

信息论

基础理论与应用

面向 21 世纪高等学校电子信息类教材

面向 21 世纪高等学校电子信息类教材

# 信息论

## 基础理论与应用

● 傅祖芸 编著

TN911  
11611



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

URL: <http://www.phei.com.cn>

面向 21 世纪高等学校电子信息类教材

# 信 息 论

——基础理论与应用

傅祖芸 编著

電子工業出版社

**Publishing House of Electronics Industry**

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书系统地讲述信息论的基础理论,内容包括:信息及信息的度量;离散信源和连续信源的信息熵;信道与信道容量;平均失真度和信息率失真函数;信源编码和信道编码定理;网络信息理论以及保密系统的信息理论。本书还介绍了信息论在通信工程实践中的应用,同时简要地介绍了信息论在热力学、光学、统计学、生物医学等其他学科中的应用。

本书文字通顺,概念清晰,取材新颖,可作为高等院校无线电技术、信息工程、通信、雷达、计算机等专业本科生、研究生的信息论课程教材,也可供声学、生物医学工程、管理科学等专业研究生及有关的教学、科研和工程技术人员参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,翻版必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

信息论:基础理论与应用/傅祖芸编著. - 北京:电子工业出版社,2001.8

面向 21 世纪高等学校电子信息类教材

ISBN 7-5053-6850-8

I. 信… II. 傅… III. 信息论 - 高等学校 - 教材 IV. G201

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 051791 号

丛 书 名:面向 21 世纪高等学校电子信息类教材

书 名:信息论——基础理论与应用

编 著 者:傅祖芸

责任编辑:陈晓莉

特约编辑:李双庆

排版制作:电子工业出版社计算机排版室

印 刷 者:北京兴华印刷厂

装 订 者:三河市双峰装订厂

出版发行:电子工业出版社 URL:<http://www.phei.com.cn>

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:28 字数:717 千字

版 次:2001 年 8 月第 1 版 2001 年 8 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 7-5053-6850-8  
TP·3878

印 数:5 000 册 定价:33.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页、所附磁盘或光盘有问题者,请向购买书店调换;  
若书店售缺,请与本社发行部联系调换。电话 68279077

## 出版说明

目前,高校正处于教改时期,新的专业目录已出台,从1999年秋季开始,各院校开始按新的专业设置进行招生。这样,原来的教材体系结构就很难适应当前调整后的专业需要,因而需要对教材进行相应的改革。为了适应当前教材改革与教材建设的需要,1996年教育部正式启动了“面向21世纪高等工程教育教学内容和课程体系改革计划”,许多高等院校经数年的研究与实践,取得了许多重要成果。

为了配合全国各类高校电子信息类专业的教学改革与课程建设,推进高校电子信息类专业新教材的出版工作,在有关专家的倡议和有关部门的大力支持下,组织成立了全国高等学校电子信息类教材编委会;组织参加教育部组织的“电气信息类专业人才培养方案及教学内容体系改革的研究和实践”和“电工电子系列课程教学内容和课程体系改革的研究与实践”两项课题的若干著名大学和其他高校的有关教师,讨论怎样尽快落实和实施面向21世纪的新教材的编写与出版工作,制定了新的教材出版规划。参加教材编写和编审的学校有:东南大学、北京邮电大学、西安电子科技大学、中国科技大学、华中理工大学、上海交通大学、西安交通大学、南京航空航天大学、天津大学、解放军信息工程大学等。

编委会一致认为,规划教材应该能够反映当前教学改革的需要,要有特色和一定的前瞻性。规划的教材由个人申报或各校推荐,经编委会认真评审,最后由出版社审定出版。这批规划教材都是教学改革力度大、有创新精神、有特色风格的教材和质量高、可读性好、可教性好的优秀教材,可满足各类高等院校21世纪初电子信息类专业及相关专业的教学需要。

限于我们的水平和经验,这批教材在编审、出版工作中还可能存在不少缺点和不足,希望使用本教材的教师、同学和其他广大读者提出批评和建议,以使教材质量不断提高,共同为建设电子信息类专业面向21世纪的新教材而努力。

