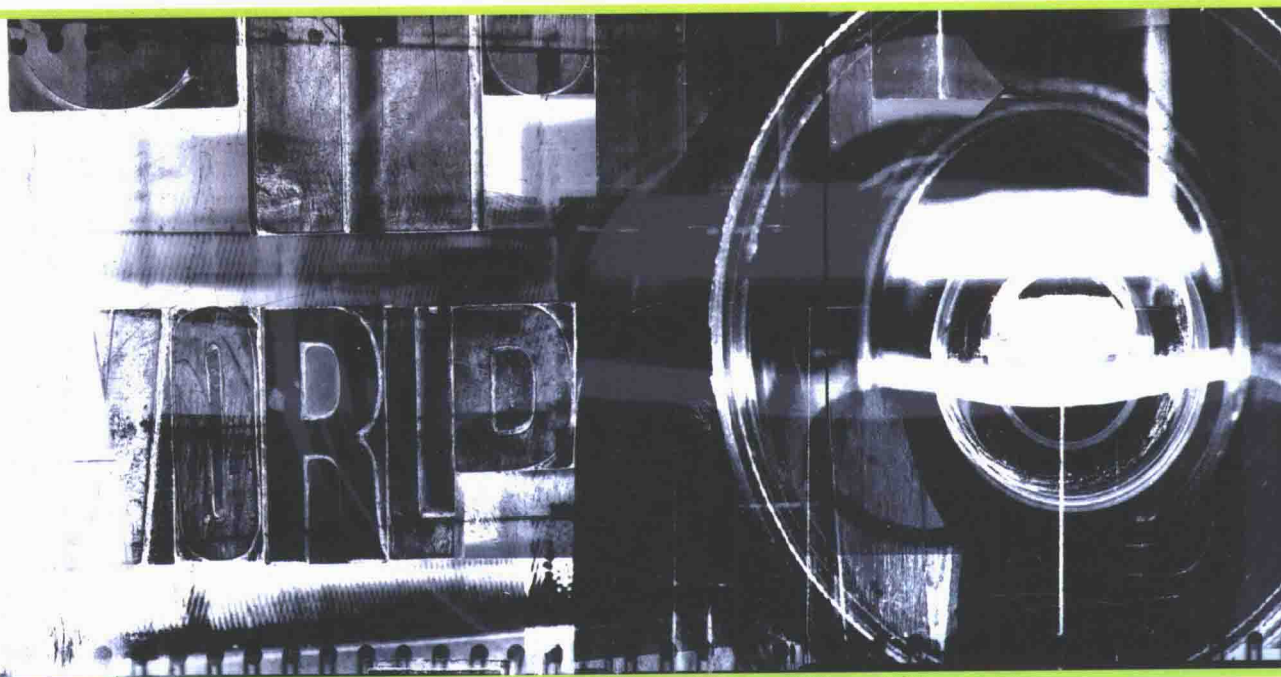


通信工程仿真开发手册系列

Simulink

通信仿真开发手册

孙屹 主编 吴磊 编著



国防工业出版社

<http://www.ndip.cn>

通信工程仿真开发手册系列

Simulink

通信仿真开发手册

孙屹 主编 吴磊 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

Simulink 通信仿真开发手册/孙屹主编. —北京:国防工业出版社,2004.10

(通信工程仿真开发手册系列)

ISBN 7-118-03538-6

I. S... II. 孙... III. 计算机辅助计算—软件工具, Simulink—应用—通信系统—系统仿真
IV. TP391.75②TN914

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 077234 号

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

涿中印刷厂印刷

新华书店经营

*

开本 787×1092 1/16 印张 26 606 千字

2004 年 10 月第 1 版 2004 年 10 月北京第 1 次印刷

印数:1-4000 册 定价:39.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: 68428422

发行邮购: 68414474

发行传真: 68411535

发行业务: 68472764

前 言

长期以来，仿真领域的研究重点是放在仿真模型建立这一环节上，即在系统模型建立以后，要设计一种算法，以使系统模型等为计算机所接受，然后再将其编制成计算机程序，并在计算机上运行，因此就产生了各种仿真算法和仿真软件。

由于对模型建立和仿真试验研究较少，因此，建模就需要很长时间，同时仿真结果的分析也必须依赖有关专家，而对仿真系统的实验者缺乏直接的指导，这样就大大阻碍了仿真技术的推广应用。

