

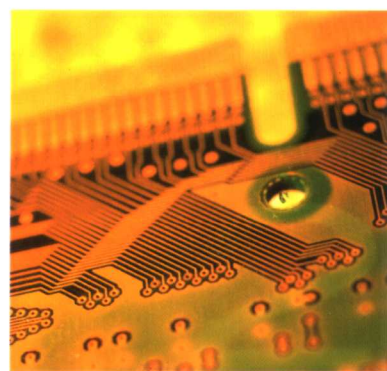
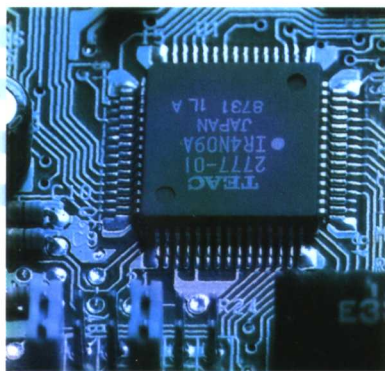
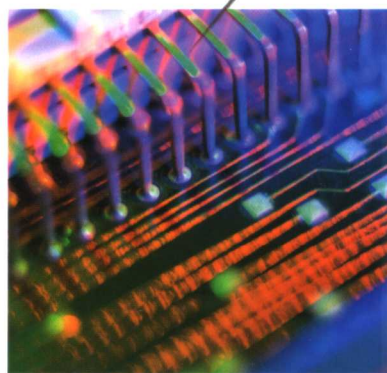


21 世纪高等学校应用型教材

计算机电路基础

□ 魏淑桃 主 编

□ 杨 洁 贺海晖 陈志毅 副主编



高等教育出版社
Higher Education Press

21 世纪高等学校应用型教材

计算机电路基础

魏淑桃 主 编

杨 洁 贺海晖 陈志毅 副主编

高等教育出版社

内容简介

本书内容以计算机专业为主,适当兼顾相近的电子类、电商类等电类相关专业的教学要求,主要介绍了电路分析、模拟电子技术基础和数字电子技术基础课程的基本内容。内容包括:电路分析基础、半导体器件基础、基本放大电路、集成运算放大器及信号处理电路、数字逻辑基础、逻辑门电路、组合逻辑电路、集成触发器、时序逻辑电路、存储器和可编程逻辑器件。在介绍基础知识和理论的同时,兼顾了基本技能训练和新器件、新知识。

本书以够用为度,重点放在应用上,适合作为计算机专业和电子信息类相关专业的教材,也可作为非电类专业的相关课程教材或参考书。对于专业技术人员,也是一本很好的参考书。

本书所配电子教案及相关教学资源可以从高等教育出版社理工教学资源网下载,网址为:<http://www.hep-sl.com.cn>。

图书在版编目(CIP)数据

计算机电路基础/魏淑桃主编. —北京:高等教育出版社,2005.9

ISBN 7-04-017558-4

I. 计… II. 魏… III. 电子计算机-电子电路-高等学校-教材 IV. TP331

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 081338 号

策划编辑	雷顺加	责任编辑	许海平	封面设计	王凌波	责任绘图	朱 静
版式设计	王艳红	责任校对	杨凤玲	责任印制	孔 源		

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 010-58581000

经 销 北京蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 河北新华印刷一厂

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.landracom.com>
<http://www.landracom.com.cn>

开 本 787×1092 1/16
印 张 19.5
字 数 470 000

版 次 2005 年 9 月第 1 版
印 次 2005 年 9 月第 1 次印刷
定 价 24.50 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 17558-00

前 言

进入21世纪,高等教育已从精英教育走向了大众化教育,培养应用型人才已成为国家培养国际人才的重要组成部分。一大批有规模、有实力、以培养应用型人才为己任的高等学校得到了长足发展。这类学校的教学特点是:在讲授“理论与技术”时,更注重技术方法的教学;在讲授“理论与实践”时,更注重理论指导下的可操作性,更注意实际问题的解决。由此培养的学生善于解决生产中的实际问题,受到地方企事业单位的普遍欢迎。

为满足这类学校的教学要求,达到培养应用型人才的目的,本书根据电路与电子技术类课程教学基本要求,结合计算机等相近专业的基本教学需求,我们对计算机专业、电子信息类等其他相关专业学生必修的专业基础课——“电路分析”、“模拟电子技术基础”和“数字电子技术基础”三门课程的内容和体系进行有机地整合,形成了“计算机电路基础”新的课程体系,并组织多年从事该类课程教学的一线教师编写了本书。编写本书时,我们注意了以下几点:

(1) 本书的内容以计算机专业的教学要求和基本需求为主,适当涵盖了电类其他专业(如电子类、电气类、机电一体化类等)的教学要求。

(2) 从介绍基础知识和基本理论入手,注意基本技能的培养,注意融入新知识和新器件。

(3) 计算机系统的应用日益广泛深入,电路与电子技术课程作为一门技术基础课,必须精选内容,力求以够用为度,重点放在应用上。

(4) 在电子电路部分,以中、小规模集成电路为主,以特殊性为主,对分立元件电路的介绍主要是培养学生看图识图的能力,重在分析原理的思路与方法上。

在使用本教材时,希望注意以下几点:

