

21世纪高等学校教材

第2版

D 电路分析

IANLU FENXI

徐贤敏 编



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

21 世纪高等学校教材

电 路 分 析

(第 2 版)

徐 贤 敏 编

西南交通大学出版社

• 成 都 •

内 容 提 要

本书内容符合教育部颁布的《电路课程教学基本要求》。

全书共分 14 章, 内容包括: 电路分析的基本概念, 电路的等效分析, 电路分析的规范方法, 电路分析的重要定理, 简单非线性电阻电路, 正弦电流电路的基本概念, 正弦稳态电路的分析, 耦合电感和变压器电路, 谐振电路, 三相电路, 周期非正弦电路, 双口网络, 动态电路的时域分析, 动态电路的复频域分析等。各章均配有丰富的例题和习题, 书末附有习题答案。

本书适用面广, 可作为电力、自控、通信、电子信息、计算机及机电等专业本科生的《电路分析》或《电工基础》课教材, 也可供科技人员、大专生、函授生和自考生参考。

图书在版编目 (C I P) 数据

电路分析 / 徐贤敏编. —2 版. —成都: 西南交通大学出版社, 2009.8

21 世纪高等学校教材

ISBN 978-7-5643-0384-6

I. 电… II. 徐… 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 146880 号

21 世纪高等学校教材

电 路 分 析

(第 2 版)

徐贤敏 编

*

责任编辑 张 雪

封面设计 墨创文化

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段 111 号 邮政编码: 610031 发行部电话: 028-87600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

成都蜀通印务有限责任公司印刷

*

成品尺寸: 185 mm×260 mm 印张: 24.875

字数: 623 千字 印数: 5 001—8 000 册

2002 年 9 月第 1 版

2009 年 8 月第 2 版 2009 年 8 月第 3 次印刷

ISBN 978-7-5643-0384-6

定价: 38.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

再版前言

本书系《电路分析》2002 年第一版的修订本。修订本保留了原版体系和编写特点：先电阻电路后动态电路，先稳态分析后动态（瞬态）分析，先时域分析后复频域分析；重视学科的系统性、严谨性以及电路理论应用的宽泛性。编写中注意面向学生、逐步深化、前后呼应，力求准确、精练、便于自学。

与原版本比，有较大变动以及需要说明的如下：

（1）作者在原版第一章中提出的分析任意两点间电压的计算式，本版中，将用此式分析计算电压的方法定名为“路径法”。

（2）在第三章“KVL 方程的独立性”中，突出、强调了确定独立回路的简易方法（通常所用），并从理论上给予了说明。作者将这一方法称之为“独占支路法”。“独占支路法”所确定的独立回路，实质上就是网络图论中的单连支回路——基本回路，因此原版中关于基本回路和相应的图论知识均予删除。

（3）在第九章中，删去了原版第三节“信号源内阻和负载对串联谐振电路的影响”，代以例题说明。

（4）在第十二章中，对双口网络参数的计算，除常规的“定义法”外，提出了简便易行的“方程法”，并给出了独特的分析技巧。增加了“双口电路的分析”一节，归纳介绍了“黑合”、“白合”两种不同的分析方法。

（5）对第十三章内容作了适当调整。

此外，对原版本的例题、习题，一一作了甄别、改写、增删及简化数据，旨在巩固、深化基础知识，联系实际，开阔思路，减少繁杂的数字计算。

本书难免有考虑不周和不足之处，敬请读者批评指正，意见请寄西南交通大学出版社转本人收。

编 者

2009 年 5 月

前 言

《电路分析》是电类各专业本科生必修的技术先导课程。其主要任务是讨论线性、非时变、集中参数电路的基本理论和分析方法,使学生掌握电路分析的基本概念和基本原理,提高分析思维能力和系统计算能力,为学习后续课程,建立良好的专业素质,以及为今后的工作奠定良好的基础。因此,编写一本内容精练、层次清楚、重点突出、分析深入、涵盖面广、适应发展需要的教材是非常必要的。基于这样的考虑,编者在数十年从事《电路分析》及其他相关课程教学的基础上,编写了此书。

本书内容符合教育部颁布的《电路课程教学基本要求》。可供高等院校电力、自控、通信、电子信息、计算机以及机电等专业本科教学使用。不同专业在使用时,可根据需要对教材内容作合理取舍。

本教材的体系是先电阻电路,后动态电路,先稳态分析,后动态(瞬态)分析;先时域分析,后复频域分析。在内容上主要有如下几个特点:

