

郭云芳 欧阳玲 刘继美 编著

计算机仿真技术

JISIFANGZHENGJISHU

北

计算机仿真技术

郭云芳 欧阳玲 刘继美 编著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书系统地介绍计算机仿真技术,包括模拟计算机仿真和数字计算机仿真,重点讨论数学仿真方法及其在控制系统仿真中的实际应用。内容包括:模拟仿真的原理、仿真应用;数字仿真的基本算法,程序设计和仿真应用;控制系统参数优化的算法和应用;并行处理与并行仿真。

为加强工程实用性,有利于读者学习掌握,书中收集了应用实例和习题,并附有常用仿真程序和小型通用仿真软件。

本书可作为高等工科院校“计算机仿真技术”课程的教材,亦可供自动控制专业研究生和工程技术人员参考。

计 算 机 仿 真 技 术

JISUANJI FANGZHEN JISHU

郭云芳 欧阳玲 刘继美 编著

责任编辑 樊 毅

北京航空航天大学出版社出版 新华书店总店科技发行所发行

北京农业工程大学印刷厂印刷 全国各地新华书店经销

787×1092 1/16 印张:21 字数:537 印数:3500册

1991年5月第1版

1991年5月第一次印刷

ISBN 7-81012-183-9/TP·030 定价:5.45元

前 言

本书是根据一九八七年航空航天工业部教材编写计划而出版的本科“计算机仿真技术”课程教材。

随着现代科学的迅速发展,计算机技术已广泛应用于科学计算、数据处理、辅助设计、过程控制、管理决策和教育训练等各个方面。

在工业部门,计算机辅助设计和辅助制造更是发挥了巨大的作用,在控制系统的分析和设计过程中,计算机辅助设计是强有力的工具。计算机仿真则是系统设计、分析各个阶段不可缺少的手段。

计算机仿真就是利用计算机对系统模型进行试验,通过仿真可以达到良好的技术效果和经济性。计算机仿真技术是一门综合性的应用技术,它是四十多年前才兴起来的一门新技术。按其使用的计算机种类,仿真技术可分为模拟仿真(Analog Simulation)和数字仿真(Digital Simulation)两大类。以往计算机仿真主要使用模拟计算机,近三十年由于数字计算机的迅速发展,数字仿真技术的应用已十分普及,近几年微型计算机在计算机仿真领域也得到广泛的应用。

本书主要介绍计算机仿真的原理、方法和应用,其中以数字仿真为主。对于需要了解模拟仿真的读者,本书也介绍一些最基本的内容。

全书按内容分为五部分,共九章。第一章绪论,介绍系统、系统模型和系统仿真等基本概念;第二、三章介绍线性、非线性系统模拟仿真的基本原理、方法和应用;第四、五、六章介绍连续系统数字仿真方法,包括离散化仿真模型的建立、仿真模型变换和程序设计;第七章介绍采样控制系统仿真的特点和方法;第八章介绍控制系统参数寻优的算法和程序设计;第九章介绍并行处理与并行仿真的有关问题。

本书计划学时为60学时,各校可根据实际情况进行选讲。为了使读者在阅读本书以后能掌握仿真原理、方法,能建立模拟仿真、数字仿真模型,并能进行程序设计,本书对仿真方法和程序设计问题进行了较详细的讨论,以有利于读者自己设计仿真程序和开发仿真软件。同时,书中附有通用仿真软件,需要时可以移植。

本书第一、六、九章由北京航空航天大学郭云芳副教授编写,第二、四、七章由南京航空学院刘继美副教授编写,第三、五、八章由西北工业大学欧阳玲副教授编写。全书由王行仁教授进行了认真细致的审阅。书中全部图稿由孙奎兰同志描绘。

本书出版得到了航空航天工业部自动控制专业教材编审委员会和北京航空航天大学教材科的大力支持,编者在此一一表示感谢。

由于该书内容涉及面广,有些问题尚未进行深入讨论,作者水平有限,在所难免,恳请读者批评指正。

目 录

第一章 绪 论

- § 1-1 基本概念.....(1)
 - 一 系统.....(1)
 - 二 系统模型.....(2)
 - 三 系统仿真.....(4)
- § 1-2 计算机仿真.....(6)
 - 一 模拟计算机仿真.....(6)
 - 二 数字计算机仿真.....(7)
 - 三 混合计算机仿真.....(7)
- § 1-3 仿真技术的应用和发展.....(8)
 - 一 计算机仿真技术的应用.....(8)
 - 二 仿真技术的发展.....(9)
- § 1-4 课程目的与内容.....(10)
 - 一 课程目的.....(10)
 - 二 课程内容.....(10)
 - 三 基本要求和学习本课的基础知识.....(10)

