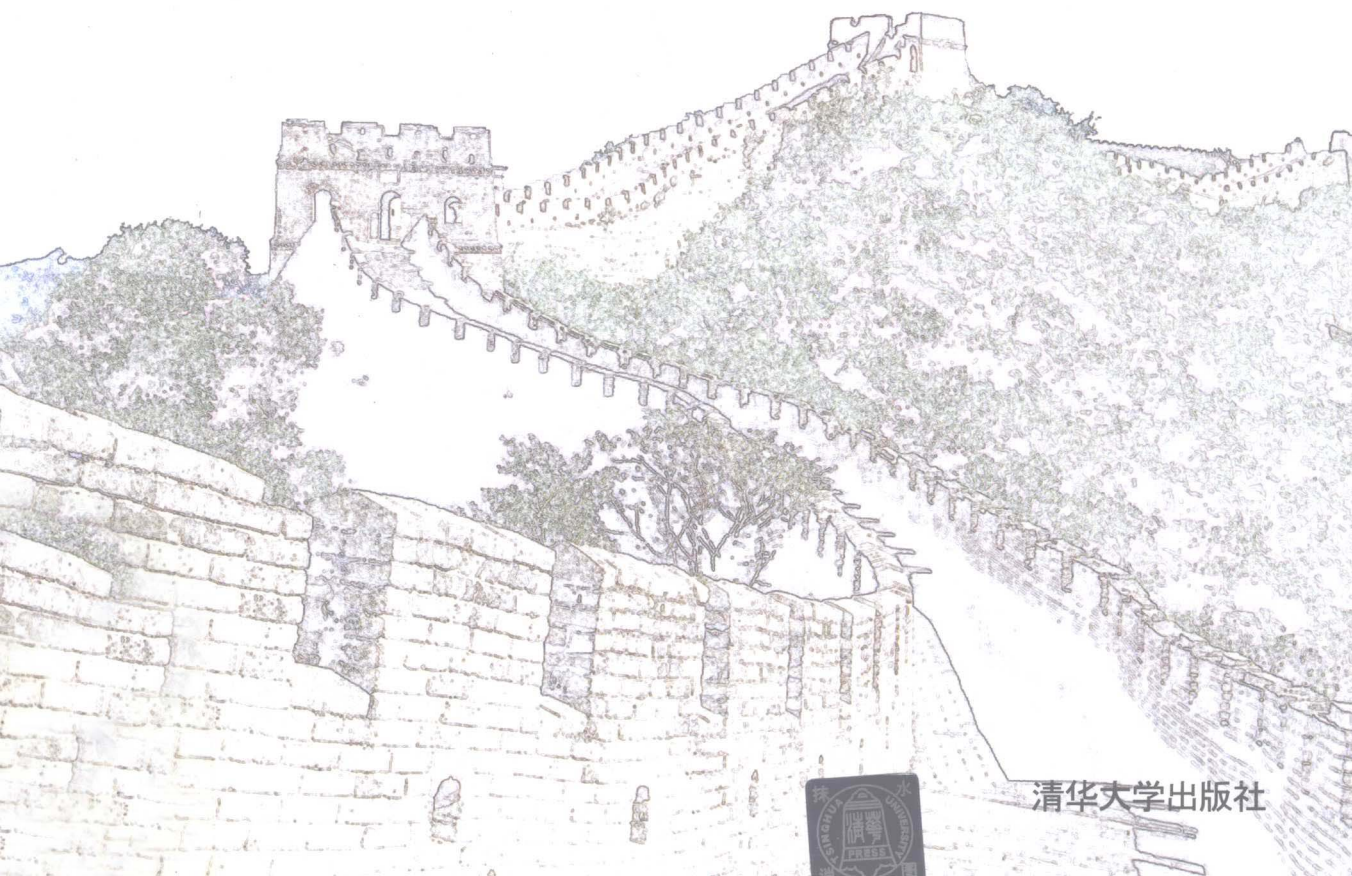


全国普通高校
电子信息与
电气学科
基础规划教材

电路理论与实践

吴大中 赵远东 盛毅 等 编著



清华大学出版社



全国普通高校电子信息与电气学科基础规划教材

电路理论与实践

吴大中 赵远东 盛毅 等 编著

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

全书内容共三篇,第1篇为电路理论部分,分为13章,主要介绍直流电路、交流电路、动态电路等的分析方法,以及分布参数电路分析;第2篇为电路仿真实验,主要介绍仿真软件 Multisim 的应用;第3篇为电路实验指导,介绍了30个常用的电路实验,分为验证性实验、研究性实验和设计性实验3个类型。书中每章都有小结,并配有大量例题和习题,有助于更好地理解 and 掌握相关内容。

