

高等学校电子信息类教材

# MATLAB/Simulink 与控制系统仿真

王正林 王胜开 陈国顺 编著 汪仁先 主审

Control

System

Simulation

<http://www.phei.com.cn>



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

| 高等学校电子信息类教材 |

# MATLAB/Simulink 与控制系统仿真

王正林 王胜开 陈国顺 编著

汪仁先 主审



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书从应用角度出发,系统地介绍了 MATLAB/Simulink 及其在自动控制中的应用。结合 MATLAB/Simulink 的使用,通过典型样例,全面阐述了自动控制的基本原理、控制系统仿真以及控制系统分析与设计的主要方法。全书共分 12 章,内容包括 MATLAB/Simulink 介绍、控制系统数学模型、时域分析法、根轨迹分析法、频域分析法、控制系统校正与综合、线性系统状态空间分析与设计、非线性系统、离散控制系统等。各章通过精心设计的实例来帮助读者理解和掌握自动控制原理以及 MATLAB/Simulink 在控制系统仿真中的应用。

本书内容深入浅出、图文并茂,各章节之间既相互联系又相对独立,读者可根据自己需要选择阅读。本书可作为自动控制、机械电子、信息处理、计算机仿真、计算机应用等大专院校学生和研究生教学参考用书,也可供自动控制、计算机仿真及其相关领域的工程技术和研究人员参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

MATLAB/Simulink 与控制系统仿真/王正林,王胜开,陈国顺编著. —北京:电子工业出版社,2005.7

高等学校电子信息类教材

ISBN 7-121-01493-9

I. M… II. ①王…②王…③陈… III. 自动控制系统—计算机辅助计算—软件包, MATLAB、Simulink IV. TP273-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 071878 号

责任编辑:高买花

印 刷:北京天宇星印刷厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:22.75 字数:582 千字

印 次:2005 年 7 月第 1 次印刷

印 数:5 000 册 定价:32.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话:(010)68279077。质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

# 前 言

作为控制理论与控制工程及其计算机仿真的强有力工具,近年来 MATLAB/ Simulink 得到了业界的一致认可,在控制系统仿真、分析与设计方面得到了广泛应用,其自身也因此得到了迅速发展,功能不断扩充,现已发展至 7.0 版本。

随着社会生产力的不断发展和人们生活质量的不断提高,必将对控制理论、技术、系统与应用提出越来越多、越来越高的要求,因此有必要进一步加强、加深对这方面的研究, MATLAB/Simulink 为此提供了可能,实践已表明它的确是一个功能强大、形象逼真、便于操作的软件工具。

为了更好地推动 MATLAB/Simulink 在控制系统仿真、分析与设计中的应用,在借鉴以往类似书籍与教材经验并弥补其中不足的基础上,我们结合日常的科研和教学工作编撰了此书。全书从实用角度出发,通过大量典型的样例, MATLAB 7.0/Simulink 6.0 的功能、操作及其在自动控制中的应用进行详细论述。书中所述的大部分内容和例子,我们已在本科生和研究生有关控制理论与控制工程的科研和教学实践中做过试验与验证,是我们多年来教学与科研的结晶。

全书共分 12 章,内容包括 MATLAB/Simulink 介绍、控制系统数学模型、时域分析法、根轨迹分析法、频域分析法、控制系统校正与综合、线性系统状态空间分析与设计、非线性系统、离散控制系统等。各章通过精心设计的实例来帮助读者理解和掌握自动控制原理以及 MATLAB/Simulink 在控制系统仿真中的应用。全书内容深入浅出、图文并茂,各章节之间既相互联系又相对独立,读者可根据自己需要选择阅读。本书既可作为自动控制、机械电子、信息处理、计算机仿真、计算机应用等大专院校学生和研究生教学参考用书,也可供自动控制、计算机仿真及其相关领域工程技术和研究人员参考。

本书第 1 章由陈国顺、王胜开编写,第 2~8 章由王正林编写,第 9 章、第 10 章由陈国顺、王正林编写,第 11 章、第 12 章由王胜开、陈国顺编写。最后,全书由王正林、王胜开统稿。

