

自动控制实践B——2022年春季学期

第二章 控制系统的设计流程

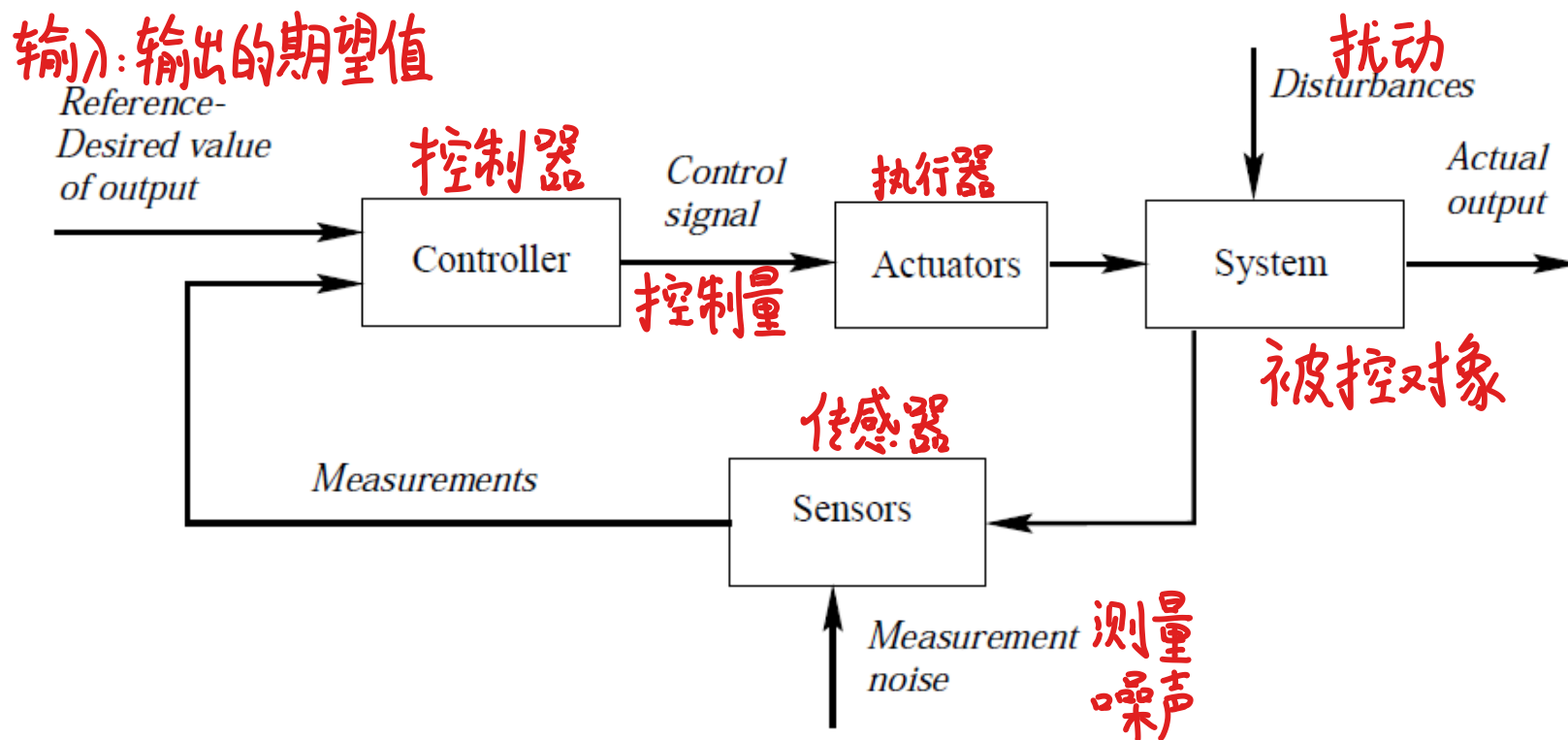
授课教师：董广忠（ Assoc. Prof. ）

哈尔滨工业大学（深圳），HITsz
