

舰船动力装置 系统仿真

张维竞 主编

JIANCHUAN DONGLI ZHUANGZHI
XITONG FANGZHEN

上海交通大学出版社

内 容 提 要

本书主要介绍计算机仿真技术在舰船动力装置动态特性仿真分析、研究中的应用。包括计算机仿真技术的基本知识和理论,建立连续系统数学模型和仿真模型的方法和途径, MATLAB 和 SIMULINK 在舰船动力工程中系统建模的应用方法等。最后,概要介绍病态系统仿真实用技术和系统仿真优化的理论。

本书主要是为高等院校轮机工程高年级本科生、研究生的有关专业课程编写的教材,也可用作船舶与海洋工程、热能与动力工程等专业的选修课教学用书,对从事舰船工程及舰船动力工程相关科研工作的科技人员也有一定的参考价值。

图书在版编目 (C I P) 数据

舰船动力装置系统仿真 / 张维竞主编. —上海: 上海交通大学出版社, 2006
ISBN 7 - 313 - 04562 - X

I. 舰... II. 张... III. 船舶—动力装置—系统仿真—高等学校—教材 IV. U664.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 101719 号

舰船动力装置系统仿真

张维竞 主编

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路 877 号 邮政编码 200030)

电话: 64071208 出版人: 张天蔚

上海颀辉印刷厂印刷 全国新华书店经销

开本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 10.75 字数: 258 千字

2006 年 12 月第 1 版 2006 年 12 月第 1 次印刷

印数: 1—3050

ISBN 7 - 313 - 04562 - X/U · 138 定价: 22.00 元

版权所有 侵权必究

前 言

本书是在 15 年的教学积累基础上编写而成的。20 世纪 90 年代初编者上海交通大学动力机械类高年级本科生开设了相关课程,并编写了讲义。多年来又为轮机工程、船舶与海洋工程的研究生讲授此课程。在“九五”期间,本书被中国船舶工业总公司船舶动力教材委员会列为船舶动力重点规划教材,但由于编者工作繁忙一直未能出版。目前由于船舶与海洋工程专业本科生和轮机工程研究生教学的需要,本书又被列为上海交通大学重点规划教材,根据计算机仿真技术的发展,对原书稿内容作了一定的补充和修改,编写了此书。

随着我国现代造船工业的发展,在现代新型舰船的设计和建造工程中,计算机仿真技术的广泛应用,在造船设计、研发、制造、营运管理各领域中受到越来越大的关注。作为船舶动力的工程技术人员应当具备相应的知识和计算机技能。基于这个目的,本书给学习和研究船舶与海洋工程、轮机工程的学生介绍一些计算机仿真的基础知识和计算机连续系统动态仿真的基础理论,建立舰船动力系统数学模型和仿真模型方法和途径,以及用 MATLAB 和 SIMULINK 建立舰船动力装置仿真模型的实用技术。最后,概要介绍病态系统仿真实用技术和系统仿真优化的理论。希望本书有助于扩大学生的专业知识面,并为其今后进一步研究计算机仿真技术在船舶动力工程中的应用打下基础。

本书由张维竞教授主编,王长林副教授、赵国光教授分别参加了第 6 章、第 7 章中部分内容的编写。全书由张维竞教授整理并统稿。

本书经海军工程大学陈兆良教授认真审阅,并提出了许多宝贵意见,在此表示谢意。

限于编者的水平,教材中疏漏和不足之处敬请读者不吝赐教,给予批评指正。

编 者

2006 年 5 月于上海交通大学

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 仿真的定义及应用	1
1.2 仿真的分类	2
1.3 计算机仿真在舰船动力装置设计研究中的应用	4
1.4 计算机仿真的发展概况	6
习题一	8
第 2 章 系统和模型	9
2.1 系统的定义	9
2.2 模型的定义及分类	10
2.3 建立数学模型的方法和基本原则	12
习题二	21
第 3 章 连续系统的数学模型及数值解法	22
3.1 连续系统的数学模型	22
3.2 常微分方程数值解法概念	30
3.3 Euler 法	32
3.4 龙格-库塔法(Runge-Kutta)	34
3.5 变步长计算和稳定性问题	37
3.6 阿当姆斯法	40
习题三	44
第 4 章 MATLAB 与仿真程序	45
4.1 初识 MATLAB	45
4.2 MATLAB 仿真技术基础	48
4.3 MATLAB 与仿真程序	60
4.4 面向系统结构图的数字仿真	67
4.5 连续系统离散相似法仿真	77
4.6 非线性系统仿真	85
习题四	90
第 5 章 Simulink 仿真软件	92
5.1 Simulink 简介	92

5.2	Simulink 建模的基本操作	97
5.3	Simulink 常用模块库	102
5.4	仿真运行参数设置	110
5.5	封装子系统	114
	习题五	118
第 6 章	舰船动力装置的数学模型及仿真	119
6.1	船桨模型	120
6.2	柴油机线性化模型	122
6.3	增压柴油机准稳态模型	124
6.4	传动设备模型	137
	习题六	138
第 7 章	病态系统仿真和仿真优化	139
7.1	病态系统的仿真	139
7.2	仿真与系统优化	146
	习题七	161
参考文献		162

