

系/统/仿/真

◇ 刘藻珍 魏华梁 编

北京理工大学出版社

391.9
7

系 统 仿 真

刘藻珍 魏华梁 编

北京理工大学出版社

JS136/11

内 容 简 介

系统仿真是一门实践性很强的综合性新兴学科,它为复杂系统的分析、设计和研究提供理论方法和重要的技术手段。本书着重介绍系统建模和仿真的基本原理、方法和技术,内容包括:系统仿真的基本理论与基本概念;系统建模方法学与模型处理技术;连续系统仿真方法学;连续模型的离散化处理方法;面向结构图的仿真方法与仿真软件;采样系统仿真;半实物实时仿真;模型验证理论与方法;离散事件系统仿真基础等。

本书可作为控制理论与控制工程,导航、制导与控制,探测、制导与控制技术,系统工程等专业研究生和高年级本科生的教材或参考书,亦可供相应领域工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

系统仿真/刘藻珍,魏华梁编. —北京:北京理工大学出版社,1998.8
ISBN 7-81045-466-8

I. 系… II. ①刘… ②魏… III. 系统仿真 IV. TP391.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 18823 号

责任印制:李绍英 责任校对:陈玉梅

北京理工大学出版社出版发行

(北京市海淀区白石桥路 7 号)

邮政编码 100081 电话 (010)68912824

各地新华书店经售

北京地质印刷厂印刷

*

787 毫米×1092 毫米 16 开本 18 印张 441 千字

1998 年 8 月第 1 版 1998 年 8 月第 1 次印刷

印数:1—2000 册 定价:26.50 元

※图书印装有误,可随时与我社退换※

出版说明

在 21 世纪即将来临之际,根据兵器工业科学技术与经济发展对于人才素质和质的要求,兵器工业总公司教育局组织兵工专业教学指导委员会制定了《兵器工业总公司“九五”教材编写与出版规划》。在制定规划的过程中,我们力求贯彻国家教委关于“抓重点,出精品”的教材建设方针,根据面向 21 世纪军工专业课程体系和教学内容改革的总体思路,本着“提高质量,保证重点”的原则,精心遴选了在学校使用两遍以上,教学效果良好的部分讲义列入教材规划,兵工专业教学指导委员会的有关专家对于这些规划教材的编写大纲都进行了严格的审定。可以预计,这批“九五”规划教材的出版将促进兵工类专业教育质量的提高、教学改革的深化和兵器科学与技术的发展。

本教材由中国系统仿真学会理事李钟武教授主审。

殷切地希望广大读者和有关单位对本教材编审和出版中的缺点与不足给予批评指正。

1998 年 5 月 17 日

前 言

本教材是根据兵器工业总公司“九五”教材编写规划,由北京理工大学“211 工程”学科建设小组推荐出版的研究生教材,可供控制理论与控制工程,导航、制导与控制,探测、制导与控制技术,系统工程等专业研究生和高年级本科生使用,亦可供相应领域工程技术人员参考。

系统仿真是一门建立在相似理论基础上的、基于模型实验的、正在不断发展和完善的综合性学科,它为系统分析、研究、设计、决策等提供了强有力的理论方法和技术手段。在系统仿真学科发展的前期,其研究重点放在仿真模型本身的建立这一活动过程中,即在建立起系统模型以后,依据该系统模型设计相应算法,并在此基础上进行二次模型化以便使系统模型成为计算机能够接受的程序代码,然后在计算机上运行。由此发展了各种仿真算法、仿真程序和软件。相对而言,对系统仿真学科本身的理论基础、系统建模方法学、模型校核与验证的理论和研究方法研究较少。

进入 80 年代以后,随着计算机技术的发展,仿真技术应用领域的不断扩大,系统仿真学科研究的日益深入以及大量共性技术问题的不断出现,人们开始普遍重视系统模型建立、模型有效性和仿真结果分析方法等技术问题。

