



高等院校教材

电路分析

胡建萍 马金龙 王宛苹
吕幼华 胡晓萍 吕伟峰

编著



科学出版社
www.sciencep.com

高等院校教材

电 路 分 析

胡建萍 马金龙 王宛苹
吕幼华 胡晓萍 吕伟峰 编著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书是按照教育部本科生“电路分析”的课程要求编写而成。全书共分10章,主要介绍直流电路、动态电路、交流稳态电路的基本概念、基本理论、基本方法及应用,重点为集总、线性、时不变、动态、稳态电路的基本概念与基本方法,电路方程的建立、求解及应用。主要特点是从模型、端口、网络、等效电路等系统的基本概念出发,以典型系统举例说明系统的概念,再分析二极管、晶体管等效电路、运算放大器、回转器、负阻抗变换器电路等,逐步进入实际电路中,为后续专业课打下扎实的理论基础。

本书以培养应用型兼顾研究型人才为目的,以应用、实用、适用为原则,可作为高等院校电子信息类专业的“电路分析”教材,也可供相关专业、相关领域的研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电路分析 / 胡建萍等编著. —北京: 科学出版社, 2006

(高等院校教材)

ISBN 7-03-017502-6

I. 电… II. 胡… 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 (2006) 第 069871 号

责任编辑: 马长芳 潘继敏 / 责任校对: 赵燕珍

责任印制: 张克忠 / 封面设计: 陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

丽源印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006年8月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2006年8月第一次印刷 印张: 24 1/4

印数: 1—3 500 字数: 470 000

定价: 30.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈路通〉)

前 言

电子信息技术是当今世界上发展最快的技术之一。“电路分析”课程是电子信息类专业的专业基础课程,是学生接触专业知识的第一门课程。将学生领进专业的门槛,向其介绍当今电子信息技术的发展与应用,编写高质量且易学易懂的教材是我们的基本任务。本书以本科学生为授课对象,以培养应用型兼顾研究型人才为目的,以应用、实用、适用为原则,既便于教师授课又便于学生自学。

“电路分析”是杭州电子科技大学电子信息类专业的专业基础平台课程,20世纪90年代中期便是杭州电子科技大学的校级重点课程,2000年“电路分析基础的教学改革与探索”荣获浙江省教学成果二等奖,2005年被评为浙江省精品课程。本书积累了课程组任课教师二十多年丰富的教学经验,是集体智慧的结晶。

本书的内容符合教育部本科“电路分析”的课程要求。全书共分10章:第1章为基本概念,第2章为电路的分析方法,第3章为线性电路的性质,第4章为一阶动态电路分析,第5章为二阶动态电路分析,第6章为正弦稳态电路的分析,第7章为三相电路,第8章为耦合电路的分析,第9章为含运算放大器电路的分析,第10章为双口网络。在保证教材结构体系完整的前提下,本书注重基本概念、基本方法和基本原理,过程简明、清晰和准确,压缩烦琐的理论推导,且配套例题不少于总篇幅的40%,例题和习题紧扣基本概念、基本方法和基本原理,注重应用、实用、适用,避免偏题。

本书系统全面地介绍了电路分析的基本概念、基本理论、基本分析方法和应用。共分三大模块:直流电路、动态电路、交流稳态电路。重点为集总、线性、时不变、动态、稳态电路的基本概念与基本分析方法、电路的代数方程与微分方程的建立、求解以及应用。主要特点是从模型、端口、网络、等效电路等系统的基本概念出发,以典型系统举例说明系统的概念,再分析介绍二极管、晶体管等效电路、运算放大器、回转器、负阻抗变换器电路等,逐步进入实际电路中,而不仅仅被线性、两端、无源器件等理想模型所包围,为后续专业课打下扎实的理论基础。

电路分析的实验课程为杭州电子科技大学单独设课的开放性课程,其实验教材单独编写。实验室隶属浙江省电工电子基础课实验示范中心,实现了时间、内容和对象的开放,学生可以在网上直接选择教师、时间和实验项目。实验内容分为三个层次:基本共性部分、拓宽选做部分、高层次加深部分,以提高设计性和

