

《直流电机双闭环控制》课程设计 Matlab 仿真



1 绪论

本文档介绍了直流电机双闭环控制 Matlab 仿真。所有操作是基于 Matlab2016B 这个版本，在不同 Matlab 版本上或许会有些许不同。

在操作中，请及时保存，以免出现断电或死机而引起的工作丢失。

2 操作步骤

2.1 打开 Matlab2016B 中的 Simulink

打开 Matlab2016B 后的界面如下图 1 所示

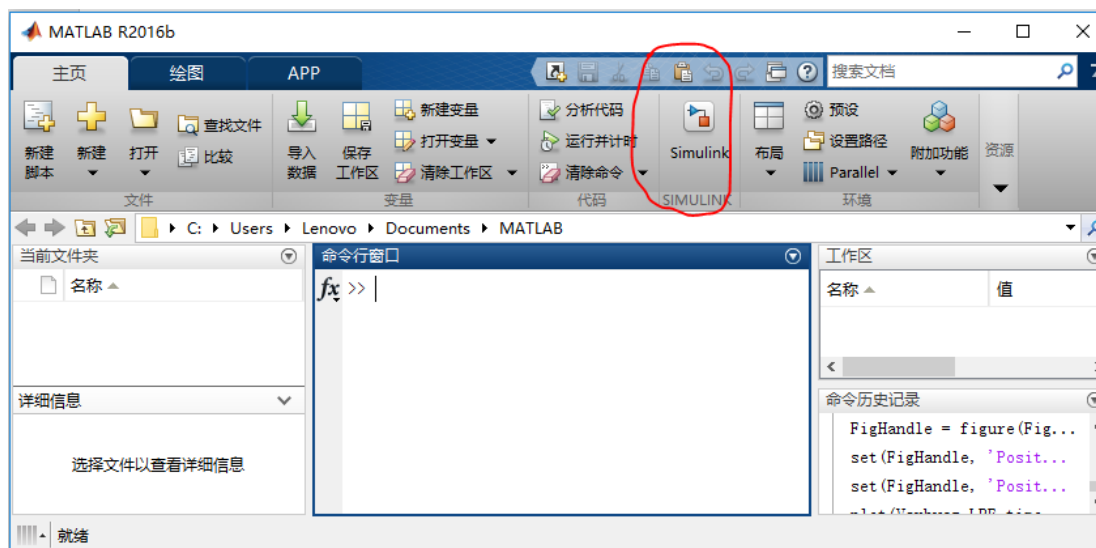


图 1 Matlab 界面

点击图 1 红色部分所示的 Simulink 图标，进入 Simulink 开始仿真界面，如图 2 所示。

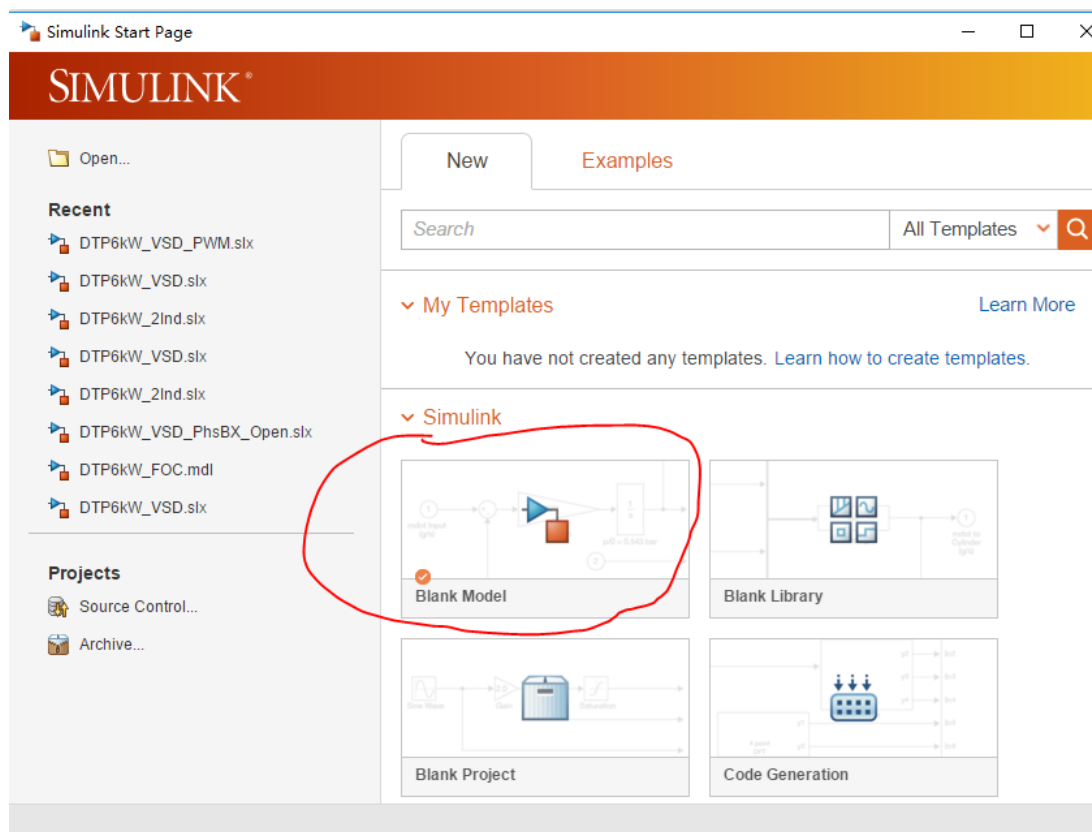


图 2 Matlab Simulink 开始界面

点击图 2 中的空白模型(Blank Model)部分，出现图 3 所示的 Simulink 空白模型界面，这个模型的名字现在为“untitled”，点击 File->Save，将会弹出一个文件保存对话框，选取合适的路径，文件名，最后保存。（有一些系统若出现不兼容中文的情况，请勿在路径和文件名中出现中文）

