



北京市高等教育精品教材立项项目



国家电工电子教学基地系列教材

信号与系统

Signals and Systems

©陈后金 胡健 薛健 编著



清华大学出版社
<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>



北方交通大学出版社
<http://press.njtu.edu.cn>

1.6

北京市高等教育精品教材立项项目

国家电工电子教学基地系列教材

信号与系统

陈后金 胡 健 薛 健 编著

清华大学出版社
北方交通大学出版社

·北京·

内 容 简 介

本书主要阐述确定性信号的时域分析和频域分析,线性时不变系统的描述与特性,以及信号通过线性时不变系统的时域分析与变换域分析。此外简要介绍了信号与系统的基本理论和方法在通信系统和生物医学系统中的应用。

本书根据信息科学与技术发展趋势,结合近年来教学改革成果,按照连续和离散并行、先时域后变换域的结构体系,对课程的内容做了较大幅度的更新。内容取材上突出基本理论、基本概念和基本方法,淡化计算技巧,引入 MATLAB 作为信号与系统分析的工具。同时注重实例分析,增编了工程性和综合设计性的例题和习题。

本书于 2002 年被列为北京市高等教育精品教材立项项目,可作为电子信息工程、通信工程、信息工程、自动控制工程、生物医学工程、计算机等专业的本科生教材,也可供有关科技工作者自学参考。

版权所有,翻印必究。

本书封面贴有清华大学出版社激光防伪标签,无标签者不得销售。

图书在版编目(CIP)数据

信号与系统/陈后金,胡健,薛健编著. —北京:北方交通大学出版社,2003.3

(国家电工电子教学基地系列教材)

北京市高等教育精品教材立项项目

ISBN 7-81082-055-9

I. 信… II. ①陈…②胡…③薛… III. 信号系统—高等学校—教材 IV. TN911.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 006773 号

策划编辑:郭 洁 责任编辑:孙秀翠 特邀编辑:李晓敏

印刷者:北京市东光印刷厂

出版发行:北方交通大学出版社 邮编:100044 电话:010-51686045,62237564

清华大学出版社 邮编:100084

经 销:各地新华书店

开 本:787×960 1/16 印张:30.5 字数:680 千字

版 次:2003 年 3 月第 1 版 2003 年 7 月第 2 次印刷

印 数:3001~8000 册 定价:38.00 元

总 序

当今信息科学技术日新月异,以通信技术为代表的电子信息类专业知识更新尤为迅猛。培养具有国际竞争能力的高水平的信息技术人才,促进我国信息产业发展和国家信息化水平的提高,对电子信息类专业创新人才的培养、课程体系的改革、课程内容的更新提出了富有时代特色的要求。近年来,国家电工电子教学基地对电子信息类专业的技术基础课程群进行了改革与实践,探索了各课程的认知规律,确定了科学的教育思想,理顺了课程体系,更新了课程内容,融合了现代教学方法,取得了良好的效果。为总结和推广这些改革成果,在借鉴国内外同类有影响教材的基础上,决定出版一套以电子信息类专业的技术基础课程为基础的“国家电工电子教学基地系列教材”。

本系列教材具有以下特色:

- 在教育思想上,符合学生的认知规律,使教材不仅是教学内容的载体,也是思维方法和认知过程的载体;

- 在体系上,建立了较完整的课程体系,突出了各课程内在联系及课群内各课程的相互关系,体现微观与宏观、局部与整体的辩证统一;

- 在内容上,体现现代与经典、数字与模拟、软件与硬件的辩证关系,反映当今信息科学与技术的新概念和新理论,内容阐述深入浅出,详略得当。增加工程性习题、设计性习题和综合性习题,培养学生分析问题和解决问题的素质与能力;

- 在辅助工具上,注重计算机软件工具的运用,使学生从单纯的习题计算转移到基本概念、基本原理和基本方法的理解和应用,提高学习效率和效果。

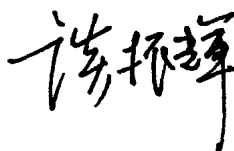
本系列教材包括:

《基础电路分析》、《现代电路分析》、《模拟集成电路基础》、《信号与系统》、《电子测量技术》、《微机原理与接口技术》、《电路基础实验》、《电子电路实验及仿真》、《数字实验一体化教程》、《数字信号处理综合设计实验》、《电路基本理论》、《现代电子线路》(含上、下册)。

本系列教材的编写和出版得到了教育部高等教育司的指导、北方交通大

学教务处及电子与信息工程学院的支持,在教育思想、课程体系、教学内容、教学方法等方面获得了国内同行们的帮助,在此表示衷心的感谢。

北方交通大学
“国家电工电子教学基地系列教材”
编审委员会主任

A handwritten signature in black ink, appearing to read '高振' (Gao Zhen), written in a cursive style.