机电工程与自动化学院 SMEA





控制系统基本组成

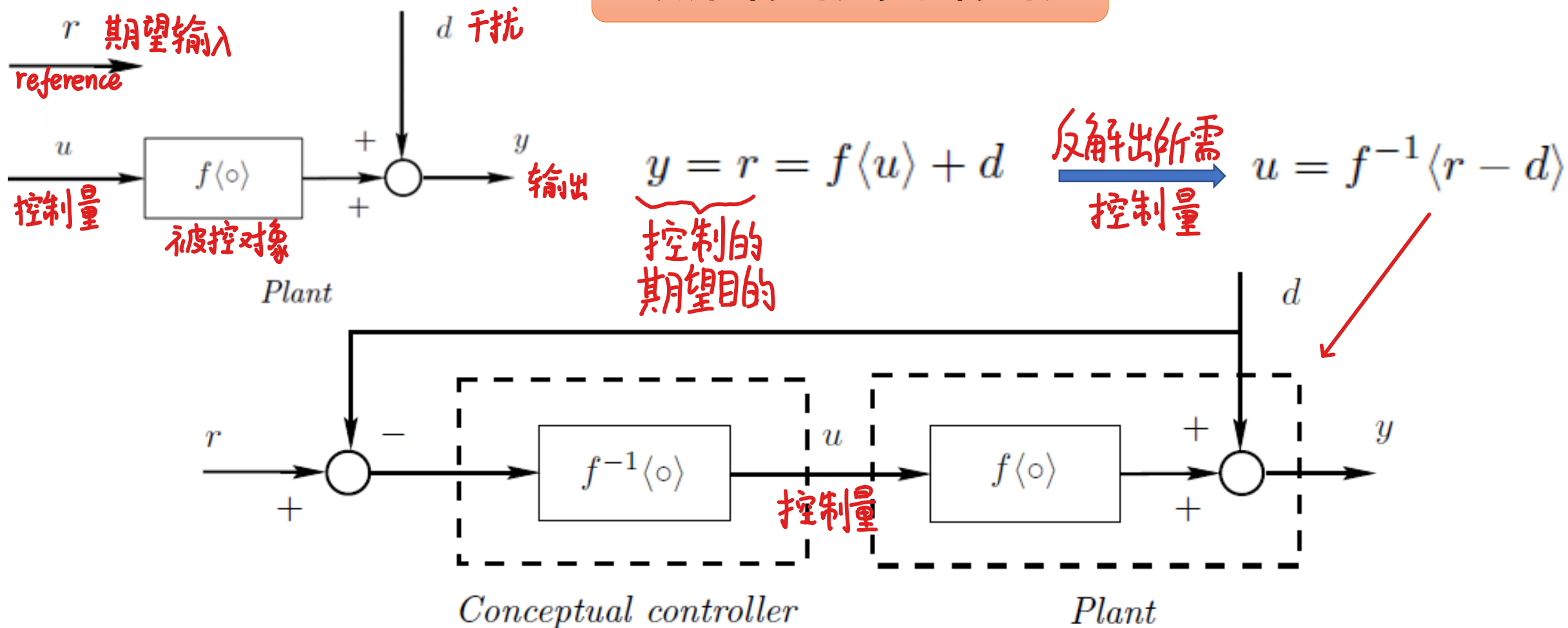


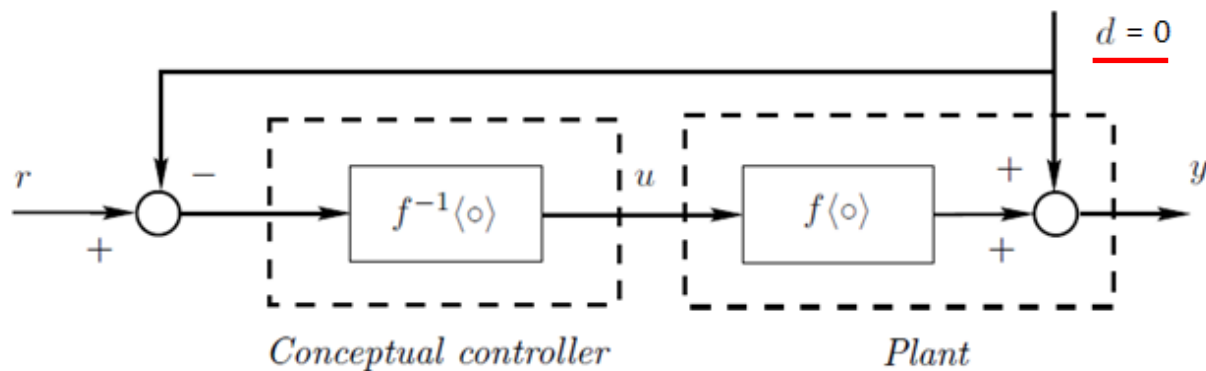
Typical feedback loop.



