

# 交流伺服电机特性实验指导书



哈尔滨工业大学（深圳）  
实验与创新实践教育中心

# 目录

1. 实验目的.....	3
2. 实验原理.....	3
2.1 交流伺服电机调压调速.....	3
2.1.1 Clark/Park 变换思想及调压调速.....	3
2.1.2 程序设计.....	6
2.2 交流伺服电机调频调速.....	8
2.2.1 调频调速原理.....	8
2.2.2 程序设计.....	8
2.3 交流伺服电机负载 (T-V) 特性.....	10
2.3.1 交流伺服电机负载特性原理.....	10
2.3.2 程序设计.....	10
3. 实验步骤.....	12
3.1 交流伺服电机调压调速.....	12
3.1.1 硬件接线及操作.....	12
3.1.2 软件操作.....	14
3.1.3 开始实验.....	15
3.2 交流伺服电机调频调速.....	18
3.2.1 硬件接线及操作.....	18
3.2.2 软件操作.....	18
3.2.3 开始实验.....	20
3.3 交流伺服电机负载特性实验步骤.....	24
3.3.1 硬件接线及操作.....	24
3.3.2 软件操作.....	24
3.3.3 开始实验.....	26
4. 实验分析.....	31
附录 1 系统硬件介绍.....	32
附录 2 系统软件介绍.....	46
附录 A CCS 如何导入工程.....	52
附录 B 上位机实时内核设置.....	55

## 1. 实验目的

- (1) 掌握交流伺服电机调压调速原理；
- (2) 了解交流伺服电机调频调速原理；
- (3) 掌握交流伺服电机转速和力矩之间的关系；

## 2. 实验原理

### 2.1 交流伺服电机调压调速

#### 2.1.1 Clark/Park 变换思想及调压调速

(回顾 Clark 和 Park 变换内容) 在伺服系统中，直流伺服电机能获得优良的动态与静态性能，其根本原因是被控制量只有电机磁通 $\Phi$ 和电枢电流 $I_a$ ，且这两个量是独立的。此外，电磁转矩 ( $T_m=K_t \Phi I_a$ ) 与磁通 $\Phi$ 和电枢电流 $I_a$  分别成正比关系。因此，可做线性控制。如果能够模拟直流电机，求出交流电机与之对应的磁场与电枢电流，独立地加以控制，即可使交流电机具有与直流电机近似的优良特性。为此，必须将三相交变量（矢量）转换为与之等效的直流量（标量），建立起交流电机的等效模型，然后按直流电机的控制方法对其进行控制。

在使用矢量控制方法控制电机时，需建立交流伺服电机的等效模型，使用 Clark 和 Park 变换对矢量进行变换并加以控制。涉及到交流伺服电机中的磁场分布如图 2-1-1 所示。交流伺服电机的磁场方向为正弦磁场。由于 U、V、W 三相的电流分别为 $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$ 。

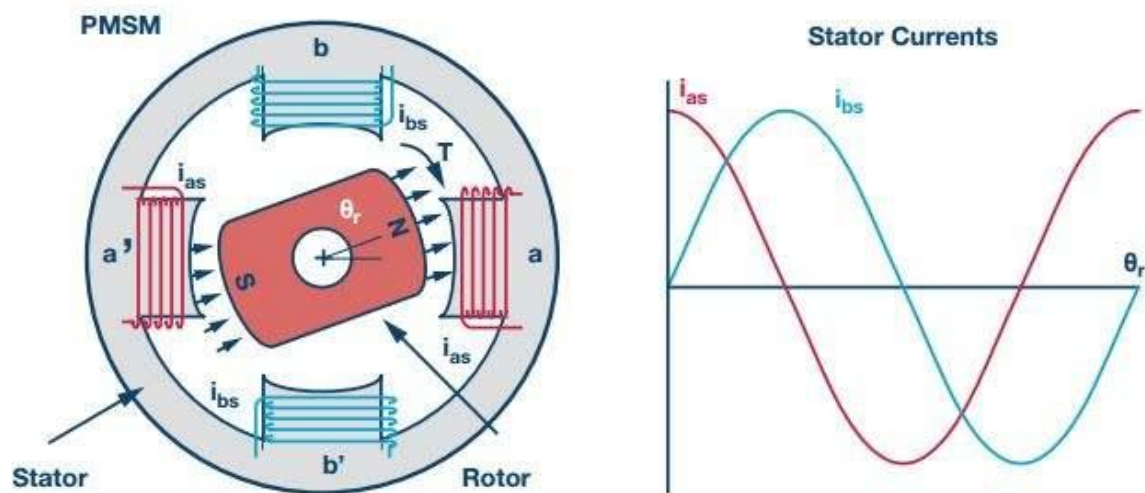


图 2-1-1 交流伺服电机的磁场

又因为在交流伺服电机中，电流的幅值相等，相位角各相差 $120^\circ$ 。所以可得电机在动态的时候各相电流表达式：

$$i_a = i_m \cdot \sin(\omega t) \quad (2-1-1)$$

$$i_b = i_m \cdot \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2-1-2)$$

$$i_c = i_m \cdot \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right) \quad (2-1-3)$$

其中， $\omega$ 表示电流角频率， $i_m$ 表示电流幅值。这三个电流在空间的矢量分布如图 2-1-2 所示。

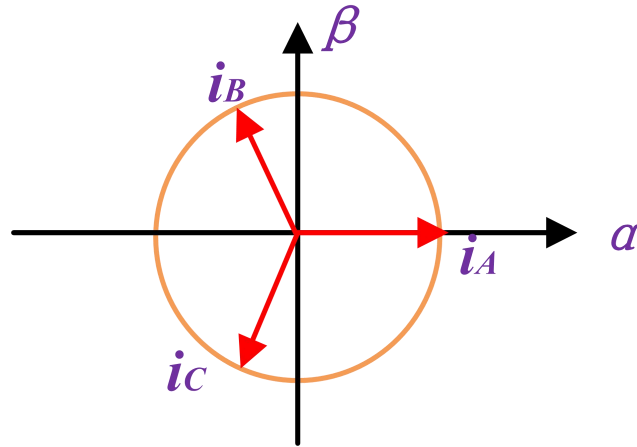


图 2-1-2 平面内电流矢量分布图

把平面内的三个电流矢量经过 Clark 变换（将 abc 变换到静止的 $\alpha\beta$ 坐标系下）

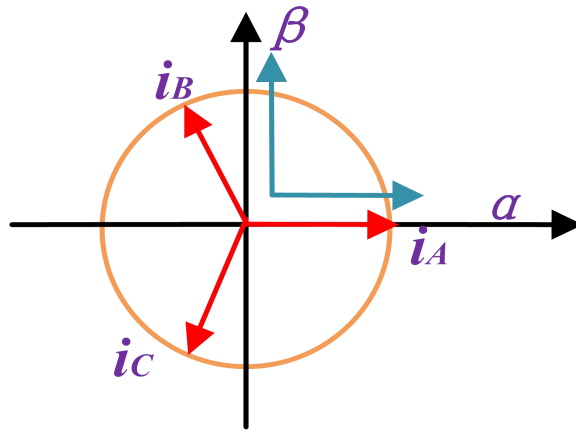


图 2-1-3 电流矢量变换原理图

投影到 $\alpha$ 、 $\beta$ 轴上可得出：

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}, \quad S_a = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (2-1-4)$$

由式子（2-1-1）、（2-1-2）、（2-1-3）、（2-1-4）联合可知：

$$\begin{cases} i_\beta = (2i_b + i_a)/\sqrt{3} \\ i_\alpha = i_a \end{cases} \quad (2-2-5)$$

其中 $i_\alpha$ 、 $i_\beta$ 是把平面内的三个矢量用二维坐标来进行表示。为了进一步方便计算，把二维坐标系建在电机转子上，同时由于电机转子在实时转动，则需要一个转化规则，将上述二维坐标系转化为转子上的运动坐标系。随时间变化的绕组电流产生的磁场可等效为旋转磁场，则可以将绕组电流表达在旋转坐标系中。在二维坐标系进行旋转变换时，也就是进行 Park 变换（把 $\alpha\beta$ 坐标系变换到旋转 dq 坐标系下），如图 2-1-4 所示。

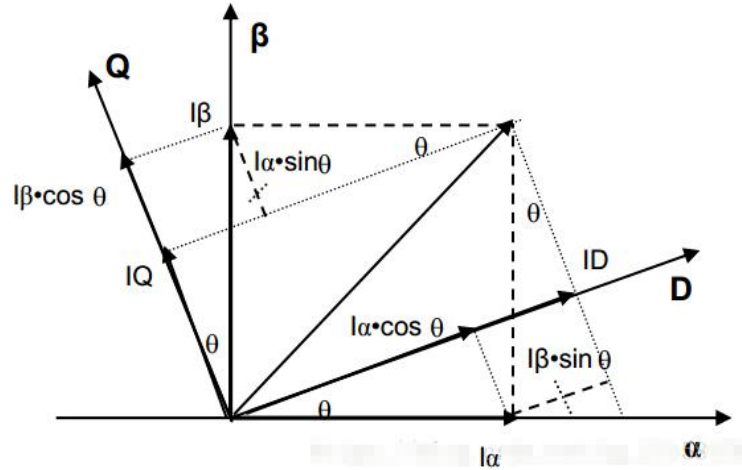


图 2-1-4 dq 变换

经由旋转之后可以得出：

$$\begin{cases} I_D = i_\alpha \cdot \cos \theta + i_\beta \cdot \sin \theta \\ I_Q = -i_\alpha \cdot \sin \theta + i_\beta \cdot \cos \theta \end{cases} \quad (2-1-6)$$

相当于乘一个齐次旋转矩阵 $S_b$ ：

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ 0 \end{bmatrix}, \quad S_b = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-1-7)$$

可以得出：

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ 0 \end{bmatrix} = S_a \cdot S_b \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2-1-8)$$

由上式可知：

$$\begin{cases} i_q = i_m \cos(\omega t - \theta + \theta_0) \\ i_d = i_m \sin(\omega t - \theta + \theta_0) \end{cases} \quad (2-1-9)$$

由于电机为永磁同步电机：

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (2-1-10)$$

式中 $\omega$ 为电流角速率， $\theta$ 代表磁场角度，对式（2-1-10）进行积分可得出：

$$\theta = \omega t + \theta_1 \quad (2-1-11)$$

式中 $\theta_1$ 为电机开始旋转时刻磁场的角度。把式（2-1-11）带入式（2-1-9）中可得出：

$$\begin{cases} i_q = i_m \cos(\theta_0 - \theta_1) \\ i_d = i_m \sin(\theta_0 - \theta_1) \end{cases} \quad (2-1-12)$$

式中， $i_q$ 、 $i_d$ 是经过矢量变换之后的电流的分量， $i_m$ 是线圈电流幅值， $\theta_0$ 是电机线圈电流初始角度， $\theta_1$ 是电机线圈磁场初始角度。

当电机经过初始上电寻相时，使得 $\theta_0 = \theta_1$ 时，带入式（2-1-12）中可得：

$$\begin{cases} i_q = i_m \\ i_d = 0 \end{cases}$$

由此可知，在经过矢量计算之后， $i_q = i_m$ ， $i_d = 0$ ，此时电流的励磁分量为0，扭矩分量为 $i_m$ 。矢量变换之后 q 轴等效电压方程可表达为：

$$U_q = R_m \cdot I_q + E_\phi \quad (2-1-13)$$

式中， $U_q$ 为母线电压， $R_m$ 为线圈阻抗（定值）， $I_q$ 为线圈电流， $E_\theta$ 为反电动势。其中 $E_\theta$ 等于：

$$E_\theta = BLV \tag{2-1-14}$$

式中， $B$ 为磁感应强度， $L$ 是线圈长度， $V$ 是转子速度。电压平衡方程可以写成：

$$U_q = R_m \cdot I_q + K_a \cdot v \tag{2-1-15}$$

式中， $K_a$ 为反电动势系数。

### 2.1.2 程序设计

程序设计思想：通过 Clark 变换和 Park 变换转换为 ID，IQ 分量。首先初始化 DSP 控制器，电机寻相。然后让 ID 置零，通过上位机设置 IQ 的值，传输到下位机之后，下位机通过 Ipark 变换以及产生实际的 PWM 波来控制电机的运转。电机的编码器反馈速度与方向信号，返回到 Ipark 变换中，形成闭环。程序设计框图如图 2-1-5 所示。

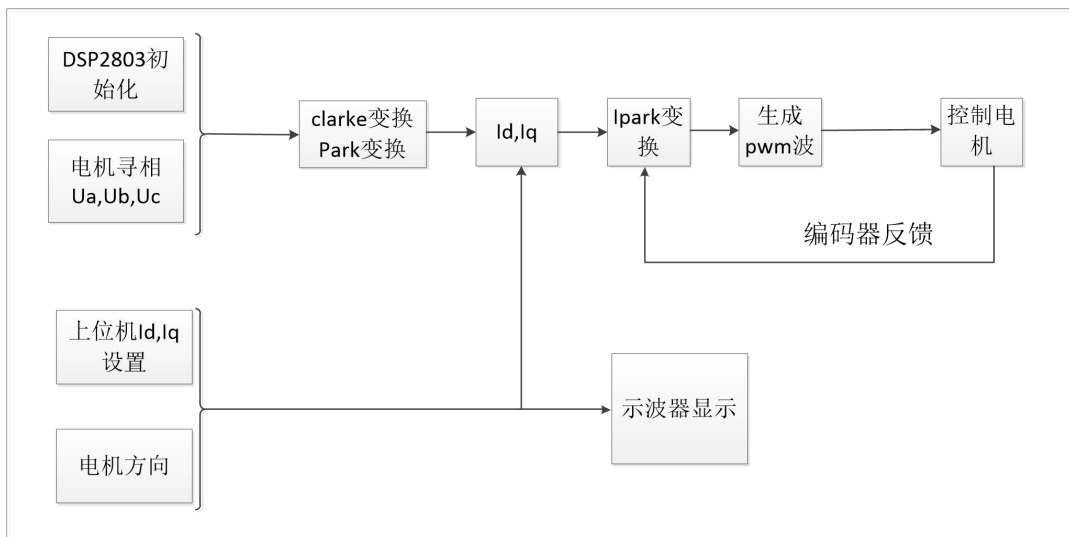


图 2-1-5 程序设计框图

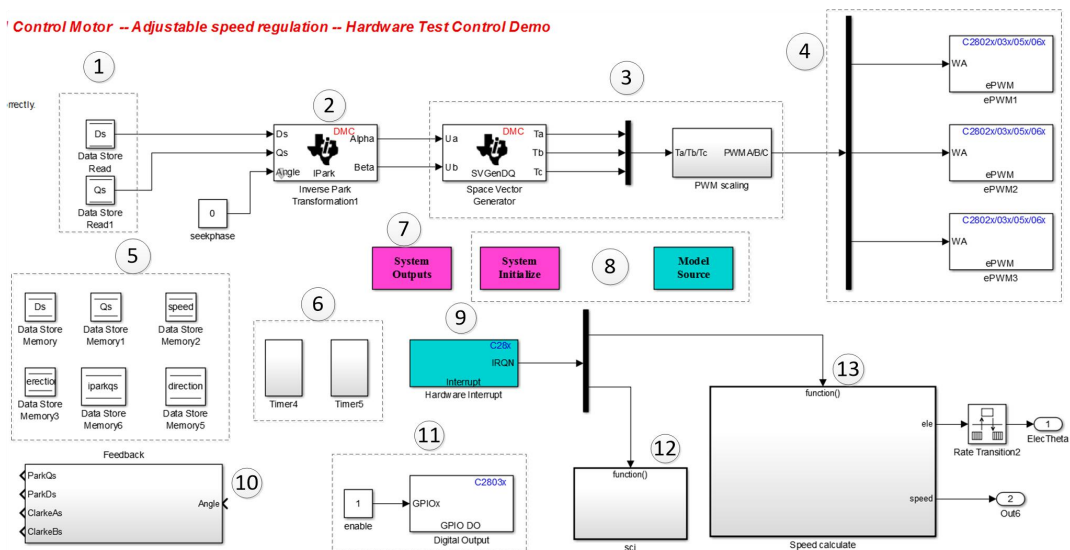


图 2-1-6 下位机程序

- ① 从上位机发送过来的 ID（电流励磁分量），IQ（电流力矩分量）的值；
- ② Ipark 变换，把平面内的旋转坐标系下矢量变换为静止坐标系下的矢量；

- ③根据 IQ 的值产生响应的 PWM 波形，对电机进行实施控制；
- ④把产生的 PWM 波输送到电机的三相绕组上去；
- ⑤初始化和定义程序中的变量；
- ⑥定时器模块，主要对 12，13 两个模块进行定时，决定这两个模块的开始执行时间；
- ⑦电机的初始寻相。电机在开始上电时需要使绕组线圈中的电流的角度与磁场的初始角度相等；
- ⑧DSP8301 初始化使用；
- ⑨任务分配器。决定⑫⑬两个模块的先后运转顺序；
- ⑩Clark 和 Park 变换；

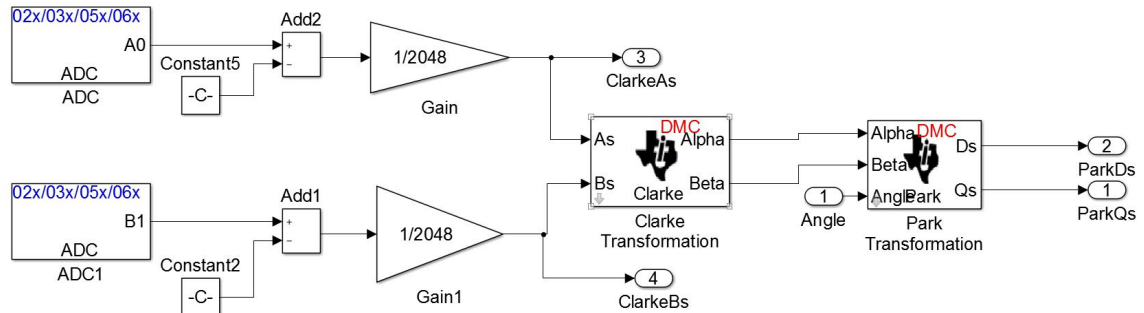


图 2-1-7 Clark 和 Park 变换

- ⑪电机上下使能；
- ⑫使用 SCI 向上位机发送数据；

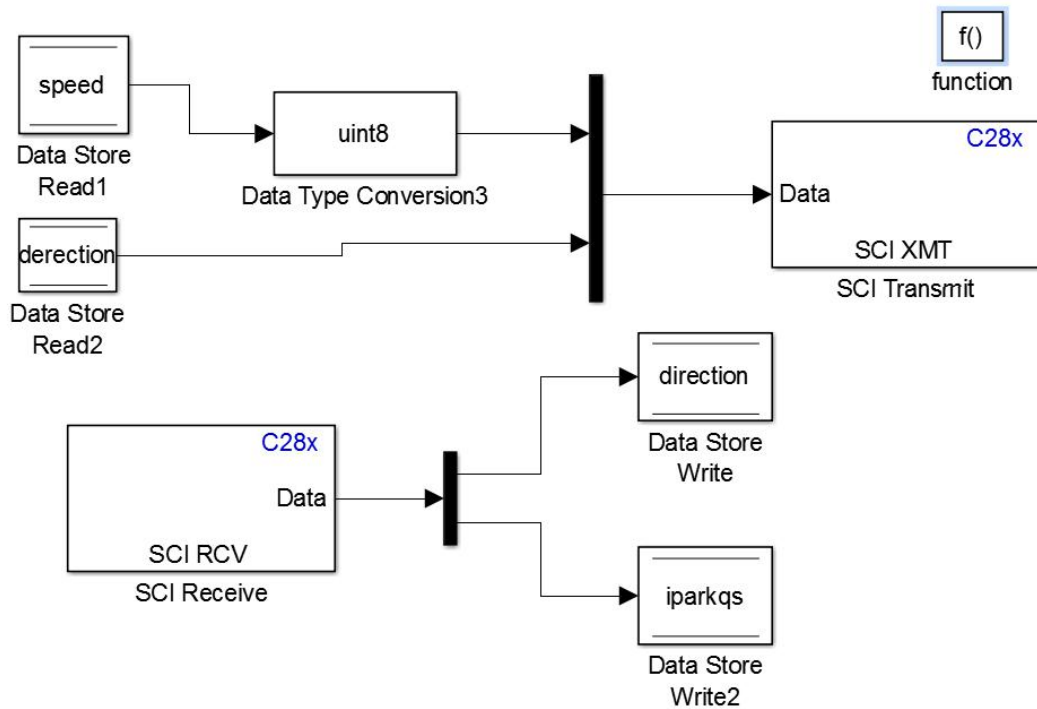


图 2-1-8 发送数据给上位机

- ⑬根据编码器的反馈计算电机速度和判断电机的运转方向。

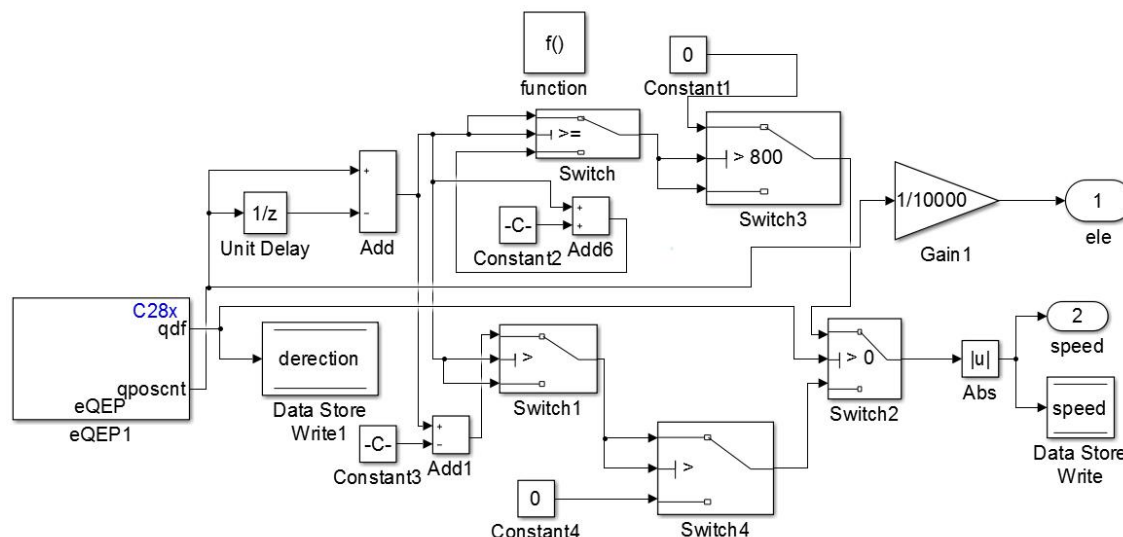


图 2-1-9 计算电机速度及反馈方向

## 2.2 交流伺服电机调频调速

### 2.2.1 调频调速原理

设 $\omega_1$ 为电机转子角速度：

$$\omega_1 = \frac{d\theta}{dt} \quad (2-2-1)$$

式中 $\theta$ 代表转子磁场角度，对式(2-2-1)进行积分可得出：

$$\theta = \omega_1 t + \theta_1 \quad (2-2-2)$$

式中 $\theta_1$ 为电机开始旋转时刻的磁场初始角度。于是可得出：

$$i_q = i_m \cos(\omega t - \omega_1 t + \theta_0 - \theta_1)$$

$$i_d = i_m \sin(\omega t - \omega_1 t + \theta_0 - \theta_1) \quad (2-2-3)$$

式中， $i_q$ 、 $i_d$ 是经过矢量变换之后电流的分量， $i_m$ 是线圈电流幅值， $\theta_0$ 是电机线圈电流初始角度， $\theta_1$ 是转子磁场初始角度。 $\omega$ 是电流角速率， $\omega_1$ 是电机转子磁场角速率。而在电机中 $i_d$ 是定子线圈电流的励磁分量，为保持定子线圈中电流产生的励磁磁场对转子的永磁磁场没有副作用，矢量控制中一般强制让 $i_d = 0$ 。则需要始终保持 $\omega = \omega_1$ ， $\theta_0 = \theta_1$ ；即转子角速度等于定子电流的角频率。在转速不高的情况下，改变定子绕组的电流角频率相当于改变定子旋转磁场的转速，定子磁场和转子磁场相互作用，使得转子以相同的角频率旋转。（当转速过高时，由于机械响应特性的限制，转子的速度跟不上电流的角频率变化，就会出现转速差，电机抖动）

### 2.2.2 程序设计

程序设计思想：首先 DSP 进行初始化，电机寻相。在初始化模块中设定 ID,IQ 的值，然后电机寻相时先模拟一个电流角度，使电机的电流角度等于电机的初始磁场角度。根据设定的ID,IQ 和上位机设定的电流角度在进行  $Ipark$  变换时，不断调整绕组线圈中电流的角频率，改变电机的速度。通过电机运转时编码器的反馈，计算电机当前运转的速度和电机运转的方向反馈给  $Ipark$  变换模块，形成闭环。程序流程框图如下图 2-2-1 所示。



