



工业和信息化部“十二五”规划教材

核动力装置 建模与仿真

HEDONGLI ZHUANGZHI
JIANMO YU FANGZHEN

编著 田兆斐 李 磊 郝 琛

HEUP 哈尔滨工程大学出版社



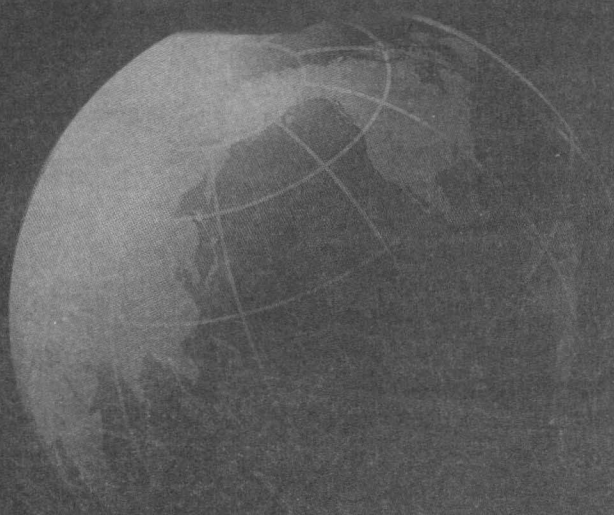
工业和信息

划教材

核动力装置 建模与仿真

HEDONGLI ZHUANGZHI
JIANMO YU FANGZHEN

编著 田兆斐 李 磊 郝 琛



HEUP 哈尔滨工程大学出版社

内 容 简 介

核动力装置建模与仿真技术涉及核反应堆工程、热动力、自动控制、电机与电气以及计算机技术等多个学科领域,是多种专业的交叉学科。该技术目前广泛应用于核电站与船舶核动力的设计、运行及人员培训等环节,发挥了巨大的作用,日益受到人们的重视。

本书内容主要来自于哈尔滨工程大学核动力仿真研究中心 20 年来的部分科研成果,通过总结和归纳,编写成本书。书中介绍了系统仿真技术的相关概念、发展和应用情况以及建模理论、基本建模方法;详细阐述了核动力装置堆芯物理、反应堆热工水力、主要设备、通用设备及管网的建模与仿真技术;介绍了实时仿真技术和仿真支撑环境的相关知识。

本书可作为核科学与核技术专业硕士生、高年级本科生的教学用书,也可供核电、船舶核动力等部门的科研、设计、运行人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

核动力装置建模与仿真/田兆斐,李磊,郝琛编著.
—哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2017.3
ISBN 978-7-5661-1222-4

I. ①核… II. ①田… ②李… ③郝… III. ①核动力装置—系统建模—高等学校—教材②核动力装置—系统仿真—高等学校—教材 IV. ①TL99

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 028789 号

选题策划 石 岭

责任编辑 丁 伟

封面设计 博鑫设计

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451-82519328
传 真 0451-82519699
经 销 新华书店
印 刷 哈尔滨工业大学印刷厂
开 本 787 mm × 1 092 mm 1/16
印 张 12.5
字 数 334 千字
版 次 2017 年 3 月第 1 版
印 次 2017 年 3 月第 1 次印刷
定 价 30.00 元

<http://www.hrbeupress.com>

E-mail:heupress@hrbeu.edu.cn

前言

核动力装置建模与仿真技术是计算机仿真同核科学与核技术相结合而形成的特色仿真技术,融合了核反应堆工程、热能动力、自动控制、电机与电气以及计算机技术等多个学科知识,并已广泛应用于军事、核电工业、教育等领域。本书作者所在的科研集体——哈尔滨工程大学核动力仿真研究中心是为了保证我国第二代潜艇核动力装置研制项目的顺利进行,以大型科研项目为牵引和依托,自1998年逐渐形成的跨专业的科研团队。在多年科研工作中,团队取得了具有代表性的创新性成果——“核动力装置培训模拟器”“中国实验快堆仿真机”“核电站精细化仿真系统”等,具有较高的军事价值和社会效益,为我国的国防建设做出了贡献,曾获得“国家科学技术二等奖”“国防科技进步奖一等奖”和“黑龙江省科学技术一等奖”。核动力仿真研究中心在核动力运行与仿真、核安全等研究领域得到了国内同行的广泛认可,2011年入选教育部科技创新团队,2013年入选教育部核科学与技术国家级虚拟仿真实验教学中心。

近20年来,作者所在的科研团队发表了大量学术论文,积累了一批技术资料,培养了一批博士、硕士研究生,并开设了核动力系统建模与仿真、热力系统动态学等研究生课程。本书体现了团队科研与教学工作部分成果,重点阐述了核动力装置关键设备的建模技术。本书共8章,其中第1,2,5,6,7,8章由田兆斐教授编写,第3章由郝琛博士编写,第4章由李磊博士编写。全书由田兆斐教授统稿。

