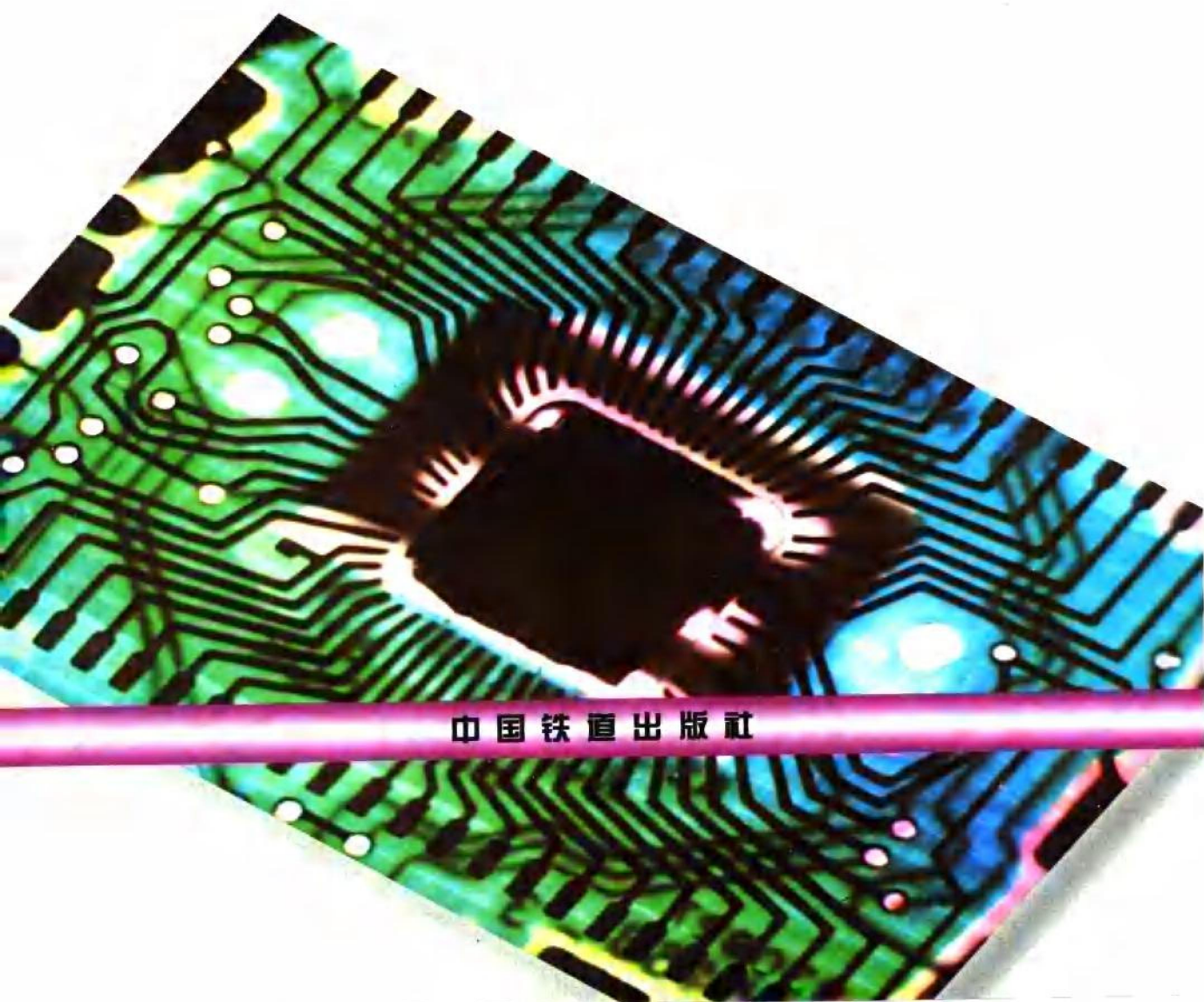


高等学校函授教材

电路分析

周宝珀 周忠雯 编

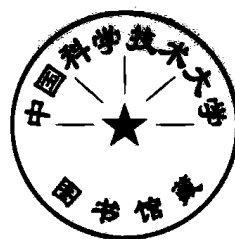


中国铁道出版社

高等学校函授教材

电 路 分 析

周宝珀 周忠雯 编



中 国 铁 道 出 版 社

1997年·北京

(京)新登字 063 号

图书在版编目(CIP)数据

电路分析/周宝珀,周忠雯编. —北京:中国铁道出版社,1997. 11
ISBN 7-113-02848-9

I. 电… I. ①周… ②周… III. 电路分析-高等学校-教材 IV. TN711.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 25869 号

内 容 简 介

本书是高等工科院校通信工程、控制工程及计算机等专业函授本科生的《电路分析》课教材。全书着重讨论线性、非时变、集中参数电路的基本理论与分析方法,还适当地介绍了非线性电路的基本概念。本书内容恰如其分,重点难点突出,文字清晰易懂。配合基本内容,书中各章均编入适量的例题、思考题、习题、自学指导及内容小结。此外,书末还附有教学大纲、学习方法、自学进度、阶段测验、模拟试题以及习题参考答案等,以适应函授学生的学习特点,便于自学与检查,提高学习效果。如将内容适当精选,本书还可作为上述专业函授专科生或专业训练班的参考教材。

