



第3章 控制系统的扰动分析和抑制

——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）

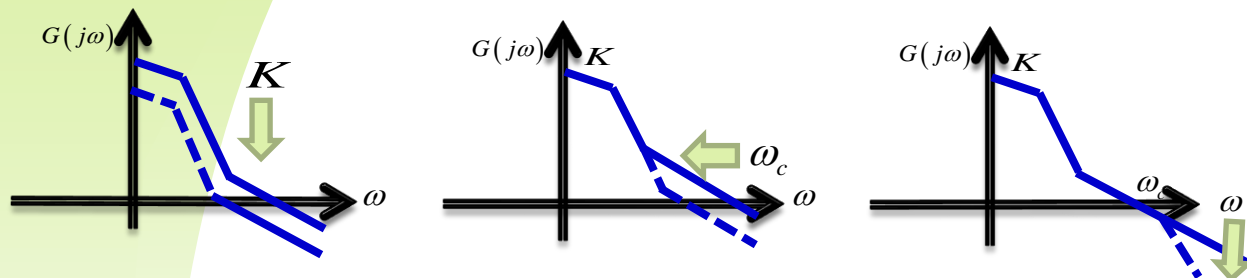
马克茂（控制与仿真中心）

陈松林（控制与仿真中心）



作业篇

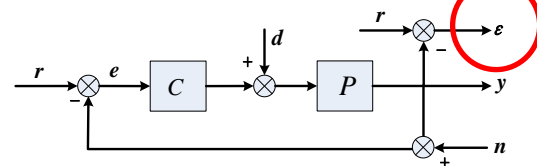
怎么对比噪声抑制效果



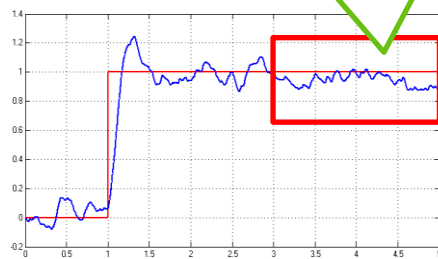
- 对比的是输出、偏差还是误差？
- 对比的是信号还是系统？均方误差和功率传递函数一致？
- 考虑的是闭环还是开环？开环围成的面积减小，闭环不一定？
- 考虑的是整个时间段，还是稳态段，是否减去了均值？
- 用的噪声是不是白噪声，仿真参数是否设置为固定步长？
- 条件要相同：同样的噪声，同样的指令，同样的时间段（都是最后5秒，无振荡）；
- 为方便对比：可以将指令设置为0，只看噪声的作用、直接计算均方误差，这样最方便；

$$G_{en} = \frac{-1}{1+G}$$
$$G_{en} = \frac{G}{1+G}$$

观察误差



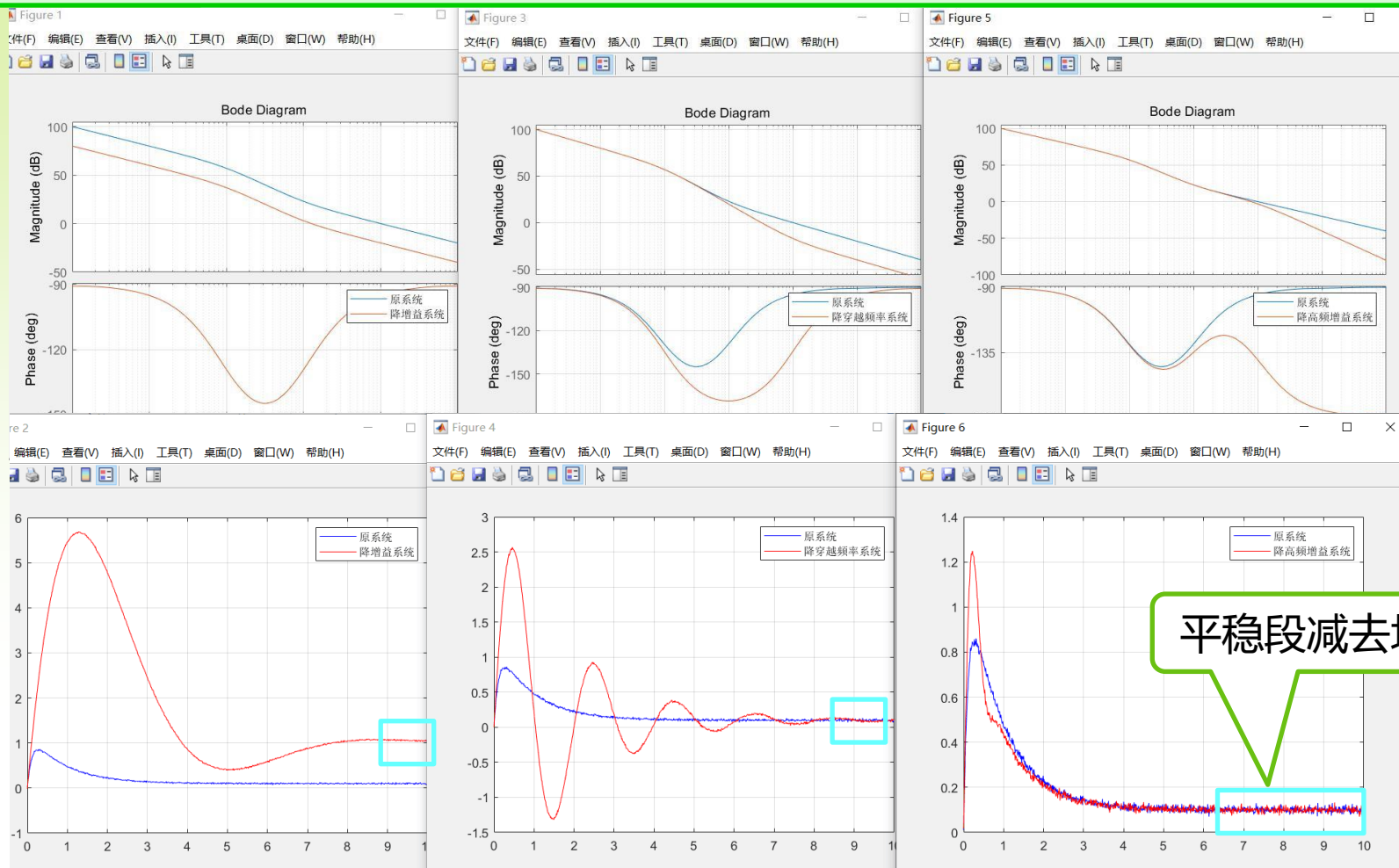
相同时间段





作业篇

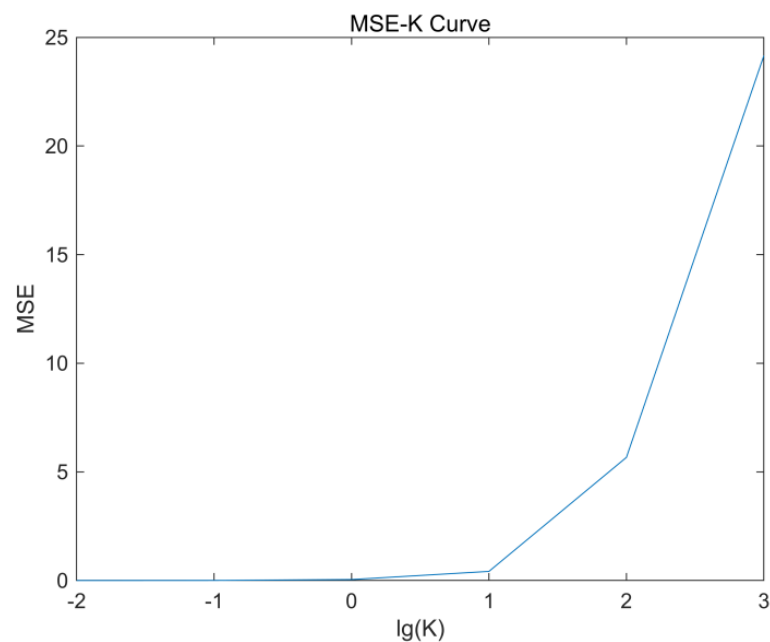
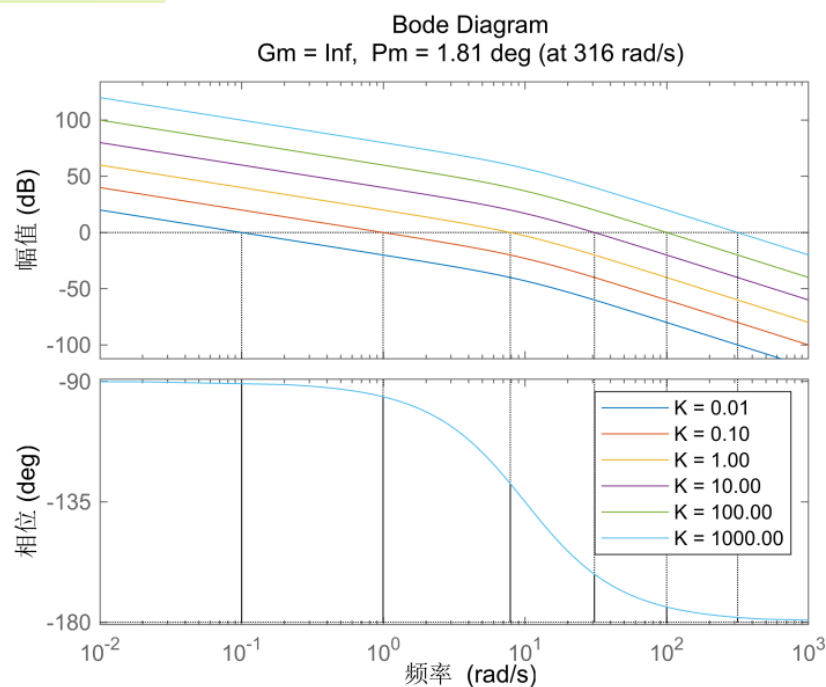
怎么对比噪声抑制效果





