



直线电机倒立摆 使用手册

| user manual |



安徽合动智能科技有限公司
AnHui Hopemotion Technology Co.,Ltd

内容简介

本书为合动智能为工科高年级学生和研究生编写的实验与实践教科书，可以作为控制系统及工业自动化领域相关课程的配套实验教材。本书基于合动智能直线电机驱动创新实验平台和直线电机驱动倒立摆而编写，合动智能拥有直线电机驱动平台和直线电机驱动倒立摆专利。

本实验平台由直线电机驱动平台和直线电机倒立摆两大部分构成，直线电机倒立摆基于直线电机平台而开发，所有实验均基于直线电机平台和倒立摆而进行。实验部分是本书的主体和重点，本实验平台可以完成的实验包括三大部分：满足教学的基础实验，在基础实验基础上的综合实验及主要用于创新研究的创新实验。基础实验包括平台实验、一级倒立摆的经典控制实验；一级倒立摆、二级倒立摆的现代控制实验；一级倒立摆、二级倒立摆的智能控制实验。基础实验可以实验课程的方式进行，与传统方式基本一致；综合实验主要基于基础实验，具有综合和创新功能；创新实验主要用于学生的科研和自主创新，主要培养学生的独立思考和深入研究能力。创新实验可以项目的方式进行，具体研究内容可根据各校的实际情况进行安排，合动智能在技术及实验方法上也会给予指导。

基础实验内容可与《自动控制理论》、《机械控制工程基础》、《现代控制工程》、《智能控制》、《数字信号处理器》、《力学》、《MATLAB 应用》、《数控技术》、《工业自动化》等教学课程配套使用，学生可以完成这些基础实验；综合实验相对较难，可以选做，或当作课程设计实验处理；创新实验主要针对学有余力的本科生或研究生作为课题研究进行，其涉及的内容较多，需要学生花大量时间进行创新和科学研究，对这类实验我们不再给出具体步骤，仅提供宏观指导，学校可根据自己的实际情况进行安排。

本书适合高年级本科生、研究生、工程技术人员及计算机控制系统开发人员使用。

注意事项

1. 没有本公司专门的技术人员指导，严禁私自拆卸实验平台，特别是直线电机部分，极易造成人身伤害；同时，建议不要私自打开控制箱，更改硬件，否则容易损坏平台。
2. 本实验平台涉及知识较多，因此做实验前，请仔细阅读本书，特别是所做实验部分，否则容易出错。
3. 做实物试验前，请对照本书，再次检查硬件接线是否正确，以免出现事故或损坏硬件。
4. 二级倒立摆控制较难，一些没注意的细节或是没考虑的环节，容易使之出现意外，摆杆甩动，容易造成人身伤害，因此：不要靠二级倒立摆太近，若出现意外，则迅速关掉控制箱开关按钮，检查原因。
5. 本书所讲的控制算法和系统参数，只针对本实验平台，进行创新探索实验时，本书例程只具有指导意义，请针对实际情况做修正。
6. 本书所示实验程序文件名不可更改。否则不能正确编译运行。

目 录

第一章 直线电机倒立摆数学建模.....	1
1.1 一级倒立摆数学建模.....	1
1.2 二级倒立摆数学建模.....	3
第二章 基本实验.....	9
2.1 直线电机位置伺服控制实验.....	9
2.1.1 *平台认知实验.....	9
2.1.2 *cSPACE 操作实验.....	10
2.1.3 *系统参数自动调节实验.....	10
2.1.4 系统参数手动调节实验.....	12
2.1.5 *直线电机平台 PID 控制实验.....	12
2.1.6 直线电机平台改进 PID 控制器设计实验.....	14
2.1.7 *采用超前、滞后算法控制直线电机跟踪正弦曲线运动.....	14
2.2 直线电机倒立摆实验.....	15
2.2.1*倒立摆认知实验.....	15
2.2.2*一级摆常规 PID 控制实验.....	16
2.2.3 一级摆串级 PID 控制实验.....	22
2.2.4*一级摆状态空间极点配置控制器实验.....	23
2.2.5* 一级摆 LQR 控制实验.....	25
2.2.6 一级摆 ANFIS 控制实验.....	35
2.2.7 一级摆 NNC 控制实验.....	36
2.2.8*一级摆正摆控制实验.....	36
第三章 综合实验.....	39
3.1 直线电机平台实验.....	39
3.1.1 直线电机控制实验.....	39
3.1.2 伺服系统实验.....	39
3.2 直线电机倒立摆综合实验.....	40
3.2.1*一级摆自动起摆实验.....	40
3.2.2*二级摆 LQR 控制实验.....	44
a.二级摆 ANFIS 控制实验.....	50
b.二级摆 NNC 控制实验.....	51
c.二级摆自动起摆演示实验.....	52
d.*二级摆滑模控制.....	53
第四章 创新实验.....	57
4.1 直线电机平台实验.....	57
4.1.1 提高直线电机跟踪精度的研究.....	57
4.1.2 DSP 控制卡研究.....	57
4.2 直线电机倒立摆实验.....	58
4.2.1 一级倒立摆基于 cSPACE 自动起摆创新实验.....	58
4.2.2 多级倒立摆的研究.....	58

第一章 直线电机倒立摆数学建模

1.1 一级倒立摆数学建模

传统的线性控制方法离不开被控系统的线性模型，为了进行线性控制器的设计，首先需要对被控系统进行建模。

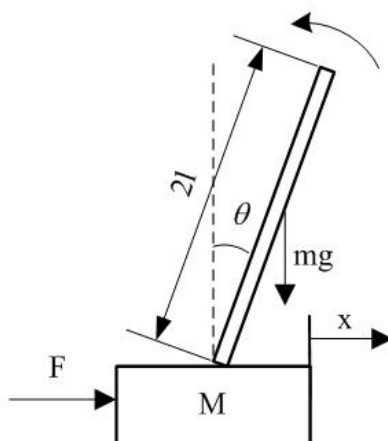


图 4.1 单级倒立摆的物理模型

为此，不妨做以下假设：（1）摆杆和底座为刚体；（2）忽略空气阻力和摆杆与底座轴承的摩擦力；（3）图示箭头所示方向为矢量正方向。

图 1 中， m 为摆杆质量， M 为摆杆底座的质量， l 为摆杆转动轴心到摆杆质心的长度， I 为摆杆惯量， F 为加在摆杆底端上的力， x 为底座的位移， θ 为摆杆与垂直向上方向的夹角。

对摆杆水平方向进行受力分析可得：

$$N = m \frac{d^2}{dt^2} (x + l \sin \theta) \quad (1-1)$$

$$\text{即： } N = m\ddot{x} + ml\ddot{\theta} \cos \theta - ml\dot{\theta}^2 \sin \theta \quad (1-2)$$

对底座水平方向进行受力分析可得：

$$M\ddot{x} = F - N - b\dot{x} \quad (1-3)$$

将 2 式代入 3 式得：

$$(M + m)\ddot{x} + b\dot{x} + ml\ddot{\theta} \cos \theta - ml\dot{\theta}^2 \sin \theta = F \quad (1-4)$$

对摆杆垂直方向上的合力进行分析可得：

$$P - mg = -m \frac{d^2}{dt^2} (l \cos \theta) \quad (1-5)$$

$$\text{即： } P - mg = ml\ddot{\theta} \sin \theta + ml\dot{\theta}^2 \cos \theta \quad (1-6)$$

对于摆杆，力矩平衡方程为：

$$-Pl\sin\theta - Nl\cos\theta = I\ddot{\theta} \quad (1-7)$$

注意：此方程中力矩的方向，由于 $\theta = \pi + \phi$, $\cos\phi = -\cos\theta$, $\sin\phi = -\sin\theta$ ，故等式前面有负号。

合并这两个方程，约去 P 和 N 可得：

$$(I + ml^2)\ddot{\theta} + mgl\sin\theta = -ml\ddot{x}\cos\theta \quad (1-8)$$

设 $\theta = \pi + \phi$ ，假设 ϕ 与 1（单位是弧度）相差很小，即 $\phi \ll 1$ ，则可以进行近似处理：

$\cos\theta = -1$, $\sin\theta = -\phi$, $(\frac{d\theta}{dt})^2 = 0$ 。用 u 来代表被控对象的输入力 F ，线性化后可得：

$$\begin{cases} (M + m)\ddot{x} - ml\ddot{\phi} + b\dot{x} = u \\ (I + ml^2)\ddot{\phi} - mgl\phi = ml\ddot{x} \end{cases} \quad (1-9)(1-10)$$

设系统的状态空间方程为：

$$\dot{X} = AX + Bu$$

$$y = CX + Du$$

取状态变量： $x_1 = x, x_2 = \dot{x}, x_3 = \theta, x_4 = \dot{\theta}$ ，则状态向量为 $X = \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix}$ ，

对方程组 9、10 求解代数方程，得到如下解：

$$\dot{x} = \dot{x}$$

$$\ddot{x} = \frac{-(I + ml^2)b}{I(M + m) + Mml^2}\dot{x} + \frac{m^2gl^2}{I(M + m) + Mml^2}\phi + \frac{(I + ml^2)b}{I(M + m) + Mml^2}u$$

$$\dot{\phi} = \dot{\phi}$$

$$\ddot{\phi} = \frac{-mlb}{I(M + m) + Mml^2}\dot{x} + \frac{mgl(M + m)}{I(M + m) + Mml^2}\phi + \frac{ml}{I(M + m) + Mml^2}u$$

整理后的状态方程为：

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \\ \dot{\phi} \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-(I + ml^2)b}{I(M + m) + Mml^2} & \frac{m^2gl^2}{I(M + m) + Mml^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{-mlb}{I(M + m) + Mml^2} & \frac{mgl(M + m)}{I(M + m) + Mml^2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \phi \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{(I + ml^2)b}{I(M + m) + Mml^2} \\ 0 \\ \frac{ml}{I(M + m) + Mml^2} \end{bmatrix} u$$

将实际的参数代入上式：

$$M=0.68\text{kg};$$

%小车质量

$$m=0.094\text{kg};$$

%摆杆质量

$$b=0.08;$$

%小车摩擦系数

$l=0.15\text{m}$;

%摆杆转动轴心到杆质心的长度

求得矩阵 a 和 b 的值如下:

$$a = \begin{bmatrix} 0 & 1.0000 & 0 & 0 \\ 0 & -0.1164 & 1.2373 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.0000 \\ 0 & -0.7164 & 67.9221 & 0 \end{bmatrix}$$

$$b = \begin{bmatrix} 0 \\ -1.4551 \\ 0 \\ 8.9546 \end{bmatrix}$$

1.2 二级倒立摆数学建模

先做一些理想化的假设: 忽略空气阻力, 直线电机导轨摩擦力为零, 摆杆铰接轴承摩擦力忽略不计, 摆杆质量均匀分布, 摆杆质心在其中点, 连接块的质量集中于铰接点。

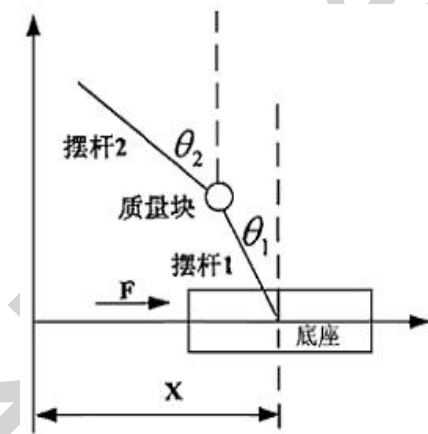


图 1.2 二级倒立摆的物理模型

各变量定义如表 1-2 所示:

表 1-2 二级倒立摆数学模型各变量定义表

变量	含义	说明	取值/单位
θ_1	摆杆 1 与竖直向上的夹角	逆时针方向为正	rad
θ_2	摆杆 2 与竖直向上的夹角	逆时针方向为正	rad
l_1	摆杆 1 质心到下转轴的距离		0.1m
l_2	摆杆 2 质心到上转轴的距离		0.36m
L	连接块质心到下转轴的距离		0.16m
m_1	摆杆 1 的质量		0.036Kg
m_2	摆杆 2 的质量		0.072Kg
m_3	连接块的质量		0.067Kg

M	底座的质量		1.2Kg
x	底座位移	向右为正，导轨中点为零点	m
F	电机输出力	向右为正	N
g	重力加速度		9.8m/sec ²

采用拉格朗日方程建模。拉格朗日方程为：

$$L(q, \dot{q}) = T(q, \dot{q}) - V(q, \dot{q}) \quad (1-11)$$

其中： L 为拉格朗日算子， q 为系统的广义坐标， T 为系统的动能， V 为系统的势能。

拉格朗日方程由广义坐标 q_i 和 L 表示为：

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_i} = Q_i \quad (1-12)$$

其中： q_i 为系统的广义坐标， Q_i 是系统沿该广义坐标方向的广义力， D 是系统的耗散能。

对于二级摆系统，广义坐标为位移 x 和摆杆角度 θ_1 、 θ_2 ； Q_i 为作用在系统上的广义力，当 $q_i = x$ ， $Q_i = F$ ，当 $q_i = \theta_1$ 、 θ_2 时， $Q_i = 0$ 。 T 为底座和各级倒立摆的总动能， V 为底座和各级倒立摆的总势能， D 为底座和各级倒立摆的总耗散能，在这里，忽略了各种摩擦，故 D 等于零。故这里用于二级摆建模的拉格朗日方程为：

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i \quad (1-13)$$

首先计算系统的动能：

$$T = T_M + T_{m_1} + T_{m_2} + T_{m_3}$$

其中： T_M 底座动能， T_{m_1} 摆杆 1 动能， T_{m_2} 摆杆 2 动能， T_{m_3} 连接块动能。

而 $T_{m_1} = T'_{m_1} + T''_{m_1}$ ，其中， $\begin{cases} T'_{m_1} & \text{摆杆1质心平动动能} \\ T''_{m_1} & \text{摆杆1绕质心转动动能} \end{cases}$

$T_{m_2} = T'_{m_2} + T''_{m_2}$ ，其中， $\begin{cases} T'_{m_2} & \text{摆杆2质心平动动能} \\ T''_{m_2} & \text{摆杆2绕质心转动动能} \end{cases}$

$$T_M = \frac{1}{2} M \dot{x}^2$$

$$T'_{m_1} = \frac{1}{2} \left(\left(\frac{d(x - l_1 \sin \theta_1)}{dt} \right)^2 + \left(\frac{d(l_1 \cos \theta_1)}{dt} \right)^2 \right) = \frac{1}{2} m_1 \dot{x}^2 - m_1 l_1 \dot{x} \dot{\theta}_1 \cos \theta_1 + \frac{1}{2} m_1 l_1^2 \dot{\theta}_1^2$$

$$T_{m_1}'' = \frac{1}{2} J_1 \omega_1^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{3} m_1 l_1^2 \right) \dot{\theta}_1^2 = \frac{1}{6} m_1 l_1^2 \dot{\theta}_1^2$$

则

$$T_{m_1} = T_{m_1}' + T_{m_1}'' = \frac{1}{2} m_1 \dot{x}^2 - m_1 l_1 \dot{x} \dot{\theta}_1 \cos \theta_1 + \frac{2}{3} m_1 l_1^2 \dot{\theta}_1^2$$

同样可以求出

$$T_{m_2}' = \frac{1}{2} m_2 \left(\frac{d(x - 2l_1 \sin \theta_1 - l_2 \sin \theta_2)}{dt} \right)^2 + \frac{1}{2} m_2 \left(\frac{d(2l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos \theta_2)}{dt} \right)^2$$

$$= \frac{1}{2} m_2 (\dot{x} - 2l_1 \dot{\theta}_1 \cos \theta_1 - l_2 \dot{\theta}_2 \cos \theta_2)^2 + \frac{1}{2} m_2 (2l_1 \dot{\theta}_1 \sin \theta_1 + l_2 \dot{\theta}_2 \sin \theta_2)^2$$

$$T_{m_2}'' = \frac{1}{2} J_2 \omega_2^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{3} m_2 l_2^2 \right) \dot{\theta}_2^2 = \frac{1}{6} m_2 l_2^2 \dot{\theta}_2^2$$

$$T_{m_2} = T_{m_2}' + T_{m_2}''$$

$$= \frac{1}{2} m_2 \left(\dot{x} - 2l_1 \dot{\theta}_1 \cos \theta_1 - l_2 \dot{\theta}_2 \cos \theta_2 \right)^2 + \frac{1}{2} m_2 \left(4l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{4}{3} l_2^2 \dot{\theta}_2^2 + 4l_1 l_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \cos(\theta_2 - \theta_1) \right)$$

$$T_{m_3} = \frac{1}{2} m_3 \left(\left(\frac{d(x - 2l_1 \sin \theta_1)}{dt} \right)^2 + \left(\frac{d(2l_1 \cos \theta_1)}{dt} \right)^2 \right)$$

$$= \frac{1}{2} m_3 \dot{x}^2 - 2m_3 l_1 \dot{x} \dot{\theta}_1 \cos \theta_1 + 2m_3 l_1^2 \dot{\theta}_1^2$$

因此，可以得到系统总动能为：

$$T = T_M + T_{m_1} + T_{m_2} + T_{m_3}$$

$$= \frac{1}{2} M \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m_1 \dot{x}^2 - m_1 l_1 \dot{x} \dot{\theta}_1 \cos \theta_1 + \frac{2}{3} m_1 l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \left(\dot{x} - 2l_1 \dot{\theta}_1 \cos \theta_1 - l_2 \dot{\theta}_2 \cos \theta_2 \right)^2$$

$$+ \frac{1}{2} m_2 \left(4l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{4}{3} l_2^2 \dot{\theta}_2^2 + 4l_1 l_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \cos(\theta_2 - \theta_1) \right) + \frac{1}{2} m_3 \dot{x}^2 - 2m_3 l_1 \dot{x} \dot{\theta}_1 \cos \theta_1 + 2m_3 l_1^2 \dot{\theta}_1^2$$

系统的势能为：

$$V = V_{m_1} + V_{m_2} + V_{m_3} = m_1 g l_1 \cos \theta_1 + 2m_3 g l_1 \cos \theta_1 + m_2 g (2l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos \theta_2)$$

