



工业和信息化普通高等教育
“十二五”规划教材立项项目

任璧蓉 聂小燕 杨红 编著

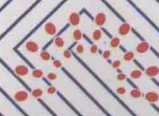
信号与系统 分析

21 世纪高等院校信息工程规划教材
21st Century University Planned Textbooks of Information and Communication Engineering

Signals and Systems Analysis



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



高校系列



工业和信息化普通高等教育
“十二五”规划教材立项项目

任壁蓉 聂小燕 杨红 编著

信号与系统 分析

Signals and Systems Analysis

人民邮电出版社
北京



图书在版编目 (CIP) 数据

信号与系统分析 / 任璧蓉, 聂小燕, 杨红编著. --
北京: 人民邮电出版社, 2011. 8
21世纪高等院校信息与通信工程规划教材
ISBN 978-7-115-23985-3

I. ①信… II. ①任… ②聂… ③杨… III. ①信号系
统一高等学校—教材 IV. ①TN911.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第063991号

内 容 提 要

本书全面介绍信号与系统分析的基本理论和分析方法。本书共分6章。第1章绪论、第2章连续时间信号与LTI连续时间系统的时域分析、第3章连续时间信号与LTI连续时间系统的频域分析、第4章连续时间信号与LTI连续时间系统的复频(S)域分析、第5章LTI离散时间系统的时域分析及第6章LTI离散时间系统的 Z 域分析。

本书可作为普通高等院校的本科生教材,也可作为高职高专院校、成人教育和高等自学考试的参考用书。

工业和信息化部普通高等教育“十二五”规划教材立项项目

21世纪高等院校信息与通信工程规划教材

信号与系统分析

-
- ◆ 编 著 任璧蓉 聂小燕 杨 红
责任编辑 滑 玉
执行编辑 董 楠
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街14号
邮编 100061 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 13.75 2011年8月第1版
字数: 334千字 2011年8月河北第1次印刷

ISBN 978-7-115-23985-3

定价: 29.00元

读者服务热线: (010)67170985 印装质量热线: (010)67129223

反盗版热线: (010)67171154

广告经营许可证: 京崇工商广字第0021号

电子科技大学成都学院是国家教育部批准成立的独立学院，已有近 10 年的办学历史。学院十分重视人才培养质量，坚持“以学生为本，以学院发展为重”的办学宗旨，坚持走以内涵发展为主的道路，不断深化教学改革，针对学生的学习基础，重视因材施教、分层次培养。“信号与系统分析”课程是电子科技大学成都学院电子信息类专业的必修专业基础课程，目前国内尚无适合独立学院和相类似高校电子信息类专业学生使用的教材，只能根据教学大纲，选用其他教材授课，虽能暂时满足教学要求，但由于特色不鲜明，针对性不强，不利于学生课堂听课和课外复习，对提高课程教学质量也有一定影响。

根据教育部“高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划”，电子科技大学成都学院组织相关教师对“信号与系统分析”课程现阶段国内外的状况、教学大纲、教学体系、教学内容和教学方法进行了认真的调研、学习及讨论，在此基础上融入教师多年给独立学院学生授课的经验，以自编讲义为基础编写出这本教材。

这本教材在体系构建、内容取舍、例题及习题编排上做了合理的处理，言简易懂。教材虽以独立学院学生为使用主体，也适用于高等职业专科院校、成人教育和高等自学考试。

电子科技大学成都学院院长 罗正祥

2011 年 3 月

“信号与系统分析”课程是通信工程、自动控制、信息工程及计算机等方向专业的必修专业基础课。理论性、逻辑性强，较抽象；需要较好的高等数学、电路分析知识和一定的复变函数知识；教与学均有一定的难度。

根据教育部“高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划”，电子科技大学成都学院对“信号与系统”课程的教学大纲、教学体系、教学内容和教学方法进行了认真的探讨。为了培养学生的学习习惯，提高学生思考、分析和解决问题的素质及能力，在总结多年来实践教学经验的基础上，组织编写了本书。

本书有如下特色。

1. 强调建立以学生为主体的编写思想。在调研独立学院学生的学习习惯、知识现状和分析后续课程所必需的“信号与系统”课程的知识的基础上，本书编写时力争尽量符合学生的认知规律，以后续课程够用为核心，精选内容。遵循先易后难、循序渐进的原则分解教材内容，适时适度地进行技巧和知识面的铺垫，以利于教与学的开展。组织教学内容时，把基本概念和知识要点有机整合，去掉繁琐的推导，形成本书的知识点。在注意条理清晰、逻辑严谨的同时，尽量做到重点突出、难点分散，能快速引导学生入门，从而建立起学习“信号与系统分析”课程的兴趣和信心。

2. 本书结构重基本概念，重对学生能力的培养。在内容编排和体系结构上，尽量考虑有利于对基本概念的理解和掌握。教材结构体系为先时域后变换域、先连续后离散、先信号分析后系统分析。

3. 精选例题。例题除及时跟进内容外，其难度还呈阶梯状推进，且配备了一定技巧性的例题。引导学生能逐渐学会自主学习，提高解题能力，从而培养学生学习“信号与系统分析”课程的兴趣和自信心，掌握基本概念和解决问题的能力，为后续课程的学习打下良好的基础。

4. 为了使学生不仅能读懂而且要喜欢、愿意学习这本教材，本书文字叙述在确保概念准确的前提下，尽力做到了语言通俗易懂、流畅，图文配合恰当，且详略得当。

5. 精选课后习题。本教材配有一定的能起到章节小结作用的填空题和简答题，能帮助学生理解本章内容及重点。所有练习题均为后续课程所需的最基本的且必须掌握的内容。本教材配有全部习题答案，帮助学生自主检查知识掌握的程度。

