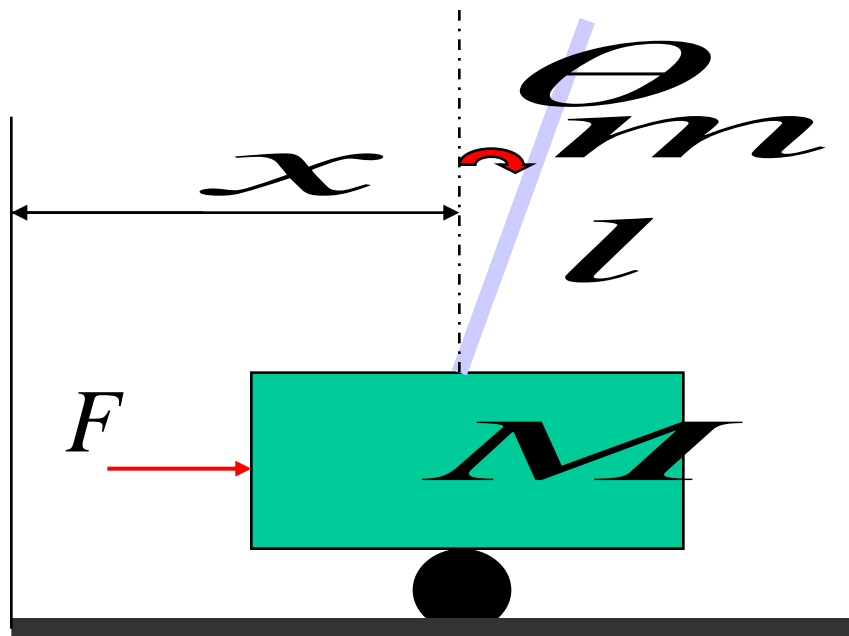


直线电机倒立摆的状态反馈 控制器设计与仿真实验

长安大学电控学院

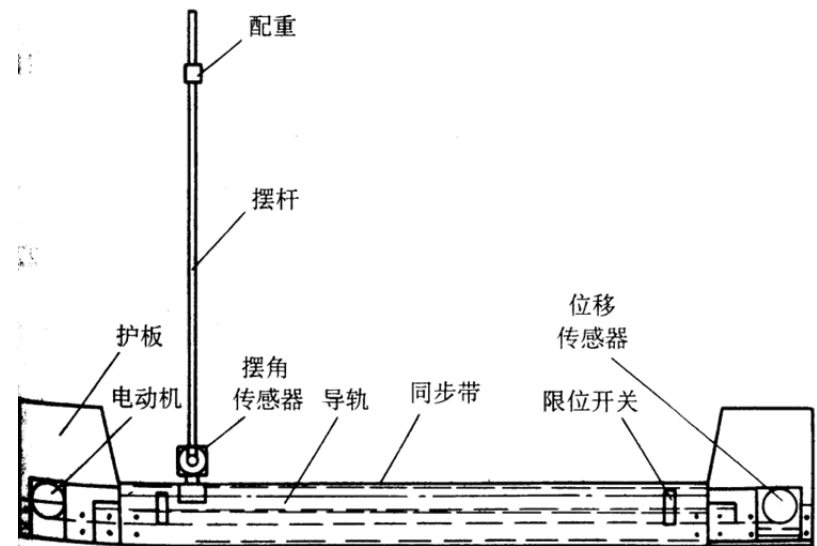
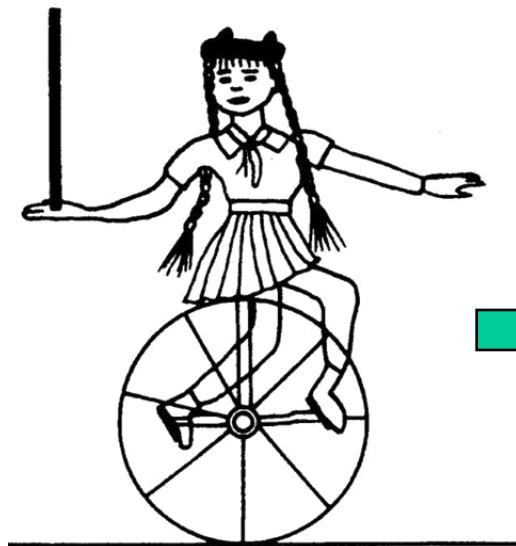
自动化与交通控制工程实验教学中心

