

系统的主要机械参数及变量如表 10.1 所示。

表 10.1 机械参数及变量

旋臂质量 m_1	0.200kg	摆杆质量 m_2	0.052kg
旋臂长度 R_1	0.20m	摆杆长度 R_2	0.25m
旋臂质心到转轴距离 L_1	0.10 m	摆杆质心到转轴距离 L_2	0.12 m
电机力矩—电压比 K_m	0.0236 N·m/V	电机反电势—转速比 K_e	0.2865 V·s/m
旋臂绕轴转动摩擦 力矩系数 f_1	0.01 N·s	摆杆绕轴转动摩擦 力矩系数 f_2	0.001 N·s
旋臂绕轴转动惯 J_1	0.004 kg·m ²	摆杆绕轴转动惯量 J_2	0.001 kg·m ²

2. 系统分析

将参数值代入方程，在 MATLAB 中键入如下函数，可以求出系统的能控性、能观性、特征根，可看出系统是能控、能观、开环不稳定。

```
rank(ctrb(A,B))
```

```
rank(observ(A,C))
```

```
eig(A)
```

系统是完全可以控和完全可观测的，因此可以根据状态反馈确定反馈控制律，使系统闭环稳定。

3. 状态反馈控制的 MATLAB 仿真

为方便起见，令 $a=J_1+m_2R_1^2$, $b=m_2R_1L_2$, $c=J_2$, $d=f_1+K_mK_e$, $e=(m_1L_1+m_2R_1)g$, $f=f_2$, $h=m_2gL_2$ 在 MATLAB 中，将各个参数值代入非线性数学模型，进行仿真，利用 ODE 函数求解微分方程。

(1) 极点配置，求取状态反馈增益矩阵以及状态观测器增益矩阵

选择主菜单 file→new→m-file 建立文件 fang_daolibai.m:

```
clear;
```

```
clc;
```

```
A=[      0      0      1      0
      0      0      0      1
    65.8751 -16.8751 -3.7062  0.2760
   -82.2122  82.2122  4.6254 -1.3444]; % System matrix
```

```
B=[0;0;5.2184;-6.5125]; % Control Matrix
```

```
C=[1,0,0,0;0,1,0,0]; % output matrix
```

```
P=[-4+3i,-4-3i,-30-6i,-30+6i]; % expect pole
```

```
rank(ctrb(A,B)) % controllability
```

```
rank(observ(A,C)) % observability
```

```
eig(A) % stability
```

```
K=place(A,B,P) % state feedback gain matrix
```

```
P1=[-20+3i,-20-3i,-80-1i,-80+1i]; %观测器极点
```

```
L=place(A',C',P1)' %状态观测器增益矩阵
```

利用极点配置的方法求反馈矩阵 K。任取一组期望极点 P，在 MATLAB 中利用 place(A,B,P)函数求得 $K=[K_a, K_o, K_{va}, K_{vo}]$ 。

(2) 建立旋转式倒立摆的非线性模型的微分方程

运行 MATLAB6.0 以上的版本，选择主菜单 file→new→m-file 建立文件 dlfun.m:

```
function xdot=dlfun(t,x);
```


$$((-0.0168*0.001)*u[3]+(0.001*0.0012*\cos(u[2]-u[1]))*u[4]+0.0012*0.0012*\sin(u[2]-u[1])* \cos(u[2]-u[1])*u[3]*u[3]-0.0012*0.001*\sin(u[1]-u[2])*u[4]*u[4]+0.2979*0.001*\sin(u[1])-0.0612 *0.0012*\sin(u[2])* \cos(u[2]-u[1])+0.0236*0.001*u[5])/(0.0061*0.001-0.0012*0.0012*\cos(u[1]-u[2])* \cos(u[2]-u[1]))$$

