



---

# 自动控制理论（甲）

## Principle of Automatic Control

徐金明/徐正国

邮箱: [xzg@zju.edu.cn](mailto:xzg@zju.edu.cn)





# 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
- 按时完成作业

## ➤ 成绩政策 Grading policy (自动控制理论（甲）):

- 平时成绩（课堂表现、作业、随堂练习、讨论）：40-60%
- 期中测试：可能会有
- 期末考试：一定会有
- 作业：按时交（0-10分），迟交（\*0.8），抄袭/答案公布后交（0分）
- 平时、卷面都有底线分！

掌握基础的概念、具备解题的能力、明了知识的联系、形成思考的习惯  
阅读经典的文献、建立自学的套路、理清表达的逻辑、培养合作的精神





# 授课方式和学习模式

---

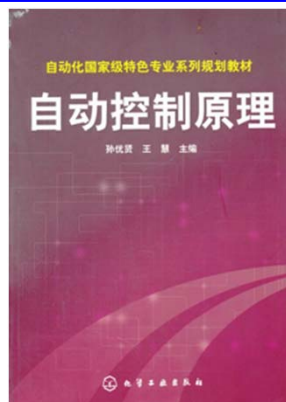
**概述：** 讲授、随堂练习、自学、考试、作业、重修……

**每周需要完成的：**

作业：用作业本在纸面上完成。当周布置，**下周二上课前交**

# 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,  
2017.11,化学工业出版社



吴麒、王诗宓主编, 自动控制原理(第2版)(上册), 2006, 清华大学出版社

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)



# 课程简介

---

- **“自动控制理论”（包括经典和现代）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、普通物理、电路原理等
  
- **“自动控制理论”（包括经典和现代）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



---

# 第一章 CHAPTER 1

## 控制系统概论

## Introduction to Control Systems





# 主要内容

---

- 基本概念
- 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

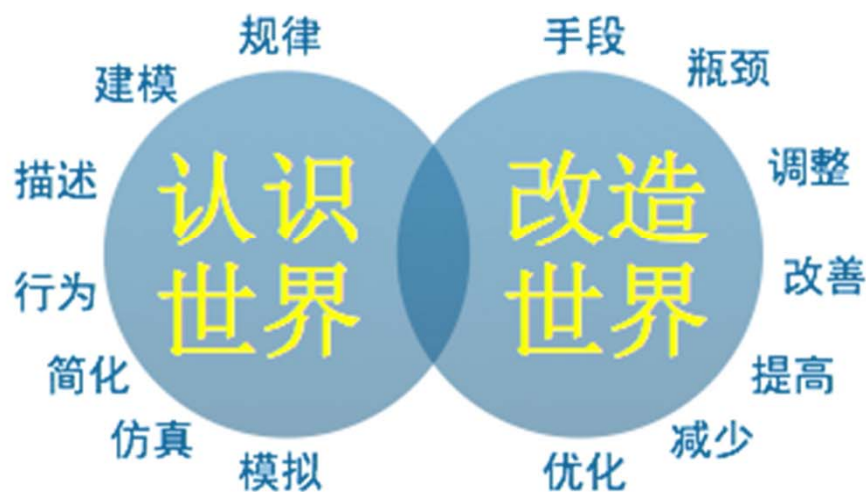
# 控制能够做什么？





# 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

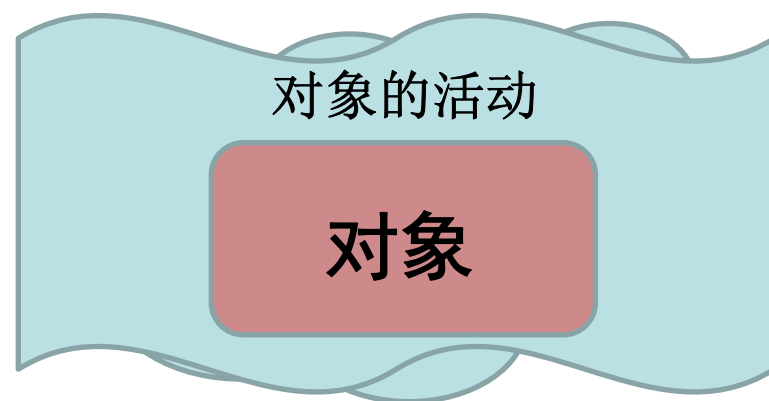


The capability of effective control is the unique characteristic distinguishing human beings and animals.

# 控制的含义

- ◆ **控制：掌握住对象不使其任意活动或超出范围；  
或使其按控制者的意愿活动**

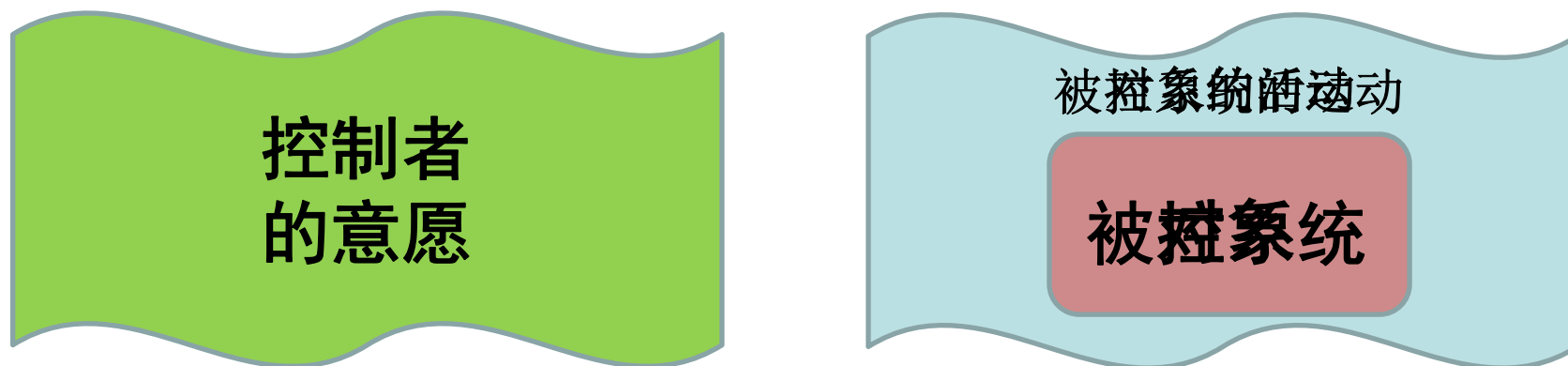
《现代汉语词典》



# 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
- 工程上的系统即是一组相互关联并共同完成特定功能的装置或部件

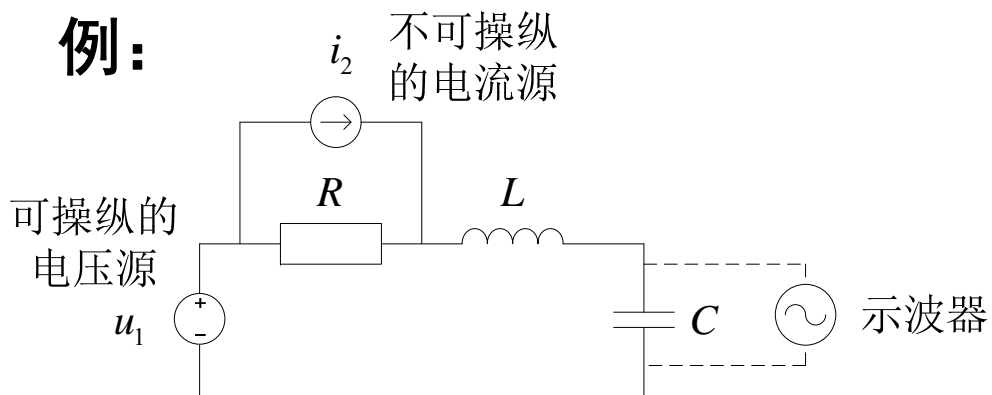


- 本课程讨论的被控系统主要是工程上的系统

# 系统与控制

- 从控制角度看，工程上的任何一个系统都可经过抽象，用一系列变量（**系统变量**）来描述
- 每个系统变量可随时间的变化而变化（有时也称**信号**）
- 系统变量间存在约束
- 系统变量中，外部施加给系统的激励称**系统输入**或输入，不属于输入的系统变量称为**内部变量**
- 控制者可操纵的系统输入称为**控制输入**或**控制变量**  
控制者不可操纵的系统输入称为**干扰输入**或**干扰变量**
- 控制者关心的内部变量称为**系统输出**（工程上称**被控变量**）

