

自动控制理论

Principles of Automatic Control

赵豫红

<http://course.zju.edu.cn> 学在浙大



课程简介

➤ “自动控制理论（甲）”所需的预修课程

数学分析（微积分）、线性代数、常微分方程、复变函数、电路原理等

➤ “自动控制理论（甲）”讨论的内容

- （1）建立系统模型（包括连续时间系统和离散时间系统）
- （2）模型的各种表示与转换关系
- （3）基于模型的系统分析：稳定性、稳态误差、系统性能等
- （4）各种分析系统的方法：时域、复频域、频域
- （5）系统的综合设计方法

.....

课程目标/课程要求

➤ 课程目标 Objective:

- 介绍控制理论(control theory)的基本原理
- 培养对控制系统理论的基本理解能力
- 学习如何分析并设计自动控制系统

➤ 课程要求 Requirements:

- 预习，课堂听讲（有事有病请假），复习
- 课堂练习与讨论
- 按时完成作业（每周二上课前交作业，迟交即使全对也只以80%计）

➤ 成绩政策 Grading policy:

- 平时成绩（课堂表现、作业、课堂测验、期中测试）：40-60%
 一旦发现作业抄袭，抄袭与被抄的同学该次作业均以零分计！！
- 期末考试：60-40%
- 平时成绩和期末卷面成绩均达到底线方可合成总评成绩



授课方式

➤ 授课时间、地点

春学期								夏学期								
三月					四月				五月					六月		
一	二	三	四	五	六	七	八	一	二	三	四	五	六	七	八	考试
27	6	13	20	27	3	10	17	24	1	8	15	22	29	5	12	19
28	7	14	21	28	4	11	18	25	2	9	16	23	30	6	13	20
1	8	15	22	29	5	12	19	26	3	10	17	24	31	7	14	21
2	9	16	23	30	6	13	20	27	4	11	18	25	1	8	15	22
3	10	17	24	31	7	14	21	28	5	12	19	26	2	9	16	☆
4	11	18	25	1	8	15	22	29	6	13	20	27	3	10	17	24
5	12	19	26	2	9	16	23	30	7	14	21	28	4	11	18	25

周二：1-2节 8:00-9:35 西2-414
周四：3-4节 10:00-11:35 西2-414
助教：张翼 19550217969 22260199@zju.edu.cn

授课方式

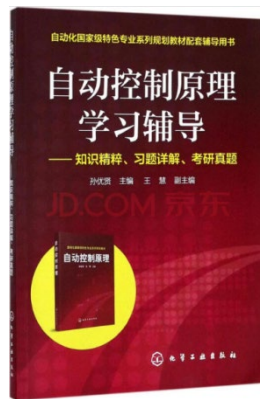
- **授课形式：** 预习、讲授、讨论、随堂练习
- **学习要点：** 预习复习 团队合作 课堂表现 思考讨论
- **课程要求：**
 - 1 掌握基础的概念
 - 2 具备解题的能力
 - 3 明了知识的联系
 - 4 形成思考的习惯
 - 5 阅读经典的文献
 - 6 建立自学的方法
 - 7 理清表达的逻辑
 - 8 培养合作的精神

教材与参考书

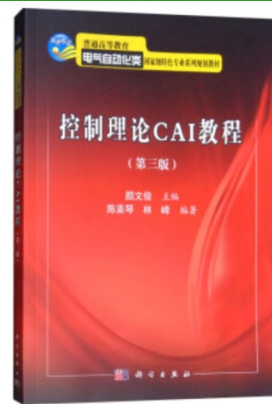
中文:



孙优贤、王慧主编
2012, 化学工业出版社



孙优贤、王慧主编
2017, 化学工业出版社



颜文俊 主编
科学出版社



胡寿松主编
2014, 科学出版社

英文:



John J. D'Azzo, Constantine H. Houpis,
Linear Control System Analysis and Design
(Fourth or Fifth Edition)



Richard C Dorf, Robert H. Bishop,
Modern Control Systems (Twelfth Edition)

第一章 CHAPTER 1

控制系统概论

Introduction to Control Systems



关键词

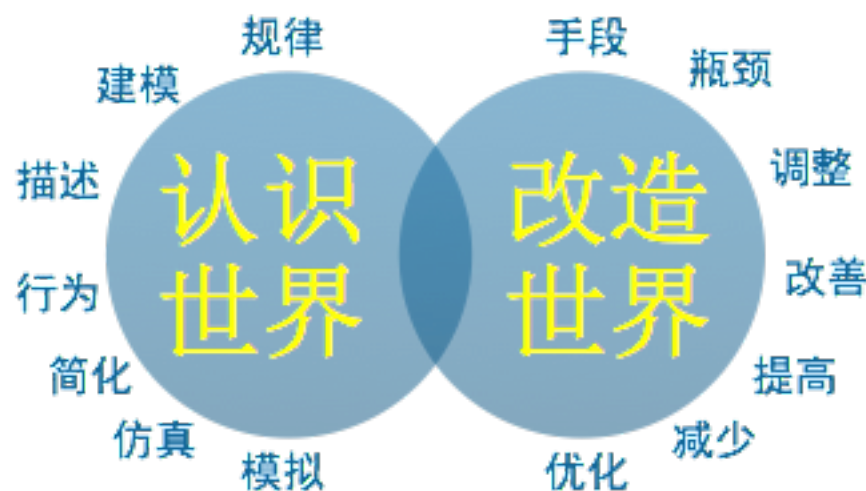
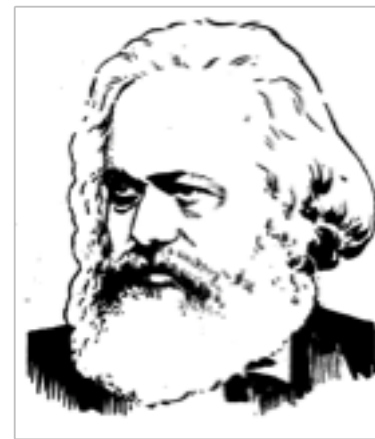
- 系统、控制、控制系统、自动控制系统
- 输入、输出、反馈
- 开环控制、闭环控制

主要内容

- 自动控制系统的基本概念
- 自动控制系统的的基本结构形式及常用术语
- 自动控制系统的分类
- 对自动控制系统的基本要求
- 自动控制理论的发展概况
- 课程的主要内容安排

从哲学的视角理解控制问题

- “The philosophers have hitherto only interpreted the world, in various ways; the point is, however, to change it.”（哲学家们迄今为止只是用各种途径解释世界，而关键是去改变它）
- 卡尔·马克思 ‘*Theses on Feuerbach*’（《论费尔巴哈》），1845



The capability of effective control is the unique characteristic distinguishing human beings and animals.

控制能够做什么？

- ◆ 设计出系统按照期望的要求工作
 - ◆ 保持被控变量（物理量）恒定
 - ◆ 使不稳定系统能够稳定
 - ◆ 减少扰动的影响，补偿物理量的波动
 - ◆ 为系统设计提供便利

控制的实例：

- 房间的温度控制
- 飞机的轨迹姿态控制

如何表示问题？如何分析？如何比较？
如何控制？如何控制得更好？有哪些
控制难题？（测量、手段、干扰、指标）

系统

➤ 系统(System)

- 一组相互关联并共同完成特定功能的集合体（或装置、部件）称之为系统

嵌套的

➤ 静态（稳态）系统(Static System)

- 系统的输入输出关系与时间无关
- 输出仅由当前的输入确定

相对的

➤ 动态(Dynamic System)

- 指有记忆的系统，例如在时刻 t 的输入值将影响未来的输出
- 动态系统与静态系统是一个相对概念

➤ 一个系统通过边界(boundary)与其周边的环境相互作用

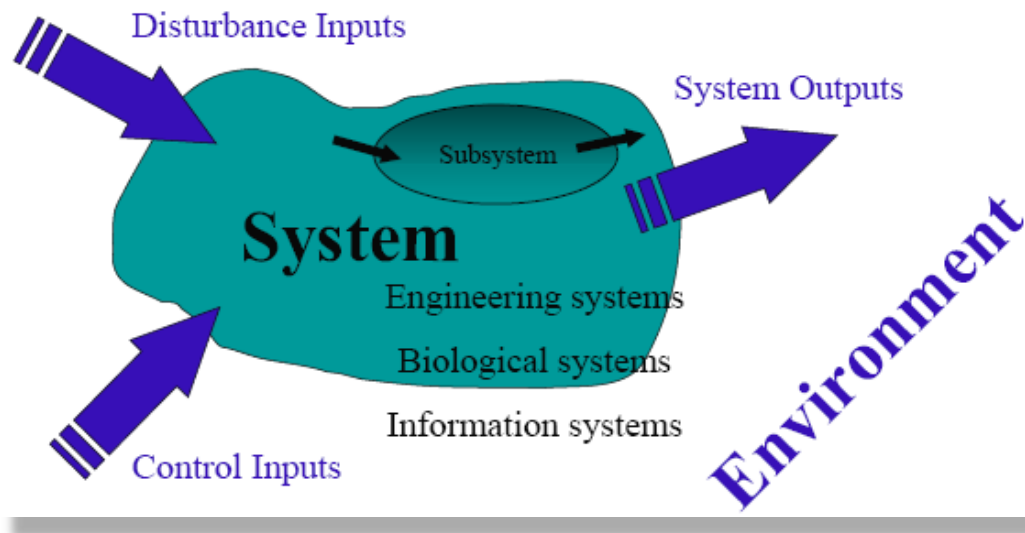
合理定义系统
边界

控制与控制系统

- **控制**是指通过对某个装置或生产过程的某个或某些物理量进行操作，以达到使某个变量**保持恒定**或**沿某个预设轨迹运动**的一个**动态过程**。
- **控制系统**是为了**达到某种“目标”**设计并按照人们意愿予以实施的一套系统。

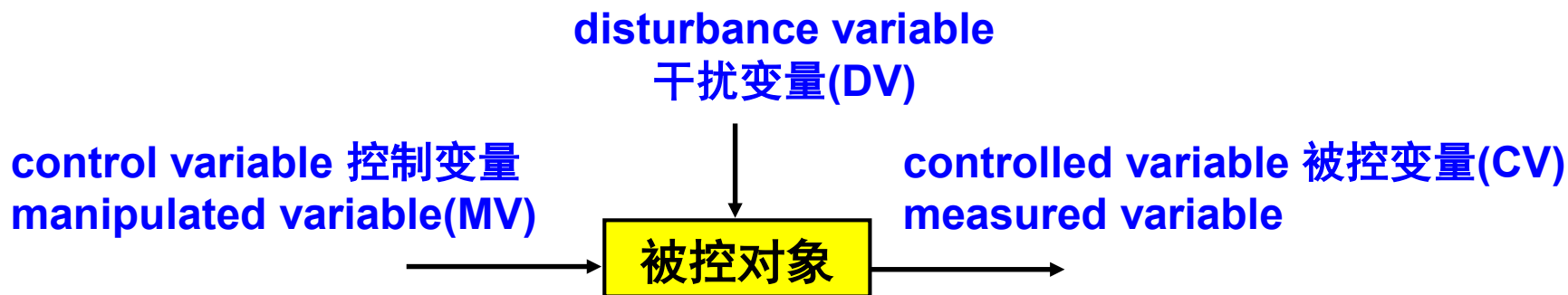
系统变量

- 系统相互作用的量称作变量 (variable)
 - i. 系统输入 (System input)
 - ii. 系统输出 (System output)
 - iii. 环境 (外部) 扰动 (Environmental disturbances)
 - iv. 状态变量 (内部变量) (State variables (internal variables)) 和子系统 (Subsystems)



