

许健雷 编

邮电高等学校教材

电路与 信号分析

人民邮电出版社

邮电高等学校教材

电路与信号分析

人民邮电出版社

登记证号 (京) 143号

内 容 简 介

本书为邮电高等院校专业基础课教学指导委员会评审通过推荐出版的教材。本书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方法。

全书共分九章。内容包括基本概念、简单电阻电路分析、线性网络分析的一般方法、一阶二阶电路的时域分析、正弦稳态电路分析、互感与变压器电路分析、电路的频率特性与双口网络、傅里叶分析和拉普拉斯变换分析。各章均附有与基本内容密切配合的例题与习题，便于自学。

本书为邮电通信管理专业本科及通信、电子类三年制专科各专业的教学用书，也可供有关技术人员学习参考。

邮电高等学校教材

电路与信号分析

许健雷 编

*

人民邮电出版社出版

北京东长安街27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 1993年6月 第一版
印张：18 页数：288 1993年6月河北第1次印刷
字数：478千字 印数：1—2000册

ISBN7-115-04835-5/G·213

定 价：10.30 元

前 言

“电路与信号分析”课是邮电通信管理专业本科及通信、电子类专科学科生的一门重要的技术基础课，它的任务是介绍电路与信号的基本概念、基本理论和基本分析方法，为学习通信理论等后续课程建立必要的基础。

本书是为适应邮电通信管理专业及通信、电子类专科的教学需要而编写的。本书采用时域——频域——复频域的体系，有利于突出重点、分散难点，便于学生对基本内容的理解与掌握，节省了教学时间。在本书的编写过程中，还从邮电通信管理及专科教学的实际需要出发，在内容的选择上注意到既要有一定的知识宽度，但又不宜过多、过深，着重基本概念、基本理论与基本分析方法的阐明，免去了一些不必要的理论证明。本书配有较为丰富的例题与习题，有助于学生对基本内容的理解与掌握。

在本书的编写过程中，得到教研室周瑞楠副教授的许多帮助，在此谨表示衷心的感谢。

限于编者的水平，书中错误及不足之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

编 者

1992年6月

目 录

第一章 基本概念

- 第一节 信号和电路····· (1)
- 第二节 电路模型····· (4)
- 第三节 电路变量····· (6)
- 第四节 电路元件····· (13)
- 第五节 电路基本定律——基尔霍夫定律····· (34)
- 第六节 基本电信号····· (40)
- 习题一····· (46)

第二章 简单电阻电路分析

- 第一节 电阻串、并、混联电路····· (54)
- 第二节 实际电源的两种模型及简单含源电路分析····· (60)
- 第三节 含受控源的简单电路分析····· (69)
- 第四节 电阻星形与三角形联接的等效互换····· (77)
- 习题二····· (82)

第三章 线性网络分析的一般方法

- 第一节 网孔分析法····· (89)
- 第二节 节点分析法····· (99)
- 第三节 叠加定理····· (105)
- 第四节 替代定理····· (110)
- 第五节 等效电源定理与最大功率传输····· (111)
- 第六节 互易定理····· (122)
- 第七节 对偶特性与对偶电路····· (125)

习题三..... (128)

第四章 一阶、二阶电路的时域分析

第一节	一阶电路的零输入响应.....	(139)
第二节	一阶电路在直流激励下的零状态响应.....	(153)
第三节	一阶电路在直流激励下的完全响应.....	(163)
第四节	一阶电路的三要素法、初始值的计算.....	(169)
第五节	一阶电路在阶跃激励下的响应.....	(179)
第六节	RLC串联电路的零输入响应	(186)
第七节	RLC串联电路在阶跃激励下的响应	(203)
第八节	GCL并联电路分析	(205)
第九节	电路的冲激响应.....	(208)
第十节	电路在任意激励下的响应——卷积积分.....	(218)
	习题四.....	(224)