2003年3月

前 言

近年来,随着信息科学与技术的迅速发展,新的信号处理和分析技术不断涌现。信息科学与技术研究的核心内容主要是信息的获取、传输、处理、识别及综合等,信号是信息的载体,系统是信息处理的手段。因此,作为研究信号与系统基本理论和方法的信号与系统课程,必须与信息科学技术的发展趋势相一致。为此,面向未来,作者结合多年教学改革与实践成果,收集和整理国内外最新教材,调研了国内外同类教材的使用情况,重新组织和编撰了此教材。该教材具有如下特色。

在教育思想上,符合学生的认知规律,体现教材不仅是知识的载体,也是思维方法和认知过程的载体。传统观念常认为教材就是将前人积累的知识系统地组织在一起,学生读书的目的就是获取这些知识。实际上,人类学习的过程既是获取知识本身,也是学习能力和创新素质的培养过程。教材不应只是静态知识,应展现科学的思维方法和认知过程。因此,在本教材编写过程中,对教材体系和内容进行了科学组织,体系结构循序渐进,内容叙述深入浅出,使之更加符合学习的认知过程。

在教材体系上,改变传统的电路与系统课程体系,建立信号与系统、数字信号处理的新体系。本书在体系结构上有3个特点。其一,先时域再变换域。因为我们生活在时空中,比较熟悉时间域,在深刻理解时域分析的理论和方法,了解其优缺点后,自然就容易进入变换域分析,从而发现时域分析与变换域分析的相互关系和各自的适用范畴。其二,先信号分析再系统分析,因为信号分析是系统分析的基础,只有通过信号分析,确定信号特征,并对其进行有效表达,才可能正确选择和设计相应的系统,对信号进行有效处理。其三,先连续后离散,并不是教材的前部分为连续信号与系统分析,后部分为离散信号与系统分析,而是将连续与离散并列在同一章中,先介绍连续再介绍离散,这样既可以避免连续与离散脱节,形成连续与离散作为一个整体概念,又可以尽量避免连续与离散在概念上的混淆,便于比较连续与离散的特点,加深理解。

在教材内容上,体现经典与现代、连续与离散、信号与系统的辩证关系,适当反映IT的新理论和新技术,内容阐述尽可能详略得当。在时域分析中,突

出基本信号的数学定义和性质,以及信号分解理论和方法,系统的描述与时域特性;在变换域分析中,突出 Fourier 变换、Laplace 变换和 z 变换的数学概念、物理概念和工程概念,淡化其数学运算和技巧,建立信号频谱与系统函数的概念。为了锻炼学生运用此理论和方法分析问题和解决问题的能力,更具体地了解信号与系统的应用领域和应用方法,教材不仅介绍了其在通信系统中调制与解调的应用,还在国内同类教材中首次阐述了其对生物神经系统的分析。书中改变了传统习题的简单计算和验证模式,增编了工程性、设计性和综合性例题与习题,以加强学生应用所学知识的能力。

在辅助工具上,注重计算机仿真软件的运用,从根本上将学生只注重计算习题转移到注重对基本概念、基本原理和基本方法的理解和应用,以提高学习效率和效果。信号与系统是一门方法性很强的课程。本书在论述信号与系统的基本理论与方法的基础上,始终强调其分析问题和解决问题的方法,包括如何对实际问题建立数学模型,如何用适当的数学工具对数学模型进行分析和求解等,从而提高学生应用基本理论和基本方法分析和解决实际问题的能力。MATLAB 软件是一种内容丰富、功能强大的分析工具,学生无需再过多地注重计算技巧,只需结合此软件应用所学理论和方法即可解决实际问题,同时更有效地学习知识,培养创新素质。

该教材是“国家电工电子教学基地系列教材”之一。近年来,教学基地对电工电子类的系列课程进行了改革和实践,已获得多项国家级和市部级的教学成果。本教材的出版得到了教育部、北方交通大学教务处和电子与信息工程学院的大力支持。

