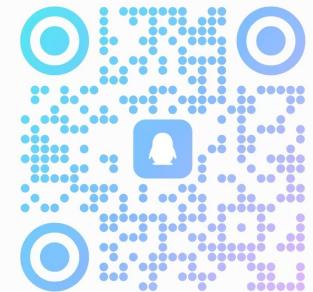


信息论基础

第一章 絮论

授课教师 顾昕钰
guxinyu@bupt.edu.cn

 信息论基础2025信工...
群号: 720331832



扫一扫二维码，加入群聊



课程介绍



课程介绍

如果地球即将毁灭，我们怎么能够在一张名片上写下地球文明全部的精髓，让其他的文明知道我们曾经怎样存在过？

$$1+1=2$$

$$E=MC^2$$

$$H=-\sum p_i \log p_i$$

——吴军



前Google高级资深研究员。原腾讯副总裁。计算机科学家、畅销书作家。
著有：《数学之美》、《浪潮之巅》、《文明之光》、《大学之路》

例子来源 <https://www.jianshu.com/p/9dc1710d8f1b>

北邮信息论课程组



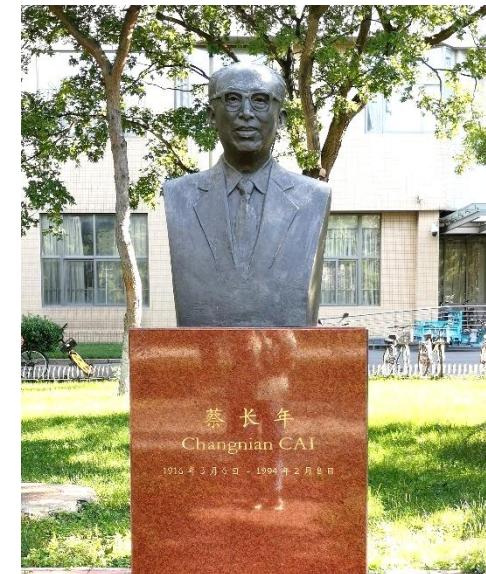
课程介绍

- ❖ 人活着就是在对抗熵增定律，生命以负熵为生。
-----薛定谔《生命是什么》
- ❖ 如果物理学只能留一条定律，我会留熵增定律。
-----吴国盛，清华大学科学史系主任
- ❖ 熵增定律：在一个孤立系统里，如果没有外力做功，其总混乱度（熵）会不断增大。
 - 事物总是向着熵增的方向发展，所以一切符合熵增的，都非常容易和舒适，比如懒散。
- ❖ 最大熵定理

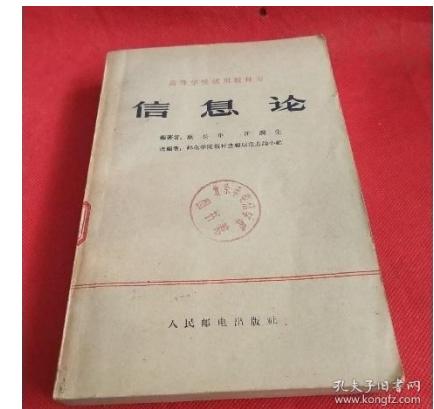


北邮信息论开拓者与领路人——蔡长年

- 交通大学电机工程系毕业，美国康奈尔大学进修
- 创建北京邮电学院，担任教授、有线电信工程系主任、副院长
- 主持研制了第一台晶体管3路载波机样机、第一代1200/2400比特/秒数据通信系统
- 蔡长年教授等编写我国第一本信息论教材《信息论》



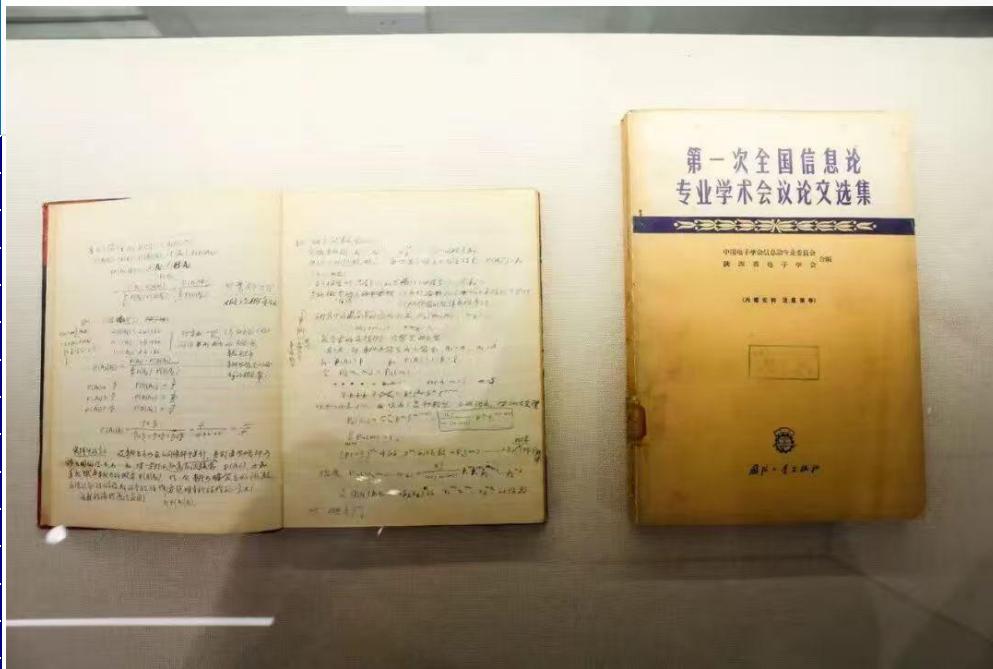
蔡长年 (1916-1994)



北邮信息论开拓者与领路人——周炯槃

- 为**第一颗人造卫星“东方红”号的**研制成功贡献卓著
- 创建了**我国第一座实验电视台——北邮教学电视台**
- 领导研制了**飞占扫塔彩色电视实验系统**
- 领导**纸传真网**
- 编写我国**第一本**研究生信息论教材《**信息理论基础**》，获全国教材**特等奖**





北邮信息论课程组



信息论的作用

信息论是帮助工程师从**全局**的观点观察和设计通信系统理论方法

- 信息论提供的一系列支持通信实践的指导原则
- 利用香农信息论可以达到通信的最佳设计

信息论是从事信息
产业研究与开发的
必备知识

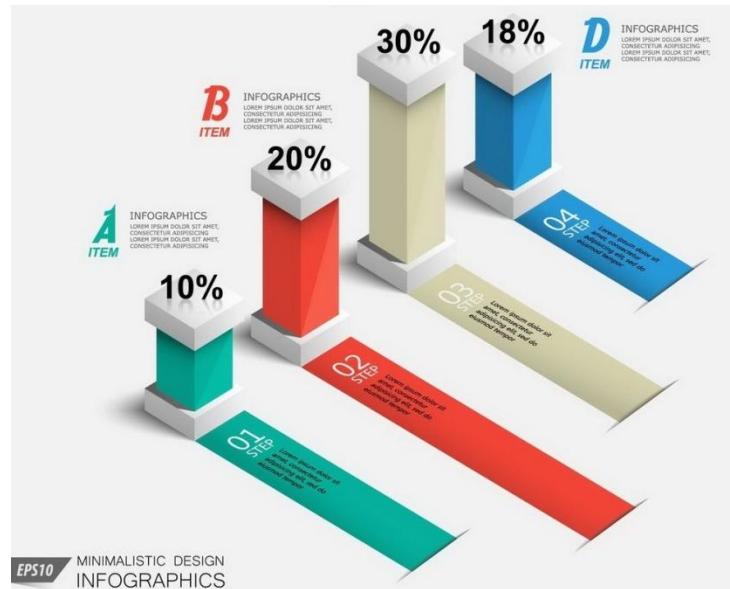
- 不掌握信息论的基本原理，就不能从全局着眼处理具体的技术问题



信息论的应用举例——数据压缩



1992年，美国的WEB Technology公司，宣布做出了重大的技术突破。该公司的DataFiles软件，**号称可以将任意大于64KB的文件，压缩为原始大小的1/16**。业界议论纷纷，如果消息属实，无异于压缩技术的革命。



