



第3章 控制系统的扰动分析(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）

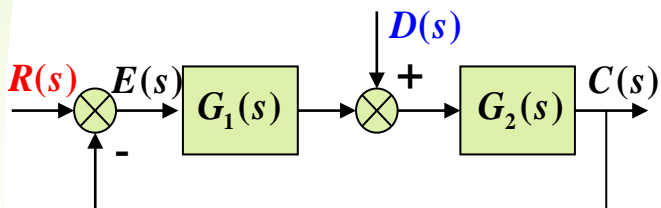
陈松林（控制与仿真中心）



回顾篇

串联校正方式下的扰动响应

- 不考虑扰动的性质，串联校正时，可以增加**偏差点到扰动作用点之间积分环节个数或放大系数**；可以采用**比例加积分，滞后环节**减小扰动产生的误差



$$e_{ssd} = -\lim_{s \rightarrow 0} \frac{sD(s)}{G_1} \cdot \frac{G_k}{1 + G_k}$$

设 $G_1(s) = \frac{K_1}{s^u} G_{10}(s)$, $G_{10}(0) = 1$

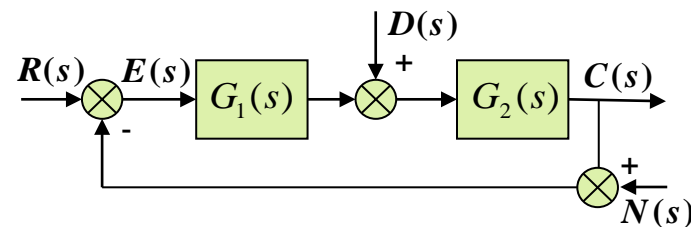
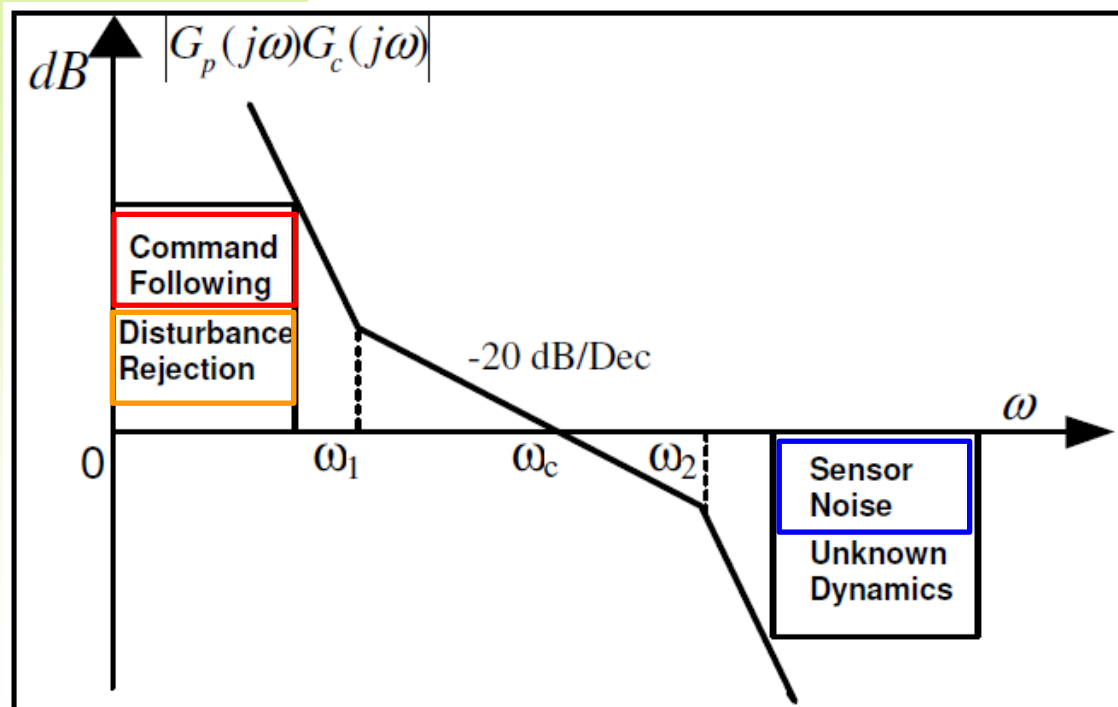
$$e_{ssd} = -\lim_{s \rightarrow 0} \frac{s^{u+1} D(s)}{K_1}$$

- 上述方法也可以用于提高系统对指令的跟踪精度



回顾篇

指令跟踪、噪声和扰动抑制对系统提出的约束



➤ 指南针（思想和原则）比地图（方法和算法）更重要；

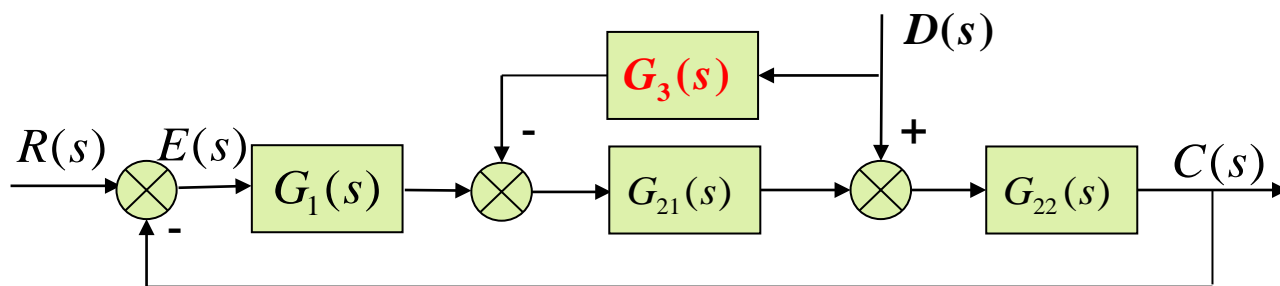
- **指令跟踪**对系统低频的斜率和增益提出了要求；
- **扰动抑制**对干扰作用点之前的特性提出了要求；
- **噪声抑制**对系统的带宽和高频增益提出了要求；



回顾篇

扰动测量与补偿

- 对于可测的扰动，可以采用顺馈（前馈）的方法抑制



$$G_3(s) = \frac{1}{G_{21}(s)} \Rightarrow E(s) = 0$$

前提：扰动可测性、模型信息的可用性；

弊端：测量成本、测量噪声、建模的精确性和物理实现性。



回顾篇

扰动估计与补偿

- 对于与系统状态有确定函数关系的扰动，进行补偿



$$F_d = f(\alpha) = \frac{1}{2}mgl \cos \alpha$$

$$F_f(\dot{\theta}) = F_c \operatorname{sgn}(\dot{\theta}) + (F_m - F_c)e^{-\alpha|\dot{\theta}|} \operatorname{sgn}(\dot{\theta}) + \sigma_2 \dot{\theta}$$

前提：已知准确函数关系、系统状态可测量或者可观测；

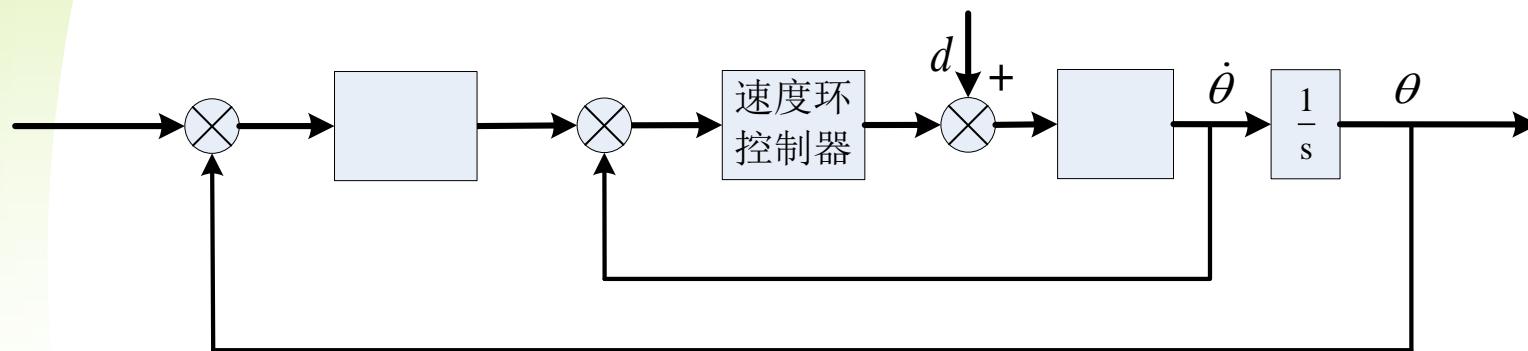
弊端：函数关系推导和辨识工作量，测量或估计带来的噪声问题和成本问题，可能的误差和参数摄动。



回顾篇

多回路控制

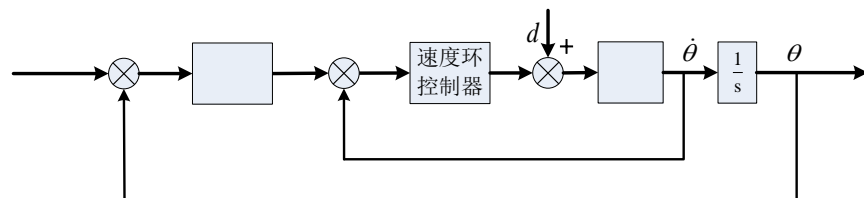
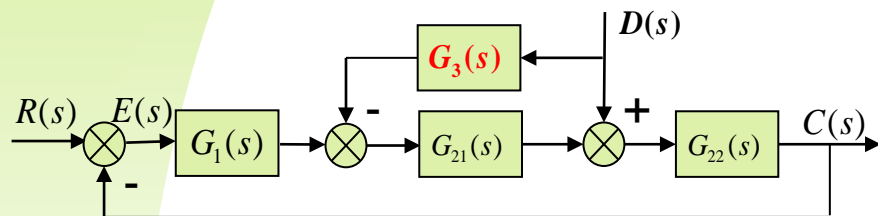
➤ 多回路的控制方法



前提： 对扰动更敏感物理量可利用（测量，观测和估计）；
弊端： 设计过程变得复杂，可能的成本问题。



我们要看到每一种方法的另一面



➤ 上述方法的弊端汇总

成本问题、模型准确性问题、物理可实现问题、可靠性问题、工作量问题、设计难度问题、噪声问题等；

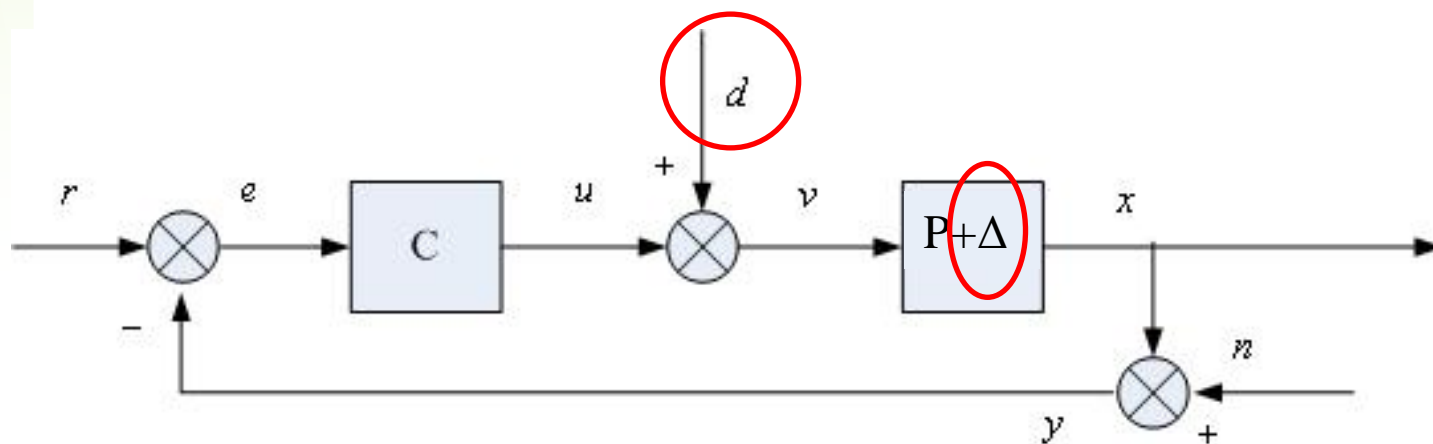
除了上述方法，还有没有其他的扰动抑制方法，能够克服或部分克服上述缺点？

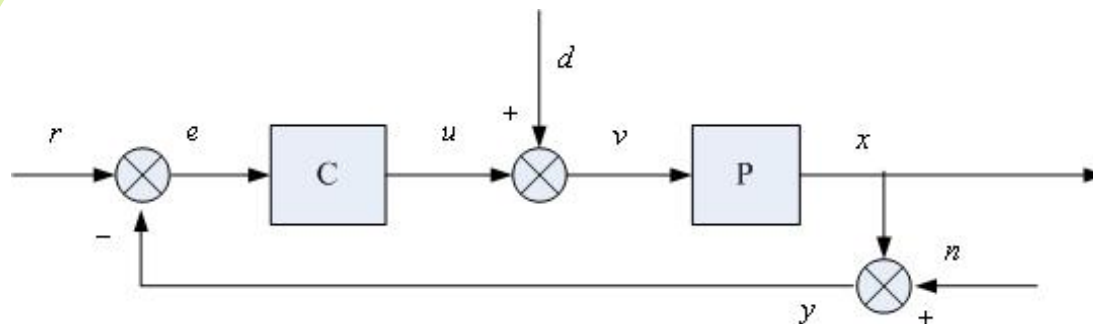


开新篇

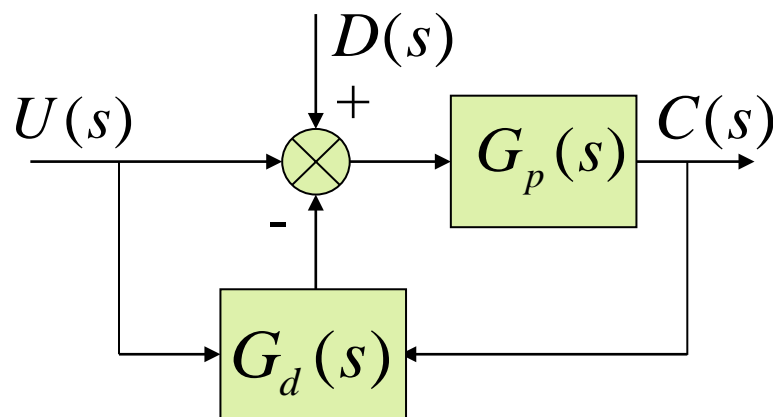
干扰观测器设计思想

干扰观测器的基本思想是将外部干扰 (d) 及模型参数变化 (Δ) 造成的实际对象与名义模型输出的差异等效到控制输入端，然后再对这个等效扰动进行观测。在控制中引入等效的补偿，实现对干扰的有效抑制。





