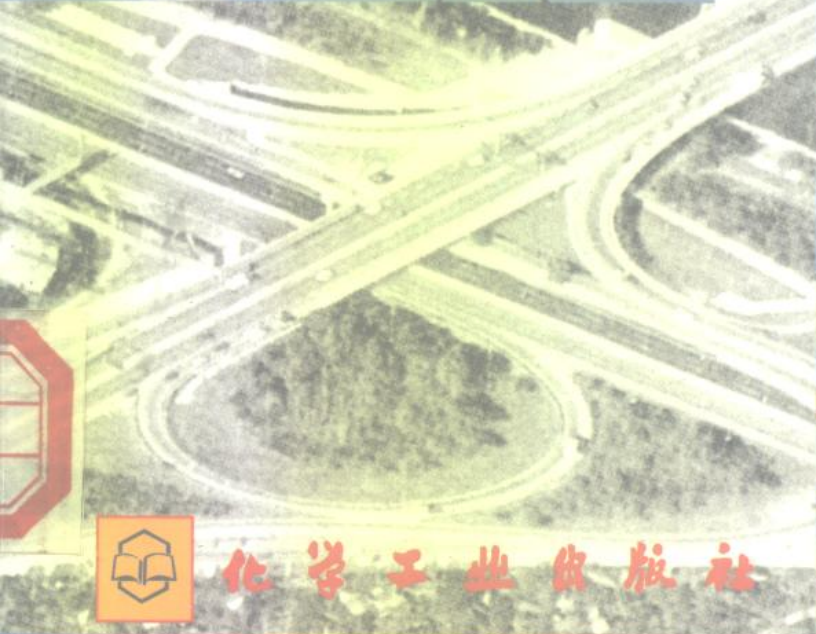
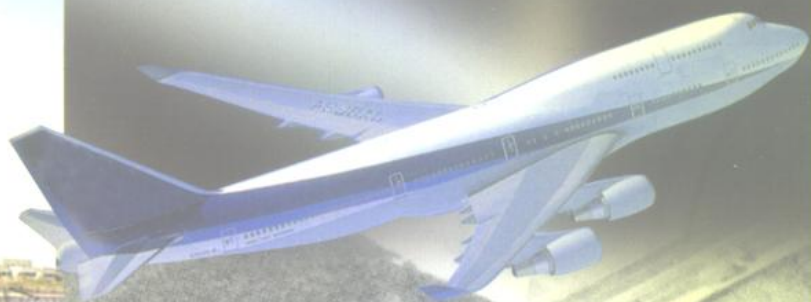


仿真技术

中国系统仿真学会组织编写

吴重光主编



化学工业出版社

TP391.9
W74-2

461336

仿真技术

中国系统仿真学会组织编写
吴重光 主编



00461386

2

化学工业出版社
·北京·

(京)新登字 039 号

JS 53 / 3009

图书在版编目 (CIP) 数据

仿真技术/吴重光主编. —北京: 化学工业出版社,
2000. 5
ISBN 7-5025-2756-7

I. 仿… II. 吴… III. 仿真-技术 IV. TP391.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 11747 号

仿 真 技 术

中国系统仿真学会组织编写

吴重光 主编

责任编辑: 刘 哲

责任校对: 凌亚男

封面设计: 于 兵

*

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市燕山印刷厂印刷

三河市前程装订厂装订

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 25 $\frac{3}{4}$ 字数 605 千字

2000 年 5 月第 1 版 2000 年 5 月北京第 1 次印刷

印 数: 1—4000

ISBN 7-5025-2756-7/TP·262

定 价: 50.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

编 委 会 名 单

主 编：吴重光

编委会委员：（以姓氏笔划为序）

王子才	王正中	五行仁	王 扬	王精业
李伯虎	吕崇德	刘德贵	孙 章	吴连伟
吴重光	肖田元	沈鹤鸣	张明廉	钟秋海
高毓麟	黄柯棣	熊光楞	颜 俊	

前 言

在世纪之交与千年之交的辉煌历史年代,《仿真技术》一书问世了。本书是集体智慧的结晶,由国内部分仿真界的专家、教授编写完成。本书是纪念中国系统仿真学会成立十周年的献礼之作,始终得到中国系统仿真学会的组织和关心。出版计划于1997年学会年会上经全体理事审议通过。化学工业出版社组织了多次编委会,出版社社长俸培宗亲自出席了编委会。经过编委们热烈讨论,将书名最终确定为《仿真技术》,并通过了编写提纲和编写人员名单。其后,历时两年完成书稿。值此《仿真技术》与读者见面之际,我们向所有支持、关心并为本书作出贡献的单位和人士表示衷心感谢。

