

//



高等学校电子信息类专业规划教材

电路分析基础

赵伟光 主 编

蒋 明 刘 择 张 军 副主编



清华大学出版社
<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>



北京交通大学出版社
<http://press.bjtu.edu.cn>



21世纪高等学校电子信息类专业规划教材

电路分析基础

赵伟光 主 编

蒋 明 刘 择 张 军 副主编

清华大学出版社
北京交通大学出版社
·北京·

内 容 简 介

本书包括电路的基本概念和定律、电路的基本分析方法、常用的电路定理、动态电路的时域分析、正弦电路的稳态分析、互感与理想变压器、谐振电路、双口网络等8章内容。本书基本概念讲述清楚,易于读者接受理解;基本方法讲解透彻,步骤明确,读者易于掌握;配合正文,有丰富的例题及详尽的解题步骤;章末配有程序训练及习题,可强化对基本概念的理解,本书所选题目难度适中,方便学生自学和教师施教。本书可作为电子信息类专业的“电路”或“电路分析基础”课程的教材,也可作为有关专业人员的参考书。

版权所有,翻印必究。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

(本书防伪标签采用清华大学核研院专有核径迹膜防伪技术,用户可通过在图案表面涂抹清水,图案消失,水干后图案复现;或将表面膜揭下,放在白纸上用彩笔涂抹,图案在白纸上再现的方法识别真伪。)

图书在版编目(CIP)数据

电路分析基础 /赵伟光主编;蒋明,刘择,张军副主编. —北京:清华大学出版社;北京交通大学出版社, 2005.1

(21世纪高等学校电子信息类专业规划教材)

ISBN 7-81082-059-1

I. 电… II. ①赵… ②蒋… ③刘… ④张… 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(2004)第 105192 号

责任编辑:陈川

出 版 者:清华大学出版社 邮编:100084 电话:010-62776969

北京交通大学出版社 邮编:100044 电话:010-51686414

印 刷 者:北京鑫海金澳胶印有限公司

发 行 者:新华书店总店北京发行所

开 本:185×260 印张:20.75 字数:503千字

版 次:2005年1月第1版 2005年1月第1次印刷

书 号:ISBN 7-81082-059-1/TM·7

印 数:1~4000册 定价:27.00元

前 言

本书是根据国家教委颁布的《电路分析基础课程教学基本要求》,结合目前电子类专业“电路分析基础”课程教学的实际需要和编者多年的实际教学经验编写而成的。

多年来,在对不同专业的“电路分析基础”课程的教学中,先后使用过多种教材和讲义,在教学实践中,通过不断地对教材内容进行调整、提炼和更新,逐步地形成了有一定特色的讲稿,经过试用修改,形成了本书的主要框架。

“电路分析基础”是电子信息类专业的一门重要的技术基础课。教学实践表明,学生对技术基础课程掌握的优劣,直接影响对其后续专业课程的掌握。因此,引导学生明确电路理论的基本概念,培养科学的思维能力,提高分析问题和解决问题的能力是本书编写的宗旨。

在编写中,充分考虑了教材的教学适用性。在内容安排上,既遵循了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,并合理地、有序地组织教材的编写内容,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、定律、方法等不仅注重正确地表述其内容,更注重其物理意义和科学道理,注重具体概念的应用场合、应用条件及在不同的情况下的变通处理。书中加入了程序训练的内容,程序训练以填空的形式出现,通过程序训练,可强化对电路理论基本概念的理解。书中配有较多的例题,用以加深对电路分析和基本概念的理解,从而提高灵活地运用其基本理论和基本概念分析解决电路问题的能力。书中介绍了一些实用电路和实际知识,以提高读者对本课程的兴趣。每章均配有较多的习题供读者选用。

本书包括电路的基本概念和定律,电路的基本分析方法,常用电路定理,动态电路的时域分析,正弦电路的稳态分析,互感和理想变压器,谐振电路,双口网络等8章内容。考虑到目前学生的物理知识水平,本教材适当地提高了知识起点,对物理学中已学过的内容只做必要的说明,并在此基础上加深和提高。在本书的编写中,尽可能使每章正文、例题与程序训练、习题之间,章与章之间相互配合、前后呼应,以利于自学。

