

高等学校简明通用系列规划教材

CIRCUIT ANALYSIS
BRIEF TUTORIAL

电路分析 简明教程

王松林 王 辉 编著 ◀



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

高等学校简明通用系列规划教材

电路分析简明教程

王松林 王 辉 编著

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书着重讲述电路分析的基本方法。全书共 5 章: 电路的基本概念和定律, 电阻电路分析, 正弦稳态电路分析, 频率响应与谐振电路, 动态电路的时域分析。各章配有大量例题、不同层次的习题及工程应用实例。

本书可作为普通高等学校相关专业少学时“电路”或“电路分析基础”课程教材, 也可供有关科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电路分析简明教程/王松林, 王辉编著. —西安: 西安电子科技大学出版社, 2016.9
高等学校简明通用系列规划教材
ISBN 978-7-5606-4139-3

I. ① 电… II. ① 王… ② 王… III. ① 电路分析—高等学校—教材
IV. ① TM133

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 189501 号

策 划 云立实

责任编辑 云立实 韩伟娜

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西华沐印刷科技有限责任公司

版 次 2016 年 9 月第 1 版 2016 年 9 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 15

字 数 353 千字

印 数 1~3000 册

定 价 28.00 元

ISBN 978-7-5606-4139-3/TM

XDUP 4431001-1

* * * 如有印装问题可调换 * * *

0808521

前 言

为了适应不同层次高等院校电子信息类专业和一些非电类专业对少学时电路基础课程的需求,编者根据多年教学经验专门编写了本书。

在编写过程中,编者充分考虑了本书的教学适用性,对全书内容进行了精心编排,既遵循电路理论自身的系统和结构,也注意适应读者的认识规律。通过合理、有序地组织全书内容,使各章、节的中心明确、层次清楚、概念准确,论述力求简明扼要。全书对概念、定理、方法等不仅正确地表述其内容,更阐明其具体应用条件、场合以及特殊情况下的变通处理等。书中配有较多例题,帮助读者加深对概念的理解,掌握如何灵活运用基本概念和方法分析具体的电路问题。与同类教材相比,书中加大了实用电路知识和应用实例的篇幅。全书各章均配有数量较多的习题,供读者选用。

本书共 5 章:电路的基本概念和定律、电阻电路分析、正弦稳态电路分析、频率响应与谐振电路、动态电路的时域分析。本书的教学参考时数为 46 学时。

本书由王松林策划,王松林、王辉参与全书编写。

本书的编写得到了学校有关部门的支持,还借鉴了从事电路教学的各位老师多年的教学实践成果并听取了同学们的意见,在此一并表示诚挚的感谢。

由于编者水平有限,难免存在疏漏和差错,敬请读者提出宝贵意见。

编者

2016 年 5 月

目 录

第 1 章 电路的基本概念和定律	1
1.1 电路和电路模型	1
1.1.1 电路模型	1
1.1.2 集中参数电路	2
1.2 电路变量	3
1.2.1 电流及其参考方向	3
1.2.2 电压及其参考极性	4
1.2.3 功率和能量	5
1.3 基尔霍夫定律	7
1.3.1 电路图	8
1.3.2 基尔霍夫电流定律	8
1.3.3 基尔霍夫电压定律	9
1.4 电阻元件	11
1.4.1 电阻元件	11
1.4.2 分立电阻与集成电阻	13
1.5 电源	15
1.5.1 电压源	15
1.5.2 电流源	16
1.5.3 电路中的参考点	17
1.5.4 受控源	19
1.6 电路等效	21
1.6.1 电路等效的概念	22
1.6.2 电阻的串联和并联等效	22
1.6.3 电阻 Y 形电路与 Δ 形电路的等效变换	25
1.6.4 等效电阻	27
1.7 含独立源电路的等效	29
1.7.1 独立源的串联和并联	29
1.7.2 实际电源的两种模型及其等效变换	30
1.7.3 电源的等效转移	33
1.8 动态元件	35
1.8.1 电容元件	35