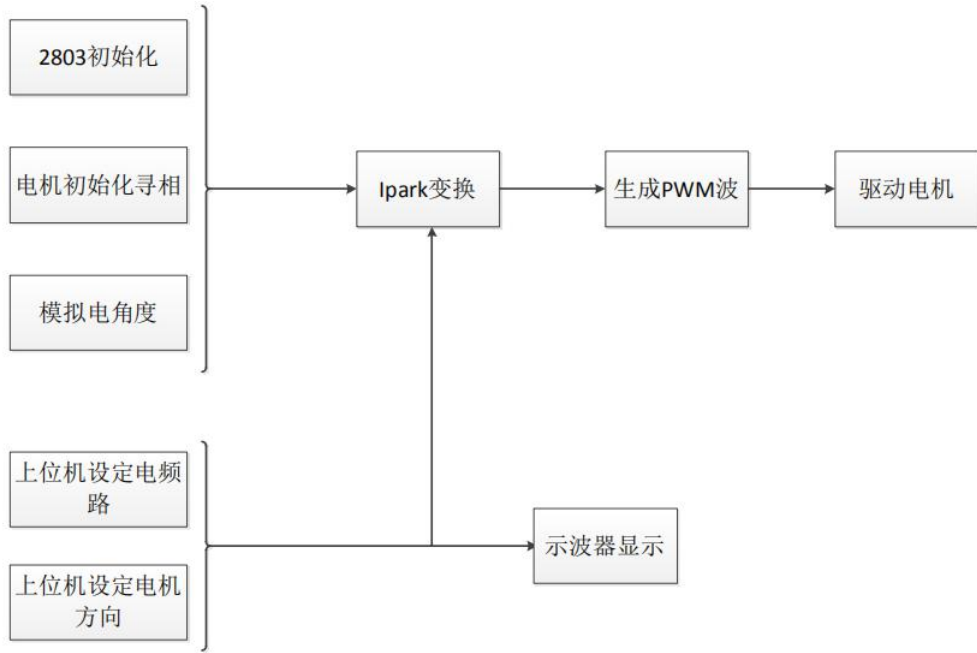


图 2-2-1 程序流程框图

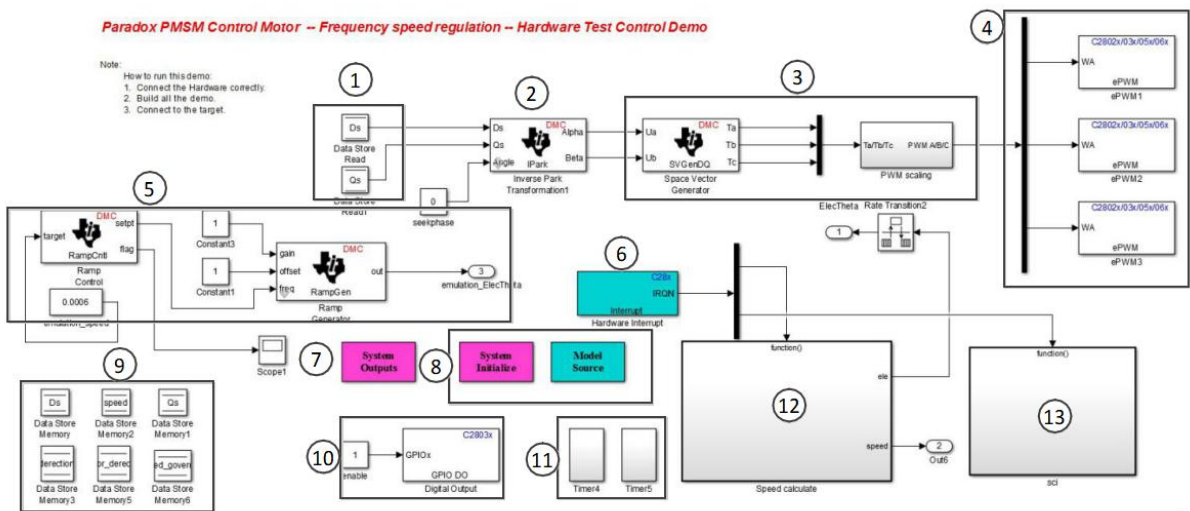


图 2-2-2 下位机程序

- ① 设定的  $ID, IQ$  的值。
- ②  $I_{park}$  变换模块，输入  $ID, IQ$ , 电频率，输出静止坐标系下的电流矢量分量。
- ③ 输出相应的 PWM 波，占空比合适，用来驱动电机的运转。
- ④ 将三相电压分量直接设置到定子绕组的线圈中，随时间变化形成一个旋转的磁场。
- ⑤ 模拟电流的角频率，当电机在一开始初始化时，接收到上位机传输的电流角频率的数据，设置到  $I_{park}$  变换模块中。

- ⑥ 任务分配器，决定 12,13 两个模块哪一个先开始工作。
- ⑦ 电机初始化寻相。
- ⑧ 系统初始化及 DSP8301 的初始化。
- ⑨ 系统初始化和变量定义。
- ⑩ 电机上下电使能。
- ⑪ 定时器模块，主要对 12,13 两个模块进行定时，决定这两个模块的开始执行时间。
- ⑫ 根据编码器的反馈计算电机的速度和测量电机的运转方向。
- ⑬ 向上位机传输数据。

## 2.3 交流伺服电机负载 (T-V) 特性

### 2.3.1 交流伺服电机负载特性原理

根据 dq 变换，得到矢量方程式如下：

$$U_q = i_q * R_m + K_a * \omega$$

其中， $U_q$  为 q 轴电压（受电源电压限制， $U_q \leq 48V$ ）； $i_q$  为绕组线圈（等效为 q 轴）电流； $K_a$  为反电动势系数。由上式可知，当电机速度  $\omega$  增大但不超过某一速度  $\omega_m$  时， $U_q$  能够保证电机加速所需要的扭矩（即提供足够的  $i_q$ ），由电机的力矩输出方程：

$$T = K_t i_q$$

式中： $T$  为电机的电磁扭矩； $K_t$  为电磁常数； $i_q$  为绕组线圈电流。一定范围内  $U_q$  能够保证电机加速所需要的扭矩（即提供足够的  $i_q$ ）。当电机速度超过某速度  $\omega_m$  时由于电机的反电动势趋近于  $U_q$  的最大值，此时绕组线圈 q 轴电流不能保证。所以此时电机就不能以原有的加速度保持匀加速状态。

### 2.3.2 程序设计

程序设计思想：电机开始旋转一周进行寻相，完成寻相后，通过上位机配置参数，选择模式，模式 0 用于负载向上运动，模式 1 用于负载向下运动，模式 2 用于实验。其中，模式 0, 1 是给一个规划速度，模式 2 是给一个无穷大加速度，当电机带动负载运动时，在相同的加速度下，不同的负载，电机能达到的最大速度不同。程序设计流程如图 2-3-1 所示。

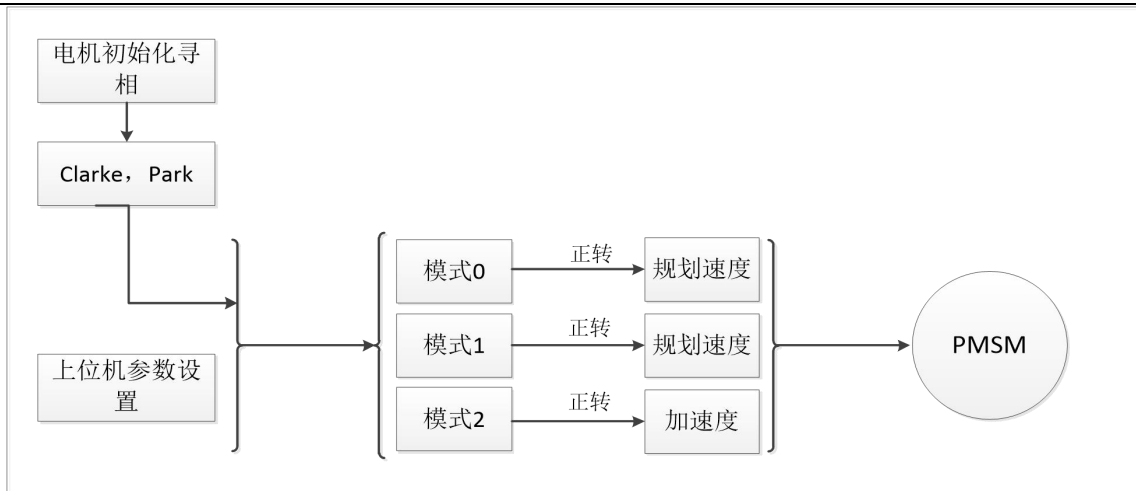


图 2-3-1 程序设计流程图

**Paradox PMSM Control Motor -- Test load -- PC**

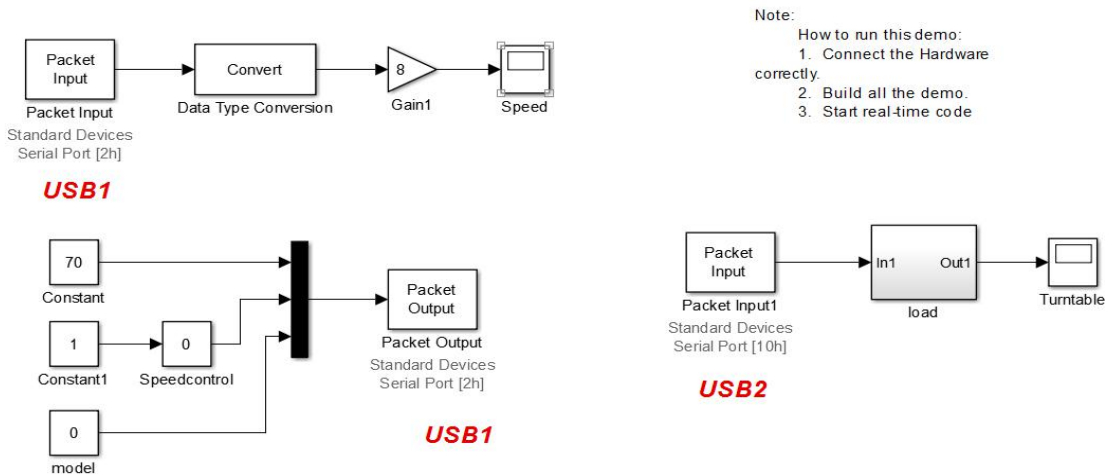


图 2-3-2 上位机程序

① “model”模块用于更换模式，模式 0 负载向下运动，模式 1 负载向上运动，模式 2 进行实验。

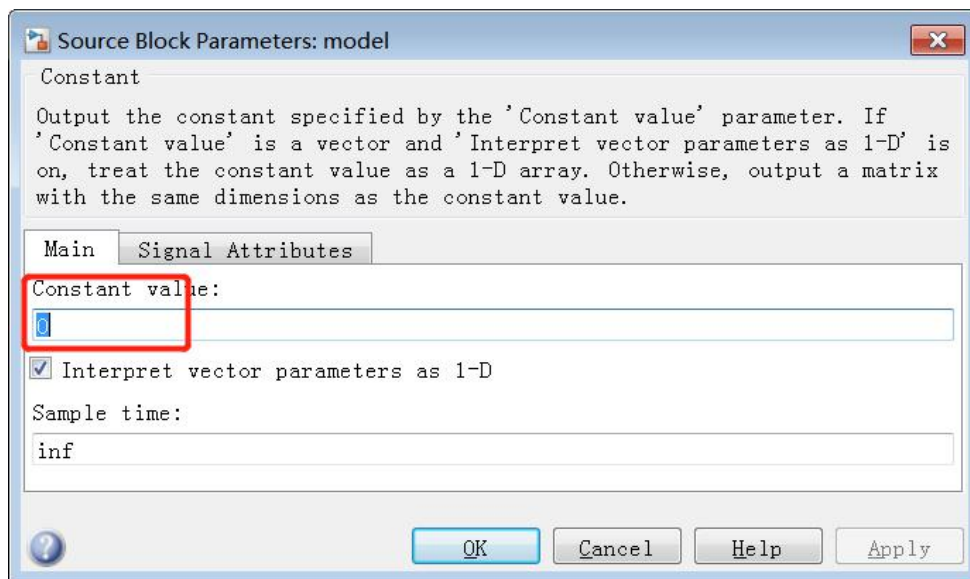


图 2-3-3 “model”模块

- ② 红标“USB1, USB2”所标模块为下位机和上位机的数据交互接口，通过 COM 口进行通信。

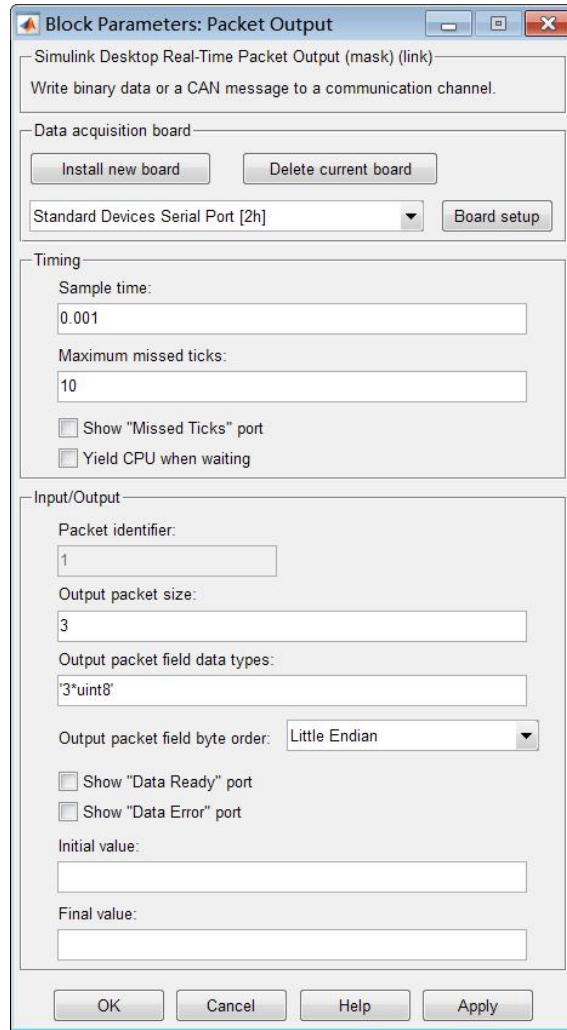


图 2-3-4 数据交互模块

### 3. 实验步骤

#### 3.1 交流伺服电机调压调速

##### 3.1.1 硬件接线及操作

1. 线路连接，电箱 CN2 和 CN6 接口连接，CN3 和 CN7 接口连接，USB1 口与电脑的 USB 口连接，推动继电器开关上电，如图 3-1-1 所示；

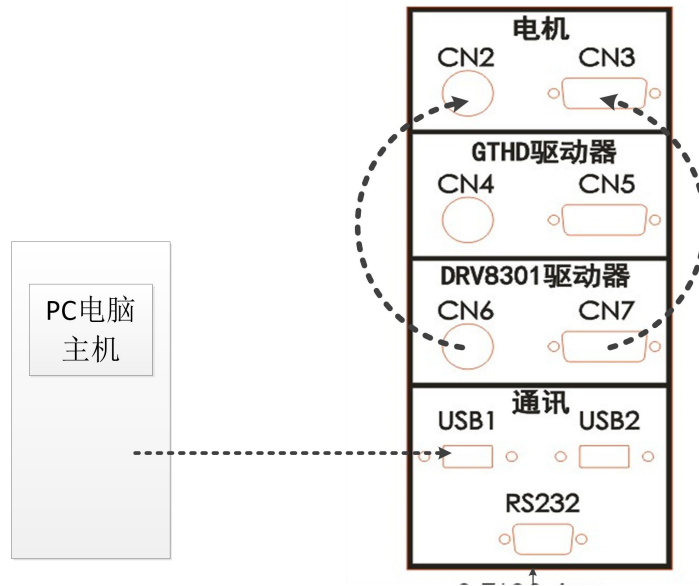


图 3-1-1 硬件连接

2. CN1 与直流电源的正负连接，按下直流电源启动按钮（图 3-1-2 所示 A 处），设置直流电源电压为 48V，恒压模式，按下直流电源输出按钮（图 3-1-2 所示 B 处），打开设备电源（空气开关）（注意，必须在代码下载前给驱动器上电）；

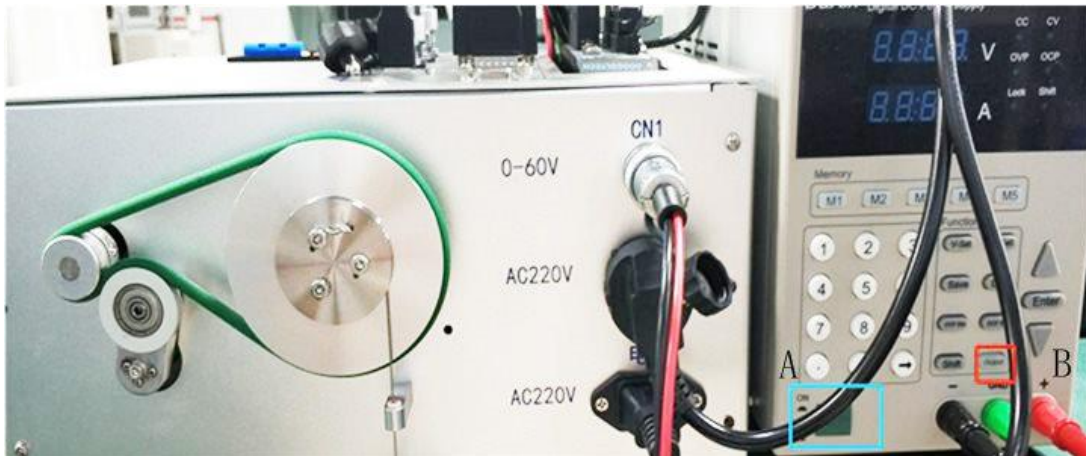


图 3-1-2 硬件连接

3. 实验前把转盘端电机皮带拆卸（去掉负载），如图 3-1-3 所示。

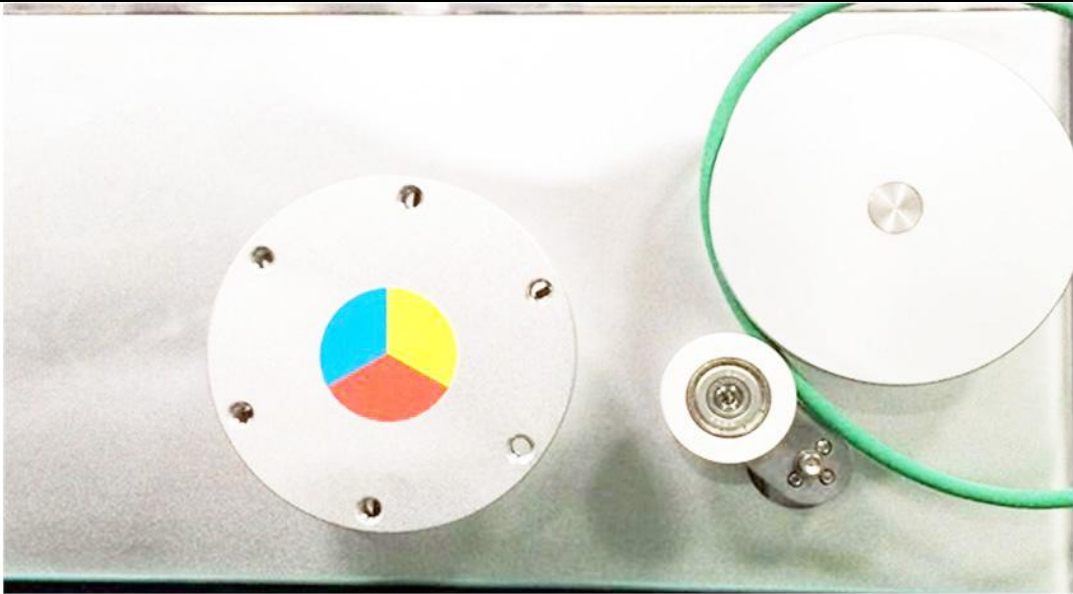


图 3-1-3 拆卸皮带

### 3.1.2 软件操作

1. 打开 Matlab，在目录“C:\ProgramFiles\MATLAB\R2015b\workspace\AC\_Servo\_test\control\_voltage”下打开程序“project\_pmsm.slx”，编译，下载，（将此程序下载到 DSP），程序如图 3-1-4；

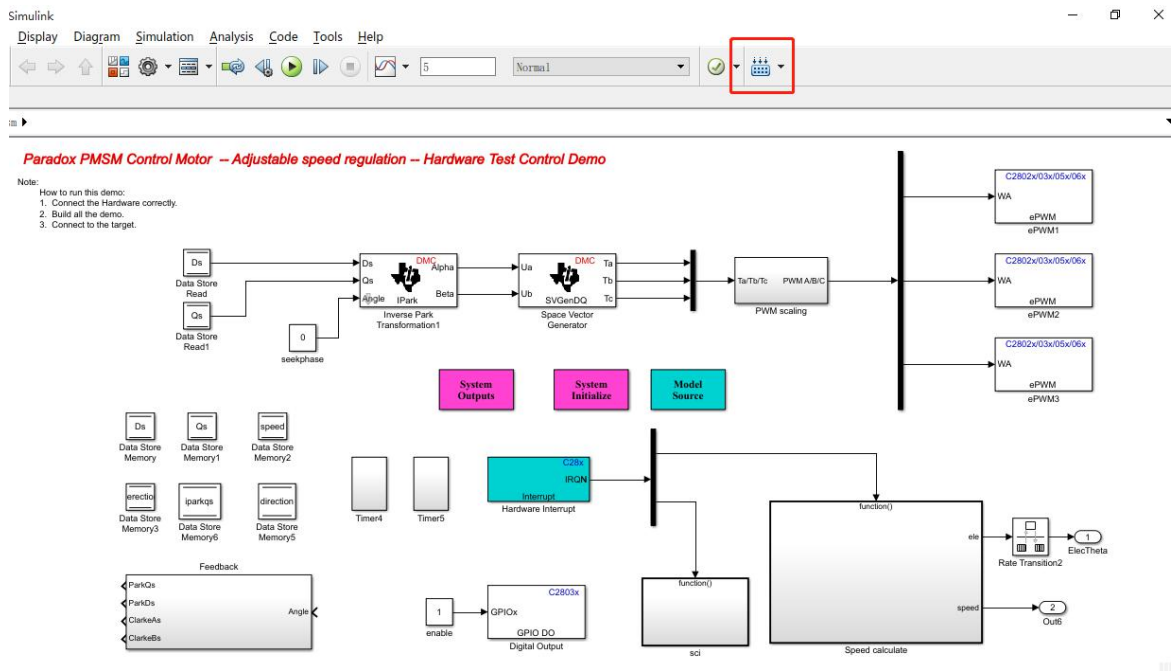


图 3-1-4 调压调速界面

2. 打开 Matlab，在目录 C:\ProgramFiles\MATLAB\R2015b\workspace\AC\_Servo\_test\control\_voltage”下选择 Adjustable\_speed\_regulation.slx 文件打开，首先需要更改 USB 的 COM 口。点击如图 3-1-5 所示 A 处，查看 B 处的 COM 口是否为电脑所示 COM 口，具体电脑设备的 COM 口可以在设备管理器中查看。在 B 处选择电脑所示的 COM 口之后，点击 C 处，弹出更改通讯 COM 口波特率对话框。更改波特率为“115200”，点击 E 处“OK”，然后点击 F 处“OK”，完成程序 COM 口设置，如图 3-1-5 所示；

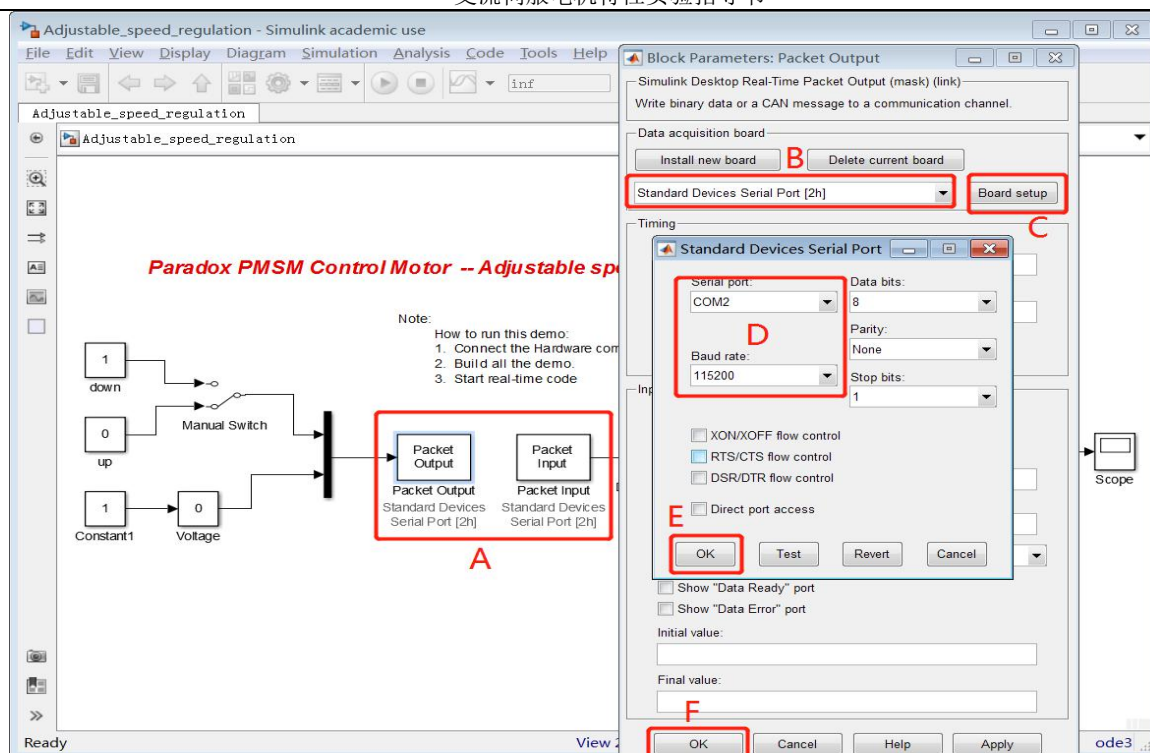


图 3-1-5 程序 COM 口设置

3. 点击图 3-1-6 红框所示按键，点击 A 处对程序进行编译下载（此程序为上位机程序，后续参数修改都在此界面）。在程序编译时可以点击图中 B 处，观察编译结果。

