

• ZIDONG KONGZHI
• XITONG MOXING SHEJI
• JI FANGZHEN JIQIAO YANJIU FENXI

# 自动控制系统模型设计及仿真技巧研究分析

陈铭 著

東北林業大學出版社
Northeast Forestry University Press

# 自动控制系统模型设计及仿真技巧研究分析

陈铭　著




東北林業大學出版社
Northeast Forestry University Press

**版权专有　侵权必究**
**举报电话:0451－82113295**

**图书在版编目(CIP)数据**

自动控制系统模型设计及仿真技巧研究分析 / 陈铭著. —哈尔滨：东北林业大学出版社，2019.9
ISBN 978-7-5674-1936-0

Ⅰ. ①自… Ⅱ. ①陈… Ⅲ. ①自动控制系统－研究
Ⅳ. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 208436 号

**责任编辑**　卢　伟
**封面设计**　崔　蕾
**出版发行**　东北林业大学出版社(哈尔滨市香坊区哈平六道街 6 号　邮编:150040)
**印　　装**　三河市铭浩彩色印装有限公司
**开　　本**　787 毫米×1092 毫米　1/16
**印　　张**　12.75
**字　　数**　228 千字
**版　　别**　2020 年 3 月第 1 版
**版　　次**　2020 年 3 月第 1 次印刷
**定　　价**　58.00 元

如发现印装质量问题，请与出版社联系调换。(电话:0451－82113296　82191620)

# 前　言

自动控制系统模型设计及仿真，为控制系统的分析和研究，以及自动控制的教育和训练提供了快速又经济的手段，在自动控制技术的发展中起着非常重要的作用，对此应用的要求也越来越高。新的控制理论与方法需要借助计算机进行仿真与分析。在设计前期，利用仿真技术论证方案，进行经济技术比较，优选合理方案；在设计阶段，仿真技术可帮助设计人员优选系统结构，优化系统参数，以期获得系统最优品质和性能；在调试阶段，利用仿真技术分析系统响应与参数关系，指导调试工作，可以迅速完成调试任务；在运行阶段，利用仿真技术可以在不影响生产的条件下分析系统的工作状态，预防事故发生，寻求改进薄弱环节，以提高系统的性能和运行效率。

本专著作者认真总结之前工作中模型设计和仿真时的注意事项及仿真处理技巧，研究出自己的系统设计流程、函数调用方式、计算机辅助设计方法、仿真波形处理技巧，并结合大量的实例进行现场验证，结果表明，新的方法节省了设计者的步骤，改善了系统性能，为读者提供了宝贵的经验。本书注重系统性、逻辑性、完整性。全书从仿真基础、控制系统分析与设计、综合应用实例三个方面进行阐述。具有以下特点：

(1)结构合理，层层递进，易于学习。利用 MATLAB 计算机辅助设计平台，将控制系统基本原理、分析设计方法与 MATLAB 仿真技术紧密衔接，通过仿真设计实例深入浅出地阐述控制系统设计技巧。

(2)取材贴近实用，讲解深入浅出。以大量工程实例控制系统为背景，在应用实例的设计上，既注重了程序代码尽量简洁明了，又注重程序设计操作步骤的详尽，使读者能够按照步骤完成实例操作后，并根据自己的想法，举一反三，提高创新应用能力。

(3)通过本书的学习，读者不仅可以全面掌握 MATLAB 编程和开发技术，还可以提高快速分析和解决实际问题的能力，从而能够在最短的时间内解决实际工作中遇到的问题，提升工作效率。

本书全面系统地介绍了与自动控制有关的基本概念和 MATLAB 相关函数，并从实用的角度出发，通过大量典型实例，对 MATLAB/Simulink 在自动控制中的应用方法和技巧进行详细论述。全书共 8 章，第 1 章介绍自动控制系统及其仿真绪论；第 2 章介绍 MATLAB 的仿真集成环境 Simulink 的应用；第 3 章介绍建立基于 MATLAB 的控制系统数学模型；第 4 章介绍

