

学 术 著 作 丛 书

Real-time Simulation
Theory & Supporting Technology

实时仿真理论与支撑技术

廖瑛 梁加红 等编著

国防科技大学出版社

TP391.9

19

Real-time Simulation

Theory & Supporting Technology

实时仿真理论与支撑技术

廖 瑛 梁加红 姚新宇 等编著

国防科技大学出版社

·湖南长沙·

图书在版编目(CIP)数据

实时仿真理论与支撑技术/廖瑛,梁加红,姚新宇等编著. - 长沙:国防科技大学出版社,2002.3

ISBN 7-81024-800-6

I. 实… II. 廖… III. 实时仿真 IV. TP391.9

国防科技大学出版社出版发行

电话:(0731)4572640 邮政编码:410073

E-mail:gfkdcbs@public.cs.hn.cn

责任编辑:卢天颢 责任校对:张 静

新华书店总店北京发行所经销

国防科技大学印刷厂印装

*

850×1168 1/32 印张:10 字数:250 千

2002年3月第1版第1次印刷 印数:1—2000册

*

定价:18.00 元

前 言

实时仿真理论与技术多年来一直是系统仿真领域的重点研究课题之一,它的主要研究内容包括:系统实时建模和模型验证,实时仿真计算机,实时仿真算法,实时仿真软件,实时仿真系统,实时仿真的时间控制等等。在实现实时仿真的过程中,它们是相辅相成,缺一不可的。实时仿真的典型应用场合之一是半实物仿真系统,与其它类型的仿真方法相比,它具有实现更高真实度的可能性,是仿真技术中置信度最高的一种仿真方法。目前,我国建设了一批水平高、规模大的半实物仿真系统,如各种类型的导弹半实物仿真系统、歼击机半实物仿真系统、驱逐舰半实物仿真系统、鱼雷半实物仿真系统等,它们在武器型号研制中发挥了重要的作用。实时仿真是在航天、航空、船舶、兵器等与国防科研相关的行业中逐步发展起来的,它已经成为研制和鉴定现代武器系统的既经济又有效的必要手段,成为国防科技战略的关键性的推动力。

本书结合国防科技大学和第二炮兵工程学院近年来关于系统仿真的研究成果,并根据国内外近几年来有关实时仿真的技术资料编写而成。其中,第一、二、三、六、七、八、十二章由廖瑛编写,第四、五、九章由梁加红编写;第十、十一章由姚新宇编写,全书由廖瑛主编。在编写过程中,我们引用了许多同行们的工作和研究成果,还得到了许多同志的热情帮助,在此一并表示谢意。

由于时间仓促,而且作者水平有限,书中一定有不当之处,欢迎读者批评指正。

编 者

2001 年 11 月于国防科技大学

目 录

第一章 实时仿真概论	(1)
1.1 系统仿真技术	(1)
1.2 实时仿真及其支撑技术	(4)
1.3 实时仿真的应用	(7)
1.4 本书内容	(9)
第二章 建模技术与实时仿真模型	(14)
2.1 建模概述.....	(14)
2.2 模型校核与验证.....	(17)
2.3 导弹制导控制系统数学模型.....	(21)
2.4 战略导弹六自由度数学模型及其特点.....	(24)
2.5 实时仿真模型的特点.....	(26)
第三章 仿真计算机	(28)
3.1 仿真计算机的发展历史及现状.....	(28)
3.2 并行仿真计算机.....	(31)
3.3 CHY-Ⅲ高速并行仿真计算机	(34)
3.4 通用计算机实时仿真.....	(40)
第四章 实时仿真软件	(43)
4.1 仿真软件概述.....	(43)
4.2 高级仿真语言 YHMPS 及应用	(47)
4.3 一体化建模/仿真软件 YFSIM	(52)
4.4 实时建模/仿真集成环境 GPSIM	(58)
第五章 并行仿真算法	(61)

