



北京市高等教育精品教材立项项目

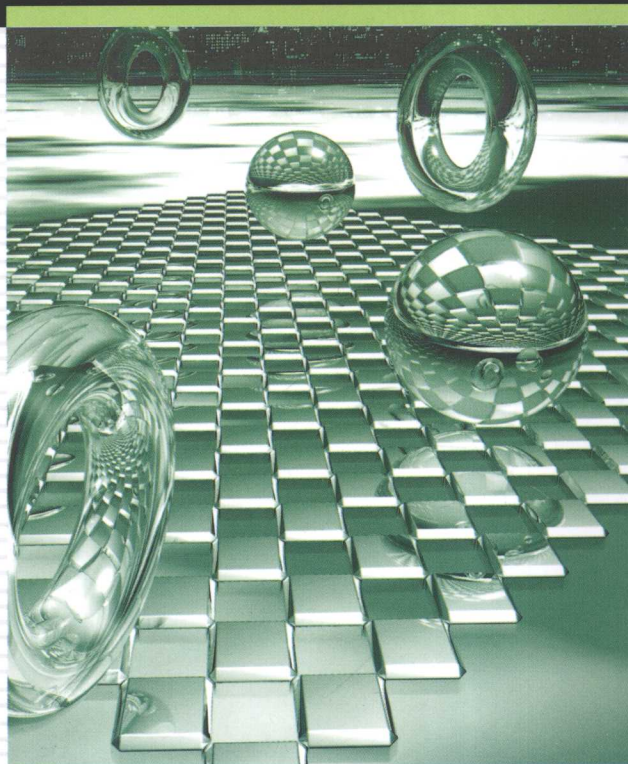
21世纪普通高等教育电子信息类规划教材

电路分析

第2版

DIANLU FENXI

● 许信玉 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



赠电子课件



北京市高等教育精品教材立项项目
21 世纪普通高等教育电子信息类规划教材

电 路 分 析

第 2 版

许信玉 主编

白敏丹
陈晋伦 参编
肖怀宝



机械工业出版社

本书是2007年“电路分析”教材的修订版。新版在内容上仍然覆盖了高等工科院校电路分析课程的教学大纲所要求的内容,在体系结构上基本保留了原书的特色。本书被列入北京市高等教育精品教材立项项目。

本书由电阻电路、动态电路、正弦稳态电路三大块构成内容体系,系统全面地介绍了电路的基本概念、基本理论和基本分析方法。全书共12章,内容包括:电路的基本概念和基尔霍夫定律、电阻电路的等效电路、线性电路的一般分析方法、电路定律、电容元件和电感元件、一阶电路、二阶电路、正弦稳态电路分析、正弦稳态功率和三相电路、耦合电感和理想变压器、双口网络、电路的频率特性,另附有PSpice简介。本书配有较丰富的例题和习题,并附有习题答案。

本书配有电子课件,欢迎选用本书作教材的教师登录 www.cmpedu.com 注册下载或发邮件到 wbj@mail.machineinfo.gov.cn 索取。

本书可作为普通高等学校电子信息工程、通信工程、电子科学与技术等专业的教材,也可供相关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电路分析/许信玉主编. —北京:机械工业出版社,
2009.8

北京市高等教育精品教材立项项目
ISBN 978-7-111-27839-9

I. 电… II. 许… III. 电路分析-高等学校-教材
IV. TM133

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第126057号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)
责任编辑:王保家 版式设计:霍永明 责任校对:张莉娟
封面设计:张静 责任印制:乔宇
北京京丰印刷厂印刷
2009年9月第2版·第1次印刷
184mm×260mm·20印张·496千字
标准书号:ISBN 978-7-111-27839-9
定价:33.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
销售服务热线电话:(010) 68326294
购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643
编辑热线电话:(010) 88379711
封面无防伪标均为盗版

前 言

“电路分析”课程是电子信息工程、通信工程、电子科学与技术、自动化等相关专业必修的一门重要的专业基础课，主要讨论电路的基本概念、基本理论和基本分析方法，为进一步研究电路理论和学习后续课程打下重要的理论基础。

本书作为“电路分析”课程的教材，是根据高等工科院校电路分析课程的教学大纲及基本要求并结合编者多年在教学实践中的体会和经验编写而成的。在编写时立足点放在了以下几个方面：

(1) 内容的编排突出课程体系和结构，有利于教学，有利于学生掌握该课程的知识及内在联系；

(2) 本着教材宜细不宜粗的指导思想，内容由浅入深、循序渐进、阐述透彻、重点突出、层次分明，符合认知规律，便于自学；

(3) 通过精选例题，从不同角度介绍分析问题的方法，使学生掌握电路分析方法的灵活性，力求体现教材不仅是教学内容的载体，更是思维方法和认知过程的载体，有利于培养学生分析问题和解决问题的能力；

(4) 突出与后续相关课程的联系，加强了端口的概念及含受控源电路的分析力度，有利于与后续课程的衔接；

(5) 较好地处理了教学基本要求与加深扩展内容的关系，一般教学与计算机辅助计算工具教学的关系；

(6) 根据重点和难点选编了大量例题和习题，并增加了部分工程性习题、设计性习题和综合性习题。

参加本书编写工作的有许信玉、白敏丹、陈晋伦、肖怀宝。其中第1、2章由白敏丹编写；第5、6、7章由陈晋伦编写；附录由肖怀宝编写；其余各章由许信玉编写。全书经许信玉修改、补充和定稿。在本书的编写过程中，信息工程学院刘剑波院长、史萍副院长及有关教师给予了大力支持和帮助，并提出了许多宝贵意见。在此一并致以衷心的感谢。

