



普通高等教育“十二五”规划教材
电子电气基础课程规划教材

电工电子技术

陈佳新 主编



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

普通高等教育“十二五”规划教材
电子电气基础课程规划教材

电工电子技术

陈佳新 主编
周 理 陈炳煌 卢光宝 鄢仁武 编
蔡金锭 主审



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书依据教学要求编写,全面系统地论述电工电子技术的基本理论及应用分析。全书共12章,主要包括:电路的基本概念和基本定律、电路的分析方法、正弦交流电路、一阶线性电路的暂态分析、变压器与电动机、常用半导体器件、分立元件组成的基本放大电路、集成运算放大器及其应用、直流稳压电源、门电路与组合逻辑电路、触发器与时序逻辑电路、电工电子技术实验。本书配套多媒体电子课件和部分习题参考答案。

本书可作为高等学校非电类专业相关课程的教材,也可作为相关行业领域工程技术人员和科技工作者的重要参考资料。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

电工电子技术 / 陈佳新主编;周理等编. —北京:电子工业出版社,2013.2

电子电气基础课程规划教材

ISBN 978-7-121-19341-5

I. ①电… II. ①陈… ②周… 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310303号

策划编辑:王羽佳

责任编辑:王羽佳

印 刷:涿州市京南印刷厂

装 订:涿州市京南印刷厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:17.25 字数:498千字

印 次:2013年2月第1次印刷

印 数:4000册 定价:36.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

前 言

“电工电子技术”课程是高等院校非电类理工科各专业的一门重要的技术基础课。随着科学技术的发展,电工电子技术的应用遍及生产领域和人类生活的各个角落,对国民经济发展及生活水平的提高都具有至关重要的作用。

“电工电子技术”的内容涉及电工电子学科的各领域,并有很强的实践性。学生通过本课程的学习,可以获得电工、电子技术及电气控制等领域必要的基本理论、基本知识和基本技能,获得电工与电子技术的基本分析方法和应用技巧,并培养初步的实践能力,以及分析问题和解决问题的实际能力。

本书从适应高等院校非电类理工科应用型人才培养需求出发,力求以尽可能少的学时阐明电工电子技术的基本内容。作者在多年教学改革与实践的基础上,结合应用型人才的培养实践,吸收当前一些改革教材中的先进经验编写本书。在课程内容的选择上,重点突出基本概念、基本理论、基本原理和基本分析方法,尽量减少过于复杂的分析与计算。强调知识的渐进性,兼顾知识的系统性,力求做到学科体系完整、知识简洁明了、理论联系实际、时代特色鲜明,同时体现近年来电工电子技术领域出现的新技术。

全书分为12章,第1章到第4章为电路分析基础部分,内容包括电路的基本概念和基本定律、直流电路与交流电路的分析方法和一阶线性电路的暂态分析;第5章为变压器与电动机部分,主要介绍变压器、三相异步电动机、单相异步电动机以及三相异步电动机的电气控制系统等内容;第6章和第7章为模拟电子技术部分,主要包括常用半导体器件、分立元件组成的基本放大电路等内容;第9章为直流稳压电源部分,主要包括单相整流电路、滤波电路、直流稳压电源等内容;第8章、第10章和第11章为数字电子技术部分,主要包括集成运算放大器及其应用、门电路与组合逻辑电路和触发器与时序逻辑电路等内容;第12章为电工电子技术实验,主要包括电路、电子技术的基本实验。本书文字力求简明,概念清晰,条理清楚,讲解到位,插图规范,使之易教易学。

通过学习本书,你可以掌握以下内容:

- 电路的基本概念和基本定律
- 电路的分析方法
- 正弦交流电路
- 一阶线性电路的暂态分析
- 变压器和电动机
- 常用半导体器件
- 分立元件组成的基本放大电路
- 集成运算放大器及其应用
- 直流稳压电源
- 门电路与组合逻辑电路
- 触发器与时序逻辑电路
- 电工电子技术实验

本书可作为高等学校非电类专业相关课程的教材,也可作为相关行业领域工程技术人员和科技工作者的重要参考资料。在编写过程中,作者学习和借鉴了大量有关的参考资料,在此向所有资料的编写者们表示深深的感谢。

教学中,可以根据教学对象和学时等具体情况对书中的内容进行删减和组合,也可以进行适当扩展。为适应教学模式、教学方法和手段的改革,本书配套有多媒体电子课件及相应的网络教学资源,请登录华信教育资源网(<http://www.hxedu.com.cn>)免费注册下载。

本书由福建工程学院的陈佳新担任主编,最后统稿并定稿。书中第1~3章由陈炳煌编写,第4章由陈佳新、鄢仁武编写,第5章由陈佳新编写,第6、7章由卢光宝编写,第9章由鄢仁武编写,第8、10、11章由周理编写,第12章由陈佳新、周理编写。福州大学的蔡金锭教授仔细审阅了书稿并提出了宝贵的修改意见,谨致以衷心谢意。