第 1 章 概 述

1.1 仿真的定义及应用

仿真这个词在英语中叫 Simulation,关于它的定义国内外许多学者和专家都进行过叙述。目前,比较一致的定义是:仿真就是利用实际系统的模型(物理模型或数学模型)对该系统进行实验和研究。

事实上,利用模型对实际系统进行实验和研究这种仿真技术的运用,可以追溯到我国的古代。例如,东汉时期的曹冲(曹操之子)称象的故事便是一个很好的例子。在曹冲还处在幼年时,为要得到一只大象的体重,他叫人先将大象放到船上,并在船的舷外刻下船的吃水深度。把大象牵上岸后,又将石块一块块放到船上,直到船载大象时的吃水深度。然后再一块块称出石块的重量,累加之便得到了这只大象的体重。曹冲巧妙地利用了浮力原理,用石块间接地得到了大象的体重,这个故事就体现了仿真技术的应用。这种应用在古代人类的建筑和造船等行业中都可以找到。当然那时仅处在这样的一种思想,解决个别的,现在看来容易解决的问题,还不成为一门综合性的技术学科,像今天这样得到如此迅速的推广和应用。

自 20 世纪 40 年代末期电子计算机问世以来,由于武器系统、航空与航天、原子能等研究领域对系统分析、设计、测试、操作培训的迫切需要,使得计算机仿真发展成为一门综合性新技术学科,同时也是一门新的综合性试验学科。现代的仿真技术得到了不断的改进和广泛的应用。它的应用领域涉及:航空与航天、原子能、电力和电子工程、动力工程、机械工程、化学工业、冶金工业、造船工业、交通运输、工业管理、通讯部门、医疗卫生、经济系统、环境系统、生物系统、社会系统等等。

现代仿真技术得到如此广泛的应用,这是因为现代仿真技术借助电子计算机,利用所研究对象的数学模型对实际系统进行分析、研究和实验。因此它具有安全、经济、见效快、可预测、可重复等特点。

1.1.1 经济性

对于某些系统来说,对其作分析和研究或用来培训操作人员,其经济代价是相当昂贵的。有时甚至是不可能的。以仿真技术发展的过程来看,它首先被应用于那些在实际系统上进行研究和实验不仅具有相当的危险性而且经济上将花费很大的领域,如武器系统、航空航天。又如,在现代仿真技术基础上得以应用的各种仿真器(Simulator),其经济性更是显而易见。常见的有:为培训飞行员的飞机仿真器、为培训大型常规电站和核电站操作人员的电站仿真器、为石油化学工业培训技术人员的化工操作培训仿真器、为培养舰船长和轮机人员及其他专门技术人员的舰船仿真器(诸如舰船操纵仿真器、轮机人员训练仿真器、核潜艇训练仿真器、鱼雷攻击训练仿真器)。仿真器中的座舱、驾驶室、操纵室或控制室中的一些指示仪表,操纵装置等是实物外,其他如视景系统、音响系统、振动系统、运动系统均借助计算机技术、自动化技术、光

电技术、机电液压技术得以实现,并由计算机完成实际系统模型的实时解算和通讯。这样的仿真器对实际系统及环境有很高的逼真度,使训练人员有在实际系统中一样的感觉。使用仿真器培养人才可节省为运行实际装置(飞机、舰船、电站等)而消耗的燃料和能源消耗;仿真器的建造一般又比实际系统经济,且人员的培训不受时间和场地的制约,又可重复使用,可见这样的训练途径既经济,又有效率高、见效快、周期短等一系列的好处。

1.1.2 安全性

对于某些实际系统的实验和研究,采用现代仿真技术可以做到安全可靠。比如:武器系统、航空航天、核电站、核潜艇等,出于安全性考虑,都广泛采用仿真技术来设计、分析、研究这些系统,并运用相应的仿真器来训练这些系统的技术人员。飞机仿真器、舰船推进系统装置仿真器以及核电站运行控制仿真器,不仅可以让训练人员进行正常的操作,还可以给出系统的一些典型的故障,让受训人员进行分析判断,并排除之,或采取相应的应急措施。我们知道在实际飞行的飞机上,大型的舰船上或正在运行的核电站上是不可能让训练人员做这些具有危险性的训练的。

1.1.3 预测性

利用现代仿真技术我们可以预测某种或某些技术措施、设计思想、改进方法是否可以达到预期的效果,或者用来验证会不会发生某些问题或后果;而这些问题或后果可能已预见到了,或者根本没有预料到。例如,通过改进一些技术条件来降低一台发动机的能耗,那么发动机的功率、转速、使用寿命将发生什么变化,通过仿真可预先得知曾考虑到或未曾考虑到的一系列问题,这样就可以进一步改进措施以达到预期的效果。

对于一些社会、环境、经济等系统来讲,直接实验并分析研究几乎是不可能的。例如:对未来若干年中某地区人口发展规划并提出计划生育保证人口素质质量的研究;某地区环境污染不断扩展的后果和控制环境污染有效途径的研究只有借助于计算机仿真来预测和分析。