本书配有电子课件，欢迎选用本书作教材的教师登录 www.cmpedu.com 注册下载或发邮件到 wbj@mail.machineinfo.gov.cn 索取。

限于编者的水平，书中难免存在不妥之处，敬请读者批评指正。意见请发到 xuxuan@cuc.edu.cn。

编 者

目 录

前言

第1章 电路的基本概念和基尔霍夫定律

定律 1

1.1 电路及电路模型 1

1.2 电路分析的基本变量 3

1.2.1 电流及其参考方向 3

1.2.2 电压及其参考方向 4

1.2.3 功率 5

1.3 基尔霍夫定律 6

1.3.1 基尔霍夫电流定律 6

1.3.2 基尔霍夫电压定律 8

1.4 电阻元件 9

1.5 独立电源 11

1.5.1 电压源 11

1.5.2 电流源 12

1.6 受控电源 13

习题 16

第2章 电阻电路的等效变换 21

2.1 单口网络及等效电路的概念 21

2.2 分压电路和分流电路 22

2.2.1 分压电路 22

2.2.2 分流电路 23

2.3 一些含源单口网络的等效规律 24

2.4 实际电源的电路模型 26

2.4.1 实际电源的两种电路模型 26

2.4.2 电源的两种电路模型间的

等效变换 27

2.5 T形网络和II形网络的等效变换 29

2.6 运算放大器 32

习题 35

第3章 线性电路的一般分析方法 40

3.1 网络拓扑的基本概念 40

3.1.1 图的概念 40

3.1.2 树的概念 41

3.1.3 割集与基本割集 42

3.1.4 回路与基本回路 42

3.2 基尔霍夫定律方程的独立性 43

3.2.1 独立的KCL方程 43

3.2.2 独立的KVL方程 44

3.3 支路分析法 44

3.4 电路的独立变量 45

3.4.1 独立电流变量 46

3.4.2 独立电压变量 46

3.5 网孔分析法 47

3.6 节点分析法 51

3.7 割集分析法 56

3.8 回路分析法 58

习题 59

第4章 电路定理 64

4.1 叠加定理 64

4.2 置换定理 67

4.3 戴维南定理和诺顿定理 69

4.3.1 戴维南定理 69

4.3.2 诺顿定理 71

4.3.3 求等效内阻的一般方法 73

4.3.4 含受控源单口网络的等效

电路 74

4.4 最大功率传递定理 78

4.5 互易定理 81

习题 85

第5章 电容元件和电感元件 91

5.1 电容元件 91

5.1.1 电容元件的定义 91

5.1.2 电容元件的分类 91

5.2 电容元件的电压电流关系 92

5.2.1 电容VCR的微分式 92

5.2.2 电容VCR的积分式 93

5.3 电容电压的连续性和记忆性 94

5.4 电容的储能	95	8.2 复数	145
5.5 电感元件	96	8.2.1 复数及其表示	145
5.5.1 电感元件的定义	96	8.2.2 复数的四则运算	145
5.5.2 电感元件的分类	97	8.3 正弦电压、电流的相量表示	147
5.6 电感元件的电压电流关系	97	8.4 正弦电压、电流的有效值	149
5.6.1 电感 VCR 的微分式	98	8.5 基尔霍夫定律的相量形式	150
5.6.2 电感 VCR 的积分式	99	8.6 三种基本元件电压电流关系 的相量形式	152
5.7 电感电流的连续性和记忆性	100	8.6.1 电阻元件	152
5.8 电感的储能	101	8.6.2 电容元件	153
5.9 电容与电感的对偶关系	102	8.6.3 电感元件	154
习题	102	8.7 阻抗、导纳及相量模型	157
第 6 章 一阶电路	105	8.8 正弦稳态简单电路的分析	159
6.1 一阶电路的典型形式 及其数学模型	105	8.8.1 串联电路的分析	159
6.2 零输入响应	107	8.8.2 并联电路的分析	161
6.2.1 换路的概念和 $u_c(0_+)$ 、 $i_L(0_+)$ 的确定	107	8.8.3 混联电路的分析	162
6.2.2 一阶电路的零输入响应	108	8.8.4 正弦稳态电路的相量图 解法	163
6.3 零状态响应	112	8.9 相量模型的网孔分析法和节点 分析法	165
6.3.1 RC 电路的零状态响应	112	8.10 相量模型的等效	166
6.3.2 RL 电路的零状态响应	114	习题	171
6.4 线性动态电路的叠加原理	116	第 9 章 正弦稳态功率和三相电路	176
6.5 动态电路的工作状态	117	9.1 三种基本元件的正弦稳态功率	176
6.6 直流一阶电路的三要素法	118	9.1.1 电阻元件的正弦稳态功率	176
6.7 阶跃响应	121	9.1.2 电容元件的正弦稳态功率及 储能	178
6.7.1 阶跃函数	121	9.1.3 电感元件的正弦稳态功率及 储能	179
6.7.2 一阶电路的阶跃响应	123	9.2 正弦稳态单口网络的功率	181
6.8 正弦激励下的一阶动态电路	124	9.2.1 单口网络的平均功率	181
习题	127	9.2.2 单口网络的无功功率	184
第 7 章 二阶电路	134	9.2.3 功率因数的提高	185
7.1 二阶电路的典型形式及其 数学模型	134	9.2.4 复功率	188
7.2 RLC 串联电路的零输入响应	135	9.3 正弦稳态最大功率传递定理	189
7.3 RLC 串联电路的零状态响应	139	9.4 三相电路	192
7.4 RLC 串联电路的全响应	140	9.4.1 三相电源	192
7.5 GCL 并联电路的分析举例	140	9.4.2 三相电源的联结	193
习题	141	9.4.3 三相电路的联结及计算	195
第 8 章 正弦稳态电路分析	144		
8.1 正弦稳态电路	144		

