

邮电高等函授教材

电路与信号

郑秀珍 编

YOU DIAN GAO DENG

YOU DIAN GAO DENG

HAN SHOU

YOU DIAN GAO DENG HAN SHOU

JIAO CAI

HAN SHOU SHI YONG



GAOHAN

邮电高等函授教材

电 路 与 信 号

郑秀珍 编

人 民 邮 电 出 版 社

登记证号(京)143号

内 容 简 介

本书为邮电高等函授电信专业(专科)教材。本书比较系统地介绍了电路与信号的基本概念、基本理论和基本分析计算方法。

全书共分六章。内容包括基础知识、直流电路及基本分析法、正弦稳态电路分析、一阶瞬态电路的时域分析、信号的频谱分析和瞬态电路的复频域分析。各章配有大量例题与习题。文字浅显,通俗易懂,便于学生自学和掌握。

本书可供邮电高等函授专科学员学习,也可供同类在职技术人员自学和参考。

邮电高等函授教材

电路与信号

郑秀珍 编

责任编辑 滑玉

*

人民邮电出版社出版发行

北京市朝阳区内南竹杆胡同111号

人民邮电出版社河北印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

*

开本: 850×1168 1/32 1994 年 8 月 第 一 版

印张: 15

1994年8月河北第1次印刷

字数: 345 千字

印数: 1—10 100 册

ISBN7-115-05230-1/TN·707

定价: 14.00 元

010128

前 言

本书是邮电高等函授各电信专业（专科）的教材，也可作为同类专业在职人员的自学参考用书。它是在1988年编写的试用教材《电路与信号》基础上，进一步去粗取精、充实提高而写成的。

本书主要是研究电路与信号两方面的基本概念、基本理论和基本分析方法，以提高学生分析问题和解决问题的能力，为今后学习专业课和进一步研究通信技术奠定坚实的基础。在内容上，考虑到专科的学制和实际水平，力求少而精，突出重点和难点；在结构上采用了先直流后交流、先稳态后瞬态、先时域后变换域的顺序，使之符合由浅入深、循序渐进的认识规律。为适应函授的特点，便于自学，对重点内容都列举了不同类型的例题和思考题，各章均配有小结和大量的习题。为扩大知识面而设立的选学内容用“※”号标出，供学生课后阅读。

本书初稿经邮电部高等函授教学指导委员会1992年12月审议通过，并推荐做为邮电高等函授专科正式教材出版。本书在撰写过程中，曾得到原试用教材的作者之一高丽副教授以及江苏省邮电学校韩范老师的帮助；“教指委”委员范书学副教授对本书初稿做了仔细、认真审校，在此一并表示衷心感谢。

限于水平，书中不妥之处，恳请广大函授师生及各界读者批评指正。

编 者

1993.12

目 录

第一章 基础知识	(1)
第一节 电路与信号的概念.....	(1)
第二节 电路的基本变量.....	(4)
第三节 电路的基本元件.....	(7)
第四节 电源.....	(13)
第五节 基尔霍夫定律.....	(18)
习题一.....	(26)
第二章 直流电路及基本分析法	(31)
第一节 直流电路的等效转换分析法.....	(32)
第二节 复杂电路的一般分析法.....	(50)
第三节 线性电路的几个基本定理.....	(67)
※第四节 网络图论的基本知识及拓扑分析法.....	(86)
习题二.....	(96)
第三章 正弦稳态电路分析	(105)
第一节 正弦信号及其相量表示.....	(105)
第二节 基本元件的正弦稳态电路分析.....	(113)
第三节 基尔霍夫定律的相量形式、阻抗和导纳.....	(126)
第四节 正弦稳态电路中的功率.....	(142)
第五节 正弦稳态电路分析举例.....	(151)
第六节 谐振电路.....	(162)
第七节 互感耦合电路.....	(183)
第八节 理想变压器.....	(202)
※第九节 三相交流电路的基本知识.....	(213)

