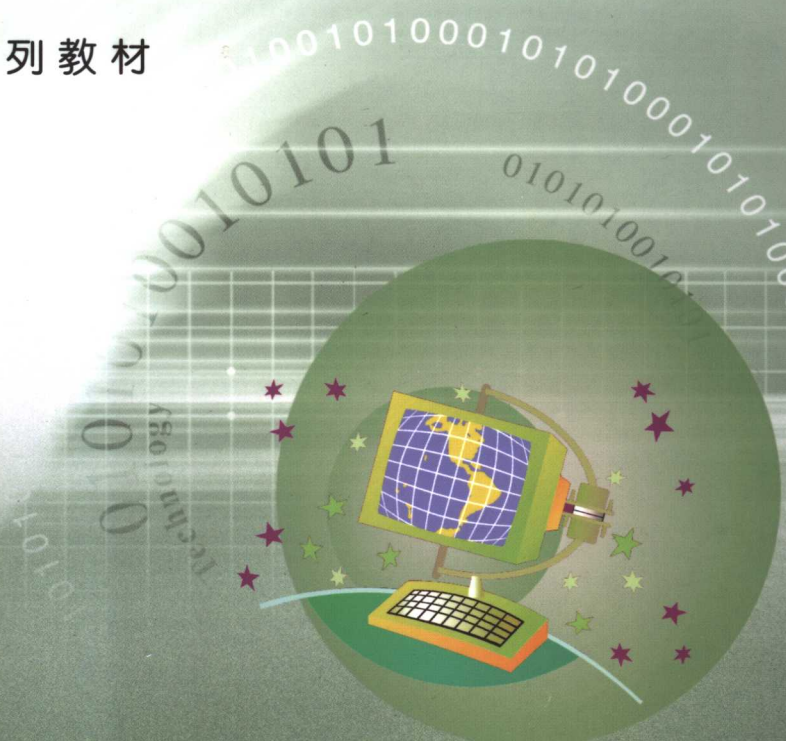


21 世纪信息通信系列教材



# 信息论基础教程

XINXILUN JICHU JIAOCHENG

李亦农 李梅 编著



北京邮电大学出版社  
www.buptpress.com

# 信息论基础教程

李亦农 李梅 编著

北京邮电大学出版社  
·北京·

## 内 容 简 介

信息论是研究信息传输和信息处理过程中的一般规律的一门学科,也是现代信息通信领域的一门基础理论。本书以香农的3个编码定理为中心,重点讲述了相关的基本概念、基本原理和基本方法。本书是作者根据多年教学经验编著而成的。鉴于目前学生可选择的课程越来越多,每门课的学时数不会很大,因此本书只讲述经典香农信息论的内容,而没有涉及过多分支。

### 图书在版编目(CIP)数据

信息论基础教程/李亦农,李梅编著. —北京:北京邮电大学出版社,2004

ISBN 978-7-5635-0910-2

I. 信... II. ①李...②李... III. 信息论—高等学校—教材 IV. G201

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第060781号

---

书 名: 信息论基础教程

编 著: 李亦农 李梅

责任编辑: 李欣一

出版发行: 北京邮电大学出版社

社 址: 北京市海淀区西土城路10号(100876)

北方营销中心: 电话 010-62282185 传真 010-62283578

南方营销中心: 电话 010-62282902 传真 010-62282735

E - mail: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京忠信诚胶印厂

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张: 14.75

字 数: 321千字

印 数: 8 001—11 000册

版 次: 2005年1月第1版 2007年1月第3次印刷

---

ISBN 978-7-5635-0910-2/TN·331

定价: 22.00元

·如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社营销中心联系·

信息论是研究信息传输和信息处理过程中一般规律的一门学科,也是现代信息科学和通信科学领域的一门基础理论,因此目前各高等院校相关专业的本科生、研究生都开有信息论这门专业基础课。

本书是作者参考借鉴了众多国内外优秀的信息论教材及参考书之后根据多年教学实践的经验编著而成的。鉴于目前学生可选择的课程越来越多,而每门课的学时数较少,因此本书只讲述了经典香农信息论的内容,而没有涉及过多的分支。本书可作为通信、电子、计算机专业本科生教材使用,也可作为相关专业科研人员的参考书。

