

数字仿真算法与软件

熊光楞 著

宇航出版社

数字仿真算法与软件

熊光楞 编著

宇航出版社

内 容 简 介

本书介绍了利用数字计算机对系统进行仿真的各种算法及实用软件。主要包括:模型与仿真,数字仿真原理,病态系统、含间断特性的系统、分布参数系统等特殊系统的仿真算法,数字仿真语言、软件包,数字仿真中的有关软件技术及仿真专家系统等。

本书可用作理工科及管理学科大学生及研究生学习系统仿真的教材,也可供从事系统仿真的科研人员和工程技术人员参阅。

数字仿真算法与软件

熊光楞 编著

责任编辑:张 芝

*

宇航出版社出版

北京和平里滨河路1号 邮政编码 100013

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经销

河北地质六队美术胶印厂印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:19.375 字数:484千字

1991年8月第1版第1次印刷 印数:1-3500册

ISBN 7-80034-408-8/TP·024 定价:8.80元

前 言

计算机仿真技术已经成为分析、研究、设计控制系统的必不可少的重要手段。最初(50年代)是采用模拟计算机进行仿真,后来逐步采用数字计算机,由此形成了仿真技术的一个重要分支——数字仿真技术。对于常规的控制系統,利用数字计算机进行仿真已经有了一套成熟的方法及软件。但是,随着国防科技及工业技术对控制系统指标要求的提高,被仿真的系统也越来越复杂。比如,系统中有的时间常数很大,有的则很小,形成所谓病态系统。又比如,系统中有很多非线性环节,它使得描述系统的微分方程式中包含有明显的间断特性。再比如,系统的数学模型是一系列偏微分方程,即不仅要考虑变量随时间变化的特性,还要考虑变量随空间变化的特性。所有这些情况,如果仍然采用一般的数字仿真技术及其仿真程序或语言,则往往不是占用机时过多,就是精度很低,不能满足要求。近年来,不少仿真领域的科学工作者在这些复杂系统的数字仿真方面做了大量的工作。1983年作者编写了《数字仿真与模型简化》讲义,就是针对这些复杂系统数字仿真的。为了使数字仿真技术能更好地为系统分析、研究、设计服务,作者在上述讲义的基础上编写了这本《数字仿真算法与软件》。它可作为大学生和研究生学习“数字仿真”的参考教材,也可作为用数字仿真技术进行实际系统分析和设计的科技人员的参考书(初次使用数字仿真的科技人员可以阅读作者1982年编著的《控制系统数字仿真》一书)。

一个成熟的数字仿真方法的形成大致可以分为以下四个阶段:

- (1) 问题的提出及数学描述;
- (2) 算法研究,各种算法的比较,提出一种比较好的算法;
- (3) 程序实现;
- (4) 构成一个使用方便的软件。

本书正是从这4个方面对各类复杂系统的数字仿真进行比较全面的讲述。因此,它不同于单纯讲述计算方法的书籍,也不同于单纯讲述程序设计与软件的书籍,而是算法与软件的有机结合。实际上,有不少仿真问题正是在这两者密切配合下才获得比较满意的结果的。

本书共分十三章。前三章是对数字仿真技术的一般性介绍,包括系统仿真概述、模型与仿真、数字仿真原理。第四章至第八章是介绍一些复杂系统的数字仿真技术。这是本书的重点。第九章讲述非工程系统的数字仿真,并向读者介绍关于离散事件系统仿真的概念。第十章至十三章讨论有关数字仿真的软件技术。书中各章都给出了一些实际例子和仿真结果,同时也给出了一些有关的程序。另外,在附录中还给出了关于系统仿真软件包SMPACK的使用说明。