由于利用仿真技术,不仅可以分析、研究一个已有的系统,甚至可以对一个尚未实现或虽已实现还需进一步改进的系统进行分析、研究,所以几乎所有的大型发展项目如阿波罗登月计划、协和式飞机的研制都运用了仿真技术。对于这些现代大型系统来讲,其规模和复杂性是不言而喻的,这就必须要求在实现系统之前,分析、研究各种计划、计划方案的可行性、预测系统的性能和各种参数并不断改进之,以使最终实现的系统达到最佳的性能指标。

1.2 仿真的分类

上一节叙述了仿真的定义,即:仿真就是利用实际系统的模型对该系统进行实验和研究。定义中强调的是借助于模型对一个系统进行实验和研究。所以,通常依据模型的种类可将仿真分成两大类:物理仿真和数学仿真。

如果仿真采用的模型是物理模型,则称为物理仿真。例如:将船舶按比例缩小制作的船模,在拖曳水池中作拖曳试验,以研究实际船舶的阻力特性和抗风浪性能,以便对所设计的船舶的性能和所需功率进行估算。又如:在建造飞机时,为了解飞机受力情况,将飞机按比例缩小制作的飞机模型放入气场相似的风洞中做试验。这些都是利用相似原理进行的物理仿真。

如果仿真采用的模型是数学模型,则称其为数学仿真。由于一般应用数学仿真手段来研究的实际系统其数学模型是十分复杂的,计算工作量相当大,往往要使用计算机才能顺利地进行仿真运行计算,所以在数学仿真中,计算机是一个重要的计算工具,正因为如此,数学仿真被称为“计算机仿真”。

如果按被仿真的系统的类型来划分,可分成两大类,即连续系统的仿真和离散系统的仿真。

所谓“连续”系统是指系统的状态随时间连续变化的系统。这种系统一般可由一组微分方程加以描述。其变量从一个值变到另一个值是平滑和连续变化的。例如:汽车悬置问题的仿真、飞机的飞行姿态仿真、舰船的推进系统动态特性仿真等都是连续系统的仿真。

所谓“离散”系统是指该系统的状态随时间跳跃变化的系统。这种系统中有的要用差分方程来描述,如计算机数据采样系统。多数离散系统带有随机性质,这些系统不可能建立确定的数学模型,要用概率论和排队论的数学方法加以描述。在现实生活中诸如仓库物资管理系统、交通管理系统、电话服务系统、市场服务系统、计算机分时系统等都是此类系统。

如果仿真的主要工具是模拟计算机,则称为模拟计算机仿真,或模拟仿真。模拟计算机由一些模拟运算部件组成,常见的有加法器、乘法器、积分器、函数发生器等。这些部件的输入、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功能。由于模拟计算机的运算是并行的,具有很高的运算速度;但其运算精度受到所用器件本身精度的限制,一般只达千分之几或万分之几,故运算精度不高。模拟仿真是基于数学模型相似原理上的一种仿真方法,故是一种相似仿真技术。因此在建立仿真模型时,还必须考虑时间和幅度比例尺(根据运算部件、外部记录设备的频率响应和模拟电压的上、下限)等问题。模拟计算机适用于连续系统的仿真。

如果仿真的主要工具是数字计算机,则称为数字计算机仿真,或数字仿真。数字计算机由运算器、控制器、存储器、输入和输出设备等组成。由于在数字计算机中,所有的数字运算均要变换成加、减、乘、除等基本运算,然后由运算器按程序计算的逻辑流程一步一步计算完成。也就是说,数字计算机的计算是串行完成的,计算速度受到一定限制。数字计算机的计算精度较高,但只要计算位数和计算方法适当,计算精度就有保证。而且数字计算机具有数据存贮能力大,逻辑处理功能强、通用性能好等优点。采用数字仿真,被仿真的模型及仿真处理过程均可由软件实现,易于修改、调整,故被广泛地应用。数字计算机不仅可用于连续系统的仿真,而且可用于离散系统的仿真。

在计算机仿真中,按有无实物参加仿真实验来分类,又可分为纯计算机仿真和半物理仿真。即若无实物参加仿真实验,称为纯计算机仿真;若有部分实物参加仿真实验则称为半物理仿真。比如:某柴油机的电子调速器是新研制出来的产品,为了充分地研究电子调速器与设计要求是否一致,或者有无需进一步改进的地方,需要做一系列试验。如果在实际的柴油机上试验,显然不经济(需要试验台、设备、耗能),有时安全性差(比如做突卸负荷试验)。若用计算机中该柴油机的数学模型来代替实际的柴油机,即用真实的电子调速器和计算机(代替实际的柴油机)组成一个柴油机调速仿真系统,这种仿真便是半物理仿真。又如:训练飞行员、舰船长以及机车和汽车驾驶员的各类仿真训练器、驾驶舱(室)中的各种指示仪表、操纵器等和实际系统中的实物一般是一样的。而其余物品均由计算机和其他模拟装置代替。不仅如此,被训练的人员也加入了整个系统,即不仅有部分实物而且有人加入了仿真系统,所以也是半物理

