

信息与电子工程导论

Introduction to Information Science and Electronic Engineering

1 信息与信息技术概述

章献民 主编

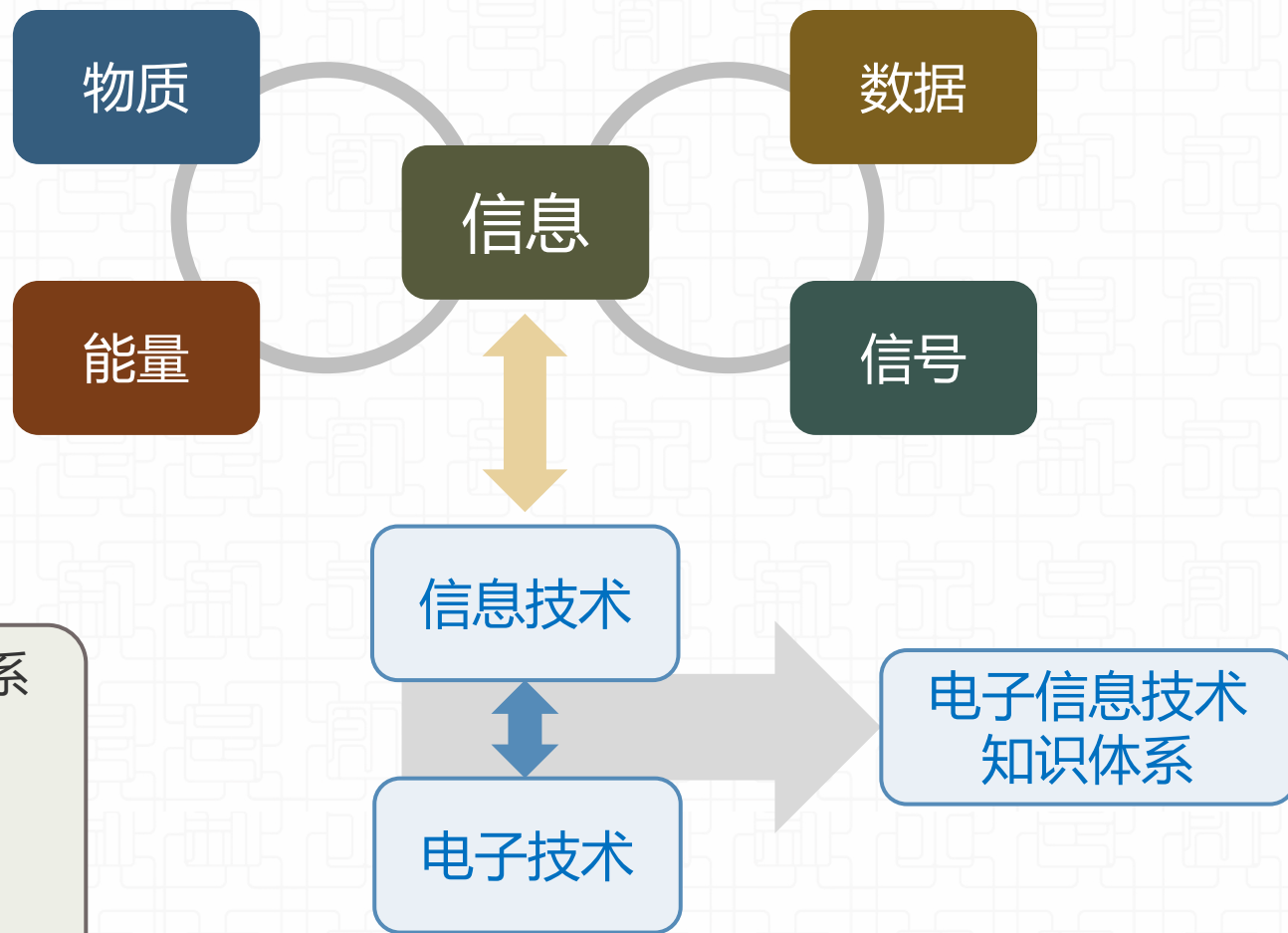
浙江大学出版社

2023年9月

内容提要

- ❖ 信息
- ❖ 信息科学技术概述
- ❖ 知识图谱

- ✓ 思考什么是信息？信息与物质和能量的关系
- ✓ 理解信息、数据与信号的关系
- ✓ 了解电子技术和信息技术的关系
- ✓ 知晓电子信息科学与技术知识体系



什么是信息？

- ❖ 信息是对客观世界中各种事物的**运动状态和变化**的反映，是客观事物之间**相互联系**和**相互作用的**表征，表现的是客观事物运动状态和变化的实质内容。
- ❖ 从本质上看信息是对社会、自然界的事物特征、现象、本质及规律的描述。
- ❖ **信息无处不到，无处不有**
 - 自从有了人类，在人们的生产和生活中，就有了信息交流。
 - 信息交流方式的演变，推动着人类信息活动的发展，导致了人类社会的一次次飞跃。

Information

- ❖ “信息”一词在英文、法文、德文、西班牙文中均是 “**information**”，表示音讯、资讯、消息、通知、情报等。
- ❖ 作为科学术语最早出现在贝尔实验室研究工程师**哈特莱**发表于1928 年的 “Transmission of Information” 一文中，他认为信息是指**新内容、新知识的消息**。
- ❖ 迄今为止，许多研究者分别从语言学、哲学、自然科学等不同研究领域出发，给出了不同的定义。

R. V. L. Hartley, Transmission of information, *Bell System Technical Journal*, 7:536, July 1928.



Ralph Vinton Lyon Hartley
Nov 30, 1888—May 1, 1970

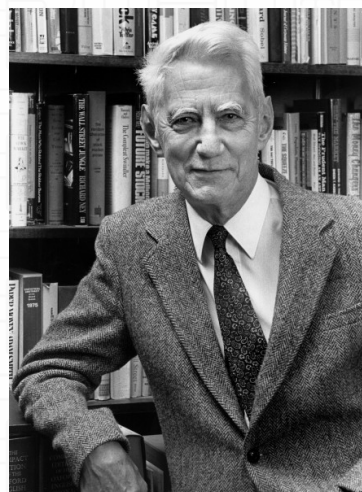
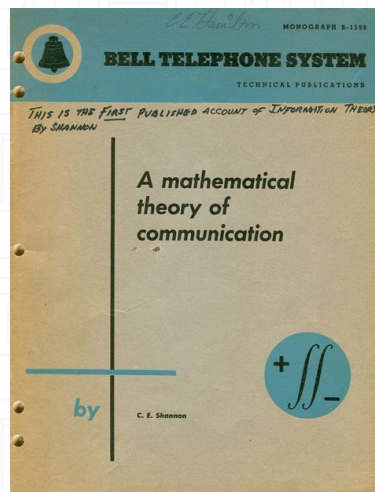
Transmission of Information¹

By R. V. L. HARTLEY

SYNOPSIS: A quantitative measure of “information” is developed which is based on physical as contrasted with psychological considerations. How the rate of transmission of this information over a system is limited by the distortion resulting from storage of energy is discussed from the transient viewpoint. The relation between the transient and steady state viewpoints is reviewed. It is shown that when the storage of energy is used to restrict the steady state transmission to a limited range of frequencies the amount of information that can be transmitted is proportional to the product of the width of the frequency-range by the time it is available. Several illustrations of the application of this principle to practical systems are included. In the case of picture transmission and television the spacial variation of intensity is analyzed by a steady state method analogous to that commonly used for variations with time.

信息量的概念

- ❖ 1948年，贝尔实验室数学家**克劳德·艾尔伍德·香农**发表题为“A Mathematical Theory of Communication”的论文，提出信息量的概念
- ❖ 认为信息是“**用来消除随机不确定性的东西**”
- ❖ 香农用**不确定性**度量定义信息：
 - 一个消息的可能性愈小，其信息愈多；而消息的可能性愈大，则其信息愈少。
 - 事件出现的概率小，不确定性越多，信息量就大，反之则少。
 - 通常，你对某件事知道得越少，则存在的不确定性就越大，而你得到的信息假如能使不确定性消除得越多，你所获得的信息量就越大。



Claude Elwood Shannon
Apr 30, 1916—Feb 26, 2001

C. E. Shannon, A mathematical theory of communication, *Bell System Technical Journal*, 27:379-423, 623-656, July, October, 1948.