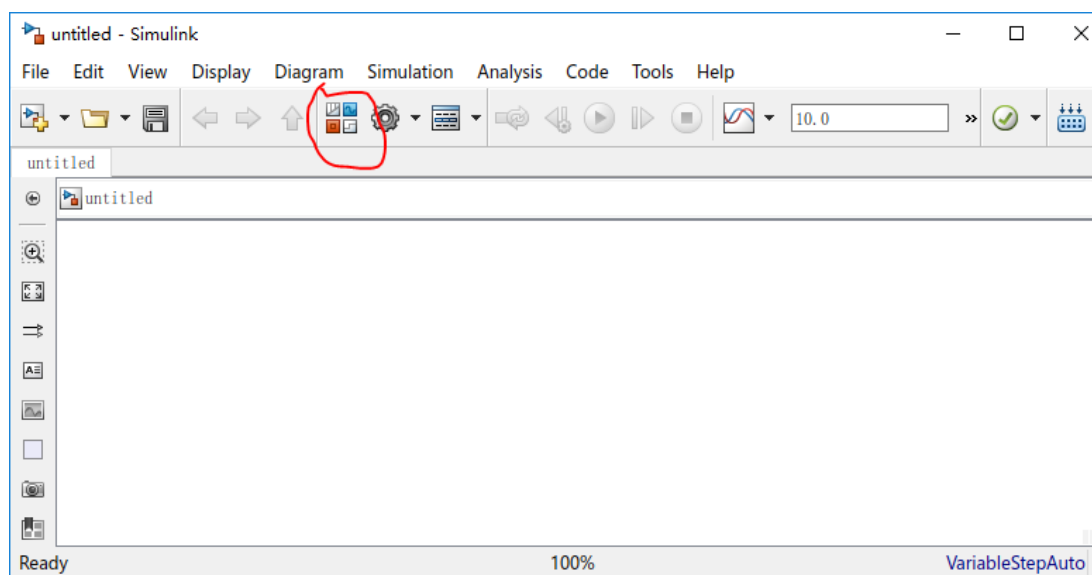


图 3 Matlab Simulink 界面

2.2 建立仿真模型

下面我们要建立一个直流电机的仿真模型，模型中包含直流电机、PI 模块、测量反馈、IGBT 模块等。

所有模块都是从打开 Simulink 器件库（Simulink Library Browser）选取的。

点击图 3 中红色标示的按钮，打开 Simulink 器件库（Simulink Library Browser），弹出图 4 所示对话框。

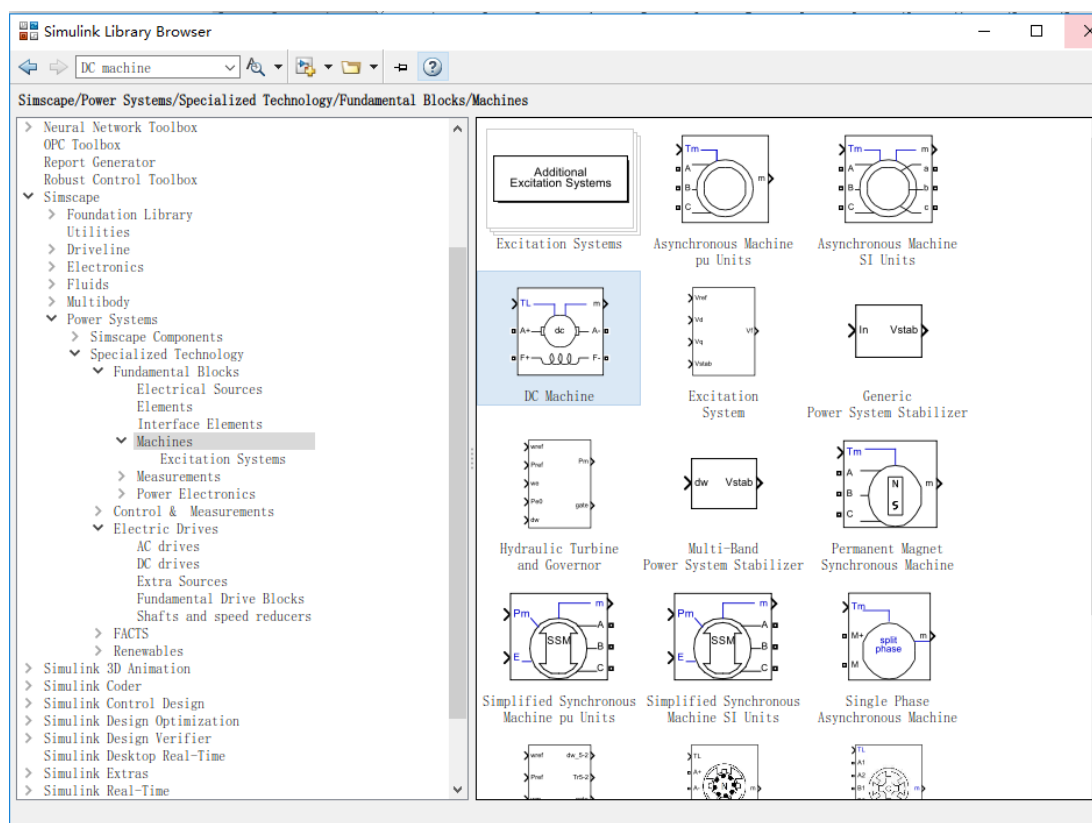


图 4 Matlab Simulink Library Browser

根据图 5 所示选择“直流电机模块”，然后按住鼠标将其移动到图 3 所示模型的空白处。或者右击“直流电机模块”，在弹出的上下文菜单中，选中“加入模块到模型 xxx 中”。

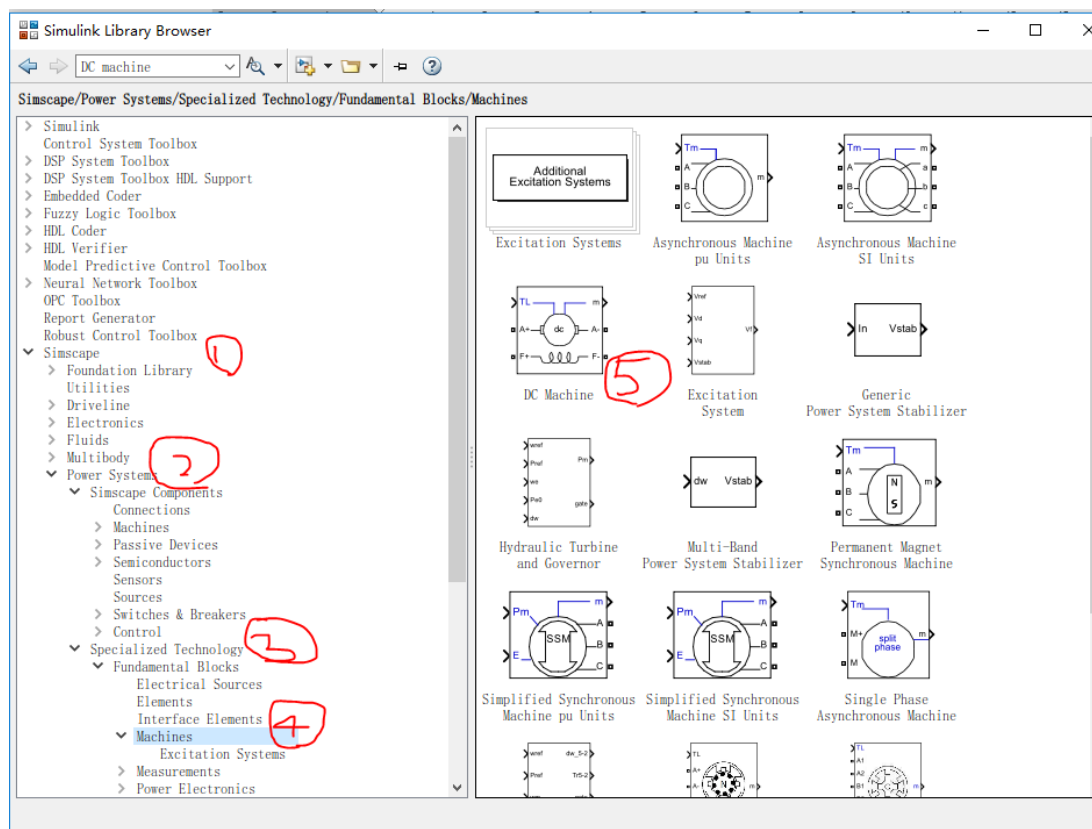


图 5 选择直流电机模块

加入直流电机模块后的模型如图 6 所示。

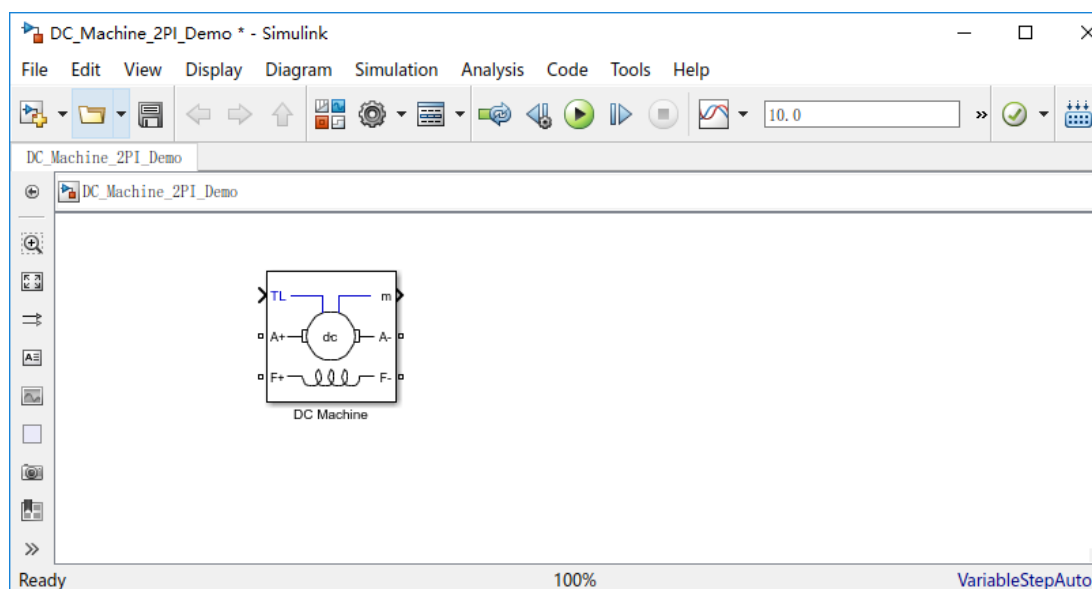
















图 6 添加直流电机模块后模型界面

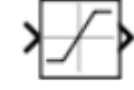



Tips:

