

# 实验二 伺服电机控制系统仿真

## 一、实验目的

1. 初步掌握在 MATLAB 环境下，用 Simulink 建立系统模型
2. 培养学生对系统线性化模型进行仿真的能力。

## 二、实验原理及方法

Simulink 是 MATLAB 里的一个实现动态系统建模、仿真与分析的仿真集成环境软件工具包(Dynamic System Simulation)，是控制系统计算与仿真最先进的高效工具。主要的功能是实现动态系统建模、仿真与分析，从而可以在实际系统制作出来之前，预先对系统进行仿真与分析，并可以对系统做适当的实时修正或者按照仿真的最佳效果来调试及整定控制系统的参数，以提高系统的性能，减少系统设计过程中反复修改的时间，实现高效率地开发系统的目标。

Simulink 过利用模块组合的方法可以方便用户快速、准确地创建动态系统的计算机模型。它可以用来模拟线性与非线性系统，连续与非连续系统，或者这些混合的系统，是强大的系统仿真工具。

Simulink 的每一个模块实际上都是一个系统，一个典型的 Simulink 模块包括输入、状态和输出三个部分：

- 输入模块：即信号源模块，包括常数信号源、函数信号发生器和用户自定义信号；

- 状态模块：即被模拟的系统模块，它是 Simulink 的中心模块，是系统建模的核心和主要部分；Simulink 的状态模块可以是连续的、离散的，或者是它们二者的结合。在 MATLAB 中，用函数 `tf()` 来建立控制系统的传递函数模型，或者将零极点模型或或者状态空间模型转换为传递函数模型。函数命令的调用格式为：

```
sys=tf (mun, den)
```

```
sys=tf (mun, den, ts)
```

`sys=tf (mun, den)` 函数返回的变量 `sys` 为连续系统的传递函数模型。函数输入参量 `mun` 与 `den` 分别为系统的分子与分母多项式系数向量。

`sys=tf (mun, den, ts)` 函数返回的变量 `sys` 为离散系统的传递函数模型。函数输入参量 `mun` 与 `den` 的含义同上，`ts` 为采样周期，当 `ts=-1` 或者 `ts=0` 时，则系统的采样周期未定义。

- 输出模块：即信号显示模块，它能够以图形方式、文件格式进行显示，也可以在 MATLAB 的工作空间显示，输出模块主要集中在 Sinks 库。

在 Simulink 中，模块都是用矢量来表示这三个部分的，如图 2-1 所示。

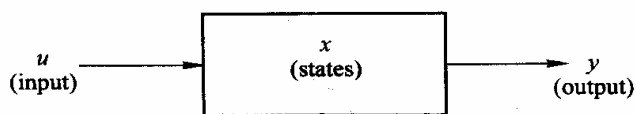


图 2-1 基本模型

在三个部分中，状态模块是最重要的，它决定了系统的输出，而它的当前值又是前一个时间模块状态和输入的函数。现有的状态模块必须保存前面的状态值，并计算当前的状态值。

Simulink 仿真分为两个阶段：初始化和模型执行。

### 三、实验仪器及材料

1. 计算机一台；
2. MATLAB 平台；
3. 打印机一台。

### 四、实验步骤

在 Simulink 中可以建立 3 种系统模型，即连续系统、离散系统和混合系统。利用 Simulink 仿真首先要确定现实系统对应的模型，只有建立模型以后才可以确定运用 Simulink 的那部分模块建立模型。

连续系统使用微分方程描述，离散系统使用差分方程描述，离散—混合系统采用差分—微分联立方程描述。

连续系统通常都是用微分方程描述的系统，而现实世界中的多数实际系统也都是连续变化的，根据现实世界建立连续的模型，通常使用 Continuous 模块库、Math operation 模块库和 Nonlinear 模块库中的模块。

离散系统通常都是用差分方程描述的系统，而实验中，都是采用离散采样。利用 Simulink 模型建模时，通常使用 Discrete 模块库、Math operation 模块库和 Sink 模块库和 Source 模块库中的模块。