实验一：用Matlab完成车载倒立摆的分析与状态反馈综合

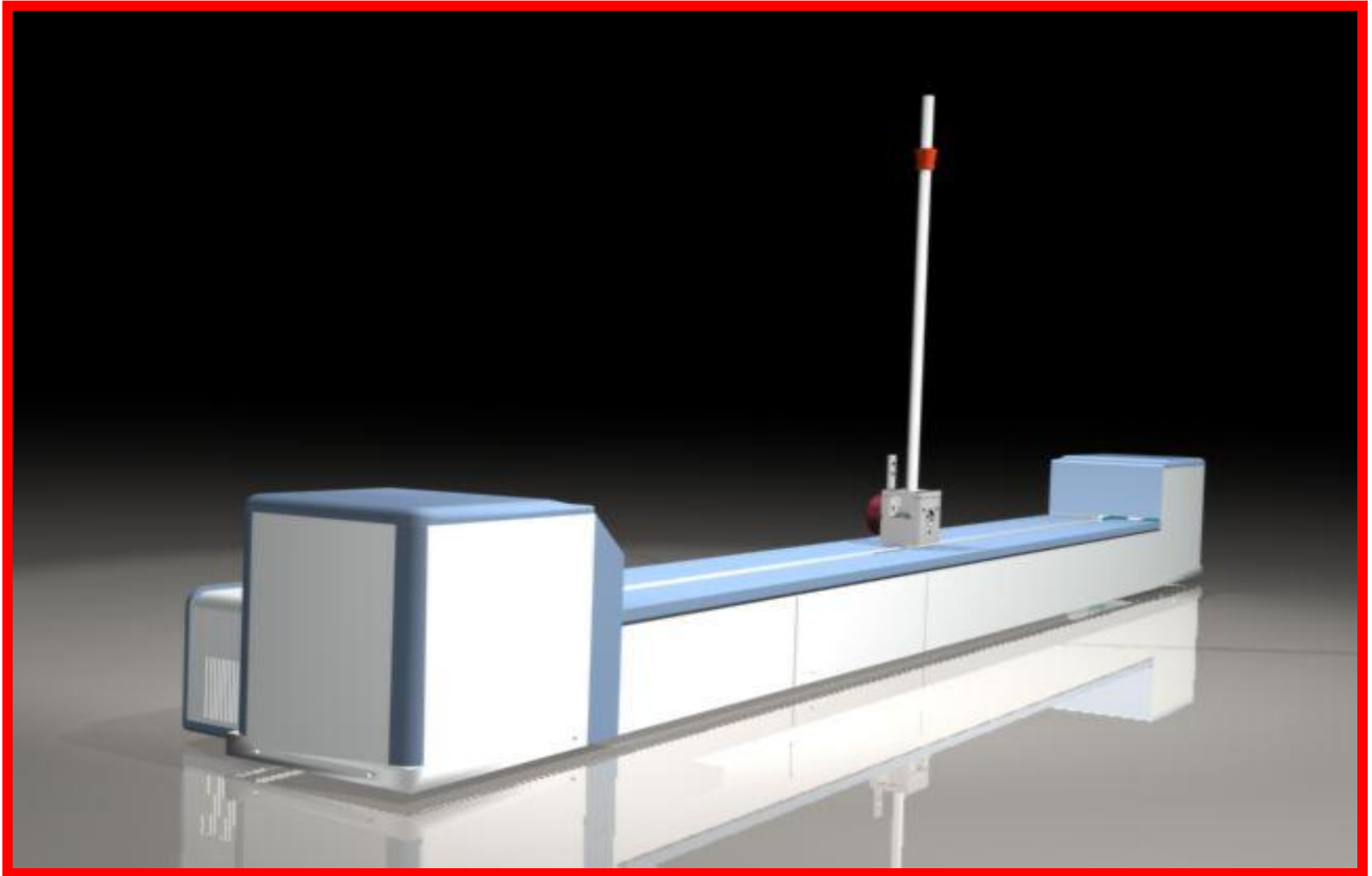


1. System model

Background: A bicycle which has only a round wheel, the balance control in the walking process of the robot, the perpendicular degree control in rocket shoot, the attitude control in satellite flying, the stable control on the sea of the drilling well platform, the safety land control of an airplane.



Single rigid pintle, two freedom degrees dynamics problem



1) turning equation on which the pole moves around the center of the pole.

$$J\ddot{\theta} = F_y l \sin \theta - F_x l \cos \theta$$

2) The horizontal move of the pole center of gravity:

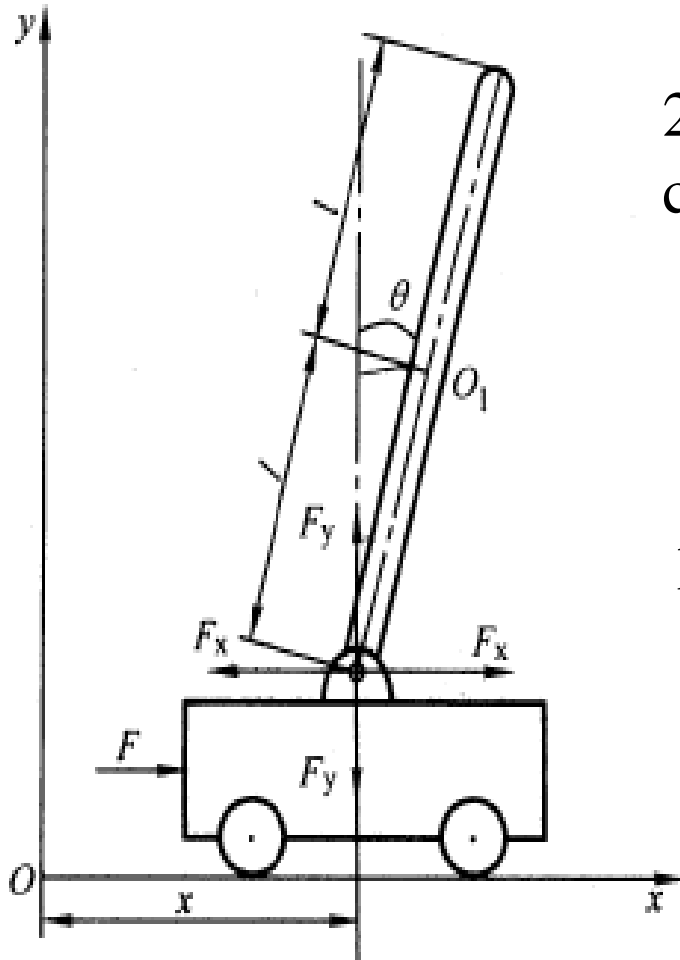
$$F_x = m \frac{d^2}{dt^2} (x + l \sin \theta)$$

3) The perpendicular move of the pole center of gravity:

$$F_y - mg = m \frac{d^2}{dt^2} (l \cos \theta)$$

4) The horizontal move of the car:

$$F - F_x = m_0 \frac{d^2 x}{dt^2}$$



Accurate model:

$$\begin{cases} \ddot{x} = \frac{(J + ml^2)F + lm(J + ml^2)\sin\theta \cdot \dot{\theta}^2 - m^2l^2g \sin\theta \cos\theta}{(J + ml^2)(m + m_0) - m^2l^2 \cos^2\theta} \\ \ddot{\theta} = \frac{ml \cos\theta \cdot F + m^2l^2 \sin\theta \cos\theta \cdot \dot{\theta}^2 - (m_0 + m)mlg \sin\theta}{m^2l^2 \cos^2\theta - (J + ml^2)(m + m_0)} \end{cases}$$

Approximate model:

$$\begin{cases} \ddot{x} = \frac{(J + ml^2)F - m^2l^2g\theta}{J(m + m_0) + m_0ml^2} \\ \ddot{\theta} = \frac{(m_0 + m)mlg\theta - mlF}{J(m + m_0) + m_0ml^2} \end{cases} \longrightarrow \begin{cases} \ddot{x} = aF + b\theta \\ \ddot{\theta} = cF + d\theta \end{cases}$$

set $x_1 = x, x_2 = \dot{x}_1, x_3 = \theta, x_4 = \dot{\theta} = \dot{x}_3$

$$\begin{cases} \ddot{x} = aF + b\theta \\ \ddot{\theta} = cF + d\theta \end{cases} \begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = bx_3 + aF \\ \dot{x}_3 = x_4 \\ \dot{x}_4 = dx_3 + cF \end{cases}$$

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & d & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ a \\ 0 \\ c \end{bmatrix} F$$

The system parameters:

$$M=1\text{kg}, m=0.1\text{kg}, l=1\text{m}, g=9.8\text{m/s}^2$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 11 & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}$$

$$\text{Set } y = \theta \quad C = [0 \quad 0 \quad 1 \quad 0]$$

2. System analysis

(1) Controllability analysis

$$\text{Rank}(M) = \text{Rank}(B \ AB \ A^2 B \ A^3 B) = 4$$

$$M = \text{ctrb}(A, B)$$

$$M =$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & -11 \\ -1 & 0 & -11 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\text{Rank}(M) = 4$$

Every state variable of the process can be controlled to reach a $\mathbf{0}$ in finite time $[t_0 \ t_f]$ by some unconstrained control input vector $u(t)$.

(2) Observability analysis

$$n = \text{obsv}(A, C)$$

$$n =$$

$$0 \quad 0 \quad 1 \quad 0$$

$$0 \quad 0 \quad 0 \quad 1$$

$$0 \quad 0 \quad 11 \quad 0$$

$$0 \quad 0 \quad 0 \quad 11$$

$$\text{Rank}(n) = 2$$

(3) Stability analysis

$$|sI - A| = s^2(s^2 - 11) = 0$$

$$s = 0, 0, \sqrt{11}, -\sqrt{11} \text{ --- } \textit{not stable.}$$

2. System Synthesis

State feed back using all the states.