控制系统的计算机辅助分析及 MATLAB 应用技巧；第 5 章介绍控制系统的计算机辅助设计方法；第 6 章介绍智能控制系统仿真设计技巧；第 7 章介绍控制系统 MATLAB 仿真应用实例；第 8 章对控制系统模型设计及仿真研究分析进行总结。

本书在总结过去研究工作的基础上，广泛吸收了国内外学者在自动控制系统模型设计及仿真方面的研究成果，重新论述了控制理论仿真基础、技术方法及应用实践技巧，为控制系统仿真模型研究提供参考。在此向相关内容的原作者表示诚挚的敬意和谢意。本书可为自动控制、电子工程、通信等专业的工程技术人员和科技工作者提供参考。

由于本书追求的目标是阐述控制理论中系统模型仿真的方法与技巧实践，这给撰写本书增添了难度，再加上作者水平有限，虽几经修改，书中错误和缺点在所难免，恳请读者批评指正。

本书的研究工作得到了“机电汽车”湖北省优势特色学科群的资助，特此表示衷心的感谢！作者还要感谢湖北文理学院汽车与交通工程学院领导和老师们的帮助和支持；感谢出版社同仁为本书付出的辛勤劳动。

陈　铭

2019 年 2 月

# 目　录


**第 1 章　自动控制系统及其仿真绪论** …… 1

1.1　自动控制系统概述 …… 1

1.2　控制系统仿真的意义 …… 4

1.3　计算机仿真技术的应用及发展趋势 …… 4

**第 2 章　MATLAB 的仿真集成环境 Simulink 的应用** …… 6

2.1　基于 MATLAB 的控制系统仿真的现状及研究的意义 …… 6

2.2　Simulink 仿真概述 …… 7

2.3　Simulink 子系统及其封装技巧 …… 7

2.4　Simulink 的仿真技巧 …… 15

2.5　Simulink 的高级应用——S 函数的设计及应用 …… 20

**第 3 章　基于 MATLAB 的控制系统数学模型** …… 25

3.1　线性系统数学模型研究 …… 25

3.2　数学模型的相互转换 …… 27

3.3　数学模型连接方式及技巧 …… 29

3.4　MATLAB/Simulink 在模型建立、转换、连接中的应用 …… 32

**第 4 章　控制系统的计算机辅助分析及 MATLAB 应用技巧** …… 49

4.1　控制系统时域分析及 MATLAB 的应用技巧 …… 49

4.2　控制系统根轨迹分析及 MATLAB 应用技巧 …… 55

4.3　控制系统频域分析及 MATLAB 应用技巧 …… 57

4.4　控制系统稳定性分析及 MATLAB 应用技巧 …… 66

4.5　线性系统状态空间分析及 MATLAB 应用技巧 …… 69

4.6　基于 MATLAB 的能控性与能观性分析 …… 74

**第 5 章　控制系统的计算机辅助设计** …… 80

5.1　频率法的串联超前滞后校正 …… 80

5.2　根轨迹法的串联超前滞后校正 …… 93

5.3　基于状态空间模型的控制器设计方法 …… 99

5.4　控制系统 PID 控制器设计 …… 112

5.5　仿真实例——球杆系统 PID 控制器设计 …… 121

**第 6 章　智能控制系统仿真设计技巧** …… 125

6.1　模糊逻辑控制及仿真设计技巧 …… 125

6.2 神经网络控制及仿真设计技巧 …… 133
6.3 群智能算法控制系统及仿真设计技巧 …… 140
**第 7 章 控制系统 MATLAB 仿真应用实例** …… 156
7.1 移动机器人 SLAM 设计及仿真 …… 156
7.2 汽车防抱死制动系统控制仿真 …… 161
7.3 车辆悬架系统控制仿真 …… 167
7.4 汽车四轮转向控制系统仿真 …… 178
7.5 直流调速系统 Simulink 仿真设计 …… 184
**第 8 章 控制系统模型设计及仿真研究分析总结** …… 189
**参考文献** …… 193