- 1, 如何旋转或翻转模块：右击模块，在弹出的上下文菜单可找到旋转或翻转
- 2: 如何改模块名字：点击模块名字，即可更改模块名字
- 3: 如何连线：点击要连的起点，按住鼠标不松手，拖动鼠标至终点，松开鼠标即完成连线。
- 4: 设置模块属性：双击模块，在弹出的对话框中更改模块属性。

同样的操作步聚，加入其它模块

序号	模块	模块所处位置(Simulink 器件库 (Simulink Library Browser 中))	作用
1	直流电压源 (双击该模块，设置电压幅值)  DC Voltage Source	Power Systems->Specialized Technology->Fundamental Blocks->Electrical Sources-> DC voltage Source	为直流电机励磁绕组供电； 为直流电机提供电源
2	IGBT 模块  IGBT	Power Systems->Specialized Technology->Fundamental Blocks->Power Electronics->IGBT	用于驱动直流电机 输入 1 至端口 g, IGBT 导通， 输入 0 至端口 g, IGBT 截止
3	电压测量模块  Voltage Measurement	Power Systems->Specialized Technology->Fundamental Blocks->Measurements->Voltage Measurement	用于测量两点之间电压值，相当于电压表
4	总线选择器  Bus Selector	Simulink->Signal Routing->Bus Selector	用于从输入的信号中选择其中的几个输出
5	阶跃输出(2 个)  Step	Simulink->Sources->Step	一个用作速度指令输入 一个用作负载指令
6	增益模块	Simulink->Math Operations->Gain	乘以一个系数

	 Gain		
7	加法模块  Add	Simulink->Math Operations->Add	输入量相加
8	减法模块  Subtract	Simulink->Math Operations->Subtract	相减
9	除法模块  Divide	Simulink->Math Operations->Divide	除法
10	符号函数  Sign	Simulink->Math Operations->Sign	符号函数 >0: 输出 1 =0: 输出 0 <0: 输出-1
11	常数模块  Constant	Simulink->Sources->Constant	常数输入
12	重复序列发生器  Repeating Sequence	Simulink->Sources->Repeating Sequence	用于产生 PWM 波载波信号
13	连续域积分模块  Integrator	Simulink->Continuous->Integrator	连续域积分
14	带限幅值的连续域积分模块  Integrator Limited	Simulink->Continuous->Integrator Limited	带限幅值的连续域积分模块

15	饱和输出模块  Saturation	Simulink->Discontinuous->Saturation	输出限幅，可设置输出上限和下限
16	信号混合模块  Mux	Simulink->Signal Routing->Mux	将所有输入信号打包成一个信号
17	示波器模块  Scope	Simulink->Sinks->Scope	用于观察信号
18	Powergui 模块  powergui	Power Systems->Specialized Technology->Fundamental Blocks->powergui	此模块在含有电力电子器件的仿真中是必不可少的，否则仿真不了

加入相应的模块，并将相应的模块互相连起来，建立如图 7 所示的基于频域（s-domain）直流电机双闭环控制仿真模型和如图 8 所示的基于 SimPowerSystems 完整的直流电机双闭环控制仿真模型。注意图 7 和图 8 的模型应保存为不同的文件名。