第二章 线性系统模拟仿真

- § 2-1 模拟仿真概述.....(11)
 - 一 相似原理.....(11)
 - 二 模拟计算机的组成.....(12)
- § 2-2 线性运算部件.....(13)
 - 一 运算放大器.....(13)
 - 二 比例加法器.....(14)
 - 三 比例积分器.....(14)
 - 四 常系数器.....(15)
- § 2-3 模拟机的各种工作状态.....(17)
 - 一 准备阶段.....(17)
 - 二 运算阶段.....(17)
- § 2-4 线性常微分方程的模拟仿真.....(19)
 - 一 微分方程仿真结构图的建立.....(19)

- 二 微分方程组仿真结构图的建立.....(20)
- 三 比例尺的选择.....(22)
- 四 线性微分方程模拟仿真举例.....(27)
- § 2-5 结构图模拟仿真方法.....(31)
 - 一 传递函数的仿真模型.....(31)
 - 二 结构图的模拟仿真.....(33)
- 习 题(37)

第三章 非线性系统模拟仿真

- § 3-1 含有典型非线性系统的模拟仿真.....(38)
 - 一 典型非线性特性模拟电路.....(38)
 - 二 具有典型非线性环节系统的仿真.....(48)
- § 3-2 非线性微分方程的仿真.....(54)
 - 一 函数变换器.....(54)
 - 二 乘法器.....(58)
 - 三 除法器.....(60)
 - 四 非线性系统仿真应用.....(61)
- 习 题(61)

第四章 应用数值积分法仿真连续系统

- § 4-1 概述.....
 - 一 数字仿真的特点.....
 - 二 数值积分法的基本原理.....
- § 4-2 欧拉(Euler)法与改进法.....
 - 一 欧拉法.....
 - 二 改进欧拉法.....
 - 三 数值积分法的基本.....

§ 4-3 龙格-库塔(Runge-Kutta)法	(71)
一 显式龙格-库塔公式	(72)
二 四阶龙格-库塔法仿真程序及应用	(74)
三 自动选步长的龙格-库塔法	(80)
§ 4-4 线性多步法	(82)
一 亚当姆斯(Adams)显式公式	(82)
二 亚当姆斯(Adams)隐式公式	(83)
三 预估-校正法	(85)
四 面向状态方程的仿真程序	(86)
§ 4-5 刚性(Stiff)方程的数字仿真	(92)
一 刚性方程的特点	(93)
二 刚性方程的数值解法	(94)
三 刚性方程的仿真程序	(98)
§ 4-6 关于计算方法和步长的选取	(101)
一 积分方法的选择	(101)
二 计算步长的选取	(102)
习 题	(104)

第五章 连续系统离散化数字仿真

§ 5-1 替换法	(105)
一 简单替换	(105)
二 典型环节的残线性替换	(107)
三 状态方程的双线性替换	(112)
2 “离散相似”法数字仿真	(113)
“离散相似”法仿真特点	(113)
典型环节“离散相似”法	(114)

三 “离散相似”法的精度和稳定性	(119)
§ 5-3 连续系统状态方程的离散化	(125)
一 状态转移阵的差分方程描述	(125)
二 矩阵指数函数的数值解	(127)
三 典型环节离散系数及差分方程	(128)
§ 5-4 增广矩阵法	(133)
一 增广矩阵法的基本思想	(133)
二 典型输入作用下的增广矩阵	(134)
附录 V-1 常用典型环节双线性替换子程序	(137)
附录 V-2 常用典型环节“离散相似”法子程序	(138)
附录 V-3 常用典型环节状态方程离散化子程序	(141)
习 题	(145)

第六章 面向动态结构图数字仿真

§ 6-1 系统传递函数转换	(146)
一 传递函数转换为状态方程	(146)
二 传递函数转换程序	(147)
§ 6-2 系统模拟结构图转换为状态方程	(148)
一 连接矩阵法	(149)
二 仿真矩阵法	(151)
§ 6-3 系统动态结构图转换为状态方程	(155)
一 典型环节组成的结构图变换	(155)
二 一般动态结构图转换为状态方程	(158)
§ 6-4 非线性系统数字仿真	(160)