本书第 1 章、第 2 章及第 4 章由任璧蓉编写，第 5 章、第 6 章由聂小燕编写，第 3 章

2 | 信号与系统分析

由杨红编写，任璧蓉负责全书编写的组织和定稿工作，最后由任璧蓉、聂小燕共同负责全书校对工作。

在此，向在本书编写过程中参考的优秀的参考文献的作者致以真诚的谢意。

鉴于水平有限及写作时间短促，不妥之处敬请指正。

编 者

2011 年 3 月

目 录

第 1 章 绪论	1	举例	39
1.1 信号的概念	1	习题	44
1.1.1 信号的分类	1	第 3 章 连续时间信号与 LTI 连续时间	
1.1.2 连续时间信号的基本运算	5	系统的频域分析	48
1.1.3 常用连续时间信号	8	3.1 周期信号的频谱分析——傅里叶	
1.2 线性时不变系统的概念	19	级数 (FS)	48
1.2.1 系统的概念	19	3.1.1 三角函数形式的 FS	48
1.2.2 系统的初始状态的概念	21	3.1.2 指数函数形式的 FS	49
1.2.3 5 个基本概念	21	3.1.3 周期信号的频谱	51
1.2.4 系统的分类	22	3.1.4 周期信号的带宽	51
1.2.5 线性时不变系统的性质及		3.2 傅里叶变换 (FT)	51
描述	23	3.2.1 FT 的引入	51
1.3 信号与系统分析概述	24	3.2.2 FT 的定义	53
1.3.1 信号分析概述	24	3.2.3 FT 的性质	55
1.3.2 系统分析概述	25	3.2.4 有理真分式的部分分式展开	72
习题	25	3.3 LTI 连续时间系统的频域分析	76
第 2 章 连续时间信号和 LTI 连续时间		3.3.1 LTI 连续时间系统的频率	
系统的时域分析	30	响应 $H(\omega)$	76
2.1 LTI 连续时间系统的零输入		3.3.2 LTI 连续时间系统的频域	
响应 $y_s(t)$	30	分析	78
2.2 LTI 连续时间系统的零状态		3.3.3 周期信号通过 LTI 连续时间	
响应 $y_f(t)$	31	系统的响应	79
2.2.1 LTI 连续时间系统的零状态		3.3.4 无失真传输系统	81
响应 $y_f(t)$ 的定义	31	3.3.5 调制、解调的概念	82
2.2.2 LTI 连续时间系统的单位冲激		3.3.6 理想滤波器的概念	82
响应 $h(t)$	32	3.3.7 时域取样	87
2.2.3 LTI 连续时间系统的零状态响		习题	89
应 $y_f(t)$ 的求法	32	第 4 章 连续时间信号与 LTI 连续时间	
2.2.4 LTI 连续时间系统的单位阶跃		系统的复频域分析	92
响应 $s(t)$	33	4.1 双边拉普拉斯变换 (LT)	92
2.3 卷积积分	33	4.1.1 由 FT 引入双边 LT	92
2.3.1 卷积积分的定义	33	4.1.2 双边 LT 的定义	94
2.3.2 卷积积分的性质	35	4.1.3 双边 LT 的收敛域	95
2.4 LTI 连续时间系统时域分析		4.1.4 双边 LT 与 FT 的关系	97

4.1.5 双边 LT 的性质	98	5.3 LTI 离散时间系统的时域分析	153
4.1.6 拉普拉斯反变换	107	5.3.1 LTI 离散时间系统的零输入 响应 $y_s[n]$	153
4.2 单边拉普拉斯变换	110	5.3.2 LTI 离散时间系统的零状态 响应 $y_f[n]$	154
4.2.1 单边 LT 的定义	110	5.4 卷和 (卷积和)	156
4.2.2 单边 LT 的性质	110	5.4.1 离散信号卷和的定义	156
4.3 LTI 连续时间系统的复频域 分析	117	5.4.2 离散信号卷和的性质	157
4.3.1 LTI 连续时间系统的系统 函数 $H(s)$	117	5.4.3 短序列间的卷和—— 列竖式法	159
4.3.2 LTI 连续时间系统对输入信号 $f(t) = e^{s_0 t}$ 的响应	120	5.5 LTI 离散时间系统时域分析 举例	162
4.3.3 LTI 连续时间系统零状态响应 $y_f(t)$ 的复频域分析	120	习题	165
4.3.4 用单边 LT 解微分方程	125	第 6 章 LTI 离散时间系统的 Z 域分析	168
4.3.5 电路的复频域分析	128	6.1 双边 Z 变换 (ZT)	168
4.4 LTI 连续时间系统的模拟	133	6.1.1 双边 ZT 的定义	168
4.4.1 子系统的简单连接	133	6.1.2 ZT 的收敛域	170
4.4.2 LTI 连续时间系统模拟所用 基本器件	135	6.1.3 双边 ZT 的性质	172
4.4.3 LTI 连续时间系统的模拟	135	6.2 反 Z 变换	178
4.5 LTI 连续时间系统的零极图、稳定 性及因果性	139	6.3 单边 ZT	180
4.5.1 LTI 连续时间系统的零极图 分析	139	6.3.1 单边 ZT 的定义	180
4.5.2 因果 LTI 连续时间系统的稳定 性判定	140	6.3.2 单边 ZT 的性质	181
4.5.3 LTI 连续时间系统的因果性	141	6.4 LTI 离散时间系统的 ZT 分析	185
习题	142	6.4.1 LTI 离散时间系统的系统 函数 $H(s)$	185
第 5 章 LTI 离散时间系统的时域分析	146	6.4.2 LTI 离散时间系统零状态响应 $y_f[n]$ 的 ZT 分析	188
5.1 离散时间信号	146	6.4.3 用单边 ZT 求解差分方程	189
5.1.1 离散时间信号的概念	146	6.4.4 LTI 离散时间系统的模拟	192
5.1.2 离散时间信号的描述	147	6.4.5 LTI 离散时间系统的零极图、 因果性及稳定性	194
5.1.3 离散时间信号的基本运算	147	6.5 离散时间信号的傅里叶变换	198
5.1.4 常用离散时间信号	149	6.6 离散时间系统的频率响应	199
5.2 LTI 离散时间系统	151	习题	200
5.2.1 LTI 离散时间系统的性质	152	习题答案	203
5.2.2 LTI 离散时间系统的差分 方程	152	参考文献	212

