第5章 抗饱和(Anti-Windup)设计

——2023年春季学期

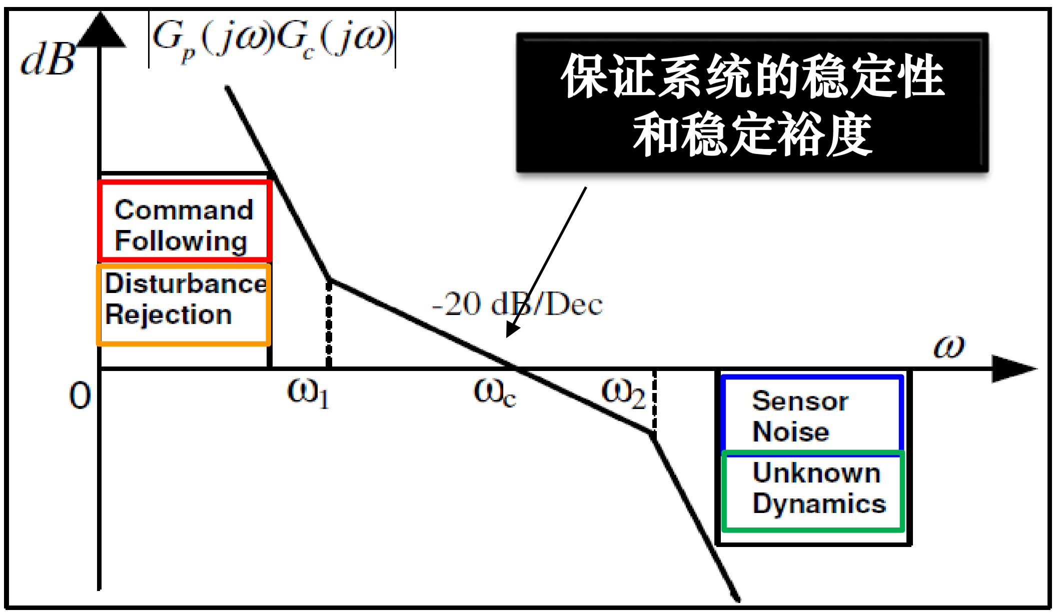
授课教师： 马 杰（控制与仿真中心）

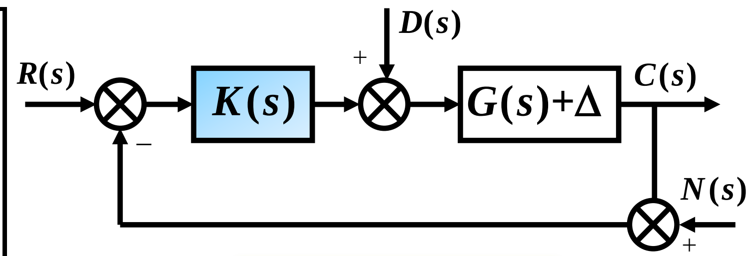
霍 鑫（控制与仿真中心）

马克茂（控制与仿真中心）

陈松林（控制与仿真中心）

控制系统设计的思想和原则

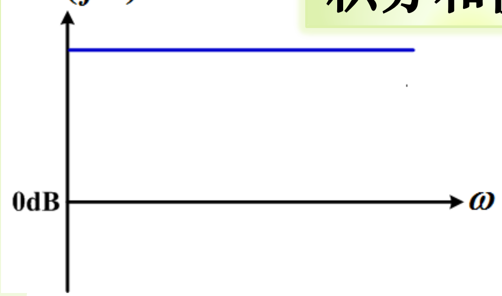




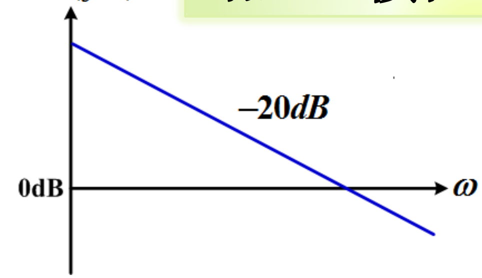
- 指令跟踪对系统低频的斜率和增益提出了要求；
- 扰动抑制对干扰作用点之前的特性提出了要求；
- 噪声抑制对系统的带宽和高频特性提出了要求；
- 不确定性对系统的带宽和高频特性提出了要求；

带宽设计的第一种情况（自身带宽较宽，需要压低带宽）

积分和惯性

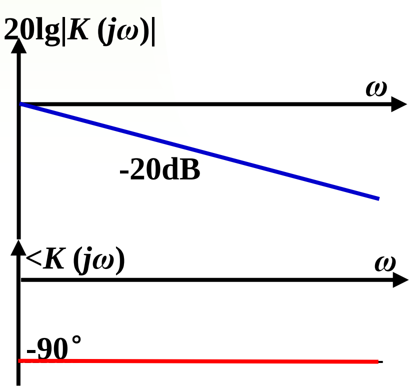


增益、惯性、滞后、PI

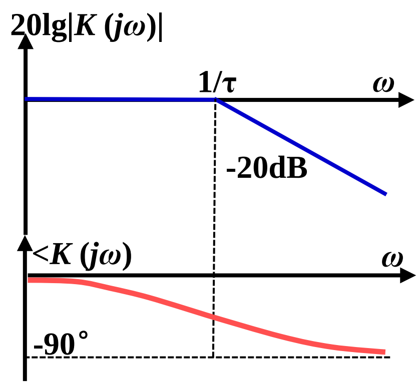


压低带宽的主要方法（积分，惯性，滞后，PI）

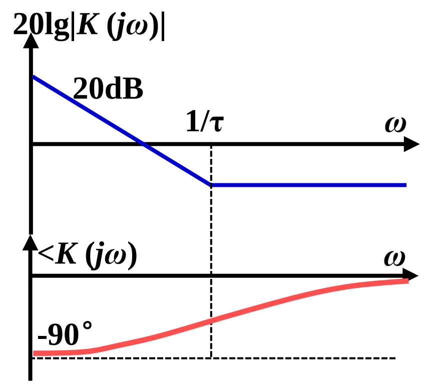
$$K(s)=\frac{1}{s}$$



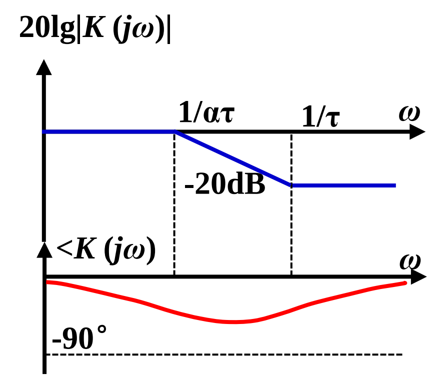
$$K(s)=\frac{1}{\tau s+1}$$



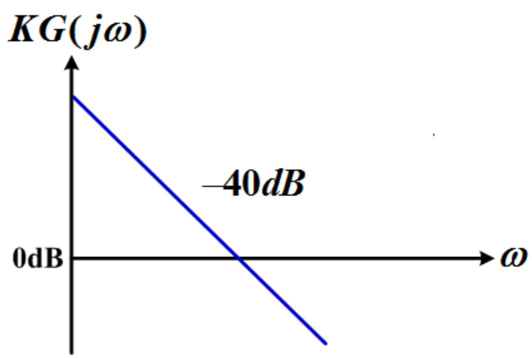
$$K(s)=\frac{K_1(\tau s+1)}{s}$$

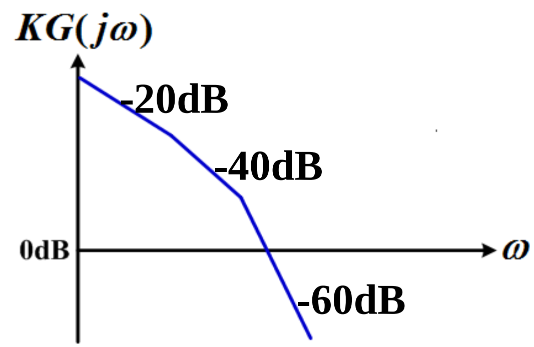


$$K(s)=\frac{\tau s+1}{\alpha\tau s+1}$$



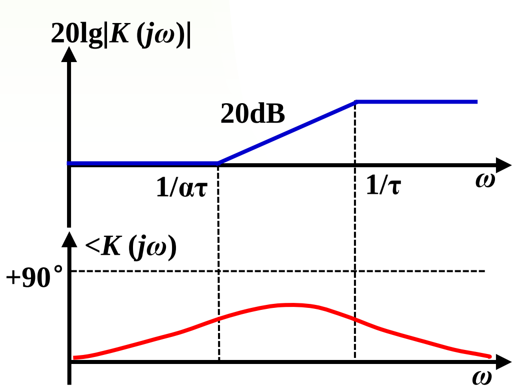
带宽设计的第二种情况（自身带宽较窄，需要拓展带宽）

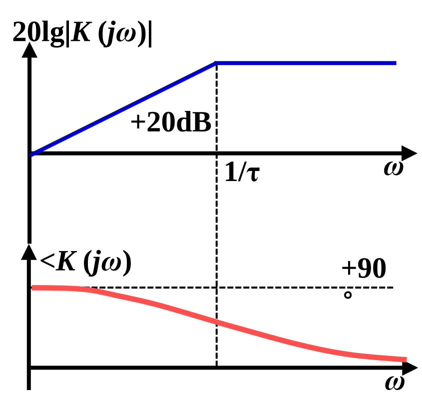


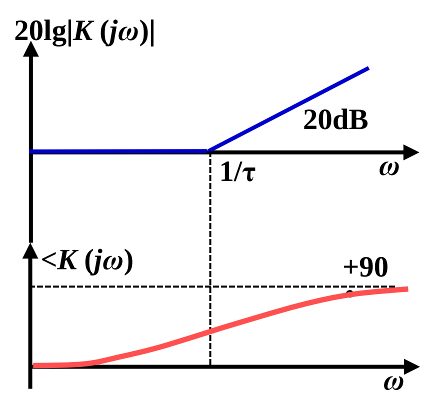


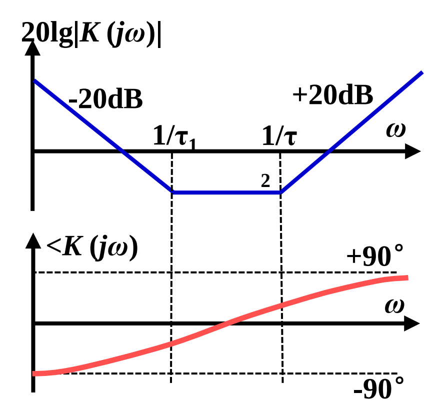
拓展带宽的主要方法（超前、近似微分/PD/PID）

$$K(s)=\frac{\alpha\tau s+1}{\tau s+1} \qquad K(s)=\frac{Ks}{1+\tau s} \qquad K_{PD}(s)=K_1(\tau s+1) \qquad K_{PID}(s)=\frac{K_1(\tau_1 s+1)(\tau_2 s+1)}{s}$$

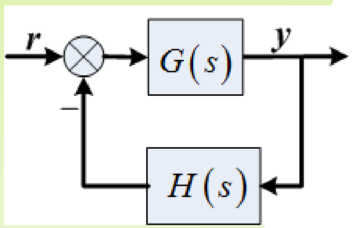


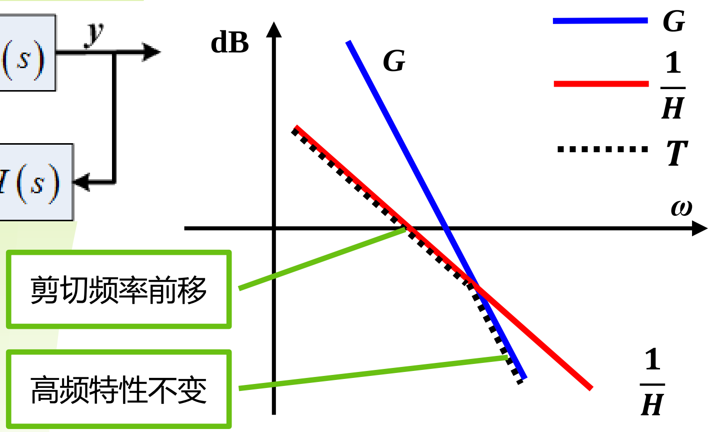






反馈校正可以直接改变闭环系统的带宽

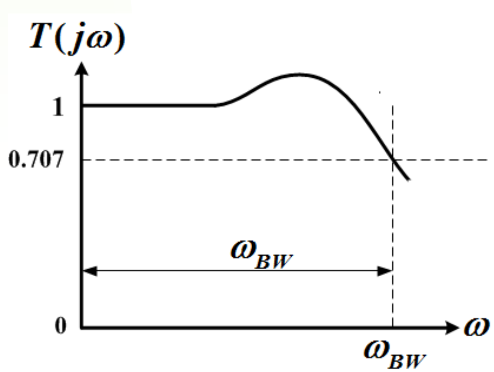


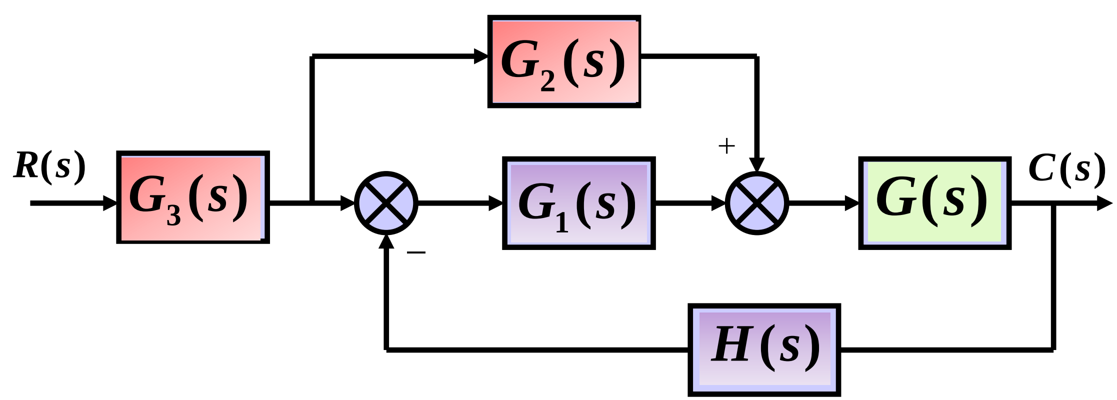


$$T(s)=\frac{G}{1+GH}=\begin{cases}\frac{1}{H}, & GH>>1,\text{ 即}G>>\frac{1}{H}\\ G, & GH<<1,\text{ 即}G<<\frac{1}{H}\end{cases}$$

当G比$\frac{1}{H}$阶次高时，低频$\frac{1}{H}$为主导，高频由G主导

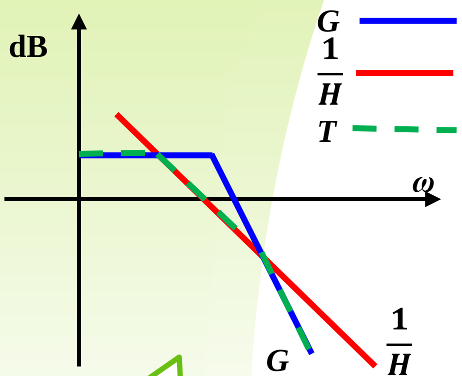
拓展整个系统带宽的方法

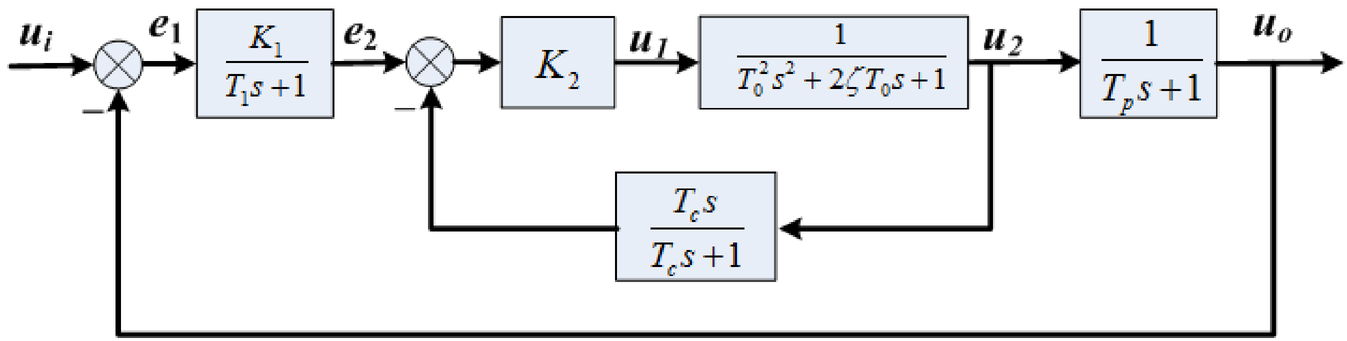




校正之后的对象特性完全由G与1/H的关系决定

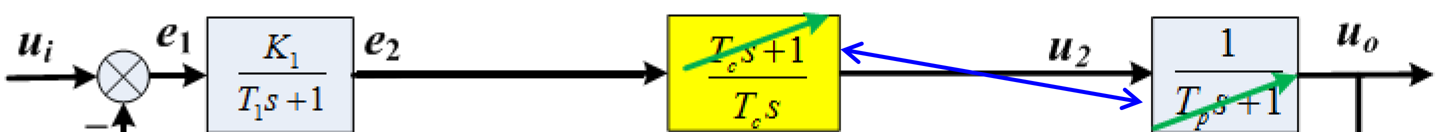
◆ 例3：电压调节器





校正的结果，改变中频段特性，同时压低了穿越频率

内回路增益较高时



$$KG(s) \approx \frac{K_1}{T_c s}$$

测量环节时间常数小，可以近似为$K1$

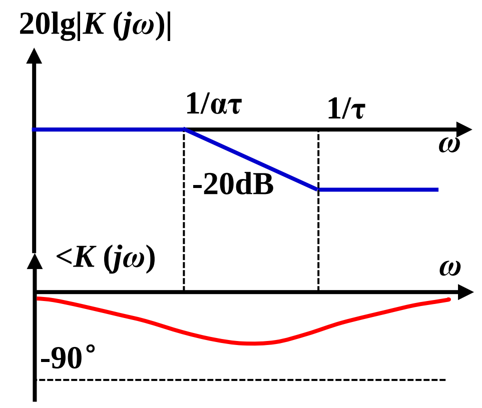
驱动环节，在反馈校正的作用下，在GH>>1的频段近似为$1/H(s)$

在反馈校正的作用下，系统近似为积分环节，实现了剪切频率前移

回顾篇

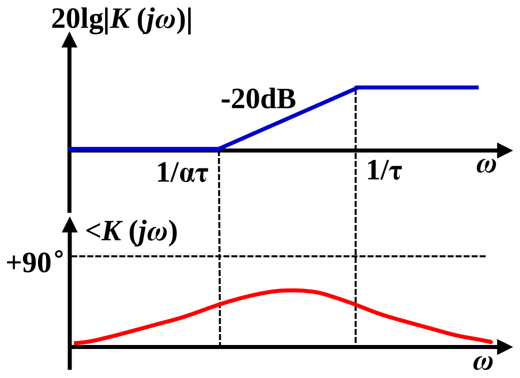
关于滞后环节（改增益-损相角-多个分散）

- 滞后可以用在低频，抬高低频增益，减小误差，但要考虑相位损失，使用时，可以用**多个中心频率错开**的滞后环节，**避免相角的集中损失，从而导致条件稳定。**
- 也可以用在高频，**压低高频增益，降低穿越频率**，但要注意其在剪切频率处带来的相位滞后，使用时要保证系统有足够的稳定裕度。



关于超前环节（补相角-抬增益-多个集中）

- 超前环节一般用在高频，也就是在剪切频率处，一个超前能够补偿的相角是有限的，通常需要多个超前环节一起使用，应用时每个超前环节的**中心频率都要和期望的剪切频率一致**，这样可以**集中补偿相角**，减小对高频增益的提升和对低频增益的衰减。