汪仁先教授在百忙中审阅了全书,提出了许多宝贵的修改意见,在此表示衷心感谢。

在本书编写过程中,孙一康教授、余达太教授、安世奇教授、刘增良教授给予了大力指导与支持,在此一并表示感谢。

由于时间仓促、作者水平和经验有限,书中错漏之处在所难免,敬请读者指正。

编著者

2005 年 5 月

# 目 录

<b>第 1 章 自动控制系统与仿真基础知识</b> .....	(1)
1.1 引言 .....	(1)
1.2 自动控制系统基本概念 .....	(1)
1.2.1 开环控制系统与闭环控制系统 .....	(1)
1.2.2 闭环控制系统组成结构 .....	(3)
1.2.3 反馈控制系统品质要求 .....	(3)
1.3 自动控制系统分类 .....	(4)
1.3.1 线性系统和非线性系统 .....	(5)
1.3.2 离散系统和连续系统 .....	(5)
1.3.3 恒值系统和随动系统 .....	(6)
1.4 自动控制系统仿真基本概念 .....	(6)
1.4.1 计算机仿真基本概念 .....	(6)
1.4.2 自动控制系统仿真 .....	(8)
1.4.3 自动控制系统计算机仿真基本过程 .....	(8)
1.4.4 计算机仿真技术发展趋势 .....	(9)
1.5 MATLAB 与控制系统仿真 .....	(10)
<b>第 2 章 MATLAB 基础知识</b> .....	(11)
2.1 引言 .....	(11)
2.1.1 MATLAB 发展历程 .....	(11)
2.1.2 MATLAB 系统构成 .....	(12)
2.1.3 MATLAB 7.0 工具箱 .....	(12)
2.1.4 MATLAB 7.0/Simulink 6.0 最新特点 .....	(14)
2.2 MATLAB 桌面操作环境 .....	(16)
2.2.1 MATLAB 启动和退出 .....	(16)
2.2.2 MATLAB 主菜单及功能 .....	(17)
2.2.3 MATLAB 命令窗口 .....	(20)
2.2.4 MATLAB 工作空间 .....	(21)
2.2.5 MATLAB 文件管理 .....	(22)
2.2.6 MATLAB 帮助使用 .....	(22)
2.3 MATLAB 数值计算 .....	(23)
2.3.1 MATLAB 数值类型 .....	(23)
2.3.2 矩阵运算 .....	(25)
2.4 关系运算和逻辑运算 .....	(30)
2.5 符号运算 .....	(32)
2.5.1 符号运算基础 .....	(32)

2.5.2	常用符号运算	(32)
2.5.3	控制系统中常用的符号运算	(34)
2.6	MATLAB 常用绘图命令	(35)
2.7	MATLAB 程序设计	(38)
2.7.1	MATLAB 程序类型	(38)
2.7.2	MATLAB 程序流程控制	(39)
2.7.3	MATLAB 程序基本设计原则	(42)
<b>第 3 章</b>	<b>仿真集成环境 Simulink</b>	<b>(44)</b>
3.1	引言	(44)
3.2	Simulink 的使用	(44)
3.2.1	Simulink 启动	(44)
3.2.2	Simulink 仿真设置	(46)
3.2.3	Simulink 模块库简介	(52)
3.2.4	Simulink 功能模块的处理	(64)
3.3	Simulink 自定义功能模块	(67)
3.3.1	采用 Subsystem 构建自定义功能模块	(67)
3.3.2	多个模块组合自定义功能模块	(67)
3.3.3	自定义功能模块的封装	(67)
3.4	S 函数设计与应用	(69)
3.4.1	S 函数设计	(69)
3.4.2	S 函数应用	(72)
3.5	Simulink 仿真举例	(73)
<b>第 4 章</b>	<b>控制系统数学模型</b>	<b>(78)</b>
4.1	引言	(78)
4.2	动态过程微分方程描述	(78)
4.3	拉氏变换与控制系统模型	(82)
4.4	动态过程的传递函数描述	(84)
4.4.1	传递函数定义与性质	(85)
4.4.2	传递函数零极点表示	(86)
4.4.3	传递函数的部分分式表示	(87)
4.5	动态过程状态空间描述	(89)
4.6	系统模型转换及连接	(91)
4.6.1	模型转换	(91)
4.6.2	模型连接	(94)
4.7	非线性数学模型的线性化	(99)
<b>第 5 章</b>	<b>时域分析法</b>	<b>(101)</b>
5.1	引言	(101)
5.2	时域响应分析	(101)