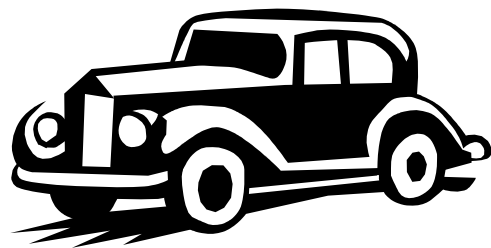
系统变量

- 系统的边界(**boundary**)取决于所定义的系统目标或性能
- 系统的目标或性能用量测的输出变量值(**measured output variables**)表示
- 系统的运行(**operation**)通过控制输入变量(**control input variables**)来操纵
- 系统的运行还会受到不是控制作用的扰动输入变量(**disturbance input variables**)的影响
- 容易混淆的两个变量:
 - measured variable = CV = 被控变量(controlled variable)
 - control variable = MV = 控制变量(manipulated variable)



手动（人工）控制与自动控制

- **例：**汽车驾驶要求控制汽车沿期望路径安全地到达预定的目的地



- 如果由司机驾驶汽车，则司机对汽车实施了**手动**控制；也可以设计一套自动驾驶设备，由自动驾驶设备控制汽车行驶，这就形成了一套**自动**控制系统
- **两个概念：**
 1. 手动控制 VS 自动控制（以人为中心考虑问题）
 2. 开环控制 VS 闭环控制——更为本质！



主要内容

- 自动控制系统的基本概念
- 自动控制系统的基本结构形式及常用术语
- 自动控制系统的分类
- 对自动控制系统的基本要求
- 自动控制理论的发展概况
- 课程的主要内容安排