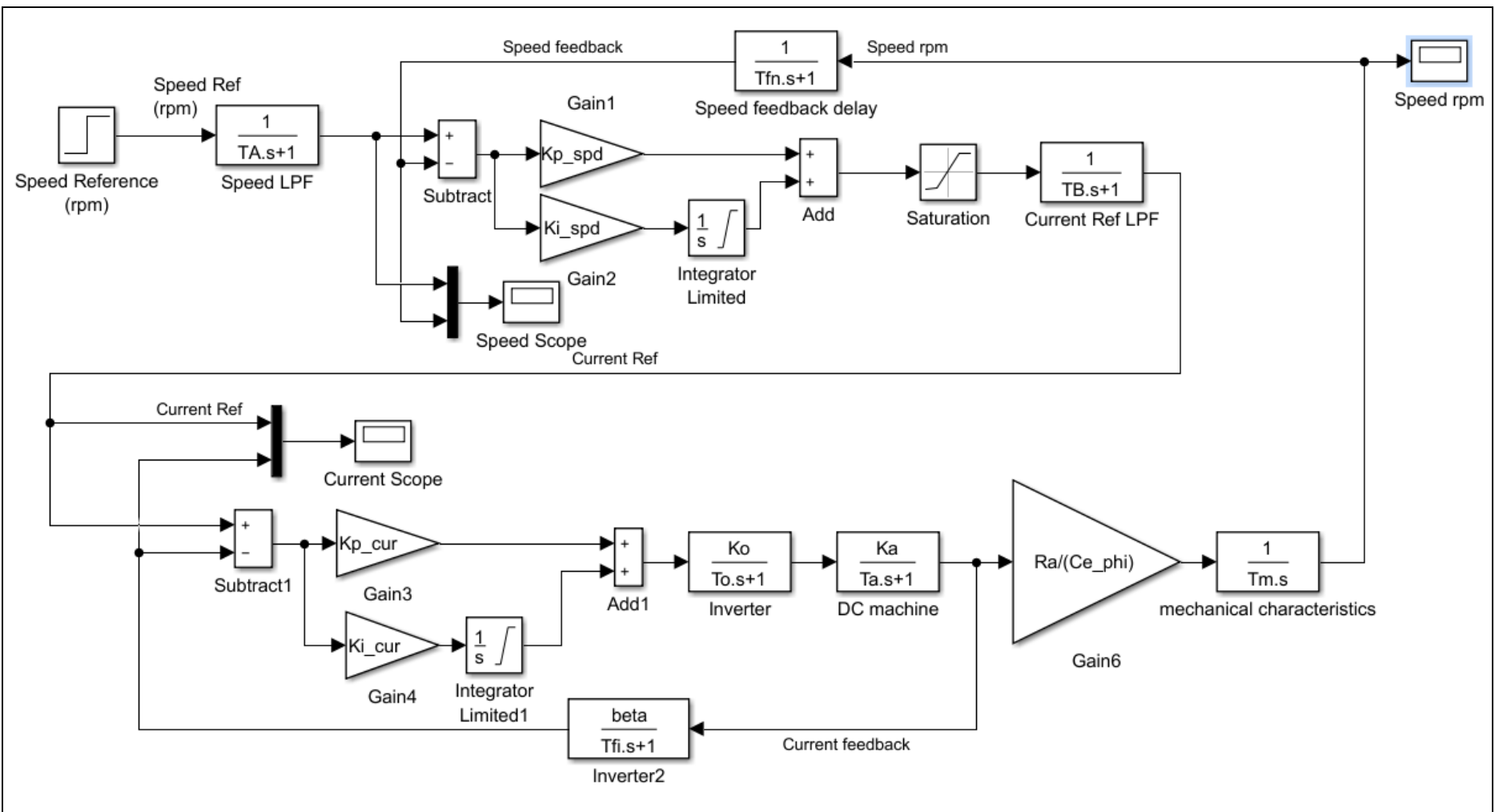


图 7 基于频域 (s-domain) 直流电机双闭环控制仿真模型

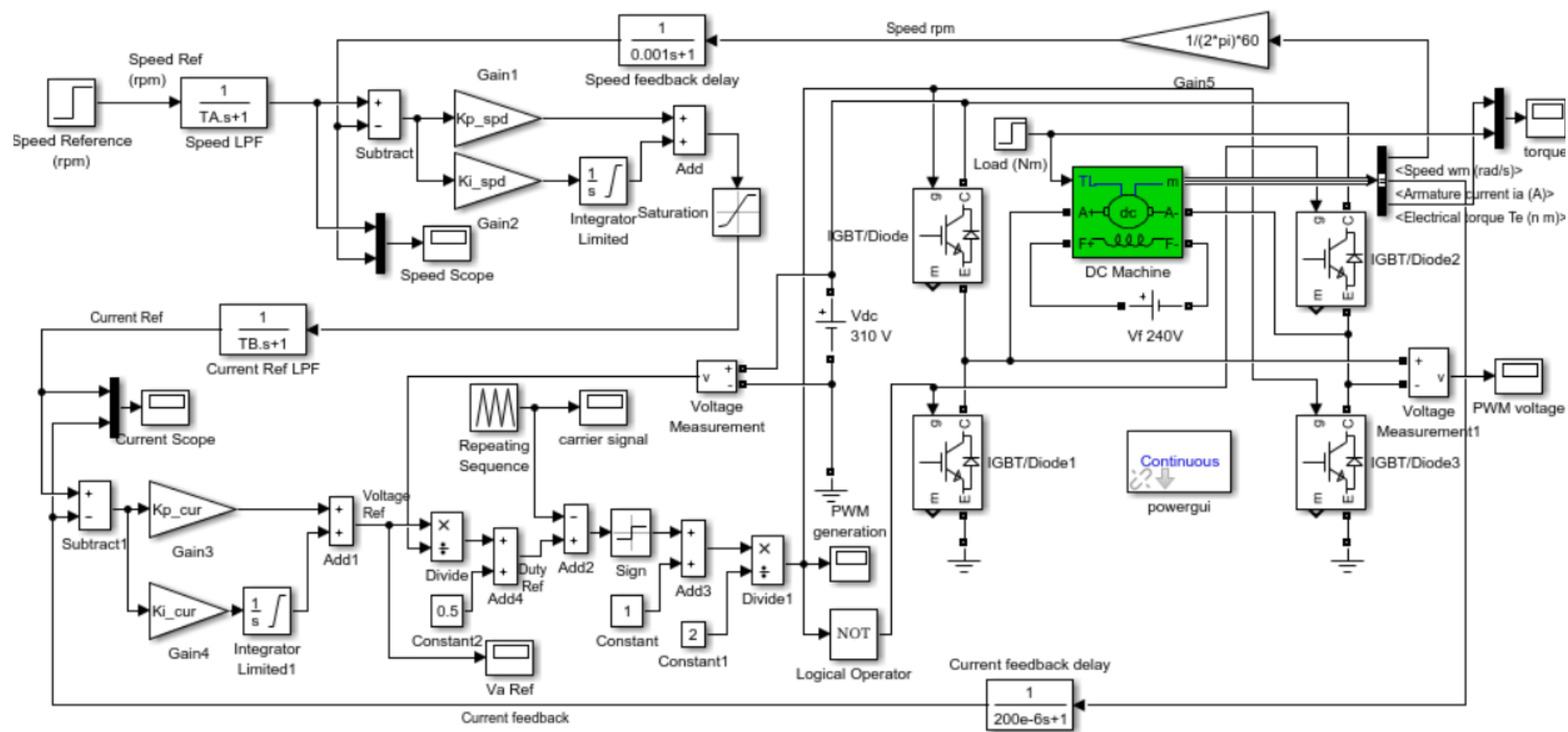


图 8 基于 SimPowerSystems 完整的直流电机双闭环控制仿真模型

2.3 参数的设定

2.3.1 电机参数的设计

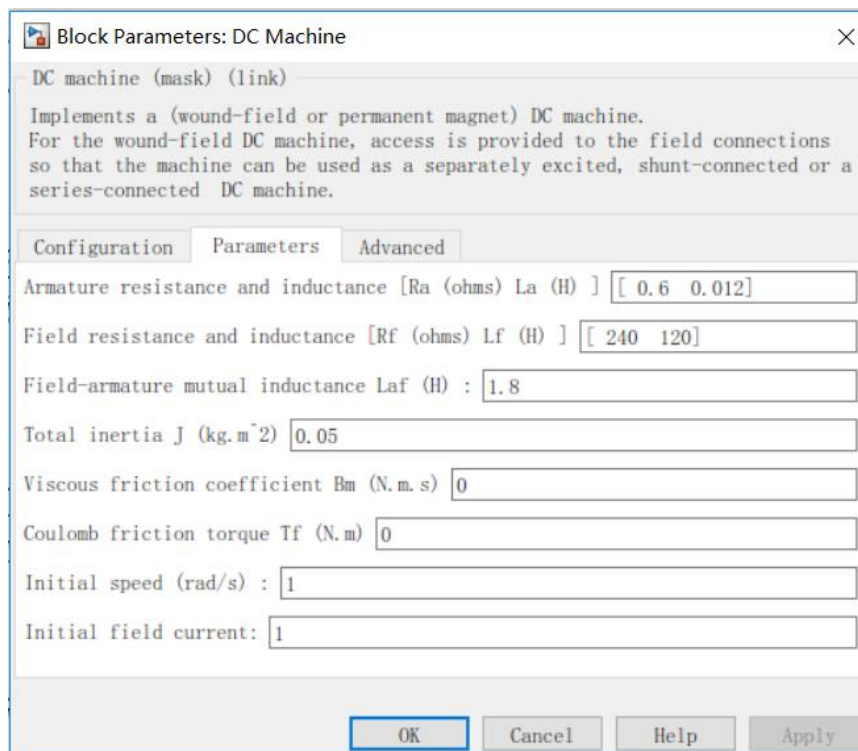


图 9 电机参数设定

2.3.2 速度指令设定

根据仿真需要，设置速度阶跃时间，初值，阶跃后的终值。

注意此处的设定值只是一个参考，同学们应该根据任务书设置相应的值。

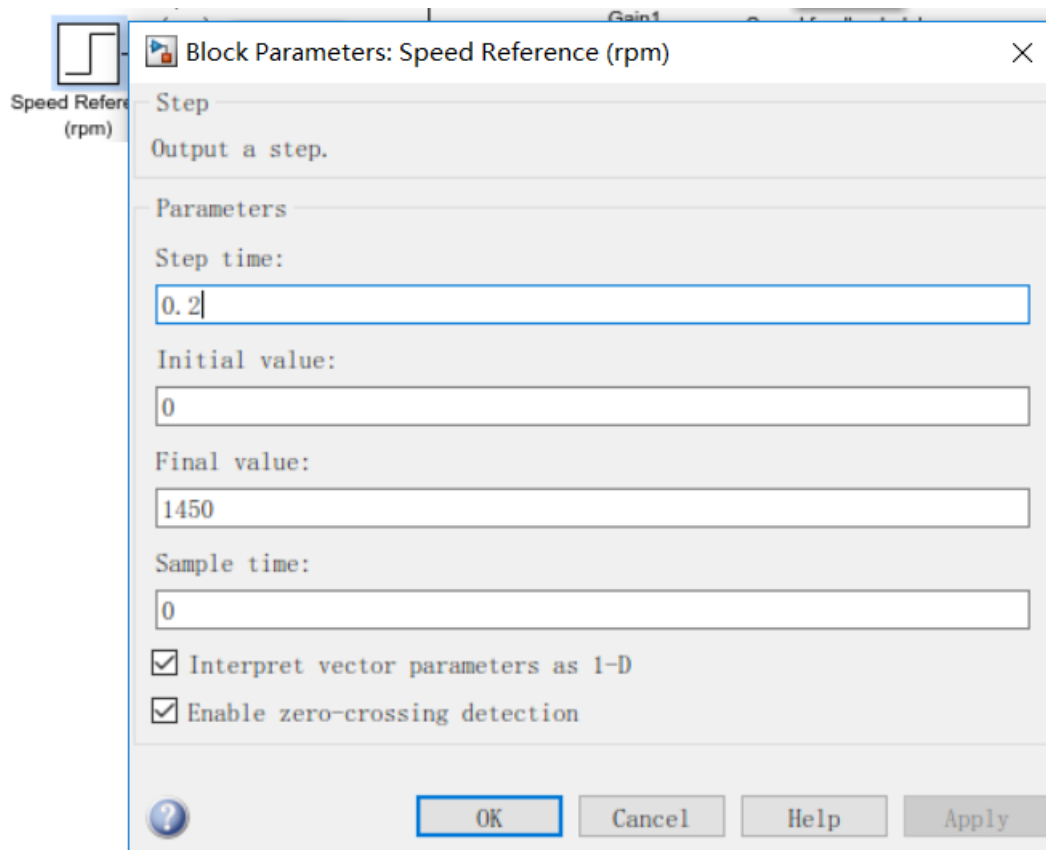


图 10 速度指令设定

2.3.3 负载指令设定

根据仿真需要，设置负载转矩阶跃时间，初值，阶跃后的终值。

注意此处的设定值只是一个参考，同学们应该根据任务书设置相应的值。

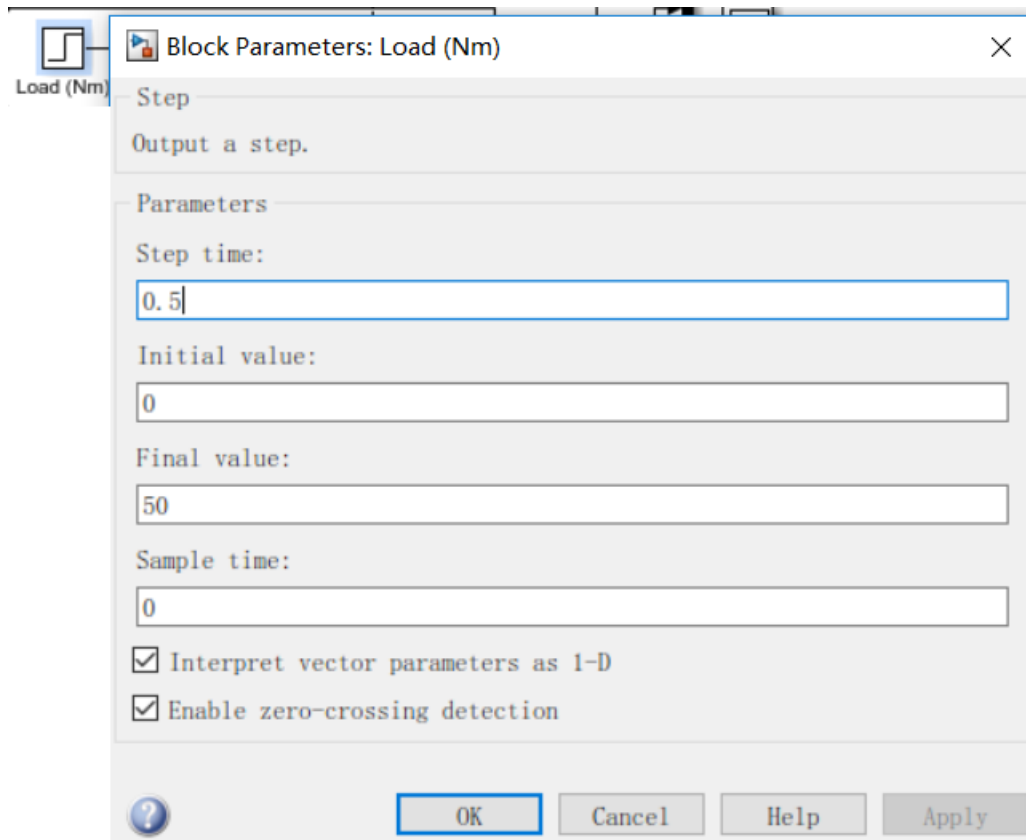


图 11 负载指令设定

2.3.4 载波信号设定