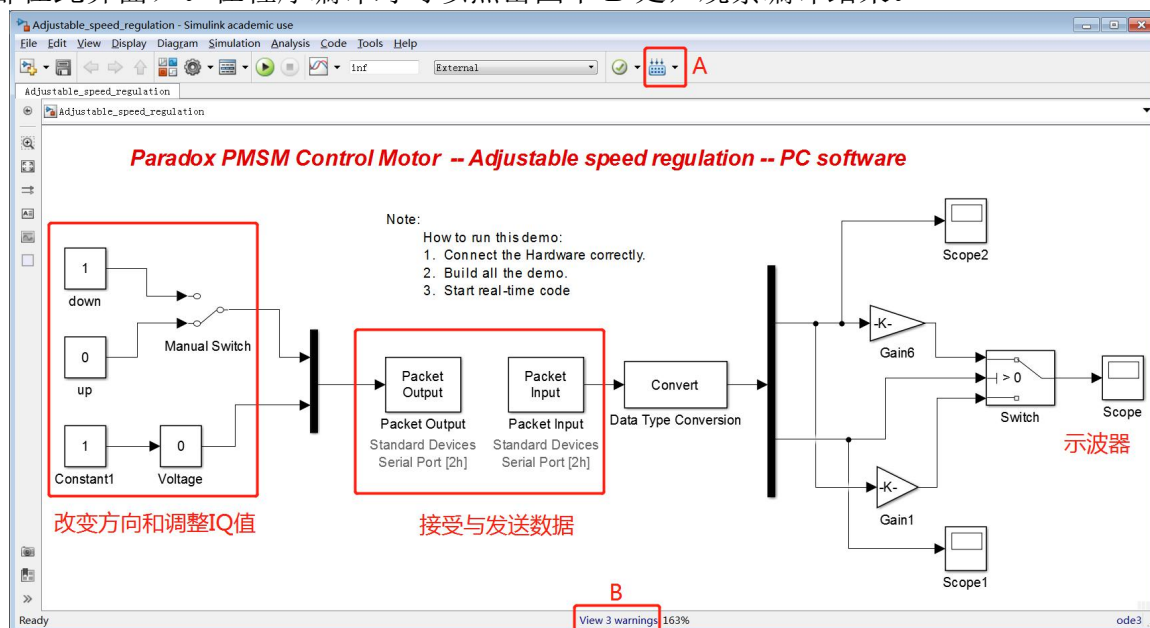



图 3-1-6 程序编译

### 3.1.3 开始实验

1. 点击图 3-1-7 红框所示的开始按钮，运行程序。图中开关选择“1”电机逆时针方向运行，开关选择“0”表示电机顺时针方向运行，改变 Voltage 模块的值，0 到 100 对应 0 到 48V 电压；

	<p><b>危险</b></p>	<p><b>严禁运动过程中改变运动方向，小心电机飞车</b></p>
---	------------------	------------------------------------

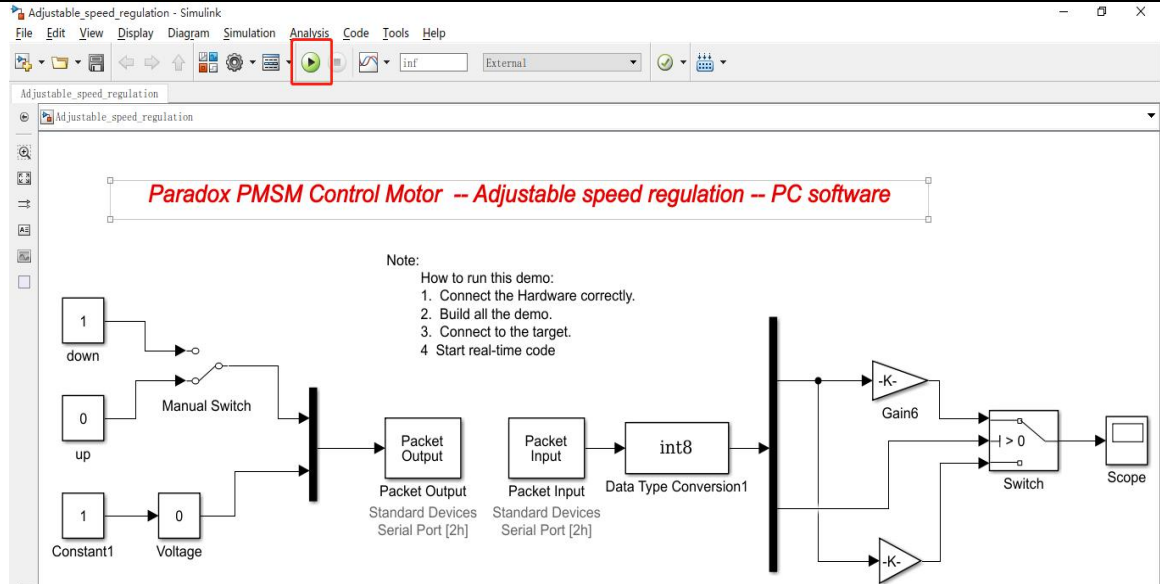


图 3-1-7 控制运行软件

2. 改变“Voltage”模块后，开关处于“0”处的实验现象如图 3-1-8 所示（注意：每个实验台数据不一致，此处仅供参考）。在表 3-1-1 中记录不同 voltage 模块值下电机的转速；

表 3-1-1 开关为 0 数据表

	Voltage 模块值	电机速度 (r/min)
1	0	0
2	20	
3	40	
4	60	
5	80	
6	100	



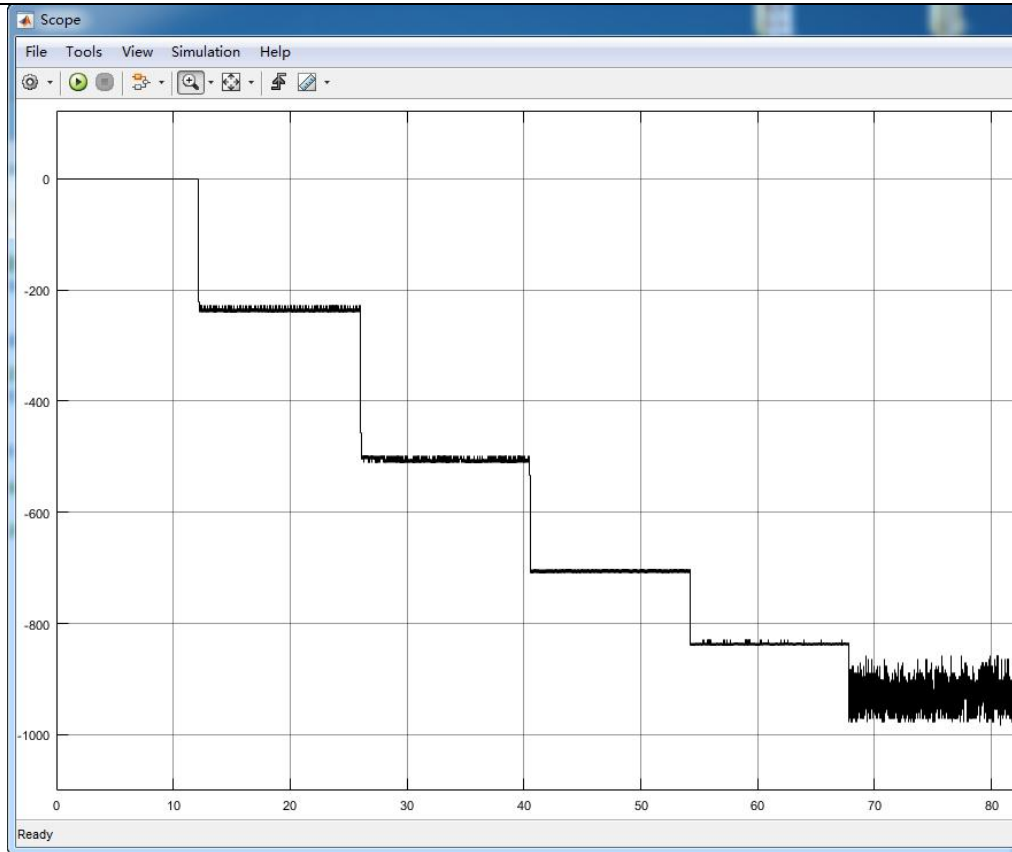


图 3-1-8 开关为 0 时 Scope 示波器图像

3. 改变“Voltage”模块后，当开关处于“1”的实验现象如下图 3-1-9 所示（注意：每个实验台数据不一致，此处仅供参考），在表 3-1-2 中记录不同 voltage 模块值下电机的转速。**注意：先停止程序，再切换开关改变电机转动方向！**

表 3-1-2 开关为 1 数据表

	Voltage 模块值	电机速度 (r/min)
1	0	0
2	20	
3	40	
4	60	
5	80	
6	100	

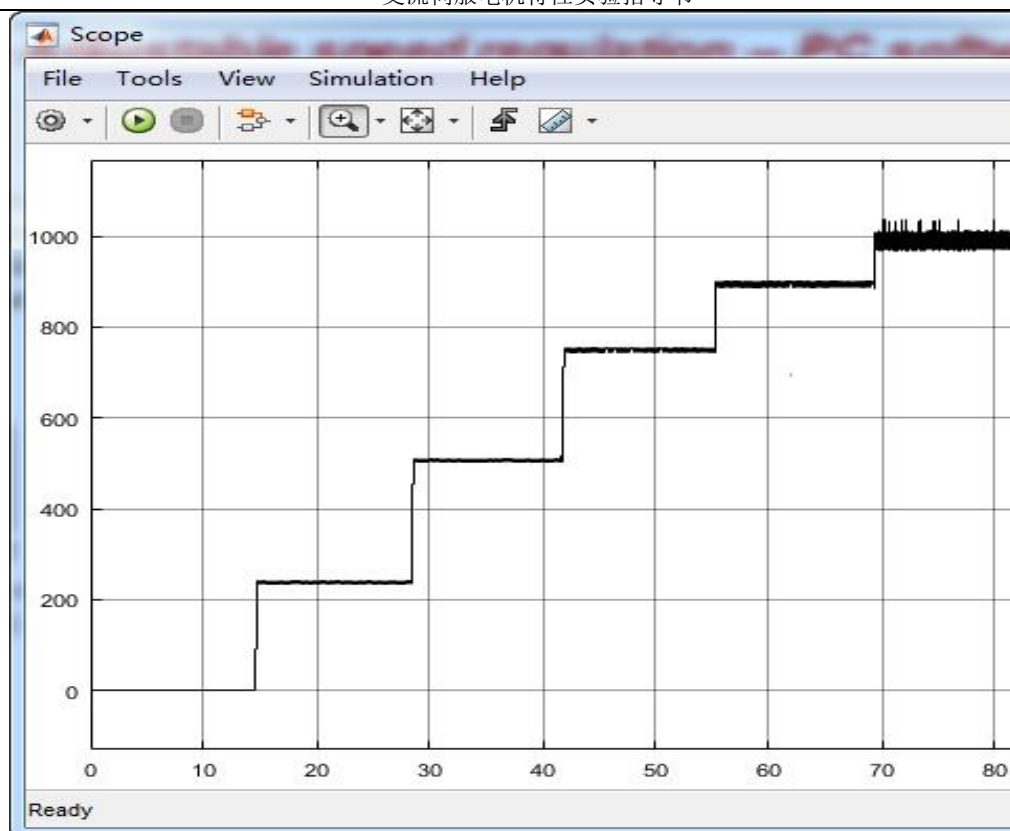


图 3-1-9 开关为 1 时 Scope 示波器图像

## 3.2 交流伺服电机调频调速

### 3.2.1 硬件接线及操作

硬件连接，与调压调速相同，不需要改变线路。

### 3.2.2 软件操作

1. 打开 MATLAB，在目录“C:\ProgramFiles\MATLAB\R2015b\workspace\AC\_Servo\_test\

control\_frequency”下打开程序“project\_pmsm.slx”，点击下图红框所示按键编译，编译时整个界面变为灰色，不可操作，编译完成后整个界面恢复原来状态，下载完成后可观察到电箱后面的圆盘旋转一周进行寻相，则表示下载成功。（注意，必须先启动直流电源，设置直流电源电压为 48V，恒压模式，红框为直流电源输出按钮，**必须要在代码下载前给驱动器上电**）如图 3-2-1 所示。

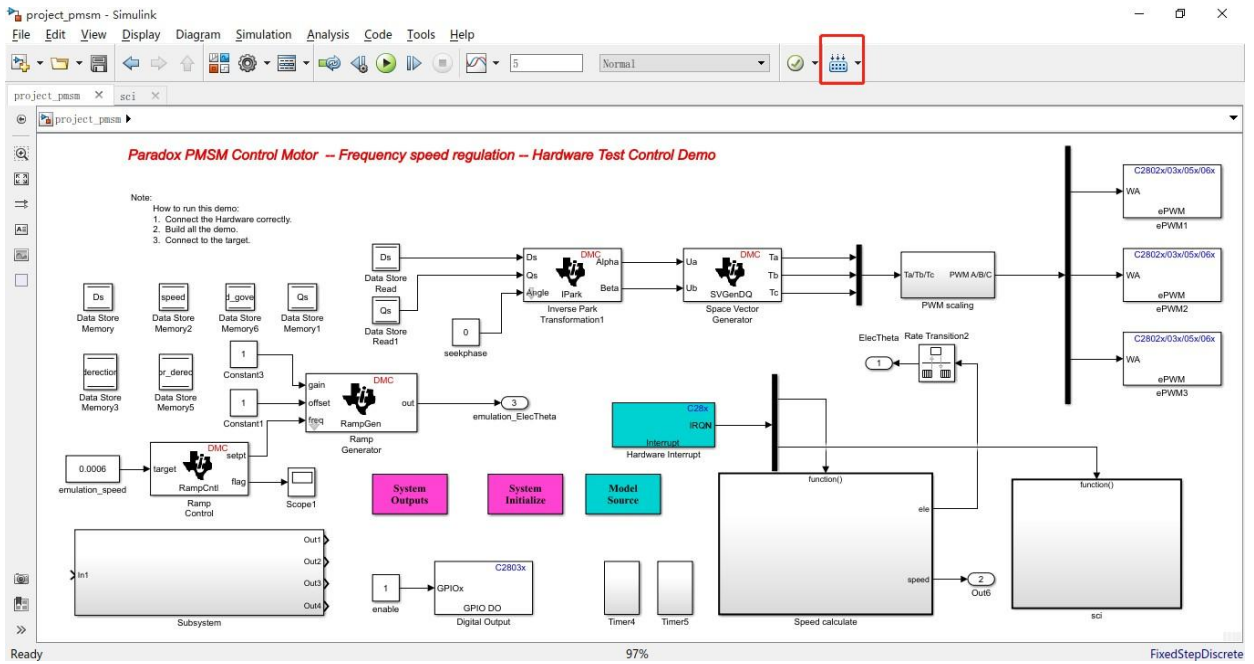


图 3-2-1 调频调速代码

2. 打MATLAB，在目录“C:\ProgramFiles\MATLAB\R2015b\workspace\AC\_Servo\_test\frequency\_voltage”下打开程序“frequency\_speed\_regulation.slx”，点击如图 3-2-2 所示，查看 COM 口是否为你电脑所示 COM 口，具体电脑设备的 COM 口可以在设备管理器中查看。选择你电脑所示的 COM 口之后，更改通讯 COM 口波特率为“115200”。然后点击“ok”，即可完成程序 COM 口设置。

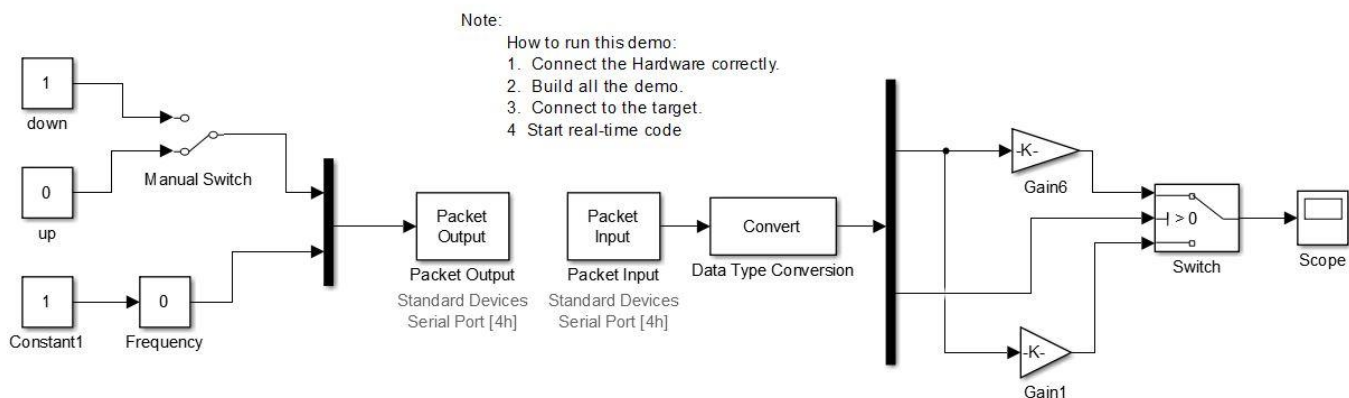
**Paradox PMSM Control Motor -- Frequency speed regulation -- PC software**

图 3-2-2 程序 COM 口设置

3. 点击下图 3-2-3 红框所示按键，对程序进行编译。在程序编译时可以点击图中B 处，观察编译完成的结果。然后就可以准备开始实验了。

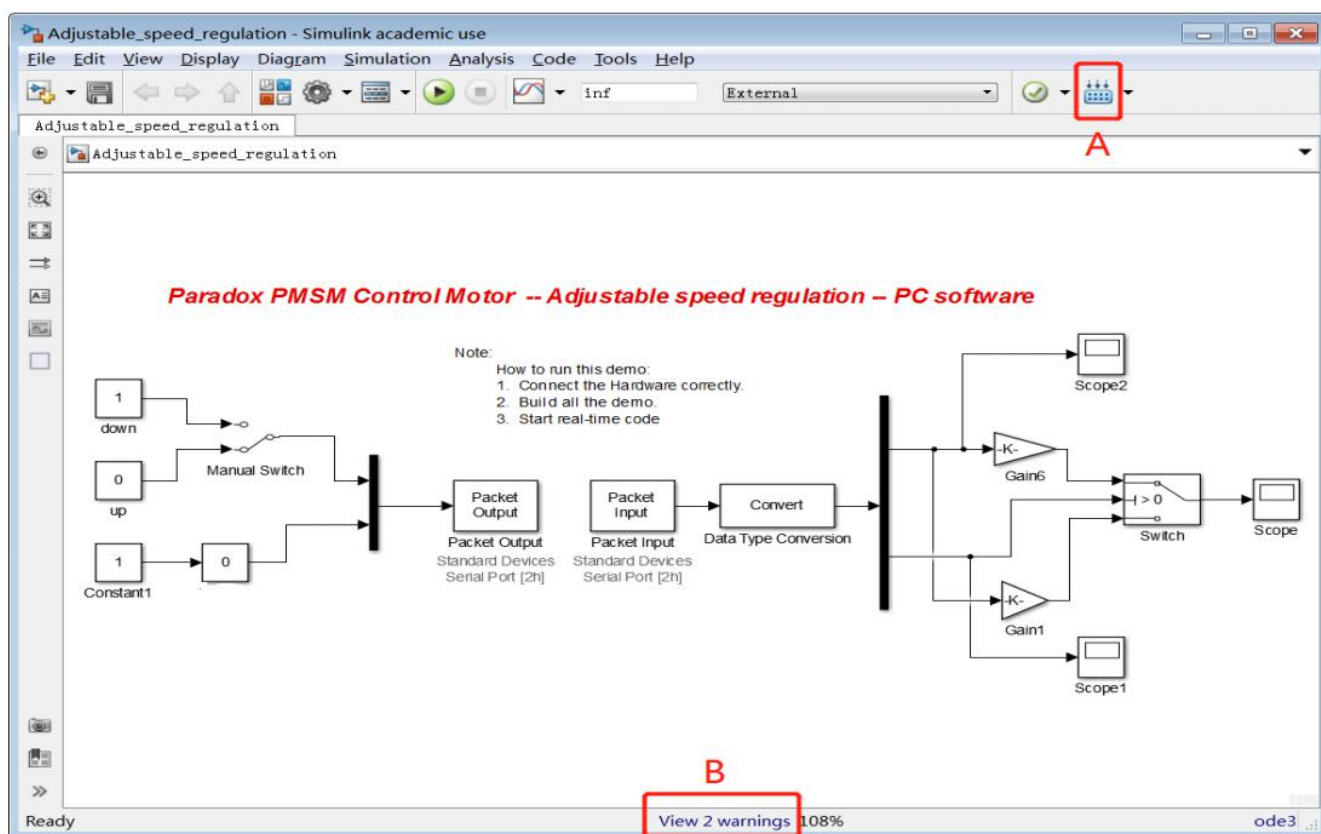


图 3-2-3 程序编译

## 3.2.3 开始实验

1. 电机图中最上方的开始按钮，图中开关选择“1”表示电机向逆时针方向旋转，开关选择“0”表示电机顺时针方向旋转，改变 Frequency 模块的值，对应的为代码里的电频率，0 到 100 对应着 0 到 100HZ 的电频率(实验

中最大为70HZ)。由于转子的机械响应特性限制,频率大于70HZ左右时候会导致转速差。电机抖动,电流过大。(严禁运动过程中改变运动方向,小心电机飞车。)如图 3-2-4 所示。

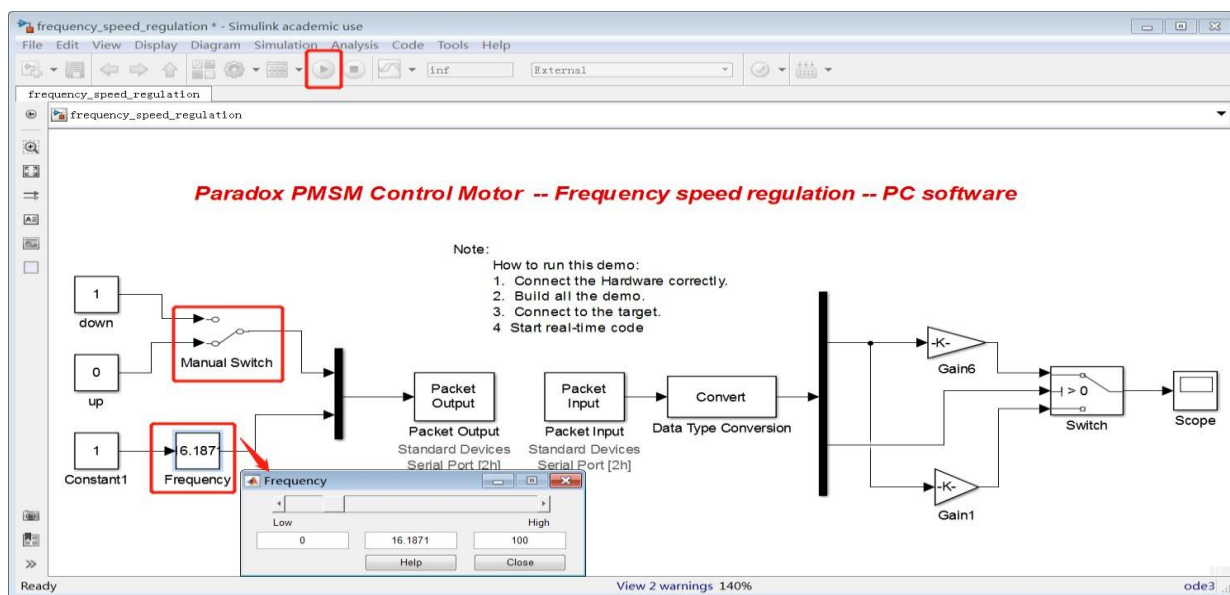


图 3-2-4 频率控制程序

2. 改变“Frequency”模块的值,当“Manual Switch”开关处于“0”状态时,示波器“Scope”的图像如 3-2-5 所示(注意:每个实验台数据不一致,此处仅供参考)。

表 3-2-1 开关为 0 数据表

	Frequency 模块值	电机速度 (r/min)
1	0	
2	20	
3	40	
4	60	
5	70	

当开关处于 0 时,改变滑块为相应值,可得到电机相应的转速,填入上表 3-2-1。

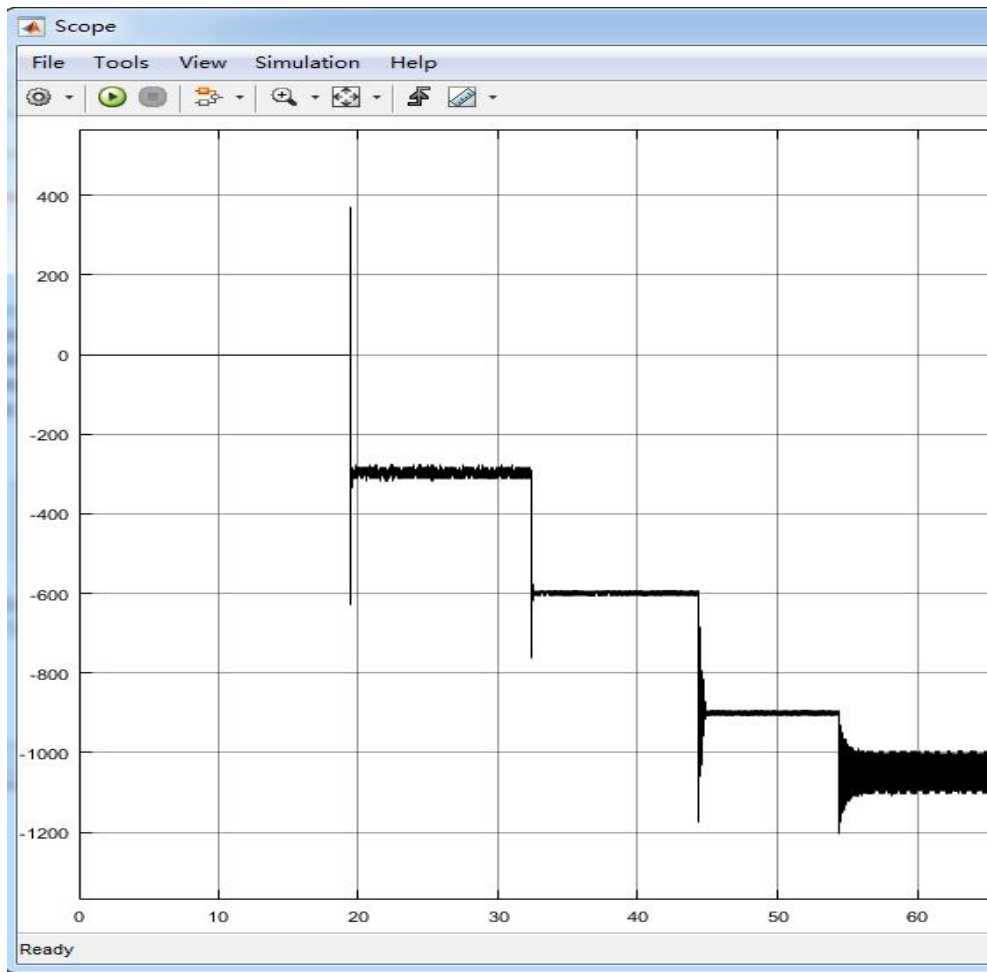


图3-2-5 开关为“0”时 Scope 值

3. 改变Frequency”模块的值,当Manual Switch”开关处于“1”状态时,示波器“Scope”的图像如 3-2-6 所示(注意:每个实验台数据不一致,此处仅供参考)。

