



# 系统建模与仿真

(下册)

□ 郭齐胜 董志明 李亮 曹军海 单家元 编著 □



国防工业出版社

National Defense Industry Press

本书得到总装备部

专项经费资助

# 系统建模与仿真

(下册)

郭齐胜 董志明 李亮 曹军海 单家元 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目 (CIP) 数据

系统建模与仿真 / 郭齐胜等编著. —北京: 国防工业出版社, 2007. 7

总装备部研究生教育精品教材

ISBN 978 - 7 - 118 - 05061 - 5

I. 系... II. 郭... III. ①系统建模—研究生—教材②系统仿真—研究生—教材 IV. N945.12 TP391.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 027491 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)

四季青印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 880 × 1230 1/32 印张 12½ 字数 358 千字

2007 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 63.00 元(上、下册)

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764



# 前 言

随着计算机技术的发展,系统建模与仿真技术得到了非常广泛的应用,正成为继理论研究和实验研究之后第三种认识客观世界和改造客观世界的重要手段。系统建模与仿真是很多学科专业研究生必须掌握或了解的技术。系统建模与仿真内容非常丰富,怎样精心选择并科学组织是教材编写中面临的一个重要问题。

本书的编写以培养高素质人才为指导思想,坚持系统性、科学性、新颖性和实用性的原则,以建模—仿真—仿真可信度评估为主线,以系统建模方法和仿真算法为重点,主要内容包括概念建模和常用的数学建模方法、常用的系统数学仿真方法和半实物仿真方法、先进的分布交互仿真和仿真可信度评估方法,旨在为研究生提供一部高水平的精品教材。

本教材的主要特色有以下几点。

(1) 面向需求。从“符合仿真方向研究生培养目标及系统建模与仿真课程教学的要求”出发,取材合适、深度适宜、层次分明、条理清楚。

(2) 体系科学。从仿真科学与技术学科的高度,阐述系统仿真的理论、方法及其应用。内容包括:建模(概念建模、数学建模)、建模与仿真(面向过程建模与仿真、面向对象建模与仿真、面向 Agent 建模与仿真、定性建模与仿真、定性定量建模与仿真)、仿真(半实物仿真、分布交互仿真)和仿真可信度评估四大部分,还附有常用的数学变换、思考题和仿真实验。

(3) 内容新颖。注重吸收和反映系统仿真学科国内外研究的代表性先进成果和研究动态。除介绍系统仿真的经典内容外,还有概念建模、面向 Agent 的建模与仿真、定性建模与仿真、定性定量建模与仿真、分布交互仿真、模型 VV&A 和仿真可信度评估等新内容。

(4) 注重实用。贯彻理论联系实际的原则,几乎每种理论和方法都有例题,便于学生系统掌握本门课程的内容。

本书由郭齐胜设计框架结构,郭齐胜、董志明、李亮、曹军海和单家元共同编写。编写过程中直接引用了郭齐胜等编写的《系统建模》和《系统仿真》中的部分章节内容,在此对这两部书的其他作者表示感谢。

因作者水平有限,不妥之处在所难免,欢迎提出宝贵意见和建议。

编 者

# 目 录

(下 册)

第 9 章 采样控制系统的建模与仿真 .....	367
9.1 引言 .....	367
9.1.1 采样控制系统的组成 .....	367
9.1.2 采样控制系统的特点 .....	368
9.1.3 采样控制系统的仿真方法 .....	368
9.2 采样控制系统仿真的一般方法 .....	369
9.2.1 $T=T_s$ 仿真法 .....	369
9.2.2 $T=T_s/M$ 仿真法 .....	371
9.2.3 数字控制器采样周期的调整与脉冲传递函数的 修正 .....	374
9.2.4 纯延迟环节的仿真 .....	376
9.3 采样控制系统仿真示例 .....	378
第 10 章 离散事件系统的建模与仿真 .....	384
10.1 引言 .....	384
10.1.1 离散事件系统建模与仿真的基本概念(术语) .....	385
10.1.2 离散事件系统建模结构 .....	390
10.1.3 离散事件系统仿真的一般步骤 .....	392
10.2 随机数的产生与检验 .....	394
10.2.1 均匀分布随机数的产生 .....	394
10.2.2 非均匀分布随机数的产生 .....	396
10.2.3 随机数性能检验 .....	400
10.3 实体流图法 .....	400

