

自动控制原理 (2)

Automatic Control Theory

2023-2024秋季学期

课程基本情况

— automatic control — automatic control — automatic control — automatic control —

主讲教师：吴热冰

办公室：FIT 3-612

电话：62792486, 13651197764

Email: rbwu@tsinghua.edu.cn

助教

陈洋 (15211394127, yang-che23@mails.tsinghua.edu.cn)

蒋珊珊 (15999577578, jss23@mails.tsinghua.edu.cn)

课程基本情况

— automatic control — automatic control — automatic control — automatic control —

- 32 学时: 信息学院平台课 / 自动化专业基础课
- 先修要求: 自动控制原理 (1)
- 实验 (模拟实验1个)
指导教师: 白玉琦 (13520887188, 62782611—520
byuqi@mail.tsinghua.edu.cn 中央主楼 520)
- 作业 (30%): 平均 2 周交 1 次 (网络学堂提交电子版)
- 答疑: FIT 3-612
- 期末考试 (70%) (闭卷笔试)

教材与参考书

— automatic control — automatic control — automatic control — automatic control —

自编讲义《自动控制原理（2）》

【网络学堂/微信群下载】

参考书

- 《自动控制原理》（下）（第二版）吴麒,王诗宓主编,清华大学出版社, 2006
- 《预测控制》 席裕庚 科学出版社 第二版 2007.
- 《控制系统计算机辅助设计: MATLAB语言与应用》, 薛定宇, 清华大学出版社, 2006

自动控制：基本概念回顾

控制无处不在

— automatic control — automatic control — automatic control — automatic control — automatic control —

We live our everyday lives surrounded by all sorts of
control systems, and we are for the most part,
unaware of them.

控制的目标

— automatic control — automatic control — automatic control — automatic control — automatic control —

控

引也。从手空聲
目标导引

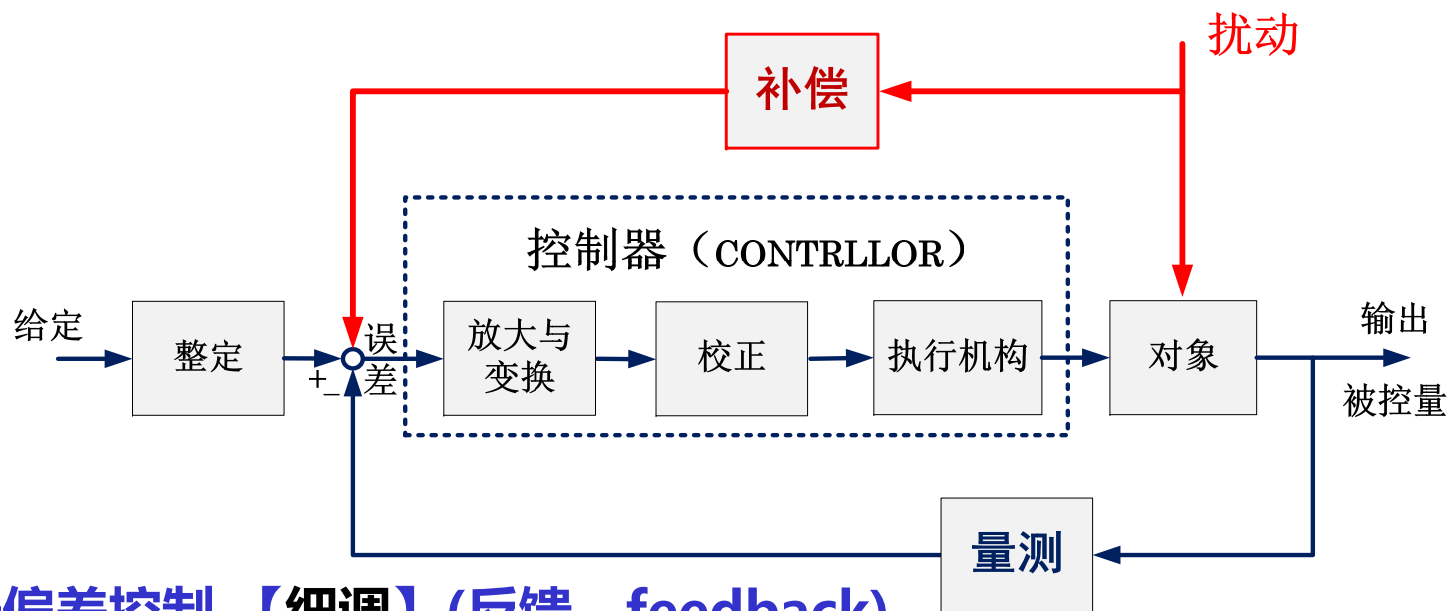
制

裁也。从刀从未
抑制干扰

控制系统的基本组成

— automatic control — automatic control — automatic control — automatic control —

按扰动控制 【粗调】 (顺馈/前馈, feedforward)