本教材有以下特点:1. 强调基本概念,突出基本理论和基本方法,对仿真中的一些基本概念,如系统、模型、系统相似性、模型校核与验证以及与之相关的属性,做了比较系统、明确的表述,从而使这类教材在系统化、理论化方面前进了一步;2. 适当吸收了近几年来仿真领域的一些新知识、新理论和新方法,如模型校核与验证的基本概念、理论与方法等,以使读者对国内外系统仿真技术的最新发展有所了解;3. 力求做到理论性和实践性的有机统一,便于教学和自学;4. 结合实际工程背景,精选了适量的例题和习题。

全书共分九章。第一章介绍了系统仿真学科的基础理论——相似理论与基本概念——系统、模型、仿真,旨在使读者对系统仿真学科的理论基础能有较为深刻的了解;第二~六章详细讲解连续系统仿真的基本理论和基本方法;第七章简略地介绍了实时半实物仿真的一些基本知识,这是系统仿真科学在航空、航天、武器等研究领域的具体应用;第八章讨论了模型校核与验证的基本概念、理论和方法,以跟踪国内外系统仿真技术的最新发展;第九章对离散事件系统仿真做了简单的介绍。全书参考教学时数为 50~60,由于系统仿真是一门实践性很强的技术性学科,所以应安排不少于 10 学时上机实验。

本书是在总结多年教学实践经验和科学研究成果并参考国内外有关资料的基础上形成的。在编写过程中借鉴了北京理工大学系统与仿真教研室其他老师在教学和科研中的实际经验,特别是邹静涛教授还在百忙之中给予了精心指导,提出了许多宝贵意见;教研室全体老师给予了很大帮助和支持,在此一并致以诚挚的谢意!本教材的出版得到北京理工大学教材科和北京理工大学出版社的大力支持,作者表示感谢!借此机会,对本教材中所有引用文献的作

者,以及帮助编者按时完成编写任务的所有同志致谢。

本教材由中国系统仿真学会理事李钟武教授担任主审。

由于作者水平有限,对某些问题理解的尚不是十分透彻,书中难免缺点、错误和不妥之处,殷切希望广大读者批评指正。

编 者

1998 年 5 月

目 录

第一章 绪 论

1.1 系统仿真的基本概念	(1)
1.2 计算机仿真	(9)
1.3 系统仿真技术及应用	(11)
思考与练习	(13)
参考文献	(14)

第二章 系统建模方法学与模型处理技术

2.1 数学模型分类	(16)
2.2 建模方法学	(20)
2.3 控制系统数学模型之间的转化关系	(39)
2.4 非线性模型的线性化	(48)
2.5 高阶模型的简化处理	(51)
思考与练习	(52)
参考文献	(58)

第三章 连续系统数值积分仿真方法学

3.1 连续系统数值积分法基本原理	(59)
3.2 Runge-Kutta 积分法	(64)
3.3 线性多步法	(69)
3.4 数值积分法稳定性分析	(72)
3.5 数值积分法的选择与计算步距的确定	(75)
3.6 通用仿真程序	(79)
练习与上机实验	(102)
参考文献	(104)

第四章 连续系统模型的离散化处理方法

4.1 替换法	(105)
4.2 根匹配法	(114)
4.3 离散相似法	(117)
练习题	(136)
参考文献	(137)

第五章 面向结构图的仿真方法与仿真软件

5.1 线性系统模拟结构图法仿真原理	(138)
5.2 基于数值积分方法面向结构图的仿真软件	(142)

5.3 基于离散相似法面向结构图的仿真程序.....	(149)
练习与上机实验.....	(153)
参考文献.....	(155)

第六章 采样控制系统仿真

6.1 采样控制系统仿真概述.....	(156)
6.2 采样系统仿真的一般方法.....	(158)
6.3 多回路与多速率采样系统的仿真.....	(163)
习题与上机实验.....	(169)
参考文献.....	(171)

第七章 实时半实物仿真

7.1 半实物仿真概述.....	(172)
7.2 半实物仿真系统组成、主要设备及技术要求	(176)
7.3 专用仿真软件.....	(186)
7.4 实时仿真算法与并行仿真算法.....	(187)
参考文献.....	(192)

第八章 模型的校核、验证与认可

8.1 系统模型的校核、验证与认可的基本概念	(193)
8.2 模型校核与验证的一般性策略.....	(195)
8.3 常用模型验证方法理论分析.....	(200)
参考文献.....	(231)

