

21

高等学校信息工程类专业规划教材

# 《信号与系统(第二版)》学习指导

张小虹 编著



西安电子科技大学出版社  
<http://www.xduph.com>

# 《信号与系统(第二版)》 学习指导

张小虹 编著

王丽娟 王友军 参编

西安电子科技大学出版社

## 内 容 简 介

本书是《信号与系统(第二版)》一书的配套教材。全书内容包括:信号与系统的基本概念、连续时间系统的时域分析、连续时间信号和系统的频域表示与分析、连续时间信号和系统的复频域表示与分析、离散时间系统的时域分析、 $z$ 变换与离散系统的频域分析、状态变量分析法共7章。每章都有知识结构、重点与难点归纳、习题详解。部分习题详解中不乏经典的多解方法,还有部分习题带有MATLAB求解程序及波形。

附录包括章节小测、期中与期末模拟试题、4套研究生入学考试试卷,并提供了全部参考答案,既方便老师根据教学进度了解学生的情况,也便于学生系统复习。

本书既可作为通信、电子、信息等专业学生自学、复习、考研的参考书,也可作为学习信号与系统课程的辅助教材。

### 图书在版编目(CIP)数据

《信号与系统(第二版)》学习指导/张小虹编著. —2版.

—西安:西安电子科技大学出版社,2011.4

高等学校信息工程专业规划教材

ISBN 978 - 7 - 5606 - 2557 - 7

I. ① 信… II. ① 张… III. ① 信号系统—高等学校—教学参考资料  
IV. ① TN911.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 035600 号

策 划 马乐惠

责任编辑 杨宗周 马乐惠

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 //www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西华沐印刷科技有限责任公司

版 次 2011年4月第2版 2011年4月第2次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张24

字 数 569千字

印 数 14 001~17 000册

定 价 33.00元

ISBN 978 - 7 - 5606 - 2557 - 7/TN · 0595

**XDUP 2849002 - 2**

\* \* \* 如有印装问题可调换 \* \* \*

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

## 第二版前言

本书是《信号与系统(第二版)》一书的配套教材。本书立足实践,着眼自学,与《信号与系统(第二版)》教材配合使用相得益彰。

本书仍以基本理论为主线,对《信号与系统(第二版)》一书中的重点和难点进行了归纳、集中和概括,尤其是每章增加了本章知识结构一节,使读者对每章的知识主线、相关联系更清晰明白。

本书概念清楚、系统性强、特色鲜明。对《信号与系统(第二版)》一书中的习题进行了详细的分析解答,并对部分难题增加了多种解题方法。在本书的指导下,读者能够更加系统地将“信号、系统”的知识进行融会贯通,为全面理解与掌握这门知识打下坚实的基础。

本书除了对第一版的错误作了修订,重点在经典理论与现代计算技术结合上作了进一步的完善和补充。本书不仅非常适合电子信息类专业学生作为重要配套教材,也可作为自控专业、计算机科学与技术等相关专业学生的重要配套教材。对相关专业的工程技术人员来说也是一本有益的自学用书和实用的参考资料。

在编写本书的过程中考虑到接受对象的不同专业,结合编者多年来的教学实践,在选择重点和难点时,既体现了教学改革的精神、教学大纲的要求,也反映了针对不同教学对象的教学实践,使组织这门课程教学的老师和学生都感到有所帮助。同时,本书也为需深入了解相关知识的读者和工程技术人员奠定了基础。

本书在与《信号与系统(第二版)》一书配套的前提下,重点对一版的考研试题做了全面修改,以期更符合新的教学要求,便于读者自测和检查对本课程知识点的掌握情况,为读者掌握本门知识提供更多的参考信息和实践机会。

解放军理工大学理学院的王丽娟副教授参与了本书第一、二章的一部分内容的编写工作,王友军副教授参与了本书第五、六章的一部分内容的编写工作,全书由张小虹教授主编并统稿。在编写过程中,还得到解放军理工大学理学院的郑绪东副教授、胡澄副教授、贾永兴副教授等同行们的大力支持和帮助。编者在此对大家的关心表示深深的谢意。

