

新工科建设·应用型本科规划教材
广东省重点学科建设、应用型专业转型、广东省质量工程项目成果

电路分析

杨智闵虎 主编

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书系统地介绍了电子电气电路的基础知识,包括电路的基本定律和定理,基本电路元件及电路分析技术。全书共 15 章,主要内容分为直流电路、交流电路及电路分析的高级技术三部分,具体包括电路的基本概念、电路的基本定律与等效、电路分析的一般方法、电路分析的基本定理、运算放大器分析、电容器与电感器、一阶与二阶电路分析、正弦交流电路和相量、正弦稳态电路分析、交流电路的功率分析、三相电路分析、磁耦合电路分析、电路的频率响应分析、二端口网络分析。附录介绍了电路仿真软件 Multisim,书末含部分习题参考答案。这是一本通俗易懂且实用的教材,对电子信息、电气及自动化类科学与工程应用的学生有所帮助。

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

电路分析/杨智,闵虎主编. —北京:电子工业出版社,2019.10

ISBN 978-7-121-36868-4

I. ①电… II. ①杨… ②闵… III. ①电路分析—高等学校—教材 IV. ①TM133

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 120881 号

策划编辑:章海涛

责任编辑:底波

印刷:

装订:

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:17.5 字数:459.2 千字

版次:2019 年 10 月第 1 版

印次:2019 年 10 月第 1 次印刷

定 价:52.00 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, 88258888。

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。

本书咨询联系方式:192910558 (QQ 群)。

前 言

“电路分析”课程是高等学校电子信息和电气自动化类学科专业的重要基础课，且为必修课。学习本课程要求学生具备必要的数学和物理基础知识。

本书以“电路分析”课程的教学基本要求为前提，重点培养学生的实际应用能力。

本书有以下特点。

1. 简明易懂，对培养应用型、创新型本科生而言，以电路的基本概念、基本定律、基本定理和基本分析方法为教学重点，突出对学生能力的培养，为学生打下适应变化、更新知识的基础。

2. 力求以电路的两个基本定律贯穿应用到电路分析的各个章节中，不进行生涩的理论推导，突出概念，保证重点，使学生对电路分析课程脉络有一个整体认识，通过系统学习，培养他们的自主学习能力和创新思维。

3. 理论联系实际、注重应用。本书不仅内容丰富，剪系统性强，而且应用广泛，为了适应发展和便于工程应用，许多例题取材于工程实践，另外增加了电路仿真软件 Multisim 的介绍和应用，引导学生学会用该软件快速解决电子电路分析中的有关问题，从而提高学习效率，培养工程素养。

4. 为了便于教学，本书末附有习题参考答案，另外还编写了与本书配套的电子教案，有需要的教师请到华信教育资源网免费下载。

本书可作为电子信息类、电气自动化类、测控技术与仪器类专业本科生的“电路分析”或“电路基础”课程教材，参考学时为 48~64。

全书共 15 章，主要内容分为直流电路、交流电路及电路分析的高级技术三部分，具体包括电路的基本概念、电路的基本定律与等效、电路分析的一般方法、电路分析的基本定理、运算放大器分析、电容器与电感器、一阶与二阶电路分析、正弦交流电路和相量、正弦稳态电路分析、交流电路的功率分析、三相电路分析、磁耦合电路分析、电路的频率响应分析、二端口网络分析。每章末都有小结和习题，便于对知识的总结和复习。附录介绍了电路仿真软件 Multisim，书末含部分习题参考答案。

本书注重理论联系实际，教师在授课的过程中应采用先进的教学手段，突出理论与实践相结合，提高学生的实际应用能力。

本书由杨智、闵虎主编，全书由杨智教授负责统稿和定稿。在本书的编写过程中，强蕾博士和闵虎教师完成了附录和习题部分，并做了编排、编辑等工作，在此表示衷心感谢。

由于作者水平有限，书中难免有不妥之处，敬请指正。

目 录

第 1 章 电路的基本概念	1
1.1 国际单位制	2
1.2 电流	3
1.3 电压	4
1.4 功率与能量	5
1.5 电源模型	7
1.6 本章小结	9
习题	9
第 2 章 电路的基本定律与等效	12
2.1 欧姆定律	12
2.2 电路分析中的几个名词定义	14
2.3 基尔霍夫定律	14
2.4 电阻的串联和分压	19
2.5 电阻的并联和分流	19
2.6 Y- Δ 变换	21
2.7 本章小结	25
习题	26
第 3 章 电路分析的一般方法	30
3.1 支路电流法	30
3.2 节点电压法	31
3.3 网孔电流法	34
3.4 本章小结	39
习题	39
第 4 章 电路分析的基本定理	44
4.1 叠加原理	44
4.2 电源变换	47
4.3 戴维南定理	48
4.4 诺顿定理	54
4.5 最大功率传输定理	57
4.6 Multisim 仿真分析	58
4.7 本章小结	60
习题	61
第 5 章 运算放大器分析	65
5.1 运算放大器	65
5.2 理想运算放大器	67

