第3章 控制系统的扰动分析(2)

——2023年春季学期

授课教师： 马　杰（控制与仿真中心）

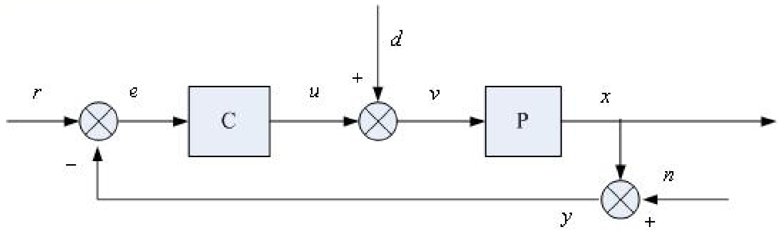
霍　鑫（控制与仿真中心）

马克茂（控制与仿真中心）

陈松林（控制与仿真中心）

扰动与噪声的区别**　扰动=干扰-噪声-系统摄动

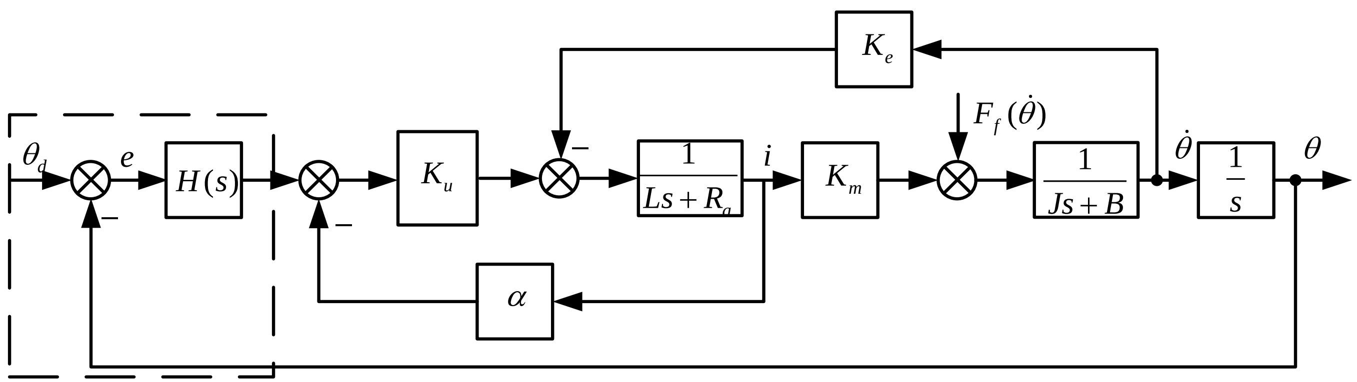
- **作用点不同**，扰动一般作用于系统的输入侧和输出侧，而噪声多是在信号采集、传输和处理等环节中引入，尤其是测量环节；
- **作用机理不同**，扰动一般直接作用于被控对象，使被控量发生改变，而噪声一般通过混入有用信号中间接地影响被控量；
- **特性不同**，扰动信号多数是可以测量或估计的，频带较窄，而噪声一般为随机信号，频谱范围很宽；
- **抑制方法不同**，控制上，噪声一般只能通过降低系统等效噪声带宽来抑制，但会影响系统的跟踪性能，而扰动的抑制方法则很多；



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

干扰分析的内容与目的

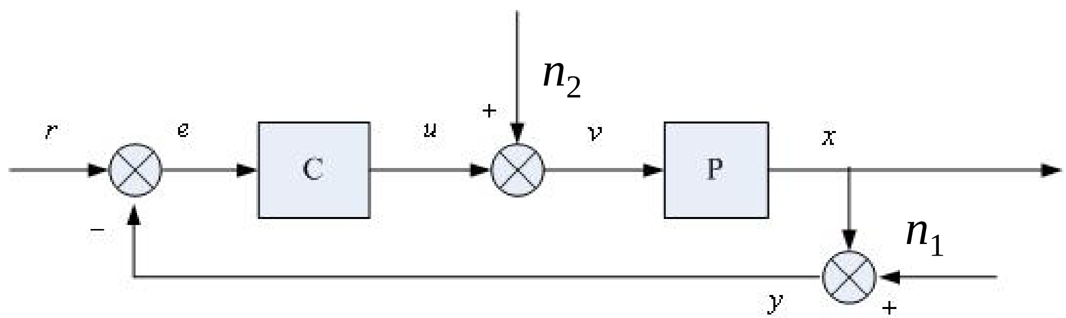
- 扰动作用机理分析（作用点，扰动建模，推导传递函数）
- 扰动的定性分析 （随机还是确定的，确定补偿方式或抑制方法）
- 扰动的定量分析（幅值、频谱等，指导选型，确定带宽）



- 指导元部件选型
- 根据扰动的特点，确定抑制扰动的控制方法

噪声的分类

反馈通道上的噪声和前向通道上的噪声对比



- 反馈通道上的量测噪声和前向通道上的噪声**传递函数不同**；
- **抑制方法不同**，前向通道上的噪声抑制方法同输入端扰动的抑制方法，对于反馈通道上的量测噪声，只能通过降低等效噪声带宽的方法进行抑制；

提升篇

如何在作业中收获更多

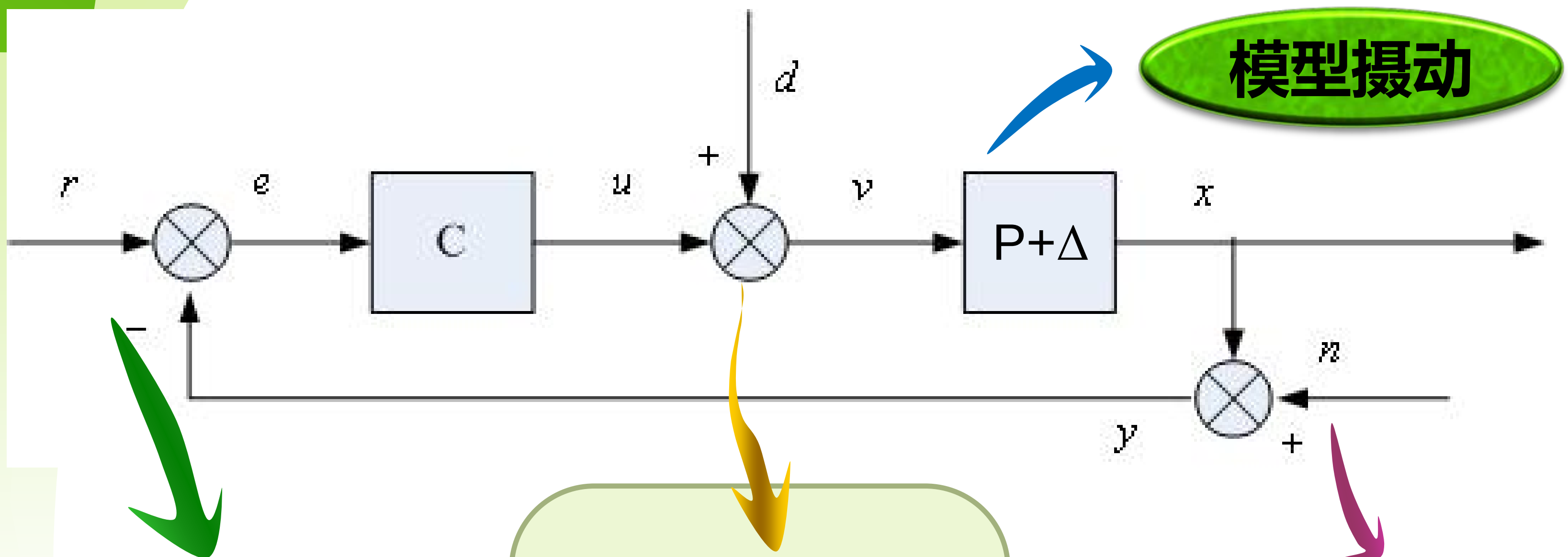
- **预期**：仿真的目的是加深课程内容的理解，预期的仿真结果要和课程中给出的结论相一致；
- **分析**：仿真结果是否与理论相符，不相符的要尽量找出原因，并想法办法解决，至少要能给出合理解释；
- **调整**：调整控制器参数，输入信号的形式（幅值，频率），仿真软件参数设置（周期、数值算法），都会影响仿真结果；
- **拓展**：多做一些拓展研究，改变一下仿真条件，换个对象，换一种方法，尝试发现一些规律；

拓展篇

概念墙

开环与闭环	误差与偏差	解析与数值
时域与频域	静态与动态	连续与离散
信号与系统	暂态与稳态	微分与差分
时间与空间	扰动与噪声	积分与求和
功能与性能	反馈与前馈	均值与方差
驱动与测量	增益与型别	幅值与相位
可控与可观	鲁棒与适应	结构与参数
理论与实践	主动与被动	超前与迟后
仿真与实验	事先与事后	直接与间接

抬头看路



指令信号 **干扰信号** **噪声信号**

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

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

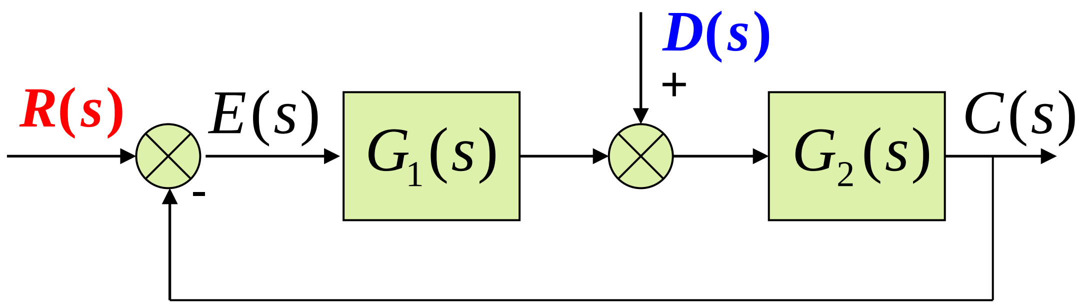
$$G_{xn} = \frac{-PC}{1+PC}$$

学习目标

本节课需要掌握的内容

- 掌握典型扰动下，系统的误差响应；
- 掌握抑制扰动的一般性原则和方法；
- 掌握几种特殊扰动的抑制方法；

3.3 扰动分析



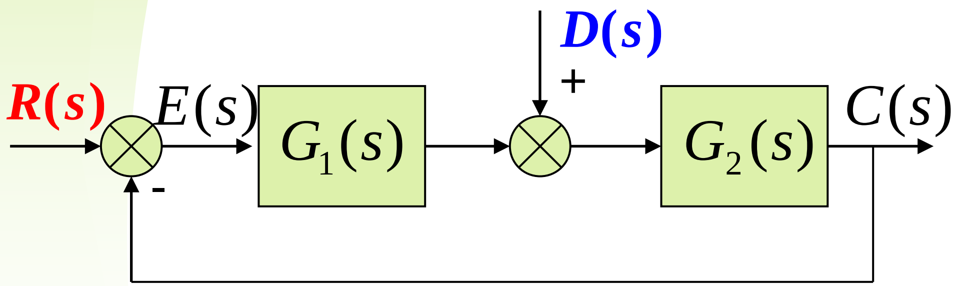
扰动响应定义： 系统输出$C(s)$对扰动$D(s)$的响应

$$T(s)=\frac{G_2(s)}{1+G_1(s)G_2(s)}$$

理想的扰动响应： $T(s)=0$

通常，给定输入作用产生的误差为系统的给定误差，扰动作用产生的误差为扰动误差。

$R(s)=0, D(s)\neq 0$ 时产生的 $-C(s)$ 称为扰动误差（偏差和误差等价）



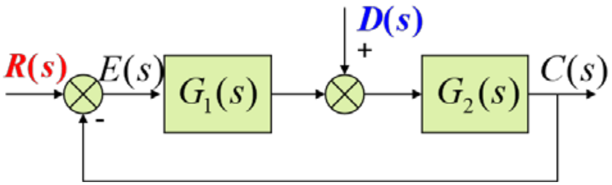
$$\frac{C(s)}{D(s)}=\frac{G_2}{1+G_1G_2}$$

$$C(s)=\frac{G_2D(s)}{1+G_1G_2}$$

$$E(s)=-C(s)=-\frac{G_2}{1+G_1G_2}D(s)$$

$$\therefore e_{ssd}=\lim_{t\to\infty}e(t)=\lim_{s\to 0}sE(s)=-\lim_{s\to 0}s\cdot\frac{G_2}{1+G_1G_2}D(s)$$