例：



系统变量:  $u_1, i_1, u_R, i_R, u_2, i_2, u_L, i_L, u_C, i_C$

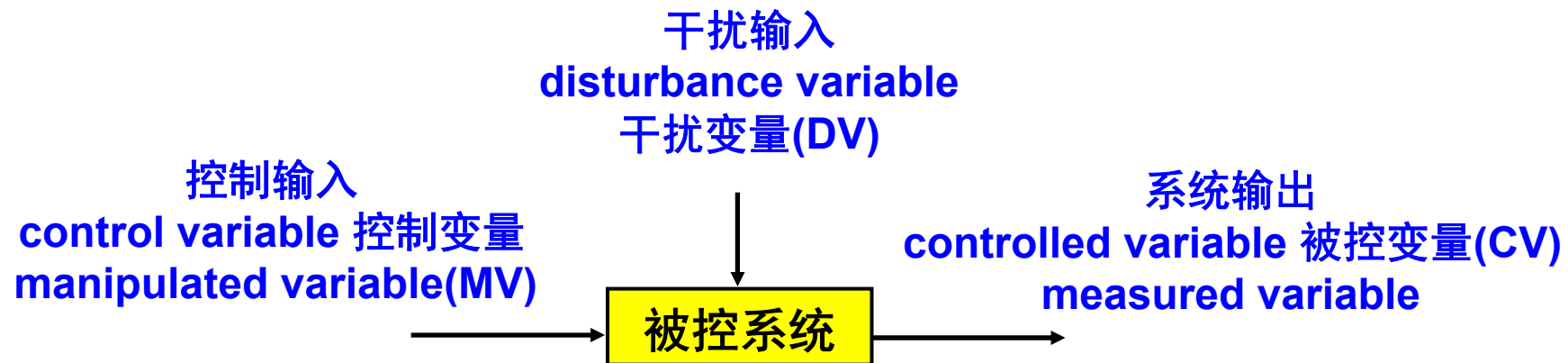
$u_1, i_2$  为系统输入

$i_1, u_R, i_R, u_2, u_L, i_L, u_C$  和  $i_C$  为内部变量

$u_1$  为控制输入； $i_2$  为干扰输入

$u_C$  为系统输出

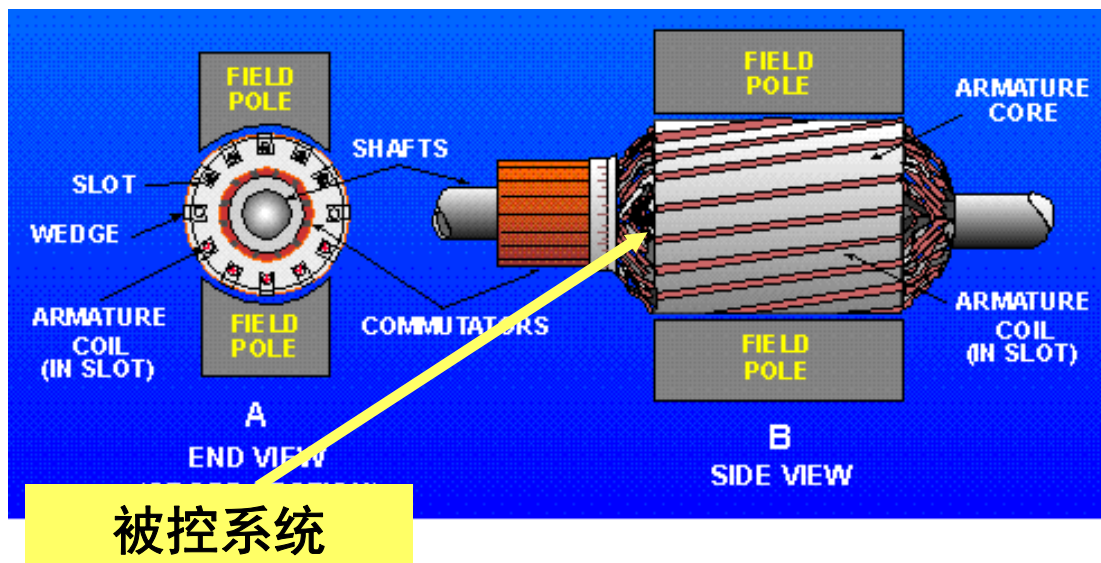
# 系统与amp;控制



- 可将**控制**理解为：通过对被控系统控制输入的操纵，以使被控制系统的输出**保持恒定或沿期望的轨迹运动**
- 被控制系统的运动当然还会受到干扰输入的影响

# 控制方式

## ➤ 一个直流电动机调速的例子

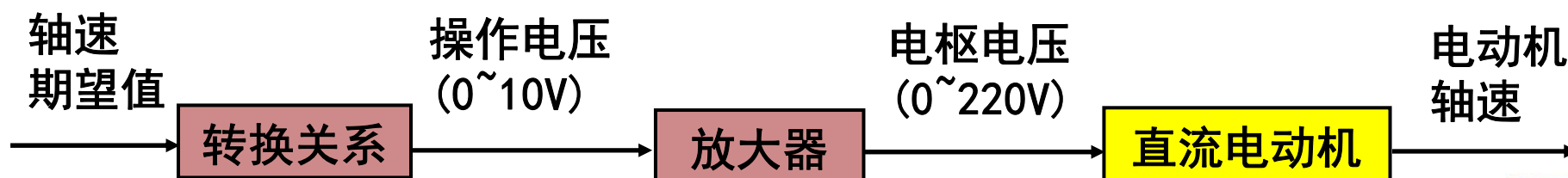


**控制目的：**电动机轴速为期望值

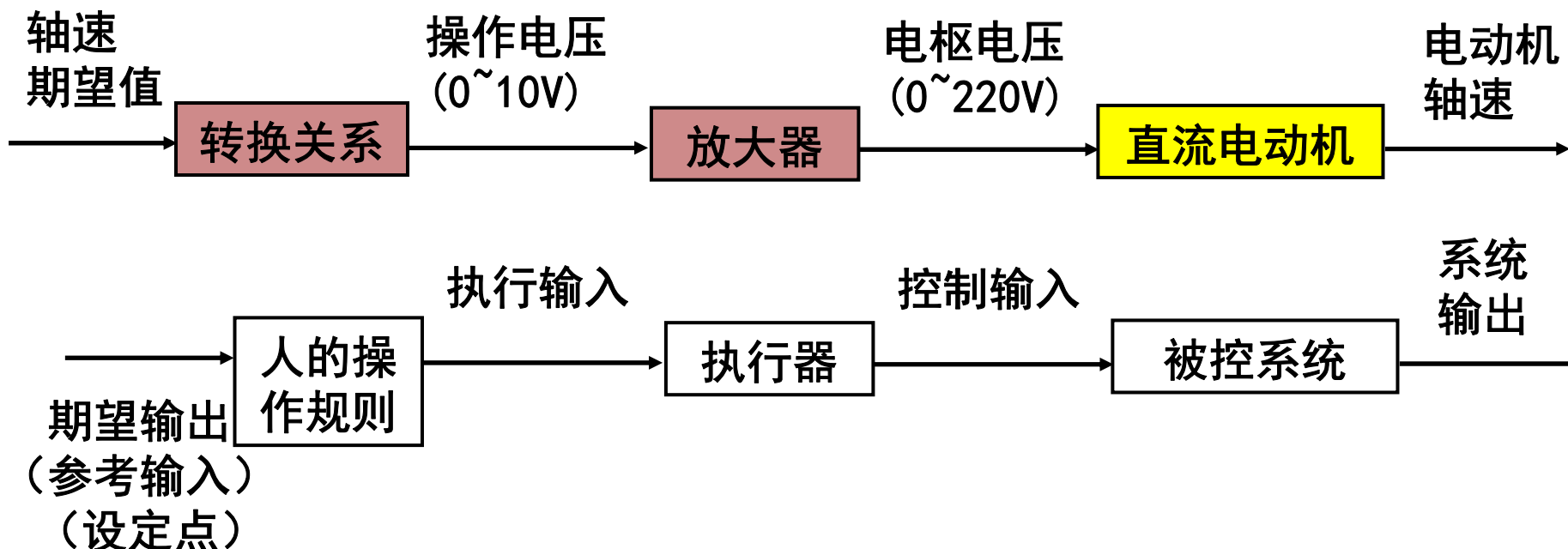
调整电枢电压可以造成电动机轴速的变化

**控制输入：**电枢电压

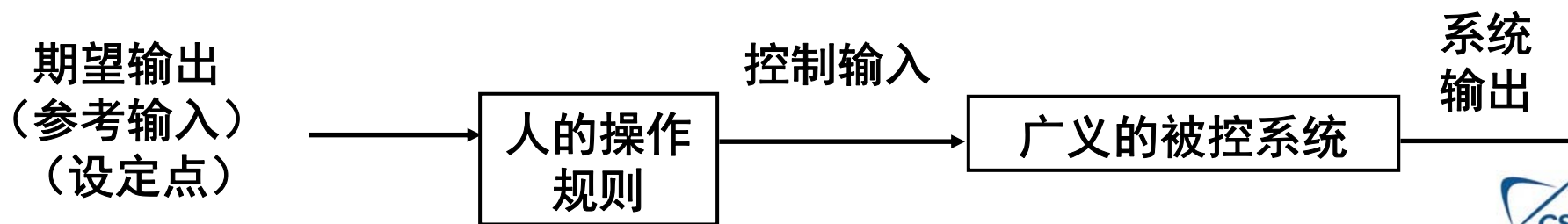