一 典型非线性特性仿真.....(161)	一 基本原理.....(270)
二 纯迟后特性仿真.....(166)	二 单纯形寻优方法.....(271)
三 非线性系统数字仿真应用(168)	三 改进的单纯形法.....(273)
§ 6-5 LNCSS 仿真软件.....(174)	§ 8-5 随机射线法.....(274)
一 概述.....(174)	一 基本原理.....(274)
二 LNCSS 仿真软件的功能和组成.....(174)	二 寻优程序.....(275)
三 使用说明.....(175)	§ 8-6 控制系统优化实例.....(278)
附录 V-1 面向动态结构图转换 程序 LSTRN(202)	一 准备工作.....(278)
附录 V-2 典型非线性子程序(210)	二 目标函数.....(279)
习 题(214)	三 参数分析.....(280)
第七章 采样系统的数字仿真	四 计算结果分析.....(281)
§ 7-1 采样系统数字仿真概述.....(217)	附录 VI-1 黄金分割法子程序.....(284)
§ 7-2 采样系统数字仿真方法.....(218)	附录 VI-2 单纯形法子程序.....(285)
一 概述.....(219)	附录 VI-3 随机射线法子程序.....(288)
二 简单采样系统的数字仿真 方法.....(223)	附录 VI-4 控制系统优化实例 程序.....(292)
三 多回路采样系统的数字 仿真.....(227)	习 题(295)
§ 7-3 多速率采样系统的数字 仿真.....(235)	第九章 并行处理与并行仿真
一 概述.....(235)	§ 9-1 并行处理的一般概念.....(296)
二 多速率采样系统的数字 仿真方法.....(236)	一 串行计算机仿真.....(296)
习 题(254)	二 并行处理.....(297)
第八章 控制系统优化技术	三 并行计算机的分类.....(297)
§ 8-1 控制系统优化的基本概念(256)	§ 9-2 并行计算机.....(299)
一 优化设计专用名词.....(256)	一 关联阵列机.....(299)
二 优化设计基本原理.....(258)	二 位阵列机.....(300)
三 控制系统优化设计时目标 函数的构成.....(261)	三 向量机 STAR-100.....(301)
§ 8-2 单变量参数寻优.....(263)	四 YH-FI 型向量机.....(304)
§ 8-3 梯度法.....(265)	§ 9-3 并行算法基本概念.....(307)
一 梯度法的基本原理.....(265)	一 数值计算方法的分类.....(307)
二 最速下降法.....(266)	二 理想并行算法假设.....(309)
三 共轭梯度法.....(268)	三 并行算法计算树.....(309)
§ 8-4 单纯形法.....(270)	§ 9-4 典型问题的并行算法.....(311)
	一 N 个数求和并行算法.....(311)
	二 多项式求值并行算法.....(313)
	三 矩阵并行计算.....(316)
	§ 9-5 控制系统的并行仿真.....(319)
	一 并行仿真.....(319)
	二 分割法并行仿真.....(319)
	三 并行预报-校正法.....
	参考文献

第一章 绪 论

系统仿真技术，是一门综合性的应用技术，过去无论是在工程系统还是非工程系统范围，都广泛地应用这一现代技术对系统进行分析、设计。

所谓“仿真”，就是构造出一个“模型”来模拟实际系统内所发生的运动过程，这种建立在模型系统上的试验技术称为仿真技术或称之为模拟技术。仿真技术在现代化科研、生产和训练教育等方面发挥了重大作用，这一学术领域的应用前景是十分广阔的。

本章简单介绍系统、系统模型、系统仿真以及系统仿真的基本方法等基本概念。

§ 1-1 基 本 概 念

一 系 统

一个系统是指自然界存在着的相互联系、相互作用、相互制约而且按照一定规律运动着的实体组合。从广义的概念上看，可以称为系统的范围是很广的，所包含的种类也很繁多。例如：地球上的自然气候、山川水土、各种动物植物和森林海洋组成了一个相互依存、制约且不断运动又保持着平衡状态的整体，这就是自然系统。又如：图1-1所示的温度控制系统，

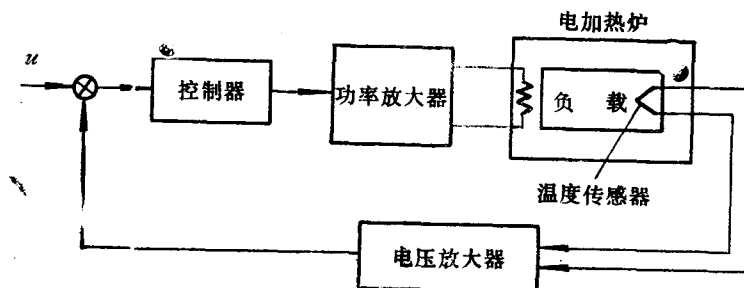


图1-1 温度控制系统

它由测温传感器、综合元件、控制器、功率放大器和电加热炉组成，它是工业上广泛使用的一个工业过程控制系统。

从以上两个简单例子可以看出，前一个系统是自然系统，它是人类长期在生产劳动和社会实践中逐渐认识世界而形成的，这种系统称为非工程系统；而图1-1所示的系统是人们根据某种需要、实现预定功能而构成的系统，这种系统又称之为工程系统。本书所讨论的仿真属工程系统仿真，一个工程系统应具有以下特性。

1. 系统是实体的集合

一个工程系统一般应由两个或两个以上的有效工作环节组成。系统的各个组成部分既具有一定的相对独立性，又相互联系构成一个整体，如图1-1所示的温度控制系统就是由一些独立元部件按一定规律连接起来的系统。

2. 组成系统的实体相互关联

要使一个系统有效地按照预定目标完成任务，它的各环节或者各子系统之间就必须相互联系、相互作用。这种联系和作用可能表现为某一个子系统从其它子系统接受输入，从而产生有用的输出作用，该子系统的输出又可能是另一子系统或环节的输入。系统的关联性表现为每个环节之间的信息流动和信息反馈作用，图1-1所示温度系统可以清楚地表现这一点。