1 下面以一个典型线性反馈控制系统为例说明实验的步骤。

例：一个典型线性反馈控制系统结构如图 2-2 所示，图中  $R(s)$  为输入函数， $y(s)$  为输出， $G_c(s)$  为控制器模型， $G(s)$  为对象模型， $H(s)$  为反馈模型。各个模块分别为：

$$G_c(s) = \frac{4}{s^3 + 2s^2 + 3s + 4}, \quad G(s) = \frac{s - 3}{s + 3}, \quad H(s) = \frac{1}{0.01s + 1}$$

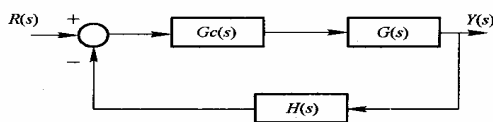


图 2-2 线性反馈控制系统结构

用 Simulink 仿真软件求出开环和闭环系统的阶跃响应曲线。

Simulink 软件仿真步骤如下：

(1) 开机，进入 MATLAB 窗口；

选择 “” 选项按钮，进入 simulink 浏览器即模块库。

(2)在 simulink 窗口，新建一个模型窗口。

(3)在模块库浏览器窗口中双击“Control System Toolbox”图标，即打开控制系统工具箱，并将其中的 LTI 模型拖动到新建的模型窗口中，共需要 3 个(可再拖动两次，也可以复制两个)，重新命名后分别作为  $G_c(s)$ 、 $G(s)$ 和  $H(s)$ 的函数模块。由于  $H(s)$ 是反向模块(即表示负反馈)，所以需选中该模块后，按快捷键 (<Ctrl>) +<R>两次以改变其传输方向。

(4)双击其中的  $G_c(s)$ 模块，将出现设置模块参数对话框，将“LTI system variable”一栏中原来系统默认的传递函数修改为  $tf(4,[1,2,3,4])$ ，同样把  $G(s)$ 的传递函数修改为  $tf([1,-3],[1,3])$ ， $H(s)$ 的传递函数修改为  $tf(1,[0.01,1])$ 。

(5)在模块库浏览器窗口中，双击 Sources 模块(信号源)，将其中的 Step 模块(阶跃信号)拖动到模型窗口；双击 Math 模块(数学运算)，将其中的 Sum 模块(求和运算)拖动到模型窗口；双击 Sinks 模块(输出)，将其中的 Scope 模块(示波器)拖动到模型窗口。

并按图 2—3 连接好系统。

(6)选择模型窗口“Simulation”菜单中的“Star”命令，即可得到与图 2-4 完全一致的闭环系统阶跃响应曲线。

断开图 2-3 中  $H(s)$  模块左侧或右侧的连线，使其成为开环系统(如图 2-5 所示)。

(7)再进行仿真，即可得到如图 2-6 的开环系统阶跃响应曲线。

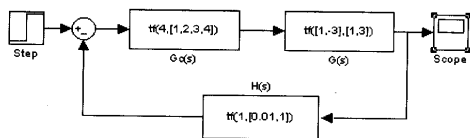


图 2-3 闭环线性反馈控制系统仿真模型

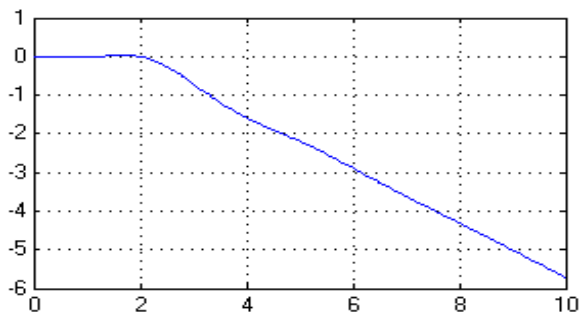
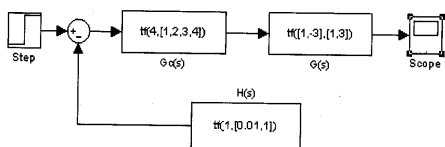


