

● 吴大正 王玉华

# 电路基础



● 西安电子科技大学出版社

## 内 容 提 要

本书内容符合经国家教委批准的工科电工课程教学指导委员会于1986年制订的高等工业学校《电路分析基础课程(90~120学时)教学基本要求》，按照西安电子科技大学《电路分析基础教学大纲》，结合多年的教学实践，在集体讨论的基础上写成。

全书包括：电路的基本规律、电阻电路分析、动态电路、正弦稳态分析、频率响应、二端口电路和非线性电路等七章。

本书编写中注意了微电子技术的发展趋向和计算机手段的进展；本着加强基础、逐步更新的精神，在内容安排上，既遵循电路理论本身的规律，又注意了符合学生的认识规律。经试用效果较好。

本书可作为电子、通信类专业电路分析基础课程本科生教材，也可供其它专业选用或有关科技人员参考。

## 电 路 基 础

吴大正 王玉华

责任编辑 叶德福

---

西安电子科技大学出版社出版发行

西安电子科技大学印刷厂印刷

新华书店经销

开本 787×1092 1/16 印张 27 4/16 字数 648 千字

1991年8月第1版 1991年8月第1次印刷 印数 1-6 000

---

ISBN7-5606-0164-2/TM·0003 定价：9.85元

# 前 言

多年来,在《电路分析基础》课程的教学过程中,先后使用过多种教材和讲义。为适应电子技术和电路理论的迅速发展,根据国家教委颁布的《电路分析基础课程教学基本要求》和我校的《教学大纲》,在教学实施中,对教材内容不断地进行了调整、提炼和更新,逐步形成了有一定特色的讲稿,经试用修改后,编写了这本教材。

编写中主要考虑了以下几个方面。

为适应微电子技术的进展,本书突出了端口特性、端口等效和端口线性的概念,用前后一致的观点和分析方法处理教学内容。强调了端口等效是指“端口伏安特性完全相同”的数学描述;将齐次定理、叠加定理并列,更完整地阐明了线性性质。这不仅使等效、线性等物理含义表述得更为准确,而且更为深刻、广泛。书中还从端口特性的角度介绍并分析了运算放大器、有源滤波器、回转器等,引出了分析非线性电路的分段线性化方法。

为了适应计算机辅助分析和设计的进展,本书有针对性地加强了有关基本概念和基本分析方法。强调了基本方程的列写和灵活运用,介绍了 $2b$ 法、支路法、特勒根定理等内容,降低了用手工计算复杂电路数值解的要求,删去了与计算机辅助分析重复的内容。

考虑到目前学生的物理学知识水平,适当地提高了教材的起点,对在物理中已学过的内容只作必要的说明,并在此基础上加深和提高。

在编写中,充分考虑了本教材的教学适用性。在内容安排上,既遵循电路理论本身的系统和结构,也注意了适应学生的认识规律。合理地、有序地组织教材内容,使各章、节的中心明确,层次清楚、概念准确、论述简明。对概念、定理、方法等不仅正确地表述其内容,更要阐明其具体应用条件、场合以及在不同情况下如何变通处理等。书中配有较多的例题,用以加深对概念的理解和说明如何灵活运用基本概念和方法分析具体的电路问题,介绍了一些实用电路和实际知识。各章均有数量较多的习题,供选用。

本书包括:电路的基本规律,电阻电路分析,动态电路,正弦稳态分析,频率响应,二端口电路,非线性电路等7章。法定单位,复数及其运算列为附录。书中标有\*号的属加深加宽的内容,请酌情选用。本书教学时数约为90~100学时。

本书第一、二、五、七章由吴大正编写并负责全书统稿,第三、四、六章由王玉华编写。

本书的编写得到校有关部门和十二系领导的指导和支持。本书无论从内容安排到具体的论述,也贯注了本校从事电路课教学的各位老师多年来教学实践的成果。张永瑞、杨林耀、燕庆明三位副教授对本书初稿,提出了许多宝贵的意见,在此一并表示诚挚的感谢。

由于编者水平有限,定有不少错误和不妥之处,敬请使用本书的老师和同学赐教。

编者

1990年10月

# 目 录

<b>第一章 电路的基本规律</b> .....	1	<b>第二章 电阻电路分析</b> .....	59
§ 1.1 引言 .....	1	§ 2.1 图与电路方程 .....	59
一、 电路模型 .....	1	一、 图 .....	59
二、 集中参数电路 .....	1	二、 回路、割集、树 .....	60
三、 电路理论与本书的任务 .....	2	三、 KCL 和 KVL 的独立方程 .....	63
§ 1.2 电流、电压、功率 .....	3	§ 2.2 2b 法和支路法 .....	64
一、 电流 .....	3	一、 2b 法 .....	64
二、 电压 .....	4	二、 支路法 .....	66
三、 功率和能量 .....	5	§ 2.3 回路法和网孔法 .....	68
§ 1.3 基尔霍夫定律 .....	6	§ 2.4 节点法 .....	74
一、 电路图 .....	6	一、 节点法 .....	74
二、 基尔霍夫电流定律 .....	7	二、 节点方程的矩阵形式 .....	79
三、 基尔霍夫电压定律 .....	9	§ 2.5 齐次定理和叠加定理 .....	82
§ 1.4 电路元件(无源元件) .....	10	一、 齐次定理 .....	82
一、 电阻 .....	11	二、 叠加定理 .....	84
二、 电容 .....	13	三、 线性 .....	88
三、 电感 .....	17	§ 2.6 替代定理 .....	91
四、 理想变压器 .....	19	§ 2.7 等效电源定理 .....	93
§ 1.5 电源(有源元件) .....	20	一、 等效电源定理 .....	93
一、 电压源 .....	20	二、 最大功率传输条件 .....	100
二、 电流源 .....	21	§ 2.8 特勒根定理 互易定理 .....	103
三、 电路中的参考点 .....	23	一、 特勒根定理 .....	103
四、 受控源 .....	25	二、 互易定理 .....	107
§ 1.6 不含独立源电路的等效 .....	28	§ 2.9 对偶性 .....	108
一、 电阻的串联和并联 .....	28	习 题 .....	112
二、 电阻 Y 形与 $\Delta$ 形联接的等效 变换 .....	32	<b>第三章 动态电路</b> .....	121
三、 等效电阻 .....	35	§ 3.1 电路方程及其解 .....	121
四、 电容、电感的串联和并联 .....	37	一、 电路方程 .....	121
§ 1.7 含独立源电路的等效 .....	39	二、 固有响应与强迫响应 .....	122
一、 独立源的串联和并联 .....	39	三、 零输入响应与零状态响应 .....	126
二、 电源的等效变换 .....	41	§ 3.2 电路的状态与初始值 .....	128
三、 电源的等效转移 .....	44	一、 电路的状态 .....	128
§ 1.8 运算放大器的线性模型 .....	46	二、 初始值的计算 .....	130
习 题 .....	51	§ 3.3 一阶电路的响应 .....	134
		一、 三要素公式 .....	134