5.3	本章小结	71
	习题	72
第 6 章	电容器与电感器	77
6.1	电容器	77
6.2	电容器的并联与串联	83
6.3	电感器	84
6.4	电感器的串联与并联	89
6.5	本章小结	90
	习题	91
第 7 章	一阶电路分析	94
7.1	典型激励信号	95
7.2	换路原则及初值的计算	97
7.3	无源激励 RC 电路	98
7.4	无源激励 RL 电路	100
7.5	RC 电路的阶跃响应	101
7.6	RL 电路的阶跃响应	103
7.7	本章小结	108
	习题	108
第 8 章	二阶电路分析	111
8.1	确定电路初值和终值	111
8.2	无源激励 RLC 串联电路	112
8.3	无源激励 RLC 并联电路	116
8.4	RLC 串联电路的阶跃响应	117
8.5	RLC 并联电路的阶跃响应	119
8.6	用 Multisim 仿真分析	122
8.7	本章小结	124
	习题	124
第 9 章	正弦交流电路和相量	128
9.1	正弦量的基本概念	128
9.2	相量	130
9.3	基本电路元件的相量关系	134
9.4	阻抗与导纳	135
9.5	频域中的 KL 定律	136
9.6	阻抗的串并联组合	137
9.7	Multisim 仿真分析	140
9.8	本章小结	141
	习题	142
第 10 章	正弦稳态电路分析	146
10.1	节点分析法	146

10.2	网孔分析法	147
10.3	叠加原理	148
10.4	电源变换及戴维南-诺顿等效变换	150
10.4.1	电源变换	150
10.4.2	戴维南-诺顿等效电路	150
10.5	Multisim 仿真分析	152
10.6	本章小结	153
	习题	154
第 11 章	交流电路的功率分析	158
11.1	瞬时功率和平均功率	158
11.2	有效值或均方根值	161
11.3	最大平均功率传输条件	163
11.4	视在功率和功率因数	165
11.4.1	视在功率	165
11.4.2	功率因数	166
11.5	复功率	166
11.6	交流电路的功率守恒定理	169
11.7	Multisim 仿真分析	170
11.8	应用举例	172
11.8.1	功率因数的改善	172
11.8.2	功率测量	174
11.9	本章小结	175
	习题	176
第 12 章	三相电路分析	181
12.1	平衡(对称)三相电压源	181
12.2	对称Y-Y连接	184
12.3	对称Y- Δ 连接	186
12.4	对称 Δ -Y连接	188
12.5	不对称三相系统	190
12.6	三相电力系统的功率	191
12.6.1	对称三相负载功率	191
12.6.2	三相功率测量	194
12.7	Multisim 仿真分析	195
12.8	本章小结	196
	习题	197
第 13 章	磁耦合电路分析	201
13.1	互感	201
13.2	耦合电路分析	204
13.3	磁耦合电路的能量	207

13.4	线性变压器	208
13.5	理想变压器	209
13.6	理想自耦变压器	212
13.7	本章小结	213
	习题	214
第 14 章	电路的频率响应分析	217
14.1	网络函数	217
14.2	伯德图	219
14.3	选频电路	220
14.4	无源滤波器	221
14.4.1	低通滤波器	221
14.4.2	高通滤波器	222
14.4.3	带通滤波器	222
14.4.4	带阻滤波器	226
14.5	有源滤波器	226
14.5.1	有源低通滤波器	226
14.5.2	有源高通滤波器	227
14.5.3	有源带通和带阻滤波器	227
14.6	应用举例	227
14.7	本章小结	230
	习题	231
第 15 章	二端口网络分析	233
15.1	阻抗参数方程及参数	233
15.2	导纳参数方程及参数	236
15.3	混合参数方程及参数	237
15.4	传输参数方程及参数	238
15.5	各参数之间的相互关系	240
15.6	二端口网络的互连	242
15.7	应用举例	244
15.8	Multisim 仿真分析	246
15.9	本章小结	248
	习题	248
附录 A	Multisim 电路仿真软件简介	252
A.1	Multisim 仿真软件入门	252
A.2	电路仿真举例	256
	部分习题参考答案	263
	参考文献	272

第 1 章 电路的基本概念

引言 电气工程 (electric engineering) 的两大基础理论是电路基础和电磁学, 在此基础上发展出电气电子工程的各个应用领域, 如电力系统、电机工程、电子工程、控制系统、通信系统、计算机系统、信号处理系统、仪器仪表、航空航天工程等。本章主要介绍电路模型与电路变量的基本概念。