综合性内容的比例。第一层次为基础技能培养，为规定项目；第二层次为系统设计能力的培养，为选做项目；第三层次是为优秀学生设置的，学生可根据自己确定的或导师指定的项目进入综合实验室来完成。在三个层次训练过程中，理论教学与实验教学的有机结合，新技术、新工具的运用与分析，使学生逐步学会上网查询、仪器使用、查找资料、仪器调试、实验数据分析处理、计算机应用、综合设计与创新设计等，以便全面提升学生对电子系统的设计能力和开发能力。

全书由杭州电子科技大学“电路分析”课程负责人胡建萍做主编，她负责拟订大纲和统稿，并编写第8~10章，马金龙编写第6、7章，王宛苹编写第4、5章，吕幼华编写第1章，胡晓萍编写第3章，吕伟峰编写第2章。

非常感谢浙江省教育厅对精品课程建设的大力支持，感谢杭州电子科技大学各级领导与部门二十多年来的关心、支持与帮助，感谢课程组全体教师的辛勤劳动和默默奉献，特别感谢薛艳亮、崔晓松、王江柱三位研究生为本书所做的大量工作。

由于水平、时间有限，书中内容会出现一些错误或不完善之处，恳请广大读者予以批评指正。

胡建萍
于杭州电子科技大学
2006年5月25日

目 录

前言

第 1 章 基本概念	1
1.1 电路及电路模型	1
1.2 电路分析中的物理量	2
1.3 基尔霍夫定律	8
1.4 电阻元件.....	10
1.5 独立电源.....	14
1.6 受控源.....	16
1.7 单口网络及等效.....	19
1.8 双口网络及等效.....	27
习题	32
第 2 章 电路的分析方法	40
2.1 KCL 和 KVL 方程的独立性与完备性.....	40
2.2 电路的拓扑基础.....	41
2.3 支路电流法.....	45
2.4 节点电压法.....	47
2.5 网孔电流法和回路电流法.....	53
2.6 应用举例.....	59
习题	65
第 3 章 线性电路的性质	73
3.1 线性电路的比例性.....	73
3.2 叠加原理.....	74
3.3 戴维南定理和诺顿定理.....	80
3.4 直流电路的最大功率传递定理.....	86
3.5 互易定理.....	88
3.6 应用举例.....	92
习题	98
第 4 章 一阶动态电路分析	105
4.1 电容元件及其性质	105
4.2 电感元件及其性质	110

4.3	一阶动态电路	114
4.4	一阶电路零输入响应	118
4.5	一阶电路零状态响应及完全响应	123
4.6	三要素法求一阶电路响应	128
4.7	阶跃响应	134
4.8	应用举例	136
	习题	140
第5章	二阶动态电路分析	148
5.1	RLC 串联电路	148
5.2	零输入响应	149
5.3	零状态响应及完全响应	157
5.4	GLC 并联电路分析及计算	161
5.5	一般二阶动态电路分析	163
	习题	168
第6章	正弦稳态电路的分析	172
6.1	正弦交流电	172
6.2	正弦量的相量表示	177
6.3	元器件伏安特性的相量表示	182
6.4	基尔霍夫定律的相量表示	187
6.5	阻抗和导纳	189
6.6	正弦稳态电路的分析	194
6.7	单口网络的有功功率和无功功率	201
6.8	视在功率和功率因数	209
6.9	最大功率传输定理	214
6.10	频率特性	217
6.11	叠加原理在正弦稳态电路分析中的应用	222
6.12	谐振	229
	习题	238
第7章	三相电路	250
7.1	三相电源	250
7.2	负载星形连接的三相电路分析	254
7.3	负载三角形连接的三相电路分析	262
7.4	三相电路的功率测量	266
	习题	272

