



教育部
高等职业教育示范专业规划教材
(电气工程及自动化类专业)

电工基础

主编 李梅



教育部高等职业教育示范专业规划教材
(电气工程及自动化类专业)

电 工 基 础

主 编	李 梅	
副主编	王素姣	刘振庭
参 编	蔡美茹	张仙娥
	方维奇	张广红
主 审	王兆奇	



机 械 工 业 出 版 社

本书是教育部高等职业教育示范专业规划教材之一。

本书共分 11 章, 主要内容包括电路的基本概念和基本定律、电路的等效变换、线性电路的基本分析方法和定理、一阶动态电路的过渡过程、正弦交流电路、三相交流电路、互感电路、非正弦周期电流电路、二端口网络、磁路和铁心线圈电路、电路的计算机辅助设计等, 另配有精选的例题、思考题和习题。

本书可作为高职高专院校、职业大学、业余大学电类专业的教材, 也可供其他相关专业选用, 或供工程技术人员参考。为方便教师授课, 本书特备有免费电子教案, 有需要者可与本书责任编辑联系。

图书在版编目 (CIP) 数据

电工基础/李梅主编. —北京: 机械工业出版社, 2005.7

教育部高等职业教育示范专业规划教材. 电气工程及自动化类专业

ISBN 7-111-16604-3

I. 电... II. 李... III. 电工学—高等学校: 技术学校—教材

IV. TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 051809 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: 于 宁

责任编辑: 于 宁 高 倩 版式设计: 张世琴

责任校对: 李秋荣

封面设计: 鞠 杨 责任印制: 石 冉

北京中兴印刷有限公司印刷 · 新华书店北京发行所发行

2005 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

787mm×1092mm $\frac{1}{16}$ · 16.75 印张· 410 千字

定价: 24.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68326294

封面无防伪标均为盗版

前 言

本书是教育部高等职业教育示范专业规划教材之一,力图体现以应用为目的的高等职业教育特点;是编者在多年从事电工基础教学改革的基础上编写而成的,吸取了各校教学改革、教材建设等方面取得的经验,可作为高职高专院校、职业大学、业余大学电类专业的教材,也可供其他相关专业选用,或供工程技术人员参考。

本教材的主要特点有:

(1) 为适应现代电气电子强、弱电技术互相渗透、融合的发展趋势,以及培养知识面宽、适应性强的复合型人才的要求,本书采用强、弱电知识合一体系。

(2) 体现时代特征,更新教材内容。本教材注意删去老化的知识点,尽量多介绍电气、电子技术领域的新知识和新技术,使学生能学到更多新颖、适用的知识,有利于培养学生的创新精神。

(3) 根据电工基础课程的教学特点,在内容选取上,重视基本概念、基本定律、基本分析方法的介绍,淡化复杂的理论分析,如对电路的暂态分析,采用分离变量法,避免了微分方程的求解,降低了理论难度。每节之后辅以适量的思考与练习题,并精选了每章的习题。全书力图做到内容层次清晰、循序渐进,使学生对基本理论能系统、深入地理解,为今后的学习奠定基础,同时注重分析问题、解决问题的能力。

(4) 强化工程技术应用能力的培养,如:第6章中三相电路功率的测量,第7章中同名端的测量,第8章中非正弦电路测量,第9章中实验参数的测定等,在叙述了电路原理的同时也介绍了具体的测量方法。再如:第5章中谐振电路的应用,第8章的滤波器、微分电路与积分电路等。在第10章中,通过介绍查基本磁化曲线和硅钢片的比损耗,引入了工程手册的图表查法;第11章中介绍的计算机辅助方法的应用等,体现了理论与实践的结合。

(5) 力求文字深入浅出,通俗易懂,版面设计图文并茂。

本书由李梅(编写第5、6章)担任主编,刘振庭(编写第8、9章)和王素姣(编写第2、4章)担任副主编,蔡美茹参编第1、11章,方维奇参编第3章,张仙娥参编第7章,张广红参编第10章。

(6) 本书在内容上尽量使各章节、各知识点按照从易到难、循序渐进的逻辑体系排列,可满足各类学校不同学制、不同专业的教学要求。书中带“*”号的内容可根据实际情况选学。

本书由王兆奇主审,他认真仔细地审阅了全书,并提出了许多宝贵意见,在此表示诚挚的谢意。

编 者

目 录

前言

第1章 电路的基本概念和基本定律

基本定律	1
1.1 实际电路与电路模型	1
1.1.1 实际电路	1
1.1.2 电路模型	2
1.2 电路的基本物理量	3
1.2.1 电流	3
1.2.2 电压	3
1.2.3 电流与电压的关联参考方向和非关联参考方向	5
1.3 电能与电功率	6
1.4 电阻元件	8
1.4.1 线性非时变电阻	8
1.4.2 电阻元件的功率与能量	9
1.5 电压源与电流源	10
1.5.1 电压源	10
1.5.2 电流源	11
1.6 基尔霍夫定律	13
1.6.1 基尔霍夫电流定律	14
1.6.2 基尔霍夫电压定律	14
1.7 电路的三种状态	17
1.7.1 电路的有载工作状态	17
1.7.2 电路的开路状态	18
1.7.3 电路的短路状态	19
本章小结	20
习题一	21

第2章 电路的等效变换

2.1 电阻的串、并、混联及其等效电阻	25
2.1.1 等效变换的概念	25
2.1.2 电阻的串联及分压	26
2.1.3 电阻的并联及分流	27
2.1.4 电阻的混联	28
2.2 电阻的星形与三角形联结及其等效变换	30
2.2.1 电阻的星形、三角形联结	30
2.2.2 星形与三角形联结的等效	