1.8.2	电感元件	40
1.8.3	电感、电容的串联和并联	43
1.9	应用实例	46
1.9.1	用电安全与人体电路模型	46
1.9.2	热电导率气体分析器电路——电桥平衡	46
1.9.3	电压表电流表量程扩展	47
习题 1		50
第 2 章	电阻电路分析	57
2.1	2b 法与支路法	57
2.1.1	KCL 和 KVL 的独立方程	57
2.1.2	2b 分析法	58
2.1.3	支路法	59
2.2	回路法与网孔法	60
2.2.1	回路法与网孔法	61
2.2.2	特殊情况的处理	64
2.3	节点法	65
2.3.1	节点法	65
2.3.2	特殊情况的处理	68
2.4	齐次定理和叠加定理	70
2.4.1	齐次定理	71
2.4.2	叠加定理	73
2.5	替代定理	75
2.6	等效电源定理	78
2.6.1	戴维南定理	78
2.6.2	诺顿定理	84
2.7	最大功率传输定理	85
2.8	电路的对偶性	87
2.9	应用实例	88
习题 2		89
第 3 章	正弦稳态电路分析	95
3.1	正弦电流与电压	95
3.1.1	正弦量的三要素	95
3.1.2	相位差	96
3.1.3	有效值	97
3.2	正弦量的相量表示	99
3.2.1	复数及其运算	99
3.2.2	正弦量的相量表示	101

3.2.3	正弦量的相量运算	102
3.3	电路定律的相量形式	104
3.3.1	KCL、KVL 的相量形式	104
3.3.2	基本元件 VAR 的相量形式	105
3.4	阻抗与导纳	110
3.4.1	阻抗	110
3.4.2	导纳	114
3.4.3	阻抗与导纳的关系	117
3.4.4	正弦稳态电路的相量模型	119
3.5	正弦稳态电路的相量分析法	120
3.5.1	方程分析法	120
3.5.2	等效分析法	121
3.6	正弦稳态电路的功率	125
3.6.1	一端口电路的功率	125
3.6.2	平均功率、无功功率和视在功率	126
3.6.3	复功率	128
3.6.4	最大功率传输条件	131
3.7	互感耦合电路	133
3.7.1	耦合电感	133
3.7.2	耦合电感的伏安关系	135
3.7.3	耦合电感的去耦等效	138
3.7.4	互感耦合电路的正弦稳态分析	140
3.8	变压器	144
3.8.1	全耦合变压器	144
3.8.2	理想变压器	145
3.9	三相电路	148
3.9.1	三相电源	148
3.9.2	对称三相电路的计算	150
3.10	应用实例	152
习题 3		153
第 4 章	频率响应与谐振电路	162
4.1	频率响应与网络函数	162
4.2	一阶电路和二阶电路的频率响应	165
4.2.1	一阶电路	165
4.2.2	二阶电路	167
4.3	串联谐振电路	171
4.3.1	RLC 串联谐振	171
4.3.2	品质因数	174

4.3.3 频率响应	175
4.4 并联谐振电路	177
4.4.1 GCL 并联谐振	177
4.4.2 简单实用的并联谐振电路	179
4.5 应用实例	182
4.5.1 信号分离电路	182
4.5.2 无线电接收机的调谐电路	184
习题 4	185
 第 5 章 动态电路的时域分析	189
5.1 动态电路方程及其解	189
5.1.1 动态电路方程	189
5.1.2 动态电路方程的求解	191
5.2 电路初始值的计算	194
5.2.1 换路定律	194
5.2.2 独立初始值(初始状态)的求解	195
5.2.3 非独立初始值的求解	195
5.3 一阶电路的响应	197
5.3.1 一阶电路的零输入响应	197
5.3.2 一阶电路的零状态响应	201
5.4 一阶电路的全响应	204
5.4.1 全响应及其分解	204
5.4.2 三要素法	205
5.5 一阶电路的阶跃响应	210
5.5.1 阶跃函数	210
5.5.2 阶跃响应	212
5.6 正弦激励下一阶电路的响应	214
5.7 应用实例	215
习题 5	216
 索引(汉语拼音顺序)	222
部分习题答案	226
参考文献	232

