



自动控制理论（甲）

浙江大学控制学院 吴俊
玉泉校区教18大楼231室
junwuapc@zju.edu.cn

助教：周啸宇
22032088@zju.edu.cn

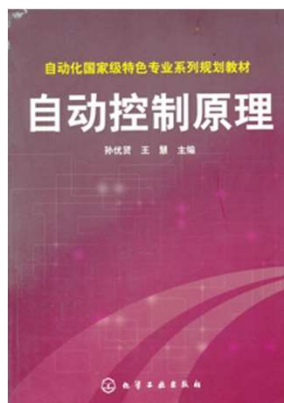
ENGINEERING
SINCE 1956

2021.3.1

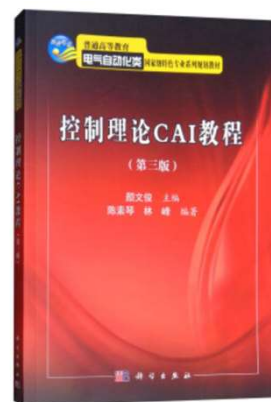


教材与参考书

中文:



孙优贤、王慧主编
化学工业出版社



颜文俊 主编
陈素琴、林峰编著
科学出版社



胡寿松主编
科学出版社

英文:



Richard C Dorf, Robert H. Bishop
Modern Control Systems



John J. D'Azzo, Constantine H. Houpis
Linear Control System Analysis and Design



课程简介

➤ “自动控制理论（甲）”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（甲）”的内容

- (1) 建立系统模型
- (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
- 课堂讨论与小组讨论
- 按时完成作业（每周一上课前交作业，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、随堂练习、讨论）：40%
一旦发现有作业抄袭，抄袭与被抄的同学该次作业均以零分计！！
- 期中测试：10-20%
- 期末考试：40-50%



授课方式

➤ 授课形式：

讲授、讨论、随堂练习

➤ 学习小组：

每4-5位同学自发组成小组，临近就座，整体评价

第1周内组长将本组的组名和名单发到课程钉钉群里

➤ 随堂练习：

未交卷得零分（请假除外）

交白卷有基本分



第一章 CHAPTER 1

控制系统概论

Introduction to Control Systems



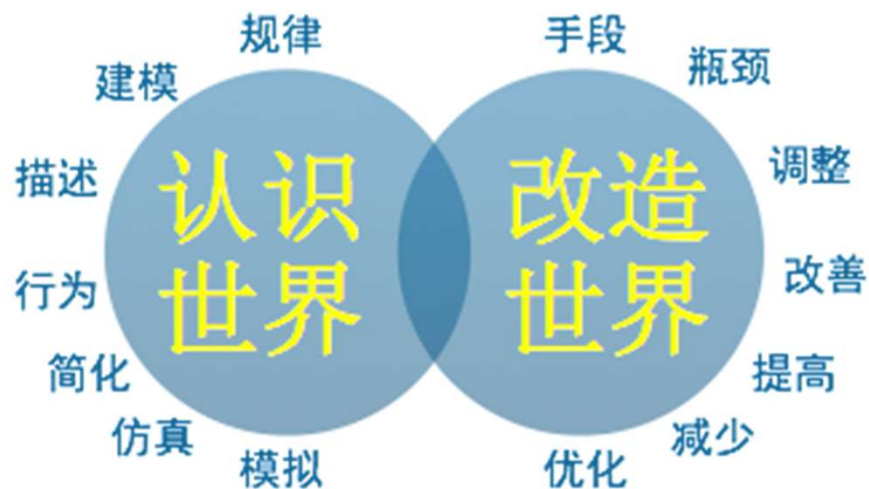


主要内容

- 基本概念
- 自动控制系统的分类
- 课程的主要内容安排

从哲学观点

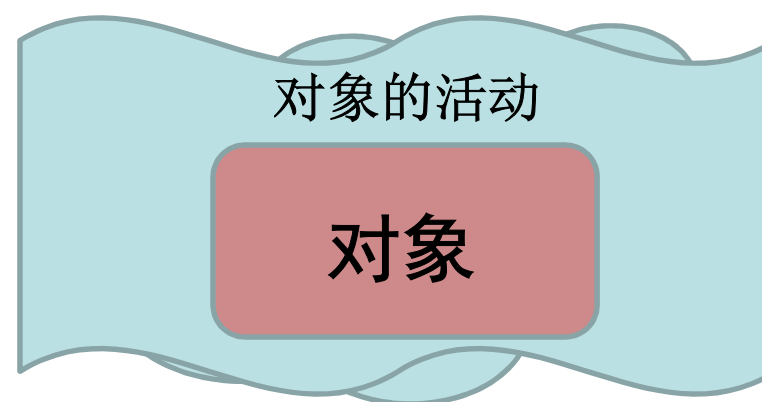
- "The philosophers have hitherto only interpreted the world, in various ways; the point is, however, to change it."
- in Karl Marx '*Theses on Feuerbach*', 1845



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

控制的含义

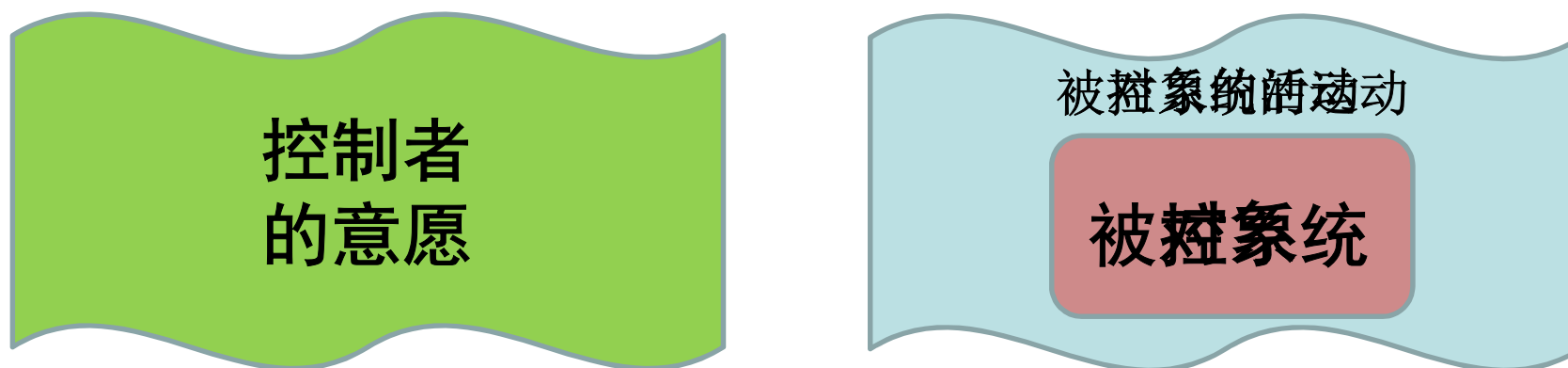
- ◆ **控制：掌握住对象不使其任意活动或超出范围；
或使其按控制者的意愿活动**
(现代汉语词典)