变换	31
2.3 两种实际电源模型及其等效变换	34
2.3.1 实际电源模型及伏安特性	34
2.3.2 两种电源模型的等效变换	35
2.3.3 几种含源支路的等效变换	36
2.4 受控源及含受控源电路的等效变换	39
2.4.1 受控源	39
2.4.2 含受控源电路的等效变换	40
本章小结	43
习题二	43

第3章 线性电路的基本分析方法和定理

方法和定理	47
3.1 支路电流法	47
3.2 网孔电流法	49
3.2.1 网孔电流法的一般步骤	49
3.2.2 用网孔电流法分析含理想电流源支路的电路	51
3.2.3 用网孔电流法分析含受控源支路的电路	51
3.3 节点电压法	52
3.3.1 节点电压方程式的一般形式	52
3.3.2 用节点电压法分析含理想电压源支路的电路	54
3.3.3 用节点电压法分析含受控源支路的电路	55
3.4 叠加定理	56
3.5 戴维南定理和诺顿定理	59
3.5.1 戴维南定理	59
3.5.2 诺顿定理	61
3.6 最大功率传输定理	63
本章小结	65
习题三	66

第4章 一阶动态电路的过渡过程

4.1 电容、电感元件及其电压、电流关系	69
4.1.1 电容元件	69

4.1.2 电感元件	71	5.6.1 阻抗的串联与并联	123
4.2 电路的过渡过程及初始值的确定	73	5.6.2 阻抗混联电路的计算	125
4.2.1 电路的过渡过程	73	5.7 用相量法分析正弦交流电路	126
4.2.2 换路定律	74	5.8 功率因数的提高	129
4.2.3 初始值的确定	74	5.9 串并联谐振电路	131
4.3 一阶电路的零输入响应	77	5.9.1 串联谐振	131
4.3.1 RC 电路的零输入响应	77	5.9.2 并联谐振	135
4.3.2 RL 电路的零输入响应	80	本章小结	139
4.4 一阶电路的零状态响应	82	习题五	139
4.4.1 RC 电路的零状态响应	82	第 6 章 三相交流电路	145
4.4.2 RL 电路的零状态响应	84	6.1 三相电源及其连接方式	145
4.5 一阶电路的全响应及三要素法	86	6.1.1 三相电源	145
4.5.1 全响应及其分解	86	6.1.2 三相电源的连接方式	146
4.5.2 一阶电路的三要素法	87	6.2 负载星形联结的三相电路	147
4.6 阶跃函数和一阶电路的阶跃响应	90	6.3 负载三角形联结的三相电路	151
4.6.1 阶跃函数	90	6.4 三相功率	154
4.6.2 一阶电路的阶跃响应	92	6.4.1 三相电路功率的计算	154
4.6.3 微分电路和积分电路	93	6.4.2 对称三相电路中的瞬时功率	155
本章小结	95	本章小结	157
习题四	96	习题六	157
第 5 章 正弦交流电路	101	第 7 章 互感电路	160
5.1 正弦交流电的基本概念	101	7.1 互感及互感电压	160
5.1.1 正弦交流电的特征	101	7.1.1 互感电压	160
5.1.2 正弦交流电的有效值	103	7.1.2 互感系数及耦合系数	161
5.2 正弦量的相量表示法	105	7.2 互感线圈的同名端	162
5.2.1 复数及其运算	105	7.2.1 同名端	162
5.2.2 相量表示法	106	7.2.2 同名端确定的原则	163
5.2.3 同频率正弦量的运算	108	7.2.3 同名端的测定	163
5.3 单一参数正弦交流电路的分析	110	7.3 互感线圈的连接及等效电路	165
5.3.1 正弦交流电路中的纯电阻元件	110	7.3.1 互感线圈的串联	165
5.3.2 正弦交流电路中的电感元件	111	7.3.2 互感线圈的并联	166
5.3.3 正弦交流电路中的电容元件	113	7.4 互感电路的计算	168
5.3.4 电感、电容的连接方式	115	7.5 空心变压器	169
5.4 基尔霍夫定律的相量形式	118	7.5.1 基本概念	169
5.4.1 相量形式的基尔霍夫电流定律	118	7.5.2 空心变压器的电路模型	170
5.4.2 相量形式的基尔霍夫电压定律	118	本章小结	171
5.5 R、L、C 串联电路的分析	120	习题七	172
5.5.1 电流、电压关系	120	第 8 章 非正弦周期电流电路	174
5.5.2 功率	121	8.1 非正弦周期信号及其分解	174
5.6 阻抗的连接方式与混联电路计算	123	8.1.1 非正弦周期信号	174
		8.1.2 非正弦周期信号的分解	175
		8.2 对称波形的傅里叶级数分解形式	177