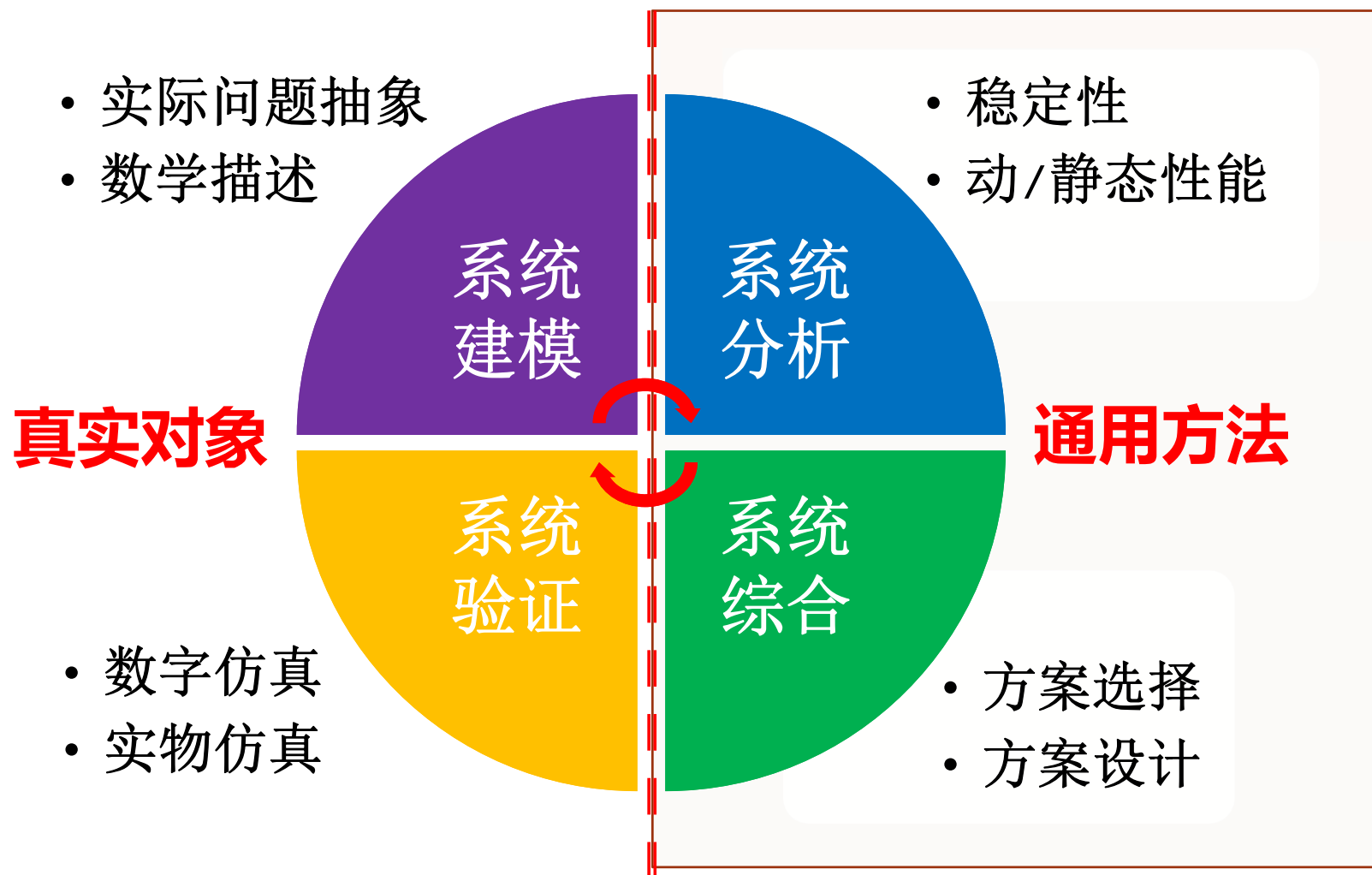


按偏差控制 【细调】 (反馈, feedback)

控制理论的重要概念：动态、建模、互联、不确定性

控制理论所要解决的主要问题

— automatic control — automatic control — automatic control — automatic control —