开环控制 Open-Loop Control

控制目标：面包的松脆度

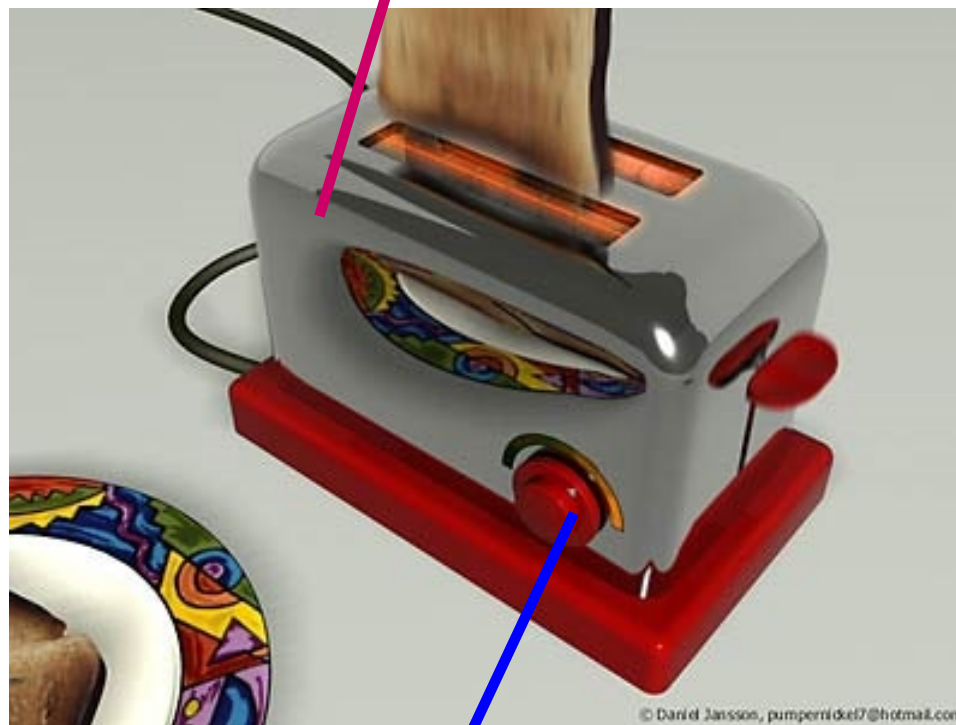
输入变量：面包的松脆度
或烘烤时间

输出变量：面包的松脆度

如果面包的松脆度没有达到要求，烤箱也**不会自动地**调节烘烤时间。

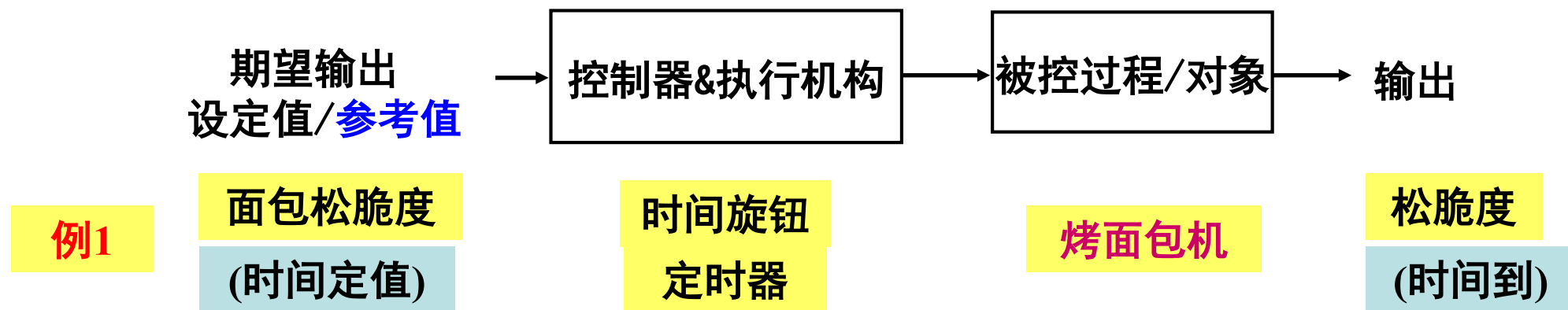
被控过程（单元）：指被控制的设备、过程等。

动态单元（被控对象、单元）



旋钮：设定松脆度或烘烤时间

开环系统的基本方块图

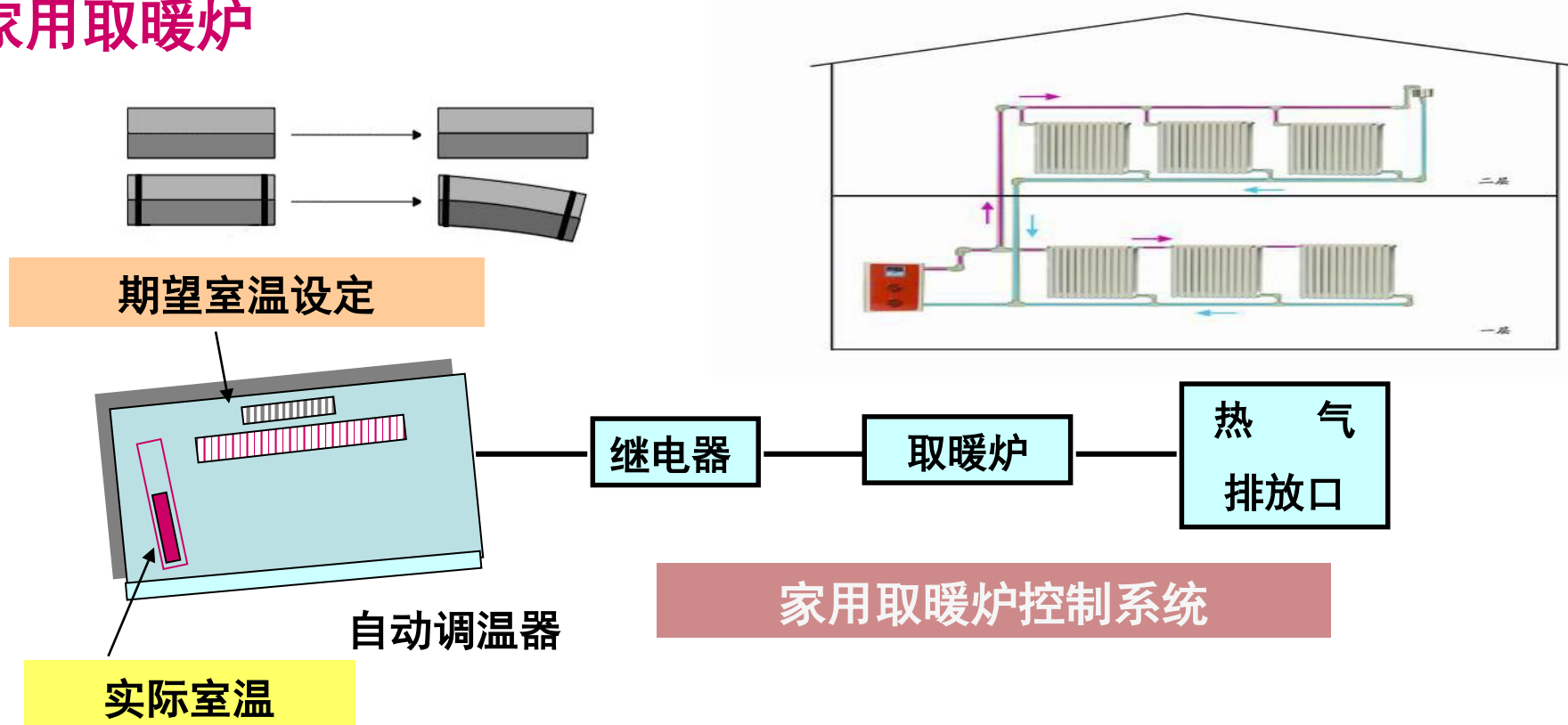


开环控制系统：系统输出不影响系统输入，没有反馈！

反馈（信号）：从系统输出端取出并反向送回到系统输入端的（信号）称为反馈（信号）。当反馈信号的符号与被比较信号相反时称为负反馈，相同时称为正反馈。

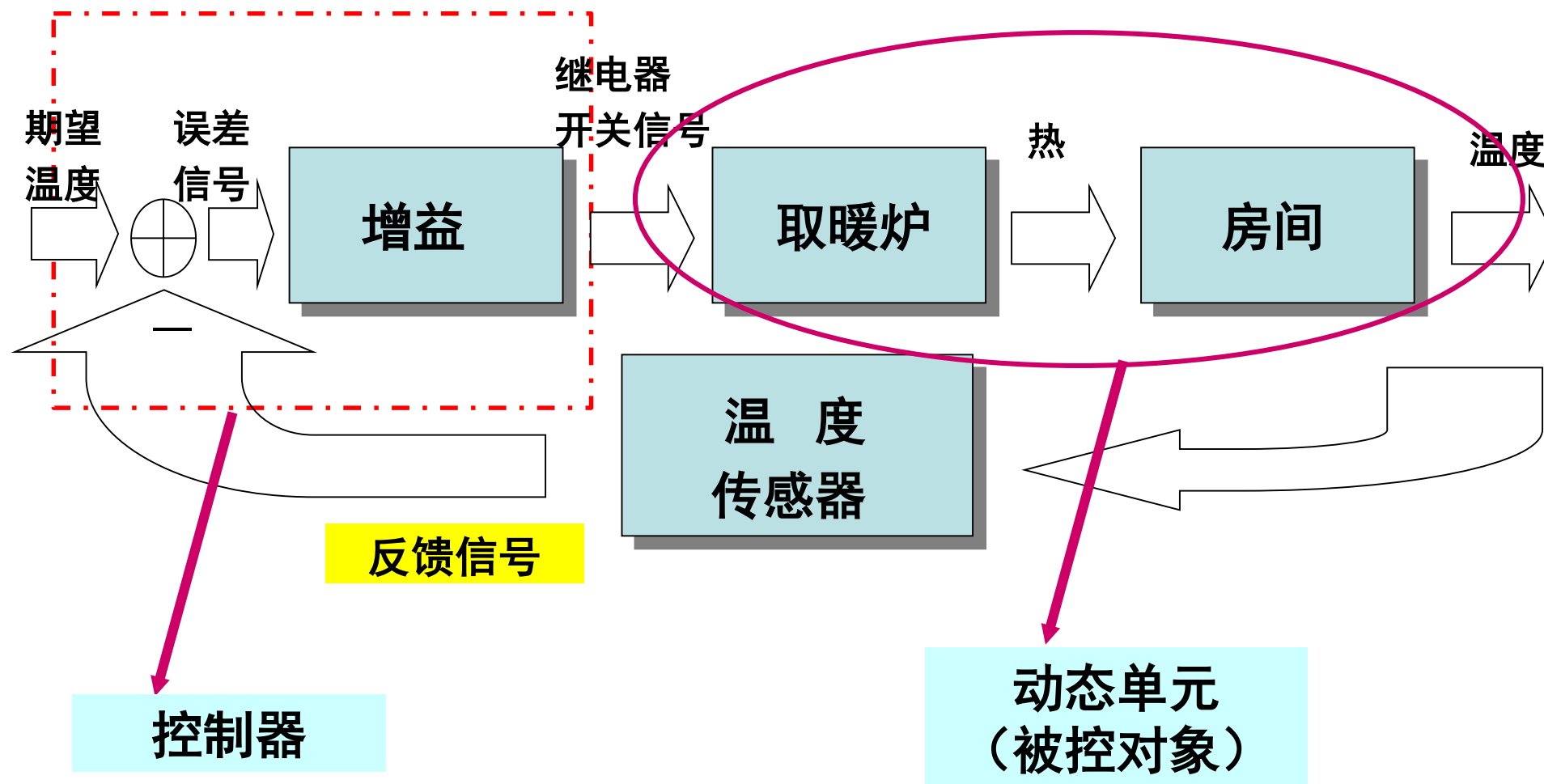
闭环控制 Closed Loop Control

家用取暖炉



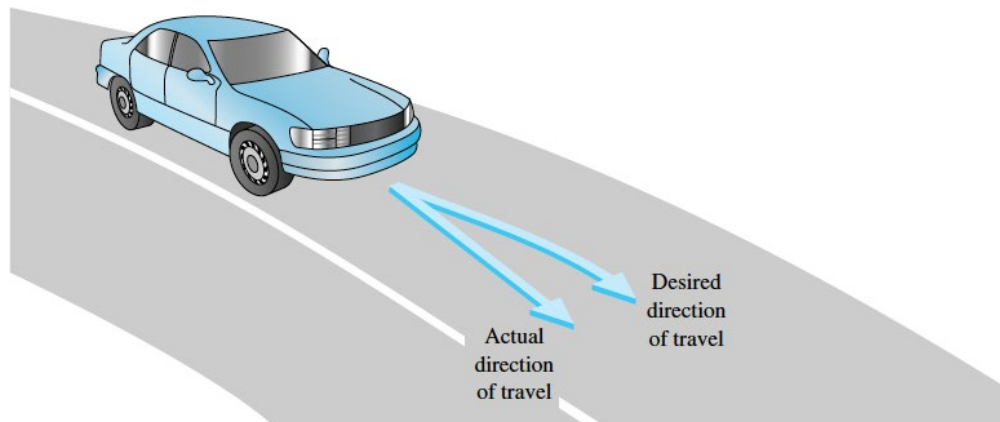
- 如果室温低于（或高于）期望温度，暖炉将启动（或关闭），直到室温略微高于（或低于）期望温度

闭环控制系统：家用取暖炉



闭环控制系统：驾驶汽车

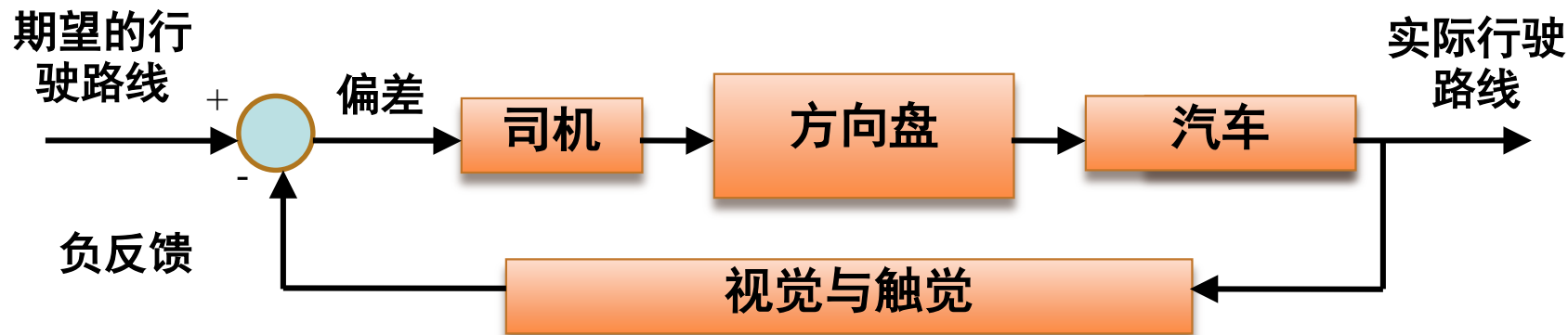
Car and Driver 广义的操控(汽车整体运行):



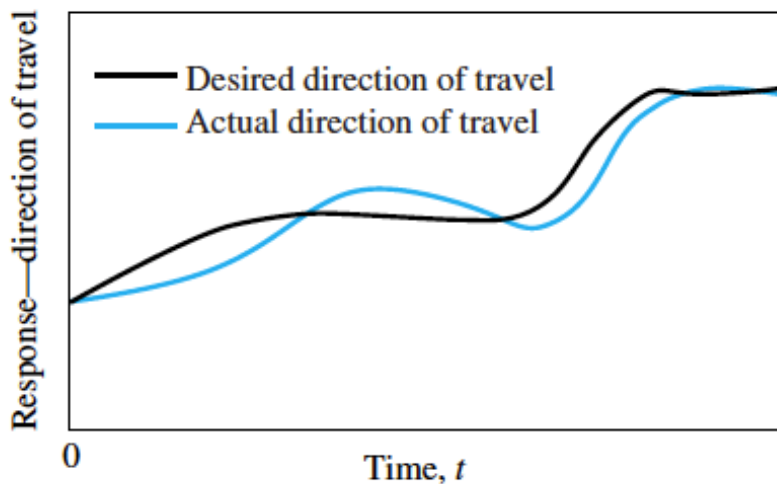
- 目标 (Objective) : 控制汽车的方向与速度
- 输出 (Outputs) : 汽车实际的方向与速度
- 控制输入 (Control inputs) : 路标与限速
- 扰动 (Disturbances) : 道路表面、风速、障碍、天气等
- 可能的子系统 (subsystems) : 机械, 发动机, 转向助力, 刹车, 悬挂, 空调。。。

闭环控制系统：驾驶汽车

➤ 汽车驾驶控制的方块图



时间响应 (Time response) :

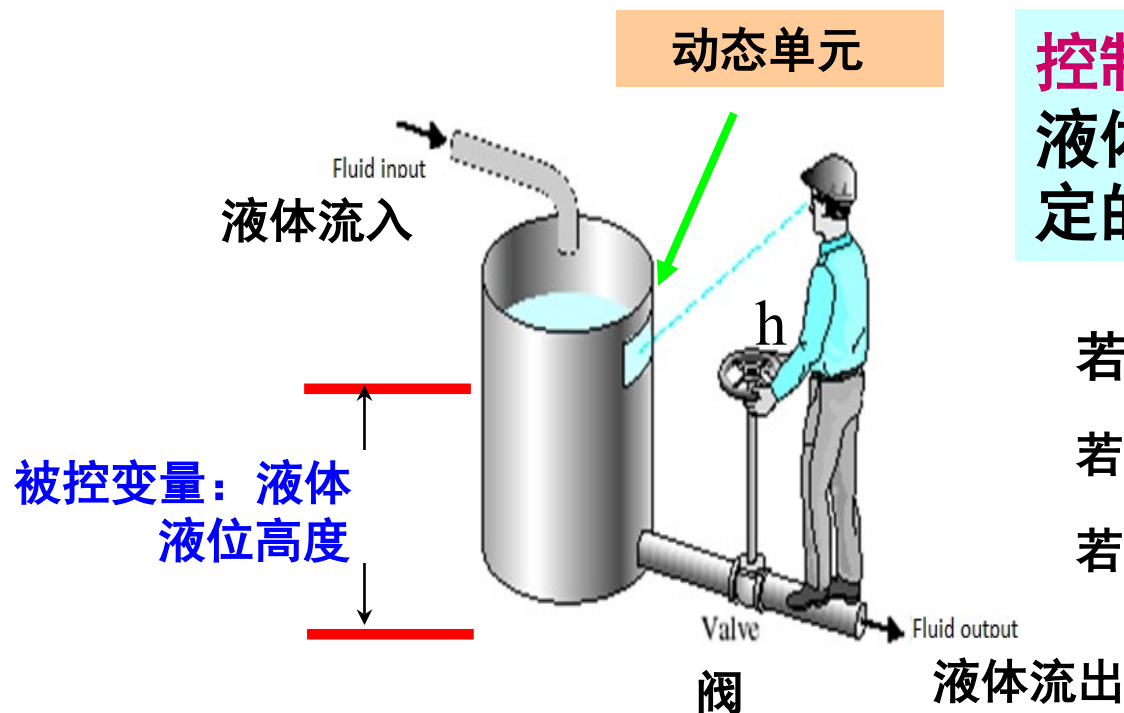


汽车驾驶控制系统

司机利用汽车行驶的实际方向与期望方向之间的误差，来控制并调节车轮转向，使汽车按照期望的路径行驶

自适应巡航控制
(Adaptive Cruise Control----ACC)