# 第 1 章　自动控制系统及其仿真绪论

控制系统仿真是对控制系统进行分析、设计和综合研究的一种很有效的手段。在计算机高度发展的今天，研究和设计的控制系统日益复杂化，控制任务日益多样化，而控制要求也越来越高，利用计算机进行仿真试验和研究，并进一步实现计算机控制就成为从事控制及相关行业的工程技术人员所必须掌握的一门技术。

## 1.1　自动控制系统概述

自动控制系统(Automatic Control System)是自动控制技术得以应用的载体和平台，是一种不需要人直接参与就可使生产过程或其他过程按期望规律或预定程序运行的控制系统。

从结构上看，自动控制系统是各种部件的组合体。这些部件是实现自动控制任务所需的，按照一定的规律连接起来，并能按特定要求去控制被控对象。

现实中，自动控制系统的种类较多，被控制的物理量也多种多样。组成这些控制系统的元(部)件虽然有较大差异，但是其基本结构却有着共同特点，且一般都通过机械、电气、液压和网络等手段来实现控制任务。为说明自动控制系统的概念，有必要分析一下图 1-1 所示的人工操纵的水池液面高度(亦称液位)控制系统。

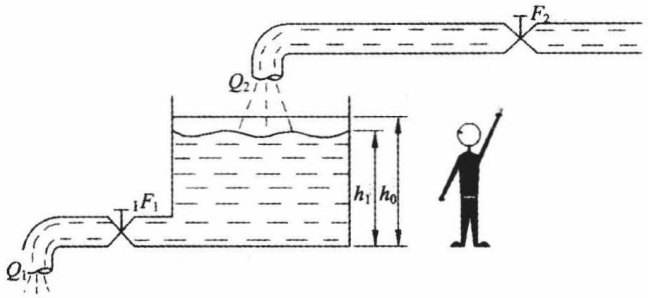



**图 1-1　水池液面高度人工控制系统**

图 1-1 中，$F_1$ 为水池的放水阀，$F_2$ 为水池的进水阀，$Q_1$ 为水池的放水量，$Q_2$ 为水池的进水量。控制任务要求实际的液面高度 $h_1$ 始终保持在希

望的液面高度 $h_0$。当工人实施控制时，需要不断用眼睛进行观察，并在大脑里将实际液面高度 $h_1$ 与希望液面高度 $h_0$ 作比较，根据比较的结果，决定将进水阀 $F_2$ 的开度增大还是减小，以达到维持液面高度符合期望值的目的。

图 1-2 所示为人工参与的水池液面高度控制系统的结构图（也称框图）。该系统由眼睛、大脑、手与阀 $F_2$ 和水池四部分组成。由该图可见，人在参与液面控制中起了以下三方面的作用。

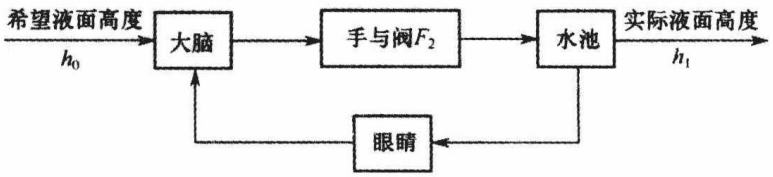



**图 1-2　液面高度人工控制系统框图**

①测量实际液面高度 $h_1$——用眼睛，充当测量机构。

②将测得的实际液面高度 $h_1$ 与希望液面高度 $h_0$ 进行比较——用大脑，充当比较机构。

③根据比较的结果，即按照偏差的正负和大小去决定阀 $F_2$ 的开度——用手，充当执行机构。

显然，用人工控制既不能保证系统要求的控制精度，也不能减轻工人的劳动强度。如果用自动控制去代替上述的人工控制，那么在自动控制系统中必须具有上述三种职能机构，即测量机构、比较机构和执行机构。