自信息量

❖ 自信息量是用来描述某一条信息（本身）的大小，度量事件 A 的发生所提供的信息可表示为

$$I(A) = -\log_2 p(A)$$

概率越小，信息量越大

$p(A)$ 为事件 A 的概率， $p(A) \leq 1$

❖ 当对数的底取 2 时，单位为**比特(bit)**，含义是用多少位二进制数能衡量该信息的大小。

❖ 如 $p(A) = 1/2$ ，则 $I(A) = 1 \text{ bit}$

❖ **1 比特信息**，就是在**两个**出现概率相等的可能选择中做出决策时所需的信息量。

❖ 目前的数字电子系统都是以二电平逻辑来工作的，因此，以 2 为底的信息量单位“比特”是信息度量的基本单位。

“谁获得了冠军”——如何度量这条信息？

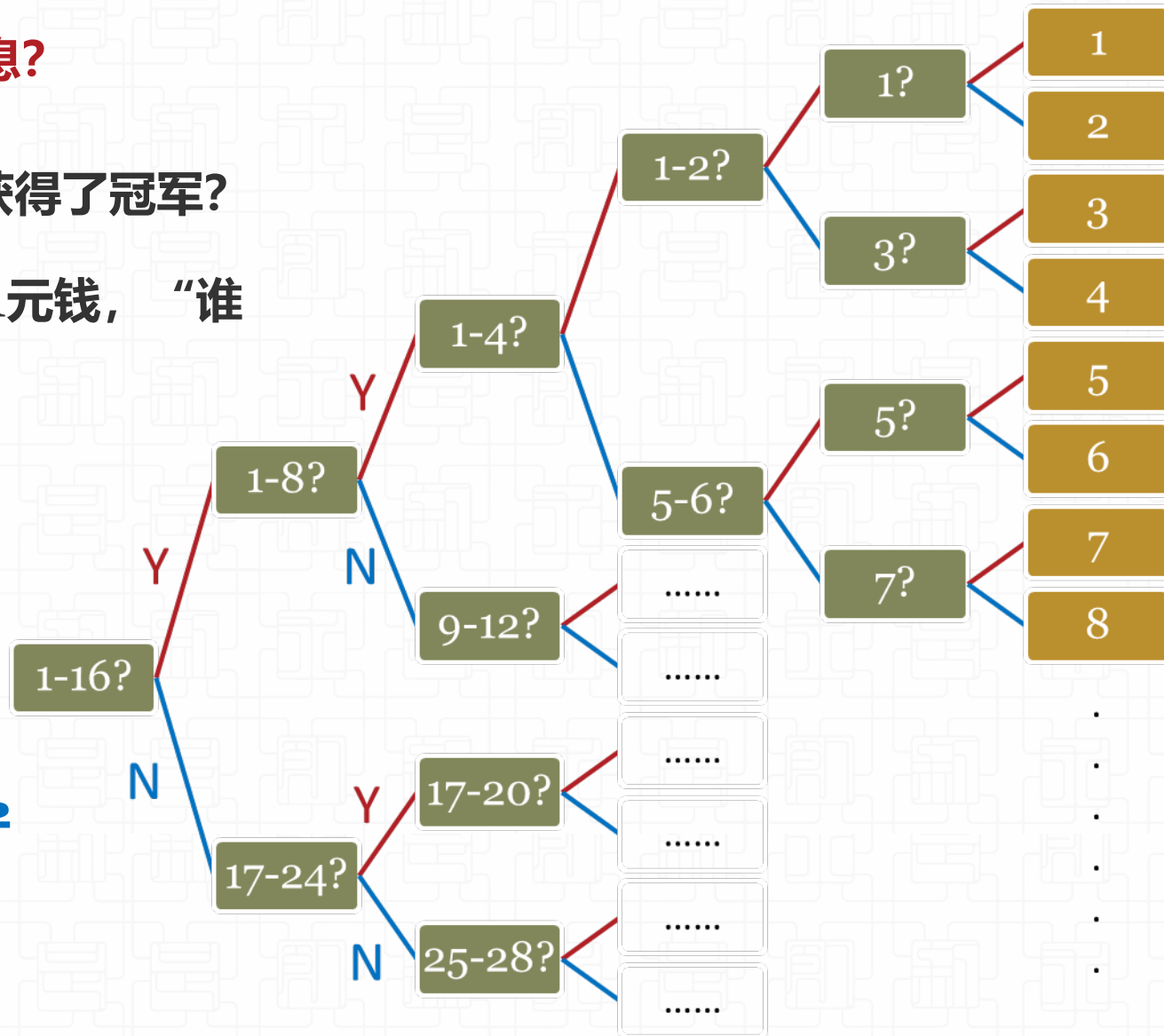
- ❖ 32支球队参加了比赛，想知道哪支球队获得了冠军？
- ❖ 只需猜5次就可猜到。如果猜一次需支付1元钱，“谁是冠军”这条信息量值5元钱。

- ❖ 香农用“比特”来度量信息，5比特

$$\log_2 32 = 5$$

- ❖ 假定每支球队获胜的概率相同，均为 $1/32$

$$-\log_2 \frac{1}{32} = 5$$



信息量具有可加性

- ❖ 若干个独立事件所含的信息量等于每个独立事件所含信息量之和
- ❖ 对于独立事件 x_1, x_2, \dots, x_n , 发生的概率分别为 $p(x_1), p(x_2), \dots, p(x_n)$, 则这些独立事件同时发生的自信息量为

$$I \left[\prod_{i=1}^n p(x_i) \right] = \sum_{i=1}^n I(x_i)$$

- ❖ 由概率论可知, 独立事件同时发生的概率等于各独立事件发生的概率之积, 积的对数等于乘数与被乘数之和, 这便是信息可加性的理论依据。

例：信息量计算

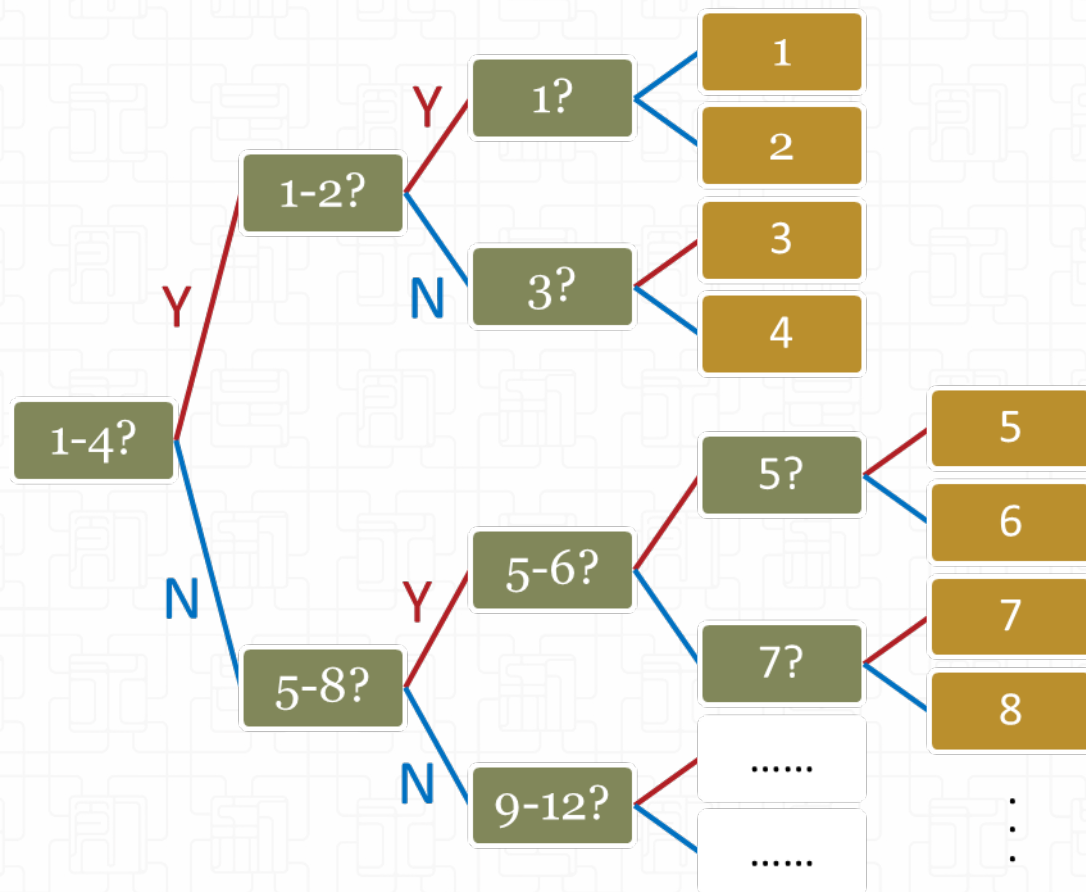
- ❖ 小明不知道某道选择题该选A、B、C、D 哪个选项时，小红告诉小明 “D 选项是错的”，提供了多少信息量？
 - 不确定性从 $-\log_2(1/4)$ 减少为 $-\log_2(1/3)$ ，提供了 $2 - 1.585 = 0.415$ bit 的信息量。
- ❖ 再告诉小明 “A 选项是错的”，又提供了多少信息量？
 - 不确定性从 $-\log_2(1/3)$ 减少为 $-\log_2(1/2)$ ，提供了 $1.585 - 1 = 0.585$ bit 的信息量。
- ❖ 最后再告诉小明 “B 选项是错的” 的信息量又是多少？
 - 不确定性从 $-\log_2(1/2)$ 减少为 0，提供了 1 bit 的信息量。

“谁获得了冠军”——信息量可能<5bit?

- ❖ 每支球队夺冠的**概率**不一样。
- ❖ 把少数支最有可能的球队分成一组，其他球队分成另一组，猜冠军球队是否在那几支热门球队中。
- ❖ 或许猜**3、4次**就猜出结果了。
- ❖ 香农指出，它的准确信息量应为：

$$H = -(p_1 \log_2 p_1 + p_2 \log_2 p_2 + \cdots + p_{32} \log_2 p_{32})$$

- ❖ 香农称之为“**信息熵**”



信息熵 (香农熵)

❖ 香农借用热力学中“熵”的概念，提出“信息熵”来解决信息的度量问题。

- 一个事件或一个系统，准确的说是一个随机变量，它有着一定的不确定性。变量的不确定性越大，需要引入消除不确定性的信息量越多，则信息熵越高，反之则越低。

❖ 假设系统 S 内存在多个事件 E_1, E_2, \dots, E_n ，每个事件的概率分别为 p_1, p_2, \dots, p_n ，则这些事件的自信息的平均值

$$H_S = \sum_{i=1}^n p_i I(E_i) = - \sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i$$