第 8 章 耦合电路的分析	279
8.1 耦合电感的基本概念及其 VAR	279
8.2 耦合电感的等效电路	283
8.3 耦合电路的动态分析	287
8.4 耦合电路的正弦稳态分析	290
8.5 理想变压器电路的分析	297
习题.....	301
第 9 章 含运算放大器电路的分析	309
9.1 运算放大器	309
9.2 含运算放大器电阻电路的计算	310
9.3 运算放大器电路的动态分析	315
9.4 运算放大器电路的正弦稳态分析	321
习题.....	324
第 10 章 双口网络	333
10.1 双口网络的流控型和压控型参数.....	334
10.2 双口网络的混合型和传输型参数.....	341
10.3 各组参数间的关系.....	347
10.4 有载双口网络的分析.....	350
10.5 双口网络的互连.....	355
习题.....	360
习题答案	369
参考文献	379

第1章 基本概念

电路分析是电类学科最基本的课程。本章的内容是整个电路理论学科的基础。

本章介绍电路中的基本物理量,包括电流、电压、功率的定义、作用、单位等,尤其是电压和电流的极性、方向及关联方向;阐明电路中的电压和电流受到的两类约束,一类是元件本身性质的约束(即伏安特性 VAR),另一类是来自元件的相互连接的拓扑约束(即基尔霍夫定律)。

本章还介绍构成电路的基本元件,包括电阻、理想和实际电源、受控源等;介绍单口网络的特性、等效及双口网络的概念。

1.1 电路及电路模型

电路是电流的通路,人们为达到某种目的,实现某种功能,将若干电气设备或元器件按一定的方式连接而构成了各种电路。

常用的手电筒是由干电池、开关、灯泡和手电筒壳(充当连接导线)组成,以实现照明功能。图 1.1-1 是手电筒的电气图。

各种具体电路有其具体功能。总体而言,电路的功能分为两大类:一是实现电能的产生、传输、控制和转换;二是电信号的产生、传输和处理。

电路是由元件组成的,元件在电路中呈现一定的电磁现象。只显现单一电磁现象,且不计元件的几何尺寸,并视其电的参数集总于一点的电路元件,称为理想电路元件,又称集总参数元件。由集总参数元件组成的电路称为集总参数电路。

电路是有尺寸的,电路中有电流在流动。电流是有频率的,对应着波长,集总参数电路的尺寸远小于使用时其最高工作频率所对应的波长。如我国的交流电的频率为 50Hz,对应的波长为 $\lambda = c/f = 3 \times 10^8 / 50 = 6 \times 10^6 \text{m} = 6000 \text{km}$ 。 c 是光速,即 $c = 3 \times 10^8 \text{m/s}$ 。家用电路显然是集总参数电路,而输电线路不是。

电路是用电路模型来描述的,每个元件用电路符号(模型)来表示,电路模型只注重电的特性,而不管其使用功能。图 1.1-2 是手电筒的电路图,图中的干电池用电压源符号,灯泡用电阻的符号,手电筒壳用导线表示。

由此可见,电路模型是实际电路的科学抽象,采用电路模型分析电路可使计算

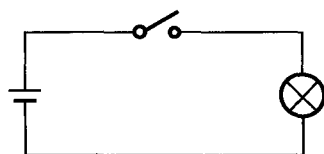


图 1.1-1 手电筒电气图

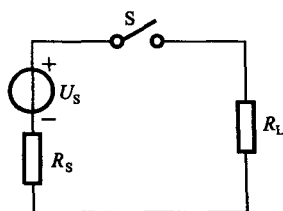


图 1.1-2 手电筒电路图

过程大为简化,而且能更清晰地反映该电路的物理本质。

一个电路中有些元件起到提供电能的作用(称为电源),有些吸收电能(称为负载),有些起到传输和控制作用。图 1.1-2 中,电压源 U_s 提供电能,电压源内阻 R_s 和灯泡 R_L 吸收电能,开关和连接导线起到控制和传输的作用。因此,电路是由电源、负载和中间环节组成的。