本书的读者对象是核科学与技术专业的研究生,也可以供从事核动力工程研究、设计、运行调试等工作的专业人员参考。

由于每位编者在仿真技术中只从事某一方面的工作,且水平有限,因此难以避免出现内容和文字上的错误,敬请读者指正。

编 者

2016年10月

目录

第1章 系统仿真技术概述	1
1.1 系统与系统仿真的概念	1
1.2 仿真系统的分类	5
1.3 系统仿真技术的应用	8
1.4 核动力装置仿真技术的发展趋势	15
思考题	19
第2章 建模技术基础	20
2.1 数学模型概述	20
2.2 数学模型的表示形式	24
2.3 模块化建模方法	29
2.4 仿真模型的验证和确认(V&V)	32
思考题	38
第3章 堆芯物理建模与仿真技术	39
3.1 基于点堆模型的堆芯物理仿真技术	40
3.2 基于扩散方程的堆芯物理仿真技术	42
3.3 基于输运理论的堆芯物理仿真技术	47
3.4 堆芯物理仿真技术发展趋势	53
思考题	54
第4章 反应堆热工水力建模与仿真技术	56
4.1 反应堆热工水力系统仿真模型	57
4.2 辅助模型	63
4.3 典型设备的控制体划分方法	76
4.4 系统仿真模型求解方法	82
4.5 其他尺度的热工水力分析程序	85
4.6 多物理场、多尺度程序耦合方法	89
思考题	96
第5章 主要设备建模与仿真技术	98
5.1 稳压器数学模型	98
5.2 反应堆冷却剂泵数学模型	106
5.3 汽轮机数学模型	110
5.4 凝汽器数学模型	119
思考题	124
第6章 通用设备及管网建模与仿真技术	125
6.1 除氧器数学模型	125

6.2	回热加热器数学模型	130
6.3	单相箱体数学模型	134
6.4	两相箱体数学模型	135
6.5	流体网络数学模型	136
6.6	泵的数学模型	146
6.7	阀门的数学模型	148
6.8	发电机的数学模型	150
	思考题	156
第7章	实时仿真技术	157
7.1	仿真中的时间概念	157
7.2	实时仿真算法的特点	158
7.3	基本实时仿真算法	160
7.4	数值积分方法的稳定性分析	163
7.5	刚性系统仿真算法	166
	思考题	172
第8章	仿真支撑环境	173
8.1	仿真支撑环境的定义与作用	173
8.2	仿真支撑环境的功能组成	173
8.3	典型仿真支撑环境介绍	176
	思考题	188
	参考文献	189

第 1 章 系统仿真技术概述

1.1 系统与系统仿真的概念

1.1.1 系统

系统广泛存在于自然界、人类社会以及人类思维描述的领域中。由于学科的不同,使用方法的不同,以及要解决的问题的不同,对系统一词有许多不同的解释。如果仅从整体和局部的关系而言,可以将系统定义为:系统是由相互作用、相互依存的若干组成部分结合而成的具有特定功能的有机整体。系统的各个组成部分通常被称为子系统或分系统,而系统本身又是它所从属的更大系统的一个组成部分。

系统有多种分类方法,从不同的角度可将系统分为不同的类型:按系统的组成部分是否是物质实体,可将系统分为实体系统和概念系统;按系统状态与时间的关系,可将系统分为动态系统和静态系统;按系统规模,可将系统分为小系统、大系统和巨系统;按系统结构,可将系统分为简单系统和复杂系统。

典型的核动力装置包含几十个系统和多种具有不同类型的设备,规模庞大,结构复杂,工作过程伴随着核反应、工质流动、传热、机械传动等多种物理过程,是典型的复杂大系统。系统规模的增大会引起系统性质上的某些改变,增加理论分析和工程处理的困难。20 世纪 60 年代,科学家提出了大系统概念,建立了大系统理论。根据该理论,复杂大系统具有如下特点:

(1) 规模庞大

复杂大系统的组成部分数目很大,关系错综复杂。通常,组成部分有几个、十几个的是小系统,组成部分有几十个、上百个的是大系统。

(2) 分散性

复杂大系统的构成子系统常常是由许多联系松散的小系统构成的,信息具有分散性。

(3) 目的性

无论设计一个新系统或改进一个已有的系统,都是为了实现一定的目的。目标就是系统目的性的具体化、数量化指标。当系统要达到的目标不止一个时,需要从整体出发,进行目标分析,优先考虑主要目标,全面协调地实现所有目标。

(4) 整体性

系统整体性是系统的一个重要特性,它主要表现为系统的整体功能。系统整体性特征来源于系统的整体对于它的组成部分之间的“非加和性”关系,即“整体不等于它的部分之和”。由于系统内各组成部分之间存在着相干性、协同性,因而系统在整体上会有“新质”突现。这些“新质”不是它的任何单个组成部分所具有的,而是作为系统整体所具有的。也就是说,系统中的任何一个部分在整体中体现的功能,一旦离开了系统这个整体,其也将丧失。