表 3-2-2 开关为 1 数据表

	Frequency 模块 值	电机速 度 (r/min)
1	0	
2	20	
3	40	
4	60	
5	70	

当开关处于 1 时,改变滑块为相应值,可得到电机相应的转速,填入上表 3-2-2 。

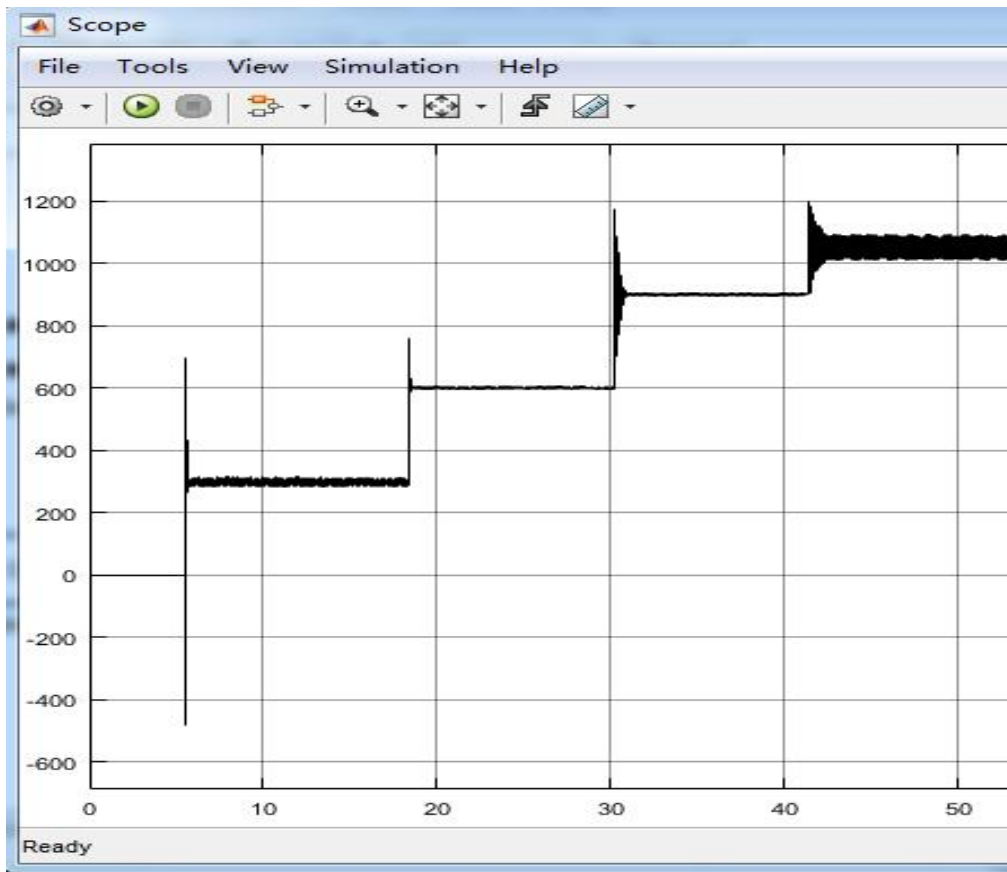


图 3-2-6 开关为“1”时 Scope 值

### 3.3 交流伺服电机负载特性实验步骤

#### 3.3.1 硬件接线及操作

1. 参照实验一连接好线路；
2. 安装好同步带，如图 3-3-1 所示。

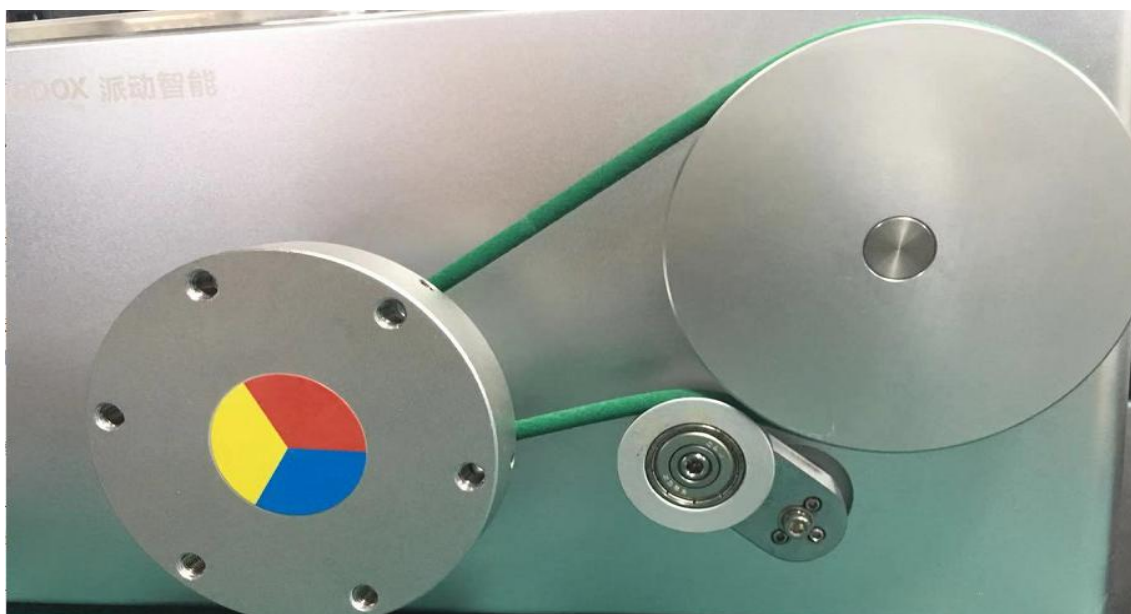


图 3-3-1 电机安装皮带示意图

#### 3.3.2 软件操作

1. 如图 3-3-2 所示，打开 CCS，在目录“C:\ProgramFiles\MATLAB\R2015b\workspace\AC\_Servo\_test\load\_test”下，导入工程 PMSM\_SD（方法见附录。**如果打开工程时已存在 PMSM\_SD，须确认此时的程序是否为本次实验所需，也可能是实验三的 PMSM\_SD**），点击“仿真下载”；点击运行，观察到电箱后面的圆盘寻相一周后，点击停止。拔出 USB1（避免用 USB2 下载程序时，覆盖 USB1 程序；系统有两个 DSP，对应 USB1 的 DSP 用于控制电机，对应 USB2 的 DSP 用于采集负载转盘上编码器数据）；



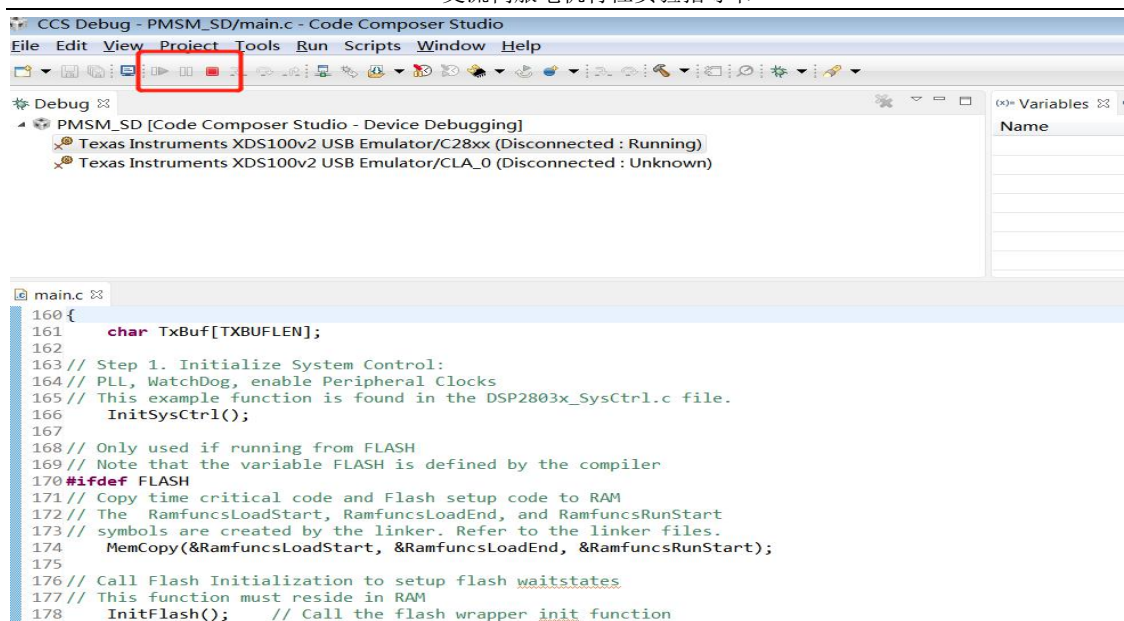


图 3-3-2 下载仿真

2. 使用 USB2 口连接电脑，打开 Matlab，在目录“C:\ProgramFiles\MATLAB\R2015b\workspace\AC\_Servo\_test\load\_test”文件夹中选择“Turntable\_position.slx”程序打开，点击图 3-3-3 红框所示按键运行（注意此时设备上 USB1 口的线是断开的）。该代码用于计算负载圆盘转速。记录此时电脑所对应的 COM 口（后续总程序设置中需要使用）如图 3-3-3 所示；

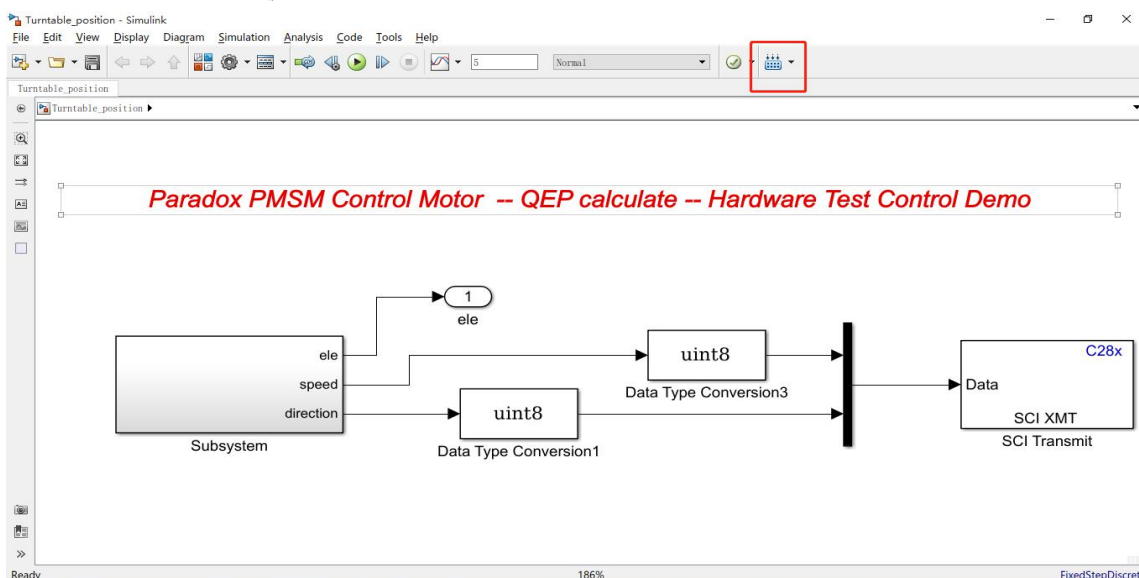



图 3-3-3 负载转盘代码

3. 插入 USB1 和 USB2，打开 Matlab，在目录“C:\ProgramFiles\MATLAB\R2015b\workspace\AC\_Servo\_test\load\_test”文件夹中选择 load\_control.slx，红框中选择 USB1 对应的 COM 口，如图 3-3-4 所示，蓝框为 USB2 对应的 COM 口，代码中的 Model 模块中，“0”表示向上运动，“1”表示向下运动，“2”表示启动实验。滑动 speedcontrol 模块，改变负载上升或者下降的速度；第一次滑动有可能自举电容充电，电机无法运行；选择模式 2，滑动该模块，负载以恒定加速度向上运动。

	<p>注意</p>	<p>1.请熟悉实验步骤后再开始实验 2.负载环到导向支架至少保留 68cm，防止碰撞</p>
---	-----------	---

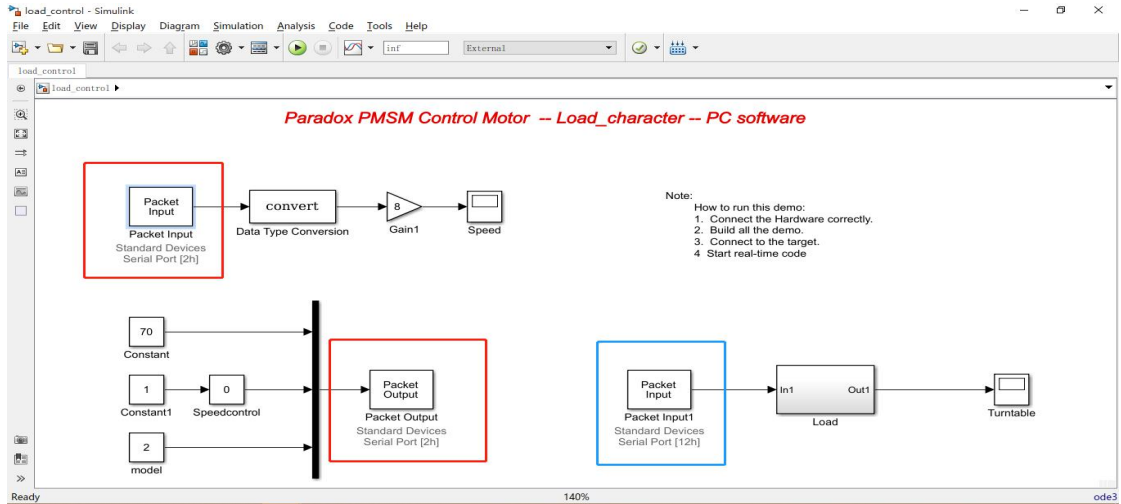


图 3-3-4 负载特性程序

### 3.3.3 开始实验

1. 首先给电机负载挂钩挂上一个“200”克的负载，如图 3-3-5 所示；

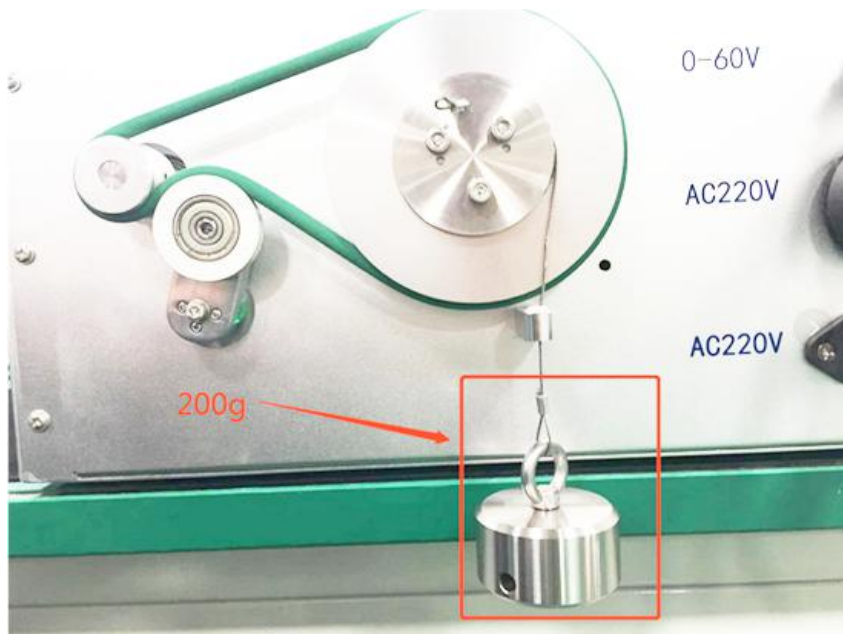


图 3-3-5 悬挂 200g 负载

2. 如图 3-3-6 所示，更改程序中 B 处“model”模块为“1”，然后点击图中 A 处，开始运行程序。打开 C 处的“Speedcontrol”模块，滑动滑块到一个固定的位置，让电机保持恒定加速度运行（注意，第一次滑动滑块时电机可能不动，因为自举电容需要充电）使滑块下降到离桌面处约 68CM 的高度，如图 3-3-7 所示；

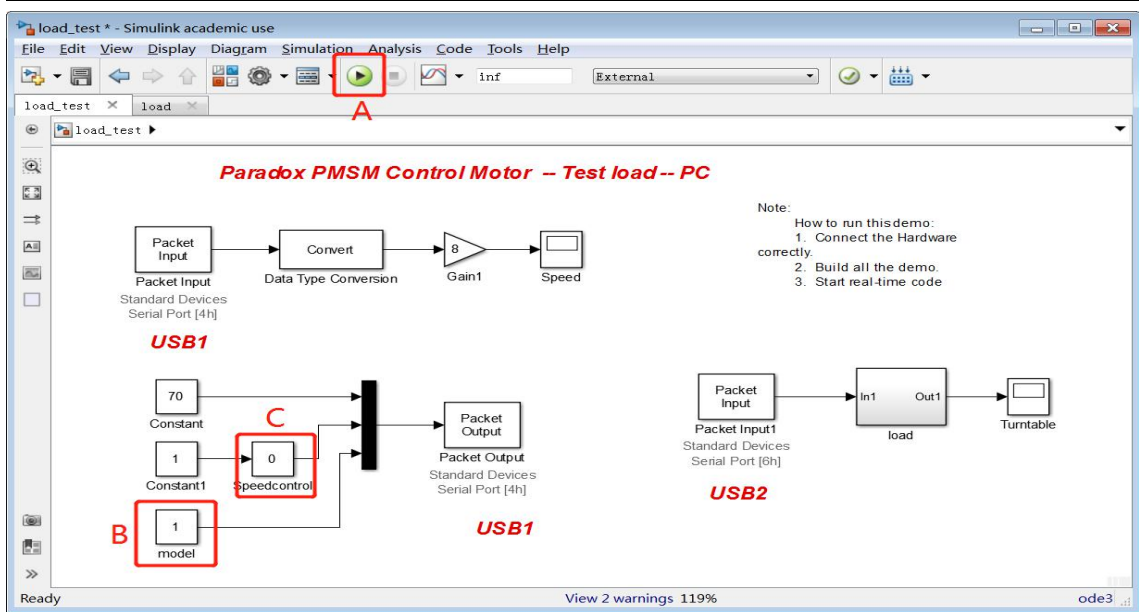


图 3-3-6 程序界面

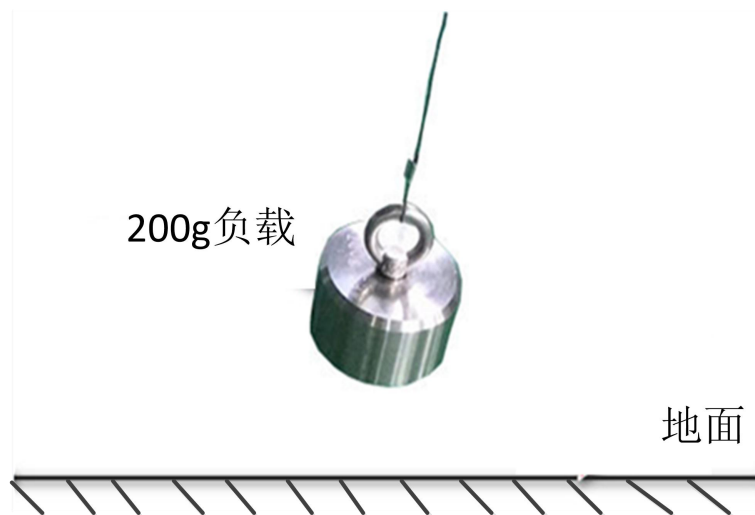


图 3-3-7 负载距桌面 68cm

3. 更改“model”为“2”，运行程序，滑动滑块“speedcontrol”到任意位置，负载向上运行 68cm 后停止运动，此时会听见电机的急停声（程序设定负载行程为 68cm）这时需要把滑块滑动到 A 处(即“0”)，然后点击 B 处停止程序运行，如图 3-3-8 所示；

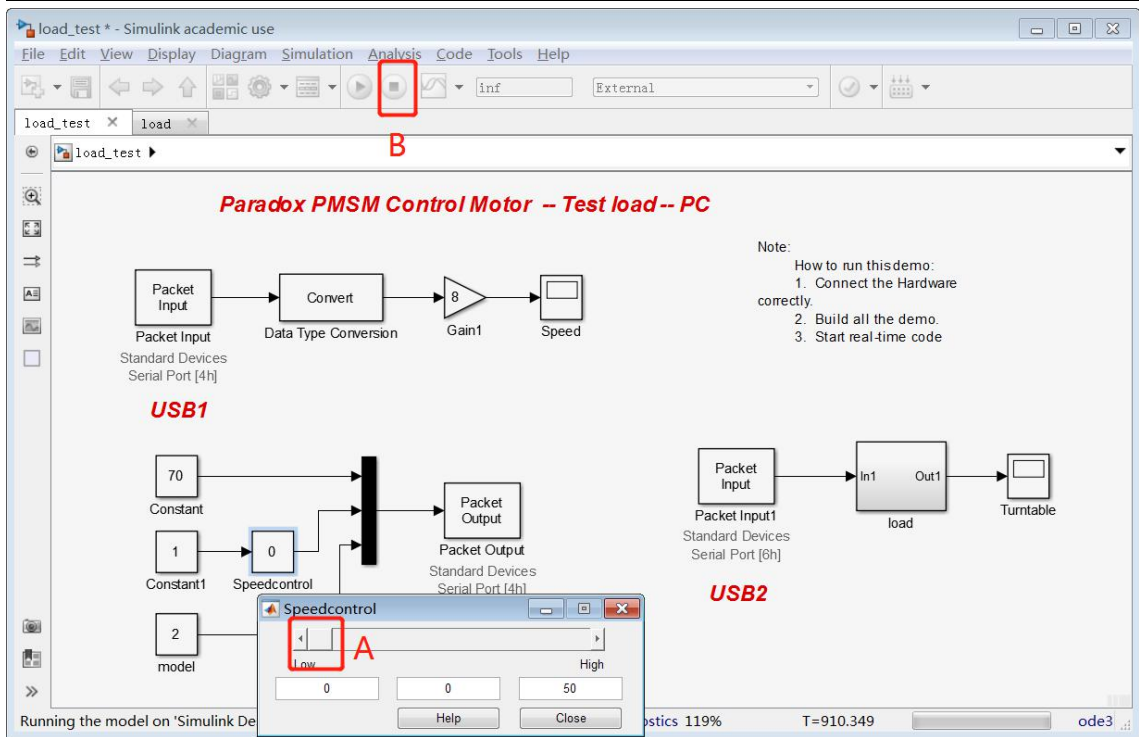


图 3-3-8 程序运行结束

4. 观察示波器，“speed”图像如图 3-3-9 所示；

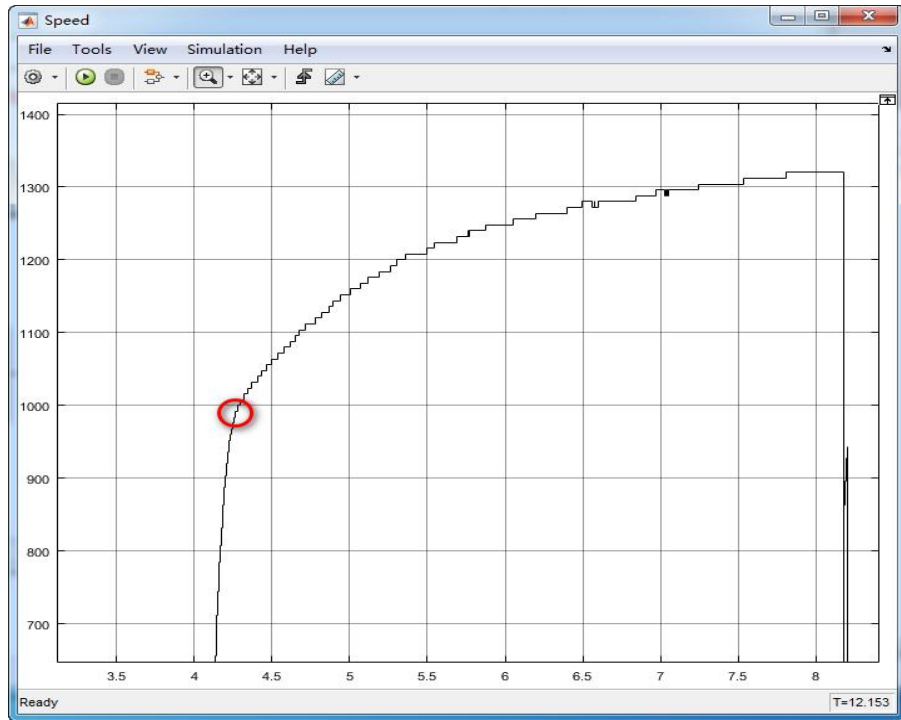


图 3-3-9 200g 负载电机编码器

5. 将负载依次换成表 3-3-1 中数据，然后再次进行实验，此时由电机编码器获得的电机转速如图 3-3-10~3-3-13 所示。（注意：每个实验台数据不一致，此处仅供参考），在表 3-3-1 记录不同负载下，电机在匀加速下能达到的最大速度（如这些图中红圈所示）。