5.2.1	典型输入 .....	(101)
5.2.2	线性系统时域响应一般求法 .....	(103)
5.2.3	时域响应性能指标 .....	(104)
5.2.4	MATLAB/Simulink 在时域分析中的应用 .....	(106)
5.2.5	一阶和二阶系统时域响应分析 .....	(111)
5.2.6	高阶系统的时域分析 .....	(121)
5.3	稳定性分析 .....	(124)
5.3.1	稳定性基本概念 .....	(124)
5.3.2	稳定性判据 .....	(125)
5.3.3	稳态误差分析 .....	(128)
5.3.4	MATLAB 在稳定性分析中的应用 .....	(133)
<b>第 6 章</b>	<b>根轨迹分析法</b> .....	<b>(135)</b>
6.1	引言 .....	(135)
6.2	根轨迹定义 .....	(135)
6.3	根轨迹法基础 .....	(136)
6.3.1	幅值条件和相角条件 .....	(136)
6.3.2	绘制根轨迹的一般法则 .....	(138)
6.3.3	与根轨迹分析相关的 MATLAB 函数 .....	(140)
6.3.4	利用 MATLAB 绘制根轨迹图举例 .....	(146)
6.4	其他形式的根轨迹 .....	(147)
6.4.1	正反馈系统的根轨迹 .....	(148)
6.4.2	参数根轨迹 .....	(149)
6.4.3	时滞系统的根轨迹 .....	(150)
6.5	用根轨迹法分析系统的暂态特性 .....	(151)
<b>第 7 章</b>	<b>频域分析法</b> .....	<b>(155)</b>
7.1	引言 .....	(155)
7.2	频率特性 .....	(155)
7.2.1	频率特性基本概念 .....	(155)
7.2.2	频率响应曲线 .....	(157)
7.3	频率响应分析 .....	(164)
7.3.1	系统品质分析 .....	(164)
7.3.2	稳定性分析 .....	(168)
<b>第 8 章</b>	<b>控制系统校正与综合</b> .....	<b>(177)</b>
8.1	引言 .....	(177)
8.2	控制系统校正与综合基础 .....	(177)
8.2.1	控制系统性能指标 .....	(177)
8.2.2	控制系统校正概述 .....	(178)
8.3	PID 控制器设计 .....	(180)

8.3.1	PID 控制器概述 .....	(180)
8.3.2	比例 (P) 控制 .....	(181)
8.3.3	比例微分 (PD) 控制 .....	(183)
8.3.4	积分 (I) 控制 .....	(184)
8.3.5	比例积分 (PI) 控制 .....	(185)
8.3.6	比例积分微分 (PID) 控制 .....	(186)
8.3.7	PID 控制器参数整定 .....	(187)
8.4	控制系统校正的根轨迹法 .....	(198)
8.4.1	基于根轨迹法的超前校正 .....	(199)
8.4.2	基于根轨迹法的滞后校正 .....	(203)
8.4.3	基于根轨迹法的超前滞后校正 .....	(206)
8.5	控制系统校正的频率响应法 .....	(210)
8.5.1	基于频率法的超前校正 .....	(210)
8.5.2	基于频率法的滞后校正 .....	(214)
<b>第 9 章</b>	<b>线性系统状态空间分析 .....</b>	<b>(218)</b>
9.1	引言 .....	(218)
9.2	线性系统状态空间基础 .....	(218)
9.2.1	状态空间基本概念 .....	(218)
9.2.2	状态空间实现 .....	(221)
9.2.3	状态空间模型描述 .....	(230)
9.2.4	状态方程求解 .....	(236)
9.3	线性系统的状态可控性与状态可观性 .....	(245)
9.3.1	状态可控性 .....	(245)
9.3.2	状态可观性 .....	(247)
9.3.3	对偶系统和对偶原理 .....	(248)
9.3.4	可控标准型和可观标准型 .....	(249)
9.4	线性系统稳定性分析 .....	(256)
9.4.1	稳定性分析基础 .....	(256)
9.4.2	李雅普诺夫稳定性分析 .....	(257)
<b>第 10 章</b>	<b>线性系统状态空间设计 .....</b>	<b>(262)</b>
10.1	引言 .....	(262)
10.2	状态反馈与极点配置 .....	(262)
10.2.1	状态反馈 .....	(262)
10.2.2	输出反馈 .....	(263)
10.2.3	极点配置 .....	(265)
10.3	状态观测器 .....	(271)
10.3.1	状态观测器的基本概念 .....	(272)
10.3.2	全维状态观测器 .....	(273)