**系统输出：**电动机轴速



# 控制方式



上图的控制方式称为**开环控制**



# 控制方式

- 维纳（控制论创始人）给出的操作工控制水箱液位例子

**控制目标：**将水箱内液体的液位维持在给定的液位高度 $H$ 上

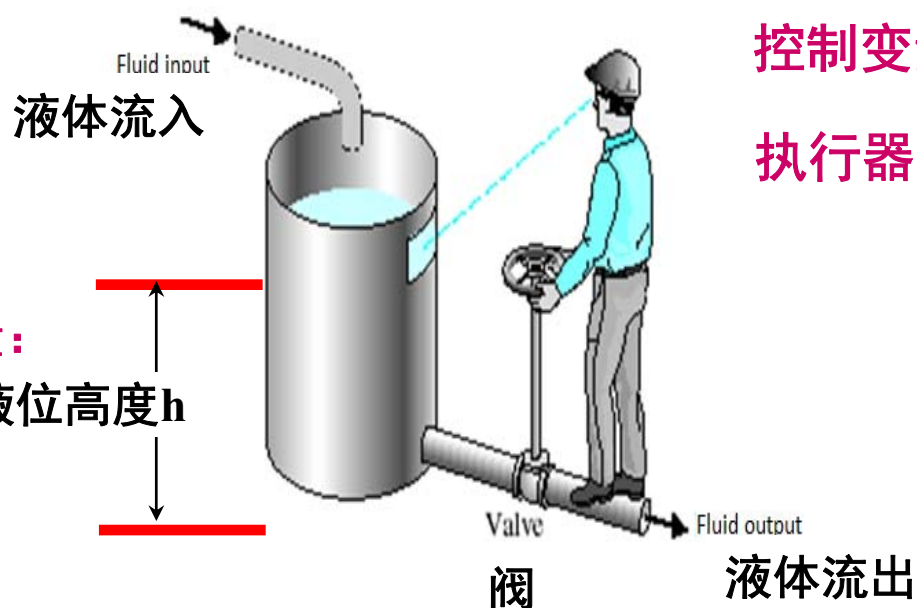
**被控系统/对象/过程：**水箱+阀

**控制变量：**液体流出速度

**执行器的输入：**阀的开度

**被控变量：**

水箱液位高度 $h$



**操作工的动作规则：**

若 $h < H$ ，减小阀的开度

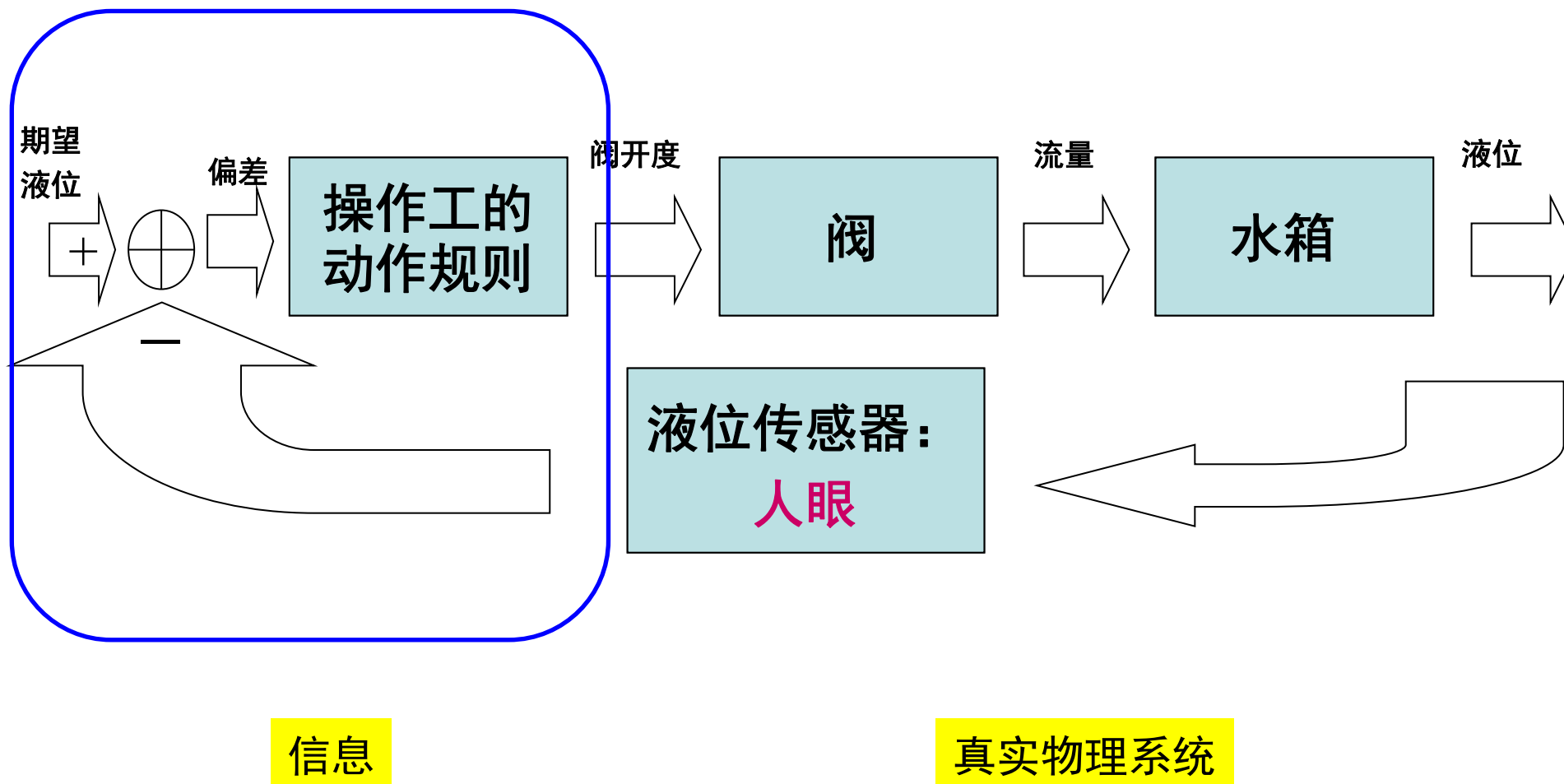
若 $h > H$ ，增大阀的开度

若 $h = H$ ，阀的开度不变

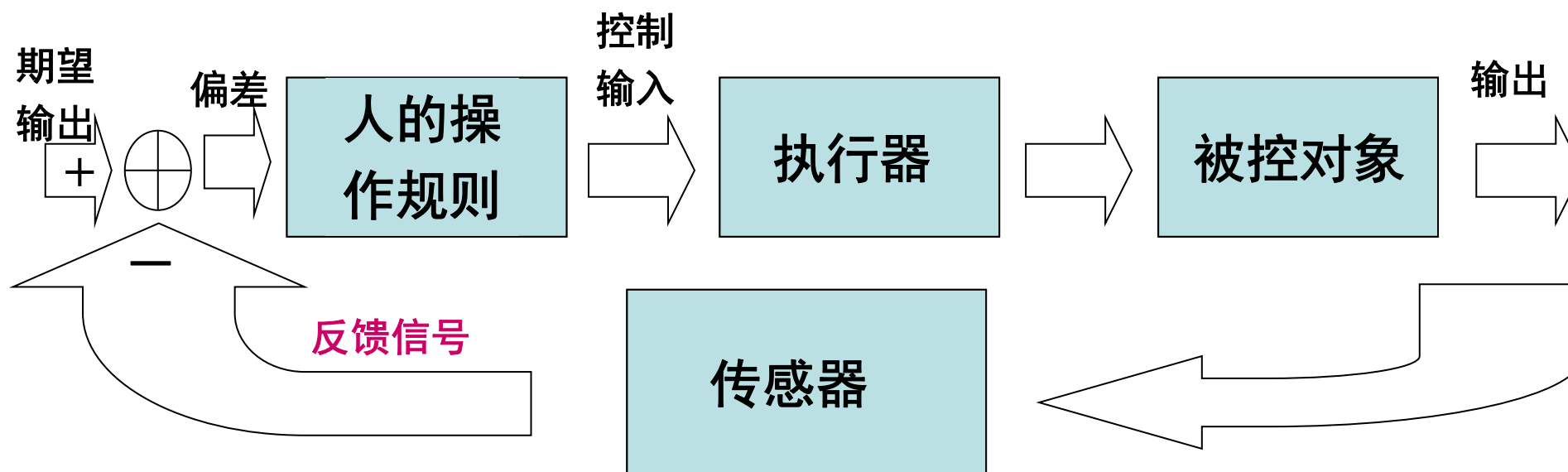
A manual control system for regulating the level of fluid in a tank by adjusting the output valve. The operator views the level of fluid through a port in the side of the tank.



