



普通高等教育“十二五”规划教材
电子信息科学与电气信息类基础课程

电路分析基础

(第二版)

高吉祥 刘 原 主编



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

内 容 简 介

本书是根据教育部高等学校电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导委员会颁布的“电路分析基础”课程教学基本要求而编写的。主要内容有:电路的基本概念、定律、定理及分析方法,正弦稳态电路,含耦合电感的电路分析,三相电路、动态电路的分析,非正弦周期电流电路的分析,网络函数,二端口网络,网络图论基础,状态方程和非线性电阻电路。

本书内容简明扼要,深入浅出,便于自学,同时注意实际应用能力的培养。可作为高等学校电气类、电子类、自动化类、计算机类,以及其他相近专业的基础教材,也可供从事电子技术工作的工程技术人员学习参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

电路分析基础/高吉祥,刘原主编. —2版. —北京:电子工业出版社,2012.3
电子信息科学与电气信息类基础课程
ISBN 978-7-121-16084-4

I. ①电… II. ①高… ②刘… III. ①电路分析—高等学校—教材 IV. ①TM133
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 028374 号

策划编辑:陈晓莉

责任编辑:陈晓莉

印 刷: 三河市双峰印刷装订有限公司
装 订:

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经 销:各地新华书店

开 本:787×980 1/16 印张:20.75 字数:588 千字

印 次:2012 年 3 月第 1 次印刷

定 价:38.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

第二版前言

本书是根据教育部高等学校电子信息科学与工程类基础课程教学指导委员会颁布的“电路分析基础”课程教学基本要求,为高等学校电气类、电子类、自动化类、计算机类和其他相近专业而编写的教材。全书分为 11 章。第 1 章电路的基本概念、定律、定理及一般分析方法,主要介绍电路的基本概念、基本定律、等效电路、电路的基本定理。第 2 章正弦稳态电路,主要介绍正弦量的基本概念,相量表示法及相量图,正弦稳态下的电阻、电感和电路元件,阻抗和导纳的串联与并联,电路定律的相量形式,电路的分析与计算,正弦稳态电路的功率及谐振电路。第 3 章含耦合电感的电路的分析,主要介绍耦合电感元件及电压电路分析,空心变压器及理想变压器。第 4 章三相电路,主要介绍三相电路,三相电路的分析及三相电路的功率。第 5 章动态电路的分析,主要介绍动态电路的暂态过程,方程及阶数,动态电路的两种分析法,即时域分析法和复频域分析法。第 6 章非正弦周期电流电路的分析,主要介绍非正弦周期性电压、电流,周期函数的傅里叶级数展开式及频谱,非正弦周期电压和电流的有效值、平均值和平均功率,以及非正弦周期性稳定电路的分析。第 7 章网络函数,主要介绍网络函数的定义和分类,网络函数的极点、零点及与冲激响应的关系,网络函数的极点、零点与频率的关系。第 8 章二端口网络,主要介绍双口网络、双口网络的方程和参数、双口网络参数(Z 、 Y 、 T 、 H)间的关系,双口网络的等效电路,双口网络的连接。第 9 章网络图论基础,主要介绍网络图的概念,关联矩阵、回路矩阵、割集矩阵和 KCL、KVL 方程的矩阵形式,典型支路及其电压电流约束(VCR)方程的矩阵形式,节点电压法的矩阵形式,割集电压方程的矩阵形式和回路电流方程的矩阵形式;第 10 章状态方程,主要介绍状态变量及状态方程,状态方程的列写方法;第 11 章非线性电阻电路,主要介绍非线性电阻元件,非线性电阻的串联与并联,非线性电阻电路的图解法,分段线性化及小信号分析法。

《电路分析基础》第一版自 2006 年出版以来,已经 5 个年头,被许多院校采用为主教材,深受广大读者的喜爱,并反馈了一些宝贵意见。在初版的基础上,再次进行修订,使本书更加符合当前“电路分析基础”课程教学的需要。

第二版修订工作的指导思想是,主要依据教育部高等学校理工科电工课程教学的基本要求,同时继续遵循本书初版的编写原则:“确保基础、精选内容、加强概念、推陈出新、联系实际、突出重点、统一符号、形成系统。”这次修订为了提高教学效果、巩固知识、提升概念,每章后增

加了一节“本章小结及典型题解”,学校课时多的可以讲解,课时少的可以让学生自学。书后提供了部分习题参考答案。

与主教材配套的教材及教辅还有:

(1) 高吉祥、谢晓霞、李珊珊编著,《电路分析基础学习辅导与习题详解》,电子工业出版社,2010.2 出版;

(2) 高吉祥、李珊珊编著,《电路分析基础教师参考用书》;

(3) 谢晓霞、李珊珊制作,《电路分析基础多媒体课件》。

本书配有的多媒体课件及教师参考用书是作者总结多年教学经验编写和制作的,若使用本教材作为主教材,可在电子工业出版社华信教育资源网(<http://www.hxedu.cn>)申请下载和索取。

本书第一版主要由刘原、高吉祥、管金云、唐少、高勐等人编写,参与编写的还有杨恒玲、陈蔚、陈文光等,西安电子科技大学张子惊对书稿进行了仔细的审读。编写过程同时得到南华大学校长凌球、国防科技大学电子科学与工程学院唐朝京院长的大力支持。

参与这次修订工作的学校和老师有:国防科技大学电子科学与工程学院高吉祥、谢晓霞,南华大学电气工程学院刘原、管金云,怀化学院物理与信息工程系李珊珊、贺达江,以及西安空军工程大学的老们,在此一并感谢。

由于编者的水平有限,敬请广大读者对书中存在的错误和缺点给予批评指正,帮助我们不断完善此教材,我们表示万分感谢。

编 者
2012 年元月

目 录

第 1 章 电路的基本概念、定律、定理和一般分析方法	(1)
1.1 电路的基本概念	(1)
1.1.1 电路的组成和功能	(1)
1.1.2 电路中常见的元器件及电路模型	(1)
1.1.3 电路的基本物理量	(4)
1.2 电路的基本定律	(6)
1.2.1 欧姆定律	(7)
1.2.2 基尔霍夫第一定律	(8)
1.2.3 基尔霍夫第二定律	(10)
1.3 等效电路	(12)
1.3.1 电路等效的一般概念	(12)
1.3.2 电阻的串联与并联等效	(13)
1.3.3 电压源、电流源等效及其互换等效	(16)
1.3.4 受控源及含受控源电路的等效	(22)
1.3.5 电阻 Δ 形、Y形电路互换等效	(25)
1.4 电阻电路的一般分析方法	(29)
1.4.1 2b 法	(29)
1.4.2 b 法	(30)
1.4.3 网孔法	(32)
1.4.4 节点法	(36)
1.5 电路的基本定理	(41)
1.5.1 叠加定理和齐次定理	(41)
1.5.2 替代定理	(46)
1.5.3 戴维南定理与诺顿定理	(48)
1.5.4 最大功率传输定理	(53)
1.5.5 互易定理	(56)
1.6 本章小结及典型题解	(59)
1.6.1 本章小结	(59)
1.6.2 典型题解	(64)
习题 1	(69)
第 2 章 正弦稳态电路	(75)
2.1 正弦量的基本概念	(75)
2.1.1 正弦量的三要素	(75)

2.1.2	正弦电流、电压的有效值	(77)
2.1.3	同频率正弦电流、电压的相位差	(77)
2.2	正弦量的相量表示法及相量图	(78)
2.2.1	复数及其运算	(79)
2.2.2	正弦量的相量表示法	(80)
2.2.3	相量图	(81)
2.2.4	相量的有关运算	(82)
2.3	正弦稳态下的电阻、电感、电容元件	(83)
2.3.1	电阻元件	(83)
2.3.2	电感元件	(85)
2.3.3	电容元件	(87)
2.4	阻抗和导纳的串联与并联	(89)
2.4.1	二端网络阻抗和导纳的定义	(89)
2.4.2	阻抗(导纳)的串联和并联	(91)
2.4.3	正弦交流电路的性质	(93)
2.5	电路定律的相量形式	(94)
2.5.1	电路定律的相量形式	(94)
2.5.2	电路的相量模型	(96)
2.6	正弦稳态电路的分析与计算	(97)
2.6.1	正弦稳态电路的分析方法	(97)
2.6.2	正弦稳态电路的分析计算	(98)
2.7	正弦稳态电路的功率	(100)
2.7.1	瞬时功率、有功功率、无功功率和视在功率	(100)
2.7.2	功率因数及功率因数的提高	(104)
2.7.3	复功率	(106)
2.7.4	最大功率传输定理	(107)
2.8	谐振电路	(109)
2.8.1	正弦交流电路的频率特性	(109)
2.8.2	串联谐振电路	(109)
2.8.3	并联谐振电路	(114)
2.9	本章小结及典型题解	(116)
2.9.1	本章小结	(116)
2.9.2	典型题解	(120)
习题 2		(125)
第 3 章	含耦合电感的电路分析	(131)
3.1	耦合电感元件	(131)
3.1.1	耦合电感的电压、电流关系	(131)
3.1.2	同名端	(132)

