

高等学校**测控技术专业**规划教材

测控信号 分析与处理

CEKONG XINHAO FENXI YU CHULI

伍川辉 朱云芳 宁 静 编



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

高等学校测控技术专业规划教材

测控信号分析与处理

伍川辉 朱云芳 宁静 编

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

内 容 简 介

本书根据“测控技术及仪器”专业对信号分析处理的基本要求,系统讲述了信号分析与处理的基本原理与方法。重点介绍了确定性信号的频谱分析与滤波技术,并对随机信号的分析与处理方法进行介绍;分析对象包括模拟信号和数字信号,对系统分析也作了适量的介绍;讲述了当前流行的小波分析的基本方法和 DSP 芯片的原理及应用等基本内容。

本书可作为自动化及各种非电子信息类专业的教材,也可作为相关专业与工程技术人员的自学参考用书。

图书在版编目 (C I P) 数据

测控信号分析与处理 / 伍川辉, 朱云芳, 宁静编.
成都: 西南交通大学出版社, 2009.9
高等学校测控技术专业规划教材
ISBN 978-7-5643-0460-7

I. 测… II. ①伍…②朱…③宁… III. ①自动检测系统—信号分析—高等学校—教材②自动检测系统—信号处理—高等学校—教材 IV. TP274

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 178318 号

高等学校测控技术专业规划教材

测控信号分析与处理

伍川辉 朱云芳 宁 静 编

*

责任编辑 张华敏

特邀编辑 张 阅

封面设计 墨创文化

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段 111 号 邮政编码: 610031 发行部电话: 028-87600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

四川森林印务有限责任公司印刷

*

成品尺寸: 185 mm×260 mm 印张: 15.5

字数: 387 千字

2009 年 9 月第 1 版 2009 年 9 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5643-0460-7

定价: 28.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有·盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

测控信号的分析处理工作是测控技术的重要内容,在工程应用中要从被分析的对象中获得有用信息,必须用有效的方法对测得的信号进行分析、处理。近年来,信号分析与处理技术发展极其迅速,在科学技术的各领域得到广泛应用。

信号分析与处理技术作为一门新兴学科,正在受到越来越多的重视,成为高等院校测控技术及仪表、非电子信息类、自动化等专业非常重要的教学内容。根据高校本科教学需要,我们结合多年从事测控信号分析与处理教学和科研实践的体会,编写了本书。

全书共 10 章。绪论主要介绍信号的定义及分类、系统的概念及分类。第 1 章主要介绍连续时间信号时域分析中信号的描述、分解和卷积,频域分析中周期信号的傅里叶级数,非周期信号的傅里叶变换。第 2 章介绍连续系统分析基础,包括拉普拉斯变换和连续系统的 s 域分析。第 3 章介绍离散时间信号分析的基本理论,包括序列的 z 变换及 z 反变换。第 4 章介绍离散系统的描述,离散系统的时域分析和 z 域分析。第 5 章介绍离散时间信号分析,包括序列的傅里叶变换、离散傅里叶级数(DFS)、离散傅里叶变换(DFT)、快速傅里叶变换(FFT)。第 6 章介绍模拟滤波器的概念,巴特沃斯和切比雪夫模拟滤波器的设计。第 7 章介绍数字滤波器的基本概念,IIR 数字滤波器和 FIR 数字滤波器的设计。第 8 章介绍随机信号分析,包括随机信号的概念、相关函数和功率谱、线性时不变系统对随机信号的响应。第 9 章介绍小波变换,包括时频分析的基本概念、短时傅里叶变换、小波变换。第 10 章介绍测控信号处理的 DSP 实现。

本书的特点是简明扼要,深入浅出,系统性强,注意循序渐进,减少学习台阶,强调基本原理,力求概念准确、图文并茂,注重数学公式的物理概念的解释,方便理解和自学。

本书的编写得到了西南交通大学高品贤教授的大力支持。他对全书的体系结构和具体的细节叙述都提出了许多指导性的意见,在此表示衷心的感谢。在编写过程中还得到了傅莉萍、李潇潇、程杨等同志的帮助。在此,向所有为本书进行审阅并提出宝贵意见以及在编写出版过程中给予热情帮助和支持的同志们,一并表示衷心的感谢。

