

自动控制原理 (2)

Automatic Control Theory

2024 春季学期



(请扫码入群)

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)

范益典 (15652586288, fanyd23@mails.tsinghua.edu.cn)

课程基本情况

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

- 32 学时：自动化专业基础课
- 先修要求：自动控制原理（1）
- 实验（旋转倒立摆系统）

指导教师：白玉琦（13520887188，62782611—520

byuqi@tsinghua.edu.cn 中央主楼 520)

- 答疑：微信 / 课堂 / FIT 3-612 / 网络学堂
- 成绩评定：
 - ✓ 作业（共6次）、实验（1次）与平时表现（30%）
作业约 2-3 周 1 次（网络学堂提交电子版）
 - ✓ 期末考试（70%）（半开卷笔试）

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 —

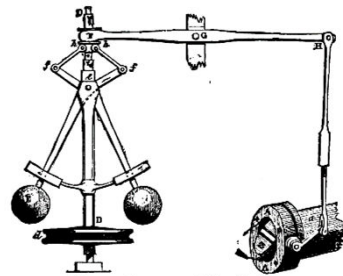


FIG. 4.—Governor and Throttle-Valve.

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



机械cax360



Tracking

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)

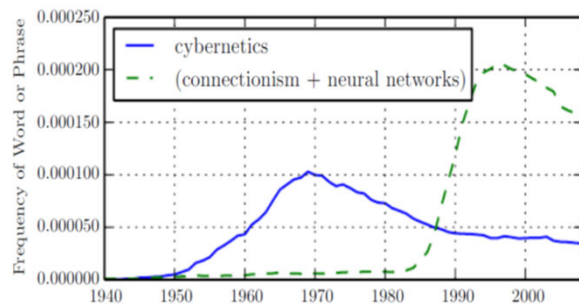
<https://ieeecss.org/impact-control-technology-2nd-edition>

Control for Societal-scale Challenges (2023)

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

控制论与人工智能

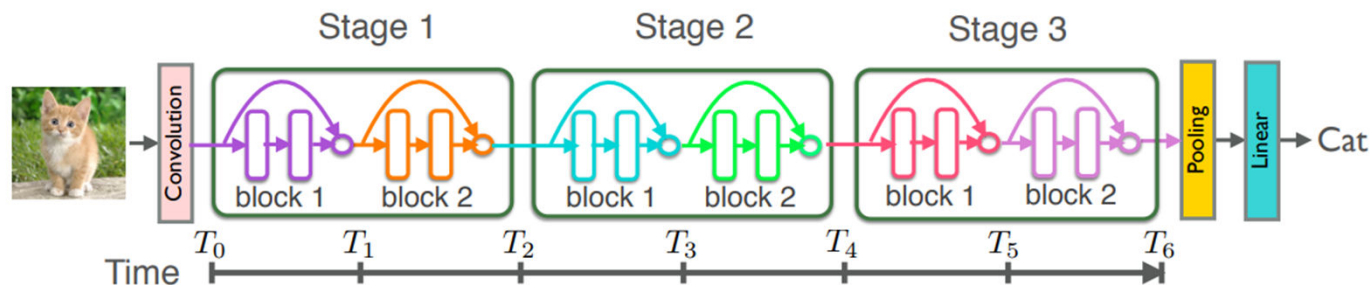
— automatic control — automatic control — automatic control — automatic control — automatic control —



Deep learning known as

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

I. Goodfellow, et al., “Deep learning”, 2016



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

“Control engineering = mind engineering”

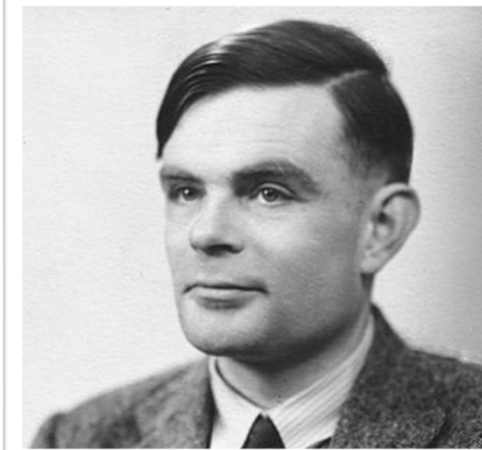
= Automated Intelligence = Actional Intelligence