本书中收录的部分程序与实验结果是由宋安澜、沈被娜、沈琪英、陈庆梅、史文月等同志提供的。部分章节的内容是作者与宋安澜同志共同讨论的,对他们热情协助作者表示感谢。

目 录

第一章 概述	(1)	§ 5.4 病态系统的判别及算法 的切换	(133)
§ 1.1 什么是系统仿真	(1)	§ 5.5 半隐式龙格-库塔法	(136)
§ 1.2 系统仿真的研究内容	(4)	§ 5.6 非线性系统的多帧速算法	(138)
§ 1.3 系统仿真的应用	(5)	§ 5.7 小结	(140)
§ 1.4 小结	(7)	参考文献	(140)
参考文献	(7)	第六章 含间断特性的系统仿真	(141)
第二章 模型与仿真	(9)	§ 6.1 问题的提出与解决途径	(141)
§ 2.1 仿真步骤	(9)	§ 6.2 条件函数零点搜索法	(144)
§ 2.2 建模原则及模型型谱	(10)	§ 6.3 平均值法	(151)
§ 2.3 连续系统的数学模型	(12)	§ 6.4 间断点估计法	(155)
§ 2.4 等价性原理	(22)	§ 6.5 小结	(158)
§ 2.5 两类数字仿真方法	(29)	参考文献	(158)
§ 2.6 小结	(29)	第七章 分布参数系统的仿真	(160)
参考文献	(30)	§ 7.1 分布参数系统及其数学模型	(160)
第三章 数字仿真原理	(31)	§ 7.2 差分解法	(161)
§ 3.1 数字仿真的特点	(31)	§ 7.3 线上求解法	(169)
§ 3.2 数值积分法	(31)	§ 7.4 线上求解法仿真程序及 仿真实例	(171)
§ 3.3 离散相似法	(40)	§ 7.5 小结	(178)
§ 3.4 误差估计与步长控制	(43)	参考文献	(178)
§ 3.5 通用数字仿真程序	(48)	第八章 高阶系统仿真与模型简化技术	(179)
§ 3.6 实时仿真算法	(84)	§ 8.1 问题的提出	(179)
§ 3.7 采样系统仿真	(88)	§ 8.2 模型简化的定义、要求及分类	(179)
§ 3.8 小结	(90)	§ 8.3 派德(Pade)逼近法	(183)
参考文献	(91)	§ 8.4 连分式法	(187)
第四章 线性病态系统的仿真	(92)	§ 8.5 结合稳定判据的混合方法	(195)
§ 4.1 增广矩阵法	(92)	§ 8.6 最优拟合法及带可调参数的 模型简化法	(202)
§ 4.2 矩阵指数 e^{AT} 的数值计算	(94)	§ 8.7 利用模型简化技术进行高阶 系统的仿真	(206)
§ 4.3 蛙跳算法	(101)	§ 8.8 小结	(207)
§ 4.4 多帧速法	(110)	参考文献	(207)
§ 4.5 小结	(111)	第九章 非工程系统的仿真	(209)
参考文献	(111)	§ 9.1 非工程系统及其特点	(209)
第五章 非线性病态系统的仿真	(113)		
§ 5.1 Stiff 稳定域	(113)		
§ 5.2 吉尔(Gear)法	(114)		
§ 5.3 程序实现	(115)		

§ 9.2 非工程系统的数学模型	(210)	§ 12.2 建模专家系统	(214)
§ 9.3 用连续系统仿真程序对非工程 系统进行仿真	(211)	§ 12.3 仿真算法选择的专家系统	(217)
§ 9.4 离散时间模型及其仿真方法	(213)	§ 12.4 专家系统的程序实现	(272)
§ 9.5 离散事件系统及其仿真	(217)	§ 12.5 小结	(233)
§ 9.6 小结	(223)	参考文献	(233)
参考文献	(224)	第十三章 数字仿真软件的发展动向	(234)
第十章 数字仿真语言及软件包	(225)	§ 13.1 连续系统仿真语言的新规范	(234)
§ 10.1 数字仿真语言的设计要求 及构成	(225)	§ 13.2 连续-离散复合仿真语言	(235)
§ 10.2 DARE-P 数字仿真语言	(227)	§ 13.3 图形仿真与动画仿真	(236)
§ 10.3 数字仿真软件包	(235)	§ 13.4 仿真数据库及仿真软件系统	(238)
§ 10.4 SMPACK 仿真与模型处理 软件包	(238)	§ 13.5 小结	(290)
§ 10.5 宿主语言的选择问题	(249)	参考文献	(291)
§ 10.6 小结	(250)	附录 SMPACK 软件包使用说明	(292)
参考文献	(250)	一、SMPACK 命令系统	(292)
第十一章 数字仿真的软件技术	(251)	二、SMPACK 的运行	(296)
§ 11.1 仿真软件中所涉及的 数据结构	(251)	三、线性系统仿真命令 SL 使用说明	(297)
§ 11.2 仿真软件中的编译技术	(253)	四、面向微分方程仿真命令 SE 使用说明	(300)
§ 11.3 仿真软件结构	(260)	五、面向结构图的仿真命令 SB 使用说明	(302)
§ 11.4 小结	(262)	六、模型简化命令 MR 使用说明	(302)
参考文献	(262)	七、频率响应分析命令 FR 使用说明	(302)
第十二章 仿真专家系统	(263)	八、误差指标计算命令 CJ 使用说明	(303)
§ 12.1 专家系统的基本概念	(263)	九、模型变换命令 MT 使用说明	(303)
		十、模型分析命令 MA 使用说明	(304)
		十一、参数寻优命令 PO 使用说明	(304)

第一章 概 述

§ 1.1 什么是系统仿真

系统仿真就是建立系统的模型,并在模型上进行试验^{[1][4]}。

一、系统及其分类

所谓系统是指相互联系又相互作用着的对象的有机组合。根据这个定义,我们可以将一个钢铁联合企业看作一个系统。它是很多工厂——采矿、选矿、炼铁、炼钢、轧钢、制品等工厂的有机组合。我们也可将一个轧钢厂看作一个系统。它是很多工段——加热、轧制、卷取、冷却等工段的有机组合。当然我们也可以将轧钢机看作一个系统。它是许多设备——主传动、压下、辊道等设备的有机组合。如果再细分一下,主传动部分也可看作一个系统。它可能由可控硅调速装置、直流电动机、测速发电机、主令控制器组成的一个有机整体。一般来说,根据系统的物理特性可将系统分成工程系统(如:电气、机械、机电、化工、热力等系统)及非工程系统(如:经济、交通、管理、生态等系统)两大类。也可根据系统的描述特性分为连续系统(用微分方程或差分方程来描述的系统)及离散事件系统(用逻辑条件或流程图来描述的系统)。

