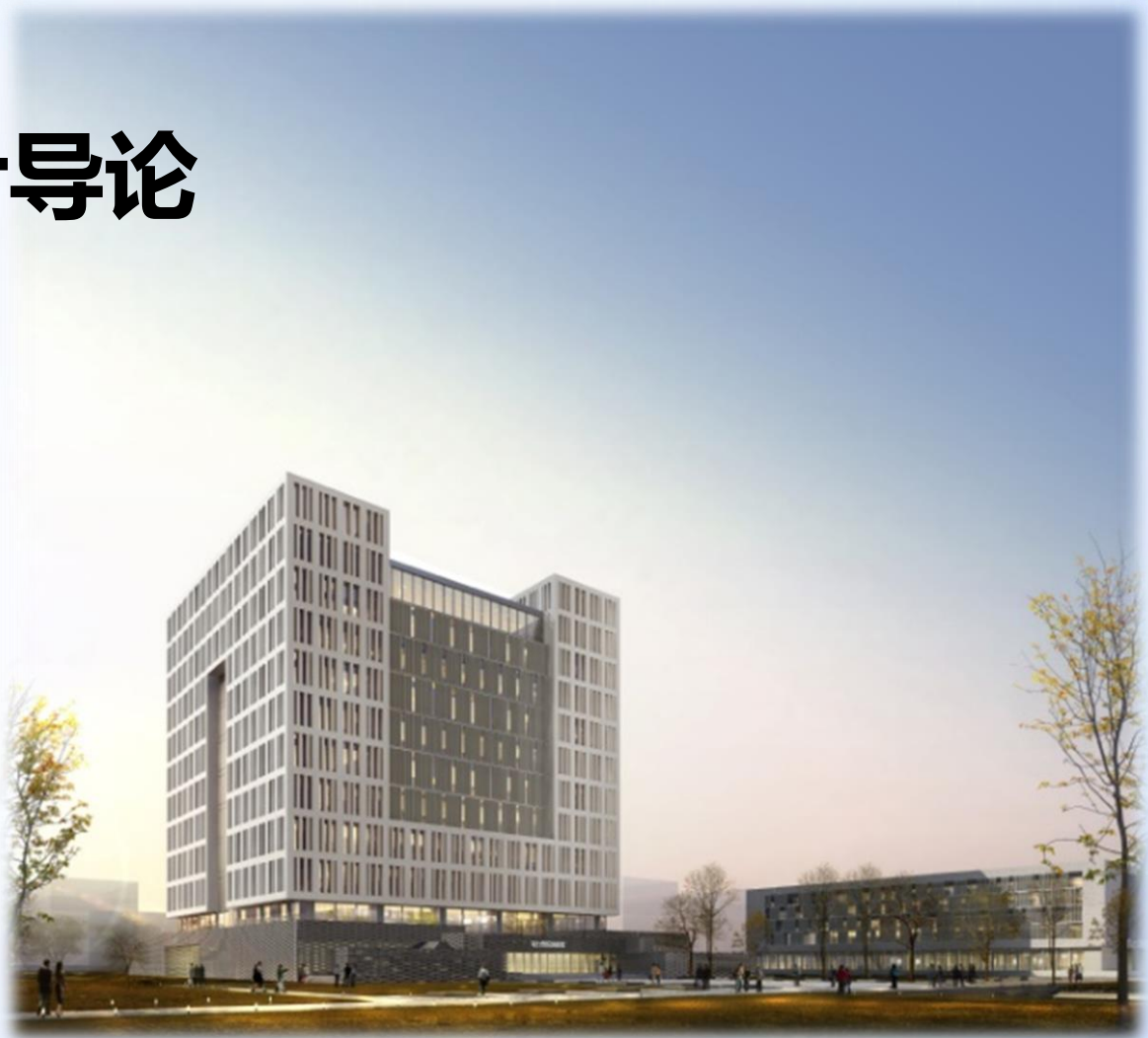


|第四章：控制系统设计导论



第四章 控制系统设计导论

4.1 控制系统结构设计

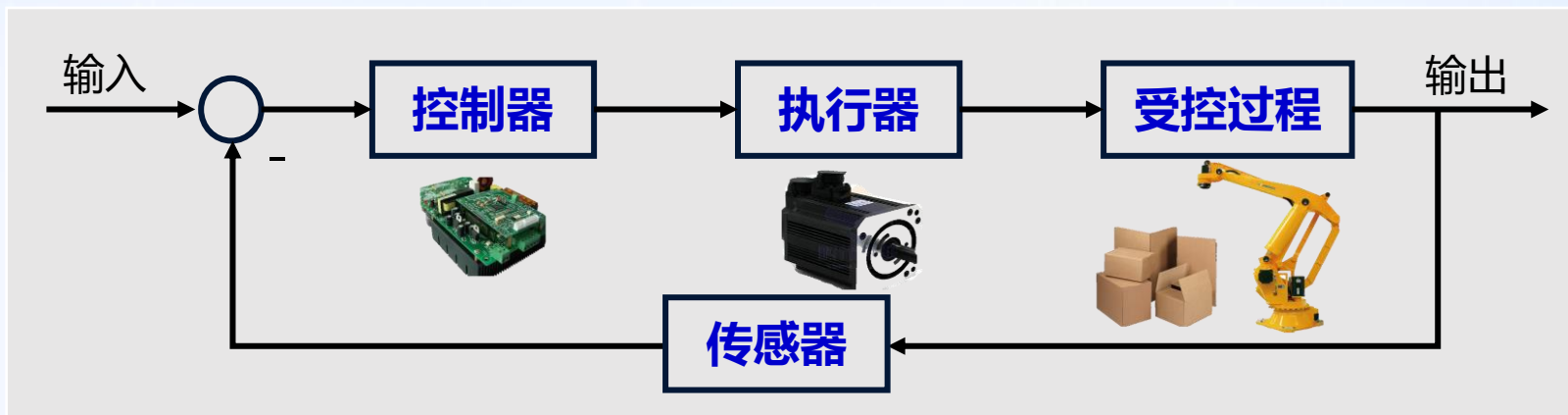
4.2 控制规律选择

4.3 PID控制器参数整定

4.4 复杂控制系统分析



什么是控制系统的设计



- 控制系统的设计就是根据受控过程的**动态特性和控制**要求确定控制器与受控过程的**连接形式与结构**以及控制器本身的**结构与参数**。
- 所谓设计是一个变革系统的机构、部件和细节以达到某种特定目的的复杂过程。
- 为特定控制工程的控制系统设计是控制工程师经常要面临的中心工作，它是创造活动与分析活动共存的复杂过程。



控制系统的设计步骤

设计过程中的特征：

- 全面综合
- 权衡利弊
- 认识差距
- 评估风险

设计过程可简单地分为四个步骤：

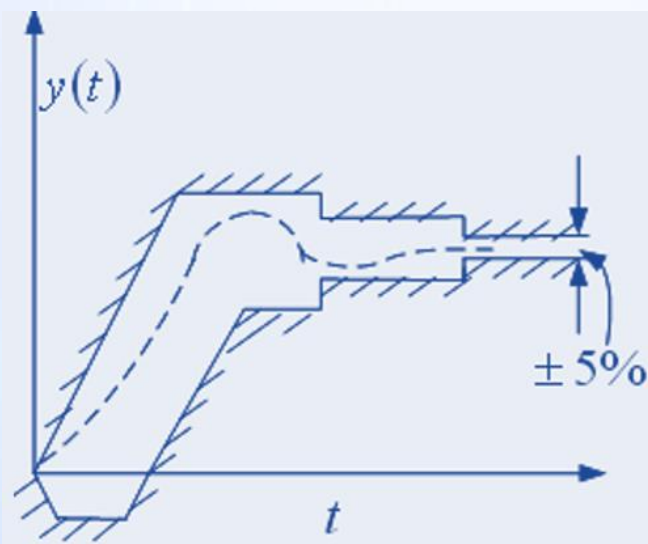
- 1) 根据需求制定技术指标；
- 2) 根据技术指标设计若干解决方案；
- 3) 根据验证试验结果选择解决方案；
- 4) 对所选择方案做细节设计。



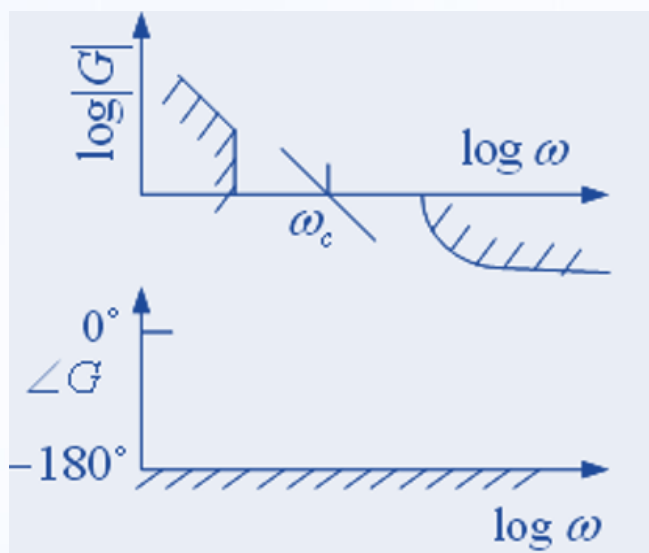
控制系统的设计步骤

Step 1: 理解被控过程并确定**控制性能指标**。

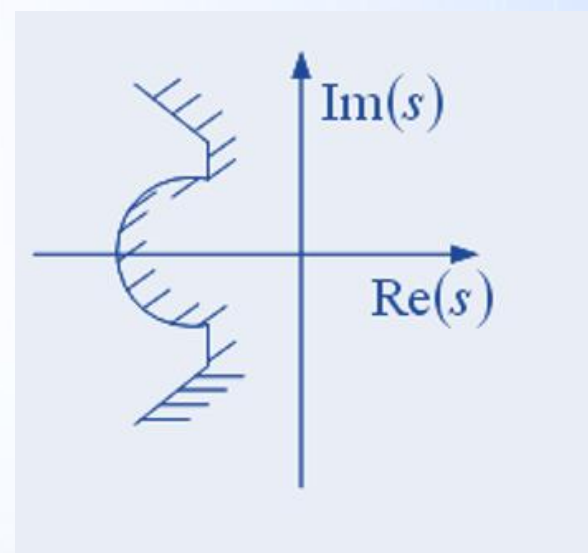
常见的控制系统性能指标有三类：时域、频域和复域。



■ 时域（阶跃响应）



■ 频域（开环系统频域特性）



■ 复域（零极点）



控制系统的设计步骤

Step 2: 根据被控过程的特点和控制品质要求进行控制系统的**整体设计**。

- 设计的焦点是采用什么样的控制系统结构才能最恰当地满足控制要求。

Step 3: 选择**传感器**。

- 选择传感器需要考虑六方面的因素：
 - 1) 数量和位置（选择变量和测点）；
 - 2) 传感原理（电、磁、机械、机电、光电等）；
 - 3) 动态特性（线性度、误差、带宽、分辨率、信噪比等）；
 - 4) 物理特性（重量、尺寸、强度）；
 - 5) 品质（可靠性、耐用性、可维护性）；
 - 6) 成本（购置、运输、安装、维修费用）。