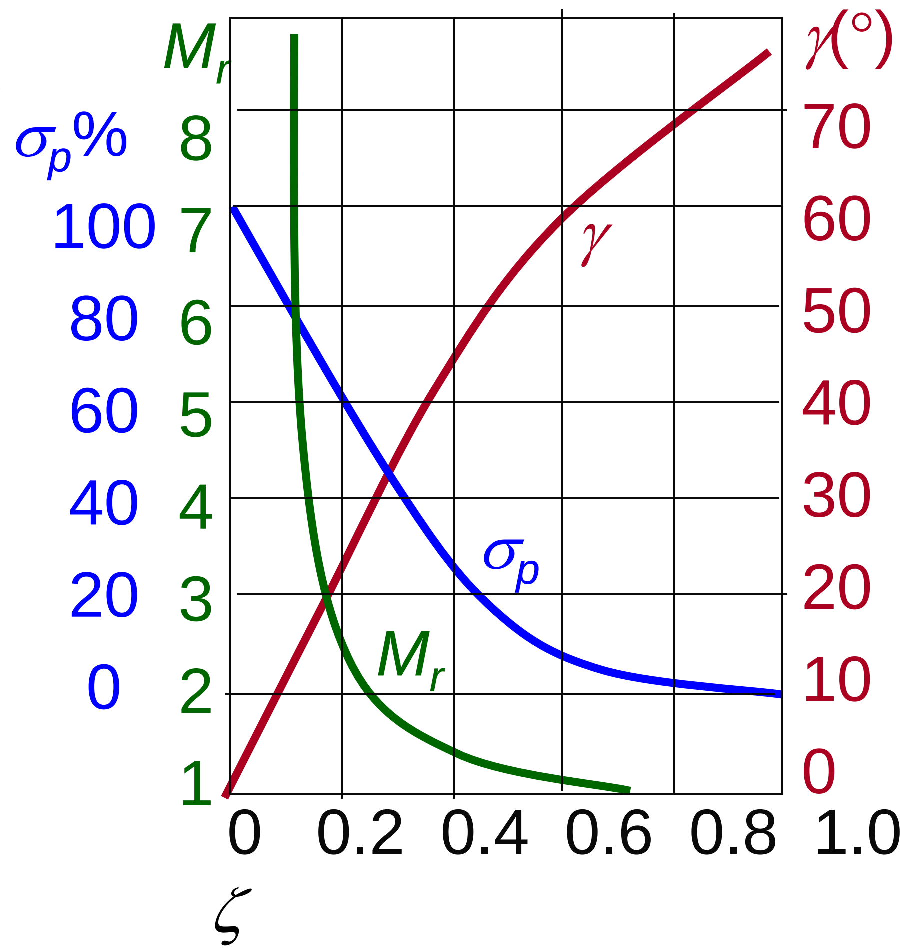


指标的关系（如何将闭环的时域和频域指标转化为开环频域指标）

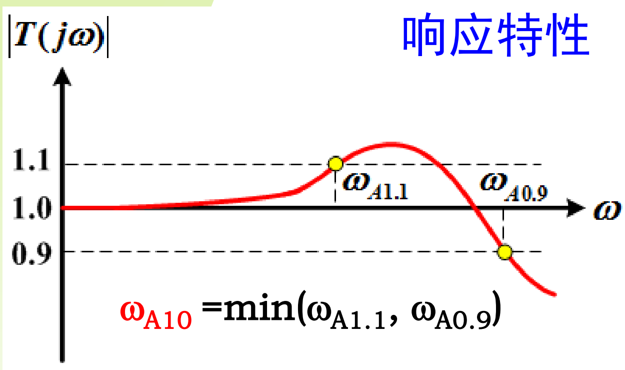
- 开环频域指标γ和时域指标σ和 t_s 的关系
  （1）越大，σ%越小；γ越小， σ%越大。
  一般希望$30° \le \gamma \le 70°$；
  （2）ω_c 越大， t_s 越小；

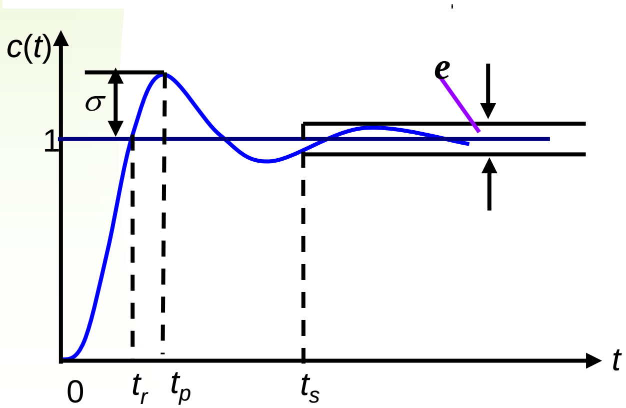
- 闭环频域指标M_r和ω_b与时域指标σ和 t_s的关系
  （1） M_r 越大， σ%越大；
  （2） ω_b 越大， t_s 越小；

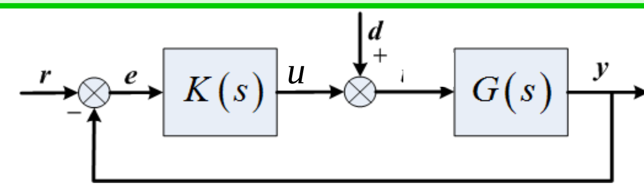
- 开环频域指标ω_c 和 γ和闭环频域指标M_r和ω_b 的关系
  （1） γ越大，M_r越小（$M_r \approx 1/\sin\gamma$）；
  （2） ω_b越大，ω_c越大 （$\omega_c<\omega_b<2\omega_c$）；

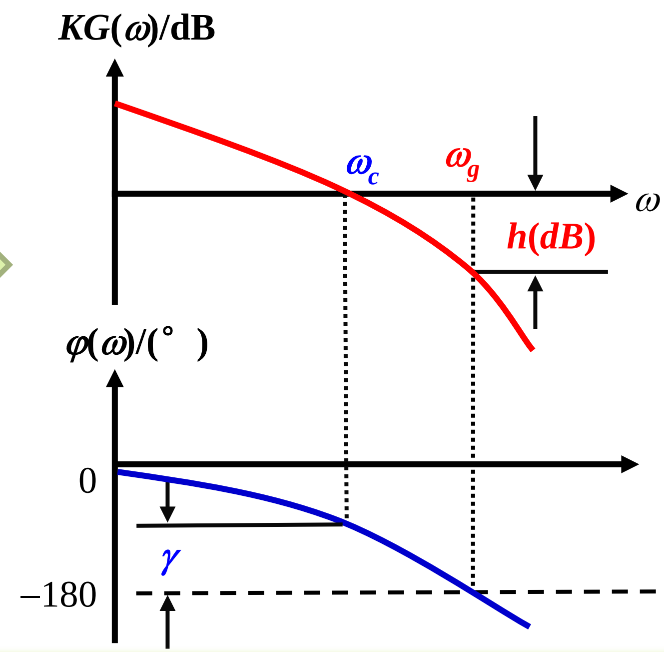


频域与时域指标的转换关系









由时域指标和闭环指标确定开环指标 K，ω_c ，γ，h，灵活运用各种手术刀实现开环指标。先用闭环校正（串联，反馈），再用开环校正（顺馈，前置滤波）。

带宽设计的几点说明

- 设计带宽之前，要明确系统的**性能指标**和**被控对象**特点（**指标、对象、方法**）；
- 根据情形找最合适的环节来使用，明确是**压低还是拓展，是补相角还是降增益**；
- 多数情况下，校正环节在改变系统特性的同时会带来**副作用**；
- 校正环节起作用的**频带越窄，副作用越小**，精确诊断，精准手术（微创最好）；
- 这些环节的合理**选取和使用（优化），可以减小副作用**，多还是少，集中还是分散要有讲究；
- 考虑到控制系统自身的约束和校正环节的副作用，带宽的拓展是有上限的，**带宽是不能任意设计**的；
- 指标很多，因素很多，控制设计时要懂得**折中和取舍**，各种方法**灵活应用**；
- **超前滞后**好用，是因为副作用可控，可精确计算，可以优化。
- 原理（**道**）比方法（**术**）更重要，掌握**道**才能找到更多的**术**，更好地使用**术**，关键时就可以应对自如；

多选题 1分

设置

一个系统的带宽设计的过宽会导致

A 系统会对噪声更敏感

B 系统更容易出现谐振现象

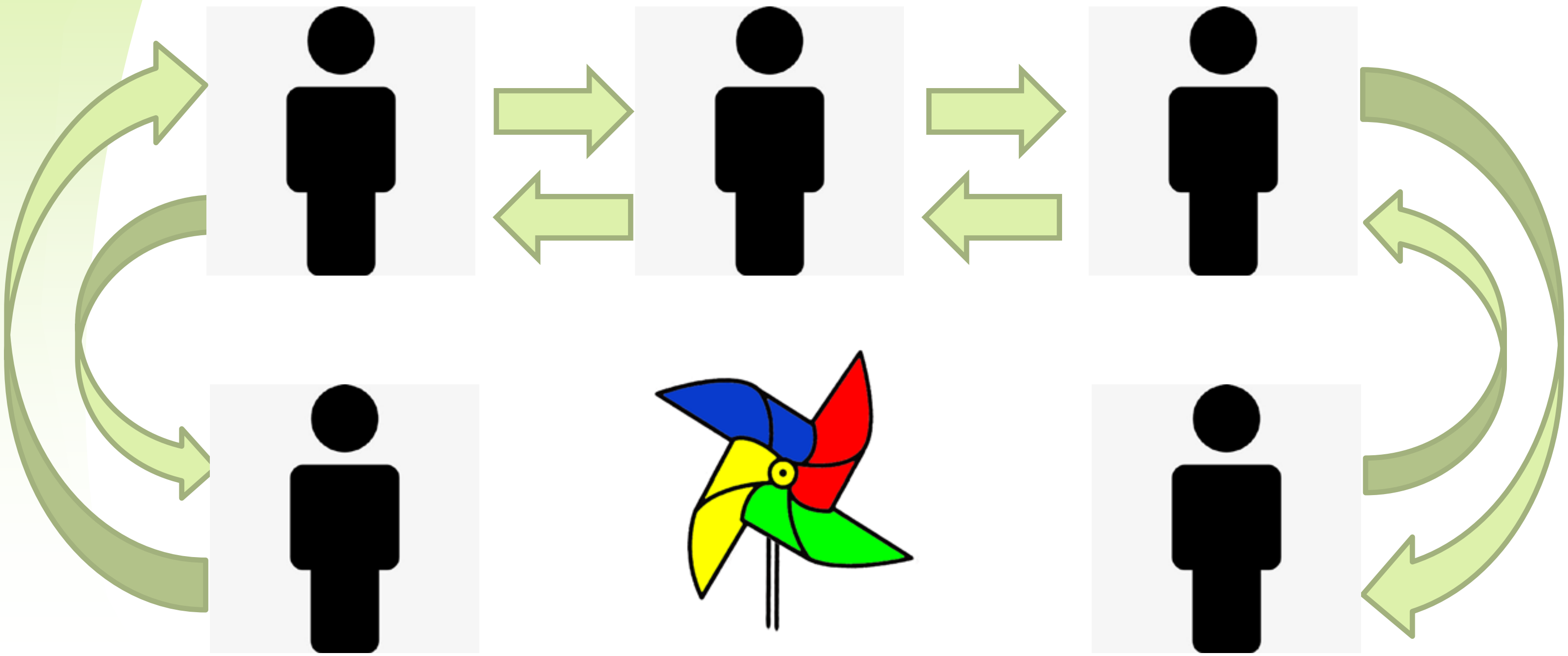
C 系统的相角裕度更可能不足

D 系统的阶跃响应的超调可能会变大

提交

反馈的力量（续）

- 要关注自己的小闭环系统，更要关注自己在社会大闭环系统中的作用



- 不做有输入没输出的子系统，要努力争取做大系统中正能量的传递者

拓展篇

无处不在的反馈（续）

- **游戏可以提供即时的反馈，让人欲罢不能，是非常高级的控制**

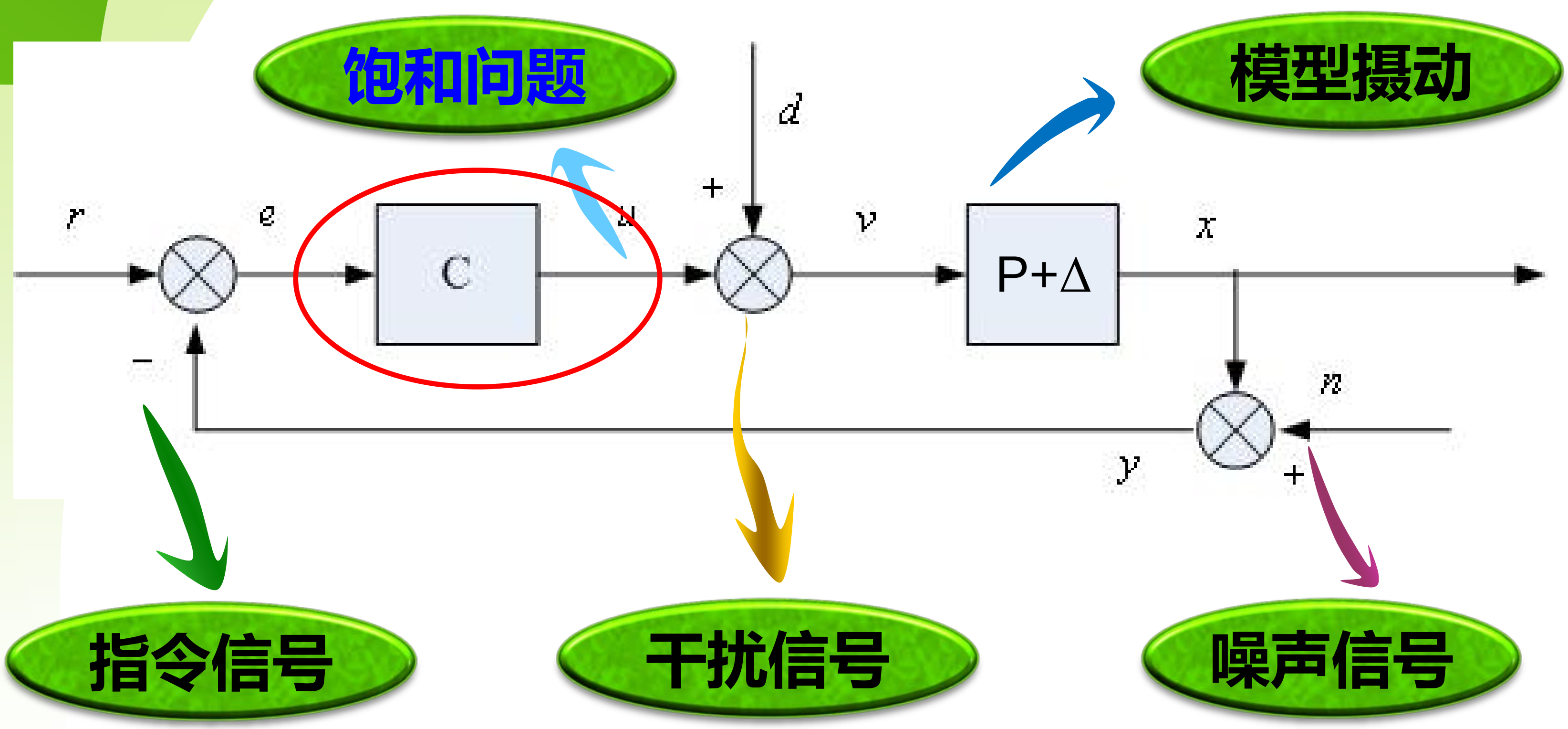
机票价格
推荐商品
游戏难度
新闻内容
视频类型

- **利用你的反馈来控制你，最大化你花在上面的时间和金钱**

无处不在的反馈（续）

防止被控制的神奇装备——手机监狱（手机自律盒）

开新篇



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

学习目标

本节课需要掌握的内容

- 掌握**饱和产生的原因**，可能带来的问题；
- 学会**执行器饱和及转换速率限制**的数学描述；
- 掌握针对**积分饱和**的处理方法；
- 熟悉其他**三种控制器抗饱和（Anti-Windup）**方法