(1) 提出了电路分析的观察法,以培养学生直接使用电路定律和元件伏安关系灵活解题的能力。观察法是后续课程常用的方法,也是实际工作中很有用的方法。

(2) 正弦稳态电路中加强了相量图的内容,这样有利于提高学生对电路的全面分析和用相量图直接解题的能力。

(3) 直流一阶电路的时域分析中,改变了传统的零输入、零状态到完全响应的分析格式,而是紧接经典法引出三要素法,将三种响应的分析统一于一式。这样既简化了分析,又避免了产生“三种响应分析方法不同”的错误概念。作者对正弦一阶电路提出了四要素法,它有着更为普遍的意义,三要素法只是它的一个特例。

(4) 在本书的编写中,特别注重了概念的准确性、分析推理的逻辑性和分析方法的多样性,对某些问题的分析、推理采用了自己的观点,叙述力求深入浅出、层次分明、便于自学。

(5) 配合正文选编了较多的例题和习题。例题除了说明分析和计算的方法外,有的还对正文内容作了引申,并适当联系实际,扩充知识;习题的题型较多,涉及面较广,分层次、有梯度,以利选用。书末附有习题答案。

在本书的编写过程中,得到了西南交通大学峨眉校区各级领导的关心、鼓励;得到了教研室同志的支持;马端副教授为本书编写了部分习题以及习题答案,付出了辛勤的劳动;西南交通大学出版社副社长、总编张雪同志对本书的出版给予了大力支持,在此谨向他们表示真诚的谢意。若本书能使读者的电路理论和分析计算能力确有提高,作者将会感到莫大的欣慰。

书中可能存在不足之处,诚请批评指正,来信请寄四川成都西南交通大学出版社。

编 者

2002 年 7 月

目 录

第一章 电路分析的基本概念	1
第一节 电路分析概述	1
第二节 电路的基本变量	4
第三节 电路的基本定律	7
第四节 无源元件及其特性	12
第五节 有源元件及其特性	21
第六节 观察法	24
习 题	27
第二章 电路的等效分析	35
第一节 等效概念与电阻的等效分析	35
第二节 独立电源的等效分析	41
第三节 电阻星形连接与三角形连接的等效互换	45
第四节 无独立源二端网络的输入电阻	47
第五节 含运算放大器电路的分析	50
第六节 电路的对偶性	54
习 题	55
第三章 电路分析的规范方法	62
第一节 电路方程的独立性	62
第二节 支路电流法	64
第三节 网孔电流法	66
第四节 回路电流法	72
第五节 节点电压法	73
习 题	79
第四章 电路分析的重要定理	85
第一节 叠加定理	85
第二节 替代定理	89
第三节 戴维南定理和诺顿定理	90
第四节 最大功率传输定理	99
第五节 互易定理	100

第六节 参数变动定理·····	103
习 题·····	107
第五章 简单非线性电阻电路 ·····	114
第一节 非线性电阻·····	114
第二节 非线性电阻电路的解析法·····	115
第三节 非线性电阻电路的图解法·····	119
第四节 分段线性化法·····	122
第五节 小信号分析法·····	125
习 题·····	127
第六章 正弦电流电路的基本概念 ·····	131
第一节 正弦信号的基本概念和有效值·····	131
第二节 正弦量的相量表示·····	136
第三节 基尔霍夫定律的相量形式·····	140
第四节 电阻、电感、电容元件伏安关系的相量形式·····	141
习 题·····	147
第七章 正弦稳态电路的分析 ·····	150
第一节 阻抗和导纳·····	150
第二节 正弦稳态电路的分析·····	160
第三节 正弦稳态电路的相量图·····	165
第四节 正弦稳态电路的功率·····	169
第五节 正弦稳态电路最大功率传输定理·····	175
习 题·····	177
第八章 耦合电感和变压器电路 ·····	184
第一节 耦合电感的伏安关系和同名端·····	184
第二节 正弦稳态互感耦合电路的计算·····	189
第三节 耦合电感的去耦等效·····	191
第四节 空芯变压器电路分析·····	194
第五节 理想变压器的伏安关系·····	198
第六节 理想变压器的阻抗变换作用·····	202
第七节 全耦合变压器·····	205
习 题·····	208
第九章 谐振电路 ·····	214
第一节 串联谐振电路·····	214

