

“模糊控制位置跟踪的 SIMULINK 仿真：

设被控对象的传递函数为 $G(s) = \frac{2500}{s^2 + 25s} \cdot e^{-0.002s}$ ，输入信号为方波，周期为 1 秒，幅值为 1，可以用 Pulse Generator 模块来产生， $e^{-0.002s}$ 表示传输延时 0.002s (2ms)，可以用 Transport Delay 模块来表示。

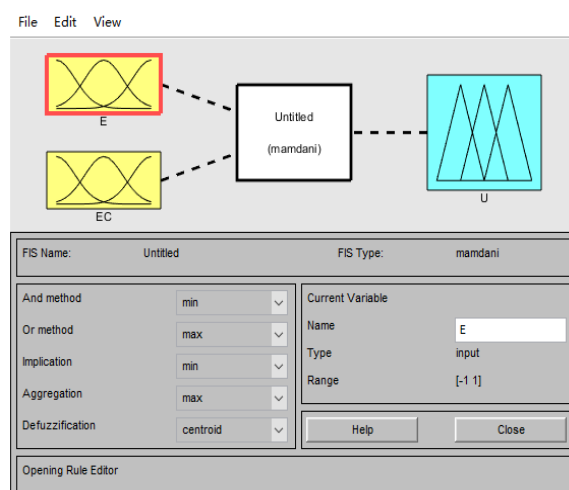
- 1) 试设计两输入单输出模糊控制器, 输入为偏差 E 和偏差变化率 EC, 输出为控制量 U, 使系统输出能实时跟踪输入信号。
- 2) 通过仿真实解并分析 E 和 EC 的参数选择对系统稳态误差和动态性能的影响, 这些参数包括量化因子, 论域的范围, 模糊子集个数等。作业中最好把不同参数下的仿真结果附上。
- 3) 能否采用 fuzzy-pid 混合控制等改进方法, 进一步提高控制系统的性能。
- 4) 仿真采用固定步长求解器, 步长设定为 1e-4。