3.2 含有耦合电感电路的分析	(134)
3.2.1 耦合电感的串联	(134)
3.2.2 耦合电感的并联	(136)
3.2.3 去耦等效电路	(137)
3.3 空心变压器	(140)
3.3.1 原边等效电路	(140)
3.3.2 副边等效电路	(142)
3.4 理想变压器	(143)
3.4.1 理想变压器的特性方程	(143)
3.4.2 理想变压器变换阻抗的性质	(145)
3.5 本章小结及典型题解	(146)
3.5.1 本章小结	(146)
3.5.2 典型题解	(150)
习题3	(151)
第4章 三相电路	(153)
4.1 三相电压	(153)
4.2 对称三相电路的电压、电流和平均功率	(155)
4.3 不对称三相电路的分析	(158)
4.3.1 有中线时不对称三相电路的分析	(158)
4.3.2 无中线时不对称三相电路的分析	(159)
4.4 三相电路功率的测量	(161)
4.5 本章小结及典型题解	(163)
4.5.1 本章小结	(163)
4.5.2 典型题解	(165)
习题4	(167)
第5章 动态电路的分析	(168)
5.1 引言	(168)
5.1.1 动态电路的暂态过程	(168)
5.1.2 动态电路的方程及阶数	(168)
5.1.3 暂态过程的分析方法	(168)
5.2 动态电路初始条件的确定	(168)
5.3 动态电路的时域分析法	(170)
5.3.1 一阶电路的响应	(170)
5.3.2 二阶电路的响应	(188)
5.4 动态电路的复频域分析法	(194)
5.4.1 拉普拉斯变换	(194)
5.4.2 拉普拉斯变换的基本性质	(195)
5.4.3 用部分分式展开法求拉普拉斯反变换	(197)

5.4.4 用运算法求解暂态过程	(200)
5.5 本章小结及典型题解	(203)
5.5.1 本章小结	(203)
5.5.2 典型题解	(204)
习题5	(207)
第6章 非正弦周期电流电路的分析	(212)
6.1 非正弦周期性电压、电流	(212)
6.2 周期函数的傅里叶级数展开式及频谱	(213)
6.2.1 周期函数的傅里叶级数展开式	(213)
6.2.2 非正弦周期函数的频谱	(218)
6.3 非正弦周期性电压和电流的有效值、平均值和平均功率	(219)
6.3.1 有效值	(219)
6.3.2 平均值	(220)
6.3.3 平均功率	(220)
6.4 非正弦周期性稳态电路的计算	(221)
6.5 本章小结及典型题解	(224)
6.5.1 本章小结	(224)
6.5.2 典型题解	(224)
习题6	(226)
第7章 网络函数	(229)
7.1 网络函数的定义和分类	(229)
7.1.1 网络函数的定义	(229)
7.1.2 网络函数的分类	(229)
7.2 网络函数的极点和零点及其与冲激响应的关系	(232)
7.2.1 网络函数的极点和零点	(232)
7.2.2 极零点与冲激响应的关系	(232)
7.3 网络函数的极点和零点与频率响应的关系	(234)
7.4 本章小结及典型题解	(237)
7.4.1 本章小结	(237)
7.4.2 典型题解	(237)
习题7	(238)
第8章 二端口网络	(241)
8.1 双口网络	(241)
8.2 双口网络的方程和参数	(241)
8.2.1 Z 参数	(241)
8.2.2 Y 参数	(244)
8.2.3 T 参数	(245)
8.2.4 H 参数	(246)

