信号分析与处理

高等学校试用教材

芮坤生　主编

SIGNAL ANALYSIS AND PROCESSING

高等教育出版社

高等学校试用教材

信号分析与处理

芮坤生 主编

高等教育出版社

(京)112号

内容提要

本书是为适应非无线电类专业教学需要而编写的，已列入国家教委高等学校工科基础课“八五”教材规划，包括信号与系统的主要内容和信号处理的基本内容。取材适当、论述简明，离散与连续时间分析平行叙述。全书共分六章：信号与系统、线性时不变系统的时域分析、傅里叶分析——连续时间信号与系统、傅里叶分析——离散时间信号与系统、拉普拉斯变换与 z 变换、模拟与数字滤波，配有例题习题。

本书可供电子、电力及非电类专业使用，也可供有关科技人员作为学习信号分析与处理的入门教材使用。

高等学校试用教材
信号分析与处理
芮坤生　主编
*
高等教育出版社出版
新华书店总店科技发行所发行
中国科学院印刷厂印装
*
开本 850×1168　1/32　印张 13.875　字数 360 000
1993年10月第1版　1993年10月第1次印刷
印数 0001—2 786
ISBN 7-04-004440-4/TM·226
定价　5.35　元

前　言

随着科学技术特别是微电子与计算机技术的不断发展，电子技术已渗透到各个领域中．在高等学校中不仅无线电技术专业需要信号分析与处理的知识，电子类、电力类以及一些非电专业也迫切要求学习这方面的知识．某些高等学校的非无线电技术类专业已经开设了这方面的课程，但缺乏适用的教材；另外，有的专业需要信号分析课程少学时的教材，为此，1991 年 5 月在无锡召开的国家教委电工教学指导委员会电路理论与信号分析小组会议上，一致同意将编写《信号分析与处理》列入国家教委高等学校工科基础课"八、五"教材规划，以满足广大学习者的需要．

回顾这一课程的沿革，60 年代无线电技术基础课程中仅讲连续时间信号与系统的内容，70 年代末设立了信号与系统课程，加入离散时间信号与系统．现在已是连续时间和离散时间信号与系统并重．我们编写的教材是将连续和离散时间信号与系统放在一起平行叙述．这种方法不仅在数学分析上是可取的，而且可以利用连续和离散时间信号与系统之间的共同点来分享各自获得的概念和观点，同时又注意它们之间的差异，以加深对内容的理解．在时域中用微分和差分方程，卷积积分及卷积和对连续和离散时间信号与系统进行分析，变换域中的分析也是如此．将连续和离散的傅里叶变换扩展为拉普拉斯变换和 z 变换，并放在一章中阐述，以便对比．在连续和离散系统中，用抽样定理作为连续时间与离散时间的桥梁，以连续时间的复频域（s 平面）与离散时间复频域（z 平面）之间的变换来沟通它们的联系．

