

清华大学电气工程系列教材

电工电子技术与EDA基础 (上) (第2版)

Electrical Engineering and
EDA Fundamentals (Volume I)

Second Edition

段玉生 王艳丹 编著
Duan Yusheng Wang Yandan

清华大学出版社

清华大学电气工程系列教材

电工电子技术与EDA基础 (上) (第2版)

Electrical Engineering and
EDA Fundamentals (Volume I)

Second Edition

段玉生 王艳丹 编著
Duan Yusheng Wang Yandan

清华大学出版社

内 容 简 介

本教材分上、下两册。本册(上册)主要讲授电工技术与相关的 EDA 知识。包括电路的基本理论和分析方法、EDA 基础知识(SPICE)、磁路与变压器、电动机的原理及应用、继电器、接触器控制和可编程控制器(PLC)等内容,附录中还介绍了本书要用到的电路仿真软件 AIM-SPICE 和 SPICE OPUS 的使用方法。内容软硬结合,选材新颖;概念叙述准确、精练,通俗易懂,便于读者自学。

书中既包含了传统的电工学基本理论,又介绍了电路仿真软件,是一本将电路基本理论和 EDA 技术结合起来的颇具特色的教材。本套教材是根据电工电子技术的发展,为高校理工科非电类专业而编写的,也可以作为高校理工科电类专业学生的参考书,或作为 EDA 初学者的参考教材。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

电工电子技术与 EDA 基础. 上/段玉生,王艳丹编著.--2 版.--北京:清华大学出版社,2015
清华大学电气工程系列教材
ISBN 978-7-302-38239-3

I. ①电… II. ①段… ②王… III. ①电工技术—高等学校—教材 ②电子技术—高等学校—教材
③电子电路—计算机辅助设计—高等学校—教材 IV. ①TM-43 ②TN01

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 235107 号

责任编辑:孙 坚
封面设计:傅瑞学
责任校对:赵丽敏
责任印制:何 芊

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:三河市吉祥印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:22.75 字 数:551 千字

版 次:2004 年 5 月第 1 版 2015 年 1 月第 2 版 印 次:2015 年 1 月第 1 次印刷

印 数:1~2500

定 价:45.00 元

前 言

“电工学”是高等学校非电类专业本科学生的技术基础课,课程的主要目的是根据学生本专业对电气工程知识的需求,介绍电气工程的基本原理及其相关应用。其主要内容一般包括“电工技术”和“电子技术”两大部分。从 20 世纪 60 年代我国高等学校开设电工学课程以来,随着新技术和新器件的出现,以及电气工程在其他工科领域应用的不断深入和扩展,课程内容进行了多次改革。例如 20 世纪 70 年代末引入了模拟和数字集成电路,90 年代初引入了可编程控制器和电力电子技术等。进入 21 世纪以来,电子设计自动化 EDA(Electronics Design Automation)技术在我国逐渐推广应用。它以计算机为工作平台,以硬件描述语言为电路和器件设计的基础,结合相应的 EDA 软件工具,使电子系统的设计产生了质的飞跃,系统的功能验证日趋完善,硬件实现的速度大为提高。因此,理解 EDA 技术的基本原理,熟练掌握和应用 EDA 技术,对于从事电气工程相关工作的工程技术人员都是非常重要的。

本套教材分为上、下两册:上册的主要内容为电工技术及 EDA 的基础知识;下册的主要内容包括电子技术、可编程逻辑器件和功率电子技术等。

上册内容包括电路的基本理论和分析方法、EDA 基础知识(SPICE)、磁路与变压器、电动机的原理及应用、继电器-接触器控制和可编程控制器(PLC)等内容;下册内容包括模拟电子电路、数字电子电路、电路的设计与仿真、数字可编程逻辑器件、电力电子等内容。另外,各章都对所选用的教学内容进行了深入细致的分析,努力做到概念准确、重点突出、叙述精练、通俗易懂,便于读者自学。配有较多的例题及习题,通过这些练习,读者会加深对课程内容的理解。

根据非电类工科专业本科专业的专业需求以及电工学课程的特点,本教材对传统的“电工学”教学内容进行了重新设计。电工学课程的发展趋势必然是软硬结合,据此我们在教学内容中加入了 EDA 基础知识,并将其放在了较重要的位置。在电工技术和模拟电路中,以电路仿真程序 SPICE 语言作为重点。教材的上册,在对电路的基本概念和分析方法做了介绍之后,从第 2 章开始便引入了电路仿真工具 SPICE,并在以后各章根据其具体内容,对 SPICE 的语法结构、语句格式以及电路仿真过程等作了进一步介绍。也就是说,采用“结合使用,循序渐进”的方法,将

