



动态系统分析与控制：序论

陈剑

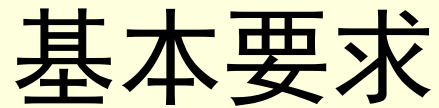
清华大学经管学院

基本要求

- ❖ 班级：经41/51 上课地点：伟伦404
- ❖ 时间：每周二上午9：50—12：15；如有特殊情况需要调课，将按学校要求事先协商。
- ❖ 目的：希望学生通过学习这门课掌握动态系统的基本概念，及其分析和控制方法。
- ❖ 重点：基本概念、原理和分析方法
- ❖ 主要内容：重点围绕线性系统展开，包括：
 - ◆ 动态系统建模方法、系统稳定性、反馈、正系统、能观性、能控性、状态反馈、状态估计，最优控制及非线性系统初步
- ❖ 参考书：《控制理论基础》 赵纯均、詹一辉，清华大学出版社 1991
- ❖ 参考书：社会动态系统引论 (美)鲁恩伯杰 著 袁天鑫,黄午阳 译（Introduction to dynamic systems : theory, models and applications / David G. Luenberger）；“动态系统分析与控制” 辅助材料， 2017
- ❖ 助教：荣立松，email: rongls.07@sem.tsinghua.edu.cn

课程安排

❖ Class 1	序论	Sept. 19
❖ Class 2	古典控制理论概述	Sept. 26
留作业：练习题；自学：复习有关基础知识		
❖ Class 3	No Class: <i>National Day Break</i>	Sept. 3
❖ Class 4	状态方程	Oct. 10
留作业：练习题		
❖ Class 5	线性定常系统 (1)	Oct. 17
留作业：练习题		
❖ Class 6	小测验 I	Oct. 24
Class 7	线性定常系统 (2)	Oct. 31
留作业：练习题		
❖ Class 8	线性定常系统 (3)	Nov. 7
❖ Class 9	正系统 (1)	Nov. 14



- 4

内容提要

- ❖ 动态系统
- ❖ 系统分类
- ❖ 举例
- ❖ 控制系统的主要形式
- ❖ 历史回顾

现象

- ❖ 1956年突破1千亿元，1982年突破5千亿元；
- ❖ 1986年中国GDP过万亿元，达到10,309亿元；
- ❖ 2001年过10万亿元，达到110,270亿元；
- ❖ 2012年过50万亿元，达到534,123亿元；
- ❖ 2014年，中国GDP总量达到636,139亿元
- ❖ 2015年，中国GDP总量达到676708亿元
- ❖ 2016年，中国GDP总量达到744127亿元

❖ 来自：<https://baike.baidu.com/item/%E4%B8%AD%E5%9B%BDGDP/6689443?fr=aladdin>

现象

- ❖ 1999年9月，马云带领下的18位创始人在杭州的公寓中正式成立了阿里巴巴集团，集团的首个网站是英文全球批发贸易市场阿里巴巴
- ❖ 1999年10月，阿里巴巴集团从数家投资机构融资500万美元。
- ❖ 2000年1月，阿里巴巴集团从软银等数家投资机构融资2,000万美元
- ❖
- ❖ 2017财年，阿里巴巴总营收1582.73亿元人民币，净利润578.71亿元人民币。

来自：

<https://baike.baidu.com/item/%E9%98%BF%E9%87%8C%E5%B7%B4%E5%B7%B4%E9%9B%86%E5%9B%A2/9087864?fr=aladdin&fromid=33&fromtitle=%E9%98%BF%E9%87%8C%E5%B7%B4%E5%B7%B4>

现象



DOW JONES INDU AVERAGE NDX

(Dow Jones Global Indexes:INDU)

Add to Watch List

Set Alert

21,987.56

Delayed Data
As of Sep 01

↑ +39.46 / +0.18%

Today's Change

17,884



TODAY

22,179

+11.26%

Year-to-Date

5 year

☐ Daily market report

Add ticker

Chart



现象

❖ 今年柑橘价格涨，去年砍树果农好无奈

◆ “唉！这个市场太不好把握了，去年的柑橘几角钱一斤都卖不脱，我把树子砍了，今年一下就卖到了一块多钱一斤。”这是XX县XX镇XX村XXX面对柑橘价格变化的叹息。

据记者这两天到连界、新场、威远县城等一些农贸市场了解，今年一般的无核温州蜜柑、新津一号等柑橘每斤要卖1元，好的卖到1.5元—2元。卖柑橘的YYY说：“去年5角一斤都不好卖，有时还卖一块钱三斤、四斤。今年能卖上1块一斤，我那一亩多地的五六千斤柑橘就有几千钱的收入，比去年高一倍多。”

现象

❖ 政府输给市场，“零利肉”昙花一现：

- ◆ 2007年09月05日 据今天《人民日报》报道：昨日，记者再次走访重庆几家“零利肉”销售超市时看到，除重百超市公司旗下的门店还挂着“零利肉”的标志外，新世纪超市、永辉超市等均看不到任何有关标志。即使仍挂着“零利肉”标志的重百超市，精瘦肉每斤13.8元的标价也比8月中旬的12元多要高出1元多。
- ◆ 8月10日，为平抑市场肉价，重庆市商委对外发布消息称，从当天起，重百、新世纪、家乐福等11家大型超市将携手，对市民需求量最大的精瘦肉、后腿肉、三线肉实施“零利润销售行动”（简称“零利肉”销售行动）。所谓“零利肉”，是指各超市对上述三个品种的肉的售价只算进价和运输成本。“该行动将持续到猪肉价格回落到正常为止”。当时有11家大型超市旗下的151个超市参与到行动中来。在重庆市商委看来，由于各超市都颇具规模，实施“零利肉”销售后，猪肉价格的下跌肯定指日可待。然而，这场由政府部门倡导的、声势浩大的平抑物价联合行动，仅一周就悄无声息。

现象

❖ 金融政策

2016年2月2日，央行下调首套房首付比。在不“限购”的城市中，居民首次购买普通住房的商业性贷款，最低首付款比例为25%，各地可向下浮动5个百分点。

2016年2月21日，央行上调公积金存款利率：职工住房公积金账户存款利率将统一按一年期定期1.50%存款基准利率执行。

2016年3月1日，央行宣布普遍下调存款准备金率0.5个百分点。

❖ 税收政策

2016年2月22日，财政部调整房地产交易环节契税。个人将购买2年以上（含2年）的住房对外销售的，免征营业税。

2016年2月22日，财政部调整营业税优惠政策。90平方米及以下住房减按1%的税率征收契税，90平方米以上减按1.5%征收契税。

2016年3月23日，“营改增正式实施”。建筑业和房地产业适用11%税率，二手房税率仍按5%征收，实际税负负担减少。

❖ 房屋新政、土地政策

2016年5月4日，国务院鼓励个人出租房，允许商业房改租赁住房，分别从房源、公租房货币化补贴、税收优惠以及市场规范方面，

2016年2月23日，国务院要求减少土地储备规模，叫停土地储备贷款不得再向银行业金融机构举借土地储备贷款。

❖



动态现象？

动态系统

- ❖ 动态现象：运动状态按照一定的规律(确定/统计)随时间演化的现象
 - ◆ 任何事物都是变化的，只是有“快”、“慢”之分，例如：
 - “快”：股票
 - “慢”：人类进化过程
 - ◆ 如何衡量变化，考察对象的一些特征，如：股票价格，人的一些特征等
- ❖ “系统”这个词在当今社会中用的越来越多。那么，“系统”是什么？具有那些性质？
- ❖ System一词源于拉丁语 Systema，意为“群”、“集合”。系统的概念源于古代人类的社会实践和科学总结。

动态系统

- ❖ “系统”这个词在古希腊时代就已使用
 - ◆ 古希腊哲学家德谟克利特(Democritus)曾经论述了“宇宙大系统”，认为原子组成万物，形成不同的系统和有层次的世界
 - ◆ 古希腊的亚里士多德(Aristoteles)，关于整体性、目的性、组织性的观点，以及关于事物相互关系的思想，是古代关于系统的一种朴素概念。
- ❖ “系统的思想”在古代中国同样有重要影响
 - ◆ 阴阳二气+五行(金、木、水、火、土)
 - ◆

动态系统

❖ 然而，“系统”的定义目前尚不统一

- ◆ 在韦伯斯特（Webster）大辞典中，“系统”被定义为：有组织的或被组织化的整体。
- ◆ 系统论的创始人贝塔朗菲(L.V. Bertalanffy)对系统的定义：相互作用诸要素的综合体。
- ◆
- ◆ 由相互关联和相互制约的若干“部分”所组成的具有特定功能的一个“整体”

❖ 系统的主要特征

- ◆ 整体性
- ◆ 动态性
- ◆ 目的性

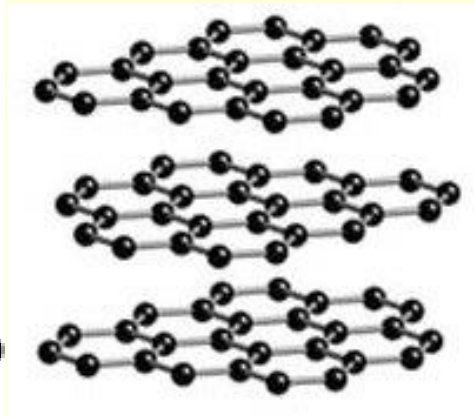
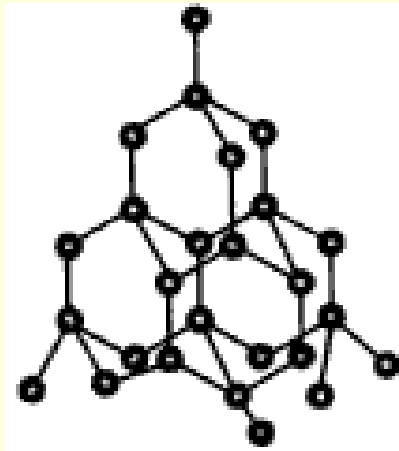
随着时间的推移系统会不断的演化

影响演化的因素：1) 外部环境，2) 内部组成之间的相互作用，3) 人为控制/干扰作用

动态系统

◆ 关联性

- 关联 \Rightarrow 系统结构 \Rightarrow 效能
- 例如：钻石(金刚石)与石墨



“合作” vs “竞争”

“三个臭皮匠” = ? “诸葛亮”

“三个和尚没水喝” ?

