



# 通信原理

湘潭大学  
自动化与电子信息学院

教师：柳文

Email: [l\\_wen9209@sina.com](mailto:l_wen9209@sina.com)

QQ: 532390179

# 课程特点

## 专业理论基础:

- ※ 介绍通信系统中基本理论、基本技术和一些简单应用，为分析、设计和研究复杂的通信系统打下基础，也为后续专业通信课程学习提供基础。

## 学习方法:

- ※ 理论联系实际，注重**基本理论**、**概念**和**技术**的学习，将所学理论应用到日常生活中，解释所遇到的与通信相关的问题，多动脑，善于揣摩。关注通信领域的最新发展。

## 参考书目：

1. 樊昌信等，《现代通信原理》，清华大学出版社；
2. Contemporary Communication Systems using Matlab, Proakis and Salehi;
3. 通信原理学习指导、辅导等类书籍

国家精品课程网站和国家资源共享课程网站：

<http://ste.xidian.edu.cn/txyl/>

[http://www.icourses.cn/coursestatic/course\\_6642.htm](http://www.icourses.cn/coursestatic/course_6642.htm)



# 课程基本内容

- 绪论
- 确知信号
- 随机过程
- 信道
- 模拟调制系统
- 数字基带传输系统
- 数字带通传输系统
- 数字信号的最佳接收
- 信源编码
- 差错控制编码
- 正交编码、伪随机序列、同步等基本概念

# 成绩考核与评定

本课程是考试课程，考核的形式是闭卷。

本课程的期评成绩采取百分制，包括考试成绩和平时成绩和实践成绩，其中平时成绩由作业成绩、课堂成绩（签到和课堂问答）决定。

期评成绩的计算公式如下：
$$\text{期评成绩} = \text{平时成绩} \times 20\% + \text{考试成绩} \times 70\% + \text{实践成绩} \times 10\%$$

助教：陈荣 电话：18473262986

QQ：1507173192



# 第1章 绪论

学

1.1 通信的基本概念

1.2 通信系统模型

1.3 通信系统分类与通信方式

1.4 信息及其度量

1.5 通信系统主要性能指标



博学笃行 明德日新

## § 1.1.1 通信的发展

**通信：**发送者和接收者之间，通过某种媒体，进行的信息传输与交换

**电信：**利用电信号传输信息的通信方式

对于人类社会而言，通信非常重要，它改变了人们的生活方式，工作方式；推动了人类社会的发展。



# § 1.1.1 通信的发展

## (1) 古代通信



烽火台



烽火  
戏诸侯

词目	击鼓鸣金
发音	jī gǔ míng jīn
释义	古时两军作战时用鼓和金发号施令，击鼓则进，鸣金则退。
出处	明·罗贯中《三国演义》第二十三回：“张辽可使击鼓鸣金，许褚可使牧羊放马。”



鸿雁传书寄深情



驿站传书





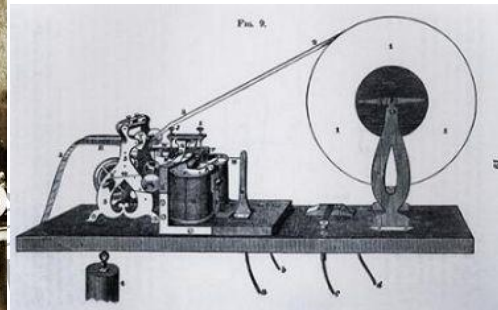
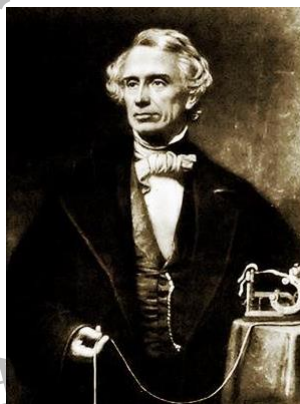
# § 1.1.1 通信的发展

## (2) 近代通信

近代通信的主要特征是“电通信”

- 1837年，莫尔斯发明了有线电报，开创了电信新时代——数字通信的开始；

1844年莫尔斯发送世界上第一封电报：  
“上帝啊，你创造了何等的奇迹”



- 1876年，贝尔发明了有线电话——模拟通信的先驱；



## § 1.1.1 通信的发展

- 1864年，**麦克斯韦**预言电磁波的存在；

麦克斯韦的伟大工作

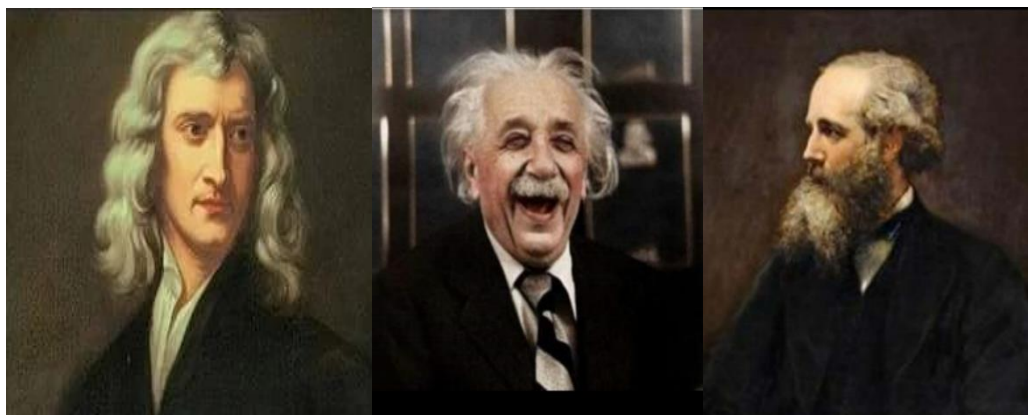
$$\nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = -\frac{\partial \mathbf{B}(\mathbf{r}, t)}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = \mu_0 \left[ \mathbf{J}(\mathbf{r}, t) + \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} \right]$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{\varepsilon_0} \rho(\mathbf{r}, t)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = 0$$

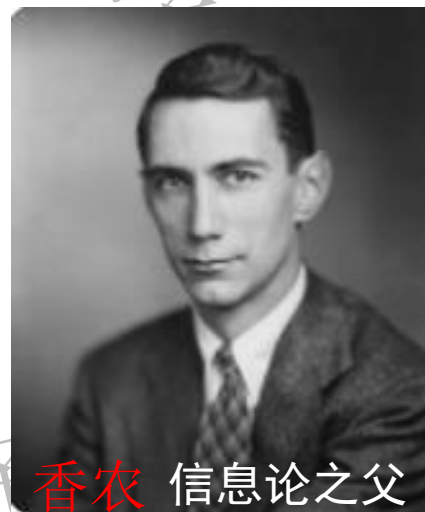
**电磁波**：传递信息的无形信使



- 1887年，**赫兹**试验证实电磁波的存在；
- 1901年，**马可尼**利用电磁波，实现横跨大西洋的无线电波通信，开启电磁波应用于实用通信先河；
- 1906年，德弗雷斯特发明真空三极管，使无线通信获得普及应用；