本书适合高等学校电类(强、弱电)及相关专业师生使用,也可供有兴趣的读者自学使用。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

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

电路理论与实践/吴大中等编著.--北京:清华大学出版社,2013.1

全国普通高校电子信息与电气学科基础规划教材

ISBN 978-7-302-30774-7

I. ①电… II. ①吴… III. ①电路—高等学校—教材 IV. ①TM13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 278863 号

责任编辑:梁 颖

封面设计:傅瑞学

责任校对:焦丽丽

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

课 件 下 载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:清华大学印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:22

字 数:534 千字

版 次:2013 年 1 月第 1 版

印 次:2013 年 1 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:39.00 元

产品编号:049630-01

前言

电路分析课程是电子、电气类专业的主干技术基础课程,目前国内工科院校的全部电类及相关专业都在不同深度和层次上开设了这门课程,且将其确定为必修课。该课程理论严密、逻辑综合性强,有广阔的工程背景。

为适应教学改革要求和强化工程实践训练,本教材分成三篇,将电路理论和电路实践的内容合在一本书里。除第1篇为电路理论外,电路实践由仿真(第2篇)和实际操作(第3篇)两部分组成。电路理论部分主要讲述了电路分析的基本理论、方法和定理,内容包括直流电路、交流电路、动态电路三部分,具体内容为:直流电路有集总参数中电压、电流的约束关系,电路等效变换及分析,电路定理;交流电路里有正弦电路的相量分析、互感电路、三相电路分析、二端口网络和非正弦周期电流电路;动态电路有一阶电路、二阶电路分析及过渡过程的复频域分析;以及分布参数电路分析。仿真实践主要是通过 Multisim 软件进行,通过这部分内容的学习和训练,要使学生学会仿真软件的使用以及利用计算机分析电路问题的基本方法。实际操作是在电工实训平台上利用实际的元器件进行的实验,使得学生掌握常用的电子仪器、仪表的使用以及基本电路的连接和测量,具有一定的综合应用能力,巩固所学理论,训练实验技能,培养学生严谨的科学作风。

在教材的编写过程中,力求做到深入浅出、通俗易懂,便于学生阅读和自学。每章都有相当的例题和习题,通过练习,有助于加深电路概念的理解。

本书由吴大中、赵远东、盛毅、周俊萍、单慧琳、夏景明等合作产生,吴大中任主编,赵远东、盛毅任副主编。周俊萍编写第4章、第7章和第11章,单慧琳编写第9章和第10章,夏景明编写第5章和第6章,赵远东编写第2章、第3章和第12章,并承担了许多章节的审阅和修订工作,设计和制作了部分章节的教学课件;盛毅编写第3篇电路实验指导,吴大中编写第1章、第8章、第13章和第2篇仿真实验,并负责整个教材的结构和组织安排,还审阅和修订了许多章节及教学课件。

吴琴、单龙、高飞等做了许多材料整理、绘图、文字录入及校对方面的工作,蔡曜、王洪宇、吴昕芸参与了教学课件的制作和整理,在此一并表示感谢。

限于编者水平,书中不妥和错误之处在所难免,恳请读者批评指正。

编者

2012年9月

第 1 篇 电路分析理论

第 1 章 电路理论基础	3
1.1 电路模型	3
1.2 电流、电压的参考方向	4
1.3 电功率	5
1.4 电路的状态	7
1.5 电阻、电容和电感元件	9
1.6 独立电源	13
1.7 受控电源	15
1.8 基尔霍夫定律	16
本章小结	21
习题	21
第 2 章 电阻电路的等效变换	28
2.1 电路的等效变换	28
2.2 电阻的串联和并联	29
2.3 电阻的 Y 形连接和 Δ 形连接的等效变换	31
2.4 电压源、电流源的串联和并联	33
2.5 实际电源的两种模型及其等效变换	34
2.6 输入电阻	35
本章小结	36
习题	37
第 3 章 电阻电路的一般分析	43
3.1 电路图概念	43
3.2 KCL 和 KVL 的独立方程数	44
3.3 支路电流法	45
3.4 网孔电流法	47
3.5 回路电流法	49
3.6 结点电压法	50
本章小结	53

