孙希纯 陈良璋 编

邮电高等函授教材

信号与线性系统

人民邮电出版社

邮电高等函授教材

信号与线性系统

孙希纯
陈良璋 编

人民邮电出版社

内 容 提 要

本书重点研究信号与线性系统的基本概念、信号的频谱分析以及在连续时间信号和离散时间信号激励下，确定线性、时不变系统响应的各种分析方法。全书共分七章，一至四章讨论连续时间系统的时域分析、频谱分析与S域分析；五、六两章讨论离散时间系统的差分方程求解和z变换；第七章介绍状态变量分析法。

本书有较多的例题与习题，书末附有习题答案，便于自学。

本书为邮电高等函授电信各专业的教学用书，也可供电视大学、业余大学的师生和相关的工程技术人员参考。

邮电高等函授教材

信 号 与 线 性 系 统

孙希纯　陈良璋　编

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　　1987年11月第一版
印张：22 24/32　页数：364　1987年11月河北第1次印刷
字数：606千字　　印数：1—8 000 册
ISBN7115-03498-2/Z
定价：3.75元

前　言

本书是根据1983年邮电部制定的邮电高等函授《信号与线性系统》教学大纲编写的，是邮电高等函授电信各专业的教学用书，也可供同类各专业在职人员参考或作为自学用书。

本书主要介绍有关信号与系统的基本概念与基本理论；讨论线性、时不变系统在连续时间信号与离散时间信号激励下，确定系统响应的各种方法以及研究信号的频谱结构等方面的问题。

本课程是一门比较重要的技术基础课，在学习本课程时，不仅应熟练掌握有关电路理论各方面的知识，同时也必须具有相应的数学基础（如微分方程、级数以及复变函数等）。在涉及这些内容时，本书将直接引用而不再进行讨论。

本书在分析方法上是以系统所具有的特性为出发点来研究激励与响应间的联系，而不再从确定电路中的电流与电压的角度来讨论问题。

本书共分七章，第三、四两章由南京邮电学院函授部陈良璋编写，其余部分由北京邮电学院函授分院孙希纯编写。在教材编审组讨论并经编写者修改后，由孙希纯对全书进行统编。参加审订本教材的有长春邮电学院函授部刘金芝，西安邮电学院函授部鲁嘉键、高丽，天津电信局何寅生，北京邮电学院函授分院郑秀珍等。

限于编写者水平，本书的不妥之处，希广大函授师生及各方面的读者提出修改意见，以便再版时更正。

编者

1986年8月

目　录

第一章

绪 论

本章是《信号与线性系统》这门课程的前言部分。在这一章里，我们将要讨论学习本门课程必须具备的有关信号与系统的预备知识；介绍《信号与线性系统》课将要研究的主要问题，同时还将对研究这些问题时所采用的方法作简要的说明。

在学完本章以后，应当对什么是信号和系统有比较清楚的认识，对本门课程所要研究的问题有一般的了解，对本章所介绍的各种分析方法建立起初步的概念。

§1-1 信号的分类

随着社会的发展，人们的生活内容日益丰富多样，彼此间的交往也变得更加频繁和复杂。情况的交流和信息的传递已成为不可缺少的社会活动的一部分。在这种情况下，原始的通信手段（如通过声响、火光来传递信息等）已经远远不能满足人们现实生活中的需要。在科学技术飞速发展的今天，现代化的通信方式正在蓬勃发展，它们已经和即将圆满地解决既快速准确，又方便易行地进行远距离传递信息等几个方面的问题。

由于“电”存在着十分明显的特性，所以它在人们的日常生活中起着十分突出的作用，在通信技术方面也是如此。可以这样说，正是由于有了“电”，现代化的通信方式才能得以顺利实现。

“电”是怎样被用来完成传递信息任务的呢？简单地说，人们是利用变化的电流和电压来进行信息传递的。这个能将信息传递到

远方去的按一定规律变化的电流和电压称为电信号（其它还有光信号、声信号等等），本课程中简称为信号。

从描述信号变化规律的图形来看，信号是各式各样的。根据不同的分类原则，可将信号分为许多类，如规则信号与不规则信号；周期信号与非周期信号；连续时间信号与离散时间信号等。下面分别对这些信号作一些说明。