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

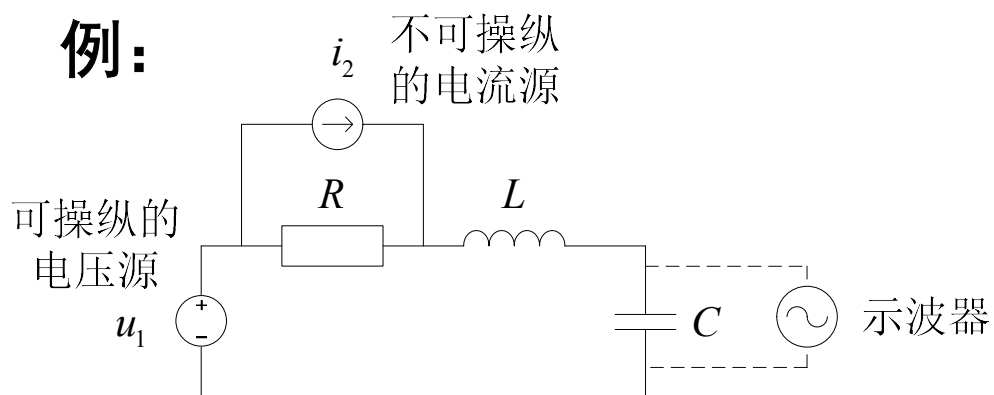


➤ 本课程讨论的被控系统主要是工程上的系统

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为**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

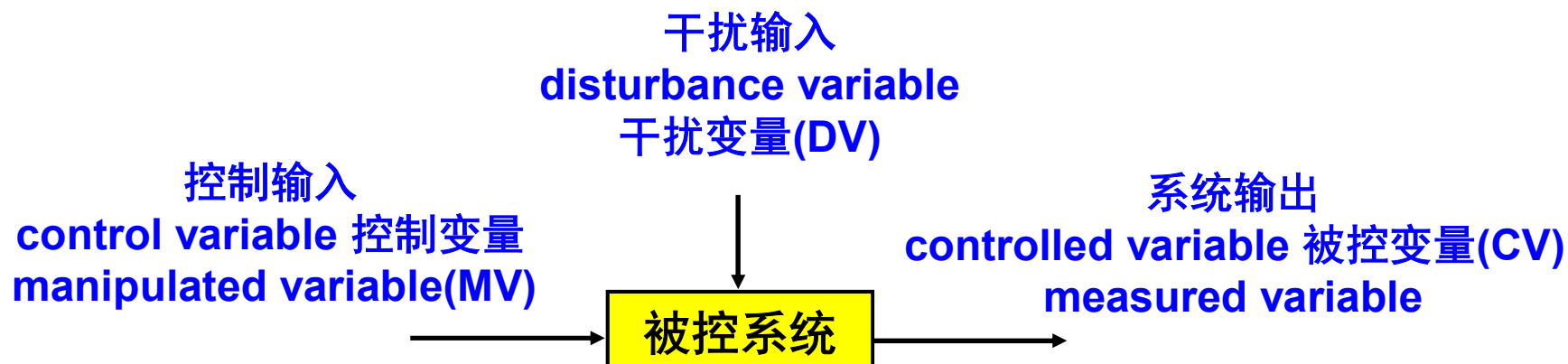
$i_1, u_R, i_R, u_2, u_L, i_L, u_C$ 和 i_C 为内部变量