控制系统的设计步骤

Step 4: 选择执行器。

■ 选择传感器需要考虑六方面的因素：

- 1) 数量和位置；
- 2) 执行原理（电动、液动、气动、磁动等）；
- 3) 动态特性（允许力矩、线性度、允许速度、功率、效率）；
- 4) 物理特性；
- 5) 品质；
- 6) 成本。



控制系统的设计步骤

Step 5: 为被控过程、传感器和执行器建立数学模型。

- 被控过程、传感器和执行器可组成广义的控制对象子系统。传感器的输出为该子系统的输出变量，执行器的输入为该子系统的输入变量。
- 分别建立这三个环节的数学模型，再把它们组合起来就得到了广义控制对象的数学模型，这个数学模型可转化为计算机仿真模型。从而可用来做控制器设计研究的仿真试验平台。



控制系统的设计步骤

Step 6: 进行控制器本身的**结构设计和初始参数的计算**。

- 控制器的结构设计也就是控制规律的选择。
例如选择PID控制器就是选择了PID控制律或控制器结构。
- 确定控制器的参数，常被称为控制器**参数整定**。

Step 7: 控制**参数仿真试验整定**。

- 1) 建立包括控制器在内的仿真模型系统;
- 2) 设计仿真试验整定方案;
- 3) 仿真试验,结果分析与方案改进



控制系统的设计步骤

Step 8: 装置制作和性能测试。

- 1) 制作包含传感器、执行器和控制器的控制样机装置;
- 2) 安装和连接受控设备, 进行实际控制试验;
- 3) 在参数整定完成后全面测试控制性能。

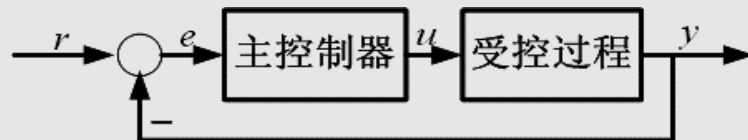
Step 9: 全面分析和评价所设计并试验测试的样机系统。

- 若已满足需要, 则设计过程可以结束。
- 若不能满足所预定的控制目标, 则进行进一步的专题分析, 找些关键性的设计缺陷或不足进行改进。
- 根据实际改进内容返回上述某一步骤, 进入又一轮的设计过程。

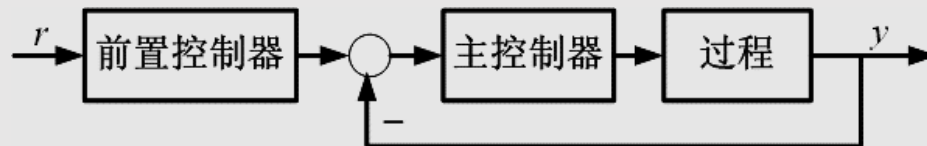


控制系统的典型结构

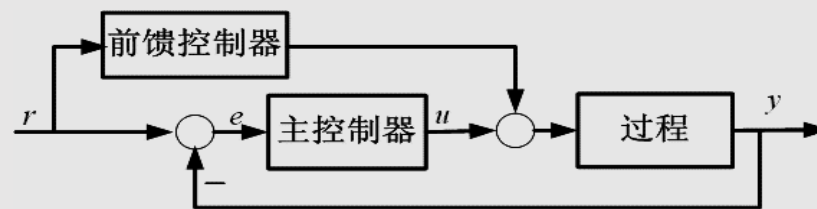
■ 基本控制系统结构



■ 有前置控制器的控制系统



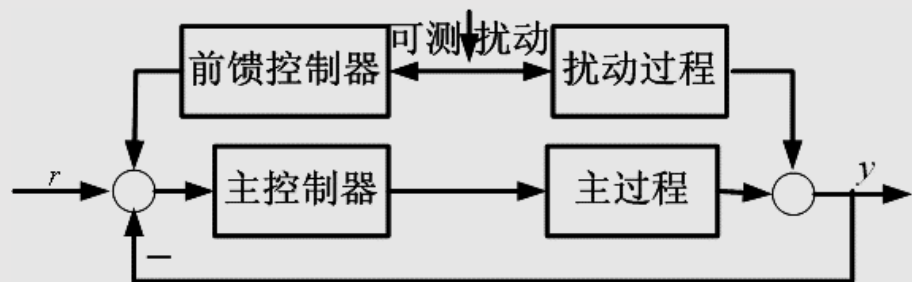
■ 带有设定值前馈的控制系统



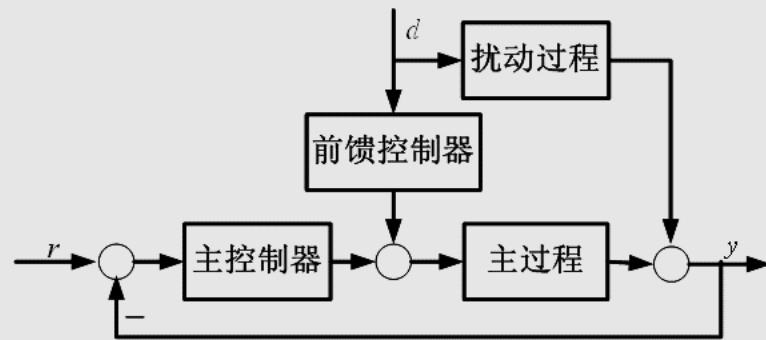


控制系统的典型结构

■ 扰动前馈加在主控制器前的控制系统



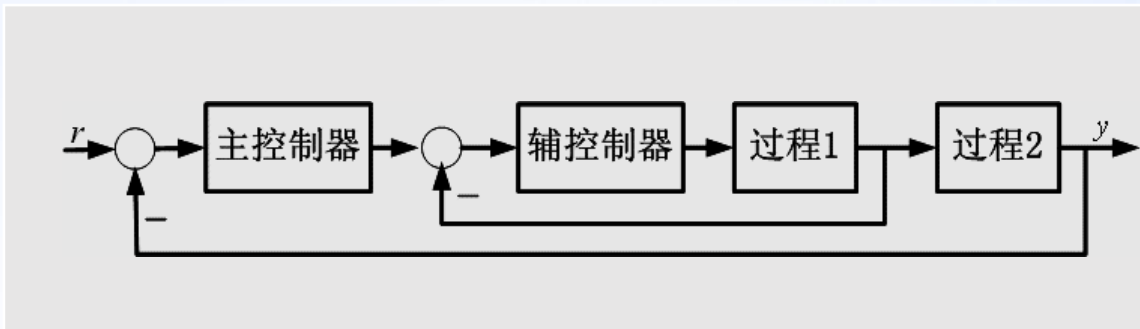
■ 扰动前馈加在主控制器后的控制系统



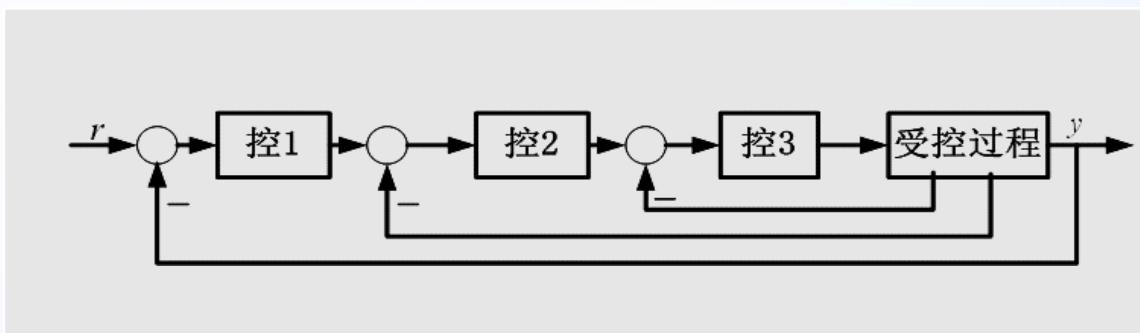


控制系统的典型结构

■ 串级控制系统



■ 多回路（多闭环）控制系统







控制系统的结构选择

控制系统结构设计主要是根据**受控过程特点**和**控制品质要求**进行的：

- 当所面对的控制过程受负荷类**扰动影响较大**，且其**扰动量可测**时，应考虑具有**前馈作用**的控制系统结构。
- 当所面对的受控过程是多变量系统且**变量间耦合严重**时，应考虑采用**解耦控制**系统结构。
- 当所面对的受控过程要求**控制的又快又好**时，可考虑**串级控制**或多回路控制系统。
- 当既要求有良好的**设定值跟踪性能**又要求有强的**过程扰动抑制性能**时，应考虑用**双自由度的**控制系统结构。