图 1.1 所示的轧钢机主传动系统就是一个工程系统。在这个系统中,速度偏差、电枢电压、转速等物理量的变化是随时间连续变化的,一般可用一组微分方程来描述这个系统,因此它属于连续系统。

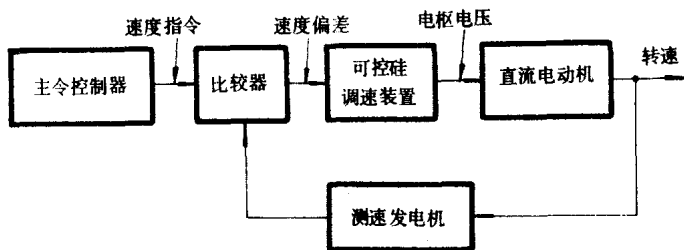


图 1.1 轧钢机主传动系统

图 1.2 所示的电话系统是一个属于管理性质的非工程系统。该系统由 N 部电话及 M 条连接线组成,并由一个接线员负责这个电话系统的管理——接通随时呼叫的电话。显然,在这个系统中所发生的变化是断续进行的,例如,电话的呼叫、接通、通话完毕等都只在特定的时间内发生的。或者说,系统状态的改变是由离散时刻发生的事件所驱动的,因此称为离散事件系统。

图 1.3 画出了一个用计算机控制的加热炉温度调节系统。从物理特性来讲,它属于工程系统。从描述特性来讲,加热炉的输入、输出是随时间连续变化的,而计算机的输入、输出是断续的数字量,由于这类系统也可用一组方程式(微分方程及差分方程)来描述,所以也归在连续系统的范围之内。这类系统有时也称采样数据系统。图中的 A/D 及 D/A 是模拟量 A 与数字量 D

之间的转换装置。

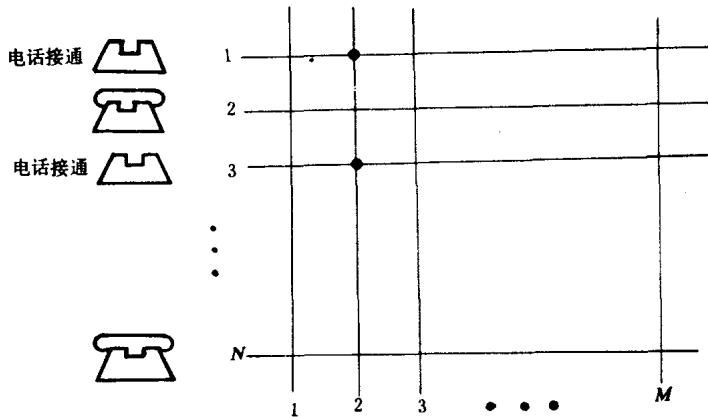


图 1.2 电话系统

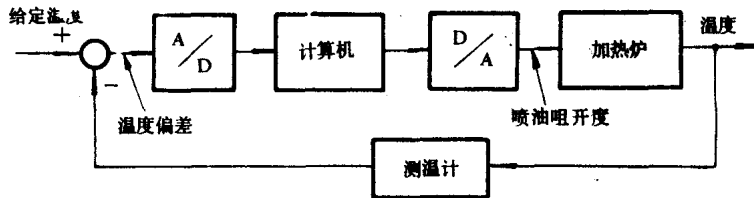


图 1.3 计算机控制系统

二、 仿真及其分类

为了研究、分析与设计这些系统,通常都需要对这些系统进行试验。由于经济、安全及可能性方面的考虑,人们不希望首先在真实系统上进行试验,而希望能在模型上进行试验,因此系统仿真就成了研究、分析与设计系统的必不可少的手段。比如,为了设计高质量的轧钢机主传动系统,可以按该系统的比例,用一台小功率的直流电动机来代替大功率的主传动直流电动机,用一个小容量的可控硅调速装置来代替大容量的可控硅调速装置,而为了模拟轧钢机主传动系统在突然加载时的情况,可以在小功率直流电动机轴上连接一台直流发电机,当刀闸 K 突然合上时,轴上就会产生一个突加的负载力矩 M_f ,这样就组成了一个如图 1.4 所示的轧钢机主传动仿真系统。

这种用一套物理系统作为模型,并在该物理模型上进行试验的技术称为物理仿真。

物理仿真的优点是直观、形象,但是要为系统构造一套物理模型,尤其是对十分复杂的系统,将花费比较大的投资,周期也很长。另外,在物理模型上作试验,修改系统参数,改变系统结构都比较困难。

数学模型是对被研究的系统的一种数学描述。对简单系统的数学模型进行研究可以采用解析的方法,但对复杂系统的数学模型进行研究则往往要采用仿真的方法,即在计算机上构成仿真模型,然后对这个模型进行试验。计算机为模型的建立与试验提供了极大的方便,因此科恩认为:它实际上是一个“活的数学模型”^[1],在计算机上对系统的数学模型进行试验就称为数学仿真,或称计算机仿真。