由于时间限制和学识的局限,书中难免有错漏或不妥之处,恳请广大读者在使用过程中提出宝贵意见。

作 者

2013年1月

目 录

第 1 章 电路的基本概念和基本定律	1	3.2.3 电容元件的正弦交流 电路	44
1.1 电路和电路模型	1	3.3 正弦交流电路的分析	45
1.1.1 电路	1	3.3.1 正弦交流电路的阻抗	45
1.1.2 电路模型	2	3.3.2 基尔霍夫定律的相量 形式	49
1.2 电路的基本物理量	2	3.3.3 正弦交流电路的分析和 计算	50
1.2.1 电流	2	3.4 正弦交流电路的功率	52
1.2.2 电压	3	3.4.1 正弦交流电路的功率	52
1.2.3 功率	5	3.4.2 功率因数的提高	54
1.3 电路元件	5	3.5 正弦交流电路的频率特性	55
1.3.1 电阻元件	6	3.5.1 串联谐振	56
1.3.2 电感元件	6	3.5.2 并联谐振	58
1.3.3 电容元件	7	3.6 三相电路	59
1.3.4 独立电源	8	3.6.1 三相电路的电压 (电流)	59
1.3.5 受控电源	10	3.6.2 三相电路的功率	63
1.4 电路定律	11	3.7 安全用电技术	64
1.4.1 欧姆定律	11	3.7.1 安全用电常识	64
1.4.2 基尔霍夫定律	11	3.7.2 防触电的安全技术	65
习题	14	3.7.3 静电防护和电气防火、 防爆常识	65
第 2 章 电路的分析方法	15	习题	66
2.1 电阻网络的等效变换	15	第 4 章 一阶线性电路的暂态分析	69
2.2 电源模型及其等效变换	20	4.1 换路定律及初始值的确定	69
2.3 支路电流法	23	4.1.1 换路定律	69
2.4 节点电压法	23	4.1.2 动态电路初始值的确定	69
2.5 叠加定理	25	4.2 一阶线性动态电路的分析	71
2.6 等效电源定理	27	4.2.1 动态电路的响应	71
习题	32	4.2.2 一阶动态电路暂态分析的 三要素法	74
第 3 章 正弦交流电路	37	4.2.3 微分电路与积分电路	78
3.1 正弦交流电的基本概念	37	习题	80
3.1.1 正弦交流电	37	第 5 章 变压器与电动机	82
3.1.2 正弦交流电的有效值	39	5.1 变压器	82
3.1.3 正弦量的相量表示法	40	5.1.1 磁性材料的磁性能	82
3.2 单一参数的正弦交流电路	42		
3.2.1 电阻元件的正弦交流 电路	43		
3.2.2 电感元件的正弦交流 电路	43		

5.1.2 变压器的基本结构及工作 原理	84	6.3 绝缘栅场效应晶体管	136
5.1.3 变压器的运行特性	89	6.3.1 增强型绝缘栅场效应 晶体管	136
5.1.4 三相变压器	90	6.3.2 耗尽型绝缘栅场效应 晶体管	137
5.1.5 特殊变压器	91	6.3.3 场效应管的主要参数及使用 注意事项	138
5.2 三相异步电动机	92	6.4 光电器件	139
5.2.1 三相异步电动机的基本 结构和工作原理	93	6.4.1 发光二极管	139
5.2.2 三相异步电动机的机械 特性	99	6.4.2 光电二极管	140
5.2.3 三相异步电动机的 启动	102	6.4.3 光电三极管	142
5.2.4 三相异步电动机的 反转	105	6.4.4 光电耦合器件	142
5.2.5 三相异步电动机的 调速	105	习题	144
5.2.6 三相异步电动机的 制动	108	第7章 分立元件组成的基本放大电路 ..	147
5.3 单相异步电动机	109	7.1 共发射极放大电路	147
5.3.1 分相式异步电动机	109	7.1.1 电路组成及电压放大 原理	147
5.3.2 罩极式异步电动机	111	7.1.2 放大电路的静态分析 ..	148
5.4 三相异步电动机的电气控制 系统	111	7.1.3 放大电路的动态分析 ..	149
5.4.1 常用低压电器	111	7.1.4 静态工作点的稳定	152
5.4.2 三相异步电动机的基本 控制线路	116	7.1.5 多级放大电路	154
习题	125	7.2 射极输出器	157
第6章 常用半导体器件	128	7.2.1 静态分析	157
6.1 半导体二极管	128	7.2.2 动态分析	157
6.1.1 PN结及其单向导电性 ..	128	7.3 差分放大电路	159
6.1.2 半导体二极管	130	7.3.1 静态分析	159
6.1.3 稳压二极管	131	7.3.2 动态分析	160
6.2 晶体三极管	132	7.4 互补对称功率放大电路	161
6.2.1 晶体三极管的基本结构和 分类	132	7.4.1 对功率放大电路的基本 要求	161
6.2.2 晶体三极管的工作 原理	133	7.4.2 OCL 互补对称功率 放大器	162
6.2.3 晶体三极管的特性曲线和 主要参数	134	7.4.3 OTL 互补对称功率 放大器	163
		7.5 场效应晶体管放大电路	164
		7.5.1 共源极放大电路静态 分析	164
		7.5.2 共源极放大电路动态 分析	164