Solutions

一、两输入单输出模糊控制器的设计

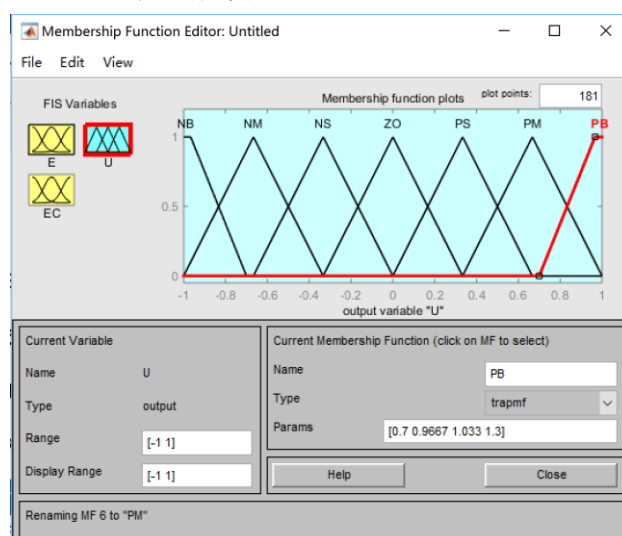
1. 确定模糊控制器的输入变量、输出变量和各自论域

输入为偏差 E 和偏差变化率 EC ，输出为控制量 U ，进行归一化处理，使得所有变量的论域范围均为 $[-1, 1]$ 。



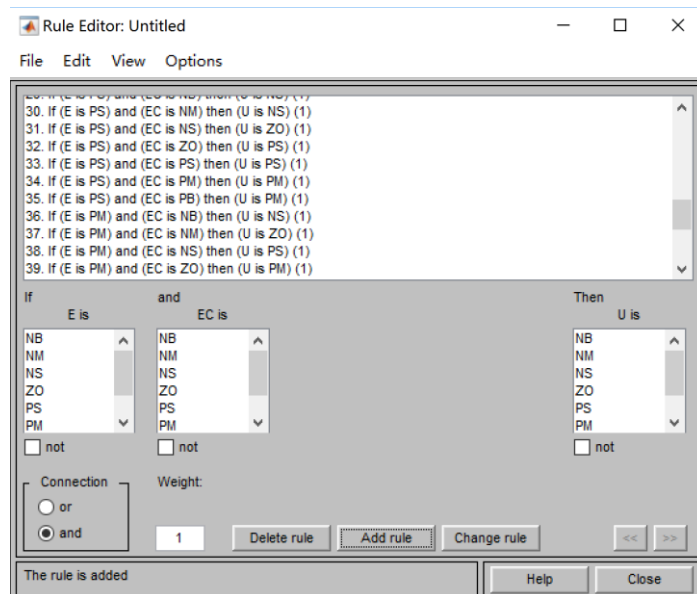
2. 输入输出空间的模糊分割

E 、 EC 、 U 的模糊子集均取为 $\{NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB\}$ ，除 $NB \setminus PB$ 采用 trapmf 外其他模糊子集隶属度函数采用 trimf

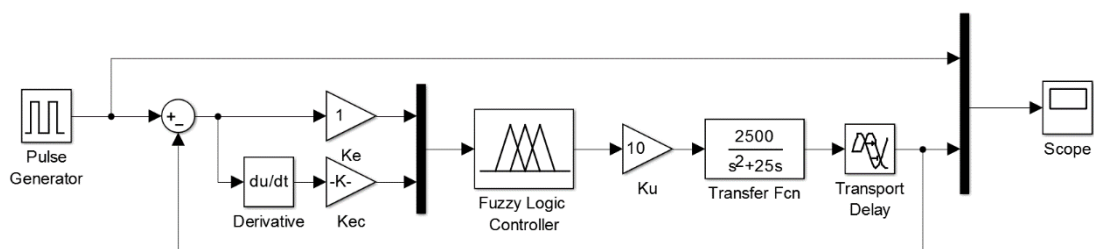


3. 确定模糊控制规则

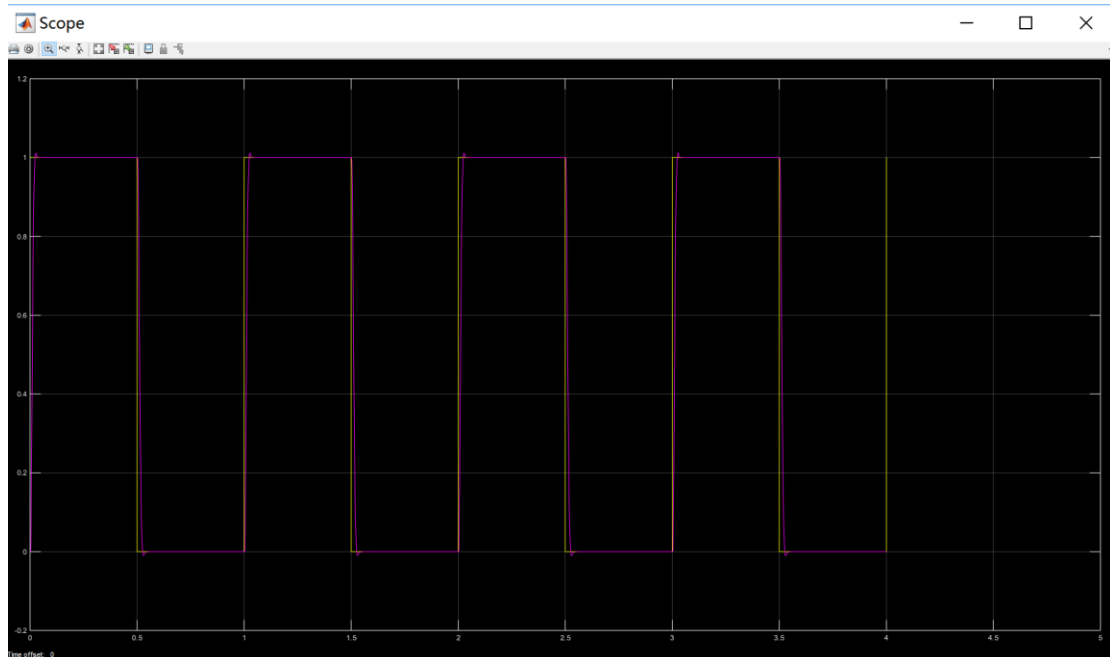
EC \ E	U						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	PS
NS	NM	NM	NM	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	NS	NS	ZO	PS	PS	PM	PM
PM	NS	ZO	PS	PM	PM	PM	PB
PB	ZO	ZO	PM	PM	PM	PB	PB