(1) 在介绍基本理论时,着重解决命题的提出及分析命题的思路、结论,中间的数学推导和过程,可以根据实际情况删繁就简。

(2) 本教材是按课程总学时72~90学时(包括8~10实验课时)安排的,教师可根据学时多少灵活选择。

(3) 课程中要注意各个教学环节的配合,要切实安排好习题课与实验课,为了培养应用型人才,还应安排2~3周的硬件实验与课程设计,它们可以分散安排或在课程进行完后一次性安排。

本书由魏淑桃教授任主编和统稿。第1、2、4章由魏淑桃编写,第5、6、7章由杨洁编写,第3、9、10章由贺海晖编写,第8章由陈志毅编写。于广铎、谢加华、石林祥、陈璐参加了本书的部分绘图和文字录入工作。本书在编写中参考了许多文献,在此对这些文献的作者表示诚挚的谢意。

由于编者水平有限,加之时间仓促,书中疏漏之处在所难免,恳请使用本书的教师和同学批评指正。

编 者

2005年4月

目 录

第1章 电路分析基础	1	2.3 半导体三极管	38
1.1 电路、电流、电压、电功率	1	2.3.1 半导体三极管的基本结构	38
1.1.1 电路和电路模型	1	2.3.2 三极管的电流放大原理	39
1.1.2 电流和电流的参考方向	3	2.3.3 三极管的伏安特性曲线	40
1.1.3 电压和电位	3	2.3.4 三极管的主要参数	42
1.1.4 电压和电流的关联参考方向	4	2.3.5 三极管的等效电路及应用	45
1.1.5 功率与电能	4	2.3.6 特种三极管	46
1.1.6 常用元件介绍	5	2.4 场效应管	46
1.2 电压源、电流源及其等效变换	9	2.4.1 N沟道增强型绝缘栅场效应管的 结构和工作原理	47
1.2.1 电压源	9	2.4.2 N沟道增强型绝缘栅场效应管的 伏安特性和主要参数	47
1.2.2 电流源	10	2.4.3 MOS管的四种基本类型及其特点	49
1.2.3 电压源与电流源的等效变换	11	2.4.4 结型场效应管的结构和工作原理	49
1.3 电路基本分析方法	14	2.4.5 结型场效应管的特性曲线	51
1.3.1 基尔霍夫定律	14	本章小结	52
1.3.2 电阻的串联及并联	16	习题二	53
1.3.3 支路电流法	18	第3章 基本放大电路	55
1.3.4 结点电压法	20	3.1 三极管放大电路基础	55
1.3.5 叠加定理	21	3.1.1 放大电路的基本概念和指标	55
1.3.6 等效电源定理	22	3.1.2 共发射极放大电路的组成	56
本章小结	25	3.1.3 共发射极放大电路的分析方法	57
习题一	25	3.2 工作点稳定的放大电路	58
第2章 半导体器件基础	29	3.2.1 温度对放大电路的影响	58
2.1 半导体基础知识	29	3.2.2 工作点稳定的放大电路	59
2.1.1 半导体及其特点	29	3.3 射极输出器	61
2.1.2 本征半导体	29	3.3.1 射极输出器的组成	61
2.1.3 N型半导体	31	3.3.2 射极输出器的分析	61
2.1.4 P型半导体	32	3.4 场效应管放大电路	63
2.2 PN结与半导体二极管	32	3.4.1 场效应管的微变等效电路	64
2.2.1 PN结的形成	32	3.4.2 场效应管共源极放大电路	64
2.2.2 PN结的单向导电性	33	3.5 多级放大电路	66
2.2.3 PN结电容	34	3.5.1 阻容耦合	66
2.2.4 半导体二极管的基本结构	35	3.5.2 直接耦合	67
2.2.5 二极管的伏安特性	35	3.5.3 放大电路的频率特性	67
2.2.6 二极管的主要参数	36	3.6 差分放大电路	68
2.2.7 二极管的等效电路及应用	37		
2.2.8 特种二极管	37		

