

控制系统的设计流程

——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



回顾篇

工程师的五个等级



作为哈工大的学生，目标至少应该是第三级



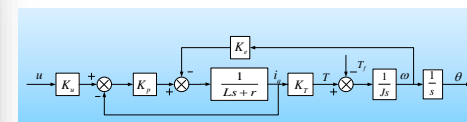
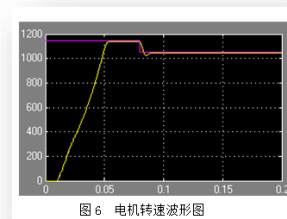


回顾篇

初级控制工程师



中高级控制工程师



系统总工程师，总设计师

没有需求可以创造需求
有需求可以更好地满足需求

需求分析

方案设计

指标测试

选型采购

系统调试

还有更多...

软硬设计

仿真验证

安装集成

控制设计

数学建模



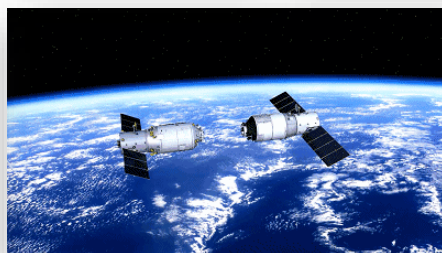
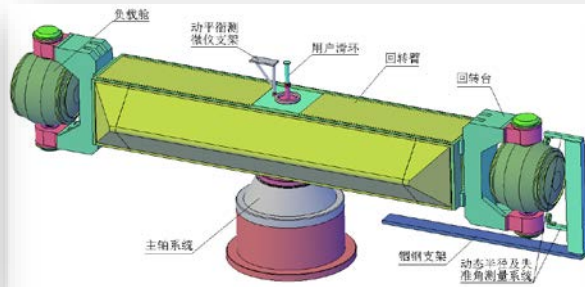
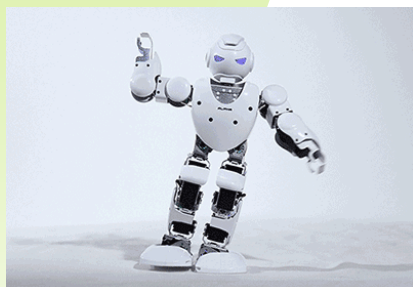
回顾篇

- 1 在设计控制系统之初，必须明确系统的功能要求，注意那些看不见的和隐含的功能要求；**
- 2 要有控制的视角，对于一个给定的系统，我们要弄清楚它控制目标是什么，被控量是什么，如何来进行控制，要提炼出来关键要素；**
- 3 我们不仅要学会理解一个给定控制系统的需求（实现），而且我们还要学会提出明确合理的需求（创造）。**



回顾篇

精彩纷呈的应用场景



27 February 2023

哈尔滨工业大学控制与仿真中心



总结篇

控制系统设计中的关键要素分解

1. **目标** (定性描述系统的功能和用途)
2. **被控量** (被控对象, 一个或多个物理量)
3. **测量方式** (传感器, 具体方式: 互补、融合、分段)
4. **控制方式** (执行器, 控制量, 具体: 规划, 集散, 分层, 多回路)
5. **性能指标** (对目标进行分解, 用多个物理量或者数学量以及他们的取值范围来准确刻画目标)
6. **干扰因素** (除指令外, 可能影响被控量, 影响性能的各种因素)
7. **约束与限制** (制约系统功能和性能的各类条件)
8. **系统分类** (单体/多体, 单变量/多变量, 线性/非线性, 时变, 确定)
9. **实现方式** (分析计算、仿真, 单项试验, 半实物仿真, 系统联调)



作业篇

流浪地球

作业1

完成“**流浪地球**”控制系统的
需求分析





作业篇

参考答案



- **目标**：在给定时间内，安全转移到特定星系（精度满足要求、时间和能量的优化）
- **指标**：最大加速度，最大速度（考虑地球和人类承受能力），轨迹跟踪精度（考虑执行器能力，考虑各种干扰）。
- **被控对象**：地球；**被控量**：地球位姿（轨迹和方向）及导数等；**控制量**：力的大小和方向；**执行器**：合理布置的多台行星发动机
- **控制方案**：规划路径，协同控制，具有抗扰能力，人在回路，借力
- **测量方案**：星敏感器，其他临近行星的观测，扰动测量，障碍物测量
- **约束限制**：发动机功率，数量，能源的限制，物理定律的限制，人类生存要求
- **扰动因素**：环境变化的影响，未知的各种不确定性，避障，容错能力，人类的可持续发展（经济政治文化心理），人类可能是最大的扰动。
- **分类特点**：运动控制、多入多出、智能控制、容错控制