仿真。

上述的半物理的计算机仿真,要求仿真模型的时间标尺 t 和实际系统的时间标尺 T 相同。即两者时间比例 $R = \frac{t}{T} = 1$,使得仿真系统的运算时间 t 和真实时间 T 完全同步,这样的仿真就称为实时仿真。对于时间比例尺 $R = \frac{t}{T} \neq 1$ 时的这一类仿真,称为非实时仿真。当时间比例尺 $R < 1$ 时,说明仿真的运行速度比实际系统快,称为超实时仿真;如果时间比例尺 $R > 1$,说明仿真的运行速度比实际系统慢,则称为欠实时仿真。即有:

$$R = \frac{t}{T} \begin{cases} = 1 & (\text{实时仿真}) \\ \neq 1 & (\text{非实时仿真}) \end{cases} \begin{cases} R < 1 & (\text{超实时仿真}) \\ R > 1 & (\text{欠实时仿真}) \end{cases}$$

事实上,上述描述源于模拟计算机仿真。对于计算机数字仿真来说,应当严格地在每一仿真计算步长都要实时完成对实际系统的解算,即在每一计算步长都要满足 $R \leq 1$,这样的数字仿真,才是实时仿真。

如果仿真的主要工具是数模混合计算机,则称为数模混合计算机仿真,或数模混合仿真。这类数模混合计算机,在计算机仿真的发展过程中,按其结构特点曾经有两种主要形式。

(1) 混合模拟机 它是在普通模拟计算机的基础上,增加一些处理数字及逻辑判断功能部件,以满足实际仿真系统的要求。

(2) 数模混合计算机(系统) 它是通过 A/D 和 D/A 等接口将数字和模拟计算机有机地结合在一起,组成的一种新的仿真计算机(系统)。数模混合计算机系统的简单原理图见图 1-1。

显然,这样的数模混合计算机价格一般是相当昂贵的,所以所研究的系统不仅在仿真精度上,而且在仿真速度上均有很高的要求。单一采用模拟计算机或数字计算机无法解决时,一般不会采用这种仿真方法。数模混合计算机适用于被研究系统本身就是一个既含连续系统又含离散系统的混合系统或要求实时和超实时的大系统仿真。

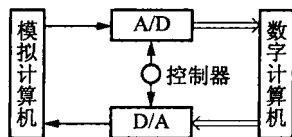


图 1-1 数模混合计算机系统原理图

1.3 计算机仿真在舰船动力装置设计研究中的应用

国外计算机仿真技术在舰船领域的应用研究始于 20 世纪 60 年代末,70 年代取得重大进展,到 80 年代,计算机仿真技术已作为一门十分成熟的技术,应用到舰船领域的各个方面,21 世纪的今天,计算机仿真技术已是舰船设计、试验、制造不可缺少的、重要的方法和手段。

由于现代舰船推进系统机械装置的复杂性,运行工况的多变性,因此其控制系统有很高的要求。而传统的舰船实船试验和推进主机台架试验,从理论上讲,也可以找出最优控制策略;但试验过程繁杂,耗费大,调试周期长。因此,是不现实的。在这种情况下,计算机仿真技术的应用成为必然。

国外海军一开始就十分注意仿真技术在舰船推进装置研究方面的应用。1972 年美国海军某舰发生燃气轮机超速损坏,1974 年美国海岸警备队又发生了试航时调距桨桨叶折断等事

故之后,仿真更加引起了各国海军的重视。在美国海军支持下,美国耗时近20年(其主要部分是从1976年到1982年共6年),研制了一个舰船推进系统动力学及其控制系统研究的发展纲要。

20世纪70年代初期,C. J. Rubis就对一艘由带调距桨的柴燃联合动力装置(CODAG)驱动的单桨驱逐舰进行了正车稳定工况和加速工况动力特性的仿真研究,提出了螺距/转速的组合控制思想。Rubis还就CODAG的舰艇仿真提出了动力学模型。同时,R. S. Benson和Ernst E. Streit等又分别对增压柴油机的仿真作了进一步的研究。随后R. V. Thompson针对一艘扫雷艇研究了由柴油机带定距桨推进系统的控制策略。1982年,Rubis又著文对燃气轮机推进舰艇的仿真提出了全面的观点。

1984年,美国密歇根大学的J. B. Woodward教授和R. G. Latorre教授对船用增压柴油机的瞬态仿真建模提出了新的观点。他们在前人的基础上,利用准稳态建模法(Quasi-steady)将四冲程柴油机模型用14个方程式来表示,其中包括16个变量和10个常量,并着重介绍了如何通过分析柴油机运行参数,来对容积效率、中冷器效率等5个量进行估值。同年他们根据热动力学和流体力学原理,并结合一些必要的经验公式,分别给出了二冲程和四冲程柴油机的各部分模型,更进一步地阐述了这种思想。

20世纪80年代后期,A. Fowler则对采用CODOG装置的护卫舰进行了仿真专项研究,着重研究了柴油机带调距桨的机动过程,给出了由起航到全速前进、全速前进到全速倒退(急停)、半速前进到全速前进三种情况下的仿真结果。其柴油机模型同样采用的是准稳态法。在该文中,A. Fowler还将用当时流行的ACSL(Advanced Continuous Simulation Language)高级仿真语言写成的软件包仿真得出的结果,与用传统的混合计算机得出的结果进行比较,论证了使用这一语言进行仿真研究的可行性,标志着舰船推进装置仿真技术进入一个新的阶段。