从而拉格朗日算子：

$$L = T - V$$

$$= \frac{1}{2} M \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m_1 \dot{x}^2 - m_1 l_1 \dot{x} \dot{\theta}_1 \cos \theta_1 + \frac{2}{3} m_1 l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \left(\dot{x} - 2l_1 \dot{\theta}_1 \cos \theta_1 - l_2 \dot{\theta}_2 \cos \theta_2 \right)^2$$

$$+ \frac{1}{2} m_2 \left(4l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{4}{3} l_2^2 \dot{\theta}_2^2 + 4l_1 l_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \cos(\theta_2 - \theta_1) \right) + \frac{1}{2} m_3 \dot{x}^2 - 2m_3 l_1 \dot{x} \dot{\theta}_1 \cos \theta_1 + 2m_3 l_1^2 \dot{\theta}_1^2$$

$$- m_1 g l_1 \cos \theta_1 + 2m_3 g l_1 \cos \theta_1 + m_2 g (2l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos \theta_2)$$

由于在广义坐标 θ_1, θ_2 上均无外力作用，有以下等式成立：

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_1} = 0 \quad (1-14)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_2} = 0 \quad (1-15)$$

展开式 (1-14)、(1-15) 分别得到式 (1-16)、(1-17)：

$$6m_2 l_2 \dot{\theta}_2^2 \sin(\theta_1 - \theta_2) + 4(m_1 + 3(m_2 + m_3))l_1 \ddot{\theta}_1 - 3(-2m_2 l_2 \ddot{\theta}_2 \cos(\theta_2 - \theta_1) + (m_1 + 2(m_2 + m_3))(g \sin \theta_1 + \ddot{x} \cos \theta_1)) = 0 \quad (1-16)$$

$$-3g \sin \theta_2 - 6l_1 \dot{\theta}_1^2 \sin(\theta_1 - \theta_2) + 4l_2 \ddot{\theta}_2^2 + 6l_1 \ddot{\theta}_1 \cos(\theta_2 - \theta_1) - 3\ddot{x} \cos \theta_2 = 0 \quad (1-17)$$

在 MATLAB 中，将式 (1-16) (1-17) 对 $\ddot{\theta}_1$ 、 $\ddot{\theta}_2$ 求解代数方程，得到以下两式：

$$\begin{aligned} \ddot{\theta}_1 = & (3(-2gm_1 \sin \theta_1 - 4gm_2 \sin \theta_1 - 4m_3 g \sin \theta_1 + 3m_2 g \cos(\theta_2 - \theta_1) \sin \theta_2 \\ & + 6m_2 l_1 \cos(\theta_1 - \theta_2) \sin(\theta_1 - \theta_2) \dot{\theta}_1^2 + 4m_2 l_2 \sin(\theta_1 - \theta_2) \dot{\theta}_2^2 - 2m_1 \ddot{x} \cos \theta_1 \\ & - 4m_2 \ddot{x} \cos \theta_1 - 4m_3 \ddot{x} \cos \theta_1 + 3m_2 \ddot{x} \cos(\theta_1 - \theta_2) \cos \theta_2)) / \\ & (2l_1(-4m_1 - 12m_2 - 12m_3 + 9m_2 \cos^2(\theta_1 - \theta_2))) \end{aligned} \quad (1-18)$$

$$\begin{aligned} \ddot{\theta}_2 = & -(-\frac{4}{9}m_2(m_1 + 3(m_2 + m_3))l_1^2 l_2 (-3g \sin \theta_2 - 6l_1 \dot{\theta}_1^2 \sin(\theta_1 - \theta_2) - 3\ddot{x} \cos \theta_2 \\ & + \frac{2}{3}m_2 l_1^2 l_2 \cos(\theta_1 - \theta_2)(6m_2 l_2 \dot{\theta}_2^2 \sin(\theta_1 - \theta_2) - 3(m_1 + 2(m_2 + m_3))(g \sin \theta_1 + \ddot{x} \cos \theta_1))) / \\ & (-\frac{16}{9}m_2(m_1 + 3(m_2 + m_3))l_1^2 l_2^2 + 4m_2^2 l_1^2 l_2^2 \cos^2(\theta_1 - \theta_2)) \end{aligned} \quad (1-19)$$

表示成以下形式：

$$\ddot{\theta}_1 = f_1(x, \theta_1, \theta_2, \dot{x}, \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \ddot{x}) \quad (1-20)$$

$$\ddot{\theta}_2 = f_2(x, \theta_1, \theta_2, \dot{x}, \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \ddot{x}) \quad (1-21)$$

取平衡位置时各变量的初值为零

$$(x, \theta_1, \theta_2, \dot{x}, \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \ddot{x}) = (0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)$$

将式 (1-19) 在平衡位置进行泰勒级数展开，并且线性化，令

$$K_{11} = \frac{\partial f_1}{\partial x} \Big|_{x=0, \theta_1=0, \theta_2=0, \dot{x}=0, \dot{\theta}_1=0, \dot{\theta}_2=0, \ddot{x}=0} = 0$$

$$K_{12} = \frac{\partial f_1}{\partial \theta_1} \Big|_{x=0, \theta_1=0, \theta_2=0, \dot{x}=0, \dot{\theta}_1=0, \dot{\theta}_2=0, \ddot{x}=0} = \frac{3(-2m_1 - 4m_2 - 4m_3)g}{2(-4m_1 - 3m_2 - 12m_3)l_1}$$

$$K_{13} = \frac{\partial f_1}{\partial \theta_2} \Big|_{x=0, \theta_1=0, \theta_2=0, \dot{x}=0, \dot{\theta}_1=0, \dot{\theta}_2=0, \ddot{x}=0} = \frac{9m_2g}{2(-4m_1 - 3m_2 - 12m_3)l_1}$$

$$K_{14} = \frac{\partial f_1}{\partial \dot{x}} \Big|_{x=0, \theta_1=0, \theta_2=0, \dot{x}=0, \dot{\theta}_1=0, \dot{\theta}_2=0, \ddot{x}=0} = 0$$

$$K_{15} = \frac{\partial f_1}{\partial \dot{\theta}_1} \Big|_{x=0, \theta_1=0, \theta_2=0, \dot{x}=0, \dot{\theta}_1=0, \dot{\theta}_2=0, \ddot{x}=0} = 0$$

$$K_{16} = \frac{\partial f_1}{\partial \dot{\theta}_2} \Big|_{x=0, \theta_1=0, \theta_2=0, \dot{x}=0, \dot{\theta}_1=0, \dot{\theta}_2=0, \ddot{x}=0} = 0$$

$$K_{17} = \frac{\partial f_1}{\partial \ddot{x}} \Big|_{x=0, \theta_1=0, \theta_2=0, \dot{x}=0, \dot{\theta}_1=0, \dot{\theta}_2=0, \ddot{x}=0} = \frac{3(-2m_1 - m_2 - 4m_3)g}{2(-4m_1 - 3m_2 - 12m_3)l_1}$$

代入式 (1-17)，得到线性化之后的公式：

$$\ddot{\theta}_1 = K_{12}\theta_1 + K_{13}\theta_2 + K_{17}\ddot{x} \quad (1-22)$$

将式 (1-20) 在平衡位置进行泰勒级数展开，并且线性化，令

$$K_{21} = \frac{\partial f_2}{\partial x} \Big|_{x=0, \theta_1=0, \theta_2=0, \dot{x}=0, \dot{\theta}_1=0, \dot{\theta}_2=0, \ddot{x}=0} = 0$$

$$K_{22} = \frac{\partial f_2}{\partial \theta_1} \Big|_{x=0, \theta_1=0, \theta_2=0, \dot{x}=0, \dot{\theta}_1=0, \dot{\theta}_2=0, \ddot{x}=0} = \frac{2(m_1 + 2(m_2 + m_3))g}{4m_2l_2 - \frac{16}{9}(m_1 + 3(m_2 + m_3))l_2}$$

$$K_{23} = \frac{\partial f_2}{\partial \theta_2} \Big|_{x=0, \theta_1=0, \theta_2=0, \dot{x}=0, \dot{\theta}_1=0, \dot{\theta}_2=0, \ddot{x}=0} = -\frac{4(m_1 + 3(m_2 + m_3))g}{3(4m_2l_2 - \frac{16}{9}(m_1 + 3(m_2 + m_3))l_2)}$$

$$K_{24} = \frac{\partial f_1}{\partial \dot{x}} \Big|_{x=0, \theta_1=0, \theta_2=0, \dot{x}=0, \dot{\theta}_1=0, \dot{\theta}_2=0, \ddot{x}=0} = 0$$

$$K_{25} = \frac{\partial f_1}{\partial \dot{\theta}_1} \Big|_{x=0, \theta_1=0, \theta_2=0, \dot{x}=0, \dot{\theta}_1=0, \dot{\theta}_2=0, \ddot{x}=0} = 0$$

$$K_{26} = \frac{\partial f_1}{\partial \dot{\theta}_2} \Big|_{x=0, \theta_1=0, \theta_2=0, \dot{x}=0, \dot{\theta}_1=0, \dot{\theta}_2=0, \ddot{x}=0} = 0$$

$$K_{27} = \frac{\partial f_1}{\partial \ddot{x}} \Big|_{x=0, \theta_1=0, \theta_2=0, \dot{x}=0, \dot{\theta}_1=0, \dot{\theta}_2=0, \ddot{x}=0} = \frac{2(m_1 + 2(m_2 + m_3)) - \frac{4}{3}(m_1 + 3(m_2 + m_3))}{4m_2l_2 - \frac{16}{9}(m_1 + 3(m_2 + m_3))l_2}$$

代入式 (1-18)，得到线性化之后的公式：

$$\ddot{\theta}_2 = K_{22}\theta_1 + K_{23}\theta_2 + K_{27}\ddot{x} \quad (1-23)$$

现在得到了两个线性微分方程，由于采用电机输出力作为控制输入，而该输出力与加速度成

比例关系，因此还需加上一个方程：

$$u = \ddot{x} \quad (1-24)$$

取状态变量如下：

$$\begin{aligned} x_1 &= x \\ x_2 &= \theta_1 \\ x_3 &= \theta_2 \\ x_4 &= \dot{x} \\ x_5 &= \dot{\theta}_1 \\ x_6 &= \dot{\theta}_2 \end{aligned}$$

由式（1-21）、（1-22）、（1-23）得到状态空间方程如下：

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_{12} & K_{13} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_{22} & K_{23} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ K_{17} \\ K_{27} \end{bmatrix} u \quad (1-25)$$

倒立摆实际的物理参数为：

$M = 0.68$	小车质量
$m1 = 0.047$	下摆杆质量
$m2 = 0.094$	上摆杆质量
$m3 = 0.253$	连接块质量
$L1 = 0.1$	下摆杆质心到一端的长度
$L2 = 0.172$	上摆杆质心到一端的长度

代入实际值可得：

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 62.7357 & -12.6144 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -39.5393 & 38.8326 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 5.1144 \\ -0.0721 \end{bmatrix} u$$

第二章 基本实验

基本实验分为直线电机平台实验和直线电机倒立摆实验，主要针对本科一般教学任务和课程实验，学生也可有选择性地深入研究部分实验。基本实验可以让机电专业和自动化专业的学生全面了解和掌握控制系统、自动控制、机电及驱动类知识，主要用于《机电传动控制》、《机电控制系统》、《电机学》、《机械控制工程》、《自动控制原理》、《计算机控制技术》、《数控技术》等课程实验和课程设计，也可以作为专业导论的演示实验。

基本实验一共 13 个，其中直线电机平台 6 个，直线电机倒立摆 7 个。

备注：有示例程序的实验用“*”号标出，没有“*”号的实验由学生自己编写程序完成。

2.1 直线电机位置伺服控制实验

2.1.1 *平台认知实验

实验目的：

熟悉直线电机及直线电机驱动基本平台

实验内容：

主要是认识平台的各组成部分，包括永磁同步直线电机组成结构、直线光栅、控制卡、驱动器、cSPACE 软件，使学生理解直驱技术的特点和控制系统的构成。

实验要求：

学生要掌握直线电机与传统电机驱动的不同点，直线电机闭环驱动系统的构成；

实验报告：

查阅文献和撰写实验报告时，比较直接驱动和传统驱动方式的不同，并分析各自的优缺点。

实验步骤：

参照“合动智能直线电机平台用户手册”文档，了解直线电机平台及其驱动系统。

2.1.2 *cSPACE 操作实验

实验目的:

熟悉 cSPACE 控制系统和操作

实验内容:

利用 cSPACE 模块和 MATLAB/Simulink 模块搭建简单的开环和闭环 PID 控制算法，在 cSPACE 上观测控制输出，相当于做仿真控制；2.实物操作，将系统接线接好，学生手动移动电机动子，在 cSPACE 上观测光栅信号的变化。

实验要求:

学生要掌握 cSPACE 模块的搭建，实现光栅信号的读出；

实验报告:

描述 cSPACE 模块的搭建过程，给出光栅信号的拷屏图。

本实验为经典控制理论实验。

实验步骤:

本实验要求搭建直线电机的 PID 控制跟踪正弦曲线进行运动的程序，参照 2.1.6 节的内容进行实验。

2.1.3 *系统参数自动调节实验

实验目的:

直线电机驱动平台的参数自动调节

实验内容:

直线电机伺服系统在进行使用前要进行参数设置，包括电流环、速度环和位置环，学生通过本实验可以了解实际驱动器和驱动平台的参数设置方法，它和实际工业应用中系统的参数设置方法完全一致。

实验要求:

掌握伺服系统三环设置的基本概念，掌握驱动器的参数设置与调节方法

实验报告:

描述控制系统三环设置的概念，描述设置过程，最后给出设置后的速度和位置响应曲线。

本实验为经典控制理论实验。

实验步骤:

参照“合动智能直线电机平台用户手册”文档，设置 Elmo 驱动器，根据 Elmo 驱动器对电机进行自动扫频时确定的电流环、速度环、位置环参数获得电机的速度阶跃响应和位置斜坡信号响应。

下图为电机的速度阶跃响应，纵坐标为脉冲的个数，一个脉冲表示 5 μm 。

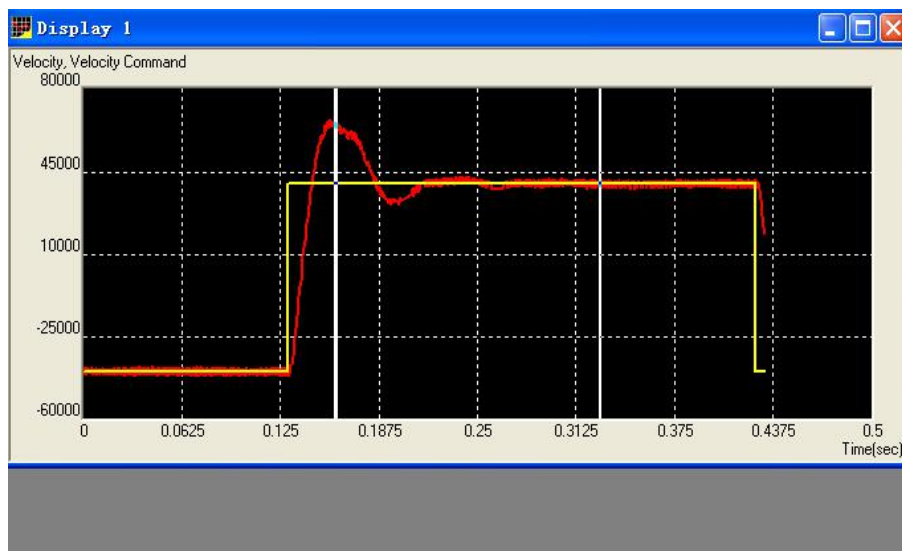


图 2.1 直线电机速度阶跃响应

下图为电机的位置响应曲线，纵坐标为脉冲的个数，一个脉冲表示 5 μm 。



图 2.2 直线电机位置跟踪响应

2.1.4 系统参数手动调节实验

实验目的：

直线电机驱动平台的参数手动调节

实验内容：

直线电机伺服系统在进行使用前要进行参数设置，包括电流环、速度环和位置环，学生通过本实验可以了解实际驱动器和驱动平台的参数设置方法，它和实际工业应用中系统的参数设置方法完全一致。本实验主要掌握参数的手动调节方法。

实验要求：

掌握伺服系统三环设置的基本概念，掌握驱动器的参数设置与调节方法。手动设置是基于学生已经掌握充分的控制理论，是比自动设置难度更大的实验。

实验报告：

描述控制系统三环设置的概念，描述设置过程，最后给出设置后的速度和位置响应曲线。

实验步骤：

参照“合动智能直线电机平台用户手册”文档，了解直线电机驱动平台的设置方法。

2.1.5 *直线电机平台 PID 控制实验

实验目的：

直线电机驱动平台的 PID 调节与控制

实验内容：

利用 cSPACE，实现直线电机的运动跟踪和定位控制。即利用 cSPACE 自带的 PID 控制算法，在 cSPACE 上生成实时控制代码，下载到 DSP 下位机，对直线电机进行实时控制，再在 cSPACE 上观察各个变量。

实验要求：

要求学生能够熟练修改 PID 参数，观察参数变化效果，发现一般的规律性。

实验报告：

描述控制系统 PID 调节机理及调节步骤，给出实验结果及不同参数下控制效果图。

本实验为经典控制理论实验。

根据以上流程搭建以下所示 cSPACE Simulink 算法框图

实验步骤:

需要运行的软件为:

(1) MATLAB R2017a

(2) 直线电机 PID 控制算法 simulink 算法文件 (“sinwave3Hz1E1.slx” 在文件夹 “sinwave3Hz1E1” 下)

(搭建算法时推荐采用公司提供的示例程序，注意文件路径应为英文路径)

