

控制系统的设计流程3

——2023年春季学期

授课教师：马 杰（控制与仿真中心）

霍 鑫（控制与仿真中心）

马克茂（控制与仿真中心）

陈松林（控制与仿真中心）



哈尔滨工业大学控制与仿真中心



- **目标：**受扰后，通过调节四肢运动保持身体平衡
- **指标：**不同方向允许的最大冲击力，平衡所需时间，平衡时最大姿态角，平衡式移动的距离；
- **被控量：**身体的姿态角；**控制量：**各关节角度；**对象：**整个躯干
- **测量方案：**IMU，加速度计，视觉，编码器；
- **控制方式：**各关节电机，感知受扰时的加速度和当前姿态，合理规划步态（仿生，仿真分析，强化学习等），实现缓冲卸力，保持平衡；
- **干扰因素：**初始姿态、地面材质、测量影响，环境空间；
- **约束限制：**电机功率，四肢尺寸和刚度，关节范围、身体尺寸重量；
- **分类特点：**运动控制、多入多出系统、分级控制（规划与协同）。

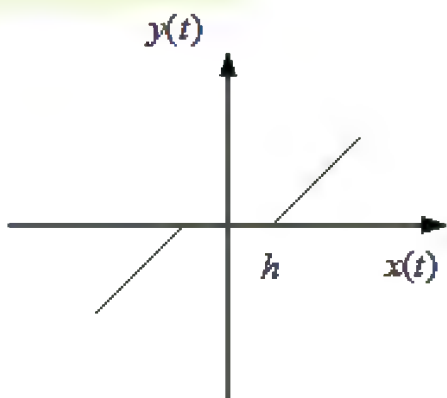
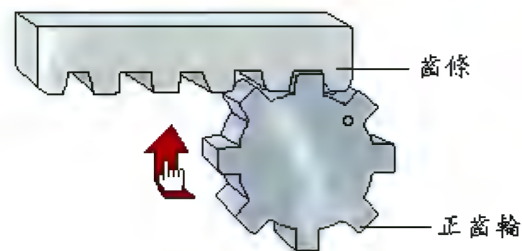
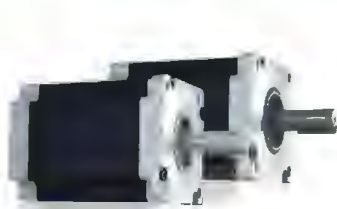
回顾篇

结构方案的对系统影响

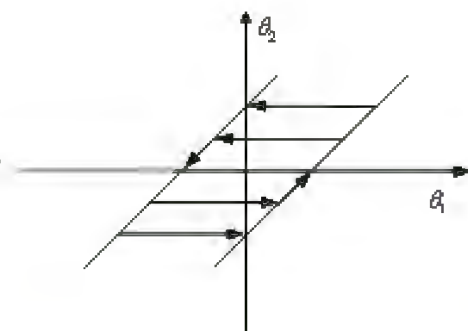
	龙门架	并联	串联
工作空间	大	小	中
整体规模	大	小	小
测量精度	直接/高	间接/低	间接/低
驱动功率	大	小	中
模型特点	简单，独立	多入多出	多入多出
控制问题	不突出	非线性 耦合干扰	惯量变化 偏载



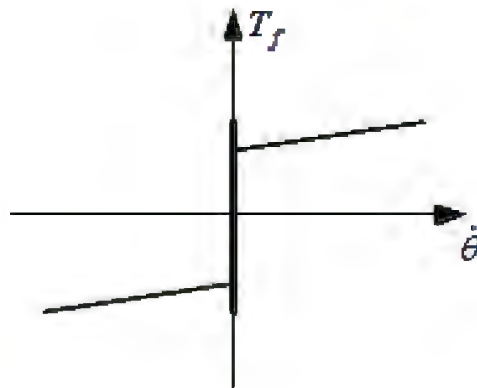
驱动传动方案选择VS控制性能



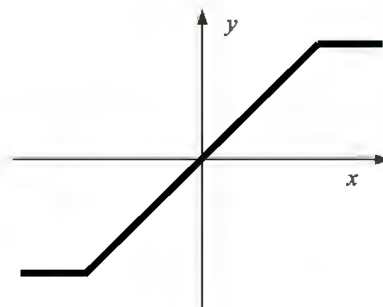
死区特性



间隙特性



摩擦

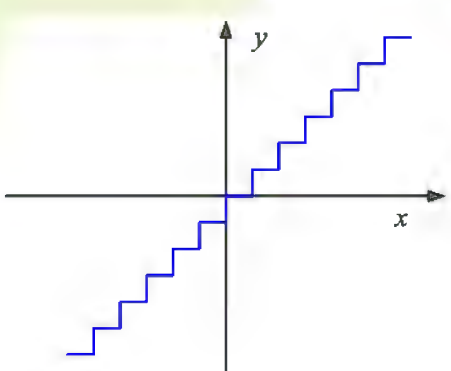


饱和

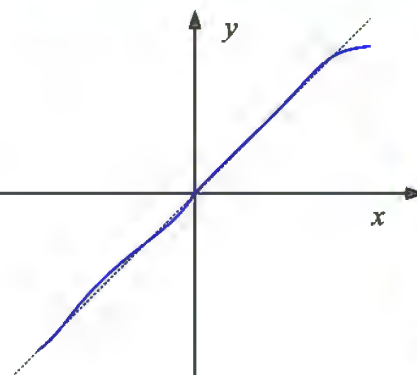
影响：精度、重复性、失真度、平稳性、快速性、带宽

回顾篇

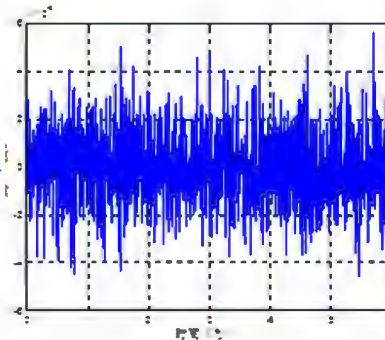
测量传动方案选择VS控制性能



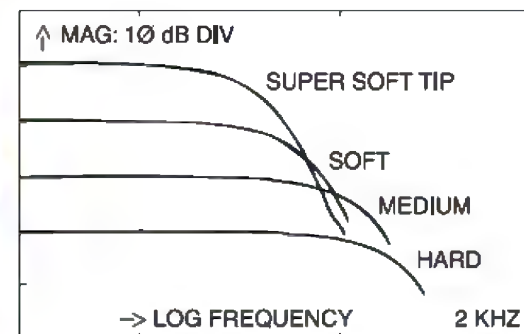
量化噪声



非线性



白噪声



动态（帧率）

精度、重复性、均方误差、平稳性、带宽（噪声、帧率、动态）

- 1 学会提出合理量化指标，能够解读指标内涵；
- 2 了解系统的工作环境、工况特点、挖掘隐含需求（任务书中没有体现的）；
- 3 若系统方案还没有设计，则能够根据功能和性能要求，从控制的视角提出合理可行的设计方案。
- 4 系统已确定或者已搭建，要能够基于系统的组成、原理和特点，判断系统性能指标的可实现性；
- 5 同时要根据各个子系统的方案发现他们对控制系统设计的可能产生的影响，以帮我们选择更合理控制设计方法；

