

高等学校教材

信号与 系统 第四版

主编 王宝祥 副主编 陈静

高等教育出版社

高等学校教材

信号与 系统 第四版

主编 王宝祥 副主编 陈静
Xinhao yu Xitong

高等教育出版社·北京

内容简介

本书全面系统地论述了信号与系统分析基础理论。全书分两篇共 11 章,第 1~5 章为信号篇,内容包括信号分析的基础知识、信号线性交换(傅里叶变换、拉普拉斯变换和 Z 变换)和快速傅里叶变换等;第 6~11 章为系统篇,主要包括连续系统和离散系统的分析方法(时域法和变换域法),系统的状态变量分析法。每章都有一定数量的习题,书后给出了部分参考答案。

本书可以作为通信工程、电子信息工程、电气工程及自动化、计算机科学与技术等专业本科生的教材,也可供相关专业师生和科技人员自学参考。

图书在版编目(CIP)数据

信号与系统 / 王宝祥主编. --4 版. --北京:高等教育出版社,2015.9

ISBN 978-7-04-043371-5

I. ①信… II. ①王… III. ①信号系统-高等学校-教材 IV. ①TN911.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 154783 号

策划编辑 袁 坤	责任编辑 杨 希	封面设计 张申申	版式设计 张 杰
插图绘制 杜晓丹	责任校对 杨凤玲	责任印制 田 甜	

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
印 刷 北京宏伟双华印刷有限公司
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 25
字 数 600 千字
购书热线 010-58581118
咨询电话 400-810-0598

网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
版 次 1992 年 7 月第 1 版
2015 年 9 月第 4 版
印 次 2015 年 9 月第 1 次印刷
定 价 35.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物 料 号 43371-00

与本书配套的数字课程资源使用说明

与本书配套的数字课程资源发布在高等教育出版社易课程网站，请登录网站后开始课程学习。

信号与系统 第四版 主编 王宝祥 副主编 陈静

用户名 密码 验证码 5640

数字课程介绍 纸质教材 版权信息 联系方式

信号与系统数字课程与纸质教材一体化设计，紧密配合。数字课程涵盖课程介绍、教学大纲、电子教案、案例素材、拓展案例、实践训练素材、视频点播、微视频资源等板块。充分运用多种形式媒体资源，极大地丰富了知识的呈现形式，拓展了教材内容。在提升课程教学效果同时，为学生学习提供思维与探索的空间。

网站登录

1. 访问 <http://abook.hep.com.cn/1249021>
2. 输入数字课程账号（见封底明码）、密码、验证码
3. 点击“进入课程”
4. 开始课程学习

账号自登录之日起一年内有效，过期作废。使用本账号如有任何问题，请发邮件至：
lilin@hep.com.cn。

本书数字资源分为 2 种类型，每种类型对应的符号如下：

例题解析（L）：扩充例题资源，帮助理解相关知识点

动画资源（D）：生动演示难点、重点，助学助教

第4版前言

本书此次再版仍分为“信号篇”和“系统篇”两大部分,其中信号篇为5章(即1~5章),系统篇为6章(即6~11章)。

本次修订在内容上做了如下改动:

(1) 在信号分析部分的“奇异函数”一节,对单位冲激偶性质有一个不同的认识,引入了单位冲激偶强度的概念。

(2) 在信号频谱分析中,增加了带通信号抽样定理的内容,以适应某些信号分析的需求。

(3) 将前版第12章有关MATLAB内容拆分到相应章节中,包括例题和习题部分,其基本MATLAB简介则置于附录中。

(4) 对习题做了改动:删去一些重复不适用的,约25题;新增加的部分约25题。

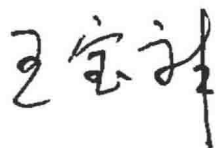
本次再版由王宝祥主编,并聘请了具有丰富一线教学经验的陈静副教授任副主编;此外,参加编写工作的还有胡航、周爽、周毅刚等。

本教材此次再版得到学校的多方面支持。首先,哈尔滨工业大学电子与信息工程学院院长顾学迈教授的关心和支持,是我们工作的基本保障;信息工程系吴之路教授和张晔教授的大力支持和热心帮助,对我们的工作起到至关重要的作用;教研室各位老师和同事亦给我们诸多帮助。对他们的一片诚心和热心,我们表示衷心的感谢!应该说,没有他们的帮助,要想顺利完成此次修订工作是不可能的!

