



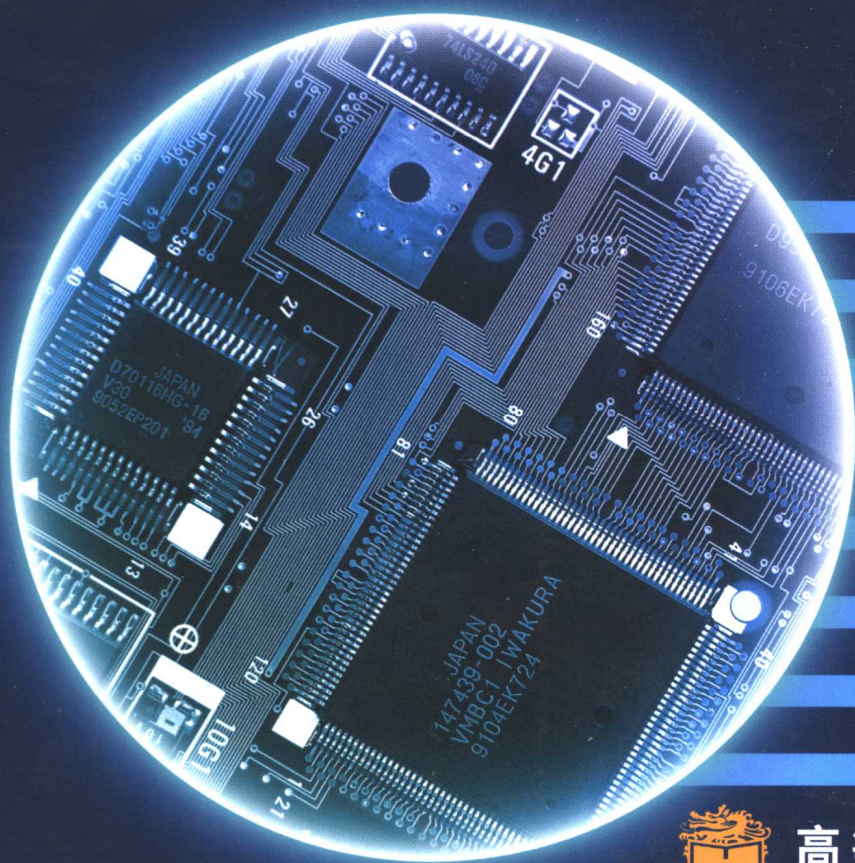
普通高等教育“十五”国家级规划教材

(高职高专教育)

电工电子技术 简明教程

谢克明 主 编

宋 红 副主编



高等教育出版社

普通高等教育“十五”国家级规划教材
(高职高专教育)

电工电子技术简明教程

谢克明 主 编
宋 红 副主编

高等教育出版社

内 容 提 要

本书是普通高等教育“十五”国家级规划教材(高职高专教育)。

本书是根据电子信息类专业的培养目标的要求编写的,突出数字电子电路部分、淡化电路和模拟电子电路部分,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:电路理论基础、正弦交流电路、安全用电常识、常用晶体管、基本放大电路、集成运算放大器、直流稳压电源、数制和编码、逻辑代数基础、门电路和组合逻辑电路、双稳态触发器和时序逻辑电路、集成化存储器电路、脉冲波形的产生和整形、数字量和模拟量的转换等共 14 章。

本书力求科学性和先进性,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。

本书适合高职高专电子信息类计算机应用技术、计算机网络技术、软件技术、信息技术专业的学生作为教材使用,也可供计算机行业的广大读者阅读使用。

图书在版编目(CIP)数据

电工电子技术简明教程/谢克明主编. —北京:高等教育出版社, 2003.7

ISBN 7-04-012556-0

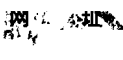
I. 电... II. 谢... III. ①电工技术—高等学校:技术学校—教材②电子技术—高等学校:技术学校—教材 IV. TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 014588 号

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 100011
总 机 010-82028899

经 销 新华书店北京发行所
印 刷 北京铭成印刷有限公司

开 本 787×1092 1/16
印 张 23
字 数 560 000

购书热线 010-64054588
免费咨询 800-810-0598
网 址  <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>