8.3 非正弦周期电流电路中的有效值、平均值和平均功率	180
8.3.1 电压、电流的有效值	180
8.3.2 电压、电流的平均值	181
8.3.3 功率的平均值	182
8.4 非正弦周期电流电路的计算	183
8.5 滤波器	186
8.5.1 RC 低通滤波器	186
8.5.2 RC 高通滤波器	187
8.5.3 RC 带通滤波器	187
8.5.4 其他形式的滤波器	188
本章小结	190
习题八	191
第 9 章 二端口网络	193
9.1 二端口网络的概念	193
9.2 二端口网络的参数方程	194
9.2.1 二端口网络的 Z 方程和 Z 参数	194
9.2.2 二端口网络的 Y 方程和 Y 参数	195
9.2.3 二端口网络的 T 方程和 T 参数	195
9.2.4 二端口网络的 H 方程和 H 参数	196
9.3 二端口网络的特性阻抗	196
9.4 二端口网络的等效电路	198
9.4.1 T 形等效电路	198
9.4.2 Π 形等效电路	198
9.5 二端口网络的连接	199
9.5.1 二端口网络的串联	200
9.5.2 二端口网络的并联	200
9.5.3 二端口网络的级联	201
9.5.4 二端口网络的等效	201
本章小结	202
习题九	202
第 10 章 磁路和铁心线圈电路	204
10.1 磁场的基本物理量及基本性质	204
10.1.1 磁感应强度	204
10.1.2 磁通	205
10.1.3 磁场强度	205
10.1.4 磁导率	206
10.2 安培环路定律	207
10.2.1 磁位差	207
10.2.2 安培环路定律	207
10.2.3 安培环路定律的应用	207
10.3 铁磁物质的磁化	210
10.3.1 铁磁物质的磁化与起始磁化曲线	210
10.3.2 磁滞回线与基本磁化曲线	211
10.3.3 铁磁材料的分类	212
10.4 磁路及磁路定律	213
10.4.1 磁路	213
10.4.2 磁路定律	213
10.5 直流磁路的计算	216
10.5.1 无分支磁路的计算	216
10.5.2 有分支磁路的计算	220
10.6 交流磁路的特点	221
10.6.1 正弦电压作用下的特点	221
10.6.2 正弦电流作用下的特点	223
10.6.3 交流磁路中的铁心损耗	223
10.7 铁心线圈的电路模型	224
本章小结	226
习题十	227
第 11 章 电路的计算机辅助设计	228
11.1 电路的计算机辅助分析与设计简介	228
11.2 电路仿真软件 PSPICE 的功能介绍与应用	228
11.2.1 电路仿真软件 PSPICE 简介	228
11.2.2 PSPICE 软件的使用方法	229
11.2.3 PSPICE 软件在电路分析中的应用举例	235
11.3 电路仿真软件 EWB 的功能介绍与应用	241
11.3.1 电路仿真软件 EWB 简介	241
11.3.2 电路模拟软件 EWB5.12 的主窗口	242
11.3.3 EWB 的元件库	242
11.3.4 EWB 基本操作方法介绍	244
11.3.5 EWB 软件在电路基础中的应用举例	249
附录 部分习题答案	254
参考文献	259

第 1 章 电路的基本概念和基本定律

本章重点介绍了电路的基本概念和基本定律，并讨论了电阻元件和独立电源的基本特性，同时介绍了电路的开路、短路和有载三种工作状态。

本章所介绍的基本概念有：电路、电路模型、电路元器件；基本物理量有：电流、电压、电功率；基本元器件有：电阻、电压源、电流源；基本定律有：欧姆定律、基尔霍夫定律等。

1.1 实际电路与电路模型

1.1.1 实际电路

电路是电流的通路。它是由若干个实际的电器装置或电器元件，根据某些特定的需要，按一定的方式组合起来的。例如，图 1-1 所示的手电筒电路是由电池、灯泡及导电的电线组成的简单照明电路。

实际电路的结构形式和所具有的功能是多种多样的。根据电路的功能的不同可将电路分为两大类：一类是实现能量的传输与转换；另一类是进行信号的传递与处理。

图 1-1 是一个手电筒电路示意图，它是将电能经过导线的传输，送到灯泡，使灯泡发光，实现能量转换。

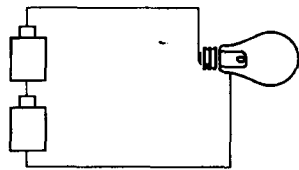


图 1-1 手电筒电路示意图

图 1-2 是一个较为复杂的电力系统电路示意图。它是将发电机发出的电能经升压变压器、输电线、降压变压器传送到电动机、电灯或其他用电器。尽管电路比较复杂，但它的功能仍是进行能量的传输与转换。

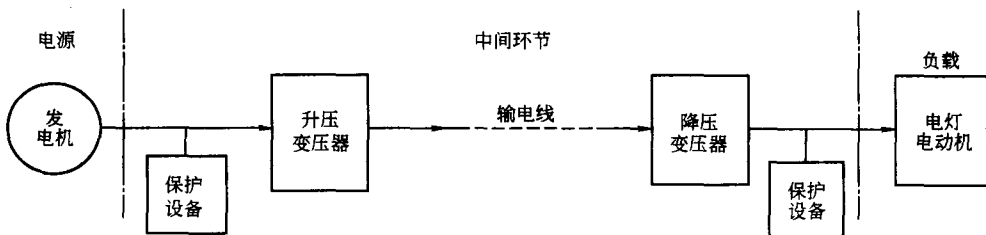


图 1-2 电力系统示意图

图 1-3 是一个扩音机电路。传声器将接收到的声音信号转换成电信号输出，再经放大器将电信号放大后送到扬声器，扬声器将电信号转换为声音信号输出。这种将信号进行转换和放大的过程就称为信号的处理。

由以上电路的组成可以看出，尽管电路的形式不同，功能各异，但它们都是由电源、负载和中间环节三部分组成的，如图 1-2 和图 1-3 所示。其中，电源是提供电能的装置，如电

池、发电机、信号源等；负载是取用电能并将其转换为其他形式能量的装置，如电灯、电动机、电炉、扬声器等；中间环节是传输、控制电能或信号的部分，它连接电源和负载，如连接导线、控制电器、保护电器、放大器等。