控制论与人工智能

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



Norbert Wiener



Alan Turing

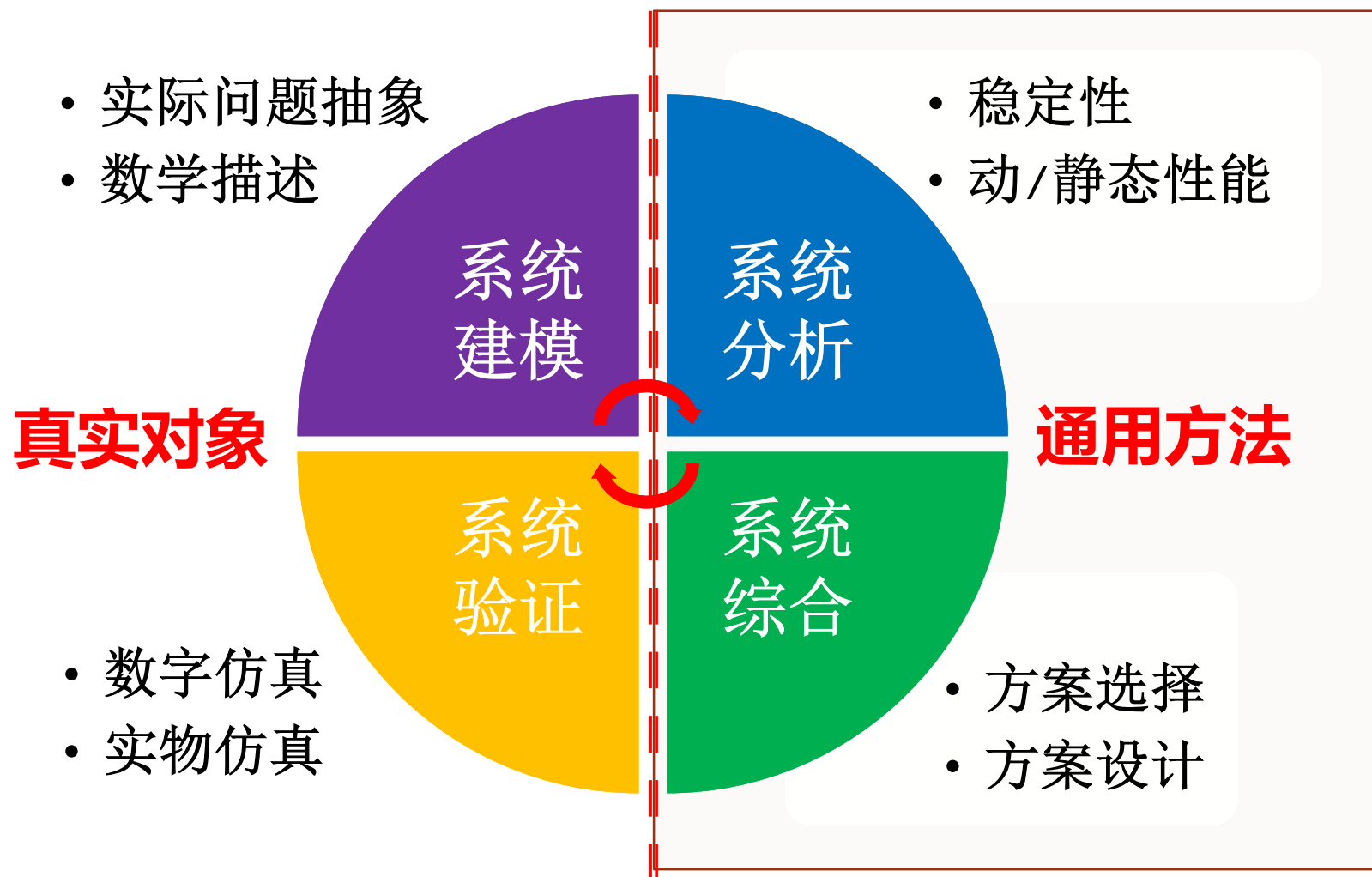
Machine Thinking and Thinking Machine

推荐阅读： Rise of Machines - a cybernetic history, Thomas Rid.