例子来源 <https://www.yxkfw.com/thread-13254-1-1.html>

北邮信息论课程组



信息论的应用举例——数据压缩



1992年，美国的WEB Technology公司，宣布做出了重大的技术突破。该公司的DataFiles软件，**号称可以将任意大于64KB的文件，压缩为原始大小的1/16。**业界议论纷纷，如果消息属实，无异于压缩技术的革命。



许多专家还没有看到软件，就断言这是不可能的。**因为根据压缩原理，不可能将任意文件压缩到1/16，并且有一些文件是无法压缩的。**

后来，事实果然如此，这款软件从来没有正式发布。没过几年，就连WEB Technology公司都消失了。

信息论的作用

近几年信息论在其他领域的应用已获得很大的成功！

- 电子信息领域：通信、计算机、信号处理和自动控制领域等
- 人工智能：条件熵、信息增益、KL散度和交叉熵等概念应用广泛
- 大数据压缩：为大数据处理提供有力支持
- 经济学：衍生学科——信息经济学及经济信息学
- 生物学：广泛应用于**生物数据的处理**，如DNA序列的熵估计及压缩
- 密码学：与信息论密切相关
- 医学：联系颇深，如**压缩感知**已广泛应用于医学图像领域



❖ 为什么要学信息论？

- 定量的描述信息
- 通信的基本理论极限问题
 - 一个有噪信道，能否实现无差错传输？
 - 有噪信道无差错传输的最高传信率是多少？
 - 信源压缩的极限是什么？

❖ 学些什么内容？

- 一个概念，三个定理
 - 信息熵
 - 有噪信道编码定理，无失真信源编码定理，限失真信源编码定理

❖ 怎么学？

- 从概率的角度思考
- 抽象思维



Microsoft Office
PowerPoint 演示文

信息论与其它课程关系

专业课程

专业核心课程

通信原理

信息系统设计

信息网络建模与仿真

网络理论基础

数据科学基础

人工智能原理与技术

信息论

信息的度量

无失真信源编码定理
香农第一定理

限失真信源编码定理
香农第三定理

有噪信道编码定理
香农第二定理

- 移动通信
- 移动互联网
- 物联网技术
- 数据中心与云计算
- 网络流量监测
- 随机信号分析
- 数字图像处理
- 机器学习
- 模式识别及应用
- 生物信息基础
- 信息处理与编码
- 多元统计分析
- 自然语言理解
- 计算机视觉
- 社会网络分析
- 多媒体技术与应用
- 数字音视频原理
- 虚拟现实原理与技术
- 音频信号处理
- 移动多媒体

通信与网络类

智能类

媒体类

高等数学

线性代数

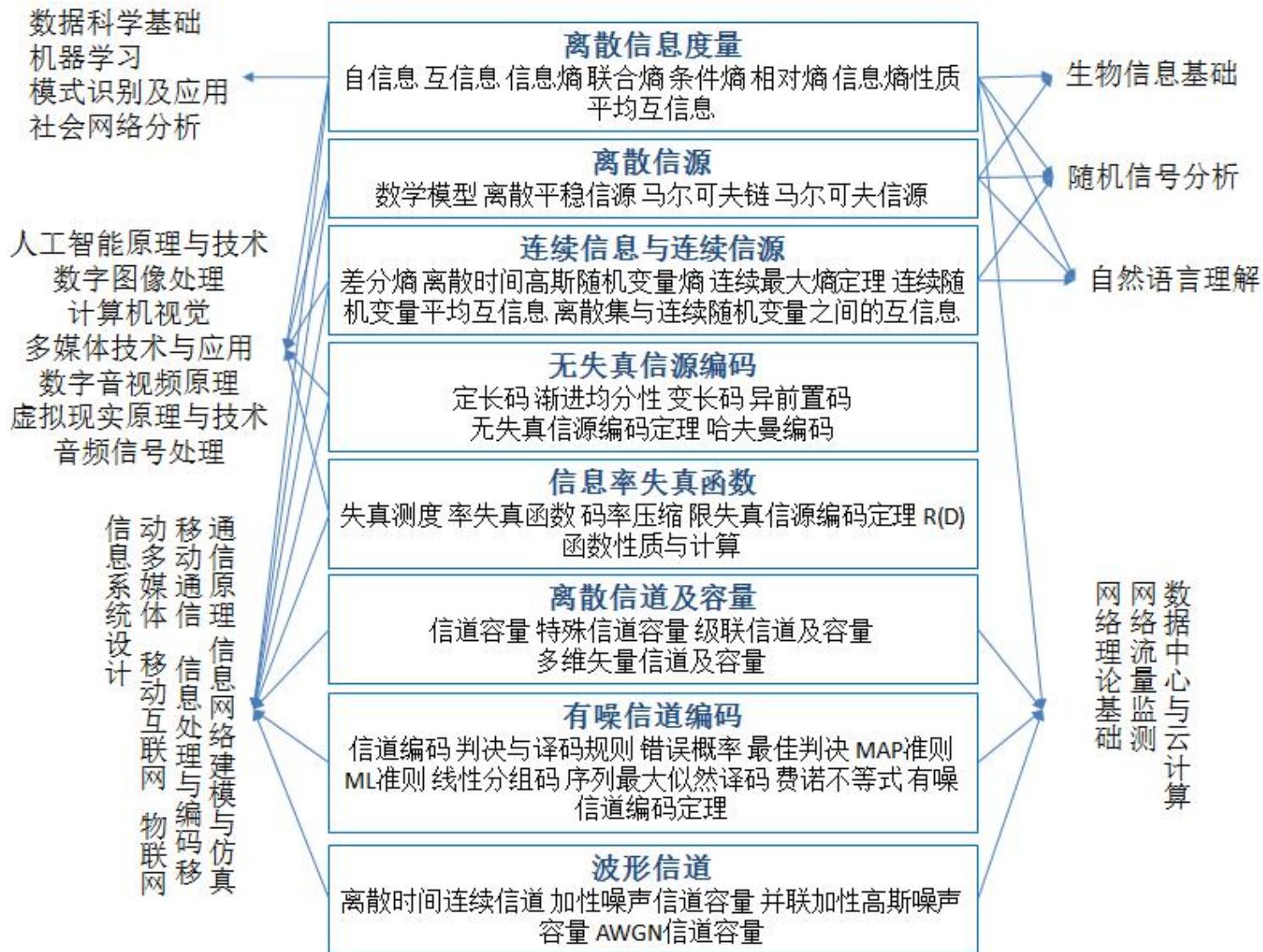
概率论

随机过程

信息论课程组



信息论与其它课程关系



课程教学目标

- ◆ 课程目标1：支撑毕业要求指标点1.5。本课程为通信传输与智能信息处理的性能极限提供专业理论知识，培养学生的基本专业素质，学会发现问题、分析问题，培养学生对人工智能和信息网络领域相关的原理、性能等问题进行比较、分析的能力。
- ◆ 课程目标2：支撑毕业要求指标点2.3。本课程为分析人工智能和信息网络领域复杂工程问题提供基础知识，包括问题抽象、建模表达、分析与优化方法等。

- ◆ **课程思政目标：**通过本课程的学习，希望学生能**从理论走向实践**，身处课堂之内，也能了解国家战略发展，既能激发学生学习信息与通信领域前沿知识的兴趣，又能**关注国家信息领域需求**，增长个人专业能力的同时又能培养学生的爱国情怀