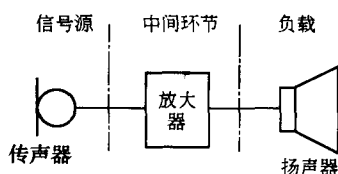


图 1-3 扩音机电路示意图

1.1.2 电路模型

实际电路中的器件，在工作时所发生的物理现象是很复杂的。例如，一个实际的绕线电阻器，当有电流通过时，它除了对电流呈现阻力之外，还在导线周围产生磁场，因而兼有电感的性质；在线匝之间会存在电场，因而又兼有电容的性质。又如连接导线总有一点电阻，甚至还有电感和电容。所以直接对由实际器件和设备组成的电路进行分析和研究，往往是很困难的，有时甚至是不可能的。为了便于对电路进行分析计算，常常将实际器件加以理想化，即忽略它的次要性质，用一个足以表征其主要物理性质的“模型”（或称理想元件）来表示。

由理想元件组成的足以表征实际电路物理性质的电路称为电路模型。电路模型具有以下特点：首先，每一种电路模型所反映的物理性质可以用数学表达式精确地描述；其次，任何一个实际器件中所发生的物理现象都可用各种电路模型的适当组合来表示。

理想电路元件主要有电阻元件、电感元件、电容元件、独立电源与受控源等。

电阻元件是一种只表示消耗电能并将其转换为热能或其他能量的元件，用 R 表示，图形符号如图 1-4a 所示。

电感元件是一种只表示储存磁场能量的元件，用 L 表示，图形符号如图 1-4b 所示。

电容元件是一种只表示储存电场能量的元件，用 C 表示，图形符号如图 1-4c 所示。

理想电压源是一种表示电压恒定（ U_S ）或是一个确定的时间函数（ u_S ）、其内阻为零的独立电源元件，图形符号如图 1-4d 所示。

理想电流源是一种表示电流恒定（ I_S ）或是一个确定的时间函数（ i_S ）、其内电阻为无穷大的独立电源元件，图形符号如图 1-4e 所示。

引入了电路模型的概念，那么图 1-1 所示的实际电路就可以用相应的电路模型来表示，如图 1-5 所示，图中连接导线是理想导体，它的内电阻是忽略不计的，视为零。

应当指出的是，由于人们对实际电路的物理性质的侧重点不同，以及对实际电路分析计算所要求的精确度不同，所以同一个实际电路可能会有不同的电路模型。本课程所研究的对象是电路模型，而不是实际电路。以后在叙述中将理想电路模型简称电路，将理想元件简称为元件。

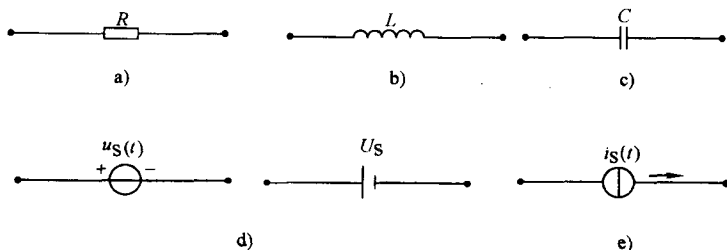


图 1-4 理想电路元件

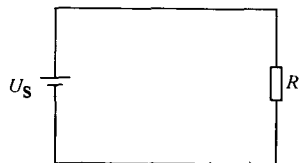


图 1-5 手电筒的电路模型

1.2 电路的基本物理量

电流和电压是电路的基本物理量。电路分析的任务就是根据电路的基本性质和定理列出电路方程, 计算电路中的电流、电压或电功率等。所以, 在分析讨论电路之前, 必须理解和掌握这些物理量。

1.2.1 电流

在电场的作用下, 电荷有规则的移动形成电流。为了表示电流的强弱, 我们引入电流强度这个物理量。电流强度, 简称电流, 用 i 表示, 它在数值上等于单位时间 dt 内通过导体某一横截面的电荷量 dq , 即

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

当电流的大小和方向不随时间变化时称为直流电流, 此时式 (1-1) 可以用式 (1-2) 表示, 即

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

式中, 电荷量 $Q(q)$ 的单位是库仑 (C); t 的单位是 s; $I(i)$ 的单位是安培 (A)。

电流的单位还有千安 (kA)、毫安 (mA) 和微安 (μA), 它们的关系是: $1\text{kA} = 10^3\text{A}$; $1\text{mA} = 10^{-3}\text{A}$; $1\mu\text{A} = 10^{-6}\text{A}$ 。

电流不仅有大小, 而且有方向。习惯上规定: 正电荷的运动方向为电流的实际方向。

在直流电路中, 某些支路电流的实际方向很容易判定, 如图 1-6 中的 R_1 支路, 但一些支路的电流实际方向很难确定, 如 R_x 支路, 因此, 我们引入“电流参考方向”这个概念。

在电路中, 我们可以沿连接导线任意选定一个方向作为电流的参考方向, 用箭头表示, 如图 1-6 和 1-7 所示。确定了参考方向后, 电流就成为一个代数量。当电流为正值 ($i > 0$) 时, 则表明电流的实际方向与参考方向相同; 当电流为负值 ($i < 0$) 时, 则表明电流的实际方向与参考方向相反, 如图 1-7 所示。