◆ 层次性

◆ 开放性

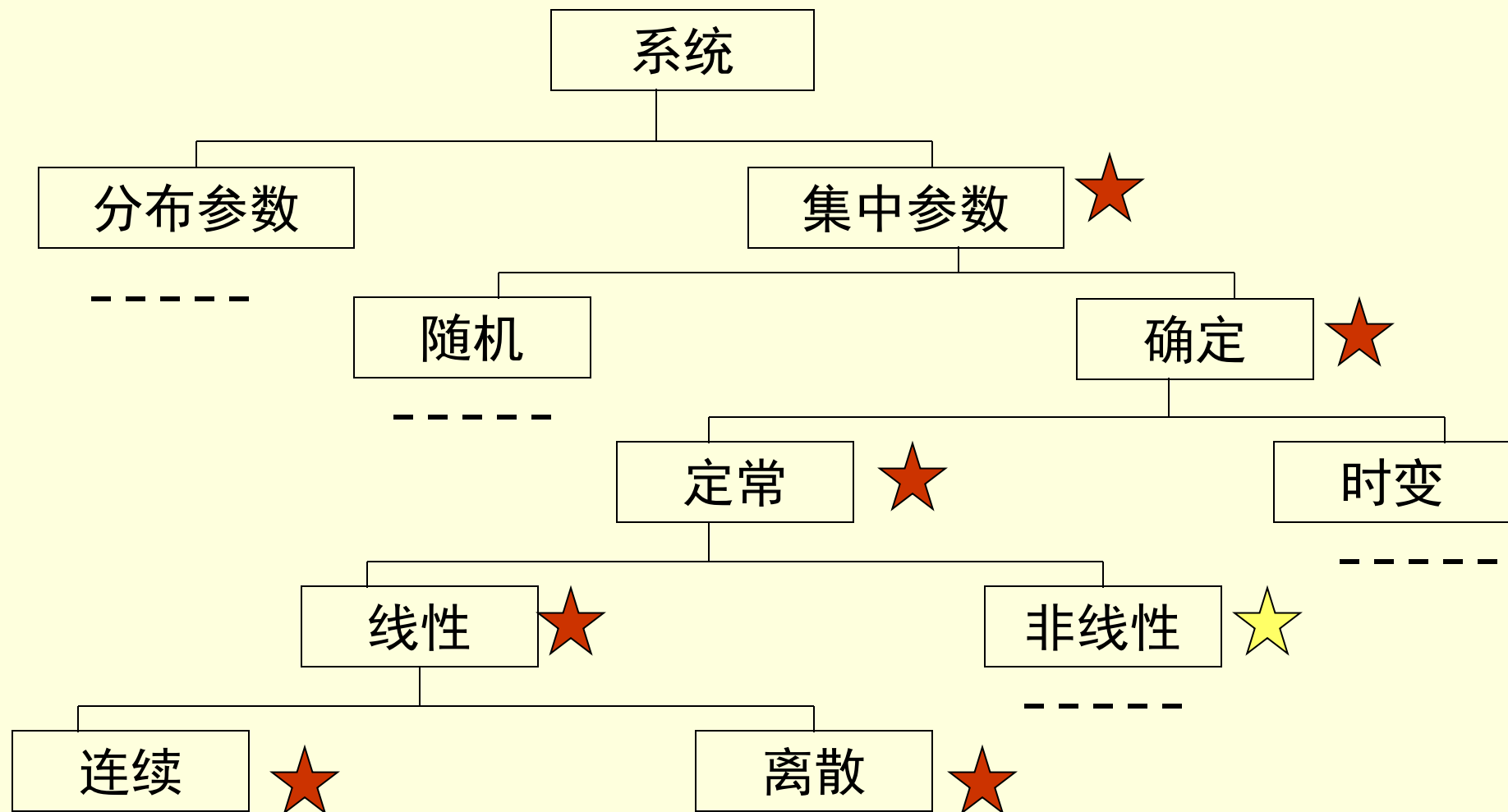
◆ 涌现性

系统分类

- ❖ 系统普遍存在于自然界和人类社会，如：
 - ◆ 太阳系、地球、国家、企业、社区、人体等等
- ❖ 系统按照不同的方式可以有不同的分类
 - ◆ 自然的：太阳系、地球、...
 - ◆ 人造的：生产线、计算机、ERP、...
 - ◆ 生物的：生态、人体、...
 - ◆ 被动系统：机械、电子、...
 - ◆ 主动系统：经济、社区、...
 - ◆ 混合系统：企业、...
 - ◆ 按大小：大系统 \Rightarrow 小系统，如：社会 \Rightarrow 单位 \Rightarrow 人 \Rightarrow 器官
 - ◆ 按难度：复杂系统（企业） \Rightarrow 简单系统（加工系统）

系统分类

❖ 从模型抽象的角度



系统控制

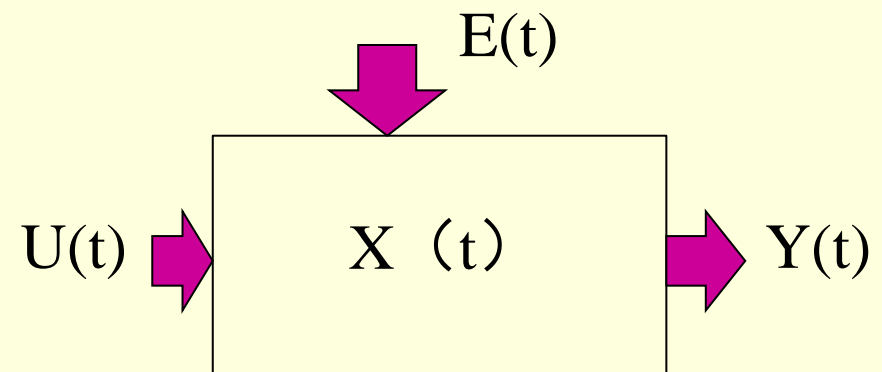
❖ 研究系统的结构，辨识其参数，分析其特征，预报系统发展的趋势，研究对系统可能的控制方式和控制行为，从而使系统向着我们期望的方向发展。