第五章 正弦稳态电路分析

第一节	正弦量.....	(234)
第二节	正弦量的相量表示与相量法.....	(246)
第三节	基尔霍夫定律的相量形式.....	(258)
第四节	电阻、电容、电感元件电压电流关系的相量形式.....	(262)
第五节	阻抗和导纳.....	(274)
第六节	正弦稳态电路的分析计算.....	(293)
第七节	正弦稳态电路的功率.....	(300)
第八节	三相电路.....	(312)
	习题五.....	(319)

第六章 互感与变压器电路分析

第一节	耦合电感的电压电流关系与同名端.....	(330)
第二节	耦合电感的去耦等效.....	(340)

第三节	空芯变压器电路分析	(347)
第四节	理想变压器	(351)
第五节	一般变压器模型	(362)
	习题六	(370)

第七章 电路的频率特性与双口网络

第一节	网络函数与频率特性	(378)
第二节	RC电路的频率特性	(379)
第三节	RLC串联谐振电路	(386)
第四节	RLC并联谐振电路	(395)
第五节	双口网络	(403)
	习题七	(417)

第八章 傅里叶分析

第一节	周期信号的频谱分析	(421)
第二节	傅里叶变换	(440)
第三节	傅里叶变换的性质	(454)
第四节	周期信号的功率谱与非周期能量信号的 能量谱	(478)
第五节	线性电路的傅里叶分析法及电路无失真传输的 条件	(486)
	习题八	(500)

第九章 拉普拉斯变换分析

第一节	拉普拉斯变换	(508)
第二节	拉普拉斯变换的性质	(516)
第三节	拉普拉斯反变换	(531)
第四节	线性电路的拉氏变换分析法	(544)
	习题九	(560)

第一章 基本概念

第一节 信号和电路

在通信系统、广播、电视或遥控遥测等系统中都进行着信息的传递。信息通常是用语言、文字、图象、数据等形式来表达的。为了便于传输与处理，又往往将它们变换成另一种形式的变化着的物理量如光、声、电等，并把这种表现形式称为信号，例如光信号、声信号、电信号等。因此，信号的变化即表现为物理量的变化，而物理量的变化就传递了一定的信息，只有变化的物理量中才可能含有信息。例如测心电图时的电脉冲的异常是显示心脏某个部位有病变这一信息的一种信号；在飞行控制雷达系统中，雷达天线中所接收到的从前方目标返回的电磁波是使荧光屏显示器出现某个光点来显示前方有目标出现这一信息的一种信号。因此，信号是携带有信息的变化着的物理量。在可以作为信号的多种物理量中，电量是最为常见和应用最为广泛的物理量。这是因为电量容易产生和控制，并且它与非电量间的转换比较容易。上面所述的两个例子中也反映出电量与非电量间的转换情况。目前通信中最常传递的也是电信号，电信号通常是随时间变化的电压或电流，在某些情况下可以是电荷与磁链。通过电信号在信道中的传递来实现信息的传递。下面通过常见的远距离电话通信系统(图1-1-1)为例来说明电信号的传递过程。

图1-1-1发送端讲话人的话音信号(蕴含着所要传递的信息)由话筒变成能在电路上传递的低频电信号，因此称话筒为声电变换

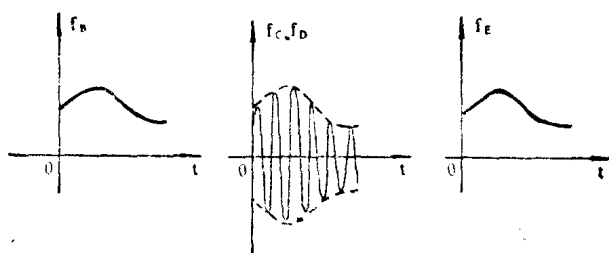
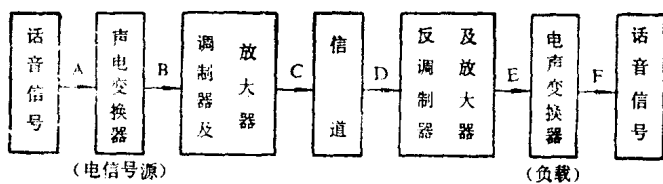
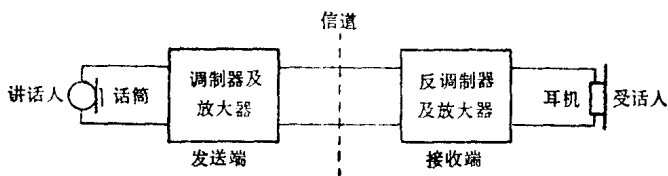