5.1	并行算法概述	(61)
5.2	多处理机并行仿真	(63)
5.3	并行仿真任务的划分与分类	(64)
5.4	虚拟单 CPU	(64)
5.5	并行任务的调度	(67)
5.6	宏流水线并行算法	(70)
第六章	实时仿真算法及其性能分析	(73)
6.1	实时仿真算法的特点	(73)
6.2	基本实时仿真算法	(74)
6.3	实时仿真算法的稳定性分析	(79)
6.4	实时仿真算法的误差分析	(84)
6.5	仿真算法的选择原则	(95)
6.6	仿真算法的实现	(99)
6.7	连续系统实时仿真的补偿方法	(105)
第七章	刚性大系统实时仿真方法	(118)
7.1	刚性系统的概念	(118)
7.2	刚性大系统仿真算法的选取原则	(121)
7.3	梯形整体外插法及实时应用	(123)
7.4	实时吉尔算法	(128)
7.5	实时仿真中对间断特性的处理	(135)
7.6	多帧速实时算法	(146)
7.7	预处理实时数字仿真算法	(157)
第八章	操作系统实时功能的开发	(165)
8.1	概述	(165)
8.2	IRIX 操作系统概述	(167)
8.3	实时系统的开发和研制	(169)
8.4	IRIX 对实时程序的支持	(170)
8.5	REACT/PRO 帧调度的使用	(174)

8.6	计时器和时钟	(176)
8.7	IRIX 上的进程通信方法	(177)
8.8	实时程序中对虚拟内存的管理	(180)
8.9	CPU 工作负荷的控制	(186)
第九章	实时仿真系统和半实物仿真	(192)
9.1	仿真系统概述	(192)
9.2	仿真系统的基本原理与组成	(194)
9.3	半实物仿真系统涉及的关键技术问题	(199)
9.4	一个典型的战略导弹半实物仿真系统	(204)
9.5	防区外机载布撒武器系统半实物仿真	(208)
第十章	实时仿真系统的时间特性分析与控制	(217)
10.1	仿真中的时间	(217)
10.2	单节点实时仿真系统的实时性分析	(226)
10.3	半实物仿真的实时控制技术	(232)
第十一章	网络实时仿真系统的时间管理	(246)
11.1	导言	(246)
11.2	机器时间对齐	(249)
11.3	机器时间偏差校正	(262)
11.4	机器时间的实时校正	(266)
11.5	算法小结	(285)
11.6	网络仿真的实时性要求	(286)
第十二章	基于 SGI 工作站的实时仿真计算机系统	(290)
12.1	系统总体设计方案	(290)
12.2	数据的高速和实时通信	(292)
12.3	实时数据通信子系统的设计	(298)
12.4	驱动器的研制	(299)
	参考文献	(302)

第一章 实时仿真概论

1.1 系统仿真技术

系统仿真技术是以相似原理、信息技术、系统理论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新兴综合性技术。它为进行实际系统的研究、分析、决策、设计,以及对专业人员的培训提供了一种先进的方法,增加了人们对客观世界内在规律的认识能力,有力地推动了那些过去以定性分析为主的学科向定量化方向发展。

仿真技术首先是在军事领域发展起来的。开始时,它主要应用于对实弹打靶的模拟仿真,以减少因多次实弹打靶而消耗的研制费用。在世界进入了高科技时代后,仿真技术迅猛发展,它综合集成了计算机、网络技术、图形图象技术、多媒体、软件工程、信息处理、自动控制等多个高新技术领域的知识。作为一种研究、发展新产品、新技术的科学手段,它在航天、航空、船舶、兵器等与国防科研相关的行业中逐步发展起来,并显示出了巨大的社会效益和经济效益。以美国为首的发达国家非常重视仿真在军事上的研究和发展,1986至1990年间,美国用于仿真技术研究的年平均投资为1.62亿美元。而且,在“冷战”结束之后,更呈逐步增长的趋势。在美国的国家关键技术和国防关键技术计划中,建模与仿真都排名于前列,海湾战争结束后不久,美