建模

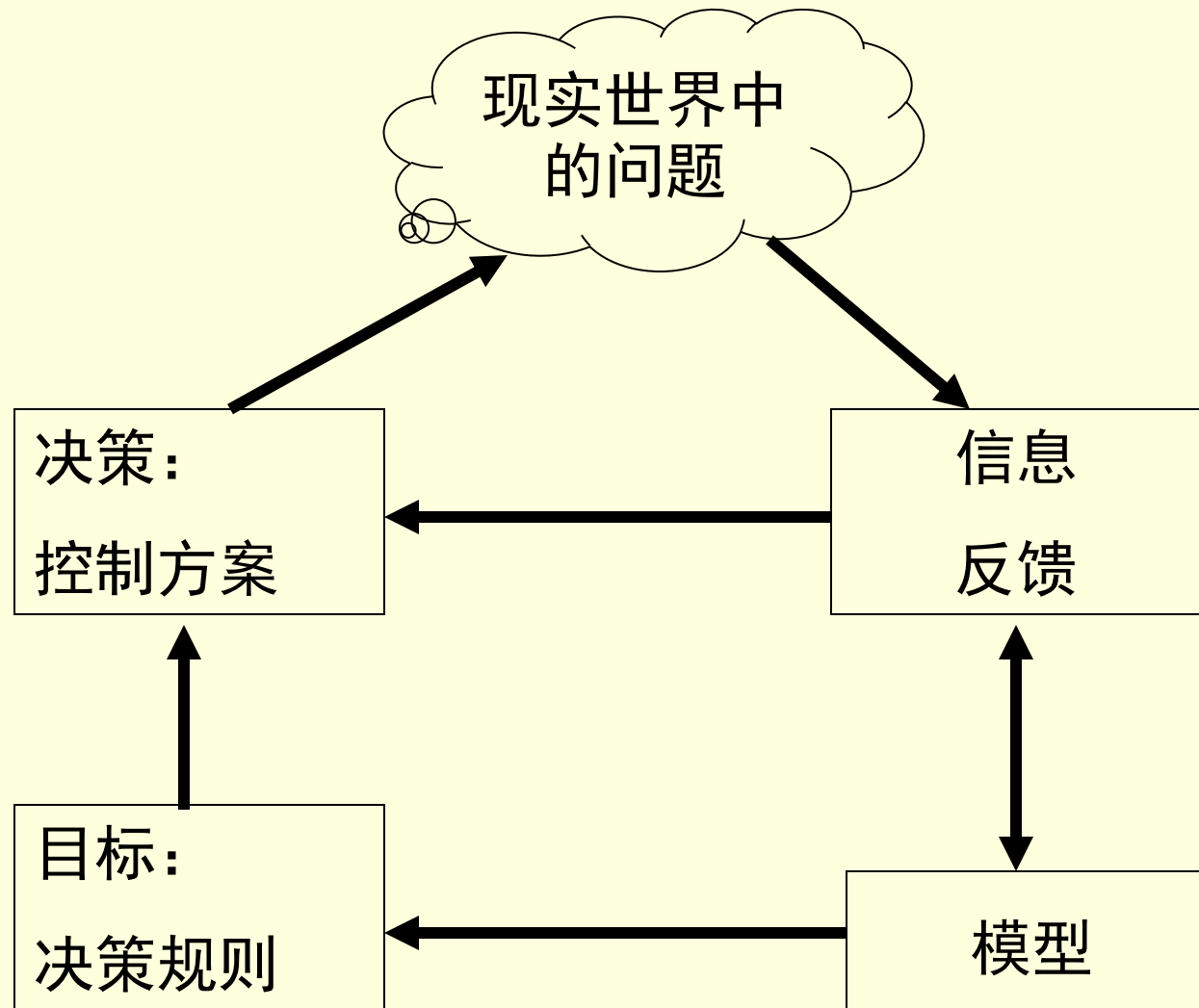
系统分析

控制

目的性

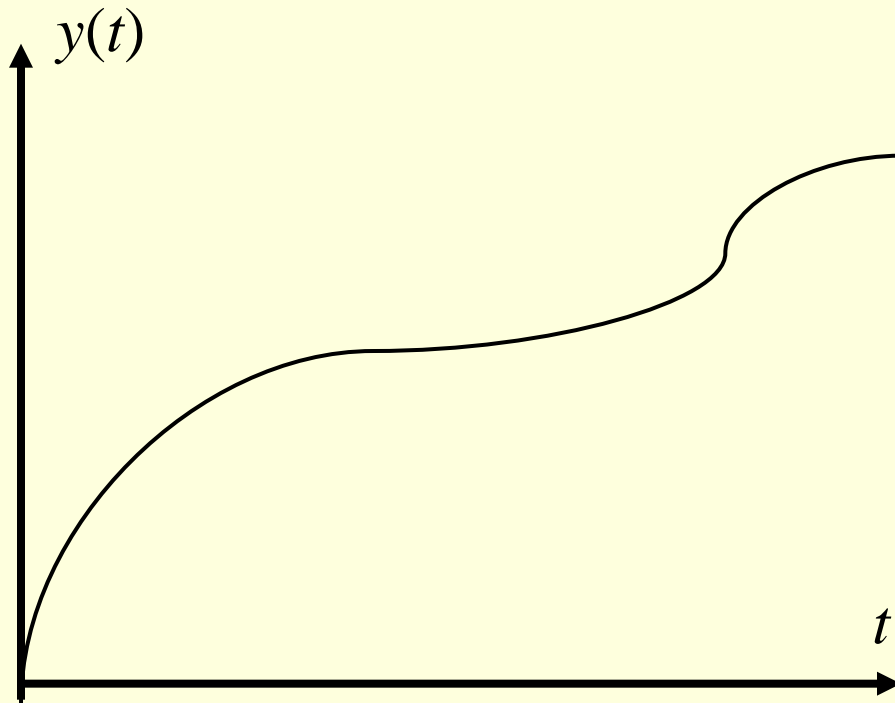


系统控制

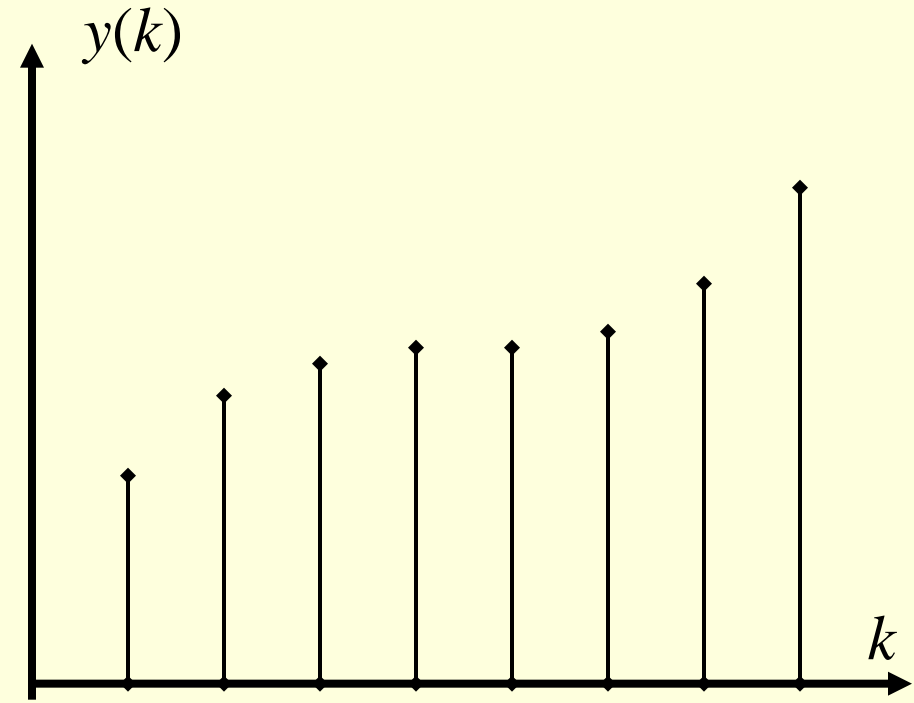


如何刻画动态现象？

连续(时间)系统vs离散(时间)系统

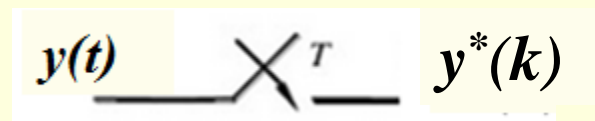


$$\dot{y}(t) = f(y(t), u(t), t)$$



时间离散, 其他变量不离散

$$y(k+1) = f(y(k), u(k), k)$$



?

Nyquist/Shannon采样定理

举例：例1(人口系统)

❖ **Thomas Robert Malthus(1766—1834)**第一个对人口系统进行了系统的研究，提出了他的人口理论，基本内容包括：

◆ “两个公理”

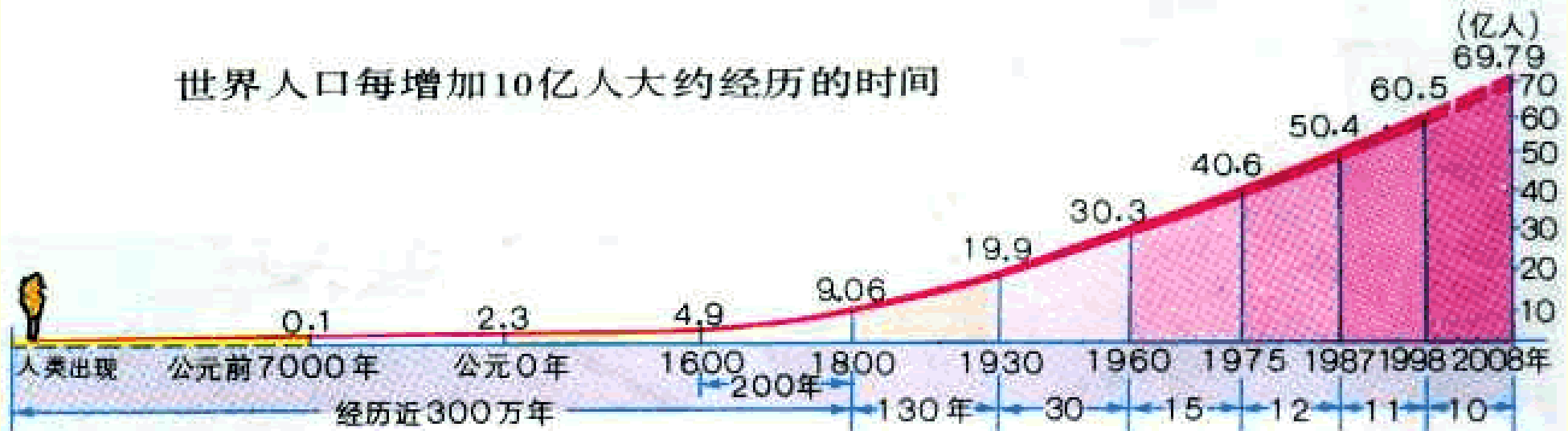
- 食物为人类生存所必须
- 两性间的情欲是必然的

◆ “两个级数”

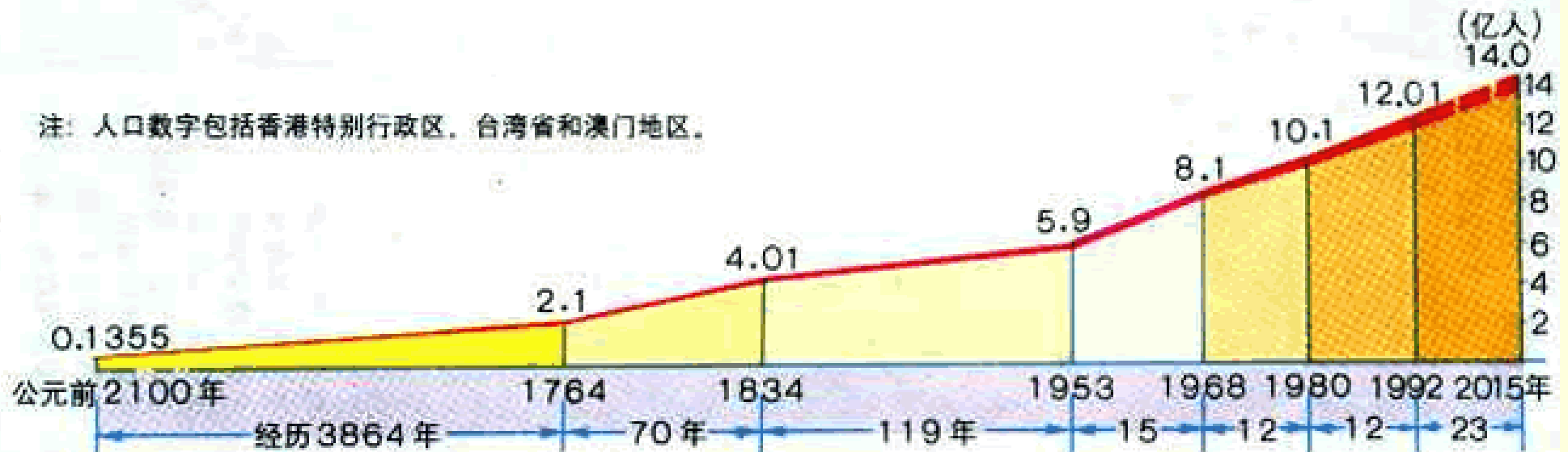
- 人口以几何级数增长
- 生活资料以算术级数增长

举例：例1(人口系统)

世界人口每增加10亿人大约经历的时间



注：人口数字包括香港特别行政区、台湾省和澳门地区。



中国人口每增加2亿人大约经历的时间

举例：例1(人口系统)

❖ 马氏人口理论关于人口发展过程可用下述简单模型加以描述：

$$\begin{aligned}x(k+1) &= \alpha x(k) \\ &= (1 + \beta - \gamma)x(k)\end{aligned}$$

其中： $x(k)$ ：k时刻人口数量； α 为净人口增长率； β 为出生率； γ 为死亡率

举例：例1(人口系统)

❖ 写成连续的形式

$$\frac{dx(t)}{dt} = \alpha_1 x(t)$$

* 系统不受控制的情形。

其中： $x(t)$ ： t 时刻人口数量； α_1 为净人口增长率； $\alpha_1 = \beta - \gamma$ ，
 β 为出生率； γ 为死亡率