版 次 2003 年 7 月第 1 版
印 次 2003 年 7 月第 1 次印刷
定 价 28.70 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

出版说明

为加强高职高专教育的教材建设工作,2000年教育部高等教育司颁发了《关于加强高职高专教育教材建设的若干意见》(教高司[2000]19号),提出了“力争经过5年的努力,编写、出版500本左右高职高专教育规划教材”的目标,并将高职高专教育规划教材的建设工作分为两步实施:先用2至3年时间,在继承原有教材建设成果的基础上,充分汲取近年来高职高专院校在探索培养高等技术应用性专门人才和教材建设方面取得的成功经验,解决好高职高专教育教材的有无问题;然后,再用2至3年的时间,在实施《新世纪高职高专教育人才培养模式和教学内容体系改革与建设项目计划》立项研究的基础上,推出一批特色鲜明的高质量的高职高专教育教材。根据这一精神,有关院校和出版社从2000年秋季开始,积极组织编写和出版了一批“教育部高职高专规划教材”。这些高职高专规划教材是依据1999年教育部组织制定的《高职高专教育基础课程教学基本要求》(草案)和《高职高专教育专业人才培养目标及规格》(草案)编写的,随着这些教材的陆续出版,基本上解决了高职高专教材的有无问题,完成了教育部高职高专规划教材建设工作的第一步。

2002年教育部确定了普通高等教育“十五”国家级教材规划选题,将高职高专教育规划教材纳入其中。“十五”国家级规划教材的建设将以“实施精品战略,抓好重点规划”为指导方针,重点抓好公共基础课、专业基础课和专业主干课教材的建设,特别要注意选择一部分原来基础较好的优秀教材进行修订使其逐步形成精品教材;同时还要扩大教材品种,实现教材系列配套,并处理好教材的统一性与多样化、基本教材与辅助教材、文字教材与软件教材的关系,在此基础上形成特色鲜明、一纲多本、优化配套的高职高专教育教材体系。

普通高等教育“十五”国家级规划教材(高职高专教育)适用于高等职业学校、高等专科学校、成人高校及本科院校举办的二级职业技术学院、继续教育学院和民办高校使用。

教育部高等教育司

2002年11月30日

前 言

本教材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》的精神基础上编写的。

电工电子技术课程是高职高专电子信息类专业的一门专业基础课(必修),课程的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。教材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。本教材内容严谨、深入浅出、通俗易懂,便于教师讲授和学生自学。

本教材的讲授以 100 学时为宜。电路部分主要包括直流电路和交流电路,这是本教材的理论基础,模拟电子电路部分的重点是集成运放的应用。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。

全书内容共分 14 章,每章结尾都有小结指出本章的要点;各章均附有思考题和习题与所讲授的内容密切配合,以达到巩固基本概念、掌握分析方法的目的。

本书由华北工学院刘朝阳教授审稿,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。主编谢克明,副主编宋红。第 1 章、第 7 章由耿素军编写;第 2 章、第 3 章、第 4 章由薄新全编写;第 5 章由宋红编写;第 6 章、第 8 章、第 11 章由史宝忠编写;第 9 章、第 10 章、附录 1 由余剑编写;第 12 章、第 14.3 节、附录 2 由渠云田编写;第 13 章、第 14 章由谢刚编写;谢克明负责对全书统稿。