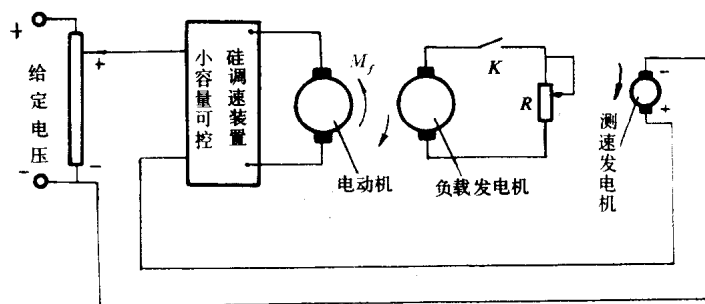


图 1.4 轧钢机主传动仿真系统

在某些系统研究中,还把计算机仿真模型和物理模型以及实物联合在一起运转、实验,这种仿真称为数学-物理仿真。

三、为什么要进行仿真

或许有人会问:为什么不直接在真实系统上进行试验,而要在模型上进行试验呢?有以下几方面原因:

- (1) 系统还处于设计阶段,并没有真正建立起来,因此不可能在真实系统上进行试验;
- (2) 在真实系统上做试验会破坏系统的运行,例如在一个化工系统中随意改变一下系统参数可能导致整个一炉成品报废;又如在经济活动中,随意把一个决策付之行动,可能会引起经济混乱;
- (3) 如果人是系统的一部分时,由于他知道自己是试验的一部分,行动往往会和平常不同,因此会影响试验的效果,这时最好将人也写成数学模型,用仿真的方法来进行试验;
- (4) 在实际系统上做多次试验时,很难保证每次的操作条件都相同,因而无法对试验结果的优劣作出正确的判断;
- (5) 试验时间太长或费用太大或有危险;
- (6) 无法复原,如改建一个轧钢车间,想要检查一下改建后轧制的效率与质量,不能先改建起来试试看,因为一旦改建后就不可能再回到原来的状态上去了。

因此香农(Shannon)认为,有下列情况之一时,应考虑采用仿真的方法^[13]。

- (1) 不存在完整的数学公式,或者还没有一套解答数学模型公式的方法。离散事件系统(如:上面介绍的电话系统)中的许多排队模型就属于这种情况;
- (2) 虽然可以用解析方法,但数学过程太复杂,仿真可以提供比较简单的求解方法;
- (3) 解析解存在而且是可能的,但超出了个人的数学能力,因而应该估计一下:建立模型、检查并且运行仿真模型的费用比起向外求助以获得解析解,何者合算;
- (4) 希望在一段较短的时间内能观测到过程的全部历史以及估计某些参数对系统行为的影响;
- (5) 由于难于在实际的环境中进行实验观测,仅有的可能是仿真,例如:对在行星间飞行的运载工具的研究;
- (6) 需要对系统或过程进行长期运行的比较,而仿真则可以随意控制时间,使它加快或减慢。

§ 1.2 系统仿真的研究内容^[14]

在计算机问世之前,由于只有物理仿真,系统仿真是附属在其它有关学科中的。只有在计算机问世之后(40年代末),由于数学仿真即计算机仿真的发展,提出了大量共同性的技术问题,因而系统仿真才逐渐发展成一门独立的学科。国际上有专门的计算机仿真协会(IMACS—International Association for Mathematics and Computers in Simulation)。美国、英国、日本等国也都有仿真协会。中国也成立了系统仿真学会。

系统仿真(这里主要是指用计算机对系统进行仿真)的主要研究内容大致可分为以下6个方面:

- (1) 仿真计算机及仿真系统^{[2][9][4][5]};
- (2) 仿真方法^{[4][5][6][7][8]};
- (3) 仿真软件^{[1][7]};
- (4) 仿真研究^{[1][4][6]};
- (5) 训练仿真器^{[9][10]};
- (6) 仿真基准问题^{[1][3]}。

表1.1介绍了这6个方面的具体内容,更为详细的内容请参看有关文献。

表 1.1 系统仿真的研究内容

名 称	具 体 内 容
仿真计算机及仿真系统	模拟计算机、数字计算机、混合计算机、外围阵列机、并行多处理机系统
仿真方法	模拟仿真方法、数字仿真方法、混合仿真方法、离散事件系统仿真方法、蒙特卡罗法
仿真软件	数字模拟仿真程序、连续系统仿真语言、动力学模型语言、离散事件系统仿真语言、连续-离散混合仿真语言
仿真研究	仿真研究与多次运行、参数寻优、函数寻优
训练仿真器	载体类训练仿真器、工厂过程类训练仿真器、博弈管理类训练仿真器
仿真基准问题	生物学基准、科学混合基准

由表1.1可知,系统仿真所包含的内容是十分广泛的,它不仅包含计算机技术、软件技术、计算数学、控制理论,而且还包含概率统计学、博弈论、排队论、运筹学等方面的内容,因此系统仿真是一门综合性的技术科学。

这里有二点要说明一下。

(1) 在仿真方法一项中,我们将它分成了五个方面,其中前三个方面基本上是属于连续系统(包括采样数据系统)的仿真,而第四方面则是属于离散事件系统仿真。由于这两类系统在数学模型、研究方法等方面都有较大差别,因此仿真技术通常分为两大类。连续系统的数学模型主要是用微分方程或偏微分方程来描述的,而离散事件系统的数学模型则主要是用到达模式(如电话系统中电话呼叫的概率)、服务过程(如电话系统中通话的过程)、排队规则(如电话系统中占线后的处理规则)等概率模型来描述的。前一类系统的研究方法主要是控制论,而后一类系统的研究方法则主要是排队论及运筹学。从仿真技术的发展来看,前一类系统的仿真发