作业篇

怎么对比噪声抑制效果



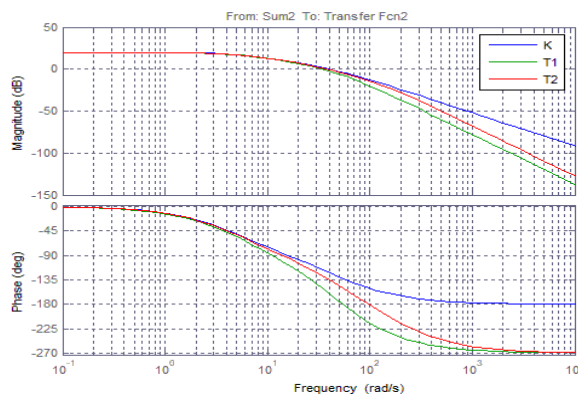


作业篇

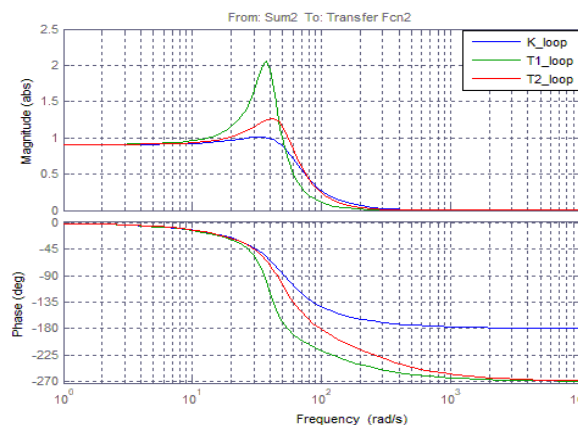
开环与闭环

惯性环节对噪声抑制作用分析

- 对高频噪声的抑制效果明显；
- 可能带来闭环谐振峰频率点和幅值的变化，导致对谐振峰频率处噪声放大，抵消了对高频噪声的抑制作用；
- 应用时，要考虑噪声的频带，同时考虑系统特性。避免惯性环节的副作用；
- 通常做法，先加惯性环节，再设计控制器



$$G_{xn} = PC$$



$$G_{xn} = \frac{PC}{1 + PC}$$



➤ 开环特性与闭环特性的关系？

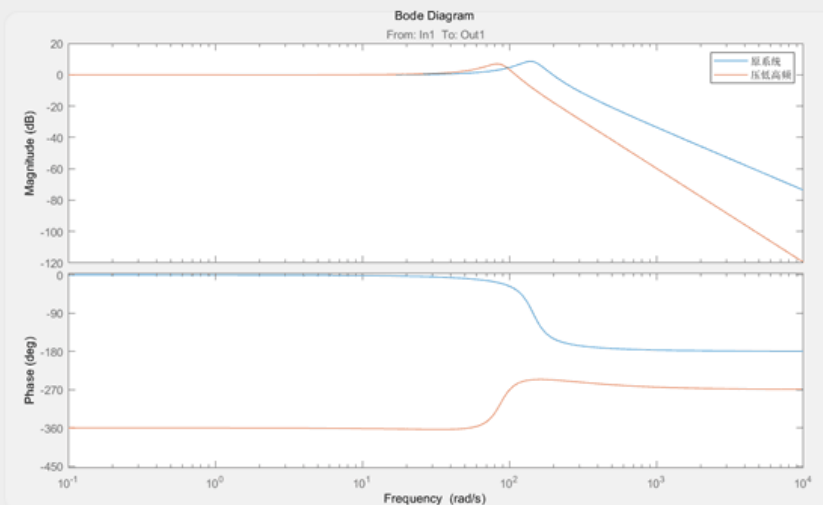
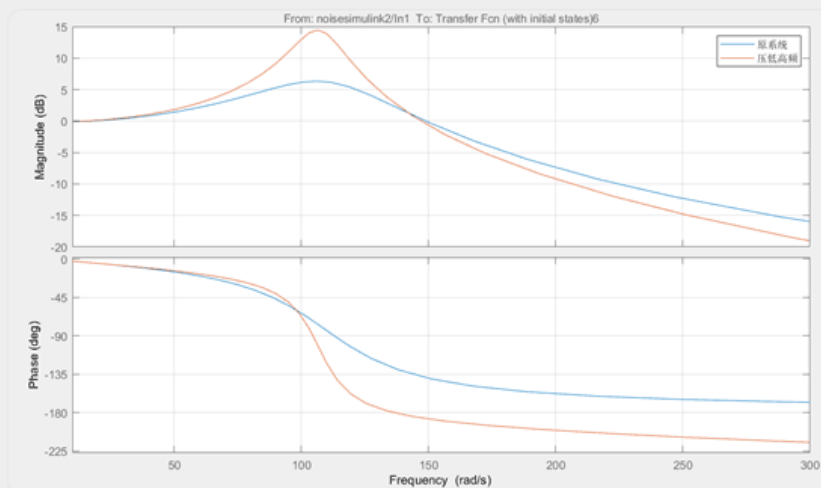


作业篇

执着

21年一个同学对这个问题的深入剖析

- 1.对于对于传递函数的分母与分子的阶次之差小于等于1的系统：高频惯性环节的效果很明显，这样的系统Bode图的形式上更接近一阶系统，加入高频惯性环节后对于谐振峰的影响很小，而高频的抑制作用相对明显得多。另外一方面，由于惯性环节在该系统的高频部分，并不会引起相位裕度的大幅度变化，因此由此引起系统的噪声变化较小。
- 2.对于传递函数的分母与分子的阶次之差大于1的系统，会出现两种情况：谐振峰增大以及虽然谐振峰减小了，但是同时谐振峰向低频偏移，相角裕度减小比较多。这两种情况最后都会导致系统的均方误差偏大。



所以我觉得这个方法可能和系统传递函数有点关系，阶次之差小于等于1可能就好使

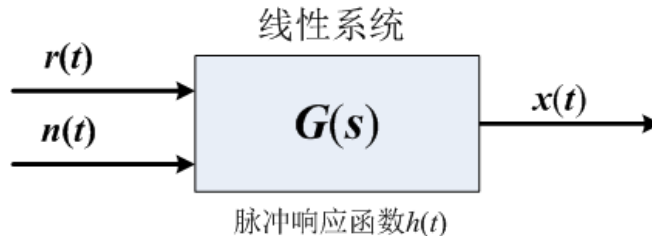


回顾篇

均方误差和等效噪声带宽

➤ 均方误差定义

$$\overline{\varepsilon^2} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T \varepsilon^2(t) dt = \mathbf{R}_{\varepsilon}(\mathbf{0}) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{\Phi}_{\varepsilon}(\omega) d\omega$$