中国铁道出版社出版发行

各地新华书店经售

(100054,北京市宣武区右安门西街 8 号)

责任编辑 方军 封面设计 薛小卉

中国铁道出版社印刷厂印刷

1997 年 12 月第 1 版 第 1 次印刷

开本:787×1092 1/16 印张:14.75 字数:364 千字

印数:1—4000 册

ISBN7-113-02848-9/TP·283 定价:18.90 元

版权所有 盗印必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社发行部调换。

编委会名单

主任委员	恽大文			
副主任委员	赵金勇	关锋华		
委员	(按姓氏笔划为序)			
	王琴放	池淑清	李 丰	李明仪
	张 凡	张凤翥	陈后金	周宝珀
	周忠雯	蒋大明		

前言

《电路分析》是高等工科院校电子工程、通信工程、控制工程与计算机等专业必修的技术基础先导课程。课程的主要任务是着重讨论线性、非时变、集中参数电路的基本理论,使学生掌握电路分析的基本概念、基本原理与基本方法,提高分析思维能力与系统计算能力,为学习后续课程和提高专业素质奠定良好的基础。

近几年来,随着我国经济建设与科学技术的快速发展,成人教育事业也相应地得到了扩大与增长。鉴于成人教育的教学体制和教学方法,继续沿用高校本科生的教材,无疑会给教学双方带来一定的困难。为此,我们特地编写了本书,以期做为上述各专业函授制教学的《电路分析》教材。

在编写本书时,我们认真总结了近几年来函授教学的经验,充分考虑到学科本身的发展和函授学生的实际情况,重新制订了教学大纲,明确了课程的基本要求,进一步精减了课程内容,突出了课程的重点与难点,在保持原有课程体系与教学传统的前提下,力求做到内容恰如其分,概念清晰明了,文字通俗易懂,以利于函授制学生在有限时间内,通过自学达到课程的基本要求。此外,配合基本内容,本书各章还编入了适量的例题、习题与思考题,每章的前后分别编写了自学指导与本章小结,书末还附有教学大纲、学习方法、自学进度、阶段测验作业、模拟试题以及各章习题参考答案等,以便于自学与自我检查,提高学习效果。按照函授制本科生教学大纲的要求,本书内容面授约需 40 学时,自学约需 160 学时。函授专科生的教学内容还可酌情精减(详见书末附录《电路分析》函授教学大纲内容)。

本书由周宝珀、周忠雯合编,其中第一、二、三、四、八章由周宝珀负责编撰,其余三章由周忠雯负责编撰,最后由周宝珀定稿。编写时曾参考了高等学校本科生教材《电路分析》(周宝珀主编,周宝珀、徐贤敏、胡象源、朱瑞英合编,西南交通大学出版社出版),节选了书中的某些段落,特此说明并向原书编者致意。另外,本书的编写与出版,曾得到北方交通大学成人教育学院及通信与控制工程系领导的支持与关怀,谨此表示衷心感谢。鉴于编者水平,书中定有不妥之处,敬希批评指正。

编 者

1996 年 9 月

目 录

第一章 电路分析的基本概念	1
第一节 电路模型及其分类	1
第二节 电路的基本变量	4
第三节 电路元件及其特性	7
第四节 电路的基本定律	17
习 题	25
第二章 电路分析的等效方法	31
第一节 电阻的联接与等效分析	31
第二节 电源的联接与等效分析	39
第三节 无源二端网络的入端电阻	44
习 题	48
第三章 电路分析的系统方法	53
第一节 支路电流法	53
第二节 网孔电流法	58
第三节 节点电压法	63
习 题	67
第四章 电路分析的重要定理	71
第一节 叠加定理	71
第二节 替代定理	74
第三节 戴维南定理与诺顿定理	76
第四节 最大功率传输定理	83
第五节 互易定理	85
习 题	88
第五章 正弦电路的稳态分析	93
第一节 正弦信号的两种表示	93
第二节 两种约束条件的相量形式	98
第三节 阻抗与导纳	103
第四节 正弦电路的计算	107
第五节 正弦电路的功率	112

习 题	112
第六章 互感电路与谐振电路的分析	125
第一节 互感电路的分析	125
第二节 变压器电路的分析	132
第三节 谐振电路的分析	140
习 题	153
第七章 动态电路的分析	158
第一节 一阶电路的动态方程	158
第二节 一阶电路的完全响应	161
第三节 三要素法	167
第四节 一阶电路的阶跃响应	174
第五节 二阶电路的动态分析	178
习 题	186
第八章 非线性电路的分析	191
第一节 非线性电路元件及其特性	191
第二节 非线性电阻电路的分析	195
第三节 非线性电感电路的分析	202
习 题	206
附录	209
附录一 《电路分析》函授教学大纲	209
附录二 谈电路分析的学习方法	211
附录三 《电路分析》函授生自学任务书(自学进程计划表;第一、二次 阶段测验作业)	213
附录四 《电路分析》期末考试模拟试题	217
附录五 习题答案	221
参考文献	227