第二节	RLC 串联谐振电路的频率特性和通频带	218
第三节	并联谐振电路	223
第四节	纯电抗串并联谐振电路	228
习 题		230
第十章	三相电路	234
第一节	对称三相电源和三相负载	234
第二节	对称三相电路	236
第三节	不对称三相电路和中点位移	242
第四节	三相电路的功率、功率因数	245
习 题		248
第十一章	周期非正弦电路	251
第一节	周期非正弦信号	251
第二节	周期非正弦信号的傅里叶级数	252
第三节	周期非正弦信号的频谱	254
第四节	傅里叶系数与波形对称性的关系	254
第五节	周期非正弦信号的有效值、平均值和电路的功率	256
第六节	周期非正弦信号激励时电路的响应	259
第七节	不同频率正弦电源共同作用下电路的分析	261
第八节	对称三相电路中的高次谐波	263
习 题		269
第十二章	双口网络	274
第一节	双口网络概述	274
第二节	双口网络的伏安方程及参数	274
第三节	双口网络的等效电路	285
第四节	双口电路的分析	290
第五节	双口网络的连接	293
第六节	回转器和负阻抗变换器	297
习 题		301
第十三章	动态电路的时域分析	305
第一节	动态过程和换路定律	305
第二节	电路初始值的计算	307
第三节	直流一阶电路动态分析的经典法	308
第四节	直流一阶电路动态分析的三要素法	315
第五节	一阶电路的零输入响应和零状态响应	320

第六节	直流一阶动态电路的叠加定理·····	325
第七节	阶跃函数、脉冲信号作用下的一阶电路·····	329
第八节	单位冲激函数和一阶电路的冲激响应·····	332
第九节	动态电路初始状态的跃变及 RL 电路切断电源·····	334
第十节	正弦一阶电路的分析——四要素法·····	337
第十一节	二阶 RLC 串联电路的零输入响应·····	340
第十二节	直流二阶 RLC 串联电路的零状态响应和完全响应·····	347
习 题	·····	349
第十四章	动态电路的复频域分析 ·····	358
第一节	拉普拉斯变换·····	358
第二节	拉普拉斯变换的基本性质·····	360
第三节	拉普拉斯反变换的部分分式展开法·····	363
第四节	复频域的电路定律、元件伏安关系及电路模型·····	367
第五节	动态电路复频域分析法·····	369
习 题	·····	375
习题答案	·····	378
参考文献	·····	390

第一章 电路分析的基本概念

本章主要内容：电路模型；电路的主要物理量（电流、电压和功率）；电路的基本定律（基尔霍夫电流定律和电压定律）；电路元件（电阻、电感、电容、电压源、电流源和受控源）及其伏安关系；电压分析的路径法和电路分析的观察法等。

基尔霍夫定律和元件的伏安关系是电路分析的重要基础，贯穿于全书；路径法是分析计算电压的基础方法，应用于各章；观察法是一个很直观的方法，对很多电路有效。

第一节 电路分析概述

电路理论是研究电路基本规律和电路分析与综合方法的学科，它经历了一个世纪的漫长道路，形成了完整的体系，并成为整个电气和电子工程，其中包括电力、通信、测量、控制及计算机等技术领域的主要理论基础，并在生产实践中获得了极其广泛的应用。

电路分析是电路理论中的一个重要分支，也是整个电路理论的基础。本章作为全书的开始，将介绍有关电路分析的一些基本概念和定律，为以后各章的学习奠定基础。

一、电路理论的发展及其研究领域

电路理论的发展经历了经典电路理论与近代电路理论两个阶段。从 19 世纪 20 年代到 20 世纪 60 年代，电路理论从物理学中电磁学的一个分支逐步发展成为一门独立的学科，这一阶段称为经典电路理论的形成与完备阶段。在这一阶段中，电路理论研究的主要对象主要是线性非时变无源电路。20 世纪 60 年代，电路理论发生了重大变革，这一变革的主要特征是：从原来主要研究线性、非时变、无源电路，进一步发展到非线性、时变、有源电路，另外在设计方法上采用了“系统的步骤”，以此与计算机辅助设计（CAD）相适应。20 世纪 60 年代至今的这一阶段被称为近代电路理论的形成及发展阶段。这一阶段虽然经历的时间不长，但电路理论的发展却极其迅速。电力、通信及控制技术、系统理论、计算机技术及大规模和超大规模集成电路的进展，对电路理论提出了一系列新的课题，从而促进了电路理论的发展。

电路理论研究的领域，包括电路分析与电路综合两个分支。电路分析是在给定的激励下，求给定电路的响应。电路综合则是在给定的激励下，为达到预期的响应而求得电路的结构及参数。这里，所谓“激励”，可理解为电源的作用；所谓“响应”，则可理解为电路各部分对电源作用的反应，例如电流、电压等。

近年来，在电路分析与综合之间，又出现了另一分支，即电路的故障诊断。电路的故障诊断，就是通过对电路的某些可及端钮的测量来确定电路中未知元件的状态及数值，从理论上说，就是元件参数的可解性问题，从实际上说，就是故障元件的定位与定值问题。