仿真工具 Simulink 的出现改变了这样的情况。Simulink 是当今国际上科学界最具影响力、也是最有活力的软件——MATLAB 中的仿真工具，它是一个用来进行动态系统仿真、建模和分析的软件包，它不但支持线性系统仿真，也支持非线性系统仿真，既可以进行连续系统仿真，也可进行离散系统仿真或者两者的混合系统仿真，同时它支持具有多种采样速率的系统仿真。因此，Simulink 成为众多仿真软件中功能最强大、最优秀、最容易使用的一种，它有效地解决了上述仿真技术中的问题。在 Simulink 中，对系统进行建模将变得非常简单，而且仿真过程是交互的，因此，可以随意改变仿真参数，并且立即可以得到修改后的仿真结果。另外，使用 MATLAB 中的各种分析工具，还可以对仿真结果进行分析和可视化。

尤其是在通信领域，因为通信领域中很多问题是研究系统性能的，传统的方法只有构建一个实验系统，采用各种仪器进行测量得到所需的数据，这样不仅需要花费大量的资金用于实验系统的构建，而且系统构建的周期长，系统参数的调整也十分困难。Simulink 的出现使得通信系统的仿真能够用计算机模拟实现，免去了构建实验系统的不便，而且操作十分简便，只需要输入不同的参数就能得到不同情况下系统的性能，而且在结果的观测和数据的存储方面也比传统的方式有很多优势。因而使用 Simulink 进行仿真正在通信仿真领域得到越来越多的应用。

本书从 Simulink 的基本功能说起，讲解 MATLAB 的基本模块和建模，然后讲解 Simulink 的通信模块库和数字信号处理模块库，而且还对通信系统的各部分理论进行了讲解，使读者在掌握 Simulink 基本用法的基础上，熟悉通信系统并能够使用 Simulink 进行通信系统的仿真。

模块是 Simulink 通信系统仿真的基础，本书最大的优点是对 Simulink 提供的模块库进行了深入细致的讲解，使读者在将来的通信系统仿真中打下坚实的基础。

由于时间仓促，本书难免有疏漏之处，希望广大读者批评指正。

编者
2004.9

内 容 简 介

本书介绍了 Simulink 在通信系统设计中建模和仿真应用，包括连续与离散模块、各种工具模块、信源信宿模块以及通信模块库中各种信源与信道编码等内容。

全书共分为 14 章，不仅对 Simulink 作了比较简单的介绍，而且通过实例使刚开始接触 Simulink 的读者能够对其有更为形象的了解。对于用来建模、分析和仿真各种动态系统的交互环境，Simulink 包括连续系统、离散系统和混杂系统。Simulink 提供了采用鼠标拖放的方法建立系统框图模型的图形交互界面。通过 Simulink 提供的丰富的功能块，用户可以迅速地创建系统的模型，不需要书写一行代码。除此之外，Simulink 还支持 Stateflow，用来仿真事件驱动过程。

本书可以作为电子通信专业高年级本科生和研究生的教材或自学辅导书，也可作为电子通信专业技术人员的参考资料。

目 录

第 1 章	Simulink 简介	1
1.1	MATLAB 概述	1
1.2	Simulink 特点	1
1.3	Simulink 的专用模型库 (Blocksets)	2
1.4	使用 Simulink 进行通信系统设计	3
第 2 章	Simulink 入门	5
2.1	Simulink 的操作界面	5
2.2	Simulink 举例	6
第 3 章	Simulink 工作原理	11
3.1	Simulink 求解器	11
3.1.1	连续求解器	11
3.1.2	离散求解器	11
3.1.3	关于求解器的其他内容	12
3.2	过零检测和事件通知	12
3.2.1	过零检测	12
3.2.2	时间通知	13
3.3	代数环	14
3.3.1	直接馈入环路 (direct feedthrough)	14
3.3.2	代数环的产生	14
3.4	改善仿真的性能和精确度	15
3.4.1	加速仿真	15
3.4.2	改善仿真的精度	16
3.5	模型文件	16
第 4 章	S 函数	26
4.1	S 函数简介	26
4.1.1	什么是 S 函数	26
4.1.2	如何在仿真模型中应用 S 函数	26
4.1.3	S 函数工作过程	27
4.1.4	S 函数例程的使用	28
4.2	M 文件 S 函数	28
第 5 章	常用模块库——连续与离散模块	31
5.1	连续模块库	31