做闭环控制系统的本质就是让输出复现输入

从开环控制到闭环控制

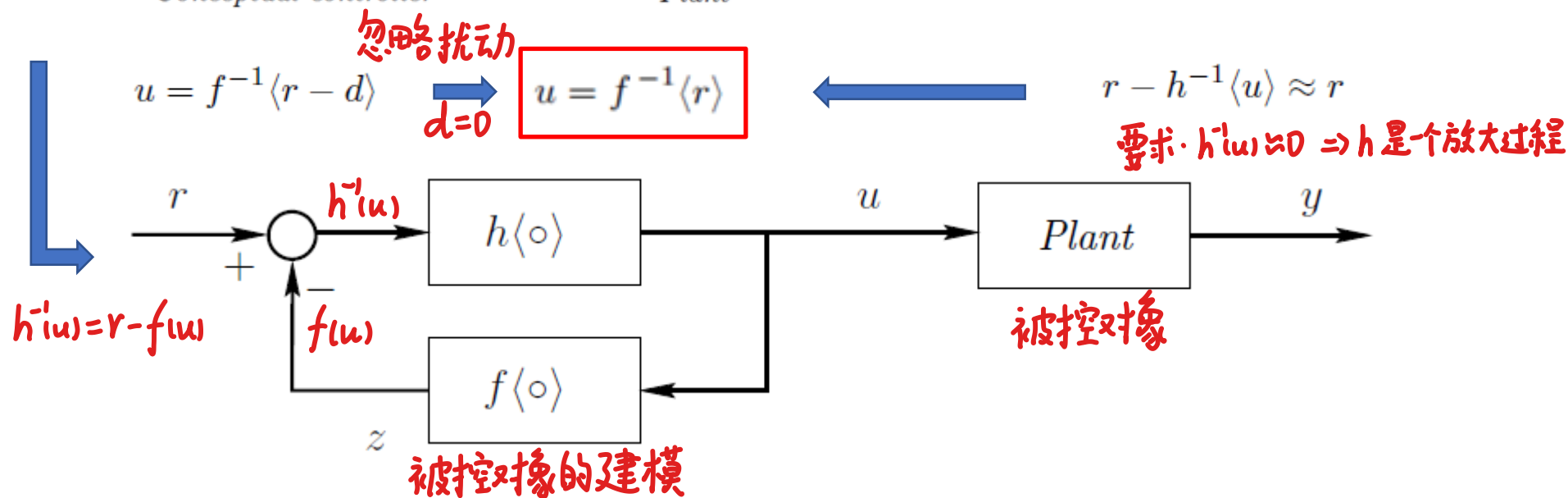




$$h^{-1}(u) = r - f(u)$$

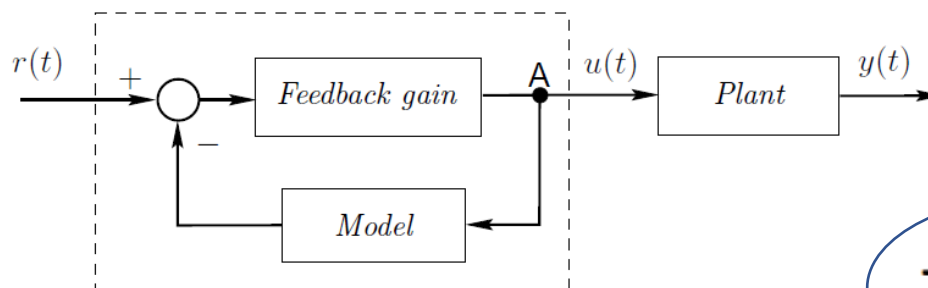
$$\downarrow$$

$$u = f^{-1}(r - h^{-1}(u))$$



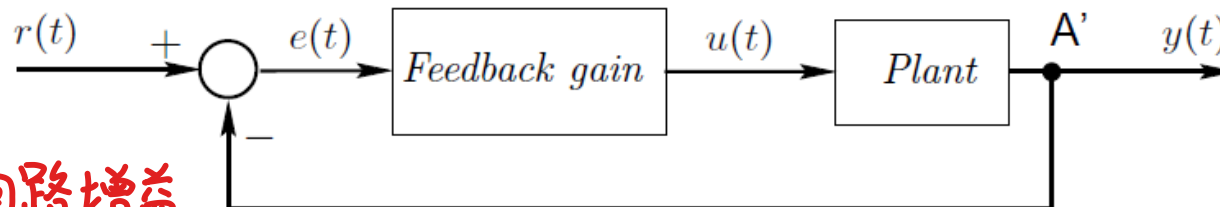
从开环控制到闭环控制

$$u = f^{-1}(r)$$



Open loop controller

Trade-offs!



高回路增益

High loop gain gives approximate inversion which is the essence of control. However, in practice, the choice of feedback gain is part of a complex web of design trade-offs. Understanding and balancing these trade-offs is the essence of control system design.

闭环控制的本质：
高增益来实现对被
控对象求逆



控制系统设计流程



控制系统设计流程



① 功能分析 ② 性能指标分析 ③ 工作条件分析

机械、驱动、测量(直接/间接)、控制

控制方案：安全是系统控制的第一要务。