在日常生活、企事业单位中到处都能找到电力系统。电力系统产生分配电力, 又称为发配电, 即发电厂及供电部门, 电力由核电站、水电站或热电站 (烧煤、油或天然气) 等产生, 再由跨越全国的电力网进行分配, 设计和运行该系统的主要挑战是提供足够的冗余和控制, 这样, 任何一台设备出现故障都不会使一座城市或地区完全停电。

控制系统用电信号控制生产过程, 如石油化工厂里的温度、流量、液位或压力的控制; 冶金行业的温度、压力、张力、速度等的控制; 机械加工数控技术; 交通运输自动化; 电梯中的电动机、门和灯光的控制及航空航天行业中的飞行控制系统; 兵器工业自动化; 智能楼宇自动化等。

通信系统是产生、传送、分配信息的电系统, 包括电视设备、发射接收机、地球图像卫星系统、雷达系统及电话系统。

计算机系统是用电信号处理信息的, 包括文字、语音和图像处理及科学计算, 邮票大小的集成电路中可以装有成百上千甚至上百万的电子元件及由这些元件构成的复杂电路。

信号处理系统对采集到的各类电信号进行处理, 如图像处理系统收集到沿轨道飞行的气象卫星传来的大量数据, 先将数据量压缩到易于处理的程度, 再将其转换为供电视播放的视频图像。医学计算机 X 线断层摄影 (CT) 扫描是另一个图像处理的例子。

各行业系统间的学科联系及相互作用值得电工程师注意。例如, 商用飞机的通信系统为飞行员和所有附近的航空飞行器设计出安全的飞行路线, 使飞行员保证飞机飞行在指定航线上, 机载计算机系统具有管理发动机的功能, 提供导航和飞行控制数据, 同时在驾驶员座舱的屏幕上播放这些信息。复杂的控制系统可以实现驾驶员座舱发布指令来调整飞机的位置和速度 (如机翼、侧翼和方向舵), 以确保飞机安全飞行并在预定的航线上。飞机必须有自己的动力系统才能在空中飞行, 同时要提供和分配所需的电力, 如保持机舱灯光、制作快餐、放演电影。信号处理系统能够减少空中交通通信的噪声。还有现代高科技技术, 如各种火星探测器等也是多种行业学科相互交叉的结晶。

电工程师主要对某一领域有兴趣, 但是他们还必须熟悉与这一领域相关的其他领域的知识。电工程领域多种多样, 但它们共同的部分就是电路。

实际电路是由电源、电气设备或电子元件等组成的。在电路中随着电流的通过, 进行着能量的转换、电能的传输和分配, 或者进行着 (非) 电量的测量与存储信息、信息处理, 这就是电路的功能。

由若干个电气设备或电子元件和电源的相互连接完成某一功能而组成的总体称为电路。图 1-1 (a) 所示为一个简单的手电筒实际电路。实际电路五花八门, 为了便于电路按照统一

的理论与分析方法进行学习，电工程师将成百上千种实际电路用一种通用的电路数学模型符号构成的电路进行分析，这样各领域的工程师即可结合各自的实际电路理解、分析和设计实际的电子电气电路。图 1-1 (b) 所示为手电筒电路模型，其中电阻性负载电灯用符号“ $\text{—}\square\text{—}$ ”表示，电池电压源用电路模型符号“ $\text{—}\oplus\text{—}$ ”表示。后续内容中我们还要介绍许多电路元件模型及符号。

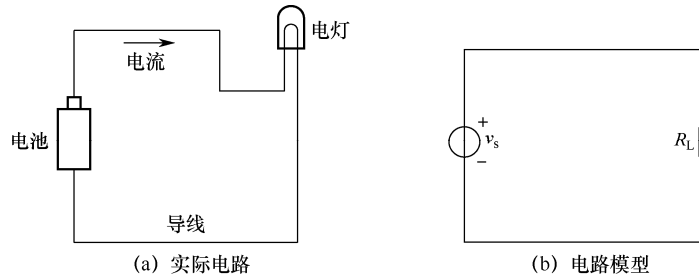


图 1-1 一个实际电路与电路模型

1.1 国际单位制

要涉及某个物理量的测量，就要以规定的单位来表示，国际上通常使用国际单位制，如表 1-1 所示 (international system of units, SI)，其导出单位如表 1-2 所示。

表 1-1 国际单位制

量的名称	单位名称	单位符号
长度 (Length)	米 (Meter)	m
质量 (Mass)	千克 (Kilogram)	kg
时间 (Time)	秒 (Second)	s
电流 (Electric current)	安培 (Ampere)	A
热力学温度 (Thermodynamic temperature)	开尔文 (Degree Kelvin)	K
发光强度 (Luminous intensity)	坎德拉 (Candela)	cd