## § 1.1.1 通信的发展

- 1918年，**阿姆斯特朗**发明了超外差接收机，调幅无线电广播问世；
- 1948年，**英国**广播电视台（BBC）开播；
- 1948年，**英国**发表了信息论的奠基之作《通信的数字理论》，推动了整个通信领域的数字化革命。



**香农** 信息论之父

### （3）现代通信

20世纪50年来，随着晶体管和集成电路出现，通信进入**现代通信**阶段。

电话、电视、广播、网络 and 光纤等现代通信手段，  
传输话音、图像、文字、视频等多媒体信息。

# § 1.1.1 通信的发展

- 1961~1970年，立体声调频广播、集成电路、卫星通信步入实用阶段；
- 1971~1980年，演示蜂窝电话系统、个人计算机出现、大规模IC时代到来，光纤通信系统投入商用；
- 1981~1990年，IBM PC机出现、传真机广泛实用、GPS完成部署；
- 1991~2000年，GSM移动通信投入商用、Internet和www普及、掌上电脑，数字蜂窝……；
- 20世纪末，人类进入**信息时代**。  
物联网，数字电视，3G、4G、5G通信，量子通信，人工智能，大数据，云计算……



当前，通信已成为现代信息时代发展最快的行业之一



## § 1.1.2 消息、信息和符号

### 消息

：通信系统传输的对象。形式多种：

- **连续消息：**  
语音、温度、图像
- **离散消息：**  
数据、文字、符号…

### 信号

：消息的电表示形式/传输载体。

- **模拟信号：**  
信号参量取值连续