全国高等学校电子信息类教材编委会  
电子工业出版社

## 面向 21 世纪高等学校电子信息类教材编审委员会成员名单

主任委员:林金桐

副主任委员:傅丰林 邹家驊 赵尔沅 沈永朝

委 员:林金桐 赵尔沅 乐光新 白中英

邹家驊 沈永朝 刘京南 沈嗣昌

傅丰林 廖桂生 史小卫 李建东

张传生 殷勤业 徐国治 徐佩霞

严国萍 朱定华 王 殊 邓建国

## 前 言

人类社会的生存和发展无时无刻都离不开信息的获取、传递、处理、控制和利用。特别是,迈入 21 世纪——高度信息化时代,信息的重要性更是不言而喻。

信息论正是一门应用概率论、随机过程和数理统计等方法来研究信息的存储、传输和处理中一般规律的学科。它主要研究如何提高信息系统的可靠性、有效性、保密性和认证性,以使信息系统最优化。所以,学习和掌握信息论越来越受到人们的重视和需求。

随着现代信息技术水平的迅猛发展和提高,信息论的一些基本理论,如:信道编码即纠错码理论、无失真和限失真信源编码即数据压缩原理等,在通信、计算机通信、数字影像等工程实践中都得到广泛的应用。甚至,日常生活娱乐中如数字激光影碟机、数字家庭音像系统等都普遍采用了纠错码技术和数据压缩技术。所以,现在人们对于信息论的基本理论已不再感到陌生,抽象及难以理解和掌握。

在这种形势下,许多高校(包括理科和工科学院)都在相关专业中开设了信息论课程,作为本科生、研究生的必修或选修课程。

为满足广大读者的需要,作者重新编写了本书,以期能适应科学技术发展的新形势。

本书主要是系统地介绍香农(Shannon)信息论的基本内容以及它的应用。全书注重基本概念、基本理论和基本分析方法的论述,并结合实例建立数学模型,给出详细的数学推演过程和证明,力求物理概念清晰、数学结构严谨和完整。在内容的编排上,力求由浅入深、循序渐进,合理而系统地安排章节。

全书共有 10 章。第 1、2、3 章和第 6 章是全书的基础。首先阐述信息的概念,引出香农关于信息的定义。在此基础上,讨论各类离散信源、连续信源和波形信源的信息测度以及离散信道、连续信道和波形信道的信息传输率和信道容量。第 4、5 章和第 7 章,论述离散信源的无失真和限失真信源编码定理以及离散有噪信道编码定理。此部分内容是香农信息论的核心部分。在这部分中还列出了一些实用的信源压缩编码方法和以(7.4)汉明码为例阐述了纠错码技术的基本思想和方法。第 8 章,介绍网络信息论的一些基本理论和新成果。第 9 章,简要地介绍香农用信息论的观点对信息保密问题的论述。第 10 章,简要地探讨信息论与热力学、光学、统计学、生物医学等学科的关系和应用。

全书引入了弱  $\epsilon$  典型序列,使全书几个重要定理的证明变得简洁明了,而且又使单用户信息理论和网络信息理论中定理的证明方法达到一致。

本书可作为有关专业本科生和研究生的教材。书中编有“\*”号的章节,均属加宽加深的内容。对高年级本科生讲授时,可作适当取舍,只讲授基本内容,复杂的数学证明可以省略。为帮助读者掌握分析和解决问题的能力,书中列举了许多例题,并且各章配有大量的习题。每章结尾还给出一小结,以公式形式列出该章的主要内容。书后的附录,为读者提供了所需的一些数学基础知识。本书还附有一些参考书目和参考文献,以供读者查阅。

作者在原有学校讲义的基础上,于 1986 年、1989 年,编写了《信息论基础》一书,作为全国高校电子类第二轮、第三轮统编教材出版。十多年来,经过北京航空航天大学、国防科技大学、北方交通大学、华中理工大学、成都科技大学等许多兄弟院校的使用,获得许多宝贵的意见。

又经过作者连续十多年的教学实践和科研工作的积累,在此基础上重新编写了本书。在教材内容上充实了信息理论发展的新成果及其应用,在定理证明上采用了统一的新的分析方法,在结构章节上作了适当的调整和变动,力求充分反映近年来国内外信息理论的发展。

在此对本书编写过程中所有给予过热情帮助的前辈和同行们:汪漱玉、钟义信、王新梅、王育民、周荫清、德钧、唐朝京、袁东风、金明录等教授表示真诚的感谢。路而红、刘泉、彭一凡、陈立、赵黎明、施燕琼、许剑卓、王君庭、牛华宁、许晓东等同志帮助绘图、习题等录入工作,表示衷心的感谢。