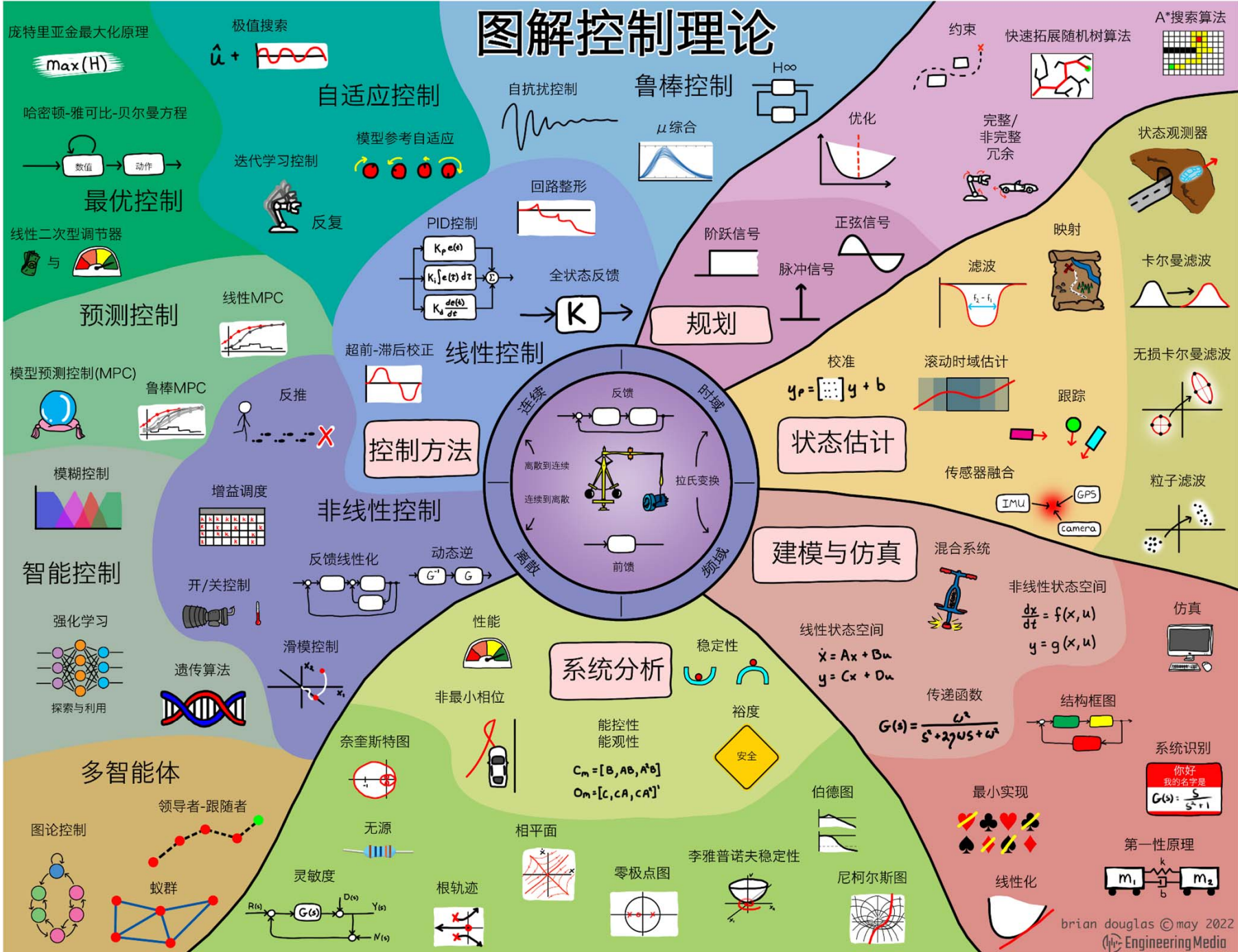
古典与现代

— automatic control — automatic control — automatic control — automatic control —

问题	古典控制	现代控制
建模	输入输出模型 $Y(s) = G(s)U(s)$ $Y(j\omega) = G(j\omega)U(j\omega)$	状态空间模型 $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u}$ $\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}\mathbf{u}$
分析	劳斯判据、Nyquist判据 稳态误差、动态性能	李雅普诺夫判据 状态能控能观性
综合	基于Bode图的校正 基于根轨迹的校正	极点配置 观测器设计

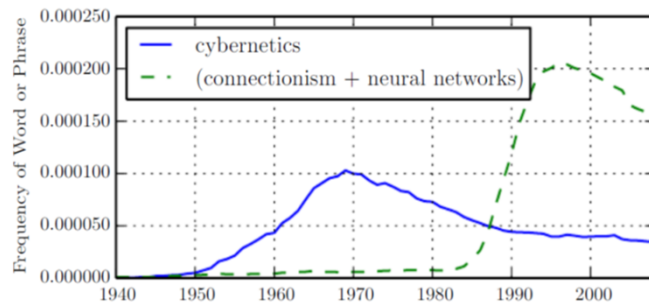
古典与现代无时间先后，与通信和计算机技术的发展密切相关

图解控制理论



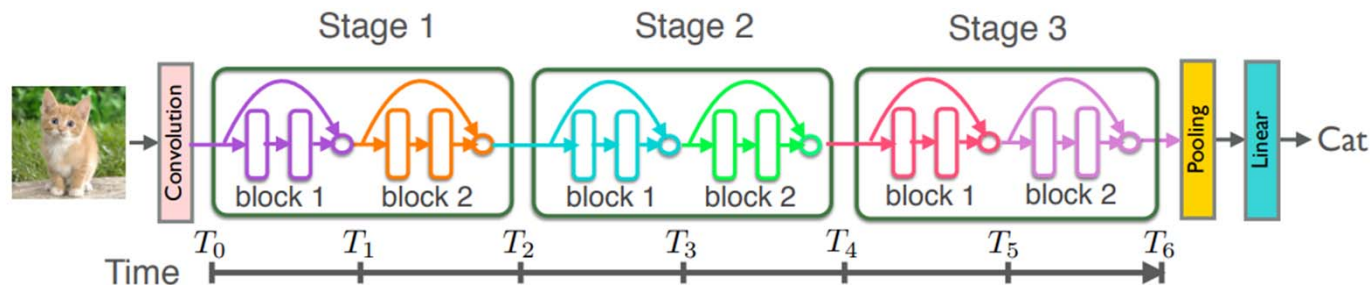
自动控制与人工智能

— automatic control — automatic control — automatic control — automatic control — automatic control —