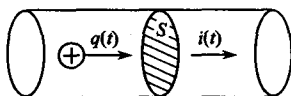
1.2 电路分析中的物理量

电路分析中涉及的物理量主要有电荷、电流、电压、功率、能量、磁通等。电路分析的主要任务是分析和计算有关的电流、电压、功率、能量等。

1.2.1 电流

电流是带电粒子的定向运动而产生的。在电子电路中,电流主要是带负电荷的电子的定向运动而产生的。电荷在定向运动过程中,需要电场对电荷做功。

图 1.2-1 中,通过截面 S 的正电荷量为 $q(t)$,则截面 S 上有电流 $i(t)$ 。如果只有电荷但不运动,电流为零。

图 1.2-1 电流 $i(t)$ 的定义

定义:单位时间内通过某截面的电荷量为该点的电流,用 $i(t)$ 表示,即

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

式(1.2-1)中, $q(t)$ 是正电荷的电荷量且与 $i(t)$ 的方向相同,否则有

$$i(t) = -\frac{dq(t)}{dt} \quad (1.2-2)$$

规定:正电荷运动的方向或负电荷运动的反方向作为电流的正方向。这表明,电流不仅有大小而且是有方向的,是矢量。

如果 $i(t)$ 是常数(可正可负),称为恒定电流,简称为直流,用 I 表示(大写的斜体字母)。如果 $i(t)$ 是时间 t 的函数,称为时变电流,简称为 i (小写的斜体字母),如按正弦规律变化的正弦电流 $i(t) = 2\sin(314t)$ A。

在国际单位制(SI)中,电荷的单位是库(C) (6.24×10^{18} 个电子的电荷量是 1C),时间的单位是秒(s),则电流的单位是安(A),有

$$1\text{A} = \frac{1\text{C}}{1\text{s}} \quad (1.2-3)$$

此外,常用的电流单位还有千安(kA)、毫安(mA)、微安(μA)。安(A)是电流的基本单位,换算关系为

$$1\text{kA} = 10^3\text{A}, \quad 1\text{mA} = 10^{-3}\text{A}, \quad 1\mu\text{A} = 10^{-6}\text{A}$$

由于电流是矢量,没有方向只有数值是没有意义的。电流的方向常用箭头表示,也可用双下标表示。

图 1.2-2 中的电流方向用箭头表示,也可用 i_{ab} 表示, i_{ab} 表示电流的方向由 a 流向 b,显然有

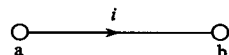


图 1.2-2 电流的表示

$$i_{ab} = -i_{ba} \quad (1.2-4)$$

在对电路进行分析时,一般预先无法知道电流的实际方向,先设定一个方向,称为人为方向或参考方向,再计算其数值,其值有正和负两种,正值表示实际方向和参考方向相同,负值表示实际方向和参考方向相反,如图 1.2-3 所示。

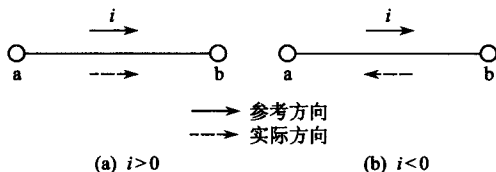


图 1.2-3 电流的实际方向和参考方向与数值的关系

由式(1.2-1),得

$$q(t) = \int_{-\infty}^t i(\lambda) d\lambda \quad (1.2-5)$$

由式(1.2-2),得

$$q(t) = - \int_{-\infty}^t i(\lambda) d\lambda \quad (1.2-6)$$

例 1.2-1 图 1.2-4 中,(1) 若正电荷 $q(t) = (2+3t)\text{C}$,求 i_{ab} ; (2) 若 i_{ba} 波形如图 1.2-4(b) 所示,求负电荷 $q(t)$ 并画出波形。