进入20世纪90年代,舰船推进装置的仿真研究更进一步发展。1996年,日本神户海事大学的Lan等又在Woodward的基础上将船用柴油机模型用7个经验公式,加上16个解析方程式来表示。在这个柴油机模型基础上,提出了一个新的柴油机电子调速器控制策略的设计方案。

国内的计算机仿真在舰船推进装置方面的应用始于20世纪80年代初。上海交通大学、海军论证中心、海军工程大学(原海军工程学院)、哈尔滨工程大学、武汉理工大学(原武汉交通科技大学)等高校和研究单位都相继从不同侧面和角度开展研究工作,分别在船舶柴油机、舰船推进装置及控制系统设计、机舱自动化等方面开展了计算机仿真技术的应用研究,取得了较大的成果。

20世纪80年代初,上海交通大学开始进行对舰船推进系统仿真技术的研究。80年代中期自行研制了第一台并行处理实时仿真机——多微机仿真系统(MMSS, Multiple Microcomputers Simulation Systems),使当时的计算机仿真工具得到了很大的改善,这套系统基本上能满足一般动力装置仿真研究的实时性要求。80年代末期,海军论证中心完成对某舰CODOG控制的非实时仿真,其中的柴油机模型和燃气轮机模型都是用以稳态工况为基点的片段线性化方法来建立的。其仿真的结果与国外某公司提供的仿真结果基本一致。

20世纪90年代初期,上海船用柴油机研究所使用常规的柴油机特性资料建立了涡轮增压柴油机准动态数学模型,并使用该模型对一台MTU20V956柴油机带调距桨推进装置在无负荷控制和带负荷控制两种情况下进行了数字及混合计算机实时仿真,结果表明使用准动态

模型进行仿真可以兼顾仿真的精度和速度。海军论证中心则对某舰的机桨匹配动态特性进行了仿真研究,又对某综合运输补给船的动力装置进行了动态仿真,对该舰推进装置建立了控制系统模型、柴油机模型、离合器及轴系模型、螺旋桨和船体直线运动模型,以及回转操纵运动模型。其中柴油机模型也是使用准稳态建模方法。利用开发的仿真软件对该舰的稳态性能、直线航行动态性能及机动性,以及回转机动性进行了预测、分析,并检验和评价了其柴油机动力系统的动态特性和可使用性。

1994年,上海交通大学和上海船舶运输科学研究所联合开发了一个面向结构图的仿真软件 RTS,并成功地将其应用于推进装置监控系统的调试。1994年底,武汉理工大学(原武汉交通科技大学)研制成功国产首台远洋船舶轮机训练仿真器(WMS-1型),它由集控室、模拟机舱、驾控室和讲习室等4个训练舱室组成。包括模拟主机及推进装置、动力装置系统控制箱、船舶电站配电盘、集控台、驾控台及大型动态图形示教板等,并于1995年通过部级验收,投入训练使用。1996年,上海交通大学完成了对35000吨油船推进系统的Sulzer 6RTA 52低速二冲程柴油机及其装置的建模和实时仿真。并在1997年召开的中国造船工程学会上,总结了船用柴油机建模方法和仿真技术当时的发展状况,介绍了船用柴油机动力装置的四类建模方法,即线性化模型、准稳态多阶非线性模型、容积法模型和压力波模型。其中重点介绍了准稳态模型的建立,并提供了用图形建模仿真软件 IEAS 实现的船用柴油机仿真实例。20世纪90年代后期,国内多数研究单位开始使用通用性强的仿真环境 MATLAB/SIMULINK 来对增压柴油机的动态仿真进行研究,并且取得了一定的成果。

21世纪初,上海交通大学、上海船舶运输科学研究所、海军工程大学以某舰为研究对象,首次将舰船推进装置及数字控制系统模型合在一起,并进行了舰船推进装置及控制系统的半物理的实时仿真研究。通过仿真研究,在得到推进装置动态特性的同时,得到推进装置控制系统的控制参数和合理的控制策略。以上计算机仿真技术在舰船推进装置方面应用的进展,对于我国新型舰船的优化设计、缩短舰船推进装置及控制系统实船的调试时间,具有十分重要的作用。

1.4 计算机仿真的发展概况

计算机仿真技术自20世纪40年代电子计算机问世以来便应运而生。40年代末期,第一台模拟计算机被用于三自由度飞机系统的仿真。其发展的第一个高潮出现在50年代,建立在反馈运算放大器基础上的模拟计算机风行一时,主要的应用领域是武器系统和航空。当时,模拟计算机仿真技术为计算机仿真的主流。50年代末期,一方面数字计算机有了很大发展;另一方面这一时期的微分方程数值解的理论方面又有很大发展,加上一些计算机高级语言的问世,数字计算机在非实时仿真方面开始得到广泛应用。由于当时数字计算机在仿真速度上还不能满足动态系统实时或超实时仿真的要求,特别是当时的航空与航天应用领域的迫切需要,促进了模拟计算机和数字计算机结合。1958年出现了第一台专用的数模混合计算机,用来解决导弹轨道的计算问题。

20世纪60年代初期出现了数模混合计算机的商品,并在60年代末期70年代初期形成了第二个浪潮。70年代微电子技术和数字计算机在硬件、软件上的飞跃发展,使数字仿真技术迅速崛起,已有可能解决动态系统的实时仿真问题,对数模混合仿真提出了有力的挑战。这