手动液位控制系统



控制目标：将水箱内液体的液位维持在给定的液位高度上

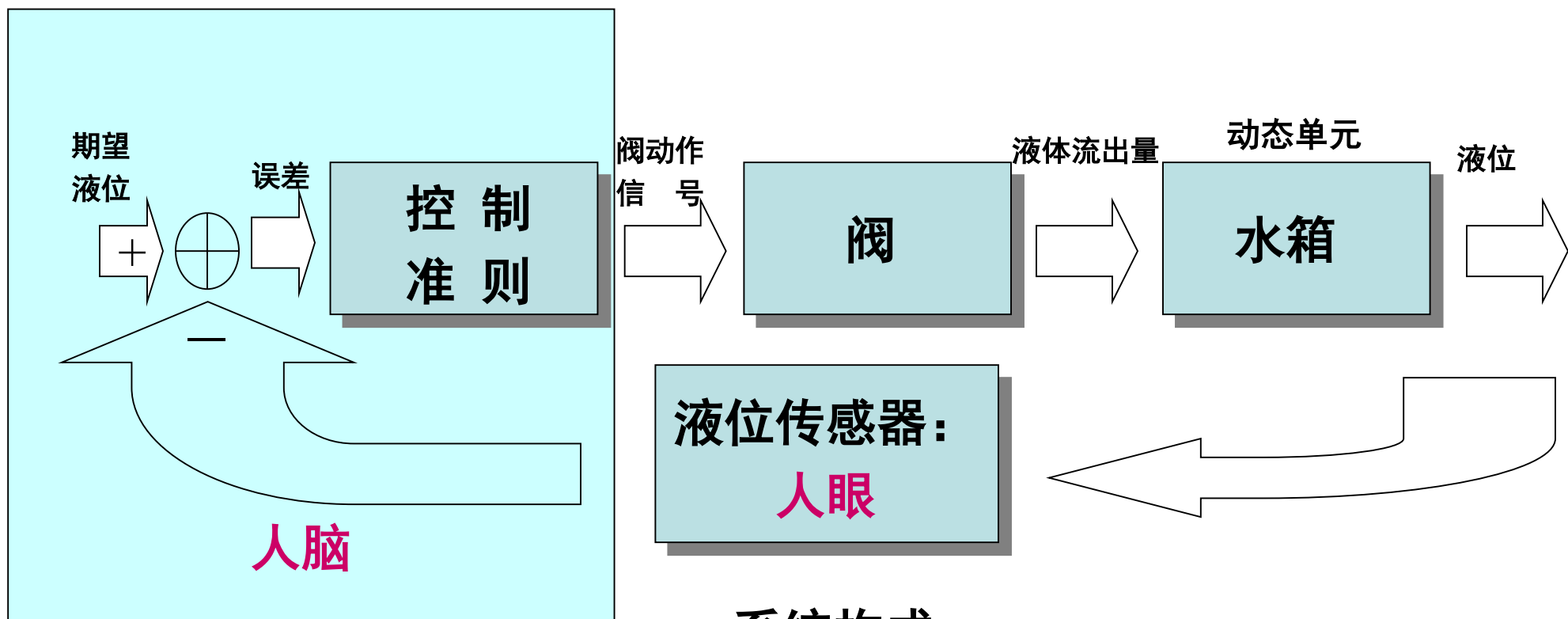
若 $h < H$ ，关阀；

若 $h > H$ ，开阀；

若 $h = H$ ，不动作。

A manual control system for regulating the level of fluid in a tank by adjusting the output valve. The operator views the level of fluid through a port in the side of the tank.

