

通信原理

叶芝慧 冯奇 卢莎 编著



科学出版社

通信原理

叶芝慧 冯奇 卢莎 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书结合“信息论与编码”和“通信原理”两部分内容,沿着以信息理论作为理论指导,以通信系统作为应用实现的思路撰写。本书介绍了模拟通信系统和数字通信系统的特性、关键技术和应用。主要内容包括信源的描述、信号和噪声分析、信息的度量、信源编码、模拟调制技术、数字信号的基带传输、模拟信号的数字传输、数字调制技术、同步原理、信道和信道编码定理、最佳接收、信道编码、多路复用与多址技术等。在编写过程中注重语言描述通俗易懂,原理阐述深入浅出,逻辑推理严谨简洁,并配合丰富的应用实例。力图将经典理论的研究成果与现代通信的实际应用相结合。本书中每章都有小结和习题或思考题。

本书可作为高等院校信息与通信工程及电子类、计算机科学与工程类、自动控制类等学科的高年级本科生或硕士研究生教材,也适合作为有关科研、技术和管理人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

通信原理/叶芝慧,冯奇,卢莎编著. —北京:科学出版社,2015.8
ISBN 978-7-03-045446-1

I. ①通… II. ①叶… ②冯… ③卢… III. ①通信理论 IV. ①TN911

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 190451 号

责任编辑:潘斯斯 张丽花/责任校对:郭瑞芝

责任印制:霍 兵/责任设计:迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年9月第一版 开本:787×1092 1/16

2015年9月第一次印刷 印张:24 3/4

字数:587 000

定价:56.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序 言

《国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010—2020年)》提出“要全面提高高等教育质量,到2020年建成一批国际知名、有特色高水平高等学校,若干所大学达到或接近世界一流大学水平”。信息学科作为与时代结合最为紧密的科学与产业领域,其发展对于高等院校调整学科布局,培养不同层次的专业人才具有重要的作用。

教材建设是高等学校教学建设的重要内容之一,编写并出版一本好的教材,对于推动课程建设、促进专业发展具有非常重要的意义,其研究成果甚至有可能促进一门新的学科的诞生。

“通信原理”和“信息论与编码”课程均以通信系统作为研究对象,从不同的角度阐述了通信系统的有效性和可靠性,使得这两门课程的教学内容既各有侧重,又相互渗透。作者在深入研究和分析这两门课程的内在联系和特点的基础上,对教学内容和课程设置进行了整合和优化,从而达到进一步改善教学质量、提高教学效率和提升教学效果的目的。

通信原理是电子信息类专业的主干课程,众多高等院校电子、通信和计算机等专业均开设这门课程,相应的教材也非常多,课程的理论性和应用背景都很强,内容抽象,公式推导多,学生理解和掌握难度比较大。

信息论与编码目前也已成为众多高等学校电子信息类专业的必修课程,相应的教材也很多。在众多的教材中,有的侧重理论,有的关注应用,各有其特色和价值。

随着信息科学的飞速发展以及教学改革的深入,对教学内容、教学效率和教学效果都提出了更高的要求,新的理论和技术成果也不断出现,如卫星通信、多用户通信等。编写能够反映当前社会经济发展需求、满足多种应用领域和读者人群、反映学科最新研究成果和发展趋势的教材,是一项极具挑战性和始终有意义的工作。

这本教材顺着“以信息论和编码作为通信技术的理论依据,以通信原理作为信息论与编码的应用发展”的思路编写,定位明确、内容新颖、系统性强,反映了通信原理和信息论与编码的最新理论与实践成果。作者在二十多年的教学经验积累过程中,不间断地在多所高校执教“信息论与编码”和“通信原理”本科生和研究生课程,在此过程中,汲取众家之长,并结合自己长期科研工作的感悟和体会,使得这本教材具有自己的特色。在教材的整体风格上,注重对物理概念的分析和说明,通过理论推导和例题等启发和引导读者进行更深层次的探索;在编排上注重深入浅出,层层展开,为读者展示通信原理和信息理论与编码理论的内在联系和丰富内涵;在注重理论分析的同时尽量减少繁琐的推导和证明;在语言描述上做到流畅和通俗易懂,将抽象的数学表达式用清晰易懂的物理概念进行阐述。相信这本教材的出版,不但能为高等院校的课程建设提供一本好的参考书,而且也将使相关领域的科学工作者受益。

