

XINHAO YU XITONG



信号与系统

钟 东 鲁 敏 主 编

电子科技大学出版社

University of Electronic Science and Technology of China Press

XINHAO YU XITONG

信号与系统

钟 东 鲁 敏 主 编



电子科技大学出版社

University of Electronic Science and Technology of China Press

· 成 都 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

信号与系统 / 钟东, 鲁敏主编. — 成都: 电子科技大学出版社, 2018.1

ISBN 978-7-5647-5670-3

I. ①信… II. ①钟…②鲁… III. ①信号系统
IV. ① TN911.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 019965 号

信号与系统

钟东 鲁敏 主编

策划编辑 罗 雅

责任编辑 兰 凯

出版发行 电子科技大学出版社

成都市一环路东一段 159 号电子信息产业大厦九楼 邮编 610051

主 页 www.uestcp.com.cn

服务电话 028-83203399

邮购电话 028-83201495

印 刷 成都市火炬印务有限公司

成品尺寸 185mm×260mm

印 张 11.5

字 数 295 千字

版 次 2018 年 1 月第一版

印 次 2018 年 1 月第一次印刷

书 号 ISBN 978-7-5647-5670-3

定 价 38.00 元

版权所有 侵权必究

前 言

“信号与系统”研究的是确定性信号与线性时不变系统的基本概念和分析方法,是通信和电子类专业一门不可或缺的专业基础课;是学习通信、信号处理、控制和系统设计等课程的基础。该课程的前续课程有高等数学、线性代数、电路分析及模拟电路等,后续主要课程有通信原理、通信系统、数字信号处理等,是连接基础课与专业课的枢纽,起着承上启下的作用。

在信号与系统的学习过程中,在学习和掌握基本知识的同时,应从知识结构与体系方面去把握课程的内容,分析知识内容及结构所体现的科学研究的规律和方法,总结和提炼观察问题角度的选取等所体现的科学思维的方式和方法,并与相关领域研究成果结合,分析本课程知识、规律及方法在科学技术发展中的体现和应用,从系统性、全局性的角度将本课程与技术领域,甚至人文科学进行有机的联系和拓展。这是本书所追求的目标和特点之一。

本书力图从学习者的角度出发,在行文方面尽量符合人们正常的思维逻辑和规律。同时尽量将这门经典课程的内容与相关领域技术发展有机结合,适当加强在研究方法及思维规律方面的延伸,另外在具体的选材和组织方面尽力体现本课程综合性强、问题分析灵活多变的特点。

由于编者水平有限,书中会存在一些缺点和错误,敬请广大读者给予批评和指正,我们不胜感激。

编 者

目 录

第 1 章 信号与系统概论	(1)
1.1 信号的描述与分类	(2)
1.2 信号的分解	(6)
1.3 系统的描述与分类	(9)
1.4 信号与系统分析方法	(15)
第 2 章 连续时间系统时域分析	(17)
2.1 常系数线性微分方程	(17)
2.2 零输入响应和零状态响应	(20)
2.3 连续的阶跃信号和冲激信号	(23)
2.4 卷积及其运算性质	(33)
第 3 章 连续时间信号实频域分析	(43)
3.1 信号的正交分解——变换	(43)
3.2 傅里叶变换的性质	(48)
3.3 抽样信号与抽样定理	(63)
第 4 章 连续时间系统实频域分析	(70)
4.1 系统的频率特性	(70)
4.2 线性系统对激励信号的响应	(72)
4.3 无失真系统	(76)
4.4 理想低通滤波器	(78)
4.5 采样及采样定理	(82)
4.6 幅度调制与解调	(91)



第5章 连续时间信号与系统复频域分析	(97)
5.1 常用信号的拉氏变换	(97)
5.2 拉普拉斯变换的性质	(99)
5.3 拉普拉斯反变换	(106)
5.4 系统方框图和信号流图	(108)
5.5 系统的稳定性	(113)
5.6 线性系统的模拟	(118)
第6章 离散时间系统的时域分析	(125)
6.1 离散时间系统的基本概念与基本性质	(125)
6.2 常系数线性差分方程及其求解	(127)
6.3 抽样信号与抽样定理	(136)
6.4 离散时间系统的单位样值响应和阶跃响应	(142)
6.5 反卷积	(144)
第7章 离散时间信号与系统变换域分析	(146)
7.1 z 变换及其收敛域	(146)
7.2 z 变换的基本性质	(154)
7.3 z 变换与拉普拉斯变换的关系	(164)
7.4 离散时间系统的 z 域分析	(165)
7.5 离散系统的模拟	(170)
参考文献	(176)