第 1 章 电路的基本概念和定律

1.1 电路和电路模型

电路理论(circuit theory)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,至今已有 170 多年的历史。随着电力和通信工程技术的发展,它逐渐成为一门比较系统且应用广泛的工程学科。自 20 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,计算机技术的迅猛发展和广泛使用等,都给电路理论研究提出了新课题,促进了电路理论的发展。

1.1.1 电路模型

电路(electric circuit)是由电器件互连而成的电流通路。实际电路的功能繁多,概括地说,电路的主要作用是能量的传送与转换和信号的传递与处理。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、电动机等),这些设备将电磁能转换为光、热、机械能等。通常将供给电磁能的设备统称为电源,将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。在电源的作用下电路中产生电压和电流,因此,电源又称激励源,由激励在电路中产生的电流和电压统称为响应。根据激励与响应之间的因果关系,有时又把激励称为输入,把响应称为输出。

实际电路在运行过程中的物理表现相当复杂,要在数学上精确描述这些物理现象很困难。为了定量地从理论上研究电路的性能,将组成实际电路的电器件在一定的条件下按其主要电磁性质加以理想化,从而抽象出一系列具有单一电磁性质的理想化元件。如电阻器、灯泡、电炉等器件,它们的主要特征是消耗电能,可以用理想电阻元件来反映其消耗电能的特征,其模型符号如图 1.1-1(a)所示;类似地,各种电容器主要储存电能,用理想电容元件来反映其储存电能的特征,其模型符号如图 1.1-1(b)所示;各种电感线圈主要储存磁能,用理想电感元件来反映其储存磁能的特征,其模型符号如图 1.1-1(c)所示。

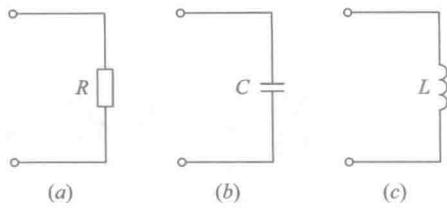


图 1.1-1 理想的电阻、电容、电感元件模型

有了这些理想元件模型之后,对任何一个实际电器件,就可以忽略一些次要特性,而用足以反映其电磁性能的一些理想元件模型来表示,以构成实际电器件的电路模型。例如,电阻器、灯泡、电炉等,它们的主要电磁性能是消耗电能,在低频应用时,其储存的电能和磁能比起消耗的电能来说很微小,可以忽略不计,此时它的电路模型都可用图 1.1-1 (a)所示的理想电阻表示。再如一个用铜丝绕制的电感线圈,如图 1.1-2(a)所示。在低频应用时,其主要电磁性能是储存磁能,它所消耗的和储存的电能都很小,与储存磁能相比可以忽略不计,它的电路模型就可用图 1.1-1(c)所示的理想电感表示;在高频应用时,它消耗的和储存的电能将增大,建模时必须考虑,其电路模型如图 1.1-2(b)所示。

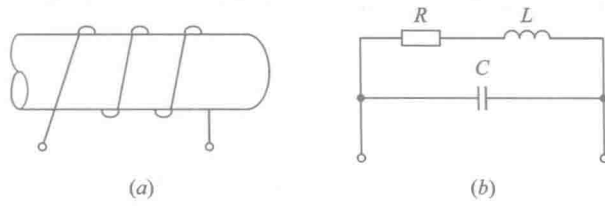


图 1.1-2 实际电感线圈及其模型

实际电路的电路模型就是用一些理想化的元件,相互连接组成理想化电路,用以描述该实际电路,进而对电路模型进行分析,分析结果就基本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,而是理想化的电路模型。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方式连接组成的总体。

1.1.2 集中参数电路

实际电路器件中的耗能和储能现象交织在一起并发生在整个器件中。只有当电路器件尺寸 l 远小于电路最高工作频率 f 所对应的波长 λ ($\lambda = c/f$, $c = 3 \times 10^8$ m/s), 即

$$l \ll \lambda \tag{1.1-1}$$

时,才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,发生在电路中的耗能和储能现象可以分开考虑。从电磁场理论的观点来看,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做质点相类似。式(1.1-1)称为电路的集中参数假设条件。满足集中参数假设条件的电路称为集中参数电路(lumped parameter circuit)。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连接组成的图形。电路图中,元件符号的大小、连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 6000 km,因而 30 km 长的输电线只有波长的 1/200,可以看做是集中参数电路。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做是集中参数电路。对于不符合集中化假设的实际电路, 需要用分布参数电路(distributed parameter circuit)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”均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, 在一定的条件下, 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。