图 1-1 给出了电路分析、电路综合及电路故障诊断这三个研究领域的图解说明。

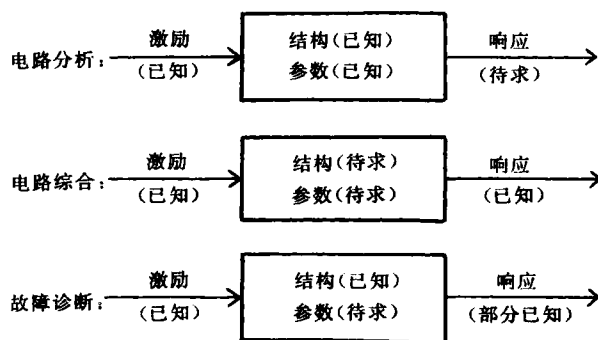


图 1-1 电路理论的三个分支

二、电路与电路模型

家用电器、照明设备以及工农业生产中的电机、电器等，统称为用电设备。它们消耗电能，故也称为负载。日光灯照明设备是由灯管、镇流器(铁芯线圈)和启动器(相当于自动开关)等连接而成的。灯管、镇流器及启动器等电器零件统称为电路器件或部件(供电电源也属于一种电路器件)。各种用电设备简繁不一，当接通电源后，即有电流流过，使电路进入工作状态。电路器件用导线连接起来构成电流通路，这样一个整体称为电路或网络。电路由电源、负载和连接导线组成。电源是供给电能的设备，电子技术中的信号源就是一种电源。负载是消耗电能的设备。导线的作用是将电源与负载连接起来进行能量传输。电路的作用是传输与分配电能，或者是传输与处理电信号。例如，供电电路就是传输与分配电能的电路；调谐电路是将输入的多频信号进行“处理”，然后输出单频或某一频带信号的电路。再如，放大电路是将输入的微弱信号放大“处理”而后输出的电路。

电路器件的特性与其工作时内部的电磁现象有关。根据电磁现象，可将器件用某个元件或若干元件的组合来模拟。所谓电路元件，是指具有单一电磁现象的器件，它是电路组成的最小单元，是理想化了的器件，因此也称为理想电路元件。理想电路元件有电阻、电容、电感、电压源、电流源、受控源、耦合电感、理想变压器及回转器等。电阻元件是只消耗电能并将其转换为热能或其他形式能量的元件。电容元件和电感元件是分别储存电场能量和磁场能量的元件。上述元件，前五种对外只有两个端钮，称为二端元件，后四种对外有四个端钮，称为四端元件。类似，对外只有两个端钮的网络称为二端网络，其他还有三端网络、四端网络等。三端以上的网络统称为多端网络。二端网络也称为单口网络，因为其一端钮上的电流是一进一出并且相等。四端网络两对端钮上的电流，若都分别是一进一出并且相等，则此四端网络称为双口网络。元件及结构完全清楚(已知)的网络称为“白盒”网络，元件及结构不清楚或不大清楚的网络，分别称为“黑盒”和“灰盒”网络。在电路分析中，电路和网络这两个词并无明显区别，通常作为整体时可称电路，仅分析“口”与“口”之间特性时则称网络。

任何电路器件都可用电路元件的恰当组合来模拟，模拟以后的模型，称为器件的电模型，简称模型。同一个电器在不同的工作条件下，其内部电磁现象不完全相同，因此对应的模型就不完全一样。例如，电感线圈在低频时的模型为电感 L 与电阻 R 的串联，但在高频时，由于线圈匝间电场影响较大，因此对应模型除 R 、 L 串联外，还要在串联支路上并一电容 C (低频时也

存在,但因其效应微弱,故而略去),若再考虑高频时的集肤效应,则模型中的电阻值还应增大。实际电路的各种器件用模型代替后,就构成了实际电路的电模型,称为电路模型。电路模型中的连接导线是理想导线,即电阻为零的导线。日光灯照明电路[图 1-2(a)]的电路模型如图 1-2(b)所示,它也称为电路图。