本书由陈后金主编。第 2、3、7、8 章由胡健执笔,第 4~6、9 章由薛健执笔。陈后金执笔其余各章,并对全书进行了整理和统稿。郝晓莉提供了部分素材,钱满义和高海林也给予了许多帮助。全书由北方交通大学吴湘洪教授审阅,并提出了许多宝贵建议与意见,在此表示衷心感谢。

限于水平,书中错误及不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

作 者

2003 年 3 月

于北方交通大学电子信息工程学院

国家电工电子教学基地系列教材 编审委员会成员名单

主 任 谈振辉

副主任 张思东 赵尔沅 孙雨耕

委 员 (以姓氏笔画为序)

王化深 卢先河 刘京南 朱定华 沈嗣昌

严国萍 杜普选 李金平 李哲英 张有根

张传生 陈后金 邹家驷 郑光信 屈 波

侯建军 贾怀义 徐国治 徐佩霞 廖桂生

薛 质 戴瑜兴

目 录

第 1 章 信号与系统分析导论	(1)
1.1 信号的描述及分类	(1)
1.1.1 信号的定义与描述	(1)
1.1.2 信号的分类和特性	(2)
1.2 系统的描述及分类	(5)
1.2.1 系统的数学模型	(5)
1.2.2 系统的分类	(6)
1.2.3 系统联结	(12)
1.3 信号与系统分析概述	(13)
1.3.1 信号与系统分析的基本内容与方法	(13)
1.3.2 信号与系统理论的应用	(15)
习题	(16)
第 2 章 信号的时域分析	(19)
2.1 连续时间信号的时域描述	(19)
2.1.1 典型普通信号	(19)
2.1.2 奇异信号	(23)
2.2 离散时间信号时域描述	(30)
2.2.1 离散时间信号的表示	(30)
2.2.2 基本离散序列	(30)
2.3 连续信号的基本运算	(35)
2.4 离散时间信号的基本运算	(41)
2.5 确定信号的时域分解	(44)
2.6 信号的 MATLAB 表示	(48)
2.6.1 连续信号的 MATLAB 表示	(48)
2.6.2 离散信号的 MATLAB 表示	(50)
2.6.3 信号基本运算的 MATLAB 实现	(52)
习题	(55)

MATLAB 习题	(59)
第 3 章 系统的时域分析	(61)
3.1 线性时不变系统的描述及特点	(61)
3.1.1 连续时间系统的数学描述	(61)
3.1.2 离散时间系统的数学描述	(63)
3.1.3 线性时不变系统	(65)
3.2 连续时间 LTI 系统的响应	(68)
3.2.1 经典时域分析方法	(68)
3.2.2 系统的零输入响应	(70)
3.2.3 系统的零状态响应	(72)
3.3 连续系统的冲激响应	(73)
3.4 卷积积分	(75)
3.4.1 卷积的计算	(75)
3.4.2 卷积的性质	(79)
3.4.3 奇异信号的卷积	(81)
3.5 离散时间系统的响应	(82)
3.5.1 迭代法	(83)
3.5.2 经典法求解差分方程	(83)
3.5.3 离散 LTI 系统的零输入响应	(85)
3.5.4 离散 LTI 系统的零状态响应	(86)
3.6 离散系统的单位脉冲响应	(87)
3.7 序列卷积和	(89)
3.7.1 序列卷积和的图形计算	(89)
3.7.2 列表法计算序列卷积和	(91)
3.7.3 序列卷积的性质	(92)
3.8 冲激响应表示的系统特性	(93)
3.8.1 级联系统的冲激响应	(93)
3.8.2 并联系统的冲激响应	(94)
3.8.3 因果系统	(96)
3.8.4 稳定系统	(98)
3.9 利用 MATLAB 进行系统的时域分析	(99)
习题	(104)
MATLAB 习题	(113)
第 4 章 周期信号的频域分析	(115)
4.1 连续时间信号的 Fourier 级数	(115)