❖ 信息熵是接收的每条消息中包含的信息的平均量，也称平均自信息量。

信息量等于传输该信息所用的代价

❖ 这也是通信中考虑最多的问题。

❖ **比如**我们要衡量一篇英语文章的信息熵，对于任意一篇文章来说，每个字母出现的频率是不同的，如果26个字母出现的概率分别为 p_1, p_2, \dots, p_{26} ，则信息熵为

$$H = -(p_1 \log_2 p_1 + p_2 \log_2 p_2 + \dots + p_{26} \log_2 p_{26})$$

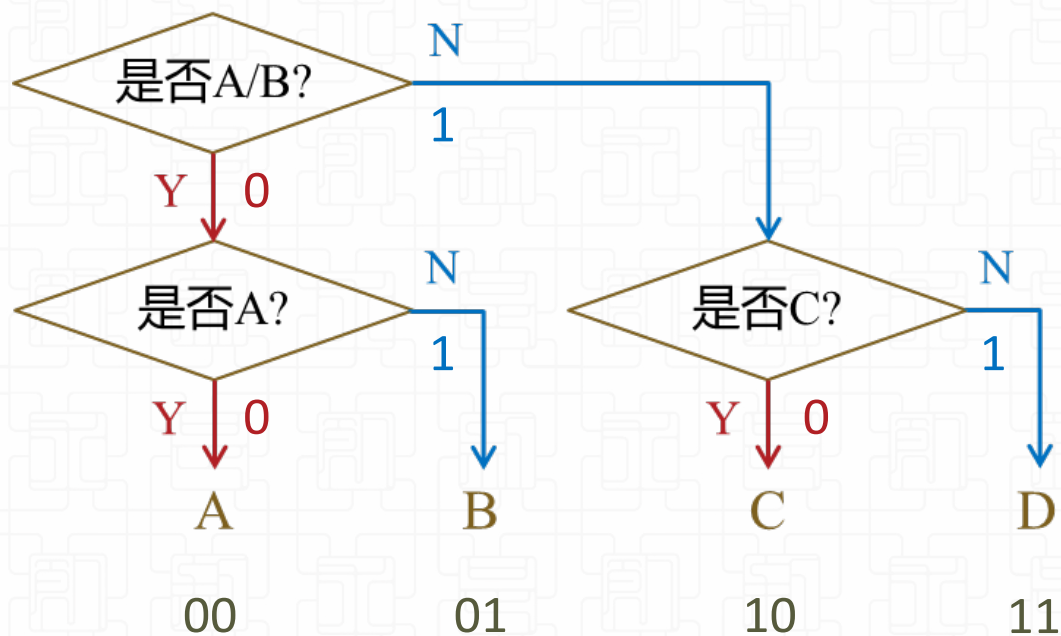
❖ 英文的信息熵是 4.03 bit，法语是 3.98 bit，西班牙语是 4.01 bit，德语是 4.10 bit，俄文是 4.8 bit，而中文的信息熵高达 9.65 bit

❖ **比如**赌马比赛，有4匹马 A、B、C、D，获胜概率分别为 $1/2$ 、 $1/4$ 、 $1/8$ 、 $1/8$ ，则信息熵为

$$H = -\frac{1}{2} \log_2 \left(\frac{1}{2} \right) - \frac{1}{4} \log_2 \left(\frac{1}{4} \right) - \frac{1}{8} \log_2 \left(\frac{1}{8} \right) - \frac{1}{8} \log_2 \left(\frac{1}{8} \right) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{3}{8} + \frac{3}{8} = 1.75 \text{ bit}$$

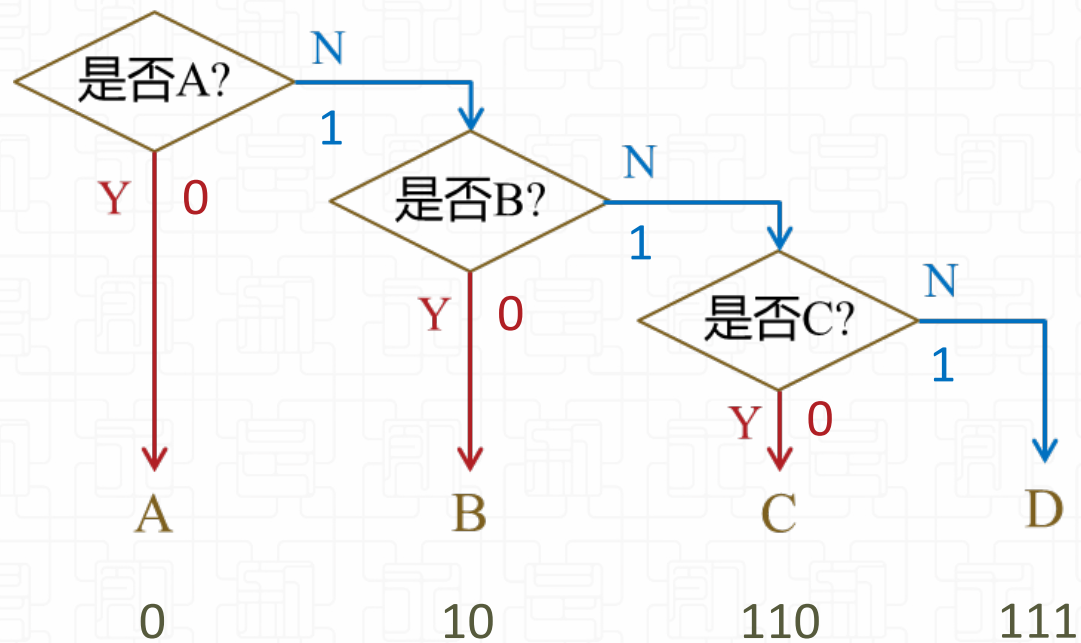
信息熵和二进制编码

等长编码



平均码长 2 bit

不等长编码



平均码长

$$1 \times \frac{1}{2} + 2 \times \frac{1}{4} + 3 \times \frac{1}{8} + 3 \times \frac{1}{8} = 1.75 \text{ bit}$$

例：信息熵计算

❖ 某离散信源由0、1、2、3四个符号组成，它们出现的概率分别是 $3/8$ 、 $1/4$ 、 $1/4$ 、 $1/8$ ，且每个符号的出现都是独立的。试求消息序列“201020130213001203210100321010023102002010312032100120210”的信息量。

解：用信息熵（平均信息量）的概念来计算

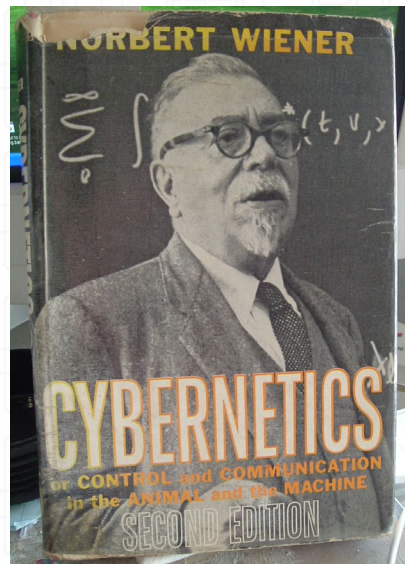
$$H = -\frac{3}{8} \times \log_2 \left(\frac{3}{8} \right) - \frac{1}{4} \times \log_2 \left(\frac{1}{4} \right) - \frac{1}{4} \times \log_2 \left(\frac{1}{4} \right) - \frac{1}{8} \times \log_2 \left(\frac{1}{8} \right) = 1.906 \text{ bit/symbol}$$

此消息序列长度为57个符号，则该消息的信息量为

$$I = 57 \times 1.906 = 108.64 \text{ bit}$$

信息就是信息，不是物质也不是能量

- ❖ 维纳在1948年出版的专著《控制论：或关于在动物和机器中控制和通信的科学》(*Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*)中指出：
- ❖ 信息是人们在适应外部世界，并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和名称
- ❖ 信息就是信息，不是物质也不是能量



Norbert Wiener
Nov 26, 1894—Mar 18, 1964

世界三要素：物质、能量、信息

❖ 物质、能量和信息在一切系统中是三足鼎立的关系，缺一不可。

❖ 信息与物质：

- 物质是信息的载体，物质的运动是信息的源泉。
- 信息是物质运动状态和状态改变方式的表现形式。

❖ 信息与能量：

- 能量是事物做功的本能，也是事物运动的源泉。
- 事物的运动状态通过信息表现出来。
- 传递信息需要能量，驾驭能量需要信息。

❖ 任何事物总是物质、能量、信息三者共存。

❖ 物质和能量是客观存在的、有形的，
信息是抽象的、无形的。

❖ 物质和能量是系统的“躯体”，
信息是系统的“灵魂”。

❖ 信息要借助于物质和能量才能产生、
传输、存储、处理和感知；物质和
能量要借助于信息来表述和控制。

以生命体为例

❖ 生命体都是在进行着物质代谢、能量循环和信息流动三个过程。

❖ 物质代谢

- 摄入各种食物和水无机盐等，然后在体内或者同化成身体组成，或者最终排出体外，或者极少部分滞留体内。

❖ 能量循环

- 从自然界摄入的食物里面的化学能转变成热能等生命体需要的能量，然后再进入自然界。

❖ 信息流动

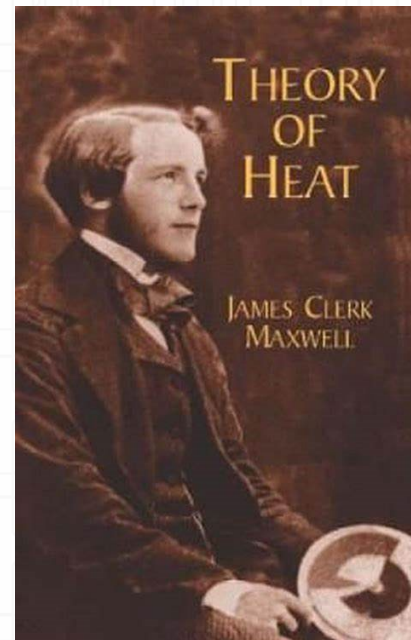
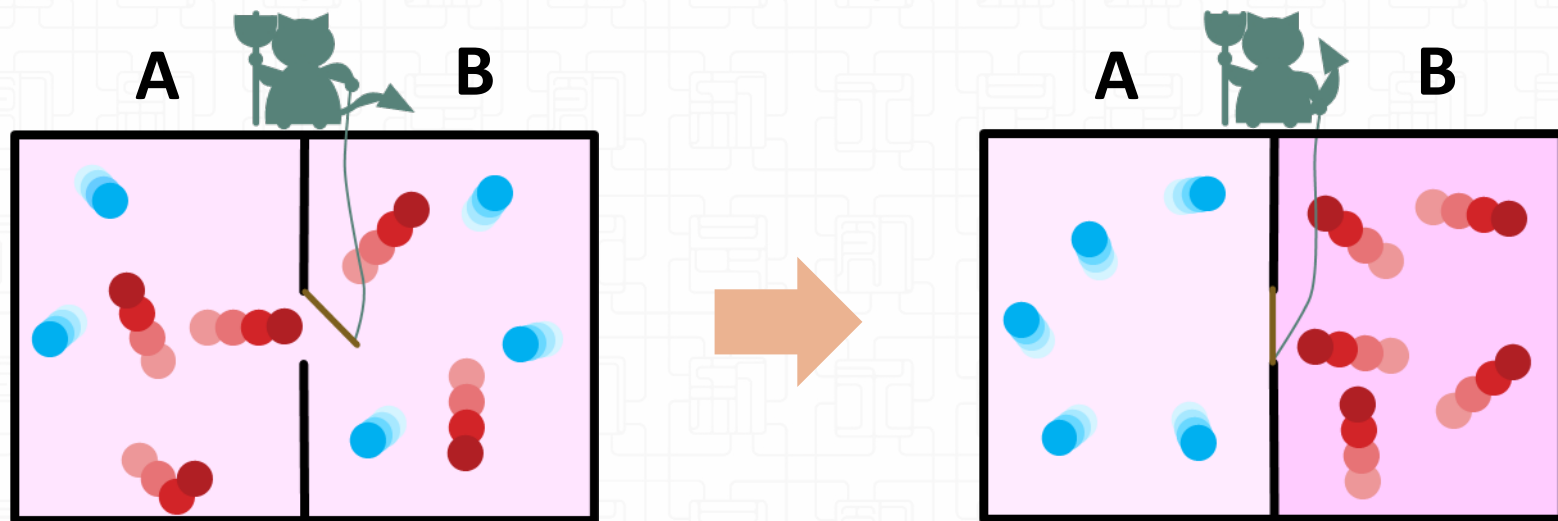
- 五官感受身边的信息，然后指挥身体动作或者交给大脑思考。