可见，e_{ssd} 不仅与 $G_2(s), D(s)$ 有关，还与 $G_1(s)$ 有关（**扰动点到偏差之间**的那部分通道传递函数）



$$\therefore e_{ssd} = -\lim_{s\to 0} s \cdot \frac{G_2}{1+G_1G_2} D(s)$$

$$= -\lim_{s\to 0} \frac{sD(s)}{G_1} \cdot \frac{G_1G_2}{1+G_1G_2} \quad = -\lim_{s\to 0} \frac{sD(s)}{G_1} \cdot \frac{G_k}{1+G_k}$$

$$G_k(s) = \frac{K}{s^\nu} \cdot \frac{\prod_{i=1}^{m_1}(\tau_i^2 s+1)\prod_{k=1}^{m_2}(\tau_k^2 s^2 + 2\zeta_k \tau_k s+1)}{\prod_{j=1}^{n_1}(T_j^2 s+1)\prod_{l=1}^{n_2}(T_l^2 s^2 + 2\zeta_l T_l s+1)} = \frac{K}{s^\nu} \cdot G_0(s)$$

式中：$G_k = G_1G_2$， $G_0(0) = 1$， $m_1 + 2m_2 = m$， $\nu + n_1 + 2n_2 = n$

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

$$G_k(s)=\frac{K}{s^{v}}\cdot G_0(s)$$

$$\therefore e_{ssd}=-\lim_{s\to 0}\frac{sD(s)}{G_1}\cdot\frac{\frac{K}{s^{v}}G_0}{1+\frac{K}{s^{v}}G_0}=-\lim_{s\to 0}\frac{sD(s)}{G_1}\cdot\frac{K}{s^{v}+K}$$

1 当 $v=0$，即开环传递函数中无积分环节，同时假设 $G_2(s)$ **无纯微分环节**，因此 $G_1(s)$ 中也**无积分环节（假设也无纯微分环节）**。

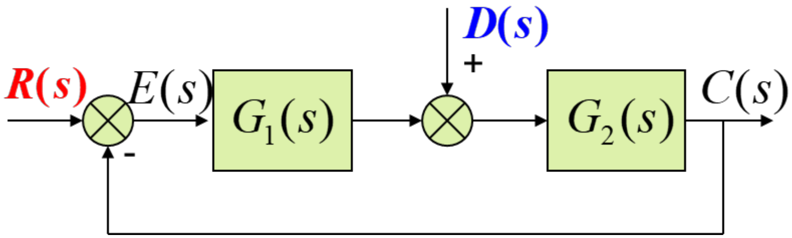
$$e_{ssd}=-\lim_{s\to 0}\frac{sD(s)}{G_1}\cdot\frac{K}{1+K}$$

此时在阶跃扰动输入时是有差系统，设 $G_1(s)=K_1G_{10}(s)$，$G_{10}(0)=1$

$$G_{10}(s)=\frac{\prod_{i=1}^{m_{10}}(\bar{\tau}_j^2 s+1)\prod_{k=1}^{m_{20}}(\bar{\tau}_k^2 s^2+2\bar{\zeta}_k\bar{\tau}_k s+1)}{\prod_{j=1}^{n_{10}}(\bar{T}_j^2 s+1)\prod_{l=1}^{n_{20}}(\bar{T}_l^2 s^2+2\bar{\zeta}_l\bar{T}_l s+1)}$$

$$e_{ssd}=-\frac{K}{K_1(1+K)}$$

2 当$v>0$，即开环传递函数中有积分环节，但积分环节可在不同的地方。



$$e_{ssd}=-\lim_{s\to 0}\frac{sD(s)}{G_1}\cdot\frac{K}{s^v+K}=-\lim_{s\to 0}\frac{sD(s)}{G_1}\cdot\frac{K}{K}=-\lim_{s\to 0}\frac{sD(s)}{G_1}$$

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

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

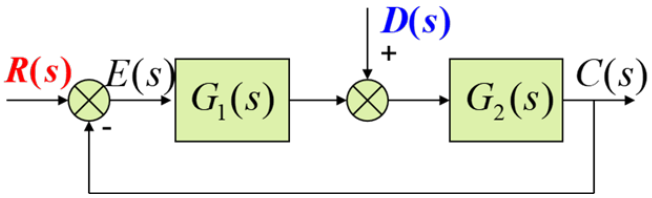
$$e_{ssd} = -\lim_{s\to 0}\frac{s^{u+1}D(s)}{K_1}$$

① 设 $u=0$ 即$G_1(s)$无积分环节，在阶跃扰动作用下 $e_{ssd} = -\dfrac{1}{K_1}$

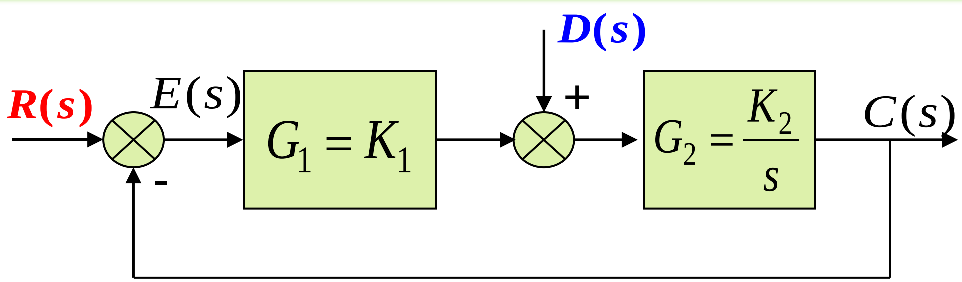
虽然开环传递函数有积分环节，在阶跃扰动作用下还是有差的。

② 设 $u>0$ 即 $G_1(s)$ 有积分环节，在阶跃扰动作用下 $e_{ssd}=0$

若 $u=1$，在阶跃扰动作用下是无差的。若 $u=2$ 在斜坡扰动作用下也是无差的。因此 $G_1(s)$ 环节中的积分环节决定了扰动作用下的无差度。



[例1]：系统结构如右图所示。当 $r(t)=d(t)=1(t)$ 时，求系统的稳态误差 e_{ss} ，若要求稳态误差为0，如何改变系统结构。



解： 该系统为 I 型系统。所以当给定输入 $R(s)$ 为单位阶跃函数时的稳态误差 $e_{ssr}=0$

但该系统对于扰动输入 $D(s)$ 为单位阶跃函数时的稳态误差 e_{ssd} 并不等于零。根据前面的分析可知，稳态误差与 G_1 中的增益和积分环节的个数有关。此时因 G_1 无积分环节，所以

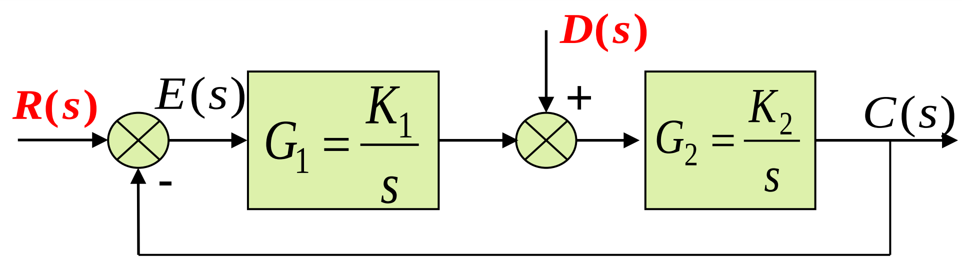
$$e_{ssd} = -\frac{1}{K_1}$$

也可这样求 $e_{ssd} = \lim_{s\to 0} s\Phi_{ED}\frac{1}{s} = \lim_{s\to 0}\frac{-K_2}{s+K_1K_2} = -\frac{1}{K_1}$

$$e_{ss} = e_{ssr} + e_{ssd} = -\frac{1}{K_1}$$

3.3.2 扰动响应与误差分析

若想使阶跃扰动下稳态误差为0，则要求G_1中有积分环节，令



$$G_1 = K_1 / s$$

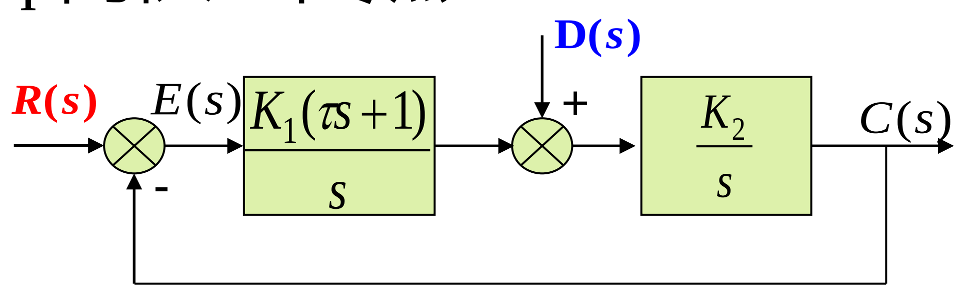
此时 $$e_{ssd} = \lim_{s\to 0} s\frac{-K_2/s}{1+K_1K_2/s^2}\frac{1}{s} = \lim_{s\to 0}\frac{-K_2 s}{s^2+K_1K_2} = 0$$

对不对?

由于此时系统的稳定性遭到破坏，直接加一个积分环节是不可行的。若要使系统稳定，还必须在原G_1中引入一个零点

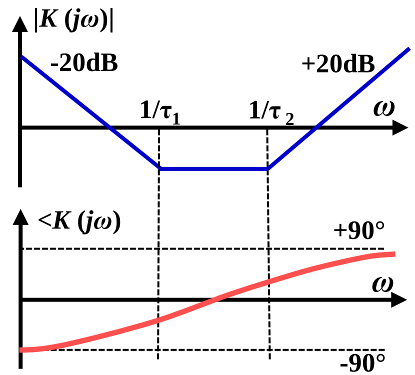
$$G_1 = \frac{K_1(\tau s+1)}{s}$$

$$\Phi_{ED} = \frac{K_2 s}{s^2+K_1K_2\tau s+K_1K_2}$$



当K_1>0，K_2>0，τ >0时系统稳定

由此可见当用 $G_1=\dfrac{K_1(\tau s+1)}{s}$ 时，才能在保证稳定的前提下使系统在阶跃扰动作用下的稳态误差为零。



$$G_1=\frac{K_1(\tau s+1)}{s}=K_1(\tau+\frac{1}{s})=K_1\tau+\frac{K_1}{s}$$

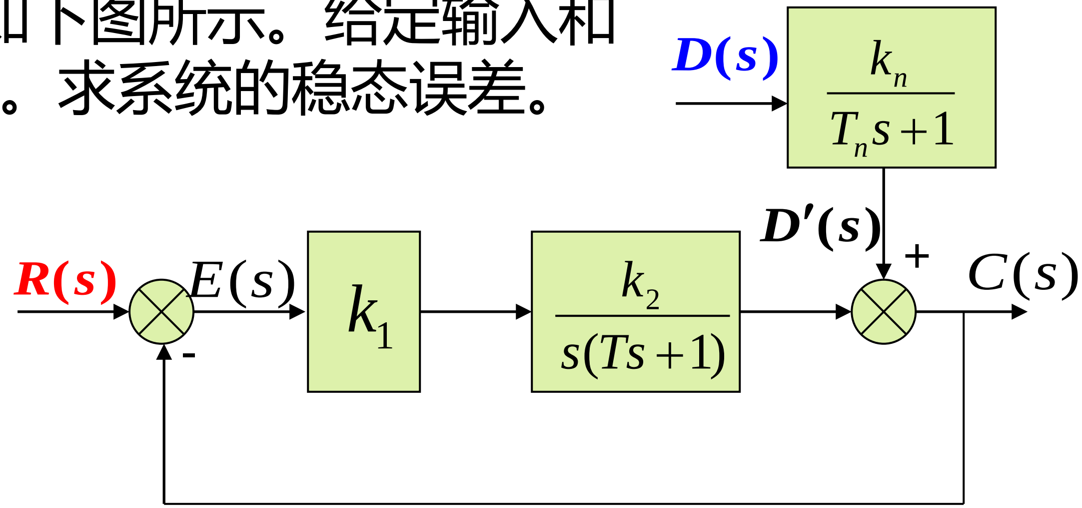
这个环节就是PI控制器。

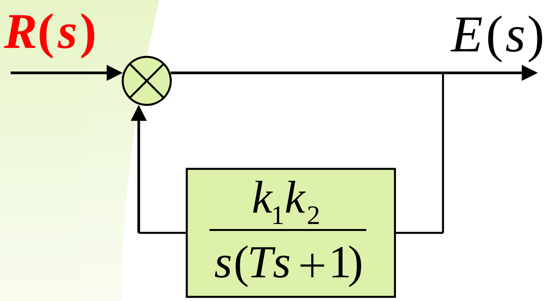
$$G_1=\frac{K_1(\tau_1 s+1)(\tau_2 s+1)}{s}=\frac{K_1+K_2 s+K_3 s^2}{s}=\frac{K_1}{s}+K_2+K_3 s$$