- **数字信号：**  
信号参量取值离散

### 信息

：消息中蕴含的有效内容。

## § 1.1.2 消息、信息和符号

消息——信息的物质载体，信息的外在表现形式

- 连续消息：（状态连续）语音、图像、温度 等
- 离散消息：（状态可数）文字、数据、符号 等

信息——消息的内涵，即消息中包含的有效内容

例：播报天气。语音是天气预报的表现形式，而天气情况是语音的内涵

同样的信息，可用不同形式的消息来表述

例：天气的“晴”和“雨”可用用语音表述，也可用符号表述，消息的形式不同，但其内涵是一样的

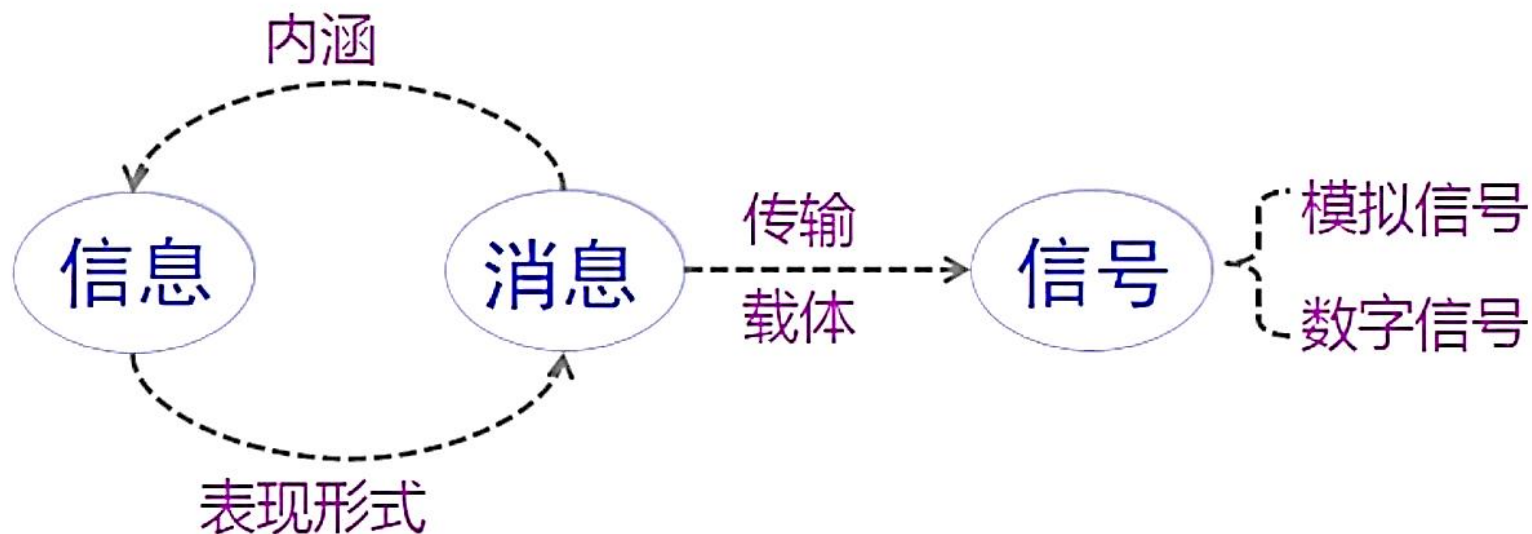


## §1.1.2 消息、信息和符号

**信号** —— 消息的传输载体，在电信系统中，**信号**是消息的电表示形式

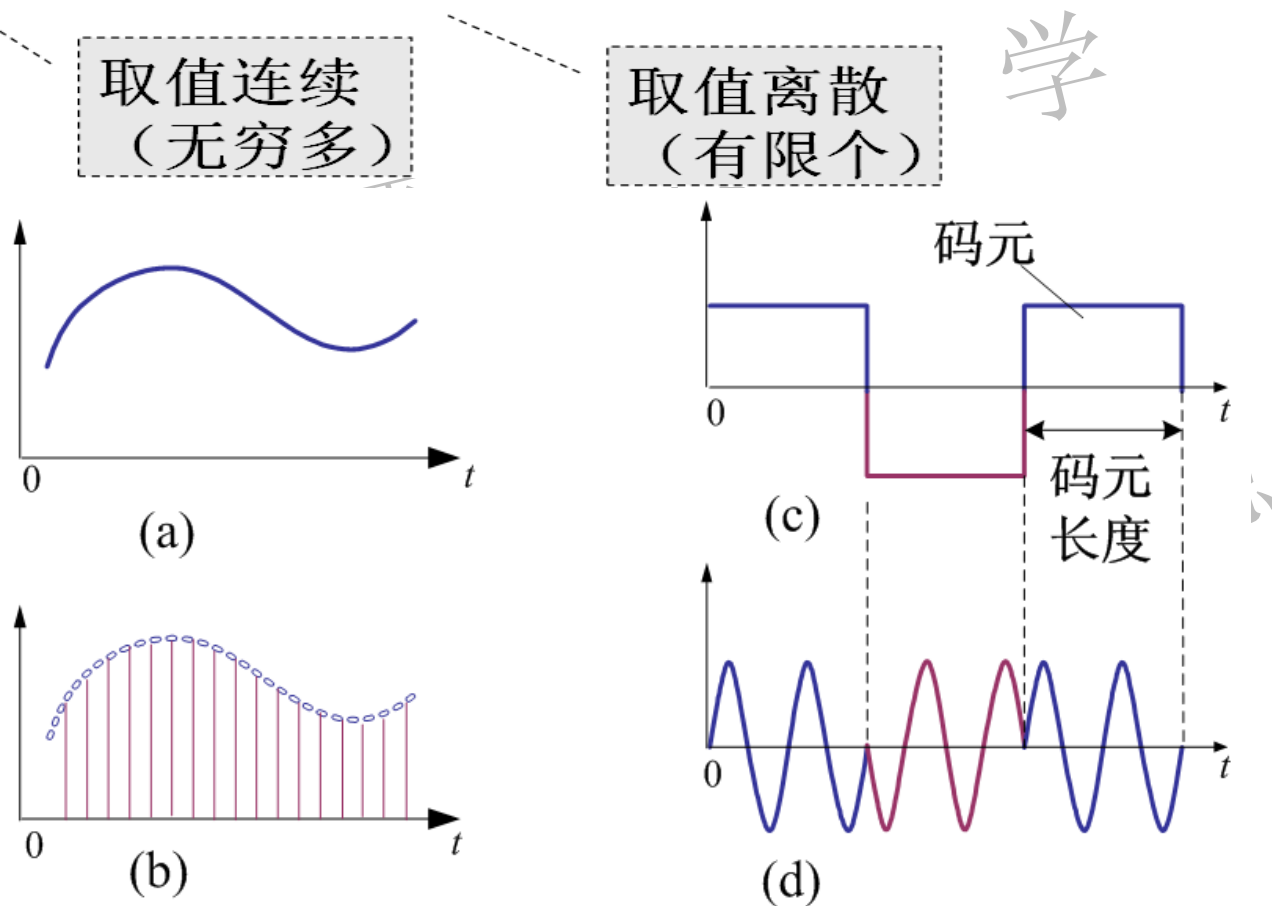
- 模拟信号：参数取值连续（不可数）
- 数字信号：参数取值离散（可数，有限个）

三者关系：



## § 1.1.2 消息、信息和符号

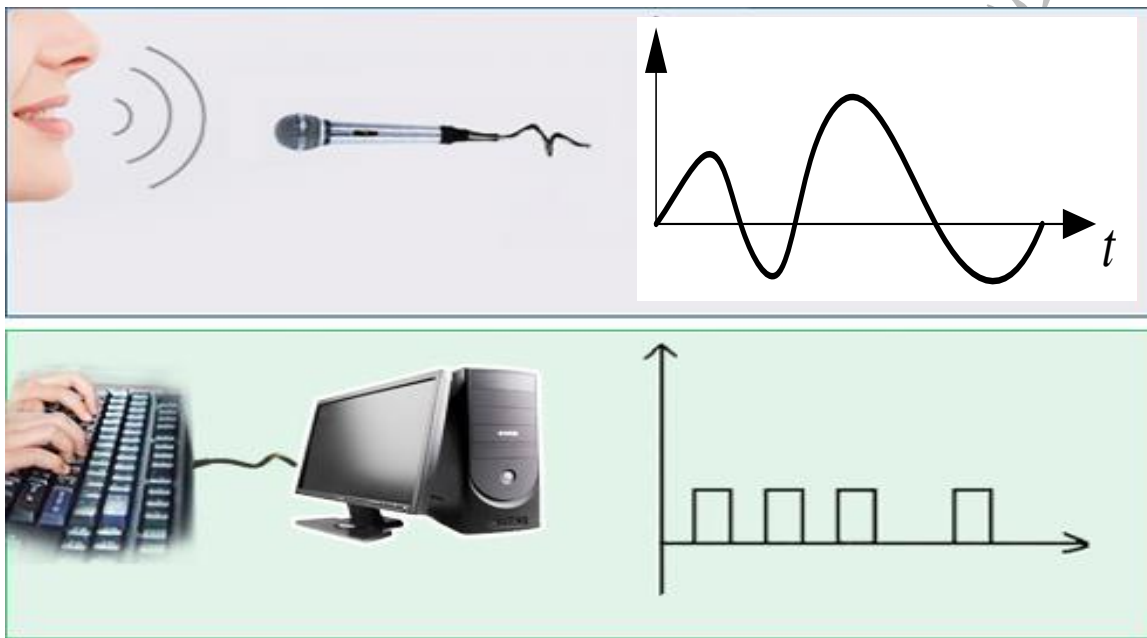
### ① 模拟信号 和 数字信号:



**区分原则:** 看携带消息的信号参量取值。

## § 1.1.2 消息、信息和符号

### ② 消息 ~ 电信号的转换:



- 话筒（声音传感器）把声音转变成音频信号；
- 数字终端把符号转变成数字信号；
- 摄像机把图像转变成视频信号；
- 热敏电阻（温度传感器）把温度转变成电信号。