在本书以香农的3个编码定理为中心,重点讲述了相关的基本概念、基本原理和基本方法,力图以读者最易接受的方式介绍信息论的基本内容及应用。

本书一共分为7章,外加两个附录。第1章绪论主要介绍香农信息论的研究对象、目的和内容等;第2章介绍关于信息度量的几个重要概念:自信息、互信息、信息熵及平均互信息以及数据处理定理;第3章研究定量度量信源产生信息的能力和度量信源冗余度的问题;第4章研究定量描述信道传递信息能力的问题,并介绍了几种特殊信道的信道容量的计算方法;第5章的核心内容是香农的无失真信源编码定理,围绕这个定理介绍了无失真信源编码的基本概念,讲解了定理的基本内容及其证明,另外还讲述了几种实用的无失真信源编码算法;第6章讲述香农的有噪信道编码定理以及纠错编码,涉及信道编码的基本概念、基本技巧和基本理论知识,同时较为详细地讲述了纠错编码的有关知识;第7章介绍香农的第三编码定理——限失真信源编码定理,引入了

信息率失真函数的概念并介绍了信息率失真函数的性质以及计算方法,最后介绍了几种常用的熵压缩编码算法;附录 A 为上机作业;附录 B 是学习本课程需要用到的一些数学预备知识。

第 1~4 章,6.3、6.4 节以及附录 B.1~B.4 由李梅编写,其余各章节由李亦农编写,全书由李梅统稿。

在本书的编写过程中,参阅了国内外一些经典著作(列于本书参考文献中),同时参考了很多国外知名大学信息论基础课程的课后习题及解答,在此向有关作者表示感谢!在本书编写的过程中,同时得到了陈剑、李洪、徐益民、唐晓晟等同志的大力支持,在此也表示感谢!

由于作者能力所限,难免有疏漏之处,敬请读者赐教。

作 者  
2004 年 5 月

## 第 1 章 绪 论

1.1 信息的概念 .....	1
1.2 信息论的研究对象、目的和内容 .....	3

## 第 2 章 信息的度量

2.1 自信息和互信息 .....	7
2.1.1 自信息 .....	7
2.1.2 互信息 .....	9
2.2 平均自信息 .....	10
2.2.1 平均自信息的概念 .....	10
2.2.2 熵函数的性质 .....	11
2.2.3 联合熵与条件熵 .....	15
2.3 平均互信息 .....	19
2.3.1 平均互信息的概念 .....	19
2.3.2 平均互信息的性质 .....	20
2.3.3 数据处理定理 .....	24
习 题 2 .....	25

## 第 3 章 信源及信源熵

3.1 信源的分类及其数学模型 .....	29
3.2 离散单符号信源 .....	30
3.3 离散多符号信源 .....	31
3.3.1 离散平稳无记忆信源 .....	32
3.3.2 离散平稳有记忆信源 .....	33

3.3.3 马尔可夫信源	36
3.3.4 信源的相关性和剩余度	40
* 3.4 连续信源	44
3.4.1 连续信源的微分熵	44
3.4.2 连续信源的最大熵	48
3.4.3 连续信源的熵功率	49
习 题 3	50

#### 第 4 章 信道及信道容量

4.1 信道的分类	55
4.2 离散单符号信道及其信道容量	56
4.2.1 离散单符号信道的数学模型	56
4.2.2 信道容量的概念	58
4.2.3 几种特殊信道的信道容量	59
4.2.4 离散对称信道的信道容量	61
4.2.5 一般离散信道的信道容量	65
4.2.6 信道容量定理	68
* 4.2.7 信道容量的迭代算法	72
4.3 离散多符号信道及其信道容量	75
4.4 组合信道及其信道容量	78
4.4.1 独立并联信道	78
4.4.2 级联信道	79
* 4.5 连续信道及其信道容量	80
4.5.1 连续随机变量的互信息	80
4.5.2 高斯加性信道的信道容量	81
4.5.3 多维高斯加性信道的信道容量	83
* 4.6 波形信道及其信道容量	84
习 题 4	85

#### 第 5 章 无失真信源编码

5.1 信源编码的相关概念	89
5.1.1 编码器	89
5.1.2 码的分类	91
5.2 定长码及定长编码定理	94

5.3 变长码及变长编码定理	99
5.3.1 Kraft 不等式和 McMillan 不等式	99
5.3.2 唯一可译码的判别准则	102
5.3.3 无失真变长编码定理	103
5.3.4 香农第一编码定理	106
5.4 变长码的编码方法	109
5.4.1 香农编码	110
5.4.2 香农-费诺-埃利斯编码	111
5.4.3 霍夫曼编码	111
5.4.4 $r$ 元霍夫曼编码	115
5.4.5 费诺编码	115
5.5 实用的无失真信源编码方法	117
5.5.1 游程编码	117
5.5.2 算术编码	119
5.5.3 LZW 码	120
习 题 5	123

