

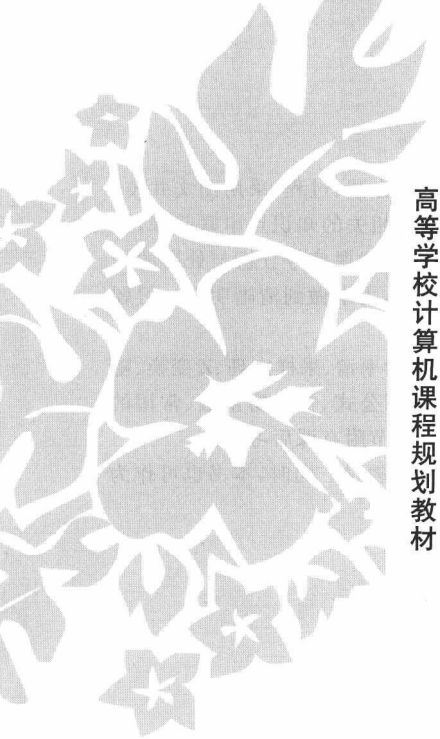
高 等 学 校 计 算 机 课 程 规 划 教 材

信号分析与处理

管 涛 主 编



清华大学出版社



高等学校计算机课程规划教材

信号分析与处理

管 涛 主编

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书面向计算机和电子信息专业本科生而编写,对于书中理论原理和实现方法、过程,采用图文并茂、列举实例的方法,实现循序渐进、由浅入深的学习过程。同时,本书通过图形将相关的知识点串联起来,形成有机的整体,便于读者将不同章节的知识结合起来思考,从而在更高的层次上把握信号分析与处理的知识体系。书中详细地给出了每部分的数学推导过程,并加以细致的分析和解释,力求做到清晰明朗。习题部分难易结合,给读者留出了更多的思考空间。

全书共分8章,内容包括绪论、信号的时域分析、信号的频域分析、能谱与功率谱、采样定理、Z变换、随机信号、滤波器。附录部分介绍了常见信号的傅里叶变换、常见的Z变换、常用公式、常见窗函数、常用的Matlab代码。书中采用Matlab工具实现了信号的分解与变换。本书的所有章节附有课后习题。

本书是定位于本科生及相关技术人员,为适应现代信息处理方法而撰写的教材。同时,本书也可作为电子技术、自动化、通信、图像处理、模式识别等专业技术人员的参考书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

信号分析与处理/管涛主编. —北京:清华大学出版社,2016

高等学校计算机课程规划教材

ISBN 978-7-302-44648-4

I. ①信… II. ①管… III. ①信号分析—高等学校—教材 ②信号处理—高等学校—教材
IV. ①TN911

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第179376号

责任编辑:汪汉友 柴文强

封面设计:傅瑞学

责任校对:李建庄

责任印制:刘海龙

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:三河市春园印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:10.5

字 数:251千字

版 次:2016年8月第1版

印 次:2016年8月第1次印刷

印 数:1~1000

定 价:25.00元



产品编号:070255-01

出版说明

信息时代早已显现其诱人魅力,当前几乎每个人随身都携有多个媒体、信息和通信设备,享受其带来的快乐和便宜。

我国高等教育早已进入大众化教育时代。而且计算机技术发展很快,知识更新速度也在快速增长,社会对计算机专业学生的专业能力要求也在不断翻新。这就使得我国目前的计算机教育面临严峻挑战。我们必须更新教育观念——弱化知识培养目的,强化对学生兴趣的培养,加强培养学生理论学习、快速学习的能力,强调培养学生的实践能力、动手能力、研究能力和创新能力。

教育观念的更新,必然伴随教材的更新。一流的计算机人才需要一流的名师指导,而一流的名师需要精品教材的辅助,而精品教材也将有助于催生更多一流名师。名师们在长期的一线教学改革实践中,总结出了一整套面向学生的独特的教法、经验、教学内容等。本套丛书的目的就是推广他们的经验,并促使广大教育工作者更新教育观念。

在教育部相关教学指导委员会专家的帮助和指导下,在各大大学计算机院系领导的协助下,清华大学出版社规划并出版了本系列教材,以满足计算机课程群建设和课程教学的需要,并将各重点大学的优势专业学科的教育优势充分发挥出来。