5.2	非连续模块库	43
5.3	离散模块库	53
第 6 章	常用模块库——各种工具模块	65
6.1	查找表模块库	65
6.2	数学操作模块库	75
6.3	信号轨迹模块库	102
第 7 章	常用模块库——信源信宿模块	120
7.1	信宿模块库	120
7.2	信源模块库	128
第 8 章	通信模块库——信源信宿	150
8.1	信号类型	150
8.1.1	向量和矩阵的处理	150
8.1.2	基于帧和基于采样信号的处理	151
8.2	信源	151
8.2.1	随机和伪随机信号的产生	152
8.2.2	非随机信号的产生	167
8.3	信宿	171
8.3.1	向文件写入数据	172
8.3.2	错误统计	173
8.3.3	眼图与散布图	176
第 9 章	通信模块库——信源与信道编码	180
9.1	信源编码	180
9.1.1	信号的量化	180
9.1.2	差分脉冲编码调制 (DPCM) 的实现	185
9.1.3	信号的压缩与扩展	189
9.2	分组码	193
9.2.1	分组码仿真的数据形式	194
9.2.2	普通线性编码模块	195
9.2.3	循环码编译码模块	197
9.2.4	汉明码编译码模块	199
9.2.5	BCH 码编译码模块	201
9.2.6	RS 码编译码模块	203
9.3	卷积码	208
9.3.1	卷积码的描述形式	209
9.3.2	卷积码编译码模块	211
9.4	交织	216
9.4.1	分组交织	216
9.4.2	卷积交织	225
第 10 章	通信模块库——调制解调	234

10.1	模拟调制与解调	234
10.1.1	模拟调制解调中的时间问题	234
10.1.2	模拟通带调制	237
10.1.3	模拟基带调制	249
10.2	数字调制与解调	259
10.2.1	数字通带调制	259
10.2.2	数字基带调制	275
第 11 章	DSP 模块库——信号描述	291
11.1	DSP 工具模块库总述	291
11.2	DSP 工具模块库中的信号工作方式	292
11.2.1	信号的概念	292
11.2.2	采样速率和帧速率	296
11.2.3	创建一个信号	314
11.2.4	构造信号	332
11.2.5	分解信号	334
11.2.6	导入信号	338
11.2.7	导出信号	343
11.2.8	观察信号	347
11.2.9	延迟和反应时间	353
第 12 章	DSP 模块库——滤波器设计	354
12.1	设计、分析和实现滤波器	354
12.2	实现 Predesigned Filters	357
12.3	多速率滤波器	360
12.4	自适应滤波器	362
12.5	模拟 IIR 滤波器	367
第 13 章	DSP 模块库——各种变换、统计工具及谱估计	369
13.1	DSP 模块库中的各种变换	369
13.2	DSP 模块库中的统计工具	376
13.3	DSP 模块库中的谱估计	380
第 14 章	Simulink 通信仿真实例	387
14.1	自适应差分调制	387
14.2	频率合成器	392
附录	Simulink 模块库结构	400
参考文献	408

第 1 章 Simulink 简介

MATLAB 是 Mathworks 公司推出的一套高性能数值计算软件。由于它具有优秀的数值计算能力和卓越的数据可视化能力，因此很快在数学软件中脱颖而出。Simulink 是 MATLAB 的软件组的一个工具箱，它是结合了框图界面和交互仿真能力的非线性动态系统仿真工具，以 MATLAB 的核心数学、图形和语言为基础。Simulink Blockset 是专门为特定领域设计的 Simulink 功能块的集合。用户也可以利用已有的块或自编写的 C 和 MATLAB 程序建立自己的块或库。

1.1 MATLAB 概述

MATLAB 产品族由以下产品构成：

- MATLAB
- MATLAB Toolbox
- MATLAB Compiler
- Simulink
- Stateflow
- Real-Time Workshop
- Simulink Blockset

MATLAB 产品族支持从概念设计、算法开发、建模仿真到实时实现，是理想的集成开发环境。无论是进行科学研究还是产品开发，MATLAB 产品族都是必不可少的工具。

MATLAB 产品族可用于进行数据分析，数值和符号计算，工程与科学绘图，控制系统设计，数字图像信号处理，财务工程，建模、仿真、原型开发，应用开发以及图形用户界面设计。

MATLAB 产品族广泛地应用于信号与图像处理、控制系统设计、通信、系统仿真等诸多领域。开放式的结构使 MATLAB 产品族很容易针对特定的需求进行扩充，从而在不断深化对问题认识的同时，提高自身的竞争力。