$$k = [k_1 \ k_2 \ k_3 \ k_4]$$

Then

$$\dot{x} = (A - Bk)x + Bu$$

$$|sI - (A - Bk)|$$

$$= s^4 + (k_2 - k_4)s^3 + (k_1 - k_3 - 11)s^2 - 10k_2s - 10k_1$$

If the requested closed-loop poles are

$$-1, -2, -1 \pm j$$

The requested closed-loop characteristic eqns

$$(s + 1)(s + 2)(s + 1 + j)(s + 1 - j)$$

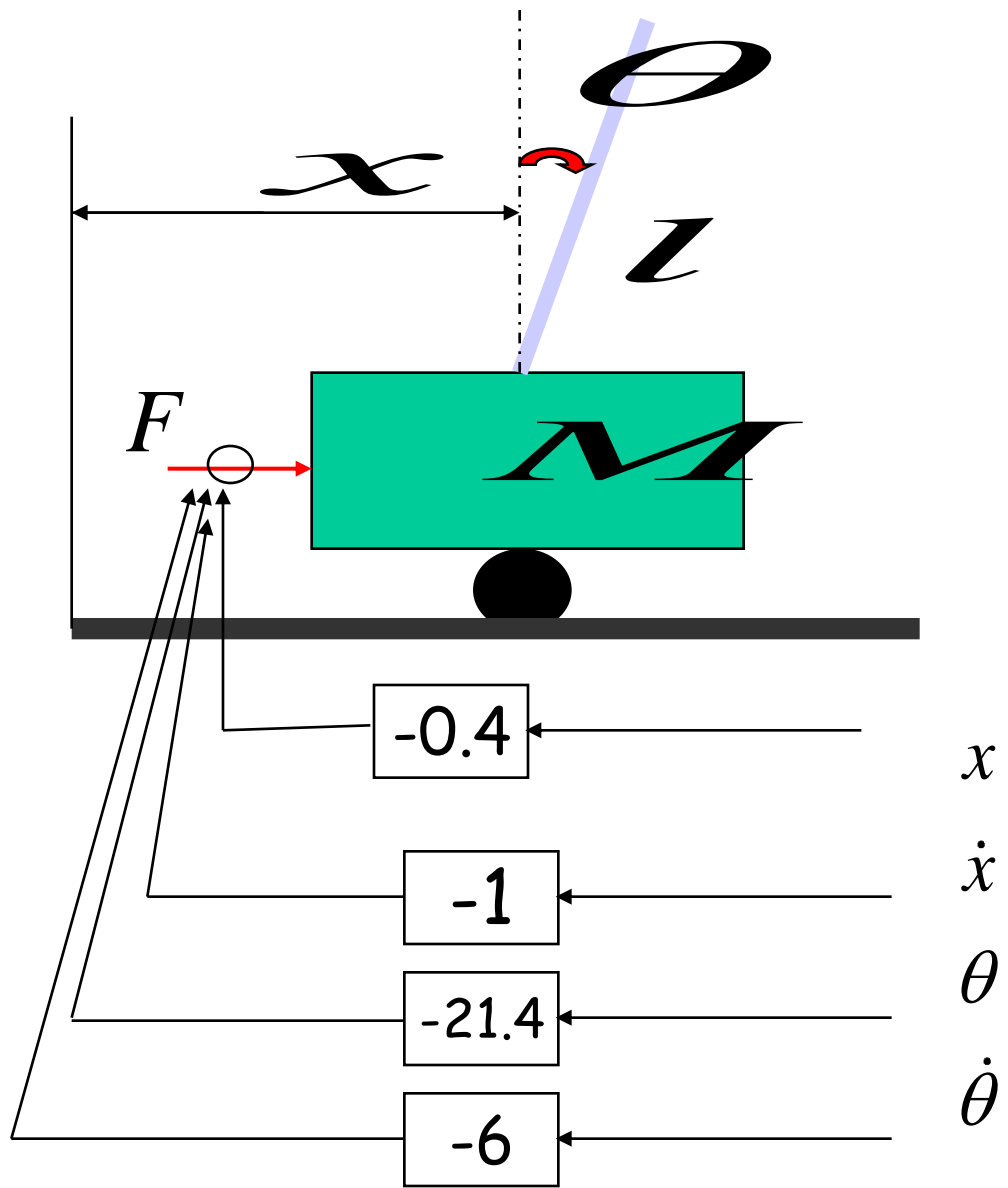
$$= s^4 + 5s^3 + 10s^2 + 10s + 4$$