这个环节为PID控制器。

所谓比例+积分(PI)或比例+积分+微分 (PID)控制器的作用就是在保证闭环系统稳定及动态特性的前提下提高系统的控制精度。

[例2] 速度控制系统的结构如下图所示。给定输入和扰动作用均为单位斜坡信号。求系统的稳态误差。



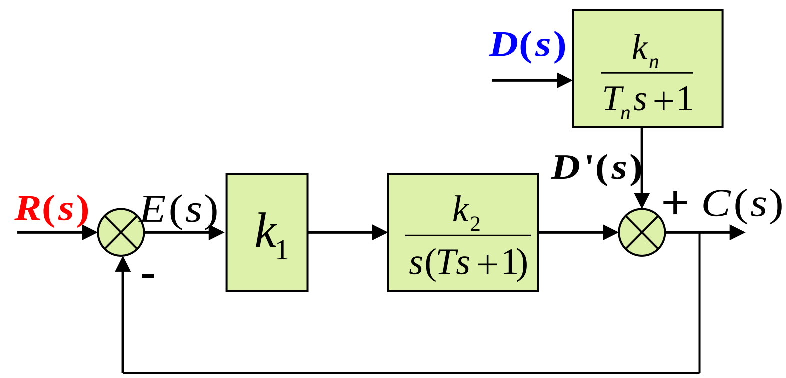


[解]: 1 先令 $d(t)=0$, $r(t)=t$, 即 $R(s)=\dfrac{1}{s^2}$

$$\Phi_{ER}(s)=\frac{E(s)}{R(s)}=\frac{Ts^2+s}{Ts^2+s+k_1k_2},\quad E(s)=\Phi_{ER}(s)\cdot R(s)=\frac{Ts^2+s}{Ts^2+s+k_1k_2}\cdot\frac{1}{s^2}$$

$$e_{ssr}=\lim_{s\to 0}s\cdot E(s)=\lim_{s\to 0}\frac{Ts+1}{Ts^2+s+k_1k_2}=\frac{1}{k_1k_2}$$

2、再令 $R(s)=0, D(t)=\dfrac{1}{s^2}$



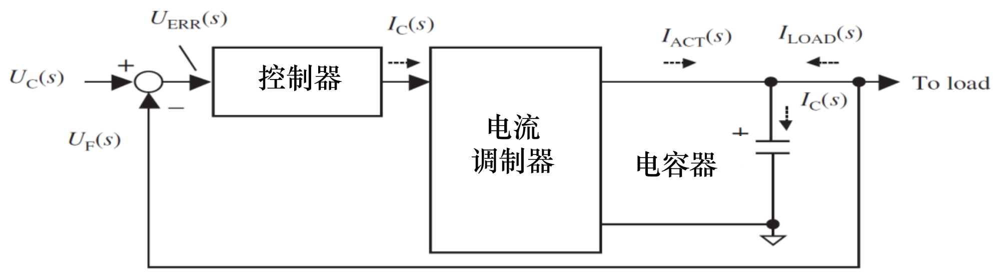
$$\frac{C(s)}{D'(s)}=\frac{1}{1+\dfrac{k_1k_2}{s(Ts+1)}}=\frac{Ts^2+s}{Ts^2+s+k_1k_2}$$

$$C(s)=\frac{Ts^2+s}{Ts+s+k_1k_2}D'(s)=\frac{Ts^2+s}{Ts^2+s+k_1k_2}\cdot\frac{k_n}{T_ns+1}\cdot D(s)$$

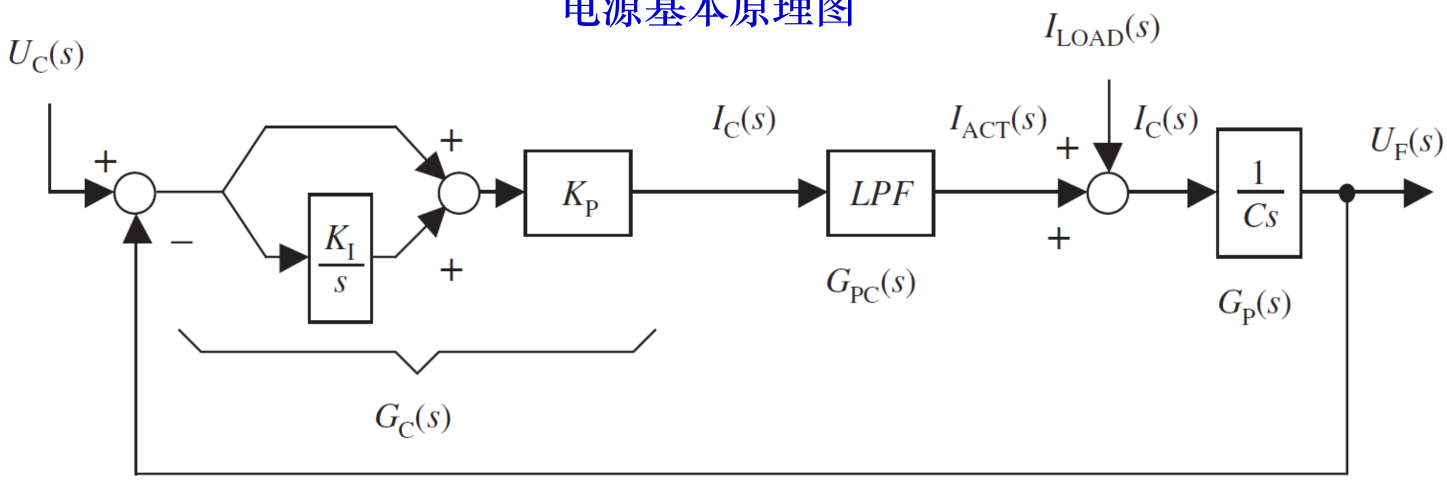
$$e_{ssd}=-\lim_{s\to 0}s\cdot C(s)=-\lim_{s\to 0}s\cdot\frac{Ts^2+s}{Ts^2+s+k_1k_2}\cdot\frac{k_n}{T_ns+1}\cdot\frac{1}{s^2}=-\frac{k_n}{k_1k_2}$$

3、总的稳态误差为： $e_{ss}=\dfrac{1}{k_1k_2}-\dfrac{k_n}{k_1k_2}=\dfrac{1-k_n}{k_1k_2}$

◆ **例3：电源的扰动响应及抑制方法（不考虑扰动的形式）**



电源基本原理图

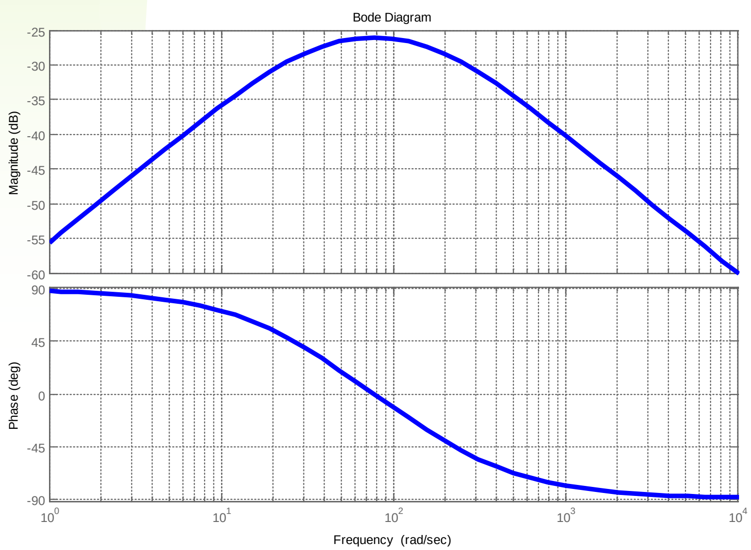


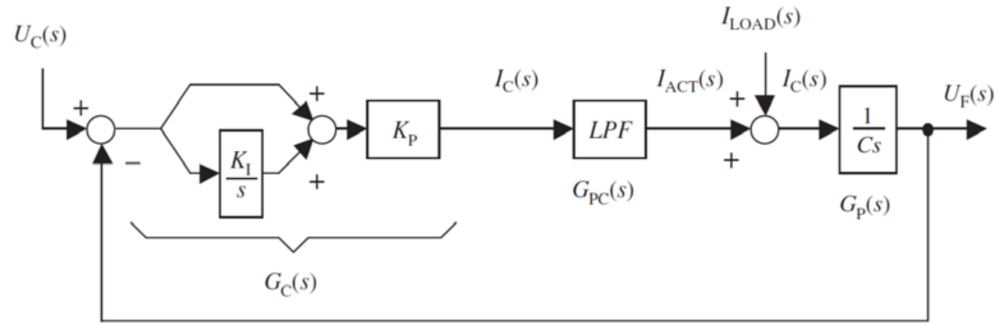
电源控制系统结构框图

◆ 例3：电源的扰动响应及抑制方法

假定$G_{pc}(s)=1$，负载电流变化带来的扰动响应表示为

$$T(s)=\frac{U_F(s)}{I_{LOAD}(s)}=\frac{\frac{1}{Cs}}{1+K_p\left(1+\frac{K_I}{s}\right)\frac{1}{Cs}}=\frac{s}{Cs^2+K_ps+K_IK_p}$$