Deep learning known as

- Cybernetics, 1940s-1960s
- Connectionism, 1980s-1990s



MACHINE LEARNING AND CONTROL THEORY, A. Bensoussan, *et al.*, arXiv:2006.05604

“Control engineering = mind engineering”

= Automated Intelligence = Actional Intelligence

领域综述

— automatic control — automatic control — automatic control — automatic control —

Control in an Information Rich World (2003)

<https://epubs.siam.org/doi/book/10.1137/1.9780898718010>

The Impact of Control Technology (2011)

<https://ieeecss.org/impact-control-technology-2nd-edition>

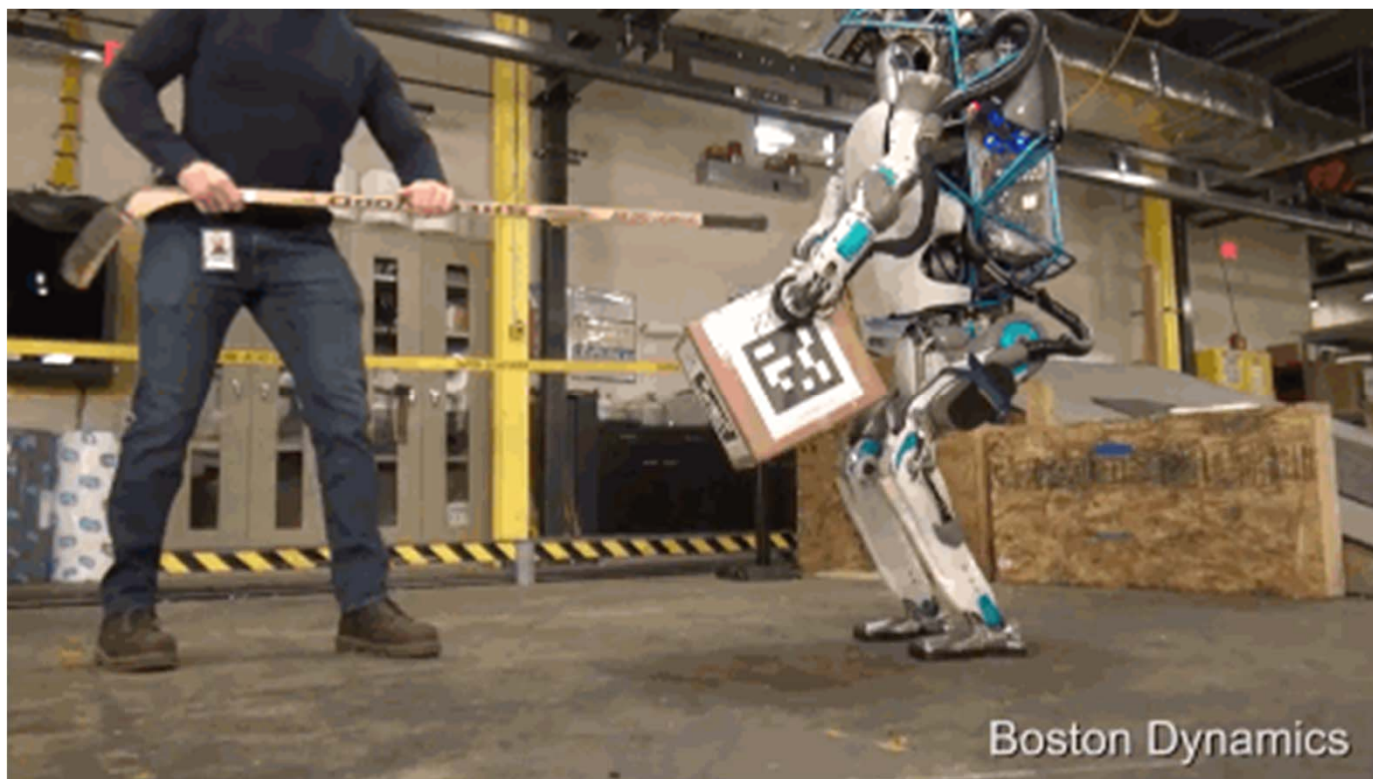
Control for Societal-scale Challenges (2023)

<https://ieeecss.org/control-societal-scale-challenges-road-map-2030>

面向实际的自动控制

我们还需要什么？

— automatic control — automatic control — automatic control — automatic control —



我们还需要什么？

— automatic control — automatic control — automatic control — automatic control —