9.4.4 三相电路的功率	199	11.6.2 输出阻抗	247
习题	201	11.6.3 开路电压	247
第10章 耦合电感和理想变压器	206	11.6.4 电压传输函数	247
10.1 耦合电感	206	11.6.5 电流传输函数	248
10.1.1 互感及同名端的概念	206	习题	249
10.1.2 耦合电感的伏安关系	208	第12章 电路的频率特性	254
10.2 耦合电感的串并联及耦合系数	209	12.1 正弦稳态网络函数	254
10.2.1 耦合电感的串联	210	12.1.1 网络函数的定义	254
10.2.2 耦合电感的并联	212	12.1.2 网络函数的分类	255
10.2.3 耦合系数	213	12.1.3 频率特性的分析举例	257
10.3 空心变压器电路的分析	214	12.2 串联谐振电路	260
10.4 耦合电感的去耦等效电路	217	12.2.1 串联谐振电路及谐振 时的特性	260
10.5 理想变压器	219	12.2.2 串联谐振电路的频率特性 及选择性	264
10.5.1 理想变压器的 VCR	219	12.2.3 串联谐振电路的通频带	265
10.5.2 理想变压器的阻抗变换 性质	221	12.2.4 串联谐振电路的电压 传输函数	266
10.6 全耦合变压器及理想变压器的 实现	223	12.2.5 信号源内阻及负载电阻对串联 谐振电路的影响	268
习题	226	12.3 并联谐振电路	271
第11章 双口网络	231	12.3.1 并联谐振电路及 谐振时的特性	271
11.1 双口网络的基本概念	231	12.3.2 谐振电路品质因数与电路元件 品质因数的关系	274
11.2 双口网络的方程和参数	232	12.3.3 信号源内阻及负载电阻对并联 谐振电路的影响	275
11.2.1 短路导纳参数	232	12.4 耦合双谐振电路	278
11.2.2 开路阻抗参数	234	12.4.1 耦合电路的耦合方式及 耦合系数	279
11.2.3 混合参数	236	12.4.2 互感耦合双谐振电路的 谐振现象	280
11.2.4 传输参数	237	12.4.3 耦合谐振电路的谐振曲线 及通频带	282
11.3 双口网络参数间的关系	239	12.4.4 电容耦合双谐振电路	287
11.4 双口网络的等效电路	240	习题	289
11.4.1 Y 参数等效电路	240	附录 PSpice 简介	293
11.4.2 Z 参数等效电路	241	部分习题参考答案	304
11.5 复合双口网络的网络参数	242	参考文献	314
11.5.1 双口网络的串联	242		
11.5.2 双口网络的并联	243		
11.5.3 双口网络的级联	244		
11.5.4 双口网络有效连接的 检验方法	245		
11.6 含双口网络的电路分析	246		
11.6.1 输入阻抗	246		

第 1 章

电路的基本概念和基尔霍夫定律

本章介绍电路模型、电路分析的变量、集中参数电路的基本定律——基尔霍夫定律，以及电阻、独立电源、受控电源等电路元件。这些内容是分析讨论集中参数电路的基础。

1.1 电路及电路模型

电在日常生活、工农业生产、科研及国防等领域都得到广泛应用。人们在通信、自动控制、计算机、电力等系统的诸多电子设备中使用形形色色的电路来完成各种各样的任务。

各种实际电路都是由电器件，如电阻器、电容器、电感线圈、变压器、晶体管、电源等相互以不同形式连接组成的。不同的电路具有不同的功能。例如，供电电路用来传输和分配电能，通信电路用来传输、加工和处理信号；计算机的存储电路用来存放数据、程序；测量电路用来测量电压、电流和电阻；等等。

虽然电路种类繁多功能各异，然而，不论其功能如何，其结构有多么不同，不论电路是复杂还是简单，却都具有共性，服从共同的基本规律。正是在这一共同规律的基础上，形成了“电路理论”这一学科。

电路理论含有两大分支：一是电路分析，主要讨论在给定电路结构和元件参数的条件下，求电路中各支路电压和电流的分配等问题；二是电路综合，主要研究在给定输入和输出（即电路传输特性）的条件下，求电路的结构和参数。本书重点讨论前者，主要任务是研究线性（linear）、时不变（Time-invariant）电路的基本理论和基本分析方法。

本课程是电路理论的入门课程，通过本课程的学习，应掌握电路的基本概念和基本分析方法，为进一步学习电路理论以及后续课程打下基础。

在大多数学科领域内，经常使用理想化的模型来描述所研究的物理系统。这种模型虽然并不需要把系统中所发生的一切物理现象不分主次地全部表现出来，但是根据这个模型进行分析所得到的结果，在所允许的精度范围内，必须与物理系统的实际情况相符合。例如，在经典力学中，为了分析机械系统，采用质点作为小物体的模型，并把刚体作为实际物体的模型。电路理论同样也是建立在模型（Model）的基础上的。

在实际电路中，每一电器件中所发生的物理现象是很复杂的，在很多情况下除一种主要的物理现象外往往还伴随着其他的物理现象。例如，一个实际的线绕电阻器通过电流时，除消耗电能这一主要物理现象外，还可能有一定的磁场和电场的效应；一个实际的电源也总会有内阻，因此，在使用时不可能总保持一定的端电压；连接导线也总会有一点电阻。

在分析电路时，如果把每一电器件中的全部物理现象都加以考虑势必会使分析复杂化，给分析带来困难。因此，必须在一定的条件下，对实际电器件加以近似化、理想化，忽略它

的次要性质，用一个足以表征其主要物理性能的模式（即理想电路元件）来表示。譬如，一个新的干电池，在其内阻很小而可以忽略不计的条件下，把它看成一个端电压恒定的理想电压源；在连接导线很短的情况下，其电阻也可完全忽略不计看作理想导体。

理想电路元件客观上是不存在的，它与实际电器件具有不同的含义：实际电器件是指具有两个或多个端钮的物理实体，而理想电路元件是指具有两个或多个端钮的理想化的模型，其端钮上的物理量（电压或电流）都具有精确的数学关系，因此又称之为数学模型。

每一个理想电路元件（以下简称电路元件）都只表示一种物理现象。很多实际电器件的运用一般都和电能的消耗、电场、磁场的存储这三种物理现象有关。由此，可定义出三种最基本的电路元件——电阻元件、电感元件、电容元件。其中，电阻元件一般只表示消耗电能（电能转换为其他形式的能量）的电路元件；电感元件只表示存储磁场能的电路元件；电容元件只表示存储电场能的电路元件。三种电路元件的图形符号如图 1-1 所示。