由于编者水平有限,书中不足之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

编者

2011年2月

# 第一版前言

本书是《信号与系统》一书的姊妹篇。本书立足实践，着眼自学，与《信号与系统》教材配合使用相得益彰。

本书以基本理论为主线，对《信号与系统》一书中的重点和难点进行了归纳、集中和概括。对《信号与系统》一书中的习题进行了精当的解答。在本书的指导下，能够更加系统地将“信号、系统”的知识做到融会贯通，为全面理解与掌握这门知识打下坚实的基础。

本书概念清楚、系统性强、特色鲜明。尤其是现代教学思想与工具的引入，对于从事这门课程教学的老师来说，是一本不可多得的参考书。本书不仅可作为电子信息类专业的配套教材，也可作为自控专业、计算机科学与技术等相关专业的配套教材。对相关专业的工程技术人员来说也是一本有益的自学用书和实用的参考资料。

在编写过程中考虑到了接受对象的不同专业，以及多年来的教学实践，在选择重点和难点时，既体现了教学改革的精神、教学大纲的要求，也反映了针对不同教学对象的教学实践，对组织这门课程教学的老师和学生都会感到参考有益。同时也为需要深入了解相关知识的读者和工程技术人员奠定了基础。

本书在内容的组织上，在与先期出版的《信号与系统》一书配套的前提下，在附录中增加了阶段测试和考研模拟题，便于读者自测和检查对本课程知识点的掌握情况。

参与本书编写工作的还有解放军理工大学理学院的陆士元副教授，总参第六十三研究所的张为民等同志。在编写过程中，得到了解放军理工大学理学院岳振军教授，王丽娟、王友军副教授，孙镇、许胜华、刘春林、贾永兴、李宁、余远德等同行们的大力支持和帮助。编者在此对大家的关心表示深深的谢意。

由于编者水平有限，书中不足之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

编者

2004年4月

# 目 录

<b>第 1 章 信号与系统</b> .....	1
1.1 本章知识结构 .....	1
1.2 基本概念、重点与难点 .....	2
1.2.1 信号与系统概述 .....	2
1.2.2 信号及其分类 .....	2
1.2.3 典型信号 .....	3
1.2.4 连续信号的运算 .....	6
1.2.5 连续信号的分解 .....	6
1.2.6 系统 .....	7
1.2.7 系统的分类 .....	7
1.2.8 LTI 系统分析方法 .....	8
1.3 习题解答 .....	9
<b>第 2 章 连续时间系统的时域分析</b> .....	21
2.1 本章知识结构 .....	21
2.2 基本概念、重点与难点 .....	22
2.2.1 LTI 系统的数学模型与传输算子 .....	22
2.2.2 LTI 因果系统的零输入响应 .....	23
2.2.3 LTI 因果系统的零状态响应 .....	23
2.2.4 卷积及其性质 .....	24
2.2.5 LTI 因果系统的全响应及其经典解方法 .....	25
2.3 习题解答 .....	26
<b>第 3 章 连续时间信号和系统的频域表示与分析</b> .....	55
3.1 本章知识结构 .....	55
3.2 基本概念、重点与难点 .....	56
3.2.1 周期信号的傅里叶级数分析 .....	56
3.2.2 周期信号的对称性 .....	57
3.2.3 非周期信号的频谱——傅里叶变换 .....	58
3.2.4 傅里叶变换性质及定理 .....	59
3.2.5 LTI 系统的频域分析 .....	50
3.2.6 无失真传输系统 .....	61
3.2.7 理想低通滤波器与物理可实现系统 .....	61
3.2.8 时域采样与恢复(插值) .....	62
3.2.9 相关 .....	63
3.2.10 能量谱和功率谱 .....	65