闭环控制系统：手动液位控制系统



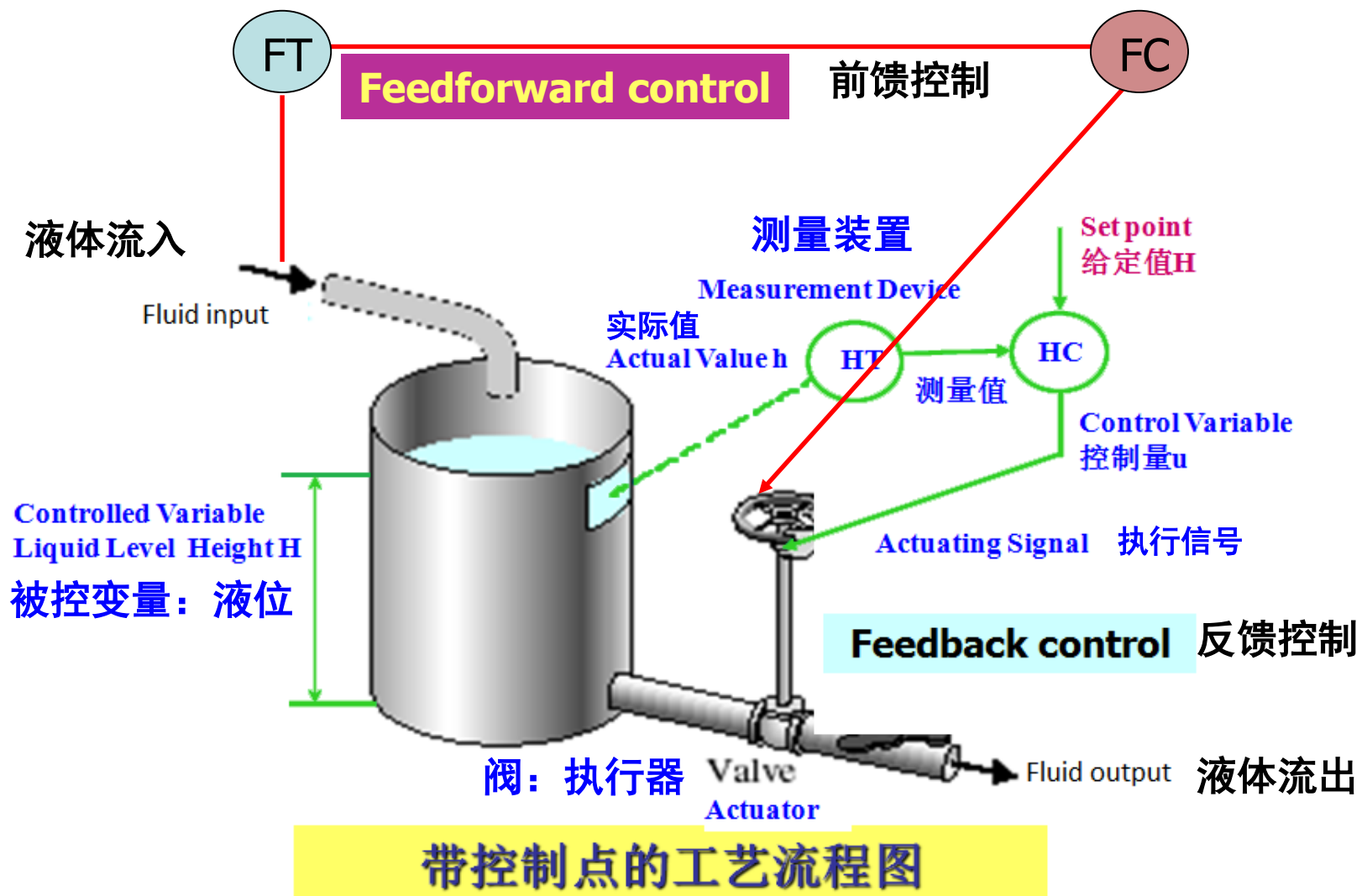
系统构成

信息

真实物理系统

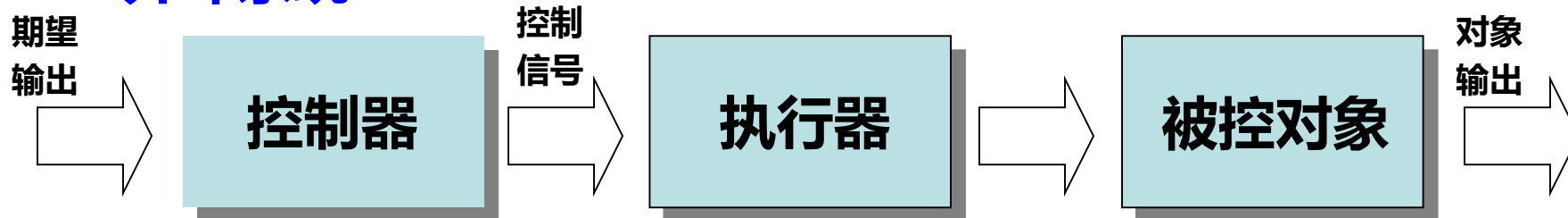
好的控制：看得清、调得勤、算得精、动得准

闭环控制系统：自动控制系统

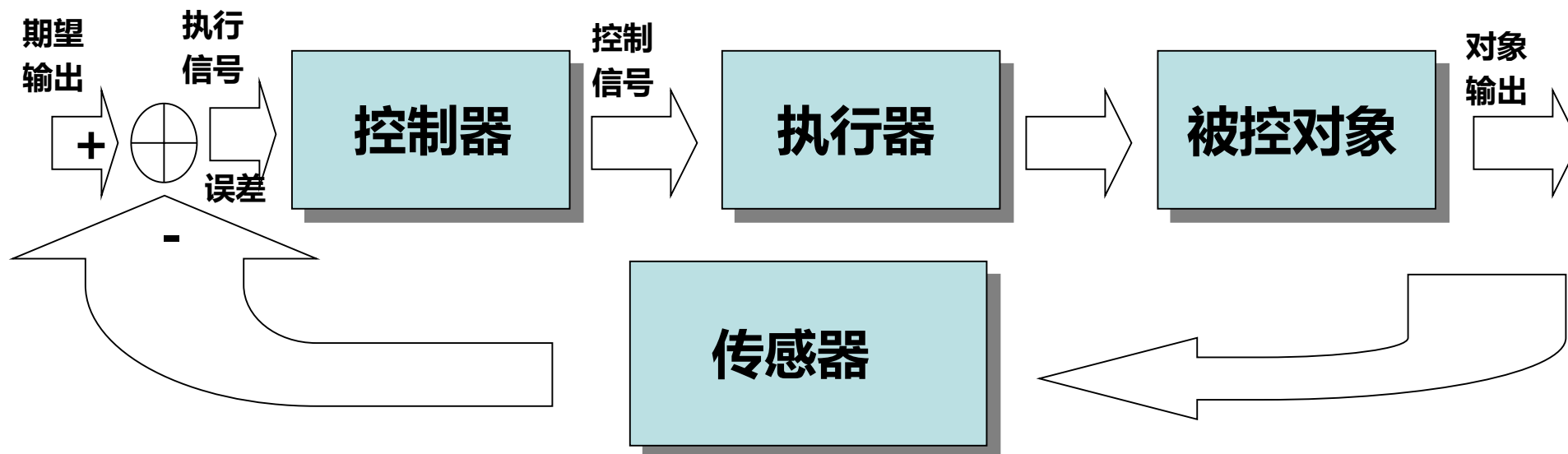


开环/闭环控制系统方块图

开环系统

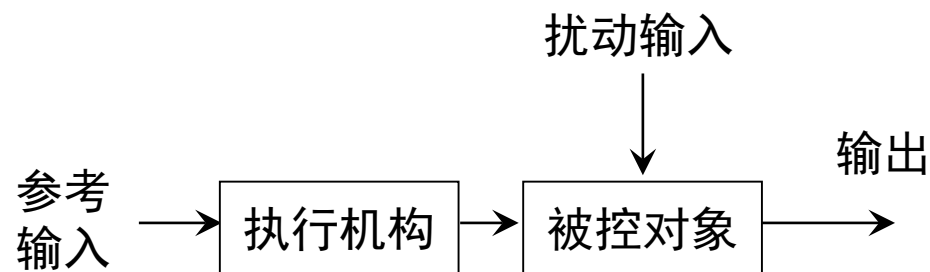


闭环系统



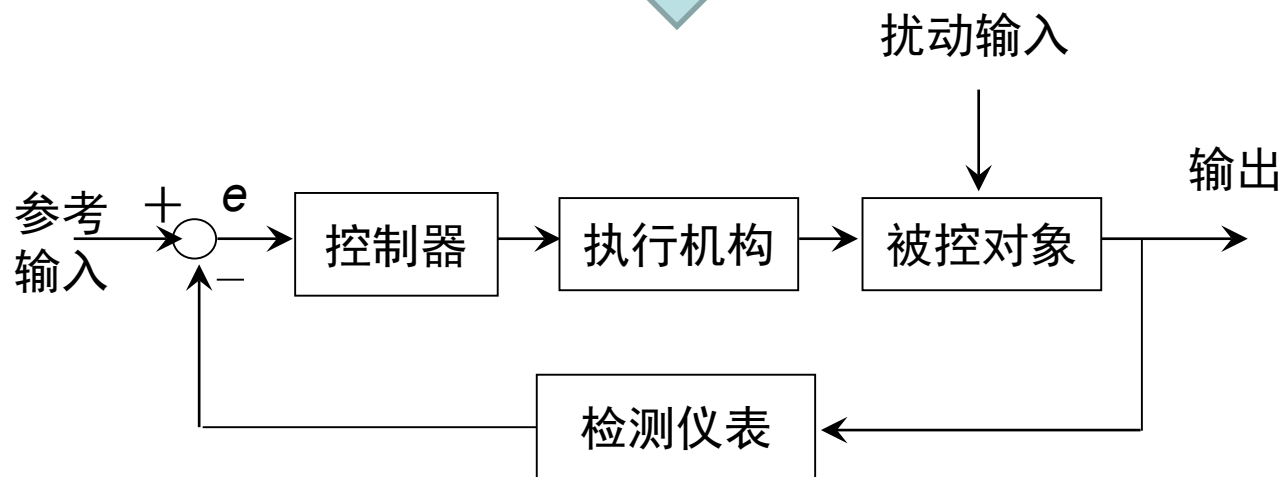
常用术语

开环控制系统：输出量不能对系统的控制作用产生影响的系统



反馈单元：提供输出量反馈的系统单元

闭环控制系统：控制系统中将输出量反馈到输入端，对控制作用产生影响的系统就称为闭环控制系统。

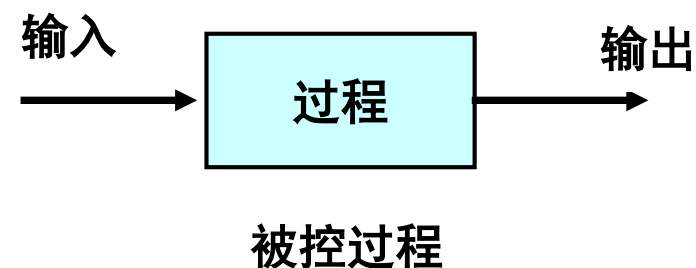


常用术语

➤ **系统**：作为一个有机的整体，将一些部件组合在一起完成特定的**任务**。

➤ **控制系统**：由一组元件相互连接构成一个系统，能够提供期望的响应。

➤ **被控对象（或过程）**：指被控制的**设备、物体**、或者一个运行的**变化过程**，如化学反应过程，炼油生产过程，生物学过程等。过程的输入输出关系反映了过程的因果关系。



➤ **被控变量（系统输出）**：**被控对象**的输出，表征了对象或过程的状态和性能。

➤ **控制变量（操作变量）**：作用于**被控对象**，改变对象运行状态的量。

常用术语

- **参考输入**：人们希望**被控变量**能达到的数值，又称给定输入、给定值、给定信号等。
- **扰动信号**：使系统的**输出量**偏离期望值的信号。如果扰动产生在系统内部，称为**内部扰动**（简称内扰）；当扰动来自系统外部时，称为**外部扰动**（简称外扰）。
- **反馈信号**：从系统输出端取出并反向送回到系统输入端的信号称为反馈信号。当反馈信号的符号与被比较信号相反时称为**负反馈**，相同时称为**正反馈**。
- **偏差信号**：指**期望输出值**与**实际输出值**之间的偏差，往往简称**偏差**，有时也称为**误差**。但在反馈控制系统中，**参考输入**和**反馈信号**间的偏差也称为误差。所以，在有可能引起误解时，最好能用文字或公式进行说明。

常用术语

- **控制器**：使**被控对象**具有期望的性能或状态的控制设备。它的作用是将系统**输出**与**参考输入**比较，根据得到的**偏差**，按预先设计好的控制规律给出控制量**输出**到执行机构。
- **执行机构**：执行来自控制器的指令，并将控制作用施加于**被控对象**，以使**被控变量**按照预定的控制规律变化。
- **反馈控制**：将系统的**输出**量与**参考输入**进行比较，根据其误差进行控制，力图保持两者间预先设定好的关系。
- **特性**：指系统**输入**与**输出**之间的关系，可用数学式表示，也可用曲线或图表方式表示。系统特性分为静态特性与动态特性。**静态特性**是系统稳定以后表现出来的输入输出关系，通常表现为静态的放大倍数；**动态特性**指的是系统输入输出在从一个平稳状态过渡到另一个平稳状态的过程中所表现出来的特性，又称为过渡过程特性。

国际自控联IFAC与中国自动化学会

International Federation of Automatic Control



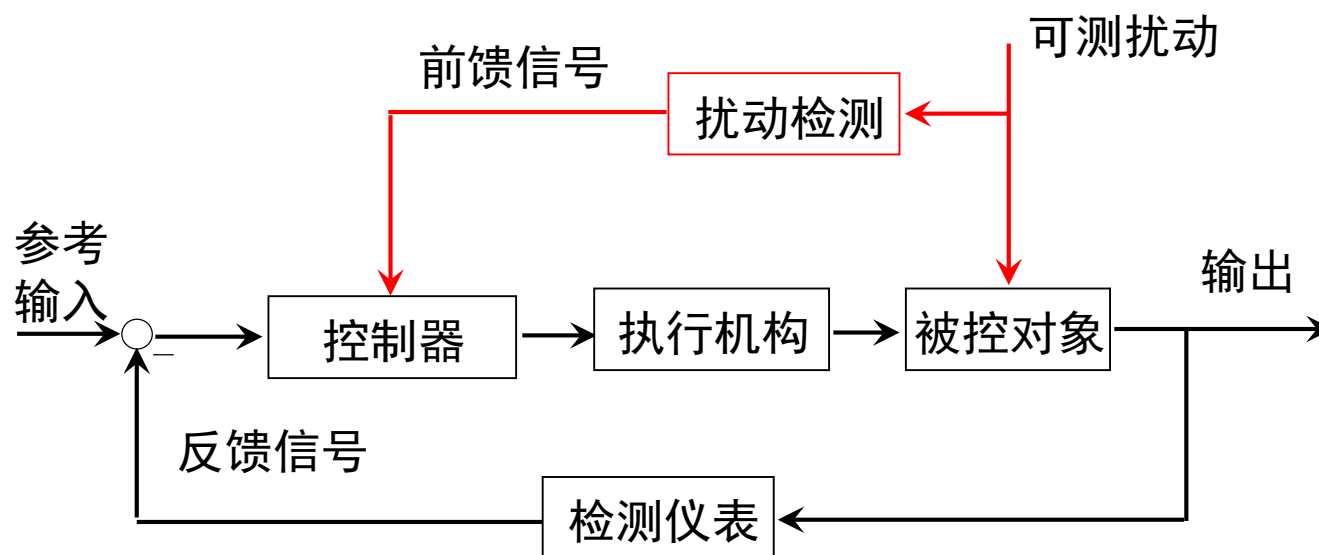
<http://www.ifac-control.org>



<http://www.caa.org.cn>

常用术语

➤ 前馈与反馈



主要内容

- 自动控制系统的基本概念
- 自动控制系统的基本结构形式及常用术语
- **自动控制系统的分类**
- 对自动控制系统的基本要求
- 自动控制理论的发展概况
- 课程的主要内容安排

控制系统分类

- 按控制系统的结构分类：
 - 开环控制系统
 - 闭环控制系统
- 按系统给定信号的特征分类：
 - 恒值（定值）控制系统（自动调节系统）
 - 随动控制系统（伺服系统）
 - 程序控制系统
- 按传输信号的性质分类：
 - 连续时间控制系统
 - 离散时间控制系统

控制系统分类

➤ 按系统的输入输出信号数量分类：

- 单变量系统 (Single Input Single Output, SISO)
- 多变量系统 (Multi Input Multi Output, MIMO)