$$k_1 = -0.4$$

$$k_2 = -1$$

$$k_3 = -21.4$$

$$k_4 = -6$$



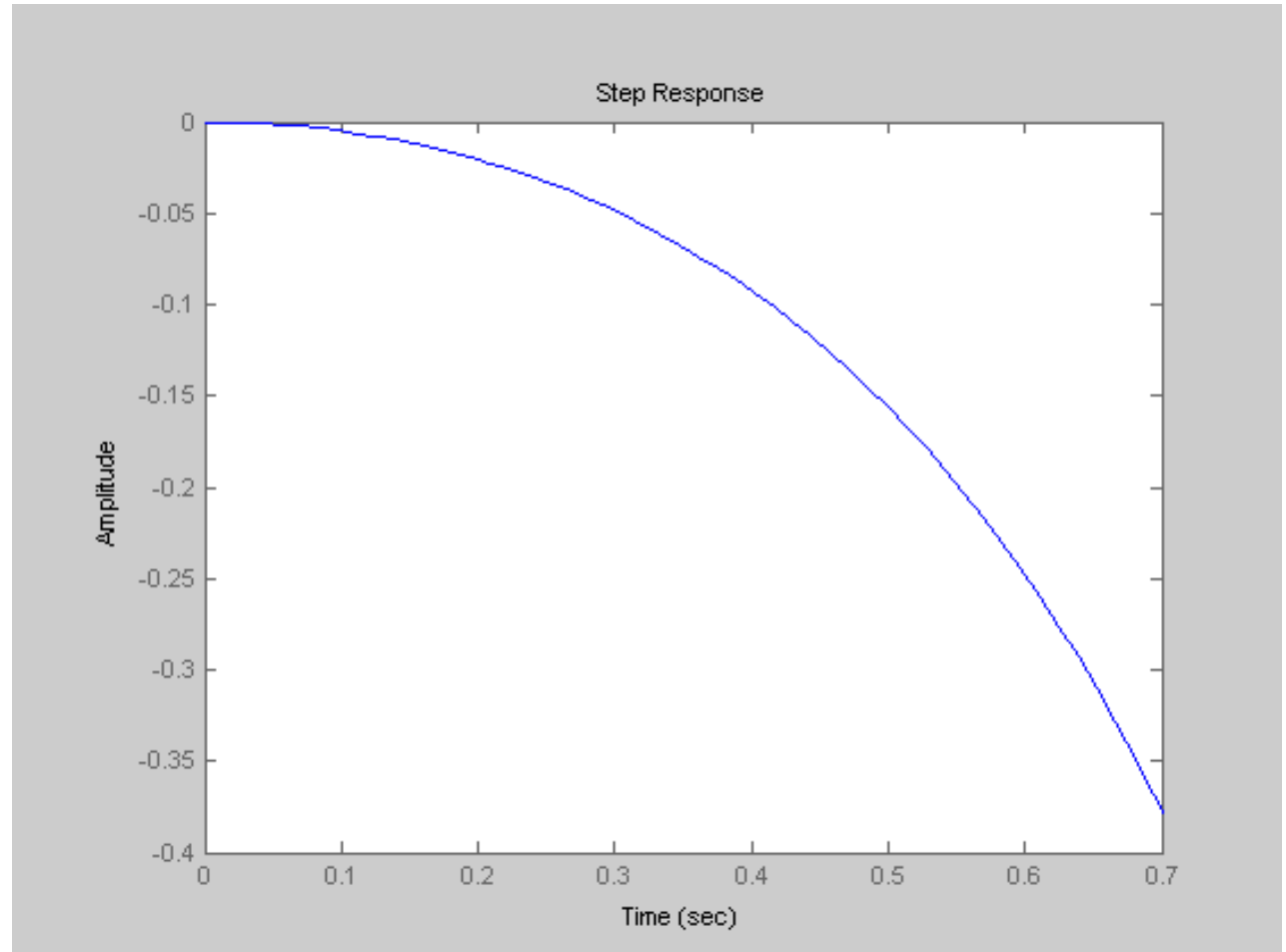
```
>> A=[0 1 0 0;0 0 -1 0;0 0 0 1;0 0 11 0];
```

```
>> B=[0 1 0 -1]';
```

```
>> C=[0 0 1 0];
```

```
>> D=0;
```

```
>> STEP(A,B,C,D)
```



```
>> k=place(A,B,[-1,-2,-1+j,-1-j])
```

```
k =
```

```
-0.4000 -1.0000 -21.4000 -6.0000
```