表 1-2 导出单位

量的名称	单位名称 (单位符号)	导出单位
频率 (Frequency)	赫兹 (Hz)	s^{-1}
力 (Force)	牛顿 (N)	$kg \cdot m/s^2$
功 (Energy)	焦耳 (J)	$N \cdot m$
功率 (Power)	瓦特 (W)	J/s
电荷 (Electric charge)	库仑 (C)	$A \cdot s$
电势 (Electric potential)	伏特 (V)	W/A
电阻 (Electric resistance)	欧姆 (Ω)	V/A
电导 (Electric conductance)	西门子 (S)	A/V
电容 (Electric capacitance)	法拉 (F)	C/V
磁通 (Magnetic flux)	韦伯 (Wb)	$V \cdot s$
电感 (Inductance)	亨 (H)	Wb/A

国际单位制的一个优点是可用以 10 的幂为基础的前缀与基本单位连接起来表示一个很大或很小的量，如表 1-3 所示。

例如： $1\text{mV} = 1 \times 10^{-3}\text{V}$ ， $1\mu\text{A} = 1 \times 10^{-6}\text{A}$ ， $1\text{mA} = 1 \times 10^{-3}\text{A}$ ， $2\text{kV} = 2 \times 10^3\text{V}$ ， $1\text{kW} = 1 \times 10^3\text{W}$ ， $5\text{GW} = 5 \times 10^9\text{W}$ ， $1\mu\text{s} = 1 \times 10^{-6}\text{s}$ 。

表 1-3 国际单位制前缀

前 缀	单位符号	幂	前 缀	单位符号	幂
皮 (pico)	p	10^{-12}	十 (deka)	da	10
纳 (nano)	n	10^{-9}	百 (hecto)	h	10^2
微 (micro)	μ	10^{-6}	千 (kilo)	k	10^3
毫 (milli)	m	10^{-3}	兆 (Mega)	M	10^6
厘 (centi)	c	10^{-2}	吉 (Giga)	G	10^9
分 (deci)	d	10^{-1}			

有了国际单位制后就可以讨论电路变量了，通常电路变量指电流、电压、功率与能量。

1.2 电 流

电荷的定向运动可以产生电流。电荷是可用来解释各种电现象的基本原理，是电路中引出的一个最基本的物理量，当人们移动羊毛衫或在地毯上受静电冲击时，就会体验到电荷的作用和影响。

电荷是构成物质的原子的一个电特性，单位是库仑，从物理学中可以知道，所有物质是由原子构成的，每个原子由电子、质子和中子组成。电子所带的电荷是负的，一个电子的电荷量是 $1.6 \times 10^{-19}\text{C}$ ，而质子所带的电荷是正的，其电荷量与电子的一样。原子中质子和电子的数量相等，因此原子呈电中性状态。

关于电荷，要注意三点：对于电荷而言，库仑是一个相当大的单位， 1C 的电荷中有 $\frac{1}{1.6 \times 10^{-19}} = 6.25 \times 10^{18}$ 个电子；实验结果证明，自然界产生的电荷量是一个电子所带电荷量 $1.6 \times 10^{-19}\text{C}$ 的整数倍；电荷守恒定律指出，电荷既不能被创造，也不能消失，只能转换或迁移，所以一个系统中电荷量的代数和是不会改变的。

电荷的一个特性就是它的可移动性，即电荷的流动。电荷可以从电路的一个地方移动到另一个地方，或者变换成另一种能量形式。习惯上，将正电荷的移动方向取为电流流动的方向。但实际上电流是由带负电的电子在金属导体中定向运动所产生的，所以说电流的方向与电子流动方向相反。

定义：电流是电荷随时间的变化率，单位为安培（A）。

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1-1a)$$

或

$$q = \int_{t_0}^t i dt \quad (1-1b)$$

$1\text{A} = 1\text{C/s}$ ，电流 i 不一定是恒定量，如果电流不随时间变化，保持常量，则称为直流电流(DC)，

如图 1-2 (a) 所示；按正弦规律随时间变化的电流称为正弦交流电流 (AC)，如图 1-2 (b) 所示。通常约定，符号 I 表示恒定电流，符号 i 表示随时间变化的电流。日常家庭用电，如空调、电冰箱、洗衣机等都是用交流电。

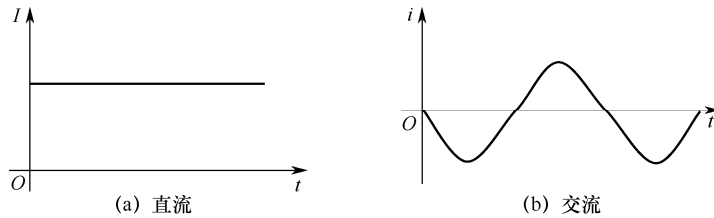


图 1-2 直流和交流电波形

例 1-1 已知电流 $i = (3t^2 - t)(A)$ ，计算从 1s 到 2s 期间通过导线的电荷量。

解 电荷量 $q = \int_1^2 i dt = \int_1^2 (3t^2 - t) dt$

$$= \left(t^3 - \frac{t^2}{2} \right) \Big|_1^2 = (8 - 2) - \left(1 - \frac{1}{2} \right) = 5.5 C$$