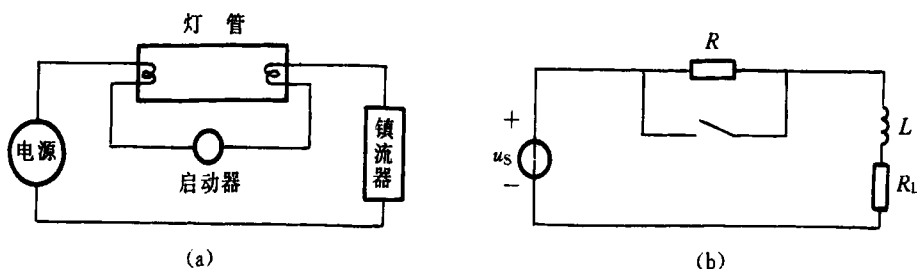


图 1-2 实际电路及其电路模型

电阻、电容、电感三个元件对应的电阻值 R 、电容值 C 及电感值 L 称为电路参数。严格地讲,电路中的电路参数是分布型的,这是因为任何电器内的电磁现象分布在整個电器之中。电路传送能量是通过电磁波的传播而实现的,若实际电路的线性尺度远小于电路工作时的电磁波波长,则电路的实际尺寸就可以忽略不计,因而电路参数可集中在一起用一个或有限个分立的 R 、 L 、 C 描述,这样的一些参数称为集中参数,对应的电路称为集中参数电路。若实际电路的线性尺度并不远小于电路工作时的电磁波波长,电路的实际尺寸就不可以忽略不计,这时就要用分布参数模拟电路,这种电路称为分布参数电路。电磁波的波长 λ 与电路工作频率 f 及电磁波传播速度 v 有关,它们之间的关系为 $\lambda = v/f$ 。电磁波在空气中的传播速度近似为光速 c ($c = 3 \times 10^8$ km/s),因此当电路工作频率 $f = 50$ Hz(工频)时,其电磁波波长 $\lambda = 6000$ km。可见,一般电路在工频时都属集中参数电路,而长距离的输电线才是分布参数电路。当计算机主频为 2 GHz (2×10^9 Hz)时,它对应的波长 $\lambda = 15$ cm,但由于采用超大规模集成电路,电路器件和电路被集成在几乎平方毫米或更小的硅片上,因此这时电路仍属集中参数电路。

电路模型是实际电路的一种抽象和近似,如何根据实际电路作出其电路模型,已成为近代电路理论中的一个重要研究课题,称为建模理论。本书只对电路模型进行分析,不考虑建模过程。

三、电路模型的分类

电路种类繁多,不同种类的电路,其基本特性与分析方法也不尽相同,因此在研究电路的分析方法之前,有必要先说明一下电路的分类以及各种电路的基本特性。

1. 线性电路与非线性电路

仅由线性元件构成的电路称为线性电路。若电路含有非线性元件,则为非线性电路。线性电路最基本的特性是它的叠加性和比例性。所谓叠加性是指,若激励 $x_1(t)$ 单独作用于电路产生的响应为 $y_1(t)$,激励 $x_2(t)$ 单独作用于电路产生的响应为 $y_2(t)$,则当 $x_1(t)$ 与 $x_2(t)$ 同时作用于电路时,产生的响应为 $y_1(t) + y_2(t)$ 。所谓比例性是指,若激励 $x(t)$ 单独作用于电路产生的响应为 $y(t)$,则激励 $kx(t)$ 单独作用于电路产生的响应为 $ky(t)$,这里 t 是时间(秒)、 k 为任意常数。非线性电路则没有这些性质。

严格说来,真正的线性电路在实际中是不存在的,但是大量的实际电路都可以很好地近似为线性电路,因此研究线性电路有着重要的理论意义和实际意义。在电路理论中,对线性电路

的研究已有相当长的历史,并已有了相当成熟的理论和分析方法。随着科学技术的发展,对非线性电路的研究也愈来愈为人们所重视,并取得了一定的成果。本书主要研究线性电路,对于非线性电路,将在第五章作简要介绍。

2. 时变与非时变电路

若电路中各元件的参数不随时间变化,则称这种电路为非时变电路。若电路含有随时间变化的电路参数,则为时变电路。非时变电路的基本特性是电路的响应特性不随激励施加的时间而变化。若激励 $x(t)$ 作用于电路产生的响应为 $y(t)$, 则激励 $x(t \pm t_0)$ 作用于电路产生的响应为 $y(t \pm t_0)$, t_0 为任意时间常数。时变电路不具有这种特性,施加激励的时间不同,它的响应也将不同。一般来说,大量的实际电路都可看做是非时变的,因此本书主要研究非时变电路。

3. 集中参数电路和分布参数电路

若电路中的每一器件都可用一个或一组集中的参数表征,则称为集中参数电路;若电路器件用分布参数表征,则称为分布参数电路。

4. 无源电路和有源电路

有源电路和无源电路是从能量观点定义的。如果某个元件在任何情况及在任意时刻 t 所消耗的电能 $w(t)$ 恒非负值,即

$$w(t) = \int_{-\infty}^t p(\xi) d\xi \geq 0 \quad (1-1)$$

则此元件称为无源元件,式中 $p(\xi)$ 为功率。不满足上述条件的元件称为有源元件。具有有源元件的电路称为有源电路,否则为无源电路。

以上是按基本特性分类,还有其他分类方法,如按工作频率来分,有高频电路、中频电路和低频电路;按电路功能来分,有放大电路、整流电路、检波电路,等等。此处不再详述。

第二节 电路的基本变量

电路中最基本的物理量是电流、电压和电功率。一般情况下,它们都是时间 t 的函数,分别用 $i(t)$ 、 $u(t)$ 及 $p(t)$ 表示,简写成 i 、 u 和 p 。直流电路中,电流、电压和功率均与时间无关,它们分别用大写字母 I 、 U 和 P 表示。电路分析的任务,就是求解已知电路中的电流、电压和功率。