10.3.3 降维状态观测器 .....	(281)
<b>第 11 章 非线性系统</b> .....	(287)
11.1 引言 .....	(287)
11.2 非线性系统概述 .....	(287)
11.2.1 非线性控制理论发展概况 .....	(287)
11.2.2 典型非线性特性 .....	(288)
11.3 相平面法 .....	(290)
11.3.1 相平面法基础知识 .....	(291)
11.3.2 相轨迹图绘制 .....	(292)
11.4 描述函数法 .....	(300)
11.4.1 描述函数基本概念 .....	(300)
11.4.2 描述函数定义 .....	(300)
11.4.3 常见非线性特性描述函数 .....	(301)
11.4.4 稳定性分析 .....	(303)
11.5 采用 Simulink 分析非线性系统 .....	(304)
<b>第 12 章 离散控制系统</b> .....	(307)
12.1 引言 .....	(307)
12.2 离散控制系统基本概念 .....	(307)
12.2.1 离散控制系统概述 .....	(307)
12.2.2 离散信号的数学描述 .....	(310)
12.3 Z 变换 .....	(314)
12.3.1 离散信号的 Z 变换 .....	(314)
12.3.2 Z 变换、Z 反变换常用方法及 MATLAB 实现 .....	(316)
12.4 离散控制系统数学模型 .....	(323)
12.4.1 离散系统时域数学模型 .....	(323)
12.4.2 离散系统频域数学模型 .....	(325)
12.5 离散控制系统分析 .....	(333)
12.5.1 离散控制系统的稳定性 .....	(333)
12.5.2 离散控制系统静态误差分析 .....	(340)
12.5.3 离散控制系统动态特性分析 .....	(342)
<b>参考文献</b> .....	(351)

# 第 1 章 自动控制系统与仿真基础知识

## 1.1 引言

本章描述自动控制系统的基本概念及自动控制系统仿真的基本知识，介绍自动控制系统与仿真的概念、组成、分类以及 MATLAB 仿真等基础知识。通过本章，读者对自动控制系统与仿真以及本书的主要内容能有整体的认识。

## 1.2 自动控制系统基本概念

在现代工业生产过程中，为了提高产品质量和生产效率，需要对生产设备和工艺过程进行控制，使被控的物理量按照期望的规律变化。这些被控制的设备或过程称为控制对象或对象，被控制的物理量称为被控制量或输出量。

在实际的条件下，生产设备或工艺过程有许多外部作用，一般只考虑对输出量影响最大的量，这些量称为输入量。

从对被控对象和输出量的影响来看，输入量可分为两种类型。一种输入作用是为了保证对象的行为达到所要求的目标，这一类输入量称为控制量或给定量。另一种输入作用则相反，它妨碍对象的行为达到目标，这类作用称为扰动作用，输入量称为扰动量。

控制的任務实际上就是形成控制作用的变化规律，使得不管是否存在扰动对象都能得到所期望的行为。

所谓自动控制系统就是在无人直接操作或干预的条件下，通过控制器使控制对象自动地按照给定的规律运行，使被控量能够按照给定的规律变化。系统是指为完成一定要求和任务的部件或功能的组合，它们相互影响，协调地完成给定的要求和任务。能够实现自动控制的系统称为自动控制系统。

### 1.2.1 开环控制系统与闭环控制系统

如果控制系统的输出量对系统没有控制作用，则这种系统称为开环控制系统。图 1.1 表示了开环控制系统输入量与输出量之间的关系。

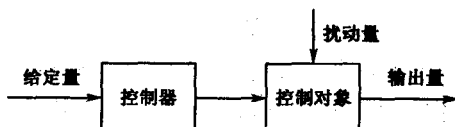


图 1.1 开环控制示意图

这里，给定量直接经过控制器作用于控制对象，不需要将输出量反馈到输入端与给定量进行比较，所以只有给定量影响输出量。当出现外部扰动或内部扰动时，若没有人的干预，输出量将不能按照给定量所希望的状态去工作。

闭环控制系统是把输出量检测出来，经过物理量的转换，再反馈到输入端与给定量进行比较（相减），并利用比较后的偏差信号，经过控制器或调节器对控制对象进行控制，抑制内部或外部扰动对输出量的影响，从而减小输出量的误差。图 1.2 表示了闭环控制系统输入量、输出量和反馈量之间的关系。