第 1 章 信号与系统概论

在日常生活中人们时时刻刻地接触和应用到各种各样的信号和系统,例如常见的通过手机与外界电话联系和通过电视机观看电视节目,人的耳朵和眼睛分别接收来自手机的语音信号以及电视屏幕的图像信号,而手机与电视机则分别接收相应的无线电波和有线电视同轴电缆中的电信号。再如通过温度计、湿度计来获取当前的温度和湿度,通过血压计测量人体的血压值等。这些例子中的信号包括声音、图像、电磁波、电压、温度、湿度和血压等,相应的系统则分别是人、手机、电视机、温度计、湿度计和血压计。这些貌似彼此不相关的对象均称为信号或系统,那么必然存在某些基本的共性特征,人们正是通过这些共性特征的提炼而建立所谓的概念,通过概念之间的关系演绎出一系列的规律,再应用于实际。

信号,从一般意义上来讲就是信息的载体。通常通过某种客观变量,包括物理变量、化学变量或者是生物变量等的变化得以体现。那么什么是信息呢?信息是和特定的对象、特定的应用密切相关的,20 世纪 80 年代《中国青年报》曾经归纳了基于不同应用领域 1000 多种信息的定义,例如“信息是物质属性的反映”“信息是一种关系”“信息是被反映的物质的属性”等。那么能否从这 1000 多种定义中提炼出某种共性的特征呢?为更有效地说明信息的本质,我们先来讨论处理信息的系统的概念。

系统是具有某种特定功能的整体。通过功能来定义的系统,其本质是实现或完成特定的信息处理的功能。例如收音机是一个系统,其功能是接收无线电波放出声音。基于不同功能的要求,收音机又包含所谓的接收无线电波的无线接收系统、产生振荡信号的本振系统、放大中频信号的中放系统、放大声音的功放系统等一系列的子系统。

现在再来讨论信息的问题。作为信息的载体,不同类型的信号如物理信号、化学信号所包含的信息当然是不同的,因此从具体的内容或应用来看,信息的定义显然是不同的。信号总是和系统联系在一起的,若无相应的系统接收信号,则信号的讨论就失去了意义。因此,从系统(也就是信号的接收者)的角度来看,信息的功能就是使得接收者消除对特定对象状态的不确定性。例如电话所传递的信息是了解通话对象对某一事情的想法或态度。因此,抽象意义上来说信息就是某种不确定性。



1.1 信号的描述与分类

1.1.1 信号的描述

就认识的一般规律而言,人们总是首先感受到某种现象的存在,然后对其进行细致的观察。通过对观察结果的不断总结提炼,得到一系列的规律,最后在此基础上进一步凝练出具有相对独立性的基本概念。所谓相对独立性就是一个基本概念不能被其他基本概念或基本概念的组合同所替代,最典型的例子就是物理学中的量纲。“米”是不能被“秒”所替代的,因为其对应的概念分别是距离和时间。可以说,基本概念是科学研究最高水平的结晶,是建立一门学科的基础,但通常也是最抽象、最难以理解和掌握的。

要在较短的时间里学习和掌握一门学科的知识 and 规律,并能够加以初步应用,不可能完全按照一般的认识过程来重复,而往往是从基本概念开始,从该学科观察和处理的基本对象的描述开始,因此我们首先讨论信号的定义及其描述方式。

所谓信号就是信息的载体。信号通常表现为某种物理量的变化,例如常见的电压、电流、电荷量以及磁通量等。人们最早对客观现象的描述方式是图形,其后才出现了文字,例如我国的《九章算术》。随着科学发展的需要,对客观对象描述的方式不仅应正确描述其特征,而且应当具有相应的逻辑推理功能,典型代表就是数学。数学至少是目前自然科学中最严谨最简洁的语言。