本节回顾

- 了解控制系统设计的步骤
- 掌握控制系统的典型结构与选择

第四章 控制系统设计导论

4.1 控制系统结构设计

4.2 控制规律选择

4.3 PID控制器参数整定

4.4 复杂控制系统分析



控制规律选择

- 控制器结构的确定问题也就是**控制器的规律选择**问题。

最常见的控制规律是**PID控制律**。

- 若采用双自由度控制结构或串级控制结构，则控制规律的选择问题聚焦在两个**控制器的配对**上，如选P-PI，还是选PD-PD，或PI-PD。
- 有多种其余控制规律可选，例如：最优控制、内模控制、状态反馈控制。



选择原则

原则：适用的就是最好的。

- 为追求最佳控制品质，不妨选择较新颖较复杂的控制律。
- 为实际工程应用，应当选择成熟的、简单的和实用的。
- 更多的考虑应放在受控对象特性和控制律的匹配上。

例：

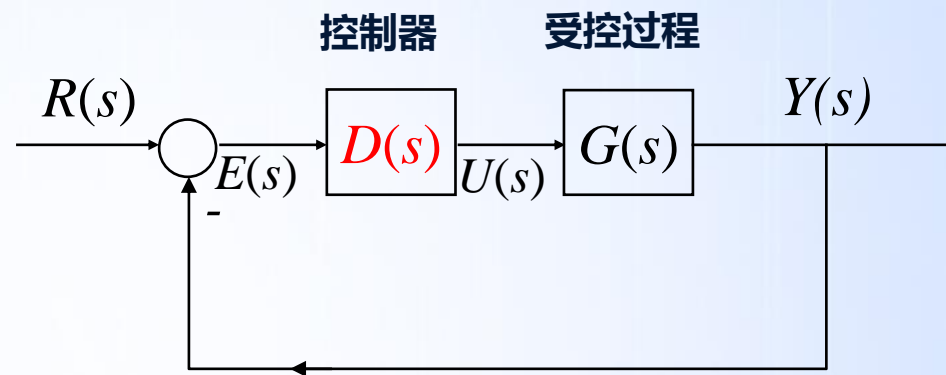
时变对象，应当选择鲁棒性好的控制律；（机器人运动控制问题）

大惯性对象，可考虑预测控制律。（锅炉燃烧优化控制问题）



PID控制

- 假设系统的传函为: $G(s) = \frac{Ke^{-\tau s}}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)}$
- 期望系统的传函为: $F(s) = \frac{DG}{1 + DG} = e^{-\tau s}$
- 解得: $D(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right)$



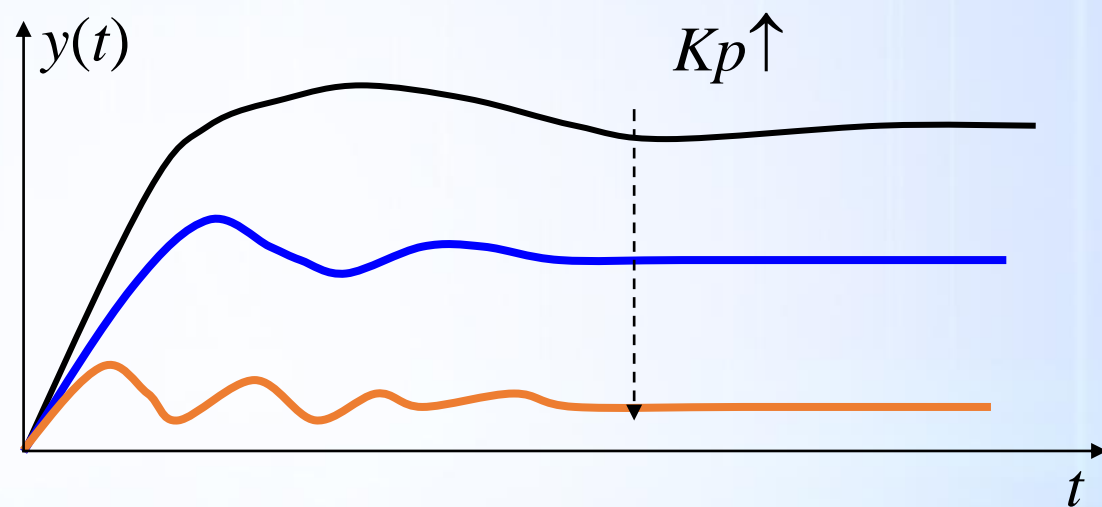


PID控制作用分析

P 控制 (Proportion)

$$u(t) = K_p e(t) = (1 / \delta) e(t)$$

- 控制器输出与误差成比例。
- P控制作用是最基本的负反馈控制作用。



调节规律:

- ✓ K_p 增大, 被控量的稳态误差变小, 但可能会导致系统的振荡。
- ✓ K_p 减小, 控制过程中的振荡变小, 但被控量的稳态误差变大。



PID控制作用分析

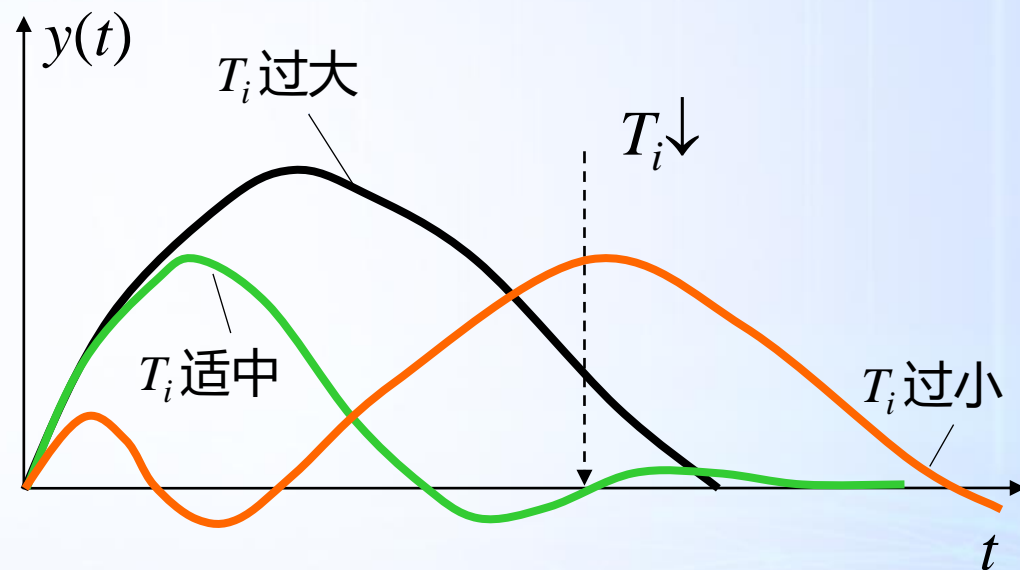
I 控制 (Integration)

$$u(t) = (1/T_i) \int_0^t e(t) d\tau$$

- 控制器输出与误差积分成比例。
- I控制作用最主要的用途是消除稳态偏差。
- 无差系统必有积分环节，或在控制器中或在被控过程中。

调节规律：

- ✓ 积分时间 T_i 增大，控制过程中的振荡变小，但动态偏差过大。
- ✓ 积分时间 T_i 减小，被控量激烈振荡，以至发散而使得系统不稳定。





PID控制作用分析

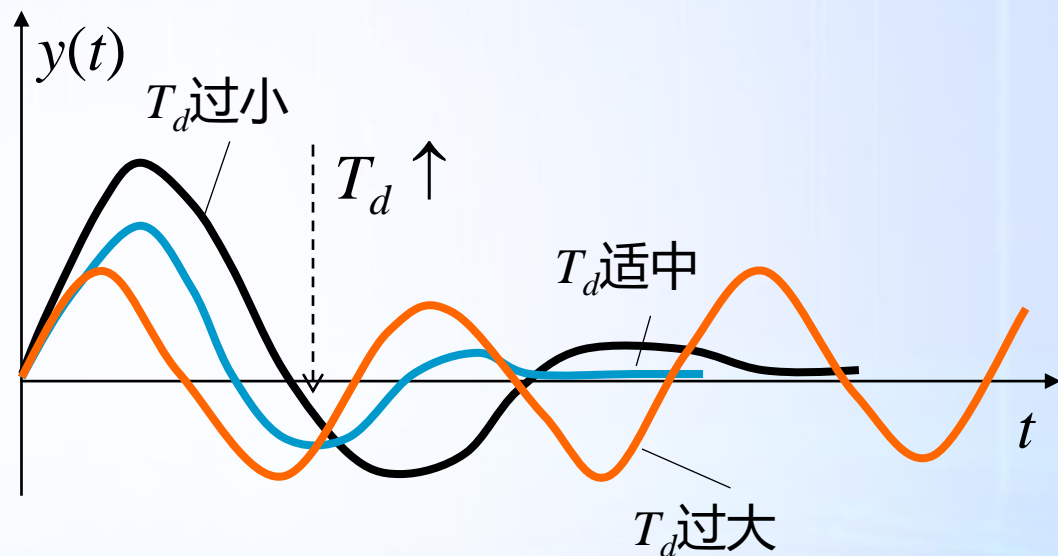
D 控制 (Differentiation)