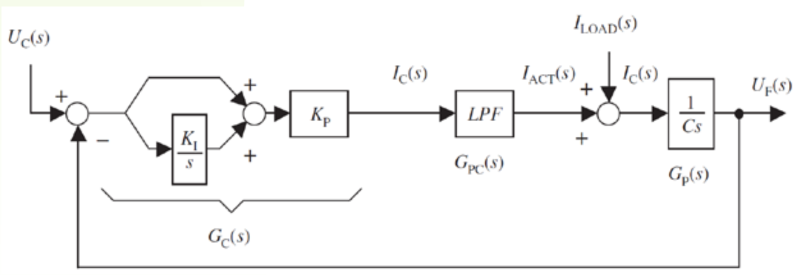


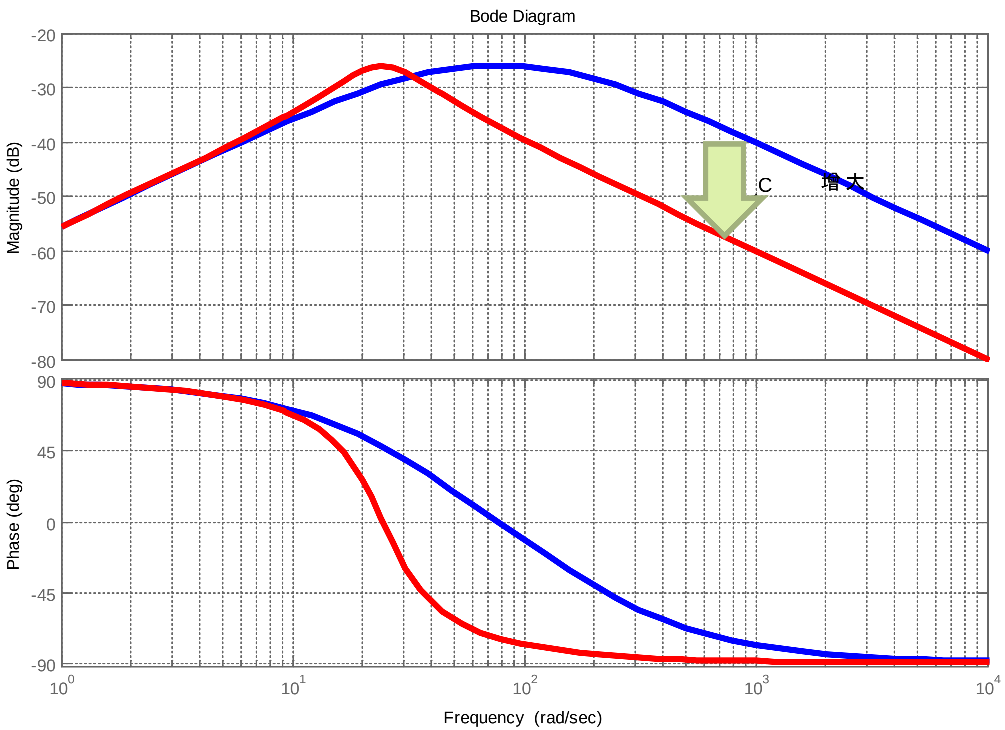


例3：电源的扰动响应及抑制方法

- **高频段：** $T_{高频}(s) \approx \dfrac{1}{Cs}$

$$T(s)=\frac{U_F(s)}{I_{LOAD}(s)}=\frac{s}{Cs^2+K_p s+K_I K_p}$$

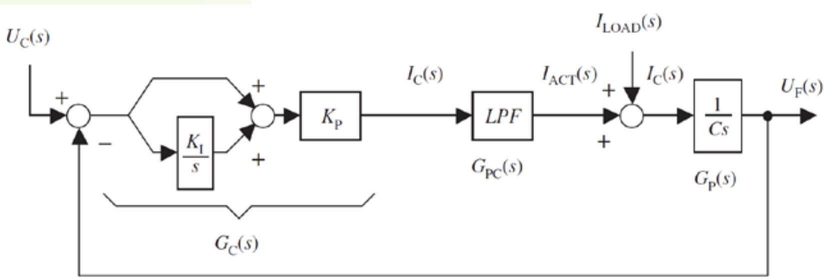


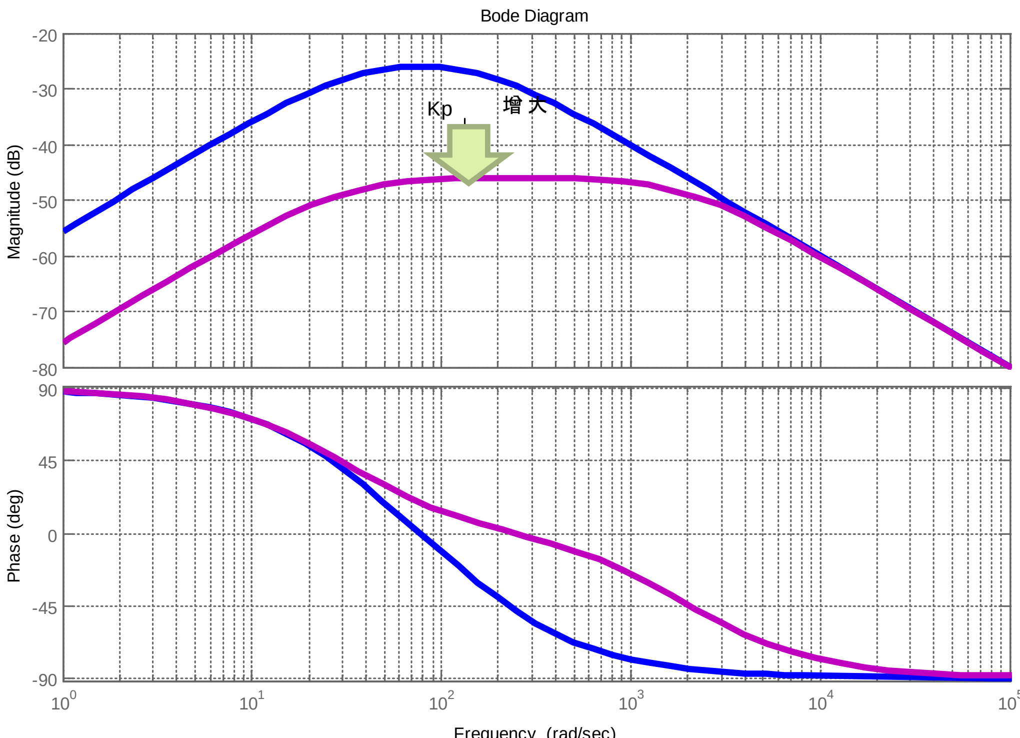


◆ 例3：电源的扰动响应及抑制方法

- **中频段：** $T_{中频}(s) \approx \dfrac{1}{K_p}$

$$T(s) = \frac{U_F(s)}{I_{LOAD}(s)} = \frac{s}{Cs^2 + K_p s + K_I K_p}$$

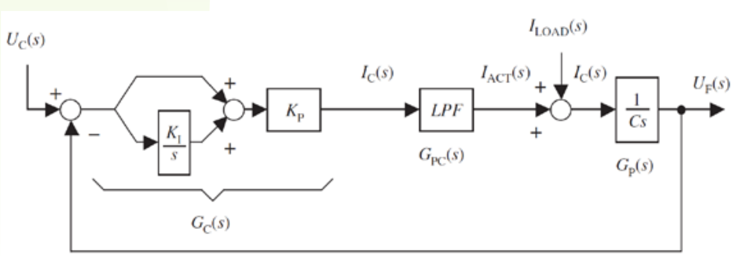


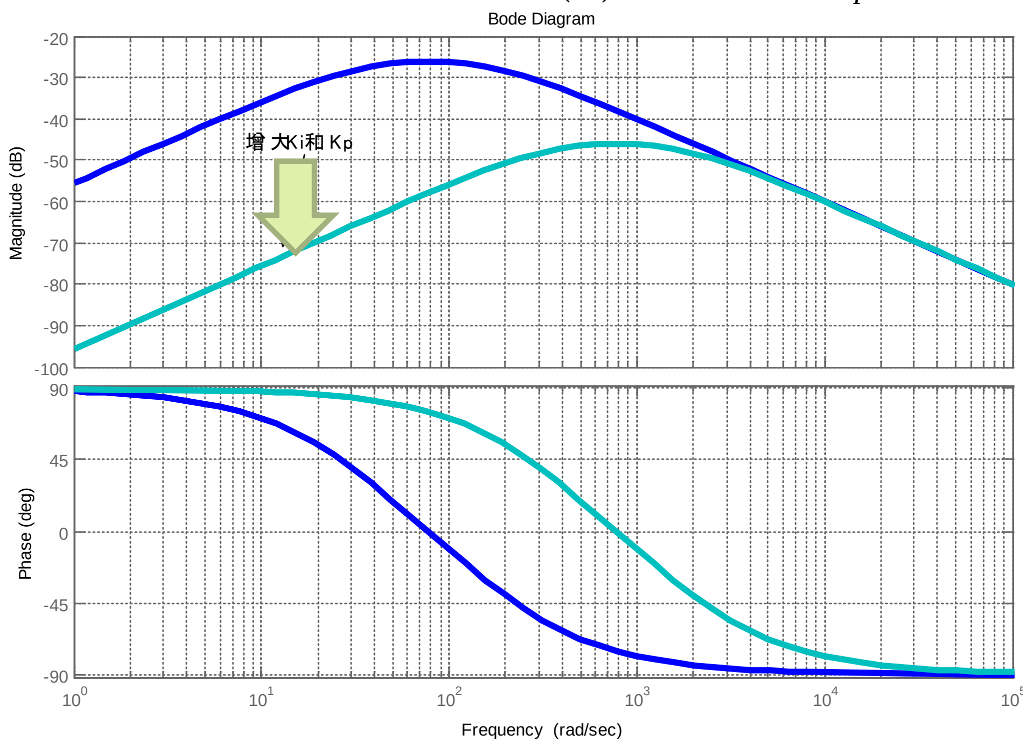


例3：电源的扰动响应及抑制方法

- **低频段：** $T_{低频}(s) \approx \dfrac{s}{K_I K_p}$

$$T(s) = \frac{U_F(s)}{I_{LOAD}(s)} = \frac{s}{Cs^2 + K_p s + K_I K_p}$$

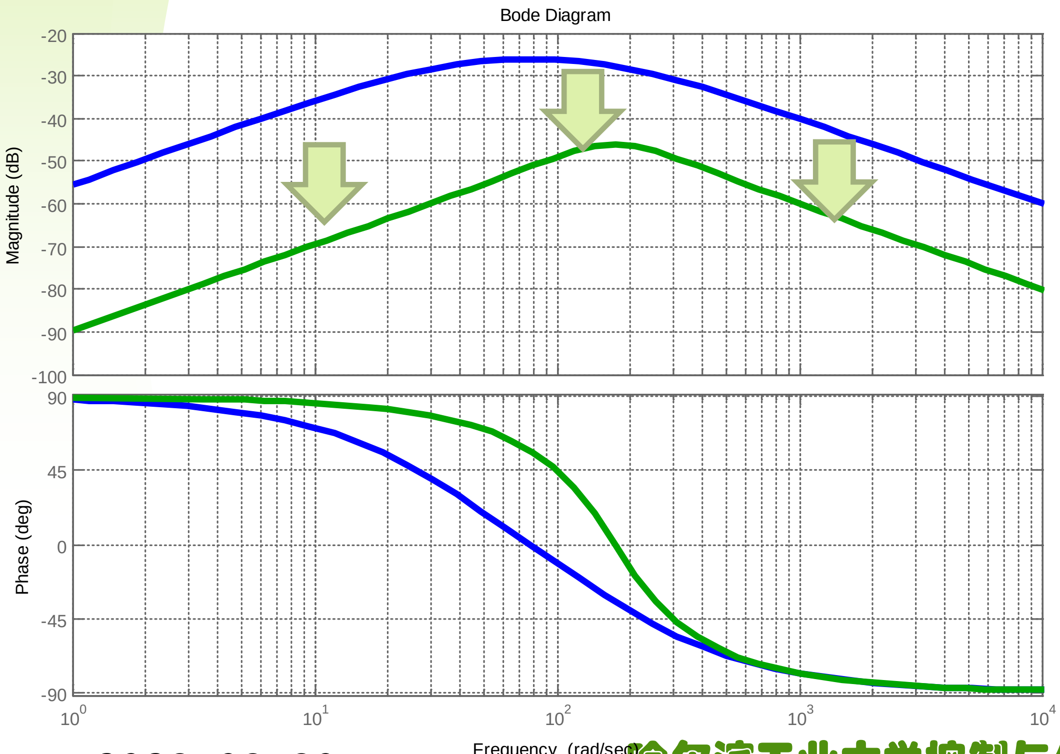


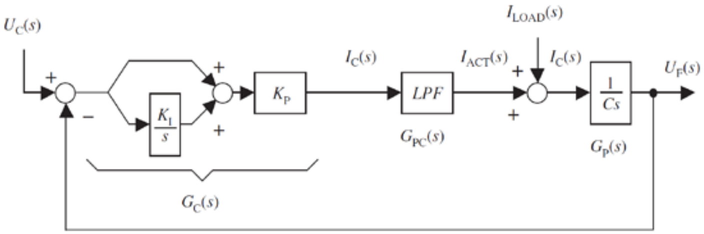


◆ 例3：电源的扰动响应及抑制方法

● **全频段——增大分母多项式系数**

$$T(s)=\frac{U_F(s)}{I_{LOAD}(s)}=\frac{s}{Cs^2+K_ps+K_IK_p}$$





对于扰动可以先写出传递函数；对于传递函数可以分频段进行分析。这是频域优于时域的地方。