考虑到大学的教学特点,本书在总体结构上力求简明,章节内容安排上既注重了课程体系的连贯性,又保持了一定的独立性,便于适应不同的教学要求进行内容上的剪裁。

本书由赵伟光担任主编,蒋明、刘择、张军为副主编。本书的编写得到了西安电子科技大学、空军工程大学的有关部门、领导和同仁的指导与支持,在此,谨向给予指导性建议的吴大正、张永瑞、杨林耀、宁德成、朱双鹤、王曙钊、尹宗谋教授,向提出宝贵意见的张凤英、梁银娇、侯文华、何长龙、徐武义、李彦、陈长兴、刘鹏副教授,向给予大力支持的徐和平、段小虎、梁爽、张斌、李莉、沈淑渭、柳革命、孙晓燕、李宏博表示感谢。

本书从内容安排到具体论述,也贯彻了从事电路理论教学的同仁们多年来教学实践的成果,是各位老师辛勤劳动的结晶,在此一并表示诚挚的谢意。

由于编者水平有限,书中难免有不少错误和不妥之处,敬请使用本书的老师 and 同学给予指正。

编 者

2005年1月

目 录

第 1 章 电路的基本概念和定律	(1)
1.1 电路及电路模型、集总假设	(1)
1.1.1 电路及电路模型	(1)
1.1.2 集总假设	(3)
1.2 电路变量	(3)
1.2.1 电流	(3)
1.2.2 电压	(4)
1.2.3 电功率	(5)
1.2.4 正方向(参考方向)	(6)
1.3 基尔霍夫定律	(10)
1.3.1 名词解释	(10)
1.3.2 基尔霍夫定律	(11)
1.4 电阻元件	(14)
1.4.1 线性电阻	(14)
1.4.2 电阻元件上消耗的功率和能量	(16)
1.4.3 电阻的串联和并联	(17)
1.4.4 分压电路与分流电路	(20)
1.5 独立电源	(27)
1.5.1 电压源	(28)
1.5.2 电流源	(30)
1.6 电源的等效和互换	(33)
1.6.1 理想电源的串、并联等效	(34)
1.6.2 实际电源的等效互换	(36)
1.7 受控源	(40)
1.7.1 受控源及其分类	(40)
1.7.2 受控源的特点	(41)
1.7.3 含受控源电路的分析重点	(41)
1.7.4 含受控源电路的等效电阻	(44)
1.8 电阻 T、 Π 电路的等效互换	(46)
1.8.1 电桥电路	(46)
1.8.2 电阻 T、 Π 电路的等效互换	(48)
程序训练 1	(51)
习题 1	(53)
第 2 章 电路的基本分析方法	(58)
2.1 电路的两类约束	(58)

2.1.1	结构约束	(58)
2.1.2	元件约束	(58)
2.2	支路电流法	(58)
2.2.1	支路电流法	(59)
2.2.2	独立方程的列写	(60)
2.3	网孔电流法	(60)
2.3.1	网孔电流	(60)
2.3.2	网孔电流法	(60)
2.3.3	电路中有电流源的处理方法	(62)
2.4	节点电位法	(64)
2.4.1	节点电位	(64)
2.4.2	节点电位法	(64)
2.4.3	电路中有电压源的处理方法	(67)
2.4.4	弥尔曼定理	(68)
2.4.5	电路的简化画法	(69)
程序训练 2		(71)
习题 2		(73)
第 3 章	常用的电路定理	(78)
3.1	叠加定理和齐次定理	(78)
3.1.1	叠加定理	(78)
3.1.2	齐次定理	(80)
3.2	置换定理	(82)
3.3	等效电源定理	(83)
3.3.1	戴维南定理	(83)
3.3.2	诺顿定理	(84)
3.3.3	求等效电阻的方法	(84)
3.3.4	举例	(88)
3.4	最大功率传输定理	(95)
3.4.1	负载获得最大功率的条件	(95)
3.4.2	负载获得最大功率的计算	(96)
3.4.3	效率	(99)
3.5	互易定理	(101)
3.6	电路的对偶性	(103)
程序训练 3		(104)
习题 3		(105)
第 4 章	动态电路的时域分析	(111)
4.1	动态元件	(111)
4.1.1	电容元件	(111)
4.1.2	电感元件	(115)
4.1.3	电容、电感的串、并联	(118)