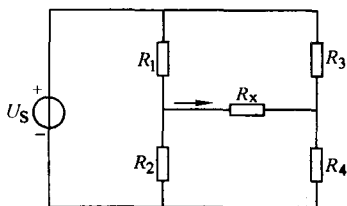


图 1-6 桥式电路

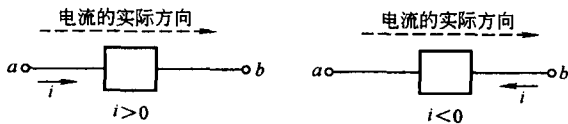


图 1-7 电流的参考方向和实际方向之间的关系

因此, 电路中的电流, 在选定的参考方向下, 由计算得出的电流的正负值就能确定电流的实际方向。显然, 在未选定电流参考方向下, 电流的正负值是毫无意义的。

1.2.2 电压

电路中的另一个基本物理量就是电压。由物理学可知, 在电场力的作用下, 电荷有规律

的移动就产生电流,电荷在移动过程中会发生能量转换,使电荷失去或获得能量。例如,在图 1-8 所示电路中,当接通时就有电流流动。电场力将单位正电荷由电路的 a 点经过电阻 R 移动到 b 点所做的功,定义为 a 、 b 两点之间的电压 u_{ab} ,

$$u_{ab} = \frac{dw}{dq} \quad (1-3)$$

式中, dw 为电荷 dq 移动过程中所做的功,单位为焦耳(J);电压 u_{ab} 的单位为伏特,简称伏(V)。

若正电荷由 a 点移到 b 点得到能量,则说明 a 点电位低、所具有的能量低, b 点电位高、所具有的能量高。因此, a 点称为电压负极; b 点称为电压正极。若正电荷由 a 点移到 b 点失去能量,则 a 点所具有的能量高, a 点的电位高,称为正极; b 点所具有的能量低, b 点的电位低,称为负极。将 a 、 b 两点之间的电位差称为 a 、 b 两点之间的电压,即

$$U_{ab} = U_a - U_b \quad (1-4)$$

式中, U_a 为 a 点的电位, U_b 为 b 点的电位,电位的单位与电压单位相同。

电压和电位都是标量,但在分析电路时,和电流一样,也需设定电压方向。电压的方向规定为由高电位(“+”极性)端指向低电位(“-”极性)端,即为电位降低的方向。实际电压的方向有时很难确定,所以如同需要为电流规定参考方向一样,也需要为电压规定参考方向。电路图中电压的参考方向通常用“+”、“-”号或用箭头表示,如图 1-9a 和 1-9b 所示;在书写时也常用带双下标的字母表示参考方向,第一个字母表示电压参考方向的正极,第二个字母表示电压参考方向的负极,如图 1-9c 所示。

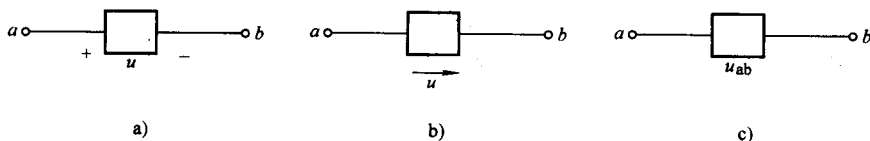


图 1-9 电压参考方向的表示方法

在规定了电压的参考方向后,经电路计算,若得出电压为正,则实际电压与参考电压方向一致,否则相反。同样,在没有规定参考方向时,电压的正负是没有意义的。

值得注意的是,在电路的分析计算中,电流、电压的参考方向可以任意标定,但一经确定,电路方程的列写就必须在标定的参考方向下进行,不应改变。

在电路的分析计算中,经常要用到电位这个概念。在图 1-8 中,若知道 u_{ab} 的值,由电压的概念只能知道 a 点和 b 点的电位的高低,而不能知道 a 点和 b 点的电位具体是多少。因此,计算电位时,必须选定电路中某一点作为参考点,以它的电位作为参考电位,通常设参考点的电位为零。电路中用接地符号“ $\perp$ ”表示电位为零的参考点。电路中其他各点的电位与参考点的电位相比较,比它高的为正,比它低的为负。正数值越大,电位越高;负数值越大,电位越低。电路中某一点的电位实质上就是将单位正电荷从电路中的某一点移到参考点时获得或失去的能量大小。

在图 1-8 中,已知 $u_{ab} = 10V$:

若设 b 点为参考点,即 $u_b = 0$,则由公式 (1-4) 可知 a 点的电位为

$$u_a = u_{ab} + u_b = u_{ab} = 10V$$

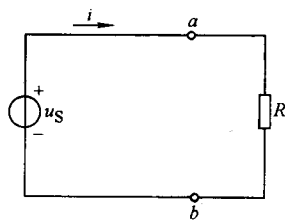


图 1-8 电压的参考方向

若设 a 点为参考点, 即 $u_b=0$, 则由公式 (1-4) 可知 b 点的电位为

$$u_b = u_a - u_{ab} = -u_{ab} = -10V$$

综上所述:

1) 电路中某一点的电位等于该点与参考点之间的电压。因此, 离开参考点讨论电位是没有意义的。

2) 参考点选的不同, 电路中各点的电位值也不同, 但是, 任意两点之间的电压是不变的。所以, 电路中各点的电位值的大小是相对的, 而两点之间的电压值是绝对的。

例 1-1 在图1-10所示的电路中, d 点为参考点, 已知 a 、 b 和 c 三点的电位分别为 $u_a=10V$, $u_b=15V$, $u_c=-5V$, 试求电压 u_{ab} 、 u_{ac} 和 u_{ad} 。

解 d 点为参考点, 即 $u_d=0$, 由式 (1-4) 可得:

$$u_{ab} = u_a - u_b = (10 - 15)V = -5V$$

$$u_{ac} = u_a - u_c = 10V - (-5V) = 15V$$

$$u_{ad} = u_a - u_d = (10 - 0)V = 10V$$

例 1-2 在图1-11所示的电路中, b 点为参考点, 已知电压 $u_{ab}=10V$, $u_{bc}=-5V$, $u_{cd}=5V$, 试求电位 u_a 、 u_c 和 u_d 。