目前对信号的描述通常有三种方式,分别为公式法、图形法、表格法。

所谓公式法也叫闭式(Closed Form)表达式,是通过建立物理量的变化与时间(或/和空间)的数学关系来描述信息随时间(或/和空间)的变化过程,例如式(1-1)表示余弦信号,其中 A 表示幅度, ω 表示角频率, θ_0 表示初始相位。

$$f(t) = A\cos(\omega t + \theta_0) \quad (1-1)$$

实际上,现实中绝大多数信号难以用一个完整的数学闭式来描述,更多的是通过对其变化过程的图形化记录来描述的,这就是所谓的图形法,如图 1-1 所表示的信号。

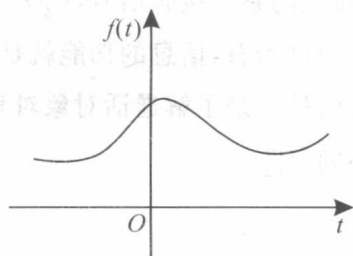


图 1-1 信号的图形表示法



信号的另一种描述方法是表格法，主要用于描述在有限时间(或/和空间)点上出现的信号，例如表 1-1。

表 1-1 信号的表格表示法

$f(t)$	0.4	1.5	1.8	2.5	2.8	3.1
t	-1	0	1.1	2	3.4	4

通过公式或表格来表示的信号可以用图形表示，这几种表示是等效的，但反之则不一定。图 1-1 所示的时间连续取值的信号无法用表格法来完整表示；而用图形和表格来表示的信号不一定能找到有效的公式来表示。

本书对于用数学公式描述的信号，也称为函数，不严格区分信号与函数的差别，两者互通互用。

1.1.2 信号的分类

大千世界中的信息多种多样，并且随着时间在不断变化，显然作为其载体的物理量也是千变万化的。认识世界的目的在于改造世界，人们对世界的认识不可能满足于某个特定的进程，而是要对同一类事物加以分析总结得到相应的规律，以推广应用。因此科学研究的一个基本方法就是通过大量观察，对不同事物进行分类。

基于一般的逻辑学常识，一个概念包含内涵和外延两个方面，内涵越丰富则外延越小，相应地所包含的个体数量越少。通过有意识地缩小概念的外延，可以使对问题的研究具有更强的针对性，使研究的程度更深，这样有利于加深对事物的认识。举一个简单的例子，当我们描述“人”和“年轻人”的行为规律时，显然对于“年轻人”可以得到更多的结果。原因就是“年轻人”是一个比“人”拥有更小外延的概念，其包含了更多具体的内涵。作为“人”的特性年轻人都有，而某些“年轻人”的特性不是所有类型的人都具有的。

对于同一类事物，人们基于不同的观察点或应用需求常常采用不同的分类依据。有些是比较直观的，有些则是在对事物进行一定程度的研究之后确定的，通常都带有明确的目的，是要对相关内容有所了解之后才能体会相应分类的意义。但是，无论采用什么依据，分类应该在逻辑上保证排他性和完备性。信号的分类主要表现在：

1. 确定性信号与随机信号

确定性信号是指在任意时间点上取值都是确定值的信号，例如式(1-1)所示的余弦信号，在任意时刻 t_1 的取值可以计算得到 $f(t_1) = A\cos(\omega t_1 + \theta_0)$ 。而所谓随机信号是指信号在时间点上的取值是一个不确定的变量，但变量的取值有一个范围，具体取值可能符合某种随机分布。随机信号更多地出现在通信系统中，例如数字通信中典型的频移键控系统采用 $\cos\omega_1 t$ 和 $\cos\omega_2 t$ 分别表示符号“0”和“1”，接收端事先并不知道接收的信号是 $\cos\omega_1 t$ 还是



$\cos\omega_2 t$,而是通过相应的检测技术对接收到的信号进行判断抉择。显然要正确判决是 $\cos\omega_1 t$ 还是 $\cos\omega_2 t$ 需要对余弦信号的特性有足够的了解,所以说确定性信号的分析是随机信号分析的必要基础。本书的研究对象限定于确定性信号,随机信号的分析在信号检测与估计等相关书籍中有详细的分析和讨论。

2. 连续时间信号与离散时间信号

在时间轴上的取值是连续的信号称为连续时间信号,即在给定的时间间隔内(除去有限个不连续点),任意时刻信号都存在,连续时间信号通常简称为连续信号。显然,对于确定性连续信号可以给出任意时刻确定的信号值。对于连续时间信号,若其幅度取值为连续的则称之为模拟信号,式(1-1)表示的余弦信号以及图 1-1 所示的信号均为模拟信号。通常在实际工程中并不严格区分连续时间信号与模拟信号,对于幅值存在间断点的连续时间信号可以看作多段模拟信号的组合。