拓展篇

培养自己的**方案力**——面对需求和难题，能够提出满足需求和解决问题的可行方案。



各种力：执行力 创造力 坚毅力 学习力 想象力 领导力

各种商：智商、情商、逆商、财商

开新篇

复杂情形

需求分析

方案设计



We are here

指标测试

选型采购

系统调试

软硬设计

仿真验证

安装集成

控制设计

数学建模

控制系统设计流程

2 方案设计

结构方案

驱动方案

测量方案

控制方案

通信方案

供电方案

考虑因素：指标、成本、复杂性、可靠性、维护性、安全性、电磁兼容性、环境适应性、熟悉程度等

你熟悉的控制器（硬件）有哪些？

正常使用主观题需2.0以上版本雨课堂

控制系统设计流程

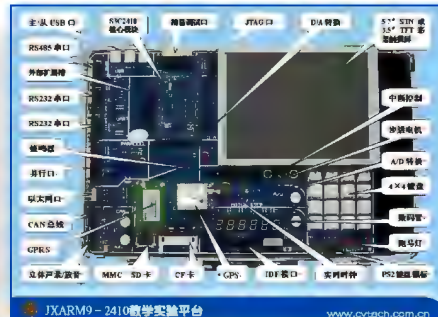
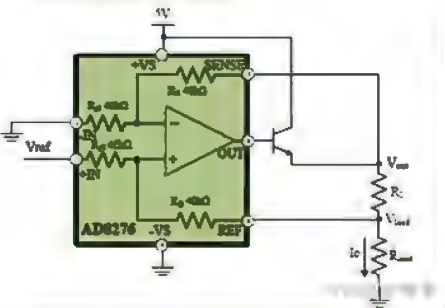
2 方案设计

2.4 控制方案 （开闭环， 程序控制， 正负反馈）

- 简单机构或电路
- 专用控制器 PLC/PAC/ DCS/ FCS
- 嵌入式系统 (DSP 单片机)
- 工业控制计算机



alibaba.com.cn



开环或闭环， 连续或开关， 模拟或数字 （组合）

控制系统设计流程

2 方案设计

2.4 控制方案 简单机构和电路 (电路系统, 调节系统)

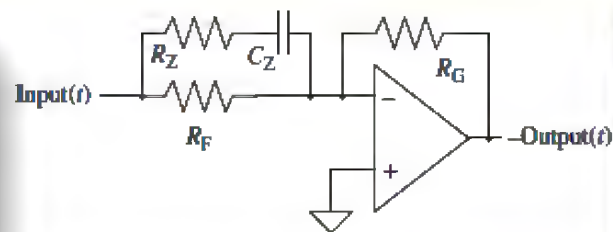
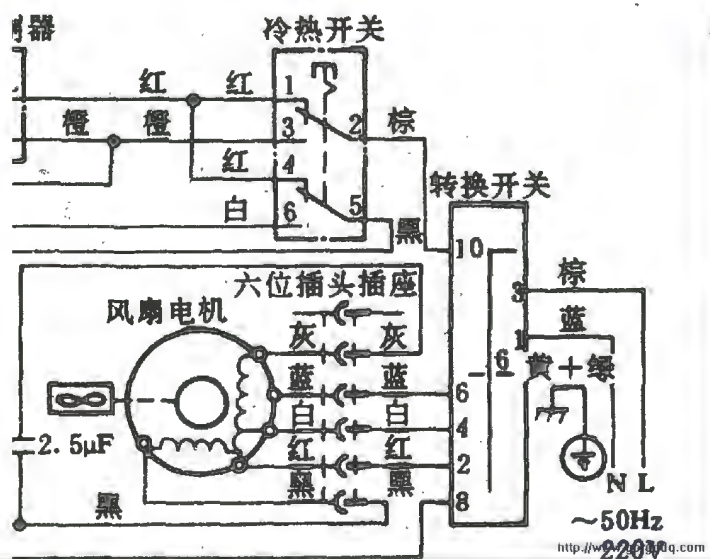
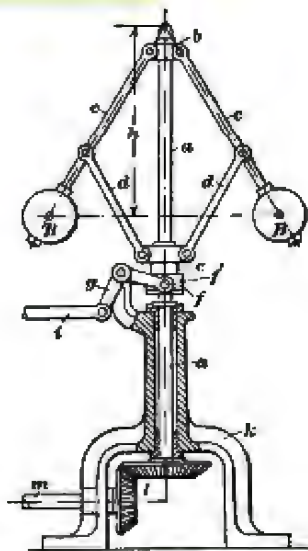
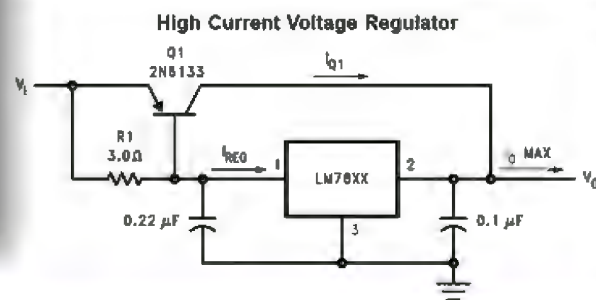


Figure A-4. Op-amp-based lead compensator.



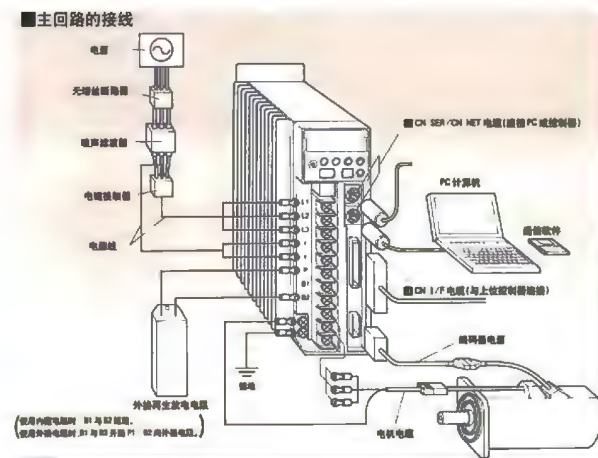
成本低, 实现简单; 精度低, 不够灵活

控制系统设计流程

2 方案设计

2.4 控制方案 电机驱动器（变频器）

➤ 电机驱动器内部集成了辅助的控制功能



可实现速度、位置闭环控制，还有辅助的逻辑顺序控制功能

2 方案设计

2.4 控制方案 专用控制器

- PLC (PAC) (适合顺序逻辑控制)
- DCS (过程控制站具有串级、前馈、解耦、自适应和预测控制, 组态软件)
- FCS (现场总线控制系统 全数字化 CAN ProfiBus EtherCAT)



