



普通高等教育“十一五”规划教材

杨家树 关静 杜玉华 于海平 编

电工技术

(电工学 I)

DIANGONG

JISHU DIANGONGXUE



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十一五”规划教材

电 工 技 术

(电 工 学 I)

杨家树 关 静 杜玉华 于海平 编



机 械 工 业 出 版 社

本书是参照国家教委电工学课程教学指导委员会制定的电工技术教学基本要求,以培养应用型人才为主要目的而编写的。书中对传统电工技术的内容进行了调整和拓宽,突出概念、突出应用、突出新技术。本书内容简明、语言流畅、通俗易懂。每章后有小结、习题,重点章节后有思考与练习,书后配有部分习题答案。

本书可以作为高等学校工科非电类专业本科生、专科生及职业继续教育的教材或参考书,也可供有关工程技术人员学习使用。

图书在版编目(CIP)数据

电工技术(电工学Ⅰ)/杨家树等编. —北京:机械工业出版社, 2010.7

普通高等教育“十一五”规划教材

ISBN 978-7-111-30568-2

I. ①电… II. ①杨… III. ①电子技术-高等学校-教材②电工学-高等学校-教材 IV. ①TN

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第080534号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:贡克勤 责任编辑:贡克勤 版式设计:霍永明

责任校对:李秋荣 封面设计:赵颖喆 责任印制:乔宇

北京机工印刷厂印刷(北京振兴源印务有限公司装订)

2010年6月第1版第1次印刷

184mm×260mm·16.5印张·406千字

标准书号:ISBN 978-7-111-30568-2

定价:29.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

读者服务部:(010)68993821 封面防伪标均为盗版

前 言

本书是参照国家教委电工学课程教学指导委员会制定的电工技术教学基本要求，以培养应用型人才为主要目的而编写的。本书具有如下特点：

1. 内容以涵盖机械设计制造及其自动化、材料成形及控制工程、土木工程、测控技术与仪器等非电类专业的教学要求为主。内容的组织注意到了教学适用性，各章习题有基本题和提高题，其要求深度不同以满足教学要求和利于因材施教，同时适应各种层次院校和不同专业的要求。

2. 对传统电工技术的内容进行了调整和拓宽，突出概念、突出应用、突出新技术。

3. 为便于学生学习与实践，教材中第10章既介绍了常用仪表的原理与使用，又讲述了直流、交流电压与电流的测量、电阻、电容与电感的阻抗测量等，为学生今后的电工实习、电子实习、课程设计与实践环节提供很好的参考。

4. 本书的例题大部分源于科研和工程实践，并在多个高校和有关科研单位进行了广泛的调查，搜集了不少有实用价值的材料。参考本书，对学生参加电工等级考试、电子设计竞赛等会有大大帮助。

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约56学时（包括4~6实验课时）安排。凡注有“*”号者，可根据学时多少，由教师灵活选择。

3. 课程中要注意各个教学环节的配合，必须安排好习题课与实验课。为了培养应用型人才，还应有2~4周的电工、电子技术的实习与课程设计。

本书由杨家树、关静、杜玉华、于海平编写。第1、4章由于海平编写，第2、5、9章由杜玉华编写，第3、7、10章由关静编写，第6、8由杨家树编写。全书由关静统稿，并做了很多重要修改与补充，张建生教授审阅了全部书稿，并提出了许多宝贵意见。

