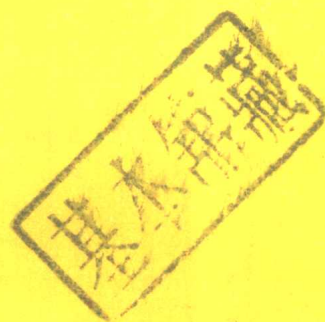


974389

TP391.9
8521

高等学校教学用书

控制系统数字仿真



冶金工业出版社

高等学校教学用书

控制系统数字仿真

昆明工学院 钟秀玲 主编

冶金工业出版社

(京)新登字 036 号

高等学校教学用书

控制系统数字仿真

昆明工学院 钟秀玲 主编

*

冶金工业出版社出版

(北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号)

新华书店总店科技发行所发行

北京怀柔东茶坞印刷厂印刷

*

787×1092 1/16 印张 18.25 字数 430 千字

1994 年 6 月第一版 1994 年 6 月第一次印刷

印数 00,001~2000 册

ISBN 7-5024-1430-4

TP.48 (课) 定价 8.55 元

前 言

控制系统的计算机仿真为控制系统的分析、综合和设计提供了快速经济的手段,近年来在我国发展很快,应用很广,不仅在航空、航天、电力、冶金、化工、交通、机械等工程系统中获得广泛的应用,而且在社会、经济、人口、生物、气象、医学、环境等非工程系统中应用也很广。

控制系统的数字仿真是一门建立在控制理论、数值方法、计算机技术、系统工程与控制工程基础上的综合性实验学科,它已成为自动控制学科的一个分支,并在自动控制技术的发展中起着重要的作用。

本书是编者们在多年教学与科研实践的基础上,根据自动化类专业的教学要求编写的。它主要研究连续系统的计算机仿真技术,以工程系统仿真为重点。理论与实践紧密结合,阐明基本理论,培养开发能力是本书的目的。本书既注重数学模型建立和仿真算法的研究,又重视实用仿真程序的介绍,使读者掌握基本的仿真方法,为研究各类控制系统,从事仿真工作打下基础。

本书共分七章。第一章、第二章和第七章由北京科技大学马正午和穆志纯编写;第三章、第四章由昆明工学院钟秀玲编写;第五章、第六章由鞍山钢铁学院许书文编写。全书由钟秀玲主编。

本书审稿会于1991年12月在昆明召开,东北大学任兴权担任主审。参加审稿的还有中南工业大学陈润太、云南工学院潘诚、昆明工学院的王贞荣和沈阳黄金学院的王明顺等同志。他们为本书提出了许多宝贵的意见,在此表示衷心的感谢。

由于计算机仿真技术是一门实践性很强的技术,为便于学习,书中对各种仿真方法均备有通用仿真程序,所有程序均用True BASIC高级语言编写。本书附录中提供的程序清单均上机通过。昆明工学院自动控制系统实验室唐西林给予大力协助,在此表示深切谢意。

由于编者水平有限,书中错误和缺点在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

1992.6

035 65 / 17 04

目 录

1 系统仿真概念与方法综述	1
1.1 系统的基本概念	1
1.1.1 系统的概念	1
1.1.2 系统的描述	1
1.1.3 系统的数学模型	1
1.2 系统仿真的基本概念	4
1.2.1 系统、模型与计算机的关系	4
1.2.2 系统仿真的目的和分类	5
1.2.3 模拟计算机仿真	5
1.2.4 数字计算机仿真	7
1.2.5 模拟-数字计算机仿真	7
1.3 系统仿真软件剖析	8
1.3.1 仿真软件的特点及分类	8
1.3.2 典型仿真语言介绍	9
1.3.3 系统仿真软件的发展趋向	13
1.4 系统仿真技术的应用及发展	16
2 连续系统仿真的数值方法	18
2.1 连续系统数学模型	18
2.1.1 单输入、单输出系统	18
2.1.2 多输入、多输出系统	21
2.2 一阶微分方程的数值解法	22
2.3 Runge-Kutta 公式	24
2.4 多步积分法	27
2.4.1 Adams 显式积分公式	27
2.4.2 Adams 隐式积分公式	29
2.5 数值积分法、阶数、步距的选择	30
2.5.1 积分方法的选择	30
2.5.2 关于积分步长的选择	31
2.5.3 关于阶数的选择问题	32
2.6 微分方程数值解稳定性问题	32
2.7 Stiff 方程	35
习题	39
3 连续系统的数字仿真	40
3.1 面向传递函数的数字仿真	40
3.1.1 系统的开环状态方程及模型转换程序	40