给大家5分钟，画出干扰观测器的原理框图



正常使用主观题需2.0以上版本雨课堂

作答



学习目标

本节课需要掌握的内容

- 掌握干扰观测器的原理；
- 了解自抗扰控制（ADRC）的来龙去脉，掌握其核心原理与思想；



3.4 扰动分析

3.3.1 扰动分析

3.3.2 扰动响应与误差分析

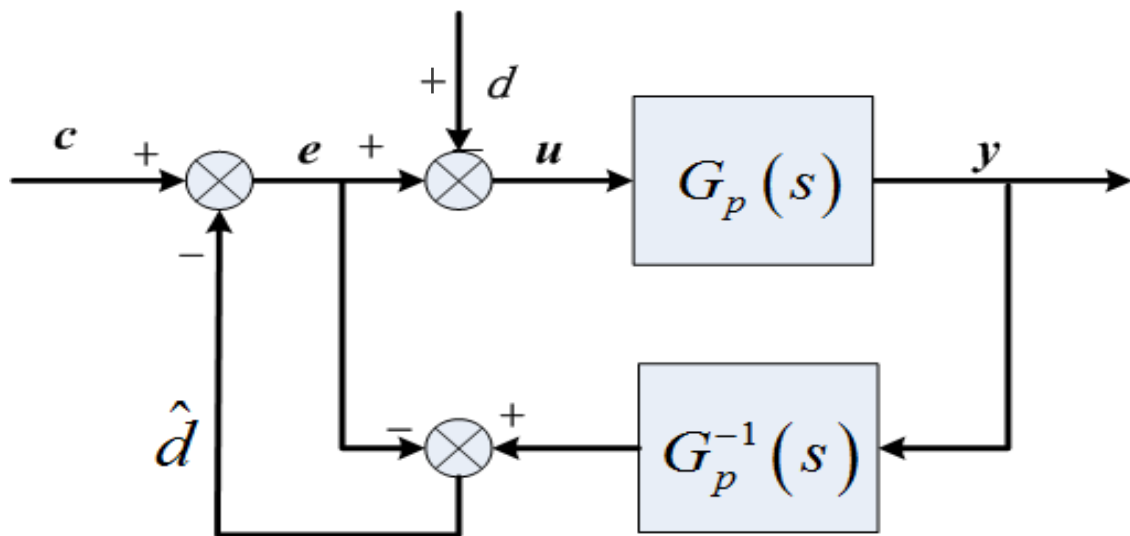
3.3.3 其他扰动抑制方法

3.3.4 扰动的观测与补偿



3.3.4 扰动的观测与补偿

基本原理 | 特性分析 | 设计原则 | 滤波器的设计 | 应用实例



d 为等效干扰；

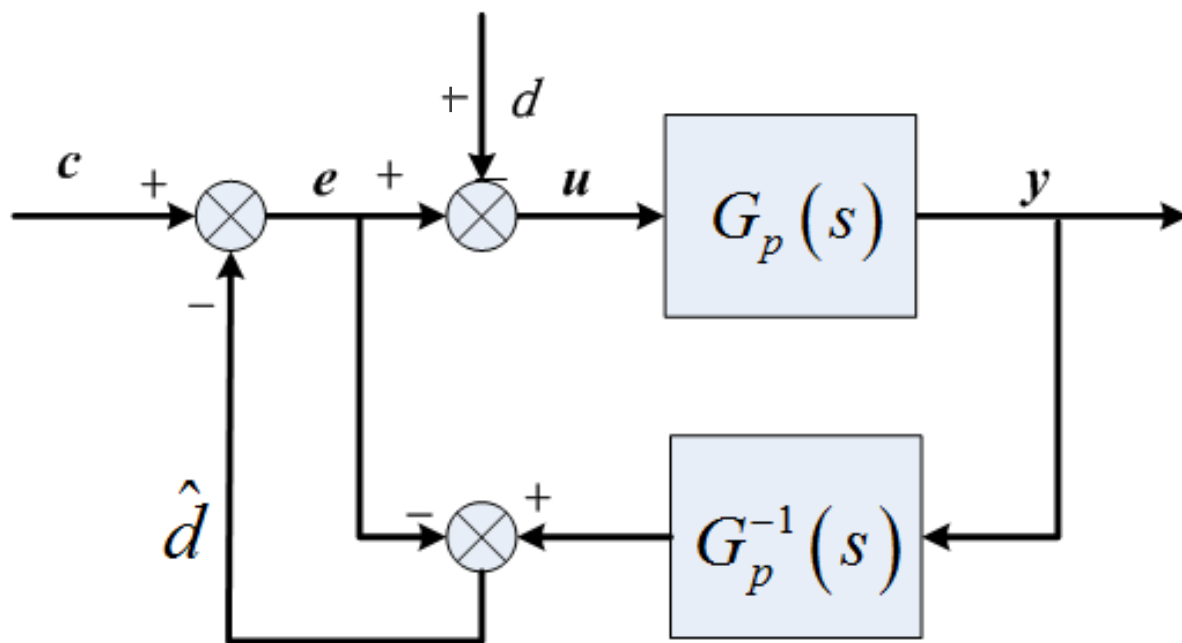
\hat{d} 为观测的干扰；

e 为控制输入；



3.3.4 扰动的观测与补偿

基本原理 | 特性分析 | 设计原则 | 滤波器的设计 | 应用实例

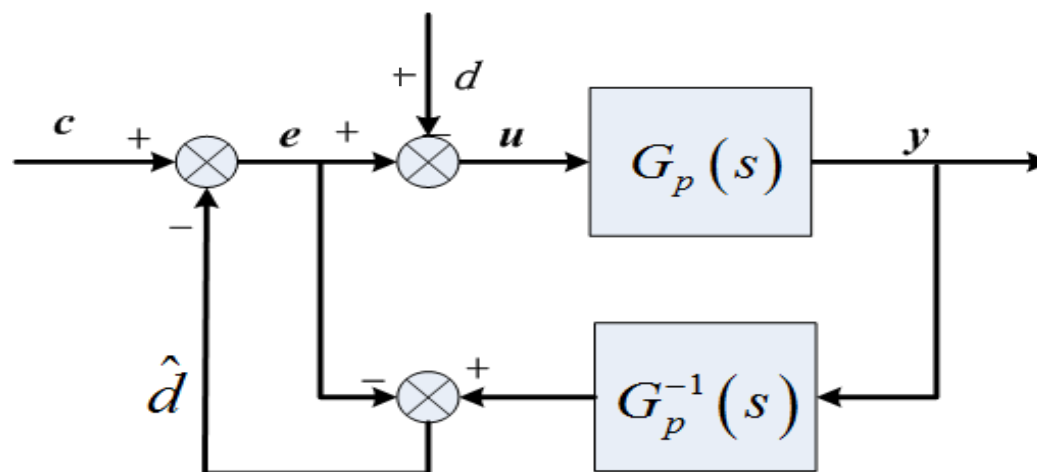


$$\hat{d} = (e + d) \cdot G_p(s) \cdot G_p^{-1}(s) - e = d$$



基本原理 | 特性分析 | 设计原则 | 滤波器的设计 | 应用实例

这种方法近乎完美地解决了扰动抑制问题，不过.....似乎有什么问题？



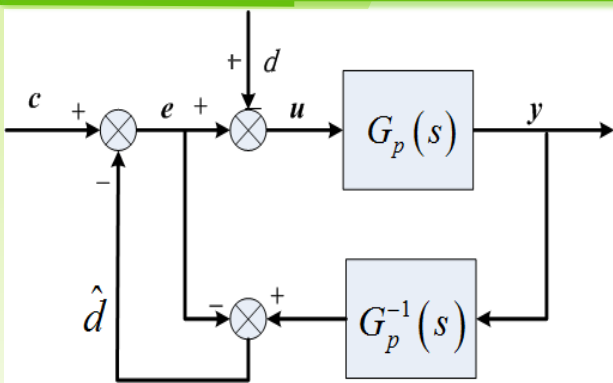
正常使用主观题需2.0以上版本雨课堂

作答



3.3.4 扰动的观测与补偿

基本原理 | 特性分析 | 设计原则 | 滤波器的设计 | 应用实例



理论上

$$\hat{d} = (e + d) \cdot G_p(s) \cdot G_p^{-1}(s) - e = d$$

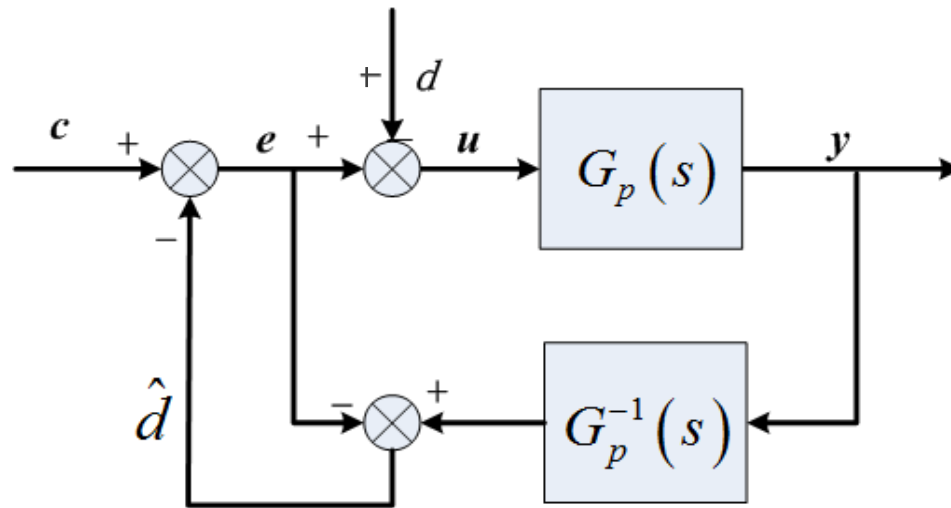
实际上

$$\hat{d} = (y + n) \cdot G_p^{-1}(s) - e \neq d$$

对于实际的物理系统，干扰观测器的实现存在如下问题：

- (1) 若 $G_p(s)$ 的相对阶不为零，其逆在**物理上不可实现**；
- (2) $G_p(s)$ 的**精确数学模型**可能无法得到；
- (3) 考虑**测量噪声**的影响，该方法的控制性能下降。

如何解决这些实际问题？



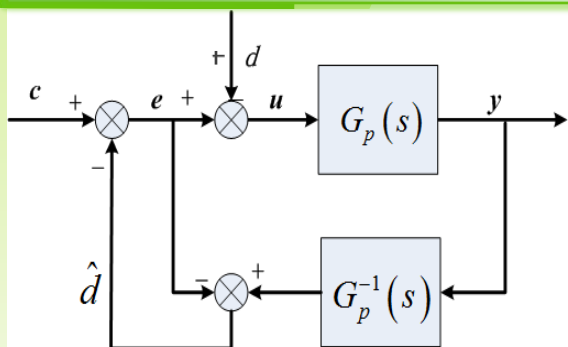
正常使用主观题需2.0以上版本雨课堂

作答

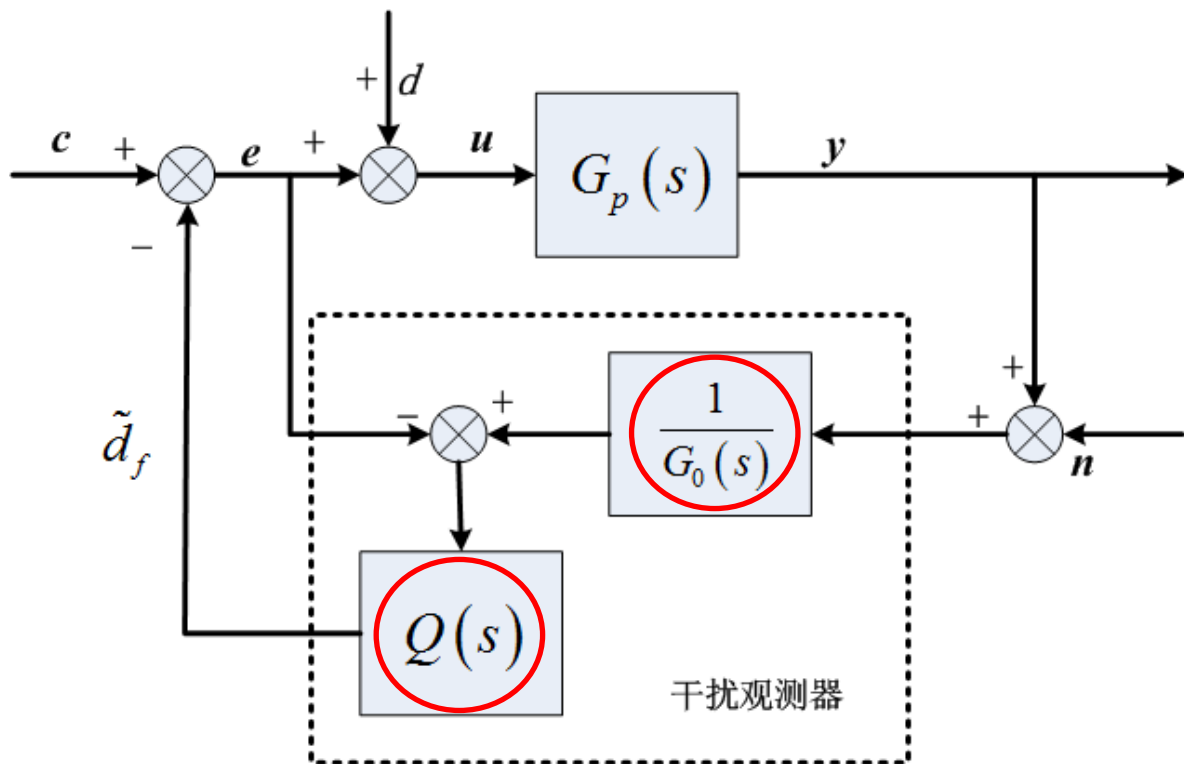


3.3.4 扰动的观测与补偿

基本原理 | 特性分析 | 设计原则 | 滤波器的设计 | 应用实例



$G_0(s)$ 为名义对象;
 $Q(s)$ 为低通滤波器;
 \tilde{d}_f 为干扰的估计值。

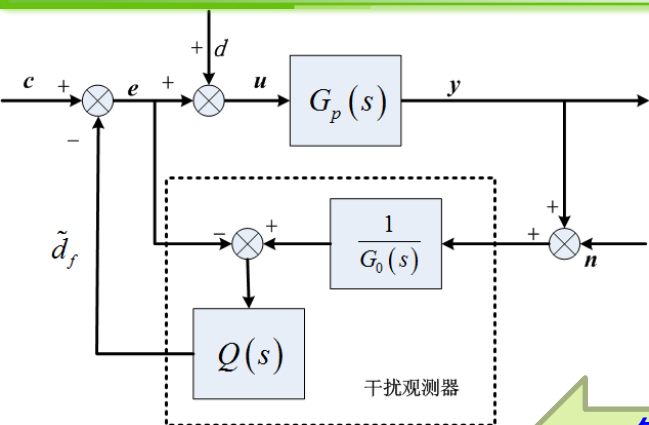


$$u = c - \tilde{d}_f + d$$



3.3.4 扰动的观测与补偿

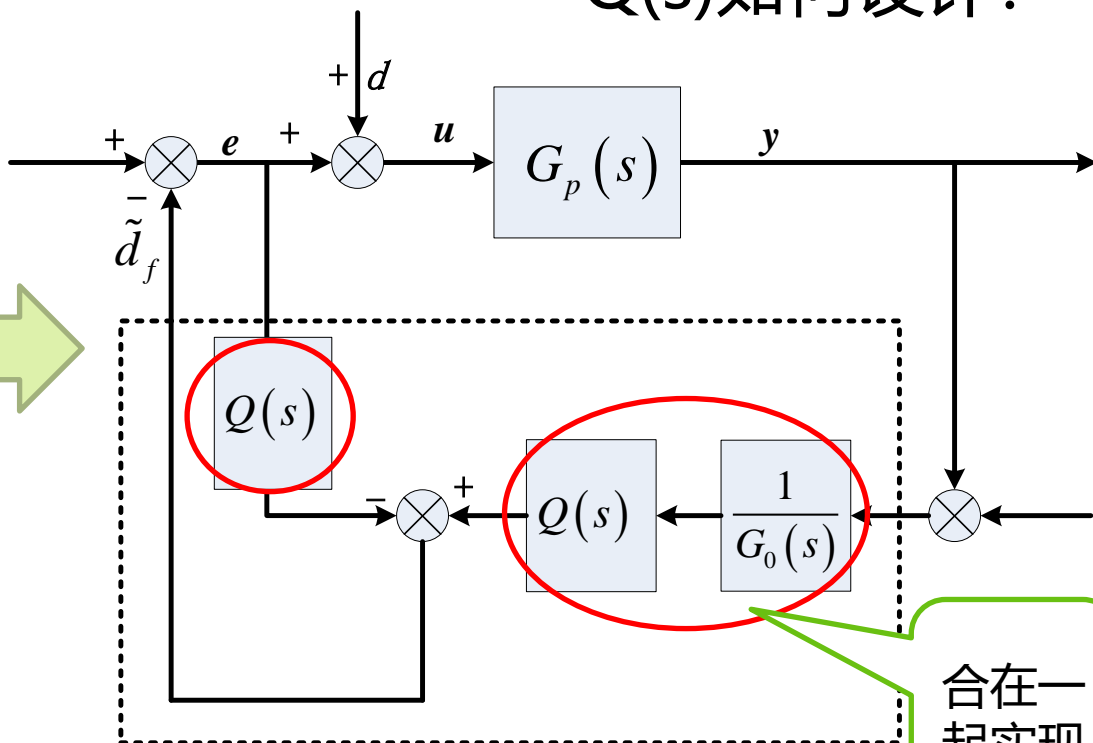
基本原理 | 特性分析 | 设计原则 | 滤波器的设计 | 应用实例



等价

$G_0(s)$ 为名义对象;
 $Q(s)$ 为低通滤波器;
 \tilde{d}_f 为干扰的估计值。

$Q(s)$ 如何设计?



$$u = c - \tilde{d}_f + d$$



3.3.4 扰动的观测与补偿

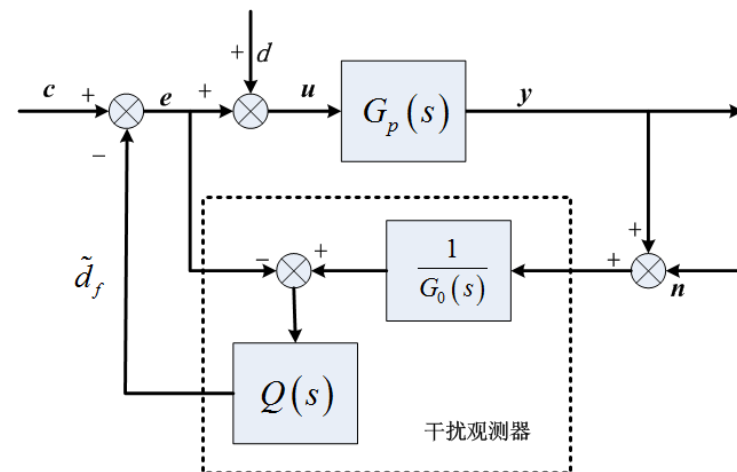
基本原理 | 特性分析* | 设计原则 | 滤波器设计 | 应用实例

求输入 c 到输出 y 的传递函数

$$(c - \tilde{d}_f) \cdot G_p(s) = y$$

$$\left(c - Q(s) \left(\frac{y}{G_0(s)} - \frac{y}{G_p(s)} \right) \right) \cdot G_p(s) = y$$

$$G_{yc} = \frac{Y(s)}{C(s)} = \frac{G_p(s)G_0(s)}{G_0(s) + Q(s)[G_p(s) - G_0(s)]}$$



$$d = 0, n = 0$$

Q 的引入对抑制模型摄动的作用



3.3.4 扰动的观测与补偿

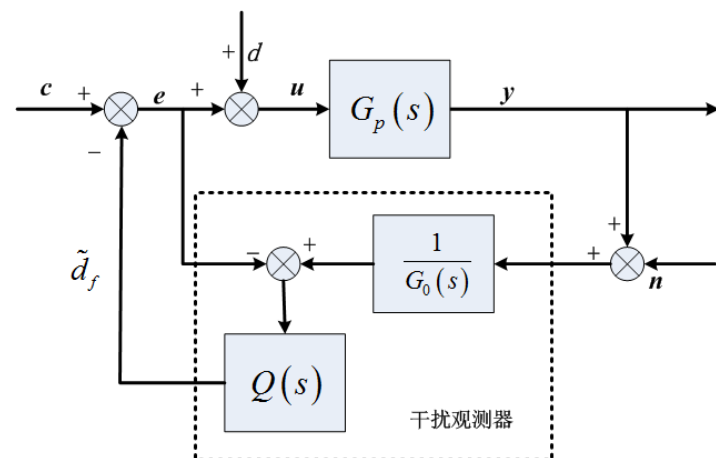
基本原理 | **特性分析*** | 设计原则 | 滤波器设计 | 应用实例

求**干扰** d 到输出 y 的传递函数

$$(d - \tilde{d}_f) \cdot G_p(s) = y$$

$$\left\{ d - Q(s) \left[\frac{y}{G_0(s)} - \left(\frac{y}{G_p(s)} - d \right) \right] \right\} \cdot G_p(s) = y$$

$$G_{yd} = \frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{G_p(s)G_0(s)(1-Q(s))}{G_0(s) + Q(s)[G_p(s) - G_0(s)]}$$