(5) 相关性

系统相关性是指系统的各组成部分按一定的方式或要求结合起来,各组成部分之间存在着相互作用、相互依存的内在联系。正是由于具有这种内在联系,系统才能作为一个有机整体去完成其特定的功能。除系统内部各组成部分之间具有相关性外,系统还通过输入输出与外部环境相关联。系统与外界环境的关联往往会影响其他系统的存在与发展。

(6) 不确定性

不确定性主要包括两个方面。一是由于系统中同时存在着负反馈和正反馈。负反馈使得系统通过自我调节而保持稳定,正反馈则促使系统偏离原来的发展轨迹。当正反馈在一定条件下处于主导地位时,它就使得系统的发展表现为不合目的性的运动,从而导致系统发展的不确定性。二是系统参数的不确定性,大系统的随机因素比小系统的更加复杂多样。大系统具有明显的模糊性,许多情况无法确知。

对系统的研究主要包括实体、属性和活动,三者之间的关系是:

(1) 系统是实体的集合

这里的实体是指组成系统的个体。

(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。

(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。

一些系统经常会受到外界因素变化的影响。在建立系统模型时,要注意正确划分系统的边界。

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,不但要定性地了解系统,而且要定量地分析系统,从而比较准确地解决工程中的各种复杂问题。

1.1.2 系统仿真

为了设计、研究与分析系统,通常都需要对系统进行实验。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实验,而希望能在模型上进行实验。仿真(Simulation)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。最初,仿真技术主要用于航空航天和核反应堆等价格高昂、周期长、危险性大且实际系统实验难以实现的少数领域,后来逐步发展到电力、石油、化工、冶金和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、交通运输系统和生态系统等一些非工程系统领域。仿真技术具有经济、可靠、实用、安全、灵活及可多次重复使用的优点,已成为对系统进行分析、设计、试验和评估的有效方法,应用领域广泛,并具有十分广阔的发展前景,应用效益也日渐显著。

通常采用仿真技术研究系统有以下情形:

(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实验;

(2) 在真实系统上做实验会对系统的正常运行造成破坏;

(3) 系统实验时间太长,或实验费用太高,或实验有危险,如武器系统、航空航天、核电站等;

(4) 在实际系统上做多次实验时,很难保证每次的操作条件都相同,因而无法对实验结果的优劣做出正确的判断;

- (5) 实验对系统有破坏性,实验结束后系统无法复原;
- (6) 难以在实际的系统环境中进行实验观测;
- (7) 对系统的机理尚未完全掌握,不存在完整的数学模型描述系统,或者还没有求解数学模型的方法,或者求解的数学过程太复杂,而仿真可以提供比较简单的求解方法;
- (8) 希望在一段较短的时间内能观测到系统的全部行为过程,以及估计某些参数对系统行为的影响。

仿真与系统和模型有着密切的关系。系统是研究的对象;模型是系统的抽象,它是系统仿真的核心和精髓;仿真则是通过对模型进行实验以达到研究系统的目的。从以上分析可以看出,仿真活动实质上包括了三个基本要素:系统、模型和实验系统。如图 1-1 所示,其中实验系统一般由仿真计算机或物理设备组成;模型在实验系统上运行,以获取所需要的信息。联系这三个要素的基本活动是系统建模、仿真建模和仿真实验,形成了系统仿真概念的基本框架。

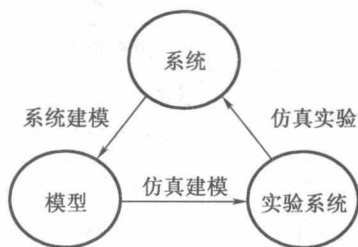


图 1-1 仿真三要素及基本活动

系统建模,就是通过对实际系统的观测或检测,用物理或数学的方法进行描述,从而获得实际系统的简化近似模型,即一次简化模型。因为具体的系统往往很庞大,因素极多,关系错综复杂,所以模型不可能也没有必要把全部因素都包括进去,它只是对实际系统的对象和过程,就某些最本质的属性进行抽象。因此,模型是对相应的实际对象和真实关系中那些有用的和令人感兴趣的特性的抽象,是对系统某些本质方面的描述。它以各种有用的形式提供被研究对象的信息,即系统建模是对实际系统的一种抽象、本质的描述。

仿真建模,反映了系统模型同实验系统之间的关系,它应能为实验系统所接受,并能进行运行。例如,计算机仿真模型就是对系统的数学模型进行一定的算法处理,使其在变成合适的形式(如将数值积分变为迭代运算模型)之后,能在计算机上进行数字仿真的“可计算模型”。显然,由于采用的算法引进了一定的误差,所以仿真模型对实际系统来讲是一个二次简化模型。

