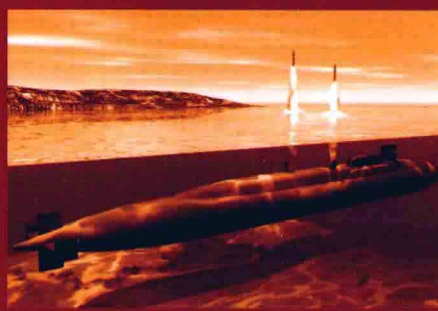


≡ 锚 ≡ 海军级重点教材

# 仿真系统 分析与设计

SIMULATION SYSTEMS  
ANALYSIS  
AND DESIGN



张毅 王士星 等编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

海军级重点教材

# 仿真系统分析与设计

张 毅 王士星 杨秀霞 编著  
方 伟 曹文静 刘晓娣

国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

本书系统地介绍了系统仿真所需要的基本工具、方法与理论,并且给出了大量的工程实例。

本书分为四篇 11 章,首先介绍了 MATLAB 仿真系统设计理论与方法,然后从飞行模拟理论、飞行系统仿真、飞行操纵与运动模拟、视景与音响系统、计算机实时系统等几个方面,全面分析了飞行模拟器系统设计的相关技术。在第三篇中重点阐述了虚拟现实技术的语言环境与设计技术。最后给出了具体的工程实例。

本书内容丰富、论述简洁、密切联系实际,并提供了大量不同层次的示例与实例,可作为高等院校的教科书,以及相关的技术人员和科研工作者的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

仿真系统分析与设计/张毅等编著. —北京:国防工业出版社,2010.4  
海军级重点教材  
ISBN 978-7-118-06796-5

I. ①仿... II. ①张... III. ①计算机仿真—程序设计 IV. ①TP391.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 054586 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

\*

开本 710×960 1/16 印张 25 $\frac{3}{4}$  字数 462 千字

2010 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 52.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

# 前 言

系统仿真以相似原理、系统技术、信息技术及应用领域有关专业技术为基础,以计算机和各种模拟器以及专用物理效应设备为工具,利用系统模型对真实的或假想的系统进行动态研究的一门多学科的综合技术。

本书系统地分析介绍了现代仿真系统技术及相关典型系统的设计应用。现代仿真系统的应用范围不断扩大,如攻防对抗系统的多武器平台的作战仿真、基于虚拟样机的设计和虚拟制造、飞行器模拟等,除了军事、工业应用外,还在管理、生物、农业、环境等人类社会和国民经济的各个领域不断拓展其应用空间。

本书的主要目的不是将所有涉及的仿真学科详尽地介绍给读者,而是以仿真系统典型设计应用为主线索,将有关的理论基础、软件工具与技术、虚拟现实技术综合为一较完整的仿真系统框架体系,同时提供一些仿真系统设计与分析技术实例,这是编者在参阅国内外大量文献和长期教学科研实践获得的成果与经验总结。

本书分为四篇 11 章,首先介绍了 MATLAB 仿真系统设计理论与方法,然后从飞行模拟理论、飞行系统仿真、飞行操纵与运动模拟、视景与音响系统、计算机实时系统等几个方面,全面分析了飞行模拟器系统设计的相关技术。在第三篇中还重点阐述了虚拟现实技术的语言环境与设计技术,最后给出了具体的工程实例。

本书的第 1 章、第 4 章、第 11 章由张毅编写,第 5 章、第 6 章由王士星编写,第 2 章、第 3 章由杨秀霞编写,第 9 章、第 10 章由方伟编写,刘晓娣编写第 7 章,第 8 章由曹文静编写并对书稿进行了校对。感谢海军航空工程学院的马登武教授对书稿做了认真的审查和推敲,并提出了许多宝贵的意见和建议。感谢海军

航空工程学院控制工程系和训练部的领导和同仁们,他们教与学的经历和反馈意见对本书的完成起着重要的作用。在此还要特别感谢参考文献中的所有作者,正是他们大量的先期研究和实践推动了本书的出版。