第九章 离散事件系统仿真基础

9.1 基本概念和建模方法.....	(232)
9.2 排队系统仿真.....	(235)
9.3 Petri 网的仿真	(245)
9.4 离散事件系统仿真语言.....	(248)
9.5 离散事件系统仿真研究的一般步骤.....	(252)
9.6 随机数和随机变量的生成原理.....	(253)
参考文献.....	(262)

附 录

附录一 GSP 程序清单	(263)
附录二 GSP 程序的屏幕调用关系	(278)
附录三 RKM34 程序清单	(279)

第一章 绪 论

系统仿真是本世纪 40 年代末以来伴随着计算机技术的发展而逐步形成的一门新兴学科。仿真 (Simulation) 就是通过建立实际系统模型并利用所建模型对实际系统进行实验研究的过程。自 40 年代仿真技术与计算机技术结合以来,先后出现了模拟机仿真、混合机仿真(模拟与数字技术相结合)、数字机仿真以及数学-物理仿真(数学模型与物理效应模型相结合)。最初,仿真技术主要用于航空、航天、原子反应堆等代价昂贵、周期长、危险性大、实际系统试验难以实现的少数领域,后来逐步发展到电力、石油、化工、冶金、机械等一些主要工业部门,并进一步扩大到社会系统、经济系统、交通运输系统、生态系统等一些非工程系统领域。可以说,现代系统仿真技术和综合性仿真系统已经成为任何复杂系统特别是高技术产业不可缺少的分析、研究、设计、评价、决策和训练的重要手段,其应用范围在不断扩大,应用效益也日渐显著。

本章主要讲述系统仿真的基本概念,并说明系统仿真技术的应用范围及其今后的发展方向。

1.1 系统仿真的基本概念

从普遍意义上讲,仿真技术是应用于系统的,就是说系统是仿真的研究对象,而系统模型化又是进行仿真的核心和必要前提,可见,系统、系统模型和系统仿真三者之间是密切相关的。

1.1.1 系 统

“系统”是一个内涵十分丰富的概念,是关于“系统”研究的各个学科所共同使用的一个基本概念,是系统科学和系统论研究的一个重要内容。

G. 戈登(G. Gordon)在《系统仿真》一书中曾这样写道:“系统这个术语在各个领域用得如此广泛,以致很难给它下一个定义,一方面要使这个定义足以概括它的各种应用,另一方面又要能简明地把这个系统应用于实际。”

系统一词,的确很难用简明扼要的文字准确地定义,因为它实在是包罗万象。关于它的定义,国内外学术界从不同的角度提出了种种不同的看法。这里我们给出一种普遍接受的定义:

系统是由相互联系、相互制约、相互依存的若干组成部分(要素)结合在一起形成的具有特定功能和运动规律的有机整体。

上述定义中的各组成部分通常被称为子系统或分系统,而系统本身又可以看作为它所从属的那个更大系统的组成部分。

考察以下几个实际系统。

图 1.1 所示是一个加热炉温度调节系统,它是一个工程系统。在这个系统中,给定温度值

与温度计所测到的实际温度进行比较,得到温度偏差,这个温度偏差被送到调节器中用来控制加热炉的喷油量,从而实现控制加热炉温度的目的。

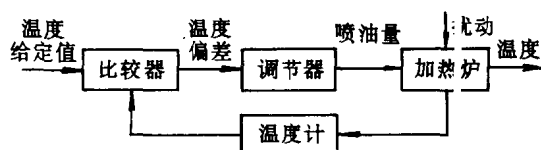


图 1.1 加热炉温度控制系统

图 1.2 所示为人体手臂位置控制系统,是一个非工程系统。在这个系统中,首先是眼睛观察到书本的位置,并将这一位置信息传给大脑,大脑控制手臂去取书,在手臂伸向书本的运动过程中,眼睛时刻都在把手与书之间的相对位置信号传输给大脑以便做出正确的决策,最终取到书。