3.1.2	系统的闭环状态方程及其算法	41
3.1.3	面向传递函数的仿真程序	42
3.1.4	应用举例	42
3.2	面向系统结构图的数字仿真	44
3.2.1	典型环节的选定	44
3.2.2	单输入—单输出系统的状态方程和连接矩阵	45
3.2.3	建立闭环系统的基本方程组	46
3.2.4	基于四阶龙格—库塔法的快速仿真	47
3.2.5	多输入、多输出系统的状态方程及连接矩阵	48
3.2.6	程序框图及使用说明	50
3.2.7	应用实例	54
3.3	连续系统的离散化模型	57
3.3.1	脉冲传递函数模型	58
3.3.2	双线性变换法	59
3.3.3	根匹配法	61
3.3.4	状态转移法	62
3.4	离散化模型的精度和稳定性	64
3.4.1	采样周期的选择	64
3.4.2	保持器的特性及其对精度和稳定性的影响	64
3.4.3	加补偿器提高模型精度和稳定性	67
3.5	连续系统离散相似法数字仿真模型	68
3.5.1	一阶环节的离散化模型	68
3.5.2	二阶环节的离散化模型	72
3.5.3	三阶环节的离散化模型	77
3.6	纯滞后环节和非线性环节的仿真	83
3.6.1	纯滞后环节	83
3.6.2	分段线性的非线性	84
3.6.3	齿隙非线性特性	85
3.6.4	继电非线性特性	86
3.6.5	具有滞环的继电非线性	86
3.6.6	具有死区和滞环的继电非线性	88
3.7	仿真系统的构成及仿真程序包 CDSS. TRU	88
3.7.1	仿真系统的构成	88
3.7.2	CDSS 程序框图和功能	90
3.7.3	CDSS 仿真程序中变量、数组含义	93
3.7.4	使用说明	94
3.7.5	应用举例	95
习题		107
4	采样控制系统的设计与仿真	109
4.1	采样控制系统仿真的基本方法	109
4.1.1	采样周期与仿真步距	110
4.1.2	采样控制系统的仿真方法	111

4.2	数字控制器的仿真	113
4.3	数字控制器的设计	114
4.3.1	数字PID控制算法及其仿真	114
4.3.2	最少拍系统的设计与仿真	117
4.3.3	无纹波最少拍系统的设计与仿真	122
4.3.4	具有延迟环节的采样控制系统的设计	126
4.4	面向离散状态方程的数字仿真	130
4.5	采样控制系统的时域设计	133
习题		138
5	控制系统参数最优化仿真	139
5.1	参数最优化的基本概念	139
5.1.1	控制系统参数最优化问题的例子	139
5.1.2	控制系统的目标函数	140
5.1.3	函数的极值及存在条件	141
5.1.4	最优化问题寻优方法	143
5.2	单变量函数寻优方法	143
5.2.1	分割法	144
5.2.2	插值法	146
5.3	多变量函数的寻优方法	151
5.3.1	一阶梯度法(最速下降法)	151
5.3.2	共轭梯度法	156
5.3.3	单纯形法	164
5.3.4	控制系统PID参数最优化问题	165
习题		170
6	控制系统计算机辅助设计	171
6.1	控制系统频率特性的辅助计算	171
6.1.1	幅频特性和相频特性的计算	171
6.1.2	相位裕量和增益裕量的计算	172
6.1.3	控制系统频率特性辅助计算程序	173
6.1.4	计算举例	174
6.2	无源校正装置的设计	176
6.2.1	校正原理	176
6.2.2	系统的仿真及时域指标的显示	179
6.2.3	程序框图及说明	180
6.2.4	应用举例	182
6.3	有源调节器的设计	186
6.3.1	电力拖动控制系统的工程设计法	186
6.3.2	拖动控制系统的频域设计法	189
6.3.3	程序框图和说明	192
6.3.4	应用实例	192
习题		197

