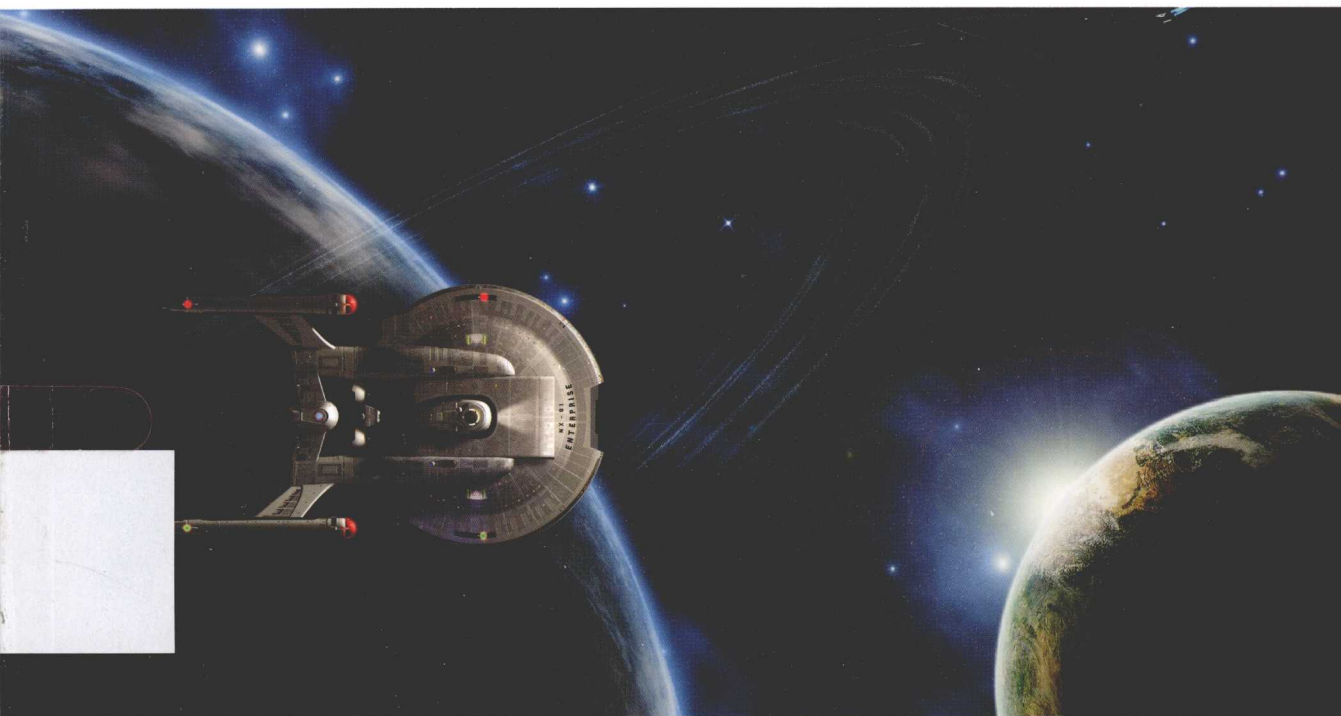




卓越工程师系列丛书·飞行器设计

飞行器系统仿真 实训教程

闫晓东 许 志◎编著



西北工业大学出版社

V47
30

014009676

卓越工程师系列丛书·飞行器设计

飞行器系统仿真实训教程

闫晓东 许 志 编著

附赠(CIP)目录图



西北工业大学出版社



北航

C1695875

出版：西安理工大学出版社
地址：西安市雁塔区雁塔路127号
电话：(029)88438844 88438845
网址：www.xitp.com
邮编：710075
地址：西安市雁塔区雁塔路127号
电话：(029)88438844 88438845
网址：www.xitp.com
邮编：710075

873000410 .

卓越工程师教育培养计划教材

【内容简介】 本书将理论与实例相结合,系统地阐述了飞行器系统仿真的基础理论和方法。本书分 11 章,内容涵盖了系统仿真的建模理论和方法、数值积分方法和插值方法、飞行器轨迹仿真的数学模型、飞行器建模仿真软件、蒙特卡罗统计打靶、试验设计与分析、半物理仿真技术、快速原型技术、视景仿真技术及软件,以及模型置信度验证与评估等。

本书可作为高等学校飞行器设计和相关专业的本科生、研究生教材,也可供从事飞行器设计的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

飞行器系统仿真实训教程/闫晓东,许志编著. —西安:西北工业大学出版社,2013.3
(卓越工程师系列丛书. 飞行器设计)

ISBN 978-7-5612-3635-2

I. ①飞… II. ①闫…②许… III. ①飞行器—系统仿真—教材 IV. ①V47

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 061517 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:(029)88493844 88491757

