

21世纪普通高等教育电子信息类规划教材

# 电路分析

许信玉 主编

免费  
电子课件

 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



21 世纪普通高等教育电子信息类规划教材

# 电 路 分 析

许信玉 主编

白敏丹

陈晋伦 参编

肖怀宝



机械工业出版社

本书是根据高等工科大学电路分析课程的基本要求,并结合编者在教学实践中的体会和经验编写而成的。

本书采用了电阻电路、动态电路、正弦稳态电路构成的体系,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:电路的基本概念和定律、电阻电路的等效与分析、线性网络的一般分析方法、电路定理、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。

本书的编写本着教材宜细不宜粗的指导思想,由浅入深、循序渐进、重点突出、层次分明,便于教学及学生自学。

本书配有电子课件,欢迎选用本书作教材的老师索取,索取邮箱:wbj@mail.machineinfo.gov.cn。

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学习电路理论的教材,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,  
2007 8

21世纪普通高等教育电子信息类规划教材  
ISBN 978 - 7 - 111 - 21954 - 5

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(2007)第112323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:张世琴 责任校对:吴美英  
封面设计:张静 责任印制:洪汉军  
北京京丰印刷厂印刷  
2007年8月第1版·第1次印刷  
184mm×260mm·20.5印张·504千字  
标准书号 ISBN 978 - 7 - 111 - 21954 - 5  
定价 30.00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

本书是根据高等工科大学“电路分析”课程教学基本要求，并结合编者在教学实践中的体会和经验编写而成的。

“电路分析”课程是高等学校通信工程、电子信息工程、电子科学技术、自动化等相关专业必修的一门主干基础课，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理论基础。

本书作为“电路分析”课程的教材，编写时立足点放在：①内容符合《电路分析课程教学大纲》；②内容的编排由浅入深、循序渐进，符合学生的认知规律，有利于学生掌握该课程的知识点及内在联系，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；③突出了与相关课程之间的相互关系，加强了含受控源电路的分析力度，有利于与后续的课程衔接；④反映当今信息科学与技术的新理论，较好地处理了传统内容与新内容的兼顾与协调；⑤内容论述概念明确、重点突出、层次分明、详略得当，便于自学；⑥每章配合正文，结合难点和重点选编了大量的不同层次的习题，并附有部分习题参考答案。同时也增加了工程性习题、设计性习题和综合性习题，有利于培养学生分析问题和解决问题的能力。

全书共12章，其中1~4章由白敏丹编写；第5、6、7、10章由陈晋伦编写；第8、9、11、12章由许信玉编写；附录由肖怀宝编写；全书由许信玉修改、补充和定稿。本书在编写过程中，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热情帮助，在此谨表衷心的感谢。

本书配有电子课件，欢迎选用本书作教材的老师索取，索取邮箱：[wbj@mail.machineinfo.gov.cn](mailto:wbj@mail.machineinfo.gov.cn)。

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。意见请寄中国传媒大学信息工程学院专业基础部电路教研室或发到电子邮箱：[xuxuan@cuc.edu.cn](mailto:xuxuan@cuc.edu.cn)。

