国家精品课程/ 国家精品资源共享课程/ 国家级精品教材
国家级十一(二)五规划教材/ 教育部自动化专业教学指导委员会牵头规划系列教材

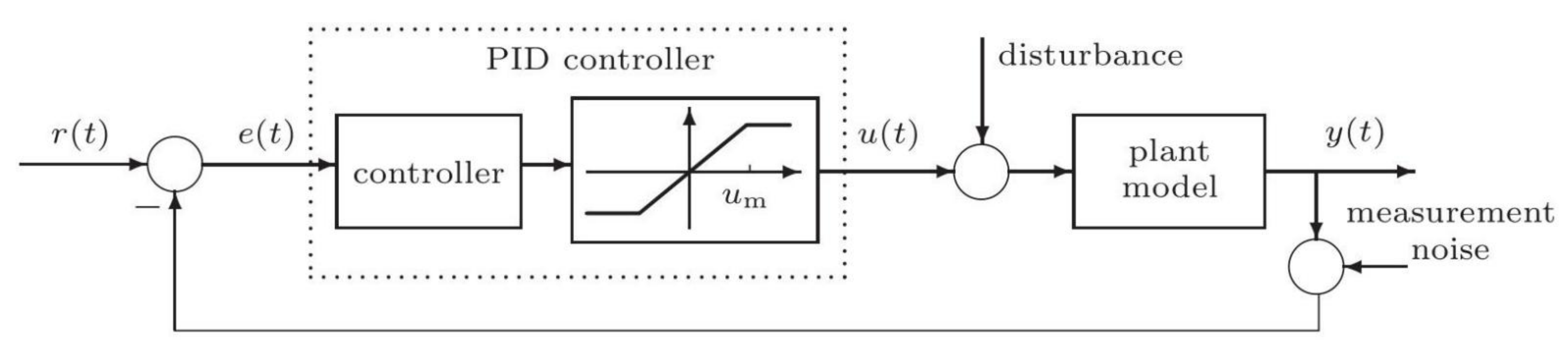
控制系统计算机辅助设计

第8章: PID控制器的参数整定

主讲: 修贤超

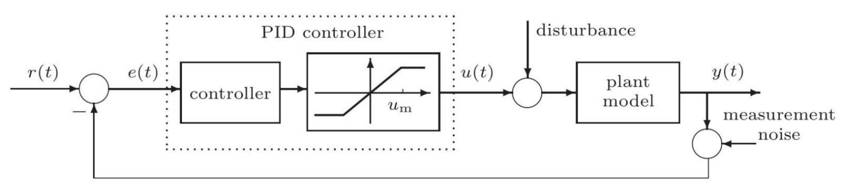
PID控制器设计概述

- PID控制结构



- 本节主要内容
  - 连续PID控制器与离散PID控制器
  - PID控制器的变形

连续PID控制器的数学模型



- PID控制器的一般形式

$$u(t)=K_{\mathrm{p}}e(t)+K_{\mathrm{i}}\int_0^t e(\tau)\mathrm{d}\tau+K_{\mathrm{d}}\frac{\mathrm{d}e(t)}{\mathrm{d}t}$$

- 两种基本表示模型
  - 标准型PID控制器

$$G_{\mathrm{c}}(s)=K_{\mathrm{p}}\left(1+\frac{1}{T_{\mathrm{i}}s}+\frac{T_{\mathrm{d}}s}{T_{\mathrm{d}}/Ns+1}\right)$$

G_{c}=`pidstd(`K_{p}`,`T_{i}`,`T_{d}`,`N`)`

  - 并联型PID控制器

$$G_{\mathrm{c}}(s)=K_{\mathrm{p}}+\frac{K_{\mathrm{i}}}{s}+\frac{K_{\mathrm{d}}s}{T_{\mathrm{f}}s+1}$$

G_{c}=`pid(`K_{p}`,`K_{i}`,`K_{d}`,`T_{f}`)`

离散PID控制器

- 微积分的离散近似 $\frac{\mathrm{d}e(t)}{\mathrm{d}t} \simeq \frac{e(kT)-e[(k-1)T]}{T}$

$$\int_0^{kT} e(t)\mathrm{d}t \simeq T\sum_{i=0}^{k} e(iT) = \int_0^{(k-1)T} e(t)\mathrm{d}t + Te(kT)$$