仿真技术是以相似原理、信息技术、系统技术及其应用领域有关的专业技术为基础,以计算机和各种物理效应设备为工具,利用系统模型对实际的或设想的系统进行试验研究的一门综合性技术。仿真技术集成了当代科学技术中多种现代化顶尖手段,正在极大地扩展着人类的视野、时限和能力,在科学技术领域产生着日益重要的作用。近十年来,我国仿真技术得到迅速发展。从应用的广泛程度来看,已经从早期的航空、航天、火力发电和核动力发电部门扩展到今天的军事、电子、通讯、交通、舰船、化工、炼油、石油化工、冶金、建筑、气象、地质、矿产、水文、机械制造、轻工、企业管理、环境、文化教育、技术训练、体育娱乐、社会与发展等多种行业、多种部门。从应用的深入程度看,已经渗透到系统生命周期的全过程。例如新产品或新系统的研究、试验、初步设计、施工设计、施工建设、开工可行性分析、运行优化、控制优化、故障预测、管理和市场策略等各环节。

党的改革开放、科教兴国政策为我国仿真事业的发展开拓了广阔空间。具有国际先进水平的仿真中心和科研机构纷纷建立,各种用途的仿真系统、高性能的银河仿真计算机和仿真软件纷纷研制成功。部分仿真产品,如电力、化工和军用仿真系统已走出国门,远销海外。为数众多的高等院校建立了仿真实验室、仿真实习基地和仿真专业,一批批专修仿真技术的硕士和博士研究生学业有成,走上了工作岗位,成为仿真领域的新生力量。更可喜的是,一批以仿真系统为产品的高新技术公司相继成立,经过艰苦创业,部分公司已达到了较大规模,取得了显著的经济效益和社会效益,标志着我国仿真技术走上了产业化的道路。所有这一切,使我们深刻感受到祖国年青的仿真事业飞速发展的震撼。《仿真技术》是这些发展的真实记录,是所有献身于祖国仿真事业的科技工作者拼搏进取的写照,将在我国仿真事业发展的长河中留下浓重的一笔。

人类正跨入科学技术飞速发展的新纪元。我们坚信,仿真技术作为当今世界的前沿科学之一,必将得到更加广泛深入的发展。

我们期待着《仿真技术》一书能够使更多的大专院校师生、科研院所与企业中的科技工作者比较系统和全面地了解仿真技术之精华,以及当前国内外所达到的水平。进而通过部分国内应用范例得到有益的启示和经验,为在各行各业普及和应用仿真技术提供参考。

我们期待着《仿真技术》一书能够使更多的企业和政府工作人员,包括领导干部,了解仿真技术的非凡作用,为普及应用仿真技术给予大力支持。

《仿真技术》全书分基础篇和应用篇两大部分。基础篇包括五章,分别是:第一章概述,

由王行仁编写；第二章仿真建模与验模，由王子才编写；第三章仿真算法，由刘德贵、宋晓秋、陈丽容编写；第四章仿真计算机系统，由黄柯棣编写；第五章仿真软件，由李伯虎、柴旭东编写。应用篇包括五章，分别是：第六章仿真技术在航空中的应用，由王行仁和张明廉编写；第七章仿真技术在导弹与航天器研制中的应用，由谢道奎、孟代奎、张新邦编写；第八章仿真技术在过程工业中的应用由吕崇德、颜俊、高毓麟和吴重光编写；第九章仿真技术在交通中的应用由徐瑞华、郎诚廉、钱学军、施朝健、真虹编写；第十章展望，由吴重光编写。