本章首先以连续时间信号为例介绍信号的分类、常用信号、信号的基本运算，然后讨论系统的相关概念，最后介绍信号分析及系统分析的基本思路。这些内容是学习信号与系统分析课程的重要基础，是展开后续课程学习的前提，应熟练掌握基本概念及运算；应清晰地理解信号分析及系统分析的基本思路。

1.1 信号的概念

信号的概念一直就存在于人们的日常生活中。在古代，当人们看见万里长城的烽火台升起浓烟时，就知道有敌人入侵了，其中包含的信息是敌人入侵，这一信息的载体是烽烟。而当渔船遇险发出求救信号时，其中的信息是渔船遇险请求救援，信息的载体是无线电波。本教材讨论的信号是指包含信息的电压或电流。

1.1.1 信号的分类

根据信号的不同属性可以对信号进行不同的分类，各种分类方法是互不相关的。本教材只讨论如下 7 种分类方法。

1. 确定性信号与随机信号

确定性信号是指可以用时间函数来描述的信号，例如信号 $f(t) = \sin 2t$ 。本教材只研究确定性信号，因此，全书信号与函数 2 个名词为同一概念。由于确定性信号是可以用函数来描述的，所以具时间特性，能作出随时间变化的波形图；具能量（功率）特性，可求出信号的能量（功率）；具频率特性，由一定的频率分量组成。而随机信号是指不能用确定的时间函数描述的信号，将在专门的后续课程中讨论。

2. 连续时间信号与离散时间信号

定义比时间 t_0 （ t_0 为实数）小无穷小的时间为 t_0^- ，即

$$t_0^- = \lim_{\substack{\varepsilon \rightarrow 0 \\ \varepsilon > 0}} (t_0 - \varepsilon) \quad (1.1.1)$$

定义比时间 t_0 （ t_0 为实数）大无穷小的时间为 t_0^+ ，即

$$t_0^+ = \lim_{\substack{\varepsilon \rightarrow 0 \\ \varepsilon > 0}} (t_0 + \varepsilon) \quad (1.1.2)$$

在高等数学中定义过函数的第 1 类间断点。若 t_0 是函数 $f(t)$ 的第一类间断点，则存在函数的左极限 $f(t_0^-)$ 和右极限 $f(t_0^+)$ ，而函数在 $t=t_0$ 时刻的函数值 $f(t_0)$ 无定义。例如图 1.1.1 所示信号 $f(t)$ ， $f(0)$ 无定义、左极限 $f(0^-)=0$ 、右极限 $f(0^+)=1$ ，所以 $t=0$ 是信号 $f(t)$ 的第 1 类间断点。

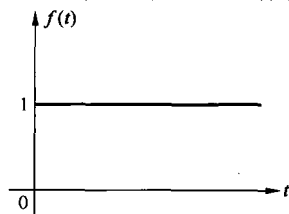


图 1.1.1 函数的第 1 类间断点例图

若信号 $f(t)$ 对于自变量 t 除第一类间断点外处处有定义，就称信号 $f(t)$ 为连续时间信号如图 1.1.2 (a) 所示。

离散时间信号是指只在离散的时间点上有定义，其余时间无定义的信号，如图 1.1.2 (b) 所示。本教材第 1 章至第 4 章学习连续时间信号与系统分析，而第 5 章、第 6 章讨论离散时间信号与系统分析。

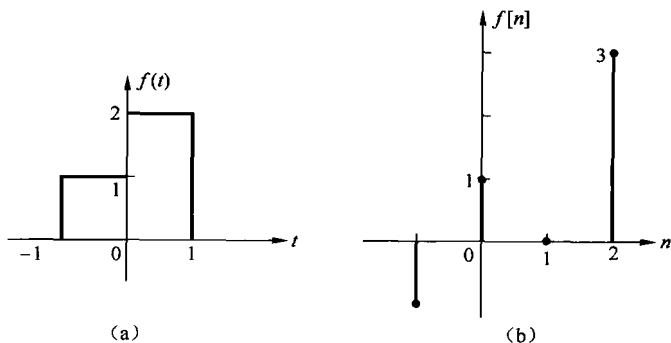


图 1.1.2 连续时间信号、离散时间信号波形例图

为了区分这 2 类信号，用 t 表示连续时间信号的时间变量，用圆括号把自变量括在里面 (t)，例如连续时间信号 $f(t)$ 。而用 n 表示离散时间信号的自变量，用方括号把自变量括在里面 $[n]$ ，例如离散时间信号 $f[n]$ 。