习题	54
第 4 章 电路定理	60
4.1 叠加定理	60
4.2 替代定理	63
4.3 戴维宁定理和诺顿定理	64
4.4 最大功率传输定理	67
4.5 特勒根定理	68
4.6 互易定理	70
4.7 运算放大器的特性	73
4.8 含理想运算放大器的电阻电路分析	74
本章小结	75
习题	76
第 5 章 相量法基础	80
5.1 正弦量的三要素	80
5.2 相位差	81
5.3 有效值	82
5.4 正弦量的相量表示	82
5.5 正弦量的相量	83
5.6 正弦电流电路中的电阻	84
5.7 正弦电流电路中的电感	86
5.8 正弦电流电路中的电容	87
5.9 关于基尔霍夫定律的相量形式	88
本章小结	88
习题	89
第 6 章 正弦稳态电路分析	92
6.1 阻抗与导纳的定义	92
6.2 阻抗与导纳的性质	93
6.3 复阻抗的串、并联	94
6.4 复阻抗与复导纳的等效变换	95
6.5 正弦电路的功率及功率因数	95
6.6 关于基本元件的功率与能量特性	97
6.7 复功率	98
6.8 最大功率传输	99
6.9 关于功率因数及负载功率因数的提高	100
6.10 正弦电流电路的一般分析方法与计算	101

本章小结	104
习题	104
第 7 章 互感与谐振	107
7.1 互感与互感电压	107
7.2 具有互感的正弦电流电路的计算	109
7.3 空心变压器	112
7.4 理想变压器	113
7.5 串联电路的谐振	114
7.6 并联电路的谐振	116
本章小结	118
习题	118
第 8 章 三相电路	121
8.1 三相电源与三相负载	121
8.2 对称三相电路线电压(电流)与相电压(电流)的关系	124
8.3 对称三相电路分析	125
8.4 不对称三相电路的概念	129
8.5 三相电路的功率	131
本章小结	135
习题	136
第 9 章 动态电路的时域分析	140
9.1 动态电路的方程及其初始条件	140
9.2 一阶电路的零输入响应	143
9.3 一阶电路的零状态响应	146
9.4 一阶电路的全响应	150
9.5 一阶电路的阶跃响应	154
9.6 一阶电路的冲激响应	157
9.7 二阶电路的零输入响应	161
9.8 二阶电路的零状态响应和全响应	166
本章小结	167
习题	167
第 10 章 二端口网络	175
10.1 二端口网络介绍	175
10.2 二端口的方程和参数	175
10.3 二端口的等效电路	181

10.4 二端口的转移函数	184
10.5 二端口的连接	185
本章小结	186
习题	187
第 11 章 非正弦周期电流电路	191
11.1 非正弦周期信号	191
11.2 周期函数分解为傅里叶级数	192
11.3 非正弦周期量的有效值、平均值和平均功率	194
11.4 非正弦周期电流电路的计算	195
本章小结	197
习题	197
第 12 章 线性电路过渡过程的复频域分析	201
12.1 拉普拉斯变换的定义	201
12.2 拉普拉斯变换的基本性质	202
12.3 拉普拉斯反变换	203
12.4 线性电路的复频域模型	206
12.5 应用拉普拉斯变换法分析线性电路	208
本章小结	209
习题	210
第 13 章 分布参数电路	213
13.1 分布参数电路的概念	213
13.2 均匀传输线及其方程	214
13.3 均匀传输线方程的正弦稳态解	216
13.4 均匀传输线上的行波和传播特性	219
13.5 终端接有负载的传输线	224
本章小结	226
习题	227

第 2 篇 电路仿真实验

第 14 章 Multisim 仿真软件	231
14.1 Multisim 的仿真功能及窗口界面	231
14.2 Multisim 2001 仿真软件的基本操作	233
14.3 仿真实验内容及要求	236