中译本： 机器崛起 - 遗失的控制论历史, 机械工业出版社, 2017.

自动控制理论要解决的主要问题

— 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 $\dot{x} = Ax + Bu$ $y = Cx + Du$
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

古典与现代无分先后，与通信和计算机技术的发展密切相关

古典与现代

— 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

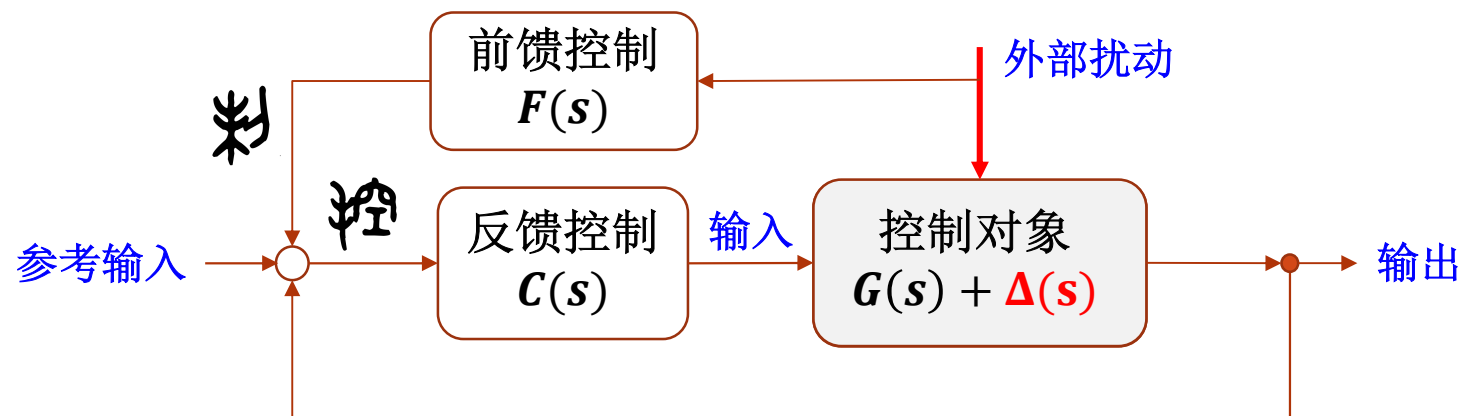
(局限：非线性/时变；非最小相位；多输入多输出)

现代：摆脱对经验的依赖，尽可能利用计算机的优势

自动控制（2）内容安排

控制系统的基本要素

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



动态：通过建模分析对象的动态演化特征

反馈：通过闭环控制改善对象的动态性能

不确定性：内部（模型误差）+ 外部（扰动信号）

前馈：根据扰动测量从输入端进行补偿

自动控制的核心概念：**动态、反馈、不确定性、前馈**

自动控制理论体系

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

针对“动态”

非线性系统、时变系统、网络系统、离散时间系统、离散事件系统、多智能体系统、量子系统、……

针对“不确定”

鲁棒（robust）控制、自适应（adaptive）控制、随机（stochastic）控制、弹性（resilient）控制、迭代学习、……

针对“前馈” + “反馈”

采样控制、事件驱动、分布式控制、量子控制……

自控(2) 要学什么？

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

如何解决“多变量”的问题？

- 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：通过状态反馈变换为互不耦合的单变量系统

自控(2) 要学什么？

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

如何解决“**不确定**”的问题？

- 内部不确定性：古典控制对模型的依赖性相对不强，基于稳定裕度的设计可以实现较好的鲁棒性；现代控制理论亦有针对鲁棒性的设计理论（本课不涉及）。
- 外部不确定性：通过前馈或者PI调节进行抵消或抑制
- 抗外扰控制：状态反馈与外扰前馈结合；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 —

基于“优化”的设计

- 人们总是希望得到“最好”的方案.
- 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.
- 性能评价大多基于近似或经验，设计容易偏向保守；可调节参数较少且受限，无法发挥更好性能.
- 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 —

基于“优化”的设计

- 人们总是希望得到“最好”的方案.
- 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.
- 性能评价大多基于近似或经验，设计容易偏向保守；可调节参数较少且受限，无法发挥更好性能.
- 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 —

基于“**优化**”的设计 + “**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，适于处理更复杂的实时控制问题.
- 预测控制：充分利用计算机，结合前瞻性预测与滚动优化实现鲁棒抗扰的实用化控制方案.