# 控制方式



# 控制方式



上图的关键特征：控制输入不仅受期望输出的影响，还受被控对象输出的影响  
维纳将这种被控对象输出对控制输入的影响称为**反馈 (feedback)**

上图的控制方式称为**闭环控制（反馈控制）**

反馈现象广泛存在于大自然中，为大自然的和谐演变奠定了基础

对于开环控制不易对付的许多被控系统，合理运用反馈控制（闭环控制）往往能得到满意的结果

# 控制方式

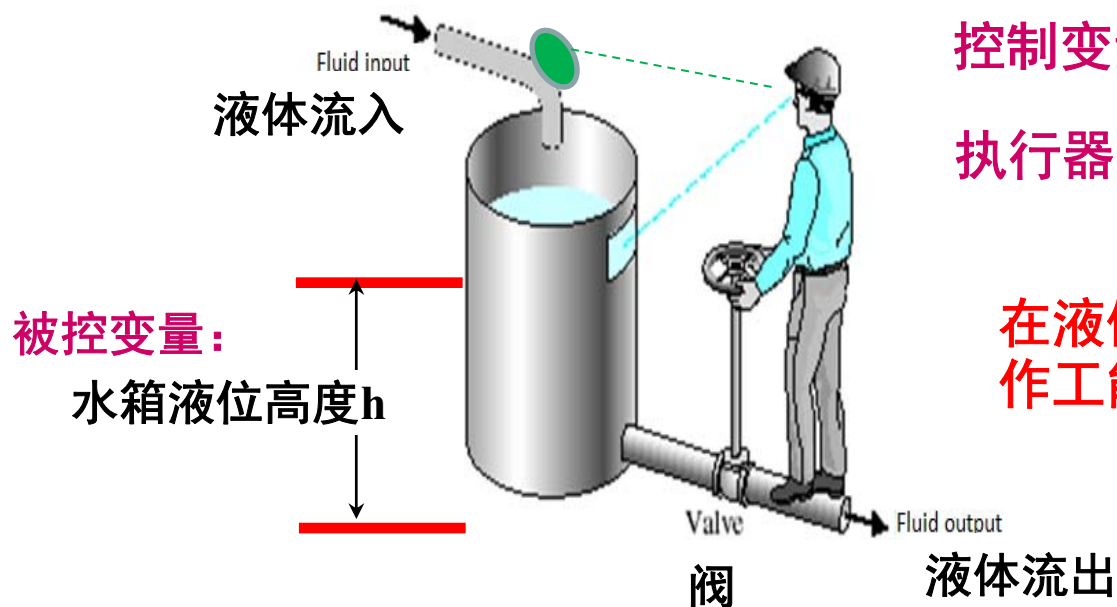
## ➤ 操作工控制水箱液位的例子2

**控制目标：**将水箱内液体的液位维持在给定的液位高度 $H$ 上

**被控系统/对象/过程：**水箱+阀

**控制变量：**液体流出速度

**执行器的输入：**阀的开度

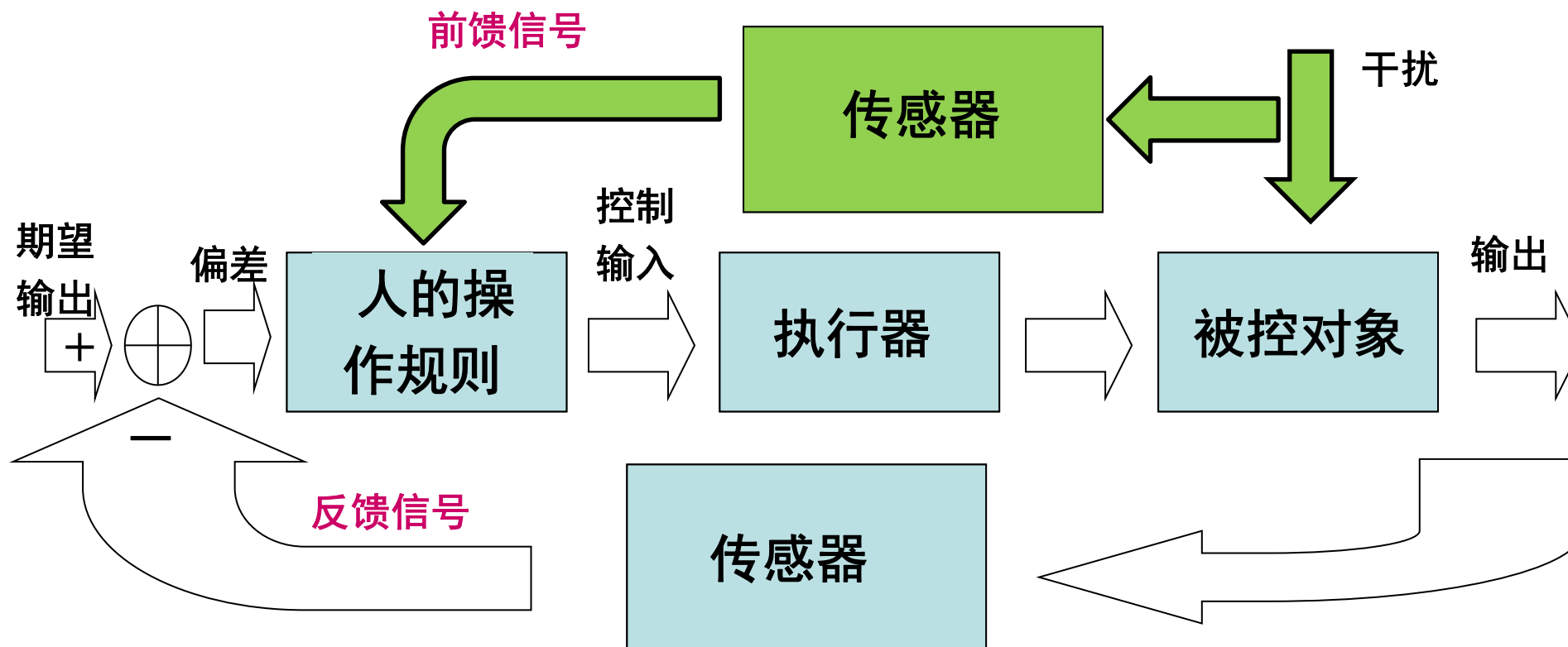


在液体流入管加装流量计，操作工能看到流量计的读数

**操作工的动作规则：**

综合期望液位、水箱液位、流入流量的信息决定阀门开度的变化

# 控制方式



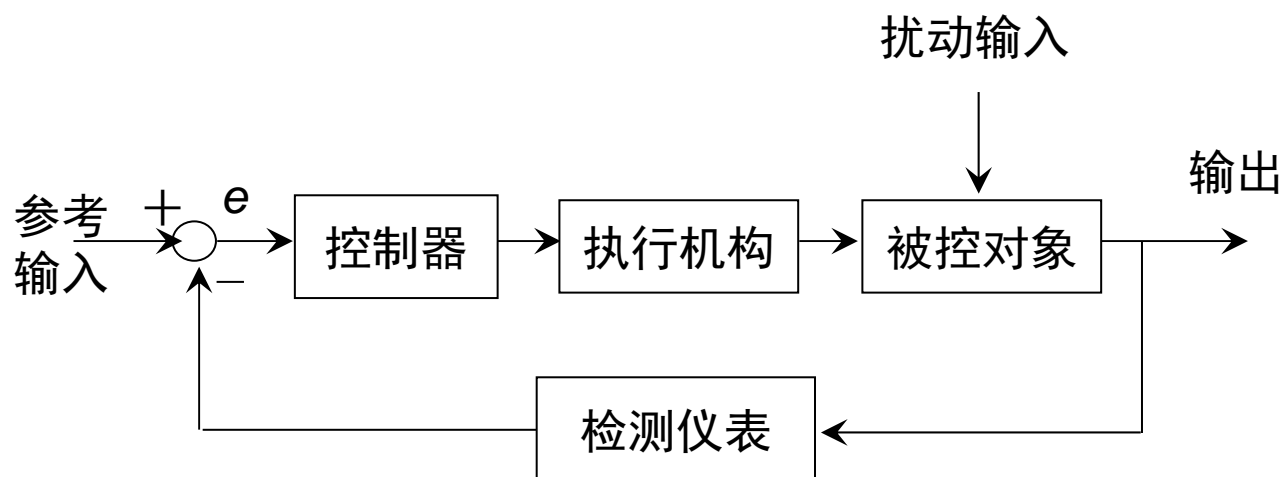
**前馈：** 将干扰的信息传至人的操作规则

上图的控制方式称为**带前馈的闭环控制**