习题三	(232)
第四章 一阶瞬态电路的时域分析	(243)
第一节 常见信号	(244)
第二节 信号的运算	(258)
第三节 电容元件与电感元件的惯性特性	(266)
第四节 直流一阶电路的时域分析——三要素分析法	(270)
第五节 一阶电路的零输入、零状态分析法	(286)
第六节 各种响应分量的补充说明	(310)
习题四	(315)
第五章 信号的频谱分析	(325)
第一节 周期信号的傅氏级数展开式	(326)
第二节 周期信号的频谱分析	(343)
第三节 非周期信号的频谱分析	(352)
第四节 傅氏变换的性质	(360)
第五节 周期信号的频谱函数	(385)
第六节 信号无畸变传输的条件	(388)
习题五	(393)
第六章 瞬态电路的复频域分析法	(400)
第一节 复频域分析法的数学基础——拉普拉斯变换	(401)
第二节 拉氏变换的性质	(408)
第三节 拉氏反变换的确定	(423)
第四节 瞬态电路的复频域分析法	(433)
第五节 网络函数与冲激响应	(443)
习题六	(452)
主要参考书目	(457)
部分习题答案	(458)

第一章 基础知识

本章将简单介绍“电路”与“信号”两个方面的基础知识：电路理论中的模型、基本元件、基本变量和基本定律；信号理论中信号的概念及常见信号。

第一节 电路与信号的概念

本节将介绍什么是电路、什么是信号，以及两者之间的关系。

一、电路与电路模型

实际电路就是由若干电气元器件（如电阻器、电容器、电感器、晶体管、电源、开关等）按照人们预先规定的目的相互联接而构成的总体。这个总体提供了电流的通路。

电路的作用虽是多种多样的，但基本上可分为两大类：一类是进行电能的传输或转换，另一类是实现信息的传输和处理。在通信技术中，后者是电路的主要作用。

组成实际电路的元器件的电磁性能比较复杂。例如，电阻器的主要功能为电能对热能的不可逆转换，但当电流通过时，它也储存了一定的磁能和电能；电感线圈的主要功能是用来储存和交换磁能，但当电流通过时，它也消耗部分热能，还伴随着一定的电场能量。若将这些电磁性能统统考虑，将使电路分析的过程复杂化，而且在工程实际中也没有这样精确的必要。因此，在误差准许的情况下，我们将实际的元器件加以近似化、理想化，并用一个表征其主要性能的模式元件（又称理想元件，简称元件）来表示。电路分析中常用的

三种最基本的理想元件为：只表示将电能转换为热能的电阻元件，只表示电场现象的电容元件，以及只表示磁场现象的电感元件。图1-1给出了它们的符号图形。



图1-1 几种基本理想元件

由理想元件联接成的电路称为电路模型或电路图，简称电路。如图1-2所示。它是电路分析的对象。

平常我们所说的电阻、电容、电感这三个术语，都具有双重含义，它们既表示电路元件，又表示电路元件的参数。在实际元件中，这三种参数是连续分布的，既在元件的任何部分都存在着电阻、电容和电感。但当电路元件的几何尺寸远小于元件正常工作的电磁波的最小波长时，这三种参数的分布性便可忽略，而认为元件的参数“集中”于一点，构成所谓集中参数元件。由这些集中参数元件联接而成的电路称为集中参数电路。

在电路图中，每一个具有两个端子的元件（称为二端元件，如图1-1所示）就构成一个支路。两个或两个以上支路的联接点称为节点，例如图1-2(a)中A、B、C、D点都是节点。在电路分析中，为方便起见，通常又将支路看成是由多个元件串联而成的组合，例如图1-2(a)中将串联的电阻 R_3 和 R_4 作为一个支路，串联的电阻 R_1 和电源 U_s 作为一个支路，这时A点和C点可不算作节点。

电路中任一闭合路径称为回路，图1-2(a)中ABCD、ABDA及BCDB都是回路。通常把内部不包含支路的回路称为网孔，如上述的回路ABDA和BCDB是网孔，而回路ABCD则不是网孔。电路也称为网络，一般可分为平面网络和立体网络两种。平面网络就是可以画在一个平面上，而不致使任何两条支路交叉的电路，如图

