

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电路与信号分析基础

汪载生 编 舒贤林 审

人民邮电出版社

内 容 简 介

本书为邮电部高等院校专业基础课教学指导委员会推荐的教材。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。

全书共分十章。内容包括基础知识、直流激励下电阻电路的等效变换分析法、线性网络的一般分析方法与网络定理、正弦稳态电路分析、互感电路与变压器、线性电路的频率特性与双口网络、周期信号分析、非周期信号分析和电路瞬态分析法。为便于学生掌握基础理论知识，各章配有大量的例题、思考题和习题。

本书为通信、电子类专科各专业的基础教学用书，也可供有关科技人员参阅。

邮电高等学校专科教材
电路与信号分析基础

汪毅生 编
舒贤林 审

人民邮电出版社出版
北京东长安街27号
河北省邮电印刷厂印刷
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 1991年6月第一版
印张：18 28/32页：302 1991年6月河北第1次印刷
字数：502千字 印数：1—3500册

ISBN7-115-04456-2/G·090

定价：5.95元

前 言

本教材是为满足近年来迅速发展的大专层次的教学需要,根据邮电部高等院校专业基础课教学指导委员会1989年制定的邮电高校专科《电路与信号分析基础》课程教学基本要求编写的。本书的任务在于研究信号与电路理论的基本概念和基本分析方法,使学生初步掌握建立信号与电路的教学模型并应用适宜的数学分析求解,不断增强分析问题和解决问题的能力,为今后进一步学习通信、电子专业知识奠定基础。

考虑到专科学生的数学基础和学制年限,本书在编写中从专科学生的实际出发,注意了内容的深度和广度,着重讲清基本概念、基本原理和基本分析方法,不贪多求深;注意专业的针对性,将“电路”与“信号”两个主题尽可能紧密地结合进行分析;教材结构采用先讲稳态、后讲瞬态,符合由浅入深、循序渐进的认识规律,也有利于与高等数学的配合;同时注意启发学生独立思维和分析问题的能力,为适应当前的科技现状和今后发展的需要,适当安排了一些加宽、加深的内容(标有“*”号),对于重要理论和方法,列举了不同类型的例题,以加深理解;书中配有习题和思考题,便于自学。

本书原稿经邮电部高校专业基础课教学指导委员会组织部内外同行专家认真评审、讨论,一致通过推荐作为邮电高校专科教材出版,并委托北京邮电学院舒贤林教授审阅。本书初稿曾在重庆邮电学院试用过三届,电信系和电路与信号分析教研室的有关同志对本书的编写给予许多支持和帮助。陈皆崇、阙彩兰两位老师为本书提供了部分习题答案,赵祖锡副教授花费大量时间对初稿进行审校,并选编了部分习题。编者在此一并表示衷心感谢。

限于编者水平，书中错误与不妥之处在所难免，诚恳地希望读者批评指正。

编 者

1990年7月

目 录

| | |
|------------------------------------|---------|
| 第一章 基础知识 | (1) |
| § 1-1 电路与信号的概念 | (1) |
| § 1-2 电压、电流和电功率 | (4) |
| § 1-3 电路参数与电阻、电容、电感元件 | (11) |
| § 1-4 电压源与电流源 | (22) |
| § 1-5 基尔霍夫定律 | (26) |
| § 1-6 受控源 | (35) |
| 习题..... | (40) |
| 第二章 直流激励下电阻电路的等效变换分析法 | (49) |
| 引言..... | (49) |
| § 2-1 电阻的串、并、混联与等效电阻的计算 | (50) |
| § 2-2 几个应用实例 | (58) |
| § 2-3 星形与三角形电阻网络的等效互换 | (66) |
| § 2-4 实际电源的两种电路模型及其等效变换 | (70) |
| § 2-5 含源电路的等效化简 | (76) |
| 习题..... | (85) |
| 第三章 线性网络的一般分析方法与网络定理 | (92) |
| 引言..... | (92) |
| § 3-1 节点分析法 | (93) |
| § 3-2 回路分析法 | (104) |
| § 3-3 叠加定理与互易定理 | (113) |

