# 《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 Matalb2016B 中的 Simulink 打开 Matlab2016B 后的界面如下图 1 所示

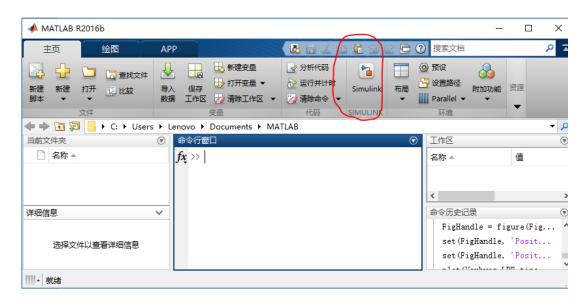


图 1 Matlab 界面

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。

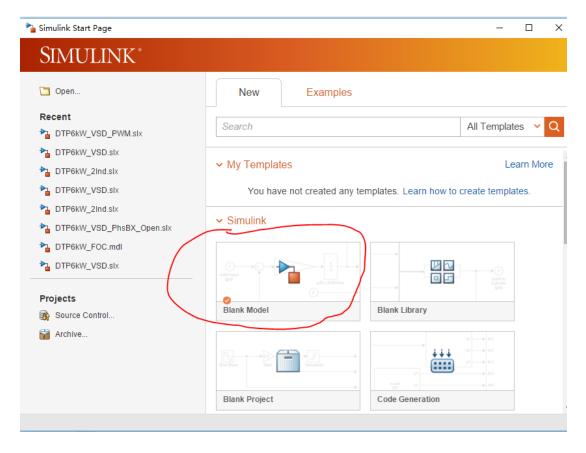


图 2 Matlab Simulink 开始界面

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)