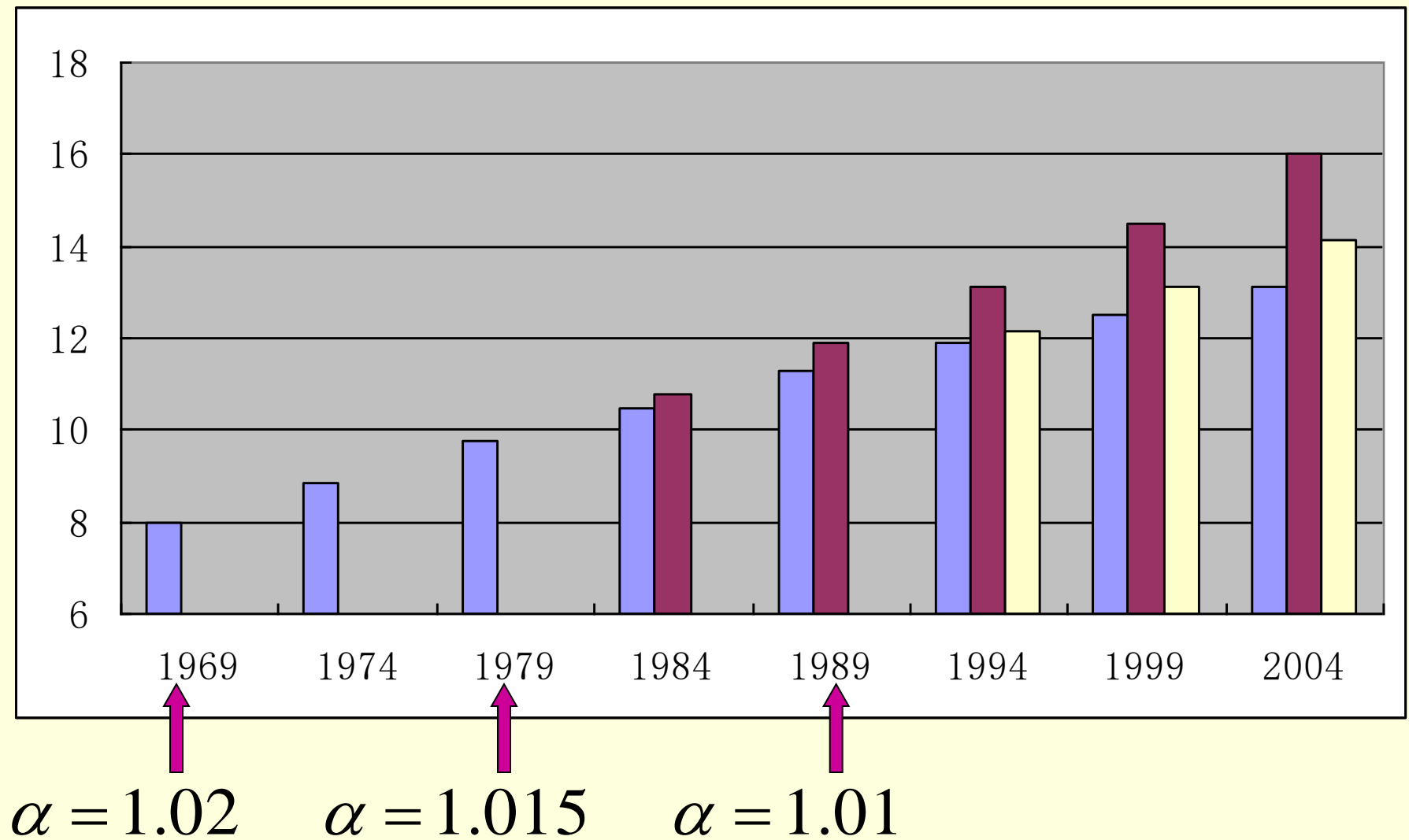
若 $\beta > \gamma \Rightarrow \alpha > 1 (\alpha_1 > 0) \Rightarrow$ 人口增长

$\beta < \gamma \Rightarrow \alpha < 1 (\alpha_1 < 0) \Rightarrow$ 人口下降

$\beta = \gamma \Rightarrow \alpha = 1 (\alpha_1 = 0) \Rightarrow$ 人口均衡发展

注意：连续与离散情形的不同！

举例：例1(人口系统)



γ (死亡率): 下降; β (出生率): 下降;

举例：例1(人口系统)

- ❖ “两种抑制”（控制方案）
 - ◆ “道德抑制”：要求无力抚养子女的人不要结婚，应当遵守性道德。认为这是控制人口代价最低的方案，否则贫困与罪恶不可避免。
 - ◆ “积极抑制”：认为人口增长后用战争、瘟疫、饥荒、赤贫等积极方式可以大量消灭人口。
- ❖ 对系统进行控制：通过施加一些控制措施使系统的某些参数发生变化。如：
 - ◆ 调整 β （出生率）：马氏第一方案，“计划生育”
 - ◆ 调整 γ （死亡率）：马氏第二方案，（灭鼠也属于此类）

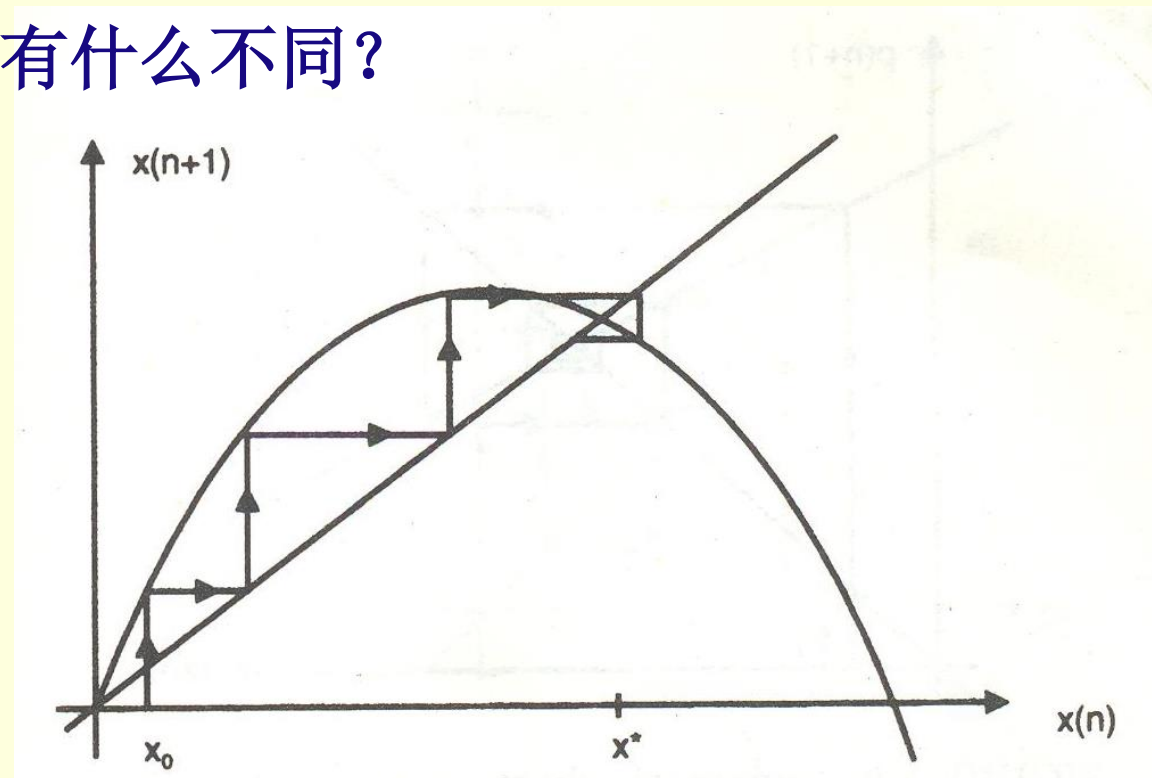
举例：例1(人口系统)

- ❖ 考虑资源有限的情况，人们需要竞争有限资源，因此，模型可以改造成：

$$x(k+1) = \alpha x(k) - bx^2(k)$$

- ❖ 与没有资源约束相比行为有什么不同？

如需要进一步深入研究，还可以考虑人口的结构，如：男女比例、年龄结构、知识结构等等



举例：例2(定价问题)

- ❖ 考虑一个无竞争的市场，一个企业基于市场的需求的生产和定价策略。定义几个变量：
 - ◆ $p(k)$: 第 k 周期的价格
 - ◆ $D(k)$: 第 k 周期的需求
 - ◆ $S(k)$: 第 k 周期的供给（生产量）
- ❖ 由经济学，我们可以得到下面最简化的关系（假设企业根据上一周期的市场价格安排生产）：

$$D(k) = -m_d p(k) + b_d$$

$$S(k+1) = m_s p(k) + b_s$$

其中：系数均大于0

举例：例2(定价问题)

- ❖ 进一步假设，该企业试图将所有生产的产品在销售季节（一个周期）卖完，即：

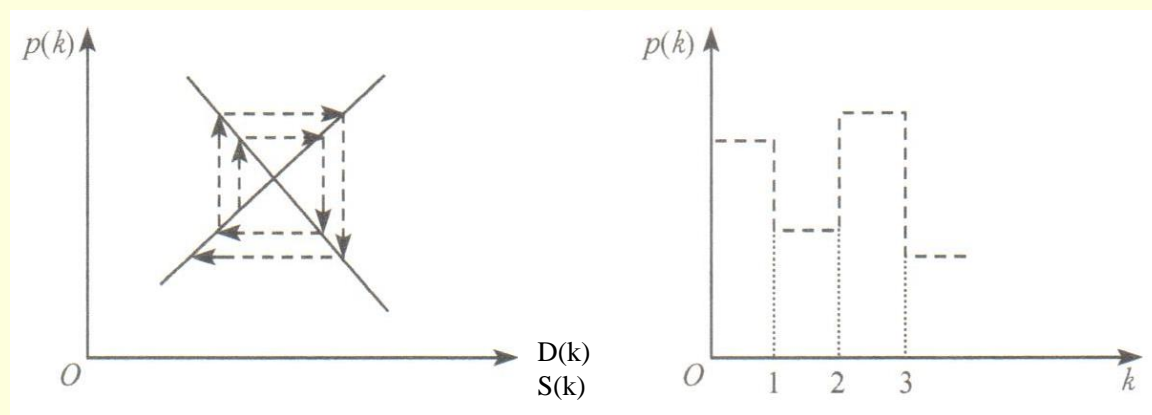
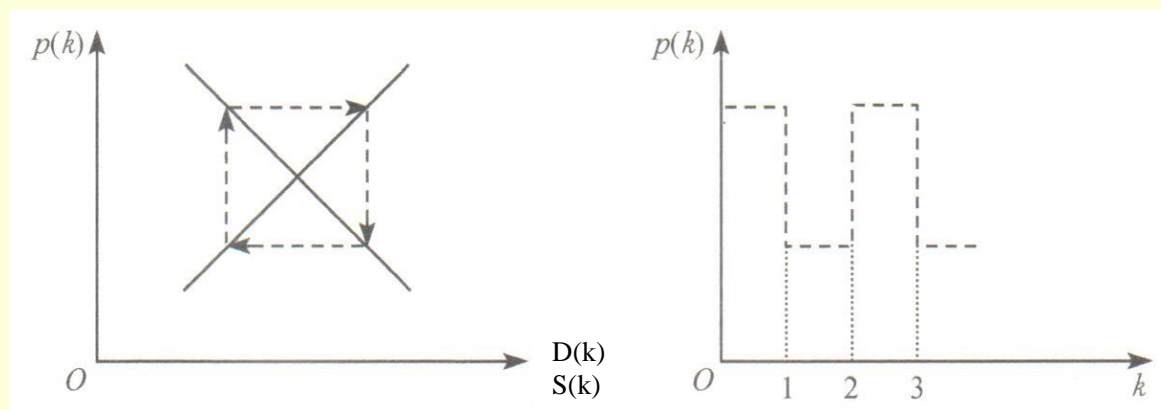
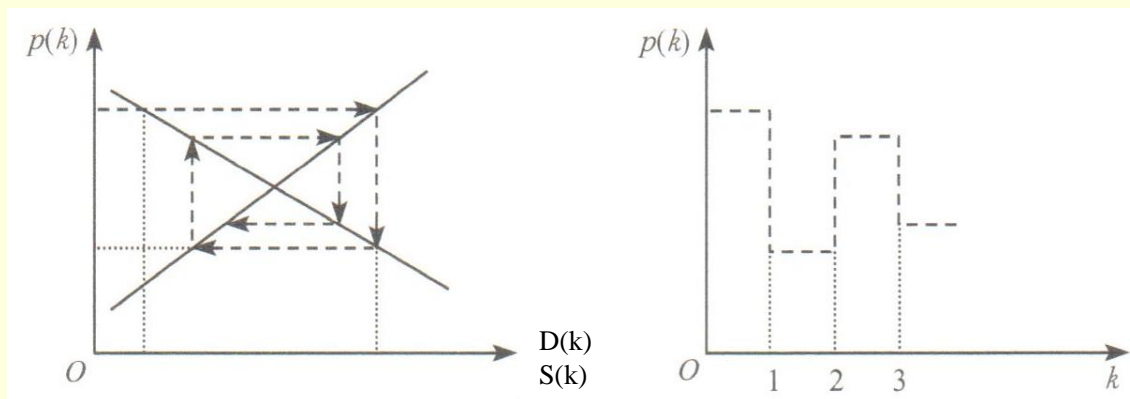
$$\mathbf{D}(\mathbf{k}+1) = \mathbf{S}(\mathbf{k}+1)$$