u_1 为控制输入； i_2 为干扰输入

u_C 为系统输出



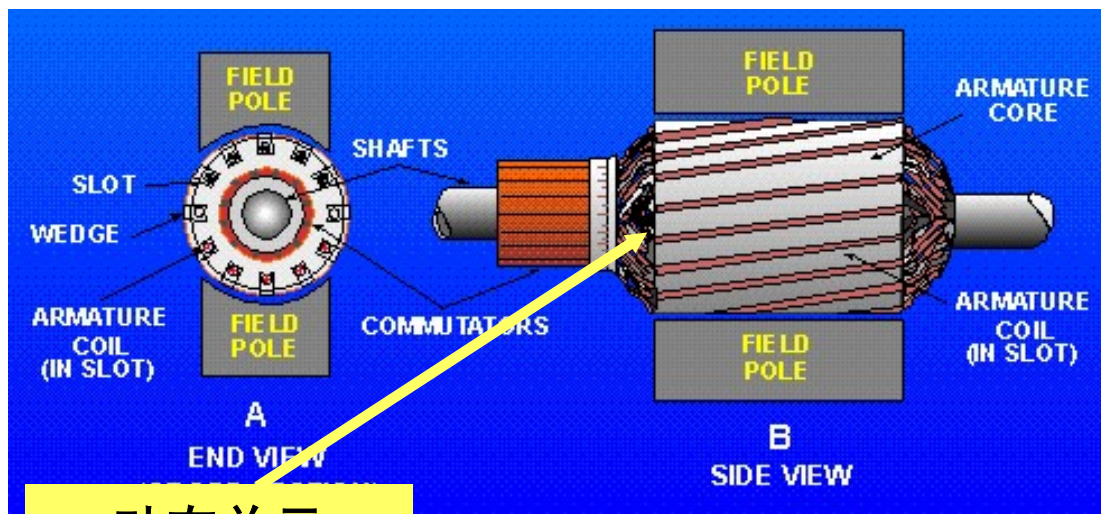
系统与amp;控制



- 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



动态单元

控制目的：电动机转速为期望值

调整电枢电压可以造成电动机转速的变化

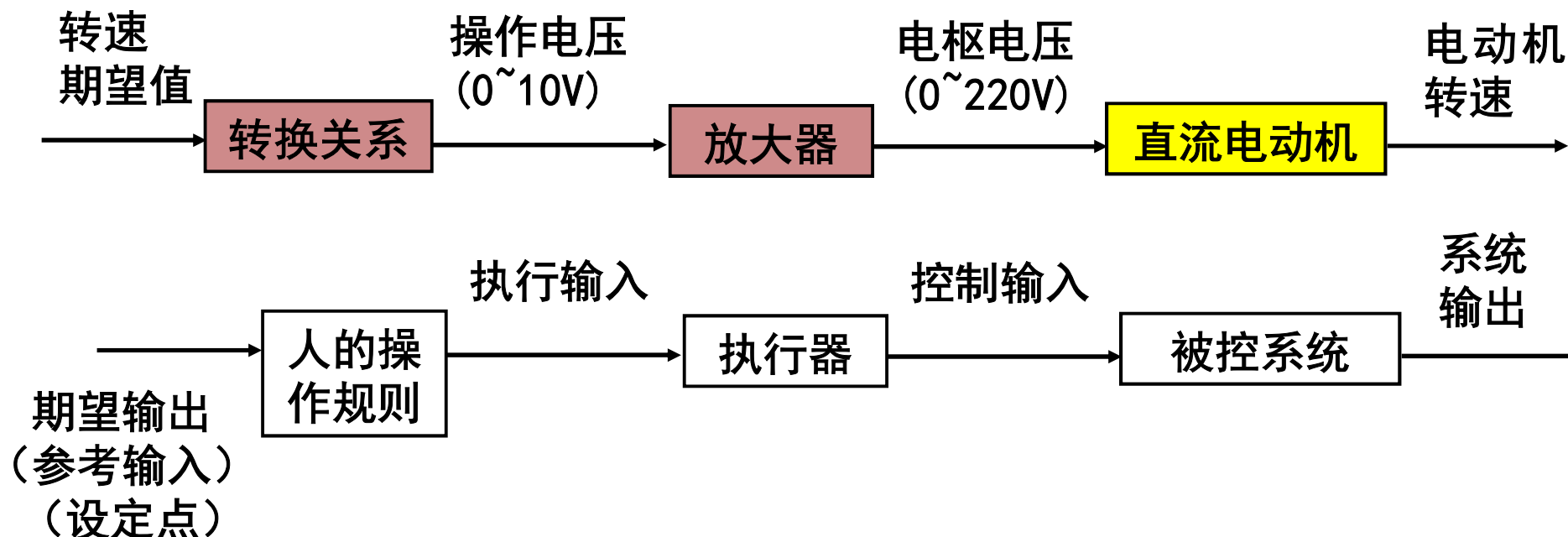
控制输入：电枢电压

系统输出：电动机转速





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

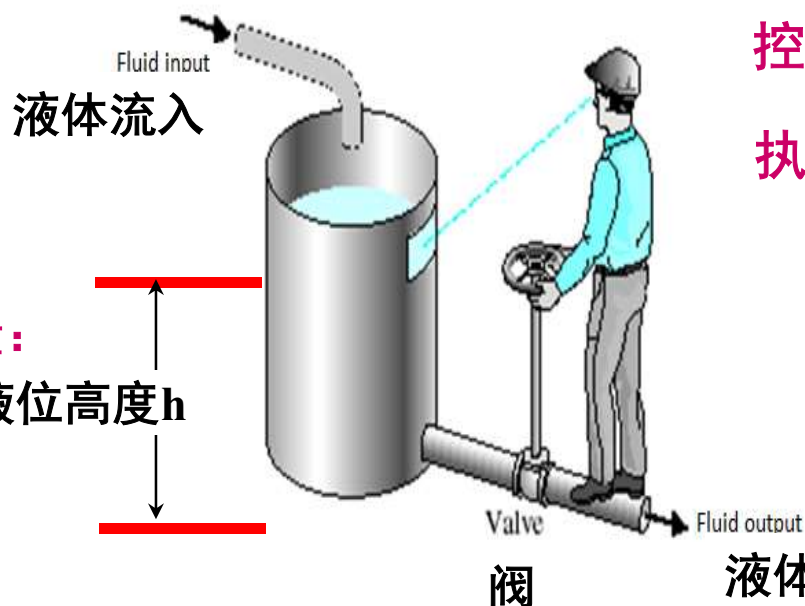
被控系统/对象/过程：水箱+阀

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

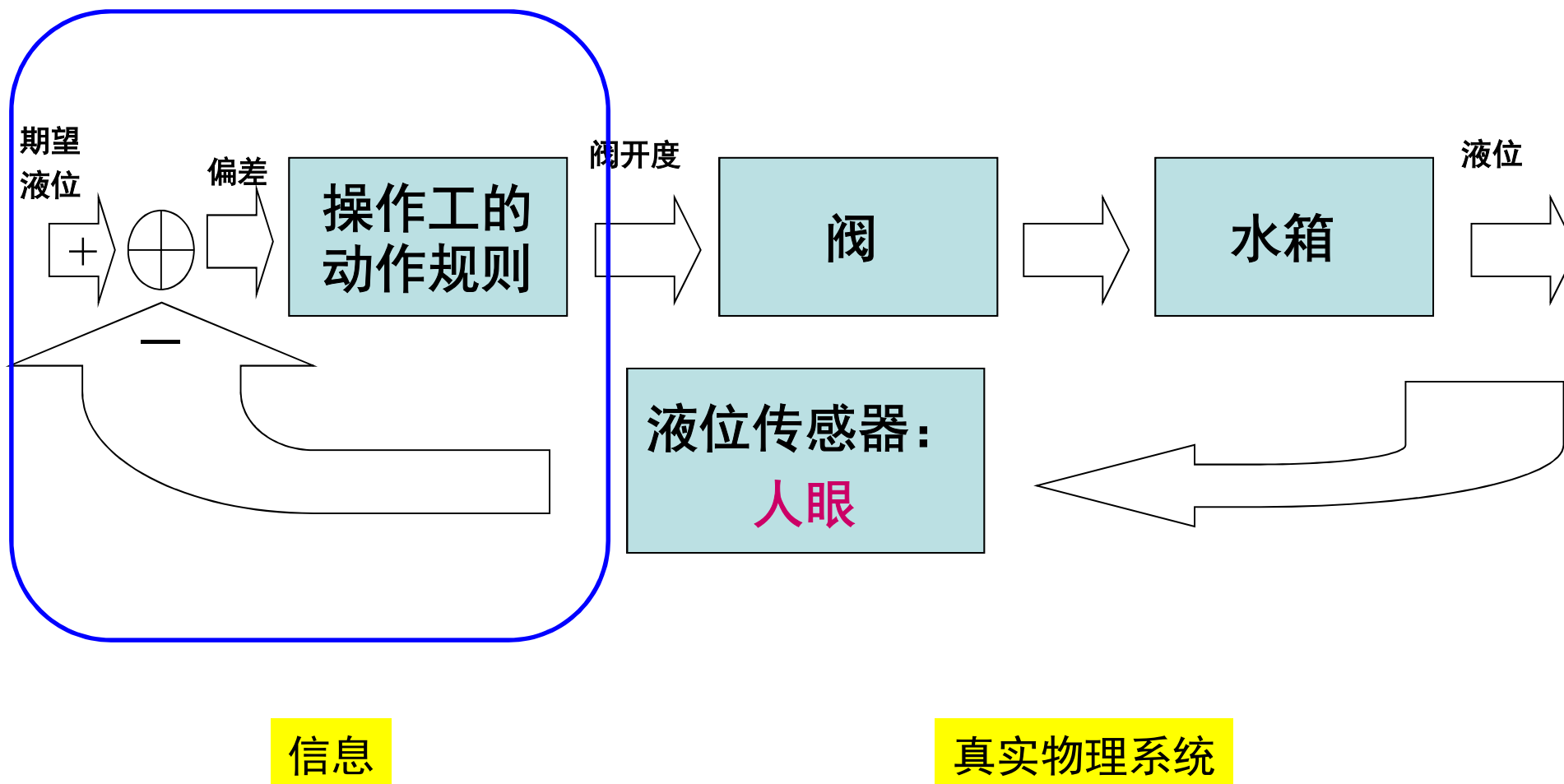
若 $h > H$ ，增大阀的开度

若 $h = H$ ，阀的开度不变

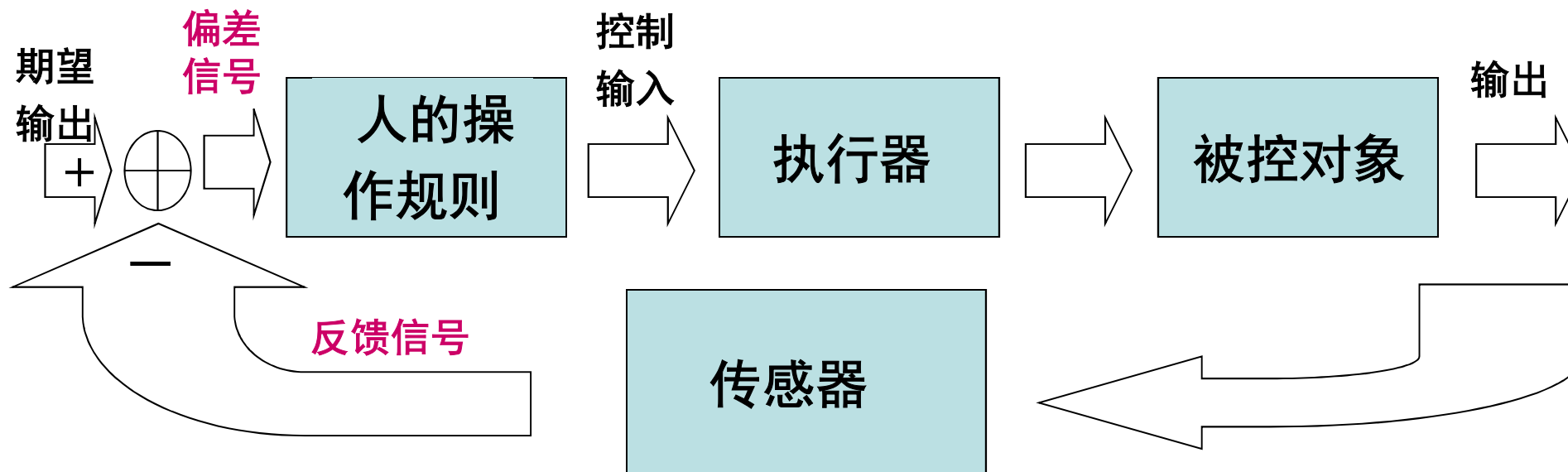
A manual control system for regulating the level of fluid in a tank by adjusting the output valve. The operator views the level of fluid through a port in the side of the tank.



