自动控制实践B——2022年春季学期

第五章 Anti-Windup设计（2）

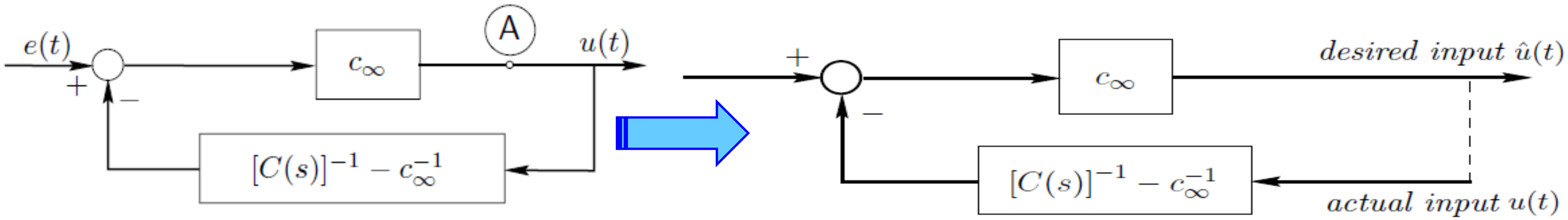
授课教师：董广忠 （ Assoc. Prof. ）

哈尔滨工业大学（深圳），HITsz
机电工程与自动化学院 SMEA

5.2 Anti-Windup设计

◆ Anti-Windup控制的基本结构

假设控制器是双正则的最小相位系统，将其分解为比例项和严格正则项：$\boxed{C(s) = c_\infty + \bar{C}(s)}$

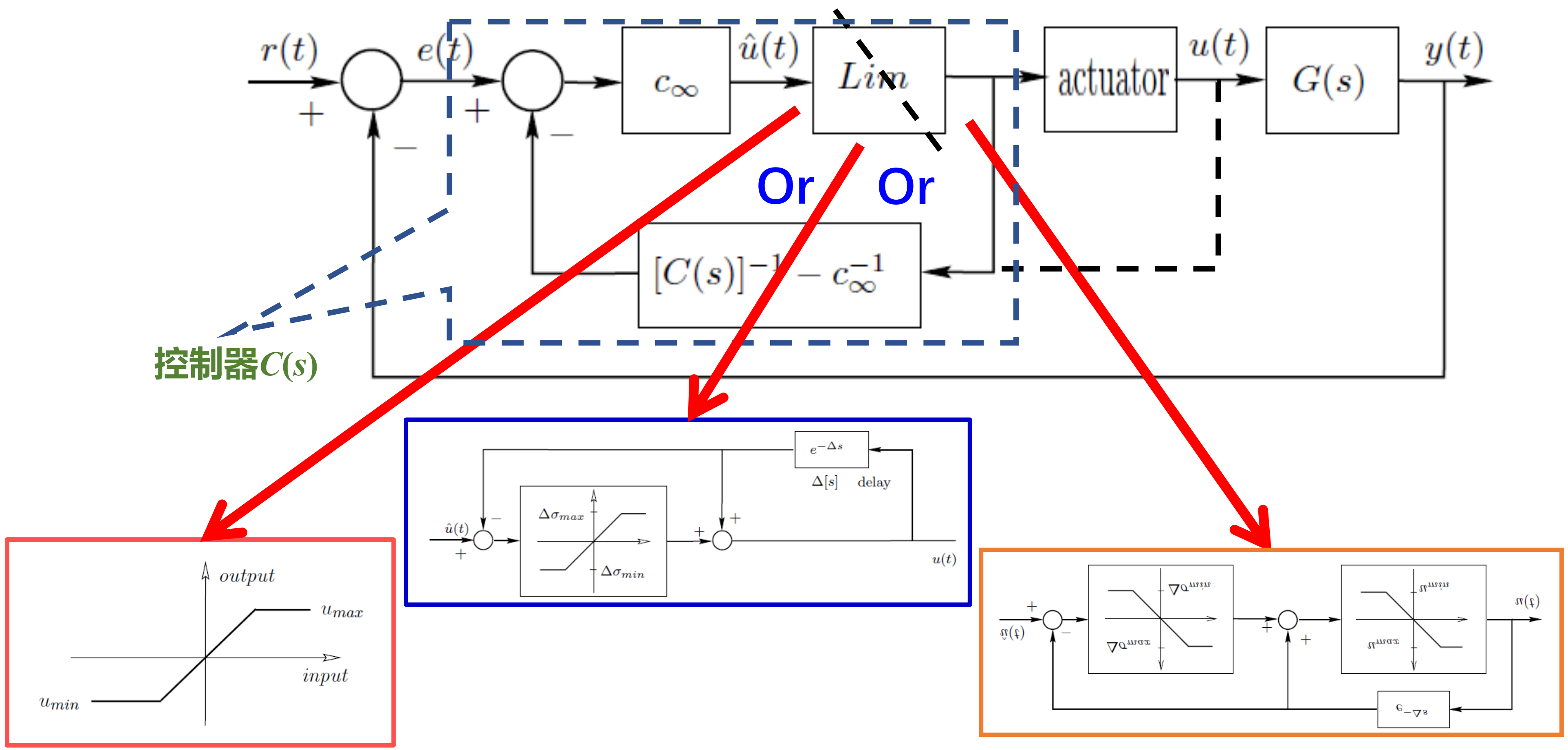


设计策略：

（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。

◆ Anti-Windup控制回路——含有执行器约束

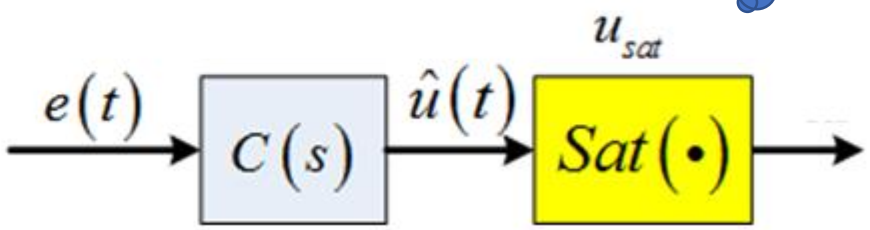


5.2.2 Anti-Windup设计原理分析

◆ Anti-Windup设计思路

如何构造出
期望误差信号?

考虑带有执行器饱和的控制器如下：



控制器的输入信号$e(t)$过大可能会导致执行器饱和，Anti-Windup的思想是基于控制器输入信号$e(t)$，找到一个期望的控制器输入信号$\bar{e}(t)$，使得期望误差信号驱动的控制器不会超出实际控制量的限幅 u_{sat}。

◆ Anti-Windup设计思路

假设控制器是最小相位、双正则的，将其分解为比例项和严格正则项：

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

期望的控制量

$$\boxed{\hat{u}=\bar{C}\,\bar{e}+C_{\infty}\,e}$$

期望的误差信号满足

$$\boxed{u(t)=sat\left(\hat{u}(t)\right)=\bar{C}\,\bar{e}+C_{\infty}\bar{e}}$$

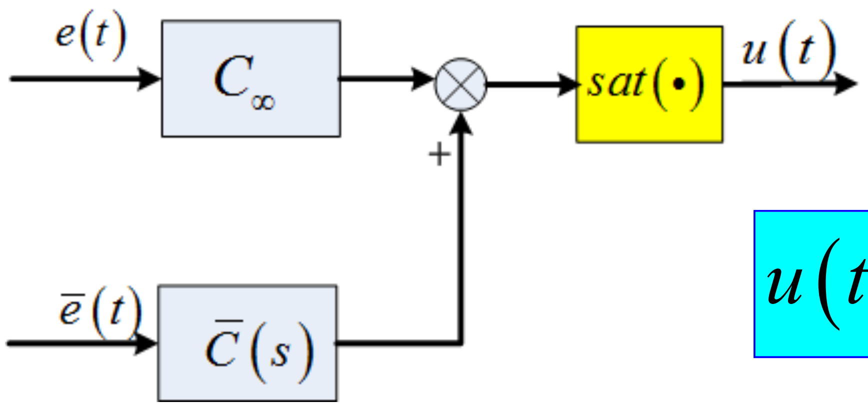
5.2.2 Anti-Windup设计原理分析

◆ Anti-Windup设计思路

期望的控制量：

$$\hat{u} = \bar{C}\,\bar{e} + C_{\infty}\,e$$

在执行器线性工作范围内，满足$\bar{e}(t) = e(t)$；当执行器饱和时，由$\bar{e}(t)$驱动控制器中的动态。



问题： $e(t) \to \bar{e}(t)$

需要满足什么条件?

$$u(t) = sat\left(\bar{C}\,\bar{e} + C_{\infty}\,e\right)$$

问题：$e(t) \to \bar{e}(t)$

需要满足什么条件?