展得比较早,也比较成熟,应用也比较广泛。但是近年来,由于系统工程及管理科学的发展,离散事件系统的研究越来越多。由于这一类系统的分析、研究几乎不可能在真实系统或物理模型上进行,主要是依靠计算机仿真,因此,这一类系统的仿真技术发展得十分快。

(2) 物理仿真应属于仿真的范畴,在连续系统的仿真中,物理仿真或半实物仿真至今仍占有十分重要的地位。许多重要的物理仿真设备仍是仿真系统中不可少的部分,如,运动系统仿真中的转台,视景仿真中的视景发生装置等。

§ 1.3 系统仿真的应用

系统仿真对于系统分析、设计、研究、训练人员及教育等方面都有十分重要的用途。

一、系统仿真在系统分析、设计与研究中的应用

1. 优化设计 现代大型系统的规模和复杂性要求在建立系统之前能够预测系统的性能和参数,并能对多种可能的方案进行比较,以便达到最优的设计系统。另外,在系统建成之后,也需要预测当控制或决策变动之后,系统响应将会发生什么变化,从而决定系统的改进方案。

2. 经济性 对于一个大型系统,直接实验的成本十分昂贵。以航空工业为例,单次飞行的成本约为 $10^4 \sim 10^8$ 美元,采用仿真实验方法后仅需成本的 $1/5 \sim 1/10$,而且设备可以重复使用。比如英、法利用仿真技术研制“协和号”,缩短研制周期 $1/8 \sim 1/6$,节省费用 $15 \sim 25\%$ 。

3. 安全性 对于某些系统,如载人宇宙飞行器、核电站控制等,直接实验往往是危险的和不允许的。又比如利用战术仿真器来研究现代战争中如何发挥各种兵力、武器的作用,比实战演习不仅能节省大量资金,而且安全可靠。

4. 预测性 对于经济、社会、生态等非工程系统,直接实验几乎是不可能的,仿真则可以用于预测这些系统的特性和外部作用的影响,从而研究控制的策略。

值得指出的是,过去仿真技术用于系统设计和研究主要是在航空、航天等部门,随着工业技术及计算机技术的发展,现在在冶金、电力等工业部门也已广泛应用计算机仿真技术来设计新的系统。以冶金工业为例^[11],过去在连轧机系统的设计阶段,通常要求建立实验轧机(相当于物理仿真),这是因为建立一套连轧机系统,要求考虑的因素甚多,且十分复杂,若不进行中间试验,一般是没有把握的。然而建立实验轧机不仅周期长,而且投资较大。60年代初英国钢铁协会在计算机上进行了四机架冷连轧机的仿真试验,它的结果与实验轧机比较基本一致,从而开始用仿真试验来取代实验轧机(即用计算机仿真来代替物理仿真)。70年代后,美、日、德等国的大型电气设备制造公司的研究开发部门,在研究、设计、制造新型热连轧机和冷连轧机系统时,也先后采用了计算机仿真技术,并相继建立了热连轧与冷连轧的专用仿真系统。这类仿真系统主要是利用一套仿真软件在中型计算机上进行轧制生产工艺控制系统的研究。由于连轧机系统十分庞大,投资极为昂贵,所以这种仿真软件在经济上收益是十分大的(AEG公司的冷连轧仿真软件报价60万马克),即通过仿真研究若能使设计合理,可大大降低为达到同样产量而需要的投资。

二、系统仿真在训练与教育方面的应用

系统仿真用于训练与教育是它的一大特点。现在已经为各种运载工具(如,飞机、火车、汽车、船舶、坦克、挖煤机等)以及各种复杂设备及系统(如,电站、电网、化工设备等)制造出各种训练仿真器^{[9][10]}。它在提高训练效率、节约能源、安全训练等方面起了十分重要的作用。据统

计^[9],1978~1983年期间,世界各国用于训练仿真器的经费达到82亿美元,其中仅美国就占了50亿美元。

所谓训练仿真器,顾名思义就是一种用于人员训练的模拟设备。更明确地说,训练仿真器是用计算机仿真技术、自动化技术及各种物理工程技术(如,光学-视景系统)构成的一种以训练为目的的仿真系统。它再现(模拟)一个真实的系统并可供训练人员操纵与管理。由于训练仿真器是用计算机仿真技术来训练人员,所以它必定是一个人-机系统。一个真实的训练系统总是由真实的人-对象-环境组成的,而训练仿真器则是用计算机仿真技术及其他技术来进行对象与环境的仿真,而被训练的人不变。

图1.5是一台数字式船舶操纵训练仿真器的方框图^{[12][15]}。整个系统在教练员控制之下,通过计算机对外部设备进行管理。教练员根据训练内容将训练科目、本次训练所采用的船型以及初始位置等初始命令输入计算机。计算机根据这些命令自动完成科目的选择、船型的确定、模型参数的给定,并使视景系统中的摄像头运动到指定位置。在训练中计算机定时采入训练人员给出的舵角 δ 、车速 n 等数据,并进行仿真计算,然后将计算结果(船舶的实时速度 V ,位置 x 、 y 及航向 φ)输出给有关设备,控制它们的运动,如视景系统中的摄像头。