二、建立 SIMULINK 系统模型

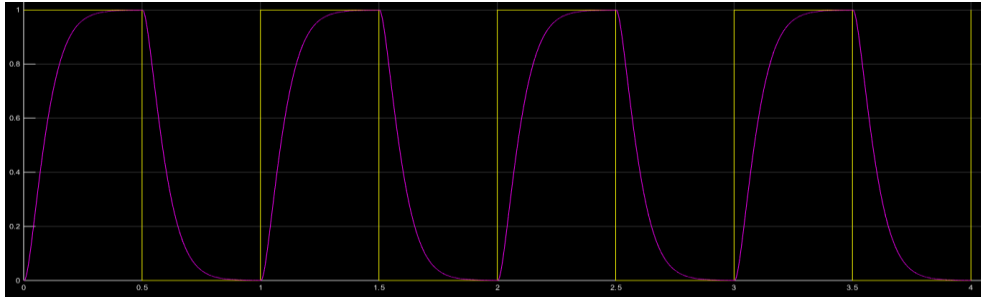


通过多次调节，得到合适的量化因子， $K_e=1$ ， $K_{ec}=0.009$ ， $K_u=10$ ，系统输入输出曲线如下图：

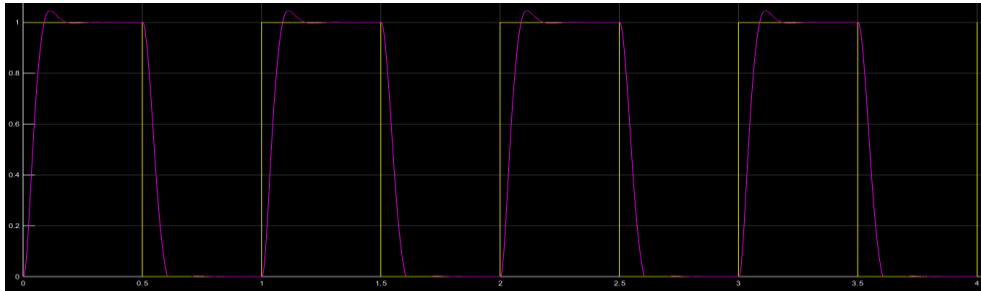


三、分析 E 和 EC 的参数选择对系统稳态误差和动态性能的影响

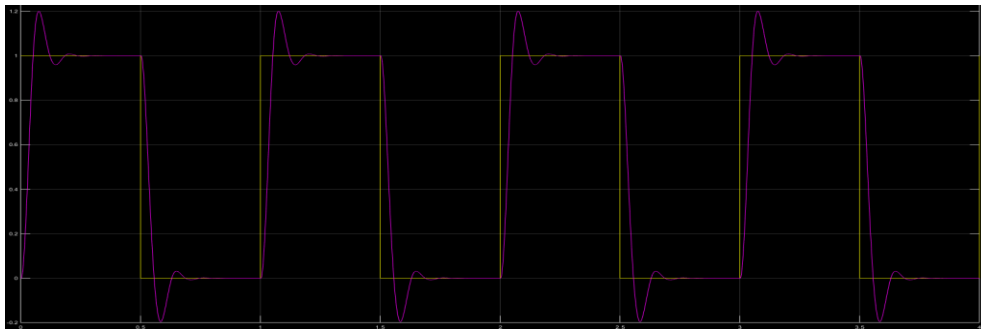
1. 量化因子和比例因子
 - 1) 保持 $K_{ec}=0.009$ ， $K_u=1$ ，改变 K_e