图 2-4 闭环系统的阶跃响应曲线



2-5 开环线性反馈控制系统仿真模型

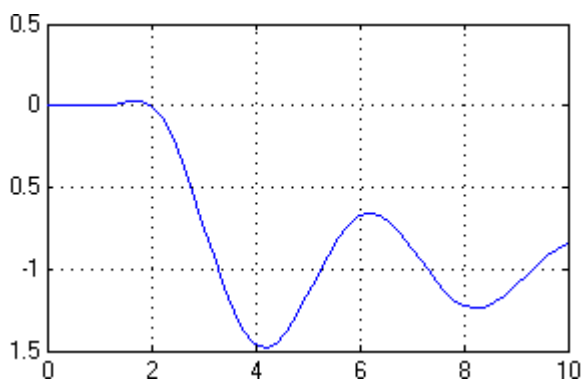


图 2-6 开环系统的阶跃响应曲线

从这个例子可以看出，开环系统是稳定的，而闭环系统是不稳定的。因此，并不是所有的控制器和闭环结构都能够改善原系统的性能，事实上，如果控制器设计不当，则将使闭环系统的特性恶化。

## 2、完成下面直流伺服电机电枢控制系统仿真实验。

### (1) 建立数学模型

直流伺服电机一般包括 3 个组成部分：

- 磁极

电机的定子部分，有磁铁 N-S 极组成，可以是永久的磁铁(此类称为永磁式直流伺服电机)，也可以是由绕在磁极上的激磁线圈构成。

- 电枢

电机的转子部分，为表面上绕有线圈的圆柱形铁芯，线圈与换向片焊接在一起。

- 电刷

电机定子的一部分，当电枢转动时，电刷交替地与换向片接触在一起。

本节所介绍的直流伺服电机，其中激磁电流保持常数，而由电枢电流进行控制。这种利用电枢电流对直流伺服电机的输出速度的控制称为直流伺服电机的电枢控制。如图 2-7 所示。

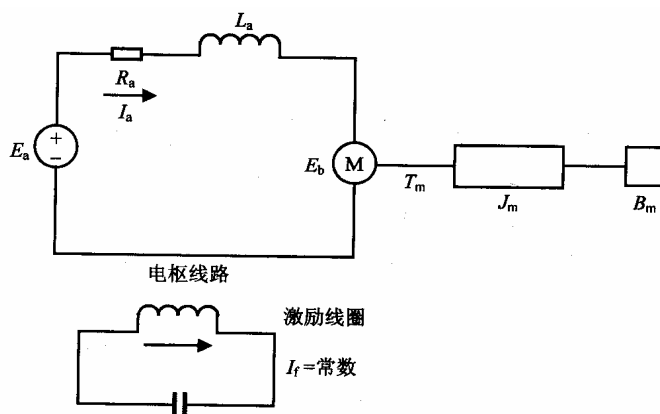


图 2-7 电路原理图

其中，

- $E_a$  定义为电枢电压(伏特)
- $I_a$  定义为电枢电流(安培)
- $R_a$  定义为电枢电阻(欧姆)
- $L_a$  定义为电枢电感(亨利)
- $E_b$  定义为反电动势(伏特)
- $I_f$  定义为激磁电流(安培)
- $\theta_m$  定义为转轴角位移(弧度)
- $T_m$  定义为电机产生的转矩(牛顿·米)

- $B_m$  定义为电机和反射到电机轴上的负载的等效粘滞系数(牛顿·米 / 弧度·秒<sup>-1</sup>)
  - $J_m$  定义为电机和反射到电机轴上的负载的等效转动惯量(千克·米<sup>2</sup>)
- 电机所产生的转矩  $T_m$ ，正比于电枢电流  $I_a$  与气隙磁通  $\Phi$  的乘积，即：

$$T_m = K_1^n I_a \Phi \quad (2-1)$$

而气隙磁通  $\Phi$  又正比于激磁电流  $I_f$ ，故式(11. 4)改写为：

$$T_m = K_1^n I_a \Phi = K I_a \quad (2-2)$$

电流  $I_f$  为常数， $K_1^n I_a \Phi$  合并为一个常数  $K$ ，称为电机电矩常数。电枢电流  $I_a$  的正负值即代表电机的正反转。

