

高等学校试用教材

信息与信号理论基础

陈元亨等编

高等教育出版社

内 容 提 要

本书讲述信息、信号和系统的基本理论,它是通信、信号处理、自动控制、计算机以及电子系统设计的基础。

全书除绪论外,包括信息与信息系统、信号频谱分析、信号变换域分析、信号时域分析、随机信号分析、信号波形变换——调制分析、线性连续时不变系统分析、线性离散时不变系统分析、最佳系统基础等共计九章。对信息系统的信息特性和物理特性做了较全面的讨论。全书对物理概念的阐述深刻明确、数学推演论证严谨简明。

本书可作为无线电电子学、无线电物理、无线电技术、电路与系统、信息工程、电子工程、通信、电视、雷达、生物医学电子学、地球物理勘探、自动控制、遥感、计算机科学等专业的《信息与信号理论基础》、《无线电理论基础》、《信号与系统》等课程的教材和教学参考书。同时作为从事相应专业的高等和中等专业学校教师、科研人员、工程设计人员、研究生的参考书亦是十分合适的。

本书责任编辑 张晔北

高等教育出版社出版

高等教育出版社照排中心照排

新华书店北京发行所发行

北京第二新华印刷厂印刷

*

开本 850×1168 1/32 印张 25 字数 650 000

1989年5月第1版 1989年5月第1次印刷

印数 0001—2 750

ISBN7-04-002134-X/TN·112

定价 5.85 元

前 言

本书是根据原教育部颁发的《信息与信号理论基础》教学大纲，在使用多年的《信号与系统理论基础》讲义基础上，扩充、改写而成。写成后作为《信息与信号理论基础》课教材和《无线电信理论基础》课主要部份的教材进行了几次教学实践。实践证明教学效果良好。

全书包括了部颁大纲的全部内容并稍有扩充。其中绪论介绍本课程的研究对象、发展历史、开设本课程的目的等。第一章讲述信息理论基础。第二章至第六章依次讲述确知信号的频谱分析、变换域分析、时域分析、随机信号分析、波形变换——调制分析。第七、八两章分别讲述连续和离散线性时不变系统的数学模型、特性和确知信号或随机信号通过系统的响应。第九章介绍最佳信息系统的原理和概念。全书对信息、信号、系统分析的基本内容、基本方法、基本结果做了较全面的讲述。对信息系统的信息特性、物理特性进行了较深入的讨论。虽然在系统分析部份，只着重于线性、时不变情况，但书中也涉及到典型的非线性系统和时变系统的分析方法。

为顺利学习本书内容，读者应具有数学分析、概率论、复变函数、线性代数、物理力学、电子技术等基础知识。

本书的主要特点：一是以信息的观点并以信息传输为主线索讲述信号、系统、信号通过系统、最佳系统等基本理论。这适应了广泛应用信息的现代社会实践需要。二是以本课程的研究对象：信息、信号、系统作为讲述内容的编排顺序。这一方面表现了作为基础课的自身特点。另方面突出了信息、信号、系统的主线，避免了与数学课的重复，突出了物理概念和解决问题的逻辑思路。从而对培养独立分析问题、解决问题的能力有较大的益处。

三是从信号可以分解成某种基本成份的观点出发利用了傅里叶变换、离散傅里叶变换、拉普拉斯变换、 z 变换等数学工具,这样首先可使研究对象,即要解决的问题更加明确,并在解决问题中熟练数学知识的运用和扩充数学知识。其次相对于在系统分析中引入这些数学工具来说,可以克服这些数学工具运用的局限性。因为系统分析所遇到的函数一般都是因果的,只须用各种单边变换。然而在信号分析中,则主要涉及双边变换,先掌握一般情况下的双边变换,然后对属于双边变换特殊情况(因果函数)的单边变换就会迎刃而解。四是选材既注意到基础知识,又考虑到本学科发展情况,因而对矩阵代数应用、随机信号、离散信号、离散系统、信号的复解析表示、相关分析、频谱计算等都给予足够的重视。