作业篇

校庆灯光秀



作业2 校庆灯光秀表演中千架无人机控制系统需求分析



作业篇

参考答案



- **目标：**通过控制多架无人机位置和灯光，显示各种图案，同时保证安全可靠
- **指标：**轨迹保持安全距离，队形变换时间，跟踪控制的最大误差，工作时间，高度和空间；
- **被控量：**无人机的位姿和轨迹；**控制量：**电机力矩（转速）；**对象：**多架无人机
- **测量方案：**GPS RTK，IMU，高度计；
- **控制方式：**通过轨迹规划实现多个无人机位置协同（实现图案变换），单个无人机位姿控制，灯光控制，开环的程序控制；
- **干扰因素：**环境干扰、通信干扰、测量干扰、相互干扰；
- **约束限制：**通信距离，电池电量，起飞场地限制、空间限制、温度限制、环境限制；
- **分类特点：**多智能体协同控制、运动控制、多入多出系统、故障处理、容错控制。



提升篇

作业总结



看到别人看不到的
看透别人看不透的

已有的能分析
没有的能设计





开新篇

复杂情形

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

1 需求分析

功能分析:

控制什么, 怎么控制 (工作方式), 怎么测量

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

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)

其他需求: 隐含需求, 特殊问题



控制系统设计流程

1 需求分析

1.2 性能指标分析（以电机位置伺服为例）

阶跃响应



执行器能力，传感器精度

系统带宽



执行器，传感器动态性能
处理器速度，采样周期

失真度



传感器类型，驱动传动方式

位置精度



传感器精度，驱动传动方式



控制系统设计流程

1 需求分析

1.2 性能指标分析（以电机位置伺服为例）

最大加速度



执行器能力

最大速度



执行器能力，传感器工作速度

最小速度



传感器精度、分辨率，驱动方式

速率精度



传感器精度，时钟精度

速率平稳性



执行器，驱动方式，结构特性



控制系统设计流程

1 需求分析

1.3 工作条件分析

航天器与航空器



环境不同，方案也不同，控制设计问题也不同

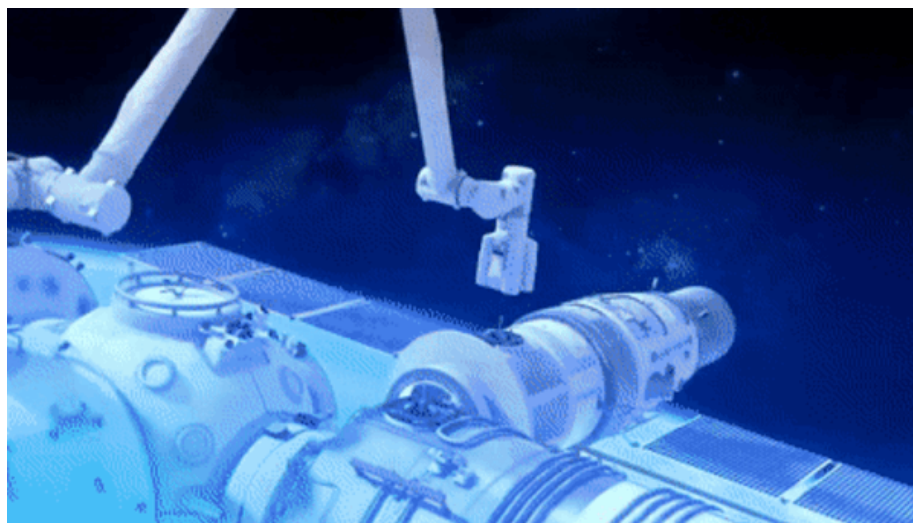


控制系统设计流程

1 需求分析

1.3 工作条件分析 (空间机械臂)

尺寸约束
质量约束
功率约束
环境要求
目标特性
...