系统的关联性也表现为各环节之间存在一定的逻辑关系。在图1-1所示的系统中，我们用箭头表现系统信息传递方向，用圆圈表示信号的综合关系。

3. 系统要按预定的目的运行

设计或者综合一个系统，是为了实现预定的目的，也就是系统具有目的性，一个系统的目的性表现为两个方面：一是系统要完成特定的功能；二是在完成基本功能的同时要使系统达到最优化。

比如一个纵向飞行控制系统，其原理框图如图1-2所示，要求该系统完成以下任务：①在垂直气流干扰作用下对飞行器的高度进行稳定，②控制飞行器按给定高度爬高。无论是对飞行高度进行稳定，还是按给定高度爬高都要求系统有最优的动态品质。

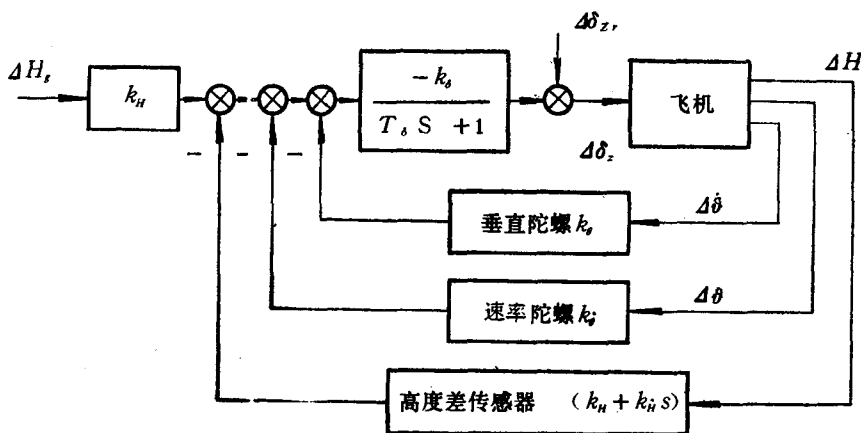


图1-2 飞行高度控制系统

二 系统模型

模型是系统某种特定性能的一种抽象形式。通过模型可以描述系统的本质和内在的关系，一个系统如果可以建立起一定形式的模型，我们就可以通过对模型的分析研究，达到对原型系统的了解。从普遍的意义上看，无论是工程系统还是非工程系统都可以建立起一定形式的模型。模型的表达形式一般分物理模型和数学模型两大类。

1. 物理模型

物理模型与实际系统有相似的物理性质，这些模型可以是按比例缩小了的实物外形，如风洞试验的飞机外形和船体外形。还有一种物理模型是与原系统性能完全一致的样机模型，如生产过程中试制的样机模型属于这一类。

2. 数学模型

用抽象的数学方程描述系统内部物理变量之间的关系而建立起来的模型，称为该系统的

数学模型。通过对系统数学模型的研究可以揭示系统的内在运动和系统的动态性能。

使用计算机对一个系统进行仿真研究，我们更感兴趣的是系统的数学模型。

根据数学表达式的性质划分，数学模型可分为：静态模型和动态模型两大类。无论是静态模型还是动态模型都具有抽象性，在计算机上运行模型还要求模型具有递归性。

(1) 静态模型

静态模型的一般形式是代数方程、逻辑表达式。例如：系统的稳态解公式、理想电位器转角和输出电压之间的关系式和继电器的逻辑关系输出式等。

(2) 动态模型

① 连续系统模型

连续系统模型分为确定性模型和随机模型，确定性模型又分集中参数模型和分布参数模型两种。对集中参数模型描述系统运动的是微分方程、状态方程和传递函数。描述热传递过程的偏微分方程则是典型的分布参数模型。

② 离散系统模型

(a) 时间离散系统。这种系统又称为采样控制系统，一般用差分方程、离散状态方程和脉冲传递函数来描述。系统的特性实质是连续的，仅仅在采样的时刻点上来研究系统的输出，各种数字式控制器的模型均属于这一类。

(b) 离散事件模型。这种系统用概率模型描述。这种系统的输出，不完全由输入作用的形式来描述，往往存在着多种可能的输出。它是一个随机系统，如库存系统、管理车辆流通的交通系统、排队服务系统等。输入和输出在系统中是随机发生的，一般要用概率模型来描述这种系统。

按照系统数学描述的差别，系统模型分类如表1-1所示。

表1-1 数学模型分类

模型类型	静态模型	动态模型			
		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 状态方程 传递函数	偏微分方程	差分方程 离散状态方程	概率分布 排队论
应用举例	电位器特性	动力学系统	热传递系统	采样系统	交通系统 库存系统

3. 建立数学模型的方法

利用计算机对一个系统进行仿真，首先要建立起被研究系统的数学模型，有三种途径来解决实际系统的建模问题。

(1) 演绎法。这是最早的一种建模方法，这种方法适用于内部结构和特性很明确的系统，可以利用已知的定律，如力、能量等平衡关系来确定系统内部的运动关系，大多数工程系统属于这一类。电路系统、动力学系统以及飞机的运动方程都可以采用演绎法来建立它们的数学模型。