本书的出版得到了国防工业出版社的大力支持,对此表示感谢。

由于作者水平有限,书中错误和不当之处在所难免,敬请读者批评指正,不吝赐教。

作者

2009年9月

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 仿真系统的组成、分类及作用 .....	2
1.2 仿真算法和仿真软件.....	3
1.3 飞行仿真技术.....	5
1.3.1 飞行仿真系统组成 .....	6
1.3.2 飞行仿真系统设计的关键技术 .....	6
1.3.3 实时仿真技术 .....	8
1.4 虚拟现实与仿真技术.....	9
1.5 全书的基本结构和内容 .....	10
1.6 小结 .....	12
1.7 习题 .....	12

## 第一篇 MATLAB 仿真系统

<b>第 2 章 MATLAB 语言程序设计</b> .....	13
2.1 MATLAB 的工作环境 .....	13
2.1.1 Command Window 指令窗简介 .....	13
2.1.2 Command History 历史指令窗和实录指令 diary .....	16
2.1.3 Current Directory 及文件管理.....	17
2.1.4 Workspace Browser 工作空间浏览器 .....	17
2.1.5 帮助系统.....	18
2.2 MATLAB 的语言体系 .....	19
2.2.1 MATLAB 的基本运算、数据结构与函数 .....	19
2.2.2 MATLAB 控制流 .....	26
2.2.3 MATLAB 函数 .....	28

2.3	MATLAB 数值运算 .....	31
2.3.1	矩阵运算 .....	31
2.3.2	数组运算 .....	34
2.3.3	多项式处理 .....	36
2.3.4	其他数值运算 .....	39
2.4	MATLAB 的符号运算 .....	42
2.5	MATLAB 的图形图像系统 .....	43
2.5.1	MATLAB 语言下的图形绘制 .....	43
2.5.2	MATLAB 图形用户界面设计技术 .....	54
2.6	小结 .....	63
2.7	习题 .....	63
<b>第 3 章</b>	<b>Simulink 建模与仿真 .....</b>	<b>65</b>
3.1	Simulink 数学建模与仿真 .....	65
3.1.1	Simulink 的运行及窗口介绍 .....	65
3.1.2	Simulink 的常用基本模块 .....	67
3.1.3	Simulink 模型建立及操作 .....	77
3.1.4	Simulink 仿真 .....	85
3.1.5	Simulink 建模及仿真举例 .....	90
3.1.6	封装子系统 .....	94
3.1.7	S-函数编写及其应用 .....	101
3.2	半实物仿真与实时控制 .....	107
3.2.1	Simulink 实时工具仿真 .....	109
3.2.2	xPC 在实时仿真中的应用 .....	112
3.2.3	dSPACE 模块及实时控制 .....	115
3.3	小结 .....	119
3.4	习题 .....	119

## 第二篇 飞行系统仿真

<b>第 4 章</b>	<b>飞行模拟系统基础 .....</b>	<b>121</b>
4.1	数学模型 .....	121

4.2	飞行系统仿真模型	122
4.2.1	坐标系及主要运动参数的定义	123
4.2.2	运动模型建立	125
4.2.3	系统仿真模型	129
4.3	小结	133
4.4	习题	133
<b>第5章</b>	<b>飞行模拟系统仿真</b>	<b>134</b>
5.1	飞控模拟分系统	135
5.2	飞行模拟分系统	135
5.2.1	飞行仿真仪表	136
5.2.2	发动机系统仿真	145
5.3	导航模拟系统	149
5.3.1	惯性导航系统工作原理	149
5.3.2	惯性导航系统模拟	151
5.3.3	无线电通信系统仿真	153
5.3.4	无线电导航系统仿真	154
5.4	飞行管理系统仿真	161
5.4.1	典型飞行管理系统的总体结构	162
5.4.2	典型飞行管理系统的仿真	162
5.5	小结	173
5.6	习题	173
<b>第6章</b>	<b>飞行操纵系统与运动模拟系统</b>	<b>174</b>
6.1	飞行操纵系统	174
6.1.1	操纵负荷模拟原理及方法	174
6.1.2	数学模型的建立	175
6.1.3	数字式操纵负荷系统	178
6.2	运动模拟系统	181
6.2.1	运动系统概述	181
6.2.2	六自由度平台运动系统	182
6.3	小结	194