二、	三要素的计算	136	一、	全耦合变压器	224
三、	一阶电路的积分解	144	二、	理想变压器	226
§ 3.4	一阶电路的阶跃响应	146	三、	实际变压器的模型	230
一、	单位阶跃函数	146	§ 4.8	谐振电路	231
二、	一阶电路的阶跃响应	148	一、	串联谐振电路	231
§ 3.5	二阶电路分析	151	二、	品质因数	234
一、	$rLC$ 串联电路的零输入响应	152	三、	并联谐振电路	236
二、	$rLC$ 串联电路的阶跃响应	156	四、	实用的谐振电路	240
三、	$GCL$ 并联电路分析	158	§ 4.9	三相电路	245
§ 3.6	正弦激励下一阶电路的零状态 响应	160	一、	三相电源	245
习 题		162	二、	对称三相电路	247
第四章	正弦稳态分析	170	三、	不对称三相电路的概念	251
§ 4.1	正弦电压与电流	170	习 题		253
一、	正弦量的三要素	170	第五章	频率响应	266
二、	相位差	171	§ 5.1	频率响应与网络函数	266
三、	正弦量的有效值	172	一、	频率响应	266
§ 4.2	相量法的基本概念	174	二、	复频率	270
一、	正弦量与相量	174	三、	网络函数	271
二、	正弦量的相量运算	175	§ 5.2	一阶电路	274
§ 4.3	电路定律的相量形式	177	一、	低通电路	275
一、	KCL 和 KVL 的相量形式	177	二、	高通电路	278
二、	基本元件 VAR 的相量形式	178	三、	全通电路	279
§ 4.4	阻抗与导纳	183	§ 5.3	二阶函数	281
一、	阻抗	183	一、	二阶函数与二阶电路	281
二、	导纳	186	二、	二阶函数的极点	284
三、	阻抗与导纳的关系	188	§ 5.4	低通电路和高通电路	285
四、	正弦稳态电路的计算	190	一、	低通电路	285
§ 4.5	正弦稳态电路的功率	200	二、	高通电路	290
一、	一端口电路的功率	200	§ 5.5	带通电路和带阻电路	291
二、	平均功率、无功功率和视在功率	202	一、	带通电路	291
三、	复功率	204	二、	带阻电路	300
四、	最大功率传输条件	207	三、	全通电路	302
§ 4.6	互感耦合电路	211	习 题		304
一、	耦合电感	211	第六章	二端口电路	311
二、	耦合电感的伏安关系	212	§ 6.1	引言	311
三、	去耦等效电路	216	§ 6.2	二端口电路的方程和参数	312
四、	互感电路的正弦稳态计算	217	一、	开路和短路参数	312
§ 4.7	变压器	224	二、	传输参数	318
			三、	混合参数	319

§ 6.3	二端口网络的联接 .....	325	二、	非线性电容 .....	371
一、	级联 .....	325	三、	非线性电感 .....	373
二、	串联和并联 .....	327	§ 7.2	非线性电阻的串联与并联 .....	374
三、	二端口网络联接的相容性 .....	330	一、	非线性电阻的串联 .....	374
§ 6.4	二端口网络的网络函数 .....	332	二、	非线性电阻的并联 .....	376
一、	驱动点函数 .....	332	三、	凹电阻和凸电阻 .....	378
二、	转移函数 .....	335	§ 7.3	非线性电阻电路分析 .....	379
三、	影像参数 .....	338	一、	电路方程 .....	379
§ 6.5	二端口电路的等效 .....	340	二、	图解法 .....	380
一、	二端口电路(含独立源)表示 定理 .....	340	三、	分段线性化法 .....	383
二、	二端口电路(不含独立源)的 等效 .....	342	四、	小信号分析法 .....	385
§ 6.6	二端口元件 .....	345	* § 7.4	非线性动态电路 .....	388
一、	广义导抗变换器和倒量器 .....	345	一、	电路方程 .....	388
二、	负阻抗变换器 .....	349	二、	平衡点 .....	390
三、	回转器 .....	350	三、	分段线性化法 .....	393
* § 6.7	不定导纳矩阵 .....	352	习 题 .....		399
一、	不定导纳矩阵 .....	352	附录 .....		408
二、	不定导纳矩阵的运算 .....	355	附录一	法定单位 .....	408
习 题 .....		360	附录二	复数及其运算 .....	408
第七章	非线性电路 .....	368	一、	复数 .....	408
§ 7.1	非线性元件 .....	368	二、	复数的代数运算 .....	410
一、	非线性电阻 .....	368	三、	算子 $R_c$ 的运算规则 .....	411
			参考书目 .....		414
			部分习题答案 .....		415