EDA 内容引入到教材中,这样安排既可以避免冗长烦琐的讲解,又可将其与传统的教学内容有机地结合起来,更便于读者学习。这种内容安排在以往的教学得到了学生的一致好评。

教材的下册,在模拟电路部分将全面使用基于 SPICE 的电路仿真软件 Multisim 进行电路设计和仿真。由于读者在电工技术部分对 SPICE 的仿真原理、元件模型等有了较深入的了解,因此能够更有效地使用 Multisim 软件。在数字电路部分,本书将对可编程逻辑器件(PLD)和硬件描述语言 VHDL 进行介绍。

可编程控制器(PLC)现在已是电工技术教学中不可或缺的内容。根据近几年我国 PLC 的使用情况,西门子公司生产的可编程控制器占有较大市场,而且其系统性能、网络特性等都比较良好。因此,上册在讲授可编程控制器时,采用了西门子的产品为介绍对象。因为不同的 PLC 产品,在编程语句和使用方法等方面多有类似之处,所以在掌握西门子产品之后,也有利于对其他品牌产品的学习和使用。在 PLC 教学内容上本书力求避免只介绍指令,而忽视介绍 PLC 程序设计方法的做法,重点介绍了利用顺序功能图的 PLC 程序设计方法。读者通过本教材的学习,能够掌握一般 PLC 程序的设计思路,掌握小型 PLC 控制系统的设计方法。

本套教材的教学内容,主要适用于多学时类型的电工学课程,也适用于其他类型电工学课程的选用。教师在选用该教材时,可不受学时数的限制,根据学生的专业需求和学时安排,对教学内容进行安排或取舍。

第 2 版教材是在第 1 版教材经过多年使用的基础上,对很多章节经过较大的重编而形成的。由于时间仓促,编者的知识水平有限,书中难免存在不妥和错误之处,真诚希望广大读者特别是从事“电工学”教学的同仁批评、指正!

编者

2014 年 9 月于清华大学

目 录

第 1 章 电路的基本概念和分析方法	1
1.1 电路变量	1
1.1.1 电流及其参考方向	2
1.1.2 电压、电压的参考方向和电位	2
1.1.3 电功率和电能	3
1.2 基尔霍夫定理	4
1.2.1 基尔霍夫电流定律	5
1.2.2 基尔霍夫电压定律	6
1.3 电路元件	6
1.3.1 电阻、电感和电容	7
1.3.2 电源	10
1.3.3 电路元件的额定值	14
1.4 电路的基本分析方法	14
1.4.1 电路方程	14
1.4.2 电阻的串联、并联和星/三角等效变换	16
1.4.3 支路电流法	19
1.4.4 节点电位法	20
1.5 线性电路中的重要定理	23
1.5.1 叠加定理	23
1.5.2 等效电源定理	25
1.5.3 最大功率传输定理	32
1.6 含受控源电路的分析	32
1.6.1 独立源与受控源	32
1.6.2 含受控源电路的分析	33
本章小结	36
习题	37
第 2 章 电路仿真程序 SPICE 入门	43
2.1 SPICE 简介	43
2.2 SPICE 电路文件	44
2.2.1 在 SPICE 中怎样描述电路	44
2.2.2 元件值的写法	46