6.4	习题	194
<b>第7章</b>	<b>音响与视景系统</b>	<b>196</b>
7.1	音响系统	196
7.1.1	飞行模拟器音响系统原理	196
7.1.2	三维真实感声音效果及影响因素	198
7.1.3	飞行模拟器音响系统设计实例	199
7.2	视景系统	203
7.2.1	概述	203
7.2.2	视景仿真基础预处理技术	204
7.2.3	视景仿真建模技术研究	211
7.2.4	视景实时解算技术	216
7.2.5	视景效果影响因素及视景显示技术	216
7.3	小结	222
7.4	习题	222
<b>第8章</b>	<b>计算机实时仿真系统</b>	<b>223</b>
8.1	计算机系统	223
8.1.1	计算机系统功能及组成	223
8.1.2	分布交互仿真	225
8.2	控制台系统	232
8.2.1	控制台系统功能及原理	232
8.2.2	控制台系统实现	233
8.2.3	关键技术难点	236
8.3	计算机实时仿真过程若干问题研究	237
8.3.1	实时仿真模型的积分算法和步长的选取	237
8.3.2	实时仿真的可信度分析(VV&A)	239
8.3.3	仿真的实时性分析	240
8.3.4	实时仿真过程中多采样频率混合情况处理	242
8.3.5	实时仿真的精度和误差分析	243
8.3.6	系统的抗干扰问题	245
8.4	小结	246

8.5 习题	247
--------	-----

### 第三篇 虚拟现实技术

<b>第9章 虚拟现实开发环境</b>	248
9.1 虚拟现实技术概述	248
9.1.1 虚拟现实技术的简介	248
9.1.2 虚拟现实技术的特征	250
9.1.3 虚拟现实技术的应用及发展趋势	251
9.1.4 虚拟现实与系统仿真	253
9.2 建模软件介绍	253
9.2.1 Creator 环境建模软件	253
9.2.2 MultiGen Creator 的构成	254
9.2.3 OpenFlight 数据结构	255
9.2.4 Creator 基本使用	257
9.2.5 CTS 地形建模软件简介	266
9.2.6 CTS 主要特性	266
9.3 Map Info 仿真软件及其应用	267
9.3.1 地理信息系统简介	267
9.3.2 MapInfo 仿真软件简介	269
9.3.3 MapX 控件概述	272
9.3.4 MapX 应用实例	283
9.4 GL Studio 仿真软件及其应用	291
9.4.1 GL Studio 仿真软件简介	291
9.4.2 GL Studio 界面	292
9.4.3 GL Studio 的应用实例	293
9.5 Vega Prime 仿真软件及其应用	304
9.5.1 Vega Prime 仿真软件简介	304
9.5.2 Vega Prime 仿真软件组成	305
9.5.3 Lynx Prime 增强模块	306
9.5.4 Lynx Prime 界面	310
9.5.5 Vega Prime 应用实例	313

9.5.6	API 函数设计 .....	323
9.6	OpenGVS 仿真软件 .....	324
9.6.1	OpenGVS 简介 .....	324
9.6.2	OpenGVS 软件层 .....	325
9.7	小结 .....	325
9.8	习题 .....	326
<b>第 10 章</b>	<b>基于虚拟现实的系统开发技术 .....</b>	<b>327</b>
10.1	三维视景开发框架 .....	327
10.1.1	概述 .....	327
10.1.2	三维视景框架结构 .....	327
10.1.3	结构描述 .....	330
10.2	基于 Vega Prime 海浪特效模拟 .....	338
10.2.1	系统需求 .....	338
10.2.2	系统实现 .....	339
10.2.3	程序完整代码 .....	341
10.3	小结 .....	344
10.4	习题 .....	344