# 第一章 电路的基本规律

## § 1.1 引言

### 一、电路模型

实用的电路是由零、部件(如电阻器、电容器、线圈、开关、晶体管、电池、发电机等)按一定的方式相互连接组成的。它们可完成各种具体任务:譬如,电力系统的发电机将热能(或水位能、原子能等)转换为电磁能,经输电线传送给各用电设备(如电灯、电炉、电动机等),这些设备将电磁能转换为光、热、机械能等。我们把供给电磁能的设备统称为电源,把用电设备统称为负载。又如,生产过程中的控制电路是用传感器将所观测的物理量(如温度、流量、压力等)变换为电信号(电压或电流),经过适当的“加工”处理得出控制信号,用以控制生产操作(如断开电炉的电源停止加热或接通电源加热等)。电视机是将接收到的高频电信号经过变换、处理(如选频、放大、解调等),将分离出的图像信号送到显像管,在控制信号的作用下,将信号显示为画面;同时将伴音信号传送到扬声器转换为声音。实际电路的功能是多种多样的,概括地说,电路的主要作用是能量的传输和信号的处理。

分析任何一个物理系统,都要用理想化的模型描述该系统。经典力学中的质点是小物体的模型,质点的几何尺寸为零,但确有一定的质量、有确定的位置、速度等等。

要分析实际电路的物理过程也需构造出能反映该实际电路物理性质的理想化模型,也就是把一些理想化的元件,相互连接组成理想化电路(电路模型),用以描述该实际电路。进而对电路模型进行分析,其所得结果就反映了实际电路的物理过程。

电路理论研究的对象不是实际电路,而是其理想化的模型。电路理论中所说的电路是指由一些理想化的电路元件,按一定规律相互连接组成的总体。

### 二、集中参数电路

电路理论主要研究电路中发生的电磁现象,用电流、电压(有时还用电荷、磁通)来描述其中的过程。我们只关心各器件端电流和端子间的电压,而不涉及器件内部的物理过程。这只有在满足集中化假设的条件下才是合理的。

实际的器件、连接导线以及由它们连接成的实际电路都有一定的尺寸、占有一定的空间,而电磁能量的传播速度是有限的( $3 \times 10^8$  m/s),如果电路尺寸远远小于其工作波长 $\lambda$ ,可以认为传送到实际电路各处的电磁能量是同时到达的。这时,与电磁波的波长相比,电路尺寸可以忽略不计。从电磁场理论的观点看来,整个实际电路可看作是电磁空间的一个点,这与经典力学中把小物体看作质点相类似。

---

\* 若工作频率为 $f$ 单位(Hz),相应的工作波长为 $\lambda$ (单位m),则电磁波的传播速度 $c = f\lambda = 3 \times 10^8$  m/s.

当实际电路的几何尺寸远小于工作波长时，我们用能充分反映其电磁性质的一些理想电路元件或它们的组合来模拟实际元件。这种理想化的电路元件称为集中(或集总)参数元件。它们有确定的电磁性质和确切的数学定义。可以认为，电磁能量的消耗都集中于电阻元件，电能只集中于电容元件，磁能只集中于电感元件。这些具有二端子的集中参数元件，可用其流经端子的电流和二端子间的电压来描述它们的电磁性能，而端电流和端子间的电压仅是时间的函数，与空间位置无关，在任一时刻，它们都是单值的量。

由集中参数元件联接组成的电路称为集中参数电路。基尔霍夫定律是适合于分析集中参数电路的重要定律。通常所说的电路图是用“理想导线”将一些电路元件符号按一定规律联接组成的图形。在那里，元件符号的大小，连接线的长短和形状都是无关紧要的，只要能正确地表明各电路元件之间的连接关系即可。

实际电路的几何尺寸相差甚大。对于电力输电线，其工作频率为 50 Hz，相应的波长为 6 000 km，因而 30 km 长的输电线只有波长的  $1/200$ ，可以看作是集中参数电路，而远距离输电线可长达数百乃至数千公里，就不能看作是集中参数电路。对于电视天线及其传输线来说，其工作频率为  $10^8$  Hz 的数量级，譬如 10 频道，其工作频率约为 200 MHz，其相应的工作波长为 1.5 m，这时 0.2 m 长的传输线也不能看作是集中参数电路。对于不符合集中化假设的实际电路，需要用分布参数电路理论或电磁场理论来研究。本书只讨论集中参数电路。今后所说的“元件”、“电路”都指理想化的集中参数的元件和电路。

需要注意的是，不应把实际器件(有的也称为元件)与电路元件(理想化的)混为一谈。各种电子设备使用的电阻器、电容器、线圈、晶体管等，在一定工作条件下，常可用某种电路元件或一些电路元件的组合来模拟。同一个器件，由于工作条件不同或精度要求不同，它的模型也不相同。譬如，一个线圈可用电感元件做它的模型；在需要考虑其能量损耗时，它可以用电阻与电感元件相串联构成的模型来描述；在高频时，线圈绕线之间的分布电容就不能忽视，这时，描述该线圈的更精确的模型还应包含电容元件。

用理想化的模型模拟实际电路总有一定的近似性，也就是说，用电路元件互连来模拟实际电路，只能近似地反映实际电路中所发生的物理过程。不过，由于电路元件有确切的定义，分析运算是严谨的，这就能保证这种近似有一定的精度，而且还可根据实际情况改善电路模型，使电路模型所描述的物理过程更加逼近实际电路的物理过程。大量的实践表明，只要电路模型选取适当，按理想化电路分析计算的结果与相应的实际电路的观测结果是一致的。当然，如果电路模型选取不当，则会造成较大的误差，有时甚至得出互相矛盾的结果。

### 三、电路理论与本书的任务

电路理论起源于物理学中电磁学的一个分支，若从欧姆定律(1827年)和基尔霍夫定律(1845年)的发表算起，至今已约有 150 年的历史。随着电力和通信工程技术的发展，逐渐形成为一门比较系统且应用广泛的工程学科。自本世纪 60 年代以来，新的电子器件不断涌现，集成电路、大规模集成电路、超大规模集成电路的飞跃进展，计算机技术的迅速发展和广泛使用等等，都给电路理论提出了新课题，促进了电路理论的发展。