环境（外扰），工况（负载变化），各种约束和限制（空间、功率）等。

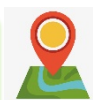


控制系统设计流程

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



控制系统设计流程

2 方案设计

2.1 机械结构方案

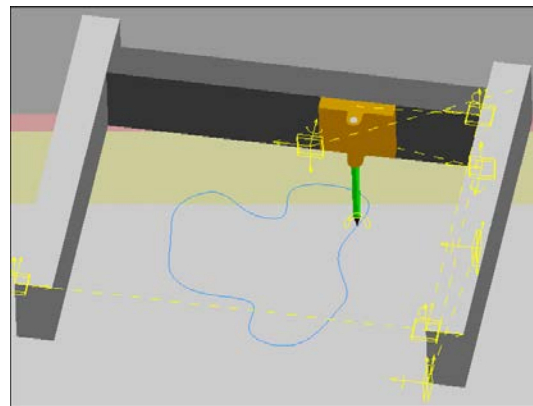
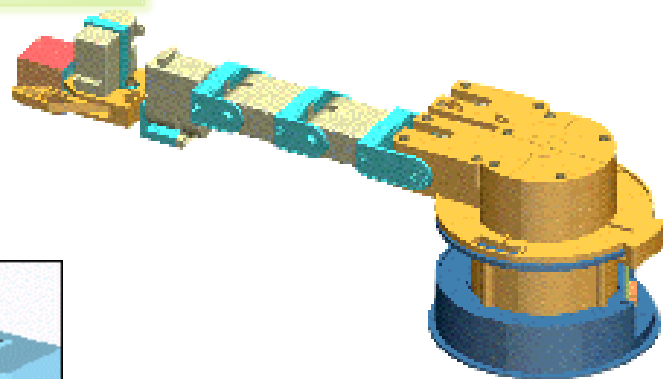
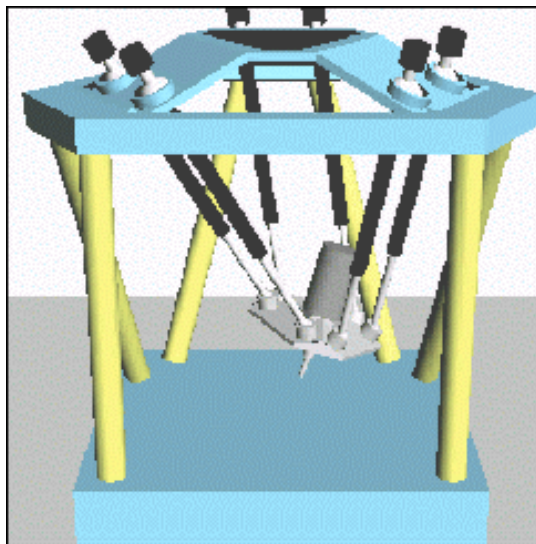
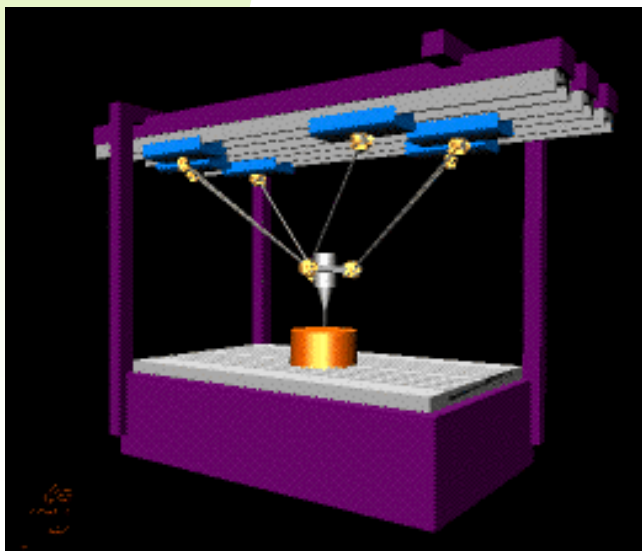




控制系统设计流程

2 方案设计

不同结构运动方式的动画演示



Logo

实现末端位姿控制那种方式更好？

- A 龙门架结构
- B 并联结构
- C 串联结构
- D 不好说



提交



控制系统设计流程

2 方案设计

2.1 机械结构:



每个自由度驱动、测量和控制上是独立的，每个自由度都可由下面的传递函数描述

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



控制系统设计流程

2 方案设计

2.1 机械结构:



间接的位
姿态控制

6个自由度相互耦合，控制复杂

$${}^{i-1}T_i = Rot(X, \alpha_{i-1}) Trans(X, a_{i-1}) Rot(Z, \theta_i) Trans(Z, d_i)$$

$$Rot(x, \theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad Rot(y, \theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$Rot(z, \theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad Trans(x, a) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$Trans(y, a) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & a \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad Trans(z, a) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & a \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



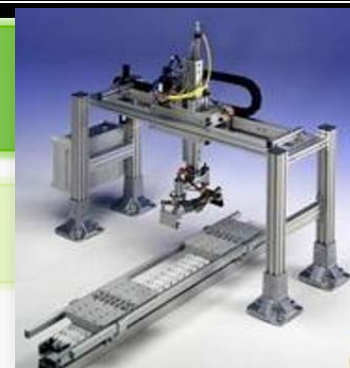


控制系统设计流程

2 方案设计

2.1 机械结构：影响驱动、测量、控制

	龙门架	并联	串联
工作空间	大	小	中
整体规模	大	小	中
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	耦合干扰	惯量变化 偏载