7 自校正控制系统的仿真	198
7.1 自校正控制系统的基本原理	198
7.1.1 问题的提出	198
7.1.2 自适应控制的基本原理	198
7.1.3 自校正控制器	201
7.1.4 数字仿真方法在分析和设计自适应控制器中的作用	202
7.2 递推参数估计	202
7.2.1 最小二乘准则	202
7.2.2 最小二乘递推参数估计	203
7.3 系统辨识仿真	205
7.3.1 伪随机二进制序列 PRBS	206
7.3.2 随机噪声干扰 $e(k)$	207
7.3.3 递推最小二乘法的通用程序	209
7.3.4 系统辨识仿真程序及应用实例	209
7.4 自校正控制器的数字仿真	210
7.4.1 隐式自校正调节器	211
7.4.2 广义最小方差控制器	216
习题	220
附录一 True BASIC 简介	222
附录二 面向微分方程数字仿真程序 TFSP.TRU	224
附录三 面向结构图数字仿真程序 BDSP.TRU	226
附录四 连续系统和采样系统通用仿真程序 CDSS.TRU	231
附录五 离散状态方程通用仿真程序 SEDC.TRU	243
附录六 控制系统频率特性辅助计算程序 CAD1	247
附录七 无源校正装置辅助设计程序 CAD2	250
附录八 有源调节器辅助设计程序 CAD3	257
附录九 参考模型自适应控制系统 PID 参数最优化仿真程序 CAD4	263
附录十 系统辨识仿真程序 SISP.TRU	268
附录十一 自校正调节器仿真程序 STRSP.TRU	272
附录十二 自校正控制器仿真程序 STCSP.TRU	276
参考文献	281

1 系统仿真概念与方法综述

1.1 系统的基本概念

1.1.1 系统的概念

所谓“系统”是指某些有关联的事物按一定规律相互联系和彼此作用的集合体。该集合体可以完成某项任务或实现某个预定的目标。一般把集合体以外,但对该集合体有影响的事物称为“环境”,集合体本身就称为“系统”。系统是“系统科学”或“系统工程”的研究对象。显然一个系统存在输入和输出,其示意图如图 1-1 所示。

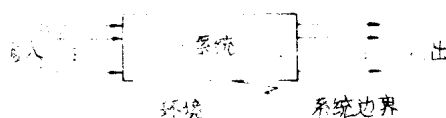


图 1-1 系统与环境

通常研究的系统有工程系统和非工程系统,例如电力拖动自动控制系统属于工程系统,它由检测、功率变换和执行部件等组成,用来完成转速、位移或其它参数控制的某一特定目标。类似的工程系统还有电力、机械、水力、冶金、化工、热力学等。非工程系统范围更广泛,大至宇宙、自然界、人类社会,小至粒子、细胞,都普遍存在着相互关联、相互制约的关系,形成一个整体,实现某一目的。如社会经济系统,交通、管理、生态及人口系统等。

建立系统概念的目的在于深入认识并掌握系统的运动规律,以便分析和综合自然、社会和工程系统中的种种复杂问题。

1.1.2 系统的描述

任何系统都有三个方面需要研究的内容,即实体、属性和活动。

实体 组成系统的具体对象;

属性 实体的特性(状态和参数);

活动 对象随时间推移而发生的状态变化。

下面以机械系统和电系统为例,来说明其上述三项内容的特点,详见表 1-1 所示。

1.1.3 系统的数学模型

研究一个系统主要是进行系统分析、系统综合和系统预测。而完成这些工作,首先需要建立系统的数学模型。系统的数学模型是系统本质方面的描述和表达,它以各种可用的形式(数学的或物理的)提供研究系统的信息,具有与系统相似的数学描述或物理属性。由于模型的形式、规模、对象、目标以及性质的不同,可以按如下方式对其进行分类:

表 1-1 机械系统与电系统的实体属性与活动

机械系统

系统描述

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} + D \frac{dx}{dt} + Kx = F(t)$$

距离	x
速度	$\frac{dx}{dt}$
外力	$F(t)$
质量	M
阻尼系数	D
弹簧系数	K

电系统

$$L \frac{d^2 q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{1}{C} q = E(t)$$