◆ Anti-Windup设计思路

在未达到饱和时，期望误差信号与实际误差信号相同，

达到饱和后，保证$C\bar{e} = u$：

$$\begin{cases} \hat{u} = \bar{C}\bar{e} + C_\infty e \\ u = sat(\hat{u}) \end{cases}$$

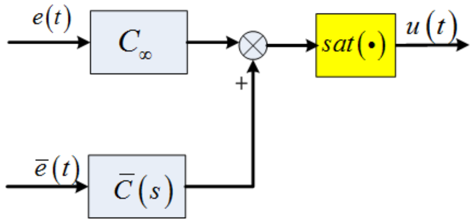
$$= sat(\bar{C}\bar{e} + C_\infty e)$$

$$\bar{C}\bar{e} + C_\infty \bar{e} = sat\left(\bar{C}\bar{e} + C_\infty e\right)$$

$$\bar{e} = C_\infty^{-1}\left[Sat\left(\bar{C}\bar{e} + C_\infty e\right) - \bar{C}\bar{e}\right]$$

执行器线性工作范围内：

$\bar{e}(t) = e(t)$

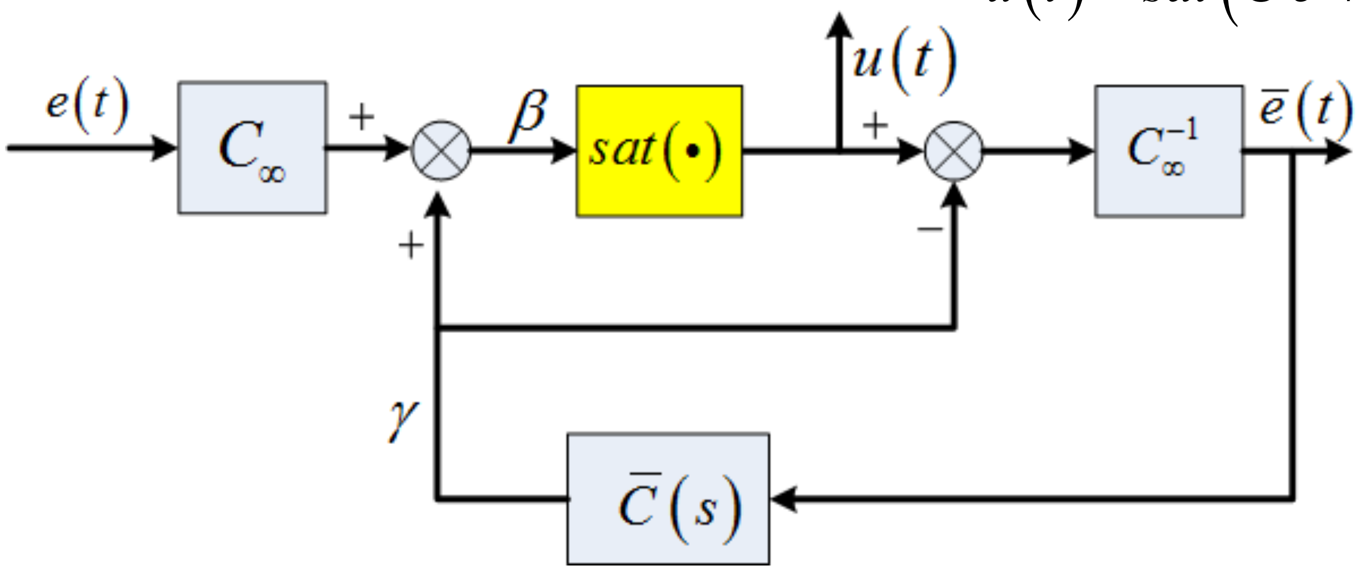


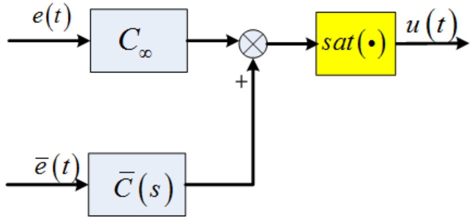
问题： $e(t) \rightarrow \bar{e}(t)$ **需要满足什么条件？**

◆ Anti-Windup设计思路

$$\bar{e} = C_\infty^{-1}\left[Sat\left(\bar{C}\,\bar{e} + C_\infty e\right) - \bar{C}\,\bar{e}\right]$$

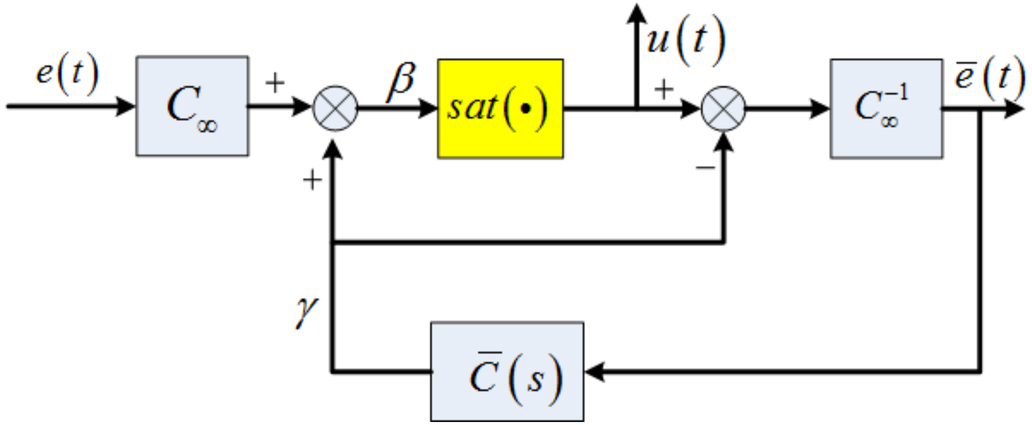
$$u(t) = sat\left(\bar{C}\,\bar{e} + C_\infty e\right)$$