本章主要内容



信息的概念和主要特征



通信系统的模型



香农信息论概述



信息论的产生与发展



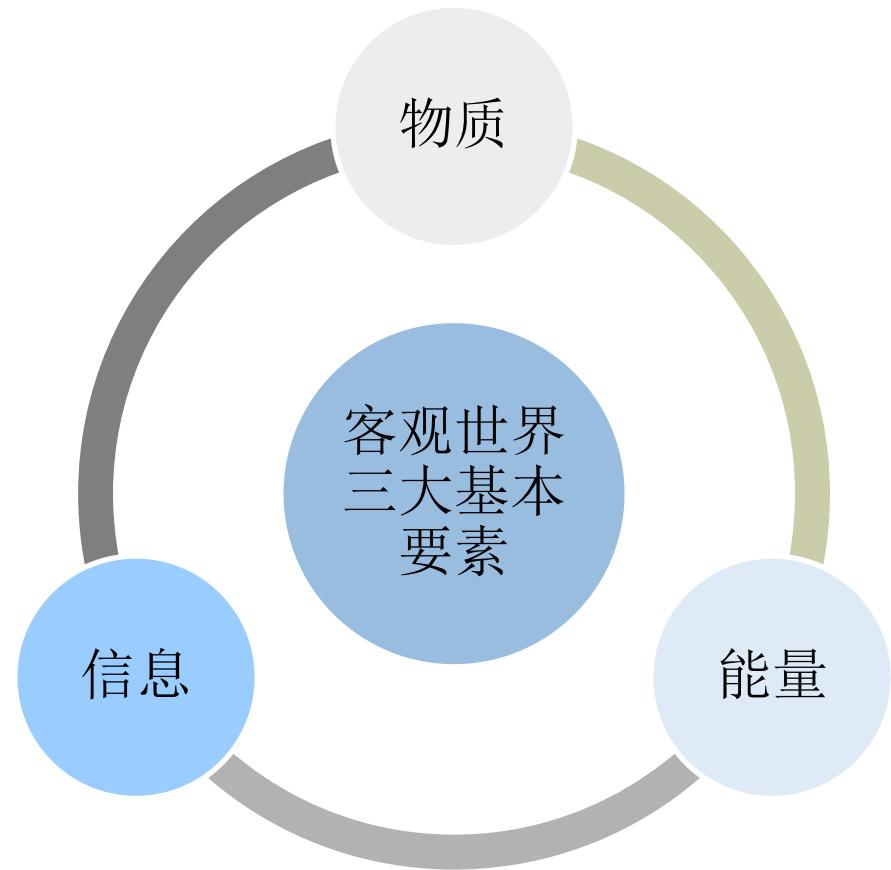
香农简介与学术风格

1.1.1 概述

信息时代社会的发展离不开**物质**（材料）、**能量**（能源）和**信息**资源。

美国学者欧廷格说：“没有物质什麼都不存在，没有能量什麼都不发生，没有信息什麼都没意义。”

按理说，关于信息的课程应该象物理、化学、生物等课程一样，是基础课。但是，由于信息的**抽象性**以及当前人们且**对信息的认识并不完全清楚**，所以在当前只能是专业课。



1.1.2 信息论的概念和主要特征（1/6）

- 由于信息已成为许多专家学者争相研究的对象，而且他们从不同的角度和侧面研究和定义信息
- 据说到目前为止已有上百种信息的定义或说法
 - “信息是事物之间的差异”
 - “信息是物质与能量在时间与空间分布的不均匀性”
 - “信息是收信者事先不知道的东西”
 - “信息是人们对客观事物的认识和反映” 等等

- 如前所述，由于当前还没有一个公认的关于信息的定义，但这并不影响我们对信息的基本特征的认识
- 信息有许多与物质、能量相同的特征
 - 例如信息可以产生、消失、携带、处理和量度
- 信息也有与物质、能量不同的特征
 - 例如，信息可以共享，可以无限制地复制等

1.1.2 信息论的概念和主要特征（2/6）

我们采用比较普遍的说法来描述广义信息：

- 信息是认识主体（**人、生物、机器**）所感受的和所表达的事物运动的状态和运动状态变化的方式。

1.1.2 信息论的概念和主要特征 (3/6)

● 信息的三个基本层次 ●

✓ 语法(Syntactic)信息

是**事物运动的状态和变化方式的外在形式**，不涉及状态含义和效用。象语言学领域的“词与词的结合方式”，不考虑词的含义与效用。在语言学中称为语法学。语法信息还可细分为，概率信息、偶发信息、确定信息、模糊信息等

✓ 语义(Semantic) 信息

是**事物运动的状态和变化方式的含义**。在语言学里，研究“词与词的结合方式含义”的学科称为语义学

✓ 语用(Pragmatic)信息

是**事物运动状态及其状态改变方式的效用**。

研究语义信息要以语法信息为基础，研究语用信息要以语义信息和语法信息为基础。三者之间，语法信息是最简单、最基本的层次，语用信息则是最复杂、最实用的层次。

1.1.2 信息论的概念和主要特征 (4/6)

□ 信息的三个层次——举例

- 有一个情报部门，其主要任务是对经济情报进行收集、整理与分析以提供给决策机构。该部门设立：信息**收集组**、**处理组**、**分析组**。

信息处理组根据资料的性质进行翻译或破译得到这些资料的含义，然后交到信息分析组。

信息处理组是根据所得到的语法信息提取出**语义信息**

信息分析组是根据所得到的语义信息提取出**语用信息**

信息收集组的任务是将收集到的资料进行分类，不管这些资料的含义如何都交到信息处理组。

信息收集组是根据所得到的消息提取出**语法信息**

信息分析组从这些资料中挑选出有价值的情报提交给决策机构

1.1.2 信息论的概念和主要特征 (5/6)

□ 信息的三个层次 & 香农信息论

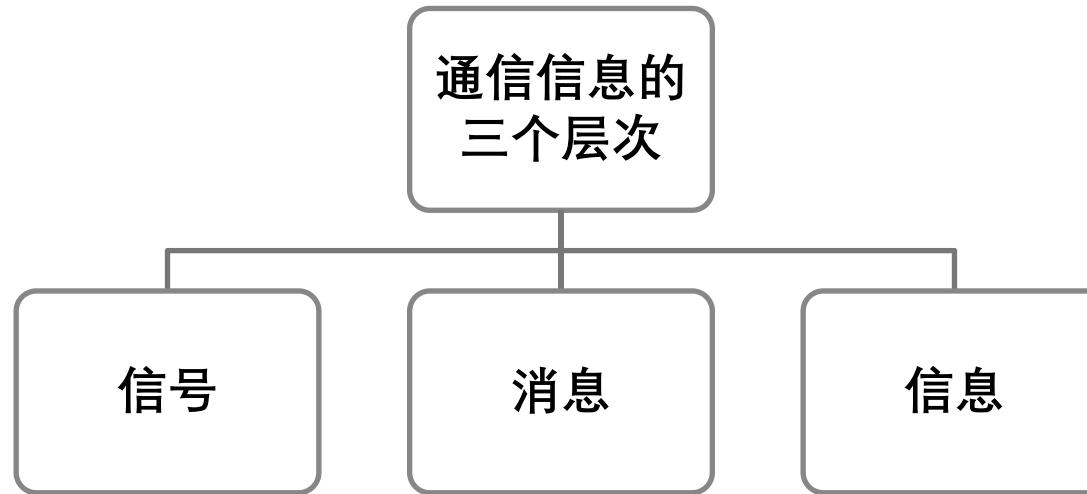
香农信息论或经典信息论所研究的信息是语法信息中的概率信息。

在研究信息理论时，排除了语义信息与语用信息的因素，先从语法信息入手解决当时最重要的通信工程一类的信息传递问题。

香农还把信源看成具有输出的随机过程，所以香农信息论研究的事物运动的状态和变化方式的外在形式是遵循某种概率分布的随机事件。

1.1.2 信息论的概念和主要特征 (6/6)

