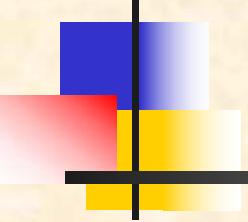


计算机仿真

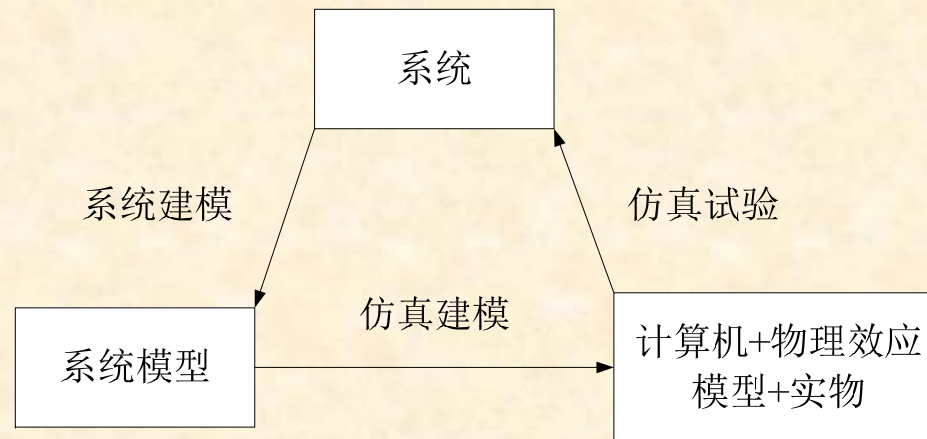


1、计算机仿真基本概念

2、计算机仿真的基本步骤与原则



1.1 计算机仿真的基本概念



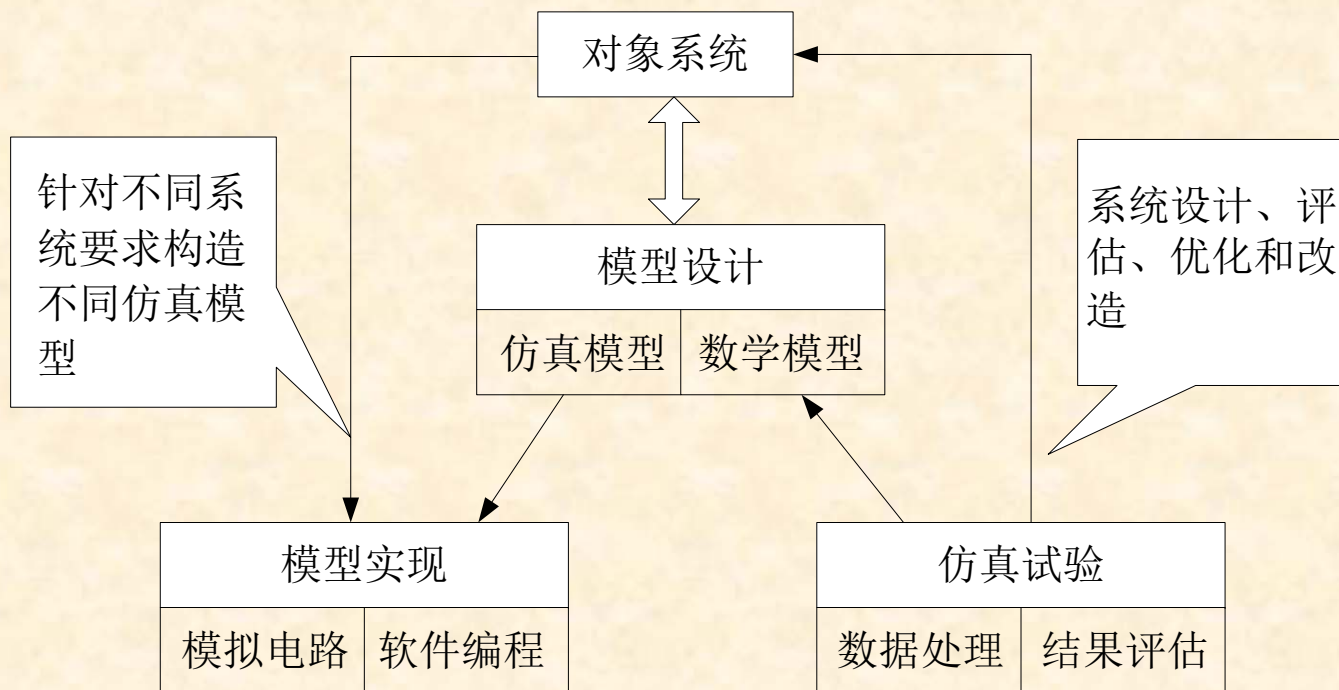
仿真：是一种基于模型的活动。即用模型对系统进行试验研究的过程。

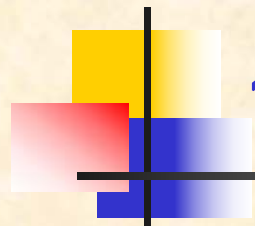
仿真三要素：系统、模型、计算机

系统是研究的对象；

模型是系统的抽象；

仿真过程的三个基本活动：建模，模型实现和仿真试验





1.1 计算机仿真的基本概念（续）

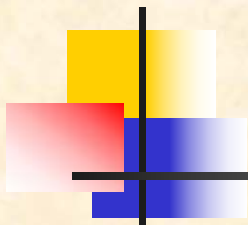
传统上：

“系统建模” 属于系统辨识技术范畴。

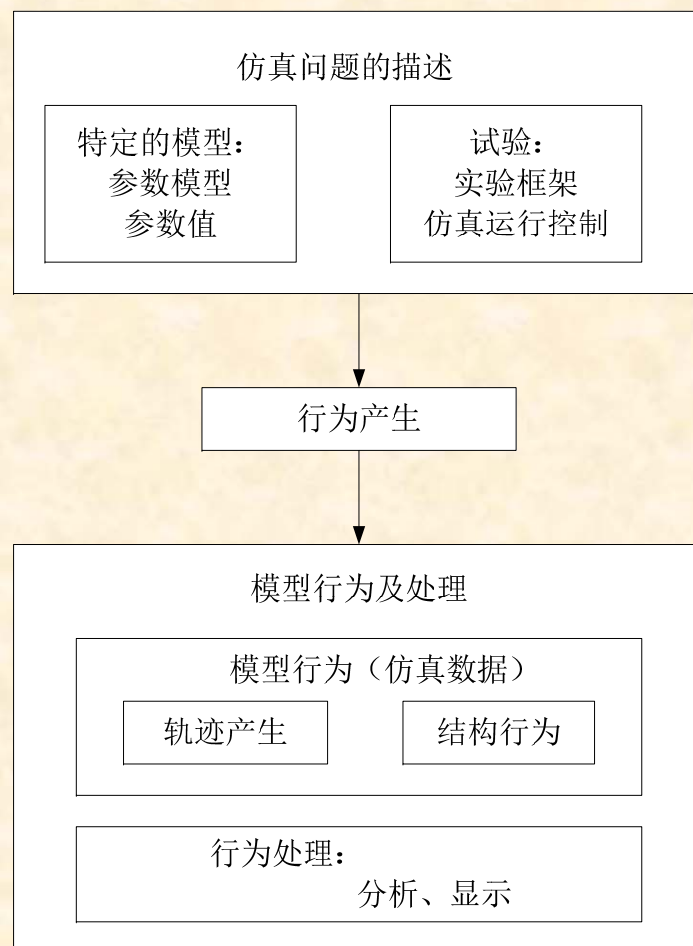
仿真技术则侧重于“仿真建模”，即针对不同形式的系统模型研究其求解算法，使其在计算机上得以实现。

至于“仿真实验” 也往往只注重“仿真程序”的校核(Verification)。

至于如何将仿真实验的结果与实际系统的行为进行比较这一根本性的问题——验证(Validation)缺乏从方法学的高度进行研究。



现代仿真的概念框架

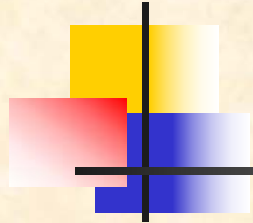




(1) . 仿真问题的描述

任何一个仿真问题都有**模型与试验**两部分组成。

- 任何一个**数学模型**都由两部分组成：一个**参数模型**及**一组参数值**。当给定一个参数模型，同时又赋予它具体的参数值后，就形成一个特定的模型。
- **试验**也分为两部分：**试验框架**和**仿真运行控制**。一个试验框架可以定义为一组条件，在该条件下，系统可被观测或被进行试验。一个实验框架定义一组条件，包括：模型参数、输入变量、观测变量、初始条件、终止条件、输出说明。



(2) 行为产生器

行为产生器是一套对模型进行试验的软件，由它可以产生一组系统状态变量随时间变化的资料（称为模型行为）。



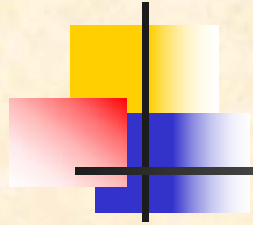
(3) . 模型行为及其处理

- 模型行为有：**点行为、轨迹行为和结构行为**。
- **点行为**则是指模型行为的一种特定属性，如均值、最小值、最大值、振荡次数、上升时间等。
- **轨迹行为**在各种类型的仿真中都将获得，它通常被表示为一组系统中各种描述变量随时间推移而变化的数据。
- **结构行为**只有可变结构系统模型才能获得，即通过改变系统模型的静态结构（指定义描述变量及其属性）或动态结构（指状态变量之间的动态关系）可获得系统模型行为随结构变化而发生变化的规律，这就是模型的结构行为。



现代仿真技术的进展

- 现代仿真技术的一个重要进展是将仿真活动扩展到上述三个方面，并将其统一到同一环境中。
- 在仿真建模方面，除了传统的基于物理、化学、生物学、社会学等基本定律及系统辨识等方法外，现代仿真技术提出了用仿真方法确定实际系统的模型。例如，根据某一系统在试验中所获得的输入输出数据，在计算机上进行仿真试验，确定模型的结构和参数。

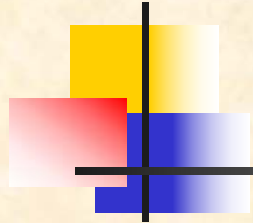


- 在仿真建模方面，除了适应计算机软硬件环境的发展而不断研究和开发许多新算法和新软件外，**现代仿真技术采用模型和实验分离技术，即模型的数据驱动(Data Driven)。**
- **现代仿真技术将模型又分为参数模型和参数值两部分，参数值属于实验框架的内容之一。**这样。模型参数与其对应的参数模型分离开来。仿真实验时，只需对参数模型赋予具体参数值，就形成了一个特定的模型，从而大大提高了仿真的灵活性和运行效率。



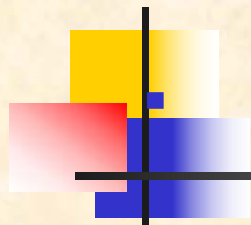
现代仿真技术的进展（续）

- 在**仿真实验**方面，现代仿真技术将实验框架与仿真运行控制区分开来。
- 与传统仿真区别在于：**将输出函数的定义也与仿真模型分离开来**。这样，当需要不同形式的输出时，不必重新修改仿真模型，甚至不必重新仿真运行。
- 复杂系统的仿真-元胞自动机多Agent

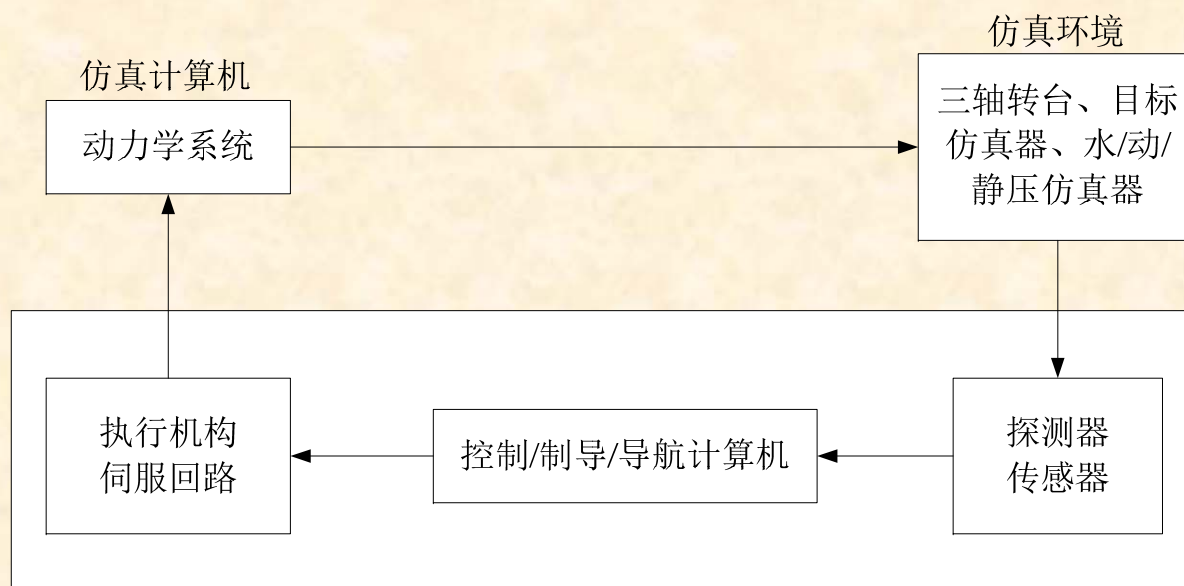


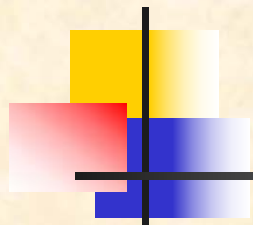
仿真的分类

- 1) 根据仿真系统的结构和实现手段分:
 - 物理仿真、数学仿真和半实物仿真(物理—数学仿真)
- 物理仿真
 - 按照真实系统的物理性质构造系统的物理模型, 并在物理模型上进行实验的过程。
- 数学仿真
 - 对实际系统进行抽象, 并将其特性用数学关系加以描述而得到系统的数学模型, 对数学模型进行实验的过程。
- 半实物仿真——Hardware In the Loop
 - 将数学模型与物理模型甚至实物联合起来进行实验。



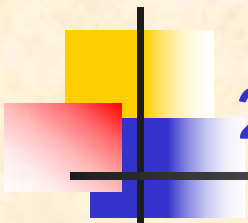
■在航空航天、武器系统等研究领域，半实物仿真是不可缺少的重要手段。





仿真的分类（续）

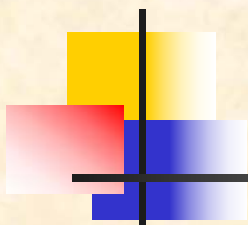
- 2) 根据仿真所用的计算机类型分：
 - 模拟计算机仿真
 - 数字计算机仿真
 - 数字模拟混合仿真。



2) 根据仿真所用的计算机类型分（续）

■ 模拟计算机仿真的特点：

- (1) 能快速求解微分方程。模拟计算机运行时各运算器是并行工作, 模拟机的解题速度与原系统的复杂程度无关。
- (2) 可以灵活设置仿真试验的时间标尺。模拟机仿真既可以进行实时仿真, 也可以进行非实时仿真。
- (3) 易于和实物相连。模拟计算机仿真是用直流电压表示被仿真的物理量, 因此和连续运动的实物系统连接时一般不需要A / D、D / A转换装置。
- (4) 模拟仿真的精度由于受到电路元件精度的制约和易受外界干扰, 所以一般低于数字计算机仿真。且逻辑控制功能较差, 自动化程度也较低。



2) 根据仿真所用的计算机类型分（续）

■ 数字计算机仿真

- 由于数字计算机只能对数码进行操作，因此任何动态系统在数字计算机上进行仿真的都必须将原系统变换成能在数字计算机上进行数值计算的离散时间模型。
- 故数字仿真需要研究各种仿真算法，这是数字计算机仿真与模拟仿真的最基本的差别。



2) 根据仿真所用的计算机类型分（续）

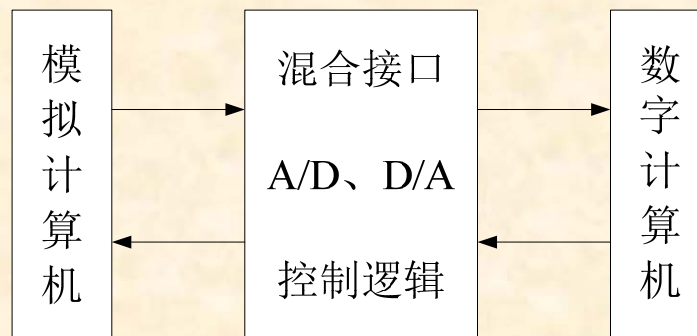
数字计算机仿真的特点

- (1) 数值计算的延迟。任何数值计算都有计算时间的延迟，其延迟的大小与计算机本身的存取速度、运算器的解算速度、所求解问题本身的复杂程度及使用的算法有关。
- (2) 仿真模型的数值化。数字计算机对仿真问题进行计算时采用数值计算，仿真模型必须是离散模型，如果原始数学模型是连续模型，则必须转换成适合数字计算机求解的仿真模型，因此需要研究各种仿真算法。
- (3) 计算精度高。特别是在工作量很大时，与模拟机相比更显其优越性。
- (4) 实现实时仿真比模拟仿真困难。对复杂的快速动态系统进行实时仿真时，对数字计算机本身的计算速度、存取速度等要求高。
- (5) 利用数字计算机进行半实物仿真时需要有A / D、D / A转换装置与连续运动的实物连接。

2) 根据仿真所用的计算机类型分（续）

数字模拟混合仿真的特点

- 可以充分发挥模拟仿真和数字仿真的特点。
- 仿真任务同时在模拟计算机和数字计算机上执行，这就存在按什么原则分配模拟机和数字机的计算任务的问题，一般是模拟计算机承担精度要求不高的快速计算任务，数字计算机则承担高精度、逻辑控制复杂的慢速变化任务。
- 混合仿真的误差包括模拟机误差、数字机误差和接口操作转换误差，这些误差在仿真中均应予以考虑。
- 一般混合仿真需要专门的混合仿真语言来控制仿真任务完成。
- 模拟计算机仿真和数字模拟混合仿真已逐步被全数字仿真取代。因此，今天的计算机仿真一般指的就是数字计算机仿真。



数字—模拟混合计算机



仿真的分类（续）

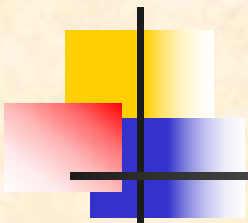
- 3) 根据仿真时钟与实时时钟的比例关系分：
 - 实时仿真、亚实时仿真、超实时仿真
 - 实际动态系统的时间基称为**实际时钟**；
 - 系统仿真时模型所采用的时钟称为**仿真时钟**。
- 1) **实时仿真**，即仿真时钟与实际时钟完全一致，也就是模型仿真的速度与实际系统运行的速度相同。当被仿真的系统中存在物理模型或实物时，必须进行实时仿真，例如，各种训练仿真器就是这样，有时也称为在线仿真。



3) 根据仿真时钟与实时时钟的比例关系分（续）

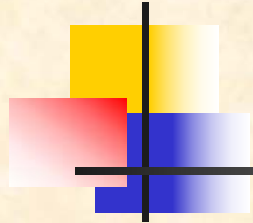
2) **亚实时仿真**，即**仿真时钟慢于实际时钟**，也就是模型仿真的速度慢于实际系统运行的速度。对仿真速度要求不苛刻的情况一般采用亚实时仿真。例如，大多数系统离线研究与分析，有时也称为离线仿真。如模拟爆炸效果。

3) **超实时仿真**，即**仿真时钟快于实际时钟**，也就是模型仿真的速度快于实际系统运行的速度。例如，大气环流的仿真、交通系统的仿真、生物进化(宇宙起源)等等。



仿真的分类（续）

- 4) 根据模型的特性分：
 - 连续系统仿真
 - 离散系统仿真



离散事件系统仿真与连续系统主要区别在于：状态变化发生在随机时间点上。

这种引起状态变化的行为称为“事件”，因而这类系统由事件驱动的；

而且，“事件”往往发生在随机时间点上，亦称为随机事件，因而离散事件系统一般都具有随机特性；系统的状态变量往往是离散变化的。

离散事件系统的动态特性很难用数学方程式描述，一般只能借助于活动图或流程图。无法得到系统动态过程的解析表达。

对离散事件系统的研究和分析的主要目标是系统行为的统计性能而不是行为的点轨迹。



计算机仿真的优点

■ (1) 安全性

安全性一直是仿真技术被重用的最主要的原因，所以航空、航天、武器系统过去曾经是仿真技术应用的最主要领域，一直到现在仍然占据很大的比重。20世纪60年代以后，核电站及潜艇等也由于安全性的原因，广泛采用仿真技术来设计这类系统及培训这类系统的人员。

■ (2) 经济性

经济性也是仿真技术被采用的十分重要的因素，几乎所有大型的发展项目，如阿波罗登月计划、战略防御系统、计算机集成制造系统都十分重视仿真技术的应用，这是因为这些项目投资极大，有相当的风险，而仿真技术的应用可以较小的投资换取风险上的大幅降低。



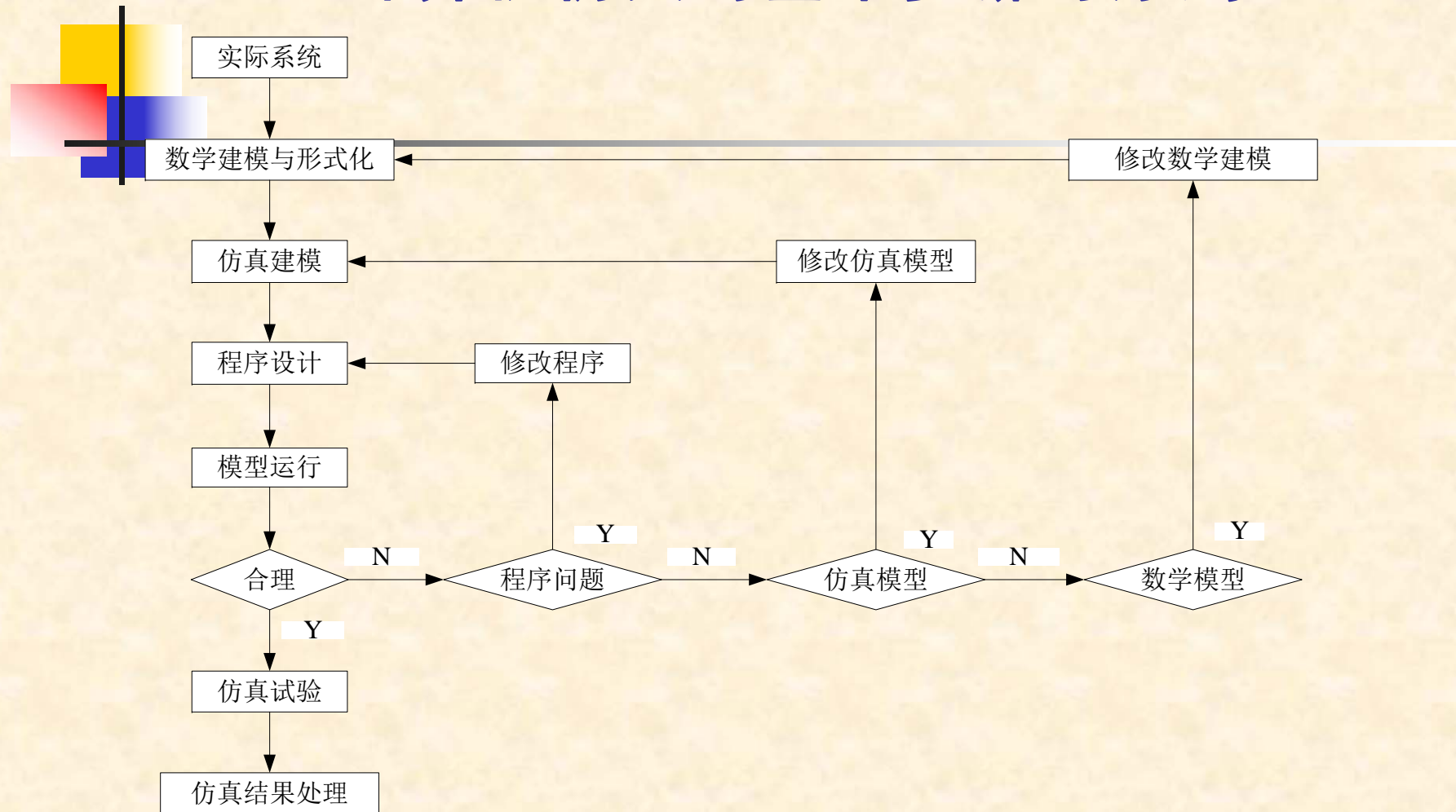
计算机仿真的优点（续）

- （3）可重复性

由于计算机仿真运行的是系统的模型，在模型确定的情况下，稳定系统的输入条件，可以复现某一仿真过程，这样可以在稳定实验条件下对系统进行重复的研究，也可以通过过程复现培养受训人员的反应处理能力，提高训练效果。如飞行模拟器、电厂仿真器训练中的故障功能设置。



1.2 计算机仿真的基本步骤与原则



计算机仿真的一般过程



1.2 计算机仿真的基本步骤与原则（续）

- **建模与形式化**的任务是：进一步明确系统模拟工作的目标，定义所要研究系统的构成要素、系统的边界和系统环境，确定系统模拟方案的评价准则。
- **仿真建模**是仿真过程的第二步。其主要任务：根据系统的特点和仿真的要求选择合适的算法。使该算法的稳定性、计算精度、计算速度能满足仿真的要求。



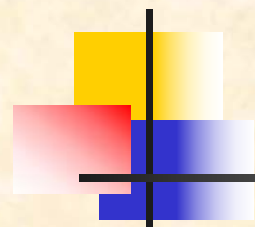
1.2 计算机仿真的基本步骤与原则（续）

- 第三步是**程序设计**，即将仿真模型用计算机能执行的程序来描述。程序中还要包括仿真实验的要求，如仿真运行参数、控制参数、输出要求等。
 - 早期的仿真往往采用通用的高级程序语言编程，随着仿真技术的发展，一大批适用不同需要的仿真语言被研制出来，大大减轻了程序设计的工作量。
- 第四步是**模型运行**，分析模型运行结果是否合适，如不合适，从前几步查找问题所在，并进行修正，直到结果满意。