控制系统设计流程

2 方案设计

2.4 控制方案 开发板（考虑性能、接口，位数）

- 以DSP、单片机等嵌入式微处理器为核心，并配备相应的接口电路。
- 可搭载实时操作系统
- 可单独工作，也可在其他设备的指令控制下工作。



便于复杂控制算法的实现，主要工作在于软件开发

控制系统设计流程

2 方案设计

2.4 控制方案 智能手机（丰富的传感器）



视觉，气压计，电子罗盘，重力感应，光线感应，陀螺仪，红外，霍尔感应器，距离感应器，GPS，WIFI，蓝牙，4G，NFC

主要工作在于通信接口的设计和软件开发

控制系统设计流程

2 方案设计

2.4 控制方案 智能手机（丰富的传感器）



控制系统设计流程

2 方案设计

2.4 控制方案

工业控制计算机

需要配套接口板卡

- 传感器数据采集卡
- 执行器信号输出卡
- I/O扩展卡
- 通信接口卡

或者采购专用的

- 运动控制卡



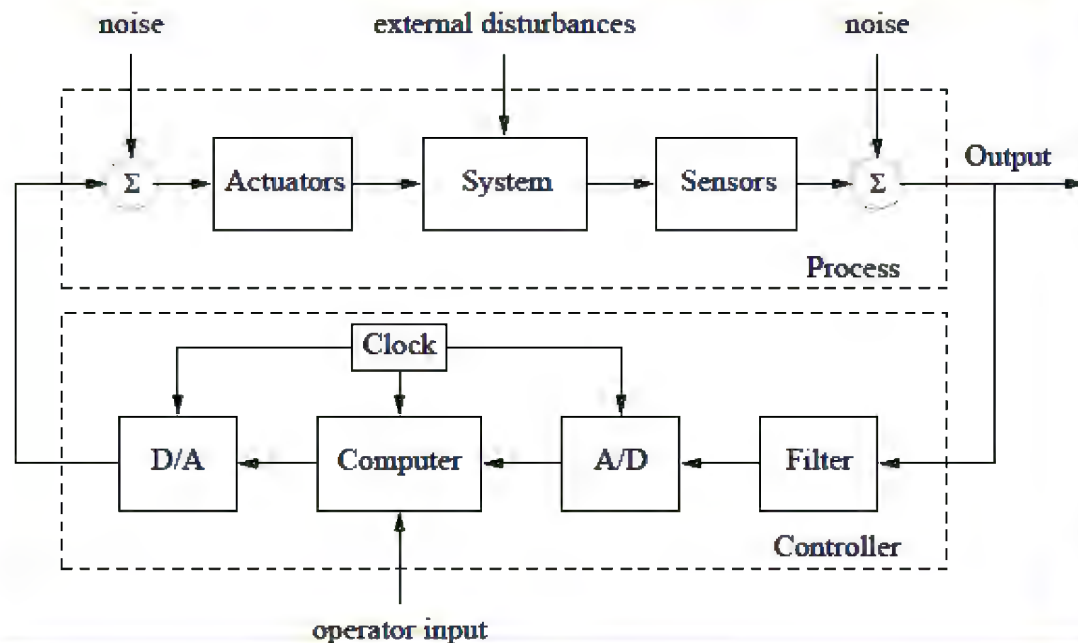
接口配置灵活，复杂控制算法，实时操作系统

控制系统设计流程

2 方案设计

2.4 控制方案 采用工控机（成本比较高）

- 抗干扰能力强
- 实现复杂算法
- 人机交互界面
- 调试测试方便
- 接口扩展方便



引入的控制问题：采样延迟，数值精度

控制器在选型时，应考虑哪些因素？

- ☒ A 成本，尺寸限制，供电
- ☒ B 电气接口，机械接口
- ☒ C 处理速度，字长，延迟
- ☒ D 实时性

提交

控制系统设计流程

2 方案设计

2.4 控制方案

例子：高速旋转过载试验机

最大旋转速度：15000r/min
转速建立时间：150ms



驱动器实现速度控制，**计算机**实现逻辑控制和数据分析

控制系统设计流程

2 方案设计

结构方案

驱动方案

测量方案

控制方案

通信方案

供电方案

考虑因素：指标、成本、复杂性、可靠性、维护性、安全性、电磁兼容性、环境适应性等

控制系统设计流程

2 方案设计

2.5 通信方案 控制器与传感器、执行器及其他设备

模拟量（电压或电流及其范围）；

数字量（并行/串行、同步/异步，协议类型）



Clock



Data



1 0 1 0 0 1 1 1 0 0 1

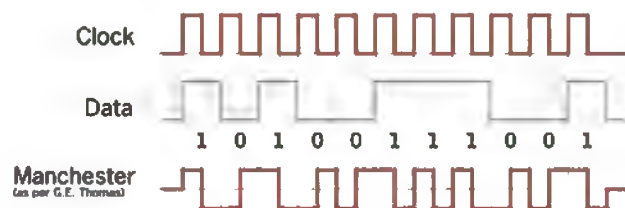
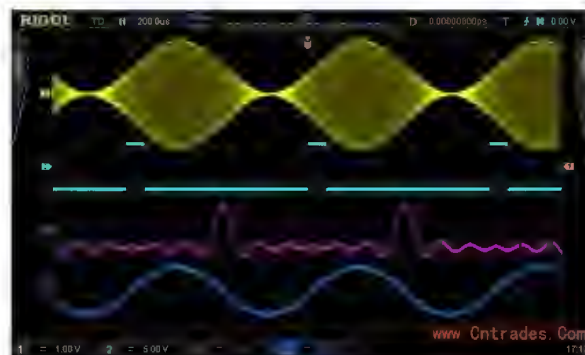
Manchester
(as per G.E. Thomas)



考虑成本、带宽、速度、可靠性、扩展性

通信方式的选择和设计，可能对控制系统带来哪些问题？

- ☒ A 噪声（电磁干扰）问题
- ☒ B 丢包和延迟问题
- ☒ C 转换精度
- ☒ D 信息安全问题

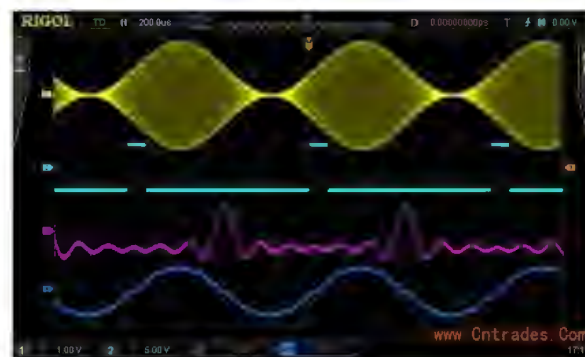
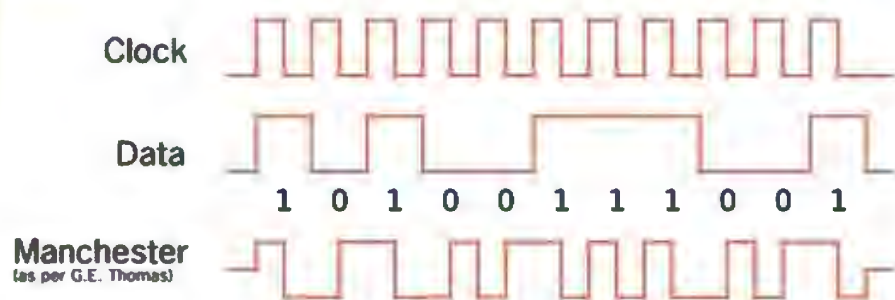


