

普通高等教育“十二五”规划教材

电路分析 实用教程

PUTONG GAODENG JIAOYU SHIERWU GUIHUA JIAOCAI DIANLU FENXI SHIYONG JIAOCHENG

窦建华 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材

电路分析实用教程

主 编 窦建华

副主编 杨学志

参 编 王 玫 郭铭铭 方 静

赵 烨 潘 敏

主 审 王志功

机械工业出版社

本书是依据电子电气基础课程教学指导分委员会制订的“电路分析基础”课程教学基本要求编写的。主要内容有：电路的基本概念与定律、电路的等效变换、电路的基本分析方法、电路的基本定理、动态电路分析、正弦稳态电路分析、耦合电感和理想变压器、二端口网络、三相电路和 PSpice 软件使用简介。本书内容简明扼要、难易适中、通俗易懂。书中包含了许多工程和生活中的电路应用实例，有利于加深学生对理论知识的理解。本书可供高等学校计算机、电子、通信等专业的学生和教师使用，也可供专业技术人员使用和参考。

本书配有免费电子课件，欢迎选用本书作教材的老师登录 www.cmpedu.com 注册下载。

图书在版编目 (CIP) 数据

电路分析实用教程/窦建华主编. —北京：机械工业出版社，2012.5
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-111-37727-6

I. ①电… II. ①窦… 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 (2012) 第 044279 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 卢若薇

版式设计：霍永明 责任校对：张 媛

封面设计：赵颖喆 责任印制：乔 宇

北京机工印刷厂印刷 (三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2012 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 14.25 印张 · 353 千字

标准书号：ISBN 978-7-111-37727-6

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

读者购书热线：(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

为了适应当前教育与教学改革的需要,培养知识面宽、能力强、有创新精神的高素质应用型人才,根据教育部最新颁布的高等学校电气与电子信息类专业“电路分析基础”和“电路理论基础”课程的基本要求以及新的课程体系和教学内容,充分应用现代电子科技发展所取得的最新成果,结合编者多年的教学实践经验特编写了本书。

“电路分析基础”课程是电气与电子信息类专业的重要专业基础课,不仅要为后续课程的学习打下扎实的电路理论基础,同时还要通过本课程的学习,培养学生应用所学理论提高分析问题和解决问题的能力。本书编写的基本思路是:突出知识重点;在内容的深度与广度、传统内容与现代内容的关系上合理取舍;在不影响教学体系完整的前提下,省去繁杂的数学推导;强调概念内涵的发掘及其应用;扩大知识面,注重电路理论的实际工程应用;力争内容准确清楚,简明扼要,通俗易懂;在每个章节后配有一定数量、难易适当、紧扣教学内容的习题,并给出了参考答案以供读者参考。附录介绍了 PSpice 软件在电路分析中的应用。

全书涵盖了本学科的基本内容,分为电阻电路分析、动态电路分析和正弦稳态电路分析三部分。可供普通高等院校电子、通信、计算机等专业的本科生和大专学生选用,也可作为有关工程技术人员的参考书。

本书共 9 章,其中南京工程学院王玫老师编写了第 1、2 章,合肥工业大学郭铭铭老师编写了第 3 章,窦建华老师编写了第 4、6、7、8 章,方静、赵烨老师编写了第 5 章,杨学志老师编写了第 9 章,潘敏老师编写了附录。窦建华老师任主编,负责全书的统稿,杨学志老师为副主编。东南大学王志功教授任主审,对全书进行了认真细致的审阅,并提出了许多宝贵的意见和建议。在编写的过程中编者参考了许多专家和学者的著作,为本书的编写带来了很大的帮助,在此表示诚挚的谢意。

由于编者的水平和经验有限,书中难免存在不足和错漏之处,敬请读者批评指正。意见请寄:合肥工业大学计算机学院(邮编 230009) E-mail: jsjtxdjh@hfut.edu.cn