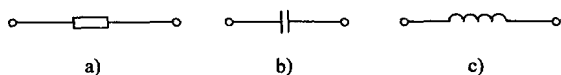


图 1-1 三种电路元件的图形符号

a) 电阻元件 b) 电容元件 c) 电感元件

除以上三种基本的电路元件外，还有电压源元件、电流源元件等其他电路元件，这些将在后面陆续讨论。

在一定条件下，各种实际电器件都可以找出其电路模型。有些电器件的模型简单，可只用一个电路元件作为模型，例如一个碳膜电阻器就可只用一个电阻元件作为其模型；有些电器件的模型比较复杂，需要用几种电路元件的组合才能建立其模型，例如一个实际的电源就需要用一个电压源元件和一个电阻元件的串联构成其模型。同一个实际电器件在不同工作条件下有可能采用不同的模型。

引入电路模型的最大优点在于：可以用有限的几种电路元件来描述种类繁多的实际电器件的物理特性，而具有很强的通用性和灵活性。至于如何用电路元件来构成实际电器件的模型，则不是本课程所要讨论的问题。

电路元件是抽象的模型，没有体积，其特性集中在空间的一点上，所以又称其为集中参数元件（Lumped Parameter Element）。所谓“集中”的另一含义为，原本同时存在且又发生在整个电器件之中并交织在一起的物理现象，假定这些现象分别集中在一起，用完全分开的“集中参数元件”（简称“集中元件”）来构成其模型。

电路元件可分为二端元件、三端元件、四端元件等，具有两个端钮的元件（如上述三种元件）称为二端元件（或单口元件），具有四个端钮的元件称为四端元件（或双口元件）如受控源、耦合电感、变压器等。

由集中元件组成的电路称为集中参数电路。在求实际电器件的模型时，采用上述的集中假设是有条件的。由于集中意味着把电器件中的电场和磁场分隔开，电场只与电容元件相关联，磁场只与电感元件相关联，这样，两种场之间就不存在相互作用，而电场与磁场间的相互作用将产生电磁波，一部分能量将通过辐射损失掉，因此，只有在辐射能量可以忽略不计的情况下才能采用“集中”的概念。这就要求电路尺寸 L 要远小于最高工作频率所对应的波长 λ ，即

$$L \ll \lambda$$

其中， $\lambda = c/f$ ， $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ （光速）。

例如, 电力网的交流电频率为 50Hz, 对应的波长为 6000km, 对实验室的设备来说, 其电路尺寸与这一波长相比可以忽略不计, 因此可以采用集中参数电路, 而对远距离的电力输电线则不满足上述条件, 就不能用集中参数电路而必须采用分布 (Distributed) 参数电路。当满足上述集中条件时, 就可以采用集中参数电路模型。

本书只对集中参数电路进行分析, 因此, 以后将省略“集中”二字。集中假设是本书最主要的假设, 后面所讨论的电路的基本定律及以基本定律为基础推出的各种分析方法必须在满足这一集中假设的前提下才能使用。

最后需要指出的是: 电路理论所分析的对象是从大量实际电路中抽象出来的电路模型 (简称电路) 而不是实际电路, 对电路进行分析也只是分析电路中电流的流通情况, 以及电路中各电路元件的电压、电功率等, 而不讨论电路的具体作用。

1.2 电路分析的基本变量

在分析电路时, 经常遇到的问题是给定电路结构、电路元件参数和激励的情况下求解电路中各个支路的电流和电压, 当然也经常要求出电路各支路的功率等。由于只要求得电路的电流和电压就可以确定该电路的性能, 因此, 电流和电压是衡量电路性能的两个重要物理量, 故称为电路的基本变量。

1.2.1 电流及其参考方向

带电粒子有规则的运动形成电流。单位时间内通过导体横截面的电荷量的多少定义为电流 (Current)。电流用符号 i 表示, 其数学式为

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

电流实际上是由导体内的自由电子在电场的作用下规则地移动形成的, 但习惯上规定正电荷移动的方向为电流的真实方向。如果电流的大小和方向均不随时间变化, 则称这种电流为恒定电流, 简称直流 (Direct Current), 记作 DC。如果电流的大小和方向是随时间变化的, 则称交变 (Alternating) 电流, 简称交流, 记作 AC。在简单电路中电流的真实方向容易判断, 但在复杂的电路中往往难以事先判断电流的真实方向, 而且电流为交流时就不可能用一个固定的箭头来表示其真实方向。为此引入参考方向的概念。所谓参考方向 (Reference Direction) 是: 在分析电路前任意假设电流的方向, 参考方向在电路图中用箭头表示, 如图 1-2a 所示。图中方框表示一个电路元件或一个支路。电流的参考方向也可以用

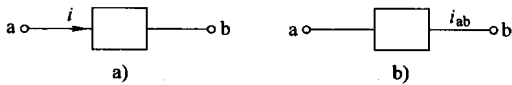


图 1-2 电流的参考方向

双下标表示, 如图 1-2b 所示。参考方向的选取完全是人为的, 可以任意选取。引入参考方向后电流是代数量: 当电流的参考方向与真实方向一致时电流为正值, 否则电流为负值。

在分析电路时, 必须首先选定支路电流的参考方向, 然后根据所选参考方向进行分析计算, 从最后得出的电流值的正负可以确定其真实方向。显然, 在未标注电流参考方向的情况下其正负值毫无意义。电流的参考方向尽可任意假设, 但一经选定, 在分析电路的过程中就不可再变动。在电路图中所标的电流方向都是指参考方向。电流的参考方向又叫电流的正方向。

在国际单位制 (SI) 中, 电流、电荷和时间的单位分别为安培 (简称安, 用 A 表示)、库仑 (简称库, 用 C 表示) 和秒 (用 s 表示), 且有

$$1\text{A} = \frac{1\text{C}}{1\text{s}}$$

1.2.2 电压及其参考方向

电路中两点间的电位之差通常称为电压 (Voltage), 用符号 u 表示。电路中 a、b 两点的电压表明了单位正电荷由 a 点转移到 b 点时所获得或失去的能量, 其数学式为