由于编者水平有限，加之时间仓促，书中疏漏之处在所难免，恳请使用本书的读者批评指正。

作 者

目 录

前言

第1章 电路的基本概念与定律 1

1.1 电路的基本概念 1

1.1.1 电路和电路模型 1

1.1.2 电路的基本物理量 3

1.2 理想电路元件及伏、安特性 8

1.2.1 无源元件 8

1.2.2 独立电源元件 15

1.3 实际电源 16

1.3.1 实际电压源 17

1.3.2 实际电流源 17

1.3.3 实际电压源与电流源的等效 变换 17

1.4 受控源 19

1.5 基尔霍夫定律 20

1.5.1 基尔霍夫电流定律 20

1.5.2 基尔霍夫电压定律 22

本章小结 24

习题 24

第2章 电路的分析方法 27

2.1 叠加定理 27

2.1.1 线性性质 27

2.1.2 叠加定理 27

2.2 网络的化简 30

2.3 等效网络定理 34

2.3.1 戴维南定理 34

2.3.2 诺顿定理 35

2.4 支路电流分析法 36

2.5 网孔分析法 38

2.5.1 网孔电流 38

2.5.2 网孔方程 39

* 2.6 结点电压法 41

2.6.1 结点电压 41

2.6.2 结点方程 42

2.6.3 结点分析法的应用 44

2.6.4 弥尔曼定理 45

* 2.7 受控源电路的分析 46

* 2.8 非线性电阻电路 49

2.8.1 非线性电阻定义 49

2.8.2 静态电阻和动态电阻的概念 49

本章小结 50

习题 51

第3章 正弦交流电路 56

3.1 正弦交流电 56

3.2 正弦交流电的相量表示法 60

3.2.1 正弦量的表示法 60

3.2.2 相量的表示法 61

3.2.3 旋转因子 63

3.3 正弦交流电路中的元件 63

3.3.1 纯电阻电路 63

3.3.2 纯电感电路 65

3.3.3 纯电容电路 68

3.4 阻抗的串联和并联 72

3.4.1 RLC 串联电路 72

3.4.2 并联交流电路 75

3.5 交流电路的功率及功率因数 77

3.5.1 交流电路的功率 77

3.5.2 交流电路功率因数 79

3.6 正弦交流电路的谐振 79

3.6.1 串联谐振 79

3.6.2 并联谐振 81

本章小结 83

习题 84

第4章 三相正弦交流电路 87

4.1 三相电源 87

4.2 三相负载 89

4.3 三相功率 93

本章小结 95

习题 96

第5章 非正弦周期信号电路 97

5.1 周期信号的傅里叶级数 97

5.1.1 周期信号的三角形式傅里叶级数 表示 97

5.1.2 对称性与傅里叶系数 100

5.2 非正弦周期信号的分解	101	8.1.1 三相异步电动机的结构	150
5.3 非正弦周期信号的平均值、有效 值	101	8.1.2 三相异步电动机的转动原理	153
5.3.1 非正弦周期信号的平均值	101	8.2 三相异步电动机的电磁转矩和机械 特性	157
5.3.2 非正弦周期信号的有效值	101	8.2.1 三相异步电动机电磁转矩	157
5.4 非正弦周期信号电路的平均功率	102	8.2.2 三相异步电动机的机械特性	159
5.5 非正弦周期信号电路的计算	104	8.3 三相异步电动机的运行与控制	161
本章小结	106	8.3.1 三相异步电动机的起动	161
习题	107	8.3.2 三相异步电动机的正反转	163
第6章 电路的过渡过程	110	8.3.3 三相异步电动机的调速	164
6.1 换路定则和电路的初始状态	110	8.3.4 三相异步电动机的制动	166
6.1.1 动态元件的储能与换路定则	110	8.4 三相异步电动机的选择与使用	168
6.1.2 电路的初始状态	111	8.4.1 三相异步电动机的铭牌参数	168
6.2 一阶 RC 电路的过渡过程	112	8.4.2 三相异步电动机的控制	172
6.2.1 电容的充电过程	112	8.5 单相异步电动机	182
6.2.2 电容充电的一般情况	114	8.5.1 单相异步电动机的工作原理	183
6.2.3 求解一阶电路过渡过程的三要 素法	115	8.5.2 几种基本形式的单相异步电 动机	184
6.3 微分电路和积分电路	118	8.6 直流电机	186
6.3.1 微分电路	118	8.6.1 直流电动机的结构	186
6.3.2 积分电路	119	8.6.2 直流电动机的工作原理	187
* 6.4 一阶 RL 电路中的过渡过程	120	8.6.3 直流电动机的铭牌参数	190
本章小结	122	8.6.4 直流电动机的使用	191
习题	123	8.7 控制电机	193
第7章 磁路和变压器	126	8.7.1 控制电机的分类	194
7.1 磁路的基本物理量	126	8.7.2 伺服电动机	194
7.2 铁磁材料	127	8.7.3 步进电动机	196
7.3 磁路的概念及磁路的基本定律	130	本章小结	199
7.4 直流磁路计算	133	习题	200
7.5 交流磁路与交流铁心线圈	135	第9章 安全用电	203
7.6 电磁铁	136	9.1 概述	203
7.7 变压器	138	9.2 触电形式	203
7.7.1 变压器的基本原理	138	9.3 触电急救与防护	204
7.7.2 变压器的运行特性	142	9.4 保护接地和保护接零	205
7.7.3 变压器绕组的同极性端	143	9.5 静电的危害及防护	206
7.7.4 三相变压器	144	9.6 雷电防护	208
7.7.5 变压器的额定值	145	本章小结	209
7.7.6 其他类型的变压器	145	习题	209
本章小结	147	第10章 电工测量	210
习题	148	10.1 测量误差的基本概念	210
第8章 电动机及其控制	150	10.1.1 有关误差概念的介绍	210
8.1 三相异步电动机的结构及工作原理	150	10.1.2 误差的表示方法	211
		10.1.3 仪器误差	212

10.1.4 测量误差的来源与分类	214	10.4.3 交流电压的测量	235
10.2 万用表的原理与使用	215	10.4.4 交流电流的测量	241
10.2.1 概述	215	10.5 电阻、电容与电感的阻抗测量	241
10.2.2 模拟式万用表	216	10.5.1 概述	241
10.2.3 数字式万用表	221	10.5.2 电阻的测量	242
10.3 电压表的原理与使用	224	10.5.3 电桥法测量阻抗	244
10.3.1 概述	224	10.5.4 谐振法测量阻抗	247
10.3.2 DA-16 电压表	224	10.5.5 阻抗的数字化测量方法	250
10.3.3 DA22B 电压表	227	习题	250
10.4 电压与电流的测量	229	部分习题答案	252
10.4.1 直流电压的测量	229	参考文献	256
10.4.2 直流电流的测量	234		

第 1 章 电路的基本概念与定律

本章讨论电路分析中最基本的概念和定律。从电路模型入手，对描述电路的基本物理量电流、电压和电位等进行了复习并讨论了电压、电流的参考方向问题。介绍组成电路的各种电路元器件及伏安特性，阐述了电路理论中的基本定律即基尔霍夫定律。