编 者

目 录

前言

第1章 电路的基本概念与定律..... 1

1.1 电路与电路模型..... 1

1.1.1 电路..... 1

1.1.2 电路模型..... 2

1.2 电路的基本变量..... 2

1.2.1 电流及其参考方向..... 3

1.2.2 电压及其参考极性..... 3

1.2.3 关联参考方向..... 4

1.2.4 功率和效率..... 4

1.3 基尔霍夫定律..... 6

1.3.1 基尔霍夫电流定律..... 7

1.3.2 基尔霍夫电压定律..... 8

1.4 电阻元件..... 10

1.4.1 电阻元件的定义..... 10

1.4.2 电阻元件的功率..... 11

1.4.3 开路和短路..... 11

1.4.4 特殊的电阻元件..... 12

1.5 独立电源..... 13

1.5.1 理想电压源..... 13

1.5.2 理想电流源..... 13

1.5.3 实际电源的模型..... 14

1.6 受控电源..... 15

1.6.1 受控电源的性质..... 15

1.6.2 受控电源的应用..... 16

1.6.3 电位及其计算..... 18

习题1..... 20

第2章 电路的等效变换..... 23

2.1 等效电路的概念..... 23

2.2 电阻的串联和并联..... 23

2.2.1 电阻的串联..... 23

2.2.2 电位器及其应用..... 25

2.2.3 分压器的负载效应..... 26

2.2.4 电阻的并联..... 28

2.2.5 电阻串并联混合电路..... 31

2.3 电阻 Y- Δ 等效变换..... 34

2.4 惠斯通电桥..... 37

2.5 输入电阻..... 38

2.6 电源的等效变换..... 40

2.6.1 电压源的串联与并联..... 40

2.6.2 电流源的串联与并联..... 41

2.6.3 电源与元件的串并联..... 41

2.6.4 实际电源的等效..... 42

习题2..... 44

第3章 电路的基本分析方法..... 47

3.1 电路的图..... 47

3.2 网孔电流法..... 48

3.3 回路电流法..... 51

3.4 节点电压法..... 52

习题3..... 56

第4章 电路的基本定理..... 59

4.1 叠加定理..... 59

4.2 替代定理..... 60

4.3 戴维南定理..... 62

4.4 诺顿定理..... 67

4.5 最大功率传输定理..... 68

4.6 特勒根定理..... 71

4.7 互易定理..... 73

4.8 对偶原理..... 74

习题4..... 75

第5章 动态电路分析..... 78

5.1 动态元件..... 78

5.1.1 电容元件..... 78

5.1.2 电感元件..... 80

5.1.3 电容、电感元件的串联 与并联..... 82

5.1.4 电容、电感元件的应用..... 83

5.2 电路初始值的计算..... 84

5.2.1 换路定律	84	6.6 正弦稳态电路的功率	135
5.2.2 初始值的确定	85	6.6.1 有功功率和无功功率	135
5.3 一阶电路分析	86	6.6.2 复功率	137
5.3.1 零输入响应	86	6.6.3 功率因数的提高	138
5.3.2 零状态响应	91	6.6.4 最大功率传输	139
5.3.3 全响应和三要素法	94	6.7 电路的谐振	140
5.3.4 一阶电路的实际应用	97	6.7.1 串联谐振	141
5.4 二阶电路的分析	98	6.7.2 并联谐振	142
5.4.1 二阶电路的零输入响应	98	习题6	144
5.4.2 二阶电路的零状态响应 与全响应	102	第7章 耦合电感和理想变压器	149
5.4.3 并联二阶电路的分析	104	7.1 耦合电感的伏安关系	149
5.5 阶跃函数和阶跃响应	107	7.2 耦合电感的去耦等效	151
5.5.1 阶跃函数	107	7.2.1 耦合电感的串联	151
5.5.2 阶跃函数的作用	108	7.2.2 耦合电感的并联	153
5.5.3 阶跃函数响应	109	7.2.3 耦合电感的受控源等效 电路	154
习题5	110	7.2.4 耦合电感的T形等效电 路	155
第6章 正弦稳态电路分析	114	7.3 空心变压器的分析	158
6.1 正弦量的基本概念	114	7.4 理想变压器的分析	161
6.1.1 正弦量的三要素	114	习题7	164
6.1.2 正弦量的相位差	115	第8章 二端口网络	166
6.1.3 正弦量的有效值	116	8.1 二端口网络的定义	166
6.2 正弦量的相量表示	117	8.2 二端口网络的网络参数	166
6.2.1 复数及其运算	117	8.2.1 Y参数	166
6.2.2 正弦量的相量	119	8.2.2 Z参数	168
6.3 基本元件伏安关系的相量形 式	121	8.2.3 H参数	170
6.3.1 电阻元件的相量形式	121	8.2.4 T参数	172
6.3.2 电容元件的相量形式	121	8.3 网络参数间的转换	173
6.3.3 电感元件的相量形式	122	8.4 具有端接的二端口网络	174
6.4 基尔霍夫定律的相量形式	123	8.4.1 输入阻抗	175
6.4.1 基尔霍夫电流定律的相 量形式	123	8.4.2 网络增益	176
6.4.2 基尔霍夫电压定律的相 量形式	125	8.5 二端口网络的连接	179
6.5 正弦稳态电路的分析	126	8.5.1 二端口网络的串联	179
6.5.1 阻抗和导纳	126	8.5.2 二端口网络的并联	181
6.5.2 相量模型	127	8.5.3 二端口网络的级联	182
6.5.3 相量模型的分析方法	129	习题8	183
		第9章 三相电路	186
		9.1 三相电源	186

9.1.1 电源的星形联结	187	附录 PSpice 软件使用简介	199
9.1.2 电源的三角形联结	188	A.1 绘制原理图	199
9.2 三相电路负载的连接	188	A.2 软件应用举例	204
9.2.1 负载的三角形联结	189	A.2.1 直流分析	204
9.2.2 负载的星形联结	190	A.2.2 交流分析	207
9.2.3 三相电路的功率	194	A.2.3 暂态响应分析	208
9.3 安全用电常识	195	A.2.4 暂态交流响应分析	211
9.3.1 触电事故	195	习题参考答案	215
9.3.2 保护接地与保护接零	196	参考文献	222
习题9	197		