此外,我们还要感谢高等教育出版社理工出版事业部电子电气分社领导和袁坤编辑、杨希编辑,他们在整个出版过程中给予的细心指导和帮助,他们一丝不苟的工作态度和效率,对我们都是很好的激励。

限于作者文学修养和业务水平,书中难免有错误和不妥之处,对书中错误,恳请各位同仁和读者给予指正,对书中问题和不妥之处可共同探讨和磋商。

请使用以下联系方式, E-mail: wangbx2002@sina.com



2015年3月25日

第3版前言

“信号与系统”是电子信息学科相关专业的一门主要专业基础课,对通信工程、电子信息工程、电气工程及自动化、计算机科学与技术等理工科大学生的知识、能力和综合素质的培养有着重要和深刻的影响,在跃升更高学位的本科生的知识构成中具有不可替代的作用。

“信号与系统”的特点,首先是理论性比较强,这也是本课程地位和重要性的一个佐证。学生必须认识到这一点,在学习是不能回避的。只有做到对课程中主要物理概念和数学概念的深刻理解,才能进入课程的自由天地。

目前,本课程国内教材的普遍结构是以系统分析为主线,并在各章中插入有关信号部分的内容。为了加强信号分析和系统分析二者的完整性和系统性,本书将此结构做了改进,把有关信号的内容集中放在前5章,而将系统分析内容集中在后面。全书分为两篇共12章,其中信号篇内容包括信号分析的基础知识、信号的线性变换(傅里叶变换、拉普拉斯变换和Z变换)和信号相关分析原理等;系统篇主要内容是连续系统和离散系统的分析方法,包括时域法和变换域法,DFT在离散系统分析中的应用,以及系统的状态变量分析法。每章都配有一定数量的习题,并在书后给出了参考答案。

现代科学技术的不断发展和进步,也在一定程度上反映到本课程教与学的各个方面。本教材第1、2版在哈尔滨工业大学出版社出版,历经18年使用和11次印刷。本次第3版是在前两版教材使用的基础上,听取同行专家和广大读者的意见修订而成的。具体内容做了如下改动:

- (1) 将原第5章信号相关分析的内容按时域或频域分别作为第1章和第2章的相应部分;
- (2) 将原第11章快速傅里叶变换改为第5章,并在内容上做了精简;
- (3) 对拉普拉斯变换的终值定理,在叙述上做些变动,并增加了例题;
- (4) 为提高教学效率,使学生适应计算机环境,增加了运用MATLAB分析信号与系统的一章内容;

- (5) 关于第1章中讨论的复变函数的正交条件,为简化正文篇幅,将其作为附录,放在书后。

本书可作为通信工程、电子工程、信息处理、电子仪器与测量和卫星工程等专业本科生的教科书。对其他需要开设本课的专业(如计算机、自动控制、机电等),根据其不同深度的要求可以选学书中的某些内容。建议做如下两种内容编排:(1) 学习第1、2、3、4、6、7、8、9、10章;(2) 只学习第1、2、3、6、7、8章,不涉及离散信号与系统的内容。

本书由王宝祥主编,参加编写的有张晔、胡航、李绍滨、陈静、贾晓光、李玉萍等。书中有关MATLAB部分的前期准备和文字编写均由陈静完成。

本教材此次出版得到学校相关部门同仁的支持和帮助,特向他们表示衷心的感谢。

限于作者水平,书中问题和不妥之处难免,恳请读者给予批评指正。请使用如下电子邮件地址联系。

E-mail:wangbx2002@sina.com

编 者

2009年9月

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任；构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人进行严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话 (010)58581897 58582371 58581879