图 1-3 所示为由图 1-1 改造而成的液面高度自动控制系统。当满足放水量小于进水量这个条件时，不论放水阀 $F_1$ 输出的流量 $Q_1$ 如何变化，该系统总能自动维持其液面高度在允许的偏差范围之内。这个液面自动控制系统的工作原理是：假设水池液面高度 $h_1$ 因放水阀 $F_1$ 的开度的增大而稍有降低，系统立即产生一个与降落液面成比例的误差电压 $u$，该电压经放大器放大后供电给进水阀的拖动电动机，使阀 $F_2$ 的开度 $\theta$ 相应增大，流量 $Q_2$ 增加，从而使水池的液面恢复到所希望的高度。

图 1-3 所示的液面高度自动控制系统由以下五部分组成。

①被控对象——水池。

②测量元件——浮子。

③比较机构——比较浮子的期望位置与实际位置之差。

④放大机构——当测量元件测得的信号与给定信号比较后得到的误差信号不足以使执行元件动作时，一般都需要放大元件。

⑤执行机构——它的作用是直接驱动被控对象，以改变被控制量。

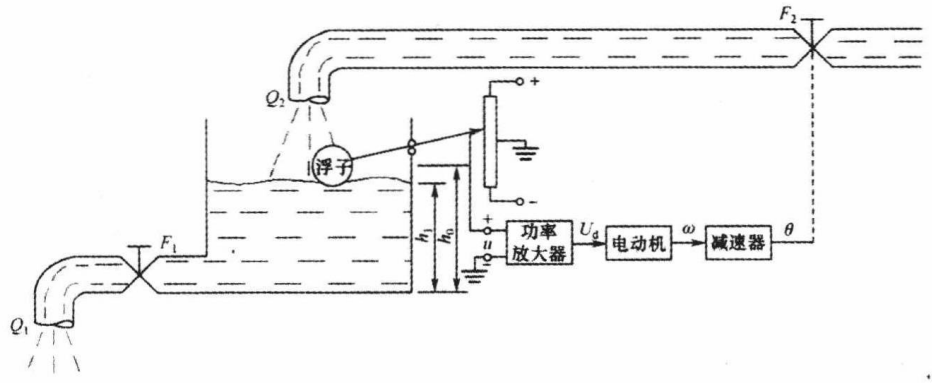



**图 1-3　液面高度自动控制系统**

以上五部分也是一般自动控制系统的基本组成单元。此外，为了改善控制系统的动态、静态性能，通常还在系统中加上某种形式的校正装置。

为使控制系统的表示简单明了，一般采用方框来表示系统中的各个组成部件，在每个方框中填入它所表示的部件的名称或函数表达式，不必画出它们的具体机构。根据信号（亦即信息）在系统中传递的方向，用有向线段依次把它们连接起来，就可得到控制系统框图。控制系统框图由以下三个基本单元组成。

①引出点，如图 1-4(a)所示。它表示信号的引出，箭头表示信号的方向。

②比较点（综合点），如图 1-4(b)所示。它表示两个或两个以上信号在该处进行的“±”运算，“+”表示信号相加，“−”表示信号相减。

③部件的方框，如图 1-4(c)所示。输入信号置于方框的左端，方框的右端为其输出量，方框内填入部件名称。

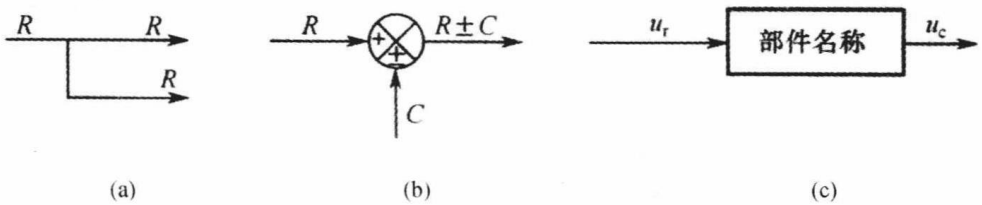



**图 1-4　系统框图的基本组成单元**

据此，可把图 1-3 所示液面高度自动控制系统的原理图改用图 1-5 所示的框图来表示。显然，后者的表示不仅比前者简单，而且信号在系统中的传递过程也更清晰。因此，在以后的讨论中，控制系统一般以框图的形式表示。