第1章 电路的基本概念与定律

电路的基本概念和基本定律是电路分析的基础，本章主要介绍电路模型、电路的基本变量、电路的基本元件以及电路的基尔霍夫定律。

1.1 电路与电路模型

1.1.1 电路

电路(Circuit)是由各种电气器件和设备相互连接而形成的电流通路。人们使用不同的电路来完成各种任务。电路具有传输、变换、处理信号和存储能量等功能。例如，供电电路用来转换、传输电能；整流电路可以将交流电变换成直流电；放大电路能把微弱的信号变成强信号；滤波电路能通过有用的信号，滤除无用的信号；计算机中的存储器电路可用来存放数据等。根据电路的实际几何尺寸和电路的工作信号波长，电路可分为集中参数电路和分布参数电路。根据电路元件的性质，电路又分为线性电路和非线性电路。

1. 集中参数电路

如果实际电路的几何尺寸远小于其工作信号的波长时，称为集中参数电路。集中参数电路的特点是电路中任意两点间的电压和任意支路上的电流是完全确定的，与器件的几何尺寸和空间位置无关。

以常见的收音机电路为例，如某广播电台的工作频率 $f=97.1\text{MHz}$ ，传播速度为光速 $c=3\times 10^8\text{m/s}$ ，则信号频率的波长 λ 为

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8 \text{m/s}}{97.1 \times 10^6 \text{Hz}} \approx 3.09 \text{m}$$

可见收音机电路的尺寸远小于其工作频率的波长，所以在该条件下的电路是集中参数电路。又如，某一计算机CPU芯片的尺寸为 $3.5\text{cm} \times 3.5\text{cm}$ ，工作频率为 $f=200\text{MHz}$ ，则相应的波长 $\lambda=1.5\text{m}$ ，可见芯片的尺寸也远小于工作频率的波长，因此该芯片也视为集中参数电路。

从以上两例可看出，工作信号频率越低，波长越长。所以，工作信号频率较低的电路，它的实际电路尺寸越远小于其工作频率的波长。本书中所讨论的电路和电路元件均满足集中参数电路的条件，为叙述方便把集中参数电路简称为电路。

2. 分布参数电路

如果实际电路的几何尺寸大于其工作信号的波长时，称为分布参数电路。分布参数电路的特点是电路中的电压和电流不仅是时间的函数，还与器件的几何尺寸和空间位置有关。

在电力系统中，远距离的高压电力传输线是典型的分布参数电路，因为 50Hz 电压的波长虽然有 6000km ，但输电线路长达几百甚至几千千米(公里)，电路的尺寸远大于工作信号的波长。

在通信系统中发射天线的实际尺寸虽不太大,但发射信号的频率很高,波长很短,也应作为分布参数电路处理。

分布参数电路与集中参数电路的分析方法完全不同,分布参数电路将在其他课程中讨论。

3. 线性电路与非线性电路

由线性代数方程或线性微积分方程描述的电路称为线性电路(Linear Circuit)。线性电路由独立源、线性受控源、线性无源元件构成。其中,线性无源元件主要是指电阻(Resister)、电容(Capacitor)、电感(Inductance)等基本线性元件。而含有二极管(Diode)、晶体管(Transistor)等非线性元件的电路称为非线性电路(Nonlinear Circuit),它在工程应用中颇为重要。线性电路可以作为非线性电路的近似模型。本书主要研究线性电路的理论和定理,为后续课程研究非线性电路奠定基础。

1.1.2 电路模型

1. 实际电路

实际电路都是由各种电器元件,如电阻器、电容器、电感线圈、变压器、晶体管、电源等连接而成。手电筒电路就是一个简单的例子,如图 1-1a 所示,它是由电池、灯泡、手电筒筒体(相当于导线)、开关组成。

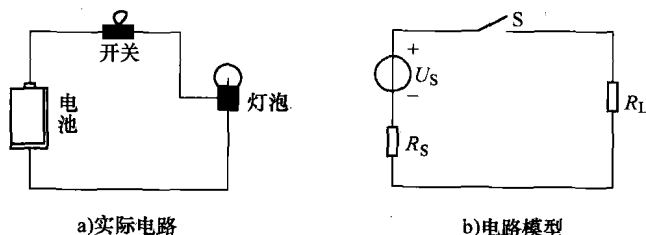


图 1-1 手电筒电路

2. 电路模型

为了对实际电路进行分析和用数学公式描述,常将实际元件理想化,即在一定的条件下突出实际元件的主要性质,忽略其次要性质,把它近似地看做理想电路元件。例如,一个实际的电阻中有电流流过时,它除了对电流呈现阻力的性质外,还会产生磁场,即电感的性质,但由于产生的电感量极小,可忽略不计,所以可以把它看成是一个理想的电阻元件。一个实际的电源可以看成是一个理想的电源和一个理想的电阻的串联组合,电阻就代替了电源中的内阻。诸如此类的例子很多,不一一列举。

由理想电路元件组成的电路就是实际电路的电路模型。图 1-1b 所示为手电筒电路的电路模型,其中,灯泡是电阻元件,参数为电阻 R_L ; 电池是电源元件,参数为电压源 U_s 和内阻 R_s ; 筒体是连接电池与灯泡的导线,可认为是一个无电阻的导体。