## § 1.1.2 消息、信息和符号

基于以上对 消息、信息和信号 的理解：

**通信**：就是利用电信号传输消息中所包含的信息。

完成通信过程所需的电子设备和信道的  
总体—— communication system

**通信系统**



# 第1章 绪论

学

1.1 通信的基本概念

1.2 通信系统模型

1.3 通信系统分类与通信方式

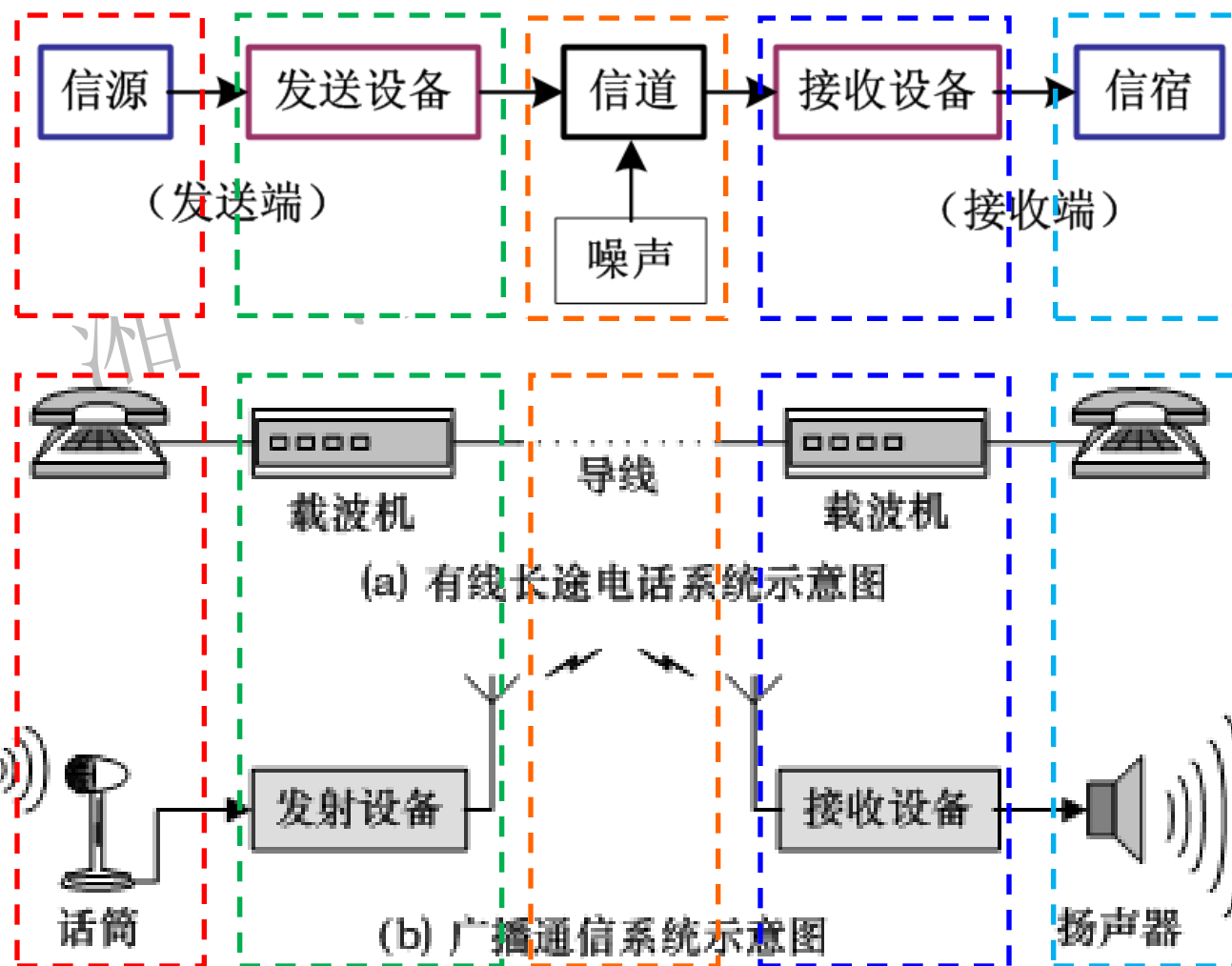
1.4 信息及其度量

1.5 通信系统主要性能指标



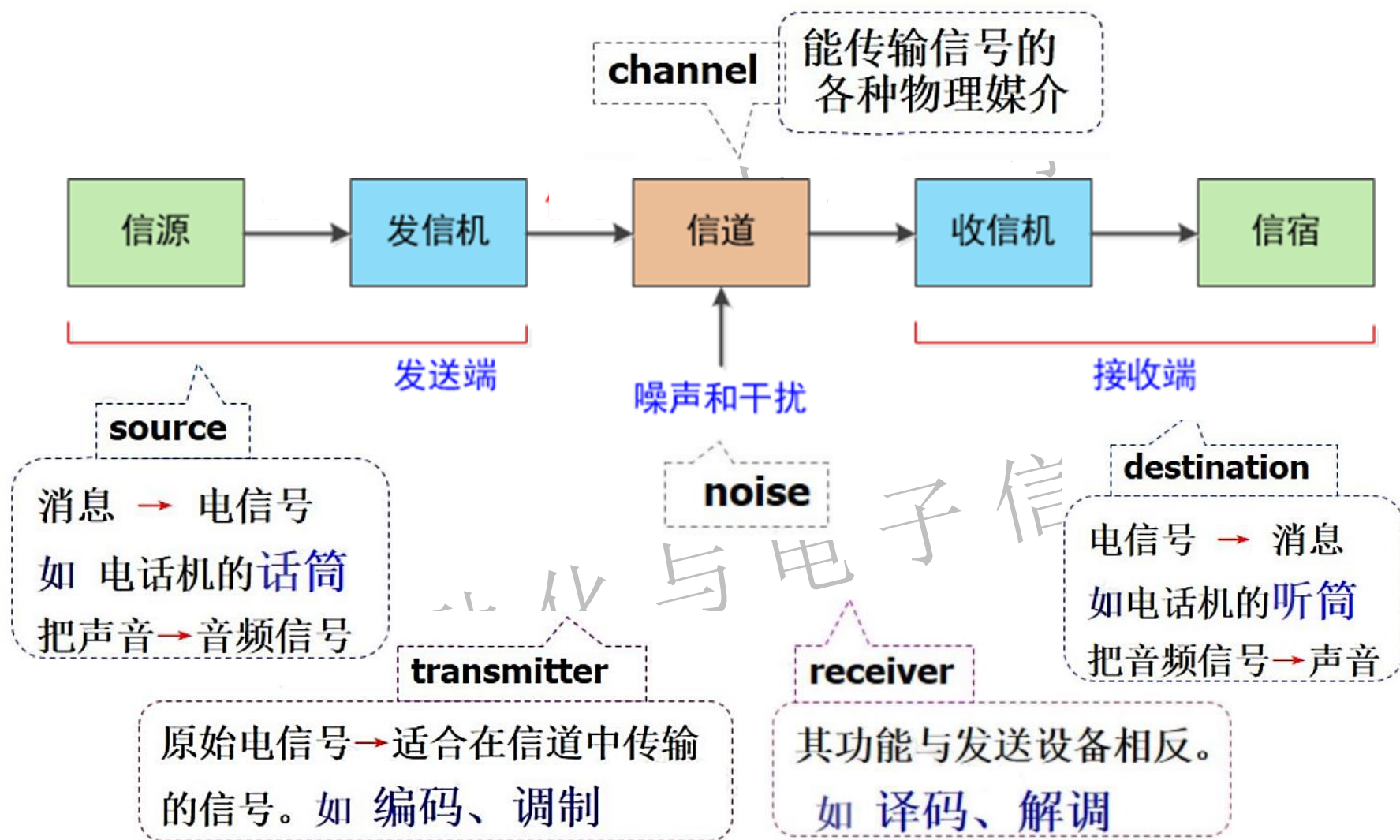
博学笃行 明德日新

## § 1.2.1 通信系统的一般模型

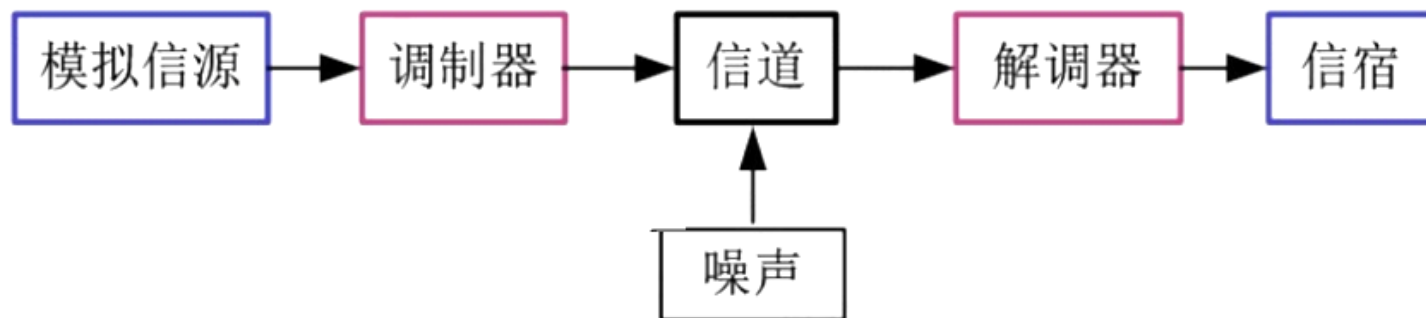




## § 1.2.1 通信系统的一般模型



## § 1.2.2 模拟通信系统模型

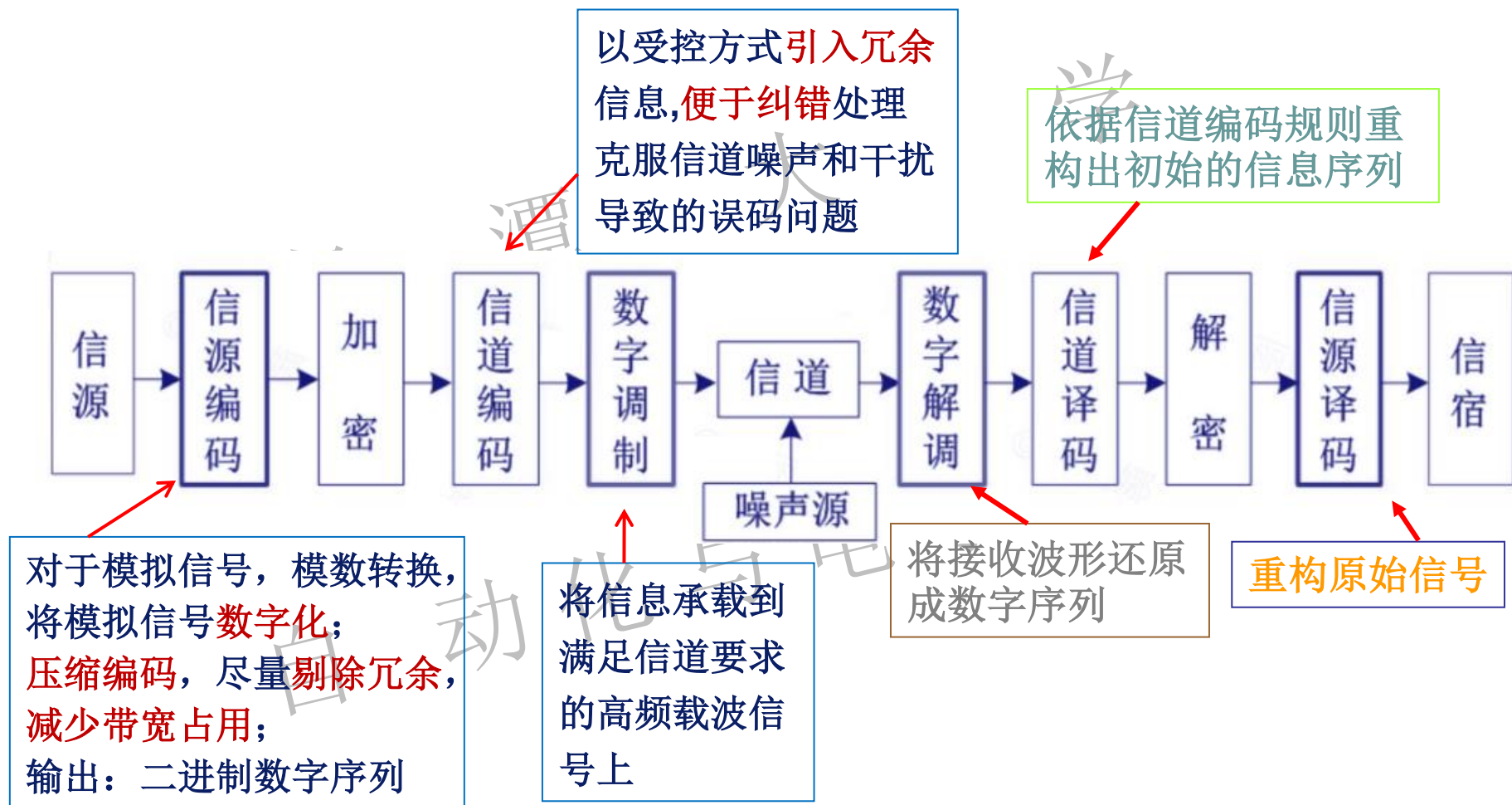


两对重要变换：

模拟消息（连续消息） $\longleftrightarrow$  原始电信号（基带信号）

基带信号 $\longleftrightarrow$  已调信号（频带信号、带通信号）

## § 1.2.3 数字通信系统模型



## § 1.2.3 数字通信系统模型

### 优点：

- 抗干扰能力强，通过再生可消除噪声积累。
- 传输差错可控，改善传输质量。
- 易于与各种数字终端接口，易于处理、存储、交换和利用计算机进行管理和采用现代数字处理技术。
- 易于集成，小型化、微型化，功耗低，灵活通用。
- 易于加密，实现保密通信。

### 缺点：

- 占用频带宽，频带利用率低；
- 对同步要求高，设备复杂。



# 第1章 绪论

学

1.1  
1.2

通信的基本概念

通信系统模型

1.3 通信系统分类与通信方式

1.4 信息及其度量

1.5 通信系统主要性能指标



博学笃行 明德日新

## § 1.3.1 通信系统的分类

按信道中传输信号特征	按传输媒质分类	按通信业务分类	按传输方式分类	按传输信号复用方式	按工作波段分类
<ul style="list-style-type: none"><li>• 模拟通信系统</li><li>• 数字通信系统</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• 有线</li><li>• 无线</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• 电话</li><li>• 数据</li><li>• 图像</li><li>• .....</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• 基带传输</li><li>• 带通传输</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• FDM(频分)</li><li>• TDM(时分)</li><li>• CDM(码分)</li><li>• SDM(空分)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• 长波</li><li>• 中波</li><li>• 短波</li><li>• .....</li></ul>