一、电 流

所谓电流是指电流强度,其定义为单位时间内通过导体横截面的电荷量,即

$$i = \frac{dq}{dt}$$

式中, q 是电荷; t 是时间。在国际单位制(SI)中, q 的单位是库仑,简称库,符号是 C; t 的单位是秒,符号为 s; i 的单位是安培,简称安,符号为 A, $1 \text{ A} = 1 \text{ C/s}$ 。

电流的实际方向规定为正电荷定向运动的方向。电路中,流过各元件电流的实际方向往往难以预先确定,而分析电路时,首先要写出电路方程,电路方程的列写又必须知道电流的方向,为此,我们先给电流一个假定方向,这个假定方向称为电流的参考方向或正方向。这样,就可按照电流参考方向列写电路方程。若解得的电流 $i > 0$,则表示电流的实际方向与参考方向一致;若 $i < 0$,则电流的实际方向与参考方向相反。

二、电压与电位

电压与电位也是电路中的重要物理量。某点的电位，是将单位正电荷由该点移到参考点（电位为零的点，物理学中一般选为无穷远处）电场力所做的功。设参考点为 0，则 a 点电位的表达式为

$$u_a = \int_{l_{a0}} \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

式中， $\vec{E}$ 为电场强度； l_{a0} 为 a 点到参考点 0 的路径（线段）。

电压是对两点之间而言的。 a 、 b 两点的电压 u_{ab} 定义为将单位正电荷由 a 点移到 b 点时电场力所做的功，即

$$u_{ab} = \int_{l_{ab}} \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (1-2)$$

电场力做功仅与路径的起点、终点有关，而与路径的选择无关。使式(1-2)中的 l_{ab} 经过参考点 0，于是式(1-2)可表示为

$$\begin{aligned} u_{ab} &= \int_{l_{a0b}} \vec{E} \cdot d\vec{l} = \int_a^0 \vec{E} \cdot d\vec{l} + \int_0^b \vec{E} \cdot d\vec{l} \\ &= \int_a^0 \vec{E} \cdot d\vec{l} - \int_b^0 \vec{E} \cdot d\vec{l} = u_a - u_b \end{aligned}$$

上式表明， a 、 b 两点之间的电压就是 a 、 b 两点的电位差，所以电压表示的是电位降的概念。由电压及电位的定义可见，某点的电位就是该点到参考点的电压。电位与参考点的选择有关，而电压与参考点的选择无关。在国际单位制中，电压和电位的单位均为伏特，简称伏(V)。

电压的实际方向规定为电位降的方向。例如图 1-3(a)， a 点和 b 点的电位分别为 -1 V 和 3 V ，于是 a 、 b 两点电压的实际方向为由 b 指向 a ，其大小为 4 V 。电压也可用极性表示，其实际极性是这样规定的：高电位点定为正极，标以“+”号；低电位点定为负极，标以“-”号。图 1-3(b)示出了 a 、 b 点的极性。与电流一样，分析电路时，要先给电压一个假定方向或极性，此方向(极性)称为参考方向(极性)，电压参考方向是由参考正极指向参考负极的方向。电压参考方向(极性)的意义与电流类似。本书电路中所标的电流、电压方向，若无说明，均系参考方向。

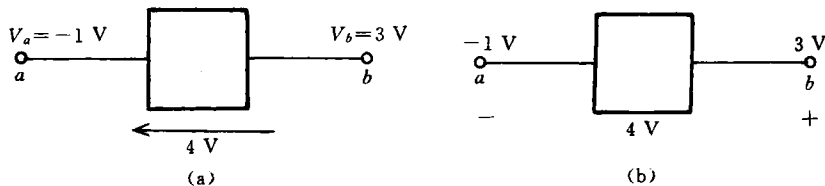


图 1-3 电压的实际方向或极性

任何二端元件(或网络)，若电压与电流方向相同，如图 1-4(a)所示，则称电压与电流方向关联；若相反，如图 1-4(b)所示，则为非关联。通常负载的电压、电流取关联方向，而电源的电压、电流取非关联方向。图 1-4(c)中，对元件 A 而言， u 与 i 为非关联方向；对元件 B 而言，则为关联方向。