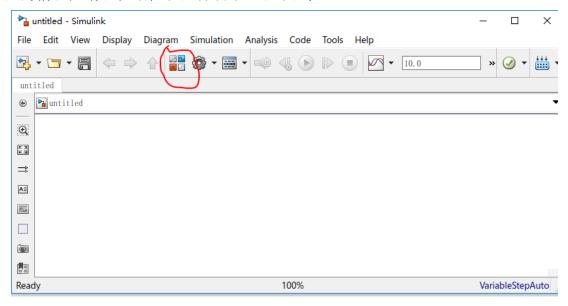


图 3 Matlab Simulink 界面

### 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。

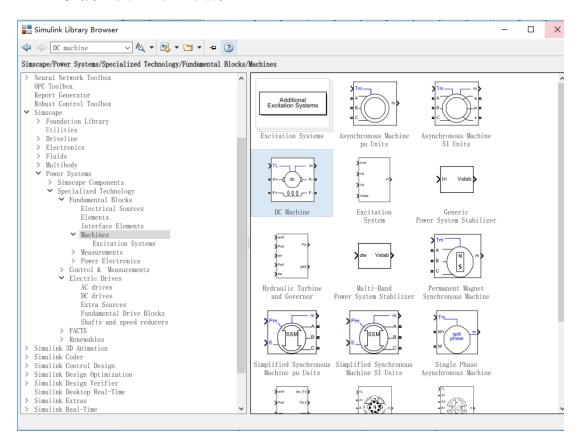


图 4 Matlab Simulink Library Browser

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"。

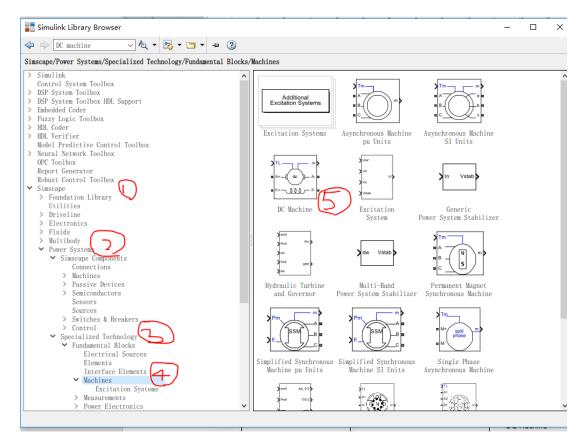


图 5 选择直流电机模块

## 加入直流电机模块后的模型如图 6 所示。

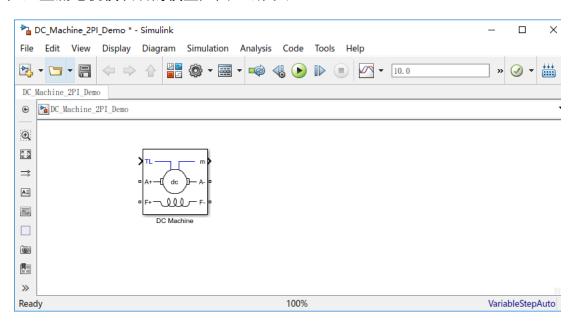


图 6 添加直流电机模块后模型界面

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。

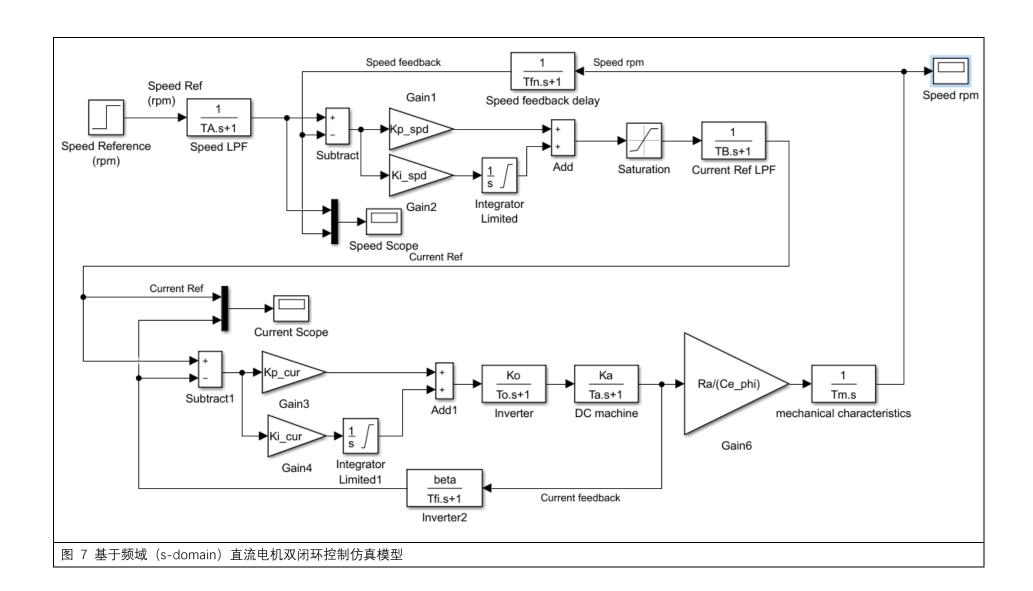
## 同样的操作步聚, 加入其它模块

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)       Power Systems->Specialized Technology->Fundamental Blocks->Electrical Sources-> DC voltage Source       为直流电机励磁绕组供电;         2       IGBT 模块       Power Systems->Specialized Technology->Fundamental Blocks->Power Electronics->IGBT       用于驱动直流输入 0 至端口痕,IGBT 导通,输入 0 至端口痕,IGBT 导通,输入 0 至端口度,IGBT 截止         3       电压测量模块       Power Systems->Specialized Technology->Fundamental Blocks->Measurmental Blocks->Measurments->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       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)       Simulink->Sources->Step       一个用作速度指令输入		17年15岁秋,加入安日	T	I
直流电压源 (双击该模块,设置电   Technology->Fundamental Blocks->Electrical	序	模块	模块所处位置(Simulink 器件库	作用
Technology->Fundamental Blocks->Electrical	号		(Simulink Library Browser 中))	
E Maid Sources Source    DC Voltage Source	1	直流电压源	Power Systems->Specialized	为直流电机励
DC Voltage Source  2 IGBT 模块		(双击该模块,设置电	Technology->Fundamental Blocks->Electrical	磁绕组供电;
### DC Voltage Source    Power Systems->Specialized		压幅值)	Sources-> DC voltage Source	
DC Voltage Source  2 IGBT 模块 Power Systems->Specialized Technology->Fundamental Blocks->Power Electronics->IGBT 第入 1 至端口 g, IGBT 转通, 输入 0 至端口 g, IGBT 截止  3 电压测量模块 Power Systems->Specialized Technology->Fundamental Blocks->Measurement  4 总线选择器 Simulink->Signal Routing->Bus Selector  5 阶跃输出(2 个) Simulink->Sources->Step  —个用作速度		•		为直流电机提
Power Systems->Specialized 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 Power Systems->Specialized		<u>†</u>		供电源
Power Systems->Specialized 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 Power Systems->Specialized		DC Voltage Source		
Technology->Fundamental Blocks->Power		De vortage Source		