1. 建模 - 把控制问题变成数学问题 ✓
2. 分析 - 定量和定性地评价系统 ✓
3. 设计 - 改善控制系统的性能…与现实还有差距！

- 控制对象：非线性、时变、时滞、…

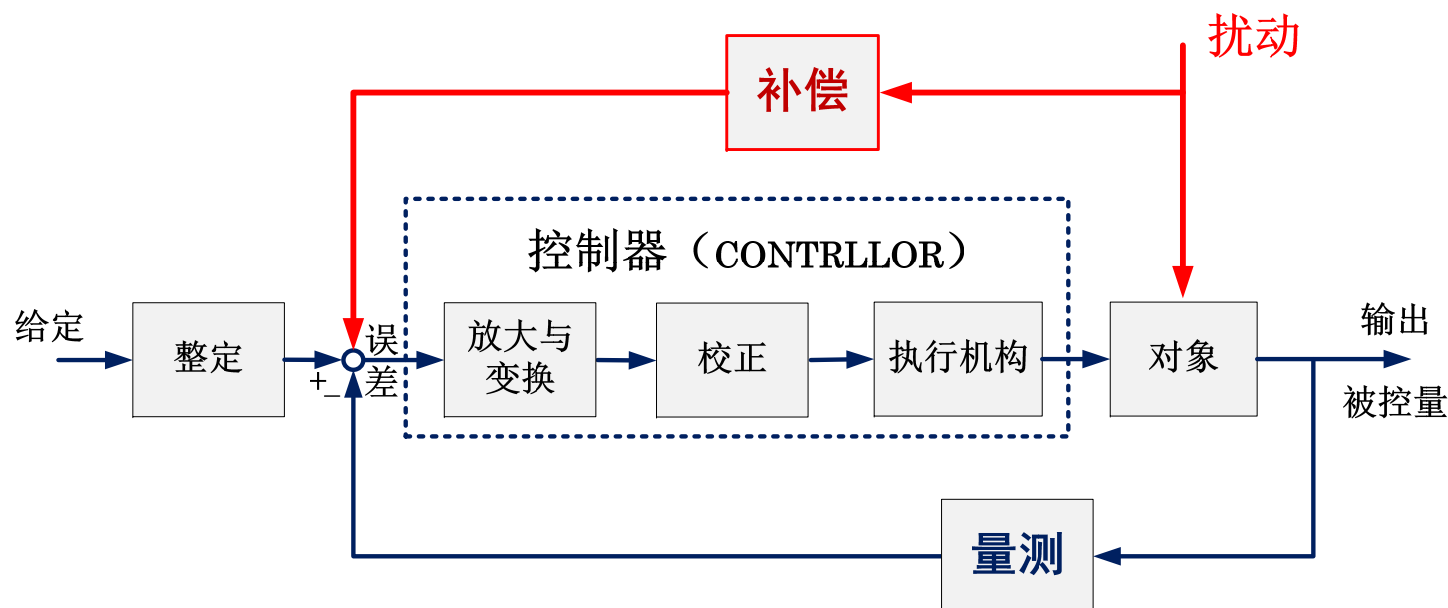
- 线性定常系统 - 多变量、不稳定、不确定、外扰、…

- 设计结果常常偏于保守，难以处理约束

- 工业应用大量依赖于计算机控制

控制系统中的非线性

— automatic control — automatic control — automatic control — automatic control —



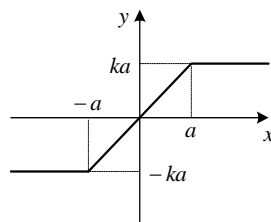
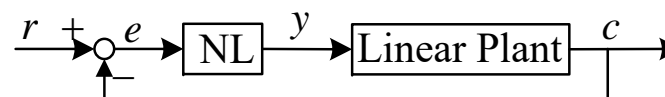
非线性系统: $\Sigma[\alpha_1 u_1(t) + \alpha_2 u_2(t)] \neq \alpha_1 y_1(t) + \alpha_2 y_2(t)$

控制器: 包含大量的开关、限幅装置, 多呈现不连续、不光滑特征.

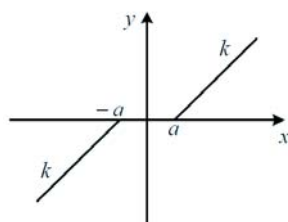
对象: 连续运动的物理对象, 多呈现与初始条件相关的复杂特征.

控制器中的非线性

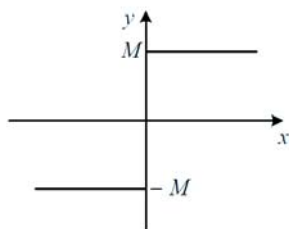
— automatic control — automatic control — automatic control — automatic control — automatic control —



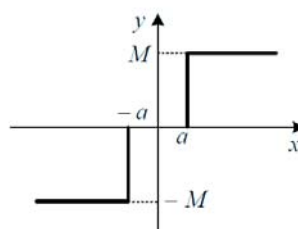
饱和非线性(Saturation)



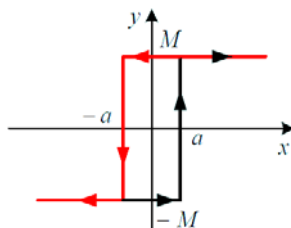
死区非线性(Dead zone)



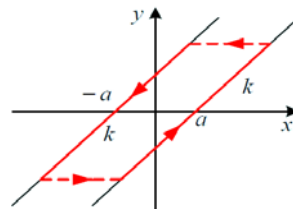
理想继电器



具有死区的继电器



滞环非线性(Hysteresis)



间隙非线性(Backlash)