习题	165	9.2.2 电感滤波电路	193
第 8 章 集成运算放大器及其应用	170	9.2.3 复式滤波电路	194
8.1 集成运算放大器简介	170	9.3 直流稳压电源	194
8.1.1 集成运算放大器的结构与符号	170	9.3.1 稳压二极管稳压电路	194
8.1.2 集成运算放大器的主要技术指标	171	9.3.2 串联型稳压电路	196
8.1.3 集成运算放大器的电压传输特性	173	9.3.3 三端集成稳压电路	197
8.1.4 集成运算放大器的理想化模型	173	习题	198
8.2 反馈在集成运算放大器中的应用	174	第 10 章 门电路与组合逻辑电路	200
8.2.1 反馈的基本概念	174	10.1 逻辑代数基础	200
8.2.2 反馈的判断	175	10.1.1 逻辑代数的特点和基本运算	200
8.2.3 4 种反馈组态	176	10.1.2 逻辑代数的基本公式和规则	201
8.2.4 负反馈放大电路的一般表达式	179	10.1.3 常用逻辑门电路	202
8.3 频率特性的基本概念	180	10.1.4 最小项和最小项表达式	205
8.3.1 频率特性的基本概念	180	10.1.5 逻辑函数的化简	205
8.3.2 对数频率特性	181	10.2 集成逻辑门电路	209
8.3.3 集成运算放大器的频率特性	181	10.2.1 TTL 门电路	209
8.4 集成运算放大器的线性应用	182	10.2.2 三态输出门 (TS 门)	210
8.4.1 比例运算电路	182	10.3 MOS 逻辑门	211
8.4.2 加法运算电路	183	10.3.1 CMOS 反相器的工作原理	211
8.4.3 减法运算电路	183	10.3.2 其他类型的 CMOS 门电路	212
8.4.4 积分运算电路	183	10.4 组合电路的分析与设计	213
8.4.5 微分运算电路	184	10.4.1 组合电路的分析	214
8.4.6 测量放大电路	184	10.4.2 组合电路的设计	215
8.5 集成运算放大器的非线性应用	185	10.4.3 加法器	216
8.5.1 比较器	185	10.4.4 组合电路设计中的几个实际问题	217
8.5.2 方波发生器	186	10.5 常用的组合电路	217
习题	188	10.5.1 译码器	217
第 9 章 直流稳压电源	190	10.5.2 编码器	222
9.1 单相整流电路	190	习题	225
9.1.1 单相半波整流电路	190	第 11 章 触发器与时序逻辑电路	228
9.1.2 单相桥式整流电路	191	11.1 触发器	228
9.2 滤波电路	192	11.1.1 基本 RS 触发器	228
9.2.1 电容滤波电路	192	11.1.2 门控触发器	229
		11.1.3 主从触发器	230
		11.2 同步时序电路分析	231

11.2.1 同步时序电路分析 步骤	231	第 12 章 电工电子技术实验	249
11.2.2 同步时序电路分析 举例	232	12.1 实验一 直流电路实验	249
11.3 寄存器与移位寄存器	234	12.2 实验二 交流串联电路实验 ...	251
11.3.1 寄存器	234	12.3 实验三 日光灯电路	252
11.3.2 移位寄存器	235	12.4 实验四 常用电子仪器的 使用	254
11.4 计数器	237	12.5 实验五 晶体管电压放大 电路	256
11.4.1 同步计数器	237	12.6 实验六 组合逻辑电路	257
11.4.2 异步计数器	240	12.7 实验七 计数、译码、显示 电路	259
11.4.3 使用集成计数器构成 N 进制计数器	243	附录 A 部分习题答案	261
习题	246	参考文献	268

第1章 电路的基本概念和基本定律



随着科学技术的飞速发展,现代电工电子设备种类日益繁多,规模和结构更是日新月异,但无论怎样设计和制造,这些电工电子设备几乎都是由各种基本电路组成的。所以,学习电路的基础知识,掌握分析电路的规律与方法,是学习电工电子技术的重要内容,也是进一步学习电机、电气和电子技术的基础。本章重点阐明了有关电路的基本概念、基本元件特性和电路基本定律。

1.1 电路和电路模型

1.1.1 电路

1. 电路及其组成

简单地讲,电路就是电流通过的路径。实际电路通常由各种电路部件(如电源、电阻器、电感线圈、电容器、变压器)和电路器件(如仪表、二极管、三极管等)相互连接组成。每种电路部件都具有各自不同的电磁特性和功能。按照人们的需要,把相关电路部件和电路器件按一定方式进行组合,就构成了一个电路。当某个电路元器件数目很多且电路结构较为复杂时,通常又把这些电路称为电网络。

手电筒电路、单个照明灯电路是在实际应用中较为简单的电路,而电动机电路、雷达导航设备电路、计算机电路、电视机电路是较为复杂的电路,但不论是简单还是复杂,电路的基本组成部分都离不开3个基本环节:电源、负载和中间环节。

电源是向电路提供电能的装置,它可以将其他形式的能量,如化学能、热能、机械能、原子能等转换为电能。在电路中,电源是激励,是激发和产生电流的因素。负载是取用电能的装置,其作用是把电能转换为其他形式的能(如机械能、热能、光能等)。通常在生产与生活中经常用到的电灯、电动机、电炉、扬声器等用电设备都是电路中的负载。中间环节在电路中起着传递电能、分配电能和控制整个电路的作用。最简单的中间环节即开关和连接导线,一个实用电路的中间环节通常还有一些保护和检测装置,复杂的中间环节可以是由许多电路元件组成的网络系统。