1.1 电路的基本概念

1.1.1 电路和电路模型

实际电路是由各种电器件按一定的方式相互连接而构成的电流通路。电路中，产生电能的元件称为电源，在电源内部局外力将非电能（水的势能、化学能、原子能等）转换为电能。电路中吸收电能并将电能转变为非电能或者电信号（电压、电流）的元件称为负载。连接电源和负载的导线，称为中间环节，其作用是传输电能和电信号。中间环节中还常接有开关等一些装置和设备，以实现对电路的控制、测量和保护。电路功能不同，电路模型就不同，但它们通常都由电源（信号源）、中间环节和负载三部分组成。

根据电路连接的目的和功能，电路可分为力能电路和信号电路两大类。

以传输和分配电能并将电能转换为非电能为目的电路称为力能电路。如图 1-1 所示的电力系统电路示意图，发电机产生的电能通过输电线送到各用户，供给动力、电热、电解、电镀和照明用电。力能电路中电压高，电流和功率大，俗称“强电”系统。一台大型发电机的功率可达几十万千瓦，电力网传输电压高达数百千伏，一台大型电动机的功率可达几千千瓦。因此，对强电系统要求电路中各部分功率损耗小，电能传输和转换的效率要高。

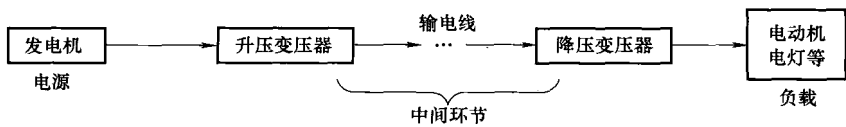


图 1-1 电力系统电路示意图

以传递和处理信号为目的的电路称为信号电路。如图 1-2 所示的扩音机电路。一般的信号电路相对于力能电路来说功率和电流都小，电压低，例如电话机的功率只有几毫瓦，一台大型扩音机的功率只有几千瓦。因此，信号电路俗称“弱电”系



图 1-2 扩音机电路

统。电视机、电话、通信电路等都是典型的信号电路，实现雷达信号处理、通信信号处理、生物信号处理等。对弱电系统要求传递信号不失真和输出的信号强。

有时这两类电路在结构上并无区别。如指挥交通的红绿灯电路是传递信号的，街道上的

照明灯是转换能量的, 但它们电路结构相同。

电路分析的研究对象并不是实际电路, 而是它们的数学模型, 即电路模型。电路模型是由理想化的电路元件相互连接构成的。理想化的电路元件 (简称电路元件) 是从实际器件的电磁特性抽象出来的数学模型, 实际电路在运行过程中的表现相当复杂, 如: 制作一个电阻器是要利用它对电流呈现阻力的性质, 然而当电流通过时还会产生磁场。要在数学上精确描述这些现象相当困难。为了用数学的方法从理论上判断电路的主要性能, 必须对实际器件在一定条件下, 忽略其次要性质, 按其主要性质加以理想化, 从而得到一系列理想化元件。

图 1-3 所示为三种基本理想电路元件的符号图形。其中, 理想电阻元件只消耗电能, 如电烙铁、灯泡、电炉等, 可以用理想电阻来反映其消耗电能的这一主要特征, 理想电容元件只储存电能, 如各种电容器, 可以用理想电容来反映其储存电能的特征; 理想电感元件只储存磁能, 如各种电感线圈, 可以用理想电感来反映其储存磁能的特征。

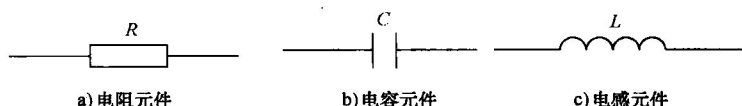


图 1-3 三种基本理想电路元件的符号图形

由理想元件组成的电路称为电路模型, 简称为电路图。举例如图 1-4 所示手电筒电路。本书中所讨论的电路和元件, 均指电路模型和理想化电路元件。应该指出, 实际电路用电路模型来近似表示是有条件的。一种电路模型只有在一定条件下才适用的, 条件变了电路模型也要作相应的改变。举例如图 1-5 所示电感线圈的几种电路模型。

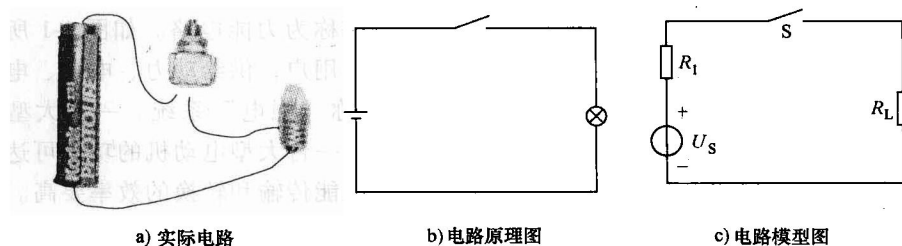


图 1-4 手电筒电路

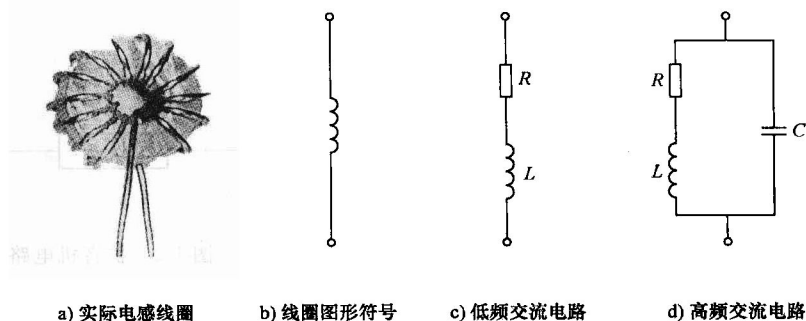


图 1-5 电感线圈的几种电路模型

理想元件是抽象的模型, 没有体积的大小, 其特性集中表现在空间的一个点上, 称为集总参数元件。由集总参数元件构成的电路称为集总参数电路。在集总参数电路中, 任何时刻该电路任何地方的电流、电压都是与其空间位置无关的确定值。