---

---

10.3.1	实体流图 .....	400
10.3.2	模型的人工运行 .....	405
10.4	活动周期图法 .....	406
10.4.1	活动周期图 .....	406
10.4.2	实体流图与活动周期图的比较 .....	413
10.5	Petri 网法 .....	414
10.5.1	Petri 网的基本概念 .....	414
10.5.2	Petri 网的行为特性及其分析方法 .....	428
10.5.3	高级 Petri 网 .....	438
10.6	离散事件系统的仿真策略 .....	449
10.6.1	事件调度法 .....	449
10.6.2	活动扫描法 .....	451
10.6.3	三段扫描法 .....	454
10.6.4	进程交互法 .....	456
10.6.5	小结 .....	459
10.7	离散事件系统仿真结果分析 .....	460
10.7.1	终止型仿真结果分析 .....	460
10.7.2	稳态型仿真结果分析 .....	463
10.8	离散事件系统仿真举例 .....	468
10.8.1	单服务台排队系统 .....	468
10.8.2	机器修理车间仿真 .....	470
<b>第 11 章</b>	<b>面向对象的建模与仿真 .....</b>	<b>483</b>
11.1	面向对象技术概述 .....	483
11.1.1	面向对象概念 .....	483
11.1.2	面向对象分析 .....	486
11.1.3	面向对象设计 .....	487
11.2	面向对象建模 .....	488
11.2.1	面向对象建模技术 .....	488
11.2.2	面向对象建模的一般过程 .....	493
11.3	面向对象仿真 .....	496

11.3.1	面向对象仿真技术 .....	496
11.3.2	面向对象仿真的优点 .....	500
11.3.3	面向对象仿真的基本内容 .....	502
11.3.4	面向对象仿真软件 .....	506
11.4	面向对象建模与仿真实例——虚拟战场环境建模与仿真 .....	507
11.4.1	环境对象数据模型 .....	507
11.4.2	面向对象的虚拟战场环境建模 .....	509
11.4.3	面向对象的虚拟战场环境仿真实现 .....	511
<b>第 12 章</b>	<b>面向 Agent 的建模与仿真</b> .....	<b>517</b>
12.1	Agent 基础 .....	517
12.1.1	Agent 的概念 .....	517
12.1.2	认知式 Agent 与反应式 Agent .....	521
12.1.3	Agent 的结构 .....	523
12.2	多 Agent 系统及多 Agent 仿真 .....	525
12.2.1	多 Agent 系统的概念 .....	527
12.2.2	多 Agent 仿真 .....	529
12.3	多 Agent 仿真建模框架 .....	532
12.3.1	引言 .....	532
12.3.2	仿真建模框架 .....	533
12.3.3	仿真控制框架 .....	544
12.3.4	ABDESM 建模仿真方法与过程 .....	555
12.4	多 Agent 仿真应用举例 .....	557
12.4.1	应用背景 .....	557
12.4.2	SM/WSRMSA 仿真对象系统分析 .....	558
12.4.3	SM/WSRMSA 系统建模结构 .....	560
<b>第 13 章</b>	<b>定性建模与仿真</b> .....	<b>569</b>
13.1	定性建模与仿真综述 .....	569
13.1.1	产生和发展 .....	569
13.1.2	理论派别 .....	570



13.1.3	应用与发展方向 .....	571
13.2	Kuipers 定性建模与仿真方法 .....	573
13.2.1	引言 .....	573
13.2.2	Kuipers 定性仿真原理 .....	573
13.2.3	基本概念 .....	574
13.2.4	约束的定义 .....	575
13.2.5	定性微分方程 .....	577
13.2.6	建模示例 .....	577
13.2.7	定性状态转换 .....	578
13.2.8	定性描绘图 .....	579
13.2.9	QSIM 算法 .....	580
13.3	Kuipers 定性仿真示例——双液面系统 .....	582
13.3.1	系统描述 .....	582
13.3.2	系统结构的定性描述 .....	582
13.3.3	系统状态的定性知识 .....	585
13.3.4	系统的初始状态 .....	585
13.3.5	系统行为的预测 .....	587
13.4	基于 SDG 的定性建模与仿真方法 .....	592
13.4.1	引言 .....	592
13.4.2	SDG 描述 .....	593
13.4.3	SDG 建模方法 .....	596
13.4.4	SDG 的推理机制 .....	596
13.4.5	SDG 方法的优缺点 .....	597
13.4.6	SDG 方法应用 .....	597
13.5	定性定量仿真简介 .....	603
13.5.1	问题的提出 .....	603
13.5.2	定性定量仿真的好处 .....	604
13.5.3	定性定量仿真的研究方向 .....	604
13.5.4	定性定量仿真的方法 .....	604
<b>第 14 章</b>	<b>基于系统动力学的建模与仿真 .....</b>	<b>607</b>