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

式中, dq 为由 a 点转移到 b 点的电荷量, 单位为 C; dw 为电荷 dq 在转移过程中, 所获得或失去的能量, 单位为焦耳 (简称焦, 用 J 表示)。

如果正电荷由 a 转移到 b 获得能量, 则电位升高, 即 a 点的电位低于 b 点。反之, 正电荷由 a 转移到 b 失去电能, 则电位降低, 即 a 点电位高于 b 点。正电荷在电路中转移时电能的获得或失去体现在电位的升高或降低。大小和极性都不随时间而变的电压叫做恒定电压 (或直流电压), 大小和极性都随时间变化的电压则称为交变电压 (或交流电压)。

电压和电流一样也是一个代数量, 所以如同需要为电流规定参考方向一样, 也需要规定电压的参考极性。电压的参考极性在电路图中用 “+”、“-” 号标注在电路元件或支路的两端, 如图 1-3a 所示。其中标 “+” 号的端表示高电位端, 标 “-” 号的端表示低电位端。电压的参考极性在电路图中也可以用箭头表示, 如图 1-3b 所示, 也可以用双下标表示, 如图 1-3c 所示, u_{ab} 表示 a 为参考极性的高电位端, b 为参考极性的低电位端。由电压的参考极性和电压的正负值, 就可以判断电压的真实极性。当电压为正值时, 该电压的真实极性与参考极性相同; 当电压为负值时, 则表示该电压的真实极性与所选定的参考极性相反。

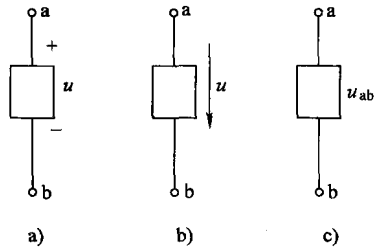


图 1-3 电压的参考极性

可见, 在未标电压参考极性的情况下, 电压的正负值毫无意义。因此, 在求解电路时必须先选定电压的参考极性。电压的参考极性常称作参考方向。

在国际单位制 (SI) 中, 电压的单位为伏特 (简称伏, 用 V 表示), 且有

$$1\text{V} = \frac{1\text{J}}{1\text{C}}$$

在分析电路时, 既要为支路电流假设参考方向, 也要为支路电压假设参考极性, 虽然原则上两者可以任意选择而彼此独立无关, 但为了方便起见, 通常采用关联 (Associated) 参考方向。所谓关联参考方向

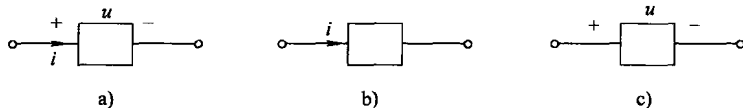


图 1-4 关联参考方向

是指电流的参考方向由电压参考极性的正极指向负极, 如图 1-4a 所示。在关联参考方向下, 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, 如图 1-4b、c 所示。换言之, 如果在电路图中只标其中一个即默认两者取关联参考方向。

1.2.3 功率

功率 (Power) 是电路分析中常用到的另一个物理量, 用符号 P 表示。功率定义为支路在单位时间内吸收的电能。当电路在 dt 时间内吸收的电能为 dw 时, 电路吸收的功率为

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

根据电压、电流的定义, 当 u 、 i 取关联参考方向时, 功率又可表示为

$$P = \frac{dw}{dt} = \frac{dw}{dq} \frac{dq}{dt} = ui \quad (1-4)$$

因为 u 、 i 均为代数量, 因此功率也应为代数量。当 $P > 0$ 时表示该支路吸收功率; 当 $P < 0$ 时表示该支路实为提供功率。

如果支路电压和电流取非关联参考方向, 电流的参考方向则与图 1-4a 所示方向相反, 故功率的表示式为

$$P = -ui \quad (1-5)$$

根据支路电压、电流参考方向是否关联, 可选用相应的计算公式, 但不论是式 (1-4) 还是式 (1-5) 都表示支路吸收的功率。若功率的值为正, 表示支路吸收功率; 若功率的值为负, 表示支路实为提供功率。

在国际单位制 (SI) 中, 功率的单位为瓦特 (简称瓦, 用 W 表示)。

伏 (V)、安 (A) 和瓦 (W) 分别是电压、电流和功率的主单位。但是在实际应用中常因为这些单位太大或太小而有时感到使用不便, 为此需采用辅助单位。辅助单位通过在主单位前冠以表 1-1 所示的词头或乘以因数 10^n 来表示。

例如, $3\mu\text{A}$ (微安) $= 3 \times 10^{-6} \text{A}$ (安), 5kW (千瓦) $= 5 \times 10^3 \text{W}$ (瓦)。

表 1-1 部分国际单位制词头

词头符号	词头名称	因数	词头符号	词头名称	因数
T	太 (tera)	10^{12}	m	毫 (milli)	10^{-3}
G	吉 (giga)	10^9	μ	微 (micro)	10^{-6}
M	兆 (mega)	10^6	n	纳 (nano)	10^{-9}
k	千 (kilo)	10^3	p	皮 (pico)	10^{-12}

例 1-1 电路如图 1-5 所示, 已知 $u_1 = 1\text{V}$, $u_2 = -6\text{V}$, $u_3 = -4\text{V}$, $u_4 = 5\text{V}$, $u_5 = -10\text{V}$, $i_1 = 1\text{A}$, $i_2 = -3\text{A}$, $i_3 = 4\text{A}$, $i_4 = -1\text{A}$, $i_5 = -3\text{A}$, 试求: (1) 各元件的功率; (2) 验证功率平衡。