□通信信息的三个层次



- 消息是信息的携带者，信息包含于消息之中。
- 信号是消息的载体，消息是信号的具体内容。

本章主要内容



信息的概念和主要特征



通信系统的模型



香农信息论概述



信息论的产生与发展



香农简介与学术风格

1.2 通信系统的模型（1/5）

香农在1948年指出：

“通信的基本问题是在一点精确地或近似地恢复另一点所选择的消息。通常，这些消息是有含义的，即它对于某系统指的是某些物理的或概念的实体。这些通信的语义方面与通信问题无关，而重要的方面是实际消息是从一个可能消息集合中选择出的一条消息。”

1.2 通信系统的模型 (2/5)

- 从一个地方向另一个地方传送信息的系统
- 例如，电话、无线通信、电视、移动通信、计算机网等

通信系统



- 在某种意义上也可看成从现在向将来发送信息的通信系统
- 例如，磁盘或光盘驱动器、磁带记录器、视频播放器等

存储系统



1.2 通信系统的模型 (3/5)

通信的 基本问题

- 在一点精确地或近似地恢复另一点所选择的消息。(最早的数据通信)

通信的 三项性能指标

- 传输的有效性(快)
- 传输的可靠性(好)
- 传输的安全性(安全)

1.2 通信系统的模型 (4/5)

有效性

- 信源代码应尽量短（如摩尔斯电码“点”代表出现频率最高的字母e）
- 信息传输应尽量快：即高的传信率和高的频谱利用率

可靠性

- 传输差错要尽量少，对数字传输就是要求低的误码率

安全性

- 传输的信息不能泄露给未授权人

1.2 通信系统的模型 (5/5)

1948年，香农 (Claude Edwood Shannon, 1916-2001)
发表了《通信的数学理论》

《A Mathematical Theory of Communication》 , BSTJ,

1948

标志着信息论的产生



1.2.1 通信系统模型介绍

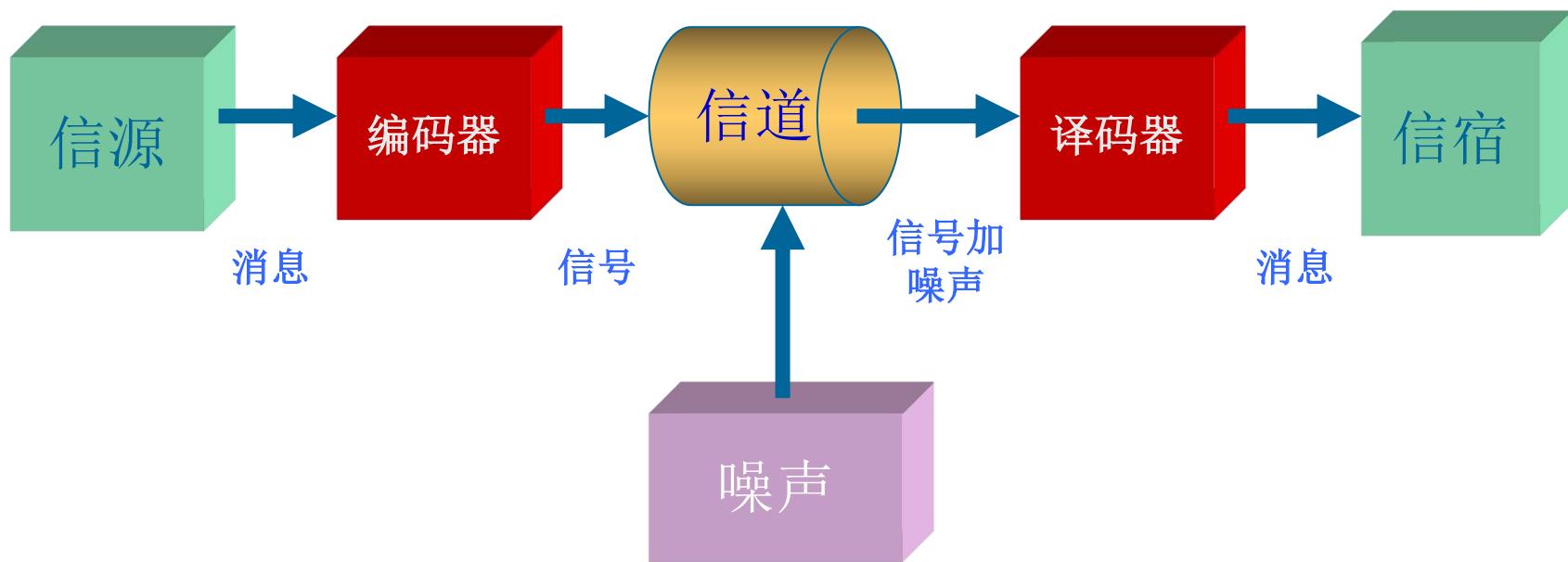


图1.2.1 通信系统模型

1.2.1 通信系统模型介绍--信源

信源(information source)

□**定义：**直接产生消息或消息序列

□**分类：**

① 按输出符号的取值分类

- 离散信源：字母序列
- 连续信源：单一时间函数、其他变量混函数、两个或多个时间函数、多变量的多个函数等

② 按输出符号之间的依赖关系

- 无记忆信源：信源输出符号的概率与以前输出的**符号无关**
- 有记忆信源：信源输出符号的概率与以前输出的**符号有关**

□**核心问题：**信源的消息中所包含的信息量以及信息如何度量

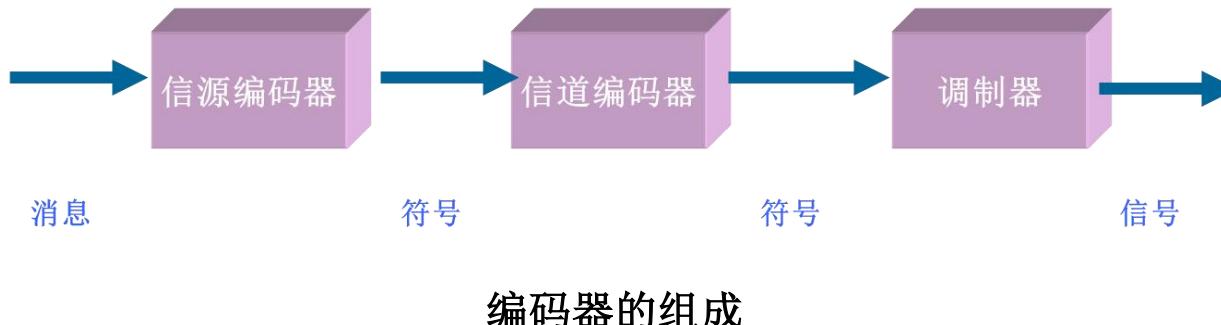
1.2.1 通信系统模型介绍--编码器 (1/6)

编码器(Encoder)