$$c = 0, n = 0$$

Q的引入对干扰的抑制作用



3.3.4 扰动的观测与补偿

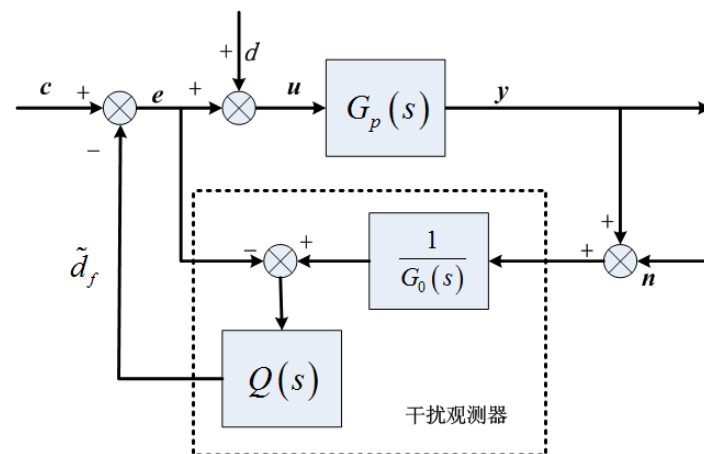
基本原理 | 特性分析* | 设计原则 | 滤波器设计 | 应用实例

求噪声 n 到输出 y 的传递函数

$$(0 - \tilde{d}_f) \cdot G_p(s) = y$$

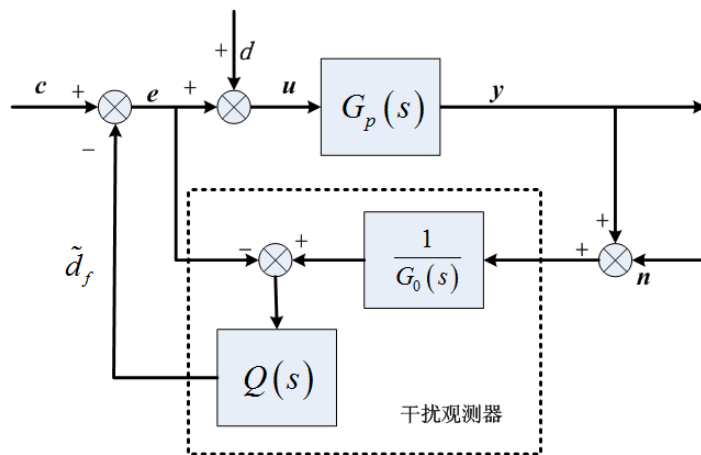
$$\left\{ 0 - Q(s) \left[\frac{y+n}{G_0(s)} - \frac{y}{G_p(s)} \right] \right\} \cdot G_p(s) = y$$

$$G_{yn} = \frac{Y(s)}{N(s)} = \frac{-G_p(s)Q(s)}{G_0(s) + Q(s)[G_p(s) - G_0(s)]}$$



$$c = 0, d = 0$$

Q 的引入对噪声的敏感程度



保持输入到输出的特性不变要求 $Q(s)=1$
 保证扰动到输出的响应为零要求 $Q(s)=1$
 保证噪声到输出的响应为零要求 $Q(s)=0$

面对这个矛盾，该怎么办？

正常使用主观题需2.0以上版本雨课堂



设低通滤波器 $Q(s)$ 的频带为 f_q

当 $f \leq f_q$ 时, $Q(s) = 1$

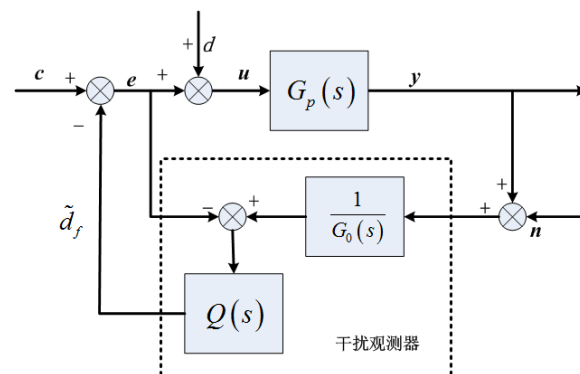


$$G_{yc} = G_0(s)$$

$$G_{yd} = 0$$

$$G_{yn} = -1$$

$Q(s)$ 的频带宽度应该覆盖扰动和输入信号的频谱范围



$$G_{yc} = \frac{Y(s)}{C(s)} = \frac{G_p(s)G_0(s)}{G_0(s) + Q(s)[G_p(s) - G_0(s)]}$$

$$G_{yd} = \frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{G_p(s)G_0(s)(1 - Q(s))}{G_0(s) + Q(s)[G_p(s) - G_0(s)]}$$

$$G_{yn} = \frac{Y(s)}{N(s)} = \frac{-G_p(s)Q(s)}{G_0(s) + Q(s)[G_p(s) - G_0(s)]}$$



3.3.4 扰动的观测与补偿

基本原理 | **特性分析*** | 设计原则 | 滤波器设计 | 应用实例

设低通滤波器 $Q(s)$ 的频带为 f_q

当 $f > f_q$ 时, $Q(s) = 0$

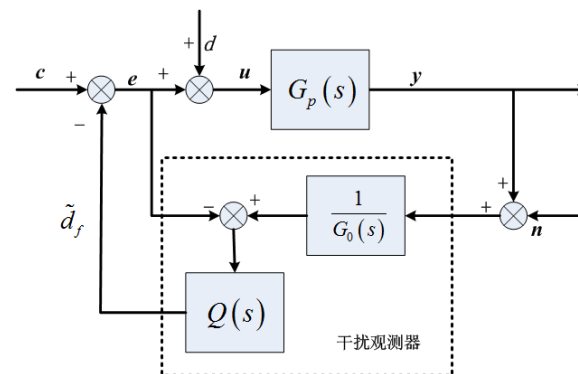


$$G_{yc} = G_p(s)$$

$$G_{yd} = G_p(s)$$

$$G_{yn} = 0$$

$Q(s)$ 在满足扰动抑制的同时, 频带应该尽可能低。



$$G_{yc} = \frac{Y(s)}{C(s)} = \frac{G_p(s)G_0(s)}{G_0(s) + Q(s)[G_p(s) - G_0(s)]}$$

$$G_{yd} = \frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{G_p(s)G_0(s)(1 - Q(s))}{G_0(s) + Q(s)[G_p(s) - G_0(s)]}$$

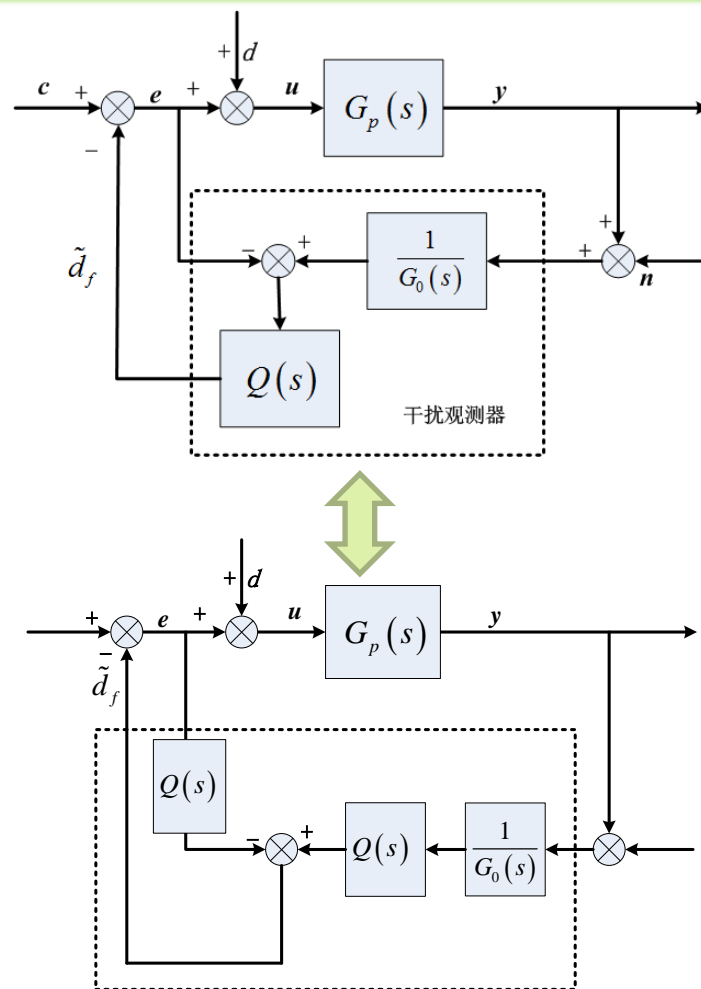
$$G_{yn} = \frac{Y(s)}{N(s)} = \frac{-G_p(s)Q(s)}{G_0(s) + Q(s)[G_p(s) - G_0(s)]}$$



1.3.4 扰动的观测与补偿

基本原理 | 特性分析 | **设计原则**** | 滤波器设计 | 应用实例

- **相对度**：为了能使系统可以物理实现， Q 的分子与分母之差应当大于等于 G_0 的分子与分母之差；
- **低频幅值限制**：为使 G_{yc} 尽可能地逼近被控对象的标称模型， Q 在工作频段（指令和干扰的频谱范围）的幅值应当为1；
- **高频幅值限制**：为使噪声对输出的影响尽可能小， Q 在高频段其幅值应当为0；
- **鲁棒稳定性**：如果假定模型摄动为乘性摄动即 $G_p = G_0(1 + \Delta)$ ，那么系统保持鲁棒稳定性的条件是 $\|\Delta(s)Q(s)\|_\infty \leq 1$





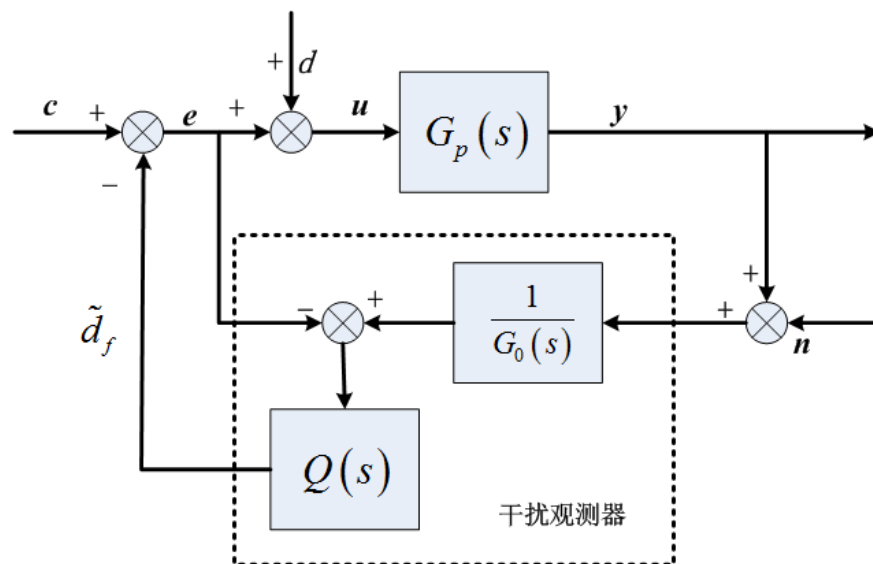
3.3.4 扰动的观测与补偿

基本原理 | 特性分析 | 设计原则 | **滤波器设计** | 应用实例

一般选用以下形式的二项式滤波器：

$$Q(s) = \frac{\sum_{k=0}^{N-r} \alpha_{Nk} (\tau s)^k}{(\tau s + 1)^N}$$

其中： $\alpha_{Nk} = \frac{N!}{(N-k)!k!}$ ， N 和 r 分别为 $Q(s)$ 的阶次和相对阶， τ 为滤波时间常数。





优化

3.3.4 扰动的观测与补偿

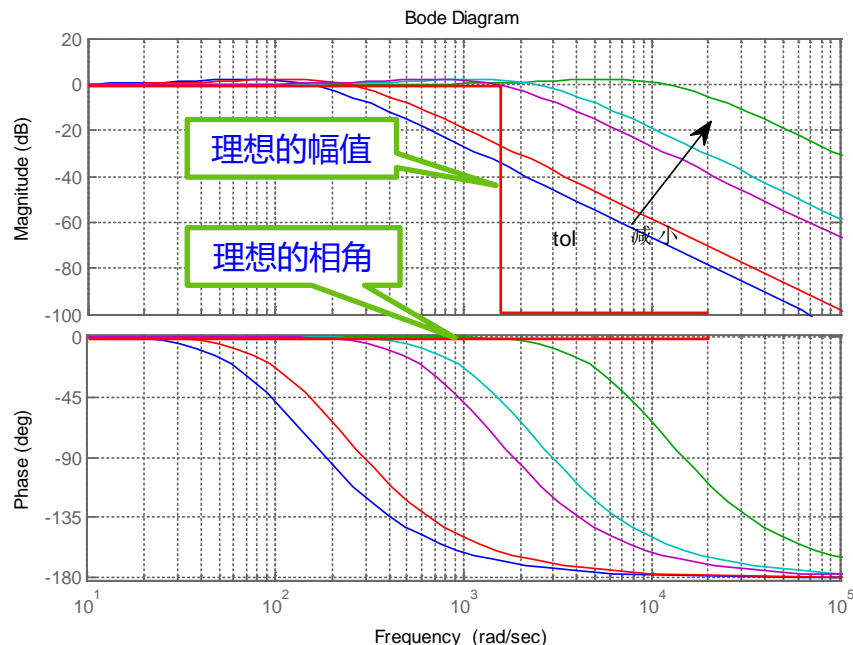
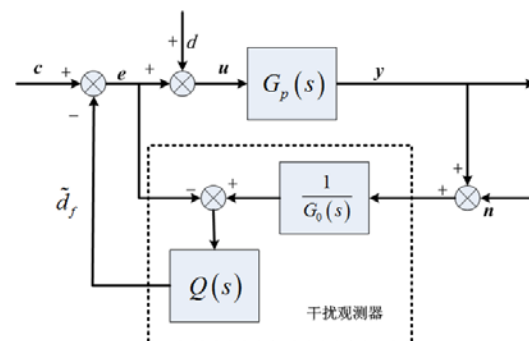
基本原理 | 特性分析 | 设计原则 | **滤波器设计** | 应用实例

一种滤波器形式， N 为阶数， r 为相对阶

$$Q(s) = \frac{\sum_{k=0}^{N-r} \alpha_{Nk} (\tau s)^k}{(\tau s + 1)^N}$$

以三阶滤波器为例， $N=3$ ， $r=2$

$$Q(s) = \frac{3\tau s + 1}{\tau^3 s^3 + 3\tau^2 s^2 + 3\tau s + 1}$$





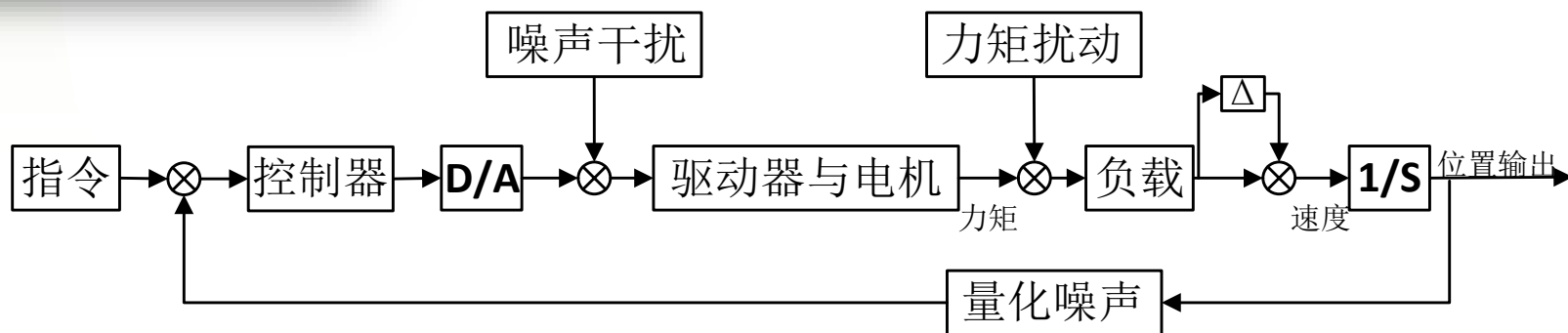
3.3.4 扰动的观测与补偿

基本原理 | 特性分析 | 设计原则 | 滤波器设计 | **应用实例**



输入指令 **0.01到0.5度正弦**时，满足双十指标10Hz要求

突出的问题：幅值较小时，**摩擦扰动**影响很大，所以必须针对扰动进行抑制；另外转台**谐振频率**只有40Hz左右，而频响指标要求高，所以频带拓展困难，必须采用顺馈控制。**负载惯量**会有变化。





组合

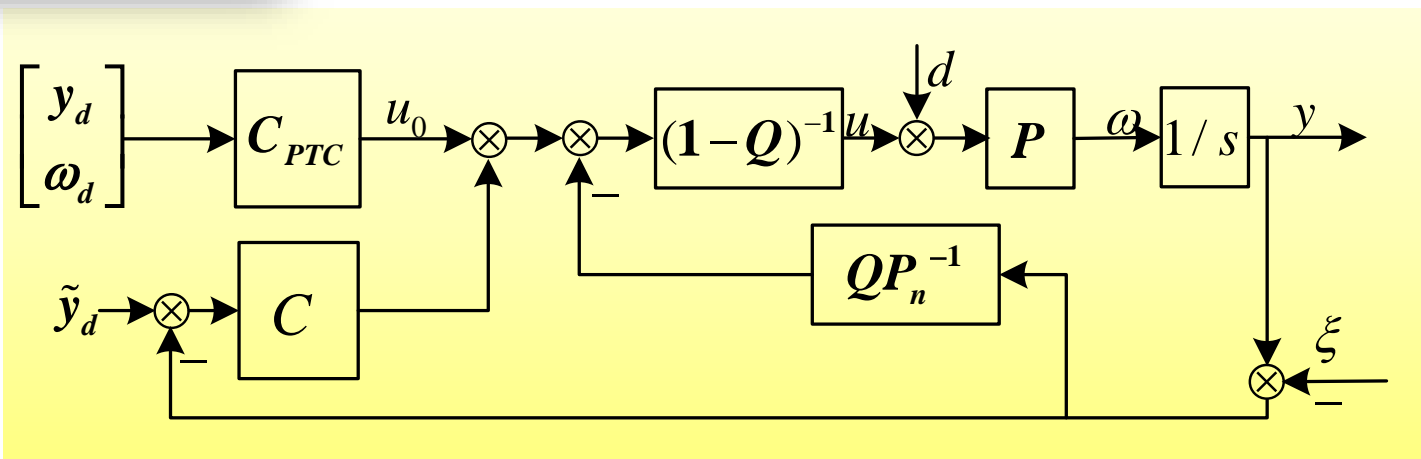
3.3.4 扰动的观测与补偿

基本原理 | 特性分析 | 设计原则 | 滤波器设计 | **应用实例**



控制方案的确定:

- **干扰观测器**——克服摩擦扰动
- **串联校正**——保证稳定性和稳定余量
- **PTC前馈控制器**——拓展带宽





简化

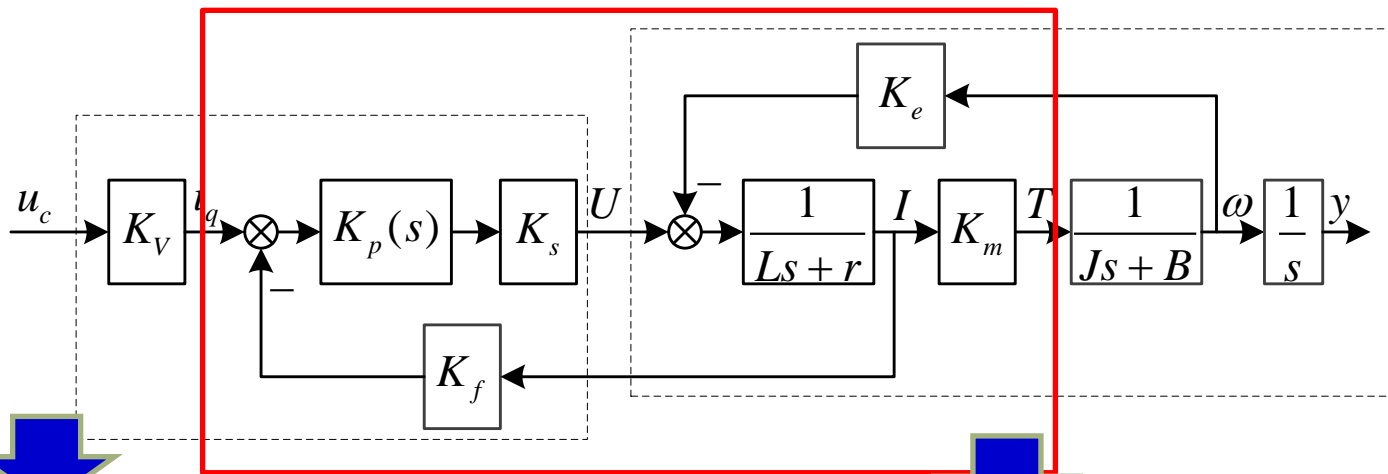
3.3.4 扰动的观测与补偿

基本原理 | 特性分析 | 设计原则 | 滤波器设计 | **应用实例**

模型简化的目的和条件

被控对象建模

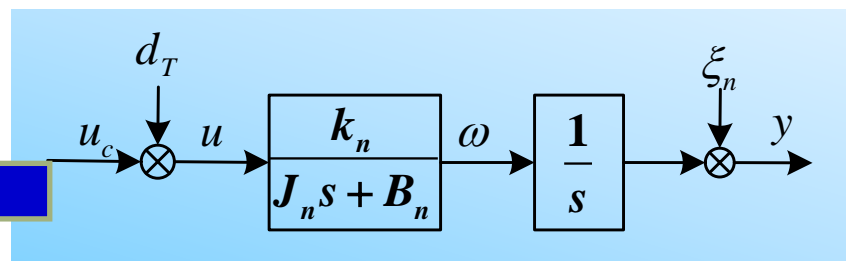
因为采用了干扰观测器，简化后的模型偏差可以由干扰观测器补偿，另外，忽略的电气时间常数，对10Hz内的低频特性影响较小



$$P_0 = \frac{K_m K_v K_p K_s}{JLs^3 + [DL + J(r + K_f K_p K_s)]s^2 + K_e K_m s}$$

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

$$P_n = \frac{k_n}{J_n s^2 + B_n s}$$





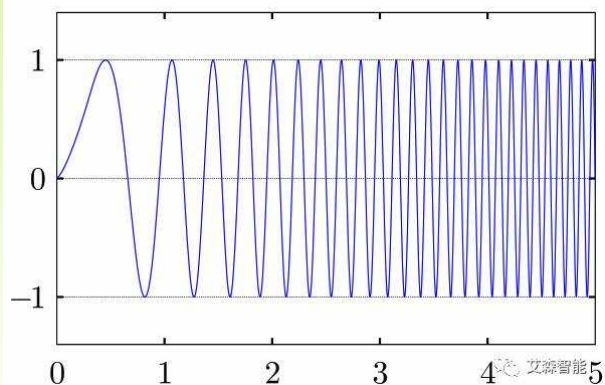
3.3.4 扰动的观测与补偿

辨识

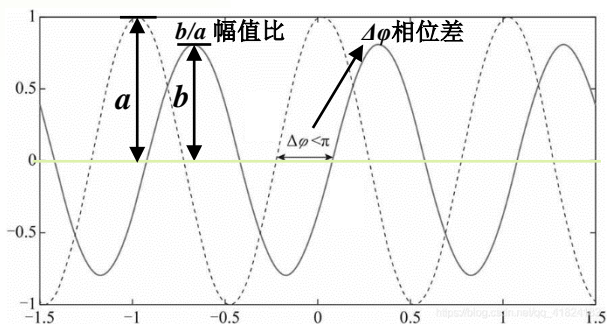
基本原理 | 特性分析 | 设计原则 | 滤波器设计 | **应用实例**

通过频响测试, FFT分析, 绘制出实际系统的Bode图

扫频信号

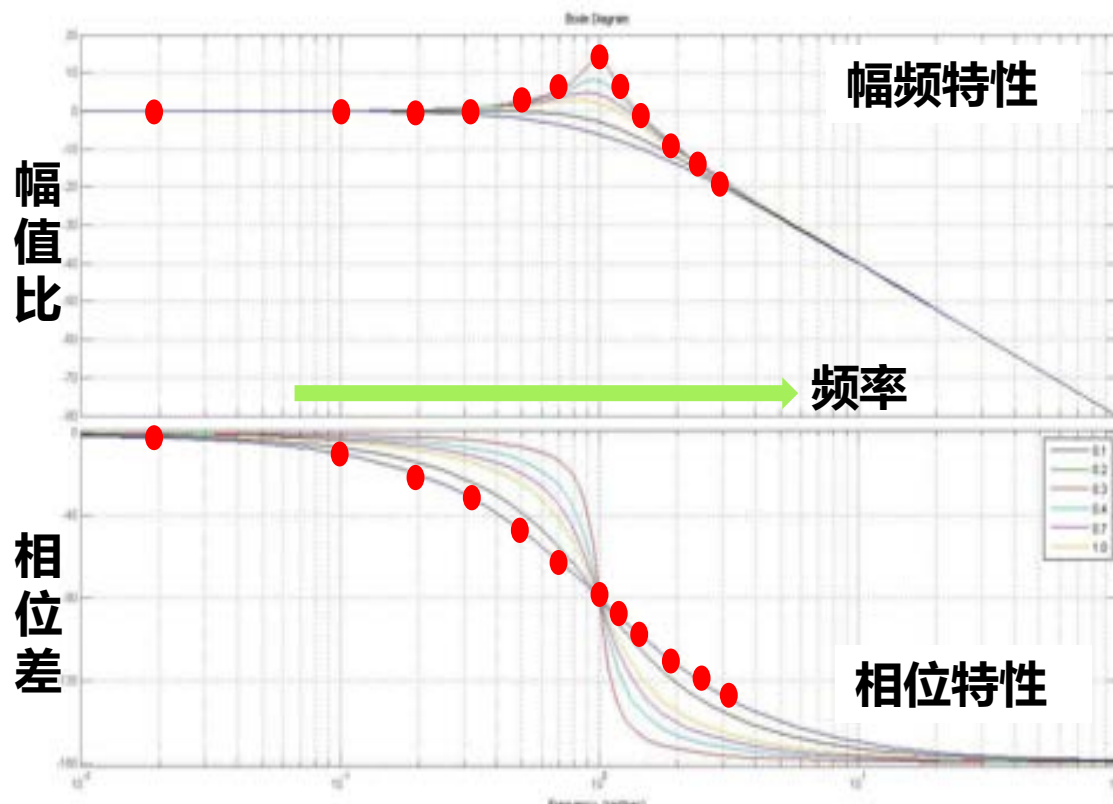


正弦响应



2023-04-03

系统频率特性——Bode图



哈尔滨工业大学控制与仿真中心



3.3.4 扰动的观测与补偿

辨识

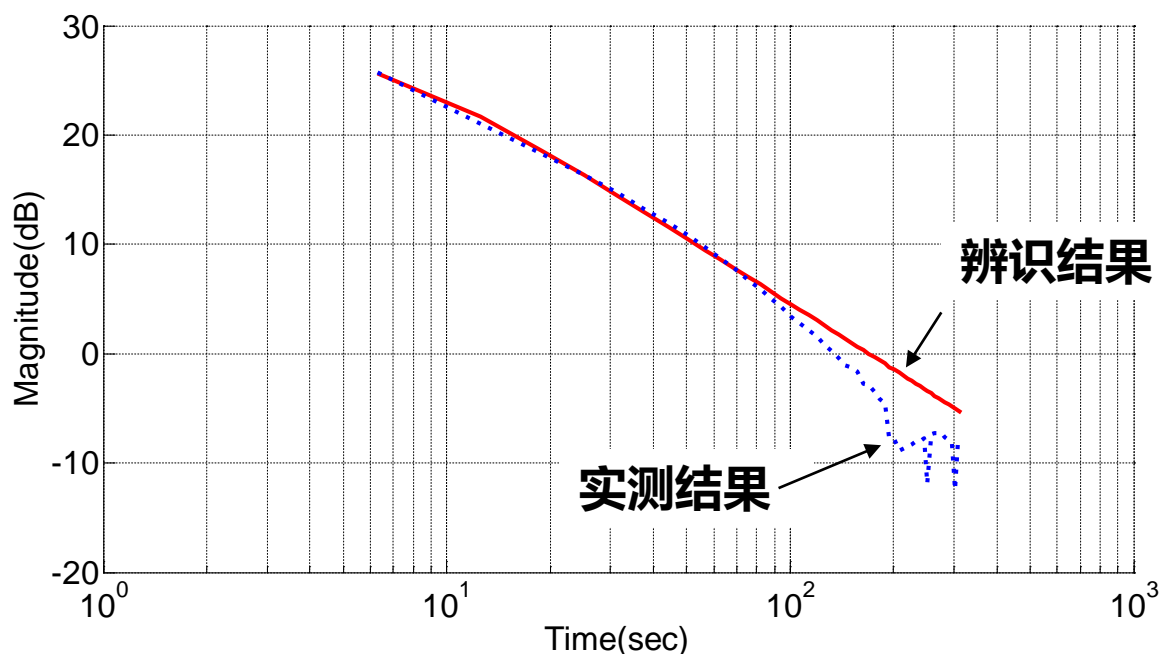
基本原理 | 特性分析 | 设计原则 | 滤波器设计 | **应用实例**



只要有频率特性数据
(频率, 幅值和相角
三组数据), 可以借
助MATLAB的辨识工
具箱实现模型的辨识
(阶数和参数)

通过频响测试, FFT分析, 最小二乘方法辨识出模型参数

$$P_n = \frac{k_n}{J_n s^2 + B_n s} \Rightarrow P_n = \frac{k}{s(\tau_m s + 1)} \Rightarrow P_n = \frac{35}{s(0.2s + 1)}$$

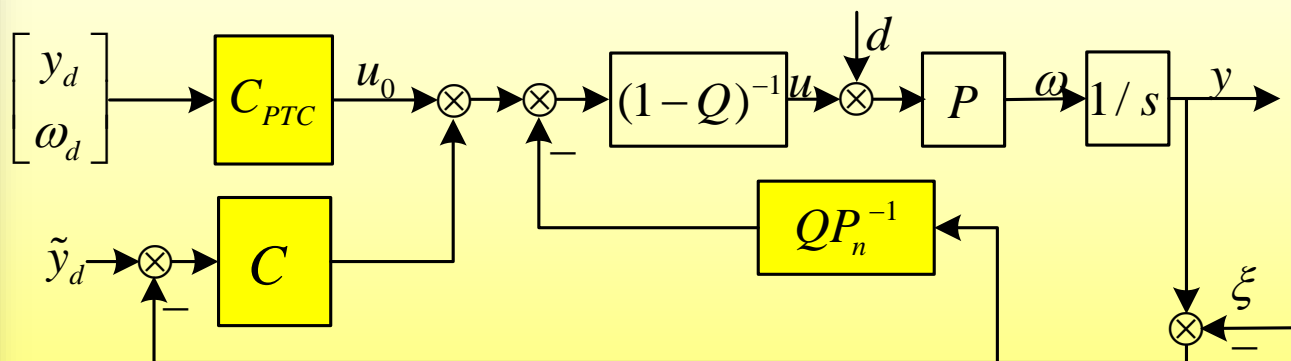




3.3.4 扰动的观测与补偿

顺序

基本原理 | 特性分析 | 设计原则 | 滤波器设计 | **应用实例**



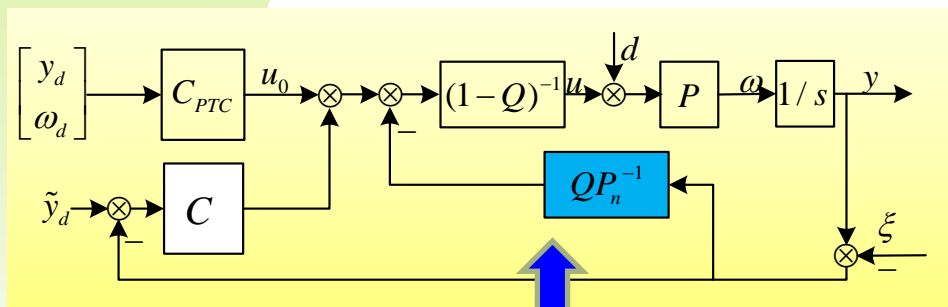
只要确定了标称模型，三部分的设计就可以同时基于标称模型进行设计，没有严格的顺序要求，但必须先保证干扰观测器的性能（ Q 的带宽大于3倍剪切频率，具体数值还需根据实际情况进行调整）。



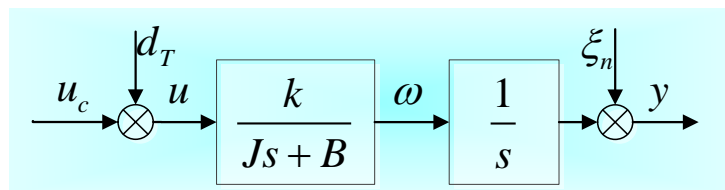
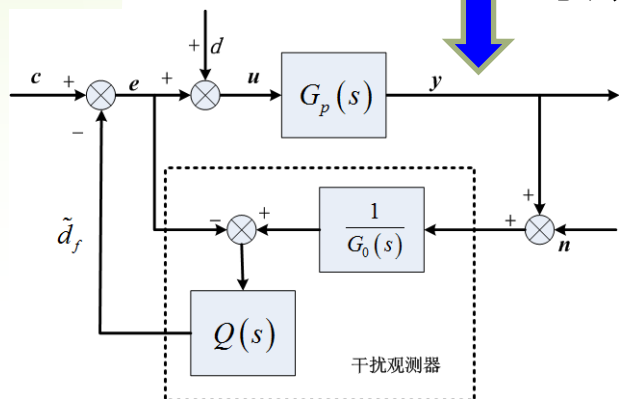
3.3 综合设计实例

基本原理 | 特性分析 | 设计原则 | 滤波器设计 | **应用实例**

干扰观测器的设计



等效

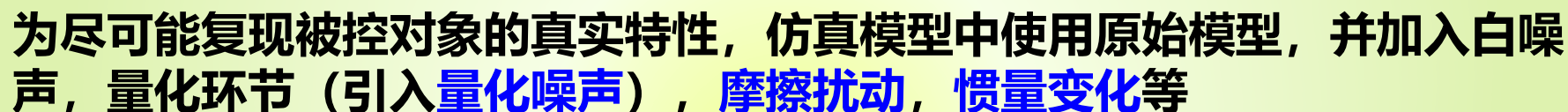


$$Q(s) = \frac{\sum_{k=0}^{N-r} \alpha_{Nk} (\tau s)^k}{(\tau s + 1)^N}$$

$$Q = \frac{3\tau s + 1}{(\tau s + 1)^3} \quad \tau = 0.0015$$



基本原理 | 特性分析 | 设计原则 | 滤波器设计 | **应用实例**





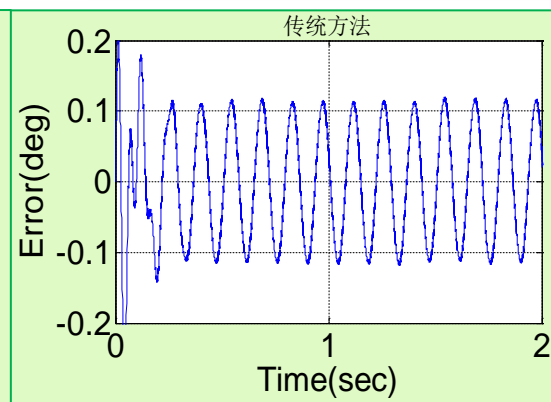
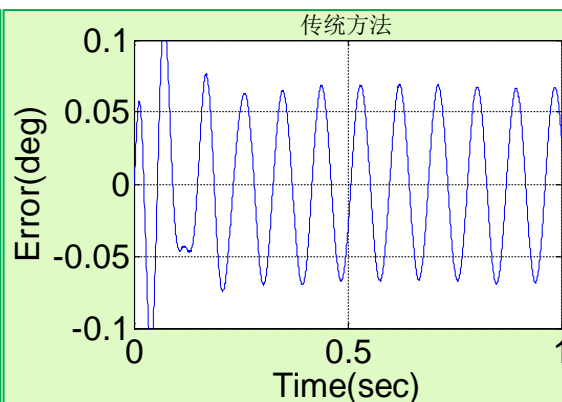
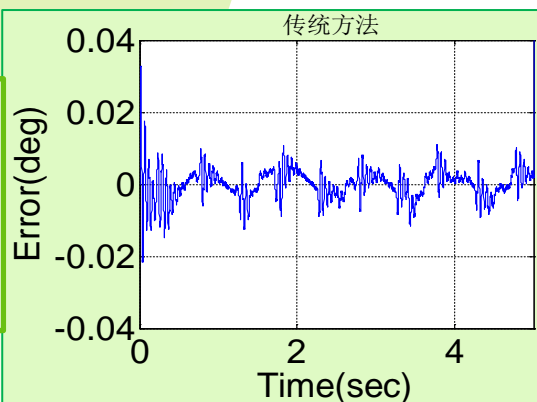
3.3.4 扰动的观测与补偿

基本原理 | 特性分析 | 设计原则 | 滤波器设计 | **应用实例**

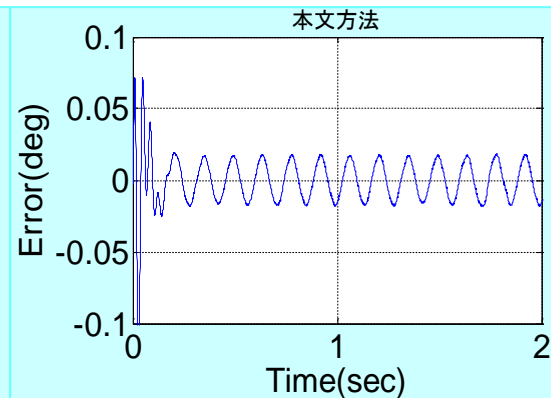
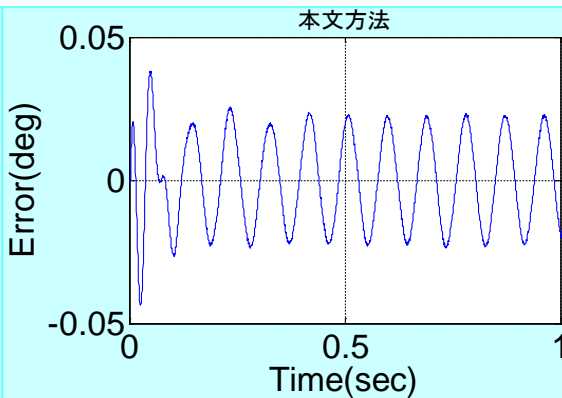
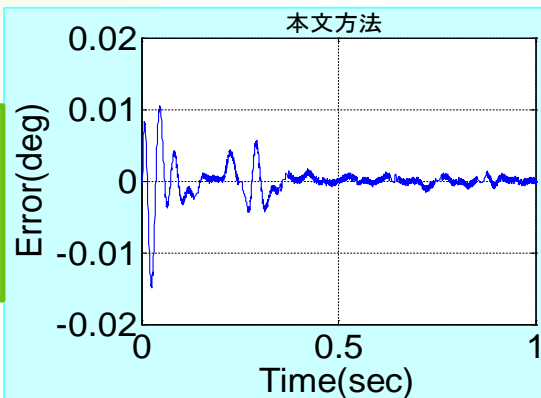
这里给出的是跟踪不同频率信号时的**跟踪误差曲线**

