



武汉大学

Wuhan University

第三章 Simulink仿真技术



武汉大学

Wuhan University

- 在工程实际中，电子系统的结构往往很复杂，如果不借助专用的系统建模软件，则很难准确地把一个电子系统的复杂模型输入计算机，对其进行进一步的分析与仿真。
- 1990年，Math Works软件公司为MATLAB提供了新的控制系统模型图输入与仿真工具，并命名为SIMULAB，但因其名字与当时比较著名的软件SIMULA类似，所以1992年正式将该软件更名为SIMULINK。
- SIMULINK的出现，给电子系统分析与设计带来了福音。顾名思义，该软件的名称表明了该系统的两个主要功能：Simu（仿真）和Link（连接），即该软件可以利用鼠标在模型窗口上绘制出所需要的电子系统模型，然后利用SIMULINK提供的功能来对系统进行仿真和分析。



武汉大学

Wuhan University

§3.1 Simulink简介

3.1.1 什么是Simulink

- SIMULINK是MATLAB软件的扩展，它是实现动态系统建模和仿真的一个软件包，它与MATLAB语言的主要区别在于，其与用户交互接口是基于Windows的模型化图形输入，其结果是使得用户可以把更多的精力投入到系统模型的构建，而非语言的编程上。
- 所谓模型化图形输入是指SIMULINK提供了一些按功能分类的基本的系统模块，用户只需要知道这些模块的输入输出及模块的功能，而不必考察模块内部是如何实现的，通过对这些基本模块的调用，再将它们连接起来就可以构成所需要的系统模型（以.mdl/.slx文件进行存取），进而进行仿真与分析。




武汉大学

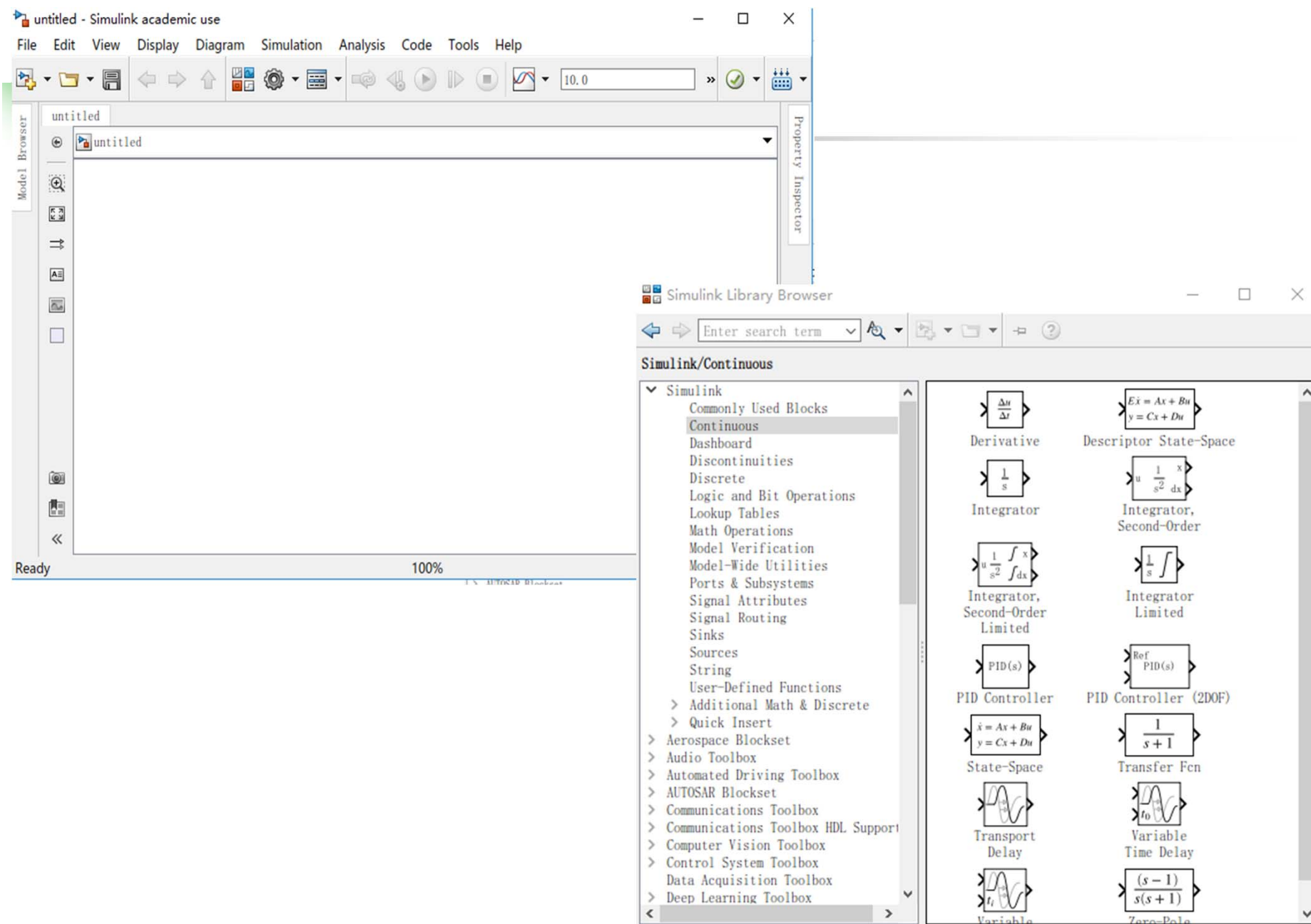
Wuhan University

3.1.2 Simulink的启动

1、在MATLAB命令窗口中输入simulink：进入Simulink Start Page的窗口。

也可通过MATLAB主窗口的快捷按钮来打开Simulink Start Page窗口。

在Simulink Start Page中点击“Blank Model”可以打开空白模板进行建模，然后点击图标  进入Simulink Library Browser窗口，在这个窗口中列出了按功能分类的各种模块的名称，可以选择目标模块进行建模。



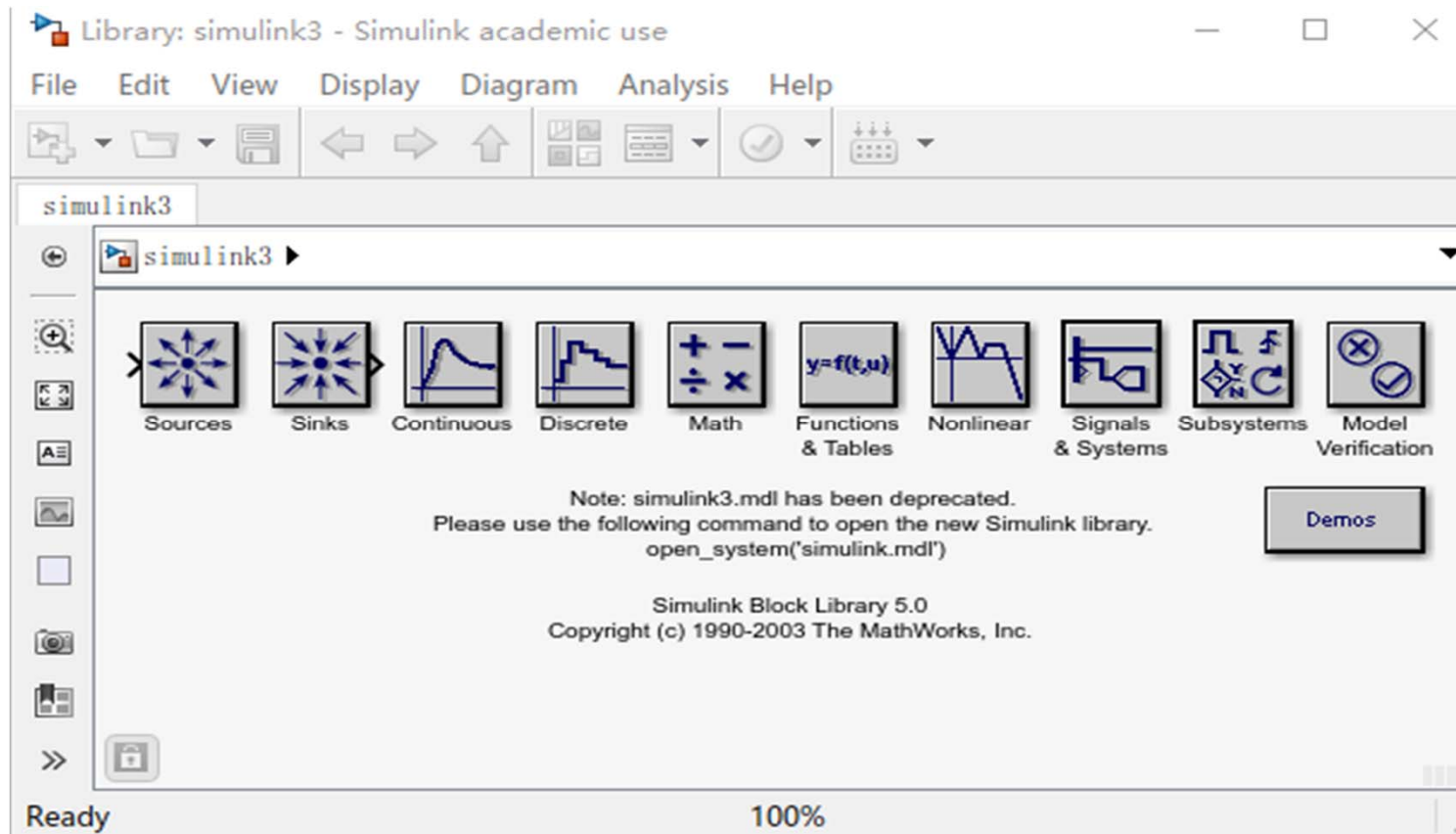


武汉大学

Wuhan University

2、在MATLAB命令窗口中输入simulink3：

出现一个用图标形式显示的Library :simulink3的Simulink模块库窗口。





武汉大学

Wuhan University

3.1.3 Simulink仿真简例

- 典型的Simulink模型由信源、系统和信宿3部分组成。



- 信源提供系统的输入信号，系统是仿真对象的数学抽象，信宿是接收信号的部分。通常信源和信宿都是为了辅助完成对系统的测试和仿真。



武汉大学

Wuhan University

- 12V-5V的DC-DC转换电路，信源为12V的DC电源，系统为转换电路（如7805），信宿可为万用表。
- 全桥整流滤波电路，信源是AC电源，系统为整流滤波电路，信宿可为万用电表。
- 信宿是为了表示系统对信源的作用，并不一定必须存在于电路真实应用中，但是可能存在于电路设计和调试中。



武汉大学

Wuhan University

Simulink仿真步骤

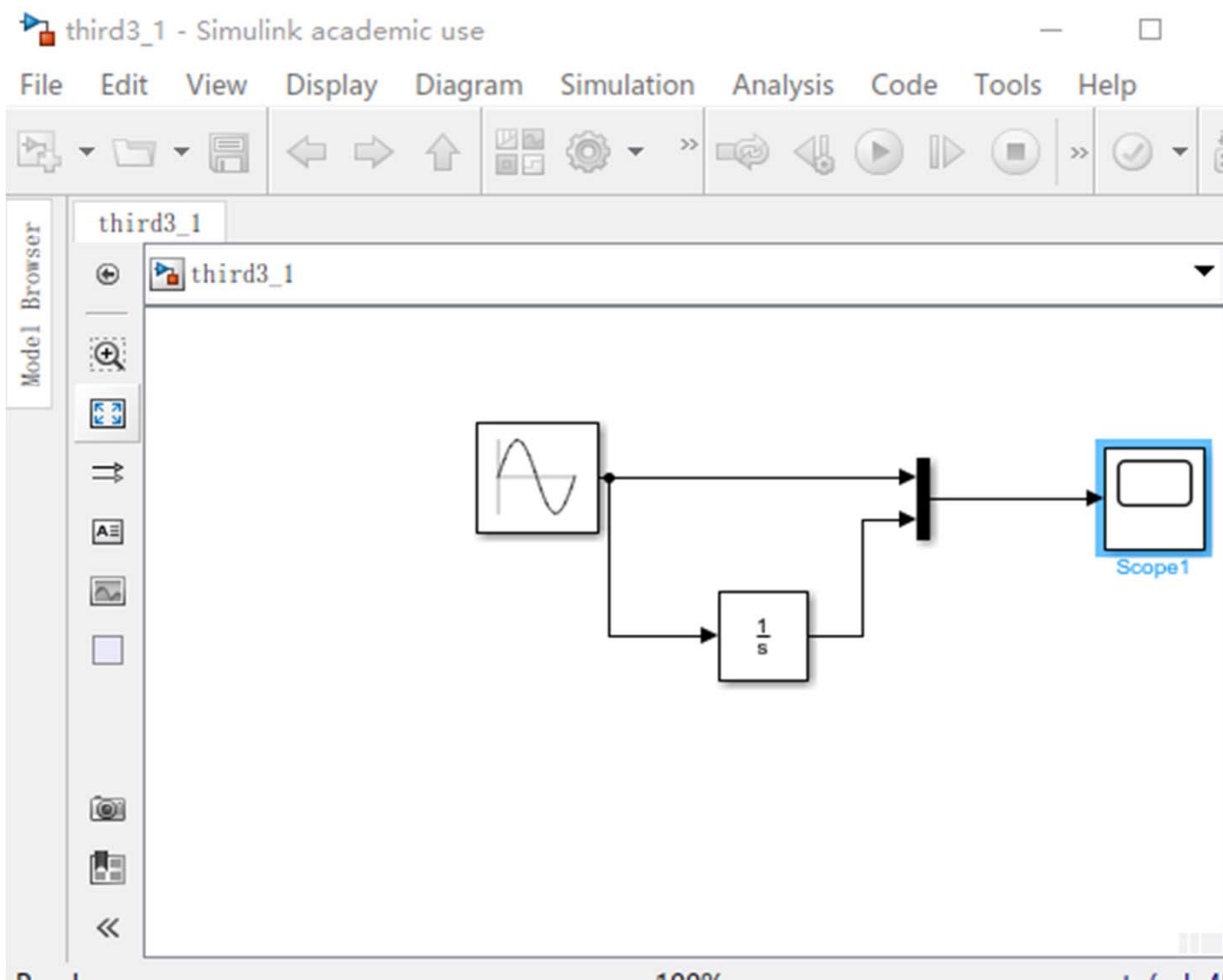
- 1、在对应模型库中选择组成信源、系统、信宿的相应模块；
- 2、将所选模块连接成所需电路；
- 3、运行，仿真。



武汉大学

Wuhan University

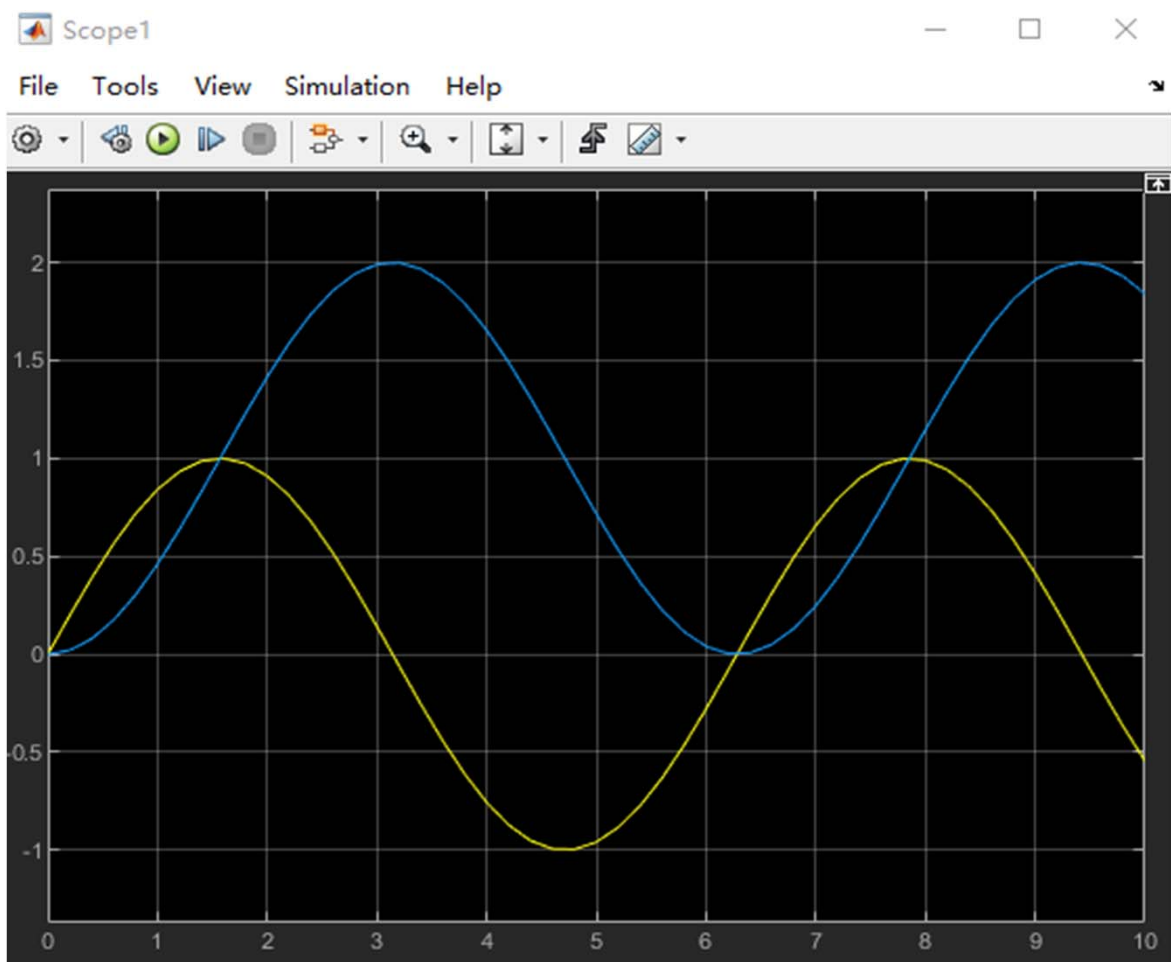
Ex3_1 一个积分电路的仿真简例





武汉大学

Wuhan University





武汉大学

Wuhan University

3.1.4 Simulink基本操作

模型文件的操作

- Simulink所建立的模型文件后缀名为.mdl。

模块的操作

- 功能模块的基本操作，包括模块的移动、复制、删除、转向、改变大小、模块命名、颜色设定、参数设定、属性设定、模块输入输出信号等。
- 模块库中的模块可以直接用鼠标进行拖曳（选中模块，按住鼠标左键不放）而放到模型窗口中进行处理。
- 在模型窗口中，选中模块，则其4角会出现黑色标记。此时可以对模块进行以下的基本操作。