2.2.3	电路文件的编辑与运行	46
2.3	元件语句	46
2.3.1	电阻、电容和电感	46
2.3.2	电源	47
2.4	直流分析语句(DC analysis)	49
2.5	输出语句(output statements)	50
2.6	子电路(subcircuit)的定义和调用	50
2.7	.model 语句与二极管、开关在 SPICE 中的表示法	51
2.7.1	.model 语句	51
2.7.2	开关模型(switch models)	52
2.7.3	二极管模型(diode model)	53
2.8	用 SPICE 分析直流电路举例	54
	本章小结	58
	习题	58
第 3 章	正弦交流电路	61
3.1	正弦量的数学描述	61
3.1.1	正弦量的三要素	61
3.1.2	正弦量的相量表示法	64
3.2	单一参数的正弦交流电路	68
3.2.1	理想电阻电路	68
3.2.2	理想电感电路	69
3.2.3	理想电容电路	71
3.3	RLC 串联电路	73
3.3.1	RLC 串联电路中电压和电流的关系及阻抗	73
3.3.2	RLC 串联电路中的功率	75
3.4	正弦交流电路中电压和电流的分析	76
3.4.1	阻抗的串并联	77
3.4.2	正弦交流电路的分析举例	79
3.5	正弦交流电路中的功率	83
3.5.1	正弦交流电路中功率的计算	83
3.5.2	功率因数的提高	83
3.5.3	正弦交流电路中的功率守恒	85
3.5.4	正弦交流电路的最大功率传输	86
3.6	电路中的谐振现象	86
3.6.1	串联谐振	87
3.6.2	并联谐振	89
3.6.3	谐振的应用举例	91
3.7	电路的频率特性	93
3.7.1	传递函数	93

3.7.2	滤波器的类型	95
3.7.3	滤波器的性能	96
3.8	SPICE 在正弦交流电路分析中的应用	97
3.8.1	SPICE 中正弦交流电源的表示方法	97
3.8.2	电阻、电感、电容在 SPICE 中的表示方法	98
3.8.3	SPICE 中的弛豫分析语句, tran	99
3.8.4	交流分析语句, ac	100
	本章小结	103
	习题	103
第 4 章	三相交流电路	108
4.1	三相交流电源	108
4.1.1	三相交流电动势的产生及其特点	108
4.1.2	三相交流电源的连接	109
4.1.3	线电压和相电压	110
4.2	三相负载的连接	111
4.3	三相电路中电压和电流的分析	111
4.3.1	三相负载星形连接时电路中的电压和电流	111
4.3.2	三相负载三角形连接时电路中的电压和电流	114
4.4	三相电路的功率	115
4.4.1	三相电路功率(three-phase power)的计算	115
4.4.2	三相电路功率的测量	116
4.5	三相电源的相序	118
4.6	用 SPICE 分析三相交流电路	119
	本章小结	120
	习题	121
第 5 章	非正弦周期交流电路	124
5.1	概述	124
5.2	非正弦周期交流信号的分解	124
5.3	非正弦周期交流电路的计算	127
5.4	有效值和平均功率的计算	130
5.4.1	有效值	130
5.4.2	平均功率	130
5.5	脉冲信号源在 SPICE 中的表示法与傅里叶分析(. Fourier)语句	131
5.5.1	脉冲信号源在 SPICE 中的表示法	131
5.5.2	SPICE 中的非线性受控源	132
5.5.3	SPICE 的傅里叶分析(. Fourier)语句	132
5.6	用 SPICE 分析非正弦电路举例	133
	本章小结	135
	习题	136

第 6 章 电路的过渡过程	139
6.1 概述	139
6.2 换路定理及起始值的确定	140
6.2.1 换路定理	140
6.2.2 起始值的确定	140
6.3 一阶电路过渡过程的分析方法	143
6.3.1 经典法	143
6.3.2 三要素法	145
6.3.3 用叠加法求一阶电路的响应	151
6.4 脉冲激励下的 RC 电路	153
6.4.1 微分电路	153
6.4.2 积分电路	154
6.4.3 序列脉冲作用下的 RC 电路	155
6.5 含有多个储能元件的一阶电路	157
6.5.1 多个储能元件可等效为一个储能元件的一阶电路	157
6.5.2 起始值不独立的一阶电路	157
6.5.3 实用电路举例——脉冲分压电路	159
6.6 二阶电路过渡过程简介	162
6.6.1 RLC 电路二阶过渡过程求解的简要说明	163
6.6.2 二阶过渡过程的特点	164
6.7 用 SPICE 分析电路的过渡过程举例	165
本章小结	166
习题	167
第 7 章 磁路与变压器	171
7.1 磁路	171
7.1.1 磁感线、磁感应强度和磁通量	171
7.1.2 磁场强度、安培环路定律和磁路的欧姆定律	172
7.1.3 磁性材料的主要特性	174
7.2 交流铁心线圈	178
7.2.1 交流励磁下铁心线圈的电压关系式	178
7.2.2 交流励磁下电压、电流与磁通的关系	179
7.3 变压器	182
7.3.1 互感与互感系数	183
7.3.2 变压器的结构	184
7.3.3 变压器的工作分析	185
7.3.4 变压器的外特性与效率	188
7.3.5 变压器的连接组别	189
7.3.6 一些特殊变压器	191
7.3.7 变压器的额定值及型号	193