编 者

# 目 录

## 前言

## 第 1 章 电路的基本概念和定律 ..... 1

### 1.1 电路和电路模型 ..... 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 ..... 7

#### 1.3.2 基尔霍夫电压定律 ..... 8

### 1.4 电阻元件 ..... 9

### 1.5 独立电压源和独立电流源 ..... 12

#### 1.5.1 电压源 ..... 12

#### 1.5.2 电流源 ..... 13

### 1.6 受控电源 ..... 14

### 1.7 两类约束和 KCL、KVL 方程的独立性 ..... 16

### 1.8 支路分析法 ..... 19

#### 1.8.1 支路电流法 ..... 19

#### 1.8.2 支路电压法 ..... 20

#### 习题 1 ..... 20

## 第 2 章 电阻电路的等效与分析 ..... 25

### 2.1 单口网络的等效电路 ..... 25

### 2.2 分压电路和分流电路 ..... 27

#### 2.2.1 分压电路 ..... 27

#### 2.2.2 分流电路 ..... 27

### 2.3 一些简单含源电路的等效规律 ..... 28

### 2.4 实际电源的两种电路模型及其等效变换 ..... 30

#### 2.4.1 实际电源模型 ..... 31

#### 2.4.2 两种实际电源的等效变换 ..... 31

### 2.5 含受控源的单口网络分析 ..... 33

### 2.6 T 形网络和 $\pi$ 形网络的等效变换 ..... 34

#### 习题 2 ..... 36

## 第 3 章 线性网络的一般分析方法 ..... 41

### 3.1 网络拓扑的基本概念 ..... 41

#### 3.1.1 拓扑图的概念 ..... 41

#### 3.1.2 回路、割集和树的概念 ..... 42

### 3.2 电路的独立变量 ..... 44

#### 3.2.1 独立电流变量 ..... 44

#### 3.2.2 独立电压变量 ..... 45

### 3.3 网孔分析法 ..... 46

### 3.4 节点分析法 ..... 50

### 3.5 割集分析法 ..... 55

### 3.6 回路分析法 ..... 57

### 3.7 含理想运算放大器的电路分析 ..... 58

#### 习题 3 ..... 61

## 第 4 章 电路定理 ..... 67

### 4.1 叠加定理 ..... 67

### 4.2 置换定理 ..... 69

### 4.3 戴维南定理和诺顿定理 ..... 72

#### 4.3.1 戴维南定理 ..... 72

#### 4.3.2 求等效内阻的方法 ..... 74

#### 4.3.3 诺顿定理 ..... 76

#### 4.3.4 使用两定理的说明 ..... 77

### 4.4 最大功率传递定理 ..... 79

### 4.5 互易定理 ..... 81

#### 习题 4 ..... 84

## 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	<b>第 8 章 正弦稳态电路分析</b> .....	144
5.3 电容电压的连续性和记忆性 .....	94	8.1 正弦稳态电路 .....	144
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 5 .....	102	8.7 阻抗、导纳及相量模型 .....	157
<b>第 6 章 一阶电路</b> .....	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 .....	160
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 8 .....	171
6.4 线性动态电路的叠加原理 .....	116	<b>第 9 章 正弦稳态功率和三相电路</b> .....	177
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 .....	177
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 .....	177
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 .....	180
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 .....	182
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 .....	182
习题 6 .....	127	9.2.2 单口网络的无功功率 .....	185
<b>第 7 章 二阶电路</b> .....	134	9.2.3 功率因数的提高 .....	186
7.1 二阶电路的典型形式及其 数学模型 .....	134	9.2.4 复功率 .....	189
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 .....	190
7.3 RLC 串联电路的零状态响应 .....	139	9.4 三相电路 .....	193
7.4 RLC 串联电路的全响应 .....	140	9.4.1 三相电源 .....	193
7.5 GCL 并联电路的分析举例 .....	140		
习题 7 .....	141		

9.4.2 三相电源的联结 .....	194	11.6.3 开路电压 .....	252
9.4.3 三相电路的联结及计算 .....	196	11.6.4 电压传输函数 .....	253
9.4.4 三相电路的功率 .....	200	11.6.5 电流传输函数 .....	253
习题9 .....	202	习题11 .....	255
<b>第10章 耦合电感和理想变压器</b> .....	<b>208</b>	<b>第12章 电路的频率特性</b> .....	<b>259</b>
10.1 基本概念 .....	208	12.1 正弦稳态网络函数 .....	259
10.2 耦合电感的伏安关系 .....	210	12.1.1 网络函数的定义 .....	259
10.3 含耦合电感电路的分析 .....	211	12.1.2 网络函数的分类 .....	260
10.3.1 耦合电感的串联 .....	212	12.1.3 频率特性的分析举例 .....	262
10.3.2 耦合电感的并联 .....	213	12.2 串联谐振电路 .....	265
10.3.3 空心变压器电路的分析 .....	215	12.2.1 串联谐振回路及谐振 时的特性 .....	265
10.3.4 耦合电感的去耦等效电路 .....	219	12.2.2 串联谐振回路的频率特性 及选择性 .....	269
10.4 理想变压器的伏安关系 .....	221	12.2.3 串联谐振回路的通频带 .....	270
10.5 理想变压器的阻抗变换性质 .....	222	12.2.4 串联谐振回路的电压 传输函数 .....	271
10.6 全耦合变压器 .....	225	12.2.5 信号源内阻及负载电阻对串联 谐振电路的影响 .....	273
10.7 铁心变压器的模型 .....	228	12.3 并联谐振电路 .....	276
习题10 .....	230	12.3.1 并联谐振电路及 谐振时的特性 .....	276
<b>第11章 双口网络</b> .....	<b>235</b>	12.3.2 谐振回路品质因数与回路元件 品质因数的关系 .....	279
11.1 双口网络的基本概念 .....	235	12.3.3 信号源内阻及负载电阻对并联 谐振电路的影响 .....	280
11.2 双口网络的方程和参数 .....	236	12.4 耦合双谐振电路 .....	283
11.2.1 短路导纳参数 .....	236	12.4.1 耦合电路的耦合方式及 耦合系数 .....	284
11.2.2 开路阻抗参数 .....	238	12.4.2 互感耦合双谐振电路的 谐振现象 .....	285
11.2.3 混合参数 .....	240	12.4.3 耦合谐振回路的谐振曲线 及通频带 .....	287
11.2.4 传输参数 .....	242	12.4.4 电容耦合双谐振电路 .....	292
11.3 双口网络参数间的关系 .....	243	习题12 .....	294
11.4 双口网络的等效电路 .....	245	<b>附录 PSpice 简介</b> .....	<b>298</b>
11.4.1 Y参数等效电路 .....	245	<b>部分习题参考答案</b> .....	<b>309</b>
11.4.2 Z参数等效电路 .....	246	<b>参考文献</b> .....	<b>319</b>
11.5 复合双口网络的网络参数 .....	247		
11.5.1 双口网络的串联 .....	247		
11.5.2 双口网络的并联 .....	248		
11.5.3 双口网络的级联 .....	248		
11.5.4 双口网络有效连接的 检验方法 .....	250		
11.6 含双口网络的电路分析 .....	251		
11.6.1 输入阻抗 .....	251		
11.6.2 输出阻抗 .....	252		