8.2.5 双口网络参数间的关系	(247)
8.3 双口网络的等效电路	(248)
8.3.1 Z 参数等效电路	(249)
8.3.2 Y 参数等效电路	(249)
8.4 双口网络的连接	(251)
8.4.1 双口网络的串联	(251)
8.4.2 双口网络的并联	(252)
8.4.3 双口网络的级联	(253)
8.5 双口网络的输入阻抗、输出阻抗与特性阻抗	(254)
8.5.1 双口网络的输入阻抗、输出阻抗	(254)
8.5.2 传输网络函数	(255)
8.5.3 特性阻抗	(256)
8.6 回转器和负阻抗变换器	(257)
8.6.1 回转器	(257)
8.6.2 负阻抗变换器	(258)
8.7 本章小结及典型题解	(259)
8.7.1 本章小结	(259)
8.7.2 典型题解	(259)
习题 8	(261)
第 9 章 网络图论基础	(264)
9.1 网络图论的基本概念	(264)
9.2 关联矩阵、回路矩阵、割集矩阵和 KCL、KVL 方程的矩阵形式	(265)
9.2.1 关联矩阵 A	(266)
9.2.2 回路矩阵 B	(266)
9.2.3 割集矩阵 Q	(267)
9.2.4 矩阵表示的 KCL 和 KVL 方程	(268)
9.3 典型支路及其电压电流约束(VCR)方程的矩阵形式	(271)
9.4 节点电压法的矩阵形式	(273)
9.5 割集电压方程的矩阵形式	(278)
9.6 回路电流方程的矩阵形式	(280)
*9.7 列表法	(281)
9.8 本章小结及典型题解	(284)
9.8.1 本章小结	(284)
9.8.2 本章小结	(285)
习题 9	(286)
第 10 章 状态方程	(289)
10.1 状态变量和状态方程	(289)
10.1.1 状态变量	(289)

10.1.2 状态方程	(290)
10.1.3 输出方程	(290)
10.2 状态方程的列写方法	(290)
10.2.1 观察法	(290)
10.2.2 叠加法	(291)
10.2.3 拓扑法	(292)
10.3 本章小结及典型题解	(294)
10.3.1 本章小结	(294)
10.3.2 典型题解	(294)
习题 10	(295)
第 11 章 非线性电阻电路	(297)
11.1 非线性电阻元件	(297)
11.2 非线性电阻的串联与并联	(298)
11.2.1 非线性电阻的串联	(298)
11.2.2 非线性电阻的并联	(299)
11.3 非线性电阻电路的图解法	(300)
11.4 非线性电阻电路的分段线性化	(302)
11.5 非线性电阻电路的小信号分析法	(304)
11.6 本章小结及典型题解	(306)
11.6.1 本章小结	(306)
11.6.2 典型题解	(306)
习题 11	(307)
附录 A 习题参考答案	(309)
附录 B 常用文字符号说明	(317)
参考文献	(321)

第1章 电路的基本概念、定律、定理和一般分析方法

[内容提要]

本章从电路的基本概念入手,重点介绍了电路的基本定律、定理及一般分析方法。

1.1 电路的基本概念

1.1.1 电路的组成和功能

在我们的日常生活、工农业生产、科学研究及国防建设中,使用着各种各样的电器设备,如收音机、电视机、录放机、电动机、计算机、手机、雷达、电子对抗设备等,广义上说,这些电器设备都是实际中的电路。

图 1.1.1 是最简单的一种照明电路。它由干电池(提供电能的能源,简称电源)、灯泡(用电装置,一般叫负载)、金属导线和控制开关等组成。

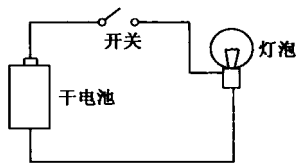


图 1.1.1 手电筒电路

实际电路种类繁多,但从其功能来说可概括为两个方面。其一是进行能量的产生、传输、分配与转换。典型的例子如电力系统中的发电、输电电路。发电厂的发电机组将其他形式的能量(或热能、或水的势能、或原子能、或太阳能等)转换成电能,通过变压器、输电线输送给各用户负载,那么又把电能转换成机械能(如负载是电动机)、光能(如负载是灯泡)、热能(如负载是电炉、电烙铁等),为人们生产、生活所利用。其二是实现信号的产生、传递、变换、处理与控制。这方面的例子有电话、FM/AM 广播、电视系统等。

由电阻器、电容器、线圈、变压器、晶体管、运算放大器、传输线、电池、发电机和信号发生器等电气器件和设备连接而成的电路,称为实际电路。图 1.1.1 就是一个简单的实际电路。根据实际电路的几何尺寸(d)与其工作信号波长(λ)的关系,可以分为两大类:满足 $d \ll \lambda$ 条件的电路称为集总参数电路,其特点是电路中任意两点间电压和流入任一器件端钮的电流是完全确定的,与器件的几何尺寸和空间位置无关;不满足 $d \ll \lambda$ 条件的另一类电路称为分布参数电路,其特点是电路中的电压和电流不仅是时间的函数,也与器件的几何尺寸和空间位置有关,由波导和高频传输线组成的电路是分布参数的典型例子。本书只讨论集总参数电路,为叙述方便,今后常简称为电路。