提交

控制系统设计流程

2 方案设计

2.5 通信方案 带来的控制问题



互扰（电磁干扰），精度、速度、距离、丢包，延迟，
时钟异步，信息安全

控制系统设计流程

2 方案设计

结构方案

驱动方案

测量方案

控制方案

通信方案

供电方案

考虑因素：指标、成本、复杂性、可靠性、维护性、安全性、电磁兼容性、环境适应性等

控制系统设计流程

2 方案设计

2.5 供电方案 系统能量来源

发电机
动力电
照明电
电池等



考虑环境，体积、容量、电压、电流

Logo

供电方式的选择和设计，可能对控制系统带来哪些问题？

A

电压波动引起系统特性变化

B

电磁干扰

C

燃料消耗引起系统特性变化

D

供电异常问题



提交

控制系统设计流程

目录



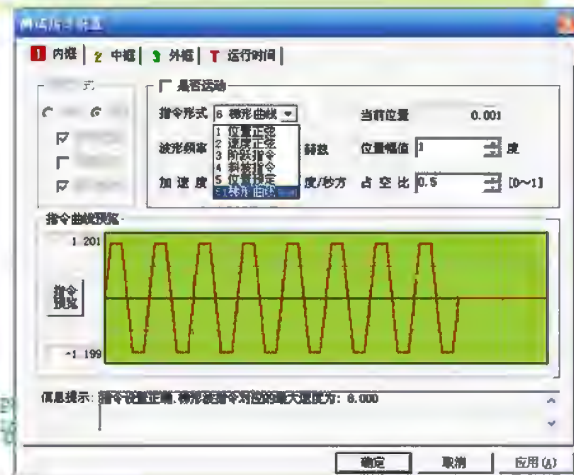
控制系统设计流程

3. 采购、设计、安装、集成

设备机械电气连接、程序设计、硬件设计调试、部件测试

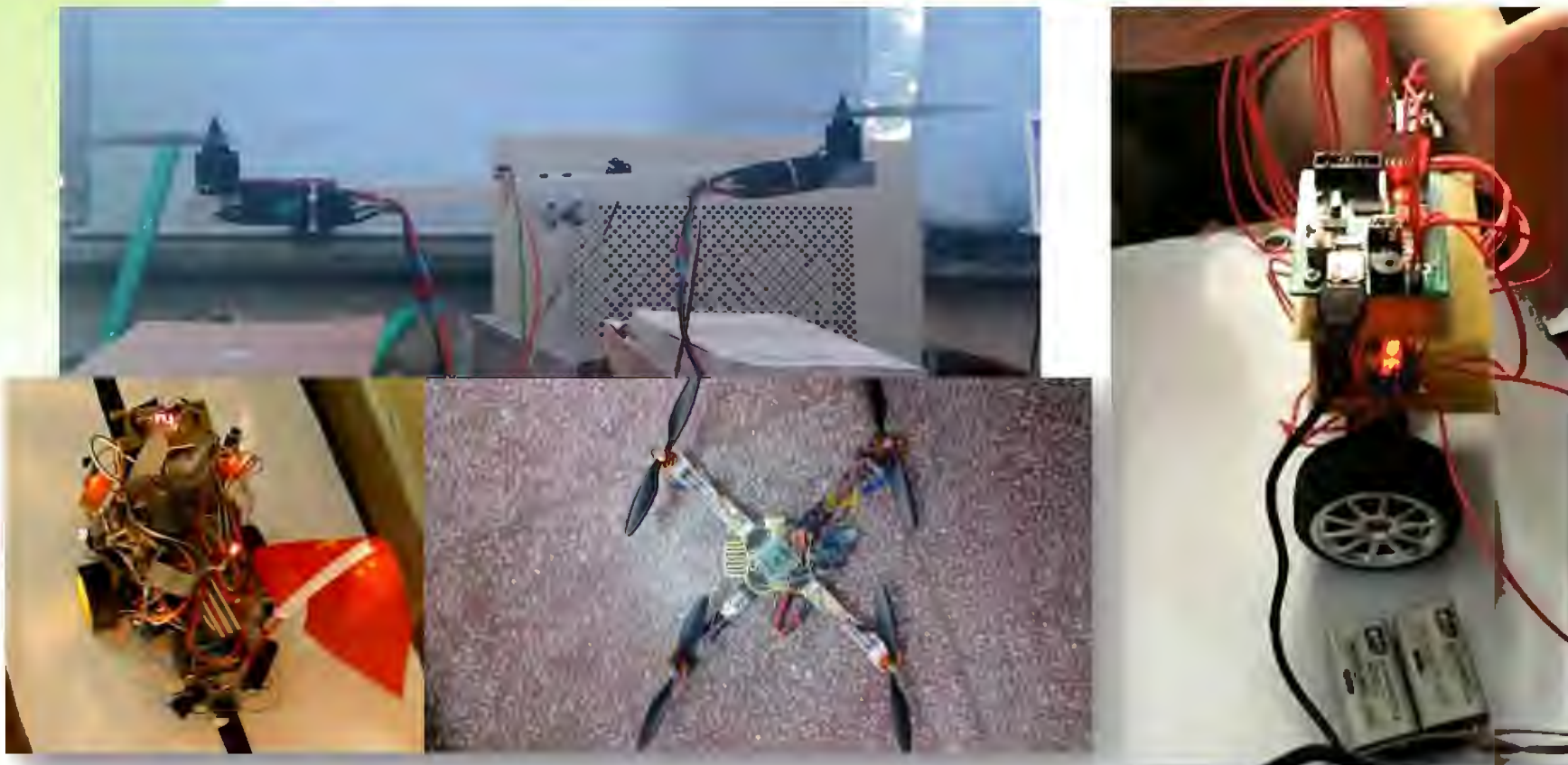


```
if(a<0xFA00)
{
P0=0x00;
CCAP0H=CCAP0H-1;
CCAP0L=CCAP0L-1; //E
if(CCAP0H==1) //E
{CCAP0H=5;}
if(CCAP0H==255)
{CCAP0H=250;}
}
if(a>0xFA00)
{
P0=0xf0;
CCAP0H=CCAP0H+1;
CCAP0L=CCAP0L+1; //PWM0的占空比调节, 占空比=(256-Y)/256;
if(CCAP0H==1)
{CCAP0H=5;}
if(CCAP0H==255)
{CCAP0H=250;}
}
```



控制系统设计流程

3. 采购、设计、安装、集成



部件机械电气连接、程序设计、硬件设计调试、部件测试

控制系统设计流程

3. 采购、设计、安装、集成

选型采购：选型错误（性能参数，机械和电气接口，环境适应性）；

硬件设计：电路原理错误，封装错误、接口不匹配，走线错误；

软件设计：编程错误（语法，算法，逻辑，时序，定时）

安装集成：连接错误，接触不良，干扰问题；



```
if (a<0xFA00)
{
    P0=0x00;
    CCAP0H=CCAP0H-1;
    CCAP0L=CCAP0L-1; //PWM0的占空比调节，占空比=(256-Y)/256;
    if (CCAP0H==1) //设置Y的上下限
        {CCAP0H=5;}
    if (CCAP0H==255)
        {CCAP0H=250;}
}
if (a>0xFA00)
{
    P0=0xFF;
    CCAP0H=CCAP0H+1;
    CCAP0L=CCAP0L+1; //PWM0的占空比调节，占空比=(256-Y)/256;
    if (CCAP0H==1)
        {CCAP0H=5;}
    if (CCAP0H==255)
        {CCAP0H=250;}
}
```

