

第1章

第1章

系统科学引论

主讲人：肖人彬

(人工智能与自动化学院)

rbxiao@163.com

教学重点

第1章为本课程的序篇。在课堂上，我们重点掌握几个内容：

- ✓ 系统科学产生和发展的三个重要阶段
- ✓ 系统的定义、结构、层次、开放性、功能、演化等基本概念
- ✓ 系统一些分类方法及重要特征

复杂性科学
基础



1.1.1 系统科学的形成

➤ 历史背景

- 古代整体观思想认为，自然界作为统一体，人和自然是统一的
- 16、17世纪确立机械自然观和科学方法论
- 19世纪上半叶能量守恒、细胞学和进化论
- 20世纪中叶计算机、航空、航天、信息、生物等领域的辉煌成就

1.1.1 系统科学的形成

➤ 历史背景

- 进入21世纪，科技飞速发展，信息大爆炸，人类生存环境协调和谐发展，多学科交叉融合

人类理智夸入“想入非非”时代

1.1.2 20世纪40—60年代从系统论、控制论到系统工程

➤ 一般系统论

- 1937年，理论生物学家贝塔朗菲所提出。概括出系统共性：整体性、关联性、动态性、有序性、终极性（目的性）
- 不是简单的拼加，要考虑子系统与整体之间的关系



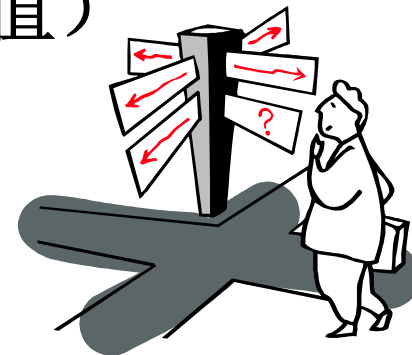
1.1.2 20世纪40—60年代从系统论、控制论到系统工程

➤ 运筹学

- 20世纪30年代末，战争武器系统的发展

- 分析制约因素 —— 要实现的目标

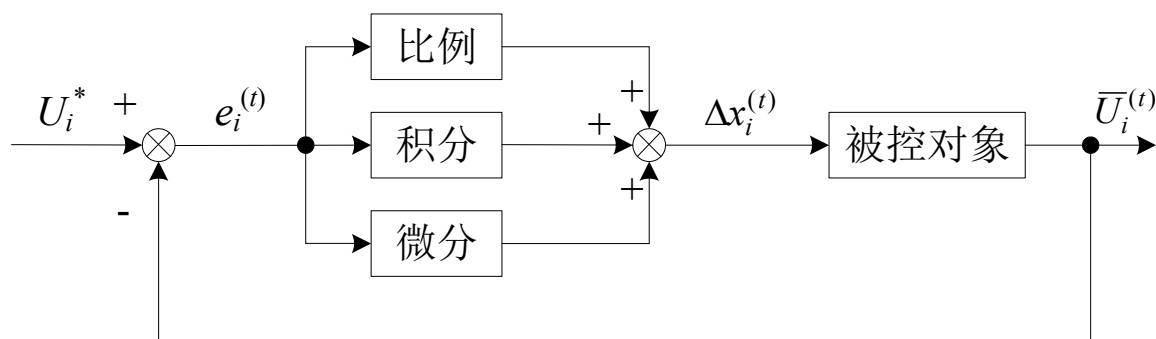
目标函数
(约束条件 —— 极大或极小值)



1.1.2 20世纪40—60年代从系统论、控制论到系统工程

➤ 控制论

- 20世纪40年代末，火炮自动瞄准飞机与狩猎行为——反馈机制
- 控制论：输入、输出、信息、反馈、控制行为及目标



1.1.2 20世纪40—60年代从系统论、控制论到系统工程

➤ 信息论

- 1948年，香农发表《通信的数学理论》标志信息论(informatics)的诞生。
- 信息论乃是关于系统的信息传递和处理的科学理论。

1.1.2 20世纪40—60年代从系统论、控制论到系统工程

► 计算机

- 1946年，世界上第一台冯·诺伊曼计算机诞生。

- 人类智能物化



1.1.2 20世纪40—60年代从系统论、控制论到系统工程

➤ 系统工程

- 解决复杂的工程问题
- 美国国家智库兰德公司利用“系统分析”研究社会、经济系统，供美国政府参考决策
- 泰勒为代表的管理科学学说
- 1969年，美国阿波罗飞船登月，系统工程最成功的范例