| | | |
|------------|---------------------------------------|---------|
| § 3-4 | 替代定理 | (121) |
| § 3-5 | 戴维南定理与诺登定理 | (123) |
| § 3-6 | 电路的对偶性 | (131) |
| | 习题 | (133) |
| 第四章 | 正弦稳态电路分析 | (140) |
| | 引言 | (140) |
| § 4-1 | 正弦信号的基本概念 | (141) |
| § 4-2 | 正弦信号的相量表示法 | (149) |
| § 4-3 | 基本电路元件的正弦稳态特性 | (156) |
| § 4-4 | 基尔霍夫定律的相量形式 | (169) |
| § 4-5 | 阻抗与导纳 | (174) |
| § 4-6 | 阻抗与导纳的串、并联电路 | (188) |
| § 4-7 | 线性网络的一般分析方法和网络定理在正弦 稳态电路中的应用 | (197) |
| § 4-8 | 正弦稳态电路中的功率 | (204) |
| § 4-9 | 三相交流电路的基本知识 | (218) |
| § 4-10 | 交流电路中的实际元件及其电路模型 | (227) |
| | 习题 | (233) |
| 第五章 | 互感电路与变压器 | (244) |
| § 5-1 | 互感系数与耦合系数 | (244) |
| § 5-2 | 互感电压与互感线圈的同名端 | (247) |
| § 5-3 | 含互感元件正弦稳态电路的计算 | (253) |
| § 5-4 | 空芯变压器 | (262) |
| § 5-5 | 铁芯变压器的工作原理 | (269) |
| § 5-6 | 理想变压器 | (276) |
| § 5-7 | 铁芯变压器的等效电路 | (284) |
| | 习题 | (290) |

| | |
|---------------------------------|---------|
| 第六章 线性电路的频率特性与双口网络 | (295) |
| § 6-1 频率响应函数(网络函数) | (295) |
| § 6-2 RC电路的频率特性..... | (300) |
| § 6-3 串联谐振电路 | (307) |
| § 6-4 并联谐振电路 | (322) |
| § 6-5 双口网络方程与网络参数 | (331) |
| § 6-6 双口网络的特性参数 | (344) |
| 习题..... | (356) |
| 第七章 周期信号分析 | (362) |
| § 7-1 周期信号表为傅里叶级数 | (362) |
| § 7-2 波形的对称性与谐波含量的关系 | (367) |
| § 7-3 周期信号的频谱 | (379) |
| § 7-4 周期信号电路的分析 | (390) |
| 习题..... | (398) |
| 第八章 非周期信号分析 | (404) |
| § 8-1 几个典型的非周期信号 | (404) |
| § 8-2 非周期信号的频谱函数——傅里叶变换 | (414) |
| § 8-3 典型信号的傅里叶变换 | (420) |
| § 8-4 傅里叶变换的几个重要性质 | (431) |
| § 8-5 频域分析的基本概念 | (444) |
| § 8-6 离散信号的基本概念与抽样定理 | (449) |
| 习题..... | (460) |
| 第九章 电路瞬态分析——经典法 | (467) |
| 引言..... | (467) |
| § 9-1 过渡过程的一般概念与初始值的计算 | (468) |

| | |
|----------------------------------|----------------|
| § 9-2 一阶电路的零输入响应 | (474) |
| § 9-3 一阶电路的零状态响应 | (480) |
| § 9-4 一阶电路的完全响应 三要素法 | (487) |
| § 9-5 微分电路与积分电路 | (494) |
| § 9-6 二阶电路的瞬态分析 | (499) |
| • § 9-7 电路中发生强迫跃变的瞬态分析 | (511) |
| 习题 | (521) |
| 第十章 电路瞬态分析——拉普拉斯变换法 | (528) |
| 引言 | (528) |
| § 10-1 拉普拉斯变换 | (529) |
| § 10-2 拉普拉斯变换的几个重要性质 | (538) |
| § 10-3 拉普拉斯反变换 | (548) |
| § 10-4 电路瞬态的复频域分析法 | (559) |
| 习题 | (569) |
| 主要参考书目 | (574) |
| 部分习题答案 | (575) |