3. 周期信号与非周期信号

周期信号 $f(t)$ 的周期为 T (s, 秒)，角频率 $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$ (rad/s, 弧度/秒)，频率 $f = \frac{1}{T}$ (Hz, 赫兹)，满足关系式

$$f(t) = f(t - T) \quad (1.1.3)$$

周期信号的波形以 T 为周期周期性重复。图 1.1.3 即为周期 $T=2$ 的周期信号。

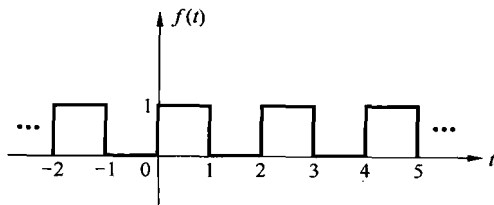


图 1.1.3 周期信号波形例图

不满足式 (1.1.3) 的信号不具周期性称为非周期信号，例如图 1.1.2 (a) 所示信号即为非周期信号。

4. 对称信号与非对称信号

本教材只介绍 2 种对称信号：满足 $f(t) = -f(-t)$

的信号称为奇信号, 波形对称于原点, 如图 1.1.4 (a) 所示; 满足 $f(t) = f(-t)$ 的信号称为偶信号, 波形对称于纵轴, 如图 1.1.4 (b) 所示。

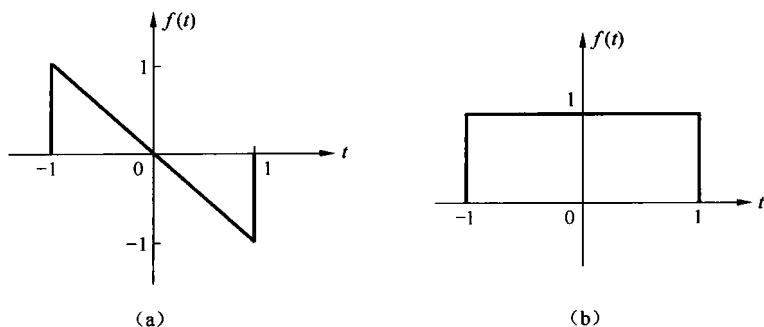


图 1.1.4 奇信号、偶信号波形例图

5. 实信号与复信号

用实函数描述的信号称为实信号, 可以作出随时间变化的波形图; 用复函数描述的信号称为复信号, 只能分别作出其实部及虚部波形图。信号 $f(t) = 2t - 1$ 是实信号, 而信号 $y(t) = e^{j\omega t}$ 是复信号。

一切物理可实现信号均为实信号, 为了建立一些有用的概念或为了简化运算常使用复变函数, 于是出现了复信号。例如运用欧拉公式可以将实信号余弦信号或正弦信号表示成一对复信号的叠加。

$$\cos \alpha t = \frac{1}{2}(e^{j\alpha t} + e^{-j\alpha t}) \quad (1.1.4)$$

$$\sin \alpha t = \frac{1}{2j}(e^{j\alpha t} - e^{-j\alpha t}) \quad (1.1.5)$$

6. 能量信号与功率信号

将信号 $f(t)$ 看作电压或电流, 通过 1Ω 电阻时所消耗的能量 E 或功率 p 称为信号 $f(t)$ 的能量或功率。即

信号 $f(t)$ 的能量的定义为

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} f^2(t) dt \quad (1.1.6)$$

信号 $f(t)$ 的功率的定义为

$$p = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T f^2(t) dt \quad (1.1.7)$$

若信号 $f(t)$ 的能量有限就称信号 $f(t)$ 为能量信号, 功率当然等于零。若信号的功率有限就称信号 $f(t)$ 为功率信号, 功率信号的能量为无穷大。

例如, 图 1.1.2 (a) 所示信号 $f(t)$ 的能量为 $E = \int_{-\infty}^{\infty} f^2(t) dt = \int_{-1}^0 dt + \int_0^1 4dt = 5$, 信号 $f(t)$ 的功率为 $p = 0$, 因此图 1.1.2 (a) 所示信号为能量信号。而图 1.1.3 所示信号 $f(t)$ 的功率为 $p = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T f^2(t) dt = \frac{1}{2} \int_0^1 dt = \frac{1}{2}$, 能量 $E \rightarrow \infty$ 。所以, 图 1.1.3 所示信号为功率信号。

7. 信号按所占时间范围分类

按照信号所占时间范围可以将信号作如下 4 种分类。

① 有始信号（又称为右边信号）。若信号 $f(t)$ 满足条件，当 $t < t_1$ 时 $f(t) \equiv 0$ ，称 $f(t)$ 为有始信号，如图 1.1.5 (a) 所示。若 $t_1 = 0$ ，即 $t < 0$ 时 $f(t) \equiv 0$ ，又称信号 $f(t)$ 为因果信号，如图 1.1.5 (b) 所示。

② 有终信号（又称为左边信号）。若信号 $f(t)$ 满足条件，当 $t > t_2$ 时 $f(t) \equiv 0$ ，称信号 $f(t)$ 为有终信号，如图 1.1.5 (c) 所示。若 $t_2 = 0$ ，即 $t > 0$ 时 $f(t) \equiv 0$ ，又称 $f(t)$ 为反因果信号（亦称为逆因果信号），如图 1.1.5 (d) 所示。

③ 时限信号。若信号 $f(t)$ 满足条件，当 $t < t_1$ 和 $t > t_2$ ($t_2 > t_1$) 时 $f(t) \equiv 0$ ，称 $f(t)$ 为时限信号，如图 1.1.5 (e) 所示。

④ 无时限信号。若信号 $f(t)$ 在自变量 t : $(-\infty, \infty)$ 都有取值，称信号 $f(t)$ 为无时限信号，如图 1.1.5 (f) 所示信号。一切周期信号均为无时限信号。