大部分学者研究反馈控制，少部分研究带前馈的闭环控制，偶见开环控制研究

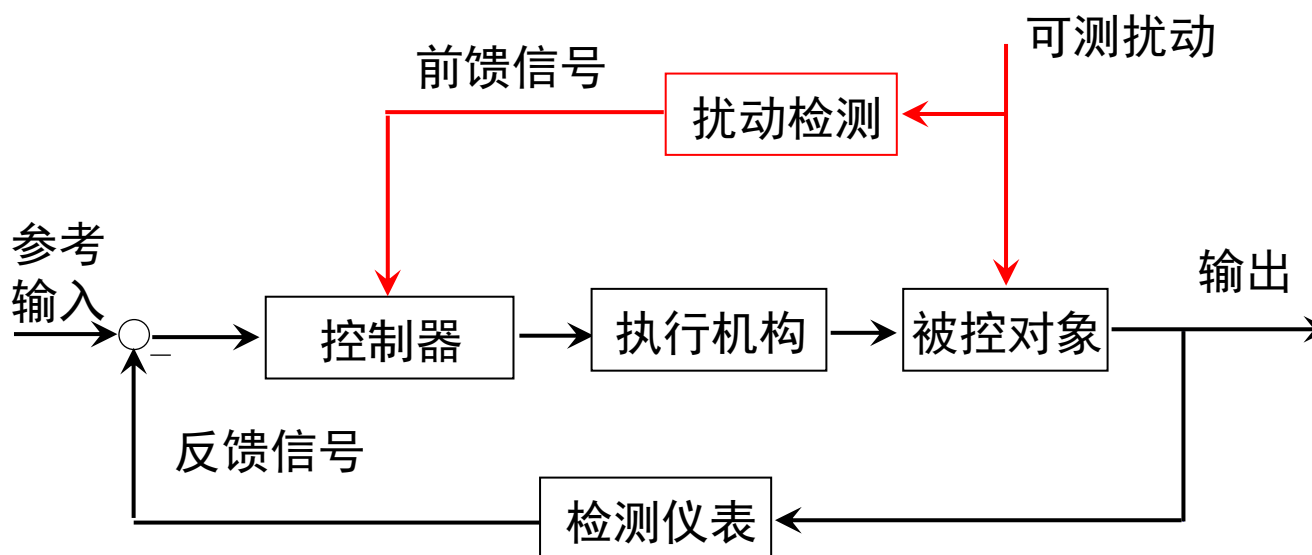
# 自动控制

“自动”意味着不用人力而借以（机械、电气等）装置直接操作  
用装置（控制器）取代前面控制中“人的操作规则”后，  
即是**自动控制**



上图中的“控制器+执行机构+被控对象+检测仪表”即构成  
**闭环控制系统**

# 自动控制



上图中的“控制器+执行机构+被控对象+检测仪表+扰动检测”  
即构成带前馈的闭环控制系统

# 自动控制

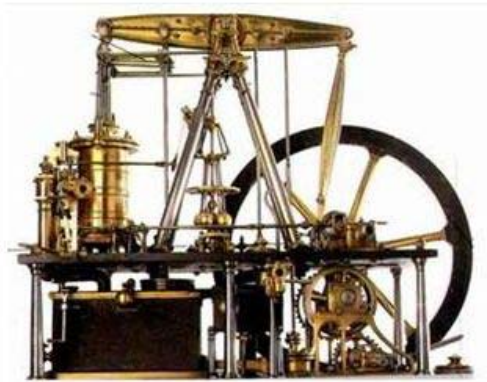


2015.5 Google的的无人驾驶汽车



2015.12百度和宝马合作的无人驾驶汽车

# 自动控制



瓦特改良的蒸气机模型

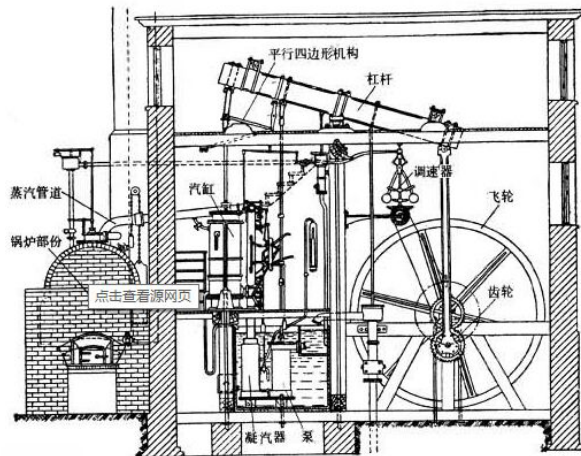
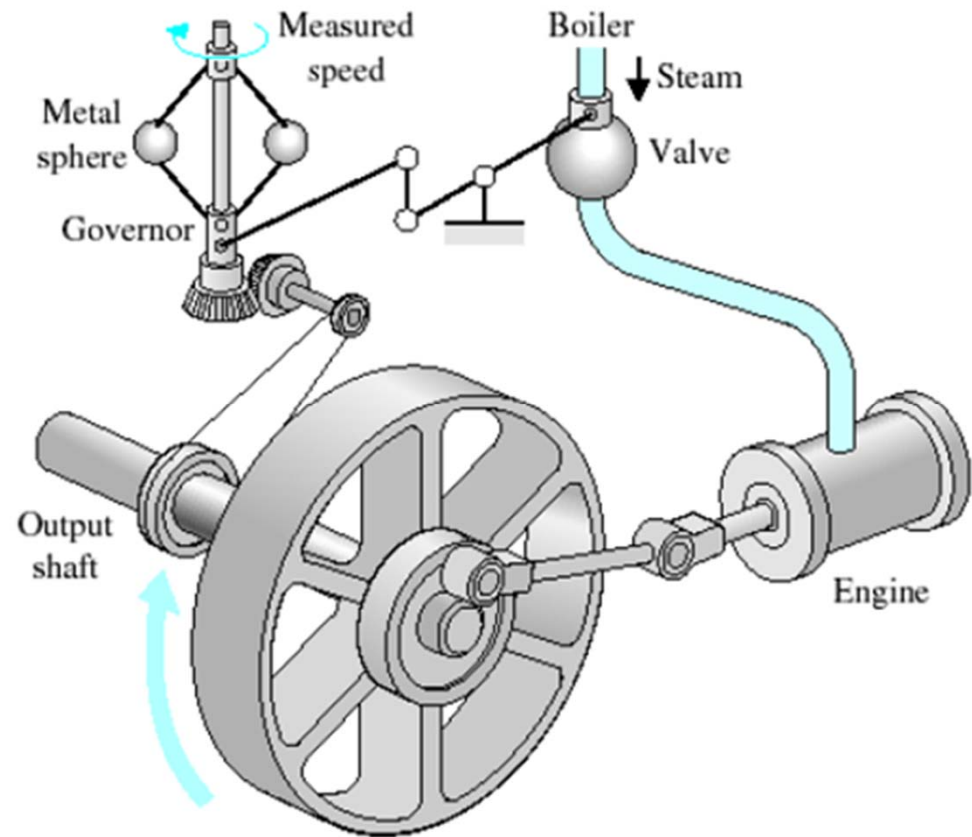
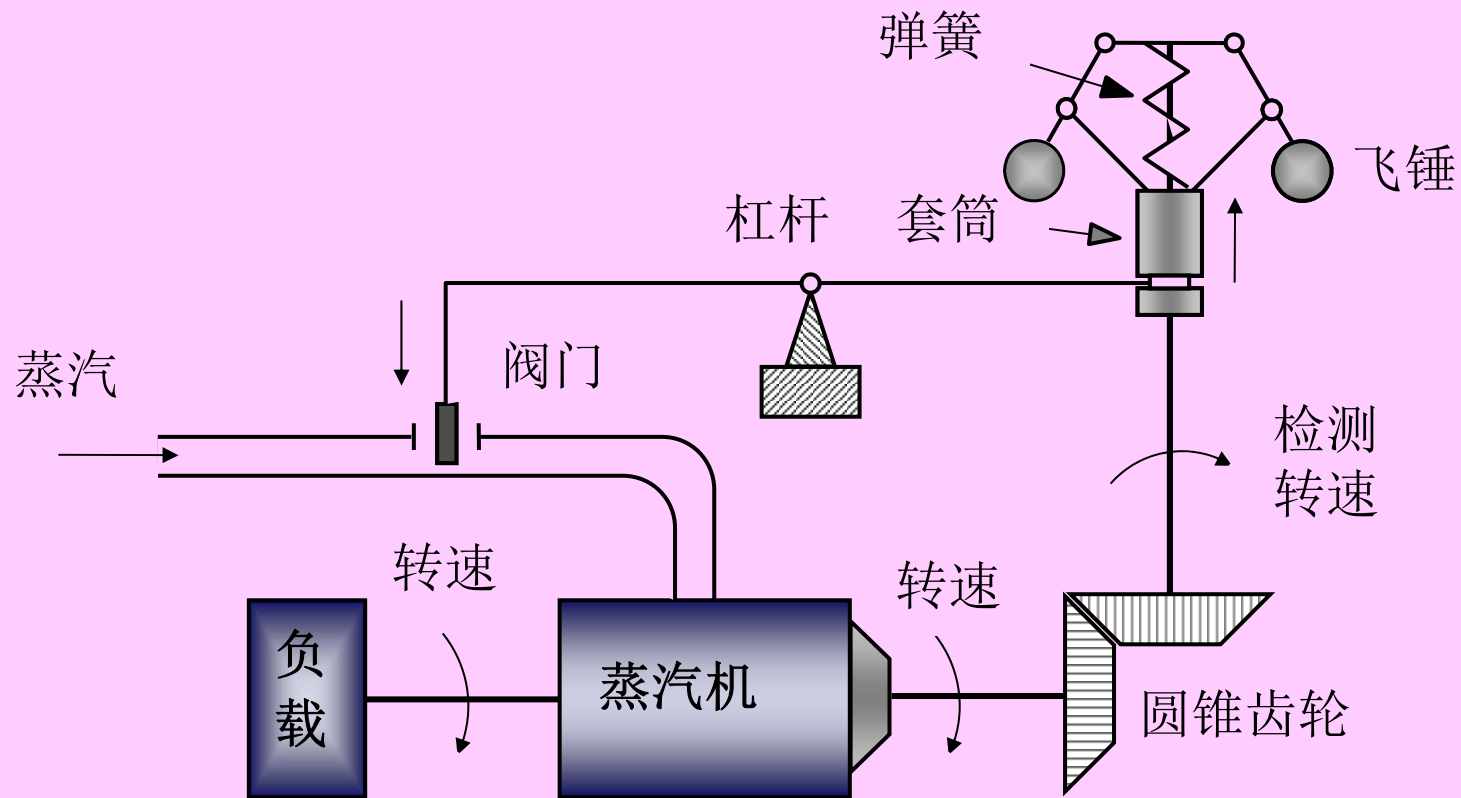


图4 1782年的瓦特蒸汽机 [BaiKe.GQSOSO.COM](http://BaiKe.GQSOSO.COM)