反盗版举报传真 (010)82086060

反盗版举报邮箱 dd@hep.com.cn

通信地址 北京市西城区德外大街4号 高等教育出版社法务部

邮政编码 100120

目 录

信号篇——信号分析与变换

第 1 章 信号分析的理论基础	3	1.9.2 信号的互相关函数	45
1.1 引言	3	1.9.3 相关与卷积的关系	47
1.2 信号的分类	4	1.10 运用 MATLAB 显示和分析	
1.3 信号的基函数表示法	6	信号波形	48
1.4 正交函数	7	1.10.1 用 MATLAB 编程获取信号和	
1.4.1 正交矢量	7	显示信号波形	48
1.4.2 正交函数定义	9	1.10.2 用 MATLAB 工具箱函数获取	
1.4.3 正交函数集	10	信号	53
1.4.4 完备正交函数集	11	1.10.3 利用 MATLAB 图形界面工具	
1.5 奇异函数	13	(SPTool)生成信号和观察信号	
1.5.1 单位斜坡函数	14	波形	56
1.5.2 单位阶跃函数	14	习题 1	58
1.5.3 单位冲激函数	16		
1.5.4 单位冲激偶	19		
1.6 信号的时域分解与变换	20	第 2 章 傅里叶变换	63
1.6.1 任意函数表示为阶跃函数		2.1 周期信号的频谱分析——	
之和	21	傅里叶级数	63
1.6.2 任意函数表示为冲激函数		2.1.1 三角形形式的傅里叶级数	63
之和	22	2.1.2 指数傅里叶级数	66
1.6.3 信号的时域变换	23	2.1.3 函数波形的对称性与傅里叶	
1.7 离散时间信号——序列	25	系数的关系	67
1.8 信号的卷积	29	2.2 典型周期信号的频谱	69
1.8.1 卷积的计算	29	2.2.1 周期矩形脉冲信号	70
1.8.2 卷积的图解说明	30	2.2.2 常用周期信号	73
1.8.3 卷积的性质	32	2.3 非周期信号的频谱分析——	
1.8.4 函数 $f(t)$ 与冲激函数或阶跃		傅里叶变换	76
函数的卷积	34	2.4 典型非周期信号的频谱	78
1.8.5 卷积积分的数值计算	39	2.5 傅里叶变换的性质	84
1.9 信号的相关	40	2.6 周期信号的傅里叶变换	94
1.9.1 信号的自相关函数	41	2.6.1 正弦、余弦信号的傅里叶变换	94
		2.6.2 周期信号的傅里叶变换	94

2.7 抽样信号的频谱	97	第4章 Z 变换	155
2.7.1 抽样信号的频谱	97	4.1 Z 变换及其收敛域	155
2.7.2 抽样定理	99	4.1.1 Z 变换定义	155
2.7.3 带通采样定理	101	4.1.2 Z 变换的收敛域	156
2.8 已调信号的频谱	102	4.1.3 典型序列的 Z 变换	159
2.8.1 调幅信号的频谱	102	4.2 Z 反变换	162
2.8.2 调角信号的频谱	105	4.2.1 幂级数展开法(长除法)	162
2.9 信号的能量谱与功率谱	106	4.2.2 部分分式展开法	162
2.9.1 能量谱与功率谱	106	4.2.3 围线积分法(留数法)	164
2.9.2 互能量和互能谱	109	4.3 Z 变换的性质	166
2.9.3 自相关函数与能谱和功率谱 的关系	110	4.4 Z 变换与拉普拉斯变换 的关系	173
2.10 运用 MATLAB 显示和分析 信号的频谱	113	4.4.1 z 平面与 s 平面的映射关系	173
习题 2	124	4.4.2 Z 变换与拉氏变换的关系	174
第3章 拉普拉斯变换	133	4.5 信号线性变换小结	176
3.1 引言	133	习题 4	176
3.2 拉普拉斯变换定义	133	第5章 离散傅里叶变换	179
3.3 拉普拉斯变换的收敛域	136	5.1 离散傅里叶级数(DFS)	179
3.4 常用函数的拉普拉斯变换	139	5.2 离散傅里叶变换(DFT)	182
3.5 拉普拉斯反变换	141	5.3 离散傅里叶变换的性质	184
3.5.1 部分分式展开法	141	5.4 离散傅里叶变换与 Z 变换 的关系	189
3.5.2 围线积分法(留数法)	145	5.5 快速傅里叶变换(FFT)	191
3.6 拉普拉斯变换的基本性质	147	习题 5	197
习题 3	152		