1) 双击桌面 MATLAB R2017a 图标运行 MATLAB 程序



2) 基于 PID 控制算法搭建算法模块

编译算法文件，打开运行程序，点击“Build”  按钮，编译算法文件，生成目标代码，成功后 Matlab 状态为 ready。

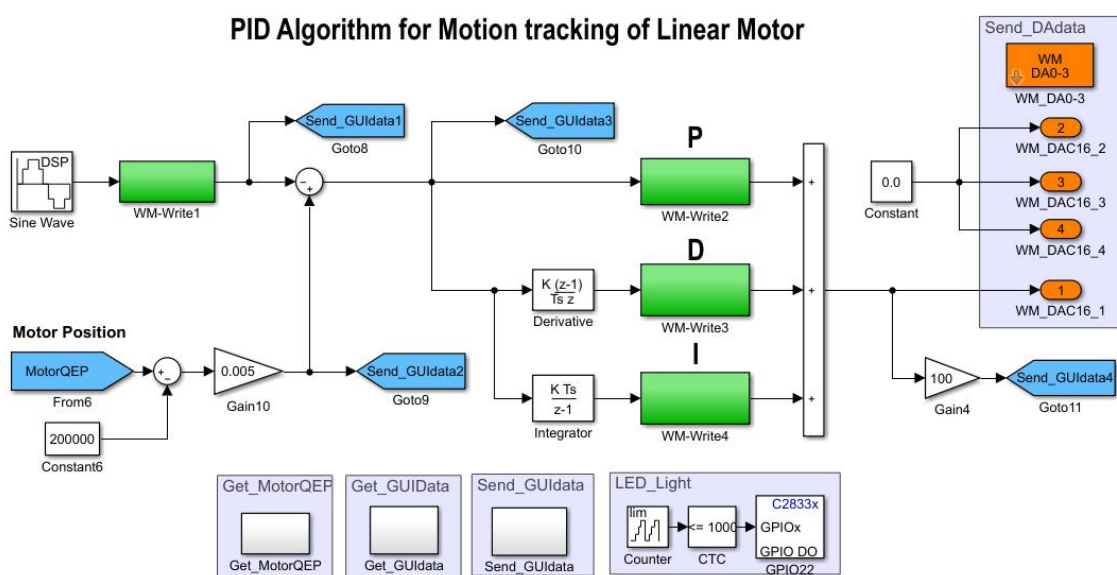





图 2.3 直线电机位置伺服控制 cSPACE 算法框图

3) 打开 Emlo 驱动器驱动软件

4) 打开 cSPACE 控制界面 cSpaceWatch0.exe。

点击“运行”按钮 ,  为停止按键。启动电机，打开电机驱动软件 Composer，点击运行按钮 , 此时可以听到电机运行的声音，

5) 当关闭控制界面时，击“关闭界面”按钮，关闭程序。

2.1.6 直线电机平台改进 PID 控制器设计实验

实验目的：

直线电机驱动平台的改进 PID 控制器设计

实验内容：

利用 cSPACE 系统，设计自己的 PID 控制器，对控制器进行改进，观察控制效果。实现直线电机平台的运动跟踪控制，在 cSPACE 上生成实时控制代码，下载到 DSP 下位机，对直线电机进行实时控制，再在 cSPACE 上观察各个变量。

实验要求：

要求学生能够设计改进的 PID 控制器，观察参数变化效果，发现一般的规律性。

实验报告：

描述控制系统改进的 PID 控制器调节机理及调节步骤，给出实验结果及不同参数下控制效果图。

本实验为经典控制理论实验。

实验步骤：

参照“直线电机位置伺服控制实验”文件夹下“各种改进型 PID 控制总结.doc”文档，学生自己学习积分分离 PID 控制、遇限削弱积分法、不完全微分 PID 控制、微分先行 PID 控制、带死区的 PID 控制等改进 PID 控制算法。

2.1.7 *采用超前、滞后算法控制直线电机跟踪正弦曲线运动

实验目的：

采用超前、滞后算法控制直线电机跟踪正弦曲线运动

实验内容：

利用 cSPACE 系统，设计超前和滞后校正模块。实现直线电机平台的运动跟踪控制，在 cSPACE 上生成实时控制代码，下载到 DSP 下位机，对直线电机进行实时控制，再在 cSPACE 上观察各个变量，观察控制效果。

实验要求：

要求学生能够设计超前和校正调节器。

实验报告：

描述超前和校正调节器的原理、设计方法及调节步骤，给出实验结果及不同参数下控制效果图。

本实验为经典控制理论实验。

实验步骤：

参照“合动智能 cSPACE 软件说明书.doc”文档的 2.3 节“采用超前、滞后算法控制直线电机跟踪正弦曲线运动”内容。

直线电机位置伺服控制实验文件夹下的“sinwave_lag.mdl”是滞后模块 Simulink 控制算法文件，“sinwave_lead.mdl”是超前模块 Simulink 控制算法文件。

2.2 直线电机倒立摆实验

2.2.1*倒立摆认知实验

实验目的：

直线电机驱动倒立摆认知实验

实验内容：

主要是认识倒立摆系统的各组成部分，包括执行元件（直线电机）、倒立摆机构、反馈元件（直线光栅、角度编码器）、控制系统（控制卡）、cSPACE 软件，使学生理解倒立摆，并且定性分析倒立摆的控制原理。

实验要求：

要求学生能够正确理解直线电机驱动倒立摆的工作机理和工作过程，了解直线电机倒立摆结构，区别与传统倒立摆的不同点。

实验报告：

描述直线电机倒立摆及其控制机理，比较传统倒立摆和直线电机驱动倒立摆的不同点，给出直线电机驱动倒立摆的优点。

本实验为经典控制理论实验。

实验步骤：

参照本实验指导书前三章的内容，然后总结实验报告。

2.2.2*一级摆常规 PID 控制实验

实验目的：

直线电机驱动一级倒立摆常规 PID 控制实验

实验内容：

它是从人的自然的观察和感觉而进行的倒立摆 PID 控制实验，其控制对象为直线电机，而反馈值为倒立摆的偏离角度值，在进行控制时学生可以发现小车向一方偏离。

实验要求：

- 1.学习 PID 控制原理；
- 2.学习一级摆数学建模；
- 3.利用 cSPACE 设计 PID 控制器，观察和发现存在的问题。

实验报告：

事实上，单个 PID 控制器不能够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，为进一步实验做准备。

本实验为经典控制理论实验。

实验步骤：

1. 硬件连接：

连接倒立摆各部分硬件，本实验所选择倒立摆系统的规格及参数为：

序号	部件参数	详细说明
1	CSPACE 控制卡处理器	TMS320F28335 数字信号发生器 32 位浮点数发生器 CPU 时钟：150MHz
2	Elmo 直线电机驱动器	用于驱动 U 型直线电机
3	U 型直线电机	带动运动部件（小车）
4	角度编码器	测量倒立摆杆摆角，型号 PSB-2500-G05L

		2500PPR, DSP 经过四倍频后得到 10000 个脉冲每圈, 角度分辨率为: $360/10000(0.036^{\circ})$
5	霍尔位置传感器 磁栅传感器	测量直线电机位置分辨率为 5 毫米
6	倒立摆杆	一级摆和二级摆
7	TI DSP 仿真器	合动智能自主研发高速仿真器
8	Elmo 驱动器电源 DSP 控制卡电源	48V 24V +15V
9	控制箱接口	编码器接口:32-bit 分辨率最大输入频率 33 MHz 霍尔接口 DSP 通讯接口: 用于启动停止电机 电机接口: 连接电机相线 电源接口: 240V AC 交流电源输入 位置编码器接口: 直线电机磁栅编码器输入
10	控制箱物理尺寸	50cmx38cmx18cm
11	串行接口	RS232, 默认 57600 的波特率

对照驱动控制箱面板接口图 2.4 进行接线



图 2.4 驱动控制箱面板接线图

- | | |
|-------------|-----------|
| ① DSP 通讯接口 | ⑥ 电磁铁接口 |
| ② EIMO 通讯接口 | ⑦ LED 灯接口 |
| ③ 编码器 1 接口 | ⑧ 光电传感器接口 |
| ④ 编码器 2 接口 | ⑨ 磁栅接口 |
| ⑤ 电机接口 | ⑩ 霍尔接口 |

电机和倒立摆的接头	控制箱前面板接头	计算机接口
12 芯航空接头	光栅接口	
5 芯航空接头	霍尔接口	
8 芯航空接头	编码器接口 E2	
	ELMO 通讯接口	任一 USB 接口
	仿真器接口	任一 USB 接口
备注：以上接头按行对应进行连接		

2. 软件及其操作界面

需要运行的软件为：

(1) MATLAB R2017a

(2) 一级摆 PID 平衡控制算法 simulink 算法文件 (cSPACE_28335demo.slx, 在一级倒立摆 PID 文件夹“dlbpid”下)

3. 运行步骤：

1) 双击桌面 MATLAB R2017a 图标运行 MATLAB 程序



2) 基于 PID 理论搭建一级摆算法模块

采用 cSPACE 的一级倒立摆控制系统硬件原理框图如图 2.5 所示：

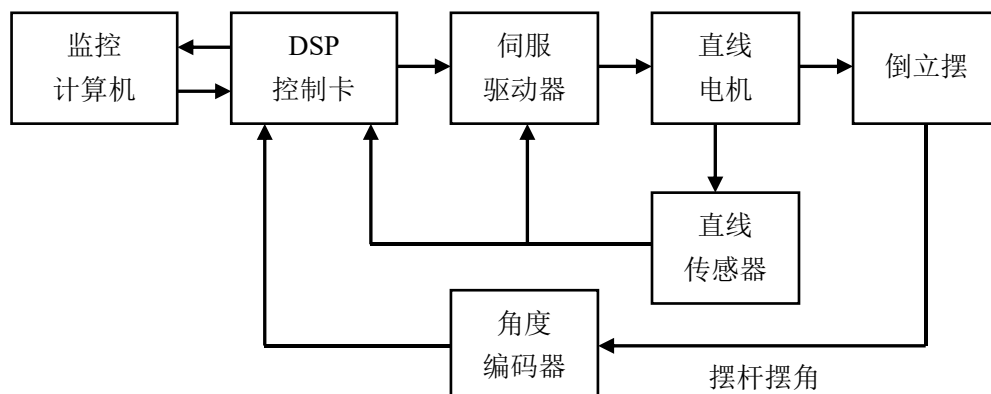


图 2.5 一级倒立摆控制系统硬件框图

系统组成包括监控计算机，DSP 控制卡，伺服驱动器，光电编码器，直线电机和倒立摆。其中，光电编码器，用于检测摆杆角度。DSP 控制卡接收来自光电编码器的摆杆角度信号和光栅输出的直线电机的工作台位移信号，并对信号进行处理得到 $x, \phi, \dot{x}, \dot{\phi}$ 四个状态变量，然后根据控制算法计算得到精确的控制量，经过 DA 转换后输出模拟控制信号，再经伺服驱动器放大后驱动直线电机输出相应的力来控制摆杆倒立平衡。

根据以上流程搭建如图 2.5 所示 Simulink 算法框图，图为本公司提供的算法文件，名为“cSPACE_28335demo.slx”

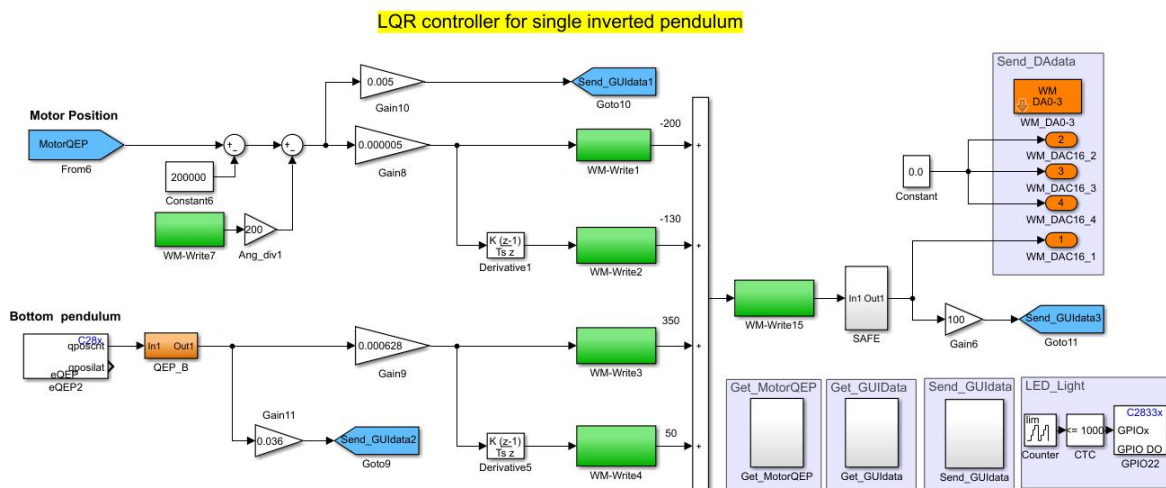


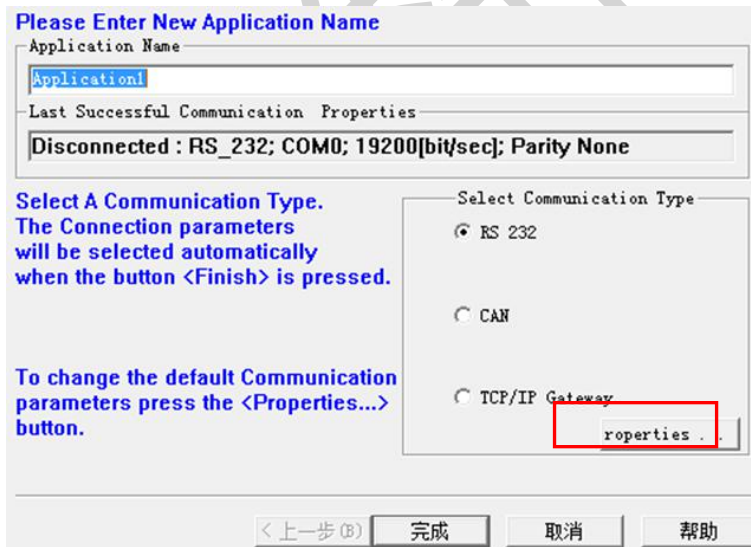
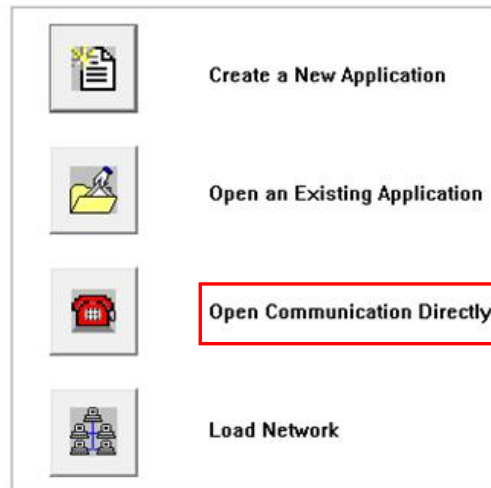
图 2.6 一级倒立摆 PID 控制算法框图

3) 编译算法文件，打开运行程序，点击“Build”按钮，编译算法文件，生成

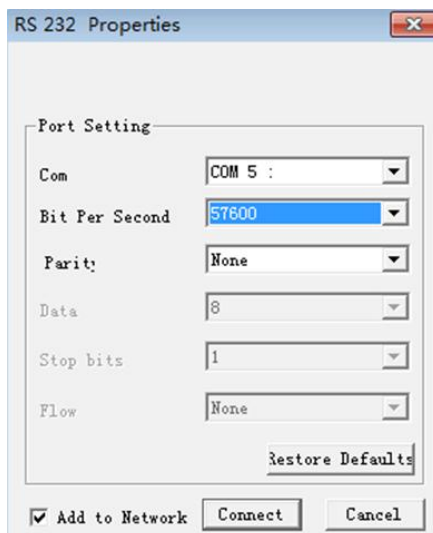
目标代码，成功后 Matlab 状态为 ready。

4) 打开驱动软件

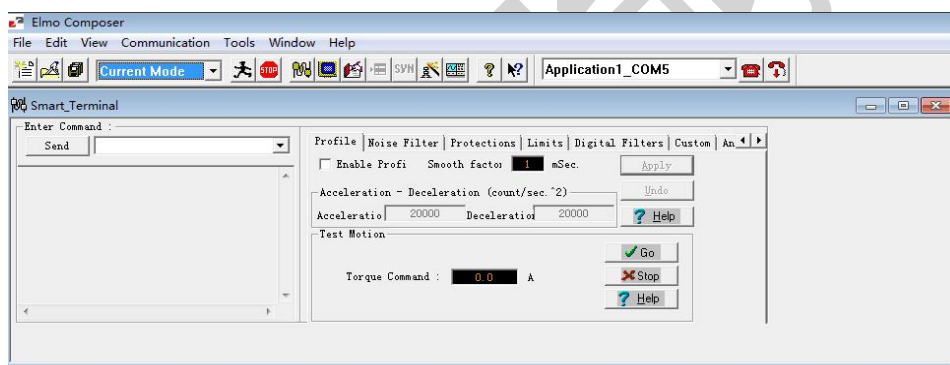
打开 Emlo 驱动器驱动软件，选择 Open Communication Directly.