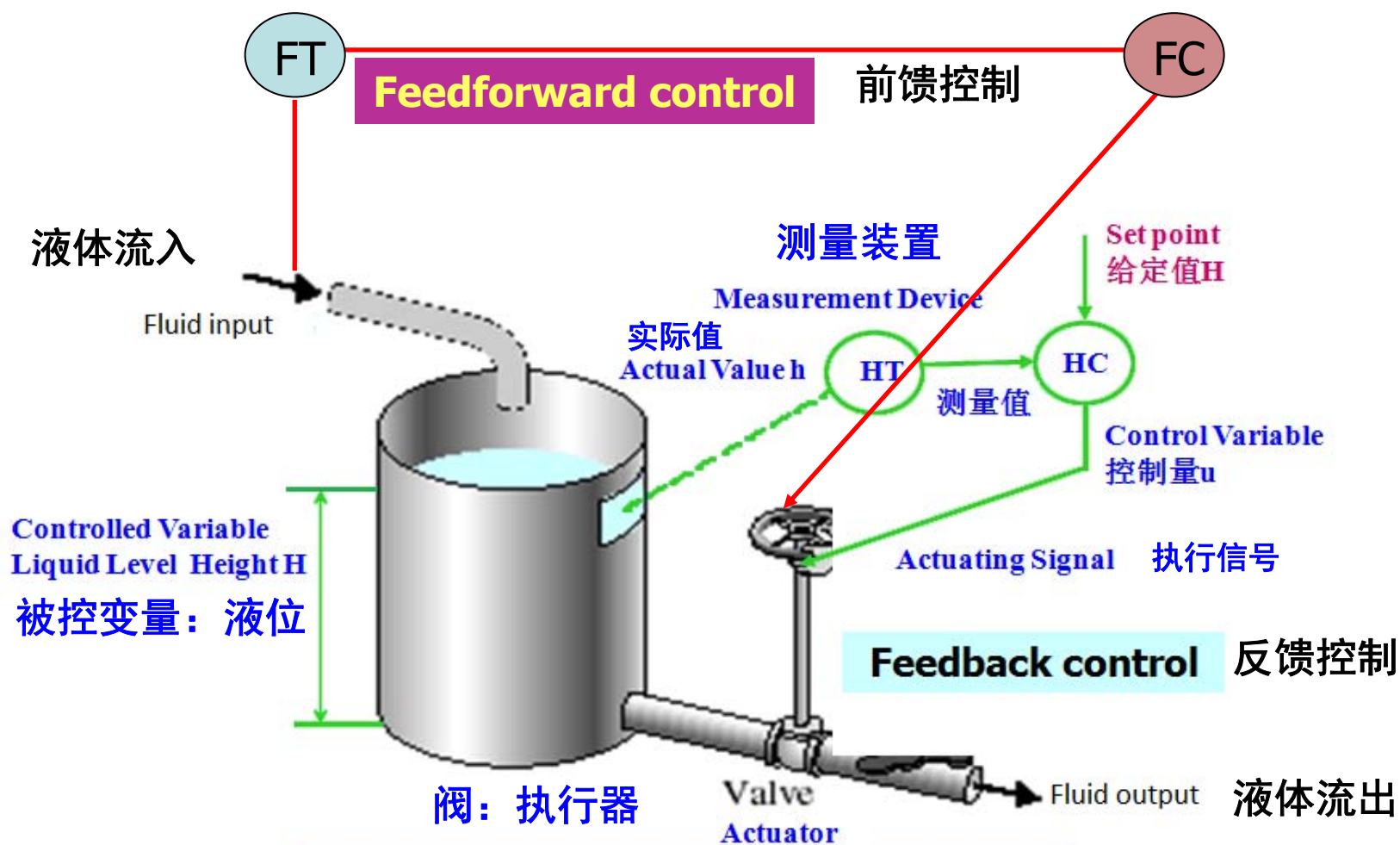


# 自动控制



Watt的蒸汽机转速控制系统原理图

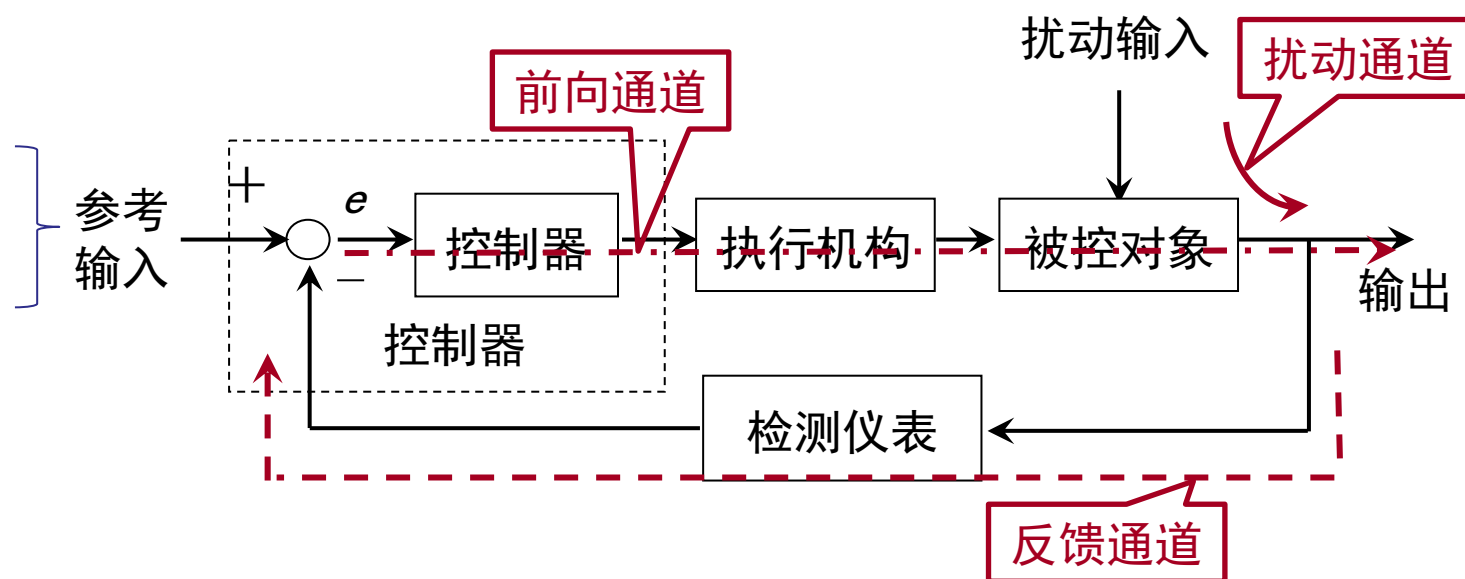
# 自动控制



带控制点的工艺流程图

# 自动控制系统的典型组成

- 定值控制
- 随动控制



# 现代控制系统实例：SpaceX火箭回收

阶段1：助推上升段，从起飞至助推级发动机关机；

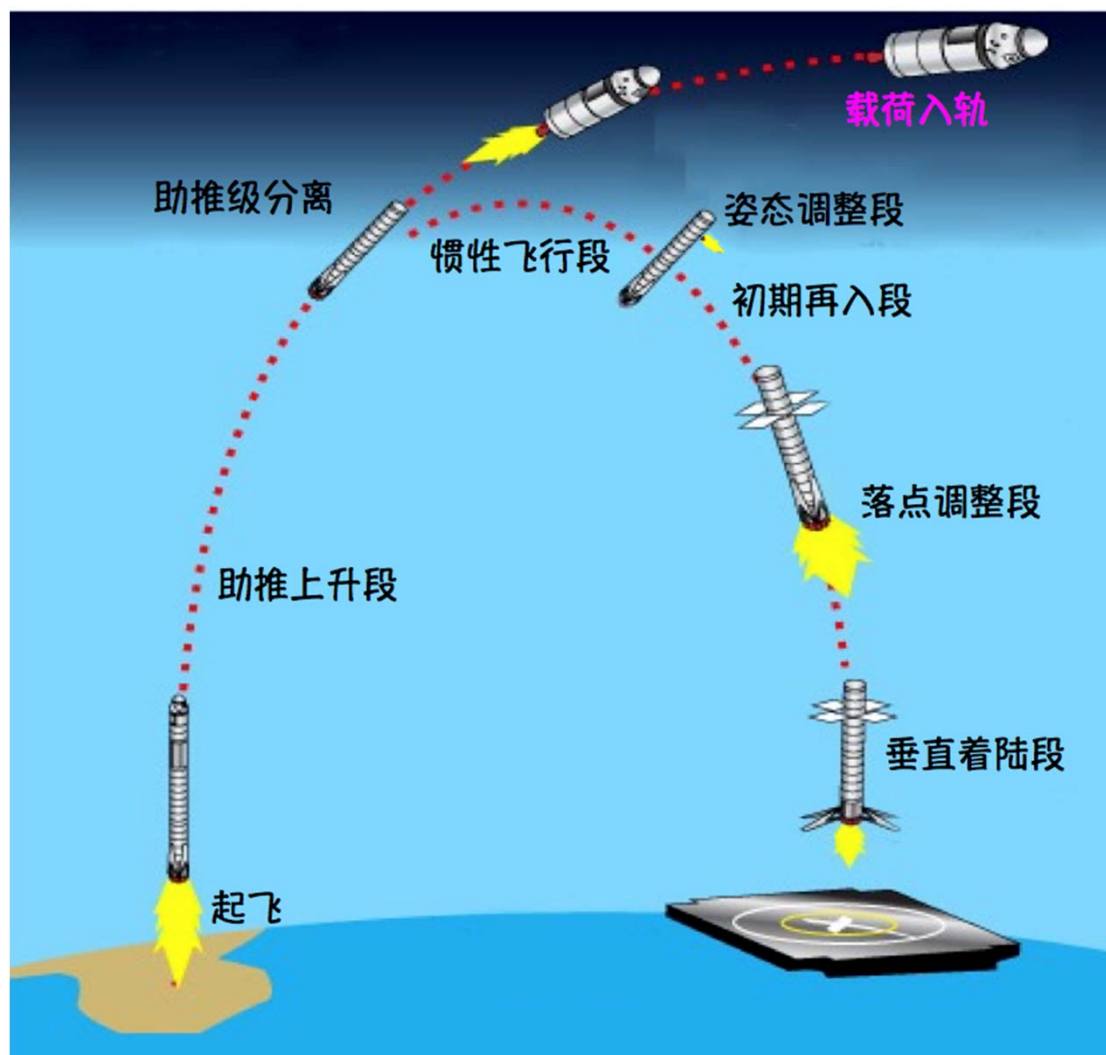
阶段2：惯性飞行段，按分离条件惯性飞行；

阶段3：姿态调整段，调整助推级至再入姿态；

阶段4：初期再入段，在稀薄大气层内飞行；

阶段5：落点调整段，利用发动机与空气动力复合控制，进行能量管理与落点控制；

阶段6：垂直着陆段，精确控制助推级速度、位置、姿态，实现软着陆。





# 现代控制系统实例：SpaceX火箭回收

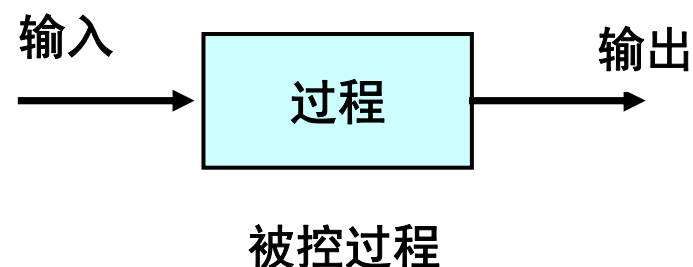


# 常用术语

➤ **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。

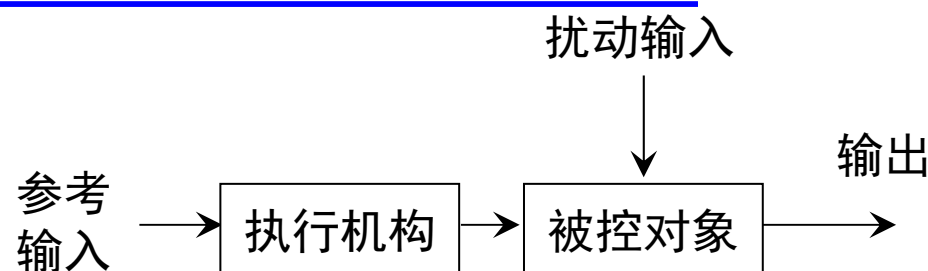
# 常用术语

- **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。



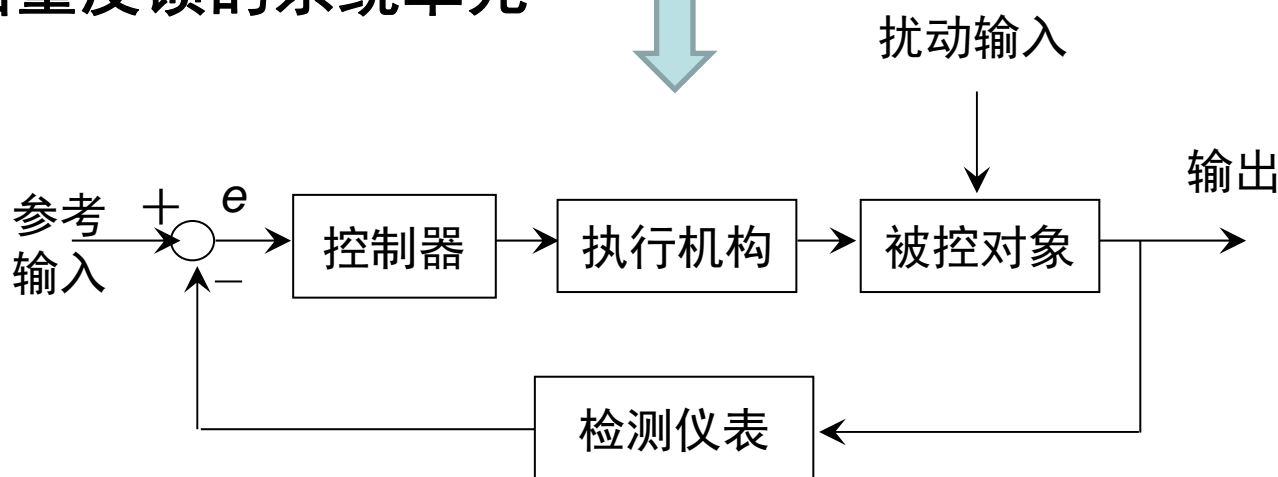
# 常用术语

**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



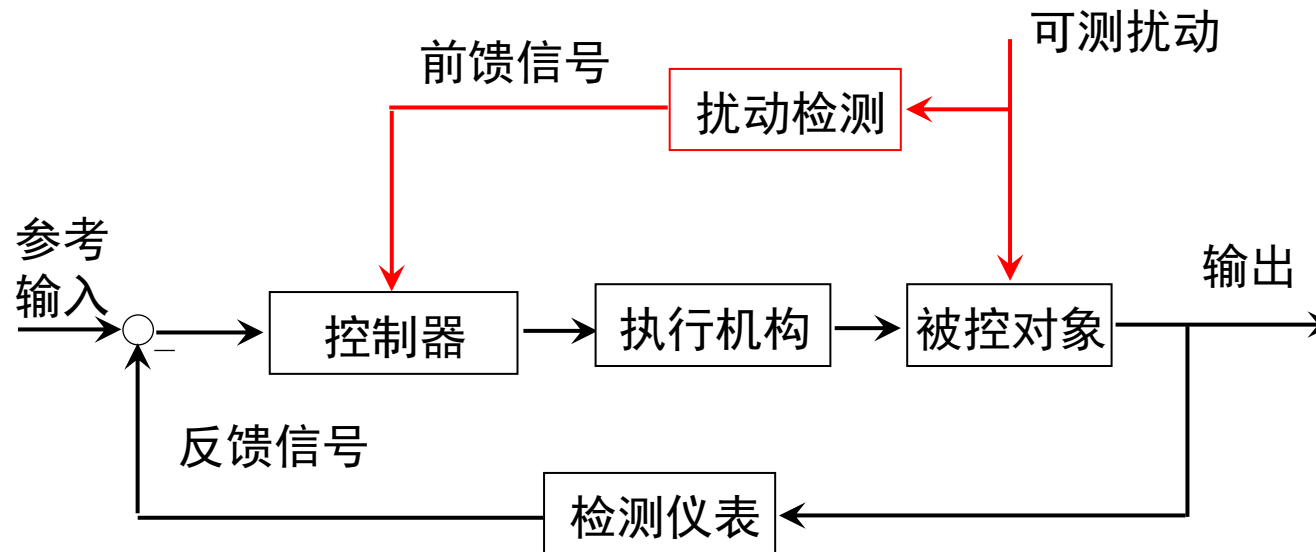
**反馈单元：**提供输出量反馈的系统单元

**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

## ➤ 前馈与反馈





# 主要内容

---

- 基本概念
- 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），如液位控制系统
- 随动控制系统（伺服系统），如雷达跟踪系统