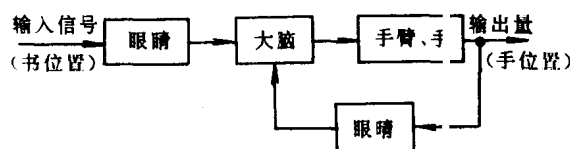


图 1.2 人作为闭环系统的方块图

图 1.3 所示的工厂系统属于非工程系统。在这个系统中有多多个生产部门和管理部门,各个部门各负其责;同时各个部门之间又相互联系,一旦某一部门发生问题而影响到该部门的生产与管理情况时,也势必影响到其它部门的生产与管理。

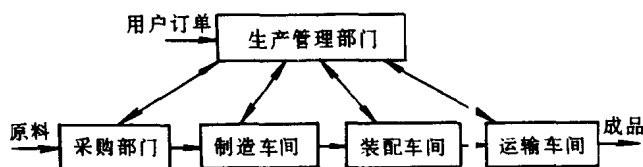


图 1.3 工厂经济管理系统

以上几个系统的物理性质、功能、构成是截然不同的,然而它们却具有以下共性:

(1) 系统是实体的集合。这里的实体指组成系统的个体。加热炉系统中的实体有:比较器、调节器、加热炉、温度计等;工厂系统中的实体有:车间、部门、订单、原料、零件、产品等。

(2) 组成系统的实体具有一定的属性。属性指组成系统的每一实体所具有的全部有效特征(如状态和参数等)。在加热炉系统中,温度、温度偏差、喷油量等是属性;在工厂系统中,产品类型和数量、零件的质量和数量、各部门所拥有的设备性能、机器数量、员工的素质和数量等是各实体的属性。

(3) 系统处于活动之中。活动是指实体随时间推移而发生的属性变化。加热炉系统的主要活动是控制喷油量的变化;而工厂系统中各车间的生产过程就是该系统的主要活动。

各种系统,不论是简单的还是复杂的,总是由一些实体组成的,而每一实体又有其属性,整个系统有其主要活动。因此,实体、属性与活动构成了系统的三大要素。把由这三大要素组成的系统整体性能状态称为系统状态。研究系统,往往是研究系统状态的变化即研究系统的动

态特性和运动规律。

系统有各种各样的分类方法,比如说,可以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)和离散事件系统(用逻辑条件或流程图来描述的系统);或者按照系统的物理结构和数学性质将系统分为线性系统和非线性系统;定常系统和时变系统;集中参数系统和分布参数系统等等。

1.1.2 模 型

为了研究系统,从理论上讲可以用实际系统来作试验。但是往往出于经济、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,而希望在模型上进行试验;另外,在一个系统未建立之前,为预见它的性能,要用实际系统作试验也是不可能的。因此必须借助于系统的模型。

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。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。模型一般分为物理模型和数学模型两大类。

一、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,如风洞试验的飞行器外形和船体外形,或生产过程中试制的样机模型,如导弹上的陀螺、导引头样机等。

二、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。通过对系统的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。

数学模型又可以分为静态模型和动态模型两类。

1. 静态模型

静态模型的一般形式是代数方程、逻辑表达式。如理想电位器的转角和输出电压之间的关系式或继电器的逻辑关系式等。

2. 动态模型

(1) 连续系统模型。连续系统模型有确定性模型和随机模型,确定性模型又分为集中参数模型和分布参数模型两种。集中参数模型描述系统运动用的是微分方程、状态方程和传递函数。而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。这种系统的特性其实是连续的,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 模型分类

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

1.1.3 系统仿真

一、系统仿真的定义

仿真界专家和学者对仿真下过不少定义。艾伦(A. Alan)在 1979 年 8 月出版的“仿真”期刊上对众多的定义进行了综述,其中雷诺(T. H. Naylor)于 1966 年在其专著中对仿真作了如下定义:“仿真是在数字计算机上进行试验的数字化技术,它包括数字与逻辑模型的某些模式,这些模型描述某一事件或经济系统(或者它们的某些部分)在若干周期内的特征。”其它一些定义只对仿真作一些概括的描述:仿真就是模仿真实系统;仿真就是利用模型来作实验等等。从这些有关仿真的定义中不难看出,要进行仿真试验,系统和系统模型是两个主要因素。同时由于对复杂系统的模型处理和模型求解离不开高性能的信息处理装置,而现代化的计算机又责无旁贷地充当了这一角色,所以系统仿真(尤其是数学仿真)实质上应该包括三个基本要素:系统、系统模型、计算机。而联系这三项要素的基本活动则是:模型建立、仿真模型建立和仿真试验。