❖ 没有物质，世界便虚无飘渺

❖ 没有能量，物质就静止呆滞

❖ 没有信息，物质和能量既无从认识，也毫无用处

麦克斯韦妖问题——预示着信息与能量间的关系



James Clerk Maxwell
Jun 13, 1831—Nov 5, 1879

- ❖ 最早出现在1867年麦克斯韦和彼得·泰特的一次书信往来中，并在1872年出版的 *Theory of Heat* 一书中发表。
- ❖ 这个悖论和热力学第二定律有关，暗示了热力学和信息之间的联系。

热力学第二定律

❖ 1850年，德国数学家克劳修斯：

- 不可能把热量从低温物体传向高温物体而不引起其它变化。

❖ 1851年，英国物理学家开尔文：

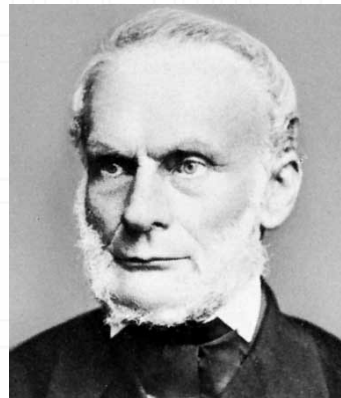
- 不可能制成一种循环动作的热机，从单一热源取热，使之完全变为功而不引起其它变化。

❖ 1865年，克劳修斯提出熵 (entropy) 的概念

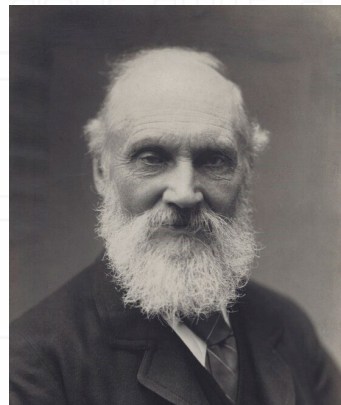
- Entropy源自希腊语的“转换” (τροπή, tropē)
- **en= in** + trope = a turning (point)

❖ 熵增加原理

- 孤立系统的熵永不自动减少，熵在可逆过程中不变，在不可逆过程中增加。

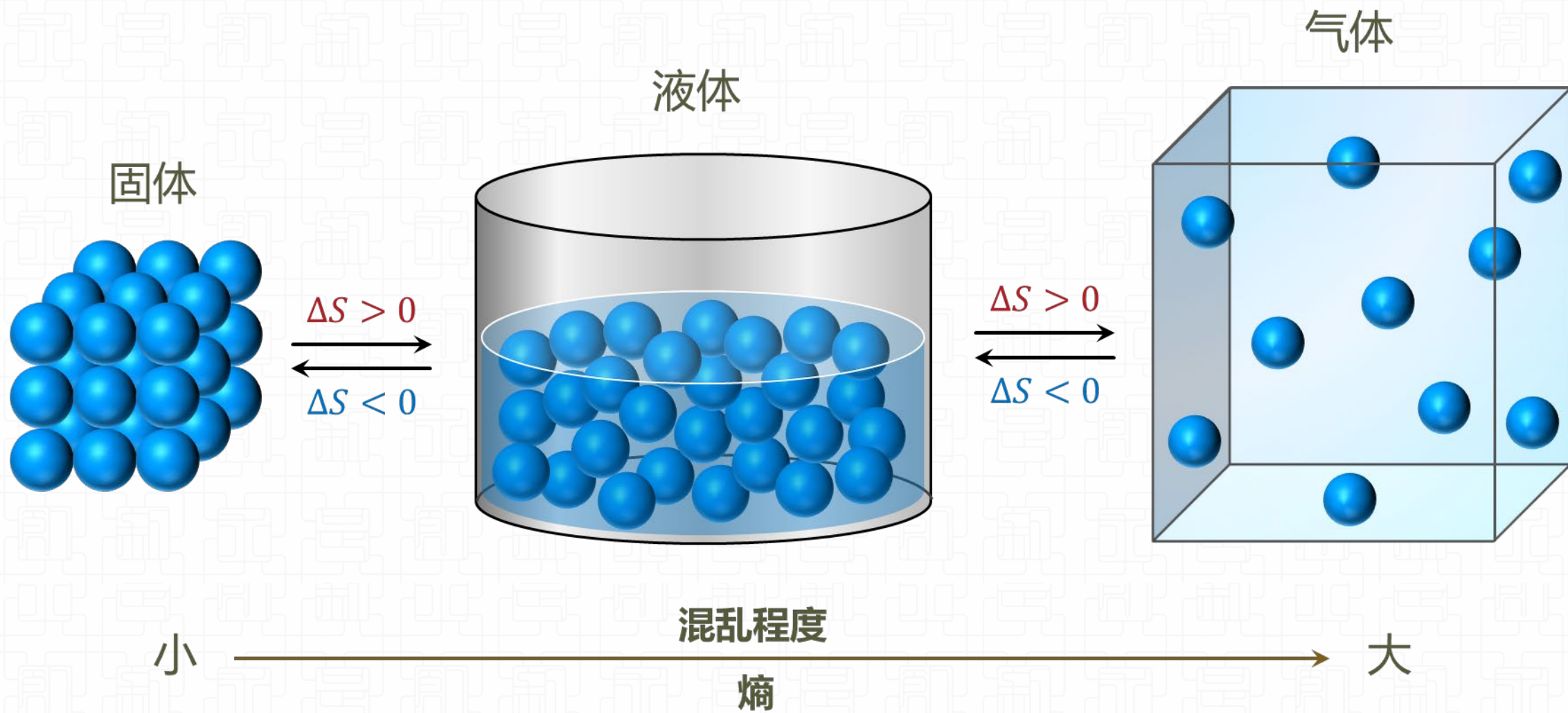


Rudolf Julius Emanuel Clausius
Jan 02, 1822—Aug 24, 1888



William Thomson, 1st Baron Kelvin
Jun 26, 1824—Dec 17, 1907

熵——混乱程度，无序



玻尔兹曼公式

$$S = k \ln W$$

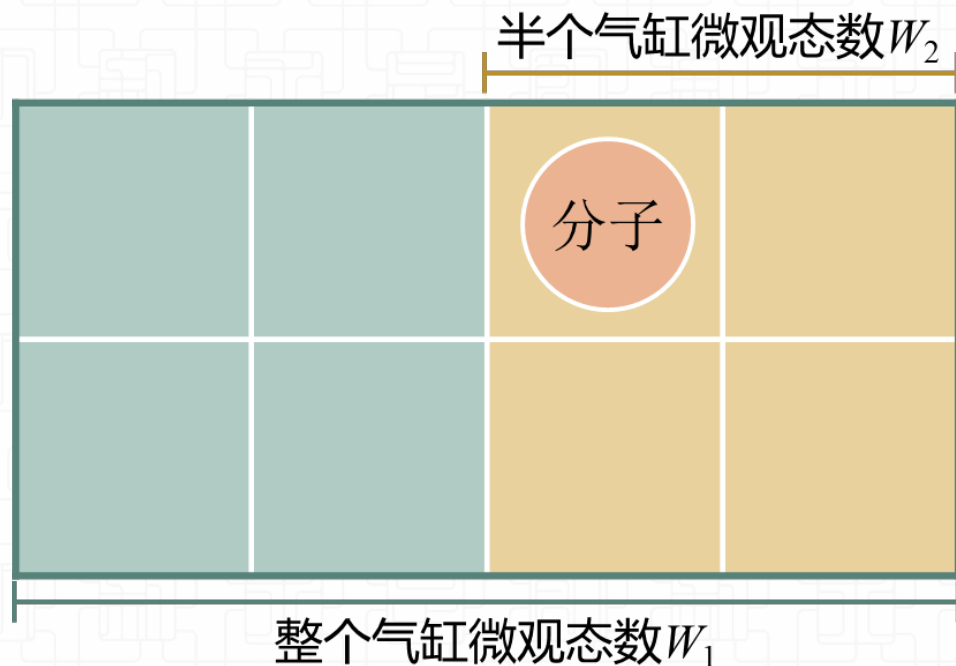
❖ k 是玻尔兹曼常数 ($1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$), W 为该宏观状态中所包含之微观状态数量。

$$S = -k \sum_i p_i \ln p_i$$

- ❖ i 标记所有可能的微观态, p_i 表示微观态的出现几率。
- ❖ 在统计力学中, 熵度量的是一个物理系统的微观状态的不确定程度, 即处于所有可能微观状态中的一种概率 (这些可能的微观状态的出现概率不一定相等)。