Intelligence
is Simplicity

点击 roperities 进行参数配置，选择 RS 232，并点击选择串口



点击并选择 Com 口（串口查看在计算机资源管理器中查看）打开后，选择驱动模式，这里选择电流模式 Current mode（默认电流环模式）



- 5) 程序编译完后，打开 cSPACE 控制界面 cSpaceWatch0.exe。
运行程序后弹出如下所示界面，图 2.7，其中串口的选择在资源管理器中查看。

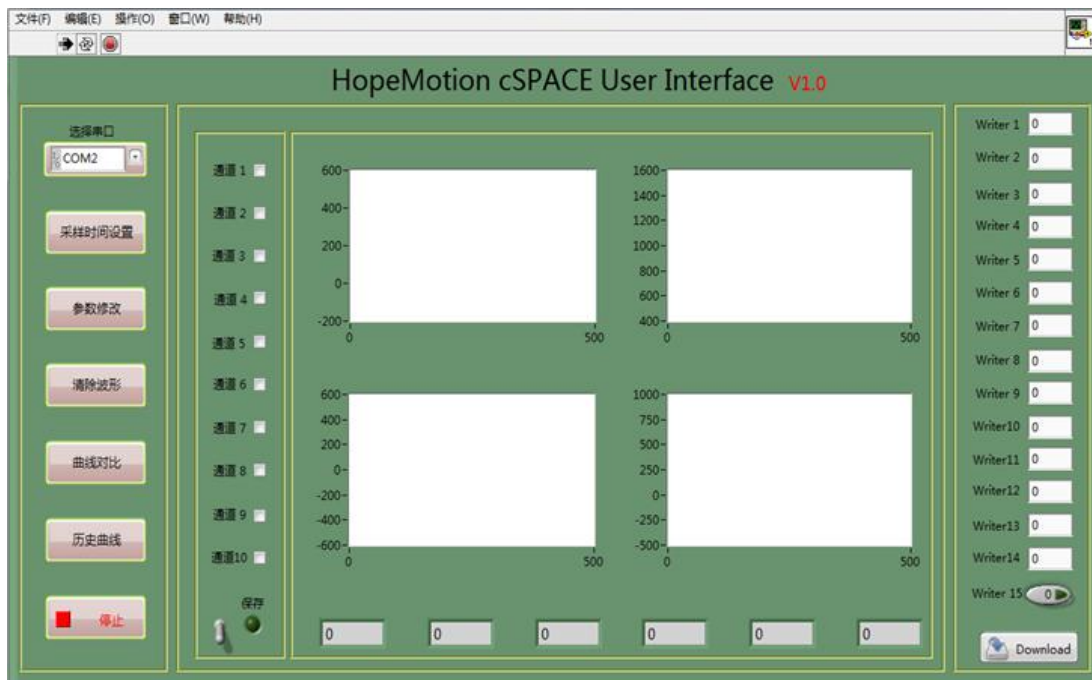





图 2.7 监控界面

- 6) 点击“运行”按钮 ， 为停止按键。将倒立摆的摆杆扶到竖直倒立位置（扶正的时候，同时观察界面，偏角参数的框图曲线从 -180° 转向 0° 左右），输入“Write1”、“Write2”、“Write3”、“Write4”、“Write5” LQR 控制算法的四个参数及增益，在本程序中值分别为：12，21，-24，-4。
- 7) 启动电机及界面，打开电机驱动软件 Composer，点击运行按钮 ，此时可以听到电机运行的声音，同时点击界面中“下载参数”按钮进行参数下载。启动后松开手，这时电机往返运动，倒立摆即能稳定运行，不稳定运行时，适当调节 LQR 控制参数。
- 8) 当关闭控制界面时，击“关闭界面”按钮，关闭程序。

2.2.3 一级摆串级 PID 控制实验

实验目的：

直线电机驱动一级倒立摆串级 PID 控制实验

实验内容：

通过人的自然观察和感觉而进行的倒立摆 PID 控制实验，可以发现平台往一边偏移，这是因为我们没有对平台位置进行控制。本实验加入额外的控制器控制小车平台的位置，其构成为两个 PID 控制器，它可使平台基本稳定在一个位置。

实验要求：

- 1.学习 PID 控制原理；
- 2.学习一级摆数学建模；
- 3.利用 cSPACE 设计串级 PID 控制器，观察和发现存在的问题。

实验报告：

串级 PID 控制器能够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。

本实验为经典控制理论实验。

2.2.4*一级摆状态空间极点配置控制器实验

实验目的：

直线电机驱动一级倒立摆串级极点配置设计控制器实验

实验内容：

设计和调节极点配置控制器，使平台和摆杆处于正确位置；调节参数观察系统的变化。比较串级 PID 控制的差别。

实验要求：

- 1.学习一级摆的极点配置设计方法；
- 2.利用 cSPACE 提供的极点配置参数做一级摆控制实验；
- 3.比较各组参数的控制效果。

实验报告：

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。

本实验为现代控制理论实验。

状态空间极点配置简介

参照 上海交通大学崔平 基于状态空间极点配置的倒立摆平衡控制.pdf

一级摆状态空间极点配置控制器设计和 simulink 仿真

wm_pole_assignment.m 为一级摆状态空间极点配置控制器仿真文件，运行该文件就能得到状态空间极点配置控制器的参数。

实验步骤:**1. 硬件连接:**

电机和倒立摆的接头	控制箱前面板接头	计算机接口
12 芯航空接头	光栅接口	
5 芯航空接头	霍尔接口	
8 芯航空接头	编码器 1	
	ELMO 通讯接口	任一 USB 接口
	仿真器接口	任一 USB 接口
备注：以上接头按行对应进行连接		

2. 软件及其操作界面

需要运行的软件为:

(1)、MATLAB R2017a

(2)、一级摆状态空间极点配置算法 simulink 算法文件 (“cSPACE_28335demo.slx”, 在 “dlb_jdpz” 文件夹下)

3. 运行步骤:

1) 双击桌面 MATLAB R2017a 图标运行 MATLAB 程序



2) 基于极点配置设计方法搭建一级摆算法模块

采用 cSPACE 的一级倒立摆控制系统硬件原理框图如图 4.6 所示:

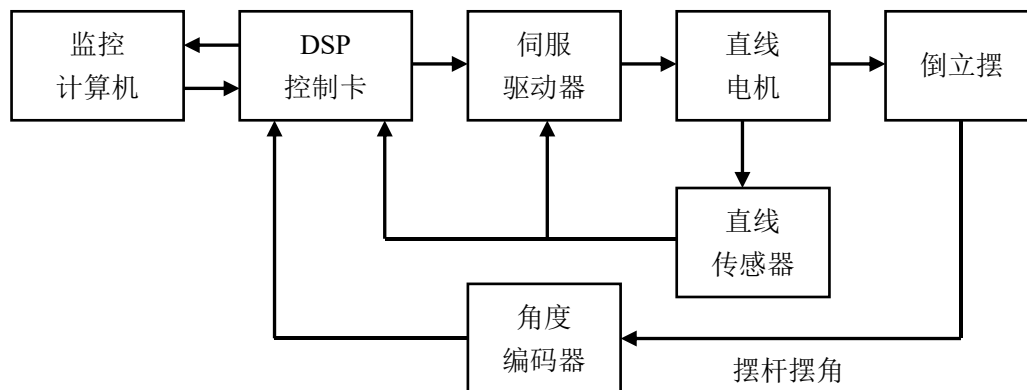


图 2.8 一级倒立摆控制系统硬件框图

根据以上流程搭建如图 2.9 所示 Simulink 算法框图，图为本公司提供的算法文件，名为

“dlblqr2_28335.slx”

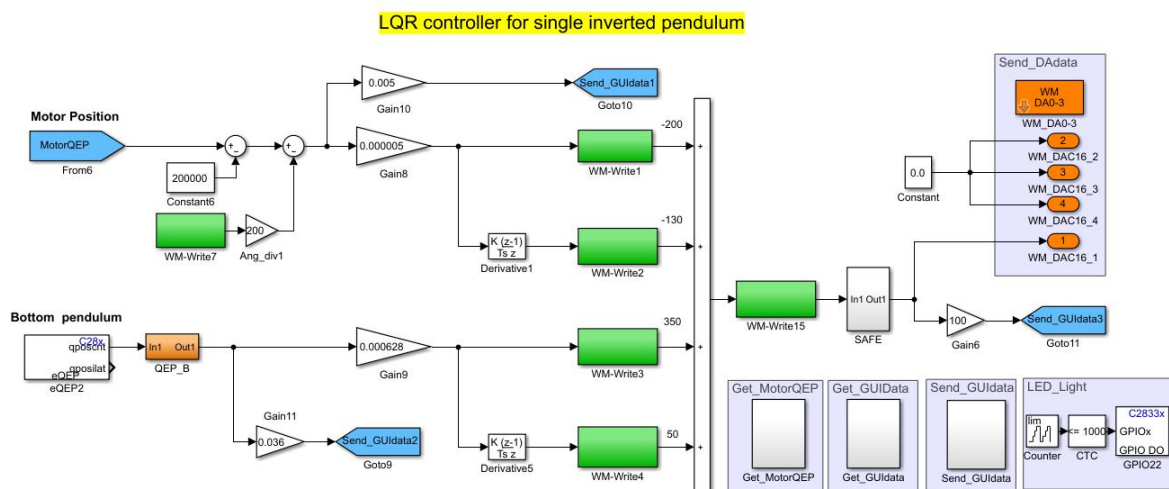





图 2.9 一级倒立摆极点配置算法框图

- 3) 编译算法文件，打开运行程序，点击“Build”  按钮，编译算法文件，生成目标代码，成功后 Matlab 状态为 ready。
- 4) 打开 Emlo 驱动器驱动软件
- 5) 打开 cSPACE 控制界面，cSpaceWatch0.exe。

点击“运行”按钮 ， 为停止按钮。将倒立摆的摆杆扶到竖直倒立位置（扶正的时候，同时观察界面，偏角参数的框图曲线从-180° 转向 0° 左右），输入“Write1”、“Write2”、“Write3”、“Write4”、控制算法的四个参数，在本程序中值分别为：18，15，17，1.5

- 6) 启动电机，打开电机驱动软件 Composer，点击运行按钮 ，此时可以听到电机运行的声音，同时点击界面中“下载参数”按钮进行参数下载。启动后松开手，这时电机往返运动，倒立摆即能稳定运行，不稳定运行时，适当调节控制参数。
- 7) 当关闭控制界面时，击“关闭界面”按钮，关闭程序。

2.2.5* 一级摆 LQR 控制实验

实验目的：

直线电机驱动一级倒立摆 LQR 设计控制器实验

实验内容：

设计和调节 LQR 控制器，使平台和摆杆处于正确位置；调节参数观察系统的变化。比较与

串级 PID 控制的差别。

实验要求:

1. 学习一级摆的 LQR 控制器设计方法;
2. 利用 cSPACE 提供的模块搭建控制器;
3. 实时调节参数, 比较各组参数的控制效果。

实验报告:

描述 LQR 控制器设计方法, 使小车稳定同时又能使杆处于倒立状态, 实验报告需要描述实验过程, 给出控制结果。本实验为现代控制理论实验。

LQR 控制器简介:

最优控制理论主要是依据庞德里亚金的极值原理, 通过对性能指标的优化寻找可以使目标极小的控制器。其中线性二次型性能指标因为可以通过求解 Riccati 方程得到控制器参数, 并且随着计算机技术的进步, 求解过程变得越来越简便, 因而在线性多变量系统的控制器设计中应用较广。利用线性二次型性能指标设计的控制器称作 LQR 控制器。

假设线性时不变系统的状态方程模型为

$$\begin{aligned}\dot{X} &= AX + Bu \\ y &= CX + Du\end{aligned}\quad (1)$$

可以引入最优控制的性能指标, 即设计一个输入量 $u(t)$, 使得

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} [x^T(t)Q(t)x(t) + u^T(t)R(t)u(t)] dt \quad (2)$$

为最小, 其中 Q 和 R 分别为对状态变量和输入变量的加权矩阵。如果该系统受到外界干扰而偏离零状态, 应施加怎样的控制 U , 才能使得系统回到零状态附近, 并同时满足 J 达到最小, 那么这时的 U 就称之为最优控制。由线性二次型最优控制理论可知, 若想使 J 最小化, 则控制信号应该为:

$$u(t) = -R^{-1}B^T P(t)x(t) = -Kx(t) \quad (3)$$

式中 $P(t)$ 就是 Riccati 方程的解, K 是线性最优反馈增益矩阵。这时只需求解 Riccati 代数方程:

$$PA + A^T P - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (4)$$

就可获得 P 值以及最优反馈增益矩阵 K 值。

$$K = R^{-1}B^TP = [k_1, k_2, k_3, k_4]^T \quad (5)$$

4.1节已经得到了直线电机倒立摆系统的比较精确的数学模型，下面针对本系统应用LQR法设计控制器，控制摆杆保持倒立平衡的同时，跟踪小车的位置。

倒立摆 LQR 控制器设计和 Simulink 仿真：

备注：LQR_simulation.m 为倒立摆 LQR 控制器设计和 simulink 仿真的 m 文件

LQR_simulation.mdl 为倒立摆 LQR 控制器设计和 simulink 仿真的 simulink 文件

应用线性反馈控制器，控制系统结构如下图，图中 R 施加在小车上的阶跃输入，状态

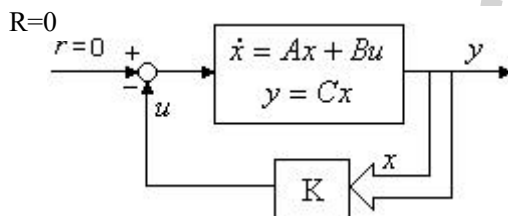


图 2.10 状态控件模型

变量 $x_1 = x, x_2 = \dot{x}, x_3 = \theta, x_4 = \dot{\theta}$ 分别代表小车位移、小车速度、摆杆位置和摆杆角速度。设计控制器使得当给系统施加一个阶跃输入时，摆杆会摆动，然后仍然回到垂直位置，小车可以达到新的指定的位置。

系统的开环极点可以用 MATLAB 程序求出，在 MATLAB 里运行 `eig(A)`，其中 A 为上节所示状态方程系数矩阵，得到开环极点为，

$$PO = [0 \ -0.0830 \ -5.2780 \ 5.2727]$$

可以看出，有一个极点“5.2727”位于右半 S 平面，这说明开环系统不稳定，即倒立摆是典型的自不稳定系统，构建好控制系统才能实现直线电机倒立摆的平衡控制。

假设全状态反馈可以实现（四个状态量都可测），找出确定反馈控制规律的向量 K。用 MATLAB 中的 `lqr` 函数，可以得到最优控制器对应的 K。`lqr` 函数允许选择两个参数——R 和 Q，这两个参数用来平衡输入量的权重。从最优控制律可以看出，其最优性完全取决于加权矩阵 Q 和 R 的选择，然而这两个矩阵如何选择并没有解析办法，目前确定加权矩阵 Q 和 R 的普遍方法是仿真试凑法。一般来说，Q 和 R 都取为对角阵，如果希望输入信号小，则选择较大的 R 矩阵，如果希望第 j 状态变量的值比较小，则应该相应地将 Q 矩阵的第 j 列元素选择较大的值，这时最优优化功能会迫使改变量变小。

当 Q 不变而 R 减小时，倒立摆系统的调整时间与超调量减小，上升时间与稳态误差增大；
当 R 不变而 Q 变大时，调整时间与超调量减小，摆杆的角度变化也同时减小，但上升时间与稳态误差却同时增大。

调用 MATLAB 的 `lqr` 命令函数求解上述最优问题，包括解 Riccati 代数方程和最优反馈矩阵 K ：

在 MATLAB 命令行里运行 $K = \text{lqr}(A, B, Q, R)$ ，得到

-8.9443 -5.9559 23.5561 2.6227

在状态反馈下的闭环系统的状态方程为 $(A - BK, B, C - DK, D)$

在 Simulink 里构建好如下控制系统框图：

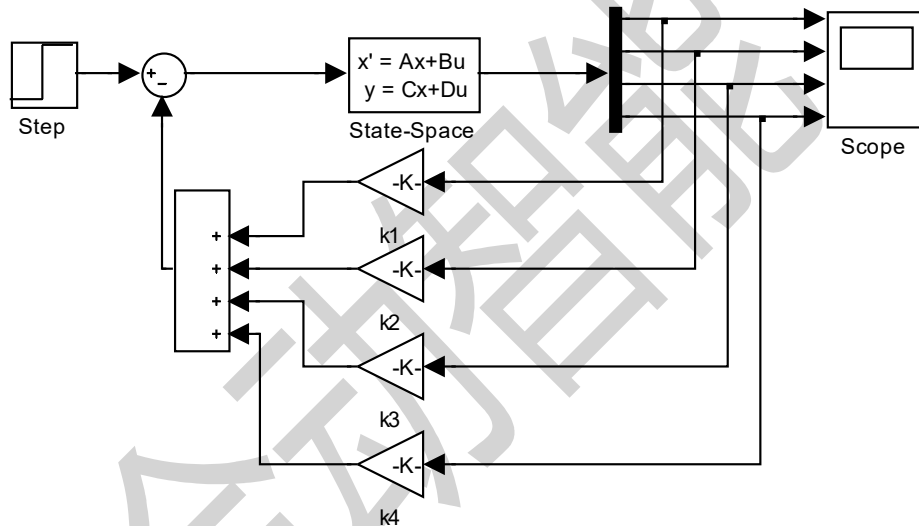


图 2.11 倒立摆 Simulink 仿真算法

k_1, k_2, k_3, k_4 分别为 $K = [-8.9443 \quad -5.9559 \quad 23.5561 \quad 2.6227]$ 中的顺序对应的四个值。

（备注：因光栅信号与模型的电机位移信号的方向相反，故实时控制中 K 的值为：

$[8.9443 \quad 5.9559 \quad 23.5561 \quad 2.6227]$

其阶跃响应曲线如下所示，图中四条曲线由上到下分别表示电机位置、电机速度、角度、角速度的阶跃响应曲线：

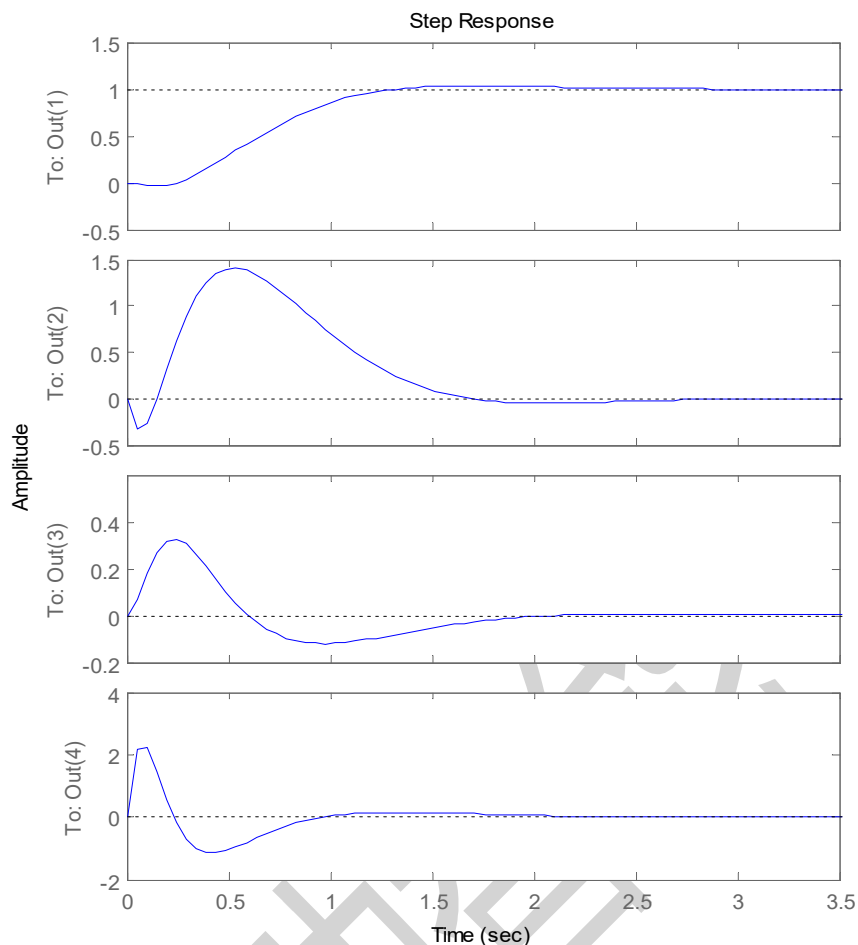


图 2.12 倒立摆阶跃响应 Simulink 仿真

从仿真图中可以看出，小车位置能跟踪输入信号，倒立摆受到阶跃扰动后能迅速稳定下来，过渡时间均小于 2s，设计的 LQR 控制器是可行的。

实验步骤：

1. 硬件连接：

连接倒立摆各部分硬件，本实验所选择倒立摆系统的规格及参数为：

序号	部件参数	详细说明
1	CSPACE 控制卡处理器	TMS320F28335 数字信号发生器 32 位浮点数发生器 CPU 时钟：150MHz
2	Elmo 直线电机驱动器	用于驱动 U 型直线电机
3	U 型直线电机	带动运动部件（小车）
4	角度编码器	测量倒立摆杆摆角，型号 PSB-2500-G05L 2500PPR，DSP 经过四倍频后得到 10000 个脉冲每圈，角度分辨率为：360/10000(0.036°)