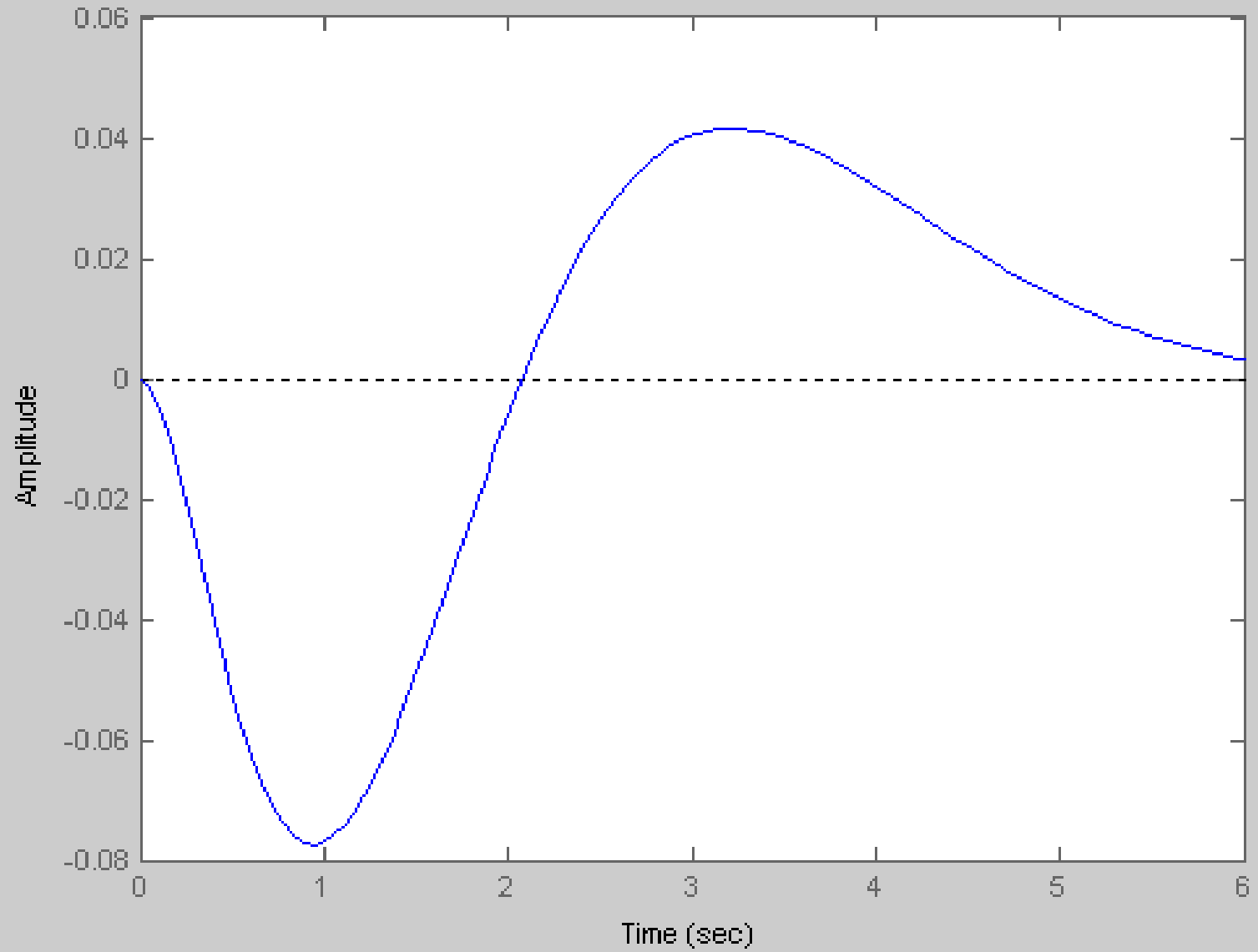
```
>> A1=A-B*K
```

```
A1 =
```

```
0 1.0000 0 0  
0.4000 1.0000 20.4000 6.0000  
0 0 0 1.0000  
-0.4000 -1.0000 -10.4000 -6.0000
```

```
>> STEP(A1,B,C,D)
```

Step Response



实验报告

1. 建立车载倒立摆的数学模型，对系统进行能控性、能观性和稳定性分析，将分析过程和结果记录。
2. 设计极点配置控制器设计方法，并进行仿真，使小车稳定同时又能使杆处于倒立状态，实验报告需要描述这一过程，给出控制结果。