MATLAB 产品族的一大特性是有众多的面向具体应用的工具箱和仿真块，包含了完整的函数集用来对通信系统、信号图像处理、控制系统、神经网络等特殊应用进行分析和设计。其他的产品则延伸了 MATLAB 的能力，包括数据采集、报告生成、依靠 MATLAB 语言编程产生独立 C/C++ 代码等。

1.2 Simulink 特点

Simulink 是用来建模、分析和仿真各种动态系统的交互环境，包括连续系统、离散

系统和混杂系统。Simulink 提供了采用鼠标拖放的方法建立系统框图模型的图形交互界面。通过 Simulink 提供的丰富的功能块，用户可以迅速地创建系统的模型，不需要书写一行代码。Simulink 还支持 Stateflow，用来仿真事件驱动过程。

Simulink 仿真具有以下特点：

1. 交互建模

Simulink 提供了大量的功能块，方便用户快速地建立动态系统模型，建模时只需使用鼠标拖放库中的功能块并将它们连接起来。用户可以通过将块组成子系统建立多级模型。对块和连接的数目没有限制。

2. 交互仿真

Simulink 框图提供了交互性很强的非线性仿真环境。用户可以通过下拉菜单执行仿真，或使用命令行进行批处理。仿真结果可以在运行的同时通过示波器或图形窗口显示。有了 Simulink，用户可以在仿真的同时，采用交互或批处理的方式，方便地更换参数来进行“*What-if*”分析。

3. 能够扩充和定制

Simulink 的开放式结构允许用户扩展仿真环境的功能：

- (1) 采用 MATLAB, Fortran 和 C 代码生成自定义块库，并拥有自己的图标和界面。
- (2) 将用户原有的 Fortran 或 C 编写的代码连接进来。

4. 与 MATLAB 和工具箱集成

由于 Simulink 可以直接利用 MATLAB 的数学、图形和编程功能，用户可以直接在 Simulink 下完成诸如数据分析、过程自动化、优化参数等工作。工具箱提供的高级的设计和析能力可以通过 Simulink 的屏蔽手段在仿真过程中执行。

5. 专用模型库 (Blocksets)

Simulink 的模型库可以通过专用元件集进一步扩展。DSP Blockset 可以用于 DSP 算法的开发，Fixed-Point Blockset 扩展了 Simulink，用于建立和模拟数字控制系统和数字滤波器。

1.3 Simulink 的专用模型库 (Blocksets)

作为 Simulink 建模系统的补充，MathWorks 公司开发了专用功能块程序包，如 DSP Blockset 和 Communication Blockset 等。通过使用这些程序包，用户可以迅速地对系统进行建模与仿真。更重要的是，用户还可以对系统模型进行代码生成，并将生成的代码下载到不同的目标机上。

另外，MathWorks 为用户从算法设计、建模仿真，一直到系统实现提供了完整的解决方案。而且，为了方便用户系统的实施，MathWorks 公司还开发了实施软件包，如 TI 和 Motorola 开发工具包，以方便用户进行目标系统的开发。

常用的 Simulink Blockset 有：

- DSP Blockset (数字信号处理工具)

- Fixed-Point Blockset (定点运算控制系统仿真)
- Power System Blockset (电力电动系统库)
- Dials & Gauges Blockset (交互图形和控制面板设计工具)
- Communications Blockset (通信系统工具)
- CDMA Reference Blkset CDMA (CDMA 通信系统设计和分析)
- Nonlinear Control Design Blockset (非线性控制设计工具箱)
- Motorola DSP Developer's Kit (Motorola DSP 开发工具)
- TI DSP Developer's Kit (TI DSP 开发工具)

1.4 使用 Simulink 进行通信系统设计

高性能、低成本、缩短产品生产周期的迫切需求，需要各个专业开发部门之间密切协作。MathWorks 产品为不同的设计队伍协同工作提供了一个高度集成化的环境，使系统工程师、DSP 开发人员、硬件设计师能够结合起来建立和维护系统模型，研究不同的算法和体系，并验证系统的性能。

通过使用 Simulink、Stateflow、DSP Blockset，用户可以快速、准确地仿真系统中每一部分的行为，包括实时 DSP 算法，数字、模拟和混合信号处理硬件，控制逻辑，通信协议和同步循环，还可以考虑信道、声学和其他物理效应。