$K_{ec}=0.009, K_u=1, K_e=0.2$



$K_{ec}=0.009, K_u=1, K_e=0.5$



$K_{ec}=0.009, K_u=1, K_e=1$

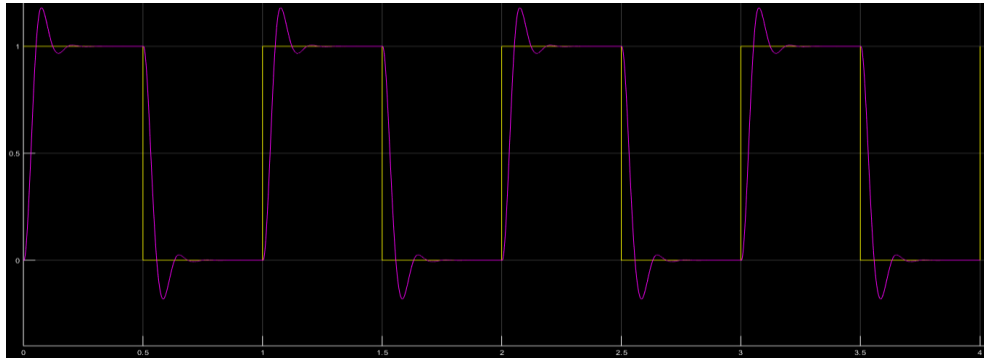
K_e 越大, 上升速率越大, 调节时间越短, 超调量越大, 但是 K_e 取得越大, 将使系统产生较大的超调, 调节时间增大, 甚至发生震荡, 使系统不能稳定工作, 而 K_e 过小, 又使系统上升速率减小, 系统调节惰性变大, 同时也影响系统的稳态性能, 使稳态精度降低。