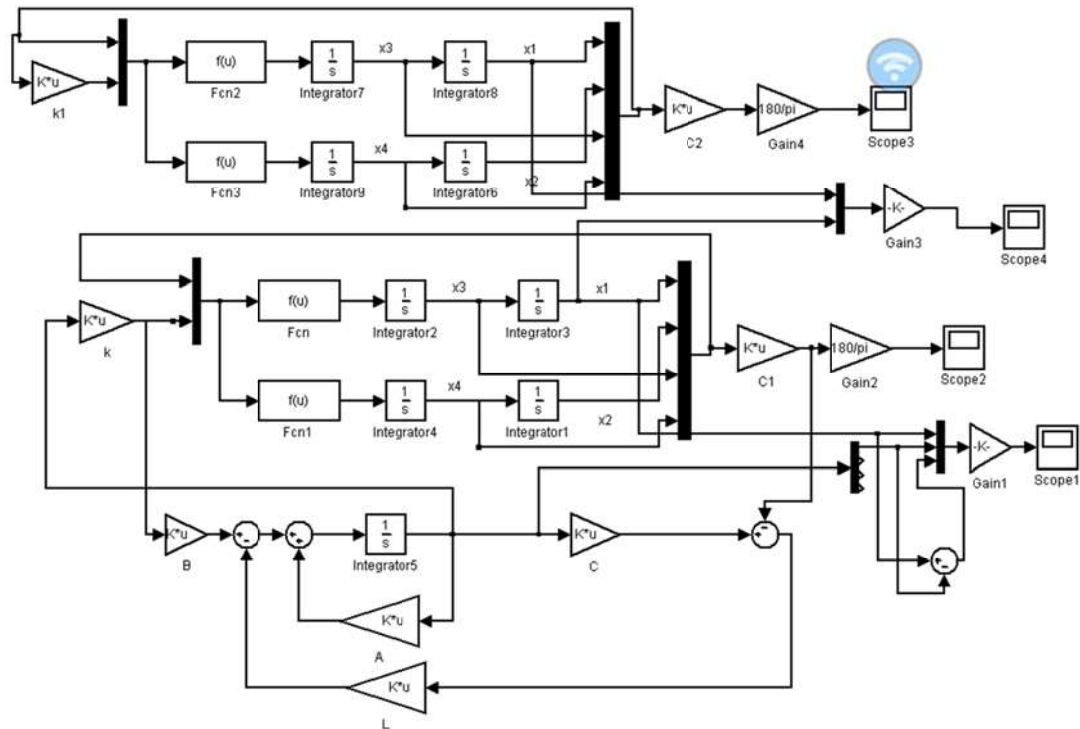
Fcn1:

$$((0.0168*0.0012*\cos(u[1]-u[2]))*u[3]-(0.0061*0.001)*u[4]-0.0061*0.0012*\sin(u[2]-u[1])*u [3]*u[3]+0.0012*0.0012*\sin(u[1]-u[2])* \cos(u[1]-u[2])*u[4]*u[4]-0.2979*0.0012*\sin(u[1])* \cos(u [1]-u[2])+0.0061*0.0612*\sin(u[2])-0.0012*\cos(u[1]-u[2])*0.0236*u[5])/(0.0061*0.001-0.0012*0. 0012*\cos(u[1]-u[2])* \cos(u[2]-u[1]))$$

仿真步骤:

- 选择期望极点 P，运行 fang_daolibai.m 求出状态反馈矩阵 K；
- 将状态反馈矩阵 K 代入图中的 L 模块中，点击保存；
- 双击 integrator3 设置 x_1 (θ_1) 的初始值，双击 integrator1 设置 x_2 (θ_2) 的初始值，运行并观察响应曲线。

5. 状态观测器的 Simulink 仿真



仿真步骤:

- 选择倒立摆的期望极点 P 和观测器的七万极点 P1，运行 fang_daolibai.m 求出状态反馈矩阵 K 和观测器增益矩阵 L；
- 将状态反馈矩阵 K 代入图中的 k 和 k1 模块中，将 L 带入图中 L 模块中点击保存；
- 双击 integrator3 设置 x_1 (θ_1) 的初始值，双击 integrator1 设置 x_2 (θ_2) 的初始值，运行并观察响应曲线。

6. 实时控制

打开 dsp.exe，选择“控制模式”。在参数设置中，按设计好的反馈参数，设置 K_a , K_o , K_{va} , K_{vo} (见图 6.5 所示参数设置对话框)。点击“OK”并进行联机控制。根据倒立摆的实际运行情况，可以修改这些参数，改善控制效果。

六、实验报告要求

1. 对一阶旋转式倒立摆系统进行动力学分析，并推导其数学模型。
2. 编写 MATLAB 仿真程序，记录输出的数据、曲线，并进行理论分析。
3. 在设计状态反馈参数中，给定多组极点进行实验，观测仿真结果，比较超调量，调节时间等性能指标。
4. 分析引入状态观测器对系统性能的影响。

七、思考题

1. 以倒立摆系统为例，简述极点配置方法设计系统控制器的基本思路。
2. 非线性系统进行如何局部线性化？
3. 描述期望极点的位置对闭环系统控制律的幅值的影响，说明原因。
4. 倒立摆系统的非线性方程式如何推导的，简单说明其过程
5. 为什么说闭环控制后的系统为非最小相位系统？
6. 描述极点位置与系统的动态性能、稳态性能和稳定性的关系。
7. 观测器的极点和倒立摆的极点，哪个应离虚轴更近一些，为什么？