仿真实验,是指对模型的运行。例如,计算机仿真就是将系统的仿真模型置于计算机上运行的过程。仿真是通过实验研究实际系统的一种技术,通过仿真活动可以弄清系统内在结构变量和环境条件的影响。因此,为了使模型能够运行,需要设计一个合理的、方便的、服务于系统研究的实验步骤和软件。

综合以上分析,可以给出系统仿真的定义。所谓系统仿真,就是以控制原理、相似理论、系统技术、信息技术及其应用领域有关专业技术为基础,以计算机和各种模拟器(仿真机)及专用物理效应设备为工具,借助系统模型,对真实的或假想的系统进行实验研究的一门多学科综合性技术。它是用来研究系统的先期规划、开发工作以及系统的检验与评估的一种有效手段,是一种可控制的、无破坏性的、有效而经济的、可多次重复的实验手段。对核动力装置来讲,仿真技术是一门综合技术,它是以数学、物理、化学、传热学、热力学、流体力学、反应堆工程、控制理论、计算机技术、热能动力、电工学、热工仪表及电气仪表等多学科专业的理论为基础,以计算机和各种物理效应设备(再现真实环境)为工具,对真实核动力装置及其运行进行仿真的技术。

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 20 世纪 40 年代末期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、计算技术和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,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了令人瞩目的成就,形成了一门独立发展的综合性学科。表 1-1 中的比较体现了系统仿真的技术优势。

表 1-1 实际系统、解析方法和仿真技术的比较

	仿真技术	实际系统	解析方法
可能性	只要能建立起仿真系统,就能进行仿真实验	系统尚未建立,则不可能;有的系统实验周期长,也不可能	有的系统无法建立解析模型
安全性	无危险	有危险(人身、设备)	无危险
经济性	花费不多	费用很大	花费不多
耗时性	中等	长	短
准确性	可以做到很准确	十分准确	要做较多假设,因此误差较大
方便性	可以做到十分方便	受现场限制,很不方便	方便

对于复杂大系统来说,应用系统仿真技术的主要目的是要提高建模与仿真的效率,提高仿真的逼真度、可靠性,改进仿真系统的体系结构。复杂大系统的仿真特点如下:

(1) 多学科综合

复杂大系统中,大型复杂问题的解决一般都不能由某一学科单独完成,必须综合应用多学科知识,进行跨学科研究。复杂大系统仿真需要充分运用数学、自动控制和相关领域的专业技术知识等分析和构建系统模型,利用计算机技术、网络技术和虚拟现实技术等构建系统仿真平台,完成对实际系统的仿真实验,并利用统计学、效能评估和优化技术等,根据实验结果对实际系统进行分析、评估和优化。

(2) 定性与定量分析相结合

复杂大系统中一般都包含目前尚不能定量描述的因素,所以在进行复杂大系统仿真时,往往需要采用定性与定量相结合的分析方法。著名科学家钱学森提出的综合集成方法是一种定性与定量相结合的方法,并进一步提出“从定性到定量的综合集成研讨体系”。日本科学家也提出类似的复杂系统研究方法,称为“既软又硬”的 Shinayaka 方法。这些方法的基本思想概括为五个结合:定性分析与定量分析相结合,科学理论与经验知识相结合,多种学科相结合,多领域、多层次专家相结合,宏观研究与微观研究相结合。

(3) 集成性

复杂大系统仿真的另一个突出特点就是对已有系统的集成。对于复杂大系统仿真,由于其研究的对象复杂,涉及众多要素,为了提高建模与仿真的效率,提高仿真系统的真实性,要求在做好仿真系统顶层设计的同时,应能充分利用已有成果,结合优势单位,共同完成仿真系统的设计、开发、测试、运行和维护。因此,在复杂大系统仿真中的一个关键问题就是如何将位于不同地域的、不同单位设计开发的、系统硬件和软件具有不同结构和配置的、实体表示与描述各异的仿真节点连接起来并实现互操作。



1.2 仿真系统的分类

依据不同的分类标准,可将系统仿真进行不同的分类。

1.2.1 按照研究系统的特征分类

根据被研究系统的特征,可将系统仿真分为连续系统仿真和离散事件系统仿真。

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。

离散事件系统仿真则是指对那些系统状态只在一些时间点上由于某种随机事件的驱动而发生变化的系统进行仿真实验。这类系统的状态量是由于事件的驱动而发生变化的,在两个事件之间状态量保持不变,因而是离散变化的,称之为离散事件系统。

1.2.2 按照仿真时钟与实际时钟之间的关系分类

按照仿真时钟与实际时钟之间的关系,可将系统仿真分为实时仿真、亚实时仿真和超实时仿真。

现实世界中的时钟称为实际时钟,而系统仿真时所采用的时钟称为仿真时钟。

1. 实时仿真

仿真时钟与实际时钟完全一致,即模型仿真的速度与实际系统运行的速度相同。其包含物理模型或实物的仿真系统,通常都采用实时仿真。例如,各种培训仿真机一般都采用实时仿真。