Ludwig Edward Boltzmann
Feb 02, 1844—Sep 05, 1906



兰道尔原理——信息就是能量

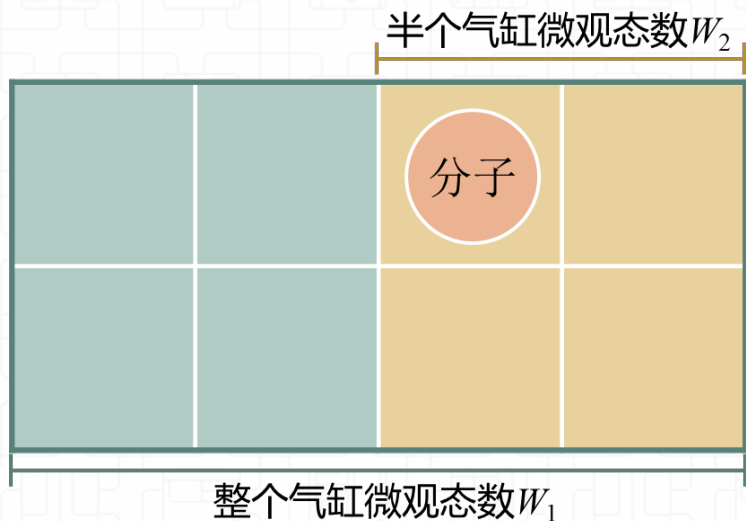
❖ 1961年，IBM Watson研究所的**罗夫·兰道尔**提出了著名的**兰道尔原理**

- 擦除 **1 比特** 的信息将会导致 $kT \ln 2$ 的热量耗散， k 为玻尔兹曼常数， T 为环境绝对温度。可计算出电脑在室温下清除 **1 比特** 信息需要 2.9×10^{-21} 焦耳的能量。



Rolf Landauer

Feb 04, 1927—Apr 27, 1999



系统的 m 个微观态等概率时

信息熵: $H = \log_2 m$

热力学熵: $S = k \ln m$

若将气体分子位置限制为半个气罐

$$\Delta S = k \ln W_1 - k \ln W_2 = k \ln 2 \quad (\text{J/K})$$

$$\Delta H = \log_2 W_1 - \log_2 W_2 = 1 \quad (\text{Bit})$$

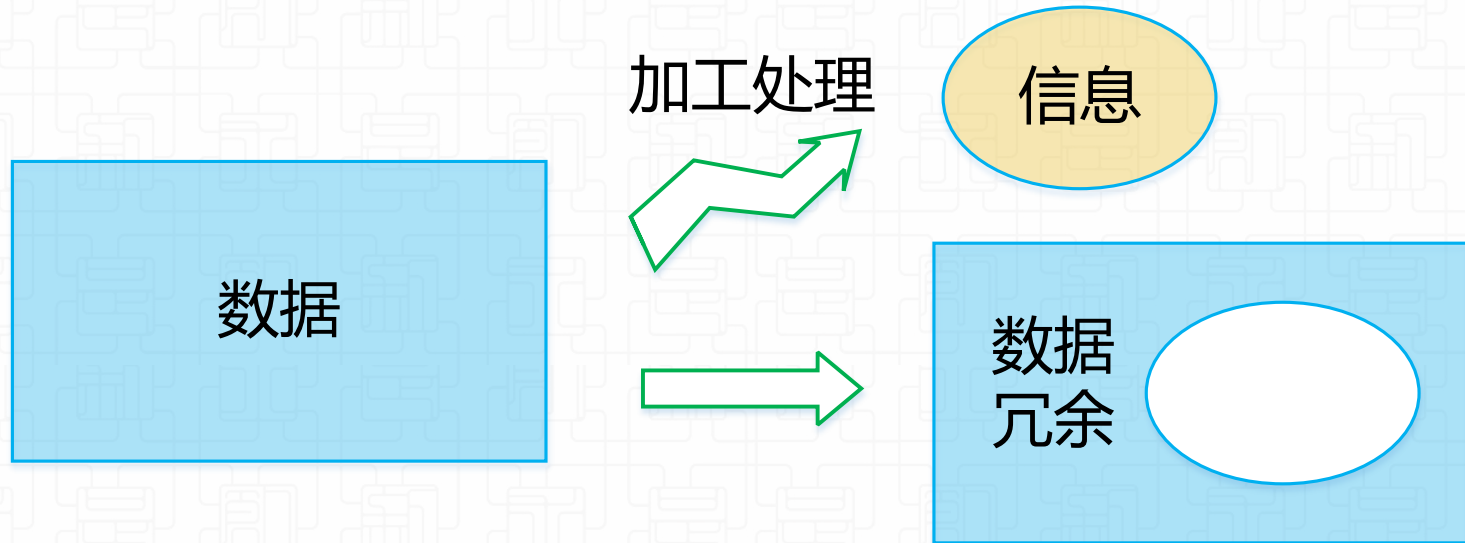
❖ 对于由气体和麦克斯韦妖构成的总系统，仍然遵守热力学第二定律。

数据

- ❖ 数据的原意是**以数字形式所表示的信息**。
- ❖ 世界上存在着大量非数字的信息，如文本、语音、图像、视频等等。
- ❖ 进入信息时代之后，人们趋向把所有存储在计算机上的信息，无论是数字还是音乐、视频，都统称为数据。
- ❖ 所以，数据是载荷或记录信息的按一定规则排列组合的物理符号，是客观实体的一种表述形式。
可以是数字、文字、图像，也可以是计算机代码。
 - 源自生产实践、社会实践、实验观测或模拟计算
- ❖ 对信息的接收始于对数据的接收，对信息的获取只能通过对数据背景的解读。

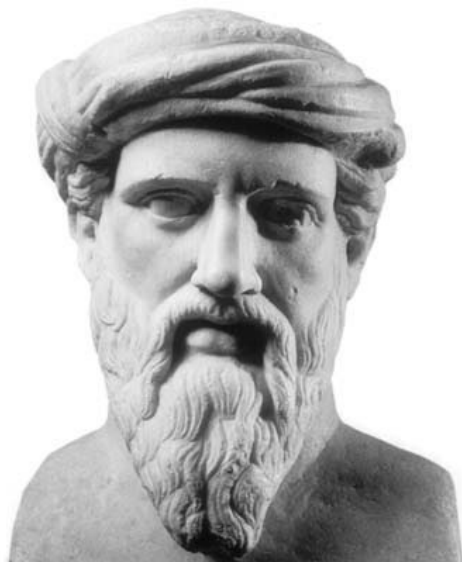
信息与数据——数据是信息的载体

- ❖ 数据是信息的符号表示，是反映客观事物属性的记录，是信息的具体表现形式。
- ❖ 信息则是数据的内涵，是经过加工的数据，是对数据的语义解释。
- ❖ 数据是信息的载体，信息蕴含在数据之中。



万物皆数

- ❖ 万物皆数是毕达哥拉斯学派提出的一种唯心主义观点。认为数是万物的本原，事物的性质是由某种数量关系决定的，万物按照一定的数量比例而构成和谐的秩序。
- ❖ 世界就是由数学构成的，用数学方法来解释世界。
- ❖ 数字是世界的本质，并支配着人类社会乃至整个自然界。
- ❖ **数 (Number)**：数学中最基本的概念之一，表示事物在数量上的不同程度的基本数学概念。除了用数字表示外，还可以用另外一些符号表示，如小数点、分数线、循环点等。
- ❖ **数字 (Digit)**：来记数的符号，一般是指阿拉伯数字。
- ❖ **数据 (Data)**



毕达哥拉斯 (Pythagoras)
c.580 BC ~ c.500 BC

信息与信号——信号是信息的载体

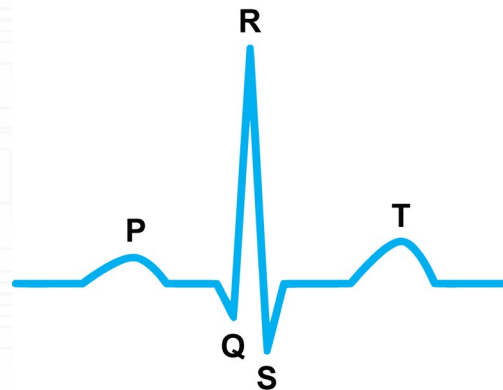
- ❖ 信息依靠某种媒介进行传递。信号就是携带信息的传输介质。
 - 古代人利用点燃烽火台而产生的滚滚狼烟，向远方军队传递敌人入侵的消息，这属于光信号
 - 当我们说话时，声波传递到他人的耳朵，使他人了解我们的意图，这属于声信号
 - 遨游太空的各种无线电波、网络电缆中的电流等，都可以用来向远方表达各种消息，这属电信号
- ❖ 人们通过对光、声、电信号进行接收，才知道对方要表达的信息。
- ❖ 所以，信号是运载信息的工具，是信息的载体。
- ❖ 从传输和处理的角度来说，电磁波、电子和光子信号便于被系统接收，广泛应用于各种技术领域。
- ❖ 这是当今电子信息技术迅猛发展和快速普及的根本原因。

数据要进行传输，必须将其转换为信号。

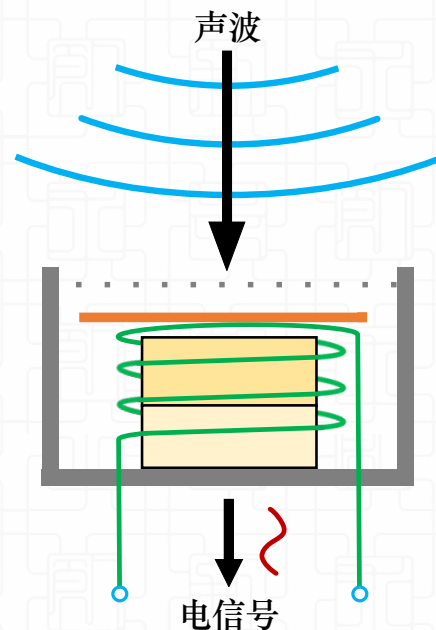
信号

- ❖ 信号是指任何待传送某种信息的随时间变化的物理信号，它是随时间或几个自变量变化的某种物理量。
- ❖ 随时间或位置变化的信号，在数学上可以用时间和空间的函数来表示。
 - 一个语音信号可以表示为声压随时间变化的函数 $p(t)$
 - 一张黑白照片可以用亮度随二维空间变量变化的函数 $I(x, y)$ 表示
 - 视频图像亮度则是一个既与红、绿、蓝三色，又与时间和二维坐标有关的函数，即 $I = [I_r(x, y, t), I_g(x, y, t), I_b(x, y, t)]$ 。
- ❖ 对信号进行分析，找到信号波形或图像的结构特征或统计特征，就完成了信号的分析工作。