贵德

2015年8月

前 言

近十几年通信技术的飞速发展给高等院校通信专业的教学带来很大的冲击与推动，教学内容和教材需要不断改进，以适应通信领域日新月异的发展。本书结合信息论与编码和通信原理两部分内容，沿着以信息理论作为理论指导，以通信系统作为应用实现的思路撰写。信息论与编码和通信原理作为通信、电子、信息等学科的重要专业课程，已成为国内外众多大学高年级本科生或硕士研究生的核心课程或必修课程。在这些开课院校中，由于基础不同、侧重点不同、办学层次和培养目标不同，对课程学习的要求也各不相同。编者曾在多所大学教授本科生和研究生的“信息论与编码”和“通信原理”课程。本书就是在多年的教学实践和学生意见反馈的基础上编写修改而成的。本书面向普通高校通信或相关专业高年级本科生或者硕士研究生，建议课时为 60~80 学时。本书有完善的多媒体课件可提供。

本书共 13 章。第 1 章概括介绍通信与信息的基本概念、信源描述、通信系统的组成及数字通信系统模型与性能指标。第 2 章介绍确知信号、随机信号的特性，分析通信系统中普遍存在的噪声的统计特性。第 3 章给出熵和信息量的概念，分析离散平稳信源的熵及离散信源的时间熵。第 4 章介绍信源编码模型与编码方法，并由限失真信源编码定理引出信息价值的概念。第 5~8 章介绍模拟通信系统与数字通信系统的特性，以及模拟信号的数字传输。包括线性调制与角度调制，数字基带信号传输系统的特性，码间串扰和噪声对数字基带信号传输性能的影响，PCM 通信系统及增量调制系统的特性等。第 9 章介绍载波同步、位同步和群同步的基本工作原理和性能。第 10 章分析几种典型的离散信道特性，重点讨论香农第二定理和香农信道容量公式，最后讨论连续信源的编码问题。第 11 章在介绍匹配滤波器和最佳接收机系统结构的基础上，讨论数字信号的最佳接收问题，并分析其抗噪声性能。第 12 章介绍差错控制的基本理论，以及线性分组码、卷积码、纠突发错误码等常用的信道编码。第 13 章分析多路复用和多址接入的几种主要方案，OFDM 调制和扩频通信技术，以及多址通信系统。

在编写过程中，贲德院士给予了热情的鼓励和指导，在此深表感谢。课题组的研究生吕珺、范中康、韩文波、郭小青、张羽、王阳、潘礁、商谦谦、钟晴、郭晨醒、胡佳伟等做了大量细致的工作。最后，要特别感谢科学出版社的潘斯斯、张丽花编辑，在她们的支持下，本书才得以顺利出版。

本书内容虽已经过多届研究生和高年级本科生的使用，但信息论与编码和通信系统都处于不断发展中，限于编者的水平，若书中存在不妥之处，恳请读者批评指正。

编 者

2015 年 6 月

目 录

序言	
前言	
第1章 绪论	1
1.1 通信与信息的基本概念	1
1.1.1 信号、信息与通信	1
1.1.2 信息的本质与特征	2
1.2 信息论与信息科学	2
1.2.1 信息论与信息科学	2
1.2.2 信息论的研究范畴	3
1.3 信源描述	4
1.3.1 离散信源	4
1.3.2 连续信源	6
1.3.3 平稳信源	6
1.3.4 自然语信源	7
1.4 通信系统的组成	9
1.5 数字通信	10
1.5.1 数字通信系统模型	11
1.5.2 数字通信与模拟通信的性能指标	12
本章小结	14
思考题	14
第2章 信号和噪声分析	15
2.1 确知信号分析	15
2.1.1 信号和系统的分类	15
2.1.2 信号的频谱分析	16
2.1.3 谱密度和帕塞瓦尔定理	19
2.1.4 信号通过线性系统	21
2.1.5 波形的相关性	22
2.2 随机信号分析	24
2.2.1 随机变量及其数字特征	24
2.2.2 随机过程的统计特性	26
2.2.3 平稳随机过程和高斯随机过程	29
2.2.4 随机过程通过线性系统	33
2.3 噪声分析	35
2.3.1 白噪声	35