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：易于理解自动控制的基本原理
- 对各类复杂控制系统的动态特征有所了解

- 期望掌握的思想

- 从单变量系统到多变量系统 - 化繁为简
- 反馈与前馈结合的控制结构 - 知己知彼
- 从优化思想出发的设计理念 - 目标与困境

教学内容（详见教学日历）

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

1. 绪论（2 学时）

2. 非线性系统概述（2 学时）

3. 解耦控制（约 4 学时）

4. 抗外扰控制（约 6 学时）

结构设计

5. 最优控制理论（约12 学时）

6. 模型预测控制（约 4 学时）

优化设计

学习方式

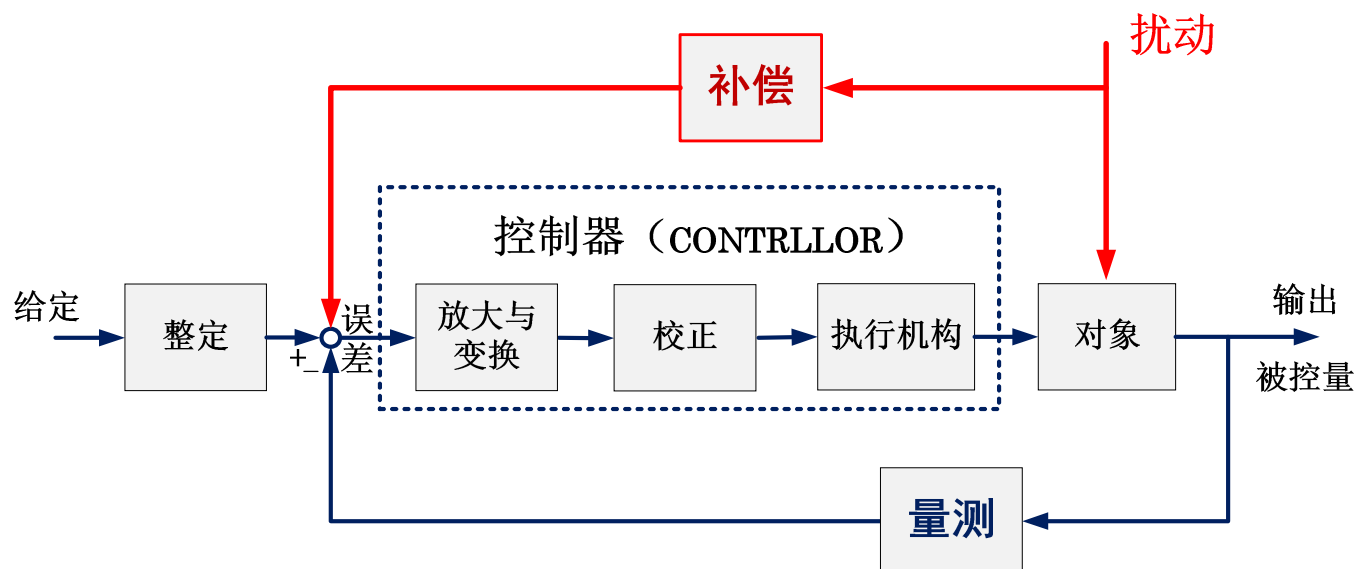
— automatic control — automatic control — automatic control — automatic control —

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

非线性系统概述

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.

自控（1）中的非线性控制

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

- 平衡点:

$$\dot{x} = f(x) \Rightarrow f(x_e) = 0 \quad \text{一般不唯一}$$

- 平衡点附近的微偏线性化
- 平衡点的稳定性
 - 李雅普诺夫第一判据 (Jacobian矩阵)
 - 李雅普诺夫第二判据 (V 函数, 能量概念)
-

非线性 Duffing 谐振子

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

Duffing 方程 (Georg Duffing, 1909)

$$\ddot{x} + c\dot{x} + ax + bx^3 = 0$$

其中非线性项 bx^3 代表非线性恢复力.

