



哈爾濱工業大學  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

# 实验报告

开课学期: 2023-24 秋季

课程名称: 系统建模与仿真

实验时间: 2023.11.21 地点: K325

实验台号: \_\_\_\_\_

学生专业: 自动化

学生学号: \_\_\_\_\_

学生姓名: \_\_\_\_\_

评阅教师: \_\_\_\_\_

报告成绩: \_\_\_\_\_

实验与创新实践教育中心印制

上传说明:

1. 本报告仅作学习交流、数据检验与分析参考，请在自主完成实验后酌量食用，切忌照搬照抄。
2. 本报告实验数据均通过课上检验，误差处于合理范围内。现象分析与思考题不保证完全正确。
3. 本报告依照 21 级实验报告要求撰写，若下届部分问题存在差异，属正常现象。
4. 本报告并未包含上机课内容。

## 直流伺服系统实验报告

### 一、实验目的

1. 了解直流伺服系统的建模方法；
2. 掌握 Matlab 系统辨识工具箱的使用方法；
3. 实现直流伺服系统的最小二乘辨识

### 二、实验设备

1. GSMT2014 型直流伺服系统平台；
2. PC (Matlab 平台)

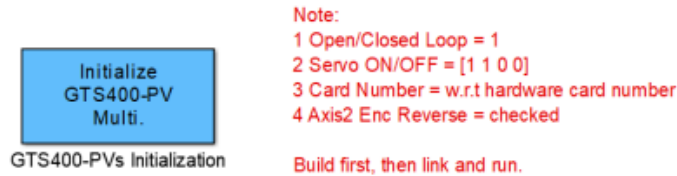
### 三、实验原理

1. 直流伺服电机的机理模型
2. 直流伺服电机的系统辨识工具箱建模
3. 直流伺服电机的递推最小二乘方法建模

### 四、实验步骤或操作要点

实验法建模:

## Damping Demo



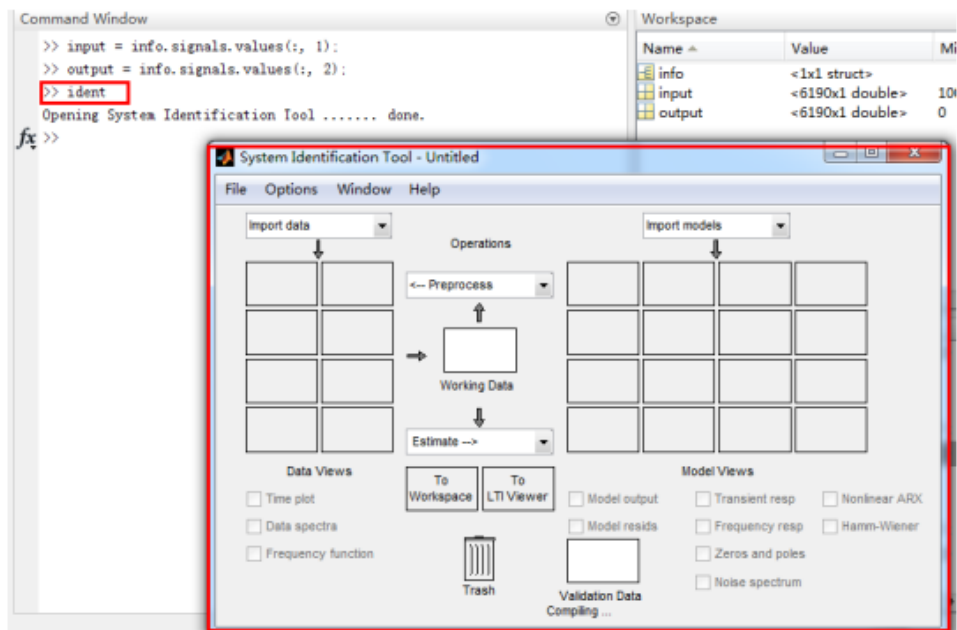
打开桌面程序“DampingDemo.slx”， 双击“Scope”模块， 设置“Save data to workspace”中“Variable name”为 info，“Format”为“Structure With Time”。

设置输入信号为 Step， 编译程序后运行程序， 运行时间为 30~100s。运行完成后， workspace 中观察采集到的数据， 并输入

```
input = info.signals.values(:, 1);
```

```
output = info.signals.values(:, 2);
```