信号根据它在变化时是否具有一定的规律性，可分为规则信号与不规则信号两大类。顾名思义，规则信号是指按一定规律而变化的信号。这就是说，信号的变化规律可以用一个时间函数$f(t)$表示出来。

例如用：

$$f(t)=\begin{cases}\dfrac{A}{t_0}(t+t_0) & (-t_0<t<0)\\ -\dfrac{A}{t_0}(t-t_0) & (0<t<t_0)\end{cases}$$

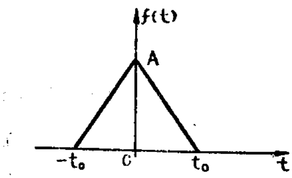

图 1-1 规则信号的图形

表示的信号就是一个规则信号。根据这个时间函数可以作出如图1-1所示的信号图形。可以想象，任何一个规则信号的图形都必定具有一定的形状，而只有这样，才能用解析式的形式将它表示出来。

反之，如果不能用一个确定的时间函数将某信号表示出来，显然它的图形的形状也必定是不规则的，这类信号称为不规则信号。

规则信号与不规则信号又分别称为确知信号与随机信号。本课程只限于规则信号的讨论。

正是由于我们只研究规则信号，即只研究可以用一个时间函数表示的信号，而信号通常又总是变化的电流与电压，所以为叙述上的方便，在本课程的所有章节里，我们将信号、函数、电流与电压看作是具有相同含义的术语而不再加以区别。

规则信号，根据它在变化时是否具有重复性又可分为周期信号与非周期信号。在《电路分析基础》课中，已经对什么是周期信号和非周期信号进行过讨论。为便于对比，这里再简要地回顾一下这部分内容，同时作一些补充说明。

某信号$f(t)$如果在$-\infty<t<\infty$时间范围内满足

$$f(t)=f(t\pm kT) \tag{1-1}$$

所规定的条件，这个信号就称为周期信号。式中：$k=0$，1，2，3，……。T是信号的周期。通常用符号$f_T(t)$表示以T为周期而变化的信号。图1-2所示的$f_T(t)$和$y_T(t)$就是周期信号的例子。

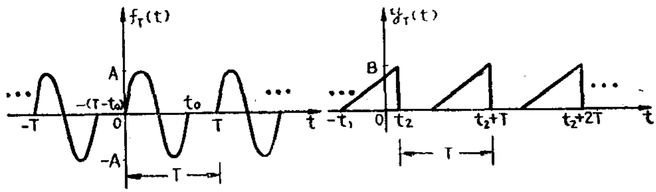

图 1-2 周期信号的图形

应当注意，周期信号的重要特点是，它在$-\infty<t<\infty$范围内始终作周期性变化。这个既不存在时间起点，也没有终了时间的“无头无尾”的信号通常称为无时限信号。

图1-3所示信号$f(t)$和$y(t)$只存在于$t>0$和$t>-t_1$时间范围内，相对图1-2的$f_T(t)$和$y_T(t)$而言，犹如分别去掉了$t<0$和$t<-t_1$的部分，这不符合于在$-\infty<t<\infty$范围内作周而复始变化的条件，这类信号称为非周期信号。

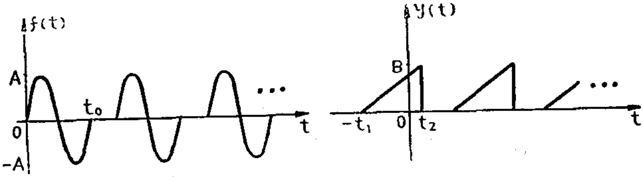

图 1-3 非周期信号的图形

设想图1-2中的信号$f_T(t)$和$y_T(t)$的周期$T\to\infty$，显然它们的图形将变成如图1-4所示的$f_0(t)$与$y_0(t)$。这种只存在于一段极短