1.3 电压

1.2 节讲过，要使电子在导体内向某个方向运动需要功或能量的转换，即要有外电动势，该电动势也称为电压或电位差。

电路中 a、b 两点之间的电压 v_{ab} 指的是单位电荷从 a 点移到 b 点所需要的能量或功，其数学表达式为：

$$v_{ab} = \frac{dw}{dq} \quad (1-2)$$

式中， w 为功，单位是焦耳 (J)； q 为电荷，单位是库仑 (C)，电压 v_{ab} 简写为 v ，单位是伏特 (V)。

定义：电压是移动单位电荷经某个电路元件所需的能量，单位是伏特 (V)。 $1V = 1J/C = 1N \cdot m/C$ 。

电压的极性或参考方向用正号 (+) 和负号 (-) 表示。图 1-3 中，电压 v_{ab} 可表达为：a 点电位比 b 点电位高 v_{ab} 伏；相对于 b 点，a 点的电位是 v_{ab} 。

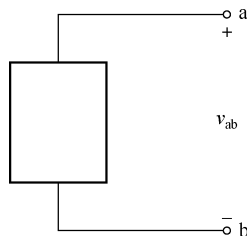


图 1-3 电压极性表示

和电流表示方法相同，用 v 表示直流和交流电压。一般电池产生的是直流电，而发电机

产生的是交流电。

在实际分析复杂电路时，往往难以事先判断电流的真实方向，有时电流的实际方向还在不断改变。而实际电压的极性也很难确定。为此，在电路分析中均需要引入“参考方向”的概念，电流用箭头表示、电压用“+”“-”号表示方向或极性。

约定：若电流的真实方向与参考方向一致，则电流为正值；若两者相反，则电流则为负值。这样便可利用电流正负值，结合参考方向判断电流的真实方向，如图 1-4 所示。

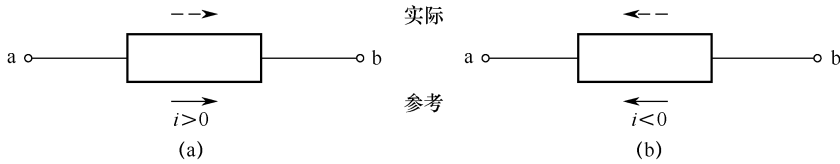


图 1-4 实际电流方向与参考方向表示

电流的参考方向是任意指定的，未标参考方向的电路计算出的电流正负是毫无意义的，今后电路图中所标电流方向均为参考方向，不一定为电流真实方向。

约定：在元件两端用“+”“-”号表示电压参考极性，“+”表示高电位端，“-”表示低电位端，如图 1-5 所示。同理，未标电压参考极性的电压正负是毫无意义的。

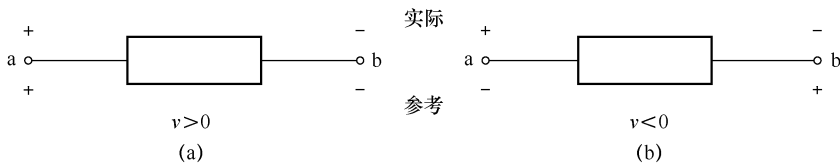


图 1-5 实际电压极性与参考极性

1.4 功率与能量

除电流和电压两个基本电路变量外，功率和能量的计算在电路分析中也是很重要的。人们知道，100W 的灯泡比 20W 的灯泡亮，对一个用电设备，也要知道它所承受或发送的功率。同样，人们也知道使用和消耗电能，就要向供电商付电费。功率和能量与电压和电流有一定的关系。

在物理学中，功率是消耗或吸收能量的速率，即：

$$p = \frac{dw}{dt} \quad (1-3)$$

式中， p 为功率，单位是瓦特 (W)； w 是能量，单位是焦耳 (J)， t 是时间，单位是秒 (s)。

进一步有：

$$p = \frac{dw}{dt} = \frac{dw}{dq} \times \frac{dq}{dt} = vi \quad (1-4)$$

功率 p 随时间变化，称为瞬时功率。众所周知，电路元件有提供还是吸收功率之分，关键要看电流的流向和电压的极性，且根据电路电流参考方向和电压参考极性的概念得知元件的电流和电压计算结果有正负之分，为了正确确定元件功率的性质及计算电路元件电压与电流关系的正负号，一般常用无源符号约定 (passive sign convention) 或关联方向的概念。