本章主要内容

A1 执行器约束问题

A2 Anti-Windup设计

A3 Anti-Windup控制器的一般形式

5.1 执行器的约束问题

5.1.1 执行器约束问题的提出

5.1.2 执行器约束的描述方法

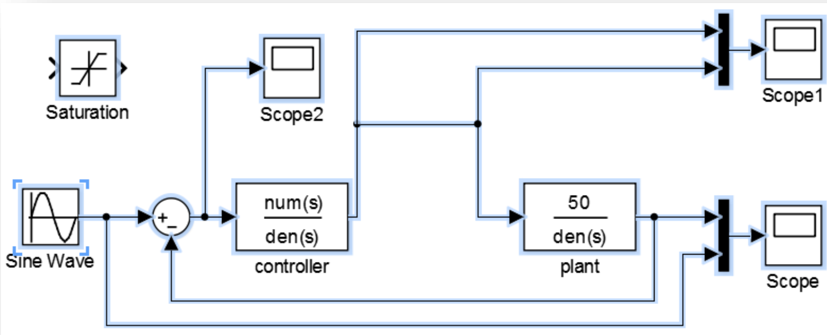
5.1.3 积分器的Windup问题

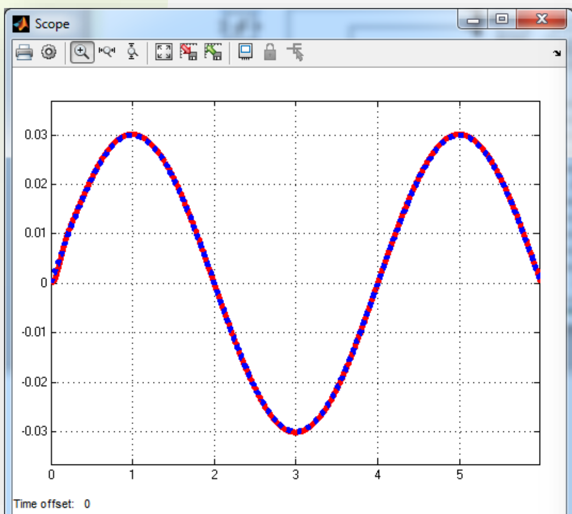
5.1.1 执行器约束问题的提出

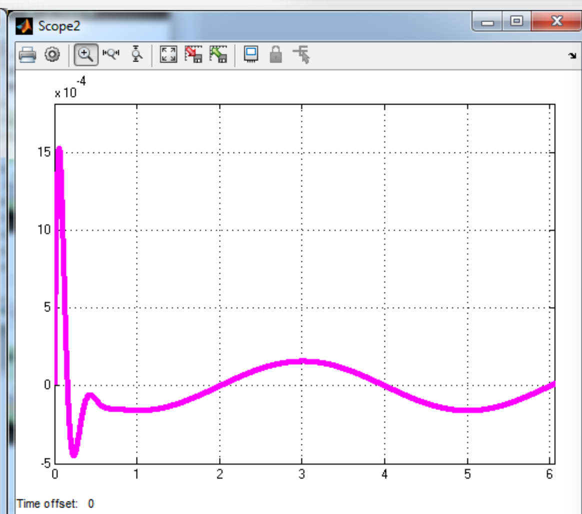
控制量增大原因分析|执行器所带来的设计约束

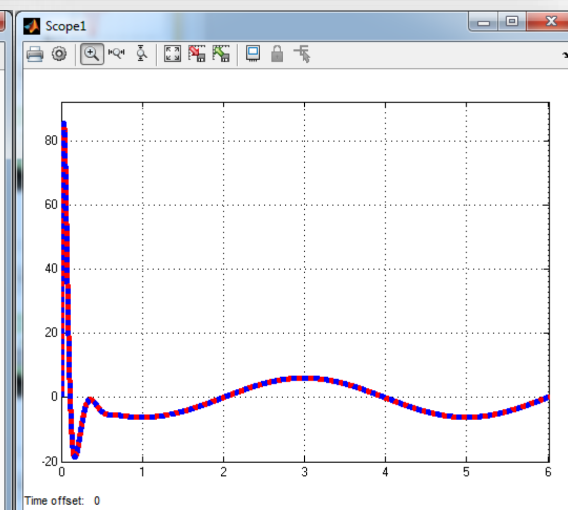
无饱和环节

输入0.25Hz 幅值0.03，最大控制量80，最大偏差0.0015





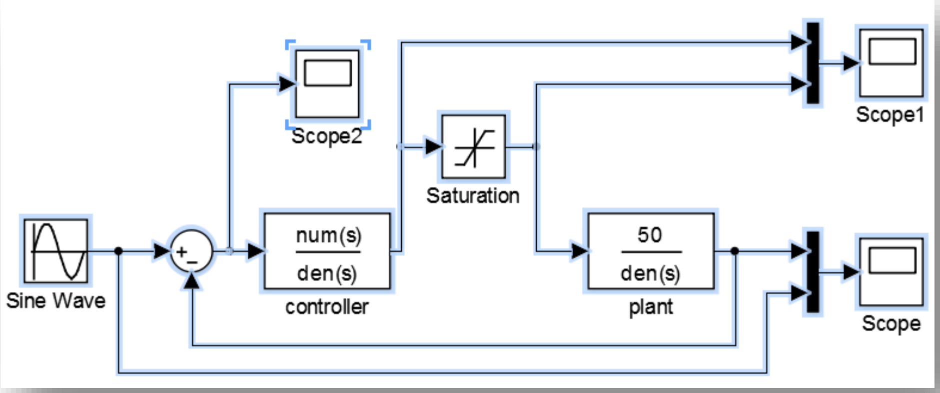


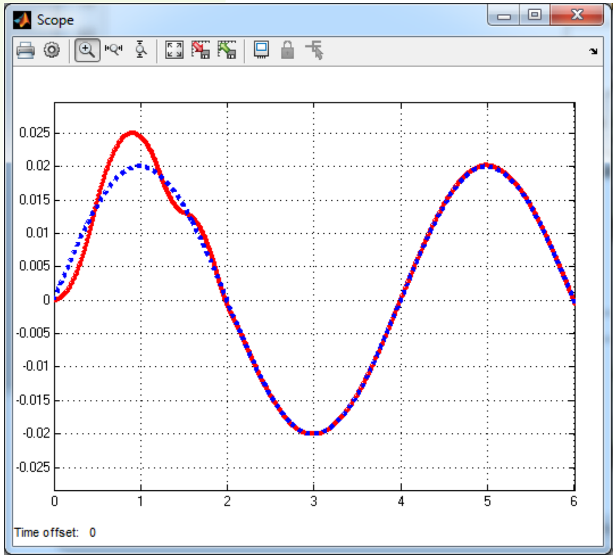


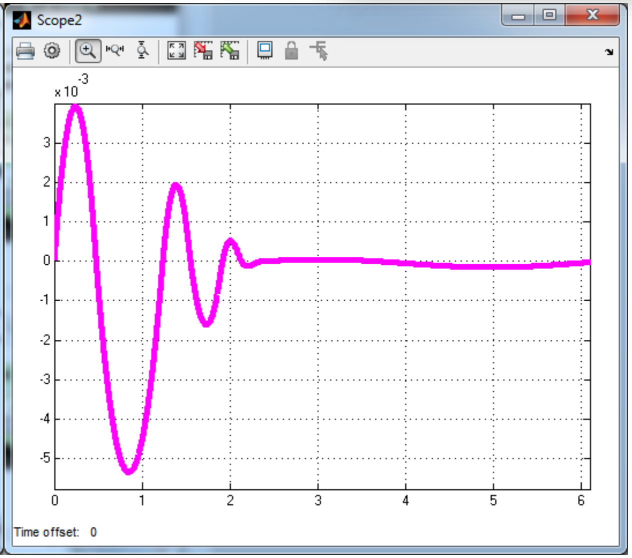
控制量增大原因分析|执行器所带来的设计约束

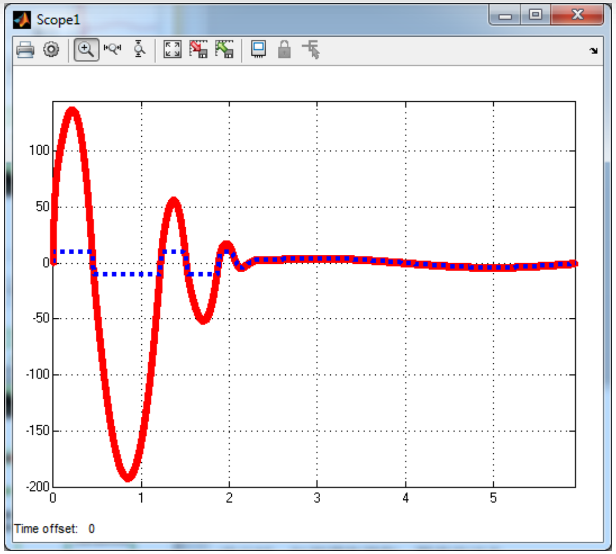
有饱和环节

指令频率0.25Hz 幅值0.02，最大控制量150，最大偏差0.04







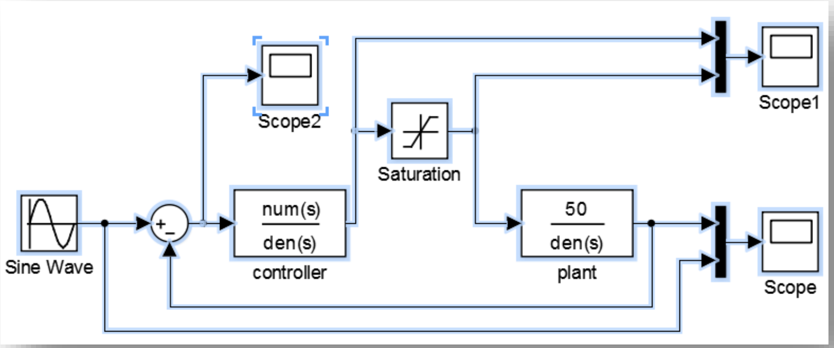


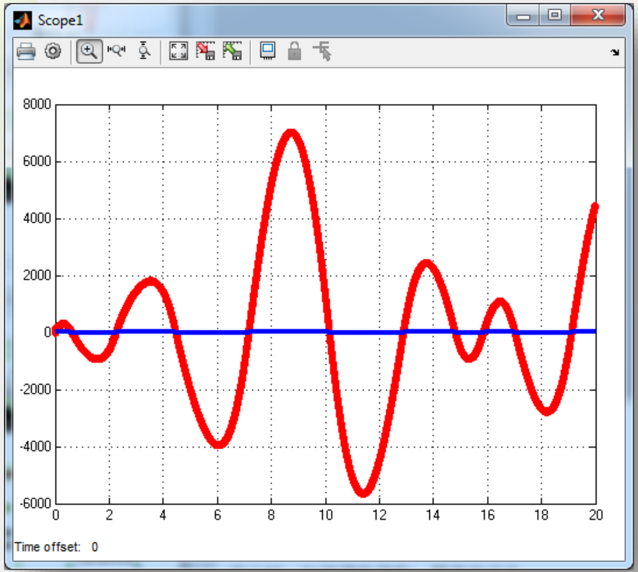
5.1.1 执行器约束问题的提出

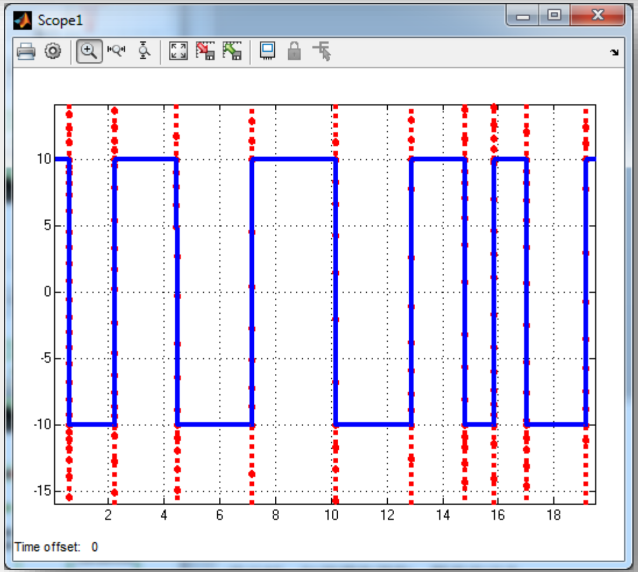
控制量增大原因分析|执行器所带来的设计约束

有饱和环节

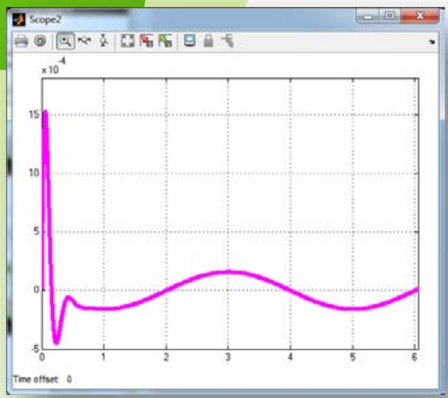
指令频率0.25Hz 幅值0.03，
最大控制量7000， 不稳定

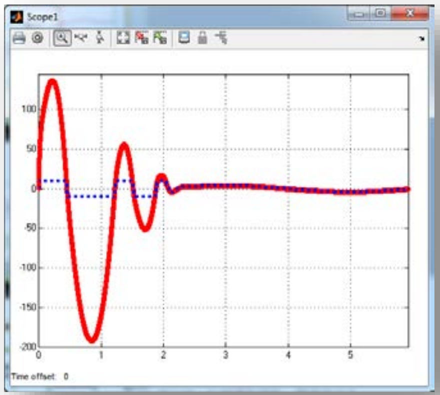


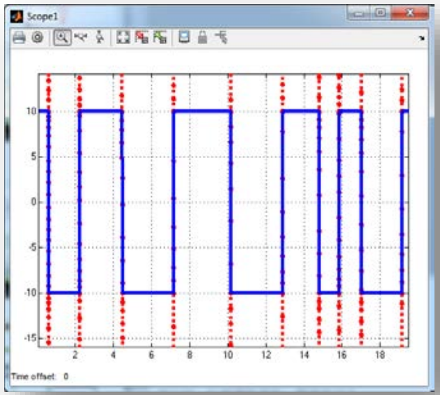




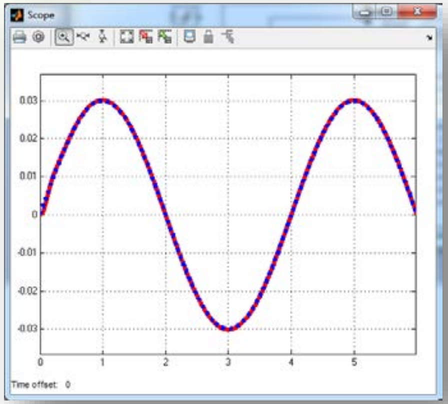
5.1.1 执行器约束问题的提出

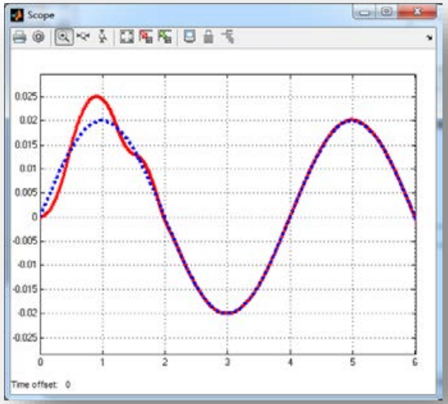


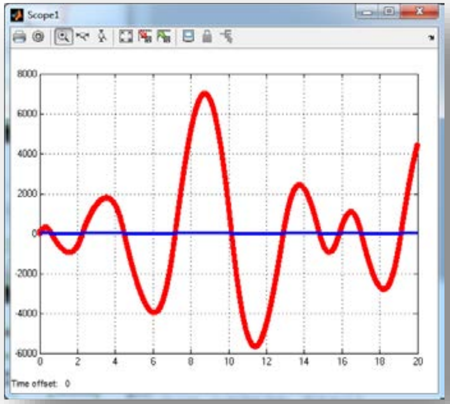




如何解决这一问题？



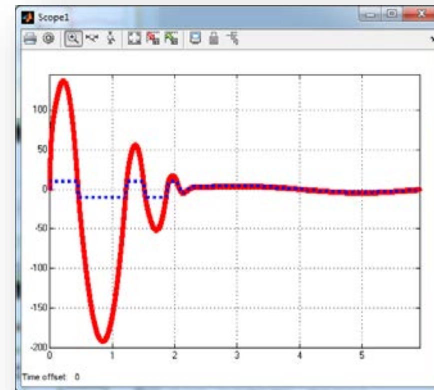




多选题 1分

设置

引起饱和的原因有哪些?



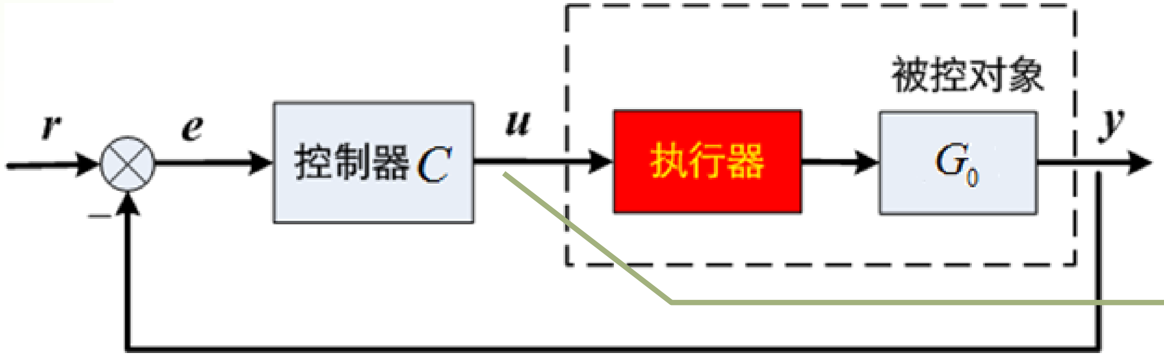
- A 指令幅值过大
- B 指令变化过快
- C 干扰或噪声过大
- D 系统中存在积分环节
- E 执行器能力不足

提交

控制量增大原因分析|执行器所带来的的设计约束

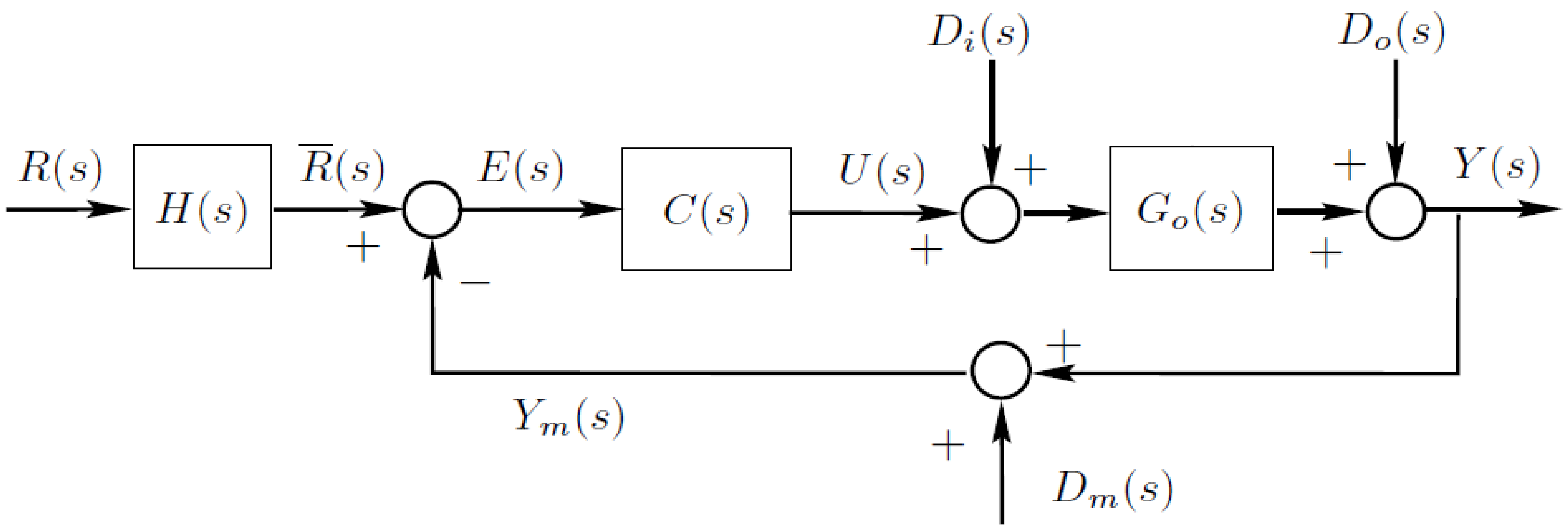
控制系统的存在很多非线性因素，有些可以忽略，有些在设计时必须要考虑。执行器存在一些典型的物理限制：如电机的最大转速限制、峰值力矩限制；阀门的开合不能超过全开或全闭等。

对于在比较宽范围内运行的控制系统，控制量有可能达到执行器的极限（幅值极限或变化速率极限）。当这种情况发生时，反馈回路失效，系统将运行于开环状态，即只要执行器处于饱和，即执行器停留在其极限状态，系统的输出相当于开环响应。



导致控制变量增大的原因是什么？

控制量增大原因分析|执行器所带来的设计约束



双自由度闭环回路

$$T_o \triangleq \frac{G_0 C}{1+G_0 C}$$

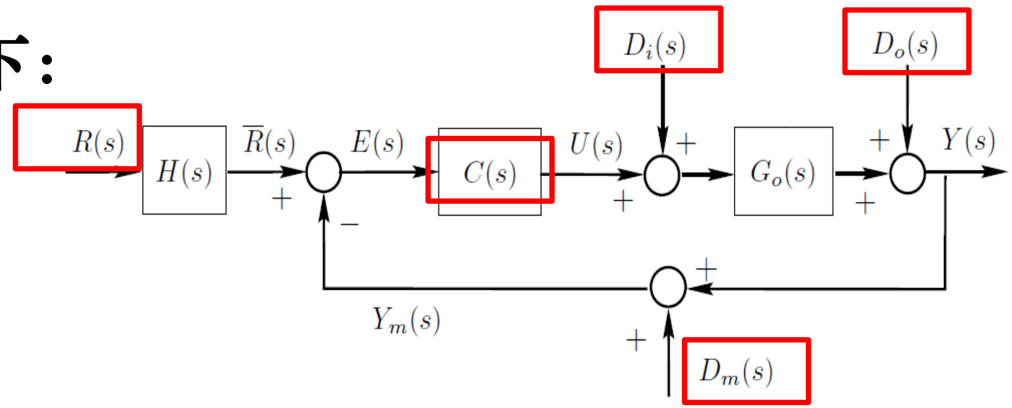
$$S_o \triangleq \frac{1}{1+G_0 C}$$

$$S_{uo} \triangleq \frac{C}{1+G_0 C}$$

$$S_{io} \triangleq \frac{G_0}{1+G_0 C}$$

控制量增大原因分析|执行器所带来的设计约束

输入与输出表达式关系如下：



控制器特性和各种输入信号都可能增大U，导致执行器饱和

$$Y(s) = T_o(s)\big(H(s)R(s) - D_m(s)\big) + S_o(s)D_o(s) + S_{io}(s)D_i(s)$$

$$U(s) = S_{uo}(s)\left(H(s)R(s) - D_m(s) - D_o(s) - G_o(s)D_i(s)\right)$$

$$T_o \triangleq \frac{G_0 C}{1+G_0 C}$$

$$S_o \triangleq \frac{1}{1+G_0 C}$$

$$S_{uo} \triangleq \frac{\boxed{C}}{1+G_0 C}$$

$$S_{io} \triangleq \frac{G_0}{1+G_0 C}$$

5.1.1 执行器约束问题的提出

控制量增大原因分析|执行器所带来的设计约束问题

对于实际的执行器，其能力都是有限的，存在幅值和变化速率的约束（分别称为饱和与转换速率限制），忽视这些约束，可能带来严重的性能下降，甚至使系统失稳。

↓

为了避免执行器饱和或转换速率限制引起的问题，通常采取一定的措施！

控制量增大原因分析|执行器所带来的设计约束问题

避免执行器饱和是在设计过程中必须考虑的问题

- 在控制系统的**方案设计阶段**，需要根据指标要求、信号分析等确定**执行器**应具备的能力并完成选型。
- 对于有些**控制问题**（比如时间最优控制问题），在问题描述时就需要明确执行器的约束，并在设计时加以考虑；否则，**可能会导致问题本身失去意义**。