控制方式



控制方式



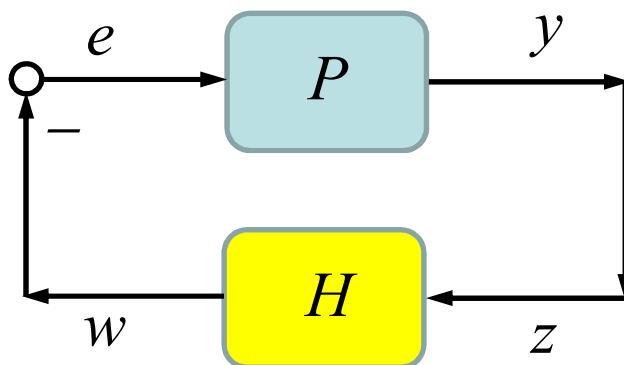
上图的关键特征：控制输入不仅受期望输出的影响，还受被控对象输出的影响

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)**

控制方式

认识反馈结构



- 系统P：输入 e 是因，输出 y 是果，如 $y = -e - 3$
- 系统H：输入 z 是因，输出 w 是果，如 $w = 11z$
- 连接P和H，形成一个反馈系统： $z = y$, $e = -w$
- 上述反馈系统中，各信号相互影响，达到平衡，解