由于时间仓促,加之我们的水平有限,书中难免存在一些不妥之处,敬请读者不吝指正。

编 者

2009 年 8 月于成都

目 录

绪 论	1
0.1 信号的概念	1
0.2 信号的分类	2
0.3 系统的概念与分类	5
0.4 线性时不变系统	9
第 1 章 连续时间信号分析	11
1.1 几种典型的连续信号	11
1.2 连续信号的时域分解	16
1.3 周期连续信号的频谱分析 (FS)	20
1.4 非周期连续信号的频谱分析 (FT)	27
1.5 抽样信号的傅里叶变换	39
习 题	45
第 2 章 连续系统分析基础	48
2.1 拉普拉斯变换 (laplace transform)	48
2.2 拉普拉斯反变换	51
2.3 拉普拉斯变换的一些重要性质	54
2.4 LTI 连续系统的 s 域分析	56
习 题	60
第 3 章 z 变换	62
3.1 离散时间信号	62
3.2 序列的 z 变换	65
3.3 常用序列的 z 变换	67
3.4 z 反变换	72
3.5 z 变换的重要性质	77
习 题	82
第 4 章 离散时间系统分析	84
4.1 线性非移变离散系统	84
4.2 离散系统的时域分析	86
4.3 离散系统的 z 域分析	90
习 题	96
第 5 章 离散时间信号分析	98
5.1 序列的傅里叶变换	98

5.2 信号的傅氏、拉氏及 z 变换间的关系	100
5.3 离散傅里叶级数 (DFS)	104
5.4 离散傅里叶变换 (DFT)	107
5.5 快速傅里叶变换 (FFT)	117
5.6 离散傅氏变换的应用	126
习 题	140
第 6 章 模拟滤波器	142
6.1 基本概念	142
6.2 传递函数设计方法	146
6.3 巴特沃思滤波器	148
6.4 切比雪夫滤波器	157
习 题	164
第 7 章 数字滤波器	166
7.1 基本概念	166
7.2 IIR 数字滤波器	171
7.3 FIR 数字滤波器	184
7.4 数字滤波器的实现	192
习 题	199
第 8 章 随机信号分析	201
8.1 随机信号的概念	201
8.2 LTI 系统对随机信号的响应	208
8.3 相关函数和功率谱估计	210
习 题	212
第 9 章 小波变换	214
9.1 时频分析	214
9.2 短时傅里叶变换 (STFT)	216
9.3 小波变换 (WT)	219
习 题	230
第 10 章 测控信号处理的 DSP 实现	231
10.1 概 述	231
10.2 DSP 芯片的基本结构和特征	234
10.3 TMS320C54x 系列 DSP	235
10.4 数字滤波器的 DSP 实现	238
习 题	241
参考文献	242

绪 论

内容提要

1. 信号的概念与分类
2. 系统的概念与分类
3. 线性系统的定义及特性

0.1 信号的概念

0.1.1 信号 (signal)

信号是物质运动的表现形式，或者说是随着时间变化的某种物理量。

信号可以理解为函数 $f(t)$ (连续信号) 或序列 $f(n)$ (离散信号)，在数学上可以表示为一个或 n 个独立变量的函数，亦可用声、光、电、文字、符号、图形、图像来表示。

不管是何种信号，它总是蕴含着某种信息，所以信号是传输信息的载体。例如，十字路口的红绿灯，是用“光”表示的信号，它含有“禁止通过”和“允许通过”两种信息；上、下课的钟声，是用“声”表示的信号，它含有“上课”或“下课”两种信息。

0.1.2 信息 (information)

信息是反映一个物理系统状态或特性的预先不知道的报道。

信息是比较抽象的概念。信息本身不是物质，不具有能量，但信息却是物质所固有的，可以将信息理解为事物运动的状态和方式，是用来消除不确定性的一种东西。

信息是通过信号传递的，是从信号中获取的。

信息可以识别、转换、存储和传输。

0.1.3 测试 (measurement)