国国防部建立了“国防建模与仿真办公室”并提出了新的建模与仿真投资战略。1992年美国国防部对关键技术项目进行了调整,确定了七个优先发展的技术领域,仿真技术仍为其中的一项。欧洲共同体在1989年制定的“欧几里德”计划中,也将建模与仿真列为11项优先发展的合作发展技术领域之一。由于各国都预测,在今后10~15年内,爆发世界大战的可能性不大,因此,大型的武器试验和大批量的武器生产计划将受到限制。于是,发达国家欲在军事上保持领先地位,都把目光转向仿真技术,实行“多研制,少生产”的武器系统发展和采办方针。仿真技术便成为研制和鉴定现代武器系统的既经济又有效的必要手段,成为国防科技战略的关键性的推动力。

在我国,仿真技术的研究与应用发展迅速,并且越来越受到国家的重视。自20世纪50年代开始,自动控制领域就首先使用了仿真技术,而且半实物仿真试验已开始应用于飞机、导弹的工程型号研制中。60年代,开始了对离散事件系统,如交通管理的仿真研究。70年代,我国的训练仿真器,如飞行模拟器、舰艇模拟器等等获得迅速发展,并形成一定市场,在操作人员培训中发挥了很大的作用。80年代,我国建设了一批水平高、规模大的半实物仿真系统,如各种类型的导弹半实物仿真系统、歼击机半实物仿真系统、驱逐舰半实物仿真系统等,它们在武器型号研制中发挥了重大的作用。90年代,我国开始对分布交互仿真、虚拟现实等先进仿真技术及其应用进行研究,开展了较大规模的复杂系统仿真,由单个武器平台的性能仿真发展为多武器平台在作战环境下的对抗仿真。同时,仿真技术在国民经济的各个领域,如发电工程、化工过程等方面都得到了应用和发展。

总之,随着计算机科学的发展,仿真技术已经渗透到各个领域,如航空、航天、生物工程、石油、化工、环境保护、农业、商业等。并且,仿真技术不仅仅应用于简单的单个系统,也应用

于多个系统综合构成的复杂系统。当前仿真研究的前沿课题主要有：仿真与人工智能技术的结合；分布交互仿真与仿真模型的并行处理；实时仿真与半实物仿真系统的实现；图形与动画等可视化仿真、建模环境与仿真支持系统，人在回路仿真，随机作战仿真，高层体系结构（HLA）等等。

对于任意一项系统的仿真研究都是一项或简或繁的系统工程，特别是对复杂系统或综合系统的总体仿真研究是一件难度很大的工作。诸如系统仿真实验总体方案设计，仿真系统的集成，仿真试验规范和标准的制定，各类模型（数学模型、物理模型、由数学模型转换而来的仿真模型等）的建立、校核、验证及确认，仿真系统的可靠性和精度分析与评估，仿真结果的认可和置信度分析等等，涉及面十分广泛。为了使仿真试验顺利进行并获得预期效果，必须把针对某一实际系统的仿真试验切切实实作为一项系统工程来抓。通常系统仿真试验是为特定目的而设计的，是为仿真用户服务的，因此，复杂的系统仿真试验需要仿真者与仿真用户共同参与，从这个意义上讲，仿真试验过程应包括以下几个阶段的工作：

（1）建模阶段

在这一阶段中，通常是先分块建立子系统的模型。若为数学模型则需要进行模型变换，即把数学模型变为可以在仿真计算机上运行的模型，并对其进行初步的校验；若为物理模型，它需在功能与性能上覆盖系统的对应部分。然后根据系统的工作原理，将子系统的模型进一步集成为全系统的仿真实验模型。

（2）模型实验阶段

在这一阶段中，首先要根据实验目的制定实验计划和实验大纲，在计划和大纲的指导下，设计一个好的流程，选定待测量的变量和相应的测量点，以及适当的测量仪表。然后转入模型运行，即进行仿真实验并记录结果。

(3) 结果分析阶段

结果分析在仿真过程中占有重要地位。在这一阶段中需要对实验数据进行去粗取精、去伪存真的科学分析，并根据分析结果作出正确的判断和决策。因为实验结果反映的是仿真模型系统的行为，这种行为能否代表实际系统的行为，往往得由仿真用户或熟悉系统的领域专家来判定。如能得到认可，则可以转入文档处理，否则，需返回建模和模型实验阶段查找原因，或修改模型结构和参数，或检查实验流程和实验方法，然后再进行实验，如此往复，直到获得满意的结果。