从以上名单可知，参加本书编写的人员都是在相关领域或专业长期工作、经验丰富、卓有成就、具有影响力的专家、教授。能够有幸集中如此之多的仿真界知名专家教授同写一部书，可以说创下了国内仿真界的一项纪录。为了充分体现各位编者的学识、观点和文风。我们确定了对写作风格不进行统一要求的原则，而全书的系统性和综合性是通过各章节的选取和主题的选定加以保证。此外为了体现本书的先进性，书中的内容反映了国际上当前仿真技术的最新水平，不仅局限于国内的仿真技术水平。

由于本书涉及范围宽、内容多，在全书的编辑中可能出现一些错误，敬请读者批评指正。

《仿真技术》编委会

2000年2月

内 容 提 要

随着计算机技术的不断发展,仿真技术的应用领域在不断扩大,越来越受到重视。本书从仿真建模与校验,仿真算法、仿真计算机、仿真软件等方面介绍了仿真的基础知识。第六章至第九章分别介绍了仿真技术在航空、航天、化工、核能、火电、煤炭、铁路运输、港口调度等方面的应用情况,对读者了解仿真技术的现状及发展有很大帮助。

本书由中国系统仿真学会组织编写,汇集了系统仿真方面专家的知识和经验,对想了解仿真技术的领导干部、工程技术人员有很大启发,也是高等院校师生很好的教学参考书。

目 录

基 础 篇

第一章 概论	(1)
1.1 定义	(1)
1.2 仿真分类	(1)
1.3 实时仿真系统的基本组成及原理	(3)
1.4 仿真系统的特点	(3)
1.5 国内外发展概况	(4)
第二章 仿真建模方法与 VV&A	(6)
2.1 概述	(6)
2.1.1 仿真的三要素及三项基本活动	(6)
2.1.2 仿真建模的基本要求与模型型谱	(6)
2.2 系统的数学模型描述	(7)
2.2.1 线性连续系统的数学模型	(7)
2.2.2 非线性连续系统的数学模型.....	(11)
2.2.3 线性离散系统的数学模型.....	(13)
2.2.4 非线性离散系统的数学模型.....	(16)
2.3 仿真模型的建立方法.....	(16)
2.3.1 机理建模方法.....	(16)
2.3.2 辨识建模方法.....	(17)
2.3.3 模糊建模方法.....	(23)
2.3.4 神经网络建模方法.....	(26)
2.3.5 模糊神经网络建模方法.....	(27)
2.4 仿真模型的校核、验证与验收 (VV&A)	(29)
2.4.1 仿真模型 VV&A 的发展概况	(29)
2.4.2 仿真模型 VV&A 的有关概念	(30)
2.4.3 仿真模型 VV&A 的意义	(31)
2.4.4 仿真模型 VV&A 的基本原则	(32)
2.4.5 仿真模型 VV&A 的主要工作	(33)
2.4.6 仿真模型 V&V 的主要技术方法	(36)
参考文献	(40)
第三章 仿真算法	(42)
3.1 数字仿真的基本算法.....	(42)
3.1.1 数字仿真过程.....	(42)
3.1.2 数字仿真中的基本算法.....	(44)

3.2 刚性系统与微分代数系统的数字仿真算法	(65)
3.2.1 刚性系统及基本的刚性算法	(65)
3.2.2 组合算法	(70)
3.2.3 仿真模型中的间断处理	(74)
3.2.4 微分代数系统的数值仿真算法	(77)
3.3 分布参数系统数值仿真算法	(80)
3.3.1 分布参数系统	(80)
3.3.2 差分方法	(81)
3.3.3 线方法	(84)
3.3.4 其他方法	(84)
参考文献	(85)
第四章 仿真计算机	(87)
4.1 模拟计算机仿真	(87)
4.1.1 模拟计算机	(87)
4.1.2 用模拟计算机求解连续动力学系统	(88)
4.2 混合仿真简介	(93)
4.2.1 概述	(93)
4.2.2 混合计算机基本结构	(94)
4.2.3 混合计算机系统数字计算机	(95)
4.2.4 混合计算机系统模拟计算机	(96)
4.2.5 混合计算机系统的中间界面	(97)
4.2.6 混合计算机系统程序生成系统	(97)
4.3 实时仿真数字机	(99)
4.3.1 概述	(99)
4.3.2 AD100 介绍	(103)
4.3.3 ADI SIM 系统介绍	(106)
4.3.4 同构型多处理机 MAXION	(108)
4.3.5 通用计算机实时仿真	(111)
4.3.6 分布交互式仿真 (DIS)	(113)
参考文献	(115)
第五章 仿真软件	(117)
5.1 仿真软件概述	(117)
5.2 数字仿真语言	(119)
5.2.1 数字仿真语言的特点	(119)
5.2.2 连续系统仿真语言	(121)
5.2.3 离散系统仿真语言	(124)
5.2.4 混合系统仿真语言	(124)
5.2.5 图形技术在仿真语言中的应用	(126)
5.2.6 多媒体技术在仿真语言中的应用	(127)
5.3 一体化建模仿真环境	(128)