在信号处理方面论述快速傅里叶变换及数字滤波器二个方面，从离散傅里叶变换（DFT）到快速傅里叶变换（FFT），从模拟滤波器到数字滤波器．

本教材共分六章，第一章讨论了信号自变量的某些变换，两种

基本类型的信号，系统的概念尤其是线性时不变系统的特点，进而介绍对求解响应极有用的增量线性系统。第二章是对线性时不变(LTI)系统的时域分析，在上述线性时不变性的基础上，结合单位脉冲序列的移位性质，以建立离散时间 LTI 系统的卷积和表示，连续时间 LTI 系统的卷积积分表示，然后转到线性常系数微分和差分方程求响应的问题，以及这两种方程的方框图表示，认识到这些方程是相加器、系数相乘器和延时器(离散时间)或积分器(连续时间)等基本单元所组成。最后进一步讨论奇异函数在描述和分析连续时间 LTI 系统的作用，特别强调在卷积意义下定义并解释信号。第三章完整地建立了连续时间信号与系统的傅里叶分析方法。第四章是以平行的方式来讨论离散时间信号与系统的情况。在这两章中先介绍对傅里叶分析的某些数学方面的理解及这种分析在信号与系统的研究中所起的作用。这类分析特别强调：相当广泛的一类信号都可以表示成复指数信号的加权和或加权积分；LTI 系统对一个复指数信号的响应就是同一复指数输入信号乘以该系统的系统函数值。为此每一章首先导出周期信号的傅里叶级数表示，然后在周期信号的周期趋于无穷大时求其傅里叶级数的极限即可导出非周期信号的傅里叶变换，这说明傅里叶级数和傅里叶变换的密切关系。在讨论它们的性质时，特别突出卷积及调制的性质，这是讨论滤波、调制和抽样等问题的基础。由于这两章平行处理的方法，在第四章末着重突出连续和离散时间傅里叶表示法对称的性质，在分析时也对比两者不同点来加深对各自性质的认识。例如离散时间中傅里叶级数是一有限级数，离散时间系统的频谱都是周期的等等，利用这一特性引出离散傅里叶变换(DFT)，然后叙述其性质，运用快速傅里叶变换(FFT)的方法，提高运算的速度。这两章的最后都是用变换法来分析由微分和差分方程表征的 LTI 系统，采用部分分式法很易求得由微分和差分方程描述的 LTI 系统的响应。另外研究了典型的一阶和二阶系统，作为系统的基本构造单元；对于较繁的系统运用波特图来求

出它们的幅频和相频响应.第五章讨论拉普拉斯变换和 z 变换.着重讨论两种变换的单边变换及其在非零初始条件下求解微分和差分方程中的应用. 在说明这两种变换时, 均从连续时间或离散时间的傅里叶变换扩展而成,又从因果条件考虑成为单边的.本章还讲述它们的有理函数变换式与零极点概念, 利用部分分式展开求反变换, 根据零极图来对系统函数和频率响应作几何求值以及变换的性质等等, 另外本章还分别利用这两种变换对 LTI 系统的系统函数性质和应用进行了讨论, 其中包括由微分和差分方程确定系统函数, 最后介绍了把一个有理函数的连续系统映射到有理系统函数的离散时间系统的变换方法. 第六章开始对信号处理作一概要的叙述,然后对模拟滤波器如巴特沃思, 切比雪夫,椭圆滤波器;数字滤波器中无限冲激响应 (IIR) 及有限冲激响应 (FIR) 滤波器在设计的定性和定量问题作了研究. 关于快速傅里叶变换及滤波器等内容对于不单独开设信号处理方面课程的学习者来说无疑是十分有用的.

本教材是考虑到学生已学过高等数学微分方程及电路的基础上编写的, 所以这方面的求解就不详细叙述. 使用本书可按每周 4 学时,每学期 18 周来安排,计 72 学时, 讲课大致为 60 学时, 习题、实验为 12 学时.

各章讲课参考时数

章　次	讲课学时数
第一章	4
第二章	8
第三章	14
第四章	10
第五章	14
第六章	10

如有的专业只需要信号分析的内容,可按每周 3 学时,每学期

18周安排，计54学时，可将§4-7及§4-8（4学时）及第六章（10学时）删去，则讲课为46学时，习题、实验为8学时。本书是为适应教改需要而编写的，是一种尝试，没有统一的教学大纲或基本要求，各个专业可根据不同要求对本书内容加以选用或补充。

1992年6月下旬在合肥工业大学召开本教材的审稿会，由国家教委电工课程教学指导委员会主任兼电路理论与信号分析指导小组组长、东南大学管致中教授主持，清华大学郑君里教授主审，西安电子科技大学吴大正教授，大连理工大学万金良副教授，东南大学夏恭恪副教授等参加会议，对本书提出了许多宝贵意见，特向他们表示衷心的感谢！