## ➤ 按传输信号的性质分类：

- 连续时间控制系统（微分方程描述的系统）
- 离散时间控制系统（差分方程描述的系统）



# 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
- ◆ 本课程考虑的系统为线性时不变、单变量负反馈系统。



# 主要内容

---

- 基本概念
- 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

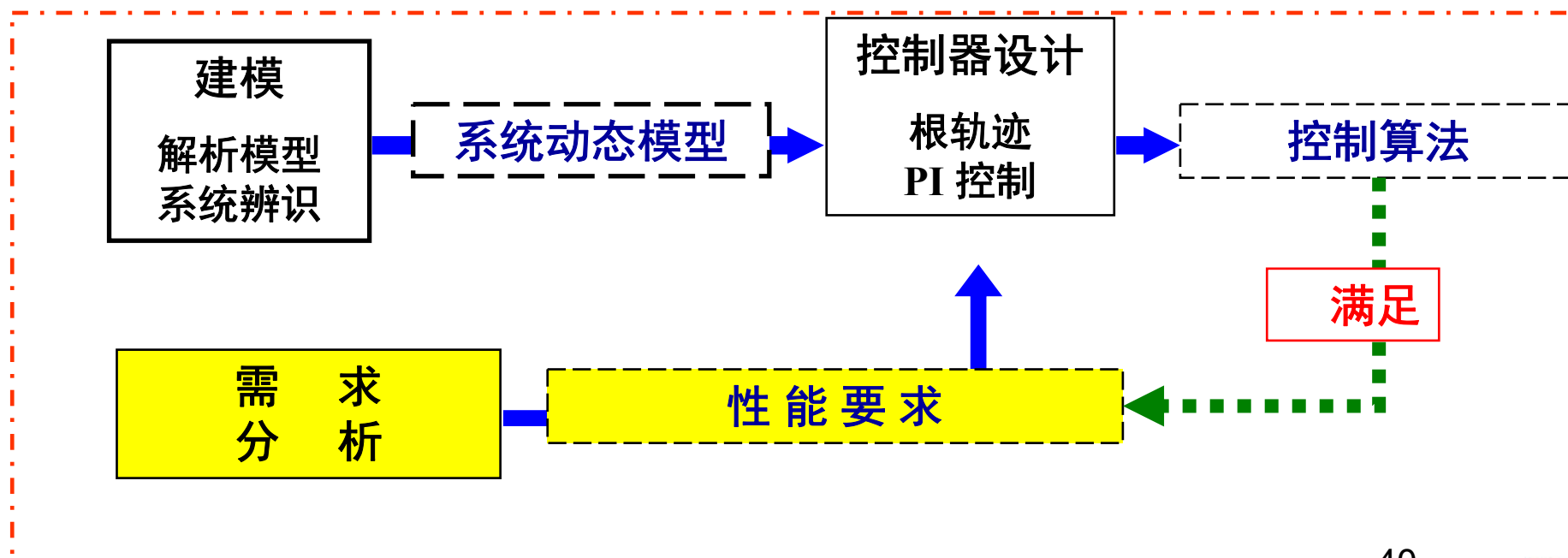
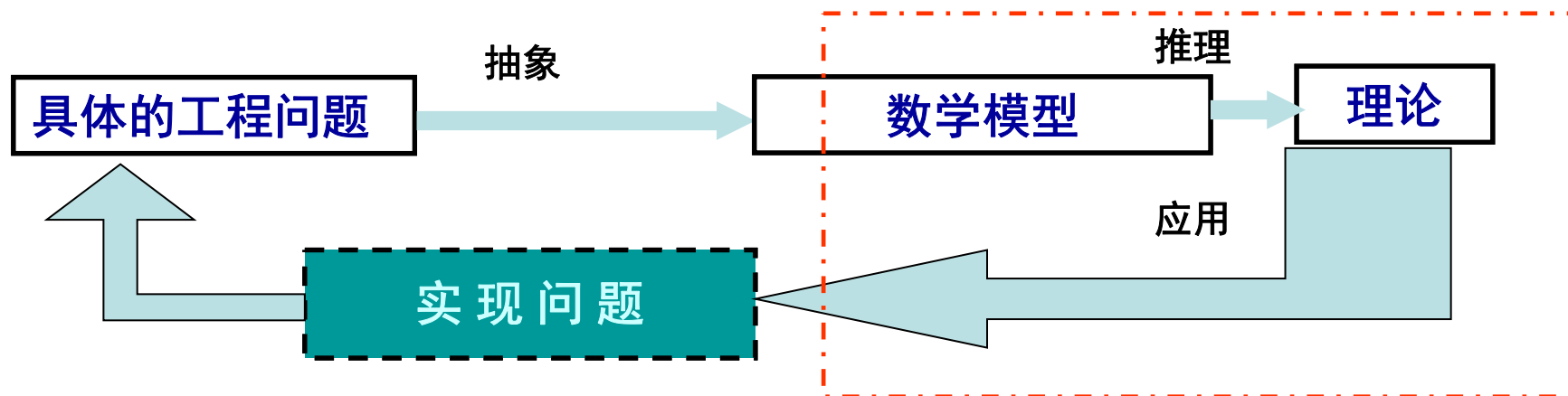
当给定输入变化时，希望系统能跟随其变化；当扰动出现时，则希望系统能克服扰动回到平衡状态。对动态的过渡过程要求是既快又稳。

## 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

---

- 基本概念
- 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

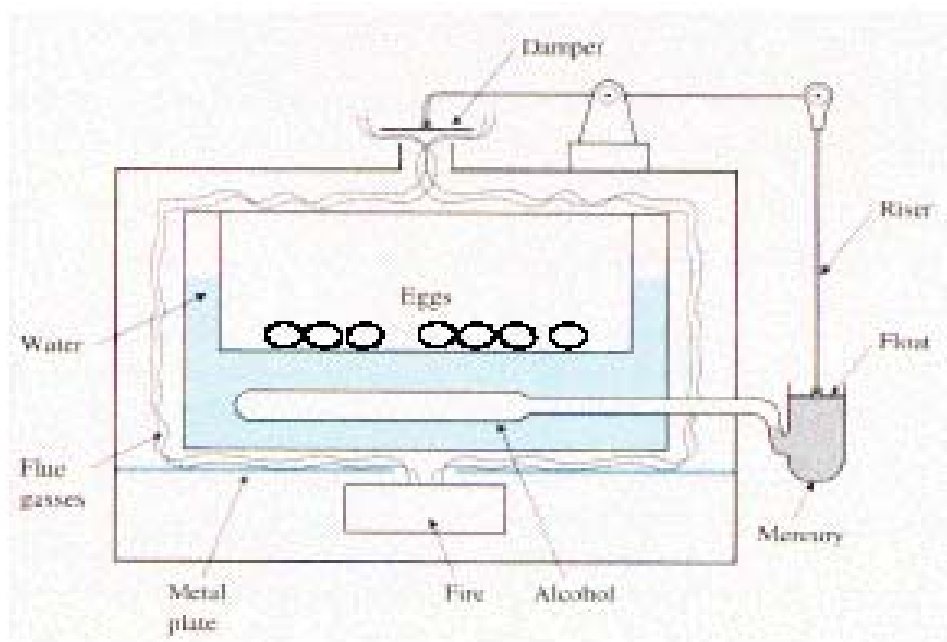
# 控制的历史

## ➤ 早期的自动控制系统

- 最早的控制系统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(Kitesibbios)**在油灯中使用了**浮子控制器**以保持油面液位稳定。
- **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。

# 控制的历史：孵蛋器温度控制

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



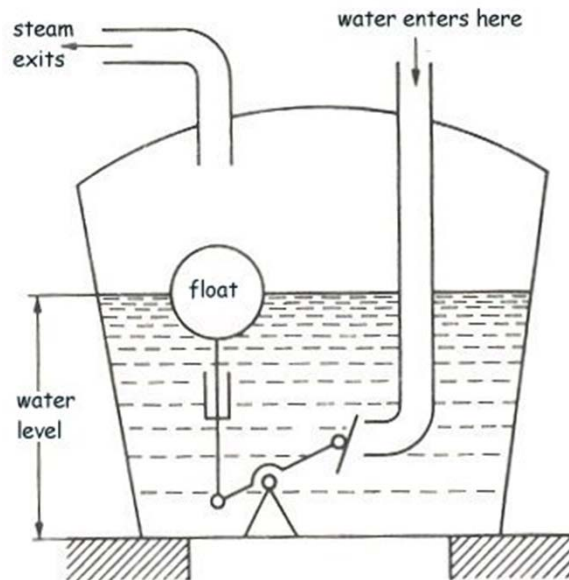
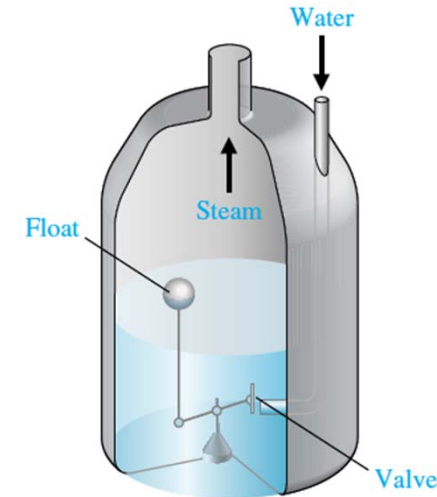
1620年左右，荷兰的德勒贝尔(Drebbel)设计了通过控制壁炉温度来给一个培育箱加热的系统。

- 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.