第一章 电路分析的基本概念

自学指导

本章作为全书的开始,将讨论有关电路分析的若干基本概念。其中包括:电路模型及其分类、电路变量及其定义、电路元件及其特性以及电路的基尔霍夫定律等。上述内容都是贯穿全书的重要概念,也是电路分析的基础。因此,初学者阅读本章时必须逐节逐段地充分理解并熟练掌握。其中特别应注意电流、电压与功率的参考方向以及电路分析的直接观察法,通过书中的例题加以理解,尽快适应直至完全掌握。学好本章内容就可由浅入深,循序渐进,为阅读与掌握后续各章奠定牢固的基础。

第一节 电路模型及其分类

电路分析是电路理论学科中的一个分支,电路理论是研究电路基本规律与基本原理的学科。它经历了一个世纪的发展与变革,使经典方法与近代方法逐步融合,形成了较为完整的体系,成为当今电气工程与电子工程各种专业的重要技术基础理论,在生产、科研与工程实践中得到了极其广泛的应用。

电路理论学科包括电路分析、电路综合与电路故障诊断等几个领域。电路分析着重讨论在给定电路结构与输入激励条件下求解电路响应的基本方法;电路综合是讨论在给定输入激励与预期的电路响应条件下求解可以实现要求的电路结构的方法;电路的故障诊断则是讨论由电路的有限个端钮测量确定电路故障元件的方法。上述三个领域相互联系并自成体系,其中电路分析是整个电路理论的基础。图 1—1 为上述三个理论分支的简明示意。本书只涉及电路分析的基本内容,其他领域的内容另有专著讨论。

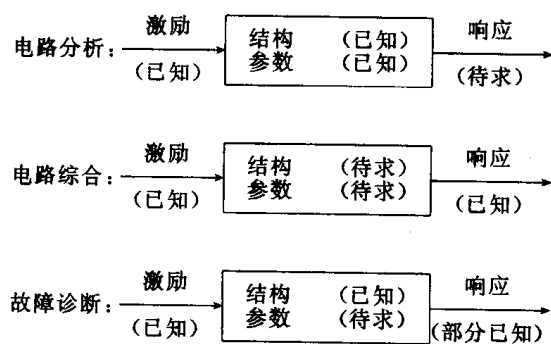


图 1—1 电路理论的三个分支

一、电路与电路器件

在当今的电气时代里,电能已经成为社会生产与人民生活不可缺少的能源之一。无论是工农业生产和科研各部门,还是家庭生活都使用着大量的各种各样的电气设备。每种电气设备都包含若干个电路器件。当电源接通时,电流就会流过电路器件,使设备处于工作状态,从而完成一定的职能作用。所谓电路就是指由若干电路器件组成的,具有一定职能作用的整体。由能量的观点来看,电路中一部分器件需要消耗一定的电能,而这些电能需要另一部分器件提供与传

输。因此,电路中的器件大致可分为电源、负载、联接导线与辅助器件等几个部分。电源是供给能量的器件;负载是消耗大部分电能并体现职能作用的器件;导线的作用则是将电路中的各个器件联接成为整体,藉以传输能量;辅助器件的作用主要是辅助实现电路的职能。例如,图 1—2(a)就是一个普通日光灯的电路。它由电源、启动器、镇流器及灯管组成。其中,灯管可作为消耗电能发光照明的负载,启动器与镇流器可看作点燃灯管所需要的辅助器件。这是一个典型的实际电路的例子。

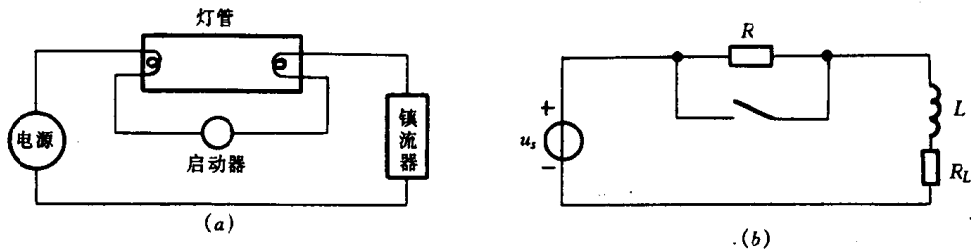


图 1—2 实际电路及其电路模型

二、电路元件与电路模型

如上所述,电路理论是研究电路基本规律与基本原理的学科。然而,实际生活中的电路是五花八门、多种多样的。电路中的每个器件都有自身的特性,其内部往往包含有多种复杂的电磁现象。因此,如果不采取一定的手段直接研究实际生活中的各种具体电路将是十分困难的。为此,电路分析首先需要建立电路器件的理想模型与实际电路的理想模型。