网 址:www.nwpup.com

印刷者:兴平市博闻印务有限公司

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:16.375

字 数:399 千字

版 次:2013 年 8 月第 1 版

定 价:33.00 元

2013 年 8 月第 1 次印刷

前 言

当今世界,科技发展日新月异,特别是随着计算机技术的快速发展,系统建模与仿真技术也得到了快速发展。从最初的小系统、单专业建模仿真,发展到了如今复杂大系统、多专业联合仿真。仿真系统的规模越来越大,仿真系统的行为与结构也越来越复杂,对仿真对象的模拟也越来越逼真。可以说系统仿真已经成为飞行器设计过程中必不可少的内容。目前与仿真相关的书籍较多,但是阐述飞行器仿真理论和方法的书籍较少,而且这些书籍要么工程性强而理论性不足,要么系统性不够,难以适应卓越工程师的培养目标。因此针对卓越工程师的培养方案和目标,有必要有针对性地编写一本飞行器系统仿真教材,以满足卓越工程师培养的需求。

本书为卓越工程师系列丛书之一,系统地讲述了飞行器系统仿真相关知识,主要内容包括系统仿真中的数学建模方法,常用的数值积分方法和插值方法,飞行器轨迹仿真的数学模型,仿真软件的简要介绍,蒙特卡罗打靶法及打靶结果统计分析,试验设计方法及其结果分析,虚拟现实及视景仿真技术,飞行器半实物仿真技术及实例分析,快速原型设计技术,仿真可信度评估技术与方法。附录中给出了常用的正交设计表和均匀设计表,以及飞行器仿真的典型算例。

本书针对卓越工程师的培养过程,具有知识覆盖面广、讲述内容难度适中、系统性强的特点,适合本科生课程教学使用。

本书第9,10章由许志编写,其余章节由闫晓东编写,全书由闫晓东统稿。

本书在编写过程中得到了西北工业大学航天学院空天飞行器实验室的大力支持,在此表示衷心的感谢!

由于本书涉及内容较多,疏漏之处在所难免,请读者批评指正,以便勘误纠错。

编著者

2013年1月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 系统建模与仿真技术的概念及模型	1
1.2 系统建模与仿真技术在军事领域的应用	3
1.3 国外建模与仿真技术及应用发展动态	3
1.4 系统建模与仿真	5
第 2 章 系统的数学模型	11
2.1 连续时间系统的数学模型	11
2.2 离散时间系统的数学模型	23
第 3 章 仿真数值算法	32
3.1 常微分方程的数值解法	32
3.2 数据插值	46
第 4 章 飞行器数学模型	56
4.1 坐标系定义	56
4.2 环境模型	61
4.3 干扰模型	66
4.4 动力系统模型	68
4.5 气动力及气动力矩	69
4.6 动力学方程组	71
第 5 章 仿真软件简介及使用	80
5.1 动力学仿真软件	80
5.2 Matlab/Simulink 仿真软件	94
第 6 章 蒙特卡罗打靶法	114
6.1 统计打靶意义	114
6.2 蒙特卡罗法思想	115
6.3 实现流程	117
6.4 随机数及随机变量的产生	117
6.5 用蒙特卡罗法计算导弹命中概率	125





第7章 试验设计方法	133
7.1 均匀试验设计方法	133
7.2 正交试验设计方法	138
7.3 回归分析方法	149
第8章 视景仿真技术	160
8.1 视景仿真软件	160
8.2 OpenGL 视景过程的编程实现	166
第9章 实时半实物仿真	177
9.1 半实物仿真概述	177
9.2 半实物仿真系统组成	180
9.3 半实物仿真系统的主要设备和模型	181
9.4 射频制导半实物仿真及其系统设计	186
9.5 成像制导半实物仿真及其系统设计	191
9.6 红外制导半实物仿真及其系统设计	194
9.7 激光制导半实物仿真及其系统设计	197
第10章 制导控制快速原型技术	201
10.1 快速原型设计的概念	201
10.2 快速原型系统构成	206
10.3 弹载计算机	213
第11章 仿真可信度评估	219
11.1 基本概念	219
11.2 仿真可信度评估方案	223
11.3 VV&A 技术	227
附录	235
附录一 常用的均匀设计表	235
附录二 常用的正交设计表	243
附录三 飞行轨迹仿真实例	248
参考文献	256

第 1 章 绪 论

当今世界,科技发展日新月异,特别是随着计算机技术的快速发展,系统建模与仿真技术也得到了快速发展。从最初的小系统、单专业建模仿真,发展到了如今复杂大系统、多专业联合仿真。仿真系统的规模越来越大,仿真系统的行为与结构也越来越复杂,对仿真对象的模拟也越来越逼真。

航空、航天飞行器是人类智慧的结晶,具有系统复杂、系统耦合性强、涵盖学科领域多等特点,其研发过程是一个漫长而又复杂的过程。将日益成熟的系统建模仿真方法应用到航空、航天飞行器的研发中是一个必然的趋势,而且从目前来看,一方面,系统建模仿真技术已经在航空、航天飞行器的研发中发挥了巨大的作用,大大减少了设计人员的工作量,缩短了飞行器的研发周期,减少了研发经费;另一方面,系统建模仿真技术在飞行器研发中的应用,也大大促进了系统建模仿真技术本身的快速发展。