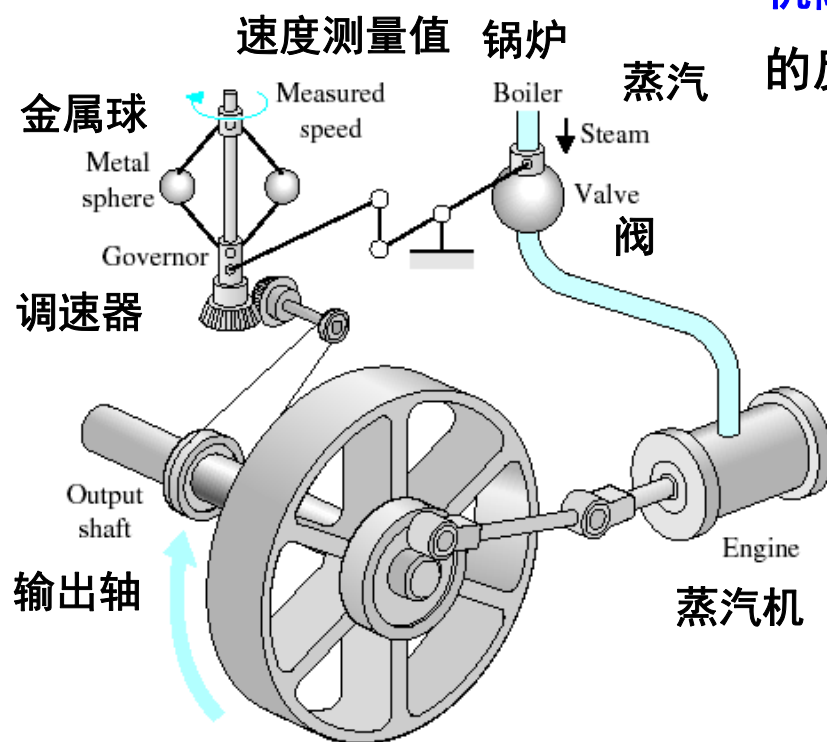


The float detects the water level and controls the valve that covers the water inlet in the boiler.

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。



Watt's Flyball Governor  
(18<sup>th</sup> century)

飞球式（离心式）调速器

➤ 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。



# 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。

# 工程系统“自动化”的目标：取代人

- 1945年，15000多名电梯操作员和维修工罢工，曼哈顿所有建筑物的电梯停止了运转，商业活动停顿了整整一周
- 已经消失的工种：专业打字员、接线员、电梯操作员
- 机械化→电气化→自动化→数字化→网络化→智能化：取代人



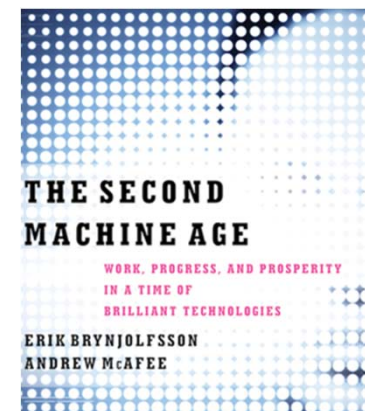
现代化的电梯：

- 安全、高速、平滑、舒适
- 感应、远程监控、群控、节能



# 自动控制、机器换人、人工智能

智能机器正取代知识技能，并且从逻辑程序运行走向灵活调整任务和识别趋势。传统知识工作者的领地正逐渐被智能机器取代



Amazon超级畅销书  
#1 in Future of Computing  
New York Times Bestseller

- 第一机器时代：体力劳动被取代
- 第二机器时代：脑力劳动被取代  
律师、医生、驾驶员、教师、演奏家…  
股票分析：《预测耐克公司收入会增加》



Erik Brynjolfsson



Andrew McAfee



# 浙江大学控制学院

➤ **历史** 化自(1956) 控制系(1997) 国重(1989) 工程中心(1991)

化学生产的操纵及检验仪器

➤ **重点研究方向:**

- 工业智能与优化控制
- 机器人与智能无人系统
- 工业控制系统安全
- 智能传感与检测

传感与检测 网络与信号  
控制与执行 诊断与容错  
建模与仿真 系统与优化  
导航与规划 智能与集成

➤ **定位: 解决国家重大需求 + 前沿技术理论创新**

- **解决调控难题**

强耦合、非线性、不确定 → 大规模、全范围、全自动、快适应

- **形成全新能力**

极端条件、极限水平的测量、控制、优化、系统集成





# 浙江大学控制科学与工程学院

控制科学与工程(双一流、A+)  
网络空间安全  
本科专业：自动化

研究所  
工业控制研究所  
智能系统与控制研究所  
智能感知与检测研究所

## 国家级平台

- ① 工业控制技术国家重点实验室(1989)
- ② 工业自动化国家工程研究中心(1991)
- ③ 工业控制系统安全技术国家工程实验室(2013)
- ④ 流程生产质量优化与控制国家级国际联合研究中心(2016)
- ⑤ 新一代工业互联网系统安全技术集成攻关大平台(2019)

## 国家级奖励

- ① 高端控制装备及系统的设计开发平台研究与应用(一等奖, 2013)
- ② 高安全成套专用控制装置及系统(2016)
- ③ 炼化化工重大工程自动化控制与优化一体化系统关键技术研究(2012)
- ④ 新一代控制系统高性能现场总线-EPA(2009)
- ⑤ 全集成新一代工业自动化系统(2006)

## 省部级平台

- ① 教育部B类实验室
- ② 信息与控制学科创新引智基地
- ③ 浙江省工业自动化公共科技创新服务平台
- ④ 浙江省工业信息物理融合系统协同创新中心
- ⑤ 信息与控制学科创新引智基地



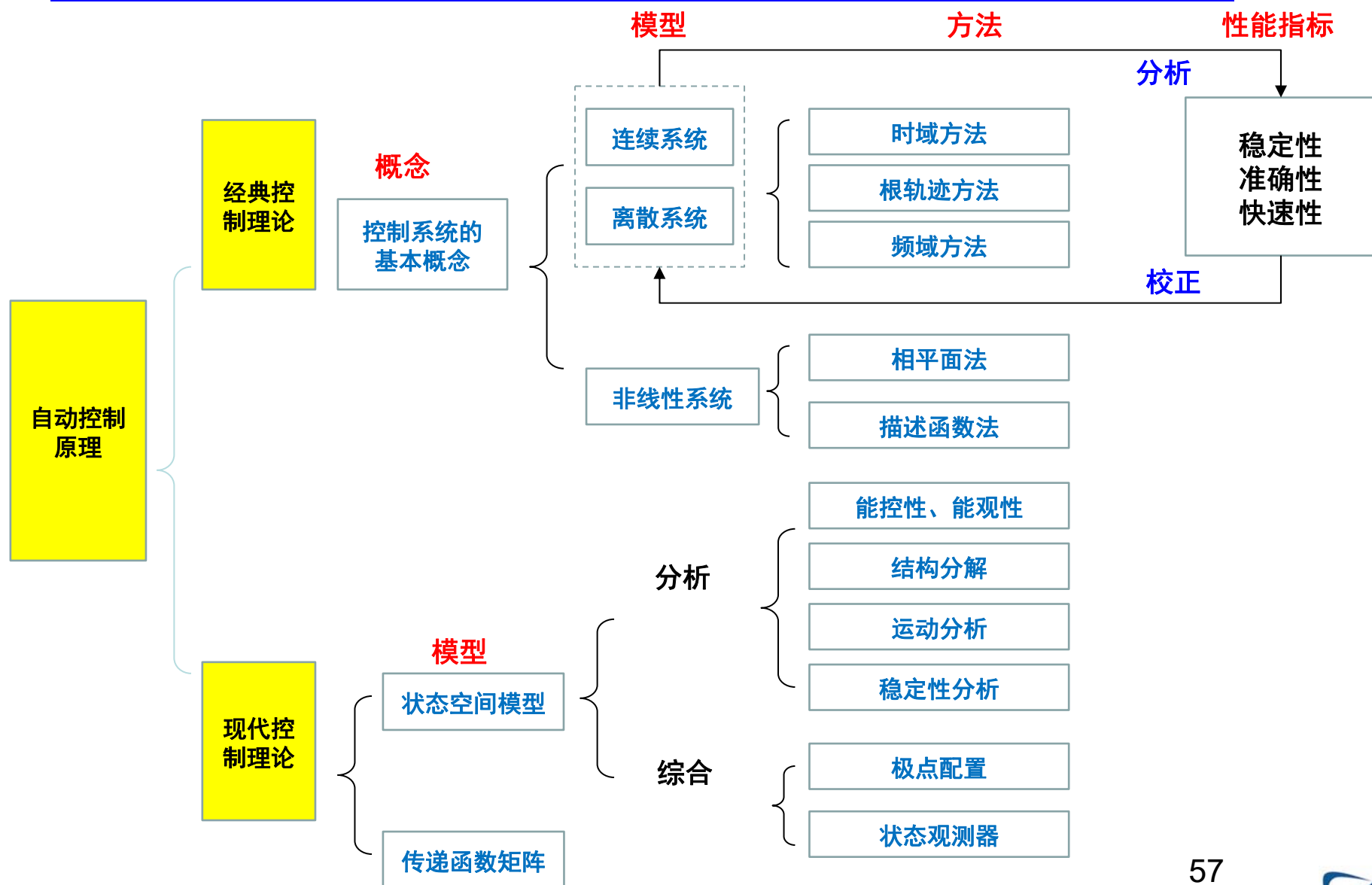
# 主要内容

---

- 基本概念
- 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



# 自动控制原理的知识体系





# 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  
(实验)





# 结语

---

- ◆ 实用且有趣的领域
- ◆ 反馈和自动化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



---

## 课外阅读推荐

1. 中文教材、英文教材
2. **Present Developments in Control Applications, K J Astrom, IFAC 50周年庆祝大会上的报告, 2006**
1. 我国古代自动装置的原理分析及其成就的探讨, 万百五, 自动化学报, 1965, Vol.3, No.2



---

膜片中引用的许多照片来自于网上，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！