相平面表示: 令 $x_1 = x$, $x_2 = \dot{x}$, 可得非线性状态方程组

$$\dot{x}_1 = x_2,$$

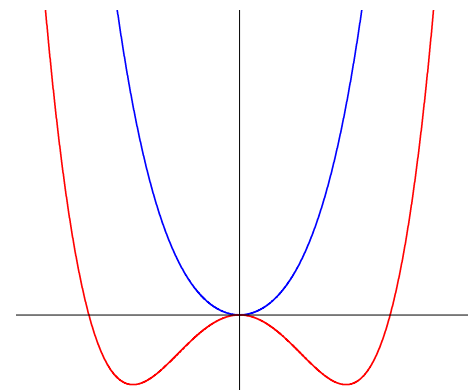
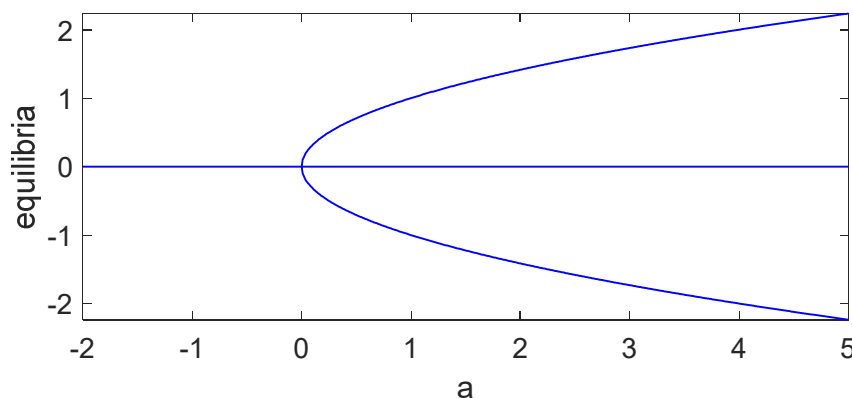
$$\dot{x}_2 = -cx_2 - ax_1 - bx_1^3$$

- MATLAB 代码:

```
ns = @(t,x) [x(2); -c*x(2)-a*x(1)-b*x(1)^3];  
[t,x]=ode45(ns,[0,T],[x10;x20])
```

分岔 (bifurcation)

— 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参数变化

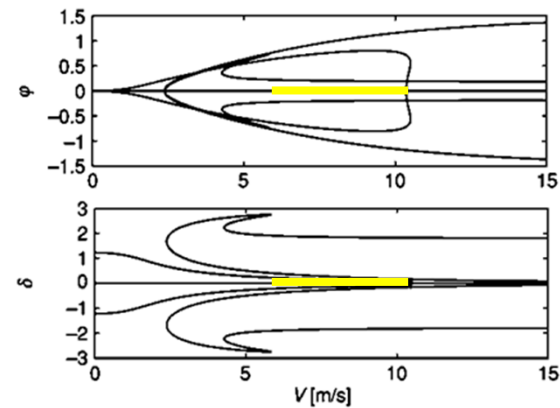
例如，无阻尼 Duffing 方程 $\ddot{x} + ax + x^3 = 0$

- $a > 0$ 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 $x_e = 0$, $x_e = \pm\sqrt{-a}$

分岔在什么时候产生？李雅普诺夫第一判据失效的时候

分岔 (bifurcation)