(2) 归纳法。对那些内部结构不十分清楚的系统，可以根据对系统输入、输出的测试数

据来建立系统的数学模型。关于用实验方法建模的具体方法很多，可参考有关专门建模的著作。

(3) 混合方法。这是将演绎法和归纳法互相结合的一种建模方法。通常采用先验知识确定系统模型的结构形式，再用归纳法来确定具体参数。一般来讲这种方法是比较有效的。

三 系统仿真

1. 仿真的目的

仿真技术是利用模型对实际系统进行试验研究的一种试验方法。它是利用一个模型来模拟实际系统内部所发生的运动过程，以达到某种实际应用效果或者对系统动态性能的求解。例如：在控制系统的设计过程中，从方案论证开始，到元部件选择、系统初步设计、详细设计和样机生产各个阶段，均可以应用仿真技术通过仿真达到以下目的：

- (1) 通过仿真对初步选择的各种总体方案进行比较，以选择合理的系统方案；
- (2) 分析被控对象、元部件和系统的动态性能，合理地选择系统结构；
- (3) 确定系统的控制规律，选择合理的控制参数，并对系统参数进行优化；
- (4) 对初步设计的系统，进行数学仿真和半实物仿真，检查系统性能指标是否满足要求，并进行修改。

另外，仿真在飞行训练中所发挥的作用也是显著的。在地面对飞行员进行驾驶飞机的各种训练，可节省大量燃油消耗，安全可靠并且不受气候条件的限制。根据统计，在飞行模拟器上训练一小时的经费仅是空口训练的十五分之一。目前各种仿真训练器可以对宇航员、汽车驾驶员、坦克驾驶员和核电站操作员进行训练。

总之，采用仿真技术分析设计系统有以下优点：

- (1) 可以缩短研制周期；
- (2) 有良好的经济效益；
- (3) 安全可靠。

2. 系统仿真分类

根据仿真所采用的模型划分，可将仿真分为数学仿真和物理仿真两大类。

(1) 数学仿真

图1-3表示飞机-自动驾驶仪系统数学仿真框图。飞机和驾驶仪系统全部采用数学模型，数学仿真就是将原系统的数学模型编排成模拟计算机的排题图或是数字计算机的程序。这一过程是将原始数学模型转换为仿真模型，通过对计算机模型的运行达到对原系统研究的目的。

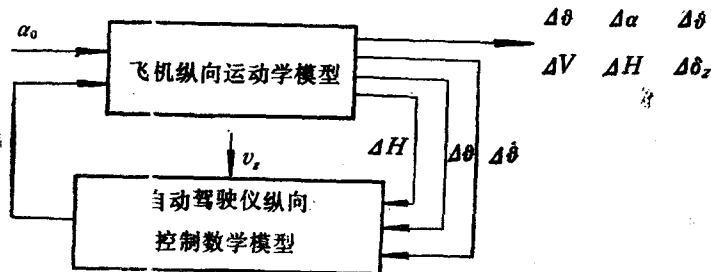


图 1-3 飞机-自动驾驶仪纵向数学仿真框图

的。数学仿真在系统设计阶段和分析阶段是十分重要的，通过数学仿真可以检验理论设计的正确性。本书将专门讨论数学仿真的有关问题。

(2) 物理仿真

物理仿真又称为实物（或半实物）仿真，它是在系统生产出机样以后，将系统实物全部或部分地引入仿真回路。图1-4表示飞机-自动驾驶仪控制系统半实物仿真框图。在物理仿真

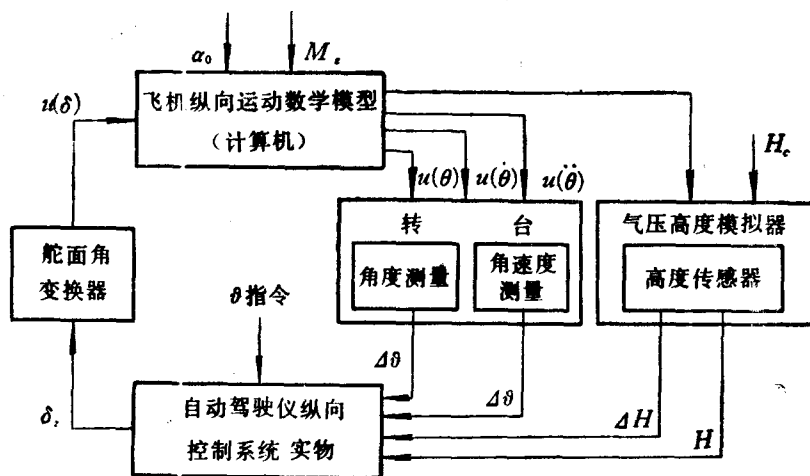


图1-4 飞机-自动驾驶仪纵向控制物理仿真框图

中飞机仍然用计算机模型代替，驾驶仪系统则用实物接入仿真回路。

图1-4中，粗实线表示的是纵向自动驾驶仪实物，其它为仿真试验设备。其中包括：计算机仿真飞机纵向运动方程，转台仿真飞机的纵向角运动，气压高度模拟器仿真不同高度大气静压，舵面角变换装置将飞机自动驾驶的舵机转角变成相应的电压信号加到纵向运动数学模型中。