本书只对集总参数电路进行分析。若实际电路的尺寸远小于其工作频率所对应的波长, 我们就说它满足集总参数化条件, 可以用集总参数电路作为其模型。

例如, 我国电力系统照明用电的工作频率为 $f = 50\text{Hz}$, 电磁波的传播速度 $v = 3 \times 10^5 \text{ km/s}$, 则

周期

$$T = 1/f = 1/50\text{s} = 0.02\text{s}$$

波长

$$\lambda = 3 \times 10^5 \times 0.02\text{km} = 6000\text{km}$$

对于大多数用电设备来说, 其尺寸与之相比可忽略不计, 采用集总参数电路是适合的。而对于远距离的通信线路和电力输电线则不满足上述条件, 就不能用集总参数电路来分析。又如在微波电路中, 信号的波长 $\lambda = 0.1 \sim 10\text{cm}$, 此时波长与元件尺寸属同一数量级, 信号在电路中传输时间不能忽略。

若描述电路特性的所有方程都是线性代数或微积分方程, 则称这类电路是线性电路; 否则为非线性电路。非线性电路在工程中应用更为普遍, 线性电路常常仅是非线性电路的近似模型。但线性电路理论是分析非线性电路的基础。本书讨论线性电路。

若组成电路的所有元件的参数值都不随时间变化的电路, 则称为非时变电路。若电路中至少有一个元件的参数是随时间而变化的, 称为时变电路。时不变电路是最基本的电路模型, 是研究时变电路的基础。本书主要讨论集总参数电路中的线性时不变电路。

1.1.2 电路的基本物理量

为了定量地描述电路的性能, 电路中引入一些物理量作为电路变量。通常分为两类: 基本变量和复合变量。电流、电压由于易测量而常被选为基本变量。复合变量包括功率和能量等。一般它们都是时间 t 的函数。

1. 电流及其参考方向

在电场力作用下, 电荷有规则的定向移动形成电流。习惯上把正电荷运动的方向规定为电流的方向。为了衡量电流的强弱, 规定了电流强度这一物理量。电流强度在数值上是指在外电场的作用下, 单位时间内通过导体横截面电荷量的代数和。

图 1-6 表示一段圆柱金属导体中的电流, 在 dt 时间内, 通过导体截面 S 的电量为 dq , 则电流强度为:

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

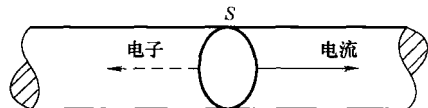


图 1-6 金属导体中的电流

式 (1-1) 中 i 为电流, 它是时间的函数。移动的电荷可以是导体和半导体中的电子或空穴, 电解液中的正负离子或真空中的电子或离子。电流的基本单位为安培 (A)。电流的辅助单位还有千安 (kA)、毫安 (mA) 和微安 (μA) 等, 它们的关系是:

$$1\text{kA} = 10^3\text{A} \quad 1\text{A} = 10^3\text{mA} = 10^6\mu\text{A}$$

若电流的大小或方向随时间而变化,则称为时变电流,记为 $i(t)$,简写为 i 。其大小或方向不随时间而变化的电流,即 $dq/dt = \text{常数}$,称为直流电流,通常用大写字母 I 来表示。因此式 (1-1) 可写成:

$$I = \frac{Q}{t} \quad (1-2)$$

由于每个电子的电荷量为 $1.602 \times 10^{-19} \text{C}$,因此要产生 1A 的电流大约需要每秒 6.24×10^{18} 个电子穿过导体的一定截面。

尽管电流是由离散运动的电子组成,但是没必要单独考虑电子的运动。因为电子的数量太大了,我们将这些电子和相应的电荷看成平滑的流体,因此电流被看成为连续量。

在电路理论中描述电流的流动方向,要选择一个参考系,即电流的参考方向。有了参考方向,电流的数学表示才有意义。即分析计算电路之前,先要假定电流的参考方向,这个参考方向的选择是任意的。但一经选定

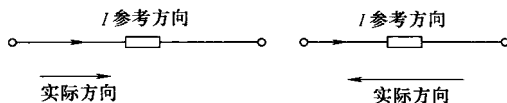


图 1-7 电流的实际方向与参考方向

就不再改变。如果经过计算其电流值为正值,表示参考方向与电流真实方向一致;如果电流值为负值,表示参考方向与真实方向相反。电流的实际方向与参考方向如图 1-7 所示。图 1-7a 表示 $I > 0$,图 1-7b 表示 $I < 0$ 。参考方向常用电路图中导线上或者导线旁的箭头来标出,也可以用双下标表示,如 i_{AB} ,表示电流的参考方向由 A 指向 B。