对比仿真验证 (0.5°)

传统方法



DOB



仿真结果满足指标，比无干扰观测器的传统方法性能更高

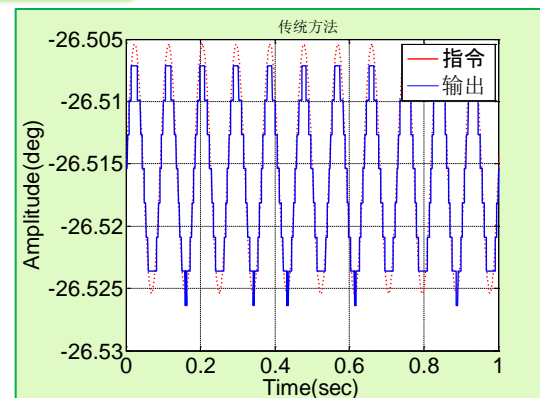
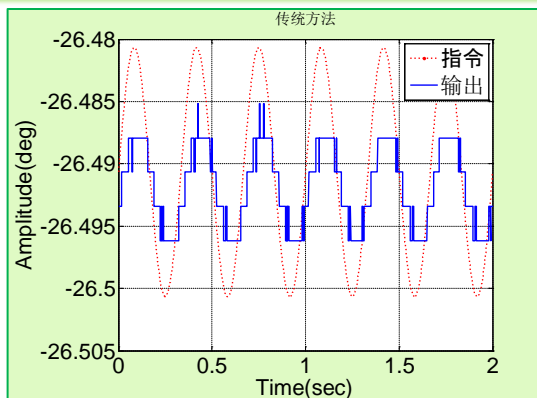
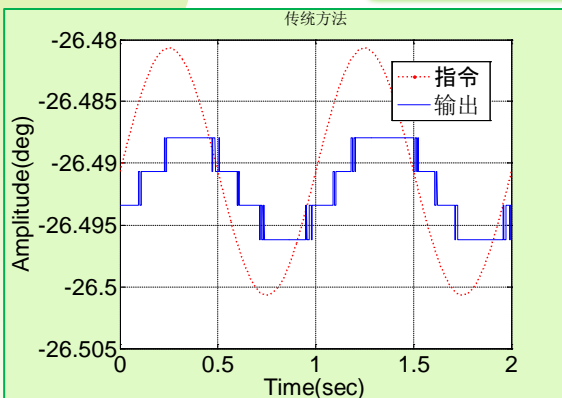


3.3.4 扰动的观测与补偿

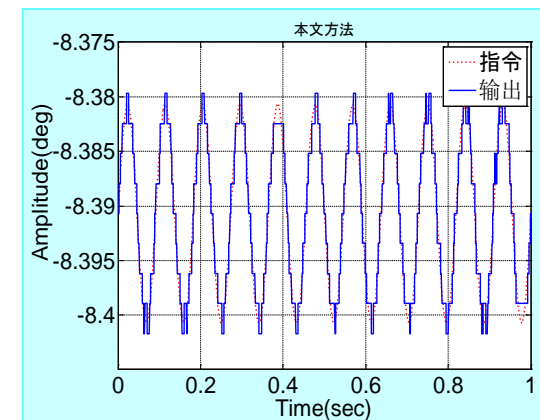
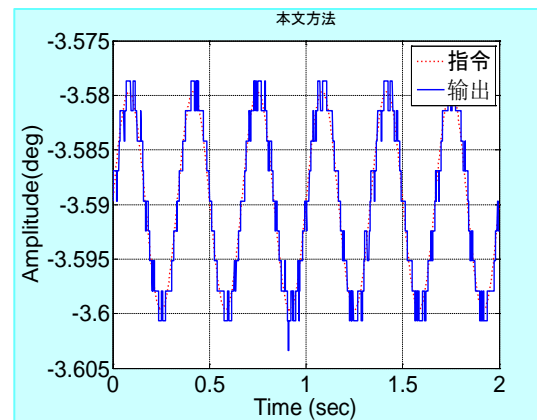
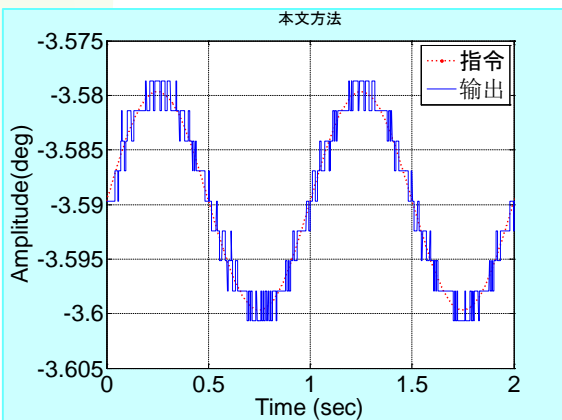
基本原理 | 特性分析 | 设计原则 | 滤波器设计 | **应用实例**

对比实验验证的位置跟踪曲线 (0.01°)

传统方法



DOB



实验结果满足指标, 优于传统方法, 尤其对小幅值信号的跟踪能力很强



3.4 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 其他扰动抑制方法

3.3.4 扰动观测与补偿

3.3.5 **自抗扰控制技术**

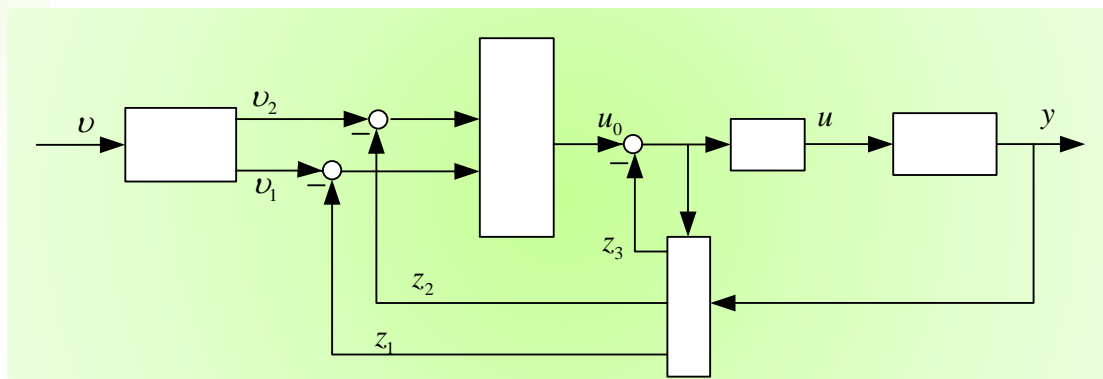


3.3.5 自抗扰控制技术

自抗扰控制器

韩京清研究员

- ❖ 自抗扰控制技术 (Active Disturbances Rejection Control, ADRC), 发扬PID控制技术的精髓并吸取现代控制理论的成就, 并通过计算机仿真实验归纳、总结与综合而来的, 是不依赖被控对象精确模型的、**能够替代PID技术的、新型实用的控制技术。**



质疑经典，颠覆创新，主要成就来自晚年



3.3.5 自抗扰控制技术

自抗扰控制器

高志强教授

乐于分享
传道授业



自抗扰_工程控制论 发消息

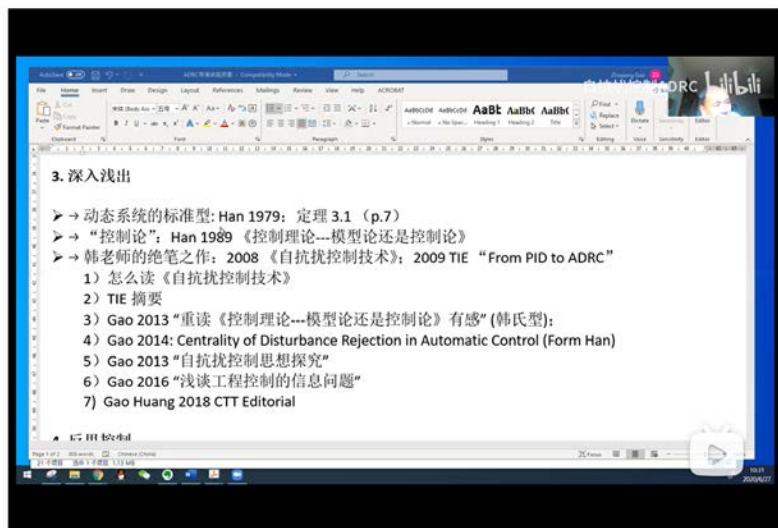
QQ: 914841616; ResearchGate: Zhiqiang_G...

+ 关注 8681

bilibili 主站 番剧 游戏中心 直播 会员购 漫画 赛事 下载APP 毁灭吧，这初号机真！ 登录 大会

自抗扰控制导读 | 2020-06-27

6760播放 · 总弹幕数38 2020-06-28 00:00:53



自抗扰控制ADRC(II)

914841616

首页

成员

设置



群介绍

本群创建于2020/5/6: 本群是自抗扰控制(ADRC)的扩展。该群创建于2011/9/11: 自抗扰控制原理适用于通用工业控制器的设计, 抗内扰和外扰, 结构和参数调节简单, 不需详细建模, 可用于控制各种不确定性强的非线性工业动态过程。初学者从基本原理和结构入手, 掌握参数的物理意义和调节规律。研究者还可以反思控制论的前提和框架, 讨论内扰, 外扰, 稳定运行等基本问题。特别欢迎新来的老师和同学。群里的要求不多, 请参考群公告。群里的讨论大致分两种, 目的不外是技术上更加精细; 理解上更加深刻。前者做加法, 借助于群里的各位热心人的积累和无私奉献; 后者则做减法, 去粗取精, 去伪存真, 整理我们的知识结构。欢迎大家一起参与思考和交流。

群标签

行业交流 ADRC 自抗扰控制

群主/管理员



分享

发消息



3.3.5 自抗扰控制技术

自抗扰控制器——视频演示



Video Demonstration

Two-mass Positioning Control ADRC vs PID

Center for Advanced Control Technologies
M. Ramirez-Neria, Han Zhang, Yu Hu, Zhiqiang Gao
Cleveland State University
04/19/2017

CACT website: <http://cact.csuohio.edu/>
E-mail: z.gao@csuohio.edu .Telephone:216-687-3528. Fax:216-687-5405

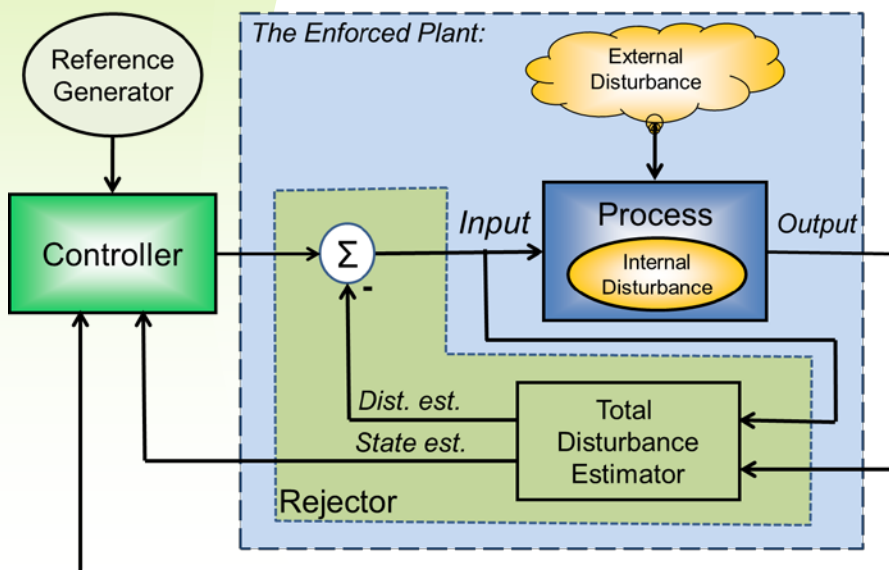




3.3.5 自抗扰控制技术

原理 | 背景 | 克服PID缺陷 | 扩张状态观测器 | 应用 | 实例 | 总结

抑制各种外部扰动，同时增强系统对参数摄动的鲁棒性



系统存在**外部扰动**
和**内部不确定性**

通过**ESO**对
总扰动进行
观测

将内扰和外扰统
一为**系统总扰动**

通过总扰动将
系统补偿为标
称模型

根据标称模型**设
计控制器**

用ESO观测补偿总扰动后，再设计PD控制器



3.3.5 自抗扰控制技术

原理 | **背景** | 克服PID缺陷 | 扩张状态观测器 | 应用 | 实例 | 总结

韩老师的创新历程

PID经久不衰，实际应用中占比95%，是最经典实用的控制方法。为什么韩老师敢于质疑经典PID控制，提出可以替代PID的，而且实用有效的ADRC控制器？

带着大家去探寻ADRC的来龙去脉



3.3.5 自抗扰控制技术

质疑

原理 | **背景** | 克服PID缺陷 | 扩张状态观测器 | 应用 | 实例 | 总结

韩老师的最初的思考

- 为什么简单的PID技术在工程实际中经久不衰?
- 鲁棒性问题普遍存在，如何去解决它?
- PID的许多缺陷促进了控制理论的发展，但是很多理论成果却在工程实践中并不实用?
- 如何研发工程中实用的控制技术?



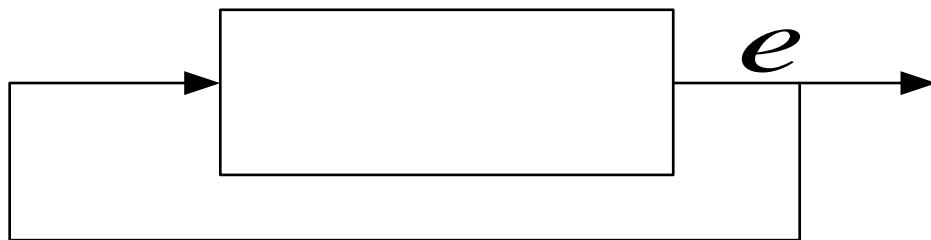
3.3.5 自抗扰控制技术

创新

原理 | 背景 | 克服PID缺陷 | 扩张状态观测器 | 应用 | 实例 | 总结

第一步：深入分析PID控制原理，总结精髓

用误差反馈来消除误差的原理



误差是产生控制量的根源，消除误差是控制的目的。

Error-Error Principle (E^2P)

误差-误差原理是“**控制论**”的基本原理，生物体自我控制过程就是感受误差并消除误差的过程，是实现“**误差 - 误差**”原理的过程。

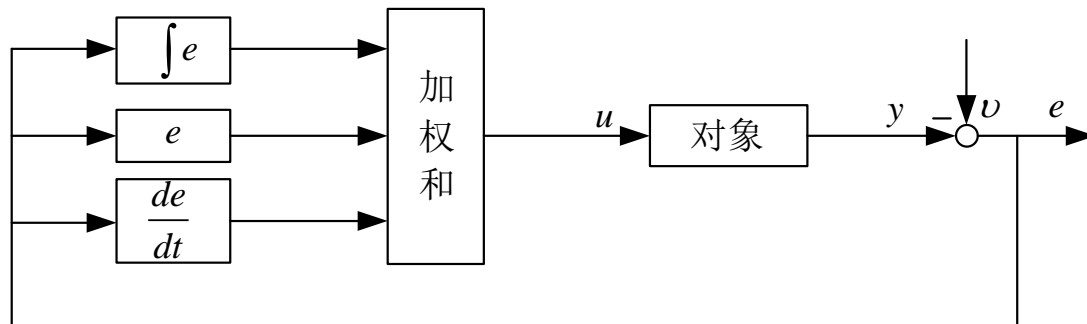


3.3.5 自抗扰控制技术

创新

原理 | 背景 | 克服PID缺陷 | 扩张状态观测器 | 应用 | 实例 | 总结

PID控制器结构：



- PID是在**模拟器件**时期，实现“误差 - 误差”原理的原始手段。
- PID技术在工程实际中能够长期占统治地位，而没有被现代控制理论成果所取代，必有其**合理性**。
- 设定值 v 与系统输出 y (被控输出)之间误差 e 、误差的积分 $\int e$ 、误差的微分 de/dt 的加权和，**这是一个线性组合**。



以下哪些是PID控制器存在的缺陷？

A

直接取设定值与输出值的误差不合理

B

微分会放大噪声

C

线性组合不一定是最优的选择

D

积分的副作用很多

E

用误差消除误差，是一种被动的方法，性能受限

提交



3.3.5 自抗扰控制技术

创新

原理 | 背景 | 克服PID缺陷 | 扩张状态观测器 | 应用 | 实例 | 总结

第二步：深入分析PID控制原理，发现不足

- 直接取设定值和输出值间的误差有时不合理；
- 取微分的方法“噪声放大”太厉害；
- 误差的“现在、过去、变化趋势”三者的加权和(线性组合)不一定是最合适的方式；
- 实践证明“积分反馈”有许多副作用；
- PID对抗动抑制是被动的，产生误差后才有动作，性能受限。