**注：** 同一个通信系统可以分属于不同分类。

例：AM广播系统：中短波通信、模拟通信、带通传输系统（调制系统）



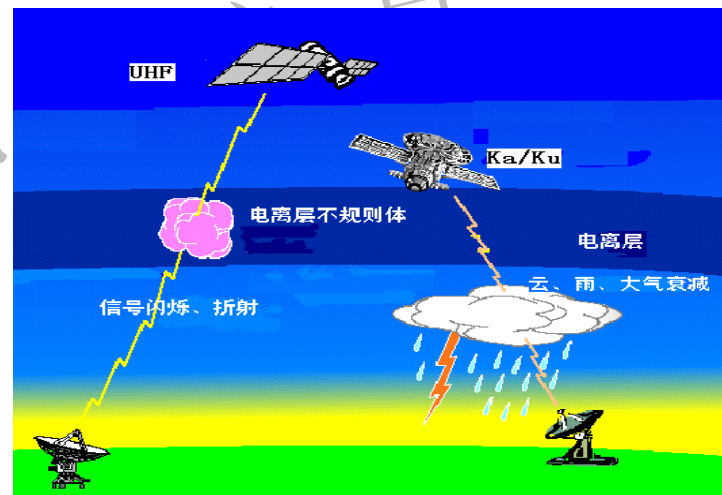
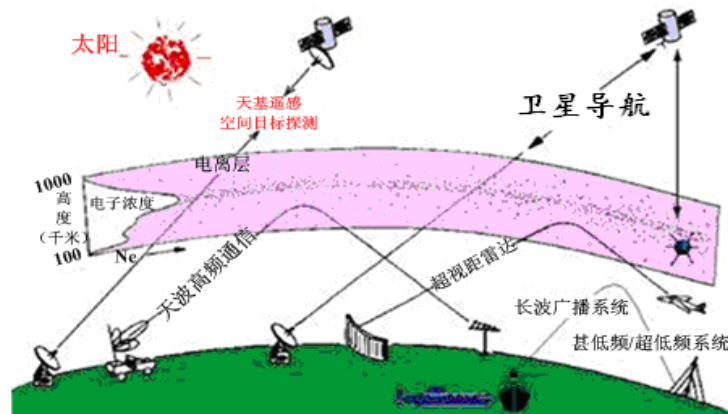
## § 1.3.1 通信系统的分类

### 无线电通信 按工作波段分类

序号	频段名称	频段范围	波段名称	波长范围
1	极低频 (ELF)	3Hz—30Hz	极长波	10000km—100000km
2	超低频 (SLF)	30Hz—300Hz	超长波	1000km—10000km
3	特低频 (ULF)	300Hz—3000Hz	特长波	100km—1000km
4	甚低频 (VLF)	3kHz—30kHz	甚长波	10km—100km
5	低频 (LF)	30kHz—300kHz	长波	1km—10km
6	中频 (MF)	3000kHz—3MHz	中波	100m—1000m
7	高频 (HF)	3MHz—30MHz	短波	10m—100m
8	甚高频 (VHF)	30MHz—300MHz	超短波 (米波)	1m—10m
9	特高频 (UHF)	300MHz—3GHz	分米波	微波 10cm—100cm 1cm—10cm 1mm—10mm
10	超高频 (SHF)	3GHz—30GHz	厘米波	
11	极高频 (EHF)	30GHz—300GHz	毫米波	
12	至高频 (THF)	300GHz—3THz	亚毫米波	0.1mm—1mm

# § 1.3.1 通信系统的分类

频段名称	主要传播方式	业务分配
超低频（超长波） 30 Hz-300 Hz	地面-电离层波 导传播	长波电台、水 下潜艇通信
甚低频（甚长波） 3 Hz - 30 kHz	地波、天波、地 面-电离层波导	远距离通信； 地下水下通信
低频（长波） 30 kHz-300 kHz	地波、天波	无线电通信
中频（中波） 0.3 MHz - 3 MHz	地波、天波	近距离广播
高频（短波） 3 MHz-30 MHz	地波（低频端）、 天波	国际广播；航 空、航海通信
甚高频（米波） 30 MHz-300 MHz	对流层、电离层 散射传播	调频广播；电 视广播
超高频（分米波） 300 MHz-3GHz	视距传播；对流 层散射传播；行 星际空间传播	公共移动通信； 卫星通信
特高频（厘米波） 3 GHz-30 GHz		
极高频（毫米波） 30 GHz-300 GHz		



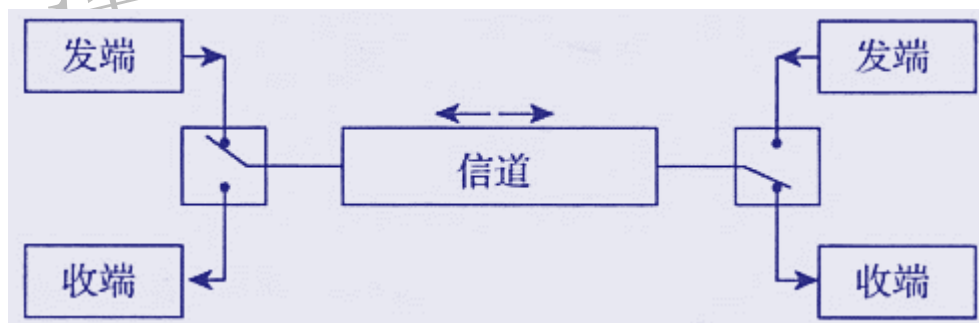
## § 1.3.2 通信方式

### 按传输方向与时间的关系分类

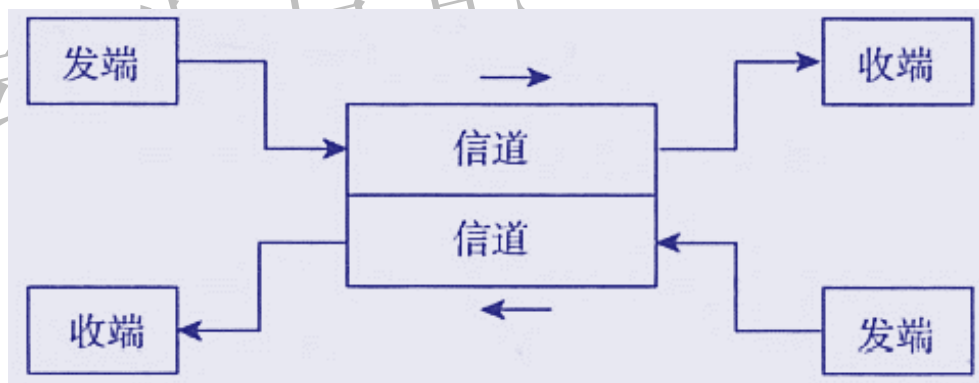
单工通信：  
(单向)



半双工通信：  
(双向，不同时)