一般而言, K_e 增加, 稳态误差将减小。

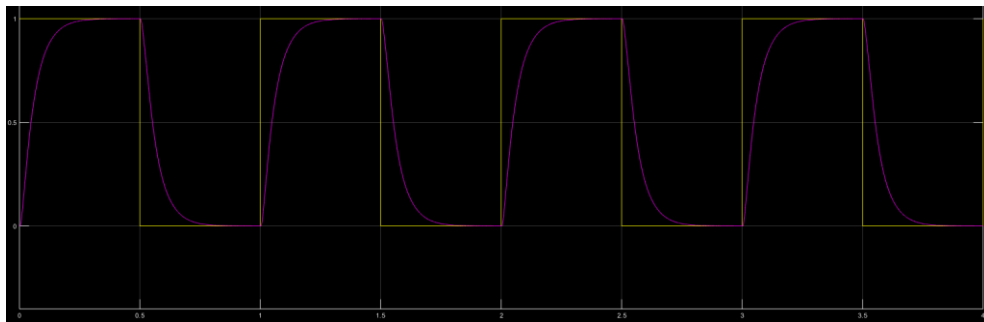
2) 保持 $K_e=1, K_u=1$, 改变 K_{ec}



$K_e=1, K_u=1, K_{ec}=0.005$



$K_e=1, K_u=1, K_{ec}=0.01$

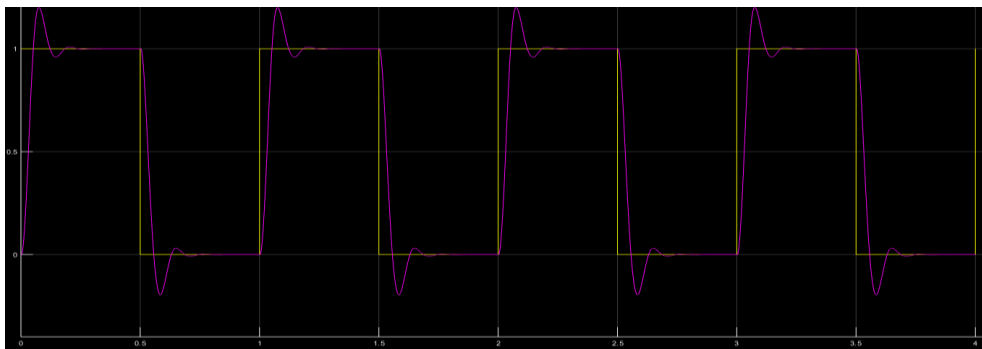


$K_e=1, K_u=1, K_{ec}=0.05$

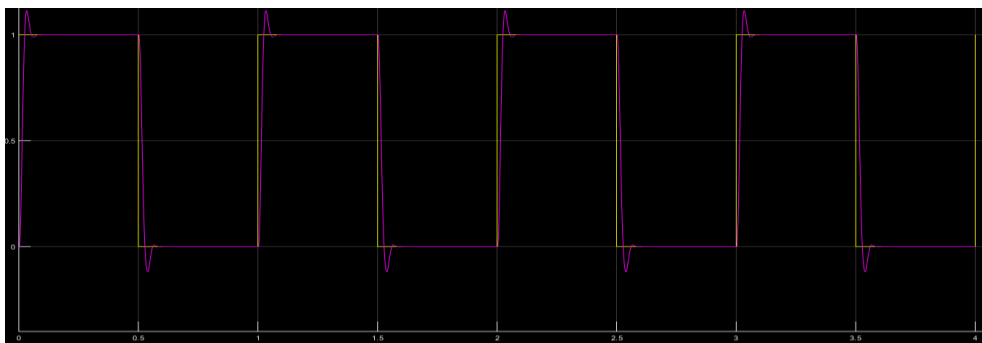
K_{ec} 越大，反应越迟钝，调节时间长，超调量大； K_{ec} 小，反应快，上升速率快，调节时间短，但 k_{ec} 过小，超调量严重，调节时间会增长，甚至引起震荡，使系统不能正常工作。