1.2 实时仿真及其支撑技术

1.2.1 实时仿真定义

在对系统进行仿真时，若有实物介入整个仿真系统，必须要求仿真时间标尺与实际系统时间标尺相同，这种仿真称为实时仿真。它不仅要求快速性，而且还提出了实时性的问题，因为计算机接收实时动态输入，输入与输出为具有固定采样区间的数列。例如，当采用仿真方法进行分系统实验时，仿真计算机与实际装置相连接，仿真计算机必须在与实际系统同步的条件下获取动态的输入信号并实时地产生动态的输出响应。如图 1.1 所示的实时飞行模拟器，它由飞机运动方程的数字仿真组成，和最终用于在飞行中控制飞机的实际飞行硬件的输出与输入相连接。图 1.1 中的系统即是所谓的硬件在回路中的仿真，这种仿真可以用于在实验室中安全可重复地检查多种模拟飞行条件下的飞行控制系统，在很多情况下，硬件是指一名飞行员，并且仿真结果用于评估飞机的飞行品质和驾驶员座舱的控制与显示效果。这种人在回路中的仿真可以用来在一个安全可以控制的环境中训练飞行员驾驶飞

机和处理紧急情况。

通常硬件在回路中的仿真其输入和输出是连续的或模拟的。在这种情况下, 连续的输入必须使用 A/D 转换器转换为数字的形式, 图 1.1 显示了一个单信道的情形。A/D 转换器的输出是一个数据序列, 通常以一个固定的时间间隔 h 对模拟输入进行采样。这时, h 通常 (但不总是) 成为飞机运动方程在数字计算机上的积分步长。计算机输出的数据序列通过 D/A 转换器转换为连续信号, 图 1.1 显示的也是一个单信道的情形。总之, 这时仿真计算机的输入、输出都是具有固定采样周期 h 的数值序列, 计算机的输入序列 u 可以从硬件中得到, 或从驱动计算机的过程中得到, 其中 $u = u(mh)$, $m = 0, 1, 2, \dots$ 。计算机从时刻 mh 开始, 根据采用仿真算法的不同, 利用 y 和 u , 或 y 及 u 以前的值算出 $y_{m+1} = y(mh + h)$ 。计算 y_{m+1} 所需要的实际时间必须小于等于 h , 以便在 $t = (m + 1)h$ 时将 y_{m+1} 输出给硬件或过程。

如果硬件是一个在导引飞行模拟器中的操作员, 那么计算机的输入从模拟信号转变为数字信号代表了飞行员作出的控制调节输入。计算机输出从数字信号转变为模拟信号, 代表了驾驶员座舱模拟仪表的读数, 输入到动力学系统 (移动模拟器的情形), 并且输入到任意的可视化显示系统中。

在连续的输入和输出之外, 对于数字飞行控制系统, 图 1.1 中的硬件可以有数字数据序列的输入/输出。当然, 许多输入/输出通道是简单的开/关信号, 每一个都代表一个离散事件的发生。

在实时数字仿真中数值积分步长 h 通常是固定的, 这对于确保计算机在每一步积分结束时产生输出而且不会迟于实际系统是必需的。固定步长也能够保证与固定的输入输出采样速率的相容性。数学步长 h 必须选择得足够大以便计算机在每一步中能有足够的时间完成必要的计算。另一方面, 步长 h 不能太大,

否则数值积分算法产生的误差将会使仿真的动态真实性变得不可接受。通常能够在特定步长下通过一定的方法减少这些积分误差(称为积分截断误差), 这样的方法可以是选择适当的积分算法, 或使用特殊的积分方法, 或运行有多个子步长的快速子系统, 或使用其它相关的特殊方法。