定义无源符号约定 (**passive sign convention**) 或关联方向: 若元件的电流参考方向是从该元件的高电位流向低电位的, 则称是无源符号约定或关联的, 反之称有源符号约定或非关联的。

若电流通过元件的正端流入, 由 $p = +vi$ 计算出的 p 值为正时, 则表示该元件吸收功率, 反之计算出的 p 值为负, 则表示该元件提供或释放功率。

若电流从元件负端流入, 由 $p = -vi$ 计算出的 p 值为正时, 则表示该元件吸收功率; p 为负时仍为提供或释放功率。

也就是说, 无论是关联还是非关联的, 若计算出的功率为正值, 则表示该元件吸收功率; 若计算出的功率为负值, 则表示该元件提供 (释放) 功率。

例如, 图 1-6 (a) 所示的关联方向为负载吸收功率, 图 1-6 (b) 所示的非关联方向为负载释放功率。

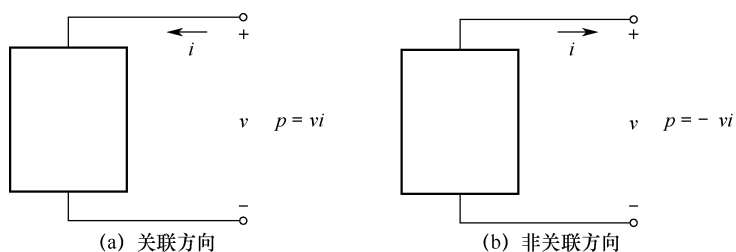


图 1-6 电压与电流参考方向与功率关系图

例 1-2 某一电路, 假设我们已选择了参考方向或极性, 如图 1-7 所示, 显然, 此时功率要按式 $p = -vi$ 计算。

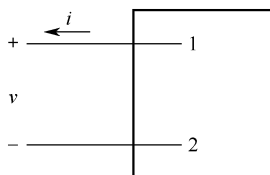


图 1-7 例 1-2 图

假设, 进一步通过电路分析计算得到的电流 $i = 4\text{A}$ 和电压 $v = -10\text{V}$, 则对应于端子 1 和 2 的功率为:

$$p = -vi = -(-10)(4) = 40\text{W}$$

此值为正, 则此例内部的电路是吸收或消耗 40W 的功率。

再进一步分析该电路, 如果只是参考方向及极性变为图 1-8 所示的图, 则功率需按 $p = vi$ 计算。如果此时电路分析有:

$$i = -4\text{A}, v = -10\text{V}$$

则 $p = vi = (-10)(-4) = 40\text{W}$, 结果不变。

注: 关于功率的讨论适用于任何一段电路, 而不局限于一个元件。任何电路都必须遵守能量守恒定律, 即任何时候电路功率的代数和必须为零, 即 $\sum p = 0$, 也就是电路中发出 (释放) 的总功率等于吸收 (消耗) 的总功率。

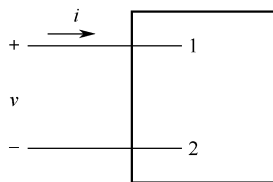


图 1-8 例 1-2 图 (变化图)

再由 $p = \frac{dw}{dt}$ 得, 时间从 t_0 到 t 元件所消耗或提供的能量为:

$$w = \int_{t_0}^t p dt = \int_{t_0}^t v i dt \quad (1-5)$$

能量是做功的本领, 单位为焦耳 (J), 度量电力系统的能量, 单位是瓦特·小时 (W·h) 和千瓦·小时 (kW·h), 即电费收缴的单位“度”。

$$1 \text{ W} \cdot \text{h} = 3600 \text{ J} \text{ 或 } 1 \text{ kW} \cdot \text{h} = 1 \text{ 度 (消耗的电能)}$$

例 1-3 一个 100W 的电灯泡, 4h 需消耗多少电能?

$$\begin{aligned} \text{解 } w &= \int_{t_0}^t p dt = pt = 100(\text{W}) \times 4(\text{h}) \times 60(\text{min/h}) \times 60(\text{s/min}) \\ &= 1440000 \text{ J} = 1440 \text{ kJ} \end{aligned}$$

$$\text{或 } w = 100(\text{W}) \times 4(\text{h}) \times 10^{-3} = 0.4 \text{ 度。}$$

1.5 电源模型

元件是组成电路的基本部分, 若干元件的相互连接就成为电路。

电路元件分为有源元件和无源元件两类。有源元件能产生能量, 如发电机、电池、晶体管、运算放大器等; 而无源元件则不能产生能量, 如电阻、电容、电感等。最重要的电源元件 (有源元件) 是电压源和电流源。它们为与其相连的电路输送功率。电源又分为两种: 独立源 (independent source) 和非独立源 (dependent source), 非独立源也称受控源。