第 15 章 Multisim 仿真应用实例	237
15.1 电阻电路仿真	237
15.2 运算放大电路	239
15.3 直流激励下一阶电路的响应	241
15.4 交流电路分析	244
15.5 三相电路	252
15.6 二端口电路设计	254
第 16 章 Multisim 仿真训练	256
16.1 戴维宁和诺顿等效电路	256
16.2 受控源电路	257
16.3 回路电流法	257
16.4 运算放大电路	258
16.5 RLC 串联谐振电路	259
 第 3 篇 电路实验指导 	
第 17 章 电路实验教学要求	263
第 18 章 验证性实验	265
实验 1 基本电工仪表的使用及测量误差的计算	265
实验 2 减小仪表测量误差的方法	268
实验 3 电流表、电压表的设计及量程扩展	271
实验 4 基尔霍夫定律的验证	275
实验 5 线性电路叠加原理和齐次性的验证	277
实验 6 电压源与电流源的等效变换	279
实验 7 典型电信号的观察与测量	281
实验 8 RC 一阶电路的响应测试	283
实验 9 R 、 L 、 C 元件阻抗特性的测定	286
实验 10 交流电路频率特性的测定	288
实验 11 互感电路测量	290
实验 12 单相铁芯变压器特性的测试	292
实验 13 单相电度表的校验	294
实验 14 功率因数及相序的测量	297
实验 15 三相交流电路电压、电流的测量	299
第 19 章 研究性实验	302
实验 16 已知和未知电阻元件伏安特性的测绘	302

实验 17	等效网络变换的原理和测试	305
实验 18	最大功率传输条件的测定	307
实验 19	三相电路功率的测量	309
实验 20	直流双口网络测试	312
实验 21	二阶动态电路响应的研究	315
实验 22	交流串联电路的研究	317
实验 23	RC 网络频率特性的测试	320
实验 24	正弦稳态交流电路相量的研究	323
第 20 章	设计性实验	326
实验 25	戴维宁定理和诺顿定理的验证——有源二端网络等效 参数的测定	326
实验 26	受控源的设计和研究	329
实验 27	R 、 L 、 C 串联谐振电路的研究	332
实验 28	负阻抗变换器	335
实验 29	回转器电路的设计	337
实验 30	感性负载断电保护电路的设计	340
参考文献		342

第1篇 电路分析理论

共 13 章,分成几个方面:直流电路、交流电路、动态电路及其他。

- 第 1 章 电路理论基础
- 第 2 章 电阻电路的等效变换
- 第 3 章 电阻电路的一般分析
- 第 4 章 电路定理
- 第 5 章 相量法基础
- 第 6 章 正弦稳态电路分析
- 第 7 章 互感与谐振
- 第 8 章 三相电路
- 第 9 章 动态电路的时域分析
- 第 10 章 二端口网络
- 第 11 章 非正弦周期电流电路
- 第 12 章 线性电路过渡过程的复频域分析
- 第 13 章 分布参数电路

第1章 电路理论基础

内 容 提 要

本章介绍电路模型的概念,电压、电流参考方向的概念,吸收、发出功率的表达式和计算方法,还将介绍电阻、电容、电感、独立电源和受控电源等电路元件。不同的电路元件的变量之间具有不同的约束。基尔霍夫定律是集总参数电路的基本定律,包括电流定律和电压定律,分别对相互连接的支路电流之间和相互连接的支路电压之间予以线性约束。这种约束与构成电路的元件的性质无关。

电工、电子技术的应用离不开电路,而电路又由电路元件构成。本章着重介绍电路模型和电路的基本概念、常用电路元件的伏安特性、基尔霍夫定律,为学习各种类型的电工、电子电路建立必要的基础。

1.1 电路模型

1. 电路概念

电路原理的研究对象不是实际电路,而且由实际电路抽象而成的理想化的电路模型。为了便于分析、设计电路,在电路理论中,需要根据实际电路中各个部件主要的物理性质,建立它们的物理模型,这些抽象化的基本的物理模型就称为理想电路元件,简称电路元件。实际电路器件是理想电路元件的组合。由电路元件构成的电路,即是实际电路的电路模型,是在一定精确度范围内对实际电路的一种近似。

一般用导线、开关等将电源和用电设备连接起来,构成一个电流流通的闭合路径,这就组成了电路。所以,把构成电流通路的一切设备的总和,称为电路。电路的作用,在强电方面,进行能量的转换和传输;在弱电方面,进行信号的处理、传递和存储。