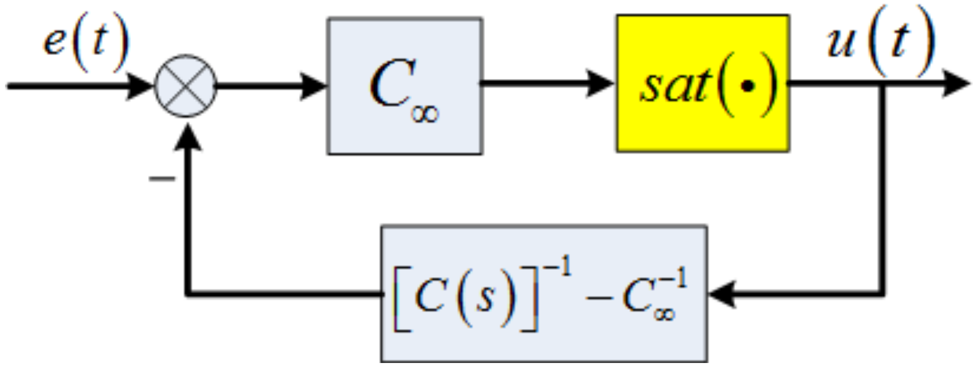


5.2.2 Anti-Windup设计原理分析

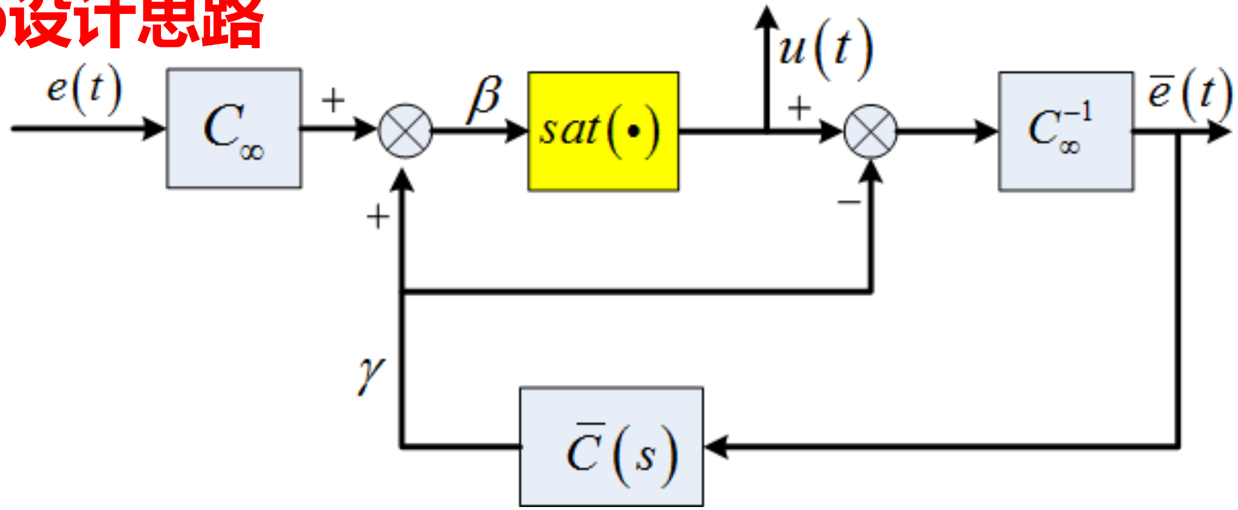
◆ Anti-Windup设计思路



$$\boxed{\bar{e} = C_\infty^{-1}\left[Sat\left(\bar{C}\,\bar{e}+C_\infty\, e\right)-\bar{C}\,\bar{e}\right]}$$



◆ Anti-Windup设计思路



$$\gamma(t)=C_\infty^{-1}\bar{C}\left[u(t)-\gamma(t)\right]$$

⬇

$$C_\infty\gamma(t)=\bar{C}u(t)-\bar{C}\gamma(t)$$

⬇

$$\left(C_\infty+\bar{C}\right)\gamma=\bar{C}u(t)$$

⬇

$$C\gamma(t)=\left(C-C_\infty\right)u(t)$$

⬇

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

⬇

$$\boxed{\gamma(t)=-C_\infty\left[C^{-1}-C_\infty^{-1}\right]u(t)}$$

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

⬇

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

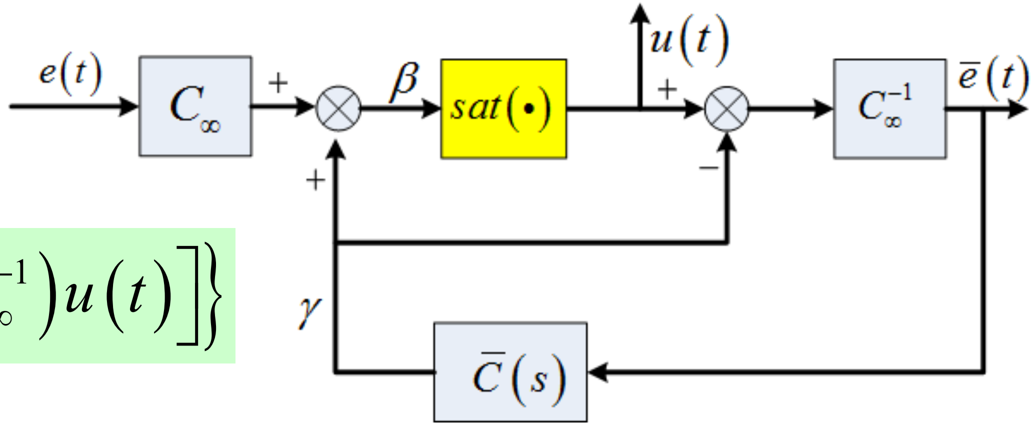
$$\gamma(t) = -C_\infty\left[C^{-1} - C_\infty^{-1}\right]u(t)$$

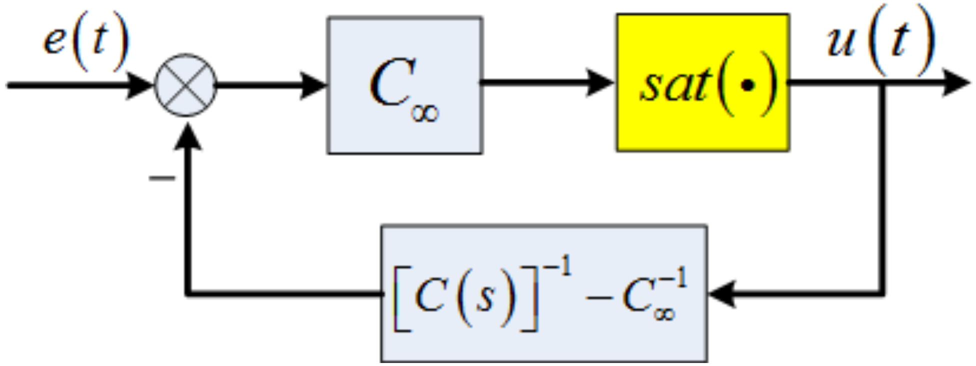
$$\beta(t) = C_\infty\left[e(t) - \left(C^{-1} - C_\infty^{-1}\right)u(t)\right]$$

◆ Anti-Windup设计思路

$$u(t) = sat(\beta)$$

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



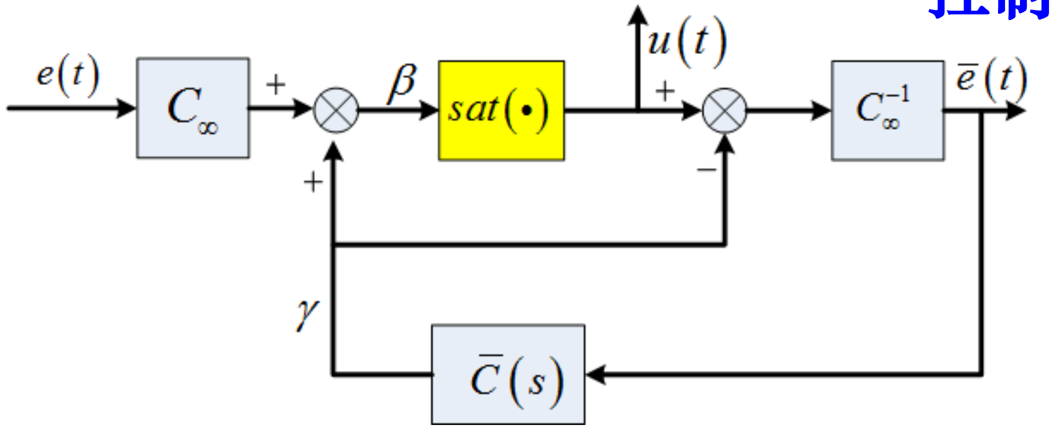


等价!