5	霍尔位置传感器 磁栅传感器	测量直线电机位置分辨率为 5 毫米
6	倒立摆杆	一级摆和二级摆
7	TI DSP 仿真器	合动智能自主研发高速仿真器
8	Elmo 驱动器电源 DSP 控制卡电源	48V 24V +-15V
9	控制箱接口	编码器接口:32-bit 分辨率最大输入频率 33 MHz 霍尔接口 DSP 通讯接口: 用于启动停止电机 电机接口: 连接电机相线 电源接口: 240V AC 交流电源输入 位置编码器接口: 直线电机磁栅编码器输入
10	控制箱物理尺寸	50cmx38cmx18cm
11	串行接口	RS232, 默认 57600 的波特率

对照驱动控制箱面板接口图进行接线



图 2.13 驱动控制箱面板接线图

- | | |
|-------------|-----------|
| ① DSP 通讯接口 | ⑥ 电磁铁接口 |
| ② EIMO 通讯接口 | ⑦ LED 灯接口 |
| ③ 编码器 1 接口 | ⑧ 光电传感器接口 |
| ④ 编码器 2 接口 | ⑨ 磁栅接口 |
| ⑤ 电机接口 | ⑩ 霍尔接口 |

电机和倒立摆的接头	控制箱前面板接头	计算机接口
12 芯航空接头	光栅接口	
5 芯航空接头	霍尔接口	
8 芯航空接头	编码器接口 E2	
	ELMO 通讯接口	任一 USB 接口

	仿真器接口	任一 USB 接口
备注：以上接头按行对应进行连接		

2. 软件及其操作界面

要运行的软件为：

- (1) MATLAB R2017a
- (2) 一级摆 LQR 平衡控制算法 simulink 算法文件 (“cSPACE_28335demo.slx”，在 “dlb_lqr1j” 文件夹下)

3. 运行步骤：

- 1) 双击桌面 MATLAB R2017a 图标运行 MATLAB 程序



- 2) 基于 LQR 理论搭建一级摆算法模块

采用 cSPACE 的一级倒立摆控制系统硬件原理框图如图 4.6 所示：

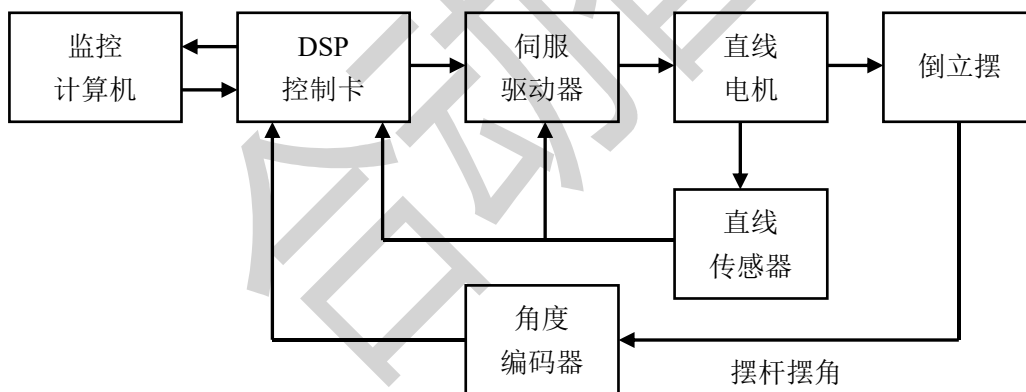


图 2.14 一级倒立摆控制系统硬件框图

系统组成包括监控计算机，DSP 控制卡，伺服驱动器，光电编码器，直线电机和倒立摆。其中，光电编码器，用于检测摆杆角度。DSP 控制卡接收来自光电编码器的摆杆角度信号和光栅输出的直线电机的工作台位移信号，并对信号进行处理得到 $x, \phi, \dot{x}, \dot{\phi}$ 四个状态变量，然后根据控制算法计算得到精确的控制量，经过 DA 转换后输出模拟控制信号，再经伺服驱动器放大后驱动直线电机输出相应的力来控制摆杆倒立平衡。

根据以上流程搭建如图 1.13 所示 Simulink 算法框图，图为本公司提供的算法文件

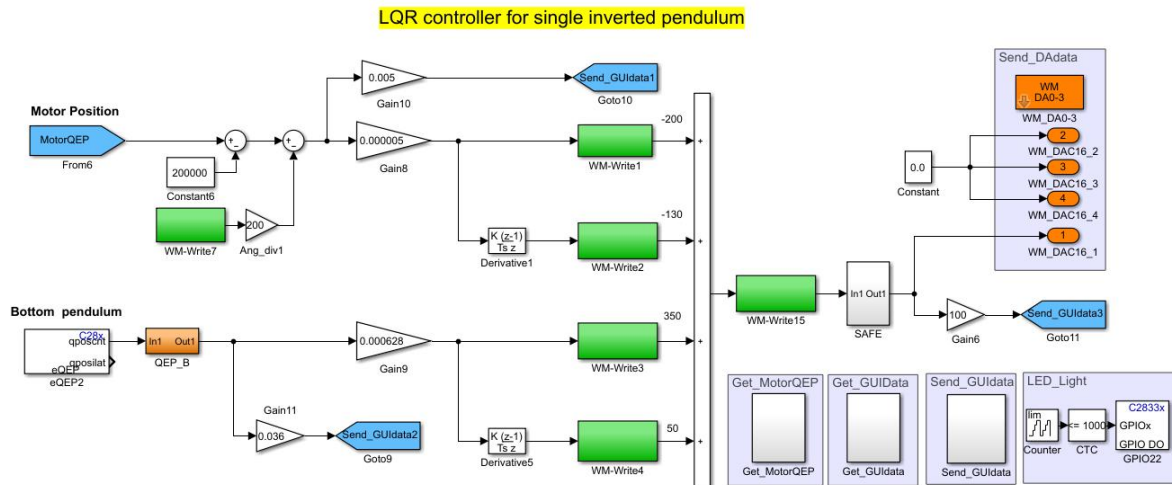
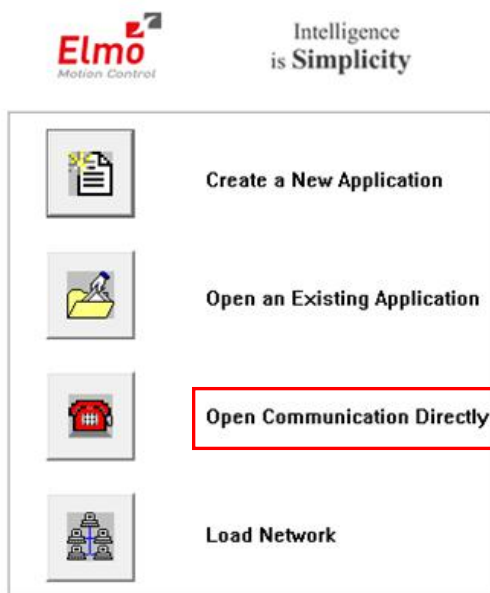
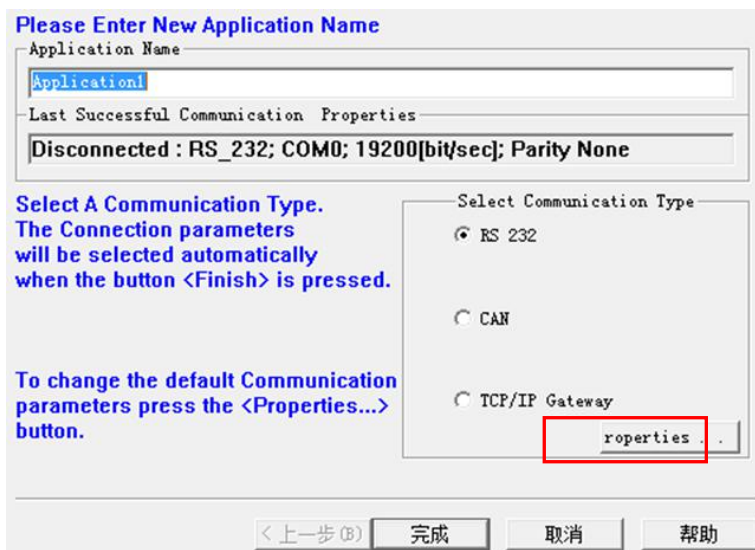


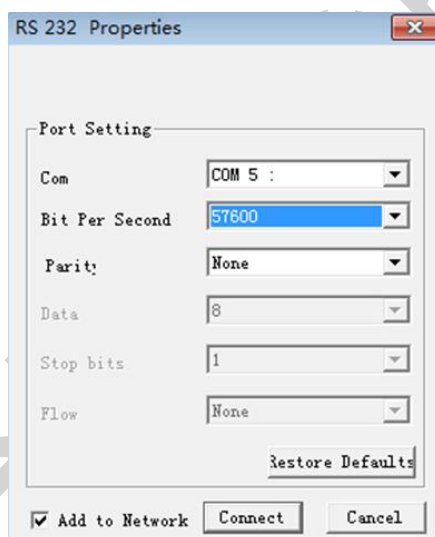
图 2.15 一级倒立摆 LQR 控制算法框图

- 3) 编译算法文件，打开运行程序，点击“Build”  按钮，编译算法文件，生成目标代码，成功后 Matlab 状态为 ready。
- 4) 打开驱动软件
打开 Emlo 驱动器驱动软件，选择 Open Communication Directly.



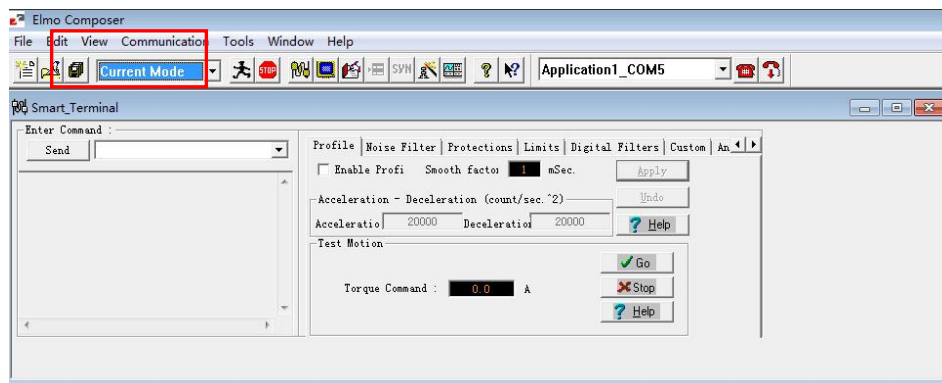


选择 RS 232，并点击选择串口

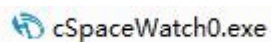


点击并选择 Com 口（串口查看在计算机资源管理器中查看）

打开后，选择驱动模式，这里选择电流模式 Current mode（默认电流环模式）



5) 程序编译完后，打开 cSPACE 控制界面。



运行程序后弹出如下所示界面，图 5.16

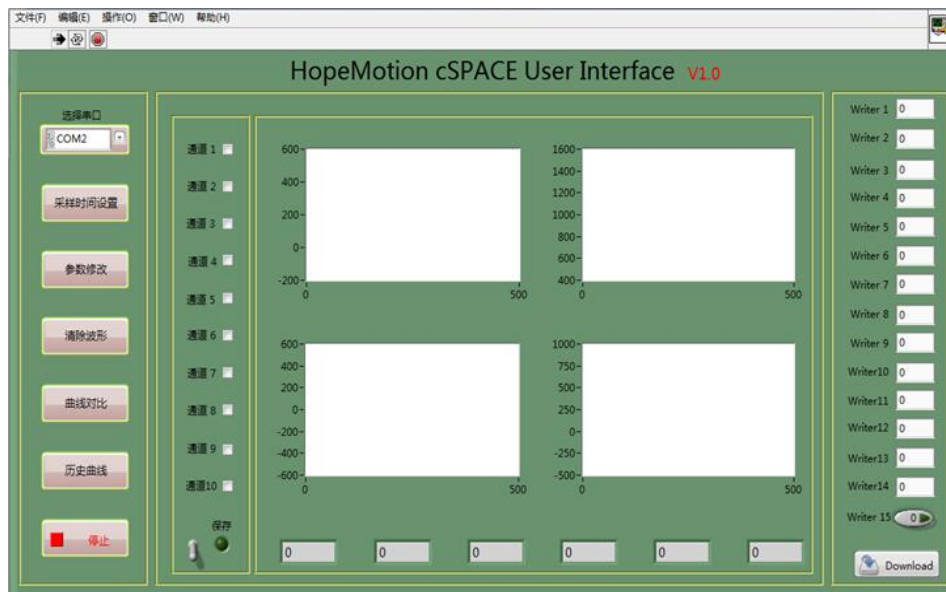





图 2.16 监控界面

- 6) 点击“运行”按钮，为停止按钮。将倒立摆的摆杆扶到竖直倒立位置（扶正的时候，同时观察界面，偏角参数的框图曲线从 -180° 转向 0° 左右），输入“Write1”、“Write2”、“Write3”、“Write4”、LQR控制算法的四个参数，在本程序中值分别为： -200 ， -130 ， 250 ， 50 。
- 7) 启动电机及界面，打开电机驱动软件 Composer，点击运行按钮，此时可以听到电机运行的声音，同时点击界面中“下载参数”按钮进行参数下载。启动后松开手，这时电机往返运动，倒立摆即能稳定运行，不稳定运行时，适当调节 LQR 控制参数。
- 8) 当关闭控制界面时，击“关闭界面”按钮，关闭程序。

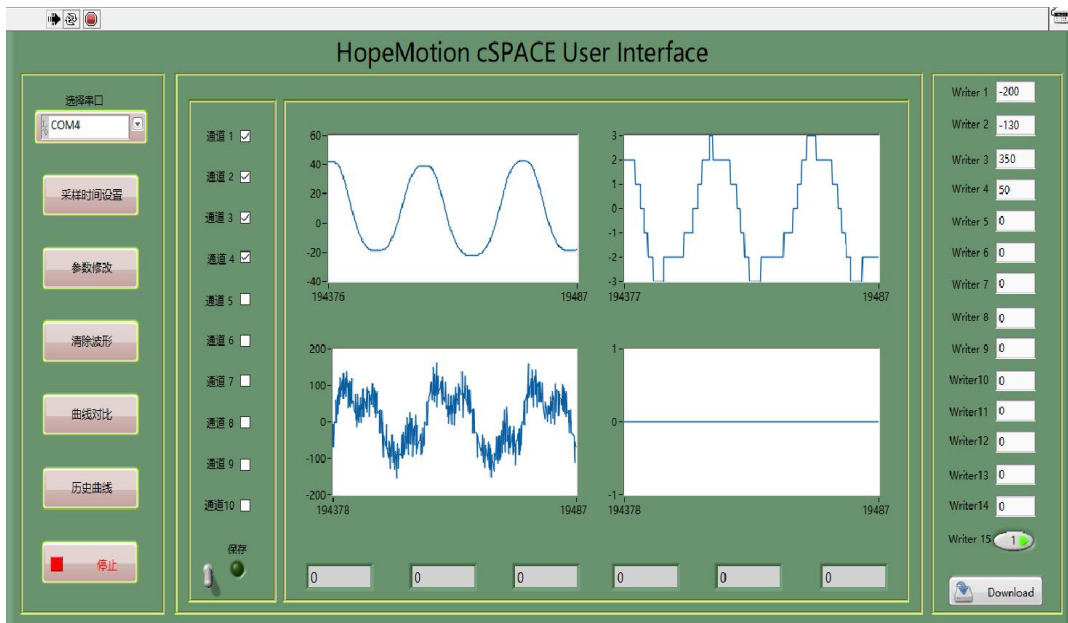


图 2.17 倒立摆稳定运行监控界面

2.2.6 一级摆 ANFIS 控制实验

实验目的：

直线电机驱动一级倒立摆 ANFIS 控制器实验

实验内容：

设计和调节 ANFIS 控制器，使平台和摆杆处于正确位置；调节参数观察系统的变化。比较与串级 PID 控制的差别。

实验要求：

- 1.学习一级摆的 ANFIS 控制器设计方法；
- 2.利用 cSPACE 提供的模块搭建控制器；
- 3.实时调节参数，比较各组参数的控制效果。

实验报告：

描述 ANFIS 控制器设计方法，使小车稳定同时又能使杆处于倒立状态，实验报告需要描述实验过程，给出控制结果。

本实验为智能控制理论实验。

2.2.7 一级摆 NNC 控制实验

实验目的:

直线电机驱动一级倒立摆 NNC 控制器实验

实验内容:

设计和调节 NNC 控制器, 使平台和摆杆处于正确位置; 调节参数观察系统的变化。比较与串级 PID 控制的差别。

实验要求:

1. 学习一级摆的 NNC 控制器设计方法;
2. 利用 cSPACE 提供的模块搭建控制器;
3. 实时调节参数, 比较各组参数的控制效果。

实验报告:

描述 ANFIS 控制器设计方法, 使小车稳定同时又能使杆处于倒立状态, 实验报告需要描述实验过程, 给出控制结果。

本实验为智能控制理论实验。

2.2.8*一级摆正摆控制实验

实验目的:

直线电机驱动一级摆正摆控制器实验

实验内容:

设计正摆的针对电机位置和摆杆角度的 PID 控制器, 实现直线电机位置控制的同时, 控制下垂摆角度摆幅尽可能的小。

实验要求:

1. 学习正摆的 PID 控制器的设计方法;
2. 利用 cSPACE 进行正摆控制实验;
3. 比较各组参数的控制效果。

实验报告:

描述正摆控制器的设计方法, 使电机实现位置控制的同时又能使摆杆角度变化的范围尽可能小, 实验报告需要描述这一过程, 给出控制结果。

本实验为经典控制理论实验。

直线电机驱动的一级摆正摆控制器设计

实验步骤:

1. 硬件连接:

电机和倒立摆的接头	控制箱前面板接头	计算机接口
12 芯航空接头	光栅接口	
5 芯航空接头	霍尔接口	
8 芯航空接头	编码器接口 E2	
	ELMO 通讯接口	任一 USB 接口
	仿真器接口	任一 USB 接口
备注：以上接头按行对应进行连接		

2. 软件及其操作界面

需要运行的软件为:

(1) MATLAB R2017a

(2) 一级摆正摆控制算法 simulink 算法文件 (“cSPACE_28335demo.slx”, 在 “dlb_zb” 文件夹下)

3. 运行步骤:

1) 双击桌面 MATLAB R2017a 图标运行 MATLAB 程序



2) 基于正摆控制设计方法搭建一级摆算法模块

采用 cSPACE 的一级倒立摆控制系统硬件原理框图如图 5.18 所示:

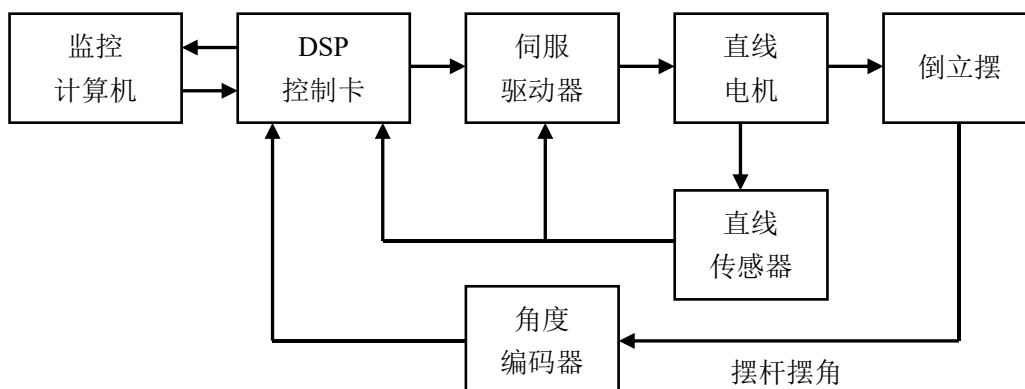


图 5.18 一级倒立摆控制系统硬件框图

根据以上流程搭建如图 5.19 所示 Simulink 算法框图，图为本公司提供的算法文件

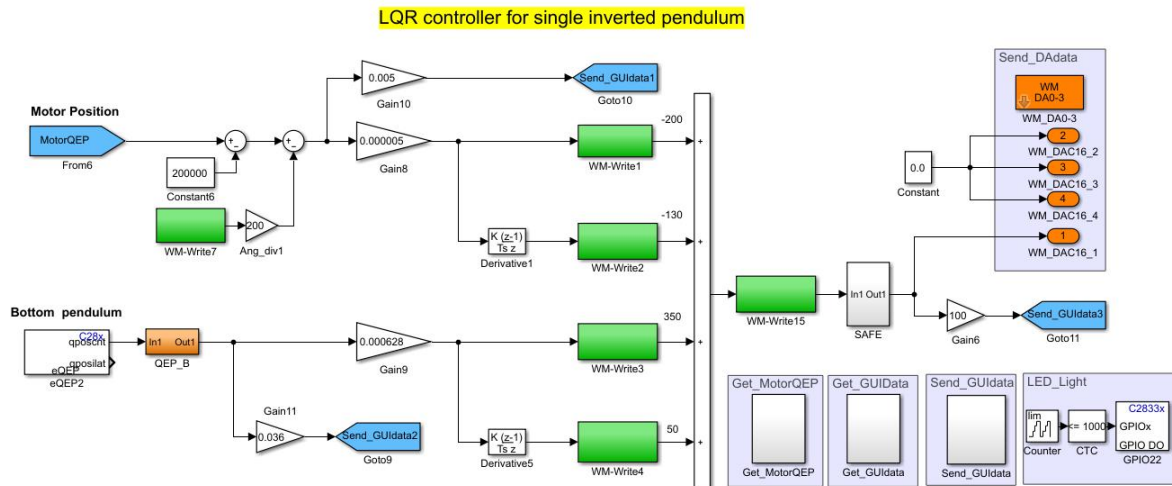





图 2.19 一级倒立摆正摆控制算法框图


- 3) 编译算法文件，打开运行程序，点击“Build”  按钮，编译算法文件，生成

目标代码，成功后 Matlab 状态为 ready。

- 4) 打开 Emlo 驱动器驱动软件。

- 5) 打开 cSPACE 控制界面，cSpaceWatch0.exe。

点击“运行”按钮 ， 为停止按键。输入“Write1”、“Write2”、“Write3”、“Write4”“Write5” 串级 PID 控制算法的四个参数和直线电机的位置设置，在本程序中值分别为：15，0.05，10，0，-0.1（‘米’为单位）。

- 6) 启动电机，点击运行按钮 ，此时可以听到电机运行的声音，同时点击界面中“下载参数”按钮进行参数下载。电机启动后能控制摆杆处于自然下垂状态，当给摆杆扰动或改变电机位置时，电机能控制摆杆迅速稳定下来。

- 7) 当关闭控制界面时，单击“关闭界面”按钮，关闭程序。

第三章 综合实验

综合实验是基本实验的深入，需要学生掌握较多的专业知识。综合实验分为直线电机平台实验和直线电机倒立摆实验，主要用于机电专业和自动化专业的高年级本科生进行课程设计或者毕业设计。

综合实验一共 12 个，其中直线电机 2 个，直线电机倒立摆 10 个。

3.1 直线电机平台实验

3.1.1 直线电机控制实验

实验目的：

直线电机驱动平台运动控制实验

实验内容：

在了解实验平台的基础上，设计前馈等控制器，使平台获得最佳的运动控制性能，如阶跃响应等，学生可根据自己的兴趣选择和设计控制器。

实验要求：

- 1.首先对直线电机平台要有一个全面了解；
- 2.利用 cSPACE 提供的模块搭建控制器；
- 3.实时调节参数，比较各组参数的控制效果。

实验报告：

描述所采用的控制器设计方法，比较参数调节时平台的运行变化，说明原因，并给出最佳设计参数，给出实际运行曲线。

本实验为综合实验，建议作为课程设计实验使用。

实验步骤：

参照“合动智能直线电机平台用户手册”文档

3.1.2 伺服系统实验

实验目的：

直线电机驱动平台伺服运动控制参数设置实验

实验内容:

在了解实验平台的基础上,用不同的方法设置驱动器和控制器,使平台获得最佳的运动控制,如阶跃响应等,学生可根据自己的兴趣选择自己的方法。

实验要求:

- 1.首先对直线电机平台要有一个全面了解;
- 2.手动设置 Elmo 的参数,特别是与运动有关的参数,更深入了解电机性能的影响因素;
- 3.设计不同的控制算法;
- 4.采用不同的参考输入 (sin、pulse);
- 5.用 signal Builder 设置想要跟随的曲线,通过 cSPACE 观察电机的跟踪效果,观察控制算法的好坏。

实验报告:

描述所采用的控制器设计方法,比较参数调节时平台的运行变化,说明原因,并给出最佳设计参数,给出实际运行曲线。

本实验为综合实验,建议作为课程设计实验使用。

实验步骤:

参照“合动智能直线电机平台用户手册”文档

3.2 直线电机倒立摆综合实验

3.2.1*一级摆自动起摆实验

实验目的:

了解直线电机驱动的一级倒立摆自动起摆的控制方法、不同控制算法的切换

实验内容:

1. 了解直线电机一级倒立摆自动起摆的要点及其 Bang-Bang 控制算法;
2. 调试程序控制一级倒立摆自动起摆和平衡控制;
3. 研究控制电压的大小和自动起摆过程中摆杆来回摆的次数的关系;
- 4 研究 Bang-Bang 控制算法和倒立摆平衡控制算法 (LQR 算法) 的切换方法。

实验要求:

- 1.首先对直线电机平台和倒立摆及其自动起摆和 DSP 编程要有一个全面了解;

2. 采用 C 语言编程实现 Bang-Bang 控制算法；
3. 调节控制电压的大小，比较各组参数的自动起摆的控制效果。

实验报告：

描述自动起摆原理和采用的 Bang-Bang 控制算法，比较不同的控制电压对起摆次数的影响和算法切换的方法。

本实验为综合实验，作为 DSP 或计算机编程类的课程设计实验。

实验原理：

参照青岛科技大学张霞的论文“非线性倒立摆系统的起摆和稳摆控制”。

实验步骤：

1. 硬件连接：

电机和倒立摆的接头	控制箱前面板接头	计算机接口
15 芯航空接头	光栅接口	
9 芯航空接头	霍尔接口	
摆杆角度信号	编码器接口 1	
	仿真器接口	任一 USB 接口
3 芯航空接头	DSP 通讯口	任一 USB 接口
备注：以上接头按行对应进行连接		

2. 软件及其操作界面

需要运行的软件为：

(1) MATLAB R2017a

(2) 一级摆 LQR 平衡控制算法 simulink 算法文件和目标程序文件夹“cSPACE_28335demo.slx”，

在 “dlb_auto” 文件夹下)

3. 运行步骤：

- 1) 双击桌面 MATLAB R2017a 图标运行 MATLAB 程序



- 2) 依据自起摆设计方法搭建一级摆算法模块

采用 cSPACE 的一级倒立摆控制系统硬件原理框图如图 6.1 所示：

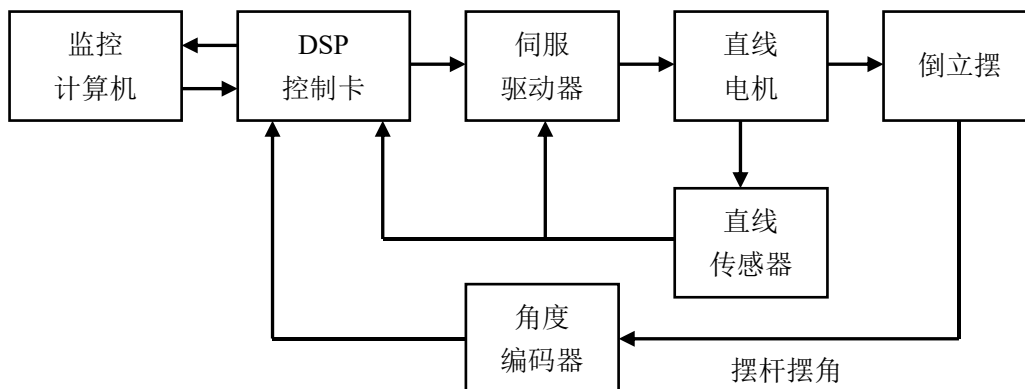


图 6.1 一级倒立摆控制系统硬件框图

把电机放置中间位置，摆杆自然下垂，“一级倒立摆自动起摆 auto”文件夹（包括 wmdlb1auto.mdl 文件、wmdlb1auto_ccslink 文件夹）



根据以上流程搭建如图 6.2 所示 Simulink 算法框图，图为公司提供的算法文件。

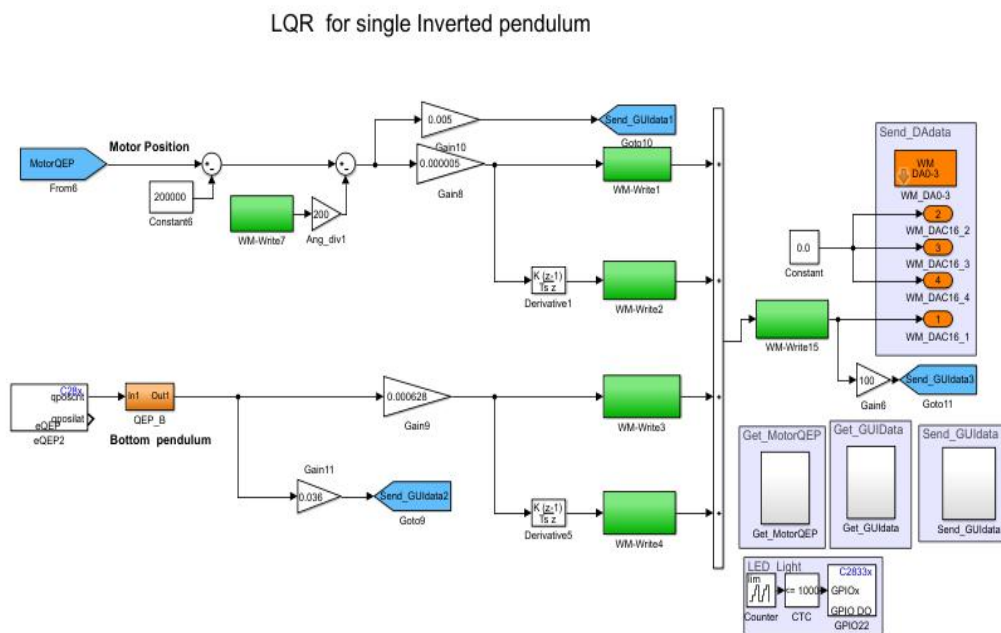






图 6.2 一级倒立摆自起摆算法框图

- 3) 编译算法文件，打开运行程序，点击“Build”  按钮，编译算法文件，生成目标代码，成功后 Matlab 状态为 ready。
- 4) 打开 Emlo 驱动器驱动软件（驱动方式由电流模式转换为位置模式）
- 5) 打开 cSPACE 控制界面，cSpaceWatch0.exe。

点击“运行”按钮,  为停止按键。输入“Write1”、“Write2”、“Write3”、

“Write4”、控制算法的四个参数,在本程序中值分别为: 18, 15, 17, 1.5; 输入“Write5”的值, 设定起摆控制电压, 值为 (0, 10), 请输入默认值 7.6, 表示电机往返运动控制摆杆倒立的控制电压为 7.6V, 当不输入任何值或输入为 0 时, 程序将使用默认的值 7.6,

- 6) 启动电机, 点击运行按钮, 此时可以听到电机运行的声音, 同时点击界面中“下载参数”按钮进行参数下载。电机启动后松开手, 这时电机往返运动, 直到使摆杆倒立切换到平衡控制。如果起摆不成功, 请迅速点击“停止”按钮停止电机, 把电机放在中间、摆杆放回原来自然下垂的状态, 使摆杆的初始角度为 -180° 。如果起摆多次不成功, 调节 Write5”的值, 增大会使电机运动剧烈, 减小会使电机运动的速度减小 (推荐值从 7 到 7.8), 调节电压值应该是摆杆最后一次能差不多顺时针摆到倒立位置, 这是一般能成功切换到平衡控制。

- 7) 当关闭控制界面时, 击“关闭界面”按钮, 关闭程序。

下图为起摆控制电压的值为 7.6 时倒立摆自动起摆摆杆角度和电机位置随时间变化的曲线, 可以看出不到 4 秒钟就能实现自动起摆并切换到平衡控制状态。

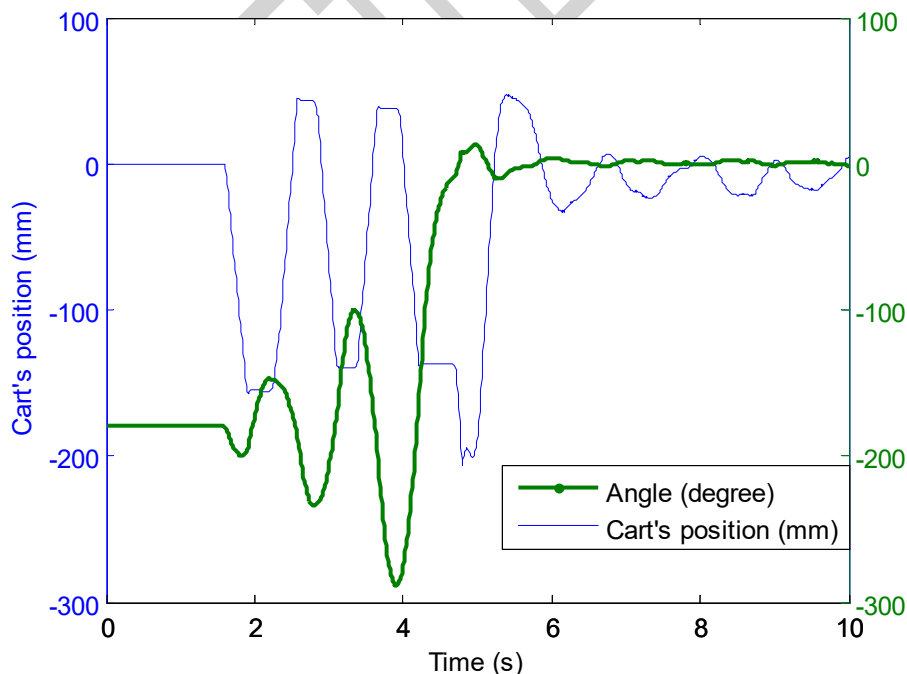


图 6.3 倒立摆自动起摆摆杆角度和电机位置曲线

3.2.2*二级摆 LQR 控制实验

实验目的:

直线电机驱动二级倒立摆 LQR 控制实验

实验内容:

- 1.学习二级摆数学建模;
- 2.利用 cSPACE 提供的 LQR 控制算法控制二级摆,并在 cSPACE 上观察各个变量;
- 3.在 cSPACE 自带控制算法的基础上,学生小范围内改变控制参数(即反馈矩阵 K),并比较控制效果;
- 4.学生在 cSPACE 提供的 LQR 控制 M 文件上,修改 Q 、 R 矩阵,进行 MATLAB 仿真;
- 5.在 cSPACE 上搭建 LQR 控制算法,再生成实时控制代码,对二级摆进行实物控制;
- 6.分析 Q 、 R 矩阵参数对控制性能的影响,总结二级摆 LQR 控制中,选取 Q 、 R 矩阵的一般规律。