4.2 一阶电路	(120)
4.2.1 一阶电路的方程及其解	(121)
4.2.2 三要素法	(125)
4.3 一阶电路的单位阶跃响应	(140)
4.3.1 单位阶跃函数	(140)
4.3.2 阶跃响应	(141)
4.3.3 阶跃函数与方波	(142)
4.3.4 线性、时不变的应用	(143)
4.4 二阶电路	(146)
4.4.1 LC 电路中的正弦振荡	(146)
4.4.2 RLC 串联电路的响应	(148)
4.4.3 并联电路的响应	(151)
程序训练 4	(155)
习题 4	(156)
第 5 章 正弦电路的稳态分析	(167)
5.1 正弦电压和电流	(167)
5.1.1 周期电压和电流	(167)
5.1.2 正弦电压和电流	(167)
5.2 正弦电压和电流的相量表示	(171)
5.2.1 复数复习	(171)
5.2.2 利用相量表示正弦量	(173)
5.3 电路定律的相量形式	(175)
5.3.1 基尔霍夫定律的相量形式	(176)
5.3.2 基本元件 VAR 的相量形式	(177)
5.4 阻抗与导纳	(182)
5.4.1 阻抗与导纳	(182)
5.4.2 一般形式下的相量模型	(183)
5.4.3 相量模型的等效	(190)
5.5 复杂正弦稳态电路的相量分析	(192)
5.5.1 网孔分析法	(193)
5.5.2 节点分析法	(193)
5.5.3 等效电源定理	(193)
5.6 正弦稳态电路的功率和能量	(194)
5.6.1 基本概念	(194)
5.6.2 电路基本元件的功率和能量	(195)
5.6.3 二端电路的功率	(199)
5.6.4 复功率	(203)
5.7 正弦稳态电路中的最大功率传输	(206)
5.7.1 共轭匹配	(206)
5.7.2 模值匹配	(207)

5.8 三相电路概述	(208)
5.8.1 对称三相电源	(208)
5.8.2 三相电源的连接	(209)
5.8.3 对称三相电路的计算	(211)
5.8.4 对称三相电路的功率	(212)
5.8.5 几个与三相电路相关的问题	(214)
5.9 不同频正弦交流电路概述	(215)
5.9.1 正弦量的叠加	(215)
5.9.2 不同频正弦量的有效值和功率	(217)
程序训练 5	(218)
习题 5	(219)
第 6 章 互感与理想变压器	(231)
6.1 耦合电感元件	(231)
6.1.1 耦合电感的基本概念	(231)
6.1.2 耦合电感的伏安关系	(232)
6.1.3 耦合电感的同名端	(233)
6.2 耦合电感的去耦等效	(234)
6.2.1 耦合电感的串联等效	(234)
6.2.2 耦合电感的并联等效	(235)
6.3 含互感电路的相量法分析	(237)
6.3.1 含互感电路的方程分析法	(237)
6.3.2 含互感电路的等效分析法	(238)
6.4 理想变压器	(242)
6.4.1 理想变压器的主要性质	(242)
6.4.2 含理想变压器电路的分析	(245)
6.5 实际变压器模型	(247)
6.5.1 理想变压器的理想条件	(247)
6.5.2 全耦合变压器	(247)
6.5.3 铁芯变压器	(249)
程序训练 6	(250)
习题 6	(251)
第 7 章 谐振电路	(260)
7.1 串联谐振电路	(260)
7.1.1 串联谐振	(260)
7.1.2 品质因数	(262)
7.1.3 谐振时回路中的能量关系	(263)
7.1.4 串联谐振时回路的频率特性	(264)
7.1.5 串联谐振回路的通频带	(266)
7.2 简单并联谐振电路	(269)
7.2.1 电源内阻对串联谐振电路的影响	(269)

7.2.2	简单并联谐振电路	(269)
7.2.3	简单并联谐振电路的代换电路	(272)
7.2.4	电源内阻及负载的影响	(273)
7.3	复杂并联谐振电路	(276)
7.3.1	电路模型及总导纳	(276)
7.3.2	谐振特性	(277)
7.3.3	接入系数	(279)
7.3.4	等效电路	(280)
7.4	耦合谐振电路	(285)
7.4.1	耦合谐振电路	(285)
7.4.2	耦合谐振电路的谐振	(286)
7.4.3	耦合谐振电路的分析	(288)
	程序训练 7	(292)
	习题 7	(292)
第 8 章	双口网络	(297)
8.1	双口网络的方程和参数	(297)
8.1.1	Z 方程和 Z 参数	(297)
8.1.2	Y 方程和 Y 参数	(301)
8.1.3	A 方程和 A 参数	(303)
8.1.4	H 方程和 H 参数	(306)
8.2	双口网络各参数之间的关系	(308)
8.3	双口网络的连接	(309)
8.3.1	双口网络的串联	(309)
8.3.2	双口网络的并联	(310)
8.3.3	双口网络的级联	(311)
8.3.4	双口网络连接的有效性	(312)
8.4	含双口网络电路的分析	(314)
	程序训练 8	(317)
	习题 8	(317)