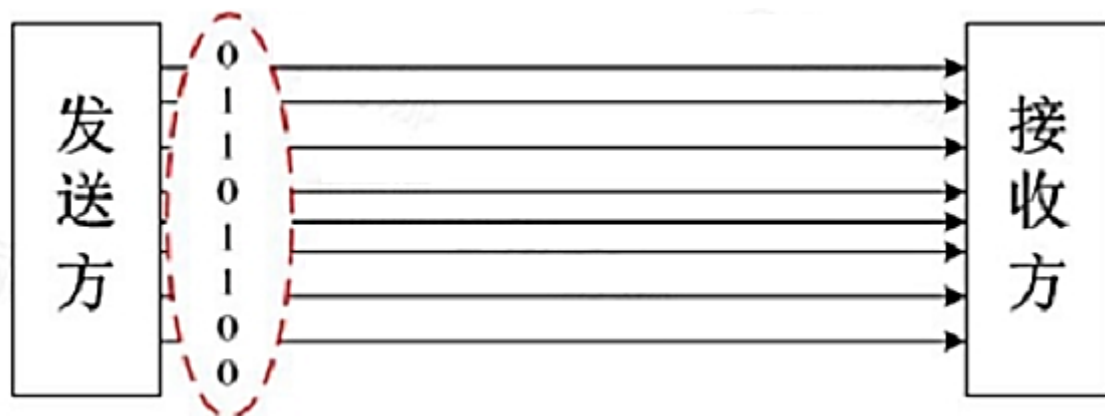


双工通信：  
(双向，同时)



## § 1.3.2 通信方式

### 并行传输和串行传输



**优点:** 节省传输时间, 速度快;

**缺点:** 需要  $n$  条通信线路, 成本高;

**应用:** 计算机和打印机之间的数据传输



**优点:** 成本低, 只需一条通信信道;

**缺点:** 速度慢, 需要外加同步措施。

**应用:** 远距离的通信。



# 第1章 绪论

学

- 1.1 通信的基本概念
- 1.2 通信系统模型
- 1.3 通信系统分类与通信方式
- 1.4 信息及其度量
- 1.5 通信系统主要性能指标



博学笃行 明德日新



## § 1.4 信息及其度量

- 通信系统的主要任务是传输信息。信源产生的是消息。消息中包含信息
- 消息是信息的具体形式，其出现是随机的，无法预知的。
- 信息是消息的本质内容，是抽象的。
- 消息：信息的物理表现形式，即符号、文字、语音、图像等。
- 信息：消息的内涵，即消息中所包含的对接收者来说事先不知道的内容。

对被传输消息中所包含的信息进行定量测量——引入**信息量**的概念

**信息量**：衡量消息中所包含信息多少的一个物理量

如何度量**消息**中所含的  
信息量



## § 1.4 信息及其度量

如何度量消息中所含的信息量

原则：

- 度量方法与消息的种类无关
- 与消息的重要程度无关

举例：

- 某客机坠毁
- 明天下雨

哪个信息量大？

可见：① 消息中所含信息量与不可预测性或不确定性有关；  
② 消息出现的概率越小，消息携带的信息量就越多；  
③ 相互独立的消息数量越多，携带的信息量就越多。

$$P \rightarrow 1, I \rightarrow 0; \quad P \rightarrow 0, I \rightarrow \infty$$

$$P(x) < P(y), \quad I(x) > I(y)$$

## § 1.4 信息及其度量

哈特莱首先提出采用消息出现的概率的对数测度定义信息量。

$$I = I\{P(x)\} = \log_a \frac{1}{P(x)} = -\log_a P(x)$$

- $a = 2$ ，信息量单位是比特（bit）记b；
- $a = e$ ，信息量单位是奈特（nat）；
- $a = 10$ ，信息量单位是哈特莱（H）；

$$1 \text{ nat} = 1.44 \text{ b}$$

对于离散信源，M个波形等概发送，且每一个波形的出现是独立的，则传送M进制波形之一的信息量为

$$I = \log_2 \frac{1}{P} = \log_2 M (\text{bit})$$

## § 1.4 信息及其度量

【例】 对二进制信源 (0, 1) 和四进制信源 (0, 1, 2, 3)  
试求：等概率发送符号时，每个符号的信息量。

解： 对二进制信源  $P(0) = P(1) = 1/2$

$$I_0 = I_1 = \log_2 2 = 1\text{b}$$

对四进制信源  $P(0) = P(1) = P(2) = P(3) = 1/4$

$$I_0 = I_1 = I_2 = I_3 = \log_2 4 = 2\text{b}$$

评注

概率相同，每个符号蕴含的信息量也相同；

二进制的每个码元含 1 (b)

四进制的每个码元含 2 (b)

M进制的每个码元含  $\log_2 M$  (b)

## § 1.4 信息及其度量

### 离散信源的统计特性

若一离散信源产生N种不同的符号，

$$\begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \cdots & x_n \\ P(x_1) & P(x_2) & \cdots & P(x_n) \end{bmatrix} \quad \text{且} \quad \sum_{i=1}^n P(x_i) = 1$$

则统计独立的 N 个符号的离散信源的平均信息量为

$$H = \sum_{i=1}^n P(x_i) \log_2 \frac{1}{P(x_i)} \quad (\text{bit/symbol})$$

类比于热力学的熵，H称为**信源的熵**

$$S = k \ln \Omega$$

熵是系统内分子热运动混乱性或无序性的一种度量

## § 1.4 信息及其度量

【例】 对四进制信源 (0, 1, 2, 3) ,  
 $P(0)=3/8$ ,  $P(1)=P(2)=1/4$ ,  $P(3)=1/8$ ,  
试求信源的平均信息量。

解:

$$H = \sum_{i=1}^M p(x_i) \log_2 \frac{1}{p(x_i)} \quad I_i = \log_2 \frac{1}{P(x_i)}$$

$$H = P(0)I_0 + P(1)I_1 + P(2)I_2 + P(3)I_3 = 1.906 \text{ (b/符号)}$$

前面可知：概率相同， $H=2$  (b/符号)

等概时，熵最大：

$$H_{\max} = \log_2 M$$

## § 1.4 信息及其度量

【例】一离散信源由0, 1, 2, 3四个符号组成, 它们出现的概率分别为  $3/8$ ,  $1/4$ ,  $1/4$ ,  $1/8$ , 且每个符号的出现都是独立的。试求某消息 201020130213001203210100321010023102002010312032100120210 的信息量。

解: 方法1, 利用信息的相加性

0: 23次, 1: 14次, 2: 13次, 3: 7次, 共57个符号

$$I = \sum_{i=1}^4 n_i \log_2 \frac{1}{P(x_i)} = 23 \log_2 \frac{8}{3} + 14 \log_2 4 + 13 \log_2 4 + 7 \log_2 8 = 108.55(\text{bit})$$