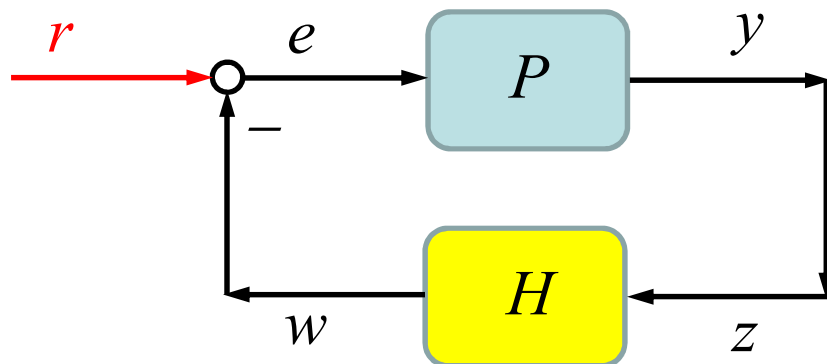
$$y = w - 3$$

$$w = 11y$$

可得平衡点 $y = 0.3, w = 3.3$



控制方式



$$y = -e - 3$$

$$w = 11z$$

$$z = y$$

$$e = r - w$$

- 在反馈结构中增加外部输入 r : $e = r - w$, 则

$$y = -r + w - 3$$

$$w = 11y$$

$$y = 0.1r + 0.3$$

$$w = 1.1r + 3.3$$

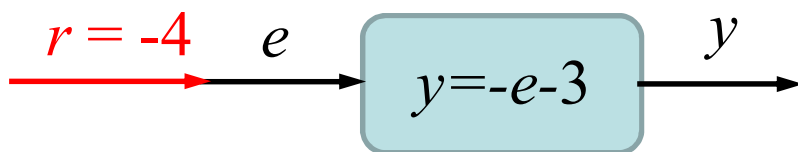
解得

反馈的引入, 改变了信号间的因果关系;
反馈合适时, 反馈系统内部的信号相互影响, 达到平衡;
合适反馈+外部输入, 平衡点由外部输入唯一决定

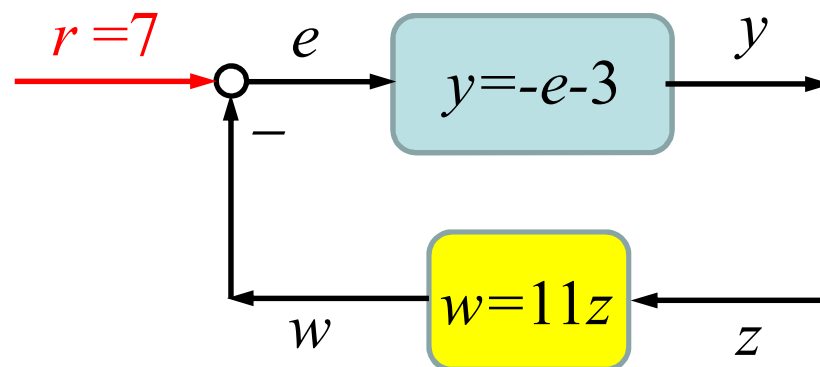
控制方式

- 控制中，用反馈比不用反馈好在哪里？

例：期望 $y=-e-3$ 的输出 $y=1$



开环控制



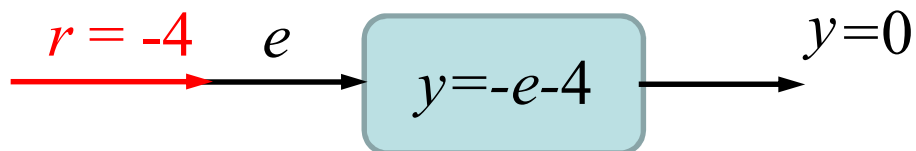
闭环控制

$$y = 0.1r + 0.3$$

$$w = 1.1r + 3.3$$

控制方式

例：期望 $y=-e-3$ 的输出 $y=1$

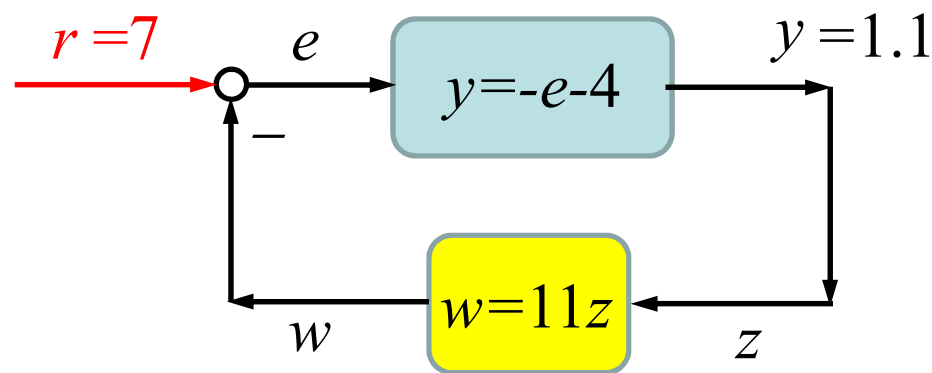


开环控制

若 $y=-e-3$ 变为 $y=-e-4$

开环控制的输出误差是1

闭环控制的输出误差是0.1



闭环控制

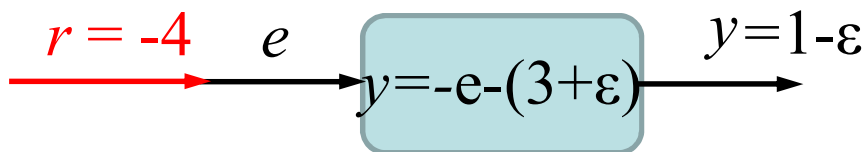
$$y = 0.1r + 0.4$$

$$w = 1.1r + 4.4$$

控制方式

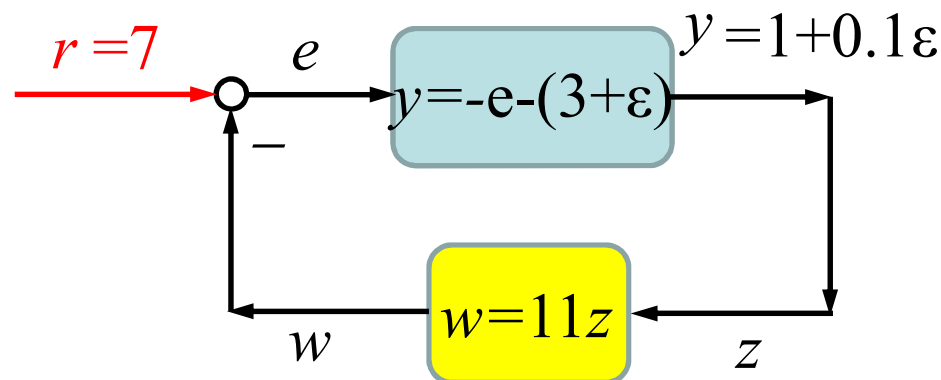
实际中我们往往得不到系统的精准模型，因此更好的描述是

$$y = -e - (3 + \varepsilon)$$



开环控制

开环控制的输出误差是 $|\varepsilon|$



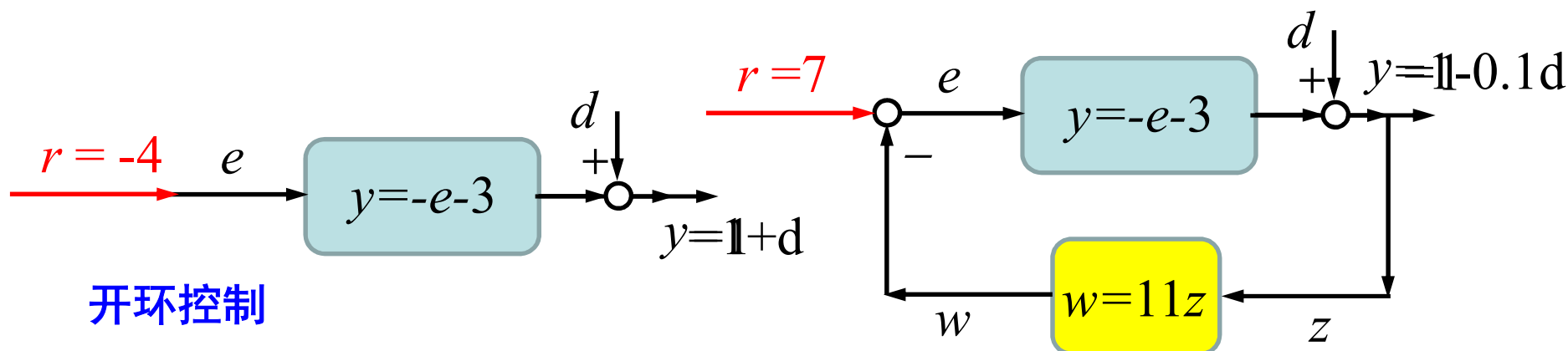
闭环控制 $y = 0.1r + 0.3 + 0.1\varepsilon$
 $w = 1.1r + 3.3 + 1.1\varepsilon$

闭环控制的输出误差是 $0.1|\varepsilon|$



控制方式

例：期望 $y=-e-3$ 的输出 $y=1$



开环控制

若存在外部干扰 d

开环控制的输出误差是 $|d|$

闭环控制的输出误差是 $|0.1d|$

闭环控制 $y = 0.1r + 0.3 - 0.1d$
 $w = 1.1r + 3.3 - 1.1d$



控制方式

- **合适的反馈控制（闭环控制）能有效抑制内部不确定性和外部不确定性对被控对象的影响**
- **被控对象的不确定性在实际中是不可避免的，因此反馈成为控制的主要方式**
- **反馈也广泛存在于自然界中**
- **“反馈”是控制的精髓**