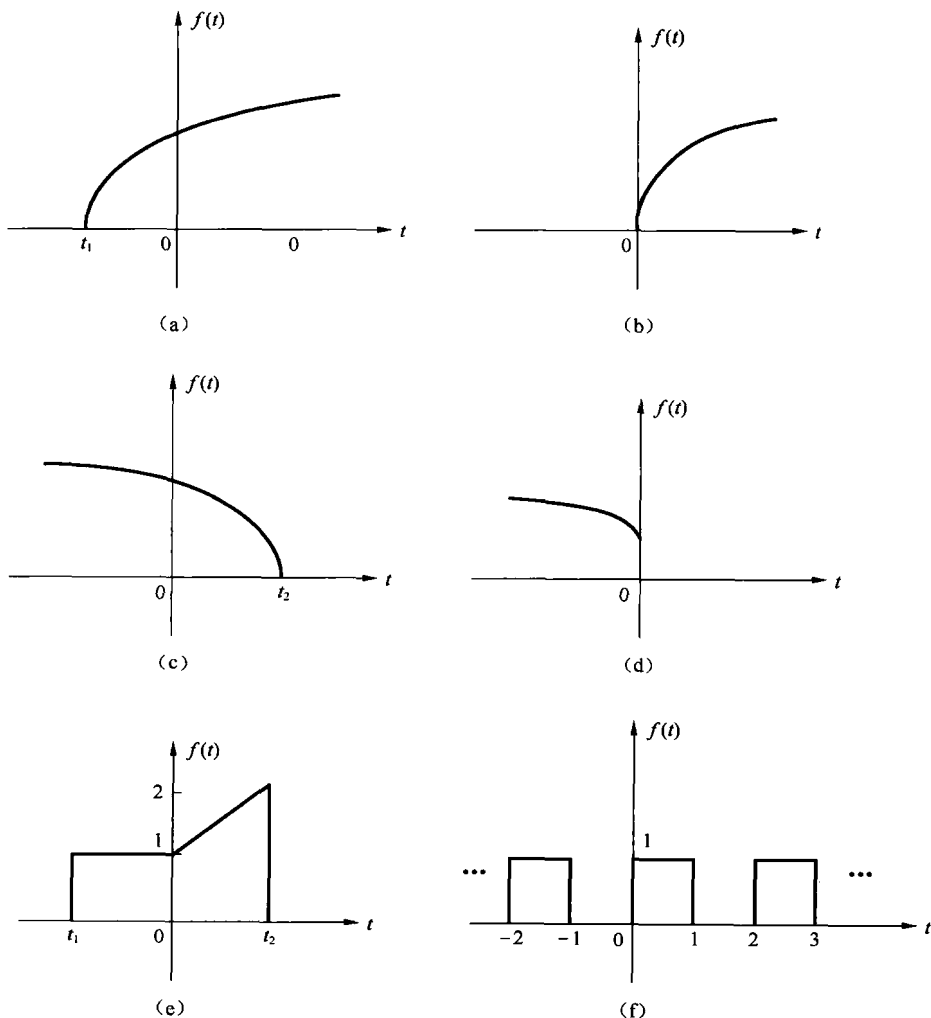


图 1.1.5 信号按所占时间范围分类示意图

1.1.2 连续时间信号的基本运算

1. 连续时间信号的加、乘运算

连续时间信号 $y_1(t) = f_1(t) + f_2(t)$ 、 $y_2(t) = f_1(t)f_2(t)$ ，在 $t = t_0$ 时刻的函数值，等于信号 $f_1(t)$ 和 $f_2(t)$ 在该瞬时 ($t = t_0$) 的函数值之和或积，即

$$y_1(t_0) = f_1(t_0) + f_2(t_0) \quad (1.1.8)$$

$$y_2(t_0) = f_1(t_0)f_2(t_0) \quad (1.1.9)$$

例如，运用信号加、乘运算的定义式 (1.1.8)、式 (1.1.9) 计算图 1.1.6 (a)、(b) 所示信号 $f_1(t)$ 、 $f_2(t)$ 的和信号及乘积信号分别如图 1.1.6 (c)、(d) 所示。

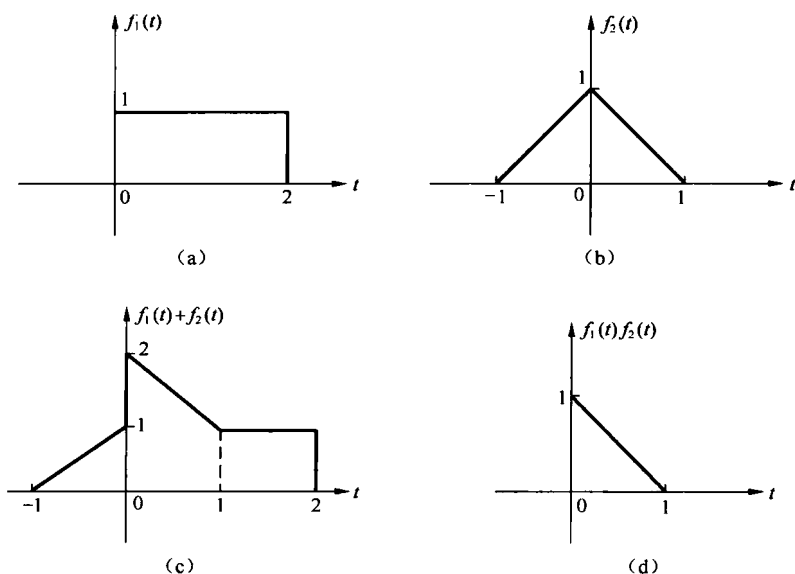


图 1.1.6 连续时间信号的加乘运算例图

2. 连续时间信号的反转运算

用 $(-t)$ 代替信号 $f(t)$ 中的独立变量 t ，得到信号 $f(t)$ 的反转信号 $f(-t)$ ，反转信号 $f(-t)$ 的波形图与原信号 $f(t)$ 的波形图对称于纵轴。