理想独立源是有源元件, 它能独立地提供与电路的其他变量无关的电压或电流。所谓理想, 就是从实际电源中抽象出来的理想化模型, 理想独立电压源是指不论流过其两端电流的大小如何, 都将保持其两端电压始终为规定值不变, 实际电源元件中的电池和发电机可近似认为是理想电压源, 独立电压源电路模型符号如图 1-9 (a) 所示。

同样, 理想独立电流源提供一定的电流而与其两端的电压大小无关, 它输送给电路的电流总保持指定的电流值, 独立电流源电路模型符号如图 1-9 (b) 所示, 其中, 箭头“↑”表示电流 i 的方向。

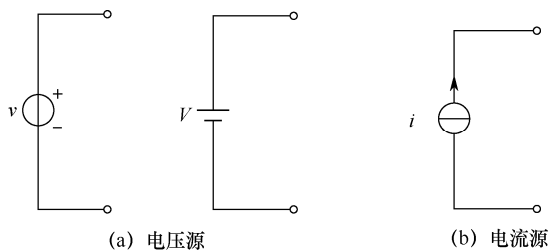


图 1-9 电源电路模型

理想非独立源（受控源）是有源元件，它所提供的电压或电流是受该电路中其他支路的电压或电流控制的。关于受控源模型的物理与数学含义将在后续的晶体管（transistor）、运算放大器（operational amplifier）和集成电路（integrated circuit）中介绍，这里我们仅先拿来其电路模型进行电路分析。

受控源不是实际电源或元件，它并不能独立产生电压或电路，其电压或电流受该电路或元件中另一支路电流或电压控制，仅为从实际电路元件中等效出来可表征实际元件物理属性的一种控制与被控制的数学关系的电路模型。在电路模型中的受控源相当于四端元件电路模型，即一定同时存在控制电压或电流量，以及被控电流或电压量。

受控源在电路模型中常用菱形符号表示，如图 1-10 所示。根据受控源控制与被控电压与电流变量的概念，受控源分为四类：电压控制的电压源（VCVS）；电流控制的电压源（CCVS）；电压控制的电流源（VCCS）；电流控制的电流源（CCCS）。

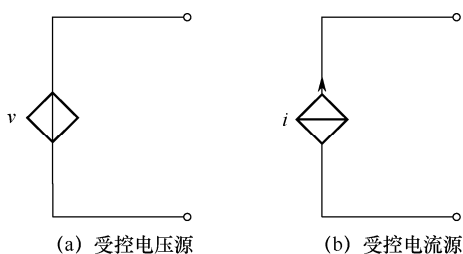


图 1-10 受控源电路模型

此外还应注意，有源元件不仅对电路提供能量或功率放大，而且还能从电路中吸收功率或能量。

例 1-4 计算图 1-11 所示电路中各元件所吸收或释放的功率。

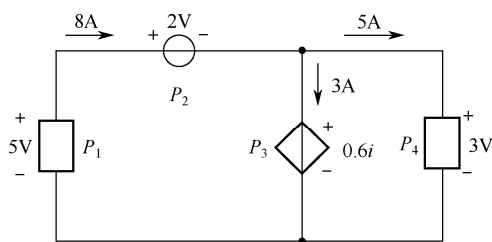


图 1-11 例 1-4 图

解 在该电路模型中，有一个 -2V 的独立电压源和一个电流控制的电压受控源。按无源符号约定确定每一个电路元件的功率：

$$P_1 = -(5\text{V})(8\text{A}) = -40\text{W}，\text{ 释放功率}$$

$$P_2 = (2\text{V})(8\text{A}) = 16\text{W}，\text{ 吸收功率}$$

$$P_3 = (3\text{V})(3\text{A}) = 9\text{W}，\text{ 吸收功率}$$

$$P_4 = (3\text{V})(5\text{A}) = 15\text{W}，\text{ 吸收功率}$$

显然， $P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 0$ ，即电路满足功率或能量守恒定理。

1.6 本章小结

- (1) 电路是由多个电子或电气元件连接在一起，满足某一设计功能构成的图。
- (2) 国际单位制包含 6 个基本单位，其他单位可由这 6 个基本单位导出。
- (3) 电流是电荷随时间的变化率：

$$i = \frac{dq}{dt}$$

- (4) 电压是移动单位电荷经某个电路元件所需的能量：

$$v = \frac{dw}{dq}$$

- (5) 功率是单位时间内消耗或吸收的能量：

$$p = \frac{dw}{dt} = vi$$

(6) 无源符号约定：电流参考方向从元件正端流入负端流出，为关联方向，反之，为非关联方向。

(7) 电流源和电压源可以是独立源和受控源，受控源所提供的电流或电压是受该电路其他支路电流或电压控制的，其控制变量与被控变量同时存在缺一不可。

- (8) 由直流信号构成的电路称为直流电路；由交流信号构成的电路称为交流电路。

习题

1-1 求出以下各式中的电量 $q(t)$ 。

- (1) $i(t) = 3\text{A}$ ， $q(0) = 1\text{C}$ ；
- (2) $i(t) = (2t + 5)(\text{mA})$ ， $q(0) = 0$ ；
- (3) $i(t) = 20\cos(10t + \pi/6)(\mu\text{A})$ ， $q(0) = 2\mu\text{C}$ ；
- (4) $i(t) = 10e^{-30t}\sin 40t(\text{A})$ ， $q(0) = 0$ 。