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, 只是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。大量的实践经验表明, 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。

1.2 电路变量

为了定量地描述电路的性能, 电路中引入一些物理量作为电路变量, 通常分为两类: 基本变量和复合变量。电流、电压由于易测而常被选为基本变量, 有时也用电荷、磁通量(或磁链)作基本变量。复合变量包括功率和能量等。一般它们都是时间的函数。

1.2.1 电流及其参考方向

在电场力的作用下, 电荷有规则地定向移动形成电流(current)。单位时间内通过导体横截面的电荷量 q 定义为电流强度, 简称电流, 用符号 i 或 $i(t)$ ^①表示, 即

$$i(t) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{dq(t)}{dt} \quad (1.2-1)$$

式中, 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)。

习惯上把正电荷运动的方向规定为电流的实际方向。但在具体电路中, 电流的实际方向常常随时间变化, 即使不随时间变化, 对较复杂电路中的电流的实际方向有时也难以预先断定, 因此, 往往很难在电路中标明电流的实际方向。

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(reference direction), 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

① 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。

② 符号 $\stackrel{\text{def}}{=}$ 可读作“定义为”或“按定义等于”。

值的正或负是没有意义的。

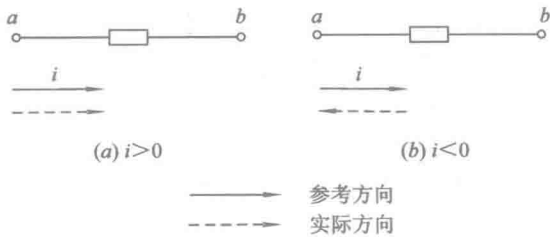


图 1.2-1 电流的参考方向

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。

1.2.2 电压及其参考极性

电路中，电场力将单位正电荷从某点移到另一点所做的功定义为该两点之间的电压 (voltage)，也称电位差，用 u 或 $u(t)$ 表示，即

$$u(t) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{d\omega(t)}{dq(t)} \tag{1.2-2}$$

式中，功 $\omega(t)$ 的单位是焦(J)，电压的单位是伏(V)。

通常，两点间存在电压时，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(也称参考方向，“+”极到“-”极的方向)。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“+”、“-”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} ，表示 a 点为“+”极， b 点为“-”极。电流、电压的参考方向在电路分析中起着十分重要的作用。电流、电压是代数量，既有数值又有与之相应的参考方向才有明确的物理意义。只有数值而无参考方向的电流、电压是没有意义的。

对一个元件或一段电路上的电压、电流的参考方向可以分别独立地任意指定，但为了方便，常常采用关联(associated)参考方向，即电流的参考方向和电压的参考方向一致，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。

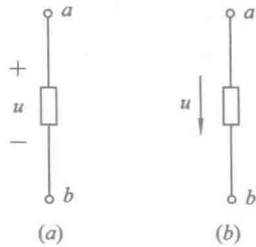


图 1.2-2 电压的参考极性



图 1.2-3 参考方向

通常在任意瞬间 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。

测量直流电流时要根据电流的实际方向将电流表串联接入待测支路中，使电流从直流电流表的正极流入。测量直流电压时，应根据电压的实际极性将直流电压表并联接入电路，使直流电压表的正极接所测电压的实际高电位端，负极接所测电压的实际低电位端。例如，理论计算得 $U_{ab}=5\text{ V}$ ， $U_{bc}=-3\text{ V}$ ， $I=1\text{ A}$ ，若要测量这些电压和电流，电压表和电流表应按照图 1.2-4 所示接入电路，图中， $\textcircled{\text{V}}$ 和 $\textcircled{\text{A}}$ 分别为电压表和电流表，两边所标示的“+”、“-”号分别为直流电压表和电流表的正、负极。