## 第 6 章 有噪信道编码

6.1 信道编码的相关概念	127
6.1.1 错误概率和译码规则	128
6.1.2 错误概率与编码方法	134
6.2 有噪信道编码定理	141
6.2.1 有噪信道编码定理	141
6.2.2 有噪信道编码逆定理	144
6.2.3 错误概率的上界	145
6.3 纠错编码	147
6.3.1 纠错码分类	147
6.3.2 纠错码的基本概念	149
* 6.4 几种重要的纠错码	150
6.4.1 线性分组码	150
6.4.2 汉明码	163
6.4.3 循环码	165
6.4.4 卷积码	170
习 题 6	173



## 第7章 限失真信源编码

7.1 失真测度 .....	177
7.1.1 失真函数 .....	177
7.1.2 平均失真 .....	179
7.2 信息率失真函数 .....	181
7.2.1 D失真许可信道 .....	181
7.2.2 信息率失真函数的定义 .....	181
7.2.3 信息率失真函数 $R(D)$ 的性质 .....	182
7.3 信息率失真函数的计算 .....	188
7.3.1 应用参量表示式计算 $R(D)$ .....	188
7.3.2 二元信源和离散等概信源的 $R(D)$ 函数 .....	195
7.4 限失真信源编码定理和逆定理 .....	198
7.4.1 限失真信源编码定理 .....	198
7.4.2 限失真信源编码逆定理 .....	202
7.5 熵压缩编码具体方法 .....	204
7.5.1 标量量化 .....	204
7.5.2 矢量量化 .....	205
7.5.3 变换编码 .....	206
*7.5.4 预测编码 .....	206
习 题 7 .....	207

## 附录 A 上机作业

A.1 信道容量的迭代计算 .....	209
A.2 唯一可译码判决准则 .....	210
A.3 Huffman 编码 .....	211
A.4 LZW 编码 .....	211

## 附录 B 数学预备知识

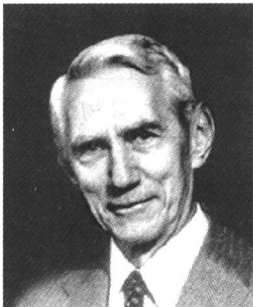
B.1 概率论简单回顾 .....	212
B.2 Jensen 不等式 .....	213
B.3 马尔可夫链 .....	214
B.4 信道容量定理的引理 .....	218
B.5 契比雪夫不等式 .....	219

---

B.6 大数定理 .....	219
B.7 渐进等同分割性和 $\epsilon$ 典型序列 .....	220
B.8 $n$ 维欧式空间 .....	224
参考文献 .....	226

# 第1章

## 绪 论



克劳德·艾尔伍德·香农(Claude Elwood Shannon, 1916~2001年)美国数学家,信息论的创始人.1948年香农在《贝尔系统技术杂志》(Bell System Technical Journal)上连载发表了著名的论文《通讯的数学原理》.1949年,香农又在该杂志上发表了另一影响深远的论文《噪声下的通信》.在这两篇论文中,香农阐明了通信的基本问题,给出了通信系统的模型,提出了信息量的数学表达式,并解决了信道容量、信源统计特性、信源编码、信道编码等一系列基本问题.这两篇论文成为信息论的奠基性著作.

### 1.1 信息的概念

信息论是通信的数学基础,它是随着通信技术的发展而形成和发展起来的一门新兴的横断学科.

信息论创立的标志是1948年香农发表的论文“A Mathematical Theory of Communi-

ation”。为了解决在噪声信道中有效传输信息的问题,香农在这篇文章中创造性地采用概率论的方法来研究通信中的问题,并且对信息给予了科学的定量描述,第一次提出了信息熵的概念。

在日常生活中,人们往往对消息和信息不加区别,消息被认为就是信息。例如,当人们收到一封电报,或者听了天气预报,人们就说得到了信息。

人们收到消息后,如果消息告诉了我们很多原来不知道的新内容,我们会感到获得了很多的信息,而如果消息是我们基本已经知道的内容,我们得到的信息就不多,所以信息应该是可以度量的。那么怎样度量信息呢?人们需要有一个可以用数学模型来表示的信息概念。