电荷	q
电流	$\frac{dq}{dt}$
电压	$E(t)$
电感	L
电阻	R
电容	$\frac{1}{C}$

系统活动

机械振荡

电荷振荡

模型	{	抽象模型	{	方程式型
				函数型
				概率统计型
				逻辑型
				图形模型
				方框图型
				信号流图型
				网络图型
				计算机程序模型(数学仿真模型)
形象模型	{			物理仿真模型(仿真器)
				实物模型

有必要强调的是，抽象模型没有具体的物理结构，只是通过数学解析表达式、图形、表格等来描述系统；而形象模型的特点是具有物理结构，所以也称物理模型。形象模型可分为两种。一种是和原来的物理元素完全不同，但动作相似，这种模型通常称为“仿真器”。例如，可用一个电气系统来模拟热传导系统。在这个电气系统中电容代表热容量，电阻代表热阻，电压代表温差，电流代表热流。现在大都采用数字计算机来作仿真器，此时抽象模型中的计算机程序就和仿真器结合在一起了。

形象模型的另一种形式是实物模型。它是根据相似原理把实际系统放大或缩小。例如 12000t 水压机可用 1200t、甚至 120t 水压机作其模型；万吨轮船也要用缩小了的模型来研究。

按模型中变量的性质，可对模型作如下分类：

- 模型

动态和静态模型
 连续性和离散性模型
 确定性和随机性模型
 线性和非线性模型
 实时和非实时模型
 理论和经验模型

如果对动态和静态模型作进一步的解析，又可细分为表 1-2 所示的情况。

表 1-2 动态与静态数学模型的描述

模型类型	静态系统模型	动态系统模型			
		连续系统模型		离散系统模型	
		集中参数	分布参数	时间离散	离散事件
数学描述	代数方程	微分方程 传递函数 状态方程	偏微分方程	差分方程 Z 变换 离散状态方程	概率分布 排队论
应用 举例	系统 稳态解	工程动力学 系统动力学	热传导场	计算机数据 采样系统	交通系统 市场系统 电话系统 计算机分时系统

静态模型只考虑同一时间实际系统中各物理量之间的数学关系，即变量中不含时间因素，因此静态模型可用代数方程描述。用以描述系统状态变化的数学模型，即系统中各物理量随时间变化的数学表达式称为动态模型，一般用微分方程来描述。

按状态变化是否连续，系统可分为连续系统和离散系统。状态随时间连续变化（包括采样数据系统）的系统称连续系统。反映这类系统动态特性的数学模型有连续模型（微分方程或一组状态方程）和离散时间模型（差分方程或离散状态方程）。与之相反，当状态只在离散时刻发生，而且往往是随机发生时，这种系统称为离散事件系统。例如通讯系统、库存系统等，这类系统的数学模型一般很难用数学方程描述，而用流程图或网络图来描述。

1.2 系统仿真的基本概念

1.2.1 系统、模型与计算机的关系

我们知道，数学模型是对所研究系统的描述。对于一个简单的数学模型，可以采用分析的方法或数学解析的方法进行研究，但对于复杂的系统，则需要借助于仿真的方法进行研究。所谓“仿真”（Simulation）方法，是指把系统的数学模型化为仿真模型，并编成程序在计算机上投入运行、实验的全过程。通常把在计算机上进行仿真实验称为“数学仿真”。计算机仿真的全过程可以用图 1-2 所示的流程图说明

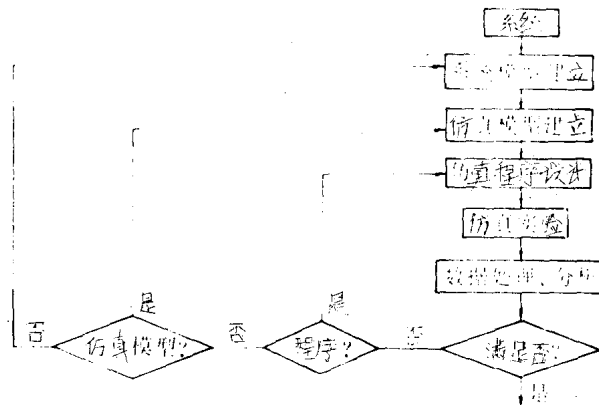


图 1-2 计算机仿真过程流程图

数学仿真一般就是在计算机上对系统的数学模型进行试验，故又称计算机仿真，它包括三个基本要素，即系统、模型与计算机，联系这三个要素的有三个基本活动：模型建立、仿真模型建立及仿真试验（运行）。以上三要素及三个基本活动的关系可用图 1-3 表示。



