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

控制系统仿真与CAD

第十章 智能控制器设计方法

自抗扰控制

Auto Disturbances Rejection Control

主讲：薛定宇教授

自抗扰控制

- 自抗扰控制
  - 199x年有韩京清研究员提出的控制策略
  - 控制器设计时无需受控对象模型的参数
- 有三个组成部分
  - 微分跟踪器
  - 扩张状态观测器
  - 自抗扰控制器

微分跟踪器

➢ 数学模型

$$\begin{cases} x_1(k+1) = x_1(k) + Tx_2(k) \\ x_2(k+1) = x_2(k) + T\mathrm{fst}(x_1(k), x_2(k), u(k), r, h) \end{cases}$$

$$\delta = rh, \quad \delta_0 = \delta h, \quad b = x_1 - u + hx_2, \quad a_0 = \sqrt{\delta^2 + 8r|b|}$$

$$a = \begin{cases} x_2 + b/h, & |b| \leqslant \delta_0 \\ x_2 + 0.5(a_0 - \delta)\mathrm{sign}(b), & |b| > \delta_0 \end{cases}$$

$$\mathrm{fst} = \begin{cases} -ra/\delta, & |a| \leqslant \delta \\ -r\mathrm{sign}(a), & |a| > \delta \end{cases}$$

S-函数(状态方程)的实现

- S-函数入口语句

function [sys, x_0, str, ts]=fun(t, x, u, flag, p_1, p_2, $\cdots$)

- S-函数的基本框架

```
switch flag
case 0, [sys,x0,str,ts] = mdlInitializeSizes(T);
case 1, sys = mdlDeravitivess(x,u,r,h,T);
case 2, sys = mdlUpdates(x,u,r,h,T);
case 3, sys = mdlOutputs(x);
end
```

扩张的状态观测器

➤ 数学模型

$$\begin{cases} z_1(k+1) = z_1(k) + T[z_2(k) - \beta_{01}e(k)] \\ z_2(k+1) = z_2(k) + T[z_3(k) - \beta_{02}\mathrm{fal}(e(k), 1/2, \delta) + bu(k)] \\ z_3(k+1) = z_3(k) - T\beta_{03}\mathrm{fal}(e(k), 1/4, \delta), \end{cases}$$

其中 $e(k) = z_1(k) - y(k)$

$$\mathrm{fal}(e, a, \delta) = \begin{cases} e\delta^{a-1}, & |e| \leqslant \delta \\ |e|^a \mathrm{sign}(e), & |e| > \delta. \end{cases}$$

扩张状态观测器的S-函数实现

- 选择参数，设计状态观测器主函数
  - 输入输出路数、连续离散状态变量个数

```
function [sys,x0,str,ts]=han_eso(t,x,u,flag,a2,d,bet,b,T)
switch flag
    case 0, [sys,x0,str,ts] = mdlInitializeSizes;
    case 2, sys = mdlUpdates(x,u,d,bet,b,T);
    case 3, sys = x;
    case {1, 4, 9}, sys = [];
    otherwise, error(['Unhandled flag = ',num2str(flag)]);
end
```

扩张状态观测器支持函数

```
function [sys,x0,str,ts] = mdlInitializeSizes
sizes = simsizes;
sizes.NumContStates = 0; sizes.NumDiscStates = 3;
sizes.NumOutputs = 3; sizes.NumInputs = 2;
sizes.DirFeedthrough = 0; sizes.NumSampleTimes = 1;
sys = simsizes(sizes);
x0 = [0; 0; 0]; str = []; ts = [-1 0];
function sys = mdlUpdates(x,u,d,bet,b,T)
e=x(1)-u(2);
sys=[x(1)+T*(x(2)-bet(1)*e);
     x(2)+T*(x(3)-bet(2)*fal(e,0.5,d)+b*u(1));
     x(3)-T*bet(3)*fal(e,0.25,d)];
function f=fal(e,a,d)
if abs(e)<d, f=e*d^(a-1); else, f=(abs(e))^a*sign(e); end
```

自抗扰控制器

- 数学模型

$$
\begin{cases}
e_1 = v_1(k) - z_1(k), \quad e_2 = v_2(k) - z_2(k) \\
u_0 = \beta_1 \mathrm{fal}(e_1, a_1, \delta_1) + \beta_2 \mathrm{fal}(e_2, a_2, \delta_1) \\
u(k) = u_0 - z_3(k)/b,
\end{cases}
$$