1928年,哈特莱(Hartley)首先提出了对数度量信息的概念,即一个消息所含有的信息量用它的所有可能的取值的个数的对数来表示。比如,抛掷一枚硬币可能有两种结果:正面和反面,所以当我们得知抛掷结果后获得的信息量是  $\log_2 2 = 1$  bit。而一个十进制数字可以表示  $0 \sim 9$  中的任意一个符号,所以一个十进制数字含有  $\log_2 10 = 3.3219$  bit 的信息量。这里对数取以 2 为底,信息量的单位为 bit。

哈特莱的工作给了香农很大的启示,他进一步注意到消息的信息量不仅与它的可能值的个数有关,还与消息本身的不确定性有关。例如,抛掷一枚偏畸硬币,如果正面向上的可能性是 90%,那么当我们得知抛掷结果是反面时得到的信息量会比得知抛掷结果是正面时得到的信息量大。

一个消息之所以会含有信息,正是因为它具有不确定性,一个不具有不确定性的消息是不会含有任何信息的,而通信的目的就是为了消除或部分消除这种不确定性。比如,在得知硬币的抛掷结果前,我们对于结果会出现正面还是反面是不确定的,通过通信,我们得知了硬币的抛掷结果,消除了不确定性,从而获得了信息。因此,信息是对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。

用数学的语言来讲,不确定性就是随机性,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——来测度不确定性的大小。在信息论中,我们把消息用随机事件表示,而发出这些消息的信源则用随机变量来表示。比如,抛掷一枚硬币的试验可以用一个随机变量来表示,而抛掷结果可以是正面或反面,这个具体的消息则用随机事件表示。

我们把某个消息  $x_i$  出现的不确定性的的大小定义为自信息,用这个消息出现的概率的对数的负值来表示:

$$I(x_i) = -\log_2 p(x_i) \quad (1.1)$$

自信息同时表示这个消息所包含的信息量,也就是最大能够给予收信者的信息量。如果消息能够正确传送,收信者就能够获得这么大小的信息量。

信源所含有的信息量定义为信源发出的所有可能消息的平均不确定性,香农把信源所含有的信息量称为信息熵。信息熵定义为自信息的统计平均,即

$$H(X) = - \sum_{i=1}^q p(x_i) \log_2 p(x_i) \quad (1.2)$$

这里的  $q$  表示信源消息的个数. 信息熵表示信源的平均不确定性的 大小, 同时表示信源输出的消息平均所含的信息量. 因此, 虽然信源产生的消息可能会含有不同的信息量, 比如抛掷一枚偏畸硬币的结果是正面和是反面这两个消息所含的信息量不同, 但是可以用它们的平均值来表示这个信源(抛掷一枚偏畸硬币的试验)的平均不确定性.

在受信端, 信源的不确定性得到了部分或全部的消除, 收信者就得到了信息. 信息在数量上等于通信前后“不确定性”的消除量(减少量).

这种建立在概率模型上的信息概念排除了日常生活中“信息”一词主观上的含义和作用, 而只是对消息的统计特性的定量描述, 所以信息可以度量, 而且与日常生活中信息的概念并不矛盾, 因此是一个科学的定义. 根据这样的信息定义, 同样一个消息对于任何一个收信者来说, 所含有的信息量都是一样的. 而事实上信息有很强的主观性和实用性, 同样一个消息对不同的人常常有不同的主观价值或主观意义. 例如, 同一则气象预报对在室外工作的人和室内工作的人可能会有不同的意义和价值, 因此所提供的信息量也应该不同. 所以香农信息的定义在某些情况下也具有一定的局限性.

## 1.2 信息论的研究对象、目的和内容

信息论从诞生到现在, 虽然只有短短的 50 多年, 但它的发展对学术界及人类社会的影响是相当广泛和深刻的. 如今, 信息论的研究内容不仅仅包括通信, 而且包括所有与信息有关的自然和社会领域, 如模式识别、机器翻译、心理学、遗传学、神经生理学、语言学、语义学甚至包括社会学中有关信息的问题. 香农信息论迅速发展成为涉及范围极广的广义信息论——信息科学.

信息论的研究对象是广义的通信系统, 它把所有的信息流通系统都抽象成一个统一的模型, 如图 1.1 所示.