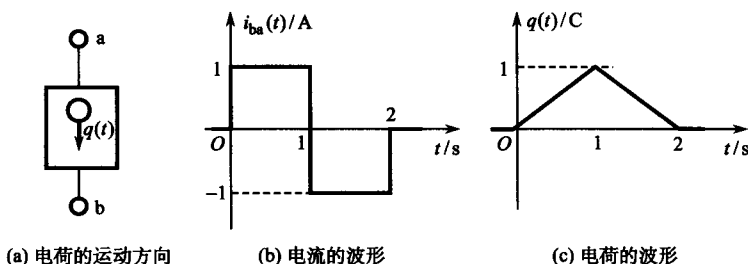


图 1.2-4 电荷的运动方向和电流的波形

解 (1) 由于 i_{ab} 与正电荷 $q(t)$ 方向相同, 由式(1.2-1)求得

$$i_{ab} = \frac{dq(t)}{dt} = 3A$$

(2) 电流的实际方向是负电荷运动的反方向, 因此 i_{ba} 与 $q(t)$ 满足式(1.2-5), 即

$$\begin{aligned} q(t) &= \int_{-\infty}^t i_{ba}(\lambda) d\lambda = \int_{-\infty}^0 i_{ba}(\lambda) d\lambda + \int_0^t i_{ba}(\lambda) d\lambda \\ &= q(t_0) + \int_0^t i_{ba}(\lambda) d\lambda \end{aligned}$$

当 $t \leq 0$ 时, $i_{ba} = 0, q(t) = 0$;

当 $0 < t \leq 1$ 时, $i_{ba} = 1A, q(t) = q(0) + \int_0^t i_{ba}(\lambda) d\lambda = \int_0^t d\lambda = tC$;

当 $1 < t \leq 2$ 时, $q(t) = q(1) + \int_1^t (-1) d\lambda = (-t + 2)C$;

当 $2 < t$ 时, $q(t) = 0$ 。

$q(t)$ 的波形如图 1.2-4(c) 所示。可见, 一般情况下电荷的变化是连续的。

1.2.2 电压和电位

电荷在电场力的作用下, 由 a 点运动到 b 点, 同时电荷在 a、b 两点的能量会发生变化。

定义: 电场力对单位电荷所做的功为 a、b 两点的电压, 即

$$u(t) = \frac{dw}{dq} \quad (1.2-7)$$

电压反映了单位正电荷由 a 点运动到 b 点所获取或失去的能量。如正电荷由 a 点运动到 b 点时失去能量, 即 a 点能量高, b 点能量低, 则 a 为正极, b 为负极。

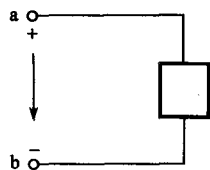


图 1.2-5 电压的方向

因此电压也是矢量, 与电流矢量相似, 电压也有参考极性、方向与实际极性、方向。电压的极性用 +、- 表示, 也可用箭头来表示电压方向, 还可以用双下标来表示, 如图 1.2-5 所示。 u_{ab} 表示 a 为正、b 为负; u_{ba} 正好相反, 并且有

$$u_{ab} = -u_{ba} \quad (1.2-8)$$

电荷在 a 点的能量为 W_a , 在 b 点的能量为 W_b , 电荷量为 q , 则有

$$u_{ab} = \frac{W_a - W_b}{q} \quad (1.2-9)$$

正电荷的 q 为正值, u_{ab} 的值为正, 表明正电荷在 a 点能量高、b 点能量低, 即正电荷

由 a 点运动到 b 点时失去能量。负电荷的 q 为负值, u_{ab} 的值为正, 表明负电荷在 a 点能量低、b 点能量高, 即负电荷由 a 点运动到 b 点时得到能量。

如果电压是常数, 可用大写的斜体字母 U 表示, 称为直流电压。如果电压是时间 t 的函数, 称为时变电压, 用小写的斜体字母 u 表示, 如交流正弦电压 $u(t) = 220\sqrt{2}\sin(314t)\text{V}$ 。

在国际单位制(SI)中, 能量的单位是焦(J), 电荷的单位是库(C), 电压的单位是伏(V), 有

$$1\text{V} = \frac{1\text{J}}{1\text{C}} \quad (1.2-10)$$

此外, 电压的常用单位还有千伏(kV)和毫伏(mV), 且有

$$1\text{kV} = 10^3\text{V}, 1\text{mV} = 10^{-3}\text{V}$$

任选电路中一点 o 为参考点, 用“ $\perp$ ”来表示, 其余点与参考点之间的电压称为该点的电位。规定参考点为负极性, 其余点为正极性, 电位用 V 表示, 如 a 点电位表示为 V_a , 有