若信号在时间轴上的取值是离散的则称之为离散时间信号,简称为离散序列。理论上离散时间信号中时间轴上的时间间隔可以是不同的,但实际中多数情况下考虑的情况是等时间间隔取值的离散时间信号。对于幅度取值离散的离散时间信号,可以通过“0”“1”,...,来表示离散的幅度值,从而得到数字信号。需要指出的是,这里的“0”“1”等并不是表示离散时间信号的幅度值一定等于 0 或 1,这里只是用来区分不同幅度的标示。目前大量存在的数字处理系统中的数字信号,大部分是通过在模拟信号离散时间点上取值,再对所取的值进行量化后获得的,而用不同的量化方法得到“1”所对应的具体幅度值是不同的。图 1-2(a)、图 1-2(b)和图 1-2(c)分别给出了连续信号、离散序列以及数字信号的示例,其中图 1-2(c)表示的数字信号是对图 1-2(b)所示的离散序列取 $T=1$ 且在幅度上量化后只有 4、5、6 三种取值。

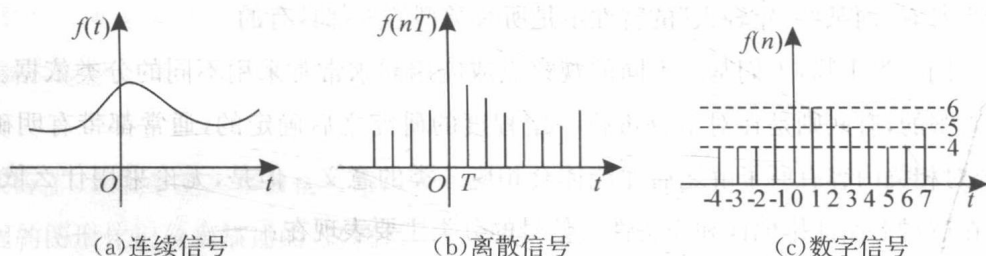


图 1-2 信号示例

本书将信号分为连续时间信号和离散时间信号,是因为对其分析的方法不同,相应的数学模型以及处理系统不同。本书采取先连续后离散的顺序来安排具体的内容,目的是将两类问题分开讨论,思路更加清晰明了。同时连续时间信号与系统和离散时间信号与系统虽然具体内容不同,但分析处理问题的思路和方法一脉相承。读者在连续时间信号及系统分析学习的基础上,能够较容易地理解和掌握离散时间信号及系统的分析。



3. 周期信号与非周期信号

在确定性信号中,信号可分为周期信号与非周期信号。所谓周期信号是指信号以固定时间间隔完全重复(包括形状和大小),并且是无始无终的。不能同时满足固定时间间隔完全重复及无始无终两个条件的信号为非周期信号。周期信号中重复的时间间隔称为该信号的周期或基本周期。周期信号的数学表示为

$$f(t) = f(t + nT) \quad (1-2)$$

其中 $n=0, \pm 1, \pm 2, \dots$, T 称为信号 $f(t)$ 的周期。式(1-1)表示的余弦信号 $f(t) = A\cos(\omega t + \theta_0)$ 是周期信号,其无始无终,且周期为 $2\pi/\omega$,即 $A\cos(\omega t + \theta_0) = A\cos(\omega t + \theta_0 + 2n\pi)$,其中 $n=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 。

本书之所以将信号分为周期性和非周期性两类,是因为一般周期信号可以分解为不同频率、不同幅度的正弦信号和余弦信号的叠加。利用正弦和余弦信号的相位关系,分解为不同频率、不同幅度以及不同相位的余弦信号或正弦信号,得到所谓的傅里叶级数。而通过将非周期信号等效为周期无穷大的周期信号,来得到非周期信号的傅里叶变换。傅里叶变换与傅里叶级数一起建立信号的傅里叶分析,也就是通常所说的信号频域分析法。信号的频域分析是目前通信及信号处理重要的分析方法和基础。

4. 能量有限信号与功率有限信号

对于信号 $f(t)$,定义

$$W = \lim_{T_1 \rightarrow \infty} \int_{-T_1}^{T_1} f^2(t) dt \quad (1-3)$$

为其能量,定义

$$P = \lim_{T_1 \rightarrow \infty} \frac{1}{T_1} \int_{-T_1}^{T_1} f^2(t) dt \quad (1-4)$$