在如图1.1.1所示的手电筒照明电路中,电池作为电源,电灯泡作为负载,导线和开关作为中间环节,将电灯泡和电池连接起来。

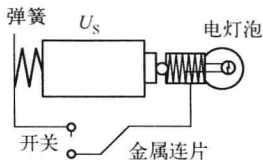


图1.1.1 手电筒照明电路

2. 电路的种类及功能

工程应用中的实际电路,按照功能的不同可分为两大类:一是完成能量的传输、分配和转换的电路,如图1.1.1所示,电池通过导线将电能传递给电灯泡,电灯泡将电能转化为光能和热能,这类电路的特点是大功率、大电流;二是实现对电信号的传递、变换、储存和处理的电路,如图1.1.2所示的是一个扩音机的工作过程,话筒将声音的振动信号转换为电信号,即相应的电压和电流,经过放大处理后,通过电路传递给扬声器,再由扬声器还原为声音,这类电路的特点是小功率、小电流。

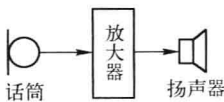


图1.1.2 扩音机电路

1.1.2 电路模型

实际电路的电磁过程是相当复杂的,难以进行有效的分析计算。在电路理论中,为了方便实际电路的分析和计算,通常在工程实际允许的条件下对实际电路进行模型化处理,即忽略次要因素,抓住足以反映其功能的主要电磁特性,抽象出实际电路器件的“电路模型”。

例如电阻器、灯泡、电炉等,这些电气设备接收电能并将电能转换成光能或热能,光能和热能显然不可能再回到电路中,因此把这种能量转换过程不可逆的电磁特性称为耗能。这些电气设备除了具有耗能的电磁特性外,还具有其他一些电磁特性,但在研究和分析问题时,即使忽略这些其他电磁特性,也不会影响整个电路的分析和计算。因此,可以用一个只具有耗能电磁特性的“电阻元件”作为它们的电路模型。

将实际电路器件理想化而得到的只具有某种单一电磁特性的元件,称为理想电路元件,简称电路元件。每种电路元件都体现了某种基本现象,具有某种确定的电磁特性和精确的数学定义。常用的有表示将电能转换为热能的电阻元件、表示电场性质的电容元件、表示磁场性质的电感元件及电压源元件和电流源元件等,其电路符号如图 1.1.3 所示。本章后面将分别讲解这些常用的电路元件。

把由理想电路元件相互连接而组成的电路称为电路模型。如图 1.1.1 中,电池对外提供电压的同时,内部也有电阻消耗能量,所以电池用其电动势 E 和内阻 R_0 的串联表示;电灯泡除了具有消耗电能的性质(电阻性)外,在通电时还会产生磁场,具有电感性。但是电感十分微弱,可忽略不计,因此可认为电灯是一电阻元件,用 R 表示。如图 1.1.4 所示为图 1.1.1 的电路模型。今后本书所涉及电路均指由理想电路元件构成的电路模型,同时把理想电路元件简称为电路元件。

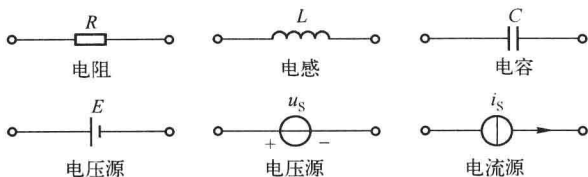


图 1.1.3 理想电路元件的符号

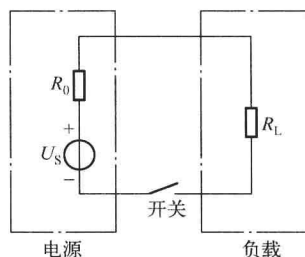


图 1.1.4 手电筒照明电路的电路模型

1.2 电路的基本物理量

1.2.1 电流

电流等于单位时间内通过导体横截面的电荷量,用来衡量电流大小的量称为电流强度。用符号 $i(t)$ 和 $q(t)$ 分别表示电流和电荷量,即

$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt} \quad (1.2.1)$$

通常,习惯上将正电荷移动的方向规定为电流的正方向,也称为电流的实际方向。

如果电流的大小和方向都不随时间变化,则把这种电流称为恒定电流,简称直流(Direct Current, DC),可用符号 I 表示。如果电流的大小和方向都随时间变化,则把这种电流称为交变电流,简称交流(Alternating Current, AC),可用符号 $i(t)$ 来表示。

以上规定了电流的实际方向,但是在进行电路分析时,电路中某个元件或某段电路的电流方向是

未知的,因此在分析计算前需要先假定电流的参考方向。参考方向的假定可以是任意的,一般可用一个实箭头表示。如图 1.2.1 (a) 所示,长方框表示电路中的一个元件或一段电路。箭头由 a 指向 b 的方向,是假定流经这个元件的电流的参考方向。但流过该元件的电流的实际方向可能是由 a 指向 b,也可能是由 b 指向 a。也就是说,电流的参考方向与电流的实际方向要么相同,要么相反。若电流的实际方向是由 a 指向 b,即如图 1.2.1 (b) 中虚线箭头所示,它与假定的参考方向一致,则电流 i 为正值,即 $i > 0$ 。在图 1.2.1 (c) 中假定电流的参考方向是由 b 指向 a,而实际方向是由 a 指向 b,与电流 i 的参考方向相反,即 $i < 0$ 。这样,在已经假定电流参考方向的情况下,电流 i 值的正和负,就反映了电流 i 的实际方向。若没有假定电流的参考方向,电流 i 的正值和负值就毫无意义,所以在分析电路时要预先假定电流的参考方向。