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



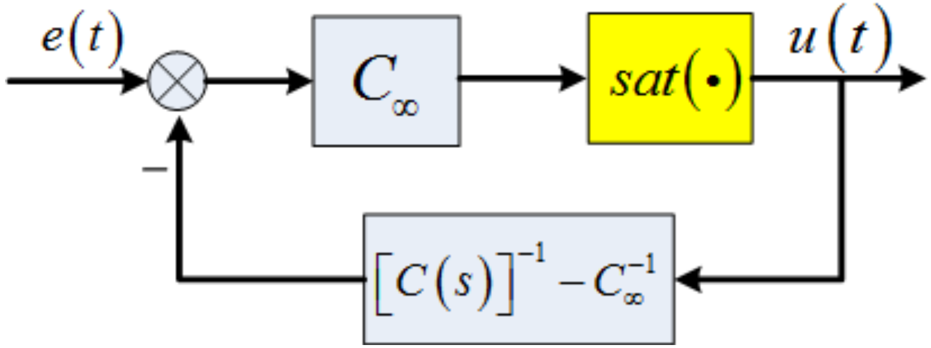
$$\boxed{\bar{e} = C_\infty^{-1}\left[Sat\left(\bar{C}\,\bar{e} + C_\infty\, e\right) - \bar{C}\,\bar{e}\right]}$$

（1）控制器的动态由对象的实际输入信号来驱动，误差只驱动比例环节；

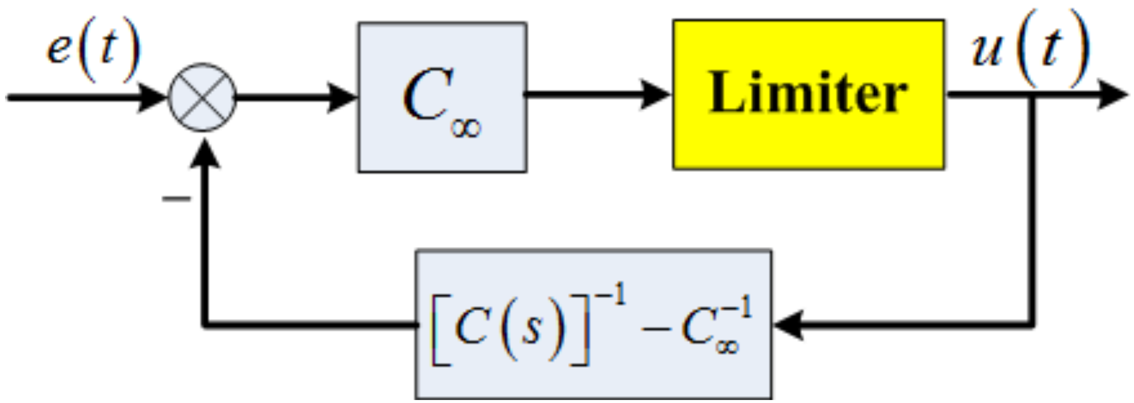
（2）由对象的实际输入信号驱动时，控制器的动态是稳定的。

控制器是最小相位、双正则的：

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



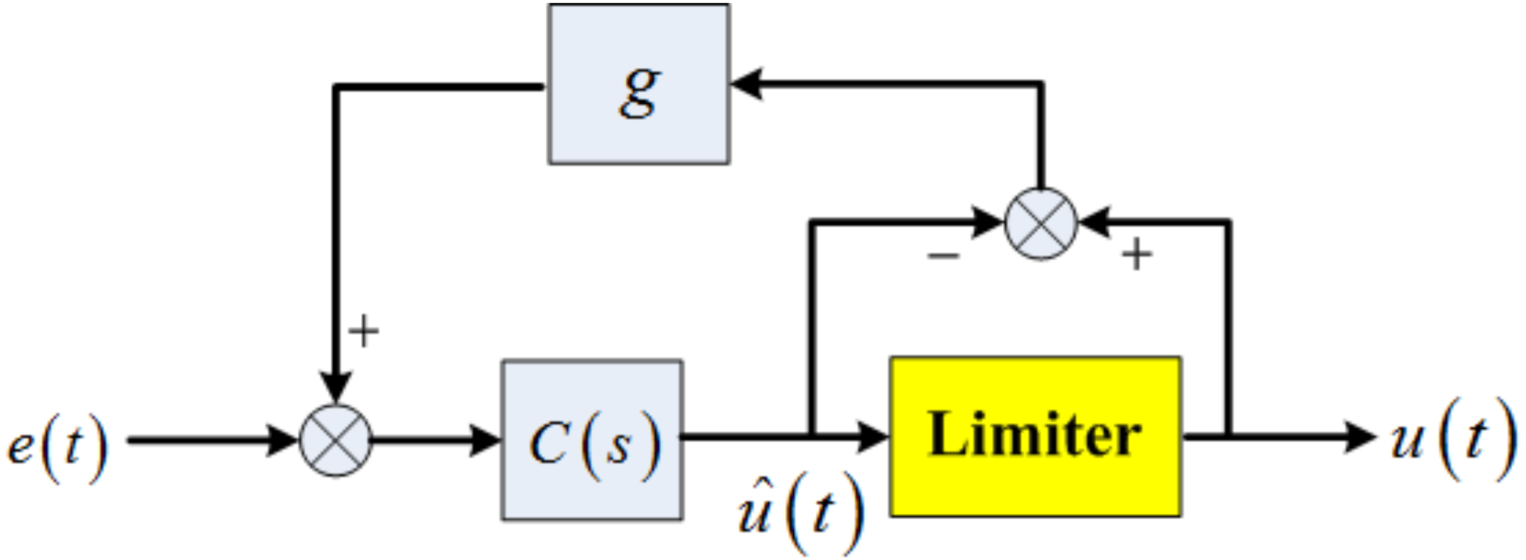
Anti-Windup设计得到了广泛研究，已有多种关于抗饱和的设计方法，这里只列举两种简单的其他形式的Anti-Windup控制器，不做深入分析。