5.3.1	概况	(128)
5.3.2	典型一体化仿真系统 TESS	(130)
5.3.3	典型一体化建模/仿真环境 TMSE	(131)
5.3.4	需要进一步研究的问题	(133)
5.4	分布交互仿真软件	(134)
5.4.1	概况	(134)
5.4.2	DIS 支撑软件技术与产品	(135)
5.4.3	HLA 支撑软件技术	(137)
5.5	并发分布交互仿真工程	(141)
5.5.1	并发分布交互仿真工程 (CDISE) 的概念	(141)
5.5.2	并发分布交互仿真工程中的关键技术及其实现策略	(143)
5.5.3	并发分布交互仿真工程支撑环境 (CDISESE)	(145)
5.6	嵌入式仿真软件	(146)
5.6.1	FCS 的特点	(147)
5.6.2	系统模型描述	(147)
5.6.3	FCS 结构	(148)
5.7	智能化仿真软件	(149)
5.7.1	概况	(149)
5.7.2	建模专家系统	(149)
5.7.3	仿真专家系统	(150)
5.7.4	输出结果分析专家系统	(151)
5.7.5	定性仿真	(152)
5.7.6	智能化仿真环境	(152)
5.7.7	基于代理 (Agent-Based) 的仿真	(154)
5.8	面向对象 (O-O) 的仿真软件	(155)
5.8.1	概况	(155)
5.8.2	O-O 建模方法学	(156)
5.8.3	OO 仿真软件的组成框架 (framework)	(156)
5.8.4	一个面向对象的复合建模与仿真框架 OOPM	(157)
5.8.5	面向对象连续系统建模/仿真支撑环境 ICSLII++	(158)
5.8.6	OO 仿真软件的进一步发展	(160)
5.9	虚拟现实技术	(161)
5.9.1	VR 系统的类型	(161)
5.9.2	VR 系统的组成	(161)
5.9.3	VR 系统的软硬件支持	(162)
5.9.4	分布式虚拟现实 (DVR)	(163)
5.9.5	VR 的研究与应用	(164)
5.10	定性仿真	(165)
5.11	仿真软件的测试与评估比较	(166)
5.12	发展中的仿真软件	(169)

参考文献	(170)
------	-------

应 用 篇

第六章 仿真在航空工业中的应用	(177)
6.1 概述	(177)
6.2 飞机飞行动力学仿真	(179)
6.2.1 刚性飞机的一般运动方程	(179)
6.2.2 飞行动力学仿真模型的组成及功能	(183)
6.2.3 飞行仿真软件的模块化结构	(185)
6.2.4 气动数据预处理	(186)
6.3 半实物仿真	(187)
6.3.1 概况	(187)
6.3.2 半实物仿真计算机系统	(189)
6.3.3 角运动仿真器	(190)
6.3.4 目标仿真器(目标环境仿真系统)	(191)
6.3.5 负载仿真器	(195)
6.3.6 半实物仿真各设备对仿真精度的影响	(197)
6.4 人在回路仿真系统——飞行模拟器	(197)
6.4.1 飞行模拟器自动飞行实时仿真系统	(197)
6.4.2 飞行模拟器运动系统	(199)
6.4.3 飞行模拟器操纵负荷系统	(202)
6.4.4 飞行模拟器音响系统	(204)
6.4.5 视景系统	(205)
6.4.6 计算机系统	(210)
6.4.7 教员控制台	(215)
参考文献	(219)
第七章 仿真技术在导弹与航天器研制中的应用	(220)
7.1 概述	(220)
7.1.1 导弹和航天器控制系统	(220)
7.1.2 导弹和航天器制导控制系统仿真	(223)
7.2 导弹和航天器仿真支撑技术	(224)
7.2.1 制导控制设备物理环境仿真技术	(225)
7.2.2 计算机仿真技术	(229)
7.2.3 信息变换和接口技术	(232)
7.2.4 虚拟现实技术	(233)
7.3 运载火箭控制系统仿真试验	(233)
7.3.1 概况	(233)
7.3.2 系统构成实例	(234)
7.3.3 实现技术	(234)
7.4 卫星控制系统仿真试验	(238)