第 1 章 电路的基本概念和定律

1.1 电路及电路模型、集总假设

1.1.1 电路及电路模型

实际电路是由电气器件(例如电阻器、电容器、线圈、开关、晶体管、电池、发电机等)按照一定的方式相互连接组成的,它们的组合,构成了电流的通路,使它们可以具有各种不同的功能,完成各种具体的任务。电路虽然有各种各样的形式,但就其主要功能而言,可分为两类。一类电路的功能是传输、分配和使用电能,例如由发电机、变压器、输电线等设备组成的输电网。另一类电路的功能是传输、变换、储存和处理电信号,例如电视机是将接收到的高频电信号经过变换、处理(例如选频、放大、解调等),将分离出的电信号分别送到显像管和扬声器,转换为画面和声音。实际电路的功能繁多,其主要的功能是能量的传输和信号的处理,基于电路的功能分类,又可将电路的主要器件分为供电设备和用电设备,它们之间用导线相连。供电设备是能提供电磁能的设备,我们将其统称为电源,用电设备是使用电磁能的设备,我们统称为负载。在电源的作用下,电路中产生电流和电压,因此,电源又称为激励源,由激励在电路中产生的电流和电压统称为响应。

1.1.1.1 实际电路

人们在日常生活中使用着各种各样的电器设备,这些电器设备都是由供电器件和用电器件互联组成的回路,都是实际中的电路。

图 1-1 中图(a)是手电筒电路的电器图,它是一种最简单的实际照明电路,它由三部分组成:提供电能的电源——干电池;使用电能的负载——灯泡;连接电源和负载的导线。其中 S 是为节约电能的开关。电源、负载和导线是任何实际电路都不可缺少的 3 个组成部分。

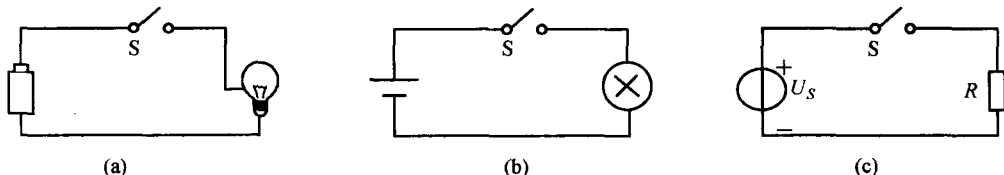


图 1-1 手电筒电路及其电路模型

1.1.1.2 电路模型

由于构成电路的电器元件的电磁性能一般比较复杂,例如一个实际的线圈,一方面要考虑其电磁感应的作用,把它看做一个电感,而另一方面又要考虑到绕制线圈的导线所带来的电阻及线圈的圈与圈之间的电容。另外,就其画法上来说,要想形象地画出各种电器件也是

十分困难的。为了克服这些困难,方便数学分析,中学物理中已采用了用符号来代替具体器件的方法,如图 1-1 中图(b)所示。但是对于较复杂的电路,这种方法仍不便分析,因此,考虑到电器的主要特性,我们用符号来表示电路中的器件,称为电路模型,如图 1-1 中图(c)所示。其中 R 表示电阻,它不仅表征了灯泡的主要性能,还可以表征诸如电炉、电暖气等的主要性能; U_s 表示电源,它不仅表征了干电池的主要性能,还可以表征任何提供电磁能的设备。

电路模型是实际电路的理想模拟,简称为电路图。在实际电路中,虽然电路器件的种类繁多,但在电磁现象方面却有许多共同的地方,根据它们的共性,我们可以用一些简单的符号来代表。例如,用理想电阻器来表征灯泡、电炉、电暖气等消耗电能的电器,简称电阻,其模型符号如图 1-2 中图(a)所示;用理想电容器来表征能储存电能的电器,简称电容,其模型符号如图 1-2 中图(b)所示;用理想电感器来表征能储存磁能的电器,简称电感,其模型符号如图 1-2 中图(c)所示。