有关书中的缺点和错误,作者殷切希望广大读者批评指正。

作 者

2001年5月

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 信息的概念 .....	1
1.2 信息论研究的对象、目的和内容 .....	8
* 1.3 信息论发展简史与现状 .....	11
<b>第 2 章 离散信源及其信息测度</b> .....	15
2.1 信源的数学模型及分类 .....	15
2.2 离散信源的信息熵 .....	20
2.2.1 自信息 .....	20
2.2.2 信息熵 .....	24
2.3 信息熵的基本性质 .....	27
* 2.4 信息熵的惟一性定理 .....	34
2.5 离散无记忆的扩展信源 .....	38
2.6 离散平稳信源 .....	40
2.6.1 离散平稳信源的数学定义 .....	40
2.6.2 二维平稳信源及其信息熵 .....	42
2.6.3 离散平稳信源的极限熵 .....	45
2.7 马尔可夫信源 .....	49
2.7.1 马尔可夫信源的定义 .....	49
2.7.2 马尔可夫信源的信息熵 .....	53
2.8 信源剩余度与自然语言的熵 .....	59
* 2.9 意义信息和加权熵 .....	64
小结 .....	68
习题 .....	69
<b>第 3 章 离散信道及其信道容量</b> .....	73
3.1 信道的数学模型及分类 .....	73
3.1.1 信道的分类 .....	73
3.1.2 离散信道的数学模型 .....	74
3.1.3 单符号离散信道的数学模型 .....	77
3.2 平均互信息及平均条件互信息 .....	80
3.2.1 信道疑义度 .....	80
3.2.2 平均互信息 .....	81
3.2.3 平均条件互信息 .....	84
3.3 平均互信息的特性 .....	86
3.4 信道容量及其一般计算方法 .....	90
3.4.1 离散无噪信道的信道容量 .....	91



3.4.2	对称离散信道的信道容量	93
3.4.3	准对称信道的信道容量	96
3.4.4	一般离散信道的信道容量	97
* 3.5	信道容量的迭代算法	103
3.5.1	信道容量的迭代算法	103
3.5.2	信道容量迭代算法的收敛性	108
3.6	离散无记忆扩展信道及其信道容量	111
3.7	独立并联信道及其信道容量	117
3.8	串联信道的互信息和数据处理定理	117
3.9	信源与信道的匹配	126
	小结	128
	习题	129
<b>第4章</b>	<b>无失真信源编码</b>	<b>134</b>
4.1	编码器	134
4.2	等长码	137
4.3	渐近等分割性和 $\epsilon$ 典型序列	139
4.4	等长信源编码定理	143
4.5	变长码	146
4.5.1	唯一可译变长码与即时码	146
4.5.2	即时码的树图构造法	148
4.5.3	克拉夫特(Kraft)不等式	149
4.5.4	唯一可译变长码的判断法	153
4.6	变长信源编码定理	154
4.7	霍夫曼码和其他编码方法	162
4.7.1	霍夫曼(Huffman)码	162
4.7.2	$r$ 元霍夫曼码	164
4.7.3	霍夫曼码的最佳性	165
4.7.4	费诺(Fano)码	168
4.7.5	香农-费诺-埃利斯码	169
4.8	几种实用的无失真信源编码方法	172
4.8.1	MH编码	172
4.8.2	算术编码	176
4.8.3	IZ码	183
	小结	185
	习题	187
<b>第5章</b>	<b>有噪信道编码</b>	<b>192</b>
5.1	错误概率和译码规则	192
5.2	错误概率与编码方法	197
5.3	联合 $\epsilon$ 典型序列	204
5.4	有噪信道编码定理	210

5.4.1 有噪信道编码定理 .....	210
5.4.2 有噪信道编码逆定理 .....	212
5.5 联合信源信道编码定理 .....	214
5.6 纠错码的基本思想和汉明码 .....	217
5.6.1 线性分组码的一些基本概念 .....	217
5.6.2 汉明码 .....	219
小结 .....	221
习题 .....	223
<b>第6章 波形信源和波形信道</b> .....	<b>226</b>
6.1 波形信源的统计特性和离散化 .....	226
6.2 连续信源和波形信源的信息测度 .....	228
6.2.1 连续信源的差熵 .....	228
6.2.2 波形信源的差熵 .....	231
6.2.3 两种特殊连续信源的差熵 .....	232
6.3 具有最大熵的连续信源 .....	234
6.3.1 峰值功率受限条件下信源的最大熵 .....	234
6.3.2 平均功率受限条件下信源的最大熵 .....	235
6.4 熵功率 .....	237
6.5 连续信源熵的变换 .....	238
6.5.1 坐标变换后概率密度函数的变化 .....	239
6.5.2 坐标变换后相对熵的变化 .....	240
6.6 连续信道和波形信道的分类 .....	242
6.6.1 按噪声统计特性分类 .....	242
6.6.2 按噪声对信号的作用功能分类 .....	245
6.6.3 连续信道的分类 .....	245
6.7 连续信道和波形信道的信息传输率 .....	247
6.7.1 单符号连续信道的平均互信息 .....	247
6.7.2 多维连续信道的平均互信息 .....	248
6.7.3 波形信道的信息传输率 .....	248
6.7.4 连续信道平均互信息的特性 .....	249
6.8 连续信道和波形信道的信道容量 .....	253
6.8.1 单符号高斯加性信道 .....	254
6.8.2 单符号非高斯加性信道 .....	255
6.8.3 多维无记忆高斯加性连续信道 .....	255
6.8.4 多维有记忆高斯加性连续信道 .....	260
6.8.5 高斯白噪声加性波形信道 .....	262
6.8.6 有色高斯加性波形信道 .....	264
6.9 连续信道编码定理 .....	266
小结 .....	268
习题 .....	270