## 第四篇 仿真实例

<b>第 11 章</b>	<b>系统仿真设计实例 .....</b>	<b>345</b>
11.1	弹目交会可视化仿真系统设计及实现 .....	345
11.1.1	总体结构 .....	345
11.1.2	系统组成 .....	346
11.1.3	系统功能 .....	346
11.1.4	实现流程 .....	347
11.1.5	详细设计 .....	349
11.1.6	软件运行界面 .....	370
11.2	飞行器实时半实物仿真系统 .....	373
11.2.1	实时半实物仿真的工作原理 .....	373
11.2.2	系统回路的硬件组成及接口 .....	375

11.2.3	仿真软件设计	377
11.2.4	通信协议	380
11.2.5	仿真可视化	382
11.3	飞行控制与惯性导航仿真训练系统	385
11.3.1	系统组成	385
11.3.2	系统实现	387
11.3.3	系统软件的设计和实现	388
11.4	小结	396
11.5	习题	397
	<b>参考文献</b>	<b>398</b>

# 第1章 绪论

系统仿真技术是当前应用最广泛的实用技术之一,它是建立在控制理论、相似理论、信息处理技术和计算技术基础之上,以计算机和其他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研究的一门综合性技术。它利用物理或数学方法来建立模型,类比模拟现实过程或者建立假想系统,以寻求过程的规律,研究系统的动态特性,从而达到认识和改造实际系统的目的。

计算机仿真技术是指以计算机为主要工具,运行真实系统或预研系统的仿真模型,通过对计算机输出信息的分析与研究,实现对实际系统运行状态和演化规律的综合评估与预测。它是分析评价现有系统运行状态或设计优化未来系统性能与功能的一种技术手段,在工程设计、航空航天、交通运输、经济管理、生态环境、通信网络和计算机集成等领域中有着广泛的应用。

仿真技术从20世纪30年代起步以来,历经了机械物理仿真阶段、电子物理仿真阶段和全数字化仿真阶段,应用范围也从最初的飞行训练器扩大到20世纪90年代的多武器平台在作战环境下的体系对抗仿真。当前,仿真技术的应用在广度、深度和规模上都得到了很大的发展,已经渗透到工业、生物、环境、社会经济等多个领域。

由于仿真技术固有的特性,国外仿真技术的发展已形成体系,尤其是在军事领域的应用,仿真技术的作用越来越显著。目前,美国、英国、法国等国以仿真技术为核心,用高速计算机网络已将各种试验系统及有关研制机构联结起来形成一个完整的试验体系,即分布式仿真试验系统。在国外,仿真技术现已成为武器系统研制、评估的重要手段,而且已成为武器系统战前演练、培训作战人员并为作战决策者提供依据的手段。美国人正在着手进行“依靠仿真试验,实现零次飞行试验评估武器系统”的设想,更体现了仿真技术的优越性,也体现了未来仿真技术的发展方向。在民用方面,以美国为代表的西方国家已开始形成仿真产业,仿真与CAD的结合、虚拟制造等,效益越来越大。

简言之,仿真(Simulation)是建立相应物理系统的数学模型在计算机上解算的过程。数学模型是仿真的基础,只有建立正确的数学模型和数据,才能得到正确的仿真结果,仿真才有意义和价值。

## 1.1 仿真系统的组成、分类及作用

### 1. 仿真系统的组成

系统仿真实质上是一类面向问题或对象,基于模型的活动。系统仿真的全过程可划分为3个阶段:模型建立阶段、模型变换阶段和仿真试验阶段。仿真系统的组成规模取决于所研究的系统问题。面向问题的仿真系统一般由仿真系统软件、仿真系统硬件、仿真系统的评估和系统的校验与确认等几部分组成。

#### 1) 仿真系统软件

它包括系统模型软件、通用软件、专用软件(应用软件)、数据库。系统模型软件一般由被仿真系统对象数学模型、仿真算法、系统运行流程等组成。

#### 2) 仿真系统硬件

仿真系统硬件可分为仿真计算机、接口、连接电缆、信号产生和激励设备、数据采集与记录显示设备、通信指挥监控设备、能源动力系统、系统测试设备及各类辅助设备。

#### 3) 仿真系统的评估

仿真系统的评估分为软件评估和硬件评估:软件评估包括评估方法、程序、指标测试方法等;硬件评估主要是评估测试设备。仿真系统的评估内容主要包括仿真系统及分系统的指标测试评估,系统的可信性、可靠性、安全性、可维护性等的评估。