电路理论是研究电路的基本规律及其计算方法的工程学科。它包括电路分析和网



路\*综合与设计两类问题: 电路分析的任务是根据已知的电路结构和元件参数, 求解描述电路性能的特性; 电路综合与设计是依据所提出的对电路性能的要求, 确定合适的电路结构和元件参数, 实现所需要的电路性能。近年来, 有些学者认为电路的“故障诊断”应作为电路理论的第三类问题。电路的故障诊断是指预报故障的发生及确定故障的位置、识别故障元件的参数等技术。电路综合与设计、电路的故障诊断都以电路分析为基础。

电路理论的内容十分广泛, 它是电工和电子科学技术的重要理论基础之一。在通信、控制、计算机、电力等众多科学技术领域, 广泛使用各种类型的电路: 线性的与非线性的、时变的与非时变的、模拟的与数字的, 等等, 它们种类繁多、功能各异。电路理论基础的任务是研讨各种电路共有的基本规律和基本分析计算方法。

作为电路理论的基础和入门, 本书主要讨论电路分析的基本规律(电路元件的伏安关系、基尔霍夫定律和电路定理)和基本分析计算方法, 为学习后续课程打下基础。

学习本课程, 应深入地理解电路的基本规律及有关物理概念, 学会分析计算电路的方法, 并充分了解这些规律、概念、方法的适用范围和使用条件, 以使用所学的电路基础理论知识去解决今后学习和工作中所遇到的电路问题。

## § 1.2 电流、电压、功率

描述电路性能的物理量可分为基本变量和复合变量两类。基本变量包括电流、电压, 有时还包括电荷、磁通(或磁链); 复合变量包括功率和能量。一般它们都是时间的函数。

### 一、电流

电荷有规则的定向运动就形成电流。单位时间内通过导体横截面的电荷量  $q$  定义为电流强度, 用符号  $i$  或  $i(t)$  \*\* 表示, 即

$$i(t) \triangleq \frac{dq(t)}{dt} \quad (1.2-1)$$

电流强度也简称电流。这样, “电流”一词既代表一种物理现象, 也代表一种物理量。

习惯上把正电荷运动的方向规定为电流的实际方向。但在具体问题中, 电流的实际方向常常随时间变化; 即使不随时间变化, 某段电路中电流的实际方向有时也难以预先断定, 因此, 很难在电路中标明电流的

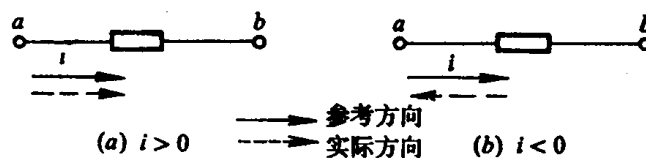


图 1.2-1 电流的参考方向

\* “电路”和“(电)网络”两个术语一般不加区分。以往, 当涉及到综合理论时, 常用“网络”一词。近来, 鉴于“网络”一词应用甚广, 如“计算机网络”、“通信网络”、“运输网络”、“信息网络”等等, 有人建议在电路领域内只用“电路”一词。这个意见目前尚未被普遍接受。

\*\* 本书用小写字母表示随时间变化的量, 如  $i(t)$ ,  $q(t)$  等, 在不致引起误会的情况下, 常省去  $(t)$ , 用  $i$ ,  $q$  表示。

实际方向。

通常在分析电路问题时，先指定某一方向为电流方向，称为电流的参考方向，用箭头表示，如图 1.2-1 中实线箭头所示。如果电流的参考方向与实际方向(虚线箭头)一致，则电流  $i$  为正值( $i > 0$ )，如图 1.2-1(a)所示；如果电流的参考方向与实际方向相反，则电流取负值( $i < 0$ )，如图 1.2-1(b)所示。这样，在指定的电流参考方向下，电流值的正或负，就反映了电流的实际方向。显然，在未指定参考方向的情况下，电流值的正或负是没有意义的。

电流的参考方向是任意指定的，一般用箭头表示；有时也用双下标表示，如  $i_{ab}$ ，表示其参考方向为由  $a$  指向  $b$ 。今后在电路图中只标明参考方向。

在国际单位制(SI)\* 中，电荷量的单位是库(C)，时间的单位是秒(s)，电流的单位是安(A)。

## 二、电压

在电路中，正电荷从电路的某点(譬如  $a$  点)移到另一点(譬如  $b$  点)是电场力对电荷作用的结果。电场力将单位正电荷从某点移到另一点所作的功定义为该两点之间的电压，用  $u$  或  $u(t)$  表示。若有正电荷量  $dq$  从某点移到另一点，电场力所作的功为  $dW$ ，则该两点间的电压

$$u(t) \triangleq \frac{dW(t)}{dq(t)} \quad (1.2-2)$$

式中，电荷量的单位是库(C)，功的单位是焦(J)，电压的单位是伏(V)。两点之间的电压也称为电位差。

通常，两点间电压的高电位端为“+”极，低电位端为“-”极。

像需要为电流指定参考方向一样，也需要为电压指定参考极性(也称为参考方向)，在分析电路问题时，先指定电压的参考极性，“+”号表示高电位端，“-”号表示低电位端，如图 1.2-2(a)所示。如果电压的参考极性与实际极性一致，电压  $u > 0$ ；如果参考极性与实际极性相反，电压  $u < 0$ 。

电压的参考极性是任意指定的，一般用“+”、“-”极性表示；有时也用箭头表示参考极性(如图 1.2-2(b))，箭头由“+”极指向“-”极；也可用双下标表示，如  $u_{ab}$ ，其中  $a$  为“+”极， $b$  为“-”极。

电流的参考方向与电压的参考极性(参考方向)在电路分析中起着十分重要的作用。

对一段电路或一个元件上电压的参考极性与电流的参考方向可以独立地任意指定，但为了方便，常常采用关联参考方向，即电流的参考方向与电压的参考方向(由“+”指向“-”)一致，如图 1.2-3(a)所示。这时在电路图上只需标明电流参考方向或电压参考极性中的任何一种即可。电流、电压参考方向相反时称为非关联参考方向，如图 1.2-3(b)所示。