解 (1) 根据式 (1-4) 和式 (1-5)

$$P_1 = u_1 i_1 = 1 \times 1 \text{W} = 1 \text{W} (\text{消耗})$$

$$P_2 = u_2 i_2 = -6 \times (-3) \text{W} = 18 \text{W} (\text{消耗})$$

$$P_3 = -u_3 i_3 = -(-4) \times 4 \text{W} = 16 \text{W} (\text{消耗})$$

$$P_4 = u_4 i_4 = 5 \times (-1) \text{W} = -5 \text{W} (\text{提供})$$

$$P_5 = -u_5 i_5 = -(-10) \times (-3) \text{W} = -30 \text{W} (\text{提供})$$

(2) 验证功率平衡。

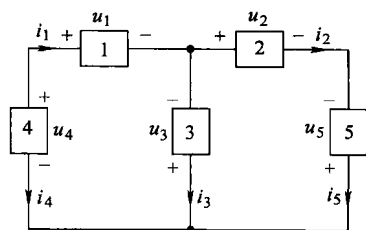


图 1-5 例 1-1 图

$$\sum_{k=1}^5 P_k = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 = (1 + 18 + 16 - 5 - 30) \text{ W} = 0 \text{ W}$$

1.3 基尔霍夫定律

在讨论基尔霍夫定律 (Kirchhoff's Law) 之前, 先介绍几个相关的名词。

支路 (Branch): 电路中每一个二端元件称为一条支路。

节点 (Node): 电路中支路的连接点称为节点。在图 1-6 中共有 6 条支路, 4 个节点。显然节点是两条或两条以上支路的连接点。为方便起见, 在分析电路时, 往往把多个电路元件串联而成的一段电路看成一条支路。例如在图 1-6 中把 5、6 元件的串联作为一条支路, 在这种情况下节点定义为三条或三条以上支路的连接点, 如 a、b 和 d 点, 而 c 点往往不当成节点。这样的定义, 显然比前面的定义支路数和节点数都要减少, 对分析求解电路是方便的。

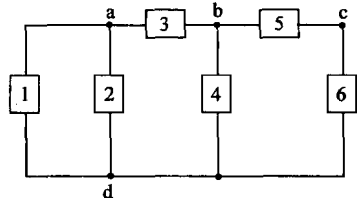


图 1-6 支路、节点、回路、网孔

回路 (loop): 电路中的任一个闭合路径均称为回路。在图 1-6 中, 由 1、2 支路构成的路径, 由 2、3、4 支路构成的路径, 由 4、5、6 支路构成的路径, 由 1、3、4 支路构成的路径, 由 2、3、5、6 支路构成的路径, 由 1、3、5、6 支路构成的路径都是回路。该电路有 6 个回路。

网孔 (mesh): 在回路内部不另含有支路的回路称为网孔。在图 1-6 中, 1、2 支路组成的回路, 2、3、4 支路组成的回路, 4、5、6 支路组成的回路均为网孔。该电路有三个网孔。

在集中参数电路中, 任何时刻流经元件 (或支路) 的电流及其端电压分别称为支路电流和支路电压, 它们是集中参数电路中分析和研究的对象。

集中参数电路是由电路元件连接而成的, 整个电路表现如何, 既要看这些元件是如何连接而成的整体 (简称拓扑约束), 又要看每个元件各具有什么样的电压、电流关系 (简称元件的伏安关系)。集中参数电路所遵循的这两方面的规律通常称为电路的两类约束。

本节先讨论电路整体所遵循的基本规律, 即基尔霍夫定律。基尔霍夫定律包括电流定律和电压定律。

1.3.1 基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律 (Kirchhoff's Current Law) 又称基尔霍夫第一定律, 简称为 KCL, 它表明电路中各支路电流间必须遵循的规律, 这规律体现在电路的各个节点上。

具体内容是: 对于任一集中参数电路中的任一节点, 在任一时刻, 流出 (或流入) 该节点的所有支路电流的代数和为零。

其数学表示式为

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

式 (1-6) 称为某节点的 KCL 方程。式中, i_k 为流出 (或流入) 该节点的第 k 条支路的电流; n 为与该节点相连的支路数。

在图 1-7 中取流进节点的电流为正, 对节点①②③列 KCL 方程可得

$$i_1 - i_4 + i_6 = 0 \quad (1)$$

$$i_2 + i_4 - i_5 = 0 \quad (2)$$

$$i_3 + i_5 - i_6 = 0 \quad (3)$$

从以上三个方程不难看出: 每个节点流入的电流与流出的电流相等。因此, KCL 的数学表示式又可以改写为

$$\sum i_{\text{出}} = \sum i_{\text{入}} \quad (1-7)$$

基尔霍夫电流定律不仅适用于节点, 也可以推广运用到电路中任一假设的闭合面, 例如图 1-7 中虚线所示的闭合面 C。

把对节点①②③所列的三个方程相加可得

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0$$

可见流入封闭面 C 的所有支路电流的代数和为零。这种闭合面在电路中也称广义节点 (或割集)。

在列写 KCL 方程时, 可设支路电流的参考方向流入节点的为正 (流出为负) 或是以流出为正 (流入为负), 两种标准可任选, 但一经选定必须以此为准。

电流定律实质是电流连续性原理, 是电荷守恒定律的体现。由 KCL 方程可看到: 每一个 KCL 方程中的各个电流彼此相约束, 例如在图 1-7 中对节点①所列的方程中, 若已知 i_1 和 i_4 的值, i_6 的值随之而定, 不能取任何其他值。KCL 为电流施加的这种约束关系称之为电流线性相关。

KCL 适用于任何集中参数电路, KCL 仅与支路和节点的连接方式有关, 而与电路元件的特性无关。

例 1-2 图 1-8 中, a 表示某一电路中的某一个节点, 已知 $i_1 = 5\text{A}$, $i_2 = 2\text{A}$, $i_3 = -6\text{A}$, 试求电流 i_4 。

解 i_1 、 i_2 、 i_3 和 i_4 分别是汇集于节点 a 的支路电流, 以流入节点的电流为正, 列 KCL 方程得

$$i_1 - i_2 + i_3 - i_4 = 0$$

把已知数据代入上式得

$$i_4 = i_1 - i_2 + i_3 = 5\text{A} - 2\text{A} + (-6\text{A}) = -3\text{A}$$

其中, i_4 为负值说明: i_4 的真实方向与参考方向相反。在这种情况下, 尽可不必去把图中所标的方向改过来, 图中所标的参考方向与所得结果已足以说明其真实方向。