4.1.1	指数形式的 Fourier 级数	(115)
4.1.2	三角形式的 Fourier 级数	(117)
4.1.3	Fourier 级数的收敛条件	(120)
4.1.4	函数的对称性和 Fourier 系数的关系	(121)
4.2	连续时间 Fourier 级数的基本性质	(125)
4.3	周期信号的频谱分析	(130)
4.3.1	周期信号频谱的概念	(130)
4.3.2	相位谱的作用	(133)
4.3.3	信号的有效带宽	(134)
4.3.4	周期信号的功率谱	(134)
4.4	离散 Fourier 级数(DFS)	(136)
4.4.1	DFS 的推导	(136)
4.4.2	DFS 的基本性质	(142)
4.5	周期信号频域分析的 MATLAB 实现	(144)
	习题	(149)
	MATLAB 习题	(153)
第 5 章	非周期信号的频域分析	(154)
5.1	非周期信号的频谱	(154)
5.2	常见信号的频域分析	(157)
5.2.1	常见非周期信号的频谱	(157)
5.2.2	常见周期信号的频谱	(161)
5.3	连续时间 Fourier 变换的性质	(164)
5.4	信号的测不准原理	(177)
5.5	离散时间 Fourier 变换(DTFT)	(180)
5.6	离散时间 Fourier 变换的主要性质	(184)
5.7	非周期信号频域分析的 MATLAB 实现	(188)
	习题	(191)
	MATLAB 习题	(197)
第 6 章	系统的频域分析	(198)
6.1	连续非周期信号通过系统响应的频域分析	(198)
6.1.1	连续系统的频率响应	(198)
6.1.2	微分方程描述的 LTI 系统响应	(201)
6.1.3	电路系统的响应	(203)
6.2	连续周期信号通过系统响应的频域分析	(204)
6.2.1	正弦信号通过系统的响应	(204)

6.2.2	任意周期信号通过系统的响应	(205)
6.3	无失真传输系统与理想滤波器	(206)
6.3.1	无失真传输系统	(206)
6.3.2	理想滤波器	(208)
6.4	抽样与抽样定理	(213)
6.4.1	信号的时域抽样	(213)
6.4.2	时域抽样定理	(215)
6.4.3	信号的重建	(217)
6.4.4	频域取样定理	(219)
6.5	离散系统的频域分析	(220)
6.5.1	离散系统的频率响应	(220)
6.5.2	正弦型信号通过 LTI 系统的响应	(222)
6.5.3	信号通过线性相位系统的响应	(223)
6.5.4	离散信号的滤波	(223)
6.6	利用 MATLAB 分析系统的频率特性	(225)
	习题	(229)
	MATLAB 习题	(232)
第 7 章	连续时间信号与系统的复频域分析	(233)
7.1	连续时间信号的复频域分析	(233)
7.1.1	Laplace 变换	(233)
7.1.2	单边 Laplace 变换的收敛域	(235)
7.1.3	常用信号的 Laplace 变换	(237)
7.1.4	单边 Laplace 变换的性质	(239)
7.1.5	Laplace 反变换	(248)
7.1.6	双边 Laplace 变换	(254)
7.1.7	双边 Laplace 变换的性质	(256)
7.1.8	双边 Laplace 反变换	(257)
7.2	系统响应的复频域分析	(259)
7.2.1	微分方程的复频域求解	(259)
7.2.2	电路的复频域模型	(262)
7.3	连续时间系统函数与系统特性	(265)
7.3.1	系统函数	(265)
7.3.2	系统函数的零极点分布	(267)
7.3.3	系统函数与系统特性的关系	(268)
7.4	连续系统的模拟	(273)

7.4.1	系统的联结	(273)
7.4.2	连续系统的模拟	(274)
7.5	用 MATLAB 进行连续系统的复频域分析	(281)
7.5.1	MATLAB 实现部分分式展开式	(281)
7.5.2	$H(s)$ 的零极点与系统特性的 MATLAB 计算	(283)
7.5.3	用 MATLAB 计算 Laplace 正反变换	(286)
	习题	(286)
	MATLAB 习题	(293)
第 8 章	离散时间信号与系统的 z 域分析	(295)
8.1	离散时间信号的 z 域分析	(295)
8.1.1	单边 z 变换	(295)
8.1.2	常用序列的 z 变换	(297)
8.1.3	单边 z 变换的主要性质	(298)
8.1.4	单边 z 反变换	(306)
8.1.5	双边 z 变换	(310)
8.1.6	双边 z 反变换	(311)
8.1.7	双边 z 变换的主要性质	(313)
8.2	离散系统响应的 z 域分析	(315)
8.3	系统函数 $H(z)$ 与系统特性	(318)
8.3.1	系统函数及其零极点	(318)
8.3.2	系统函数的零极点分布与系统时域特性的关系	(320)
8.3.3	系统函数的零极点分布与系统频响特性的关系	(321)
8.3.4	系统函数的零极点分布与系统稳定性的关系	(326)
8.4	离散时间系统的模拟	(328)
8.4.1	离散时间系统的联结	(328)
8.4.2	离散时间系统的模拟	(329)
8.5	利用 MATLAB 进行离散系统的 z 域分析	(334)
8.5.1	部分分式展开式的 MATLAB 实现	(334)
8.5.2	利用 MATLAB 计算 $H(z)$ 的零极点与系统特性	(335)
8.5.3	利用 MATLAB 计算 z 正变换和 z 反变换	(338)
	习题	(339)
	MATLAB 习题	(344)
第 9 章	系统的状态变量分析	(345)
9.1	引言	(345)
9.2	连续时间系统状态方程的建立	(346)