当电转动时，在电枢中感应出与电机转轴角速度成正比的电压，称为反电动势，即：

$$E_b = K_b \omega_m = K_b \frac{d\theta_m}{dt} \quad (2-3)$$

其中， $K_b$  称为反电动势常数。

电机的速度是由电枢电压  $E_a$  控制，应用基尔霍夫电压定律导出电枢电流的微分方程式为：

$$L_a \frac{dI_a}{dt} + R_a I_a + E_b = E_a \quad (2-4)$$

电枢电流  $I_a$  产生的力矩，用来克服系统所含负载的惯性和摩擦，可得

$$J_m \frac{d^2\theta_m}{dt^2} + B_m \frac{d\theta_m}{dt} = T = K I_a \quad (2-5)$$

(2) 根据式(2-3)、式(2-4)、式(2-5)，在 Smulink 建立模型图（见图 2-8）。

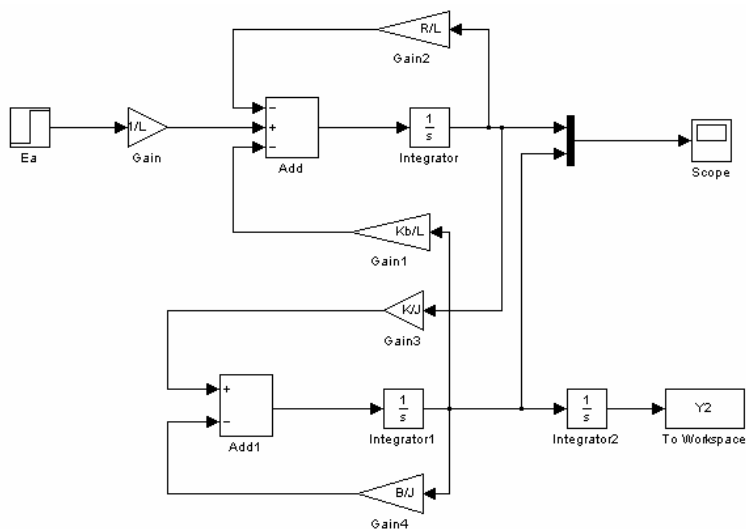


图 2-8 模型图

令  $R_a=1$ 、 $L_a=0.2$ 、 $K_b=1$ 、 $B_m=0.1$ 、 $J_m=5$ 、 $K=0.5$ ，在时间 1 秒加入 2 伏特驱动电压由 Scope 模块输出电枢电流波形和电机转速波形。

(3) 假设所有变量的初始值都为零，对式(2-3)、式(2-4)、式(2-5)分别取拉普拉斯变换，可得下列方程式：

$$E_b(s) = K_b s \theta(s)$$

$$(L_a s + R_a) I_a(s) + E_b(s) = E_a(s) \quad (2-6)$$

$$(J_s^2 + Bs)\theta(s) = T(s) = K I_a(s)$$

设电枢电压  $E_a(s)$  为输入变量，电机转轴角位置  $\theta(s)$  为输出变量。重组式(2-6)可得电机系统的框图，反电动势可以看作是一个与电机速度成比例的反馈信号，它增加了系统的有效阻尼(Damping)。上述直流伺服电机的传递函数为：

$$\frac{\theta(s)}{E_a(s)} = \frac{K}{s[JL_a s^2 + (L_a B + R_a J)s + R_a B + K K_b]} \quad (2-7)$$