➤ 功率传递函数定义 (线性系统, 输入不相关)

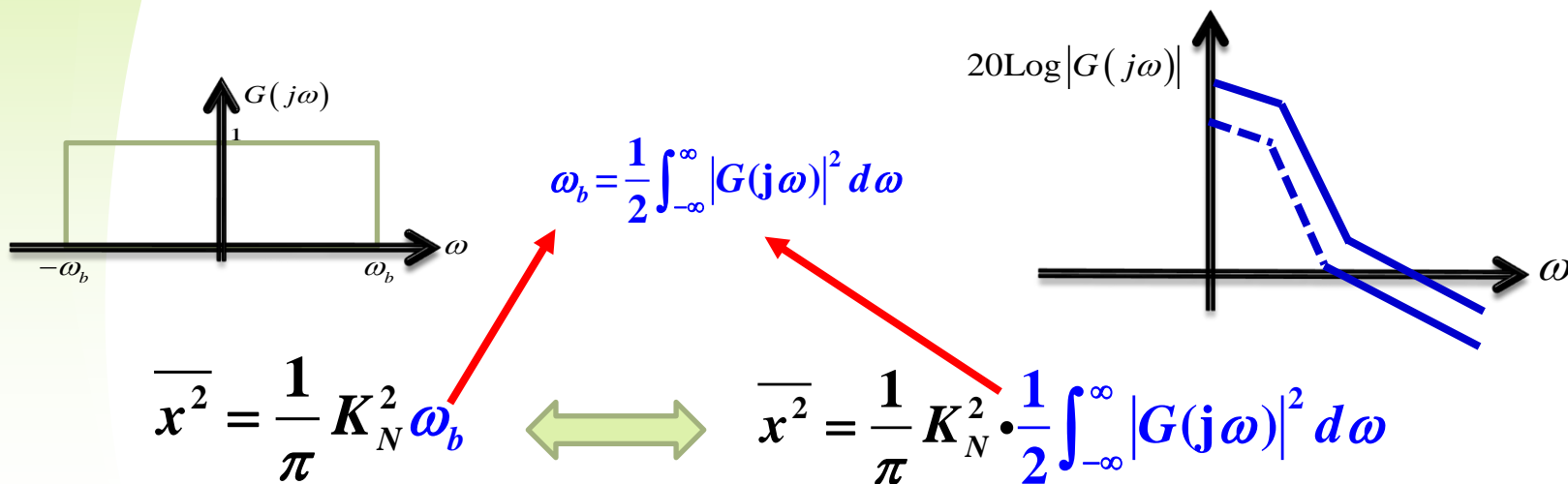
$$\Phi_x(\omega) = |G_{xr}(j\omega)|^2 \cdot \mathbf{\Phi}_r(\omega) + |G_{xn}(j\omega)|^2 \cdot \mathbf{\Phi}_n(\omega)$$



回顾篇

均方误差和等效噪声带宽

- 利用白噪声作用下均方误差相等的条件来计算给定系统的等效噪声带宽



注意： 性能指标的两种提法，针对信号提要明确给定信号并由计算结果，针对系统提的指标则不需要指定信号形式

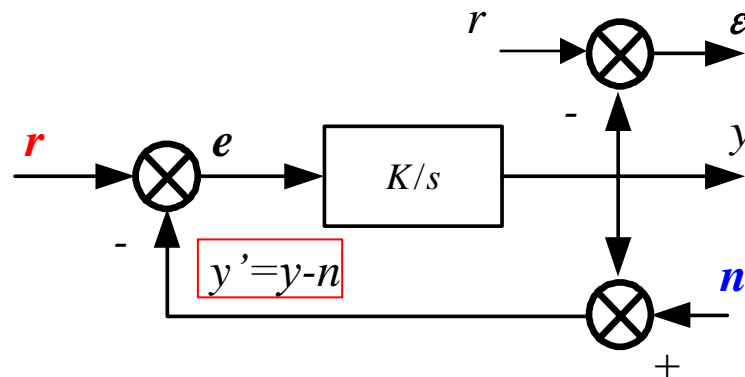
(你得多做好事，你要做一个好人)



回顾篇

测量噪声带来设计约束

均方误差与均方偏差



$$\varepsilon = r - y = r - \frac{G}{1+G} \cdot r + \frac{G}{1+G} \cdot n = \frac{1}{1+G} \cdot r + \frac{G}{1+G} \cdot n$$

$$\sigma_{\varepsilon}^2 = \frac{2}{2+K} + \frac{K}{4+K}$$

不能完全跟踪指令
所产生的误差分量

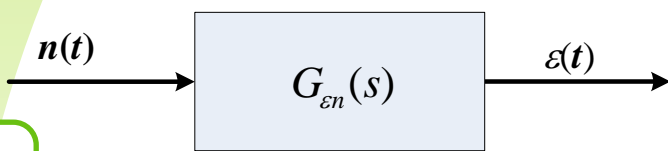
噪声在系统输出端
所产生的误差分量

系统增益越高、带宽越宽对指令的跟踪就越好，但是噪声带来均方误差也会增加，控制设计时必须折中考虑。



回顾篇

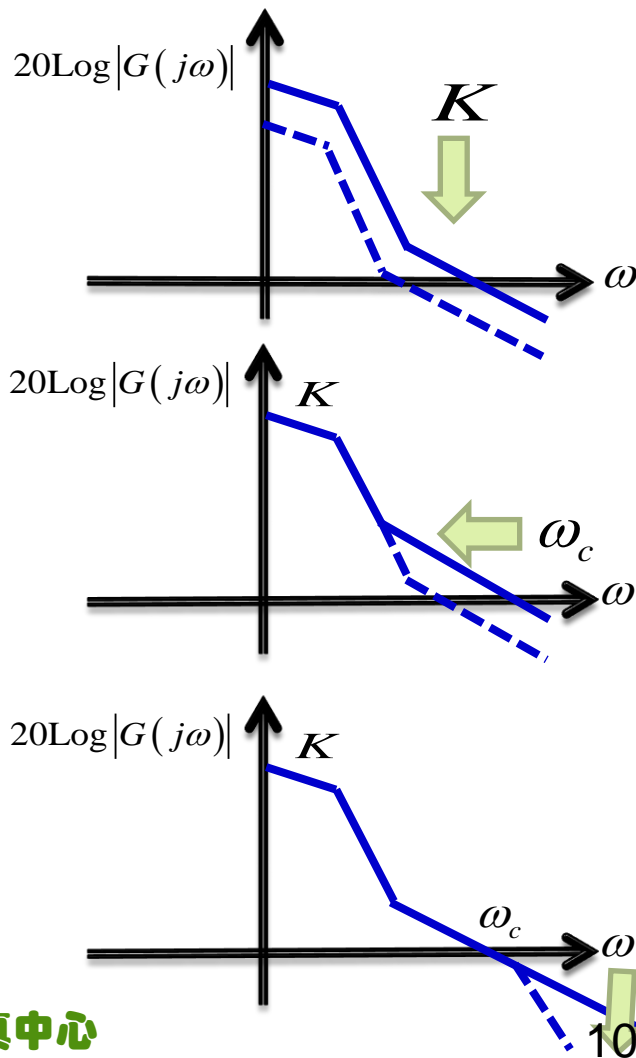
抑制噪声的方法（事后，被动，软的）



减小等效
噪声带宽

$$\Phi_e(\omega) = |G_{en}(j\omega)|^2 \Phi_n(\omega)$$

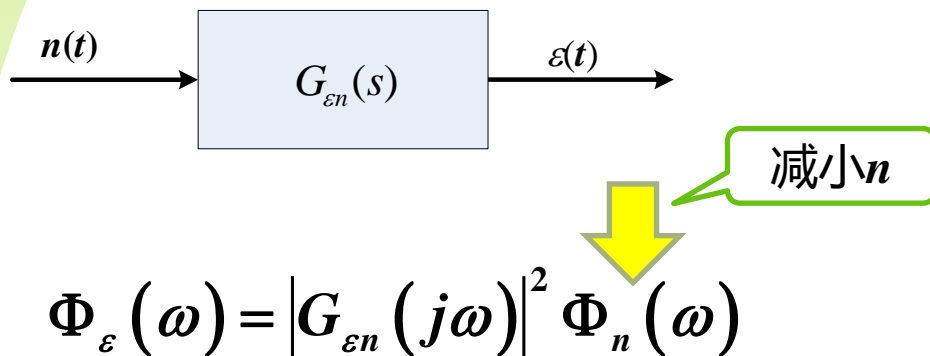
- 1 降低系统的增益
- 2 降低系统的穿越频率
- 3 降低系统的高频增益（惯性环节）