# 第1章 电路的基本概念和定律

本章介绍电路的基本概念和基本变量，阐述集中参数电路的基本定律——基尔霍夫定律。定义四种常用的电路元件：电阻、独立电压源、独立电流源和受控源。最后讨论集中参数电路中电压和电流必须满足的两类约束。这些内容是全书的基础。

## 1.1 电路和电路模型

在日常生活、工农业生产、科研以及国防等领域电都得到广泛应用。在通信、自动控制、计算机、电力等各个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。电的应用可分为能量和信息两大领域，它们都利用了电能几乎可以瞬时地传送到远处这一性质。电力系统涉及大规模电能的产生、传输和转换（转换为其他形式的能量），构成现代工业生产、家庭生活电气化等方面的基础。在这里能量是主要的着重点。电能也可以以极其微小而被精确控制的形式传送，具有携带信息的能力，如日常的电话通信等。在这里信息是主要的着眼点。电用作信息处理和交换的媒体已成为当代社会的显著特征。

各种实际电路都是由元器件如电阻器、电容器、电感线圈、变压器、晶体管、电源等相互以不同的形式连接组成的。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，计算机的存储器电路用来存放数据、程序，测量电路用来测量电压、电流和电阻等。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，主要内容是在给定电路结构、元件参数的条件下，求电路中各处电压、电流的分配；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。本书讨论前者，主要任务是研究线性、时不变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，应掌握电路的基本理论、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。

在大多数科学领域内，经常使用理想化的模型来描述所研究的物理系统，这种模型并不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，但是根据这个模型分析的结果，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，刚体作为实际物体的模型。电路理论同样也是建立在模型的基础上。

在实际的电路中，每一电器件中所发生的物理现象是很复杂的，在很多情况下除一个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，还可能会有一定的磁场和电场的效应；一个实际的电源也总会有一点内阻，因而，在使用时不可能保持一定的端电压；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性能模型——理想电路元件表示。譬如说，一个新的干电池，其内阻很小可以忽略不计，可以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，其导线的电阻完全可以忽略不计，可看作理想导体。

每一个理想的电路元件（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、磁场的存贮这三种物理现象有关。由此，我们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，电阻元件是只表示消耗电能（电能转换为其他形式的能量）的元件，电感元件是只表示贮存磁场能的元件，电容元件只表示贮存电场能。三种理想元件的电路符号如图 1-1 所示。

理想电路元件实际上是不存在的，它与实际的电器件具有不同的含意。通常实际的电器件是指具有两个或多个端子的物理实体，而理想电路元件是指具有两个或多个端子的模型，其端子上的

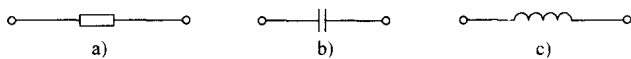


图 1-1 三种理想元件的电路模型

a) 电阻元件 b) 电容元件 c) 电感元件

的物理量（电压或电流）遵守一定的数学规律。在电路模型中，除以上三种基本的电路元件外还需要电压源元件、电流源元件等其他电路元件，每一种电路元件都可用数学方法精确定义（后面讨论），因此又称它们为数学模型。