主观题 10分

设置

对于恒压源的扰动抑制，你觉得应该压低高频、中频、低频还是整个频段，为什么？

正常使用主观题需2.0以上版本雨课堂

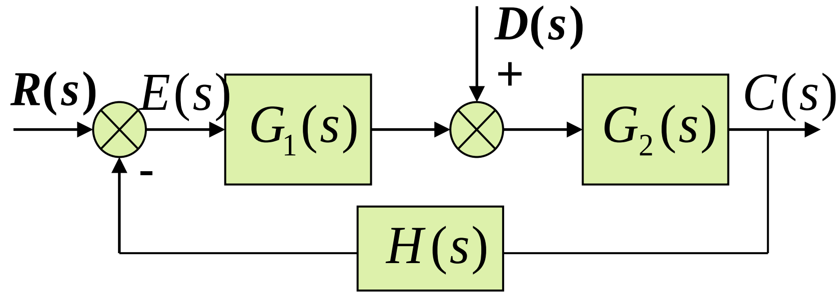
作答

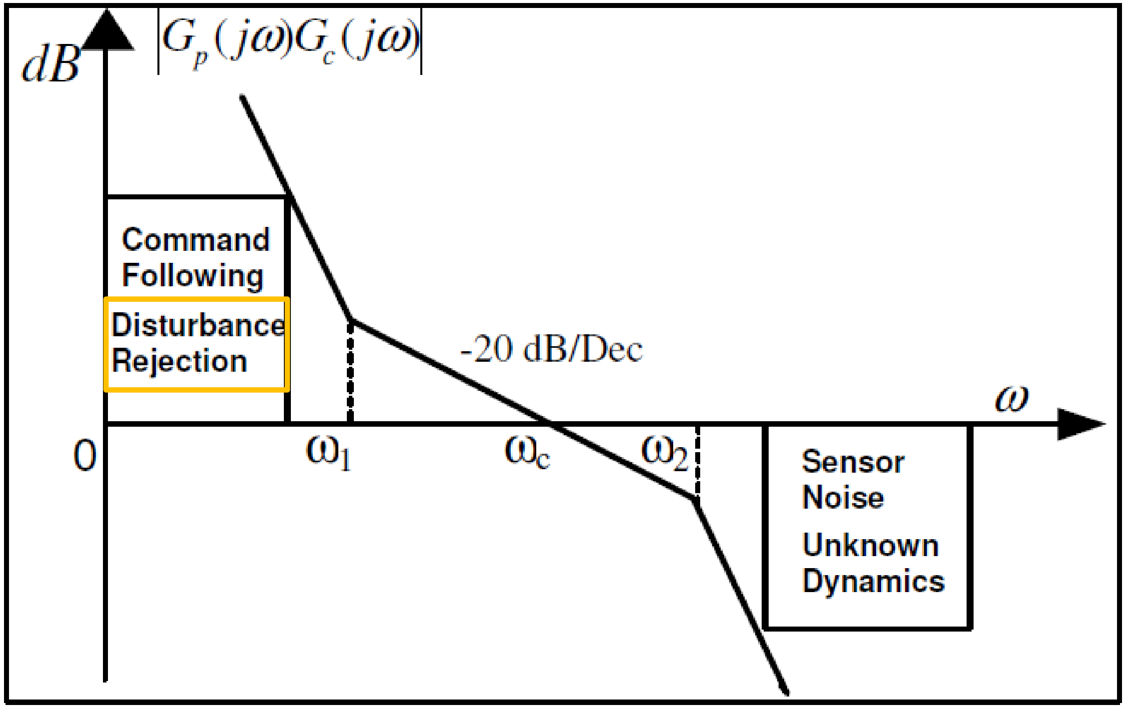
- 为了减小扰动误差，可以增加偏差点到扰动作用点之间积分环节个数或放大系数；

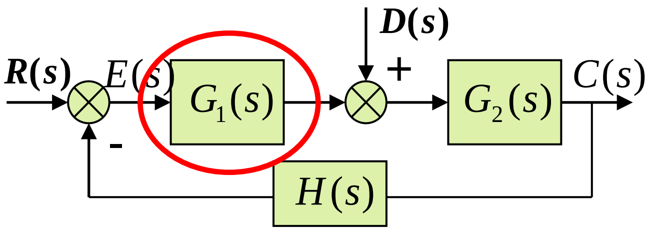
- 放大系数不能任意放大，积分环节也不能太多（最多2个），否则系统将会不稳定；

- 可以采用比例加积分，滞后环节减小扰动产生的误差

扰动引起的动态误差分析可以参考指令跟踪误差的分析方法



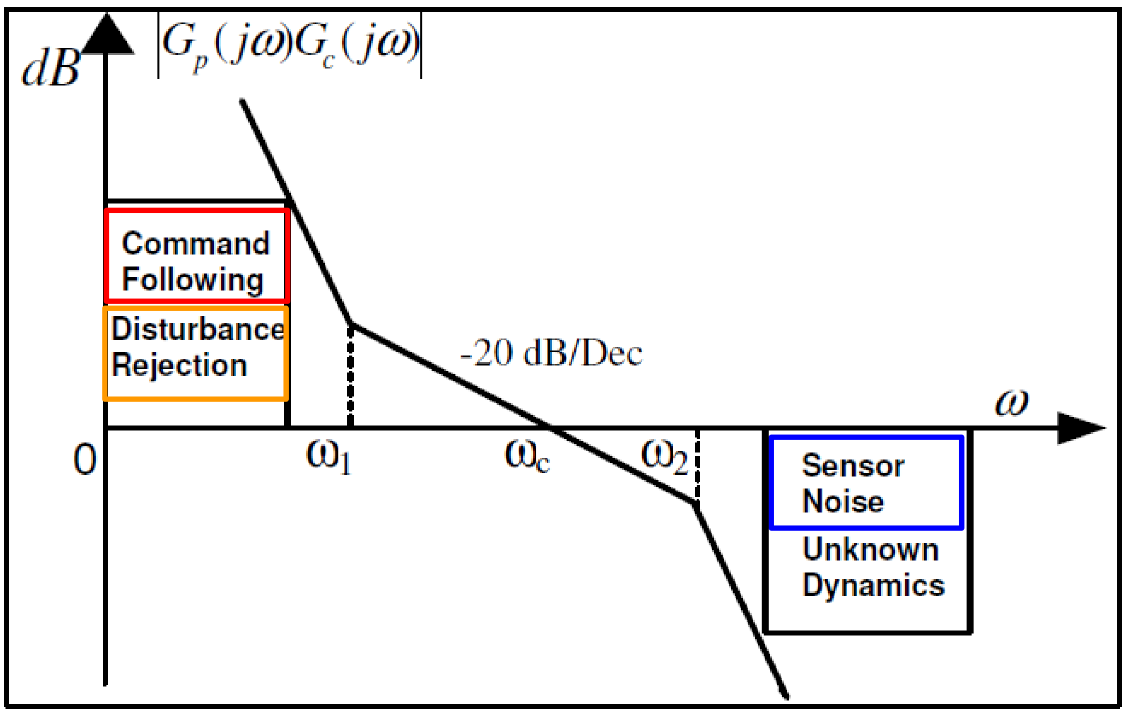


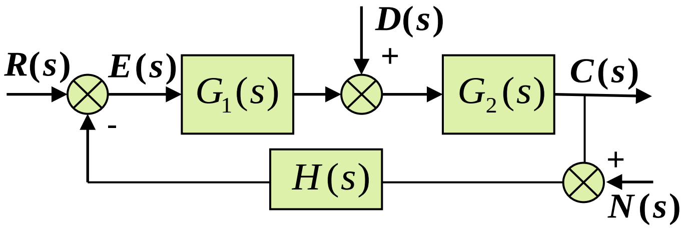


- 扰动抑制对干扰作用点之前的系统特性（积分有无和增益大小）提出了要求，可以由控制器改变；

课程的主要结论***（思想原则）

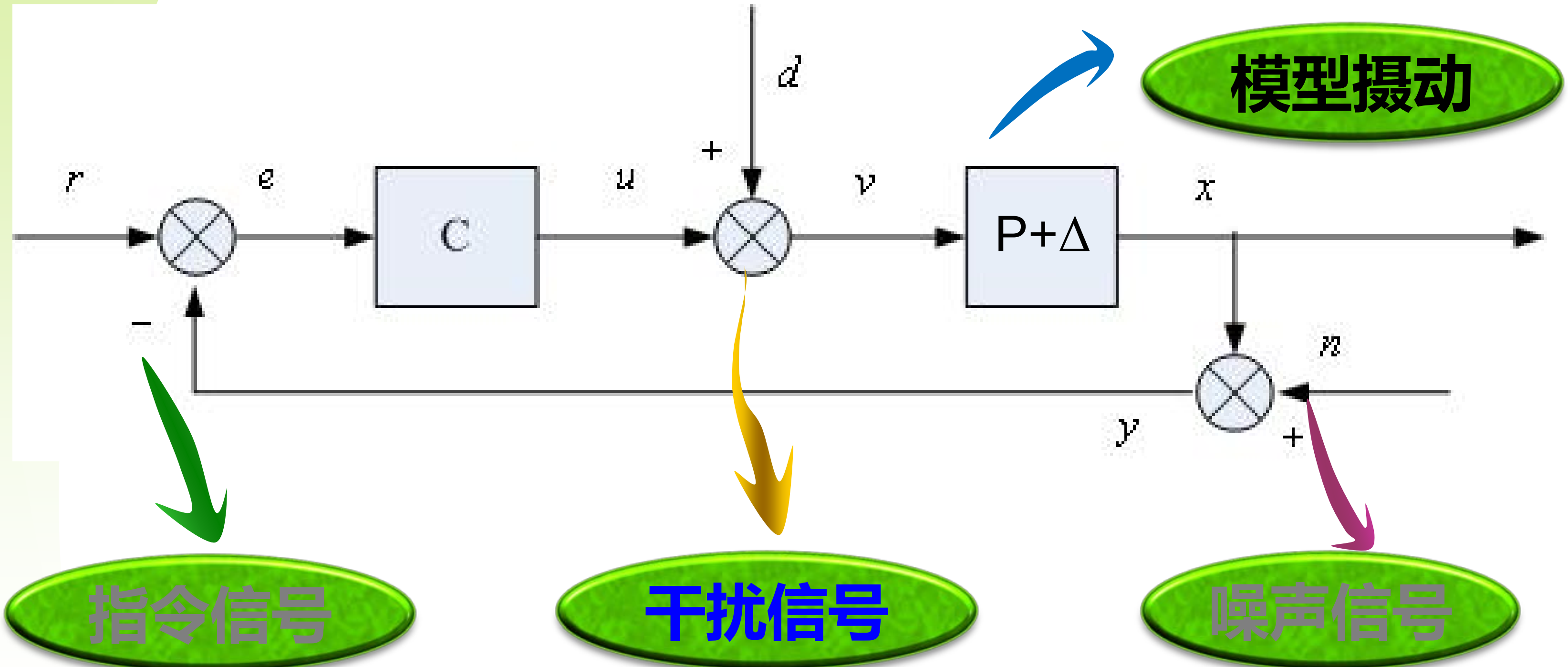
指令跟踪、噪声及扰动抑制对系统提出的约束





- 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；

串联校正之外的扰动抑制方法



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

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

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

3.3 扰动分析

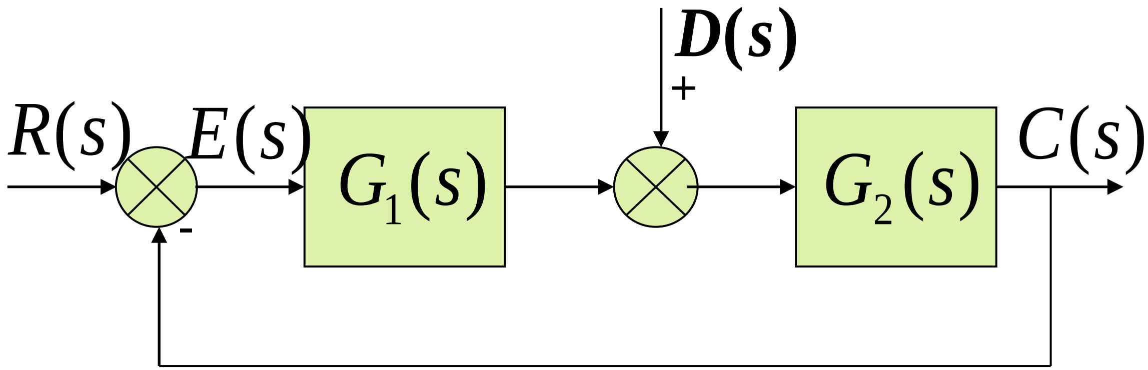
3.3.1 扰动分析

3.3.2 扰动响应与误差分析