利用船舶训练仿真器有十大好处。

- (1) 它允许操纵人员在训练时发生错误,因此能保证安全训练;
- (2) 它可以自由地安排训练项目,并能重复进行重要的训练;
- (3) 它可以选择不同的气候条件、外界环境(如各种类型的港口、码头)进行训练;
- (4) 它可以人为制造一些故障,然后在故障情况下进行训练;
- (5) 用仿真器进行训练的价格比使用真船要经济得多。以5000t级的船为例,一次靠离码头的训练约需燃油近10t,而仿真器只耗电十几度,另外用真船进行训练,主机磨损费用很大,而仿真器则根本无此损耗;

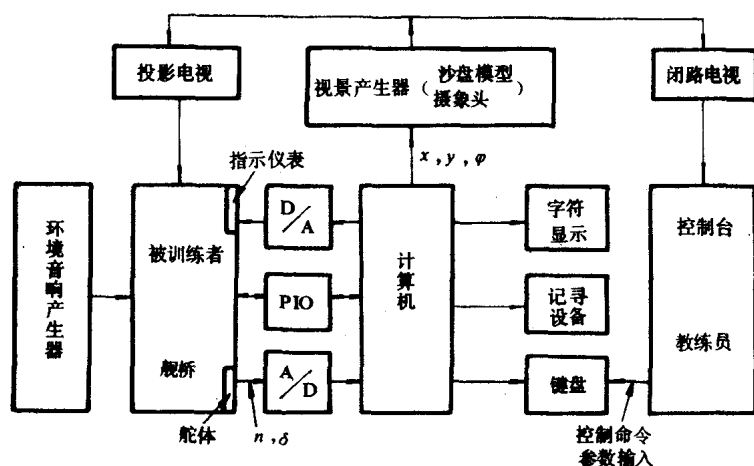


图 1.5 数字式船舶仿真器方框图

(6) 可以将训练的结果记录下来以便考察操纵人员的水平,甚至可将操纵人员的操纵过程重新复现,以便迅速纠正操纵中发生的错误,提高训练效率,缩短训练周期;

(7) 它不受气候及外界自然条件的限制,即使在外界冰冻情况下也能进行训练;

(8) 它是实现船舶操纵性闭环研究的有效工具,因为从船舶操纵性角度来看,船舶操纵的好坏,不仅取决于船本身的性能,而且与操纵人员的生理学、心理学特性有关。利用船舶操纵训练仿真器来研究船舶比过去只进行开环操纵性的研究要强得多;

(9) 船舶操纵仿真器可用来进行自动舵、各种导航仪表以及其它新的控制系统的研究,而且可用来研究风、流、浪等各种外界随机因素对航行的影响;

(10) 它可以用来进行港口设计,如海港水道宽度等。

实际上,凡是需要有一个或一组熟练人员进行操纵、控制、管理和决策的真实系统,都需要对这些人员进行训练。这就需要研制该系统的仿真器。而真实系统的操纵、控制、管理与决策越复杂,系统价值越高,训练时因操作不慎引起的破坏与损失越大,能源消耗越多,或限于条件不可能在真实系统上进行训练时,对训练仿真器的需求就越迫切。

§ 1.4 小 结

系统仿真就是建立系统的模型,并在模型上进行试验。用一套物理系统作为模型,并在该物理模型上进行试验的技术称为物理仿真;建立系统的数学模型,并将它放到计算机上进行试验就称为数学仿真或称为计算机仿真。由于计算机仿真的发展,提出了大量共同性的技术问题,因而系统仿真逐渐发展为一门独立的学科。

系统仿真的主要研究内容为仿真计算机及仿真系统、仿真方法、仿真软件、仿真研究、训练仿真器及仿真基准问题。

系统仿真对于系统分析、设计、研究、训练人员、教育等方面都有十分重要的用途,因此它是一门有广泛应用价值的技术学科。

参 考 文 献

- [1] G A 科恩, J V 韦特. 连续系统数字仿真. 北京: 科学出版社, 1981.
- [2] L 德克尔. 系统仿真中并行处理的现在和未来. 北京: 国防工业出版社, 1981.
- [3] 王正中. 现代仿真计算机的发展与评价. 信息与控制, 1983, 10.
- [4] 周炎勋等编著. 模拟与混合计算技术. 北京: 国防工业出版社, 1980.
- [5] 孙国基等编著. 计算机仿真技术. 北京: 国防工业出版社, 1980.
- [6] 熊光楞编著. 控制系统数字仿真. 北京: 清华大学出版社, 1982.
- [7] G 戈登. 系统仿真. 北京: 冶金工业出版社, 1982.
- [8] I M 史密斯. 工程技术和科研人员用数学模型与数字仿真. 北京: 原子能出版社, 1982.
- [9] A Ben Clymer. Simulation for Training and Decision——Making in Large Scale Control Systems. Simulation, 1982, 35, No. 2, 3, 4, 5.
- [10] 王杨. 训练仿真器概论. 信息与控制, 1984, 2.
- [11] 陈振宇. 仿真技术在冶金自动化方面的应用. 信息与控制, 1983, 4.
- [12] 肖田元等. 数字式船舶操纵训练仿真器. 信息与控制, 1983, 4.
- [13] Robert E Shannon. System Simulation the Art and Science. Prentice-Hall, Inc. Englewood

cliffs, New Jersey, 1975.