1.1 系统建模与仿真技术的概念及模型

系统建模与仿真技术是以相似原理、模型理论系统技术、信息技术以及建模与仿真应用领域的有关专业技术为基础,以计算机系统、与应用有关的物理效应设备及仿真器为工具,利用模型对系统(已有的或设想的)进行研究、分析、评估、决策或参与系统运行的一门多学科的综合技术。典型的系统建模与仿真过程包括系统模型建立、仿真模型建立、仿真程序设计、仿真试验和数据分析处理等,涉及多学科、多领域的知识与经验。随着现代信息技术的高速发展以及军用和民用领域对仿真技术的迫切需求,仿真技术也得到了飞速的发展。建模与仿真技术的作用主要有下述几方面:

- 优化系统设计;
- 对系统或系统的某一部分进行性能评价;
- 节省经费;
- 重现系统故障,以便判断故障产生的原因;
- 避免试验的危险性;
- 进行系统抗干扰性能的分析研究;
- 训练系统操作人员;
- 为管理决策和技术决策提供依据。

建模与仿真技术可以有多种分类方法。按系统模型的特性,可分为连续系统仿真、离散系统仿真、连续离散(事件)混合系统仿真;按仿真的实现方法和手段,可分为物理仿真、计算机仿真、硬件在回路中的仿真(半实物仿真)和人在回路中的仿真;根据人和设备的真实程度,可分为实况仿真、虚拟仿真和构造仿真。建模与仿真的基本流程如图 1-1 所示。



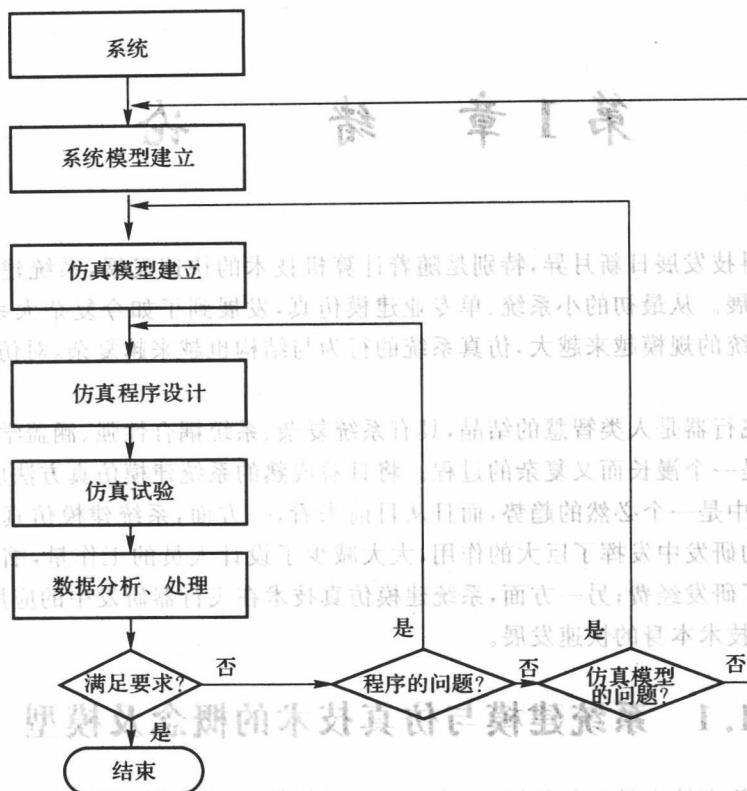


图 1-1 建模与仿真基本流程图

总结 20 世纪及近几年系统仿真技术发展的特点,不难给出下述结论:分布交互仿真、虚拟现实仿真、离散事件系统仿真、武器系统半实物仿真、作战仿真、面向对象仿真和建模与仿真的 VV&A 等现代建模与仿真技术及其应用取得了引人注目的进展。建模与仿真技术已成为高科技产品从决策、论证、设计、试验、训练到更新等全生命周期各个阶段不可缺少的技术手段,为研究和解决复杂系统问题提供了有效的工具。它是一种可控制的、无破坏性、耗费小并允许多次重复的试验手段。建模与仿真在武器系统全生命周期各阶段的应用如图 1-2 所示。