- ❖ 从而得到：

$$\mathbf{p}(\mathbf{k}+1) = \mathbf{A}\mathbf{p}(\mathbf{k}) + \mathbf{B}$$

- ❖ 其中： $\mathbf{A} = -\mathbf{m}_s/\mathbf{m}_d$, $\mathbf{B} = (\mathbf{b}_d - \mathbf{b}_s)/\mathbf{m}_d$

举例：例2(定价问题)



举例：例3(种群竞争，生态系统)

- ❖ 设在一个孤岛上只有两种动物：狼和羊，羊的食物为草，而狼的食物是羊。20's-30's，出生于乌克兰的美国人Alfred J. Lotka (1880-1949)和意大利人Vito Volterra(1860 - 1940)最早对这个问题进行研究，假设
 - ◆ 捕食者(狼， t 时刻的数量记为 $N_2(t)$)完全依赖被捕食者(羊， t 时刻的数量记为 $N_1(t)$)而生存
 - ◆ 被捕食者有充足的食物，并且没有其它天敌
- ❖ 先对双方的情况进行分析
 - ◆ 如果岛上没有狼，则羊的数量将按指数增长(与人口模型一样，并设羊有足够的食物)，其增长速度显然与羊当前的数量有关，设为 $aN_1(t)$
 - ◆ 如果岛上没有羊，则狼没有食物(设狼不吃草)，它的数量将按指数下降(出生率低于死亡率)，其下降的速度同样与狼当前的数量有关，设为 $-bN_2(t)$

举例：例3(种群竞争，生态系统)

- ◆如果岛上同时有狼和羊存在，那么他们必然有机会相遇，显然，相遇的概率与两种动物的数量成正比。狼与羊相遇，则羊遭到捕杀，导致羊的数量下降，设为 $-cN1(t)N2(t)$ ；相反将使得狼的数量增加，设为 $dN1(t)N2(t)$
- ◆总结起来，有：

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dN1(t)}{dt} = aN1(t) - cN1(t)N2(t) \\ \frac{dN2(t)}{dt} = -bN2(t) + dN1(t)N2(t) \end{array} \right.$$

Lotka - Volterra模型

举例：例3(种群竞争，生态系统)

❖ 进一步验证

◆ 没有狼，即： $N2(t)=0$

$$\frac{dN1(t)}{dt} = aN1(t)$$

$$N1(t) = e^{at} \quad a > 0$$

◆ 没有羊，即： $N1(t)=0$

$$\frac{dN2(t)}{dt} = -bN2(t)$$

$$N2(t) = e^{-bt} \quad b > 0$$

◆ 动态平衡

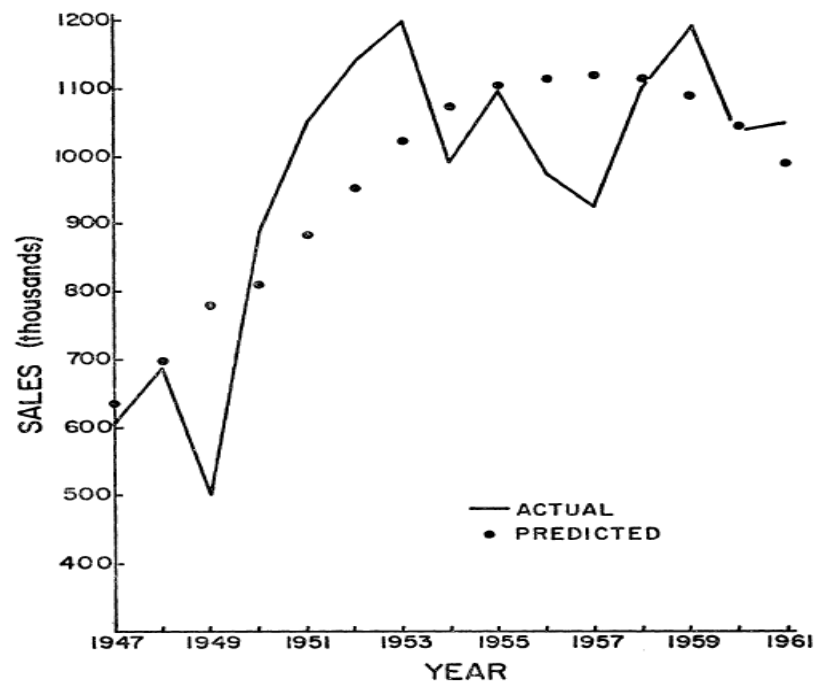
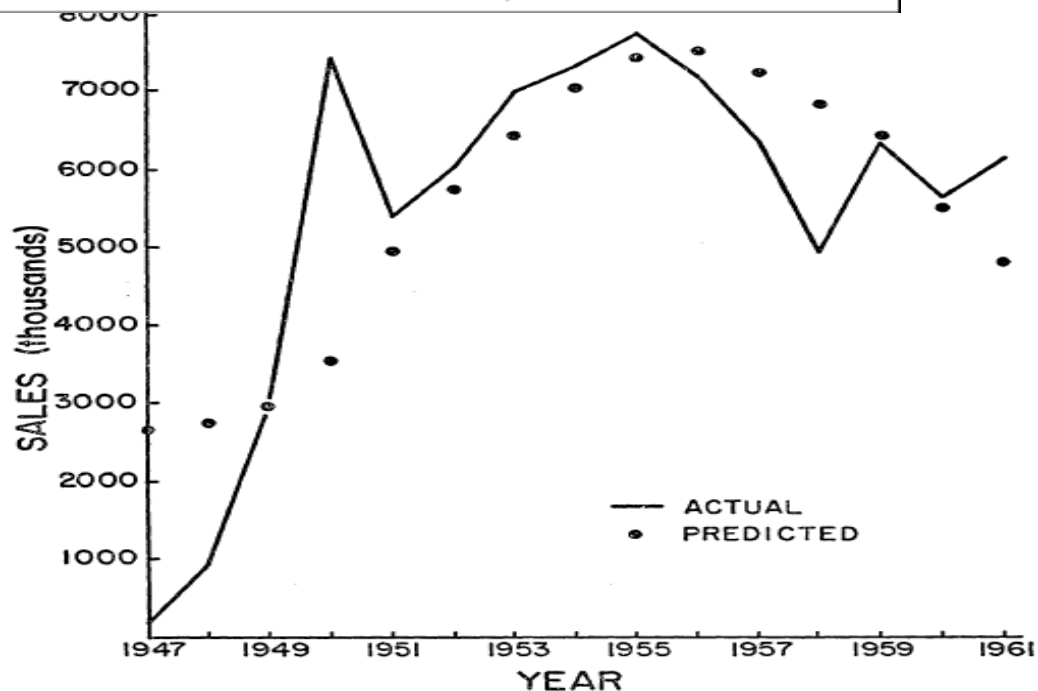
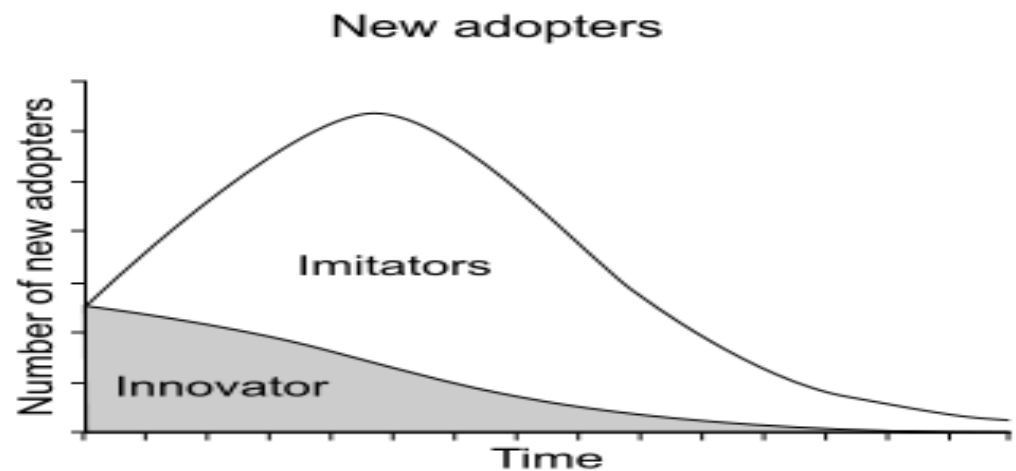
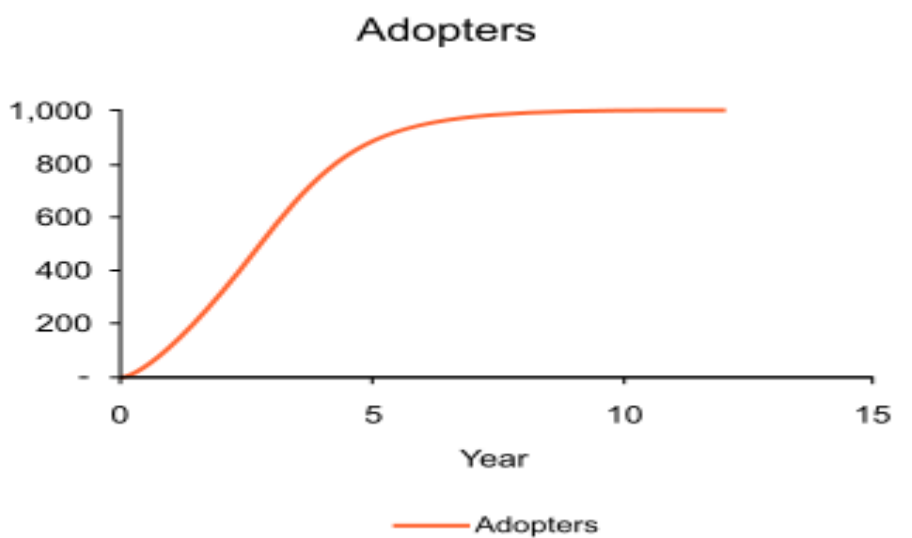
举例： 例4(产品扩散过程)

❖ Bass模型

$$N(k+1) = N(k) + p[m - N(k)] + \frac{q}{m} N(k)[m - N(k)]$$

- ❖ where: $N(k)$ is number of adopters from period 0 to period k
 m is the market potential, the total number of people who will eventually use the product
 p is the coefficient of innovation(external influence), the likelihood that somebody who is not yet using the product will start using it because of mass media coverage or other external factors
 q is the coefficient of imitation(internal influence), the likelihood that somebody who is not yet using the product will start using it because of “word-of-mouth” or other influence from those already using the product.