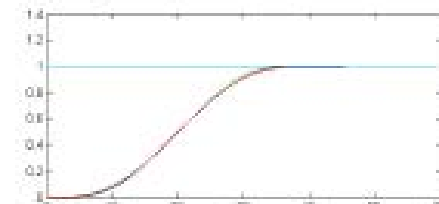
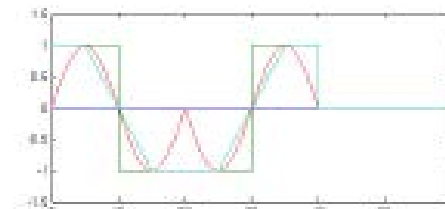
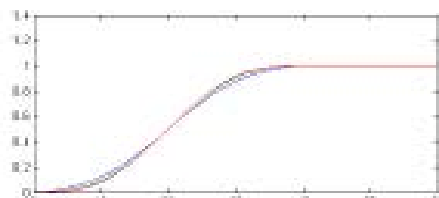
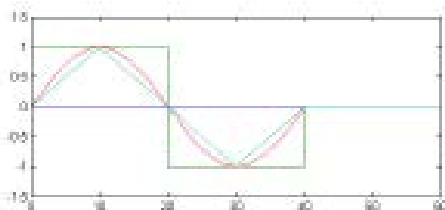
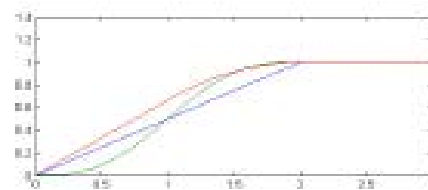
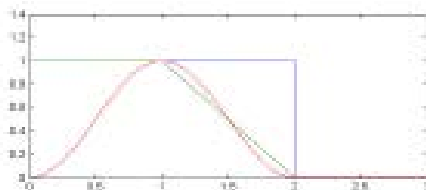
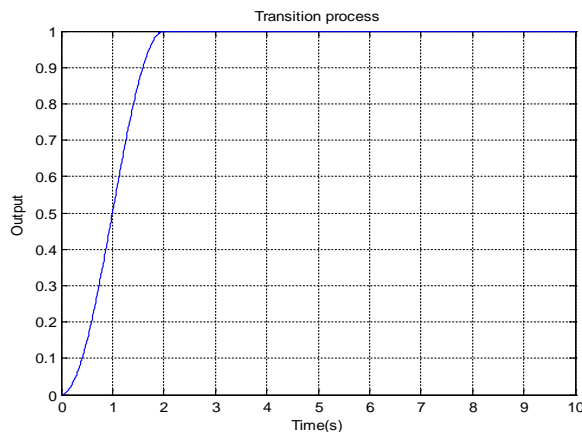
3.3.5 自抗扰控制技术

原理 | 背景 | **克服PID缺陷** | 扩张状态观测器 | 应用 | 实例 | 总结

1. 安排过渡过程(ATP)——平滑阶跃指令

根据设定值和对象承受能力安排过渡过程，对1, 2, 3阶对象，可以安排有速度、加速度、加加速度模式的指令规划。

$$\text{trns}(T_0, t) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left\{ 1 + \sin \left[\pi \left(\frac{t}{T_0} - \frac{1}{2} \right) \right] \right\}, & t \leq T_0 \\ 1, & t > T_0 \end{cases}$$

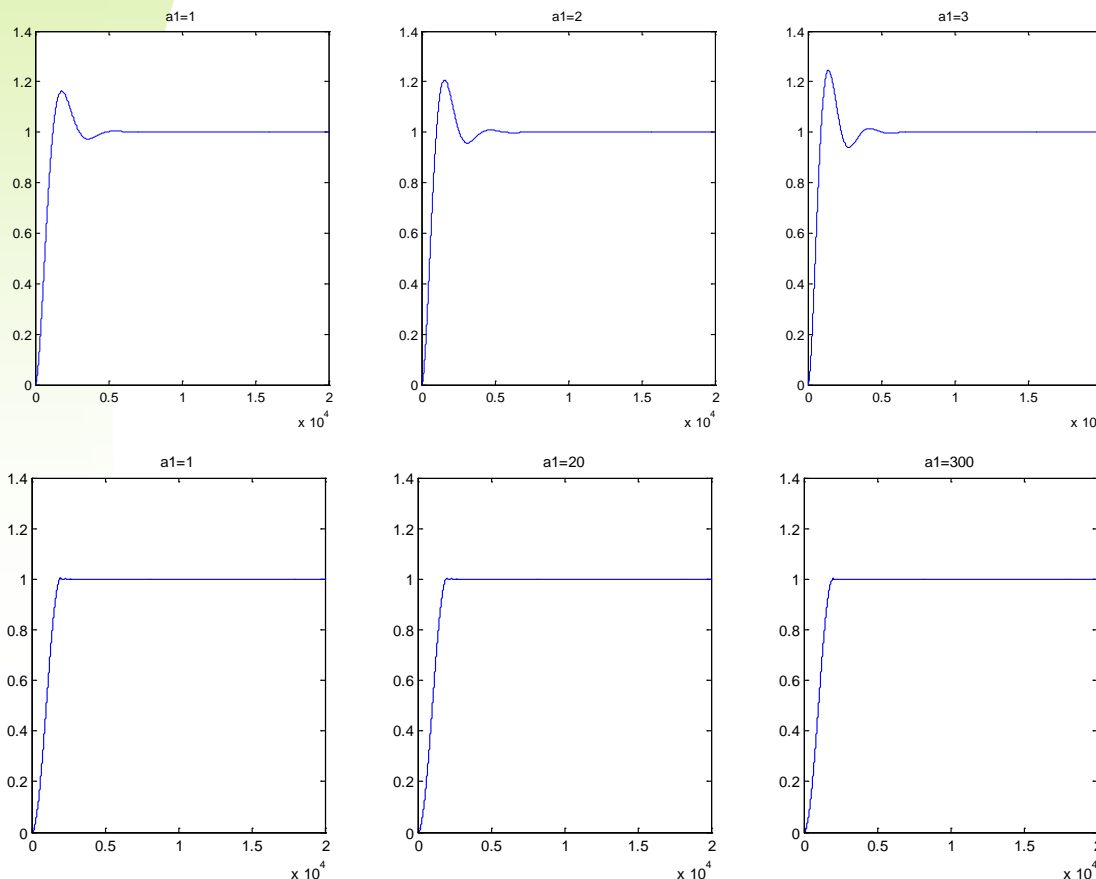




3.3.5 自抗扰控制技术

原理 | 背景 | **克服PID缺陷** | 扩张状态观测器 | 应用 | 实例 | 总结

1. 安排过渡过程(ATP) ——减小超调的作用



无ATP情况下，**系统参数**变化时，阶跃响应的变化。

$$\begin{cases} \ddot{x} = -\bar{a}_1(x - v_0) - \bar{a}_2\dot{x} \\ y = x \\ \bar{a}_1 = a_1 + k_1 \\ \bar{a}_2 = a_2 + k_2 \end{cases}$$

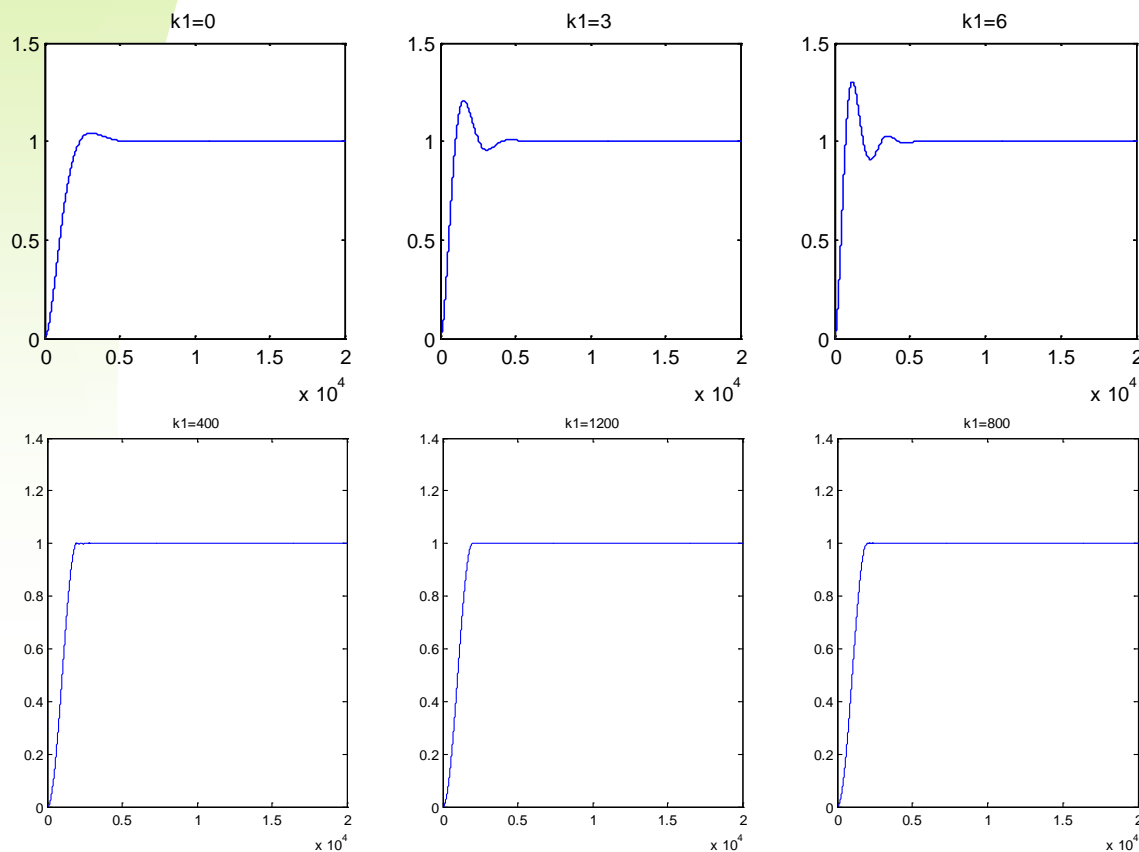
有ATP情况下，**系统参数**变化时，阶跃响应的变化。



3.3.5 自抗扰控制技术

原理 | 背景 | **克服PID缺陷** | 扩张状态观测器 | 应用 | 实例 | 总结

1. 安排过渡过程(ATP) ——减小超调的作用



无ATP情况下，**控**
制器参数变化时，
阶跃响应的变化。

$$\begin{cases} \ddot{x} = -\bar{a}_1(x - v_0) - \bar{a}_2\dot{x} \\ y = x \\ \bar{a}_1 = a_1 + k_1 \\ \bar{a}_2 = a_2 + k_2 \end{cases}$$

有ATP情况下，**控**
制器参数变化时，
阶跃响应的变化。

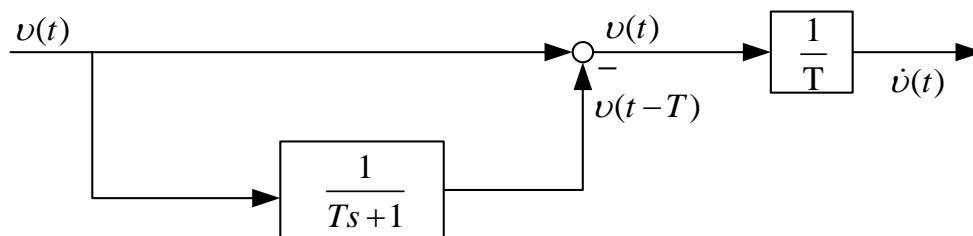


3.3.5 自抗扰控制技术

原理 | 背景 | **克服PID缺陷** | 扩张状态观测器 | 应用 | 实例 | 总结

2. 合理提取信号的微分——经典微分器

经典微分器



$$y = \frac{k}{\tau s + 1} u, \quad \tau s y + y = k u \quad \tau \dot{y} + y = k u, \quad \dot{y} = -\frac{1}{\tau} (y - k u)$$

$$\dot{y} = -\frac{1}{\tau} (y - u(t)) \Rightarrow y(t) \approx u(t - \tau)$$

用了微分近似 $\dot{v}(t) \approx \frac{v(t) - v(t-T)}{T}$, 会带来严重的噪声。



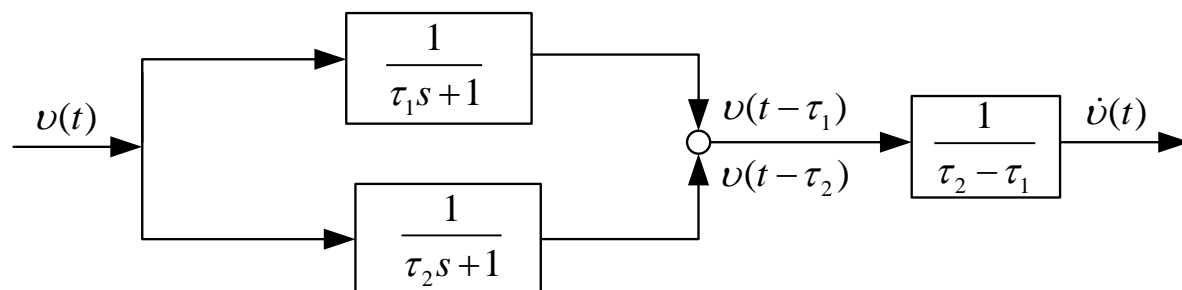
3.3.5 自抗扰控制技术

频域

原理 | 背景 | **克服PID缺陷** | 扩张状态观测器 | 应用 | 实例 | 总结

2. 合理提取信号的微分——改进微分器

改进微分器



$$\dot{v}(t) \approx \frac{v(t - \tau_1) - v(t - \tau_2)}{\tau_2 - \tau_1}$$

$$w(s) = \frac{1}{\tau_2 - \tau_1} \left(\frac{1}{\tau_1 s + 1} - \frac{1}{\tau_2 s + 1} \right)$$

$$w(s) = \frac{s}{(ws + 1)^2 + \varepsilon s} \approx \frac{s}{\left(\frac{s}{r} + 1\right)^2}$$





3.3.5 自抗扰控制技术

原理 | 背景 | **克服PID缺陷** | 扩张状态观测器 | 应用 | 实例 | 总结

2. 合理提取信号的微分——微分跟踪器

构造微分跟踪器

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -r \operatorname{sign} \left(\frac{(x_1 - \mathbf{v}(t)) + x_2 |x_2|}{2r} \right) \end{cases}$$

$x_1 \rightarrow \mathbf{v}(t)$ 跟踪信号本身

$x_2 \rightarrow \dot{\mathbf{v}}(t)$ 跟踪信号的微分

具体实现采用如下离散系统

$$x_1(t+h) = x_1(t) + hx_2$$

$$x_2(t+h) = x_2(t) + hu, \quad |u| \leq r$$

韩老师设计的最优反馈控制律：

$$u = \mathbf{fhan}(x_1, x_2, r, h_1)$$

$$\mathbf{fhan}(x_1, x_2, r, h_1) = -r \begin{cases} \frac{a}{d}, & |a| \leq d \\ \operatorname{sign}(a), & |a| > d \end{cases}$$

$$\begin{cases} a = \begin{cases} x_2 + \frac{(a_0 - d)}{2} \operatorname{sign}(y), & |y| > d_0 \\ x_2 + \frac{y}{h_1}, & |y| \leq d_0 \end{cases} \\ d = rh_1; & d_0 = h_1 d; \\ y = x_1 + hx_2; & a_0 = \sqrt{d^2 + 8r|y|} \end{cases}$$

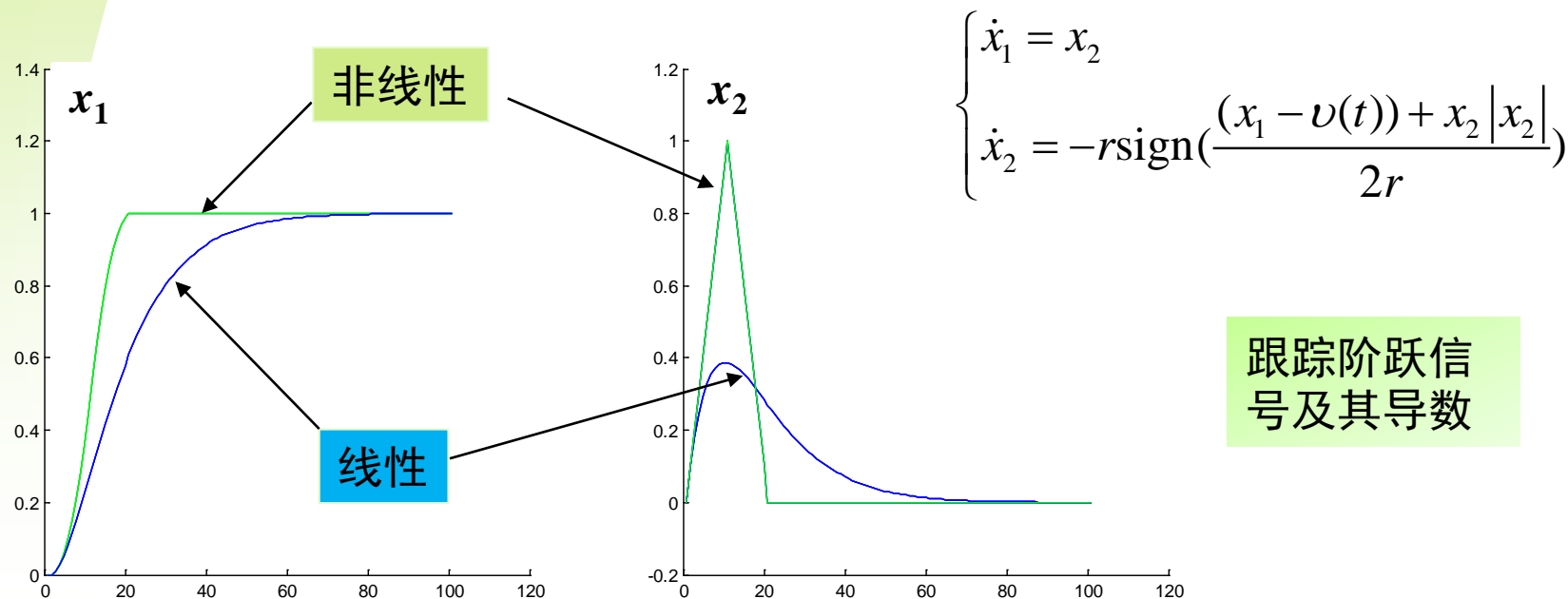
用跟踪控制解决信号处理问题



3.3.5 自抗扰控制技术

原理 | 背景 | **克服PID缺陷** | 扩张状态观测器 | 应用 | 实例 | 总结

2. 合理提取信号的微分——微分跟踪器



非线性与线性微分跟踪器获取的微分信号效果对比



3.3.5 自抗扰控制技术

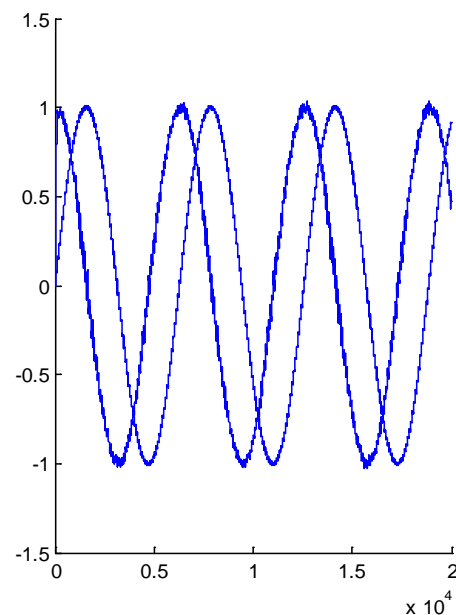
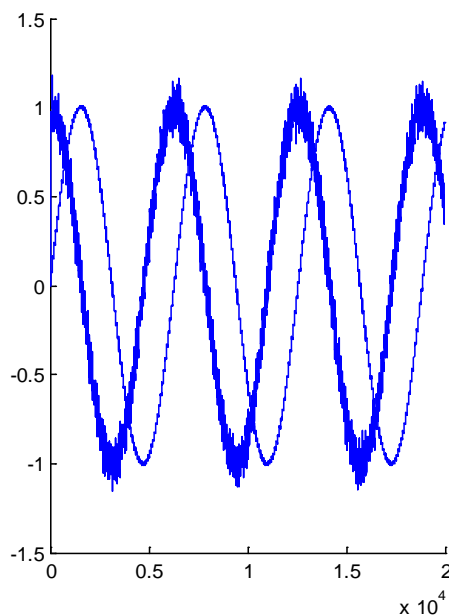
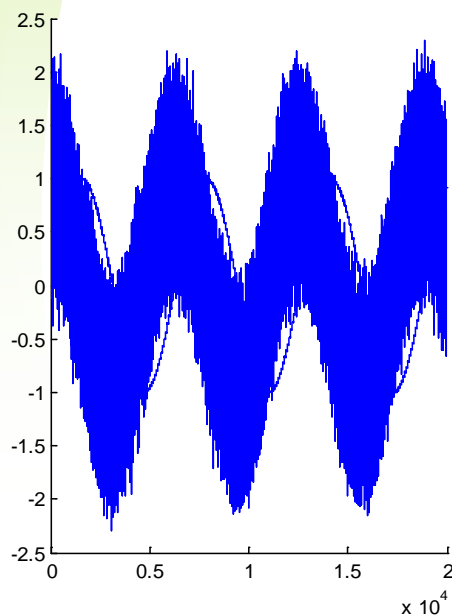
原理 | 背景 | **克服PID缺陷** | 扩张状态观测器 | 应用 | 实例 | 总结