对闭环控制的静态误差、响应时间、超调等有什么影响？

提供快速切换，使系统响应更快、更光滑，也可导致振荡

对输入有延迟作用，导致系统响应迟钝和振荡

控制对象中的非线性：平衡点不唯一

— automatic control — automatic control — automatic control — automatic control — automatic control —

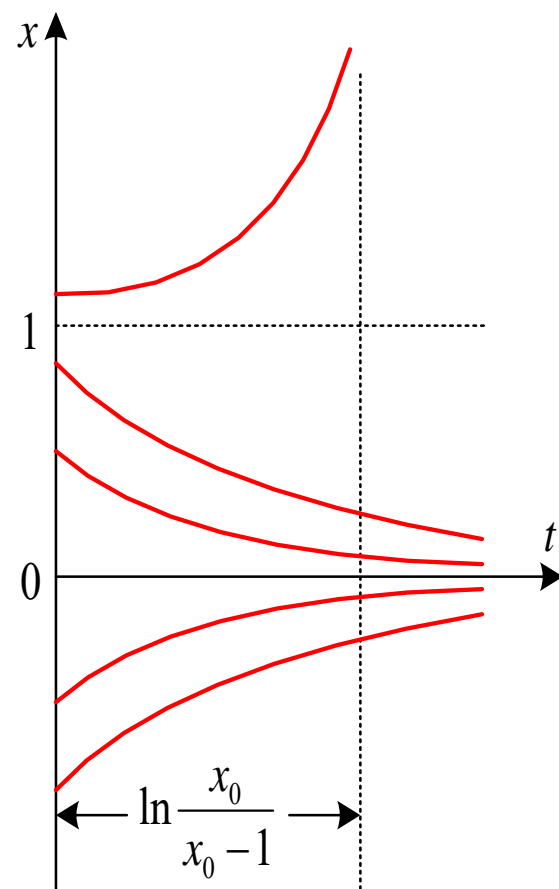
例：方程 $\dot{x} = -x(1-x)$ 描述的非线性系统有两个平衡点 (对应于 $\dot{x} \equiv 0$)

$$x = 0 \text{ 和 } x = 1$$

微分方程解为：

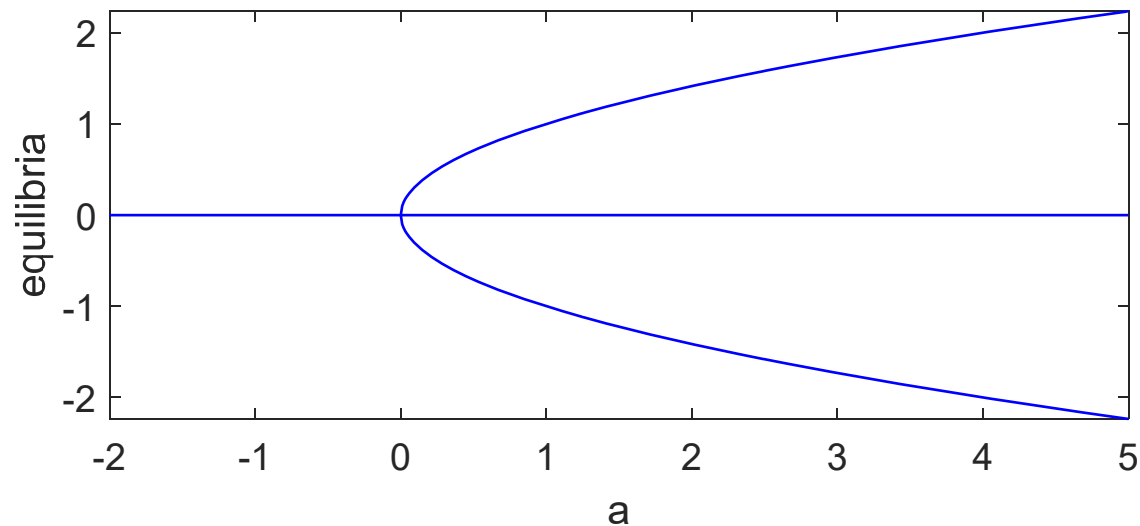
$$x(t) = \frac{x_0 e^{-t}}{1 - x_0 + x_0 e^{-t}}$$

- $x_0 > 1$ 时，运动不稳定
- $x_0 < 1$ 时，运动稳定 $x(t) \rightarrow 0$.



控制对象中的非线性：分岔

— automatic control — automatic control — automatic control — automatic control — automatic control —