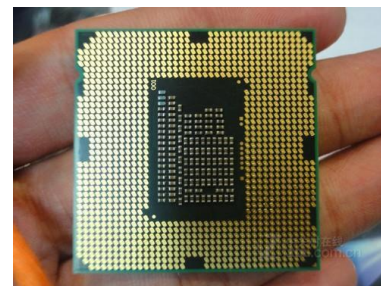
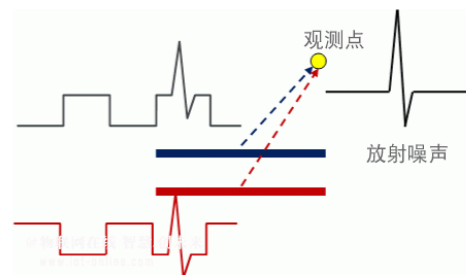
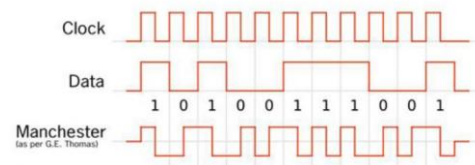


回顾篇

抑制噪声的方法（事前，主动，硬的）



- 信号采集过程中引入噪声
- 信号传输过程引入的噪声
- 信号处理过程引入的噪声

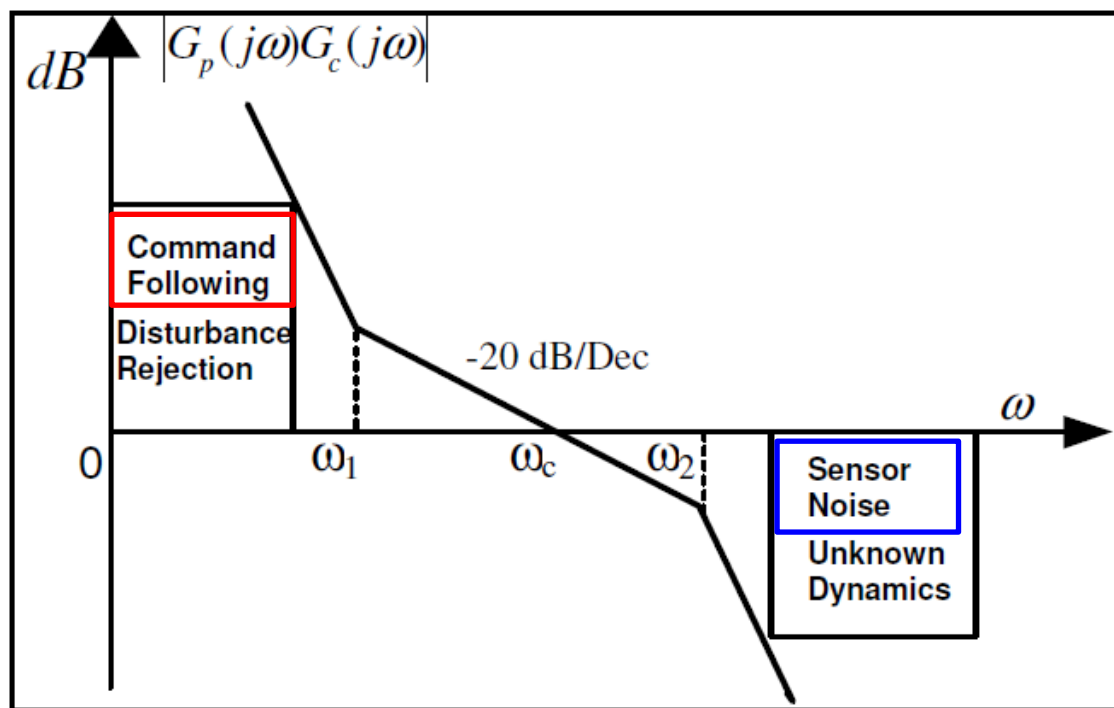


解决噪声问题重点还是在方案设计阶段，要努力成为4-级工程师，做好顶层规划和设计



课程的主要结论***（思想原则）

指令跟踪和噪声抑制对设计提出的要求



- **指令跟踪**对系统低频的斜率和增益提出了要求；
- **噪声抑制**对系统的带宽和高频增益提出了要求；



提升篇

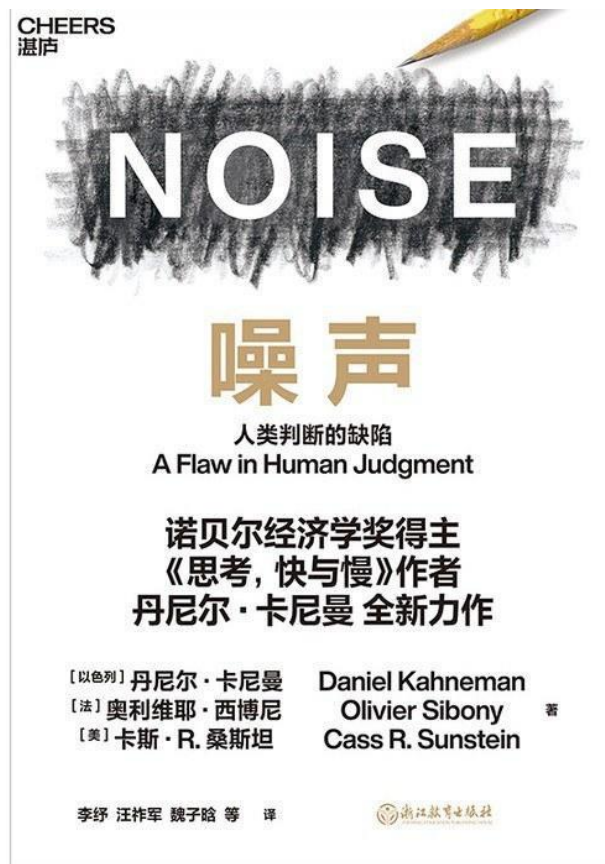
关于噪声抑制需要说明

- 噪声抑制的指标通常都是隐含的，很少在任务书中直接给出，但我们不能因此忽略噪声抑制问题；
- 有些系统不必过多关注噪声的影响；
- 噪声还有很多其他的危害；
- 噪声的大小与工作环境是密切相关的；
- 噪声的作用点不同，噪声的抑制方法不同（控制上）。



我们判断和决策时面对的噪声

- 我们每个人在做出判断和决策时都会受到噪声的影响；
- 法官判案、医生诊断、领导决策、教师评分、学生择业等；
- 决策噪声包括水平噪声和模式噪声（情景噪声）；
- 水平噪声：决策者文化、信仰、学识、偏好、性格和经历等固有因素；
- 模式噪声：你的心情、身体状态、压力水平、天气等偶然因素；