图 1-1-1 远距离电话通信系统

器。为便于远距离传输，要对此低频信号进行处理加工，如调制放大等变成高频载波信号。载波信号通过信道传输进入接收端，通过反调制及放大器处理加工，还原成为低频电信号，再经过耳机这个电声变换器重现原话语音信号，从而完成远距离电话通信的过程。

上述通信系统中的各个部分是由许多具体电路来组成的，例如为实现信号的放大与调制任务的放大电路与调制电路等等。实际电路是由一些电工或电子器件如电阻器、电感器、电容器、变压器、半导体二极管、三极管等等按照一定方式联接所构成的完成一定功能的装置。在通信技术中，电路的主要功能是实现电信号的传递与

处理，其中发出需要传输、处理电信号的器件称为信号源，简称信号源，接收电信号的器件称为负载。无论是通信电路中的信号源，或一般电路中的电源都是变非电能为电能的装置，没有太大本质的区别，且由于课程中讨论的是抽象而非实际的电路，因而常将电源与信号源两个名词交替使用而不作严格区分。此外，对每个局部电路来说，可认为前级电路是后级电路的电源或信号源，后级电路是前级电路的负载。把电源或信号源上的电压或电流称为电路的输入或激励，负载端子上的电压或电流称为电路的输出或响应。

根据电路理论，由给定电路及电路的激励求取电路的响应或分析电路的激励与响应的关系，称为电路分析。

电路的激励和响应的关系可以用数学方程来描述，若描述电路的方程是代数方程或常微分方程，这种电路称为集总参数电路；若描述电路的方程是偏微分方程，这种电路称为分布参数电路；若代数方程或常微分方程是线性的，这种电路称为线性集总参数电路；否则称为非线性集总参数电路；若代数方程或常微分方程的系数不随时间而变，这种电路称为时不变集总参数电路；否则称为时变集总参数电路。本书只讨论线性时不变集总参数电路。

在电路中传递的(电)信号是随时间变化的物理量，因此(电)信号定是时间 t 的函数，绘出的函数图象称为(电)信号的波形。图1-1-2(a)、(b)分别为常见的矩形脉冲信号与周期性锯齿波脉冲信号的波形，它们除了若干个不连续点外，其它时刻都有定义，因此称之为连续时间信号。相反，图(c)所示信号仅在一些离散时刻有定义，因此称为离散时间信号。本书中只讨论连续时间信号。

信号的特性首先表现为它随时间变化的规律，即“时间特性”，比如它出现时间的先后，持续时间的长短、重复周期的大小以及随时间变化的快慢等。另外，信号的特性也可以表现为它的频率成分分布的规律，即“频率特性”，因一般的信号总可以分解为许多不同频率的正弦分量之和，具有一定的频率分量，各频率分量具有一定的相对大小，主要频率分量占有一定的频率范围。不同信号有不同