本课程研究的电路就是指从实际电路中抽象出来的理想电路模型。

1.2 电路的基本变量

电路的特性由电流、电压、功率等物理量来描述,电路分析的任务就是研究电路中的电

流、电压和功率以及它们之间的关系。

1.2.1 电流及其参考方向

电流产生的必要条件是电路必须是闭合路径。在图 1-1b 电路中,当开关闭合时,电路中才有电流。电流是由电荷有规则的定向运动形成的,单位时间内通过导体横截面的电荷量称为电流。即

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

式中, q 为电荷量,单位为 C(库仑); t 为时间,单位为 s(秒)。

在国际单位制中,电流的单位为 A(安培),简称安。此外,电流也可以用 mA(毫安)、 μA (微安)、nA(纳安)等表示,它们的关系是 $1\text{A} = 10^3\text{mA}$, $1\text{mA} = 10^3\mu\text{A}$, $1\mu\text{A} = 10^3\text{nA}$ 。

如果电流的大小和方向都不随时间变化,称其为直流电流(Direct Current),常用大写字母 I 表示。如果电流的大小和方向都随时间变化,则称之为交流电流(Alternating Current),常用小写字母 i 表示。

电流的实际方向为正电荷移动的方向。但在复杂电路分析中,电流的实际方向很难确定。为了解决这个问题,我们引用“参考方向”这个概念,即在求解电路中的电流时,先假设电流的参考方向。电流的参考方向可用箭头表示,也可用双下标表示。

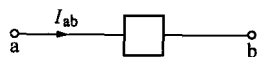


图 1-2 电流的参考方向

如图 1-2 所示,箭头的方向和 I_{ab} 都表示电流参考方向是由 a 点流向 b 点。然后根据假设的电流参考方向进行计算,如果计算出的电流为正值,说明假设的电流参考方向与实际电流方向相同;如果计算出的电流为负值,说明假设的电流参考方向与实际电流方向相反。

在测量电流时,应该把电流表串接到电路中,如图 1-3a 所示。初学者经常将电流表并在元件两端去测电流,如图 1-3b 所示,考虑一下这样接为什么不对?

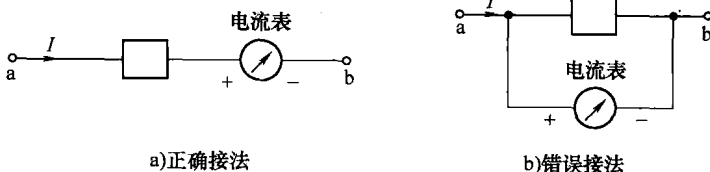


图 1-3 电流表的接法

1.2.2 电压及其参考极性

电场力把单位正电荷从 a 点移到 b 点所做的功称为 a、b 两点间的电压,可表示为

$$u(t) = \frac{dw}{dq} \quad (1-2)$$

式中, q 为由 a 点移到 b 点的电荷量,单位为 C(库仑); w 为电荷由 a 点移到 b 点过程中获得或失去的能量,单位为 J(焦耳)。

在国际单位制中,电压的单位为 V(伏特),简称伏。电压还可以用 kV(千伏)、mV(毫伏)、 μV (微伏)、nV(纳伏)等表示,它们的关系是 $1\text{kV} = 10^3\text{V}$, $1\text{V} = 10^3\text{mV}$, $1\text{mV} = 10^6\text{nV}$ 。

如果电压的大小和极性都不随时间变化,就称为直流电压,用符号 U 表示。如果电压

的大小和极性都随时间变化,则称为交流电压,用符号 u 表示。

电压的真实极性为高电位指向低电位,即电压降的方向。同电流一样,需要在计算电压前为电压规定参考极性。电压的参考极性是在元件或电路两端用“+”表示高电位,用“-”表示低电位,如图1-4所示。如果计算得到的电压为正值,则说明电压的真实极性与参考极性相同;如果计算得到的电压为负值,则说明电压的真实极性与参考极性相反。

在测量电压时,应该把电压表并接到元件或电路两端,如图1-5所示。

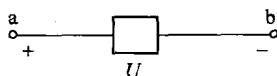


图 1-4 电压的参考极性

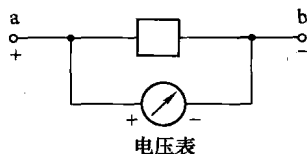


图 1-5 电压表的接法

1.2.3 关联参考方向

在分析电路时,电流和电压都要假设参考方向,而且可任意假设。为了分析方便,我们常采用关联参考方向,就是将元件上的电压参考方向与电流参考方向取为一致,即电流从电压正端(标“+”号的端钮)流入,从负端(标“-”号的端钮)流出,如图1-6所示。在采用关联参考方向后,电路图上只需标出电流的参考方向或电压的参考极性中任何一个即可。若电流、电压的参考方向取得不一致,则称为非关联参考方向,如图1-7所示。

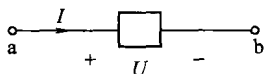


图 1-6 关联参考方向

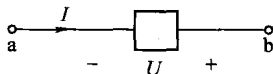


图 1-7 非关联参考方向

例 1-1 判断图1-8部分电路的端口电压、电流的参考方向。

解 图1-8a、b电路中标的电流参考方向都是从电压正端流入负端,满足关联参考方向的规则,故为关联参考方向。图1-8c电路中标的电流参考方向是从电压负端流入正端,故为非关联参考方向。