图 1-3 系统、模型与计算机的关系

模型建立反映了系统和模型间的关系，它的主要任务是通过对系统的观察，辨识一个实际系统以建立系统的模型。在建模过程中，由于对次要因素的影响和某些不可观察变量的忽略，因而所建模型常常是一个被简化了的模型。

仿真模型的建立反映了系统模型和计算机间的关系，它的主要任务是设计一种算法，以使系统模型能为计算机接受，并能在计算机上运行。显然，由于算法设计上存在着误差，所以仿真模型对于实际系统将是一个二次简化模型。

仿真实验就是对模型的运算，而模型运算需要设计一个合理的服务于系统研究的仿真软件。系统仿真技术实质上就是建立仿真模型并进行仿真实验的技术。

1.2.2 系统仿真的目的和分类

1.2.2.1 系统仿真的目的及其在系统研究中的作用

(A) 优化设计 现代大型系统结构复杂,要求在建立系统之前能够预测系统的性能和参数,使所设计的控制系统达到最优指标。

(B) 经济性 对一个大型系统进行研究,采用物理模型或直接在实物上试验,成本十分昂贵。以空间技术为例,单次飞行的成本约为 $10^4 \sim 10^8$ 美元,采用数字计算机仿真的方法,仅需实际飞行成本的 $\frac{1}{5} \sim \frac{1}{10}$,而且设备可以重复使用。

(C) 安全性 对于某些系统,如载人宇宙飞行器、核电站等,直接实验往往是危险和不允许的,因此必须在模型上进行试验。

(D) 预测性 对于经济、社会、生物等非工程系统,直接实验几乎是不可能的。仿真则可预测系统的特性和外作用的影响,从而研究控制的策略。

在进行仿真研究的过程中,一般需要经历以下四个步骤:

- (1) 确定需要仿真的问题(即对象系统),建立实际系统的数学模型;
- (2) 将它转换成仿真模型;
- (3) 画出实现仿真模型的流程图,用仿真语言或通用高级语言编制仿真程序;
- (4) 对仿真模型进行修改、校验,验证仿真结果与实际系统是否一致,以确认数学模型的正确性。

运行仿真程序,在不同初始条件和参数下的,对系统进行反复地分析和研究。

1.2.2.2 系统仿真分类

系统仿真根据其所研究对象的模型特征、要求与目标等不同,可分为以下几大类:

(1) 连续系统仿真。当系统的数学模型是由微分方程(或差分方程)描述时,该系统的仿真过程称为连续系统仿真(Continuous System Simulation)。其仿真方法主要是微分方程的数值求解方法。

(2) 离散事件系统仿真。当系统的数学模型是由随机事件、随机函数来描述时,该系统的仿真过程一般称为离散事件系统仿真(Discrete Event System Simulation)。其仿真方法主要是建立在概率论的基础之上。

(3) 混合系统仿真。当系统的数学模型是由上述两类模型混合构成时,其仿真的过程称为混合系统仿真。其仿真方法是综合上述两类方法于一体。

(4) 系统动力学仿真。当对象的数学模型是用系统动力学方程式来描述时,该系统的仿真过程称为系统动力学仿真。由于系统动力学仿真模型是一阶微分方程经离散化的差分方程,其仿真算法又只采用欧拉折线数值求解法,所以此类仿真应归属于连续系统仿真。但它的模型建立方法(采用因果关系图和流程图的形式)自成体系,因此常常将它单独划分出来。