➤ 按系统的数学描述分类：

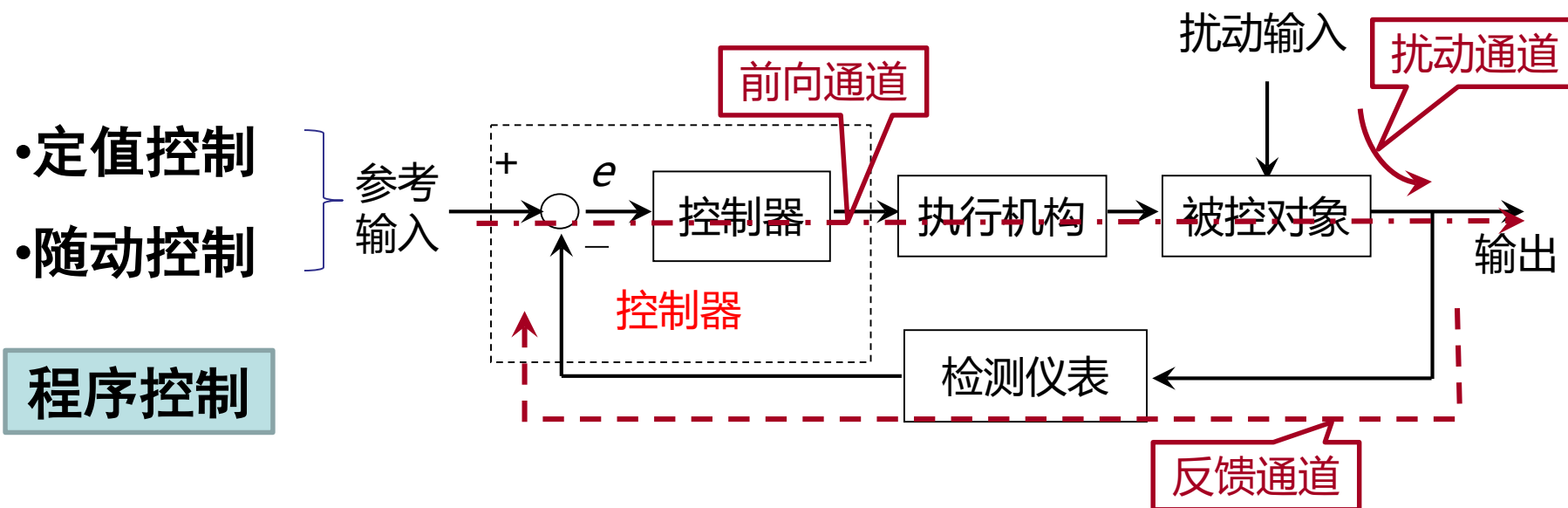
- 线性系统
- 非线性系统

➤ 按系统的参数是否随时间变化分类：

- 定常（时不变）系统
- 时变系统

◆ 本课程主要考虑的系统为线性时不变、单变量负反馈系统

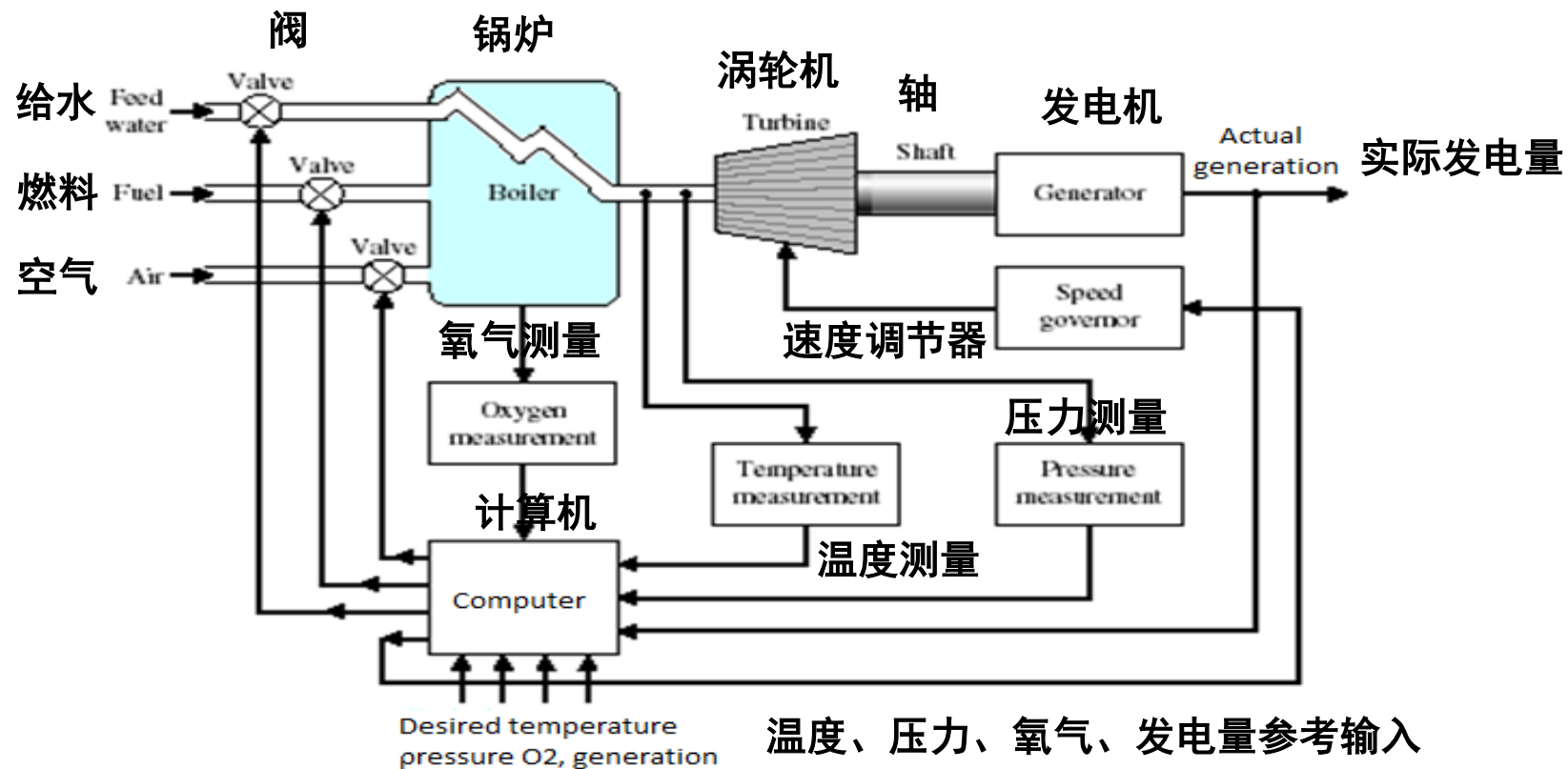
自动控制系统的典型组成



单回路（单变量）：单输入单输出控制系统（SISO）

多回路（多变量）：多输入多输出控制系统（MIMO）

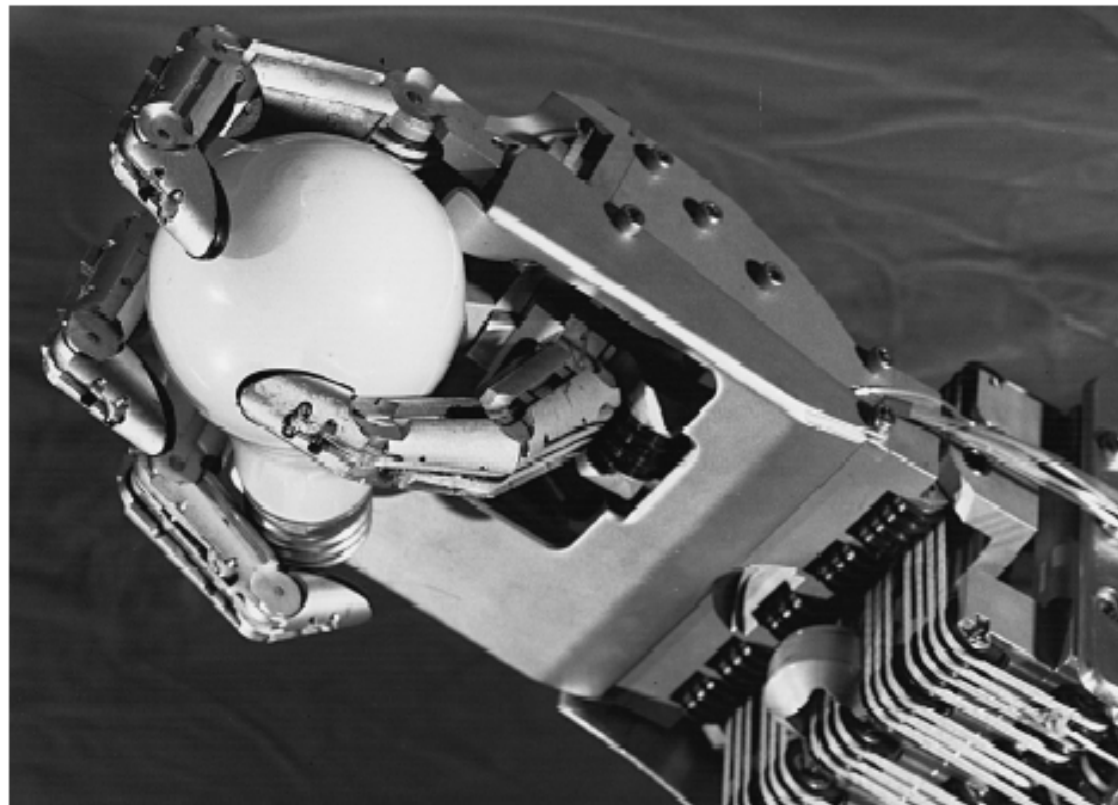
现代控制系统实例：电厂自动化



汽轮发电机协同控制系统

- 提高发电机的效率
- 减少废气排放
-

现代控制系统实例：Utah/MIT机械臂



Utah/MIT机械臂有18个自由度，由犹他大学工程设计中心和麻省理工学院人工智能实验室联合研制，主要用于科学研究。该机械臂由5个Motorola68000微处理器控制，并由36个高性能电动执行器驱动。该机械臂有4根手指，其中包括1根拇指。此外，该装置利用触觉传感器和腱进行控制。

主要内容

- 自动控制系统的基本概念
- 自动控制系统的基本结构形式及常用术语
- 自动控制系统的分类
- 对自动控制系统的基本要求
- 自动控制理论的发展概况
- 课程的主要内容安排