平衡点的个数及其稳定性依赖于某变化参数

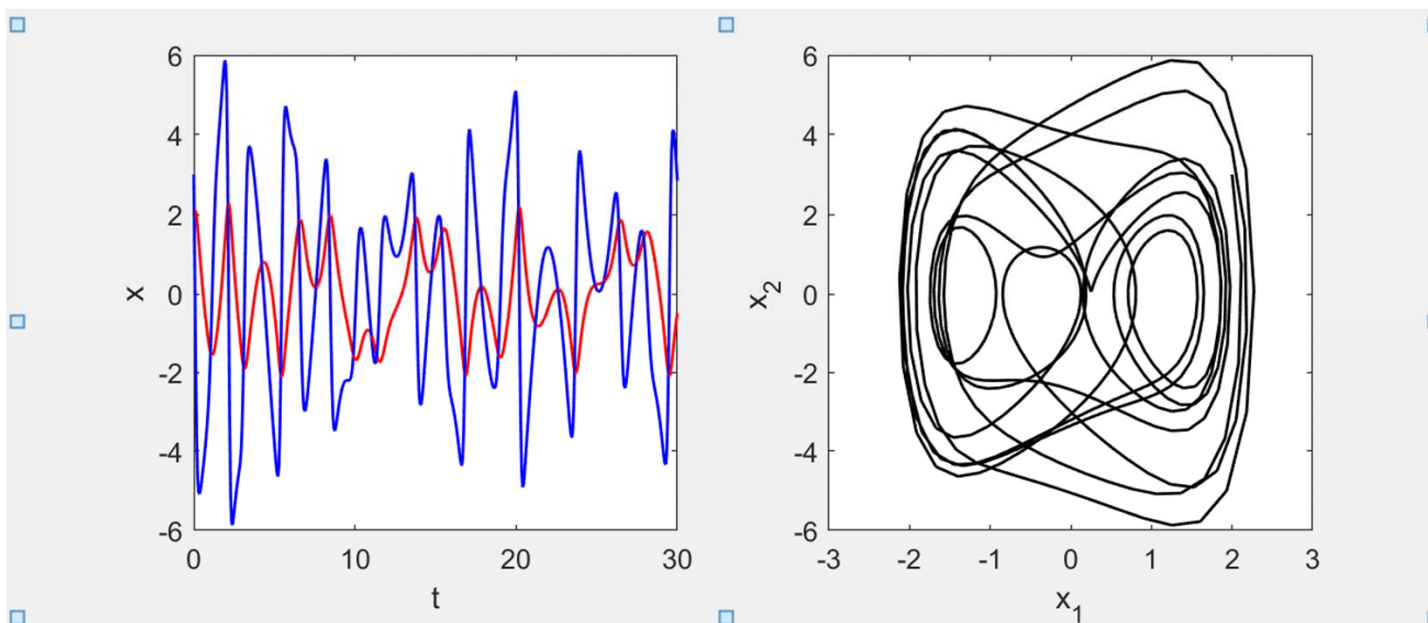
例如，无阻尼 Duffing 方程 $\ddot{x} + ax + x^3 = 0$

- $a > 0$ 时，仅有一个平衡点 $x_e = 0$ ($\Leftarrow ax_e + x_e^3 = 0$)
- $a < 0$ 时，有三个平衡点 $x_e = 0$, $x_e = \pm\sqrt{a}$

控制对象中的非线性：混沌

— automatic control — automatic control — automatic control — automatic control — automatic control —

$$\ddot{x} + 0.1\dot{x} + x^5 = 6 \sin t \quad \mathbf{[}x_1 = x, x_2 = \dot{x}\mathbf{]}$$

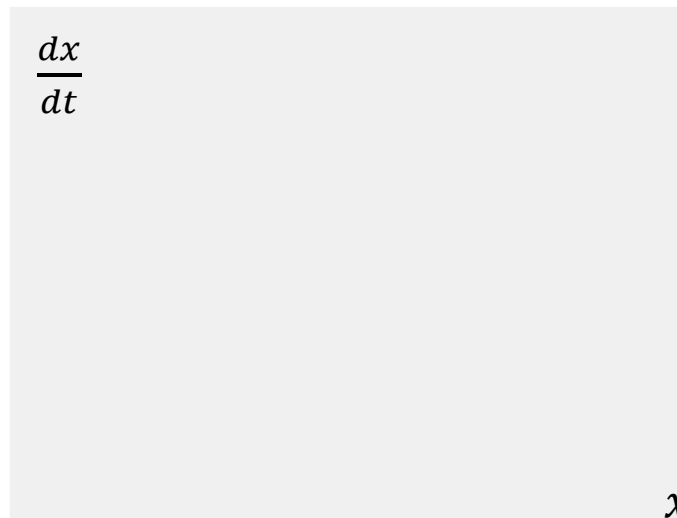
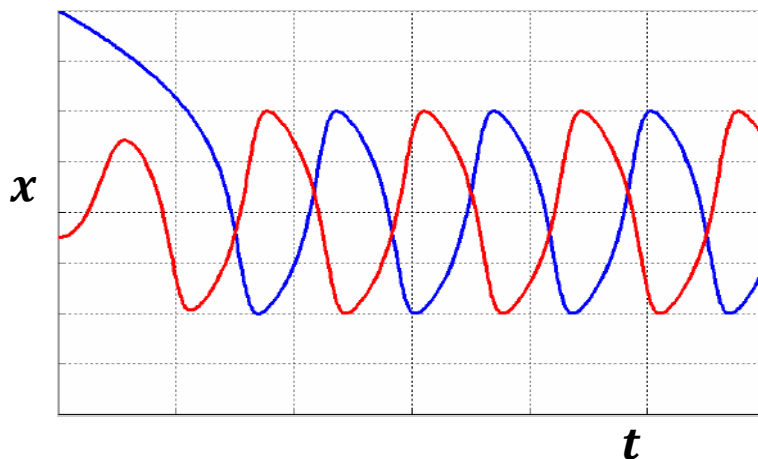