3.3 习题解答 .....	66
<b>第4章 连续时间信号和系统的复频域表示与分析 .....</b>	<b>120</b>
4.1 本章知识结构 .....	120
4.2 基本概念、重点与难点 .....	121
4.2.1 拉普拉斯变换 .....	121
4.2.2 拉普拉斯变换性质(定理) .....	122
4.2.3 拉普拉斯反变换 .....	123
4.2.4 拉普拉斯变换分析法 .....	124
4.2.5 系统函数与复频域分析法 .....	125
4.2.6 连续时间系统的模拟及信号流图 .....	127
4.2.7 LTI连续系统的稳定性 .....	130
4.3 习题解答 .....	131
<b>第5章 离散时间系统的时域分析 .....</b>	<b>175</b>
5.1 本章知识结构 .....	175
5.2 基本概念、重点与难点 .....	176
5.2.1 离散序列与基本运算 .....	176
5.2.2 LTI离散系统的数学模型及其求解方法 .....	177
5.2.3 LTI离散系统的零输入响应 .....	178
5.2.4 离散系统的零状态响应 .....	179
5.2.5 离散序列卷积(和) .....	180
5.2.6 离散系统的完全响应与系统特性 .....	181
5.3 习题解答 .....	183
<b>第6章 <math>\mathcal{Z}</math>变换与离散系统的频域分析 .....</b>	<b>214</b>
6.1 本章知识结构 .....	214
6.2 基本概念、重点与难点 .....	215
6.2.1 $\mathcal{Z}$ 变换的定义 .....	215
6.2.2 $\mathcal{Z}$ 变换收敛区及典型序列 $\mathcal{Z}$ 变换 .....	215
6.2.3 $\mathcal{Z}$ 变换的性质与定理 .....	217
6.2.4 逆 $\mathcal{Z}$ 变换 .....	217
6.2.5 离散系统的复频域分析 .....	218
6.2.6 离散序列的傅里叶变换 .....	219
6.2.7 系统函数与系统特性 .....	219
6.2.8 离散系统的模拟与信号流图 .....	221
6.3 习题解答 .....	223
<b>第7章 状态变量分析法 .....</b>	<b>260</b>
7.1 本章知识结构 .....	260
7.2 基本概念、重点与难点 .....	261
7.2.1 连续系统状态方程与输出方程的建立 .....	261

7.2.2	连续时间系统状态方程的 $s$ 域分析法	263
7.2.3	离散系统状态方程与输出方程的建立	263
7.2.4	离散系统状态方程的 $z$ 域分析法	265
7.2.5	系统的可控性与可观测性	266
7.3	习题解答	267

<b>附录</b>		297
附录 A	连续信号与系统时域分析测试题	297
A.1	测试题(一)	297
A.2	测试题(二)	298
附录 B	连续信号与系统频域分析测试题	302
B.1	测试题(一)	302
B.2	测试题(二)	305
附录 C	连续信号与系统复频域分析测试题	307
C.1	测试题(一)	307
C.2	测试题(二)	308
C.3	测试题(三)	310
附录 D	连续信号与系统综合分析测试题(期中测试)	312
D.1	测试题(一)	312
D.2	测试题(二)	315
附录 E	离散信号与系统分析、 $\mathcal{Z}$ 变换与状态变量分析法测试题	317
E.1	测试题(一)	317
E.2	测试题(二)	319
E.3	测试题(三)	320
附录 F	信号与系统模拟试题(期末考试)	322
F.1	模拟试卷(一)	322
F.2	模拟试卷(二)	324
F.3	模拟试卷(三)	326
附录 G	信号与系统考研试题	329
G.1	考研试卷(一)	329
G.2	考研试卷(二)	332
G.3	考研试卷(三)	335
G.4	考研试卷(四)	339

<b>附录答案</b>		344
附录 A	连续信号与系统时域分析测试题答案	344
A.1	测试题(一)	344
A.2	测试题(二)	345
附录 B	连续信号与系统频域分析测试题答案	346
B.1	测试题(一)	346
B.2	测试题(二)	347
附录 C	连续信号与系统复频域分析测试题答案	348
C.1	测试题(一)	348



C.2	测试题(二)	349
C.3	测试题(三)	350
附录 D	连续信号与系统综合分析测试题(期中测试)答案	351
D.1	测试题(一)	351
D.2	测试题(二)	353
附录 E	离散信号与系统分析、 $\mathcal{Z}$ 变换与状态变量分析法测试题答案	354
E.1	测试题(一)	354
E.2	测试题(二)	356
E.3	测试题(三)	357
附录 F	信号与系统模拟试题(期末考试)答案	358
F.1	模拟试卷(一)	358
F.2	模拟试卷(二)	360
F.3	模拟试卷(三)	362
附录 G	信号与系统考研试题答案	364
G.1	考研试卷(一)	364
G.2	考研试卷(二)	367
G.3	考研试卷(三)	369
G.4	考研试卷(四)	371
<b>参考文献</b>		<b>374</b>