控制系统设计流程

目录

需求分析

方案设计

指标测试

选型采购

系统调试

软硬设计

仿真验证

安装集成

控制设计

数学建模

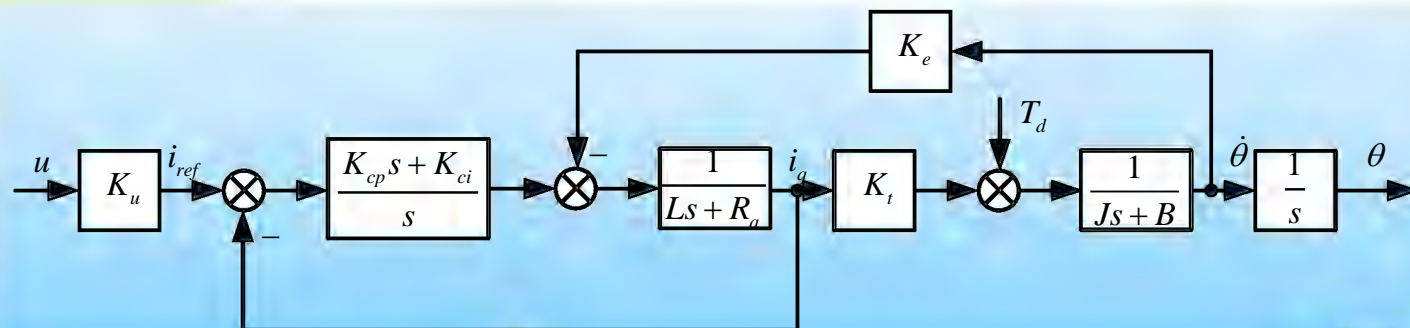


We are here

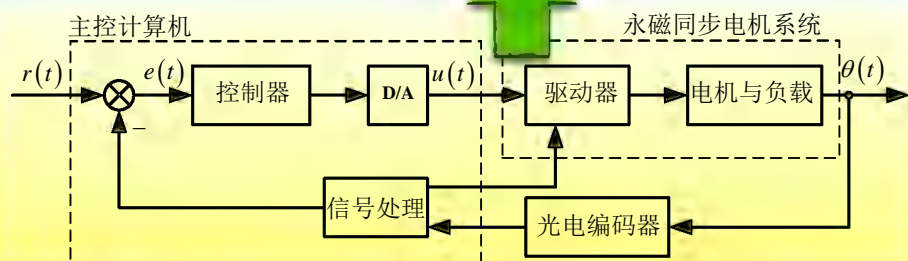
控制系统设计流程

4 数学建模（简化和处理）

4.1 机理模型推导（数学建模和实验建模）



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，参数辨识，非线性处理，干扰因素分析等

控制系统设计流程

4 数学建模（简化和处理）

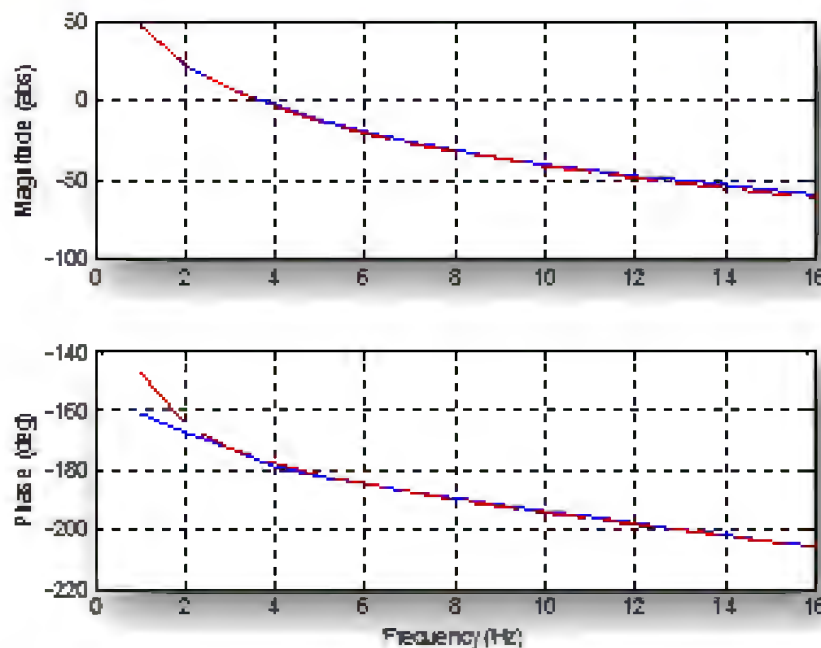
4.2 模型验证及参数辨识

- 正弦扫频测试
- 最小二乘拟合

$$D = \sum_{i=1}^n d_i^2 = \sum_{i=1}^n [y_i - a - bx_i]^2$$

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

$$P_0(s) = \frac{666.7}{s(0.1989s + 1)(0.0106s + 1)}$$



控制系统设计流程

目录

需求分析

方案设计

指标测试

选型采购

系统调试

软硬设计

仿真验证

安装集成

We are here



控制设计

数学建模

控制系统设计流程

5 控制器设计

5.1 控制系统类型——先确定控制系统的类型

(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
(随机性)	确定系统	不确定系统 (随机系统)
(时变性)	定常系统	时变系统
(信号特性)	连续系统	离散系统
	离散事件动态系统	混杂系统
(控制要求)	伺服系统	调节系统
(系统特点)	机电系统	电路系统
	通信网络系统	电力系统
(系统数量)	单体系统	多体系统