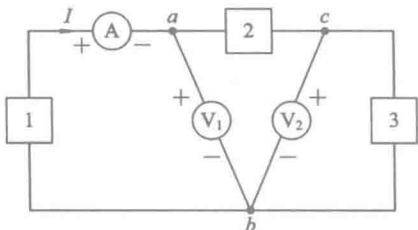


图 1.2-4 直流电压和电流测量电路

在实际应用中，上述电流、电压的单位有时会过小或过大，这时可在各单位前加适当的词头，形成十进倍数单位或分数单位。例如： $1\text{ }\mu\text{A}$ (微安) $=10^{-6}\text{ A}$ ， 1 mV (毫伏) $=10^{-3}\text{ V}$ ， $3\text{ k}\Omega$ (千欧) $=3\times10^3\text{ }\Omega$ ， 2 GHz (吉赫) $=2\times10^9\text{ Hz}$ 等。部分常用国际制词头见表 1-1。

表 1-1 部分国际制(SI)词头

因数	词 头	符号	因数	词 头	符号
10^{12}	太[拉](tera)	T	10^{-3}	毫(milli)	m
10^9	吉[咖](giga)	G	10^{-6}	微(micro)	μ
10^6	兆(mega)	M	10^{-9}	纳[诺](nano)	n
10^3	千(kilo)	k	10^{-12}	皮[可](pico)	p

1.2.3 功率和能量

功率(power)是指某一段电路吸收或提供能量(energy)的速率，用符号 $p(t)$ 表示，其数学定义式为

$$p(t) = \frac{dw(t)}{dt} \tag{1.2-3}$$

式中， dw 为 dt 时间内电场力所作的功。功率的单位为瓦(W)。

功率与电压和电流密切相关。正电荷从电路元件上电压的“+”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；反之，正电荷从电路元件的“-”极移到“+”极，则必须由外力(化学力、电磁力等)对电荷做功以克服电场力，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的情况下(这时，正电荷从电压“+”极移到“-”)，如图 1.2-5(a)所示，由式(1.2-1)可得，在 dt 时间内电场力所作的功，即该元件吸收的能量为

$$dw(t) = u(t)i(t)dt \tag{1.2-4}$$



图 1.2-5 吸收功率

由功率的定义式(1.2-3)可得电路元件吸收的功率 $p(t)$ 为

$$p(t) = \frac{d\omega(t)}{dt} = u(t)i(t) \quad (1.2-5(a))$$

需要注意的是,式(1.2-5(a))是在电压、电流为关联参考方向下推得的[参看图 1.2-5(a)],如果电压、电流为非关联参考方向,如图 1.2-5(b)所示,则电路元件吸收的功率 $p(t)$ 为

$$p(t) = -u(t)i(t) \quad (1.2-5(b))$$

利用式(1.2-5(a))计算功率时,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。

设 $t=t_0$ 时元件的能量为 $\omega(t_0)$, t 时刻元件的能量为 $\omega(t)$,在 u 与 i 为关联参考方向的情况下,对式(1.2-4)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为

$$\int_{\omega(t_0)}^{\omega(t)} d\omega(\xi) = \int_{t_0}^t p(\xi) d\xi = \int_{t_0}^t u(\xi)i(\xi) d\xi \quad (1.2-6)$$

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 ξ 。

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

$$\omega(t) = \int_{-\infty}^t p(\xi) d\xi = \int_{-\infty}^t u(\xi)i(\xi) d\xi \quad (1.2-7)$$

它是指到时刻 t ,元件吸收的能量。在实际工程中,能量单位除用焦之外,还常用千瓦时($\text{kW} \cdot \text{h}$)。吸收功率为 1000 W 的家用电器,加电使用 1 h,它吸收的电能(即消耗的电能)为 1 $\text{kW} \cdot \text{h}$,俗称 1 度电。

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 ,元件吸收的能量满足

$$\omega(t) = \int_{-\infty}^t p(\xi) d\xi \geq 0, \quad \forall t \quad (1.2-8)$$

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

例 1.2-1 图 1.2-6 是由 A 和 B 两个元件构成的电路,已知 $u = 3 \text{ V}$, $i = -2 \text{ A}$ 。求元件 A 和 B 分别吸收的功率。