- 其中
  - 方程没有连续、离散状态
  - 输入信号为 $\boldsymbol{m}(t)=[v_1(t), v_2(t), z_1(t), z_2(t), z_3(t)]$
  - 输出信号为 $u(t)$

自抗扰控制器S-函数实现

- 主函数

```
function [sys,x0,str,ts]=han_ctrl(t,x,u,flag,aa,bet1,b,d)
switch flag,
case 0, [sys,x0,str,ts] = mdlInitializeSizes(t,u,x);
case 3, sys = mdlOutputs(t,x,u,aa,bet1,b,d);
case {1,2,4,9}, sys = [];
otherwise, error(['Unhandled flag = ',num2str(flag)]);
end;
```

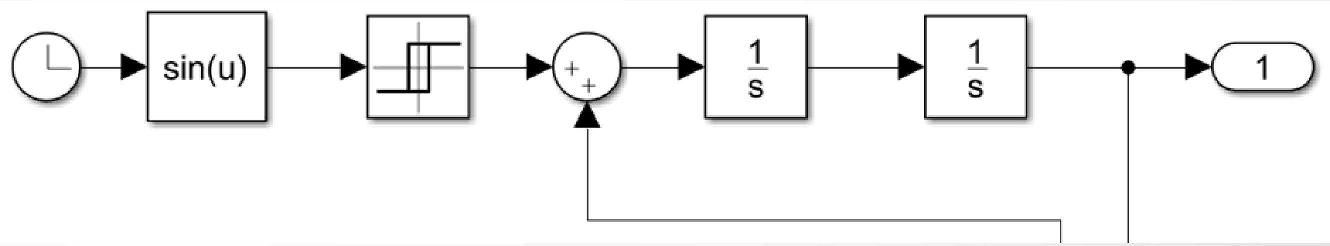
支持函数

输入信号为 $\boldsymbol{m}(t)=[v_1(t), v_2(t), z_1(t), z_2(t), z_3(t)]$
输出信号为 $u(t)$

```
function [sys,x0,str,ts] = mdlInitializeSizes(t,u,x)
sizes = simsizes;
sizes.NumContStates = 0; sizes.NumDiscStates = 0;
sizes.NumOutputs = 1; sizes.NumInputs = 5;
sizes.DirFeedthrough = 1; sizes.NumSampleTimes = 1;
sys = simsizes(sizes); x0 = []; str = []; ts = [-1 0];
function sys = mdlOutputs(t,x,u,aa,bet1,b,d)
e1=u(1)-u(3); e2=u(2)-u(4);
u0=bet1(1)*fal(e1,aa(1),d)+bet1(2)*fal(e2,aa(2),d); sys=u0-u(5)/b;
function f=fal(e,a,d)
if abs(e)<d, f=e*d^(a-1); else, f=(abs(e))^a*sign(e);
```

例10-4 自抗扰控制器仿真

- 时变受控对象模型



$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2(t) \\ \dot{x}_2(t) = \mathrm{sign}(\sin t) + u(t). \end{cases}$$