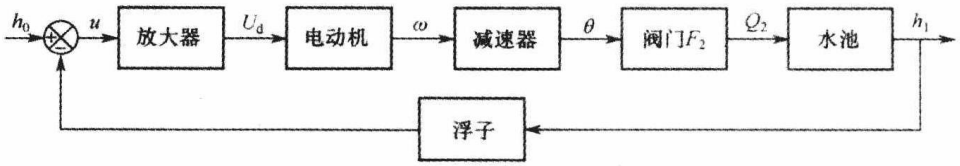



图 1-5　液面高度自动控制系统框图

## 1.2　控制系统仿真的意义

在工业自动化领域，控制系统的分析、设计和系统调试、改造，大量应用仿真技术。例如，在设计前期，利用仿真技术论证方案，进行经济技术比较，优选合理方案；在设计阶段，仿真技术可帮助设计人员优选系统结构，优化系统参数，以期获得系统最优品质和性能；在调试阶段，利用仿真技术分析系统响应与参数关系，指导调试工作，可以迅速完成调试任务；在运行阶段，利用仿真技术可以在不影响生产的条件下分析系统的工作状态，预防事故发生，寻求改进薄弱环节，以提高系统的性能和运行效率。

## 1.3　计算机仿真技术的应用及发展趋势

### 1.3.1　计算机仿真技术的应用

计算机仿真技术的应用范围十分广泛。它不仅被应用于工程系统，如控制系统的设计、分析和研究，电力系统的可靠性研究，化工流程的模拟，造船、飞机、导弹等研制过程；而且还被应用于非工程系统，如用于研究社会经济、人口、污染、生物、医学系统等。

计算机仿真在系统研究中的重要性在于它不仅经济而且安全可靠。首先，由于仿真技术在应用上的安全性，使得航空、航天、核电站等成为仿真技术最早的和最主要的应用领域。特别是在军事领域，新型的武器系统、大型的航空航天飞行器在其设计、定型过程中，都要依靠仿真试验进行修改和完善；导弹、火箭的设计研制，空战、电子战、攻防对抗等演练也都离不开仿真技术。其次，从仿真的经济性考虑。出于仿真往往是在计算机上模拟现实系统过程，并可多次重复运行，使得其经济性十分突出；据美国对“爱国者”等三个型号导弹的定型试验统计，采用仿真试验可减少实弹发射试验次数

约 43%，节省费用达数亿美元。我国某种型号导弹在设计和定型过程中，通过仿真试验就缩短研制时间近两年。我国电力系统应用火电厂单元机组模型仿真装置培训值班长和运行人员，大大缩短了岗前培训时间并提高了人员的专业素质。采用模拟装置培训工作人员，经济效益和社会效益也十分明显。另外，从环境保护的角度考虑，仿真技术也极具价值。例如，现代核试验多数在计算机上进行仿真，固然是由于计算机技术的发展使其得以在计算机上模拟，但政治因素和环境因素才是进行核试验仿真的主要原因。通过仿真研究还可以预测系统的特性以及外界干扰的影响，从而可以对制订控制方案和控制决策提供定量依据。特别值得指出的是，对于像社会人口的未来变化趋势这样的问题，就只能采用仿真技术来进行研究。