系统仿真技术作为分析和研究系统运动行为、揭示系统动态过程和运动规律的一种重要的手段和方法,随着 40 年代第一台计算机的诞生而迅速发展。特别是近些年来,随着系统科学研究的深入,控制理论、计算技术、信息处理技术的发展,计算机软件、硬件技术的突破,以及各个领域对仿真技术的迫切需求,使得系统仿真技术有了许多突破性的进展,在理论研究、工程应用、仿真工程和工具开发环境等许多方面都取得令人瞩目的成就,形成一门独立发展的综合性科学。

综合国内外仿真界学者对系统仿真的定义,可对系统仿真做如下的定义:

系统仿真是建立在控制理论、相似理论、信息处理技术和计算技术等理论基础之上的,以计算机和其它专用物理效应设备为工具,利用系统模型对真实或假想的系统进行试验,并借助于专家经验知识、统计数据和信息资料对试验结果进行分析研究,进而做出决策的一门综合性的和试验性的学科。

上述定义中的计算技术,除了包含通常意义下的计算理论和技术,还应该包括现代运筹学的绝大部分内容。对信息理论、控制理论、运筹学等概念和术语,文献[1.15]和其它一些有关系统科学和系统工程的著作都给予了明确的解释。定义中模型可以是定量的,也可以是定性的;可以是物理的,也可以是数学的,或者是它们的综合。要对某一系统进行研究,其“白色”部

分,可以建立定量的解析模型;“灰色”部分则可以通过实验、观测和归纳推理获得其模型结构,并根据专家经验和知识来辨识其参数;而对于“黑色”部分则只能借助于各种信息知识(感性的、理性的、经验的、意念的、行为的等)给予定性描述。

二、相似理论

相似理论是系统仿真学科的最主要的基础理论之一。相似理论包括相似性原理、相似方式和实现相似的方法。

1. 相似性原理

相似性是一个非常朴素和极其普遍的概念,是自然界一种普遍存在的现象。

相似性原理就是指按某种相似方式或相似规则对各种事物进行分类,获得多个类集合;在每一个类集合中选取一个具体事物并对它进行综合性研究,获得有关信息、结论和规律性的东西;这种规律性的东西可以方便地推广到该类集合的其它事物中去。

图 1.4 所示车厢支撑系统(机械的)与一个振荡电路(电系统),其数学模型分别如下:

机械系统的数学模型: $M \frac{d^2 x}{dt^2} + D \frac{dx}{dt} + Kx = F(t)$

电系统的数学模型: $L \frac{d^2 q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{1}{C}q = E(t)$

式中 M 为惯性; D 为阻尼; K 为弹性比例; x 为位移;

L 为电感; R 为电阻; C 为电容; q 为电量。

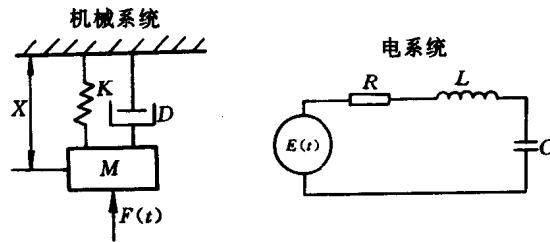


图 1.4 机械系统与电系统互为相似模型

这两个系统的数学模型是互为相似的,这使得我们可以通过研究电系统来揭示机械系统的运动规律;另外,对于电系统本身而言,其数学模型又相似于实际的电系统,故又可以借助数学模型研究实际系统的运动规律。

再如,对下述方程

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0$$

可以描述不同系统,如果 φ 是温度,则上述方程表示固体中的温度场;如果 φ 是势,上述方程可以表示导体中的电势场;如果 φ 是重力,则上述方程表示重力场。

对于相似性,有以下定理。

相似定理 1 以 S 表示系统整体或其部分所具有的某些特征,则相似具有下列性质:

- (1) 自反性。 $S \sim S$ (这里符号 $\sim$ 表相似)
- (2) 对称性。即若 $S_1 \sim S_2$, 则 $S_2 \sim S_1$ 。
- (3) 传递性。若 $S_1 \sim S_2$, $S_2 \sim S_3$, 则 $S_1 \sim S_3$ 。

对于(3)应该指出,传递性会直接影响相似度,即 S_1 与 S_2 , S_2 与 S_3 以及 S_1 与 S_3 之间的

相似度可能两两都不相等。

相似定理 2 相似具有下列性质:

(4) 相似的系统可用文字相同的方程组描述,或者说它们具有相同的数学描述。

(5) 表征相似系统的对应量在四维空间(通常意义下的三维空间加上一维的时间空间)互相匹配且成一定的比例关系。

(6) 由于描述相似系统的对应量互成比例,同时描述相似系统的方程又是相同的,所以各对应量的比值(相似倍数)不能是任意的,而是彼此相约束的。

2. 相似方式

在系统仿真学科中有多种相似方式,如

(1) 比例相似。比例相似包括几何相似和综合参量比例相似。

几何比例相似是几何尺寸按一定比例放大或缩小,如飞行器的风洞试验模型,就是按照几何相似原则制作的。而将原始方程变换成模拟计算机的排题方程或某些定点运算的仿真计算机的仿真程序,就是按照综合参量比例相似原则进行变换的。

(2) 感觉信息相似。感觉相似包括运动感觉信息相似、视觉相似和音响感觉相似等。各种训练模拟器及当前正蓬勃兴起的虚拟现实技术,都是应用感觉信息相似的例子。

(3) 数学相似。应用原始数学模型,仿真数学模型,数字仿真或模拟仿真,近似地而且尽可能逼真地描述某一系统的物理或主要物理特征,则为性能相似。

(4) 逻辑相似。思维是人脑对客观世界反映在人脑中的信息进行加工的过程,逻辑思维是科学抽象的重要途径之一,它在感性认识的基础上,运用概念、判断、推理等思维形式,反映客观世界的状态与进程。由于客观世界的复杂性,人们的认识在各方面都受到一定的限制,人的经验也是有限的,因此人们用以分析、综合事物的思维方法以及由此而得出的结论,一般来说也只能是相似的。

3. 相似方法

而实现相似的方法也是多种多样的,下面给出几种常用的方法。

(1) 模式相似方法。模式相似方法又包括统计决策法和句法(或结构)方法。

统计决策法是指选择某一类事物的特征空间的某些典型或主要特征,实际上是使特征空间降维,设计有效的模式分类器。在多类多特征情况下,则设计有效的多级判决树形模式分类器。对某种要求识别其模式的事物,按一定操作步骤,经若干次与参考模式的匹配,即可判别待识别的事物的类别。

句法(或结构)方法,将事物的模式类比语言中的句子,借用形式语言来描述和表达模式。待分类的模式,只需根据各模式方法进行句法分析即可判别它的类型,并给出其结构描述。

无论哪种模式识别方法,其识别结果都是对实际模式的相似。

(2) 模糊相似法。如果说概率统计是研究一级不确定性问题的话,那么模糊理论则是研究双重或多级不确定性。

对仿真系统来说,相似方法是用来分析仿真系统与真实系统的相似程度(精度)。仿真系统在很多情况下确实存在模糊问题,需要用模糊相似方法才能进行分析研究。

(3) 组合相似方法。在仿真系统中,即使各个部件和子系统均已获得精度足够高的相似处理,已经满足各自的性能指标,但未必能保证系统的整体性能满足要求,故有必要对各子系统建立组合相似模块并进行综合补偿处理,形成组合相似方法,以适应不同模态和不同情况