2.3.2	通信系统中的噪声	36
2.3.3	正弦波加窄带高斯噪声	38
	本章小结	39
	思考题	39
	习题	40
第3章	信息的度量	42
3.1	度量信息的思路	42
3.2	信息的度量	43
3.2.1	信源的信息熵	43
3.2.2	平均互信息量	45
3.2.3	n 维随机变量的信息传递	49
3.2.4	离散信源的符号熵和时间熵	50
	本章小结	54
	习题	55
第4章	信源编码	56
4.1	信源的冗余度与编码模型	56
4.1.1	信源的冗余度	56
4.1.2	信源编码模型	58
4.2	最佳信源编码	58
4.2.1	编码效率	59
4.2.2	信源符号序列分组定理	60
4.3	无失真信源编码	61
4.3.1	变长码的信源编码	61
4.3.2	等长码的信源编码定理	64
4.4	常用的无失真信源编码方法	64
4.4.1	香农第一定理	64
4.4.2	香农编码	66
4.4.3	费诺编码	67
4.4.4	霍夫曼编码	68
4.4.5	游程编码	70
4.4.6	Lempel-Ziv 编码	71
4.5	信源编码的错误扩散	73
4.6	信息率失真理论	73
4.6.1	平均失真度和信息率失真函数	74
4.6.2	保真度准则下的信源编码定理	81
4.6.3	信息价值	82
	本章小结	84
	习题	85
第5章	模拟调制技术	88

5.1	模拟调制	88
5.2	模拟基带信号传输	89
5.3	线性调制	90
5.3.1	双边带调制	90
5.3.2	振幅调制	91
5.3.3	单边带调制	92
5.3.4	残留边带调制	95
5.4	线性调制系统的抗噪声性能分析	96
5.4.1	同步解调的抗噪声性能	97
5.4.2	非同步解调的抗噪声性能	98
5.5	非线性调制(角调制)	98
5.5.1	角调制信号的一般概念	99
5.5.2	角调制信号的频谱	100
5.5.3	调频信号的平均功率	103
5.6	调频系统的抗噪声性能分析	103
5.7	调频信号解调的门限效应	106
5.8	加重技术	107
	思考题	108
	习题	108
第6章	数字信号的基带传输	110
6.1	数字基带信号传输系统的构成	110
6.2	数字基带信号的码型和波形	112
6.3	数字基带信号的频谱分析	116
6.3.1	随机脉冲序列的一般表示	116
6.3.2	数字基带信号的功率谱密度表达式	117
6.3.3	常用数字基带信号的功率谱密度	118
6.4	数字基带传输中的码间串扰和噪声	122
6.4.1	码间串扰和噪声对误码的影响	122
6.4.2	数字基带信号传输系统的数学模型	124
6.5	无码间串扰的传输特性	126
6.5.1	无码间串扰传输函数 $H(\omega)$ 的特例	126
6.5.2	无码间串扰传输特性的数学分析	128
6.5.3	几种常用的无码间串扰的传输特性	129
6.6	噪声对无码间串扰传输性能的影响	131
6.6.1	加性噪声作用下误码的分析	132
6.6.2	误码率 P_e 的计算	133
6.6.3	误码率与信噪功率比 ρ 、码元速率 f_b 的关系	134
6.7	多进制数字基带信号的传输	135
6.8	眼图	137

6.8.1	眼图的基本原理	137
6.8.2	眼图的模型	140
6.9	改善数字信号基带传输性能的措施	140
6.9.1	部分响应系统	140
6.9.2	时域均衡	145
	本章小结	148
	思考题	148
	习题	148
第7章	模拟信号的数字传输	151
7.1	抽样定理及其应用	151
7.1.1	概述	151
7.1.2	低通信号的均匀理想抽样	153
7.1.3	自然抽样(曲顶抽样)	155
7.1.4	平顶抽样	157
7.1.5	带通信号的抽样定理	158
7.2	量化	160
7.2.1	量化和量化噪声	160
7.2.2	均匀量化及其量化信噪功率比	161
7.2.3	非均匀量化	163
7.2.4	压缩与扩张的特性	164
7.3	编码和译码	167
7.3.1	常用的二进制码	167
7.3.2	逐次(比较)反馈型编码器	169
7.4	PCM 通信系统	172
7.4.1	PCM 信号的码元速率和带宽	172
7.4.2	PCM 系统的抗噪声性能	173
7.5	增量调制系统	175
7.5.1	简单增量调制(ΔM)	175
7.5.2	简单增量调制系统抗噪声性能分析	177
7.6	改进型的增量调制	180
7.6.1	总和增量调制($\Delta\Sigma$ 调制)	180
7.6.2	数字音节压缩增量调制	181
7.6.3	差分脉码调制	183
	本章小结	186
	思考题	186
	习题	187
第8章	数字调制技术	190
8.1	二进制数字振幅调制	191
8.1.1	2ASK 信号的功率谱及带宽	191