两种仿真主导地位之争进行了近十年。1976年美国陆军指挥部集中了一批仿真专家论证仿真计算机的发展趋势问题,从而揭开了上述两种仿真技术决战的序幕。1978年第一台全数字实时仿真计算机 AD10 问世(美国 ADI 公司研制)。这种基于并行处理原理,采用 MIMD(多指令多数据流)及变字长结构的数字计算机在处理集中参数系统仿真方面显示出优越的实时仿真性能,这意味着数模混合计算机在大型、复杂系统仿真中的垄断地位已过去,数字仿真的全新时代已到来,数字仿真将逐渐成为计算机仿真的主流。

20 世纪 80 年代数字仿真技术迅速发展带动了仿真方法学,并行仿真技术、仿真算法、仿真软件、CAD 设计和人工智能技术的发展,进而把计算机仿真的应用领域不断拓宽,形成了计算机仿真的第三个浪潮。尽管计算机仿真是一门新学科,但在工业发达的国家中仿真技术已得到广泛的应用。

我国在 20 世纪 60 年代就进行了模拟计算机仿真的研究工作,1965 年 12 月由北京计算机一厂(原北京无线电制造厂)生产的 DMJ-3 型模拟计算机,可解不高于 20 阶的线性或非线性微分方程,曾为我国的系统仿真研究起过重要作用。

70 年代后,我国开始进行数字仿真、数模混合仿真的研究工作,研制 HMJ-200/DJS-8, HAP2/DJS-130 等数模混合计算机系统。1979 年自动化学会成立了仿真技术专业委员会并召开了全国性学术会议,对推动我国计算机仿真技术的发展起了一定的作用。

80 年代我国在计算机仿真领域取得了较大的进展,包括仿真计算机以及各类仿真器的开发和应用。例如:1985 年研制成功(中国国防科技大学)银河仿真计算机 YHF-1,在功能上达到 AD10 仿真计算机的水平。另外我国在高性能仿真工作站、小巨型仿真计算机、一体化仿真软件开发、人工智能在仿真中的应用诸方面都取得了不少成果。

同时,我国在仿真器的研制和应用方面也取得了迅速的进展。例如:在飞行器方面,我国在 1974 年引进波音 737 和三叉戟飞机仿真器后,1988 年又引进了 MD82 飞行仿真器。1983 年研制成功歼 6 飞行仿真器,1988 年研制成功地地对地导弹发射训练仿真器。其他如:汽车驾驶训练仿真器、机车驾驶及运行仿真器、石油化工培训仿真器、火电和核电培训仿真器等也相继研制成功,在使用中不仅节省能源,降低了培训技术人员费用,而且缩短了培训周期,及时地为我国四化建设培养了一批急需的技术人员。

1988 年 11 月中国系统仿真学会宣布成立,该学会下设仿真方法与建模、仿真计算机与软件、仿真技术应用、航空与空间仿真、仿真器等五个专业委员会。

90 年代到现在,国内外在计算机仿真学科和计算机仿真实验学科取得了突飞猛进的发展,科学家们在计算机分布式仿真、计算机虚拟仿真技术、计算机智能仿真等领域开拓了新的研究领域,推动计算机仿真学科不断的发展。

目前,我国已有一支计算机仿真科技队伍,活跃在仿真技术研究、应用、开发的各个领域,广泛地开展了我国计算机仿真的学术活动,为我国的计算机仿真学科和应用技术仿真作出了积极的贡献。同时,我国的科研工作者积极参加国际间的计算机仿真学术活动,在有关的国际会议宣读论文。可以说,现代仿真技术已在我国得到较广泛的研究和应用,而且必将朝着更深入、更广泛的方向发展,为赶超世界水平,为中华民族的富强和复兴作出重大的贡献。

习 题 一

1. 试述为何现代仿真技术得到如此广泛的应用。
2. 试问军事演习可否看作是仿真技术的应用？如果是的话，属于何种类型的仿真？
3. 何为“离散”系统？何为“连续”系统？模拟计算机和数字计算机各属什么系统？
4. 什么是纯计算机仿真，什么是半物理仿真？其主要特征是什么？
5. 试述什么是实时仿真，什么是非实时仿真。

第 2 章 系统和模型

2.1 系统的定义

系统这个名词已被广泛地用于各个领域,但在它的各个特定的应用领域中其含义不尽相同。例如自动控制系统、舰船推进系统、计算机网络系统、电力系统等等。第 1 章提到计算机仿真已广泛地应用到人类现代社会的各个领域,故仿真中所指的系统是广义的,其定义为:系统是按某种规律结合起来,既相互联系又相互作用的物体所构成的集合。

由于人们研究和分析问题的角度不同,系统往往可分成不同的类型。如第 1 章中提到的连续系统、离散系统,其他如简单系统、复杂系统、确定系统、随机系统、静态系统、动态系统等。仿真所研究的各种系统,一般可分成两大基本类型:即工程系统和非工程系统。机械、动力、机电、电气、水力、声学、热系统等属于工程系统;社会、经济、管理、交通、生物系统等属于非工程系统。图 2-1 所示的自动调节系统属工程系统。