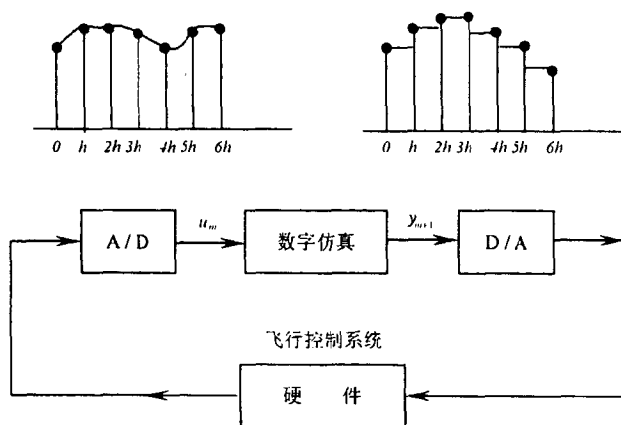


图 1.1 硬件在回路中的飞行仿真

1.2.2 实时仿真支撑技术

通过上面对系统进行实时仿真的讨论, 我们可以看到实时仿真涉及到的理论和关键技术, 主要有:

- (1) 系统实时建模理论和模型验证;
- (2) 实时仿真计算机;
- (3) 实时仿真算法理论及应用;
- (4) 实时仿真软件;
- (5) 实时仿真系统 (包括高速数据转换和数据传输、实时

I/O、仿真过程中的实时交互功能和输出结果的实时可视化等)；

(6) 实时仿真的时间特性分析与控制。

上述理论与技术通常被称为实时仿真理论与支撑技术。在实现实时仿真的过程中，它们是相辅相成、缺一不可的，只有对上述的几方面同时考虑，采取相应的措施，才能完成实时仿真。

1.3 实时仿真的应用

实时仿真理论与支撑技术的典型应用场合之一是半实物仿真系统，所谓半实物仿真是指在仿真实验系统的仿真回路中接入部分实物的实时仿真。“半实物仿真”这一称谓是国内仿真界对这一类系统仿真方法和相应的仿真系统的一种通俗而习惯的称呼，其准确的含义是：Hardware In the Loop Simulation (HILS)，即回路中含有硬件的仿真。实时性是进行半实物仿真的必要前提。

HILS 同其它类型的仿真方法相比具有实现更高真实度的可能性，是仿真技术中置信度最高的一种仿真方法。从系统的观点来看，HILS 允许在系统中接入部分实物，意味着可以把部分实物放在系统中进行考察，从而使部件能在满足系统整体性能指标的环境中得到检验，因此是提高系统设计的可靠性和研制质量的必要手段。

半实物仿真技术是在第二次世界大战以后，伴随着自动化武器系统的研制及计算机技术的发展而迅速发展起来的。特别是，由于导弹武器系统的实物实验其代价高昂，而半实物仿真技术能为导弹武器的研制实验提供最优的手段，使在不做任何实物飞行的条件下，可对导弹全系统进行综合测试。因而从 20 世纪 60～70 年代起，美国、西欧、日本等国都不惜重金建造了一大批半实物仿真实验室，并不断进行扩充和改进。根据美国对“爱国者”、“罗兰特”、“针刺”三种型号的统计，采用仿真技术后，试

验周期可缩短 30%~40%，节约实弹数 43.6%。

以导弹武器系统的半实物仿真为例，它要求我们完成以下的主要任务：

(1) 建立系统的数学模型，并进行适当的优化。

(2) 建立仿真模型。仿真模型的建立包括以下内容：

- 使各参试设备处于正常的工作状态；
- 根据数学仿真计算结果及仿真设备的性能，构造正确的指令生成方法；

- 正确编制各设备的驱动程序；

- 保证正确的信号通路；

- 合理选择仿真帧时间。

(3) 选择实时算法。

(4) 根据仿真计算机的要求，用专用或通用计算机语言编制正确的实时仿真软件，它应能完成如下任务：

- 伺服机构模型的实时解算；
- 导弹弹体运动学及动力学模型的实时解算；
- 转台驱动指令的形成；
- 有关信号的采集。

(5) 确认模型，即校验模型的准确性。仿真模型的校验可依如下步骤进行：

- 上述前 4 项内容可分别通过设备自检、理论推导、信号通路测量及观测设备反馈值来验证。

·对所选帧时间合理性的校验可通过数字仿真进行，具体方法如下：在进行数字仿真计算时，用足够小的积分步长解算参试实物的模型。而弹体运动学及动力学环节、伺服机构模型等则以所选定的帧时间为积分步长进行解算。将计算结果与全部采用小积分步长的数字仿真结果进行比较。若各参数的误差均在可接受范围之内，则认为所选的帧时间合理。