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

2002 年 12 月

目 录

第 1 章 电路理论基础	1	4.4 场效应管	92
1.1 电路模型及基本物理量	1	本章小结	95
1.2 功率	4	思考题与习题	95
1.3 电路元件	5	第 5 章 基本放大电路	97
1.4 基尔霍夫定律	12	5.1 共射极放大电路的组成及工作原理	97
1.5 基尔霍夫定律的应用	14	5.2 放大电路的静态分析	98
1.6 电压源与电流源的等效变换	19	5.3 放大电路的动态分析	100
1.7 叠加定理	22	5.4 射极输出器	109
1.8 戴维宁定理	23	5.5 多级放大电路	111
1.9 一阶电路的瞬态过程	26	本章小结	115
本章小结	34	思考题与习题	115
思考题与习题	35	第 6 章 集成运算放大器	118
第 2 章 正弦交流电路	37	6.1 集成运算放大器的基本组成	118
2.1 正弦量的三要素	37	6.2 放大器中的负反馈	122
2.2 正弦量的相量表示法	40	6.3 集成运算放大器的应用	126
2.3 电阻、电感、电容元件的特性	42	6.4 集成运算放大器的选择与使用	
2.4 正弦交流电路中元件的串并联	49	注意事项	132
2.5 正弦交流电路的串并联谐振	52	本章小结	135
2.6 正弦交流电路的功率	56	思考题与习题	135
2.7 三相交流电路	60	第 7 章 直流稳压电源	138
2.8 非正弦周期电流电路的概念	67	7.1 单相半波整流电路	138
本章小结	69	7.2 单相桥式整流电路	140
思考题与习题	70	7.3 滤波电路	142
第 3 章 安全用电常识	72	7.4 稳压电路	144
3.1 电流对人体的作用	72	7.5 开关电源简介	149
3.2 触电形式与触电急救	73	本章小结	151
3.3 保护接地和保护接零	74	思考题与习题	151
3.4 电气防雷、防火和防爆	76	第 8 章 数制与编码	154
3.5 静电的防护	78	8.1 数制及其转换	154
本章小结	79	8.2 数字电子装置中数的表示方法	159
思考题与习题	79	8.3 数与字符的编码	160
第 4 章 常用晶体管	80	本章小结	162
4.1 半导体基本知识	80	思考题与习题	162
4.2 PN 结与晶体二极管	82	第 9 章 逻辑代数基础	164
4.3 晶体三极管	87	9.1 基本概念、公式和定理	164

9.2 逻辑函数的化简方法	169	12.4 存储器的扩展	268
9.3 逻辑函数的表示方法及其相互转换	175	12.5 可编程逻辑阵列与分类	271
本章小结	179	12.6 可编程阵列逻辑(PAL)	272
思考题与习题	179	12.7 通用阵列逻辑(GAL)	276
第 10 章 门电路和组合逻辑电路	181	12.8 GAL22V10	278
10.1 基本逻辑门电路	181	12.9 GAL16V8	281
10.2 TTL 集成门电路和 CMOS 集成门 电路	183	12.10 在系统可编程逻辑器件 ispPLD	283
10.3 组合逻辑电路的分析和设计	193	12.11 可编程逻辑器件的程序设计	290
10.4 组合逻辑电路部件	196	本章小结	300
本章小结	207	思考题与习题	301
思考题与习题	208	第 13 章 脉冲波形的整形与产生	303
第 11 章 双稳态触发器和时序逻辑 电路	211	13.1 概述	303
11.1 双稳态触发器	211	13.2 脉冲整形电路	305
11.2 触发器逻辑功能的转换	221	13.3 脉冲产生电路	314
11.3 时序逻辑电路分析	223	13.4 555 定时器及其应用	319
11.4 寄存器	230	本章小结	325
11.5 计数器	235	思考题与习题	325
本章小结	252	第 14 章 数模和模数转换	327
思考题与习题	253	14.1 数模转换	327
第 12 章 半导体存储器与可编程逻辑 器件	255	14.2 模数转换	330
12.1 半导体存储器概述	255	本章小结	338
12.2 只读存储器	257	思考题与习题	339
12.3 随机存储器	264	部分习题答案	341
		附录 常用中、小规模基本逻辑单元 引脚示意图	351
		参考文献	357

第 1 章 电路理论基础

学习电气信息技术,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,但它具有普遍性。在后面将讲述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、电压关系与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,各电流间及各电压间的约束关系,这与元件的性质无关。这两种约束关系是电路分析与计算的基本依据。

1.1 电路模型及基本物理量

1.1.1 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:

1. 电路能够实现电能的传输和转换

这方面的例子非常多,例如日常的用电照明就是利用灯泡将电能转换为光能和热能,从而完成了电能的传输和转换。

2. 电路能够实现对信号的转换和传递

这方面的例子也很普遍,例如人的声音经过话筒转换成微弱的电信号,通过放大电路放大,放大了的电信号驱动扬声器,使扬声器发出声来。

无论电路有多复杂,它都可以看作由电源,中间环节和负载 3 部分组成。

图 1.1.1 所示的是一个手电筒照明电路,其中图(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)组成。

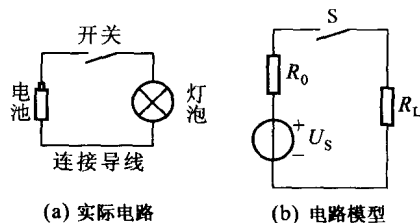


图 1.1.1 实际电路与电路模型

图(b)是手电筒照明电路的电路模型。其中 R_L 是灯泡的等效电阻, R_0 是电源的内阻, U_S 对应的图形表示理想电压源, U_S 表示理想电压源的电压, R_0 和 U_S 的串联代表干电池, S 是开关的符号。

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。例如发电机将机械能转换为电能,电池将化学能转换为电能。

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。

连接导线和开关将电源与负载连接起来,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。

1.1.2 电路模型

实际的电器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的处理。

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,忽略其次要电磁性质,把它近似地看作理想电路元件,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器件。例如凡是把电能转换成热能的元件都抽象成电阻,用内电阻和理想电压源的串联来代替实际的电源。在理想电路元件(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、电容相应的量值称电路参数。例如在图 1.1.1 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。本书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。

1.1.3 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。

1. 电流及其参考方向

电荷的定向移动形成电流。电流的实际方向习惯上指正电荷运动的方向,电流的大小用电流强度来表示,简称电流,用 i 表示。电流强度的定义为:单位时间内通过导体某一横截面的电荷量。即

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

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,当电路中的某一截面在 1 s 时间内,通过 1 C 的电荷量时,电路中该处的电流为 1 A。

若 $\frac{dq}{dt} = \text{常数}$, 称这种电流为恒定电流, 简称直流, 用大写字母 I 表示, $I = \frac{q}{t}$ 。

当 $\frac{dq}{dt} \neq \text{常数}$ 时, 电流的大小或方向随时间变化, 称这种电流为交变电流, 简称交流用小写英文字母 i 表示。

特别指出, 本书在讲解定理、原理时, 考虑到普遍意义, 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, 各物理量则用大写字母表示。

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数量, 电流的值才有正负之分。图 1.1.2 中有了电流的参考方向, 就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。

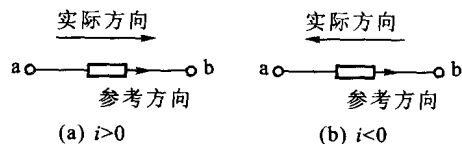


图 1.1.2 电流参考方向
与实际方向的关系

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 。且 $i_{ab} = -i_{ba}$, 今后电路图中只标明参考方向。

2. 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“ $\perp$ ”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。在一般情况下, 电压是时间的函数, 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“+”和“-”号表示。标“+”号代表高电位点, 标“-”号代表低电位点。当电压的实际极性与所选的参考极性相同时, 电压 u 为正值($u > 0$), 反之, 电压 u 为负

值($u < 0$)。电压的参考极性也可用双下标或箭头表示。如 u_{ab} 表示的参考极性是 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, 即从高电位指向低电位。

3. 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 1.1.3 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 1.1.3(a) 中, 电流、电压的参考方向一致, 是关联参考方向; 当电流和电压参考方向不一致时, 称为非关联参考方向。在图 1.1.3(b) 中, 电流、电压是非关联参考方向。