一般而言， K_{ec} 增大，稳态误差变化率也将减小。

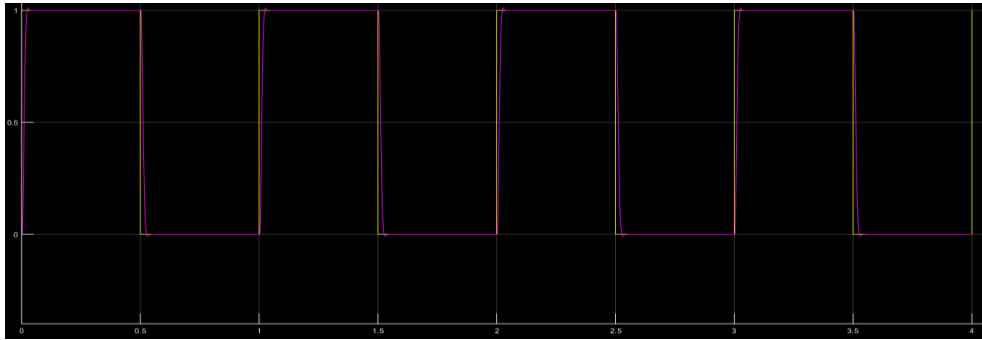
3) 保持 $K_e=1$, $K_{ec}=0.009$, 改变 K_u



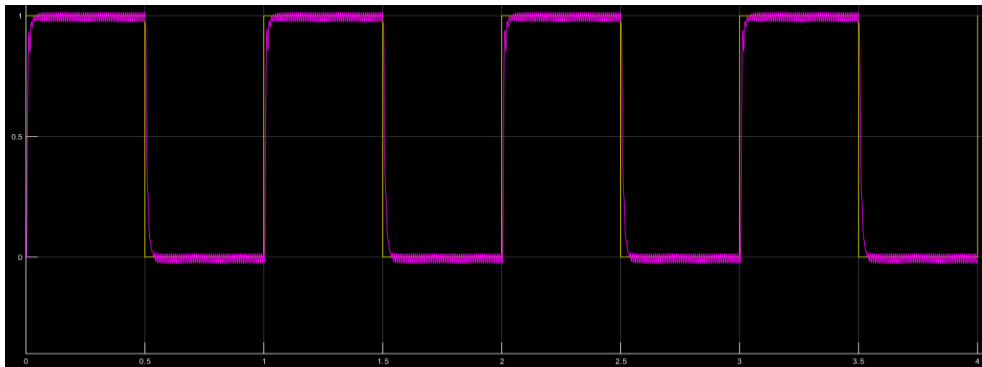
$K_e=1, K_{ec}=0.009, K_u=1$



$K_e=1, K_{ec}=0.009, K_u=5$



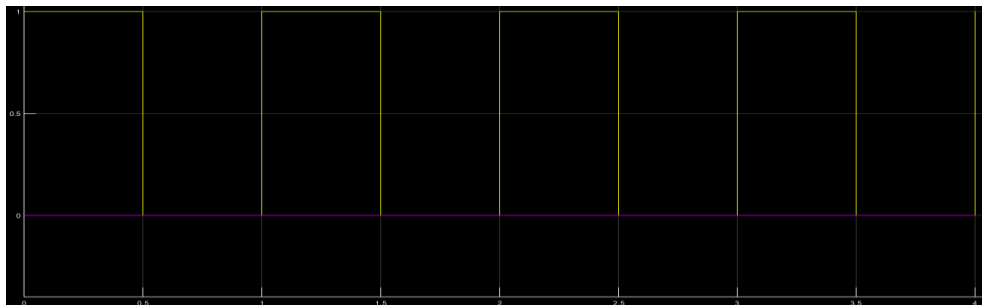
$K_e=1, K_{ec}=0.009, K_u=10$



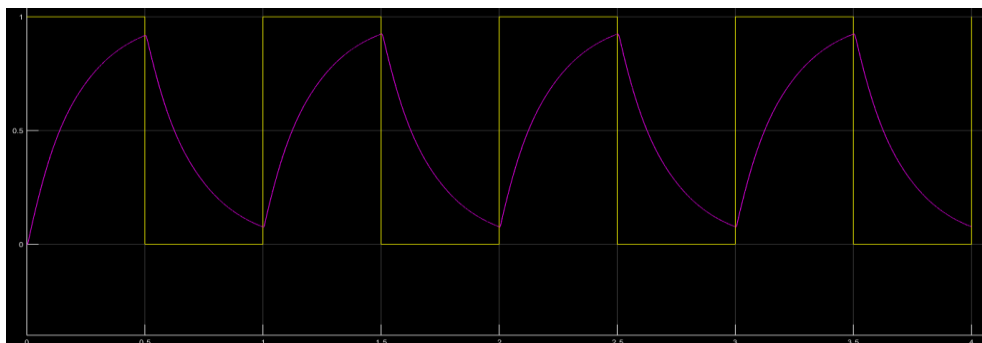
$K_e=1, K_{ec}=0.009, K_u=30$

K_u 相当于常规系统中的比例增益，它主要影响系统的动态性能， K_u 增大，上升速率加快，响应时间减小，但是 K_u 过大，系统输出上升速率过大，从而产生过大的超调乃至振荡。由上图中可注意到一个奇怪的现象，当 K_u 值较小时也有很大的振荡过程，这是由于 K_u 较小时，上升速率较慢，系统的超调量会被放大，调节时间加长。