2. 合理提取信号的微分——效果对比

$$\dot{v}(t) \approx \frac{v(t) - v(t-T)}{T}$$

$$\dot{v}(t) \approx \frac{v(t-\tau_1) - v(t-\tau_2)}{\tau_2 - \tau_1}$$

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -r \operatorname{sign}\left(\frac{(x_1 - v(t)) + x_2 |x_2|}{2r}\right) \end{cases}$$



不同方法的效果对比



3.3.5 自抗扰控制技术

原理 | 背景 | **克服PID缺陷** | 扩张状态观测器 | 应用 | 实例 | 总结

3. 误差PID的组合形式

线性反馈和非线性反馈：考察一阶对象 $\dot{e} = w + u$

取反馈 $u = -ke^a$ ，记 $e^a = |e|^a \text{sign}(e)$ ， $k > |w|$

$a=1$ —线性反馈	$a=0.5$ —开方反馈	$a=2$ —平方反馈
$\dot{e} = w - ke$	$\dot{e} = w - ke^{0.5}$	$\dot{e} = w - ke^2$
$e(\infty) = (\frac{w}{k})$	$e(\infty) = (\frac{w}{k})^2$	$e(\infty) = \sqrt{\frac{w}{k}}$

$a=0$ 时， $u = \text{sign}(e)$ —变结构控制，稳态误差 $e(\infty) = (\frac{w}{k})^\infty = 0$

非线性组合形式： $u = k_0 e_0^{a_0} + k_1 e_1^{a_1} + k_2 e_2^{a_2}$ ， $-1 < a_0 < 0 < a_1 < 1 < a_2 < 2$



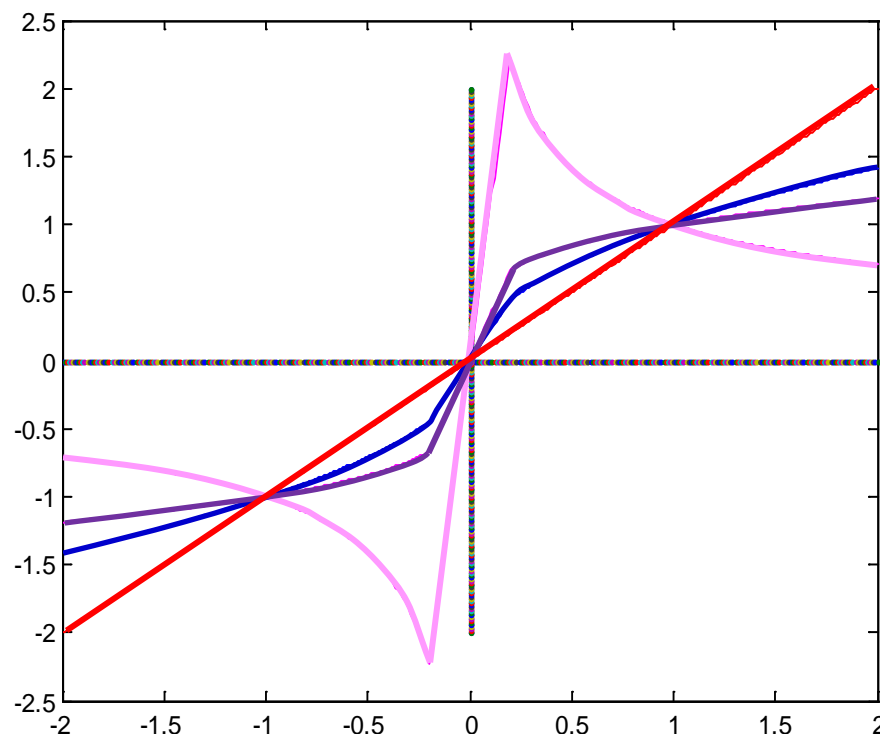
3.3.5 自抗扰控制技术

原理 | 背景 | 克服PID缺陷 | **扩张状态观测器** | 应用 | 实例 | 总结

3. 误差PID的组合形式

$$\text{fal}(e, a, \delta) = \begin{cases} |e|^a \text{sign}(e), & |e| > \delta \\ e / \delta^{1-a}, & |e| < \delta \end{cases}$$

当 $0 < a < 1$ 时，实际上是对控制工程界一个经验知识，“**大误差，小增益；小误差，大增益**”的数学拟合。可以从非线性反馈的角度提升系统的鲁棒性和适应性。





3.3.5 自抗扰控制技术

原理 | 背景 | 克服PID缺陷 | **扩张状态观测器** | 应用 | 实例 | 总结

4. 主动抑制扰动——扩张状态观测器

给定二阶被控对象:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(x_1, x_2) + b_0 u \\ y = x_1 \end{cases}$$

扩张一维状态变量:

$$x_3(t) = f(x_1(t), x_2(t)), \quad \dot{x}_3(t) = w(t)$$



$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 + bu \\ \dot{x}_3 = w(t) \\ y = x_1 \end{cases}, \quad w(t) \text{未知}$$

建立状态观测器ESO:

$$\begin{cases} e = z_1 - y \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_{01} e \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_{02} e + b_0 u \\ \dot{z}_3 = -\beta_{03} e \end{cases}$$

ESO的作用:

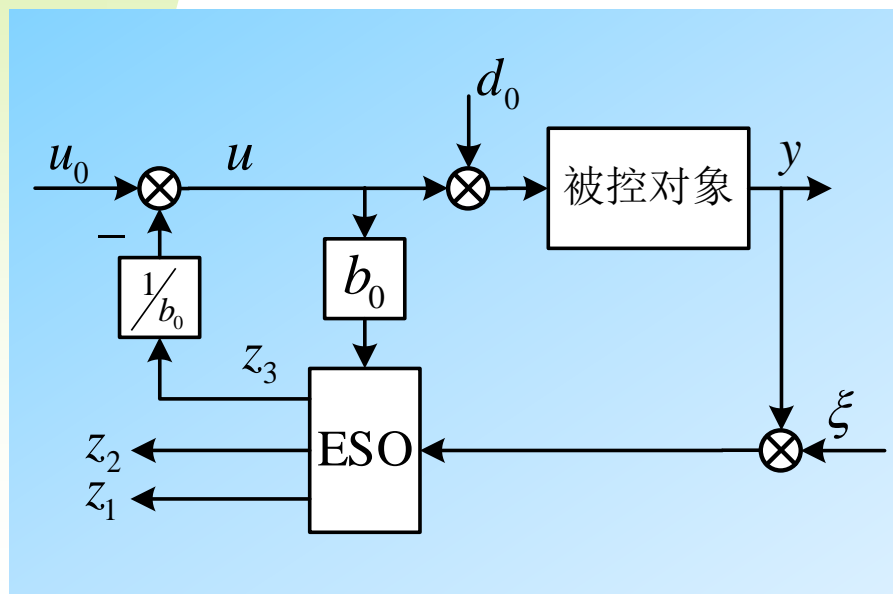
$$\begin{aligned} z_1(t) &\Rightarrow x_1(t), & z_2(t) &\Rightarrow x_2(t) && \text{观测对象状态} \\ z_3(t) &\Rightarrow x_3(t) = f(x_1(t), x_2(t)) && && \text{观测对象总扰动} \end{aligned}$$



3.3.5 自抗扰控制技术

原理 | 背景 | 克服PID缺陷 | **扩张状态观测器** | 应用 | 实例 | 总结

4. 主动抑制扰动——补偿后的对象形式



$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(x_1, x_2) + b_0 u \\ y = x_1 \end{cases}$$



$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 + \beta_1 (y - z_1) \\ \dot{z}_2 = z_3 + \beta_2 (y - z_1) + b_0 u \\ \dot{z}_3 = \beta_3 (y - z_1) \end{cases}$$

将系统补偿为 $G_0(s) = \frac{b_0}{s^2}$ 待观测的总扰动为 $f(x_1, x_2) = \ddot{y} - b_0 u$



3.3.5 自抗扰控制技术

原理 | 背景 | 克服PID缺陷 | **扩张状态观测器** | 应用 | 实例 | 总结

4. 主动抑制扰动——总扰动补偿后的优点

$$G_0(s) = \frac{b_0}{s^2}$$

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f + b_0 u \\ y = x_1 \end{cases}$$

$$\ddot{y} = f(y, \dot{y}, w, t) + u$$

$$u = u_0 - \hat{f}$$

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 \approx b_0 u_0 \Leftrightarrow \ddot{y} \approx b_0 u_0 \\ y = x_1 \end{cases}$$

不确定
非线性
时变的
复杂的

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 - \beta_1(z_1 - y) \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_2(z_1 - y) + b_0 u \\ \dot{z}_3 = -\beta_3(z_1 - y) \end{cases}$$

$$\hat{f} = z_3 \approx x_3 = f(y, \dot{y}, w, t)$$

确定的
线性的
定常的
简单的



3.3.5 自抗扰控制技术

原理 | 背景 | 克服PID缺陷 | **扩张状态观测器** | 应用 | 实例 | 总结

4. 主动抑制扰动——线性ESO参数整定

方法一：经验公式（斐波那契数列）

$$\begin{cases} e = x_1 - z_1 \\ \dot{z}_1 = z_2 + \beta_{01}e \\ \dot{z}_2 = z_3 + \beta_{02}e + b_0u \\ \dot{z}_3 = \beta_{03}e \end{cases}$$

参数整定方法

1	1	2	5	8	13	34	55
1	3	8	13	21	34	55	89

$$\beta_{01} = \frac{1}{h}, \beta_{02} = \frac{1}{3h^2}, \beta_{03} = \frac{2}{8^2 h^3}, \beta_{04} = \frac{5}{13^3 h^4}, \dots$$



3.3.5 自抗扰控制技术

频域

原理 | 背景 | 克服PID缺陷 | **扩张状态观测器** | 应用 | 实例 | 总结

4. 主动抑制扰动——线性ESO参数整定

方法二：极点配置方法

$$\begin{cases} e = x_1 - z_1 \\ \dot{z}_1 = z_2 + \beta_{01}e \\ \dot{z}_2 = z_3 + \beta_{02}e + b_0u \\ \dot{z}_3 = \beta_{03}e \end{cases}$$

其特征方程为

$$D(s) = s^3 + \beta_{01}s^2 + \beta_{02}s + \beta_{03}$$

令

$$\begin{cases} \beta_{01} = 3\omega_o \\ \beta_{02} = 3\omega_o^2 \\ \beta_{03} = \omega_o^3 \end{cases}$$

特征方程变为

$$D(s) = (s + \omega_o)^3$$

只需根据系统带宽要求或者扰动信号频谱宽度确定 ω_o 即可

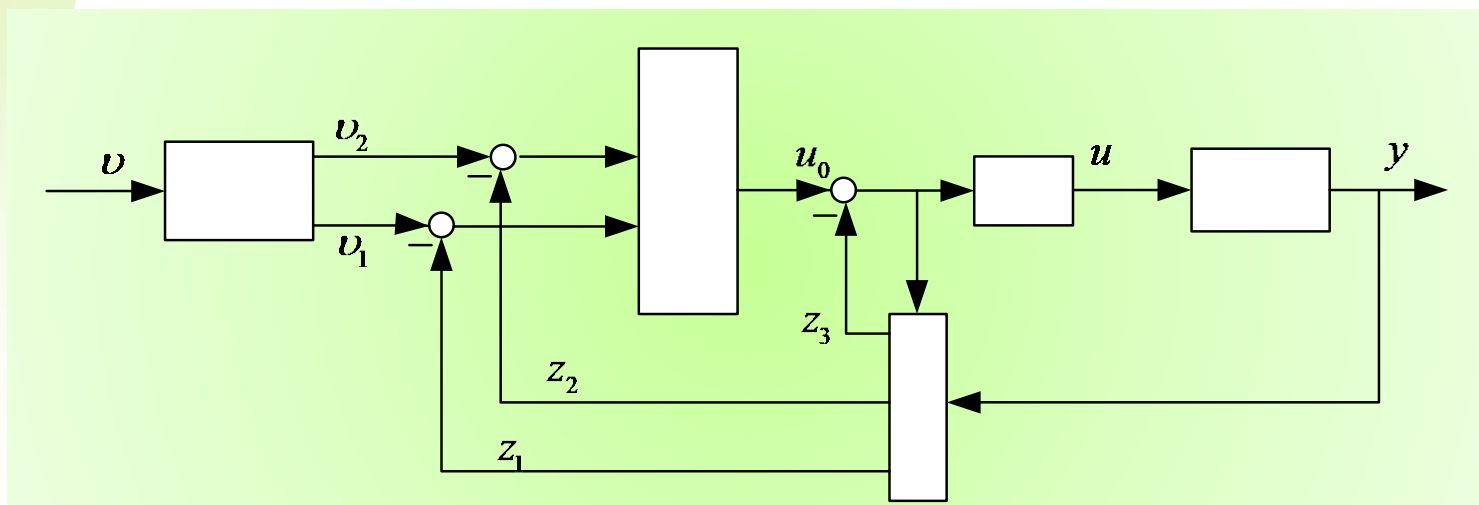
参数整定方法



3.3.5 自抗扰控制技术

原理 | 背景 | 克服PID缺陷 | **扩张状态观测器** | 应用 | 实例 | 总结

ADRC 整体结构



$$G_0(s) = \frac{b_0}{s^2}$$



3.3.5 自抗扰控制技术

原理 | 背景 | 克服PID缺陷 | 扩张状态观测器 | **应用** | 实例 | 总结

- 美国，NASA空间飞行器**太阳能发电稳压控制**
- 日本，为Ampere公司解决了商用Micro-Slide的纳米级别精度的**位移控制**问题
- 国内，在电力系统电厂控制系统、化工系统、电机调速系统、精密机械加工车床。**已经应用于某型号导弹舵机控制系统和飞行器姿态控制，性能大幅提升。**

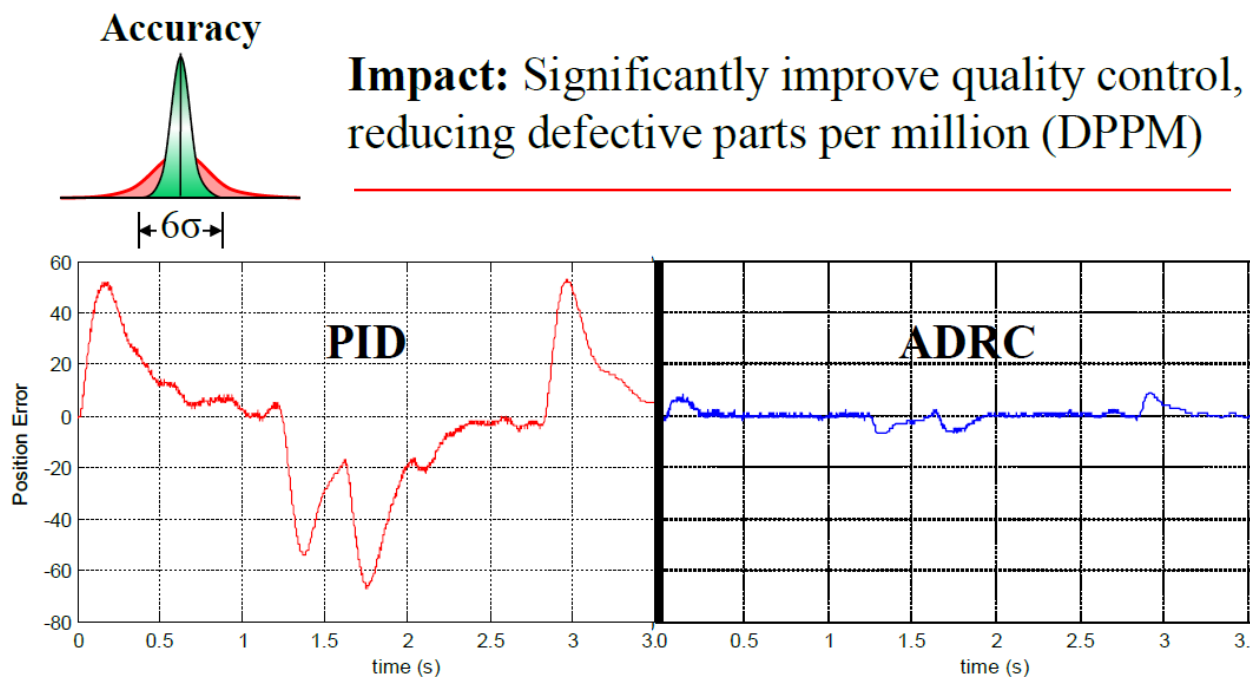


3.3.5 自抗扰控制技术

原理 | 背景 | 克服PID缺陷 | 扩张状态观测器 | **应用** | 实例 | 总结

与
P
I
D
的
全
面
对
比

Motion Control Test: Accuracy



81% Reduction in Position Error



3.3.5 自抗扰控制技术

原理 | 背景 | 克服PID缺陷 | 扩张状态观测器 | **应用** | 实例 | 总结

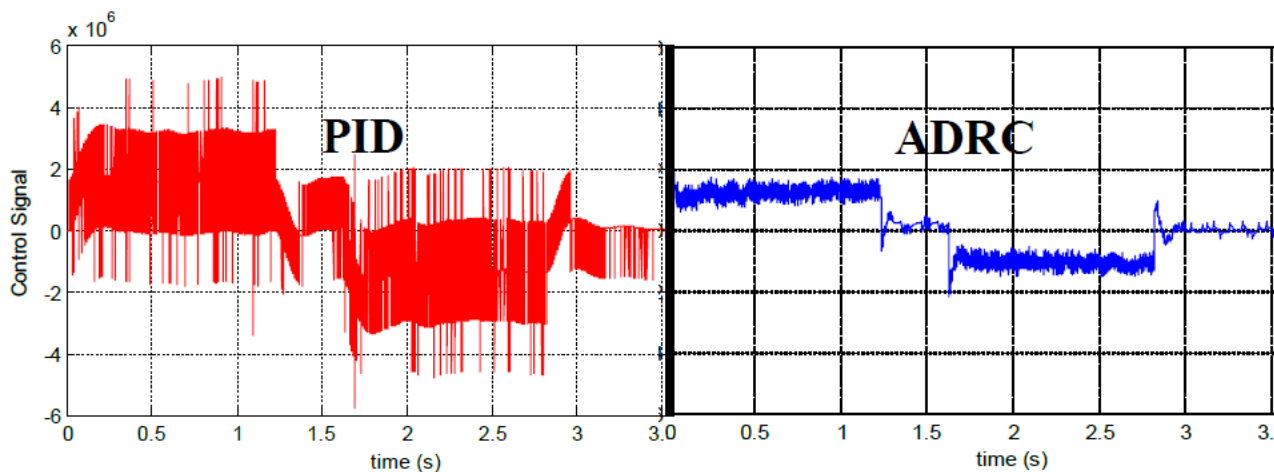
与
P
I
D
的
全
面
对
比

Motion Control Test: Energy Savings

Energy Savings



Impact: Reduce power usage by minimizing overshoots, vibration, and delayed response