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

Logo

以运动控制系统为例，你能想到改变位移和角度的执行器有哪些？

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

2.2 驱动方式（执行器）

- 电动马达（步进、交流、直流、异步）
- 液压马达（出力大，维护麻烦）
- 气动马达（成本低，出力小）
- 智能材料（压电陶瓷、记忆合金、IPMC）



控制：带宽的限制，调节能力，电气死区，特性变化

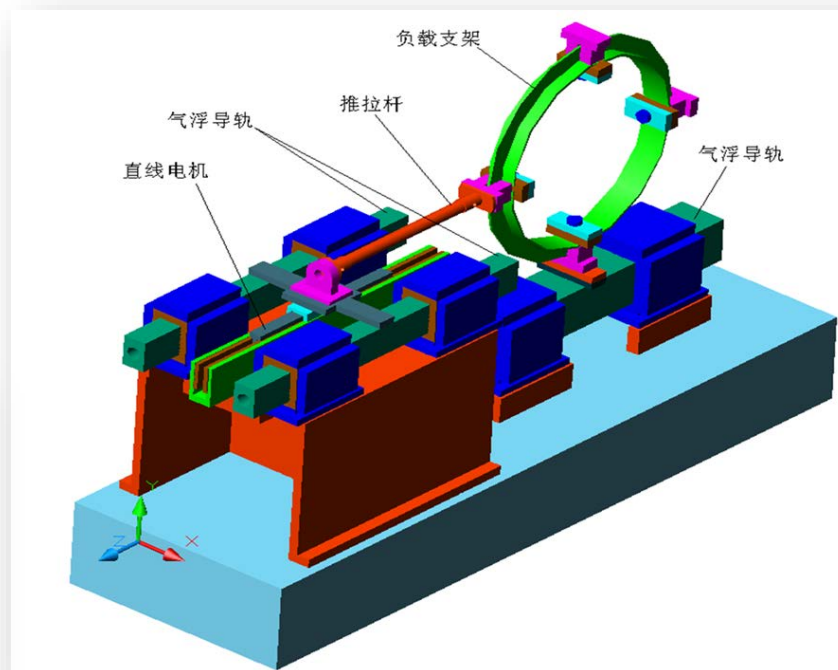
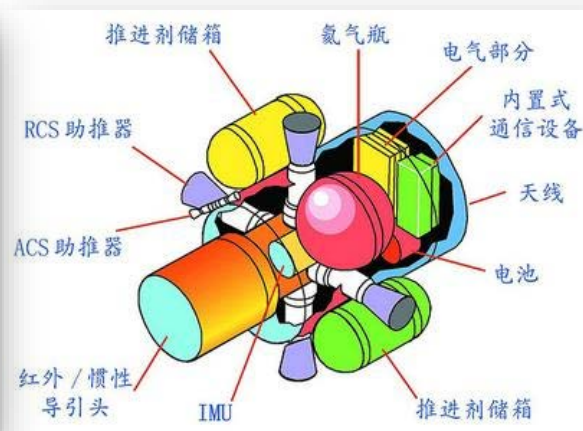


控制系统设计流程

2 方案设计

2.2 驱动方式 例子：直线电机驱动，气浮导轨支撑

负载重量35kg
负载尺寸：400×700mm
最大冲击作用距离：±100mm
最大冲击加速度：3g
冲击力建立时间：6ms



采用直线电机驱动的冲击模拟器

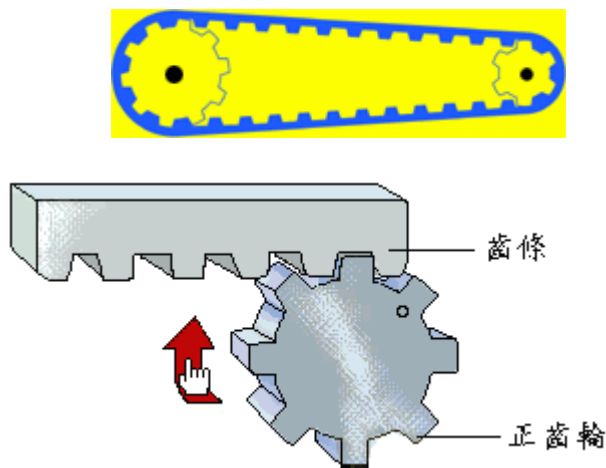
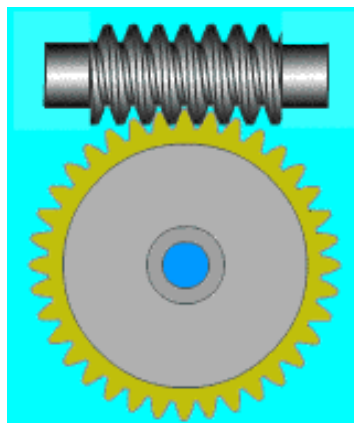
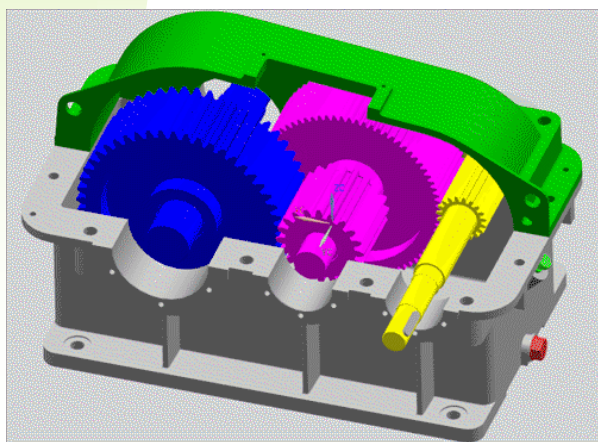
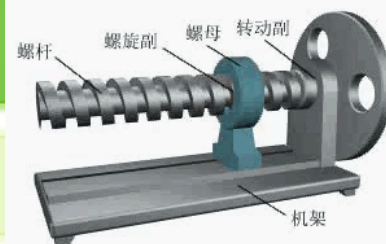