- 离散PID控制器的一般形式

$$u(kT) = K_\mathrm{p}e(kT) + K_\mathrm{i}T\sum_{m=0}^{k} e(mT) + \frac{K_\mathrm{d}}{T}\Big[e(kT) - e[(k-1)T]\Big]$$

- 简记 $u_k = K_\mathrm{p}e_k + K_\mathrm{i}T\sum_{m=0}^{k} e_m + \frac{K_\mathrm{d}}{T}(e_k - e_{k-1})$

两种不同的微分近似及PID控制器

- 后向Euler微分

$$u_k = K_\mathrm{p} e_k + K_\mathrm{i} T \sum_{m=0}^{k} e_m + \frac{K_\mathrm{d}}{T}(e_k - e_{k-1})$$

$$G_\mathrm{c}(z) = K_\mathrm{p} + \frac{K_\mathrm{i} T z}{z-1} + \frac{K_\mathrm{d}(z-1)}{Tz}$$

- 前向Euler微分

$$u_k = K_\mathrm{p} e_k + K_\mathrm{i} T \sum_{m=0}^{k+1} e_m + \frac{K_\mathrm{d}}{T}(e_{k+1} - e_k)$$

$$G_\mathrm{c}(z) = K_\mathrm{p} + \frac{K_\mathrm{i} T}{z-1} + \frac{K_\mathrm{d}(z-1)}{T}$$

例8-1 不同PID控制器输入

- 不同的控制器 $T=0.1$s

$$C_1(s)=1.5+\frac{5.2}{s}+3.5s,\ C_2(s)=1.5\left(1+\frac{3.5s}{1+0.035s}\right)$$

$$C_3(z)=1.5+\frac{5.2}{z-1}+3.5(z-1),\ C_4(z)=1.5\left(1+\frac{z}{5.2(z-1)}+\frac{3.5(z-1)}{z}\right)$$

- MATLAB输入语句

```
>> C1=pid(1.5,5.2,3.5,0), C2=pidstd(1.5,inf,3.5,100)
   C3=pid(1.5,52,0.35,0,0.1)
   C4=pidstd(1.5,52,0.35,inf,0.1,'IFormula','backward')
```

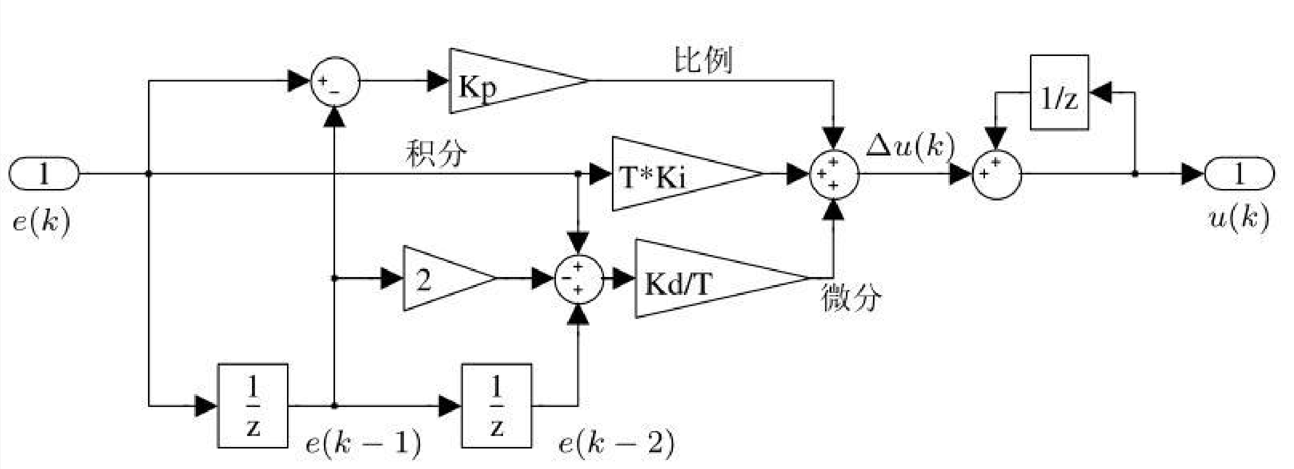
变形的PID控制器

- 积分分离式PID控制器
  - 误差大时关闭 I，快速跟踪
  - 误差小时开启 I，消除静态误差
- 离散增量式PID控制器
  - 误差的积分累加计算麻烦
  - 可以引入增量来计算积分量
  - 控制量的增量

$$u_k - u_{k-1} = K_{\mathrm{p}}(e_k - e_{k-1}) + K_{\mathrm{i}}Te_k + \frac{K_{\mathrm{d}}}{T}(e_k + e_{k-2} - 2e_{k-1})$$