为其功率。

若 W 为有限值即 $0 < W < \infty$,则称 $f(t)$ 为能量有限信号,简称能量信号。若 P 为有限值即 $0 < P < \infty$,则称 $f(t)$ 为功率有限信号,简称功率信号。通常功率信号为周期信号,而能量信号一定是非周期信号,请注意反之则不一定成立。当然也存在一些功率和能量均无限的信号,称为非功率非能量信号。

不同的物理过程例如动力学和热力学,其具体的物理过程及规律可能不同,但其相互联系的纽带就是能量关系,即物理学中的基本规律——能量守恒定理。信号与系统分析的基本特点是从多个角度或者领域,来分析相同的物理问题,而这些领域之间的基本关系就是能量守恒。在傅里叶变换中将介绍分别对应于能量信号和功率信号的能量谱和功率谱概念,以及系统激励与响应的能量与功率关系,这些是通信及信号处理技术的基础。



1.2 信号的分解

在对信号进行分析和处理时,常常将信号分解成基本信号分量之和。这种分解可以按信号的时间函数进行分解,也可以按信号的不同频率进行分解,或按照其他方式进行分解。本节主要讨论连续信号的分解,离散信号的分解与此类似。

1.2.1 直流分量与交流分量

一连续信号 $f(t)$ 可以分解为直流分量 $f_d(t)$ 与交流分量 $f_a(t)$ 之和,即

$$f(t) = f_d(t) + f_a(t) \quad (1-5)$$

信号直流分量 $f_d(t)$ 即信号平均值,从原信号中减去直流分量即得到信号的交流分量 $f_a(t)$,如图 1-3 所示。

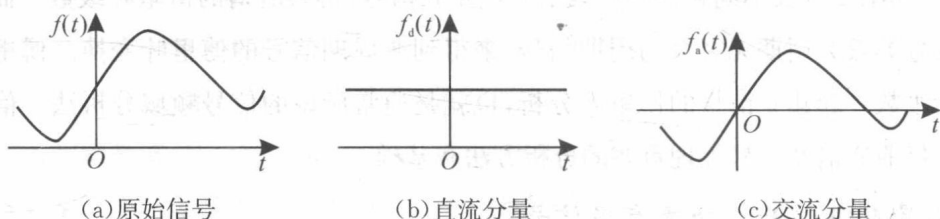


图 1-3 直流分量与交流分量

1.2.2 偶分量与奇分量

偶信号 $f_e(t)$ 满足

$$f_e(t) = f_e(-t) \quad (1-6)$$

而奇信号 $f_o(t)$ 满足

$$f_o(t) = -f_o(-t) \quad (1-7)$$

任一信号均可以分解为偶分量与奇分量之和,即

$$f(t) = f_e(t) + f_o(t) \quad (1-8)$$

式中: $f_e(t)$ 为偶分量,可表示为

$$f_e(t) = \frac{1}{2} [f(t) + f(-t)] \quad (1-9)$$

$f_o(t)$ 为奇分量,可写成

$$f_o(t) = \frac{1}{2} [f(t) - f(-t)] \quad (1-10)$$



例 1-1 试求单位阶跃函数 $\varepsilon(t)$ 的偶分量与奇分量。

解 $\varepsilon(t) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{sgn}(t)$

故得 $\varepsilon(t)$ 的偶分量 $\varepsilon_e(t) = \frac{1}{2}$, 而 $\varepsilon(t)$ 的奇分量 $\varepsilon_o(t) = \frac{1}{2} \operatorname{sgn}(t)$, 如图 1-4 所示。