# 第 1 章 信号与系统

## 1.1 本章知识结构

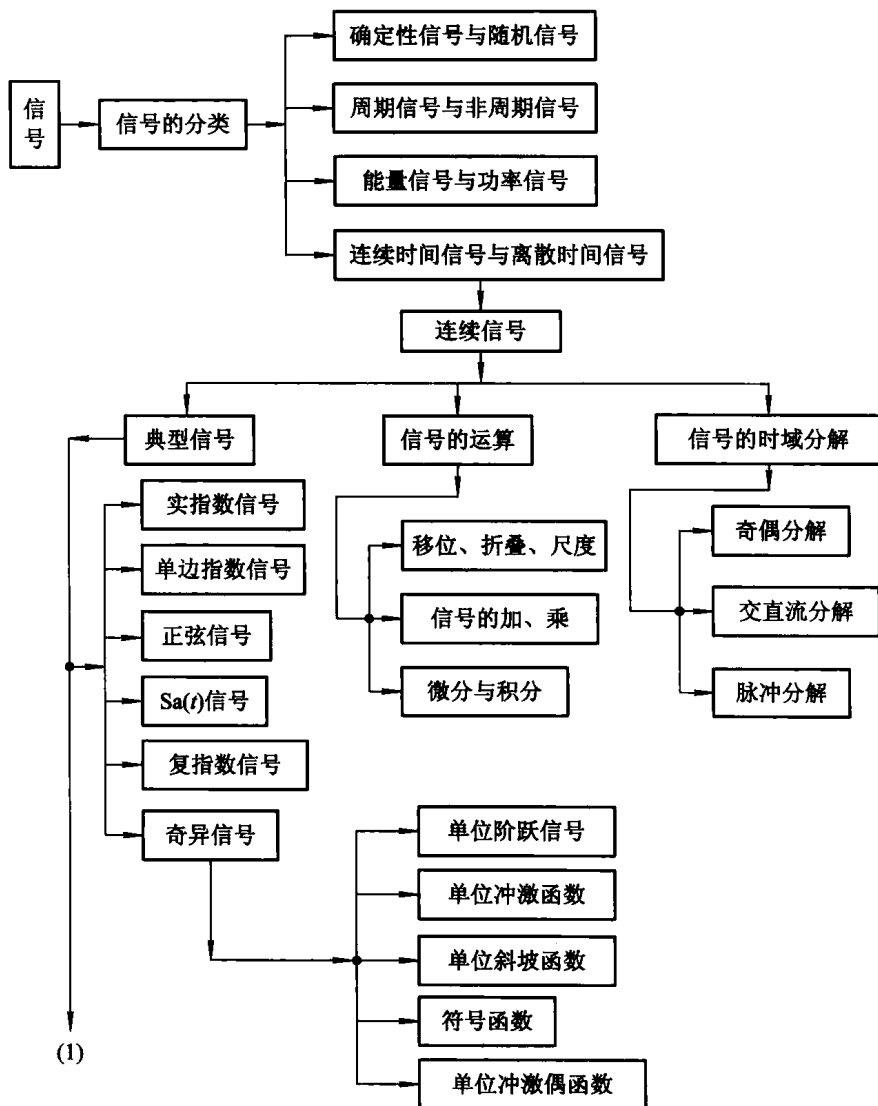


图 1-1(1)