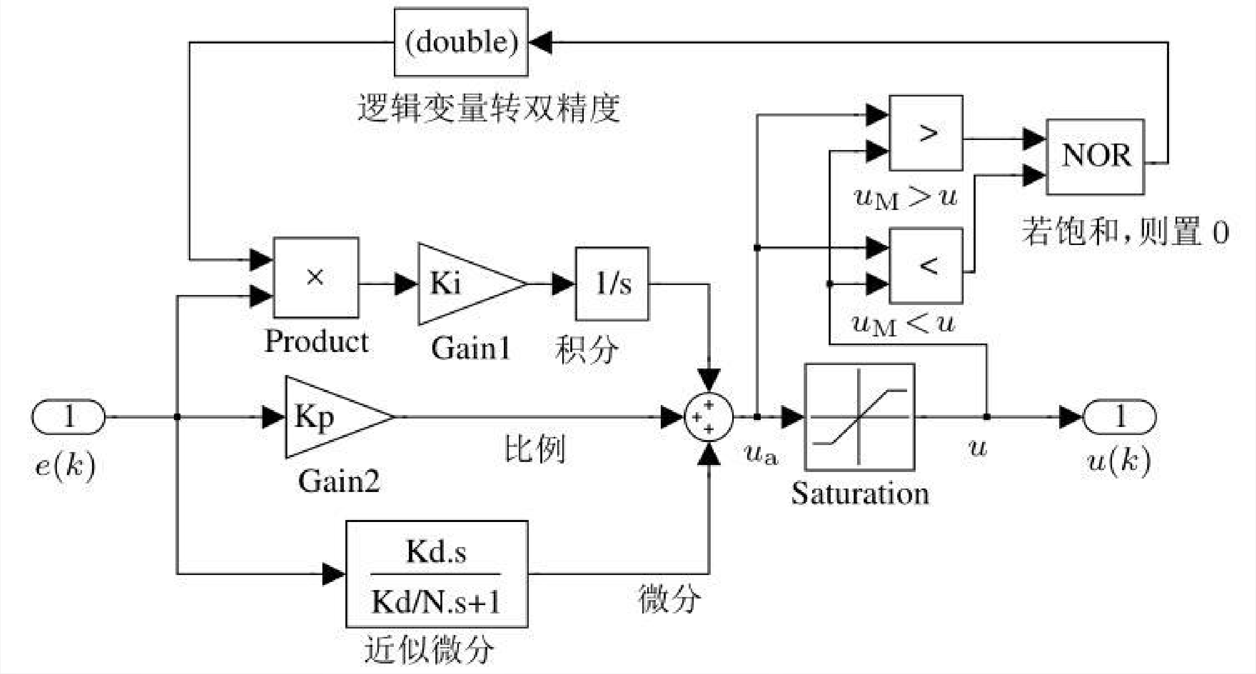
增量式PID控制器

- 控制量计算 $u_k = u_{k-1} + \Delta u_k$
- 增量式PID控制器Simulink框图
  - 文件名：c8mdpid1.mdl



抗积分饱和PID控制器

- 抗积分饱和（anti-windup）
- PID控制器结构：c8mantiw.mdl



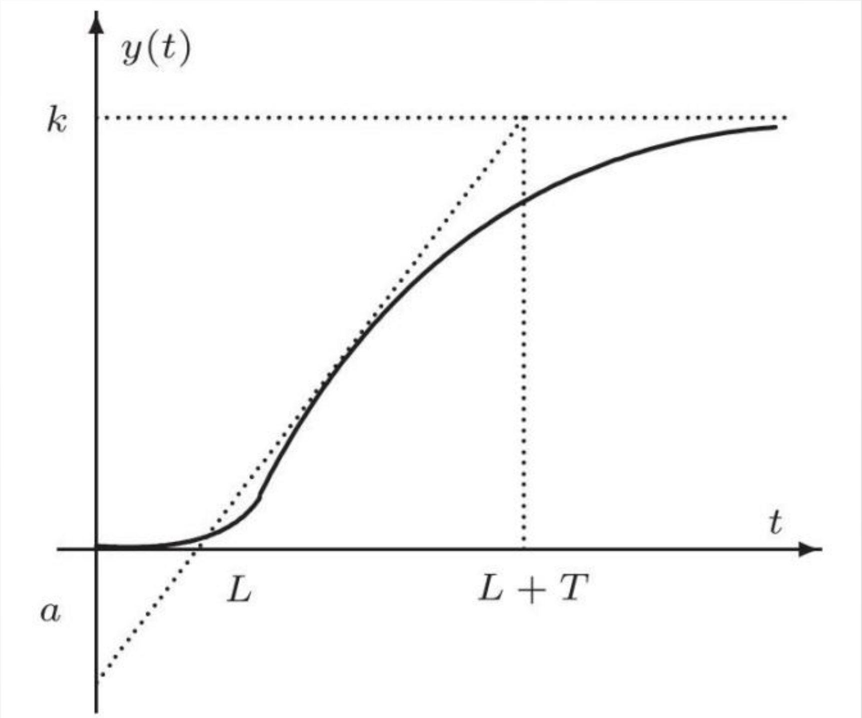
PID控制器设计经典方法

- 常用过程对象一阶延迟模型(FOPDT)的获取
- 基于FOPDT的设计方法
  - Ziegler-Nichols经验公式
  - MATLAB实现
- 其他模型类型的直接设计
  - MATLAB直接求解
  - 存在的问题——设计方法；非线性

过程对象的一阶延迟近似

- 常见近似模型 FOPDT $$G(s)=\frac{k}{Ts+1}\mathrm{e}^{-Ls}$$
- 问题，如何求出 k, L, T
  - 由响应曲线识别一阶模型
  - 基于频域响应的近似方法
  - 基于传递函数的辨识方法
  - 最优降阶方法
- 基于MATLAB的求解

$[K,L,T,G_c]$=getfopdt(key,G)



例8-2 参数识别

- 受控对象 $G(s) = \dfrac{1}{(s+1)^5}$
- 获取FOPDT模型的方法

```
>> s=tf('s'); G=1/(s+1)^5;
   [K1,L1,T1,G1]=getfopdt(1,G),
   [K2,L2,T2,G2]=getfopdt(2,G)