实验要求:

- 1.首先对直线电机平台和倒立摆要有一个全面了解;
- 2.利用 cSPACE 提供的模块搭建控制器;
- 3.实时调节参数,比较各组参数的控制效果。在了解直线电机驱动二级倒立摆实验平台的基础上,学生设计自己的控制器,使平台和倒立摆获得最佳的运动控制效果。

实验报告:

描述所采用的控制器设计方法,比较参数调节时平台的运行变化,说明原因,并给出最佳设计参数,给出实际运行曲线。

本实验为现代控制理论实验,若只做前三点,则可以作为课程设计;全做可以作为建毕业设计课题或大学生创新实验。

LQR 控制器:

参照 5.2.5 节的内容。

倒立摆 LQR 控制器设计和 Simulink 仿真:

具体设计方法参照 5.2.5 节的内容。

实验步骤:

1. 硬件连接:

连接倒立摆各部分硬件，本实验所选择倒立摆系统的规格及参数为：

序号	部件参数	详细说明
1	CSPACE 控制卡处理器	TMS320F28335 数字信号发生器 32 位浮点数发生器 CPU 时钟：150MHz
2	Elmo 直线电机驱动器	用于驱动 U 型直线电机
3	U 型直线电机	带动运动部件（小车）
4	角度编码器	测量倒立摆杆摆角，型号 PSB-2500-G05L 2500PPR，DSP 经过四倍频后得到 10000 个脉冲每圈，角度分辨率为：360/10000(0.036°)
5	霍尔位置传感器 磁栅传感器	测量直线电机位置分辨率为 5 毫米
6	倒立摆杆	一级摆和二级摆
7	TI DSP 仿真器	合动智能自主研发高速仿真器
8	Elmo 驱动器电源 DSP 控制卡电源	48V 24V +-15V
9	控制箱接口	编码器接口:32-bit 分辨率最大输入频率 33 MHz 霍尔接口 DSP 通讯接口：用于启动停止电机 电机接口：连接电机相线 电源接口：240V AC 交流电源输入 位置编码器接口：直线电机磁栅编码器输入
10	控制箱物理尺寸	50cmx38cmx18cm
11	串行接口	RS232，默认 57600 的波特率

对照驱动控制箱面板接口进行接线，如图 6.4 所示。



图 6.4 驱动控制箱面板接线图

- | | |
|-------------|-----------|
| ① DSP 通讯接口 | ⑥ 电磁铁接口 |
| ② EIMO 通讯接口 | ⑦ LED 灯接口 |
| ③ 编码器 1 接口 | ⑧ 光电传感器接口 |
| ④ 编码器 2 接口 | ⑨ 磁栅接口 |
| ⑤ 电机接口 | ⑩ 霍尔接口 |

电机和倒立摆的接头	控制箱前面板接头	计算机接口
12 芯航空接头	光栅接口	
5 芯航空接头	霍尔接口	
下摆杆角度信号	编码器接口 2	
上摆杆角度信号	编码器接口 1	
3 芯航空接头	DSP 通讯口	任一 USB 接口
	仿真器接口	任一 USB 接口
备注：以上接头按行对应进行连接		

2. 软件及其操作界面

要运行的软件为：

- (1) MATLAB R2017a
- (2) 二级摆 LQR 平衡控制算法 simulink 算法文件（“cSPACE_28335demo.slx”，在“dlb_lqr2j”文件夹下）

3. 运行步骤：

- 1) 双击桌面 MATLAB R2017a 图标运行 MATLAB 程序



- 2) 基于 LQR 理论搭建二级摆算法模块

采用 cSPACE 的二级倒立摆控制系统硬件原理框图如图 4.6 所示：

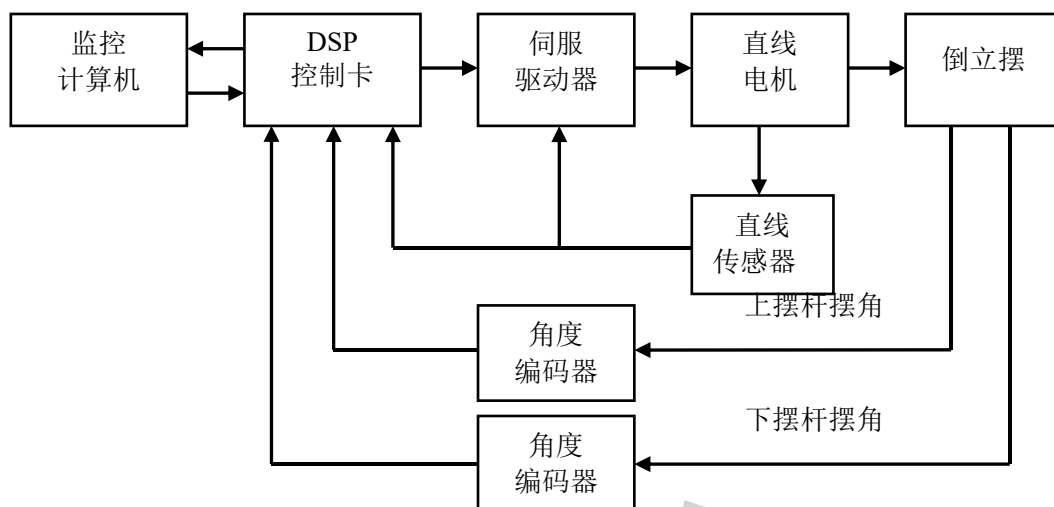


图 6.5 二级倒立摆控制系统硬件框图

系统组成包括监控计算机，DSP 控制卡，伺服驱动器，光电编码器，直线电机和倒立摆。其中，光电编码器，用于检测摆杆角度。DSP 控制卡接收来自光电编码器的摆杆角度信号和光栅输出的直线电机的工作台位移信号，并对信号进行处理得到 $x, \phi_1, \phi_2, \dot{x}, \dot{\phi}_1, \dot{\phi}_2$ 六个状态变量，然后根据控制算法计算得到精确的控制量，经过 DA 转换后输出模拟控制信号，再经伺服驱动器放大后驱动直线电机输出相应的力来控制摆杆倒立平衡。

根据以上流程搭建如图 6.6 所示 Simulink 算法框图，图为本公司提供的算法文件

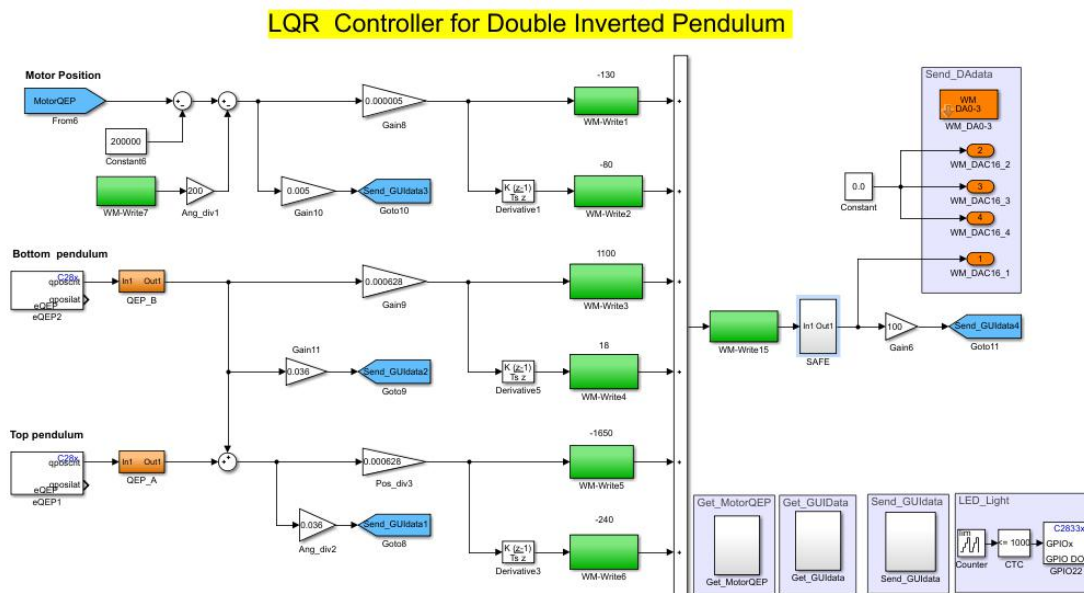

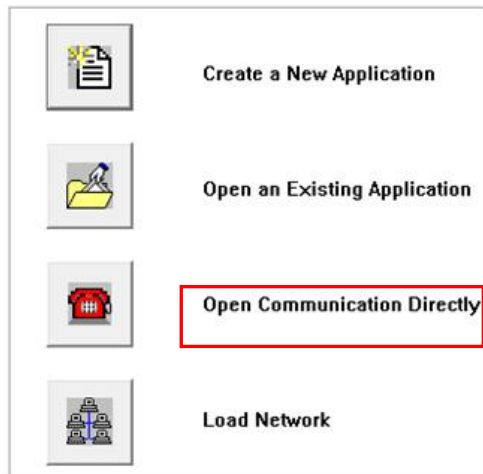


图 6.6 二级倒立摆 LQR 控制算法框图

- 3) 编译算法文件，打开运行程序，点击“Build”  按钮，编译算法文件，生成目标代码，成功后 Matlab 状态为 ready。
- 4) 打开驱动软件
打开 Emlo 驱动器驱动软件，选择 Open Communication Directly.

Intelligence
is Simplicity

Please Enter New Application Name

Application Name

Last Successful Communication Properties

Select A Communication Type.
The Connection parameters
will be selected automatically
when the button <Finish> is pressed.

To change the default Communication
parameters press the <Properties...>
button.

Select Communication Type

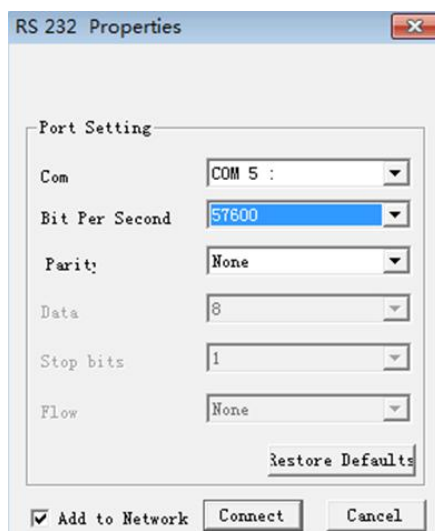
☒ RS 232

☐ CAN

☐ TCP/IP Gateway

< 上一步(B) 完成 取消 帮助

选择 RS 232，并点击选择串口



点击并选择 Com 口（串口查看在计算机资源管理器中查看）
 打开后，选择驱动模式，这里选择电流模式 Current mode（默认电流环模式）。



5) 程序编译完后，打开 cSPACE 控制界面，cSpaceWatch0.exe。

运行程序后弹出如图 6.7 所示界面

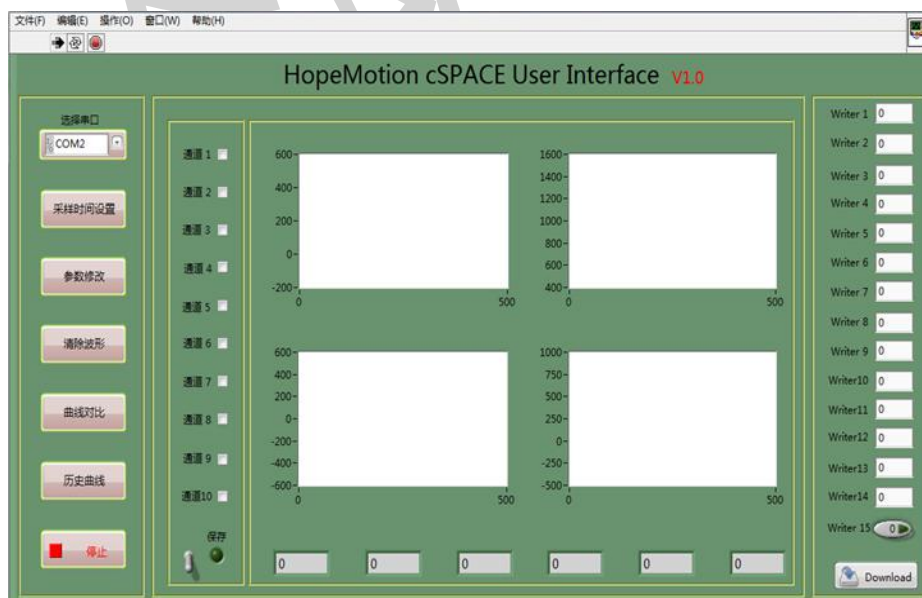





图 3.7 监控界面

6) 点击“运行”按钮,  为停止按键。将倒立摆的两个摆杆扶到竖直倒立位置（扶正的时候，同时观察界面，两个摆杆的偏角参数的框图曲线都是从-180°

转向 0° 左右), 输入 “Write1”、“Write2”、“Write3”、“Write4”、“Write5”、“Write6” LQR 控制算法的六个参数, 在本程序中值分别为: -130 -80 1100 18 -1650 -240。

- 7) 启动电机及界面, 打开电机驱动软件 Composer, 点击运行按钮 , 此时可以听到电机运行的声音, 同时点击界面中“下载参数”按钮进行参数下载。启动后松开手, 这时电机往返运动, 倒立摆即能稳定运行, 不稳定运行时, 适当调节 LQR 控制参数。

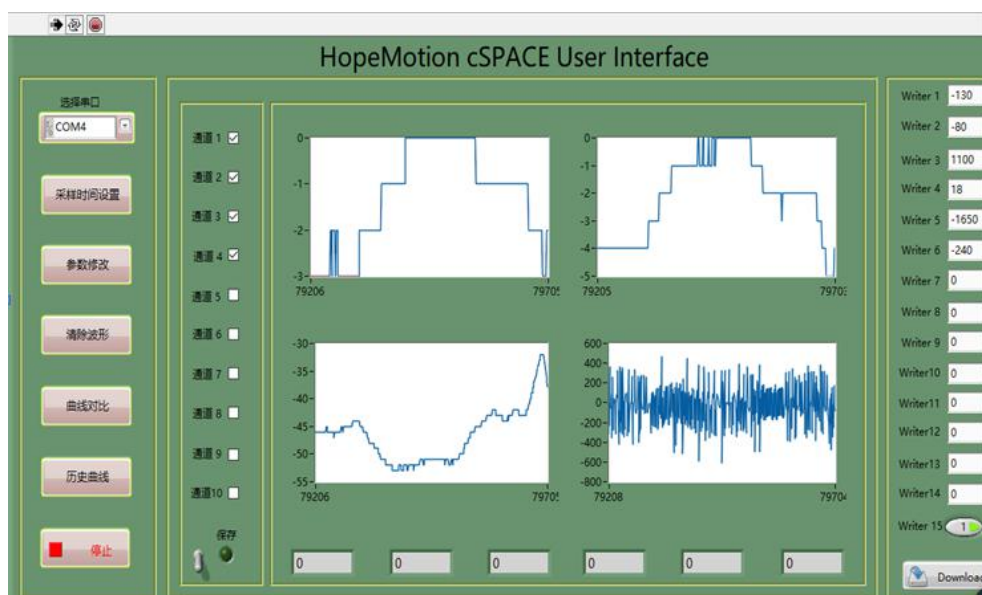


图 3.8 cSPACE 二级摆 LQR 控制界面

- 8) 当关闭控制界面时, 击“关闭界面”按钮, 关闭程序。

下图为测试一级摆时实际采集的倒立摆稳定运行时受到阶跃扰动后电机位移、下摆杆角度、上摆杆角度随时间变化曲线。

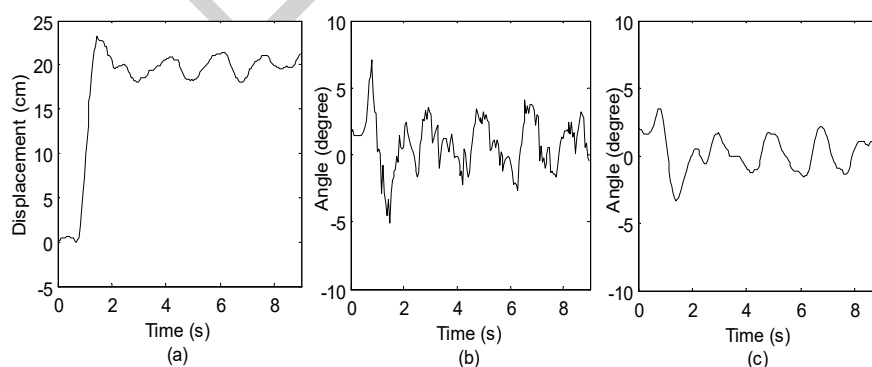


图 3.9 二级倒立摆的阶跃响应

a.二级摆 ANFIS 控制实验

实验目的:

直线电机驱动二级倒立摆 ANFIS 控制实验

实验内容：

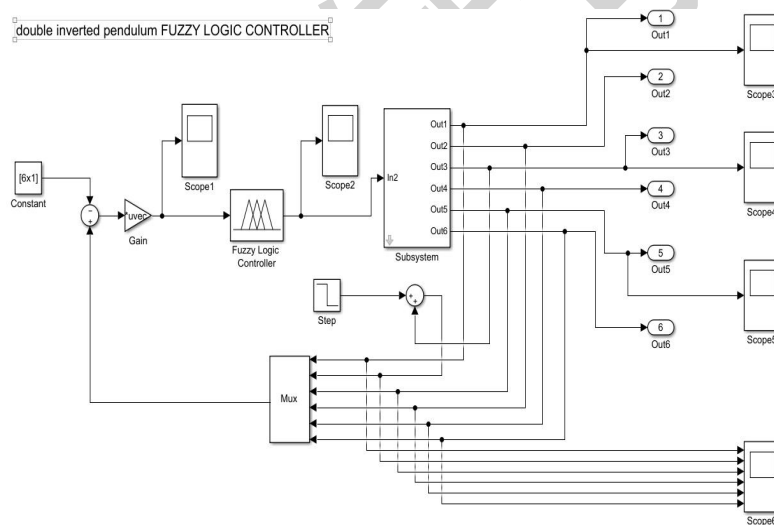
1. 学生自己编写 ANFIS 控制的 M 函数，即 order.m、genstate.m、genfismat.m 三个文件，训练生成模糊控制器；
2. 分别采用融合函数、并联 ANFIS、串联 ANFIS 方式实现模糊规则的降维；
3. 在 cSPACE 上搭建 ANFIS 控制算法，再生成实时控制代码，对二级摆进行实物控制；
4. 分析模糊变量划分、控制规则条数、降维方式对控制性能的影响。