本系列教材行文注重趣味性,立足课程改革和教材创新,广纳全国高校计算机优秀一线专业名师参与,从中精选出佳作予以出版。

本系列教材具有以下特点。

1. 有的放矢

针对计算机专业学生并站在计算机课程群建设、技术市场需求、创新人才培养的高度,规划相关课程群内各门课程的教学关系,以达到教学内容互相衔接、补充、相互贯穿和相互促进的目的。各门课程功能定位明确,并去掉课程中相互重复的部分,使学生既能够掌握这些课程的实质部分,又能节约一些课时,为开设社会需求的新技术课程准备条件。

2. 内容趣味性强

按照教学需求组织教学材料,注重教学内容的趣味性,在培养学习观念、学习兴趣的同时,注重创新教育,加强“创新思维”,“创新能力”的培养、训练;强调实践,案例选题注重实际和兴趣度,大部分课程各模块的内容分为基本、加深和拓宽内容3个层次。

3. 名师精品多

广罗名师参与,对于名师精品,予以重点扶持,教辅、教参、教案、PPT、实验大纲和实验指导等配套齐全,资源丰富。同一门课程,不同名师分出多个版本,方便选用。

4. 一线教师亲力

专家咨询指导,一线教师亲力;内容组织以教学需求为线索;注重理论知识学习,注重学习能力培养,强调案例分析,注重工程技术能力锻炼。

经济要发展,国力要增强,教育必须先行。教育要靠教师和教材,因此建立一支高水平的教材编写队伍是社会发展的关键,特希望有志于教材建设的教师能够加入到本团队。通过本系列教材的辐射,培养一批热心为读者奉献的编写教师团队。

清华大学出版社

序 言

信号在生活中无处不在,比如电话语音、无线 WiFi 信号、鸟鸣、汽车振动、雷达波、心脏跳动、爆炸声、地震波、监控图像或视频、网络流量。通过信号,人们可以获得许多有用的信息,如系统状态(如心脏状态、呼吸情况、发动机运行状态)、异常信息(如系统报警、异常、错误、故障),建立更多的社会联系方式,方便生活,如北斗导航为出租车业务提供了定位、跟踪等服务,蓝牙通信方式省去了多余的导线。然而,人们在享受着现代科技带来的便捷的同时,是否思考了信息是怎么随着信号从一端传递到另一端的呢?这个过程涉及了许多技术原理,如信号的识别、降噪、编码、压缩、载波、增强、传输、滤波、解码等过程,实现这些环节就离不开信号的分析、处理。

信号分析和处理是一门数学理论较深、实践性较强的课程,同时,它也是许多工程应用的基础,比如医学诊断、故障检测、资源勘探、控制系统。在计算机领域,它可用于实现数据压缩、图像变换、聚类分析、语音识别。然而,当前信号处理教材多侧重于电子、通信、自动化领域,对没有相关学科基础的计算机专业学生来讲,具有一定的难度,因此,需要反复询问、阅读和编程实践加以理解和体会。信号分析和处理方法来源于工程实践,也将服务于工程应用。

本书结合了计算机领域的应用问题,为适应计算机科学专业的本科生而编写的,主要包括:绪论、信号的时域分析、信号的频域分析、 Z 变换、随机信号、滤波器和自适应滤波器。

第 1 章简介了信号、信息、系统概念和性质,及信号的分类。然后介绍了三个典型的应用领域。最后采用图示的方式概括了本书的知识要点和结构。

第 2 章描述了连续和离散信号的时域分析,介绍了信号的平移、缩放、翻摺运算。随后介绍了信号的卷积运算、相关性分析以及信号的脉冲分解和正交分解。

第 3 章阐述了连续和离散信号的频域分析,介绍了傅里叶级数、傅里叶变换以及它们的性质。然后,描述了傅里叶级数和傅里叶变换的关系,重点阐述了离散傅里叶变换。最后,介绍了拉普拉斯变换、快速傅里叶变换算法(FFT)、连续系统。