1-2(a); 否则, 便称为立体网络或非平面网络, 如图1-2(b)。显然, 网孔的概念只对平面网络有效, 而对立体网络来说则是不适用的。

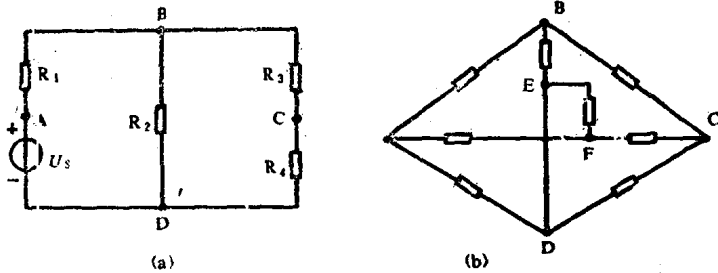


图1-2 电路图

本书研究的电路仅限于集中参数的、线性的、时不变的电路。线性电路是由线性元件和电源组成的电路, 线性电路的传输特性 (即输出与输入间的关系) 满足比例性 (又称齐次性) 和叠加性 (又称可加性)。时不变电路是指当输入延时时, 输出也相应地延时, 但波形不变。

二、信号与电路

信号是带有信息的随时间变化的一个物理量, 如声音、光线、电磁波等等都可以构成信号。在通信技术中, 携带语言、文字或图象等信息的随时间变化的电流或电压称为电信号, 这就是本书要研究的信号。

信号分为规则信号与不规则信号。规则信号 (又称确定性信号) 是指按一定规则变化的、可以用一个确定的数学解析式或波形来描述的信号。因此本书认为“信号”、“函数”这两个名词具有相同含义。否则称为不规则信号 (又称随机信号)。规则信号据其变化时是否有重复性的特点可分为周期信号和非周期信号; 按它的存在时间是否为连续的特点又可分为连续时间信号和离散时间信号。本书不

讨论离散时间信号。图1-3给出了几种常见信号的波形图。

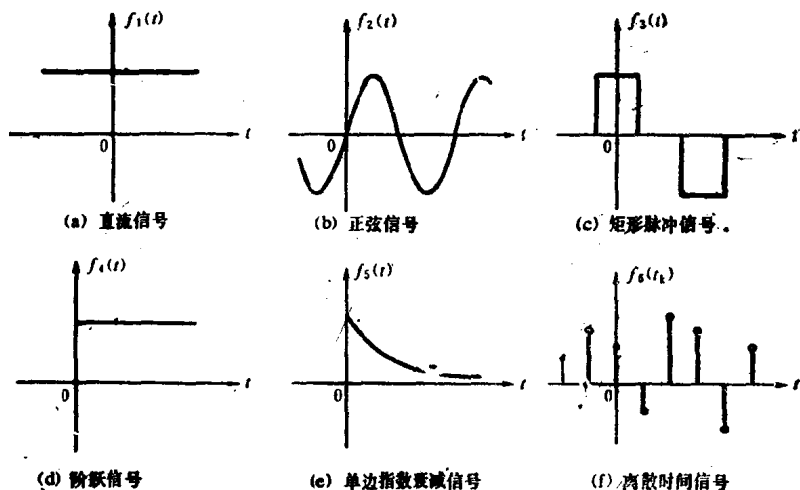


图1-3 常见信号

通信技术的任务就是要解决远距离的信息传递。信号是运载信息的工具，而电路起着传递、处理信号的作用。

通常将输入电路的信号称为激励，而把经过电路传输和处理后的输出信号称为响应。

第二节 电路的基本变量

电路中的变量有六种：电荷、磁链、电流、电压、功率和能量。通常选用电流、电压作为基本变量，因为它们可以方便地表示出其他变量。

电流、电压的基本概念、定义和单位等在物理学中已有明确规定，故不重述。这里仅强调一下它们的参考方向。

一、电流、电压的参考方向

电流和电压不仅有大小，而且是有方向的物理量。通常把正电荷流动的方向定为电流的实际方向，又称正方向；而电压的实际方向则是从高电位（正极）指向低电位（负极），即电位降的方向为电压的正方向。