在使用 Simulink 的同时，用户可以随时利用 MATLAB 进行算法开发，分析和显示数据。MATLAB 工具箱提供的先进的算法赋予用户无以伦比的分析和设计能力，包括信号生成、滤波器设计及实现、谱估计、高阶谱分析等等。

以往测试和验证通常要花去设计周期的 2/3 的时间，手工代码错误也拖延了时间。通过 Real-Time Workshop, Stateflow Coder 用户可以自动生成可靠优化的代码，对用户的设计在 DSP 硬件上进行测试和验证。

1. 基于帧的 DSP 仿真

DSP Blockset 提供了超过 200 个高级 DSP 和数据功能块，包括变换、矩阵代数、FIR、IIR、自适应和多数率滤波器、实时数据 I/O，所有这些均基于帧处理来实施。DSP Blockset 适合用于实时语音和基带通信算法，支持基于传感器的信号处理。

2. 物理层通信仿真

Communications Toolbox 提供了调制和信道编码技术也提供了信道模型和分析高级数字通信系统的物理层设计的工具，包括宽带调制解调器、无线手持机和基站、大容量存储设备等。

3. 定点仿真

使用 Fixed-Point Blockset，用户可以进行滤波器和其他信号处理器件的定点算法仿真。这个应用库提供了基础算法和逻辑运算，用于在定点 DSP、微处理器和 ASIC 的算法设计中考虑区间和字长等影响。

4. 快速准确地求解模拟模型和混合信号模型


许多仿真工具只提供对模拟行为的近似离散时间表述。Simulink 提供真正的连续时间求解器，保证非线性模拟和混合信号系统仿真的快速性和准确性，如放大器、PLL 和 A/D 转换器等。

第 2 章 Simulink 入门

2.1 Simulink 的操作界面

进入 MATLAB 主界面后，在命令行窗口中输入：

```
>> simulink
```

这时就会调用 Simulink 的库浏览器，如图 2-1 所示。在 MATLAB 主界面下点击工具栏上的“”按钮，也会弹出 Simulink 的库浏览器。

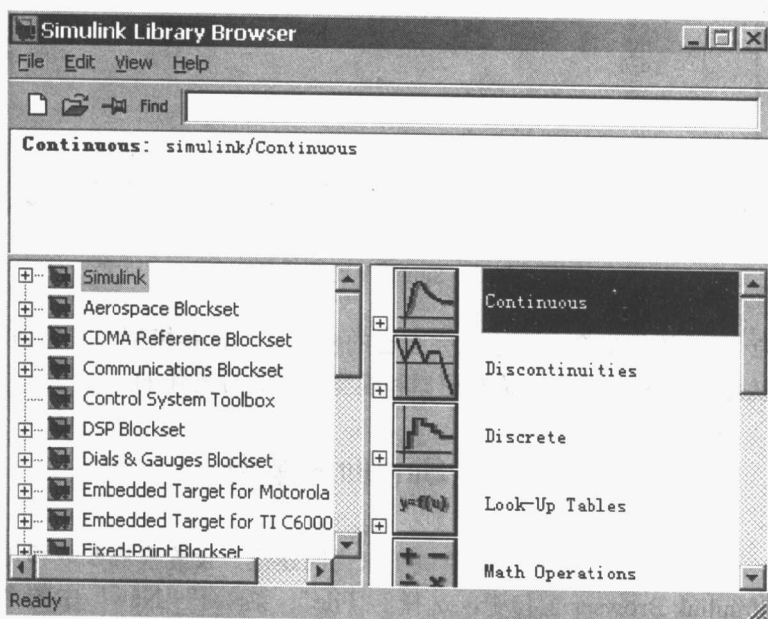


图 2-1 Simulink 库浏览器

Simulink 的一个优点是它的图形用户界面特别适合用户使用，操作起来简单方便。在 Simulink 中建立模型 (Model) 都是从这个 Simulink Browser 开始的。

Simulink Browser 窗口左边的子窗口 Simulink 下的各个模块库是按照应用进行分类的，在通信仿真中应用的模块库除了 Simulink 基本模块库外，还包括 Communication Blockset、DSP Blockset 等。

Simulink Browser 窗口右边的子窗口显示的是左边选中的库的低层次子库或模块。用户在左边窗口中选中不同的模块库，右边子窗口中显示的内容就会发生相应的变化，显示当前选中的模块库中的子库或模块。