电路的形式是多种多样的,但从电路的本质来说,其组成都有电源、负载、中间环节三个最基本的部分。如图 1-1 所示的手电筒电路中,电池把化学能转换成电能供给灯泡,灯泡却把电能转换成光能作照明之用。常用的电源如干电池、蓄电池和发电机等,常用的负载如电热炉、白炽灯和电动机等;连接电源和负载的部分,称为中间环节,如导线、开关等。

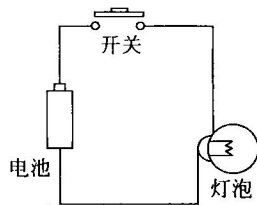


图 1-1 手电筒电路

用于构成电路的电工、电子元件或设备统称为实际电路元件,简称实际元件。实际元件的物理性质,从能量转换角度看,有电能的产生,电能的消耗以及电场能量和磁场能量的储存。

实际电路的类型以及工作时发生的物理现象是千差万别的,在电路分析中,不可能也没有必要去探讨每一个实际电路,而只须找出它们的普遍规律。为此,把实际电路的元件理想化,忽略其次要因素,在反映主要物理性质的基础上,用理想元件来代替实际的元件,可以表征或近似地表示一个实际器件(或电路)中所有的主要物理现象。这样由理想元件组成的电

路就是实际电路的电路模型,它是对实际电路物理性质的高度抽象和概括。所以,电路模型是通过理想的电路元件相互连接而成的。

2. 常用电路元件

图 1-2 是常用的理想电路元件电路模型图形符号(后面理想两字常略去),无源元件有电阻 R 、电容 C 和电感 L ,有源元件有电压源 U_s 、电流源 I_s 。它们为电路结构的基本模型,由这些基本模型可构成电路的整体模型。

例如,手电筒电路的电路模型如图 1-3 所示。灯泡看成电阻元件 R_L ,干电池看成恒压源 E (或 U_s)和电阻元件(内阻) R_0 。串联。可见电路模型就是实际电路的科学抽象。采用电路模型来分析电路,不仅计算过程大为简化,而且能更清晰地反映电路的物理实质。

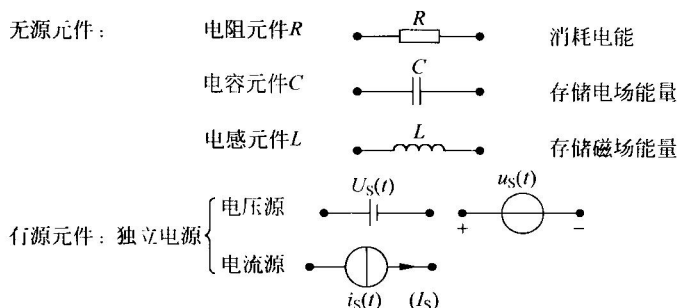


图 1-2 常用的理想电路元件

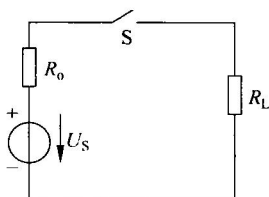


图 1-3 手电筒电路模型

3. 集总参数电路

实际电路部件的运用一般都和电能的消耗现象及电、磁能的储存现象有关,它们交织在一起并发生在整个部件中。这里所谓的“理想化”指的是:假定这些现象可以分别研究,并且这些电磁过程都分别集中在各元件内部进行,这样的元件(电阻、电容、电感)称为集总参数元件,简称为集总元件。由集总元件构成的电路称为集总参数电路。

用集总参数电路模型来近似地描述实际电路是有条件的,它要求实际电路的尺寸 l (长度)要远小于电路工作时电磁波的波长 λ ,即

$$l \ll \lambda \quad (1-1)$$

集总参数电路中 u 、 i 可以是时间的函数,但与空间坐标无关。因此,任何时刻,流入两端元件一个端子的电流等于从另一端子流出的电流,端子间的电压为单值量。

与集总参数电路相对应的是分布参数电路,本书除第 13 章讨论分布参数电路以外,其余各章只考虑集总参数电路。

1.2 电流、电压的参考方向

电流、电压、电动势的实际方向在物理学中已作过明确的规定:电路中电流的流动方向是指正电荷流动的方向,电路中两点之间电压的方向是高电位指向低电位的方向(即电位降落的方向),电动势的方向在电源内部由低电位指向高电位的方向(即电位升高的方向)。图 1-4 所示电路中分别标出了电流、电压、电动势的方向。