1.1.2 电路中常见的元器件及电路模型

“模型”是现代各个自然学科、社会学科分析研究问题中普遍使用的重要概念。如,没有宽窄厚薄的“直线”是数学学科研究中的一种模型;不占空间尺寸却有一定质量的“质点”是物理学研究中的一种模型。人们在分析、设计某一个实际系统时,几乎都采用模型化的方法,即先建立能反映该系统基本特性的模型,使问题得到合理简化,然后对该模型进行定量分析,以

求得该系统的某些分析研究结果。研究电路问题也是如此,我们首先要建立电路模型,然后进行定量分析。

1.1.2.1 电路中常见的元器件及电原理图

在实际电路中常见的元器件有:导线、开关、熔断器、灯、电压表、传声器、扬声器、二极管、晶体三极管、运算放大器、电池、电阻器、电容器、线圈、变压器、直流发电机和直流电动机等。表 1.1.1 列举了我国国家标准中部分电气图用的元器件的图形符号。采用这些图形符号,可以画出表明实际电路中各个器件互相连接关系的电原理图。图 1.1.1 表示日常生活中使用的手电筒电路,图 1.1.2 是手电筒原理图。

表 1.1.1 部分电气图用图形符号
(根据国家标准 GB4728)

名 称	符 号	名 称	符 号	名 称	符 号
导线		传声器		电阻器	
连接的导线		扬声器		可变电阻器	
接地		二极管		电容器	
接机壳		稳压二极管		线圈, 绕组	
开关		隧道二极管		变压器	
熔断器		晶体管		铁心变压器	
灯		运算放大器		直流发电机	
电压表		电 池		直流电动机	

1.1.2.2 电路模型

研究集总参数电路特性的一种方法是用电气仪表对实际电路直接进行测量。另一个更重要的方法是将实际电路抽象为电路模型,用电路理论的方法分析计算出电路的电气特性。运用现代电路理论,借助于计算机,可以模拟各种实际电路的特性和设计出电气性能良好的大规模集成电路。

如何将实际电路抽象为电路模型呢? 实际电路中发生的物理过程是十分复杂的,电磁现象发生在各器件和导线之中,相互交织在一起。对于集总参数电路,当不关心器件内部的情况,只关心器件端钮上的电压和电流时,可以定义一些理想化的电路元件来近似模拟器件端钮上的电气特性。例如,定义电阻元件是一种只吸收能量(它可以转化成热能、光能或其他形式的能量)的元件,电容元件是一种只存储电场能量的元件,电感元件是一种只存储磁场能量的元件,新的干电池可看成是一种内阻 R_i 为 0, 输出为恒定电压的元件,等等。用这些电阻、电容、电感、电源等理想元件近似模拟实际电路中每个电气器件和设备,再根据这些器件的连接

方式,用理想导线将这些电路元件连接起来,就得到该电路的电路模型。例如图 1.1.3(a)就是实际电路图 1.1.1 手电筒的电路模型。在电路分析中,为了便于看出电路模型中各元件的连接关系,常采用仅仅表示元件连接关系的拓扑结构图,如图 1.1.3(b)所示。表 1.1.2 列举了本书采用的部分电路元件的电路模型图形符号,其中有一些符号是与电气原理图所用的图形符号相同。这些电路元件的定义和特性将在以后陆续介绍。

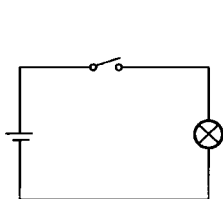
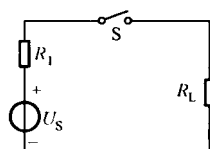


图 1.1.2 手电筒原理图



(a) 电路模型



(b) 拓扑结构图

图 1.1.3 手电筒的电路模型和拓扑结构图

电路模型近似地描述实际电路的电气特性。根据实际电路的不同工作条件及对模型的精度不同要求,应当用不同的电路模型。例如一个电感线圈,在低频电子线路中,如电路模型精度要求不高,可采用图 1.1.4(a)来模拟,如电路要求较高,常采用图 1.1.4(b)(用一个电阻与一个电感串联)来模拟。而在高频交流工作条件下,则要再并联一个电容来模拟,如图 1.1.4(c)所示。又如对同一个晶体管在低频段、中频段和高频段所采用的电路模拟(或等效电路)不相同。这些将在后续的课程中详细介绍。