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



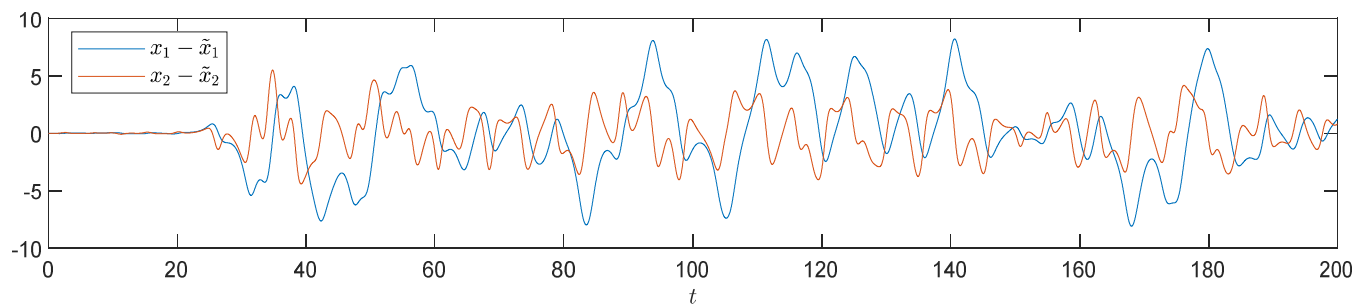
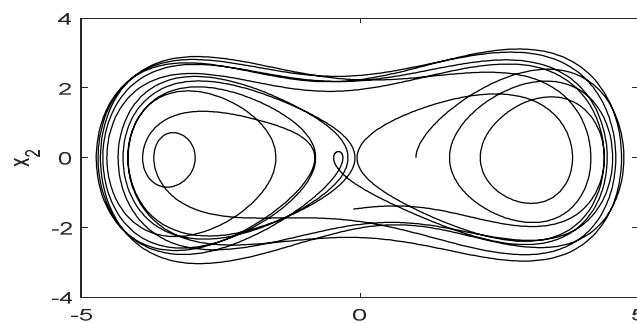
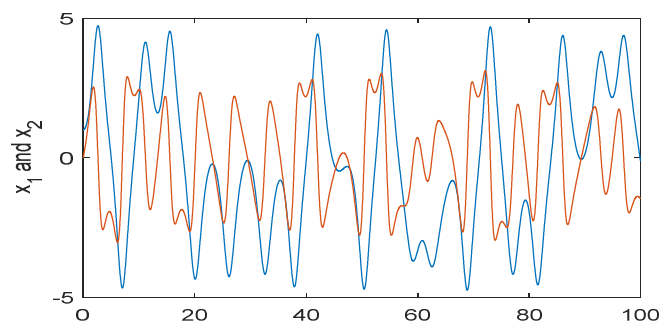
考察自行车匀速行驶时，转向角 δ /倾斜角 φ 的平衡位置

- 平衡位置的个数随速度大小变化
- 只在一定速度范围内才能保持直立姿态平衡
- 只有在高速行驶时才能保持大倾角平衡

控制对象中的非线性：混沌

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

$$\ddot{x} - 0.2\dot{x} - x + 0.1x^3 = \sin t$$

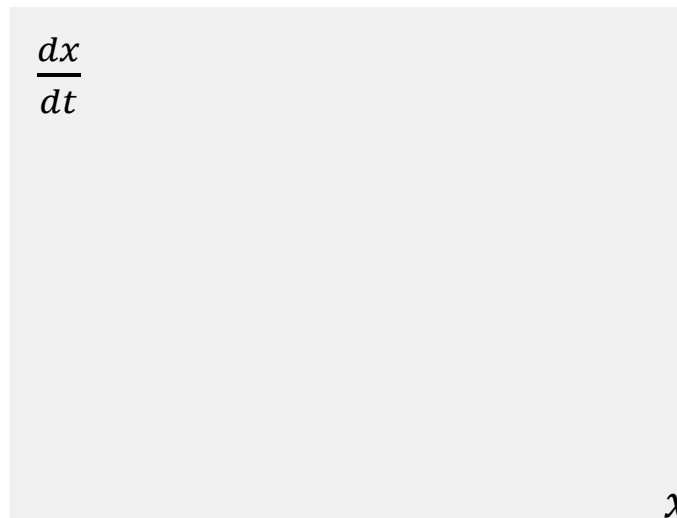
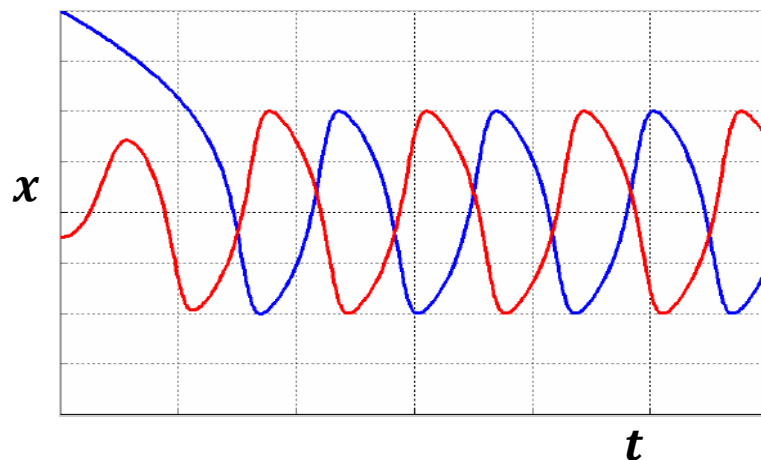