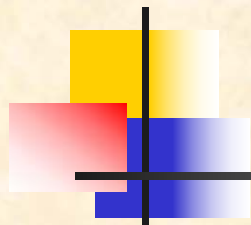


1.2 计算机仿真的基本步骤与原则（续）

- 第五步是进行仿真实验、处理仿真结果。
 - 对每一个方案，都要用不同的随机数序列多次重复运行，并根据重复运行的输出数据，运用数理统计方法，分析仿真结果的统计特征。
 - 而对不同的方案，则要用相同的随机数序列进行仿真运行，以便消除由于随机数序列不同而引起的差异。
 - 仿真结果：打印数据、曲线，提供2D/3D图形显示，乃至虚拟环境。



Simulink建模与仿真基础(1)



Simulink简介

Simulink是**Matlab**的仿真工具箱，可以用来对动态系统进行建模、仿真和分析，支持连续的、离散的以及线性的和非线性的系统。具有以下特点：

- ★ 用绘制方框图代替编写程序，结构和流程清晰；
- ★ 智能化地建立和运行仿真，仿真精细、贴近实际；
- ★ 适应面广。包括线性、非线性系统；连续、离散及混合系统；单任务、多任务离散时间系统。



Simulink文件操作

Simulink模型的文件为MDL模型文件，扩展名为.mdl，以ASCII码形式存储。

1、新建文件

新建仿真模型文件主要有以下几种方式：

★ 在Matlab命令窗口选择

“File” → “New” → “Model”

★ 在命令窗口运行simulink命令，在弹出的模块库浏览器窗口中选择 “File” → “New” → “Model”

★ 在Simulink模型窗口中选择

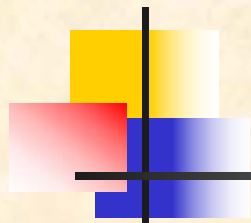
“File” → “New” → “Model”

2、打开文件

打开仿真模型文件主要有以下几种方式：

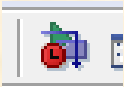
- ★ 在Matlab命令窗口输入不加扩展名的文件名
- ★ 在Matlab命令窗口选择 “File” → “Open”
- ★ 在Simulink模块库浏览器窗口选择 “File” → “Open”
- ★ 在Simulink模型窗口选择 “File” → “Open”

Simulink模型库浏览器

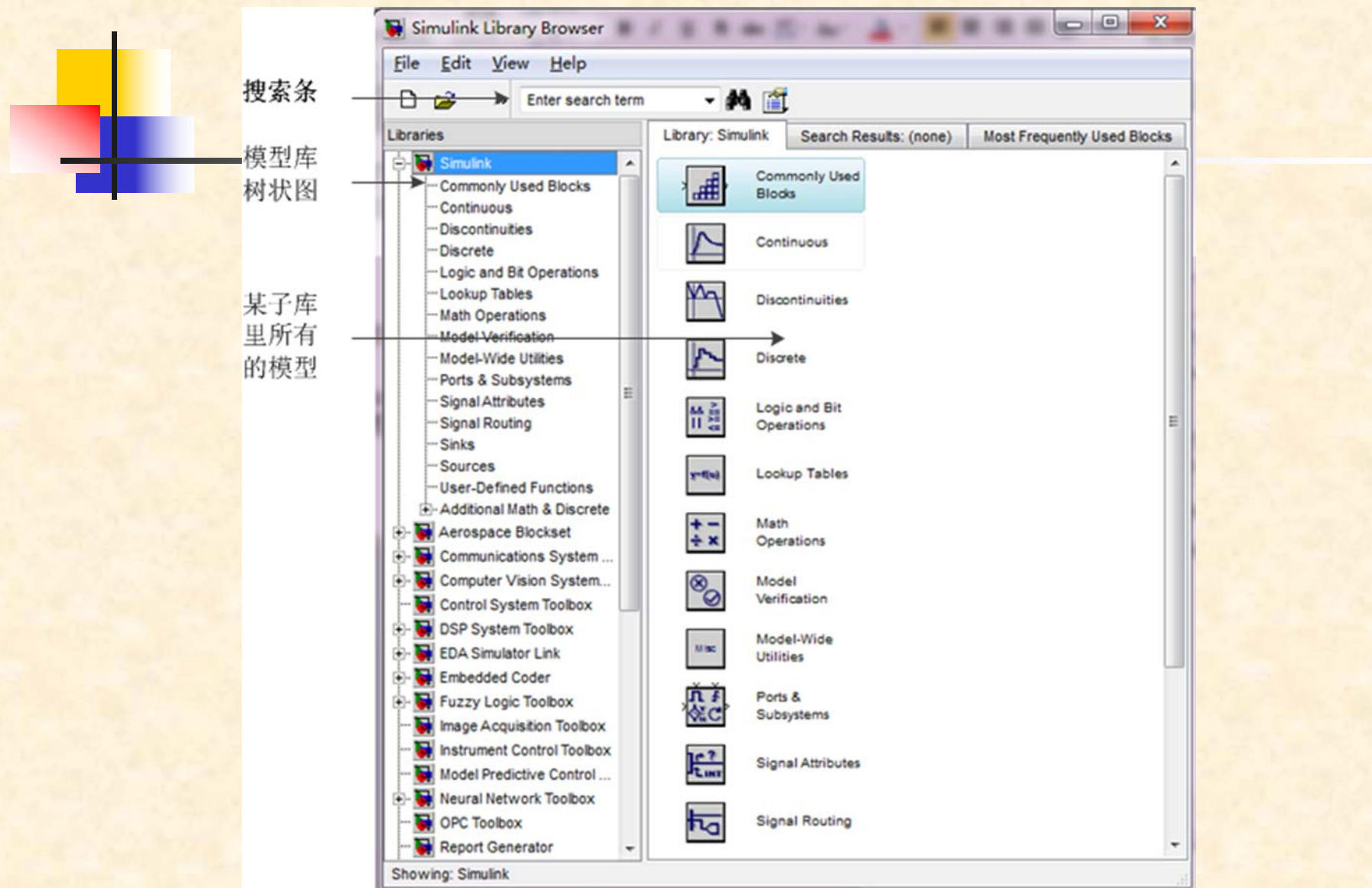


Matlab simulink所用的所有模块都在模型库中，通过模型库浏览器可找到所需要的模块，然后将其拖动到模型中。

模型库浏览器窗口打开方式有两种：

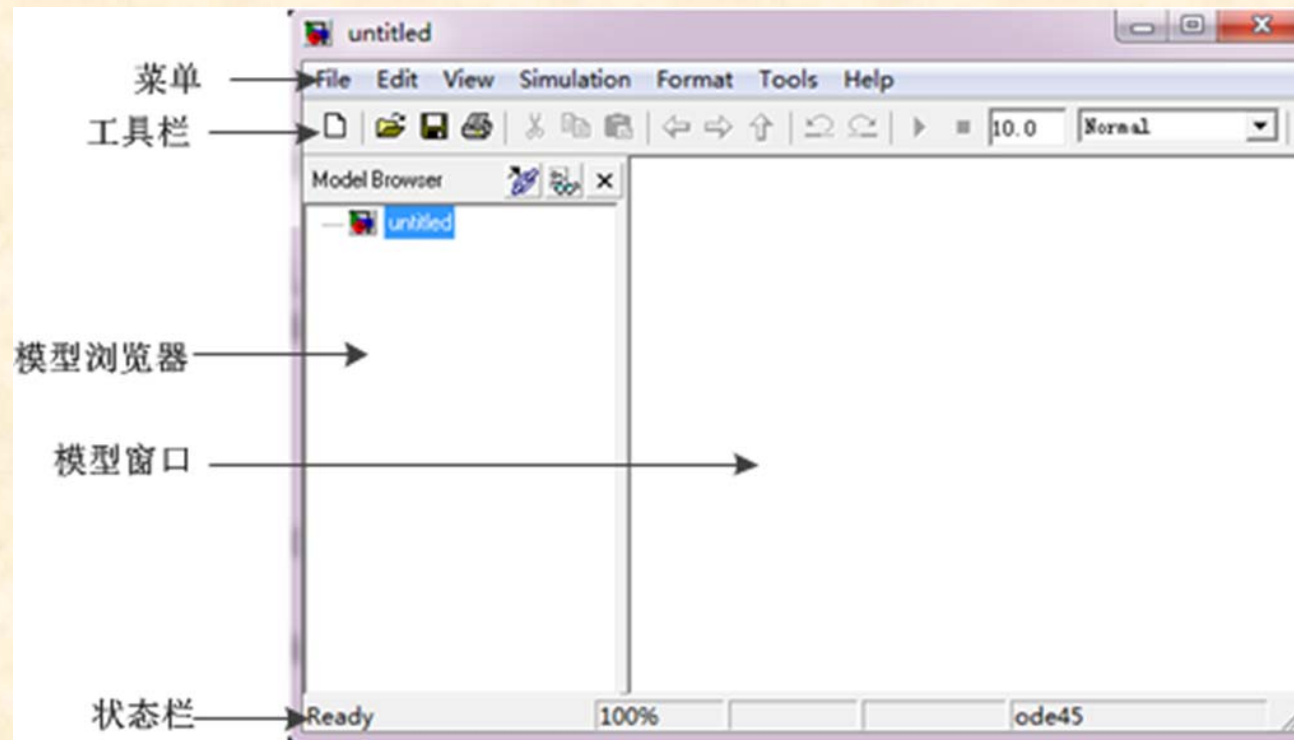
- 1、在命令窗口输入“simulink”命令
- 2、通过图标 

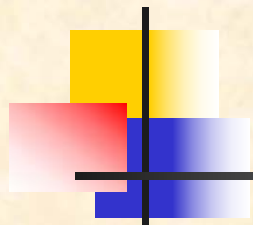
模型库浏览器窗口如下：



Simulink模型窗口

Simulink模型窗口由菜单栏、工具栏、模型浏览器、模型框图窗口及状态栏组成。





Simulink模型创建

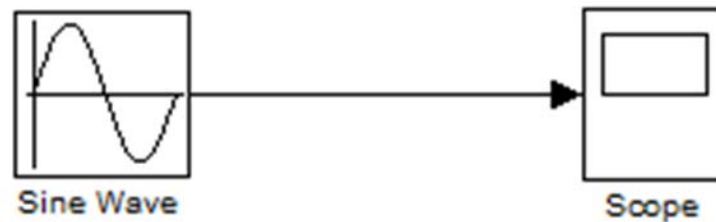
Simulink模型是由模块和信号线连接构成的方框图，创建模型就是绘制方框图。

1、模块操作

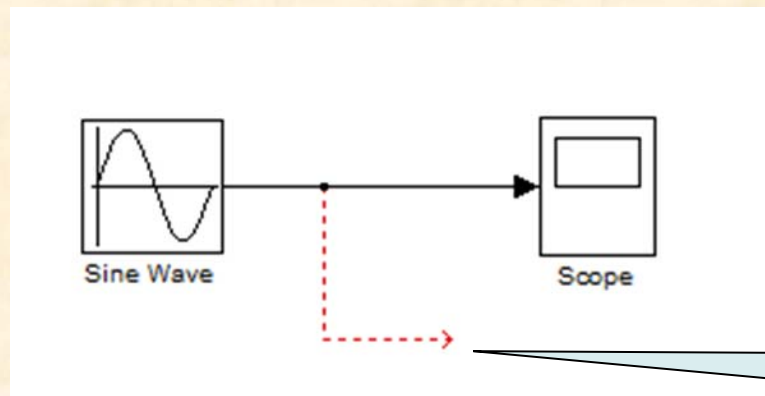
模块操作包括对象的选定、模块的复制、模块的移动、模块的删除、改变模块大小、模块的翻转和模块名的编辑等。

2、信号线操作

◆ **模块间连线**: 先将光标指向一个模块的输出端, 待光标变成十字后按下鼠标左键拖动, 直到另一模块的输入端。



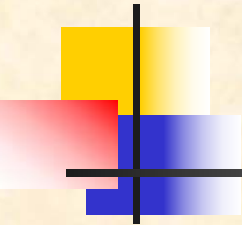
◆ **信号线分支**：将光标指向信号线的分支点上，
按住鼠标右键，光标变为十字，拖动鼠标直到分支
线的终点，释放鼠标。



虚线，因为
终端没有连
接到模块

◆ **信号线文本注释**，在信号线中插入模块

Simulink基本模块

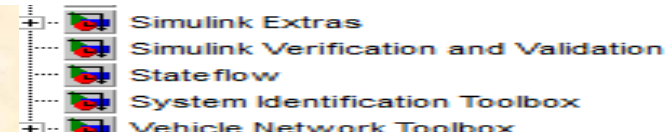
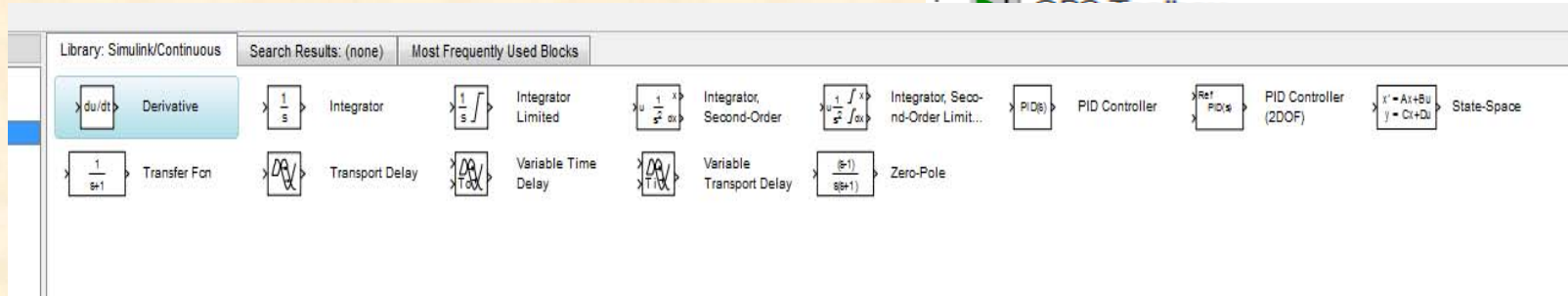
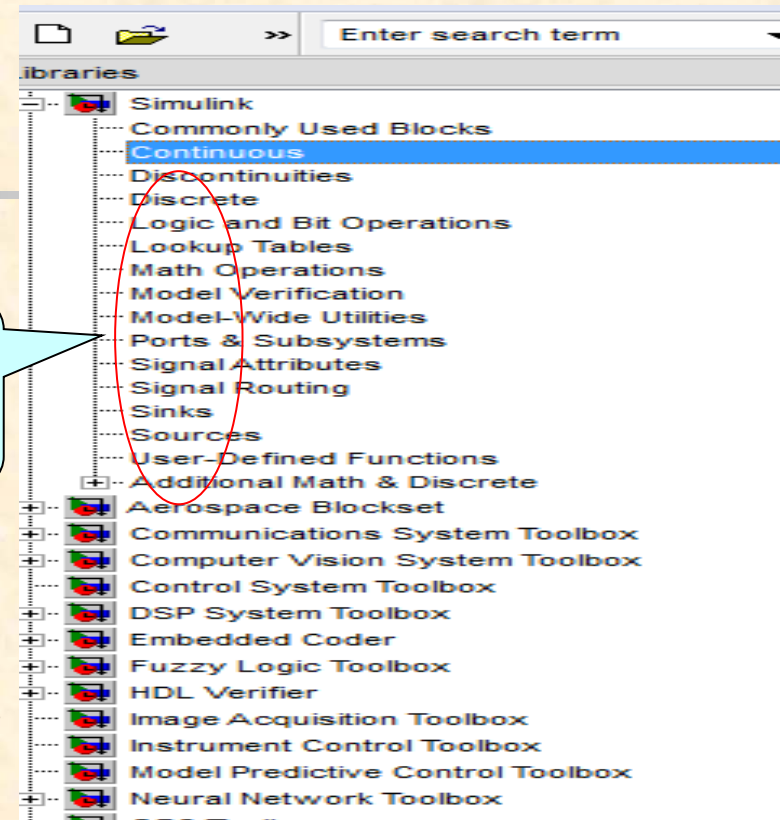


1、基本模块

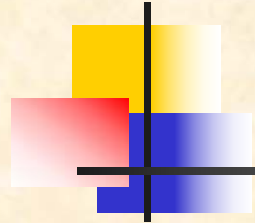
Simulink
基本模块

*Simulink*模块库

包含各种功能模块，如：放大器、微分器、积分器、各种信号源等。



Simulink基本模块库主要有：



连续模块库

离散模块库

函数与表格模块库

数学模块库

信号输出模块

信号源模块库

……等

简要介绍以下三个：

(1) 输入信号源 (Sources)

信号源模块库用来为模型提供输入信号，没有输入口，至少有一个输出口，如：



(2) 接收模块 (Sinks)

接收端模块用来接收信号，如：



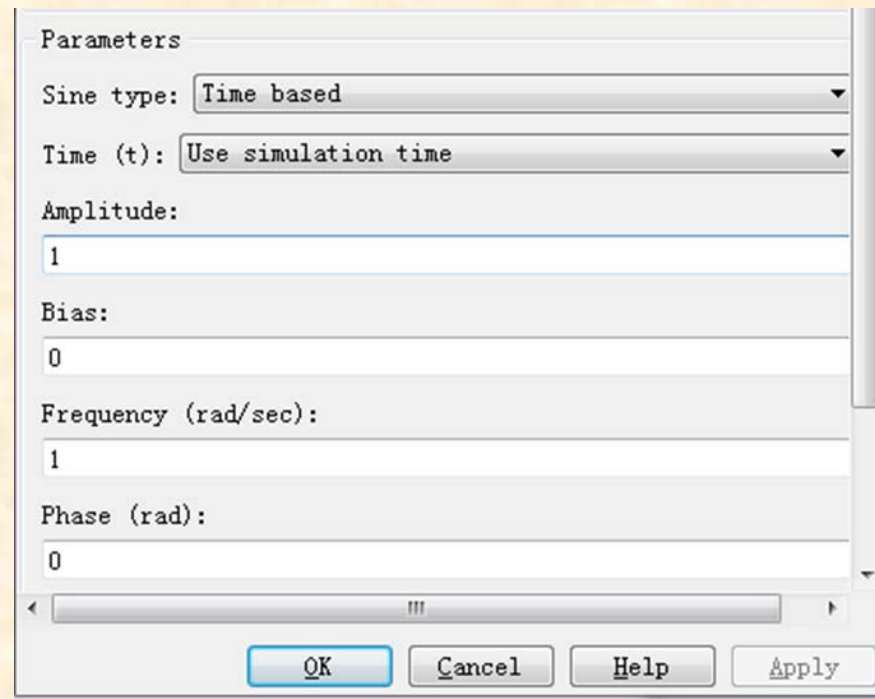
(3) 连续系统模块 (continuous)

连续系统模块用来构成连续系统的环节，如：



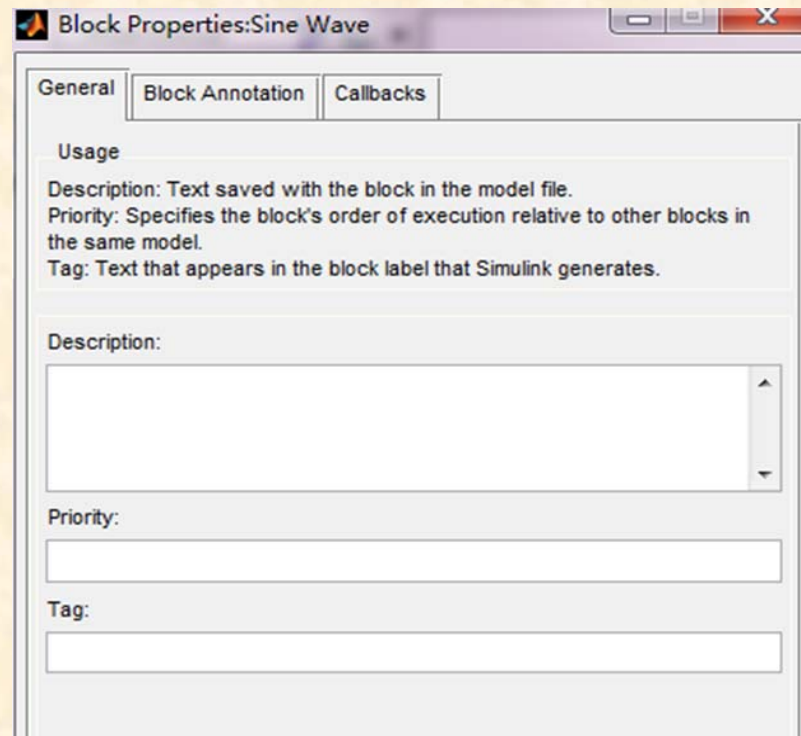
2、模块参数设置

打开参数设置对话框：**双击模块**或者右键选择“Block Parameters”，比如**正弦信号源**，可以设置幅度、频率、初相等。



3、模块属性设置

打开属性设置对话框：右键选择“Block Properties”，可以设置模块的优先级、标记、调用函数等。



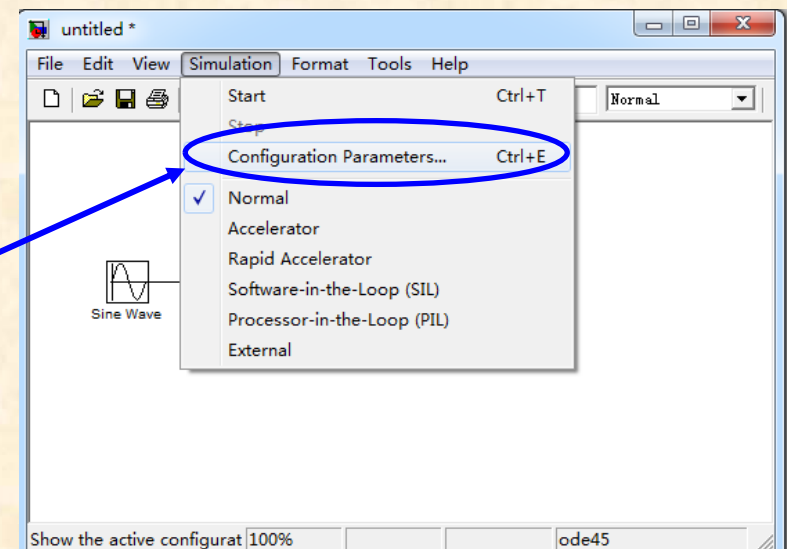
系统仿真与分析

1、仿真设置

Simulink的模型实际上是定义了仿真系统的微分或差分方程组，而仿真则是用数值解算法来求解方程。

仿真设置包括对仿真的起始和结束时间、仿真步长、仿真解法、输出模式，以及是否从工作空间装载数据或保存数据到工作空间等进行设置。

打开仿真设置对话框：在模型窗口选择
“Simulation” → **“Configuration Parameters”**



仿真设置对话框如下：

数据装载或保存

起始和结束时间

Configuration Parameters: untitled/Configuration (Active)

Select:

- Solver
- Data Import/Export
- + Optimization
- + Diagnostics
- Hardware Implementa...
- Model Referencing
- + Simulation Target
- + Code Generation
- + HDL Code Generation

Simulation time

Start time: 0.0 Stop time: 10.0

Solver options

Type: Variable-step Solver: ode45 (Dormand-Prince)

Max step size: auto Relative tolerance: 1e-3

Min step size: auto Absolute tolerance: auto

Initial step size: auto Shape preservation: Disable all

Number of consecutive min steps: 1

Tasking and sample time options

Tasking mode for periodic sample times: Auto

☐ Automatically handle rate transition for data transfer

☐ Higher priority value indicates higher task priority

Zero-crossing options

Zero-crossing control: Use local settings Algorithm: Nonadaptive

Time tolerance: 10*128*eps Signal threshold: auto

Number of consecutive zero crossings: 1000

2、连续系统仿真

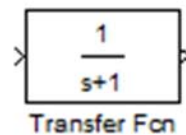
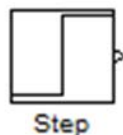
例1：建立二阶系统的仿真模型，传递

函数为 $\frac{1}{s^2+0.6s}$ 。

方法：输入信号源使用阶跃信号，系统使用开环传递函数 $\frac{1}{s^2+0.6s}$ ，接收模块使用示波器来构成模型。

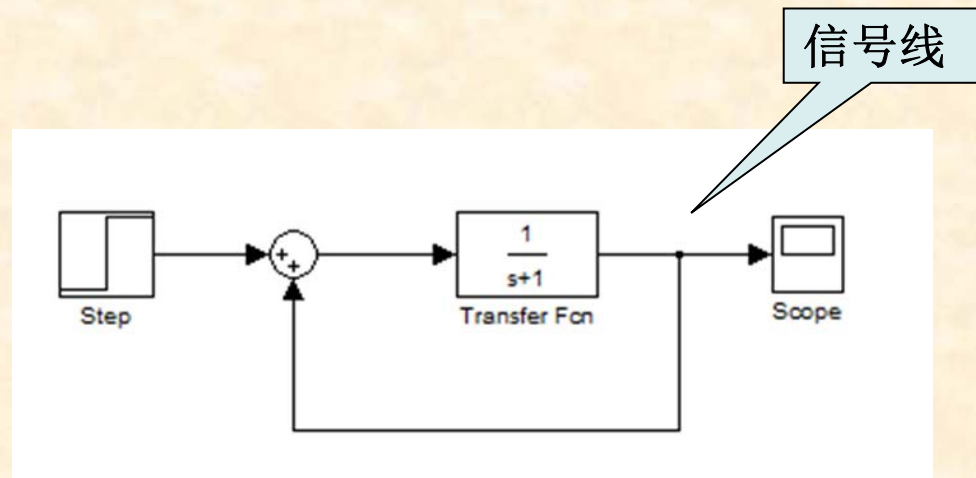
步骤:

(1) 先将需要的模块放入模型窗口，如：
在“**Sources**”库中选“**step**”模块，
在“**Continuous**”库中选“**Transfer Fcn**”模块，
在“**Math Operations**”库中选“**Sum**”模块，
在“**Sinks**”库选择“**Scope**”模块。



步骤:

(2) 连接各模块，从信号线引出分支点，构成闭环系统。



步骤:

(3) **设置模块参数**: 通过双击模块或弹出菜单, 可打开该模块的属性对话框, 可设置参数。

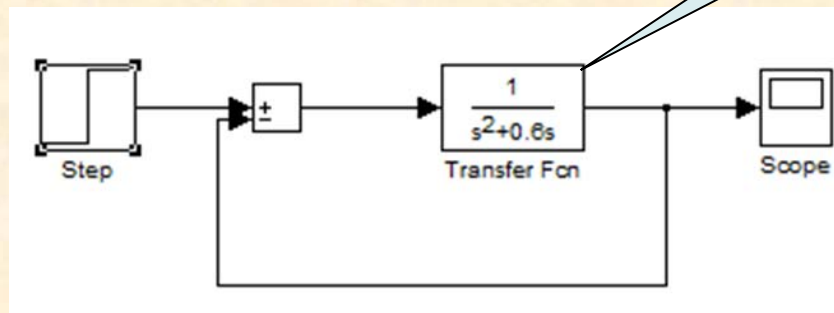
如:

Sum: “Icon shape” 设置为 “rectangular”,
“List of signs” 设置为 “|+ -”。

Transfer Fcn: 分母多项式 “Denominator”
设置为 “[1 0.6 0]”。

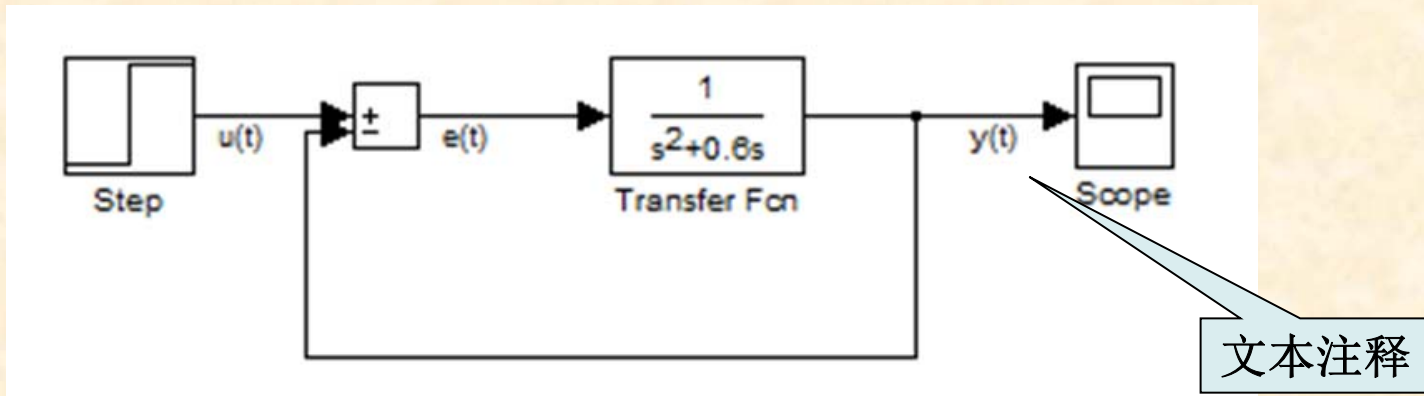
Step: “Step time” 设置为0。

设置传递函数



步骤:

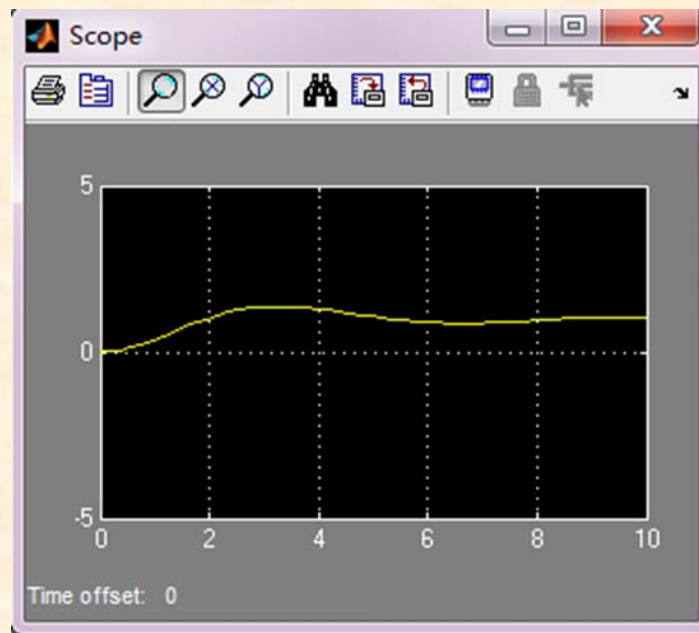
(4) 添加信号线文本注释
双击信号线，出现编辑框，在编辑框内输入文本。



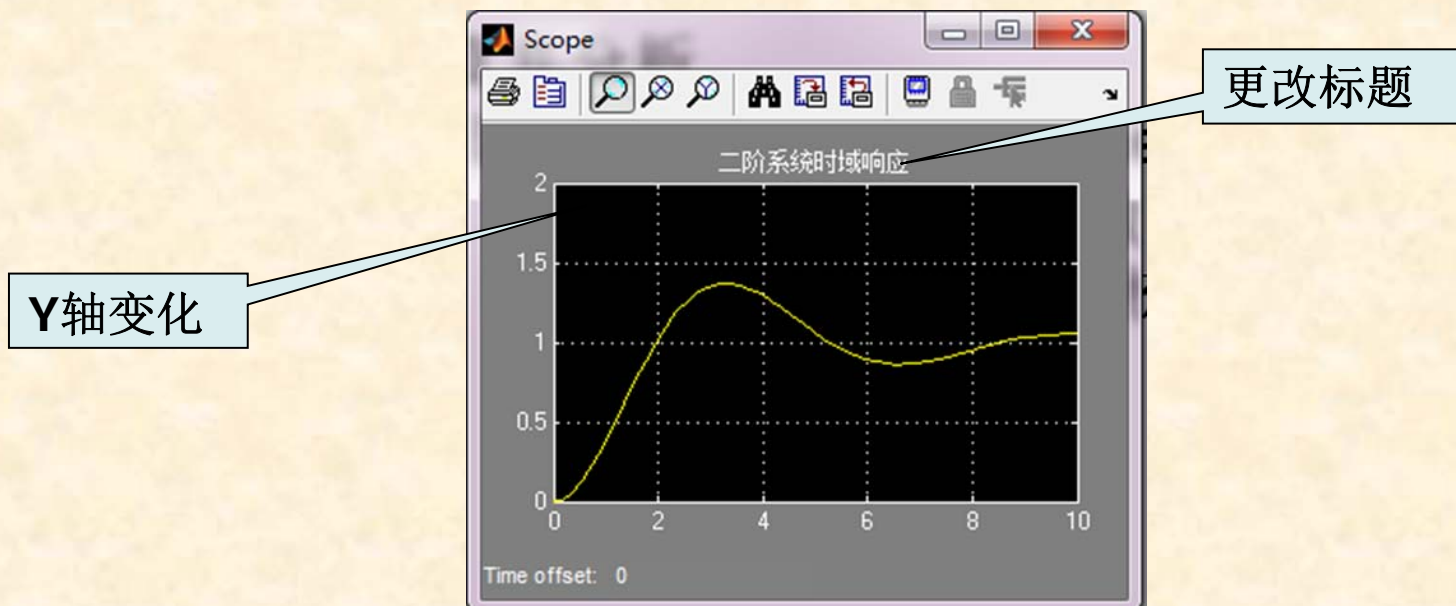
步骤:

(5) 仿真并分析

- 仿真运行：单击工具栏的“**Start simulation**”按钮，开始仿真，在示波器上显示出阶跃响应。

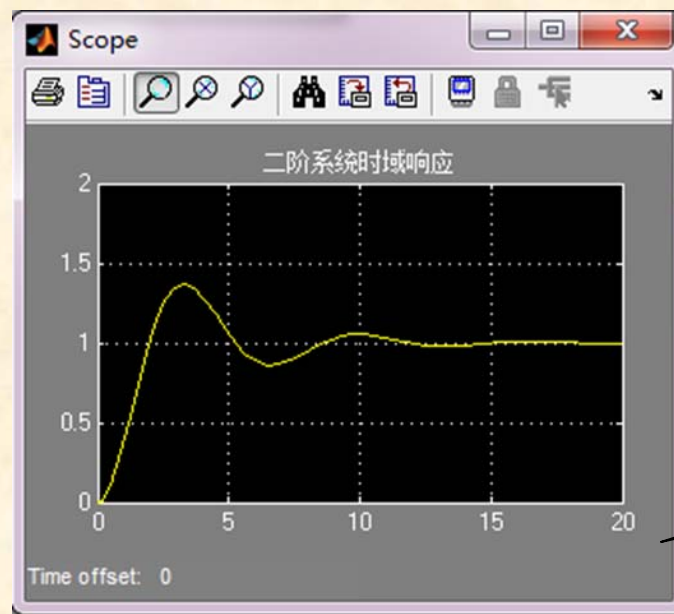


- 纵坐标及标题修改：右击示波器的坐标框，选择“**Axes properties**”，将y坐标的“**Y-min**”改为0，“**Y-max**”改为2，“**Title**”改为“二阶系统时域响应”。

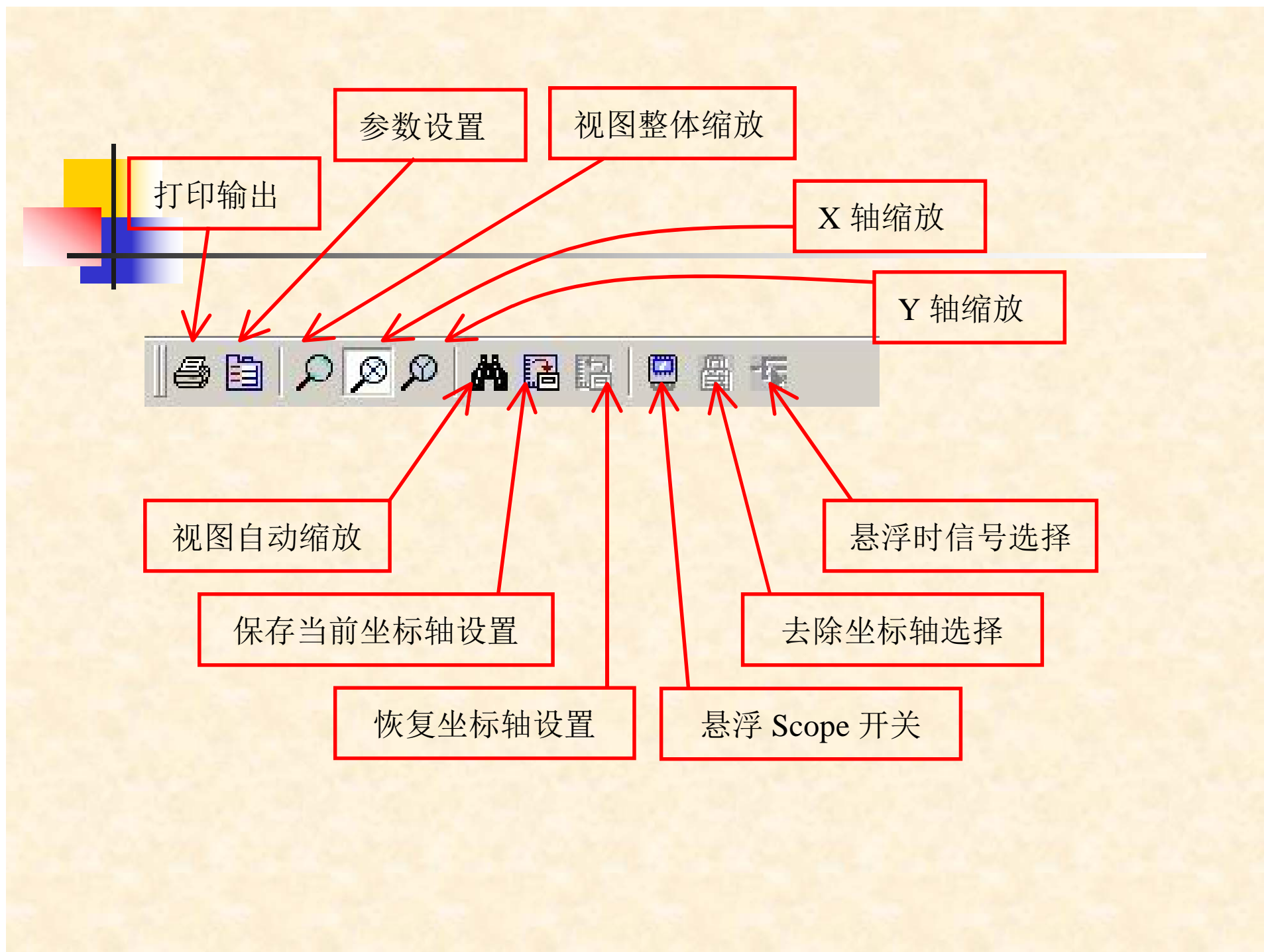


步骤:

- 在模型窗口，选择“Simulation” → “Configuration parameters”，在“Solver”页将“Stop time”设置为20，然后单击“Start simulation”按钮。



时间增加到20s





3、离散系统仿真

离散系统的仿真过程与连续系统的仿真过程基本一样，只是选择的模块为离散系统模块，设置的参数也需根据离散系统设置。

例2:设某一年的人口数目为 $p(n)$ ，其中 n 表示年份，它与上一年的人口 $p(n-1)$ 、人口繁殖速率 r 以及新增资源所能满足的个体数目 k 之间的动力学方程由如下的差分方程所描述：

$$p(n) = rp(n-1) \left[1 - \frac{p(n-1)}{K} \right]$$

如果设人口初始值 $p(0)=100000$ 、人口繁殖速率 $r=1.05$ 、新增资源所能满足的个体数目 $k=1000000$ ，要求建立此人口动态变化系统的系统模型，并分析人口数目在0至100年之间的变化趋势。

1 建立模型

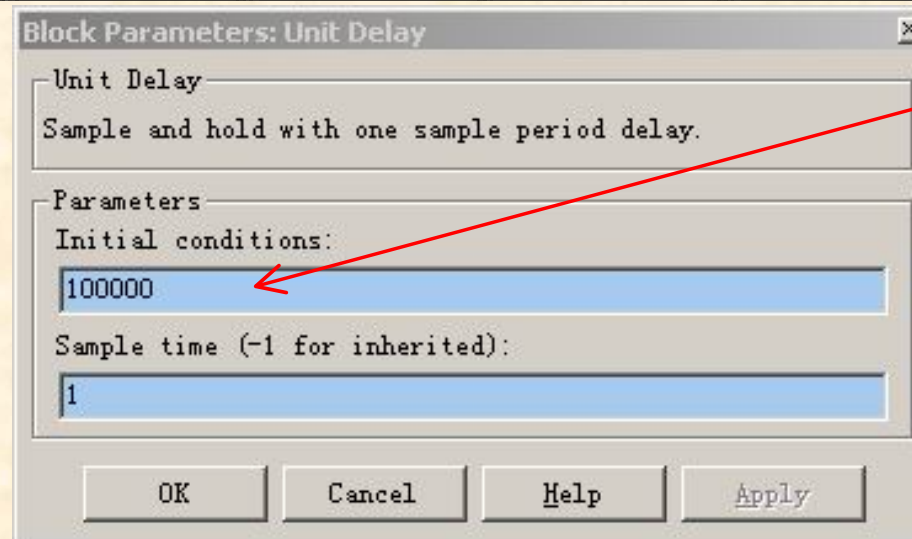
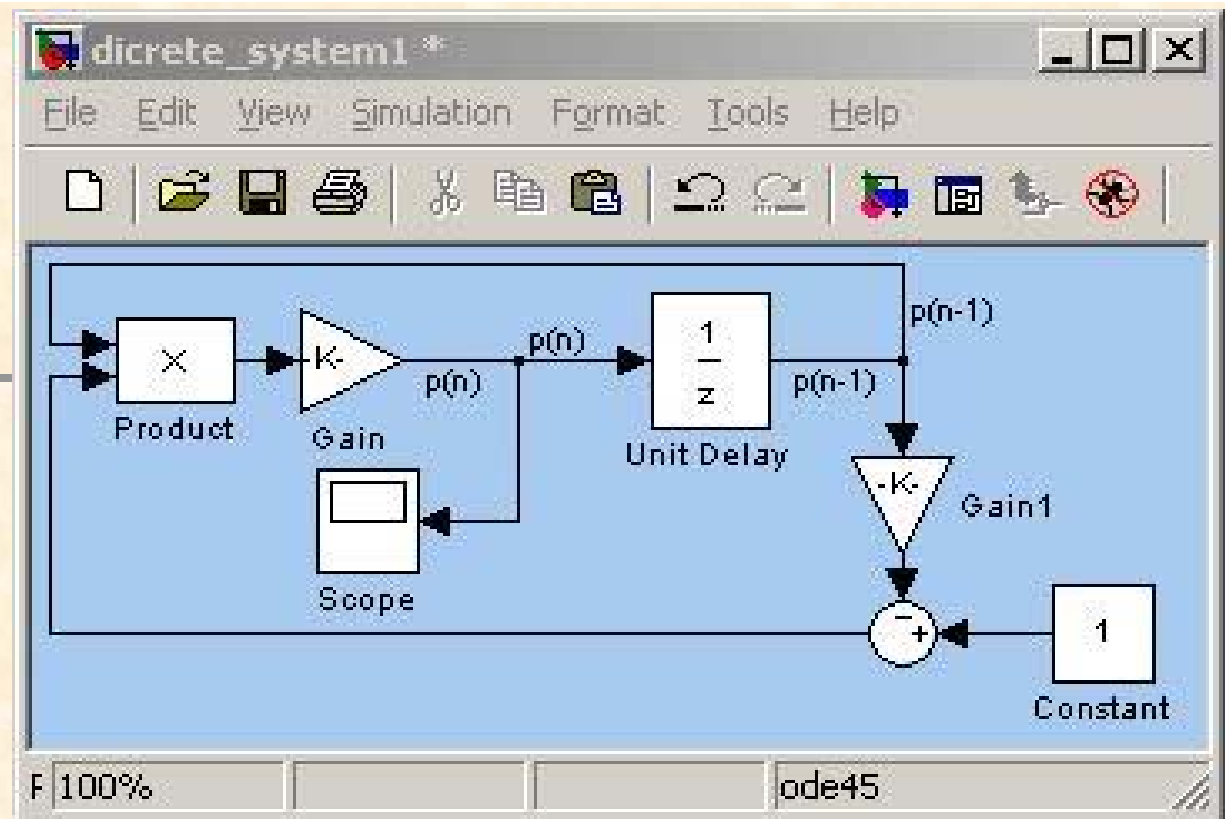
2 模块参数设置

(1) 增益模块Gain表示人口繁殖速率，故取值为1.05。

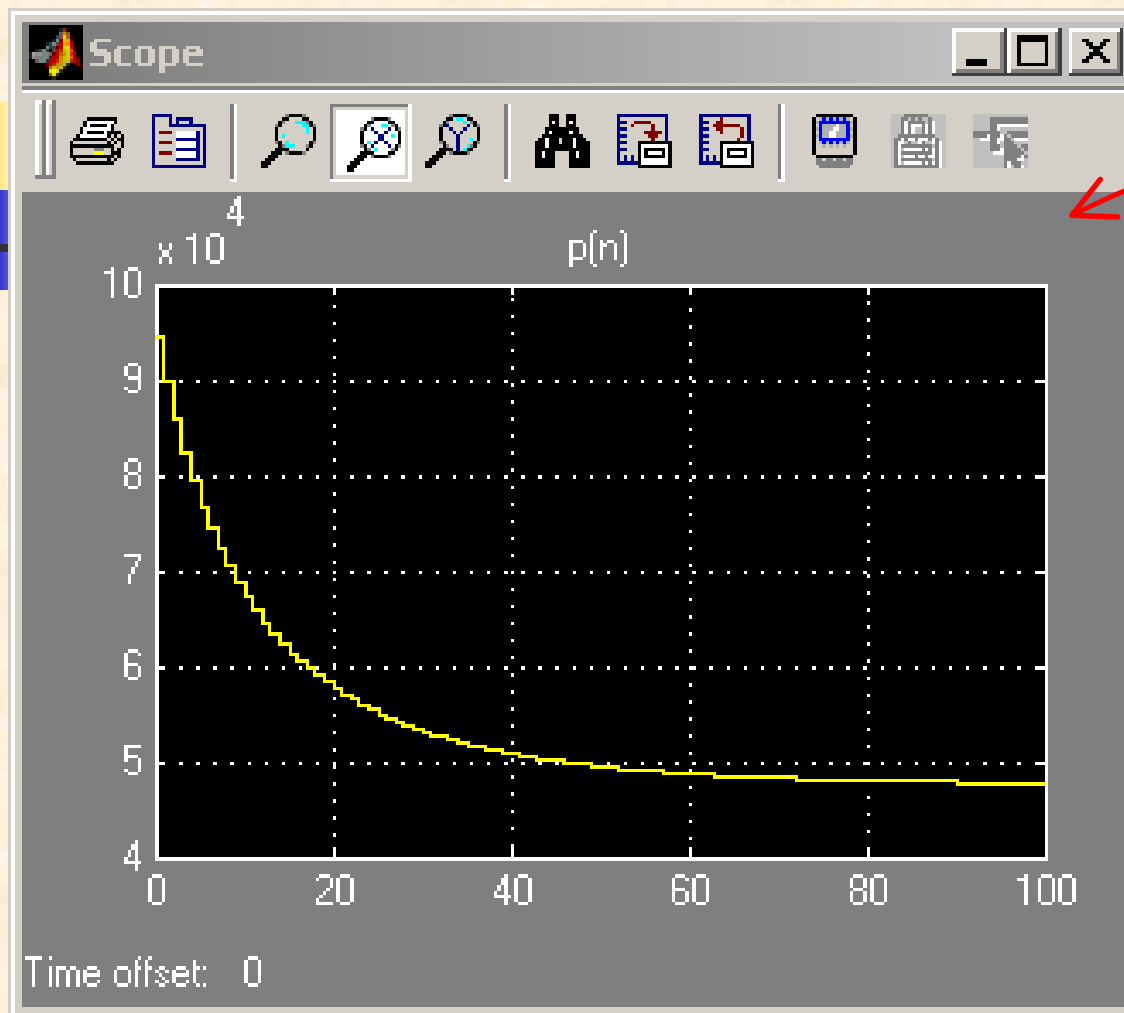
(2) 模块Gain1表示新增资源所能满足的个体数目，故取值为1000000。

(3) Unit Delay模块参数设置。

3 系统仿真参数设置及仿真分析



初始条件相当于人口的初始值 $p(0)$ ，故取值为 100000



人口数目在
0 至 100(年)
之间的变化
趋势,人口逐
渐趋向一个
稳定值

Simulink建模与仿真基础(2)

主要内容如下：

- 5.1 Simulink基本操作
- 5.2 模块库和系统仿真
- 5.3 子系统创建与封装
- 5.4 Simulink仿真举例

- Simulink 中的 “Simu”一词表示可用于计算机仿真，而 “Link”一词表示它能进行系统连接，即把一系列模块连接起来，构成复杂的系统模型。作为MATLAB的一个重要组成部分，Simulink由于它所具有的上述的两大功能和特色，以及所提供的可视化仿真环境、快捷简便的操作方法，而使其成为目前最受欢迎的仿真软件。
- 本章主要介绍Simulink的基本功能和基本操作方法，并通过举例介绍如何利用Simulink进行系统建模和仿真。

5.1 Simulink 基本操作

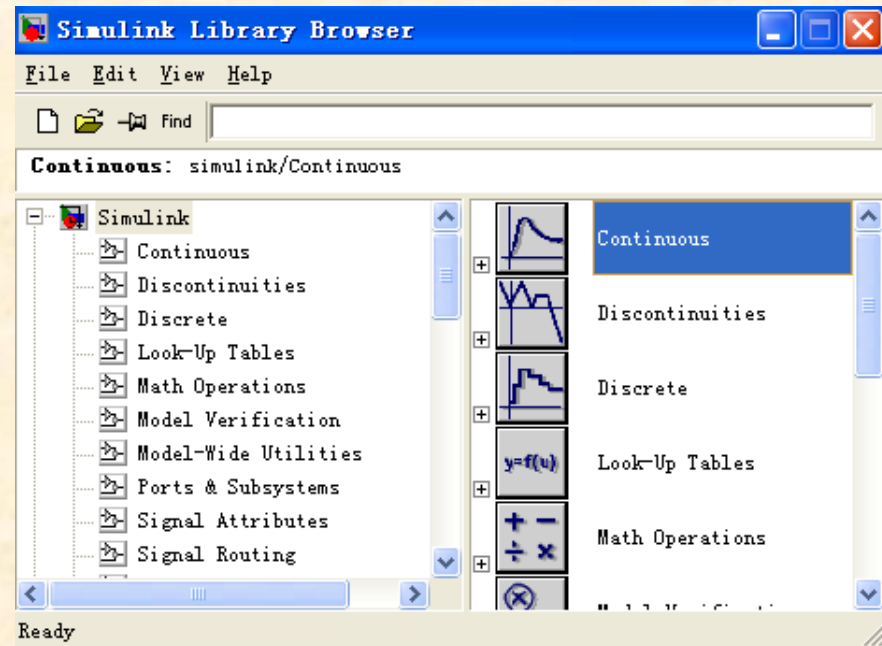
- 利用Simulink进行系统仿真的步骤是：
 - ① 启动Simulink，打开Simulink模块库
 - ② 打开空白模型窗口；
 - ③ 建立Smulink仿真模型；
 - ④ 设置仿真参数，进行仿真；
 - ⑤ 输出仿真结果。