在这个例子中，载波信号设置为 5kHz,因此时间上设置为 $[0 \ 100\text{e-}6 \ 200\text{e-}6]$ ，输出上设置为 $[0 \ 1 \ 0]$ 。这样，在时间为零时时刻，输出 0。在时间为 $100\text{e-}6\text{s}$ ，也即 $100\mu\text{s}$ 时，输出 1，在时间为 $200\text{e-}6\text{s}$ 时，也即 $200\mu\text{s}$ 时，输出 0。这样整个周期为 $200\mu\text{s}$ ，也即 5kHz。

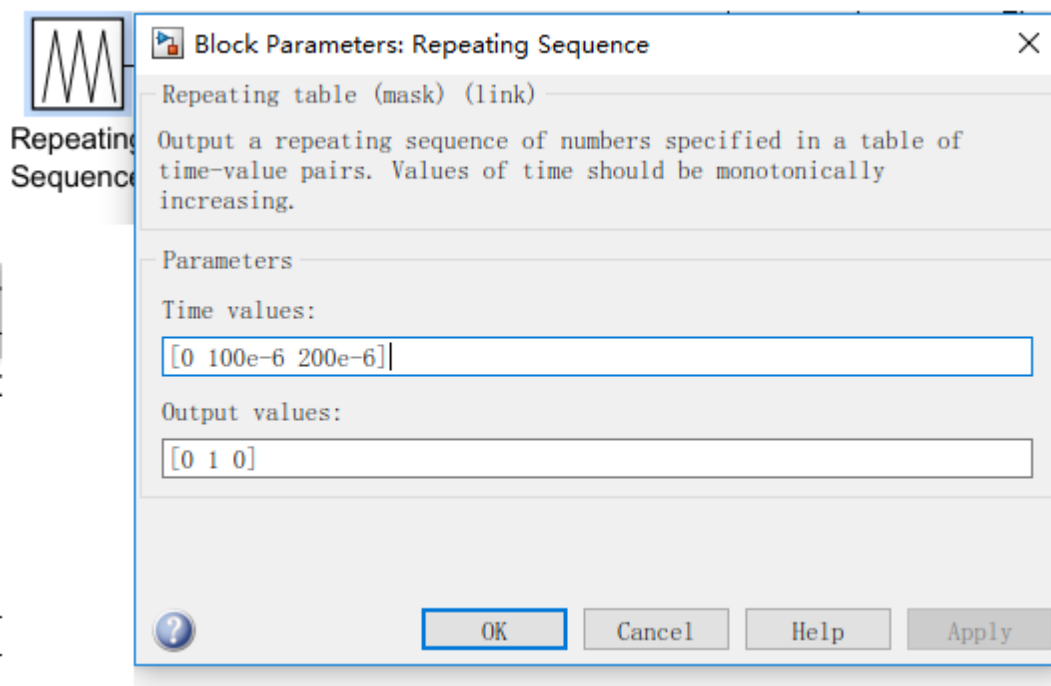


图 12 载波信号设定

2.3.5 直流电机参数计算

直流电机的精确数学模型如图 13，若需要了解模型的推导过程，请参考贺益康的书“电机控制”中的第 1.4 章。

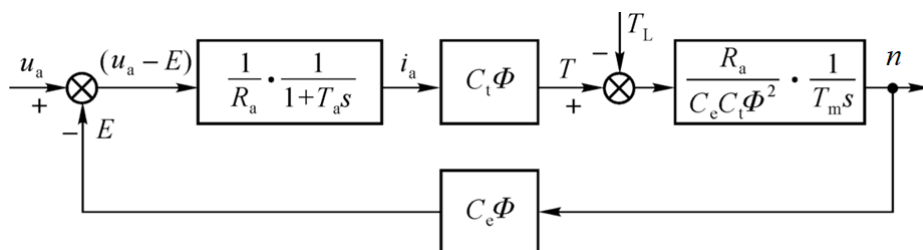


图 13 直流电机的精确模型

在此次示例中， $R_a = 0.6\Omega$, $L_a = 0.012H$ ；因此可计算出 $T_a = L_a / R_a$ 。

由于励磁绕组电压为 240V，磁励绕组电阻为 240Ω，因此，励磁电流 $I_f = 1A$ 。

由于反电势 $E = K_E \omega = L_{af} I_f \omega = C_e \Phi n$ ，此例中励磁电枢互感 $L_{af} = 1.8H$ ，由此可以计算出 $C_e \Phi$