$$V_a = u_{ao} \quad (1.2-11)$$

$$u_{ab} = V_a - V_b \quad (1.2-12)$$

即 a、b 间的电压为 a 点电位减去 b 点电位。又由于

$$u_{ab} = V_a - V_b = V_a - V_c + V_c - V_b = u_{ac} + u_{cb}$$

所以

$$u_{ab} = u_{ac} + u_{cb} = u_{ac} - u_{bc} \quad (1.2-13)$$

以此类推, 有

$$u_{ab} = u_{ac} + u_{cd} + u_{db}$$

例 1.2-2 图 1.2-6 所示电路中, 选 d 为参考点, 已知 $V_a = 2\text{V}$, $V_b = 1\text{V}$, $V_c = 3\text{V}$ 。若选 c 为参考点, 求 V_a 、 V_b 和 V_d 。

解 选 d 是参考点, 所以

$$V_a = u_{ad} = 2\text{V}, V_b = u_{bd} = 1\text{V}, V_c = u_{cd} = 3\text{V}$$

当选 c 为参考点时, 有

$$V_a = u_{ac} = u_{ad} - u_{cd} = 2 - 3 = -1\text{V}$$

$$V_b = u_{bc} = u_{bd} - u_{cd} = 1 - 3 = -2\text{V}$$

$$V_d = u_{dc} = -u_{cd} = -3\text{V}$$

可见, 选择不同的参考点, 电位会发生变化。

一般情况下, 电路中的元件既有电流又有电压, 而电压和电流都有各自的参考

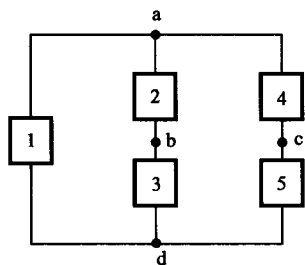


图 1.2-6 例 1.2-2 图

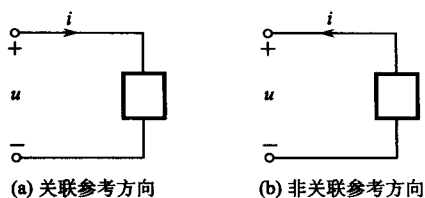


图 1.2-7 关联和非关联参考方向

方向,这样就有关联参考方向(简称关联方向)和非关联参考方向(简称非关联方向)两种。图 1.2-7(a)是电流和电压的关联参考方向,图 1.2-7(b)是非关联参考方向。关联方向是电流从电压的正端流入,或电压的正极性端是在电流的流入端,非关联方向正好相反。在电路分析时尽可能选用关联参考方向。

1.2.3 功率和能量

电功率(简称功率)是用来反映电能转换的快慢。定义为:单位时间内吸收(或产生)的电能量,即

$$p(t) = \frac{dw}{dt} \quad (1.2-14)$$

由于

$$i(t) = \frac{dq}{dt}, \quad u(t) = \frac{dw}{dq}$$

所以

$$p(t) = u(t)i(t) \quad (1.2-15)$$

在国际单位制(SI)中,能量的单位是焦(J),时间的单位是秒(s),功率的单位是瓦(W),有

$$1\text{W} = \frac{1\text{J}}{1\text{s}} = 1\text{V} \cdot 1\text{A}$$

此外,功率的常用单位还有毫瓦(mW)、千瓦(kW)和兆瓦(MW),且有

$$1\text{mW} = 10^{-3}\text{W}, \quad 1\text{kW} = 10^3\text{W}, \quad 1\text{MW} = 10^6\text{W}$$

在直流电路中,功率是常数,用大写的 P 表示,即 $P=UI$ 。在交流电路中,功率是时间的函数,用 p 表示瞬时功率, P 表示平均功率。

由于 $u(t)$ 和 $i(t)$ 均是矢量,其值有正负之分,由式(1.2-15)求得的功率也有正负,功率的正负表明了元件在电路中提供能量(或称产生)还是吸收能量(或称消耗)。由于电压和电流有关联和非关联参考方向,以图 1.2-8 的手电筒电路加以说明,电池的电压为 E 且不计内阻,灯泡的电阻为 R 。