控制系统设计流程

5 控制器设计

5.2 控制理论——再选择合适的控制方法

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

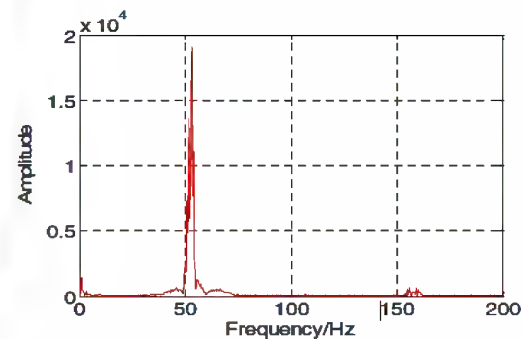
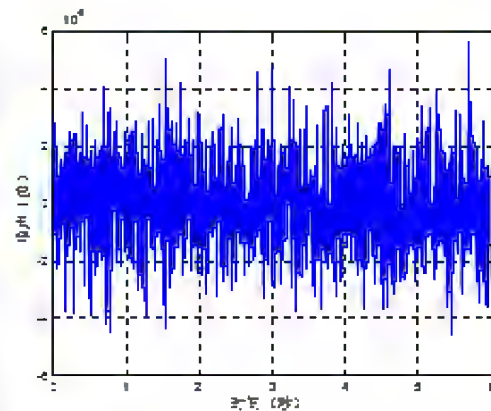
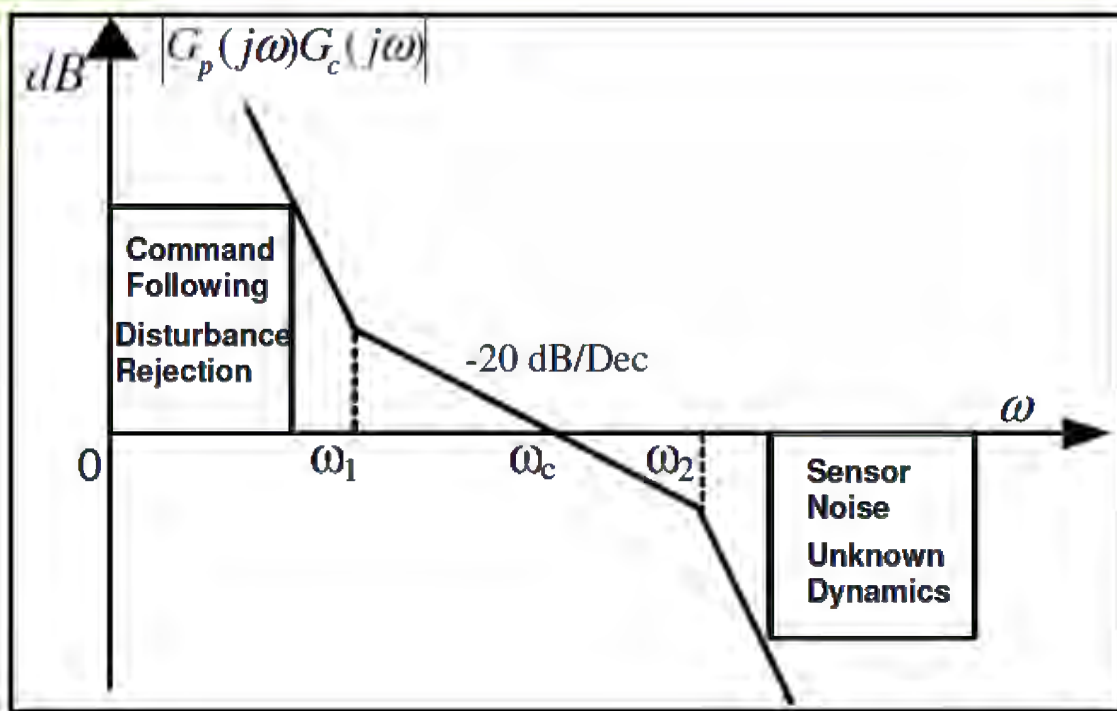
数据驱动控制