Electronics->IGBT 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 Power Systems->Specialized 用于测量两点 之间电压值, 相当于电压表  Voltage Measurement Blocks->Measurments->Voltage Measurement 相当于电压表  4 总线选择器 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) Simulink->Sources->Step 一个用作速度	2	IGBT 模块	Power Systems->Specialized	用于驱动直流
g, IGBT 导通, 输入 0 至端口 g, IGBT 截止  3 电压测量模块 Power Systems->Specialized 用于测量两点 之间电压值, 相当于电压表  Voltage Measurement 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) Simulink->Sources->Step 一个用作速度			Technology->Fundamental Blocks->Power	电机
1GBT 编入 0 至端口 g, IGBT 截止  3 电压测量模块 Power Systems->Specialized 用于测量两点 之间电压值,相当于电压表  Voltage Measurement Blocks->Measurement 相当于电压表  4 总线选择器 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) Simulink->Sources->Step 一个用作速度			Electronics->IGBT	输入1至端口
Blocks->Measurement  IGBT  Delication  De		"اِ تُلْمَانَا"		g, IGBT 导通,
B, IGBI 截止  B 电压测量模块 Power Systems->Specialized Technology->Fundamental Blocks->Measurement Poltage Measurement  A 总线选择器 Simulink->Signal Routing->Bus Selector  Bus Selector  Simulink->Sources->Step  FH 测量两点 之间电压值,相当于电压表  用于从输入的信号中选择其中的几个输出				输入 0 至端口
Technology->Fundamental 之间电压值,相当于电压表  Voltage Measurement  Simulink->Signal Routing->Bus Selector  基础		IGBT		g, IGBT 截止
Blocks->Measurement 相当于电压表  Voltage Measurement  Simulink->Signal Routing->Bus Selector  用于从输入的信号中选择其中的几个输出  Simulink->Sources->Step  一个用作速度	3	电压测量模块	Power Systems->Specialized	用于测量两点
Voltage Measurement  4 总线选择器 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) Simulink->Sources->Step 一个用作速度		n +	Technology->Fundamental	之间电压值,
4 总线选择器 Simulink->Signal Routing->Bus Selector 用于从输入的信号中选择其中的几个输出 Simulink->Sources->Step 一个用作速度		- v	Blocks->Measurments->Voltage Measurement	相当于电压表
4 总线选择器 Simulink->Signal Routing->Bus Selector 用于从输入的信号中选择其中的几个输出 Simulink->Sources->Step 一个用作速度		Voltage Measurement		
信号中选择其中的几个输出  5 阶跃输出(2 个) Simulink->Sources->Step 一个用作速度		vortage measurement		
中的几个输出  Bus Selector  5 阶跃输出(2 个) Simulink->Sources->Step 一个用作速度	4	总线选择器	Simulink->Signal Routing->Bus Selector	用于从输入的
Bus Selector  5 阶跃输出(2 个) Simulink->Sources->Step 一个用作速度		Ь		信号中选择其
5 阶跃输出(2 个) Simulink->Sources->Step 一个用作速度		<b>₩</b>		中的几个输出
5 阶跃输出(2 个) Simulink->Sources->Step 一个用作速度		Bus		
		Selector		
指令输入	5	阶跃输出(2 个)	Simulink->Sources->Step	一个用作速度
				指令输入
III III III III III III III III III I		Step		一个用作负载
指令				指令
6 增益模块 Simulink->Math Operations->Gain 乘以一个系数	6	增益模块	Simulink->Math Operations->Gain	乘以一个系数