本书第一至五章由芮坤生编写，第四章§4-7及§4-8与第六章由潘孟贤编写，各章习题由丁志中选编；本书初稿承合肥工业大学计算机与信息系计算机房芮雪等帮助打印，使书稿得以顺利完成。

编者水平所限，书中定有错误和不妥之处，恳请读者批评指正。

编　者

1992年10月于合肥工业大学计算机与信息系

目　录

第一章　信号与系统

§1-1　信　　号

广义地说，一切运动或者状态的变化都是一种信号．通常把语言、文字、图象或数据等统称为蕴涵着消息的信号，将受信者从消息中获得的新知识称为信息．信号则是消息的表现形式或运载工具，即消息蕴涵于信号之中．一般而言，信息是指从客观世界获得的新知识或者对客观事物发出的新要求，所以信息、消息和信号三者既有密切的联系又有区别．信号的具体形式是某种物理量，如光信号、电信号、声信号等．所谓电信号，就是随时间变化的电压和电流，也可以是电荷或磁通以及电磁波等．

描述信号的基本方法是写出它的数学表达式，一般是时间的（或空间的）函数，习惯上认为信号与函数两种术语具有相同的含义．信号的几何图像称为波形，例如电压和电流的波形分别用 $u(t)$ 和 $i(t)$ 表示．有些物理量不用时间作自变量，如气象工作者研究湿度或温度对于高度的变化；地质学者关心的是地层密度与地球表面下深度的关系．信号可按其波形分为连续信号和离散

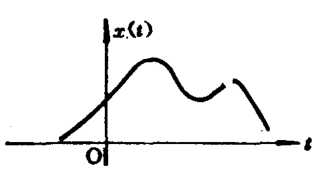

图 (1-1)

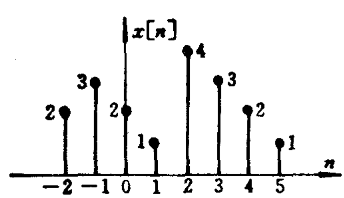

图 (1-2)

（或抽样）信号．图(1-1)为连续信号 $x(t)$ 的波形，它对应于连续变量 t 的所有值．图(1-2)为离散信号 $x[n]$ 的波形，它对应于

离散变量 n 的值，且 n 仅取整数．本书将连续信号用符号 $x(\cdot)$ 表示，离散信号用 $x[\cdot]$ 表示．

为便于分析与处理，有时需要对信号的自变量进行变换．常用的变换为时间的反转、尺度变换以及移位变换．

第一种自变量的变换是反转变换．它是在 $x[n]$ 中以 $-n$ 代替 n 而得到 $x[-n]$，即原信号 $x[n]$ 以 $n=0$ 为轴反转而成 $x[-n]$，如图(1-3)所示．类似地，图(1-4)中 $x(-t)$ 系 $x(t)$ 以 $t=0$ 为轴反转而成．如果 $x(t)$ 代表一录制在磁带上的声音信号，那么 $x(-t)$ 是从后向前倒放的磁带声音信号．

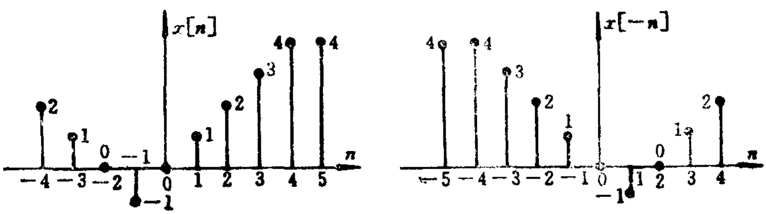

图 (1-3)

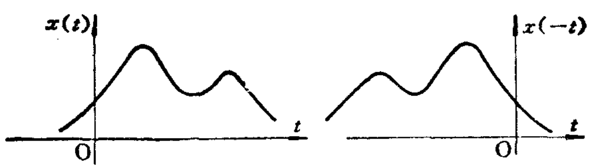

图 (1-4)