解 b 点为参考点, 即 $u_b=0$, 由式 (1-4) 可以推知:

$$u_a = u_{ab} + u_b = u_{ab} = 10V$$

$$u_c = u_b - u_{bc} = -u_{bc} = 5V$$

$$u_d = u_c - u_{cd} = 5V - 5V = 0$$

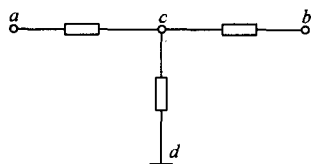


图 1-10 例 1-1 的电路图

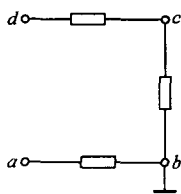


图 1-11 例 1-2 的电路图

1.2.3 电流与电压的关联参考方向和非关联参考方向

对于一段电路或一个元件上的电压和电流的参考方向可以独立地任意选定。当选定的电流参考方向和电压参考方向一致时, 即电流从元件的电压正极流入, 从电压的负极流出, 此时, 称电压与电流为关联参考方向, 如图 1-12a 所示; 否则, 称电压与电流为非关联参考方向, 如图 1-12b 所示。一般情况下, 人们习惯采用关联参考方向。

在图 1-13a、c 中, 电压与电流的参考方向为关联参考方向, 而图 1-13b、d 中的电压与电流的参考方向为非关联参考方向。

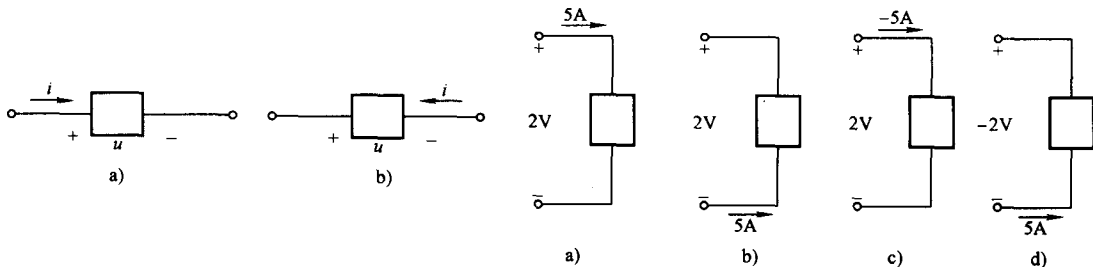


图 1-12 电压与电流的关联和非关联参考方向

图 1-13 电压与电流关联和非关联参考方向的判定

思考与练习题

1-2-1 在图 1-9a 中如果 $u_{ab} = -5V$, 试问 a 点和 b 点哪一点的电位高?

1-2-2 在图 1-14 中, 如果 $u_1 = -6V$, $u_2 = 4V$, 试问:

(1) u_{ab} 等于多少?

(2) 若选 b 点为参考点, 则 a 、 b 和 c 三点的电位各是多少?

(3) 若选 c 点为参考点, 则 a 、 b 和 c 三点的电位各是多少?

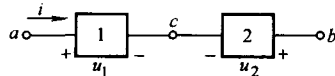


图 1-14 练习题 1-2-2

1-2-3 在图 1-14 中, 若电流和电压的参考方向如图所示, 试问元件 1 和元件 2 的电流与电压参考方向为关联还是非关联参考方向?

1.3 电能与电功率

电路在工作状态下总伴随着能量的转换。对于某一个二端元件或一个一端口电路来说, 当有电流流过时, 该电路元件就会获得或失去能量。如图 1-8 中, 在关联参考方向下, 单位时间 dt 内, 正电荷量 dq 由 a 点移到 b 点, 若电压降为 U , 则由电压的定义可知, 在移动过程中电荷失去的电能为

$$dw = Udq$$

那么, 在 t_0 到 t 的时间内电荷失去的电能为

$$W = \int_{q(t_0)}^{q(t)} Udq$$

又由于 $i = \frac{dq}{dt}$, 则上式可以写为

$$W = \int_0^t u(t) \cdot i(t) dt \quad (1-5)$$

由于电压和电流都是代数量, 能量 W 也是一个代数量。在 u 与 i 为关联参考方向下, $W > 0$ 时, 电荷失去能量, 元件吸收能量; $W < 0$ 时, 电荷得到能量, 元件释放能量。

电荷失去能量, 电路则吸收能量。电路元件在单位时间内吸收的能量称为电功率, 用 p 表示, 即为

$$p = \frac{dw}{dt} = \frac{dw}{dq} \times \frac{dq}{dt} = ui$$

又由于电流的定义

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

所以, 在关联参考方向下

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

在直流电路中

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

在非关联参考方向下

$$p = -ui \quad (1-8)$$

直流电路中

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

由于电压和电流都是代数量, 所以电功率也是一个代数量, 若根据式子 (1-6) 至式

(1-9) 计算出的 $P(p) > 0$, 则表示该元件吸收功率; 若 $P(p) < 0$, 则表示该元件发出功率。

例 1-3 计算图1-15所示的各元件的功率, 并判别该元件是吸收功率还是发出功率。

解 a) 因为 U 与 I 为关联参考

方向

所以 $P = UI = 2V \times 5A = 10W$

因为 $P > 0$, 所以该元件吸收功率。

b) 因为 U 与 I 为非关联参考方

向

所以 $P = -UI = -(2V \times 5A)$

$= -10W$

因为 $P < 0$, 故该元件发出功率。

c) 因为 U 与 I 为关联参考方向

所以 $P = UI = 2V \times (-5A) = -10W$

因为 $P < 0$, 故该元件发出功率。

d) 因为 U 与 I 为非关联参考方向

所以 $P = -UI = -(-2V \times 5A) = 10W$

因为 $P > 0$, 故该元件吸收功率。

例 1-4 在图1-16所示电路中, 已知 $I = 3A$, $U_1 = 10V$, $U_2 = 6V$, $U_3 = 4V$, 试计算各个元件的功率, 并判别该元件是吸收功率还是发出功率。