解 对元件 A 来说, u 与 i 为关联参考方向;对元件 B 来说, u 与 i 为非关联参考方向;因此

$$p_{A\text{吸}} = ui = 3 \times (-2) = -6 \text{ W}$$

$$p_{B\text{吸}} = -ui = -3 \times (-2) = 6 \text{ W}$$

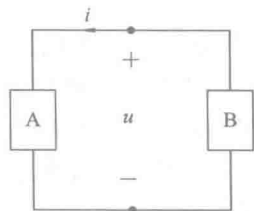


图 1.2-6 例 1.2-1 图

① 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 $t(t > -\infty)$ 。

例 1.2-2 某一段电路电流、电压为关联参考方向，其波形如图 1.2-7(a) 所示。分别画出其功率和能量的波形，并判断该电路是无源电路还是有源电路。

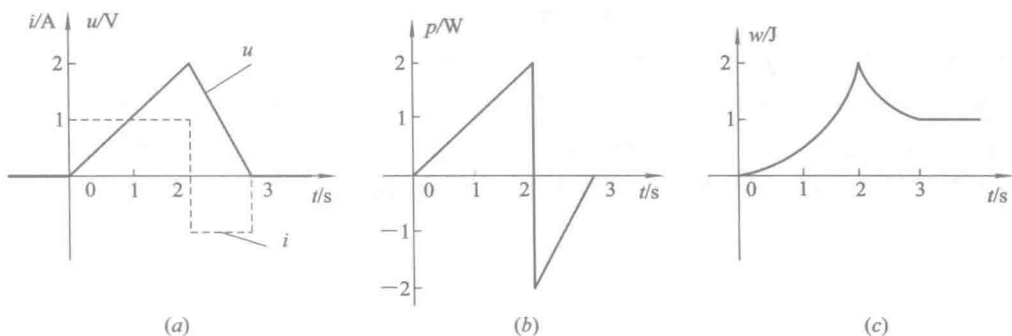


图 1.2-7 例 1.2-2 图

解 由图 1.2-7(a) 可写出

$$u = \begin{cases} 0, & t < 0, t > 3 \\ t, & 0 \leq t \leq 2 \\ 2(3-t), & 2 \leq t \leq 3 \end{cases}$$

$$i = \begin{cases} 0, & t < 0, t > 3 \\ 1, & 0 \leq t \leq 2 \\ -1, & 2 \leq t \leq 3 \end{cases}$$

因此

$$p = ui = \begin{cases} 0, & t < 0, t > 3 \\ t, & 0 \leq t \leq 2 \\ 2(t-3), & 2 \leq t \leq 3 \end{cases}$$

$$w(t) = \int_{-\infty}^t p(\xi) d\xi = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 0.5t^2, & 0 \leq t \leq 2 \\ t^2 - 6t + 10, & 2 \leq t \leq 3 \\ 1, & t > 3 \end{cases}$$

其功率和能量的波形分别如图 1.2-7(b) 和 (c) 所示。由图 1.2-7(c) 可见， $w(t)$ 满足式 (1.2-8)，因此，该段电路是无源电路。

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。电路中各元件的电流和电压受到两类约束。一类是元件的相互连接给元件电流之间和元件电压之间带来的约束，称为拓扑约束 (topological constraint)。这类约束由基尔霍夫定律体现。另一类是元件的特性造成的约束，即每个元件上的电压与电流自身存在一定的关系，称为元件约束 (element constraint)。这里先讨论前者，元件约束稍后再讨论。

1.3.1 电路图

图 1.3-1(a)是由 6 个元件相互连接组成的电路图,各元件上的电压、电流均为关联参考方向。如前所述,在电流、电压取关联参考方向的前提下,其参考方向可只标示一种(这里只标示电流的参考方向)。如果仅研究各元件的连接关系暂不关心元件本身的特性,则可用一条线段来代表元件。这样,图 1.3-1(a)所示的电路图就可简化表示为图 1.3-1(b)的拓扑图^①,简称图(graph)。标明参考方向的图称为有向图(directed graph)。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。