第一章 基础知识

§ 1-1 电路与信号的概念

这本书的名称叫《电路与信号分析基础》。这个名称已经指明了它所讨论的主题：一个是“电路”，一个是“信号”。本节我们先简单介绍一下什么是电路，什么是信号，以及它们之间的关系。

一、电路与电路模型

在日常生活中，我们每天都要接触一些用电设备，如简单的设备一手电筒，复杂一些的设备一收音机。虽然繁简不同，形式各异，但有一点是共同的：它们都是由各种电的器件（如电阻器、电容器、电感器、半导体管、电源、开关等）组合起来，构成一个电的通路。从这个角度看，它们都是电路。

电路的形式多种多样。小的如各种集成电路，在几个平方毫米的硅片上可以安排数以千计的电阻、电容、半导体管等等；大的如现代的电话、电报通信网络（电路又可称网络），可以延伸到数百甚至数千公里以外。它们都可以构成复杂的电路，完成复杂的功能。

电路的作用虽是多种多样的。但基本上可以分为两种：一种是传输和分配电能，一种是传输和处理信号。对于通信技术工作者来讲，后一个作用是我们尤其感兴趣，并需要着重研究的问题。

从能量传输的观点，电路可以看成是由电源、负载和连接导线三部分组成。其中电源是产生电能的部件，即把非电形式的能量

(化学能、机械能等)转变为电能。负载则是消耗电能的部件,即把电能转变为非电形式的能量。连接导线起传输和分配电能的作用。

例如,图1.1.1(a)表示一个最简单的实际电路。它是由干电池、小灯泡和连接导线组成。其中干电池是电源,小灯泡是负载。

实际电路一般都比较复杂。为了便于分析,常用一些能近似反映实际电路主要物理性能模型来代表实际的电路部件。电路模型是由少量几种理想电路元件(简称元件)组成。每一种元件的电磁特性都可以用数学式精确描述。将实际电路模型化之后,就可方便地画出易于分析的电路图。在电路图中出现的都是理想元件,可分别用简单的图符表示。例如图1.1.1(a)所示实际电路,可用图1.1.1(b)那样的电路图表示。其中,电源的图形符号是一个标有极性的圆圈,而负载的图形符号是一个矩形方框。

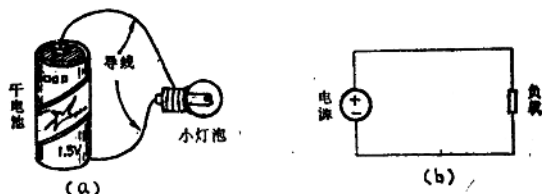


图 1.1.1 实际电路与电路图

二、信号及其与电路的关系

简单地说,信号是一种带有信息的随时间变化的物理量。声音、光线、电磁波等等都可以构成信号。

大家知道,电信技术的任务,主要是为了解决相隔遥远的人们互通信息的问题。信息可以用语言、文字或图象等转变成相应的随时间变化的电流或电压。这种携带着信号的随时间变化的电压和电流,就是电信号。我们所说的信号就是这种电信号的简称。

信号一般是时间的函数,可用函数式或波形图来描述。图1.1.2

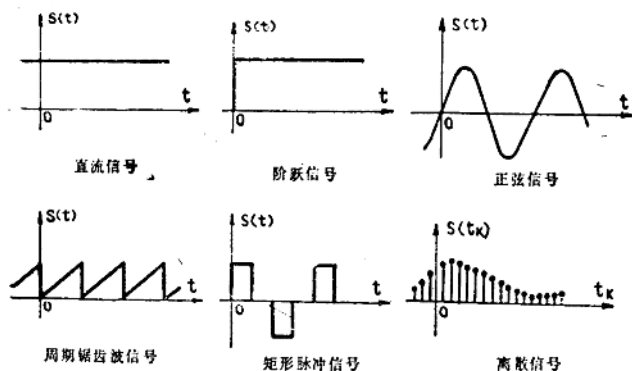


图 1.1.2 几种常见信号的波形图

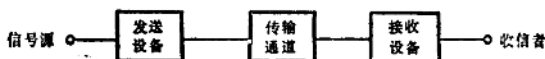


图 1.1.3 信号的传输过程

中给出了几种常见的信号波形。

信号的传输过程，可用图1.1.3的框图表示。

在通信过程中，我们要求通信设备和传输通道将发信者提供的信号尽可能不失真地传送给受信者。为了达到这个目的，就要利用各种功能不同的具体电路对信号进行适当地变换和处理。