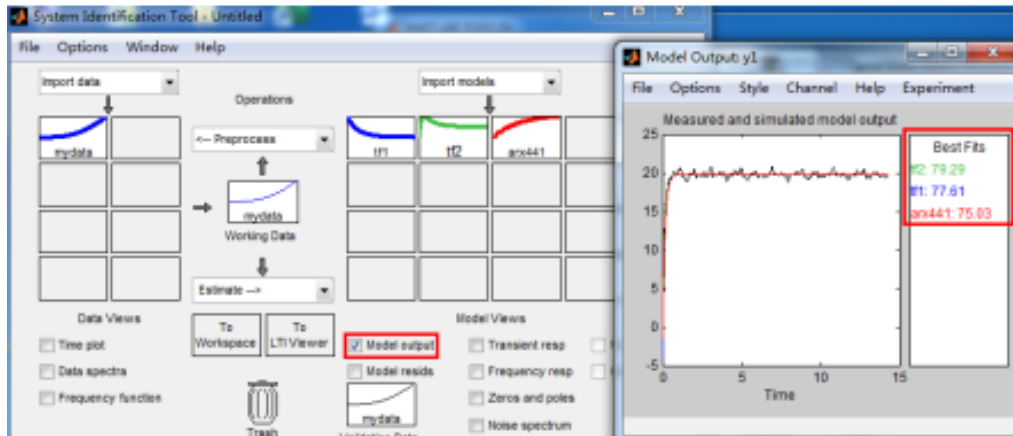
输入“ident”打开系统辨识工具箱， 点击“Import data”， 选择“Time domain data”导入数据， Input 设置 input， Output 设置为 output， Startingtime 设置为 0， Samplinginterval 设置为 0.001， 最后点击“Import”导入系统辨识数据。



点击“Estimate->”选择“TransferFunctionModels”，并设置“Numberof poles”与“Numberofzeros”，点击“Estimate”开始辨识一、二阶系统。

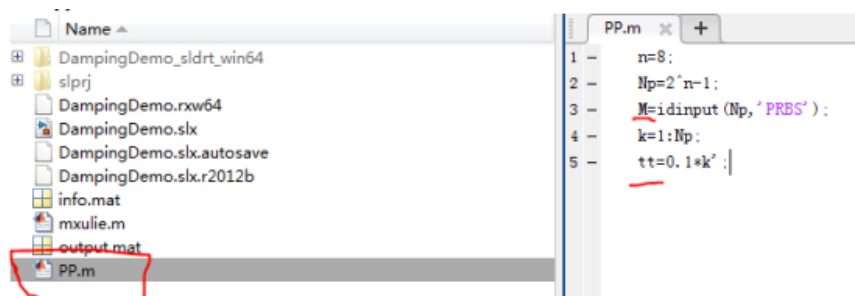
点击“Estimate-->”选择“PolynomialModels”，并设置“Numberof poles”为 1，设置“Orders”为[4 4 1]，点击“Estimate”开始辨识。

辨识完成后，输出辨识结果“tf1”为一阶系统辨识模型，“tf2”为二阶系统辨识模型，“arx441”为多项式模型，勾选“Modeloutput”，查看辨识效果。

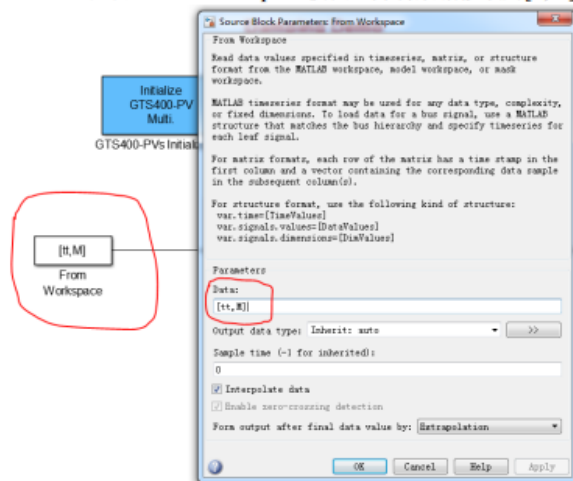


将 Step 换成 Chirp Signal，重复以上步骤，运行时间 90s，Frequency at target time 设置 1~10 之间。

将 Chirp Signal 换成 M 序列，用以下方式生成：



运行 pp.m 程序，在 simulink 中添加 From Workspace 模块，并将数据修改为[tt,M]；



采用自己编写的最小二乘辨识程序 (程序一定要准确), 分别采集相应的输入输出数据, 利用最小二乘辨识程序辨识系统模型, 记录下来并与系统辨识工具箱辨识的结果进行比较。