3.6.1 基本差分放大电路	68	4.4.5 集成电压比较器	105
3.6.2 具有射极公共电阻的差分放大电路(双电源长尾式差放)	70	本章小结	106
3.6.3 恒流源式差放电路	71	习题四	107
3.7 功率放大电路	72	第5章 数字逻辑基础	110
3.7.1 功率放大电路概述	72	5.1 数制与码制	110
3.7.2 功率放大电路的特殊问题	72	5.1.1 进位计数制	110
3.7.3 典型功率放大电路的分析	73	5.1.2 进位计数制的相互转换	111
3.8 负反馈放大电路	75	5.1.3 二进制编码	114
3.8.1 负反馈放大的一般概念	75	5.2 逻辑函数	115
3.8.2 负反馈放大电路的分析方法	77	5.2.1 逻辑函数的基本概念	115
3.8.3 负反馈对放大电路的影响	80	5.2.2 正、负逻辑的概念	118
本章小结	81	5.3 布尔代数	118
习题三	81	5.3.1 布尔代数的基本公式	119
第4章 集成运算放大器及信号处理电路	84	5.3.2 布尔代数的基本定理	119
4.1 集成运算放大器的基本概念	84	5.3.3 利用布尔代数化简逻辑函数	120
4.1.1 集成运算放大器的指标	84	5.4 卡诺图	122
4.1.2 集成运算放大器在线性状态下工作	85	5.4.1 逻辑函数的最小项表达式	122
4.1.3 集成运算放大器在非线性状态下工作	86	5.4.2 卡诺图的结构与特点	124
4.2 集成运算放大器的线性应用	87	5.4.3 利用卡诺图化简逻辑函数	128
4.2.1 反相比例运算电路	87	5.5 具有约束的逻辑函数	130
4.2.2 同相比例运算电路	88	5.5.1 约束的概念	130
4.2.3 差动比例运算电路	89	5.5.2 具有约束的逻辑函数的化简	132
4.2.4 反相输入求和电路	89	5.6 逻辑函数的表示方法及相互转换	135
4.2.5 同相输入求和电路	90	5.6.1 表示方法	135
4.2.6 数据运算放大电路	92	5.6.2 转换方法	137
4.2.7 积分和微分电路	94	本章小结	139
4.3 滤波的概念和基本滤波电路	96	习题五	139
4.3.1 滤波电路的作用和分类	96	第6章 逻辑门电路	144
4.3.2 低通滤波器(LPF)	96	6.1 概述	144
4.3.3 高通滤波器(HPF)	98	6.2 分立元件逻辑门电路	145
4.3.4 带通滤波器(BPF)	98	6.2.1 三极管与门和或门	145
4.3.5 带阻滤波器(BEF)	99	6.2.2 三极管非门	147
4.4 电压比较电路	100	6.3 CMOS集成逻辑门电路	149
4.4.1 过零比较电路	101	6.3.1 CMOS反相器	149
4.4.2 单限比较电路	102	6.3.2 CMOS与非门和或非门	155
4.4.3 滞回比较电路	103	6.3.3 CMOS与或非门	158
4.4.4 双限比较电路	104	6.3.4 CMOS异或门	158
		6.3.5 CMOS传输门	159
		6.3.6 CMOS三态门	160
		6.3.7 CMOS漏极开路门(OD门)	161
		6.3.8 CMOS门电路输入特性	162

6.4 TTL 集成逻辑门电路	162	8.2.2 集成主从 RS 触发器	236
6.4.1 TTL 反相器	162	8.3 主从 JK 触发器和边沿 JK 触发器	237
6.4.2 TTL 与非门	163	8.3.1 主从 JK 触发器	237
6.4.3 TTL 或非门	164	8.3.2 边沿 JK 触发器	239
6.4.4 TTL 与门、或门及与或非门	165	8.4 边沿 D 触发器	241
6.4.5 TTL 异或门	165	8.4.1 内部结构	241
6.4.6 TTL 集电极开路门(OC 门)	165	8.4.2 工作原理和逻辑功能	241
6.4.7 输出三态门	166	8.5 触发器的功能分类及相互转换	242
6.4.8 TTL 集成逻辑门电路输入负载特性	167	8.5.1 触发器的功能分类	242
本章小结	167	8.5.2 不同类型触发器的相互转换	247
习题六	168	8.6 触发器的主要参数	252
第 7 章 组合逻辑电路	171	8.6.1 静态参数	252
7.1 概述	171	8.6.2 动态参数	252
7.2 组合逻辑电路的基本分析方法和设计方法	172	本章小结	253
7.2.1 组合逻辑电路的基本分析方法	172	习题八	254
7.2.2 组合逻辑电路的基本设计方法	174	第 9 章 时序逻辑电路	257
7.3 加法器和奇偶校验器	177	9.1 时序逻辑电路的基本概念	257
7.3.1 加法器	177	9.1.1 时序逻辑电路	257
7.3.2 奇偶校验器	182	9.1.2 时序逻辑电路的描述方法	257
7.4 编码器和译码器	184	9.1.3 时序逻辑电路的种类	258
7.4.1 编码器	184	9.2 时序逻辑电路的分析方法	258
7.4.2 译码器	197	9.2.1 同步时序逻辑电路的分析方法	258
7.4.3 显示译码器	205	9.2.2 异步时序逻辑电路的分析方法	263
7.5 数据选择器和数据分配器	209	9.3 时序逻辑电路的设计方法	265
7.5.1 数据选择器	209	9.3.1 时序逻辑电路的基本设计方法及一般步骤	265
7.5.2 数据分配器	213	9.3.2 设计举例	267
7.6 用中、大规模集成电路实现组合逻辑电路	215	9.4 寄存器、锁存器和移位寄存器	271
7.6.1 用数据选择器实现组合逻辑电路	215	9.4.1 寄存器	271
7.6.2 用译码器实现组合逻辑电路	221	9.4.2 锁存器	271
本章小结	225	9.4.3 移位寄存器	272
习题七	226	9.4.4 常用集成电路介绍	275
第 8 章 集成触发器	230	9.5 计数器	279
8.1 触发器的基本电路	230	9.5.1 同步计数器	280
8.1.1 基本 RS 触发器	230	9.5.2 异步计数器	285
8.1.2 同步 RS 触发器	232	本章小结	287
8.2 主从 RS 触发器	235	习题九	287
8.2.1 主从 RS 触发器的工作原理	235	第 10 章 存储器和可编程逻辑器件	290
		10.1 概述	290
		10.2 随机存取存储器	291
		10.2.1 RAM 的结构及工作原理	291