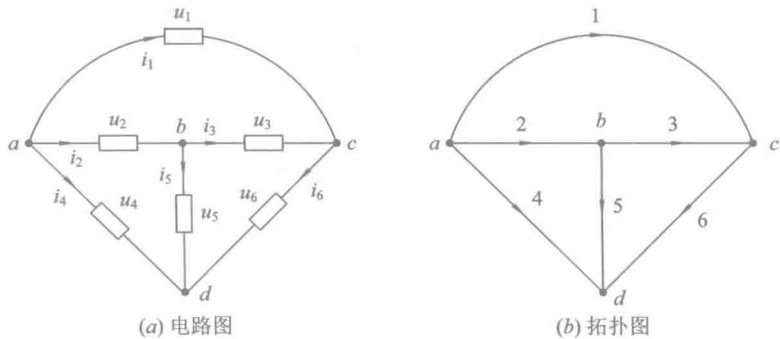


图 1.3-1 电路图及其拓扑图

电路图中的每一个元件,即图中的每一条线段,称为支路(branch,图论中常称为边),支路的连接点称为节点(或结点 node)。图 1.3-1(a)和(b)中有 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,这样的闭合路径称为回路^②(loop)。图 1.3-1(b)中,支路(1, 2, 3)、(3, 5, 6)和(2, 3, 6, 4)等都是回路。

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定律是基尔霍夫电流定律(KCL)和基尔霍夫电压定律(KVL)^③。

1.3.2 基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律(KCL)可表述如下:

对于集中参数电路中的任一节点,在任意时刻,流出该节点的电流和等于流入该节点的电流和,即对任一节点,有

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

例如,图 1.3-2 是某电路图中的一个节点 p,根据 KCL,在任意时刻有

① 拓扑图(topological graph),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变。
② 关于支路、节点、回路等有关图的知识,将在 2.1 节中进一步说明。
③ KCL 是 Kirchhoff's Current Law 的缩写,KVL 是 Kirchhoff's Voltage Law 的缩写。1845 年,年仅 21 岁的德国人 G.R. Kirchhoff 提出了基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律。

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

如果流出节点的电流前面取“+”号，流入节点的电流前面取“-”号，则 KCL 可表述如下：

对于集中参数电路中的任一节点，在任意时刻，所有连接于该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 1.3-2 的节点 p ，KCL 方程为 $i_1 - i_2 + i_3 + i_4 - i_5 = 0$ 。

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(cut set))。图 1.3-3 中，对于闭合曲面 S ，有

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

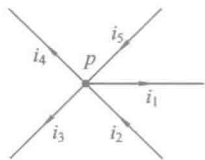


图 1.3-2 KCL 用于节点

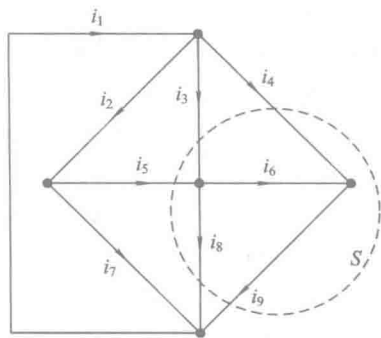


图 1.3-3 KCL 用于广义节点

例 1.3-1 如图 1.3-4 的电路，已知 $i_1 = -5\text{ A}$ ， $i_2 = 1\text{ A}$ ， $i_6 = 2\text{ A}$ ，求 i_4 。

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

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

将 i_3 代入 i_4 的表达式，得

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

或者，取闭合曲面 S ，如图 1.3-4 中虚线所示，根据 KCL，有

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

可得

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

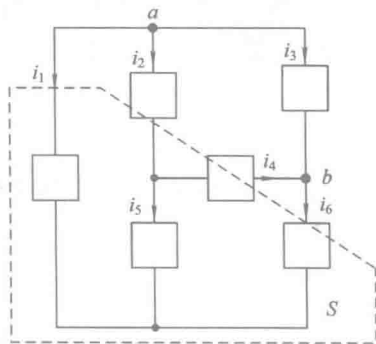


图 1.3-4 例 1.3-1 图

1.3.3 基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电压定律(KVL)可表述如下：

在集中参数电路中，任意时刻，沿任一回路绕行，回路中所有支路电压的代数和恒为零。即，对任一回路有

$$\sum u(t) = 0, \quad \forall t \quad (1.3-3)$$