_		
<b>&gt;</b>		
		* > = !p.!=
加法模块	Simulink->Math Operations->Add	输入量相加
Add		
减法模块	Simulink->Math Operations->Subtract	相减
Subtract		
除法模块	Simulink->Math Operations->Divide	除法
× ÷ Divide		
符号函数	Simulink->Math Operations->Sign	符号函数
√ T		>0: 输出1
		=0: 输出 0
		<0: 输出-1
常数模块	Simulink->Sources->Constant	常数输入
Constant		
重复序列发生器	Simulink->Sources->Repeating Sequence	用于产生
$\Lambda\Lambda\Lambda$		PWM 波载波
Repeating Sequence		信号
连续域积分模块	Simulink->Continuous->Integrator	连续域积分
$\frac{1}{s}$ Integrator		
带限幅值的连续域积	Simulink->Continuous->Integrator Limited	带限幅值的连
分模块		续域积分模块
Integrator Limited		
	减法模块  Subtract  除法模块  符号函数  Sign  常数模块  1 Constant  重复序列发生器 Repeating Sequence 连续域积分模块  1 Sign  市職幅值的连续域积分模块  1 Sign  The grator  The Repeating Sequence	加法模块 Add  减法模块 Simulink->Math Operations->Subtract  除法模块 Divide  符号函数 Simulink->Math Operations->Divide  常数模块 Simulink->Math Operations->Sign  常数模块 Constant  重复序列发生器 Eg序列发生器 Simulink->Sources->Constant  重复序列发生器 Simulink->Sources->Repeating Sequence  连续域积分模块 Integrator  带限幅值的连续域积 分模块  Integrator  Simulink->Continuous->Integrator Limited

15	饱和输出模块	Simulink->Discontinuous->Saturation	输出限幅,可
			设置输出上限
	<b>≯</b> />		和下限
	Saturation		
	Saturation		
16	信号混合模块	Simulink->Signal Routing->Mux	将所有输入信
	k		号打包成一个
	*		信号
	Mux		
17	示波器模块	Simulink->Sinks->Scope	用于观察信号
	Scope		
18	Powergui 模块	Power Systems->Specialized	此模块在含有
		Technology->Fundamental Blocks->powergui	电力电子器件
	powergui		的仿真中是必
			不可少的,否
	powergui		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。