我们知道,电路器件的特性是由其内部的电磁现象确定的。我们可以根据各种器件的基本特性,将其归纳与抽象为几种具有单一电磁现象的理想化模型,这称为电路元件。因此,电路元件就是电路器件的理想化模型。电路分析中常见的电路元件有电阻器、电容器、电感器、理想电压源、理想电流源及理想变压器等。其中,每种元件都有确切的定义、独立的参数与基本的特性,且仅包含单一的电磁现象。这样,实际电路中的电路器件就可由电路元件或电路元件的组合表示。这种由电路元件组成的电路整体是实际电路的理想化模型,称为电路模型。图 1—2(b)就是日光灯电路的理想化模型。其中,灯管以电阻元件 R 表示;镇流器则以电感元件 L 与电阻元件 R_L 的组合表示;启动器可看作是一个理想开关;电源与联接导线也分别以相应的理想模型表示。电路分析的研究对象不再是实际电路,而是电路模型。在以下的内容中,如不特别说明,文中所有的电路一词均指电路模型而言。

应该指出,由于同一个电路器件在不同的条件下,其内部的电磁现象不尽相同,因此,其对应的元件模型也就不尽相同。例如,一个电感线圈在低频电源的作用下,可用电感元件与电阻元件的组合表示。但在高频电源的作用下,由于必须考虑线圈匝间的电场作用以及高频下的集肤效应,就需用电感元件、电阻元件与电容元件的组合表示。

综上所述,电路分析作为电路理论的一个基础分支,着重讨论在给定电路结构与输入激励条件下,求解电路响应的基本方法。为此,电路分析并不直接分析由各种电路器件组成的实际电路,而是将各种电路器件抽象成几种理想的电路元件,并将实际电路抽象成由电路元件组成的电路模型,然后研究电路模型内在的基本规律及其分析方法。诚然,对电路模型的分析不同于对实际电路的分析,但是,由于电路模型一般都能体现实际电路的主要矛盾与基本规律,因而其分析的结果仍具有普遍的指导意义。

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

具有线性特性的电路称为线性电路。若电路不具有线性特性,则为非线性电路。线性电路最基本的特性是它的叠加性和均匀性。所谓叠加性是指,若激励 $x_1(t)$ 作用于电路产生的响应为 $y_1(t)$,激励 $x_2(t)$ 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,产生的响应必为 $y_1(t)+y_2(t)$ 。所谓均匀性是指,若激励 $x(t)$ 作用于电路产生的响应必为 $y(t)$,则激励 $kx(t)$ 作用于电路产生的响应为 $ky(t)$,这里 k 为任意常数。非线性电路没有这些性质。

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,因此对线性电路的研究有着重要的理论和实际意义。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,对于非线性电路在第八章中仅作简要介绍。

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 $x(t\pm\tau)$ 作用于电路产生的响应为 $y(t\pm\tau)$, τ 为任意常数。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作是非时变的,因此本书主要研究非时变电路。

3. 集中参数电路与分布参数电路

若电路中的每一元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。若电路元件用分布参数表征,则称为分布参数电路。

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个电器之中。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能忽略不计,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 $\lambda=v/f$ 。电磁波在空气中传播速度近似为光速 $C(C=3\times 10^5\text{ km/s})$ 。例如,电路工作频率 $f=50\text{ Hz}$ (工频),则其电磁波波长 $\lambda=6\text{ 000 km}$ 。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。有线通信最高音频按 3.4 kHz 计,其对应电磁波的波长 $\lambda=88.2\text{ km}$,因此一般的架空通信线路是分布参数电路。计算机电路,其频率可高达 500 MHz ,它对应的 $\lambda=0.6\text{ m}$,因此用集中参数模拟不太合适。但若计算机采用大规模或超大规模集成电路,电路器件及电路被集成在几毫米的硅片上,这时电路属于集中参数电路。

4. 无源电路与有源电路

有源电路和无源电路是从能量观点定义的。如果某个元件在任意时刻 t 所消耗的总电能 w

(t)恒为非负值,即

$$w(t) = \int_{-\infty}^t P(\xi) d\xi > 0$$

式中 $P(\xi)$ 为功率,且与元件在电路中的联接方式无关,则此元件称为无源元件。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,即为无源电路。

以上是按基本特性分类,还有其它分类方法。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。本书将着重讨论线性、集中参数、非时变电路。

思 考 题

1. 电路元件与电路器件有什么不同?
2. 何谓电路模型? 电路分析研究的是电路模型还是实际电路?
3. 实际电路根据什么确定其是集中参数电路还是分布参数电路?
4. 线性、非时变、集中参数电路具有哪些特性?
5. 如何区分有源元件和无源元件?