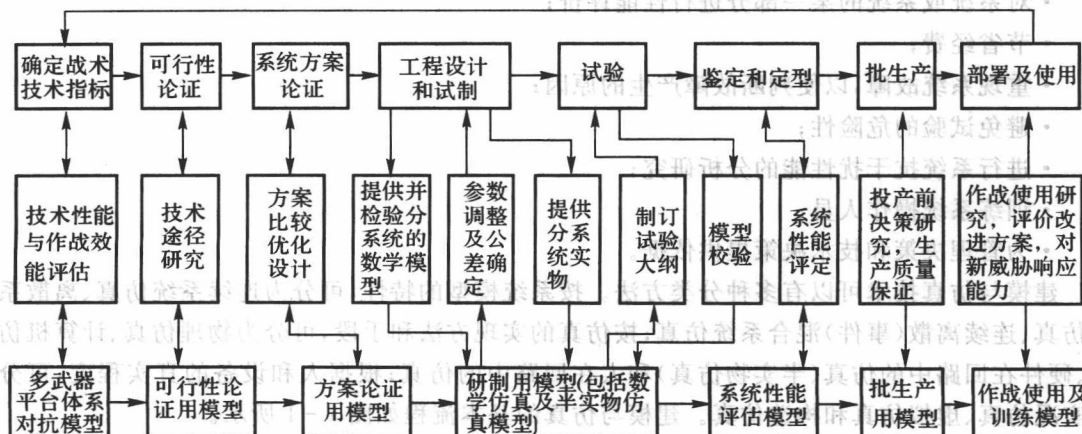


图 1-2 建模与仿真在武器系统全生命周期各阶段应用示意图

现代建模与仿真技术体系已经形成,并日趋完善。在军事应用领域,仿真技术正向服务于系统的全寿命、全系统和管理的全方位方向迅速发展,并正向作战仿真方向发展,是促进武器装备成系统、成建制地形成战斗力和保障能力的强有力手段;在观念上,仿真技术与高性能计算一起,正成为继理论研究和试验研究之后第三种认识、改造客观世界的方法,是解决复杂系统的重要技术途径之一。

1.2 系统建模与仿真技术在军事领域的应用

在军事领域,仿真技术已经成为武器装备研制与试验中的先导技术、校验技术和分析技术。采用仿真技术使武器系统靶场试验次数减少了30%~60%,研制费用节省了10%~40%,研制周期缩短了30%~40%。

当前,现代建模与仿真在技术上正向以“数字化、虚拟化、网络化、智能化、集成化、协同化”为特征的方向发展;在军事领域,军用建模与仿真技术服务于武器装备发展论证和决策、型号研制、鉴定定型、训练使用、维护保障、作战应用和武器装备采办等领域。

系统建模与仿真技术在军事领域的发展有两个主要特点,即武器系统仿真应用正分别朝着纵向(全生命周期、全系统和管理的全方位方向)和横向(多武器平台、体系)扩展。建模与仿真技术中的体系仿真技术、武器装备研制仿真技术、基于仿真的虚拟采办及虚拟样机技术、虚拟战场技术、智能化建模仿真技术和仿真网络等的综合运用,已成功地在深度和广度上扩展了仿真技术的应用领域,仿真技术和仿真系统在各应用领域都发挥了巨大的作用。

1.3 国外建模与仿真技术及应用发展动态

以美国为代表的发达国家,仿真系统已嵌入到作战系统,成为战斗力的重要组成部分,支持了装备论证、研制、使用等全生命周期中的相关工作,是建模与仿真技术为新的军事理论与作战思想服务的综合体现,标志着军用仿真技术的发展达到了一个新的高度。

1.3.1 武器装备研制和武器系统仿真技术

在武器装备研制方面,美国各军兵种及各大军火公司均建有自己的大型仿真试验室,特别是美国各军兵种,都建有种类齐全的半实物仿真试验室,可以进行单一装备和多种装备的综合性能仿真试验与作战仿真试验。如陆军红石兵工厂,建有红外、毫米波、射频、红外成像等多种制导体制的综合仿真试验室,可以满足陆军装备各种制导武器的半实物仿真需要。

美国还通过分布式仿真网络,将各大仿真中心与作战指挥中心、军事基地等连接起来,可以进行实时的武器装备作战半实物仿真,进行战术演练,评价武器系统的作战能力。

在武器系统仿真方面,美国陆军高级仿真中心的武器系统仿真设施包括3个屏蔽室中的全尺寸武器系统地面设备,能够实现设备之间的互联,并能与其他设备互联。借助于大量半实物仿真技术并将武器系统仿真应用到战场仿真中去,能够对性能指标、控制策略和体系以及不同武器系统之间的互操作性进行模拟研究,并能对多目标、多武器系统环境下的各种武器进行详细的性能评估。

1.3.2 体系对抗仿真技术

未来联合作战的内容已经向信息化作战时代转化,全纵深、非线性、非技术作战的特点更加突出,因此对体系对抗仿真技术需求更加明显。如美国十分重视体系对抗仿真技术的研究及应用,将不同内容、位于不同地点的仿真器进行联网,组成分布式一体化的综合仿真试验环境,用于综合作战仿真试验;还结合先进的建模仿真与高性能计算机组成虚拟战场,对武器系统进行研制试验、鉴定与作战训练。为实现仿真互操作与重复使用,美国的体系对抗仿真正在向通用的高层体系结构(HLA)方向发展,并正在开展可扩展的仿真服务框架研究。

大规模体系对抗仿真系统及其相关关键技术是发达国家研究和突破的重点,近年来国外开展的主要仿真项目和计划有下述几方面。

1. 美国的综合战区演练(STOW)计划

由美国国防部高级研究计划局和美国大西洋司令部联合开展了先进概念技术演示计划,后取名为综合战区演练计划。1997年10月,举行了STOW97的联合演练,参加演练的节点分布于美英两国5个不同地点,通过一个先进且安全的ATM网,利用DIS互联进行演练和功能演示。

2. 欧美大型军事演习(JPOW)

从1996年起,欧美联合进行每年一次的大型分布式军事演习,演练关于战区导弹防御体系与来袭目标的对抗,参加国有美国、英国、德国、荷兰、丹麦等,演习目的是评估战区导弹防御协同作战效果。

3. 战争模拟 2000(Wargame 2000)