2. 亚实时仿真

仿真时钟慢于实际时钟,即模型仿真的速度慢于实际系统运行的速度。例如,对核爆炸的仿真就可以用亚实时仿真,以便计算机有足够的时间计算出爆炸瞬间的各种复杂模型。

3. 超实时仿真

仿真时钟快于实际时钟,即模型仿真的速度快于实际系统运行的速度,如大气环流的仿真、交通系统的仿真等。

1.2.3 按照参与仿真的模型的种类分类

按照参与仿真的模型的种类,可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)。

1. 物理仿真

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实验研究。例如:将船舶按比例缩小制作的船模,在拖曳水池中做拖曳实验,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。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,在物理模型上做实验不易修改系统的结构和参数。

2. 数学仿真

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

此为试读,需要完整PDF请访问⁵ www.ertongbook.com

真模型的运行达到对系统运行的目的。数字计算机的基本组成是存储部件、运算部件、控制部件和外围设备等。由于一般应用数学仿真手段来研究实际系统,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,因此,在数学仿真中,计算机是一个重要的计算工具,所以数学仿真也称为计算机仿真。基本的计算机仿真系统组成如图 1-2 所示。

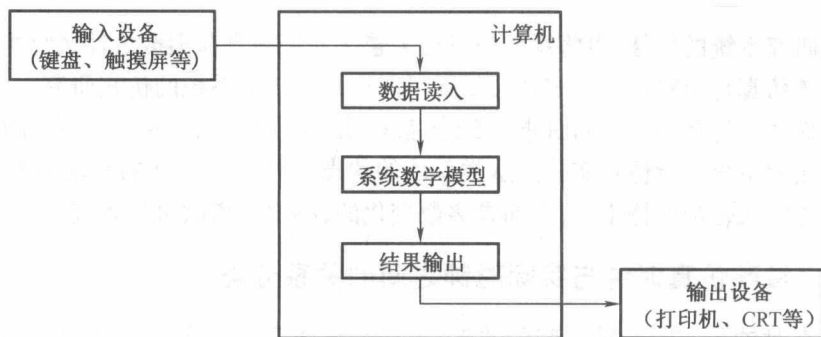


图 1-2 计算机仿真系统

数学仿真的特点如下:

(1) 数值计算的延迟。任何数值计算都有计算时间的延迟,其延迟的大小与计算机本身的存取速度、运算器的解算速度、所求解问题本身的复杂程度及使用的算法有关。

(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,则必须转换成适合数字计算机求解的仿真模型,因此需要研究各种仿真算法。

(3) 计算精度高。数学仿真建立在仿真对象数学模型的基础上,相对于模拟仿真来说,精度较高。

(4) 实现实时仿真比较困难。对复杂的快速动态系统进行实时仿真时,对数字计算机本身的计算速度、存储量及存取速度等要求高,因此实现实时仿真比较困难。

(5) 利用数字计算机进行半实物仿真时,需要有转换装置与连续运动的实物连接。

(6) 系统仿真过分依赖于系统建模,而有些系统的建模是困难的。

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。

3. 物理-数学仿真

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(如控制系统的测量传感器、控制计算机和伺服执行机构)方式引入仿真回路。半实物仿真系统如图 1-3 所示。

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,参与仿真实验,可以避免建模的困难。

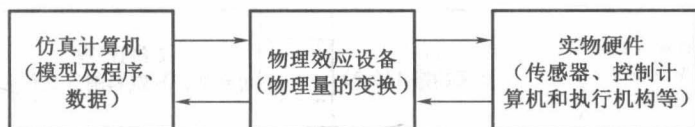


图 1-3 半实物仿真系统

(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。

1.2.4 按照所使用的计算机类型分类

根据所使用的计算机类型,可将系统仿真分为模拟计算机仿真、数字模拟混合仿真和数字计算机仿真。

1. 模拟计算机仿真

模拟计算机是 20 世纪 50 年代至 60 年代普遍采用的仿真设备。实际系统某一物理量随时间变化的关系和模拟计算机上与该物理量对应的电压随时间变化的关系是相似的。因此,原系统的数学方程和模拟机上的排题方程是相似的。只要原系统能用微分方程、代数方程描述,就可以在模拟计算机上求解。模拟计算机是由运算放大器组成的模拟计算装置,包括运算器、控制器、模拟结果输出设备和电源等。其基本运算部件有加(减)法器、积分器、乘法器、函数器和其他非线性部件。这些运算部件的输入输出部分是随时间连续变化的模拟量,故称为模拟计算机。模拟计算机仿真就是将数学模型在模拟计算机上实现并进行的实验。实际系统中的物理量都用按一定比例变化的电压来表示。