为了配合书中内容的学习,每章之后附有思考题和习题,以帮助正确理解书中概念和熟练解题技巧。附录中列有习题参考答案,供解题时自我检查之用。

本书作为《信息与信号理论基础》课教材,可安排 90 学时讲课(含习题课),从绪论到第九章依次学时可分配为:3, 12, 15, 8, 6, 8, 10, 10, 12, 4。也可安排 72 学时讲课(含习题课),这时加*号的章节可以不讲,留作参考阅读材料。本书还可作为无线电物理等专业的《无线电理论基础》课教材的主要部份,之外再补充网络方面的内容。若将本书的第一、九两章列为参考内容,用它作工科有关专业的《信号与系统》课教材或教学参考书仍是很合适的。另外,本书作为从事无线电电子学、无线电物理、无线电技术、信息电子学、信息工程、电子工程、通信、电视、雷达、生物医学电子学、地球物理勘探、自动控制、遥控遥感、计算机科学等专业的教学、科研人员,工程设计人员和研究生的参考书亦是十分合适的。

全书是由陈元亨执笔写成,胡家骥、卢定庆同志参加了全书的讨论和修改,习题参考答案是钟国法同志完成的。

在本书的编写过程中,得到国家教委理科无线电教材编审委

员会的支持和鼓励。辽宁大学刘成城教授、内蒙古大学钟鹏飞教授、新疆大学鹿笃倬副教授、杭州大学张礼和教授、安徽大学张良震教授和汪铭芳同志、南开大学张延昕教授、成都电讯工程学院张宏基教授等对本书初稿分别评阅了一些章并提出了宝贵的修改意见。1985年暑期参加国家教委委托四川大学举办的信息理论讲习班的老师们，应邀对本书初稿进行了评议，给编者以热情的鼓励并提出了许多宝贵的修改意见。武汉大学的廖孟扬教授主持了本书的最后审稿工作。四川大学教务处在本书的写作过程中，曾给予热情关心和支持。编者在此向他们致以衷心的感谢。

限于编者水平，书中难免有错误和不妥之处，恳请读者批评指正。

编 者

1986年11月
于四川大学

本书中主要符号说明

$\exp[\cdot]$: 表示以 e 为底的指数函数。例如: $\exp[x] = e^x$ 。

$A \operatorname{rect}\left(\frac{t-t_0}{\tau}\right)$: rect 表示矩形, $A \operatorname{rect}\left(\frac{t-t_0}{\tau}\right)$ 表示幅度为 A , 宽度为 τ 、中心位于 t_0 的矩形信号波形。

$A \operatorname{sinc} \frac{\pi(t-t_0)}{t_p}$: 表示幅度为 A 、中心在 t_0 、中心到第一个零值点的间隔为 t_p 的辛格函数信号。