武汉大学

Wuhan University

- **移动**：选中模块，按住鼠标左键将其拖曳到所需的位置即可。若要脱离线而移动，可按住shift键，再进行拖曳。
- **复制**：选中模块，然后按住鼠标右键进行拖曳即可复制同样的一个功能模块。
- **删除**：选中模块，按Delete键即可。若要删除多个模块，可以同时按住Shift键，再用鼠标选中多个模块，按Delete键即可。也可以用鼠标选取某区域，再按Delete键就可以把该区域中的所有模块和线等全部删除。
- **转向**：为了能够顺序连接功能模块的输入和输出端，功能模块有时需要转向。在菜单Format中选择Flip Block旋转180度，选择Rotate Block顺时针旋转90度。或者直接按Ctrl+F键执行Flip Block，按Ctrl+R键执行Rotate Block。



- **改变大小**：选中模块，对模块出现的4个黑色标记进行拖曳即可。
- **模块命名**：先用鼠标在需要更改的名称上单击一下，然后直接更改即可。名称在功能模块上的位置也可以变换180度，可以用Format菜单中的Flip Name来实现，也可以直接通过鼠标进行拖曳。Hide Name可以隐藏模块名称。
- **颜色设定**：Format菜单中的Foreground Color可以改变模块的前景颜色，Background Color可以改变模块的背景颜色；而模型窗口的颜色可以通过Screen Color来改变。
- **参数设定**：用鼠标双击模块，就可以进入模块的参数设定窗口，从而对模块进行参数设定。参数设定窗口包含了该模块的基本功能帮助，为获得更详尽的帮助，可以点击其上的help按钮。通过对模块的参数设定，就可以获得需要的功能模块。



- **属性设定**：选中模块，打开Edit菜单的Block Properties可以对模块进行属性设定。包括Description属性、Priority优先级属性、Tag属性、Open function属性、Attributes format string属性。其中Open function属性是一个很有用的属性，通过它指定一个函数名，则当该模块被双击之后，Simulink就会调用该函数执行，这种函数在MATLAB中称为回调函数。
- **模块的输入输出信号**：模块处理的信号包括标量信号和向量信号；标量信号是一种单一信号，而向量信号为一种复合信号，是多个信号的集合，它对应着系统中几条连线的合成。缺省情况下，大多数模块的输出都为标量信号，对于输入信号，模块都具有一种“智能”的识别功能，能自动进行匹配。某些模块通过对参数的设定，可以使模块输出向量信号。



武汉大学

Wuhan University

信号线的操作

SIMULINK模型的构建是通过用线将各种功能模块进行连接而构成的。用鼠标可以在功能模块的输入与输出端之间直接连线。所画的线可以改变粗细、设定标签，也可以把线折弯、分支。

- **改变粗细**：线所以有粗细是因为线引出的信号可以是标量信号或向量信号，当选中Format菜单下的Wide Vector Lines时，线的粗细会根据线所引出的信号是标量还是向量而改变，如果信号为标量则为细线，若为向量则为粗线。选中Vector Line Widths则可以显示出向量引出线的宽度，即向量信号由多少个单一信号合成。



武汉大学

Wuhan University

- **设定标签**：只要在线上双击鼠标，即可输入该线的说明标签。也可以通过选中线，然后打开Edit菜单下的Signal Properties进行设定，其中signal name属性的作用是标明信号的名称，设置这个名称反映在模型上的直接效果就是与该信号有关的端口相连的所有直线附近都会出现写有信号名称的标签。
- **线的折弯**：按住Shift键，再用鼠标在要折弯的线处单击一下，就会出现圆圈，表示折点，利用折点就可以改变线的形状。



武汉大学

Wuhan University

- **线的分支**：按住鼠标右键，在需要分支的地方拉出即可以。或者按住Ctrl键，并在要建立分支的地方用鼠标拉出即可。

模型的注释

- 模型编译框内任意的位置双击左键，将弹出编辑框，可添加注释。



武汉大学

Wuhan University

§3.2 Simulink常用模块介绍

3.2.1 Simulink模型库概述

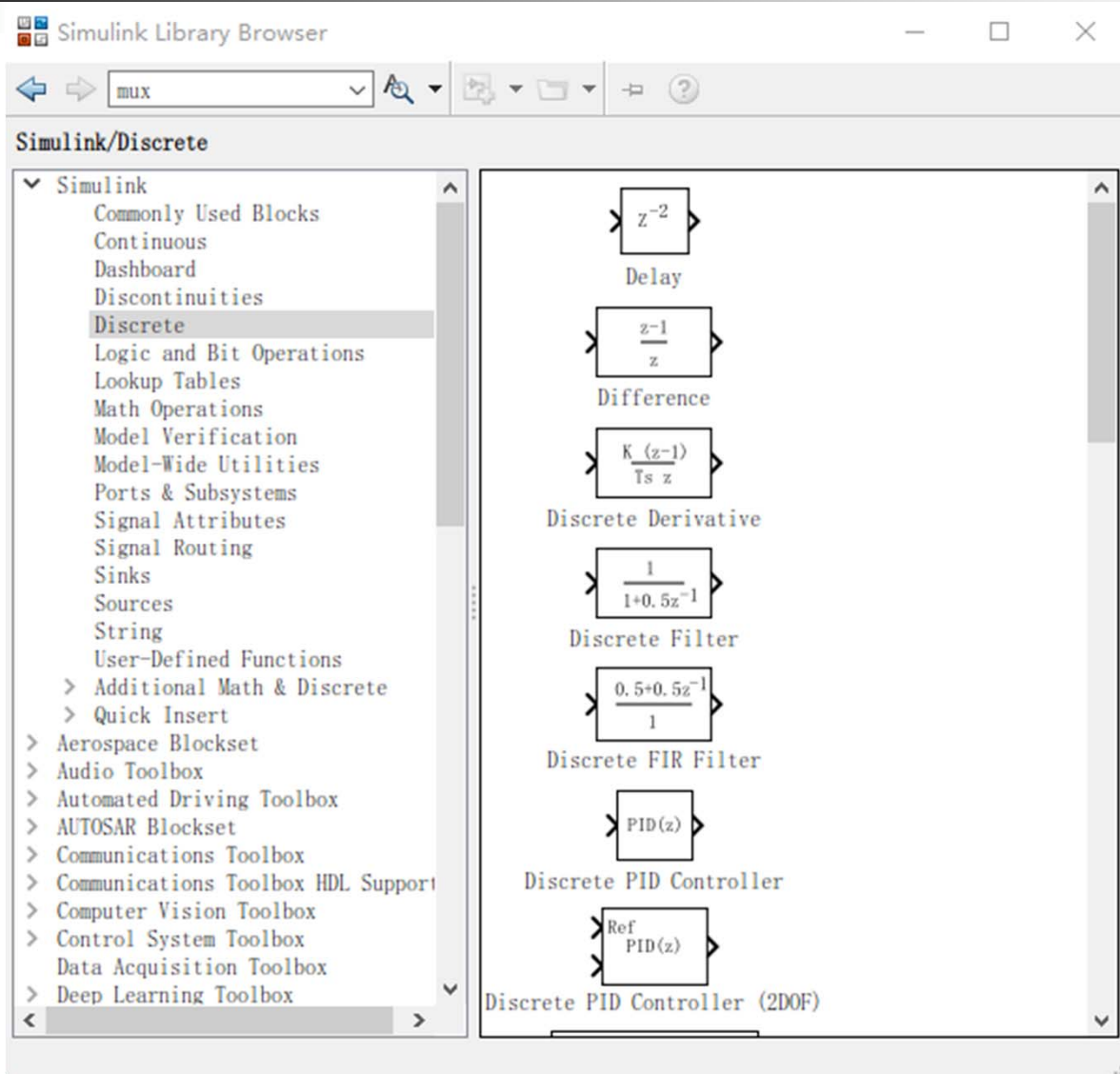
SIMILINK模块库按功能进行分类，包括以下8类子库：

- Continuous (连续模块)
- Discrete (离散模块)
- Logic and Bit Operations(逻辑和位操作模块)
- Lookup Table(查找表模块)
- Math Operations(数学模块)
- Signal Routing(信号线路模块)
- Sinks (接收器模块)
- Sources (输入源模块)
- User-Defined Functions (用户定义函数)



武汉大学

Wuhan University





武汉大学

Wuhan University

1、连续模块 (Continuous) continuous.mdl

- Integrator : 输入信号积分
- Derivative : 输入信号微分
- State-Space : 线性状态空间系统模型
- Transfer-Fcn : 线性传递函数模型
- Zero-Pole : 以零极点表示的传递函数模型
- Transport Delay : 输入信号延时一个固定时间再输出
- Variable Transport Delay : 输入信号延时一个可变时间再输出



武汉大学

Wuhan University

2、离散模块 (Discrete) discrete.mdl

- Discrete-time Integrator : 离散时间积分器
- Discrete Filter : IIR与FIR滤波器
- Discrete State-Space : 离散状态空间系统模型
- Discrete Transfer-Fcn : 离散传递函数模型
- Discrete Zero-Pole : 以零极点表示的离散传递函数模型
- First-Order Hold : 一阶采样和保持器
- Zero-Order Hold : 零阶采样和保持器
- Unit Delay : 一个采样周期的延时
- Memory:系统对输入信号进行一步采样保持, 在下一步输出



武汉大学

Wuhan University

3.逻辑和位操作模块 (Logic and Bit Operations)

- Bitwise Operator: 逐位操作
- Compare To Constant:和常量比较
- Compare To Zero:和零比较
- Logical Operator:逻辑操作符
- Relational Operator:关系操作符



武汉大学

Wuhan University

- **4.查找表模块 (Lookup Tables)**
- 1-D LookUp Table : 一维输入信号的查询表 (线性峰值匹配)
- 2-D LookUp Table : 二维输入信号的查询表 (线性峰值匹配)
- Sine : 正弦函数查询表



武汉大学

Wuhan University

- **5.数学模块 (Math Operations)**
- Abs : 取绝对值
- Add:加法
- Product : 乘运算
- Dot Product : 点乘运算
- Gain : 比例运算
- Math Function : 包括指数函数、对数函数、求平方、开根号等常用数学函数
- Trigonometric Function : 三角函数
- MinMax : 最值运算
- Complex to Real-Imag : 由复数输入转为实部和虚部输出



武汉大学

Wuhan University

- Sign : 符号函数
- Complex to Magnitude-Angle : 由复数输入转为幅值和相角输出
- Magnitude-Angle to Complex : 由幅值和相角输入合成复数输出
- Real-Imag to Complex : 由实部和虚部输入合成复数输出
- Sqrt: 平方根
- Divide: 除法
- Sum: 求和运算ping'fang'ge
- Subtract: 减法



武汉大学

Wuhan University

- **6.信号线路模块 (Signal Routing)**
- Mux : 将多个单一输入转化为一个复合输出。
- Demux : 将一个复合输入转化为多个单一输出。
- From: 信号来源
- Goto: 信号去向



武汉大学

Wuhan University

7、Sinks (接收器模块) sinks.mdl

- Scope : 示波器。
- Out1: 输出端口
- Display : 将信号值直接相似于模块窗口中。
- To Workspace : 将输出写入MATLAB的工作空间。
- To File(.mat) : 将输出写入数据文件。
- XY Graph : 显示二维图形



武汉大学

Wuhan University

8、Sources (输入源模块) sources.mdl

- Constant : 常数信号。
- Clock : 显示和提供仿真和时间。
- From Workspace : 来自MATLAB的工作空间。
- From File(.mat) : 来自数据文件。
- Pulse Generator : 脉冲发生器。
- Repeating Sequence : 重复信号。
- Signal Generator : 信号发生器, 可以产生正弦、方波、锯齿波及随意波。
- Sine Wave : 正弦波信号。
- Step : 阶跃波信号。



武汉大学

Wuhan University

9、User-Defined Functions (用户定义函数) function.mdl

- Fcn : 用自定义的函数 (表达式) 进行运算
- S-Function : 调用自编的S函数的程序进行运算
- MATLAB Function: 利用MATLAB的现有函数进行计算
- S-Function Builder: S函数创建
- S-Function Examples: S函数例子



武汉大学

Wuhan University

3.2.2 Sources模型库

Sources库内的模块主要用于给Simulink仿真模型提供输入信号，常用模块如下：

- Constant：常数信号。
- Clock：显示和提供仿真和时间。
- From Workspace：来自MATLAB的工作空间。
- From File(.mat)：来自数据文件。
- Pulse Generator：脉冲发生器。
- Repeating Sequence：重复信号。
- Signal Generator：信号发生器，可以产生正弦、方波、锯齿波及随意波。
- Sine Wave：正弦波信号。
- Step：阶跃波信号。



武汉大学

Wuhan University

Sine Wave模块

提供正弦波信号

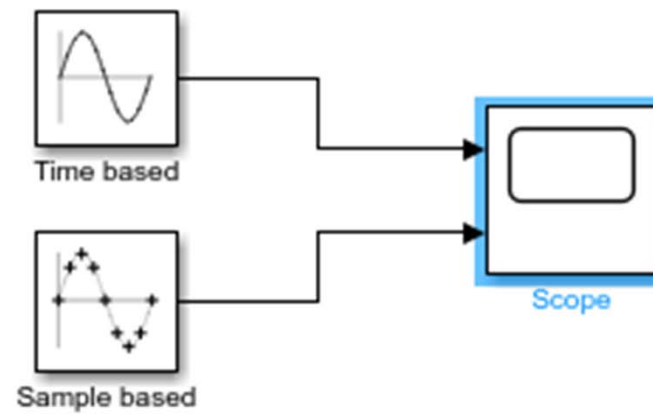
- Time based方式：设定幅度（Amplitude）、偏移（Bias）、频率（Frequency，以弧度为单位）、初相（Phase）等参数
- Sample based方式：设定幅度（Amplitude）、偏移（Bias）、每周期采样数（Samples per period）、偏移采样数（Number of samples）等参数，不能以连续的方式工作。
- 每周期采样数 = $2 \times \pi / (\text{频率} \times \text{采样时间})$
- 偏移采样数 = 初相 * 每周期采样数 / ($2 \times \pi$)



武汉大学

Wuhan University

■ Ex3_2





武汉大学

Wuhan University

Block Parameters: Time based

Sine Wave

Output a sine wave:

$$O(t) = \text{Amp} * \sin(\text{Freq} * t + \text{Phase}) + \text{Bias}$$

Sine type determines the computational technique used. The parameters in the two types are related through:

$$\text{Samples per period} = 2 * \pi / (\text{Frequency} * \text{Sample time})$$
$$\text{Number of offset samples} = \text{Phase} * \text{Samples per period} / (2 * \pi)$$

Use the sample-based sine type if numerical problems due to running for large times (e.g. overflow in absolute time) occur.