5.1.1 启动Simulink

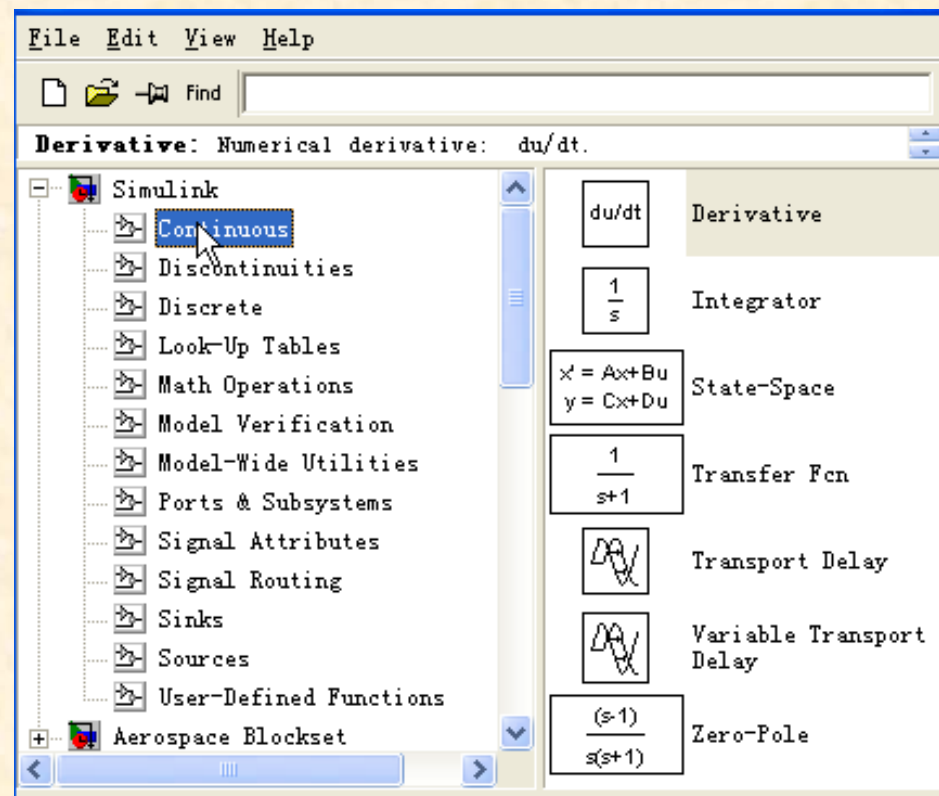
a) 启动Simulink。

- 单击MATLAB Command窗口工具条上的Simulink图标，或者在MATLAB命令窗口输入simulink，即弹出图示的模块库窗口界面(Simulink Library Browser)。该界面右边的窗口给出Simulink所有的子模块库。

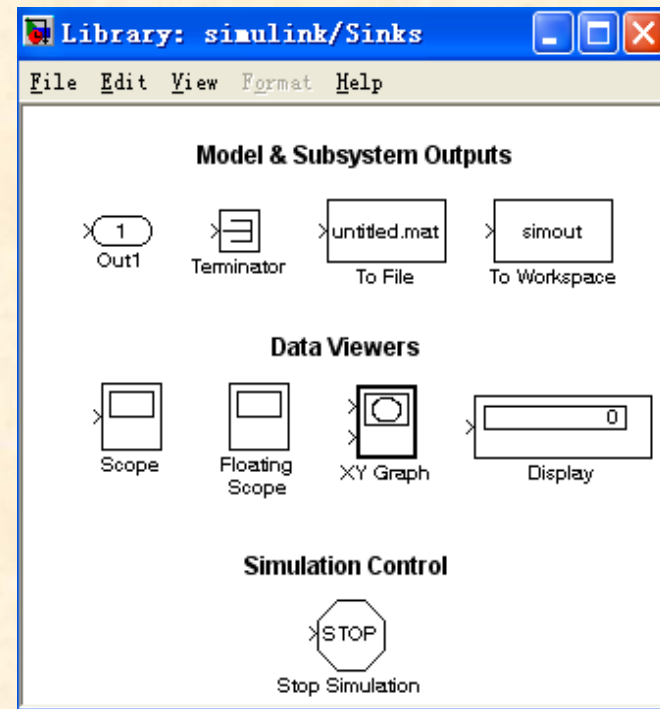
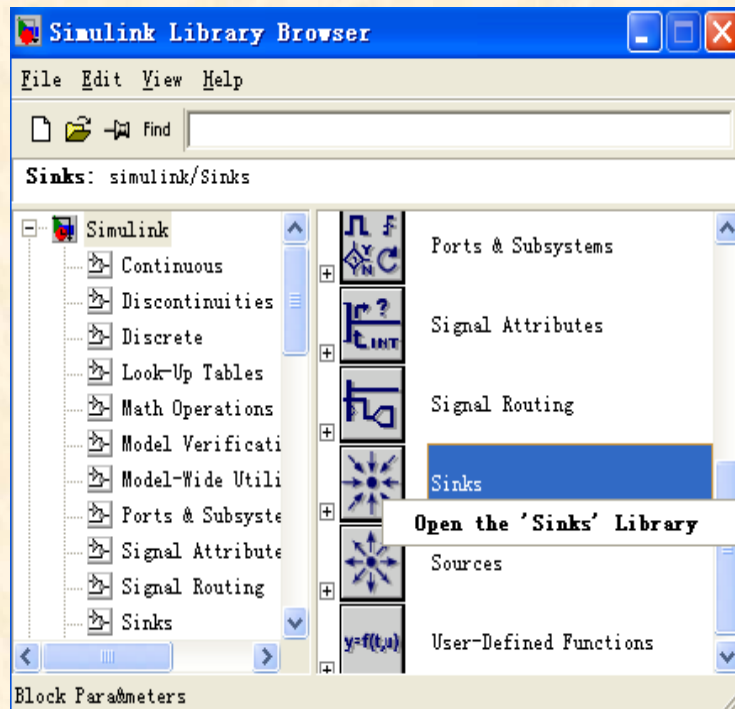
- 常用的子模块库有 Sources(信号源), Sink(显示输出), Continuous(线性连续系统), Discrete (线性离散系统), Function & Table (函数与表格), Math(数学运算), Discontinuities (非线性), Demo (演示) 等。



- 每个子模块库中包含同类型的标准模型，这些模块可直接用于建立系统的Simulink框图模型。可按以下方法打开子模块库：
 - ① 用鼠标左键点击某子模块库(如【Continuous】)，Simulink浏览器右边的窗口即显示该子模块库包含的全部标准模块。



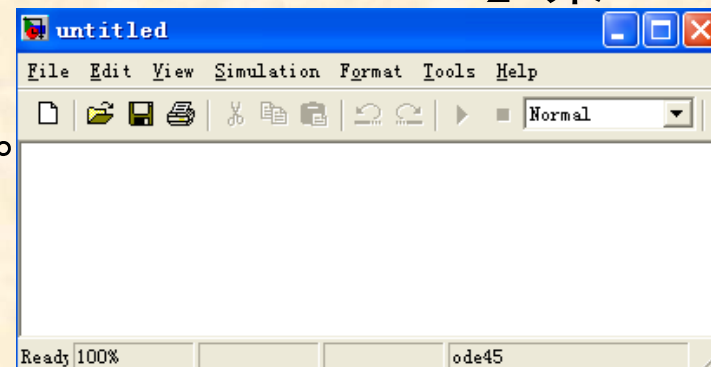
- ② 用鼠标右键点击Simulink菜单项，则弹出一菜单条，点击该菜单条即弹出该子库的标准模块窗口.如单击左图中的【Sinks】，出现“Open the ‘Sinks’ Library”菜单条，单击该菜单条，则弹出右图所示的该子库的标准模块窗口。



b) 打开空白模型窗口

- 模型窗口用来建立系统的仿真模型。只有先创建一个空白的模型窗口，才能将模块库的相应模块复制到该窗口，通过必要的连接，建立起Simulink仿真模型。也将这种窗口称为Simulink仿真模型窗口。
- 以下方法可用于打开一个空白模型窗口：
 - 在MATLAB主界面中选择【File:New→Model】菜单项；
 - 单击模块库浏览器的新建图标 ；
 - 选中模块库浏览器的【File : New → Model】菜单项。

所打开的空白模型窗口如图所示。



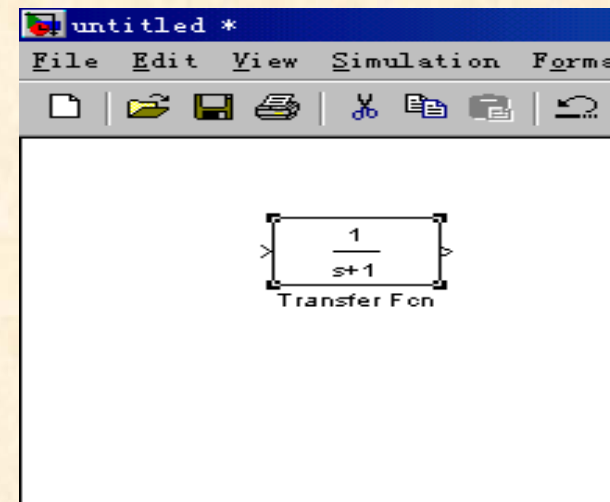
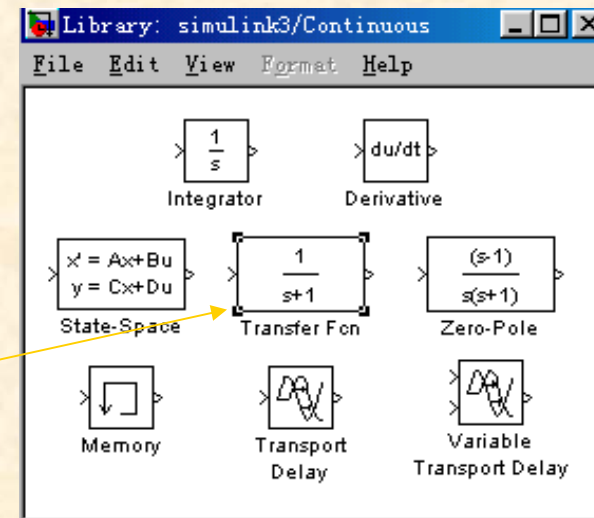
5.1.2 建立Simulink仿真模型

- a) 打开Simulink模型窗口(Untitled)
- b) 选取模块或模块组

- 在Simulink模型或模块库窗口内，用鼠标左键单击所需模块图标，图标四角出现黑色小方点，表明该模块已经选中。

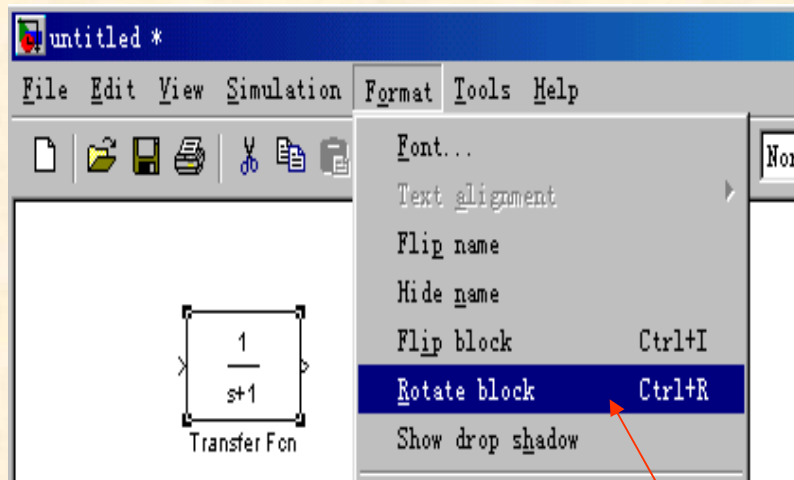
- c) 模块拷贝及删除

- 在模块库中选中模块后，按住鼠标左键不放并移动鼠标至目标模型窗口指定位置，释放鼠标即完成模块拷贝。
- 模块的删除只需选定删除的模块，按Del键即可。

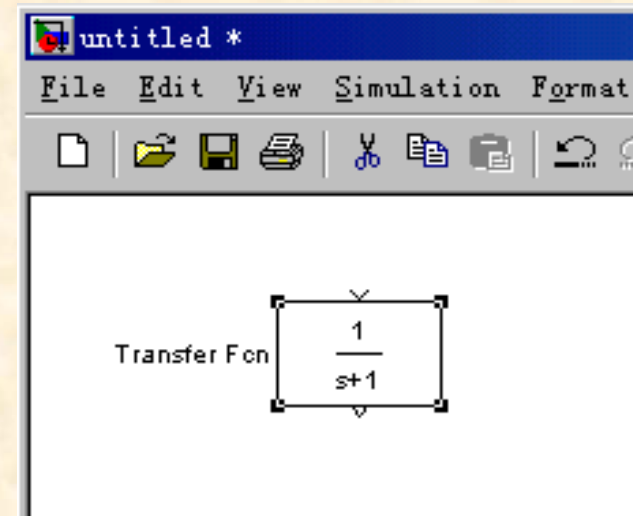


d) 模块调整

- 改变模块位置、大小；
- 改变模块方向
 - 使模块输入输出端口的方向改变。选中模块后，选取菜单Format→RotateBlock，可使模块旋转90°。

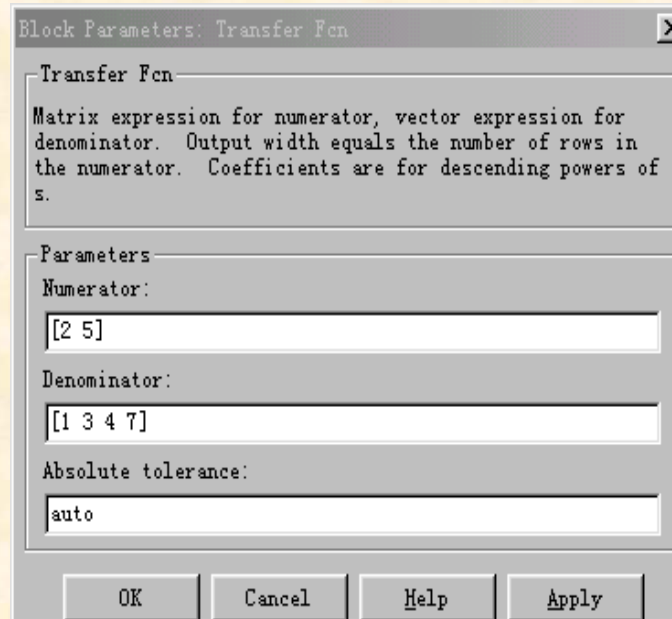
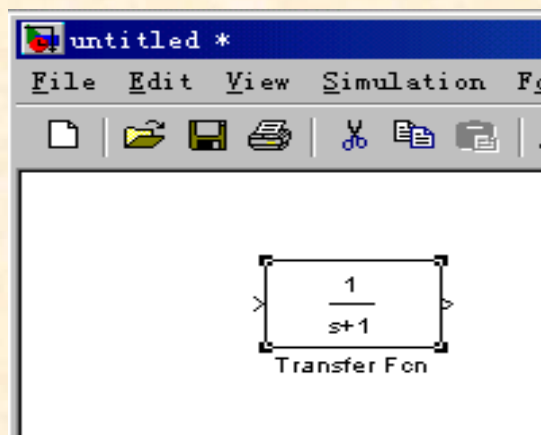


按快捷键Ctrl+R结果相同。

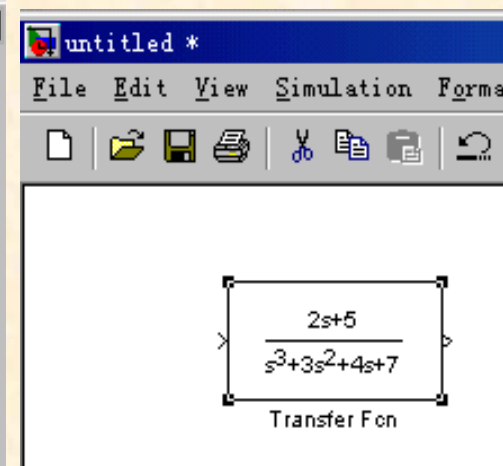


e) 模块参数设置

- 用鼠标双击指定模块图标，打开模块对话框，根据对话框栏目中提供的信息进行参数设置或修改。
 - 例如双击模型窗口的传递函数模块，弹出图示对话框，在对话框中分别输入分子、分母多项式的系数，点击OK键，完成该模型的设置，如右下图所示：

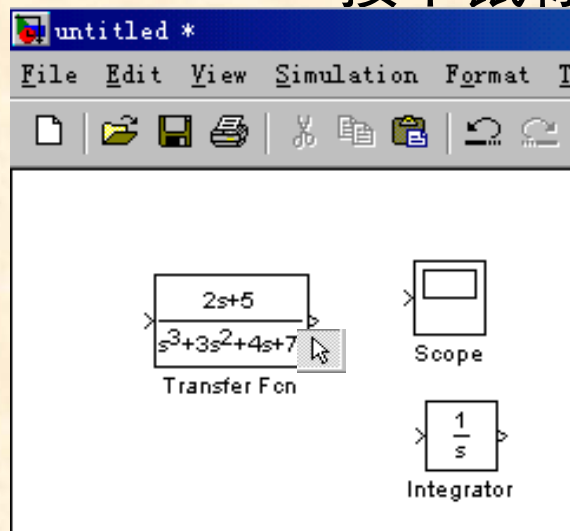


The image shows the 'Block Parameters: Transfer Fcn' dialog box. It has a title bar with a close button. The main area contains the following text: 'Transfer Fcn', 'Matrix expression for numerator, vector expression for denominator. Output width equals the number of rows in the numerator. Coefficients are for descending powers of s.', and a 'Parameters' section. The 'Parameters' section has three input fields: 'Numerator:' with the value '[2 5]', 'Denominator:' with the value '[1 3 4 7]', and 'Absolute tolerance:' with the value 'auto'. At the bottom are four buttons: 'OK', 'Cancel', 'Help', and 'Apply'.

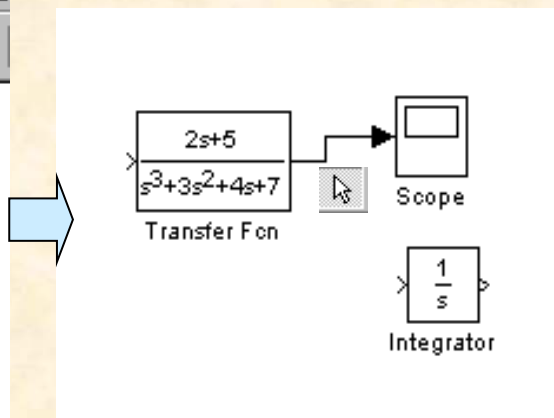


f) 模块的连接

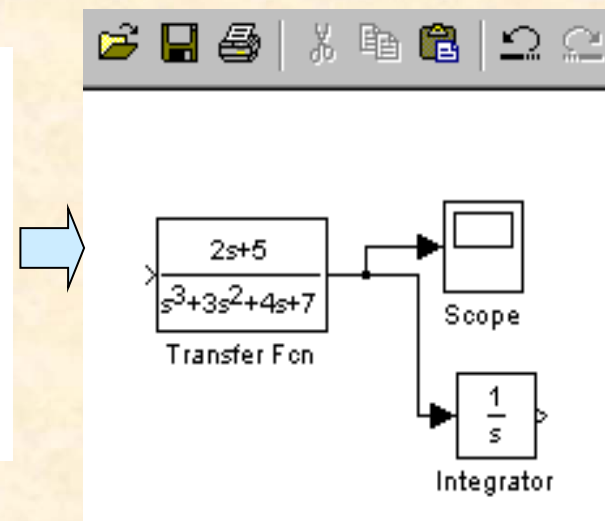
- 模块之间的连接是用连接线将一个模块的输出端与另一模块的输入端连接起来；也可用分支线把一个模块的输出端与几个模块的输入端连接起来。
- 连接线生成是将鼠标置于某模块的输出端口(显示一个十字光标)，按下鼠标左键拖动鼠标至另一模块的输入端口即可。分支线则是将鼠标置于分支点，按下鼠标右键，其余同上。



连接线(左键)



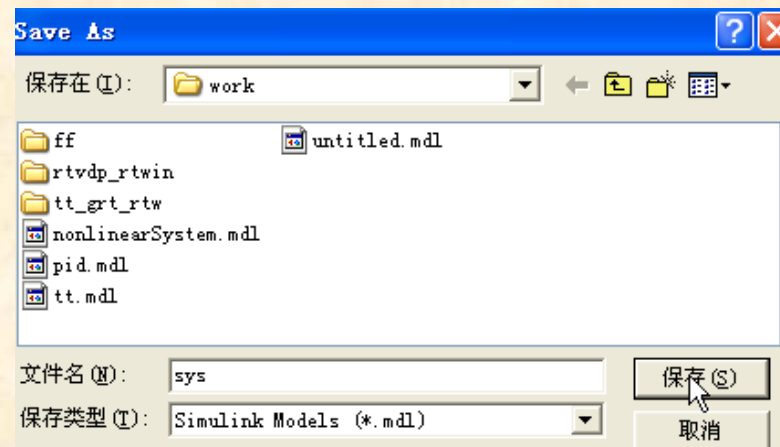
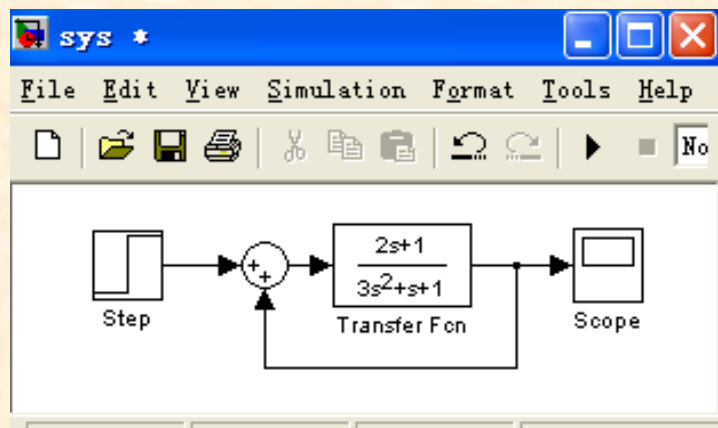
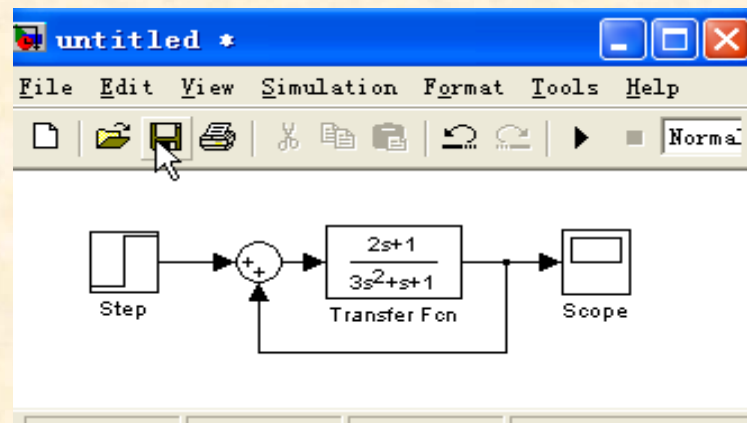
分支线(右键)



g)

模块文件的取名和保存

- 选择模型窗口菜单 File→Save as后弹出一个“Save as”对话框，填入模型文件名，按保存(s)即可。



[说明]

- 模块的修改、调整、连接通常只能在仿真模型窗口中进行，不要直接对模块库中的模块进行修改或调整。



5.1.3 系统仿真运行

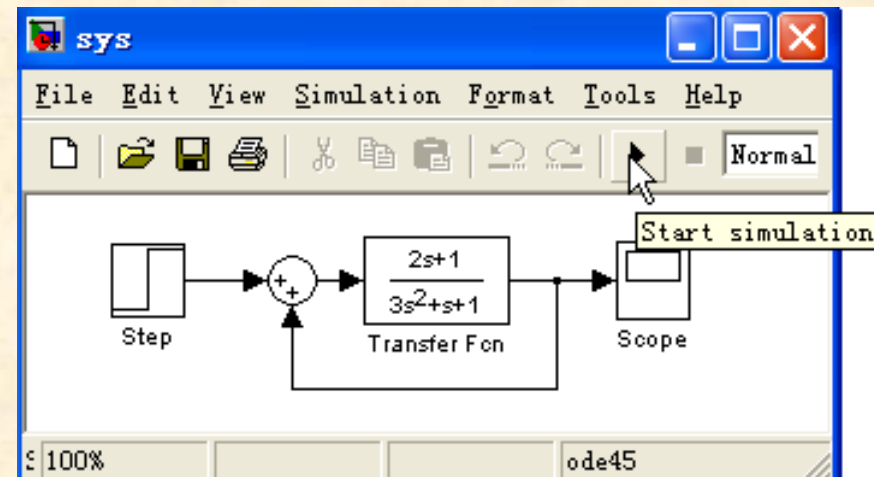
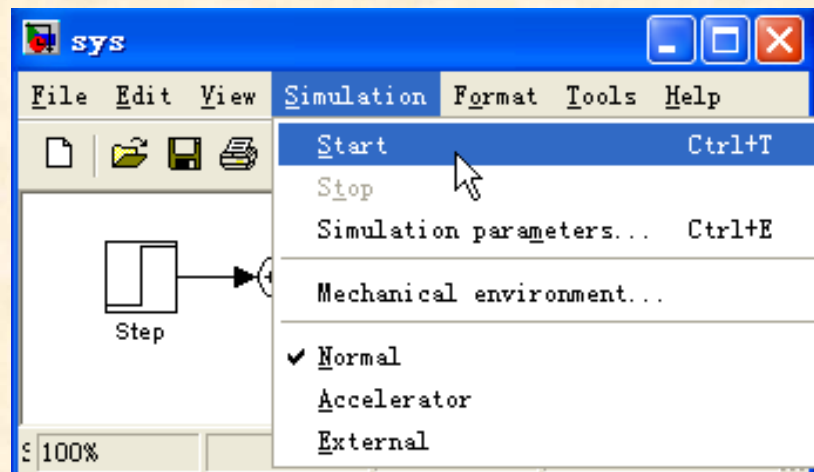
1. Simulink模型窗口下仿真 步骤

- ① 打开Simulink仿真模型窗口，或打开指定的.mdl文件;
- ② 设置仿真参数：在模型窗口选取菜单【Simulation: Parameters】,弹出“Simulation Parameters”对话框，设置仿真参数，然后按【OK】即可。



[说明]若不设置仿真参数,则采用Simulink缺省设置.