微分方程的解对初始条件的变化非常敏感，以至于即使系统模型精确，系统的运动趋势也无法预测。

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

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。

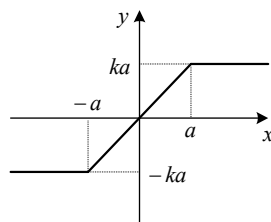
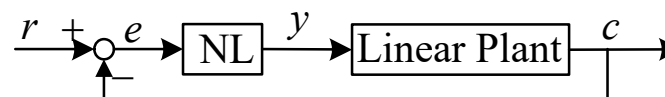
➤ 反馈线性化

结合反馈和非线性变换对系统进行大范围线性化。

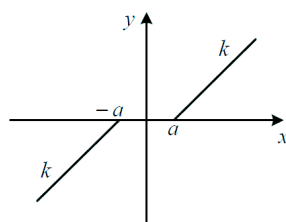
➤ 其它：模糊控制、滑模控制、自适应控制、AI控制……

控制器中的非线性

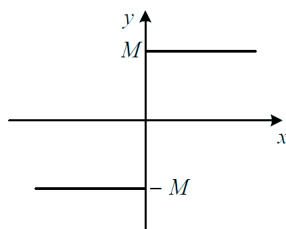
— automatic control — automatic control — automatic control — automatic control — automatic control —



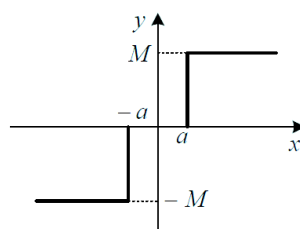
饱和非线性(Saturation)



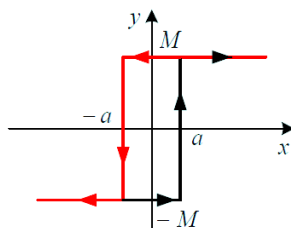
死区非线性(Dead zone)



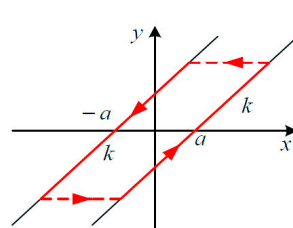
理想继电器



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？

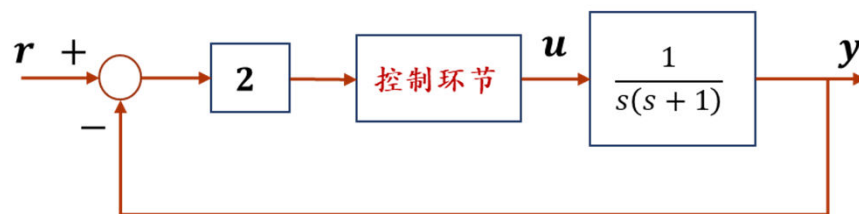
提供快速切换，使系统响应更快、更光滑，也可导致振荡

对输入有延迟作用，导致系统响应迟钝和振荡

作业

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

0.1 请利用Simulink搭建如下反馈控制系统



其中参考输入 r 为单位阶跃信号。请仿真比较“控制环节”为下列环节时与没有该环节时闭环系统动态性能和静态性能的变化：

- ① 限幅为 ± 0.5 和 ± 0.2 的饱和环节 (Saturation) ；
- ② 宽度为 ± 0.5 和 ± 0.2 的死区环节 (Deadzone) ；
- ③ 开关阈值为 ± 0.5 和 ± 0.2 的间隙环节 (Backlash) ；
- ④ $\tau=0.5$ 和 $\tau=0.2$ 的时滞环节 (Time Delay) 。

请绘制并比较输出响应的仿真曲线，描述性能的变化趋势，并分析原因。