7.4	互感器和理想变压器在 SPICE 中的表示方法	195
7.4.1	互感器在 SPICE 中的表示方法	195
7.4.2	理想变压器在 SPICE 中的表示方法	195
7.5	用 SPICE 分析变压器电路举例	196
	本章小结	198
	习题	199
第 8 章	电动机	203
8.1	三相异步电动机	203
8.1.1	三相异步电动机的结构及转动原理	203
8.1.2	三相异步电动机的等效电路	208
8.1.3	三相异步电动机的电磁转矩和机械特性	210
8.1.4	三相异步电动机的铭牌数据及应用	213
8.2	单相异步电动机	218
8.2.1	单相异步电动机的结构和工作原理	219
8.2.2	单相异步电动机的启动	220
8.2.3	三相异步电动机的单相运行	221
8.3	直流电动机	222
8.3.1	直流电动机的主要结构	222
8.3.2	直流电动机的工作原理	223
8.3.3	机械特性	224
8.3.4	直流电动机的调速	225
8.3.5	直流电动机的使用	227
8.3.6	直流电动机的额定值	228
8.4	控制电动机	229
8.4.1	步进电动机	229
8.4.2	伺服电动机	234
	本章小结	236
	习题	236
第 9 章	继电器、接触器控制	239
9.1	常用低压电器	239
9.1.1	刀开关	239
9.1.2	熔断器	240
9.1.3	控制按钮	240
9.1.4	行程开关	241
9.1.5	交流接触器	242
9.1.6	中间继电器	243
9.2	三相异步电动机的启—保—停控制及电动机的保护	243

9.2.1	三相异步电动机的启—保—停控制	243
9.2.2	电动机的保护	244
9.3	基本控制环节	246
9.3.1	电动机的启动和停车控制	246
9.3.2	电动机正反转控制	248
9.3.3	行程控制	249
9.3.4	时间继电器和延时控制	250
9.4	综合应用举例	251
	本章小结	257
	习题	257
第 10 章	可编程控制器	261
10.1	可编程控制器的组成与工作原理	262
10.1.1	PLC 的组成	262
10.1.2	PLC 的工作原理	264
10.1.3	西门子 S7-200 可编程序控制器简介	265
10.2	S7-200 PLC 程序设计基础	267
10.2.1	可编程序控制器的编程语言与程序结构	267
10.2.2	S7-200 PLC 存储器的数据类型与寻址方式	270
10.3	S7-200 PLC 的基本指令(SIMATIC 指令)	274
10.3.1	位逻辑指令	274
10.3.2	定时器指令	279
10.3.3	计数器指令	282
10.4	小型 PLC 控制系统设计	283
10.4.1	小型 PLC 控制系统设计的一般步骤	283
10.4.2	PLC 程序的经验设计方法	284
10.5	利用顺序功能图设计 PLC 控制程序	287
10.5.1	顺序功能图	288
10.5.2	利用顺序控制继电器指令编写程序	294
10.6	STEP 7-MicroWIN 编程软件使用指南	303
10.6.1	STEP 7-MicroWIN 编程软件的窗口界面介绍	303
10.6.2	项目的组成	303
10.6.3	程序的编写与下载	304
10.6.4	监视与调试程序	306
	本章小结	306
	习题	307
附录 A	电阻器与电位器	310
附录 B	电感与电容	314

附录 C	AIM-SPICE 的使用方法	318
附录 D	混合电路仿真软件 SPICE OPUS 使用说明	327
附录 E	本书用到的 SPICE3F5 语句	331
附录 F	用电安全技术知识	338
附录 G	常用电工电子术语中英文对照	342

电路的基本概念和分析方法

把各种电路元件(element)以某种方式互联而形成的能量或信息的传输通道称为电路(electric circuit),或称为电路网络(electric network)。电路元件的运用与电能的消耗和存储相关。例如,当电流通过电阻时将电能转换成热能,同时电流也会产生磁场。如果电流是变化的,则电路中各元件通过空间的电磁感应相互作用,使电路中的一部分能量会通过电磁波辐射。但是,如果电路元件及电路的尺寸远远小于电路中与电流频率有关的电磁波波长,则可以近似认为能量只驻留于(或者说集总于)各个元件的内部,这种元件称为集总元件(lumped element),由集总元件组成的电路称为集总电路(lumped circuit)。在集总电路中电场与磁场是分隔开的,不存在相互作用,电路不存在电磁辐射。只有在集总电路中电路的各种定律及其分析方法才成立,本书的电路分析以集总电路为基本假设。