8.1.2	二进制幅移键控系统的性能	193
8.2	二进制数字频率调制	196
8.2.1	调制解调方法	196
8.2.2	2FSK 信号的功率谱及带宽	196
8.2.3	二进制频移键控系统的性能	198
8.3	二进制数字相位调制	200
8.3.1	2PSK 信号的产生和解调	201
8.3.2	2DPSK 信号的产生与解调	203
8.3.3	二进制移相信号的功率谱及带宽	205
8.3.4	二进制相移键控系统的性能	206
8.4	二进制数字调制系统性能的比较	209
8.5	多进制数字调制	211
8.5.1	多进制幅移键控(MASK)和多进制频移键控(MFSK)	211
8.5.2	多进制相移键控(MPSK)	212
8.5.3	多进制数字调制的性能比较	213
8.6	改进型数字调制方式	214
8.6.1	时频调制	214
8.6.2	时频相调制	216
8.6.3	恒包络数字调制	216
	本章小结	221
	思考题	222
	习题	222
第 9 章	同步原理	224
9.1	载波同步	225
9.1.1	直接法(自同步法)	225
9.1.2	插入导频法(外同步法)	227
9.1.3	载波同步系统的性能	229
9.1.4	同步载波频率和相位误差对解调性能的影响	231
9.2	位同步	231
9.2.1	插入导频法提取位同步信号	232
9.2.2	直接提取位同步信号方法	233
9.2.3	位同步系统的性能	235
9.3	群同步(帧同步)	236
9.3.1	连贯式插入法	237
9.3.2	间歇式插入法	239
9.3.3	群同步系统的性能	242
9.3.4	群同步的保护	244
	思考题	245
	习题	245

第 10 章 信道和信道编码定理	247
10.1 信道的传输特性	247
10.1.1 信道模型	247
10.1.2 分集接收	248
10.1.3 多普勒频移	248
10.2 离散(数字)信道的信道容量	249
10.2.1 数字信道的数学模型	249
10.2.2 单符号离散信道的信道容量	251
10.2.3 多符号离散信道的信道容量	255
10.3 有扰离散信道编码定理	257
10.3.1 译码准则	257
10.3.2 汉明距离	260
10.3.3 有扰离散信道的信道编码定理	262
10.4 连续信源和连续信道	263
10.4.1 连续消息的信息度量	263
10.4.2 最大相对熵定理	269
10.4.3 熵功率	270
10.4.4 香农信道容量公式	273
本章小结	275
习题	275
第 11 章 最佳接收	280
11.1 匹配滤波器	280
11.2 数字信号的最佳接收	282
11.2.1 二元假设检验	282
11.2.2 二元确知信号的最佳接收机结构	285
11.2.3 最佳接收机的检测性能	286
11.2.4 实际接收机与最佳接收机的比较	289
11.3 连续信号的最佳接收	290
11.3.1 最佳接收与理想接收机	290
11.3.2 相关信源的预测编码	292
本章小结	295
思考题	295
习题	295
第 12 章 信道编码	296
12.1 差错控制和纠错编码	296
12.1.1 差错控制的基本方式	296
12.1.2 纠错编码的基本概念	297
12.1.3 纠错编码的检纠错能力	300
12.2 近世代数基础	301