   [K3,L3,T3,G3]=getfopdt(3,G)
   [K4,L4,T4,G4]=getfopdt(4,G)
   step(G,'-',G1,':',G2,'*',G3,'--',G4,'-.',15)
```

Ziegler-Nichols经验公式

- 1942年Ziegler与Nichols的一篇经典文章
- 已知：k, L, T 参数　　　　$a = KL/T$
- 求解PID类控制器参数
- 查表方法（直接计算、编MATLAB程序）

控制器类型	由阶跃响应整定			由频域响应整定		
	K_p	T_i	T_d	K_p	T_i	T_d
P	$1/a$			$0.5K_\mathrm{c}$		
PI	$0.9/a$	$3L$		$0.4K_\mathrm{c}$	$0.8T_\mathrm{c}$	
PID	$1.2/a$	$2L$	$L/2$	$0.6K_\mathrm{c}$	$0.5T_\mathrm{c}$	$0.12T_\mathrm{c}$

基于MATLAB的设计程序

- 直接设计

$$[G_c, K_p, T_i, T_d] = \mathtt{ziegler(key,vars)}$$

- 时域公式直接设计 $\mathtt{vars} = [K, L, T, N]$
- 频域公式直接设计

$$\mathtt{vars} = [K_c, T_c, N],\ K_c,\ T_c = 2\pi/\omega_c$$

- 改进方法 —— 可调参数 r_b, ϕ_b

$$[G_c, K_p, T_i, T_d] = \mathtt{ziegler(key,}[K_c, T_c, r_b, \phi_b, N]\mathtt{)}$$