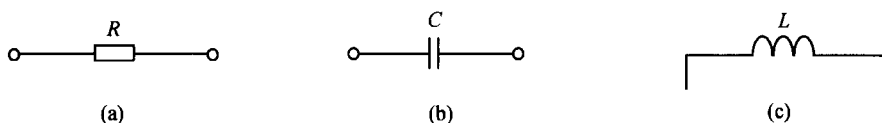


图 1-2 理想电阻、电容、电感元件模型

上述的元件模型以及在以后讲到的电压源、电流源都是具有两个端钮的器件,称为二端元件(或单口元件),除此之外,还有四端元件(或双口元件),将在后续章节中讲述。

在设定理想电阻器、理想电容器和理想电感器的条件下,任何一个实际的电阻器、电容器和电感器都可以在不同的条件下用一个或多个理想元件的模型来表征。例如,对于一个电感器来说,当加在其上的信号频率较低时,它主要的电磁性能是储藏磁能,其消耗的电能及储藏的电能与其储藏的磁能相比是非常小的,可以忽略不计,在这种条件下,其模型可以看做如图 1-3 中图(a)所示的理想电感器;如果频率较高,绕制线圈的导线所消耗的能量需要考虑,而其储藏的电能仍可忽略时,其模型可以看做如图 1-3 中图(b)所示的理想电感器与理想电阻器的串联;当频率再高时,除绕制线圈的导线所消耗的能量需要考虑外,其储藏的电能也不可忽略,这时,其模型可以看做如图 1-3 中图(c)所示的理想电感器与理想电阻器的串联,再并联一个理想电容器。

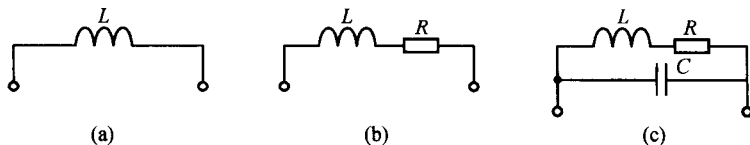


图 1-3 电感器在不同条件下的模型

电路的理想元件模型抛弃了实际元件的外形、尺寸的差异,而突出了它们所表现出来的主要的电磁特性,使得数学分析更加方便。因此,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,是由对实际器件加以理想化的模型组成的电路——电路(模型)图。

1.1.2 集总假设

在理想化的电路模型中,通常假设器件的电磁现象总是发生在各元件模型的内部,而导线本身不具有电阻,这样的假设称为集总假设,这样的元件称为集总参数元件,在这种假设下,由集总参数元件构成的电路称为集总参数电路。

应用集总假设必须满足实际电路的尺寸(长度)要远远小于电路工作时电磁场的波长的要求,例如,我们使用的市电的正常工作频率为 50 Hz,其所对应的波长为 6000 km。如果不满足这个条件,实际电路将不能按集总参数电路模型来处理,而要采用分布参数。本书只讨论集总参数电路。

1.2 电路变量

在电路分析中,描述电路性能的物理量是电流、电压和电功率,我们称其为电路中的基本变量,这些物理量虽然在中学物理中已有一些粗浅的认识,但在具体分析电路之前,首先建立和深刻的理解这些物理量是十分重要的。

1.2.1 电流

电流是描述电路性能的基本物理量之一,是电路的基本变量,它具有大小、方向等物理量的基本特征,下面对它的相关内容予以讨论。

1.2.1.1 电流强度

单位时间内通过导体横截面的电荷量被定义为电流强度,用符号 $i(t)$ 表示。即:

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

式中, $dq(t)$ 是 dt 时刻通过导体横截面的电荷量,单位为库仑(C),是时间 t 的函数。

电流强度是用以衡量电流大小的常用的物理量,在电路分析中经常使用。为了方便,简称电流强度为电流。因此,“电流”一词经常带有两重含义:一是指一种物理现象,二是指一个物理量及这个量的大小。

1.2.1.2 电流的方向

电流是一个既有大小又有方向的物理量,通常规定正电荷运动的方向为电流的实际方向。在简单的直流电路中,电流总是从电源的正极流出,流向电源的负极。

1.2.1.3 电流的分类

电流可分为直流和交流两大类:

大小和方向均不随时间变化的电流称为恒定电流,简称直流(Direct Current,简写作 dc 或 DC)。该“不变”的实质是在任意时刻,通过导体横截面的电荷量及其流动方向均不变,此时,电流用大写字母 I 表示为:

$$I = \frac{Q}{t} \quad (1-2)$$

大小和方向均可随时间变化的电流称为交变电流,简称交流(Alternating Current,简写作 ac 或 AC)。该“变化”的实质是通过导体横截面的电荷量及其流动方向均可能随时间变化,因此,其可表示为

$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt} \quad (1-3)$$

由电流的分类表达式可以看到,若交流电流表达式中的电荷的大小和方向均不随时间变化,则其表达式即为直流电流表达式。因此,可以认为直流是交流的特殊情况,表达式(1-3)更具有一般的意义,所以在谈及电流时,可统一用交流表达式表示。为了方便,也经常将 $i(t)$ 简写为 i 。

1.2.1.4 电流的单位

电流的单位是安培(A),简称“安”。通常使用的单位还有千安(kA)、毫安(mA)、微安(μ A),其换算关系为:

$$1 \text{ kA} = 10^3 \text{ A}$$

$$1 \text{ mA} = 10^{-3} \text{ A}$$

$$1 \text{ }\mu\text{A} = 10^{-6} \text{ A}$$

1.2.2 电压

电压也是描述电路性能的基本物理量,和电流相似,它也具有大小、方向等物理量的基本特征,下面对它的相关内容予以讨论。

1.2.2.1 电位

在物理学中我们已经知道,若将无穷远处定为参考点,将单位正电荷从某一点 a 移动到参考点电场力所做的功的大小称为 a 点的电位。在电路理论中,电位的物理意义同物理学中所讲电位是一样的,只不过参考点的选择是电路中的某点而不是无穷远, a 点的电位是将单位正电荷沿电路中所约束的路径从 a 点移至参考点电场力所做的功,用 U_a 表示。

1.2.2.2 电压

从电场力做功的意义上来说, a 与 b 两点之间的电压是将单位正电荷从 a 点移动到 b 点电场力所做的功的大小,用 U_{ab} 表示,结合电位的定义,可知, a 与 b 两点之间的电压是 a 与 b 两点之间的电位差,即:

$$U_{ab} = U_a - U_b \quad (1-4)$$

一般来说,两点之间的电压就是将单位正电荷从电路中的某一点移动到电路中的另一点电场力所做的功的大小,用符号 $u(t)$ 表示。即:

$$u(t) = \frac{dw(t)}{dq(t)} \quad (1-5)$$

式中, $dq(t)$ 是移动的电荷量,单位为库仑(C); $dw(t)$ 是为移动电荷 $dq(t)$ 电场力所做的功,单位为焦耳(J);它们都是时间 t 的函数。

1.2.2.3 电压的极性

在谈及电压时,我们常称两点中具有较高电位的一端为正极,用符号“+”表示;而称具有较低电位的一端为负极,用符号“-”表示。

1.2.2.4 电压的方向

电压的方向规定为在电场力的作用下正电荷失去能量的方向,即由高电位到低电位的方向。若用符号“+、-”来表示电压的方向时,电压的方向是由“+”指向“-”的方向;若用下标表示电压的方向,如 U_{ab} ,电压的方向是由 a 指向 b 的方向。

1.2.2.5 电压的分类

电压的分类和电流的分类相同,也可分为直流和交流两大类。

大小和方向均不随时间变化的电压称为直流电压,用字母 U 表示。其表达式为

$$U = \frac{W}{Q} \quad (1-6)$$

大小和方向均可随时间变化的电压称为交流电压,用 $u(t)$ 表示。其表达式为

$$u(t) = \frac{dw(t)}{dq(t)} \quad (1-7)$$

由电压的分类表达式可以看到,若交流电压表达式中的电荷的大小和方向均不随时间变化,则其表达式即为直流电压表达式,因此,可以认为直流电压是交流电压的特殊情况,式(1-7)更具有一般的意义,所以在谈及电压时,可统一用交流电压表达式表示。为了方便,也经常将 $u(t)$ 简写为 u 。

1.2.2.6 电压的单位

电压的单位是伏特(V),简称“伏”。通常使用的单位还有千伏(kV)、毫伏(mV)、微伏(μV),其换算关系为:

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

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

$$1 \mu V = 10^{-6} \text{ V}$$

1.2.3 电功率

在电路中,当正电荷从电路元件上的“+”极移动到“-”极时,电场力对电荷做功,这时该元件吸收能量;当正电荷从电路元件上的“-”极移动到“+”极时,外力对电荷做功,这时该元件释放能量。在电路理论中,吸收能量的元件是负载,释放能量的元件是电源,元件吸收能量或释放能量的多少由电功率来衡量。