例 1-1 图 1-8 电路中流过某元件的电流为 i ,参考方向是从 A 到 B。若经过计算或测量得 $i = -5\text{A}$,则电流的实际方向与参考方向相反,即从 B 通过元件流向 A。若取参考方向从 B 流向 A,则 $i = 5\text{A}$ 。

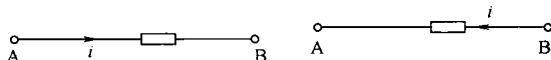


图 1-8 例 1-1 电路

2. 电压及其参考方向

电压是电场力对单位正电荷做功的表征量,其数值为电场力把单位正电荷从 a 点移到 b 点所作的功。电压用字母 u (或 U) 表示,即

$$u_{ab} = dW/dq \quad (1-3)$$

a、b 两点间的电压记作 u_{ab} ,下标 ab 表明电压的方向为 a - b。 dq 表示由 a 点转移到 b 点的电荷量; dW 表示移动过程中电场力所作的功,如果电压的大小和方向都不随时间改变,则这种电压称为恒定电压或直流电压,用 U_{ab} 表示。

在电场力做功的过程中正电荷具有的电位能减少,电位能减少意味着从高电位点到低电位点,所以电位降低的方向为电压的方向。

电压的基本单位为伏特 (V)。电压的辅助单位还有千伏 (kV)、毫伏 (mV) 和微伏 (μV)。它们的关系是:

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

在电路分析中,也要对电压选取参考系,即电压的参考方向,使电压成为可计算的代数。电压的参考方向可以任意设定,一般有三种表示方法:可以用标在电路图中的一对“+”和“-”符号来表示,如图 1-9a 所示,并标以电压符号,规定两点间电压的高电位

端为“+”极，低电位端为“-”极。两点电位降低的方向也称为电压的方向；也可以用箭头表示电压的参考方向，由高电位端指向低电位端，并标以电压符号，如图1-9b所示；还可以用双下标表示，如图1-9c所示， u_{AB} 表示电压的参考方向是由A指向B。

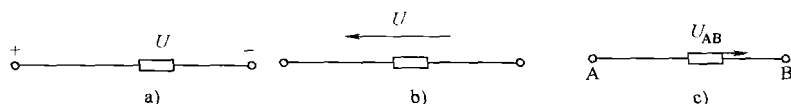


图1-9 电压的参考方向

选定参考方向后，才能对电路进行分析计算，如经过计算，电压值为正值，表示电压的参考方向与真实方向一致，如图1-10a表示 $U > 0$ ；如电压值为负值，则表示电压的参考方向与真实方向相反，如图1-10b表示 $U < 0$ 。与电流参考方向类似，不标注电压参考方向的情况下，电压的正负是毫无意义的。所以求解电路时必须首先选定电压的参考方向。

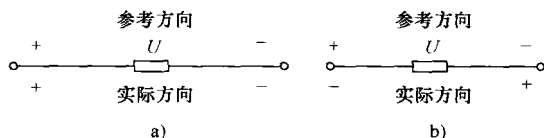


图1-10 电压的实际方向与参考方向

3. 电位

电路中的电压可以用电位来表示。电路中某点电位就是单位正电荷从该点移动到某个参考点能够放出的能量。若参考点为0，则a点到参考点0点的电压 u_{a0} 就称为a点（相对于参考点）的电位，用 V_a 表示。参考点的0点电位为零，即 $V_a = 0$ 。

在电力系统中，常选大地为参考点；而在电子线路中，常规定一条公共导线作为参考点，这条公共导线常是众多元件的汇集点。参考点用接地符号 $\perp$ 表示。

根据电压和电位的定义可知，a、b两点间的电压等于a、b两点间的电位之差，即

$$u_{ab} = V_a - V_b \quad (1-4)$$

例如，在图1-11a所示电路中，已知 $U_{S1} = 6V$ ， $U_{S2} = 3V$ 。若以c点为参考点，则各点电位为 $V_c = 0$ ， $V_a = 6V$ ， $V_b = (6 + 3)V = 9V$ ，b、c两点间的电压 $U_{bc} = V_b - V_c = (9 - 0)V = 9V$ ；若以b点为参考点，如图1-11b所示，则各点电位分别为 $V_b = 0$ ， $V_a = -3V$ ， $V_c = (-3 - 6)V = -9V$ ，b、c两点间的电压 $U_{bc} = V_b - V_c = [0 - (-9)]V = 9V$ 。

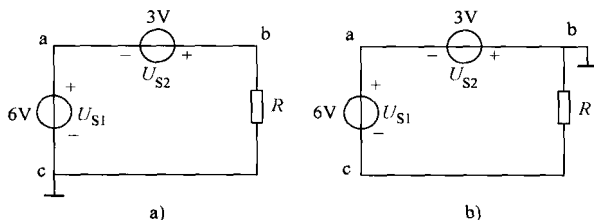


图1-11 电路图

由上例可以看出，电路中各点的电位值是相对的，是相对于参考点的电压差，它将随参考点的选定而确定。参考点改变，各点的电位值随之改变，但各点间电位差则不变，因此两点间的电压值是绝对的，与参考点无关。