- ③ 仿真运行和终止：在模型窗口选取菜单【Simulation: Start】，仿真开始，至设置的仿真终止时间，仿真结束。若在仿真过程中要中止仿真，可选择【Simulation: Stop】菜单。也可直接点击模型窗口中的 （或 ）启动（或停止）仿真。



2、MATLAB 命令窗口下的仿真运行

- 在Matlab命令窗口下可直接运行一个已存在的Simulink模型：

- `[t,x,y]=sim('model',timespan,option,ut)`

其中，t为返回的仿真时间向量；

- x为返回的状态矩阵；
- y为返回的输出矩阵；
- model为系统Simulink模型文件名；
- timespan为仿真时间；
- option为仿真参数选择项，由simset设置；
- ut为选择外部产生输入， $ut=[T,u1,u2,\dots,un]$ 。

[说明]


- 上述参数中，若省略timespan,option,ut则由框图模型的对话框Simulation Parameters设置仿真参数。

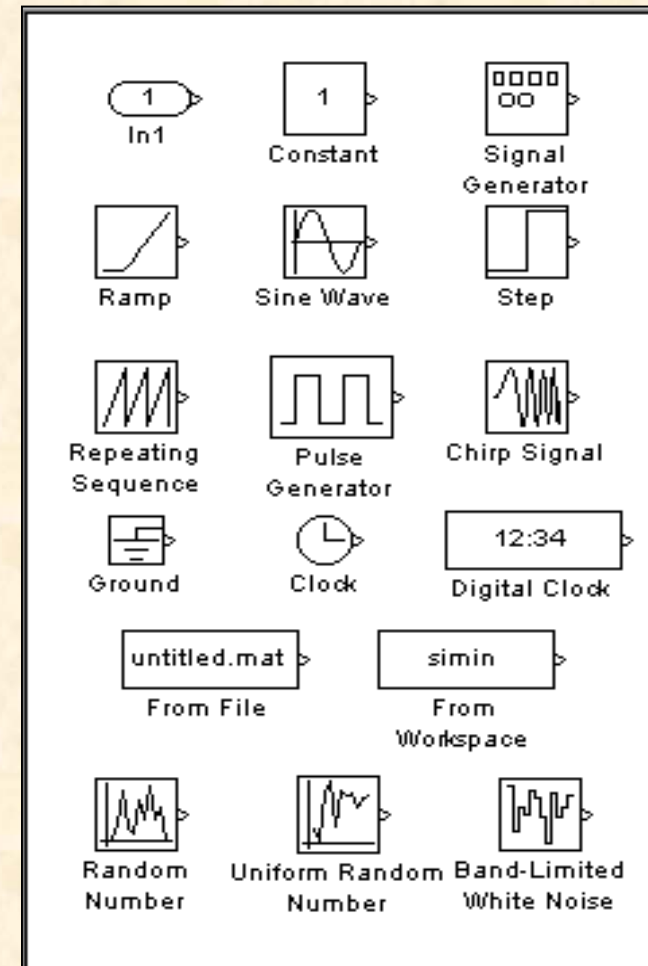
[back](#)

5.2 模块库和系统仿真


5.2.1 Simulink模块库

1. Sources库

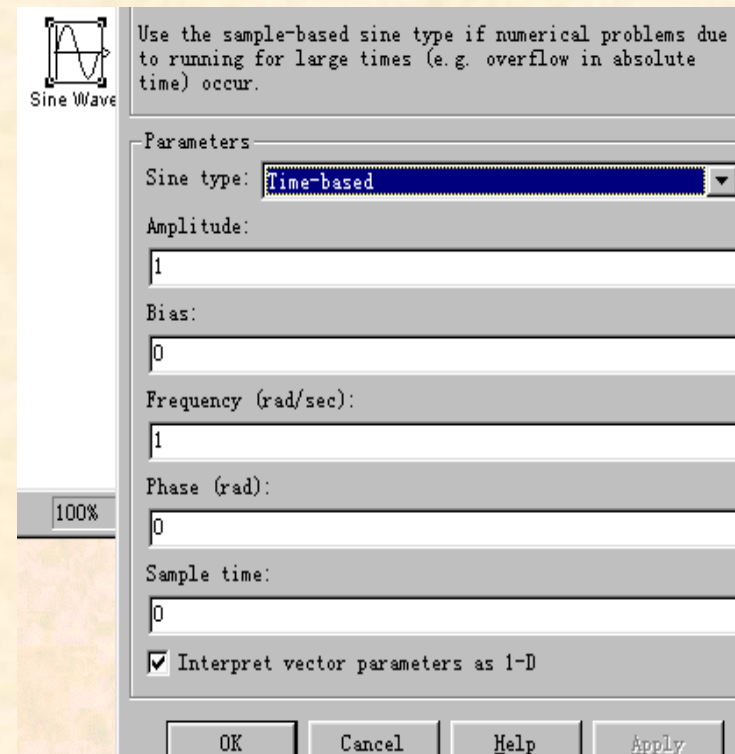
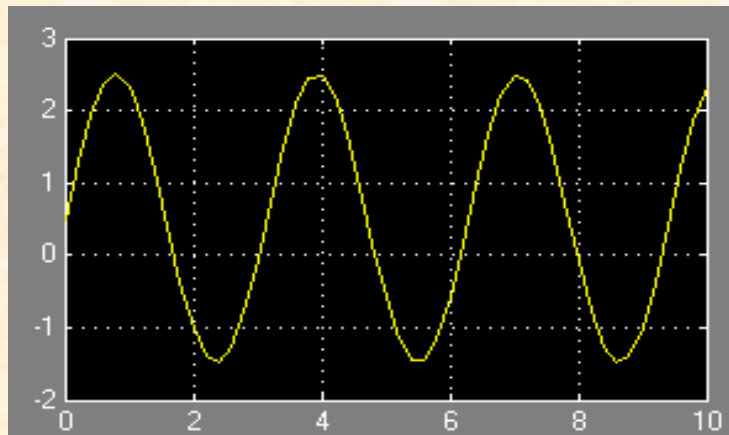
- 也可称为信号源库，该库包含了可向仿真模型提供信号的模块。它没有输入口，但至少有一个输出口。
- 双击图标  即弹出该库的模块图：
- 在该图中的每一个图标都是一个信号模块，这些模块均可拷贝到用户的模型窗里。用户可以在模型窗里根据自己的需要对模块的参数进行设置（但不可在模块库里进行模块的参数设置）。



① Sine Wave: 产生幅值、频率可设置的正弦波信号。

➤ 双击图标  (认定该模块已拷贝到用户模型窗, 以下均如此), 弹出正弦波的参数设置框图。图中参数为Simulink默认值, 用户可根据需要对这些参数重新设置。

➤ 幅值、频率为2, 基准为0.5, 其波形如下图所示:



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**

Amplitude:

Bias:

Frequency (rad/sec):


Phase (rad):

Sample time:

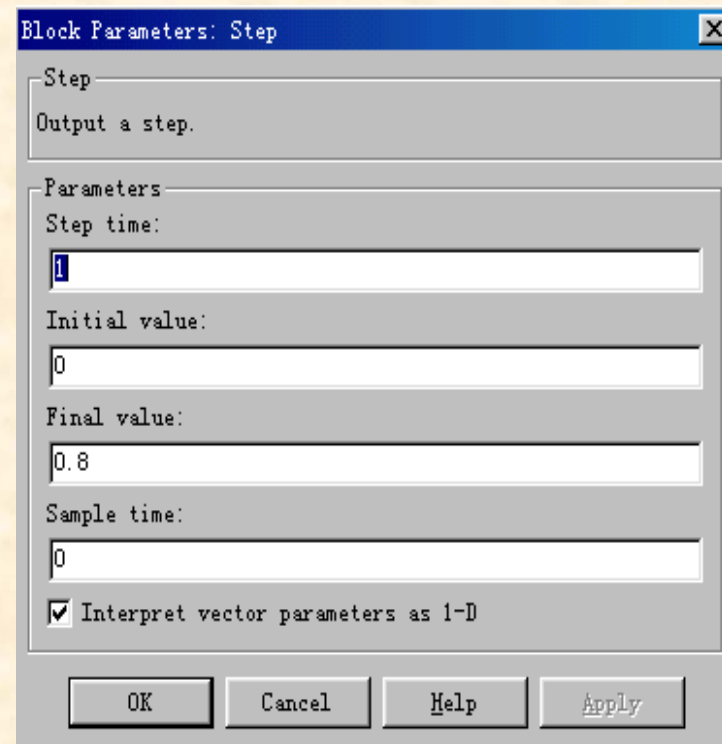
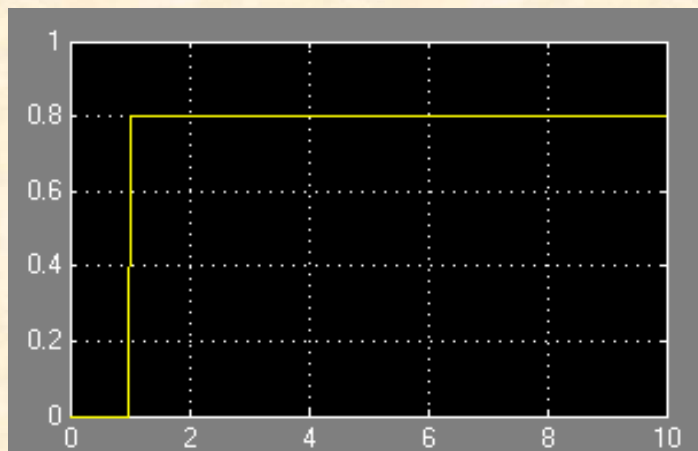
☒ Interpret vector parameters as 1-D

OK Cancel Help Apply

② Step: 产生幅值、阶跃时间可设置的阶跃信号。

➤ 双击图标  ,弹出阶跃信号的参数设置框图。图中参数为Simulink默认值。

➤ 当设置幅值为0.8,阶跃时间为1秒时,阶跃波形如下图所示:



Block Parameters: Step

Step

Output a step.

Parameters

Step time: 1

Initial value: 0

Final value: 0.8

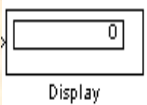
Sample time: 0

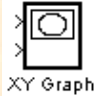
☒ Interpret vector parameters as 1-D

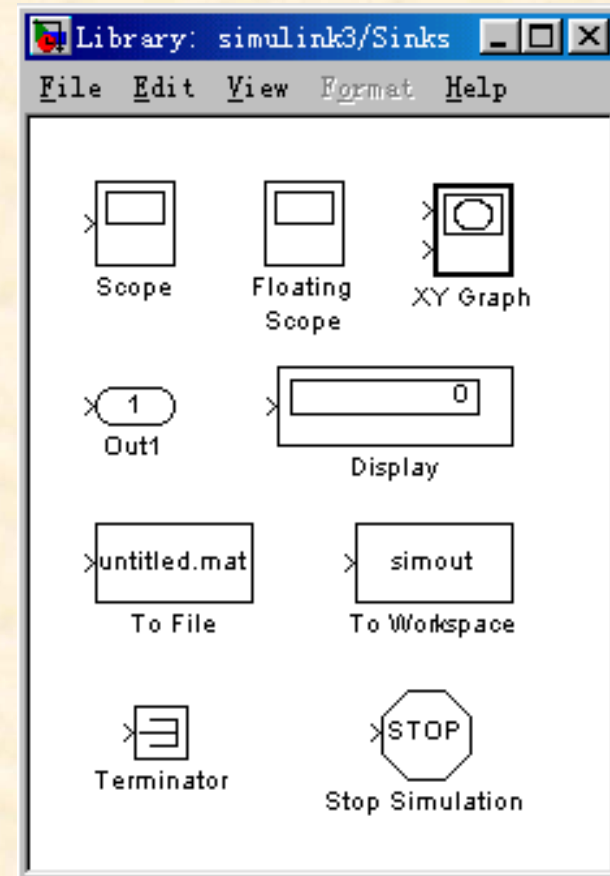
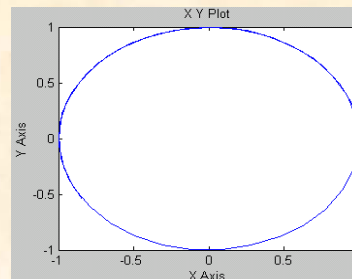
OK Cancel Help Apply

2、Sinks 库

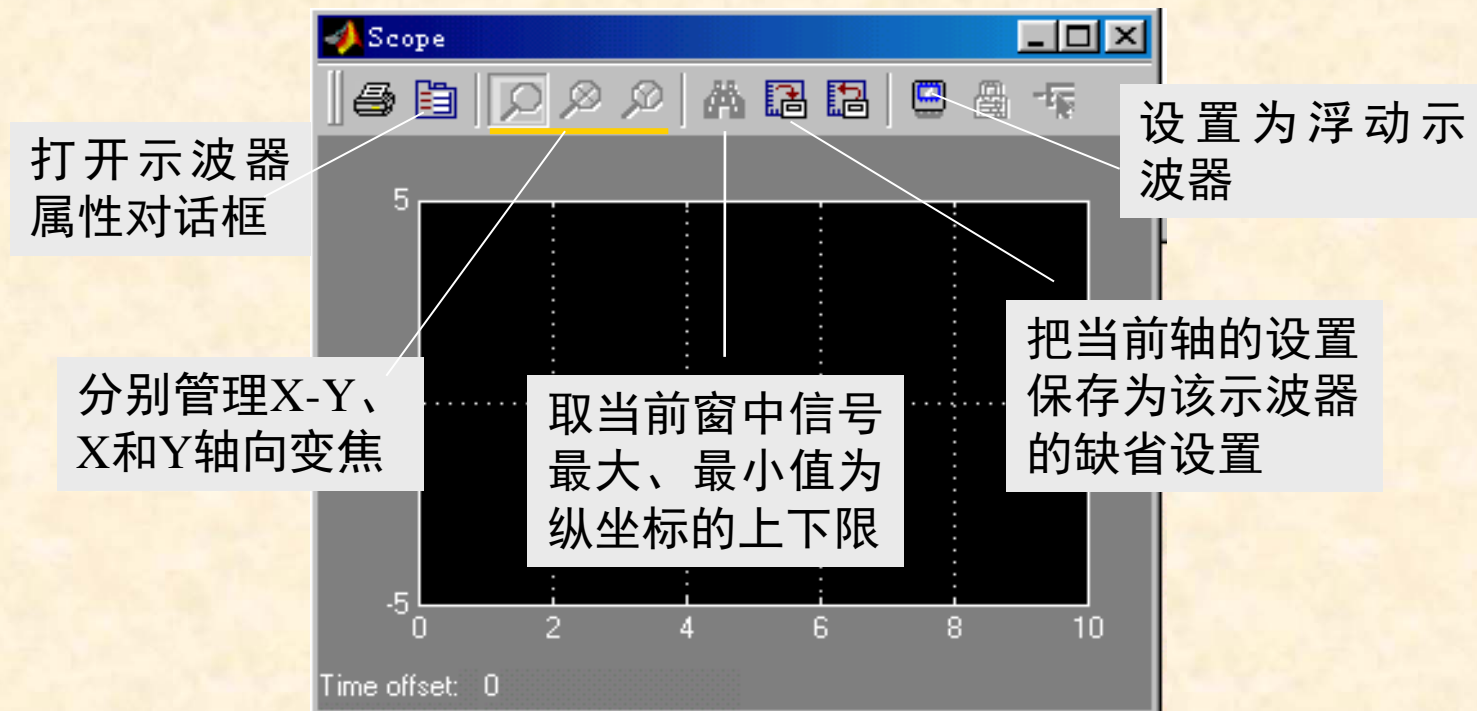
- 该库包含了显示和写模块输出的模块。双击即弹出该库的模块图：

- ：数字表，显示指定模块的输出数值。

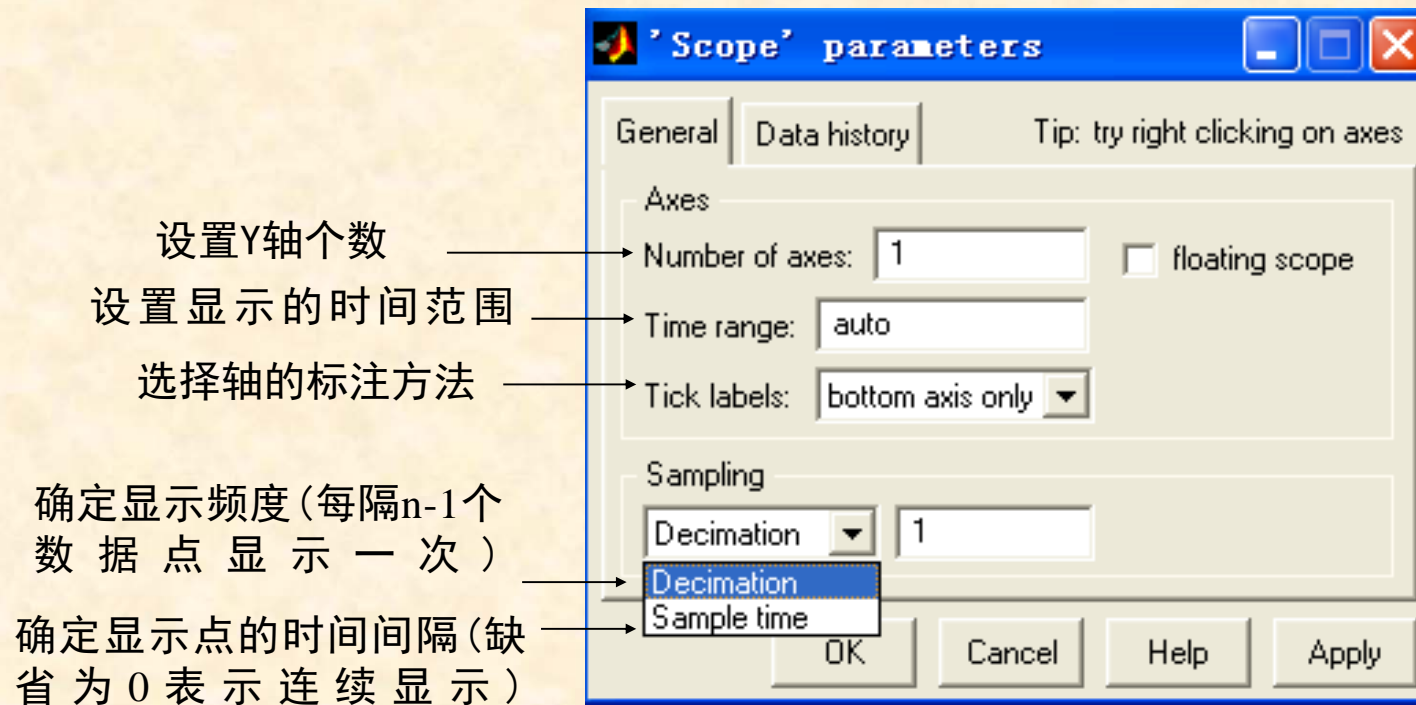
- ：X-Y绘图仪用同一图形窗口，显示X-Y坐标的图形(需先在参数对话框中设置每个坐标的变化范围)，当X、Y分别为正、余弦信号时，其显示图形如下：



- ③ : 示波器。显示在仿真过程产生的信号波形。
双击该图标,弹出示波器窗如右图所示:



➤ 示波器属性对话框

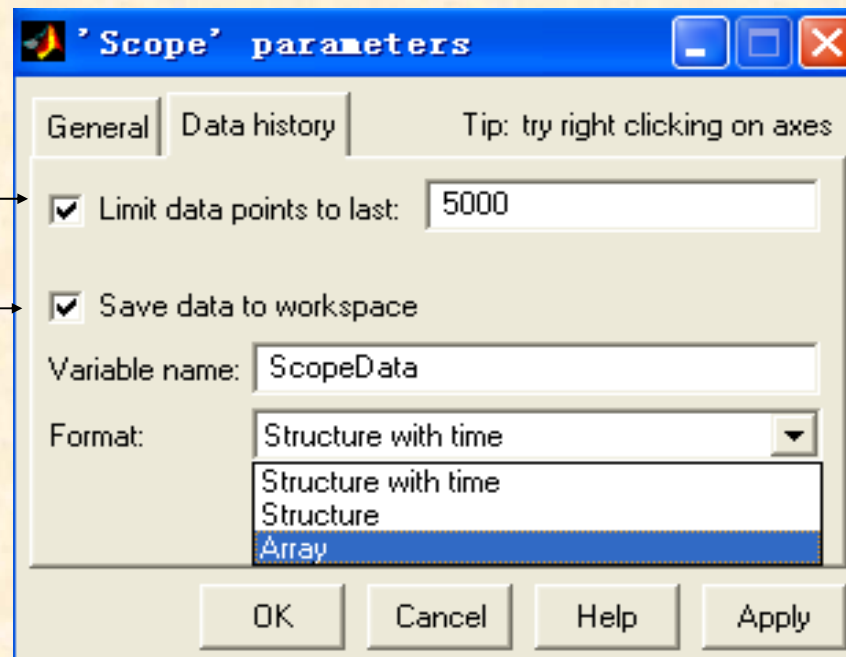


示波器属性对话框General页

➤ 示波器属性对话框

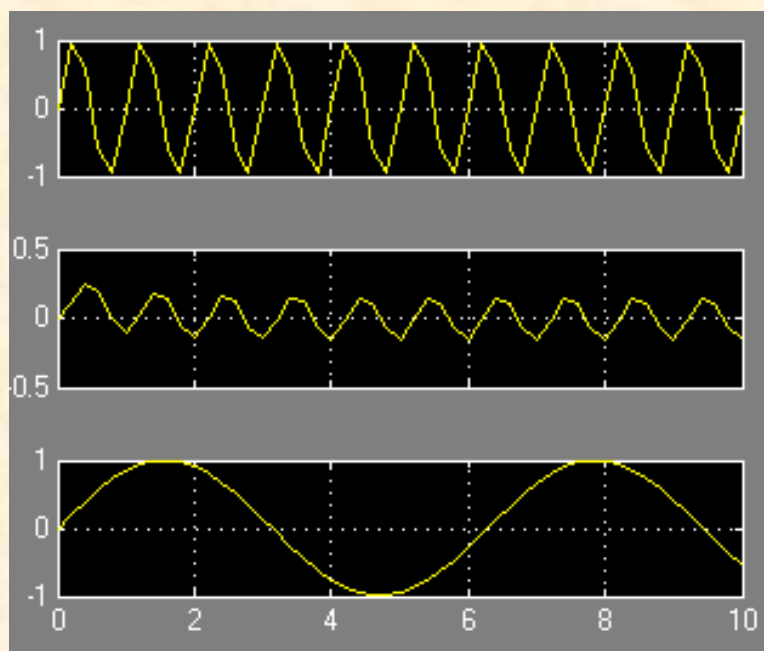
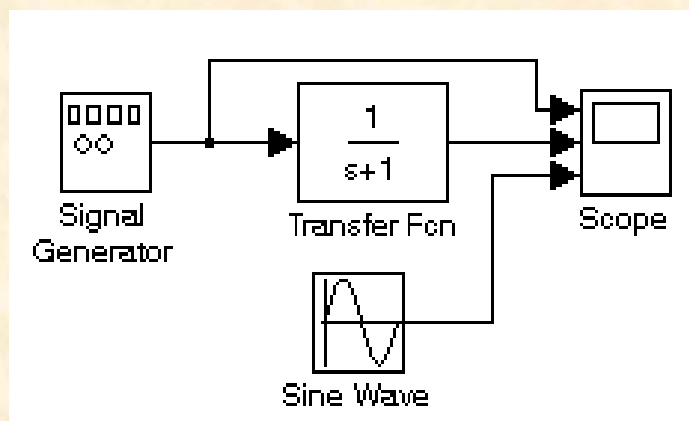
设定缓冲区接受数据的长度,勾选为缺省状态,其值为5000

确定示波器数据是否保存到MATLAB工作空间。若勾选则为保存,且需确定变量名和保存格式(缺省时,不被勾选)




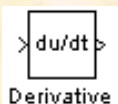
示波器属性对话框Data history页

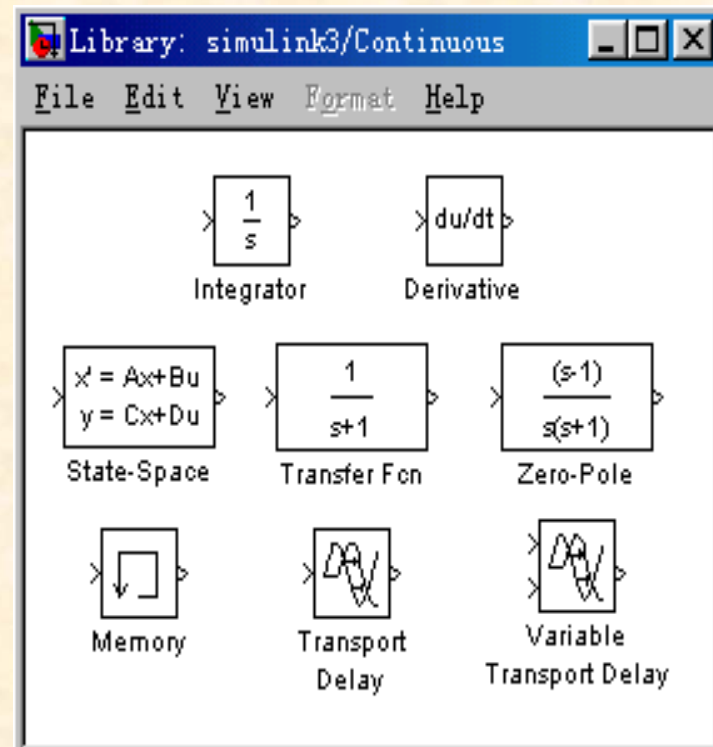
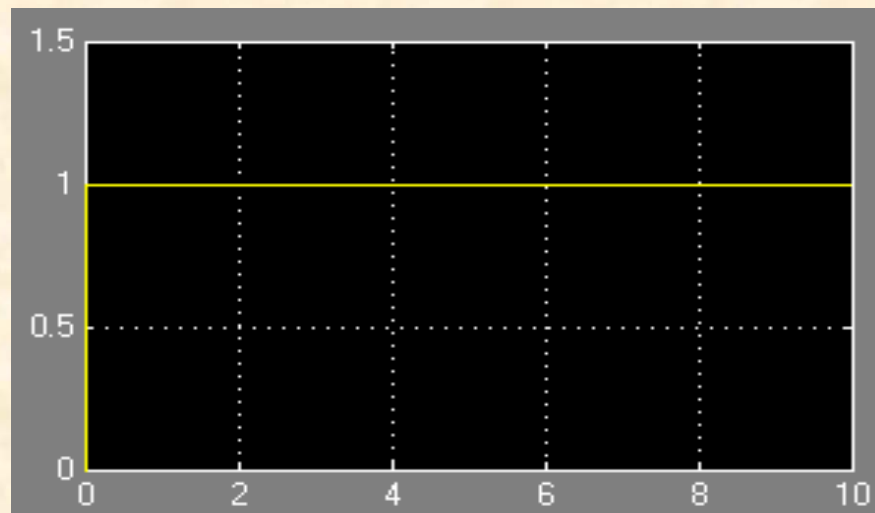
【例5-1】示波器应用示例。Simulink仿真模型如左图所示，示波器输入为3（Y轴个数为3）。右图为该示波器显示的三路输入信号的波形。