(4) 坐标变换相似方法。坐标变换相似法是研究空中运动体系统不可缺少的一种方法, 经常用于飞行器状态数学模型中, 在视景系统的相似变换中更是常用。

该图展示了计算机集成制造系统(CIMS)的组成结构。中心是一个名为“管理调度”的大圆，它通过粗实线（表示数据流）与周围的各个子系统相连。这些子系统包括：

- 生产处理 MIS**: 位于左下方，接收来自“材料”和“财务”的数据。
- 控制系统 CAD**: 位于左上方，包含“部件性能设计”、“软件开发”和“可靠性分析”等子模块。
- 数字仿真 CAS**: 位于顶部中央。
- 测试 CAT**: 位于顶部右侧。
- 部件结构设计 可靠性计算 CAE**: 位于右上方，接收来自“机构部件”、“电器部件”和“电子部件”的数据。
- 人、机实时仿真 CAS**: 位于右侧中间。
- CAD/CAM**: 位于右下方，包含多个子模块：
 - 一个接收来自“CAD/CAM”和“检测 CAT”数据的子模块。
 - 一个接收来自“CAS”和“电子部件”数据的子模块。
 - 另一个接收来自“CAD/CAM”数据的子模块。
- 宏观决策全局分析 DMS**: 位于底部中央，包含“可行性论证”、“三坐标论证”和“CAS”子模块。

此外，图中还显示了不同层级的信息流：粗实线代表数据流，细实线代表控制流，虚线代表计划流。例如，从“生产处理 MIS”到“宏观决策全局分析 DMS”，再到“控制系统 CAD”，最后到“生产处理 MIS”形成了一个完整的信息循环。

图中英文缩写: DMS(Decision Management) CAD(Computer Aided Design)
CAT(Computer Aided Test) CAE(Computer Aided Engineering)
CAS(Computer Aided Simulation)
CAD/CAM(Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing)
MIS(Management Information System)

依据不同的分类标准,可将系统仿真进行不同的分类。如:

连续系统仿真是指对那些系统状态量随时间连续变化的系统的仿真研究,包括数据采集与处理系统的仿真。这类系统的数学模型包括连续模型(微分方程等),离散时间模型(差分方程等)以及连续-离散混合模型。

(2) 按仿真实验中所取的时间标尺 τ (模型时间) 与自然时间 (原型) 时间标尺 T 之间的比例关系可将仿真分为实时仿真和非实时仿真两大类。若 $\tau/T = 1$, 则称为实时仿真, 否则称为

非实时仿真。非实时仿真又分为超实时 $\tau/T > 1$ 和亚实时 $\tau/T < 1$ 两种。

(3) 按照参与仿真的模型的种类不同,将系统仿真分为物理仿真、数学仿真及物理-数学仿真(又称半物理仿真或半实物仿真)。

物理仿真,又称物理效应仿真,是指按照实际系统的物理性质构造系统的物理模型,并在物理模型上进行试验研究。物理仿真直观形象,逼真度高,但不如数学仿真方便;尽管不必采用昂贵的原型系统,但在某些情况下构造一套物理模型也需花费较大的投资,且周期也较长,此外在物理模型上作试验不易修改系统的结构和参数。

数学仿真是指首先建立系统的数学模型,并将数学模型转化成仿真计算模型,通过仿真模型的运行达到对系统运行的目的。现代数学仿真由仿真系统的软件/硬件环境,动画与图形显示、输入/输出等设备组成。数学仿真在系统分析与设计阶段是十分重要的,通过它可以检验理论设计的正确性与合理性。数学仿真具有经济性、灵活性和仿真模型通用性等特点,今后随着并行处理技术、集成化软件技术、图形技术、人工智能技术和先进的交互式建模/仿真软硬件技术的发展,数学仿真必将获得飞速发展。

物理-数学仿真,又称为半实物仿真,准确称谓是硬件(实物)在回路中(Hardware In the Loop)的仿真。这种仿真将系统的一部分以数学模型描述,并把它转化为仿真计算模型;另一部分以实物(或物理模型)方式引入仿真回路。半实物仿真有以下几个特点:

(1) 原系统中的若干子系统或部件很难建立准确的数学模型,再加上各种难以实现的非线性因素和随机因素的影响,使得进行纯数学仿真十分困难或难以取得理想效果。在半实物仿真中,可将不易建模的部分以实物代之参与仿真试验,可以避免建模的困难。

(2) 利用半实物仿真可以进一步检验系统数学模型的正确性和数学仿真结果的准确性。

(3) 利用半实物仿真可以检验构成真实系统的某些实物部件乃至整个系统的性能指标及可靠性,准确调整系统参数和控制规律。在航空航天、武器系统等研究领域,半实物仿真是不可缺少的重要手段。