7.4.1 概况	(238)
7.4.2 系统构成实例	(240)
7.4.3 实现技术	(242)
7.5 地空导弹制导控制系统仿真试验	(244)
7.5.1 概况	(244)
7.5.2 系统构成实例	(246)
7.5.3 实现技术	(248)
7.6 发展展望	(254)
7.6.1 技术发展	(254)
7.6.2 应用发展	(255)
参考文献	(256)
第八章 仿真技术在过程工业中的应用	(257)
8.1 仿真技术在化学工业中的应用	(257)
8.1.1 仿真辅助训练	(257)
8.1.2 仿真辅助设计	(269)
8.1.3 仿真辅助生产	(270)
8.1.4 仿真辅助研究	(271)
8.2 仿真技术在火电中的应用	(272)
8.2.1 中国火电仿真机的发展过程及在世界上的地位	(272)
8.2.2 全范围火电培训仿真系统的结构及特点	(278)
8.2.3 对电站培训仿真机的基本要求及评价	(282)
8.2.4 火电机组仿真自动建模技术	(286)
8.3 仿真技术在核能工业中的应用	(295)
8.3.1 概况	(295)
8.3.2 全范围核电站操纵员培训模拟机主要特点	(298)
8.3.3 堆芯核裂变动态实时仿真模型	(301)
8.3.4 反应堆冷却剂系统热工水力动态实时仿真模型	(307)
8.3.5 在 RCS 和蒸汽发生器以外的放射性分布	(323)
8.3.6 安全壳内热工水力过程仿真模型简介	(324)
参考文献	(330)
8.4 仿真技术在煤炭工业中的应用	(330)
8.4.1 采煤工艺系统简介	(330)
8.4.2 矿井采运系统的仿真	(331)
8.4.3 露天煤矿调度系统的仿真	(340)
8.4.4 矿井火灾的仿真	(349)
8.4.5 经营管理系统的仿真	(356)
参考文献	(366)
第九章 仿真技术在交通中的应用	(368)
9.1 仿真技术在铁路运输中的应用	(368)
9.1.1 列车驾驶仿真器发展概况	(368)

9.1.2	列车驾驶仿真器的作用	(368)
9.1.3	列车驾驶仿真器的原理结构	(371)
9.1.4	列车驾驶仿真器的数学模型	(373)
9.1.5	列车驾驶仿真器开发与发展趋势	(375)
9.2	计算机动态图形仿真技术在港口生产调度方案优化中的应用	(377)
9.2.1	港口生产组织过程的一般方法	(377)
9.2.2	港口生产调度计算机动态图形仿真系统的功能	(380)
9.2.3	系统主要功能模型实现的研究	(380)
9.2.4	集装箱码头生产调度方案优化仿真系统	(387)
第十章	展望	(392)
10.1	仿真建模水平不断提高	(392)
10.2	仿真手段不断革新	(394)
10.2.1	仿真硬件的进展	(394)
10.2.2	仿真软件的进展	(395)
10.2.3	人工智能技术在仿真中广泛应用	(395)
10.2.4	实物仿真向虚拟现实过渡	(396)
10.3	仿真应用不断扩展	(396)
10.3.1	政府与企业重视仿真技术	(396)
10.3.2	仿真技术的工程应用不断深入	(396)
10.3.3	仿真技术应用进展集锦	(397)

基 础 篇

第一章 概 论

1.1 定义

客观世界中的物理现象和物理系统通常可以用数学方程来描述。例如我们熟悉的“质量-弹性-阻尼”机械运动系统的动态过程和“电感-电容-电阻”电路的动态过程，都可以用二阶微分方程来描述；又如控制面板上各种开关按钮的操作顺序及其相互之间的约束关系，控制面板上各种信号指示灯的明暗顺序及其相互之间的约束关系，都可用逻辑关系式来描述。也就是说客观世界中任何连续系统、离散事件系统或连续/离散事件混合系统在一般情况下都可以建立数学模型。