例8-3 直接设计

K_p	T_i	T_d
$1/a$		
$0.9/a$	$3L$	
$1.2/a$	$2L$	$L/2$

- 受控对象 $G(s) = \dfrac{0.1}{(s+1)^6}$
- 直接设计 $k = 0.1,\ T = 2.883,\ L = 3.37$
- 控制器设计与效果比较

```
>> s=tf('s'); G=0.1/(s+1)^6; N=10;
   K=0.1; T=2.883; L=3.37; a=K*L/T;
   Kp=0.9/a; Ti=3*L; G1=Kp*(1+tf(1,[Ti 0]));
   Kp=1.2/a; Ti=2*L; Td=0.5*L; p=[Kp,Ti,Td]
>> G2=Kp*(1+tf(1,[Ti,0])+tf([Td 0],[Td/N 1]));
   step(feedback(G*G1,1),'-',feedback(G*G2,1),'--')
```

不同设计方法设计的控制器

K_p	T_i	T_d
$0.5K_c$		
$0.4K_c$	$0.8T_c$	
$0.6K_c$	$0.5T_c$	$0.12T_c$

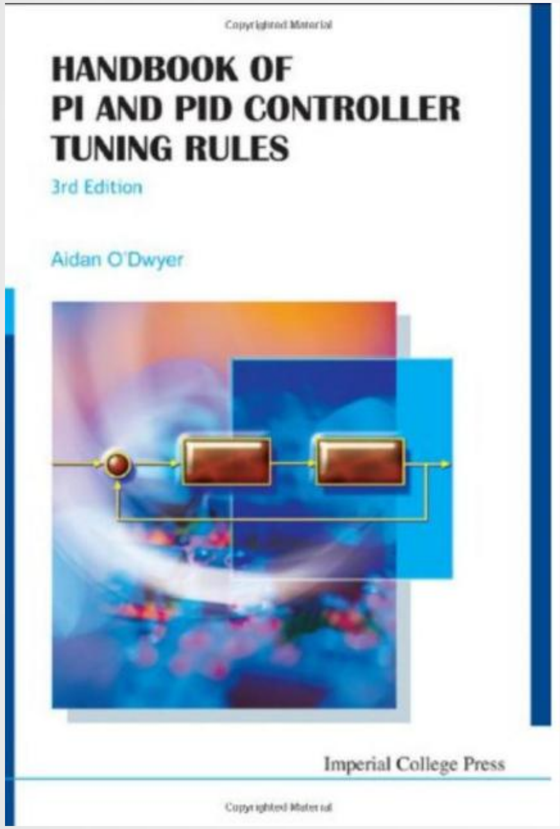
➢ 频率响应数据设计

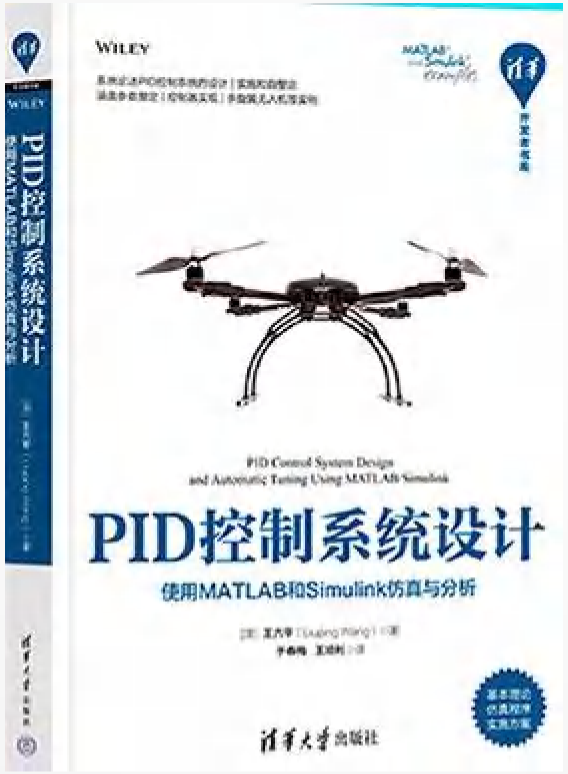
```
>> [Kc,b,wc,d]=margin(G); Tc=2*pi/wc;
   Kp=0.4*Kc; Ti=0.8*Tc; G1=Kp*(1+tf(1,[Ti 0]));
   Kp=0.6*Kc; Ti=0.5*Tc; Td=0.12*Tc;
   G2=Kp*(1+tf(1,[Ti,0])+tf([Td 0],1));
   step(feedback(G*G1,1),'-',feedback(G*G2,1),'--')
```