对自动控制系统的基本要求

一、稳定性

稳定性是保证系统正常工作的先决条件。

二、瞬态性能

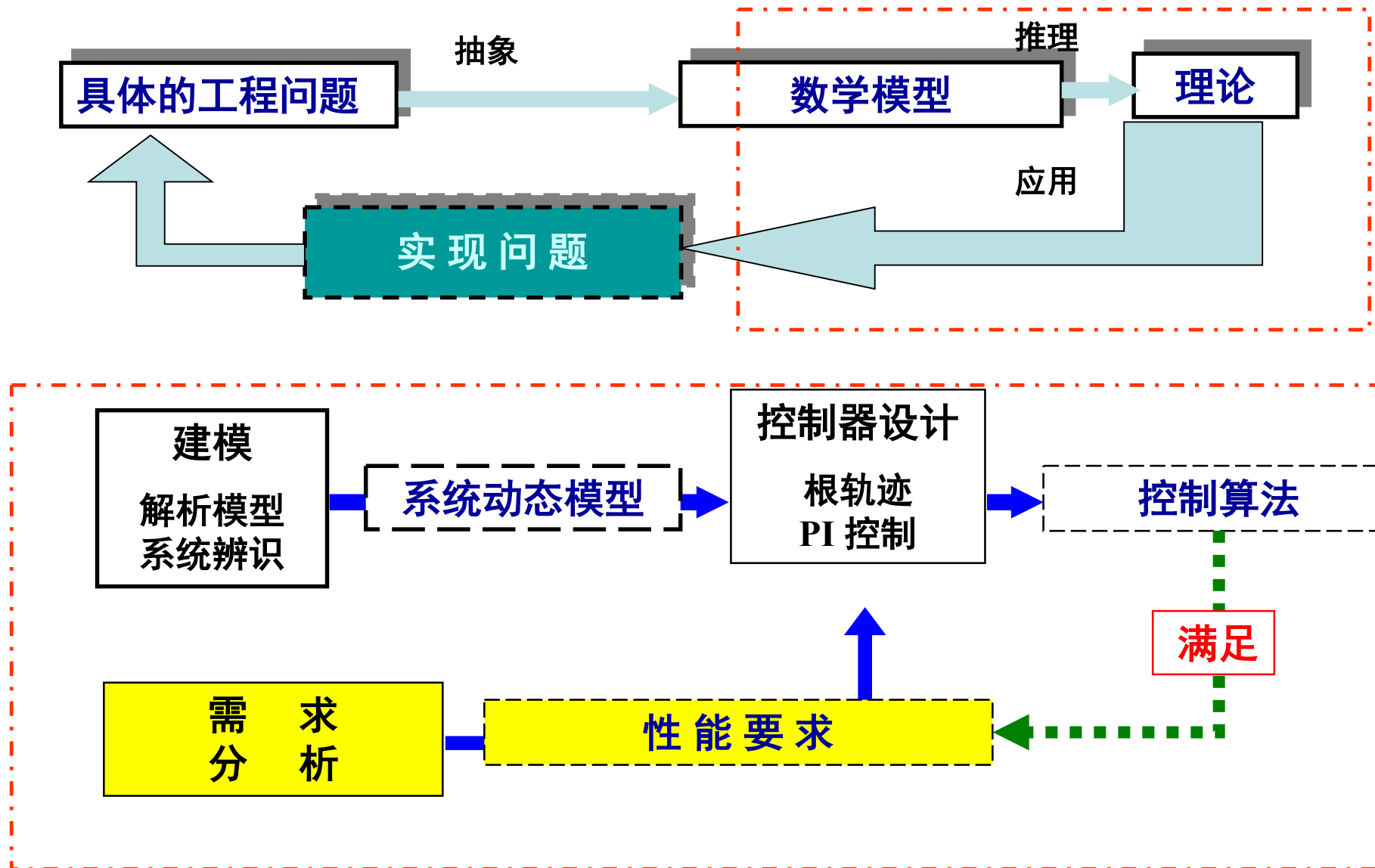
当给定输入变化时，希望系统能跟随其变化；当扰动出现时，则希望系统能克服扰动回到平衡状态。对动态的过渡过程要求是既快又稳。

三、稳态性能

当动态过程结束进入下一个平稳状态后，要求稳态误差尽可能地小。

一句话，对控制系统的要求就是：稳、准、快

控制系统设计的一般步骤



控制系统设计的一般步骤

1. 建立控制目标

- 定性目标：如，不要消耗过多燃料
- 定量目标：如，阶跃响应超调量小于 20%

2. 构造系统结构，选择合适的传感器与执行器

3. 获得对象、执行器、传感器的模型

- 解析模型
- 通过测量数据分析获得（系统辨识）

4. 设计控制器

- 选择控制律
- 选择参数

5. 分析系统的闭环性能——是否满足期望的要求？

- 如果是，结束，控制问题得到解决
- 如果否，返回

主要内容

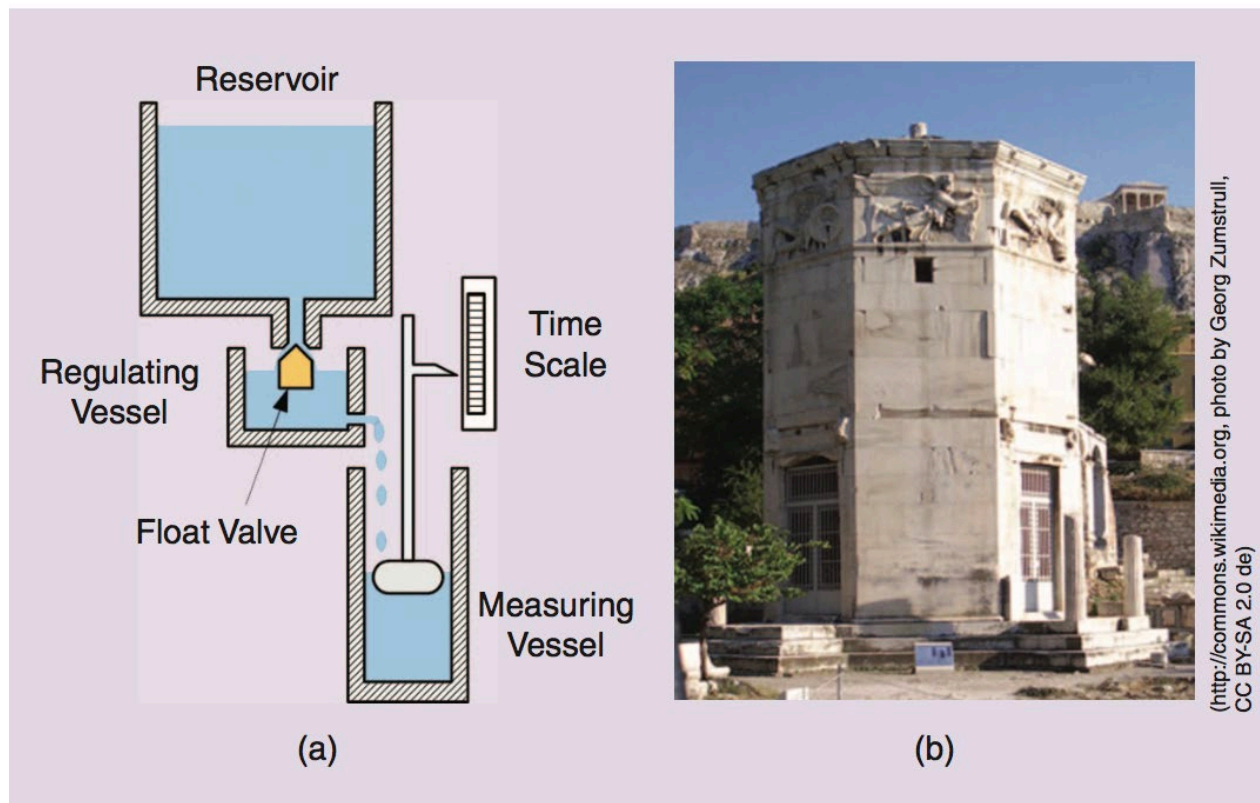
- 自动控制系统的基本概念
- 自动控制系统的基本结构形式及常用术语
- 自动控制系统的分类
- 对自动控制系统的基本要求
- **自动控制理论的发展概况**
- 课程的主要内容安排

控制的历史

<http://www.asc-cybernetics.org/foundations/timeline.htm>

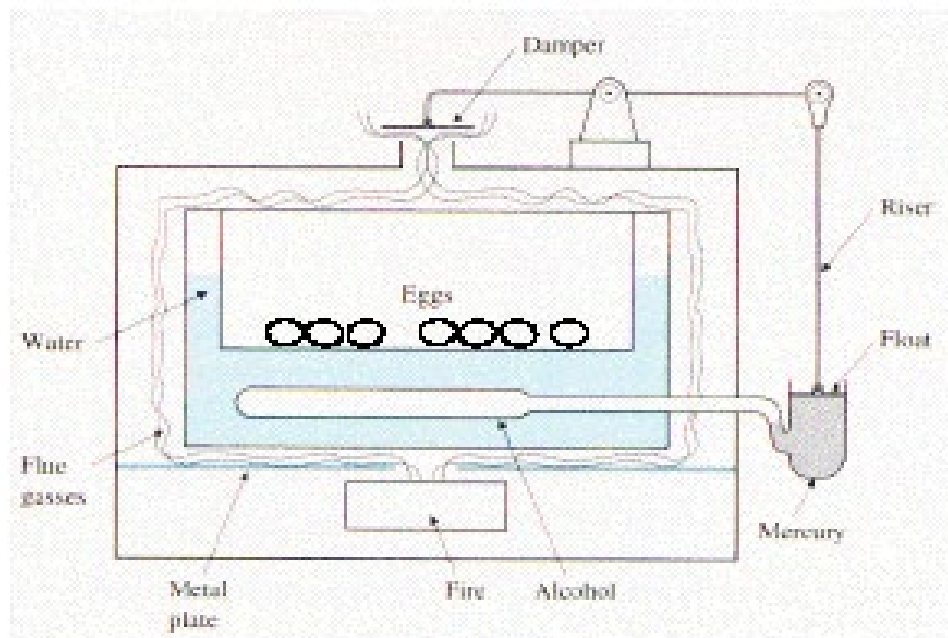
➤ 早期的自动控制系统

- 最早的控制应用可以追溯到中国古代发明的用来指示方向的**指南车**，那是一个利用齿轮传动系统，根据车轮的转动按扰动控制原理构成的控制系统。
- **北宋**，**苏颂**和**韩公廉**在他们制造的水运仪象台里使用了一个**天衡装置**，实际上就是一个按被调量偏差控制原理构成的闭环控制系统。
- **公元前三世纪**，希腊的**凯特斯比斯 (Ktesibios)**在水钟中使用了**浮子控制器**以保持液位稳定。
- **公元一世纪时**，**赫容 (Heron)**出版了名为《**浮力学**》的书，介绍了好几种用**浮阀控制液位**的方法。



(<http://commons.wikimedia.org>, photo by Georg Zurnstrull, CC BY-SA 2.0 de)

控制的历史：孵蛋器温度控制



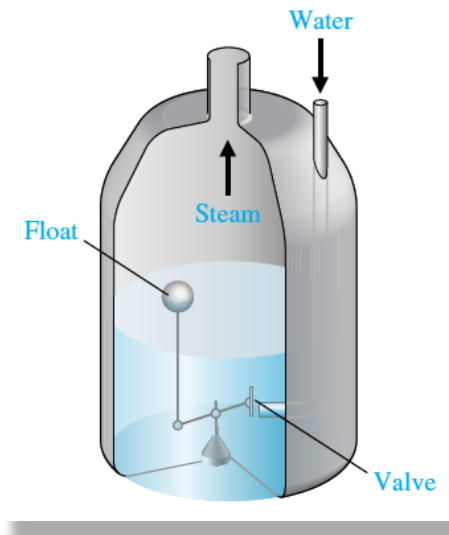
1620年左右，荷兰的德勒贝尔(Drebbel)设计了通过控制壁炉温度来给一个培育箱加热的系统。

- 温度传感器是酒精+水银的器皿 期望温度由杆长度决定
- 利用酒精热胀冷缩控制浮筒float升降，继而控制风门damper的开度，最终影响燃烧和水温

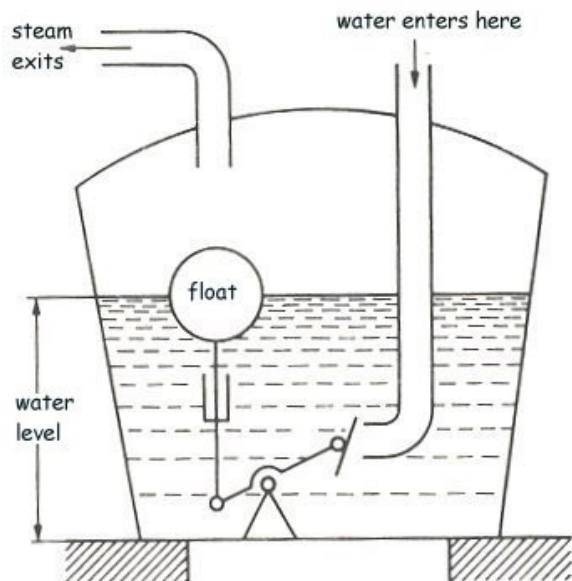
连续反馈→修正偏差→达到目标→参数可调

控制的历史：水位调节

- The first historical feedback system, claimed by Russia, is the water-level float regulator said to have been invented by I. Polzunov(波尔祖诺夫) in 1765.