以上是按系统模型的特征进行分类。如果按采用计算机的类型,仿真又可分为模拟计算机仿真、数字计算机仿真以及模拟-数字混合计算机仿真。下面分别加以介绍。

1.2.3 模拟计算机仿真

模拟仿真是基于数学模型相似原理的一种方法。仿真的主要工具是模拟计算机。模拟计算机由一些基本的模拟运算部件组成,见图 1-4,它们的输入和输出是连续变化的电压。

在输入和输出之间完成一定的运算关系。

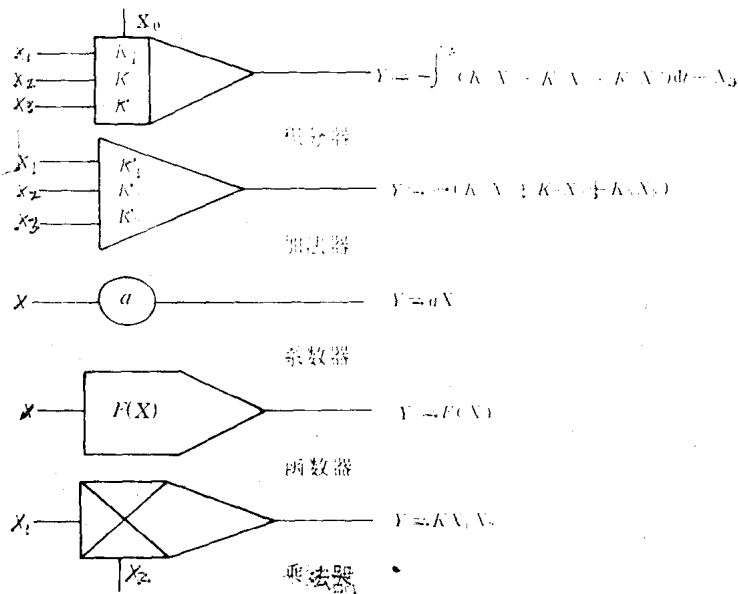


图 1-4 模拟计算机基本运算部件

• 模拟计算机是并行运算的，运算速度快，但精度不高。由于它可以实现传递函数为 $\frac{1}{s}$ 的积分运算，可以方便地求解微分方程，所以也被称为模拟微分分析器。

以飞机自动驾驶系统为例加以说明。如图 1-5，它表示了一个飞机自动驾驶系统的示意图，该系统模型的框图如图 1-6 所示。

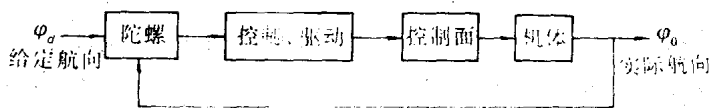


图 1-5 飞机自动驾驶系统

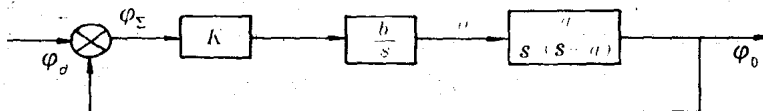


图 1-6 飞机自动驾驶系统框图

由图 1-6 可以写出该系统的开环传递函数为

$$G(s) = \frac{\varphi_0}{\varphi_\Sigma} = (K) \cdot \left(\frac{b}{s}\right) \cdot \left(\frac{a}{s+a}\right) \cdot \left(\frac{1}{s}\right)$$

式中 $\varphi_\Sigma = \varphi_0 - \varphi_0$ 。

括号中的每一项都可以用模拟运算部件来构成相似模型,误差检测可用加法器完成。完整的相似模型框图如图 1-7 所示。

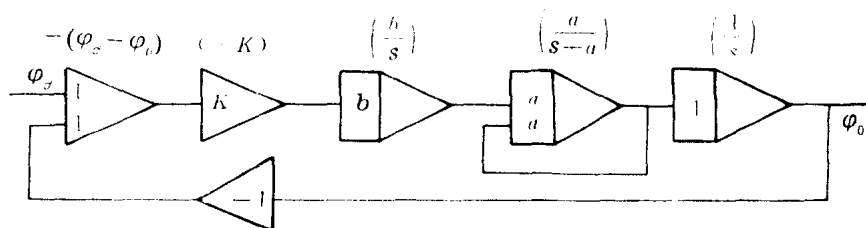


图 1-7 飞机自动驾驶系统仿真模型

上述系统一般是不稳定的,为了改善品质,还需要加入校正环节。这在模型上是很容易实现的。

模拟仿真是一种相似仿真技术,因此在仿真模型建立时,还必须考虑比例尺的变换问题。

模拟计算机适合于线性或非线性的、时变或非时变的连续状态系统的仿真。

1.2.4 数字计算机仿真

数字计算机仿真基于数值计算原理,其主要工具是数字计算机和相应的数字仿真软件。数字计算机仿真的主要对象是连续系统(时间离散系统也属这一类)。应用数字计算机仿真连续系统的首要步骤是必须把连续系统的数学模型离散化。因为数字计算机本身就是一个离散系统,同时又具有相当强的存贮信息的能力,所以仿真离散化以后的连续系统是极其方便的。