第二种自变量的变换是线性尺度变换。图(1-5)示出 $x(t)$、$x(2t)$ 和 $x\left(\frac{t}{2}\right)$ 三个信号，如 $x(t)$ 仍代表一盘录音磁带上的信号，那么 $x(2t)$ 是这盘磁带以两倍速度放音的结果；而 $x\left(\frac{t}{2}\right)$ 则将原磁带放音速度降低一半．对于离散信号尺度变换的概念不易阐述，故略去这方面的论述．

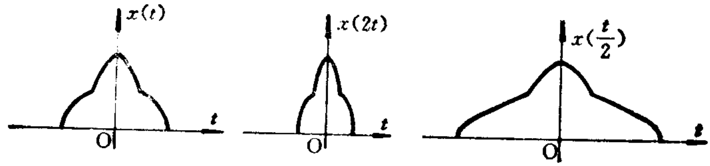

图 (1-5)

第三种自变量变换是移位变换，信号 $x(t)$ 和 $x(t-t_0)$ 的图形完全一样，将 $x(t)$ 中的 t 右移(延时) t_0 即得 $x(t-t_0)$ 如图(1-6a). 类似地 $x[n+n_0]$ 可由 $x[n]$ 中的 n 左移 n_0 得到，如图 (1-6b) 所示 ($n_0=2$).

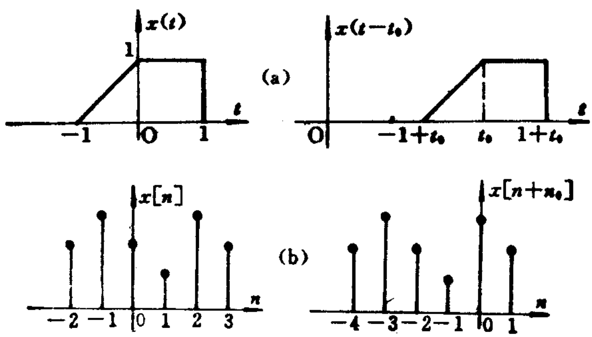

图 (1-6)

例 1-1 一连续时间信号 $x(t)$ 与一离散时间信号 $x[n]$ 示于图(1-7)中. 从 $x(t)$ 画出 $x(t-2)$, $x(1-t)$ 及 $x(2t+1)$; 从 $x[n]$ 画出 $x[n+3]$ 及 $x[2-n]$.

解 $x(t-2)$ 形同 $x(t)$，但向右移 2 秒 (当 $t-2=0$ 即

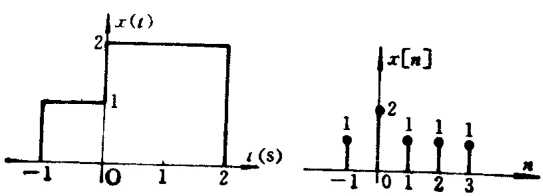

图 (1-7)

$t=2$ 时,它具有 $x(0)$ 的值),示于图 (1-8a)。

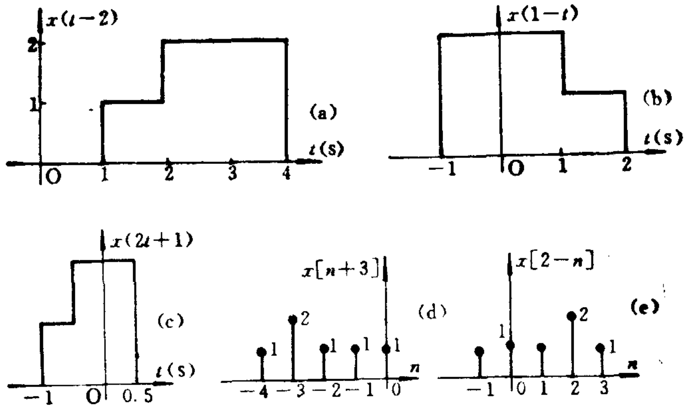

图 (1-8)

$x(1-t)$ 需移位及反转. 当 $1-t=0$ 即 $t=1$, $x(0)$ 的值出现,它示于图 (1-8b). 作图时可先左移 1 秒再反转, 也可将 $x(t)$ 反转再右移 1 秒,结果相同.