### 1.3.2　仿真技术的发展趋势

近年来，由于问题域的扩展和仿真支持技术的发展，生长了一批新的研究热点，具体而言，仿真技术的发展趋势如下：

①在硬件方面，基于多 CPU 并行处理技术的全数字仿真系统将有效地提高仿真系统的速度，从而使仿真系统“实时性”得到进一步加强。

②随着网络技术的不断完善和提高，分布式数字仿真系统将被人们广泛采用，从而达到“投资少、效果好”的目的。

③在应用软件方面，直接面向用户的高效能数字仿真软件将不断推陈出新，各种专家系统与智能化技术将更深入地应用于仿真软件开发中，使得在人机界面、结果输出、综合评判等方面达到更理想的境界。

④虚拟技术的不断完善。

当前仿真研究的前沿课题主要有仿真与人工智能技术结合以实现智能化的仿真系统、分布式仿真与仿真模型的并行处理、图形与动画仿真、面向用户、面向问题、面向实验的建模与仿真环境以及仿真支持系统等。

# 第 2 章　MATLAB 的仿真集成环境 Simulink 的应用

Simulink 是 MATLAB 最重要的组件之一，它提供了一个动态系统建模、仿真和综合分析的集成环境。在该环境中，无须编写大量程序，而需要通过简单直观的鼠标操作，就可构造出复杂的系统。

## 2.1　基于 MATLAB 的控制系统仿真的现状及研究的意义

### 2.1.1　基于 MATLAB 的控制系统仿真的现状

MATLAB 可以在各种类型的机型上运行，如 PC 及兼容机、Macintosh 及 Sun 工作站、VAX 机、Apollo 工作站、HP 工作站、DEC 工作站、SGI 工作站、RS/6000 工作站、Convex 工作站及 Cray 计算机等。

可以将 CAD 方法与 MATLAB 结合起来，制作了大量的控制系统工具箱，如控制系统工具箱、系统辨识工具箱、鲁棒控制工具箱、模型预测控制工具箱、神经网络工具箱、优化工具箱、模糊逻辑工具箱和遗传算法与直接搜索工具箱等。MATLAB 的 Simulink 和 Stateflow 功能的增加使控制系统的设计更加简便和轻松，而且可以设计更为复杂的控制系统。用 MATLAB 设计出控制系统进行仿真后，可以利用 MATLAB 的工具在线生成 C 语言代码，用于实时控制。

### 2.1.2　基于 MATLAB 的控制系统仿真研究的意义

基于 MATLAB 的控制系统仿真的研究具有重要的意义，主要体现在以下方面：

①经济。大型、复杂系统直接实验是十分昂贵的，如空间飞行器一次飞行实验的成本约在 1 亿美元左右，而采用仿真实验仅需其成本的 1/10～1/5，且设备可以重复利用。

②安全。某些系统，如载人飞行器、核电装置等，直接实验往往会有很

大的危险，而采用仿真实验可以有效降低危险程度，对系统的研究起到保障作用。

③快捷。提高设计效率，如电路设计、服装设计等。

④具有优化设计的功能。对一些真实系统进行优化设计是非常困难的，这时仿真可以发挥它特殊的优化设计功能。

## 2.2　Simulink 仿真概述

Simulink 是一个用来对动态系统进行建模、仿真和分析的软件包，它支持连续、离散及两者混合的线性和非线性系统，也支持具有多种采样频率的系统。

### 2.2.1　Simulink 的启动

启动 Simulink 有如下两种方法：

①在 MATLAB 的命令窗口中键入 Simulink 命令，然后按 Enter 键，就可以打开 Simulink 的库浏览器进入 Simulink。

②在 MATLAB 的工具栏中，单击 Simulink 按钮，也可以打开 Simulink 的库浏览器窗口。

### 2.2.2　Simulink 的界面

Simulink 界面上方是标题栏和菜单栏，菜单栏下面是常用按钮及待查关键字填写栏，在关键字填写栏输入要查找的关键字并按 Enter 键，就可以查到相应功能模块。常用按钮的下面是对所选模块对象的文字说明。