6.2.2	任意周期信号通过系统的响应	(205)
6.3	无失真传输系统与理想滤波器	(206)
6.3.1	无失真传输系统	(206)
6.3.2	理想滤波器	(208)
6.4	抽样与抽样定理	(213)
6.4.1	信号的时域抽样	(213)
6.4.2	时域抽样定理	(215)
6.4.3	信号的重建	(217)
6.4.4	频域抽样定理	(219)
6.5	离散系统的频域分析	(220)
6.5.1	离散系统的频率响应	(220)
6.5.2	正弦型信号通过 LTI 系统的响应	(222)
6.5.3	信号通过线性相位系统的响应	(223)
6.5.4	离散信号的滤波	(223)
6.6	利用 MATLAB 分析系统的频率特性	(225)
	习题	(229)
	MATLAB 习题	(232)
第 7 章	连续时间信号与系统的复频域分析	(233)
7.1	连续时间信号的复频域分析	(233)
7.1.1	Laplace 变换	(233)
7.1.2	单边 Laplace 变换的收敛域	(235)
7.1.3	常用信号的 Laplace 变换	(237)
7.1.4	单边 Laplace 变换的性质	(239)
7.1.5	Laplace 反变换	(248)
7.1.6	双边 Laplace 变换	(254)
7.1.7	双边 Laplace 变换的性质	(256)
7.1.8	双边 Laplace 反变换	(257)
7.2	系统响应的复频域分析	(259)
7.2.1	微分方程的复频域求解	(259)
7.2.2	电路的复频域模型	(262)
7.3	连续时间系统函数与系统特性	(265)
7.3.1	系统函数	(265)
7.3.2	系统函数的零极点分布	(267)
7.3.3	系统函数与系统特性的关系	(268)
7.4	连续系统的模拟	(273)

10.7.3 宽带调频·····	(416)
10.8 利用 MATLAB 分析信号的调制与解调·····	(417)
习题·····	(422)
MATLAB 习题·····	(426)
第 11 章 信号与系统在生物学中的应用 ·····	(427)
11.1 神经元的生理结构和生化组成·····	(427)
11.2 单个神经元等效电路·····	(429)
11.2.1 神经元动作电位测试电路·····	(429)
11.2.2 静息状态下的神经元等效电路·····	(430)
11.2.3 激励状态下的神经元等效电路·····	(431)
11.2.4 神经元离子电导的非线性特性·····	(432)
11.3 神经网络中神经元等效电路·····	(434)
11.4 Hodgkin 和 Huxley 神经元数学模型·····	(435)
11.5 神经网络中神经元数学模型·····	(440)
11.5.1 离子电流·····	(440)
11.5.2 离子电导调节因子函数·····	(442)
11.5.3 化学突触电流·····	(444)
11.5.4 电突触电流·····	(445)
11.5.5 电导随机性波动·····	(445)
11.6 数值计算方法·····	(446)
11.6.1 等间隔步长数值计算方法·····	(446)
11.6.2 自适应步长数值计算方法·····	(448)
11.6.3 混合数值计算方法·····	(448)
习题·····	(451)
部分习题答案 ·····	(453)
主要参考文献 ·····	(469)