最小二乘法 Matlab 代码:

假设系统形式为  $y(k) = -a_1y(k-1) - a_2y(k-2) + b_0x(k) + b_1x(k-1) + b_2x(k-2)$

```
x = m_x;
y = m_y;
len=size(x,1);

P = 10000 * eye(5);
Theta = zeros(5,1);

for i=1:len-6
    fai = [-y(i+2) -y(i+1) x(i+3) x(i+2) x(i+1)]';
    P = P - P*fai*( (1+fai'*P*fai)^-1 )*fai'*P;
    K = P*fai*( (1+fai'*P*fai)^-1 );
    Theta = Theta + K*(y(i+3)-fai'*Theta);
end

Theta
```

## 五、实验结果分析

### 1. 机理法建模实验数据记录

内容	阶跃信号
开环系统传递函数	$\frac{20}{0.09s + 1}$
开环系统输入	1A
开环系统输出信号	$\frac{20}{s(0.09s+1)}$ , 稳态 20rad/s, 开环系统稳定, $\sigma = 0, t_s = 0.35s$

### 2. 实验法建模实验数据记录

模型	阶跃信号	扫频信号	M 序列
一阶开环传递函数	$\frac{180.3}{s + 8.266}$	$\frac{206.8}{s + 8.477}$	$\frac{192.8}{s + 8.477}$

二阶开环传递函数	$\frac{64.13s + 2926}{s^2 + 22.82s + 133.8}$	$\frac{-101.3s + 21520}{s^2 + 98.1s + 967.8}$	$\frac{-5215s + 321400}{s^2 + 1455s + 15440}$
差分方程 (ARX441)	$A(z) = 1 - 0.958z^{-1} - 0.4317z^{-2} + 0.04072z^{-3} + 0.3508z^{-4}$ $B(z) = 0.04049z^{-1}$	$A(z) = 1 - 2.108z^{-1} + 0.8691z^{-2} + 0.6607z^{-3} - 0.4208z^{-4}$ $B(z) = -191.9z^{-1} + 578.4z^{-2} - 581.4z^{-3} + 191.9z^{-4}$	$A(z) = 1 - 2.109z^{-1} + 0.8813z^{-2} + 0.6433z^{-3} - 0.4149z^{-4}$ $B(z) = -0.1711z^{-1} + 0.2938z^{-2} - 0.04349z^{-3} - 0.008849z^{-4}$
最小二乘辨识	$y(k) = 1.2757y(k-1) - 0.2793y(k-2) + 0.0261x(k) + 0.0261x(k-1) + 0.0261x(k-2)$	$y(k) = 1.9529y(k-1) - 0.9535y(k-2) + 1.3786x(k) - 2.7376x(k-1) - 1.3701x(k-2)$	$y(k) = 1.9518y(k-1) - 0.9523y(k-2) - 0.0267x(k) + 0.1451x(k-1) - 0.1085x(k-2)$

拟合度:

模型	阶跃信号	扫频信号	M 序列
一阶开环传递函数	53.03%	81.34%	84.47%
二阶开环传递函数	53.14%	88.00%	91.52%
差分方程 (ARX441)	99.02%	99.83%	99.85%

## 六、实验分析及思考

影响系统稳定的因素是系统的极点位置，如果极点位于  $s$  右半平面，则系统不稳定。测量系统稳定性的方法之一是加入适量大小的阶跃信号，根据其输出的阶跃响应分析系统的稳定性和其他性能指标。