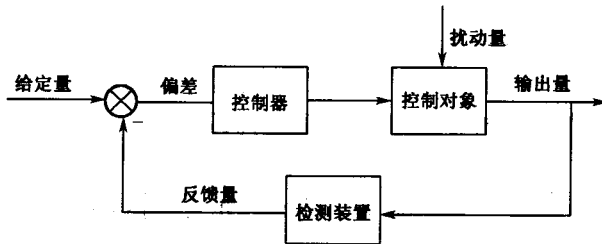


图 1.2 闭环控制示意图

这种系统把输出量直接或间接地反馈到输入端形成闭环，参与系统的控制，所以称为闭环控制系统。由于系统是根据负反馈原理按偏差进行控制的，因此也称为反馈系统或偏差控制系统。

在现代工业生产中，按照偏差控制的闭环系统种类繁多，尽管它们的控制任务不同，具体结构不完全相同，但是，检测偏差、利用偏差信号对控制对象进行控制，以减小或纠正输出量的偏差这一控制过程都是相同的。

这种系统的特点可归纳如下：

(1) 在开环系统中，只有输入量对输出量产生控制作用；从控制结构上看，只有从输入端到输出端、从左向右的信号传递通道（该通道称为正向通道）。在闭环控制系统中，除正向通道外，还必须有从右向左、从输出端到输入端的信号传递通道，使输出信号也参与控制作用，该通道称为反馈通道。闭环控制系统就是由正向通道和负反馈通道组成的。

(2) 为了检测偏差，必须直接或间接地检测出输出量，并将其变换为与输入量相同的物理量，以便与给定量相比较，得出偏差信号。所以闭环系统必须有检测环节、给定环节和比较环节。

(3) 闭环控制系统是利用偏差量作为控制信号来纠正偏差的，因此系统中必须具有执行纠正偏差这一任务的执行机构。闭环系统正是靠放大的偏差信号来推动执行机构，进一步对控制对象进行控制的。只要输出量与给定量之间存在偏差，就自动纠正输出量与期望值之间的误差，因此可以构成精确的控制系统。

反馈控制系统广泛地应用于各个工业部门，例如加热炉的温度控制、机器手的控制等。

在有些系统中，将开环控制和闭环控制结合在一起，构成一个开环—闭环控制系统，这种系统称为复合控制系统。

本书中提到的自动控制系统主要是指闭环控制系统。

## 1.2.2 闭环控制系统组成结构

闭环控制系统有各种不同的形式，但是概括起来，一般均由以下基本环节组成，如图 1.3 所示。

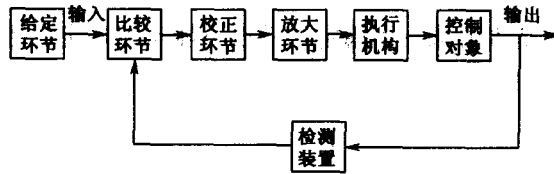


图 1.3 闭环控制系统结构图

(1) 给定环节：它是设定被控制量的给定值的装置，如电位器等，给定环节的精度对被控制量的控制精度有较大的影响，现代的控制系统一般采用控制精度高的数字给定装置。

(2) 比较环节：比较环节将所检测的被控制量和给定量进行比较，确定两者之间的偏差量。该偏差量由于功率较小或者物理性质不同，还不能直接作用于执行机构，所以在执行机构与比较环节之间还有中间环节。

(3) 中间环节：中间环节一般是放大元件，将偏差信号变换成适于控制执行机构工作的信号。根据控制的要求，中间环节可以是一个简单的功率放大环节，或者是将偏差信号变换为适于执行结构工作的物理量，如液压伺服放大器。常常除了要求中间环节将偏差信号放大以外，还希望它能按某种规律对偏差信号进行运算，用运算的结构控制执行机构，以改善被控制量的稳态和暂态性能，这种中间环节常称为校正环节。

(4) 执行机构：一般由传动装置和调节机构组成，执行机构直接作用于控制对象，使被控制量达到所要求的数值。

(5) 控制对象或调节对象：它是指要进行控制的设备或过程，相应地，控制系统所控制的某个物理量就是系统的输出量或被控量，闭环控制系统的任务就是控制这些系统输出量的变化规律，以满足生产工艺的要求。

(6) 检测装置或传感器：用于检测被控制量，并将其转换为与给定量统一的物理量。检测装置的精度和特性直接影响控制系统的控制品质，它是构成自动控制系统的关键元件，所以一般应要求检测装置的测量精度高、反应灵敏、性能稳定等。