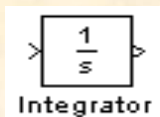
3. Continuous 库

该库包含描述线性函数的模块。双击  即弹出下图：

- ①  : 微分环节。其输出为其输入信号的微分。如下图为输入斜坡信号时微分环节的输出：



②



：积分环节。其输出为其输入信号的积分。

- 双击该模块,弹出积分器的参数对话框,可设置积分器的复位、积分上限和下限等。当设置为信号下跳过零复位、积分器限幅为 ± 5 时,积分器对谐波输入的输出如图所示:

Parameters

External reset: **falling**

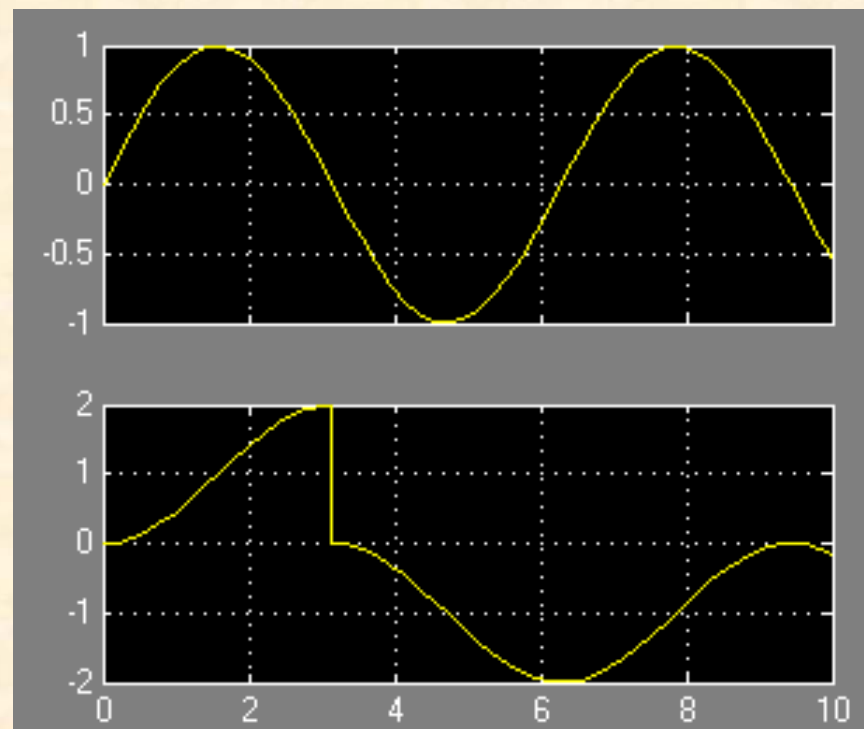
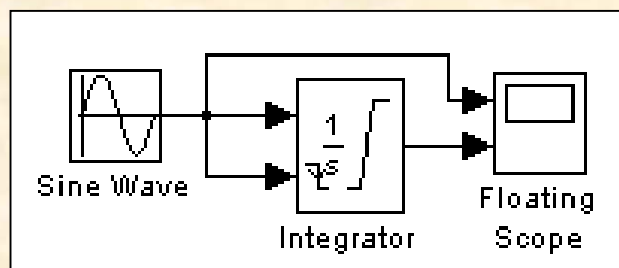
Initial condition source: **internal**

Initial condition: **0**

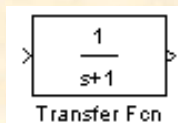
☒ Limit output

Upper saturation limit: **5**

Lower saturation limit: **-5**



③



：分子分母为多项式形式的传递函数。

- 双击该模块，弹出传递函数的参数对话框，设置框图中的参数后，该传递函数显示如下：

Parameters

Numerator:

[1 2]

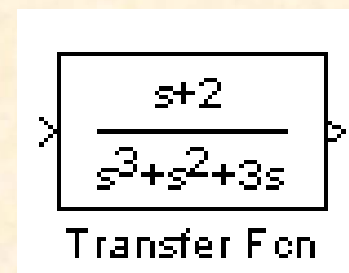
Denominator:

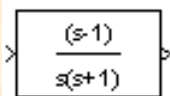
[1 1 3 0]

Absolute tolerance:

auto

OK Cancel Help Apply



④  : 零极点增益形式的传递函数。

Parameters

Zeros:

[1, -2]

Poles:

[0 3+2i, 3-2i, -1]

Gain:

[4.5]

Absolute tolerance:

auto


OK Cancel Help Apply

$$\frac{4.5(s-1)(s+2)}{s(s-3-2i)(s-3+2i)(s+1)}$$

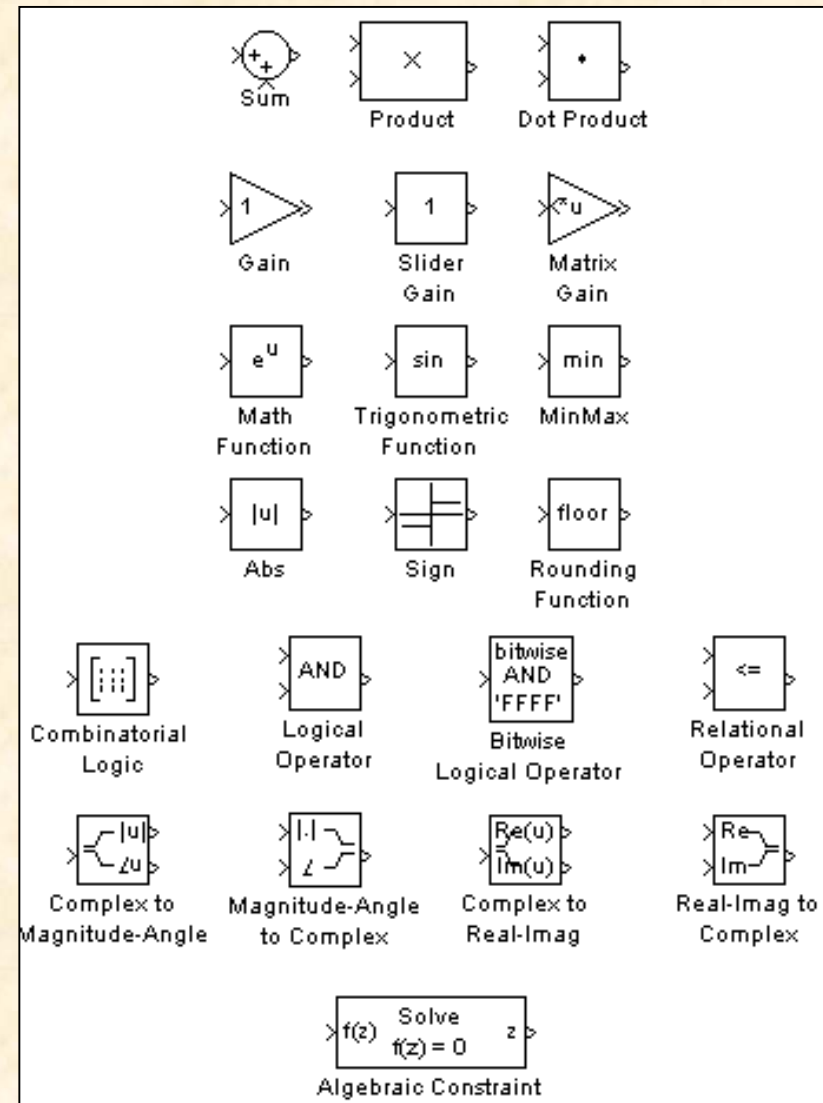
Zero-Pole


4.

Math 库

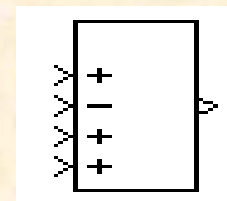
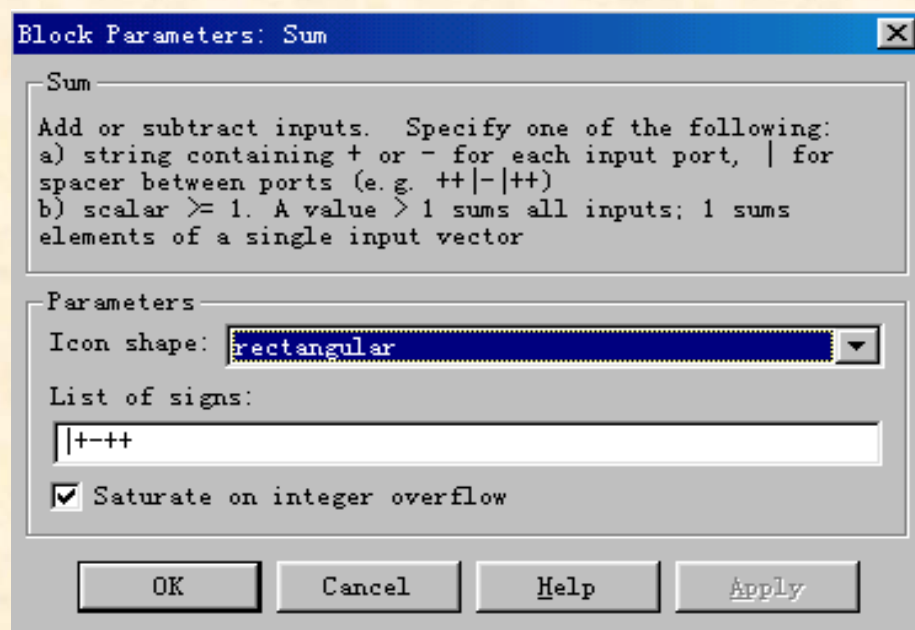
该库包含描述一般数学函数的模块。双击  即弹出右图。

➤ 该库中模块的功能就是将输入信号按照模块所描述的数学运算函数计算，并把运算结果作为输出信号输出。

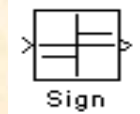


①  : 加法器。

- 该模块为求和装置。求和器形状，输入信号个数和符号可设置，如右边框图。若设置如框图。则模块显示为：

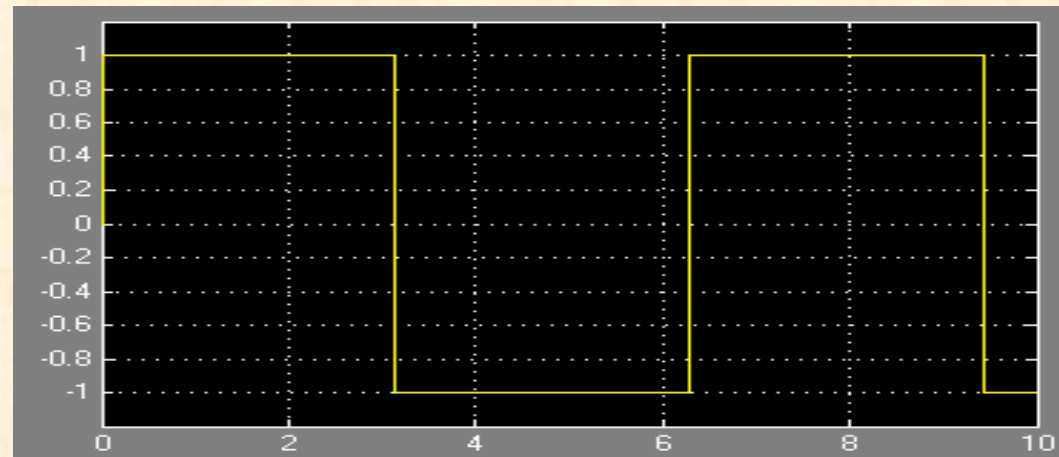
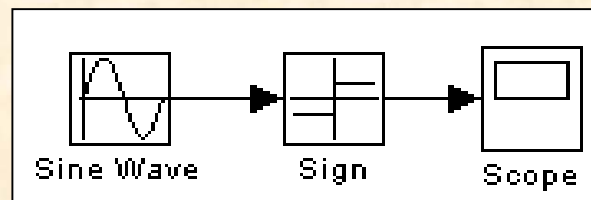


②

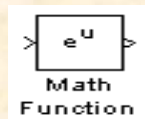


: 符号函数。

- 该模块的输出为输入信号的符号。下图为对正弦信号经符号运算后的波形。

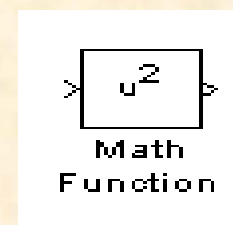
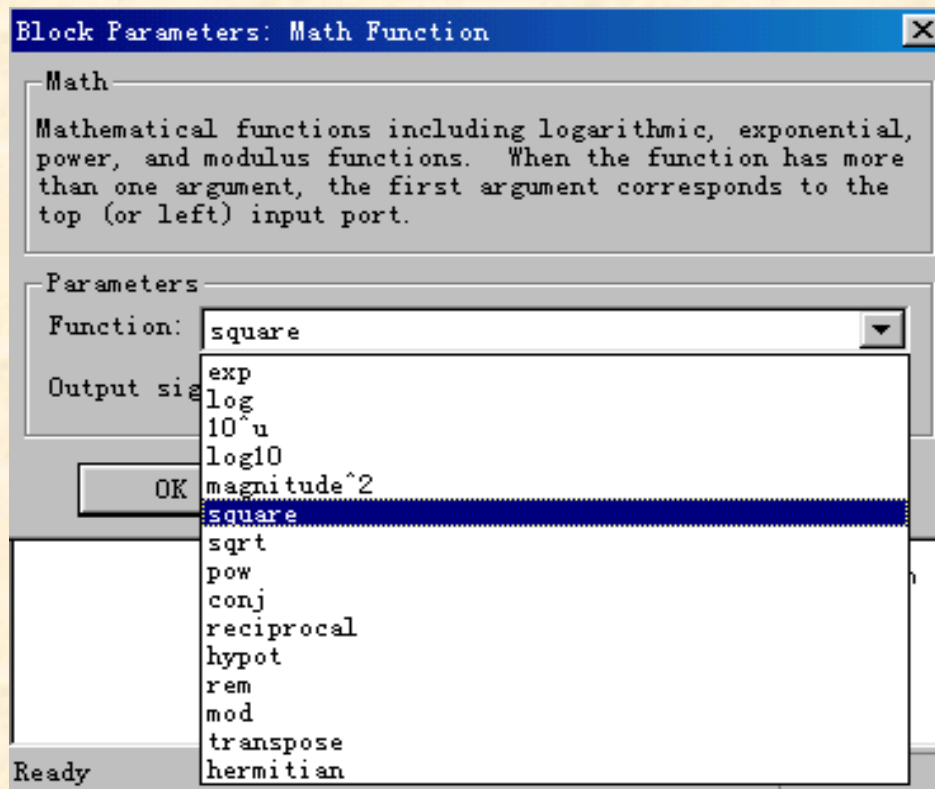


③




：实现一个数学函数。


- 右图为该函数的参数设置框。点击函数设置的下拉窗口，可选择所需要的函数。选定函数后，该模块图标将显示所选函数。如选择“Square”，则模块图标变为：



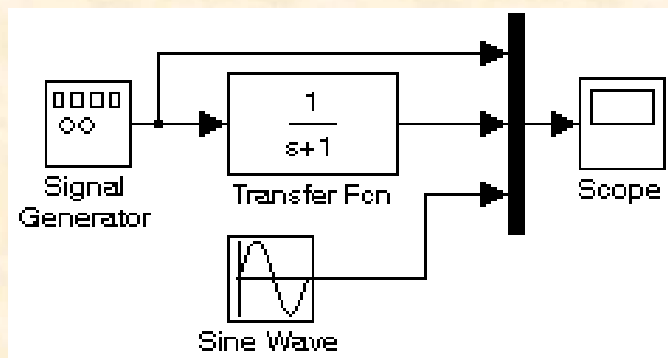
5. Signal Routing库

①  : 信号分路器。

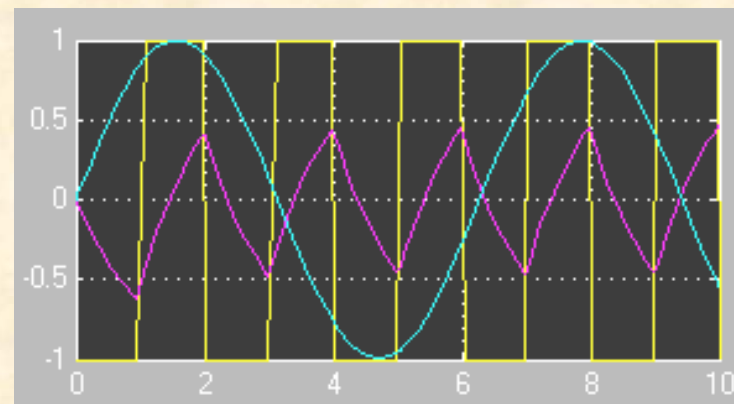
➤ 将混路器输出的信号依照原来的构成方法分解成多路信号。

②  : 信号汇总器

将多路信号依照向量的形式混合成一路信号。



(a)



(b)

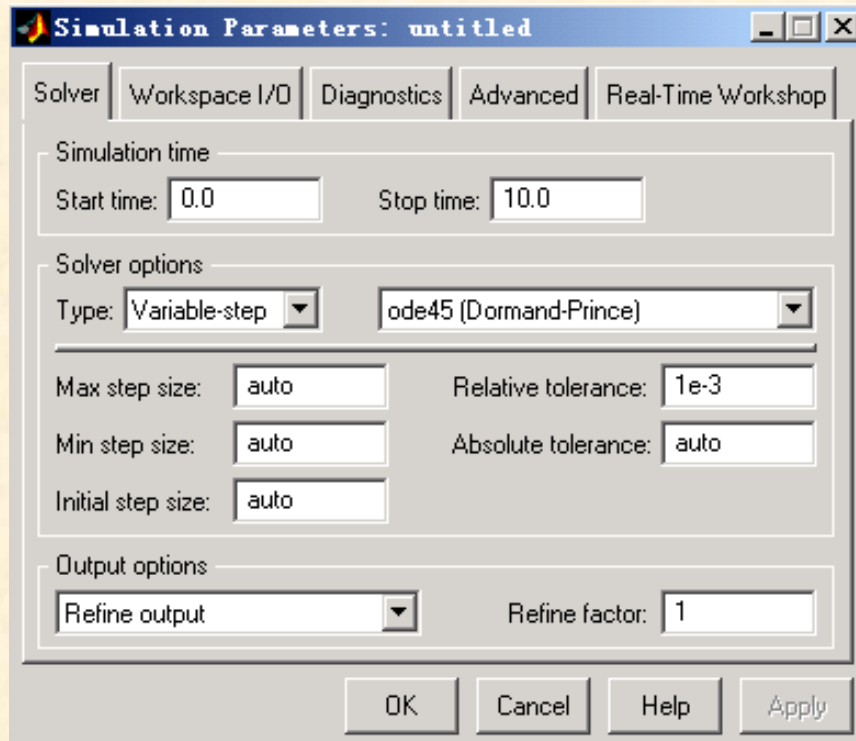
5.2.2 Simulink环境下的仿真运行

1. 仿真参数对话框

点击Simulink模型窗simulation菜单下的Parameters命令，弹出仿真参数对话框如右图所示。它共有5页，用得较多的主要是Solver页和Workspace I/O页。

① Solver页

- *Simulation time*（仿真时间）：设置*Start time*（仿真开始时间）和*Stop time*（仿真终止时间）可通过页内编辑框内输入相应数值，单位“秒”。另外，用户还可以利用Sinks库中的Stop模块来强行中止仿真。



- **Solver options**（仿真算法选择）：分为定步长算法和变步长算法两类。定步长支持的算法可在**Fixed step size**编辑框中指定步长或选择 *auto*，由计算机自动确定步长，离散系统一般默认地选择定步长算法，在实时控制中则必须选用定步长算法；变步长支持的算法如图9-16所示，对于连续系统仿真一般选择ode45，步长范围使用 *auto* 项。

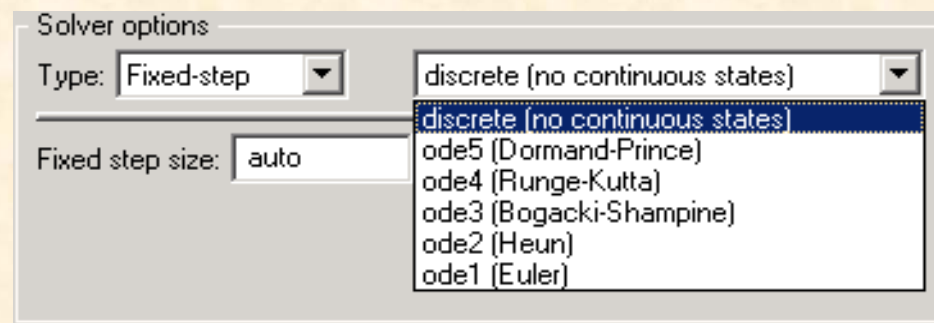


图9-15 定步长算法

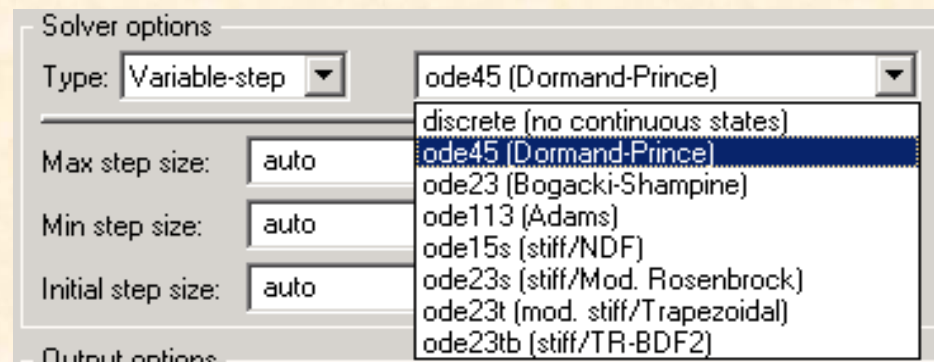
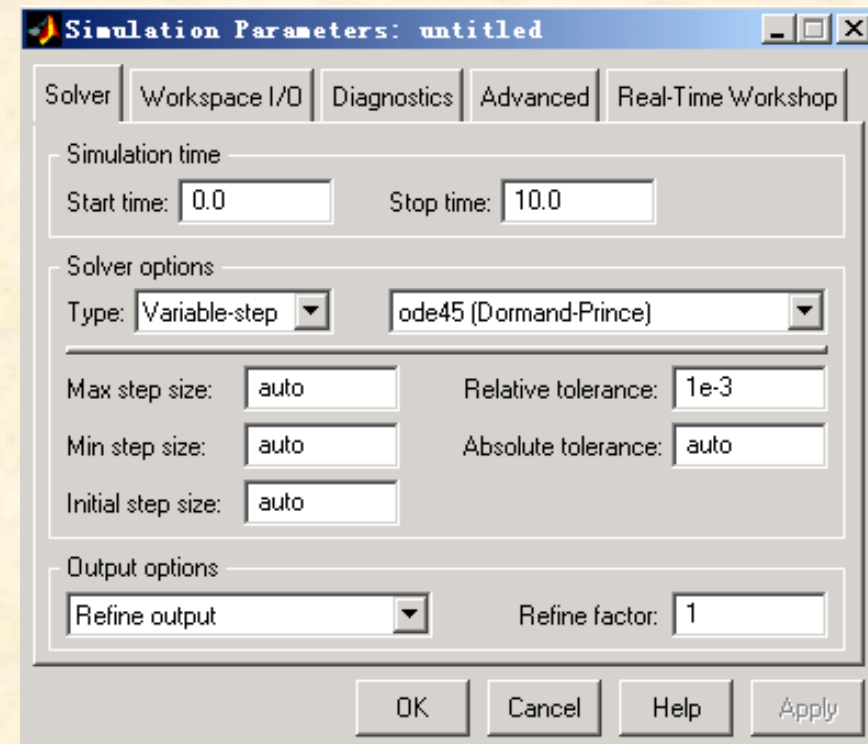


图9-16 变步长算法

- *Error Tolerance*（误差限度）：算法的误差是指当前状态值与当前状态估计值的差值，分为*Relative tolerance*（相对限度）和*Absolute tolerance*（绝对限度），通常可选*auto*。

- Output options(输出选择项)：
有Refine output(细化输出)、
Produce additional output（产生附加输出）、
Produce specified output only（只产生指定输出）。