依上述表示电机在 Simulink 中应用 Transfer Fcn 模块所建构的模型图如 2-9 所示。

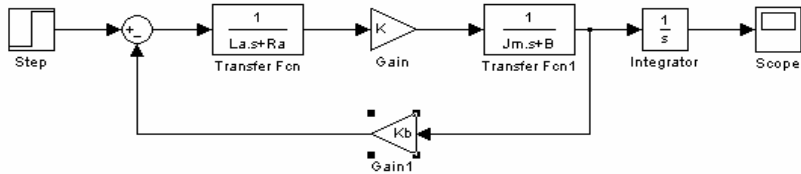



图 2-9 模型图

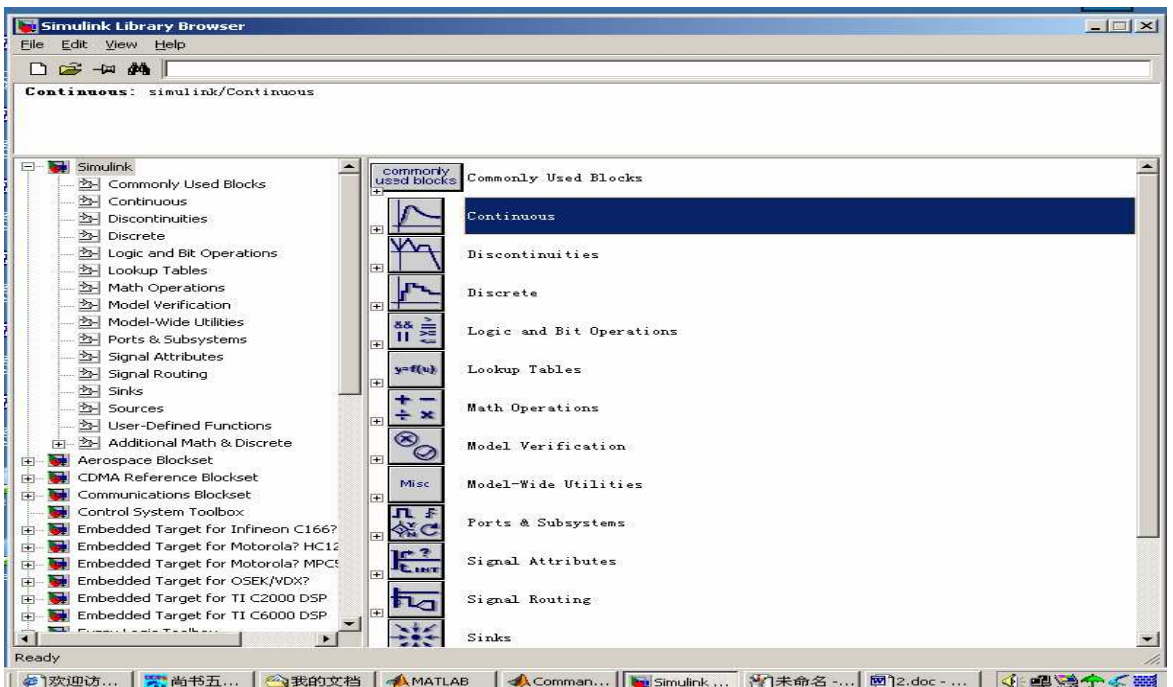
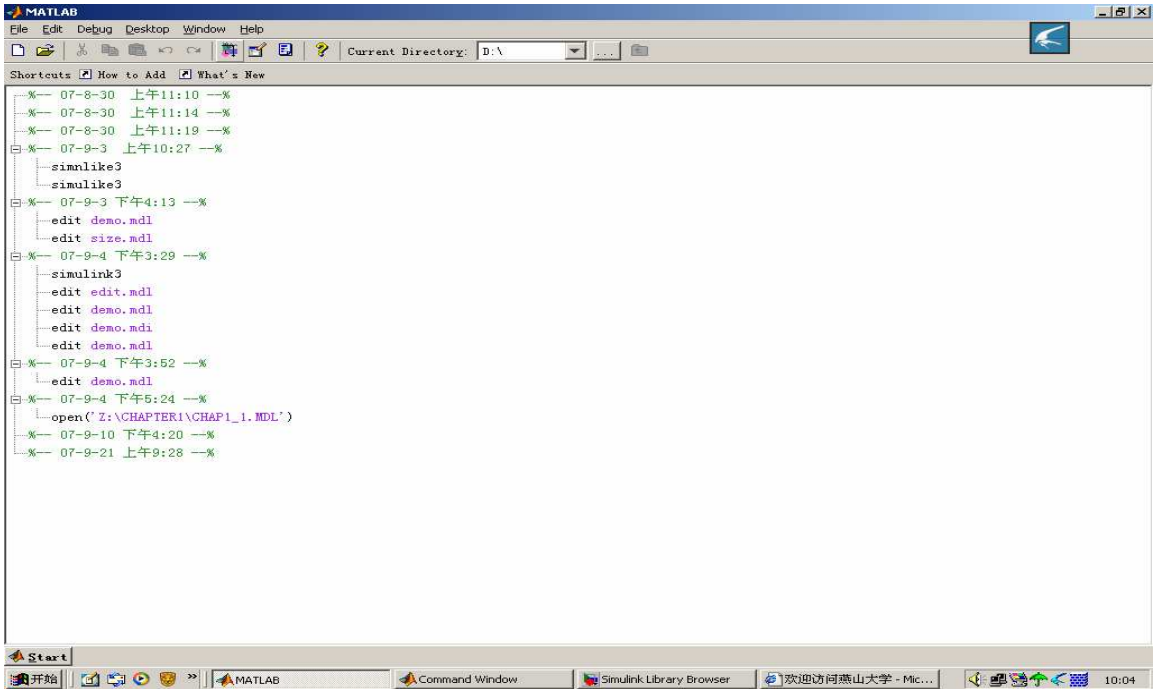
4、打印仿真结果曲线；