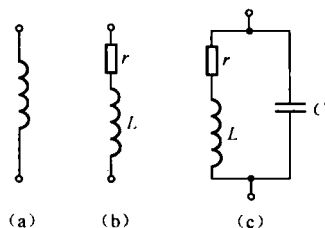


图 1.1.4 线圈的几种电路模型

表 1.1.2 部分电路元件的图形符号

名称	符号	名称	符号	名称	符号
独立电流源		理想导线		电容	
独立电压源		连接的导线		电感	
受控电流源		电位参考点		理想变压器耦合电感	
受控电压源		理想开关		回转器	
电阻		开路		理想运放	
可变电阻		短路		二端元件	
非线性电阻		理想二极管			

将实际电路抽象成电路模型的工作,需要对各种电气器件的特性有深入的了解,有时非常复杂和困难。本书只能涉及一些简单的情况,其目的是为了牢固地树立“电路模型”概念。本

课程的主要任务是研究电路模型(简称为电路)的各种分析方法,其目的就是通过对电路(模型)的分析研究来预测实际电路的电气特性,以便指导改进实际电路的电气特性和设计制造新的实际电路。电路的研究问题可以分为两类:一类是电路分析,已知电路结构和元件特性,分析电路特性;另一类是网络(电路)综合,根据电路特性的要求来设计电路的结构和元件参数。本课程是电路的入门课程,主要讨论电路分析问题。

1.1.3 电路的基本物理量

电路的特性是由电流、电压和电功率等物理量来描述的。电路分析的基本任务是计算电路中的电流、电压和电功率。

1.1.3.1 电流

电荷有规则的定向运动,形成传导电流。电子和负离子带负电荷,空穴和正离子带正电荷。电荷用符号 q 或 Q 表示,它的 SI 单位为库[仑](C)。

单位时间内通过导体横截面的电荷量定义为电流强度。用符号 i 或 I 表示,其数学表达式为

$$i = dq/dt \quad (1.1.1)$$

电流强度(简称电流)的 SI 单位是安[培](A)。

大小和方向均不随时间改变的电流,称为恒定电流,简称直流(dc 或 DC),一般用符号 I 表示;大小和方向随时间改变的电流,称为时变电流,一般用符号 i 表示;大小和方向随时间作周期性变化且平均值为零的时变电流,称为交流(ac 或 AC)。

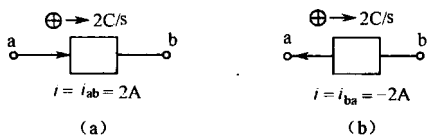


图 1.1.5 电流的参考方向

和计算的需要,任意规定一个电流的参考方向,用箭头标在电路图上。若电流的实际方向与参考方向相同,电流取正值;反之取负值。根据电流的参考方向及电流量值的正负,就能确定电流的实际方向,如图 1.1.5 所示。

1.1.3.2 电压

在物理学中我们已经知道,将单位正电荷自某一点 a 沿任意路径移动到参考点(物理学中习惯选无穷远处作为参考点)电场力做功的大小称为 a 点的电位,记为 V_a 。在电路中,电位的概念同物理学静电场中所讲的概念是一样的,只不过电路中计算某点的电位是将单位正电荷沿任一电路所约束的路径移动至参考点(习惯上选电路中的某点而不选无穷远处)电场力所做功的大小。

两点间的电位差就是两点间的电压。或者说,电荷在电路中移动,会有能量的交换发生。单位正电荷由电路 a 点移动到 b 点所获得或失去的能量,称 ab 两点的电压。其数学表达式为

$$u = dW/dq \quad (1.1.2)$$

式中, dq 为由 a 点移动至 b 点的电荷量, 单位为库[仑](C), dW 为电荷移动过程中所获得或失去的能量, 单位为焦[耳](J), 电压的单位为伏[特](V)。