机理模型、数据驱动模型、简化方法

模型降阶，非线性处理，不确定性描述，平均化等

仿真搭建与方案验证





1 需求分析

功能分析
性能指标分析
工作条件分析

① 功能分析:
控制什么，怎么控制（工作方式）

具体问题
具体分析

② 指标分析:
带宽，阶跃，位置精度，位置重复性，速率精度，
速率平稳性，最大加速度，最大速度，最小速度等

③ 工作条件:
环境（外扰），工况（负载变化），各种约束和限制（空间、功率）



1.1 功能分析： 例1-机器人

仿生机器人：像人或动物一样自由行动。

- (1) 平衡和动态运动能力：在多种地方、地形下保持平衡，实现自由活动，有效扩展机器人的工作范围；
- (2) 对运动的控制能力：移动过程中完成各项操作任务；
- (3) 移动感知能力：感知空间中物体的稳定存在，能够绘制出周边环境障碍物位置图，能够有效避开障碍物。





1.2 性能指标分析（根据指标确定系统能力）

阶跃 -> 执行器能力，传感器精度

带宽 -> 执行器和传感器动态性能，处理器速度，采样周期

失真度 -> 传感器选型，驱动传动方式

位置精度 -> 传感器精度，驱动传动方式





1.2 性能指标分析（元部件参数）

最大加速度 -> 执行器能力

最大速度 -> 执行器能力，传感器量程

最低速度 -> 分辨率，采样周期

速率精度 -> 传感器精度，时钟精度

速率平稳性 -> 执行器和机械特性



1.3 工作条件

尺寸约束
质量约束
功率约束
环境影响
清晰度要求

.....