举例：例4(产品扩散过程)



举例：例5(产品广告控制模型)

❖ Nerlove&Arrow模型

$$\dot{A}(t) = -\delta A(t) + u(t)$$

where: $A(t)$, advertising goodwill, which summarizes the effects of current and past advertising expenditures by a firm on the demand for its products

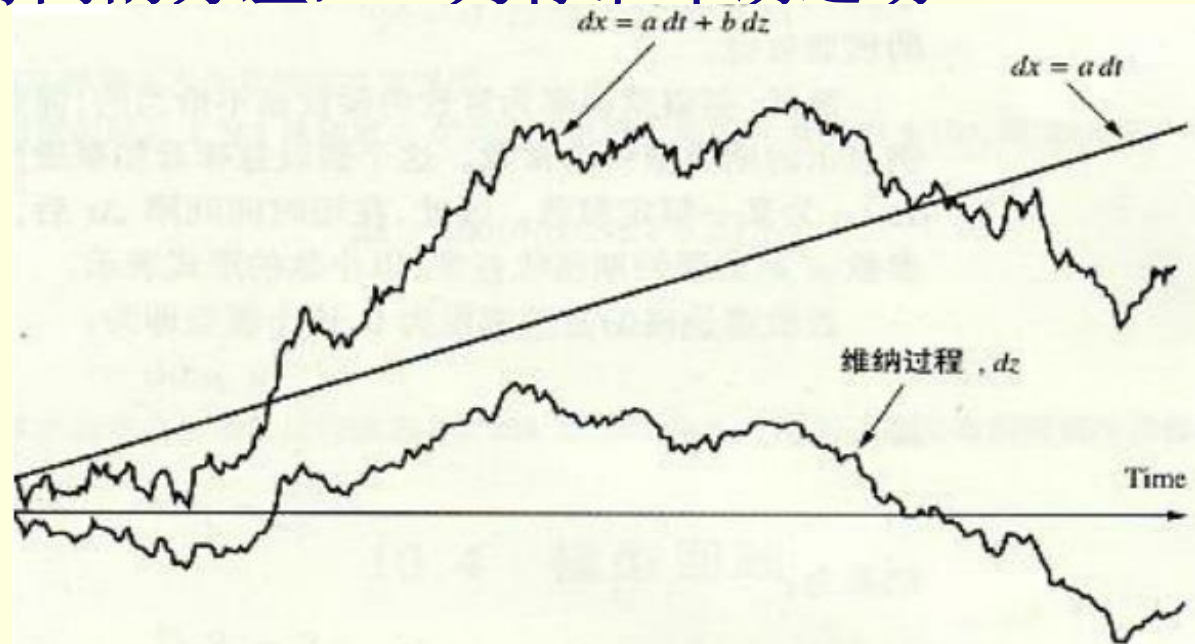
$u(t)$ denotes the current advertising rate (in dollars) and δ is a constant proportional depreciation rate.

举例：例6(证券运动过程)

❖ 维纳过程模型

$$\frac{dS}{S} = \mu dt + \sigma dz$$

- ❖ 其中：S为t时刻的股票价格， μ 为股票单位时间期望收益率(Expected rate of return)， σ 为股票价格波动率(Stock price volatility)， σ^2 为单位时间的方差，dz为标准布朗运动



动态系统描述

❖ 人口系统

$$x(k+1) = \alpha x(k)$$

- 线性、离散系统
- 系统不受控制的情形。

---- 差分方程

❖ 广告控制

$$\dot{A}(t) = -\delta A(t) + u(t)$$

- * 线性、连续系统
- 系统受控制的情形。

---- 微分方程

❖ 种群竞争

$$\begin{cases} \frac{dN_1(t)}{dt} = aN_1(t) - cN_1(t)N_2(t) \\ \frac{dN_2(t)}{dt} = -bN_2(t) + dN_1(t)N_2(t) \end{cases}$$

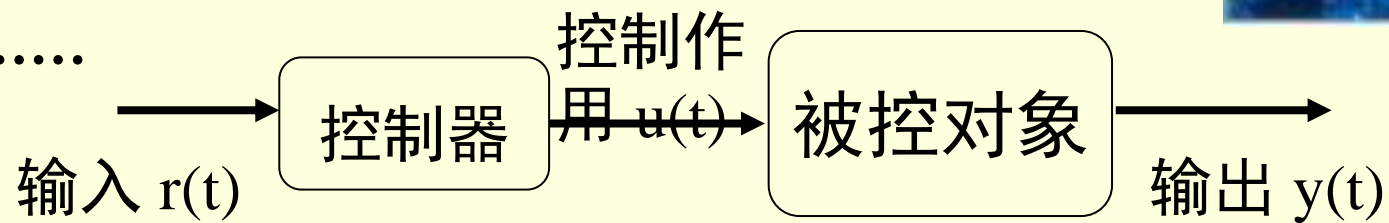
- 非线性、连续系统

---- 微分方程

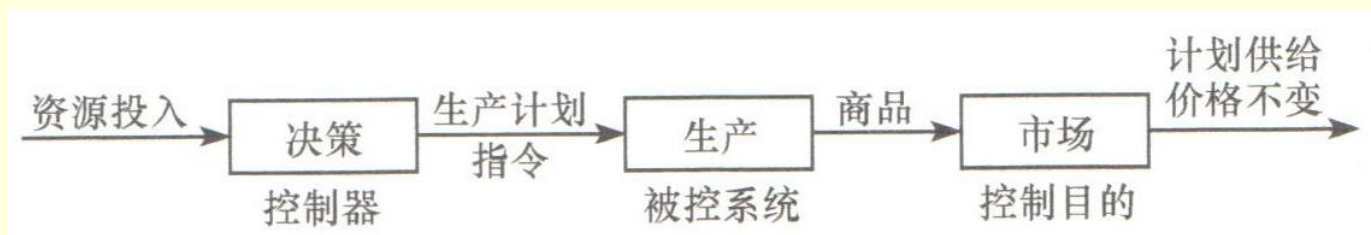
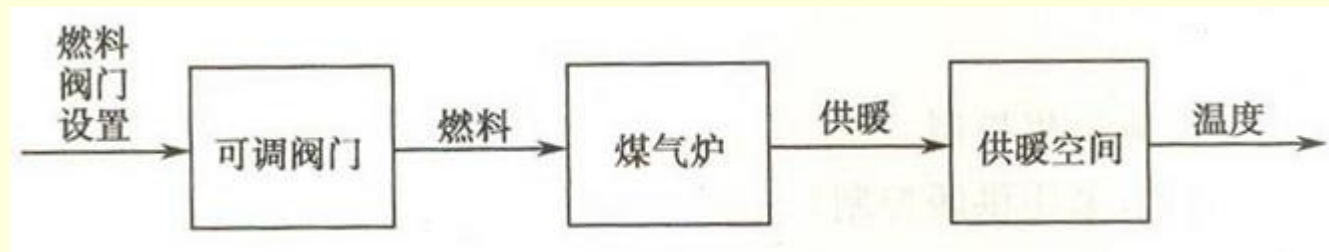
控制系统的形式

❖ 开环控制系统

- ◆ 计划经济
- ◆ 计算机程序
- ◆ 自动洗衣机
- ◆



例如：



控制系统的形式

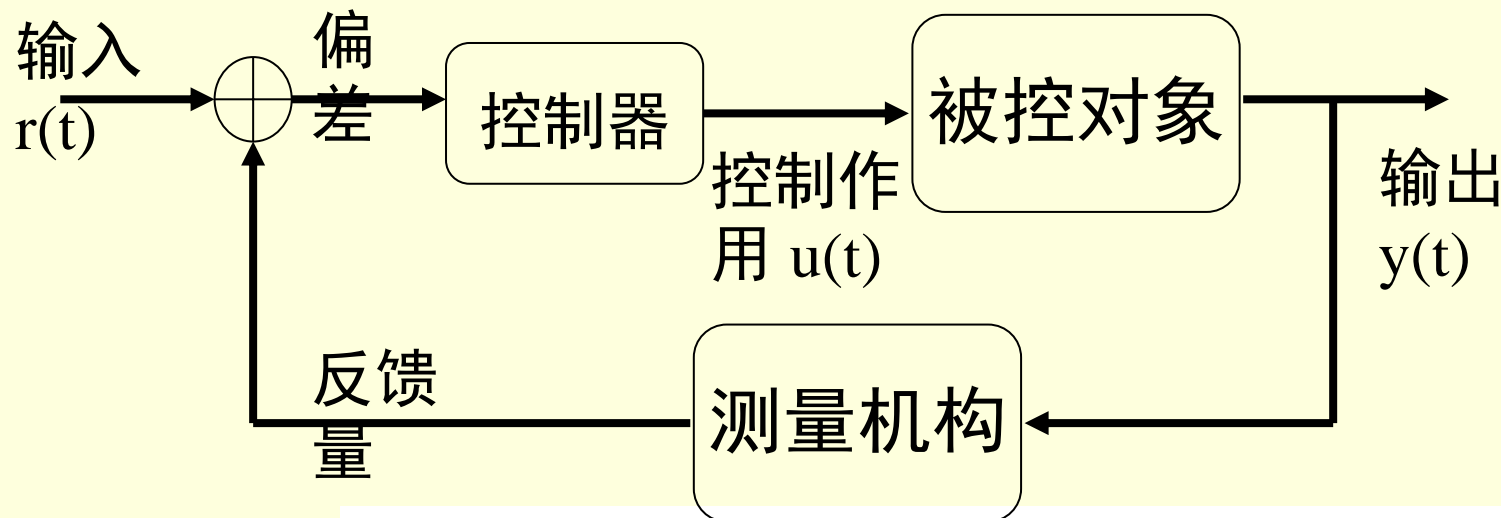
❖ 开环控制系统的特点

- ◆ 控制量：事先确定
- ◆ 简单
- ◆ 对模型精度要求很高
- ◆ 对扰动敏感
- ◆ 稳态精度不高
- ◆

- ◆ “扰动”：能对系统运动行为产生影响的无规律的信号。
。如：经济系统中的自然灾害(如：SARS)。
 - “内扰”，“外扰”