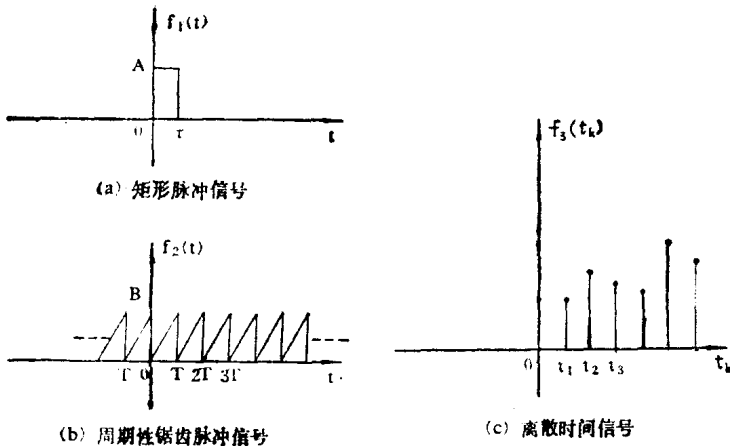


图 1-1-2 几种电信号波形

的时间特性与频率特性，其时间特性与频率特性之间又有着密切的联系。信号分析即分析信号的时(间)域特性与频(率)域特性及其两者之间的内在联系。

前已指出，今后讨论的是抽象而非实际的电路，那么这些电路由什么组成呢？为描述电路各部分传递、处理信号和转换能量的过程需用一组电路变量，这些变量是什么？这些变量间受什么规律所约束？电路中传递、处理的基本电信号又有哪些？这些是电路与信号分析的首要问题，本章下面几节就围绕这几个问题展开讨论。

第二节 电路模型

当电路工作时，各种电路器件所发生的电磁过程相当复杂，如一起考虑，会给电路分析带来困难，甚至变成不可能。因此，必须将构成实际电路的各种电工或电子器件理想化和模型化。理想化就是保留所发生的电磁过程的主要方面而忽略其微不足道的方面；模型化就是用一种抽象的电路元件来表征所发生的某一种电磁过程。被

理想化和模型化后的实际电路称为电路模型。由于每一种电路元件只表征一种电磁过程，具有一定的数学特性，这使电路的激励响应关系可以用数学方程来描述，电路各部分的行为和状态也就不难确定了。

下面就以常用的手电筒电路为例来加以说明。图1-2-1(a)所示为手电筒的实际电路，它是由干电池(电源)、灯泡(负载)、手电筒壳(联接导线)组成。在这个简单的实际电路中所发生的电磁过程也很复杂，如先就灯泡而言，电流流过时除要将电能转化为热能、光能外，还在周围产生磁场、储藏磁场能；灯泡两端有电位差，两端间必存在电场，储藏一定的电场能。如果将这些电磁过程一起考虑，会使得电路的分析复杂化。灯泡工作时，其主要的电磁过程是将电能转换为热能、光能，其储藏电场能、磁场能的过程相对来说弱得很，可以忽略不计。再看电池的主要功能是将化学能转换成电能，对外供出一定的电压，在电路中产生电流，其它电磁过程也可忽略不计。这样，灯泡和电池就分别可用电阻与电压源这两个理想电路元件（参见本章第四节）来模拟表征它们。联接导线的作用只是引导电流通过，其它电磁过程很弱，可不予考虑，因而可用一根理想导线代之。这样一来，实际手电筒电路就可用图1-2-1(b)中所示的电路模型模拟它内部所发生的主要电磁过程。

综上所述，电路模型是由理想电路元件所组成的非实际电路。但模型是在一定条件下建立的，条件变化了，模型就必须作相应的修正，否则模型中的激励响应关系与所模拟的实际电路不再符合，该模型就失效了。如灯泡在通过高频电流时，其中的电感、电容效应不可忽略时，就不能仅用一个电阻元件去模拟它了，否则就不能反映灯泡工作在高频时的主要电磁过程。

当实际电路的几何尺寸与电路工作频率所对应的波长相比要小得多，从而当电路激励变化时，它所产生的电路效应在电路所有部分同时发生，与响应所在位置无关，这类电路就可用有限个理想电路元件模拟的集总参数电路，否则就是要用无限多个理想电路元件