通常将信号源输入电路的信号称为**激励**，而把经过电路的传输和处理后输出的信号称为**响应**。

电路的激励、响应关系可用图1.1.4表示。

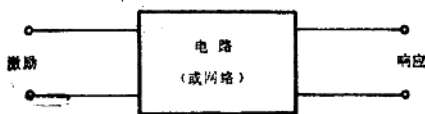


图 1.1.4 电路的激励响应关系

电路分析的任务，概括说来，就是在给定的电路中，由已知的激励求出响应。

§ 1-2 电压、电流和电功率

电压、电流和电功率是电路分析中三个基本的物理量。物理课中对它们已有详细讨论，这里我们只简要给出它们的定义，而着重阐述电流、电压的参考方向和功率正、负号的意义。

一、电流及其参考方向

带电粒子在外电场作用下定向移动形成电流。在电路分析中“电流”一词不仅指一种物理现象，而且是一个可以定量计算的物理量（在物理学中这个物理量一般称为电流强度）。电流用符号 i 表示。其定义为：单位时间内通过导体横截面的电量，或者说电流是电荷对时间的变化率。表达式是：

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1-2-1)$$

式中 q 代表电量，就是带电粒子携带的电荷量。在国际单位制(SI)中，电荷的单位是库(仑)，符号为 C；电流的单位是安(培)，符号为 A。式中 t 表示时间，单位为秒，符号为 s。因此 1 库 = 1 安·秒。

在电信技术中常用的电流单位有：毫安(mA)、微安(μ A)。
 $1 \text{ mA} = 10^{-3} \text{ A}$, $1 \mu\text{A} = 10^{-6} \text{ A}$ 。

电路中的电流可以具有两个不同的方向（因为电荷可以按两个不同方向穿过导体的任一横截面），是一个代数数量。历史上把电流的方向规定为正电荷沿导体运动的方向，沿用至今。按这个规定，电流的方向与电子（带负电荷）运动的方向正好相反。

大小和方向都不随时间变化的恒定电流，称为直流，用符号 I 表示。其表达式为

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

在简单电路中，例如图1.1.1所示的电路，不难根据电源电压的极性直接在电路图中标出电流的方向。但对于复杂一些的电路，电流的实际方向有时就难以判断。此外，如果电路中电流的实际方向不断随时间改变，更无法在电路中标明电流的实际方向。这个困难可用选定参考方向的办法来解决。参考方向是人为指定的。因为电流是代数量，可以是正值或负值。我们规定：当电流的实际方向与参考方向相同时，这电流取正值；若相反，则取负值。这样，一旦指定了参考方向之后，就可以通过电流值的“正”或“负”来说明电流的实际方向，不言而喻，在没有指定参考方向的情况下，电流值的“正”、“负”是没有意义的。由于电流的参考方向就是电流取“正”值的方向，所以也称为正方向。注意：参考方向一经指定之后，在计算过程中就不能改变了。

电流参考方向在电路图中的标注方法如图1.2.1所示。在计算式中，电流的参考方向可用带有下标的电流符号表示。如 I_{ab} 表示 I 的参考方向由 a 指向 b ，而 I_{ba} 则表示 I 的参考方向由 b 指向 a 。对同一实际电流若指定的参考方向不同，计算结果差一“一”号。即：

$$i_{ab} = -i_{ba} \quad (\text{直流: } I_{ab} = -I_{ba}) \quad (1-2-3)$$

例1-2-1.如图1.2.1所示电路元件，设每秒有5C(库仑)的正电荷由 a 端移到 b 端，

- (1) 若电流的参考方向由 $a \rightarrow b$ ，求 $i = ?$
- (2) 若电流的参考方向由 $b \rightarrow a$ ，再求 $i = ?$
- (3) 若电荷是负电荷，结果又如何？