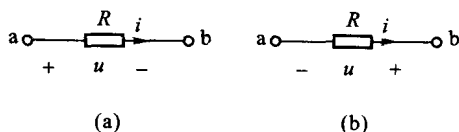


图 1.1.3 电压和电流方向

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。

1.2 功率

在物理学中知道, 电功率是电流通过负载时电场力在单位时间内对电荷所做的功。数值上等于负载两端的电压和负载中电流强度的乘积。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, kW 和 mW。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, 有些元件在放出功率, 有些元件在吸收功率, 即功率的代数和为零, 遵守能量守恒定律。在电路分析计算中, 要求一看计算结果就能区别功率是吸收还是放出, 方法是用功率值的“+”、“-”号区别, 规定以吸收功率为正, 放出功率为负。因为在电阻上 $p_R = Ri^2$, 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: 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; $p < 0$ 是放出功率。

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。由 t_0 到 t , 电路吸收的能量可由下式表示

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

在日常生活中,还经常用“度”来表示电能单位,1度电等于1 kWh(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。当电流超过额定值过多时,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能力或不能正常合理的工作。例如一个灯泡的额定电压是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,灯泡的亮度将降低。

特别注意,电气设备或元件的额定值不一定等于实际值。如电动机的实际输出功率和电流完全决定于轴上所带机械负载的大小。

例 1.1 在图 1.2.1 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放出的功率。

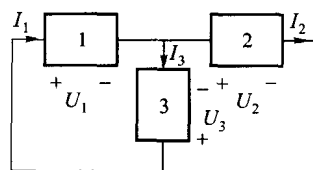


图 1.2.1 例 1.1 题图

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 和 I 是关联参考方向,所以功率可表示为

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

方框 2 因 U 和 I 是关联参考方向,所以功率可表示为

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

方框 3 因 U 和 I 是非关联参考方向,所以功率可表示为

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

最后验证功率是否守恒:

方框 1 和方框 3 共有

$$-60 \text{ W} - 140 \text{ W} = -200 \text{ W} \text{ 的功率放出。}$$

方框 2 共有 200W 的功率吸收。

满足功率守恒定律,即 $\sum P = 0 \text{ W}$,说明计算正确。

1.3 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。

1.3.1 电阻

电阻元件是电阻器、白炽灯、电炉等把电能转换成热能器件的理想化模型,简称电热相关元件。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 1.3.1 所示。其中 R 是电阻的文字符号。电阻有线性电阻和非线性电阻之分,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,与电压、电流大小无关。在关联参考方向条件下,如图 1.3.2(a)所示,其端电压 u 和通过的电流强度 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。

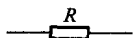


图 1.3.1 电阻元件

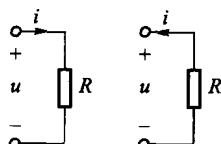


图 1.3.2 欧姆定律形式的表示

当电压和电流参考方向相反时,如图 1.3.2(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,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

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

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 一只 220 V,100 W 的白炽灯,额定电流是多少? 灯丝电阻是多少? 若每晚工作 4 h,一个月消耗多少电能(以 kWh 计,即单位为度)?

解: 白炽灯可以看作是纯电阻。

$$\text{该电灯的额定电流为 } I = \frac{P}{U} = \frac{100}{220} \text{ A} \approx 0.45 \text{ A}$$

$$\text{灯丝电阻为 } R = \frac{U^2}{P} = \frac{48\,400}{100} \Omega = 484 \Omega$$

若每晚工作 4 h,一个月按 30 天计算,则消耗的电能为:

$$W = PT = 100 \times 10^{-3} \times 4 \times 30 \text{ kWh} = 12 \text{ kWh}$$

例 1.3 如图 1.3.3 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

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

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 。

对于电阻元件的选用,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。

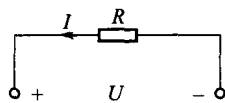


图 1.3.3 例 1.3 题图

1.3.2 电容

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。电容元件是实际电容器的理想化模型,是电路中能储存电场能的基本元件,这个性质称为电容的储能特性。

电容在电路中的图形符号用图 1.3.4(a)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 q ,在图 1.3.4(b)所示的关联参考方向下,其正极板上储存的电荷量 q 与其两端电压 u 之间的关系可用下式表示,即

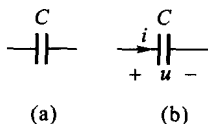


图 1.3.4 电容元件的表示

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

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电压的变化而变化。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。其之间的关系为