$u(t)$: 单位阶跃信号, 这个符号也适用于频域。

$\operatorname{sgn}(t)$: 符号函数, 当 $t > 0$ 时, 函数值为 1; 当 $t < 0$ 时, 函数值为 -1 。

$\psi(t)$: 表示复解析函数。

$\{x_i(t)\}$: 表示函数的集合。

$\{x_i(t_i)\}$: 表示数值的集合。

$\delta_T(t)$: 表示以 T 为间隔的周期 δ 函数。

$S(jn\omega_0)$: 表示周期信号 $s(t)$ 的离散频谱。

$S(j\omega)$: 表示信号 $s(t)$ 的谱密度。

$F\{s(t)\}, F^{-1}\{S(j\omega)\}$: 分别表示对 $s(t)$ 、 $S(j\omega)$ 作傅里叶正、反变换。

$L\{f(t)\}, L^{-1}\{F(s)\}$: 分别表示对 $f(t)$ 、 $F(s)$ 作拉氏正、反变换。

$z\{f(n)\}, z^{-1}\{F(z)\}$: 分别表示对 $f(n)$ 、 $F(z)$ 作正、反 z 变换。

$*$: 卷积运算符号。

$\in$: 属于符号, 例: $x \in (a, b)$ 表示 x 取值在 (a, b) 内。

$\triangle$: 前向差分号, 例: $\triangle X(n) = X(n+1) - X(n)$ 。

∇ : 后向差分号, 例: $\nabla X(n) = X(n) - X(n-1)$ 。

$X(n)$: 表矢量或矩阵, 即 $X(n) = [X_1(n), X_2(n), \dots, X_N(n)]^T$ 。

目 录

绪论

§0-1 信息与信号理论的研究对象	(1)
§0-2 信息与信号理论的发展	(10)
§0-3 中华民族对信息、信号理论的贡献	(11)
第一章 信息与信息系统	(13)
§1-1 信息及其传输系统模型	(13)
§1-2 信息的度量	(17)
1-2-1 信源的数学模型	(17)
1-2-2 信源的熵 H ()	(21)
1-2-3 信息量	(28)
§1-3 信道和信道容量	(31)
1-3-1 信道的数学描述和分类	(31)
1-3-2 传输速率	(34)
1-3-3 信道容量	(37)
§1-4 信息率失真函数 $R(D)$	(42)
1-4-1 失真的描述	(42)
1-4-2 信息率失真函数	(45)
§1-5 编码	(48)
1-5-1 信源编码	(51)
1-5-2 信道编码	(56)
思考题	(59)
习题	(60)
第二章 信号的频谱	(61)

§2-1 周期信号的简谐波展开式.....	(61)
§2-2 离散频谱——周期信号的频谱分析.....	(66)
2-2-1 离散频谱的概念	(67)
2-2-2 某些典型信号的离散频谱	(72)
§2-3 离散频谱的性质	(82)
§2-4 连续频谱——能量型信号的频谱分析	(91)
2-4-1 能量型信号的傅里叶积分展式.....	(93)
2-4-2 连续频谱的概念	(96)
2-4-3 一些典型信号的频谱密度	(102)
§2-5 频谱密度的性质	(113)
§2-6 功率谱与能量谱	(146)
2-6-1 能量谱密度	(147)
2-6-2 功率谱密度	(149)
* §2-7 信号频谱的近似分析	(156)
2-7-1 吉布斯 (Gibbs) 现象	(156)
2-7-2 逗留相位原理	(159)
2-7-3 短时频谱的概念	(170)
§2-8 离散信号的离散谱密度	
—— 离散傅里叶变换	(171)
2-8-1 离散傅里叶变换的概念	(172)
2-8-2 离散傅里叶变换的性质	(179)
2-8-3 离散信号的离散傅里叶变换与其频谱的关系	(189)
*2-8-4 DFT 的快速算法——快速傅里叶变换 FFT	(193)
思考题	(199)
习题	(200)
第三章 信号的变换域分析	(210)
§3-1 信号的复频域分析——拉普拉斯 (Laplace)	
变换	(210)
3-1-1 拉普拉斯变换的概念	(211)
3-1-2 拉普拉斯反变换的计算	(220)

3-1-3 拉普拉斯变换与谱密度的关系	(228)
§3-2 离散信号在复 z 平面的分析—— z 变换	(233)
3-2-1 z 变换的基本概念	(233)
3-2-2 z 变换的性质	(248)
3-2-3 z 反变换的计算	(261)
§3-3 信号在希尔伯特空间的分析——希尔伯特 (Hilbert) 变换	(267)
3-3-1 希尔伯特变换的基本概念	(267)
3-3-2 希尔伯特变换的性质	(270)
* §3-4 信号在整数 z_M 域上的分析——数论变换 ...	(276)
3-4-1 数论变换的基本原理	(277)
3-4-2 数论变换的实现问题	(286)
* §3-5 离散余弦变换	(292)
思考题	(295)
习题	(295)
第四章 信号的时域分析	(302)
§4-1 信号的抽样	(302)
4-1-1 抽样定理	(303)
4-1-2 抽样过程的频谱变化及与其它变换的关系	(310)
§4-2 信号的振幅量化	(315)
4-2-1 信号振幅的量化方法	(316)
*4-2-2 量化定理	(319)
*4-2-3 量化噪声的统计性质	(322)
*4-2-4 量化输出信噪比	(324)
§4-3 实信号的复解析表示	(325)
4-3-1 实信号及其主要特征	(326)
4-3-2 实信号的复解析表示形式	(328)
4-3-3 简谐实信号的相量表示形式	(331)
§4-4 信号的相关分析	(333)
4-4-1 信号的相关系数	(333)