第7章 保真度准则下的信源编码	274
7.1 失真度和平均失真度	275
7.1.1 失真度	275
7.1.2 平均失真度	277
7.2 信息率失真函数及其性质	279
7.2.1 信息率失真函数	279
7.2.2 信息率失真函数的性质	280
7.3 信息率失真函数的参量表述及其计算	286
7.4 二元信源和离散对称信源的 $R(D)$ 函数	294
7.4.1 二元对称信源的 $R(D)$ 函数	295
7.4.2 离散对称信源的 $R(D)$ 函数	297
* 7.5 信息率失真函数的迭代算法	299
7.6 连续信源的信息率失真函数	303
7.6.1 连续信源的信息率失真函数	303
7.6.2 高斯信源的信息率失真函数	304
7.6.3 连续信源 $R(D)$ 函数的参量表述及其计算	306
7.7 保真度准则下信源编码定理	311
* 7.7.1 失真 $\epsilon$ 典型序列	312
* 7.7.2 保真度准则下信源编码定理的证明	314
7.7.3 保真度准则下信源编码逆定理	316
7.8 联合有失真信源信道编码定理	317
7.9 有失真信源编码定理的实用意义	319
小结	322
习题	323
第8章 网络信息论	327
8.1 通信网信道的分类	327
8.2 联合典型序列	331
8.3 相关信源编码	335
8.4 多址接入信道	340
8.4.1 离散多址接入信道	341
8.4.2 多址接入高斯噪声信道	349
8.5 相关信源和多址接入信道	352
8.5.1 相关信源和多址接入信道的对偶性	352
8.5.2 相关信源的多址接入信道	353
* 8.6 广播信道	356
* 8.7 中继信道	363
* 8.8 具有边信息的信源编码	366
* 8.9 具有边信息的数据压缩	371
小结	376
习题	377
· IV ·	

第 9 章 保密系统的基本信息理论	380
9.1 保密学的基本概念	380
9.2 保密系统的数学模型	381
9.3 古典密码体制	383
9.3.1 单表密码	383
9.3.2 移位代换密码	383
9.3.3 乘数密码	384
9.3.4 固定周期 $d$ 的位移置换	385
9.3.5 多表代换密码	385
9.4 完全保密性	387
9.5 理论保密性	390
9.6 实际保密性	393
小结	395
第 10 章 信息论与其他学科的关系和应用	396
10.1 信息熵与热力学熵	396
10.2 信息论与光学	399
10.2.1 光学信息量	400
10.2.2 光量子信道的信道容量	402
10.2.3 最大熵光学图像恢复	405
10.3 最大熵与谱估计	407
10.3.1 高斯随机过程的熵率	409
10.3.2 伯格的最大熵定理	410
10.4 信息论与生物医学	412
10.4.1 DNA 到蛋白质的通信系统	412
10.4.2 医学中的信息分析	417
小结	421
附录	422
附录 A 凸函数和詹森不等式	422
附录 B 马尔可夫链	426
B.1 马尔可夫链的定义	426
B.2 转移概率和转换矩阵	426
B.3 各态历经定理	428
附录 C 熵函数的函数表	432
参考书目和文献	435

# 第 1 章 绪 论

信息论是人们在长期通信工程的实践中,由通信技术与概率论、随机过程和数理统计相结合而逐步发展起来的一门科学。通常人们公认信息论的奠基人是美国科学家香农(C. E. Shannon),他在 1948 年发表了著名的论文《通信的数学理论》,为信息论奠定了理论基础。近半个世纪以来,以通信理论为核心的经典信息论,正以信息技术为物化手段,向高精尖方向迅猛发展,并以神奇般的力量把人类社会推入了信息时代。随着信息理论的迅猛发展和信息概念的不断深化,信息论所涉及的内容早已超越了狭义的通信工程范畴,进入了信息科学这一更广阔、更新兴的领域。