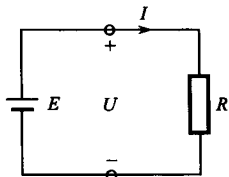


图 1.2-8 功率数值正负的涵义

在图 1.2-7 中,选电压和电流参考方向与实际方向相同,即 U 和 I 数值均为正值。对于电池而言, U 和 I 是非关联参考方向;对灯泡而言, U 和 I 是关联参考方向。电池和灯泡的功率数值相等,显然,电池提供电功率,灯泡吸收电功率,由此得到如下结论:

(1) 关联参考方向下,元件的功率为 $P=UI$ 。若 P 为正值,表明该元件吸收功率;若 P 为负值,表明该元件提供功率。

(2) 非关联参考方向下,元件的功率为 $P=-UI$ 。若 P 为正值,表明该元件吸收功率;若 P 为负值,表明该元件提供功率。

元件在电路中提供功率,起到电源作用,称为电源;吸收功率,起到负载作用,称为负载。

由式(1.2-14),得

$$w(t) = \int_{-\infty}^t P(\lambda) d\lambda = \int_{-\infty}^{t_0} P(\lambda) d\lambda + \int_{t_0}^t P(\lambda) d\lambda \quad (1.2-16)$$

在 t_1 到 t_2 时间内,元件的能量变化为 $\int_{t_1}^{t_2} P(\lambda) d\lambda$ 。

例 1.2-3 图 1.2-9 所示电路由 4 个元件组成,已知 $U_1=3\text{V}$, $U_3=1\text{V}$, $I_1=1\text{A}$, $I_2=2\text{A}$, $I_3=-3\text{A}$ 。(1) 求 U_2 和 U_4 ; (2) 求每个元件的功率,并指出哪些是电源,哪些是负载。

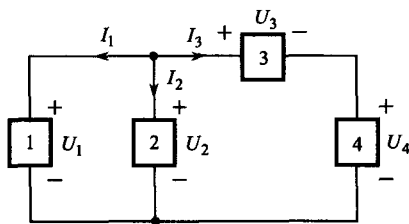


图 1.2-9 例 1.2-3 电路

解 (1) 由于元件 1 和元件 2 是并联的,故

$$U_2 = U_1 = 3\text{V}$$

由于 $U_1=U_3+U_4$,故

$$U_4 = U_1 - U_3 = 3 - 1 = 2(\text{V})$$

(2) 每个元件的电压和电流都是关联方向,故吸收的功率为

$$P_1 = U_1 I_1 = 3 \times 1 = 3(\text{W}) \quad (\text{吸收 } 3\text{W 电功率})$$

$$P_2 = U_2 I_2 = 3 \times 2 = 6(\text{W}) \quad (\text{吸收 } 6\text{W 电功率})$$

$$P_3 = U_3 I_3 = 1 \times (-3) = -3(\text{W}) \quad (\text{提供 } 3\text{W 电功率})$$

$$P_4 = U_4 I_3 = 2 \times (-3) = -6(\text{W}) \quad (\text{提供 } 6\text{W 电功率})$$

所以,元件 1 和 2 是负载,3 和 4 是电源,而且 $P_1 + P_2 = -(P_3 + P_4)$,即所有元件提供的功率与吸收的功率相等。

1.3 基尔霍夫定律

电路是由各种元件连接而成的。电路在工作时,会有电流流过元件并在元件的两端产生电压,这些电流和电压受元件本身的特性和元件之间相互连接的约束,前者称为元件的电流电压关系(即伏安特性 VAR),后者称为拓扑约束。德国物理学家基尔霍夫(Kirchhoff)于 1845 年(当时年仅 21 岁,为大一学生)建立了电路结构对电流电压的关系,称为基尔霍夫定律。基尔霍夫定律分基尔霍夫电流定律(KCL)和基尔霍夫电压定律(KVL)。