Parameters

Sine type: Time based

Time (t): Use simulation time

Amplitude: 1

Bias: 0.5

Frequency (rad/sec): $10 * \pi$

Phase (rad): $0.25 * \pi$

Sample time: 0

☒ Interpret vector parameters as 1-D

OK Cancel Help Apply

Block Parameters: Sample based

Sine Wave

Output a sine wave:

$$O(t) = \text{Amp} * \sin(\text{Freq} * t + \text{Phase}) + \text{Bias}$$

Sine type determines the computational technique used. The parameters in the two types are related through:

$$\text{Samples per period} = 2 * \pi / (\text{Frequency} * \text{Sample time})$$
$$\text{Number of offset samples} = \text{Phase} * \text{Samples per period} / (2 * \pi)$$

Use the sample-based sine type if numerical problems due to running for large times (e.g. overflow in absolute time) occur.

Parameters

Sine type: Sample based

Time (t): Use simulation time

Amplitude: 1

Bias: 0

Samples per period: 20

Number of offset samples: 2.5

Sample time: 0.01

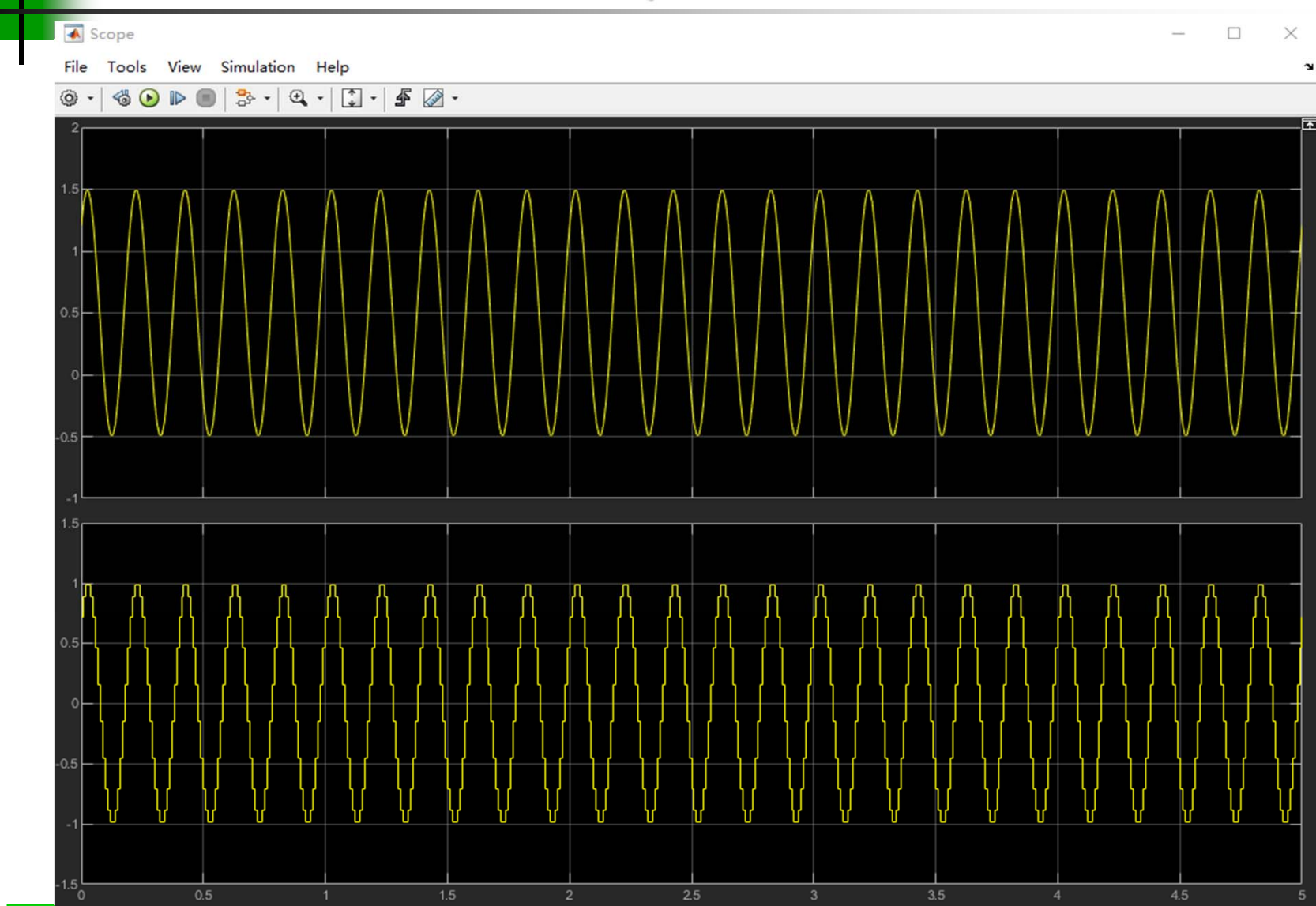
☒ Interpret vector parameters as 1-D

OK Cancel Help Apply



武汉大学

Wuhan University

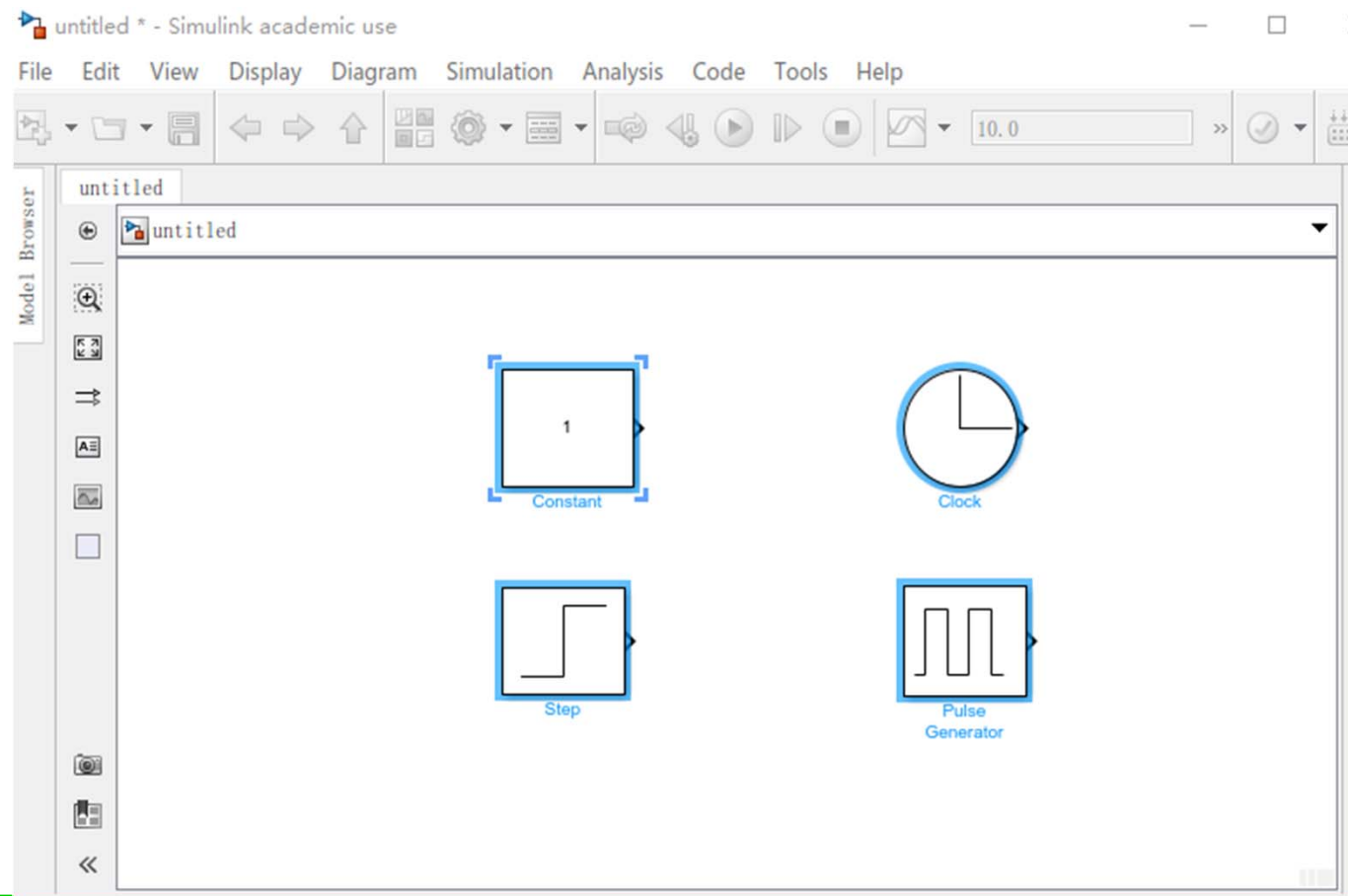




武汉大学

Wuhan University

Constant、Clock、Pulse Generator、Step等模块类似于Sine Wave模块，都是直接产生信源。





武汉大学

Wuhan University

From Workspace模块

从工作空间中读取数据作为输入信号。

- 在工作空间中设置变量，再由From Workspace模块读入到Simulink模型中：

- 1、双击From Workspace模块，在“Data”文本框中填写工作空间中的变量名(默认为simin)。
- 2、在MATLAB命令窗口中键入simin=变量名。

- “From output after final data value by” 的选择

Setting ToZero:有效数据后的数据置0

HoldingFinalValue:保持最后一刻的值

Extrapolate+Interpolate date:以后的数据外推得到

CyclicRetition !+Interpolate date:以后的数据循环



武汉大学

Wuhan University

- ex3_3

- Sin_signal.m

```
function Sin_signal=Sin_signal(A,Bias,W,Phase,t0,te,N)
```

```
    t=linspace(t0,te,N);
```

```
    Data=A*sin(W*t+Phase)+Bias;
```

```
    Sin_signal=[t'   Data'   ];
```

```
end
```

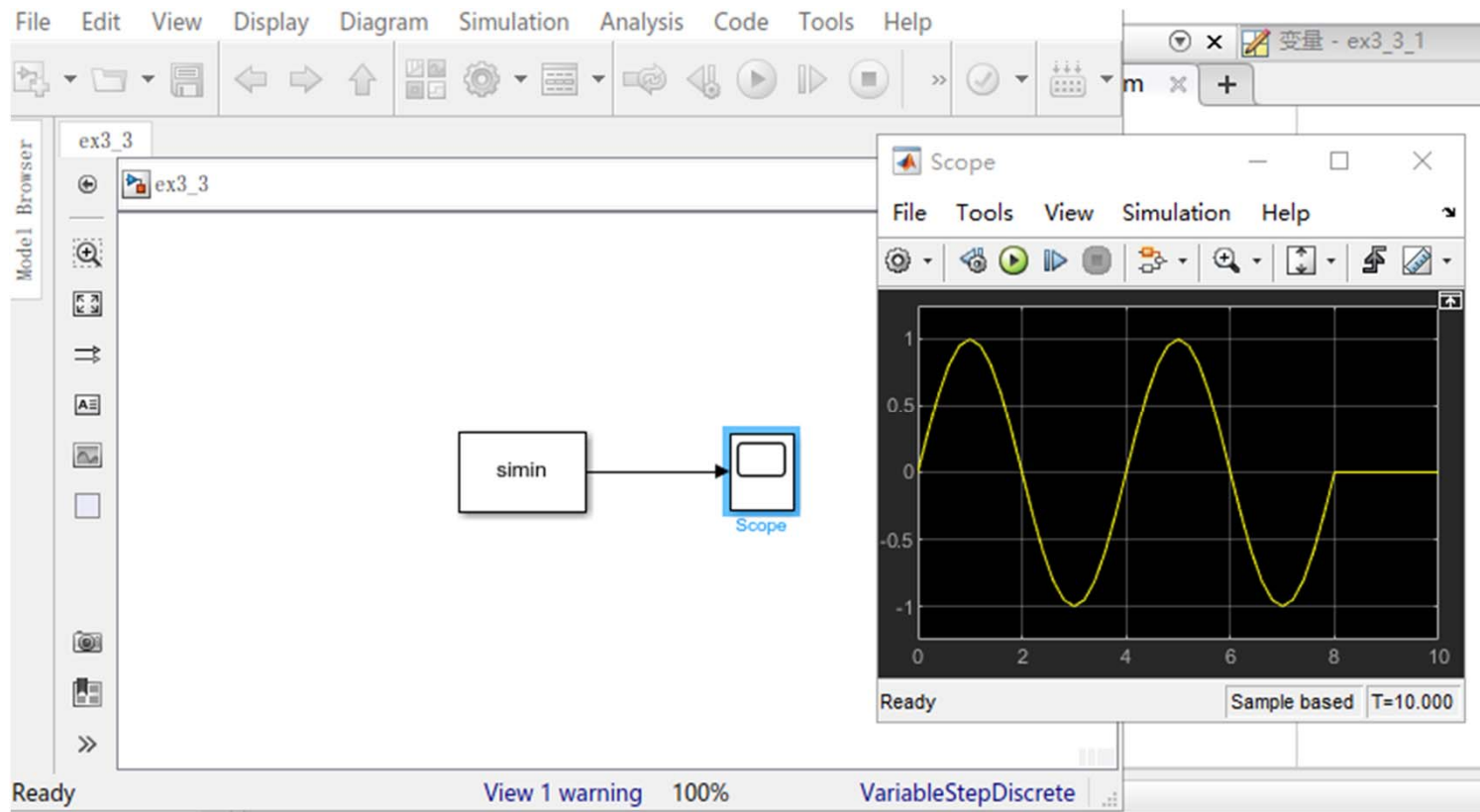
```
>> simin=Sin_signal(1,0,0.5*pi,0,0,8,100)
```



武汉大学

Wuhan University

ex3_3.mdl





武汉大学

Wuhan University

From File模块

从mat文件中读取数据作为模型的输入信号

- 从mat文件的第一个矩阵中读取信号。该矩阵的第一行被认为是一组时刻值，其余行给出相应信号值，以内插和外推的方式给出其余时刻值。

```
>> Save_Data=simin'
```

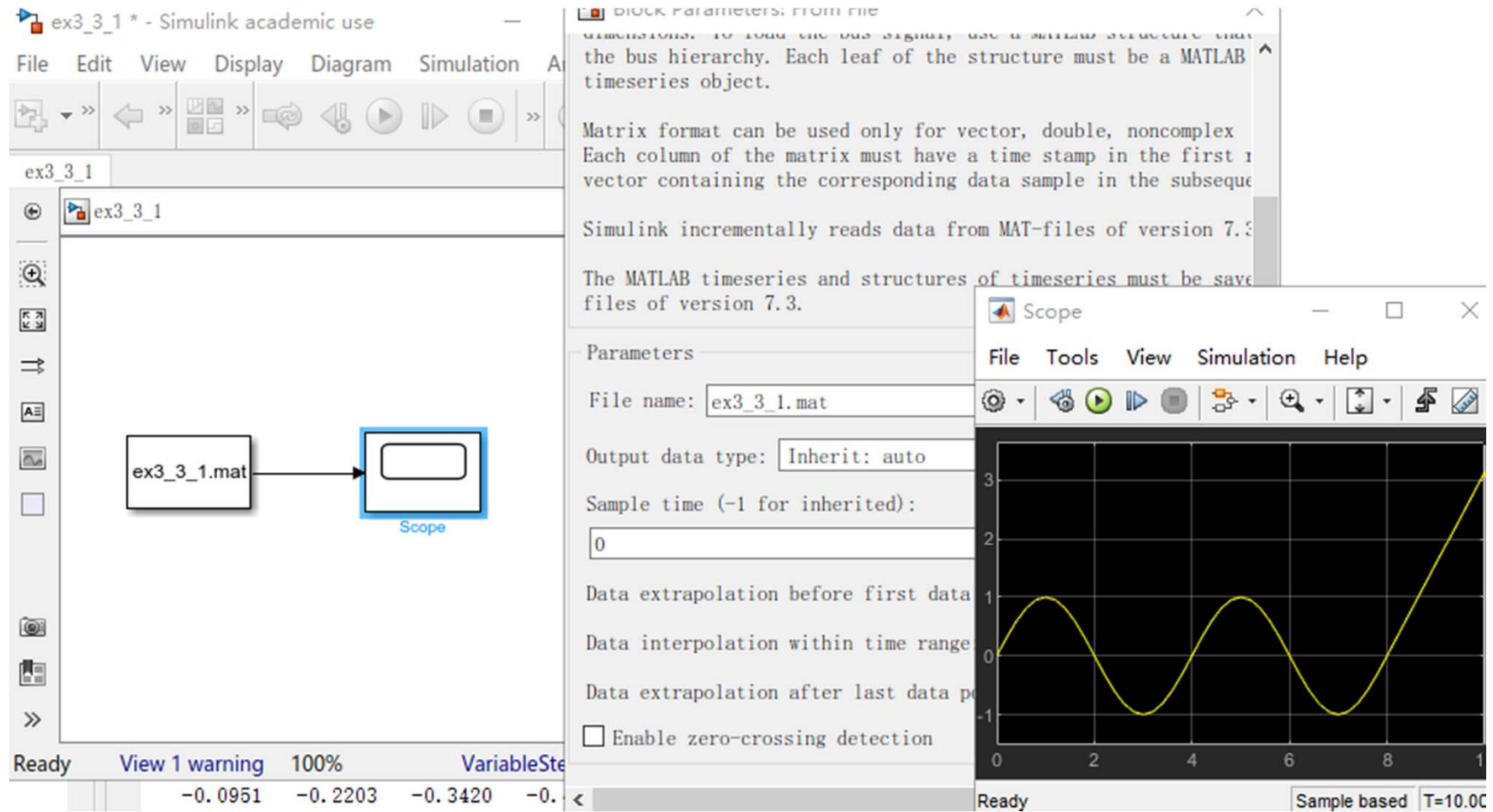
```
>> save ex3_3_1 Save_Data %保存成ex3_3.mat的文件
```