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的其他形式——第一种

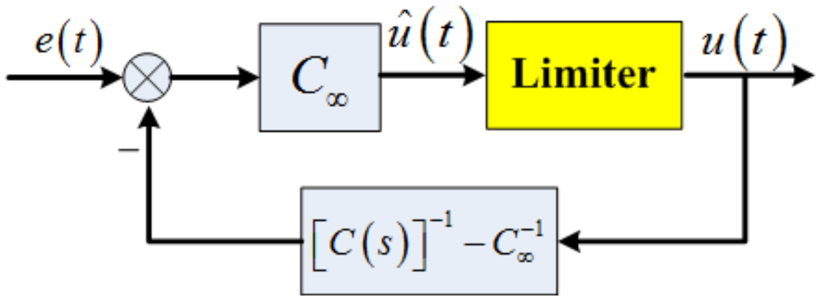


Anti-Windup 控制器的其他形式——第一种

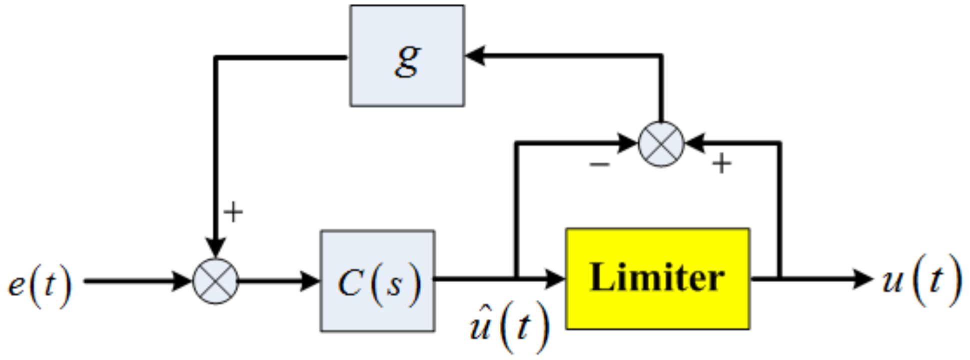
g：静态增益
控制器无双正则、最小相位需求

◆ 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其他形式-第一种

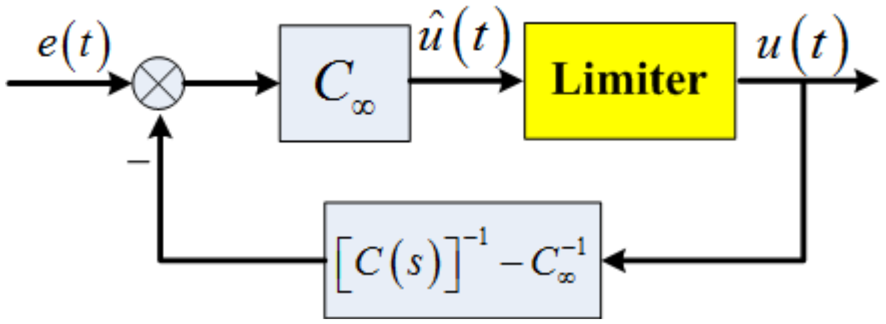
◆ 例4——两种Anti-Windup控制器对比分析

考虑积分型控制器 $C(s)=\dfrac{k}{s}$

通过添加一个远离虚轴、最小相位的零点$\varepsilon s+1$，可以变为近似等价的双正则最小相位的形式：

$$C(s)=\frac{k(\varepsilon s+1)}{s}$$

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



（a）Anti-Windup基本结构

◆ 例4——两种Anti-Windup控制器对比分析

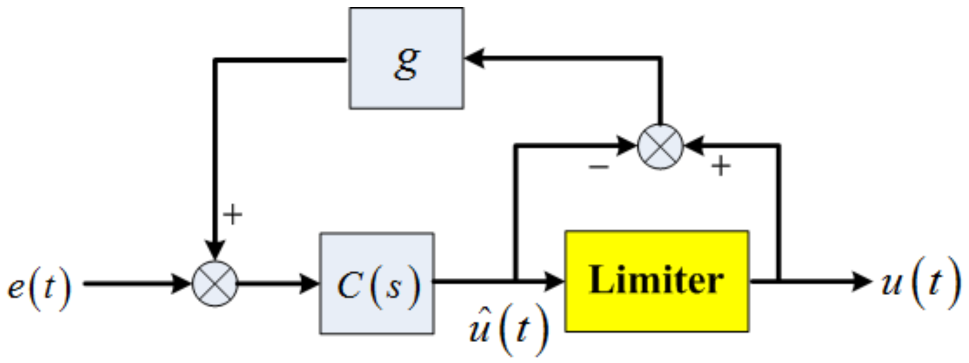
考虑积分型控制器 $C(s)=\dfrac{k}{s}$

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

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

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

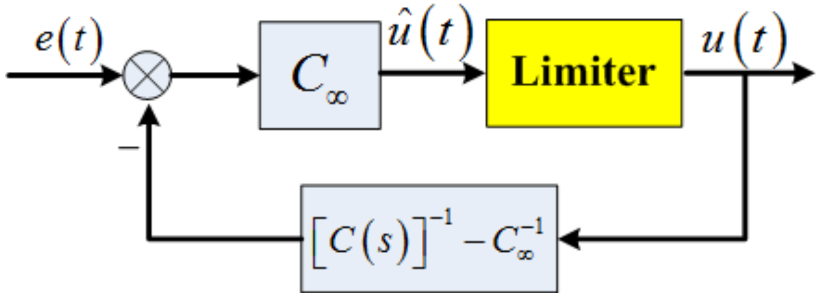
$$\hat{u}(t)=u(t)+\left[\frac{k}{s+gk}e(t)-\frac{s}{s+gk}u(t)\right]$$



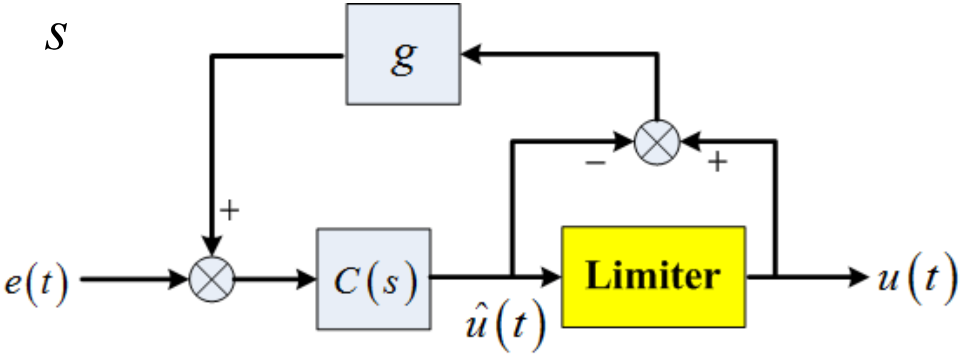
（b）Anti-Windup其他形式—第一种

◆ 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其他形式—第一种

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

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

$$\frac{1}{g}e(t)$$

近似等价

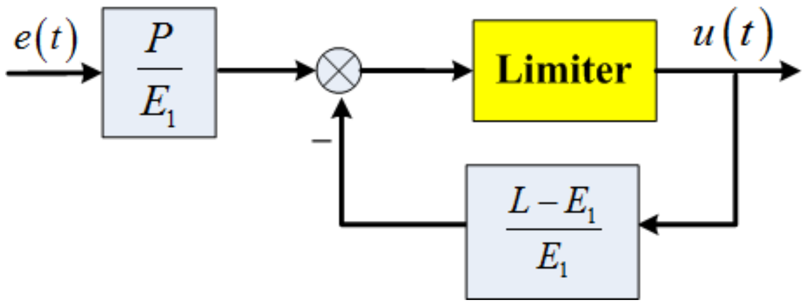
◆ Anti-Windup的其他形式——第二种

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 $s=-\alpha_i,\ i=1,\cdots,N>n$



Anti-Windup其他形式——第二种

$E_1(s)$为n阶(与$L(s)$的阶次相同)的首一的Hurwitz多项式：

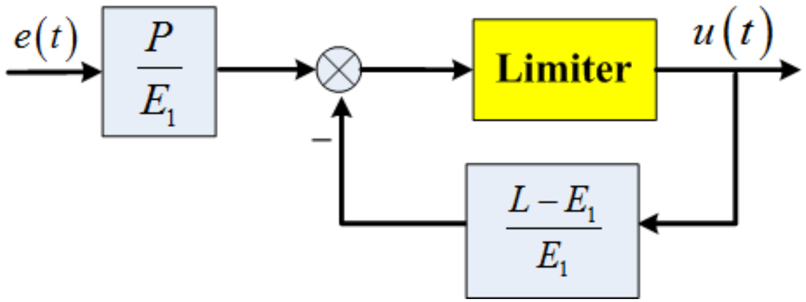
$$E_1=(s+\alpha_{m_1})(s+\alpha_{m_2})\cdots(s+\alpha_{m_n})$$

无限制条件，适用于：
非最小相位控制器、
不稳定控制器、
⋮

◆ Anti-Windup的其他形式——第二种

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

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



Anti-Windup其他形式——第二种

线性区域内的传递函数：

$$\frac{U(s)}{E(s)}=\frac{P(s)}{E_1(s)}\left(\frac{1}{\left(1+\frac{L(s)-E_1(s)}{E_1(s)}\right)}\right)=\frac{P(s)}{E_1(s)}\frac{E_1(s)}{L(s)}$$