Simulink 界面的下方分为两部分：左边为全部模块库，从中可以选择需要的模块库；右边为选中的模块库中所有的模块。

## 2.3　Simulink 子系统及其封装技巧

子系统类似于编程语言中的子函数。建立子系统有两种方法：在模型中新建子系统以及在已有的子系统的基础上建立。

### 2.3.1 创建子系统

打开 Simulink 模型库，建立相应的模型，并创建一个子系统。

在模型窗口中，用鼠标拖出的虚线框框住控制对象中的中间模块连接部分，选择菜单 Edit→Create subsystem，则系统如图 2-1 所示。

双击子系统，则会出现 Subsystem 模型窗口，如图 2-2 所示。

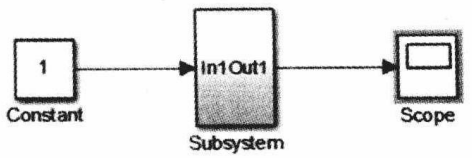



图 2-1 子系统创建

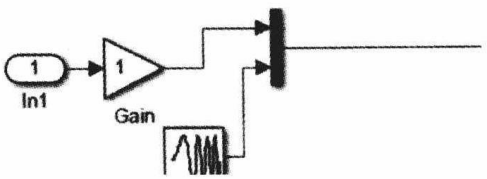



图 2-2 Subsystem 模型

可以看到子系统模型除了用鼠标框住的两个环节，还自动添加了一个输入模块 In1 和一个输出模块 Out1。该输入模块和输出模块将应用在主模型中作为用户的输入和输出接口，如图 2-3 所示。运行仿真结果如图 2-4 所示。

SWJTU YSW

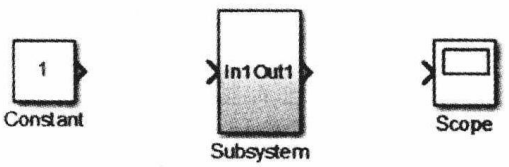



图 2-3 系统生成模块图

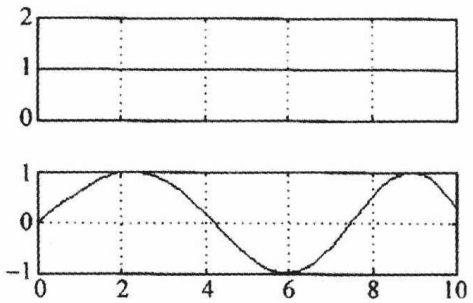



图 2-4 仿真结果图

新建一个 PID 控制器，在图 2-1 所示模型的基础上建立新子系统，利用 Simulink 模型库中的模块搭建 PID 控制器，如图 2-5 所示。

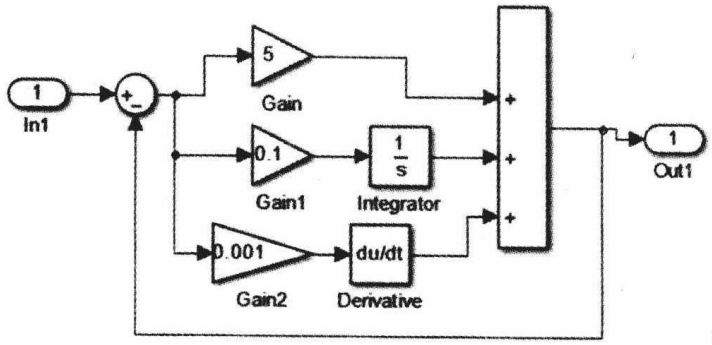



图 2-5　PID 子系统

将图 2-5 中的所有对象都复制到新的空白模型窗口中，双击打开子系统 Subsyste，则出现如图 2-5 所示的子系统模型窗口。子系统创建好后，复制粘贴操作都是整体进行。