$$u(t) = T_d \frac{de(t)}{dt}$$

- 控制器输出与误差微分成比例。
- D 控制作用最主要的用途是抑制动态偏差。
- D 作用有预测涵义，但在有噪声情况下，预测变误测，导致误动作。

调节规律：

- ✓ 微分时间 T_d 增大，动态偏差减小，但振荡加剧。
- ✓ 微分时间 T_d 减小，动态偏差增大，且调节时间变长。

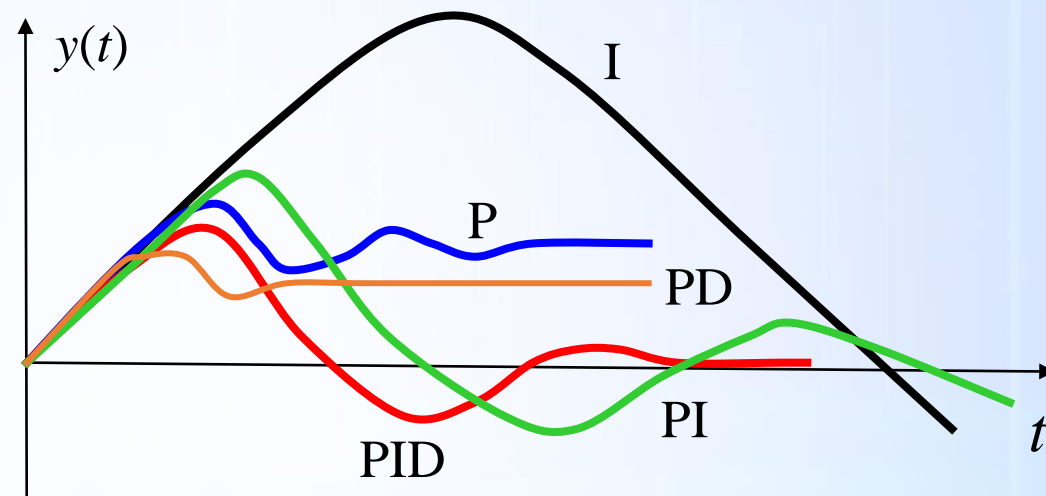




PID控制作用分析

几种控制作用的比较

- **P 只管当前误差，I 顾及以前的误差，D 看重将来的误差。** 物理意义明确，控制作用恰当，需要优化组合。
- **P 为主，I和D为辅，I或D一般不单独使用。** 常见的组合有P，PI，PD，PID。





本节回顾

- 掌握PID控制规律结构
- 掌握不同PID参数对控制系统性能的影响

第四章 控制系统设计导论

4.1 控制系统结构设计

4.2 控制规律选择

4.3 PID控制器参数整定

4.4 复杂控制系统分析



PID控制器的参数整定

- ❑ 控制器参数的确定首先应当根据受控过程的特性，其次依据控制性能指标。
- ❑ 控制器参数确定并不能通过简单计算就一蹴而就，往往需要经过初步计算，仿真试验调整 and 实际试验调整三个步骤的多次重复才能完成，所以这个参数确定过程是一个经多次调整试验才能确定的过程，故被称为参数“整定”。
- ❑ 控制器参数与受控过程特性相匹配才能获得好的效果。为此控制器投入使用时都需要整定。
- ❑ 按整定过程的特征可分类：**人工、自动、理论、实验、工程。**

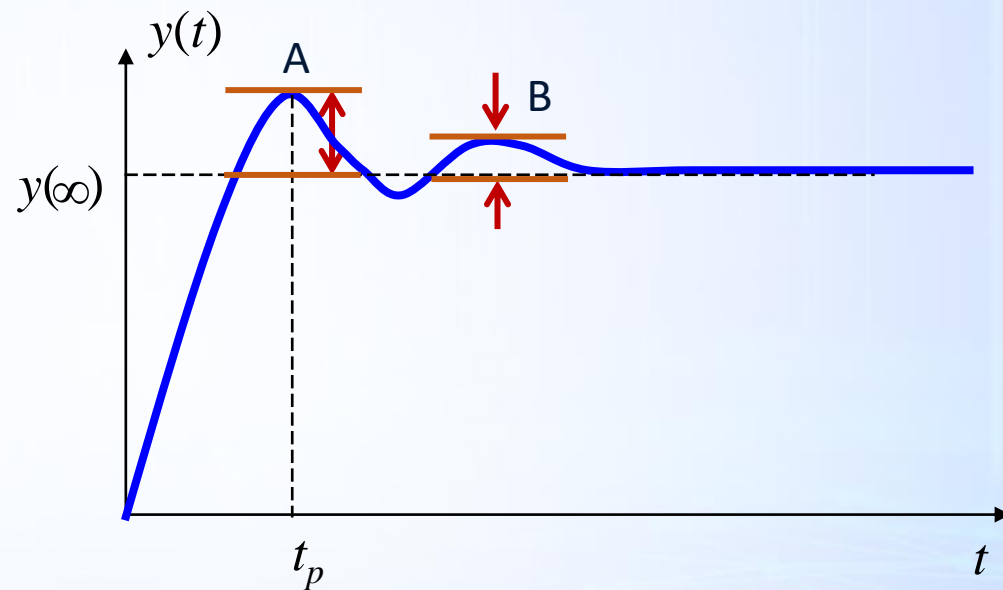


常用的参数整定方法

衰减曲线法

- 1) 设 T_i 最大, T_d 为零, K_p 为较小值。
- 2) 逐渐加大 K_p 做阶跃响应试验, 直至出现 $\psi=0.75$ (即 $B/A=1/4$) 的衰减振荡过程。
- 3) 记下此时的 K_{ps} 和振荡周期 T_s , 按下表确定PID参数。

控制器	K_p	T_i	T_d
P	K_{ps}		
PI	$0.83K_{ps}$	$0.5T_s$	
PID	$1.25K_{ps}$	$0.3T_s$	$0.1T_s$





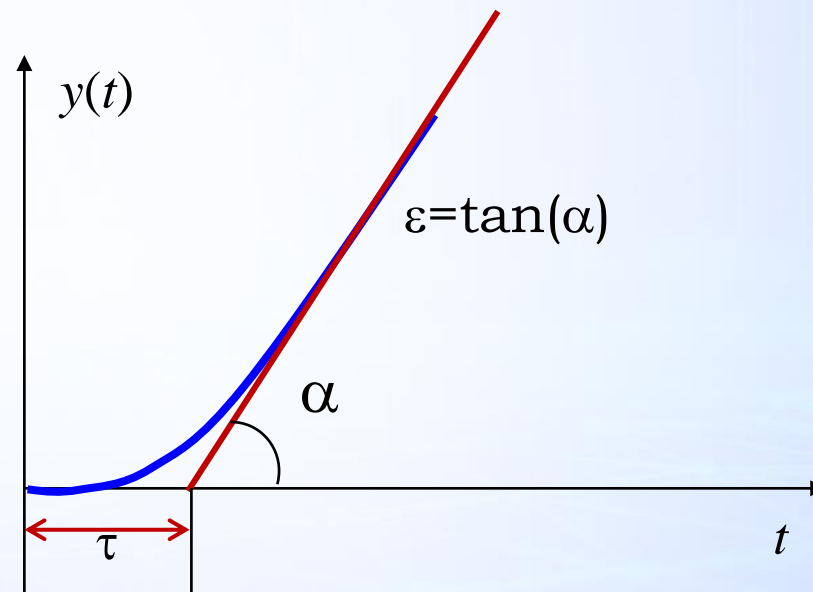
常用的参数整定方法

Z-N法 (Ziegler-Nichols 1942 提出)

- 已知受控对象的单位阶跃响应，用图解法可测得参数：延迟时间 τ 、飞升速度 ε ，再查表计算。

1) 受控过程无自平衡能力

控制器	K_p	T_i	T_d
P	$1/(\varepsilon\tau)$		
PI	$0.91/(\varepsilon\tau)$	3.3τ	
PID	$1.18/(\varepsilon\tau)$	2.0τ	0.5τ





常用的参数整定方法

Z-N法 (Ziegler-Nichols 1942 提出)

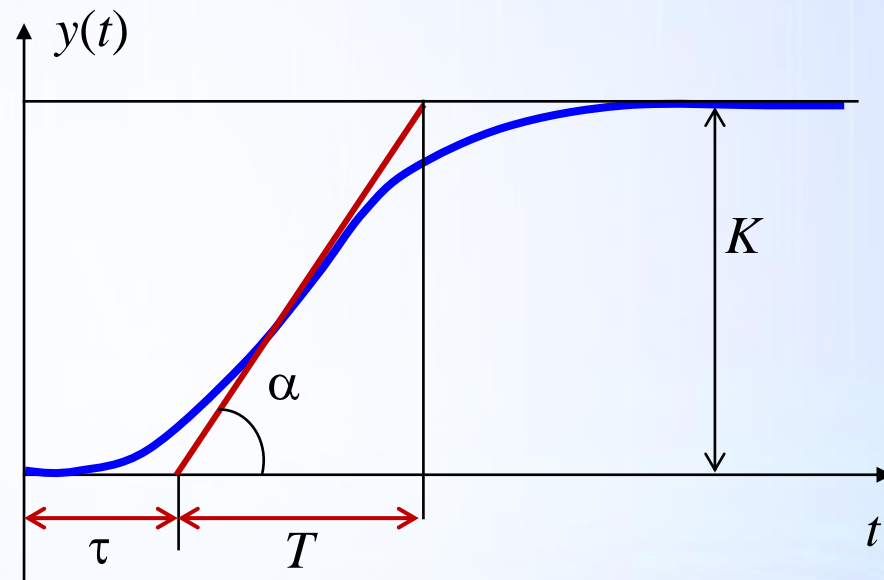
2) 受控过程有自平衡能力

①当 $\tau/T \leq 0.2$

控制器	K_p	T_i	T_d
P	$T / (K\tau)$		
PI	$0.91T/(K\tau)$	3.3τ	
PID	$1.18T/(K\tau)$	2.0τ	0.5τ