本章首先引出信息的概念,进而讨论信息论这一学科的研究对象、目的和内容,并简述本学科的发展历史、现状和动向。

## 1.1 信息的概念

人类从产生那天起,就生活在信息的海洋之中。

人类社会的生存和发展,一时一刻都离不开接收信息、传递信息、处理信息和利用信息。

自古以来,人们对信息的表达、存储、传送和处理等问题进行了许多研究。原始人的“结绳记事”也许是最初期的表达、存储和传送信息的方法。我国古代的“烽火告警”是一种最早快速、远距离传递信息的方式。语言和文字则是人类社会用来表达和传递信息的最根本的工具。自从造纸术和印刷术的发明,使信息表示和存储方式产生了一次重大的变化,使文字成为信息记录、储存和传递的有效手段。特别是电报、电话和电视的发明,使信息传送快速、便利、远距离,再次出现了信息加工和传输的变革。近百年来,随着生产和科学技术的发展,使信息的处理、传输、存储、提取和利用的方式及手段达到了更新更高的水平。

近代,电子计算机的迅速发展和广泛应用,尤其个人微型计算机得以普及,大大提高了人们处理加工信息、存储信息及控制和管理信息的能力。

20 世纪后半世纪,计算机技术、微电子技术、传感技术、激光技术、卫星通信和移动通信技术、航空航天技术、广播电视技术、多媒体技术、新能源技术和新材料技术等新技术的发展和运用,尤其近年来以计算机为主体的互联网技术的兴起和发展,它们相互结合、相互促进,以空前的威力推动着人类经济和社会高速发展。正是这些现代新科学新技术汇成了一股强大的时代潮流,将人类社会推入到高度化的信息时代。

在当今“信息社会”中,人们在各种生产、科学研究和社会活动中,无处不涉及到信息的交换和利用。迅速获取信息,正确处理信息,充分利用信息,就能促进科学技术和国民经济的飞跃发展。可见,信息的重要性是不言而喻的。

那么,什么是信息呢?

信息是信息论中最基本、最重要的概念,它是一个既抽象又复杂的概念。这一概念像在实践中提出来的其他科学概念一样,是在人类社会互通情报的实践过程中产生的。在现代信息理论形成之前的漫长时期中,信息一直被看作是通信的消息的同义词,没有赋予它严格的科学定

义。到了 20 世纪 40 年代末,随着信息论这一学科的诞生,信息的含义才有了新的拓展。

在日常生活中,信息常常被认为就是“消息”、“情报”、“知识”、“情况”等等。的确,信息与它们之间是有着密切联系的。但是,信息的含义是要更深刻、更广泛,它是不能等同于消息、情报、知识和情况的。

信息不能等同于情报。情报往往是军事学,文献学方面的习惯用词。如“对敌方情况的报告”,“文献资料中对于最新情况的报道或者进行资料整理的成果”等称为情报。在“情报学”,这一新学科中,它们对于“情报”是这样定义的,“情报是人们对于某个特定对象所见、所闻、所理解而产生的知识”。可见,情报的含义要比“信息”窄得多。它只是一类特定的信息,不是信息的全体。

信息也不能等同于知识。知识是人们根据某种目的,从自然界收集得来的数据中,整理、概括、提取得到有价值的、人们所需的信息。知识是一种具有普遍和概括性质的高层次的信息。例如,如图 1.1 所示。有一堆 A、B 两所大学学生的考试成绩数据。为了了解 A、B 两所大学学生的学习成绩水平的差别,而进行统计处理,得到一张曲线图。从中获得了有关 A、B 两所大学学生学习水平的知识。当然,还可以从这堆数据中获得其他有关知识(两所大学男、女生成绩差别等等)。又例如,获得大量的遥感图片数据,根据不同目的,处理后可以得到不同的知识(地质知识、地形知识、水源知识等等)。由此可知,知识是以实践为基础,通过抽象思维,对客观事物规律性的概括。知识信息只是人类社会中客观存在的部分信息。所以知识是信息,但不等于信息的全体。