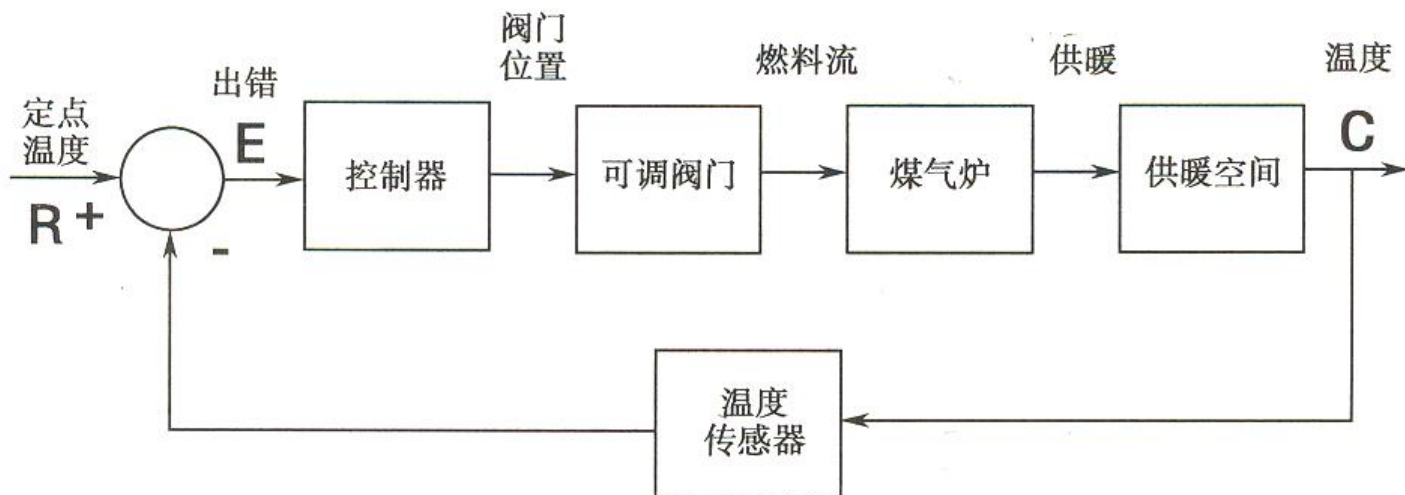
控制系统的形式

❖ 反馈控制系统

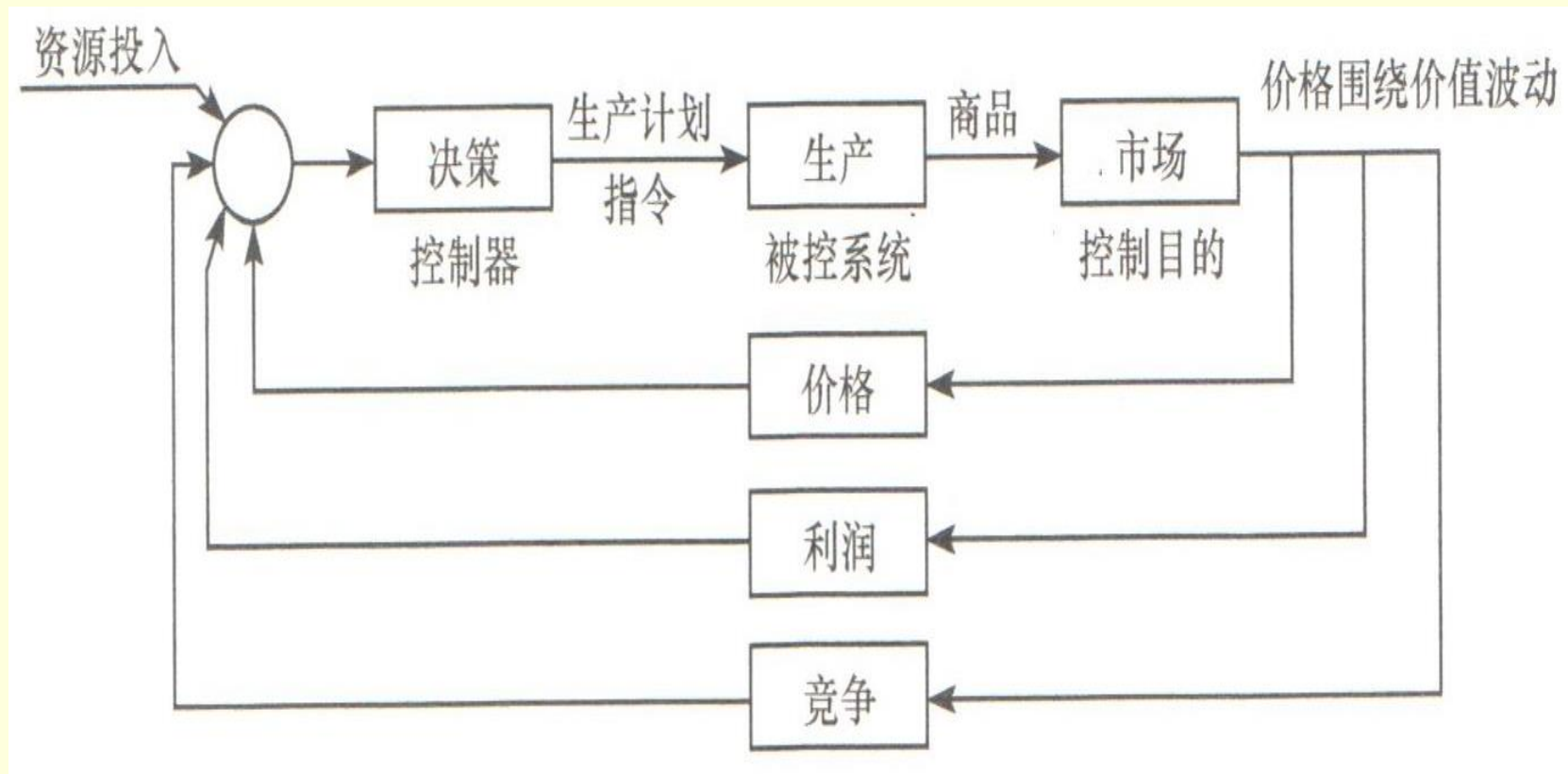


反馈：把系统的输出直接或者通过测量机构引向输入端，与输入信号共同构成控制作用。

例如：



控制系统的形式



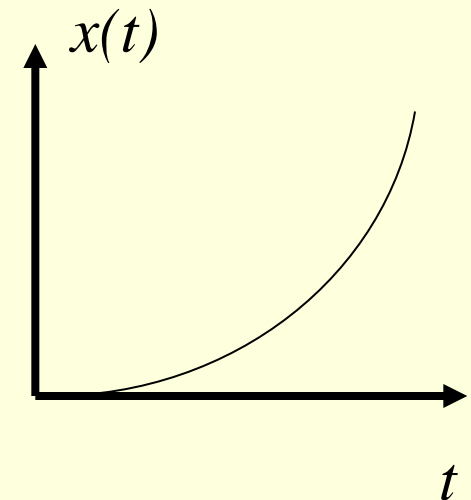
控制系统的形式

❖ 正反馈

◆ 正反馈倾向于增强或放大系统的输出(自增强, self-reinforcing)

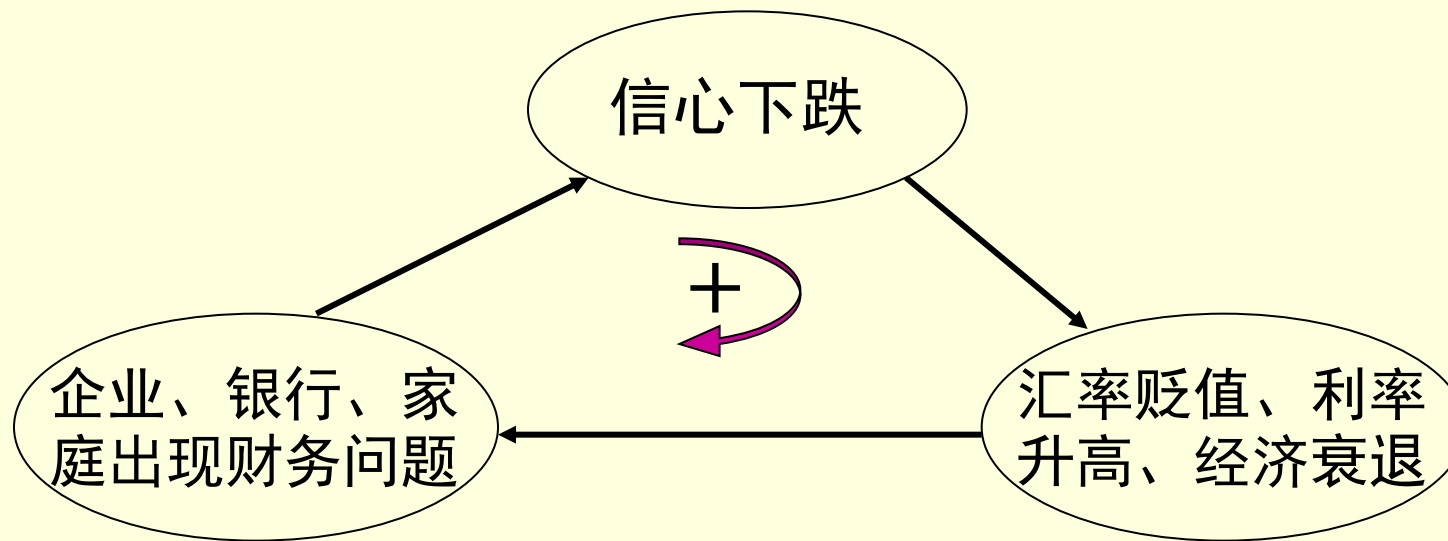
- 冷战时期: 美国 vs 苏联之间的军备竞赛
- QWERTY键盘(Christopher Sholes, 1874)
- 70's, 松下VHS和索尼BETA录像带之间的竞争
- 增加工资——提高物价
-