例如，若信号 $f(t)$ 如图 1.1.7 (a) 所示，则 $f(t)$ 的反转信号 $f(-t)$ 的波形图如图 1.1.7 (b) 所示。

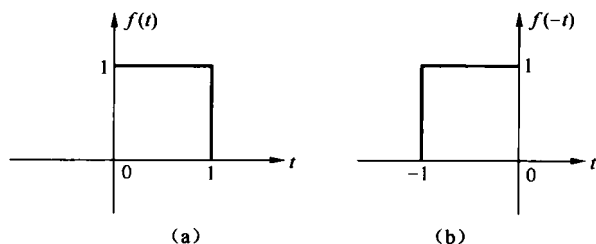


图 1.1.7 连续时间信号的反转运算波形例图

3. 连续时间信号的时移运算

用 $(t-t_0)$ (t_0 为实数) 代替信号 $f(t)$ 中的独立变量 t 得到信号 $f(t)$ 的时移信号 $f(t-t_0)$ 。当 $t_0 > 0$ 时, 信号 $f(t-t_0)$ 的波形图是信号 $f(t)$ 的波形图沿 t 轴右移 t_0 的结果; 当 $t_0 < 0$ 时, 信号 $f(t-t_0)$ 的波形图是信号 $f(t)$ 的波形图沿 t 轴左移 $|t_0|$ 的结果。

例如, 若信号 $f(t)$ 如图 1.1.8 (a) 所示, 根据信号时移运算的定义可作出信号 $f(t-1.5)$ 、 $f(t+1)$ 的波形图分别如图 1.1.8 (b)、(c) 所示。

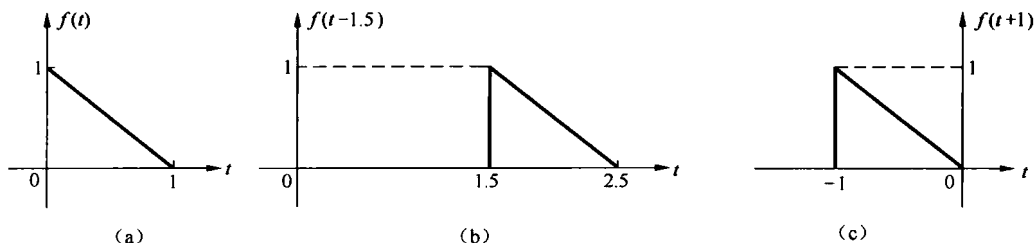


图 1.1.8 连续时间信号的时移运算波形例图

【例 1.1.1】 信号 $f(t)$ 如图 1.1.9 (a) 所示, 试作出信号 $f(1-t)$ 的波形图。

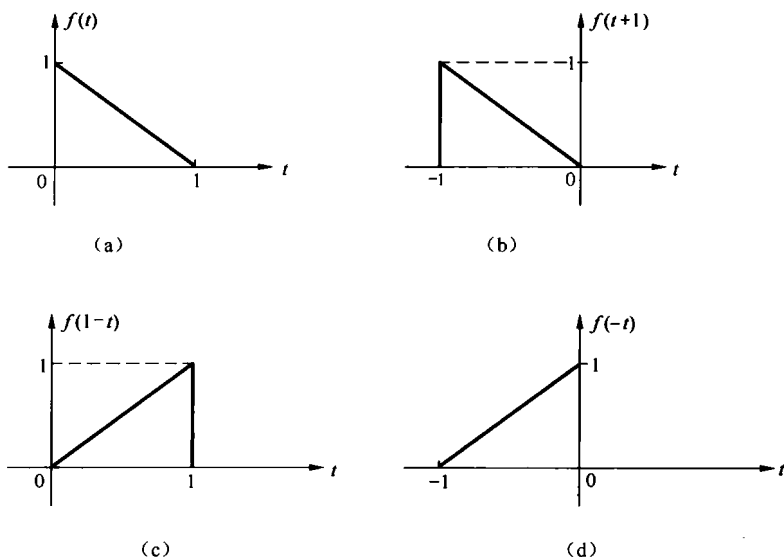


图 1.1.9 【例 1.1.1】图

显然, 此题需要用到反转、时移 2 种运算, 本例题将 2 种不同的运算顺序都作出来, 希望可以帮助加深对独立变量 t 这一概念的理解。

解 1 先时移运算。用 $(t+1)$ 代替信号 $f(t)$ 中的独立变量 t , 得到时移信号 $f(t+1)$, 波形图如图 1.1.9 (b) 所示。

再反转运算。用 $(-t)$ 代替时移信号 $f(t+1)$ 中的独立变量 t , 得到信号 $f(1-t)$, $f(1-t)$

的波形图如图 1.1.9 (c) 所示。

解 2 先反转运算。用 $(-t)$ 代替信号 $f(t)$ 中的独立变量 t ，得到反转信号 $f(-t)$ ， $f(-t)$ 的波形图如图 1.1.9 (d) 所示。

再时移运算。用 $(t-1)$ 代替反转信号 $f(-t)$ 中的独立变量 t ，得到信号 $f(1-t)$ 。 $f(1-t)$ 的波形图是 $f(-t)$ 波形图沿 t 轴右移 1 的结果， $f(1-t)$ 的波形图仍然如图 1.1.9 (c) 所示。