在一定条件下，各种实际器件都可以找出其电路模型，各种实际器件中有些其模型简单，可只用一个电路元件来构成，例如一个碳膜电阻器就可用一个电阻元件作为其模型；有些其模型比较复杂需要用几种理想元件组合才能建立其模型，例如一个实际的电源则需要用一个理想电压源和一个（理想）电阻元件的串联构成其模型。引入电路模型的最大优点在于可以用几种有限的（理想）电路元件来描述种类繁多的实际器件的物理特性，而具有很强的通用性和灵活性。至于如何用（理想）电路元件来构成实际器件的模型不是本课程所要讨论的问题。

例如，日常生活中使用的手电筒电路就是一个最简单的电路，它是由干电池、灯、开关、手电筒壳（充当连接导体）组成，其电路模型如图 1-2 所示。

理想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，所以又称为集中参数元件。所谓“集中”的另一含义为原本同时存在且又发生在整个器件之中，并交织在一起的物理现象，假定这些现象分别集中在一起，用完全分开的所谓“集中参数元件”（简称“集中元件”）来构成模型。具有两个端子的元件（如上述三种元件）称为二端元件（或称单口元件）。除二端元件外还有四端元件（双口元件），如受控源、耦合电感、变压器等。

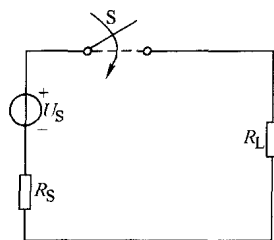


图 1-2 手电筒电路模型

由集中元件组成的电路模型称为集中电路。在求实际器件的模型时，采用上述的集中假设是有条件的。集中意味着把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。这就要求电路的尺寸  $L$  远小于正常工作频率所对应的波长  $\lambda$ 。例如，一个音频放大电路的最高工作频率为  $f=25\text{kHz}$ ，其波长为

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{25 \times 10^3 \text{ s}^{-1}} = 12 \times 10^3 \text{ m} = 12 \text{ km}$$

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

即  $L \ll \lambda$ ，应视为集中参数电路。而对远距离的通信线路和电力输电线则不满足上述条件，就不能用集中参数电路而必须采用分布参数电路，或者应用电磁场理论来进行分析。当满足集中参数条件时，就可以采用由分立元件组成的集中参数电路模型。

本书只对集中参数电路进行分析。因此，以后我们将省略“集中”二字。集中假设是本书最主要的假设，今后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假设的前提下才能使用。

## 1.2 电路分析的基本变量

电路分析使我们能够得出给定电路的电性能。电路的电性能通常可以用一组表示为时间函数的变量来描述，电路分析的任务在于了解这些变量。这些变量中最常用到的便是电流、电压和功率。电路分析的基本任务是计算电路的电压、电流和功率。因此，电流和电压值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

每单位时间内通过导体横截面的电荷量定义为电流强度，电流强度通常简称电流（Current），电流用符号  $i$  表示，其数学表示式为

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

习惯上规定正电荷移动的方向为电流的方向。

如果电流的大小和方向均不随时间变化，则这种电流叫恒定电流，简称直流，习惯记作 DC，用大写字母  $I$  表示。如果电流的大小和方向是随时间变化的，则称交变电流，简称交流，记作 AC。在简单电路中电流的真实方向较易判断，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。所谓参考方向是在分析电路前先任意假设电流的方向，在电路中用箭头表示。参考方向的选取完全是人为的，可以任意选取。我们规定：当电流的参考方向与真实方向一致时，电流为正值；当两者相反时，电流为负值。

分析电路时，必须首先选定支路电流的参考方向。而电路图中所标的电流方向都是指参考方向。根据所选参考方向进行分析计算，所得结果为代数量。我们可以从最后得出的电流正负值来确定其真实方向。显然，在未标注电流参考方向的情况下其正负毫无意义。电流的参考方向尽可先任意假设，但一经选定，在分析电路的过程中就不可再变动。今后，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）。

$$1\text{A} = \frac{1\text{C}}{1\text{s}} \quad 1\text{安} = \frac{1\text{库}}{1\text{秒}}$$

### 1.2.2 电压及其参考方向

电压（voltage）有时也称为“电位差”，用符号  $u$  表示。电路中 ab 两点的间电压表明单位正电荷由 a 点转移到 b 点时所获得或失去的能量，即

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

式中， $dq$  为由 a 点转移到 b 点的电荷量，单位为库仑（C）； $dw$  为转移过程中，电荷  $dq$  所获得或失去的能量，单位为焦耳（J）。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 失去能量，则电位降低，即 a 点电位高于 b 点。所以正电荷在电路中转移时电能的获得或失去体现为电位的升高或降低。