武汉大学

Wuhan University

ex3_3_1.mdl





武汉大学

Wuhan University

3.2.3 Sinks模型库

- Sinks模型库的主要功能是接收信号，并将接收到的信号显示出来。常用模块如下；
- Scope：示波器。
- Display：将信号值直接相似于模块窗口中。
- Out1: 输出端口
- To Workspace：将输出写入MATLAB的工作空间。
- To File(.mat)：将输出写入数据文件。
- XY Graph：显示二维图形



武汉大学

Wuhan University

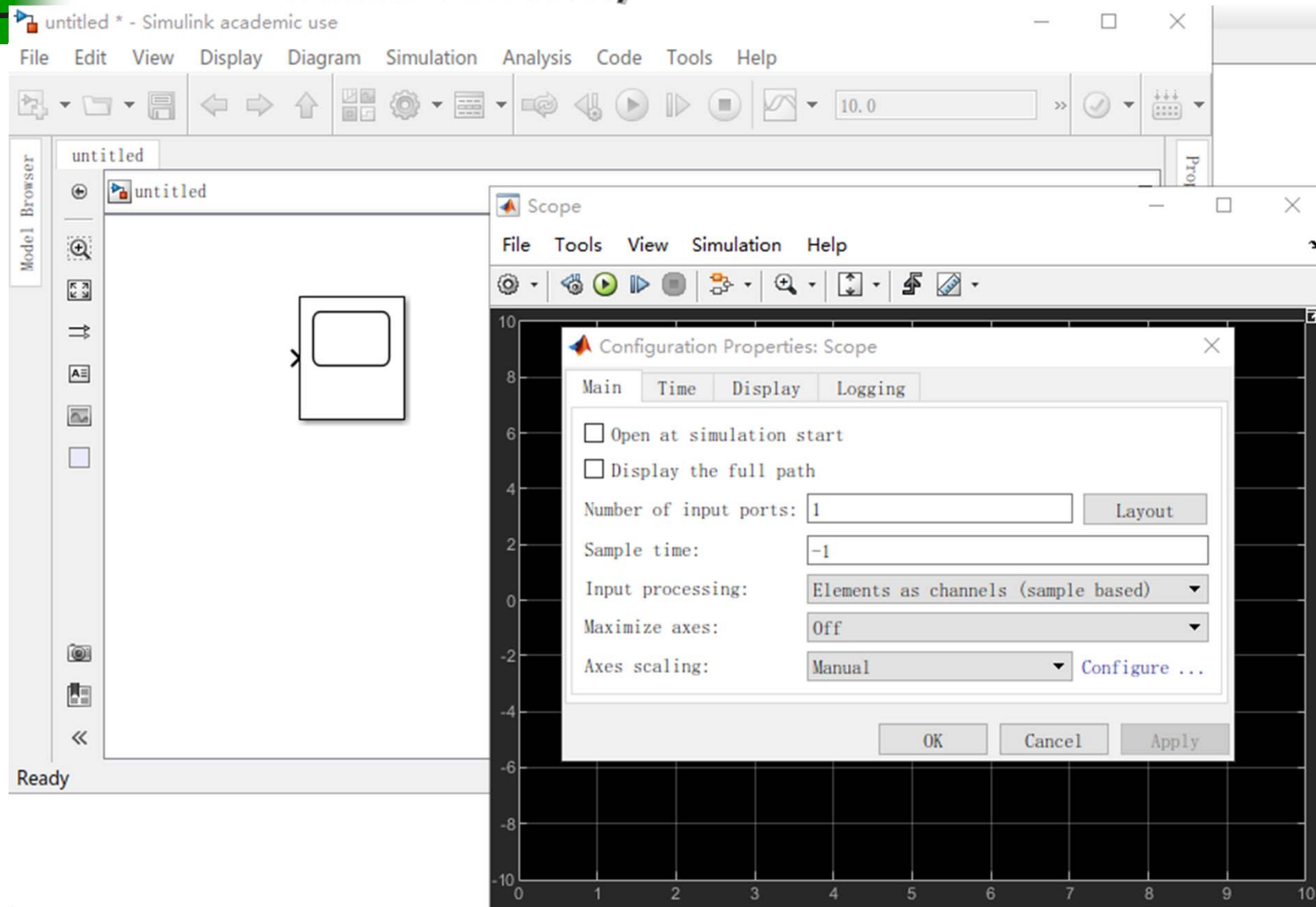
Scope 模块 示波器

- Simulink中的示波器模块是一个非常有用的模块，通常连接在需要观测信号波形的地方，仿真后可直观显示波形。
- 1. "Number of input ports" 设置轴的个数。
- 2. "Sample time"选项按采样时间显示，0表示显示连续信号，-1表示显示方式取决于输入信号，任何大于0的数据表示显示离散信号的时间间隔。
- 3. "Input processing"
- "Elements as channels(sample based)"对待每一个元素的输入作为一个单独的信道(基于样品的处理)
- "Columns as channels(frame based)"对待每一列元素的输入作为一个单独的信道（基于帧的处理）



武汉大学

Wuhan University





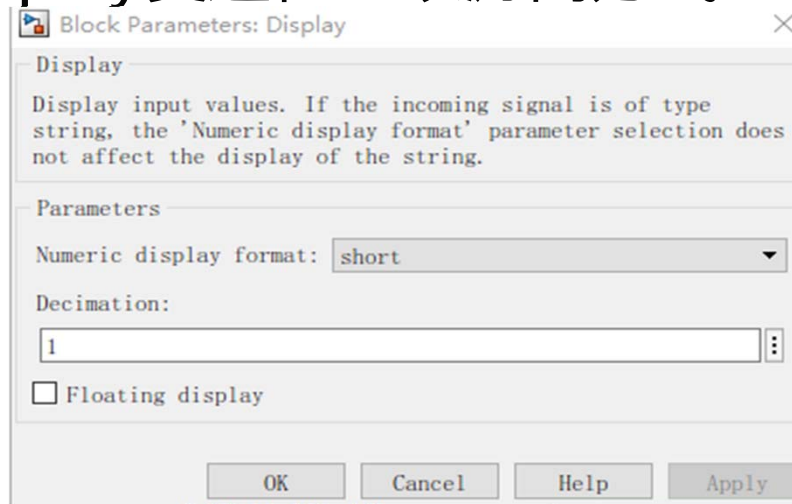
武汉大学

Wuhan University

Display模块

将信号值直接相似于模块窗口中

- 与示波器模块一样，是Simulink仿真中常用的观测手段，通常用来显示不随时间变化的量。
- Numeric display format，选项选择显示数值的制式。
- Decimation:按频度显示，对数据每隔n-1个点给与显示；
- Floating display复选框：以游离方式工作。





武汉大学

Wuhan University

- To Workspace模块，To File模块 是From Workspace模块 From File模块的对应，用法也与之相似。



武汉大学

Wuhan University

3.2.4 Continuous模型库

- Continuous模块库内的模块主要用于对连续系统的建模。主要包括以下模型：
- Integrator：输入信号积分
- Derivative：输入信号微分
- State-Space：线性状态空间系统模型
- Transfer-Fcn：线性传递函数模型
- Zero-Pole：以零极点表示的传递函数模型
- Transport Delay：输入信号延时一个固定时间再输出
- Variable Transport Delay：输入信号延时一个可变时间再输出



武汉大学

Wuhan University

ex3_4

求解微分方程 $y''(t) + 3y'(t) + 2y(t) = f(t)$, $f(t) = 2u(t)$
描述的因果系统的系统响应,初始状态为0,

方法一:使用Simulink构造仿真模型

思路:积分和微分的相对关系

$y'(t)$ 可视为 $y''(t)$ 的积分, $y(t)$ 可视为 $y'(t)$ 的积分

求系统相应 $y(t)$, 则应以 $y''(t)$ 为输入

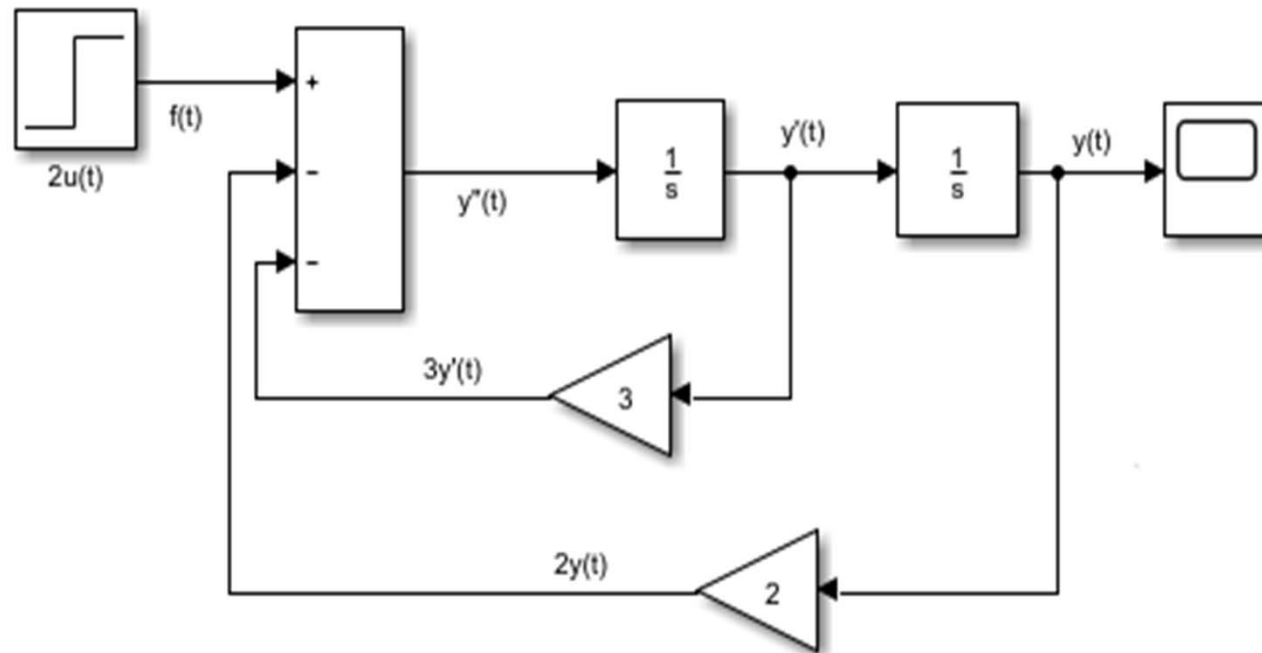
$$y''(t) = f(t) - 3y'(t) - 2y(t)$$



武汉大学

Wuhan University

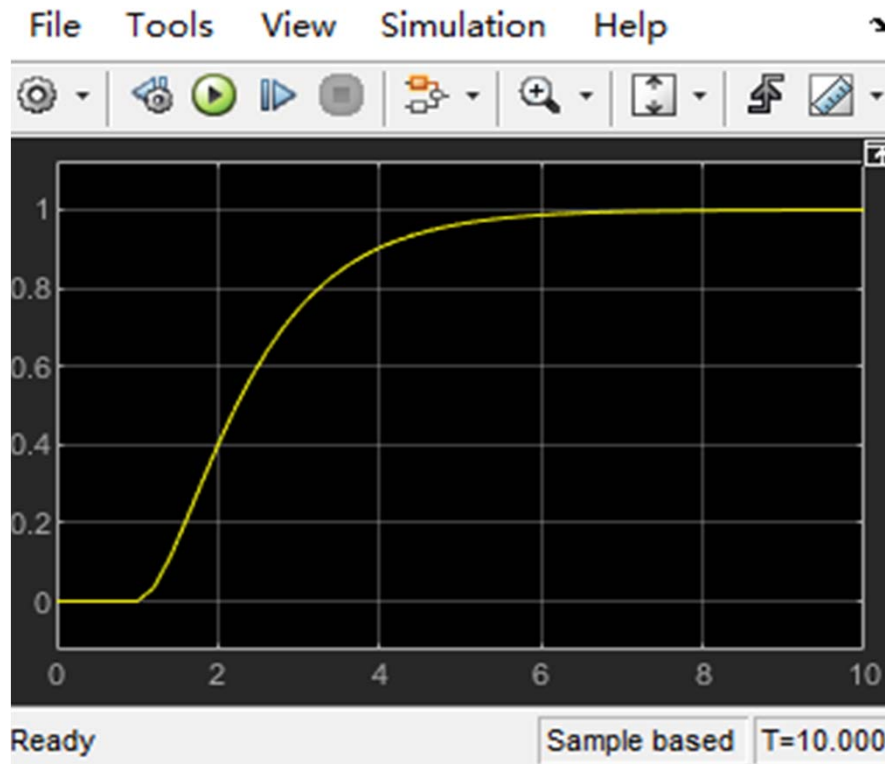
ex3_4_1





武汉大学

Wuhan University



- Step模块中Final Value = 2
- Sum模块可选择方形或圆形



武汉大学

Wuhan University

方法二：采用传递函数模块建立模型

Laplace变换→系统传输函数 $H(s)=2/(s^2+3s+2)$

■ Transfer Fcn模块

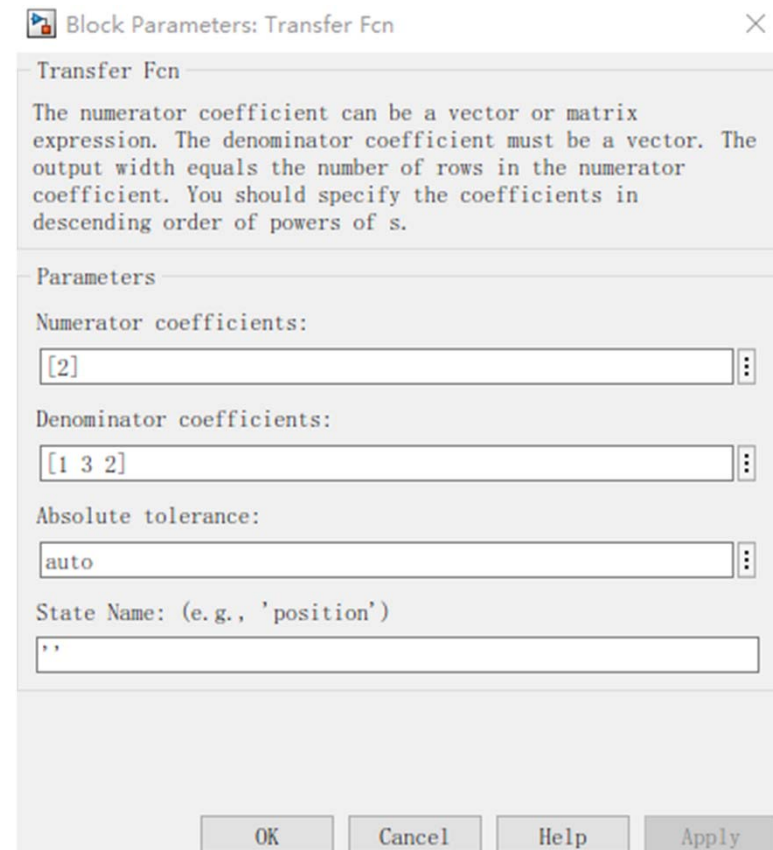
Numerator :

分子的各阶系数

Denominator :

分母的各阶系数

$[2 \ -1 \ 3] \rightarrow 2s^2 - s + 3$



Block Parameters: Transfer Fcn

Transfer Fcn

The numerator coefficient can be a vector or matrix expression. The denominator coefficient must be a vector. The output width equals the number of rows in the numerator coefficient. You should specify the coefficients in descending order of powers of s.