第 4 章介绍了能谱与功率谱的定义和相关概念。

第 5 章介绍了从模拟信号转变为数字信号的过程,阐述了采样定理,并依据采样过程推导了采样信号的频率。

第 6 章阐述了 Z 变换的目的和意义,描述了系统和方程的关系、 Z 变换和 Z 反变换的定义。介绍了 Z 变换和傅里叶变换之间的关系、 Z 变换的应用。

第 7 章描述了随机信号的基本概念、统计特性以及随机信号的时域和频域分析方法。随后介绍了几种典型的随机信号。

第 8 章介绍了滤波器的概念与分类、模拟滤波器的设计和类型,然后介绍了巴特沃斯低

通滤波器和切比雪夫低通滤波器。同时,本章也介绍了数字滤波器的分类和设计方法,描述了有限冲击响应和无限冲击响应两种数字滤波器。

附录部分给出了常见函数的傅里叶变换、Z变换、常见窗函数、常见的 Matlab 代码以及中英文对照表。

作者于郑州

2016年8月

符 号 表

符 号	含 义
$x(t)$	信号
T	信号的周期
T_s	采样周期
f	信号的频率
f_s	采样频率
ω	信号的角频率
ω_0	基本角频率
∂	求偏导
$H(s)$	连续系统传输函数
$H(z)$	离散系统传输函数
$\delta(t)$	单位冲击
$\delta(n)$	采样信号
$h(t)$	连续系统单位冲击响应
$h(n)$	离散系统单位冲击响应
$u(t)$ 或 $u(n)$	阶跃信号
θ	数字角频率

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 信号与信息	1
1.2 信号的分类	1
1.2.1 模拟信号和数字信号.....	2
1.2.2 连续时间信号与离散时间信号.....	2
1.2.3 周期信号与非周期信号.....	3
1.2.4 常参信号与变参信号.....	3
1.2.5 奇异信号.....	4
1.3 信号与系统	4
1.4 应用简介	7
1.4.1 语音信号处理.....	7
1.4.2 医学超声图像处理.....	7
1.4.3 雷达信号处理.....	7
1.5 本书的知识结构	7
习题.....	9
第 2 章 信号的时域分析	10
2.1 常见连续信号及离散形式.....	10
2.2 信号的基本运算.....	16
2.2.1 相加与相减	16
2.2.2 相乘与相除	16
2.2.3 平移变换	16
2.2.4 尺度变换	16
2.2.5 翻褶变换	17
2.2.6 综合运算及实例	17
2.3 卷积及性质.....	18
2.3.1 连续信号卷积	19
2.3.2 卷积的性质	20
2.3.3 离散信号卷积	20
2.3.4 卷积的扩展与应用	22
2.4 信号的相关性分析.....	24
2.4.1 连续信号的相关性分析	24
2.4.2 离散信号的相关性分析	26
2.4.3 应用简介	27

2.5	信号的分解	28
2.5.1	交直流分解	28
2.5.2	奇偶分解	28
2.5.3	脉冲分解	28
2.5.4	正交分解	30
	小结	32
	习题	33
第3章	信号的频域分析	35
3.1	傅里叶级数(FS)	35
3.1.1	正交分解方法	35
3.1.2	周期信号的频谱	36
3.1.3	傅里叶级数的性质	38
3.1.4	Gibbs 现象	38
3.1.5	FS 实例分析	39
3.2	傅里叶变换(FT)	41
3.2.1	定义	41
3.2.2	频谱分析	42
3.2.3	性质	43
3.3	FS 与 FT 之间的关系	48
3.4	序列的傅里叶变换	49
3.4.1	非周期序列的傅里叶变换(DTFT)	49
3.4.2	周期序列的傅里叶级数(DFS)	50
3.4.3	离散傅里叶变换(DFT)	52
3.4.4	DFT 的性质	53
3.4.5	4 种傅里叶变换的比较	56
3.5	快速 FFT 变换	56
3.5.1	时域的基-2FFT 算法	56
3.5.2	多重分解算法	57
3.5.3	FFT 的应用	58
3.6	拉普拉斯变换	60
3.6.1	定义	60
3.6.2	性质	60
3.7	连续系统	61
3.7.1	连续系统的系统函数	61
3.7.2	系统方程的解法	61
	小结	63
	习题	63

第 4 章 能量谱与功率谱	66
4.1 引言	66
4.2 能量谱	66
4.3 功率谱	67
小结	68
习题	68
第 5 章 采样定理	69
5.1 基本概念	69
5.2 时域采样定理	70
5.2.1 采样信号的频谱	70
5.2.2 时域采样定理	71
5.3 频域采样定理	74
5.3.1 频域采样	74
5.3.2 频域采样定理	75
5.4 应用	75
5.4.1 音频采样	75
5.4.2 图像采样	76
小结	76
习题	76
第 6 章 Z 变换	78
6.1 系统与方程	78
6.2 Z 变换	78
6.3 Z 变换的收敛域	79
6.4 Z 变换的性质	79
6.5 序列的 Z 变换	81
6.5.1 有限长度序列	81
6.5.2 右边序列	81
6.5.3 左边序列	81
6.5.4 双边序列	81
6.6 常见序列的 Z 变换	82
6.7 Z 反变换	83
6.7.1 留数法	83
6.7.2 部分分式法	84
6.7.3 长除法(幂级数展开法)	86
6.8 Z 变换与傅里叶变换之间的关系	87
6.9 离散系统	89
6.9.1 系统函数	89