IV 目录

10.2.2 存储容量的扩展	292	10.4.2 可编程逻辑阵列 PLA	297
10.3 只读存储器	294	10.4.3 可编程阵列逻辑 PAL	297
10.3.1 ROM 的结构及工作原理	294	10.4.4 通用阵列逻辑 GAL	298
10.3.2 EPROM 和 E ² PROM	295	本章小结	299
10.4 可编程逻辑器件 PLD	296	习题十	300
10.4.1 PLD 的基本结构和分类	296	参考文献	301

第1章

电路分析基础

本章从介绍电路的基本组成、电压和电流的参考方向、欧姆定律、电路的工作状态等基本概念出发,进而讨论电路的基本定律和基本分析方法。主要内容有:基尔霍夫定律、电阻的串联和并联及其等效电路、支路电流法、结点电压法、叠加原理以及电源等效变换等。利用这些方法可将复杂电路转化为简单电路,以便于对电路进行分析和计算。

1.1 电路、电流、电压、电功率

1.1.1 电路和电路模型

电路就是电流的流通途径。实际电路是由一些电路器件(电器设备或元件)用导线连接起来组成的。所谓电路器件是指电阻器、电感器、电容器、有源器件(二极管、三极管等)、变压器、开关、发电机和电池等。

为了便于对实际电路进行分析,通常是将实际电路器件理想化(或称模型化),即在一定条件下突出其主要的电磁性质,忽略其次要因素,将其近似地看做理想电路元件,并用规定的图形符号表示,即建立电路模型。由一些理想化元件组成的电路,就是实际电路的电路模型。一般将理想电路元件简称为元件,将电路模型简称为电路。

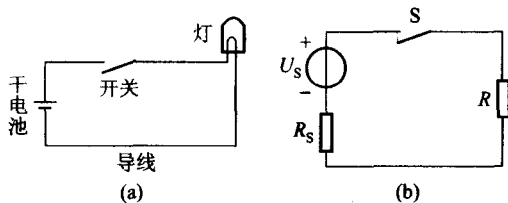


图 1.1.1 实际电路与电路模型

(a) 实际电路 (b) 电路模型

图 1.1.1(a)所示是手电筒的实际电路,其电路元件有干电池、灯、开关和导线;图 1.1.1(b)所示为其电路模型。在这里,干电池用理想电压源 U_s 和电池内电阻 R_s 表示,灯用电阻 R 表示,导线的电阻忽略不计,开关用 S 表示。

按照电路的作用分类,常见电路有两大类:一类用于信号的传递和处理,如扩音系统、电视接收系统等,如图 1.1.2 所示;另一类用于电能的传输与转换,如照明和动力电路、配电系统等,如图 1.1.3 所示。

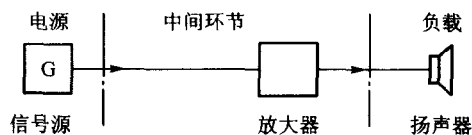


图 1.1.2 扩音系统示意图

因为所要完成的功能不同,所以实际电路的组成是多种多样的,但通常都由电源(或信号源)、负载和中间环节三部分组成,如图 1.1.2 和图 1.1.3 所示。

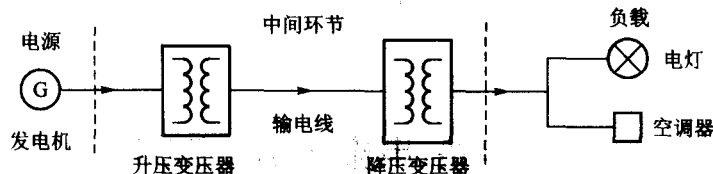


图 1.1.3 电力系统示意图

其中,电源是提供电能的装置,电能可以由其他形式的能量转换而来,也可以由某一种形式的电能转换为另一种形式的电能(如交流电能转换成直流电能)。电源有电压源和电流源之分,还有受控电压源(输出电压受其他变量控制)和受控电流源(输出电流受其他变量控制)之分,各种电源在电路中的常用符号如图 1.1.4 所示。而信号源可以是系统自身产生的,也可以是从外部接收的。