计算机是一种解算工具。简单来说，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。

计算机的发展经历了模拟计算机（Analog Computer）、混合计算机（Hybrid Computer）、数字计算机（Digital Computer）的历史过程，相应地，仿真的发展也经历了模拟仿真（Analog Simulation）、混合仿真（Hybrid Simulation）、数字仿真（Digital Simulation）的历史过程。目前，采用数字计算机的数学仿真获得了普遍的应用。

随着技术的发展，仿真技术的应用在扩大，仿真系统出现多种形式，仿真不仅仅是建立相应物理系统的数学模型在计算机上进行解算的过程，在型号产品研制过程中，要求对已研制生产出来的产品或原型机进行试验和评估，产品或原型机将替代原来在计算机上对应的数学模型，构成既有数学模型又有实物的更为复杂的仿真系统。

从技术应用的角度看，系统仿真技术可定义为：以相似原理、控制理论、计算机技术、信息技术及其应用领域的专业技术为基础，以计算机和各种物理效应设备为工具，利用数学模型或部分实物对实际的或设想的系统进行动态试验研究的一门综合性技术。

1.2 仿真分类

从不同角度对仿真进行分类有多种方法。按被仿真对象性质可分为连续系统仿真（Continuous System Simulation）和离散事件系统仿真（Discrete Events System Simulation）；按功能用途可分为工程仿真（Engineering Simulation）和训练仿真（Training Simulation）；按应用领域可划分为工程领域仿真和非工程领域仿真；按虚实结合的程度又可分为结构仿真（Constructive Simulation）、虚拟仿真（Virtual Simulation）和实况仿真（Live Simulation）。

下面着重叙述在工程应用领域内连续系统仿真的常用分类方法。一般分为四大类。

（1）数学仿真（Mathematical Simulation）

数学仿真无需昂贵的实物系统，也无需模拟生成客观真实环境的各种物理效应设备，而

是建立数学模型，按数学模型选好合适的算法，编好程序，在计算机上运行试验，再现和评价客观世界的客观事物特性。数学仿真试验时，通过键盘等输入设备改变系统参数或系统结构，通过CRT、打印机、绘图仪等输出设备显示仿真试验结果，或者将仿真结构存储在磁盘上，如图1-1所示。数学仿真应选择合适的步长，可以实时运行，也可以在非实时（欠实时或超实时）条件下运行。数学仿真尤其适用于方案论证、研究开发和设计分析。

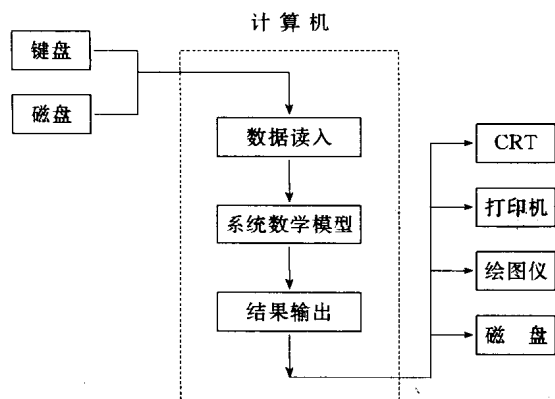


图 1-1 数学仿真

(2) 硬件在回路仿真 (Hardware-In-Loop Simulation)

硬件在回路仿真又称含实物仿真，或半实物仿真。它是将系统的部分实物（如控制系统的测量传感器、控制计算机、伺服执行机构）接入回路进行的试验。这种仿真试验将对象实体的动态特性通过建立数学模型、编程，在计算机上运行，此外要求有相应的模拟生成传感器测量环境的各种物理效应设备，如图1-2所示。不同类型的传感器要求有不同类型的模拟生成环境，例如气压传感器要求有气压模拟装置，角度、角速度传感器要求有模拟转台等等。由于在回路中接入实物，硬件在回路仿真系统必须实时运行。