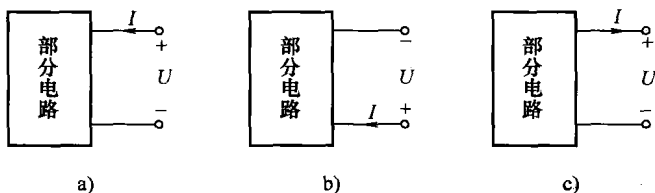


图 1-8 例 1-1 图

1.2.4 功率和效率

单位时间内吸收或产生的电能,称为功率(Power),即

$$p(t) = \frac{dw}{dt} = \frac{dw}{dq} \frac{dq}{dt} = u(t)i(t) \quad (1-3a)$$

在直流的情况下,则为

$$P = UI \quad (1-3b)$$

当电压、电流为关联参考方向时, 计算功率的公式为 $P = UI$; 当电压、电流为非关联参考方向时, 计算功率的公式应为 $P = -UI$ 。不论用哪个公式, 当算得的功率 $P > 0$ 时, 电路或元件吸收功率; $P < 0$ 时, 电路或元件产生功率。

输出功率(P_o)与输入功率(P_i)的比率, 称为效率(Efficiency), 通常用百分比表示, 即

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} \times 100\% \quad (1-4)$$

例如, 如果输入功率为 80W, 输出功率为 30W, 则效率为

$$\eta = \frac{30}{80} \times 100\% = 37.5\%$$

在电路中, 输出功率总是小于输入功率, 因为电路内部总要消耗功率, 这种内部的功率消耗叫做功率损耗。输出功率等于输入功率减去功率损耗, 即

$$P_o = P_i - P_{\text{loss}} \quad (1-5)$$

例 1-2 电路如图 1-9 所示。(1) 计算各元件的功率, 并指出是产生功率还是吸收功率; (2) 计算元件 4 的效率; (3) 验证电路是否满足能量守恒定律。

解 (1) 元件 1 上的电压、电流为关联参考方向, 由 $P = UI$, 得

$$P_1 = (5 \times 1) \text{ W} = 5 \text{ W}$$

由于 $P_1 > 0$, 故元件 1 吸收功率。

元件 2 上的电压、电流为非关联参考方向, 由 $P = -UI$, 得

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

由于 $P_2 < 0$, 故元件 2 产生功率。

元件 3 上的电压、电流为非关联参考方向, 由 $P = -UI$, 得

$$P_3 = -(2 \times 3) \text{ W} = -6 \text{ W}$$

由于 $P_3 < 0$, 故元件 3 产生功率。

元件 4 上的电压、电流为非关联参考方向, 由 $P = -UI$, 得

$$P_4 = -[(-2) \times 2] \text{ W} = 4 \text{ W}$$

由于 $P_4 > 0$, 故元件 4 吸收功率。

(2) 由计算结果知, 元件 2 和元件 3 共产生了 9W 功率, 相当于是电路的输入功率, 元件 4 消耗 4W 功率, 相当于电路的输出功率, 故元件 4 的效率为

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} \times 100\% = \frac{4}{9} \times 100\% = 44.4\%$$

(3) 电路的总功率为 $\Sigma P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 0$, 电路中产生功率等于吸收功率, 故满足能量守恒定律。

以后我们可以利用能量守恒定律来检查整个电路中功率计算的结果是否正确。

练 习 题

1-1 电路如图 1-10 所示, 试问: (1) 端口电压和电流的参考方向是否关联? (2) 计算各电路的功率, 并指出是吸收功率还是产生功率。

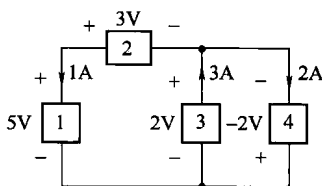


图 1-9 例 1-2 图

[关联, 2W, 吸收功率; 非关联, -2W, 产生功率; 非关联, 2W, 吸收功率; 关联, -2W, 产生功率]

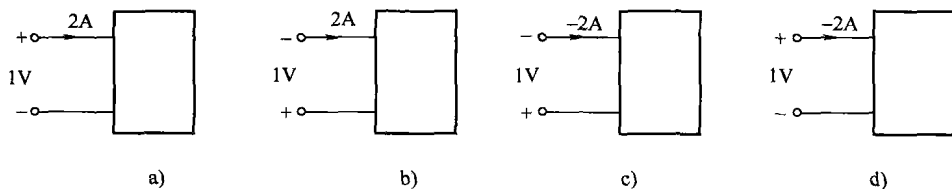


图 1-10 练习题 1-1 图

1-2 各电路的参考方向和参数如图 1-11 所示, 试回答以下问题:

- (a) 元件 A 吸收功率 30W, 求电流 I_1 ; (b) 元件 B 吸收功率 15W, 求电流 I_2 ;
(c) 元件 C 产生功率 10W, 求电压 U_1 ; (d) 元件 D 产生功率 -15W, 求电压 U_2 。