在 Simulink Browser 界面下，选择“File”菜单下“New”中的“Model”选项，弹出如图 2-2 所示模型窗口，此时用户就可以在 Simulink Browser 界面中选择不同的模块来建立自己的模型。

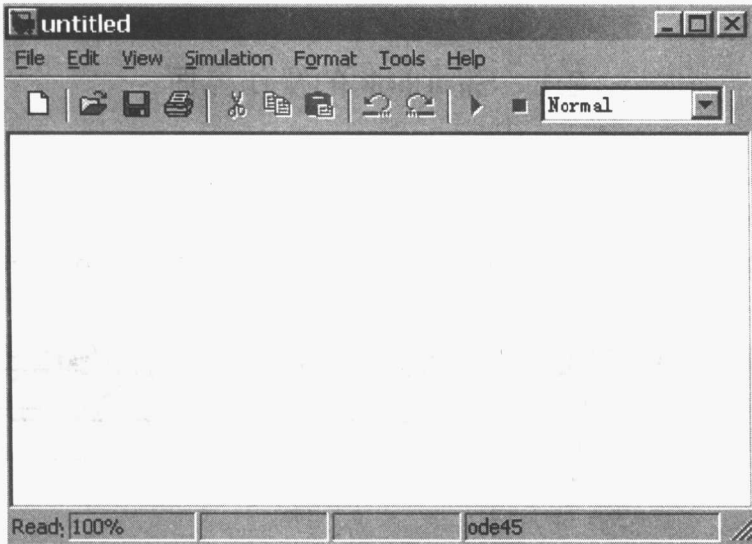


图 2-2 Simulink 的模型窗口

在图 2-2 所示的模型窗口中建立完自己的模型后，保存模型，开始仿真。Simulink 的仿真主要就是针对 Simulink 浏览器窗口和模型窗口进行操作的。

2.2 Simulink 举例

这里举一个观察正弦波波形的简单例子来说明建模、设置模块参数和仿真的方法。

(1) 在 Simulink Browser 窗口中，选择“File”菜单下“New”中的“Model”项，建立一个新的模型。此时模型如图 2-2 所示。

(2) 向模型中添加模块。添加模块首先要在 Simulink Browser 窗口中找到所要添加的模块，然后单击鼠标右键，在弹出的菜单中选择“Add to untitled”项，就可以将该模块添加到模型窗口中；也可以在找到了所要添加的模块后，左键直接选中该模块，然后将该模块拖到模型窗口中。

在 Simulink Browser 窗口中选择 Simulink/Sources 库下的 Sine Wave 模块，如图 2-3 所示，然后将其拖到模型窗口中，如图 2-4 所示。