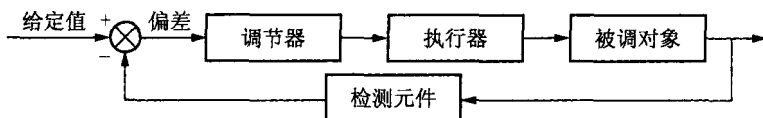


图 2-1 自动调节系统

图 2-2 所示的工厂生产管理系统属非工程系统。

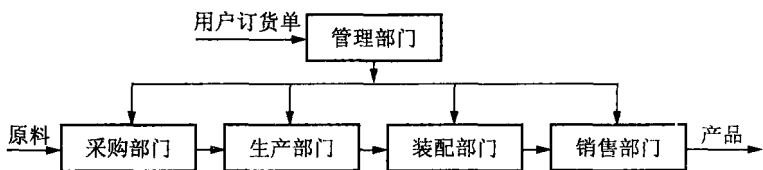


图 2-2 工厂生产管理系统

在研究和分析一个系统时,一般要注意三个主要内容,即:实体、属性、活动。

实体——构成系统的每一物体;

属性——各实体的特性(状态和参数);

活动——各实体随时间推移所发生的状态变化过程。

在上述的自动调节系统中,调节器、执行器、被调对象、检测元件、比较器是系统的实体;系统的属性有调节器特性、执行器特性、被调对象特性等;调节器根据偏差发出的调节信号、被调对象调节的响应等则是系统的活动。在工厂生产管理系统中,系统的实体是各部门、订货单、零件、产品等;属性为各部门的设备数量及设备的特性、订货数量、零件的数量及规格、产品数

量等;各个部门的加工或生产过程就是系统的活动。

任何一个系统所处的环境对系统本身会产生很大的影响,环境对系统的作用就是系统的约束条件(或系统输入);系统对环境作用的响应就是系统的适应性(或系统的输出)。从研究系统的目的出发,首先要正确确定系统与环境的界限。对某一船舶的动力装置进行自动控制研究时,这条船可以看成一个系统,但在整个航运管理系统中,则仅仅是一个子系统,其次要考虑系统的完整性。当系统与环境确定后,无论该系统复杂程度如何,都要认真分析该系统的每一实体,特别是构成系统的主要实体。例如:在常见的自动调节系统中,调节器、执行器、被调对象、检测部件是必不可少的;否则,就不能成为一个自动调节系统。所以,对于任何一个系统,只有对该系统的实体、属性、活动以及该系统所处的环境作了明确的描述后,该系统才能确定,才有可能建立该系统的模型。

2.2 模型的定义及分类

对一个简单系统,人们可以直接进行系统分析、设计和预测;而对于一个复杂系统,由于技术或经济等客观条件的限制,无法采用直接方式进行系统研究,需要借助于间接方式来研究,这样就产生了系统模型的概念。所谓模型,其定义为:模型是系统本质方面的描述,是系统的间接表现。利用模型,人们可以脱开实际系统方便地获得感兴趣的信息,利用建立模型来研究复杂系统的目的正在于此。

模型的形式是相当多的,但主要分成两大类:物理模型和数学模型(或称符号模型)。物理模型与系统之间具有相似的物理属性,而数学模型的特征是用数学符号、方程式来描述所研究的系统。对于这两类模型又可分成静态模型和动态模型,如图 2-3 所示。

最简单的静态物理模型是比例模型,如原子核模型、人体模型、地球仪,以及齿轮传动、发动机工作原理这样一些用于教学的模型。显见这类模型具有直观性好的优点。在第 1 章中提到船模水池试验和设计飞机的风洞试验,也是利用比例模型做试验。虽然试验中船模要作直线运动,空气要吹过飞机模型,但它们仍属于静态物理模型,这是因为这类试验要在一组平衡条件下进行研究,无法反映所研究系统随时间推移的动态变化。

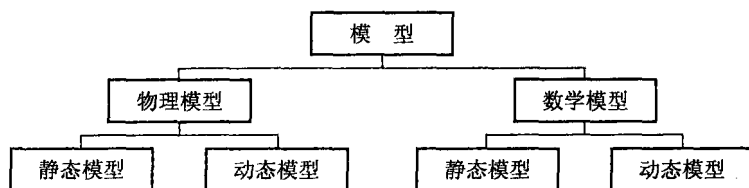


图 2-3 模型分类方法之一

动态物理模型可以用一个由质量为 M 的物体、弹簧、阻尼器组成的机械系统和一个由电阻器 R 、电容器 C 、电感器 L 组成的电学系统来说明。见图 2-4(a)、图 2-4(b)。

对于图 2-4(a)所示的机械系统(这个系统可以用来简单表示汽车轮子悬置时的情况),由力学可知,弹性力与位移 y 成正比,方向与位移的方向相反,可以用 $-Ky$ 表示,其中 K 为弹簧刚度。阻尼力的大小与运动的速度成正比,方向与运动方向相反,可用 $-D \frac{dy}{dt}$ 表示,其中 D 为