4. 信号的尺度变换运算

用 (at) (a 为实常数， $a \neq 0$) 代替信号 $f(t)$ 中的独立变量 t ，得到信号 $f(t)$ 的尺度变换信号 $f(at)$ 。当 $a > 1$ 时，信号 $f(at)$ 的波形图是信号 $f(t)$ 的波形图沿 t 轴压缩到 $\frac{1}{a}$ 的结果，纵坐标不变；当 $0 < a < 1$ 时，信号 $f(at)$ 的波形图是信号 $f(t)$ 的波形图沿 t 轴扩展到 $\frac{1}{a}$ 的结果，纵坐标不变。

例如，已知信号 $f(t)$ 的波形图如图 1.1.10 (a) 所示，根据信号的尺度变换运算定义，可得信号 $f\left(\frac{t}{2}\right)$ 、 $f(3t)$ 的波形图分别如图 1.1.10 (b)、(c) 所示。

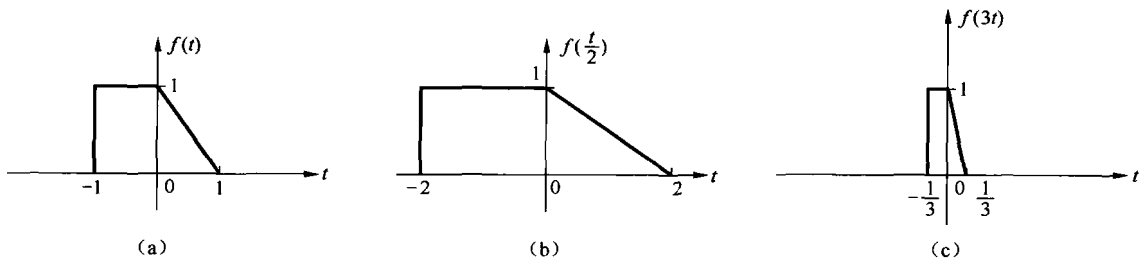


图 1.1.10 连续时间信号的尺度变换运算波形例图

【例 1.1.2】 信号 $f(t)$ 的波形图如图 1.1.11 (a) 所示，试作信号 $f(1-2t)$ 的波形图。

此题用到了反转、时移、尺度变换 3 种运算，可以经 6 种运算顺序得出 $f(1-2t)$ 的波形图，本教材只作出了 2 种运算顺序。

解 1 先用 $(t+1)$ 代替信号 $f(t)$ 中的独立变量 t ，得到信号 $f(t+1)$ ，波形图如图 1.1.11 (b) 所示。再用 $(-t)$ 代替信号 $f(t+1)$ 中的独立变量 t ，得到信号 $f(1-t)$ ，波形图如图 1.1.11 (c) 所示。最后用 $(2t)$ 代替信号 $f(1-t)$ 中的独立变量 t ，得到信号 $f(1-2t)$ ，信号 $f(1-2t)$ 的波形图如图 1.1.11 (d) 所示。

解 2 先用 $(-t)$ 代替信号 $f(t)$ 中的独立变量 t ，得到信号 $f(-t)$ ，波形图如图 1.1.11 (e) 所示。再用 $(2t)$ 代替 $f(-t)$ 中的独立变量 t ，得到信号 $f(-2t)$ ，波形图如图 1.1.11 (f) 所示。最后用 $\left(t-\frac{1}{2}\right)$ 代替信号 $f(-2t)$ 中的独立变量 t ，得到信号 $f(1-2t)$ 。作出 $f(1-2t)$ 的波形图仍然如图 1.1.11 (d) 所示。

5. 信号的微、积分运算

本教材只讨论可以用函数描述的确定性信号，所以书中的信号与函数表示同一概念，其微、积分运算的定义与高等数学相同，而且在后续章节中还会阐述阶跃信号及单位冲激信号的微、积分。