实验要求：

1. 首先对直线电机平台和倒立摆要有一个全面了解；
2. 利用 cSPACE 提供的模块搭建控制器；
3. 实时调节参数，比较各组参数的控制效果。在了解直线电机驱动二级倒立摆实验平台的基础上，学生设计自己的控制器，使平台和倒立摆获得最佳的运动控制效果。

实验原理：

Matlab 仿真原理框如图 3.10 所示



3.10 二级倒立摆 ANFIS 仿真原理框图

实验报告：

描述所采用的控制器设计方法，比较参数调节时平台的运行变化，说明原因，并给出最佳设计参数，给出实际运行曲线。

本实验为智能控制实验，建议作为毕业设计课题或大学生创新实验。

b.二级摆 NNC 控制实验

实验目的：

直线电机驱动二级倒立摆 NNC 控制实验

实验内容：

1. 学生自己编写二级摆 BP 神经网络训练 M 函数，训练生成 NNC；
2. 在 cSPACE 上搭建 NNC 控制器，再生成实时控制代码，对二级摆进行实物控制；
3. 分析训练样本、网络层数，神经元个数对网络训练的影响，总结训练样本处理和神经元个数选择的基本方法。

本实验为智能控制理论实验。

实验要求：

1. 首先对直线电机平台和倒立摆要有一个全面了解；
2. 利用 cSPACE 提供的模块搭建控制器；
3. 实时调节参数，比较各组参数的控制效果。在了解直线电机驱动二级倒立摆实验平台的基础上，学生设计自己的控制器，使平台和倒立摆获得最佳的运动控制效果。

实验报告：

描述所采用的控制器设计方法，比较参数调节时平台的运行变化，说明原因，并给出最佳设计参数，给出实际运行曲线。

本实验为智能控制实验，建议作为毕业设计课题或大学生创新实验。

c. 二级摆自动起摆演示实验

实验目的：

了解直线电机驱动的二级倒立摆自动起摆的控制方法、cSPACE 下自动起摆的实现方法、不同控制算法的切换方法

实验内容：

1. 了解直线电机二级倒立摆自动起摆的要点及其 Bang-Bang 控制算法；
2. 了解 cSPACE 下二级倒立摆自动起摆的控制算法搭建要点；
3. 研究自动起摆的影响因素；
4. 研究二级倒立摆自动起摆的 Bang-Bang 控制算法和平衡控制算法（LQR 算法）的切换方法。

实验要求：

1. 对直线电机平台和倒立摆及其自动起摆和 DSP 编程要有一个全面了解，已经做过二级倒立摆的 LQR 控制实验；
2. 能较熟练的使用 cSPACE 进行开发；
3. 实验中需要研究影响二级摆自动起摆成功率的因素。

实验报告：

描述自动起摆原理和采用的 Bang-Bang 控制算法，总结影响二级摆自动起摆成功率的因素，描述二级倒立摆自动起摆的 Bang-Bang 控制算法和平衡控制算法（LQR 算法）的切换方法。

本实验为智能控制实验，建议作为毕业设计课题或大学生创新实验。

d.*二级摆滑模控制

实验目的：

直线电机驱动二级倒立摆滑模控制实验

实验内容：

1. 学习二级摆数学建模；
2. 利用 cSPACE 提供的滑模控制算法控制二级摆，并在 cSPACE 上观察各个变量；
3. 在 cSPACE 上搭建滑模控制算法，再生成实时控制代码，对二级摆进行实物控制；

实验要求：

1. 首先对直线电机平台和倒立摆要有一个全面了解；
2. 利用 cSPACE 提供的模块搭建控制器；
3. 实时调节参数，比较各组参数的控制效果。在了解直线电机驱动二级倒立摆实验平台的基础上，学生设计自己的控制器，使平台和倒立摆获得最佳的运动控制效果。

实验报告：

描述所采用的控制器设计方法，比较参数调节时平台的运行变化，说明原因，并给出最佳设计参数，给出实际运行曲线。

本实验为现代控制理论实验，若只做前三点，则可以作为课程设计；全做可以作为建毕业设计课题或大学生创新实验。

实验原理：

参照辽宁石油化工大学战江洋的论文“基于滑模控制的二级倒立摆控制”。

Matlab 仿真原理框图如下所示：

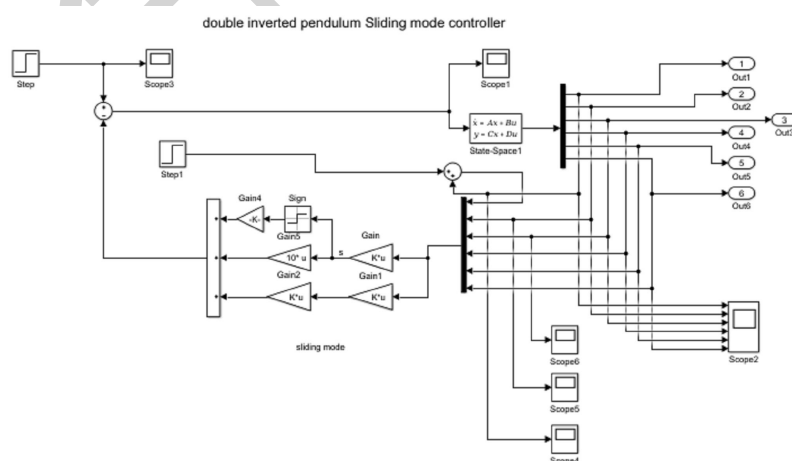


图 3.11 二级倒立摆滑模控制仿真原理框图

实验步骤：

1. 硬件连接：

电机和倒立摆的接头	控制箱前面板接头	计算机接口
12 芯航空接头	光栅接口	
5 芯航空接头	霍尔接口	
下摆杆角度信号	编码器接口 2	
上摆杆角度信号	编码器接口 1	
3 芯航空接头	DSP 通讯口	任一 USB 接口
	仿真器接口	任一 USB 接口
备注：以上接头按行对应进行连接		

2. 软件及其操作界面

需要运行的软件为：

- (1) MATLAB R2017a
- (2) 二级摆滑模平衡控制算法 simulink 算法文件(“cSPACE_28335demo.slx”，在“dlb_sm”文件夹下)

3. 运行步骤：

- 1) 双击桌面 MATLAB R2017a 图标运行 MATLAB 程序



- 2) 基于滑模控制理论搭建二级摆算法模块

采用 cSPACE 的二级倒立摆控制系统硬件原理框图如图 3.12 所示：

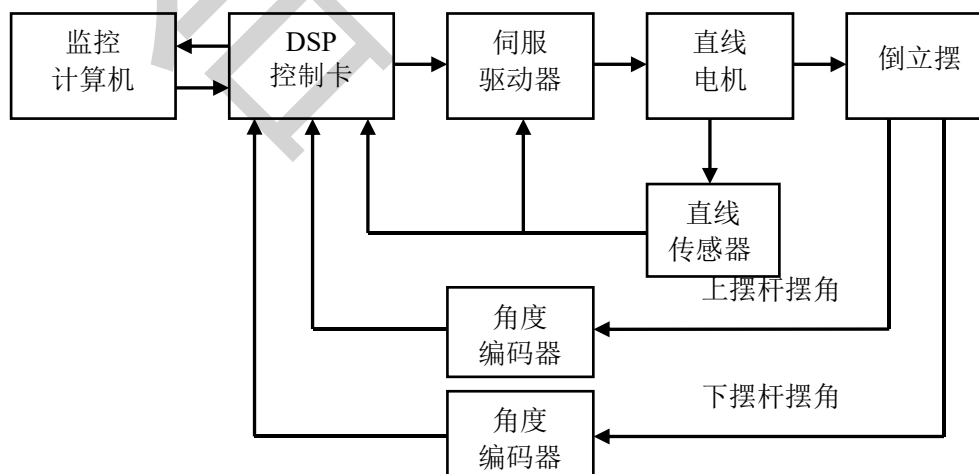


图 3.12 二级倒立摆控制系统硬件框图

系统组成包括监控计算机，DSP 控制卡，伺服驱动器，光电编码器，直线电机和倒立摆。其中，光电编码器，用于检测摆杆角度。DSP 控制卡接收来自光电编码器的摆杆角度信号和光栅输出的直线电机的工作台位移信号，并对信号进行处理得到 $x, \phi_1, \phi_2, \dot{x}, \dot{\phi}_1, \dot{\phi}_2$

六个状态变量，然后根据控制算法计算得到精确的控制量，经过 DA 转换后输出模拟控制信号，再经伺服驱动器放大后驱动直线电机输出相应的力来控制摆杆倒立平衡。

根据以上流程搭建如图 3.13 所示 Simulink 算法框图，图为本公司提供的算法文件

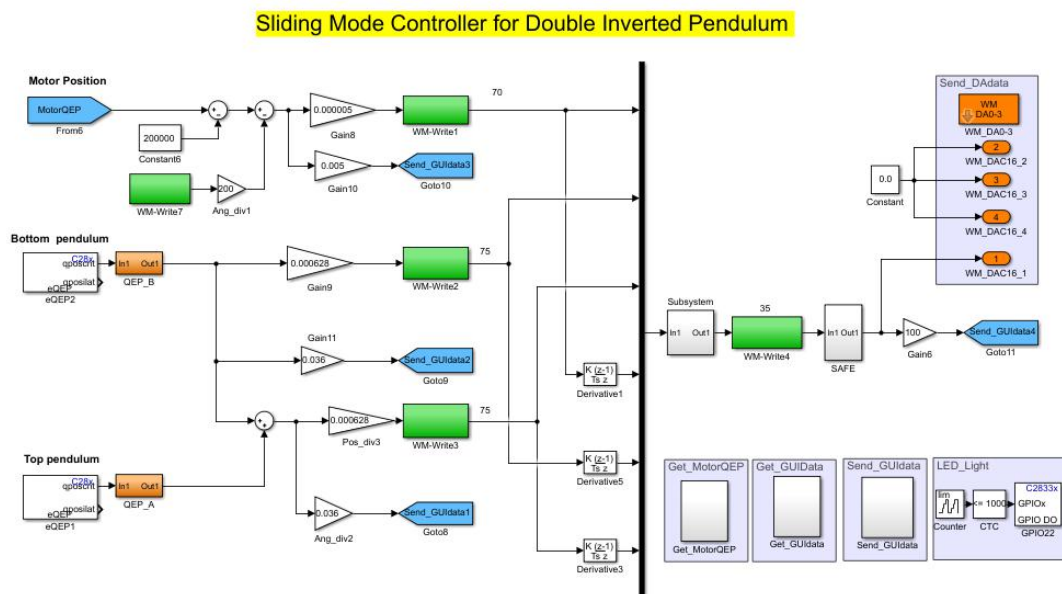






图 3.13 二级倒立摆滑模控制算法框图

- 3) 编译算法文件，打开运行程序，点击“Build”  按钮，编译算法文件，生成目标代码，成功后 Matlab 状态为 ready。
- 4) 打开 Emlo 驱动器驱动软件。
- 5) 打开 cSPACE 控制界面，cSpaceWatch0.exe。
- 6) 点击“运行”按钮 ， 为停止按键。将倒立摆的两个摆杆扶到竖直倒立位置(扶正的时候,同时观察界面,两个摆杆的偏角参数的框图曲线都是从-180°转向 0°左右),输入“Write1”、“Write2”、“Write3”、“Write4”滑模控制算法的四个参数,在本程序中值分别为: -80, 75, 75, 35。
- 7) 启动电机及界面,打开电机驱动软件 Composer,点击运行按钮 ,此时可以听到电机运行的声音,同时点击界面中“下载参数”按钮进行参数下载。启动后松开手,这时电机往返运动,倒立摆即能稳定运行,不稳定运行时,适当调节滑模控制参数。
- 8) 当关闭控制界面时,击“关闭界面”按钮,关闭程序。

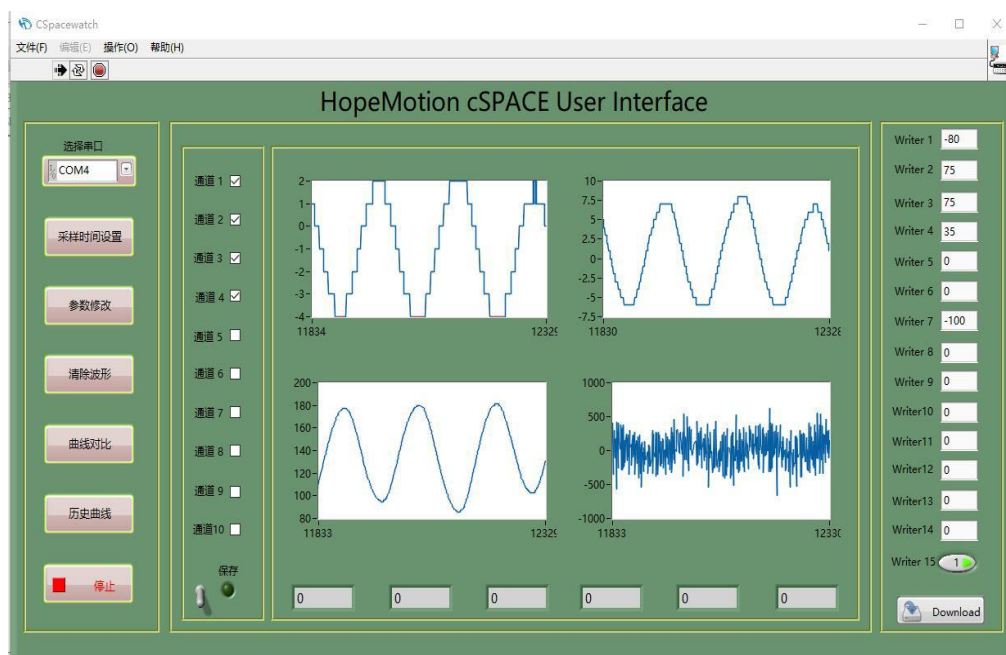


图 3.14 cSPACE 二级摆滑模控制界面

第四章 创新实验

创新实验同样分为直线电机平台实验和直线电机倒立摆实验，主要用于研究生或高年级本科生深入进行科研创新或者开展课题项目，满足高水平学生的需求。创新实验没有具体的实验步骤，只提出实验要求和结果。

创新实验一共 7 个，其中直线电机平台 2 个，直线电机倒立摆 5 个。

4.1 直线电机平台实验

4.1.1 提高直线电机跟踪精度的研究

实验目的：

提高直线电机驱动平台运动控制精度。

实验内容：

1. 分析影响运动控制精度的影响因素，设计控制器；
2. 提出新的控制方法或改进的控制算法；
3. 在 cSPACE 上搭建控制算法，再生成实时控制代码，对直线电机平台进行实物控制；

实验要求：

1. 首先对直线电机平台和倒立摆要有一个全面了解；
2. 利用 cSPACE 提供的模块搭建控制器；
3. 实时调节参数，比较各组参数的控制效果，并提高运动平台的控制精度。

实验报告：

将以论文的形式给出实验报告，描述所采用的控制器设计方法，比较参数调节时平台的运行变化，说明原因，并给出最佳设计参数，给出实际运行曲线，给出参考文献。

本实验为创新实验，建议作为毕业设计课题或大学生创新研究课题。

4.1.2 DSP 控制卡研究

直线电机平台采用 TMS320F28335DSP 作为主处理器的控制卡，该 DSP 控制卡具有丰富的接口，并且配备有示例程序，与直线电机平台结合，在实践中学习 DSP，可以进行伺服控制卡的开发、研究。利用平台的 DSP 控制卡可以进行下列创新研究实验：

- CCS 入门实验；
- DSP 数据存取实验；
- 片上存储器实验：SRAM 读写实验，SRAM 存储器的访问与控制；
- 片上外设实验：定时器控制实验，GPIO 控制实验，CAN 总线读写实验，AD 采集实验，SCI 数据传递实验，SPI 数据传递实验同步串口实验；

- MCBSP 实验;
- PWM 输出实验;
- AD 输入 DA 输出实验;

本实验为创新实验,建议作为毕业设计课题或大学生创新研究课题,不建议作为学生学习 DSP 的实验,而是作为在 DSP 基础上的控制实验。

需要配置有 DSP 卡接口附件的控制箱才有此功能。

4.2 直线电机倒立摆实验

4.2.1 一级倒立摆基于 cSPACE 自动起摆创新实验

实验目的:

基于 cSPACE 的一级倒立摆自动起摆控制实验。

实验内容:

1. 分析一级倒立摆自动起摆机理;
2. 基于 cSPACE 设计控制和自动起摆方法。生成实时控制代码,进行实物控制。

实验要求:

1. 首先对直线电机平台和倒立摆要有一个全面了解;
2. 利用 cSPACE 提供的模块搭建控制器;
3. 完成自动起摆过程。

实验报告:

将以论文的形式给出实验报告,描述所采用的控制器设计方法,比较参数调节时平台的运行变化,说明原因,并给出最佳设计参数,给出实际运行曲线,给出参考文献。

本实验为创新实验,建议作为毕业设计课题或大学生创新研究课题。

4.2.2 多级倒立摆的研究

二级及二级以上的倒立摆为多级倒立摆,通常由于多级倒立摆的复杂性,它已经不宜作为一般性的大学生本科实验,但可以为大学生提供创新实验。

多级倒立摆的控制难度很大,传统倒立摆控制多级倒立摆,需要开发出很复杂的控制算法,一般需要专门的控制理论和数学方面的专家,因此,目前学生对倒立摆控制的研究多止于一级倒立摆和二级倒立摆,而且能够实现二级倒立摆实物控制的不多。直线电机倒立摆由于其直接驱动方式,对控制算法的要求相比传统倒立摆更低,因此,学生可以在本实验平台上进行多级摆的研究。用户可以根据具体需求,向合动智能要求是否增加实验平台的摆杆组件。

Innovation Leads The Future

安徽合动智能科技有限公司

地址：安徽省合肥市高新区望江西路860号管委会B座12楼
合肥工业大学智能制造技术研究院 1216室

电话：+86 0551 63830245

传真：+86 0551 63830245

邮箱：info@hopemotion.com 网址：www.hopemotion.com