第二节 电路的基本变量

电路中最基本的物理量是电流、电压及电功率。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 及 P 。电路分析的任务,就是求解已知电路中的电流、电压和功率。下面分别讨论电流、电压与电功率。

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

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

式中 q 为电荷量,单位为库仑,符号为 C ; t 的单位为秒,符号为 s ; i 的单位为安培,符号为 A , $1A = 1 C/s$ 。

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。分析电路时,首先要写出电路方程,而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标定方向。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其参考方向一致。反之,若 $i < 0$,则电流的实际方向与其参考方向相反。

应当指出,事先假定电流的参考方向,通过分析计算最后确定电流的实际大小与方向,这是电路分析的独特方法。这种方法不难理解,初学者应当尽快接受并养成习惯。这里再次强调,在分析计算以前,没有必要弄清电流的确切大小与实际方向,可以任意假定电流的参考方向,只有经过分析计算以后,根据参考方向与计算结果,才能最后确定电流的真实大小与实际方向。在本书中这种方法将贯穿始终。

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

$$u_a = \int_{l_{a0}} \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (1-2)$$

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,电场力所做之功,即

$$u_{ab} = \int_{l_{ab}} \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (1-3)$$

由于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,因此使式(1-3)中的 l_{ab} 经过参考点 0,于是式(1-3)可表示为

$$\begin{aligned} u_{ab} &= \int_{l_{a0b}} \vec{E} \cdot d\vec{l} = \int_a^{0} \vec{E} \cdot d\vec{l} + \int_0^b \vec{E} \cdot d\vec{l} \\ &= \int_a^0 \vec{E} \cdot d\vec{l} - \int_b^0 \vec{E} \cdot d\vec{l} = u_a - u_b \end{aligned} \quad (1-4)$$

上式表明, a 、 b 两点之间的电压,就是 a 、 b 两点的电位差。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。电压与电位的单位均为伏特,符号为 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 $-1V$ 和 $3V$,于是 a 、 b 两点电压的实际方向为由 b 指向 a ,其大小为 $4V$ 。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(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。

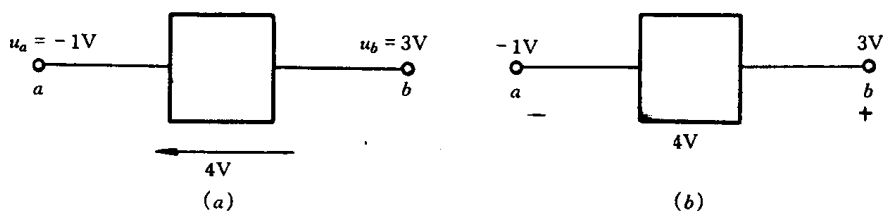


图 1—3 电压的实际方向或极性

任何二端元件,若其电压与电流的方向一致,即电流由高电位流向低电位,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,而对元件

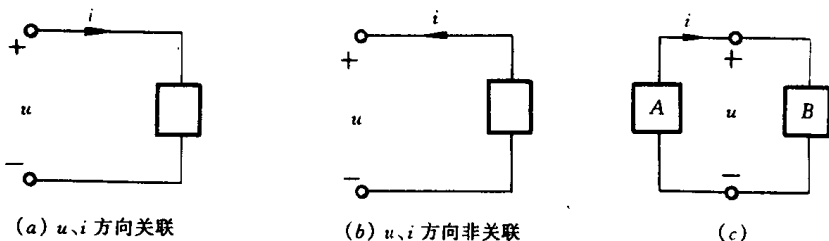


图 1—4 电流、电压参考方向

B 而言, u 与 i 则为关联方向。

三、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 的电荷从二端元件的一端移到另一端时,电场力所做的功,即电功率,简称为功率。电场力做功,表明

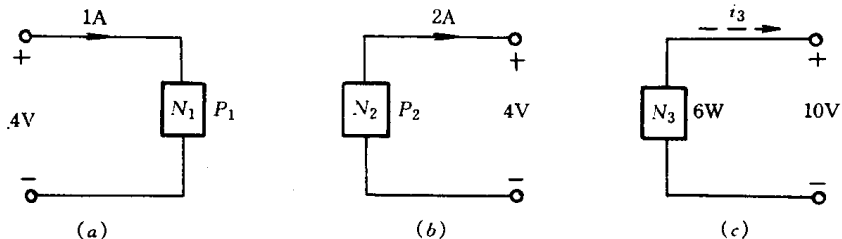


图 1—5 例 1—1 电路

电场能量减少,减少的能量显然被二端元件所吸收或消耗。所以,当元件上电压 u 与电流 i 方向关联时,元件吸收的功率为

$$P_{\text{吸}} = ui \quad (1-5)$$

反之,若 u, i 非关联,则吸收的功率为

$$P_{\text{吸}} = -ui \quad (1-6)$$

二端元件供出的功率应等于其吸收功率的负值。当 u, i 关联时, $P_{\text{供}} = -ui$; 当 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,需要注明所用公式 ($P_{\text{吸}}$ 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 10W 。

【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 6W 。

【解】

$$P_{1\text{吸}} = 4 \times 1 = 4\text{W} (\text{吸收})$$

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

设 N_3 的电流 i_3 如图 1—5(c)虚线所示,则

$$P_{3\text{供}} = 10i_3$$

$$i_3 = \frac{P_{3\text{供}}}{10} = \frac{6}{10} = 0.6\text{A}$$

四、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

$$W(t) = \int_{-\infty}^t P(\xi) d(\xi) \quad (1-7)$$

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, $1\text{J} = 1\text{W} \cdot \text{s}$ 。