控制系统设计流程

2 方案设计

2.2 驱动方式（传动）

直接和间接传动：齿轮齿条、皮带、滚珠丝杠



考虑因素：间隙、磨损、刚度、热胀冷缩、畸变问题

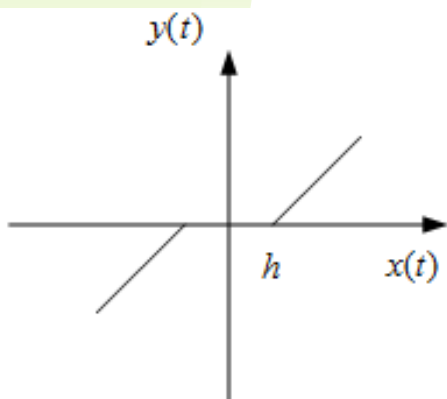


控制系统设计流程

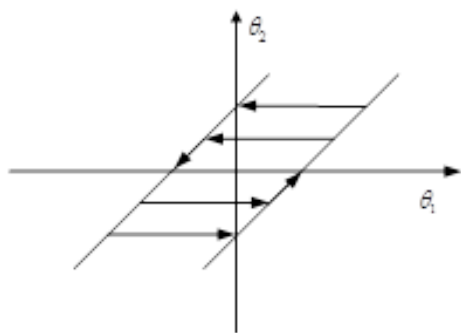
2 方案设计

2.2 驱动方式

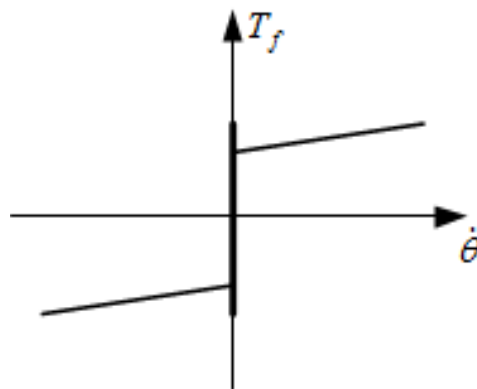
驱动传动系统可能引入的非线性环节



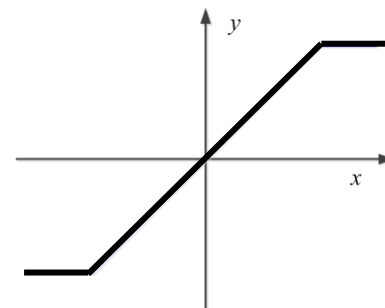
死区特性



间隙特性



摩擦



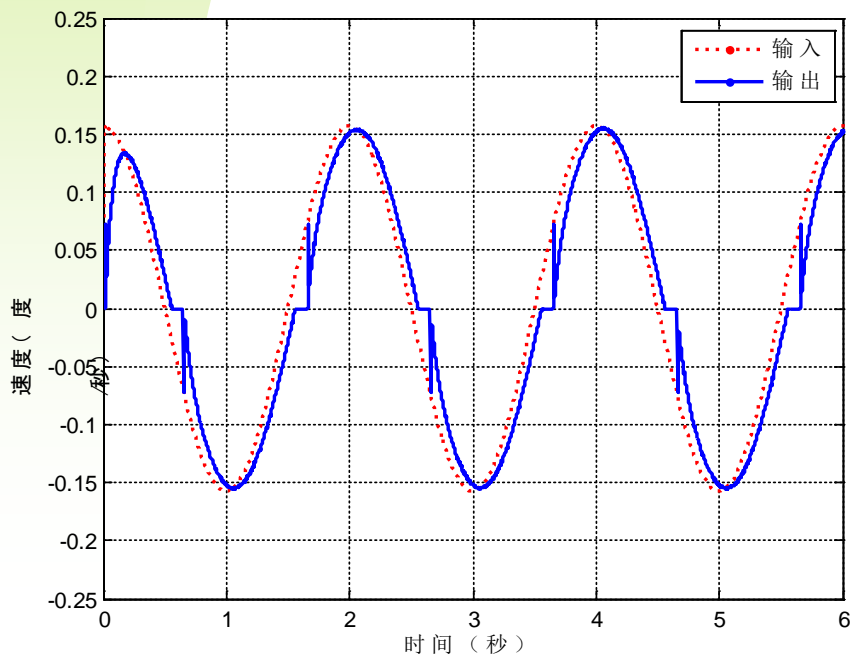
饱和



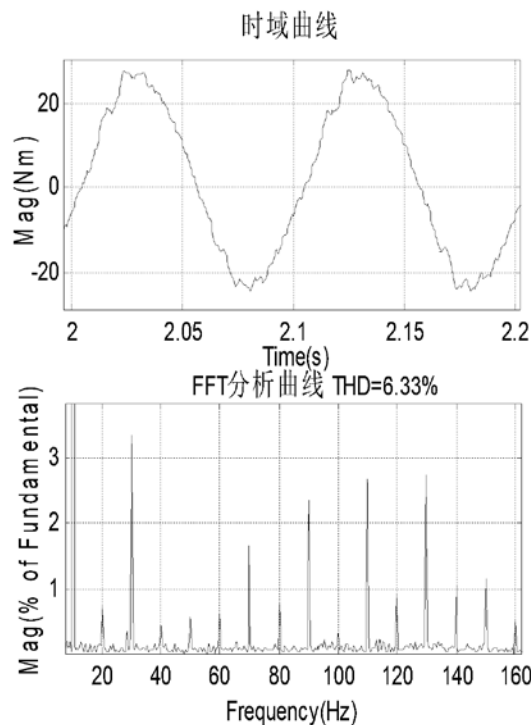
控制系统设计流程

2 方案设计

2.2 驱动方式 (传动)