根据以上特点,电子线路中常用一种简化的习惯画法——极性数值法,来简画有一端接地的电压源,如图 1-12a 所示电路,其简化电路图见图 1-12b。

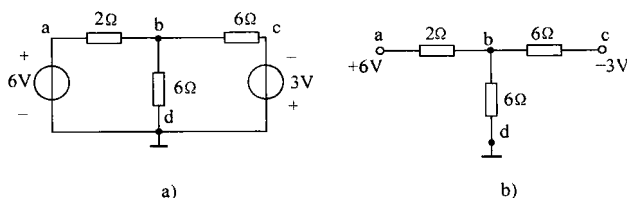


图 1-12 电路图

4. 关联参考方向

如上所述,电路中的电流与电压的参考方向是任意选定的,两者之间独立无关。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,例如在

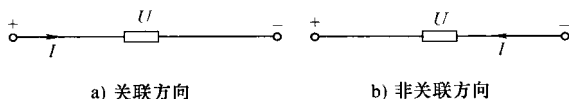


图 1-13 电压和电流的参考方向

说明元件的端口特性,或者考虑一个元件或一个电路端口的功率时,需要考虑二者的相对关系。为方便起见,对于同一元件或同一个电路端口,习惯上采用“关联”参考方向。如果指定流过元件的电流的参考方向是从标以电压正极性的一端指向负极性的一端,即两者的参考方向一致,则把电流和电压的这种参考方向称为关联参考方向,如图 1-13a 所示;反之称为非关联参考方向,如图 1-13b 所示。一般情况下,同一个元件的电压和电流的参考方向选为关联方向,可以只选取一个量的参考方向,另一个量为默认关联方向,可以不表注。

5. 电动势

用来描述电源将其他形式的能量转换成电能能力的物理量称为电动势,它反映了单位正电荷在电源力的作用下,由低电位转移到高电位时所做的功,用字母 e (或 E) 表示,单位同电压,其方向为电位升高的方向。

6. 功率和能量

电路的基本作用之一是实现能量的传输,能量对时间的变化率称为功率,用字符 p 表示,即

$$p = dW/dt \quad (1-5)$$

应用式 (1-1)、式 (1-3),得

$$p = ui \quad (1-6)$$

直流电路中,功率的计算公式

$$P = UI \quad (1-7)$$

利用式 (1-6)、式 (1-7) 对电路进行功率计算时,必须注意电压电流的参考方向,对于如图 1-14a 所示的二端电路,当电压、电流采用关联参考方向时,可以用式 (1-6) 求取某吸收功率。若求出功率为正值,表示该二端电路吸收了功率,充当负载的作用;若求出功率值为负值,表示该二端电路供出了功率,充当电源的作用。

若二端电路的电压和电流采用非关联参考方向,如图 1-14b 所示,则可以把电路看成是关联参考方向的负值,故电路吸收功率的公式应为

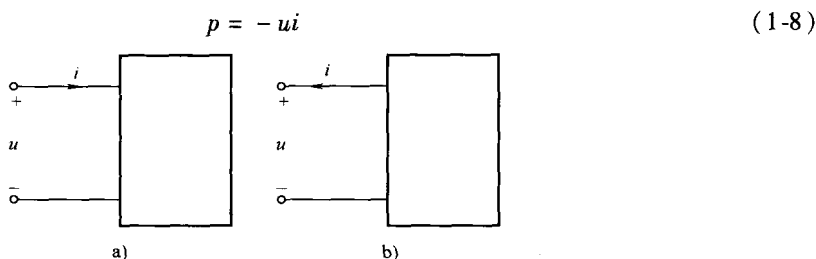


图 1-14 二端网络功率的计算方法

根据电压和电流是否为关联参考方向，可选用相应的计算公式。但不论是式 (1-6) 还是式 (1-8) 都是按照吸收功率进行运算的。若计算出功率为正值，均表示吸收了功率；若计算出功率为负值，均表示供出了功率。

若二端电路为直流电路，则电路吸收功率亦不随时间而改变。则式 (1-6)、式 (1-8) 可以改写为

$$P = UI \quad (1-9)$$

$$P = -UI \quad (1-10)$$

功率单位是瓦特 (W)，1 瓦 = 1 焦/秒 = 1 伏 · 安 = 1V · A。另外，电功率的单位也常用千瓦 (kW) 表示，电能常用千瓦时 (kW · h) 表示，1 kW · h 就是 1 度电。

例 1-2 某元件的电压、电流参考方向如图 1-15 所示，若 $U = 5V$ ， $I = -3A$ ，求：(1) 试判断元件在电路中作用是电源还是负载？(2) 若电流参考方向与图中所设方向相反，则又如何？

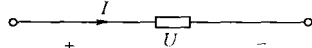


图 1-15 例 1-2 电路

解：(1) 因为 U 、 I 参考方向一致，根据式 (1-7)，其消耗的电功率为

$$P = UI = 5 \times (-3) \text{ W} = -15 \text{ W} < 0$$

故元件为电源。

(2) 若电流参考方向与图中所设相反，则根据式 (1-10) 可得

$$P = -UI = -5 \times (-3) \text{ W} = 15 \text{ W} > 0$$

故元件为负载。

在电路分析中，功率的计算是很重要的。因为电路在工作状态下总伴随着电能和其他形式能量的相互转换。电气设备、电路器件都有额定功率的限制，在使用时要注意其电流值和电压值是否超过额定值。除了额定功率，还有额定电压和额定电流两个参数。器件的工作电压不能超过额定值，否则器件容易损坏。也不能超过额定电流或额定功率，否则长时间就可能因过热而烧坏。额定值一般用表示文字符号加下标 N 表示，所以额定电压、额定电流和额定功率分别用 U_N 、 I_N 、 P_N 表示。由于功率、电压和电流之间存有一定的关系，所以在给出额定值时不一定要全部标出。例如电阻上常标出其阻值和额定功率。