这里需要指出的是,对连续系统数学模型进行离散化的方法很多,如欧拉法、龙格-库塔法、状态转移法等。不同的方法,仿真模型的形式和精度都不一样。若步长选择不当时,还会导致系统不稳定。因此,进行数字仿真时,要特别注意算法的选择和积分步长的确定。

1.2.5 模拟-数字计算机仿真

顾名思义,模拟-数字计算机仿真是将模拟仿真与数字仿真相结合的一种方法。它的主要工具是模拟-数字计算机系统,即由模拟计算机、数字计算机以及用于信息转换及传输的中间界面所组成,如图 1-8 所示。

模拟-数字仿真主要用于:

(1) 当仿真系统模型的精度和响应速度,在模拟计算机或数字计算机中的任何一种难以达到时,可以采用模拟-数字计算机混合仿真的方法;

(2) 若所研究的系统本身就是既包含连续系统又包含离散系统,则采用模拟-数字混合仿真是十分方便的。例如图 1-9 所示的由数字计算机控制的过程控制系统就是典型的模拟-数字混合系统。

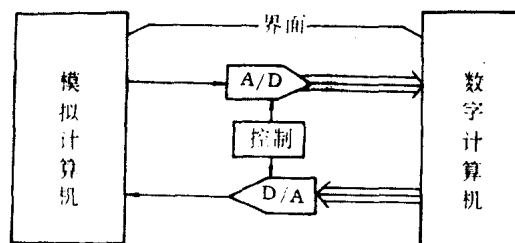
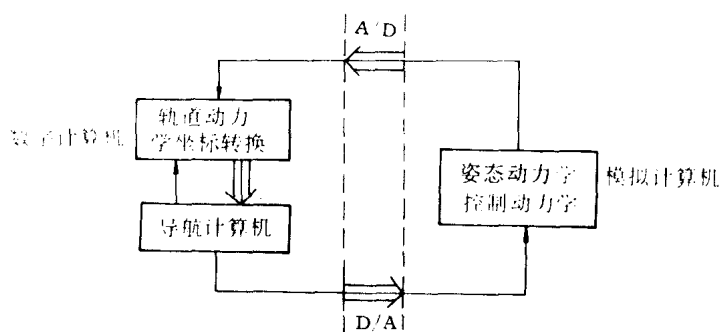
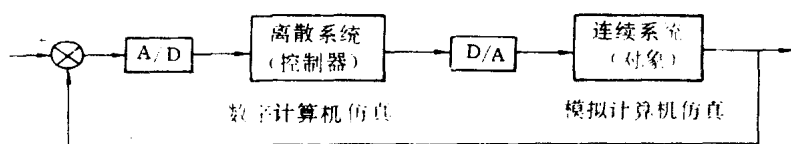


图 1-8 模拟-数字仿真系统

模拟-数字混合仿真比较复杂,但由于上述特点,它在某些大系统的实时仿真中倍受重



(a) 空间轨道飞行器模拟-数字仿真



(b) 过程控制系统模拟-数字仿真系统

图 1-9 模拟-数字混合系统

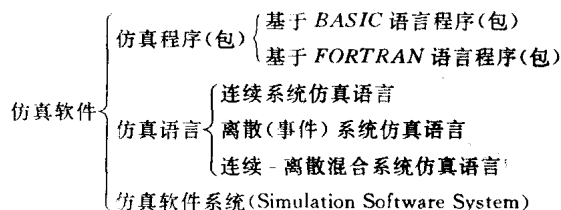
视。此外，由于模拟-数字计算机系统模拟子系统的高速求解能力，它还被用于参数优化、最优控制、随机过程统计计算及统计寻优等问题的研究中。