注：第二章将介绍通信系统中信号的变换过程。



正常窦性心律心电信号



麦克风工作原理

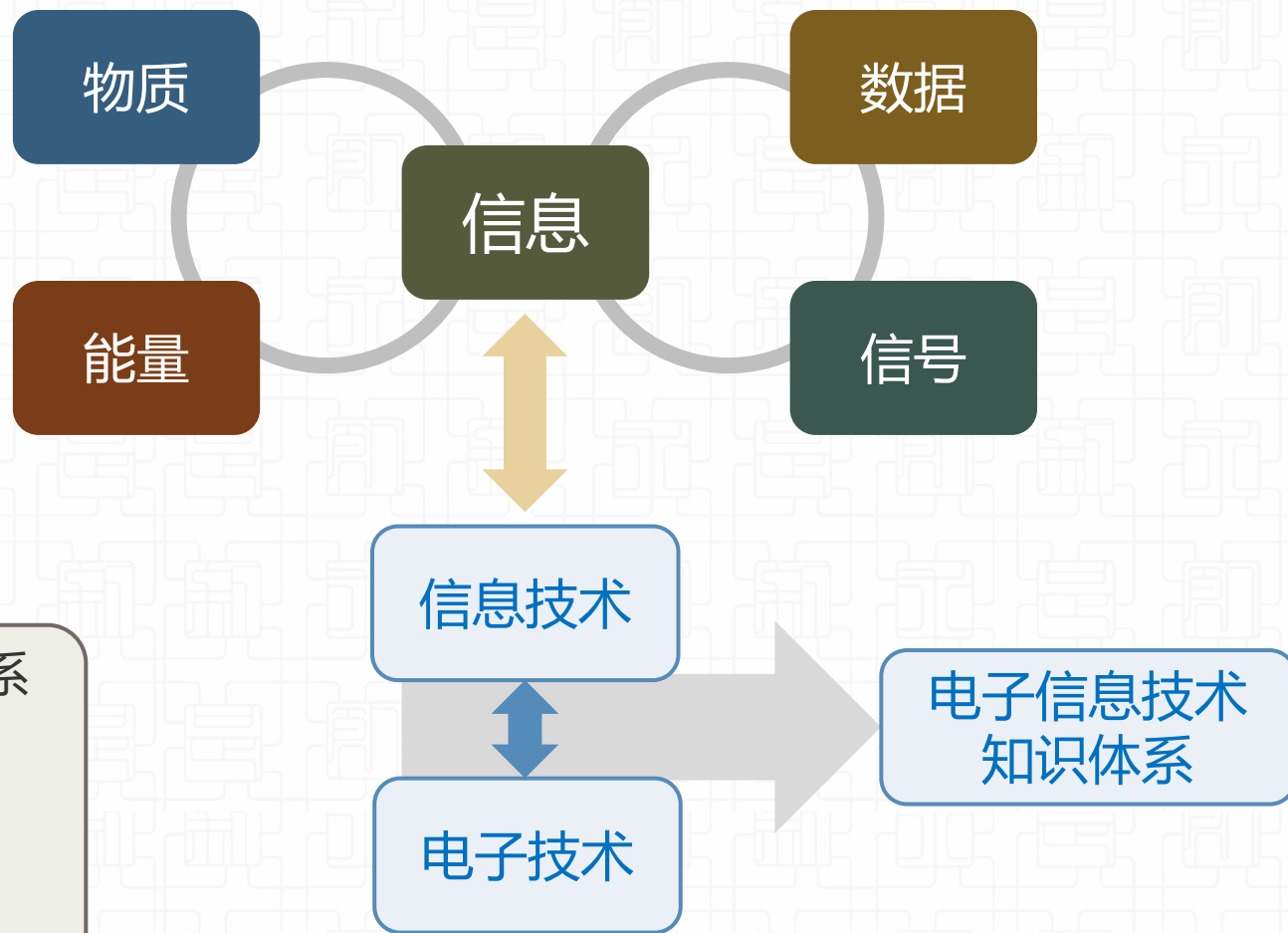
内容提要

❖ 信息

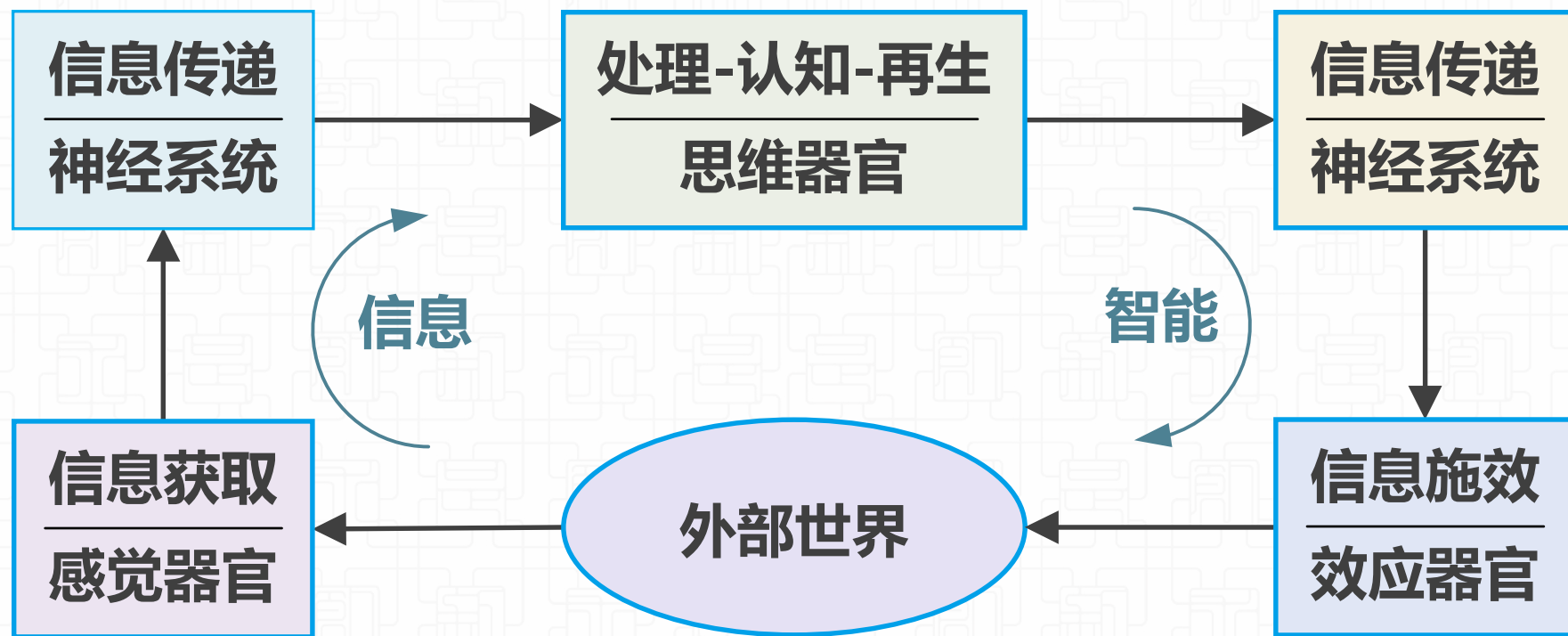
❖ 信息科学技术概述

❖ 知识图谱

- ✓ 思考什么是信息？信息与物质和能量的关系
- ✓ 理解信息、数据与信号的关系
- ✓ 了解电子技术和信息技术的关系
- ✓ 知晓电子信息科学与技术知识体系

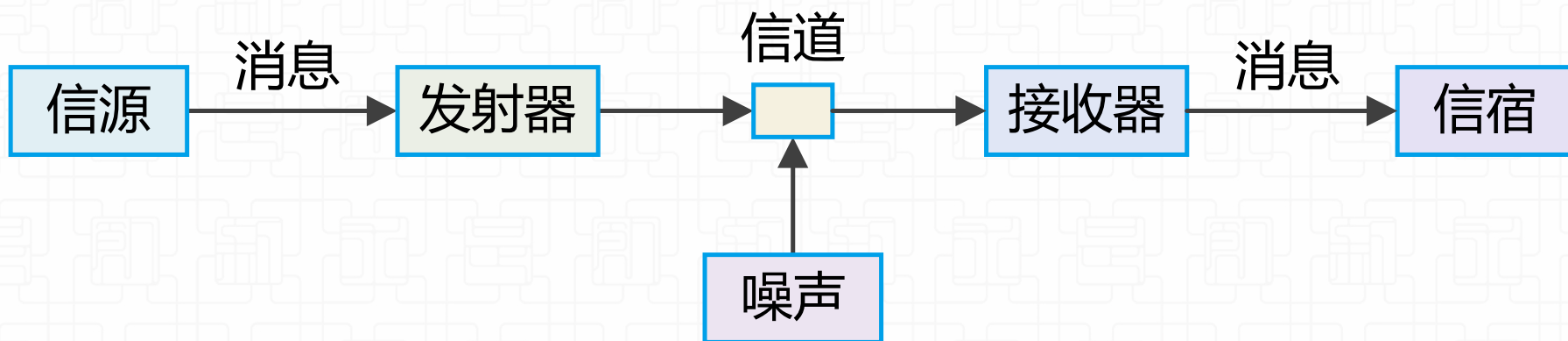


典型信息运动过程



❖ 扩展人类的信息器官功能，提高人类对信息的接收和处理的能力，实质上就是扩展和增强人们认识世界和改造世界的能力。这既是信息科学技术的出发点，也是它的最终归宿。

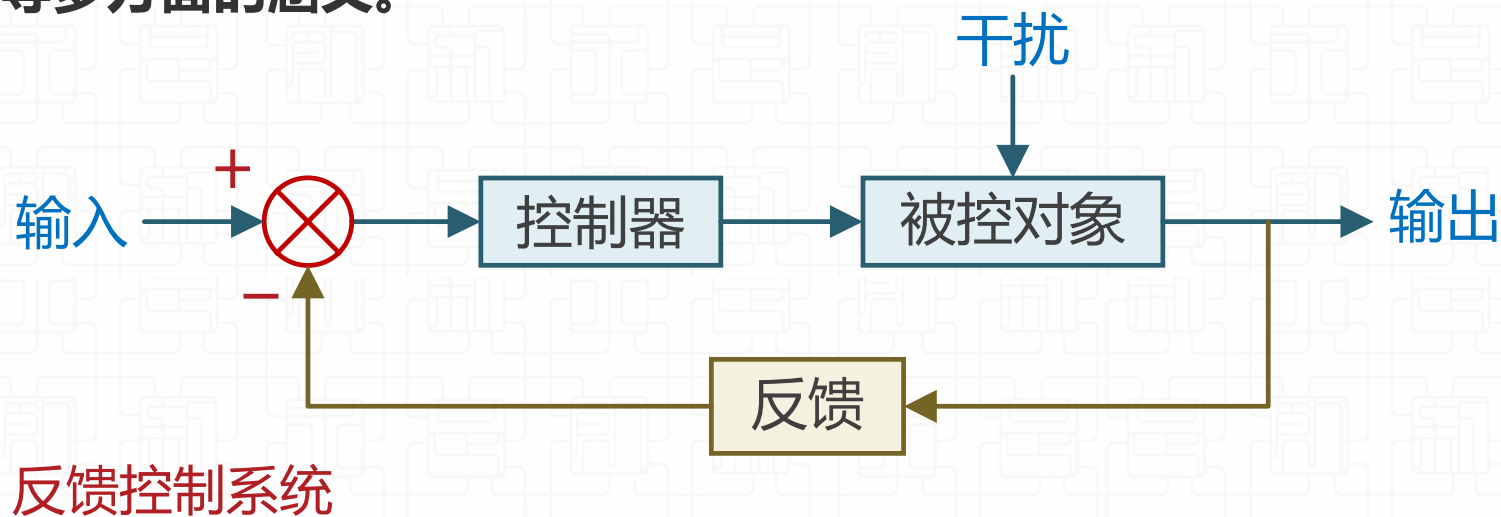
信息论



- ❖ 1948年香农发表的《通讯的数学理论》一文，成为信息论诞生的标志。
- ❖ 信息论是信息科学的前导，是一门运用概率论与数理统计方法研究**信息的度量、传递和交换规律的科学**。香农信息论构建了现代信息大厦的根基，建立了**信息度量、压缩、传输**的基础理论体系。
- ❖ **信息系统就是广义的通信系统**，泛指某种信息从一处传送到另一处所需的全部设备所构成的系统。

控制论

- ❖ 1948年，维纳发表了《控制论：或关于在动物和机器中控制和通信的科学》
- ❖ 维纳把控制论看作是一门研究机器、生命社会中控制和通信的一般规律的科学，是研究**动态系统在变的环境条件下**如何保持平衡状态或稳定状态的科学。
- ❖ 控制论一词Cybernetics，来自希腊语，愿意为掌舵术，包含了调节、操纵、管理、指挥、监督等多方面的涵义。

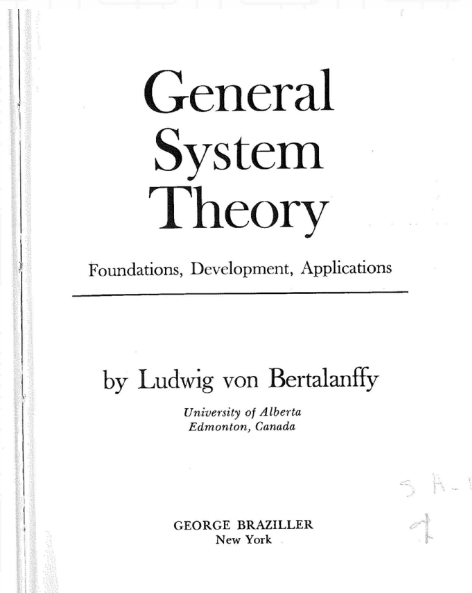


所谓**反馈**，就是把被控制对象在控制信息作用下产生的输出信息返回传送给控制器，以便根据控制效果来调整控制作用。

系统论



Ludwing Von Bertalanffy
Sep 19, 1901 ~ Jun 12, 1972



- ❖ 系统论是研究**系统的一般模式、结构和规律**的学问。
- ❖ 研究各种系统的共同特征，用数学方法定量地描述其功能，寻求并确立适用于一切系统的原理、原则和数学模型。
- ❖ 系统思想源远流长，但作为一门科学的系统论，人们公认是美籍奥地利人、理论生物学家贝塔朗菲创立的。1968年，他发表了《一般系统论：基础、发展与应用》，成为系统论的代表著作。