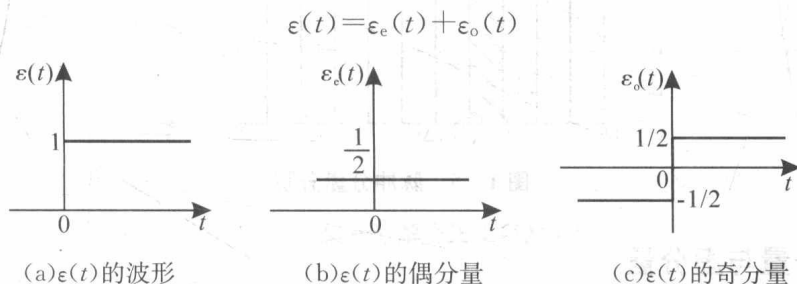


图 1-4 $\varepsilon(t)$ 的分解

1.2.3 脉冲分量分解

任一连续信号 $f(t)$ 可分解为许多矩形脉冲的叠加, 如图 1-5 所示, 画斜线的矩形脉冲的持续时间自 τ 至 $\tau + \Delta\tau$, 幅值 $f(\tau)$, 可表示为

$$f(\tau) [\varepsilon(t - \tau) - \varepsilon(t - \tau - \Delta\tau)]$$

从 $\tau=0$ 到 t , 将许多这样的矩形脉冲相加, 就得到 $f(t)$ 的近似表示:

$$\begin{aligned} f(t) &= \sum_{\tau=0}^t f(\tau) [\varepsilon(t - \tau) - \varepsilon(t - \tau - \Delta\tau)] \\ &= \sum_{\tau=0}^t f(\tau) \frac{\varepsilon(t - \tau) - \varepsilon(t - \tau - \Delta\tau)}{\Delta\tau} \Delta\tau \end{aligned}$$

取 $\Delta\tau \rightarrow 0$ 的极限, 可得

$$\begin{aligned} f(t) &= \lim_{\Delta\tau \rightarrow 0} \sum_{\tau=0}^t f(\tau) \frac{\varepsilon(t - \tau) - \varepsilon(t - \tau - \Delta\tau)}{\Delta\tau} \Delta\tau \\ &= \lim_{\Delta\tau \rightarrow 0} \sum_{\tau=0}^t f(\tau) \delta(t - \tau) \Delta\tau \end{aligned}$$

于是求得

$$f(t) = \int_0^t f(\tau) \delta(t - \tau) d\tau \quad (1-11)$$

将式(1-11)中的变量 τ 改为 t , 观察时刻 t 以 t_0 代换, 可得

$$f(t_0) = \int_0^{t_0} f(t) \delta(t_0 - t) dt$$

由于 $\delta(t)$ 是偶函数, $\delta(t_0 - t) = \delta(t - t_0)$, 于是

$$f(t_0) = \int_0^{t_0} f(t) \delta(t - t_0) dt$$

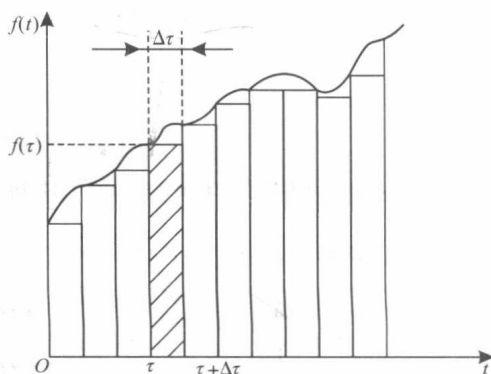


图 1-5 脉冲分量分解

1.2.4 实分量与虚分量

复数连续信号 $f(t)$ 可分解为实分量 $f_r(t)$ 与虚分量 $f_i(t)$ 之和, 即

$$f(t) = f_r(t) + jf_i(t) \quad (1-12)$$

$f(t)$ 的共轭复数为

$$f^*(t) = f_r(t) - jf_i(t) \quad (1-13)$$

于是实分量为

$$f_r(t) = \frac{1}{2}[f(t) + f^*(t)] \quad (1-14a)$$

虚分量为

$$jf_i(t) = \frac{1}{2}[f(t) - f^*(t)] \quad (1-14b)$$

复信号 $f(t)$ 的模平方为

$$|f(t)|^2 = f(t)f^*(t) = f_r^2(t) + f_i^2(t) \quad (1-15)$$

复信号在通信系统、网络理论与信号处理方面的应用非常广泛。利用将复信号分解为实分量和虚分量, 可以实现对复信号的分析与处理。

1.2.5 正交函数分量

连续信号可分解为正交函数分量。例如, 一个对称矩形脉冲信号可以用各次谐波的正弦与余弦信号叠加来近似表示, 如图 1-6 所示。各次谐波的正弦、余弦信号就是此矩形脉冲的正交函数分量。