2. 数字模拟混合仿真

20 世纪 60 年代至 70 年代,在数字计算机技术还处于较低水平时,产生了数字模拟混合仿真。数字模拟混合仿真是将系统模型分为两部分,其中一部分放在模拟计算机上运行,另一部分放在数字计算机上运行,两类计算机之间利用模数和数模装置交换信息。

3. 数字计算机仿真

随着数字计算机技术的发展,计算机的计算速度和并行处理能力不断提高,模拟计算机仿真和数字模拟混合仿真逐步被数字计算机仿真取代。数字计算机仿真是将系统数学模型用计算机程序加以实现,通过运行程序得到数学模型的解,从而达到系统仿真的目的。当前的计算机仿真一般指的就是数字计算机仿真。

值得注意的是,目前许多武器或过程工业的控制系统广泛采用数字计算机通过软件进行控制运算,如核电站的 DCS 系统,软件的规模越来越大,功能越来越强,许多设计思想和核心技术都反映在应用软件中,因此软件在系统中的测试越显重要。图 1-4 是典型的用于测试软件的仿真系统组成。这种仿真实验将系统用计算机与仿真计算机通过接口对接,进行系统实验。接口的作用是将不同格式的数字信息进行转换。这种用于测试软件的仿真系统一般情况下要求实时运行。

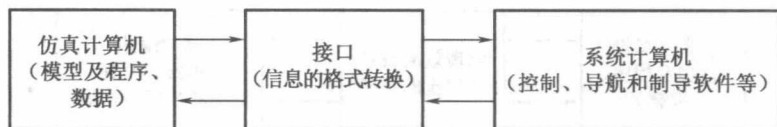


图 1-4 用于测试软件的仿真系统

1.3 系统仿真技术的应用

1.3.1 系统仿真技术的用途

系统仿真技术是分析、研究各类系统的一种有力工具和手段,其突出的技术特点为仿真应用奠定了良好的基础,目前已被广泛应用于几乎所有的科学技术领域。仿真技术既可应用于军事、能源、水利、交通、工业、农业、经济、管理、教育和训练等领域,也可应用于产品研制的方案论证、设计分析、生产制造、试验评估、运行维护和人员训练的全过程。

1. 系统仿真在系统设计中的应用

系统设计是一项复杂的任务,仿真技术为系统设计提供了强有力的工具。一个较为复杂的系统,其设计过程一般要经历可行性论证、初步设计、详细设计和实施等若干阶段。在每个阶段,仿真技术均可提供强有力的技术支持。例如,我国的“神舟”载人飞船工程在飞船的轨道设计、航天员的救生逃逸系统等许多方面采用了仿真技术。在可行性论证阶段,系统尚未建立起来,可以根据系统设计的目标及边界条件,对各种方案进行定量比较,发现不同方案的优缺点,真正了解方案的可行性,为系统设计打下坚实的基础。在系统设计阶段,设计人员可以利用仿真技术建立、简化或完善系统模型,进行模型实验及验证,并能对多种可能的方案进行比较以便达到最优的系统设计。在系统建成之后,可以利用仿真技术来分析系统的运行状况,寻求改进系统的最佳途径,因而国内外开发的许多设计软件大都包含仿真程序包。

系统设计中经常涉及新的设备、部件或控制装置。此时,可以利用仿真技术进行分系统实验,即一部分采用实际部件,另一部分采用模型。这样,既可避免由于新子系统投入可能造成的对原系统的破坏,又可大大缩短开工周期,提高系统投入的一次成功率。

2. 系统仿真在系统分析与研究中的应用

要对系统进行分析,就必须对系统进行实验,通过实验来了解系统的结构及其内部发生的活动,从而达到对系统的正确评价。目前通常有两种实验方案。一种实验是直接在实际系统上进行,如模式堆实验、飞机试飞和轮船试航等。通过实验,发现设计或制造中的技术或工艺问题,以便在正式投产前或投入运行前加以改正。另一种实验是对实际系统构造模型,对模型进行仿真实验,即仿真分析。对于一个大型系统,直接实验的成本十分高。以航空工业为例,单次飞行的成本为 104 ~ 108 美元,采用仿真实验方法后仅需成本的 1/10 ~ 1/5,并且设备可以重复使用。另外,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且不允许的。利用仿真不但能节省大量资金,而且安全可靠。

3. 系统仿真在系统理论研究中的应用

对系统理论的研究,过去主要依靠理论推导。今天,系统仿真技术为系统理论研究提

供了一个十分有力的工具。它不仅可以验证理论本身的正确与否,还可以进一步暴露系统理论在实现中的矛盾与不足,为理论研究提供新的研究课题。目前,在最佳控制系统、自适应控制和大系统的分解协调等理论问题的研究中都应用了系统仿真技术。