②当 $0.2 < \tau/T \leq 2$

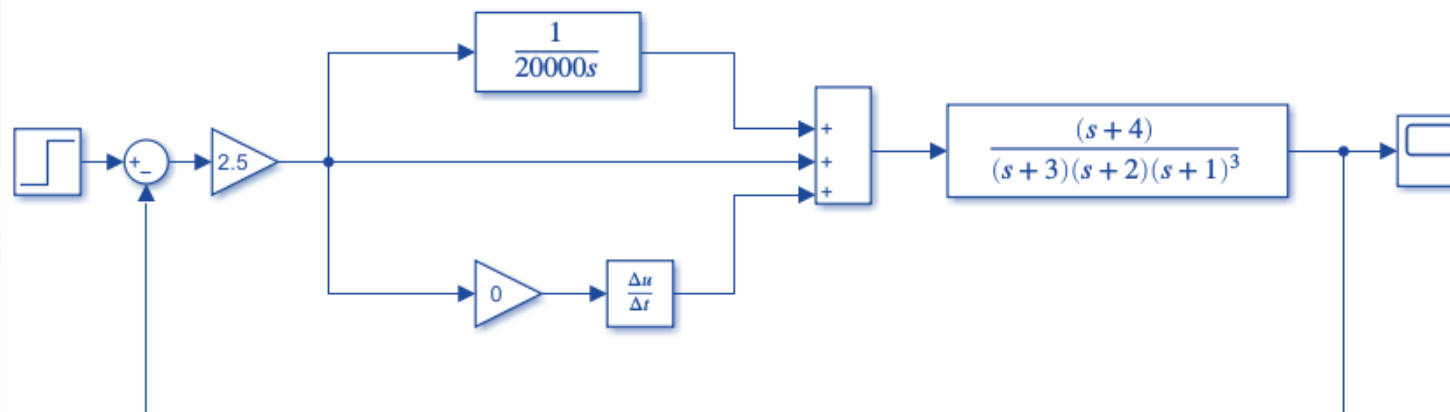
控制器	K_p	T_i	T_d
P	$0.385(\tau/T+0.7)/[K(\tau/T-0.08)]$		
PI	$0.385K(\tau/T+0.6)/[K(\tau/T-0.08)]$	$0.8T$	
PID	$0.385K(\tau/T+0.6)/[K(\tau/T-0.15)]$	$0.81T+0.19\tau$	0.25τ





参数整定仿真试验

衰减曲线法

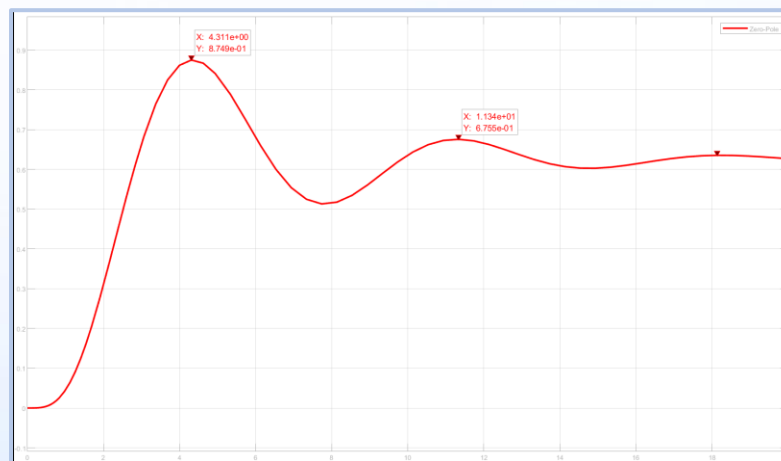


$$T_s=7$$

$$K_p=2.5$$

$$T_i=20000$$

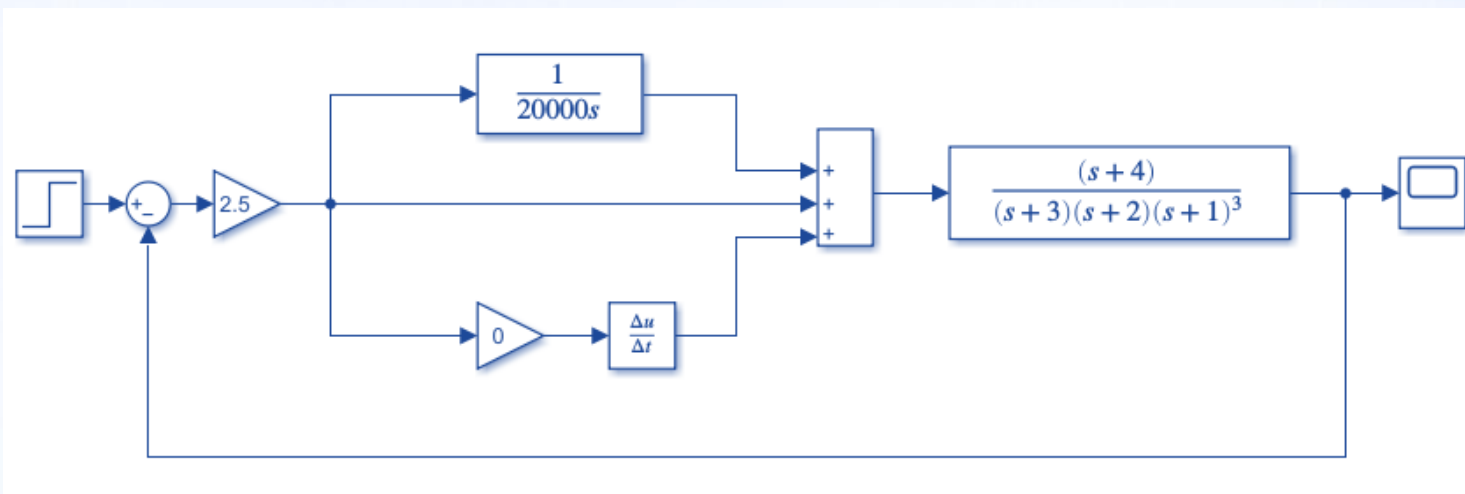
$$T_d=0$$





参数整定仿真试验

衰减曲线法

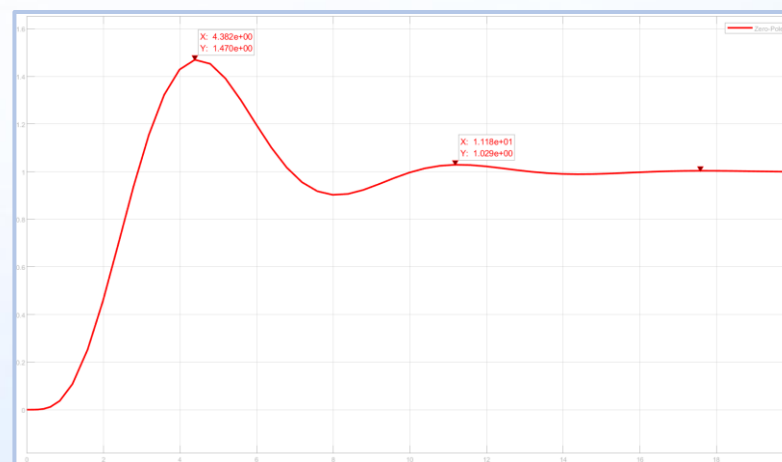


$$T_s=7$$

$$K_p=1.25K_{ps}=1.25*2.5=3.125$$

$$T_i=0.3T_s=0.3*7=2.1$$

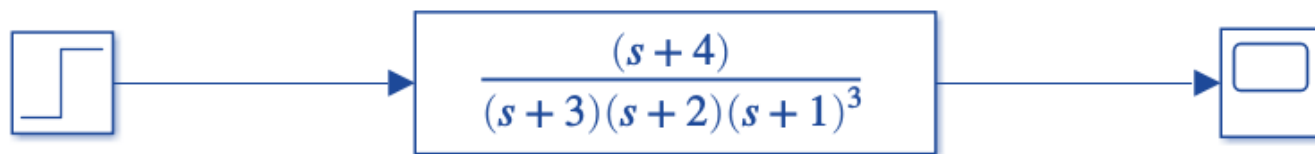
$$T_d=0.1T_s=0.1*7=0.7$$



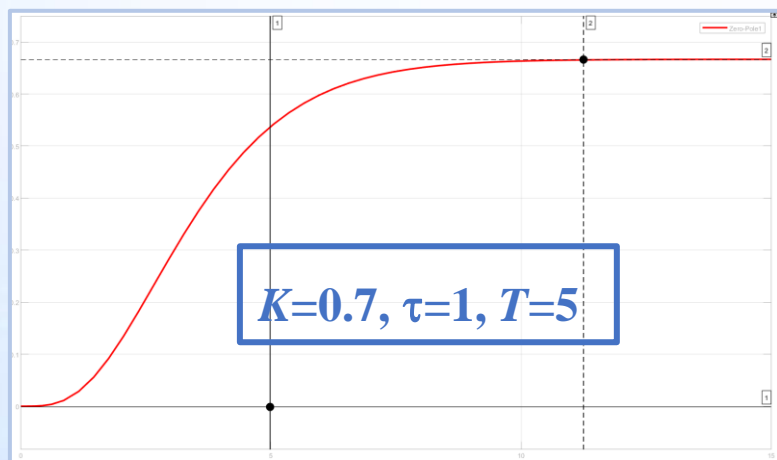


参数整定仿真试验

Z-N法



↓ 阶跃响应



查表法



$$K=0.7, \tau=1, T=5$$

$$K_p = 1.18T / (K\tau) = 1.18 * 5 / (0.7 * 1) = 8.429$$

$$T_i = 2\tau = 2 * 1 = 2$$

$$T_d = 0.5\tau = 0.5 * 1 = 0.5$$



参数整定方法总结

■ 衰减曲线法

适合于受控过程模型**未知**的情况。

通过实际试验可测得反映受控过程的两个关键参数： K_{ps} (反映增益特性)和 T_s (反映动态响应时间特性)；再根据这两个关键参数初步确定PID控制器的参数；然后根据实际调整试验最后确定PID控制器参数。