$$\dot{x} = f(t, x, u), \qquad x(t_0) = x_0 \qquad u \in U \subset \mathbb{R}^m$$

$$J(u) = \frac{1}{2}\int_{t_0}^{t_f} (x^T Q x + u^T R u) dt$$

- 有些则是在**控制器设计之后**，针对饱和特性对控制器进行抗饱和设计，**提升性能，避免失稳；**

5.1 执行器的约束问题

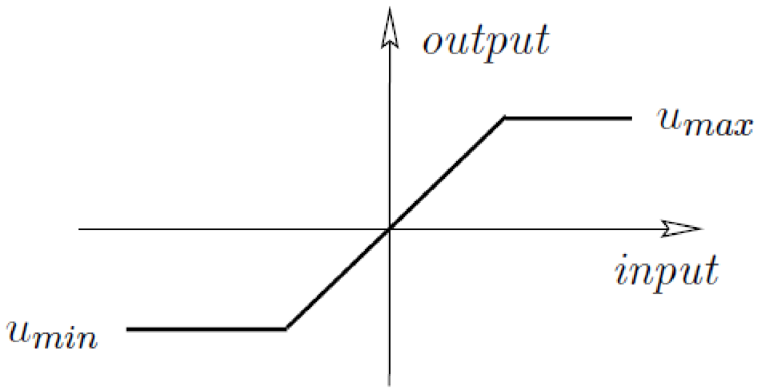
5.1.1 执行器约束问题的提出

5.1.2 **执行器约束的描述方法**

5.1.3 积分器的Windup问题

5.1.2 执行器约束的描述方法

执行器饱和模型|执行器转换速率限制模型|组合模型



$$u(t) = Sat\langle \hat{u}(t) \rangle \triangleq \begin{cases} u_{max} & \text{if } \hat{u}(t) > u_{max}, \\ \hat{u}(t) & \text{if } u_{min} \le \hat{u}(t) \le u_{max}, \\ u_{min} & \text{if } \hat{u}(t) < u_{min}. \end{cases}$$

u_{max}——执行器输出的最大幅值；

u_{min}——执行器输出的最小幅值；

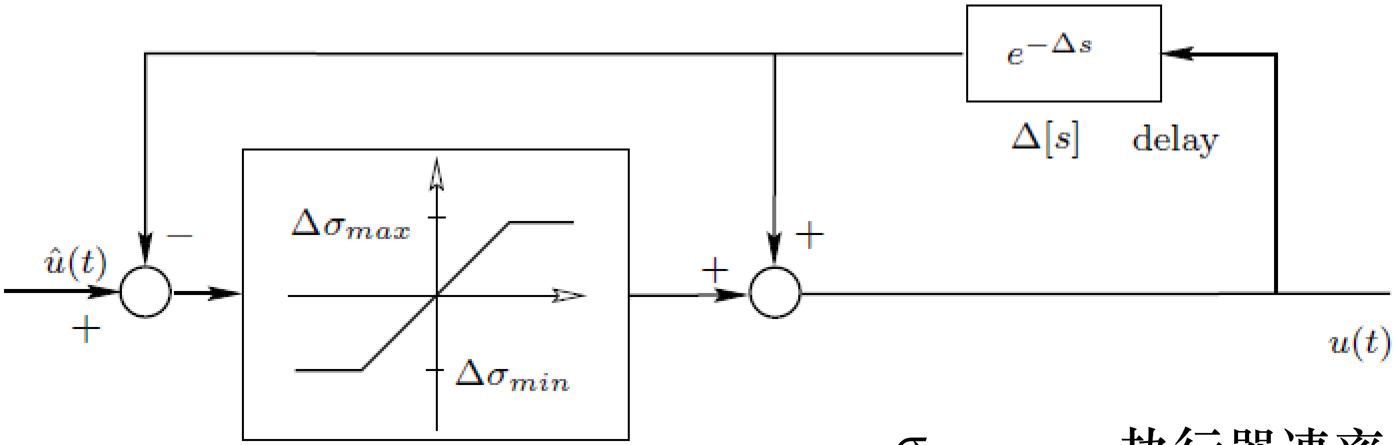
$u(t)$ ——执行器实际输出；

$\hat{u}(t)$ ——执行器期望输出；

$Sat\langle \cdot \rangle$ ——饱和函数。

5.1.2 执行器约束的描述方法

执行器饱和模型|执行器转换速率限制模型|组合模型



$$\dot{u}(t) = Sat\langle \dot{\hat{u}}(t) \rangle \triangleq \begin{cases} \sigma_{max} & \text{if } \dot{\hat{u}}(t) > \sigma_{max}, \\ \dot{\hat{u}}(t) & \text{if } \sigma_{min} \le \dot{\hat{u}}(t) \le \sigma_{max}, \\ \sigma_{min} & \text{if } \dot{\hat{u}}(t) < \sigma_{min}. \end{cases}$$

$\sigma_{\max}$ ——执行器速率最大值；

$\sigma_{\min}$ ——执行器速率最小值；

Δ ——时延因子；

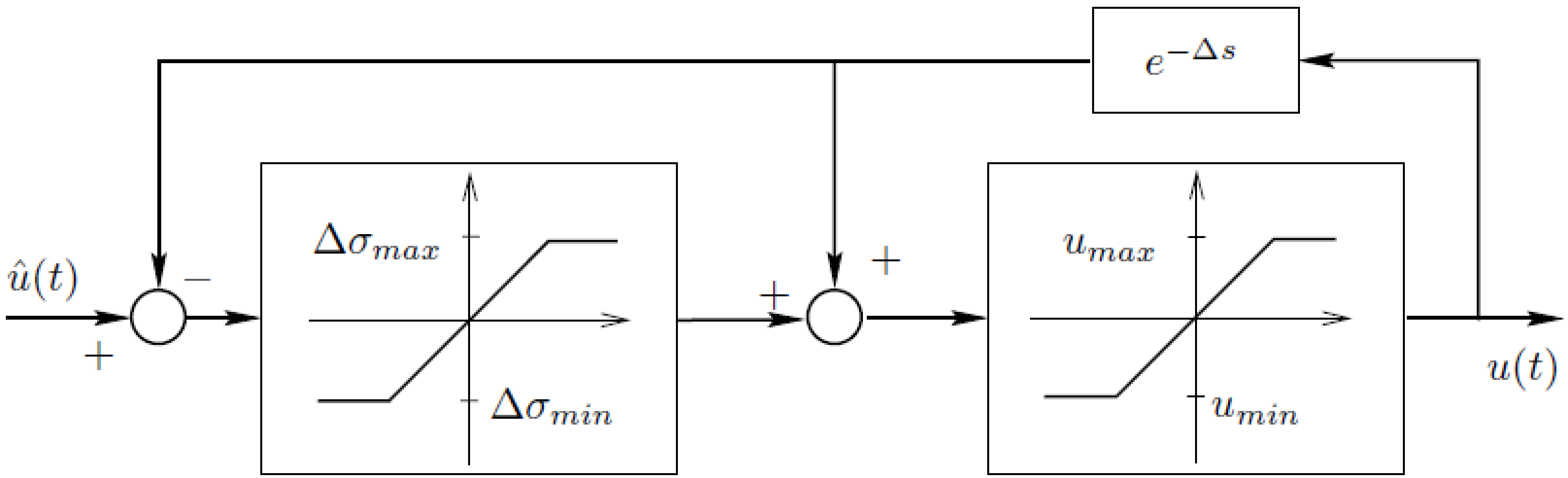
$\dot{u}(t)$ ——执行器实际输出速率；

$\dot{\hat{u}}(t)$ ——执行器期望输出速率；

$Sat\langle\bullet\rangle$ ——饱和函数。

5.1.2 执行器约束的描述方法

执行器饱和模型|执行器转换速率限制模型|组合模型



u_{max}——执行器输出的最大幅值；

u_{min}——执行器输出的最小幅值；

$u(t)$ ——执行器实际输出；

$\hat{u}(t)$ ——执行器期望输出；

$Sat\langle\cdot\rangle$ ——饱和函数。

$\sigma_{\max}$ ——执行器速率最大值；

$\sigma_{\min}$ ——执行器速率最小值；

Δ ——时延因子；

$\dot{u}(t)$ ——执行器实际输出速率；

$\dot{\hat{u}}(t)$ ——执行器期望输出速率；

$Sat\langle\cdot\rangle$ ——饱和函数。

请举出一些具有转换速率限制的执行器的例子

作答

阶跃指令作用下，什么样的控制器更容易出现饱和现象

A **增益比较大**的控制器

B 有**滞后环节**的控制器

C 有**纯微分环节**的控制器

D 有纯**积分环节**的控制器

提交

5.1 执行器的约束问题

5.1.1 执行器约束问题的提出

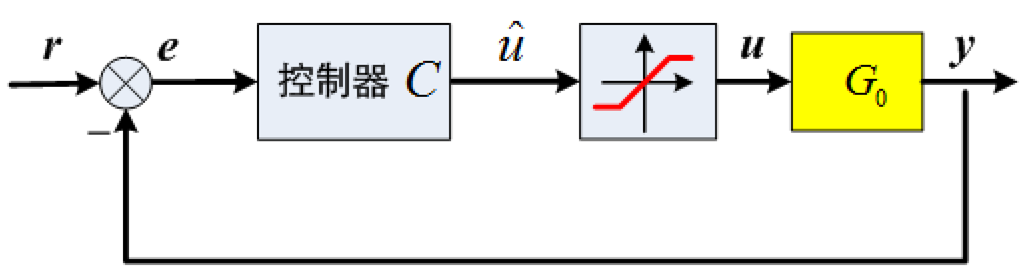
5.1.2 执行器约束的描述方法

5.1.3 积分器的Windup问题

5.1.3 积分器的Windup问题

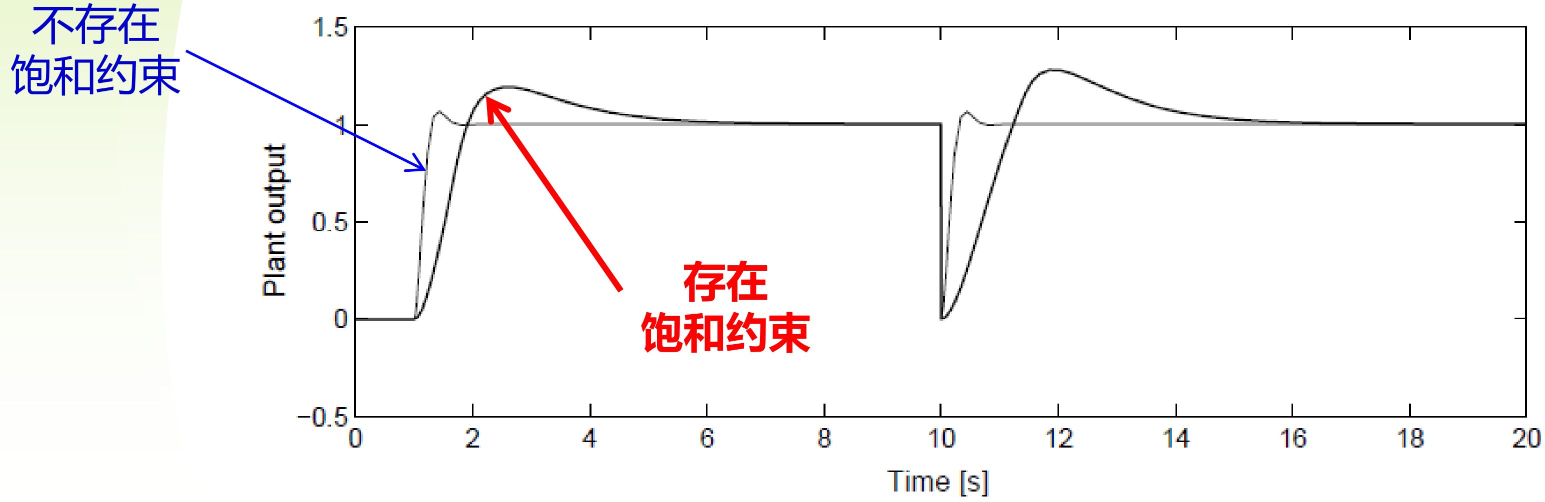
积分器带来的深度饱和问题|原因分析|解决办法

控制中经常使用**积分器**来消除系统的稳态误差，其前提是回路工作在线性范围内。当执行器达到其约束边界进入饱和后，在误差的作用下，积分器不断累积，控制器的输出 $\hat{u}$ 可能会累积到很大的值，但执行器由于处于饱和状态而无响应，即 u 仍受到饱和约束的限制。控制器的输出 $\hat{u}$ 回到饱和边界之内（线性范围）后，**这一积分值作为初始条件，会导致很大的暂态响应**。这一现象称为**Windup**，会严重影响系统的性能，甚至使系统失稳。

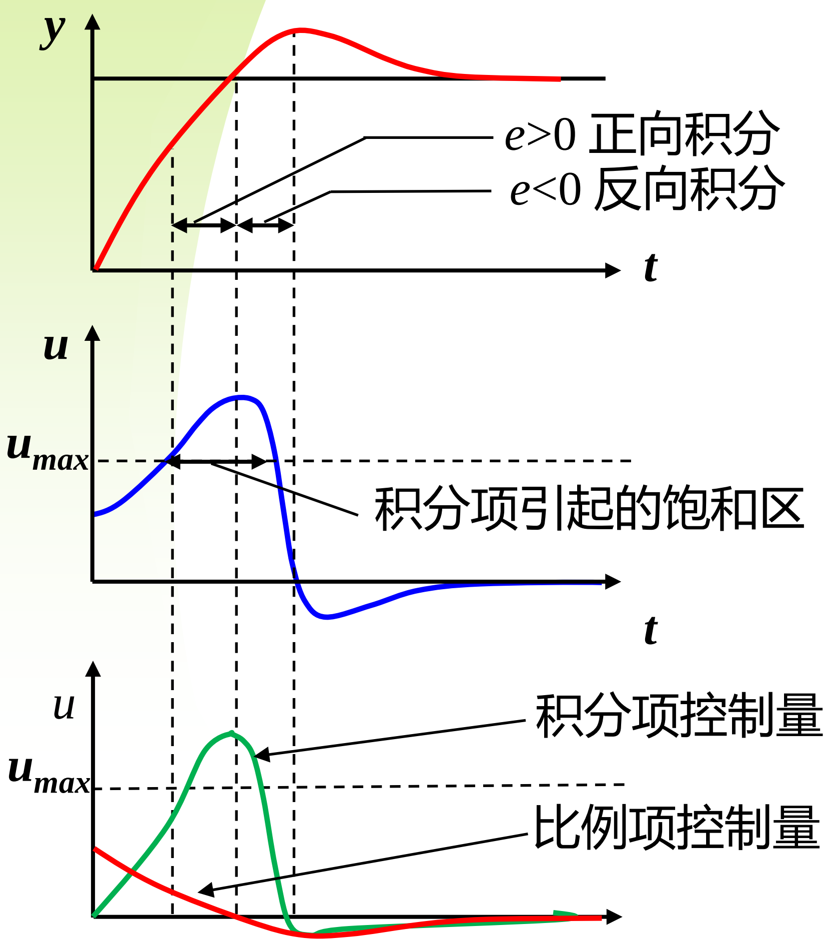


◆例2

被控对象	控制器	闭环传函
$G_o(s)=\frac{2}{(s+1)(s+2)}$	$C(s)=\frac{50(s+1)(s+2)}{s(s+13)}$	$T_o(s)=\frac{100}{s^2+13s+100}$

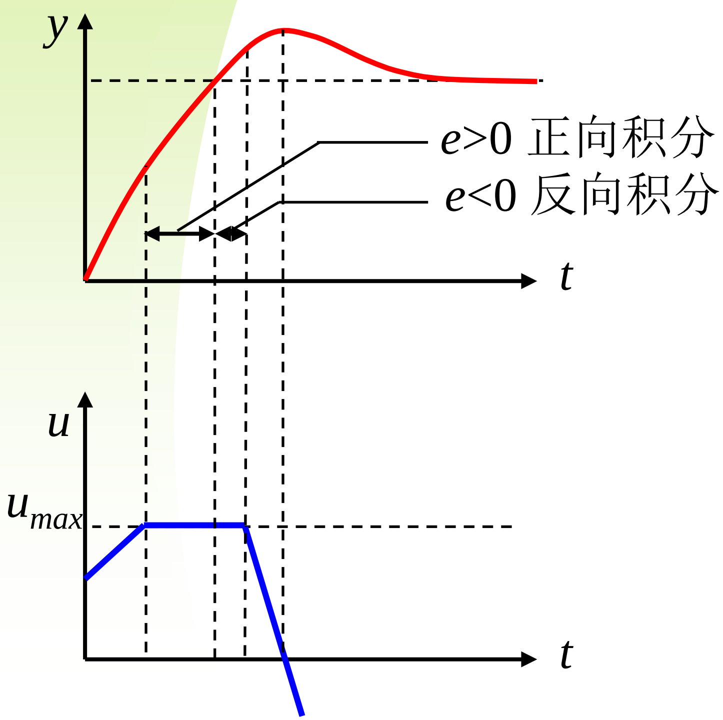


在1秒时施加单位阶跃输入信号，在10秒时存在一个负向单位阶跃输出扰动信号。**执行器的线性工作范围是[-3, 3]** 。



- 当$e(t)>0$时，即积分器输入符号不变时，积分器的输出会持续增大，时间越长输出越大；
- 当$e(t)<0$时，即积分器误差符号改变时，由于积分器的初值较大，需要较长时间才能改变符号；
- 由于积分器的上述特性，积分器的存在很容易使系统进入深度饱和，使系统进入开环状态，失去对误差的调节能力

如何从控制上解决积分器饱和（Windup）问题?