Contents

A1

输入信号和跟踪误差

A2

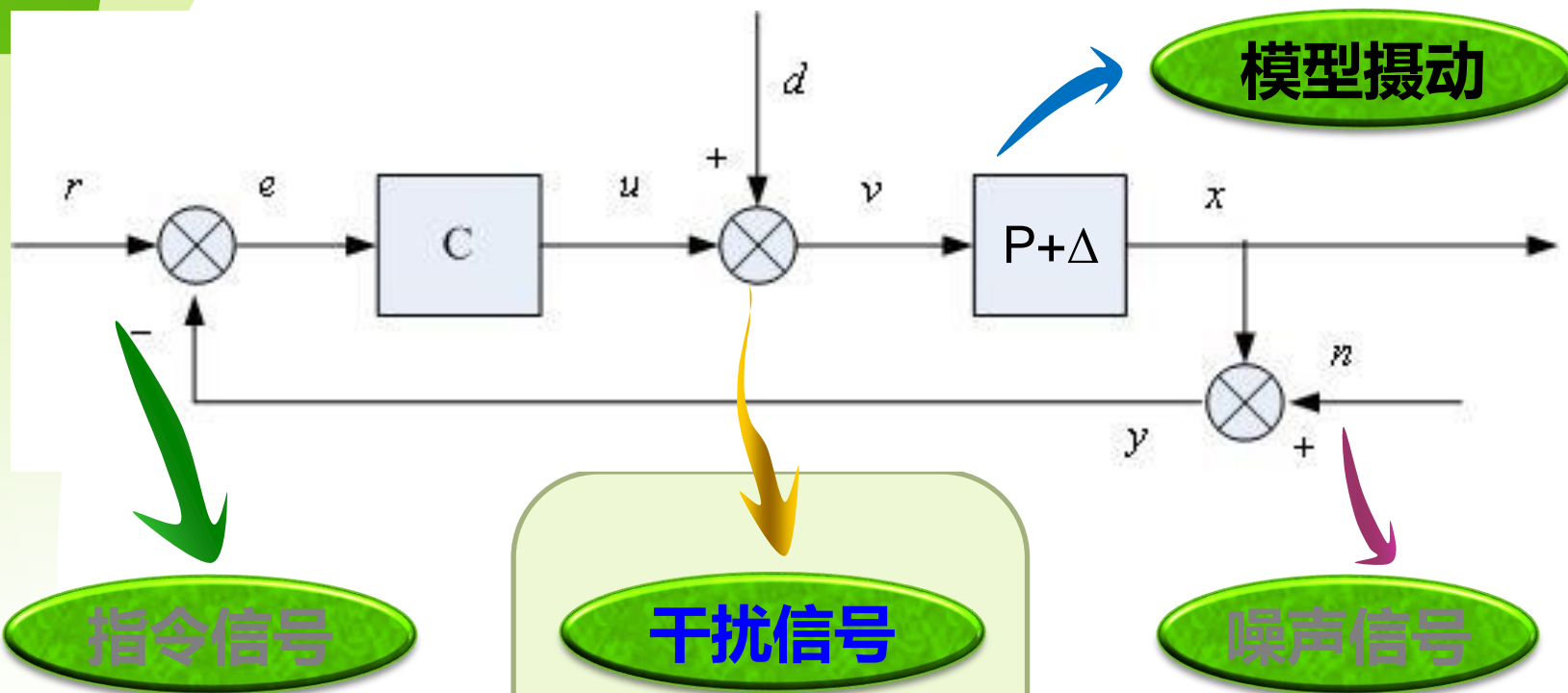
噪声和它引起的误差

A3

扰动响应与抑制



开新篇



$$G_{xr} = \frac{PC}{1 + PC}$$

$$G_{xd} = \frac{P}{1 + PC}$$

$$G_{xn} = \frac{-PC}{1 + PC}$$



3.3 扰动分析

3.3.1 扰动分析

3.3.2 扰动响应与误差分析

3.3.3 特殊扰动的抑制

3.3.4 扰动观测器



学习目标

本节课需要掌握的内容

- 掌握扰动分析的目的和内容；
- 掌握扰动与噪声的联系与区别；
- 学会分析给定系统的扰动；



3.3.1 扰动分析

扰动与噪声的区别 | 扰动分析目的与内容 | 举例

◆ 扰动(disturbance)

$$G_{xd} = \frac{P}{1 + PC}$$

除给定值之外，凡能引起被控量变化的因素，都是干扰。干扰有时也称为扰动。干扰是一种对系统的输出产生不利影响的信号。如果扰动产生在系统内部称为内扰；扰动产生在系统外部，则称为外扰。外扰是系统的输入量。

按这个定义，噪声和模型摄动都可以看做是干扰。为了对不同性质的干扰进行更好地分析和抑制，我们将噪声和模型摄动从干扰中分离出来，除了二者之外的干扰，我们将其称为扰动。干扰=噪声+扰动+模型摄动；

扰动和噪声的区别？



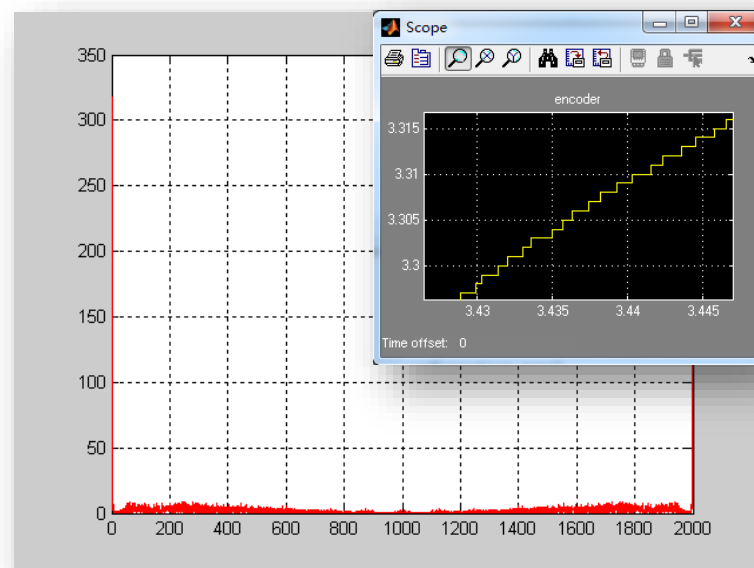
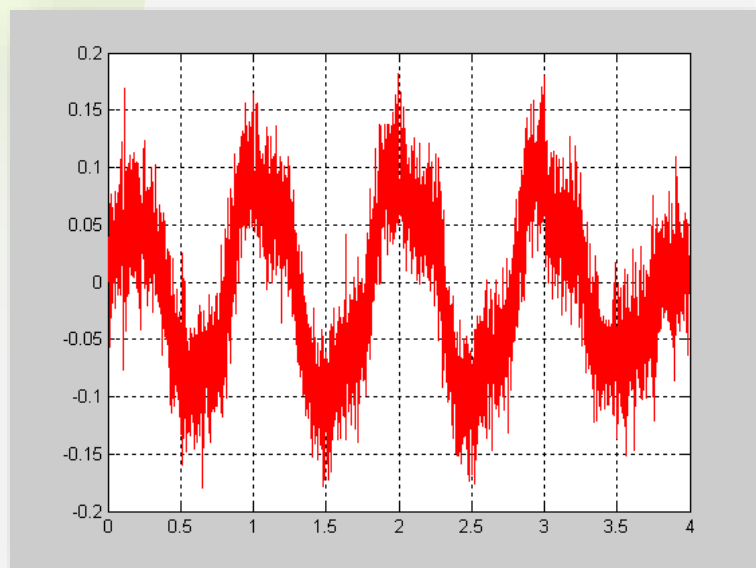
3.3.1 扰动分析

扰动与噪声的区别 | 扰动分析目的与内容 | 举例

➤ 噪声(noise)

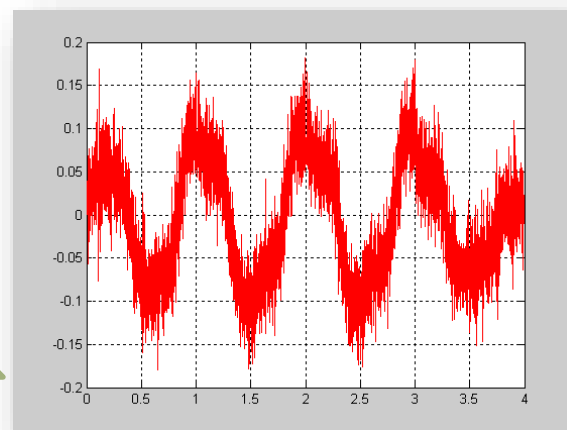
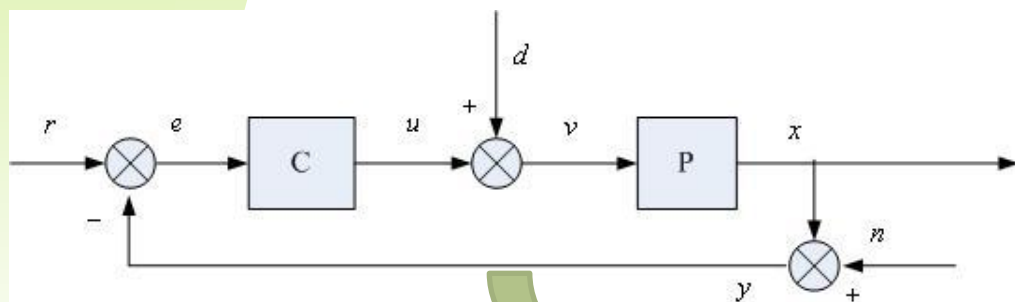
$$G_{xn} = \frac{-PC}{1 + PC}$$