4. 系统仿真在产品开发及制造过程中的应用

虚拟制造是实际制造过程在计算机上的本质实现,即采用计算机仿真与虚拟现实技术,在计算机群组上协同工作,在计算机上建立产品的三维全数字化模型,“在计算机上制造”产生许多“软”样机,从而在设计阶段,就可以对所设计的零件甚至整机进行可制造性分析,这包括加工过程的工艺分析、铸造过程的热力学分析、运动部件的运动学分析以及整机的动力学分析等,甚至包括加工时间、加工费用和加工精度分析等。设计人员或用户甚至可“进入”虚拟的制造环境检验其设计、加工、装配和操作,而不依赖于传统的原型样机的反复修改。这样使得产品开发走出主要依赖于经验的狭小天地,发展到了全方位预报的新阶段。

5. 系统仿真在培训与教育方面的应用

系统仿真用于培练与教育是它的一大特点,在提高培训效率、节约能源和安全训练等方面起到十分重要的作用,现在已经为各种运载工具(如飞机、火车、汽车和船舶等)以及各种复杂设备及系统(如核动力装置、电站、电网和化工设备等)制造出各种培训仿真机。所谓培训仿真器,顾名思义就是一种用于人员培训的模拟设备。更明确地说,培训仿真机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)构成的一种以培训为目的的仿真系统。它再现(模拟)一个真实的系统并可供培训人员操纵与管理。由于培训仿真系统是用计算机仿真技术来训练人员,所以它必定是一个人-机交互系统,系统基本组成如图1-5所示。

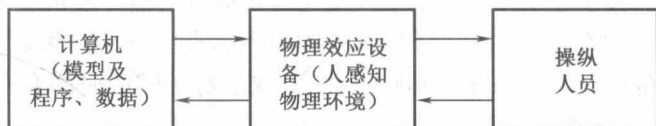


图 1-5 培训仿真系统

根据模拟对象、训练目的,可将培训仿真系统分为三大类:

(1) 载体操纵型

这是与运载工具有关的仿真系统,包括航空航天、航海和地面运载工具,以训练驾驶员的操纵技术为主要目的。

(2) 过程控制型

过程控制型用于培训各种工艺过程的运行操作人员。例如,在核电站,由于特殊的安全性要求,其操作人员的培训不能直接在运行中的核电站上进行,只能用核电仿真机来训练操作人员,研究异常现象处理和故障排除等方法。核电仿真机的控制台操作面板与真实系统的操作面板完全一致,只是系统与设备的工作过程和响应输出是用计算机仿真实现的。

(3) 博弈决策型

博弈决策型用于企业管理人员、交通管制人员(火车调度、航空管制、港口管制和城市交通指挥等)和军事指挥人员(空战、海战和电子战等)的训练。

1.3.2 仿真技术的应用限制

由于仿真在一定程度上模拟了真实系统或设计系统的行为,我们可以更加直观地观察到系统的行为变化,因此仿真方法也成为一种诱人的、易于被人理解的技术。但要看到,仿真不能直接回答我们所要研究问题或系统的运行规律。在仿真运行时,只是运行了仿真模型,仅能通过对仿真系统的运行观测仿真模型的运行结果,这些结果不能直接给出所研究问题的答案。一般我们需要改变仿真模型的输入和模型的结构,以观察不同输入条件下的仿真运行结果的变化;并通过对不同输入条件下的结果分析,获得系统在不同运行条件下的运行规律,才能对系统的设计、实现或使用给出相应的建议。另外,虽然仿真具有广泛的应用范围,然而在很多情况下,仿真不是一个很好的或唯一的解决方案。这些情况一般包括:

(1) 如果问题可以采用简单的或解析的方法解决,就没有必要采用仿真方法。

(2) 如果更容易对系统进行实验,并且获得准确的实验结果,就没有必要采用仿真方法,因为真实的系统永远比仿真模型更加准确和全面。

(3) 仿真研究需要很多阶段,耗费大量的人力和时间才能完成。而且仿真系统一般只能对公共的算法、程序进行共享和重用,不能直接将其他类似的仿真系统或仿真应用直接应用到新的仿真应用中。如果采用仿真方法付出的代价过高,或超过其所带来的经济效益,就不应该采用仿真方法。因此,在很多操作培训仿真中,是否采用仿真方法需要进行仔细权衡。

(4) 仿真研究一般需要大量的输入数据,如果仿真实验分析需要的数据或估计的数据不充足,不建议采用仿真方法解决问题,否则仿真只能停留在演示验证阶段。

(5) 建模技术依赖于建模人员的水平以及建模人员对建模对象机理的认识程度。当这两个方面有缺陷时,可能会造成模型精度不高,从而导致仿真应用的失败。

(6) 如果不具备仿真模型的确认和验证能力,或没有足够的时间和专业人员完成这些工作就进行仿真研究也是不合适的。

(7) 一般情况下,复杂系统的仿真结果很难解释和分析。很多情况下,仿真输出一般都是基于输入的随机变量,因此很难区分观测到的仿真结果是源于系统内部的相互作用还是源于系统固有的随机性。如果不具备对仿真结果的分析能力,分析需要的经费不足,专业人员有限或仿真实验分析时间可能超过指定期限,那么采用仿真方法将会带来风险。