- **积分分离法**
  - **方法**：|e|>设定限值时，改用纯P调节
  - **作用**：既不会积分饱和又能在小偏差时利用积分作用消除偏差

- **遇限削弱积分法**
  - **方法**：u_I>设定限值时，只累加负偏差，反之亦然
  - **作用**：可避免控制量长时间停留在饱和区

控制方法：当执行器达到约束的边界时切断积分作用！

本章主要内容

A1 执行器约束问题

A2 **Anti-Windup设计**

A3 Anti-Windup控制器的一般形式

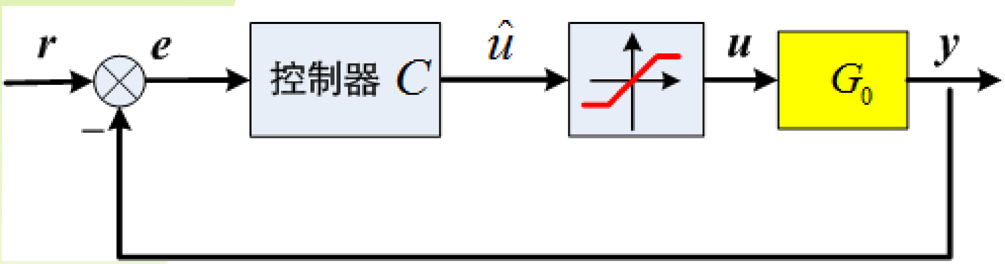
5.2 Anti-Windup设计

5.2.1 Anti-Windup设计策略

5.2.2 Anti-Windup设计原理分析

5.2.3 Anti-Windup的多种实现形式

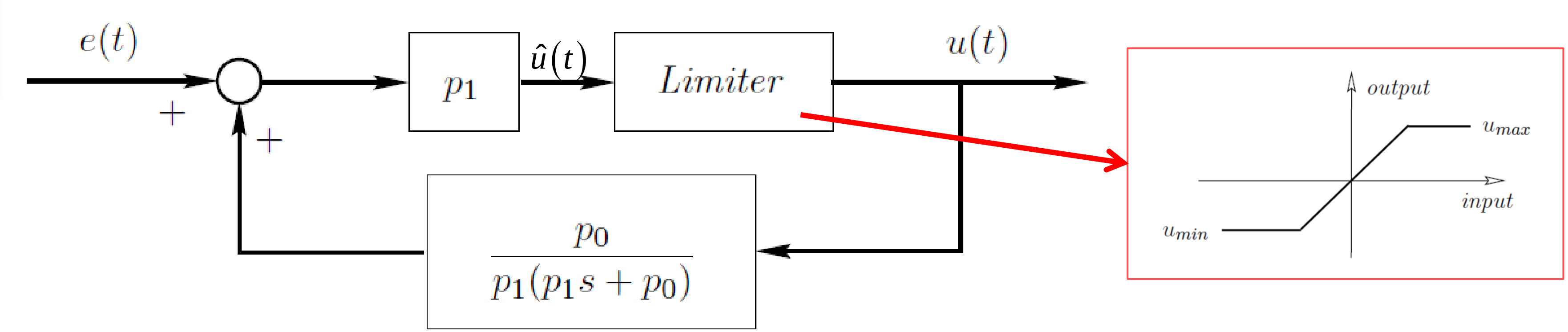
PI控制器的Anti-Windup设计|Anti-Windup的基本结构|示例

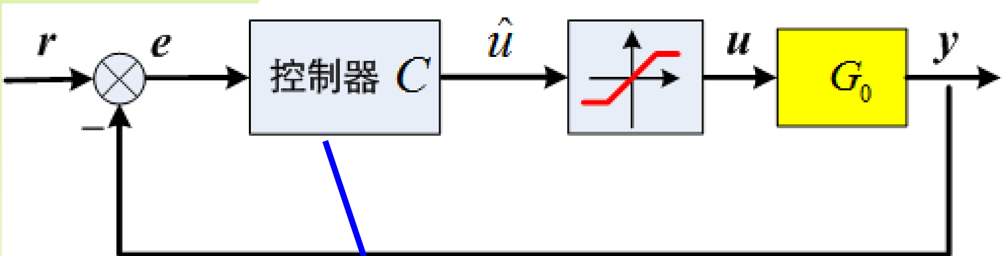


线性工作范围内的传递函数

$$C(s)=\frac{p_1 s+p_0}{s}$$

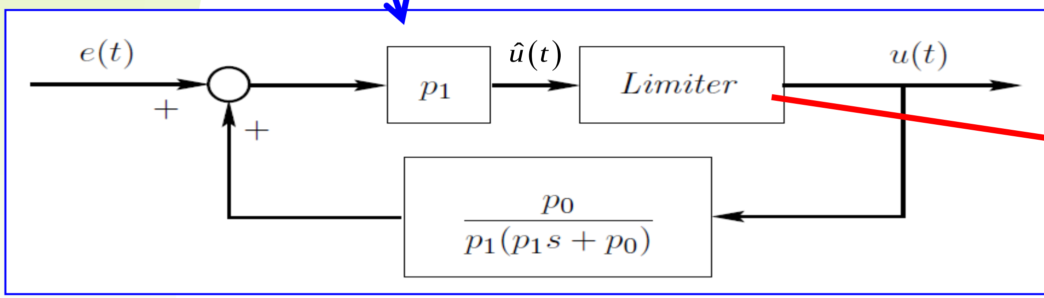
- 在线性工作范围内，实现比例+积分的作用，性能保持不变
- 而达到约束边界时，切除了积分作用，避免了Windup

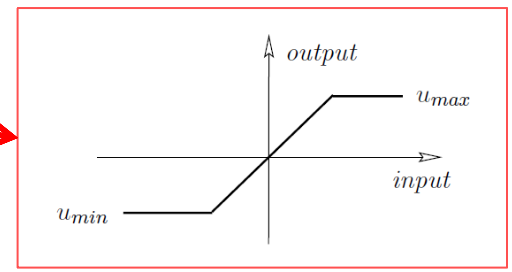




线性工作范围内的PI传递函数

$$C(s)=\frac{p_1 s+p_0}{s}$$



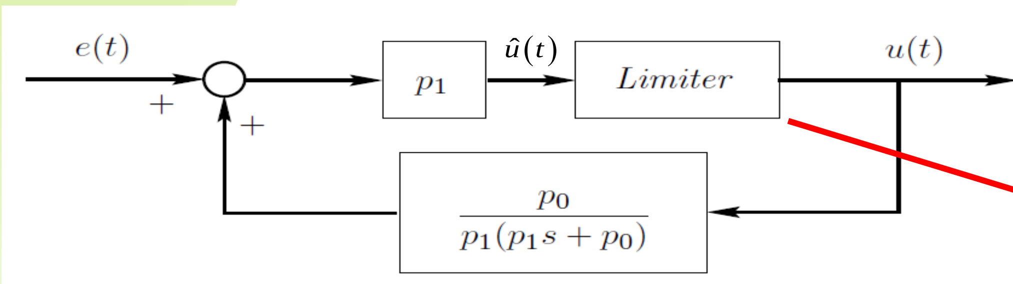


重新推导E到U的传递函数

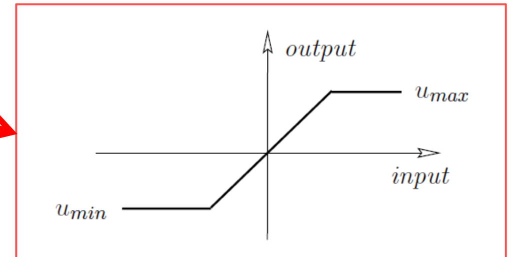
$$\left[e(t)+\frac{p_0}{p_1(p_1 s+p_0)}u(t)\right]p_1=\hat{u}(t)$$

$$p_1 e(t)=\hat{u}(t)-\frac{p_1 p_0}{p_1(p_1 s+p_0)}u(t)$$

5.2.1 Anti-Windup的设计策略



$$C(s) = \frac{p_1 s + p_0}{s}$$



$$p_1 e(t) = \hat{u}(t) - \frac{p_1 p_0}{p_1(p_1 s + p_0)} u(t)$$

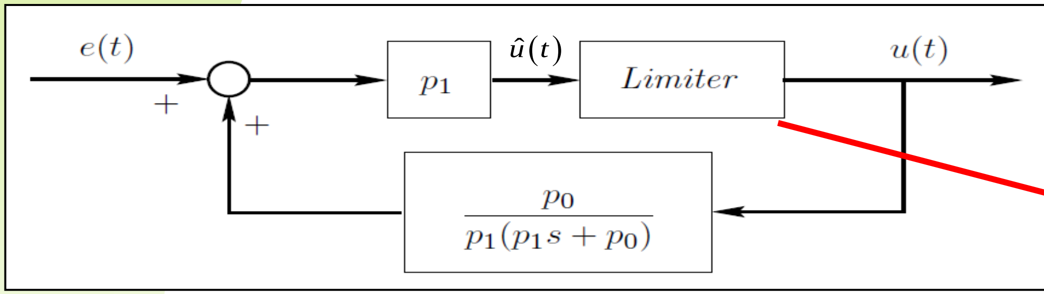
$$u(t) = Sat\langle \hat{u}(t) \rangle \triangleq \begin{cases} u_{max} & \text{if } \hat{u}(t) > u_{max}, \\ \boxed{\hat{u}(t) \quad \text{if } u_{min} \le \hat{u}(t) \le u_{max},} \\ u_{min} & \text{if } \hat{u}(t) < u_{min}. \end{cases}$$

线性区 $u(t) = \hat{u}(t) \quad \text{if } u_{\min} \le \hat{u}(t) \le u_{\max}$

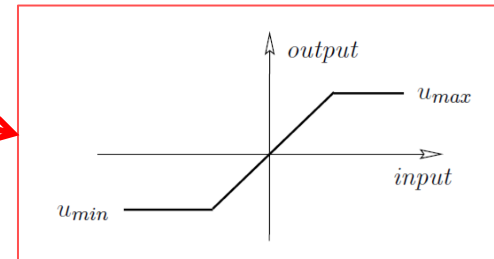
$$p_1 e(t) = \frac{p_1 p_1 s}{p_1(p_1 s + p_0)} u(t)$$

$$\boxed{\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{p_1 s + p_0}{s}}$$

仍然是PI控制器（不改变线性区控制器的特性）



$$C(s)=\frac{p_1 s+p_0}{s}$$



$$p_1 e(t)=\hat{u}(t)-\frac{p_1 p_0}{p_1(p_1 s+p_0)}u(t)$$

$$u(t)=Sat\langle\hat{u}(t)\rangle\triangleq\begin{cases}\boxed{u_{max}\quad \text{if } \hat{u}(t)>u_{max},}\\ \hat{u}(t)\quad \text{if } u_{min}\le\hat{u}(t)\le u_{max},\\ u_{min}\quad \text{if } \hat{u}(t)<u_{min}.\end{cases}$$

饱和区 $u(t)=u_{\max}\quad \text{if}\quad \hat{u}(t)\ge u_{\max}$

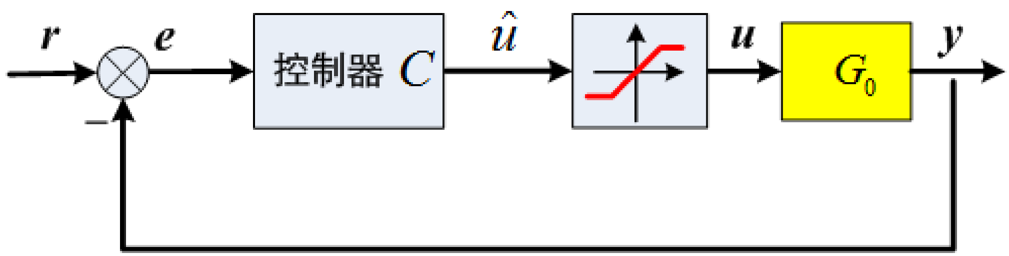
$$p_1 e(t)+\frac{p_1 p_0}{p_1(p_1 s+p_0)}u_{\max}=\hat{u}(t)$$

$$\boxed{\hat{u}(t)=p_1 e(t)+u_{\max}}$$

此时，控制量为误差的比例项加一个常值。积分器停止工作，不会出现Windup现象

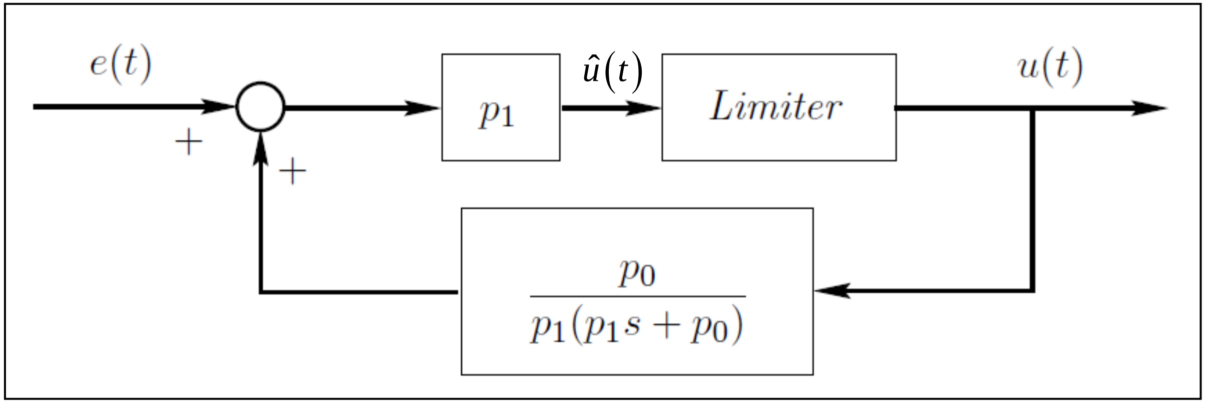
5.2.1 Anti-Windup的设计策略

PI控制器的Anti-Windup设计|Anti-Windup的基本结构|示例



对于一般的控制器（非PI控制器），如何进行Anti-Windup设计?

能从前面的PI控制器Anti-Windup设计中，总结出一般控制器的Anti-Windup方法吗？



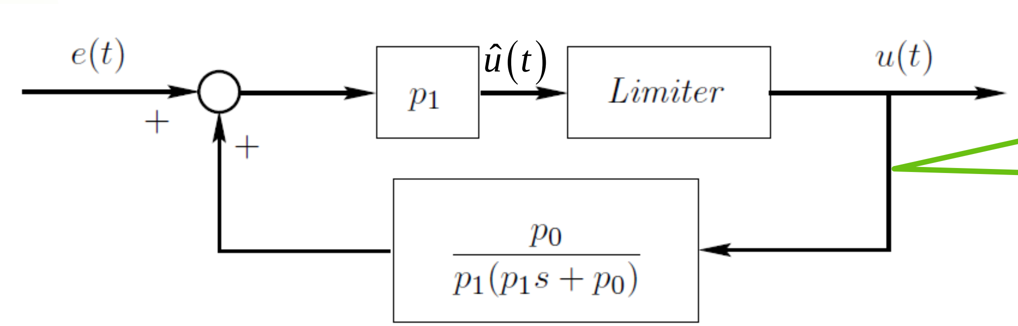
对于一个给定的控制器，如何应该进行拆分？

——总结Anti-Windup设计策略

$$C(s)=\frac{p_1 s+p_0}{s}$$

（1）控制器的动态由对象的**实际输入信号**（执行器的实际输出）来驱动；

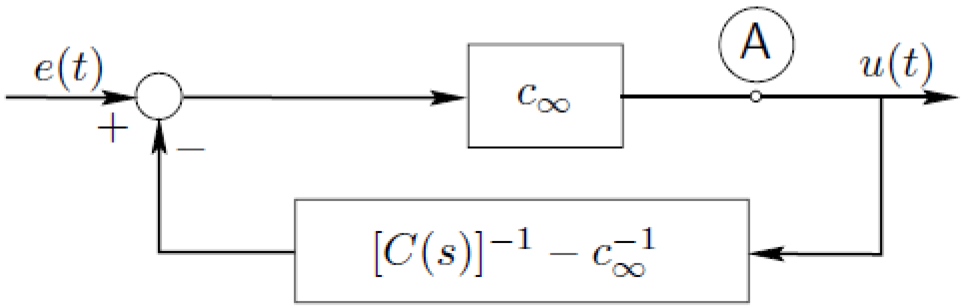
（2）由对象的实际输入信号驱动时，控制器的**动态是稳定的。**



执行器输出达到约束边界时，控制器的积分作用被切除！

假设控制器$C(s)$是**双正则最小相位的**，将其分解为比例项和严格正则项：

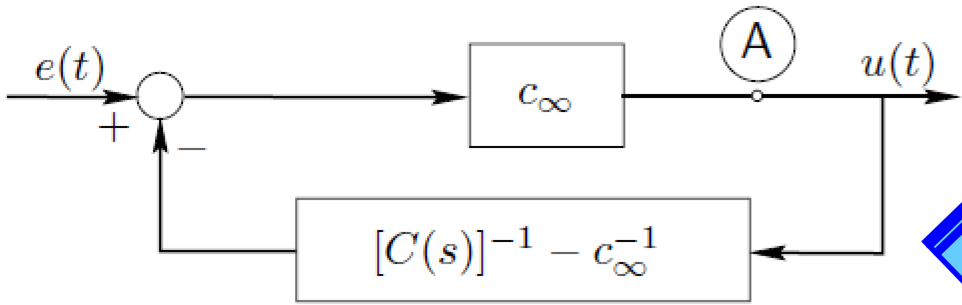
$$C(s) = c_\infty + \bar{C}(s)$$



$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{c_\infty}{1 + ([C(s)]^{-1} - c_\infty^{-1})c_\infty} = \frac{c_\infty}{[C(s)]^{-1}c_\infty} = C(s)$$

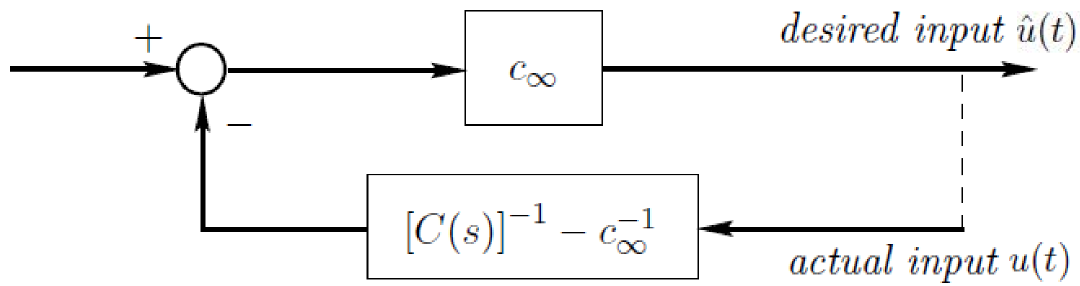
严格正则的最小相位控制器可通过适当添加远离虚轴的最小相位零点变为双正则的形式。

5.2.1 Anti-Windup的设计策略



双正则控制器:

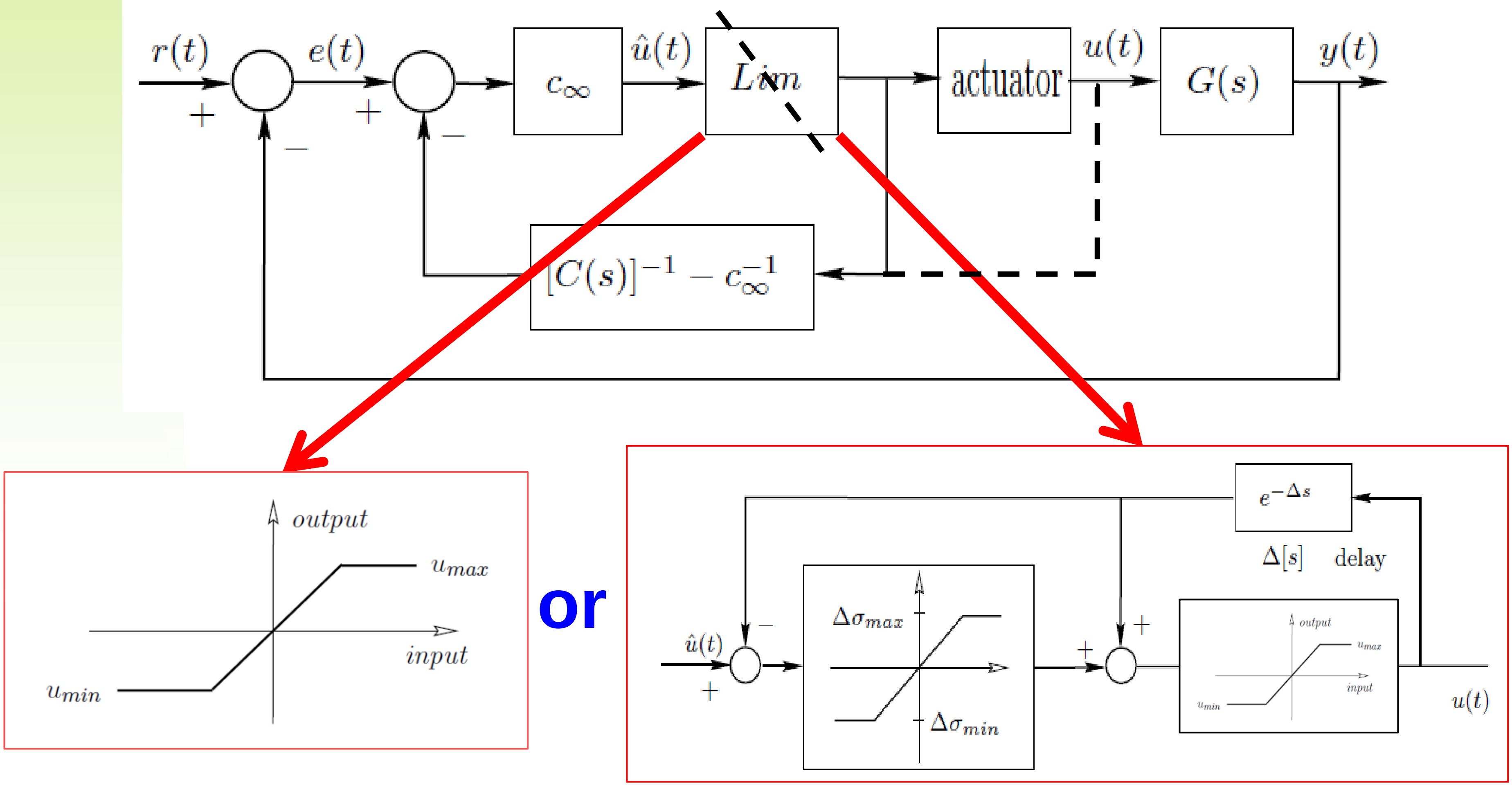
$$C(s) = c_\infty + \bar{C}(s)$$



设计策略:

（1）控制器的动态由对象的实际输入信号来驱动;

（2）由对象的实际输入信号驱动时，控制器的动态是稳定的。



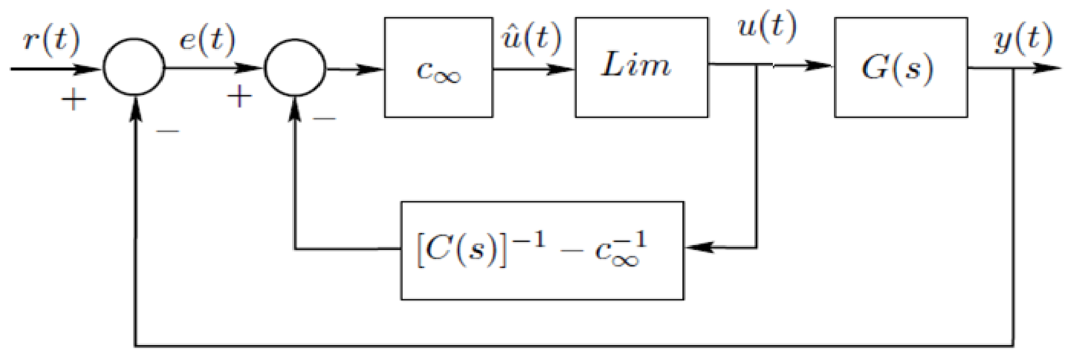
$r(t)$
$e(t)$
$+$
$-$
c_∞
$\hat{u}(t)$
Lim
actuator
$u(t)$
$G(s)$
$y(t)$
$[C(s)]^{-1} - c_\infty^{-1}$
output
u_{max}
input
u_{min}
or
$e^{-\Delta s}$
$\Delta[s]$ delay
$\Delta\sigma_{max}$
$\Delta\sigma_{min}$

◆ 例2 Anti-Windup设计（含有执行器幅值约束）

$$G_o(s)=\frac{2}{(s+1)(s+2)}$$

$$C(s)=\frac{50(s+1)(s+2)}{s(s+13)}$$

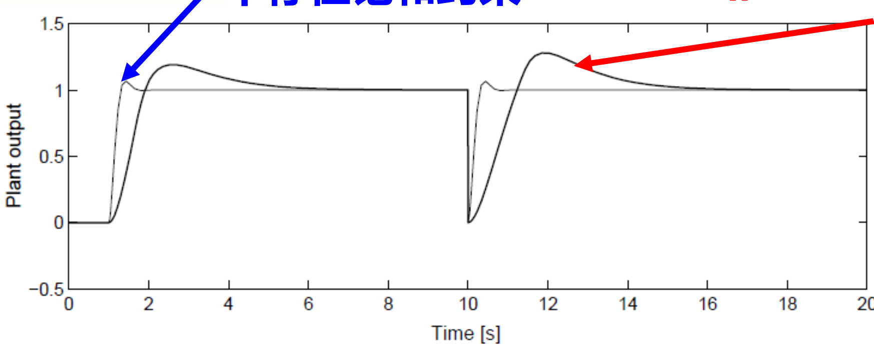
$$T_o(s)=\frac{100}{s^2+13s+100}$$

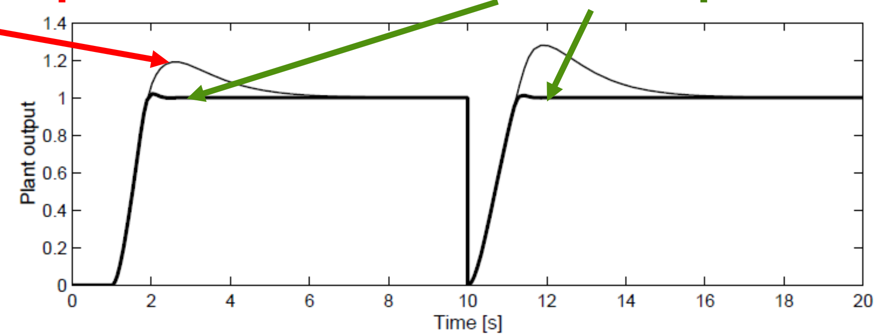


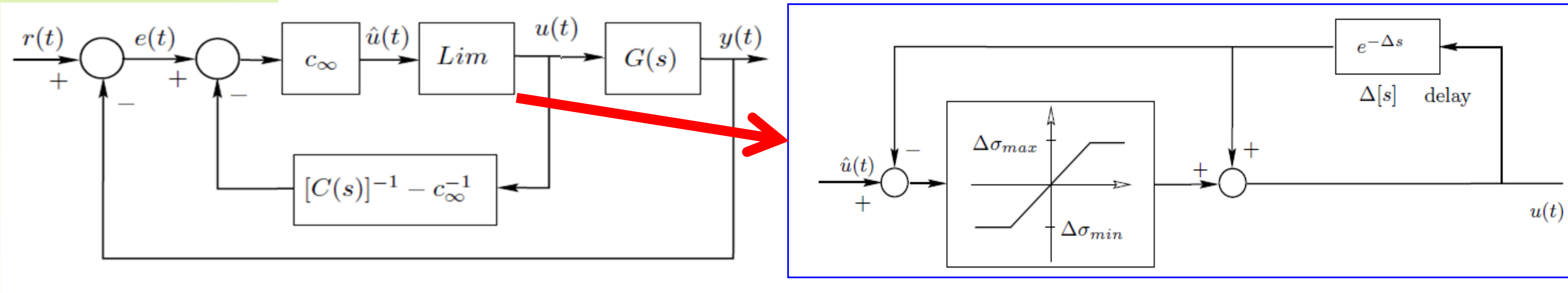
存在饱和约束
非Anti-Windup设计

存在饱和约束
Anti-Windup设计

不存在饱和约束







对象模型：

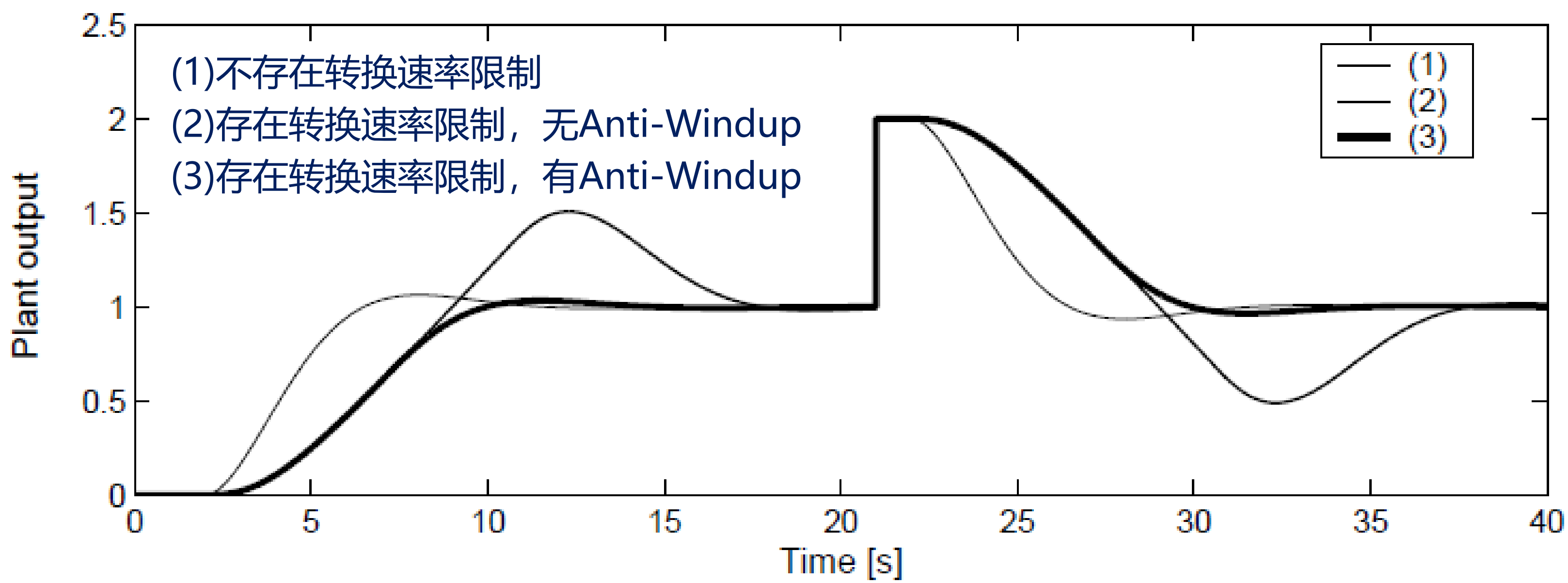
假设执行器的转换速率小于等于0.2s^{-1}。

$$Y(s)=e^{-s}\left(\frac{1}{(s+1)^2}U(s)+D_g(s)\right)$$

$$\left\{\begin{aligned}&C(s)=K_p\left(1+\frac{1}{T_r s}\right)\\&K_p=0.5\\&T_r=1.5[s]\end{aligned}\right\}\Rightarrow\left\{\begin{aligned}&c_\infty=K_p=0.5\\&[C(s)]^{-1}-c_\infty^{-1}=-\frac{1}{K_p(T_r s+1)}=-\frac{2}{(1.5s+1)}\end{aligned}\right\}$$

$$Y(s) = e^{-s}\left(\frac{1}{(s+1)^2}U(s) + D_g(s)\right) \quad c_\infty = K_p = 0.5 \quad [C(s)]^{-1} - c_\infty^{-1} = -\frac{2}{(1.5s+1)}$$

在1s时输入单位阶跃参考信号，在20s时加入输出端单位阶跃扰动输入。



如果控制器不满足双正则，非最小相位，还有其他的方法进行Anti-Windup设计吗？

作答

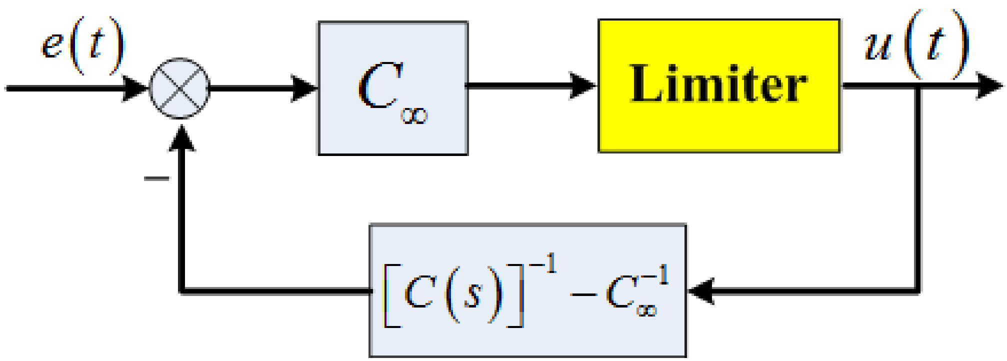
5.2 Anti-Windup设计

5.2.1 Anti-Windup设计策略

5.2.2 Anti-Windup的设计原理分析

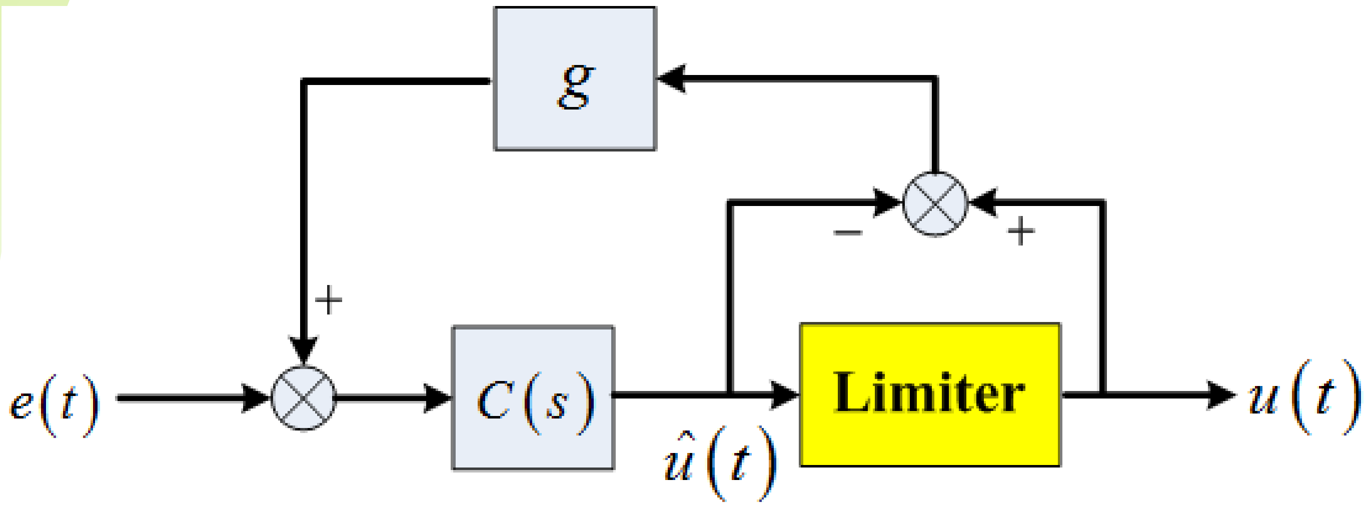
5.2.3 Anti-Windup的多种实现形式

Anti-Windup设计得到了广泛研究，已有多种关于抗饱和的设计方法，这里只列举两种简单的其他形式的Anti-Windup设计方法。



Anti-Windup 控制器基本结构

适用条件：控制器双正则，最小相位



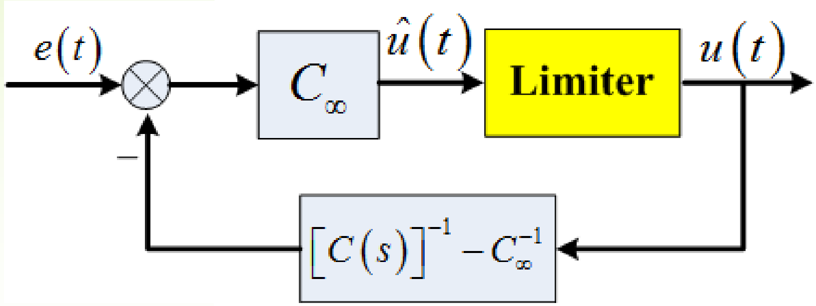
Anti-Windup 控制器控制器的一般形式——第一种

g：静态增益

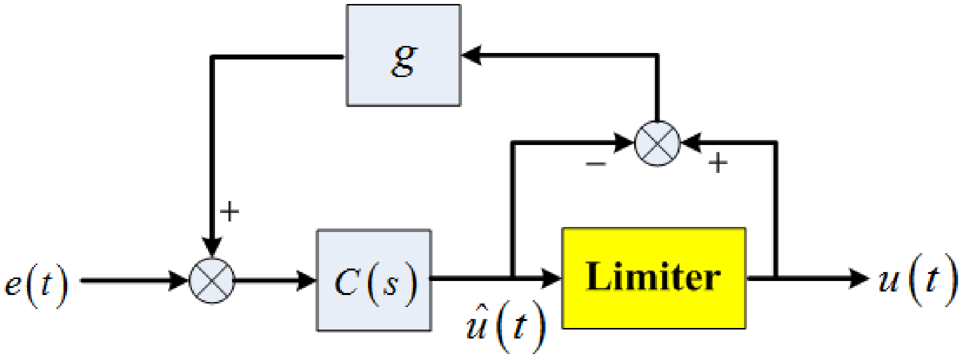
控制器无双正则、最小相位要求

◆ 例4——两种Anti-Windup控制器对比分析

考虑积分型控制器 $C(s)=\dfrac{k}{s}$



（a）Anti-Windup基本结构



（b）Anti-Windup一般形式-第一种

◆ 例4——两种Anti-Windup控制器对比分析

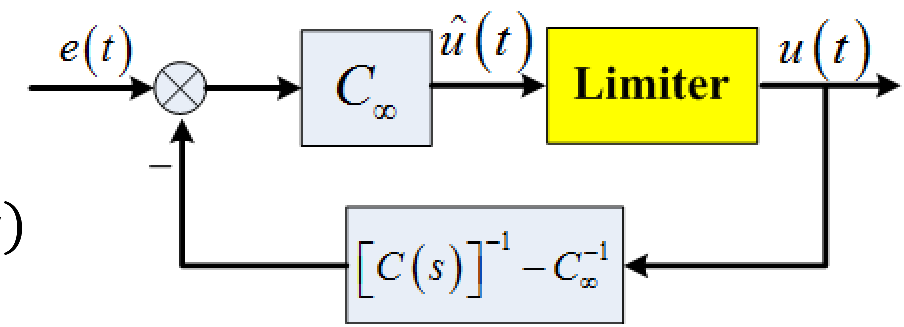
$$C(s)=\frac{k}{s}$$

通过添加一个远离虚轴、稳定的零点 $\varepsilon s+1$，可以变为近似等价的双正则最小相位的形式： $C(s)=\dfrac{k(\varepsilon s+1)}{s}$

$$\hat{u}(t)=C_\infty\left[e(t)-\left(C(s)^{-1}-C_\infty^{-1}\right)u(t)\right]$$

$$=u(t)+C_\infty e(t)-C_\infty C(s)^{-1}u(t)$$

$$=u(t)+\left[k\varepsilon e(t)-\frac{\varepsilon s}{\varepsilon s+1}u(t)\right]$$



（a）Anti-Windup基本结构

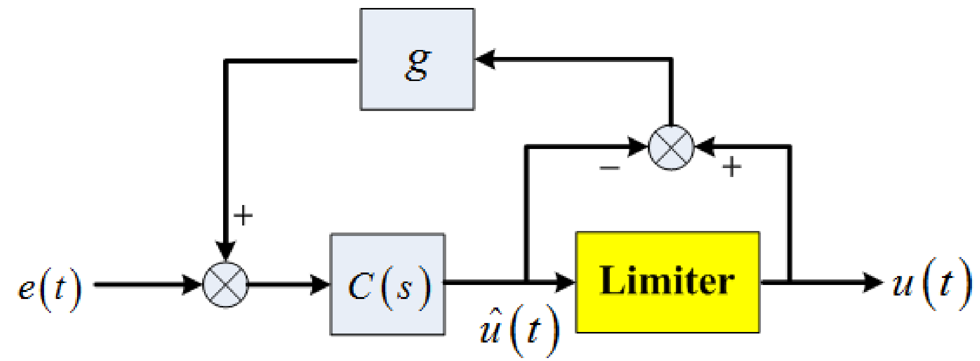
◆ 例4——两种Anti-Windup控制器对比分析

$$\hat{u}(t)=C(s)\{e(t)+g[u(t)-\hat{u}(t)]\}=C(s)e(t)+C(s)g\,u(t)-C(s)g\hat{u}(t)$$

$$\hat{u}(t)+\frac{gk}{s}\hat{u}(t)=\frac{k}{s}e(t)+\frac{gk}{s}u(t)$$

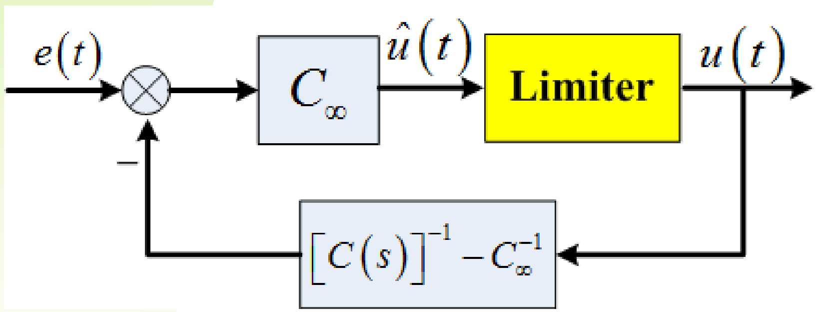
$$\hat{u}(t)=\frac{gk}{s+gk}u(t)+\frac{k}{s+gk}e(t)$$

$$\hat{u}(t)=u(t)+\left[\frac{k}{s+gk}e(t)-\frac{s}{s+gk}u(t)\right]$$

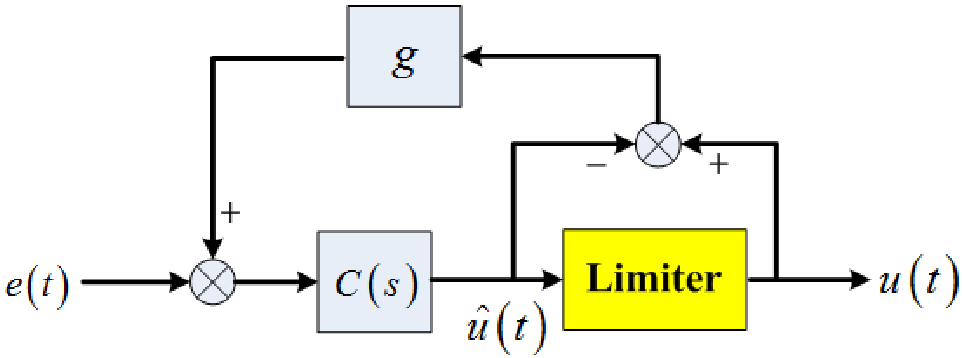


（b）Anti-Windup一般形式—第一种

◆ 例4——两种Anti-Windup控制器对比分析



（a）Anti-Windup基本结构



（b）Anti-Windup一般形式—第一种

$$\varepsilon=\frac{1}{gk}$$

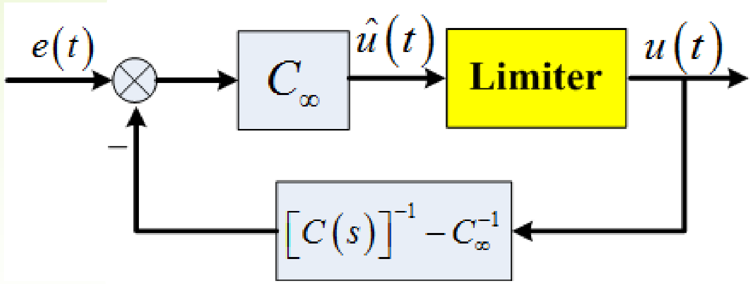
$$\hat{u}(t)=u(t)+\left[k\varepsilon e(t)-\frac{\varepsilon s}{\varepsilon s+1}u(t)\right] \Longleftrightarrow \hat{u}(t)=u(t)+\left[\frac{k}{s+kg}e(t)-\frac{s}{s+gk}u(t)\right]$$