■ Z-N法

适合于受控过程模型**已知**的情况。

根据阶跃响应曲线可判断属于**无自平衡类型**或**有自平衡类型**，然后提取出受控过程模型参数 ε 、 τ 或 τ 、 T 、 K ；再根据过程模型参数初步推算PID参数；然后根据实际调整试验最后确定PID控制器参数。



参数整定方法总结

在控制参数初定后，还需要根据实际试验测得性能指标值，再一次地调整控制参数以获得最为满意的控制性能。

- 过程模型的建立存在误差，参数整定计算的方法是近似和粗略的。所以在实际性能测试常会发现控制性能并不令人满意，故需要进一步调整。
- 有时进一步的调整是为了某项专门指标的改善，例如，对某一受控过程要求控制的超调量很小，那么就可为专门减少超调量调整控制器参数。



本节回顾

- 了解PID控制器参数整定原则
- 掌握常用的两种工程整定方法

第四章 控制系统设计导论

4.1 控制系统结构设计

4.2 控制规律选择

4.3 PID控制器参数整定

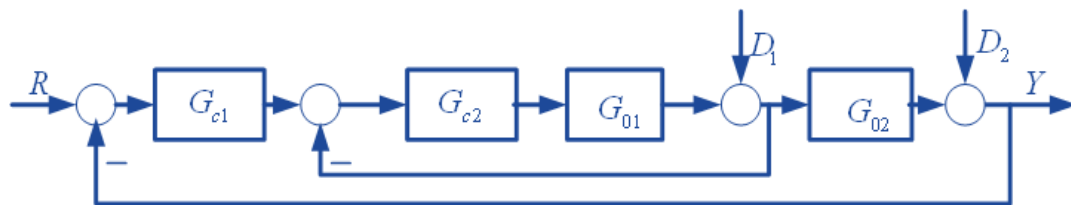
4.4 复杂控制系统分析



串级控制系统

- 将两个或多个控制器串起来构成的控制系统。是一种能明显改善控制品质的复杂控制系统。
- **应用条件：**只要受控过程可以拆分为几个环节的串联，其中间变量可以测取。

串级控制系统示意图

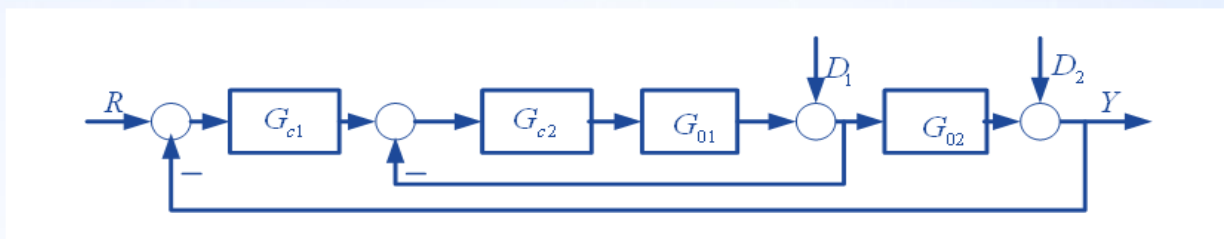


- 控制对象被拆为两个环节，控制器也有两个。
- 其中，外回路的调节器常称为主调节器；内回路的调节器常称为副调节器。
外回路调节目标是定值调节；内回路属于随动跟踪系统。



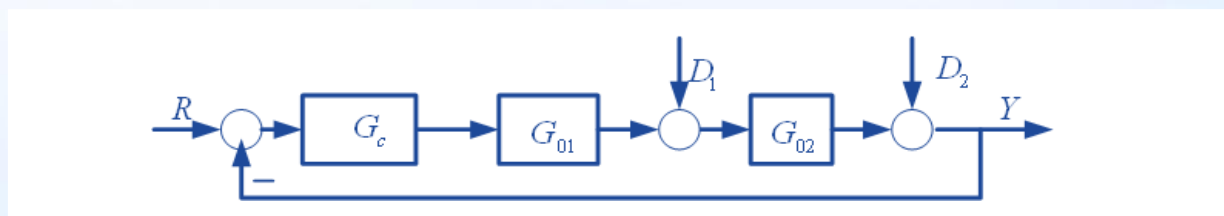
串级控制系统

串级控制系统示意图



- 串级控制最明显的优点是快速地抑制了内回路的扰动，而使整个系统的动态误差大为减少。
- 当内回路中的扰动 D_1 出现时，副调节器首先发挥作用，通过内回路把 D_1 抑制到很小。
- 与不采用串级控制的情况相比， D_1 出现后，先要通过 G_{02} 传到 Y ，再通过反馈传给 G_C ，显然这个抑制过程要比串级时慢得多。

简单控制系统示意图



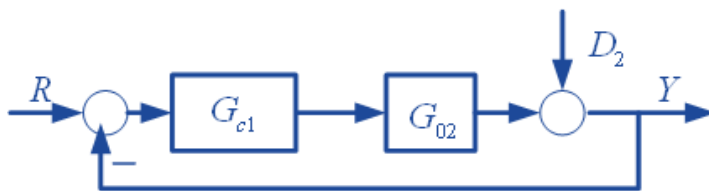


串级控制系统

- 当副调节器的增益 G_{c2} 比较大时，内回路的传递函数可进一步简化为：

$$G_{\text{内回路}}(s) = \frac{G_{c2}(s)G_{01}(s)}{1 + G_{c2}(s)G_{01}(s)} \approx 1$$

- 则整个系统可简化如图所示。可见对于外回路扰动 D_2 的抑制也比不用串级控制时快得多。因此大大缩短了调整时间。



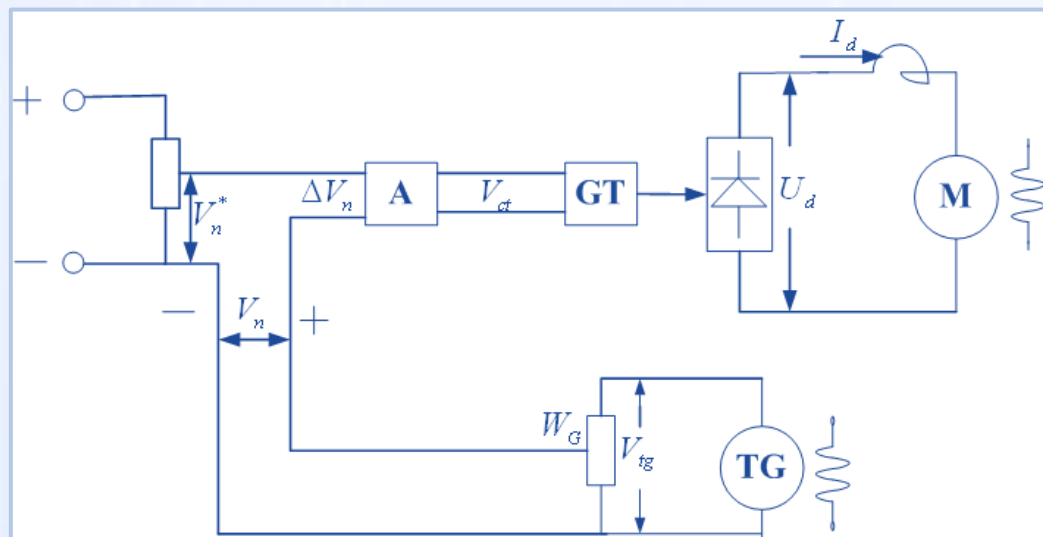


多闭环控制系统

- 在结构上，前向通道和反馈回路构成一个闭合回路，称为一个闭环。凡是具有一个闭合回路的反馈控制系统就是单闭环或者说单回路控制系统。为了使控制品质更高，所设计的反馈回路往往不止一个，从而形成了**双闭环或者说双回路**，甚至是**多闭环或是多回路**控制系统。
- 多闭环控制系统与串级控制系统在系统结构上是一样的，共同特征是：
只有一个被调量，却有多多个反馈控制回路。
- 区别在于：
串级控制系统，一定是一个又一个**控制器串联**起来实施控制，即每个闭环中必有一个控制器的存在。
然而多闭环控制系统，每个闭环中**可含专用的控制器，也可不含。**



单闭环电机直流调速控制系统



A: 为放大器,

GT: 为可控硅触发器,

TG: 为测量转速的直流发电机。

工作原理:

用电位器 W_n 设定与期望转速量对应的电压 V_n^* , 用电位器 W_G 可改变源于测速发电机电压 V_{tg} 的反馈电压 V_n , 放大器A的输入端则得到设定电压 V_n^* 与反馈电压 V_n 的差值 ΔV_n , 放大器A的输出 V_{ct} 用来控制可控硅触发器GT的导通角, 从而改变直流电动机M的工作电压 U_d ; L是电抗器用来抑制电流脉动, 当电机转速偏离设定转速时, ΔV_n 就有变化, 使电机工作电压增加或减小, 电机转速随着改变, 从而使转速偏差减小。



单闭环电机直流调速控制系统

用机理分析建模方法建立图示调速系统中各环节的动态数学模型：

- 1) 额定励磁下的直流电动机

$$\begin{cases} \frac{I_d(s)}{U_d(s) - E(s)} = \frac{1/R}{T_l s + 1} \\ \frac{E(s)}{I_d(s) - I_{dl}(s)} = \frac{R}{T_m s} \end{cases}$$

式中：

R 为电枢回路电阻，

$T_l = \frac{L}{R}$ 为电枢回路电磁时间常数，

$T_m = \frac{GD^2 R}{275 C_e C_m}$ 为机电时间常数 (C_m 、 C_e 为转矩电流比， GD^2 为电机轴上的飞轮力矩)