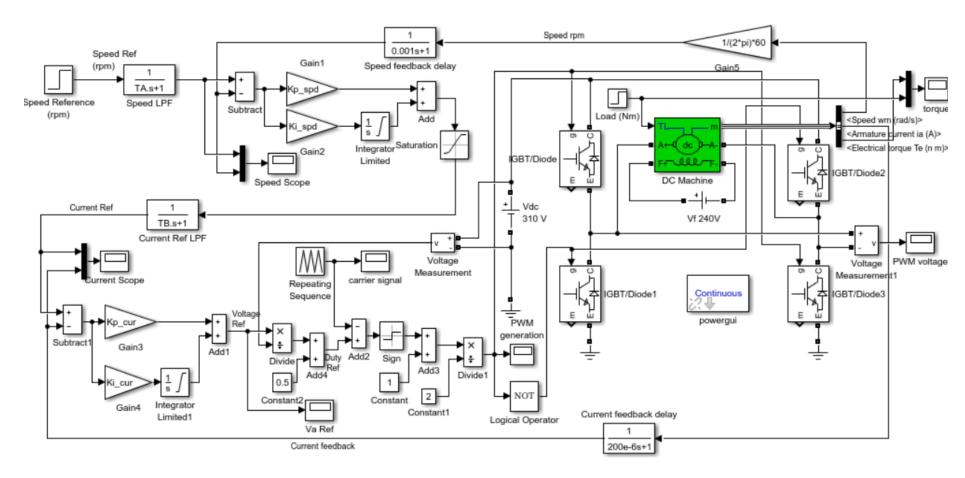


图 8 基于 SimPowerSystems 完整的直流电机双闭环控制仿真模型

## 2.3 参数的设定

## 2.3.1 电机参数的设计

Block Parameters: DC Machine	×
DC machine (mask) (link)	
Implements a (wound-field or permanent magnet) DC machine. For the wound-field DC machine, access is provided to the field connecti so that the machine can be used as a separately excited, shunt-connected series-connected DC machine.	
Configuration Parameters Advanced	
Armature resistance and inductance [Ra (ohms) La (H) ] [ 0.6 0.012]	
Field resistance and inductance [Rf (ohms) Lf (H) ] [ 240 120]	
Field-armature mutual inductance Laf (H) : 1.8	
Total inertia J (kg.m <sup>2</sup> ) 0.05	
Viscous friction coefficient Bm (N.m.s) 0	
Coulomb friction torque Tf (N.m) 0	
Initial speed (rad/s) : 1	
Initial field current: 1	

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。

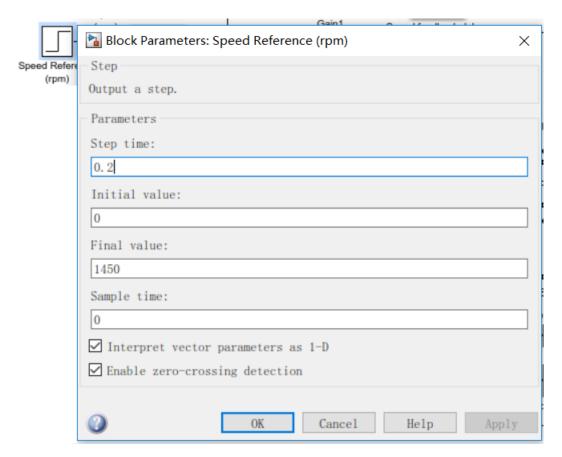


图 10 速度指令设定

### 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。

	Block Parameters: Load (Nm)	×
Load (Nm)	Step	
	Output a step.	
	Parameters	
	Step time:	
	0. 5	
	Initial value:	
	0	
	Final value:	
	50	
	Sample time:	
	0	
	✓ Interpret vector parameters as 1-D	
	☑ Enable zero-crossing detection	
	OK Cancel Help Appl	y

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 100e-6 200e-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 100e-6s, 也即 100us 时, 输出 1, 在时间为 200e-6s 时, 也即 200us 时, 输出 0。这样整个周期为 200us, 也即 5kHz。

	Block Parameters: Repeating Sequence
/ / / /	Repeating table (mask) (link)
Repeating Sequence	
	Parameters
	Time values:
	[0 100e-6 200e-6]
	Output values:
	[0 1 0]
	OK Cancel Help Apply

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。

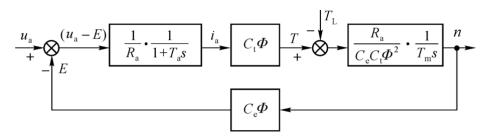


图 13 直流电机的精确模型

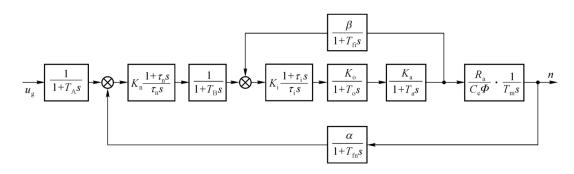
在此次示例中,Ra = 0.6Ω, La=0.012H; 因此可计算出 $T_a = \frac{L_a}{R_a}$ .