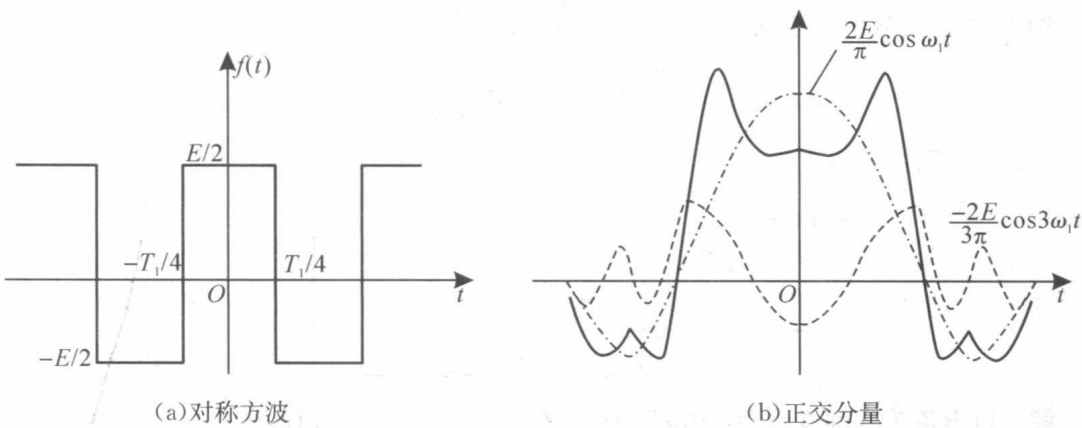


图 1-6 信号分解为正交函数分量

1.3 系统的描述与分类

1.3.1 系统的基本概念

1. 系统的定义

系统是非常广泛的概念。通常将若干相互依赖、相互作用的事物所组成的具有一定功能的整体称为系统。它可以是物理系统，也可以是非物理系统。系统的功能是用来传输、处理和交换信号的。任何复杂的单入单出系统，都可以用下面的框图进行描述，如图 1-7 所示。

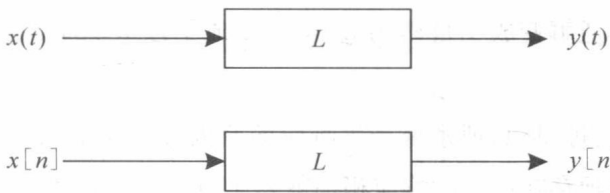


图 1-7 系统框图

从框图的角度看，系统也可以理解为联系输入信号(或激励)与输出信号(或响应)之间关系的物理过程的描述。其中，方框内来描述系统如何传输处理交换信号的，称为系统的本质。本书将用很多种方法从不同的方面来表述系统的本质。本节从数学模型的角度来描述系统。

2. 系统的数学模型

系统中的各种物理规律最终会体现在输入和输出满足的数学方程上，将这样的方程称为系统的数学模型。方程形式有代数方程、微积分方程和差分方程。系统越简单，数学模型的建立越容易获得，系统越复杂，数学模型的建立越难获得。



例 1-2 如图 1-8 所示,建立 RLC 串联系统的数学模型。

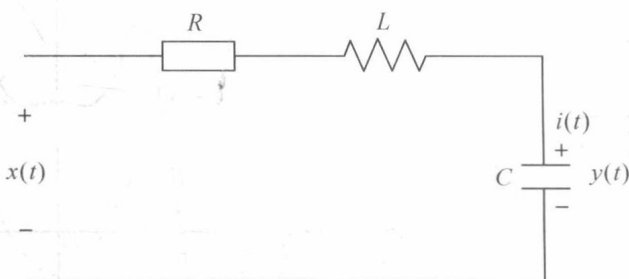


图 1-8 例 1-2 图

解 以电流为中间变量,利用电路理论的知识可建立如下方程:

$$Li'(t) + \frac{1}{C}i^{(-1)}(t) + Ri(t) = x(t)$$

$$y(t) = \frac{1}{C}i^{(-1)}(t)$$

通过消去中间变量,得到系统的数学模型为 $LCy''(t) + RCy'(t) + y(t) = x(t)$ 。

该数学模型为二阶常系数微分方程,所以系统是二阶的。

什么样的方程是差分方程呢? 方程的两端分别关于输出和输入的各次移动或各次差分的组合。例如, $y[n] - y[n-1] = x[n] - 2x[n-1]$ 是差分方程,系统是一阶的。