在电路中,能产生电能或者电信号的电路元件称为电源(source);能将电能转化为其他形式的能量,或对信号进行处理的电路元件称为负载(load)。在电路中,电源、负载、连接导线和开关构成通路,产生电压和电流。电路中的电压和电流是在电源的作用下产生的,所以电源又称为激励源或激励,电压、电流称为响应。

电路分析建立在电路模型的基础上。电路模型中各电路元件是从实际电路中抽象得到的理想模型,可以用数学表示式精确地描述其特性。在电路模型中,元件之间的连线是没有电阻的理想导线,开关为理想开关,即当开关闭合时其电阻为0,断开时其电阻为 ∞ 。

本章将介绍电路分析所常用的物理量、电路的基本定律、电路元件的电路模型及其端口电压和电流的特性、电路的分析方法。

1.1 电路变量

电路变量用于描述电路特性。电路变量有电流(current)、电压(voltage)、电荷(charge)、磁通量(flux)、功率(power)和能量(energy)

等,其中电压和电流是电路中最容易观察和测量的两个基本变量,电路元件的特性通常以电压和电流的关系来描述(称为伏安特性, volt-ampere characteristic),电路的基本定律也即电路中电压或电流的关系。这些电路变量在物理学中已给出严格的定义,这里仅简单介绍在电路分析中常用的一些物理量。

1.1.1 电流及其参考方向

电流定义为单位时间内,通过某一导体横截面的电荷量,用符号 i 表示。根据定义,有

$$i(t) \stackrel{\text{def}}{=} \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt} \quad (1.1.1)$$

式中, i 为流过导体的电流; q 为通过横导体截面的电荷量; t 为时间。在国际单位制(SI)中,电流的单位为 A(安[培])。实用中还常用到千安(kA)、毫安(mA)和微安(μA)。

如果电流的大小和方向不随时间变化,则称之为直流电流或恒定电流(direct current, DC),用大写字母 I 表示。如果电流的大小和/或方向随着时间变化,则用小写字母 i 表示。

电流的实际方向规定为正电荷移动的方向。但在分析电路时,若事先并不知道电流的实际方向,则需先假定电流的方向才能列写电路方程。这种人为假设的方向称为参考方向(reference direction),亦称正方向(positive direction)。电流的参考方向可以在电路图中用箭头表示,如图 1.1(a)所示,假定电流 i 沿箭头方向流动;也可以在电流符号中用双下标表示参考方向,如图 1.1(b)所示, i_{AB} 表示假设电流从点 A 流到点 B。如果所分析的结果为正,表明实际方向与参考方向一致;否则,实际方向与参考方向相反。若无特别说明,电路中物理量所标示的方向均为其参考方向。

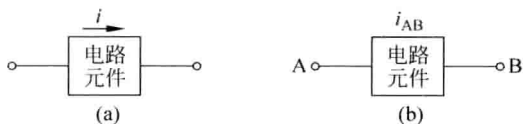


图 1.1 电流参考方向的表示法

1.1.2 电压、电压的参考方向和电位

在电场力的作用下,将单位正电荷从点 A 移到点 B 所做的功称为点 A 与点 B 之间的电压,记作 u_{AB} 。根据定义,有

$$u_{AB} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{d\omega_{AB}}{dq} \quad (1.1.2)$$

式中, u_{AB} 为点 A 到点 B 的电压; q 为电荷量; ω_{AB} 为将电荷量为 q 的正电荷从点 A 移动到点 B 所做的功。在国际单位制(SI)中,电压的单位为 V(伏[特])。实用中还常用到千伏(kV)、毫伏(mV)和微伏(μV)。直流电压用大写字母 U 表示,非直流电压用小写字母 u 表示。

在静电学中,电位即电势(electric potential)定义为:位于电场中某个位置的单位电荷所具有的电势能。在分析电路时,通常在电路中选择某点为“0”电位点,称为参考节点,亦称