[6A; -3A; -2V; 3V]

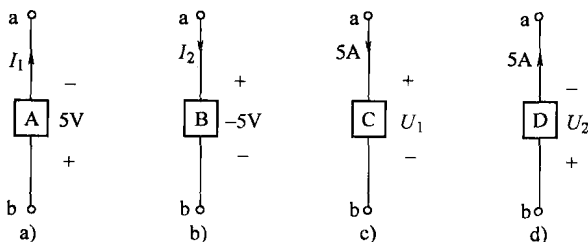


图 1-11 练习题 1-2 图

1.3 基尔霍夫定律

基尔霍夫定律(Kirchhoff's Law, KL)是电路理论的基石, 是分析电路的重要依据。许多重要的电路定理、电路的分析方法都是以基尔霍夫定律为“源”推导、证明、归纳总结得出的。为了叙述问题方便, 在讨论基尔霍夫定律之前, 先介绍几个电路中的常用术语。

1. 支路

每一个二端元件视为一条支路(Branch), 图 1-12 电路中的 1、2、3、4、5 元件, 分别为 5 条支路。流经元件的电流和元件的端电压称为支路电流和支路电压。为简便起见, 也常把流过同一个电流的各个元件的串联组合称为一条支路, 如图 1-12 中的 4 元件和 5 元件可看成是一条支路。

2. 节点

电路中两个或两个以上电路元件的连接点称为节点(Node)。图 1-12 电路中有 3 个节点。如果把 4 元件和 5 元件看成是一条支路, 节点 3 就不存在了。所以, 为简便起见, 通常把 3 个或 3 个以上元件的连接点称为节点。

3. 回路

电路中任一闭合路径称为回路(Loop)。图 1-12 电路中的 1、2 元件; 2、3 元件; 3、4、5 元件; 1、3 元

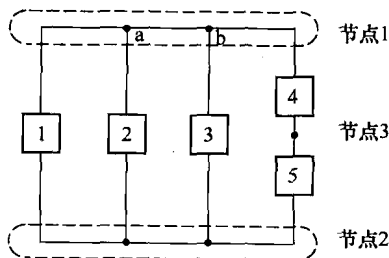


图 1-12 常用术语解释电路

件；2、4、5元件；1、4、5元件分别构成6个回路。

4. 网孔

内部不包含支路的回路称为网孔 (Mesh)。图 1-12 电路中的 1、2 元件；2、3 元件；3、4、5 元件分别构成 3 个网孔。

5. 网络

网络 (Network) 指较多元件组成的电路。至少含有一个独立电源的网络称含源网络，不含独立电源的网络称无源网络。通常网络与电路这两个名词没有严格的区别，可以通用。

1.3.1 基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律 (Kirchhoff's Current Law, KCL) 是对电路中各节点上的支路电流的约束。表述为：在任一时刻，流入或流出任一节点或封闭面的所有支路电流的代数和为零。其关系式为

$$\sum_{k=1}^b i_k = 0 \quad (1-6a)$$

式中， i_k 为流入或流出节点的第 k 条支路的电流； b 为节点处的支路数。

在图 1-13a 电路中，a 节点的电流分别为 i_2 、 i_4 和 i_5 ，参考方向如图中所示。假设流入节点的电流为正，流出节点的电流为负，该节点的 KCL 方程为

$$i_2 + i_4 - i_5 = 0$$

对应图 1-13a 电路，S 封闭面的电流分别为 i_1 、 i_2 和 i_3 ，流入该封闭面的 KCL 方程为

$$i_1 + i_2 - i_3 = 0$$

可看出 KCL 不仅应用于节点，也可以应用于电路中的任一封闭面。

对应图 1-13b， N_1 电路和 N_2 电路之间只有一条支路连接，由 KCL 可知， $i=0$ 。

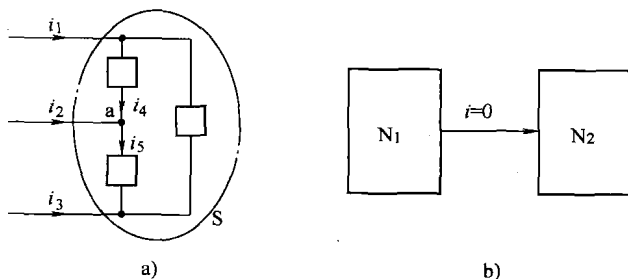


图 1-13 KCL 应用电路

KCL 定律还可以表示为：流入该节点的电流，等于流出该节点的电流。其关系式为

$$\sum i_i = \sum i_o \quad (1-6b)$$

所以，在图 1-13a 电路中，a 节点的电流方程又可写为

$$i_2 + i_4 = i_5$$

由此可知，KCL 仅仅是支路电流的约束关系，它与支路元件的性质无关，因此 KCL 不仅适用于线性电路，也适用于非线性电路。

注意：在列写 KCL 方程时，应先标出所有电流的参考方向。已知电流的参考方向常是给定的，未知电流的参考方向则可以任意假设。若选流入节点的电流为正，则流出节点的电

流为负。若选流入节点的电流为负，则流出节点的电流为正。两种选取方法是等效的。

例 1-3 电路如图 1-14 所示，已知 $i_1 = 4\text{A}$ ， $i_4 = 2\text{A}$ ， $i_B = 1\text{A}$ 。求电路中其他未知电流的值。