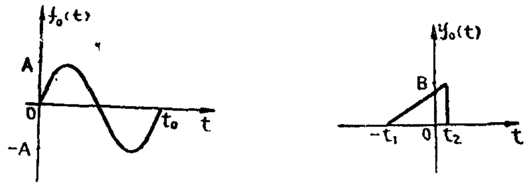

图 1-4 脉冲信号的图形

时间范围内的可以认为是由周期信号在周期$T\to\infty$时而衍生出来的信号，是脉冲信号中最为常见的一种，也是本门课程用得较多的一种信号（它们当然也是非周期信号）。有时也根据它们的图形而称为正弦脉冲与锯齿形脉冲。

信号还可以根据它在变化时，其时间值是否为连续的而分为连续时间信号与离散时间信号两大类。

除个数有限的不连续点外，图1-5(a)所示的$f_1(t)$，对任何一个给定的时间值t都有一个确切的函数值（亦称幅值）与之相对应，这类信号称为模拟信号。除不连续点外，模拟信号的图形都是平滑曲线，或由平滑曲线所组成。

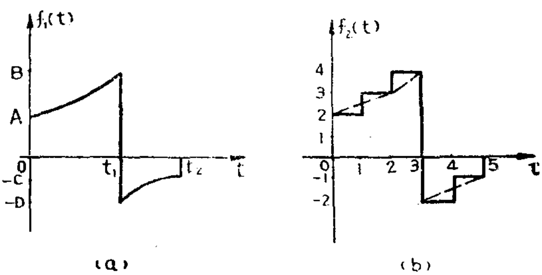

图 1-5 模拟信号与量化信号的图形

除模拟信号外，还有一类信号称为量化信号，这类信号的特点是，它的幅值经过了“量化”，即在时间上仍是连续的，但幅值却被限制在几个特定值上。电报信号就是量化信号的典型例子。量化信号的图形如图1-5(b)所示。

模拟信号与量化信号统称为连续时间信号，简称为连续信号。

下面再对连续信号作一些补充说明。

连续信号是允许有不连续点（即间断点）存在的，但其个数只能是有限的（对周期信号而言，则是一个周期内个数有限）。在间断点t_0处，信号的函数值认为是t_{0-}与t_{0+}处函数值的平均值。例如在图1-5(a)所示信号中，有

$$f_1(0)=\frac{1}{2}[f_1(0_+)+f_1(0_-)]=\frac{1}{2}(A+0)$$

而

$$f_1(t_1)=\frac{1}{2}[f_1(t_{1+})+f_1(t_{1-})]=\frac{1}{2}(B-D)$$

和

$$f_1(t_2)=\frac{1}{2}[f_1(t_{2+})+f_1(t_{2-})]=\frac{1}{2}(0-C)$$

在间断点t_0处，信号如果发生了跳变，我们称$f(t_{0+})-f(t_{0-})$为信号在$t=t_0$瞬间的跳变值。例如图1-5(a)所示信号在$t=0$、$t=t_1$和$t=t_2$瞬间的跳变值分别为：A、$-(B+D)$和C。

如果信号只在某些不连续的瞬间才有确定的函数值，而在其它所有瞬间，信号并不存在，那么这个信号就称为离散时间信号，简称离散信号。幅值经过量化的离散信号称为数字信号。它们的图形分别如图1-6(a)和(b)所示。

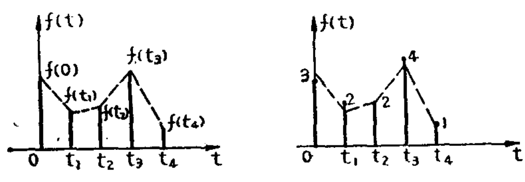

图 1-6　离散信号与数字信号的图形

由于离散信号只在一些不连续瞬间才存在（例如图1-6所示信号只有当$t=0$、t_1、t_2…时才存在），所以用来描述信号的时间函数$f(t)$中的变量t只能是一些不连续的值（如上述的$t=0$、t_1、

$t_2\cdots$），而不能为其它值，所以符号$f(t)$必须加以修正才能确切地表示离散信号。关于这个问题将在第五章进行深入地讨论，这里仍简单地在图形的坐标上记以$f(t)$和t。