- [14] 熊光楞、孙国基. 数字仿真技术及其应用(综述). 信息与控制, 1983, 4.
- [15] G L Xiong, T Y Xiao, Y Wang, J Zhu, Z Y Lin. Digital Ship Manoeuvring Simulation for Training. Modeling and Simulation in Engineering, IMACS Transactions on Scientific Computation, 10th IMACS World Congress, 1982.

第二章 模型与仿真

在第一章中,已经给出了仿真的定义:“系统仿真就是建立系统模型并在模型上进行试验”。由此可知,系统、模型与仿真这三者之间有着密切的关系。简言之,系统是我们研究的对象,模型是系统的描述,而仿真则是模型的试验,计算机仿真则是模型在计算机上的试验。本章将从仿真步骤、建模原则、模型型谱、连续系统的数字模型及仿真方法等方面进一步讲述模型与仿真的关系。

§ 2.1 仿真步骤

根据仿真定义,可以画出仿真的流程,如图 2.1 所示。更为具体地说,可将仿真分成十个步骤^[1]。

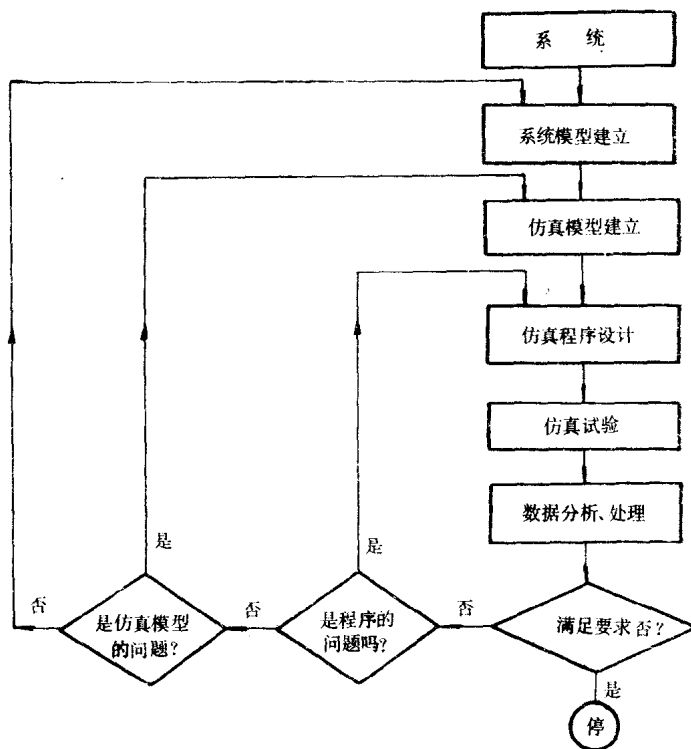


图 2.1 仿真流程图

- (1) 系统定义(System Definition):确定所研究的系统的边界与约束;
- (2) 模型表达(Model Formulation):把实际系统简化或抽象为数学公式或逻辑流程图;
- (3) 数据准备(Data Preparation):核对模型所需要的数据,并简化为适当的形式;
- (4) 模型解释(Model Translation):用计算机可接受的语言描述模型,也即建立仿真模型;
- (5) 确认(Validation):有信心断定实际系统的模型是正确的;
- (6) 战略设计(Strategic Planning):设计一个试验,使之能提供所需要的信息;
- (7) 战术设计(Tactical Planning):决定试验过程应怎样进行,比如修改那些参数等;
- (8) 实验(Experimentation):进行仿真,得出所需要的数据,进行敏感性分析;
- (9) 整理(Interpretation):由仿真的结果进行推断,得到一些设计或改进系统的有益结论;
- (10) 实现(Implementation):使用模型或仿真结果。