战争模拟 2000 是美国弹道导弹防御组织联合国家测试中心共同开发的下一代作战指挥和控制仿真系统,它主要用于国家导弹防御系统(NMD)和联合战区空中导弹防御系统(JTAMD)的概念评估、战略战术和作战过程等研究。

4. 千年挑战 2002(MC02)

MC02是迄今为止美国国防部组织的规模最大、复杂程度最高的多目标的仿真活动。MC02用了多于30 000个实体仿真和相应的C⁴ISR系统,13 500人参加演习,使用美国国防部的HLARTI的演化版本连接分布在不同地方的9个实际训练场和1~8个模拟训练场,共使用了50个作战仿真系统,80%由计算机仿真完成。

1.3.3 仿真共用技术

1. 仿真系统体系结构

复杂仿真系统体系结构是仿真技术发展的重要问题。20世纪90年代前期,国外主要研究了SIMNET和DIS的复杂仿真系统体系架构。1995年,美国国防部在其建模与仿真主计划的目标中提出了为国防领域的建模与仿真制定一个通用的HLA技术框架,该框架对提高仿真系统互操作性和可重用性具有十分重要的意义。仿真框架方面最新的概念发展是“可扩展建模仿真框架”和“仿真C⁴ISR共同框架”,这些仿真框架目前在国外属于概念摸索的阶段,但代表了军用仿真框架发展的重要方向。

2. 建模与 VV&A 技术

随着仿真系统向复杂仿真系统的发展,对建模与 VV&A(校核、验证及确认)技术提出了更高的要求。在仿真建模方面,仿真模型的种类和建模方法大大增加了,其中仿真概念模型、面向对象模型、基于 Agent 建模等方法是最发展展的趋势。在建模与仿真 VV&A 方面, VV&A 的研究对象也从单个仿真模型发展到复杂仿真系统,目前国外复杂仿真系统 VV&A 发展的两个核心问题是宏观指导政策和 VV&A 标准规范。

3. 仿真支撑平台技术

仿真支撑平台是仿真系统重要的组成部分,以往的支撑平台主要包括仿真运行支撑平台和建模支撑平台两类。随着仿真系统向可互操作和可重用的复杂仿真系统方向发展,仿真支撑平台的组成在不断扩展。国外近些年来发展的重要仿真支撑平台包括 HLA 运行支撑环境(RTI)、仿真资源库、全球信息网格(GIG)和仿真系统测试平台等。

4. 仿真标准及规范

为了适应分布交互仿真技术的发展,美国的仿真管理部门、研究部门、学术界和工业界等共同组成分布交互仿真标准研究组织,定期组织研讨会,推动仿真标准的发展,目前已经通过 IEEE 公布了 DIS、IEEE1278 系列标准和 HLA、IEEE1516 系列标准,对推动分布交互仿真发展发挥了重要的作用。国外军用仿真标准规范是全方位覆盖的,复杂仿真系统开发是一项系统工程,因此必须管理和技术两方面并重,这也是对未来仿真标准规范研究的重要要求。

5. 虚拟样机技术

虚拟样机技术是将先进的仿真与建模技术、多领域的数字化设计技术、交互式用户界面技术和 VR 技术综合应用于产品开发的一项综合性技术,是一种基于计算机仿真的产品数字化设计方法。人们利用虚拟样机代替物理样机对产品进行创新设计、测试和评估,可以将不同工程领域的开发模型结合在一起,使设计者在物理样机生产出来前就可进行有效的、可验证的设计工作。虚拟样机技术在国外已得到广泛重视和研究应用,并有相应的支持虚拟样机技术的软件产品问世,如 ADMAS 等。

可见,目前世界各国特别重视军用仿真技术的发展和应工作。建模与仿真的最新成果,往往被率先应用于军事领域,在高技术条件下局部战争“体系与体系对抗”的需求牵引下,系统仿真将向更高、更全面的方面发展。目前大规模的作战模拟系统开发计划正向涵盖技术、战术、战役和战略各层次的体系对抗仿真方向发展。

1.4 系统建模与仿真

本质上讲,系统数学模型是从系统概念出发的关于现实世界的一小部分或几个方面的抽象的“映像”。为此,系统数学模型的建立需要建立如下抽象:输入、输出、状态变量及其间的函数关系。这种抽象过程称为模型构造。抽象中,必须联系真实系统与建模目标,其中描述变量起着很重要的作用,它可观测,或不可观测。

从外部对系统施加影响或干扰的可观测变量称为输入变量。

系统对输入变量的响应结果称为输出变量。

输入、输出变量对的集合,表征着真实系统的“输入-输出”性状(关系)。

综上所述,真实系统可视为产生一定性状数据的信息源,而模型则是产生与真实系统相同性状数据的一些规则、指令的集合,抽象在其中则起着媒介作用。系统数学建模就是将真实系统抽象成相应的数学表达式(一些规则、指令的集合)。

所谓系统仿真(system simulation),就是根据系统分析的目的,在分析系统各要素性质及其相互关系的基础上,建立能描述系统结构或行为过程的、且具有一定逻辑关系或数量关系的仿真模型,据此进行试验或定量分析,以获得正确决策所需的各种信息。

系统仿真的实质是:

(1)它是一种对系统问题求数值解的计算技术。尤其当系统无法通过建立数学模型求解时,利用仿真技术能有效处理。

(2)仿真是一种人为的试验手段。它和现实系统试验的差别在于,仿真试验不是依据实际环境,而是作为实际系统映像的系统模型以及相应的“人造”环境下进行的。这是仿真的主要功能。

(3)仿真可以比较真实地描述系统的运行、演变及其发展过程。

1.4.1 系统模型的一般描述及描述级

1. 系统模型的一般描述

一个系统的数学模型可以用以下七元组集合来描述:

$$S = (T, U, \Omega, X, Y, \delta, \lambda)$$

其中,

T :时间基,描述系统变化的时间坐标, T 为整数则称为离散时间系统, T 为实数则称为连续时间系统。

U :输入集,代表外部环境对系统的作用。

Ω :输入段集,描述某个时间间隔内的输入模式,是 (U, T) 的一个子集。

X :内部状态集,描述系统内部状态量,是系统内部结构建模的核心。

δ :状态转移函数,定义系统内部状态是如何变化的,是一个映射。

Y :输出集,系统通过它作用于环境。

λ :输出函数,是一个映射,给出了一个输出段集。

2. 系统模型描述级(水平)

按照系统论的观点,实际系统可在某种级(水平)上被分解,因此系统的数学模型可以有不同的描述级(水平)。

(1)性状描述级。性状描述级或称为行为描述级(行为水平)。在此级上描述系统是将系统看成黑箱,并施加输入信号,同时测得输出响应,结果是得出一个输入-输出对 (ω, ρ) 及其关系 $R_s = \{(\omega, \rho): \Omega, \omega, \rho\}$ 。

因此,系统的性状级描述只给出输入-输出观测结果。其模型为五元组集合结构:

$$S = (T, U, \Omega, Y, R)$$

当 ω, ρ 满足 $\rho = f(\omega)$ 函数关系时,其集合结构变为

$$S = (T, U, X, Y, F)$$

(2)状态描述级。在状态结构级(状态结构水平)上,系统模型不仅能反映输入-输出关

系,而且应能反映出系统内部状态,以及状态与输入、输出间的关系,即不仅定义了系统的输入与输出,而且定义了系统内部的状态集及状态转移函数。

系统的数学模型对于动态结构可用七元组集合来描述,即

$$S = (T, U, \Omega, X, Y, \delta, \lambda)$$

对于静态结构有

$$S = (U, X, Y, \lambda)$$

(3)复合结构级。系统一般由若干个分系统组成,对每个分系统都以行为级描述,被视为系统的一个“部件”。这些部件有其本身的输入、输出变量,以及部件间的连接关系和接口。于是,可以建立起系统在复合结构级(分解结构级)上的数学模型。

这种复合结构级描述是复杂系统和大系统建模的基础。

应该强调:

系统分解为复合结构是无止境的,即每个分系统还会有自己的复合结构;

一个有意义的复合结构描述只能给出唯一的的状态结构描述,而一个有意义的状态结构描述本身只有唯一的性状(行为)描述;

上述系统概念必须允许分解停止,又允许进一步分解,即包含递归可分解性。

1.4.2 系统仿真的研究内容

1. 仿真三要素

系统仿真的三要素是系统、模型、计算机,如图 1-3 所示。

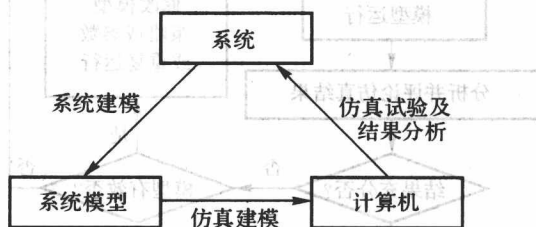


图 1-3 系统仿真三要素

联系三者的三个基本活动:

系统建模:一直是研究的重点,技术成熟,包括抽象的公式、定理等,需要结合相关专业知识。

仿真建模:难点之一,先要设计算法使系统模型能被计算机所接受,然后编程,再在计算机上运行,由此产生仿真算法、仿真软件,技术较为成熟。

仿真试验及结果分析:最有实际意义,但常常被忽略,技术难点多。

2. 系统仿真的基本步骤

系统仿真过程即建立模型并通过模型在计算机上的运行对模型进行检验、修正和分析的过程。与软件开发类似,可以分为若干阶段。系统仿真的基本步骤如图 1-4 所示。

系统定义:求解问题前,先要提出明确的准则来描述系统目标及是否达到的衡量标准,其次必须描述系统的约束条件,再确定研究范围,即哪些实体属于要研究的系统,哪些实体属于

系统的环境。

(1)构造模型:抽象真实系统,并规范化,确定模型要素、变量、参数及其关系,表达约束条件;要求以研究目标为出发点,模型性质尽量接近原系统,尽可能简化,易于理解、操作和控制。