自抗扰控制（ADRC）

控制系统设计流程

5 控制器设计

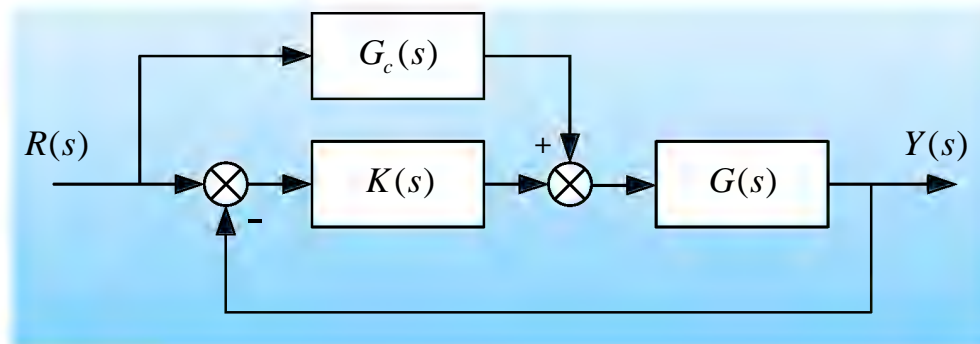
5.3 基本的原则（以单入单出系统，频域设计为例）



控制系统设计流程

5 控制器设计

5.4 控制器设计方法 二自由度控制

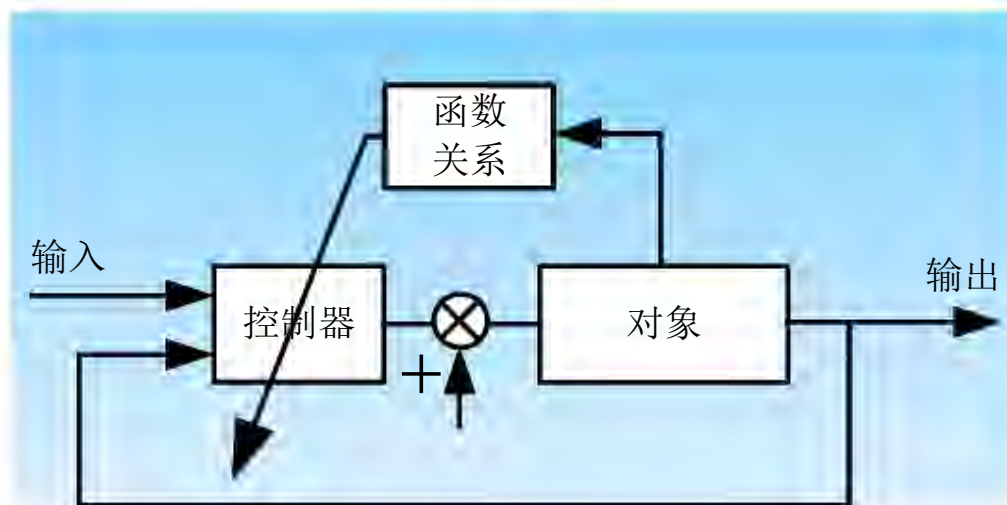


反馈利用偏差信息，顺馈利用模型和指令信息

控制系统设计流程

5 控制器设计

5.4 控制器设计方法 自适应（校正）控制

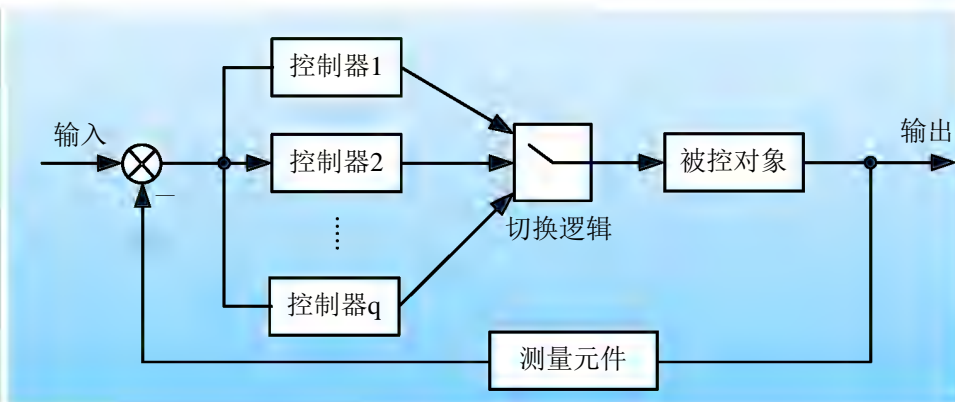


利用转动惯量与各个关节角度之间的关系，对控制器进行校正(自校正控制器)，保持校正后整个系统的特性不变。

控制系统设计流程

5 控制器设计

5.4 控制器设计方法 切换控制

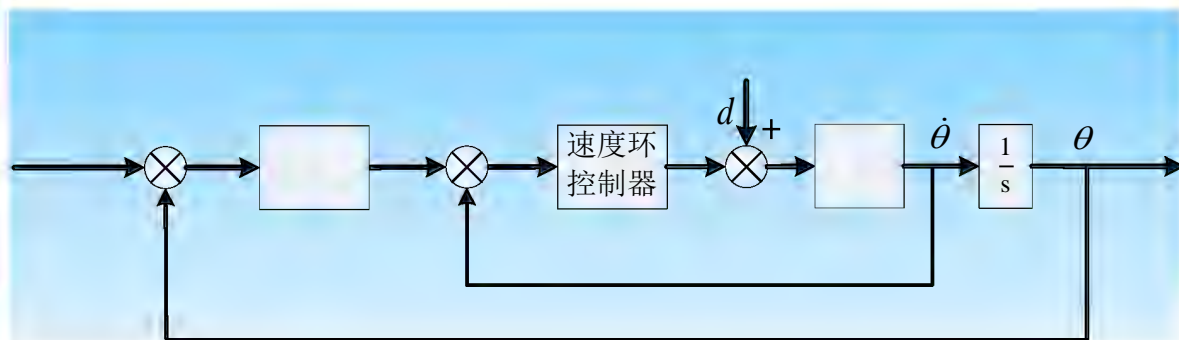


利用传感器（或系统的工作时序流程）来获得系统当前的状态，采用多个控制器来适应工况的变化

控制系统设计流程

5 控制器设计

5.4 控制器设计方法 多回路控制



用位置间接获得速度信息，利用速度对干扰敏感的特点，双回路抑制干扰

控制系统设计流程

5 控制器设计

5.5 数字控制的实现方案

s域或z域设计

方案1：被控对象z变换后，在z域设计控制器

方案2：先在s域进行设计，然后对得到的控制器 $K(s)$ 做离散化

第二种方案更灵活

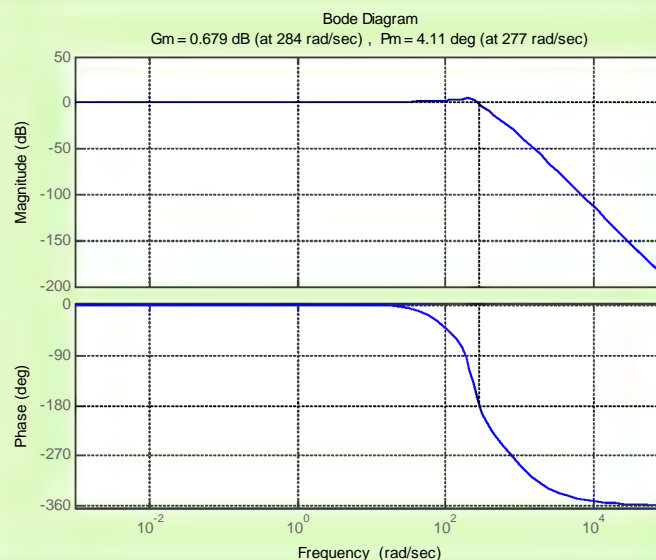
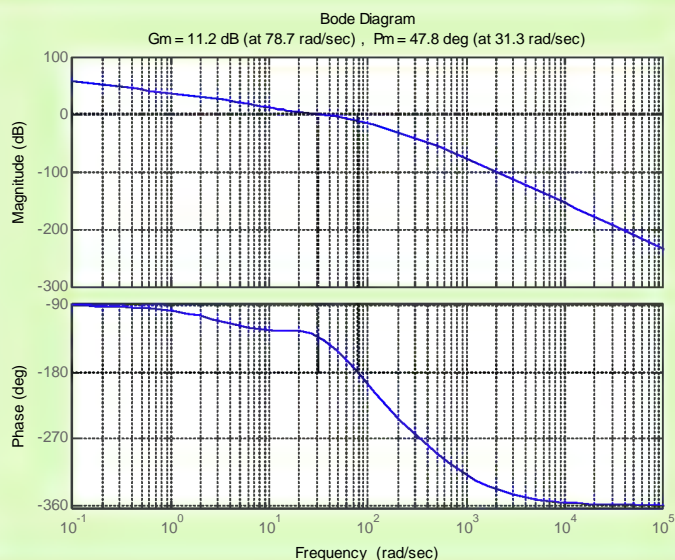
控制系统设计流程

5 控制器设计

5.6 性能确认 (用闭环波特图验证频带)

$$= \frac{K_{1,1}(s)K_{1,2}(s)K_{1,3}(s)K_{1,4}(s)P_0(s)}{0.2122s^2 + 7.702s + 69.88}$$

$$= \frac{1.136 \times 10^{-9}s^6 + 9.502 \times 10^{-7}s^5 + 1.647 \times 10^{-4}s^4 + 0.01055s^3 + 0.2479s^2 + s}{0.2122s^2 + 7.702s + 69.88}$$



控制系统设计流程

目录

需求分析

方案设计

指标测试

选型采购

系统调试

软硬设计

仿真验证



We are here

安装集成

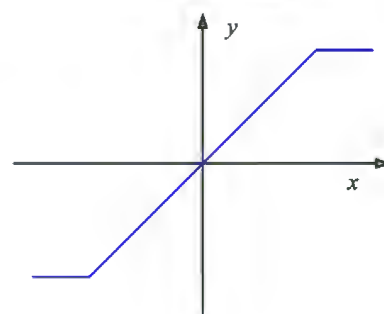
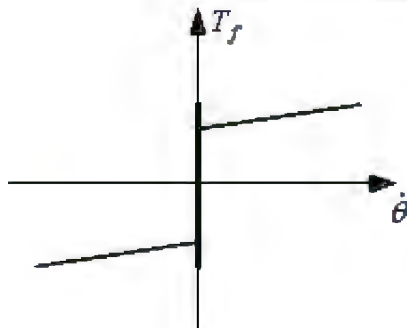
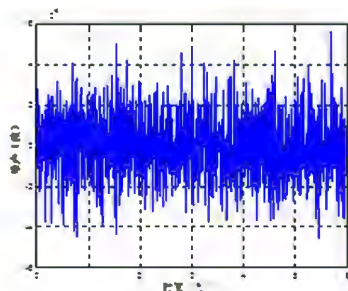
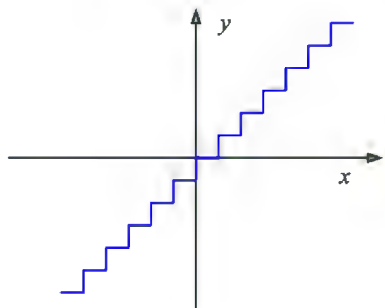
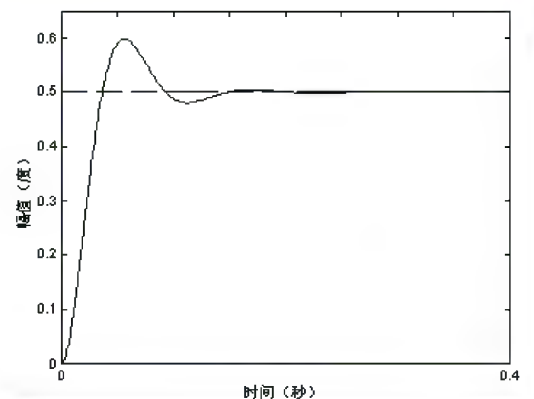
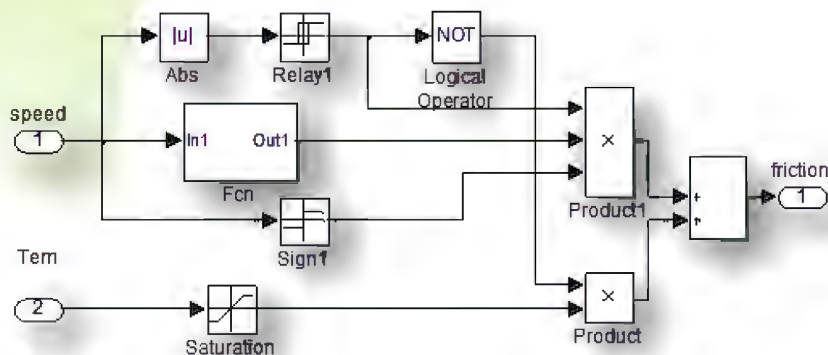
控制设计