今后，在任意瞬间  $t$  的电流、电压分别用  $i(t)$ 、 $u(t)$  表示，也常简写为  $i$ 、 $u$ 。如果它们的大小和方向(极性)都不随时间变化，则称为直流电流、直流电压，用大写字母  $I$ 、 $U$  表示。

\* 请参看附录一。

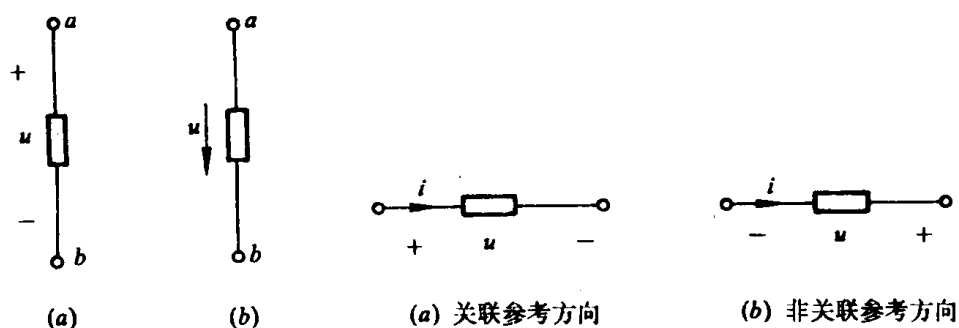


图 1.2-2 电压参考极性

图 1.2-3

### 三、功率和能量

正电荷从电路元件的电压“+”极，经元件移到“-”极是电场力对电荷做功的结果，这时元件吸收能量；如果正电荷从电路元件的电压“-”极移到“+”极，则必须由外力(化学力，电磁力等)对电荷作用以克服电场力，这时，电路元件发出能量。

若某元件两端的电压为  $u$ ，在  $dt$  时间内流过该元件的电荷量为  $dq$ ，那么，根据电压的定义式(1.2-2)，电场力作的功

$$dw(t) = u(t)dq(t)$$

在电流与电压为关联参考方向下(这时，正电荷由电压“+”极移到“-”极)，由式(1.2-1)可得，在  $dt$  时间内电场力所作的功，亦即该元件吸收的能量为

$$dw(t) = u(t)i(t)dt \quad (1.2-3)$$

能量对时间的导数是功率。于是，电路元件吸收的电功率  $p(t)$  为

$$p(t) = \frac{dw(t)}{dt} = u(t)i(t) \quad (1.2-4)$$

电功率简称功率，单位是瓦(W)。

需要注意的是，式(1.2-4)是在电压、电流为关联参考方向下推得的(参看图 1.2-4(a))，如果  $p > 0$ ，表示元件吸收功率；如果  $p < 0$ ，表示元件吸收的功率为负值，实际上它将发出功率。如果电压、电流为非关联参考方向，如图 1.2-4(b)，则用

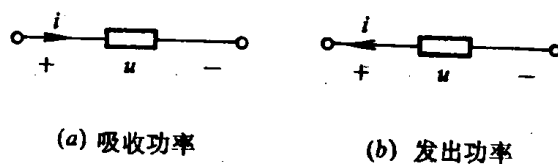


图 1.2-4 功率  $p = ui$

$p = ui$  计算所得的功率  $p$  表示元件发出的功率。在这种情况下，如果  $p > 0$ ，表示发出功率；如果  $p < 0$  表示元件发出功率为负值，实际上它将吸收功率。

设  $t = t_0$  时元件的能量为  $w(t_0)$ ， $t = t$  时元件的能量为  $w(t)$ 。对式(1.2-3)从  $t_0$  到  $t$  积分，可求得从  $t_0$  到  $t$  的时间内元件吸收的能量( $u, i$  为关联参考方向)为

$$\begin{aligned} \int_{w(t_0)}^{w(t)} dw(\xi) &= \int_{t_0}^t p(\xi)d\xi \\ &= \int_{t_0}^t u(\xi)i(\xi)d\xi \end{aligned} \quad (1.2-5)$$

上式中, 为避免积分上限  $t$  与积分变量  $t$  相混淆, 将积分变量换为  $\xi$ 。

若选  $t_0 = -\infty$ , 且假设  $w(-\infty) = 0$ , 则

$$w(t) = \int_{-\infty}^t p(\xi) d\xi = \int_{-\infty}^t u(\xi) i(\xi) d\xi \quad (1.2-6)$$

它是直到时刻  $t$ , 元件吸收的能量。

以上关于功率、能量的论述也适用于任何一段电路。

一个二端元件(或电路), 如果对于所有的时刻  $t$ , 有

$$w(t) = \int_{-\infty}^t p(\xi) d\xi \geq 0 \quad \forall t \quad (1.2-7)$$

则称该元件(或电路)是无源的, 否则就称其为有源的。在 § 1.4 和 § 1.5 中我们将分别讨论无源元件和有源元件(电源)。

### § 1.3 基尔霍夫定律

电路是由一些电路元件相互连接构成的总体。有两个引出端子的元件称为二端元件, 它的特性可用其端电压  $u$  和电流  $i$  来描述, 如图 1.3-1 所示。通常都指定其电压、电流为关联参考方向, 即电压、电流方向一致。将一些二端元件相互连接就组成了电路。分析电路问题, 首先要研究各相连元件的电压(电流)之间的相互制约关系(也称为拓扑约束), 以及各元件自身的电流与电压的关系(也称为元件约束)。这里先讨论前者, 元件的约束关系稍后再讨论。

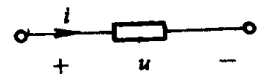


图 1.3-1 二端元件

#### 一、电路图

图 1.3-2(a)是由 6 个元件相互连接组成的电路图, 各元件的端电压、电流均为关联参考方向。如前所述, 在电流、电压参考方向一致(即其参考方向相关联)的前提下, 其参考方向可只标示一种; 再者, 如果仅研究各元件的连接关系而暂不关心元件本身的特性, 就可用一条线段来代表元件。这样, 图 1.3-2(a)的电路图就可简化表示为图 1.3-2(b)的拓扑图 \*\*, 或简称为图。标明参考方向的图称为有向图。通常图中的参考方向与相应电路图中电流(或电压)的参考方向相同。