1.2.3.1 电功率

在电路中,单位时间电场力做功的大小称为电功率,简称功率,它是能量转换的速率,是能量对时间的变化率。用符号 $p(t)$ 表示。即:

$$p(t) = \frac{dw(t)}{dt} \quad (1-8)$$

式中, $dw(t)$ 是在 dt 时间内移动电荷 $dq(t)$ 电场力所做的功,单位为焦耳(J),是时间 t 的函数。

电功率是与电压和电流密切相关的量,若某元件两端的电压为 $u(t)$,在 dt 时间内通过该元件的电荷量为 $dq(t)$,由电压的表达式(1-5)可得电场力所做的功为:

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

结合电流的表达式(1-3),可得:

$$dw(t) = u(t)i(t)dt$$

因此,可得功率的计算公式为:

$$p(t) = \frac{dw(t)}{dt} = \frac{u(t)i(t)dt}{dt} = u(t)i(t) \quad (1-9)$$

由式(1-9)可见,功率的计算可以通过计算电压和电流的乘积而获得,式(1-9)是常用的计算功率的公式。

1.2.3.2 电功率的正负

一个元件是释放能量的电源还是吸收能量的负载,由该元件的功率是“+”还是“-”来判定。

若元件的功率为“+”,即 $p(t) > 0$,则该元件是吸收能量的负载。

若元件的功率为“-”,即 $p(t) < 0$,则该元件是释放能量的电源。

1.2.3.3 电功率的平衡

在物理学中已知,能量既不能消灭也不能再生,即所谓的能量守恒原理,该原理反映在电路理论中为:对一个完整的电路来说,其产生的功率与消耗的功率总是相等的,即在一个完整的电路中,功率的代数和为零,这称为功率平衡,可表示为:

$$\sum p(t) = 0 \quad (1-10)$$

1.2.3.4 电功率的单位

电功率的单位是瓦特(W),简称“瓦”。通常使用的单位还有千瓦(kW)、毫瓦(mW)、微瓦(μ W),其换算关系为:

$$1 \text{ kW} = 10^3 \text{ W}$$

$$1 \text{ mW} = 10^{-3} \text{ W}$$

$$1 \mu\text{W} = 10^{-6} \text{ W}$$

1.2.3.5 能量

由物理学中已知,某段时间的能量是该段时间内功率的总和,所以,在 t_0 到 t 时刻内元件的能量为 $w(t_0, t)$:

$$w(t_0, t) = \int_{t_0}^t p(t)dt = \int_{t_0}^t u(t)i(t)dt \quad (1-11)$$

能量的单位是焦耳(J),简称焦。

1.2.4 正方向(参考方向)

在分析电路时,必须要知道电流和电压的方向,否则电路分析将无法进行。在一些简单的电路中,电流和电压的实际方向是显而易见的,例如,在图1-4所示的简单电路中,显然,电流的实际方向是从电源的正极流出,流向电源的负极,因此,在中学的物理学中,很少提及电流和电压的方向问题,而是默认电流和电压的方向为如图1-4中所示,因而,我们有了在中学的物理学已经知道的欧姆定律:

$$I = \frac{U_R}{R} \quad (1-12)$$

但如果我们不知电流的实际方向,而选择了 I_1 为电流的方向,这时,由于 $I = -I_1$,所以表达式(1-12)将改为:

$$U_R = R \cdot I_1 \quad (1-13)$$

由此可见,选择电流和电压的方向是十分重要的,如果没有电流和电压的方向,电路分析就不能进行。例如,在一些稍微复杂的电路中,往往不能预先先知电流和电压的实际方向。例如,在图1-5所示的桥形电路中, R_5 上的电流的实际方向就不是一看便能知道的,因此,当在 R_5 上使用欧姆定律时,我们将不知应选择表达式(1-12)还是(1-13)。为了解决这一问题,我们引入正方向的概念。

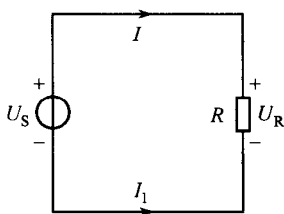


图 1-4 简单电路

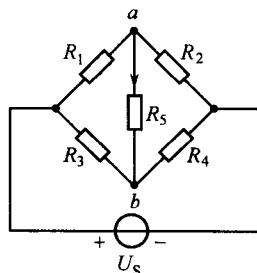


图 1-5 桥形电路

1.2.4.1 正方向(参考方向)