我们不仅重点研究连续信号，同时还以两章的篇幅对离散信号进行讨论。

除以上所介绍的三种分类原则外，信号还可根据其它分类原则分为：能量信号与功率信号以及控制信号与调制信号等。这些都将在适当的章节内加以介绍，这里不再一一列举。

练习题与思考题：

1. 举一两个说明什么是信号的实际例子。

2. 举几个不同图形的周期信号、非周期信号和脉冲信号的例子。

3. 将图1-7所示信号用函数式表示出来，即写出它们的表示式（解析式）。

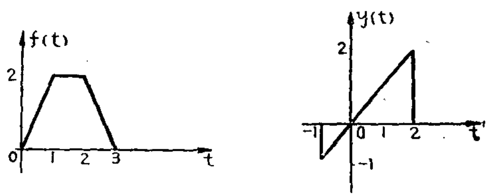

图 1-7 练习题与思考题图

§1-2 常见的连续信号

所谓常见信号，是指在本门课程的学习过程中经常用到的信号。这些信号的图形和表示这些信号的时间函数$f(t)$都十分简洁。用这些信号还可组成一些比较复杂的信号。常见信号亦称单元信号、基本信号或常用信号。这一节仅介绍常见的连续信号，关于离

散信号将在第五章内介绍。

在《电路分析基础》课里曾经介绍过的直流信号、正弦信号和阶跃信号都是本课程的常见信号。为便于今后的学习，这一节除再介绍几种其它常见信号外，还将对这些已经介绍过的信号进行简要的说明，并作些必要的补充。

常见信号有以下几种。

一、直流信号

某信号$f(t)$如果满足

$$f(t)=A \qquad (-\infty<t<\infty) \qquad (1\text{-}2)$$

所规定的条件，这个信号就称为直流信号（式中A为任意常数）。直流信号的特点是，在$-\infty<t<\infty$时间范围内，信号的函数值始终保持恒定而不发生任何变化。

直流信号的图形如图1-8所示。

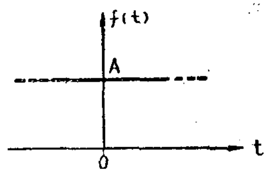

图 1-8 直流信号的图形

二、正弦信号

某信号$f(t)$如果满足

$$f(t)=A_0\cos(\omega_0 t+\psi_0) \qquad (-\infty<t<\infty) \qquad (1\text{-}3)$$

所规定的条件，这个信号就称为正弦信号（式中A_0、ω_0和ψ_0分别称为正弦信号的振幅、角频率和初相位）。正弦信号的特点是，在$-\infty<t<\infty$时间内按正弦规律变化。