②

Workspace I/O页

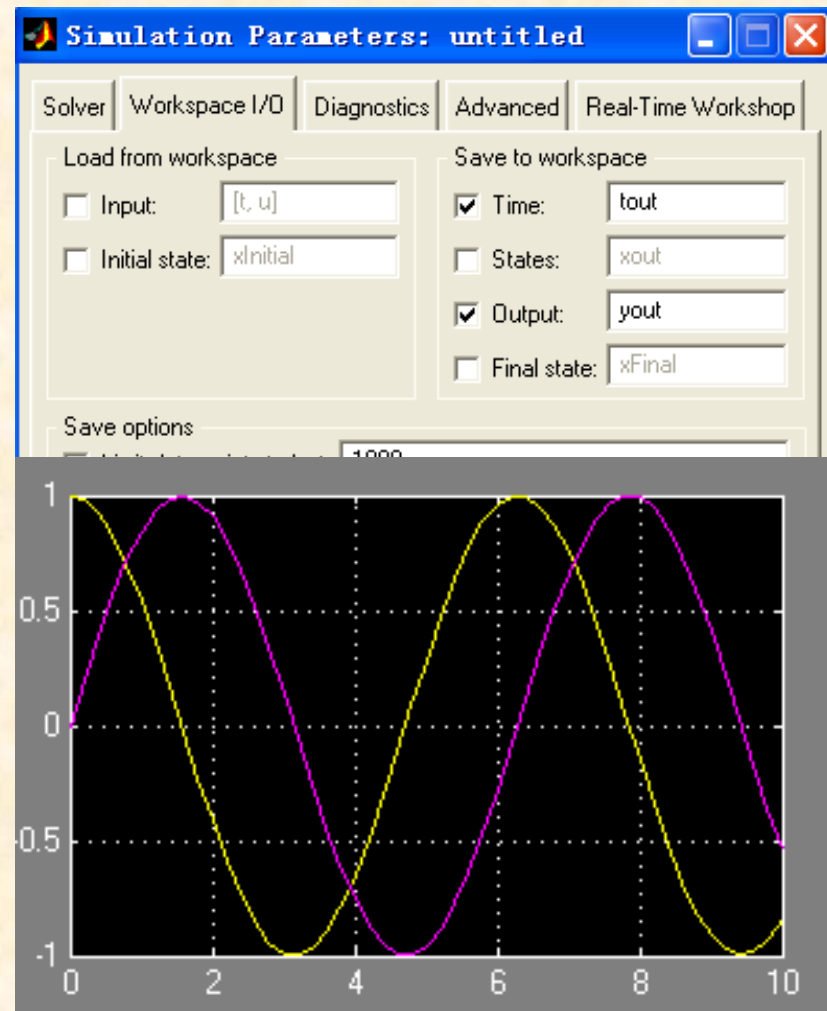
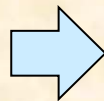
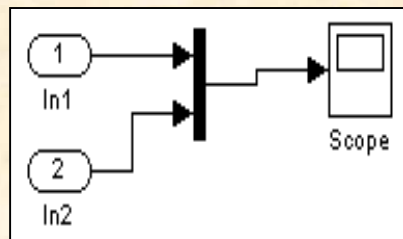
这个页面的作用是定义将仿真结果输出到工作空间，以及从工作空间得到输入和初始状态。

- **Load from workspace:** 勾选相应方框表明从工作空间获得输入或初始状态。若勾选**Input**，则工作空间提供输入，且为矩阵形式。输入矩阵的第一列必须是升序的时间向量，其余列分别对应不同的输入信号。

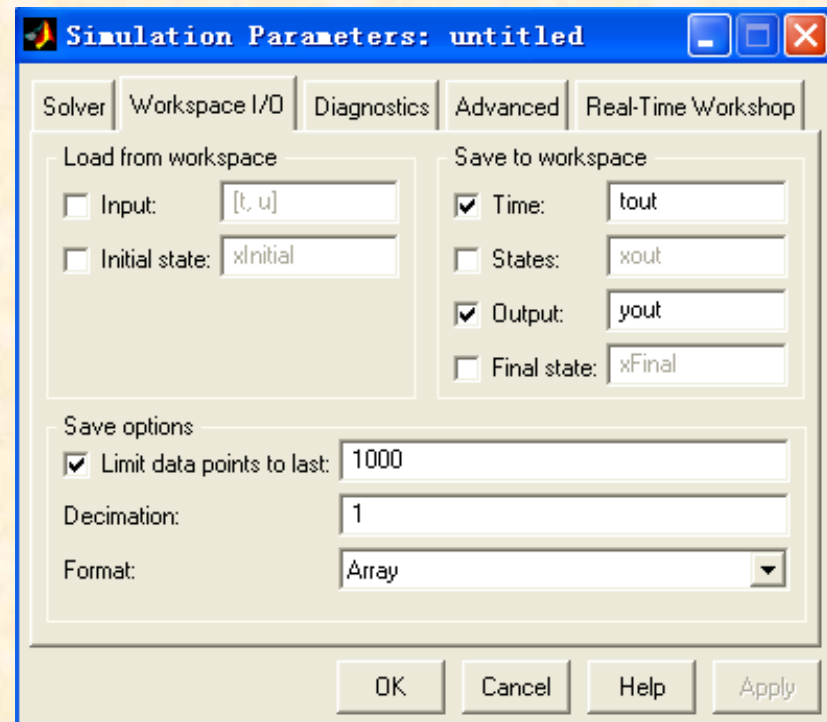
如在指令窗中输入：

```
t=(0:0.1:10)';  
u=[cos(t),sin(t)];
```

且在模型窗中的模型为：



- **Save to workspace:** 勾选相应方框表明保存输出到MATLAB工作空间。time 和 output 为缺省选中的。即一般运行一个仿真模型后，在MATLAB 工作空间都会增加两个变量tout、yout。变量名可以设置。
- **Save options**（存储选项）：存储数据到工作空间的格式，可选数组、构架数组、包含时间数据的构架数组。



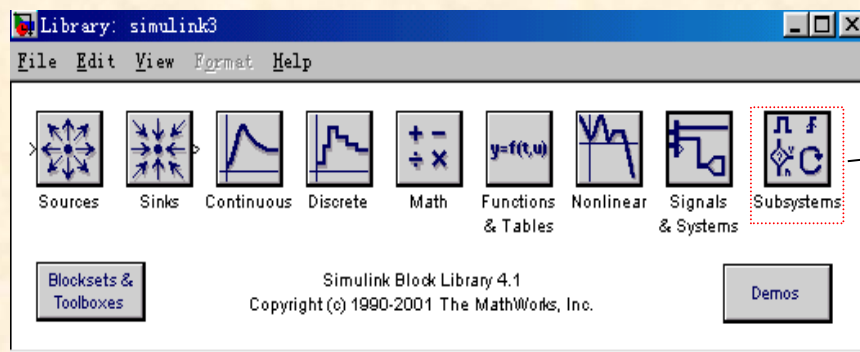
5.3 子系统创建与封装

- 在建立的Simulink系统模型比较大或很复杂时，可将一些模块组合成子系统，这样可使
 - ① 模型得到简化，便于连线；
 - ② 可提高效率，便于调试；
 - ③ 可生成层次化的模型图表，用户可采取自上而下或自下而上的设计方法。
- 将一个创建好的子系统进行封装，也就是使子系统象一个模块一样，例如可以有自己的参数设置对话框，自己的模块图标等。这样就使子系统使用起来非常方便。

5.3.1 子系统的创建

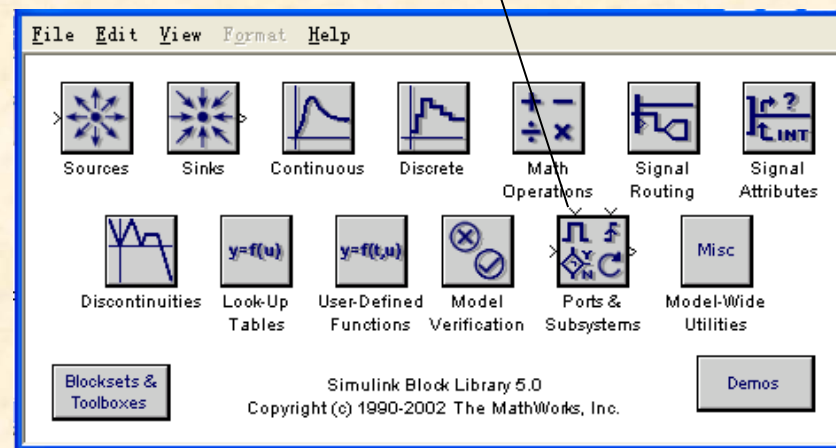
1. 通过子系统模块来建立子系统

- 在Simulink库浏览器，有一个子系统(Subsystems)的库模块(有的版本在Signals & Systems子库里)，点击该图标即可看到不同类型的子系统模块。



MATLAB6.0 版

MATLAB6.5 版



1. 通过子系统模块来建立子系统

- 下面以PID控制器子系统创建，说明子系统的创建过程：

① 将子系统库模块中的Subsystem模块复制到模型窗，如图9-23。

② 双击该图标即打开该子系统的编辑窗口，如图9-24；

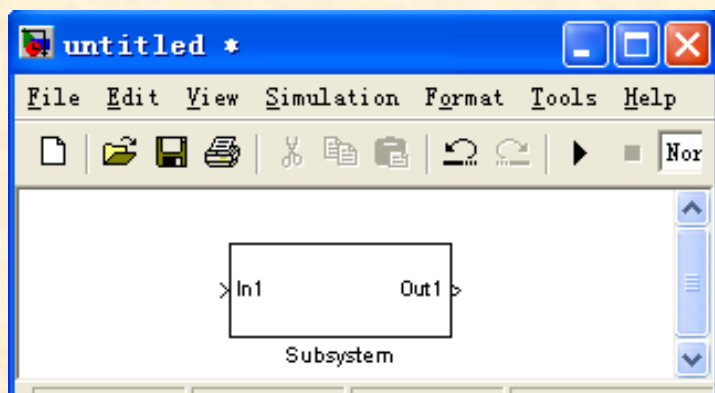
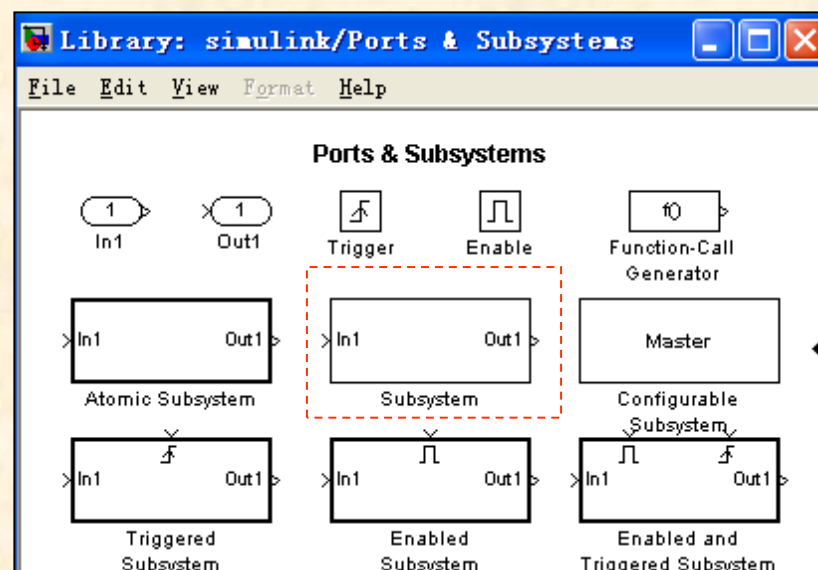


图9-23 子系统模块复制到模型窗

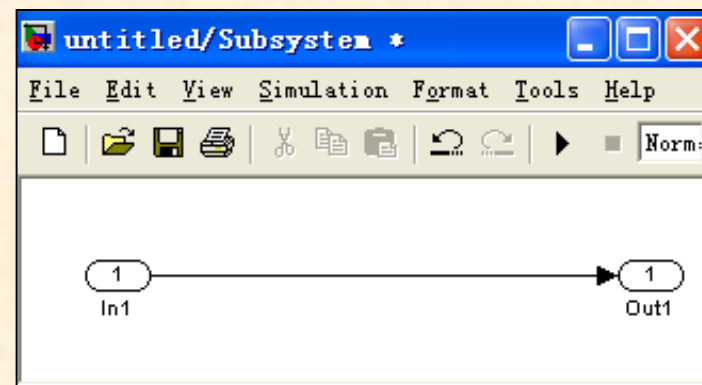
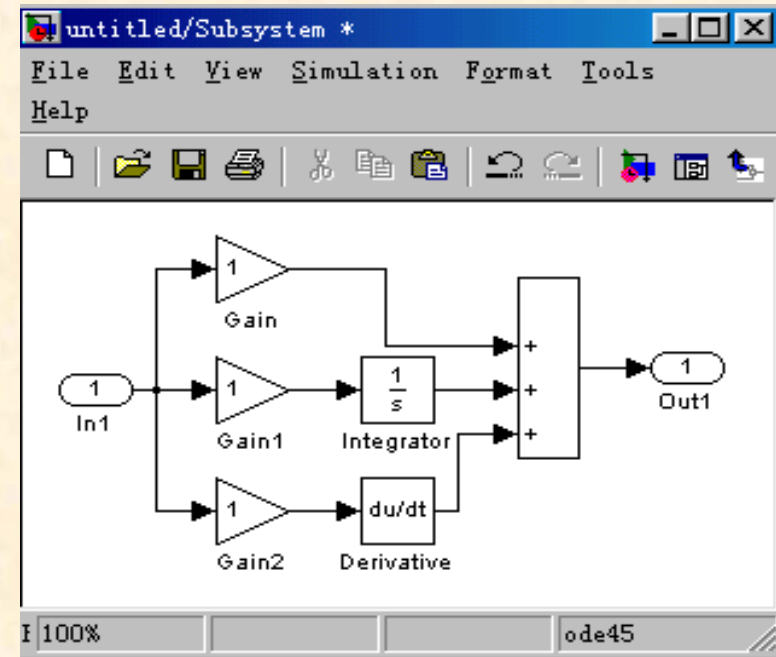
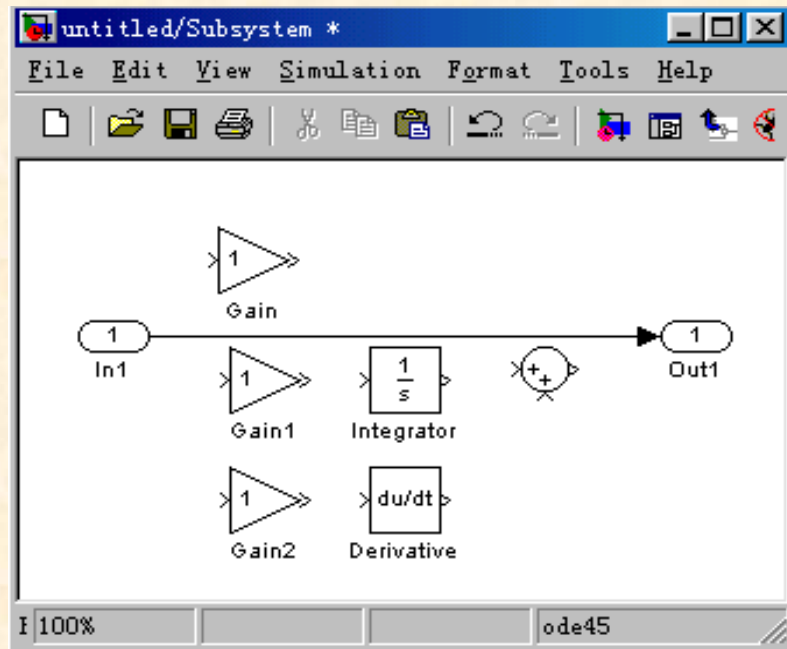
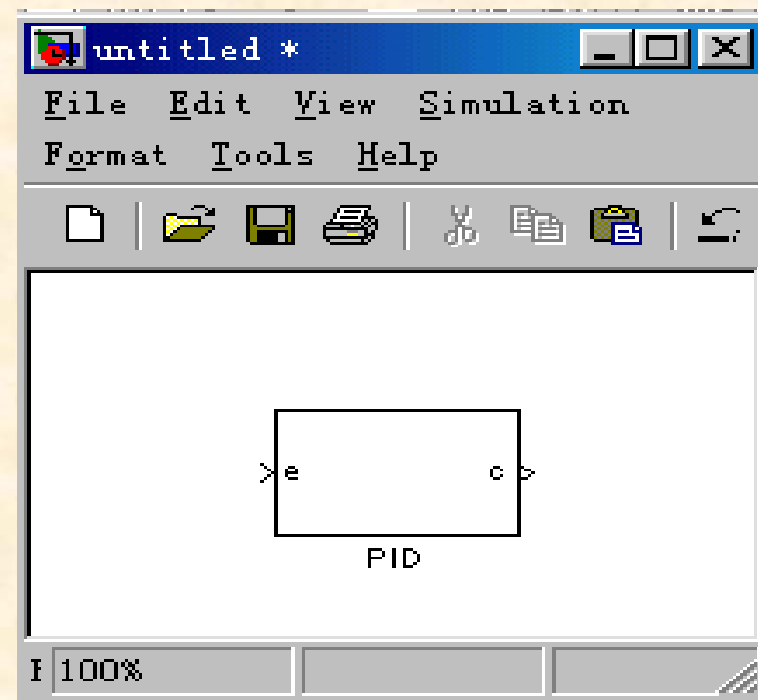
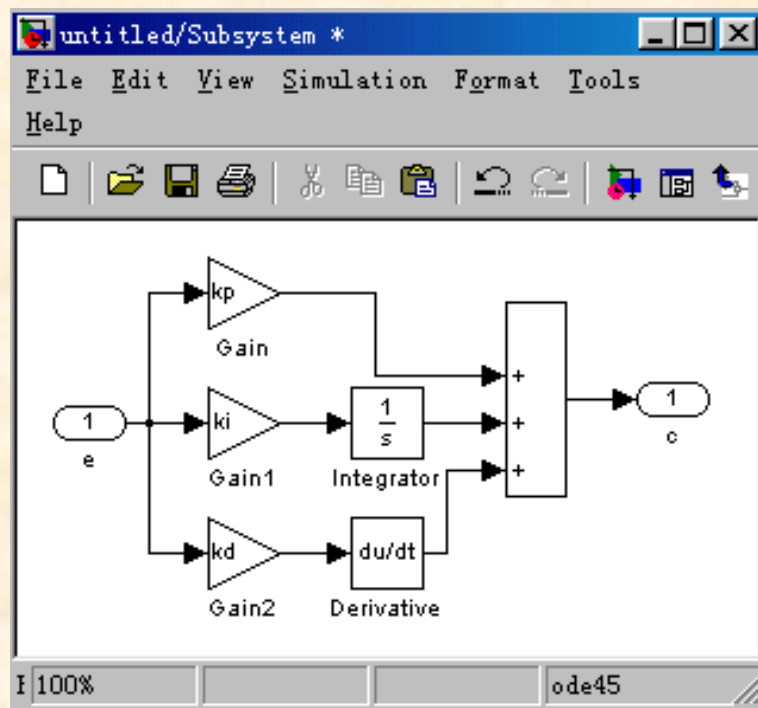


图9.24 原始子系统模块的内部结构型窗

- ③ 将组成子系统的模块添加到子系统编辑窗口：
- ④ 将模块按设计要求连接：



- ⑤ 设置子系统各模块参数（可以是变量）；修改 in1 和 out1 模块下面的标签；
- ⑥ 关闭子系统的编辑窗口，返回模型窗口，修改子系统的标签（PID），该PID子系统即可作为模块在构造系统模型时使用。



2. 组合已存在的模块来建立子系统

如果现有的模型已经包含了需要转化成子系统的模块，就可以通过组合这些模块的方式建立子系统。步骤如下：

- ① 确定需建立Subsystem的模型（被选中的均标记有黑块）

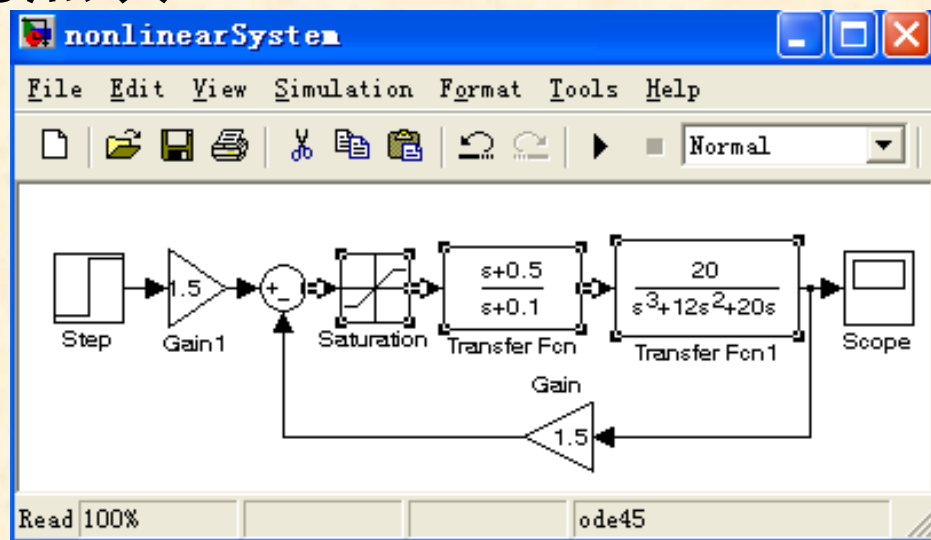
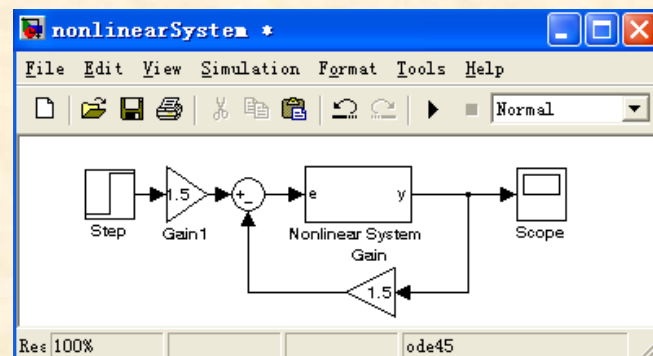
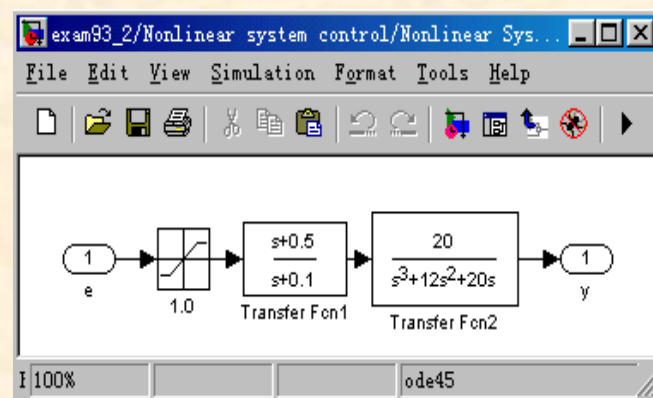
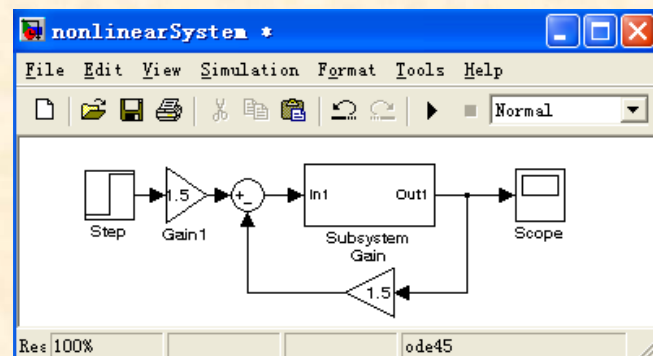


图9-27 圈选欲建子系统的模块

② 点击模型窗Edit菜单下的Create Subsystem 命令, 则所选定的模型组合自动转化成子系统:

③ 双击该图标, 可打开该子系统窗口, 改写输入输出符号:

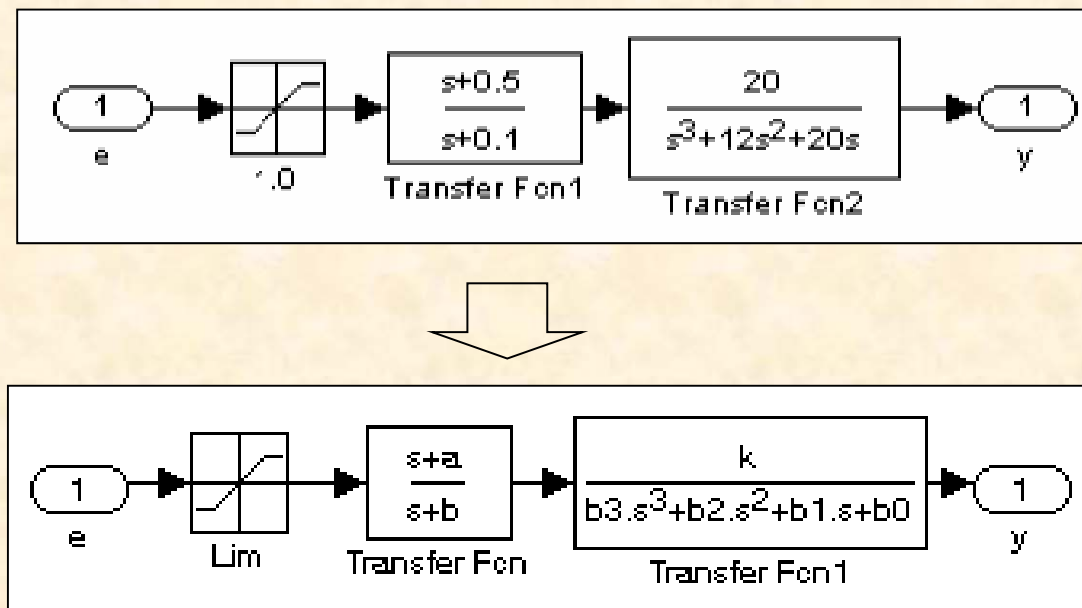
④ 关闭子系统编辑窗口, 设置子系统标签, 则系统模型如下图所示:



5.3.2 子系统的封装

- 子系统可以建立自己的参数设置对话框，以避免对子系统内的每个模块分别进行参数设置，因此在子系统建立好以后，需对其进行封装。子系统封装的基本步骤如下：
 - ① 设置好子系统中各模块的参数变量；
 - ② 定义提示对话框及其特性；
 - ③ 定义被封装子系统的描述和帮助文档；
 - ④ 定义产生模块图标的命令。

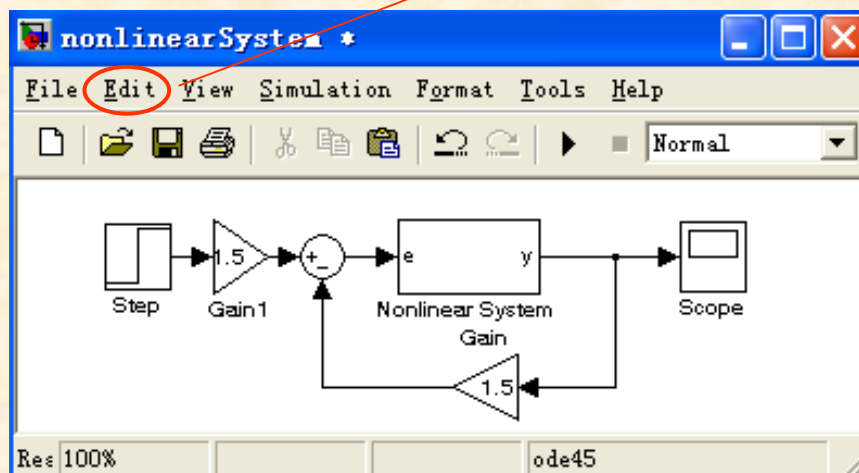
1. 设置子系统参数变量



将原子系统中的常数改为变量,其中饱和环节的上、下限分别设为au、ab (需打开该环节的参数设置框).