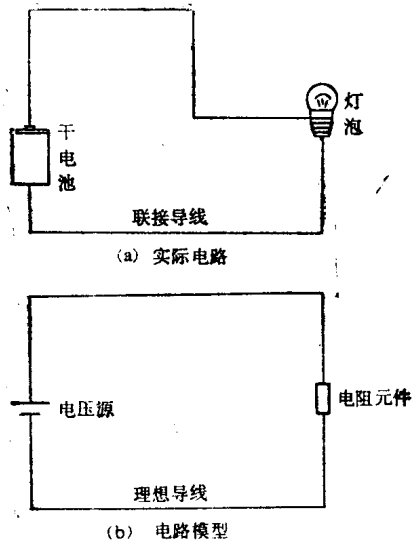


图 1-2-1 手电筒电路

模拟的分布参数电路。

第三节 电路变量

电路变量有电流、电压、电荷、磁链、功率及能量。其中电流、电压和功率是本书中用得较多的三个变量，而电流、电压又是电路分析中最常见的两个基本变量。以上这些变量在物理课程中已有明确定义，本节仅对电流、电压、功率的定义作简要的复习，然后主要讨论电流、电压的参考方向及电路功率的计算。

一、电流

电荷在导体中的定向运动形成电流。电流的大小即电流强度是单位时间里通过导体横截面的电荷量，可简称为电流，用字母 i 表

示, 即为

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

电流的单位为安培(A)。

大小和方向均不随时间而变化的电流称作恒定电流或直流电流, 可用字母*I*表示。

习惯上规定正电荷运动的方向为电流的真实方向。但是导体中正电荷流动的方向有两种可能, 各段电路中正电荷流动的方向又往往难以判断, 当电流实际方向还随时间而变化时, 还有如何表明导体中每一瞬间电流实际方向的问题。基于上述原因, 要引入电流参考方向或正方向的概念。所谓电流的参考方向或正方向即是予先任意假定的电流方向, 在电路中常用一个箭头表示, 如图1-3-1所示。标定了各段电路上电流的参考方向后, 就可以这些参考方向作为分析计算的依据。这时电流已是一个代数量, 若计算结果, 电流*i*为正值, 即 $i > 0$, 表明所标电流的参考方向与实际方向一致; 电流*i*为负值, 即 $i < 0$, 表明所标电流参考方向与真实方向相反。



图 1-3-1 电流的参考方向

电流参考方向除用一箭头表示外, 也可以用双下标表示, 如图1-3-1中电流*i*可表示为*i_{ab}*, 它即表明了该电流*i*的参考方向由*a*指向*b*。

例1-3-1 已知图1-3-1这段电路上的电流为 $i = 4\cos(2\pi t + \frac{\pi}{4})\text{A}$

- (1) 求 $t = 0$ 秒、 0.5 秒时电流*i*的值, 并说明其真实方向。
- (2) 若电流*i*参考方向与图中设定的方向相反, 此时电流*i*的表

达式将是怎样?

解:

(1) $t=0$ 秒时

$$i = 4 \cos \frac{\pi}{4} = 4 \times \frac{\sqrt{2}}{2} = 2.828 \text{ A} > 0$$

$i > 0$, 说明其实际方向与参考方向一致, 即实际方向也由 a 指向 b 。

$t=0.5$ 秒时

$$i = 4 \cos \left(2\pi \times 0.5 + \frac{\pi}{4} \right) = 4 \cos \left(\pi + \frac{\pi}{4} \right) = -2.828 \text{ A} < 0$$

$i < 0$, 说明实际方向与参考方向相反, 即实际方向由 b 指向 a 。

(2) 若电流参考方向与图中设定方向相反, 说明任何瞬间电流值都要在原值的基础上改变符号, 此时电流 i 的表达式应为

$$i = -4 \cos \left(2\pi t + \frac{\pi}{4} \right) \text{ A}$$

二、电压

所谓电压即两点之间的电位差。电路中 a 、 b 两点间的电压, 在数值上是单位正电荷从 a 点移动到 b 点时所获得或失去的能量。电压可用字母 u 表示, 即为

$$u = \frac{dw}{dq} \quad (1-3-2)$$

电压的单位为伏特(V)。

对于大小与方向均不随时间而变化的电压, 称为恒定电压或直流电压, 可用字母 U 表示。

a 、 b 两点间的电压即是 a 、 b 两点间的电位差。若单位正电荷从 a 移到 b 时失去能量, 表明 a 点电位比 b 点电位高, 因而从 a 到 b 的方向是电压的下降方向; 若单位正电荷从 a 移到 b 时获得能量, 表明 a 点电位比 b 点电位低, 因而从 a 到 b 的方向实为电压的升高方向。今后