电路图上的每一个元件, 即图中的每一条线段, 称为支路(图论中常称为边), 支路的连接点称为节点(或顶点)。图 1.3-2(a)和(b)中共有 1, 2, ..., 6 等 6 条支路; 有  $a, b, c, d$  等 4 个节点。在图中, 从某一节点出发, 连续地经过一些支路和节点(只能各经过一次), 到达另一节点, 就构成路径。如果路径的最后到达点就是出发点, 就称之为闭合路径。由支路(经有关节点)构成的闭合路径称为回路 \*\*\* 图 1.3-2 中, 支路(1, 5, 2),

\* 数学符号  $\forall$  的意思是所有的, 一切的。  $\forall t$  意思是对于所有的时刻  $t(t > -\infty)$ 。

\*\* 拓扑图, 简单地讲就是图形可以作弹性运动, 其各线段可以随意伸长、缩短、弯曲、拉直等, 但图形的连接关系不能改变。

\*\*\* 关于支路、节点、回路等有关图的知识, 将在 § 2.1 中进一步说明。

(4, 5, 6), 及(2, 5, 6, 3)等都是回路。

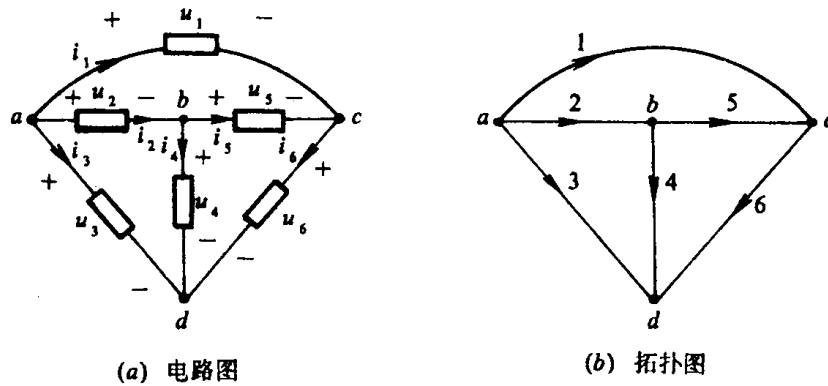


图 1.3-2 电路图及其拓扑图

描述集中参数电路中支路电流之间的关系和支路电压之间的关系的基本规律是基尔霍夫电流定律(KCL)\* 和基尔霍夫电压定律(KVL)\*\*

## 二、基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律(KCL)可表述为:

对于集中参数电路中的任意节点, 在任一时刻, 流出该节点电流的和等于流入该节点电流的和。

例如, 图 1.3-3 是某电路中的一个节点  $p$ , 按 KCL, 在任意时刻有

$$i_1(t) + i_3(t) + i_4(t) = i_2(t) + i_5(t)$$

一般可表示为: 对任一节点, 有

$$\sum_{\text{流出}} i(t) = \sum_{\text{流入}} i(t) \quad \forall t \quad (1.3-1)$$

如果流出节点的电流取“+”号, 流入节点的电流取“-”号 (或者流出取“-”, 流入取“+”), 则 KCL 可表述为:

对于集中参数电路中的任意节点, 在任一时刻, 所有连接于此节点的支路电流的代数和恒等于零, 即对任一节点有

$$\sum i(t) = 0 \quad \forall t \quad (1.3-2)$$

对于图 1.3-3 的节点  $p$ , 有  $i_1 - i_2 + i_3 + i_4 - i_5 = 0$ 。

KCL 通常用于节点, 它也可推广用于包括数个节点的闭合曲面(可称为广义节点, 即图论中的割集)。图 1.3-4 中, 对于闭面  $S$ , 有

$$-i_3 - i_4 - i_5 + i_8 + i_9 = 0$$

例 1.3-1 如图 1.3-5 的电路, 已知  $i_1 = -5$  A,  $i_2 = 1$  A,  $i_6 = 2$  A, 求  $i_4$ 。

\* KCL为Kirchhoff's Current Law 的缩写。

\*\* KVL为Kirchhoff's Voltage Law的缩写。

解 为求得 $i_4$ , 对于节点 $b$ , 根据KCL有  $-i_3 - i_4 + i_6 = 0$ , 即

$$i_4 = -i_3 + i_6$$

为求出 $i_3$ , 可利用节点 $a$ . 由KCL有  $i_1 + i_2 + i_3 = 0$ , 即

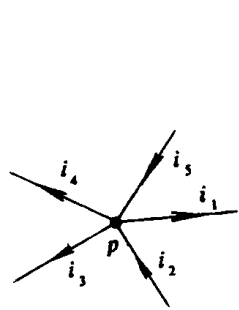


图 1.3-3

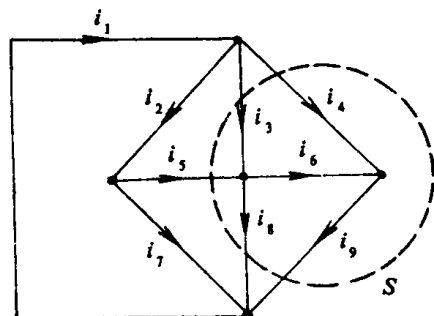


图 1.3-4

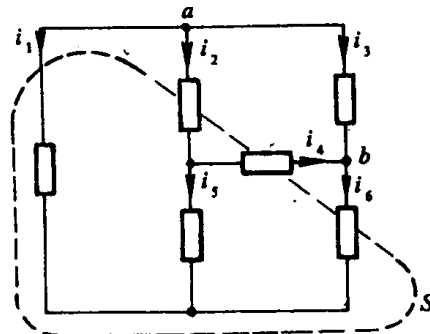


图 1.3-5

$$i_3 = -i_1 - i_2 = -(-5) - 1 = 4 \text{ A}$$

将 $i_3$ 代入 $i_4$ 的表示式, 得

$$i_4 = -i_3 + i_6 = -4 + 2 = -2 \text{ A}$$

或者, 取闭面 $S$ , 如图1.3-5中虚线所示, 根据KCL, 有

$$-i_1 - i_2 + i_4 - i_6 = 0$$

可得

$$i_4 = i_1 + i_2 + i_6 = -5 + 1 + 2 = -2 \text{ A}$$

将KCL应用于广义节点, 可得以下重要结论:

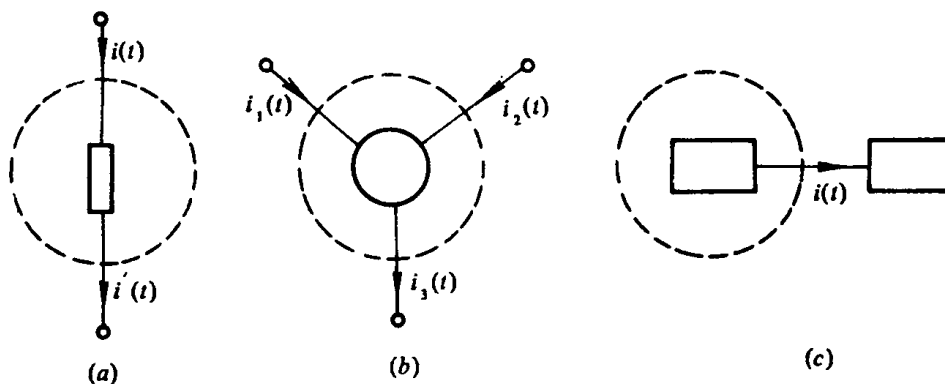


图 1.3-6

对任一集中参数的二端元件, 在任意时刻, 流入一端的电流等于从另一端流出的电流, 如图1.3-6(a)中, 有

$$i(t) = i'(t) \quad \forall t$$

对任一集中参数的三端元件, 如图1.3-6(b), 有

$$i(t) = i_1(t) + i_2(t) \quad \forall t$$

如果两个部分电路之间只有一条导线相连, 如图 1.3-6(c)所示, 则必有

$$i(t) = 0 \quad \forall t$$

### 三、基尔霍夫电压定律

图 1.3-7 是某图中的一个回路, 各支路电压的参考方向如图。我们选定该回路的绕行方向如图中虚线所示。可以看到, 支路电压  $u_1$ 、 $u_3$ 、 $u_4$  沿绕行方向为由“+”极到“-”极, 其电位是降低的, 可称之为电位降(按定义, 电位降即为电压); 而  $u_2$ 、 $u_5$  沿绕行方向为由“-”极到“+”极, 其电位是升高的, 可称为电位升。

基尔霍夫电压定律(KVL)可表述为:

对于集中参数电路中的任意回路, 在任意时刻, 电位降的和等于电位升的和。

对于图 1.3-7 中的回路, 根据 KVL, 有

$$u_1 + u_3 + u_4 = u_2 + u_5$$

一般可表示为, 对任一回路, 有

$$\sum_{\text{电位降}} u(t) = \sum_{\text{电位升}} u(t) \quad \forall t \quad (1.3-3)$$

如果按回路绕行方向, 电位降(即电压)取“+”号, 电位升取“-”号, KVL 也可表述为:

对于集中参数电路中的任意回路, 在任意时刻, 沿该回路的所有支路电压的代数和恒等于零, 即对任一回路有

$$\sum u(t) = 0 \quad \forall t \quad (1.3-4)$$

对于图 1.3-7 的回路有  $u_1 - u_2 + u_3 + u_4 - u_5 = 0$ 。

在电路分析时, 常常需要求得某两节点之间的电压。譬如图 1.3-8 中节点  $a$ 、 $d$  之间的电压  $u_{ad}$ 。为了叙述方便, 这里各支路电压用双下标表示。如图 1.3-8 中,  $u_{ab} = u_1$ ,  $u_{bc} = -u_2$ ,  $u_{cd} = u_3$ ,  $u_{de} = u_4$ ,  $u_{ea} = -u_5$ 。根据 KVL, 沿  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $e$ 、 $a$  的绕行方向有

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

亦即

$$u_{ab} + u_{bc} + u_{cd} + u_{de} + u_{ea} = 0$$

将上式中的后两项移到等号右端, 考虑到  $u_{de} = -u_{ed}$ ,  $u_{ea} = -u_{ae}$ , 可得

$$u_{ab} + u_{bc} + u_{cd} = u_{ae} + u_{ed}$$

上式等号左端是沿路径  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  的电压  $u_{ab}$ , 即

$$u_{ad} = u_{ab} + u_{bc} + u_{cd} = u_1 - u_2 + u_3$$

而等号右端是沿路径  $a$ 、 $e$ 、 $d$  的电压  $u_{ad}$ , 即

$$u_{ad} = u_{ae} + u_{ed} = u_5 - u_4$$

二者相等。

以上结果表明，在集中参数电路中，任意两点(譬如  $p$  和  $q$ )之间的电压与路径无关，它等于沿从  $p$  到  $q$  的任一路径上所有支路电压的代数和(其中电位降取“+”号，电位升取“-”号)，即

$$u_{pq}(t) = \sum_{\substack{\text{沿由 } p \text{ 到 } q \\ \text{的任一路径}}} u(t) \quad \text{V} \quad (1.3-5)$$

例 1.3-2 如图 1.3-9 的电路，已知  $u_1 = 10 \text{ V}$ ， $u_2 = -2 \text{ V}$ ， $u_3 = 3 \text{ V}$ ， $u_7 = 2 \text{ V}$ 。求  $u_5$ ， $u_6$  和  $u_{cd}$ 。