6.9.2	差分方程的建立	90
6.9.3	差分方程的求解	91
小结	.....	93
习题	.....	94
第7章	随机信号	96
7.1	简介	96
7.2	时域分析	97
7.2.1	时域特性	97
7.2.2	通过线性系统的时域特性分析	100
7.3	频域分析	102
7.3.1	频谱分析	102
7.3.2	随机信号通过线性系统	104
7.4	典型随机信号	105
7.4.1	平稳随机过程	105
7.4.2	各态历经性(各态遍历性)	106
7.4.3	高斯过程(GP)	108
7.4.4	白噪声	109
小结	.....	109
习题	.....	109
第8章	滤波器	111
8.1	概念与分类	111
8.2	模拟滤波器的原理与特性	111
8.2.1	基本原理	111
8.2.2	滤波器的幅频特性	112
8.2.3	滤波器的传递函数	113
8.3	信号通过线性系统时不失真的条件	113
8.3.1	理想低通滤波器的频率响应	114
8.3.2	理想低通滤波器的实例	115
8.4	模拟滤波器的设计	117
8.4.1	设计方法	117
8.4.2	巴特沃斯低通滤波器	117
8.4.3	切比雪夫低通滤波器	121
8.5	数字滤波器及设计	123
8.5.1	基本概念	124
8.5.2	IIR 数字滤波器的设计	125
8.5.3	FIR 数字滤波器的设计	129
小结	.....	139

习题.....	139
附录 A 常见信号的傅里叶变换.....	141
附录 B 常见序列的 Z 变换.....	142
附录 C 常用公式.....	143
附录 D 中英文对照表.....	144
附录 E 窗函数的 Matlab 函数.....	145
附录 F 典型 Matlab 代码.....	146
参考文献.....	151

第 1 章 绪 论

1.1 信号与信息

如今,信号广泛用于语音通话、医疗诊断(超声和心电图等)、石油勘探、机械故障诊断、雷达探测、遥感成像、公共交通、计算机网络等等。信号的表现形式多样,如古代的笛声、烽火、锣鼓声,现代的无线电、激光、脑电波、图像和视频。常见的温度、压力、湿度、PM2.5 值等也属于信号。

信号可能蕴含着某种信息或不含信息,人们可以通过观察、分析和处理加以鉴别。例如,电视广播包含了视频信息,人们可以通过电视设备接收这种信号,解码出视频信息;白噪声也是信号,具有很高的随机性,几乎不包含任何信息。信号具有不同的维度,如电流、电压是一维信号、图像是二维信号,而视频是三维信号。本书内容主要涉及一维信号,同时讨论一些高维信号的应用。

在数学上,有些信号可以表示为一个或者多个参数的函数,通过图形的方式表现,如正弦函数。通过函数形式,人们可以简化、理解信号变换、分解、采样、传输和恢复的过程。另一方面,有些信号并不能通过具体的函数来表示,如音乐、语音,那么就需要结合信号的统计信息等进行分析和处理、获取其中的信息。

总之,信号是信息的载体,信息是信号的内容。不蕴含信息的信号并无实际意义,而信息在很多场景中需要通过信号传递。如何分析给定信号的性质、简化信号处理的过程、从信号中分离出有用的信息是工程应用中面临的问题。

1.2 信号的分类

信号具有不同的类别,图 1-1 描述了信号的各种分类形式。

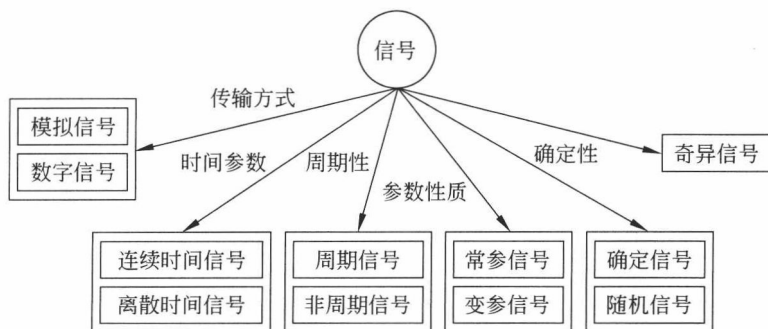


图 1-1 信号的分类

下面详细介绍信号的分类。

1.2.1 模拟信号和数字信号

模拟信号指幅度和相位均随时间连续变化的信号。自然界中许多信号都是模拟信号，如气泵的压力、水的流量、车轮的转速、空气的湿度或者温度、电容的压力、身高、长度等。在模拟信号的传输过程中，发送设备先将信号转化为近似的波动电信号，然后通过有线或者无线的方式发送出去，最后接收设备还原这些信号。