1.3 系统仿真软件剖析

1.3.1 仿真软件的特点及分类

系统仿真软件是一类面向仿真用途的计算机应用软件。它的特点是面向对象系统，面向用户；它可以使不同水平的用户在不同级别上利用自然语言，方便地与计算机对话，完成对象系统的建模与仿真。

系统仿真软件的功能可以概括为：(1) 源语言的规范及处理——规定模型描述的结构、符号、语句、句法、语法和错误检测，同时将面向问题的源程序翻译成机器可执行的代码；(2) 仿真的执行控制——规定模型内的时间拨动程序，设定模型运行的初始与终止条件，控制实现一次、多次或迭代实验；(3) 数据的分析与显示；(4) 模型、程序、数据、图形的存贮与检索。必须指出的是上述功能的实现都是在系统仿真软件一级，而不是在计算机操作系统一级。按照上述功能可将仿真软件进一步划分成仿真程序（包）、仿真语言及仿真软件系统三类，即



一般把具备上述仿真功能中的 (1)、(2)、(3) 的仿真软件称为“仿真语言”；把具备 (2)、(3)、(4) 中任何一种或兼有其中两种功能的仿真软件称为“仿真程序（包）”；而

“仿真软件系统”则是具备(1)、(2)、(3)、(4)功能的一体化软件系统。该软件系统目前尚处于逐步完善阶段。

不论是系统仿真语言,还是仿真程序(包),都有一些共同的问题需要在设计时加以考虑。归纳起来有以下几点:

(1) 面向方式问题。对于控制系统仿真软件,一般有两种面向方式,即面向方程和面向框图,前者要求输入描述系统的微分方程及代数方程,而后者要求输入描述系统的各环节的类型、参数及它们之间的连接情况。由于面向方式不同,程序的结构也有差别,从使用角度来看,两者各有优缺点。当然,对于进行控制系统研究的工程技术人员来讲,它们可能更乐于采用面向框图形式的仿真软件。

(2) 系统模型的计算顺序问题。由于数字计算机是串行计算,因此存在一个计算顺序的问题。一般来讲,应该先计算输入量已知的方程或环节,而对输入量尚未计算出来的方程或环节则要放到后面去计算。为使用方便,仿真软件都具有自动排序(分类)功能,即不论输入次序如何,程序会根据上述原则自动安排计算次序。例如已知 B 、 D ,且它们的关系式为:

$$\begin{aligned}C &= B * A; \\ A &= B + D,\end{aligned}$$

求 A 、 C 。

如果采用计算机高级语言按上述次序进行计算,显然是行不通的,而且会发生错误。但对具有排序功能的仿真软件,则允许这样书写在程序中。当计算机内部执行仿真计算时,机器能自动地按

$$\begin{aligned}A &= B + D \\ C &= B * A\end{aligned}$$

正确地进行运算。因此,衡量一个仿真软件的功能强弱,有无自动排序功能是一个重要标志。

(3) 仿真算法的可选择性问题。为了满足不同的仿真要求,任何一个功能强的仿真软件都必须提供多种数值积分算法,以供使用者挑选。积分步距也应该是定或变的,以适应不同仿真精度的要求。

(4) 仿真结果输出的方式问题。仿真结果输出方式的好坏,直接影响到人们对仿真结果的分析。一般地讲,人们要求仿真软件具有多种输出方式,例如数据打印输出,曲线绘图输出等;同时用户能根据需要灵活改变。

(5) 仿真控制问题。由于实际仿真的需要,一个好的仿真软件应能方便地实现多次仿真;能进行参数的迭代修改,以使某个指标函数达到最优;能将多次仿真的结果进行比较或在随机输入、随机参数或随机初始条件下进行多次仿真。

1.3.2 典型仿真语言介绍

1.3.2.1 CSSL 语言(连续系统仿真语言)

美国仿真协会在1965年召开一次发展未来仿真语言讨论会,成立了仿真软件委员会。该委员会在1967年提出了一个新的语言——连续系统仿真语言(Continuous System Simulation Language,缩写成CSSL)。迄今为止,它已经在许多种计算机上实现和运行过。

CSSL主要用于连续系统的动态仿真。它提供了一个清晰的形式去描述系统,语句语义