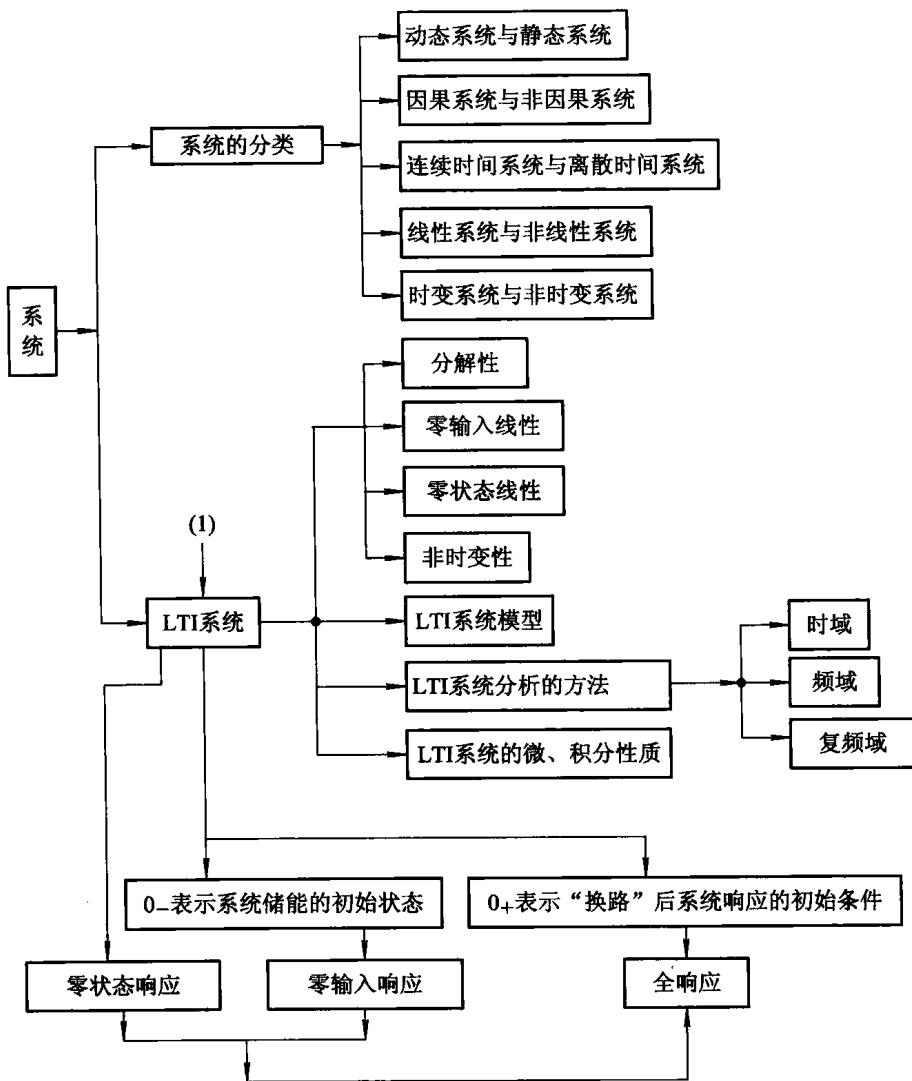


图 1-1(2)

## 1.2 基本概念、重点与难点

### 1.2.1 信号与系统概述

信号是各类消息的运载工具，是某种变化的物理量。系统是由若干相互作用、相互关联的事物组合而成的，是具有特定功能的整体。

### 1.2.2 信号及其分类

人们用来传递信息的信号主要是电信号。电信号是随时间变化的电压或电流。常用的信号有以下 5 种。

### 1. 确定性信号与随机信号

可以表示为确定时间函数的信号是确定性信号，也称规则信号。随机信号是不能用确定的时间函数表示且只知其统计特性的信号。

### 2. 周期信号与非周期信号

周期信号一般表示为

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

其中， $T$  为最小重复时间间隔，也称周期，不满足上式的为非周期信号。

若干周期信号叠加后仍为周期信号，叠加后信号角频率  $\omega_0$  的计算如下：

$$\omega_1 = \frac{N_1}{N_0}, \omega_2 = \frac{N_2}{N_0}, \dots, \omega_n = \frac{N_n}{N_0}$$

式中， $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$  为各周期信号的角频率； $N_1, N_2, \dots, N_n$  为正整数且无公因子，则  $\omega_0 = \frac{1}{N_0}$ ；若有公因子  $N$ ，则  $\omega_0 = \frac{N}{N_0}$ 。

### 3. 连续时间信号与离散时间信号

连续时间信号在所讨论的时间内，对任意时间值(除有限不连续点外)都可以给出确定的函数值。

离散信号亦称序列，其自变量  $n$  是离散的，通常为整数。离散信号的幅值被量化，即只能取某些规定值(并被编码)时，称为数字信号。

### 4. 能量信号与功率信号

在  $(-T/2, T/2)$  区间信号的平均功率  $P$  为

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

在  $(-\infty, \infty)$  区间信号的能量  $E$  为

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

信号  $f(t)$  的能量有界，即  $0 < E < \infty$ ；而平均功率  $P = 0$ ，是能量信号。如果信号  $f(t)$  的平均功率有界，即  $0 < P < \infty$ ，而能量  $E \rightarrow \infty$ ，就是功率信号。如果有信号能量  $E \rightarrow \infty$ ，且功率  $P \rightarrow \infty$ ，就是非能量非功率信号。