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），用符号  $U$  表示。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）。式（1-2）说明电压可正可负，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，也需要规定电压参考极性。电路中电压的参考极性和用“+”、“-”号标注在元件或支路的两端。其中“+”号表示高电位，“-”号表示低电位，如图 1-3a 所示。图中方框表示一个元件。电压的参考极性也称做参考方向。

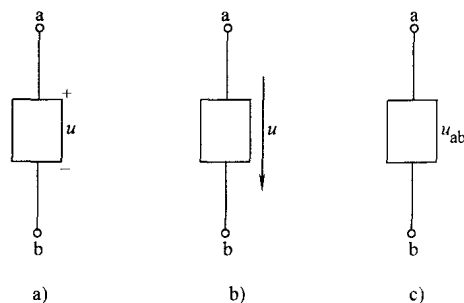


图 1-3

在电路中也可以用箭头表示电压的参考方向，如图 1-3b 所示，也可以用双下标表示电压的参考方向，如图 1-3c 所示， $u_{ab}$  表示 a 为参考方向的高电位端，b 为参考方向的低电位端。由电压的参考极性和电压的正负值，就可以判断电位的高低。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。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。所以在求解电路时必须先选定电压的参考极性。

为方便起见，我们常采用关联（associated）的参考方向，所谓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，只要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 所示，N 表示电路的一个部分，它有两个端子与外电路连接，电流  $i$  的参考方向自电压  $u$  的正极性端流入电路，从负极性端流出，两者参考方向一致，所以是关联参考方向。图 1-4c 所示电流和电压的参考方向是非关联的。

在国际单位制（SI）中，电压的单位为伏特（简称伏，用 V 表示）。

$$1\text{V} = \frac{1\text{J}}{1\text{C}} \quad 1\text{伏} = \frac{1\text{焦}}{1\text{库}}$$

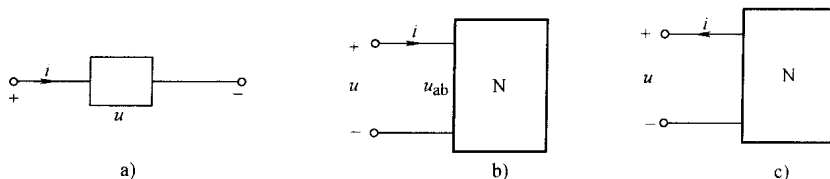


图 1-4

### 1.2.3 功率

在电路的分析和计算中,能量和功率的计算是十分重要的。这是因为电路在工作状态下总伴随有电能与其他形式能量的相互交换;另一方面,电气设备、电路部件本身都有功率的限制,在使用时要注意其电流值或电压值是否超过额定值,过载会使设备或部件损坏,或不能正常工作。

功率(power)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 $dw$ 时则电路吸收的功率为

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

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

$$P = ui \quad (1-4)$$

因为 $u$ 、 $i$ 均为代数量所以功率也应为代数量。当 $P > 0$ 时表示该支路实为吸收功率;当 $P < 0$ 时表示该支路实为产生功率。

如果支路电压和电流取非关联参考方向,则可看成电流与图1-4a所示的方向相反,故功率的表示式为

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

根据所取电压、电流参考方向是否关联,可选用相应的计算公式。若算出的功率为正,表示该支路吸收功率;若算出的功率为负,表示该支路提供功率。

在国际单位制中,功率的单位为瓦特(简称瓦,用W表示)。

安(A)、伏(V)、瓦(W)是以上三个电路变量的主单位,在实际应用中有时感到这些单位太大或太小,使用不便。为此常采用辅助单位,在其主单位前冠以表1-1所示的词头或乘以因数 $10^n$ 来表示。

表 1-1 部分 SI 词头

国际符号	中文(原文)名称	因数	国际符号	中文(原文)名称	因数
T	太(tera)	$10^{12}$	m	毫(milli)	$10^{-3}$
G	吉(giga)	$10^9$	$\mu$	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 如图 1-5 所示电路, 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) 各二端元件吸收的功率;
- (2) 整个电路吸收的功率。

解 (1) 根据式(1-4)和式(1-5)