用同样的方法添加下列模块：

Simulink/Continuous 库下 Integrator block（微分模块）；

Simulink/Sinks 库下的 Scope block（示波器模块）；

Simulink/Signal Routing 库下的 Mux block（合并模块）。

添加完各个模块后，模型窗口如图 2-5 所示。

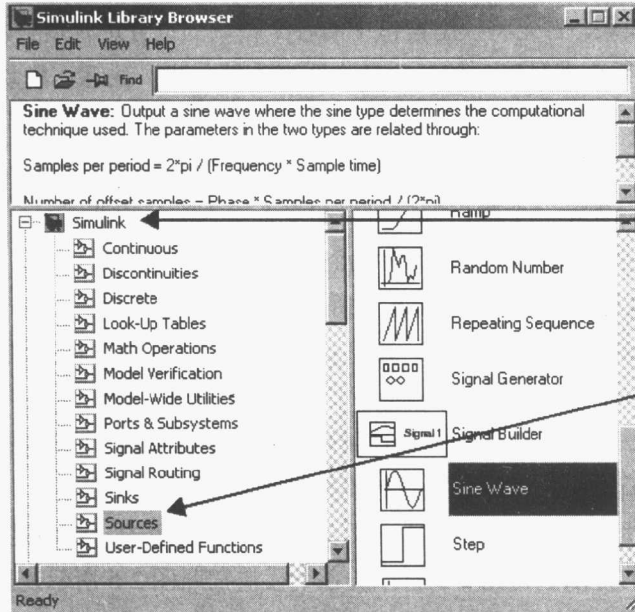


图 2-3 选择 Sine Wave 模块

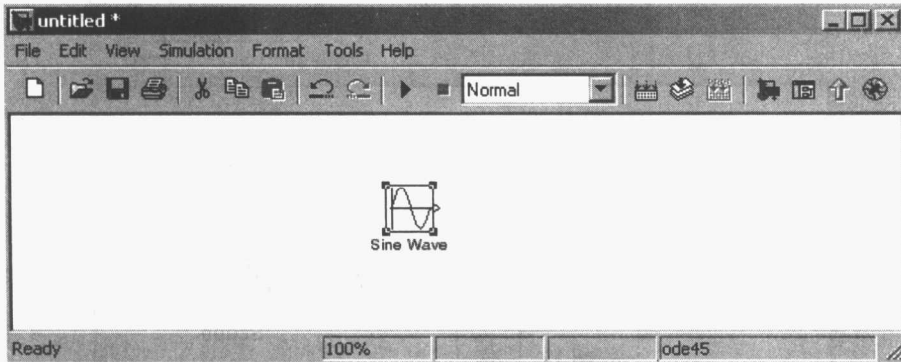


图 2-4 添加 Sine Wave Block 后的模型窗口

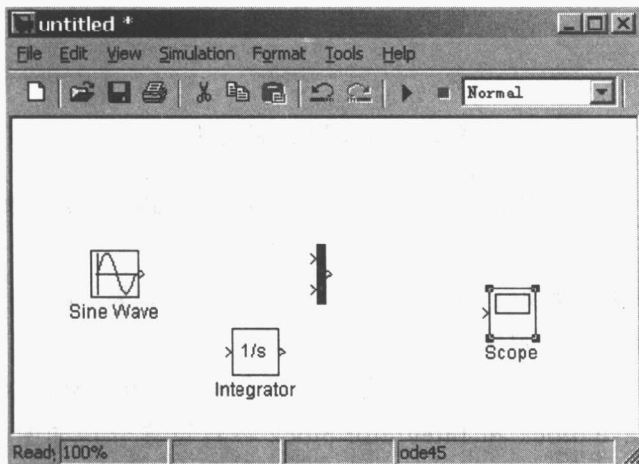


图 2-5 添加了各个模块后的模型窗口

(3) 连接各个模块。首先将模型窗口中的各个模块的位置进行调整,使需要连接的各个模块之间级联关系清晰易懂,然后将各个图形连接起来。注意,模块的输入端只能和模块的输出端相连。

在连线中有两种情况:一种是直接连线,表示一个输出端口只和一个输入端口相连;另一种是分支连线,表示一个输出端口可能和多个输入端口相连。

直接连线的方法很简单,当鼠标移动到模块的输出端口附近时,就变成了一个十字形状。此时就可以按住左键,将其连向所连模块的输入端口。还有一种简便的方法,就是在模块的输出端同时按下鼠标左键和 CTRL 键,然后将鼠标拖动到目的模块上即可。