但是在分析复杂电路时往往不能预先确定某段电路上电流、电压的实际方向。为了便

于分析电路,电路中引出了参考方向的概念。电流、电压的参考方向是人为任意设定的,图 1-5 电路中箭头所示方向就是电流和电压的参考方向。电路中的电流和电压的参考方向可能与实际方向一致或相反,但不论属于哪一种情况,都不会影响电路分析的正确性。

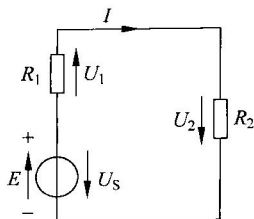


图 1-4 电流、电压的实际方向

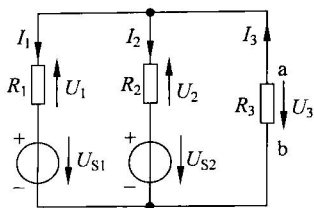


图 1-5 电流、电压的参考方向

按参考方向求解得出的电流和电压值有两种可能。得正值,说明设定的参考方向与实际方向一致;若为负值,则表明参考方向与实际方向相反。必须指出,电路中的电流或电压在未标明参考方向的前提下,讨论电流或电压的正、负值是没有意义的。

参考方向也称做正方向,除了用箭头标示外,还可以用双下标标示。如图 1-5 中电流 I_3 和电压 U_3 也可以写为 I_{ba} 和 U_{ab} 。电压也可以用参考极性“+”、“-”标示。如图 1-5 中电压源 U_{S1} 、 U_{S2} ,其中“+”表示高电位,“-”表示低电位。

当一个元件或一段电路上的电流、电压参考方向一致时,则称它们为关联的参考方向,如图 1-6(a)所示。在分析电路时,尤其是分析电阻、电感、电容等元件的电流、电压关系时,经常采用关联参考方向。例如,在应用欧姆定律时必须注意电流、电压的方向,如图 1-6(a)中电流、电压采用了关联参考方向,这时电阻 R 两端电压为

$$U = RI$$

若采用非关联参考方向,如图 1-6(b)所示,则电阻 R 两端的电压为

$$U = -RI$$

当电阻的单位为欧姆(Ω)、电流的单位为安培(A)时,电压的单位为伏特(V)。

列写公式时,根据电流和电压的参考方向得出公式中的正负号。此外电流和电压本身还有正值和负值之分。

1.3 电功率

从物理学中知道,一个元件上的电功率等于该元件两端的电压与通过该元件电流的乘积,即

$$P = UI \quad (1-2)$$

当电压的单位为伏特(V)、电流的单位为安培(A)时,功率的单位为瓦特(W)。

元件上的电功率有吸收(取用、消耗)和发出(产生)两种可能,用功率计算值的正负相区别,以吸收(取用)功率为正。在分析电路时,就列写功率计算公式做如下规定。

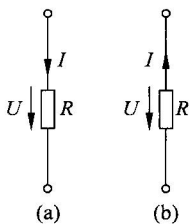


图 1-6 参考方向的关联性

(1) 当电流、电压取关联的参考方向时

$$P = UI$$

(2) 当电流、电压取非关联参考方向时

$$P = -UI$$

在此规定下,将电流 I 和电压 U 数值的正负号如实代入公式,如果计算结果为 $P > 0$ 时,表示元件吸收功率,该元件为负载;反之, $P < 0$ 时,表示元件发出功率,该元件为电源。

【例 1-1】 在图 1-7 所示电路中,已知: $U_{S1} = 15V$, $U_{S2} = 5V$, $R = 5\Omega$,试求电流 I 和各元件的功率。