转矩系数 $C_t \Phi = K_E = K_T = L_{af} I_f$ ，由此可以计算出 $C_t \Phi$ 。

$T_m = J R_a / (C_t C_e \Phi^2)$ ，若已知转动惯量，则可计算出 T_m 。

由此图 13 中所有参数已经全部确定。

2.3.6 电流环 PI 参数设定

在电机控制专业课上已经讲授过电流环 PI 和速度环 PI 设计的方法，请参考贺益康的书“电机控制”中的第 1.4 章。在此仅做简单的介绍。

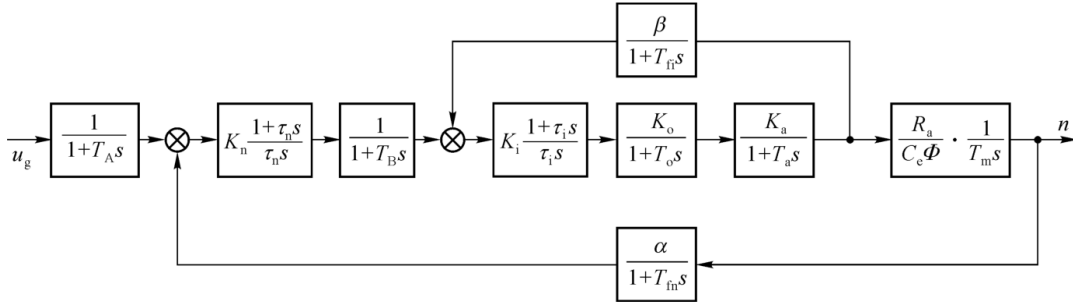


图 14 直流电机双闭环调速系统框图

在图 14 中

$K_a = 1/R_a$, R_a 为直流电机电枢电阻。

$K_i \frac{1+\tau_i s}{\tau_i s}$ 为电流环的 PI

$K_n \frac{1+\tau_n s}{\tau_n s}$ 为速度环的 PI

$\frac{K_o}{1+T_o s}$ 为开关器件的传递函数，此例中， $K_o = 1$, $T_o = 200\mu s$

$\frac{\beta}{1+T_{fi} s}$ 为电流采样回路的传递函数， β 为反馈系数，此处 $\beta = 1$, T_{fi} 为电流反馈回路的滤波时间常数，此例中 $T_{fi} = 200\mu s$

$\frac{\alpha}{1+T_{fn} s}$ 为速度采样回路的传递函数， α 为反馈系数，此处 $\alpha = 1$, T_{fn} 为速度反馈回路的滤波时间常数，此例中 $T_{fn} = 1ms$ 。

$\frac{1}{1+T_B s}$ 用于补偿电流环的反馈延时，此时可选取 $T_B = T_{fi}$

此例中拟将电流环设计成一个典型二阶系统，则电流环的 PI 参数如下：

$$\tau_i = T_a \quad (2.1)$$

$$K_i = \frac{T_a}{2T_{\Sigma i} K_a K_o \beta} \quad (2.2)$$

其中

$$T_{\Sigma i} = T_{fi} + T_o \quad (2.3)$$

这样设计后的电流环可等效为(2.4)所示的一个惯性环节

$$1/(\beta(T_{ei}s + 1)) \quad (2.4)$$

其中

$$T_{ei} = 2T_{\Sigma i} \quad (2.5)$$

这样，Simulink 模型当中的电流环 PI 参数可表达为

$$K_{p_cur} = K_i \quad (2.6)$$

$$K_{i_cur} = K_i/\tau_i \quad (2.7)$$

其中 K_i ， τ_i 的表达式请见(2.1)和(2.2)。

有兴趣的同学也可以将电流环设计成一个典型二阶系统，计算电流环的 PI。

2.3.7 速度环 PI 参数设定

将电流环等效为一阶惯性环节后，速度环的框图如图 15 (a) 所示，将其等效为单位反馈系统，则可等效为图 15 (b) 所示框图。

如果把两个小时时间惯性环节合在一起，即认为

$$\frac{1}{\beta} \cdot \frac{s}{1+T_{ei}s} \cdot \frac{\alpha}{1+T_{fn}s} \approx \frac{\alpha}{\beta} \cdot \frac{s}{1+(T_{ei}+T_{fn})s} \equiv \frac{\alpha}{\beta} \cdot \frac{s}{1+T_{\Sigma n}s} \quad (2.8)$$

其中

$$T_{\Sigma n} = T_{ei} + T_{fn} \quad (2.9)$$

T_{ei} 为等效电流环惯性环节的时间常数， T_{fn} 为为速度反馈回路的滤波时间常数，在此例中， $T_{fn} = 1ms$ 。速度反馈系数为 $\alpha = 1$ 。

这样，速度环可等效成图 15 (c) 所示框图，其为一典型的三阶系统。为了得到优化的调节特性，速度环的积分时间常数应满足

$$\tau_n = 4T_{\Sigma n} \quad (2.10)$$

速度环的放大系数应为

$$K_n = \frac{T_m}{2T_{\Sigma n}} \cdot \frac{\beta}{\alpha} \cdot \frac{C_e \Phi}{R_a} \quad (2.11)$$

由于将速度环等效为典型的三阶系统，速度环的输入端需要加一等效传递函数为 $1/(1 + 4T_{\Sigma n}s)$ ，因此

$$\frac{1}{1+T_A s} (1 + T_{fn}s) \approx \frac{1}{1+4T_{\Sigma n}s} \quad (2.12)$$

因此

$$T_A \approx 4T_{\Sigma n} + T_{fn} \quad (2.13)$$

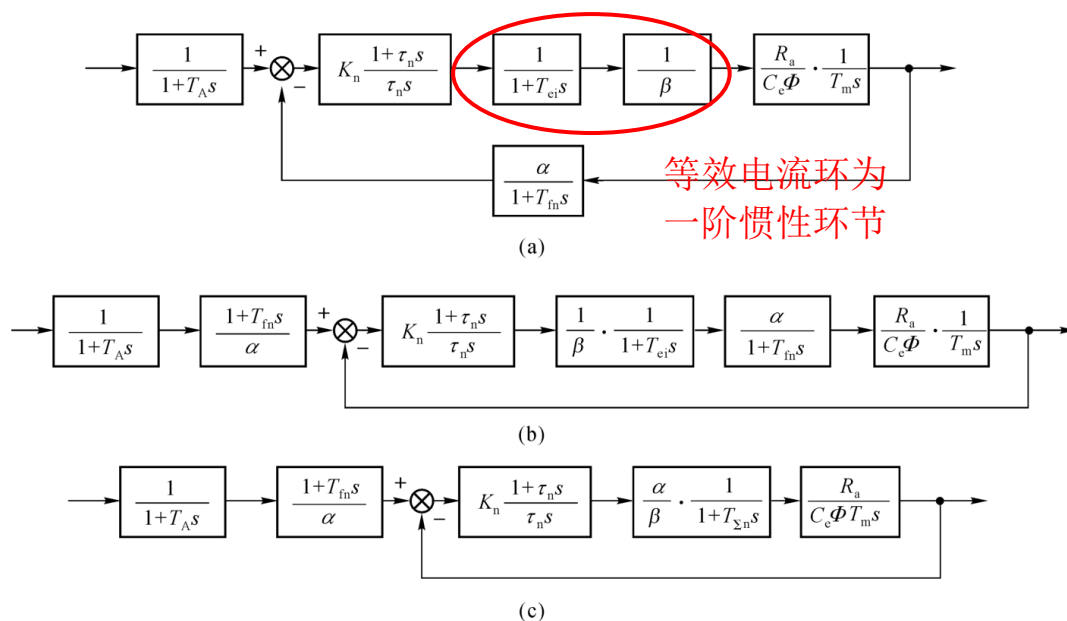


图 15 直流电机双闭环调速系统速度环框图

2.3.8 Matlab 中计算 PI 参数

根据 2.3.6 节电流环 2.3.7 节速度环参数的计算，可在 Matlab 上当中新建一个后缀名为 m 的文件*.m，内容如图 17 所示。点击运行按钮，即可得到所有仿真模型中所需要的待定参数： K_p_spd , K_i_spd , K_p_cur , K_i_spd , T_A , T_B 。同时这些参数可以在 Matlab 的工作区进行查看。