根据功率的定义 $p = dW/dt$ ，在电压、电流采用关联参考方向情况下，从 t_0 到 t 时刻内该电路元件吸收的能量为：

$$W(t) = \int_{t_0}^t p(\tau) d\tau = \int_{t_0}^t u(\tau) i(\tau) d\tau \quad (1-11)$$

前面介绍电流、电压、功率和能量的基本单位分别是安 (A)、伏 (V)、瓦 (W)、焦

耳 (J)，有时嫌单位太大（无线电接收），有时又嫌单位太小（电力系统），使用不便。我们便在这些单位前加上如表 1-1 常用国际单位制 (SI) 词头，用以表示这些单位被一个以 10 为底的正次幂或负次幂相乘后所得辅助单位。

表 1-1 常用国际单位制 (SI) 词头

因子	原文名称 (法)	符号	中文名称
10^9	giga	吉	G
10^6	mega	兆	M
10^3	kilo	千	k
10^{-3}	milli	毫	m
10^{-6}	micro	微	μ
10^{-9}	nano	纳	n
10^{-12}	pico	皮	p

思考与练习

1. 一般电路由哪几个部分组成？各在电路中起什么作用？
2. 为什么要对电路中的电流、电压设参考方向？
3. 在图 1-16 电路中，分别以 C、D 为参考点，计算各点电位及电压 U_{AB} 、 U_{BD} 。
4. 在图 1-17 各框内哪个是电源？哪个是负载？已知 $U = 20V$ ， $I = -2A$ 。

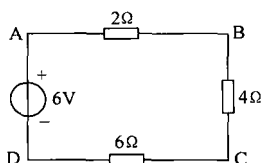


图 1-16 思考与练习 3 电路

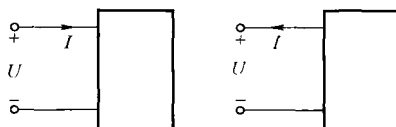


图 1-17 思考与练习 4 电路

1.2 理想电路元件及伏、安特性

电路元件是组成电路模型的最小单元，元件本身就是一个最简单的电路模型。电路元件按与外部连接的端子数目可分为二端、三端、四端元件等。在电路中电路元件的特性是由它端子上的电压、电流关系来表征的，通常称为伏安特性，记为 VCR，它可以用数学关系式表示，也可以描述成电压、电流的关系曲线即伏安特性曲线。

电路元件分为两大类：无源元件和有源元件。如果一个元件在任何时刻吸收的能量均为非负值，则该元件为无源元件，否则为有源元件。本教材所涉及的无源元件有电阻元件、电感元件、电容元件和理想变压器。有源元件有独立电源和受控电源。

1.2.1 无源元件

1. 电阻元件

在任何时刻，能用 $u \sim i$ 坐标平面上的一条曲线表示其外部特性的元件称为电阻元件。电阻元件按其伏安特性曲线是否通过原点的直线可分为线性电阻元件和非线性电阻元件；按其特性曲线是否随时间变化又可分为时变电阻元件和非时变电阻元件。

在通常的应用条件下,工程实际中遇到的大部分电阻器可以用线性非时变电阻元件作为其模型。本书中主要讨论线性非时变电阻。线性非时变电阻元件就是我们常说的电阻元件,简称电阻。其电路符号用 R 表示,如图 1-18a 所示,电压、电流在关联参考方向时,其伏安特性曲线如图 1-18b 所示。该特性曲线的数学描述为欧姆定律,式中 R 的数值为该直线的斜率,是一个与电压电流无关的量,简称电阻。式 (1-12) 表明在一定电压下电阻 R 的增大将使电流减小。可见 R 是表征电阻元件阻碍电流能力大小的参量。电阻的单位为欧 [姆] (Ω)。 $1\Omega = 1\text{V}/\text{A}$ 。

$$u = Ri \quad (1-12)$$

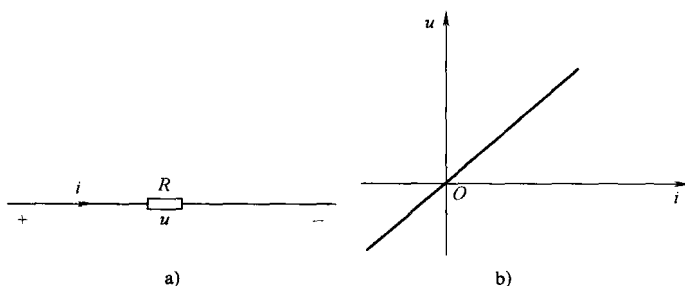


图 1-18 电阻元件

式 (1-12) 也可以用另一种形式表示:

$$i = Gu \quad (1-13)$$

式中, G 称为电阻元件的电导,即 $G = 1/R$ 。电导的单位是西 [门子] (S), $1\text{S} = 1\text{A}/\text{V}$ 。