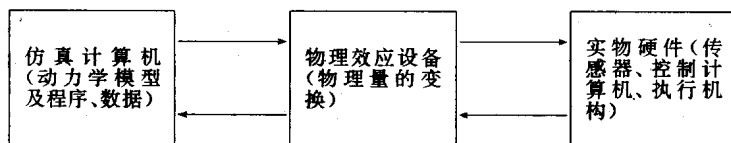


图 1-2 硬件在回路仿真系统

(3) 软件在回路仿真 (Software-In-Loop Simulation)

控制系统、导航系统和制导系统广泛采用数字计算机，通过软件进行控制、导航和制导的运算，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。这种仿真试验将系统用计算机与仿真计算机通过接口对接，进行系统试验，如图1-3所示。接口的作用是将不同格式的数字信息进行转换。软件在回路仿真系统一般情况下要求实时运行。

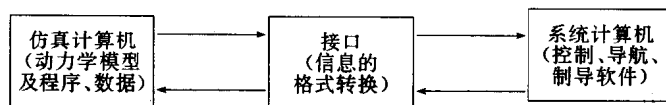


图 1-3 软件在回路仿真系统

(4) 人在回路仿真 (Man-In-Loop Simulation)

人在回路仿真是操作人员、飞行员或宇航员在系统回路中进行操纵的仿真试验。这种仿真试验将对象实体的动态特性通过建立数学模型、编程，在计算机上运行，此外要求有模拟生成人的感觉环境的各种物理效应设备，包括视觉、听觉、触觉、动感等人能感觉的物理环境的模拟生成，如图1-4所示。由于操作人员在回路中，人在回路仿真系统必须实时运行。

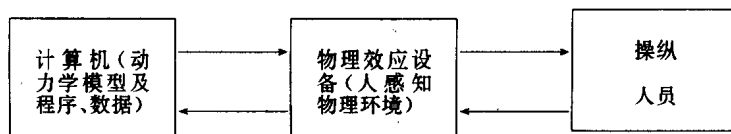


图 1-4 人在回路中仿真系统

1.3 实时仿真系统的基本组成及原理

半实物仿真系统和人在回路仿真系统都属于实时仿真系统。实时仿真系统由以下几部分组成。

(1) 仿真计算机

仿真计算机是实时仿真系统的核心部分，它运行实体对象和仿真环境的数学模型和程序。一般来说，采用层次化、模块化的建模方法，将模块化程序划分为不同的速率块，在仿真计算机中按速率块实时调度运行。对于复杂的大型仿真系统，仿真计算机的运行速度满足不了实时性要求时，可采用多台计算机联网实时运行。

(2) 物理效应设备

物理效应设备的作用是模拟复现真实世界的物理环境，形成仿真环境或称为虚拟环境。物理效应设备实现的技术途径多种多样。方案之一是采用伺服控制回路，通过伺服控制回路控制形成相应的物理量，例如三轴转台复现飞行器的角运动，动、静压模拟器复现大气压力的变化，三轴转台和动静压模拟器都由伺服控制回路控制实现。方案二是在已存储好的数据库中搜索相应的数据，转换为相应的物理量，例如地形地貌等地理环境的复现。

(3) 接口设备

仿真计算机输出的驱动信号经接口变换后驱动相应的物理效应设备。接口设备同时将操作人员或实物系统的控制输入信号馈入仿真计算机。

实时仿真系统原理框图如图 1-5 所示，它实现半实物仿真或人在回路中仿真。在仿真计算机中通过对动力学系统和环境的数学模型解算，获得系统和环境的各种参数。对于半实物仿真系统，这些参数通过物理效应设备生成传感器所需要的测量环境，对于人在回路中仿真系统，这些参数通过物理效应设备生成操作人员所需要的感觉环境，从而构成完整的闭环仿真系统。物理效应设备是实现仿真系统所需要的中间环节，它的动态特性、静态特性和时间延迟都将对仿真系统的置信度和精度产生影响，应该有严格的相应技术指标要求。