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

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

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,通过电容器的电流 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。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,储存在极板上的电量及介质中的电场,都不随时间而变化,导线中没有电流流过,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,极板上存储的电荷量增加,电容器充电;当加在电容器两端电压 u 降

低时,极板上存储的电荷量减少,电容器放电。其电压与电流之间仍满足关系式(1.3.6)。

所以电容器具有“隔直流通交流”的作用。

式(1.3.6)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1.3.4(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

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

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

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

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 $2\mu\text{F}$ 电容器两端的电压波形如图1.3.5所示,画出电流 i_C 随时间 t 的波形关系,并求电容储存能量的最大值。

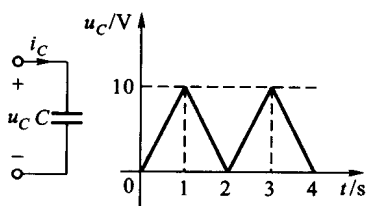


图1.3.5 例1.4题图

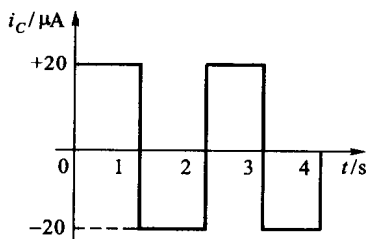


图1.3.6 电容充放电的电流波形

解:(1)写出电容电压 u_C 与时间 t 的函数关系式

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

(2)根据图示的参考方向和(1.3.6)式可得

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

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

(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 1.3.6 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

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

1.3.3 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。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通链为

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

磁通链 Ψ 方向与电流 i 方向之间满足右手螺旋定则, 如图 1.3.7(a) 所示。在图 1.3.7(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 为电感元件的文字符号。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通链 Ψ 与电流 i 成正比, 比例常数用 L 表示, 称为线圈的电感或自感, 即

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

在国际单位制中, 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]), 若电感 L 不是常数, 而是随电流 i 的大小而变化, 则成为非线性电感元件。我们常见的带铁芯的线圈就是非线性电感元件。本书只讨论线性电感元件。

当变化的电流通过线圈时, 根据电磁感应定律, 将在线圈中产生感生电动势。按图 1.3.7(a) 所示的参考方向, 则有

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

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。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。

在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

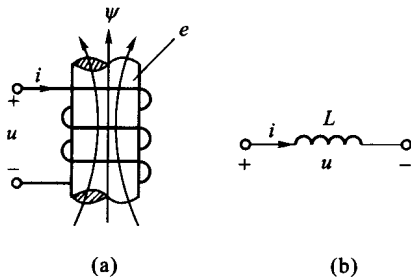


图 1.3.7 电感元件的表示

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

从 0 到 t 时间内,电感元件储存的磁场能量可表示为

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

当 $i(0)=0$ 或 $W_L(0)=0$ 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,在实际问题中,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,就有可能烧坏线圈。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。

1.3.4 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、电压的特性不同,实际电源有两种不同的类型:一类是电压源;另一类是电流源。

1. 电压源

如果一个二端元件的端口电压 u 和时间 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。用字母 u_s 表示。理想电压源的电路图形符号如图 1.3.8(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 1.3.8(b) 所示。

通常,一个实际电压源从空载到满载的输出电压比较稳定,负载加大时,电压下降并不多,所以实际电压源可以用理想电压源 u_s 和内阻 R_0 串联组合的模型来描述,如图 1.3.8(c) 所示。

电压源作为一个电路元件,它可以向外电路放出功率,也可以从外电路吸收功率,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。

当电压源用电阻 R_0 和理想电压源 u_s 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。

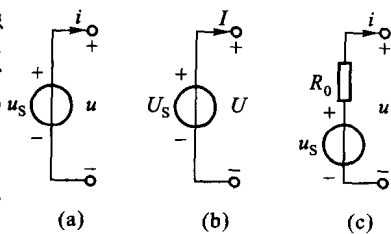


图 1.3.8 电压源