大小和方向均不随时间变化的电压, 称为恒定电压或直流电压, 一般用符号 U 表示; 大小和方向随时间变化的电压, 称为时变电压, 一般用符号 u 表示。

电压是个代数量, 它是有正、负之分的, 也就是说它是有方向性的。习惯上认为电压的实际方向是从高电位指向低电位。将高电位称为正极, 低电位称为负极。与电流类似, 电路中各电压的实际方向或极性往往不能事先确定, 在电路分析时, 必须规定电压的参考方向或参考极性, 用“+”号或“-”号分别标注在电路图的 a 点和 b 点附近。若计算出的电压 $u_{ab}(t) > 0$, 表明该时刻 a 点电位比 b 点电位高; 若 $u_{ab}(t) < 0$, 表明该时刻 a 点电位比 b 点电位低。

综上所述, 在分析电路时, 必须对电流变量规定电流参考方向, 对电压变量规定参考极性。对于二端元件而言, 电流和电压的参考方向的选择有四种可能的方式, 如图 1.1.6 所示。为了电路分析和计算方便, 常采用电流与电压的关联参考方向。也就是说, 当电压的极性已经规定

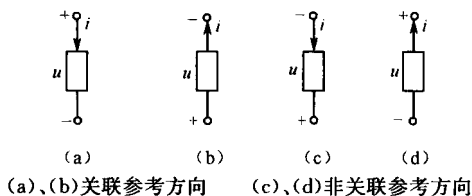


图 1.1.6 二端元件电流、电压的参考方向

时, 电流参考方向从“+”指向“-”; 当电流参考方向已经规定时, 电压参考极性的“+”号标在电流参考方向的进入端, 如图 1.1.6(a)和(b)所示。在二端元件的电压、电流采用关联参考方向的条件下, 在电路图上可以只标明电流参考方向, 或者电压的参考极性。除特殊声明外, 本书今后均采用电压与电流的关联参考方向。

1.1.3.3 电功率

单位时间做功大小称为功率, 或者说做功的速率称为功率。在电路中所说的电功率是指电场力做功的速度, 或者说单位时间一段电路所消耗或产生的能量, 以符号 $P(t)$ 表示。其数学表达式为

$$P(t) = \frac{dW(t)}{dt} = \frac{dW(t)}{dq} \cdot \frac{dq}{dt} = ui \quad (1.1.3)$$

式中, dW 为 dt 时间内电场力所做的功。功率的单位为瓦[特](W)。 u 的单位为伏[特](V), i 的单位为安[培](A), $1W=1VA$ 。

必须强调的是, 在电压、电流参考方向关联的条件下, 一段电路所吸收(或产生)的电功率为该段电路两端的电压与电流之乘积。若 $P > 0$, 该段电路实际就是吸收功率; 若 $P < 0$, 该段电路实际就是向外提供正功率, 或者说产生功率。

若已知元件吸收功率为 $P(t)$, 并设 $W(-\infty) = 0$, 则从 $t = -\infty$ 开始至时刻 t 该元件吸收的电能为

$$W(t) = \int_{-\infty}^t P(\xi) d\xi \quad (1.1.4)$$

一个元件, 若对于任何时刻均有

$$W(t) \geq 0 \quad (1.1.5)$$

则称该元件为无源元件。否则称为有源元件。在电路工程中,能量单位除有焦耳外,还常用千瓦时($\text{kW} \cdot \text{h}$)。吸收功率为 1000 瓦的家用电器,加电使用 1 小时,它吸收的电能(即消耗的电能)为 $1\text{kW} \cdot \text{h}$,俗称一度电。

【例 1.1.1】如图 1.1.7 所示电路,已知 $i=1\text{A}$, $u_1=3\text{V}$, $u_2=7\text{V}$, $u_3=10\text{V}$,求 ab, bc, ca 三部分电路上各吸收的功率 P_1 , P_2 , P_3 。

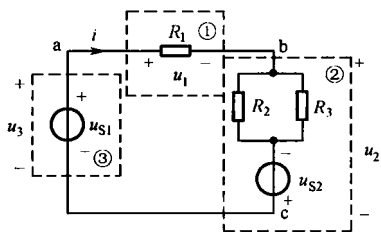


图 1.1.7 例 1.1.1 图

解: ab, bc 段上电压、电流参考方向关联,计算吸收功率,有

$$P_1 = u_1 i = 3 \times 1 = 3(\text{W})$$

$$P_2 = u_2 i = 7 \times 1 = 7(\text{W})$$

对于 ca 段电路,电压、电流参考方向非关联,计算它的吸收功率,有

$$P_3 = -u_3 i = -10 \times 1 = -10(\text{W})$$

实际上 ca 这段电路产生功率 10W。由此例可见

$$P_1 + P_2 + P_3 = 0$$

对一个完整的电路来说,它产生的功率与消耗的功率总是相等的,这称为功率平衡。这一点由能量守恒定理是容易理解的。

上面我们介绍了电路中基本物理量及其单位。在电力系统中感着它们太小,而在弱电中又感着它们太大。下面列出了部分国际单位制的单位和国际单位制的词头,供今后计算参考,见表 1.1.3 和表 1.1.4。