例 1-3 电路如图 1-9 所示, 已知 $i_1 = 2\text{A}$, $i_2 = -1\text{A}$, 求电流 i_3 。

解 图中虚线所示闭合面, 以流进封闭面的电流为正列 KCL 方程得

$$i_1 - i_2 - i_3 = 0$$

把已知数据代入上式得

$$i_3 = i_1 - i_2 = 2\text{A} - (-1\text{A}) = 3\text{A}$$

通过这两个例题可以看到, 在运用 KCL 时需要和两套符号打交

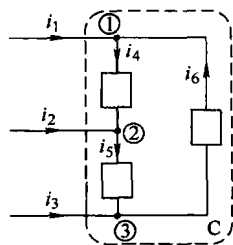


图 1-7 列写 KCL 方程

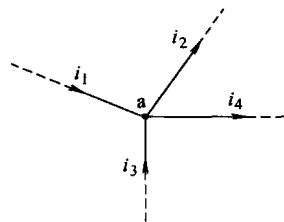


图 1-8 例 1-2 图

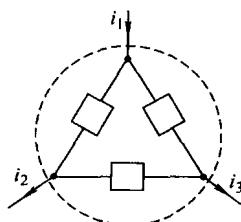


图 1-9 例 1-3 图

道：一是方程中各项前的正、负号，其正负取决于电流参考方向对节点的相对关系，如以流出为正，则流入为负；另一是电流本身数值的正负值，其正负值取决于电流的真实方向与参考方向的关系，如上式中各括弧内的符号。两者不要混淆。

1.3.2 基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电压定律也叫基尔霍夫第二定律，简称为 KVL，它表明电路中各支路电压之间必须遵循的规律。这个规律体现在电路的各个回路中。具体内容是：对于任一集中参数电路中的任一回路，在任一时刻，沿该回路所有支路电压降的代数和为零。

其数学表示式为

$$\sum_{k=1}^n u_k = 0 \quad (1-8)$$

式 (1-8) 称为某回路的 KVL 方程式。式中， u_k 为该回路中的第 k 条支路电压， n 为该回路所含的支路数。

在列写 KVL 方程时，必须先设回路的绕行方向即回路的参考方向，绕行方向可选顺时针方向，也可选逆时针方向，一般在回路中用带箭头的实线表示，如图 1-10 所示。这里“绕行”的含义是：从一个节点出发，沿一定路径，经过若干个支路又回到出发点。列方程时，在所设的绕行方向下，若支路电压的参考极性与回路绕行方向一致取正号，否则取负号。图 1-10 所示为某一电路中的一个回路，对其列 KVL 方程得

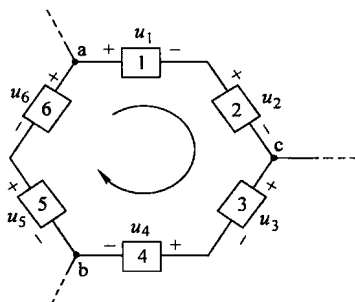


图 1-10 列写 KVL 方程

$$u_1 + u_2 + u_3 + u_4 - u_5 - u_6 = 0 \quad (1)$$

把式 (1) 改写成

$$u_1 + u_2 + u_3 + u_4 = u_5 + u_6 \quad (2)$$

不难看出：式 (2) 左端为该回路在所设绕行方向下支路电压的电压降之和，右端为电压升之和。按照能量守恒定律，单位正电荷沿回路绕行一周，所获得的能量必须等于所失去的能量。由电压的定义，正电荷获得能量则电位升高，失去能量则电位降低，所以在闭合回路中电位升必然等于电位降。因此，基尔霍夫电压定律实质是能量守恒定律的体现。

式 (2) 还说明：电路中 a、b 两节点间的电压与从节点 a 到节点 b 所选的路径无关，即电路中任意两点之间的电压与所选择的路径无关。

由 KVL 方程可看到：每一个 KVL 方程中的各个电压彼此相约束，即每一个回路中各电压彼此相约束，KVL 为电压所施加的这种约束称之为电压线性相关。

KVL 适用于任何集中参数电路，KVL 仅与电路元件（或支路）的连接方式有关，而与电路元件的性质无关。

在列 KVL 方程时，也需要和两套符号打交道：一套取决于支路电压的参考极性与回路绕行方向的相对关系，当支路电压参考极性与绕行方向一致时取正号，反之取负号；另一套则取决于支路电压的真实极性与参考极性间的关系。

例 1-4 电路如图 1-11 所示，已知 $u_1 = -10\text{V}$ ， $u_3 = -5\text{V}$ ， $u_4 = 20\text{V}$ ， $u_5 = -15\text{V}$ ，求 u_2 、 u_6 和 u_{13} 。

解 设两个回路的绕行方向如图 1-11 所示, 分别对 1、2 回路列 KVL 方程得

$$u_1 + u_2 - u_3 - u_4 = 0 \quad (1)$$

$$-u_2 + u_5 + u_6 = 0 \quad (2)$$

把已知数据分别代入式 (1) 式 (2) 得

$$u_2 = -u_1 + u_3 + u_4 = [-(-10) + (-5) + (20)] \text{ V} = 25 \text{ V}$$

$$u_6 = -u_5 + u_2 = -(-15) \text{ V} + (25) \text{ V} = 40 \text{ V}$$

$$u_{13} = u_4 + u_3 = u_1 + u_2 = 15 \text{ V}$$

u_{13} 为节点①和③之间的电压, 两点之间的电压与所选路径无关。

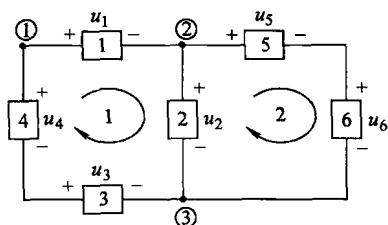


图 1-11 例 1-4 图

以上讨论了电路由电路元件的连接方式所决定的规律, 电路元件是组成电路的最小单元, 各元件在电路中的特性表示为其端钮上电压与电流之间的关系 (Voltage Current Relation, VCR), 简称为元件的伏安关系。每个电路元件的伏安关系都有精确的定义, 其定义用数学关系式或曲线 (即伏安特性曲线) 描述。基尔霍夫定律连同元件的伏安关系构成了分析集中参数电路的基本依据 (简称两类约束)。下面要介绍电阻电路中常用的几种二端元件及其 VCR。