E 为感应电动势

$I_{dl} = \frac{T_L}{C_m}$ 为负载电流 (T_L 为负载转矩)



单闭环电机直流调速控制系统

用机理分析建模方法建立图示调速系统中各环节的动态数学模型：

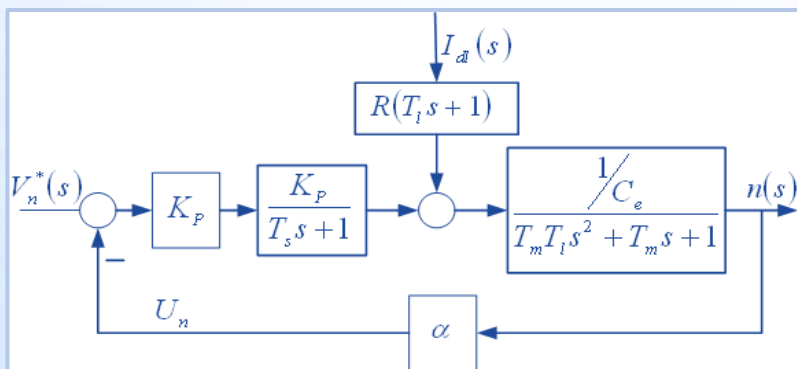
- 2) 可控硅触发装置：

$$\frac{U_d(s)}{U_{ct}(s)} = K_s e^{-T_s s} \approx \frac{K_s}{T_s s + 1} \quad \text{式中：} T_s \text{为失控时间。}$$

- 3) 比例放大器： $\frac{U_{ct}(s)}{\Delta U_n(s)} = K_p$

- 4) 测速发电机： $\frac{U_n(s)}{n(s)} = \alpha$

于是可整理得到闭环调速系统数学模型方框图：

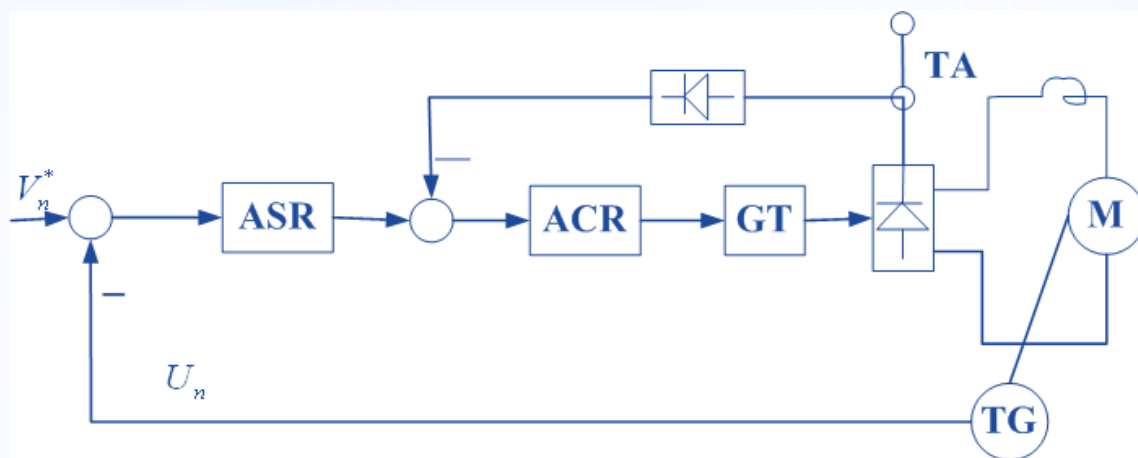


在这个系统中比例放大器 K_p 起到一个比例控制器的作用。由于受控对象属于0型系统，所以，比例控制下存在静差。若要求无静差，可把比例控制器改为比例积分

控制器PI，这时环节改为： $K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right)$

双闭环直流调速系统

- 在单闭环直流调速系统上再加入一个调节器专门控制电流就形成了双闭环的直流调速系统。

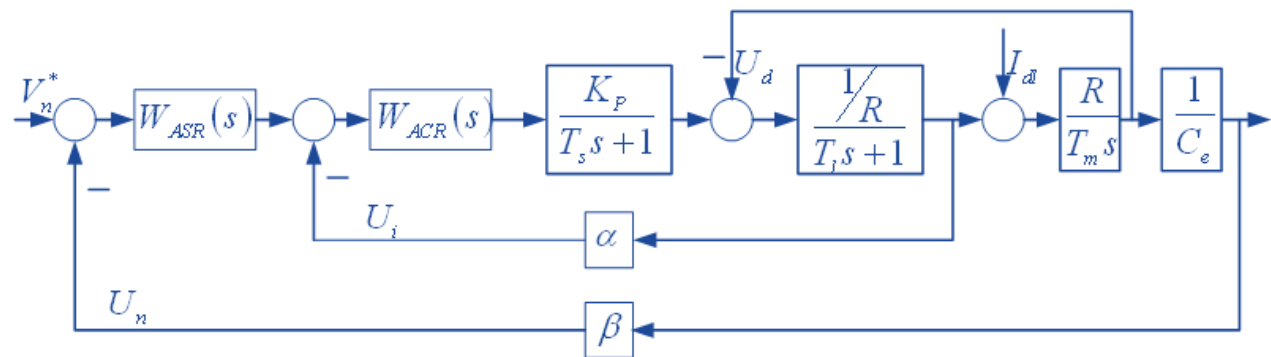


- ASR为转速调节器，ACR为电流调节器，两个调节器串联在一起，所以又称串级控制系统。



双闭环直流调速系统

- 这样的系统可以模型化为：



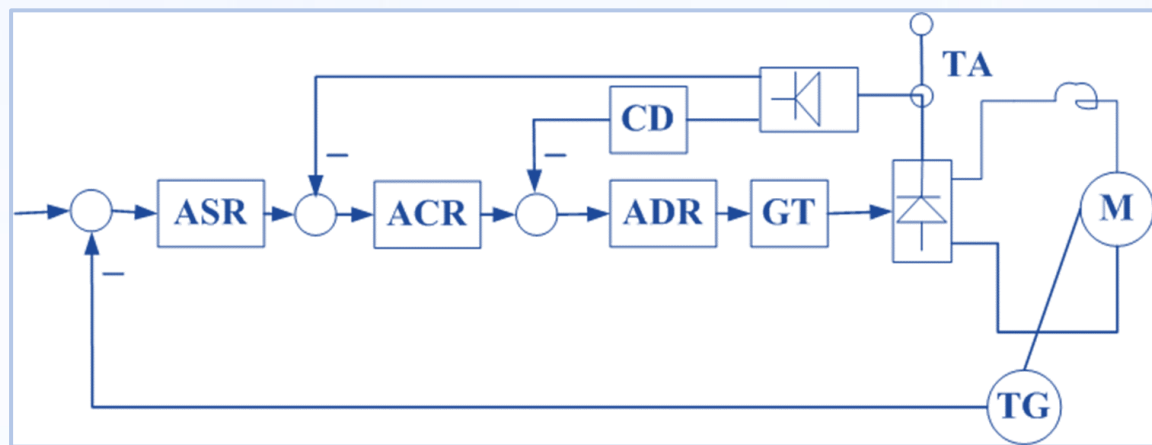
$W_{ASR}(s)$ 为转速调节器传递函数， $W_{ACR}(s)$ 为电流调节器。一般用PI调节器。电流调节回路处在转速调节回路内部，称为内环，转速调节器称为外环。

- 内环使内环内的扰动得到及时抑制，使电机电流迅速跟随转速调节的要求。从而使外环的调节快速性能得到加强，动态响应加快，从而提高了控制品质。



三闭环直流调速系统

- 为进一步提高控制的及时性，在双闭环直流调速系统上还可再加入一个内环控制。就成为带电流变化率控制内环的三环直流调速系统。



在这个系统中新添的调节器是ADR。

ADR接受来自可控硅电流的微分信号，所以调节的主要变量是电流变化率。

- ASR用于调节转速，ACR用于调节电流，ADR专用于调节电流变化率，三个调节器的串联起来使用，各司其职，使系统的控制作用细化和强化。从而减小了控制对象的惯性影响，及时抑制了各回路中可能出现的扰动，使控制品质比单闭环控制时大为提高。



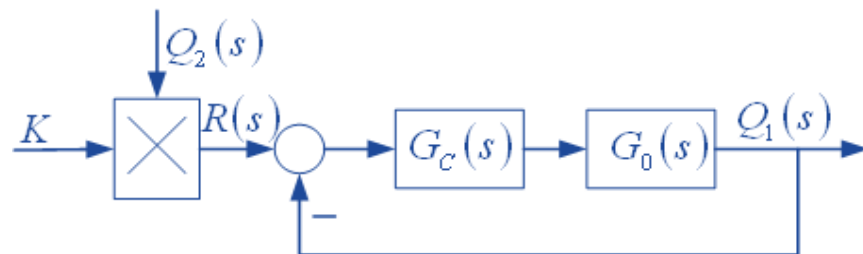
比值控制系统

- 在生产过程控制，常有需要控制两个参数成一定的比例。这种控制参数比例的系统就被称为比值控制系统。
- 化工生产中，要求两种物料投放流量成一定比例，这是一种**定比值控制系统**。
- 锅炉燃烧控制中，风量流量的控制要求与燃料量成比例，还要求这个比例值随燃烧工况的好坏而调整，这就是一种**变比值控制系统**。



比值控制系统

定比值控制系统



■ K 是定值

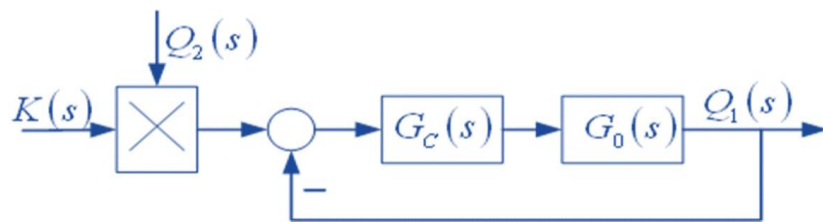
■ 设要求维持 Q_1 和 Q_2 的比值不变, 即 $\frac{Q_1}{Q_2} = K$