(8) 如果决策人员对仿真具有不合理的要求,请求开展的研究工作太多,没有明确的研究目标,时间进度要求过高,或者对仿真的能力估计过高,都会导致仿真应用的失败。

(9) 如果系统行为(人的行为)过于复杂,无法进行正确的定义,采用仿真方法也是不合适的。

1.3.3 仿真技术在核动力装置中的应用

核动力装置的仿真技术主要是伴随着核电仿真机的发展而逐步成熟的。早在 20 世纪 50 年代,就开始了核电仿真机发展的萌芽阶段。该阶段以采用模拟计算机为计算机仿真的主要特征。

1957 年,英国原子能研究院为了培训 Calder Hall 型核电站的人员,设计和开发了一台培训仿真机。数学模型运算和逻辑系统采用模拟计算机和电子机械辅助装置,比较完整地



复制了该核电站的控制盘台。应该说,这是世界上首台有一定使用价值的核心系统培训仿真机。1958年,英国为一艘 Savannah 核动力商船建造了一台完全复制真实操作盘台的培训用仿真机。其硬件采用标准的、通用性的模拟电子计算机。它的精度可以用于培训,也可以用于系统操作的工程研究。英国中央发电局(Central Electricity Generating Board, CEGB)为了培训运行人员,于1959年建成了它的第一台核电仿真机,该核电仿真机是由 Elliots 公司建造的。1966年英国中央发电局又安装了第二台核电仿真机,该核电仿真机是由 Redifon 公司研制的。它们均采用模拟计算机。后来,这两台仿真机做了大量修改,构成了英国最老的核电仿真培训中心 Oldburg - on - seven。在此时期,用于指导仿真机制造、运行和维护的法规很不完善。在美国,唯一的依据便是 10CFR55(操纵员审批)的附录 A 中笼统的叙述。1960年在维也纳召开的第一届 IFAC(国际自动控制学会)国际会议上开始出现模拟和数字混合式仿真技术的论述。1968年,日本原子能研究所开发了第一台核电仿真机。它采用的是数字-模拟混合式计算机。1971年,东京电力公司酝酿成立日本第一个正式的沸水堆培训中心,于1973年安装了日本东芝公司制造的第一台全范围仿真机。1968年6月,General Electric(GE)公司在伊利诺伊州的 Morris 建成了美国第一个核电仿真培训中心,也是世界上第一台完全复制控制室的沸水堆核电培训用的仿真机。1971年,美国 Singer 公司 Link 仿真系统与 ERI 公司先后开发了电站仿真机。随后,Singer - Link 公司研制了第一台由核电厂业主购买的仿真机。1972年,Westinghouse Electric(西屋电气公司)把它自己设计和开发的第一台核电仿真机安装在该公司设在伊利诺伊州 Zion 的培训中心。仿真对象是 Zion 核电厂 1 号机组 1 100 MW 四回路压水堆,这是英国第一台成功的压水堆仿真机。

培训仿真机的开发期正是计算机工业的早期发展阶段。由于计算机能力有限,当时的仿真机具有如下特征:

- (1) 数学模型简单,系统中热工水力过程都采用单相、集总参数模型描述;
- (2) 初始工况预置能力不超过 12 个,故障设置能力在 70 ~ 100 个之间;
- (3) 对复杂系统常采用“黑盒子”模拟;
- (4) 仿真系统中常常嵌有原型实物,如汽轮发电机组的控制器;
- (5) 大量使用汇编语言;
- (6) 仿真机能够仿真的系统范围和过程有限,仿真精度较低,并且修改和提高很困难。

1973年至1978年,仿真机的发展进入了潜在发展期,这个时期仿真机的数量增加很慢,但下列因素为其发展提供了良好的条件:

(1) 数字计算机技术迅速发展,出现增强型 32 位小型机(如 VAX 和 SEL 系列计算机),为研制高性能的仿真机提供了基础;

(2) 大量核电厂投入运行(如美国已有约 50 座电厂运行),这些电厂为验证仿真机性能提供了大量实验数据;

(3) 仿真机的业主不仅是单纯的设计建造核电站的公司(如 WH 和 GE),出现了第一家公司所有的培训仿真机;

(4) 由美国核管理委员会(Nuclear Regulatory Commission, NRC)主持,设计公司、电厂业主和仿真机制造公司组成的小组编制了第一个全复制型培训仿真机国家标准,即“Nuclear Power Plant Simulators for Use in Operation Training—ANS3.5, 1975”。

1974年,日本建成第一台压水堆核电培训仿真机,仿真对象和美国西屋公司的 Zion 培训中心一样。1977年,一台 400 MW 的钠冷却回路快中子增殖堆仿真机开始运行于美国电