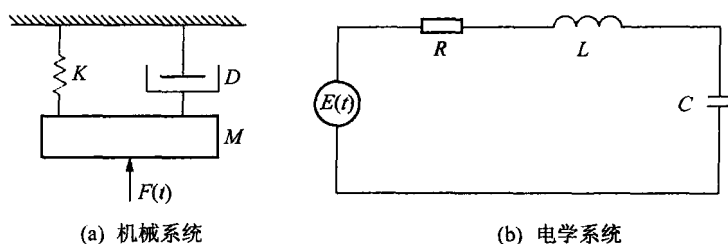


图 2-4 动态物理模型示意图

阻尼系数。根据牛顿第二定律,可用下列微分方程来描述这个系统的运动。

$$M \frac{d^2 y}{dt^2} + D \frac{dy}{dt} + Ky = F(t) \quad (2-1)$$

式中 y —— 位移;
 M —— 质量;
 K —— 弹簧刚度;
 D —— 阻尼系数。

对于图 2-4(b)所示的电学系统,应用克希荷夫电压定律,用电量 q 的形式便可用下列微分方程来描述这个系统的性能。

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

由式(2-1)、(2-2)显见它们具有相似的数学描述形式,并且在参数上一一对应:

力	$F(t)$	$\longleftrightarrow$	电压	$E(t)$
质量	M	$\longleftrightarrow$	电感	L
阻尼系数	D	$\longleftrightarrow$	电阻	R
刚度	K	$\longleftrightarrow$	1/电容	$1/C$
速度	$\frac{dy}{dt}$	$\longleftrightarrow$	电流	$\frac{dq}{dt}$
位移	y	$\longleftrightarrow$	电量	q

这两个系统的活动还都具有振荡的特性。图 2-4(a)所示的机械系统为机械振动;图 2-4(b)所示的电学系统为电振荡。由于这两个系统彼此相似,所以一个系统的性能可以用另一个系统来研究。即:人们可以利用一个领域里的现象去研究另一个领域中的现象。对于上述两个系统,一般改变电学系统要比改变机械系统更为容易。所以建立电学系统去研究相应的机械系统,显得更为简便。图 2-4(a)所示的机械系统可看作一个汽车轮子悬置的情况,如果要研究减震器及弹簧刚度参数的变化对汽车性能的影响,可以通过图 2-4(b)所示的电学系统来研究,这样更方便。只要改变这个 RCL 电路上的电阻和电容值,并注意这两个参数变化对电量变化的影响即可。

同物理静态模型一样,数学静态模型只能表明系统处于平衡状态时属性的数值以及各属性值之间的关系。当平衡点由于某个属性值的变化而变化,则模型将给出其他属性值与之相应的新数值。静态数学模型一般用代数方程加以描述。例如:在力学中描述系统处于平衡状态的平面力系平衡方程式,热力学中描述系统处于能量平衡的基本能量方程式(热力学第一定

律),传热学中描述系统处于稳态导热的稳态导热解,还有描述经济问题的市场商品供求关系的平衡关系式。

在计算机仿真中,人们更关心对系统动态过程的研究和分析,故动态数学模型更受重视。同动态物理模型一样,动态数学模型用于描述系统状态随时间推移的变化过程(称为系统的动态过程或过渡过程)。系统的动态数学模型一般用微分方程来描述。如描述一个汽车轮子悬置问题的式(2-1)和描述 RCL 串联电路系统的式(2-2)。当然,实际系统的动态数学模型往往是相当复杂的。

以上主要介绍了两大类型的模型,数学模型和物理模型。按照不同的分类方法,模型还可以分成各种不同的形式,例如:连续性模型、离散性模型、确定性模型、随机性模型、简单模型、复杂模型等等。这里不一一赘述了。

表 2-1 所示的是数学模型的基本分类及应用领域。

表 2-1 数学模型的基本分类

模型类型 描述方法 及应用	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	系统平衡方程、系统稳态解	动力学系统、控制系统	声学系统、热传导场	计算机数据采集系统	交通系统、库存系统、电话系统、计算机分时系统

2.3 建立数学模型的方法和基本原则

数学模型与物理模型比较有一个明显的优点,就是许多物理本质完全不同的系统可能具有相同的数学模型,这也是人们十分重视系统的数学模型原因之一。下面继续介绍如何建立系统的数学模型和建立数学模型的基本原则。

首先,我们提出在建立一个系统的数学模型时,以下两点是值得注意的。

第一,一个系统的数学模型是采用数学符号和方程式对该系统进行描述的,而这种描述本身不可能做到无所不包,不可能做到完全精确。而且在建立模型的过程中,除了不考虑与系统研究无关的因素和内容外,往往由于系统研究的条件,或者是系统研究目的的原因,或者是技术的、经济的原因,对某些次要因素也进行了忽略。比如物理学中经常讲到的单摆运动方程,一般设一质量为 m 可看作质点的小球,系

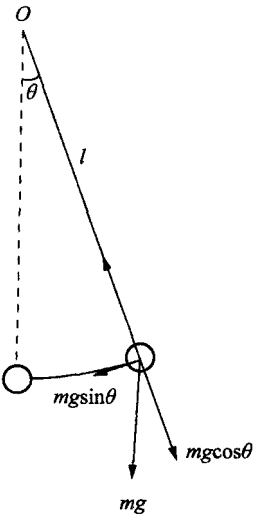


图 2-5 单摆运动