系统篇——线性系统分析

第6章 连续系统的时域分析	203	6.6 运用 MATLAB 在时域求解 线性时不变系统	221
6.1 系统概述	203	习题 6	227
6.1.1 系统的概念	203	第7章 连续系统的频域分析	231
6.1.2 系统的分类	204	7.1 傅里叶变换分析法	231
6.1.3 线性非时变系统的基本性质	205	7.1.1 频域分析原理	231
6.1.4 系统的分析方法	206	7.1.2 非周期信号激励下系统的 响应	232
6.2 微分方程的经典解法	206	7.1.3 周期信号激励下系统的响应	234
6.3 零输入响应	210		
6.4 冲激响应与阶跃响应	214		
6.5 零状态响应	219		

7.2 无失真传输条件·····	236	第10章 离散系统的 z 域分析·····	303
7.3 理想低通滤波器·····	239	10.1 离散系统的 Z 变换分析法·····	303
7.3.1 理想低通滤波器的冲激响应·····	239	10.1.1 零输入响应·····	303
7.3.2 理想低通滤波器的阶跃响应·····	241	10.1.2 零状态响应·····	304
习题7·····	243	10.1.3 全响应·····	306
第8章 连续系统的复频域分析·····	249	10.2 离散系统的系统函数·····	308
8.1 拉普拉斯变换分析法·····	249	10.3 离散系统的频率响应·····	311
8.1.1 复频域分析原理·····	249	10.3.1 序列的傅里叶变换·····	311
8.1.2 零状态响应·····	249	10.3.2 频率响应特性·····	311
8.1.3 零输入响应·····	250	10.3.3 频率特性的几何表示法·····	312
8.1.4 积分微分方程的拉普拉斯 变换解法·····	254	10.3.4 运用MATLAB分析离散时间 LTI系统的响应和频率特性·····	313
8.2 系统函数的表示法·····	256	习题10·····	315
8.3 极点零点分布与时域响应 特性·····	259	第11章 系统的状态变量分析法·····	319
8.4 极点零点分布与系统频率 特性·····	261	11.1 引言·····	319
8.5 波特图·····	265	11.2 状态方程的建立·····	320
8.6 线性系统的模拟·····	270	11.2.1 连续系统状态方程的建立·····	320
8.7 信号流图·····	273	11.2.2 离散系统状态方程的建立·····	326
8.8 运用MATLAB分析连续时间线性 时不变系统的频率特性·····	277	11.3 连续系统状态方程的解法·····	329
习题8·····	278	11.3.1 矩阵指数函数 e^{At} ·····	329
第9章 离散系统的时域分析·····	283	11.3.2 矢量微分方程的解法·····	330
9.1 引言·····	283	11.3.3 矩阵指数 e^{At} 的计算·····	331
9.2 离散系统的描述和模拟·····	283	11.3.4 状态方程的拉普拉斯解法·····	334
9.2.1 离散系统的描述——差分方程·····	283	11.4 离散系统状态方程的解法·····	338
9.2.2 离散时间系统的模拟·····	286	11.4.1 矢量差分方程的解法·····	338
9.3 差分方程的经典法·····	289	11.4.2 A^n 的计算·····	339
9.4 零输入响应和零状态响应·····	293	11.4.3 状态方程的 Z 变换解法·····	341
9.4.1 零输入响应·····	293	11.5 系统的可控性和可观性·····	344
9.4.2 零状态响应·····	295	11.5.1 系统的可控性·····	344
习题9·····	299	11.5.2 系统的可观性·····	346
附录A 常用周期信号的傅里叶级数表·····	353	11.6 运用MATLAB求解和分析由 状态变量法描述的线性时 不变系统·····	348
附录B 常用信号的傅里叶变换表·····	355	习题11·····	349

附录 C 常用数学表	359
附录 D 复函数的正交条件	363
附录 E MATLAB 简介	365
部分习题答案	369
参考文献	386

信号篇

——信号分析与变换

1.1 引言

社会生活中,人们总要不断地以某种方式发出消息和接收消息,即传递和交换消息。实现人类社会职能乃至维持人本身的生存,都必须不停地进行各种消息的传递和交换。例如,我国古代利用烽火台的火光传送敌人入侵的警报;古希腊人以火炬的位置表示不同的字母符号;人们还曾利用击鼓鸣金的音响传达战斗命令等。人们将欲传送的消息变为光和声的形式,即形成了光信号和声信号。在当时,信号的形式和内容以及传递信号的方式都是很简单的,因此要实现信号的传送,无论在距离、速度及可靠性等方面都受到很大限制。