数字信号指在时间和幅值上均离散的信号。它是一种人工信号，通过二进制编码实现传输。 n 位二进制编码可以表示 2^n 个幅值。在现代信号处理中，数字信号的地位愈发重要，当前的计算机、计算机网络、数码(摄)相机、数字录音笔等均采用数字信号进行处理。数字信号的优点很多：抗干扰能力强；便于数字设备处理(如数字程控交换机)；存储方便(如 CD、优盘)；兼容电话、电报、数据和图像等多类信息的传送，能在同一条线路上传送多种信息；便于加密和纠错，具有较强的保密性和可靠性等。

1.2.2 连续时间信号与离散时间信号

连续时间信号指在时间定义域内，除了有限个不连续点之外，都可以给出确定的函数值的信号，简称为连续信号，如图 1-2 所示。连续信号的幅值可以是连续的或者离散的。幅值连续连续信号即为模拟信号。

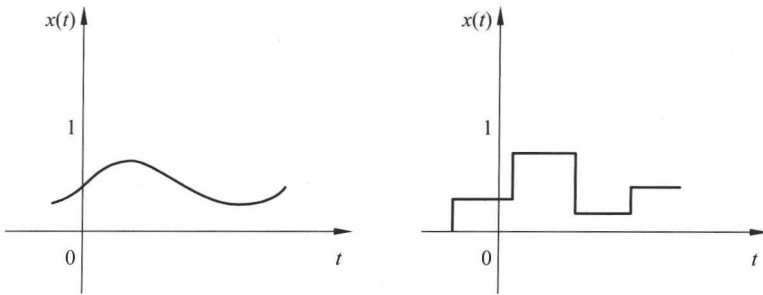


图 1-2 连续信号

离散时间信号指时间上离散的信号，简称离散信号，如图 1-3 所示。它只在有定义的时刻有值，其他无定义。离散信号的幅值可以是离散的、也可以是连续的。幅值离散的离散信号即为数字信号。

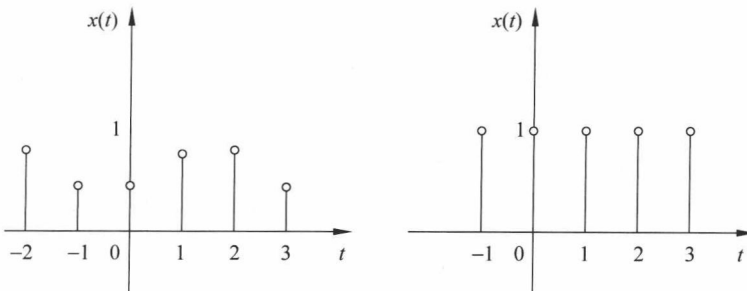


图 1-3 离散信号

1.2.3 周期信号与非周期信号

依照一定时间间隔周而复始、无始无终的信号称为周期信号。时间间隔 T 称为信号的周期。生活中的周期信号如心脏搏动曲线、日常交流电电压、交通信号灯、地球公转、农历、钟表时刻。图 1-4 描述了一个周期信号及其一个周期内的波形。

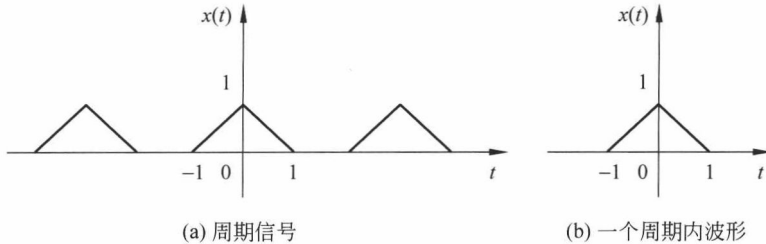


图 1-4 周期信号表示

周期为 T 的函数 $x(t)$ 可以表示为一个周期内函数 $x_0(t)$ (如图 1-4(b)) 的延拓之和的形式

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x_0(t+nT), \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