1-2 流过某一导线的电荷如图 1-12 所示，求对应的电流 $i(t)$ 。

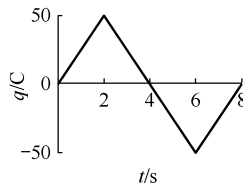


图 1-12 习题 1-2 图

1-3 已知流经某元件的电流 $i(t) = 5\sin 40t(\text{A})$ ，求 $0 \sim 10\text{ms}$ 内流过该元件的电荷。

1-4 已知流过一元件正端的电流为 $i(t) = 3e^{-2t}(\text{A})$ ，其两端的电压为 $v(t) = 5\frac{di}{dt}(\text{V})$ ，求：

- (1) $0 \sim 2\text{s}$ 内流过元件的电荷；

(2) $0\sim 2\text{s}$ 内元件的功率;

(3) $0\sim 3\text{s}$ 内吸收的能量。

1-5 如图 1-13 所示为流过一元件的电流和元件两端的电压。求元件在 $0\text{s} < t < 4\text{s}$ 间所吸收的功率。

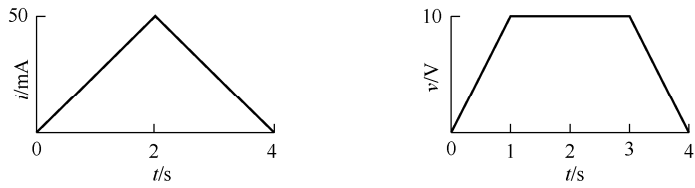


图 1-13 习题 1-5 图

1-6 求图 1-14 所示电路中的电流 i_0 。

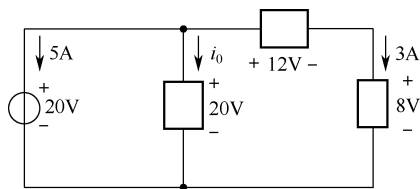


图 1-14 习题 1-6 图

1-7 说明图 1-15 中:

(1) v 、 i 的参考方向是否关联?

(2) 如果图 1-15 (a) 中 $v > 0$ 、 $i < 0$, 图 1-15 (b) 中 $v > 0$ 、 $i < 0$, 则元件实际释放功率还是吸收功率?

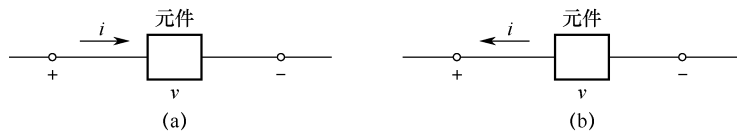


图 1-15 习题 1-7 图

1-8 试求图 1-16 所示各电路中各元件的功率, 并说明是吸收功率还是释放功率。

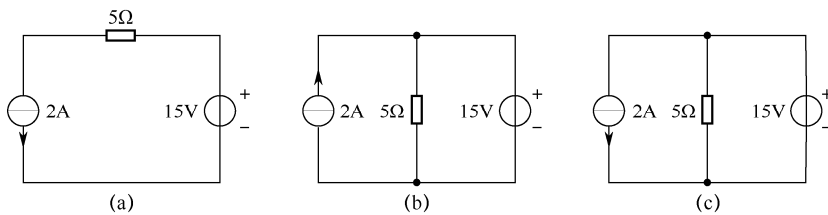


图 1-16 习题 1-8 图

1-9 我国自葛洲坝水电站至上海的高压直流输电线路示意图如图 1-17 所示。输电线每条线对地耐压为 500kV , 导线允许电流为 1kA 。每根导线电阻为 27Ω , 全长 1088km 。问当首端线间电压 v 为 1000kV 时, 可传输多少功率到上海? 传输效率是多少?

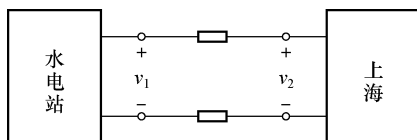


图 1-17 习题 1-9 图

1-10 电池的额定功率可用安培·小时 (A·h) 表示, 某个 200A·h 的电池, 求:

- (1) 若要工作 40h, 其最大允许电流是多少?
- (2) 若该电池以 1mA 的电流放电, 它将持续放电几天?