四、系统仿真的一般过程与步骤

1. 系统仿真的一般过程

系统仿真对系统进行试验研究的综合性技术学科。对于任一项系统的仿真研究都是一项或简或繁的系统工程,特别是对复杂系统或综合系统的总体仿真研究是一件难度很大的工作。诸如系统仿真实验总体方案设计,仿真系统的集成,仿真试验规范和标准的制定,各类模型(数学模型、物理模型、由数学模型转换而来的仿真模型等)的建立、校核、验证及确认,仿真系统的可靠性和精度分析与评估,仿真结果的认可和置信度分析等等,涉及面十分广泛。为了使仿真试验顺利进行并获得预期效果,必须把针对某一实际系统的仿真试验切切实实作为一项系统工程来抓。通常系统仿真试验是为特定目的而设计的,是为仿真用户服务的,因此,复杂的系统仿真试验需要仿真者与仿真用户共同参与,从这个意义上讲,仿真试验过程应包括这样几个阶段工作:

(1) 建模阶段。在这一阶段中,通常是先分块建立子系统的模型。若为数学模型则需要进行模型变换,即把数学模型变为可以在仿真计算机上运行的模型,并对其进行初步的校验;若为物理模型,它需在功能与性能上覆盖系统的对应部分。然后根据系统的工作原理,将子系统的模型进一步集成为全系统的仿真实验模型。

(2) 模型实验阶段。在这一阶段中,首先要根据实验目的制定实验计划和实验大纲,在计

划和大纲的指导下,设计一个好的流程,选定待测量变量和相应的测量点,以及适当的测量仪表。之后转入模型运行,即进行仿真实验并记录结果。

(3) 结果分析阶段。结果分析在仿真过程中占有重要地位。在这一阶段中需要对实验数据进行去粗取精、去伪存真的科学分析,并根据分析结果作出正确的判断和决策。因为实验结果反映的是仿真模型系统的行为,这种行为能否代表实际系统的行为,往往得由仿真用户或熟悉系统领域的专家来判定。如能得到认可,则可以转入文档处理,否则,需返回建模和模型实验阶段查找原因,或修改模型结构和参数,或检查实验流程和实验方法,然后再进行实验,如此往复,直到获得满意的结果。

2. 系统仿真的步骤

对于一般意义下的系统仿真,通常将它分为以下十个步骤:

(1) 系统定义(System Definition)。确定所研究系统的边界条件与约束。

(2) 数据准备(Data Preparation)。收集和整理各类有关信息,简化成适当形式,同时对数据可靠性进行核实,为建模做准备。

(3) 模型表达(Model Formulation)。把实际系统抽象成数学公式或逻辑流程图,并进行模型验证(Validation)。

(4) 模型变换(Model Translation)。用计算机语言描述模型,即建立仿真模型,并进行模型校核(Verification)。

(5) 模型认可(Model Accreditation)。断定所建立的模型是否正确合理,是整个建模与仿真过程中极其困难而又非常重要的一步,与模型校核,模型验证及其它各步都有密切联系。

(6) 战略设计(Strategic Planning)。根据研究目的和仿真目标,设计一个试验,使之能提供所需要的信息。

(7) 战术设计(Tactical Planning)。确定试验的具体流程,如仿真执行控制参数、模型参数与系统参数等。

(8) 仿真执行(Simulation Execution)。运行仿真软件并驱动仿真系统,得出所需数据,并进行敏感性分析。

(9) 结果整理(Result Interpretation)。由仿真结果进行推断,得到一些设计和改进系统的有益结论。

(10) 实现与维护(Implementation and maintenance)。使用模型或仿真结果,形成产品并进行维护。

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。按照所使用的计算机的种类不同,可将计算机仿真分为模拟计算机仿真、数字计算机仿真和混合计算机仿真。

1.2.1 模拟计算机仿真

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等。模拟计算机的基本运算部件为加(减)法器、积分器、乘法器、函数器和其它非线性部件。这些运算部件的输入输出变量都是随时间连续变化的模拟量电压,故称为模拟计