### 5. 因果信号与非因果信号

当  $t < 0$  时，连续信号  $f(t) = 0$ ，信号  $f(t)$  是因果信号，反之为非因果信号；当  $n < 0$  时，离散信号  $x(n) = 0$ ，则信号  $x(n)$  是因果信号，反之为非因果信号。

## 1.2.3 典型信号

### 1. 常用连续信号

#### 1) 实指数信号

$$f(t) = Ae^{at}$$

式中，当  $a > 0$  时， $f(t)$  随时间增长； $a < 0$  时， $f(t)$  随时间衰减； $a = 0$  时， $f(t)$  不随时间变化。常数  $A$  表示  $t = 0$  时信号的初始值， $|a|$  的大小反映了信号随时间增减的速率。

单边指数信号表示式为

$$f(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ Ae^{-\frac{t}{\tau}}, & t > 0 \end{cases}$$

特别地, 在  $f(0) = A$  时,

$$f(t) |_{t=\tau} = f(\tau) = \frac{A}{e} = 0.368A$$

2) 正弦信号

$$f(t) = A \sin(\omega t + \theta)$$

其中,  $A$  是振幅,  $\omega$  是角频率,  $\theta$  是初相, 周期  $T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{1}{f}$ 。

3) 复指数信号

$$f(t) = Ae^{st}$$

当  $s = \sigma + j\omega$  时,  $f(t) = Ae^{\sigma t} (\cos\omega t + j \sin\omega t)$ ;

当  $s = j\omega$  时,  $f(t) = A(\cos\omega t + j \sin\omega t)$ ;

当  $s = \sigma$  时,  $f(t) = Ae^{\sigma t}$  是实指数信号;

当  $s = 0$  时,  $f(t) = A$  是直流信号。

4) Sa(t) 信号(抽样信号)

$$f(t) = \text{Sa}(t) = \frac{\sin t}{t}$$

Sa(t) 具有以下性质:

(1) 信号是偶函数;

(2)  $f(0) = 1$ ,  $f(\pm n\pi) = 0$ , 其中  $n$  为整数;

(3)  $\int_0^{\infty} \text{Sa}(t) dt = \frac{\pi}{2}$ ,  $\int_{-\infty}^{\infty} \text{Sa}(t) dt = \pi$ 。

## 2. 奇异信号

1) 单位阶跃信号  $u(t)$

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

2) 单位冲激函数  $\delta(t)$

$$\begin{cases} \delta(t) = \begin{cases} \infty, & t = 0 \\ 0, & t \neq 0 \end{cases} \\ \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1 \end{cases}$$

冲激函数的运算与性质:

(1) 取样性或“筛选”。若  $f(t)$  是在  $t=0$  处为连续的有界函数, 则

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(t)\delta(t) dt = \int_{-\infty}^{\infty} f(0)\delta(t) dt = f(0)$$

以及

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

(2) 偶函数:

$$\delta(t) = \delta(-t)$$

(3) 与单位阶跃函数  $u(t)$  互为积分、微分关系, 即

$$\int_{-\infty}^t \delta(\tau) d\tau = u(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & t > 0 \end{cases}$$
$$\frac{du(t)}{dt} = \begin{cases} 0, & t \neq 0 \\ \infty, & t = 0 \end{cases}$$
$$= \delta(t)$$

(4) 尺度特性:

$$\delta(at) = \frac{1}{|a|} \delta(t)$$

3) 单位斜坡函数

$$R(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ t, & t > 0 \end{cases}$$
$$= tu(t)$$

单位斜坡函数与阶跃函数  $u(t)$  互为微分、积分关系, 即

$$\frac{dR(t)}{dt} = u(t)$$
$$\int_{-\infty}^t u(\tau) d\tau = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ t, & t > 0 \end{cases}$$
$$= R(t)$$

4) 门函数  $g_{\tau}(t)$

$$g_{\tau}(t) = \begin{cases} 1, & |t| < \frac{\tau}{2} \\ 0, & |t| > \frac{\tau}{2} \end{cases}$$
$$= \left[ u\left(t + \frac{\tau}{2}\right) - u\left(t - \frac{\tau}{2}\right) \right]$$