则有 $R(s)=KQ_2(s)$



比值控制系统

变比值控制系统



■ K 是变量

■ 比值量 $K(s)$ 成为一个变量而非常数。

控制的目标成为使 $Q_1(s)$ 与 $Q_2(s)$ 的比值 $K(s)$ 可变化。

所以有 $Q_1(s)/Q_2(s) = K(s)$

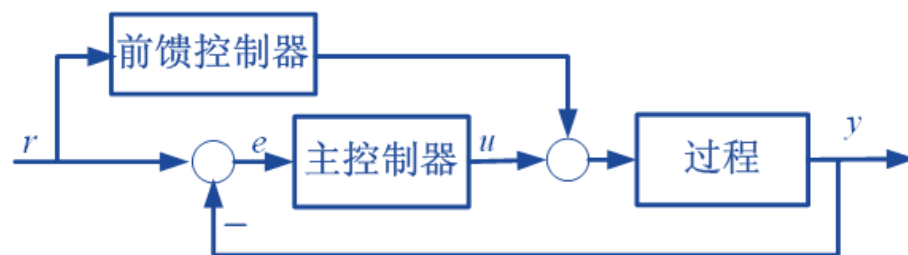


前馈控制系统

要点

- 前馈校正可分为设定值前馈，扰动前馈。扰动前馈又可分为至控制器前点和至后点两种。
- 前馈校正不单独使用，常与反馈控制结合成复合控制系统。
- 前馈校正环节的设计主要是依据全补偿或不变性原理。

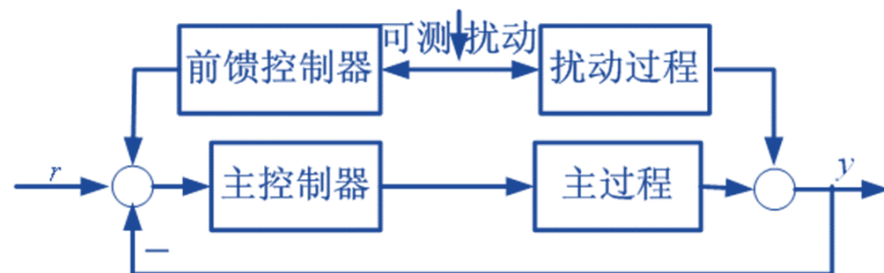
■ 带有设定值前馈的控制系统



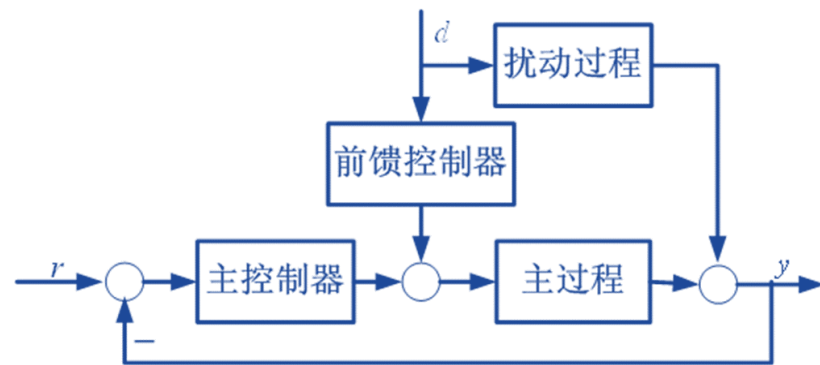


前馈控制系统

■ 扰动前馈加在主控制器前的控制系统



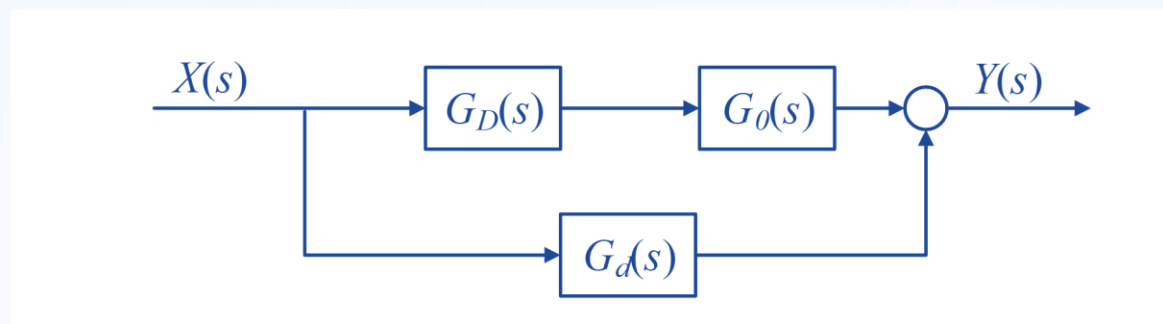
■ 扰动前馈加在主控制器后的控制系统





前馈控制的全补偿原理

对于单纯的前馈控制系统



- 有 $Y(s)=[G_d(s)+G_D(s)G_0(s)]X(s)$, 若要使输入信号 X 完全不影响输出信号 Y , 须使

$$G_d(s)+G_D(s)G_0(s)=0$$

- 于是有前馈校正环节的全补偿公式: $G_D(s)=-\frac{G_d(s)}{G_0(s)}$

- 按全补偿公式计算, 有可能是不可实现。



前馈控制的全补偿原理

对于单纯的前馈控制系统

- 按全补偿公式计算出的可能是不可实现的。

例：

$$G_d(s) = \frac{1}{Ts + 1}$$

$$G_0(s) = \frac{1}{(Ts + 1)(s^2 + bs + c)}$$



$$G_D(s) = -s^2 - bs - c$$

s^2 项不可物理实现

- 若取 $G_D(s) = -bs - c$ ，称为半补偿；
- 若取 $G_D(s) = -c$ ，称为静态补偿。

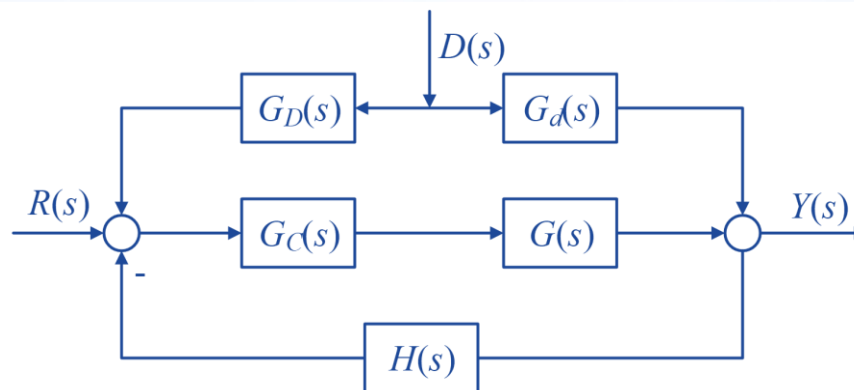


前馈控制的全补偿原理

扰动前馈控制器设计

■ 输出不随扰动变化

设系统为框图所示：



扰动前馈加在主控制器前的控制系统。

$$\text{则 } Y(s) = \frac{G_d + G_D G_c G}{1 + G G_c H} D(s) + \frac{G G_c}{1 + G G_c H} R(s)$$

$$\text{■ 令 } G_d + G_D G_c G = 0, \text{ 据全补偿原理, 有 } G_D = -\frac{G_d}{G G_c}$$

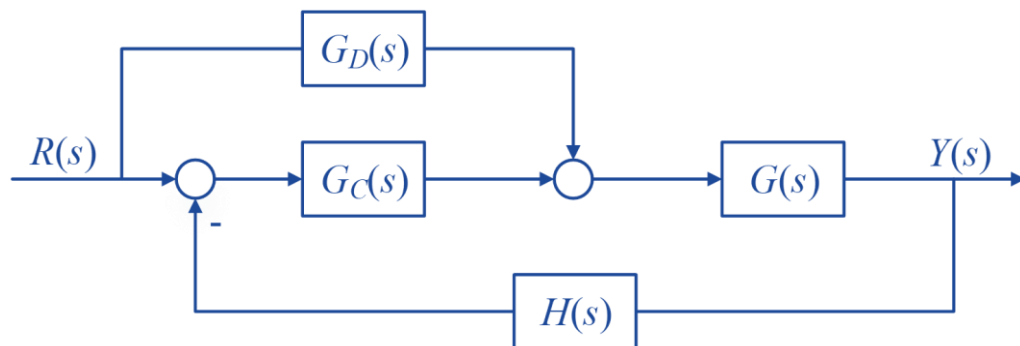


前馈控制的全补偿原理

设定值前馈控制器的设计

■ 输出跟踪设定值

设系统为框图所示：



带有设定值前馈的控制系统。

$$\text{则 } Y(s) = \frac{G(s)(G_D(s) + G_c(s))}{1 + H(s)G_c(s)G(s)} R(s)$$



前馈控制的全补偿原理

设定值前馈控制器的设计

- 若要最理想的补偿, 令 $Y(s)=R(s)$, 即 $\frac{G(s)(G_D(s)+G_c(s))}{1+H(s)G_c(s)G(s)}=1$

$$\begin{aligned}\text{所以 } G_D(s) &= \frac{1}{G(s)}(1+G_c(s)G(s)H(s))-G_c(s) \\ &= \frac{1}{G(s)}+G_c(s)(H(s)-1)\end{aligned}$$

- 当为单位反馈系统时, $H(s)=1$, $G_D(s)=\frac{1}{G(s)}$



本节回顾

- 了解复杂控制系统的设计方法
- 掌握前馈控制、多闭环控制系统的设计方法