在如图1-2(a)所示的由单一电源构成的简单电路中，各支路的电流和电压的实际方向很容易判断；但对于由多个电源组成的复杂电路，各支路的电流和电压的实际方向就很难断定了；另外，如果电路中电流和电压本身的正方向是随时间不断变化的，就更无法在电路中标出它们的正方向。这个困难可用参考方向来解决。参考方向是人为选定的、随便假设的正方向。所以，参考方向又称选定正方向。正因如此，电流和电压都成了代数量，可“正”可“负”：凡是参考方向与实际方向相同时，取正值；相反时，则取负值。这样，当参考方向选定后，就可通过电流或电压值的“正”或“负”来说明各支路中电流或电压的实际方向了。因此，今后分析电路时，首先应在电路图中标明各支路电流或电压的参考方向（而不去追究其实际方向），然后再进行分析计算。显然，没有标明参考方向，计算出来的正值或负值是没有意义的，也是无法计算的。

在电路分析中，各支路的电流和电压均可随意选定其参考方向，互不相关。但为了分析方便，常常将两者的参考方向取为一致：即电流的参考方向从电压的正极指向负极，这称为“关联参考方向”。图1-4(a)表示 i 、 u 采用关联参考方向的情况；图(b)、(c)则表示在采用关联参考方向的前提下，可以只标出 i 或 u 的参考方向的情况。

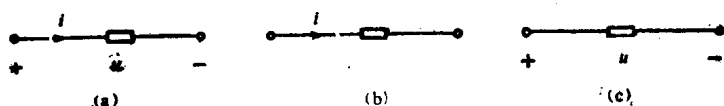


图1-4 关联参考方向

二、电功率及其正、负号的意义

电功率（简称功率）是描述电路中能量变化速率的物理量，定义为单位时间内电场力所作的功。由物理课得知：在直流电路中，功率是恒定不变的，用大写字母 $P=UI$ 表示；当电流、电压是随时间变化的 $i(t)$ 和 $u(t)$ 时，则功率也是随时间变化的，称为瞬时功率，用小写字母 $p(t)=u(t) \cdot i(t)$ 表示，或简写为 $p=ui$ 。

功率有正值和负值之分。从前面的定义可知，电场力做功为“正”，那么外力做功（如干电池的化学能、发电机的机械能等）就为“负”。

在电路中，如何计算某个元件或某段电路（如图1-5中方块A）的功率的正、负呢？功率的正或负值是由两个因素决定的：其一是电流和电压间的参考方向；其二是电流和电压本身的正、负值。

当 I 、 U 为关联参考方向时，如图1-5(a)所示，计算功率用公式

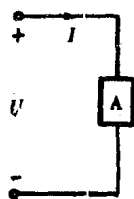
$$P=UI \quad (1-2-1)$$

当 I 、 U 为非关联参考方向时，如图1-5(b)所示，计算功率用公式

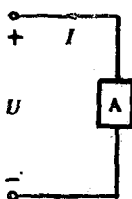
$$P=-UI \quad (1-2-2)$$

已知， U 、 I 本身也是有方向的代数量，即也有正、负值之分。因此，无论使用式（1-2-1），还是使用式（1-2-2），只需将 U 和 I 本身的代数值直接代入即可。最终的计算结果：若 $P>0$ （即 P 为“正”值），是电场力做功，说明方块A是消耗功率（或称吸收功率）；若 $P<0$ （即 P 为“负”值），是外力做功，说明方块A产生功率（或称供出功率）。

例1-1 在图1-6中五个方块分别代表电源或负载元件，各支路的电流、电压的参考方向如图1-6所示。现通过测量得 $I_1=4\text{A}$ ， $I_2=-5\text{A}$ ， $I_3=9\text{A}$ ， $U_1=120\text{V}$ ， $U_2=80\text{V}$ ， $U_3=-40\text{V}$ ， $U_4=160\text{V}$ ， $U_5=-40\text{V}$ 。试计算各元件的功率，并说明各方块所代表的



(a)



(b)

图1-5 功率正负号的意义

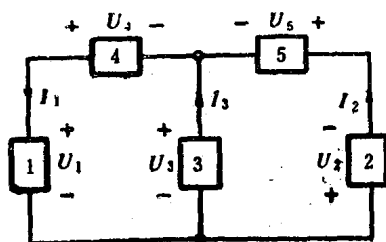


图1-6 例1-1图

是电源还是负载?