解：(1) 因参考方向与正电荷的运动方向一致，故电流应取

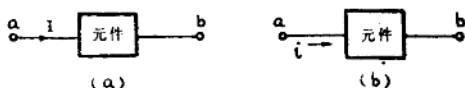


图 1.2.1 电流的参考方向

正值，即 $i = 5\text{A}$ 。

(2) 参考方向与正电荷的运动方向相反，电流应取负值，故有 $i = -5\text{A}$ 。

(3) 负电荷由 a 转移到 b ，相当于等量的正电荷由 b 转移到 a 。因此，当参考方向由 $a \rightarrow b$ 时， $i = -5\text{A}$ ，而当参考方向由 $b \rightarrow a$ 时， $i = 5\text{A}$ 。

二、电压及其参考方向

电路分析中另一个重要的物理量是电压。电路中的电荷只有在外电场的作用下才能作有规则的定向移动，从而形成电流。电压是一个衡量电场力对电荷做功大小的物理量。电路中 a 点对 b 点的电压，在数值上等于电场力把单位正电荷由 a 点移到 b 点所作的功，也就是该单位正电荷在此过程中获得或失去的能量。电压用符号 u 表示。其定义式为：

$$u = \frac{dw}{dq} \quad (1-2-4)$$

式中 w 是电场力把正电荷由 a 点移到 b 点所作的功，单位为焦(耳)，符号为 J 。 q 是被移动的正电荷的电量。 u 是 a 、 b 两点间的电压，单位为伏(特)，符号为 V 。常用的电压单位有千伏(kV)、毫伏(mV)、微伏(μV)等。

$$1\text{ kV} = 10^3\text{V}; \quad 1\text{ mV} = 10^{-3}\text{V}; \quad 1\text{ }\mu\text{V} = 10^{-6}\text{V}.$$

若正电荷从 a 点移到 b 点失去电能，表明正电荷在 a 点具有的能量高于在 b 点的能量，则 a 点是高电位， b 点是低电位，从 a 到 b 是电位降(或电压降)。反之，如果正电荷从 a 点移到 b 点获得电能，则 a 点是低电位而 b 点是高电位，从 a 到 b 是电位升。〔注〕

通常把电位降的方向作为电压的实际方向。

大小和方向(或极性)都不随时间变化的电压，称为直流电压，用大写字母 U 表示，其定义为

〔注〕：根据物理学，电场中某点的电位，即单位正电荷在该点具有的电位能。

$$U = \frac{W}{q} \quad (1-2-5)$$

与电流需要指定参考方向的理由相似，在电路分析中，电压也需要指定参考方向（或参考极性）。

指定了电压参考方向之后，如果计算得到的电压为正值，说明电压的实际方向与参考方向一致。若计算得到的电压为负值，就说明电压的实际方向与参考方向相反。

电压参考方向在电路图中的标注方法如图1.2.2所示。图中(a)(b)两图都表示电压参考方向由a指向b。

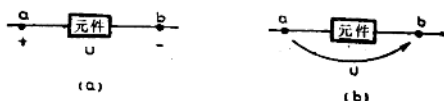


图 1.2.2 电压的参考方向

在计算式中，电压参考方向可用带有双下标的电压符号表示，如 u_{ab} 表示电压 u 的参考方向由a指向b。同一电压当指定的参考方向不同时，互为负值。即

$$u_{ab} = -u_{ba} \quad (\text{直流电压: } u_{ab} = -u_{ba})$$

在电路分析中，电流和电压都要规定参考方向，两者的参考方向原则上可以分别任意指定，互不相关。但为分析方便起见，常常采取一致的参考方向，即把元件上的电压参考方向和电流参考方向取为一致，亦即电流的参考方向从电压的“+”极性端指向电压的“-”极性端，这称为关联参考方向。图1.2.3(a)表示 u 、 i 采用关联参考方向的情况。(b)、(c)两图表示在采用关联参考方向