定义符号

$$f^{(-1)}(t) = \int_{-\infty}^t f(\tau) d\tau \quad (1.1.10)$$

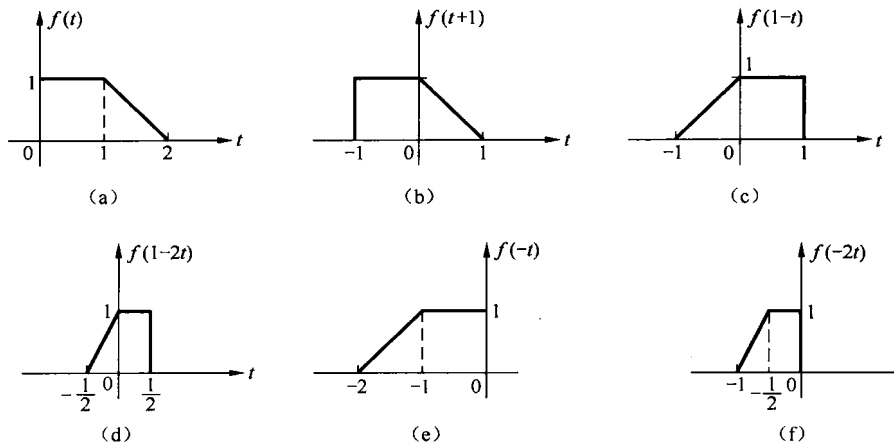


图 1.1.11 [例 1.1.2]图

例如，信号 $f(t)$ 如图 1.1.12 (a) 所示，根据高等数学函数的微分运算的定义，可求得 $f'(t)$ 的波形图如图 1.1.12 (b) 所示。

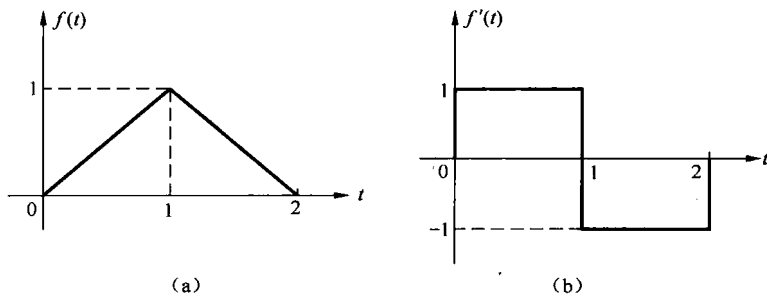


图 1.1.12 连续时间信号的微分运算例图

1.1.3 常用连续时间信号

1. 连续时间单位阶跃信号 $u(t)$

定义连续时间单位阶跃信号

$$u(t) = \begin{cases} 1 & t > 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad (1.1.11)$$

其波形图如图 1.1.13 所示。

【例 1.1.3】 信号 $f(t)$ 如图 1.1.14 (a) 所示, 试分别作出信号 $f(t)u(t)$ 、 $f(t)u(t-1)$ 、 $f(t)u(-t)$ 、 $f(t)u(1-t)$ 的波形图。

解 单位阶跃信号 $u(t)$ 的波形图如图 1.1.14 (b) 所示, 作信号的反转运算 $u(-t)$ 波形图如图 1.1.14 (c) 所示, 进行时移运算得 $u(t-1)$ 、 $u(1-t)$ 波形图分别如图 1.1.14 (d)、(e) 所示。根据信号相乘的定义式 (1.1.9), 可得 $f(t)u(t)$ 、 $f(t)u(t-1)$ 、 $f(t)u(-t)$ 、 $f(t)u(1-t)$ 各波形图分别如图 1.1.14 (f) ~ 图 1.1.14 (i) 所示。

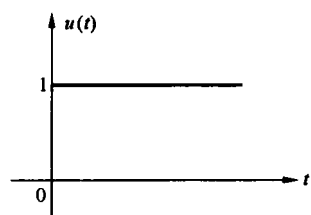


图 1.1.13 连续时间单位阶跃信号 $u(t)$ 的波形图

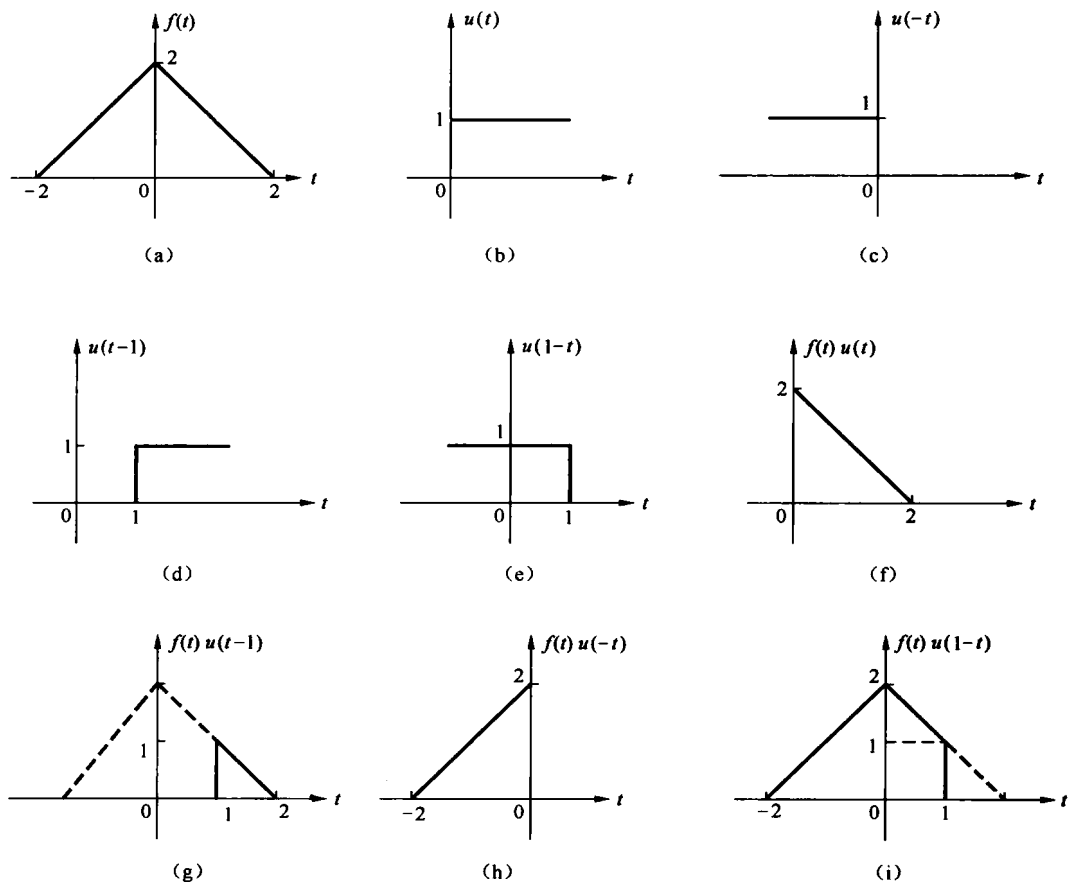


图 1.1.14 [例 1.1.3]图

【例 1.1.4】 信号 $f_1(t)$ 、 $f_2(t)$ 如图 1.1.15 所示, 试分别写出用阶跃信号表示的信号 $f_1(t)$ 、 $f_2(t)$ 的表达式。