解: $P_1 = U_1 I_1 = 120 \times 4 = 480 (\text{W})$

$$P_2 = U_2 I_2 = 80 \times (-5) = -400 (\text{W})$$

$$P_3 = -U_3 I_3 = -(-40) \times 9 = 360 (\text{W})$$

$$P_4 = -U_4 I_1 = -160 \times 4 = -640 (\text{W})$$

$$P_5 = U_5 I_2 = -40 \times (-5) = 200 (\text{W})$$

从以上功率的计算可看出: P_1 、 P_3 、 P_5 均为正值,说明方块1、3、5是消耗功率的,为负载;而 P_2 、 P_4 均为负值,说明方块2、4是供出功率的,为电源。

从本例还可看到:电路中各元件吸收功率的总和为

$$\sum P_{\text{吸}} = P_1 + P_3 + P_5 = 480 + 360 + 200 = 1040 (\text{W})$$

而各元件供出功率的总和为

$$\sum P_{\text{供}} = P_2 + P_4 = 400 + 640 = 1040 (\text{W})$$

吸收和供出功率的数值正好相等,称为功率平衡,是能量守恒原理的具体体现。在电路分析中常利用功率平衡来检验计算结果是否正确。

第三节 电路的基本元件

电阻、电感、电容是电路的基本元件。

一、电阻元件

电阻元件是消耗电能的元件，简称耗能元件，是电路中最常见的元件之一。

1. 电阻元件的伏安特性、欧姆定律

任何二端元件两个端子上的电压、电流之间的关系称为元件的伏安关系或伏安特性。电阻元件的伏安特性是由大家熟知的欧姆定律来描述的。

当电压、电流为关联参考方向时，如图1-7(a)示，欧姆定律记为

$$u = Ri \quad (1-3-1)$$

当电压、电流的参考方向非关联时，如图1-7(b)示，欧姆定律记为

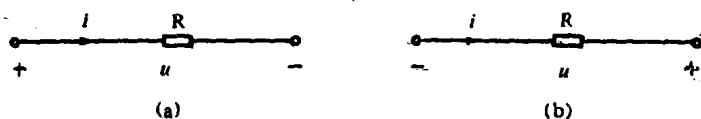


图1-7 欧姆定律

$$u = -Ri \quad (1-3-2)$$

电阻的伏安特性也可写成

$$i = Gu \quad (1-3-3)$$

的形式，即通过电阻元件的电流与元件的端电压成正比。比例系数

$$G = \frac{i}{u} = \frac{1}{R} \quad (1-3-4)$$

称为元件的电导。单位是“西门子”，用符号“S”表示。电导与电阻互为倒数。

在直流电路中可将上述各公式中的电压、电流的符号改为英文大写的U、I。

电阻元件的伏安特性还可由曲线表示。伏安特性为一条通过坐

标原点的直线者，称为线性电阻，如图1-8示；伏安特性为一条过原点的曲线者，称为非线性电阻。例如PN结二极管就是一个非线性电阻元件，它的伏安特性如图1-9所示，即 u 、 i 之比不是常数，但就每点而言亦符合欧姆定律。本书只讨论线性电阻。

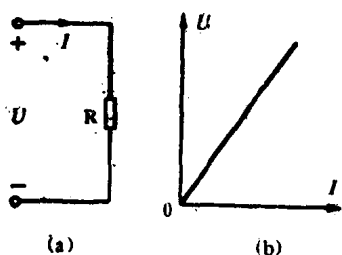


图1-8 线性电阻

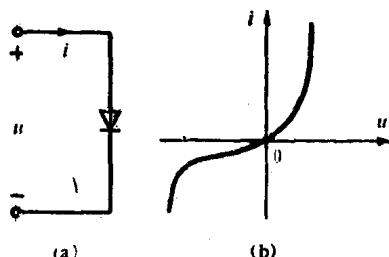


图1-9 非线性电阻

2. 电阻元件的功率

在第二节中已知：一个二端元件任一瞬时的功率 $p=u \cdot i$ 。当这个元件是一个线性电阻元件时，结合欧姆定律，就可得到电阻元件的功率

$$p=i^2 R$$

$$\text{或} \quad p=Gu^2=u^2/R \quad (1-3-5)$$

在直流电路中，记为

$$P=UI=I^2 R=GU^2=U^2/R \quad (1-3-6)$$

从上述式子可看出，电阻元件的功率与通过元件的电流的平方或元件的端电压的平方成正比，因此，其功率恒大于零。这说明电阻元件是一个只消耗电能而不储存电能的元件，电能从电源供给电阻，并转换成其他形式的能量，而不能再返回电源。