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

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

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

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

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

(2) 整个电路吸收的功率为

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

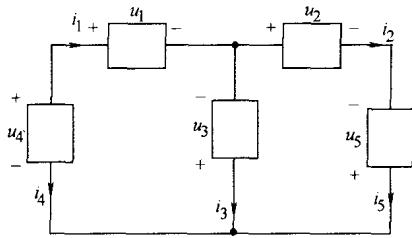


图 1-5 例 1-1 电路

### 1.3 基尔霍夫定律

基尔霍夫定律 (Kirchhoff's Law) 是任何集中参数电路都适用的基本定理, 它包括电流定律和电压定律。基尔霍夫电流定律描述电路中各电流的约束关系, 基尔霍夫电压定律描述电路中各电压的约束关系。

先介绍有关的几个名词:

支路 (branch): 电路中每一个二端元件称为一条支路。其电流和电压分别称为支路电流和支路电压。

节点 (node): 电路中支路的连接点称为节点。图 1-6 所示电路中共有 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 点就不再是节点。这样的定义, 显然比前面的定义支路数和节点数要减少, 对分析求解电路是方便的。

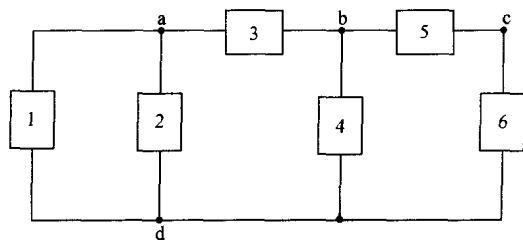


图 1-6

回路 (loop): 电路中的任一个闭合路径称为回路。例如: 图 1-6 中, 由元件 1、2 构成的路径, 由元件 2、3、4 构成的路径, 由元件 4、5、6 构成的路径, 由元件 1、3、4 构成的路径, 由元件 2、3、5、6 构成的路径, 由元件 1、3、5、6 构成的路径都是回路, 该电路有 6 个回路。

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

孔。

在集中参数电路中，任何时刻流经元件的电流以及元件端电压都是可确定的物理量。支路电流和支路电压是集中电路中分析和研究对象。

集中电路的基本规律，包含两方面的内容。一是电路整体结构遵循的规律，另一个是电路的各个组成部分的特性，统称为电路的两类约束，在分析电路时这两方面都是不可缺少的。因为，电路是由元件组合而成的，整个电路表现如何，既要看这些元件是怎样连接而成的一个整体，又要看每个元件各具有什么特性。本节先讨论电路整体的基本规律，即基尔霍夫定律。

### 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，它表明了电路中各支路电流间必须遵循的规律，这个规律体现在电路的各个节点上，具体内容是：对于任一集中电路中的任一节点，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

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

式中， $i_k$  为流出（或流入）该节点的第  $k$  条支路的电流， $k$  为与该节点相联的支路数。

以图 1-7 为例，对节点①应用 KCL 有

$$i_1 + i_4 - i_6 = 0$$

上式可改写为

$$i_1 + i_4 = i_6$$

此式表明，流出节点①的电流等于流入该节点的电流。

因此，KCL 的数学表示式又可以写成

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

基尔霍夫电流定律不仅适用于节点

点，也可以推广运用到电路中任一假设的封闭面，例如图 1-7 中虚线所示的封闭面  $S$ 。对于节点①、②和③有

$$i_1 + i_4 - i_6 = 0$$

$$-i_2 - i_4 + i_5 = 0$$

$$i_3 - i_5 + i_6 = 0$$

把对节点①、②、③有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  $S$  的所有支路电流的代数和为零。这种封闭面在电路中也称广义节点。在列写 KCL 方程时，根据各支路电流的参考方向，以流入为正（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。由基尔霍夫电流定律可看

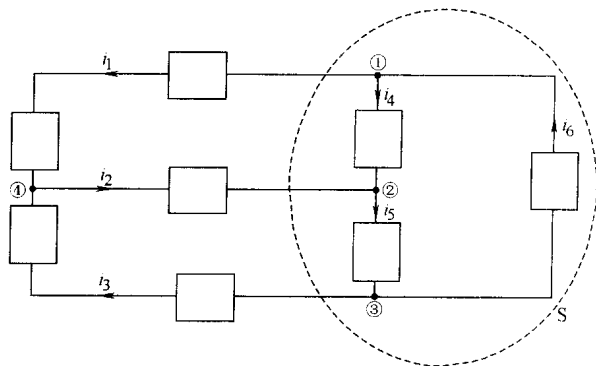


图 1-7

到：每一个 KCL 方程中的各个电流彼此相约束。KCL 适用于任何集中参数电路，它仅与电路中节点与支路的连接方式有关，而与元件的特性无关。

例 1-2 图 1-8 表示某复杂电路中的一个节点处，已知  $i_1 = 5A$ ， $i_2 = 2A$ ， $i_3 = -3A$ ，试求流过元件 A 的电流  $i_4$ 。