测试是人们认识客观事物的方法，是获取信息的手段。

测试过程是从客观事物中提取有关信息的认识过程。它较一般的测量、计量和测绘具有更广泛的含义，测量、计量和测绘是指对“物”的“量度”；而测试是指对“现象”的检测和

对所检测到的信号进行分析与处理，即获取信号和从信号中提取信息。它包括四个主要部分：

检出信号→变换信号→分析处理（获取信息）→判断（决策）

在现代广义的测试中，以计算机为主体的测试系统已成为主流，而且发展很快，由于这种系统能实现自动测试和进行测试控制，所以又称为测控系统，其系统框图如图 0.1 所示。

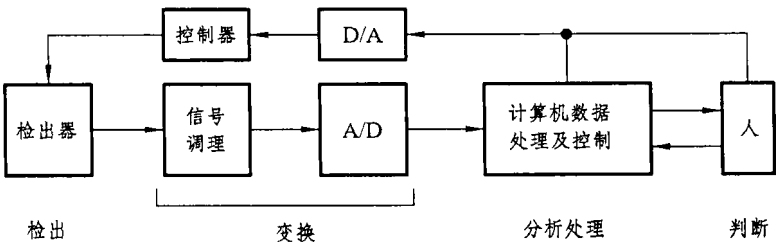


图 0.1 测试系统

0.2 信号的分类

信号分类的方法很多，最常用的有两种：一是按信号的性质分类；二是按信号的变量取值方式分类。

0.2.1 按信号的性质分类

按信号的性质，信号可分为确定性信号和随机信号两大类，如图 0.2 所示。

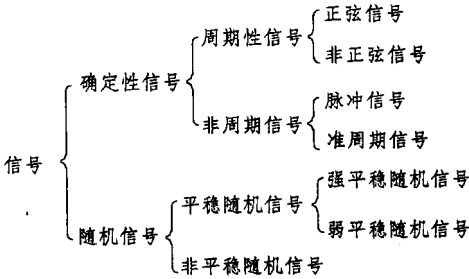


图 0.2 按信号的性质分类

1. 确定性信号

确定性信号随时间的变化服从于某种确定规律，能用确定的数学函数描述，对于任一确定的时刻，信号有确定的函数值。确定性信号主要有两种：周期信号（periodic signal）和非周期信号（aperiodic signal），周期信号是时间的周期函数，是按周期 T 重复出现的，其表达式为：

连续周期信号

$$f(t) = f(t \pm nT), \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (0.1)$$

离散周期信号

$$f(k) = f(k \pm nN), \quad k, n = 0, 1, 2, \dots \quad (0.2)$$

其中, T 、 N 为周期。

非周期信号可以看成是周期信号在周期 T (或 N) 趋向于无穷大时的特例。

2. 随机信号 (random signal)

随机信号的取值在不同时刻是随机变化的, 不能预先确切地知道它的变化规律, 工程中有不少信号都属于该类型。由于随机信号不能用一个确定的时间函数来描述, 所以只能用数理统计的方法来加以研究。随机信号也分两种: 一是平稳性随机信号, 其统计特性基本上不随测量时间而变化; 二是非平稳随机信号, 其统计特性是随测量时间不同而变化的。

0.2.2 按信号的变量取值方式分类

1. 时间连续信号 (continuous-time signal)

这是一种时间 t 连续的信号, 函数值 $f(t)$ 可以是连续的, 也可以是离散的, 前者称为模拟信号 (analog signal), 是最常见的信号; 后称为量化信号, 主要用于抽样过程中的量化, 如图 0.3 (a)、(b) 所示。