$x(2t+1)$ 需移位及尺度变换. 当 $2t+1=0$ 或 $t=-0.5$ 时出现 $x(0)$ 值,压缩因子为 2,如图 (1-8c) 所示. 作图时先左移 1 秒,然后压缩一半.

$x[n+3]$ 的波形如同 $x[n]$, 但左移 3 个抽样间隔. 当 $n=-3$ 时,它有 $x[0]$ 的值,如图 (1-8d) 所示.

$x[2-n]$ 需移位及反转. 当 $n=2$ 时,它有 $x[0]$ 的值, 如图(1-8e) 所示. 可先左移 2 个抽样间隔,然后反转.

例 1-2 已知 $x_0(t)$ 的波形如图 (1-9a), $x(t)$ 的波形如图 (1-9b) 所示. 试根据 $x(t)$ 的图形写出与 $x_0(t)$ 有关的函数式。

解

$$x(t)=x_0(-t-1)+2x_0(-t)+x_0(-t+1)$$

一个信号 $x(t)$ 或 $x[n]$,如将其反转后不变,即

$$x(-t)=x(t) \tag{1-1a}$$

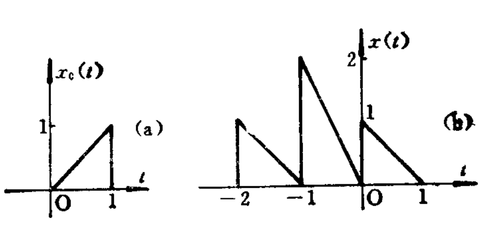

图 (1-9)

$$x[-n] = x[n] \tag{1-1b}$$

则该信号称为偶信号，符合纵轴对称的情况.

一个信号 $x(t)$ 或 $x[n]$，如满足

$$x(-t) = -x(t) \tag{1-2a}$$

$$x[-n] = -x[n] \tag{1-2b}$$

则该信号称为奇信号，符合原点对称的情况. 在 $t=0$ 或 $n=0$ 处，奇信号必须为零.

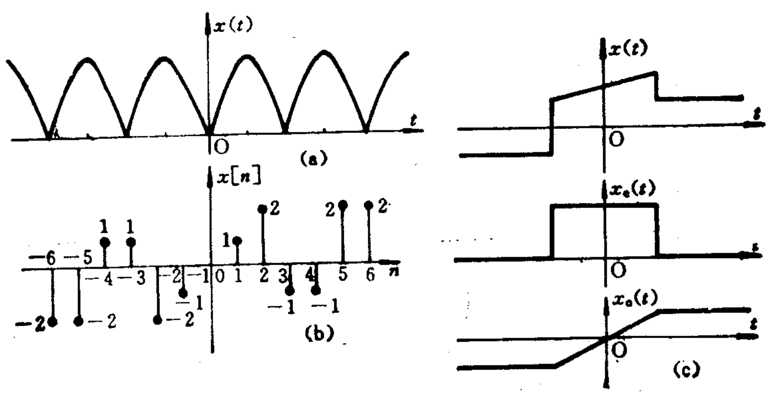

图 (1-10)

任何信号可分解为一偶信号(偶函数) $x_e(t)$ 与奇信号(奇函数) $x_o(t)$ 之和，即

$$x(t) = x_e(t) + x_o(t) \tag{1-3}$$

如有一连续信号 $x(t)$，则其偶部 $x_e(t)$ 为

$$x_e(t) = \frac{1}{2}\{x(t) + x(-t)\} \tag{1-4a}$$

其奇部为

$$x_o(t) = \frac{1}{2}\{x(t) - x(-t)\} \tag{1-4b}$$

这一分解也适用于离散信号，即

$$x[n] = x_e[n] + x_o[n] \tag{1-5}$$

其中

$$x_e[n] = \frac{1}{2}\{x[n] + x[-n]\} \tag{1-6a}$$

$$x_o[n] = \frac{1}{2}\{x[n] - x[-n]\} \tag{1-6b}$$

图（1-10a）所示连续时间信号为偶函数；图（1-10b）所示离散时间信号为奇函数；图（1-10c）为一连续时间信号分解为偶部及奇部的图形.