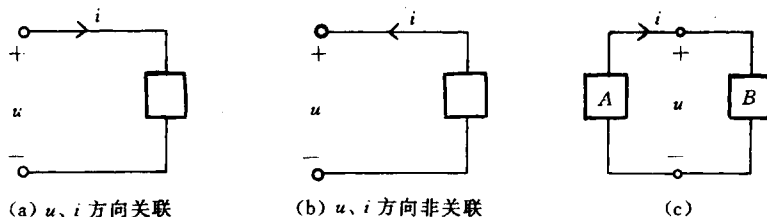


图 1-4 电流、电压参考方向

三、电动势

电路中一般都接有电源以维持电流的流动。电源有将正电荷从低电位经电源内部移到高电位的能力。我们将使单位正电荷从电源负极经电源内部移至正极时,电源力(非静电力)所做的功定义为电源的电动势,用 e 表示。可见,电动势表示的是电位升的概念。电压 u 表示电位降,电动势 e 表示电位升,因此,当电源两端的 u 与 e 方向相反时 $u=e$,方向相同时 $u=-e$ 。

四、电功率

电流是单位时间内通过导体横截面的电量,电压是将单位正电荷由一点移到另一点电场力所做的功。因此,当二端元件的电流与电压方向关联时,电流与电压的乘积就表示单位时间内,将数值为 i 的电荷从二端元件(网络)的一端移到另一端电场力所做的功,即电功率,简称为功率。电场力做功,表明电场能量减少,减少的能量显然被二端元件(网络)所吸收或消耗。所以,当元件(网络)上电压 u 与电流 i 方向关联时,元件(网络)吸收的功率为

$$p_{\text{吸}} = ui$$

反之,若 u, i 非关联,则吸收的功率为

$$p_{\text{吸}} = -ui$$

二端元件供出的功率等于吸收功率的负值,所以 u, i 关联时 $p_{\text{供}} = -ui$; u, i 非关联时 $p_{\text{供}} = ui$ 。功率的单位是瓦特,符号为 W, $1 \text{ W} = 1 \text{ V} \cdot \text{A}$ 。在求解功率时,需要注明 p 的下标($p_{\text{吸}}$ 或 $p_{\text{供}}$)。若求得的 $p_{\text{吸}} < 0$,则表示元件实际上供出能量,例如 $p_{\text{吸}} = -10 \text{ W}$,表示供出功率 10 W 。

根据能量守恒定律,电路(指整体电路)中各元件吸收(或供出)的功率之和恒等于零,即

$$\sum p_{\text{吸}} = 0 \quad \text{或} \quad \sum p_{\text{供}} = 0$$

这就是功率平衡或守恒原理。

例 1-1 试求图 1-5 所示二端网络 N_1 、 N_2 的功率 P_1 、 P_2 以及流过 N_3 的电流。设 N_3 供出的功率为 6 W 。

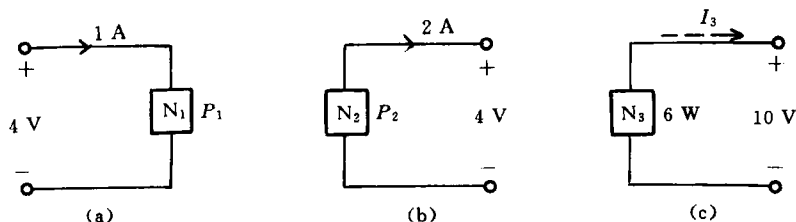


图 1-5 例 1-1 电路

解 $P_{1吸} = (4 \times 1)W = 4W$ (吸收)
 $P_{2吸} = (-4 \times 2)W = -8W$ (供出 8 W)

设 N_3 的电流 I_3 如图 1-5(c)虚线所示,则

$$P_{3供} = 10I_3$$

$$I_3 = \frac{P_{3供}}{10} = \frac{6}{10} A = 0.6 A$$

五、电能量

设元件吸收的功率为 $p(t)$,则 t 时刻元件吸收的总能量为

$$w(t) = \int_{-\infty}^t p(\xi) d\xi$$

式中,积分上限为 t ,为了区别,积分式内的时间变量改用 ξ 。能量的单位是焦耳,符号为 J。

上面介绍了电路的基本物理量电流、电压及功率等,它们的基本单位分别是安、伏和瓦。实用中,有时感到这些单位太大或太小,使用不便,因此常在这些单位前加某一词头,用来表示这些单位乘以 10^n 后所得的辅助单位。词头的符号、名称及因次见表 1-1。例如:1 mA = 10^{-3} A; 1 kV = 10^3 V; 1 MW = 10^6 W。表 1-1 中各词头不仅用于安、伏、瓦前,也用于电路参数前,如 kΩ(千欧)、mH(毫亨)、μF(微法)等。

词头的符号、名称及因次

表 1-1

符 号	T	G	M	k	m	μ	n	p
词 头 名 称	太	吉	兆	千	毫	微	纳	皮
因 次	10^{12}	10^9	10^6	10^3	10^{-3}	10^{-6}	10^{-9}	10^{-12}