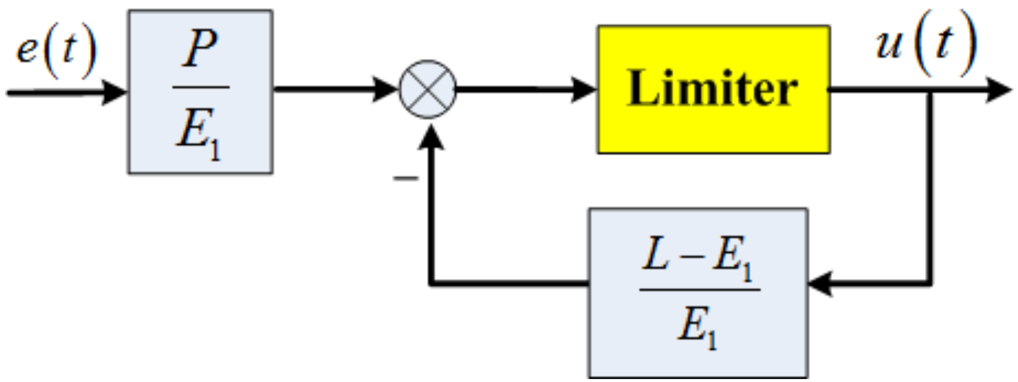
$$E_1=\left(s+\alpha_{m_1}\right)\left(s+\alpha_{m_2}\right)\cdots\left(s+\alpha_{m_n}\right)$$

无限制条件，适用于：
非最小相位控制器、
不稳定控制器、
⋮

◆ Anti-Windup的其他形式——第二种

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。

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

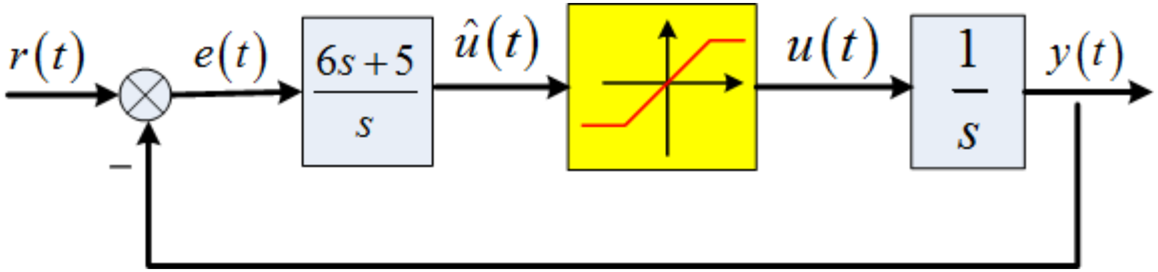


Anti-Windup其他形式——第二种

闭环极点 $s=-\alpha_i,\ i=1,\cdots,N>n$

例5——Anti-Windup其他形式控制器举例

$$U(s)=\frac{P(s)}{L(s)}E(s)$$



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

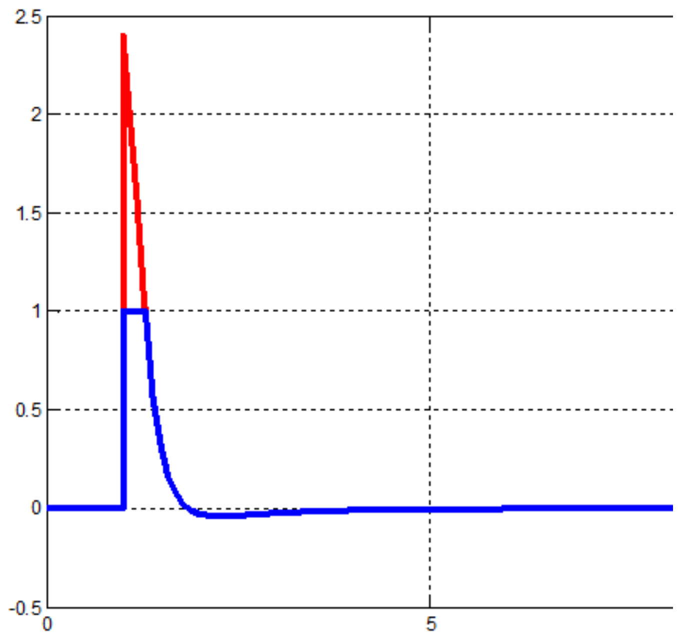
$s_1=-1, \quad s_2=-5$

控制系统框图
（非Anti-Windup控制器）

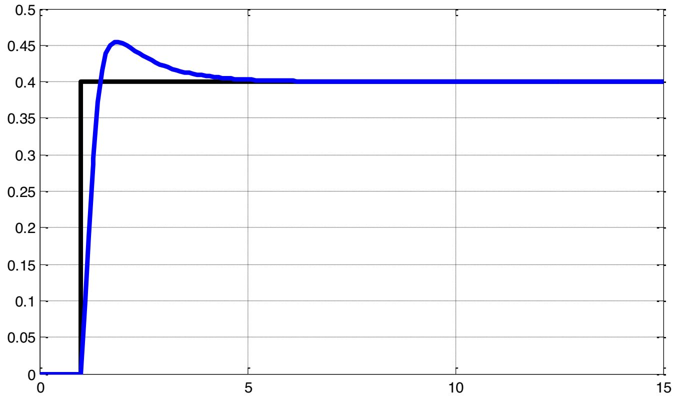
$$G_c(s)=\frac{\frac{6s+5}{s^2}}{1+\frac{6s+5}{s^2}}=\frac{6s+5}{s^2+6s+5}$$