由于励磁绕组电压为 240V,磁励绕组电阻为 240 $\Omega$ ,因此,励磁电流 If = 1A. 由于反电势 $E=K_E\omega=L_{af}I_f\omega=C_e\emptyset n$ ,此例中励磁电枢互感 $L_{af}=1.8H$ ,由此可以计算出 $C_e\emptyset$ 

转矩系数 $C_t$ Ø= $K_E = K_T = L_{af}I_f$ ,由此可以计算出 $C_t$ Ø.  $T_m = JR_a/(C_tC_e$ Ø<sup>2</sup>),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

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

 $\frac{\beta}{1+T_{fi}s}$ 为电流采样回路的传递函数, $\beta$ 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 $T_{fi}=200us$ 

 $\frac{\alpha}{1+T_{fn}s}$ 为速度采样回路的传递函数, $\alpha$ 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:

$$\tau_i = T_a \tag{2.1}$$

$$K_i = \frac{T_a}{2T_{\sum i}K_aK_0\beta} \tag{2.2}$$

其中

$$T_{\sum i} = T_{fi} + T_0 \tag{2.3}$$

这样设计后的电流环可等效为(2.4)所示的一个惯性环节

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

其中

$$T_{ei} = 2T_{\sum i} \tag{2.5}$$

这样, Simulink 模型当中的电流环 PI 参数可表达为

$$K_{n}\_cur = K_i (2.6)$$

$$K_{i}\_cur = K_{i}/\tau_{i} \tag{2.7}$$

其中 $K_i$ ,  $\tau_i$ 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

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

其中

$$T_{\Sigma n} = T_{ei} + T_{fn} \tag{2.9}$$

 $T_{ei}$ 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

$$\tau_n = 4T_{\sum n} \tag{2.10}$$

速度环的放大系数应为

$$K_n = \frac{T_m}{2T_{\Sigma n}} \cdot \frac{\beta}{\alpha} \cdot \frac{C_e \emptyset}{R_a} \tag{2.11}$$

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传递函数为 $1/(1+4T_{\Sigma n}s)$ ,因此

$$\frac{1}{1+T_A s} \left(1 + T_{fn} s\right) \approx \frac{1}{1+4T_{\sum n} s} \tag{2.12}$$

因此

$$T_A \approx 4T_{\sum n} + T_{fn} \tag{2.13}$$

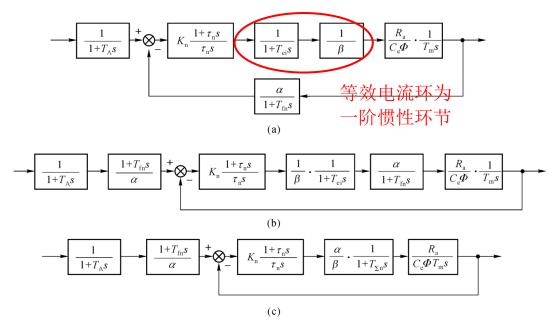


图 15 直流电机双闭环调速系统速度环框图

#### 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 Matalb 上当中新建一个后 辍名为 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: $K_{p\_}spd$ ,  $K_{i\_}spd$ ,  $K_{p\_}cur$ ,  $K_{i\_}spd$ , TA, TB。同时这 些参数可以在 Matalb 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。