分支连线的方法是在模块的输出端连线附近按下鼠标右键,此时鼠标变成十字形状,然后一直按住鼠标右键,将鼠标移至目的模块的输入端处。

如果两个模块相连成功,连线末端的箭头是实的、黑色的,否则是虚的。

按照上面所述的方法,将图 2-5 所示的各个模块按照图 2-6 所示连接起来。

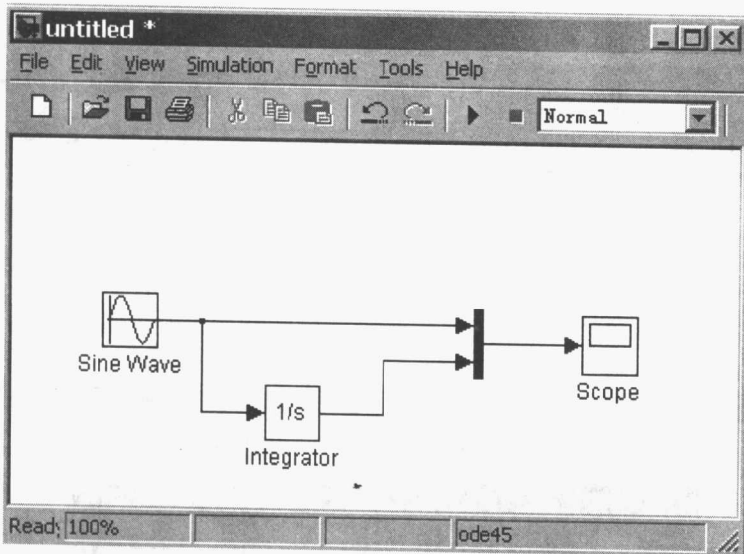


图 2-6 连线完成后的模型

(4) 保存文件。将文件命名为 `sinwave.mdl`, Simulink 模型文件的扩展名均为 `.mdl`。

(5) 设置模块参数。要使模型能够得到用于想要的仿真效果,必须正确地对模块的参数进行设置,这往往要求用户熟悉各个模块的用法。

要设置每个模块的参数,只需在模型中双击模块即可。Mux 的参数设置如图 2-7 所示。Sine Wave block 和 Integrator block 参数设置分别如图 2-8 和图 2-9 所示。

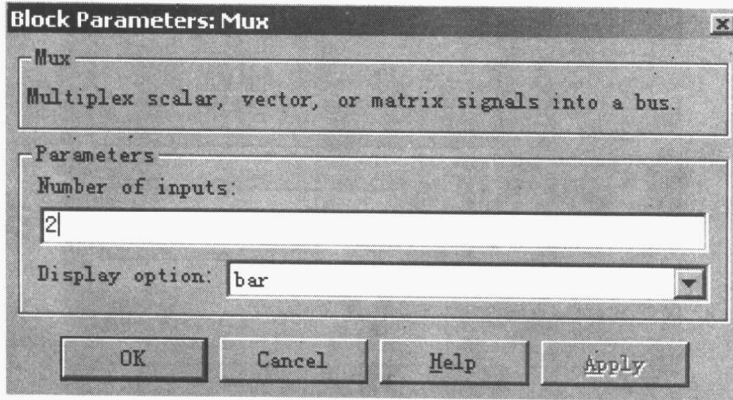


图 2-7 Mux 参数设置

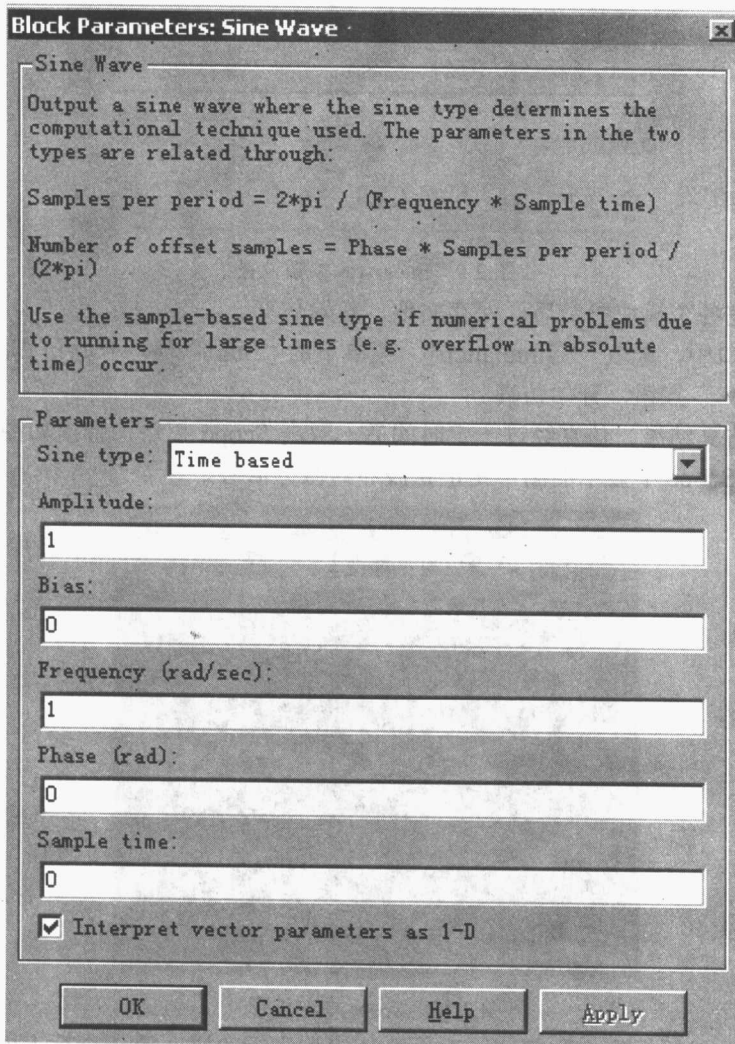


图 2-8 Sine Wave 参数设置