---

---

14.1	引言 .....	607
14.2	系统动力学建模与仿真基础 .....	607
14.2.1	系统的因果关系 .....	608
14.2.2	系统动力学模型的构造 .....	611
14.2.3	系统流图的基本构成 .....	613
14.2.4	系统流图设计中的几个问题 .....	614
14.3	系统动力学建模与仿真方法 .....	615
14.3.1	系统动力学建模与仿真的主要环节 .....	615
14.3.2	系统动力学建模与仿真步骤 .....	618
14.4	系统动力学建模与仿真实例 .....	620
14.4.1	系统描述 .....	620
14.4.2	因果关系图绘制 .....	620
14.4.3	系统流图绘制 .....	620
14.4.4	数学模型建立 .....	621
14.4.5	数学模型求解 .....	623
14.5	系统动力学建模与仿真总结 .....	624
14.5.1	系统动力学建模与仿真的优势 .....	624
14.5.2	系统动力学建模与仿真的不足 .....	625
<b>第 15 章</b>	<b>半实物仿真</b> .....	<b>626</b>
15.1	半实物仿真概述 .....	626
15.1.1	半实物仿真技术 .....	626
15.1.2	半实物仿真系统 .....	628
15.2	运动特性仿真技术 .....	632
15.2.1	运动控制系统技术 .....	632
15.2.2	运动仿真系统技术 .....	633
15.3	力与力矩特性仿真技术 .....	636
15.3.1	随动负载特性仿真技术 .....	636
15.3.2	力反馈/触觉技术 .....	637
15.3.3	压力仿真技术 .....	638
15.4	目标与环境特性仿真技术 .....	638

15.4.1	可见光图像目标仿真技术	638
15.4.2	激光目标特性仿真技术	642
15.4.3	红外成像目标半实物仿真技术	650
15.4.4	雷达目标半实物仿真技术	655
<b>第 16 章</b>	<b>分布交互仿真</b>	<b>658</b>
16.1	概述	658
16.1.1	分布交互仿真的产生	658
16.1.2	分布交互仿真的发展	658
16.1.3	分布交互仿真的分类	663
16.2	体系结构	665
16.2.1	DIS 体系结构	665
16.2.2	HLA 体系结构	667
16.2.3	两种体系结构的互连	670
16.3	信息交换标准	672
16.3.1	引言	672
16.3.2	DIS 协议	672
16.3.3	HLA 标准	676
16.4	DR 算法	684
16.4.1	算法描述	684
16.4.2	推算定位模型(DRM)表示法	685
16.4.3	推算定位公式	685
16.4.4	DR 算法的执行过程	686
16.5	时钟同步	688
16.5.1	时钟同步的概念	688
16.5.2	同步方法分类	688
16.5.3	硬件同步	689
16.5.4	软件同步方法	690
16.6	计算机生成兵力	693
16.6.1	引言	693
16.6.2	CGF 组成与工作过程	695