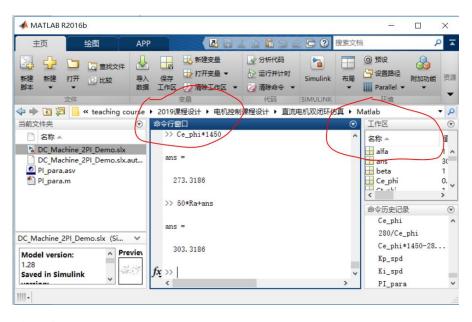


图 16 PI 参数计算

```
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,请同学们自已编写。

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 所示的对话弹,配置仿真参数如图 18 所示。

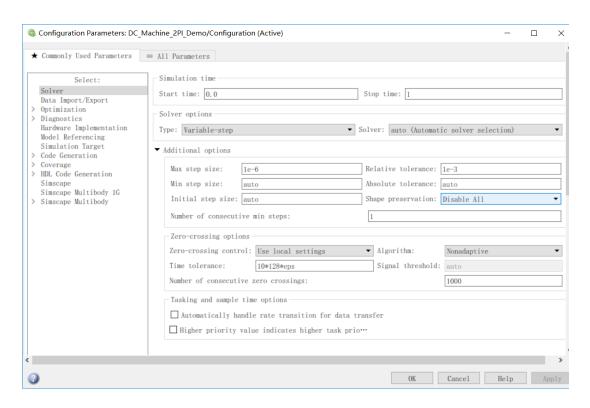


图 18 模型配置参数

### 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。

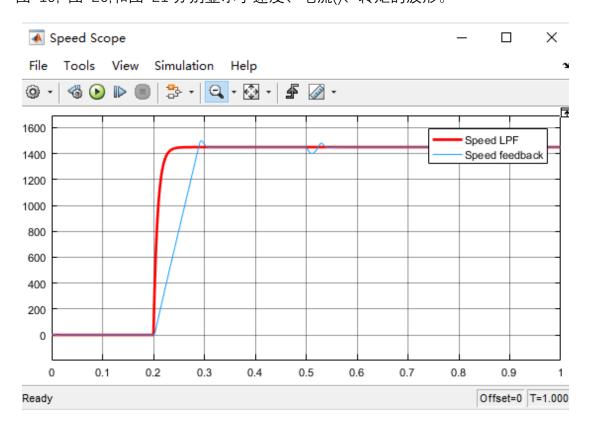


图 19 速度指令和反馈

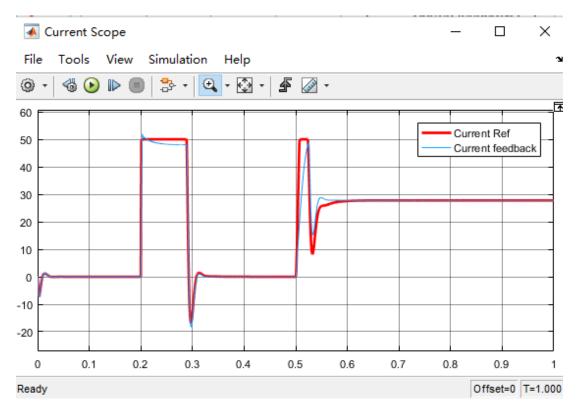


图 20 电流指令和反馈

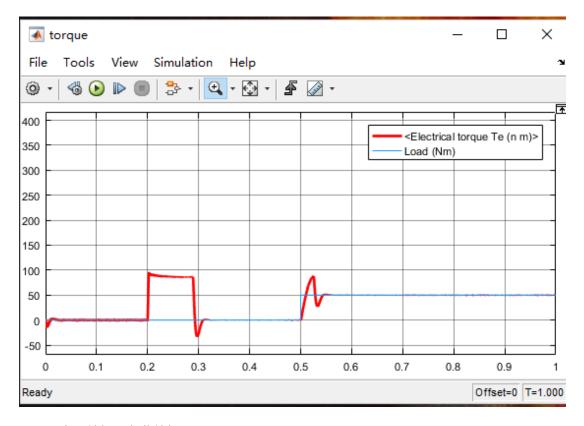


图 21 电磁转矩和负载转矩

# 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