1. 根据直流伺服电机的建模过程，总结实验法建模的基本步骤。

使用合适的信号（如阶跃信号、M 序列等）作为系统输入，得到系统对此信号的响应，再利用传递函数拟合、最小二乘等方法对系统进行辨识，得到系统模型。

2. 改变阻尼系统，系统模型会有怎样改变？

考虑系统开环传递函数  $G(s) = \frac{C_m}{Js+B}$ ，若输入为阶跃信号，当  $B$  增大时系统增益与调节时间均减小。

# 直线一级倒立摆系统 LQR 控制实验

## 一、实验目的

1. 掌握一级倒立摆的机理建模方法；
2. 搭建基于 Simulink 的 LQR 控制；
3. 分析扰动，起摆角度对控制性能的影响。

## 二、实验设备

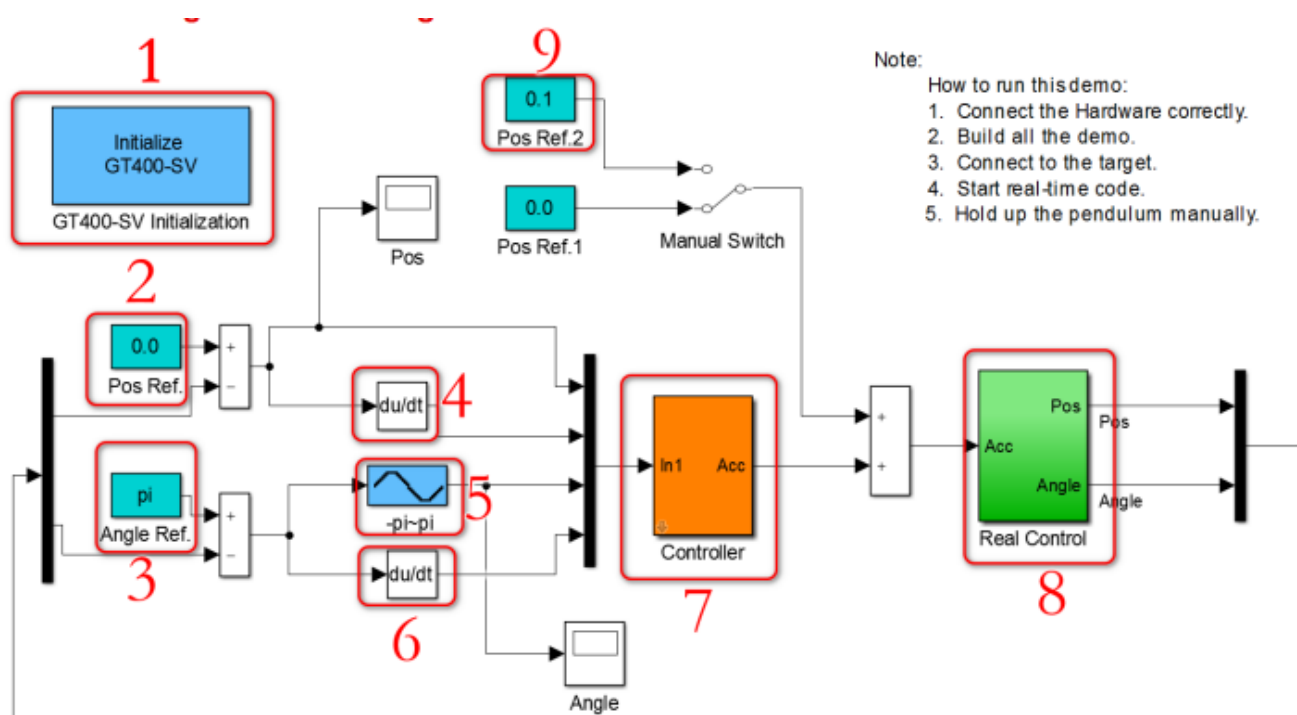
1. 直线一级倒立摆平台；
2. PC (Matlab 平台)