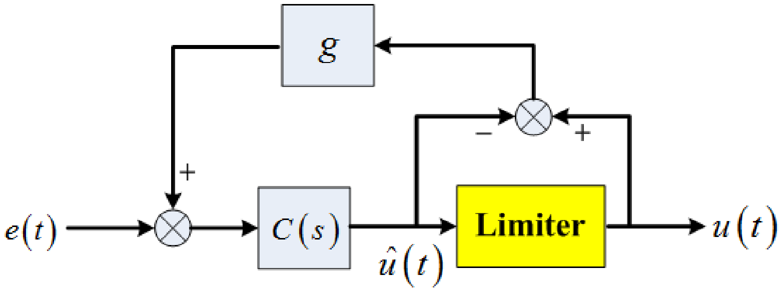
近似等价

主观题 10分

设置

你还能想到其他形式的Anti-Windup设计吗?





正常使用主观题需2.0以上版本雨课堂

作答

Anti-Windup一般形式（第一种）|**Anti-Windup一般形式（第二种）**

控制器 $C(s)=\dfrac{P(s)}{L(s)}$，其中 $L(s)=s^n+l_{n-1}s^{n-1}+\cdots+l_0$

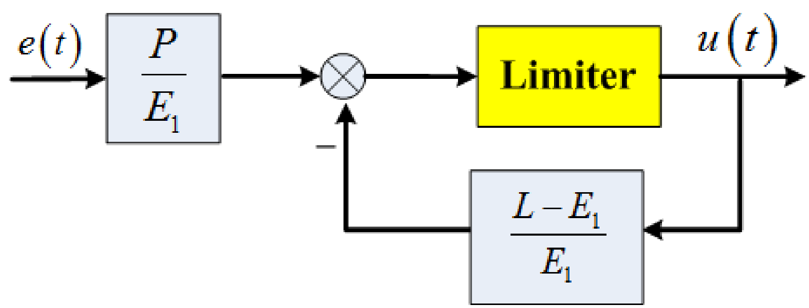
$P(s)=p_ns^n+p_{n-1}s^{n-1}+\cdots+p_0$

闭环极点 $s=-\alpha_i \quad i=1\cdots N>n$

$E_1(s)$为n阶（与$L(s)$的阶次相同）

的首一的Hurwitz多项式：

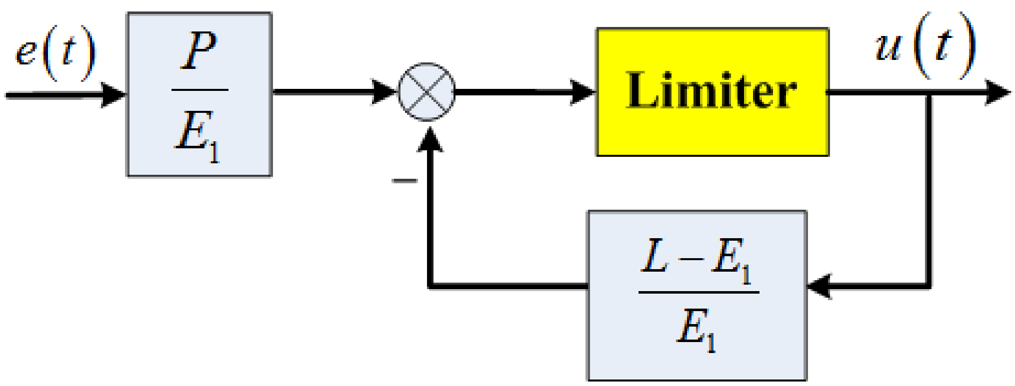
$$E_1=\left(s+\alpha_{m_1}\right)\left(s+\alpha_{m_2}\right)\cdots\left(s+\alpha_{m_n}\right)$$



Anti-Windup一般形式——第二种

无限制条件，适用于：
非最小相位控制器、
不稳定控制器、
⋮

从原理上讲，$E_1(s)$可选择为任意的n阶首一Hurwitz多项式，但不同的选择会导致控制性能的差异。一种经验的选择方法是从**闭环极点中选择(n)个最快的极点**作为$E_1(s)$的根，大多数情况下可获得满意的性能。



Anti-Windup一般形式——第二种

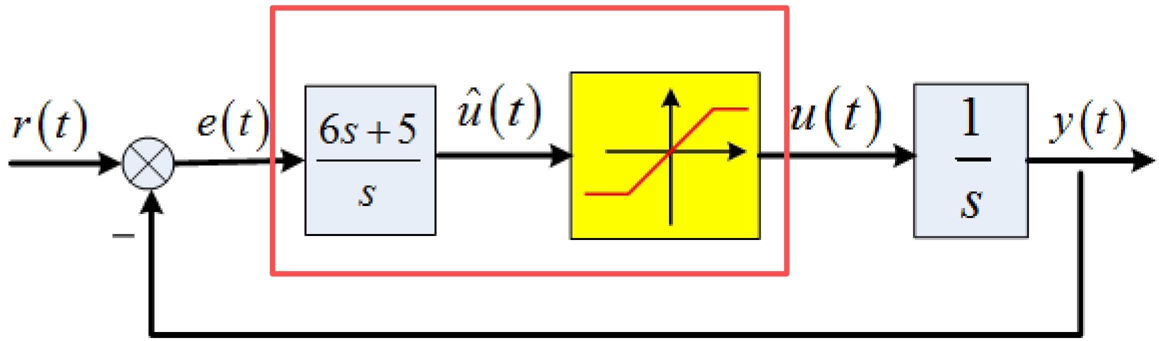
$$E_1=\left(s+\alpha_{m_1}\right)\left(s+\alpha_{m_2}\right)+\cdots+\left(s+\alpha_{m_n}\right)$$

闭环极点：$s=-\alpha_i \quad i=1\cdots N>n$

5.2.3 Anti-Windup的多种实现形式

◆ **例5**

$$C(s)=\frac{P(s)}{L(s)}$$



控制器 $L(s)=s$

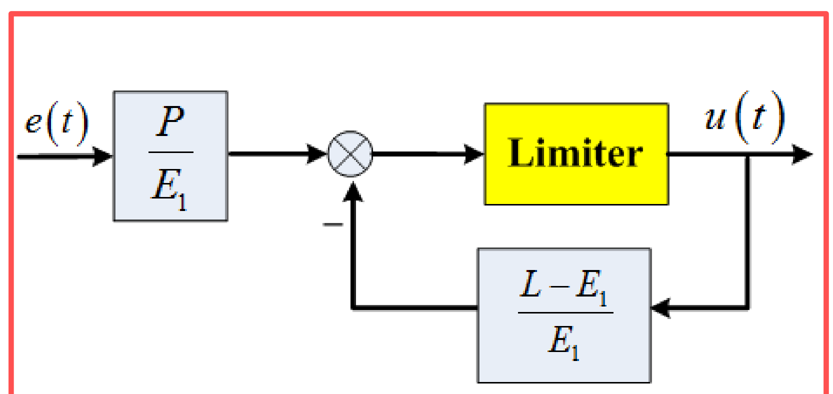
$$P(s)=6s+5$$

执行器限幅

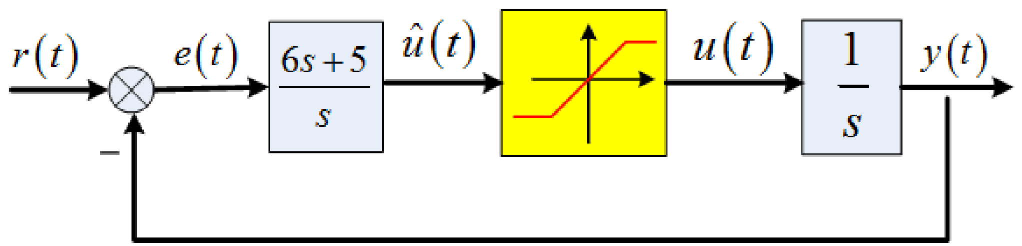
$$u_{\max}=1 \quad u_{\min}=-1$$

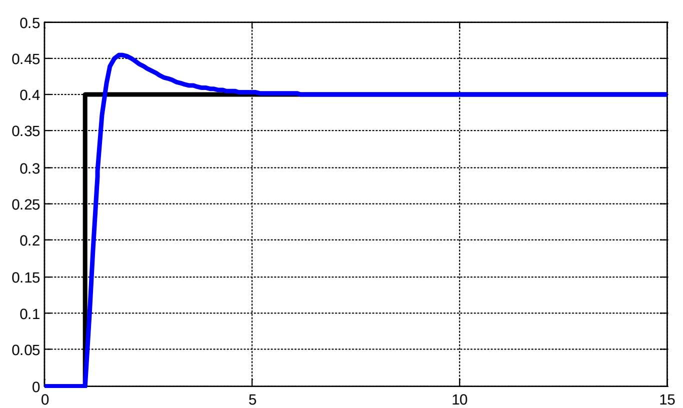
闭环极点

$$s_1=-1, \quad s_2=-5$$

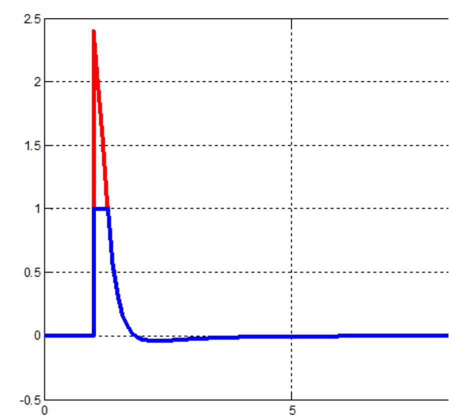


◆ 例5 非Anti-Windup 设计仿真结果



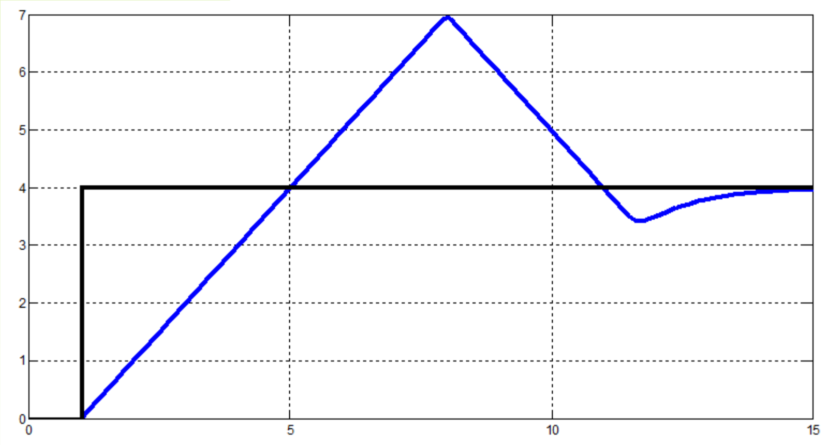


阶跃响应（r=0.4）

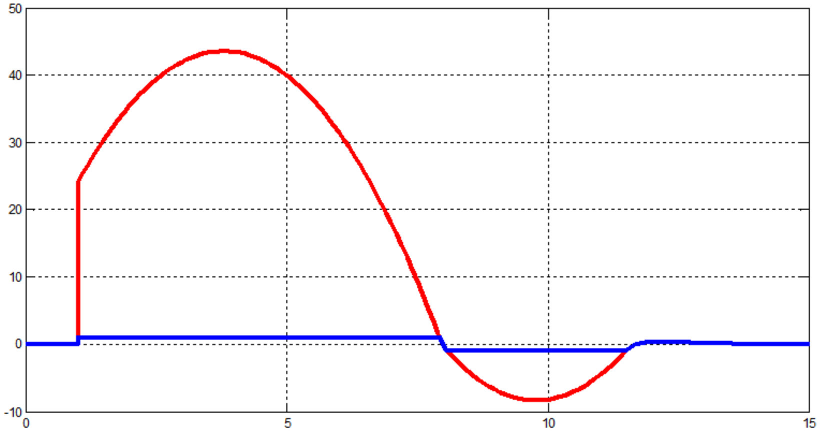


u & $\hat{u}$

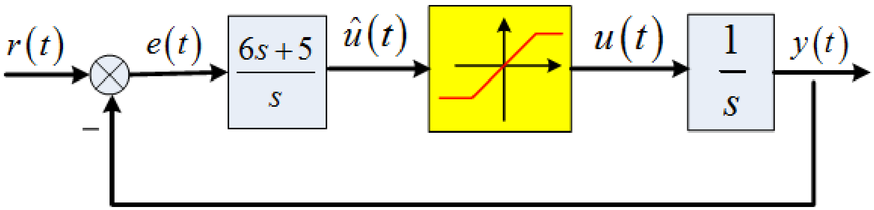
◆ 例5 非Anti-Windup 设计仿真结果



阶跃响应（r=4）



u & $\hat{u}$



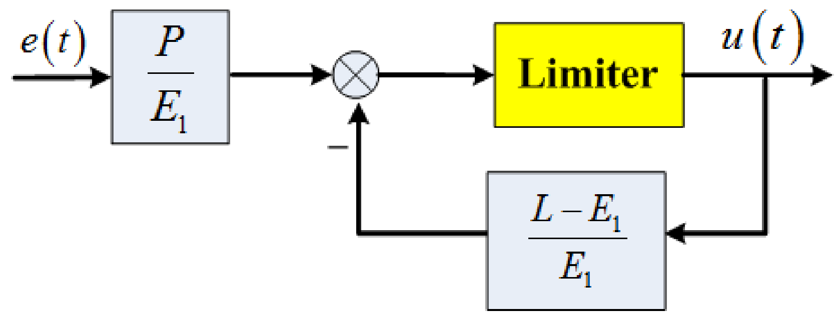
控制系统框图
（非Anti-Windup控制器）

◆ 例5 Anti-Windup 设计

控制器 $L(s)=s$

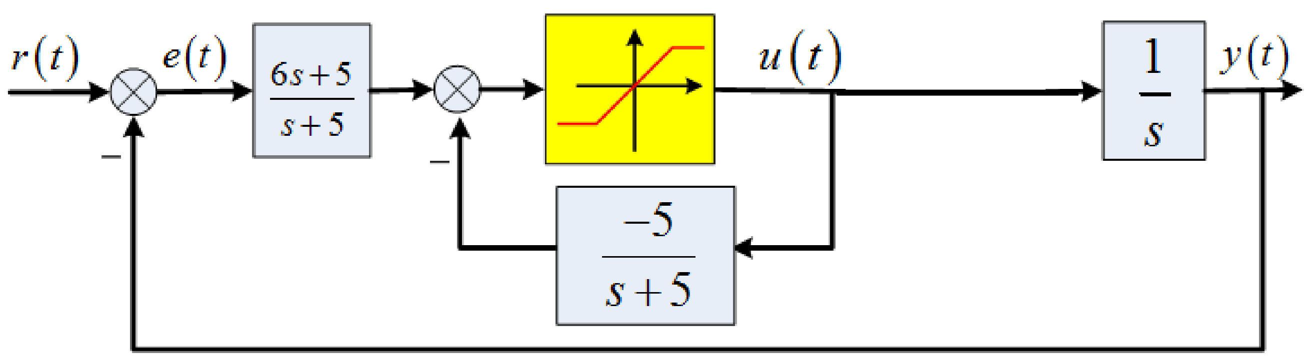
$P(s)=6s+5$

选取 $E_1(s)=s+5$



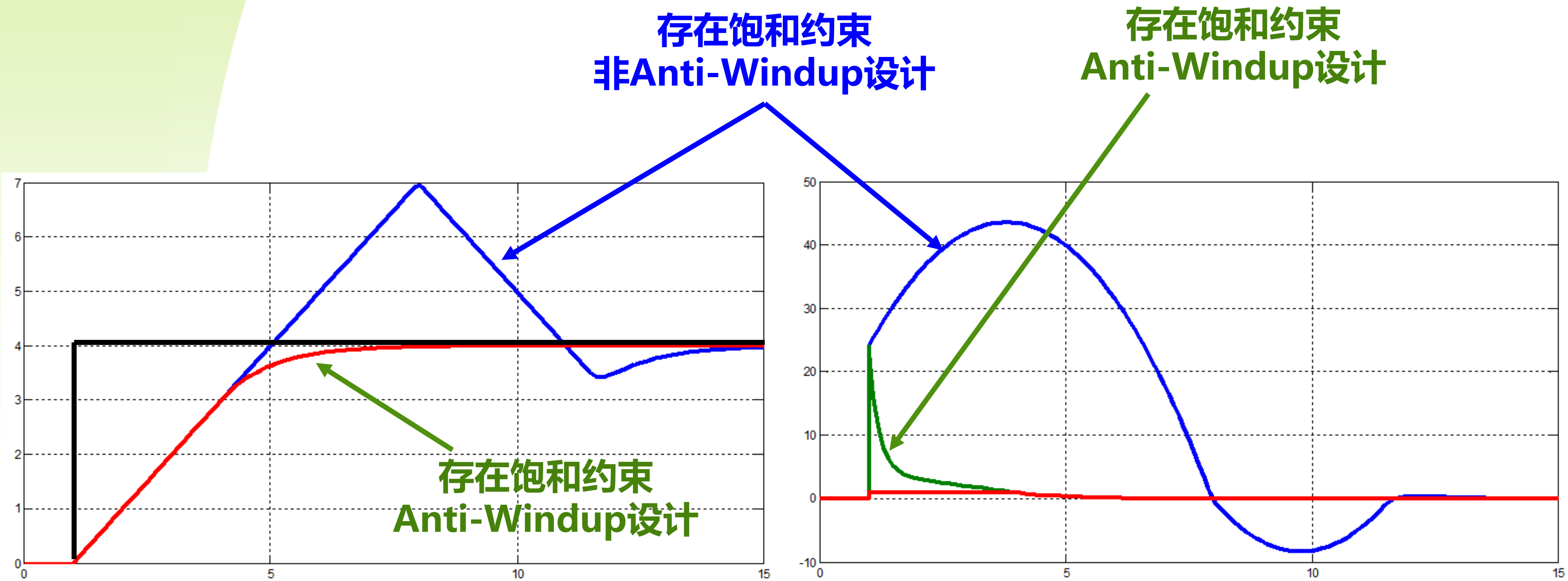
$$\frac{P(s)}{E_1(s)}=\frac{6s+5}{s+5}$$

$$\frac{L(s)-E_1(s)}{E_1(s)}=\frac{-5}{s+5}$$



控制系统框图
(Anti-Windup控制器)