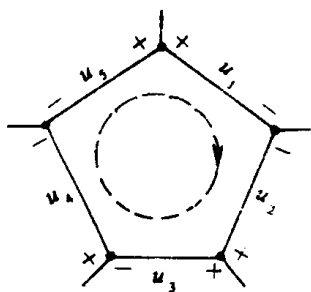


图 1.3-7

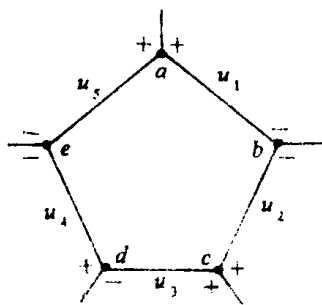


图 1.3-8

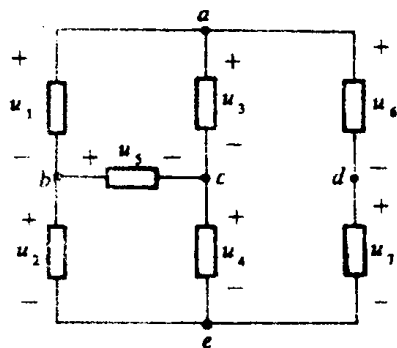


图 1.3-9

解 由图可见

$$u_5 = u_{bc} = u_{ba} + u_{ac} = -u_1 + u_3 = -7 \text{ V}$$

由于  $u_6 = u_{ad}$ ，沿  $a, b, e, d$  路径，得

$$u_6 = u_{ab} + u_{be} + u_{ed} = u_1 + u_2 - u_7 = 6 \text{ V}$$

$$u_{cd} = u_{ca} + u_{ad} = -u_3 + u_6 = 3 \text{ V}$$

或者沿路径  $c, a, b, e, d$ ，得

$$\begin{aligned} u_{cd} &= u_{ca} + u_{ab} + u_{be} + u_{ed} \\ &= -u_3 + u_1 + u_2 - u_7 = 3 \text{ V} \end{aligned}$$

基尔霍夫电流定律和电压定律是集中参数电路的基本规律。KCL 规定了电路中任一节点处，各支路电流的约束关系；KVL 规定了电路的任一回路中，各支路电压的约束关系。KCL 和 KVL 仅与电路中元件的相互连接形式有关，而与元件自身的性质无关，它是元件互联的约束关系，或称为拓扑约束。KCL 和 KVL 不仅适用于线性电路，也适用于非线性电路；不仅适用于非时变电路，也适用于时变电路。

## § 1.4 电路元件(无源元件)

在集中参数电路中，电路元件是构成电路的基本单元。按电路元件引出端(称为端子)的数目，可分为二端元件、三端元件等。在集中参数假设条件下，通常只关心元件端子上的特性(称为外部特性)，而不注意其内部的情况。



如前所述，由二端元件某端子流入的电流  $i$  等于由另一端子流出的电流  $i'$ ，如图 1.4-1(a) 所示。对于满足如此条件的一对端子，常称为端口(或简称为口)。以上条件(即  $i=i'$ )也称为端口条件。这样，二端(子)元件可称为一端口元件。相应地，也有二端口元件、多端口元件。图 1.4-1(b) 是二端口元件，对于端子 1 和 1'，有  $i_1=i_1'$ ，1-1' 是一个端口，常称为输入端口或输入口；对于端子 2 和 2'，有  $i_2=i_2'$ ，故 2-2' 是另一个端口，常称为输出端口或输出口。

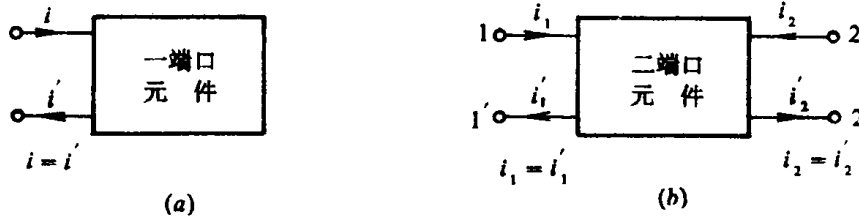


图 1.4-1

如果图 1.4-1 的方框中是电路，相应地就称其一端口电路、二端口电路。本节主要讨论电阻、电容、电感、理想变压器等无源元件。

### 一、电阻

电阻是消耗能量的元件。要了解实际耗能元件的外部特性，可以将它接上电源，并测量其端口电压  $u$  和电流  $i$ ，如图 1.4-2(a) 所示。将测量的结果描绘在以  $u$  为横坐标， $i$  为纵坐标(或以  $i$  为横坐标， $u$  为纵坐标)的平面上，如图 1.4-2(b) 所示，称其为伏安特性。用这样的方法，可以建立实际耗能元件的理想化模型——电阻元件。

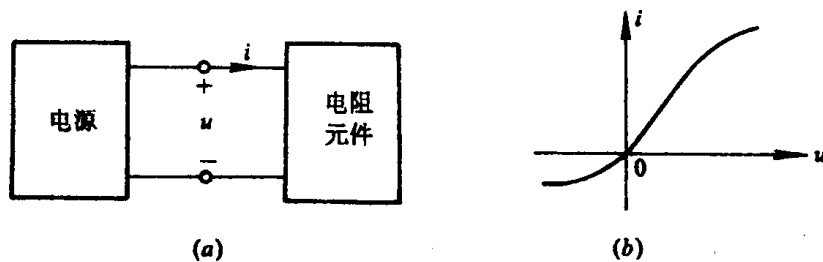


图 1.4-2 电阻元件的伏安特性

电阻元件可定义为：一个二端元件，如果在任意时刻  $t$ ，其端电压  $u$  与流经它的电流  $i$  之间的关系能用  $u \sim i$  平面(或  $i \sim u$  平面)上的曲线所确定，就称其为电阻元件。

如果电阻元件的伏安特性不随时间改变(即它不是时间的函数)，则称其为非时变(或时不变)的，否则称为时变的；如其伏安特性是通过原点的直线，则称其为线性的，否则称为非线性的。本书涉及最多的是线性非时变电阻元件。

线性非时变电阻元件的伏安特性是  $u \sim i$  平面上一条通过原点的直线，如图 1.4-3(b) 所示。在电压、电流参考方向一致(见图 1.4-3(a))的条件下，其电压与电流的关系就是熟知的欧姆定律，即