Parameters

Numerator coefficients:

[2]

Denominator coefficients:

[1 3 2]

Absolute tolerance:

auto

State Name: (e.g., 'position')

''

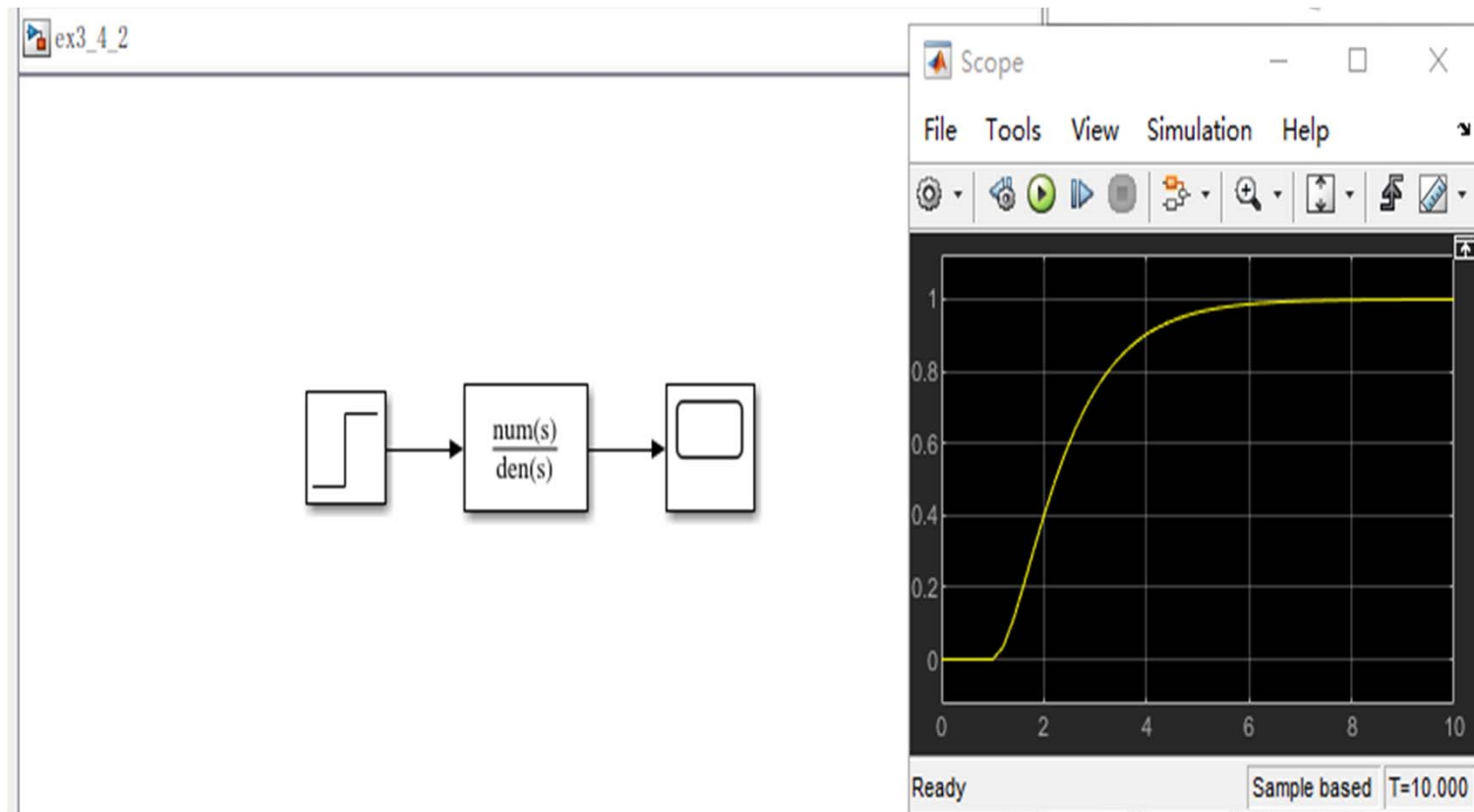
OK Cancel Help Apply



武汉大学

Wuhan University

ex3_4_2.mdl





武汉大学

Wuhan University

3.2.5 Discrete模型库

Discrete模块库内的模块主要用于对离散系统的建模，主要包括以下常用模块：

- Discrete-time Integrator：离散时间积分器
- Discrete Filter：IIR与FIR滤波器
- Discrete State-Space：离散状态空间系统模型
- Discrete Transfer-Fcn：离散传递函数模型
- Discrete Zero-Pole：以零极点表示的离散传递函数模型
- First-Order Hold：一阶采样和保持器
- Zero-Order Hold：零阶采样和保持器
- Unit Delay：一个采样周期的延时
- Memory:系统对输入信号进行一步采样保持，在下一步输出



武汉大学

Wuhan University

ex3_5

体会Simulink模型仿真的特点

一离散系统用差分方程描述

$$x_1(k-1)=x_1(k)+0.1x_2(k)$$

$$x_2(k-1)=-0.05\sin x_1(k)+0.094x_2(k)+f(x)$$

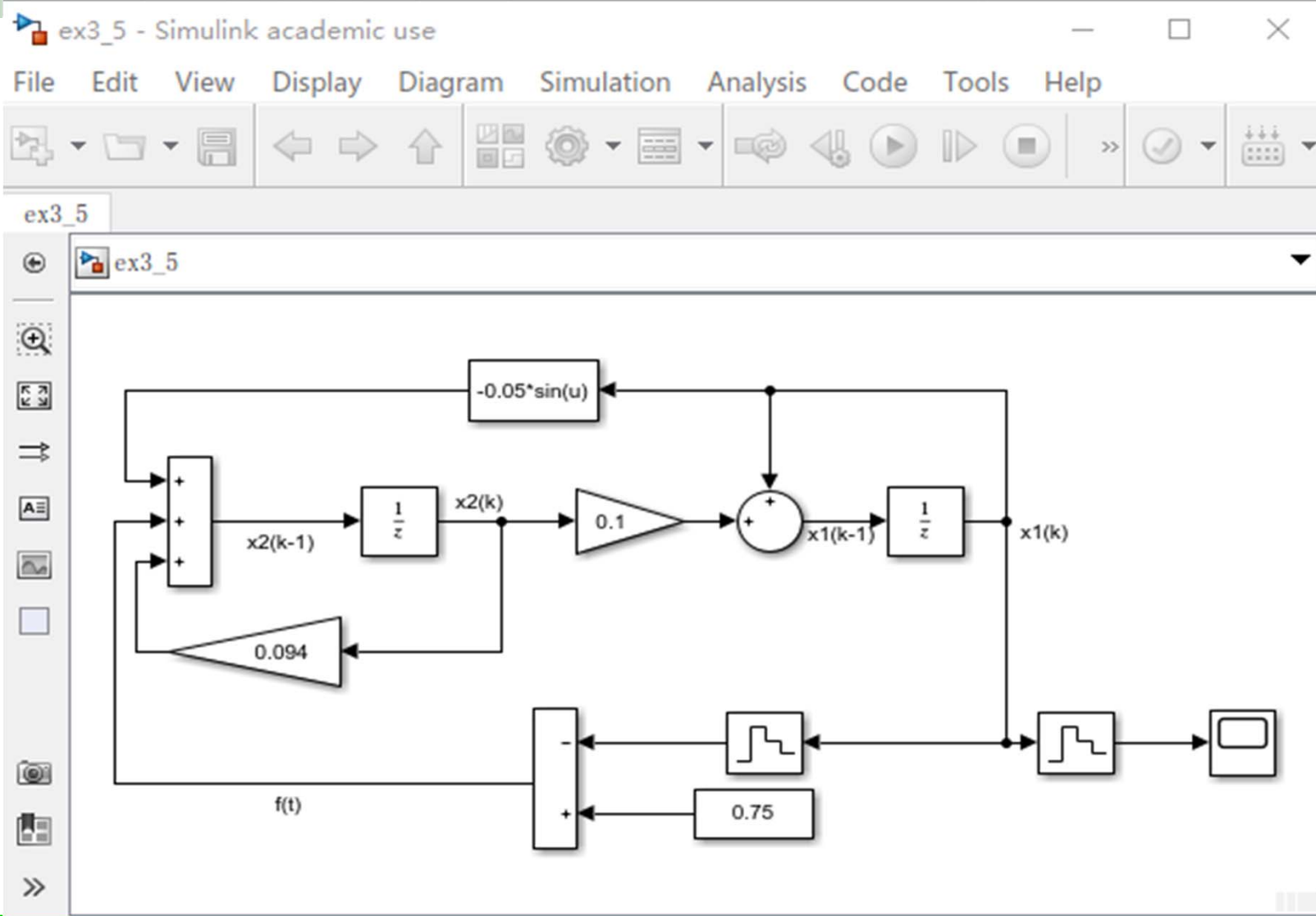
其中 $f(x)$ 是控制信号， $f(x)=0.75-x_1(k)$ ，对系统进行仿真。

- 控制器更新频率小于被控系统，显示系统更新频率更小。
被控系统更新频率设为10Hz；
控制系统更新频率设为4Hz；
显示系统更新频率设为2Hz。
- 使用单位延迟模块和零阶保持模块来描述离散系统的采样和更新



武汉大学

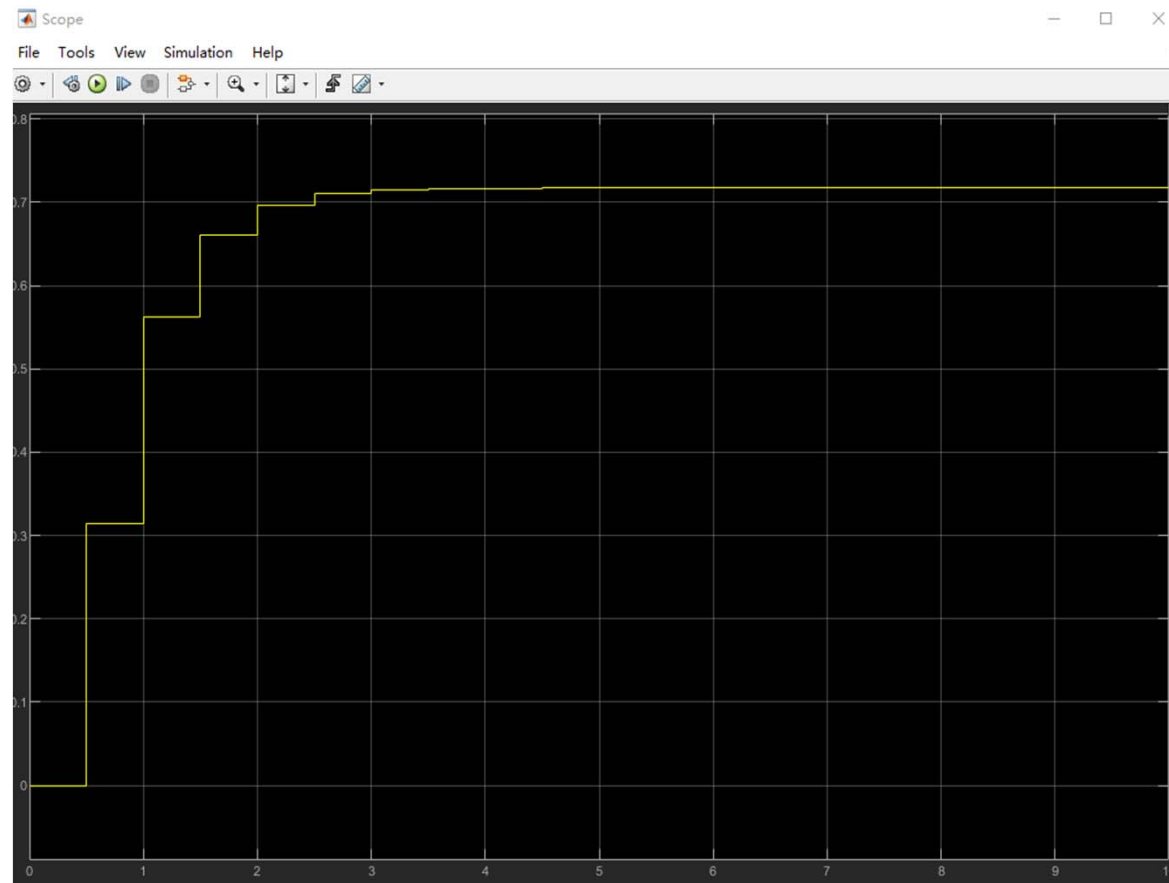
Wuhan University





武汉大学

Wuhan University





武汉大学

Wuhan University

- 在Scope中设置将数据以Array的格式存为ScopeData变量

- 输入以下命令

```
>> t=ScopeData(:,1);
```

```
>> values=ScopeData(:,2);
```

```
>> plot(t,values)
```

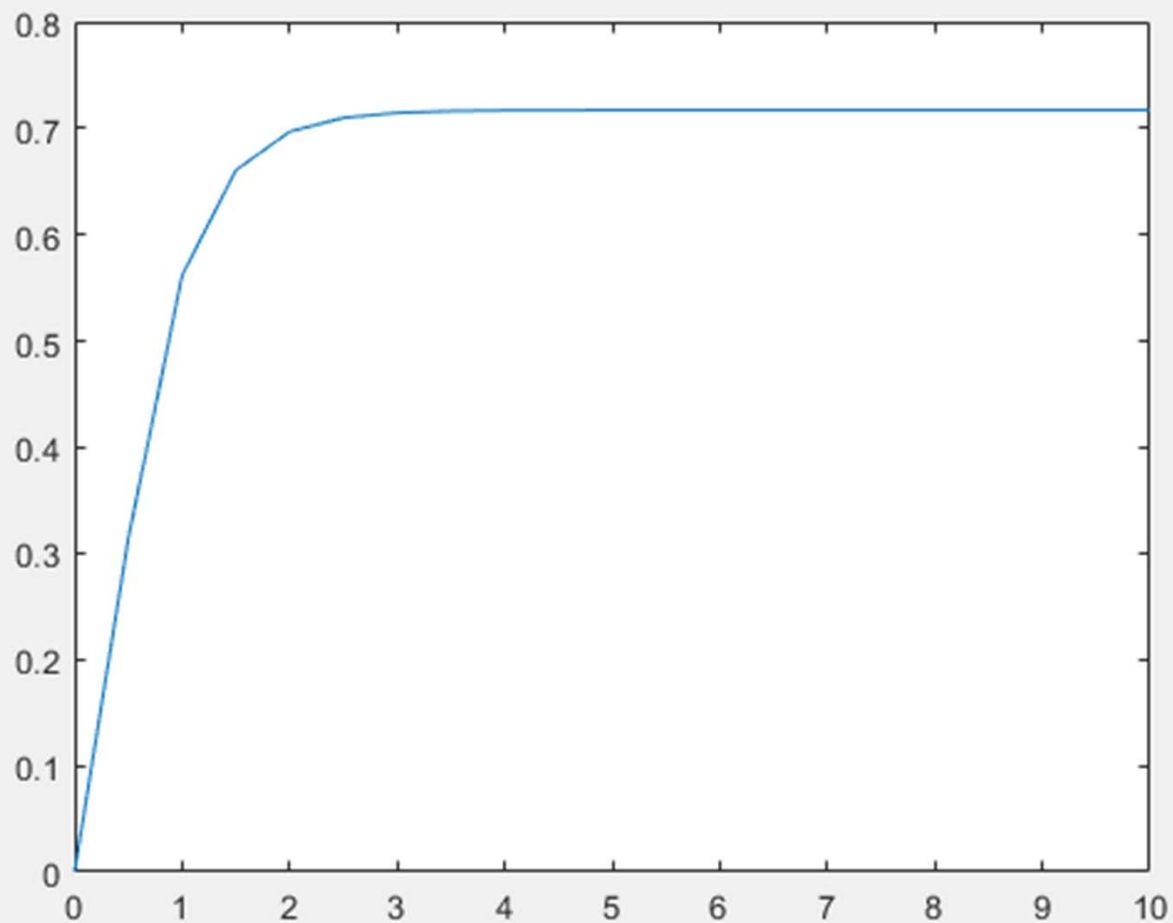
或

```
>> plot(ScopeData(:,1),ScopeData(:,2))
```