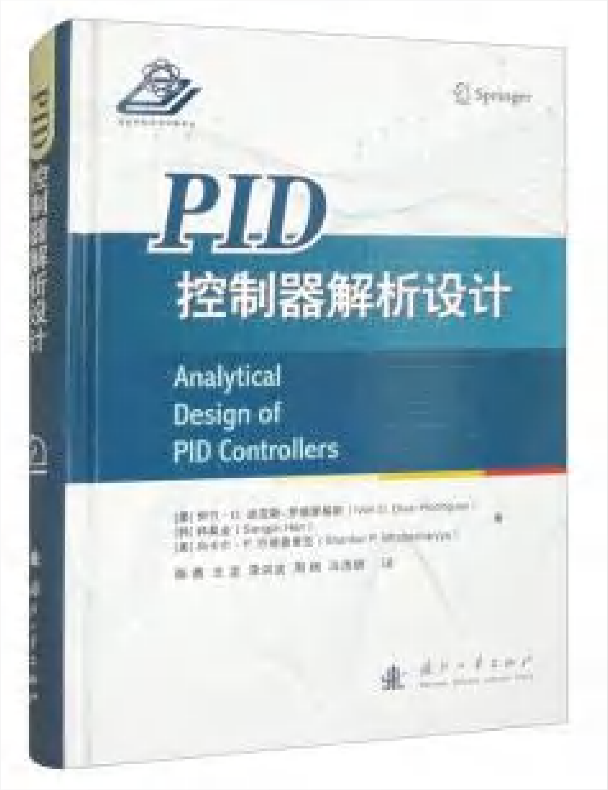
➢ 改进设计方法

```
>> s=tf('s'); G=0.1/(s+1)^6;
   G1=pidtune(G,'pi'), G2=pidtune(G,'pid')
   step(feedback(G*G1,1),feedback(G*G2,1))
```

其他基于模型的设计方法







MATLAB提供的设计函数

- Ziegler-Nichols 类方法的局限性
  - 只能用于 FOPDT 受控对象模型
  - 需要任意受控对象的PID控制器设计程序
- MATLAB的 pidtune 函数可以用于任意SISO LTI对象
  - 选项 —— p, i, pi, pd, pdf, pid, pidf

G_c=pidtune(G,'pi',ω_c), G_c=pidtune(G,'pid',ω_c)

```
>> s=tf('s'); G=0.1/(s+1)^6;
   G1=pidtune(G,'pi'), G2=pidtune(G,'pidf')
   step(feedback(G*G1,1),feedback(G*G2,1))
```

例8-4 复杂受控对象的

- 受控对象

$$G(s)=\frac{1+\dfrac{3\mathrm{e}^{-s}}{s+1}}{s+1}$$

- 设计命令
  - 用LTI模型表示复杂受控对象模型，直接设计控制器

```
>> s=tf('s'); G1=3/(s+1); G1.ioDelay=1;
   G=(1+G1)/(s+1);
   Gc1=pidtune(G,'pi'), Gc2=pidtune(G,'pidf')
   step(feedback(Gc1*G,1),feedback(Gc2*G,1))
```

不稳定模型的PID控制器设计

- 不稳定受控对象 $G(s)=\dfrac{s+2}{s^4+8s^3+4s^2-s+0.4}$,
- PID控制器

```
>> s=tf('s'); G=(s+2)/(s^4+8*s^3+4*s^2-s+0.4);
   Gc=pidtune(G,'pidf'), step(feedback(Gc*G,1))
```

```
>> Gc=pidtune(G,'pidf',1), step(feedback(Gc*G,1))
```