41% Reduction in Energy (RMS Torque)



3.3.5 自抗扰控制技术

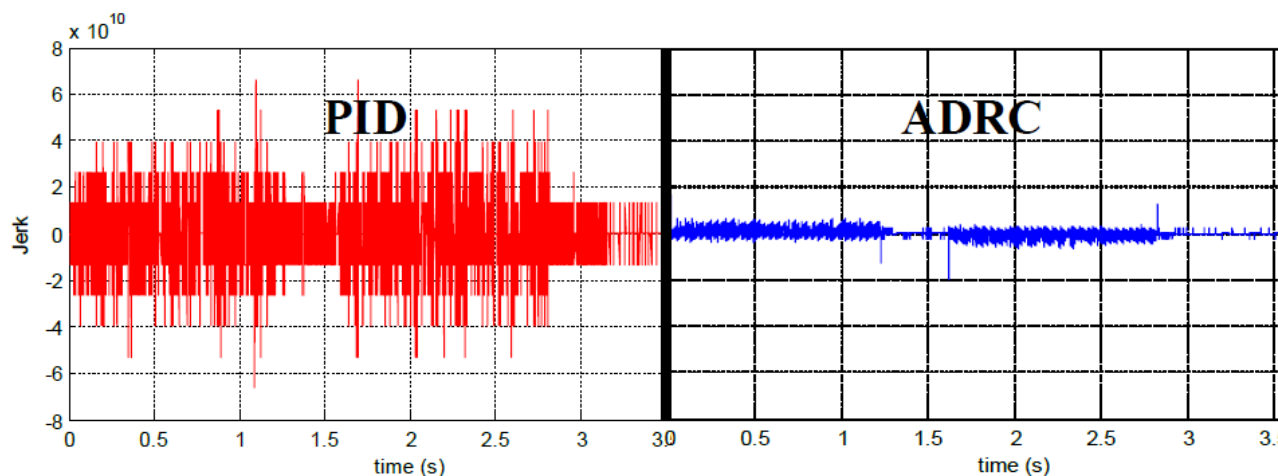
原理 | 背景 | 克服PID缺陷 | 扩张状态观测器 | **应用** | 实例 | 总结

Motion Control Test: Machine Life

Machine Life



Impact: Reduce wear and tear on machine, creating less downtime and prolonged life



RESULT: 71% Reduction in Jerk

与PID的全面对比



3.3.5 自抗扰控制技术

原理 | 背景 | 克服PID缺陷 | 扩张状态观测器 | [应用](#) | 实例 | 总结





3.3.5 自抗扰控制技术

原理 | 背景 | 克服PID缺陷 | 扩张状态观测器 | [应用](#) | 实例 | 总结



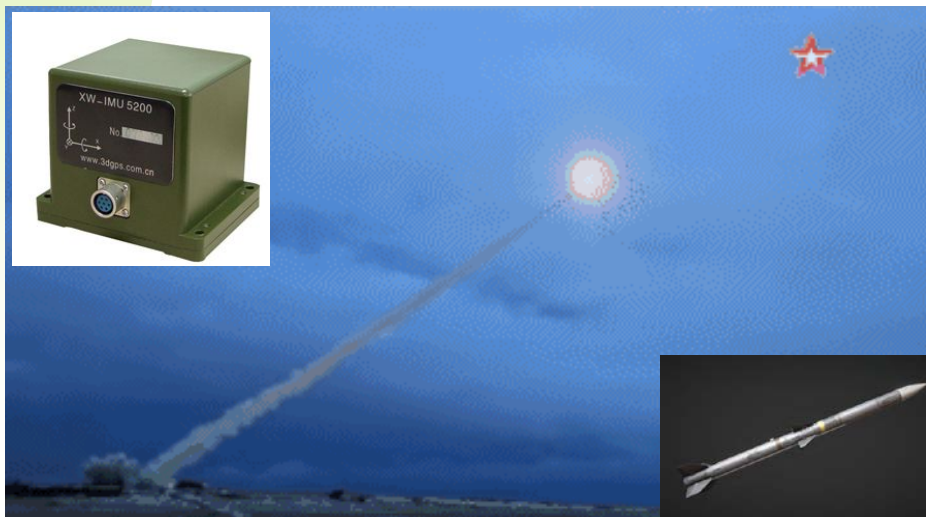


3.3.5 自抗扰控制技术

原理 | 背景 | 克服PID缺陷 | 扩张状态观测器 | 应用 | **实例** | 总结

实例：真空高低温星光惯组高精度测试转台（精度1"）

国内第一套可同时模拟真空、温度和姿态运动的综合测试设备



影响惯组性能的因素有：温度变化，气压变化，粒子辐照等



3.3.5 自抗扰控制技术

原理 | 背景 | 克服PID缺陷 | 扩张状态观测器 | 应用 | **实例** | 总结

实例：真空高低温星光惯组高精度测试转台（精度1''）



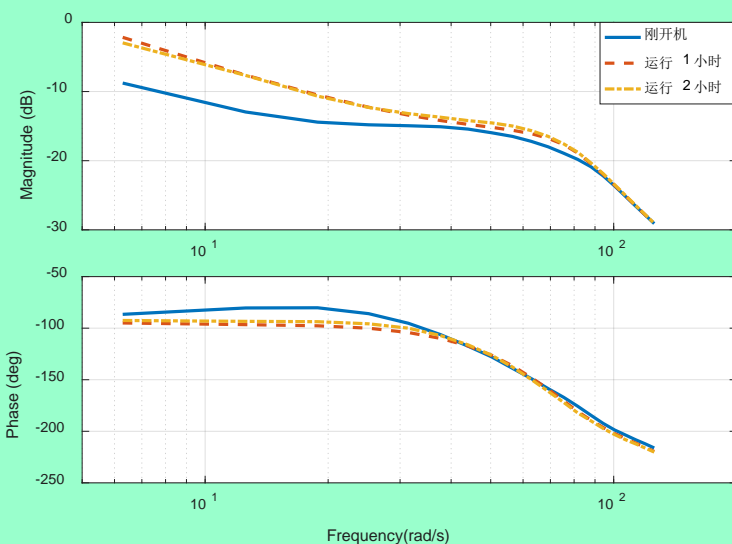
磁流体密封导致**系统特性变化很大**，**流体特性和磁特性**还带来了额外的扰动，与工况相关，传统方法难以满足性能要求



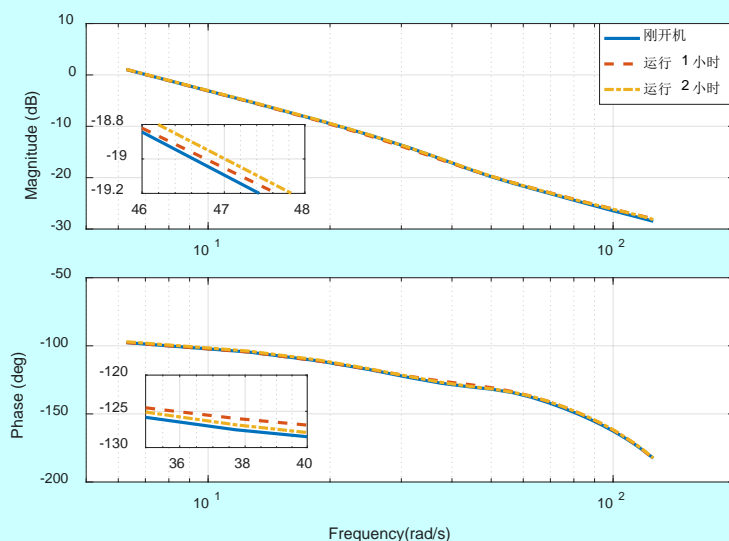
3.3.5 自抗扰控制技术

原理 | 背景 | 克服PID缺陷 | 扩张状态观测器 | 应用 | **实例** | 总结

实例：带真空高低温箱的星光惯组测试转台（精度1''）



补偿前



补偿后

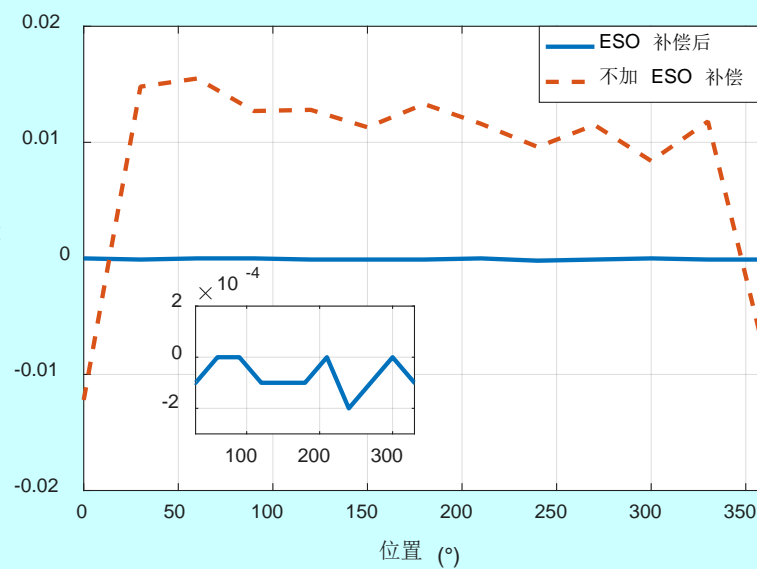
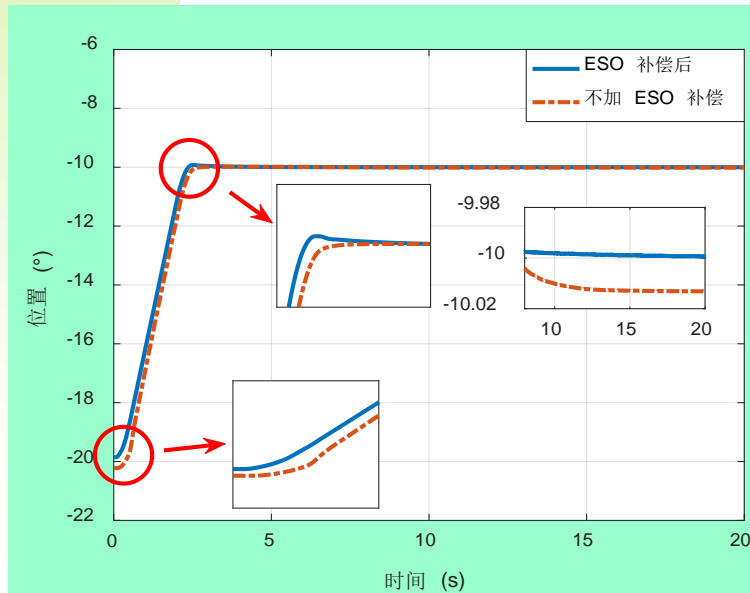
补偿前后，长时间运行后对象特性的变化



3.3.5 自抗扰控制技术

原理 | 背景 | 克服PID缺陷 | 扩张状态观测器 | 应用 | **实例** | 总结

实例：带真空高低温箱的星光惯组测试转台（精度1''）



补偿前后的位置精度，从0.02 提高到 0.0002，两个数量级



3.3.5 自抗扰控制技术

原理 | 背景 | 克服PID缺陷 | 扩张状态观测器 | 应用 | 实例 | **总结**

ADRC设计思想总结

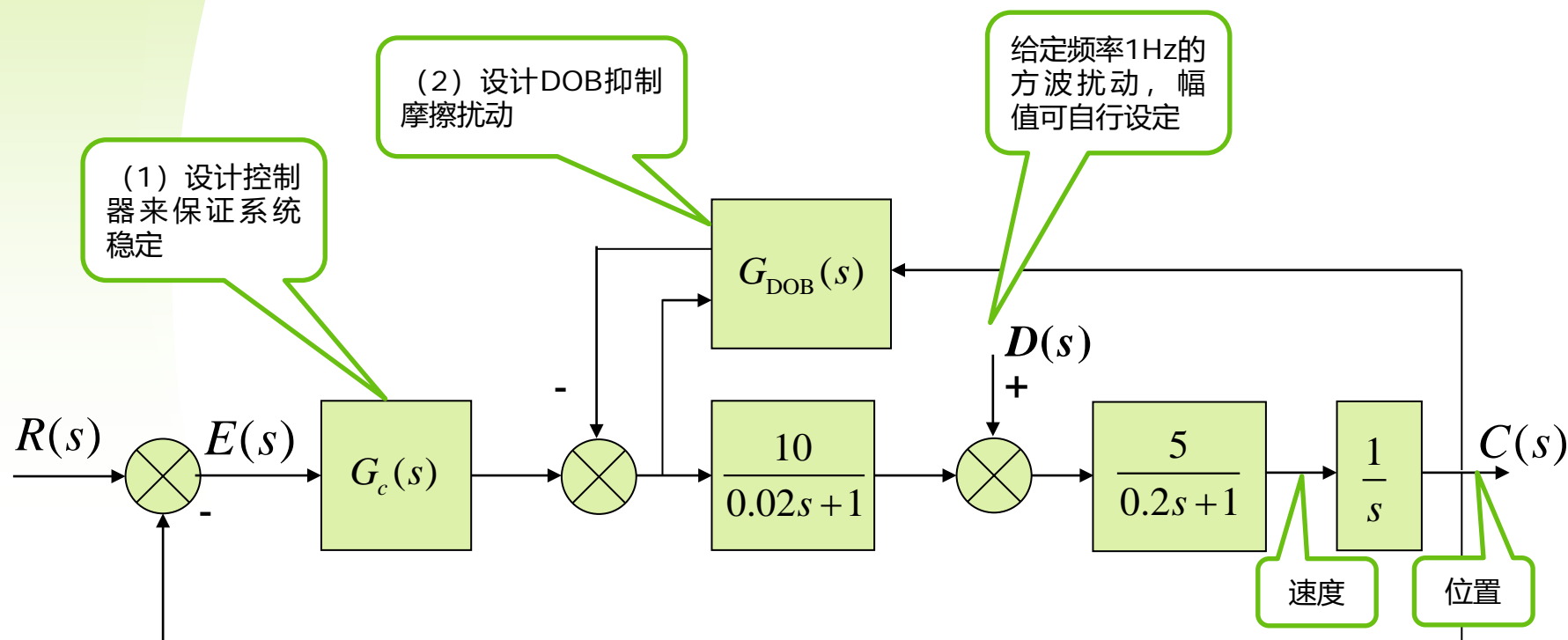
1. 通过设计过度过程ATP来平滑阶跃指令，改善了系统的瞬态响应；
2. 用控制方法实现信号处理，设计跟踪微分器TD代替传统微分器，减小了微分引入的噪声；
3. 引入总扰动概念，设计了扩张状态观测器ESO，可以将复杂被控对象补偿成简单的串联积分标准型；
4. 设计了fhan和fal两个优化的非线性函数，可以有效提升TD、PD和ESO性能；
5. 与PID控制一样，不需要精确的数学模型；



第13次课后作业

1 必选作业

1 仿真题：加入1Hz，幅值为5方波扰动到下面的系统中，同时跟踪正弦指令，幅值为1，频率为0.5Hz。设计DOB来补偿方波扰动。（1）并验证DOB性能时，还可以再加入一些模型摄动（改变一下增益或时间常数）（2）改变DOB滤波器 $Q(s)$ 的带宽，观察抗扰性能变化，也可尝试改变标称模型，看看带来的影响。





第13次课后作业

2 可选作业

1. 针对必选题，试试设计一下ADRC控制器（可以只设计线性ESO）；
2. PID控制规律给我们的**人生启发**？
3. 根据ADRC的来龙去脉，总结一下**科研创新**的方法，或者你受到的启发；
4. 硬币总有**正反两面**，分析ADRC的缺点；
5. 为什么ADRC中只用了**PD控制器**，为什么没用I？
6. 分析**DOB和ESO**的联系与却别，他们是否存在**等价关系**，等价条件是什么？
7. 如何理解**模型论和控制论**，你认为他们各有什么优缺点，你会更倾向于哪一种观点？
8. 你能想到ADRC中各部分（ATP，TD，NLDP，ESO，fhan，fal等）的其他使用方法吗，比如与其他方法的组合使用。



拓展思考

自己总结，无需上交

- a. 控制理论和方法的能力边界（控制不是万能的）；
- b. 每一种控制方法的利与弊（硬币总有正反两面）；
- c. 控制系统中的各种约束与限制（你不能随心所欲）；
- d. 各种方法都有自己的适用条件（看准了再用）
- e. 控制系统设计中的优化问题（处处有优化）；
- f. 哪些是针对信号的，哪些有是针对系统的，如何进行转化（信号与系统）；
- g. 控制系统中的各种性能指标（为什么这么多）；
- h. 控制系统设计中的各种概念和原理给我们的人生启发（人生可控吗）；



Thank You !