解 由图中电流的参考方向,可得

$$I = \frac{U_{S1} - U_{S2}}{R} = \frac{15 - 5}{5} = 2A$$

电流为正值,说明电流参考方向与实际方向一致。

根据对功率计算的规定,可得

元件 U_{S1} 的功率

$$P_{S1} = -U_{S1}I = -15 \times 2 = -30W \text{ (发出功率)}$$

元件 U_{S2} 的功率

$$P_{S2} = U_{S2}I = 5 \times 2 = 10W \text{ (吸收功率)}$$

元件 R 的功率

$$P_R = I^2 R = 2^2 \times 5 = 20W \text{ (吸收功率)}$$

由本例可看出,电源发出的功率等于各个负载吸收的功率之和,即

$$30W = 10W + 20W$$

按照能量守恒定律,对所有的电路来说,上述结论均成立,称为功率平衡,记为

$$\sum P = 0$$

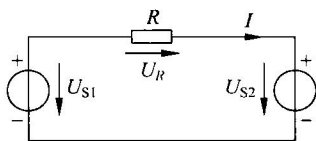


图 1-7 例 1-1 图

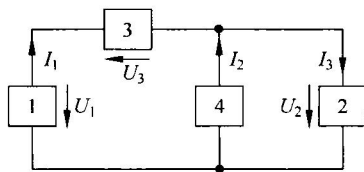


图 1-8 例 1-2 图

【例 1-2】 在图 1-8 所示的电路中,已知: $U_1 = 20V$, $I_1 = 2A$, $U_2 = 10V$, $I_2 = -1A$, $U_3 = -10V$, $I_3 = -3A$,试求图中各元件的功率,并说明各元件的性质。

解 由功率计算的规定,可得

元件 1 功率

$$P_1 = -U_1 I_1 = -20 \times 2 = -40W$$

元件 2 功率

$$P_2 = U_2 I_2 = 10 \times (-1) = -10W$$

元件 3 功率

$$P_3 = -U_3 I_1 = -(-10) \times 2 = 20W$$

元件4功率

$$P_4 = -U_2 I_3 = -10 \times (-3) = 30 \text{ W}$$

元件1和元件2发出功率是电源,元件3和元件4吸收功率是负载。满足 $\sum P = 0$,说明计算结果无误。

需要注意的是,在电路分析计算中的两套正负号。列写电路方程时,根据电流和电压的参考方向得出公式中的正负号;代入数据时要如实代入电流和电压数值的正负号。

1.4 电路的状态

电路在不同的工作条件下,将分别处于通路、开路和短路状态。现以图1-9所示电路为例,分别讨论每一种状态的特点。

1. 通路

在图1-9(a)中,当电源与负载接通时,电路称为通路。电路中的电流,也就是电源的输出电流

$$I = \frac{E}{R_o + R_L} = \frac{U_s}{R_o + R_L}$$

式中, R_L 为负载电阻; R_o 为电源的内阻,通常 R_o 很小。负载两端的电压也就是电源输出电压

$$U = E - IR_o = U_s - IR_o$$

通路时的功率平衡关系式为

$$P_{R_L} = P_E - P_{R_o} = EI - I^2 R_o = UI$$

式中, EI 为电源产生的功率; UI 为负载消耗的功率; $I^2 R_o$ 为电源内部损耗的功率。

通路状态下,电路中有了电流,就有了功率的输送和转换。这时电源产生的电功率等于负载消耗的功率与电源内部损耗的功率之和。由此得出,电源输出的电流和功率取决于负载的大小。

电源和负载等电气设备在一定工作条件下其工作能力是一定的。为表示电气设备的正常工作条件和工作能力所规定的数据统称电气设备的额定值。它包括额定电压 U_N 、额定电流 I_N 和额定功率 P_N 等。额定值一般都列入产品说明书中,或直接标明在设备的铭牌上,使用时务必遵守这些规定。如果超过或低于这些额定值,都有可能引起电气设备的损坏或降低使用寿命,或使其不能发挥正常的效能。例如一个标有 1 W 、 400Ω 的电阻,即表示该电阻的阻值为 400Ω ,额定功率为 1 W ,由 $P = I^2 R$ 的关系,可求得它的额定电流为 0.05 A 。使用时电流值超过 0.05 A ,就会使电阻过热,严重时甚至立即损坏。

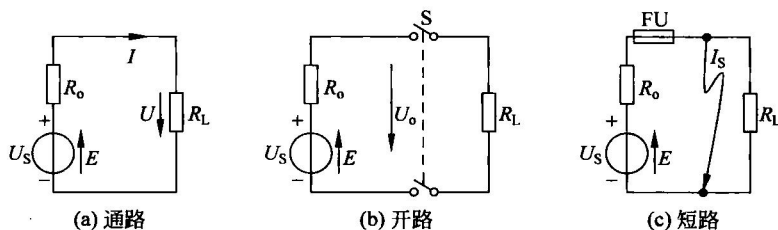


图 1-9 电路的三种状态