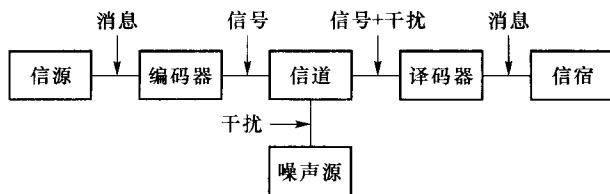


图 1.1 通信系统模型

这个模型不仅包括电话、电报、传真、电视、雷达等狭义的通信系统, 还包括生物有机体的遗传系统、神经系统、视觉系统, 甚至人类社会的管理系统. 信息以消息的形式在这个

通信系统中传递,人们通过研究通信系统中消息的传输和处理来得到信息传输和处理的规律,目的是提高通信的可靠性和有效性。

在任何一个信息流通系统中,都有一个发出信息的发送端(信源),有一个接收信息的接收端(信宿),以及信息流通的通道(信道)。在信息传递的过程中不可避免的会有噪声,所以有一个噪声源。为了把信源发出的消息变成适合在信道中传输的信号,还需要加入编码器,在送到信宿之前要进行反变换,所以要加入译码器。

这个通信系统主要分成 5 个部分:

### (1) 信源

顾名思义,信源是产生消息和消息序列的源。信源可以是人、生物、机器或其他事物。比如,各种气象状态是信源,能够产生独特的气味吸引蜜蜂来采花蜜的花朵是信源,人脑的思维活动也是一种信源。信源的输出是消息(或消息序列)。

消息有着各种不同的形式,例如:文字、符号、语言、图片、图像、气味等等。消息以能被通信双方所理解的形式,通过通信进行传递和交换。消息携带着信息,是信息的载体。信源输出的消息是随机的、不确定的,但又有一定的规律性,因此用随机变量或随机矢量等数学模型来表示信源。

### (2) 编码器

编码就是把消息变成适合在信道传输的物理量,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,它是消息的载体。

编码器可分为信源编码器和信道编码器。信源编码的目的是压缩信源的冗余度(即多余度),提高信息传输的效率,这是为了提高通信系统的有效性。信源编码又可分为无失真信源编码和限失真信源编码。信道编码是为了提高信息传输的可靠性而有目的地对信源编码器输出的代码组添加一些监督码元,使之具有纠、检错能力。比如,老师讲课需要把知识进行加工和提炼,以提高信息传输的有效性,而为了让学生听得明白,有时又需要适当地重复,这是为了提高信息传输的可靠性。

在实际的通信系统中,可靠性和有效性常常是相互矛盾的,提高有效性必须去掉信源符号的冗余部分,但是这会导致可靠性的下降,而提高可靠性就需要增加监督码元,这又降低了有效性。有时为了兼顾有效性,就不一定要求绝对准确地在接收端再现原来的消息,而是可以允许一定的误差或失真,也就是说允许近似地再现原来的消息。

### (3) 信道

信道是指通信系统把载荷消息的信号从发送端送到接收端的媒介或通道,是包括收发设备在内的物理设施。信道除了传播信号以外,还有存储信号的作用。在狭义的通信系统中,实际信道有明线、电缆、光缆、无线电波传播空间、磁盘、光盘等,这些都属于传输电磁波能量的信道。对于广义的通信系统来说,信道还可以是其他的传输媒介。

在信道中引入噪声和干扰,这是一种简化的表达方式。为了分析方便起见,把在系统其他部分产生的干扰和噪声都等效地折合成信道干扰,看成是由一个噪声源产生的,它将

作用于所传输的信号上. 这样, 信道输出的已是叠加了干扰的信号. 噪声源的统计特性是划分信道的依据, 并且是信道传输能力的决定因素. 由于干扰或噪声往往具有随机性, 所以信道用输入和输出之间的条件概率分布来描述.

#### (4) 译码器

译码就是把信道输出的已叠加了干扰的编码信号进行反变换, 变成信宿能够理解的消息. 译码器也可分成信源译码器和信道译码器. 译码器需要尽可能准确地再现信源输出的消息.

#### (5) 信宿

信宿是消息传送的对象, 即接受消息的人、机器或其他事物.

以上我们考虑的是收发两端单向通信的情况, 它只有一个信源和一个信宿, 信息传输也是单向的. 在组网通信的情况下(比如电话网、计算机网等等), 可能有很多分开的信源、信道和信宿同时进行信息交换. 例如, 广播信道是一个输入、多个输出的单向信道, 而卫星通信则是多个输入、多个输出的多向传输的通信, 这就需把两端单向通信的模型做适当的修正, 得出多用户通信系统的模型, 把两端单向通信的信息理论发展成为多用户通信信息理论.