解  $i_1$ 、 $i_2$ 、 $i_3$  和  $i_4$  是汇集于该节点的所有支路电流，满足 KCL，已知其中任意三个电流，即可确定另一电流。列写节点的 KCL 方程

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

$$i_4 = i_2 + i_3 - i_1$$

把已知数据代入得

$$i_4 = 2A + (-3A) - 5A = -6A$$

$i_4$  为负值说明  $i_4$  的实际方向与参考方向相反。

通过这个例题可看到：在运用 KCL 时有两套符号，

其一是方程中各项前的正、负符号，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、流入为负；另一是电流本身数值的正、负号，该正负取决于电流的实际方向和参考方向的关系。

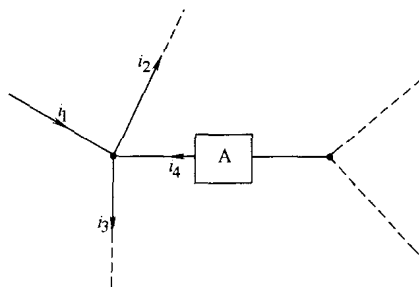


图 1-8 例 1-2 图

### 1.3.2 基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电压定律 (Kirchhoff's Voltage Law) 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。具体内容为：对于任一集中电路中的任一回路，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

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

式中， $u_k$  为该回路中的第  $k$  条支路电压， $k$  为该回路中支路数。

在列写 KVL 方程时，必须先假定回路的绕行方向即回路的参考方向，绕行方向可选为顺时针方向，也可选为逆时针方向，一般在回路中用带箭头的实线表示，如图 1-9 中所示。

列写 KVL 方程时，在选定的绕行方向下，支路电压的参考极性与回路绕行方向一致的取正号，支路电压参考极性与回路绕行方向相反的取负号，图 1-9 所示回路的 KVL 方程为

$$u_1 + u_2 - u_3 + u_4 = 0$$

上式可改写为

$$u_3 = u_1 + u_2 + u_4$$

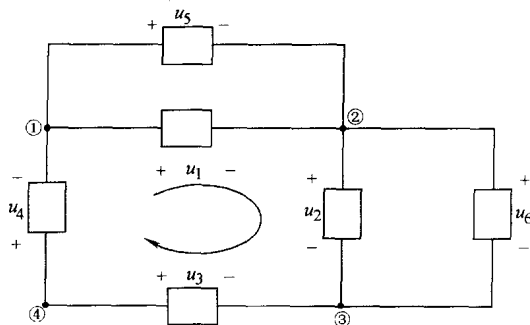


图 1-9

可以看出左端为回路中电压升之和，右端为回路中电压降之和。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，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。基尔霍夫电压定律实

质是能量守恒定律的体现。

由基尔霍夫电压定律可看到：每一个 KVL 方程中的各个电压彼此相约束，即每一个回路中任一电压的取值都必须受其回路中其他电压的约束，KVL 适用于任何集中参数电路，它仅与电路中元件的连接方式有关，而与电路元件性质无关。

注意：列写 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关系，当支路电压参考极性与绕行方向相同时取正号，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。

KCL 是电荷守恒法则运用于集中电路的结果；KVL 是能量守恒法则和电荷守恒法则运用于集中电路的结果。前者反映电路中支路电流间的约束关系；后者反映电路中各支路电压间的约束关系。

**例 1-3** 求图 1-10 所示电路中，已知各元件的电压  $u_1 = u_6 = 2V$ ， $u_2 = u_3 = 3V$ ， $u_4 = -7V$ ，试求  $u_5$ 。

**解** 选回路的绕行方向，如图中所示，列写 KVL 方程

$$-u_1 + u_2 + u_3 + u_4 - u_5 - u_6 = 0$$

将已知数据代入得

$$-2V + 3V + 3V + (-7V) - u_5 - 2V = 0$$

$$\text{解得} \quad u_5 = -5V$$

$u_5$  为负值说明  $u_5$  的实际极性与参考极性相反。

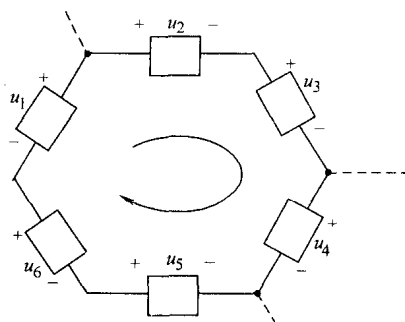


图 1-10 例 1-3 图

## 1.4 电阻元件

集中参数电路由电路元件连接而成。电路元件是为建立实际电气元件的模型而提出的一种理想元件，它们都有精确的定义。根据电路元件与外电路连接端点的数目，电路元件可分为二端元件、三端元件、四端元件等。本节介绍一种常用的二端电阻元件。