$$y(t) = x_1(t)$$

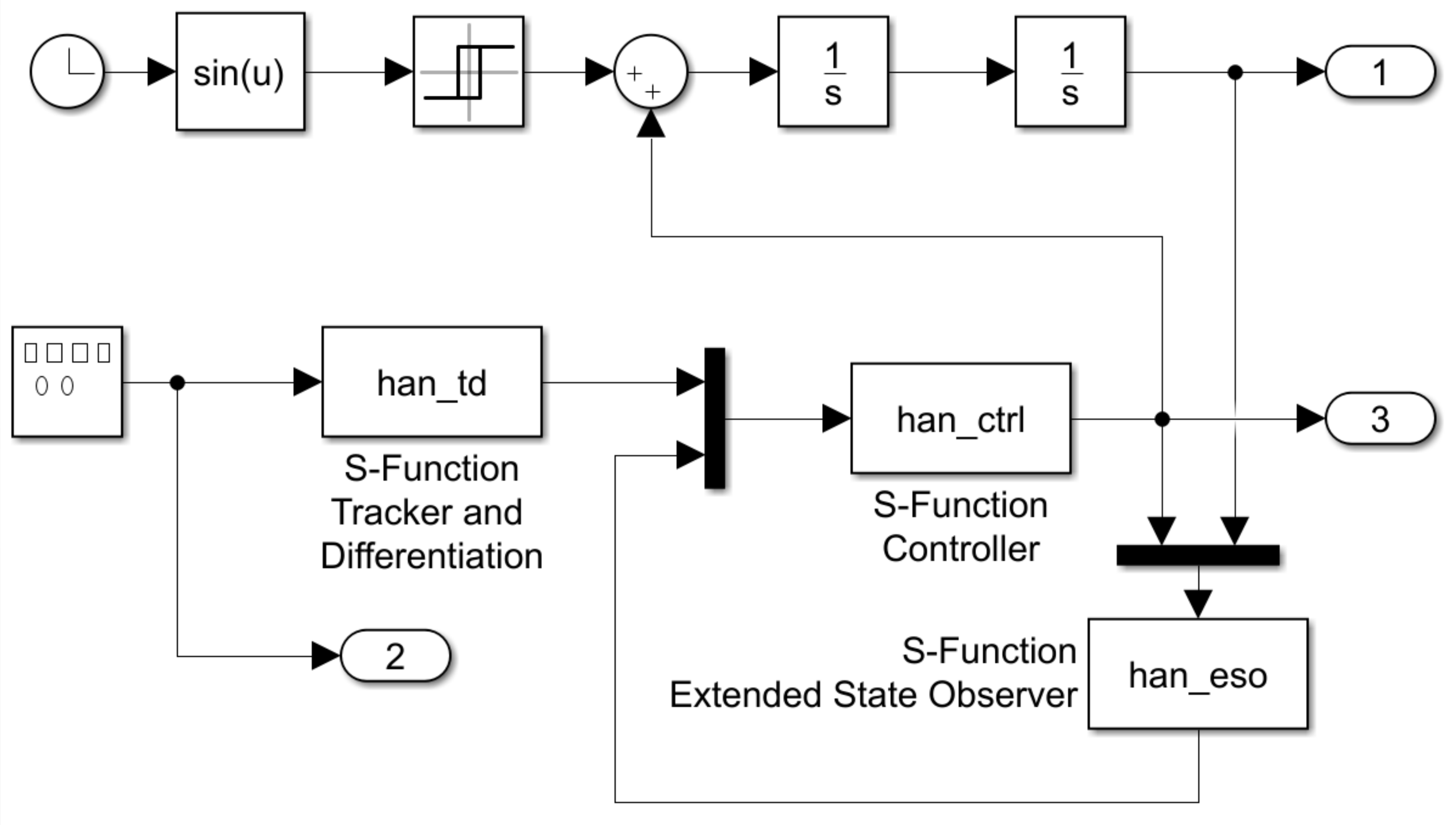
- 搭建仿真框图 ex_han2.slx
- 控制器参数

```
>> r=10; h=0.01; T=0.001; bet=[100 65 80]; bet1=[100,10];
   aa=[0.75 1.25]; d=0; b=1;
```