#### 4) 仿真系统的校验与确认

通常,对建立的仿真系统进行评估之后,还要进行系统仿真试验设计与协调,确定仿真试验过程,通过大系统的仿真试验对仿真系统进行全面的考核,以确定仿真系统是否能满足系统仿真试验要求,是否能达到系统仿真试验目的并具有足够的可信度。

### 2. 仿真系统的分类

按照实现方式的不同可以将仿真系统分为以下4类:

#### 1) 实物仿真

实物仿真又称为物理仿真,它是指研制某些实体模型,使之能够重现原系统的各种状态。它的优点是直观形象,但是为系统构造一套物理模型投资大、周期长,且很难改变参数,如风洞试验等。

#### 2) 数学仿真

数学仿真就是用数学模型去表述一个系统,并编制程序在计算机上对实际

系统进行研究的过程。数学仿真把研究对象的结构特征或输入输出关系抽象为一种数学描述(微分方程、状态方程,可分为解析模型、统计模型)来研究,它可以方便地改变系统结构参数,优点是速度快、精确度高、重复性好;但数学仿真也有其局限性,如对某些复杂系统很难用数学模型来表示,或难以建立其精确模型,或数学模型过于复杂而无法求解,或计算量太大无法仿真。

### 3) 半实物仿真

半实物仿真又称为混合仿真。为了提高仿真的可信度或者针对一些难以建立模型的系统,在系统研究中往往把数学模型、物理模型和实体结合起来组成一个复杂的仿真系统。

按照仿真系统与实际系统时间尺寸上的关系,又可以将其分为以下3类:

#### 1) 实时仿真

实时仿真系统的仿真时钟和系统实际时钟完全一致。许多仿真应用需要满足实时性,这时往往需要实时操作系统或者专用实时仿真硬件的支持。

#### 2) 欠实时仿真

欠实时仿真系统的仿真时钟比系统实际时钟慢。

#### 3) 超实时仿真

超实时仿真系统的仿真时钟比系统实际时钟快。

### 3. 仿真系统的作用

仿真具有很高的科学研究价值和巨大的经济效益。由于仿真技术的安全性和经济性,使得仿真技术得到广泛的应用。仿真技术的主要用途有以下6点:

(1) 优化系统设计 在实际系统建立之前,通过改变仿真模型结构和调整系统参数来优化系统设计。如控制系统、数字信号处理系统的设计往往要靠仿真来优化系统性能。

(2) 系统故障再现,发现故障原因 实际系统故障的再现必然会带来某种危害性,利用仿真来再现系统故障是安全和经济的。

(3) 验证系统设计的正确性。

(4) 对系统或其子系统进行性能评价和分析,如飞机的疲劳试验。

(5) 训练系统操作员,如飞行模拟器、坦克模拟器等。

(6) 为管理决策和技术决策提供支持。

## 1.2 仿真算法和仿真软件

在建立系统的数学模型后,需要将其转变为能够在计算机上运行的仿真模

型。由于计算机只能进行离散的数值运算,因而必须推导出连续系统的递推数学公式,如解微分方程的 Runge - Kutta 算法。这就是计算机仿真算法的设计,即把数学模型转化为能在计算机上运行的仿真模型。一般来说,系统仿真的算法有如下 3 类:

- (1) 集中参数系统仿真算法。
- (2) 分布参数系统仿真算法。
- (3) 离散时间系统仿真算法。

仿真软件的功能可以概括为以下 5 点:

- (1) 为仿真提供算法支持。
- (2) 模型描述,用来建立计算机仿真模型。
- (3) 仿真试验的执行和控制。
- (4) 仿真数据的显示、纪录和分析。
- (5) 对模型、数据、文档资料和其他仿真信息的存储、检索和管理。