接地点。参考节点在电路图中的符号如图 1.2 所示,本书统一使用图 1.2(a)所示的符号。电路中某点与参考节点之间的电压,称为该点的电位,通常记作 $V(\text{DC})$ 或 $v(\text{非 DC})$ 。

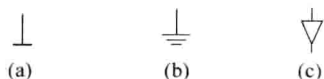


图 1.2 参考节点的表示法

电压的实际方向规定为从高电位端指向低电位端,即电位降低的方向。电压的参考方向为假定方向,有三种表示方法:正负号、箭头、双下标,分别如图 1.3(a),(b),(c)所示。图 1.3(a)中“+”表示高电位端,“-”表示低电位端;图 1.3(b)中箭头从高电位端指向低电位端;图 1.3(c)中, u_{AB} 的下标 A 表示高电位端,B 表示低电位端。

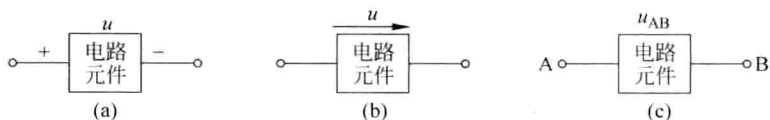


图 1.3 电压参考方向的表示法

电压和电位是两个概念。电路中任何两点的电压等于这两点的电位差。电压为绝对量,不随参考节点的变化而变化;电位是相对量,随参考节点的变化而变化。

1.1.3 电功率和电能

电功率(power)定义为电流在单位时间内所做的功,记作 P 或 p ,单位为 W (瓦[特])。根据电功率、电压和电流的定义,有

$$p = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d\omega}{dq} \cdot \frac{dq}{dt} = ui \quad (1.1.3)$$

功率的方向即能量的流向,规定能量流入(即消耗能量)时功率的值为正,能量流出(即提供能量)时则功率的值为负。当某电路元件电压与电流的实际方向相同时,则表明正电荷从高电位移动到低电位,电场力做功,则该元件消耗电能,功率的值为正;反之,当其电压与电流的实际方向相反时,则该元件提供电能,功率的值为负。

在计算某电路元件的功率时,根据其电压和电流的参考方向选择计算公式:在电压 U 和电流 I 的参考方向一致(称为一致参考方向或关联参考方向)时,如图 1.4(a),(b)所示,采用公式 $P=UI$ 计算;在电压 U 和电流 I 的参考方向不一致(称为不关联参考方向)时,如图 1.4(c),(d)所示,采用公式 $P=-UI$ 计算。计算结果 $P>0$,则表示元件的 U 、 I 实际方向一致,元件消耗电能,是电路中的负载; $P<0$,则表示元件的 U 、 I 实际方向相反,元件提供电能,是电路中的供电电源。

电能指一段时间内所提供或者消耗的能量。电能通常记作 W 。 W 和 p 的关系可表示为

$$W = \int_{t_1}^{t_2} p(t) dt \quad (1.1.4)$$

在物理学中,能量单位是 J (焦[耳])。在电力系统中,电能通常采用的单位是“千瓦时”

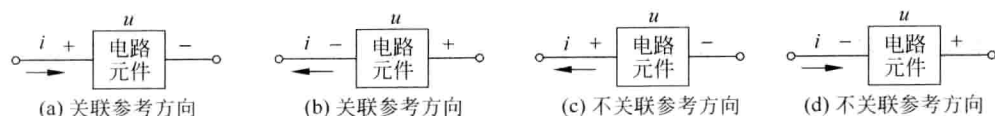


图 1.4 电压与电流参考方向的关联性

(kW·h), 1 千瓦时即为常说的 1“度”电。两种电能单位之间的换算关系为 $1\text{kW}\cdot\text{h} = 3.6 \times 10^6\text{J}$ 。

例 1.1.1 直流电路如图 1.5 所示, 图中已标出各电路元件电流和电压的参考方向。已知 $I=1\text{A}$, $U_1=-2\text{V}$, $U_2=3\text{V}$, $U_3=-5\text{V}$ 。问:

- (1) 三个元件的功率各是多少?
- (2) 哪个元件是供电电源, 哪个元件是负载?