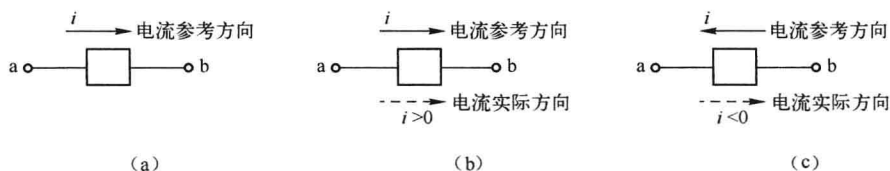


图 1.2.1 电流的参考方向

1.2.2 电压

电压等于单位正电荷在电场力作用下由 a 点移到 b 点时所做的功,即

$$u_{ab} = \frac{dw_{ab}}{dq} \quad (1.2.2)$$

式中, dq 为电荷由 a 点转移到 b 点的电量,单位为库仑[C]; dw 为转移过程中电荷 dq 所失去的电能,单位为焦耳[J]; 电压单位为伏特[V]。

单位正电荷在电场力的作用下由 a 移到 b,消耗电能,则 a 点是高电位点,称为正极,用符号“+”表示, b 点为低电位点,称为负极,用符号“-”号表示。电荷转移失去电能表现为电压降落,即电压降。通常,电路中两点之间的电压方向可用电压极性或电压降方向表示。

若电压的大小和极性均不随时间变动,则这样的电压称为恒定电压或直流电压,可用符号 U 表示。若电压的大小和极性均随时间变化,则称为交变电压或交流电压,用符号 $u(t)$ 表示。

电路两点之间的电压如同电流一样,在计算时也需要假定参考极性或参考方向。在图 1.2.2 (a) 中,如果假定 a 点的电位高于 b 点的电位,则 a 点为“+”极性, b 点为“-”极性。若实际中 a 点的电位高于 b 点的电位,则电压 $u > 0$,这表示元件两端的电压实际极性与参考极性相同,或者说电压实际方向与参考方向一致。如果 $u < 0$,说明电压的参考方向与实际方向相反,如图 1.2.2 (b) 所示。

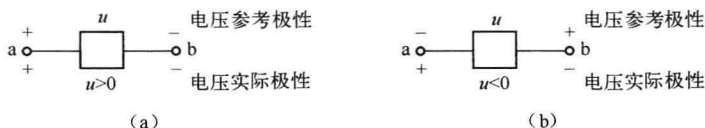


图 1.2.2 电压的参考极性

一个元件中通过的电流或端电压的参考方向可以分别任意指定。如果假定流过元件的电流参考方向是从标有电压“+”极性的一端指向电压“-”极性的一端,即电流和电压参考方向一致,则把这种电流和电压参考方向称为关联参考方向,如图 1.2.3 (a) 所示。当电压和电流的参考方向不一致时,称为非关联参考方向。在图 1.2.3 (b) 中, N 表示电路的一部分, N 有两个端子与外电路相连,为二端电路,其电流 i 的参考方向是从电压的“+”极端流入二端电路,再从“-”极端流出,电流和电压

参考方向一致，所以是关联参考方向。图 1.2.3 (c) 所示的电流与电压是非关联参考方向。

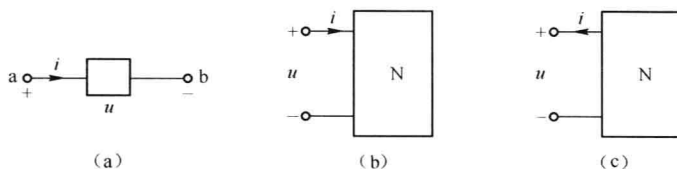


图 1.2.3 关联和非关联参考方向

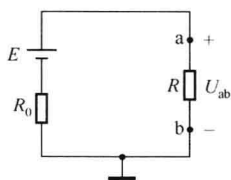


图 1.2.4 零电位示意图

为了方便分析问题，常在电路中指定一点作为参考点，假定该点的电位是零，用符号“⊥”表示，如图 1.2.4 所示。在生产实践中，把地球作为零电位点，凡是机壳接地的设备（接地符号是“⊥”），机壳电位即为零电位。有些设备或装置的机壳并不接地，而是把许多元件的公共点作为零电位点，用符号“⊥”表示。电路中其他各点相对于参考点的电压就是各点的电位，

因此，任意两点间的电压等于这两点的电位之差，可以用电位的高低来衡量电路中某点电场能量的大小。

电路中各点电位的高低是相对的，参考点不同，各点电位的高低也不同，但是电路中任意两点之间的电压与参考点的选择无关。电路中，凡是比参考点电位高的各点电位都是正电位，比参考点电位低的各点电位都是负电位。