上面介绍了电路的基本物理量电流、电压及功率等,它们在我国法定计量单位中的基本单位分别是安、伏及瓦。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、名称及因数见表 1—

1. 例如: $1\text{mA}=10^{-3}\text{A}$; $1\text{kV}=10^3\text{V}$; $1\text{MW}=10^6\text{W}$ 。表 1—1 各词头不仅用于安、伏、瓦前,也用于电路参数前,如 $\text{k}\Omega$ (千欧)、 mH (毫亨)、 μF (微法)等。

表 1—1

符 号		T	G	M	k	m	μ	n	p
词头名称	中 文	太	吉	兆	千	毫	微	纳	皮
	英 文	tera	giga	mega	kilo	milli	micro	nano	pico
因 数		10^{12}	10^9	10^6	10^3	10^{-3}	10^{-6}	10^{-9}	10^{-12}

思 考 题

1. 为什么要选定电流、电压的参考方向? 什么是关联参考方向?
2. 某元件上的 u, i 方向关联或非关联时,如何计算该元件吸收(供出)的功率? 此计算式对任何二端网络都有效吗(设 u, i 分别为二端网络端口的电压和电流)?

第三节 电路元件及其特性

一、电阻元件

在任意时刻 t ,能用 $u-i$ 平面内一条曲线(称为伏安特性曲线)来表征其外部特性的二端网络称为电阻元件。例如电阻器就是其中之一。根据电阻元件的伏安特性曲线是否为通过坐标原点的直线,而将它分为线性电阻和非线性电阻两大类。线性电阻元件以图 1—6(a)所示符号表示。当电压 u 与电流 i 方向关联时,其伏安特性曲线是一条通过坐标原点的直线[见图 1—6(b)],其数学表达式为

$$u = Ri \quad (1-8)$$

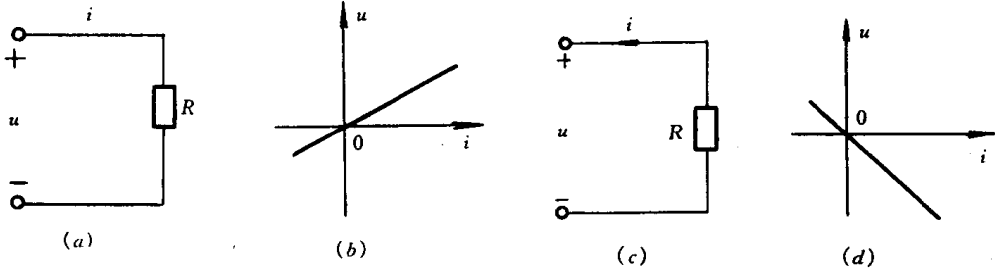


图 1—6 电阻元件及其伏安特性曲线

式(1—8)称为电阻元件的伏安关系(本书以下简称为 VAR),它就是大家熟知的欧姆定律。式中比例系数 R 是一正实常数,它与 u, i 无关。 R 称为电阻元件的电阻量。为简便起见,以后电阻一词既表示电阻元件,也表示电阻量。电阻的单位是欧姆,用符号 Ω 表示。 $1\Omega=1\text{V/A}$ 。式(1—8)亦可写成

$$i = \frac{1}{R}u = Gu$$

式中 $G=1/R$ 称为电阻元件的电导,其单位是西门子,用符号 S 表示。 $1\text{S}=1\text{A/V}=1/\Omega$ 。如果电阻的电压与电流方向非关联,见图 1—6(c),则欧姆定律为

$$u = -Ri \quad (1-9)$$

或

$$i = -Gu$$

(1-9)

其对应的伏安特性曲线如图 1-6(d) 所示。

伏安特性不能用通过坐标原点的直线来表示的电阻元件,称为非线性电阻。非线性电阻不服从欧姆定律。例如,半导体二极管就是非线性电阻元件。有关非线性电阻元件的特性将在第八章讨论。