尺寸约束：
22mmX42mm

环境（外扰），工况（负载变化），各种约束和限制（空间、功率）等。





①功能分析②性能指标分析③工作条件分析

机械、驱动、测量(直接/间接)、控制

控制方案：安全是系统控制的第一要务。

机理模型、数据驱动模型、简化方法

模型降阶，非线性处理，不确定性描述，平均化等

仿真搭建与方案验证





★ 方案设计

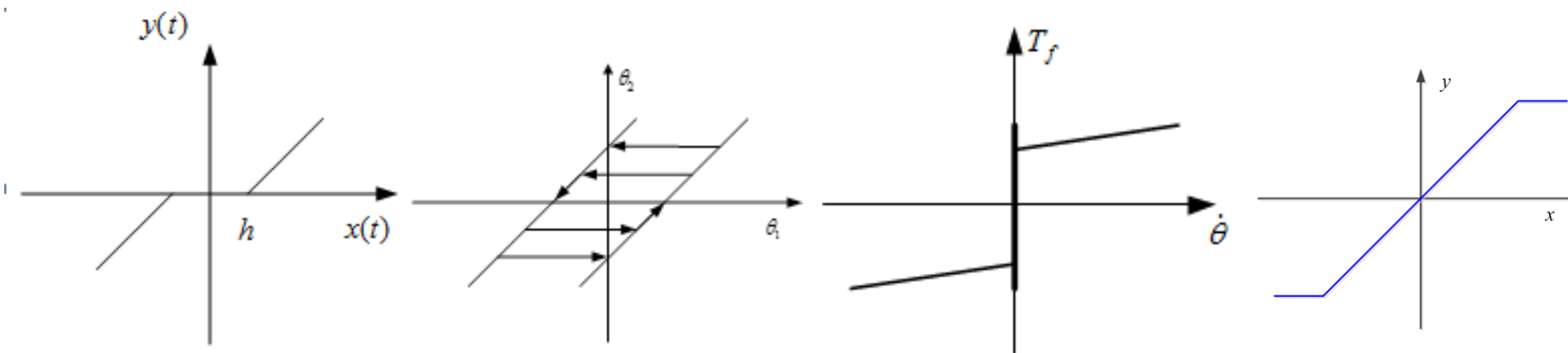
机械、驱动、测量(直接/间接)、控制方案。

考虑因素：指标、成本、可靠性、维护性、安全性、电磁兼容性、环境、熟悉程度等。

- (1) 驱动：驱动传动系统引入非线性环节（死区、间隙、摩擦、饱和），机械谐振。
- (2) 测量：测量引入的控制问题：量化噪声、非线性、白噪声、频带。
- (3) 控制方案：安全是系统控制的第一要务。
- (4) 开环系统结构简单，经济性好，但无法消除干扰的影响；闭环系统精度高，具有抗干扰性。