武汉大学

Wuhan University



思考：为什么二者图像有不同？



武汉大学

Wuhan University

§3.3 Simulink仿真运行

- 构建好一个系统的模型之后，接下来的事情就是运行模型，得出仿真结果。运行一个仿真的完整过程分成三个步骤：设置仿真参数，启动仿真和仿真结果分析。



武汉大学

Wuhan University

3.3.1 设置仿真参数和选择解法器

- 设置仿真参数和选择解法器，选择Simulation菜单下的Model Configuration Parameters命令，就会弹出一个仿真参数对话框，它主要用三个页面来管理仿真的参数。
- Solver页，它允许用户设置仿真的开始和结束时间，选择解法器，说明解法器参数及选择一些输出选项。
- Data Import/Export页，作用是管理模型从MATLAB工作空间的输入和对它的输出。
- Diagnostics页，允许用户选择Simulink在仿真中显示的警告信息的等级。



武汉大学

Wuhan University

1、Solver页

- 此页可以进行的设置有：选择仿真开始和结束的时间；选择解法器，并设定它的参数；选择输出项。
- 仿真时间：注意这里的时间概念与真实的时间并不一样，只是计算机仿真中对时间的一种表示，比如10秒的仿真时间，如果采样步长定为0.1，则需要执行100步，若把步长减小，则采样点数增加，那么实际的执行时间就会增加。一般仿真开始时间设为0，而结束时间视不同的因素而选择。总的说来，执行一次仿真要耗费的时间依赖于很多因素，包括模型的复杂程度、解法器及其步长的选择、计算机时钟的速度等等。



武汉大学

Wuhan University

- 仿真步长模式：用户在Type后面的第一个下拉选项框中指定仿真的步长选取方式，可供选择的有Variable-step（变步长）和Fixed-step（固定步长）方式。变步长模式可以在仿真的过程中改变步长，提供误差控制和过零检测。固定步长模式在仿真过程中提供固定的步长，不提供误差控制和过零检测。用户还可以在第二个下拉选项框中选择对应模式下仿真所采用的算法。

变步长模式解法器有：ode45，ode23，ode113，ode15s，ode23s，ode23t，ode23tb和discrete。

- ode45：缺省值，四/五阶龙格 - 库塔法，适用于大多数连续或离散系统，但不适用于刚性（stiff）系统。它是单步解法器，也就是，在计算 $y(t_n)$ 时，它仅需要最近处理时刻的结果 $y(t_{n-1})$ 。一般来说，面对一个仿真问题最好是首先试试ode45。



武汉大学

Wuhan University

- ode23：二/三阶龙格 - 库塔法，它在误差限要求不高和求解的问题不太难的情况下，可能会比ode45更有效。也是一个单步解法器。
- ode113：是一种阶数可变的解法器，它在误差容许要求严格的情况下通常比ode45有效。ode113是一种多步解法器，也就是在计算当前时刻输出时，它需要以前多个时刻的解。
- ode15s：是一种基于数字微分公式的解法器（NDFs）。也是一种多步解法器。适用于刚性系统，当用户估计要解决的问题是比较困难的，或者不能使用ode45，或者即使使用效果也不好，就可以用ode15s。



武汉大学

Wuhan University

- ode23s：它是一种单步解法器，专门应用于刚性系统，在弱误差允许下的效果好于ode15s。它能解决某些ode15s所不能有效解决的stiff问题。
- ode23t：是梯形规则的一种自由插值实现。这种解法器适用于求解适度stiff的问题而用户又需要一个无数字振荡的解法器的情况。
- ode23tb：是TR-BDF2的一种实现，TR-BDF2 是具有两个阶段的隐式龙格 - 库塔公式。
- discrtet：当Simulink检查到模型没有连续状态时使用它。



武汉大学

Wuhan University

固定步长模式解法器有：ode5，ode4，ode3，ode2，ode1和discrete。

- ode5：缺省值，是ode45的固定步长版本，适用于大多数连续或离散系统，不适用于刚性系统。
- ode4：四阶龙格 - 库塔法，具有一定的计算精度。
- ode3：固定步长的二/三阶龙格 - 库塔法。
- ode2：改进的欧拉法。
- ode1：欧拉法。
- discrete：是一个实现积分的固定步长解法器，它适合于离散无连续状态的系统。



武汉大学

Wuhan University

步长参数：对于变步长模式，用户可以设置最大的和推荐的初始步长参数，缺省情况下，步长自动地确定，它由值auto表示。

- Max step size（最大步长参数）：它决定了解法器能够使用的最大时间步长，它的缺省值为“仿真时间/50”，即整个仿真过程中至少取50个取样点，但这样的取法对于仿真时间较长的系统则可能带来取样点过于稀疏，而使仿真结果失真。一般建议对于仿真时间不超过15s的采用默认值即可，对于超过15s的每秒至少保证5个采样点，对于超过100s的，每秒至少保证3个采样点。
- Initial step size（初始步长参数）：一般建议使用“auto”默认值即可。



武汉大学

Wuhan University

仿真精度的定义（对于变步长模式）

- Relative tolerance（相对误差）：它是指误差相对于状态的值，是一个百分比，缺省值为 $1e-3$ ，表示状态的计算值要精确到0.1%。
- Absolute tolerance（绝对误差）：表示误差值的门限，或者是说在状态值为零的情况下，可以接受的误差。如果它被设成了auto，那么simulink为每一个状态设置初始绝对误差为 $1e-6$ 。



武汉大学

Wuhan University

Zero-crossing options (过零检测)

- 在动态系统中，如果系统检测到当前时间步长内有不连续，将会采取过零检测，就是在不连续处前后取更多的步长来确定采样点的精确时间，所以变步长仿真勾上过零检测结果会更准确。

任务和样本时间选项

- 自动处理数据传输的速率转换；较高的优先级值表示较高的任务优先级。



武汉大学

Wuhan University

2、Date Import/Export页

- 此页主要用来设置SIMULINK与MATLAB工作空间交换数值的有关选项。
- Load from workspace：选中前面的复选框即可从MATLAB工作空间获取时间和输入变量，一般时间变量定义为t，输入变量定义为u。Initial state用来定义从MATLAB工作空间获得的状态初始值的变量名。
- Save to workspace：用来设置存往MATLAB工作空间的变量类型和变量名，选中变量类型前的复选框使相应的变量有效。一般存往工作空间的变量包括输出时间向量（Time）、状态向量（States）和输出变量（Output）。Final state用来定义将系统稳态值存往工作空间所使用的变量名。



武汉大学

Wuhan University

- Save option : 用来设置存往工作空间的有关选项。

Limit data to last用来设定SIMULINK仿真结果最终可存往MATLAB工作空间的变量的规模，对于向量而言即其维数，对于矩阵而言即其秩；

Decimation设定了一个亚采样因子，它的缺省值为1，也就是对每一个仿真时间点产生值都保存，而若为2，则是每隔一个仿真时刻才保存一个值。

Refine output : 这个选项可以理解成精细输出，其意义是在仿真输出太稀松时，simulink会产生额外的精细输出，这一点就像插值处理一样。



武汉大学

Wuhan University

Refine factor: 用户可以在refine factor设置仿真时间步间插入的输出点数。产生更光滑的输出曲线，改变精细因子比减小仿真步长更有效。精细输出只能在变步长模式中才能使用，并且在ode45效果最好。



3、Diagnostics页

- 此页分成两个部分：仿真选项和配置选项。配置选项下的列表框主要列举了一些常见的事件类型，以及当SIMULINK检查到这些事件时给予的处理。仿真选项options主要包括是否进行一致性检验、是否禁用过零检测、是否禁止复用缓存、是否进行不同版本的SIMULINK的检验等几项。
- 除了上述3个主要的页外，仿真参数设置窗口还包括Code Generation页，主要用于与C语言编辑器的交换，通过它可以直接从SIMULINK模型生成代码并且自动建立可以在不同环境下运行的程序，这些环境包括实时系统和单机仿真。



3.3.2 启动仿真

设置仿真参数和选择解法器之后，就可以启动仿真而运行。

- 选择Simulink菜单下的start选项来启动仿真，如果模型中有些参数没有定义，则会出现错误信息提示框。如果一切设置无误，则开始仿真运行，结束时系统会发出一鸣叫声。

- 除了直接在SIMULINK环境下启动仿真外，还可以在MATLAB命令窗口中通过函数进行，格式如下：

```
[t,x,y]=sim('模型文件名',[to tf],simset('参数1',  
参数值1,'参数2',参数值2,...))
```

其中to为仿真起始时间，tf为仿真终止时间。[t,x,y]为返回值，t为返回的时间向量值，x为返回的状态值，y为返回的输出向量值。simset定义了仿真参数，包括以下一些主要参数：



武汉大学

Wuhan University

- AbsTol：默认值为 $1e-6$ 设定绝对误差范围。
- Decimation：默认值为1，决定隔多少个点返回状态和输出值。
- Solver：解法器的选择。
- MaxRows：默认值为0，表示不限制。若为大于零的值，则表示限制输出和状态的规模，使其最大行数等于该数值。
- InitialState：一个向量值，用于设定初始状态。
- FixedStep：用一个正数表示步阶的大小，仅用于固定步长模式。
- MaxStep：默认值为auto。用于变步长模式，表示最大的步阶大小。
- 如果知道模型文件名称，可以用以下命令得到该模型的仿真参数：`simget('模型文件名')`



武汉大学

Wuhan University

§3.4封装子系统

3.4.1 子系统的概念

- 子系统是模块化、层次化设计的必然，电子设计和仿真工具基本上都能提供子系统的概念，例如SPICE中的SUBCKT，HDL语言中的每个module或entity更是本身就可以当做子系统来使用。
- 对于很大的SIMULINK模型，通过自定义功能模块可以简化图形，减少功能模块的个数，有利于模型的分层构建。



Simulink中定义子系统的方法

- 方法1 采用Ports&Subsystems 模块库中的Subsystem功能模块，利用其编辑区设计组合新的功能模块，将Ports&Subsystems模块库中的Subsystem功能模块复制到打开的模型窗口中。