实验二：直线电机倒立摆的调试运行与状态反馈综合

直线电机倒立摆实验平台如图2.1所示，主要由监控计算机、光电编码器、DSP运动控制卡、伺服驱动器、伺服电动机和倒立摆等组件组成。

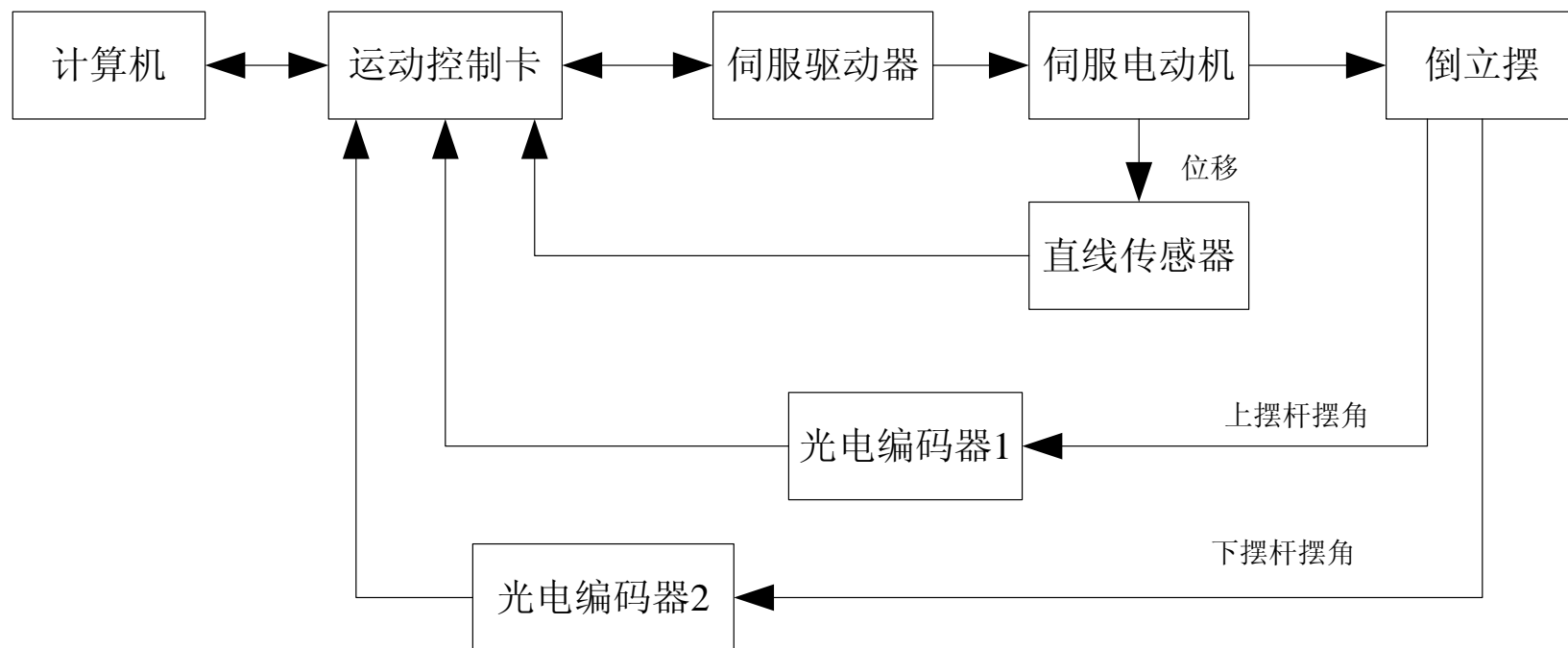
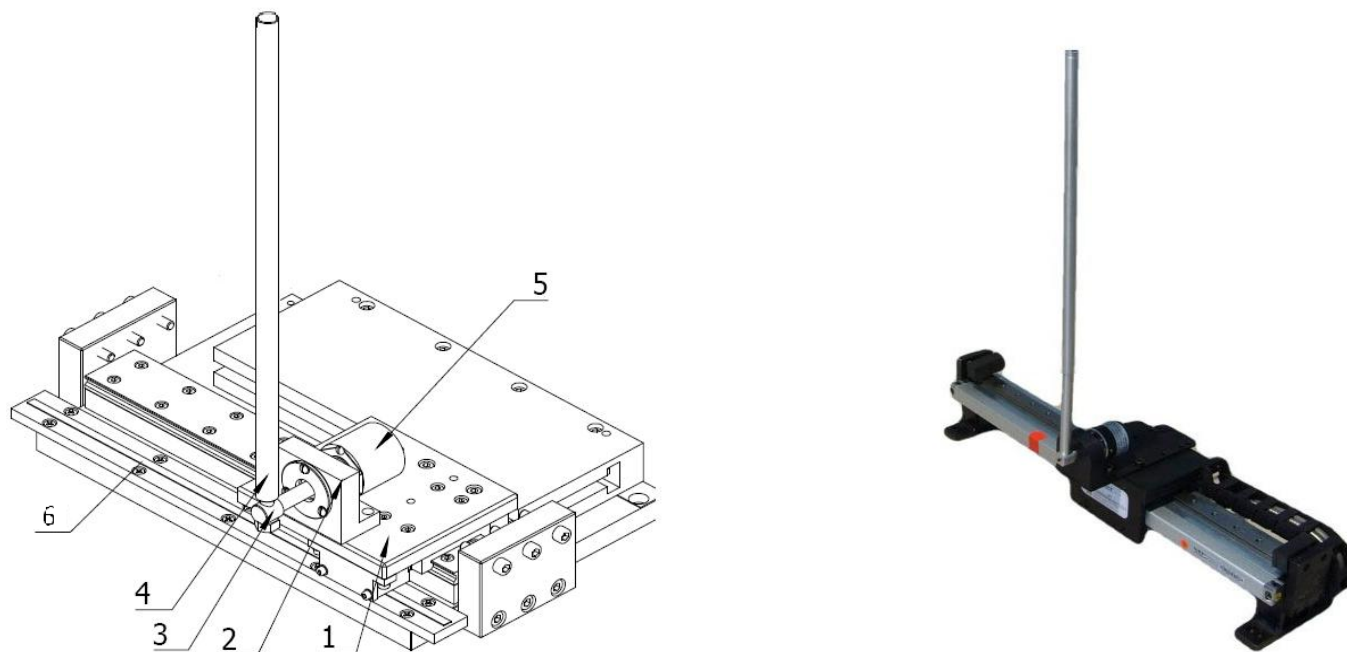