- 真需要这么大的调节时间吗？
- 控制信号的曲线

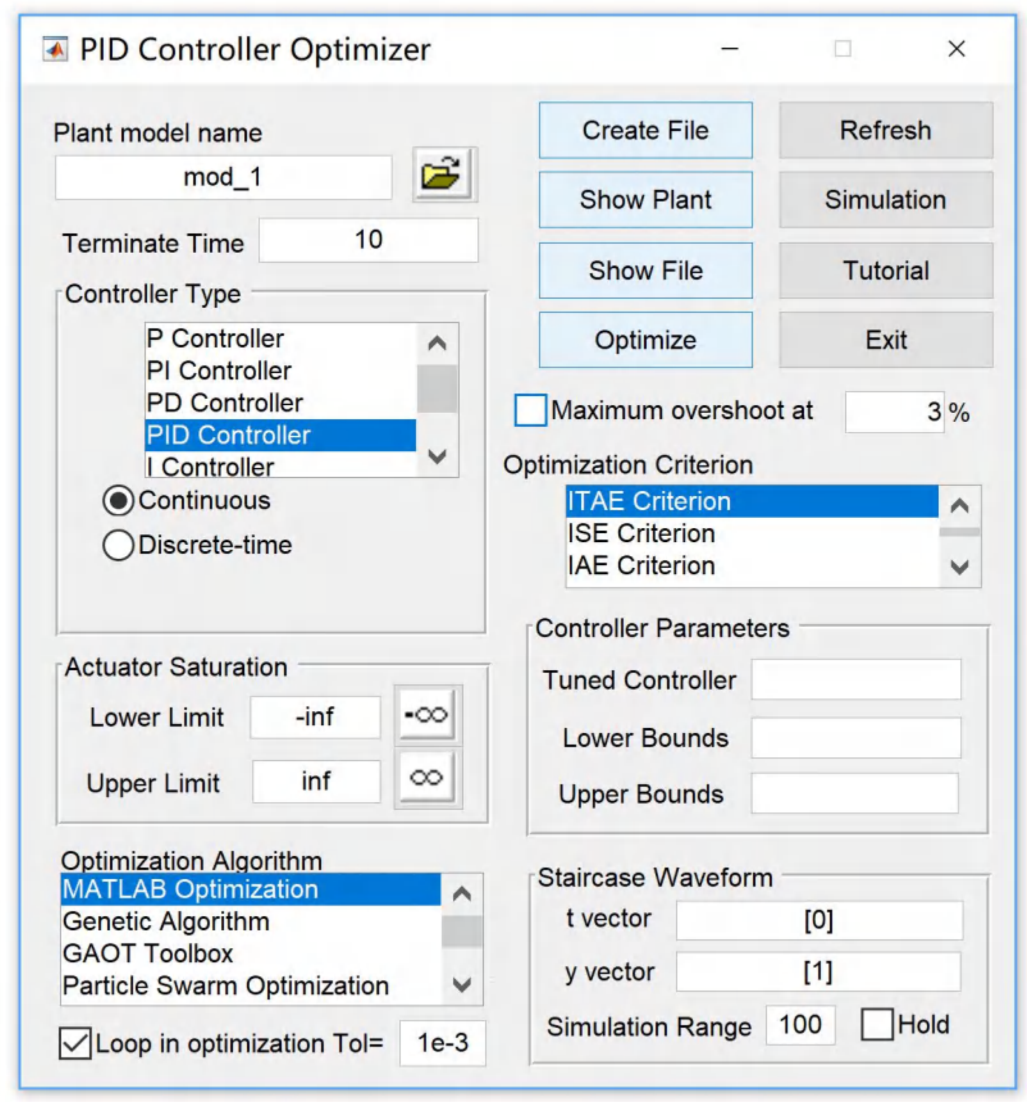
```
>> step(feedback(Gc,G))
```

由OptimPID直接设计

- 线性模型参数输入

```
>> num=[1,2]; den=[1 8 4 -1 0.4];
   G=tf(num,den); tau=0;
```

- 控制器的驱动饱和 $|u(t)|<5$
- 如何设计控制器
  - 直接采用LTI模型的模板 mod_lti
  - 选择终止仿真设计 $t_n=10$
  - 控制器类型、ITAE准则
- c6mcompc



PID控制器小结

- 两种不同的连续PID控制器
  - 直接输入方法：pid, pidstd
- 离散PID控制器
  - 积分算法
  - 特殊结构

PID经典设计小结

- 针对一大类过程模型的近似设计方法
  - FOPDT模型的参数识别方法
  - 针对FOPDT模型的设计方法，Ziegler Nichols方法
  - 二自由度PID控制结构与设计
  - 存在的问题 —— 算法繁杂，不宜比较
- MATLAB提供的设计函数
  - 简单使用，效果良好
  - 不能处理时变模型、非线性模型等，效果有待改进

Q & A

感谢您的聆听和反馈