五、分析整理实验数据，写出实验报告。

## 附录:Simulink 操作

(1)开机, 进入 MATLAB 命令窗口;

在 MATLAB 的命令窗口里输入“Simulink”命令然后按回车键 或者选择“”选项按钮, 进入 simulink 浏览器即模块库(图 F-1), 看到两层目录结构, 以及右侧的相对应的 13 个模块组的图标。



常用的模型库包括：

常用模块组 Commonly Used Blocks;

连续模块组 Continuous

非连续模块组 Discontinuities;

离散模块组 Discrete; ...

逻辑与二进制操作模块组 Logic and Bit Operations;

寻表操作组 Lookup Tables;

数学操作模块组 Math Operations;

模型确认操作模块组 Model Verification;

Model-Wide Utilities;

端口与子系统模块组 Ports & Subsystems;

信号路由模块组 Signal Routing;

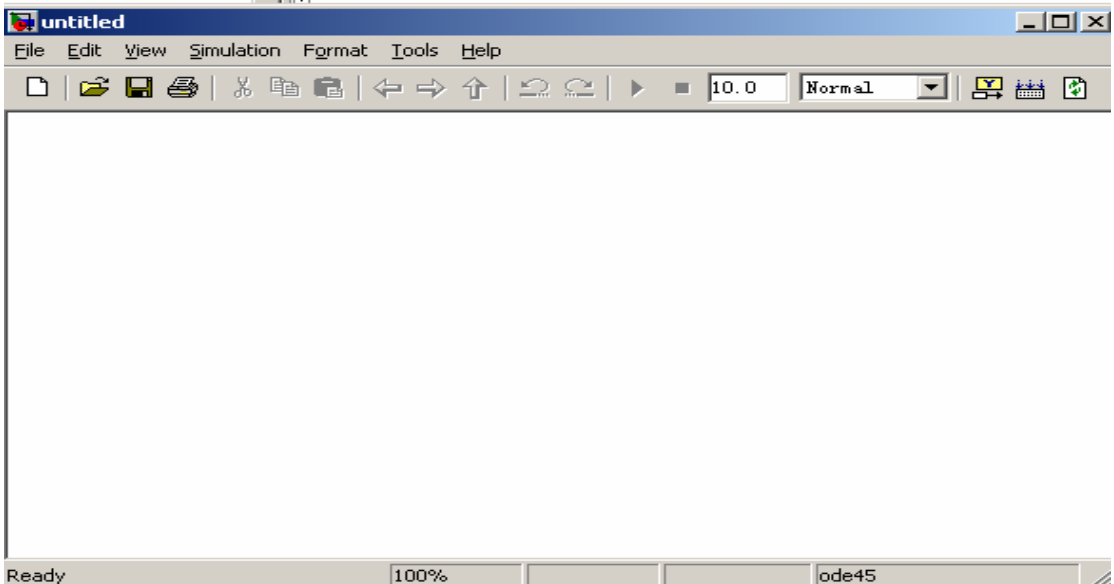
接受器模块组 Sinks;

信号源模块组 Sources

自定义函数模块组 User-Defined Functions;