图2.1 直线电机倒立摆控制系统的硬件框图

直线电机采用无铁芯永磁同步直线电机，电机自带直线光栅，用以检测动子位移；倒立摆组件包括角度编码器，用以检测摆杆角度；倒立摆DSP控制软件；cSPACE为快速控制原型开发系统。图2.2为直线电机一级倒立摆系统的原理图和实物照片。



1.直线电机工作台;2.倒立摆的底座;3.轴;4.摆杆;5.角度编码器;6.直角位移传感器;

图2.2 直线电机驱动倒立摆装置

表2.1 直线电机倒立摆参数表

| 参数 | 一级直线电机倒立摆 |
|--------------|-----------|
| 摆杆长度 (mm) | 310 |
| 摆杆质量 (Kg) | 0.083 |
| 编码器底座重量 (Kg) | 0.68 |
| 移动部分总计 (Kg) | 2.369 |

实验准备:

1、CCS安装

2、MATLAB 2008安装, 必须安装: (1)MATLAB Distributed Computing Serve 3.3; (2)MATLAB 7.6; (3)Simulink 7.1; (4)Embedded IDE Link CC 3.2; (5)Fixed-Point 5.6; (6)Real-Time workshop 7.1; (7)Signal Processing Blockset 6.7; (8) Signal Processing Toolbox 6.9; (9)Simulink Fixed Point 5.6; (10)Target Support Package TC2 3.0

3、Frame Net安装

- 4、cSPACE软件安装
- 5、Composer直线电机驱动软件的安装
- 6、电机性能参数的设置
- 7、运动控制卡控制时设置步骤
- 8、WCSPACE安装

PID控制的实验步骤

- 1、双击桌面MATLAB R2008a图标运行MATLAB程序。
- 2、把电机放置中间位置，打开一级摆平衡控制算法simulink算法文件wmdlb1pid.mdl（PID算法），建议把这个算法文件拷贝在MATLAB的work目录下建立文件夹，如文件的路径设置为“\MATLAB\R2008a\work\DLB1\ wmdlb1pid.mdl”。
- 3、双击 simulink 算法文件中的“WM Model Build”按钮，编译算法文件，如果已经编译了算法文件，则双击“WM Model Run”按钮运行程序和自动打开cSPACE 控制界面。

- 4、在双击“WM Model Run”按钮后自动弹出以下cSPACE1界面，输入“WM-Read1”、“WM-Read2”、“WM-Read3”、“WM-Read4”控制算法的四个参数，在本程序中值分别为：18，15，17，1.5，点击“下载参数”按钮（由于实际情况影响，变需要微调参数，使倒立摆稳定运行）。
- 5、把倒立摆杆顺时针扶到倒立位置。
- 6、选择串口COM1，“Open Serial Port”按钮使能，点击后，该串口变为“Close Serial Port”，点击“Start Motor”，启动电机，启动电机后“Star Motor”会变成“Close Motor”，功能变为停止电机。电机启动后松开手，倒立摆即能稳定运行。
- 7、当关闭控制界面时，要先点击“Close Serial Port”关闭串口，然后再点击“关闭界面”按钮，关闭程序。

状态反馈控制的实验步骤

- 1、双击桌面MATLAB R2008a图标运行MATLAB程序。
- 2、采用矩阵法计算状态反馈极点配置的K，并生成Simulink控制文件wmdlblpid.mdl。
- 3、把电机放置中间位置，打开一级摆平衡控制算法simulink算法文件wmdlblpid.mdl（PID算法），建议把这个算法文件拷贝在MATLAB的work目录下建立文件夹，如文件的路径设置为“\MATLAB\R2008a\work\DLB1\ wmdlblpid.mdl”。
- 4、双击 simulink 算法文件中的“WM Model Build”按钮，编译算法文件，如果已经编译了算法文件，则双击“WM Model Run”按钮运行程序和自动打开cSPACE 控制界面。
- 5、在双击“WM Model Run”按钮后自动弹出以下cSPACEI界面，输入“WM-Read1”、“WM-Read2”、“WM-Read3”、“WM-Read4”控制算法的四个参数，在本程序中值分别为：18，15，17，1.5，点击“下载参数”按钮（由于实际情况影响，变需要微调参数，使倒立摆稳定运行）。
- 6、把倒立摆杆顺时针扶到倒立位置。

7、选择串口COM1,“Open Serial Port”按钮使能，点击后，该串口变为“Close Serial Port”,点击“Start Motor”，启动电机，启动电机后“Star Motor”会变成“Close Motor”，功能变为停止电机。电机启动后松开手，倒立摆即能稳定运行。

8、当关闭控制界面时，要先点击“Close Serial Port”关闭串口，然后再点击“关闭界面”按钮，关闭程序。

实验报告

1. 将实验设计的控制器参数输入到实际系统中进行调试，可以控制摆杆平衡，调节参数观察系统的变化。
2. 描述极点配置控制器设计方法，使小车稳定同时又能使杆处于倒立状态，实验报告需要描述这一过程，给出控制结果。