混在有用信号上的外加信号叫做**噪声**，一般由测量引入且**难以分离**。（信号采集，传输和处理也会引入，难以分离）



Logo

扰动与噪声的区别 | 扰动分析目的与内容 | 举例



传感器输出的电信号与真实的物理量都差了什么？

正常使用主观题需2.0以上版本雨课堂

作答

Logo

扰动与噪声的区别 | 扰动分析目的与内容 | 举例

关于扰动与噪声的区别

A

作用点不同

B

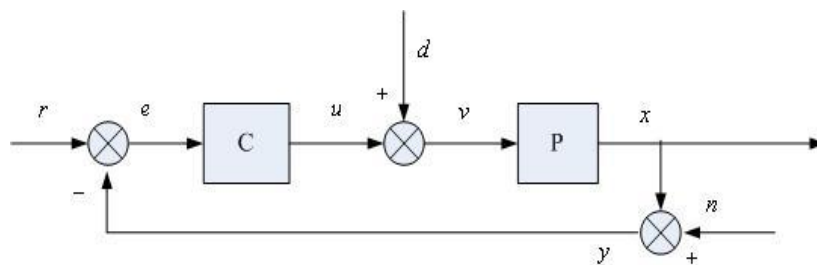
作用机理不同

C

特性不同

D

抑制方法不同



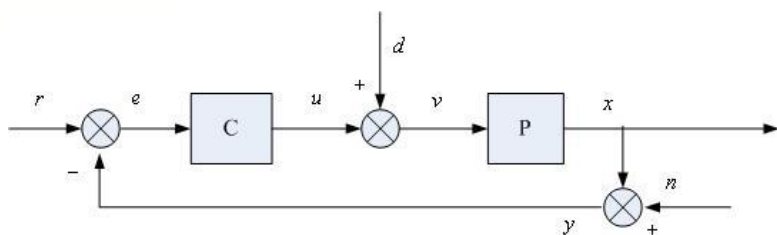
提交



3.3.1 扰动分析

扰动与噪声的区别 | 扰动分析目的与内容 | 举例

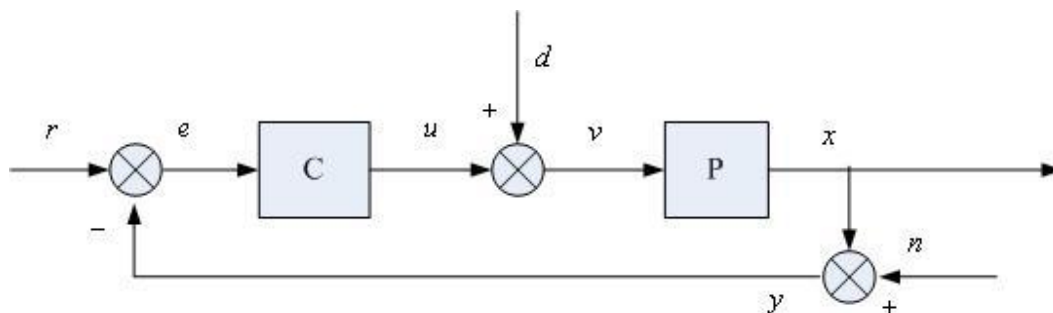
- **作用点不同**，扰动一般作用与系统的输入侧和输出侧，而噪声更多是在信号采集、传输和处理等环节中引入；
- **作用机理不同**，扰动一般直接作用于被控对象，使被控量发生改变，而噪声一般通过混入有用信号中间接地影响被控量；
- **特性不同**，扰动信号多数是可以测量或估计的，频带较窄，而噪声一般为随机信号，频谱范围很宽；
- **抑制方法不同**，控制上，噪声一般只能通过降低系统等效噪声带宽来抑制，但会影响系统的跟踪性能，而扰动的抑制方法则很多；