控制方式

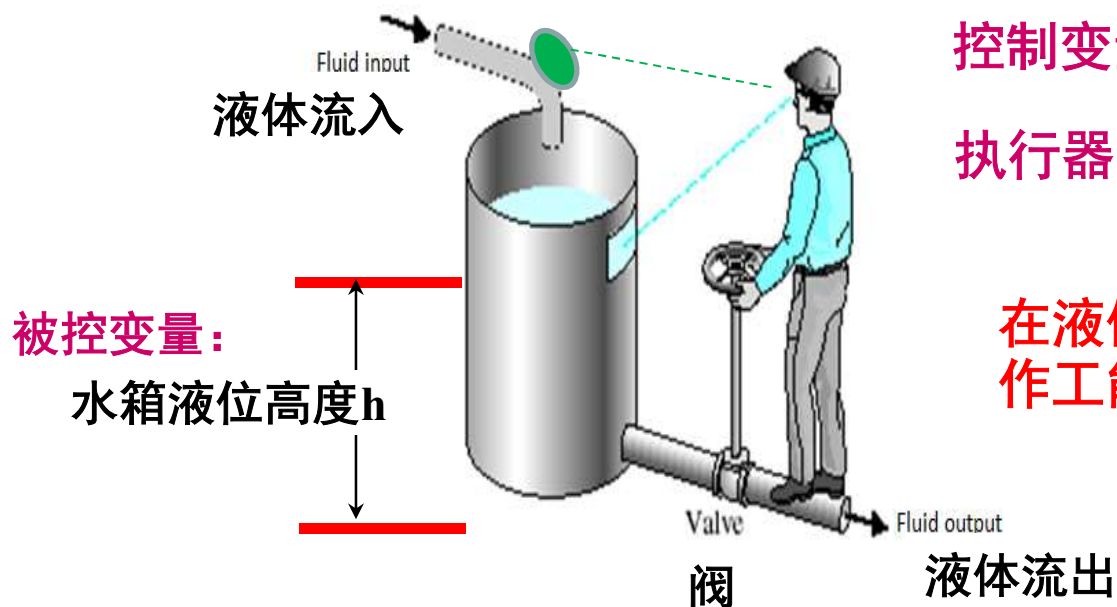
➤ 操作工控制水箱液位的例子2

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

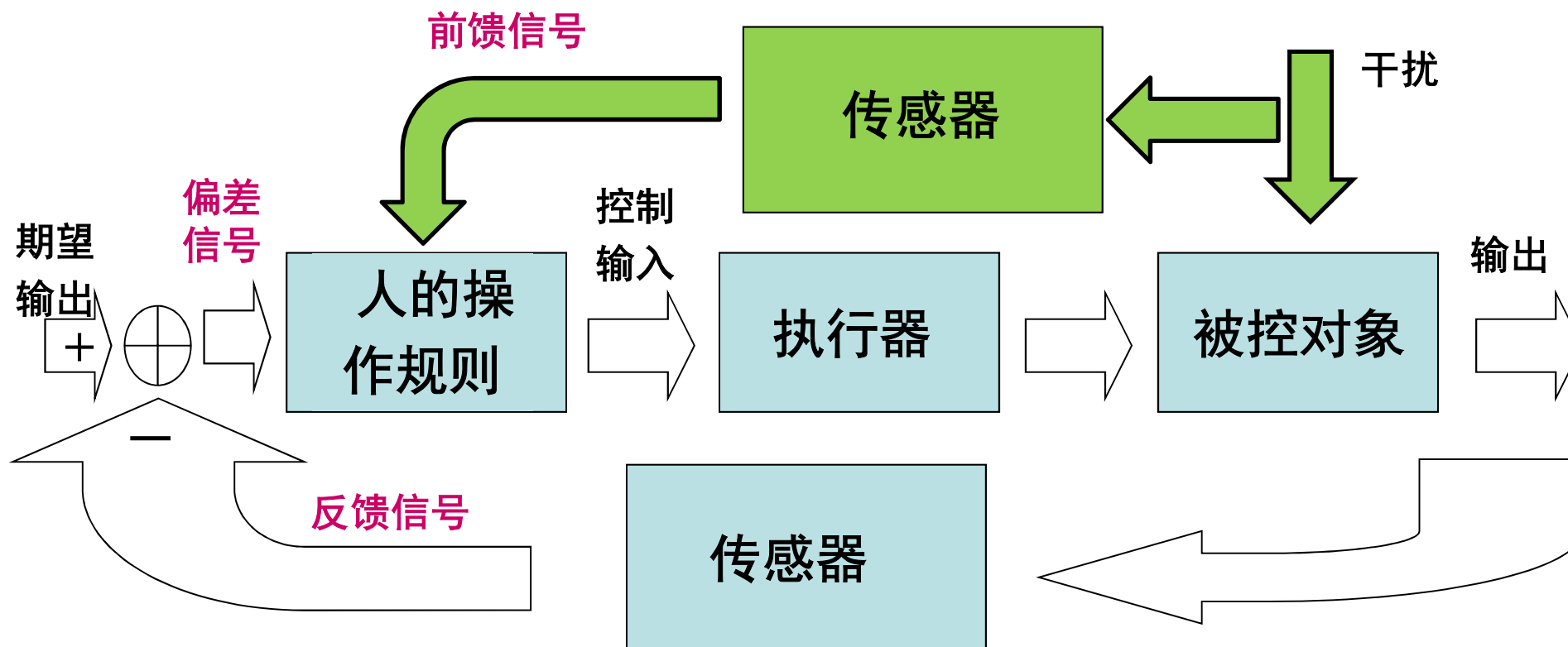


在液体流入管加装流量计，操作工能看到流量计的读数

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

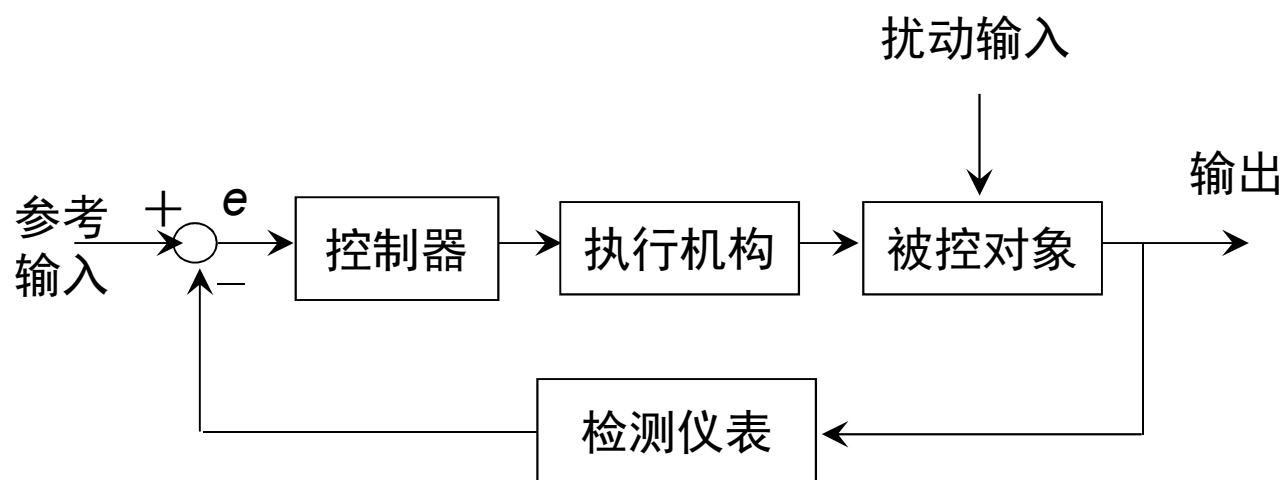