4-4-2 相关函数的概念	(340)
4-4-3 相关函数的特性	(343)
思考题	(348)
习题	(349)
第五章 随机信号分析	(351)
§5-1 随机信号的概念	(351)
§5-2 随机信号的统计分布描述	(353)
§5-3 随机信号的平均表征	(361)
5-3-1 随机信号的集平均表征量	(361)
5-3-2 随机信号的时间平均表征量	(379)
5-3-3 各态历经性随机信号	(382)
5-3-4 随机信号的功率谱	(386)
5-3-5 相关函数和功率谱密度的实验确定方法	(389)
§5-4 某些典型的随机信号	(398)
5-4-1 高斯随机信号	(398)
5-4-2 白噪声	(404)
5-4-3 窄带高斯随机信号	(407)
5-4-4 均匀分布随机信号	(412)
思考题	(414)
习题	(414)
第六章 调制——信号形式变换的分析	(418)
§6-1 引言	(418)
§6-2 AM 调制	(420)
6-2-1 AM 波的分析	(421)
6-2-2 AM 波的产生方法	(423)
6-2-3 AM 波的解调	(427)
§6-3 双边带抑制载波 DSB - SC (Double Side Band Suppressed Carrier) 调制	(432)
6-3-1 DSB - SC 信号的分析	(433)
6-3-2 DSB - SC 信号的产生	(434)

6-3-3 DSB-SC 已调制信号的检波	(437)
§6-4 单边带 (Single Side Band) 调制	(438)
6-4-1 SSB 已调制波分析	(438)
6-4-2 单边带信号的产生方法	(440)
6-4-3 单边带已调信号的解调	(443)
§6-5 角调制	(444)
6-5-1 调频波的分析	(446)
6-5-2 调频波的产生方法	(453)
6-5-3 调频波的解调	(457)
§6-6 脉冲调制	(463)
6-6-1 脉冲振幅调制	(465)
6-6-2 脉冲编码调制	(468)
* §6-7 调制系统中的噪声	(472)
6-7-1 AM 包络检波系统的噪声	(472)
6-7-2 双边带DSB-SC 相干检波系统的噪声	(474)
6-7-3 SSB 相干检波系统的噪声	(475)
6-7-4 FM 波解调的噪声	(476)
6-7-5 脉码调制系统中的噪声	(480)
思考题	(480)
习题	(481)
第七章 连续线性时不变系统分析	(486)
§7-1 关于物理系统的概述	(487)
7-1-1 基本概念	(487)
7-1-2 物理系统的分类	(491)
7-1-3 线性时不变系统的分析方法	(497)
§7-2 连续线性时不变系统的微分方程分析	(499)
7-2-1 微分方程的建立步骤	(499)
7-2-2 微分方程的传输算子表示	(503)
7-2-3 系统响应 —— 微分方程的解	(505)
7-2-4 系统的性能分析	(519)

§7-3 系统的冲激(脉冲)响应分析	(522)
7-3-1 冲激响应的概念和特性	(522)
7-3-2 利用 $h(t)$ 求系统响应	(524)
7-3-3 系统 $h(t)$ 的确定方法	(526)
§7-4 系统的频域分析	(529)
7-4-1 系统频率响应的概念和特性	(530)
7-4-2 利用 $H(j\omega)$ 求系统的响应	(534)
7-4-3 几种特殊系统的频率响应	(538)
7-4-4 确定系统频率响应的方法	(543)
§7-5 系统的复频域分析	(545)
7-5-1 传输函数的概念和特性	(545)
7-5-2 系统的信号流图	(548)
7-5-3 传输函数 $H(s)$ 的确定方法	(555)
§7-6 系统的模拟	(557)
§7-7 系统的状态变量分析	(560)
7-7-1 状态变量法的基本概念	(561)
7-7-2 系统状态方程的建立方法	(563)
7-7-3 系统特性——状态方程和输出方程的解	(568)
§7-8 随机信号通过线性时不变系统	(576)
7-8-1 用冲激响应 $h(t)$ 分析随机信号通过线性时 不变系统	(577)
7-8-2 用频率响应分析随机信号通过线性时不变系统	(579)
思考题	(586)
习题	(587)
第八章 离散线性时不变系统分析	(600)
§8-1 引言	(600)
§8-2 离散线性系统的差分方程分析	(602)
8-2-1 离散线性系统的差分方程列写步骤	(602)
8-2-2 离散线性时不变系统的响应——差分方程的解 ...	(612)
8-2-3 系统的特性	(625)