【例 1.2.1】 求图 1.2.5 中 a 点的电位。



图 1.2.5 例 1.2.1 题图

解 对于图 1.2.5 (a) 有

$$U_a = -4 + \frac{30}{50 + 30} \times (12 + 4) = 2V$$

对于图 1.2.5 (b)，因 20Ω 电阻中电流为零，故

$$U_a = 0$$

国际单位制 (SI) 已规定了电路变量的单位，如安、伏、秒等。如表 1.2.1 所示为国际单位制中规定的十进制倍数和分数的单位词头。

$$1 \text{ 微安}[\mu A] = 1 \times 10^{-6} \text{ 安}[A]$$

$$5 \text{ 千伏}[kV] = 5 \times 10^3 \text{ 伏}[V]$$

$$2 \text{ 毫秒}[ms] = 2 \times 10^{-3} \text{ 秒}[s]$$

表 1.2.1 部分国际单位制倍数与分数词头

倍数	词头名称		词头符号	分数	词头名称		词头符号
	中文	原文 (法)			中文	原文 (法)	
10^{12}	太[拉]	tera	T	10^{-1}	分	deci	d
10^9	吉[咖]	giga	G	10^{-2}	厘	centi	c
10^6	兆	mega	M	10^{-3}	毫	milli	m
10^3	千	kilo	k	10^{-6}	微	micro	μ
10^2	百	hecto	h	10^{-9}	纳[诺]	nano	n
10	十	deca	da	10^{-12}	皮[可]	pico	p

1.2.3 功率

电流通过电路时传输或转换电能的速率,即单位时间内电场力所做的功,称为电功率,简称功率。数学描述为

$$p = \frac{dw}{dt} \quad (1.2.3)$$

式中, p 表示功率。在国际单位制中,功率的单位是瓦特[W],规定元件 1s 内提供或消耗 1J 能量时的功率为 1W。常用的功率单位还有千瓦[kW], $1\text{kW}=1000\text{W}$ 。

将式 (1.2.3) 等号右边的分子、分母同乘以 dq 后,变为

$$p = \frac{dw}{dt} = \frac{dw}{dq} \times \frac{dq}{dt} = ui \quad (1.2.4)$$

可见,元件吸收或发出的功率等于元件上的电压乘以元件中的电流。

若元件的电流为直流电流 I , 电压为直流电压 U , 则电功率为

$$P = UI \quad (1.2.5)$$

当式 (1.2.4) 或 (1.2.5) 中的电压和电流是关联参考方向时,则 p 为元件吸收的电功率。若在某一时刻, $p > 0$, 表明元件吸收电功率; $p < 0$, 表明元件实际上提供电功率或输出电功率。

当电流的单位为安培[A]、电压的单位为伏特[V]、能量的单位为焦耳[J]、时间的单位为秒[s]时,则电功率的单位为瓦特[W]。

电气设备或元件长期正常运行的电流允许值称为额定电流,其长期正常运行的电压允许值称为额定电压。额定电压和额定电流的乘积为额定功率。通常电气设备或元件的额定值标在产品的铭牌上。如一白炽灯标有“220V、40W”,表示它的额定电压为 220V,额定功率为 40W。

【例 1.2.2】 计算如图 1.2.6 所示各电路的电功率。设图 (a) 中, (1) $I = 1\text{A}$, $U = 2\text{V}$; (2) $I = 1\text{A}$, $U = -2\text{V}$ 。设图 (b) 中, (1) $I = -2\text{A}$, $U = 3\text{V}$; (2) $I = -2\text{A}$, $U = -3\text{V}$ 。

解 在图 1.2.6 (a) 中, I 和 U 为关联参考方向。

(1) 元件吸收的电功率为

$$P = UI = 1 \times 2 = 2\text{W}$$

(2) 元件吸收的电功率为

$$P = UI = (-2) \times 1 = -2\text{W}$$

计算结果为负值,表明该元件向外提供 2W 电功率。

在图 1.2.6 (b) 中,电压和电流为非关联参考方向, U 与 I 的乘积表示该元件提供的电功率。

(1) 元件提供的电功率为

$$P = UI = 3 \times (-2) = -6\text{W}$$

计算结果为负值,表明该元件吸收了 6W 电功率。

(2) 元件提供的电功率为

$$P = UI = (-3) \times (-2) = 6\text{W}$$

计算结果为正值,表明该元件向外提供 6W 电功率。

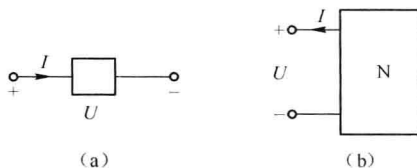


图 1.2.6 例 1.2.2 题图

1.3 电路元件

电路元件是构成电路的基本单元。元件按一定方式进行互连而组成电路,这种连接是通过元件端子来实现的。元件就其端子的数目而言,可分为二端元件和多端元件。具有两个以上端子的元件称为

三端、四端、……、 n 端元件，统称为多端元件。

元件的主要电磁特性通过端子间的有关变量来描述，不同变量间的特定关系反映了不同元件的性质。元件的这种关系可用一条曲线、一个或一组方程来表示，该曲线称为元件的特性曲线，该方程或方程组称为元件的定义（或特性）方程或方程组。通常，在电路分析中，用元件端电压与电流的关系（Voltage Current Relation, VCR）来表征元件的特性。VCR 方程也称为元件的特性方程或元件的约束方程。