微分方程的解对初始条件的变化非常敏感，以至于即使系统模型精确，系统的运动趋势也无法预测。

控制对象中的非线性：自持振荡

— automatic control — automatic control — automatic control — automatic control — automatic control —

考察 Van der pol 方程： $m\ddot{x} - f(1 - x^2)\dot{x} + kx = 0$ ($f > 0$)
等效阻尼系数



- $|x(t)| > 1$, 消耗能量, 振动减弱
- $|x(t)| < 1$, 吸收能量, 振动增强

极限环: 与初值和输入无关的固定频率、固定幅度的持续振荡

如何处理非线性？

— automatic control — automatic control — automatic control — automatic control — automatic control —

➤ 描述函数法

Nyquist 方法的推广，适用于静态、不连续非线性，可近似计算系统中存在的自持振荡（极限环）特征。

➤ 相平面法

适用于二阶系统，通过绘制相轨迹进行分析和设计。

➤ 微偏线性化

在工作点附近对系统进行线性近似，继而基于线性方法控制。

➤ 反馈线性化

结合反馈和非线性变换对系统进行大范围线性化。

➤ 其它：模糊控制、滑模控制、自适应控制、AI控制……

时变与时滞

— automatic control — automatic control — automatic control — automatic control — automatic control —

➤ 时变：系统参数随时间变化（例：光照、火箭）

缓慢时变的系统可以通过系统辨识进行自适应控制

➤ 时滞（例：管道传输确定时滞、网络通信不确定时滞）

时滞较小环节可以近似为多个惯性环节的串联：

$$e^{-\tau s} \approx \left(1 + \frac{\tau}{n}s\right)^{-n}$$

自动控制（2）内容安排

自控(2) 要学什么?

— automatic control — automatic control — automatic control — automatic control —

- 主要关注的对象：线性定常系统
 - 易于理解基本原理/可近似非线性、时变、时滞系统
- 希望解决的问题：
 - “多变量”：系统具有多个输入和输出且相互耦合
 - “不确定”：克服外扰或模型误差的影响
 - “保守性”：希望提升质量、效益、能耗等指标
 - “计算机”：克服采样装置的影响，利用计算机优势.
- 期望掌握的思想：
 - 控制器结构设计的； - 基于优化的设计思想

自控(2) 要学什么?

— automatic control — automatic control — automatic control — automatic control —

古典 还是 **现代**?

古典：希望减少计算量，尽可能利用工程师的经验

现代：摆脱对经验的依赖，尽可能利用计算机的优势

自控(2) 要学什么？

— automatic control — automatic control — automatic control — automatic control —

“多变量”

- 基于传递函数的古典控制理论主要用于单回路（单变量）系统，在一定条件下可以用于多回路控制，但相对受限，设计复杂.
- 基于状态空间的现代控制理论天然适于处理多变量系统，设计复杂度与单变量系统没有本质区别.
- 解耦：通过反馈变换转化为多个单变量系统

自控(2) 要学什么？

— automatic control — automatic control — automatic control — automatic control —

“不确定”

- 古典控制方法对模型的依赖性相对不强，基于稳定裕度或根轨迹的设计可以实现较好的鲁棒性；现代控制理论对模型的依赖较强.
- 古典控制通过前馈或者PI调节实现对特定外扰的抑制
- 抗外扰控制：反馈与顺馈结合实现对外扰的抑制；基于内模原理推广PI控制思想.

自控(2) 要学什么？

— automatic control — automatic control — automatic control — automatic control —

“保守性”

- PID控制根据输出偏差确定当前控制输入，难以在快速性、准确性和鲁棒性中取得好的平衡.
- 古典控制的性能评价大多基于近似或经验，设计结果容易偏向保守；可调节参数较少，为简化设计常常会限制可选择的控制方案，也容易限制控制性能.
- 最优控制：基于优化理论实现约束条件下的性能最优.

自控(2) 要学什么？

— automatic control — automatic control — automatic control — automatic control —

“计算机”

- 古典控制（PID）只能对测量信息进行简单加工，难以充分发挥计算机的计算优势.
- 现代控制理论可以基于线性代数和统计充分发挥计算机的优势，适于处理更复杂的控制问题.
- 预测控制：充分利用计算机的计算优势，结合预测与优化实现鲁棒抗扰的实用化控制方案.

教学内容（详见教学日历）

— automatic control — automatic control — automatic control — automatic control —

基于现代控制理论学习针对“多变量”、“不确定”、“保守性”和“计算机”等实际控制问题的控制设计理论：

1. 绪论 + 非线性、时变、时滞概述

2. 多变量系统的解耦控制

3. 跟踪系统的抗外扰控制

结构设计

4. 最优控制理论

5. 离散时间控制系统

6. 模型预测控制

优化设计

学习方式

— automatic control — automatic control — automatic control — automatic control —

1. 课下学习结合课件、自编讲义《自动控制原理（2）》与辅助教材
3. 结合MATLAB仿真软件进行学习,请于校园网下载安装正版软件
4. 鼓励利用微信群、网络学堂等各种方式进行讨论