系统的基本概念

- ❖ 系统——有相互作用的元素的综合体。
- ❖ 要素——系统中的子系统，即基本组成部分。
- ❖ 结构——是系统内部各要素之间相互联系和相互作用的方式。它表现为各要素在时间和空间上的组合形式。
- ❖ 功能——是系统在与外部环境相互联系和相互作用过程中所具有的行为、能力和功效。是系统对外的表现。
- ❖ 系统论认为，整体性、关联性、动态性、有序性、目的性等是所有系统的共同的基本特征。
- ❖ 系统论显然把那些不具备这些属性的集合体不看成系统。常常把一团散沙和系统相对立。

整体大于部分之和

信息技术

❖ 信息技术是在信息科学的基本原理和方法的指导下**扩展人类信息功能**的技术。利用电子计算机和现代通信手段实现获取信息、传递信息、存储信息、处理信息和显示信息等的相关技术。

❖ 信息技术能够延长或扩展人的信息功能：

✓ 传感技术

- 信息的采集技术，对应于人的**感觉器官**。

✓ 通信技术

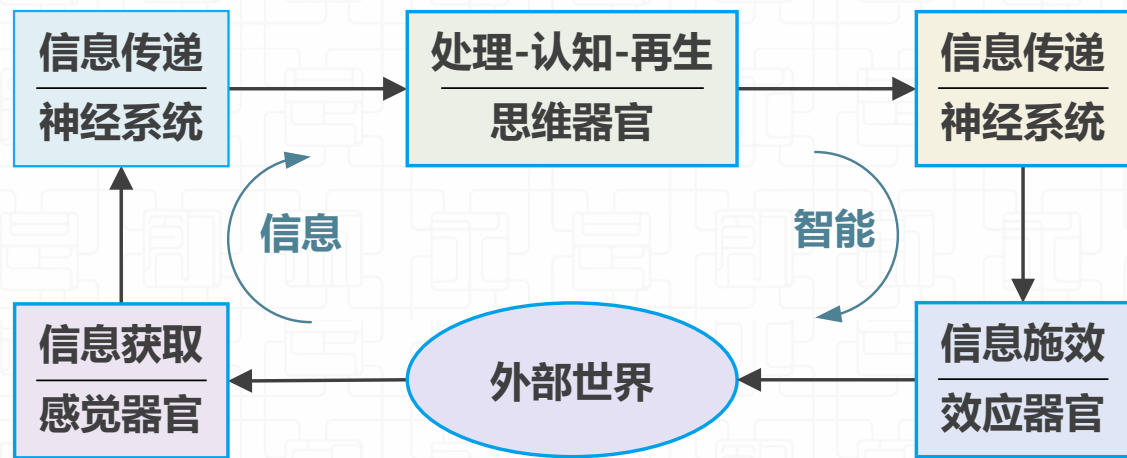
- 信息的传递技术，对应于人的**神经网络**的功能。

✓ 计算机技术

- 信息的处理和存储技术，对应于人的**思维器官**。

✓ 控制技术

- 信息的使用技术，对应于人的**效应器官**。



人类经历的五次信息技术革命

- ❖ 第一次：语言的产生和应用
- ❖ 第二次：文字的发明和使用
- ❖ 第三次：造纸术和印刷术的发明和应用
- ❖ 第四次：电报、电话、广播及其他通讯技术的发明和应用
- ❖ 第五次：电子计算机和现代通信技术的应用

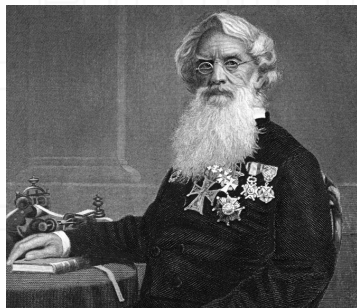
信息载体的演变，推动着人类信息活动的发展，导致了人类社会的一次次飞跃

电子学与电子技术

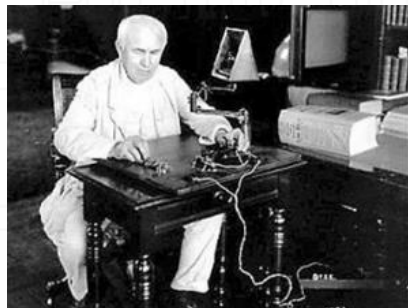
- ❖ 电子学是发展信息科学与技术的重要和不可或缺的基础。
- ❖ 是一门以应用为主要目的的科学和技术，以电子运动和电磁波及其相互作用的研究和利用为核心而发展起来的，作为新的信息技术手段获得了蓬勃发展。
- ❖ 电子学的发展已有近200年的历史。
- ❖ 19世纪出现的欧姆定律和基尔霍夫定律奠定了电路基础，麦克斯韦方程组奠定了电磁波理论基础；
- ❖ 20世纪初薛定谔、海森堡、狄拉克天才群体完成了微观粒子的量子力学体系；嗣后固体物理学的出现更是在理论与工程之间架起了坚固的桥梁。