◆ 例5 Anti-Windup 设计仿真结果



阶跃响应对比（*r*=4）　　控制量对比（*r*=4）

◆ 例6——Anti-Windup一般形式控制器举例

不稳定对象 $G(s)=\dfrac{1}{s-1}$

控制器 $L(s)=s$

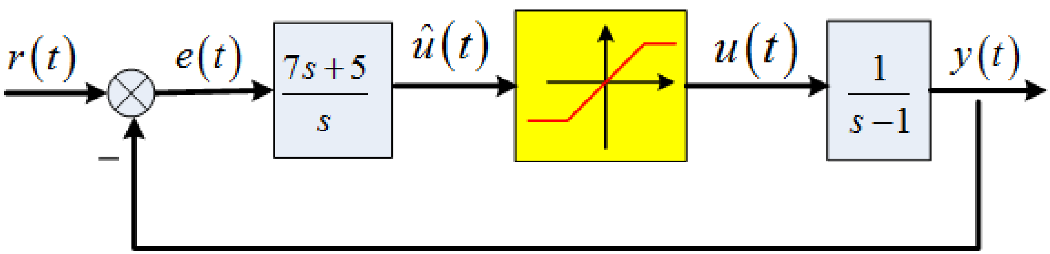
$P(s)=7s+5$

执行器限幅

$u_{\max}=1 \quad u_{\min}=-1$

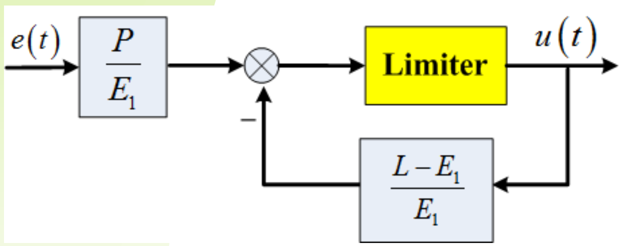
闭环极点

$s_1=-1, \quad s_2=-5$



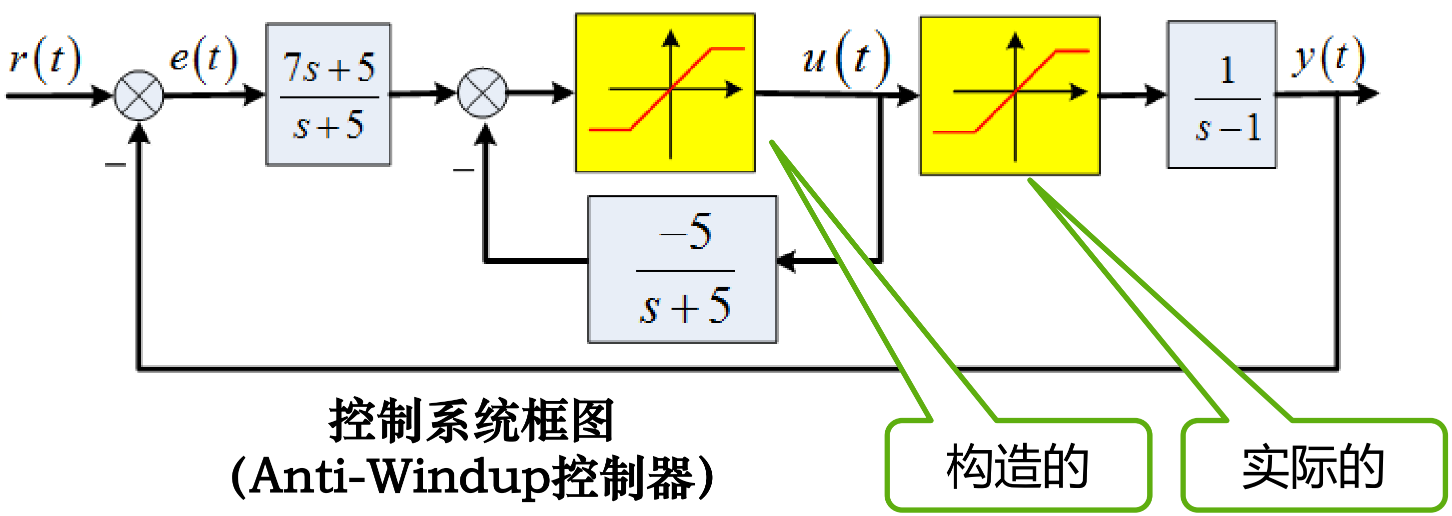
控制系统框图
（非Anti-Windup控制器）

◆ 例6——Anti-Windup一般形式控制器举例



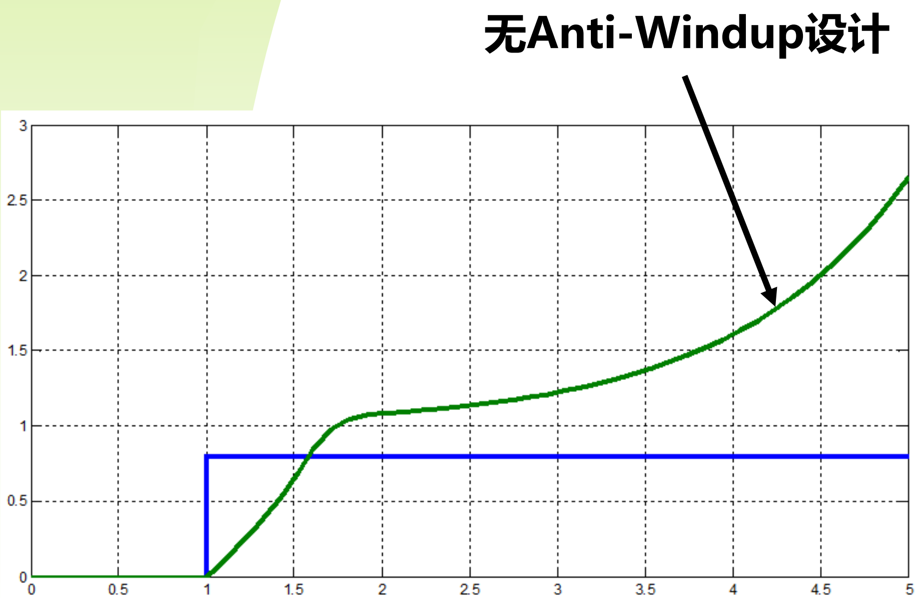
$$E_1(s) = s+5$$

$$\frac{P(s)}{E_1(s)} = \frac{7s+5}{s+5} \qquad \frac{L(s)-E_1(s)}{E_1(s)} = \frac{-5}{s+5}$$

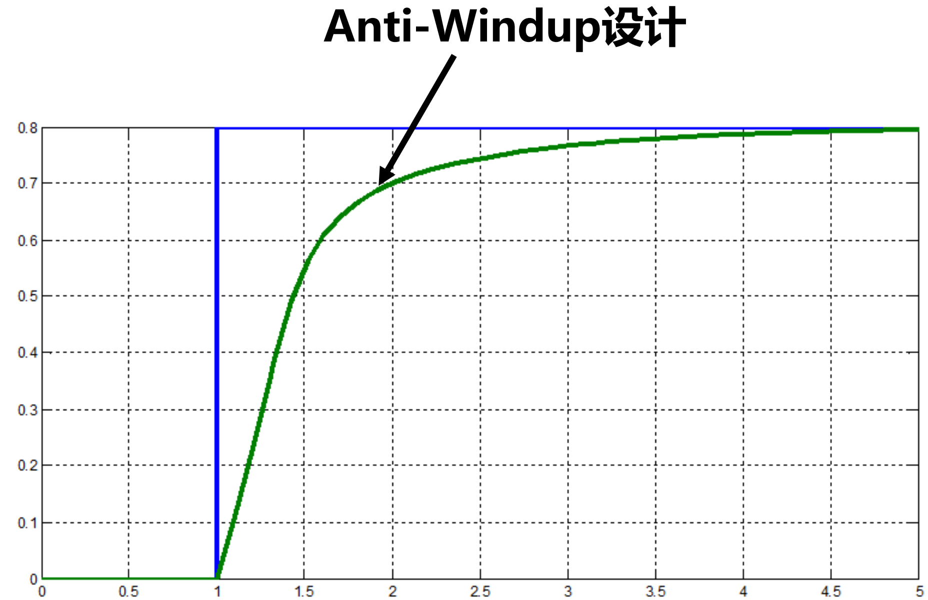


控制系统框图
(Anti-Windup控制器)

◆ 例6——Anti-Windup一般形式控制器举例



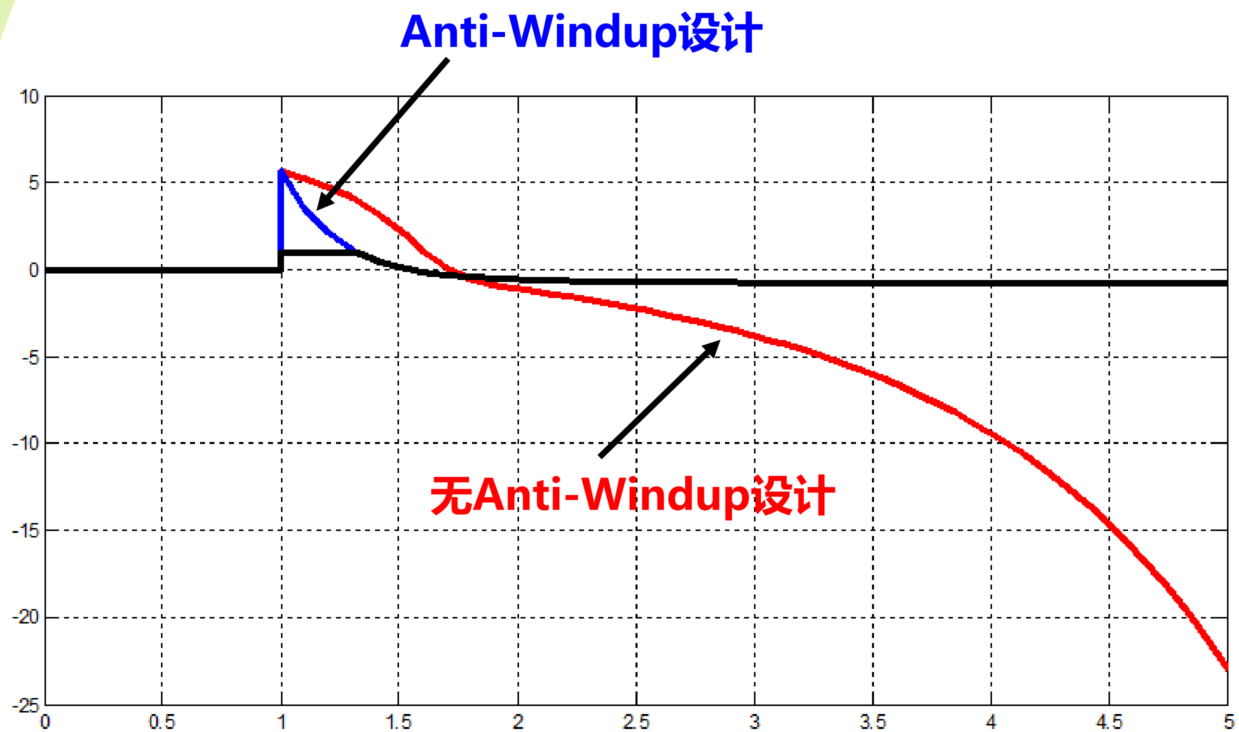
阶跃响应对比（r=0.8）
非Anti-Windup控制



阶跃响应对比（r=0.8）
Anti-Windup控制

Anti-Windup一般形式（第一种）|Anti-Windup一般形式（第二种）

- 例6



阶跃响应（r=0.8）下的控制量对比

非Anti-Windup控制　Anti-Windup期望控制　Anti-Windup实际控制

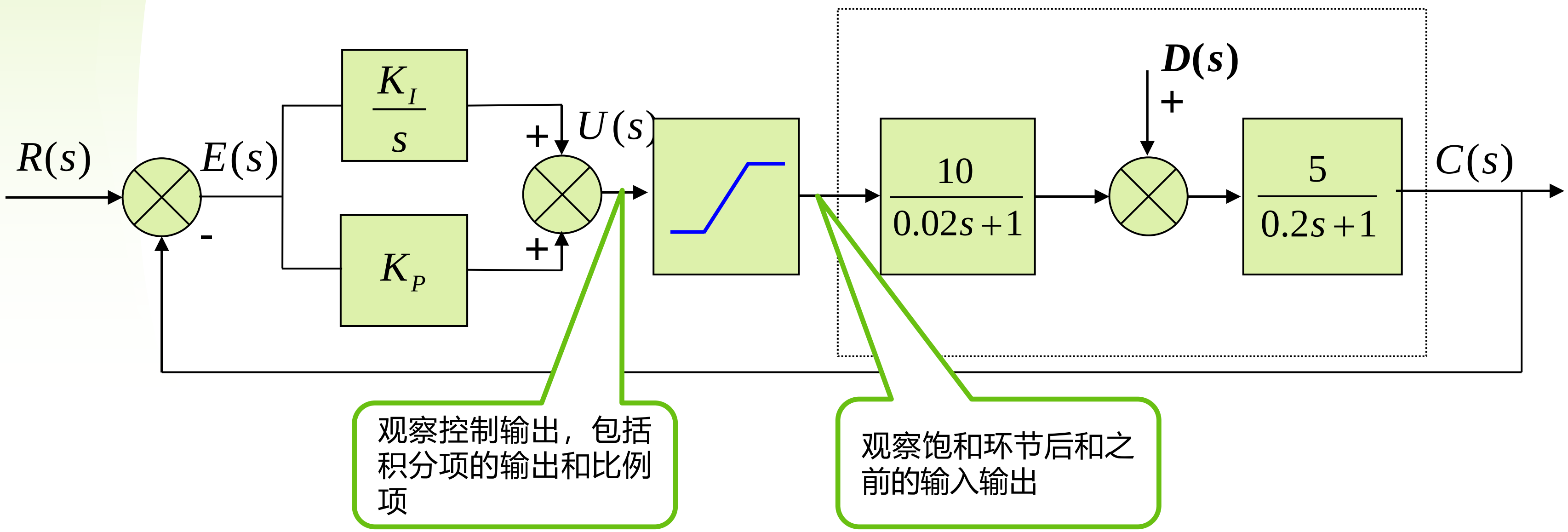
总结

本节课内容回顾

- 再次回顾了执行器饱和问题；
- 从控制器、各类输入信号与控制量关系角度分析了饱和原因；
- 给出了饱和和执行器转换速率限制的模型；
- 分析了积分器饱和原因及解决办法；
- 讲解了三种控制器Anti-Windup设计方法；

1 必做作业

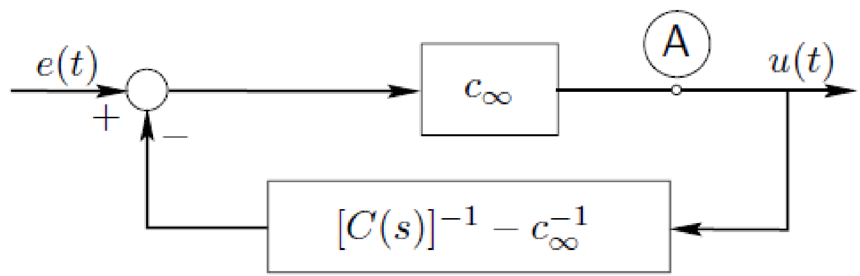
18-1 仿真题：对下面给定的系统（饱和环节幅值上下限都为10），首先采用PI控制器，调出保证系统稳定的参数，然后给定不同幅值的阶跃信号，（1）观察控制器积分项和比例项的输出，复现本节课所讲积分饱和现象；（2）采用课上给出的两种避免积分饱和的方法之一进行抗饱和设计，验证方法的有效性（可以采用S函数的方法实现）；

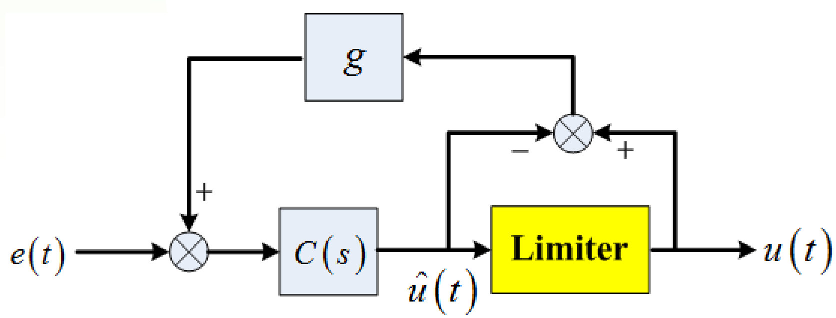


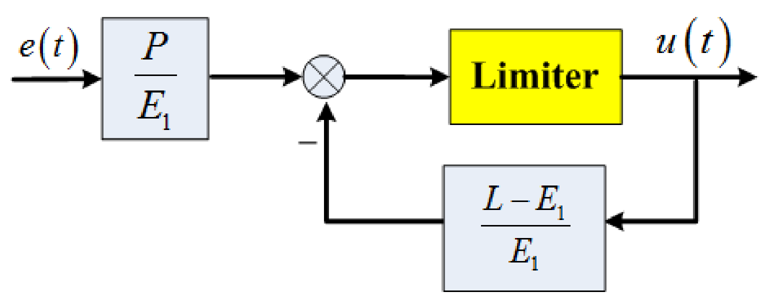
第18次 课后作业

1 必选作业

18-2 仿真题：对18-1给定的系统（饱和环节幅值上下限都为10），设计控制器使闭环系统稳定（可以用前面作业中的设计好的系统），然后采用下面的方法对控制器进行抗饱和设计，验证这些方法的有效性，加深对这些方法的理解；







第18周 课后作业

2 可选作业

18.1 总结执行器饱和可能给实际系统带来的问题（结合噪声，谐振等的影响考虑）；

18.2 总结解决执行器饱和问题的各种方法（事前，事后，控制和控制之外，有些本节课提到过）；

18.3 对于积分饱和，除了课上讲的两种方法，你还能想到哪些抗饱和方法？能否做到既可以避免深度饱和，又不影响积分器的作用；

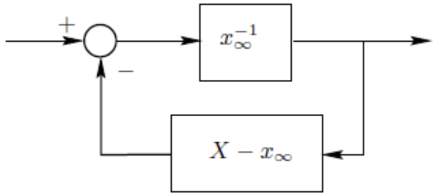
18.4 你在努力达成目标的过程中，出现过“饱和”问题吗？你是怎么解决的？

18.5 总结三种Anti-Windup设计方法的优劣和适用范围；

18.6 从信息利用的角度，解释Anti-Windup设计思想。

18.7 对于实际系统，如何获取实际执行器输出或被控对象输入。如果不能获得，那抗饱和控制应该如何实现？

18.8 推导下面框图的传递函数，并对结果进行分析，看看你有什么洞见；



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，哪些又是针对系统的，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（你可以控制好人生）；
i. 控制系统中各种概念的联系与区别（对比才能深刻理解）
j. 控制系统中主动和被动的方法（上工治未病）；
k. 分析仿真和实验，理论与实际的差别（纵然无法解决，也要给出解释）；
l. 开环与闭环的特性（为什么一定要闭环）；
m. 控制设计中可用的信息有哪些（信息有多重要）

拓展思考

自己总结，无需上交

n 反馈的力量，闭环的作用（日用而不知）；

o 时域和频域的联系与区别（形式不同，本质相通）；

p 高与低，宽与窄，谁相对于谁（相对与绝对）；

r 控制系统中的各种非线性及处理方法（怎么对付非线性）；

s 反馈中的反馈，闭环中的闭环（只要有用就可以嵌套着使用）；

t 特殊到一般，简单到复杂（走上科研创新之路）；

Thank You！

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）