解 对于元件1, U_1 与 I 为非关联参考方向, 所以

$$P_1 = -U_1 I = -(10V \times 3A) = -30W$$

因为 $P_1 < 0$, 所以该元件发出功率。

对于元件2, U_2 与 I 为关联参考方向, 所以

$$P_2 = U_2 I = 6V \times 3A = 18W$$

因为 $P_2 > 0$, 所以该元件吸收功率。

对于元件3, U_3 与 I 为关联参考方向, 所以

$$P_3 = U_3 I = 4V \times 3A = 12W$$

因为 $P_3 > 0$, 所以该元件吸收功率。

在例1-4的电路中, 元件发出的总功率为 $30W$, 吸收的总功率为 $18W + 12W = 30W$, 可见吸收的功率之和与发出的功率之和是相等的。

因此, 在电路中, 各个元件发出的功率之和等于吸收的功率之和, 也就是说, 电路中发出的功率与吸收的功率是平衡的, 这反映了电路的能量守恒定律。

思考与练习题

1-3-1 有人说, 在关联参考方向下功率一定大于零, 在非关联参考方向下功率一定小于零。这种说法对吗?

1-3-2 计算图1-17中各个元件的功率, 并验证电路中发出的功率和吸收的功率是否平衡?

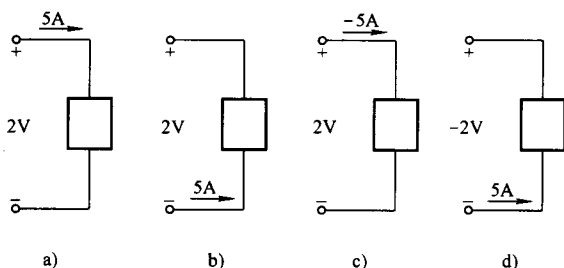


图 1-15 例 1-3 电路图

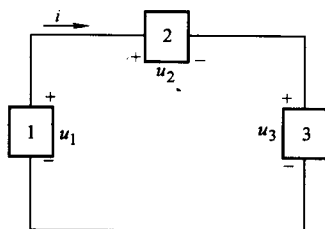


图 1-16 例 1-4 电路图

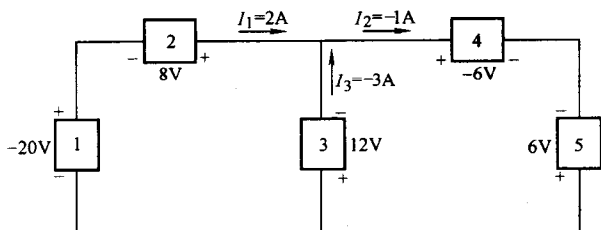


图 1-17 练习题 1-3-2 的图

1.4 电阻元件

电阻元件是从实际电阻器中抽象出来的电路模型，它是一个二端理想元件，它的特性就是消耗电能。许多实际器件在一定条件下都可以用电阻元件作为电路模型，如：电炉丝、灯泡、电烙铁等。

1.4.1 线性非时变电阻

电阻元件端子间的电压和电流取关联参考方向时，在任何时刻其两端子间的电压和电流关系服从欧姆定律，即

$$u = Ri \quad (1-10)$$

式中， u 为电压，单位为 V； i 为电流，单位为 A； R 为电阻，单位为欧姆，简称欧 (Ω)。电阻的单位还有千欧 ($k\Omega$)、兆欧 ($M\Omega$)。

如果电阻的阻值不随电压或电流的变化而变化，则称为线性电阻。阻值不随时间变化的电阻，称为非时变电阻。如没有特殊说明，则我们讨论的是线性非时变电阻，即阻值不随时间变化的线性电阻。它的图形符号如图 1-18a 所示。

以电流 i 为横坐标，以电压 u 为纵坐标，可以绘出电阻元件在 $u-i$ 平面上的电压和电流关系曲线，称为电阻的伏安特性曲线。显然，线性非时变电阻的伏安特性曲线是一条通过原点的直线，如图 1-18b 所示。直线的斜率即为电阻的阻值 R ，即

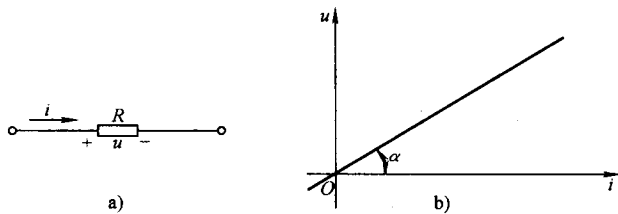


图 1-18 电阻元件的符号及其伏安特性曲线

$$R = \tan \alpha = \frac{u}{i}$$

电阻元件也可用另一个参数——电导来表示。电阻的倒数叫电导，用符号 G 表示，即

$$G = \frac{1}{R}$$

国际单位制中，电导的单位为西门子，简称西 (S)。于是式 (1-10) 可以写为

$$i = Gu \quad (1-11)$$

应当指出, 式 (1-10) 和式 (1-11) 都是在电压电流为关联参考方向下得出的。在非关联参考方向下, 应为:

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

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

从电阻元件的伏安特性来看, 在任意时刻, 电阻的电压 (或电流) 仅仅与同一时刻的电流 (或电压) 有关, 而与其他时刻的电流 (或电压) 大小无关。所以说, 电阻元件是一个无记忆元件。