解 选流入节点的电流为正，流出节点的电流就为负。图中封闭面的 KCL 方程为

$$i_A + i_4 - i_B = 0$$

则
$$i_A = -i_4 + i_B = (-2 + 1)\text{A} = -1\text{A}$$

图中 a 节点的 KCL 方程为

$$i_A - i_1 - i_3 = 0$$

则
$$i_3 = i_A - i_1 = (-1 - 4)\text{A} = -5\text{A}$$

图中 c 节点的 KCL 方程为

$$i_2 + i_3 - i_B = 0$$

则
$$i_2 = i_B - i_3 = [1 - (-5)]\text{A} = 6\text{A}$$

计算结果 i_A 和 i_3 为负值，说明 i_A 和 i_3 的实际电流方向与电路中标的参考方向相反。

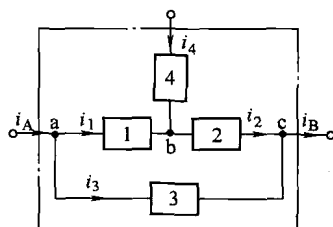


图 1-14 例 1-3 图

1.3.2 基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电压定律 (Kirchhoff's Voltage Law, KVL)，是对电路的各个回路中电压的约束。表述为：对于电路中的任一回路，在任一时刻，沿着该回路的各元件电压降的代数和为零，其关系式为

$$\sum_{k=1}^b U_k = 0 \quad (1-7a)$$

式中， u_k 为回路中第 k 个元件的电压； b 为回路中的元件数。

图 1-15 所示为某个电路中的一个闭合回路，电压极性和绕行方向如图中所示。根据 KVL，该回路中的各元件电压降之和等于零。于是 KVL 方程为

$$U_1 - U_2 - U_3 + U_4 = 0$$

式中，按假设的绕行方向， U_1 和 U_4 都是电压降的方向，所以取正； U_2 和 U_3 都是电压升的方向，所以取负。

若将绕行方向反过来，KVL 方程为

$$-U_1 + U_2 + U_3 - U_4 = 0$$

可以看出，相当于在原式上乘以 -1 。

因此不论按照哪种绕行方向写出的 KVL 方程，计算结果都相同。所以，列 KVL 方程前必须先规定绕行方向。

KVL 的另一表述为：在电路的任一回路中，沿着该回路的各元件电压降的总和等于电压升的总和。其关系式为

$$\sum U_{\text{down}} = \sum U_{\text{up}} \quad (1-7b)$$

根据式(1-7b)，图 1-15 电路的 KVL 方程可写为

$$U_1 + U_4 = U_2 + U_3$$

可以看出，式(1-7a)和式(1-7b)是等价的。

由上可知，KVL 方程反映了任一回路中各元件的电压关系，它与元件的性质无关。因

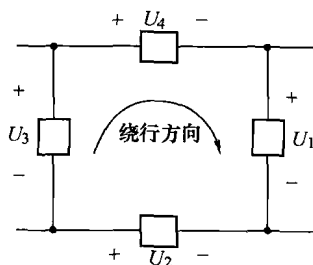


图 1-15 电路中的闭合回路

此 KVL 不仅适用于线性电路, 也适用于非线性电路。

注意: 在列写 KVL 方程时, 应先标出绕行方向。

例 1-4 电路如图 1-16 所示, 已知 $U_1 = U_6 = 2\text{V}$, $U_2 = U_3 = 3\text{V}$, $U_4 = -7\text{V}$, 试求 U_5 的值。

解 设 U_5 的参考极性如图中所示。从 a 点出发, 顺时针方向绕行一周, 根据 KVL 可得

$$-U_1 + U_2 + U_3 + U_4 - U_5 - U_6 = 0$$

式中, 参考极性所表示的电压降方向与绕行方向一致者取正号, 如 U_2 、 U_3 、 U_4 ; 否则取负号, 如 U_1 、 U_5 、 U_6 。

整理方程并将已知数据代入得

$$\begin{aligned} U_5 &= -U_1 + U_2 + U_3 + U_4 - U_6 \\ &= [-2 + 3 + 3 + (-7) - 2]\text{V} \\ &= -5\text{V} \end{aligned}$$

解得 U_5 为负值, 说明 U_5 的实际极性与图中所假设的极性相反。

从本题可以看出, 在运用 KVL 时也需要和两套符号打交道。一套是方程中各项前的符号, 其正负取决于各元件电压的参考方向与所选的绕行方向是否一致, 一致取正号, 反之取负号; 另一套符号是每项电压本身的符号, 其正负取决于电压降的实际方向与参考方向是否一致, 一致取正号, 反之取负号。