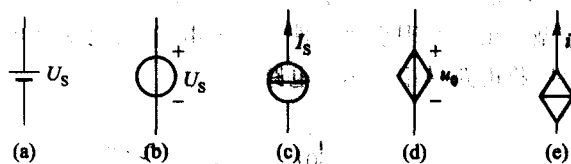


图 1.1.4 常用的电源符号

(a) 电池 (b) 电压源 (c) 电流源 (d) 受控电压源 (e) 受控电流源

负载是取用电能的装置,如电炉、电动机、扬声器等,它们可以将电能转换成其他形式的能量,如热能、机械能等。负载在电路中通常用电阻 R 来表示。

中间环节是指将电源和负载连接成闭合电路的部分,起传输、分配、控制电能的作用,如变压

器、放大器、开关、保护设备等。

1.1.2 电流和电流的参考方向

电流是由电荷有规则地定向流动形成的。电流的大小用电流强度来衡量。电流强度等于单位时间内通过导体某横截面的电量。电流强度也简称电流。若在 dt 时间内,通过导体某横截面 S 的电量为 dq ,则有

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

式中, i 为电流强度(简称电流),它是时间的函数。在通常情况下, i 是随着时间而变化的。若电流强度不随时间变化,即 $dq/dt = \text{常数}$,则这种电流为恒定电流,简称直流。直流电流常用大写字母 I 来表示。

在国际单位制(SI)中,电荷量的单位是库[仑](C),电流的单位是安[培](A),时间的单位是秒(s)。在计量微小电流时,通常用毫安(mA)或微安(μA)作为单位,它们之间的关系为

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

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

习惯上把正电荷流动的方向作为电流的实际方向。在电路分析中有时不容易判断出电流的实际方向,为此,可以任意选定一个方向作为电流的参考方向。当电流的实际方向与参考方向相同时,为 $i > 0$;当电流的实际方向与参考方向相反时,为 $i < 0$;这样电流 i 的值就有正有负,是个代数量。本书电路图上所标出的电流方向都是参考方向。在选定的电流参考方向下,根据电流的正负,就可确定电流的实际方向,如图 1.1.5 所示。

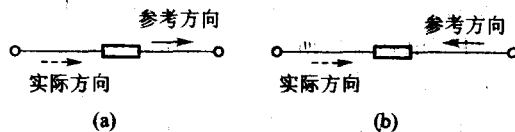


图 1.1.5 电流的实际方向和参考方向

(a) $i > 0$ (b) $i < 0$

电流的参考方向在电路图中用箭头表示出来,可以画在线外,也可以画在线上,如图 1.1.5 所示。

1.1.3 电压和电位

电场力将单位正电荷从 a 点移动到 b 点所做的功定义为 a 点到 b 点间的电压,用 u_{ab} 表示,其数学表达式为

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

式中, dW_{ab} 是电场力在时间 dt 内将正电荷 dq 从 a 点移动到 b 点所做的功,单位为焦[耳](J); u_{ab} 是 a 、 b 两点间的电压,单位为伏[特](V)。

在直流电路中,电压是恒定不变的,用大写英文字母 U 表示。

在电场内,两点间的电压也称为两点间的电位差,可表示成

$$u_{ab} = V_a - V_b \quad (1.1.3)$$

式中, V_a 为 a 点的电位值, V_b 为 b 点的电位值。电路中的电位值采用这样的方法来确定:在电路中选定一点作为参考点,并将参考点的电位规定为零,则某点与参考点之间的电压就作为该点的电位值。显然,同一点的电位值是随着参考点的不同而变化的,而任意两点之间的电压却与参考点的选取无关。

在国际单位制中,电压、电位、电动势的单位都是伏[特](V)。为了方便计量,还可以用毫伏(mV)、微伏(μ V)和千伏(kV)等作为单位,它们之间的关系为

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

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

$$1 \text{ kV} = 10^3 \text{ V}$$

为了便于分析电路,也给电压和电动势规定了方向。电压的方向规定为由高电位指向低电位,即电位降低的方向;电动势的方向规定为在电源内部由低电位指向高电位,即电位升高的方向。

在电路中,电压的方向常用“+”、“-”号来表示,如图 1.1.6 所示。

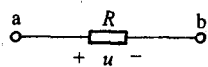


图 1.1.6 电压方向的表示方法

1.1.4 电压和电流的关联参考方向

在一段电路或一个元件中,电流和电压的参考方向均可以任意假设,二者可以一致,也可以不一致,不会影响到分析结果。但是,在分析电路时,有时要同时考虑电压和电流的参考方向,即需要考虑电压和电流的参考方向的相对关系,这时就要用到电压和电流的关联参考方向的概念。

关联参考方向:当某一元件或电路端口所设定的电压和电流的参考方向是让参考电流从参考电压的正极到负极流过该元件或电路时,称电压和电流的参考方向对于该元件或电路是关联的。而对于电动势来说,关联参考方向是让参考电流从电动势的负极流到正极。如果不满足这种约定,则称为非关联参考方向。

[例 1.1] 在如图 1.1.7 所示电路中,电压 u 与电流 i 的参考方向是否关联?