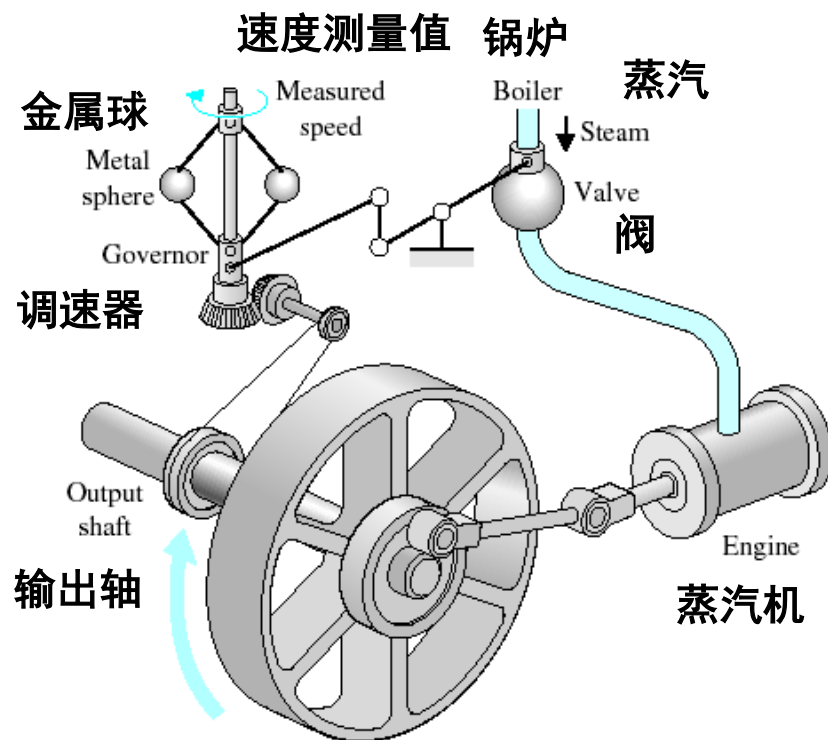
The float detects the water level and controls the valve that covers the water inlet in the boiler.



思考：杠杆的作用？

控制的历史：蒸汽机的转速控制

➤ 英国人瓦特(J. Watt) 在1784年发明的蒸汽机离心式转速调节器，将具有比例控制作用的反馈控制系统真正引入了工业生产。



➤ 1868年，英国物理学家麦克斯韦尔(J.C.Maxwell)在他发表的“论调节器”论文中首次从理论上全面地论述了反馈系统的稳定性问题，将控制系统稳定性分析与判别微分方程特征根的实部符号问题联系起来，被公认为是自动控制理论研究的一个重要里程碑。

Watt's Flyball Governor
(18th century)

飞球式（离心式）调速器

自动控制理论的发展概况

➤ 经典控制理论

- 数学家劳斯(E.J.Routh)和霍尔维茨(A.Hurwitz)分别在1877年、1895年独立地给出了对于高阶线性系统的稳定性代数判据。
- 1892年，俄国的数学家李雅普诺夫(A. M. Lyapunov)用严格的数学分析方法全面地论述了稳定性理论及方法，提出了李雅普诺夫稳定性判别方法。
- 1903年，莱特兄弟(Wright Brothers)实现了飞行控制。
- 1910年，斯佩里(Sperry)发明了陀螺仪和导航辅助仪。
- 1927年，贝尔实验室的布莱克(Black)发明了反馈电子放大器。
- 奈奎斯特(H. Nyquist)在1932年提出了基于频率响应实验数据的负反馈系统稳定性的判据。

自动控制理论的发展概况

➤ 经典控制理论

- 1940年，波特(H. Bode)在研究通信系统频域方法时，提出了频域响应的对数坐标图描述方法，进一步简化了频域分析方法。
- 1942年，齐格勒(J. G. Zigler)与尼科尔斯(N. B. Nichols)给出了PID控制器的最优参数整定法。
- 1942年，维纳(Wiener)提出了最优滤波器设计方法。
- 1948年，伊万斯(W. Evans)提出了根轨迹方法，给出了系统参数变化与时域性能变化之间直观的图示分析方法。

自动控制理论的发展概况

➤ 现代控制理论

- 1956年，苏联**庞特里亚金(I. S. Pontryagin)**发表“**最优控制的极大值原则**”论文，阐述了最优控制的必要条件。
- 1957年，美国**贝尔曼(R. Bellman)**给出了“**动态规划**”理论。
- 1960年，美国**卡尔曼(R. E. Kalman)**发表“**最优滤波与线性最优调节器**”论文，采用了状态空间法研究线性系统，称为“**卡尔曼滤波器**”。
- 1969年，**霍夫(Hoff)**发明了**微处理器**，为数字控制奠定了基础。

自动控制理论的发展概况

➤ 大系统控制理论与智能控制理论

- 实际应用中被控对象的需求
 - 规模庞大、结构复杂、功能繁杂、多目标优化、影响因素众多、子系统间相互关联。。。
 - 难以建模、复杂多变、需要参考人的智能

。。。。 还在继续发展中

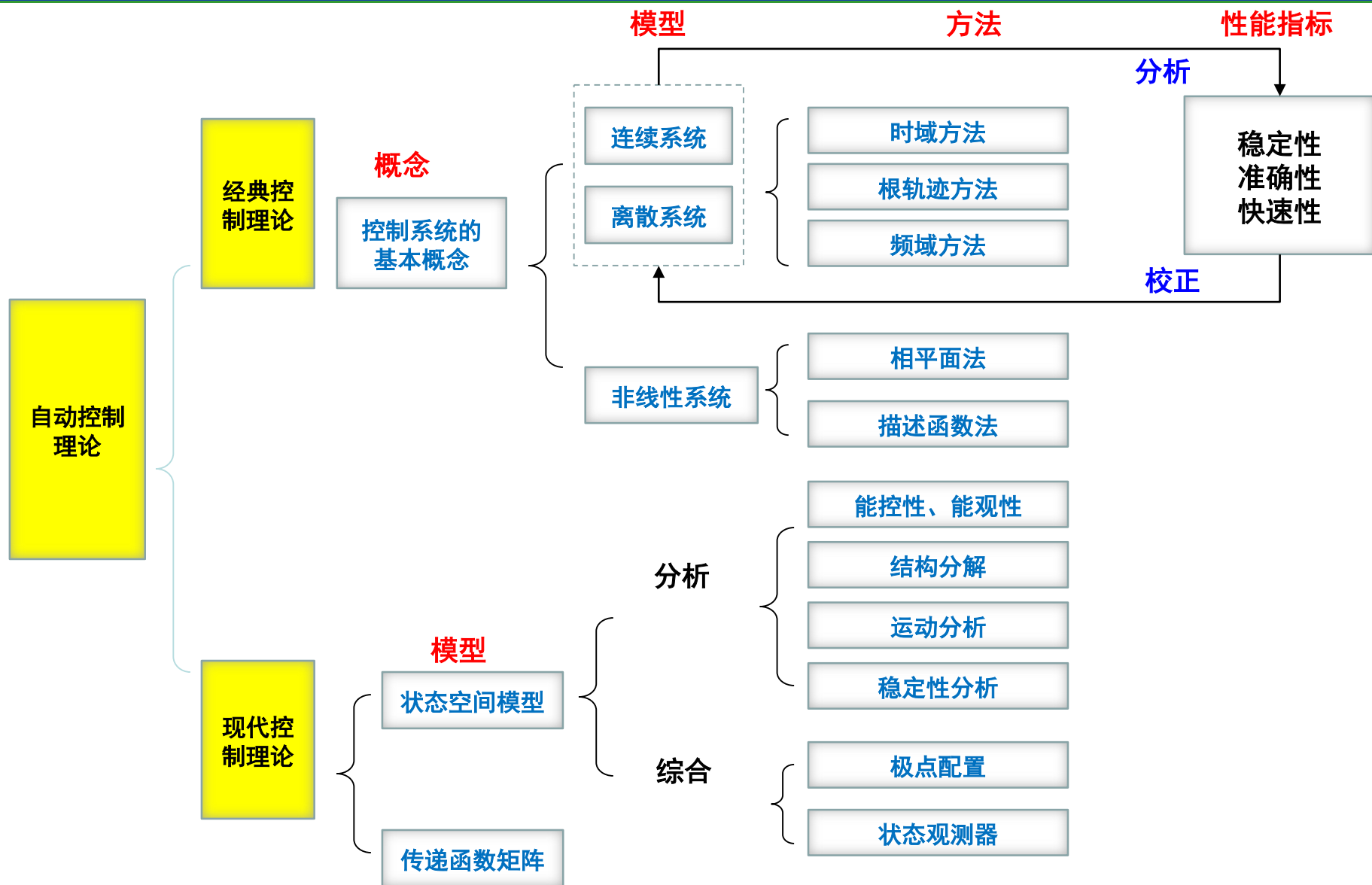
控制理论与控制论

- 控制论（**cybernetics**）出自希腊语κυβερνήτης，与kybernētēs, steersman, governor, pilot, rudder 等源于同一词根 **government**
- 控制论是“关于在动物和机器中的控制和通信的科学”（the science of **control and communication** in the animal and the machine）- Norbert Wiener
- 控制论研究的范围遍及各个领域（工程、社会、经济、政治、人口），人工控制和自动控制都属于其中
- 控制理论（**control theory**）主要基于数学工具研究**工程领域的自动控制系统**，其结果已逐渐推广应用于其他领域
- 本课程限于仅控制理论的基本内容。

主要内容

- 自动控制系统的基本概念
- 自动控制系统的基本结构形式及常用术语
- 自动控制系统的分类
- 对自动控制系统的基本要求
- 自动控制理论的发展概况
- 课程的主要内容安排

自动控制理论的知识体系



课程内容

- 绪论：控制系统概述
- 数学模型
- 时域分析
- 稳定性分析
- 根轨迹
- 频率响应
- 离散控制系统
- 状态空间分析与综合
- 非线性系统

春
学
期

夏
学
期

秋
学
期

结语

- ◆ 实用且有趣的领域
- ◆ 反馈的应用常常会带来革命性的突破
- ◆ 应用领域广泛且快速扩张
- ◆ 许多悬而未决的问题
- ◆ 知识体系庞大且丰富
- ◆ 智力挑战

膜片中引用的许多照片来自于网络，在此说明，
并向原作者致谢！

祝愿大家努力并快乐地学习好这门课程！