12.2.1	群和域	301
12.2.2	多项式域	304
12.2.3	GF(2)的扩域 GF(2^m)	305
12.2.4	向量空间	307
12.3	线性分组码	308
12.3.1	线性分组码的基本概念	308
12.3.2	线性分组码的编译码	310
12.3.3	线性分组码的纠错性能	314
12.3.4	汉明码和格雷码	314
12.3.5	循环码	316
12.3.6	BCH 码	323
12.3.7	R-S 码	326
12.4	卷积码	328
12.4.1	卷积码的编码	329
12.4.2	卷积码的译码	333
12.5	纠突发错误码	341
12.5.1	纠突发错误循环码	342
12.5.2	纠突发错误卷积码	344
12.5.3	纠突发和随机错误码	345
	本章小结	349
	习题	349
第 13 章	多路复用与多址技术	353
13.1	通信资源的分配	353
13.2	频分复用和频分多址	354
13.3	时分复用和时分多址	356
13.3.1	时分复用的原理	356
13.3.2	时分复用的 PCM 系统(TDM-PCM)	358
13.4	码分多址	359
13.5	空分多址和极分多址	360
13.6	OFDM 调制	360
13.6.1	OFDM 的基本原理	361
13.6.2	OFDM 系统的参数选择	364
13.6.3	OFDM 系统性能	364
13.7	扩频通信	365
13.7.1	直接序列扩频	365
13.7.2	跳频扩频	367
13.7.3	DSSS 与 FHSS 的比较	368
13.8	多址通信系统及其结构	369
	本章小结	370

思考题	371
习题	371
参考文献	373
附录	374
附表 1 常用时间函数及其傅里叶变换	374
附表 2 傅里叶变换的运算特性	376
常用符号	377
常用缩略词	378

第1章 绪 论

通信原理是在信息理论的指导下不断发展的一门科学。信息论是为了解决噪声与干扰中的通信问题而诞生的一门科学。信息理论不断发展对通信系统的设计及通信技术的实现起着越来越重要的作用。

信息论的创始人是美国的数学家香农(Shannon, 1916-2001)。信息理论利用概率论、随机过程和数理统计等数学方法来研究信息的存储、度量、编码、传输和处理。目前已逐步渗透到经济、管理和社会的各个领域,产生一般信息论、广义信息论等分支。

通信系统是指将信息从信源传送到信宿的电子系统。信息可以是数字消息或模拟消息。数字消息通常是指幅度或时间上离散的序列,而典型的模拟消息则是一个时间连续的波形。数字通信系统代表着通信系统的方向,系统设计的目标是在成本、功耗和复杂度限制条件下,设计和构建错误传输概率尽可能低的通信系统。

本章从通信与信息的关系着手,分析消息、信号、信息、通信的关系,并给出通信系统的基本架构。

1.1 通信与信息的基本概念

通信的目的是传递消息,而信息是消息中包含的有意义的内容,消息是信息的载体。信息是用于交流的,如果不交流,信息就没有意义。从这个角度看,信息和通信密不可分。

通常将语言、文字、图像、数据等统称为消息。消息是客观存在的,它的传递需要借助载体,如记录文字的纸,记录语音、图像和数据的光盘等。如果载体是电、磁、光等,则将这种消息的载体称为信号,它使无形的消息具体化。

1.1.1 信号、信息与通信

从古代的烽火狼烟到近现代的航海旗语、交警手势,以及现代的电话、电视等,都是传递消息的方式,因此都可以称为通信,但是现代的通信通常特指“电通信”,即以电信号作为载体进行信息的传递。

信号理论是一门通过时域、频域及其他变换域来研究信号的波形、频谱等特征的科学。

在有意义的通信中,虽然消息的传递意味着信息的传递,但对接收者而言,信源发出的消息可能是已知的,也可能是未知的,可能是有用的,也可能是无用的,也就是说,某些消息可能比另外一些消息能够传递更多的信息。此外,人的主观因素也会影响到对消息的判断。对这些问题的进一步研究就产生了信息理论的各种分支,如广义信息理论等。

通信的任务是快速、准确地传递信息。因此,从研究消息传输的角度而言,有效性和可靠性是评价通信系统优劣的最主要的两个性能指标。

一方面,消息中通常包含大量的冗余,在送入信道传输之前,通常需要先进行一些去除冗余度的处理,从而提高通信的有效性。信源编码的主要任务是解决通信的有效性问题的。

另一方面,消息在传输过程中通常会引入各种干扰或噪声,从而使接收到的消息与发送的消息产生误差,这就要求信宿能够对接收到的消息进行判断、纠正和恢复,从而提高通信的可靠性。信道编码的主要任务是解决通信的可靠性问题。