口功能：将消息变成适合于信道传输的信号

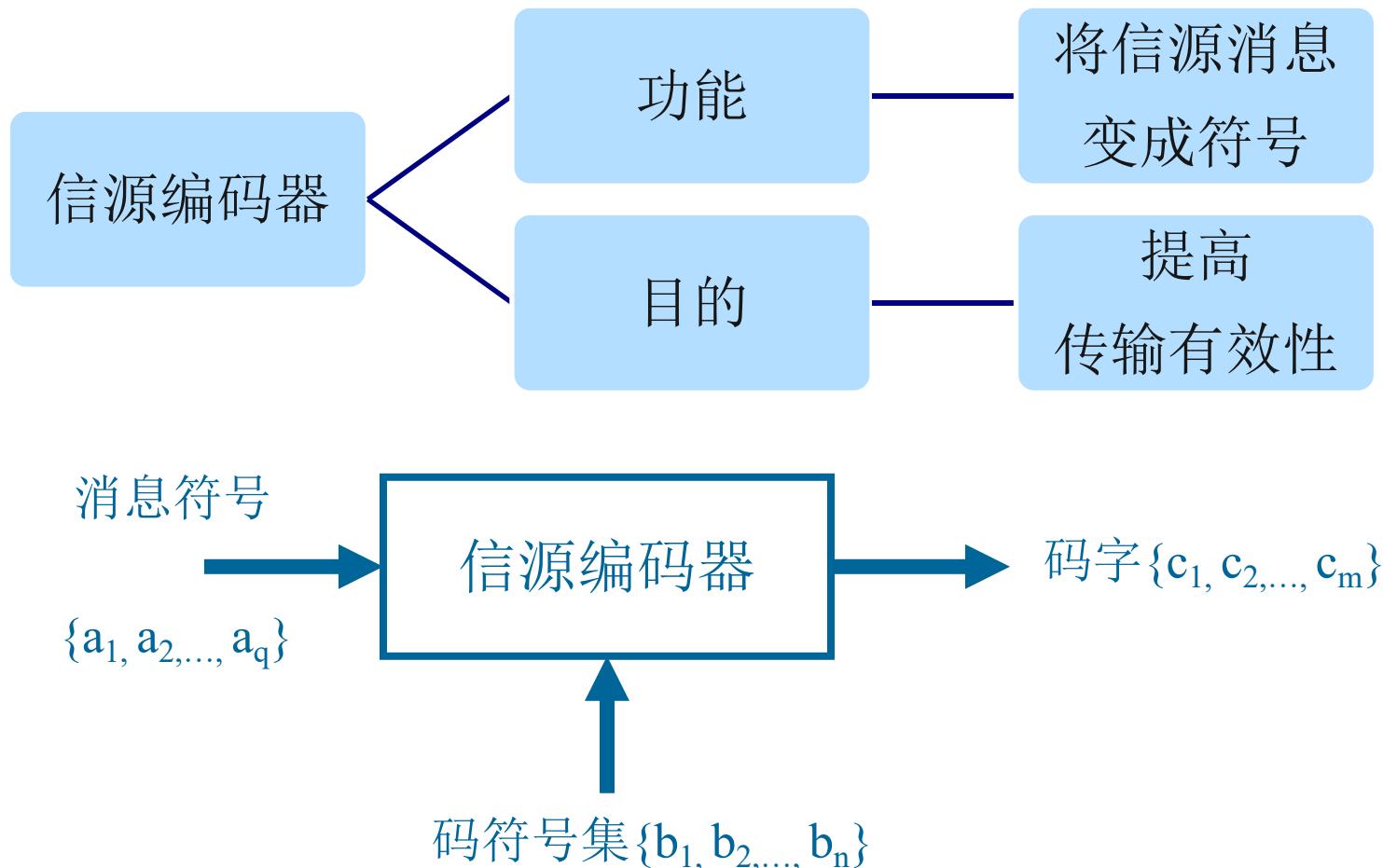
口组成：

- 1) 信源编码器 (source encoder)
- 2) 信道编码器 (channel encoder)
- 3) 调制器 (modulator)



1.2.1 通信系统模型介绍--编码器 (2/6)

1) 信源编码器



1.2.1 通信系统模型介绍--编码器 (3/6)

1) 信源编码器



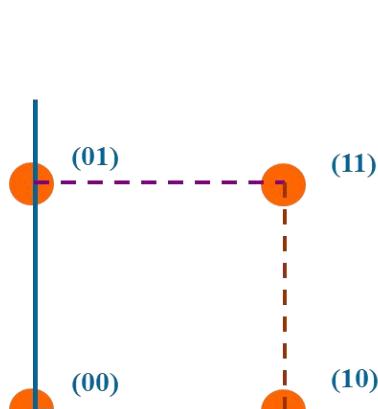
马的编号	胜率	Code 1	Code 2
A	1/2	000	0
B	1/4	001	10
C	1/8	010	110
D	1/16	011	1110
E	1/64	100	111100
F	1/64	101	111101
G	1/64	110	111110
H	1/64	111	111111

1.2.1 通信系统模型介绍--编码器 (4/6)

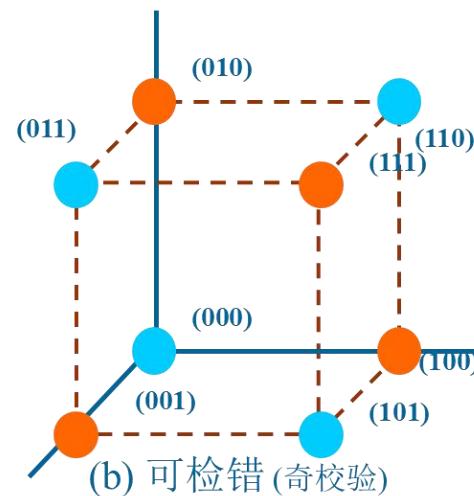
2) 信道编码器

功能：给信源编码符号增加冗余符号

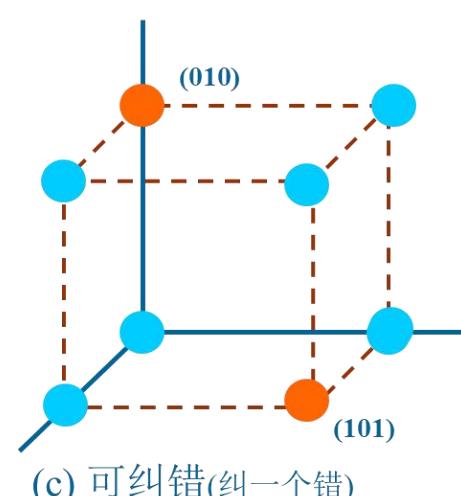
目的：提高传输可靠性



(a) 无检错



(b) 可检错(奇校验)



(c) 可纠错(纠一个错)

1.2.1 通信系统模型介绍--编码器 (5/6)

2) 信道编码器

信源编码输出直接传送，不能保证传输可靠性。利用信道编码对信源编码器的输出符号增加一些冗余符号，并让这些符号满足一定的数学规律，使传输具有纠错或检错能力。因为出现传输错误就会破坏这种数学规律，在接收端就会发现错误。

例如，最简单的奇偶纠错，将信源编码输出的每个码组的尾补一个1或0，使得整个码组“1”的个数为奇或偶（或模二加为1或0）。当传输发生奇数差错，打乱了“1”数目的奇偶性，从而可以检测出错误。实际这是最简单的检错方式，而实际的信道编码技术要复杂得多。

1.2.1 通信系统模型介绍--编码器 (6/6)