表 1.1.3 部分国际单位制的单位(SI 单位)

量的名称	单位名词	单位符号	量的名称	单位名词	单位符号
长度	米	m	电荷[量]	库[仑]	C
时间	秒	s	电位、电压	伏[特]	V
电流	安[培]	A	电容	法[拉]	F
频率	赫[兹]	Hz	电阻	欧[姆]	Ω
能量、功	焦[耳]	J	电导	西[门子]	S
功率	瓦[特]	W	电感	亨[利]	H

表 1.1.4 部分国际单位制词头

因数	10^9	10^6	10^3	10^{-3}	10^{-6}	10^{-9}	10^{-12}
名称	吉	兆	千	毫	微	纳	皮
符号	G	M	k	m	μ	n	p

1.2 电路的基本定律

在电路分析中,欧姆定律(Ohm's Law, 简记 OL)、基尔霍夫定律(Kirchhoff's Law, 简记 KL)是最基本的定律,是分析一切集总参数电路的根本依据。

1.2.1 欧姆定律

1.2.1.1 电阻

在实际电路中电流流动并不是畅通无阻的,例如,在金属材料绕制的电阻器中,电流是由自由电子的定向移动形成的。事实上,电子在受电场力作用作定向运动的过程中,必然会碰撞到金属内部存在的原子、离子,也就是说,这种碰撞对电流要呈现一定的阻力,当然也就有能量损耗。电路参数之一电阻,实际上是表征材料(或器件)对电流呈现阻力、损耗能量的一种参数。

这里所述的电阻元件就是前述的理想电阻,就电磁功能讲,它只消耗电能。给出电阻元件的一般定义:一个二端元件,如果在任意时刻,其端电压 u 与流经它的电流之间的关系(Voltage Current Relation, 简记 VCR)能用 $u-i$ 平面上的一条曲线描述,就称之为电阻元件。若曲线是通过原点的直线,则称为线性电阻,否则称为非线性电阻。若曲线不随时间变化,则称为时不变电阻,否则为时变电阻。线性电阻的显著特点是阻值不随其上电压或电流数值变化,时不变电阻的显著特点是阻值不随时间变化。本书主要涉及线性时不变电阻。今后无特殊说明,电阻一词即指线性时不变电阻。

1.2.1.2 欧姆定律

欧姆定律是反映流过线性电阻的电流与该电阻两端电压之间的关系,反映了电阻的特性。这里我们联系电流、电压参考方向讨论欧姆定律。设电阻上电压、电流参考方向关联,如图 1.2.1(a)所示,图 1.2.1(b)为电阻 R 上的 VCR,显然它是处在 $u-i$ 平面一、三象限过原点的直线。写该直线的数学表达式,即有

$$u(t) = Ri(t) \quad (1.2.1)$$

此式就是欧姆定律公式。电阻的单位为欧姆(Ω)。电阻的倒数称电导,用符号 G 表示,即

$$G = \frac{1}{R} \quad (1.2.2)$$

在国际单位中,电导的单位是西门子,简称西(S)。从物理概念讲,电导是反映材料导电能力强弱的参数。电阻、电导是从相反的两个方面来表征同一材料特性的两个电路参数,所以定义电导为电阻的倒数是有道理的。故欧姆定律另一种形式为

$$i(t) = Gu(t) \quad (1.2.3)$$

应该强调:

- (1) 欧姆定律只适用于线性电阻(电导);
- (2) 如果电阻(电导)上的电压、电流参考方向非关联,则欧姆定律应冠以负号,即

$$u(t) = -Ri(t) \text{ 或 } i(t) = -Gu(t) \quad (1.2.4)$$

- (3) 电阻(电导)元件是无记忆性元件,又称即时元件。

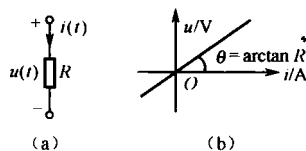


图 1.2.1 线性时不变电阻模型符号及其 VCR 特性