$$G_{xd} = \frac{P}{1 + PC}$$

$$G_{xn} = \frac{-PC}{1 + PC}$$

扰动与噪声的区别 | 扰动分析目的与内容 | 举例



扰动与噪声的异同？

扰动与模型摄动的异同？

噪声与模型摄动的异同？

正常使用主观题需2.0以上版本雨课堂

作答

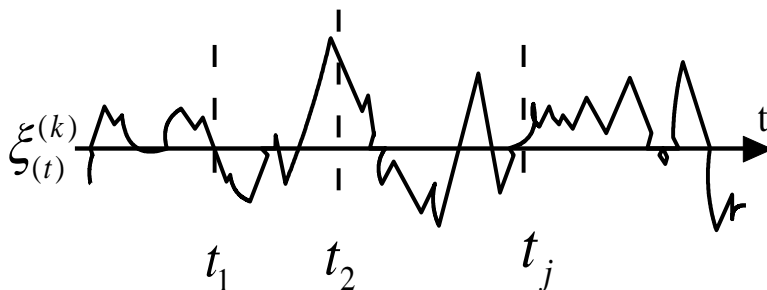


3.3.1 扰动分析

扰动与噪声的区别 | **扰动分析目的与内容** | 举例

扰动分析的目的

- 指导元部件选型—执行器，传感器
- 根据扰动的特点—确定抑制扰动的控制方法



扰动形式多样，因此扰动的分析比指令的分析更复杂

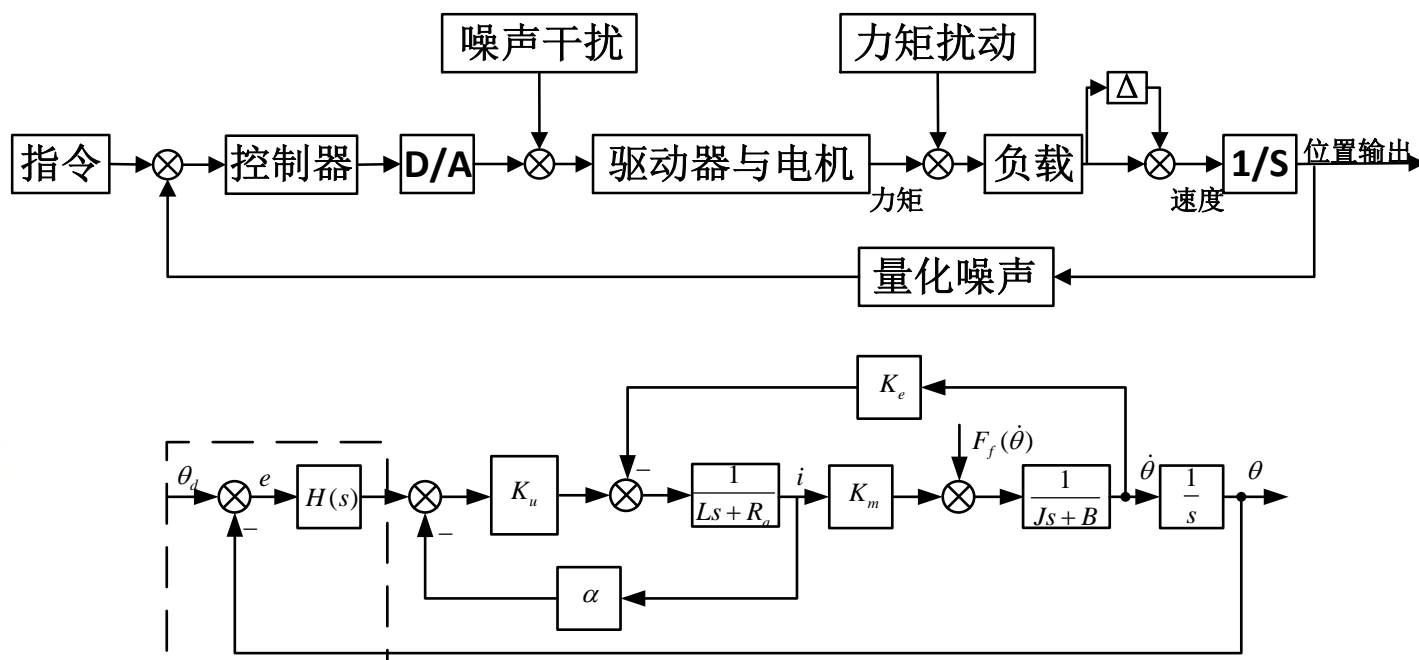


3.3.1 扰动分析

扰动与噪声的区别 | 扰动分析目的与内容 | 举例

扰动分析的主要内容

- 扰动作用机理（作用点，扰动建模，传递函数）
- 扰动的定性分析（随机性，规律性）
- 扰动的定量分析（如幅值、导数、频谱）





3.3.1 扰动分析

扰动与噪声的区别 | 扰动分析目的与内容 | 举例



部件选择

- 驱动电机的额定速度和**力矩**;
- 传感器的量程及其它参数。

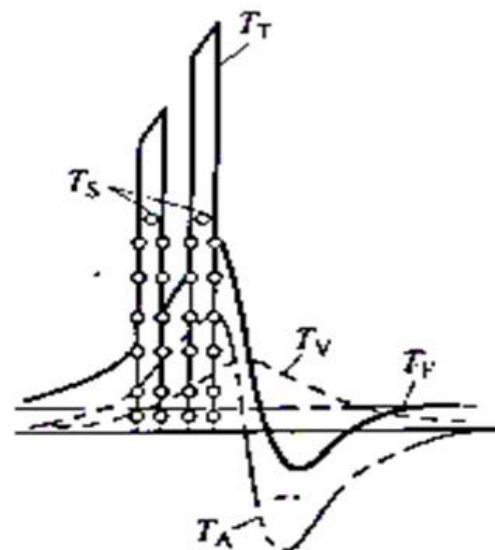


图 3-5 跟踪过程的力矩分量

T_A —加速度力矩; T_V —速度力矩; T_F —摩擦力矩;
 T_S —冲击力矩; T_T —总负载力矩

加速度力矩、速度力矩、摩擦力矩、冲击力矩、偏载力矩

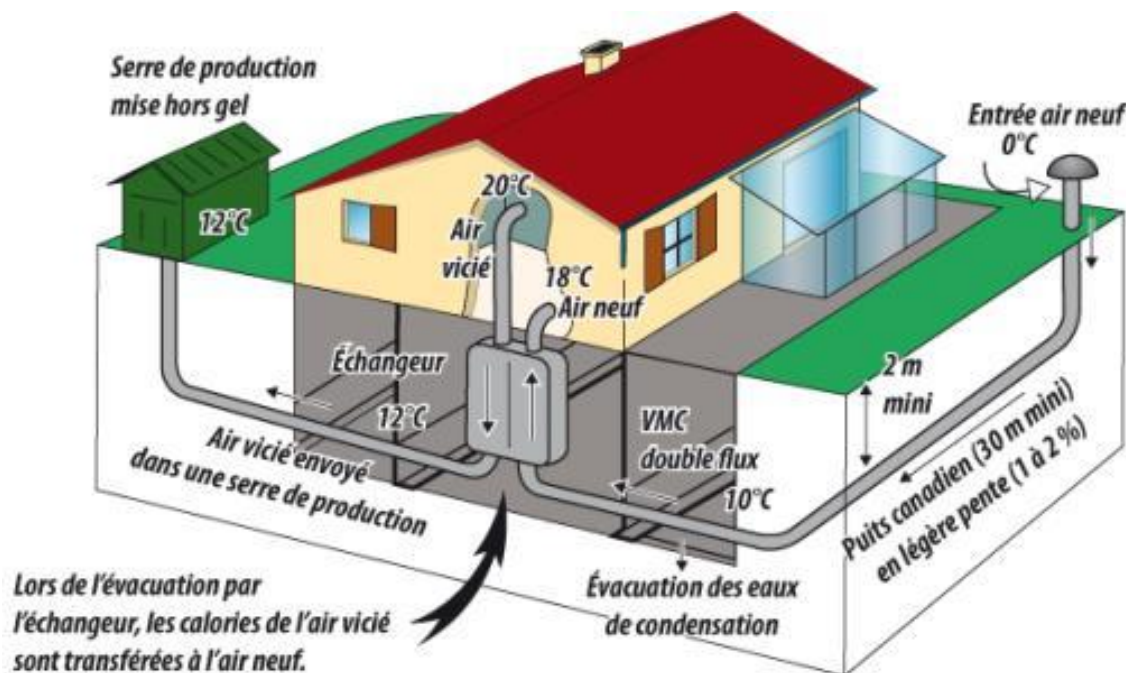


3.3.1 扰动分析

扰动与噪声的区别 | 扰动分析目的与内容 | 举例

温控系统

- 室外的温度变化
- 光线的强弱
- 室内外湿度的变化
- 门窗的开启
- 室内电器的使用
- 人员的进出
- 气源或电源



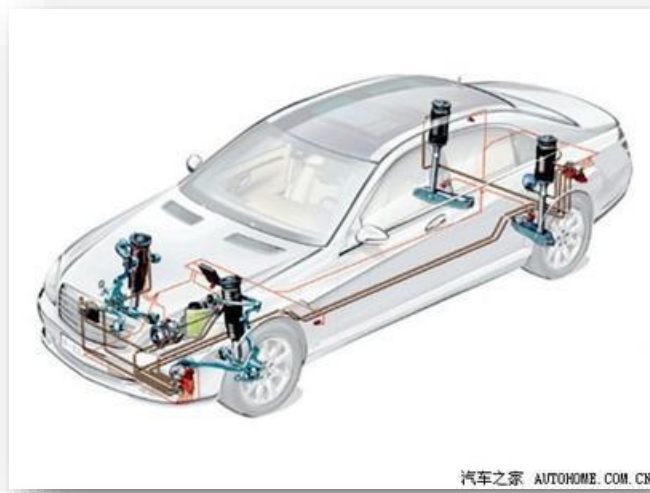
干扰有随机性，作用方式比较复杂，但有些因素可测或可估计



3.3.1 扰动分析

扰动与噪声的区别 | 扰动分析目的与内容 | 举例

汽车的定速巡航



- 乘客、货物、油料重量变化
- 风、雨、雪产生的阻力
- 路面变化导致摩擦力的变化