1.1.3 20世纪70年代从耗散结构论、协同学、突变论到非线性科学

- 耗散结构论 (**dissipative structure theory**)
 - 1969年，比利时自由大学化学家普利高津提出，因而获得诺贝尔奖。
 - 开放系统远离平衡状态所形成的需要消耗物质和能量的有序结构称为耗散结构。
 - 研究一个开放系统由混沌向有序转换的机理、条件和规律。

1.1.3 20世纪70年代从耗散结构论、协同学、突变论到非线性科学

► 协同学 (synergetics)

- 1969年，德国理论物理学家哈肯提出。
- 系统从无序到有序的关键是系统内部各子系统间通过非线性相互作用和协作，在一定条件下，自发产生在时间、空间或功能上稳定的有序结构，这就是自组织理论。
- 系统在临界点（分支点）附近的行为仅由少数变量决定，系统的慢变量支配快变量，即支配原理。

1.1.3 20世纪70年代从耗散结构论、协同学、突变论到非线性科学

► 突变论 (catastrophe theory)

- 1972年，法国数学家托姆出版专著《结构稳定性和形态发生学》。
- 研究系统的状态随外界控制参数连续改变而发生不连续变化的数学理论。

太阳系是否稳定？

1.1.3 20世纪70年代从耗散结构论、协同学、突变论到非线性科学

► 混沌学

- 研究确定性动力学系统所表现出来的具有貌似随机，无规则性复杂行为混沌运动的非线性动力学。
- 研究混沌运动中从无序到有序的演化及其反演化的规律和控制的科学。
- 混沌(chaos)一词由李天岩和约克在1975年提出。

无序中的有序

上帝如何掷骰子？

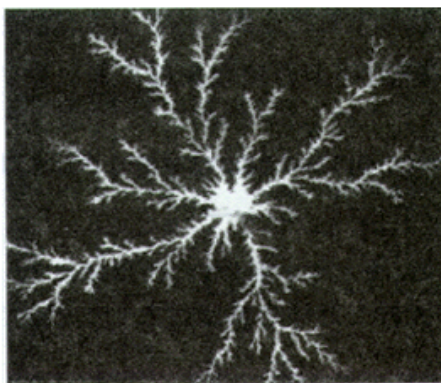
1.1.3 20世纪70年代从耗散结构论、协同学、突变论到非线性科学

➤ 分形学

- 分形（**fractal**）由美国**IBM**公司数学家曼德布罗德**1973**年提出。
- 分形几何研究自然景物不规则图形，核心在于自相似性和递归性。
- 分形注重对某一动力行为而产生的吸引子的研究。

1.1.3 20世纪70年代从耗散结构论、协同学、突变论到非线性科学

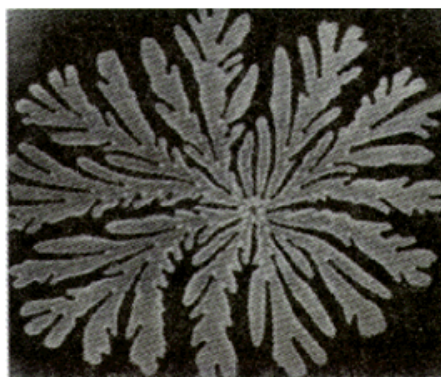
➤ 分形学 fractal



电解沉积



细菌群落



黏性指进



多孔介质的化学溶解

1.1.3 20世纪70年代从耗散结构论、协同学、突变论到非线性科学

➤ 超循环理论 (hypercycle theory)