5) 符号函数  $\text{sgnt}$

$$\text{sgnt} = \begin{cases} 1, & t > 0 \\ -1, & t < 0 \end{cases}$$
$$= 2u(t) - 1 = -u(-t) + u(t)$$

6) 单位冲激偶函数  $\delta'(t)$

$$\delta'(t) = \frac{d\delta(t)}{dt} = \lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{1}{\tau} \left[ \delta\left(t + \frac{\tau}{2}\right) - \delta\left(t - \frac{\tau}{2}\right) \right]$$

单位冲激偶函数具有如下特性:

(1) 对  $f'(t)$  在 0 点连续的函数, 有

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta'(t) f(t) dt = -f'(0)$$

(2) 无限区间对单位冲激偶函数积分为零, 即

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta'(t) dt = 0$$

(3)  $\delta'(t)$ 与 $\delta(t)$ 互为积分、微分关系,即

$$\delta'(t) = \frac{d\delta(t)}{dt}$$
$$\int_{-\infty}^t \delta'(\tau) d\tau = \begin{cases} 0, & t < 0_- \\ \infty, & 0_- < t < 0_+ \\ 0, & t > 0_+ \end{cases}$$

## 1.2.4 连续信号的运算

### 1. 时移、折叠、尺度

(1) 时移。将信号  $f(t)$  的自变量  $t$  用  $t-t_0$  替换,得到  $f(t-t_0)$  是  $f(t)$  的时移,是  $f(t)$  的波形在时间轴  $t$  上整体移位  $t_0$ 。

(2) 折叠。将  $f(t)$  自变量  $t$  用  $-t$  替换,得到信号  $f(-t)$  是  $f(t)$  的折叠信号。

(3) 尺度变换。将  $f(t)$  的自变量  $t$  用  $at (a \neq 0)$  替换,得到  $f(at)$  是  $f(t)$  的尺度变换。

以上变换都是函数自变量的变换,而变换前后端点上的函数值(冲激函数除外)不变。确定变换前后波形中各端点的相应位置的具体方法是:设变换前信号为  $f(at+b)$ ,用  $t_1$  表示变换前端点的位置;变换后信号为  $f(mt'+n)$ ,用  $t'_1$  表示变换后端点的位置,则变换后的端点为

$$t'_1 = \frac{1}{m}(at_1 + b - n)$$

### 2. 微分与积分

微分是对  $f(t)$  求导数的运算,表示为

$$f'(t) = \frac{df(t)}{dt}$$

积分是对  $f(t)$  在  $(-\infty, t)$  区间内的积分,表示式为

$$y(t) = \int_{-\infty}^t f(\tau) d\tau$$

### 3. 信号的加(减)、乘(除)

$f_1(t) \pm f_2(t)$  是两个信号瞬时值相加(减)形成的新信号;  $f_1(t) \cdot f_2(t)$  或  $f_1(t)/f_2(t) = f_1(t) \cdot [1/f_2(t)]$  是两个信号瞬时值相乘形成的新信号。一般两个信号相乘,变化慢的信号形成包络。包络线反映了相乘信号总的变化趋势。

## 1.2.5 连续信号的分解

### 1. 交、直流分解

信号可以分解为直流分量  $f_D(t)$  与交流分量  $f_A(t)$ , 即

$$f(t) = f_D(t) + f_A(t)$$

式中直流分量  $f_D(t)$  是信号的平均值。信号  $f(t)$  除去直流分量  $f_D(t)$ , 剩下的即为交流分量  $f_A(t)$ 。

## 2. 奇偶分解

任意信号  $f(t)$  可分解为偶分量与奇分量之和

$$f(t) = f_e(t) + f_o(t)$$

式中, 偶分量  $f_e(t) = \frac{1}{2}[f(t) + f(-t)]$ ; 奇分量  $f_o(t) = \frac{1}{2}[f(t) - f(-t)]$ 。