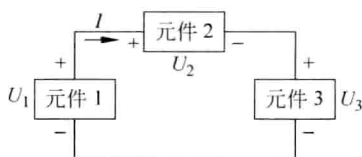


图 1.5 例 1.1.1 电路

解 (1) 三个元件的功率分别为

$$P_1 = -IU_1 = -1 \times (-2) = 2(\text{W})$$

$$P_2 = IU_2 = 1 \times 3 = 3(\text{W})$$

$$P_3 = IU_3 = 1 \times (-5) = -5(\text{W})$$

(2) 因为 $P_1 > 0$, $P_2 > 0$, $P_3 < 0$, 所以元件 1 和元件 2 消耗功率, 为负载; 元件 3 为电路提供功率, 为供电电源。

1.2 基尔霍夫定理

首先了解几个有关电路结构的名词:

支路(branch): 电路中的每个分支。电路元件的串联组合为一条支路。

节点(node): 三条或三条以上支路的连接点。

回路(loop): 电路中的任何一条闭合路径。

网孔(mesh): 把电路图画在一个平面上, 不含有分支的回路称为网孔, 即平面电路的每一个格就是一个网孔。一个网孔是一条回路, 而一条回路不一定是网孔。

例 1.2.1 电路中各电路元件的连接如图 1.6 所示。试分析该电路有几条支路, 几个节点, 几条回路, 几个网孔。

解 该电路共有 6 条支路: ab, bc, cd, dea, bd, afc 。

有 4 个节点: 点 a, 点 b, 点 c, 点 d。

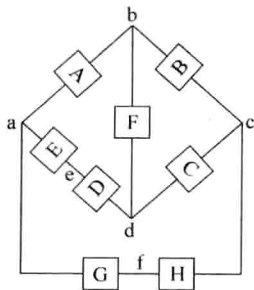


图 1.6 例 1.2.1 图

有 7 条回路: abdea, bcdb, abcdea, abcfa, aedcfa, abdcfa, aedbcfa。

有 3 个网孔: abdea, bcdb, aedcfa。

基尔霍夫定理(Kirchhoff's law)包含基尔霍夫电流定律(KCL)和基尔霍夫电压定律(KVL),描述了电路中电流和电压分别遵循的基本规律。

1.2.1 基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律描述了电路中各支路电流之间关系,其内容为:在任何时刻,流入某节点的电流之和恒等于流出该节点的电流之和。若规定电流流入节点为正,流出为负,则基尔霍夫电流定律可以表述为:电路中与某节点连接的所有支路的电流的代数和为 0。若有 n 条支路与某节点连接,则

$$\sum_{m=1}^n i_m = 0 \quad (1.2.1)$$

电路如图 1.7 所示。按流入节点的电流等于流出节点的电流列节点 a 的电流方程,有

$$I_1 + I_3 = I_2 + I_4$$

按照节点 a 电流的代数和为 0 列方程,有

$$I_1 - I_2 + I_3 - I_4 = 0$$

基尔霍夫电流定律不仅适用于电路中的任何节点上,还可推广到包围电路任何部分的闭合面上:与闭合面相连接的各支路电流的代数和等于零。在电路分析中,这种闭合面称为广义节点。例如,在图 1.8 所示的电路中,可用一个闭合面(图中虚线所示)把右边的电路圈起来作为一个广义节点。对于这个广义节点,根据 KCL,有

$$\sum_{m=1}^n i_m = 0$$

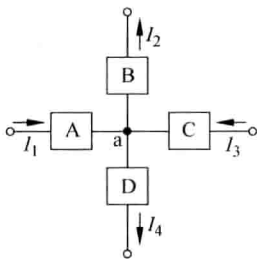


图 1.7 KCL 例图

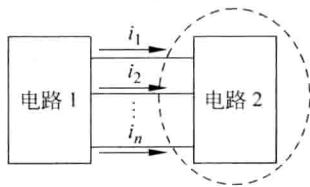


图 1.8 广义节点(虚线框以内)

利用 KCL 可以证明电路中功率守恒。设电路有 n 个节点, b 条支路。第 k 条支路连接在第 p 、 q 两个节点之间,支路电压和电流 u_k 、 i_k 参考方向一致,则

$$u_k i_k = u_{pq} i_{pq} = u_{qp} i_{qp}$$

所以有

$$u_k i_k = \frac{1}{2} (u_{pq} i_{pq} + u_{qp} i_{qp})$$

$$\sum_{k=1}^b u_k i_k = \sum_{p,q=1}^n \frac{1}{2} (u_{pq} i_{pq} + u_{qp} i_{qp})$$