16.6.3	CGF 行为仿真 .....	696
16.7	仿真管理技术 .....	698
16.7.1	引言 .....	698
16.7.2	分布交互仿真管理的主要内容 .....	699
第 17 章	模型与仿真的 VV&A 及可信度评估 .....	701
17.1	引言 .....	701
17.1.1	问题的提出 .....	701
17.1.2	仿真可信度研究的发展状况 .....	701
17.1.3	仿真可信度研究中的关键问题 .....	702
17.2	模型与仿真的 VV&A .....	704
17.2.1	VV&A 的概念 .....	704
17.2.2	有关人员及其职责 .....	704
17.2.3	VV&A 的基本原则 .....	705
17.2.4	VV&A 的工作过程 .....	706
17.2.5	模型文档 .....	708
17.3	模型校核方法 .....	710
17.4	模型验证方法 .....	711
17.4.1	可用于模型验证的软件验证方法 .....	712
17.4.2	模型验证的常用方法介绍 .....	714
17.5	仿真可信度 .....	726
17.5.1	仿真逼真度的概念 .....	726
17.5.2	仿真可信度的概念 .....	728
17.5.3	仿真可信度与 VV&A 的关系 .....	730
17.6	分布交互仿真可信度 .....	731
17.6.1	引言 .....	731
17.6.2	分布交互仿真系统可信度分析的技术途径 .....	733
附录	拉普拉斯变换和 $z$ 变换 .....	736
附录 1	拉普拉斯变换 .....	736
附录 1.1	拉普拉斯的定义 .....	736
附录 1.2	拉普拉斯变换的性质 .....	736



附录 2 $z$ 变换 .....	738
附录 2.1 $z$ 变换的定义 .....	738
附录 2.2 $z$ 变换的性质 .....	739
附录 3 拉普拉斯变换及 $z$ 变换表 .....	741
参考文献 .....	745

# 第9章 采样控制系统的建模与仿真

## 9.1 引言

采样控制系统(或称数字控制系统)是这样一类控制系统:系统中的被控对象的状态变量是连续变化的,然而它的输入变量和控制变量却是在采样点(时刻)取值的间断的脉冲序列,其数学模型为差分方程或离散状态方程,这类在一处或多处存在采样脉冲序列信号的控制系统称为采样控制系统。采样控制系统首先要对受控对象(过程)的有关信号进行采样,通过输入通道(A/D)把模拟量转换成数字量,然后送给数字控制器或计算机;数字控制器或计算机根据输入的数字信号,按预定的控制规律进行计算;最后将计算结果通过输出通道转换成模拟量以控制被控对象,使被控量达到预期指标要求。这类系统既具有连续系统特征(如受控对象),也具有离散系统的特征(如数字控制器)。然而,从数字仿真的建模方法学角度来看,虽然这类系统有它自身的特点,但它与连续系统没有本质的区别,因而也可将其归类为连续系统仿真。

### 9.1.1 采样控制系统的组成

一个典型的采样控制系统(图9-1)由以下部分组成。

- (1) 连续的被控对象或被控过程。
- (2) 离散的数字控制器。
- (3) 采样开关或模数转换器。
- (4) 数模转换器或信号重构器。

将图9-1所示的采样控制系统与离散相似法所得到的系统进行比较,不难看到,两者的结构是相近的,其被控对象均是连续的,系统中均有

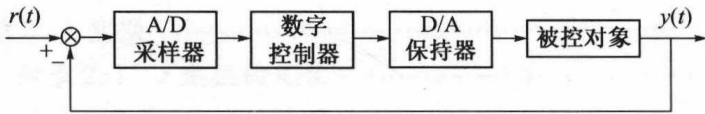


图 9-1 采样控制系统框图

采样器和保持器,因此离散相似法可以很方便地用于采样控制系统的仿真。

### 9.1.2 采样控制系统的特点

(1) 在对连续系统进行离散化时,其采样开关是虚拟的,即其采样周期、采样开关所处位置及保持器的类型是由用户根据仿真精度和仿真速度的要求加以确定的。一般来说,在连续系统仿真时,仿真所用的离散化模型中的虚拟采样间隔(即仿真步长)对整个系统来说是唯一的,且是同步的;而采样控制系统则不同,其采样周期、采样开关所处位置及保持器的类型是实际存在的。因此,在对采样控制系统进行仿真时,连续部分离散化模型中的仿真步长与实际采样周期可能相同,也可能不同。对于给定的采样控制系统,首先必须解决如何确定仿真步长。

(2) 对一个连续模型来讲,不同的仿真步长得出的差分模型不同,其仿真精度也不同。因此,仿真步长的选择与仿真方法的选择是紧密相连的。或者说,为实现一定精度与一定速度的仿真计算,仿真步长与方法的选择必须兼顾考虑。由于实际系统分为离散和连续两部分,从而得到的差分模型也分为两部分,如何处理这两部分模型之间的联系是采样控制系统仿真中的特点。因此,第二个必须解决的问题是如何来处理在不同采样间隔下的差分模型。