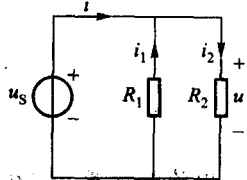


图 1.1.7 例 1.1.1 电路

解:在考察电压和电流的参考方向是不是关联时,要看对电路的哪一部分而言。对照该图中的电压和电流方向的假定,对 u_s 和 R_2 来说是关联的,对 R_1 来说是非关联的。

1.1.5 功率与电能

在电路中,有的元件吸收电能,并将电能转换成其他形式的能量,有的元件是将其他形式的能转换成电能,即元件向电路提供电能。电功率是指单位时间内元件所吸收或发出的电能,在电路中,电功率常简称为功率。功率的定义可推广到任何一段电路,而不局限于一个元件,当然,一个元件可看做是一段电路的特例。

设在时间 dt 内电路转换的电能为 dW ,则有

$$P = \frac{dW}{dt} \quad (1.1.4)$$

在国际单位制中,功率的单位是瓦[特](W)。常用的功率单位还有千瓦(kW)、毫瓦(mW)等。电能的单位为焦[耳](J),定义为功率为1 W的设备在1 s时间内转换的电能。工程上常采用千瓦小时(kW·h)作为电能的单位,俗称1度电,定义为功率为1 kW的设备在1 h内所转换的电能。

根据电流、电压的定义,有如下表达式:

$$P = \frac{dW}{dq} \frac{dq}{dt} = u \times i \quad (1.1.5)$$

上式表明:某段电路的功率等于该段电路上的电压与电流的乘积。若 $P > 0$,说明这段电路上电压和电流的实际方向是一致的,电路吸收了能量;若 $P < 0$,说明这段电路上电压和电流的实际方向不一致,电路释放了能量。计算功率时必须注意电压和电流的参考方向及各数值的正、负号。

1.1.6 常用元件介绍

1. 电阻元件

在如图1.1.2、图1.1.3所示电路中的电灯、扬声器,它们在电路中的作用可等效为一个电阻元件。电阻元件有不同型号和规格,习惯上称为电阻器,简称电阻。电阻用 R 表示,符号如图1.1.8(a)所示。电阻上的电压和电流有确定的对应关系,可以用伏安坐标平面上的一条关系曲线或相应的数学方程式来表示。

如果电阻上的电压、电流的方向如图1.1.8(a)所示,那么图1.1.8(b)所示的就是其伏安关系曲线,它是一条通过坐标原点的直线。也可以用公式来表示电阻上电压、电流的伏安关系,它们是

$$u = iR \quad \text{或} \quad \frac{u}{i} = R \quad (1.1.6)$$

即著名的欧姆定律。

欧姆定律的另一种表达式为

$$\frac{i}{u} = G \quad (1.1.7)$$

式中,比例常数 G 称为电导,它是电阻 R 的倒数,单位是西[门子](S)。

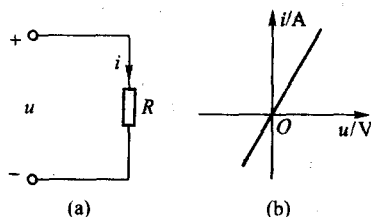


图 1.1.8 线性电阻的符号和伏安特性

(a) 电阻的符号 (b) 线性电阻的伏安特性曲线

如果某类电阻的伏安关系曲线是一条直线,如图 1.18(b)所示,则称该类电阻为线性电阻。

在国际单位制中,电阻的单位是欧[姆](Ω)。工程上常用的电阻单位还有千欧($k\Omega$)、兆欧($M\Omega$)。

电阻有线性电阻和非线性电阻之分。如果一个电阻的伏安特性不是直线,则该电阻称为非线性电阻元件,如图 1.1.9 所示就是半导体二极管的伏安特性曲线,半导体二极管就是一个具有非线性电阻特性的器件。

实际的电阻如白炽灯、电炉丝等,其伏安特性曲线并不是一条通过坐标原点的直线,但在一定的工作范围内可以近似地将它们看做是线性电阻。在以后的章节中,若无特殊说明,一般所说的电阻均指线性电阻。

2. 电容元件

从物理学课程中已知,在两个金属极板之间加上绝缘介质就构成了实际的电容器。电容器在工程上应用非常广泛,种类规格也很多,常用的有电解电容器、瓷片电容器等,简称电容。在电路中,电容通常用如图 1.1.10 所示的符号表示。