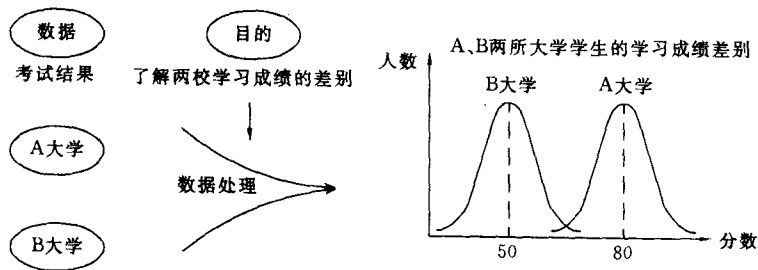


图 1.1 统计处理后的分布曲线

信息也不能等于消息。人们也常常错误地把信息等同于消息,认为得到了消息,就是得到了信息。例如,当人们收到一封电报,接到一个电话,收听了广播或看了电视等以后,就说得到了“信息”。的确,人们从接收到的电报、电话、广播和电视的消息中能获得各种信息,信息与消息有着密切的联系。但是,信息与消息并不是一件事,不能等同。

我们知道,在电报、电话、广播、电视(也包括雷达、导航、遥测)等通信系统中传输的是各种各样的消息。这些被传送的消息有着各种不同的形式,例如:文字、符号、数据、语言、音符、图片、活动图像等等。所有这些不同形式的消息都是能被人们感觉器官所感知的,人们通过通信,接收到消息后,得到的是关于描述某事物状态的具体内容。例如,听气象广播,气象预报为“晴间多云”,这就告诉了我们某地的气象状态,而“晴间多云”这广播语言则是对气象状态的具体表述。又如,我们收到一份电报为“母病愈”,则得知了母亲的身体健康状况,报文“母病愈”是对母亲身体健康状况的一种描述。再例如,电视中转播球赛,人们从电视图像中看到了球赛进展情况,而电视的活动图像则是对球赛运动状态的描述。可见,语言、报文、图像等消息都是对客观物质世界的各种不同运动状态或存在状态的表述。当然,消息也可用来表述人们头脑里的思

维活动。例如，朋友给你打电话，电话中说：“我想去上海”，你就得知了你的朋友的想法。这时，此语言消息则反映了人的主观世界——大脑物质的思维运动所表现出来的思维状态。

因此，用文字、符号、数据、语言、音符、图片、图像等能够被人们感觉器官所感知的形式，把客观物质运动和主观思维活动的状态表达出来就成为消息。

可见，消息中包含信息，是信息的载体。得到消息，从而获得信息。同一则信息可用不同的消息形式来载荷。如前例中，球赛进展情况可用电视图像、广播语言、报纸文字等不同消息来表述。而一则消息也可载荷不同的信息，它可能包含非常丰富的信息，也可能只包含很少的信息。因此，信息与消息是既有区别又有联系的。

既然信息不同于消息，当然也不同于信号。

在各种实际通信系统中，往往为了克服时间或空间的限制而进行通信，必须对消息进行加工处理。把消息转换成适合信道传输的物理量，这种物理量称为信号（如电信号，光信号，声信号，生物信号等等）。信号携带着消息，它是消息的运载工具。如前例中，“母病愈”这种关于母亲身体健康状况的信息，用汉文“母病愈”的消息来表述，然后通过电报系统传送到另一地的收信者。由于这个电报系统的传递信道是无线电电波信道，所以汉文消息不能直接在信道中传输。一般，需先将汉文（例如“母病愈”）转换成四位码，然后转换成由点、划和空隔三种符号组成的莫尔斯码，再转换成脉冲电信号，然后经过调制变成高频调制电信号，才能在信道中传输。此时，脉冲电信号或高频调制电信号都载荷着汉文消息，表述了母亲身体健康的一种状态。在通信系统的接收端，通过解调，反变换，若无干扰的话就可恢复成原汉文消息——“母病愈”。收信者收到报文后，就得知了母亲病愈，身体健康，从而获得了信息。可见，信号携带信息，但不是信息本身。同样，同一信息可用不同的信号来表示。同一信号也可表示不同的信息。例如，红、绿灯信号。若在十字路口，红、绿灯信号表示能否通行的信息。若在电子仪器面板上，红绿灯信号却表示仪器是否正常工作或者表示高低电压等信息。所以，信息、消息和信号是既有区别又有联系的三个不同的概念。

关于信息的科学定义，到目前为止，国内外已有不下百余种流行的说法。它们都是从不同的侧面和不同的层次来揭示信息的本质的。

最早对信息进行科学定义的，是哈特莱(R. V. L. Hartley)。他在1928年发表的《信息传输》一文中，首先提出“信息”这一概念。他认为，发信者所发出的信息，就是他在通信符号表中选择符号的具体方式，并主张用所选择的自由度来度量信息。

哈特莱的这种理解在一定程度上能够解释通信工程中的一些信息问题，但它存在着严重的局限性。首先，他所定义的信息不涉及到信息的价值和具体内容，只考虑选择的方式。其次，即使考虑选择的方法，但没有考虑各种可能选择方法的统计特性。正是这些缺陷严重地限制了它的适用范围。