添加模型构成反馈环形成闭环系统，如图 2-6 所示。

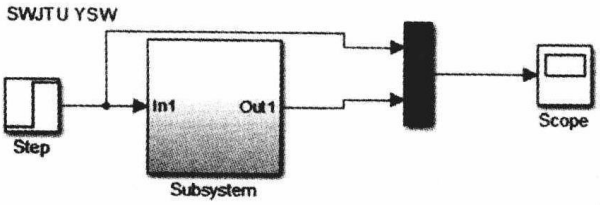



图 2-6　PID 闭环系统

## 2.3.2　使能子系统

建立一个用使能子系统(Enabled Subsysterm)控制正弦信号为半波整流信号的模型。

模型由正弦信号 Sine Wave 为输入信号源，示波器 Scope 为接收模块，Enabled Subsysterm 为控制模块。

连接模块，将 Sine Wave 模块的输出作为 Enabled Subsysterm 的控制信号，模型如图 2-7 所示。

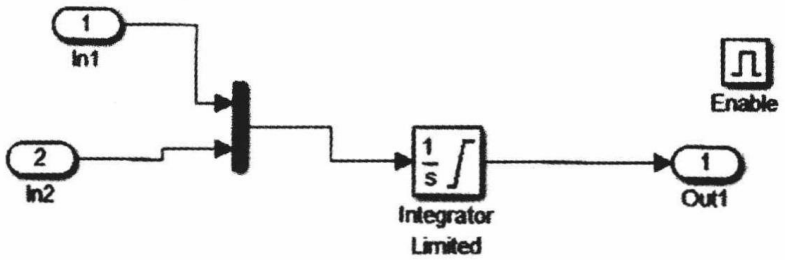



图 2-7　使能子系统

使能系统设置和 Out 1 输出模块设置分别如图 2-8 和图 2-9 所示。

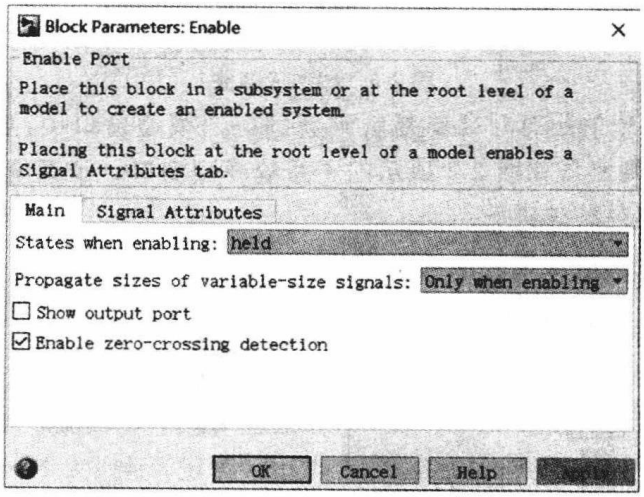



图 2-8　使能模块属性

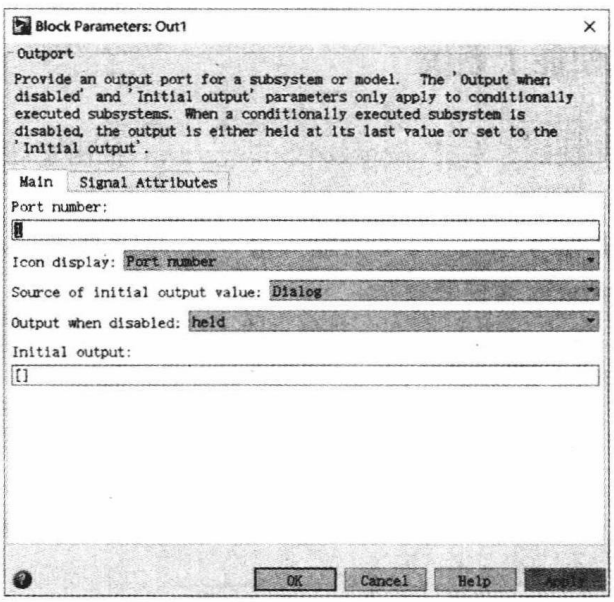



图 2-9　Out 1 输出模块属性