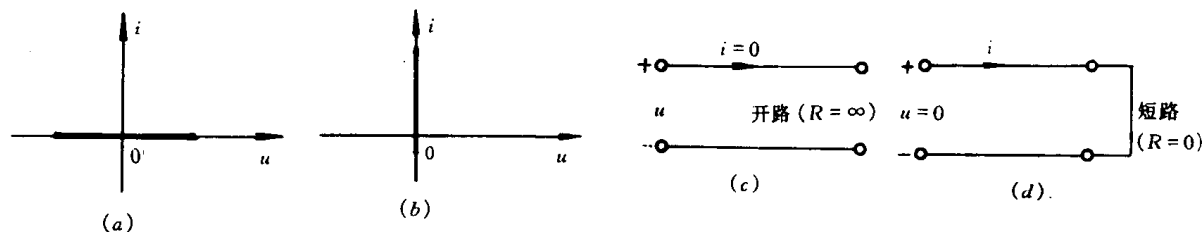


图 1-7 开路、短路及其伏安特性曲线

线性电阻的伏安特性曲线有两种极端情况,一是通过坐标原点而画在电压轴上的直线,如图 1-7(a) 所示,另一是通过坐标原点而画在电流轴上的直线,如图 1-7(b) 所示。图 1-7(a) 表示,不论电阻两端电压为何值,而流过的电流总是零,因此对应的 $R=u/i=\infty$ 或 $G=0$ 。这种情况称为开路,其电路如图 1-7(c) 所示。图 1-7(b) 表示,不论流过电阻的电流为何值,而其端电压总为零,因此对应的 $R=u/i=0$ 或 $G=\infty$ 。这种情况称为短路,其电路如图 1-7(d) 所示。

电阻还有时变和非时变之分。不论线性电阻还是非线性电阻,若它的伏安曲线随时间而异,则为时变电阻,否则为非时变电阻。图 1-8 示出了它们的伏安特性曲线。本书主要研究线性非时变电阻。

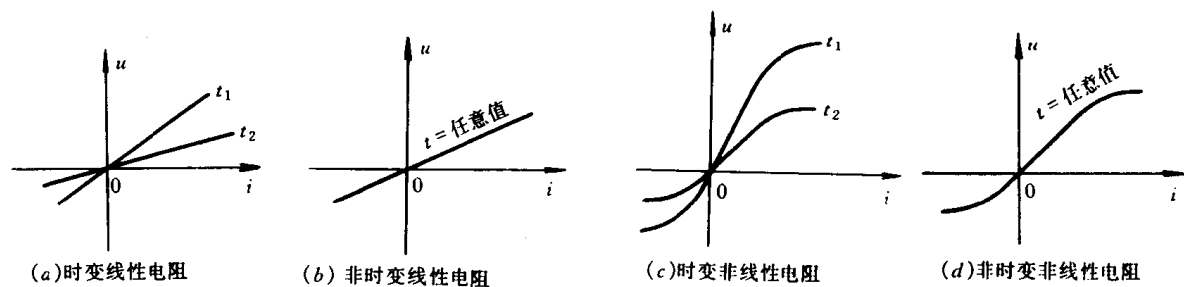


图 1-8 时变、非时变电阻

由电阻的伏安关系可以看出,电阻的电压完全由同一时刻的电流所决定,而与该时刻以前的电流值无关。这一关系反映了电压与电流的即时效应,或者说“无记忆”特性,因此电阻又是无记忆元件。

线性电阻 R 的端电压 u 与电流 i 方向关联时,其吸收的功率

$$P = ui$$

考虑到欧姆定律式(1-8),于是

$$P = ui = i^2 R = \frac{u^2}{R} \quad (1-10)$$

若 u 与 i 方向非关联,再考虑到式(1-9),于是

$$P = -ui = -(-Ri)i = i^2 R = \frac{u^2}{R} \quad (1-11)$$

式(1-10)和式(1-11)表明,线性电阻吸收的功率恒为非负值,它在任何时刻都不可能供出能量,故电阻是耗能元件,又是无源元件。电阻在 t_1-t_2 时间内消耗的能量为

$$W_R = \int_{t_1}^{t_2} P(\xi) d\xi = R \int_{t_1}^{t_2} i^2(\xi) d\xi = G \int_{t_1}^{t_2} u^2(\xi) d\xi$$

式中, u 和 i 分别为电阻的端电压和电流。

图 1-9(a) 所示二端网络的 u 、 i 方向关联, 而其伏安曲线的斜率为负, 如图 1-9(b) 所示, 这种二端网络对应的电阻称为负电阻。其伏安关系为

$$u = -Ri$$

式中 $R > 0$ 且为常数。它吸收的功率

$$P = ui = -i^2 R$$

恒非正值。可见, 负电阻是一有源元件。利用电子技术可以实现负电阻。

电阻元件在额定工作情况的电压、电流及功率值, 称为其额定电压、额定电流及额定功率, 其电阻值称为标称值。一般常在电阻元件上标明其中两个数值。例如 220V、100W 的电烙铁, 意即在 220V 电压作用下, 其吸收的功率为 100W。又如 100Ω 、1A; 100Ω 、1/4W 电阻等等。若电阻工作时的电压、电流超过其额定值, 就有可能被烧毁或缩短寿命。

【例 1-2】 二端网络 N_1 、 N_2 和 N_3 的伏安特性曲线分别如图 1-10(a)、(b) 和 (c) 所示, 试求各网络对应的电阻 R_1 、 R_2 和 R_3 。