- 德国学者艾根 (M.Eigen) 根据进化论和自组织理论于1979年提出
- 研究分子自组织进化现象
- 将生命起源解释为自组织现象

1.1.3 20世纪70年代从耗散结构论、协同学、突变论到非线性科学

非线性科学出现前：

机械整体观——整体等于局部之和，认识了局部就等于认识了整体；

系统整体观——整体大于局部之和，认识了局部不等于认识整体。

非线性科学出现后：

混沌与分形理论进一步表明，整体既不同于局部，又等同于局部，这是一种崭新的辩证整体观。

1.1.4 20世纪80年代从复杂性、复杂系统到复杂适应系统理论

➤ 简单性与复杂性

- 复杂性并不等同于组成系统的要素在数量上“多”，
简单的根源是线性，而复杂的根源是非线性。

➤ 复杂性研究热潮

- 1984年，美国圣菲研究所（SFI）。运用自组织、混沌概念及提出涌现（**emergence**）、复杂适应系统（**complex adaptive system**）来研究复杂性。
- 复杂性研究领域包括社会系统、经济系统、生命系统、免疫系统、生态系统及人脑系统。

1.1.4 20世纪80年代从复杂性、复杂系统到复杂适应系统理论

➤ 研究专著及研究动态

- 1992，沃尔德罗（M.Waldrop）《复杂性—诞生于秩序与混沌边缘的科学》。
- 1995，霍兰（J.H.Holland）《隐秩序：适应性造就复杂性》。
- 1998，霍兰《涌现—从混沌到有序》。
- 1999，美国《Science》出版《复杂系统》专辑。
- 2001、2002，SFI在布达佩斯举办第一、第二期复杂系统暑假学校，2004年在青岛大学举行。

1.1.5 21世纪的科学——复杂性科学

➤ 主要特点

- 研究对象是复杂系统。
- 研究方法是定性判断与定量计算相结合，微观分析与宏观综合相结合，还原论与整体论相结合，科学推理与哲学思辩相结合。
- 研究深度不限于对客观事物的描述，而着重于揭示客观事物构成的原因、演化的历程及其复杂机理，并力图尽可能准确地预测其未来的发展。

1.1.5 21世纪的科学——复杂性科学

➤ 研究重点

- 研究复杂性与复杂系统中各组成部分之间相互作用所涌现出复杂行为、特性与规律的科学。
- 主要领域包括复杂性科学的理论与方法、物理层次复杂系统、生物层次复杂系统、社会层次复杂系统。

1.2.1 系统的定义

通常，将一些相互关联、相互作用、相互制约的组成部分构成的具有某种功能的整体称为系统。

组成系统的三要素：

- 有许多部分组成（整体与部分）
- 部分之间存在着相互关联、相互作用、相互制约（相关性/相干性）
- 具有某种功能的整体（功能性）

1.2.1 系统的结构

系统在组分不变的情况下，为了完成系统整体的功能而把系统内关联的组分与组分之间整合为统一的整体形式——系统的结构。

系统结构的划分：

- 静态结构
- 动态结构
- 时间结构
- 空间结构
- 时空结构

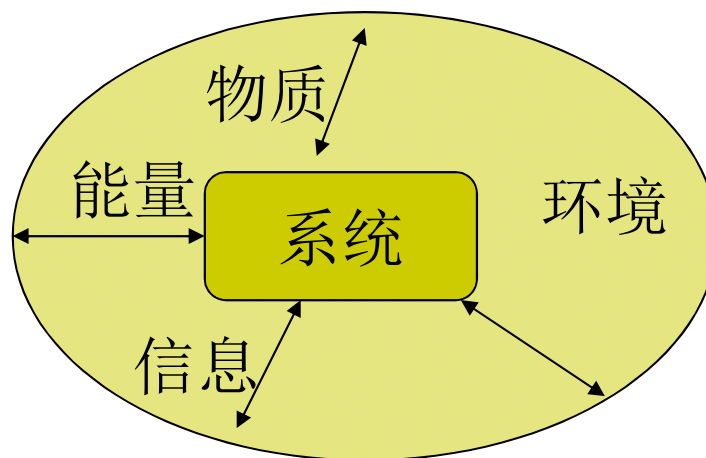
1.2.3 系统的层次

- 一个复杂系统包括许多子系统，整合在同一级别上的系统就构成一个层次。
- 复杂系统必须按层次划分由低级到高级逐级进行组织整合才能称为系统整体。
- 层次反映一个系统的复杂程度