附加操作组 Additional Math & Discrete

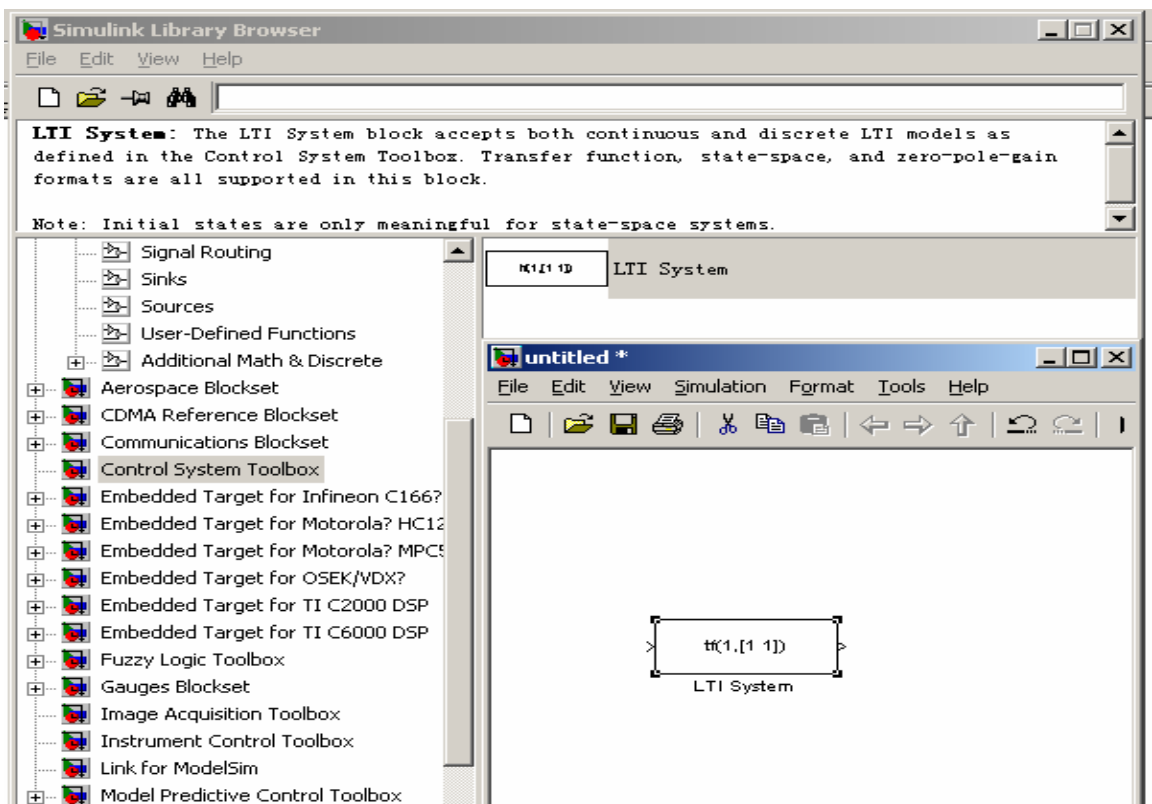
(2) 在 simulink 窗口，新建一个模型窗口。



### (3) 建立模型

在模块库浏览器窗口中双击所需的工具箱图标如“Control System Toolbox”图标，将所需的模型拖动到新建的模型窗口中，并重新命名新的函数模块。改变其传输方向可以通过快捷键 (<Ctrl>) + <R> 实现。





#### (4)修改模块参数

双击选中的模块，将出现设置模块参数对话框，可以将“LTI system variable”一栏中原来系统默认的传递函数修改为所需的如  $tf(4,[1,2,3,4])$ 。

(5)在模块库浏览器窗口中，双击 Sources 模块(信号源)，将其中的 Step 模块(阶跃信号)拖动到模型窗口；双击 Math 模块(数学运算)，将其中的 Sum 模块(求和运算)拖动到模型窗口；双击 Sinks 模块(输出)，将其中的 Scope 模块(示波器)拖动到模型窗口。