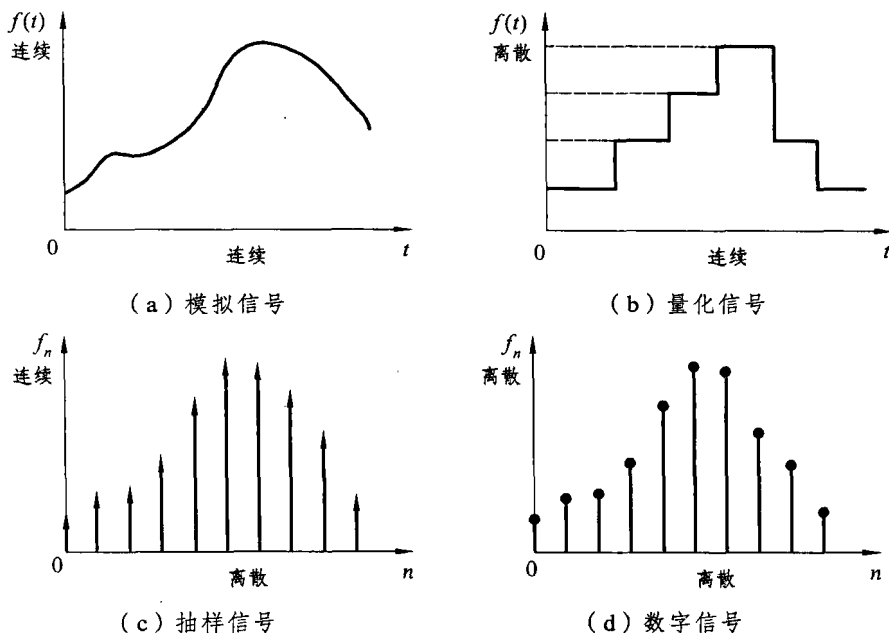


图 0.3 按信号的变量取值方式分类

2. 时间离散信号 (discrete-time signal)

这是一种时间 t 离散的信号, 函数值 $f(t)$ 可以是连续的, 也可以是离散的。前者称为抽样信号, 后者称为数字信号 (digital signal), 如图 0.3 所示。

0.2.3 其他分类法

1. 因果信号与非因果信号

如果一个信号只在自变量的非负半轴左闭区间 $[0, \infty)$ 才取非零值, 而在 $(-\infty, 0)$ 开区间内取值均为 0, 那么这样的信号就称为“因果信号 (causal signal)”, 否则就称为“非因果信号”。

2. 能量有限信号和功率信号

如果一个信号其能量是有限的, 则称之为能量有限信号 (energy-limited signal), 如衰减的周期信号或有限长的非周期信号 (持续时间有限)。能量信号定义为

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} f^2(t) dt < \infty \quad (0.3)$$

式中, E 为称为能量, 满足 $E < \infty$ 的信号称为能量有限信号。

对于周期信号, 其能量为无穷大, 不满足式 (0.3) 的要求, 这时只能用平均功率来表达信号的能量, 故称为功率信号。信号的平均功率的定义为

$$P = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f^2(t) dt \quad (0.4)$$

式中, P 为平均功率; T 为平均周期。功率信号有周期信号、随机信号及不衰减的非周期信号等。

0.2.4 信号分析与处理 (signal analysis and processing)

1. 信号分析

信号分析是将复杂的信号分解成若干便于识别的简单信号, 如正弦信号、余弦信号、直流信号、脉冲信号等, 以便于提取所需信息。

2. 信号处理

信号处理是对原始信号进行加工、变换, 去伪存真, 以便获取所需分析的信号, 如滤波, 变换、调制、解调, 编码、解码, 增强或衰减等。

需要指出的是, 信号的分析与处理并无严格的区别, 而是一种复合关系, 分析中包含有

处理，处理中也包括有分析。

3. 分析方法

信号分析的方法主要有三种：时域分析法、频域分析法和时频分析法。

时域分析法主要是分析信号的“波形 (waveform)”，信号波形是信号的幅度随时间变化的关系曲线。通过时域分析，可以了解信号的时域特性，如波形的参数、波形的变化、信号的强度、时域相关特性、概率密度函数等。

频域分析法主要是分析信号的“频谱 (spectrum)”，信号的频谱是信号幅度或功率随频率变化的关系曲线。因此，进行频谱分析时，需要将时域信号变换为频域信号，最常用的是傅里叶变换 (FT)，通过变换，可以研究信号在频域内的特性和频率结构，如幅度谱、相位谱、功率谱等。