3) 调制器

功能：将编码器的输出符号变成适合信道传输的信号

目的：提高传输效率

详细说明：信道编码符号不能直接通过信道输出，要将编码器的输出符号变成适合信道传输的信号

1.2.1 通信系统模型介绍—信道

分类

狭义信道

广义信道

无噪声信道和有噪声信道

加性噪声和乘性噪声

AWGN信道

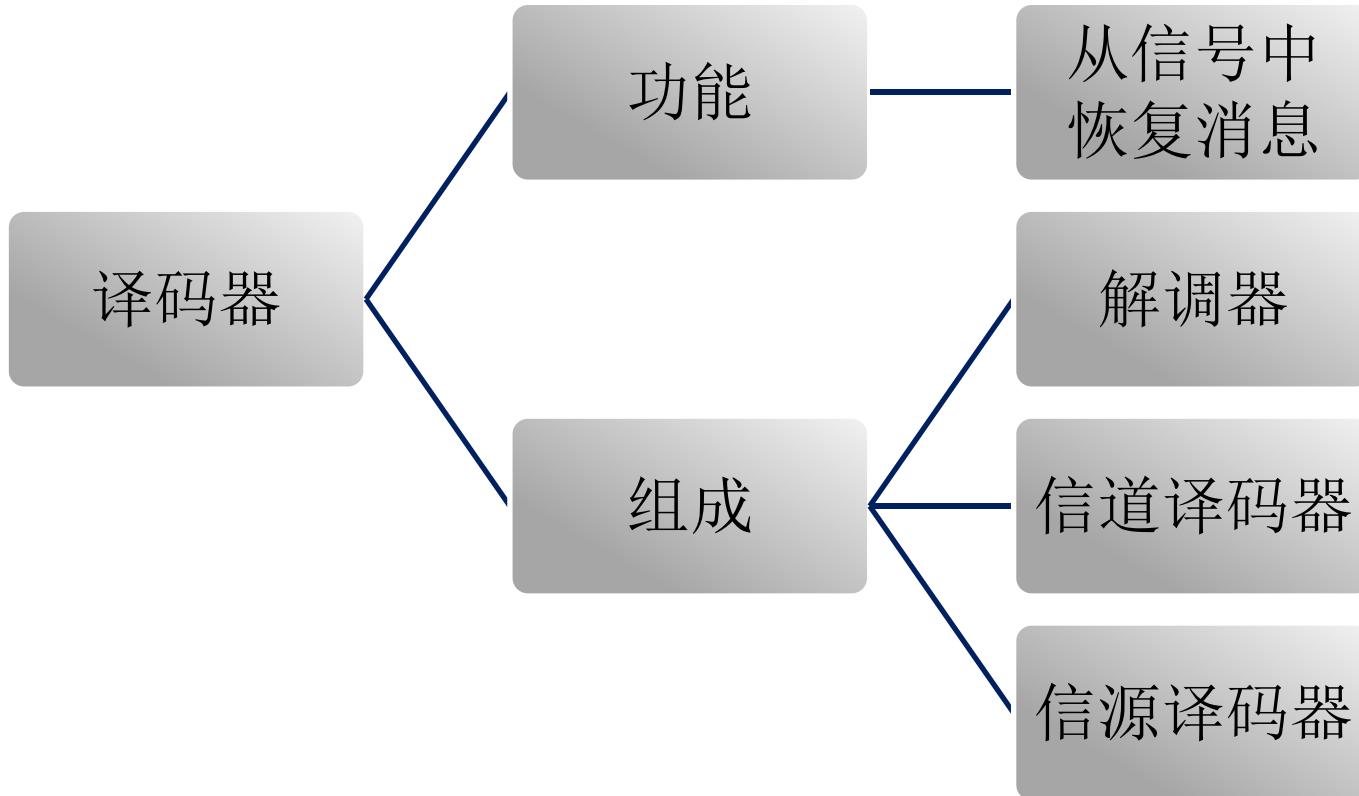
在信息论中研究最多的是理想加性高斯白噪声（AWGN）信道

是某些物理通信信道，也可以是物理的存储介质。例如有线、无线、光纤、磁盘、光盘等

是一种逻辑信道，它和信息所通过的介质无关，只反映信源与信宿的连接关系

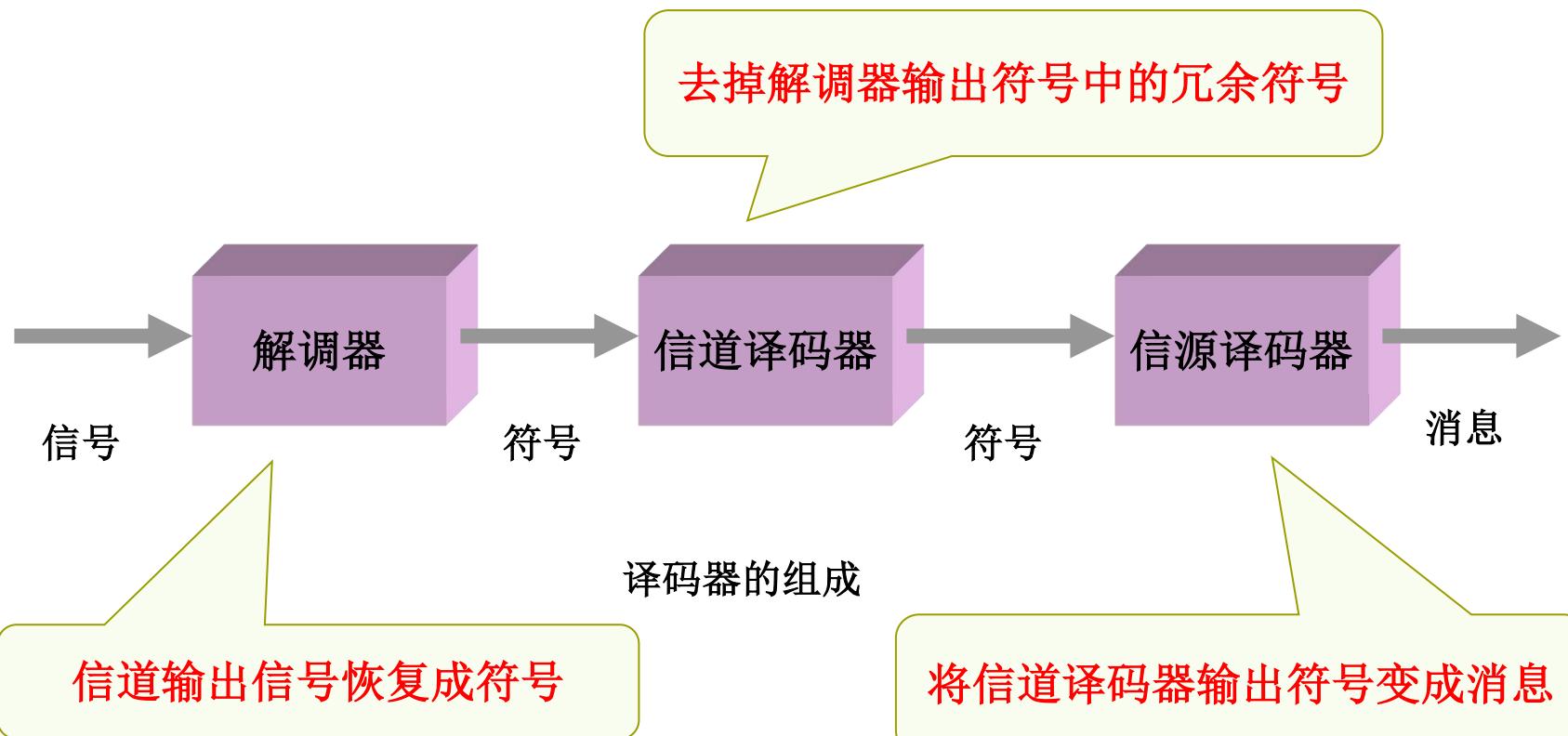
原因是：根据中心极限定理，无数独立随机变量的和的分布趋近高斯分布，因此**高斯噪声普遍存在**，其次高斯噪声是最难“对付”的噪声

1.2.1 通信系统模型介绍--译码器 (1/2)