表 3-3-1 负载速度对照表

	负载 (g)	电机最大速度 (r/min)
1	200	
2	600	
3	1000	
4	2000	
5	3000	

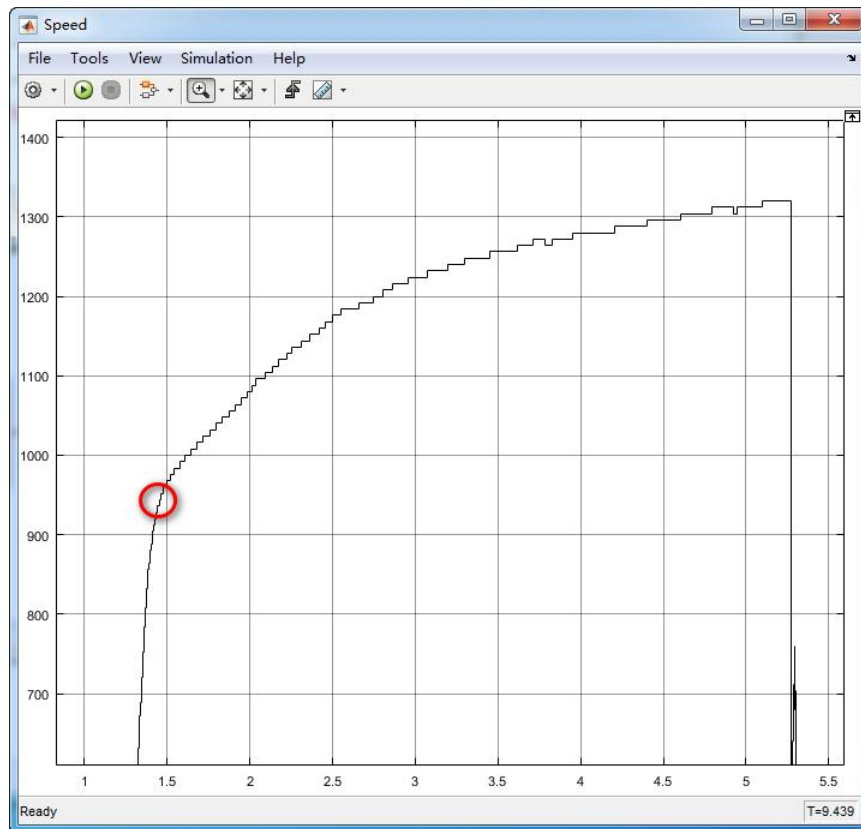


图 3-3-10 600g 负载电机编码器

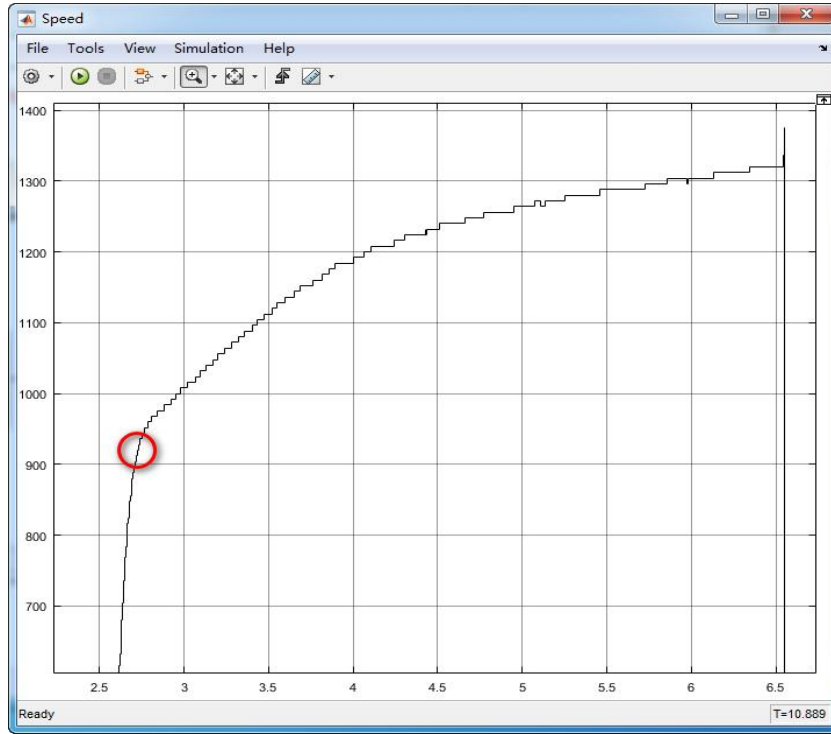


图 3-3-11 1000g 负载电机编码器

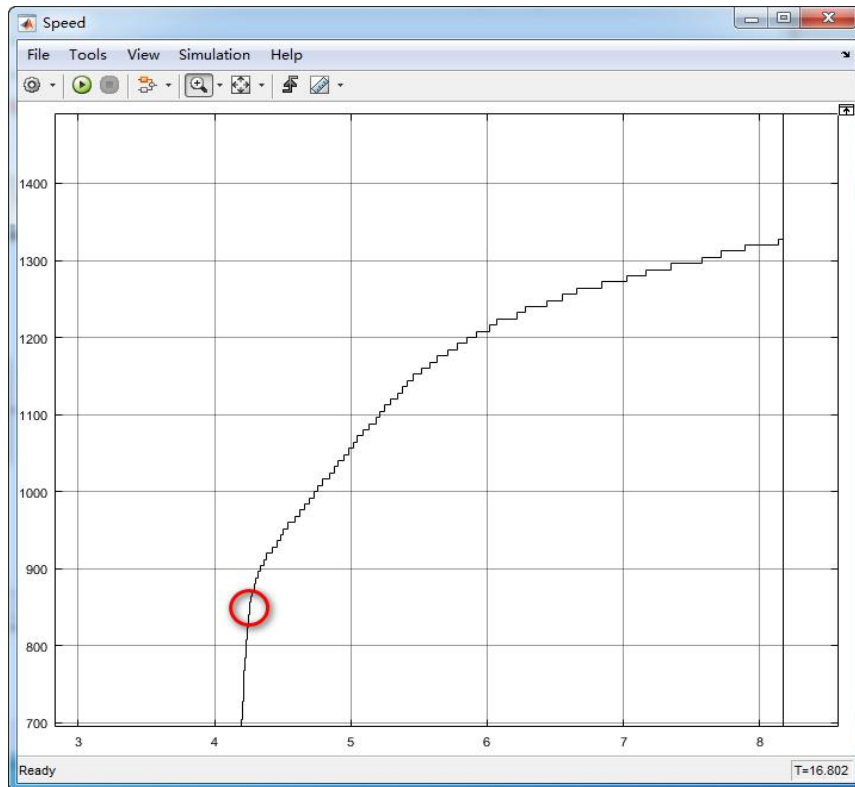


图 3-3-12 2000g 负载电机编码器

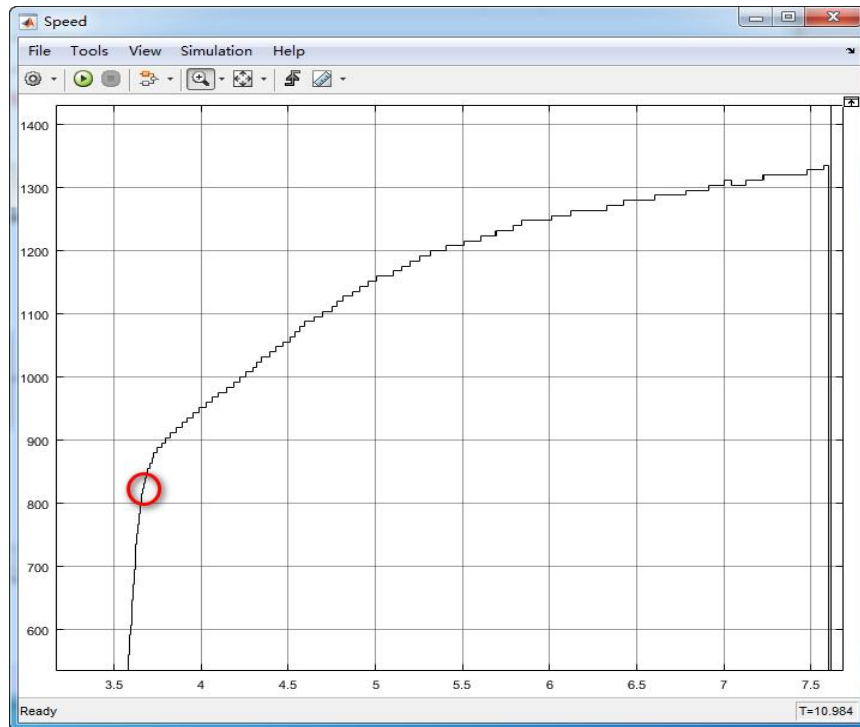


图 3-3-13 3000g 负载电机编码器

#### 4. 实验分析

(1) 由表 3-1-1 和表 3-1-2 记录的数据，绘制出横坐标为电压，纵坐标为转速的调压调速曲线。分析曲线变化的规律，解释为什么工程师们常说电压决定转速？更严密的说法应该是什么？电机在速度达到 1000r/min 附近的时候，为什么会发生明显的抖动？

(2) 分析交流伺服电机调频调速的原理是什么，思考交流伺服电机调速和直流电机调速有什么区别。

(3) 结合实验数据，以及电机基本方程式，分析当负载逐渐变大时，电机保持匀加速状态可达到的最大速度有什么变化？思考原因是什么。

## 附录 1 系统硬件介绍

### 1.1 系统构成

电机调试平台系统主要由交流伺服电机、GTHD 驱动器、DSP 驱动板、漏电保护开关及编码器构成，如图 1-1—图 1-5 所示。

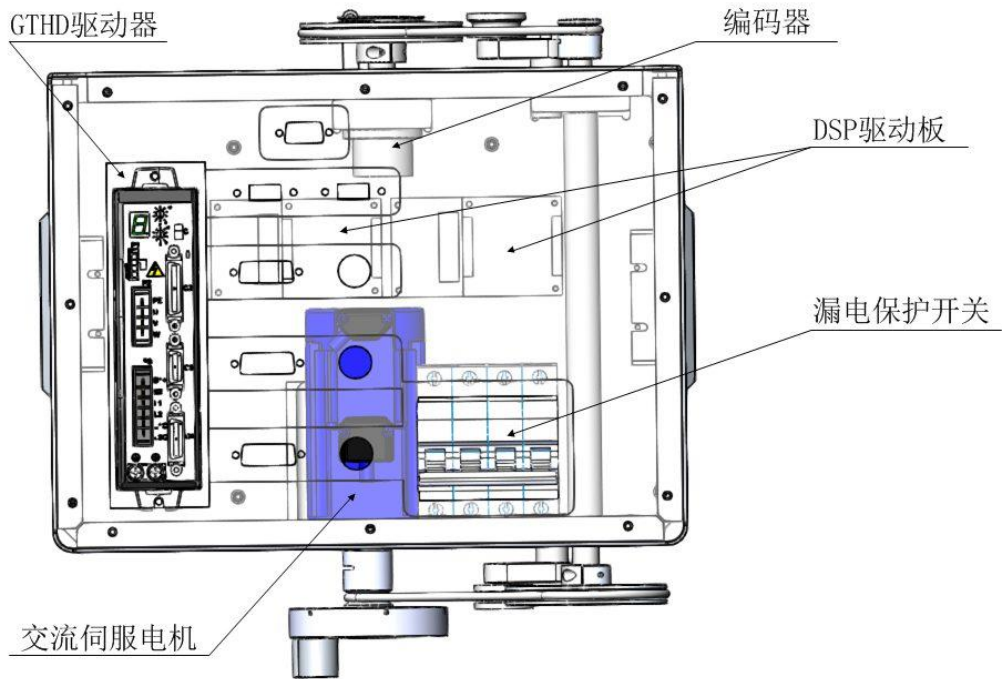


图 1-1 机械结构



图 1-2 硬件实物图



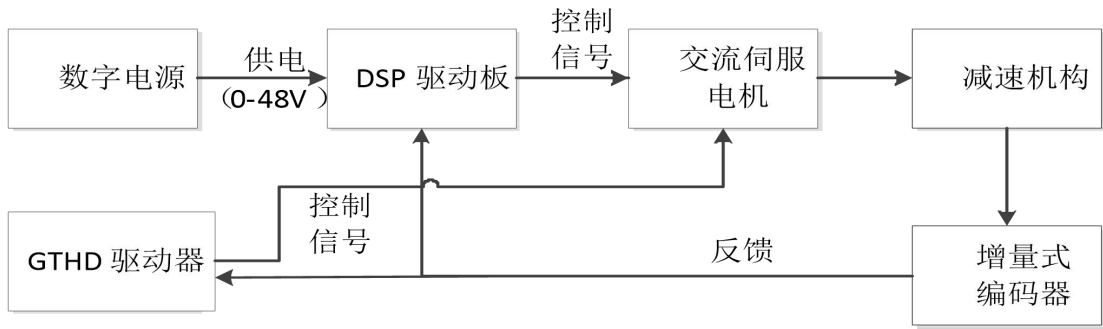


图 1-3 硬件连接原理框图

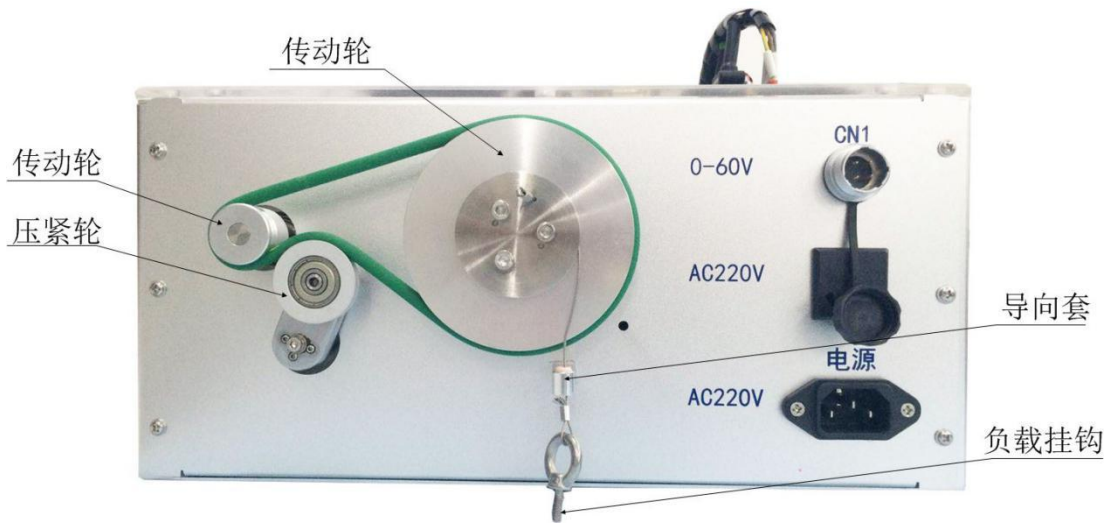


图 1-4 正视图

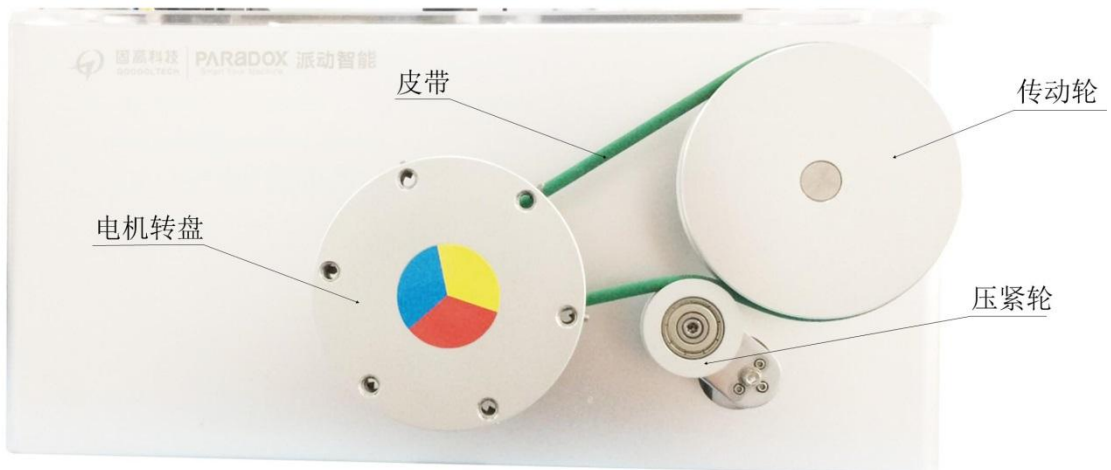


图 1-5 后视图

## 1.2 系统接线定义

交流伺服平台采用两个驱动器单独控制同一电机，需要不同的电气接线方式来满足相应的实验需求，系统电气接口如图 1-6、1-7 所示。



图 1-6 顶部电气接口示意图

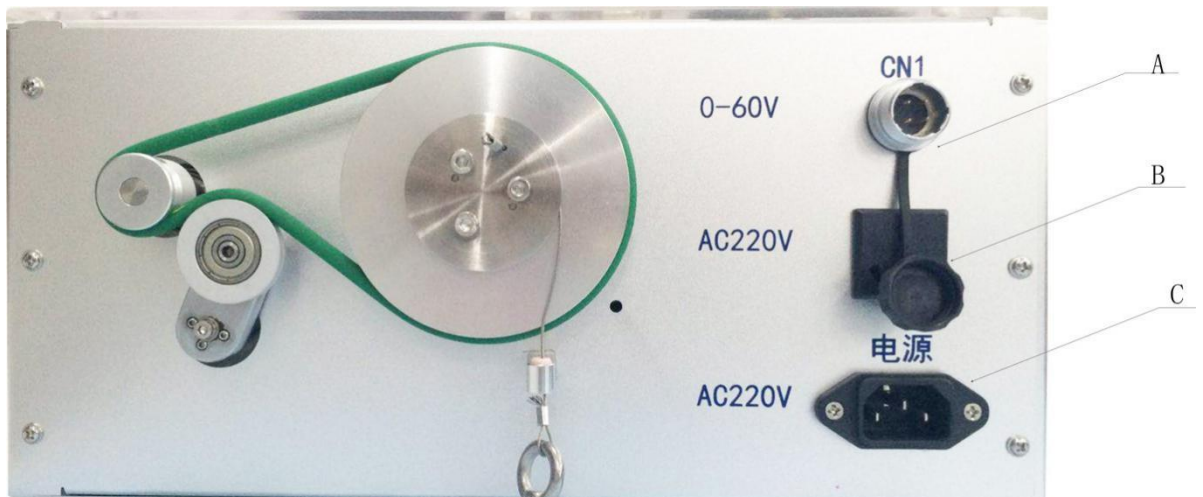


图 1-7 侧面电气接口示意图

各个电气接口定义，如表 1-1 所示。

表 1-1 电气接口定义

电气接口标识	定义
RS232	GTHD 驱动器调试及通讯接口
USB1	DSP 驱动板 1 通讯接口
USB2	DSP 驱动板 2 通讯接口
CN6	DSP 驱动板电机电源接口
CN7	DSP 驱动板电机编码器接口
CN4	GTHD 驱动器电机电源接口
CN5	GTHD 驱动器电机编码器接口
CN2	交流伺服电机电源接口
CN3	交流伺服电机编码器接口
A	实验平台总电源接口
B	数字调压电源电源接口
C	DSP 驱动板电源接口

## 1.3 交流伺服电机

### 1.3.1 电机参数

表 1-2 伺服电机参数

电机型号	TS4607N1680E200
额定功率(W)	200
额定扭矩(N·m)	0.64
瞬时最大扭矩(N·m)	1.91
额定转速(r/min)	3000
最大转速(r/min)	5000
Encoder 电机转子惯量(kg·m <sup>2</sup> )	0.19x10 <sup>-4</sup>
Resolver 电机转子惯量(kg·m <sup>2</sup> )	0.2x10 <sup>-4</sup>
每秒最大功率(kw)	21.5
机械时间常数(ms)	0.9
额定电流(A)	1.7
瞬时最大电流(A)	5
极对数 (对)	4
绝缘等级	F
使用温度	0℃-40℃

保存温度	-10℃-85℃
耐震性	5G 以下
使用湿度	85%RH 以下（不结露）
IP 等级	标准 IP42（可支持 IP65）

### 1.3.2 电机结构

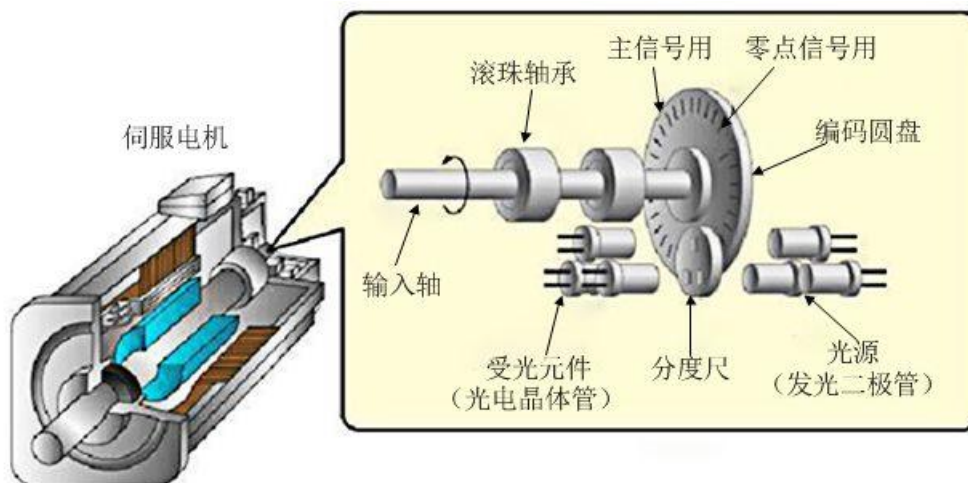


图 1-8 交流伺服电机基本结构图

如图 1-8 所示，交流伺服电机主要由定子和转子构成。定子铁心通常用硅钢片叠压而成。定子铁心表面的槽内嵌有两相绕组，其中一相绕组是励磁绕组，另一相绕组是控制绕组，两相绕组在空间位置上互差  $90^\circ$  电角度。工作时励磁绕组与交流励磁电源相连，绕组上电，电机运动。

输入轴上装有玻璃制编码器圆盘，圆盘上印刷有能够遮住光的黑色条纹。圆盘两侧有一对光源与受光元件，中间有一个分度尺元件。圆盘转动时，遇到玻璃透明的地方光就会通过，遇到黑色条纹光就会被遮住。受光元件将光的有无转变为电信号之后就成为脉冲（反馈脉冲）。“圆盘上条纹的密度=伺服电机的分辨率”亦即“每转脉冲数”，根据条纹可以掌握圆盘的转动量。

## 1.3.3 电机接线定义

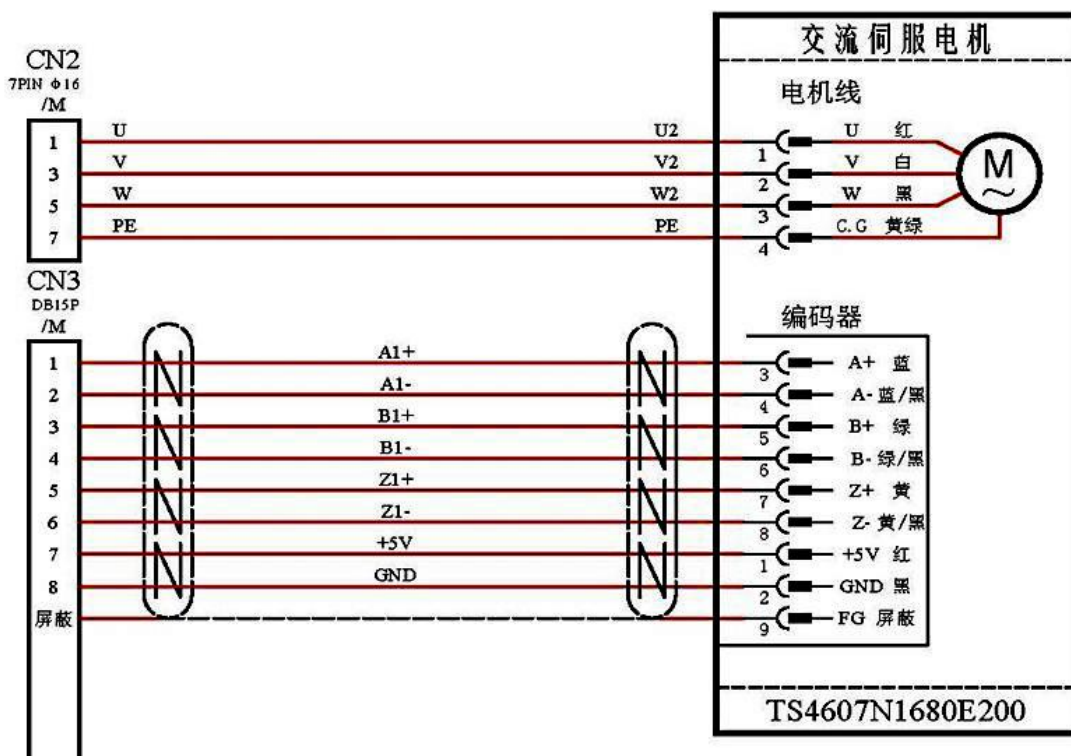


图 1-9 电机接线定义示意图

电机电源及编码器接口引脚如图 1-9 所示，电机电源接口对应 CN2，编码器接口对应 CN3。

## 1.3.4 永磁同步电机特性

同步电机构造：永磁体被严格地固定至旋转轴以生成一个恒定的转子磁通。这个转子磁通通常具有一个恒定的磁通量。当加电时，定子绕组产生一个旋转的电磁场。为了控制旋转的磁场，有必要控制定子电流。