1948年，控制论的创始人之一，美国科学家维纳(N. Wiener)出版了《控制论——动物和机器中通信与控制问题》一书。维纳在该书中是这样来论述信息的，他指出：“信息是信息，不是物质，也不是能量”<sup>①</sup>。这就是说，信息就是信息自己，它不是其他什么东西的替代物，它是与“物质”、“能量”同等重要的基本概念。正是维纳，首先将“信息”上升到“最基本概念”的位置。

后来，维纳在《人有人的用处》<sup>②</sup>一书中，他提出：“信息是人们适应外部世界并且使这种适应反作用于外部世界的过程中，同外部世界进行互相交换的内容的名称。”又说：“接收信息和

<sup>①</sup> N. Wiener:《控制论——动物和机器中的通信与控制问题》，科学出版社，1963年

<sup>②</sup> N. Wiener:《人有人的用处》，商务印书馆，1978年版

使用信息的过程,就是我们适应外部世界环境的偶然性变化的过程,也是我们在这个环境中有效地生活的过程。”“要有效地生活,就必须有足够的信息。”的确,信息对人类的生存是很重要的;但是,信息不仅仅与人类有关,不仅仅是人与外部世界交换的内容。在自然界中,一切生物体都在与外部世界进行着互相交换信息。一切生物体都有它们独自的接收信息和交换信息的方式。俗话说“禽有禽言,兽有兽语”,这是动物之间特别是群体动物之间传递信息的方式。人们发现动物之间可以利用气味、声音、不同的运动姿态、乃至超声波、电磁场等多种方式来传递信息。另外,信息确是人们与外部世界互相交换的内容,但是,人们在与外部世界相互作用过程中,还进行着物质与能量的交换。这样,就又把信息与物质、能量混同起来。所以,维纳关于信息的定义是不确切的。

关于信息的定义,有人提出用变异度、差异量来度量信息,认为“信息就是差异”。这种说法的典型代表是意大利学者朗格(G. Longe)。他在1975年出版的《信息论:新的趋势与未决问题》一书序言中,提出:“信息是反映事物的形式、关系和差别的东西。信息是包含于客体间的差别中,而不是在客体本身中。”“在通信中仅仅差别关系是重要的。”也就是说,他定义信息是客体之间的相互差异。的确,宇宙内到处存在着差异,差异的存在使人们存在着“疑问”和“不确定性”。从这个角度看,差异确是信息。但是,并不能说没有差异就没有信息。所以,这样定义的信息也是不全面的、不确切的。

而香农在1948年发表了一篇著名的论文,“通信的数学理论”。他从研究通信系统传输的实质出发,对信息作了科学的定义,并进行了定性和定量的描述。

如前所述,各类通信系统——电报、电话、广播、电视、雷达、遥测…等传送的是各种各样的消息。消息的形式可以不同,但它们都是能被传递的,能被人们感觉器官(眼、耳、触觉等)所感知的,而且消息表述的是客观物质和主观思维的运动状态或存在状态。

香农将各种通信系统概括成如图1.2所示的框图。在各种通信系统中,其传输的形式是消息。但消息传递过程的一个最基本、最普通却又不十分引人注意的特点是:收信者在收到消息以前是不知道消息的具体内容的。在收到消息以前,收信者无法判断发送者将会发来描述何种事物运动状态的具体消息;他也更无法判断是描述这种状态还是那种状态。再者,即使收到消息,由于干扰的存在,他也不能断定所得到的消息是否正确和可靠。总之,收信者存在着“不知”、“不确定”或“疑问”。通过消息的传递,收信者知道了消息的具体内容,原先的“不知”、“不确定”和“疑问”消除或部分消除了。因此,对收信者来说,消息的传递过程是一个从不知到知的过程,或是从知之甚少到知之甚多的过程,或是从不确定到部分确定或全部确定的过程。如果不具备这样一个特点,那就根本不需要通信系统了。试想,如果收信者在收到电报或电话之前就已经知道报文或电话的内容,那还要电报、电话系统干什么呢?