集总（参数）元件假定：在任何时刻，流入二端元件的一个端子的电流一定等于从另一端子流出的电流，且两个端子之间的电压为单值量。由集总元件构成的电路称为集总电路，或称为具有集总参数的电路。

电路元件还可以分为线性元件和非线性元件、时变元件和时不变元件等。本章介绍的元件均是线性时不变元件。

1.3.1 电阻元件

电阻是一种最常见的、用于反映电流热效应的二端电路元件。电阻元件可分为线性电阻和非线性

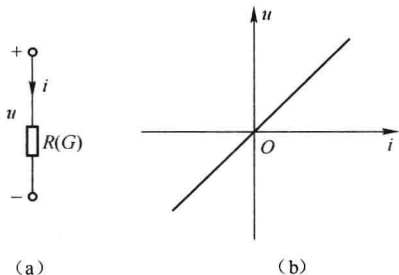


图 1.3.1 电阻的符号和特性

电阻两类，如无特殊说明，本书所涉及的电阻元件均指线性电阻元件。在实际交流电路中，白炽灯、电阻炉、电烙铁等均可看成是线性电阻元件。如图 1.3.1 (a) 所示是线性电阻的符号，在电压、电流的关联参考方向下，其端伏安关系为

$$u = Ri \quad (1.3.1)$$

式中， R 为常数，用来表示电阻及其数值。

式 (1.3.1) 表明，凡是服从欧姆定律的元件都是线性电阻元件。图 1.3.1 (b) 所示是它的伏安特性曲线。若电压、电流在非关联参考方向下，伏安关系应写成

$$u = -Ri \quad (1.3.2)$$

在国际单位制中，电阻的单位是欧姆[Ω]，规定当电阻电压为 1V、电流为 1A 时的电阻值为 1Ω。此外电阻的单位还有千欧[kΩ]、兆欧[MΩ]。电阻的倒数称为电导，用 G 来表示，即

$$G = \frac{1}{R} \quad (1.3.3)$$

电导的单位是西门子[S]或 1/欧姆[1/Ω]。

电阻是一种耗能元件。当电阻通过电流时，就会发生电能转换为热能的过程。热能向周围扩散后，不可能再直接回到电源而转换为电能。电阻所吸收并消耗的电功率可由式 (1.3.4) 计算得到

$$p = ui = i^2 R = \frac{u^2}{R} \quad (1.3.4)$$

在直流电路中

$$P = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R} \quad (1.3.5)$$

对于线性电阻，当 $R = \infty$ 或 $G = 0$ 时，称为开路，此时无论端电压为何值，其电流恒为零；当 $R = 0$ 或 $G = \infty$ 时，称为短路，电阻元件相当于一段理想导线，此时无论其电流为何值，其端电压恒为零。

1.3.2 电感元件

电感元件是实际线圈的一种理想化模型，它能够储存和释放磁场能量。空心电感线圈常可抽象为

线性电感，用如图 1.3.2 (b) 所示的符号表示。

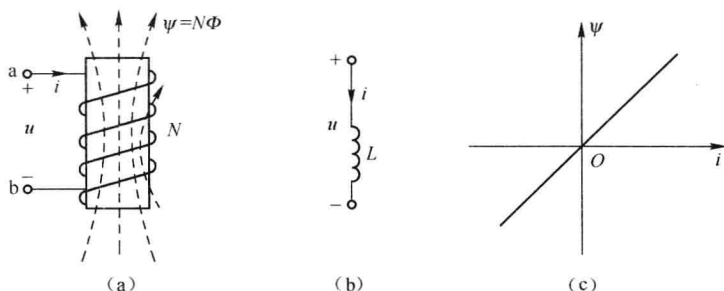


图 1.3.2 线圈、电感及特性

如果感应电压 u 的参考方向与磁通链 ψ 成右手螺旋关系，则根据电磁感应定律和电感元件特性有

$$u = \frac{d\psi}{dt} = \frac{d(Li)}{dt} = L \frac{di}{dt} \quad (1.3.6)$$

式 (1.3.6) 表明，电感元件上任一瞬间的电压大小与这一瞬间电流对时间的变化率成正比。如果电感元件中通过的是直流电流，因电流的大小不变，即 $di/dt=0$ ，那么电感上的电压就为零，所以电感元件对直流可视为短路。

L 为电感元件的参数，称为自感系数或电感，它是一个正实常数。在国际单位制中，磁通和磁通链的单位是韦伯[Wb]，当电流单位为安培[A]时，电感的单位是亨利[H]。

在关联参考方向下，电感元件吸收的功率为

$$p = ui = Li \frac{di}{dt} \quad (1.3.7)$$

则电感线圈在 $0 \sim t$ 时间内，线圈中的电流由 0 变化到 I 时，吸收的能量为

$$W = \int_0^t p dt = \int_0^I L i di = \frac{1}{2} LI^2 \quad (1.3.8)$$

即电感元件在一段时间内储存的能量与其电流的平方成正比。当通过电感的电流增加时，电感元件就将电能转换为磁能并储存在磁场中；当通过电感的电流减小时，电感元件就将储存的磁能转换为电能释放给电源。所以，电感是一种储能元件，它以磁场能量的形式储能。同时电感元件也不会释放出多于它吸收或储存的能量，因此它是一个无源的储能元件。