1.3.1 电路结构的有关术语

电路要正常工作,必须提供电荷流动的通路。元件连接后出现支路、节点、回路和网孔等电路术语。

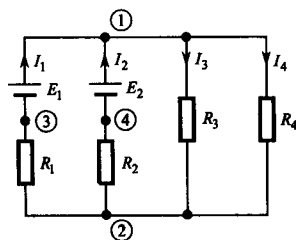


图 1.3-1 电路结构示例

1. 支路

每个二端元件称为一条支路,电荷经支路而流动。图 1.3-1 所示的电路有 6 个元件,即有 6 条支路。在手算时,为减少支路数目,把流过同一个电流的元件组合成一条支路,所以把所有串联元件称为一条支路。图 1.3-1 中, R_1 和 E_1 , R_2 和 E_2 串联各称为一条支路,因而图中有 4 条支路。

2. 节点

两条或是两条以上支路的连接点称为节点。图 1.3-1 所示电路共有 4 个节点。其中③、④为传统节点,一般手算时只需①和②两个节点。

3. 回路

由支路连接而成的闭合路径称为回路。图 1.3-1 中有 6 个回路。

4. 网孔

图 1.3-1 的电路称为平面电路。这种电路画在平面上,能够做到除节点之外,各支路互不相交。网孔是平面电路中的单孔回路,在这种特殊回路内除构成该回路的支路外没有别的支路与其相连,好像渔网中的孔一样。图 1.3-1 中有 3 个网孔。

1.3.2 基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律(Kirchhoff's current law)简称为 KCL。KCL 反映了与节点相连的各支路电流的强制性约束关系。陈述如下:

陈述一 在集总参数电路中,任一时刻对任一节点,流出(或流入)该节点的所有电流的代数和等于零,即

$$\sum i(t) = 0 \quad (1.3-1)$$

在式(1.3-1)中,如果规定流入节点的电流为正,则流出节点的电流为负。对图 1.3-1 的节点①,有

$$I_1 + I_2 - I_3 - I_4 = 0$$

在用式(1.3-1)列 KCL 方程时,一定要注意相加时各支路电流前的正负号。

陈述二 在集总参数电路中,任一时刻对任一节点,所有流入该节点的电流之和等于所有流出该节点的电流之和,即

$$\sum i_{\lambda} = \sum i_{\text{出}} \quad (1.3-2)$$

图 1.3-1 的节点①中,流入节点的支路电流为 I_1 和 I_2 ,流出节点的支路电流为 I_3 和 I_4 ,故有

$$I_1 + I_2 = I_3 + I_4$$

由于 $i(t) = \frac{dq(t)}{dt}$, 式(1.3-1)变为 $\sum_k \frac{dq_k}{dt} = 0$, 即 $\sum_k dq_k = 0$ 。式(1.3-2)变为 $\sum \frac{dq_{\lambda}}{dt} = \sum \frac{dq_{\text{出}}}{dt}$, 即 $\sum dq_{\lambda} = \sum dq_{\text{出}}$ 。所以, KCL 反映了在单位时间内,在电路的任一节点上,流入的电荷等于流出的电荷,即在节点上既不会产生电荷也不会消失电荷,电荷的流动是连续的。

KCL 不仅可用于节点,还可用于闭合面。图 1.3-2 所示闭合面 S , 流入 S 的电流有 i_1 和 i_2 , 流出电流有 i_3 , 有

$$i_1 + i_2 = i_3$$

例 1.3-1 局部电路如图 1.3-2, 已知 $i_1 = -1\text{A}$, $i_3 = 2\text{A}$, 求 i_2 。

解 由于 $i_1 + i_2 = i_3$, 所以

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

注意,应用 KCL 进行数值计算时电流的正负号。

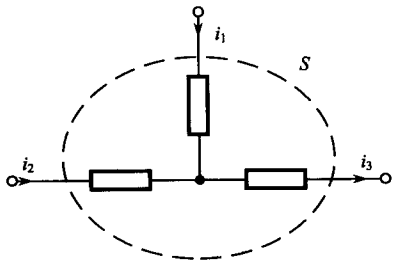


图 1.3-2 闭合面 S