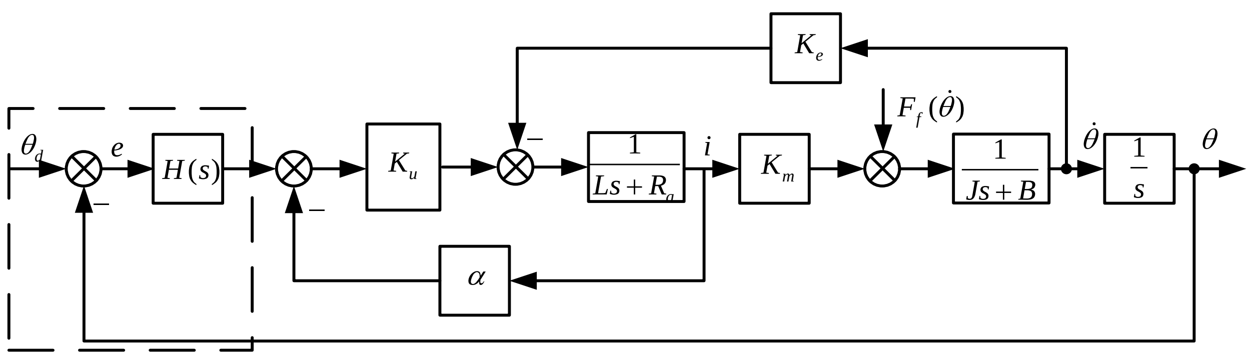
3.3.3 其他扰动抑制方法

3.3.4 扰动观测与补偿

3.3.3 其他扰动抑制方法



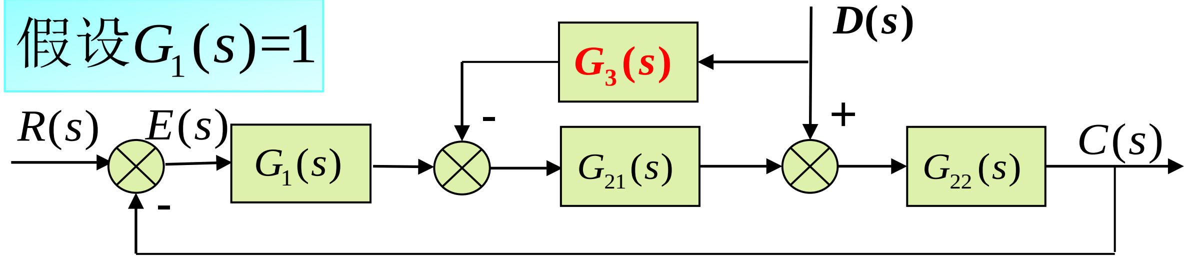
如果扰动是可以测量的，如何处理？



3.3.3 特殊扰动的抑制

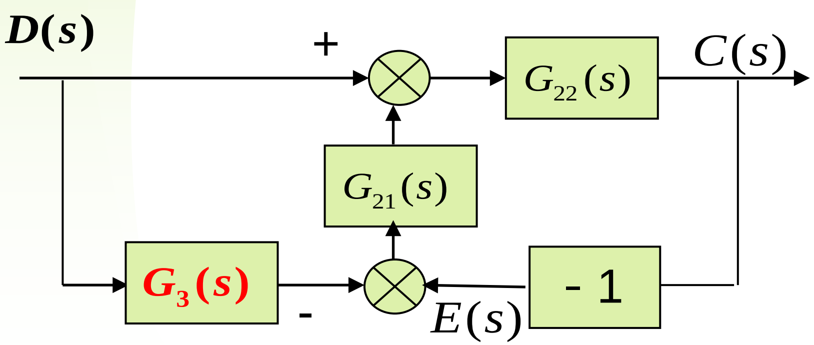
令 $R(s)=0$，由于是单位反馈系统，所以误差 $E(s)=-C(s)$。

假设$G_1(s)=1$



未加前馈时，$\Phi_D(s)=\dfrac{C(s)}{D(s)}=\dfrac{G_{22}}{1+G_{21}G_{22}}$

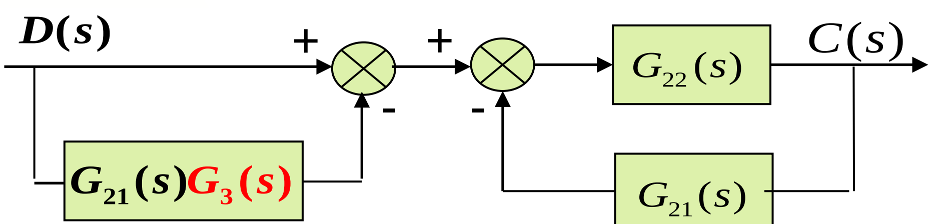
$$E(s)=-C(s)=-\frac{G_{22}}{1+G_{21}G_{22}}\cdot D(s)$$



$$C(s)=\frac{[1-G_{21}(s)G_3(s)]G_{22}(s)}{1+G_{21}(s)G_{22}(s)}\cdot D(s)$$

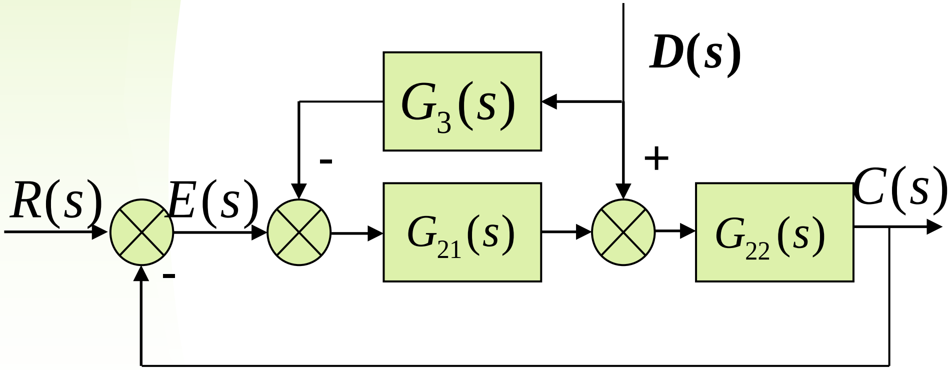
$$E(s)=-C(s)$$

$$=-\frac{[1-G_{21}(s)G_3(s)]G_{22}(s)}{1+G_{21}(s)G_{22}(s)}\cdot D(s)$$



$$E(s)=-C(s)=-\frac{[1-G_{21}(s)G_3(s)]G_{22}(s)}{1+G_{21}(s)G_{22}(s)}\cdot D(s)$$

若 $G_3(s)=\dfrac{1}{G_{21}(s)}$ 则 $E(s)=0$ 这个条件就是对扰动作用实现完全不变性的条件。即系统的输出完全不受扰动的影响。



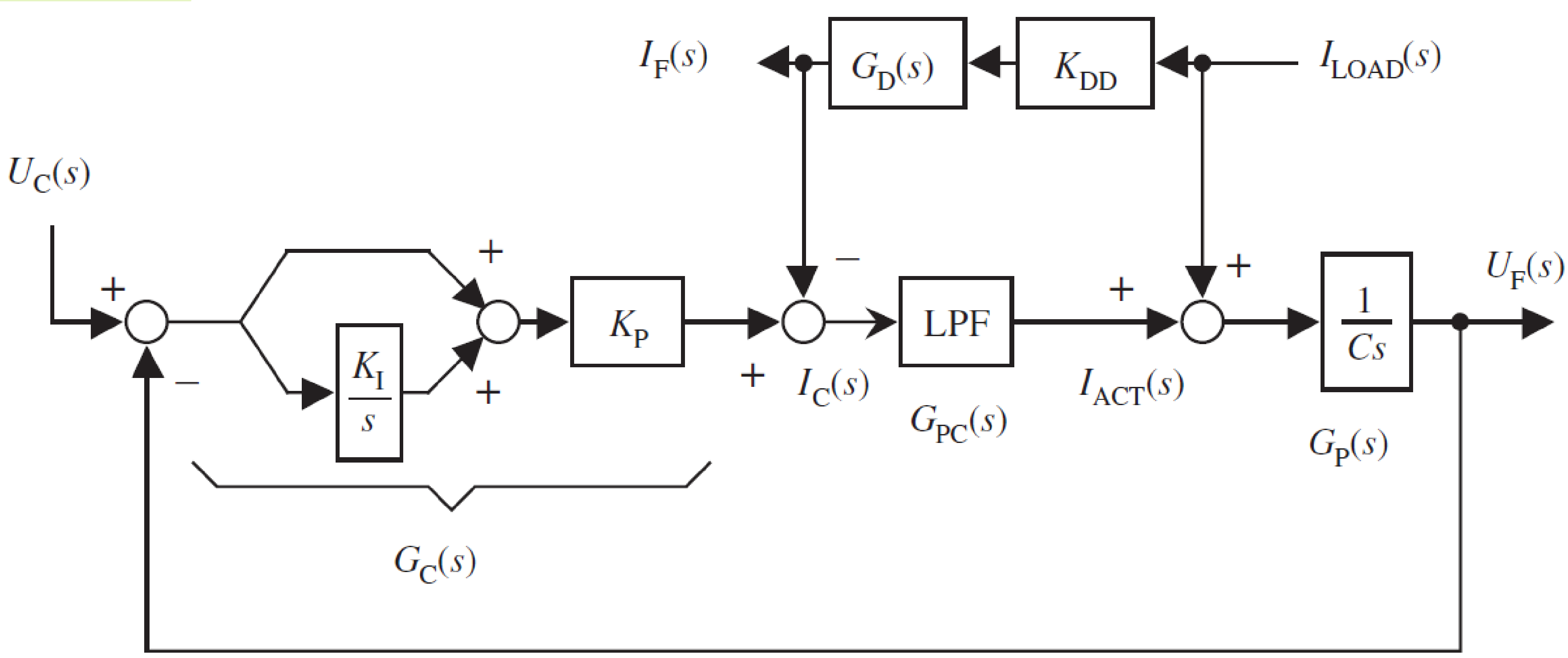
从结构图可看出，实际上是利用双通道原理使扰动信号经两条通道到达相加点时正好大小相等，方向相反。从而实现了干扰的全补偿。