在控制系统中，通常把比较环节、校正环节和放大环节合在一起称为控制装置。

## 1.2.3 反馈控制系统品质要求

在反馈控制系统中，当扰动量或给定量（或给定量的变化规律）发生变化时，被控量偏离了给定量（或给定量的变化规律）而产生偏差，通过反馈控制的作用，经过短暂的过渡过程，被控量又趋于或恢复到原来的稳态值，或按照新的给定量（或给定量的变化规律）稳定下来，这时系统从原来的平衡状态过渡到新的平衡状态。我们把被控量处于变化状态的过程称为动态或暂态，而把被控量处于相对稳定的状态称为静态或稳态。

反馈控制系统品质要求可以归结为稳定性（长期稳定性）、快速性（相对稳定性）和准确性（精度）。

### 1. 稳定性

稳定性对于不同的系统有不同的要求。对于恒值系统，要求当系统受到扰动后，经过一定时间的调整能够回到原来的期望值；对于随动系统，要求被控制量始终跟踪参量的变化。

稳定性是对系统的基本要求，不稳定的系统不能实现预定任务。稳定性通常由系统的结构决定，与外界因素无关。

### 2. 快速性

快速性是指对过渡过程的形式和快慢提出要求，一般称为动态性能或暂态性能。一个自动控制系统还应能满足暂态性能的要求。如果控制对象的惯性很大，系统的反馈又不及及时，则被控量在暂态过程中将产生过大的偏差，到达稳态的时间加长，并呈现各种不同的暂态过程。

一般说来，在合理的结构和适当的系统参数下，一个系统的暂态过程多属于衰减振荡过程，即被控量变化很快并产生超调，经过几个振荡后，达到新的稳定工作状态。为了满足生产工艺要求，往往要求系统的暂态过程不仅是稳定的，并且进行得越快越好，振荡程度越小越好。前者是暂态过程的稳定性问题，后者是暂态过程的性能问题。这些都是设计闭环控制系统时必须研究的问题。

### 3. 准确性

准确性通常用稳态误差来表示，所谓稳态误差是指系统达到稳态时，输出量的实际值和期望值之间的误差。这一性能表示稳态时的控制精度，一个设计合理的自动控制系统其稳态特性应能满足工艺的要求。

在参考输入信号作用下，当系统达到稳态后，其稳态输出与参考输入所要求的期望输出之差叫做给定稳态误差。显然，这种误差越小，表示系统的输出跟随参考输入的精度越高。

一个闭环控制系统往往在满足稳态精度和暂态品质之间存在着矛盾，例如要求稳态精度高，往往不能得到很好的暂态性能。因此必须兼顾这两方面的要求，根据具体情况合理地解决。

## 1.3 自动控制系统分类

自动控制系统广泛地应用于各类工业部门。随着生产规模的不断扩大和生产能力的不断提高，以及自动化技术和控制理论的发展，自动控制系统也日益复杂和日趋完善。例如，由单输入单输出的控制系统发展为多输入多输出的系统；由具有常规控制仪表和控制器的连续控制系统，发展到由计算机作为控制器的直接数字控制系统，从而实现最优控制。由于各式各样自动控制系统的不断发展，很难确切地对自动控制系统进行分类。现将常见的几种自动控制系统概括介绍如下。

### 1.3.1 线性系统和非线性系统

按不同系统的特征方程式，可将自动控制系统分为线性系统和非线性系统。

线性控制系统是由线性元件组成的系统，该系统的特征方程式可以用线性微分方程描述。叠加性和齐次性是鉴别系统是否为线性系统的根据。线性微分方程的各项系数为常数时，称为线性定常系统。线性定常系统可以用拉普拉斯变换解微分方程，并由此定义出系统传递函数这一系统动态数学模型。根轨迹法和频率法就是在这—基础上发展起来的分析和设计线性系统的有效方法。多输入多输出系统所采用的状态空间、传递矩阵等分析方法，将在有关章节中论述。

如果系统微分方程的系数与自变量有关，则为非线性微分方程，由非线性微分方程描述的系统称为非线性控制系统。在自动控制系统中，即使只含一个非线性环节，这一系统也是非线性的。

对于非线性控制系统的理论与研究远不如线性控制系统那样完整，一般只能满足于近似的定性描述和数值计算。任何物理系统的特性，精确地说都是非线性的，但在误差允许范围内，可以将非线性特性线性化，近似地用线性微分方程来描述，这样就可以按照线性系统来处理。

非线性系统的暂态特性与其初始条件有关，从这一点来看，它与线性系统有很大的区别。例如当偏差的初始值很小时，系统的暂态过程是稳定的，而当偏差量的初值较大时，则可能是不稳定的。线性系统的暂态过程与初始条件无关。