§8-3 离散线性时不变系统的冲激响应	(630)
8-3-1 冲激响应的概念和性质	(630)
8-3-2 离散系统 $h(n)$ 的确定方法	(632)
8-3-3 离散线性卷积的计算	(636)
§8-4 离散线性时不变系统的脉冲传输函数分析	(644)
8-4-1 脉冲传输函数的概念和特性	(644)
8-4-2 $H(z)$ 的极点与 $h(n)$ 的关系	(648)
8-4-3 确定 $H(z)$ 的方法	(650)
§8-5 离散线性时不变系统的频域分析	(653)
8-5-1 频率响应的概念及特性	(653)
8-5-2 频率响应 $H(e^{j\omega})$ 的确定方法	(656)
§8-6 离散线性时不变系统的模拟	(660)
§8-7 离散线性时不变系统的状态变量分析	(664)
8-7-1 状态方程和输出方程的建立方法	(665)
8-7-2 系统的特性——状态方程的解	(673)
§8-8 离散时间随机信号通过离散系统	(680)
* §8-9 数字滤波的原理	(684)
思考题	(691)
习题	(692)
第九章 最佳信息系统基础	(699)
§9-1 引言	(699)
§9-2 最佳信号波形传输系统	(702)
* §9-3 最佳滤波系统	(704)
9-3-1 最佳滤波	(706)
9-3-2 获得最大峰值信噪比的相关法	(710)
9-3-3 获得最大峰值信噪比的相关滤波法	(712)
* §9-4 最佳检测系统	(714)
9-4-1 最大后验概率检测系统	(715)
9-4-2 最大似然检测系统	(719)

9-4-3 其他检测准则	(721)
思考题	(722)
习题	(722)
附录	
附录 I: 常用周期信号的傅里叶级数系数及离散频谱 ...	(724)
附录 II: 常见信号的频谱密度	(728)
附录 III: 连续信号的卷积 (线性)	(736)
附录 IV: 离散信号卷积 (和) 表 (线性)	(738)
附录 V: 常用离散信号的 z 变换	(740)
附录 VI: 传输算子 $H(p)$ 与 $h(t)$ 的关系表	(741)
附录 VII: 传输算子 $H(E)$ 与 $h(n)$ 的关系表	(741)
附录 VIII: 级数求和表	(741)
附录 IX: 两个序列 $a(i)$ (N 点) 和 $b(i)$ (M 点) 的相关 函数数值计算参考程序	(742)
附录 X: FFT 和 IFFT 子程序 (BASIC), 输入序列是 $r(i) + j i(i), i = 1, 2, \dots, n$	(743)
附录 XI: 两个序列 $a(i)$ (N 点) 和 $b(i)$ (M 点) 卷积和数 值计算程序 (BASIC)	(744)
附录 XII: 习题参考答案	(745)
主要参考书目及资料	(784)

绪 论

§ 0-1 信息与信号理论的研究对象

信息是人类社会和自然界中需要传送、交换、存储和提取的抽象内容。信息存在于一切事物之中，事物的一切变化和运动都伴随着信息的交换和传送。从远古的生物进化到当代形形色色的科学和社会活动。如人和动物对外界事物的感觉、大脑的思维、无线电波的传播、计算机的运算等等都是信息交换和传输的过程。所以信息是人类认识世界和改造世界的知识源泉。信息是如此地普遍存在，又是如此的重要，所以信息是本课程的研究对象。

由于信息是抽象的内容，为了传送和交换它，首先必须用语言、文字、图象和数据将它表示出来。人们称表示信息的语言、文字、图象、数据等为消息。消息在许多情况下也是不便传送和交换的，例如人的自然声音就不宜远距离传送。为此，需要用光、声、电等物理量来运载消息，运载消息的光、声、电等物理量被称为信号。信号用数学式子写出来就是时间或空间的函数，也可能是时间、空间的多元函数。常记为 $s(t)$ 、 $s(X, Y, Z)$ 及 $s(X, Y, Z, t)$ 等。它们的几何图形称为信号波形。由此可见信息、消息和信号是互相区别又互相联系的。要研究信息，也必研究信号。