式(1-3)所示的正弦信号的图形如图1-9所示。图中的T_0为正弦信号的周期，它与角频率ω_0间的关系为：

$$T_0=\frac{2\pi}{\omega_0} \qquad (1\text{-}4)$$

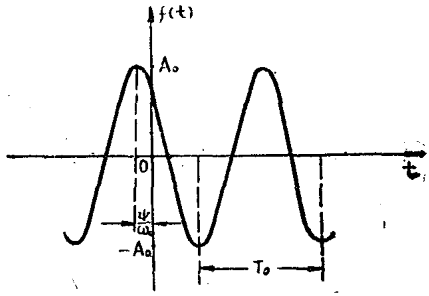

图 1-9　正弦信号的图形

三、阶跃信号

某信号$f(t)$如果满足

$$f(t)=\begin{cases} A & (t>0) \\ 0 & (t<0) \end{cases} \tag{1-5}$$

所规定的条件，这个信号就称为阶跃信号，式中A为一常数。如果$A=1$，则称为单位阶跃信号，它的代表符号为$U(t)$。即单位阶跃信号的定义式可记作：

$$U(t)=\begin{cases} 1 & (t>0) \\ 0 & (t<0) \end{cases} \tag{1-6}$$

引用符号$U(t)$后，式(1-5)所表示的阶跃信号可以记作

$$f(t)=AU(t) \tag{1-7}$$

式(1-6)和式(1-7)所示信号的图形如图1-10所示。

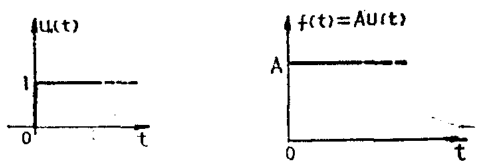

图 1-10　阶跃信号的图形

如果信号的时间起点不是$t=0$，如图1-11所示的两信号分别起自$t=-t_1$和$t=t_2$瞬间，它们的解析式则应记作：

$$f_1(t)=\begin{cases}1 & t>-t_1\\0 & t<-t_1\end{cases}$$

和

$$f_2(t)=\begin{cases}1 & t>t_2\\0 & t<t_2\end{cases}$$

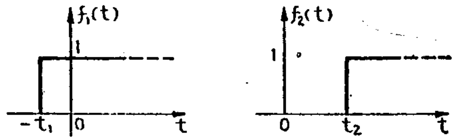

图 1-11　其它形式的阶跃信号

仿效阶跃信号的符号$U(t)$的用法，它们又可记作：

$$f_1(t)=U(t+t_1)$$

$$f_2(t)=U(t-t_2)$$

相对$U(t)$而言，这两个信号称为$U(t)$的时移信号。关于时移的概念将在下一节详细介绍。

最后再对阶跃信号作一点补充说明。

在式(1-6)中，信号没有表示出 $t=0$ 时的函数值，这是由于在通常的情况下，信号$U(t)$在 $t=0$ 瞬间的函数值往往是无关紧要的，因而可以不予考虑。在需要考虑的情况下，可以用$U(t)$在$t=0_+$和 $t=0_-$ 瞬间的平均值：$\frac{1}{2}[U(0_+)+U(0_-)]=\frac{1}{2}$来表示，即在这种情况下单位阶跃信号$U(t)$的定义式应记作：

$$U(t)=\begin{cases}1 & (t>0)\\ \frac{1}{2} & (t=0)\\ 0 & (t<0)\end{cases} \tag{1-8}$$

阶跃信号的应用十分广泛，是电路分析与系统理论中非常重要的信号。它可以用来说明某信号的存在时间范围，例如

$$f_1(t)=\sin t\cdot U(t)$$

表示正弦信号$\sin t$只存在于 $t>0$ 的一段时间范围内，而信号

$$f_2(t)=\sin(t)[U(t+\pi)-U(t-\pi)]$$

则表示正弦信号 $\sin t$ 仅存在于$-\pi < t < \pi$ 的一段时间范围内。这种在一个式子里既说明了信号的变化规律，又说明了信号的存在时间范围的表示形式有时要比用

$$f_1(t)=\sin t \qquad (t>0)$$

和

$$f_2(t)=\sin t \qquad (-\pi<t<\pi)$$

方便。这里顺便指出，有的课本是用符号$u(t)$表示单位阶跃信号的（本书用的是符号$U(t)$）。

阶跃信号还可以用来组成比较复杂的信号。门信号就是由阶跃信号组成的一个比较有用的信号。典型的门信号如图 1-12(a)所示，它的表示式为：

$$f(t)=U(t)-U(t-t_0)$$

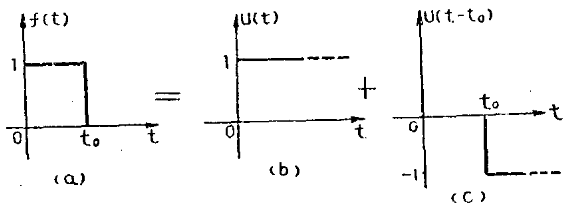

图 1-12 门信号和它与阶跃信号的关系

从图形上看，门信号也就是矩形脉冲信号。下面用一个例题来说明门信号的应用。

例1-1 写出图1-13所示信号的表示式。

解：图示信号$f(t)$是由门信号

$$f_1(t)=[U(t)-U(t-1)] \qquad (见图1\text{-}13(a))$$

和门信号

$$f_2(t)=2[U(t-1)-U(t-2)] \qquad (见图1\text{-}13(b))$$

组合而成的，所以$f(t)$的表示式应为

$$f(t)=[U(t)-U(t-1)]+2[U(t-1)-U(t-2)]$$

展开后得