虽然 R_5 上的电流的实际方向不能确定,但其无外乎只有三种可能:从 a 流向 b 、从 b 流向 a 和等于零。因而,我们可以为其先假定一个方向来分析,这个假定的方向我们称为正方向,它是人为任意选取的方向。在今后的分析中,如无特殊的说明,电路图中所标的电流、电压的方向均为正方向。

特别需要指出的是,在分析电路时,必须首先选定正方向,虽然正方向是任意选定的,但是,一旦正方向选定,必须严格地按其选定进行分析,不可随意更改。

1.2.4.2 实际方向与正方向

正方向的选择无非带来两种结果,一是与实际方向相同,一是与实际方向相反;与实际方向相同时,将得到正值,与实际方向相反时,将得到负值;因此,可根据计算的结果判定实际方向与正方向的关系,即运算结果得正,则正方向与实际方向一致;运算结果得负,则正方向与实际方向相反。

在电路理论中,运算结果的正负只有在正方向的前提下才有意义,判断分析结果的正负是同时根据标明的正方向和计算结果的正负共同完成的。

1.2.4.3 关联正方向

在电路理论中,经常涉及电流正方向与电压正方向的关系问题,如果设定电流的正方向从 a 指向 b , a 为假定的电压的高电位端,即电流从电压的“+”极流向“-”极,则称电流与电压正方向关联;否则,称电流与电压正方向非关联。如图1-6所示,图(a)中的电流从电压的正极流向负极,其正方向为关联正方向;图(b)中的电流从电压的负极流向正极,其正方向为非关联正方向。



图 1-6 电流、电压正方向的关联与非关联

1.2.4.4 电源与负载上电流、电压的关系

由物理学已知,电源从其正极发出电流,因而,电源上电流的实际方向与电压的实际方向是非关联的,如图 1-7 中图(a)所示;负载上电流的实际方向与电压的实际方向是关联的,如图 1-7 中图(b)所示。

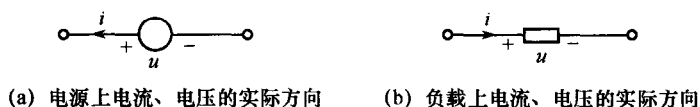


图 1-7 电源和负载上电流、电压的实际方向

有一点需要说明,如图 1-7 中图(a)所示的电源上电流的实际方向与电压的实际方向是当电源供电时的方向,如果电源用电,例如电源被充电,这时电源并没有起到电源的作用,而应视其为负载,这时其上电流的实际方向与电压的实际方向将是关联的。为了更清楚的认清一个元件是电源还是负载,往往借助功率的正负来判定元件的性质。

在关联正方向下,功率的计算公式为:

$$p(t) = u(t)i(t) \quad (1-14)$$

对表达式(1-14)分析可知,如果元件是电源,其关联正方向的电流、电压中必有其一与正方向相反,为负值,因而其功率为负值;如果元件是负载,其关联正方向的电流、电压中的两者必同时与实际方向相同或同时与实际方向相反,因而其功率为正值。

在非关联正方向下,功率的计算公式须冠以负号为:

$$p(t) = -u(t)i(t) \quad (1-15)$$

对表达式(1-15)分析可知,如果元件是电源,其非关联正方向的电流、电压中的两者必同时与实际方向相同或同时与实际方向相反,即两者同时为正或同时为负,因而其功率为负值;如果元件是负载,其非关联正方向的电流、电压中的两者必有其一与正方向相反,为负值,因而其功率为正值。

通过上述分析可见,无论如何选择电流、电压的正方向,只要注意在关联正方向时选用公式:

$$p(t) = u(t)i(t)$$

而在非关联正方向时选用公式:

$$p(t) = -u(t)i(t)$$

就可得到相同的结论。可将其记为:

$$\left. \begin{array}{l} \text{关联: } p(t) = u(t)i(t) \\ \text{非关联: } p(t) = -u(t)i(t) \end{array} \right\} \begin{array}{ll} p(t) > 0 & \text{负载} \\ p(t) < 0 & \text{电源} \end{array}$$

但为了使计算起来更为方便,通常在电源上选用非关联正方向,在负载上选用关联正方向。