第 1 章 信号与系统分析导论

内容提要 本章介绍了信号与系统的基本概念及信号与系统的分类与特性,重点讨论了线性系统与时不变系统的特性,并以此为基础介绍了信号与系统分析的基本内容和方法。

1.1 信号的描述及分类

1.1.1 信号的定义与描述

“信号”一词在人们的日常生活与社会活动中有着广泛的含义。严格地说,信号是指消息的表现形式与传送载体,而消息则是信号的具体内容。但是,消息的传送一般都不是直接的,需借助某种物理量作为载体。例如通过用声、光、电等物理量的变化形式来表示和传送消息。因此信号可以广义地定义为随一些参数变化的某种物理量。在数学上,信号可以表示为一个或多个变量的函数。例如:语音信号是空气压力随时间变化的函数 $f(t)$,图 1-1 所示为语音信号‘你好’的波形;图 1-2 所示的静止单色图像是亮度随空间位置变化的函数 $B(x, y)$ 。而静止彩色图像则是三基色红(R)、绿(G)、蓝(B)随空间位置变化的函数

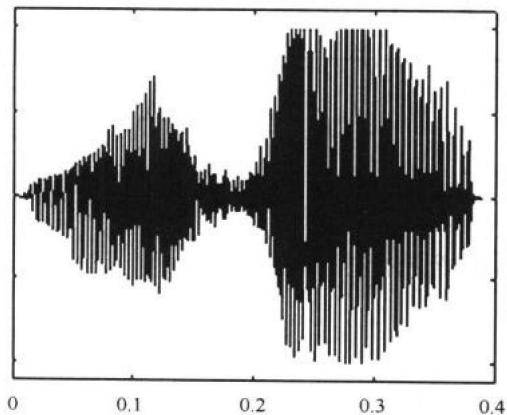


图 1-1 语音信号



图 1-2 静止单色图像

$$I(x, y) = [I_R(x, y), I_G(x, y), I_B(x, y)]。$$

在可以作为信号的诸多物理量中，电是应用最广的物理量。电易于产生与控制，传送速率快，也容易实现与非电量的相互转换。因此，本课程主要讨论电信号。电信号通常是随时间变化的电压或电流（电荷或磁通），由于是随时间而变化的，在数学上常用时间 t 的函数来表示，本书中“信号”与“函数”这两个名词常交替使用。

1.1.2 信号的分类和特性

信号的分类方法很多，可以从不同的角度对信号进行分类。在信号与系统分析中，根据信号和自变量的特性，信号可以分解为确定信号与随机信号、连续时间信号与离散时间信号、周期信号与非周期信号、能量信号与功率信号等。

1. 确定信号与随机信号

按照时间函数的确定性来划分，信号可分为确定信号与随机信号。

确定信号是指能够以确定的时间函数表示的信号，该信号在其定义域内的任意时刻都有确定的函数值。图 1-3(a)所示的正弦信号就是确定信号的一个例子。随机信号也称为不确定信号，它不是时间的确定函数。也就是说，在其定义域内的任意时刻没有确定的函数值。图 1-3(b)所示混合有噪声的正弦信号就是随机信号的一个例子，它无法以确定的时间函数来描述，也无法根据过去的记录准确地预测未来情况，而只能用统计规律来描述。

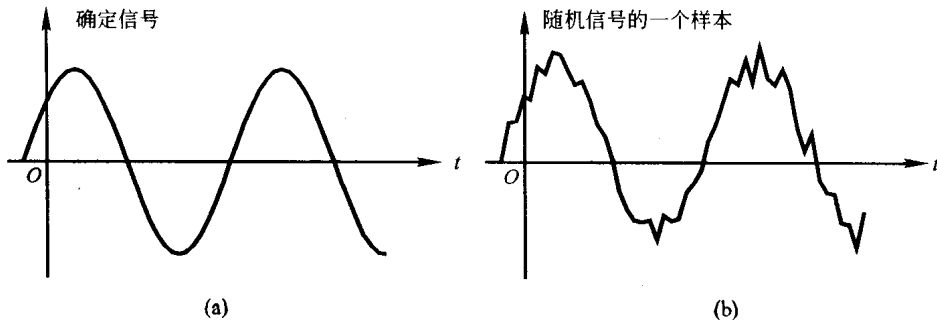


图 1-3 确定信号与随机信号波形

2. 连续时间信号与离散时间信号

按照信号自变量取值的连续性划分，信号可分为连续时间信号与离散时间信号。连续时间信号是指在信号的定义域内，除有限个间断点外，任意时刻都有确定函数值的信号，如图 1-4(a)所示。通常以 $f(t)$ 表示连续时间信号。