 R_0 上。

实际的电源总是存在内阻的,其内阻越小,它的特性就越接近于理想电压源。

(二) 理想电流源

如果一个两端元件,其端口电流 i 与时间 t 总能保持一个特定的函数关系,而与它两端的电压无关,就称其为理想电流源,用 i_s 表示。如果 i_s 不随时间变化,则称其为直流电流源,用 I_s 表示。图 1.13(a) 给出了理想电流源的电路图形符号,图 1.13(b) 给出了直流电流源的电路图形符号。

实际的电源可以用一个电阻和理想电流源并联组合的模型来描述,如图 1.13(c) 所示,称为实际电源的电流源模型。

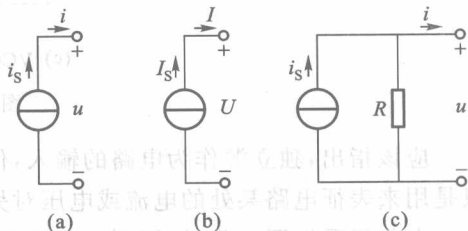


图 1.13 电流源及电源表示

综上所述,理想电流源有如下的特点:

- (1) 理想电流源的输出电流完全由自身的特性确定,与其端电压无关。
- (2) 理想电流源的端电压可以是任意值,端电压的大小和方向取决于外电路参数。

当一个实际电源用电阻和电流源的并联表示后,其端电流为

$$i = i_s - \frac{u}{R}$$

即实际电源提供给外电路的电流 i 等于 i_s 减去电源内电阻上的分流 $\frac{1}{R}u$,电源的内电阻越大,分流越小,其特性越接近于理想电流源。在实际应用中,有些电源近似具有这样的性质。例如光电池在一定照度的光线照射时,光电池将被激发产生一定的电流,该电流与照度成正比,而与它的电压无关。光电池可近似看做电流源。

(三) 受控源

前面讲到的电压源和电流源,它们的输出不受其他支路的控制,称为独立源。这里介绍另一类电源,它们输出的电压、电流并不独立存在,而是受电路中另一处的电压或电流的控制,这类电源称为受控源。根据控制量是电压或电流、受控的电源是电压源或电流源,受控源有四种基本形式:电压控制电压源(VCVS)、电流控制电流源(CCCS)、电压控制电流源(VCCS)和电流控制电压源(CCVS)。图 1.14 分别给出了它们的图形符号,图中的菱形符号表示受控电源, μ 、 r 、 g 、 β 是控制系数,其中 μ 和 β 量纲为一, r 和 g 分别有电阻和电导的量纲。当这些系数为常数时,被控量与控制量成正比,这种受控源为线性受控源。本书只讨论线性受控源。