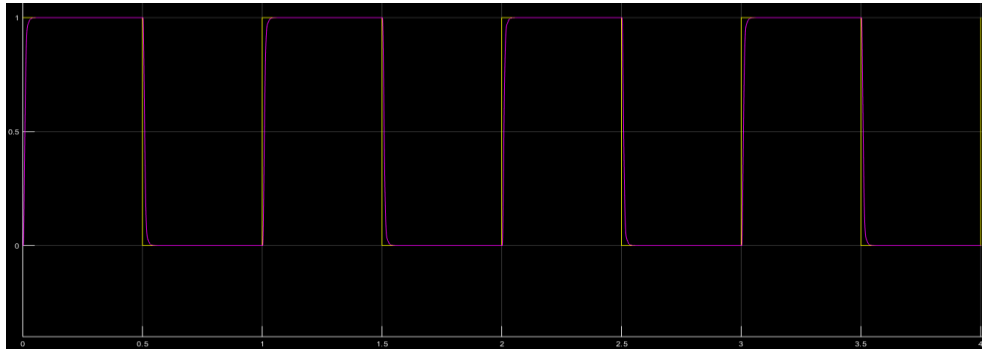
2. 论域的范围



论域为 $[-0.1, 0.1]$, $K_e=1, K_{ec}=0.009, K_u=10$



论域为 $[-0.1, 0.1]$, $K_e=0.05, K_{ec}=0.009, K_u=10$



论域为 $[-10\ 10]$, $K_e=1$, $K_{ec}=0.009, K_u=10$

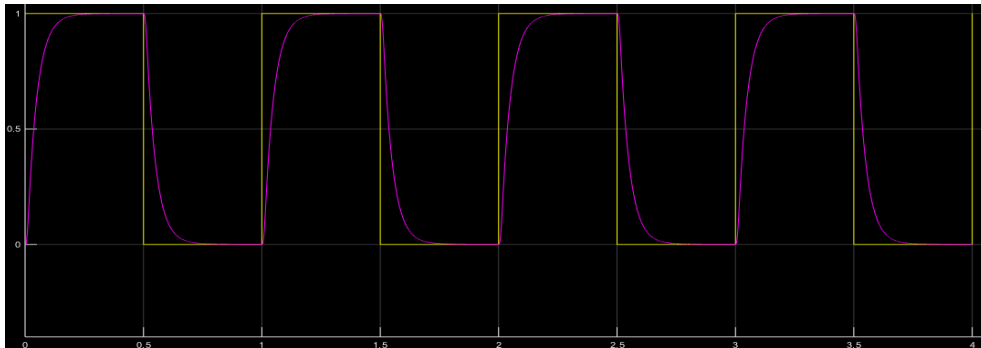
论域为 $[-0.1\ 0.1]$ 时, 跟踪速率和精度大大降低, 论域为 $[-10\ 10]$ 时跟踪效果较好, 论域为 $[-1\ 1]$ 时跟踪效果最好。这说明在制定模糊控制器时, 应根据 e 和 ec 的实际大小选择合适的论域, 理想的状况应该是当偏差缩小时, 论域的划分也相应缩小以提高控制系统在小偏差范围下的分辨能力。

3. 模糊子集个数

将 e 、 ec 和 u 的论域均分为 3 个模糊子集 N、Z、P, 模糊控制规则如下:

U \ EC \ E			
	N	Z	P
N	N	N	Z
Z	N	Z	P
P	Z	P	P

调整量化因子 $K_e=0.5$, $K_{ec}=0.02$ 和比例因子 $K_u=5$, 跟踪结果如下:



由仿真结果可知, 模糊子集越多, 系统性能越好, 控制动作越细腻。但过多的子集会大大增大计算量, 因而在实际应用中, 我们应根据精度和实时性要求, 选择合适的模糊子集个数。

四、Fuzzy-PID 控制

1. 整定 PID 控制器参数

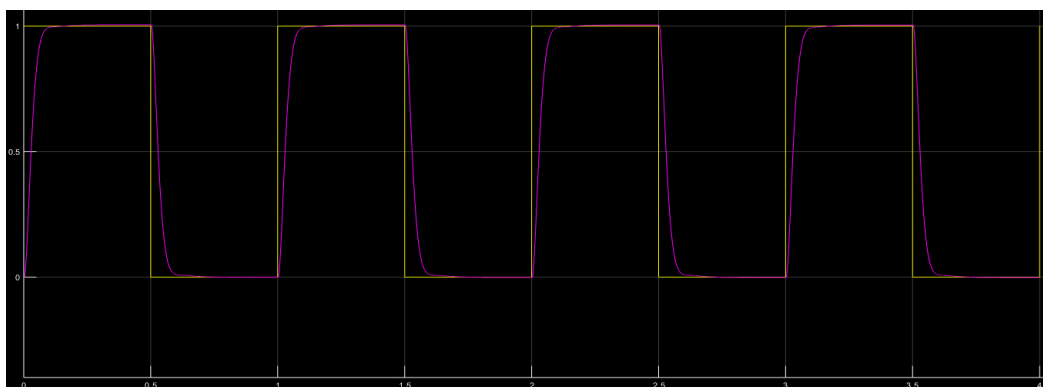
- 1) 取消 PID 控制器中积分环节 K_i 与微分环节 K_d 的作用, 以比例控制方式进行闭环控制;
- 2) 逐步增加 K_p , 直到闭环系统的阶跃响应出现等幅振荡, 记录此时控制器的比例增益为 K_c ;
- 3) 设等幅振荡时的振荡周期为 T_c , 根据控制器的类型按下表方式选择 PID 的参数;

控制方式	K_p	K_i	K_d
P	$0.5K_c$	0	0
PI	$0.45K_c$	$K_c/0.83T_c$	0
PID	$0.6K_c$	$K_c/0.5T_c$	$K_c*0.12T_c$