物理仿真将系统的实际参数、数学仿真中难以考虑到的非线性因素和干扰因素引入仿真回路。因此，实物仿真更能反映系统的实际情况，通过仿真可以检验实物系统工作的可靠性，可以准确地调整系统和元件的参数，实物仿真也是试飞不可缺少的试验手段。

3. 数学仿真的过程步骤

利用计算机进行数学仿真，一般需要经过以下步骤：

- (1) 确定原系统进行仿真的目的和基本仿真要求。
- (2) 建立系统的数学模型，将被研究系统用演绎法或实验法抽象出表达式或信号流图，这一过程称为一次化建模过程，它是数学仿真的重要依据。
- (3) 模型的变换，即将原始数学模型通过一定的方式变换成能在计算机上运行的仿真模型，通常把仿真模型称作二次化模型。
- (4) 运行仿真模型，在运行仿真模型之前，须对仿真的具体流程进行设计，无论模拟计算机仿真或是数字计算机仿真都需要进行程序设计，然后在计算机上加载模型求出仿真计算结果。

- (5) 整理分析仿真结果，确认仿真结果正确无误以后，根据要求写出仿真技术报告。

以上仿真过程可以归纳为三个阶段，即：

- (1) 一次建模阶段；
- (2) 二次模型变换阶段；
- (3) 模型加载运行及结果判定阶段。

三个阶段的流程图如图1-5所示。

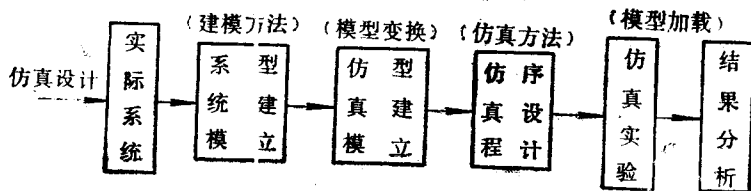


图1-5 计算机仿真过程

§1-2 计算机仿真

数学仿真的基本工具是计算机，通常又将数学仿真称为计算机仿真，计算机仿真的分类方法很多，如：连续系统仿真、离散事件仿真，模拟计算机仿真、数字计算机仿真。下面以后一种分类法介绍计算机仿真的类型和基本特点。

一 模拟计算机仿真

1. 模拟计算机

模拟计算机是由运算放大器组成的模拟计算装置，它包括运算器、控制器、模拟结果输出设备和电源四大部分。

运算器的任务是完成数学问题的求解，模拟计算机的基本运算部件有：加（减）法器、积分器、乘除器、函数器和其它非线性部件。这些运算部件的输入和输出变量都是随时间连续变化的模拟量电压，故称之为模拟计算机。各运算器按一定的结构组合起来，可以完成更为复杂的计算。

2. 模拟仿真的原理

模拟仿真以相似原理为基础的，实际系统中的物理量，如距离、速度、角度和重量等，都可以用按一定比例变换的电压来表示，系统某一物理量随时间变化的动态关系和模拟计算机上与该物理量对应的电压随时间的变化关系是相似的。因此，原系统的数学方程和模拟机上的解题方程是相似的，只要原系统能用微分方程、代数方程（或逻辑方程）描述，就可以在模拟机上求解。

3. 模拟仿真的特点

(1) 快速求解微分方程。模拟计算机运行时各运算器同时并行工作，模拟机的解题速度与原系统的复杂程度无关，并且适合于多次重复计算的仿真问题。

(2) 可以灵活设置仿真试验时间标尺。模拟机仿真既可以进行实时仿真也可以进行非实时仿真，在模拟计算机内如机器运算时间基准为 τ ，原系统的时间基准为 t ，则 $M_t = \tau/t$ 为

时间比例尺。当 $M_t=1$ 时为实时仿真； $M_t<1$ 时为超实时仿真，即机器上的计算速度比实际系统快； $M_t>1$ 时为缓实时仿真，即机器计算速度比实际系统慢， M_t 可以根据需要进行选择。

(3) 易于和实物相连。模拟计算机仿真用直流电压（分为 $\pm 100V$ 和 $\pm 10V$ 两种）表示被仿真的物理量，和连续实物系统连接时一般不需要 A/D 、 D/A 中间转换装置。

(4) 模拟仿真精度低于数字机仿真，逻辑控制功能差，自动化程度低。

有关模拟仿真的具体方法将在第二、第三章讨论。

二 数字计算机仿真

早期的数学仿真大都采用模拟计算机，自五十年代后期，由于数字计算机迅速发展，数字仿真已逐渐成为仿真领域的主要工具。

1. 数字计算机

在电子数字计算机内，变量是以断续变化的数码表示的，一般采用二进制、八进制和十六进制码表示。对于单指令流单数据流计算机，它们按照串行工作方式求解数学问题，其基本组成有：存储器、运算器、控制器和外围设备，大多数数字计算机都包括这些基本部分。