- 根据机器的功率范围和额定速度，转子的实际结构会有所不同。永磁体适合于范围高达几千瓦的同步机器。为了获得更高的功率额定值，转子通常由支持直流电流循环的绕组组成。转子的机械结构针对所需磁极的数量和需要的磁通梯度而设计。

- 定子和转子磁通的交感产生了一个转矩。由于定子被牢固地安装在电机架上，而转子可自由旋转，转子的旋转将产生一个有用的机械输出。

- 必须仔细控制转子磁场和定子磁场间的角度以产生最大转矩，并且实现较高的机电变换效率。为了实现这一目的，在同一速度和转矩条件下，为了汲取最少量的电流，在关闭速度环路后需要进行微调。

- 旋转中的定子磁场的频率必须与转子永磁磁场的频率相同；否则，转子将会经历快速的正负转矩交替。这会减少最优转矩产出量，并且在机器部件上产生过多的机械抖动、噪声和机械应力。此外，如果转子惯性使转子不能对这些摆动做出响应，那么转子在同步频率上停止转动，并且对静止转子的平均转矩：零转矩做出响应。这意味着机器经历了一个已知的“牵出”现象。这也是为什么同步机器不能自启动的原因。

- 转子磁场与定子磁场间的角度必须等于  $90^\circ$  以获得最高的互转矩产出量。

为了产生正确的定子磁场，这个同步需要知道转子位置。

•通过将不同转子相位的输出组合在一起，可将定子磁场设定为任一方向和强度以产生相应的定子磁通。转动中的定子磁通和转子磁通间的交感产生了一个导致电机转动的转矩，如图 1-10 所示。

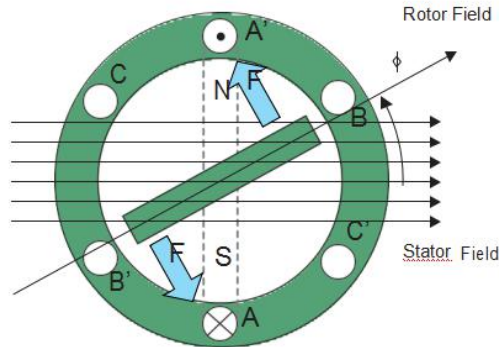


图 1-10 转矩产生示意图

## 1.4 DSP 驱动板

### 1.4.1 DSP 驱动板参数

表 1-3 DSP 驱动板参数

<b>28035 核心板</b>	
特点	32 位中央处理单元(CPU)
	60MHz 主频
	45 个复用通用输入输出(GPIO)引脚
	三个 32 位 CPU 定时器
	串行端口外设(一路 SCI/两路 SPI/一路 I2C/一路 LIN/一路 eCAN)
	14 路增强型脉宽调制器(ePWM)，可选高分辨率 PWM(HRPWM)
	一路增强型捕捉(eCAP)
	两路高分辨率输入捕获(HRCAP)
	一组增强型正交编码器脉冲(eQEP)
	16 路模数转换器 (ADC) 12 位 AD
可编程控制律加速器(CLA)，32 位浮点算术加速器独立于主 CPU 之外的代码执行	
<b>8301 驱动板</b>	
特点	工作电源电压范围为 8V-60V
	2.3A 沉电流和 1.7A 源门驱动电流能力
	具有可调节增益和抵消补偿的集成双重并联电流放大。可选放大 10 倍，20 倍，40 倍，80 倍。
	3 或 6PWM 输入的独立控制
	支持 100%的占空比的引导门驱动器
	可编程空载时间以避免外部 FET 直通
	外部 MOSFETs 的可编程过流保护
	能减少电磁干扰(EMI)的转换速率控制

备注	驱动器是由 28035 核心板和 8301 驱动板组合而成，驱动板能接一组霍尔或一组编码器编码器，可以驱动 500W 以下的无刷直流电机和永磁同步电机。驱动板供电电压 12-60，目前最大电流 5A，可以镀锡改变最大电流到 20A。
----	--

#### 1.4.2 DSP 驱动板功能特点

DSP 芯片，也称数字信号处理器，是一种特别适合于进行数字信号处理运算的微处理器，其主要应用是实时快速地完成各种数字信号处理算法。根据数字信号处理的要求，DSP 芯片一般具有如下主要特点：

- (1) 在一个指令周期内可完成一次乘法和一次加法；
- (2) 程序和数据空间分开，可以同时访问指令和数据；
- (3) 片内具有快速 RAM，通常可通过独立的数据总线在两块中同时访问；
- (4) 具有低开销或无开销循环及跳转的硬件支持；
- (5) 快速的中断处理和硬件 I/O 支持；
- (6) 具有在单周期内操作的多个硬件地址产生器；
- (7) 可以并行执行多个操作；
- (8) 支持流水线操作，使取指、译码和执行等操作可以重叠执行；
- (9) 与通用微处理器相比，DSP 芯片的其他通用功能相对较弱。

本系统采用 DSP-F28035 核心板及 8301 驱动板，如图 1-11 所示。



图 1-11 DSP-F28035 核心板及 8301 驱动板示意图

该系列微控制器为 C28x™内核和控制的加速器(CLA)供电，此内核和 CLA 与低引脚数量器件中的高集成控制外设向耦合。该系列的代码与以往基于 C28x 的代码相兼容，并且提供了很高的模拟集成度。一个内部电压稳压器允许单一电源轨运行。对 HRPWM 模块实施了改进，以提供双边缘控制（调频）。增设了具有内部 10 位基准的模拟比较器，并可直接对其进行路由以控制 PWM 输出。ADC 可在 0V 至 3.3V 固定精度范围内进行转换操作，并支持公制 VREFHI/VREFLO 比例基准。ADC 接口专门针对低开销/低延迟进行了优化。

### 1.4.3 DSP 系统接线

实验硬件系统接线如图 1-12 所示。

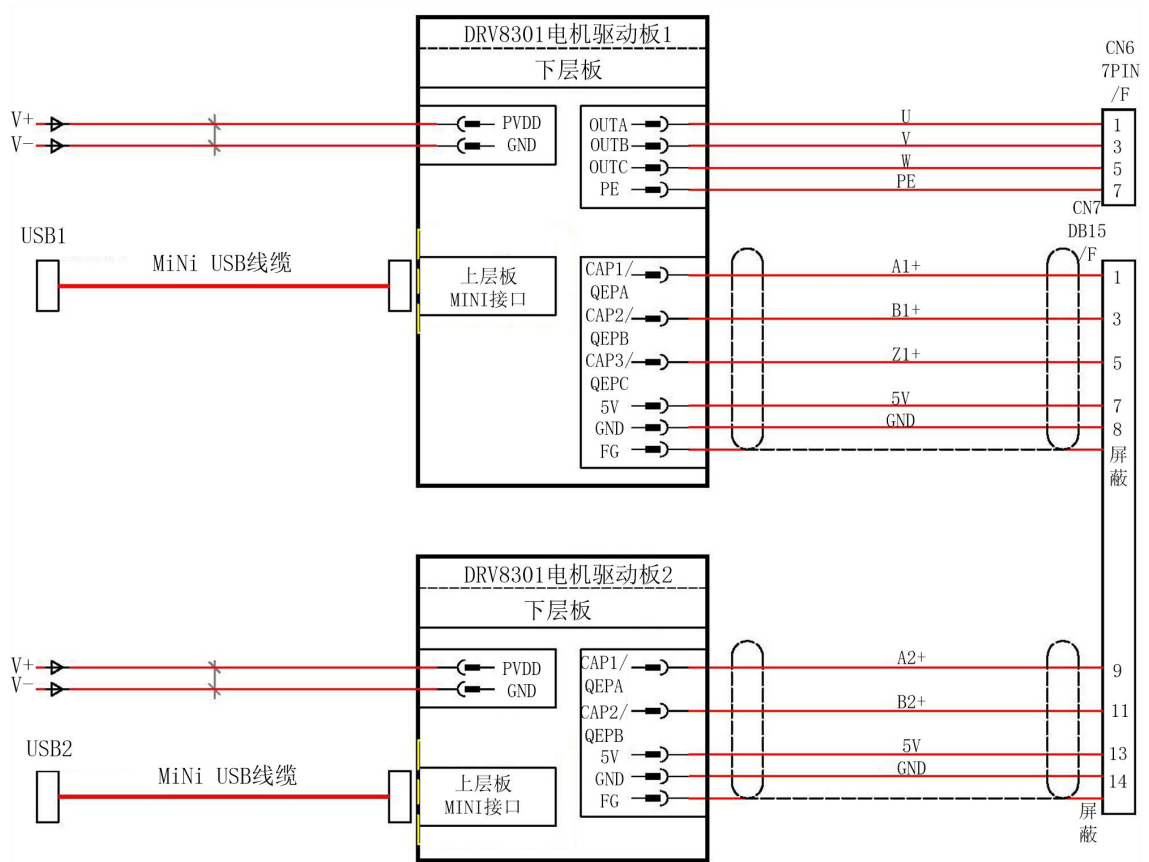


图 1-12 DSP 系统接线原理图

## 1.5 交流伺服驱动器

### 1.5.1 交流伺服驱动器参数

表 1-4 GTHD 驱动器参数

驱动器型号	GTGD-0032AAP1
额定电压(VAC 线-线) $\pm 10\%$	120~240
频率 (Hz)	50/60
线路熔断器 (A)	10
耐受电压 (V)	1500
连续电流 (A)	5
控制电路电源损耗 (W)	5
净重 (kg)	0.75
连续输出电流 (A)	3
PWM 频率 (kHz)	16



### 1.5.2 伺服驱动器

伺服驱动器是现代运动控制的重要组成部分，被广泛应用于工业机器人及数控加工中心等自动化设备中。尤其是应用于控制交流永磁同步电机的伺服驱动器，已经成为国内外研究热点。当前交流伺服驱动器设计中普遍采用基于矢量控制的电流、速度、位置 3 闭环控制算法。该算法中速度闭环设计合理与否，对于整个伺服控制系统，特别是速度控制性能的发挥起到关键作用。

在伺服驱动器速度闭环中，电机转子实时速度测量精度对于改善速度环的转速控制动静态特性至关重要。为寻求测量精度与系统成本的平衡，一般采用增量式光电编码器作为测速传感器，与其对应的常用测速方法为 M/T 测速法。M/T 测速法虽然具有一定的测量精度和较宽的测量范围，但这种方法有其固有的缺陷，主要包括：

1. 测速周期内必须检测到至少一个完整的码盘脉冲，限制了最低可测转速；
2. 用于测速的 2 个控制系统定时器开关难以严格保持同步，在速度变化较大的测量场合中无法保证测速精度。因此应用该测速法的传统速度环设计方案难以提高伺服驱动器速度跟随与控制性能。

### 1.5.3 GTHD 驱动器系统布线及系统驱动器引脚定义

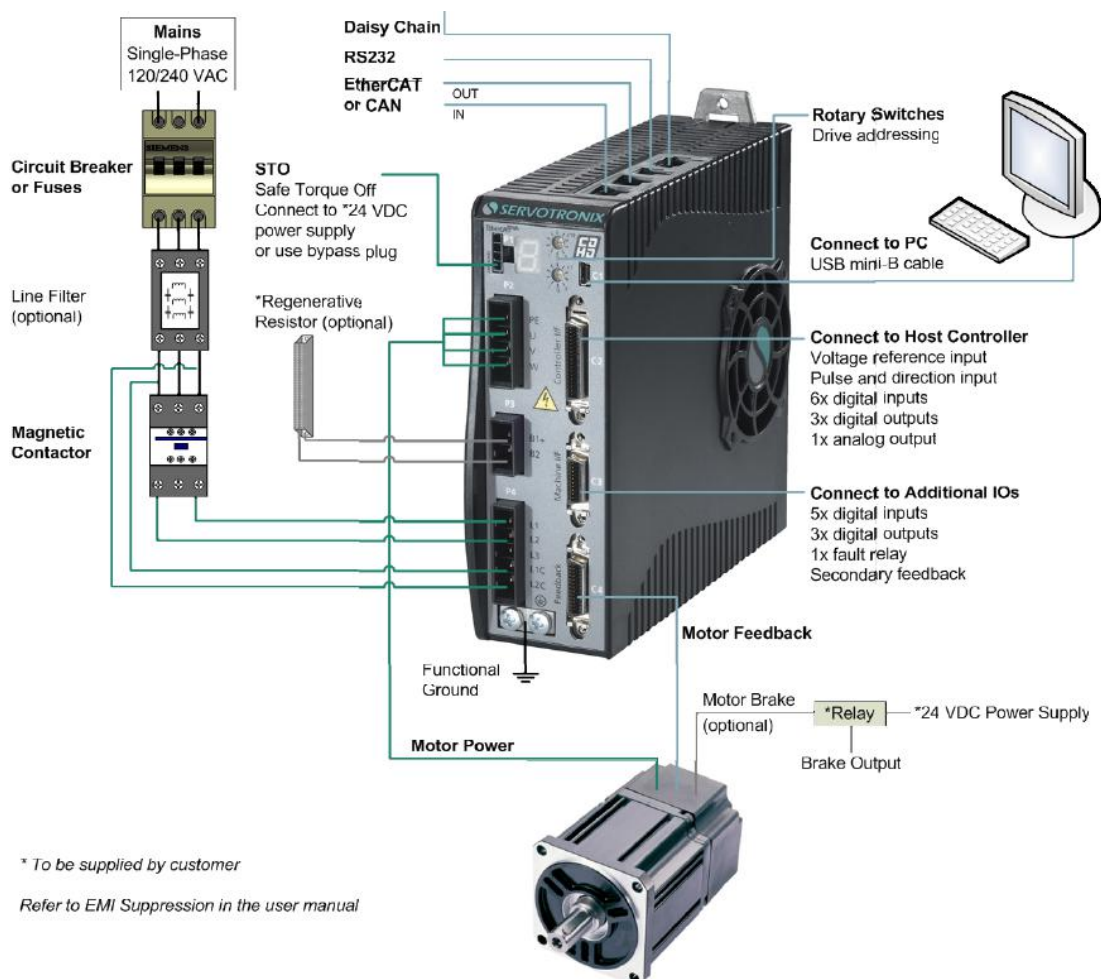


图 1-13 GTHD 驱动器系统布线

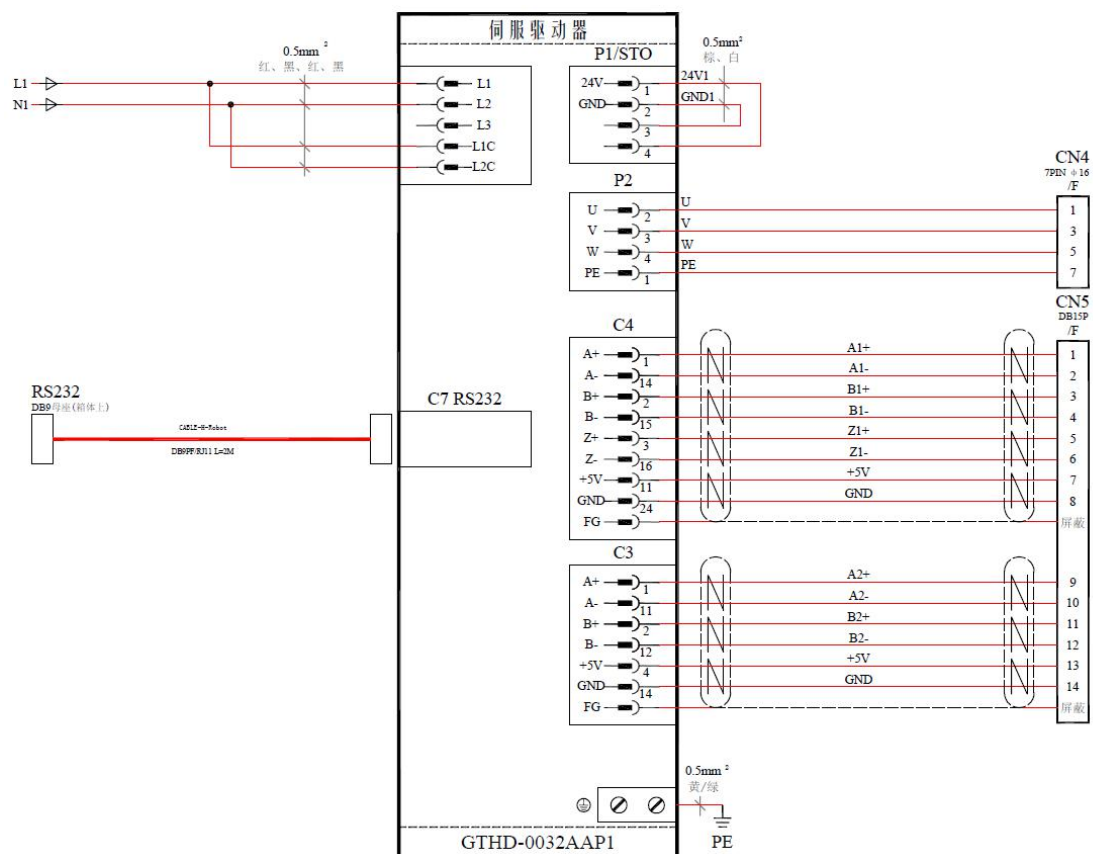


图 1-14 GTHD 驱动器电气原理图

## 1.6 传动机构

实验平台采用同步轮减速传动，减速比 1:16，同步带的最大传动力矩为 8kgf·m。电机的额定扭矩是 0.64 N·m，则输出端的最大输出力矩为 10.24 N·m。

## 1.7 负载砝码与惯量块

### 1. 负载

200g 负载砝码如图 1-15 所示，负载质量范围 0-1.2kg，每 200g 一个等级，精度±5g。



图 1-15 200g 负载砝码示意图

1kg 负载砝码如图 1-15 所示，负载质量范围 0-4kg，每 1kg 一个等级，精度  $\pm 5g$ 。



图 1-16 1kg 负载砝码示意图

## 2. 惯量块

惯量块如图 1-17 所示。惯量中心距电机旋转中心 35mm，如图 1-18 所示。



图 1-17 惯量块示意图

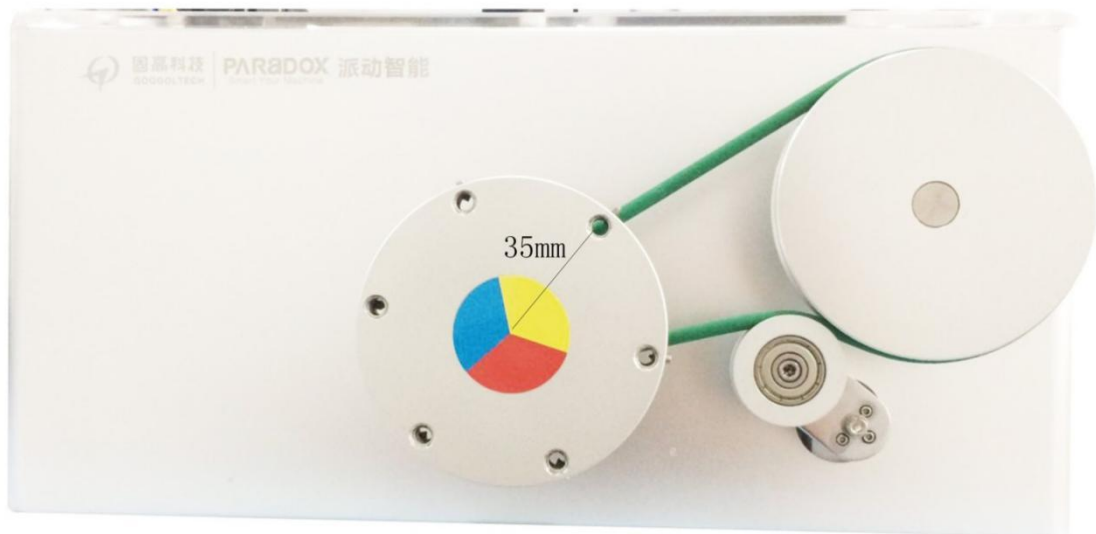


图 1-18 惯量中心与电机旋转中心间距示意图

## 1.8 数字调压电源

	危险	严禁把数字电源的正负极接反。要红接正，黑接负
--	----	------------------------

1. 数字调压电源功能板说明如图 1-19 所示。

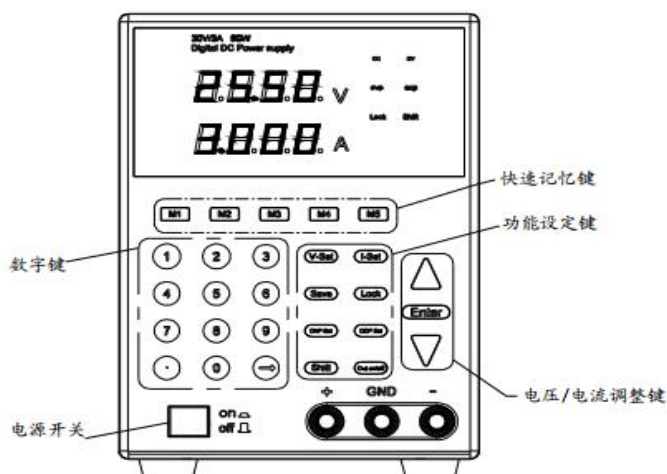


图 1-19 数字调压电源功能板说明

## 2. 功能键说明

M1~M5: 5 档存储电压/限流参数存储/调出键

数字键: “0~9”, “.”键为电流/电压、限流/限压、过流/过压数字化输入键, 箭头为输入删除键

功能键:

V-Set            键电压设定键  
 I-Set            限流电流设定键  
 Save            快捷存储键  
 Lock            键盘锁定/解锁键  
 OVP Set        过电压保护设定键  
 Ocp Set        过电流保护设定键  
 Shift            输出保护/不保护切换键  
 Out no/off     输出保护键  
 Enter            设定确认键

状态显示 LED 功能:

CV              定电压输出  
 CC              定电流输出  
 OVP            过电压保护设定  
 OCP            过电流保护设定  
 LOCK          键盘锁定  
 Shift            存储电压连续/关断输出转换键

## 3. 参数

表 1-5 数字调压电源参数

型号	DX6005DS	
输入电压 (V)	110V AC $\pm$ 10% 50Hz $\pm$ 2% 或 220V AC $\pm$ 10% 50Hz $\pm$ 2%	
输入功率 (W)	450	
输出额定值	电压	0~60V DC

## 交流伺服电机特性实验指导书

	电流	0~5A
电源效应 $\pm\%$ of Output+offset	电压	$CV \leq 0.01\% + 3\text{mV}$
	电流	$CC \leq 0.05\% + 5\text{mA}$
电源效应 $\pm\%$ of Output+offset	电压	$CV \leq 0.01\% + 3\text{mV}$
	电流	$CC \leq 0.05\% + 5\text{mA}$
设定精度@25°C $\pm\%$ of Output+offset	电压	$\leq 0.1\% + 10\text{mV}$
	电流	$\leq 0.1\% + 10\text{mA}$

## 附录 2 系统软件介绍

### 2.1 总体软件构成

设计思想：总体软件部分由上位机 Matlab 和下位机 CCS 构成。其中，下位机主要负责底层驱动电机运动及处理编码器反馈数据然后把数据发送给上位机，上位机主要是显示下位机反馈的数据，以及向下位机发送控制信号。程序组成部分框图如下。

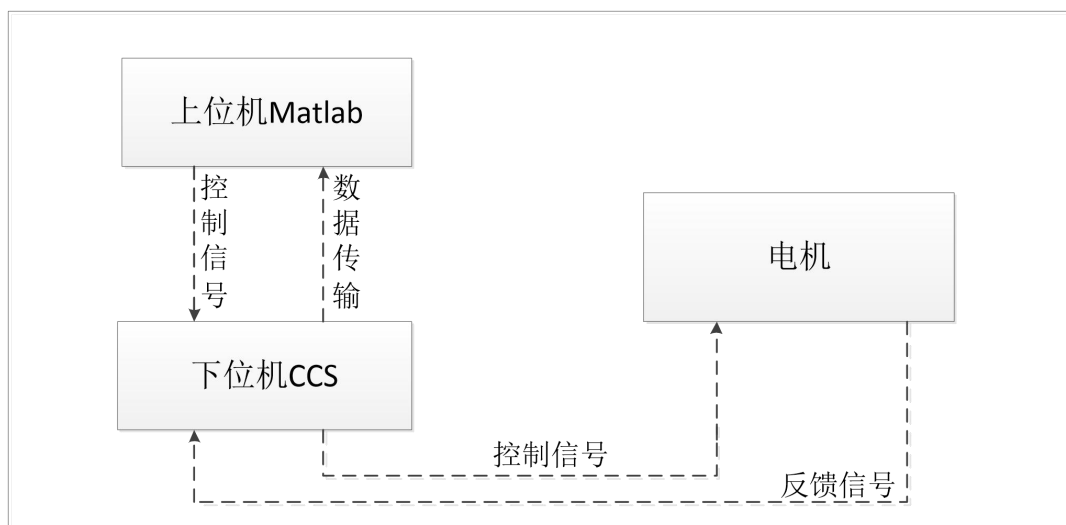


图 2-1 总体软件结构

### 2.2 Matlab 连接 CCS 配置

如图 2-1 所示的软件结构，需要分别使用 Matlab 和 CCS，并且使之连接起来，目的是在使用 Matlab 运行程序时 CCS 能实时反馈编码器的状态，通过上位机进行数据处理之后，发出相应的控制信号给下位机，下位机能更好地去驱动电机的运动。Matlab 连接 CCS 具体步骤如下：