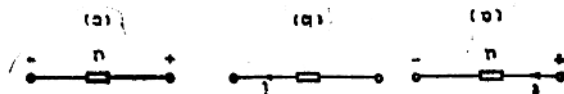


图 1.2.3 u 、 i 采用关联参考方向时的标注方法

的前提下，可以只标出 u 、 i 两者参考方向中的任意一个而将另一个省略。

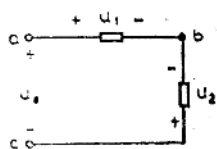


图 1.2.4 例1-2-2电路图

例1-2-2. 在图1.2.4所示电路中，已知某瞬间 $u_1=5\text{V}$ ， $u_2=8\text{V}$ 。求该瞬间电压 u_3 的值。

解：由图可知 $u_1=u_{ab}$ ， $u_2=u_{cb}$
 $=-u_{bc}$ ， $u_3=u_{ac}$ ，求 u_3 的值就是求单位正电荷由 a 移到 c 所失去的能量，它

应该等于单位正电荷从 a 移到 b ，再从 b 移到 c 失去能量的和，即应有

$$u_3=u_{ac}=u_{ab}+u_{bc}=u_1+(-u_2)=5+(-8)=-3\text{V}$$

u_3 为负值，表明 a 点到 c 点实际上是电位升。

三、电功率及其正、负号的意义

能量的传输和转换是电路的基本物理现象之一。

电功率（简称功率）是衡量电路中能量变化速率的物理量。功率的定义式为

$$p = \frac{dw}{dt} \quad (1-2-6)$$

式中 w 为能量， t 为时间。它说明功率在数值上等于单位时间内变化的能量。式(1-2-6)还可以进一步写为

$$p = \frac{dw}{dt} = \frac{dw}{dq} \cdot \frac{dq}{dt} = u \cdot i \quad (1-2-7)$$

此式说明：一段电路的功率等于这段电路的电压与电流的乘积。式中，若电压单位用伏，电流单位用安，则功率单位是瓦(特)，符号W。常用的更小与更大的功率单位是：毫瓦(mW)、微瓦(μW)、千瓦(kW)。

当 u 、 i 随时间变化时，功率 p 也是时间的函数，一般称为瞬时功率。在直流电路中，功率与电压、电流一样均不随时间而变。这

式(1-2-7)可写为

$$P = UI \quad (1-2-8)$$

当用式(1-2-7)或(1-2-8)进行功率计算时, 由于 u 、 i (或 U 、 I)都是代数量, 可正可负, 因而功率值也可正可负, 那么, 功率取正或负值有什么意义呢? 这个问题的答案与 u 、 i 的参考方向有关。

先考虑 u 、 i 采用关联参考方向的情况, 这时功率正、负号的意义如图1.2.5所示, 并可作如下说明:

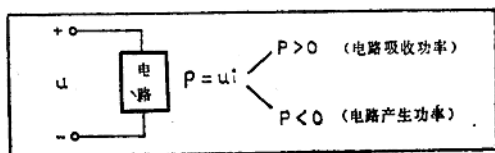


图 1.2.5 功率正、负号的意义

设 $P > 0$, 必然是 u 、 i 的符号相同。在关联参考方向下, u 、 i 符号相同表示 u 、 i 的实际方向相同。由于电流的方向代表正电荷移动的方向, 电压的方向代表电位降, 两者的实际方向相同, 说明正电荷在通过这个电路元件(或这段电路)时, 电位降低了。电位降低代表失去能量, 或者说, 能量被这个电路元件吸收(或消耗)。单位时间内吸收的能量也就是吸收功率。于是我们得到: $P > 0$ 表明这个电路元件吸收功率。

反之, 若 $P < 0$, 必然是 u 、 i 符号相反。在关联参考方向下, u 、 i 符号相反意味着它们的实际方向相反, 正电荷在通过电路时提高电位得到能量。由此可以推断, 这个电路元件释放或产生功率。

对于 u 、 i 采用非关联参考方向的情况, 如果仍然使用式(1-2-7)或式(1-2-8)计算功率, 则功率正、负符号的意义与前面所作的说明相反。这时最好改用公式:

$$P = -ui \quad (\text{或 } P = -UI) \quad (1-2-9)$$