摩擦引起的速率波动



间隙引起的波形畸变 (失真度)



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

Logo

你能想到的角位置测量传感器有哪些？测量方式又有哪些，测量可能引入什么影响控制性能的问题？

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

2.3 测量方案 位置、速度、加速度、力矩等

- 直接或间接
- 接触非接触
- 传统或视觉
- 直线或旋转
- 在线或离线



考虑因素：量程 精度 分辨率 尺寸 接口 速度 帧率 动态特性 成本

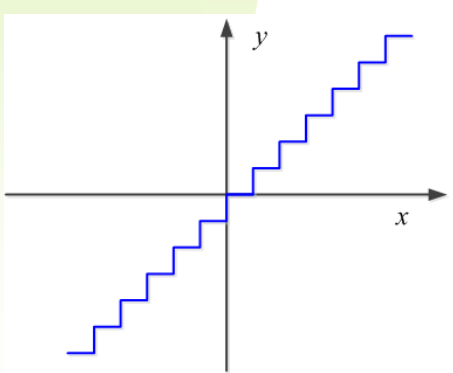


控制系统设计流程

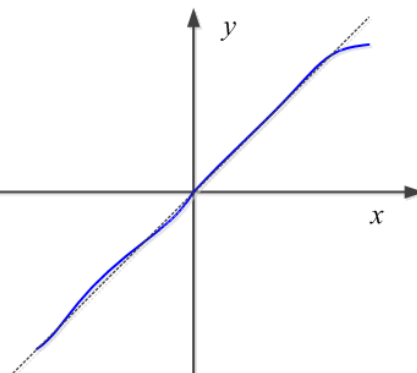
2 方案设计

2.3 测量方案

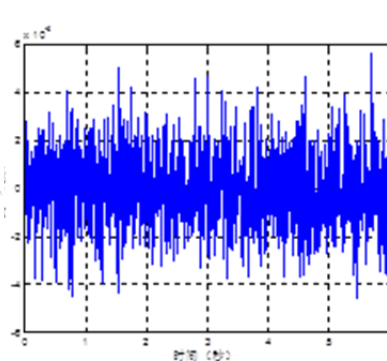
测量（元件）带来的控制问题



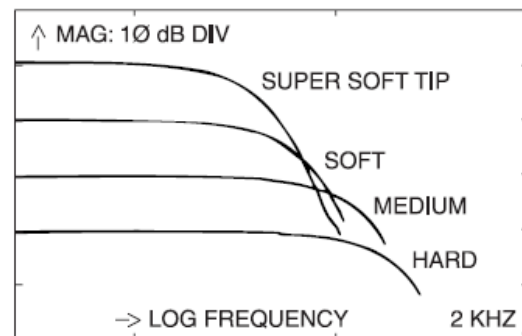
量化噪声



非线性



白噪声



频带

控制：精度（重复性）、噪声（量化，白）、带宽（延迟）

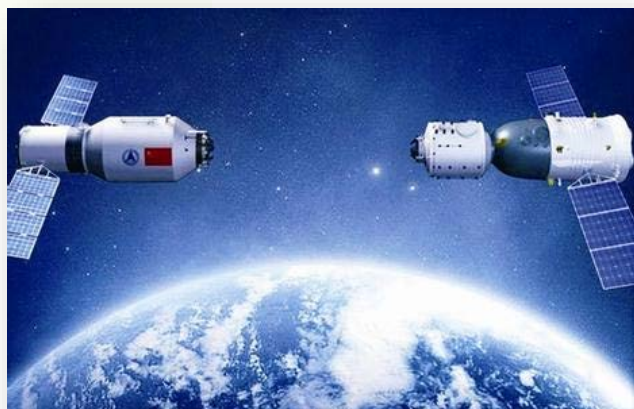
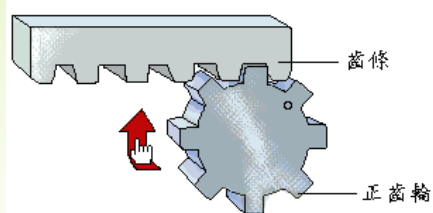