·实时仿真软件的校验可按如下步骤进行：A. 导弹运动学及动力学环节的校验。这项校验以全数字仿真计算结果为标准，考察实时仿真软件实时解算导弹运动学及动力学模型的计算结果。
B. 实时仿真软件其它部分的校验。

·全部仿真模型校验。这项校验工作实际上就是进行系统的开环试验。

另外，还有许多涉及到实时输入和输出的数字仿真的例子，包括空间飞行器模拟器、陆地交通工具模拟器、船舶模拟器、程序控制模拟器、发电厂模拟器等。在图 1.1 中的飞行模拟器的例子中，回路中的硬件可以是操作员。这样模拟器就可以用来做人系统的开发与测试，或者操作人员的训练。

1.4 本书内容

尽管在实时仿真计算机系统、实时仿真软件、实时仿真算法等方面，国内外的专家和同行们做了大量的工作，有了不少成功的范例。但是，它们都或多或少地存在如下缺陷或不足：

(1) 目前的专用仿真计算机价格十分昂贵。例如，美国 ADI 公司的 RTS 实时仿真工作站一项就已达 20 多万美金，若配置上所有的仿真所需软件，则又需 10 多万美金。

(2) 专用仿真计算机大都体积庞大、使用环境要求很高，难以在部队推广使用。

(3) 多数仿真工作站是单处理机系统，不能进行并行运算，因而仿真速度受到限制。

(4) 仿真系统中的接口多数不是专用的实时接口。例如，有些 DIS 系统利用网络作接口，传送数据的速度受到影响，难以做到实时。

(5) 仿真机的操作系统没有或不完全具备实时性，软件开销

过大。

(6) 仿真算法不够完善, 因而仿真的实时性受到影响。而且关于实时数字仿真算法的研究, 尚有大量课题有待解决, 例如: 低精度大步长算法; 刚性系统实时仿真算法问题; 等等。

本书的研究背景是导弹武器系统半实物仿真, 研究的中心问题是实时仿真理论与支撑技术。它的体系结构如图 1.2 所示, 其中括号内的数字表示所指内容在本书中的章节号。

本书各章的主要内容如下:

第一章介绍系统仿真、实时仿真及支撑技术的有关概念及其应用情况, 论述国内外的研究现状和发展趋势, 简要说明本书的研究背景和研究内容。

第二章研究建模方法与技术, 分析、介绍建模的基本要求及途径和建立可信模型的一般过程, 论述了动力学系统的建模方法和模型表述, 模型校核与验证的方法与策略, 介绍导弹制导控制系统数学模型的原理结构及其特点和某型号战略导弹的六自由度模型, 详细分析了实时仿真模型的特点。

第三章研究仿真计算机, 特别是并行计算机的硬件结构及分类, 并详细介绍了 CHY-III 并行仿真计算机。最后, 提出了一种基于通用计算机实时仿真的体系结构。

第四章论述实时仿真软件的功能结构、性能要求以及实时专用仿真软件的特殊要求, 介绍了高级仿真语言 YHMPS、一体化建模仿真软件 YFSIM 和一体化建模仿真软件环境 YFSIM/ α 的功能、结构、特点和应用。

第五章讨论并行算法的有关概念, 提出了基于多处理机并行仿真的任务划分和调度策略, 针对异构型多处理机的特点提出了虚拟单 CPU 的概念和方法, 提出了有关静态流水和动态流水处理的并行算法。

第六章研究实时仿真算法的特点和怎样将现有的仿真算法改