信息的交换、传送、存储和提取是借助于信号来完成的。而信号是物理量，它的传输、存储和处理必须借助于物理设备才能实现。这些传输、存储和处理信号的设备总称为系统。详细地说，系统是由各个不同的部分按照一定的方式组成的一个整体并能完成某种任务的设备总称。这个任务从抽象的观点看，就是传输、

存储和变换信号，以达到使自然界、人类社会、生产设备按照希望的规律运动的目的，所以系统的组成和特性应该由信息和信号决定，它的功用是产生、变换、传输信号。

由上述可知，信息、信号、系统是有机联系的一个整体。所以，信息与信号理论基础就是研究信息、信号和系统的概念、特性及内在联系的一门课程，它是现代技术科学、现代管理科学的基础。其具体内容是，信息的概念、信息的度量及信息传输的基本原理；信号的频域、时域及其他变换域的分析以及载荷信息的方式；系统的描述及信号通过系统的分析，并将介绍最佳系统的概念。通过这些内容的学习，可以为进一步掌握现代科学技术打下一个良好的基础。

信息、信号与系统虽是不可分割的，但在研究它们的时候，仍然分别形成了各自的学科。本课程不可能全面讲授它们的全部内容，但是从信息的概念和观点，来讨论信号的表示、信号的特性以及信号通过系统的加工处理与传输原则，则是必须的，也是可能的。下面我们先介绍信息、信号和系统理论的概貌。

一、信息和信息理论

若把信息的传送、交换、存储和提取的方式、方法称为信息技术，则可以说它是和生物同时出现的。但研究信息的理论，即信息论还是从本世纪二十年代至四十年代末才建立的一门新学科。它研究信息的度量问题，传输信道的容量和率失真函数以及编码问题。这一理论的基础是 C·E·山农(C·E·Shannon)在 1948 年发表的“通信的数学理论”论文奠定的。所以常常称它为山农信息论。又由于它是基础理论，所以也称它为基础信息论，有时也称为狭义信息论。

自基础信息论建立以后，这一学科得到了很大的发展，它不仅研究通信系统的理论问题，还研究噪声、信号滤波、检测、估值、信号预测、调制与信息处理等方面的理论。通常把这种发展了的信息论称为工程信息论或一般信息论。

目前社会上所说的信息论，不仅包括基础信息论和工程信息论，而且还包含一切与信息有关的领域，如心理学、语言学、神经生物学等。它所涉及的研究对象不仅包括物理的人工信息系统、自然信息系统，还包括社会组织、经济组织、生产管理组织等非物理信息系统。人们把这种信息论称为广义信息论。

信息论的发展除了扩大内容和研究对象的范围外，同时对信息的描述和度量也在发展。首先从信息的意义上，提出了语言信息、语义信息、语用信息等概念。另外七十年代以来，有人不是象山农等人那样从随机性和统计理论研究信息，而是从非随机的模糊性和模糊理论来研究信息，提出了模糊信息理论。这些都还正在发展中。本书以工程信息论的观点来讨论信息、信号和系统。首先介绍基础信息理论，然后讨论信号分析和系统分析以及最佳信息系统的概念。这些都是工程信息论和广义信息论的基础。

二、信号的描述及分类

前面已经指出，信息必须借助信号才能传送、交换、存储和提取，所以在信息系统中，信号是一个重要的客体，一方面它包含着信息，另一方面由于系统是传输、变换、处理信号的，其特性应由信号决定。因此，必须比较透彻地了解和研究信号的各种属性。

研究信号的信号理论涉及面很广，内容十分丰富，从大的方面来说大致可分为两部分。一部分是信号分析，它研究信号的解析表示，信号有用性质的数值特征、信号的变换和处理等；另一部分是信号的综合，它讨论根据一定的要求设计或选择信号的最佳形式。信号分析与信号综合两个方面虽有区别，但它们又是互相联系、互相制约的，信号分析是综合的基础，所以本书的重点是讨论信号分析。

信号的形式是多种多样的，要研究信号，必须将其进行分类。信号的分类方法很多，我们感兴趣的是下述分类法。