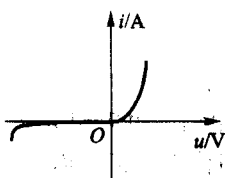


图 1.1.9 非线性电阻伏安特性

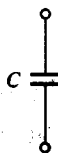


图 1.1.10 电容的符号

电容是一种能够储存电场能量的实际电路元件。假设电容两极板上储存的电荷量为 q ,在两极板间建立起的电压为 u ,那么就存在如下关系:

$$q = Cu \quad (1.1.8)$$

式中,系数 C 称为电容的容量,如果电荷量 q 的单位为库[仑],电压 u 的单位为伏[特],则系数 C 的单位为法[拉](F)。因为法[拉](F)太大,常用的单位还有微法(μF)、皮法(pF),它们之间的关系为

$$1 \mu F = 10^{-6} F$$

$$1 pF = 10^{-12} F$$

在电路中,如果流过一个电容的电流为 $i(t)$,在电容上建立的电压为 $u_c(t)$,那么,它们就有如下的伏安关系

$$i(t) = \frac{dq}{dt} = C \frac{du_c(t)}{dt} \quad (1.1.9)$$

从式(1.1.9)可以看出:如果 $i > 0$,电容充电,电压增高;如果 $i < 0$,电容放电,电压减小。设 $t = 0$ 时, $u_c = 0$,由式(1.1.9)还可得到

$$u_c(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt \quad (1.1.10)$$

在关联电压、电流参考方向下,电容的瞬时吸收功率为

$$P = u_c i_c \quad (1.1.11)$$

与电阻不同的是,电容的瞬时吸收功率可正可负。电容吸收的功率不会以热能或其他能量形式消耗掉,而是以电能的形式储存在电容两极板间的电场中,所以,电容属于储能元件。它某一时刻的储能大小是瞬时吸收功率的积累,当 $u_c(0) = 0$ 时,电容的储能为

$$W_c = \frac{1}{2} C u_c^2(t) \quad (1.1.12)$$

式(1.1.12)表明:任意时刻电容的储能总是大于或等于零,由此可知,电容属于无源元件。

纯电容两端的电压和电流的幅值或有效值的大小,存在以下关系

$$I_{cm} = U_m \omega C \quad \text{或} \quad I_c = U \omega C \quad (1.1.13)$$

令

$$X_c = \frac{1}{j\omega C} = \frac{1}{j2\pi fC} \quad (1.1.14)$$

则根据式(1.1.13),可以将瞬时电流写成

$$i_c = \frac{u}{X_c} \quad (1.1.15)$$

式(1.1.15)的形式与描述纯电阻电路中电流和电压之间关系的欧姆定律相同。按照欧姆定律的概念,可将 X_c 称为电容的电抗,简称容抗。如果 f 的单位用 Hz, C 的单位用 F,那么 X_c 的单位就是 Ω 。

从式(1.1.14)可以看到,容抗 X_c 与 C 和 ω 成反比。当电容 C 一定时,角频率 ω 越高, X_c 越小,说明电容对低频电流的阻抗作用大,对高频电流的阻抗作用小。而当 $\omega = 0$ 时, $X_c = \infty$, 电容两端虽然有电压存在,但电流却为零,相当于电容开路,它的这一特性在电子技术中称为隔直(流)特性。

[例 1.2] 某电容 $C = 10 \mu\text{F}$, 充电后的电压变化规律如图 1.1.11(a) 所示,求电容充电电流的变化规律,并作出波形图。

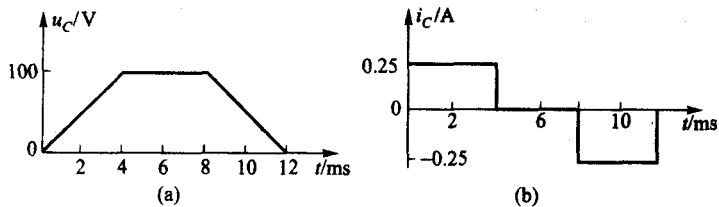


图 1.1.11 例 1.1.2 的波形图

解: ① t 在 $0 \sim 4 \text{ ms}$ 期间, u_c 由 0 V 线性上升到 100 V , 所以

$$i_c = C \frac{du_c}{dt} = 10 \times 10^{-6} \frac{100 - 0}{(4 - 0) \times 10^{-3}} \text{ A} = 10 \times 10^{-6} \times 25 \times 10^3 \text{ A} = 0.25 \text{ A}$$

② t 在 $4 \sim 8 \text{ ms}$ 期间, u_c 保持不变, 所以

$$i_c = C \frac{du_c}{dt} = 0$$

③ t 在 $8 \sim 12$ ms 期间, u_c 由 100 V 线性下降至 0 V, 所以

$$i_c = C \frac{du_c}{dt} = 10 \times 10^{-6} \frac{0 - 100}{(12 - 8) \times 10^{-3}} \text{ A} = 10 \times 10^{-6} \times (-25 \times 10^3) \text{ A} = -0.25 \text{ A}$$