时频分析法是将时域分析与频域分析结合起来，取长补短，将一维分析变为二维分析，这是一种现代分析方法，是分析处理时变信号的一种有效方法。

0.3 系统的概念与分类

各种变化着的信号不是孤立存在的，信号总是在系统中产生又在系统中不断传递，因此信号与系统是不可分离的。

0.3.1 系统 (system)

系统是由若干相互联系、相互作用的单元组成的具有一定功能的有机整体（如一台机器、一座大桥、通信系统、检测系统、生态系统、经济系统等），其种类繁多，内容丰富，广泛存在于自然界，是工程研究的主要对象。

信号的产生、传输、分析与处理均离不开系统，而系统的性质往往是通过输入与输出信号间的关系来描述的。

系统的输入与输出可表示为：单输入、单输出系统，这是一种理想化的系统；多输入、多输出系统，这是一种实际系统，如图 0.4 所示。

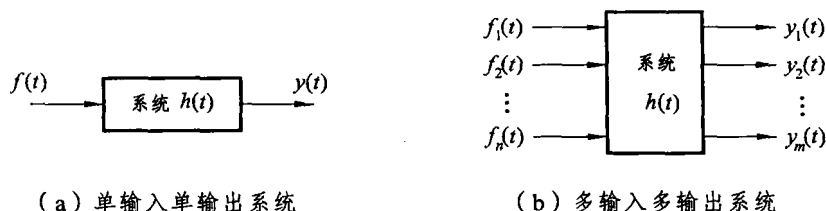


图 0.4 系统的表示

0.3.2 系统分类

1. 连续系统、离散系统、混合系统

根据系统处理的信号形式分为：连续系统、离散系统、混合系统。

连续系统：若系统的输入（激励）和输出（响应）都是连续时间信号，则称此系统为连续时间系统，简称连续系统。连续系统是用微分方程来描述的，如图 0.5 (a) 所示。

离散系统：若系统的输入（激励）和输出（响应）都是离散时间信号，则称此系统为离散时间系统，简称离散系统。离散系统是用差分方程来描述的，如图 0.5 (b) 所示。

混合系统：连续系统与离散系统的组合，如图 0.5 (c) 示。

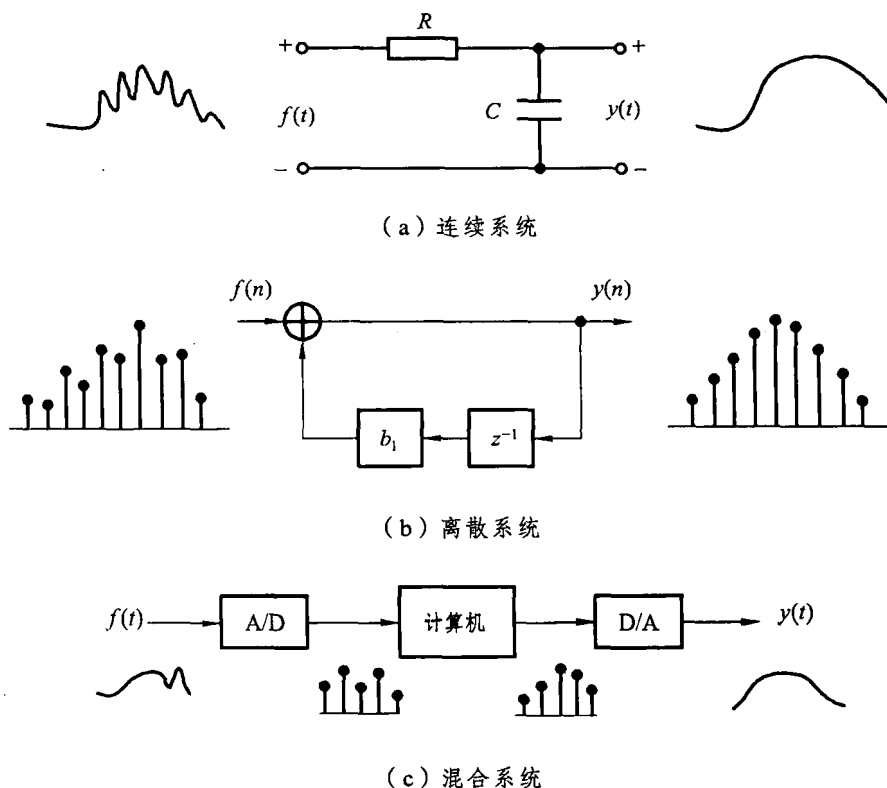


图 0.5 系统的分类

2. 因果系统与非因果系统

因果系统 (causal system) 的响应是系统激励所产生的结果，激励是响应产生的原因，有“因”才有“果”，即有激励才有响应，如图 0.6 所示。一般的电路系统、机械系统等物理上可实现的系统都具有这种特性，故因果系统又称物理上可实现的系统。因果系统的特点是，在 $t < 0$ 时，输入 $f(t)$ 和输出 $y(t)$ 恒为零。

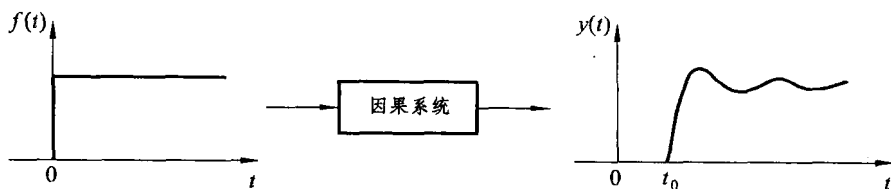