上图的控制方式称为**带前馈的闭环控制**

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



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

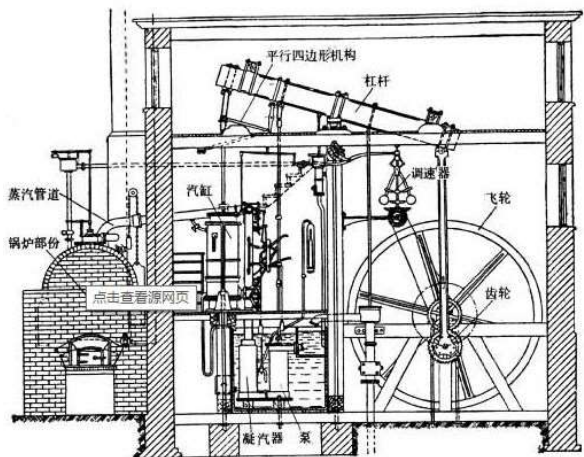
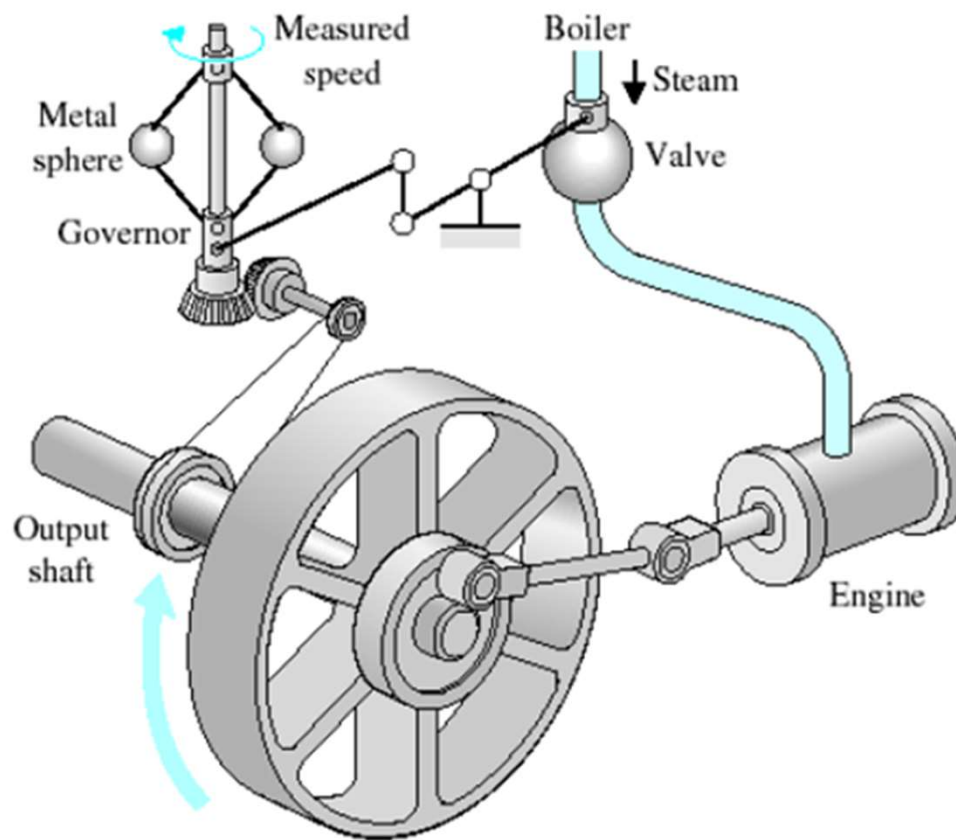
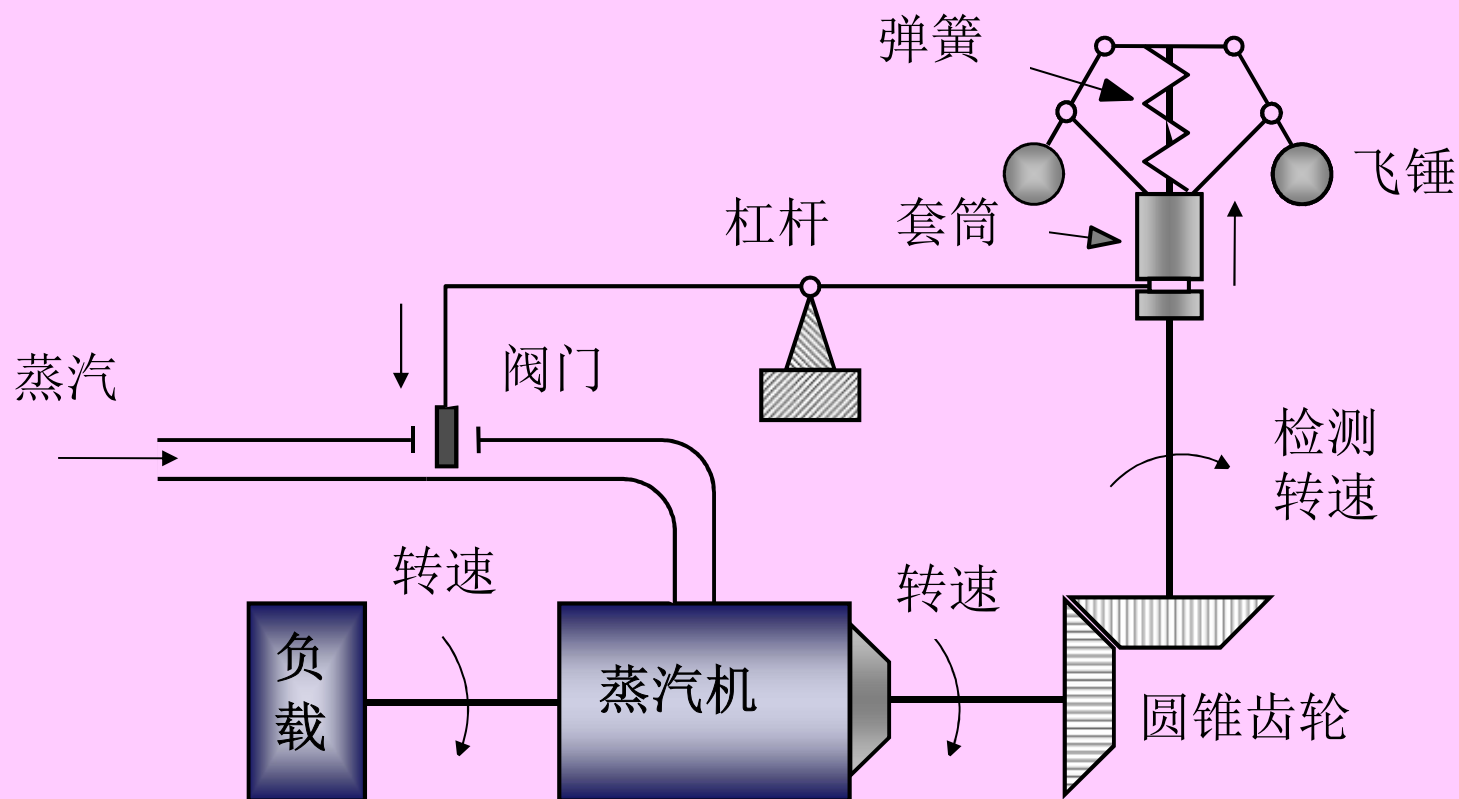