通信系统的有效性和可靠性是一对矛盾。信息理论最初是从解决这一对矛盾入手的,逐步发展成为一门新兴学科,即信息科学。

1.1.2 信息的本质与特征

概括地说,通信系统传输的是信号,信号是消息的载体,消息中的未知成分是信息。消息、信号和信息密不可分。事实上,如果接收方(信宿)事先完全知道信源发出的消息是什么,这种通信就失去了意义。因此人们更感兴趣的是消息中所包含的未知或者不确定的成分,这种成分就是包含在消息中的信息。

信息论的创始人香农把信息看作“一种解除不确定性”的量,用所解除的不确定性的程度来表示信息量的多少。因此,信息论中的信息,就是指被解除的不确定性。从这个角度看,信息和信息量是同一个概念。即在信息论中,信息量公式就是对信息最明确的定义。

香农的狭义信息论从通信的角度将信息定义为人们对事物了解的不确定性的消除或减少。因此,在无干扰的理想情况下,信源发出的信号与信宿接收的信号一一对应。

信息具有如下特征。

(1)不确定性。这是信息的最基本属性。对于接收消息的一方,消息从未知到已知,等效为不确定性元素的减少。由此,可以利用概率论和随机过程来描述信息的传输。

(2)可度量性。这也是信息的基本属性之一,它使信息可以进行比较。

(3)其他属性。包括可识别性、可转换性、可传递性、特定范围有效性、可扩充性、主客体二重性及能动性。需要指出的是,信息受主观和客观双重因素的影响,这使它既具有能量和物质的某些属性,又不同于能量。

1.2 信息论与信息科学

1.2.1 信息论与信息科学

信息的上述特征使人们可以运用概率论与数理统计来研究信息传输和处理中的一般规律。需要解决的核心问题是信息传输的有效性和可靠性以及两者之间的关系。

香农在1948年和1949年分别发表了 *The mathematical theory of communication* 和 *Communication in the presence of noise* 两篇文章,提出了信息及其度量、信息特征、信息传输速率、信道容量即信息在信道中的传输极限、干扰对信息传输的影响、在允许失真的条件下信息的进一步压缩等问题,成为信息论诞生的标志。在香农信息论中,信息量、信道容量、熵、香农的3个定理、香农公式等明确回答了这些问题。

下面举一个例子来进一步理解信息的本质和特征。

某人某日收到两条消息:一条是2015年12月22日将进入冬至;另一条是2030年9月15日一颗小行星将撞击地球。

显然,这两个事件出现的概率有很大的不同。第一条是必然事件,如果此人事先已有这方面的知识,则这条消息并没有给他带来信息。但是如果事先不知道,则他仍会从中获得信

息。第二条事件出现的概率极小，如果它真的出现了，就会带来极大的信息量。

再举一个例子，某人收到一箱礼物，并且知道这是一箱苹果，打开箱子看到苹果后，实际上他并没有得到新的信息；如果他事先只知道箱子里可能是苹果也可能是梨，打开箱子后，不管看到的是苹果还是梨，他都得到 1bit 的信息(假设两种水果出现的可能性相等)；如果可能性不止两种，他得到的信息将大于 1bit。但是如果事先得知箱子里装的是苹果，但打开来一看，却是另外一种东西，这种情况就超出了狭义信息论的研究内容，属于广义信息论范畴。

最初的信息论只对信息进行定量的描述，而没有考虑信息的语义和效用等问题。随着信息论从通信领域渗透到自动控制、信息处理、系统工程、人工智能等领域，要求对信息的本质、语义和效用等问题进行更深入的研究，建立更一般的理论，从而产生了信息科学。信息和控制是信息科学的基础和核心。

信息产业的概念是在知识产业研究的基础上产生和发展起来的，它将社会经济划分为农业、工业、服务业、信息业四大类，其中信息产业是与信息的获取、存储、传输、加工处理和利用等直接相关的产业的总称。