上述 10 个步骤的关系如图 2.2 所示。

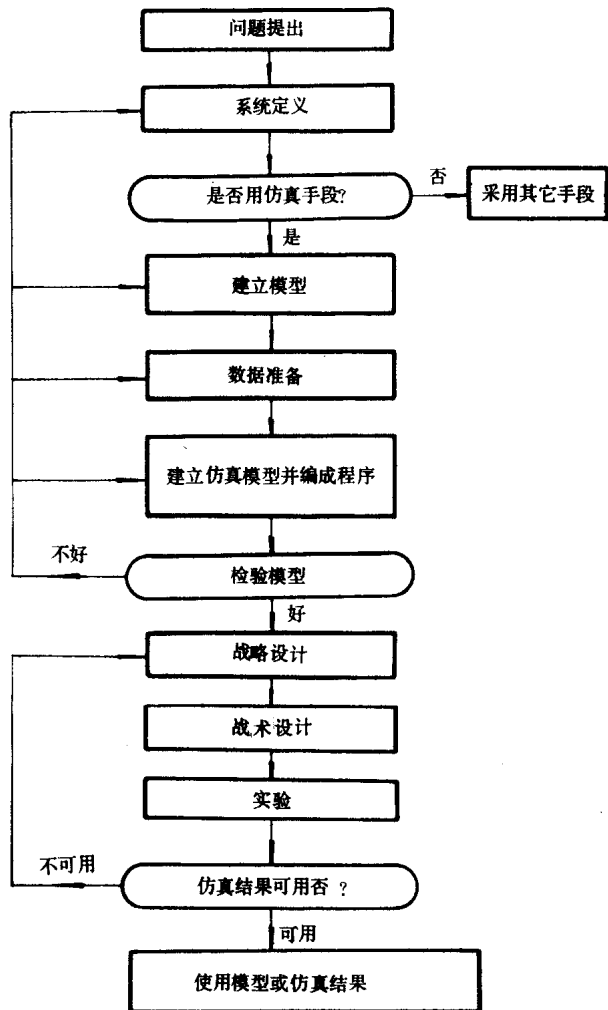


图 2.2 仿真各阶段的关系

总之,模型是进行仿真的先决条件,而反过来,仿真技术又是建立模型的重要手段,即通过仿真可以检验模型并不断使之完善。

§ 2.2 建模原则及模型型谱

一、建模原则

在模型建立时一般应遵循以下四条基本原则

- (1) 清晰性 一个复杂系统通常是由许多子系统组成的,因此对应的系统模型也是由许多子模型组成的。比如第一章 § 1.1 中所介绍的轧钢厂系统,它是由加热子系统、轧制子系统、卷取子系统、冷却子系统等组成。每个系统均有它们相应的子模型,比如轧机主传动系统模

型可以由图 1.1 推导出来。为了使模型简单明了,便于分析与研究,在子模型和子模型之间除掉为了研究目的所必要的信息联系外,相互耦合要尽可能少,结构要尽可能清晰。

(2) 切题性 即模型只应包括与研究目的有用的方面。对于同一个系统,模型不是唯一的,研究目的不同,模型也不同。

(3) 精密性 同一系统的模型按其精密程度可以分为许多级。对于不同的工程考虑,其精密程度要求也各不相同。例如一个水面舰船的数学模型,在对舰船的操纵性进行一般性研究时可采用如下的非线性微分方程:

$$T_1 \ddot{\psi} + T_2 \dot{\psi} + \psi - T_3 \psi^3 = T_4 \delta + T_5 \dot{\delta} \quad (2.1)$$

$$\dot{U} - a_u U^2 + a_v \dot{U}^2 - a_{\delta\delta} \delta^2 U^2 = a_{nn} n^2 + a_{un} n \dot{U} \quad (2.2)$$

其中 ψ 为航向角速度, U 为航速, δ 为舵角, n 为体速。但是若要构造一个舰船训练仿真系统,那么必须考虑风与水流的影响,因此在数学模型上需作适当修改。简单的方法是在(2.1)式及(2.2)式中加一些附加项(详见文献[8])。如果要对舰船进行结构参数的设计,那么数学模型还要更复杂。

(4) 集合性 对于一个系统实体的分割,并不是分得越细越好,相反,为了研究上的方便,可能时要尽量合并为大的实体,即集合性要高。比如对反导弹系统的研究,无需分割出每一枚导弹发射的细节,重要的是考虑当许多导弹发射后成功的概率。

二、建模方法

系统模型的建立大致有三种方法:

(1) 演绎法 根据构成系统的基本原理,从理论上建立描述该系统中各部分的数学表达式或逻辑表达式;

(2) 归纳法 根据系统输入输出数据的分析及处理来建立系统的模型;

(3) 演绎归纳相结合方法。

通常对于那些内部结构和特性基本清楚的系统,如电子、电路组成的系统,机械系统等,则可以采用第 1 种方法,而对于那些内部结构和特性尚不清楚的系统则一般要采用第 2 种方法,比如生态系统、社会经济系统等。介乎这两者之间的还有一大类系统,对于它们的内部结构和特性有部分了解,但又不甚了解,此时则可采用第 3 种方法。当然,即使对于第 1 类系统,有时在演绎推导出模型结构后,尚需通过实验方法来确定出它们的参数,因此第 3 种方法是用得最多的。

三、模型型谱

根据建模理论,我们可以将各种类型的系统按照我们已经对它们的认识程度画出如图 2.3 所示的型谱。谱的右端是白色的,表示人们已经对这些系统的物理规律有了比较深入的了解,因此基本上可以通过演绎的方法来建立它们的数学模型。谱的中间是灰色的,表示人们对这些系统了解得尚不甚清楚,因此要通过演绎与归纳相结合的方法来建立它们的模型,而谱的左端则是黑色的,表示人们对这些系统了解得还很不清楚,主要是通过归纳方法来建立模型,由于数据掌握得不够多,所以模型的准确度一般来说是比较差的。

模型的型谱与模型的形式之间有着密切的关系。图 2.4 进一步画出了各种系统的模型形式。对于接近白色的动力学系统、电子电路系统、空间系统及过程控制系统,主要是用常微分方程来描述,而接近灰色的空气污染系统、水文液动系统则主要是用偏微分方程来描述;至于灰度较大的生理学、生态学系统,虽然在空间上也是分布的,但由于目前对它们的认识程度还不