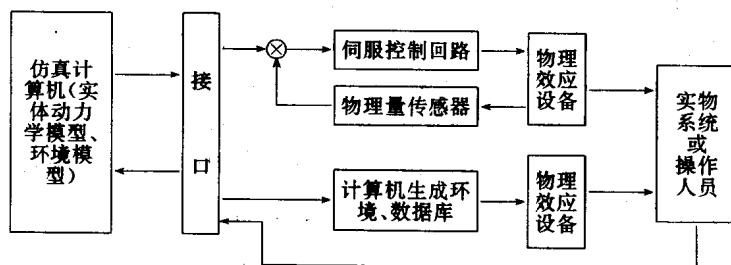


图 1-5 实时仿真系统原理框图

1.4 仿真系统的特点

仿真系统是虚、实结合的系统，它具有以下特点。

① 建立仿真模型。任何仿真系统的实现，必须建立被仿真的对象实体的数学模型。例如

飞行仿真系统必须建立飞行器的飞行动力学数学模型，它是一组变系数多变量非线性微分方程组，通过选择合适的数值积分算法，将微分方程转换为差分方程形式，即为在数字计算机上能实现的仿真模型。除建立被仿真对象实体的数学模型外，还应建立环境模型，例如飞行仿真系统中的大气环境（气压、气温、阵风、扰动气流等）模型、地理环境（地形、地貌）模型等。

② 实物的接入与仿真环境的生成。实时仿真系统一般都接入实物系统，例如将飞行控制系统（包括传感器、控制计算机、执行机构）接入飞行仿真系统进行含实物仿真试验。各种物理效应设备将模拟生成实物系统所需的物理环境，通过物理效应设备和接口使仿真计算机和接入的实物系统构成一个完整的含实物仿真系统。

③ 系统仿真试验。系统仿真试验具有良好的可控性、无破坏性，可多次重复，经济、安全，不受气象条件和场地环境的限制。

④ 系统仿真应用。系统仿真技术可广泛应用于国防、能源、水利、交通、工业、农业、经济、管理、训练等工程领域和非工程领域，也可广泛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、人员训练的全过程。

⑤ 系统仿真的实时性。仿真计算机从“并行”计算的模拟计算机发展到“串行”计算的数字计算机，其中突出的技术关键是如何保证仿真系统的运行实时性。实时性体现在循环迭代计算的帧周期上，应根据仿真系统内的信息变化速率快慢选定帧周期。对飞行实时仿真系统来说，帧周期一般为几毫秒至几十毫秒。联网仿真的网络延迟和物理效应设备的时间延迟都将影响仿真系统的实时性。

1.5 国内外发展概况

30 年代美国生产了用于训练飞行员的林克飞行训练器，它使飞行员熟悉飞机的操作程序和驾驶技术，着重在飞机的机械操纵特性。经过 40 年的发展，到 70 年代，飞行模拟器有了很大改进，仿真计算机由数字计算机代替了模拟计算机，并着重在飞机的飞行性能、航空电子和武器系统的仿真。又经过 20 年的发展，到 90 年代，由单武器平台性能仿真发展到多武器平台在作战环境下的体系对抗仿真，着重在仿真器联网的分布交互仿真。

随着技术的发展，现代战争更重要的是体系对抗，仿真技术不仅仅应用于单个武器平台（例如一架飞机，一枚导弹），而是应用于多武器平台在作战环境下的体系对抗。1983 年美国提出了 SIMNET（Simulation Networking）计划，这是一种多武器平台联网仿真，到 80 年代末 SIMNET 计划结束时，已形成了约 260 个地面装甲车辆仿真器和飞机飞行模拟器以及通讯网络、指挥所和数据处理设备等互联的网络，分布在美国和德国的 11 个城市。在 SIMNET 的基础上发展了异构型网络互联的分布交互仿真（DIS——Distributed Interactive Simulation），1989 年 3 月在美国由 Central Florida 大学仿真与训练研究所（IST——Institute of Simulation and Training）主办召开了第一届 DIS 研讨会，并成立工作小组，此后每年举行两次研讨会。1992 年 3 月第六届 DIS 研讨会上，提出了 DIS 的体系结构，并从第一届研讨会开始就着手制定 DIS 的各种规范协议。DIS 可定义为：采用协调一致的结构、标准、协议和数据库，通过局域网或广域网，将分散在各地的各类仿真系统互联，人可以参与交互作用的一种综合环境。1995 年针对 DIS 体系结构存在的问题又提出了高层体系结构 HLA（High Level Architecture）。

70 年代初，世界上工业发达国家如英国、美国、日本研制生产了火电厂仿真培训系统，用