由于数字计算机只能对数码进行操作，一般只能作加、减、乘、除等基本算术运算，因此，任何动态系统在数字机上进行仿真都必须将原系统变换成能在数字计算机上进行数值计算的离散时间模型。数字仿真需要研究各种仿真算法，这是数字仿真与模拟仿真最基本的差别。

数字仿真用于离散事件系统仿真时，由于系统事件的产生是随机的，仿真模型需要涉及到概率分布模型和排队问题，有关离散事件系统的仿真问题本书将不讨论。

2. 数字仿真的特点

(1) 数值计算的延迟。任何数值计算，无论是适用于串行计算机上的串行算法，还是适用于并行处理机上的并行算法都有计算时间的延迟，其计算速度与计算机本身的存取速度、计算速度、所求解问题本身的复杂性和使用的计算方法有关。

(2) 仿真模型的数值化。数字计算机对仿真问题进行计算时采用数值计算，仿真模型必须是离散模型，如果原始数学模型是连续模型，各种原始数学模型必须转换成适合于数字机仿真的仿真模型，因此，需要研究各种仿真算法。

(3) 计算精度高。

(4) 实现实时仿真比模拟仿真困难。对复杂的快速动态系统进行实时仿真比较困难。需要在并行处理机上采用并行仿真或是采用编程复杂的汇编语言进行仿真。

(5) 利用数字计算机进行实物或半实物仿真需要有 A/D 、 D/A 变换装置。

关于串行数字仿真的基本方法将在四、五、六、七章中讨论，并行仿真和仿真模型的并行处理将在第九章进行讨论。

三 混合计算机仿真

混合计算机系统是由模拟计算机、数字计算机通过一套混合接口(A/D 、 D/A 装置)组成的数字/模拟混合计算系统，该系统具有模拟计算机的快速性和数字计算机的高精度和灵活

性的优点。混合计算机系统的简单组成框图如图1-6所示。

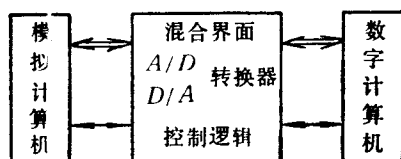


图1-6 混合计算机系统

1. 混合仿真系统的特点

- (1) 混合仿真系统可以充分发挥模拟仿真和数字仿真的特点。
- (2) 仿真任务在模拟计算机和数字计算机上执行，这就存在按什么原则分配模拟机和数字机的计算任务，一般是模拟计算机承担精度要求不高的快速计算任务，数字机则承担高精度、逻辑控制复杂的慢速变化任务。
- (3) 混合仿真误差包括模拟机误差、数字机计算误差和接口操作转换误差，这些误差在仿真中应给以考虑。
- (4) 混合仿真需要有专门的混合仿真语言控制仿真任务的完成。

2. 混合仿真的应用

六十年代末发展起来的混合仿真系统主要用于以下几个方面：

- (1) 系统仿真速度和仿真精度要求在模拟仿真或数字仿真单独执行有困难的情况下，如空间轨道飞行器仿真任务。
- (2) 若系统本身是一个既有数字部分又有模拟部分的混合系统，采用混合计算机仿真是十分方便的。
- (3) 混合仿真中模拟子系统的高速求解能力，使它在参数寻优、最优控制、随机过程统计计算的研究中能充分发挥作用。

由于混合仿真组成复杂、造价高，过去只在航空、宇航等部门用得较多，难以在一些小型研究单位推广。特别是并行处理仿真技术的发展，使之有逐渐被并行处理仿真计算机所代替的趋势。

§ 1-3 仿真技术的应用和发展

一 计算机仿真技术的应用

计算机仿真是在模型上进行试验，它具有经济、安全可靠、试验周期短等特点。计算机仿真技术已成为工程系统和非工程系统研究人员不可缺少的设计分析工具。在工程领域中的应用有航空、航天、航海、石油、化工、机械制造、钢铁、冶金等。在非工程领域中有社会经济、生物、医学、工业管理等部门。

仿真在工程系统研究的各个阶段，如方案论证、系统对象和基本部件的分析、初步设计、详细设计、分系统试验等各阶段，均发挥了显著的作用。采用仿真技术使研制周期缩短，研制费用减少。如我国研制的各类自动驾驶仪系统和各种自动领航系统，从研究工作开始直到装机试飞前均进行过多次仿真试验。