§1-2　阶跃、冲激与斜变信号

信号的种类很多，其中阶跃及冲激函数的连续与离散形式是所有基本信号中最重要的，斜变函数较为次要，但它与阶跃及冲激函数有密切的关系，故亦将述及.

连续单位阶跃函数 $\varepsilon(t)$（有些书籍及文献用 $U(t)$ 表示）定义为

$$\varepsilon(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ 1 & t > 0 \end{cases} \tag{1-7a}$$

如图（1-11a）所示.

离散单位阶跃函数 $\varepsilon[n]$ 定义为

$$\varepsilon[n] = \begin{cases} 0 & n < 0 \\ 1 & n \geqslant 0 \end{cases} \tag{1-7b}$$

它示于图（1-11b）中.

$\varepsilon(t)$ 在 $t=0$ 时为不定值，在此瞬间它从 0 突变到 1，因此

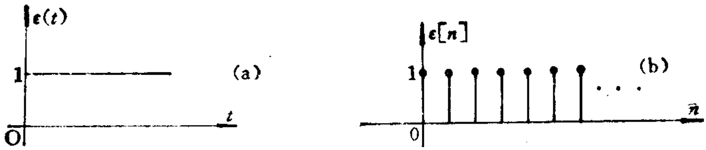

图 (1-11)

在 $t=0$ 时，$\varepsilon(t)$ 是不连续的．而当 $n=0$ 时，$\varepsilon[n]$ 有确定值为 1．阶跃函数经常出现，通常用作研究系统特性的测试信号．直流电路中开关的开闭可给出电压或电流的阶跃函数，如图(1-12)．若开关 S_1 在 $t=0$ 时从 b 点推向 a 点而闭合，一阶跃电压加至电路 1；若 S_2 在 $t=0$ 时打开，一阶跃电流加至电路 2．加在电路上的电压或电流不一定是单位阶跃，而是具有幅度 E 伏或 I 安的阶跃函数，因此这些电压或电流可写成 $E\varepsilon(t)$ 或 $I\varepsilon(t)$．

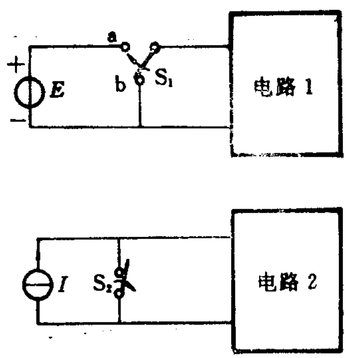

图 (1-12)

由于 $\varepsilon(t)$ 在 $t>0$ 时才有值为 1，故表示某一函数在 $t>0$ 的情况，可将函数乘以 $\varepsilon(t)$．

一个基本的较单位阶跃更重要的信号是单位冲激函数 $\delta(t)$，它可定义为 $\varepsilon(t)$ 的微分，即

$$\delta(t)=\frac{d\varepsilon(t)}{dt} \tag{1-8}$$

这方程的给出存在一些困难，因为 $\varepsilon(t)$ 在 $t=0$ 是不连续的，从严格的普通函数来定义这将是不可微分的．然而，可把 $\varepsilon(t)$ 表示为某一近似的连续函数 $\varepsilon\Delta(t)$，如图(1-13)所示，当 $\Delta\to 0$ 时由其极限即可得到 $\varepsilon(t)$．因此也可用极限的观点按式(1-8)来定义 $\delta_\Delta(t)$．