也可手动计算出所有参数后，直接在模型中修改上述参数；或者在 Matlab 的命令行窗口给上述参数赋值。

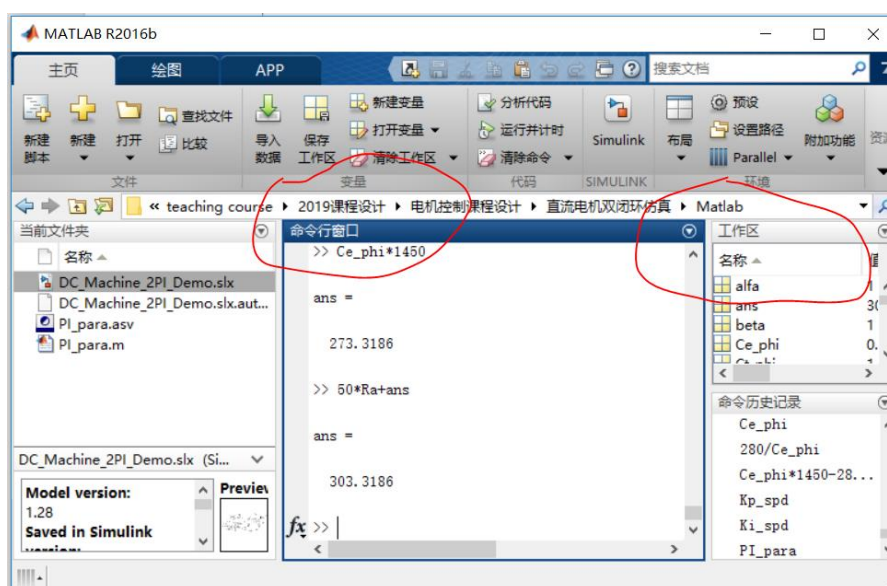


图 16 PI 参数计算


```

J = 0.05;           %kg.m^2
J = J*2*pi/60;      % for J*dn/dt
Ra = 0.6;           %ohm
La = 0.012;         %H
Ka = 1/Ra;
Ta = La/Ra;
Laf = 1.8;          %H
If = 1;             %1A
Ce_phi = Laf*If*2*pi/60;
Ct_phi = Laf*If;
Tm = J*Ra/(Ce_phi*Ct_phi);
beta = 1;
Ko = 1;
To = 200e-6;        %200us

```

更多所需要的参数，请同学们自己编写。

图 17 m 文件中 PI 参数计算

2.3.9 配置仿真参数

在 Simulink 菜单中点击 Simulation->Model Configuration Parameters,弹出如图 18 所示的对话框，配置仿真参数如图 18 所示。