图 4 1782 年的瓦特蒸汽机 BaiKe.GQSOSO.COM

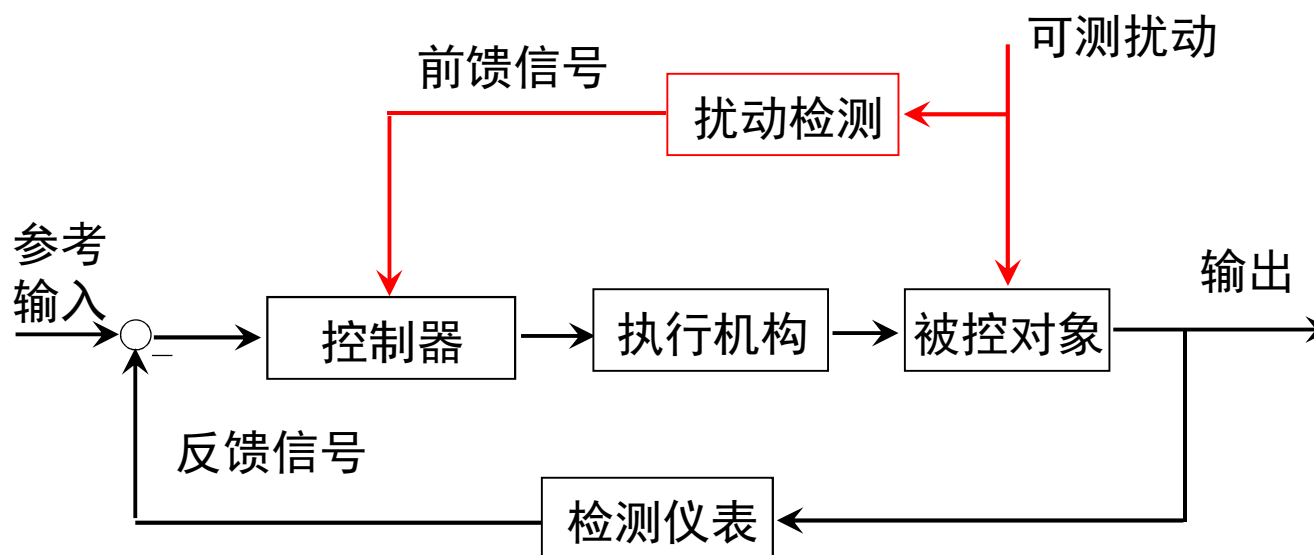


自动控制



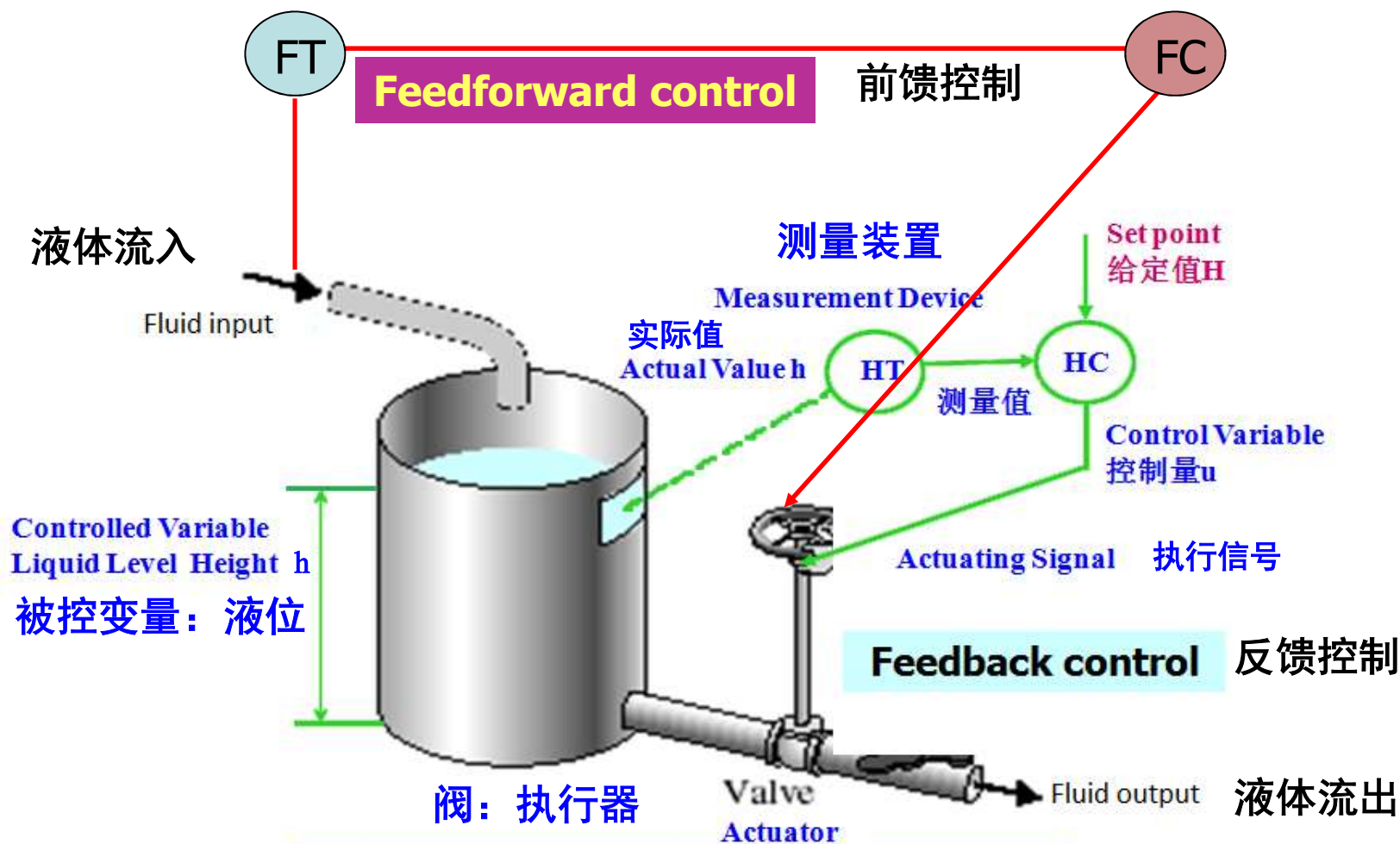
Watt的蒸汽机转速控制系统原理图

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



带控制点的工艺流程图



主要内容

- 基本概念
- 自动控制系统的分类
- 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

- 按系统给定信号的特征分类
 - 定值控制系统（自动调节系统）
 - 随动控制系统（伺服系统）

控制系统分类

定值控制的例子



参考输入是恒值或变化缓慢的信号（一般预知）

控制的重点是抗干扰，使系统对扰动输入的响应不灵敏

控制系统分类

随动控制的例子



参考输入是变化剧烈的信号（一般不预知）

自动

控制的重点是跟踪，使系统对参考输入的响应灵敏



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
- ◆ 本课程重点考虑线性时不变、单变量负反馈系统

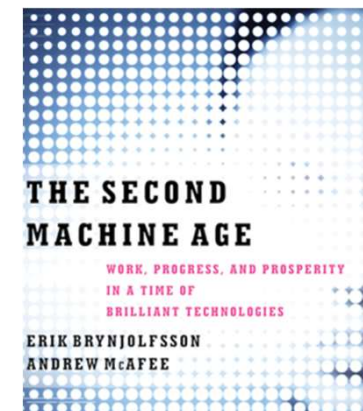


现代控制系统实例：绝影四足机器人



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》

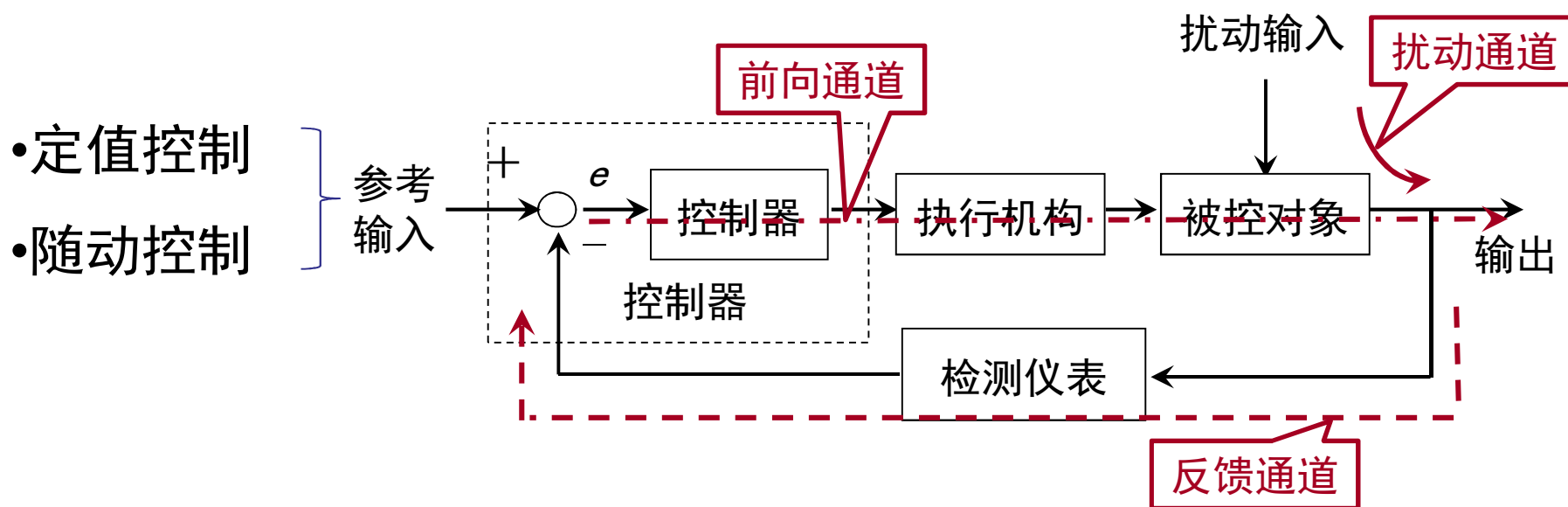


Erik Brynjolfsson



Andrew McAfee

自动控制系统的典型组成





主要内容

- 基本概念
- 自动控制系统的分类
- 课程的主要内容安排



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

春学期

- 根轨迹
- 频率响应

夏学期



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



PPT中引用的许多照片和视频来自于网上，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！