数学建模

控制系统设计流程

6 仿真验证

6.1 用最原始模型——仿真一定要真（还原系统）



控制系统设计流程

目录

需求分析

方案设计

指标测试

选型采购

系统调试



We are here

软硬设计

仿真验证

安装集成

控制设计

数学建模

控制系统设计流程

7 系统调试

控制器编程实现，实际系统调试测试

$$G(s) = \frac{s^2 + 2\pi\xi ks + (2\pi f)^2}{s^2 + 2\pi ks + (2\pi f)^2}$$

$$y(n) = c_0 y(n-2) + c_1 y(n-1) + d_0 u(n-2) + d_1 u(n-1) + d_2 u(n)$$

$$\begin{cases} c_0 = \frac{-4/T^2 + 4\pi k/T - (2\pi f)^2}{4/T^2 + 4\pi k/T + (2\pi f)^2} \\ c_1 = \frac{8/T^2 - 2(2\pi f)^2}{4/T^2 + 4\pi k/T + (2\pi f)^2} \\ d_0 = \frac{4/T^2 - 4\pi k\xi/T + (2\pi f)^2}{4/T^2 + 4\pi k/T + (2\pi f)^2} \\ d_1 = \frac{-8/T^2 + 2(2\pi f)^2}{4/T^2 + 4\pi k/T + (2\pi f)^2} \\ d_2 = \frac{4/T^2 + 4\pi k\xi/T + (2\pi f)^2}{4/T^2 + 4\pi k/T + (2\pi f)^2} \end{cases}$$

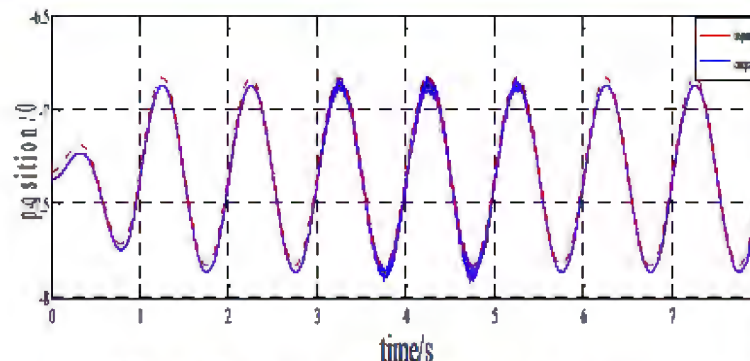
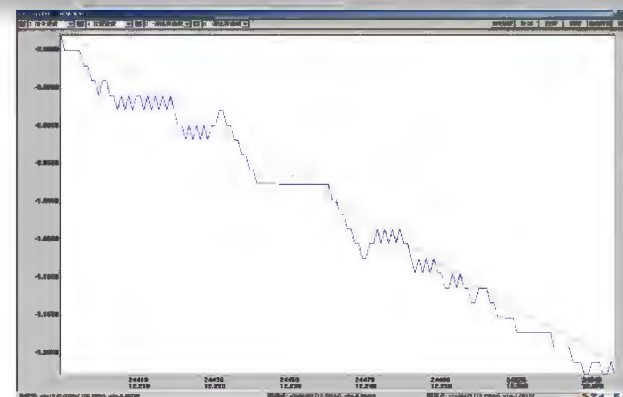


Fig. 8 Experimental input and output curve



控制系统设计流程

7 系统调试

根据测试结果对控制器进行修改，并最终满足要求



控制系统设计流程

目录

需求分析

方案设计

指标测试



We are here

选型采购

系统调试

软硬设计

仿真验证

安装集成

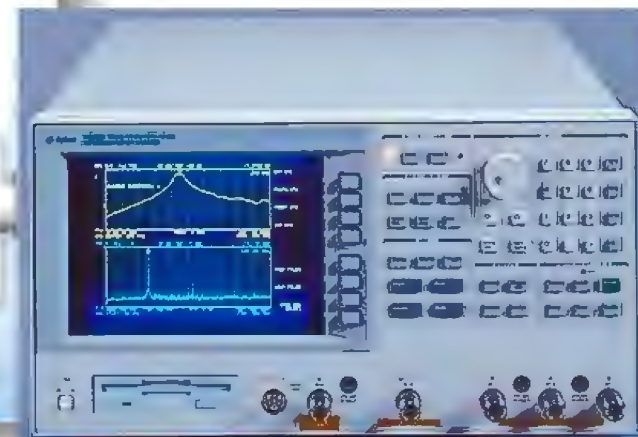
控制设计

数学建模

控制系统设计流程

7 系统测试

根据测试结果对控制器进行修改，并最终满足要求



一般利用第三方仪器设备，参考一些标准和规范来进行测试

控制系统设计流程

作业1（必选）：



总结控制系统设计流程的主要知识点（可以用思维导图），写下自己的体会和收获，尤其是理论和实践的差别。

控制系统设计流程

作业2（可选）



如果你来设计四旋翼倒立摆系统，请给出你的方案。结合课程内容，从机械结构、驱动、测量、供电、控制、通信、供电，调试流程等方面来写。

控制系统设计流程

作业3（可选）



波士顿机器人
(1983-2023)



1989 - 1993



波士顿机器人
(1983-2023)



2013



波士顿机器人
(1983-2023)



2016



波士顿机器人
(1983-2023)



2023

观看波士顿机器人42年进化史视频，重点关注调试和试验辅助过程和方法，感受一个实际系统实现过程中的艰辛过程，写下你的感受。

感受最后扔包功能的具体的实现方式，思考需要哪些感知设备和算法，决策方法，规划和控制方法等。



Thank You !



哈尔滨工业大学控制与仿真中心