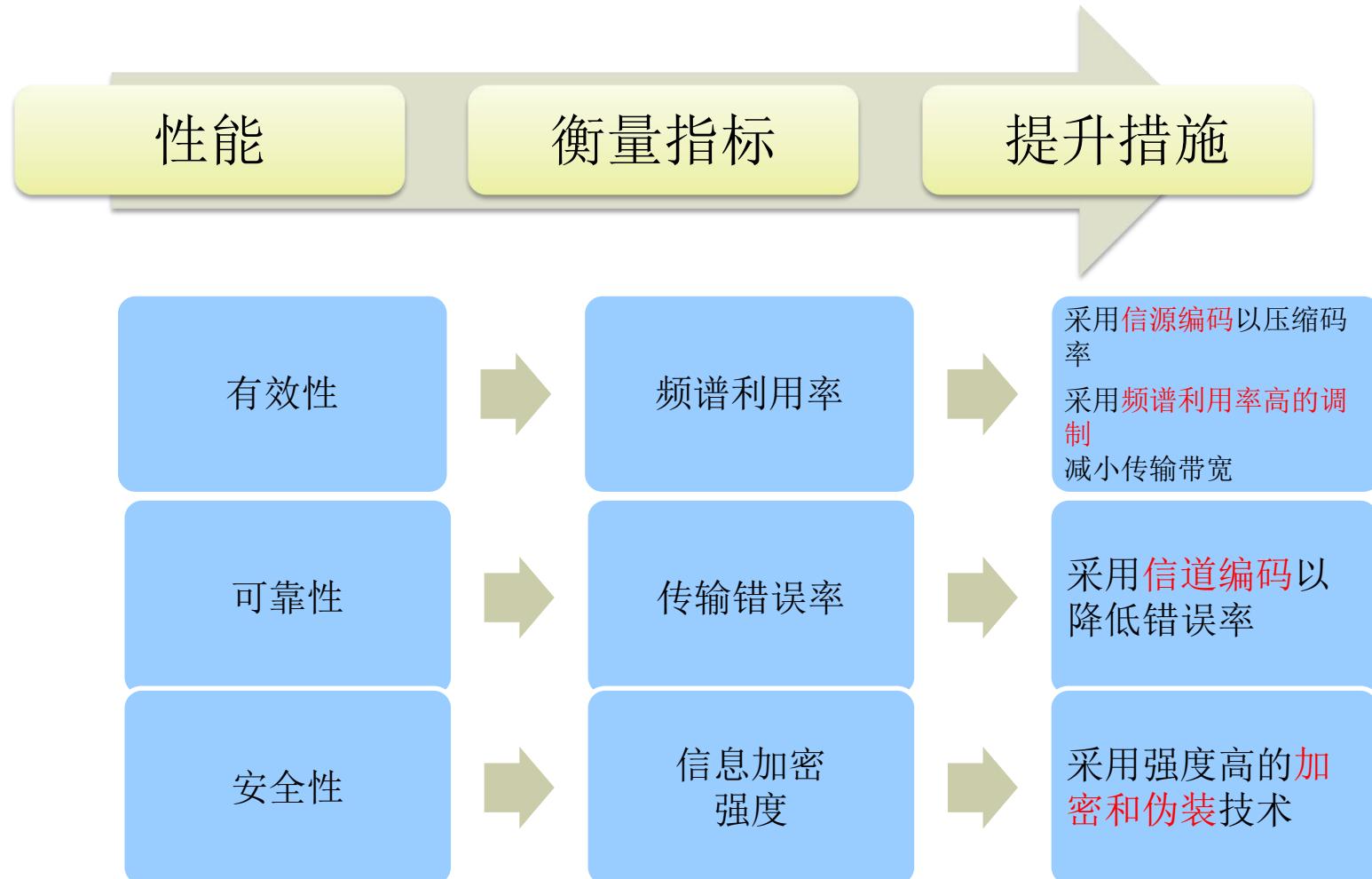


1.2.1 通信系统模型介绍--译码器 (2/2)

功能与发信机中的对应部分功能相反。



1.2.2 提高通信系统性能指标的措施



本章主要内容



信息的概念和主要特征



通信系统的模型



香农信息论概述



信息论的产生与发展



香农简介与学术风格

1.3.1 香农信息论研究的主要问题 (1/5)



1. 关于信源以及信息的含义和度量
2. 无失真信源编码定理（香农第一定理）
3. 关于信道容量与信息的可靠传输
4. 信息率失真理论（数据压缩的理论基础）

1.3.1 香农信息论研究的主要问题 (2/5)

1. 关于信源以及
信息的含义和度量

信源限制为具有
某一先验概率的随机过程

熵作为信源
平均不确定性的度量

1.3.1 香农信息论研究的主要问题 (3/5)

2. 无失真信源编码定理 (香农第一定理)

如果编码后的信源序列信息传输速率不小于信源的熵，则可实现无失真编码，反之，不存在无失真编码。

1.3.1 香农信息论研究的主要问题 (4/5)

3. 关于信道容量与信息的可靠传输

有噪信道编码定理（香农第二定理）：
如果信息传输速率小于信道容量，则
总可找到一种编码方式使得当编码序
列足够长时传输差错任意小，反之不
存在使差错任意小的编码。

1.3.1 香农信息论研究的主要问题 (5/5)

4. 信息率失真理论 (数据压缩的理论基础)

信源限失真信源编码定理（香农第三定理）：对任何失真测度 $D \geq 0$ ，只要码字足够长，总可找到一种编码，使得当编码后信息传输率在 $\geq R(D)$ 时，码的平均失真 $d \leq D$ 。 $R(D)$ 称为信息率失真函数。

熵另一种等价描述：对任何失真测度 $D \geq 0$ ，平均失真 $d \leq D$ ，那么编码后信息传输率 $\geq R(D)$ 。 $R(D)$ 是满足失真准则的最小的平均码长

1.3.2 信息论的特点

以概率论、随机过程为基本研究工具

研究通信系统的整个过程，而不是单个环节，并以编、译码器为重点
(对于单个环节同样有帮助)

信息论特点

关心的是最优系统的性能和怎样到达这个性能；
(并不具体设计系统)