(6) 并按设计好的模型图连接好。选择模型窗口“Simulation”菜单中的“Star”命令，进行仿真。

#### Source 库信源

信号源模块组包括常用的信号发生模块，信号源模块组包括

- 输入端口模块(In1)：用来反映整个系统的输入端，在模型线性化与命令行仿真时，这个设置非常有用，可作为信号输入。
- 接地模块(Ground)：一般用于表示零输入模块，如果一个模块的输入端没有接其他任何模块，仿真时往往会出现警告，这样可以将该模块接入，功能类似于终结模块(Terminator)。
- 从文件中输入数据模块(From File)、从工作区输入数据模块(From Workshop)：从外部输入数据，前者从 .mat 文件中输入，后者从 MATLAB 工作区输入数据。

- 常数模块(Constant): 产生不变常数。
- 信号发生器模块(Signal Generator): 可产生正弦波、方波、锯齿波等信号, 并可以设置幅度和频率。
  - 脉冲发生器模块(Pulse Generator): 产生脉冲信号, 可以设置幅度、周期、宽度等信息。
  - 信号构造模块(Signal Builder): 在模块窗口双击此模块, 在弹出的对话框中绘制信号, 即可构造出所需信号。
    - 斜坡信号模块(Ramp): 产生斜坡信号。
    - 正弦波信号模块(Sine wave): 产生正弦波信号。
    - 阶跃信号模块(Step): 产生阶跃信号。
    - 重复信号模块(Repeating Sequence): 可构造重复的输入信号。
    - 变频信号模块(Random Number): 产生正态分布随机信号。:’
    - 均匀分布随机信号模块(Uniform Random Number): 产生均匀分布的随机信号。
    - 限带白噪声(Band-Limited White Noise): 一般用于连续或混合系统的白噪声信号输入。.
  - 时钟模块(Clock): 用于显示和提供仿真时间信号。
  - 数字时钟模块(Digital Clock): 用于显示在制定的样本间隔内的时间, 其他情况保持时间不变。
    - 重复离散信号模块(Repeating Sequence Stair): 构造可重复输入的离散信号, 样本间信号采用零阶保持。
    - 重复离散信号模块(Repeating Sequence Interpolated): 构造可重复输入的离散信号, 样本间信号采用线性插值。
    - 累加信号模块(Counter Free-Running): 信号不断累加, 当累加的信号大于  $2^N-1$  时, 信号会自动回零, 其中  $N$  为参数设置对话框 Number of Bits 所设置。

#### Sink 库信源

信号接受模块组包括常用的离散模块

- 输出到动作空间模块(out1): 用来反映整个系统的输出端, 这样的设置在模型线性化与命令行仿真时是必须的, 在系统直接仿真时, 这样的输出将自动在 MATLAB 工作空间中生成变量。
- 终结模块(Terminate): 用来终结输出信号, 在仿真的时候可以避免由于某些模块的输出端无连接信号而导致的警告。
  - 输出数据到文件模块(To File): 将模块输入的数据输出到.mat 文件当中。
  - 输出数据到工作区模块(To Workspace): 将模块输入的数据输出到工作区当中。
    - 示波器模块(Scope): 将输入信号输入到示波器中显示出来。
    - X-Y 示波器模块(XY Graph): 将两路信号分别作为示波器的两个坐标轴, 以显示信

号的相轨迹。

- 终止仿真模块(Stop Simulation): 如果输入为零, 则强制终止仿真。

### 数学运算模块

模 块	功 能	模 块	功 能
Sum	求和	Rounding Function	取整函数
Product	积或商	Combinatorial Logic	逻辑真值表
Dot Product	点积	Logic Operator	逻辑算子
Gain	常数增益	Bitwise Logical Operator	位逻辑算子
Slider Gain	可变增益	Relational Operator	关系算子
Matrix Gain	矩阵增益	Complex to Magnitude-Angle	复数的模和辐角
MahF Function	数学运算函数	Magnitude-Angle to Complex	模和辐角合成函数
Trigonometric function	三角函数	Complex to Real-Imag	复数的实部和虚部
MinMax	求最大值	Real-Imag to Complex	实部和虚部合成复数
Abs	求绝对值	Algebraic Constraint	强迫输入信号为零