3. 电气设备的额定值

当电流通过电气设备（电器或电路元件）时，设备内的电阻将消耗一定的能量，使电能转变为热能，导致电气设备本身的温度增高。在电阻一定的情况下，如果加上过高的电压或过大的电流，将会烧坏设备。为了保证电气设备能正常工作，对各种电气设备消耗

的功率或外加电流、电压的数值都有一定的限额，称为额定功率、额定电流和额定电压。它们是设备能安全工作所允许的最大值。各种电气设备一般都在铭牌上标明它们的额定值。根据电压、电流和功率间的关系，额定值不一定全部标出。例如，电灯泡通常只给出额定电压和额定功率。而电阻元件则只标明电阻值和额定功率。

例1-2 有一个 $10\text{k}\Omega$ 、 9W 的电阻器。问在使用时，它所能承受的最大电压、允许通过的最大电流各是多少？若把这个电阻器接在 380V 直流电源上能否正常工作？

解：据 $P=U^2/R$ ，则有

$$U = \sqrt{PR} = \sqrt{9 \times 10 \times 10^3} = 300(\text{V})$$

又由 $P=I^2R$ ，则有

$$I = \sqrt{\frac{P}{R}} = \sqrt{\frac{9}{10 \times 10^3}} = 3 \times 10^{-2}(\text{A}) = 30(\text{mA})$$

通过计算可知，该电阻器能承受的最大电压为 300V ，允许通过的最大电流为 30mA 。若把这个电阻器接在 380V 直流电源上，此时的功率为

$$P' = U^2/R = 380^2/10 \times 10^3 = 14.44(\text{W})$$

因为 P' 超过额定功率 9W ，会使电阻器烧坏，所以不能这样使用。

二、电容元件

1. 电容元件的伏安特性、动态特性

从物理学中得知，当电容元件的端电压 u_c 随时间发生变化时，存储在电容元件极板上的电荷 q 将随之变化，在电容元件支路中将出现电流 i_c 。在如图1-10(a)所示的关联参考方向下， i_c 为

$$i_c = \frac{dq}{dt} = C \frac{du_c}{dt} \quad (1-3-7a)$$

非关联时, 则为

$$i_c = -C \frac{du_c}{dt} \quad (1-3-7b)$$

从式(1-3-7)可以看出:

(1) 电容支路的电流 i_c 与端电压 u_c 的变化率成正比, 比例系数为电容量 C 。当 C 为常数时, 这个电容元件称为线性电容。

(2) 变化的电压才可能产生电流, 即电容电流反映了电压的动态, 因此电容元件被称为动态元件。

当电压是一个不随时间变化的直流时, 因 $dU/dt = 0$, 致使 $i_c = 0$, 此时电容元件相当于开路。在有的电路中, 就利用了电容元件的这个特性来“隔直流”。

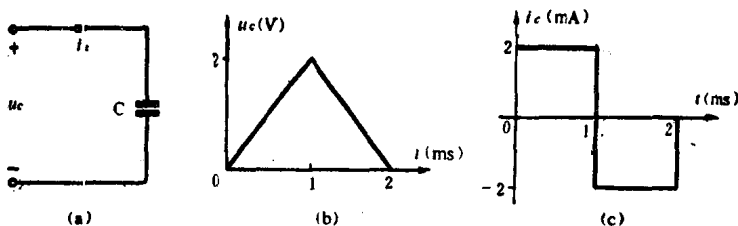


图1-10 例1-3图

例1-3 已知图1-10(a)中的电容 $C = 1\mu\text{F}$, 电容端电压 u_c 的波形如图1-10(b)所示。试求电容电流 i_c 。

解: 因为

$$u_c = \begin{cases} 2t & 0 \leq t \leq 1 \\ -2(t-2) & 1 \leq t \leq 2 \end{cases}$$

所以

$$i_c = C \frac{du_c}{dt} = \begin{cases} 2C = 2(\text{mA}) & 0 < t < 1 \\ -2C = -2(\text{mA}) & 1 < t < 2 \end{cases}$$

i_c 的波形如图1-10(c)所示。从图(b)和图(c)的波形可看出: 电容