(2)数据准备:收集数据,决定使用方式,数据完整性、有效性检验,用来确定模型参数。

(3)模型转换:用计算机语言(高级语言或者专用仿真语言)描述数学模型。

(4)模型运行:获取被研究系统的信息,预测系统运行情况,一般是动态过程,常反复运行以获得足够的试验数据。

分析并评论仿真结果:仿真技术包括了某些主观的方法,如抽象化、直观感觉和设想等,在提交仿真报告前,应全面分析和论证仿真结果。

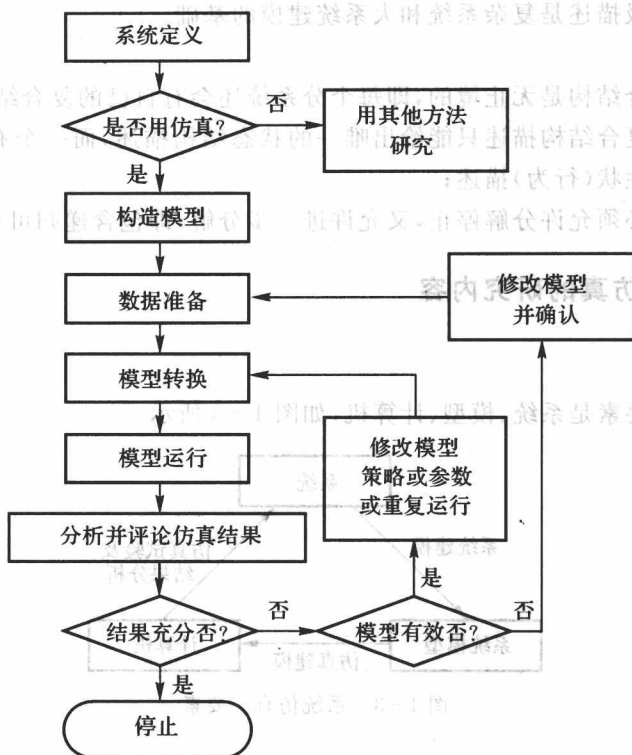


图 1-4 系统仿真的基本步骤

3. 系统仿真的应用

现代仿真技术经过近 50 年的发展与完善,已经在各行各业做出卓越贡献,同时也充分体现出其在科技发展与社会进步中的重要作用。

(1)航空与航天工业。对于航空与航天工业的产品来说,系统的庞杂、造价的高昂等因素促成了其必须建立起完备的仿真试验体系。在美国,1958 年所进行的四次发射全部失败了,1959 年的发射成功率也不过 57%。通过对实际经验的不断总结,美国宇航局逐步建立了一整套仿真试验体系,到了 20 世纪 60 年代发射成功率达到 79%,在 70 年代发射成功率已达到 91%,近年来,其空间发射计划已很少有不成功的情况了。

(2)电力工业。电力系统是最早采用仿真技术的领域之一。在电力系统负荷分配、瞬态稳

定性以及最优潮流等方面,国内较早地采用了数字仿真技术,取得了显著的经济效益。在三峡水利工程的子项目——大坝排沙系统工程——的设计中,设计人员也采用了物理仿真的方法,取得了较完善的研究成果。

近年来,国内在电站操作人员培训模拟系统的研制上,达到了国际先进水平,为仿真技术的应用开辟了广阔的前景。

(3)原子能工业。由于能源的日趋紧张,原子能的和平利用在世界范围内为人们广泛重视,随着核反应堆的尺寸与功率的不断增加,整个原子能电站运行的稳定性、安全性与可靠性等问题成为必须要解决的问题。因此,几乎大部分核电站都建有相应的仿真系统,许多仿真器是全尺寸的,即仿真系统与真实系统是完全一致的,只是对象部分,如反应堆、涡轮发电机有关的动力装置是用计算机来模拟的。核电站仿真器用来训练操作人员以及研究异常故障的排除和处理,对于保证系统的安全运行是十分重要的。目前,我国及世界各主要核技术先进国家在这方面均建立了相当规模的仿真试验体系,并取得了可观的成果。

(4)石油、化工及冶金工业。石油、化工生产过程中有一个显著的特点就是过程缓慢,而且往往过程控制、生产管理、生产计划、经济核算等混在一起,使得综合效益指标难以预测与控制。因此,仿真试验成为石油、化工及冶金系统设计与分析研究的基本手段,仿真技术对这些领域的技术进步也不同程度地起到了促进作用。

4. 系统仿真的发展现状及发展趋势

(1)系统仿真的发展现状。工程系统仿真作为虚拟设计技术的一部分,与控制仿真、视景仿真、结构和流体计算仿真、多物理场以及虚拟布置和装配维修等技术一起,在贯穿产品的设计、制造和运行维护改进乃至退役的全寿命周期技术活动中,发挥着重要的作用,同时也在满足越来越高和越来越复杂的要求。因此,工程系统仿真技术也就迅速地发展到了协同仿真阶段。其主要特征表现为下述几方面。

1)控制器和被控对象的联合仿真:Matlab+AMESIM,可以覆盖整个自动控制系统的全部要求。

2)被控对象的多学科、跨专业的联合仿真:AMESIM+机构动力学+CFD+THERMAL+电磁分析。

3)实时仿真技术:实时仿真技术是由仿真软件与仿真机等半实物仿真系统联合实现的,通过物理系统的实时模型来测试成型或者硬件控制器。

4)集成设计平台:现代研发制造单位,尤其是设计研发和制造一体化的大型单位,引进PDM/PLM系统已经成为信息化建设的潮流。在复杂的数据管理流程中,系统仿真作为CAE工作的一部分,被要求嵌入流程,与上下游工具配合。