### 9.1.3 采样控制系统的仿真方法

我们规定  $T_s$  为采样周期,  $T$  为仿真步长。对于图 9-1 所示的典型采样控制系统,可用图 9-2 所示的结构图来表示。

其中  $G(s)$  为被控对象的传递函数,  $H(s)$  为信号保持器的传递函数,  $D(z)$  为数字器的  $z$  传递函数,  $T_s$  为采样控制系统中实际的采样周期,

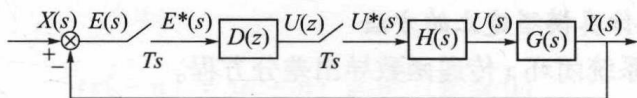


图9-2 采样控制系统方框图

$X(s)$ 为输入信号, $Y(s)$ 为输出信号。

显然,仿真步长 $T$ 的选择必须根据被控对象的结构、采样周期的大小、信号保持器的类型以及仿真精度和仿真速度的要求来综合考虑。一般来说有三种情况。

- (1) 采样周期 $T_s$ 与仿真步长 $T$ 相等( $T = T_s$ )。
- (2) 仿真步长 $T$ 小于采样周期 $T_s$ ( $T < T_s$ )。
- (3) 改变数字控制器的采样周期 $T_s$ ( $T > T_s$ )。

## 9.2 采样控制系统仿真的一般方法

对采样系统进行仿真时可参考第8章的连续系统离散化方法,首先将系统中的连续部分离散化处理,求得它的脉冲传递函数,然后通过 $z$ 逆变换得到离散相似差分方程;而系统中的数字部分本来就已经给出其脉冲传递函数。因而,采样系统仿真同连续系统的离散相似法仿真在思想方法是类似的,只是在具体处理上略有不同。

### 9.2.1 $T = T_s$ 仿真法

#### 1. 特点

在对系统进行仿真时,实际采样开关与虚拟的采样开关在整个系统中均是同步工作的。因此,这种仿真与连续系统仿真完全相同,从而可大大简化仿真模型,缩短仿真程序,提高仿真速度。

#### 2. 应用场合及注意事项

- (1) 实际系统的采样周期 $T_s$ 比较小,系统的阶次比较低,取 $T = T_s$ 时可以满足仿真精度要求。
- (2) 以采样时刻的系统输出为目标的仿真。



### 3. 系统仿真模型建立的方法

- (1) 由系统闭环  $z$  传递函数导出差分方程。
- (2) 由数字控制器的  $z$  传递函数  $D(z)$  导出差分方程  $a$ 。
- (3) 由连续部分的脉冲传递函数  $G'(z)$  导出差分方程  $b$ 。
- (4) 信号综合得到差分方程  $c$ , 即建立方程  $a$  的输出和方程  $b$  的输入之间的关系。

### 4. 举例

离散相似系统的结果如图 9-3 所示。

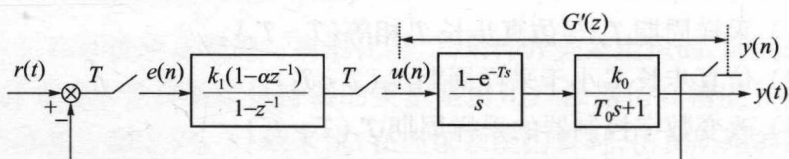


图 9-3 离散相似系统的结果图

- (1) 控制器  $z$  传递函数和差分方程为

$$D(z) = \frac{k_1(1 - \alpha z^{-1})}{1 - z^{-1}} = \frac{u(z)}{e(z)}$$

$$u(n) = u(n-1) + k_1[e(n) - \alpha e(n-1)] \quad (9-1)$$

- (2) 被控制对象的  $z$  传递函数和差分方程为

$$G'(z) = Z[G_h(s)G(s)] = k_0 \frac{1 - \beta}{1 - \beta z^{-1}} \cdot z^{-1} = \frac{y(z)}{u(z)}$$

$$y(n) = \beta y(n-1) + k_0(1 - \beta)u(n-1) \quad (9-2)$$

式中:  $\beta = e^{-T/T_0}$

- (3) 信号综合为

$$e(n) = r(n) - y(n) \quad (9-3)$$

根据初始条件

$$e(t) = u(t) = 0 \quad (t \leq 0)$$