例5——Anti-Windup其他形式控制器举例

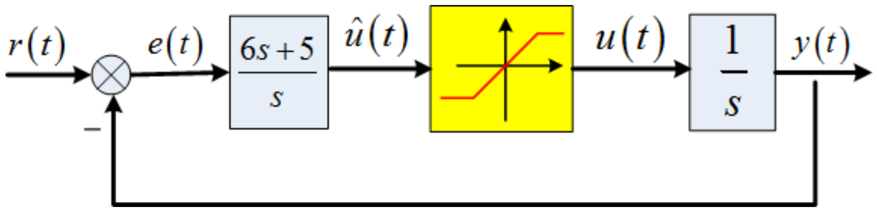
——非Anti-Windup 设计仿真结果



u & $\hat{u}$



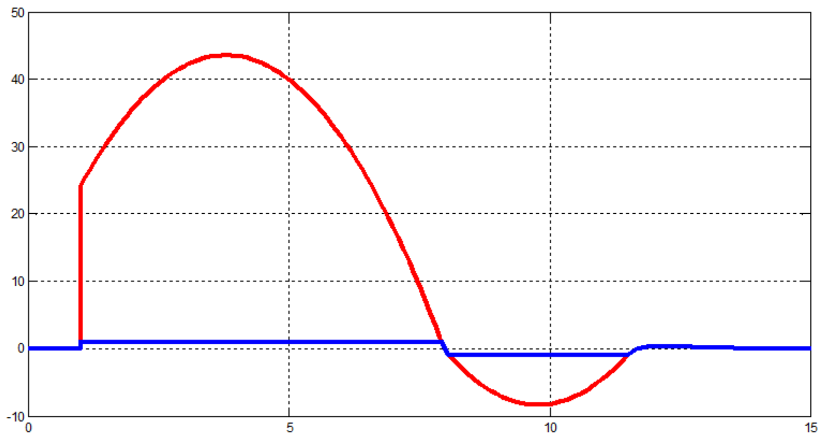
阶跃响应（r=0.4）



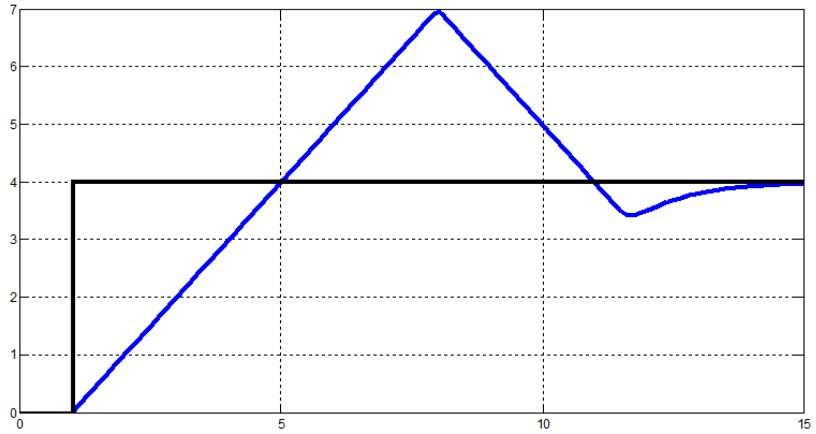
控制系统框图
（非Anti-Windup控制器）

◆ 例5——Anti-Windup其他形式控制器举例

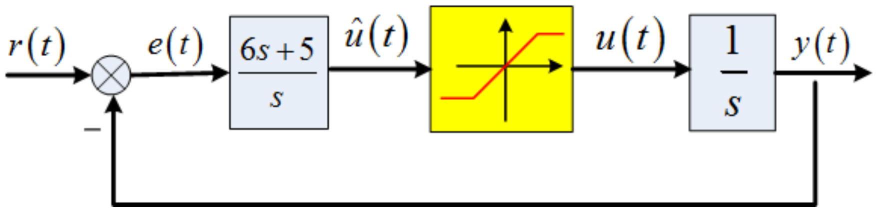
——非Anti-Windup 设计仿真结果



u & $\hat{u}$



阶跃响应（r=4）



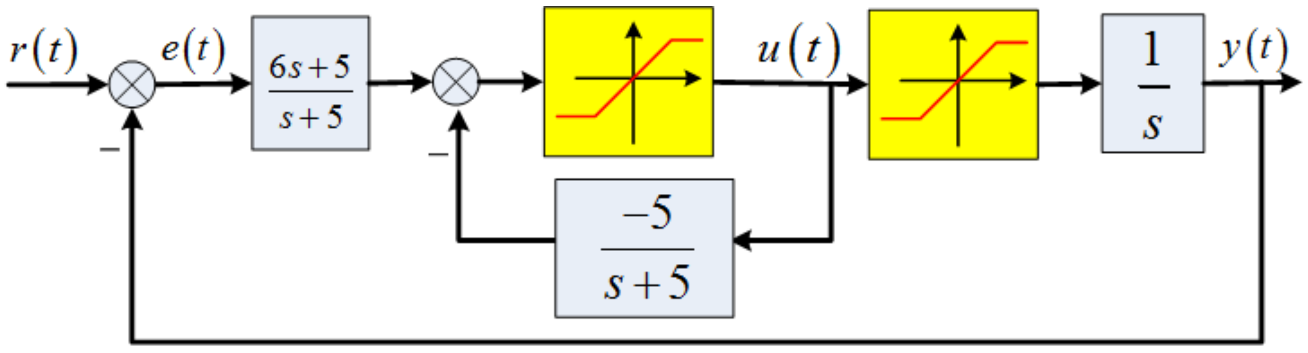
控制系统框图
（非Anti-Windup控制器）

◆ 例5——Anti-Windup其他形式控制器举例

闭环极点

——Anti-Windup 设计

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



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

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

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

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

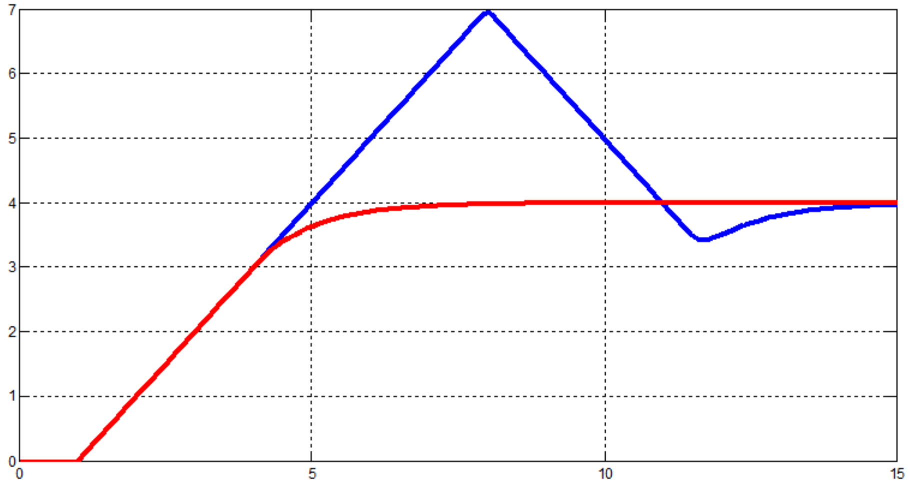
控制系统框图

(Anti-Windup控制器)

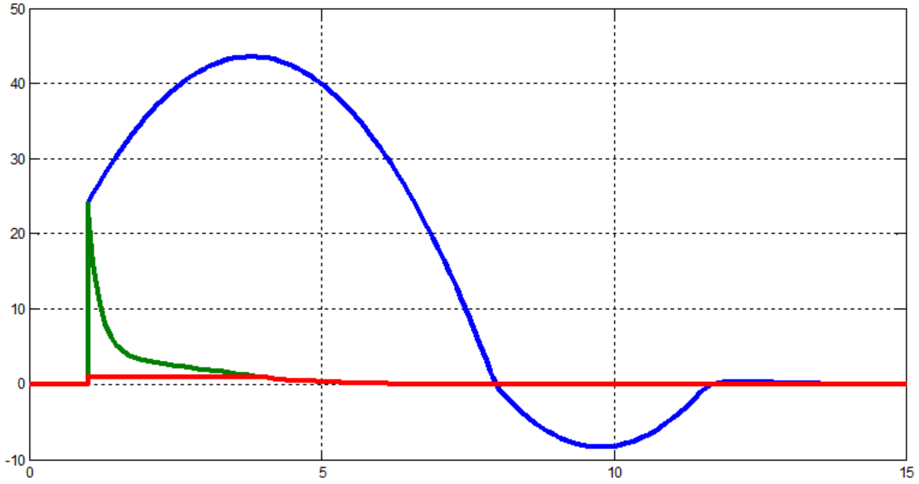
$$L(s)=s\qquad P(s)=6s+5$$

◆ 例5——Anti-Windup其他形式控制器举例

——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其他形式控制器举例

不稳定对象 $G(s)=\dfrac{1}{s-1}$

控制器 $L(s)=s$

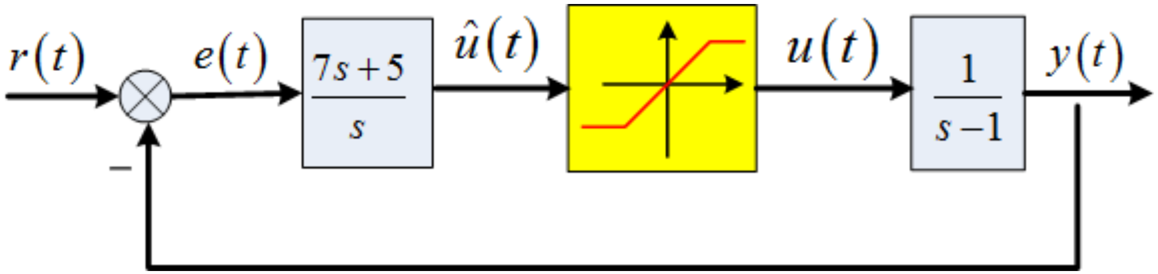
$P(s)=7s+5$

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）

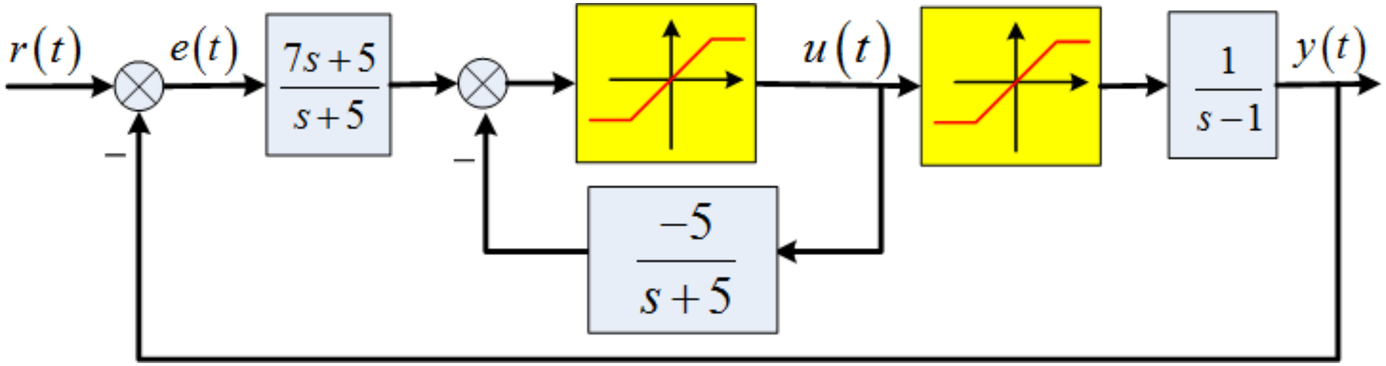
$$G_c(s)=\frac{\dfrac{7s+5}{s(s-1)}}{1+\dfrac{7s+5}{s(s-1)}}=\frac{7s+5}{s^2+6s+5}$$