2.2 驱动方式（传动）

驱动传动系统引入的非线性环节，机械谐振



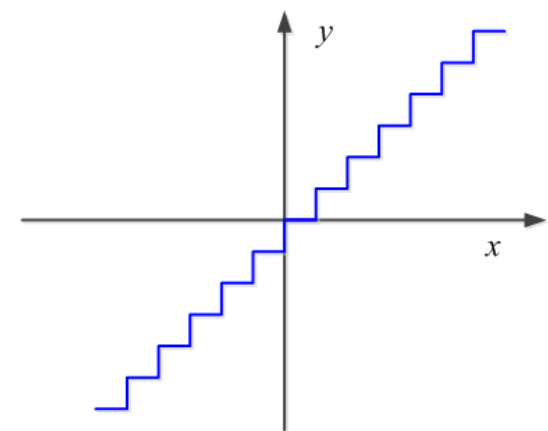
死区特性

间隙特性

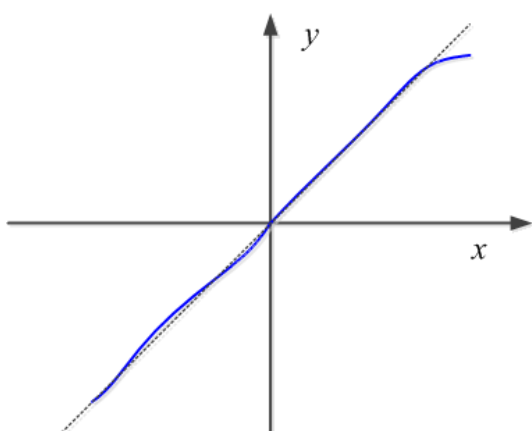
摩擦

饱和

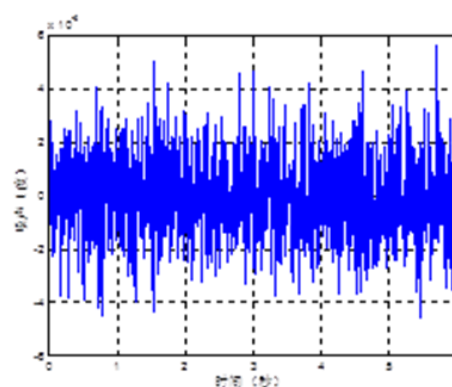
2.3 测量方案 测量引入的控制问题



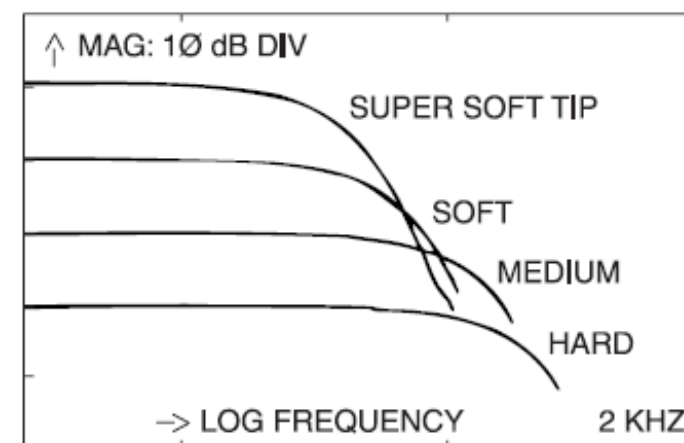
量化噪声



非线性



白噪声



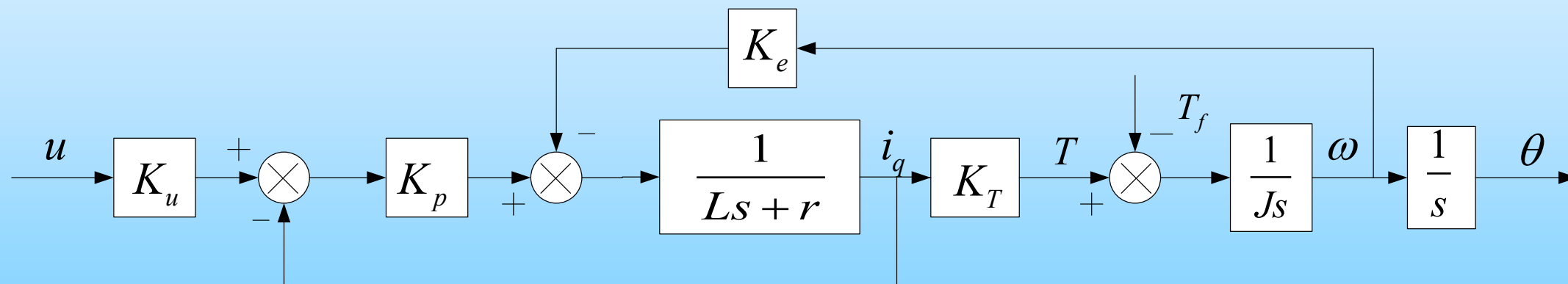
频带

控制：精度（重复性）、噪声（量化，白）、带宽（延迟）

2.4 控制方案-电机驱动器

➤ 矢量控制

通过控制电流空间矢量在转子坐标系中的交轴分量对转矩控制，保持直轴分量为零，以最小的电流幅值实现最大的输出转矩。



永磁同步电机数学模型



①功能分析、②性能指标分析 ③工作条件分析

机械、驱动、测量(直接/间接)、控制

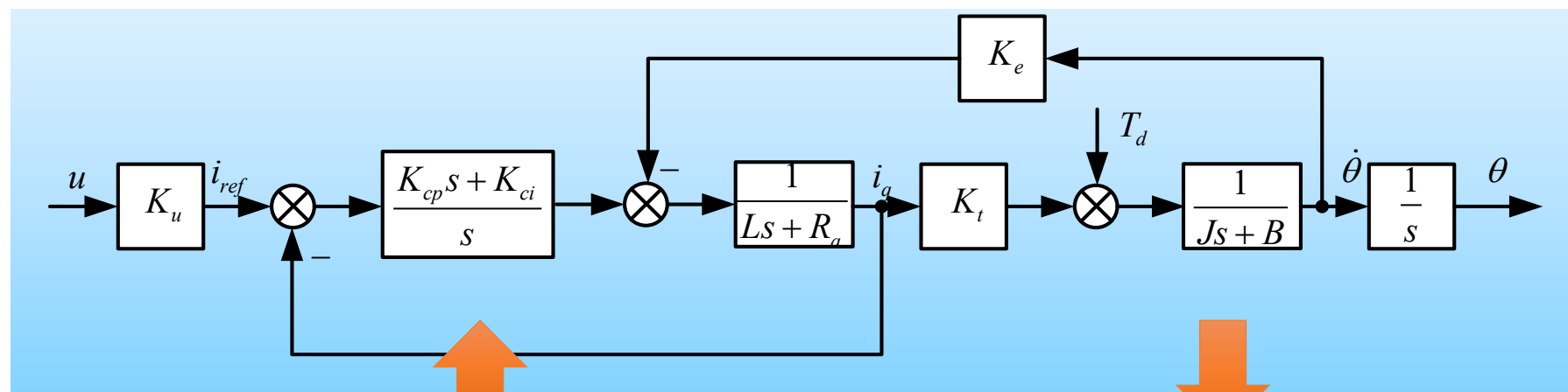
机理模型、数据驱动模型、简化方法

模型降阶，非线性处理，不确定性描述，平均化等