例 1-5 试求图 1-16 所示电路中 a、b 两点间的电压。

解 a、b 两点间的电压用 U_{ab} 表示, 下标 ab 表示从 a 点到 b 点的电压降。求 U_{ab} 有两条途径。

(1) 沿元件 1、2 的路径计算, 根据 KVL 可得

$$U_{ab} = -U_1 + U_2 = [-2 + 3]\text{V} = 1\text{V}$$

(2) 沿元件 6、5、4、3 的路径计算, 根据 KVL 可得

$$U_{ab} = U_6 + U_5 - U_4 - U_3 = [2 + (-5) - (-7) - 3]\text{V} = 1\text{V}$$

从计算结果中可看出, 任何两点间的电压与所选的路径无关。

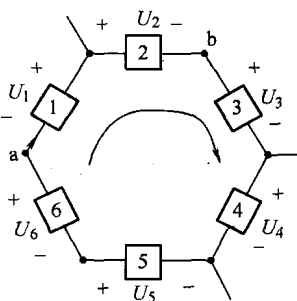


图 1-16 例 1-4、例 1-5 图

练 习 题

1-3 电路如图 1-17 所示, A、B、C 元件上的电压、电流参考方向如图所示, 并知 $I_1 = 3\text{A}$, $U_1 = 12\text{V}$, $U_2 = 4\text{V}$ 。试求 I_2 、 I_3 和 U_3 的值。

$$[I_2 = -3\text{A}, I_3 = 3\text{A}, U_3 = 8\text{V}]$$

1-4 电路如图 1-18 所示, 已知 $i_1 = 2\text{A}$, $i_3 = -1\text{A}$, $i_5 = 1.5\text{A}$, $i_6 = 0.5\text{A}$ 。试求流经电阻 R_2 和 R_4 上的电流。

$$[1\text{A}, 2\text{A}]$$

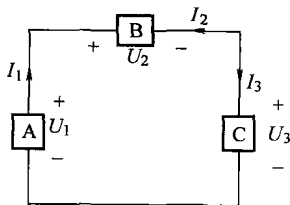


图 1-17 练习题 1-3 图

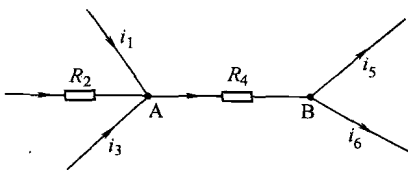


图 1-18 练习题 1-4 图

1.4 电阻元件

电阻元件是由实际电阻器抽象出来的理想化二端元件，灯泡、电炉、扬声器、电动机等实际器件都能等效成电阻元件。

1.4.1 电阻元件的定义

任何一个二端元件，如果在任一时刻的电压和电流之间存在代数关系，亦可以由 $u-i$ 平面上一条曲线所决定，则此二端元件称为电阻元件，简称电阻，用 R 表示。 $u-i$ 平面上的这条曲线称为电阻元件的伏安特性曲线。如果伏安特性曲线是一条过原点的直线，如图 1-19a 所示，这样的电阻元件称为线性电阻元件，其电路符号如图 1-20a 所示。如果伏安特性曲线是一条任意曲线，如图 1-19b 所示，这样的电阻元件称为非线性电阻元件，其电路符号如图 1-20b 所示。本书主要研究线性电阻。

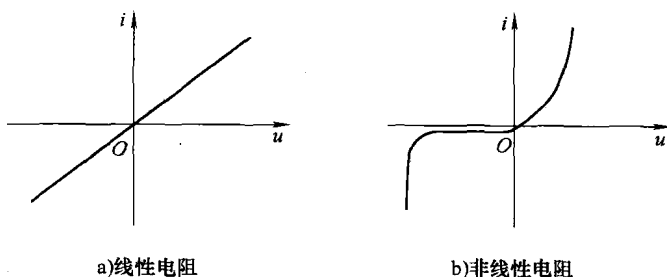


图 1-19 电阻元件的伏安特性曲线

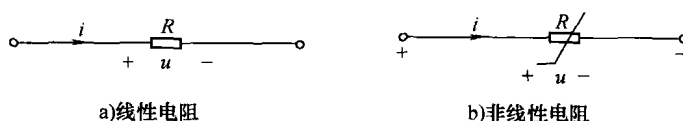


图 1-20 电阻元件的电路模型

当 u 、 i 为关联参考方向时，如图 1-20a 所示，线性电阻的伏安特性符合欧姆定律，即

$$u = Ri \quad (1-8)$$

式中， u 为该电阻两端的电压，单位为 V； i 为流过该电阻的电流，单位为 A； R 为电阻，单位为 Ω 。

在直流电路中一般用大写字母表示，即 $U = RI$ 。

当 u 、 i 为非关联参考方向时，电阻的伏安关系为 $u = -Ri$ 。在直流电路中， $U = -RI$ 。

电阻的倒数称为电导，用符号 G 表示，单位是 S (西门子)，即

$$G = \frac{1}{R} \quad (1-9)$$

在关联参考方向下，有 $i = Gu$ 。在直流电路中， $I = GU$ 。

在国际单位制中，电阻的单位为 Ω (欧姆)。此外，还可用 $k\Omega$ (千欧) 或 $M\Omega$ (兆欧) 表示，它们的关系是， $1M\Omega = 10^3 k\Omega$ ， $1k\Omega = 10^3 \Omega$ 。