仿真模型

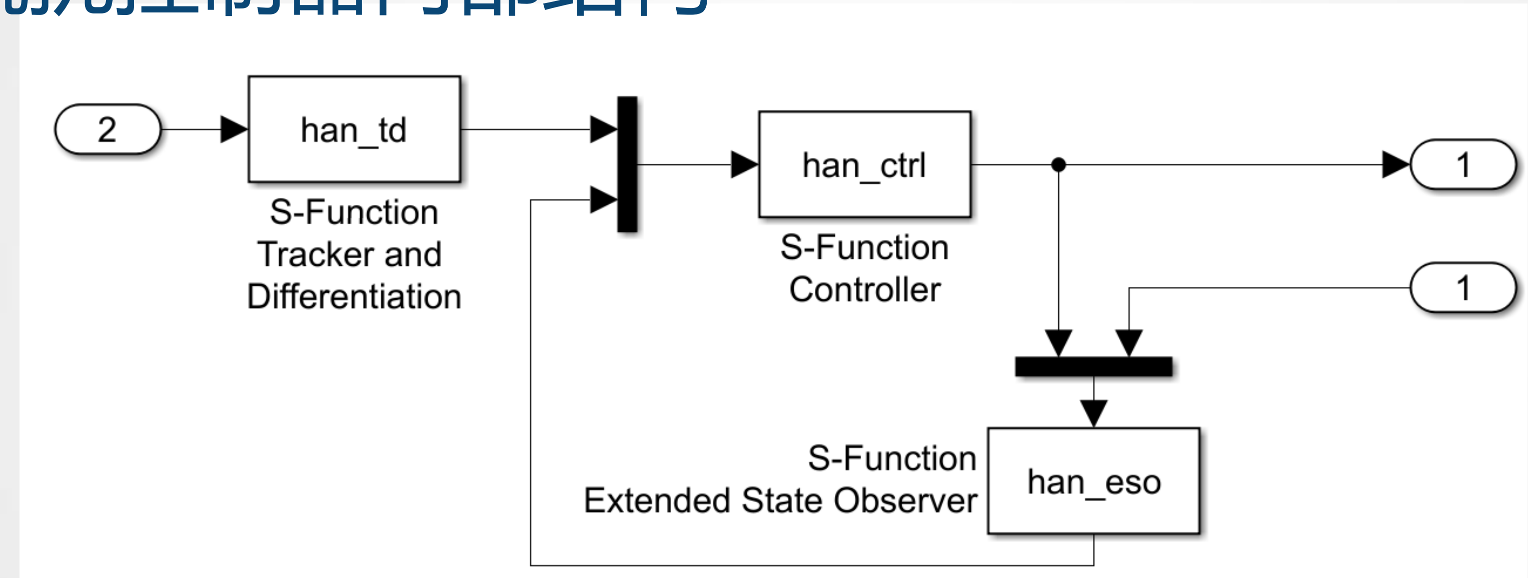
➢ 受控对象

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2(t) \\ \dot{x}_2(t) = \mathrm{sign}(\sin t) + u(t) \end{cases}$$



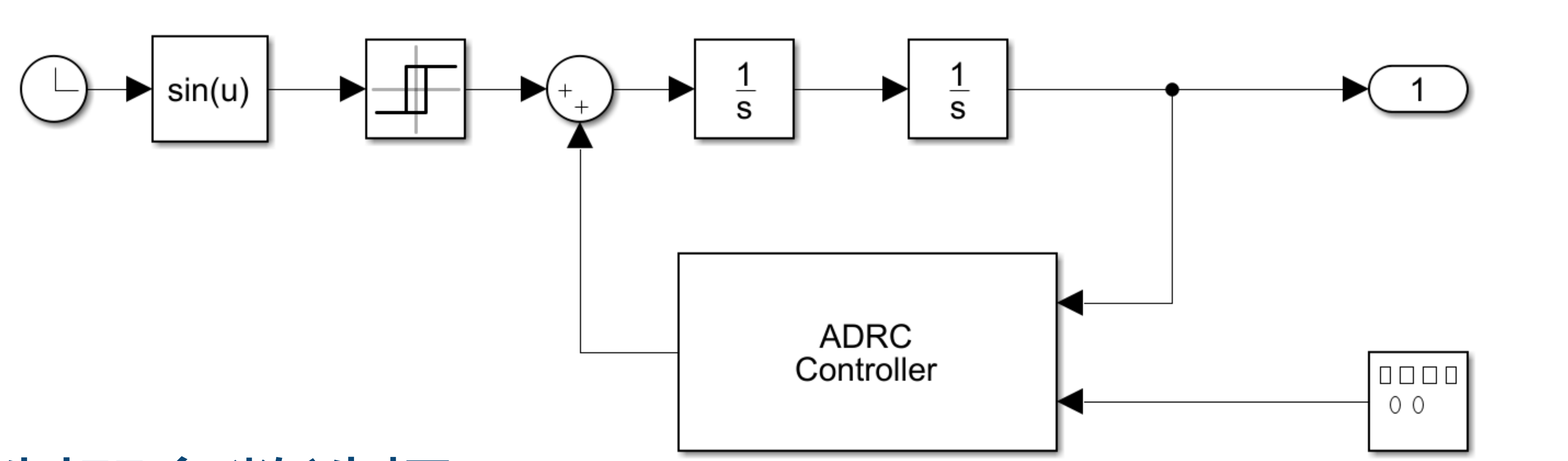
ADRC控制器模块封装

➢ 自抗扰控制器内部结构



自抗扰控制器仿真

➢ 新的系统框图



➢ 控制器参数选择

```
>> r=10; h=0.01; T=0.001; bet=[100 65 80]; bet1=[100,10];
   aa=[0.75 1.25]; d=0; b=1;
```

自抗扰控制设计小结

- 自抗扰控制的三个组成部分
  - 微分跟踪器
  - 扩张的状态观测器
  - 自抗扰控制器
- 数学模型与S-函数实现
- 自抗扰控制系统的仿真与设计

薛定宇教授主讲

东北大学

NORTHEASTERN UNIVERSITY 1923

控制系统仿真与CAD