### 1.3.2 离散系统和连续系统

从数学模型角度而言，连续系统各部分信号均以模拟的连续函数形式表示，以前的大部分闭环系统都属于连续系统。

从数学模型角度而言，离散系统的某—处或几处信号是以脉冲序列或数字形式表示的。目前的计算机控制系统都属于离散系统。

离散系统的主要特点是：在系统中使用脉冲开关或采样开关，将连续信号转变为离散信号。通常对以离散信号取脉冲形式的系统，称为脉冲控制系统；而对于采样数字计算机或数字控制器，其离散信号以数字形式传递称为采样数字控制系统。图 1.4 是典型的采样数字控制系统结构示意图。

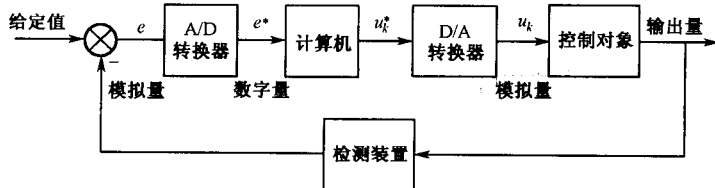


图 1.4 采样数字控制系统结构示意图

由于被控对象的输入量和输出量是模拟信号，而计算机的输入量和输出量是数字信号，所以要有将模拟量转换为数字量的模数转换装置（A/D）和把数字量转换为模拟量的数模转换装置（D/A）。

研究离散系统的方法和研究连续系统的方法类似。

### 1.3.3 恒值系统和随动系统

在现代生产应用中使用最多的闭环自动控制系统，按给定量的不同特征，可将系统分为恒值系统和随动系统。

恒值系统往往要求被控制量保持在恒定值，其给定量是不变的，如恒温、恒速、恒压等自动控制系统。

在随动系统中，给定量是按照事先不知道的时间函数变化，要求输出量跟随给定量的变化而变化，因此也称为同步随动系统，如自动火炮的控制系统。

## 1.4 自动控制系统仿真基本概念

系统仿真作为一种特殊的试验技术，在 20 世纪 30~90 年代的半个多世纪中经历了飞速发展，到今天已经发展成为一种真正的、系统的实验科学。伴随着第一台电子管电子计算机的诞生和以相似理论为基础的模拟技术的应用，仿真作为一种研究、发展新产品、新技术的科学手段，在航空、航天、造船、兵器等与国防科研相关的行业中首先发展起来，并显示了巨大的社会效益和经济效益。

以武器的作战使用训练为例，1930 年左右，美国陆、海军航空队就使用了林克式仪表飞行模拟训练器。当时其经济效益相当于每年节约 1.3 亿美元，而且少牺牲 524 名飞行员，此后，固定基座及三自由度飞行模拟座舱陆续大量投入使用。1950~1953 年，美国首先利用计算机来模拟战争，防空兵力或地空作战被认为是具有最大训练潜力的应用范畴。20 世纪 60 年代，目标探测、捕获、跟踪和电子对抗已经进入了仿真系统。70 年代利用放电影方式，在大球幕内实现了多目标、飞机—导弹作战演习。随着 80 年代数字计算机的高速发展，训练仿真开始蓬勃发展，甚至呈现了两个新概念，即武器系统研制与训练装置的开发同步进行以及训练装置作为武器系统可嵌入的组成部分而进入整个计算机软件系统。至于武器的控制与制导（C&G）系统研制、试验与定型中仿真技术的应用则更为普遍。在 80 年代对于导弹的研制中，由于采用仿真使飞行试验数量减小了 30%~40%，节约研制经费 10%~40%，缩短周期 30%~60%，这足以说明系统仿真在工程应用中的重大意义。