仿真在非工程应用方面主要有：经济管理系统，生物系统数学模型，人口动力学模型的仿真。仿真还在人口增长预测、自然资源消耗预测、环境污染预测方面具有指导意义。

仿真在训练方面也得到广泛的应用，各种训练仿真器用于训练飞行员、宇航员、轮船驾驶员、汽车、坦克驾驶员。核电站的操纵人员以及企业的经理也都可以应用仿真器培训。

二 仿真技术的发展

50年代初连续系统仿真在模拟计算机上进行，50年代中出现数字仿真技术，从此计算机仿真技术沿着模拟仿真和数字仿真两个方面发展。六十年代初出现了混合模拟计算机，增加了模拟仿真的逻辑控制功能，解决了偏微分方程、差分方程、随机过程的仿真问题。

数字仿真除了计算机的运算速度不断提高外，为了使仿真人员摆脱复杂的程序设计，从60~70年代发展了面向仿真问题的仿真语言。早期的仿真语言有CSMP、CSSL、DSL、MIMIC，应用十分广泛；七十年代以后在我国使用的仿真语言有DSL、DARE-P和CSSL系统。以上仿真语言适用于动力学系统，它们共同的特点是：

- (1) 它们都定义了类似模拟计算机的“内部函数”或“仿真算子”。
- (2) 各种仿真语言都定义了一些典型、通用和专用非线性函数。
- (3) 有多种数值积分方法以便灵活使用。
- (4) 定义了简单的输入格式和多种输出。

目前我国国内有不少数字计算机上配备有专门的仿真软件，应使其更加普及和完善。另外，仿真语言的进一步完善需要提供一个自学习的人-机交互界面和图形输入手段，给用户开发一个使用仿真语言的良好环境。

90年代仿真技术研究的前沿课题有以下几方面：

(1) 仿真技术与人工智能相结合，即智能化仿真。智能化仿真有两方面的意义：①仿真与最优化技术有机地结合起来，使仿真建模、自寻最佳的仿真研究融为一体。②智能化仿真的另一内容是仿真专家系统的应用，它是一个知识库及推理机理的仿真软件系统。

(2) 分布式并行处理仿真。由于仿真对象越来越复杂，对仿真计算机的速度要求也越来越高，分布式仿真与并行处理技术应运而生，近年来多指令流、多数据流的多处理机系统迅速发展，促进了并行仿真、冗余度技术和分散化控制系统的发展。并行处理在连续系统仿真和离散事件系统仿真中都有广阔的应用前景。

(3) 计算机图形技术在仿真中的应用。

(4) 仿真支持系统的发展。系统仿真软件已从仿真程序的编制发展为仿真模型的开发与建立，由仿真模型库辅助用户进行模型拼合，利用图形功能和人工智能组合模型从而自动生成系统模型，它是系统设计过程选择方案的有力工具。

从航空航天起步应用的仿真技术，发展到了在一般工程和非工程系统的应用。80年代仿真技术在高科技发展中的应用引起了各方面的关注，从而成为高科技技术发展不可缺少的工具。随着数字计算技术的发展，数字机的价格越来越低，性能越来越好；随着仿真技术的进一步发展，如：一体化仿真软件的出现，专用仿真软件的出现，专家系统在仿真中的应用，仿真技术的应用范围和前景将更为宽广。

§ 1-4 课程目的与内容

建立在模型试验基础上的仿真技术，是在自动控制工程的设计和分析中应用最广泛的领域之一。它已成为控制系统研究中不可缺少的一项重要手段和工具。

一 课程目的

控制系统“计算机仿真技术”是自动控制专业的一门专业应用技术课，本课程的主要目的是：培养学生掌握计算机仿真控制系统的基本方法，使学生通过学习本课程能应用仿真技术分析、综合自动控制系统，为今后从事自动控制的分析打下基础。

本书的基本任务是：系统地介绍模拟仿真和数字仿真的基本原理、方法和程序设计，具体解决仿真技术在自动控制系统中的应用，重点是数字计算机仿真应用。

二 课程内容

- (1) 模拟计算机应用于线性系统 and 非线性系统仿真的原理、方法和步骤。
- (2) 数值积分法在控制系统仿真中的应用，包括单步积分法、线性多步法的计算方法和程序设计问题。
- (3) 快速数字仿真方法，主要解决离散差分方程仿真模型的建立。
- (4) 结构图仿真模型变换和非线性数字仿真。
- (5) 采样系统仿真方法和程序设计。
- (6) 控制系统参数寻优原理、方法和在系统设计中的应用。
- (7) 并行处理技术在控制系统仿真中的应用。

三 基本要求和学习本课的基础知识

1. 基本要求

通过本书的学习应达到以下基本要求：

- (1) 掌握利用模拟计算机对线性、非线性系统进行排队与解题的方法；
- (2) 掌握连续系统离散化的各种方法，正确建立控制系统数字仿真模型、采样系统的仿真模型，并能进行程序设计和上机调试程序；
- (3) 掌握参数寻优原理、方法；
- (4) 能独立在数字机终端上调试程序。

2. 学习本书需要的基础知识

学习本书需要有一定的基础知识和专业知识。如：微分方程、差分方程、线性代数、计算方法和算法语言以及电工原理、电子技术、微机原理和自动控制原理等。