信息论研究的是关于这个通信系统的最根本、最本质的问题. 例如:

- ① 什么是信息? 如何度量信息?
- ② 怎样确定信源的输出中含有多少信息量?
- ③ 对于一个信道, 它传输信息量的最高极限(信道容量)是多少?
- ④ 为了能够不失真地传输信源信息, 对信源编码时所需的最少的码符号数是多少? 这是无失真信源编码, 即香农第一定理的内容.
- ⑤ 在有噪信道中有没有可能以接近信道容量的信息传输率传输信息而错误概率几乎为零? 这是有噪信道编码, 即香农第二定理的内容.
- ⑥ 如果对信源编码时允许一定量的失真, 所需的最少的码符号数又是多少? 这是限失真信源编码, 即香农第三定理的内容.

毫无疑问, 如果我们对这些问题都有了确定的答案, 那么在设计通信系统时就有了目标和指导方向, 同时也有了评价通信系统优劣的标准.

在这里, 我们举几个成功地应用信息论的概念和方法指导通信系统设计的例子.

#### (1) 无失真信源编码的应用: 计算机文件的压缩

由于数据库的广泛应用, 存储计算机文件所需的存储量问题日益突出. 在过去的 20 多年中, 至少已有 20 种不同的对计算机文件的压缩算法问世, 其中较好的算法能使文件压缩后所需的存储量只为原文件的 30% 左右.

#### (2) 有噪信道编码的应用: 模拟话路中数据传输速率的提高

最早的调制解调器速率只有 300 bit/s, 此后, 调制解调器的速率从 4 800 bit/s 到 33.6 kbit/s, 已经非常接近于理论极限(56 K 调制解调器由于下行只经过一次模/数转换,

所以下行速率更快一些)。

### (3) 限失真信源编码的应用:语音信号压缩

按照信息理论的分析,语音信号(也就是话音信号)所需的编码速率可以远远低于按 Nyquist 采样定理和量化噪声理论所确定的编码速率.几十年来,人们在这方面的的工作取得了巨大的进展.CCITT 关于长途电话网的语音编码速率标准已从 1972 年的 64 kbit/s 降低到 1992 年的 16 kbit/s.在移动通信中,1988 年欧洲 GSM 标准中的语音编码速率为 13.2 kbit/s,而 1989 年美国 CTIA 标准中的语音编码速率仅为 7.95 kbit/s.目前,声码器的速率可低于 100 bit/s,已接近信息论指出的极限.

目前,对信息论的研究范围一般有 3 种理解:

(1) 狭义信息论:又称香农信息论.主要通过数学描述与定量分析,研究通信系统从信源到信宿的全过程,包括信息的测度、信道容量以及信源和信道编码理论等问题,强调通过编码和译码使收、发两端联合最优化,并且以定理的形式证明极限的存在.这部分内容是信息论的基础理论.

(2) 一般信息论:也称工程信息论.主要也是研究信息传输和处理问题,除香农信息论的内容外,还包括噪声理论、信号滤波和预测、统计检测和估计、调制理论、信息处理理论以及保密理论等.

(3) 广义信息论:也称信息科学,不仅包括上述两方面内容,而且包括所有与信息有关的自然和社会科学领域,如模式识别、机器翻译、心理学、遗传学、神经生理学、语言学、语义学甚至包括社会学中有关信息的问题.

本课程主要研究香农信息论的内容.



## 第2章

# 信息的度量

关于信息的度量有几个重要的概念:

(1) 自信息(量):一个事件(消息)本身所包含的信息量,它是由事件的不确定性决定的,比如抛掷一枚硬币的结果是正面这个消息所包含的信息量.

(2) 互信息(量):一个事件所给出关于另一个事件的信息量,比如今天下雨所给出关于明天下雨的信息量.

(3) 平均自信息(量),或称信息熵:事件集(用随机变量表示)所包含的平均信息量,它表示信源的平均不确定性,比如抛掷一枚硬币的试验所包含的平均信息量.

(4) 平均互信息(量):一个事件集所给出关于另一个事件集的平均信息量,比如今天的天气所给出关于明天的天气的信息量.

我们在最简单的离散随机变量的情况下引入这些概念.

## 2.1 自信息和互信息

### 2.1.1 自信息

在绪论中我们讲过,信源发出的消息(事件)具有不确定性,而事件发生的不确定性与