复杂系统必须由低层到高层逐层整合，最终涌现系统整体层次。
- 系统层次分析是结构分析的重要方面。

1.2.4 系统的开放性

- 系统之外与之相关联并对系统产生响应的事物所构成的集合称为该系统的环境。
- 任何一个系统都与环境有关并受其影响。
- 根据系统与环境的作用，将系统分为开放系统与封闭系统。

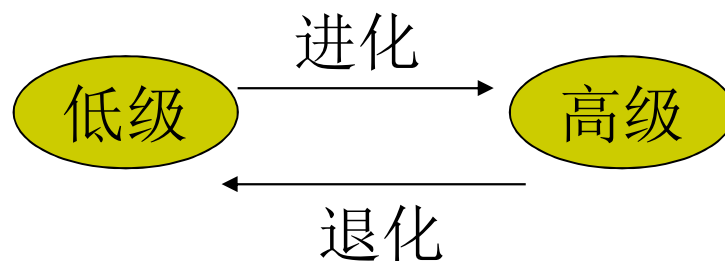


1.2.5 系统的行为、功能

- 一个系统在其所处环境的作用下所表现出系统自身特性的任何变化称为系统的行为。
- 系统的行为对环境中的某些事物乃至环境产生的持续作用，称为系统的功能。
- 系统功能反映了系统整体特性（整体涌现性）。
- 系统的功能由其结构和环境共同决定。

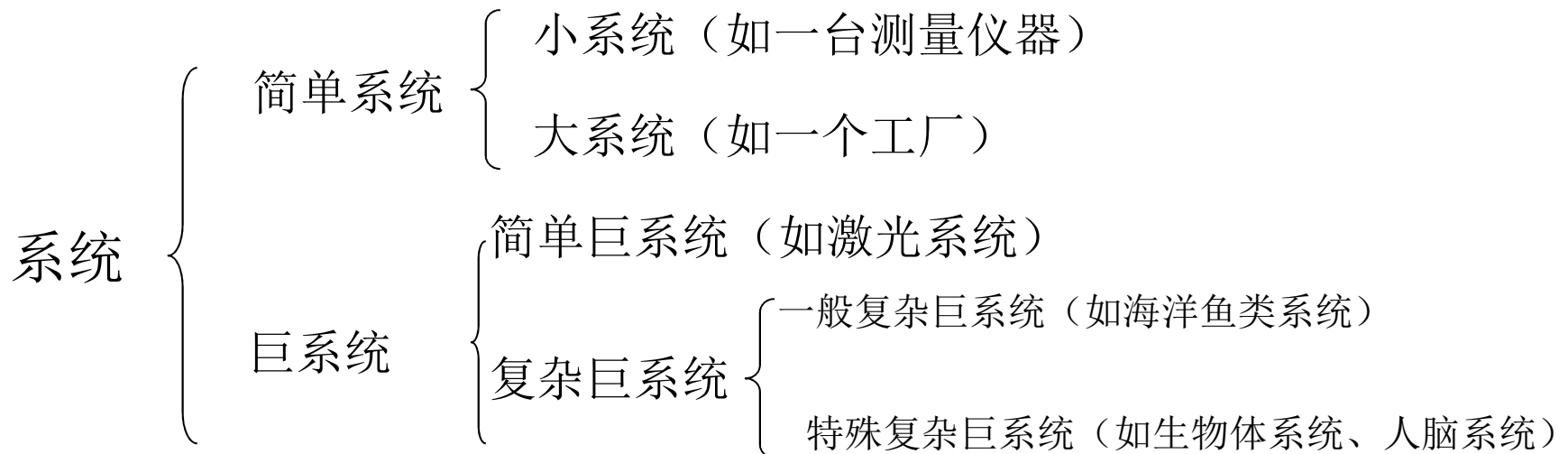
1.2.5 系统的演化

- 系统的结构、状态、特性、行为、功能等随着时间的推移而发生变化称为系统的演化。
- 系统演化的原因：内因（内部作用），外因（外部环境作用）。



1.3.1 系统的分类方法

- 按系统组成部分的数量规模大小分为：小系统（**little system**）、大系统（**large system**）和巨系统（**giant system**）。
- 按系统层次结构简单与否分为：简单系统（**simple system**）和复杂系统（**complex system**）。