1.4.2 电阻元件的功率与能量

当电阻元件上的电压和电流取关联参考方向时, 电阻元件吸收的功率为

$$p = ui = \frac{u^2}{R} = Gu^2 \quad (1-14)$$

或

$$p = ui = Ri^2 = \frac{i^2}{G} \quad (1-15)$$

由上式可以看出, G 和 R 都是正常数, 所以功率 p 总是大于等于零的。故电阻元件总是吸收功率, 它是一种耗能元件。

在 t_0 到 t 的时间内, 电阻元件吸收的电能为

$$W = \int_{t_0}^t p(t) dt = \int_{t_0}^t \frac{u^2(t)}{R} dt = \int_{t_0}^t Ri^2(t) dt$$

当电流、电压为一个常数时, 上式可以写为

$${}_tW = PT = UIT \quad (1-16)$$

能量的国际单位为焦耳 (J), 工程单位为千瓦时 (kWh), 1kWh 就是通常所说的 1 度电。它们的换算关系是

$$1\text{kWh} = 1000\text{Wh} = 1000\text{J/s} \times 3600\text{s} = 3.6 \times 10^6\text{J}$$

电阻器吸收的能量往往转换为热能, 使电阻器的温度升高, 但温度过高, 会使电阻器烧坏。因此, 一般电阻器除了标明电阻器的阻值外, 还要标出它的额定功率或额定电流 (电压) 值。

电压、电流和功率之间有一定的关系, 所以在给出额定值时, 三者不必全部给出。如: 灯泡、电烙铁通常标出额定电压和额定功率; 线绕电阻和碳膜电阻要标明阻值和功率。

例 1-5 一个额定电压为 220V, 额定功率为 100W 的灯泡, 试计算:

(1) 其额定电流和电阻值。

(2) 在额定电压下工作, 若每天用 5h, 一个月 (按 30 天计算) 灯泡消耗的电能为多少?

解 (1) 由 $P = UI = U^2/R$ 可得

$$\text{额定电流} \quad I = P/U = 100\text{W}/220\text{V} = 0.4545\text{A}$$

$$\text{阻值} \quad R = U^2/P = (220\text{V})^2/100\text{W} = 484\Omega$$

(2) 一个月 (按 30 天计算) 灯泡消耗的电能

$$W = PT = 100\text{W} \times (5\text{h} \times 30) = 15 \times 10^3\text{Wh} = 15\text{kWh}$$

例 1-6 在电路中需要一个能通过 300mA、阻值为 100Ω 的电阻器。现有下列三种电阻器: 100Ω 、5W; 100Ω 、7.5W; 100Ω 、10W。试问选哪一种合适?

解 所需电阻的功率为

$$P = I^2 R = (0.3\text{A})^2 \times 100\Omega = 9\text{W}$$

故选用 100Ω 、 10W 的电阻器合适。

思考与练习题

1-4-1 $2\text{k}\Omega$ 的电阻上通过 2mA 的电流，试问：

- (1) 电阻两端的电压为多少？
- (2) 它吸收的功率为多少？
- (3) 在 1h 内消耗的电能为多少？

1-4-2 计算图 1-19 中各个电阻上的压降和功率。

1-4-3 有一个阻值为 100Ω 、额定功率为 1W 的电阻，若在直流电路中使用，电阻上的电压和电流最大不得超过多少？

1-4-4 将两个标有“ 110V ， 20W ”的灯泡串联后接在 220V 的电源上是否合适？并联后接在 220V 的电源上是否合适？

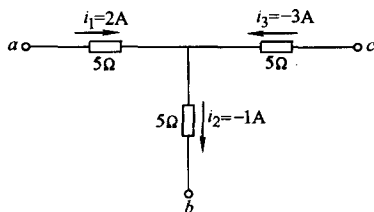


图 1-19 练习题 1-4-2 的电路图

1.5 电压源与电流源

电源是一种能将其他形式的能量转换成电能的装置和设备，它为电路提供电能。实际电源有两种类型：一种是电压源，如电池、发电机和信号源等；另一种是电流源，如光电池等。

电压源和电流源是从实际电源中抽象出来的理想化模型，也称理想电压源和理想电流源。

1.5.1 电压源

电压源通常是指理想的电压源，它是从实际电源中抽象出来的一种电路模型。电压源有两个基本性质：①它的端电压是一个定值 U_S 或者是一个给定的时间函数 $u_S(t)$ ，它的端电压的大小与流过它的电流大小无关；②流过电压源的电流大小取决于与它相连接的外电路。

电压源的图形符号如图 1-20a 所示，其中 $u_S(t)$ 是电压源的电压值，而“+”、“-”是其参考极性。

当电压源的电压值为常数时，即 $u_S(t) = U_S$ ，就称其为直流电压源，它的电路符号也可用图 1-20b 表示，图中长线段表示电压源的正极，短线段表示电压源的负极。直流电压源的伏安特性如图 1-21 所示，它是 $u-i$ 平面上一条与电流轴线平行的直线。

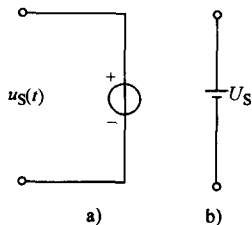


图 1-20 电压源的符号

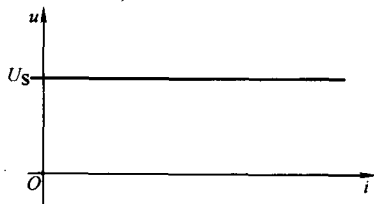


图 1-21 直流电压源的伏安特性