19 世纪以后,人们开始利用电信号传递消息。1837 年,莫尔斯(F.B.Morse)发明了有线电报,将欲传送的字母和数字经编码后变成电信号进行传送。1876 年,贝尔(A.G.Bell)发明了电话,直接将声音转变为电信号沿导线传送。在 19 世纪,人们致力研究电信号的无线传输也有突破。1865 年,英国的麦克斯韦(Maxwell)总结了前人的科学技术成果,提出了电磁波学说。1887 年,德国的赫兹(H.Hertz)通过实验证实了麦克斯韦的学说,为无线电电子学的发展奠定了理论基础。1895 年,俄国的波波夫(A.C.Попов)、意大利的马可尼实现了利用电磁波传送信号的美好理想。此后,传送电信号的通信方式得到迅速发展,无线广播、超短波通信、广播电视、雷达、无线电导航等相继出现,并且已经应用到工农业生产、国民经济管理、国防及人们日常生活的各个方面。

无线电电子学的发展和应用,归根结底是要解决一个信号传输问题,也就是要建立一个输送信号的装置,即所谓信号传输系统。电报、电话、电视、雷达、导航等都是一类信号传输系统。例如,一个电视系统要传送的消息是一些配有声音的画面,在传输时首先要利用电视摄像机把画面转换成图像信号,并利用话筒把声音变成伴音信号,这就是待传送的全电视信号。由于这种信号的振荡频率太低,很难直接在天线上激励起电磁波,因此利用电视发射机把全电视信号变换为频率更高的信号,通过天线将这种高频信号转换为电磁波发射出去,电磁波在空间传播。在接收端,电视接收天线截获到电磁波的一小部分能量并将其转变成为微弱的高频电信号,送入电视接收机。电视接收机将高频信号的频率降低,变为全电视信号,再分解为图像信号和伴音信号,并分别送到显像管和喇叭,于是就能收看到配有伴音的画面,从而得到了发送端发出的消息。这个过程可以用方框图表示出来,如图 1.1-1 所示。



图 1.1-1 一般通信系统的组成

现在对图 1.1-1 中的一些名词稍做解释。

消息 待传送的一种以收、发双方事先约定的方式组成的符号,如语言、文字、图形、电码等。

信号 按照习惯,人们将用于描述和记录消息的任何物理状态随时间变化的过程叫做信号。这里是指电信号。由于消息一般不便直接传输,故需把消息转换成相应变化的电压或电流,即电信号。由此可见,信号是消息的一种表现形式,而消息是信号的具体内容。

除了消息和信号之外,人们还常用到“信息”一词。所谓信息是指包含在消息中的有效成分。通信的意义即以信号为载体传输消息中的信息。在本书中,我们不讨论有关信息的问题。

转换器 把消息转换为电信号,或者反过来把电信号还原成消息的装置,如摄像管、显像管、话筒和喇叭等。由于这些装置具有将一种形式的能量转换为另一种形式能量的功能,所以也常称其为换能器。

信道 信号传输的通道。它可以是双导线、同轴电缆、波导和光纤,也可以是空间和人造卫星。有时发射机和接收机也可以看成是信道的通道。

由上述可知,通信系统的工作主要包括三个方面:消息与信号之间的转换,信号的处理,以及信号的传输。可见,通信系统是以信号为核心进行工作的。为了保证信号以尽可能小的失真进行传输及处理,以获得令人满意的结果,作为无线电技术工作者应首先认真研究信号的特性。

1.2 信号的分类

信号是通信系统中所传输的主体,而系统中所包含的各种电路、设备只是实现这种传输的手段。

信号是运载消息的载体,其最常见的表现形式是随时间变化的电压或电流,因此描述信号的常用方法是写出它的数学表达式,也可以绘制随时间变化的波形图表示。由于信号常被表现为以时间为自变量的函数,故在本书中常常交替地使用“信号”与“函数”这两个名词而不加区别。