## 3. 任意信号的脉冲分解

用冲激函数表示任意因果信号的积分形式为

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

任意因果信号用阶跃信号表示的积分形式为

$$f(t) = f(0)u(t) + \int_{0+}^t f'(\tau)u(t-\tau) d\tau$$

## 1.2.6 系统

(1) 系统的作用是将输入信号转变为所需要的输出信号。

(2) 初始状态。连续系统中, “初始”通常是一个非零的电源接入电路系统的瞬间, 或电路发生“换路”的瞬间。一般用  $0_-$  表示系统“换路”前系统储能的初始状态, 用  $0_+$  表示“换路”后系统响应的初始条件。

## 1.2.7 系统的分类

### 1. 动态系统与静态系统

含有动态元件的系统是动态系统, 描述动态系统的数学模型为微分方程, 其响应不仅与该时刻的激励有关, 还与该时刻以前的激励有关; 没有动态元件的系统是静态系统, 也称即时系统, 描述静态系统的数学模型为代数方程, 其响应仅与该时刻的激励有关。

### 2. 因果系统与非因果系统

因果系统的响应是由激励引起的, 激励是响应的原因, 响应是激励的结果; 响应与激励具有因果关系的系统也称为物理可实现系统。如果响应出现在激励之前, 系统为非因果系统也称物理不可实现系统。

另外,  $t < 0$  时为零的信号也称为因果信号。对于因果系统, 在因果信号激励下, 响应也是因果信号。

### 3. 连续时间系统与离散时间系统

激励与响应均为连续时间信号的系统是连续时间系统, 也称模拟系统; 激励与响应均为离散时间信号的系统是离散时间系统, 也称数字系统。

### 4. 线性系统与非线性系统

线性系统必须满足以下三个条件:

(1) 分解性。系统响应可表示为

$$y(t) = y_{ai}(t) + y_{zs}(t)$$

式中,  $y_{ai}(t)$  是零输入响应,  $y_{zs}(t)$  是零状态响应。



(2) 零输入线性。若

$$x_k(0_-) \rightarrow y_{zik}(t) \quad (k = 1 \sim n) \quad t \geq 0$$

则

$$\sum_{k=1}^n a_k x_k(0_-) \rightarrow \sum_{k=1}^n a_k y_{zik}(t), \quad t \geq 0$$

(3) 零状态线性。若

$$f_i(t)u(t) \rightarrow y_{zsi}(t)u(t)$$

则

$$\sum_{i=1}^m b_i f_i(t)u(t) \rightarrow \sum_{i=1}^m b_i y_{zsi}(t)u(t), \quad t \geq 0$$

### 5. 时变系统与非时变系统

非时变系统(亦称时不变系统)在初始状态相同的情况下,系统响应与激励加入的时刻无关。即

$$f(t) \leftrightarrow y_{zs}(t)$$

则

$$f(t-t_0) \rightarrow y_{zs}(t-t_0)$$

不满足此关系的为时变系统。

## 1.2.8 LTI 系统分析方法

同时满足线性及非时变性的系统为线性非时变系统,通常简称为 LTI 系统。

### 1. LTI 系统模型

(1) 输入—输出描述法着眼于系统激励与响应的外部关系,不关心系统内部的变量情况。适用于单输入、单输出系统。如通信系统中大量遇到的是单输入、单输出系统。

(2) 状态变量描述法除了给出系统的响应外,还可以提供系统内部变量的情况。适用于多输入、多输出的情况。如在控制系统理论研究中,广泛采用状态变量描述法。

### 2. LTI 系统分析的方法

LTI 系统分析的方法是将信号分解为多个基本信号元。时域分析将脉冲信号作为基本信号元,信号可以用冲激(阶跃)函数表示。(复)频域(也称变域)分析将正弦(复指数)函数作为基本信号元,信号可以用不同频率的正弦(复指数)函数来表示。两类分析方法均以叠加性、均匀性及时不变特性作为分析问题的基点,没有本质上的区别,仅是分解的基本信号元不同而已。

### 3. LTI 系统的微、积分性质

若  $f(t) \rightarrow y(t)$ , 则

$$\begin{aligned} \frac{df(t)}{dt} &\rightarrow \frac{dy(t)}{dt} \\ \frac{d^n f(t)}{dt^n} &\rightarrow \frac{d^n y(t)}{dt^n} \quad (n \text{ 为正整数}) \\ \int_0^t f(\tau) d\tau &\rightarrow \int_0^t y(\tau) d\tau \end{aligned}$$