## 三、实验原理

1. 建立直线一级倒立摆模型；
2. 搭建基于 Simulink 的 LQR 控制；

## 四、实验步骤或操作要点

Simulink 搭建如下：



Pos Ref.2 实际设置为 0.5(0.5~1)。

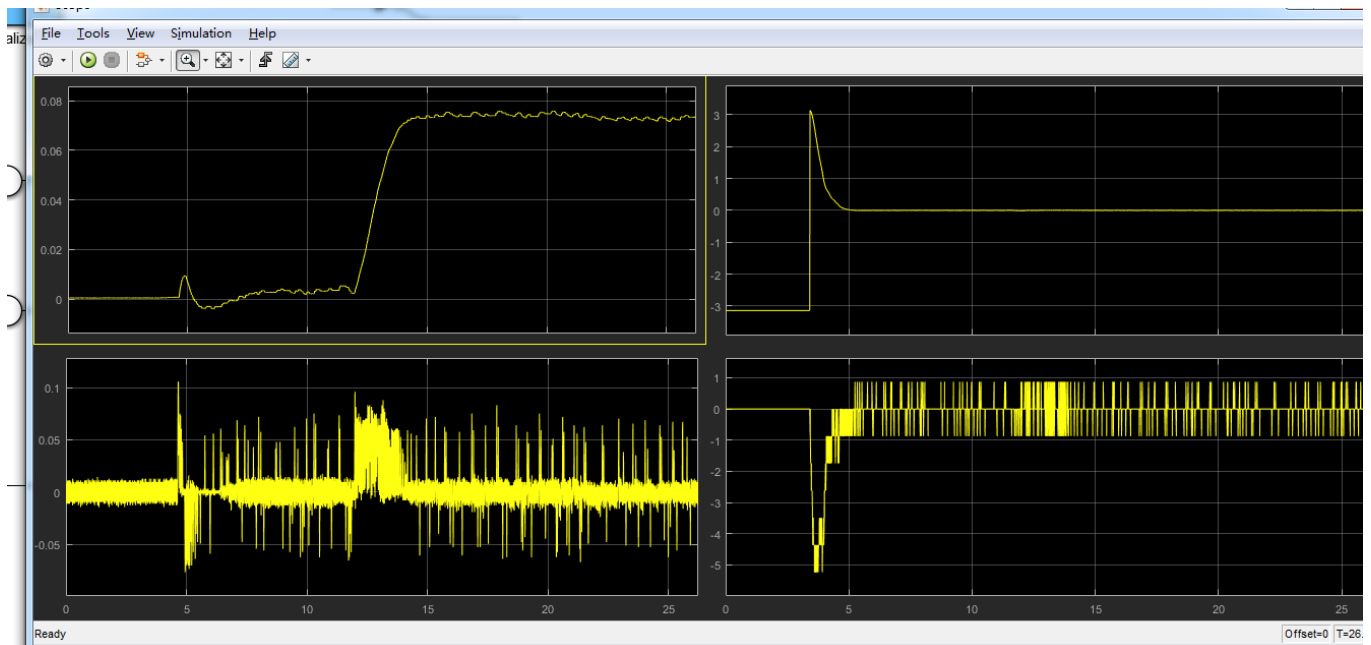
打开倒立摆电控箱上的电源按钮，然后将倒立摆小车扶至导轨中间位置。编译并运行程序后，右下角开始计时后迅速提起摆杆到竖直向上的位置，程序进入自动控制后松开摆杆。系统稳定后双击“Manual Switch”将输入信号打到  $0.5\text{m/s}^2$  端，观察摆杆的运动现象。

## 五、实验结果分析

1. 记录施加扰动后小车的位移、速度及摆杆角度的响应图和数据；

	小车位移	小车速度	摆杆角度	摆杆角速度
稳态时方差	$1.132 * 10^{-6}$	$2.2593 * 10^{-4}$	$2.432 * 10^{-6}$	0.0181
阶跃响应振幅	0.093	0.4992	0.0131	0.8727
调节时间	2.195	2.141	0.25	0.25

施加扰动后响应：



x	theta
dx	dtheta



## 2. 分析扰动，起摆角度对控制性能的影响

扰动较小、起摆角度较小时系统控制性能较好。系统稳定后，若扰动较大，系统可能会失去控制。

## 六、思考题

### 1. 如何设计鲁棒性更强的系统？

对系统进行更精确的建模、获取更准确的系统参数；在模型与参数足够准确时，适当提高系统的阶数；对于实际控制系统，选用精度更高的执行机构与反馈元件。

2.若在 LQR 实时控制程序中不采用  $-\pi \sim \pi$  模块，该如何搭建控制程序？对提起摆杆方向是否有要求？如果有要求，该如何提起摆杆才会稳定？

不采用  $-\pi \sim \pi$  模块时，控制程序删去  $-\pi \sim \pi$  模块，其余部分不变。摆杆需要沿  $\theta$  减小的方向缓慢提起，则顶部返回  $\theta$  仍为 0。

此时系统状态如下：