1.2.2 信息论的研究范畴

目前关于信息论的研究范畴可以分成 3 种：狭义信息论、一般信息论和广义信息论，如图 1.1 所示。

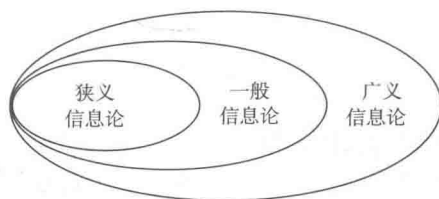


图 1.1 信息论的研究范畴

狭义信息论又称为香农信息论、经典信息论等，它是关于通信技术的理论，是以通信系统模型为对象，以概率论和数理统计为工具研究通信技术中关于信息的传输和变换规律的一门科学。香农信息论在信息可以度量的基础上，研究如何在通信系统中有效可靠地传输信息。本书主要涉及狭义信息论的内容。

香农信息论研究通信过程中的信源、信道、信宿、编码和译码、信息的度量及信息容量等问题。狭义信息论主要从量的方面描述信息的传输和提取，所以有时也称为统计信息论。本书中讨论的经典信息论的主要内容如下。

- (1) 信息及其度量：给出了信息量及熵的概念，是信息论的基础。
- (2) 无失真信源编码：包括香农第一定理及各种无失真的信源编码方法。
- (3) 信道容量：主要内容是香农公式即信道容量公式，给出了信息传输能力的极限值。
- (4) 信息率失真理论：描述了在允许一定失真的情况下信息传输能力的极限，包括信息率失真理论、香农第三定理、信息价值等。
- (5) 信道编码和差错控制理论：主要内容是香农第二定理及各种信道编码方法，如线性分组码、循环码、卷积码等。

一般信息论是在狭义信息论的基础上发展起来的，主要研究信息传输的一般理论，包括信号与噪声理论、信号过滤与检测、调制与信息处理等问题。

广义信息论则超出了通信技术的范围来研究信息问题，它以各种系统、各门科学中的信息为对象，广泛地研究信息的本质和特点，以及信息的取得、计量、传输、储存、处理、控制和利用的一般规律。

1.3 信源描述

信源是信息的来源，即消息或消息序列的源头。如前所述，不确定性和可度量性是信息的两个基本属性，因此用概率论和随机过程对信源建模是一种有效的手段。由此给出信源空间的定义。

定义 1.1 如果信源的输出是 N 个随机事件的集合 X ，其出现概率为 $P(X)$ ，则它们所构成的集合，称为信源的概率空间，简称信源空间。

信源空间可以用如下数学表达式描述：

$$\begin{bmatrix} X \\ P(X) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1, & x_2, & \dots, & x_i, & \dots, & x_N \\ P(x_1), & P(x_2), & \dots, & P(x_i), & \dots, & P(x_N) \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

信源空间应是一个完备集，即

$$\sum_{i=1}^N P(x_i) = 1 \quad (1.2)$$

其中， N 是自然数。

概率空间能够完整地表征离散信源的统计特性，也就是说，当信源给定时，其相应的概率空间就已给定；反之，概率空间给定，就表示相应的信源已给定。

对信源进行分类的方法很多，例如，从信源消息是模拟的还是数字的，可将信源分为模拟信源和数字信源；从信源发出的消息在时间和幅度上的分布情况，可将信源分为离散信源和连续信源；根据消息符号之间的关联性，可将信源分为无记忆信源和有记忆信源；从描述信源消息的随机过程的平稳性角度，可将信源分为平稳信源和非平稳信源；若根据随机过程的类别，还可将信源分为高斯信源、马尔可夫信源等。此外，从人们对信源消息的感知角度，可将信源分为数据信源、语音信源、文本信源、图像信源等，其中语音信源和文本信源通称为自然语信源。

1.3.1 离散信源

离散信源是指发出在时间和幅度上都是离散分布的离散消息的信源，如文字、数字、数据等。离散信源分为离散无记忆信源和离散有记忆信源两类，其中离散无记忆信源又可分为单符号离散无记忆信源和符号序列离散无记忆信源。

1. 单符号离散无记忆信源

现实生活中有很多这样的信源。例如，抛硬币时向上的一面、信件上的文字、阿拉伯数字、计算机代码等。这些信源输出的都是单个符号或代码消息，一个符号就代表一条完整的消息，其符号集的取值都是有限或无限可列的，可以用一维离散型随机变量集合 X 来描述这