语法信息中的概率信息，要求信源为随机过程，也不研究信宿

本章主要内容



信息的概念和主要特征



通信系统的模型



香农信息论概述



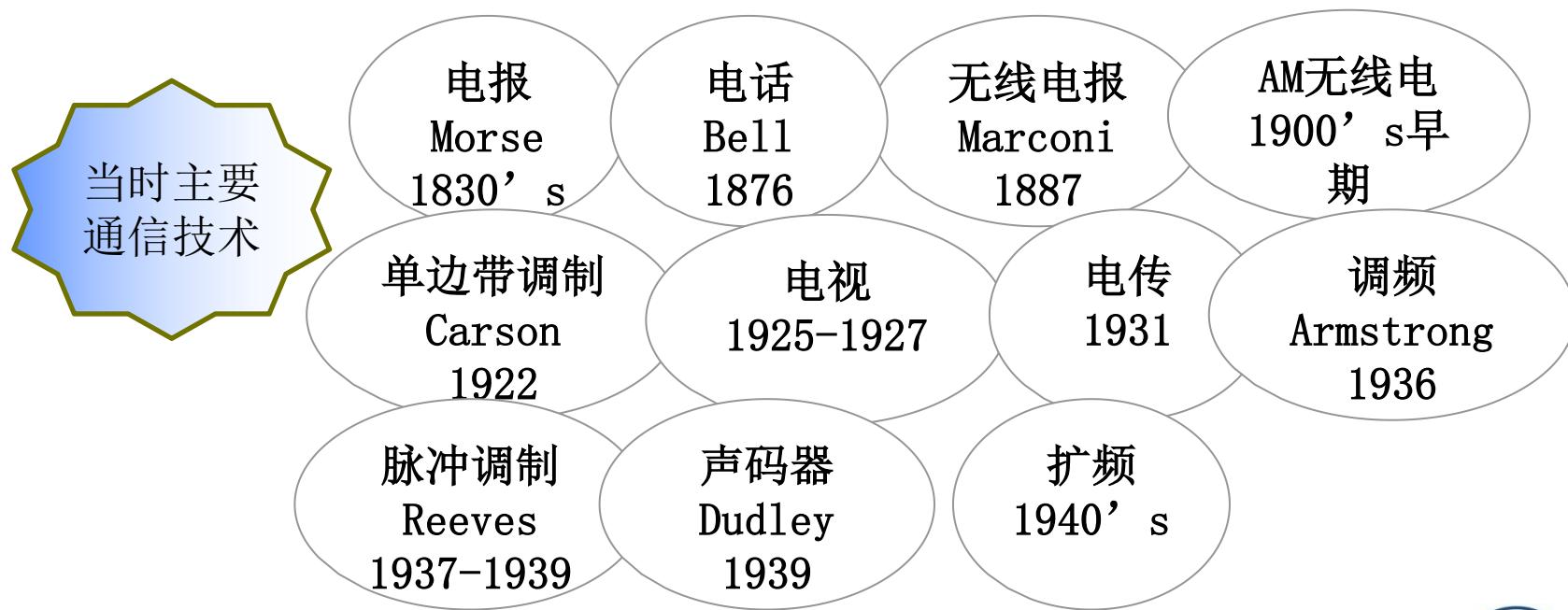
信息论的产生与发展



香农简介与学术风格

1.4.1 技术背景

- 香农的信息论的创立主要是由于香农的杰出贡献，但也与当时的技术发展背景和前人的工作密不可分
- 当时通信理论与技术已有较大发展



1.4.2 理论背景

1948年以前，Nyquist、Hartley等人也做了许多有影响的工作

- ✓ 例如Nyquist发现传输速率正比于在单位时间信号电平数目的对数（1924）
- ✓ Hartley提出“传输速率”，“码间干扰”，“系统传输信息的容量”等术语
- ✓ Wiener, Rice等人把随机过程作为通信工程师的工具

所有这些都为信息理论
的建立产生了重要影响

热熵，吉布斯方程
人活着就是在对抗熵增
定律——薛定谔

1.4.3 香农的主要工作

1948年，发表《通信的数学理论》，奠定了信息论的理论基础

1956年，发表 *The Zero-Error Capacity of a Noisy Channel*（《噪声信道的零差错容量》），开创了零差错容量的研究领域；

1959年，发表 *Coding Theorem for a Discrete Source with a Fidelity Criterion*（《在保真度准则下的离散信源编码定理》），推动了信息率失真理论研究

1961年，发表 *Two-Way Communication Channels*（《双路通信信道》），从而开拓了多用户理论的研究

1.4.4 香农信息论的发展（1/3）

1. 无损数据压缩

- 理论基础是香农第一定理
- Huffman解决了固定到可变长度信源编码最小平均码长的码的构造，即Huffman编码
- 由A. Lempel和J. Ziv提出的方法（L-Z算法）
- 由F. Willems等提出了文本树加权编码方法
- D. Slepian和J. Wolf提出相关信源编码是数据压缩理论的最重要的进展之一

1.4.4 香农信息论的发展 (2/3)

2. 可靠性

- 理论基础是**香农第二定理**
- S. Arimoto和R. Blahut提出计算**离散无记忆信道容量的迭代算法**
- 在**高斯信道**的研究方面
- **信道编码定理**方面
- 香农计算了有约束信道（香农称做离散无声信道）的容量，并成为**有约束序列编码**的理论基础
- **零差错信道容量**是香农开辟的另一个研究领域
- **多用户**信息论的理论

1.4.4 香农信息论的发展（3/3）

3. 有损数据压缩

- 多用户信息论的理论
- 理论基础是信息率失真理论
- 率失真函数
- 编码定理
- 通用有损数据压缩
- 多端数据压缩等

本章主要内容



信息的概念和主要特征



通信系统的模型



香农信息论概述



信息论的产生与发展



香农简介与学术风格

1.5.1 香农生平简介



1916年, 生于
Gaylord , Petosky,
Michigan (密歇根州)

1932年, 进入密歇根大学,
1936年获电气工程和数学
两个学士学位

Thomas A. Edison 是他童年
羡慕的英雄, 数学和科学是
他学习中的爱好

1936年, 在MIT担任研究助理并成为电
气工程系研究生, 用Bush分析器(早
期的模拟计算机)解微分方程的工作

1937年, 硕士论文《继电器和
开关电路的符号分析》, 此文
首次提出了可用于设计和分析
逻辑电路的系统方法, 是数字
信号处理的里程碑之一

1941-1956年, 贝尔实验室
1956年, MIT访问学者, 第
二年接受MIT永久聘任

1940年, 获电气工程硕士学位和
数学博士学位, 博士论文《理论
遗传学的代数》(未公开发表)

1978年, 退休
February, 24, 2001,
病逝



1.5.2 香农学术风格

个性化的科学研究

什么问题最吸引他，他就研究什么问题，兴趣广泛



勤于且善于思考

从1940到1948年进行通信的基础理论研究，8年时间，竟然无草稿或部分底稿

理工融合于一身

大数学家Kolmogrov很好地总结了香农作为一个学者的才华，他说：“在我们的时代，当人的知识越来越专业化的时候，香农是科学家的一个卓越的典范。他把深奥而抽象的数学思想和一个概括的同时又很具体的对关键技术问题的理解结合起来。他被认为是最近几十年最伟大的工程师之一，同样也被认为是最伟大的数学家之一。”

本课程的要求



掌握熵与互信息的概念、性质与计算

掌握离散信源、马尔可夫信源熵的计算

掌握离散信源编码定理与Huffman编码方法

掌握离散信道传输错误概率的计算与编译码准则

掌握特殊离散信道与高斯信道容量的计算



❖ 平时成绩20%+期中成绩30%+期末成绩30%

北邮信息论课程组

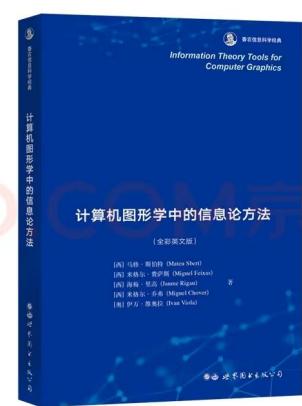
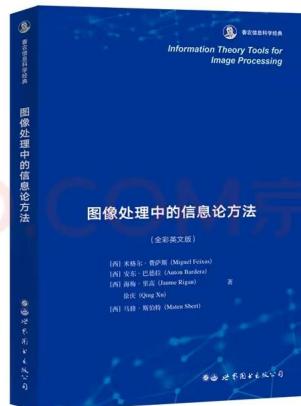


参考文献

- [1] 周炯磐.《信息理论基础》,人民邮电出版社,
- [2] 吴伟陵.《信息处理与编码》,人民邮电出版社,1999
- [3] 傅祖云.《信息论--基础理论与应用》,电子工业出版社,2001
- [4] 朱雪龙.《应用信息论基础》,清华大学出版社,2001
- [5] 周荫清.《信息理论基础》,北京航空航天大学出版社,1993
- [6]Gallager,*Information Theory and Reliable Communications*,John Wiley & Sons,1968
- [7]L.P.Hyvarinen, *Information Theory for System Engineers*, Springer-Verlag ,1970
- [8]Toby Berger, *Rate Distortion Theory*, Prentice-Hall,1971
- [9]John R.Pierce, *An Introduction to Information Theory*,Dover Publications,1979
- [10]Andrew J.Viterbi,Jim K.Omura, *Principle of Digital Communication and Coding*, McGraw- Hill,1979
- [11]Robert M.Gray, *Entropy and Information Theory*, Springer-Verlag ,1990
- [12]Kees A.Schouhamer Immink, *Coding Techniques for Digital Recorders*,Prentice Hall,1991
- [13]Solomon W.Golomb,Robert E.Peile Robert A.Scholtz, *Basic Concept in Information Theory and Coding*, Plenum Press,1994
- [14]Richard B.Wells, *Applied Coding and Information Theory for Engineers*,Prentice Hall,1999
- [15]Gareth A.Jones and J.Mary Jones, *Information and Coding Theory*,Springer-Verlag London Limited,2000

B站课程视频: 账号 Janeyang-bupt

- ❖ 香农信息科学经典系列图书
- ❖ Information Theoretic Learning



未来扩展学习

北邮信息论课程组



本章结束
谢谢