双击Subsystem功能模块，进入自定义功能模块窗口，从而利用已有的基本功能模块设计出新的功能模块。

- 方法2 将现有的多个功能模块组合起来，形成新的功能模块

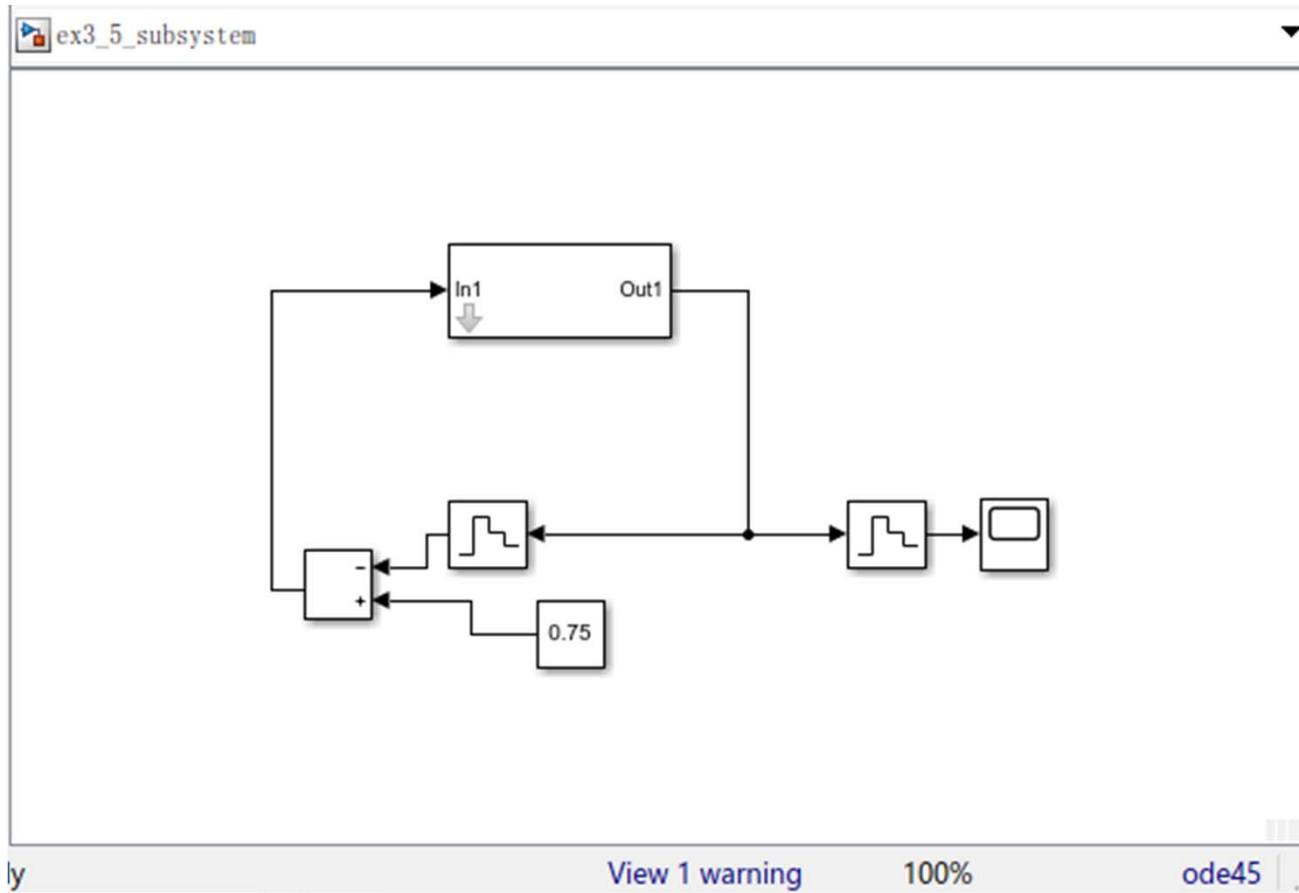
在模型窗口中建立所定义功能模块的子模块。

用鼠标将这些需要组合的功能模块框住，然后选择Edit菜单下的Create Subsystem即可。



武汉大学

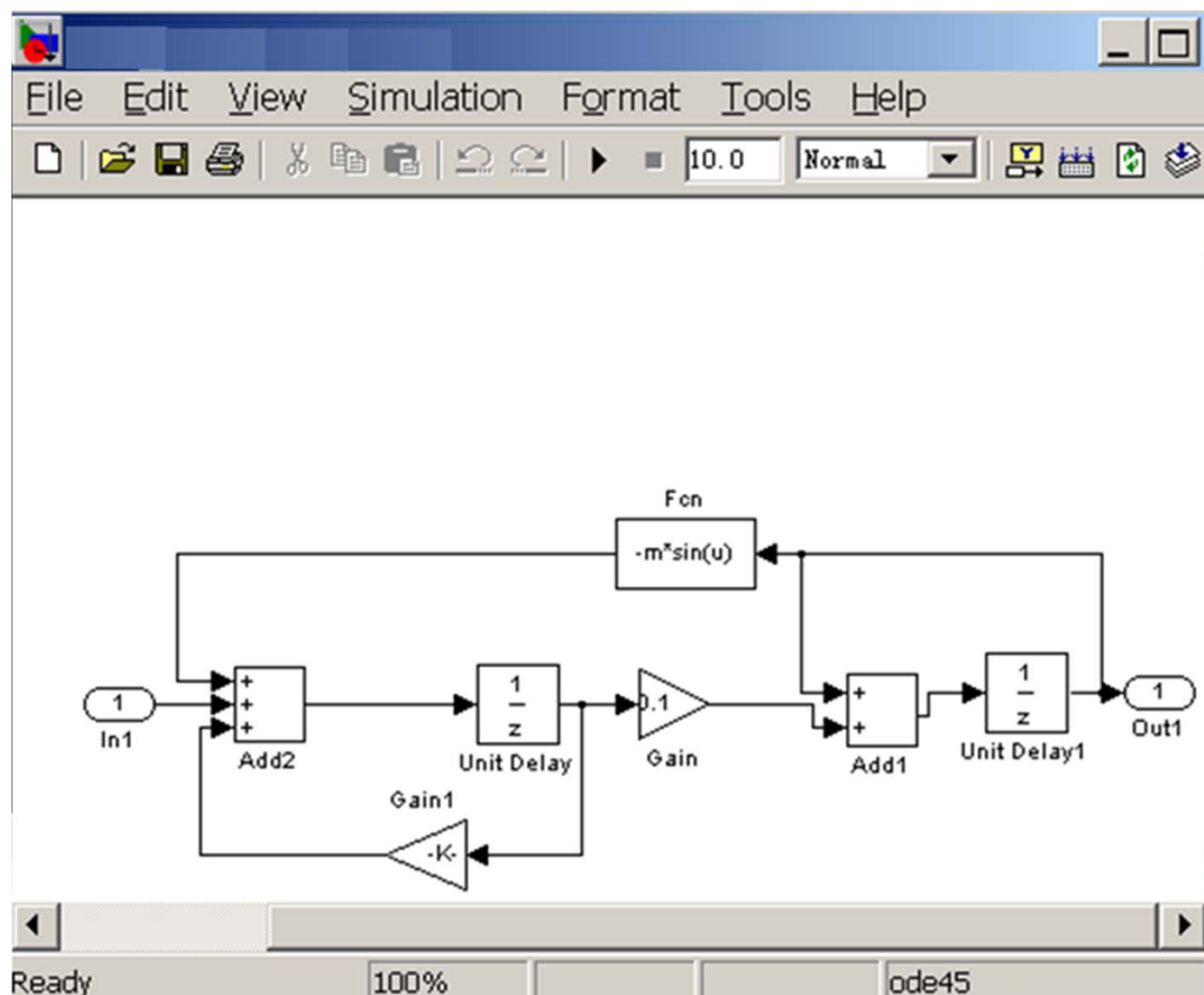
Wuhan University





武汉大学

Wuhan University





武汉大学

Wuhan University

条件执行子系统

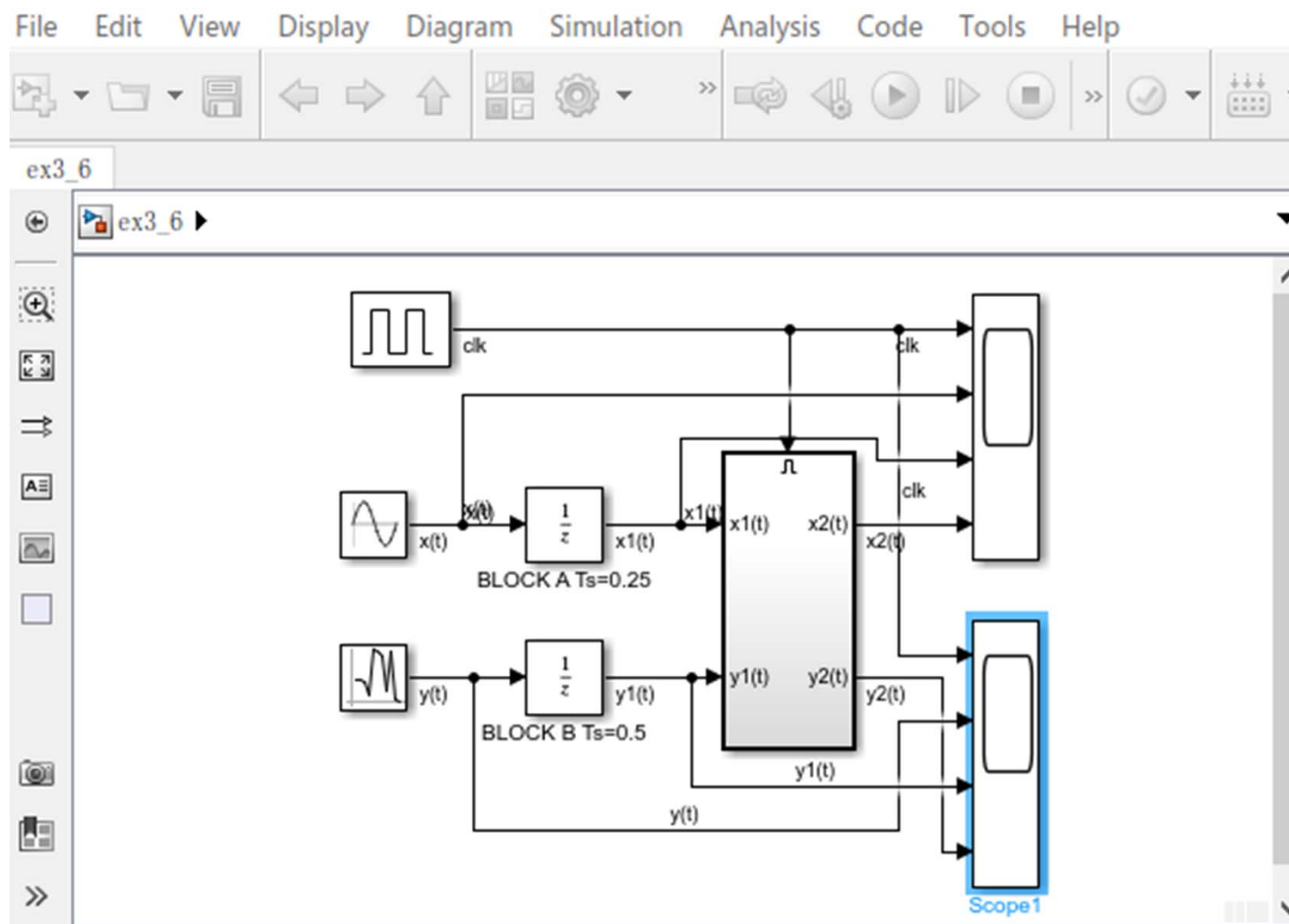
条件执行子系统是指存在一个或多个控制输入端的子系统，这些控制输入端决定了所在子系统的工作状态。类似于单元器件中的rst、enable等控制信号。

- 使能子系统 在使能信号为正时才会被激活，为负时则不做响应。电平触发的触发器可视为其一个特例。
- 触发子系统 通过触发时间是否发生来控制子系统是否执行。边沿触发的触发器可视为其一个特例。
- 触发使能子系统 使能、触发双重控制。



武汉大学

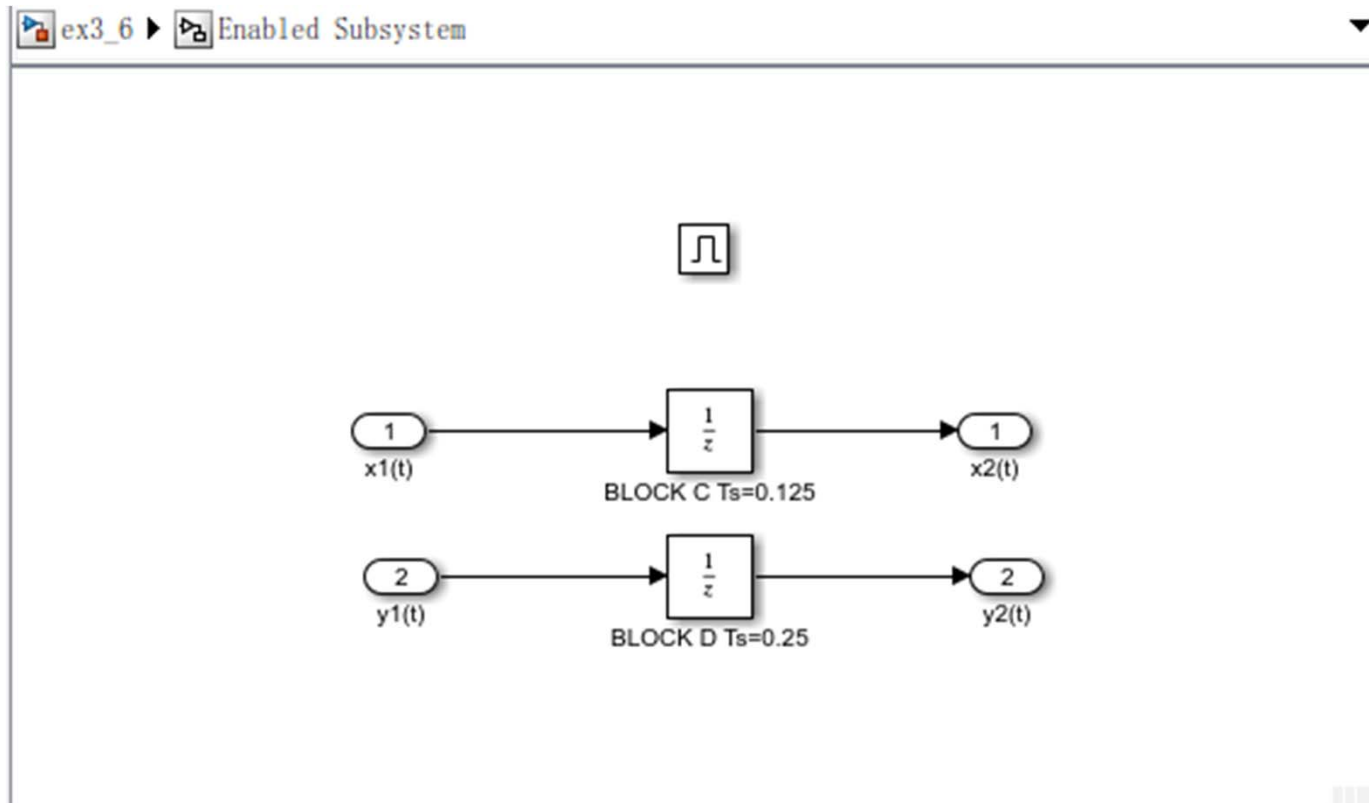
Wuhan University





武汉大学

Wuhan University

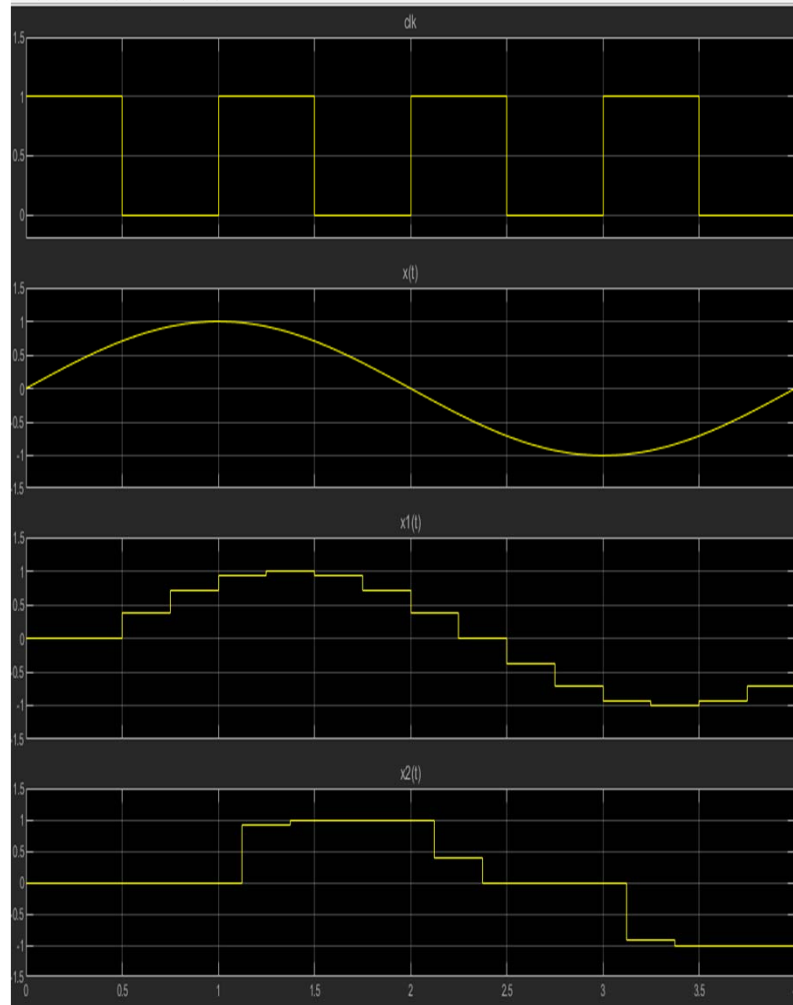




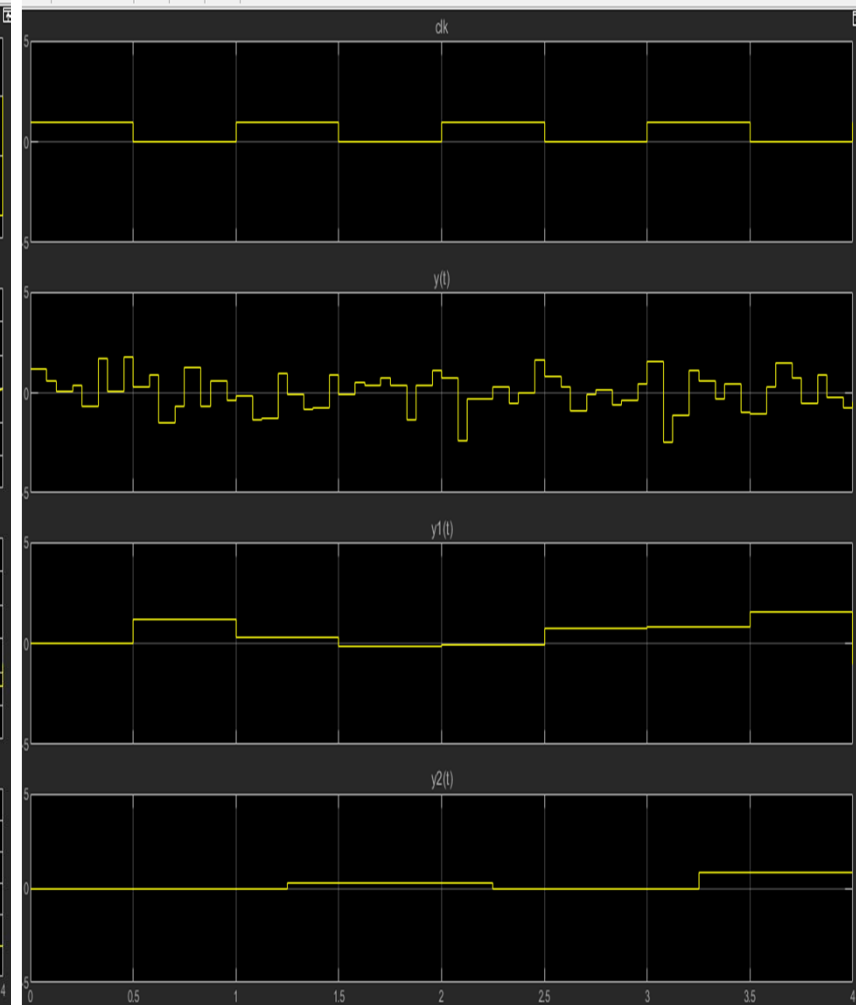
武汉大学

Wuhan University

File Tools View Simulation Help



File Tools View Simulation Help





武汉大学

Wuhan University

3.4.2 子系统的封装

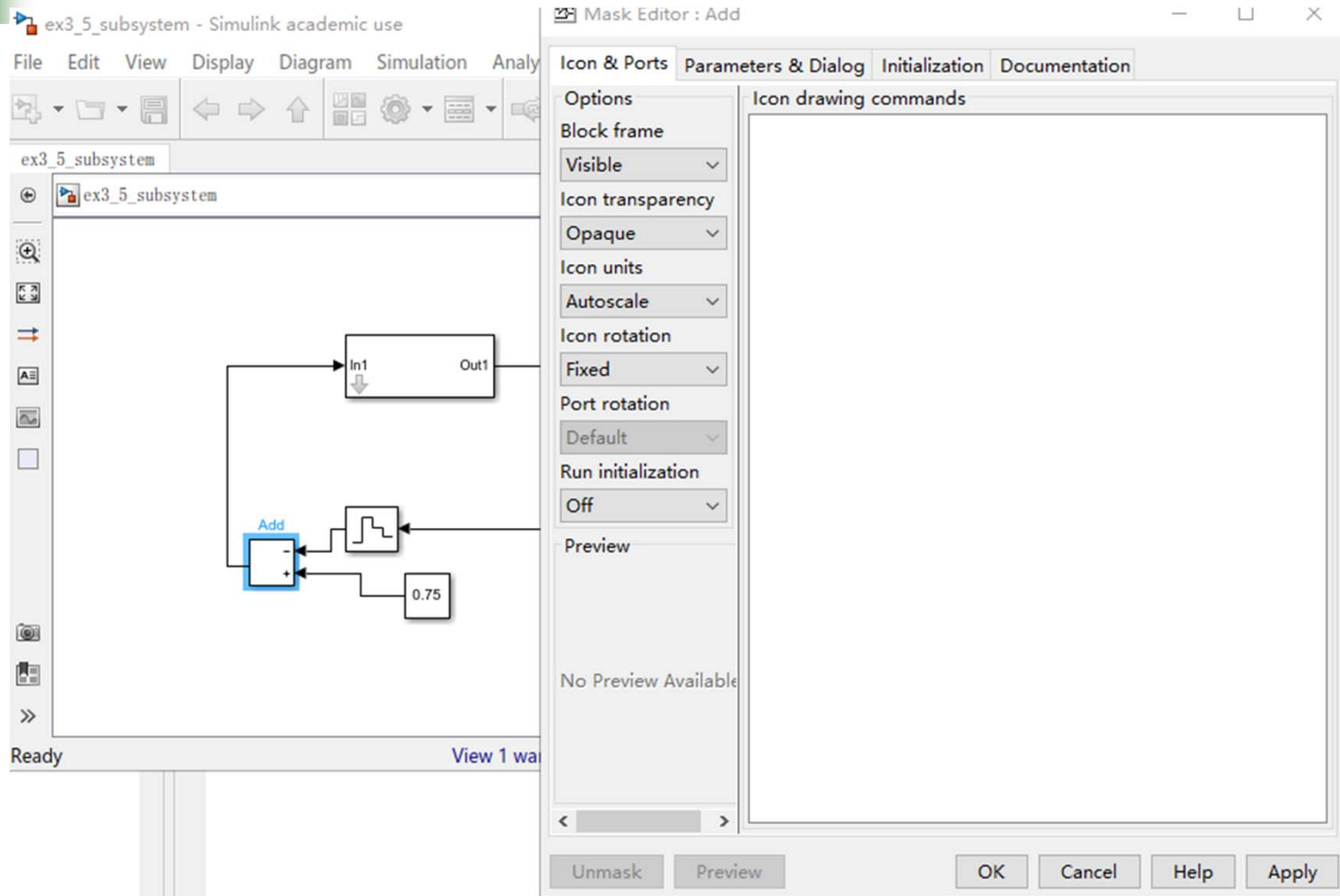
封装的概念

- 将子系统装载在一个模块内，从外部只能观测其端口特性而看不到内部结构，视为一黑盒。
- 封装对功能模块完成说明、选定模块外观、设定输入数据窗口，则需要对其进行封装处理。
- 首先打开Subsystem, 选中需要编辑的模块，右击，选择Mask-Creat Mask，会进入mask的编辑窗口，可以看出有4个标签页。