注意: 当电阻端电压和电流采用非关联参考方向时,则

$$u = -Ri \quad (1-14)$$

当电阻元件的电阻值为无限大或电导值为无限小时,其伏安特性曲线与 u 轴重合,此时电阻元件相当于断开的导线,称为“开路”;当电阻元件的电阻值为无限小或电导值为无限大时,其伏安特性曲线与 i 轴重合,此时电阻元件相当于一段理想的导线,称为“短路”。

当电阻元件电压、电流在关联参考方向时,电阻元件的功率可表示为

$$p = ui = i^2 R = u^2 G \quad (1-15)$$

式 (1-15) 表明电流通过电阻时要消耗能量。电阻元件是一种耗能元件。它将吸收的全部电能转换为其他形式的能量。

作为理想元件,电阻元件上的电压、电流可以不受限制地满足欧姆定律。但作为实际的电阻器如灯泡、电炉等,对电压、电流或功率都有一定的限制。过大的电压或者电流会使器件过热而损坏。因此,在电子设备的设计中,必须考虑器件的额定电流、额定电压和额定功率以及器件的散热问题。市售的各类电阻,除标明其电阻值外,还标明其功率大小,通常标有 $\frac{1}{8}\text{W}$ 、

$\frac{1}{4}\text{W}$ 、 $\frac{1}{2}\text{W}$ 和 2W 等。在选用电阻时除了选择其电阻值外,还必须考虑其功率大小。

例 1-3 图 1-19 中,已知电阻两端瞬时电压 $u = 4\text{V}$,且 $R = 2\Omega$ 。求该瞬时流经电阻的电流 i 和电阻吸收的功率 p 。

解: 图 1-19 所示电路中,电压、电流才用非关联参考方

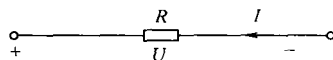


图 1-19 例 1-3 的电路

向, 即

$$u = -Ri$$

解得

$$i = -\frac{u}{R} = -\frac{4}{2} \text{ A} = -2 \text{ A}$$

该瞬时吸收功率为:

$$p = -ui = -4 \text{ V} \times (-2 \text{ A}) = 8 \text{ W}$$

2. 电感元件

实际电感器通常是由绕在磁性材料上的线圈构成。当线圈流过电流时即在其线圈内外建立磁场并产生磁通 Φ (单位为 Wb), 电感线圈示意图如图 1-20 所示。如果线圈紧绕, 且有 N 匝, 则各线匝磁通的总和称为磁链 Ψ ($\Psi = N\Phi$)。可见电感器是一种建立磁场、存储磁场能量的器件。

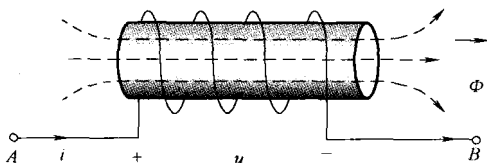
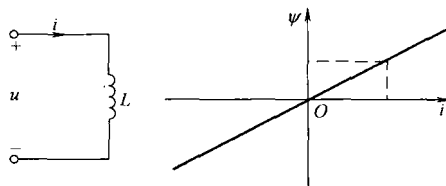


图 1-20 电感线圈示意图

电感元件是实际电感器的理想化模型, 其电路符号如图 1-21a 所示。它的定义: 一个二端元件, 如果在任一时刻, 它所交链的磁链与其电流之间关系可以用一条曲线来确定, 则此二端元件称为电感元件, 简称电感。该曲线称为电感元件在 t 时刻的韦安特性曲线。

与电阻元件类似, 若电感元件的 Ψ - i 平面上的曲线为通过原点的直线, 则称为线性电感; 否则为非线性电感。若曲线不随时间而变化, 则称为非时变电感, 否则为时变电感。本课程中的电感元件均指线性非时变电感。其 Ψ - i 曲线如图 1-21b 所示, 关系式可写成:



a) 电路符号

b) Ψ - i 曲线

图 1-21 电感元件

$$\Psi = Li \quad (1-16)$$

式中, L 称为电感元件的电感系数, 简称电感。电感值的单位为亨利 (H)。当电感较小时, 可以用毫亨 (mH) 或微亨 (μH) 表示。

当变化的电流通过电感线圈时, 在其周围产生变化的磁通, 根据法拉第电磁感应定律, 该变化的磁通在线圈两端引起感应电压。感应电压的大小等于磁链的变化率。若电感元件两端的电压 u 与 i 采用图 1-21a 所示关联参考方向, 得到电感元件伏安关系的微分形式为:

$$u_L = \frac{d\Psi_L}{dt} = L \frac{di_L}{dt} \quad (1-17)$$

式 (1-17) 表明: ①任何时刻, 电感元件两端的电压与该时刻的电流变化率成正比, 而与该时刻元件中电流的大小无关, 由于电感电流与电压的这种动态关系, 电感元件被称为动态元件; ②若通过电感的电流为直流, 无论其值的大小如何, 都有 $u = 0$, 即电感对直流相当于短路; ③当电感的电压为有限值时, 电感的电流不能跃变, 若 i 发生跃变, 则有 $L di/dt = \infty$ 。电感这一特性是分析动态电路的重要依据。

根据式 (1-17), 电感电流为:

$$\frac{1}{L} \int_{-\infty}^t u d\tau = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^{t_0} u d\tau + \frac{1}{L} \int_{t_0}^t u d\tau = i(t_0) + \frac{1}{L} \int_{t_0}^t u d\tau \quad (1-18)$$