1. 在 Matlab 中输入 `xmakefilessetup`，首先将 `Display operational configuration only` 的勾选去掉，然后在 `Configuration` 的下拉中选择 `ticcs_c2000_ccsv5`;

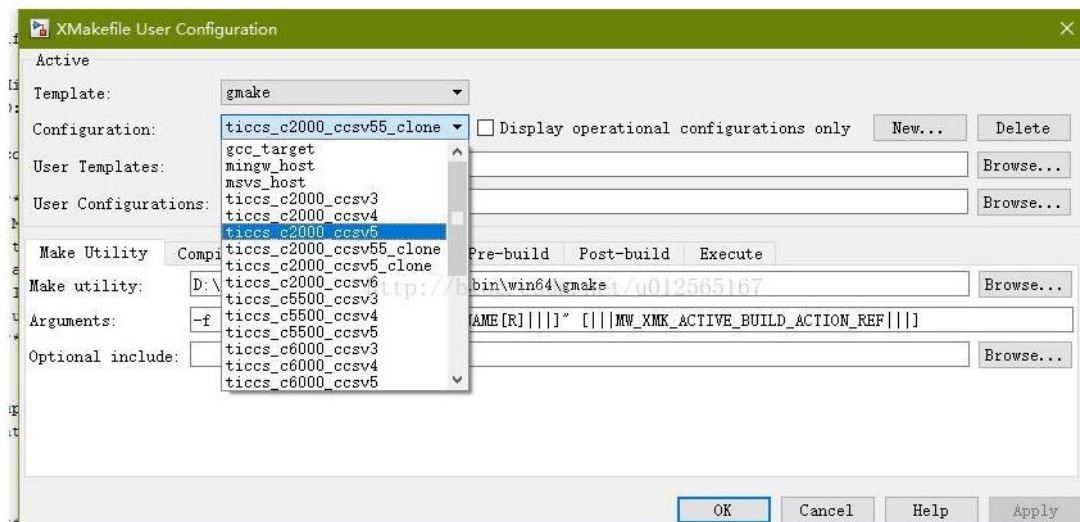


图 2-2 配置 `ticcs_c2000_ccsv5`

2. 点击 `Apply` 后选择安装文件夹及编译器文件夹，完成选择会多出一个 `Tool Directories` 选项，检查安装位置是否正确。点击 `new`，新建配置文件 `ticcs_c2000_ccsv6`，此时 `Tool Directories` 选项消失，`Execute` 选项可更改;

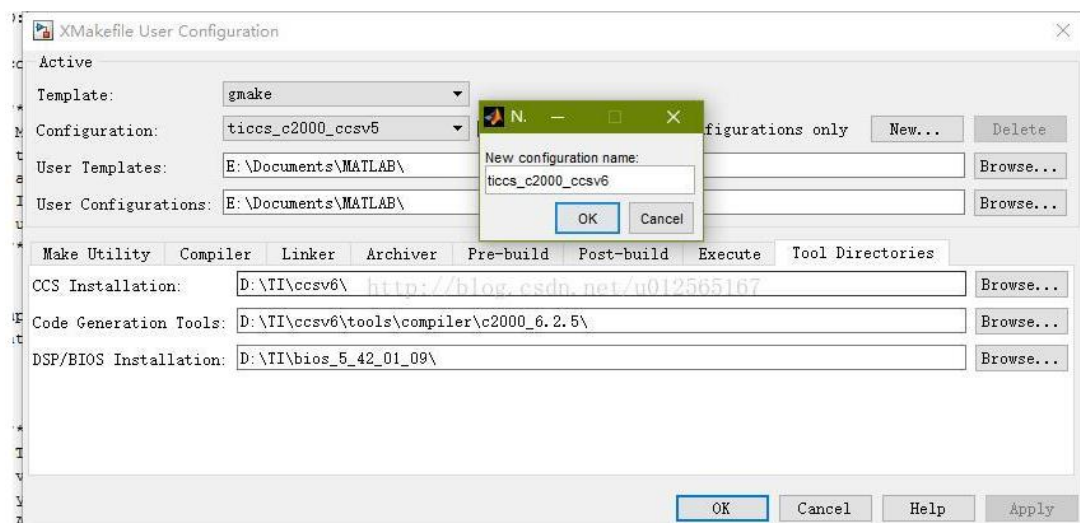


图 2-3 配置 `ticcs_c2000_ccsv6`

3. 在 `Execute Tool` 中选择: `C:\ti\ccsv6\ccs_base\scripting\bin\dss.bat` 在 `Arguments` 中添加: `"C:\ProgramFiles\MATLAB\R2017a\toolbox\idmlink\extensions\ticcs\ccs demos\runProgram.js""C:\Users\Administrator\ti\CCSTargetConfigurations\NewT.ccx ml" "[||MW_XMK_GENERATED_TARGET_REF[E]||]"`;

注意 `runProgram.js` 和 `NewT.ccxml` 的路径，配置完成后，配置文件在 Matlab 文档里，可以打开修改;

4. 在“计算机->属性->高级系统设置->高级->环境变量”中添加系统变量 `XDCROOT`，如图 2-4 所示:

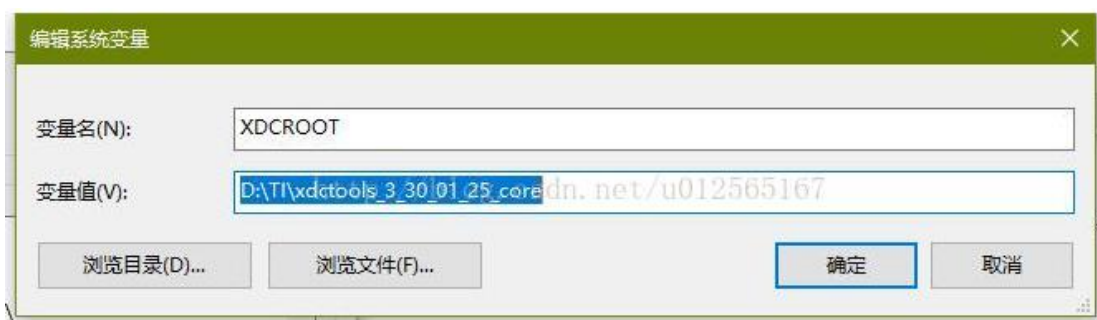


图 2-4 系统环境变量设置图

5. 在 Matlab 中键入 `checkEnvSetup('ccsv5', 'f28035', 'setup')`，依次修改软件目录、编译器目录、BIOS 目录和 FLASH 目录，如图 2-5 所示：

```
>> checkEnvSetup('ccsv5','f28035','setup')
```

1. Checking CCSv5 (Code Composer Studio) version  
 Required version: 5.0 or later  
 Required for : Code Generation  
 Your Version : 6.1.0  
 ### Setting environment variable "TI\_DIR" to "C:\ti\ccsv6"
2. Checking CGT (Texas Instruments C2000 Code Generation Tools) version  
 Required version: 5.2.1 to 6.0.2  
 Required for : Code generation  
 Your Version : 5.3.0  
 ### Setting environment variable "C2000\_CGT\_INSTALLDIR" to "C:\ti\5.3"
3. Checking DSP/BIOS (Real Time Operating System) version  
 Required version: 5.33.05 to 5.41.11.38  
 Required for : Code generation  
 Your Version : 5.41.11.38  
 ### Setting environment variable "CCSV5\_DSPBIOS\_INSTALLDIR" to "C:\ti\bios\_5\_41\_11\_38"
4. Checking XDC Tools (eXpress DSP Components) version  
 Required version: 3.16.02.32 or later  
 Required for : Code generation  
 Your Version : 3.32.01.22.
5. Checking 2803x C/C++ Header Files version  
 Required version: 1.27  
 Required for : Code generation  
 Your Version : 1.27  
 ### Setting environment variable "DSP2803x\_INSTALLDIR" to "C:\ti\controlSUITE\device\_support\f2803x\v127"
6. Checking Flash Tools (TMS320F2803x Piccolo(TM) Flash API) version  
 Required version: 1.00  
 Required for : Flash Programming  
 Your Version : 1.00  
 ### Setting environment variable "FLASH\_2803X\_API\_INSTALLDIR" to "C:\ti\controlSUITE\libs\utilities\flash\_api\2803x\v100"

图 2-5 配置 checkEnvSetup

6. 打开 Simulink，设置 CCS 版本以及芯片配置点击 parameters；选择 Solver 设置如图 2-6 所示；



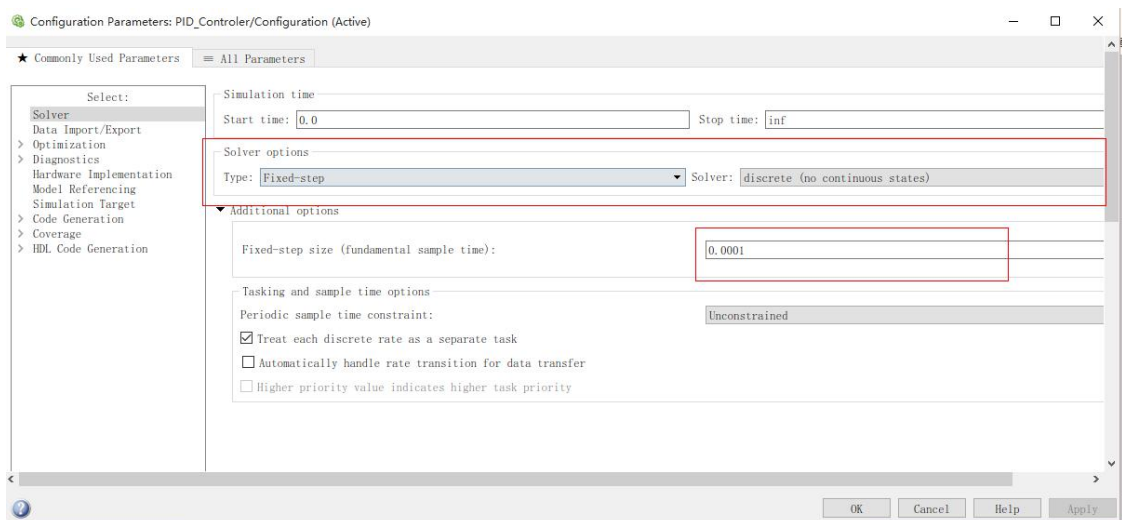


图 2-6 parameters

7. 选择 Hardware Implementation, 设置如图 2-6 所示;

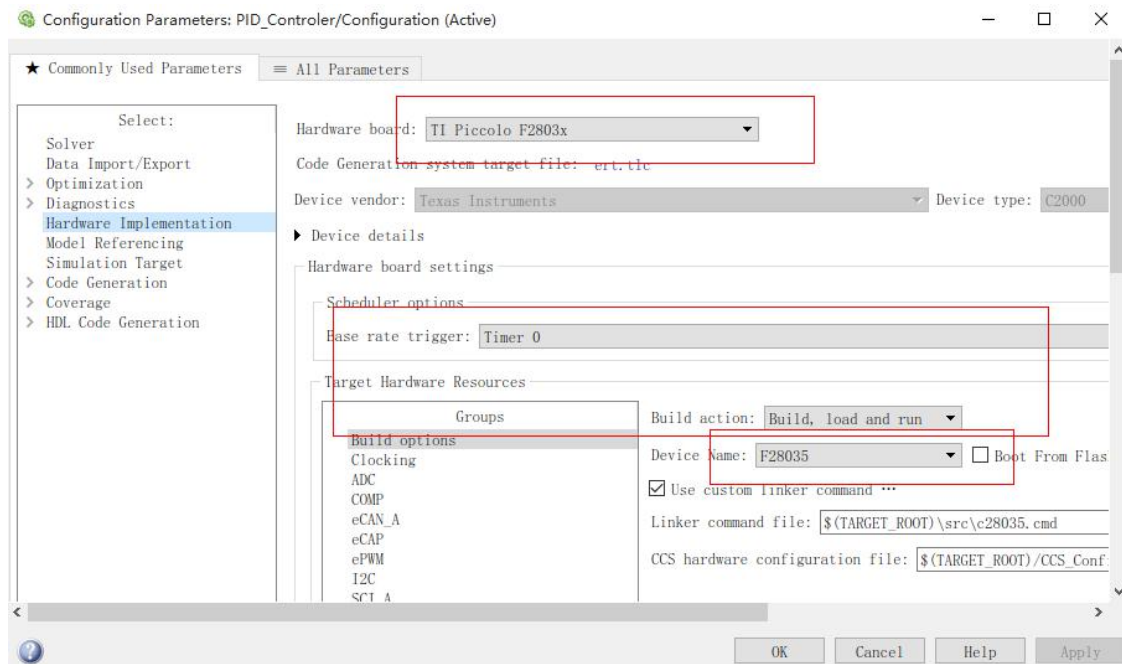


图 2-6 配置 Hardware Implementation

8. 选择 Hardware Implementation 中的 SPI\_B, 设置如图 2-7 所示;

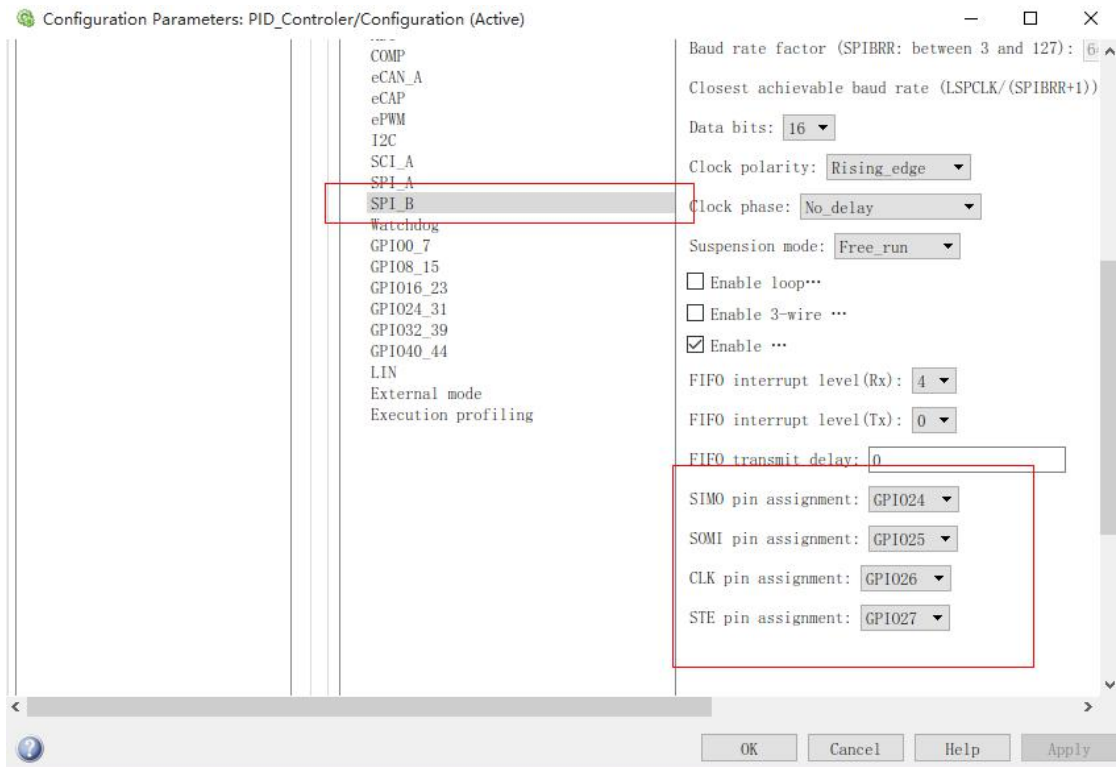


图 2-7 配置 SPI\_B

### 9. 选择 Code Generation, 设置如图 2-8 所示;

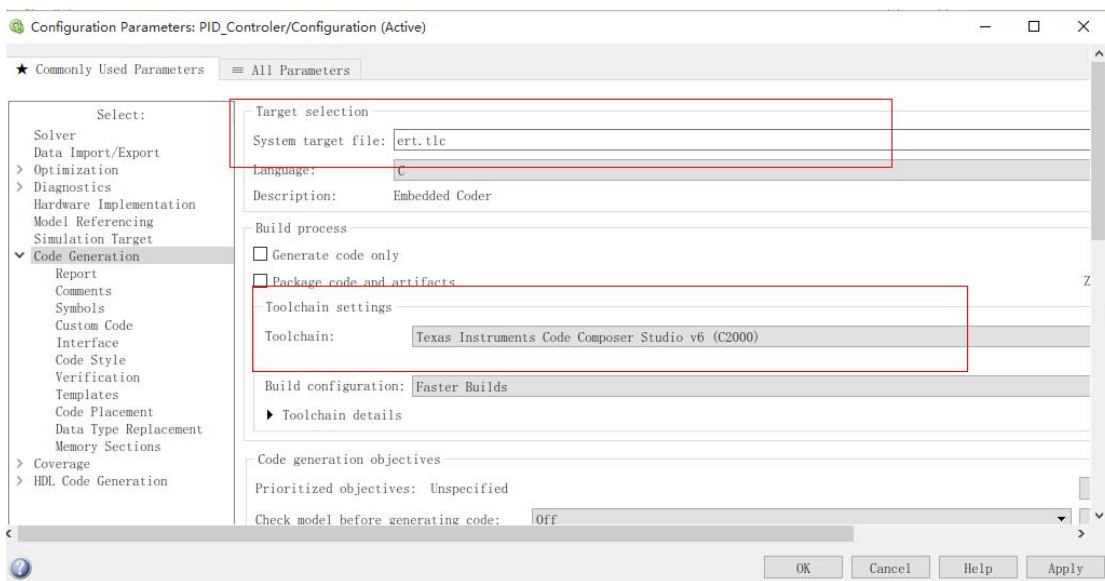


图 2-8 配置 Code Generation

10. 完成链接配置, 可生成代码自动下载运行到 DSP 板上。程序下载到 FLASH, 打开 Simulink 设置, 选择 Hardware, 选择 2803x(boot from flash), 如图 2-9 所示;

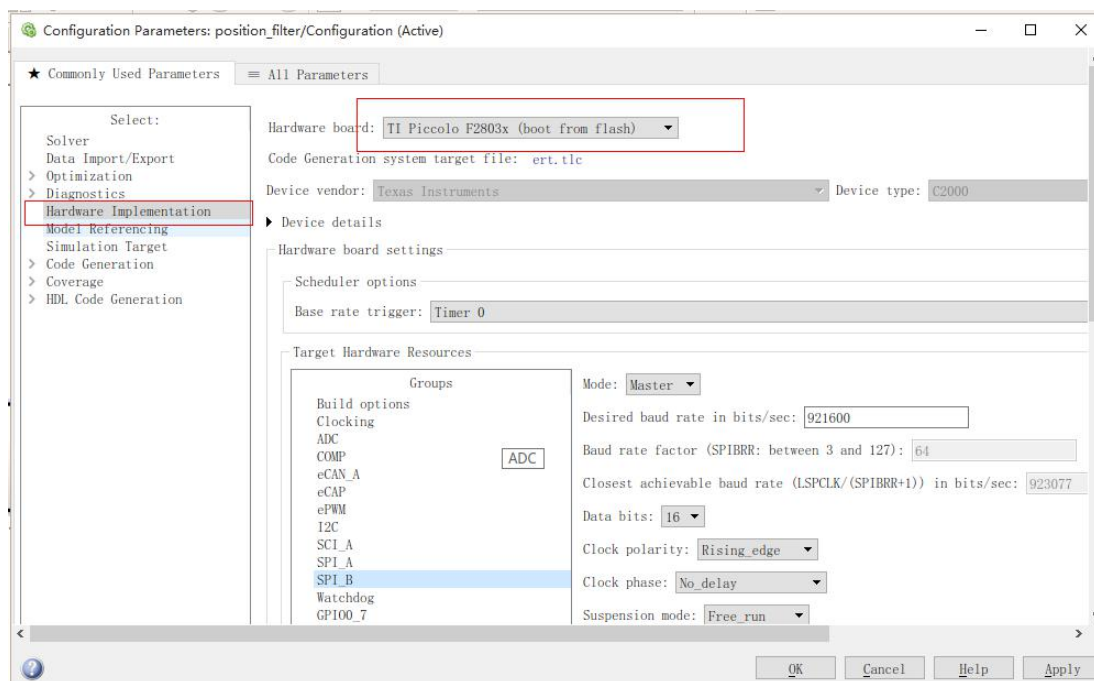


图 2-9 设置 boot from flash

11. 修改 SPIB 引脚，选择 GPIO24, GPIO25, GPIO26, GPIO27, 点击 OK, 把代码烧写到 FLASH 内，如图 2-10 所示；