图 0.6 因果系统

非因果系统的响应与未来激励有关，响应在激励之前就已存在，这是一种物理不可实现系统，如图 0.7 所示，响应中的 $-t_0$ 部分出现在激励之前，也就是说它与未来的激励有关。

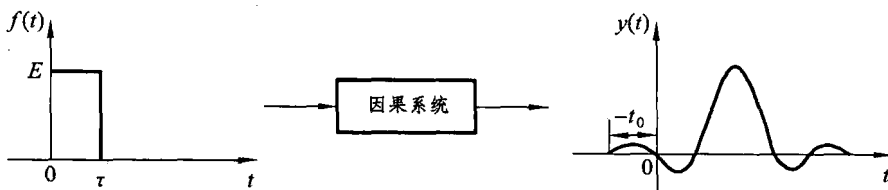


图 0.7 非因果系统

3. 动态系统与即时系统

描述系统的方程若为微分方程或差分方程，该系统为动态系统；若为代数方程，则该系统为即时系统。

电学上的纯电阻网络就是即时系统，包含有电感、电容的电路则是动态系统，力学上有惯量的系统也是动态系统。

动态系统任意时刻的输出不仅与此时刻的输入有关，还与此时刻以前的系统的历史状况有关；而即时系统某时刻的输出只与此时刻的输入有关，与历史状况无关。所以，动态系统又称有记忆的系统，即时系统又称无记忆的系统。

4. 时不变系统与时变系统

描述系统的微分（或差分）方程的系数与时间 t （或 n ）无关时，则该系统为时不变系统；系数与时间 t （或 n ）有关时，则为时变系统。

时不变系统本身的参数不随时间变化，因此，在同样的起始状态下，系统的响应与激励施加于系统的时刻无关，这就是时不变系统响应的时不变特性。

5. 线性系统与非线性系统

线性系统是指那些数学模型是线性微分方程或线性差分方程的系统；如果系统数学模型是非线性的微分方程或非线性差分方程，则为非线性系统。

线性系统具有叠加性和齐次性，在几个激励信号同时作用下产生的零状态响应等于每个激励单独作用时所产生的零状态响应之和。当激励为原激励的 K 倍时，线性系统的零状态响应也为原来激励所产生的零状态响应的 K 倍。

任何线性系统的全响应均可分解为零输入响应与零状态响应两部分。系统的零输入响应

只与系统的初始状态、系统本身的特性有关，而与激励无关，因此，激励的叠加与加倍不会改变系统的零输入响应。反之，系统状态的初值只会影响系统的零输入响应，不会影响系统的零状态响应。因此，线性系统的零状态响应或零输入响应还分别具有叠加性与齐次性。

非线性系统不具有叠加性与齐次性。描述非线性系统的方程是非线性的微分方程或非线性的差分方程，多数非线性方程解析解的求取是很困难的，有时甚至是不可能的，而图解法与数值分析则是常用的方法。