方法2, 利用信源的熵

$$H = \sum_{i=1}^n P(x_i) \log_2 \frac{1}{P(x_i)} = \frac{3}{8} \log_2 \frac{8}{3} + \frac{1}{4} \log_2 4 + \frac{1}{4} \log_2 4 + \frac{1}{8} \log_2 8 = 1.906(\text{b/符号})$$

$$I = 57 \times H = 57 \times 1.906 = 108.64(\text{b})$$

一条由 $m$ 个符号构成的消息, 其信息量为  $I = mH$





# 第1章 绪论

学

- 1.1 通信的基本概念
- 1.2 通信系统模型
- 1.3 通信系统分类与通信方式
- 1.4 信息及其度量
- 1.5 通信系统主要性能指标**

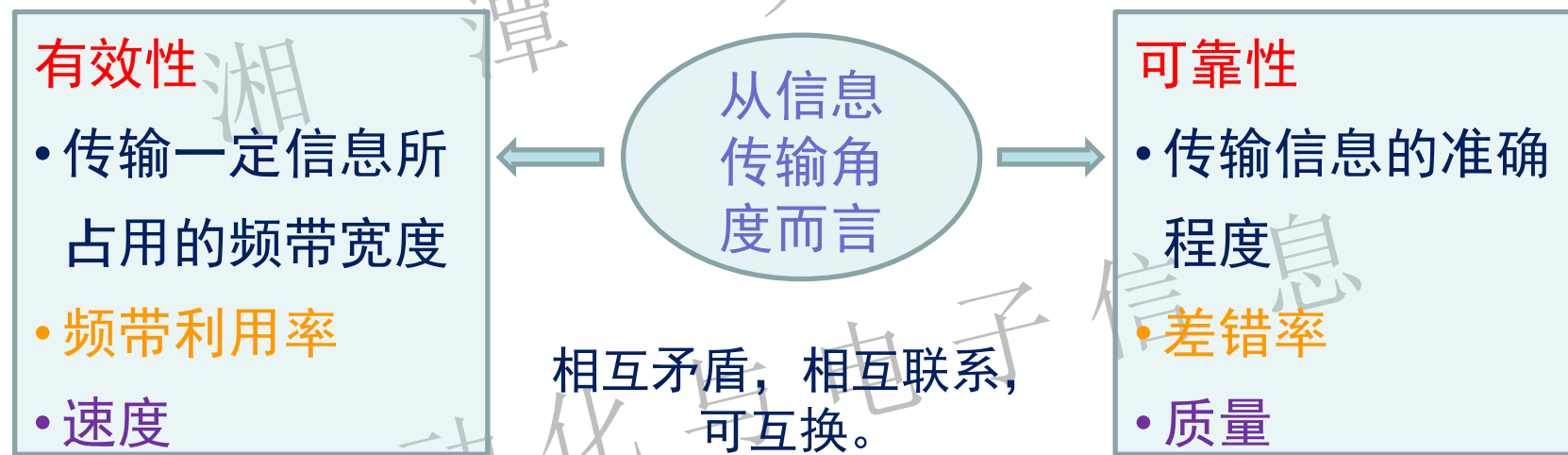


博学笃行 明德日新

## § 1.5 通信系统主要性能指标

通信系统中常用的性能指标有：

有效性，可靠性，适应性，经济性，保密性，标准性，维修性和工艺性等。



### 1. 模拟通信系统

- ① 有效性：有效传输频带
- ② 可靠性：接收端最终的输出信噪比

### 2. 数字通信系统

- ① 有效性：码元传输速率/信息传输速率/频带利用率
- ② 可靠性：误码率/误信率

## § 1.5.1 有效性指标

(1) 码元传输速率 $R_B$ （简称传码率、波特率、符号速率）

- 定义：单位时间内传输码元的数目，
- 单位：波特（Baud），记B
- 计算：若一个码元持续时间为 $T_s$ ，则

$$R_{Bd} = \frac{1}{T_s} \quad (B)$$

**注：**码元速率与进制无关，只与码元长度 $T_s$ 有关

**【例】**1秒内传输1000个码元，则 $R_B = 1000\text{Baud}$

## § 1.5.1 有效性指标

### (2) 信息传输速率 $R_b$ (传信率、比特率)

- 定义：单位时间内传输的平均信息量或比特数，
- 单位：比特/秒，记bit/s, b/s, bps

每个码元或符号通常都含有一定比特数的信息量，因此码元速率和信息速率有确定的关系 · · ·

$H$ 为纽带

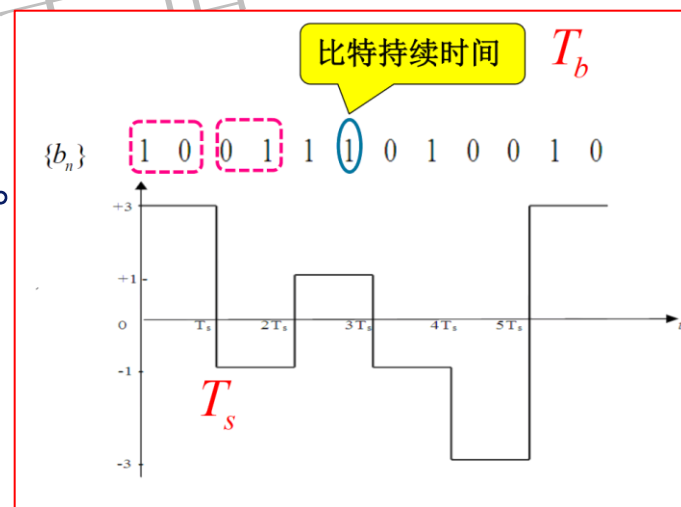
若信源的码元速率为 $R_B$ ，熵为 $H$ ，则该信源的平均信息速率为

$$R_b = R_B \cdot H \quad (\text{bps})$$

$H$ 为信源中每个符号所含的平均信息量。

独立等概时：  $R_b = R_B \log_2 M$  (bps)

$M = 2$ 时，  $R_b = R_B$



## § 1.5.1 有效性指标

### (3) 频带利用率 $\eta$

衡量在一定传输速率下，所占用的信道的频带宽度  
把带宽和传输速率联系起来

定义：单位频带内码元传输速率

$$\eta = \frac{R_{Bd}}{B} \quad (\text{Bd/Hz})$$

或单位频带内信息传输速率

$$\eta_b = \frac{R_b}{B} \quad (\text{b/(s} \cdot \text{Hz)})$$

## § 1.5.2 可靠性指标

误码率 $P_e$ （码元差错率）

$$P_e = \frac{\text{错误码元数}}{\text{传输总码元数}}$$

误信率 $P_b$ （信息差错率）

$$P_b = \frac{\text{错误比特数}}{\text{传输总比特数}}$$

$P_e$ 与 $P_b$ 的关系

- 二进制—— $P_e = P_b$
- $M$ 进制—— $P_e > P_b$



# 小 结

- ※ 通信系统的组成及各部分功能
- ※ 通信系统的分类与通信方式
- ※ 信息及其度量
- ※ 通信系统的主要性能指标

自动化与电子信息