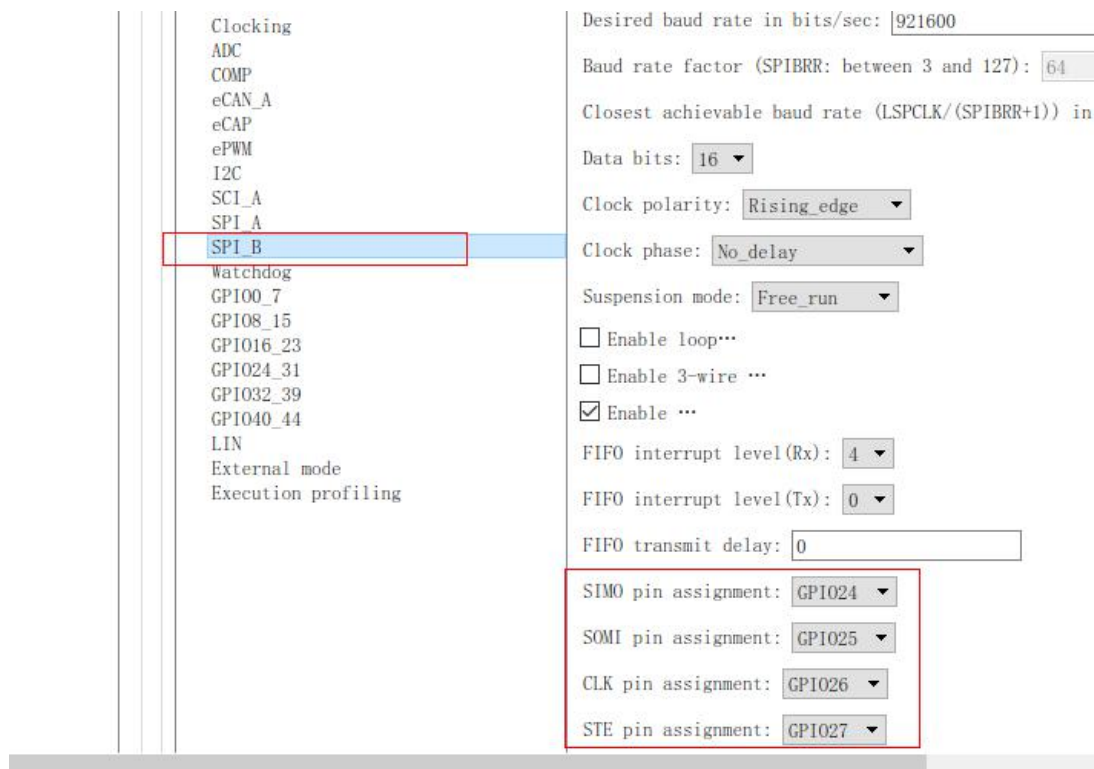


图 2-10 配置 SPIB 引脚

## 附录 A CCS 如何导入工程

1. 打开 CCS，选择 Project，点击 Import CCS Projects，如下图 A-1 所示；

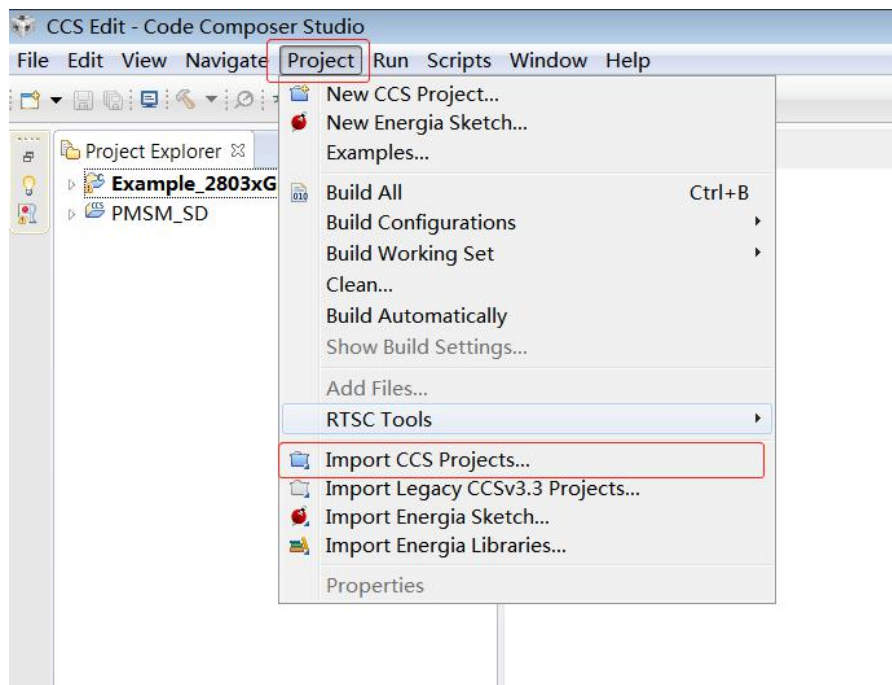


图 A-1 导入工程

2. 点击 Browse，选择 load\_test 文件夹中的 PMSM\_SD，然后点击确定，然后点击 finish，完成导入工程，如图 A-2 所示；

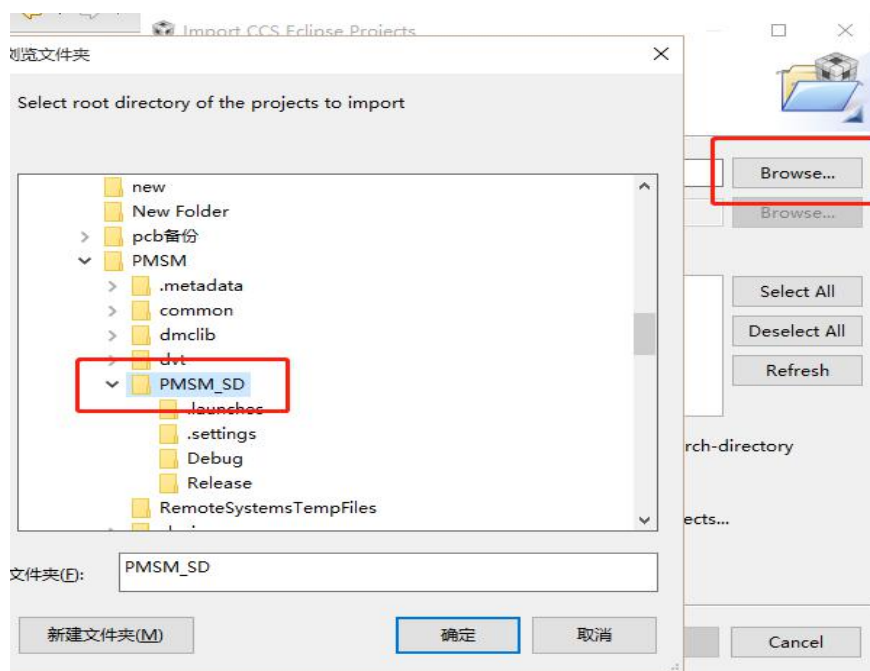


图 A-2 工程导入

3. 右键单击导入的工程文件，选择 Properties，选项，如图 A-3 所示；

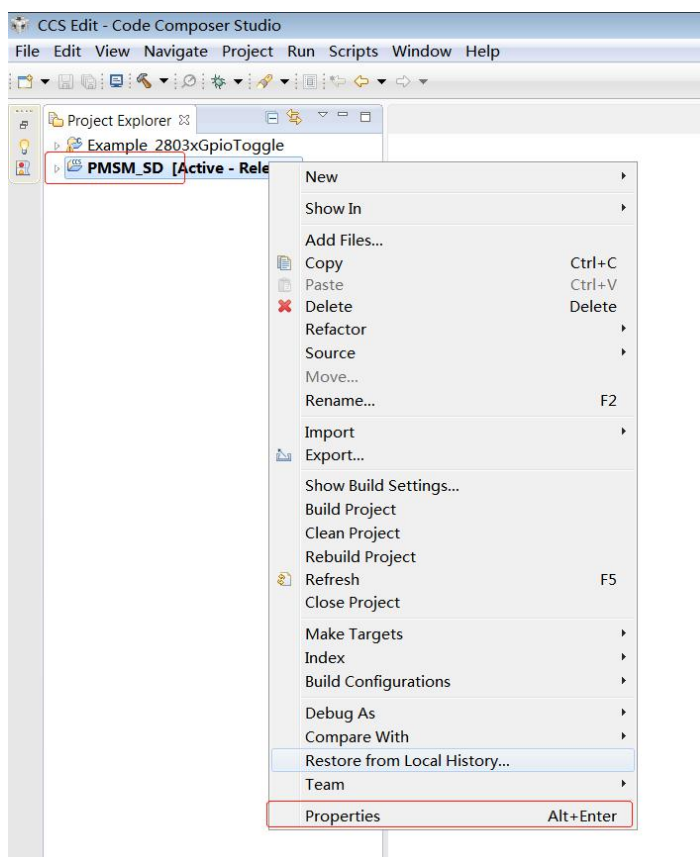


图 A-3 工程设置

4. 选择 Include options 选项，删除蓝色框中的前四个路径，点击添加 load\_test 文件夹下面的，前四个路径的文件。点击 OK。如图 A-4 所示；

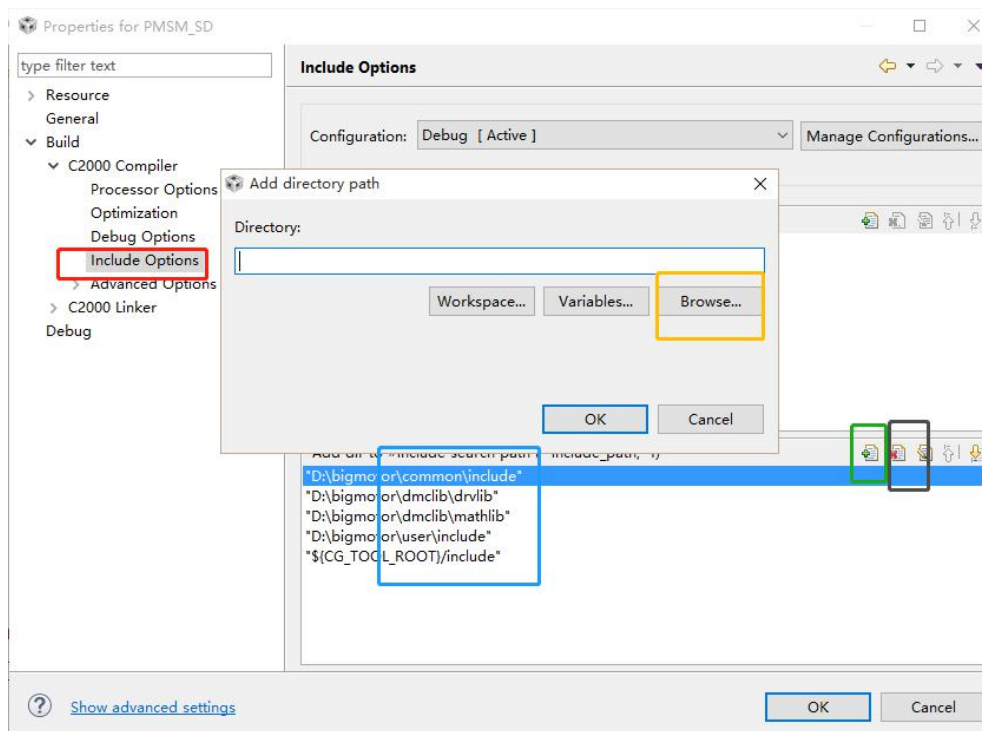


图 A-4 工程设置

5. 点击 CCS 界面下红框向下箭头，选择 Release 模式，等待编译完成，点击蓝框仿真按钮，进入仿真，如图 A-5 所示；

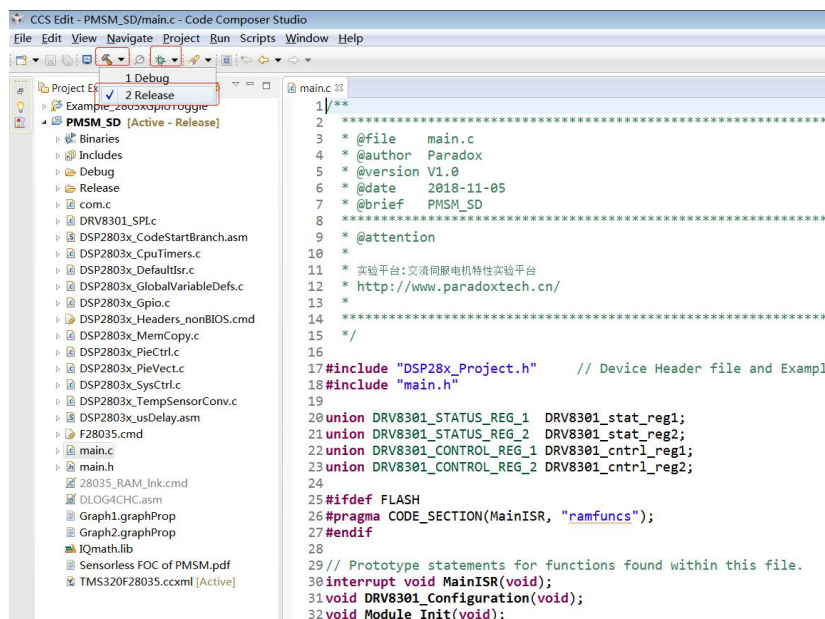


图 A-5 编译仿真

6. 仿真界面如下图所示，下图红线分别为运行，停止，退出。

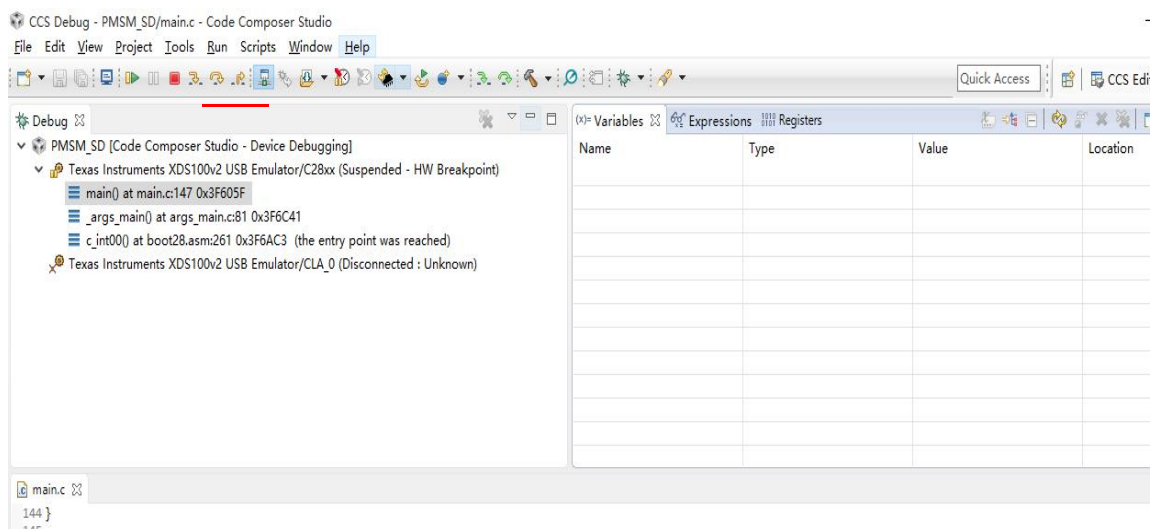


图 A-6 仿真界面

## 附录 B 上位机实时内核设置

1. 打开 Matlab，在 load\_test 文件夹中打开 load\_control 文件，在设置中选择如图 B-1 所示；

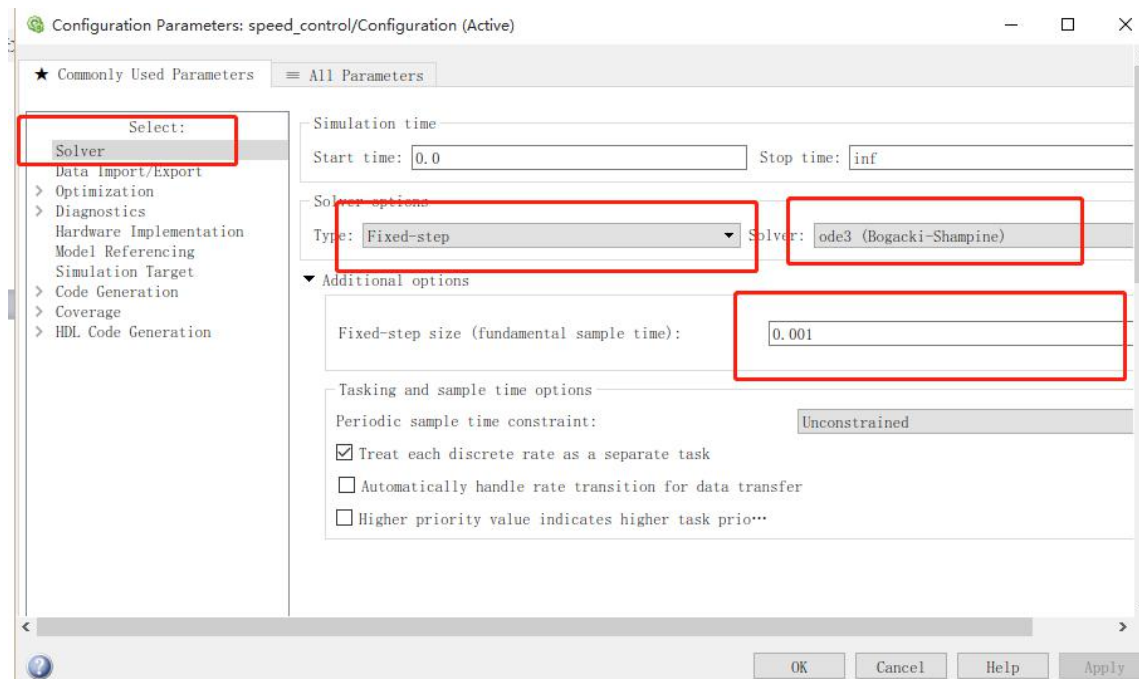


图 B-1 配置设置

2. 在 Code Generation 选项中选择电脑实时内核仿真模式，如图 B-2 所示；

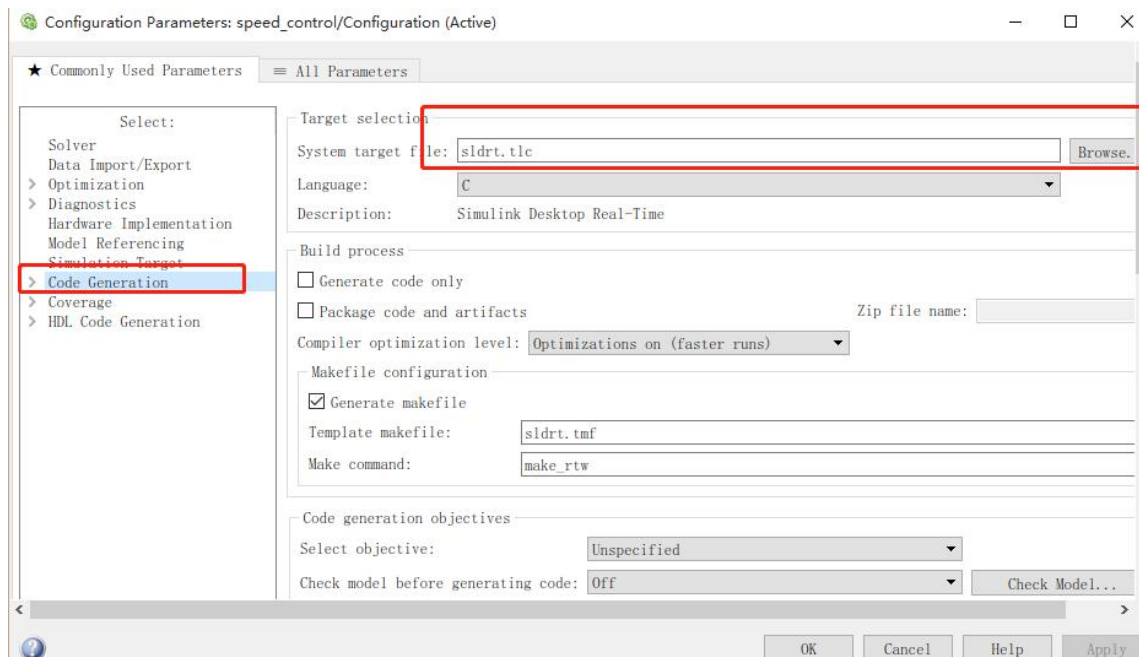


图 B-2 实时内核设置

3. 双击 Packet Input 模块，点击 install new board 选项，新建实验平台连接

上位机 USB 对应的 COM 口。如图 B-3 所示；

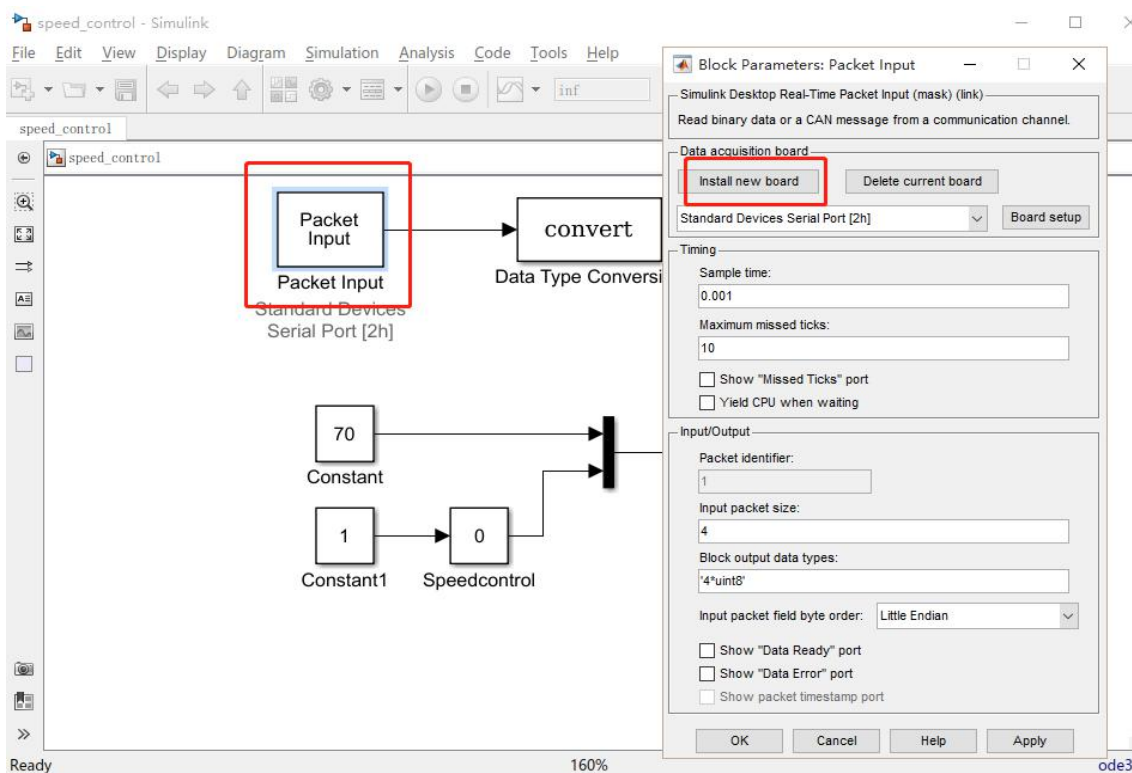


图 B-3 串口设置

4. 选择 Serial Port, 如图 B-4 所示；

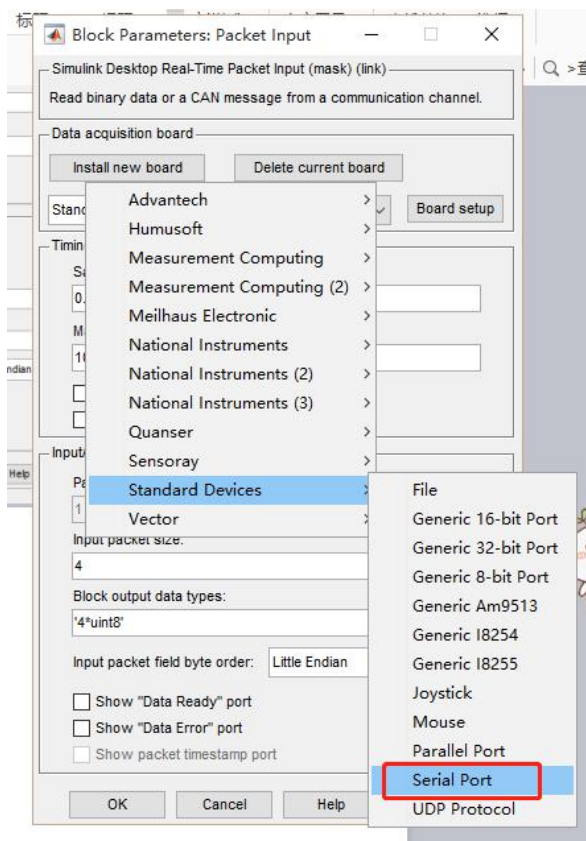


图 B-4



5. 选择 Other 选项,在图 B-5 红框里填入实验平台与上位机连接的 USB 对应的 COM 口号, 点击 OK。如图 B-5 所示;

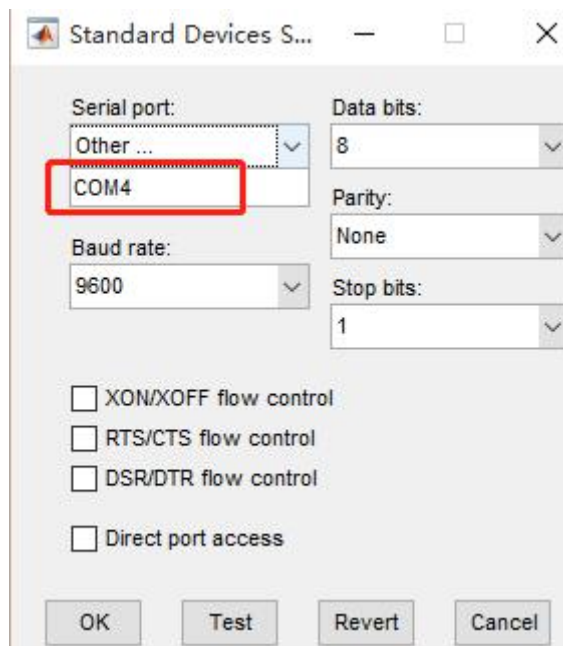


图 B-5

6. 在图 B-6 红框里选择上一步新建的端口, 点击旁边的 Board setup 按钮, 选择 COM 口, 选择 115200 的波特率。按蓝框配为数据配置, 采样时间, 个数。如图 B-6 所示;

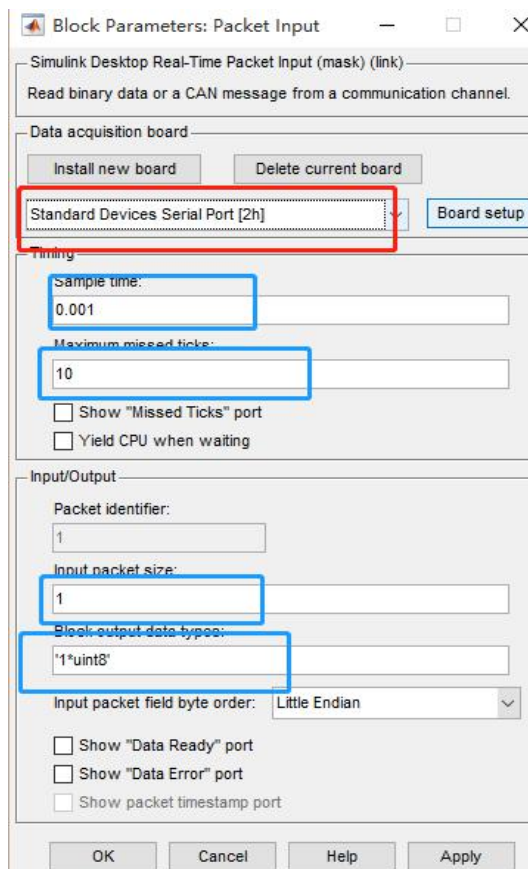


图 B-6

7. 双击 Packet output 模块，选择 COM 口，选择波特率，如下图所示设置。

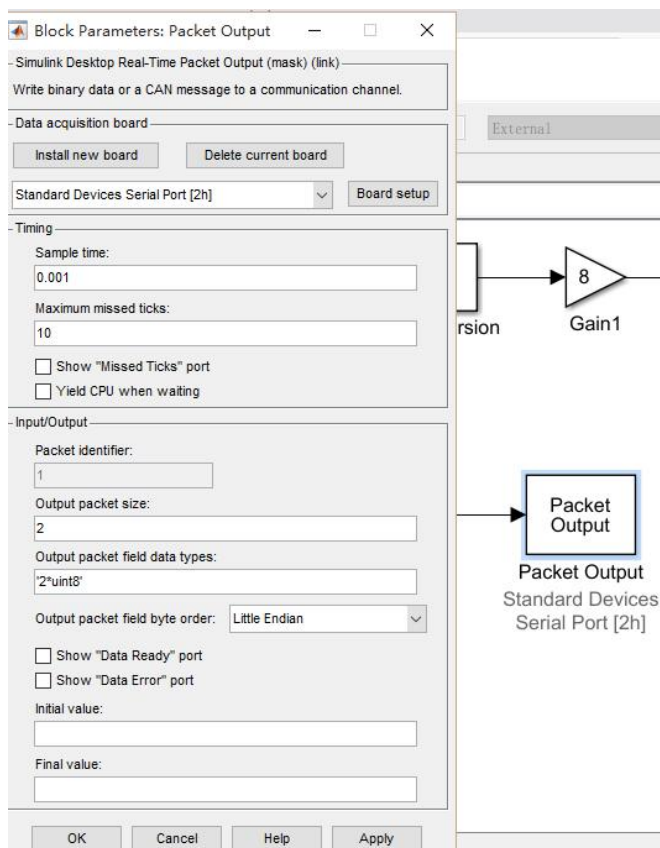


图 B-7