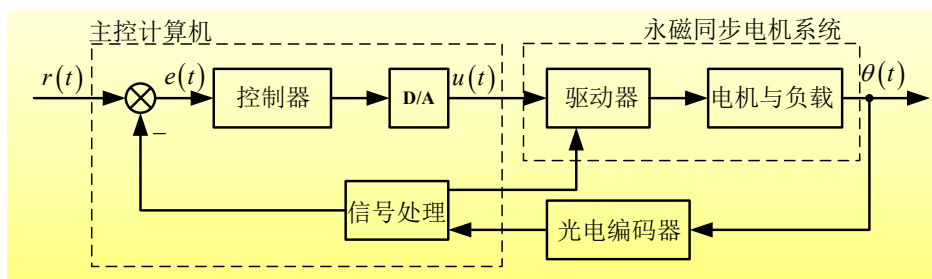
仿真搭建与方案验证

4 数学建模（简化和处理）

4.1 机理模型推导（理论分析和实验建模）



交流永
磁同步
电机伺
服系统



$$P(s) = \frac{\theta}{u} = \frac{K_0}{s(\tau_e s + 1)(\tau_m s + 1)}$$



模型降阶，非线性处理，不确定性描述，平均化等



5 控制器设计

★ 5.1 控制系统类型

输入输出：单变量系统、多变量系统
复杂度：简单系统、复杂系统、大系统
线性特性：线性系统、非线性系统
确定性：确定系统、不确定系统（随机系统）
参数确定性：定常系统、时变系统
信号特性：连续系统、离散系统、混杂系统
功能特性：伺服系统、调节系统
系统组成：机电系统、电路系统、通信网络系统、电力系统
系统数量：个体系统、多智能体系统

Controller



Control law





5 控制器设计

5.2 控制理论/方法介绍



古典控制（根轨迹、频域、**PID**）

鲁棒控制

自适应控制

最优控制

变结构控制（滑模控制）

智能控制（模糊，神经网络）

预测控制

数据驱动控制

自抗扰控制（**ADRC**）