电子学的应用

- ❖ 1838年，美国莫尔斯发明电报
- ❖ 1876年，美国贝尔发明电话
- ❖ 1901年，意大利马可尼实现跨大西洋通讯
- ❖ 1906年，加拿大费森登第一无线电广播
- ❖ 1925年，英国贝尔德首先发明电视
- ❖ 1946年，世界第一台**通用**计算机ENIAC
(Electronic Numerical Integrator and Computer) 诞。



Samuel Finley Breese Morse
Apr 27, 1791—Apr 2, 1872



Alexander Graham Bell
Mar 3, 1847—Aug 2, 1922



Guglielmo Marconi
Apr 4, 1874—Jul 20, 1937



Reginald Aubrey Fessenden
Oct 6, 1866—Jul 22, 1932



John Logie Baird
Aug 14, 1888—Jun 14, 1946

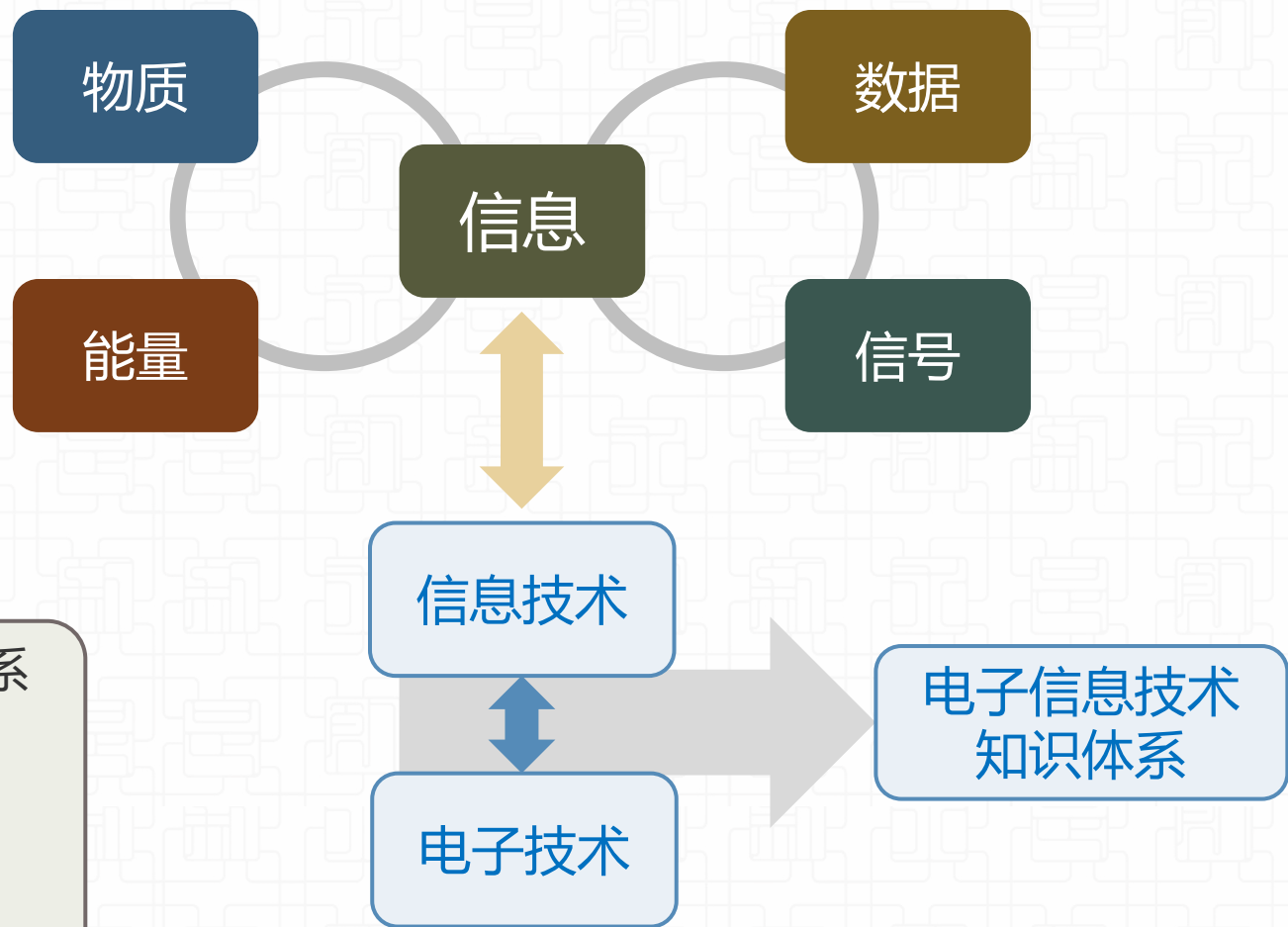


1946, ENIAC

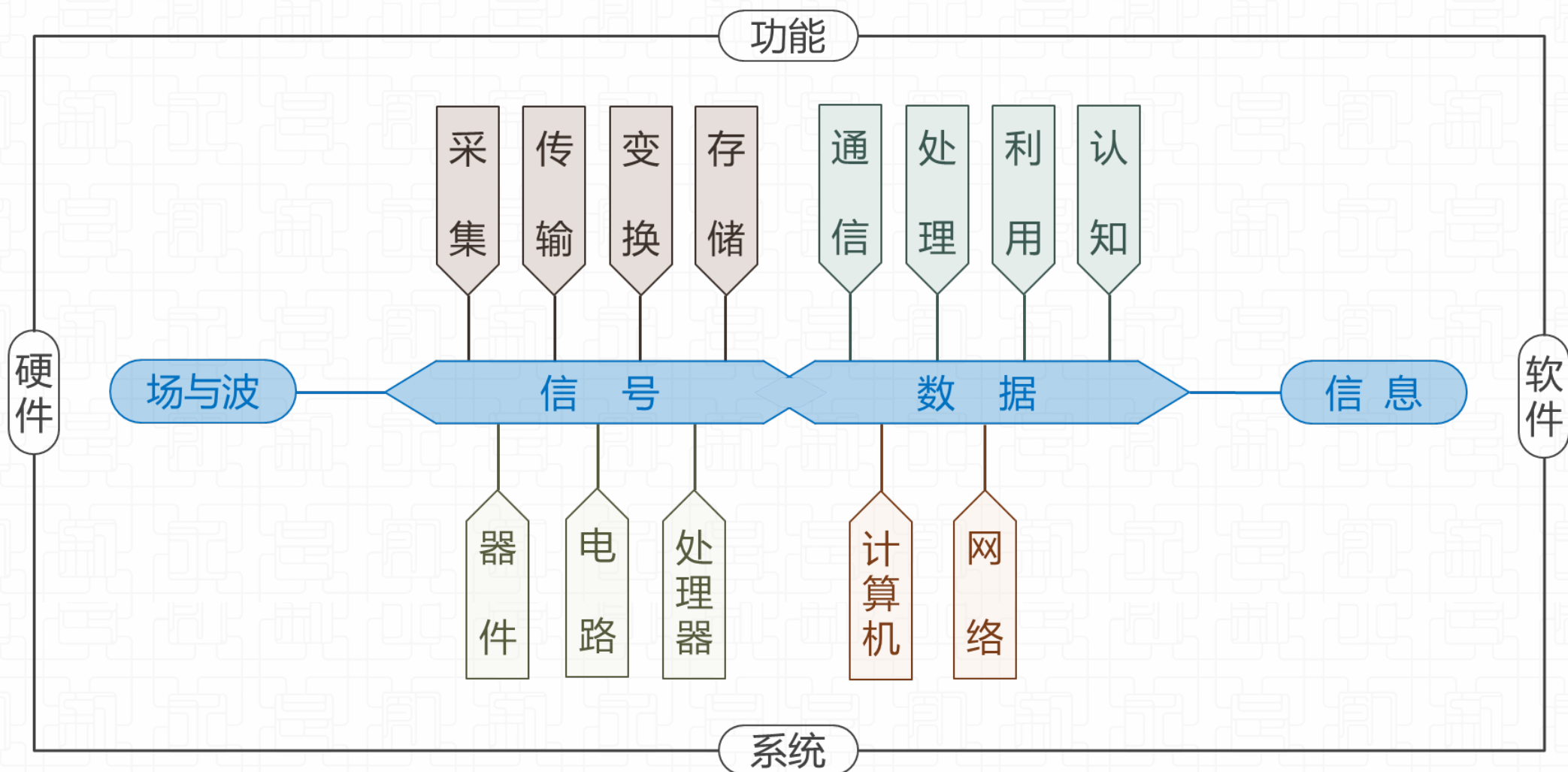
内容提要

- ❖ 信息
- ❖ 信息科学技术概述
- ❖ 知识图谱

- ✓ **思考**什么是信息？信息与物质和能量的关系
- ✓ **理解**信息、数据与信号的关系
- ✓ **了解**电子技术和信息技术的关系
- ✓ **知晓**电子信息科学与技术知识体系



知识图谱——以“数据与信号”为主线



教学内容

- 2.1 时域和频域
- 2.2 模拟和数字
- 2.3 编码和调制
- 2.4 电磁场与波

2 信号与数据

场与波

信号

数据

信息

1 信息与信息技术概述

- 1.1 信息
- 1.2 信息科学技术概述
- 1.3 知识图谱

3 电子器件与电路

- 3.1 电路模型和基本定律
- 3.2 晶体管 and 集成电路
- 3.3 集成运算放大器

器件

电路

处理器

4 逻辑与数字系统

- 4.1 数字逻辑和电路
- 4.2 组合逻辑和时序逻辑
- 4.3 微处理器和计算机系统
- 4.4 嵌入式系统
- 4.5 EDA技术

计算机

网络

5 互联与计算

- 5.1 通信与网络
- 5.2 物联与数联
- 5.3 计算与智能

采集

传输

变换

存储

通信

处理

利用

认知

The End.



中国大学MOOC

章献民

zhangxm@zju.edu.cn