1.4 电阻元件

电阻 (Resistor) 元件 (简称电阻) 是电路中最常用的元件之一, 是从实际电阻器抽象出来的理想化的模型。其图形符号如图 1-12a 所示。在电压、电流取关联参考方向的条件下, 其 VCR 为

$$u = Ri \quad (1-9)$$

式 (1-9) 即为在物理学中已学过的欧姆定律。其中 $R = u/i$ 为一正常数, 是表征电阻元件特性的电路参数, 即电阻值。电阻元件的伏安特性曲线如图 1-12b 所示, 它是通过坐标原点的一条直线, 其斜率为 R 。由式 (1-9) 定义的电阻元件, 称为线性电阻。

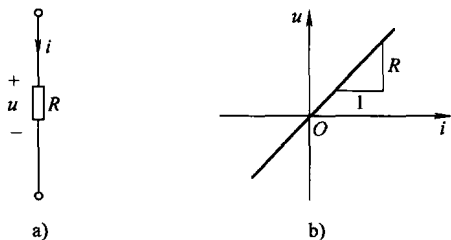


图 1-12 线性电阻的图形符号及伏安特性曲线

a) 线性电阻的图形符号

b) 线性电阻的伏安特性曲线

需要注意: 在图 1-12a 中, 如果 u 、 i 取非关联参考方向, 其 VCR 为

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

电阻元件的伏安关系还可以用另一种形式表示, 即

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

式中, G 称为电导 (Conductance), $G = 1/R$ 。在国际单位制中, 电阻的单位为欧姆 (简称欧, 用符号 Ω 表示); 电导的单位为西门子 (简称西, 用符号 S 表示)。

从式 (1-9) 可看出: 当电压一定时, 电阻越大电流越小, 这说明电阻对电流有阻力, 因此, 电流通过电阻时必然要消耗能量。线性电阻元件在电压电流取关联参考方向下, 其功率为

$$P = ui = i^2 R = u^2 G \quad (1-12)$$

因为 i^2 (或 u^2) 总为正值, 所以 $R \geq 0$ 时电阻吸收的功率总为正值, 说明电阻是一种耗能元件。通常遇到的电阻大都属于这种情况。工程上利用电阻消耗电能并转化成热能的特点可做成如电炉、电烙铁等各种电热器。但在电子设备中由于电流通过电阻器件时不可避免地要产生热量, 在设计时必须考虑散热问题。

不论从式 (1-9) 还是从图 1-12b 都可以看到: 在任一时刻电阻元件端电压 (或电流) 由同一时刻的电流 (或电压) 所决定, 而与过去的电流 (或电压) 无关。这就是说电阻的电压 (或电流) 不能“记忆”电流 (或电压) 在历史上曾对它的作用。因此, 电阻是一种无记忆 (Memoryless) 的电路元件。任何一个二端元件只要它的电压与电流之间存在这种关系, 不论这一关系是线性的还是非线性, 在电路理论中均称为电阻元件。

电阻元件的一般定义是: 任何一个二端元件, 在任一时刻其端电压 $u(t)$ 与流过的电流 $i(t)$ 之间存在代数关系, 亦即这一关系在 $u-i$ 平面 (或 $i-u$ 平面) 上, 由唯一的一条过原点的曲线所决定, 不论其波形如何, 均称其为电阻元件。

由电阻的定义不难想到除线性电阻外还有非线性电阻。凡元件特性在 $u-i$ 平面上不是一条直线, 就属于非线性电阻, 非线性电阻的图形符号如图 1-13 所示。

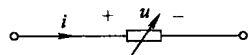


图 1-13 非线性电阻的图形符号

许多电子元件可用非线性电阻构成其电路模型, 例如电子电路中常用的半导体二极管, 其图形符号如图 1-14a 所示, 伏安特性曲线如图 1-14b 所示。

非线性电阻的电阻值不是常量, 而是随着电压或电流的大小和方向而改变。因此, 其电压、电流关系不能用一个固定的参数 R 或 G 来描述, 函数关系也很难用解析式较精确地表示, 一般由整条伏安特性曲线来表征, 有时为了理论分析或计算采用近似的解析式。

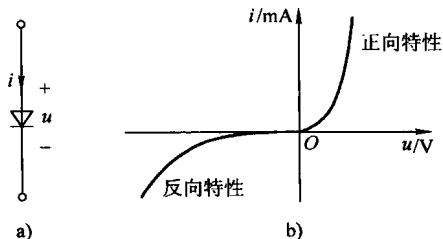


图 1-14 二极管的图形符号和伏安特性曲线
a) 二极管图形符号 b) 二极管的伏安特性曲线

电阻还有时变电阻与非时变电阻之分。不论是线性电阻还是非线性电阻, 其特性不随时间变化的称非时变 (或定常) 电阻, 随时间变化的称时变电阻。在电压、电流取关联参考方向下, 线性时变电阻和非线性时变电阻的伏安特性曲线如图 1-15a、b 所示。

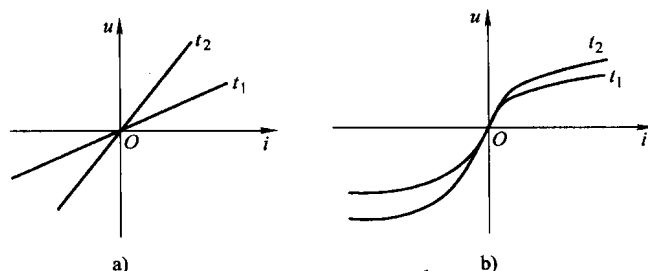


图 1-15 时变电阻的伏安特性曲线

a) 线性时变电阻的特性曲线 b) 非线性时变电阻的特性曲线

对于线性电阻, 由于其伏安特性曲线是通过原点的直线, 对称于原点, 电压与电流的比