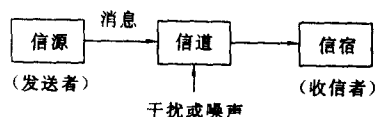


图 1.2 通信系统框图

由于主、客观事物运动状态或存在状态是千变万化的、不规则的、随机的。所以在通信以前,收信者存在“疑问”和“不知”。例如,在电报通信中,收报人在收到报文前,首先他不知何人会给他发电报,而且也不知将要告诉他什么事情。若当他收到报文是“母病愈”后,才能确定是他家人告诉他母亲的身体情况。其次,报文“母病愈”是母亲身体健康状态的一种描述,而母亲身体健康情况会表现出不同的状态,到底出现的什么状态是随机的、变化的。收信者在看到报文以前,他不能确定母亲身体健康状态如何,也存在“不确定性”。只要报文是清楚的,在传递过程中没有差错,那么,他收到报文以后,他原来



所有的“不确定性”都没有了，他就获得了所有的信息。如果在传递过程中存在着干扰，使报文完全模糊不清，收信者收到报文以后，原先所具有的不确定性一点也没有减少，他就没有获得任何信息。如果干扰使报文发生部分差错，使收信者原先的不确定性减少了一些，但没有全部消除，他就获得了一部分信息。所以，通信过程是一种消除不确定性的过程。不确定性的消除，就获得了信息。原先的不确定性消除得越多，获得的信息就越多。如果原先的不确定性全部消除了，就获得了全部的信息；若消除了部分不确定性，就获得了部分信息；若原先不确定性没有任何消除，就没有获得任何信息。由此可见，信息是事物运动状态或存在方式的不确定性的描述。这就是香农信息的定义。

从上分析可知，在通信系统中形式上传输的是消息，但实质上传输的是信息。消息只是表达信息的工具，载荷信息的客体。显然，在通信中被利用的（亦即携带信息的）实际客体是不重要的，而重要的是信息。信息较抽象，而消息是较具体的，但还不一定是物理性的。通信的结果是消除或部分消除不确定性从而获得信息。

根据香农的有关信息的定义，信息如何测度呢？当人们收到一封电报，或听了广播，或看了电视，到底得到多少信息量呢？显然，信息量与不确定性消除的程度有关。消除多少不确定性，就获得多少信息量。那么，不确定性的大小能度量吗？

用数学的语言来讲，不确定就是随机性，具有不确定性的事件就是随机事件。因此，可运用研究随机事件的数学工具——概率论和随机过程来测度不确定性的大小。若从直观概念来讲，不确定性的大小可以直观地看成是事先猜测某随机事件是否发生的难易程度。

例如，假设有甲、乙两个布袋，各袋内装有大小均匀，对人手感觉完全一样的球 100 个。甲袋内红、白球各 50 个，乙袋内有红、白、蓝、黑四种球，各 25 个。现随意从甲袋或乙袋中取出一球，并猜测取出的是什么颜色的球，这事件当然具有不确定性。显然，从甲袋中摸出是红球要比从乙袋中摸出是红球容易得多。这是因为，在甲袋中只在“红”与“白”两种颜色中选择一种，而且“红”与“白”机会均等，即摸取的概率各为  $\frac{1}{2}$ 。但在乙袋中，红球只占  $\frac{1}{4}$ ，摸出是红球的可能性就小。自然，“从甲袋中摸出的是红球”比“从乙袋中摸出的是红球”的不确定性来得小。从这例子得出，不确定性的大小与可能发生的消息数目及各消息发生的概率有关。

再例如气象预报，我们知道可能出现的气象状态有许多种。以十月份北京地区天气为例，经常出现的天气是“晴间多云”、“晴”或“多云”，其次是“多云转阴”、“阴”、“阴有小雨”等，而“小雪”这种天气状态出现的概率是极小的，“大雪”的可能性则更小更小。因此，在听气象预报前，我们大体上能猜测出天气的状况。由于出现“晴间多云”、“晴”或“多云”的可能性大，我们就比较能确定这些天气状况的出现。因此，当预报明天白天“晴间多云”或“晴”，我们并不觉得稀奇，因为和我们猜测的是基本一致，所消除的不确定性要小，获得的信息量就不大。而出现“小雪”的概率很小，我们很难猜测它是否会出现，所以这事件的不确定性很大。如果预报是“阴有小雪”，我们就要大吃一惊，感到气候反常，这时就获得了很大的信息量。出现“大雪”的概率更小，几乎是不可能出现的现象，它的不确定性更大。如果一旦出现“大雪”的气象预报，我们将万分惊讶，这时将获得更大的信息量。由此可知，某一事物状态出现的概率越小，其不确定性越大；反之，某一事物状态出现的概率接近于 1，即预料中肯定会出现的事件，那它的不确定性就接近于零。

这两例子告诉我们：某一事物状态的不确定性的大小，与该事物可能出现的不同状态数目以及各状态出现的概率大小有关。既然不确定性的大小能够度量，可见，信息是可以测度的。