武汉大学

Wuhan University





武汉大学

Wuhan University

1、Icon&Ports选项卡 定义封装子系统外观

- 此页最重要的部分是Drawing Commands，在该区域内可以用disp指令设定功能模块的文字名称，用plot指令画线，用dpoly指令画转换函数。
- 注意，尽管这些命令在名字上和以前讲的MATLAB函数相同，但它们在功能上却不完全相同，因此不能随便套用以前所讲的格式。
- 用户还可以设置一些参数来控制图标的属性，这些属性在Icon页右下端的下拉式列表中进行选择。
- Block frame : Visible 显示外框线；Invisible : 隐藏外框线。
- Icon Transparency : Opaque 隐藏输入输出的标签；Transparent : 显示输入输出的标签。
- Icon units: 设置图标的单位
- Icon Rotation : 旋转模块。
- Run initialization: 运行时赋初值

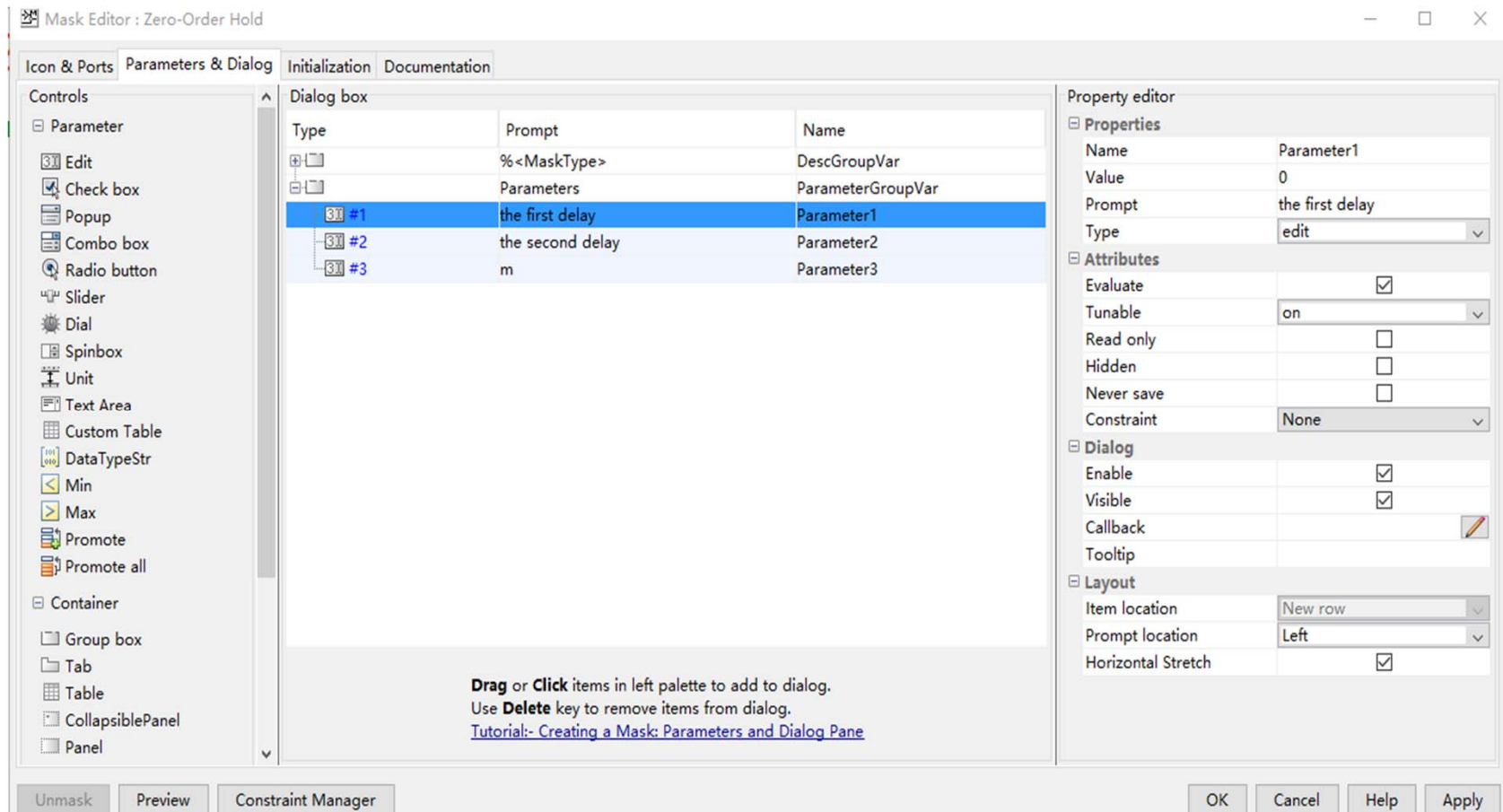


武汉大学

Wuhan University

2、Parameters&Dialog选项卡 定义封装子系统的参数设置

具体参数在 “Property editor” 中定义

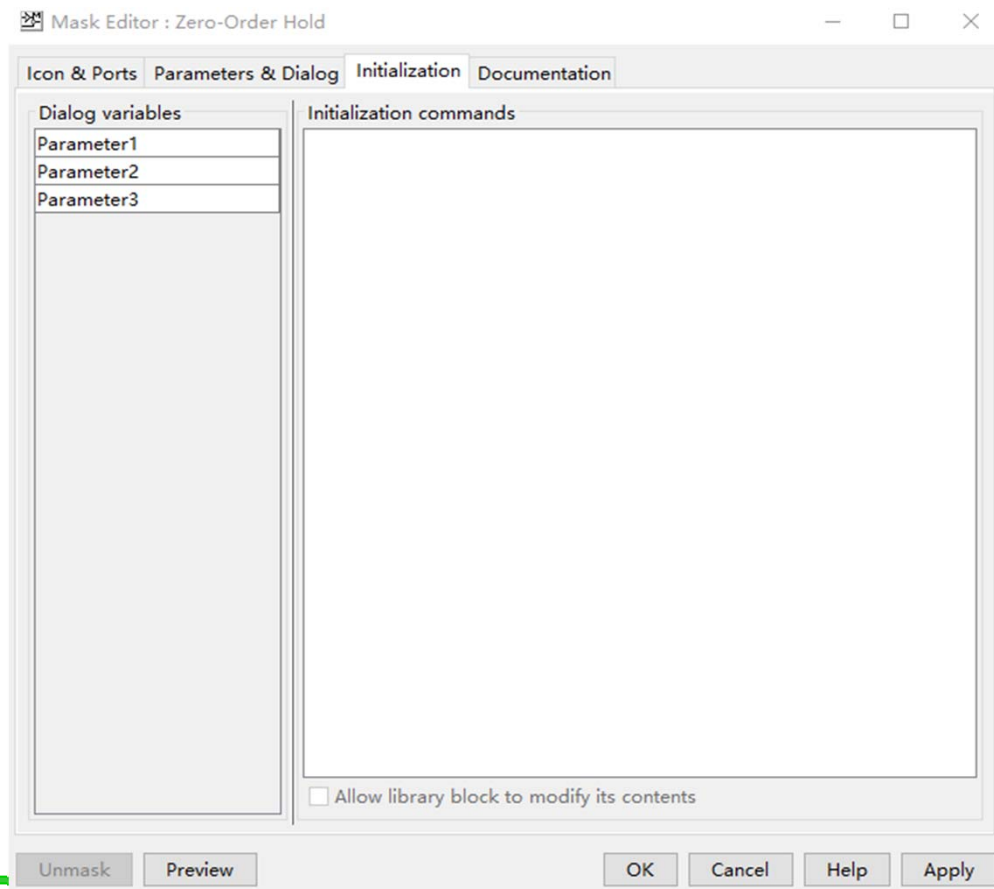




武汉大学

Wuhan University

3、Initialization选项卡 对封装子系统进行初始化在“Dialog variables”选项区域中列出了与子系统封装参数关联了的变量，用户可在此对变量名进行编辑。





武汉大学

Wuhan University

4、Documentation选项卡 对封装子系统进行说明

- 主要用来针对完成的功能模块来编写相应的说明文字和 Help。
- Description中输入的文字，会出现在参数窗口的说明部分。
- Help中输入的文字则会显示在单击参数窗口中的help按钮后浏览器所加载的HTML文件中。
- Type：在此处输入的文字作为封装模块的标注性说明，在模型窗口下，将鼠标指向模块，则会显示该文字。当然必须先在View菜单中选择Block Data Tips——Show Block Data Tips。



武汉大学

Wuhan University

Mask Editor : Add

Icon & Ports Parameters & Dialog Initialization Documentation

Type
delay module

Description
my first delay module

Help

Unmask Preview OK Cancel Help Apply



武汉大学

Wuhan University

3.4.3 建立自己的模块库

- 开放式的模块库结构，可添加和使用自定义的模块库
- 新建一个库文件
- 需保存在MATLAB的搜索路径中
- 将模块加入模块库
- 若从其它库复制的模块则要注意断开连接，否则是原模块的镜像，任何对新“库模块”的修改都会影响到原“参考模块”。



武汉大学

Wuhan University

§3.5 Simulink s-function的设计

- Simulink为用户提供了许多内置的基本库模块，通过这些模块进行连接而构成系统的模型。对于那些经常使用的模块进行组合并封装可以构建出重复使用的新模块，但它依然是基于Simulink原来提供的内置模块。
- 而Simulink s-function是一种强大的对模块库进行扩展的新工具。



武汉大学

Wuhan University

3.5.1 s-function的概念

- s-function是一个动态系统的计算机语言描述，在MATLAB里，用户可以选择用m文件编写，也可以用c或mex文件编写，在这里只给大家介绍如何用m文件编写s-function。
- S-function提供了扩展Simulink模块库的有力工具，它采用一种特定的调用语法，使函数和Simulink解法器进行交互。
- S-function最广泛的用途是定制用户自己的Simulink模块。它的形式十分通用，能够支持连续系统、离散系统和混合系统。



3.5.2 建立m文件s-function

1、使用模板文件：sfuntmp1.m

- 该模板文件位于MATLAB根目录下toolbox/simulink/blocks目录下。
- 模板文件里s-function的结构十分简单，它只为不同的flag的值指定要相应调用的m文件子函数。比如当flag=3时，即模块处于计算输出这个仿真阶段时，相应调用的子函数为sys=mdloutputs(t,x,u)。
- 模板文件使用switch语句来完成这种指定，当然这种结构并不唯一，用户也可以使用if语句来完成同样的功能。而且在实际运用时，可以根据实际需要来去掉某些值，因为并不是每个模块都需要经过所有的子函数调用。



- 模板文件只是Simulink为方便用户而提供的一种参考格式，并不是编写s-function的语法要求，用户完全可以改变子函数的名称，或者直接把代码写在主函数里，但使用模板文件的好处是，比较方便，而且条理清晰。
- 使用模板编写s-function，用户只需把s-函数名换成期望的函数名称，如果需要额外的输入参量，还需在输入参数列表的后面增加这些参数，因为前面的4个参数是simulink调用s-function时自动传入的。对于输出参数，最好不做修改。接下去的工作就是根据所编s-function要完成的任务，用相应的代码去替代模板里各个子函数的代码即可。
- Simulink在每个仿真阶段都会对s-function进行调用，在调用时，Simulink会根据所处的仿真阶段为flag传入不同的值，而且还会为sys这个返回参数指定不同的角色，也就是说尽管是相同的sys变量，但在不同的仿真阶段其意义却不相同，这种变化由simulink自动完成。



- m文件s-function可用的子函数说明如下：
- mdlInitializeSizes：定义s-function模块的基本特性，包括采样时间、连续或者离散状态的初始条件和sizes数组。
- mdlDerivatives：计算连续状态变量的微分方程。
- mdlUpdate：更新离散状态、采样时间和主时间步的要求。
- mdlOutputs：计算s-function的输出。
- mdlGetTimeOfNextVarHit：计算下一个采样点的绝对时间，这个方法仅仅是在用户在mdlInitializeSizes 里说明了一个可变的离散采样时间。
- mdlTerminate：实现仿真任务必须的结束。
- 概括说来，建立s-function可以分成两个分离的任务：
- 初始化模块特性包括输入输出信号的宽度，离散连续状态的初始条件和采样时间。
- 将算法放到合适的s-function子函数中去。



武汉大学

Wuhan University

2、定义s-function的初始信息

- 为了让Simulink识别出一个m文件s-function，用户必须在s-函数里提供有关s-函数的说明信息，包括采样时间、连续或者离散状态个数等初始条件。这一部分主要是在mdlInitializeSizes子函数里完成。



武汉大学

Wuhan University

Sizes数组是s-function函数信息的载体，它内部的字段意义为：

- NumContStates：连续状态的个数（状态向量连续部分的宽度）
- NumDiscStates：离散状态的个数（状态向量离散部分的宽度）
- NumOutputs：输出变量的个数（输出向量的宽度）
- NumInputs：输入变量的个数（输入向量的宽度）
- DirFeedthrough：有无直接馈入
- NumSampleTimes：采样时间的个数

如果字段代表的向量宽度为动态可变，则可以将它们赋值为 - 1。



- 注意DirFeedthrough是一个布尔变量，它的取值只有0和1两种，0表示没有直接馈入，此时用户在编写mdlOutputs子函数时就要确保子函数的代码里不出现输入变量u；1表示有直接馈入。
- NumSampleTimes表示采样时间的个数，也就是ts变量的行数，与用户对ts的定义有关。
- 需要指出的是，由于s-function会忽略端口，所以当有多个输入变量或多个输出变量时，必须用mux模块或demux模块将多个单一输入合成一个复合输入向量或将一个复合输出向量分解为多个单一输出。



武汉大学

Wuhan University

3、输入和输出参量说明

- S-function默认的4个输入参数为t、x、u和flag，它们的次序不能变动，代表的意义分别为：
- t：代表当前的仿真时间，这个输入参数通常用于决定下一个采样时刻，或者在多采样速率系统中，用来区分不同的采样时刻点，并据此进行不同的处理。
- x：表示状态向量，这个参数是必须的，甚至在系统中不存在状态时也是如此。它具有很灵活的运用。
- u：表示输入向量。
- flag：是一个控制在每一个仿真阶段调用哪一个子函数的参数，由Simulink在调用时自动取值。



武汉大学

Wuhan University

- S-function默认的4个返回参数为sys、x0、str和ts，它们的次序不能变动，代表的意义分别为：
- sys：是一个通用的返回参数，它所返回值的意义取决于flag的值。
- x0：是初始的状态值（没有状态时是一个空矩阵[]），这个返回参数只在flag值为0时才有效，其他时候都会被忽略。
- str：这个参数没有什么意义，是MathWorks公司为将来的应用保留的，m文件s-function必须把它设为空矩阵。
- ts：是一个 $m \times 2$ 的矩阵，它的两列分别表示采样时间间隔和偏移。



武汉大学

Wuhan University

习题：

考虑简单的线性微分方程：

$$y'''' + 3y''' + 3y'' + 4y' + 5y = e^{-3t} + e^{-5t} \sin(4t + \pi/3)$$

其中 $y(0) = 1$ $y'(0) = y''(0) = 0.5$ $y'''(0) = 0.2$ 。试用 Simulink 搭建起系统的仿真模型，并绘制出仿真结果曲线。

提高要求：将仿真模型封装成为子系统，并能提供参数设置功能。