控制系统设计流程

2 方案设计

2.3 测量方案 间接测量（空间交会对接运动模拟器）

通过电机测角元件间接
实现直线位移测量



27 February 2023

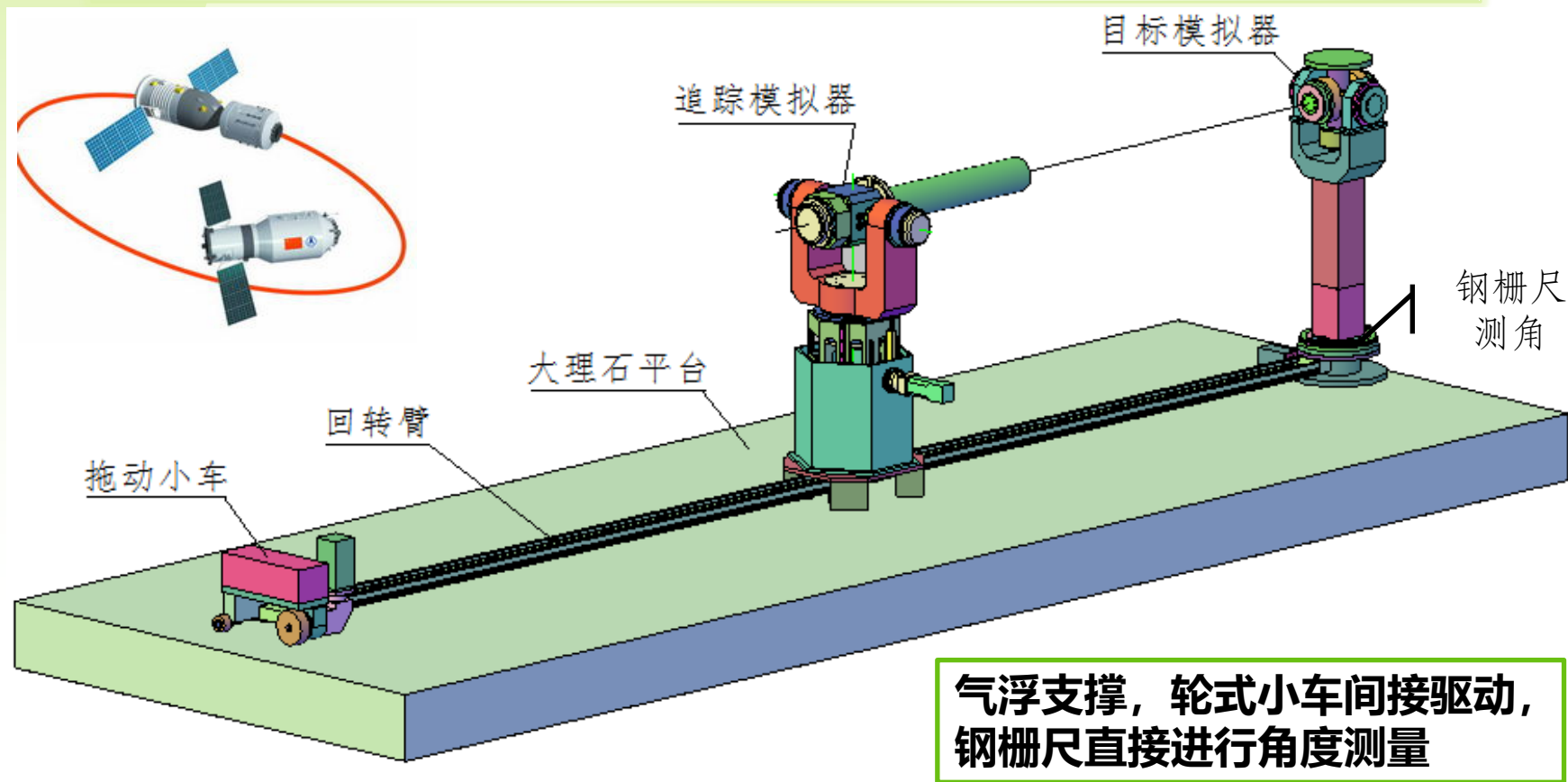
哈尔滨工业大学控制与仿真中心



控制系统设计流程

2 方案设计

2.3 测量方案 直接测角间接驱动（绕飞模拟器）

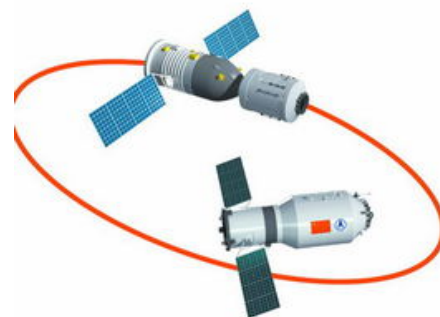




控制系统设计流程

2 方案设计

2.3 测量方案 直接测角间接驱动（绕飞模拟器）



无边的梦想
无止境的追求
无极限的探索



控制系统设计流程

2 方案设计

2.3 测量方案 直接测角间接驱动（绕飞模拟器）

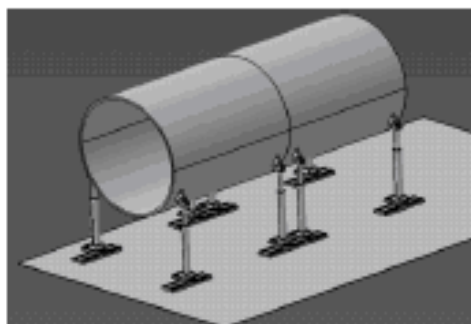
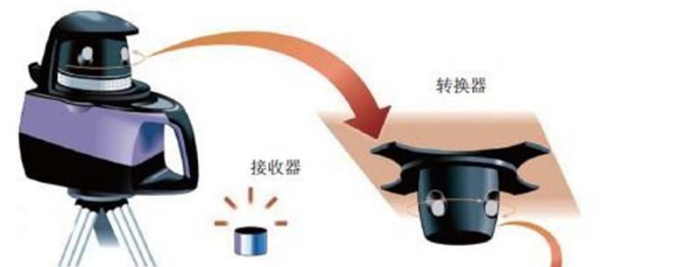