3. 系统的响应

本书在学习系统时,更多考虑如何寻找系统数学模型的解,将数学模型的解称为系统的响应。

数学上求解带初始条件的微分方程或差分方程的时候,用全解 = 通解 + 特解来求解。当确定了待定系数后,通解变成了自然响应,特解变成了强迫响应,将这种方法称为经典求解方法。

为了更好地体现物理思想,把系统产生响应的原因分为初始状态和输入。当系统满足线性时,这两个原因单独存在产生的响应相加就是全响应。当输入为 0,仅由初始状态作用产生的响应称为零输入响应,记为 $y_x(t)$ 或 $y_x[n]$,用下标 x 来标识。当初始状态为 0,仅由输入作用产生的响应称为零状态响应,记为 $y_f(t)$ 或 $y_f[n]$,用下标 f 来标识。所以全响应可以描述为

$$\begin{aligned} y(t) &= y_x(t) + y_f(t) \\ y[n] &= y_x[n] + y_f[n] \end{aligned} \quad (1-16)$$

将这样的分析方法称为零输入—零状态法。本书常常采用这种方法来求取全响应。当系统初始状态为 0 时,称系统为松弛的,否则为非松弛的。

4. 系统的互联

往往一个复杂的系统是由很多简单系统组成的。在理论研究和分析系统时,常常采用



框图来描述子系统之间的连接关系。

框图有下面两个重要特点：

- (1) 有方向的箭头代表信号的流动方向；
- (2) 几个支路相交的点称为节点。

系统中的信号种类是多种多样的，可以是电流、电压、电机转速等，所以框图中有方向的箭头，并不一定代表电流的流动。框图中节点具有汇总信号的功能。节点所代表的信号等于流入到该节点的所有信号之和，也等于每个流出支路所代表的信号。

可以通过对简单系统(子系统)的分析以及子系统互联而达到分析复杂系统的目的。也可以通过将若干个简单子系统互联起来而实现一个相对复杂的系统。这一思想对系统分析和系统综合都是十分重要的。现实中的系统是各式各样的，其复杂程度也大相径庭。但许多系统都可以分解为若干个简单系统的组合。以连续系统为例，子系统之间的基本连接关系有下面三种：

- (1) 串联，如图 1-9(a) 所示；
- (2) 并联，如图 1-9(b) 所示；
- (3) 反馈，如图 1-9(c) 所示。

其中，加法器旁边标记“+”为正反馈，标记“-”为负反馈。稳定系统需要反馈时常常只能采用负反馈。

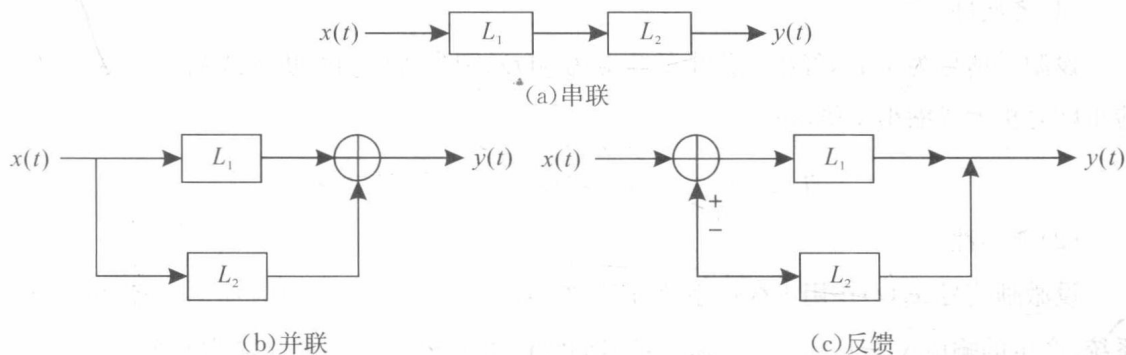


图 1-9 三种基本连接的框图

1.3.2 系统的分类

1. 连续时间系统与离散时间系统

连续时间系统是指输入、输出及状态量都是时间 t 的连续函数，即能够完成一种连续信号转换成另一种连续信号的数学模型。这种数学模型就是微分方程，如模拟通信系统。

离散时间系统是指输入、输出都是离散 n 的变量(n 为整数集合)，即将一种离散信号转换成另一种离散信号的数学模型。而离散系统的数学模型是差分方程，如数字计算机系统。