6. 集中参数系统与分布参数系统

由集中参数的元件组成的系统称为集中参数系统，如由 R 、 L 、 C 组成的电路系统，它的电能仅储存在电容 C 中，磁能仅储存在电感 L 中，电阻 R 只消耗能量，各参数是集成的，集中参数系统用常微分方程描述。

含分布参数元件的系统称为分布参数系统，如由均匀长线组成的传输系统、天线等就是分布参数系统，其参数是均匀分布的，描述它的数学模型是偏微分方程，其独立变量有两个：时间变量和空间变量。

0.3.3 系统的组成

实际系统通常由许多子系统组合而成。

1. 串联（级联）系统

串联系统是由多个子系统串接而成的，如图 0.8 所示。串联系统的总传递函数是各个子系统传递函数的乘积，即

$$H(s) = H_1(s) \cdot H_2(s) \cdots H_i(s) \quad (0.5)$$

式中， $H(s)$ 为系统的总传递函数； $H_i(s)$ 为第 i 个子系统的传递函数。

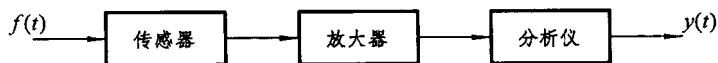


图 0.8 串联系统

2. 并联系统

并联系统是由多个子系统并接而成的，如图 0.9 所示。并联系统的总传递函数是各个子系统传递函数的和，即

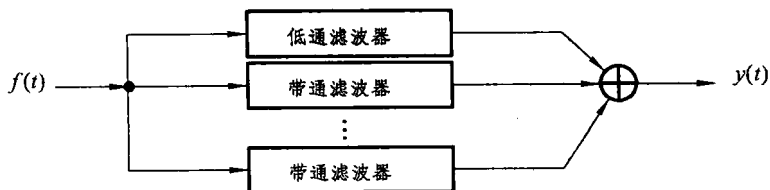


图 0.9 并联系统

$$H(s) = H_1(s) + H_2(s) + \cdots + H_i(s) \quad (0.6)$$

式中, $H(s)$ 为系统的总传递函数; $H_i(s)$ 为第 i 个子系统的传递函数。

3. 混联系统

一个系统如果有串联部分, 也有并联部分, 则这个系统称为混联系统, 实际系统大都是混联系统。

4. 反馈系统

一个系统如果存在反馈连接部分, 如图 0.10 所示, 则这个系统称为反馈系统, 这种系统在控制系统中经常采用。

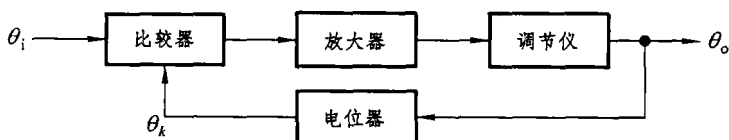


图 0.10 反馈系统

0.4 线性时不变系统

0.4.1 线 性

线性包含叠加性和齐次性两个重要概念。

1. 叠加性

如果输入 $f_1(t)$ 时系统的响应为 $y_1(t)$, 输入 $f_2(t)$ 时系统的响应为 $y_2(t)$, 则输入 $f_1(t) + f_2(t)$ 时, 系统的响应为 $y_1(t) + y_2(t)$ 。

2. 齐次性

如果输入 $f(t)$ 时系统的响应为 $y(t)$, 当输入增至 a 倍即 $af(t)$ 时, 其响应也增加 a 倍即 $ay(t)$ 。

同时满足叠加性和齐次性的系统称为线性系统。一般情况下, 系统的这两个性质是同时具有的, 即有

$$a_1 f_1(t) + a_2 f_2(t) \rightarrow a_1 y_1(t) + a_2 y_2(t) \quad (0.7)$$

不满足式 (0.7) 关系的称为非线性系统, 如:

$y'(t) + 2y(t) = x(t)$ 所描述的是线性系统。

$y'(t) + 2y^2(t) = x(t)$ 所描述的非线性系统。

0.4.2 线性时不变系统及特性

线性时不变系统是指既具有线性性又具有时不变性的系统，线性时不变系统简记为 LTI (linear time invariant)。

线性时不变系统有三个重要的特性：微分特性、积分特性和频率保持特性。

1. 微分特性

如果线性系统的输入 $f(t)$ 引起的响应为 $y(t)$ ，则当输入为 $f(t)$ 的导数 $\frac{df(t)}{dt}$ 时，则输出将变为 $y(t)$ 的导数 $\frac{dy(t)}{dt}$ ，如图 0.11 所示。

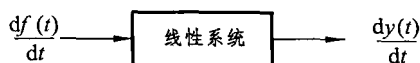


图 0.11 LTI 系统的微分特性

2. 积分特性

如果线性系统的输入 $f(t)$ 引起的响应为 $y(t)$ ，则当输入为 $f(t)$ 的积分 $\int_0^t f(\tau) d\tau$ 时，则输出将变为 $y(t)$ 的积分 $\int_0^t y(\tau) d\tau$ ，如图 0.12 所示。

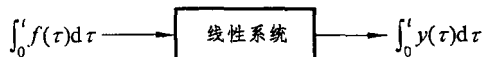


图 0.12 LTI 系统的积分特性

3. 频率保持特性

如果线性系统的输入信号中含有频率成分： $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ ，则系统的稳态响应也只含有 $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ 的成分，有些成分可能没有，但不会增加成分，也就是说，信号通过线性系统后不会产生新的频率分量。

0.4.3 线性时不变因果系统

线性时不变因果系统是同时满足线性性、时不变性和因果性的系统，这是一种理想化的系统，但在工程界中，有许多实际系统接近这种系统，这种系统的分析理论比较成熟，求解方便，能解决很多实际问题，是本课程的主要研究对象。

第1章 连续时间信号分析

内容提要

1. 几种典型的信号（函数）
2. 主要时域分析方法，卷积（褶积）
3. 主要频率分析方法，频谱

1.1 几种典型的连续信号

1.1.1 单位阶跃函数 $\varepsilon(t)$ (unit step function)

阶跃函数是幅值在 $t=0$ 处发生跳变的一种函数，是一种特殊的连续信号，又称为奇异信号。在工程界中，一个直流稳压电源，在开关的闭合过程可以用阶跃函数来描述。其幅度为 1 时称为单位阶跃函数，国标 GB3102.11—93 规定用 $\varepsilon(t)$ 表示，习惯用 $u(t)$ 表示，波形如图 1.1 所示。定义为

$$u(t) = \begin{cases} 1, & t > 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases} \quad (1.1)$$

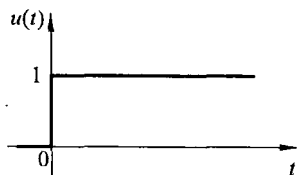


图 1.1 单位阶跃函数

在跳变点 $t=0$ 处，函数值未定义，或定义 $u(0)=1/2$ 。单位阶跃函数的其他形式如图 1.2 所示。

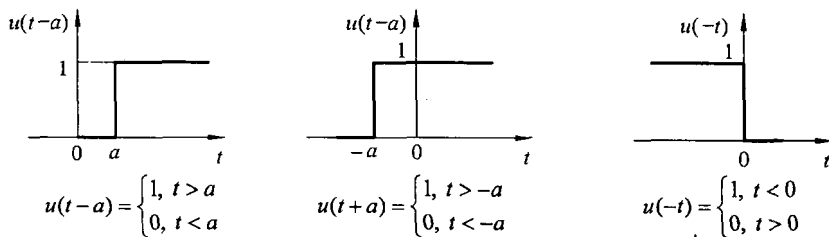


图 1.2 单位阶跃函数的其他形式

单位阶跃信号是一个很有用的信号，可以用两个单位阶跃信号来表示一个矩形脉冲信号，还可以用单位阶跃信号来表示单边信号以及一个信号的起始点。

1.1.2 单位冲激函数 $\delta(t)$ (unit impulse function)

在工程界中，存在一些在一瞬间发生的信号，在这一瞬间过后信号又消失了，如两个物