◆ 例6——Anti-Windup其他形式控制器举例

闭环极点

——Anti-Windup 设计

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



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

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

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

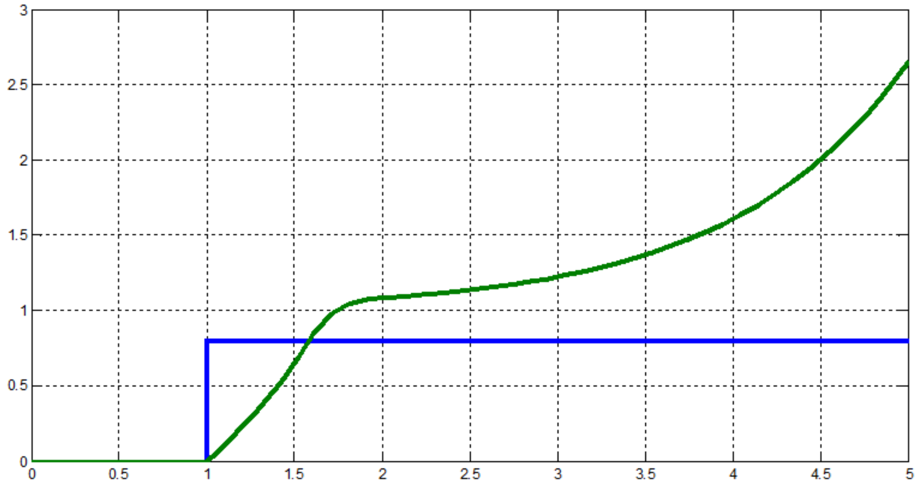
$$\boxed{C(s)=\frac{P(s)}{L(s)}}$$

控制系统框图
（Anti-Windup控制器）

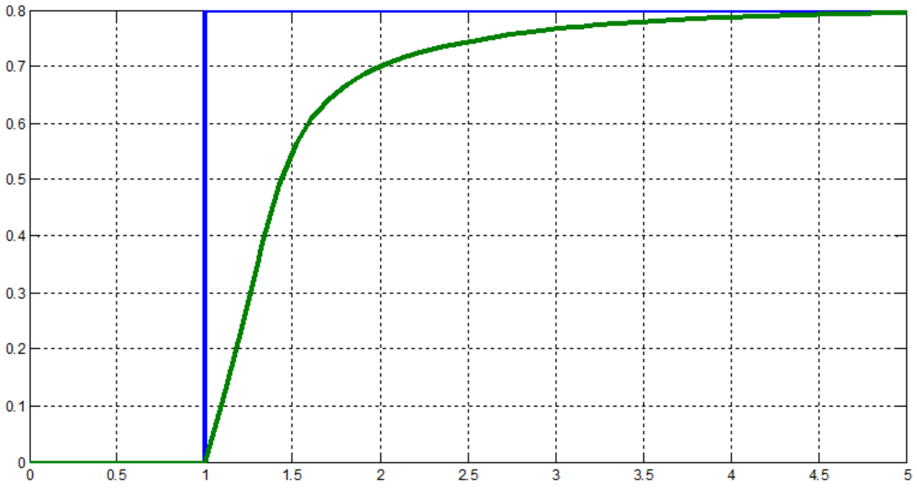
$$L(s)=s\qquad P(s)=7s+5$$

◆ 例6——Anti-Windup其他形式控制器举例

——Anti-Windup 设计仿真结果



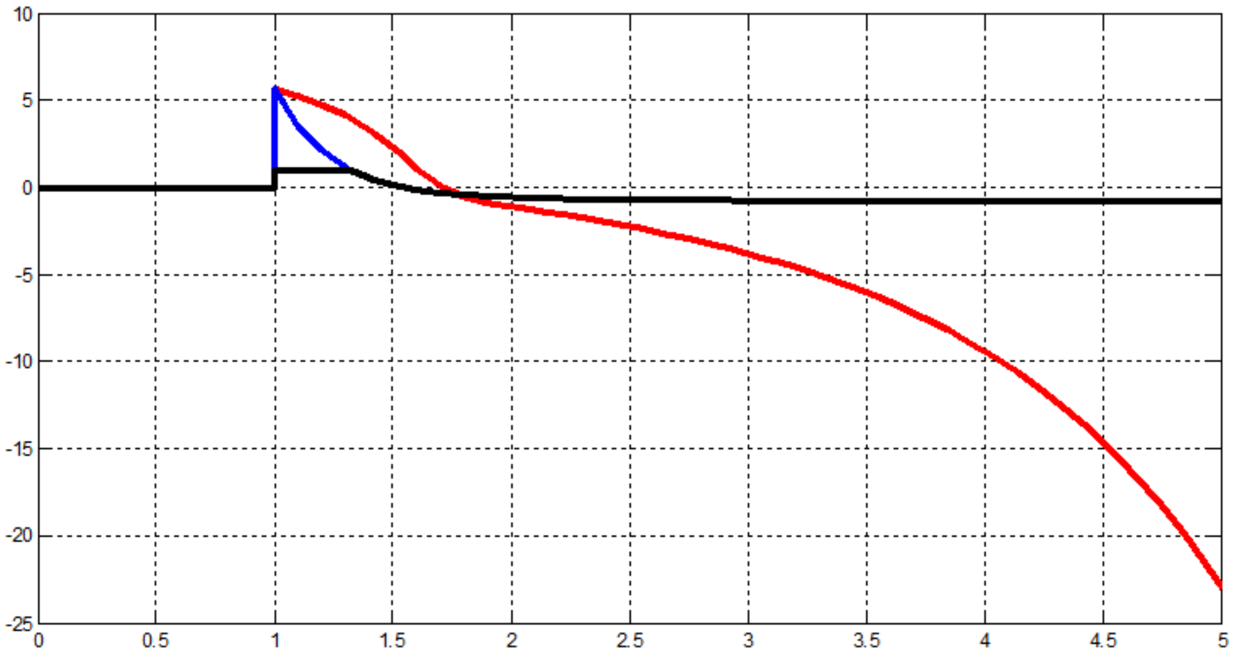
阶跃响应对比（r=0.8）
非Anti-Windup控制



阶跃响应对比（r=0.8）
Anti-Windup控制

◆ 例6——Anti-Windup其他形式控制器举例

——Anti-Windup 设计仿真结果



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

小 结

1. 执行器的饱和或转换速率限制并不总是能够完全避免，但可以通过多种措施减弱其对控制性能的影响。
2. 执行器进入饱和后，如不能及时退出饱和（如积分存在Windup时），则反馈作用被切断，系统处于开环状态，对于不稳定的被控对象，这是非常危险的。
3. 一个主要的Anti-Windup设计策略是**控制器的动态由对象的实际输入信号来驱动**，且此时控制器的动态是稳定的。

Thanks for your attention!