2. 产生提示对话框

- 选择需要封装的子系统，从模型窗口的 Edit 菜单选择 Mask Subsystem 命令，即弹出封装编辑器：

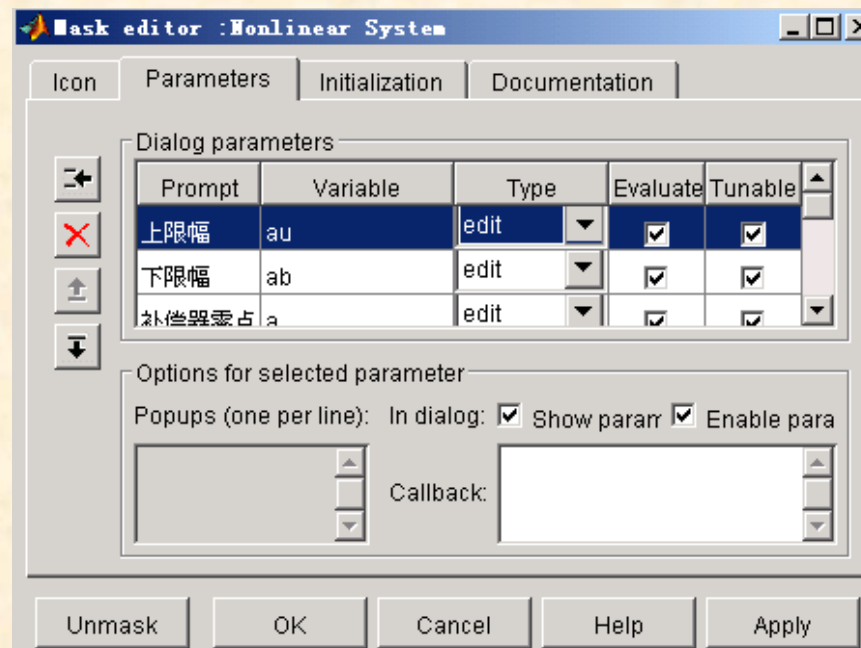


Can't undo	Ctrl+Z
Can't redo	Ctrl+Y
Cut	Ctrl+X
Copy	Ctrl+C
Paste	Ctrl+V
Clear	Delete
Select all	Ctrl+A
Copy model to clipboard	
Find...	Ctrl+F
Open block	
Mask parameters...	
Block parameters...	
Block properties...	
Create subsystem	Ctrl+G
Mask subsystem...	Ctrl+M
Look under mask	Ctrl+U
Link options	
Update diagram	Ctrl+D

■ 该编辑器分为四页(MATLAB6.5版):

- ① Icon(图标)页
- ② Parameters(参数页)
- ③ Initialiation(初始化)页
- ④ Documentation(文档)页

其中对于子系统封装最关键的是Parameters项，用于设置参数变量及其类型等。



■ Parameters页



- 假定子系统（Nonlinear system）的参数变量名已由封装编辑器全部输入。双击该子系统图标，即弹出如图所示子系统的参数设置框图。如图所示逐栏输入与变量所对应的参数，即完成对该子系统的参数设置。



Parameters

上限幅	1
下限幅	-1
补偿器零点	-1
补偿器极点	-0.1
增益	20
s^3	1
s^2	12
s^1	20
s^0	0

5.4 Simulink仿真举例

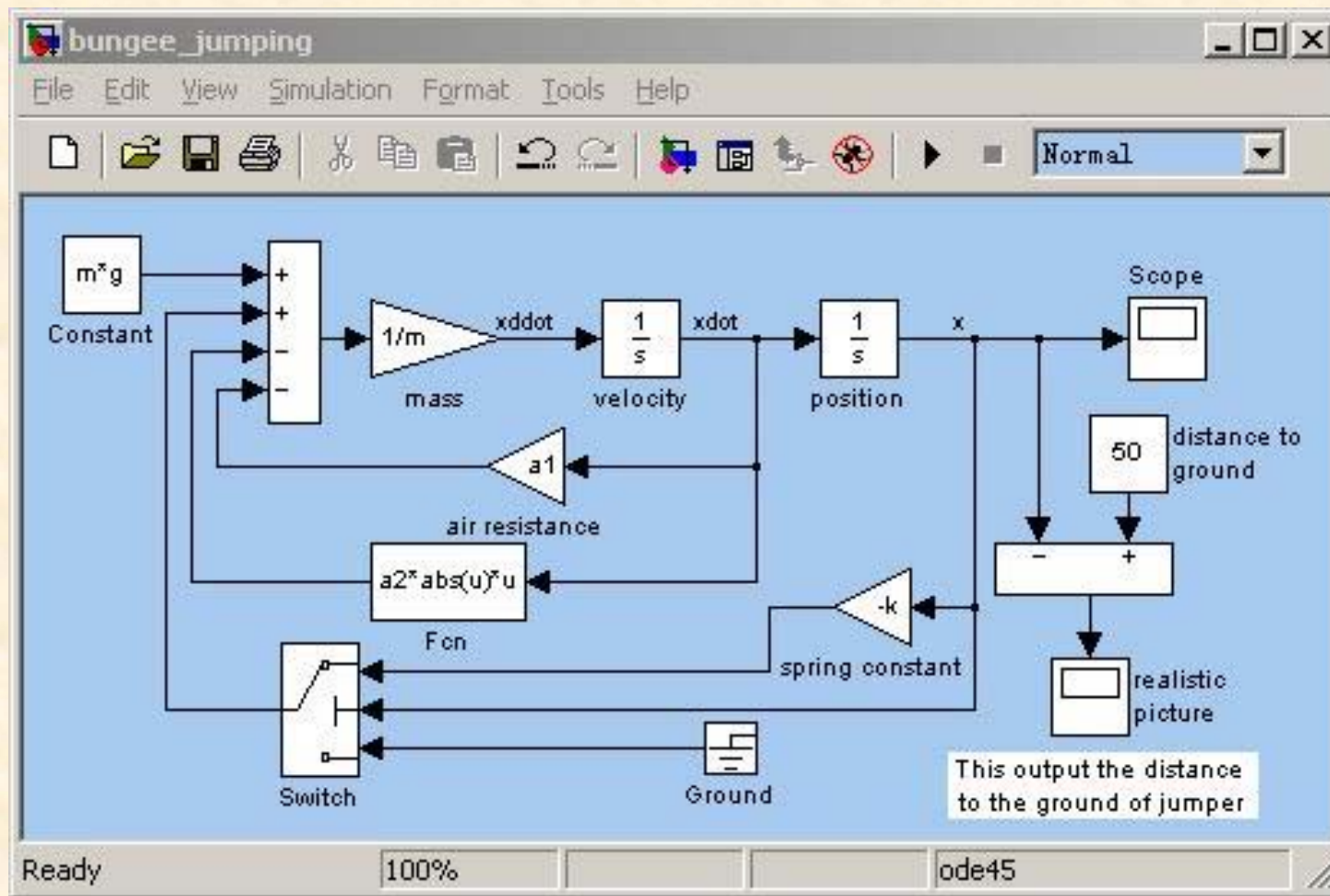
例3、蹦极者系着一根弹力绳从高处的桥梁（或是山崖等）向下跳，整个蹦极跳系统的数学描述为：

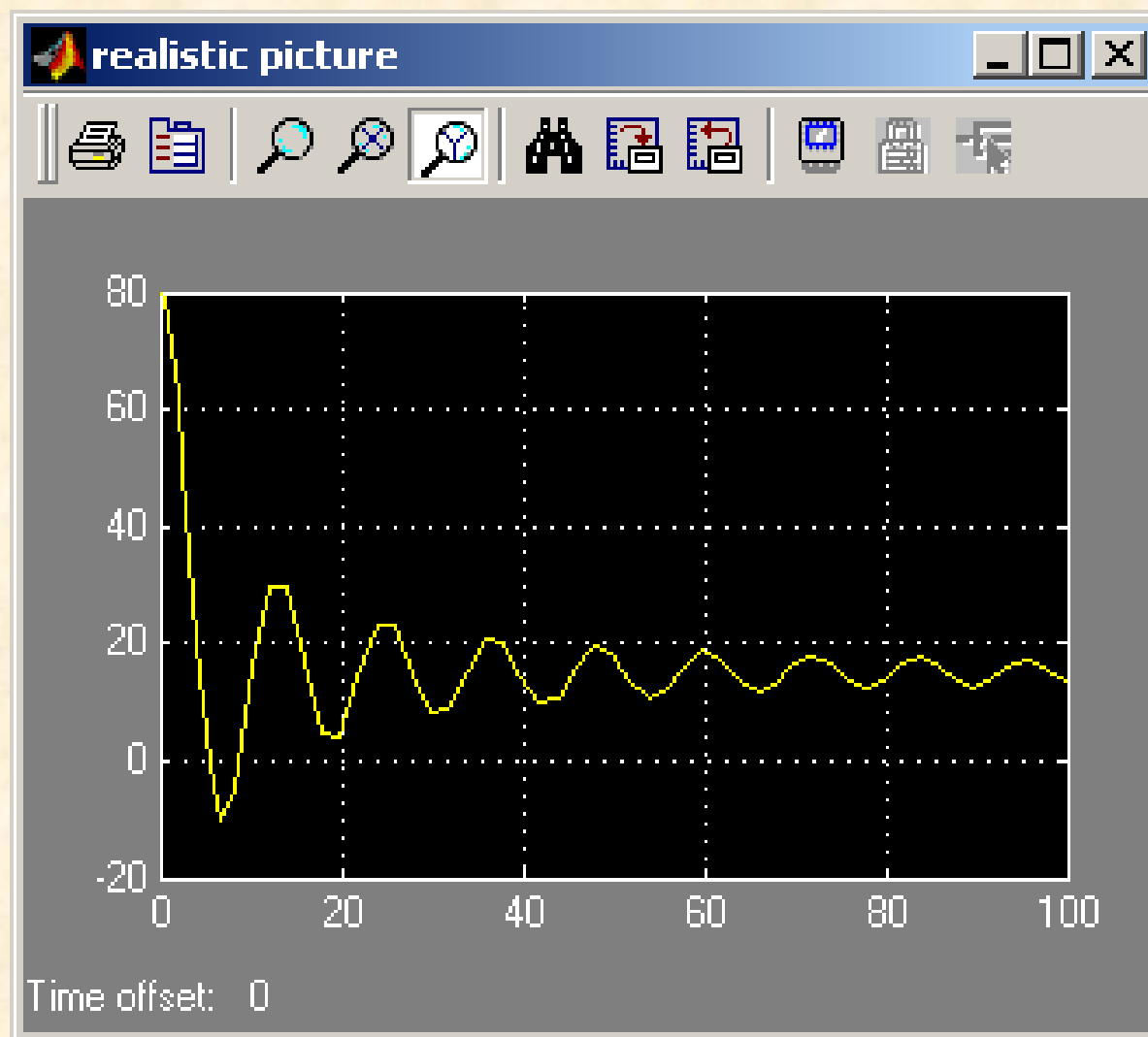
$$m\ddot{x} = mg + b(x) - a_1\dot{x} - a_2|\dot{x}|\dot{x}$$

其中 m 为物体的质量， g 为重力加速度， x 为物体的位置。如果物体系在一个弹性常数为 k 的弹力绳索上，定义绳索下端的初始位置为0，则其对落体位置的影响为

$$b(x) = \begin{cases} -kx, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases}$$

设桥梁离地面为50m，蹦极跳的起始位置为绳索的长度-30m，即 $x(0)=-30$ ，蹦极者起始速度为0，即 $x'(0)=0$ ，其他参数 $k=20, a_2=a_1=1, m=70\text{kg}, g=10\text{m/s}^2$ 。

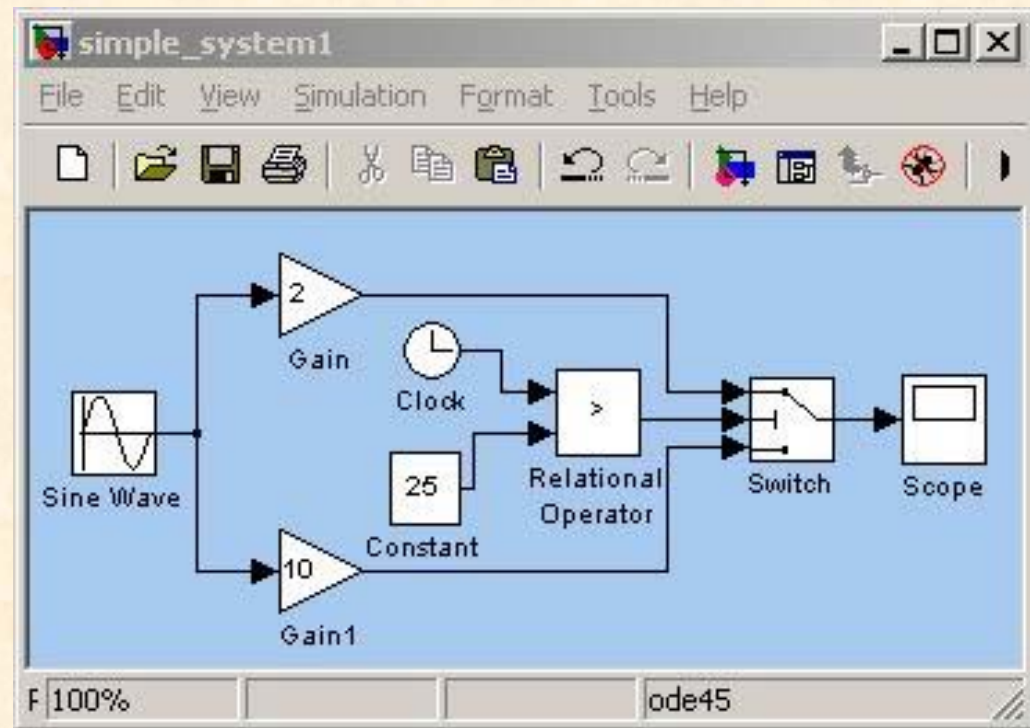


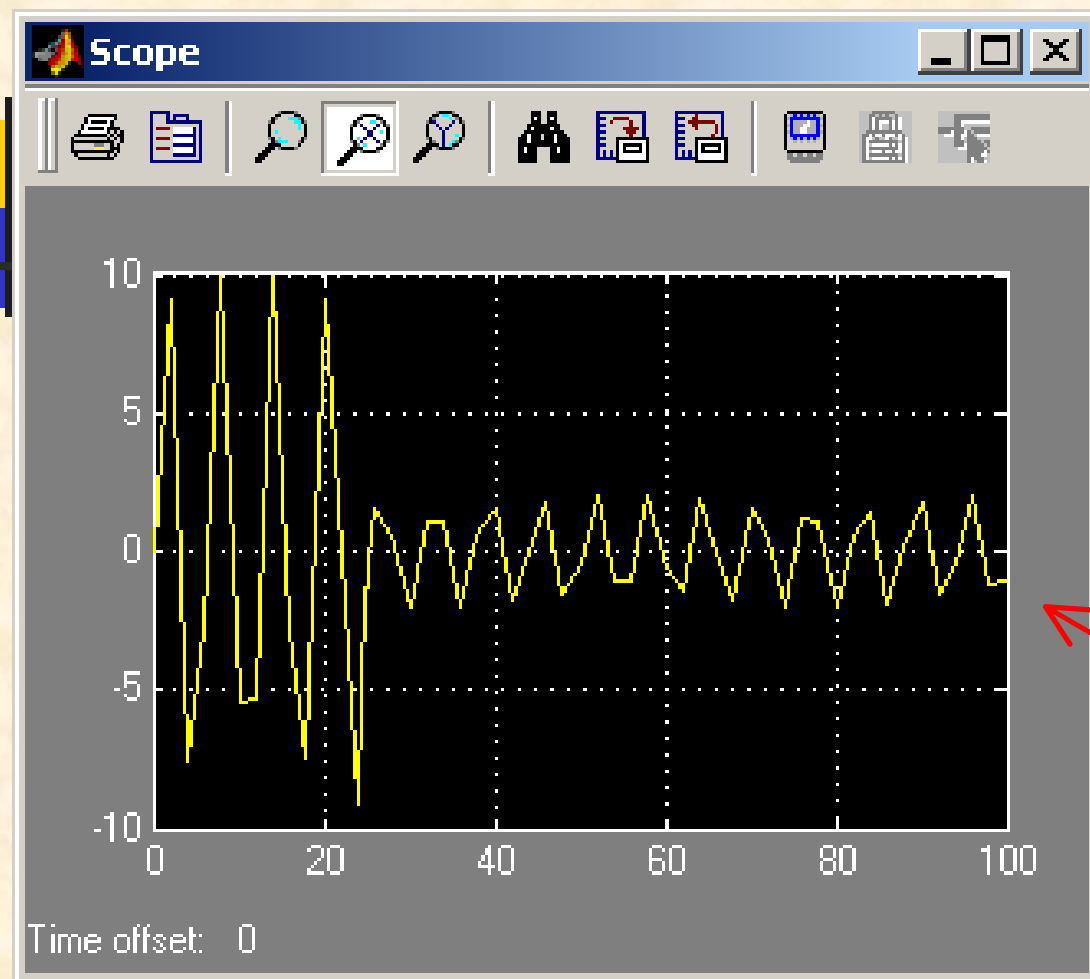


例4、建立如下简单系统

$$y(t) = \begin{cases} 2u(t), & t > 25 \\ 10u(t), & t \leq 25 \end{cases}$$

- 1 选择模块
- 2 连线
- 3 模块参数设置
- 4 系统参数设置
- 5 运行仿真





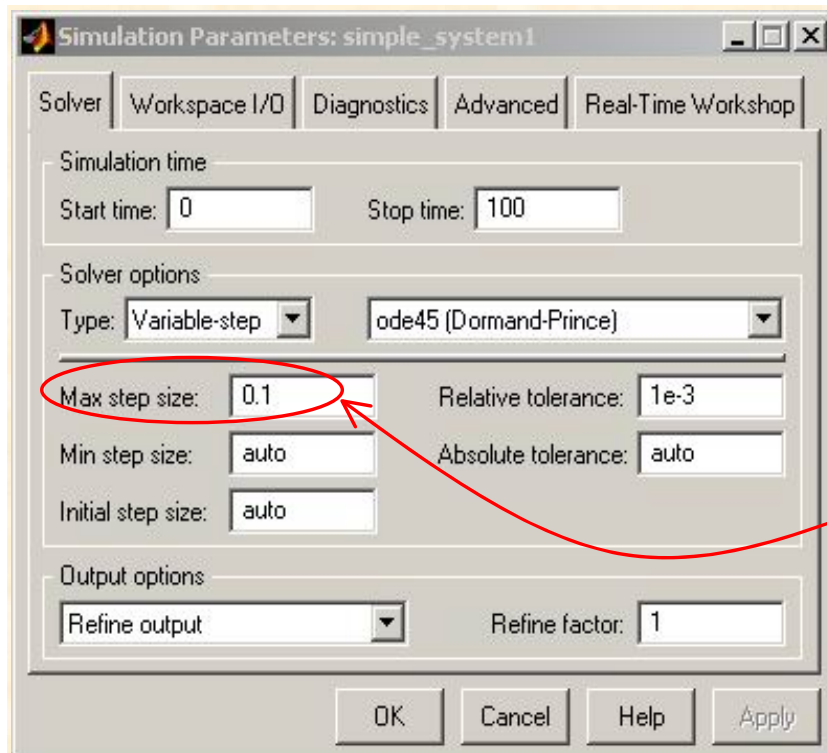
采用默认仿
真步长设置
造成仿真输
出曲线的不
光滑

仿真步长设置

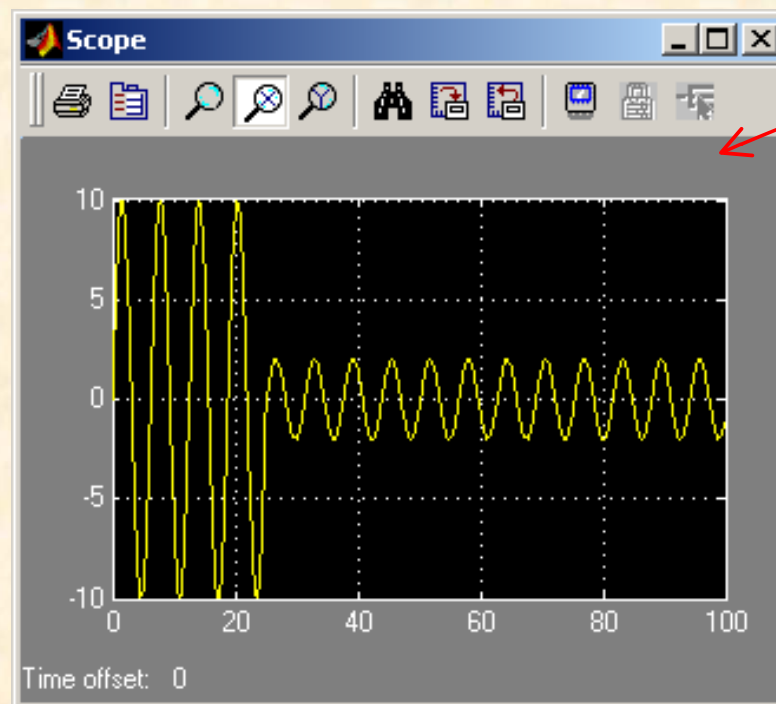
仿真参数的选择对仿真结果有很大的影响。在使用Simulink对简单系统进行仿真时，影响仿真结果输出的因素有仿真起始时间、结束时间和仿真步长。对于简单系统仿真来说，不管采用何种求解器，Simulink总是在仿真过程中选用最大的仿真步长。

如果仿真时间区间较长，而且最大步长设置采用默认取值auto，则会导致系统在仿真时使用大的步长，因为Simulink的仿真步长是通过下式得到的：

$$h = \frac{t_{final} - t_{start}}{50}$$

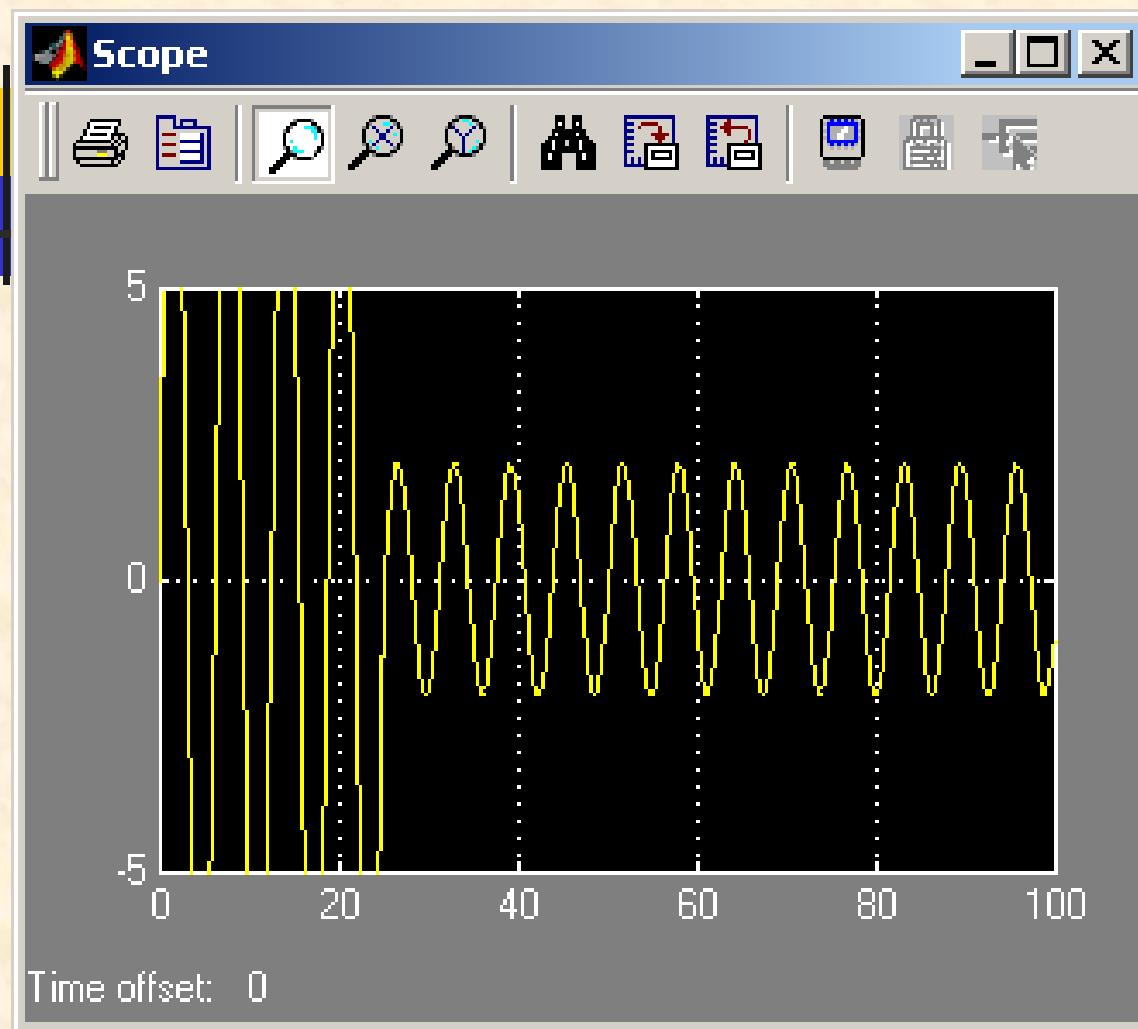


最大仿
真步长
设置为
0.1



仿真输出曲
线变得比较
光滑, 仿真结
果得到明显
改善

Scope模块的使用



默认设置下
Scope 模块所
显示的系统仿
真结果输出
(Scope 模块
动态范围不足
以显示仿真输
出结果)