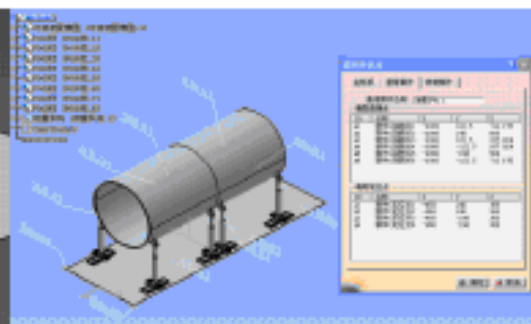
控制系统设计流程

2 方案设计

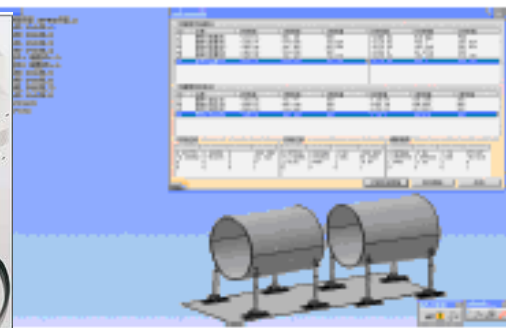
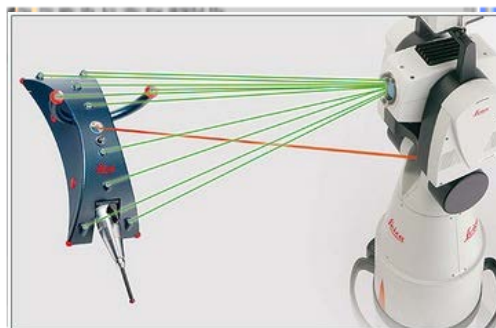
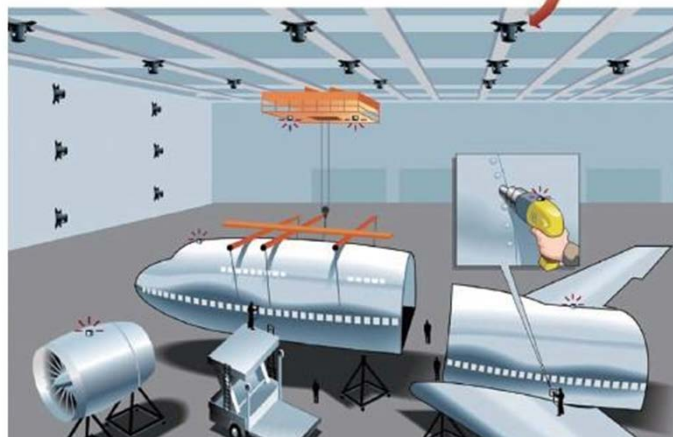
2.3 测量方案 离线测量（飞机舱段对接）



(a) 界面 1



(b) 界面 2



采用动捕系统或激光跟踪仪实现舱段对接面相对位置的精确测量（直接测量），再据此调整位姿（间接调整），并重复多次，保证最后的对接精度。



控制系统设计流程

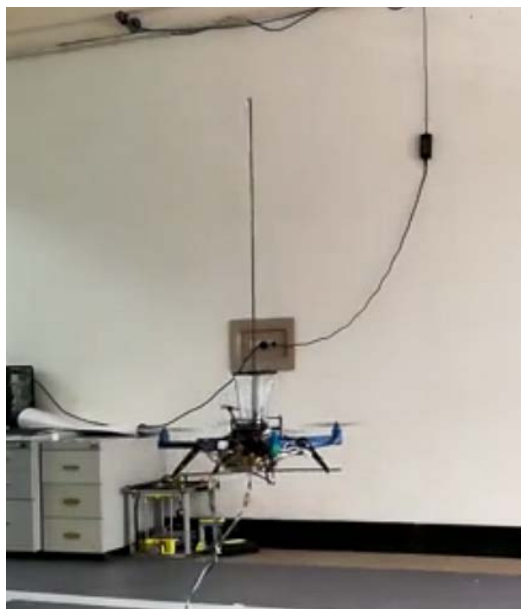
2 方案设计

2.3 测量方案 (无人机倒立摆)



Logo

这个无人机倒立摆是如何测量的？



正常使用主观题需2.0以上版本雨课堂



Thank You !



哈尔滨工业大学控制与仿真中心