对于各种信号,可以从不同的角度进行分类。

1. 确定信号与随机信号

当信号是一确定的时间函数时,给定某一时间值,就可以确定出一相应的函数值,这样的信号是确定信号或称规则信号。但是,实际传输的信号往往具有不可预知的不确定性,这种信号是随机信号或称不确定信号。严格说来,在自然界中确定信号是不存在的。因为在实际通信中,信号传输的目的就是使接收者获得不确定的,即新的消息,一个确定的时间函数的传输显然是没有意义的。而且,在信号传输过程中,不可避免地要受到各种干扰和噪声的影响,这些干扰和噪声都具有随机特性。随机信号不能表示为确切的时间函数,对它的研究只能使用统计无线电的方法,属于后续课“随机信号处理”的研究内容。需要指出的是,自然界中的随机信号往往在某一时间段内具有确定的变化规律,可视为确定信号,这使确定信号的研究具有意义。

2. 周期信号与非周期信号

在确定信号中又可分为周期信号和非周期信号。所谓周期信号就是依一定时间间隔无始无

终地重复着某一变化规律的信号,其表达式可以写为

$$f(t) = f(t+nT) \quad n=0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (1.2-1)$$

满足此关系式的最小 T 值称为信号的周期。非周期信号在时间上不具有周而复始变化的特性,它不具有周期 T (或者认为周期 T 是趋于无限大的情况)。当然,真正的周期信号实际上是不存在的,实际的周期信号只是指在某一时间段内按某一规律重复变化的信号。例如,语音信号中的元音部分在短时段内呈现周期性变化规律。

3. 连续时间信号与离散时间信号

按照时间函数自变量取值的连续性和离散性可将信号分为连续时间信号与离散时间信号(简称连续信号与离散信号)。如果在某一时间间隔内,对于任意时间值(除若干不连续点外)都可给出确定的函数值,则此信号就称为连续信号。例如,图 1.2-1 所示的正弦波和矩形波,都是在 $-\infty < t < \infty$ 时间间隔内的连续信号。只是在图 1.2-1(a) 中 $t < 0$ 和图(b)中 $t < 0$ 及 $t > t_0$ 的范围内的信号值均为零,并且图 1.2-1(b) 中在 $t=0$ 和 $t=t_0$ 处存在两个不连续点。连续信号的幅值可以是连续的,即可以取任何实数,如图 1.2-1(a) 所示;连续信号的幅值也可以是离散的,即只能取有限个规定的数值,如图 1.2-1(b) 所示,幅值仅可取 0 和 1。对于时间和幅值都连续的信号又称为模拟信号,如图 1.2-1(a) 所示。与连续信号相对应的是离散信号。代表离散信号的时间函数,只在某些不连续的规定瞬时给出函数值,在其他时间,函数没有意义。例如,在图 1.2-2(a) 中,函数 $f(t_k)$ 只在 $t_k = -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, \dots$ 离散时刻分别给出函数值 1.3, -1.7, 2, 3, 1, 4.1, -2.5, $\dots$ 。离散时间间隔一般都是均匀的,也可以是不均匀的。如果离散信号的幅值是连续的,即幅值可取任何实数(如图 1.2-2(a)),则称为抽样信号,即由模拟信号在时间上等间隔抽取得到的信号。如果离散信号的幅值只能取某些规定的数值(例如图 1.2-2(b) 中幅值仅可取 0 和 1),则称为数字信号。

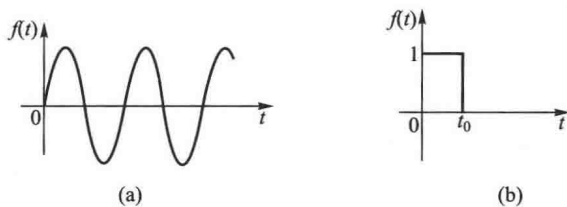


图 1.2-1 连续时间信号

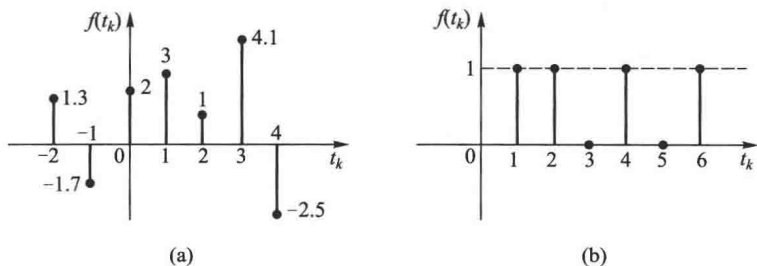


图 1.2-2 离散时间信号

4. 能量信号与功率信号

按照信号的能量特点可以将信号分为能量信号和功率信号。如果在无限大的时间内,信号