第三节 电路的基本定律

在集中参数电路中,各电流之间、各电压之间遵循着一定的规律,此即基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律。基尔霍夫定律是德国物理学家 Gustav Robert kirchhoff(1824—1887)提出的。这个定律揭示了任一集中参数电路内的节点电流及回路电压的平衡关系。在叙述这两个定律之前,先介绍支路、节点、回路及网孔等几个名词。

电路中每一个二端元件称为一条支路,支路与支路的连接点称为节点。图 1-6(a)中有七条支路(ab、bc、ac、ae、bd、df 及 cg)和五个节点(a、b、c、d 及 f)。e、f、g 是一个节点,因为它们由理想导线连接。图 1-6(a)亦可画成图 1-6(b)形式。支路、节点的另一说法是:电路中由一个元件或若干元件串联组成的一条分支称为一条支路,三条及三条以上支路的汇聚点称为节点。按此说法,图 1-6 中有六条支路(ab、bc、ac、af、bf 及 cf)和四个节点(a、b、c 及 f)。电路中从某点出发,经过若干支路和节点(均不能重复)又回到原始点,这一首尾相连的通路称为回路。例如图 1-6(a)中的 abdfea、bdfgcb、abca、abcgfea……回路内若不另含支路,这种回路称为网孔,上述前三个回路为网孔。回路方向是指沿回路各节点绕行的方向,上述四个回路

中,两个是顺时针方向,两个是逆时针方向。

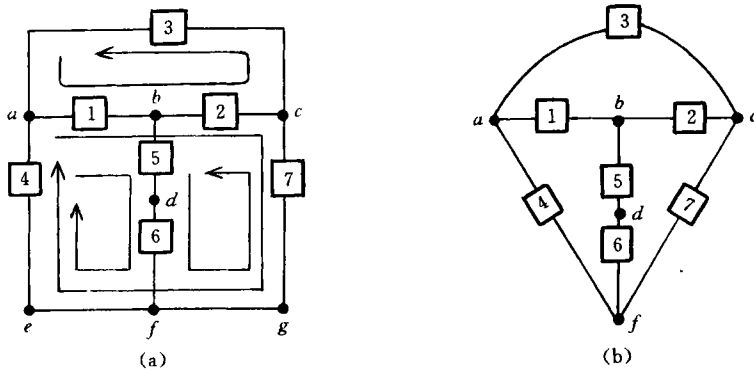


图 1-6 支路、节点、回路与网孔

一、基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律简称为 KCL(Kirchhoff's Current Law),表述为:在集中参数电路中,任一瞬间,流出(流入)任一节点电流的代数和恒为零。其表达式为

$$\sum i = 0 \quad (1-3)$$

式(1-3)称为 KCL 方程。其中电流正、负号的取法是:当 i 的方向流出(流入)节点时取“+”,反之取“-”。例如对图 1-7(a)的节点 A 有

$$-i_1 + i_2 + i_3 - i_4 + i_5 = 0$$

即

$$i_2 + i_3 + i_5 = i_1 + i_4$$

上式说明,流出节点的总电流等于流入节点的总电流,这一特性称为电流连续性原理,实际上就是单位时间内流入节点的电荷量等于流出节点的电荷量,这正是电荷守恒定律在电路中的体现。根据电流连续性原理,在图 1-7(b)中,流过各元件的电流应相等,且是同一个电流。

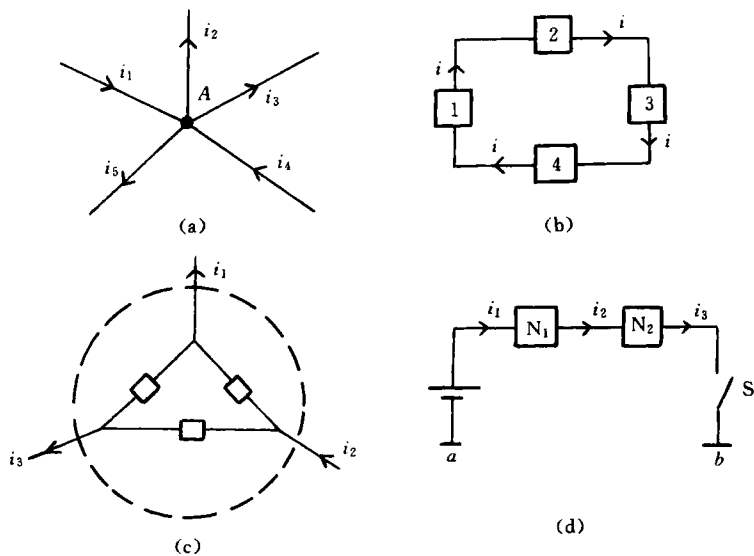


图 1-7 基尔霍夫电流定律