但在实际的系统中，对于 $G_3(s)=\dfrac{1}{G_{21}(s)}$ 也要考虑物理可实现问题。

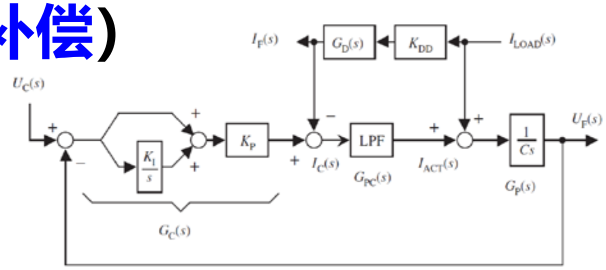
如果物理不可实现，也可以采取近似的补偿，以减小扰动引起的稳态误差。

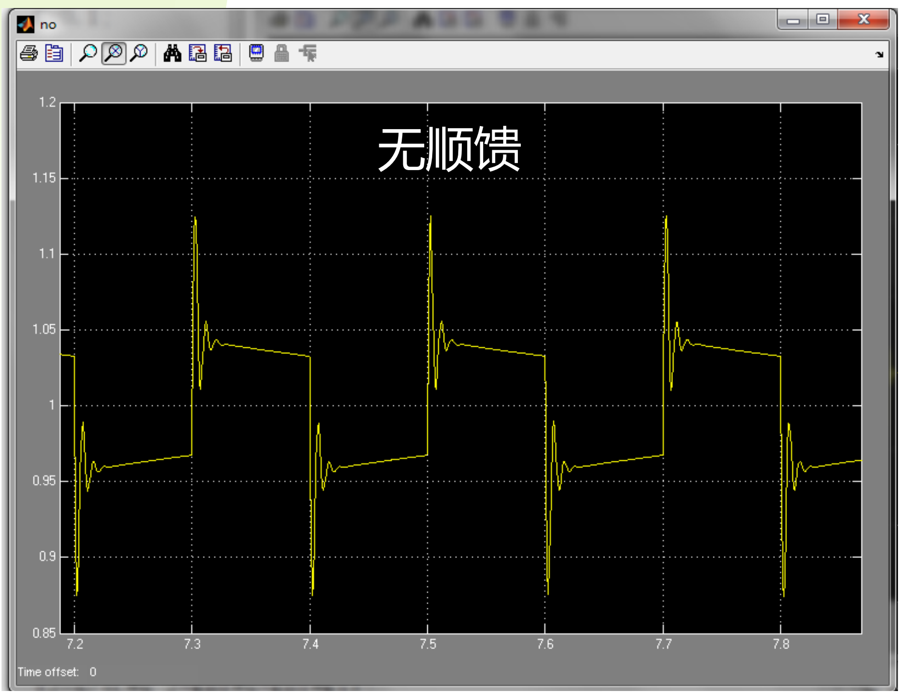
扰动测量与补偿 | 扰动估算与补偿 | 多回路控制

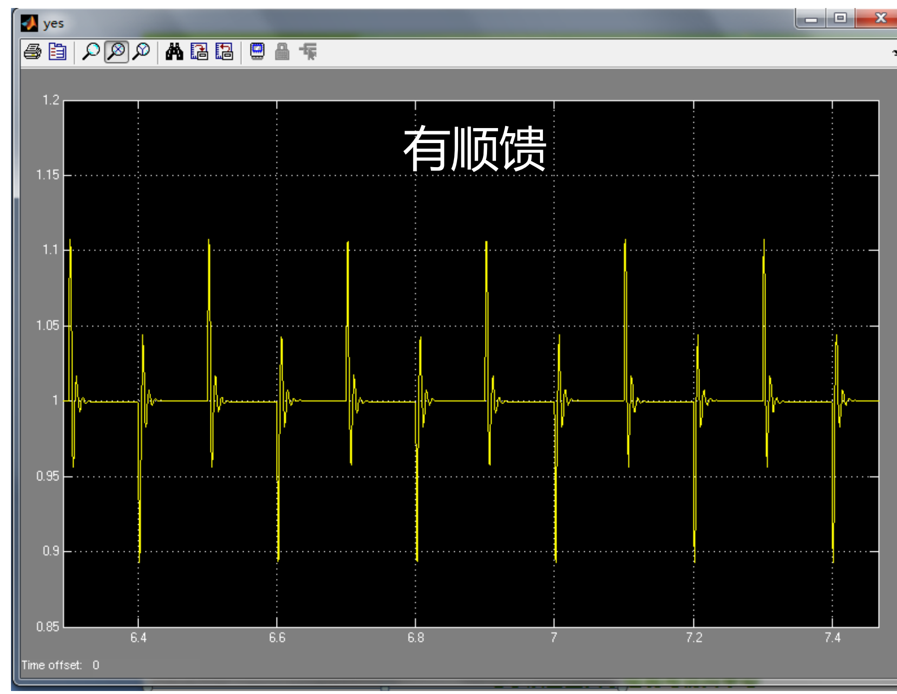
◆ 例5：电源的扰动响应及扰动补偿（**顺馈补偿**）



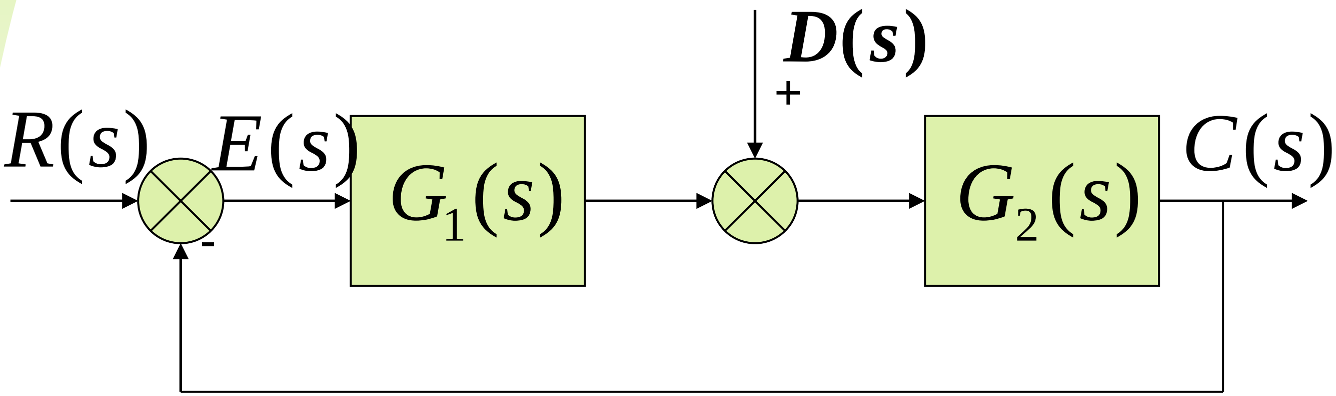
◆ 例5：电源的扰动响应及扰动补偿（**顺馈补偿**）







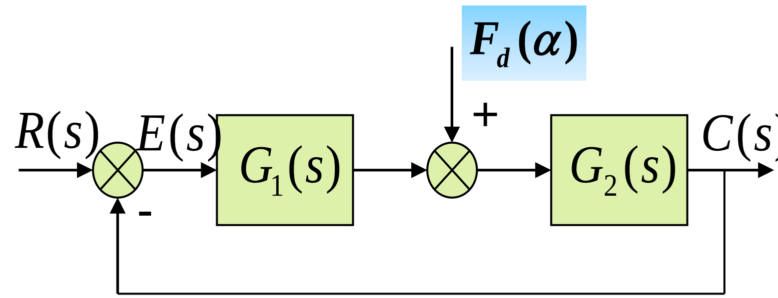
3.3.3 其他扰动抑制方法

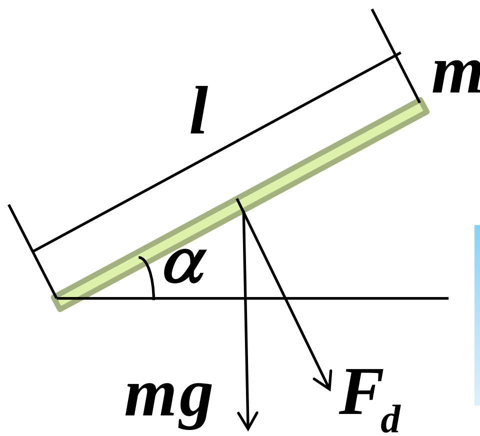


如果扰动与系统的状态有确定的函数关系，如何处理？

3.3.3 其他扰动抑制方法

偏载力矩扰动与机械臂关节角度相关

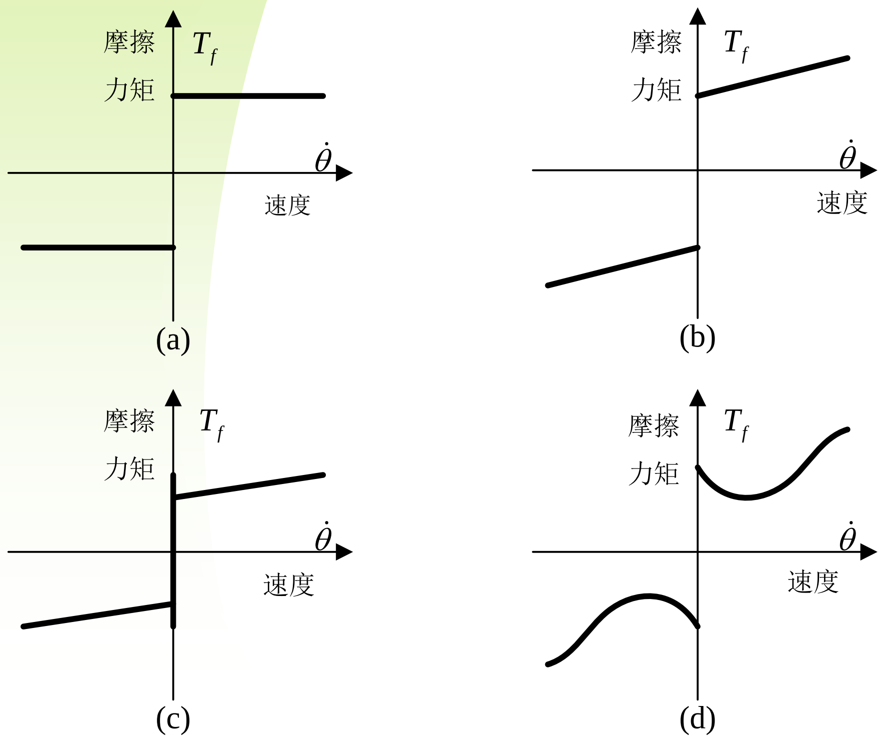


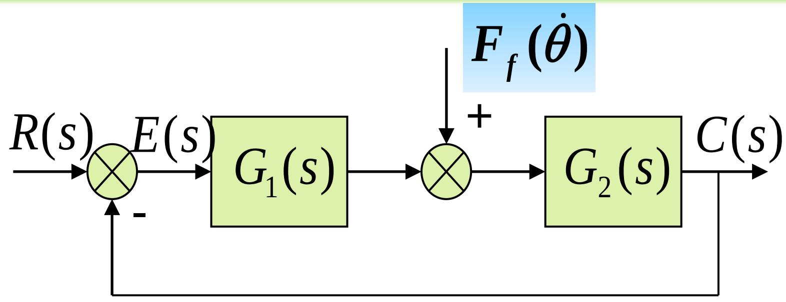


$$F_d = f(\alpha) = \frac{1}{2} mgl\cos\alpha$$

先推导出扰动与系统状态的函数关系，然后直接在控制量中进行补偿，抵消扰动的作用。

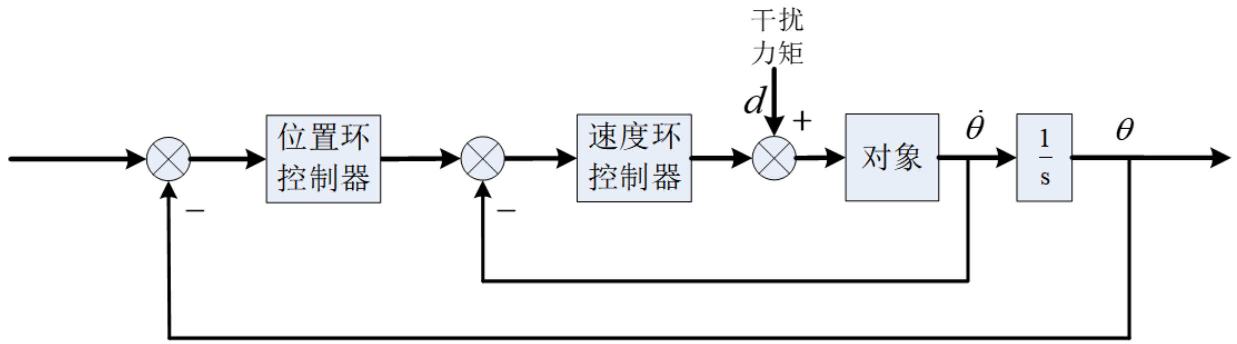
摩擦扰动与机械臂的角速度相关





在进行扰动补偿前，必须辨识出模型中的参数

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

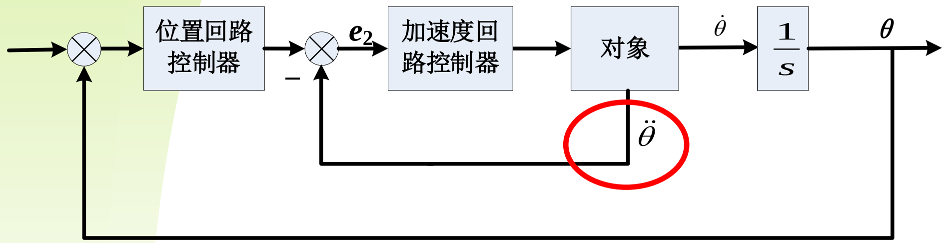


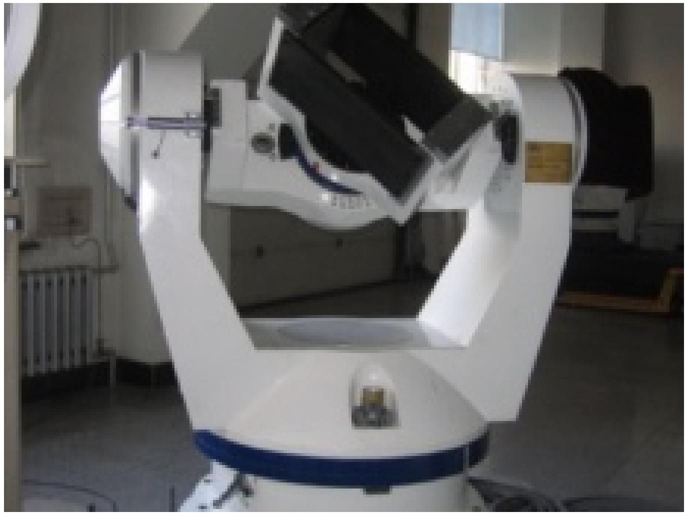
电机位置伺服系统中，**位置+速度双回路**控制，能够抑制摩擦力矩、电机波动力矩、负载力矩等外部扰动，提高控制精度，同时能在一定程度上提升系统的鲁棒性。