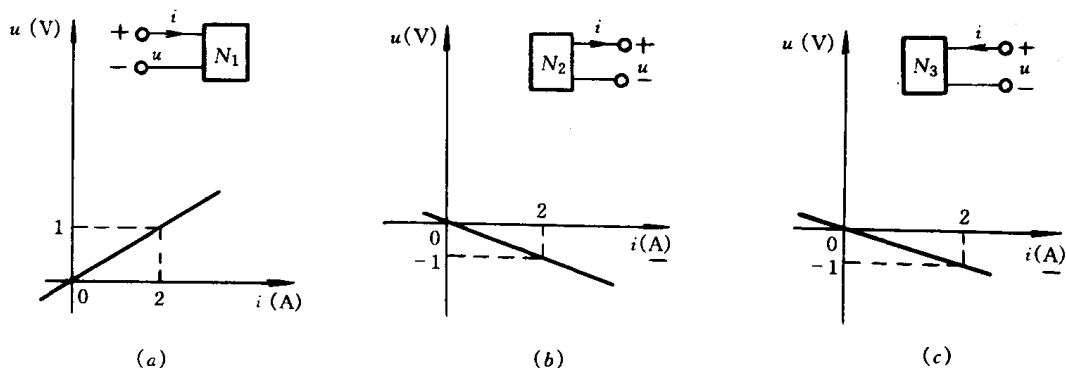


图 1-10 例 1-2 电路及曲线

【解】

图(a) u 与 i 方向关联, 故

$$R_1 = \frac{u}{i} = \frac{1}{2} = 0.5 \Omega$$

图(b) u 与 i 方向非关联, 故

$$R_2 = -\frac{u}{i} = -\frac{-1}{2} = 0.5 \Omega$$

图(c) u 与 i 方向关联,故

$$R_3 = \frac{u}{i} = \frac{-1}{2} = -0.5 \Omega$$

【例 1—3】 (1) 100Ω 、 $1/4\text{W}$ 的电阻,允许长期通过的最大电流为多少? (2) 400Ω 、 1A 的电阻,允许最大端电压是多少?

【解】

(1)

$$P = i^2 R$$

$$i = \sqrt{\frac{P}{R}} = \sqrt{\frac{1/4}{100}} = 0.05 \text{ A} = 50 \text{ mA}$$

故 100Ω 、 $1/4\text{W}$ 的电阻允许长期通过的最大电流为 50mA 。

(2)

$$u = Ri = 400 \times 1 = 400 \text{ V}$$

400Ω 、 1A 的电阻,允许的最大端电压为 400V 。

【例 1—4】 (1) 试求 220V 、 60W 白炽灯的电阻; (2) 两个 220V 、 60W 的白炽灯串联后接于 220V 电压上,它们消耗的总功率为多少? (3) 220V 、 60W 白炽灯与 220V 、 25W 白炽灯串联后接于 220V 电压上,试问哪个亮? 哪个暗?

【解】

(1)

$$P = u^2 / R$$

$$R = u^2 / P = 220^2 / 60 = 806.7 \Omega$$

(2) 设一个白炽灯的电阻为 R ,故

$$P = u^2 / 2R = \frac{1}{2} \frac{u^2}{R} = \frac{1}{2} \times 60 = 30 \text{ W}$$

(3) 两灯串联,电流相等,瓦数较小的灯其电阻较大(因为 $R = u^2 / P$)。故 220V 、 60W 与 220V 、 25W 的白炽灯串联工作时, 25W 的灯较亮(读者自行计算两灯各消耗的功率是多少)。

二、电容元件

在任意时刻 t ,能用 q — u 平面内一条曲线(库伏曲线)来表征其外部特性的二端网络称为电容元件,简称电容。例如电容器就是其中之一。电容是一种只储存电场能量的元件。线性电容用图 1—11(a)所示符号表示。当电压 u 作用于电容 C 上时,电容两极板上分别出现正、负电荷 $+q$ 和 $-q$ 。若 q — u 曲线是通过坐标原点的直线,如图 1—11(b)所示,则该电容为线性电容。线性电容的库伏关系为

$$q = Cu$$

式中,比例系数 C 是一个正实常数,它与 q 、 u 无关,是电容本身固有的物理量,称为电容元件的电容量,也简称为电容。电容的单位是法拉,用 F 表示, $1\text{F} = 1 \text{ C/s}$ 。实际电容元件的电容量往往很小,多采用 μF (微法)和 pF (皮法)单位。

根据库伏曲线的特点,电容也有线性、非线性;时变和非时变之分,其定义与电阻的相类似。本书主要分析线性非时变电容。

在电路分析中,主要的电

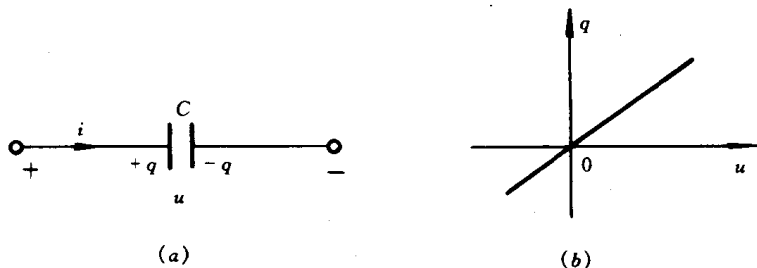


图 1—11 电容元件及其库伏特性曲线