不具有任何周期性的信号称为非周期信号,如爆炸声、闪电、鸟鸣、地震波、汽车振动、白噪声等。

1.2.4 常参信号与变参信号

一般情况下,信号具有参量,如振幅、频率、周期等,这些量或是常量,或随时间变化。所有参量不随时间变化的信号称为常参信号,否则,称为变参信号。例如,信号 $A(t)\sin\omega t$ 的振幅随时间变换,因此是变参信号,而 $A\sin\omega t$, A 为常数,为常参信号。雷达使用的线性 Chirp 信号频率随时间变化,因此属于变参信号,如图 1-5 所示。

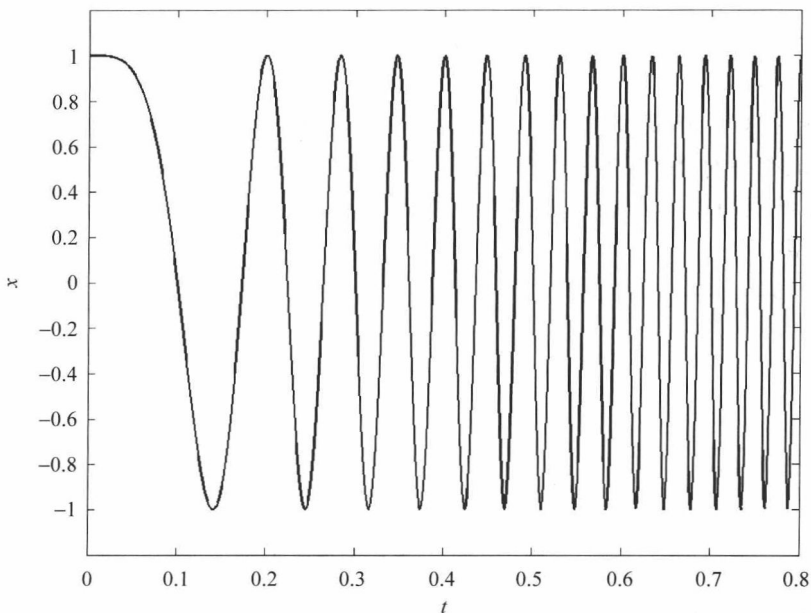


图 1-5 线性 Chirp 信号

1.2.5 奇异信号

奇异信号指本身具有不连续点或者其导数、积分有不连续点的信号。常见的奇异信号包括：阶跃信号、冲激信号、冲激偶信号、斜变信号(或称斜坡信号、斜升信号)、符号函数,其中阶跃信号、冲激信号在工程中较为常用。例如,单位斜变信号定义如下:

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

单位斜变信号如图 1-6 所示。

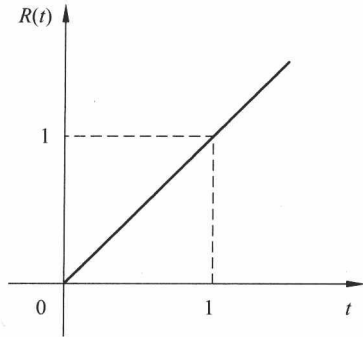


图 1-6 单位斜变信号

1.3 信号与系统

信号与系统密不可分。信号必须通过系统传输,系统是信号传输的通道。信号通过系统所发生的变化由系统的特性所决定。

一般情况下,硬件系统通常可由时域的微分方程(或差分方程)表示,方程右端为输入的各阶微分(或差分),左端为输出的各阶微分(或差分)。为了求得方程的解,需要对方程两端进行拉普拉斯变换(或 Z 变换),将问题转化到频域,然后用简单的代数方程解决。硬件系统有各种各样的形式,为具体的应用目的而设计。复杂系统由简单系统构成,而简单系统具有基本的表示形式。图 1-7(a)给出了加法器模型,图 1-7(b)给出了标量乘法器模型。

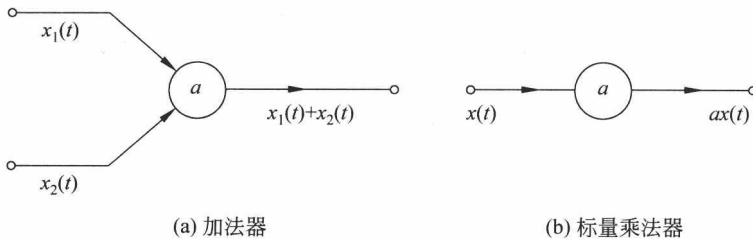


图 1-7 连续系统基本部件

系统具有以下特性。