根据以上计算, 可得电流的变化规律如图 1.1.11(b) 所示。

3. 电感元件

实际的电感器是用导线绕制而成的线圈。根据用途的不同, 电感器也有很多种类, 简称为电感, 它在电路中的符号如图 1.1.12 所示, 一般来说, 绕制线圈的导线本身是有电阻的, 但因为电阻很小, 可以忽略不计。

电感线圈在通过交流电流 i_L 时, 线圈周围就会建立磁场, 即储存了磁场能量, 而在线圈两端会出现感应电压 u_L 。流过线圈的电流 i_L 与线圈两端的感应电压 u_L 之间存在如下关系:

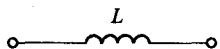


图 1.1.12 电感的符号

$$u_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (1.1.16)$$

式中, 系数 L 称为线圈的电感, 其单位为亨[利](H)。当 di_L/dt 为 1 A/s 、感应的电压为 1 V 时, 电感就是 1 H , 常用的单位还有毫亨(mH)、微亨(μH), 它们之间的关系为

$$1 \text{ mH} = 10^{-3} \text{ H}$$

$$1 \mu\text{H} = 10^{-6} \text{ H}$$

式(1.1.16)就是电感的伏安关系表达式。当 $i_L(0) = 0$ 时, 式(1.1.16)也可写成

$$i_L(t) = \frac{1}{L} \int_0^t u_L(t) dt \quad (1.1.17)$$

当电感两端的电压和电流取关联参考方向时, 电感元件的瞬时吸收功率为

$$P = u_L i_L \quad (1.1.18)$$

与电阻不同的是, 电感的瞬时吸收功率不会以热能或其他能量形式消耗掉, 而是以磁能的形式储存在电感线圈周围的磁场中。所以, 电感属于储能元件, 它某一时刻的储能为

$$W_L = \frac{1}{2} L i_L^2(t) \quad (1.1.19)$$

式(1.1.19)表明: 任意时刻电感元件的储能总是大于或等于零, 由此可知, 电感属于无源元件。

纯电感的电压和电流在幅值或有效值的大小上, 存在着如下关系

$$U_{Lm} = I_{Lm} \omega L \quad \text{或} \quad U_L = I_L \omega L \quad (1.1.20)$$

令

$$X_L = j\omega L = j2\pi fL \quad (1.1.21)$$

则根据式(1.1.20), 可以将瞬时电压写成

$$u_L = i_L X_L \quad (1.1.22)$$

式(1.1.22)与描述纯电阻电路的电流和电压关系一样, 可将 X_L 称为电感的电抗, 简称感抗。若 f 的单位用 Hz, L 的单位用 H, 则 X_L 的单位是 Ω 。

由式(1.1.21)可知, X_L 与 L 和 ω 成正比关系。当 L 一定时, 角频率 ω 越高, X_L 也越大, 说明电感线圈对高频电流的阻抗作用比低频大, 而对直流无阻抗作用, 可视为短路。利用电感线圈的这一特性可以制作各种滤波器等。

【例 1.3】图 1.1.13(a) 所示为一个 $L = 50 \text{ mH}$ 电感中电流的波形, 求该电感的电压波形和功率波形。

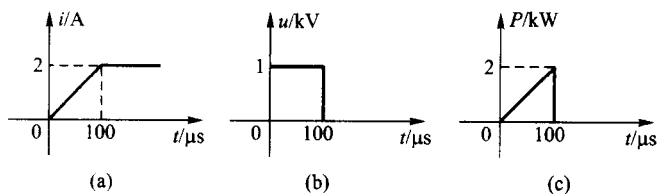


图 1.1.13 例 1.1.3 的图

解: 由式(1.1.16)可知, 电感电压是对电流求微分后, 再乘以电感值得到的。所以对图 1.1.13(a) 所示的电流进行微分并乘以 0.05 后, 得到如图 1.1.13(b) 所示的电感电压波形。

用如图 1.1.13(a) 所示的电流乘以如图 1.1.13(b) 所示的电压, 可以得到如图 1.1.13(c) 所示的功率波形。

1.2 电压源、电流源及其等效变换

任何一个实际电源都可以用两种电路模型来表示: 电压源 (U_s) 和串联电阻 (R_s) 或者电流源 (I_s) 和并联电阻 (R_s)。

1.2.1 电压源

理想电压源简称电压源, 是一个理想二端元件。它在工作时, 无论接在输出端的负载如何变化, 其输出端电压保持不变, 而输出的电流与它所连接的外电路 (即负载) 有关。如图 1.2.1(a) 所示。

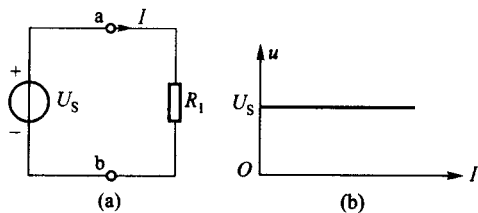


图 1.2.1 理想电压源及其外特性

电源的端电压 U_s 与输出电流 I 的关系称为电源的外特性。根据理想电压源的定义, 其外特