5)超越仿真技术本身:工程师不必是精通数值算法和仿真技术的专家,而只需要关注自己的专业对象,其他大量的模型建立、算法选择和数据前后处理等工作都交给软件自动完成。这一技术特点极大地提高了仿真的效率,降低了系统仿真技术的应用门槛,避免了因为不了解算法造成的仿真失败。

6)构建虚拟产品:在通过建立虚拟产品进行开发和优化的过程中,关注以各种特征值为代表的系统性能,实现多方案的快速比较。

(2)系统仿真技术的发展趋势。

1)摒弃单一专业的仿真。单一专业仿真将退出系统设计的领域。作为总体优化的系统级

设计分析工具,必要条件之一是跨专业、多学科协同仿真。

2) 跟随计算技术的发展。随着计算技术在软硬件方面的发展,大型工程软件系统开始有减少模型的简化、减少模型解耦的趋势,力争从模型和算法上保证仿真的准确性。更强更优化的算法,配合专业的库,将提高大型工程对象的系统整体仿真的可能性。在高性能计算方面,将支持包括并行处理、网格计算技术和高速计算系统等技术。

3) 平台化。要求仿真工具能够提供建模、运算、数据处理(包括二次开发后的集成和封装)、数据传递等全部仿真工作流程要求的功能,并且通过数据流集成在更大的 PDM/PLM 平台上。同时,在时间尺度上支持全开发流程的仿真要求,在空间尺度上支持不同开发团队甚至是交叉型组织架构间的协同工作以及数据的管理。

4) 整合和细分市场。

整合化:将出现主流的标准工具。其特征是功能涵盖了现代工业领域的主要系统仿真需求,并与其他主流软件工具通过接口或后台关系数据库级别的数据交互,有协同工作的能力;软件自身的技术进展迅速,具有强大的发展后劲。

专业化:随着市场需求的细分,走专业化道路,将出现极专业的工具。这些工具将在某些具体的专业领域提供深入研究的特殊支持,如开发特殊的库或模型,专注于具有鲜明行业特征的技术,满足特殊的行业标准。以后将出现整合型工具和专业化工具互补的局面。

智能化:将引进更加友好的操作界面、智能化的求解器及模型管理。不断改进 GUI,让软件使用者直接体验到数值计算专家开发的后台工具提供的强大功能,同时减少软件学习和使用的困难。提供易学易用的强大工具。

第2章 系统的数学模型

第1章论述了有关系统和模型的基本概念,系统是研究的对象,模型是系统行为特性的描述,仿真则是建立在模型上的试验。任何系统的动态特性都取决于两大因素,即内因(系统的结构、参数、结构状态)和外因(输入信息和干扰等)。换句话说,任何一个实际系统,不论它是电的、机械的还是液压的,也不论是生物学的还是经济学的,只要能把它的内外两大因素都用数学表达式描述出来,也就是得到了系统的数学模型。有了它,便可以在计算机上研究实际系统的动态特性了。建立系统的数学模型应遵循以下基本原则:

(1)清晰性:系统模型是由许多分系统、子系统模型构成的,在模型与模型间,除了研究目的需要的信息联系外,相互耦合要尽可能少,结构尽可能清晰。

(2)切题性:模型只应包括与研究目的有关的那些信息,而不是一切方面。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)精确性:建立系统模型时,应该考虑所收集的用以建立模型的信息的精确度,要根据所研究问题的性质和所要解决的问题来确定对精确度的要求。对于不同的工程,精确度要求是不一样的。即使对于同一个工程,由于研究的问题不同,精确度要求也可能不一样。

(4)集合性:指把一些个别的实体能组成更大实体的程度,对于一个系统实体的分割,在可能时应尽量合并为大的实体。

本章主要讲述常用的连续时间系统和离散时间系统的数学模型和各种模型间的转换。

2.1 连续时间系统的数学模型

2.1.1 常用的连续时间系统数学模型

常用的连续时间系统数学模型有以下几种。

1. 微分方程

设系统的输入为 $u(t)$, 输出为 $y(t)$, 它们之间的关系, 即系统的微分方程为

$$\frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = b_m \frac{d^m u(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} u(t)}{dt^{m-1}} + \cdots + b_1 \frac{du(t)}{dt} + b_0 u(t) \quad (m \leq n) \quad (2.1)$$

式中, $a_i (i=0, 1, \cdots, n-1)$, $b_j (j=0, 1, \cdots, m)$ 为常系数。

2. 传递系数

对式(2.1)两边进行拉普拉斯变换,并假设 $y(t)$ 和 $u(t)$ 及各阶导数的初值为零,则可得

$$s^n Y(s) + a_{n-1} s^{n-1} Y(s) + \cdots + a_1 s Y(s) + a_0 Y(s) = b_m s^m U(s) + b_{m-1} s^{m-1} U(s) + \cdots + b_0 U(s) \quad (2.2)$$