1.3.3 电容元件

电容器种类很多，但从结构上都可看成是由中间夹有绝缘材料的两块金属极板构成的。电容元件是实际的电容器即电路器件的电容效应的抽象，用于反映带电导体周围存在电场，是能够储存和释放电场能量的理想化电路元件。它的符号及规定的电压和电流参考方向如图 1.3.3 (a) 所示。

当电容接上交流电压 u 时，电容器不断被充电、放电，极板上的电荷也随之变化，电路中出现了电荷的移动，形成电流 i 。若 u 、 i 为关联参考方向，则有

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{d(Cu)}{dt} = C \frac{du}{dt} \quad (1.3.9)$$

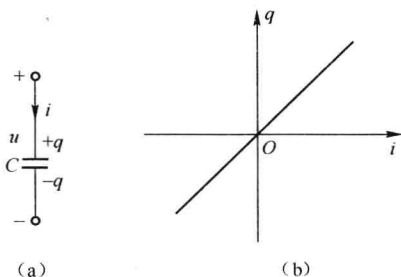


图 1.3.3 电容的符号和特性

式 (1.3.9) 表明，电容器的电流与电压对时间的变化率成正比。如果电容器两端加直流电压，因

电压的大小不变, 即 $\frac{du}{dt}=0$, 那么电容器的电流就为零, 所以电容元件对直流可视为断路, 因此电容具有“隔直通交”的作用。在国际单位制中, 当电荷和电压的单位分别为库仑[C]和伏特[V]时, 电容的单位为法拉[F], $1\text{F}=10^6\mu\text{F}=10^{12}\text{pF}$ 。

在关联参考方向下, 电容元件吸收的功率为

$$p = ui = uC \frac{du}{dt} = Cu \frac{du}{dt} \quad (1.3.10)$$

则电容器在 $0 \sim t$ 时间内, 其两端电压由 0V 增大到 U 时, 吸收的能量为

$$W = \int_0^t p dt = \int_0^U C u du = \frac{1}{2} CU^2 \quad (1.3.11)$$

式(1.3.11)表明, 对于同一个电容元件, 当电场电压高时, 它储存的能量就多; 对于不同的电容元件, 当充电电压一定时, 容量大的储存的能量就多。从这个意义上说, 电容 C 也是电容元件储能本领大小的标志。

当电压的绝对值增大时, 电容元件吸收能量, 并转换为电场能量; 当电压的绝对值减小时, 电容元件释放电场能量。电容元件本身不消耗能量, 同时也不会放出多于它吸收或储存的能量, 因此电容元件也是一种无源的储能元件。

1.3.4 独立电源

在组成电路的各种元件中, 电源是提供电能或电信号的元件, 常称为有源元件, 如发电机、电池等。能够独立地向外电路提供电能的电源称为独立电源; 不能独立地向外电路提供电能的电源称为非独立电源, 又称为受控源。本节介绍独立电源, 包括电压源和电流源。

电压源和电流源是两个理想化的电路元件, 它们的物理原形是实际电源, 如干电池、发电机、信号源、光电池等。通常它们在电路中提供电能, 是两个电源元件。

电压源的定义为: 一个理想二端元件, 若其端电压 $u(t)$ 总保持为一个确定的值 U_S 或确定的时间函数 $u_S(t)$, 而与通过它的电流 $i(t)$ 无关, 则这种二端元件称为独立电压源, 简称电压源。电压源的图形符号如图 1.3.4 (a) 所示, 用文字符号 U_S 或 $u_S(t)$ 表示电压值。图中“+”、“-”符号表示电压源的方向。当电压源为直流电压源时, 用图 1.3.4 (b) 所示的图形符号表示, 其中长线段表示电压的正极, 短线段表示电压的负极。

如图 1.3.5 (a) 所示为电压源接外电路的情况, 通常取电压源的电压和电流方向为非关联参考方向。电压源的特点是: 端电压 $u(t)$ 总等于 $u_S(t)$, 不受外电路影响; 而电压源的电流值由外电路决定, 当电压源所连接的外电路不同时, 流经电压源的电流也不同。如果 $u_S(t) = U_S$ 为一直流电压, 则电压源端电压 $u(t) = U_S \neq 0$, 电压源的特性曲线是一条不过原点且平行于电流轴的直线, 如图 1.3.5 (b) 所示。

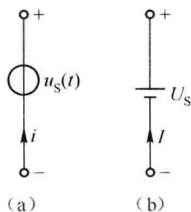


图 1.3.4 电压源图形符号

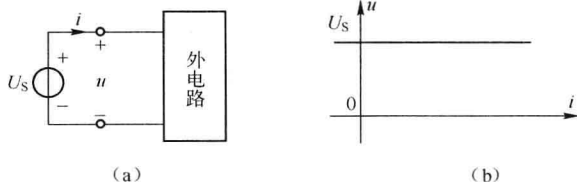


图 1.3.5 电压源外特性

如果电压源 $u_S(t) = 0$ 时, 电压源相当于一短路, 即电压源的伏安特性为 $u-i$ 平面上的电流轴。电压源两端不允许短路, 因为电压源短路时端电压 $u = 0$, 这与电压源的特性不相容。

电压源发出的电功率为