若无特别说明，所谓电压均是指电压降而不是电压升。和电流一样，电路两点间的电压的实际方向（即高电位指向低电位的方向）有两种可能，因此，为了判断和表明电压的真实方向，也必须利用电压参考方向的概念。电压的参考方向用“+”、“-”极性标注，“+”表示假定的电压高电位端，“-”表示假定的电压低电位端，如图1-3-2所示。因此电压的参考方向又称为电压的参考极性。电压的参考极性可以任意选定，但一经选定，就按此规定的极性作为分析计算的依据。计算结果，若有 $u > 0$ ，表明真实极性与参考极性一致；若有 $u < 0$ ，表明真实极性与参考极性相反。

电压的参考极性也可用双下标表示，如 u_{ab} 即表示电压参考极性为a“+”b“-”。

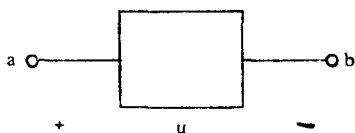


图 1-3-2 电压的参考极性

例1-3-2 图1-3-2所示的这段电路中，

(1)若单位负电荷从a移动到b时，失去能量4焦耳，试说明a-b这段电路上电压的真实极性。

(2)在图中参考方向下，该电压 u 为多少？

解：

(1)单位负电荷从a移到b时失去能量，相当于单位正电荷从b移到a失去能量，故电压的真实极性是b为高电位端，a为低电位端。

(2)现移动单位电荷要失去4焦耳的能量，说明电压大小为4伏，由(1)知，图中电压 u 的参考极性与真实方向相反，因而有

$$u = -4V$$

将电路上的电流、电压的参考方向与电流、电压的代数量相结合，可以清楚地表明每一瞬间电流、电压的实际方向与大小。电路在进行分析计算之前，首先必须标明电流、电压的参考方向。参考

方向可任意选定，但是一旦选定，在电路分析计算过程中不允许再作更动。

在电路分析中，原则上电流与电压的参考方向是可分别独立地任意选定，但是为了分析上的方便起见，电流与电压的参考方向往往选得一致，即电流的参考方向选的是从电压参考极性的“+”极性端流入，如图1-3-3(a)所示。参考方向的这种选择，称作为关联参考方向或一致参考方向。在电流、电压参考方向选择一致的情况下，电路图中往往只要标出其中任一个参考方向即可认为另一个参考方向已确定而可省略不标，如图1-3-3(b)、(c)所示。

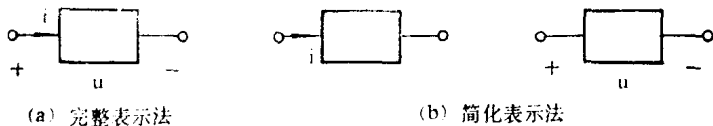


图 1-3-3 关联参考方向

三、功率

单位时间里一段电路所吸收的能量，称作该段电路吸收的电功率，简称功率，可用字母 p 表示，

即

$$p = \frac{dw}{dt} \quad (1-3-3)$$

功率的单位为瓦特(W)。

电路吸收的功率可用电压与电流表示。如一段电路上有图1-3-3(a)中所示电压、电流参考方向时，则有

$$p = \frac{dw}{dt} = \frac{uw}{dq} \cdot \frac{dq}{dt} = u \cdot i \quad (1-3-4)$$

在直流情况下有

$$P = UI \quad (1-3-5)$$

这说明，在一段电路上，若电压与电流采用关联参考方向时，该段电路吸收的功率可用电压与电流的乘积来计算。因电流、电压都是