1.3.1 系统的分类方法

- 根据客观世界物质系统空间尺度的大小分为：渺观、微观、宏观、宇观和胀观。

目前人类研究范畴

层次名称	渺观系统	微观层次	宏观层次	宇观层次	胀观层次
研究领域	超弦理论	量子力学	牛顿力学	相对论	(有待研究)
空间尺度	10^{-34}cm	10^{-15}cm	10^2m	$10^{21}\text{m}(10^5\text{ly})$	$10^{40}\text{m}(10^{24}\text{ly})$

客观世界物质系统空间尺度的5个层次

1.3.1 系统的分类方法

- 按系统输入输出特性的复杂性程度的不同分为：线性系统、非线性系统、复杂性系统（复杂系统）。
- 人脑系统、人体系统、社会系统、地理环境系统等都属于非常复杂的适应系统，也可称为开放的复杂巨系统。

不是我不明白，

这世界变化太快。

扎扎实实掌握知识，

以不变应万变！

1.3.2 线性系统

➤ 能用线性数学描述的系统。线性连续动态系统的数学模型

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_{1n}x_n \\ \dot{x}_2 = a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \cdots + a_{2n}x_n \\ \vdots \\ \dot{x}_n = a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \cdots + a_{nn}x_n \end{cases}$$

令状态向量为 $X = (x_1, x_2, \cdots, x_n)^T$

则系统矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

写成向量形式

$$\dot{X} = AX$$

1.3.2 线性系统

- 线性系统的加和性、齐次性与叠加性。

$$f(x_1+x_2) = f(x_1) + f(x_2) \quad \text{加和性}$$

$$f(kx) = kf(x) \quad \text{齐次性}$$

$$f(ax_1+bx_2) = af(x_1) + bf(x_2) \quad \text{叠加性}$$

- 线性科学中的决定论：初始状态（条件）确定后，系统未来的状态（行为）也就决定了。

线性系统

只要知道初始条件，
即可了解过去，预测未来

1.3.3 非线性系统

- 不能用线性数学描述的系统。系统中至少有一个部分存在非线性

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = f_1(x_1, \dots, x_n, c_1, \dots, c_m) \\ \dot{x}_2 = f_2(x_1, \dots, x_n, c_1, \dots, c_m) \\ \vdots \\ \dot{x}_n = f_n(x_1, \dots, x_n, c_1, \dots, c_m) \end{cases} \quad \text{其中 } f_1, \dots, f_n \text{ 中至少一个为非线性函数}$$

令 $\mathbf{C} = (c_1, c_2, \dots, c_m)$ 表示控制参数向量

$$\mathbf{F} = (f_1, f_2, \dots, f_n)$$

则方程组可写成向量形式: $\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{F}(\mathbf{X}, \mathbf{C})$ 自由系统

引入外界强迫作用项 $\mathbf{G}(t)$ $\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{F}(\mathbf{X}, \mathbf{C}) + \mathbf{G}(t)$ 强迫系统

包含时间 t 时, $\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{F}(\mathbf{X}, \mathbf{C}, t)$ 非自治系统

1.3.3 非线性系统

- 非线性系统，难以通过解析方法求解，几何方法用于定性分析。常用计算机进行数值计算求近似解。
- 非线性的实质是变量间的相互作用，产生系统动态过程的多样性和多尺度性。
- 非线性系统不满足叠加性，整体作用大于各分部分之和。

非线性系统

三个臭皮匠

为何

胜过一个诸葛亮？

1.3.4 复杂系统

➤ 复杂系统的重要特征

- 非线性
- 不确定性
- 参数分布性及自由度的无穷性（柔性结构复杂系统）
- 结构的多层性及事件的离散性（离散事件复杂动态系统）
- 纯滞后、大惯性、挠性及弹性（化工、石油生产过程系统以及大型高速旋转机械复杂系统）

1.3.4 复杂系统

➤ 典型的复杂系统

- 交通系统：人、车、路、环境四大要素
- 经济系统
- 人体生命系统


复杂系统

自然之神奇

人体

最完美，最复杂

生命信息系统

- 
- ▶ 基于复杂性科学的系统思维与中医整体思维辨析，北京中医药大学学报，2009年，第32卷，第2期