MATLAB 是 MathWorks 公司开发的通用仿真软件,它包含数值计算、符号计算、高级图形与可视化、高级编程语言的集成化科学计算环境。Simulink 作为 MATLAB 的重要组成部分,它提供了丰富的模块库来帮助用户快速建立动态系统模型。MATLAB 语言一直是国际科学界应用和影响最广泛的三大计算机数学语言之一。从某种意义上讲,在纯数学以外的领域中,MATLAB 语言有着其他两种计算机数学语言 Mathematica 和 Maple 无法比拟的优势和适用面。

MATLAB 以强大的科学计算与可视化功能、简单易用、开放式可扩展环境,特别是所附带的 30 多种面向不同领域的工具箱支持,使得它在许多科学领域中成为计算机辅助设计和分析、算法研究和应用开发的基本工具。

MATLAB 具有一些其他高级语言难以比拟的优点,如编写简单、编程效率高、易学易懂等,因此 MATLAB 语言也被通俗地称为演算纸式科学算法语言。在控制、通信、信号处理及科学计算等领域中,MATLAB 都得到广泛应用,已经被认可为能够有效提高工作效率、改善设计手段的工具软件,掌握了 MATLAB 就好比掌握了开启这些专业领域大门的钥匙。

MATLAB 是从事众多工业、科研领域的必备工具。无论是在校学生,还是已经参加工作的工程技术人员和科研人员,都非常渴望快速学习 MATLAB 并熟练运用它来解决各种科学问题、工程问题。

随着 MATLAB 语言和 Simulink 仿真环境的日益广泛应用,在系统仿真领域,国外很多高校在教学与研究中都把 MATLAB/Simulink 语言作为首选的计算机工具。我国的科学工作者和教育工作者也逐渐认识到 MATLAB 语言的重



要性。MATLAB 语言是一种十分有效的工具,能轻松解决在系统仿真领域的教学与研究中遇到的问题,它可以使使用者从烦琐的底层编程中解放出来,把有限的宝贵时间更多地花在解决科学问题中。

本书系统地对 MATLAB 语言和 Simulink 仿真环境做了介绍,让国内外的工程技术人员无须花费太多的时间和精力就能够尽快掌握该软件及它的一些特性和功能,并通过大量的系统仿真实例告诉使用者如何解决面临的实际问题。

### 1.3 飞行仿真技术

飞行仿真是计算机仿真在飞行器中的应用,是典型的人在回路中的仿真(Man in the Loop Simulation),其主要特点是对实时性要求很高。人在回路中的仿真,是指操作/决策人员进入仿真回路内的仿真。仿真过程中,要求利用计算机图形生成(CIG)等技术生成人的感觉环境,以便人对仿真进程进行实时控制。

飞行仿真根据仿真模型类型及其实现方式的不同,分为数字仿真、半实物仿真和实物仿真 3 种形式:数字仿真是一种利用计算机编程实现的纯数字仿真计算,主要用于对飞行器的性能进行分析与评估;半实物仿真和实物仿真通过对计算机增加一些外围硬件设备,以营造部分近似于实际飞行的工作环境,通常用于人一机系统动态特性的研究和飞行训练。

飞行仿真系统(飞行模拟器)原理框图如图 1-1 所示。

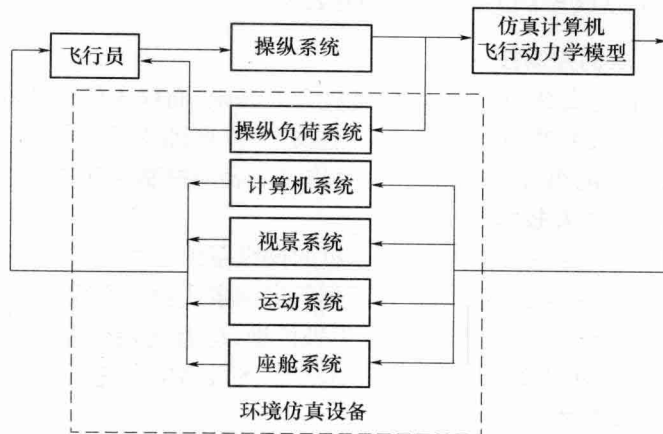


图 1-1 飞行仿真系统原理方框图