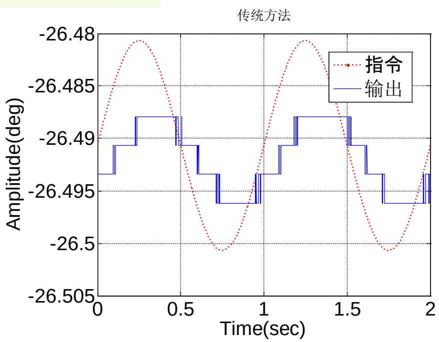
3.3.3 其他扰动抑制方法

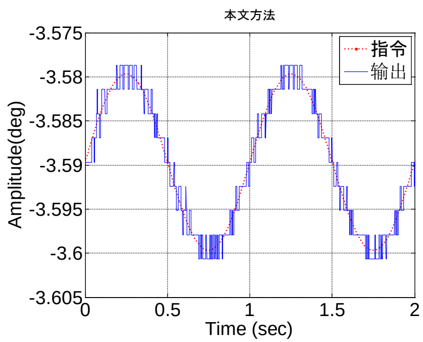
扰动测量与补偿|扰动估算与补偿|多回路控制

国内第一套角加速度转台



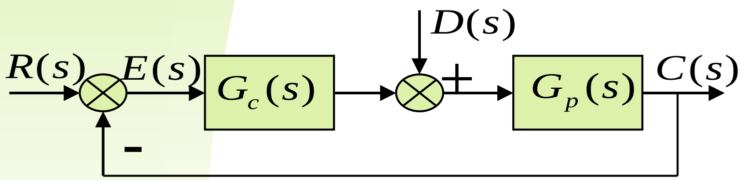


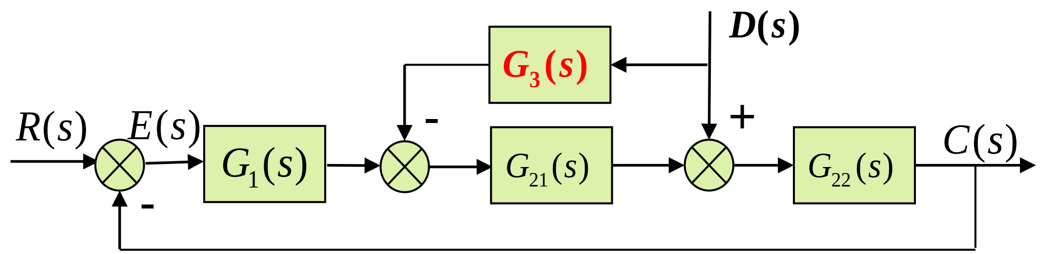


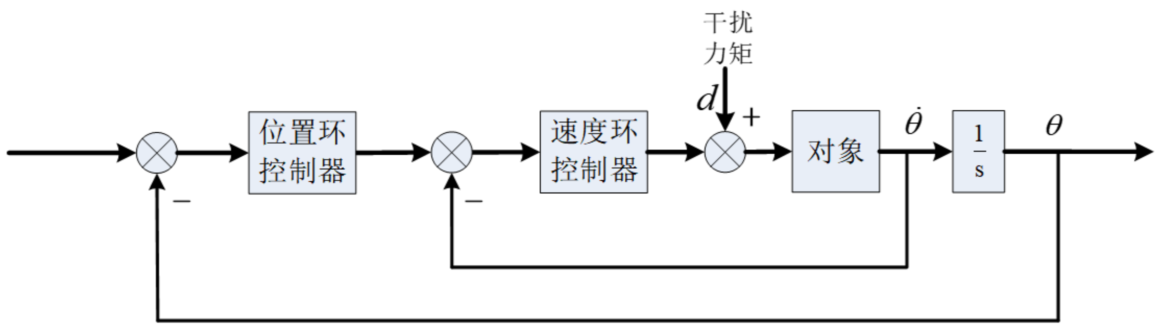


系统要求对小信号的跟踪能力强，必须能够有效克服摩擦死区的影响，采用角加速度、位置双回路的控制方法有效解决了这一问题。

请总结上述扰动抑制方法的应用条件和副作用?





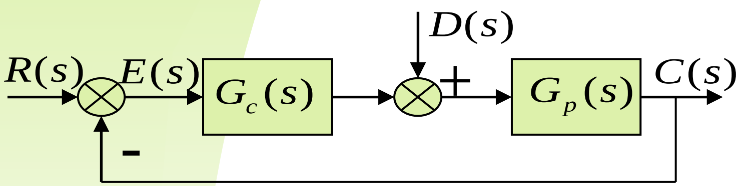


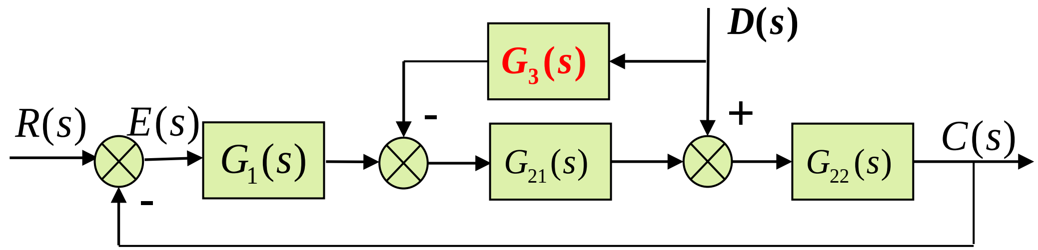
上述扰动抑制方法的本质是什么？

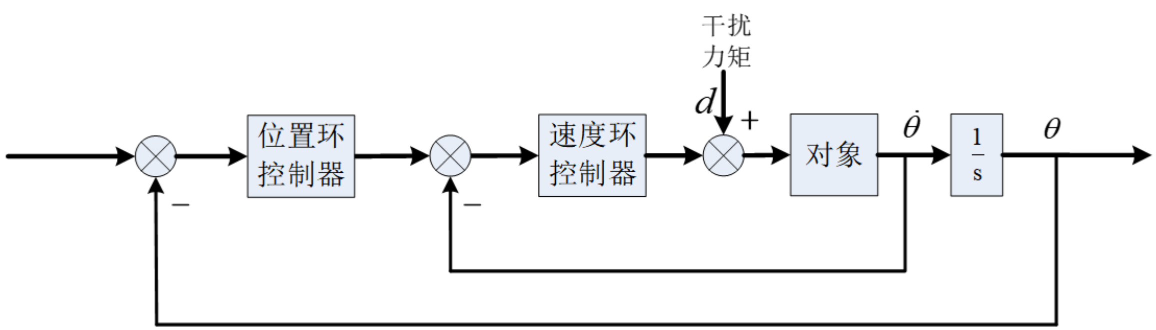
正常使用主观题需2.0以上版本雨课堂

作答

其他扰动抑制方法





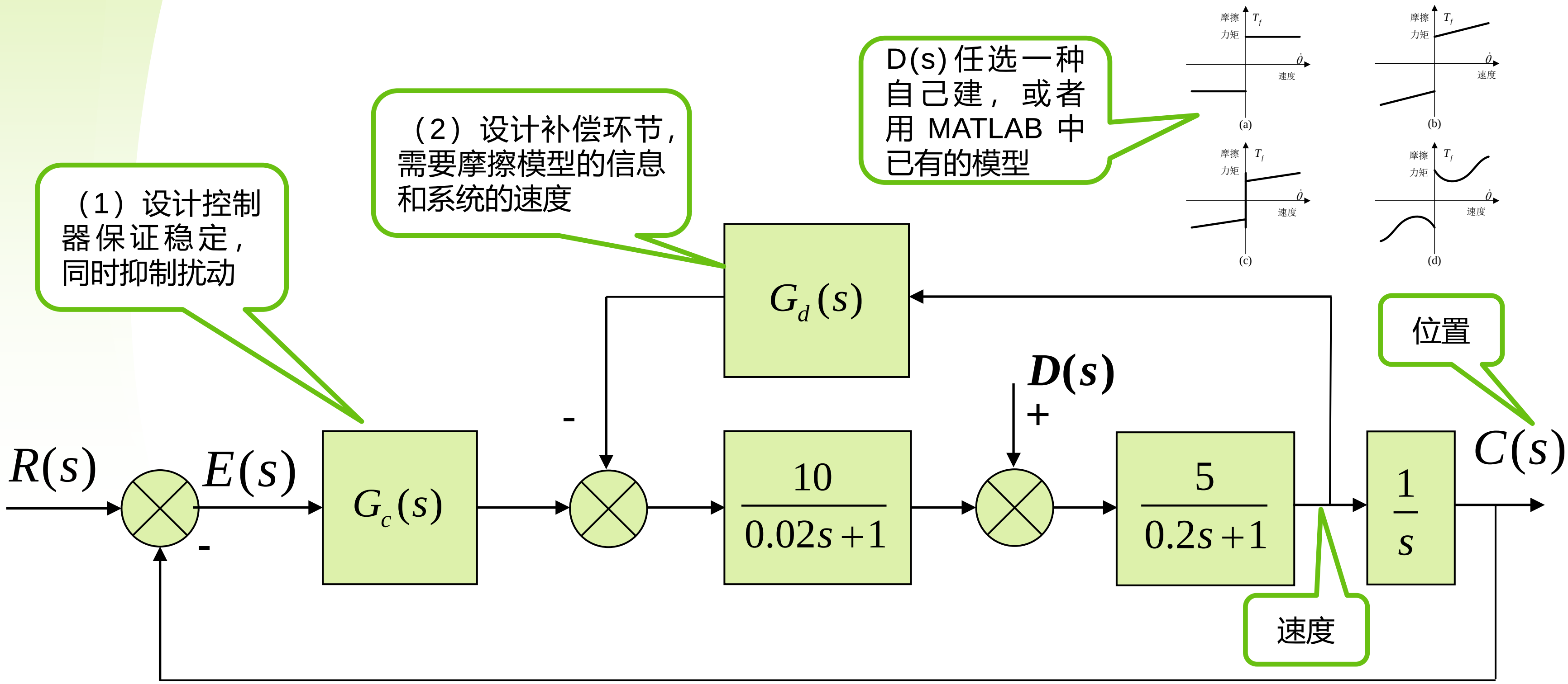


除了上述方法，还有没有其他的扰动抑制方法，能够克服或部分克服上述缺点?

第12次课作业

必选作业

12.1 仿真题：建立摩擦模型加入下面的系统中，（1）设计控制器使系统稳定，采用正弦指令（参考频率幅值均为1），观察有无摩擦扰动时系统的输出变化，也可以直接使用方波扰动（2）利用已经学到的各种扰动抑制方法，验证扰动抑制效果，加深对各种对各种方法的理解；



第12次课作业

可选作业

12.1 总结本节课所讲的各种扰动抑制方法的适用条件，以及利与弊；

12.2 总结目前所学到的，减小误差、抑制噪声、克服扰动的各种方法的应用条件；

12.3 对比理解拓展篇给出的各种概念，用这些概念将课程的内容关联起来，加深记忆和理解；

Thank You !