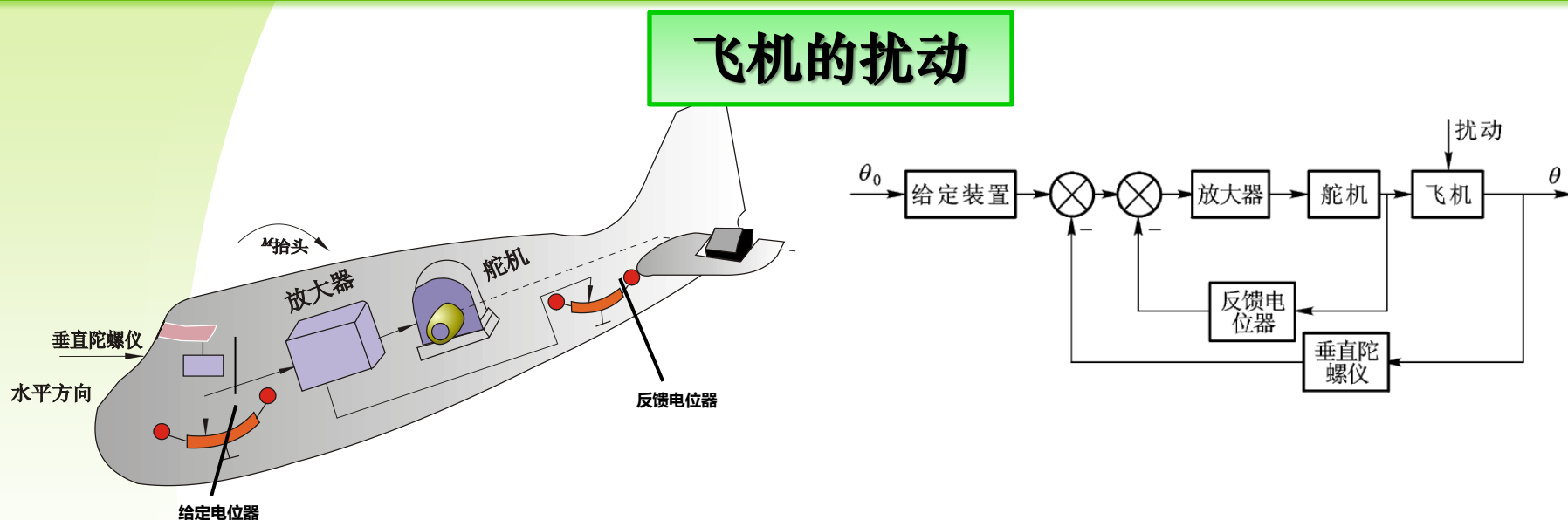
- 上坡下坡
- 车窗的状态
- 转向状态，胎压，胎温

干扰有随机性，作用方式比较复杂，但有些因素可测或可估计



3.3.1 扰动分析

扰动与噪声的区别 | 扰动分析目的与内容 | 举例



- 风，云、雾、雨等扰动；
- 大气密度变化；
- 燃料消耗带来的飞机重量变化；

- 飞行高度引起的重力变化；
- 乘客的位置的变化；

部分干扰有随机性，部分干扰可测或可估计



3.3.1 扰动分析

扰动与噪声的区别 | 扰动分析目的与内容 | 举例

导弹舵片控制

- 飞行速度
- 飞行器姿态
- 大气密度
- 舵片面积
- 舵片角度



有随机性，但很多都可测或可估计，或者与状态有函数关系



3.3.1 扰动分析

扰动与噪声的区别 | 扰动分析目的与内容 | **举例**

滚梯控制系统

- 随机性负载的力矩扰动；
- 乘客即改变了惯量，又改变了负载力矩；
- 摩擦力矩的扰动；



扰动的随机性比较强，但是可测



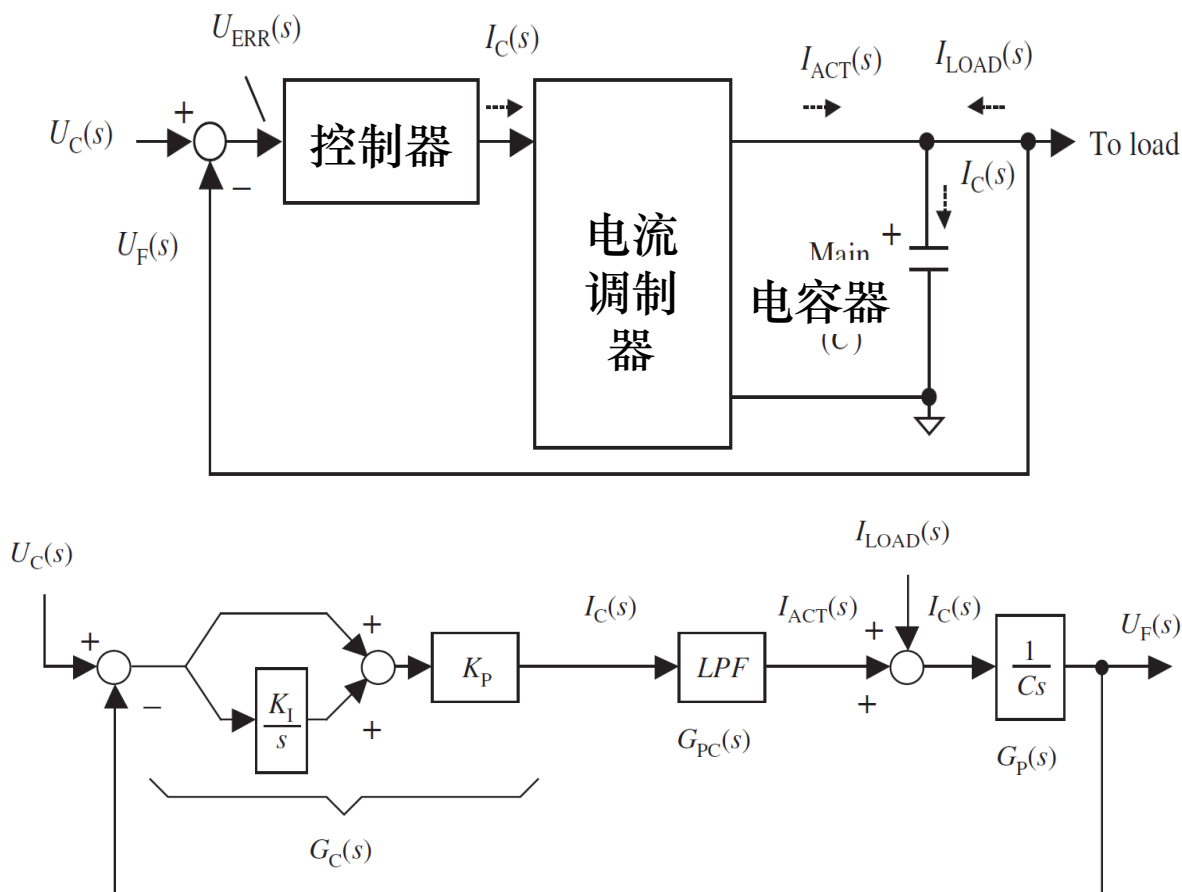
3.3.1 扰动分析

扰动与噪声的区别 | 扰动分析目的与内容 | 举例

恒压电源

➤ 用电设备的开关，启停和动作导致负载电流变化；

扰动很容易测量





3.3.1 扰动分析

扰动与噪声的区别 | 扰动分析目的与内容 | **举例**

机械臂

- 负载重量会引起各关节转动惯量和偏载力矩发生变化；
- 各关节的转动惯量和偏载力矩还会受到其他关节角度的影响；



扰动与状态有函数关系，惯量变化可测或可估计



3.3.1 扰动分析

扰动与噪声的区别 | 扰动分析目的与内容 | **举例**



经济

➤ 政治、金融、战争、自然灾害、科技、文化



生物和医疗

➤ 摄入的食物，情绪的变化，身体状态变化，外界环境

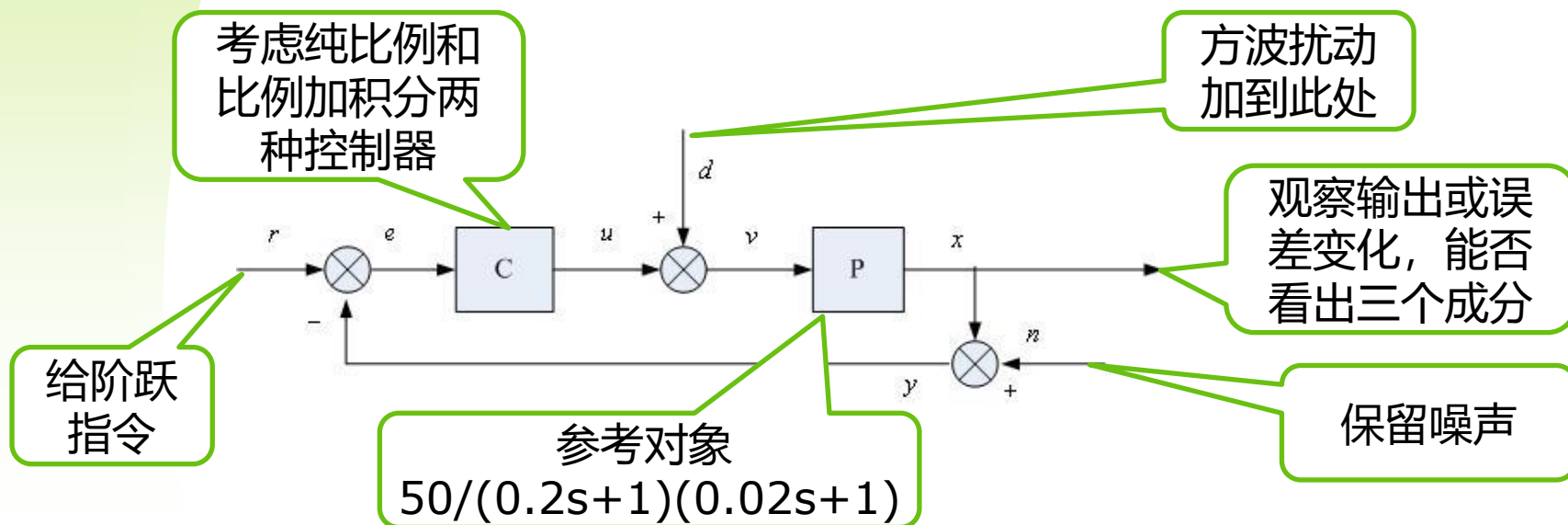
扰动具有随机性，有些可预测，有些事后可测



第11讲 课后作业

1 必选作业

1 仿真题：在已搭建好的闭环仿真系统中，在控制量 u 处加入周期为2s，幅值为2的方波扰动，观察系统的输出，了解扰动对系统的影响；



2 思考题：请举出一个身边的控制系统的例子（课程内容之外的），分析其中存在的扰动，判断扰动的性质，并试着给出抑制扰动的方法；



Thank You !