边际收益递增



控制系统的形式

开发快的剃须刀 \Rightarrow 节约时间 \Rightarrow 开发更快的剃须刀 \Rightarrow 节约更多的时间 \Rightarrow



泰国金融危机的恶性循环过程

控制系统的形式

❖ 负反馈

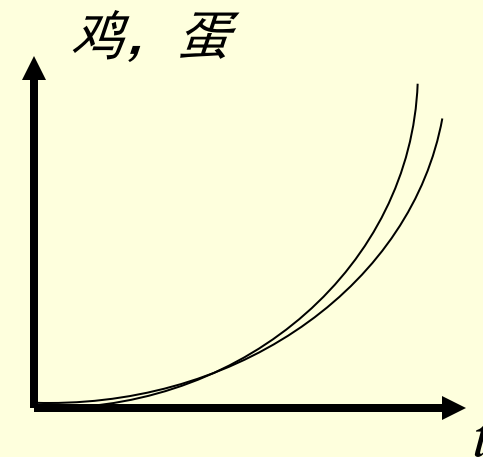
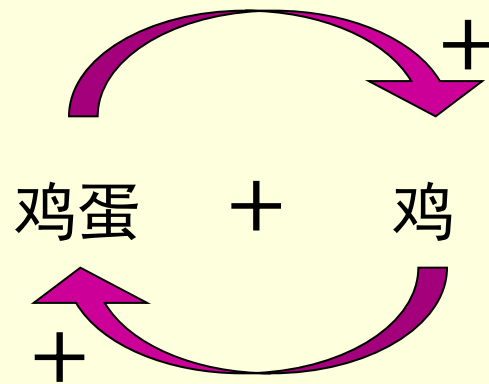
- ◆ 它试图抑制系统的变化 \Rightarrow 平衡或均衡（自校正, self-correcting）
- ◆ 优秀小区 \Rightarrow 更多的人定居 \Rightarrow 房价上涨、道路拥挤、... \Rightarrow 小区不再那么优秀 \Rightarrow 进一步再来的人减少
- ◆ 产品价格 —— 需求
- ◆ 生产量 —— 库存
- ◆ 市场垄断 —— 政府反垄断
- ◆
- ◆ 特点
 - 抗干扰能力强
 - 对模型精度要求不高
 - 复杂
 - 稳定性、振荡问题
 -

边际收益递减

控制系统的形式

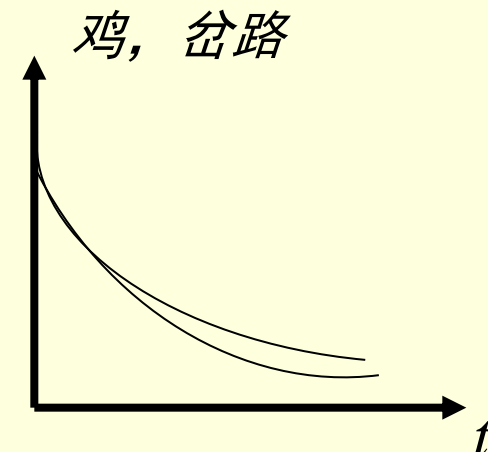
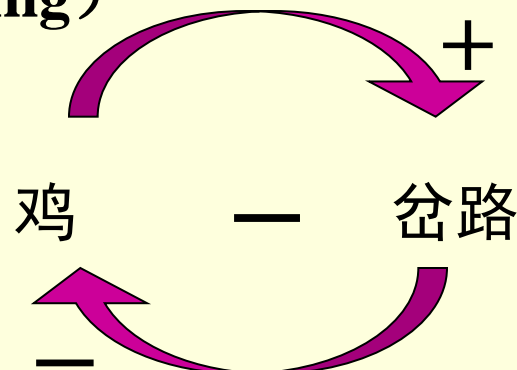
❖ 正反馈

- ◆ 正反馈倾向于增强或放大系统的输出(自增强, **self-reinforcing**)



❖ 负反馈

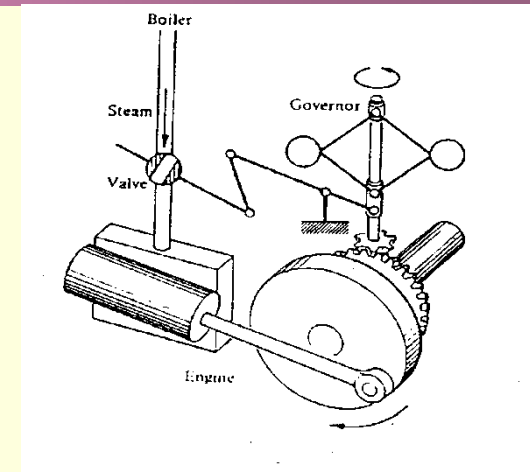
- ◆ 它试图抑制系统的变化 \Rightarrow 平衡或均衡 (自校正, **self-correcting**)



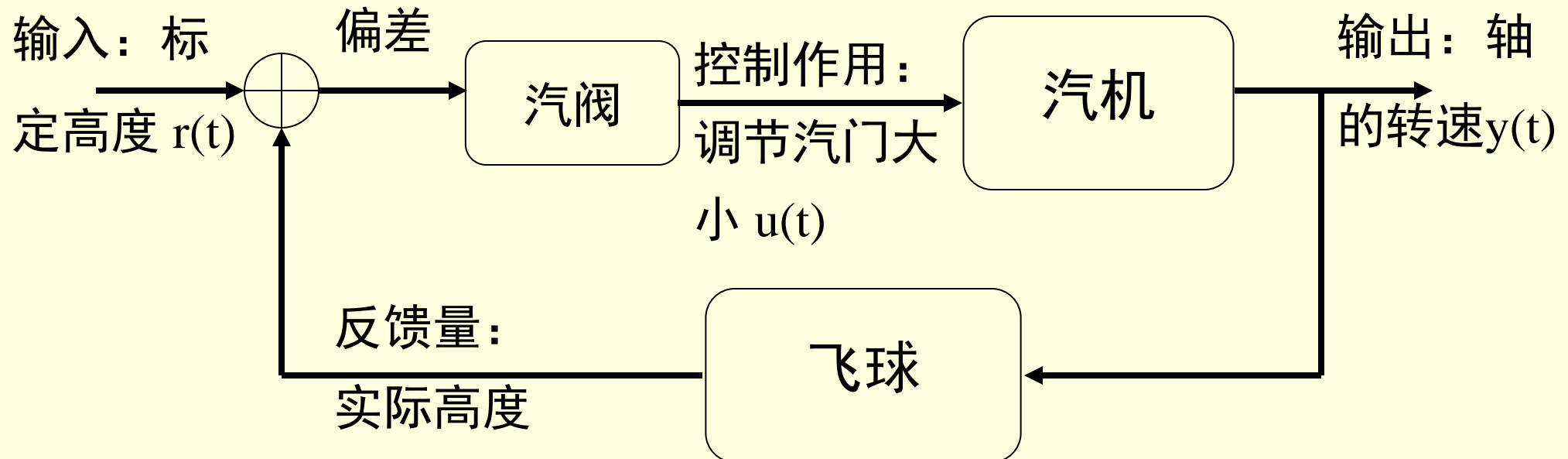
历史回顾

❖ 两千多年前，漏壶、指南车

❖



❖ 1788年，Watt的离心式调速器(飞球调速器，蒸汽机)



历史回顾

- ❖ 调速系统 \Rightarrow 振荡问题
- ❖ 1860's, Maxwell开始对稳定性进行研究
- ❖ 1890's, Routh, Hurwitz对高阶代数方程稳定性判据的研究; Lyapunov对非线性系统的研究
- ❖
- ❖ 1930's以后, Bode、Nyquist、Evans提出频域分析法 \Rightarrow 古典控制理论
 - ◆ 对象: SISO (单输入/单输出) 线性定常系统
 - ◆ 方法: 频域分析法, 传递函数
 - ◆ 数学工具: 微分(差分)方程, L、Z变换

历史回顾

- ❖ 1950's后期开始, **Kalman**的状态空间, **Bellman**的动态规划, **Pontriagin**的极大值原理 \Rightarrow 现代控制理论
 - ◆ 对象: **MIMO**(多输入/多输出), 线性/非线性, 定常/时变, 随机
 - ◆ 方法: 时域分析, 状态方程
 - ◆ 数学工具: 线性代数, 矩阵分析, 古典变分, 随机过程
- ❖ 1970's, 大系统理论
 - ◆ 思路: 分解协调——集中, 层次
分散控制——自治, 扁平
 - ◆ 典型交通系统, 典型通讯系统,
- ❖ 1980's, 智能控制
- ❖ 1990's——, 复杂系统分析与控制

历史回顾

- ❖ 系统与控制的思想在几乎所有的领域都得到广泛的应用和发展，包括在管理和经济等领域；
- ❖ 亚当斯密在其著作《国富论》(The Wealth of Nations)中形象地将市场体系比喻为一只“看不见的手”，朴素地反映了反馈、调节、均衡稳定等控制论的基本思想；
- ❖ 泰勒提出采用系统化的方法对企业生产过程进行科学管理；
- ❖ 列昂捷夫把瓦尔拉供求模型的平衡方程应用到集中计划经济的情况，建立投入产出模型(Input-Output Model)应用于经济分析和预测；
- ❖ 数学家冯诺伊曼和经济学家莫根施特恩合作发表了专著《对策论与经济行为(The Theory of Games and Economic Behaviour)》为分析经济等问题中竞争现象奠定了基础；

历史回顾

- ❖ 20世纪50年代初，世界控制论大会上出现了经济控制论一词，后来波兰学者隆盖出版了《经济控制论导论》(*Introduction to Economic Cybernetic*);
- ❖ 福雷斯特创立系统动力学(System Dynamics)，并用于构建工业动力学(Industrial Dynamics)和世界动力学(World Dynamics)模型，之后系统动力学的思想被广泛应用于商务系统中(Business Dynamics);
- ❖ 华裔学者邹至庄教授(Gregory C. Chow)将最优控制、卡尔曼滤波等现代控制论的概念与方法应用于经济系统分析，出版了《动态经济系统的分析与控制》(Analysis and Control of Dynamic Economic Systems)一书;
- ❖

小结

- ❖ 动态系统的特点及分类
- ❖ 系统分析与建模举例
- ❖ 控制系统的主要形式
- ❖ 历史回顾

**** 动态系统的概念、描述形式，反馈的概念**