仿真的基本思想是利用物理的或数学的模型来类比模仿现实过程，以寻求对真实过程的认识，它所遵循的基本原则是相似性原理。

### 1.4.1 计算机仿真基本概念

计算机仿真是基于所建立的系统仿真模型，利用计算机对系统进行分析与研究的技术与方法。

### 1.4.1.1 模型

模型是对现实系统有关结构信息和行为的某种形式的描述，是对系统特征与变化规律的一种定量抽象，是人们认识事物的一种手段或工具。

模型可以分为以下三类：

(1) 物理模型，指不以人的意志为转移的客观存在的实体。例如，飞行器研制中的飞行模型、船舶制造中的船舶模型等。

(2) 数学模型，指从一定的功能或结构上进行相似，用数学的方法来再现原型的功能或结构特征。

(3) 仿真模型，指根据系统的数学模型，用仿真语言转化为计算机可以实现的模型。

### 1.4.1.2 仿真分类

可以从模型角度和计算机类型角度对不同的仿真系统进行分类。

#### 1. 按模型分类

(1) 物理仿真：采用物理模型，有实物介入，具有效果逼真、精度高等优点，但造价高或耗时长，大多在一些特殊场合下采用（如导弹、卫星一类飞行器的动态仿真，发电站综合调度仿真与培训系统等），具有实时、在线的特点。

(2) 数学仿真：采用数学模型。它在计算机上进行，具有非实时、离线的特点，经济、快速、实用。

#### 2. 按计算机类型分类

(1) 模拟仿真：采用数学模型，在模拟计算机上进行的仿真实验。这是一种早期的仿真手段，现在基本被淘汰。它的特点是描述连续物理系统的动态过程比较自然、逼真，具有仿真速度快、失真小、结果可靠的优点，但受元器件性能影响，仿真精度较低，对计算机控制系统的仿真较困难，自动化程度低。模拟计算机的核心是运算部分，它由我们熟知的“模拟运算放大器”为主要构成部件。

(2) 数字仿真：采用数学模型，在数字计算机上借助数值计算方法所进行的仿真实验。它是在 20 世纪 60 年代随着计算机的发展而发展起来的，其特点是计算与仿真的精度较高。理论上计算机的字长可以根据精度要求来“随意”设计，因此其仿真精度可以是无限的，但是由于受到误差积累、仿真时间等因素影响，其精度也不易定得太高。它对计算机控制系统的仿真比较方便，仿真实验的自动化程度较高，可方便地实现显示、打印等功能，但计算速度比较低，在一定程度上影响到仿真结果的可信度。随着计算机技术的发展，速度问题会在不同程度上有所改进与提高。数字仿真没有专用的仿真软件支持，需要设计人员用高级程序语言编写求解系统模型及结果输出程序。

(3) 混合仿真：结合了模拟仿真与数字仿真的技术与特点。

(4) 现代计算机仿真：采用先进的微型计算机，基于专用的仿真软件、仿真语言来实现，其数值计算功能强大，易学易用。它是在 20 世纪 80 年代发展起来的，是当前主流的仿真技术与方法。



### 1.4.1.3 仿真应用

仿真技术有着广泛的应用，而且应用的深度和广度也越来越大，目前主要应用在以下方面：

(1) 航空与航天工业，包括飞行器设计中的三级仿真体系（即纯数学仿真）、半实物仿真、实物仿真或模拟飞行实验，飞行员及宇航员训练用飞行仿真模拟器等。

(2) 电力工业，包括电力系统动态模型实验，电力系统负荷分配、瞬态稳定性以及最优潮流控制，电站操作人员培训模拟系统等。

(3) 原子能工业，包括模拟核反应堆，核电站仿真器，用来训练操作人员以及研究异常故障的排除处理等。

(4) 石油、化工及冶金工业。

(5) 非工程领域，如医学、社会学、宏观经济和商业策略的研究等。

### 1.4.1.4 仿真技术应用意义

仿真技术的应用具有重要的意义，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，而且设备可以重复使用。

(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，甚至是不允许的，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) 具有优化设计和预测的特殊功能。对一些真实系统进行结构和参数的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。再如在非工程系统，如社会、管理、经济等系统，由于其规模及复杂程度巨大，直接实验几乎是不可能的，这时通过仿真技术与方法的应用可以获得对系统的某种超前认识。

## 1.4.2 自动控制系统仿真

自动控制系统仿真是系统仿真的一个重要分支，它是一门涉及自动控制理论、计算数学、计算机技术、系统辨识、控制工程以及系统科学的综合性新型学科。它为控制系统的分析、计算、研究、综合设计以及自动控制系统的计算机辅助教学等提供了快速、经济、科学及有效的手段。

自动控制系统仿真就是以自动控制系统模型为基础，采用数学模型替代实际控制系统，以计算机为工具，对自动控制系统进行实验、分析、评估及预测研究的一种技术与方法。

### 1.4.3 自动控制系统计算机仿真基本过程

自动控制系统仿真包括以下几个基本步骤：问题描述、模型建立、仿真实验、结果