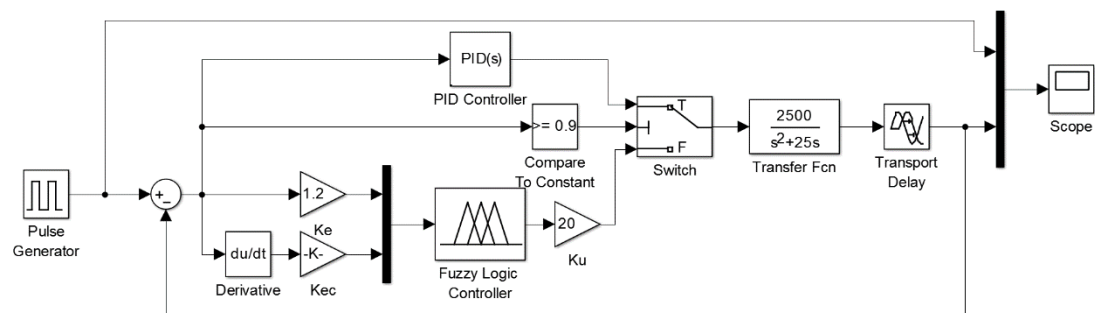
4) 按上表方式整定的 PID 参数并不保证是最佳的 PID 参数，还必须通过实验再进一步优化

最终整定得 pid 参数值为， $P=0.3$ ， $I=0.05$ ， $D=0.01$ 。

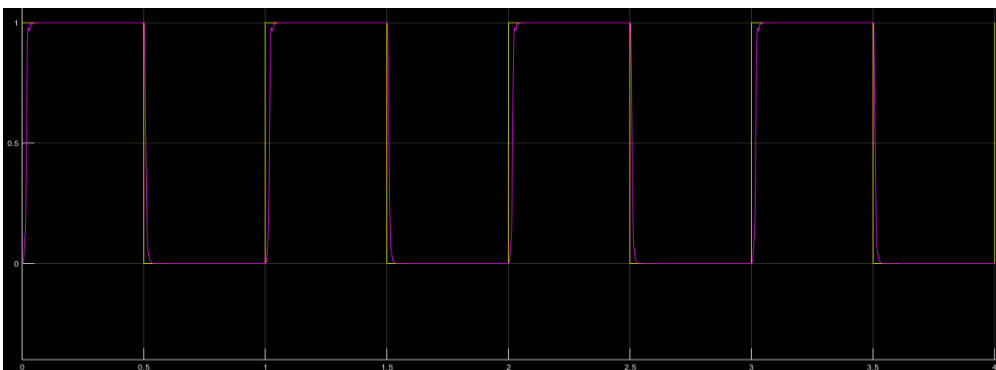
跟踪效果如下图：



2. 合并 fuzzy 和 pid 控制器



调整 fuzzy/pid 切换阈值，使得跟踪效果既能有 fuzzy 控制器的快速响应优点，同时有 pid 控制器的静态精度高优点。因为加入了 pid 控制，fuzzy 控制器的超调量成为了次要考虑因素，因而可以调整量化因子和比例因子，使系统响应更快。参数整定后的数值为 $K_e=1.2$ ， $K_{ec}=0.008$ ， $K_u=20$ 。跟踪效果如下：



五、遇到的问题

- 1、At time 0.005258523587253783, simulation hits (1000) consecutive zero crossings. Consecutive zero crossings will slow down the simulation or cause the simulation to hang. To continue the simulation, you may 1) Try using Adaptive zero-crossi...

原因及解决办法：利用 simulink 仿真时，默认如果遇到超过 1000 个连续的过零事件，就会报错，如果想继续仿真，那么第一种方法就是使用自适应过零检测算法，在 Simulation->Configuration Parameters->Zero Crossing Options 中，把 Algorithm 选项选成 Adaptive。第二种方法就是把提示中那个模块的过零检测关掉。Simulation->Configuration Parameters->Zero Crossing Control，选择 Disable All。

- 2、scope 中的显示波形一边显示一边消失

原因及解决办法：示波器中有个 data history 选项，下面有个 limit points to 5000，将其勾去掉。

六、心得体会

本次仿真内容较多，且参数整定需有一定的经验技巧。虽然之前我对 MATLAB 和 SIMULINK 并不熟悉，但通过查找资料和自己一步步摸索，最终整定出的控制器跟踪效果还是不错的。通过此次仿真，我初步掌握了设计模糊控制系统的基本步骤，包括设计模糊控制器、建立 simulink 系统模型和参数整定，同时加深了我对模糊控制的理解，这对我以后将模糊控制原理运用到实际应用中去有很大帮助。