电阻元件（简称电阻 resistor）是电路中最经常用到的元件之一。前面已指出电路分析中所说的电阻元件是从实际电阻器抽象出来的模型。其电路符号如图 1-11a 所示。在电压、电流取关联参考方向的条件下，其电压、电流关系（Voltage Current Relation, VCR）（简称伏安关系）表述为

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

这个式子即为物理学中的欧姆定律。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。其伏安特性曲线如图 1-11b 所示，它是通过坐标原点的一条直线，其斜率为  $R$ ，即电阻值可由直线的斜率来确定。由式 (1-9) 定义的电阻元件，称为线性电阻元件。

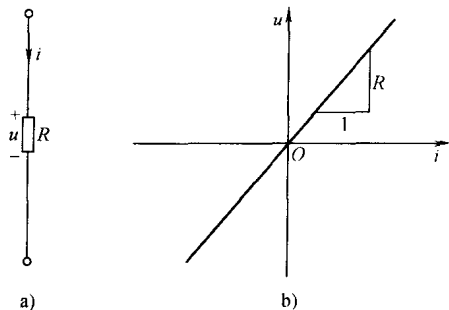


图 1-11

a) 线性电阻的符号 b) 线性电阻元件的伏安特性曲线



需要注意的是图 1-11a 中, 如果  $u$ 、 $i$  取非关联参考方向, 其 VCR 的表达式为

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

电阻元件的伏安关系还可以用另一种形式表示

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

式中,  $G = 1/R$ , 称为电导 (conductance)。在国际单位制中, 电压的单位为伏 (V), 电流的单位为安 (A), 电阻的单位为欧姆 (简称欧, 符号为  $\Omega$ ), 电导的单位为西门子 (简称西), 国际符号为 S。

从式 (1-9) 可看出, 当电压一定时, 电阻愈大, 电流愈小。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, 在电压电流取关联参考方向下, 线性电阻的功率为

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

因为  $i^2$  (或  $u^2$ ) 总为正值, 且  $R \geq 0$ , 所以电阻吸收的功率总为正值, 说明电阻是一种耗能元件。通常我们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元件时, 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 1-11b 都可以看到: 在任一时刻电阻端电压 (或电流) 是由同一时刻的电流 (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) 在历史上曾对它起过的作用。因此, 电阻是一种无记忆 (memoryless) 的元件。这种性质不仅仅是线性电阻所具有, 任何一个二端元件只要它的电压与电流之间存在代数关系, 不论这一关系是线性的还是非线性的都具有这种性质。

电阻元件的一般定义为: 任何一个二端元件, 在任一时刻其电压  $u(t)$  与电流  $i(t)$  之间存在代数关系  $f(u, i) = 0$ , 亦即这一关系在  $u-i$  平面 (或  $i-u$  平面) 上, 由唯一的一条过零点的曲线所决定, 不论电压或电流的波形如何, 则此元件就称为电阻元件。

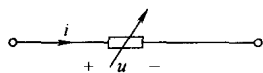


图 1-12 非线性电阻的符号

欧姆定律所描述的仅仅是线性电阻。除线性电阻外还有非线性电阻。凡元件在  $u-i$  平面上, 有确定的一条特性曲线, 但不是通过原点的直线, 都属于非线性电阻元件, 非线性电阻的电路符号如图 1-12 所示。许多电子器件可用非线性电阻构成其电路模型, 例如电子线路中常用到的半导体二极管如图 1-13a 所示, 其伏安特性曲线如图 1-13b 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简单的参数  $R$  或  $G$  来表述, 其函数关系也很难用解析式较精确地描述, 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。

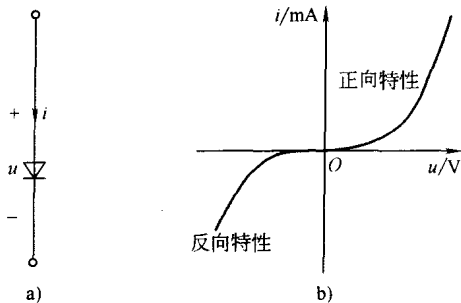


图 1-13

a) 二极管符号 b) 二极管的伏安特性曲线