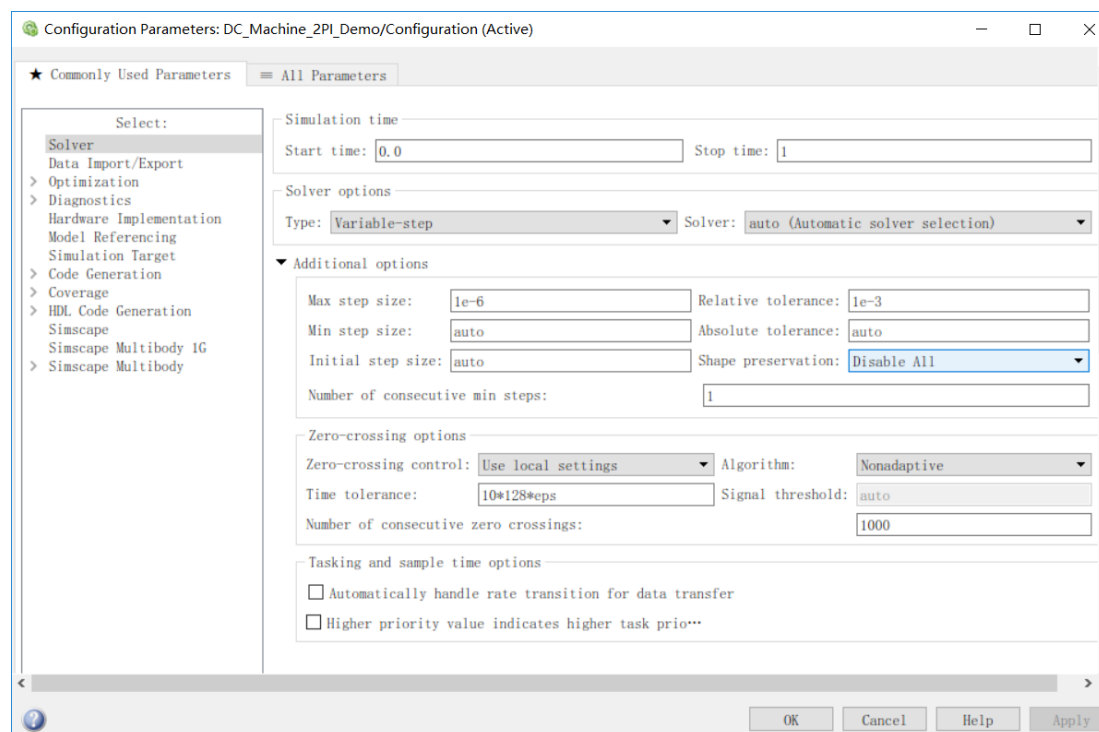


图 18 模型配置参数

2.3.10 电机机械特性曲线的确定

2.4 仿真结果

点击工具栏上的运行按钮，或者点击菜单栏 Simulation->Run,则开始进行仿真，右下侧的状态栏将会显示仿真进度。

仿真结束后，点击相应的示波器（Scope），观察信号是否正确。

图 19, 图 20,和图 21 分别显示了速度、电流()、转矩的波形。

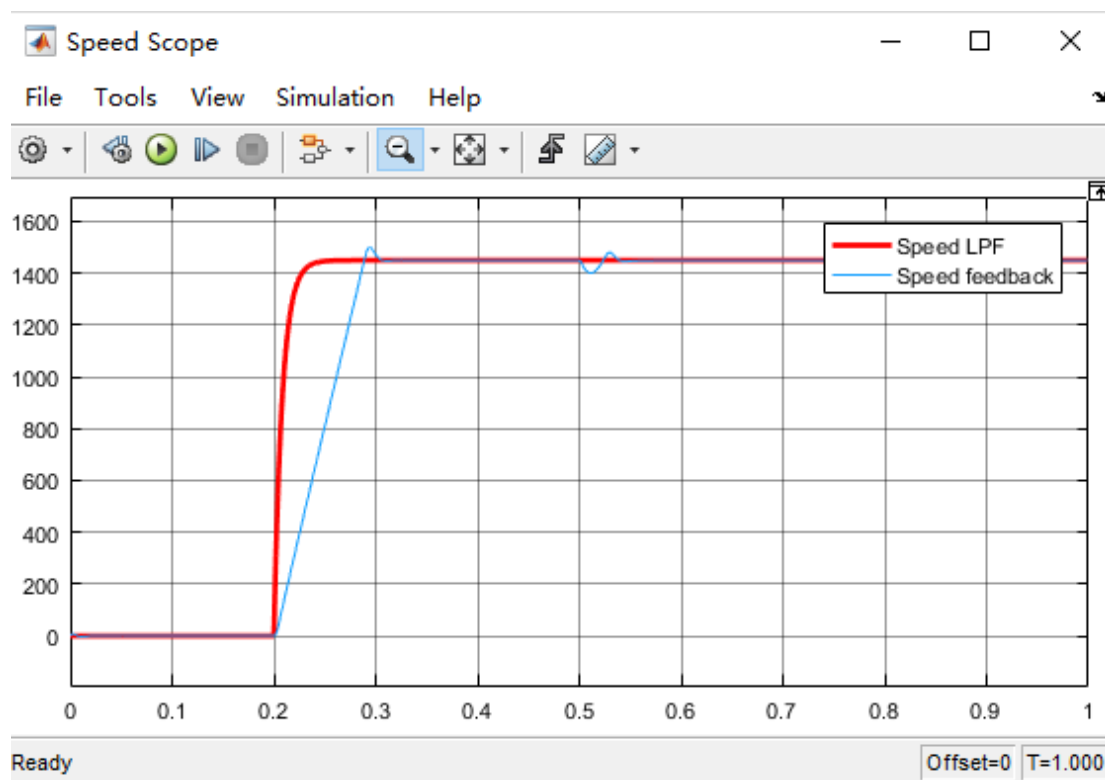


图 19 速度指令和反馈

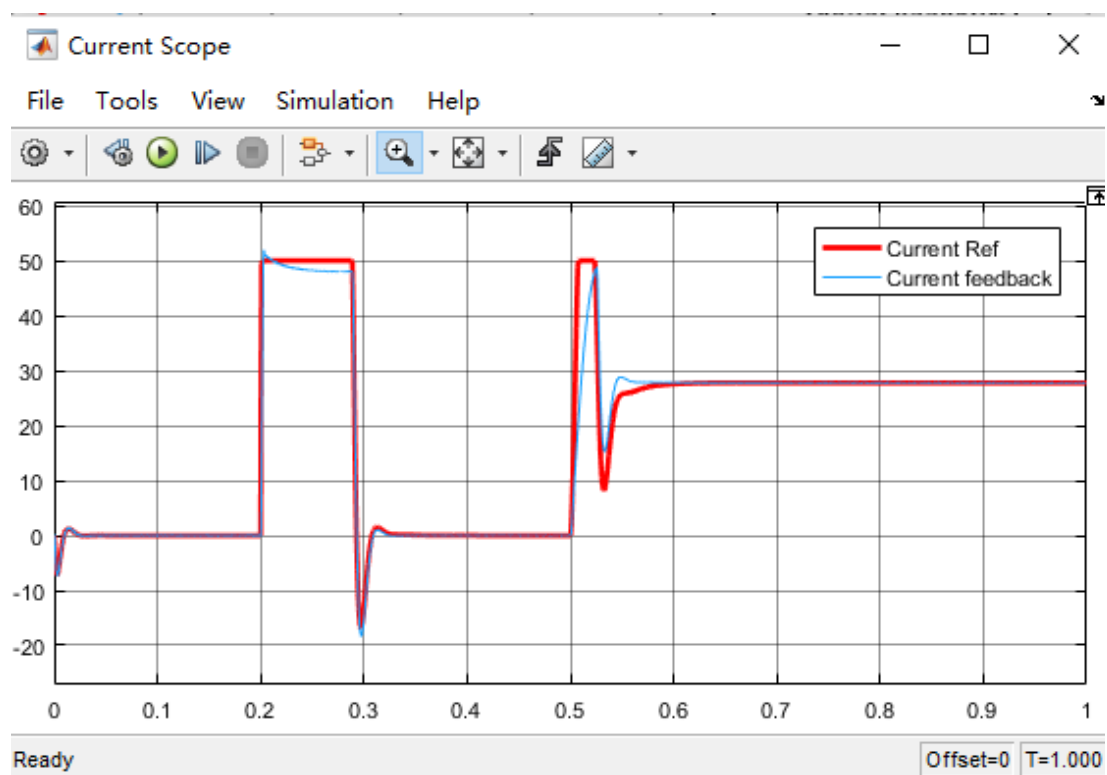


图 20 电流指令和反馈

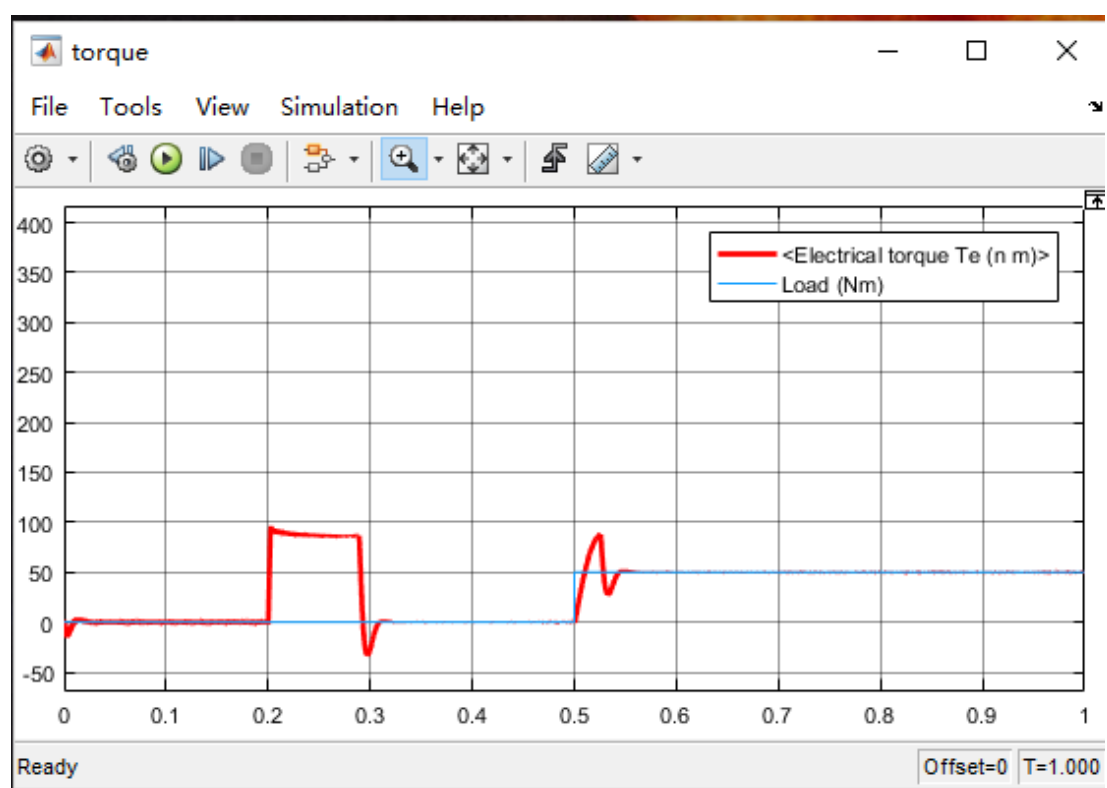


图 21 电磁转矩和负载转矩

3 总结

本文档详细介绍了直流电机的双闭环建模和仿真，以及电流环，速度环的参数选取。

希望对同学们的课程设计有所帮助，谢谢。

4 参考书籍

(1) 电机控制 贺益康 浙江大学出版社

(2) 现代电机控制技术 王成元，夏加宽，孙宜标 机械工业出版社

(3) 基于 MATLAB 的电力电子技术和交直流调速系统仿真 陈中 清华大学出版社

(4) 电力电子技术 王兆安 机械工业出版社