



仿真科学与技术及其军事应用丛书

Hardware_In_the_Loop Simulation
(Second Edition)

半实物仿真 (第2版)

单家元 孟秀云 丁艳 贾庆忠 编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press



仿真科学与技术及其军事应用丛书

北京理工大学“十二五”规划教材

半实物仿真 (第2版)

单家元 孟秀云 丁艳 贾庆忠 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书主要从半实物仿真的概念、理论和设计三个方面,对半实物仿真系统和技术作了较为详细的介绍,涉及半实物仿真基本概念、半实物仿真系统和技术、仿真计算技术、视景仿真技术、目标与环境的物理特性及其仿真技术、运动特性仿真技术、力与力矩特性仿真技术、卫星导航信号仿真技术、半实物仿真系统总体设计、半实物仿真系统网络与接口技术、飞行器半实物仿真系统集成以及半实物仿真试验技术等内容。

本书可作为教材供飞行器设计、探测制导与控制、导航制导与控制等相关专业的本科生、研究生使用,也可以供从事系统建模与仿真、半实物仿真工作的研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

半实物仿真/单家元等编著. —2 版. —北京:国防工业出版社,2013. 1

(仿真科学与技术及其军事应用丛书)

ISBN 978-7-118-08210-4

I. ①半... II. ①单... III. ①计算机仿真—应用—武器装备 IV. ①E92—39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 223269 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)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 24¼ 字数 445 千字

2013 年 1 月第 2 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 48.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

丛书编写委员会

主任委员 郭齐胜

副主任委员 徐享忠 杨瑞平

委 员 (按姓氏音序排列)

曹晓东	曹裕华	丁 艳	邓桂龙	邓红艳
董冬梅	董志明	范 锐	郭齐胜	黄俊卿
黄玺瑛	黄一斌	贾庆忠	姜桂河	康祖云
李 雄	李 岩	李宏权	李巧丽	李永红
刘 欣	刘永红	罗小明	马亚龙	孟秀云
闵华侨	穆 歌	单家元	谭亚新	汤再江
王 勃	王 浩	王 娜	王 伟	王杏林
徐丙立	徐豪华	徐享忠	杨 娟	杨瑞平
杨学会	于永涛	张 伟	张立民	张小超
赵 倩				

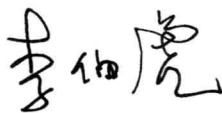
总序

为了满足仿真工程学科建设与人才培养的需求,郭齐胜教授策划在国防工业出版社出版了国内第一套成体系的系统仿真丛书——“系统建模与仿真及其军事应用系列丛书”。该丛书在全国得到了广泛的应用,取得了显著的社会效益,对推动系统建模与仿真技术的发展发挥了重要作用。

系统建模与仿真技术在系统科学、控制科学、计算机科学、管理科学等学科的交叉、综合中孕育和发展而成为仿真科学与技术学科。针对仿真科学与技术学科知识更新快的特点,郭齐胜教授组织多家高校和科研院所的专家对“系统建模与仿真及其军事应用系列丛书”进行扩充和修订,形成了“仿真科学与技术及其军事应用丛书”。该丛书共19本,分为“理论基础—应用基础—应用技术—应用”4个层次,系统、全面地介绍了仿真科学技术的理论、方法和应用,体系科学完整,内容新颖系统,军事特色鲜明,必将对仿真科学与技术学科的建设与发展起到积极的推动作用。

中国工程院院士

中国系统仿真学会理事长



2011年10月

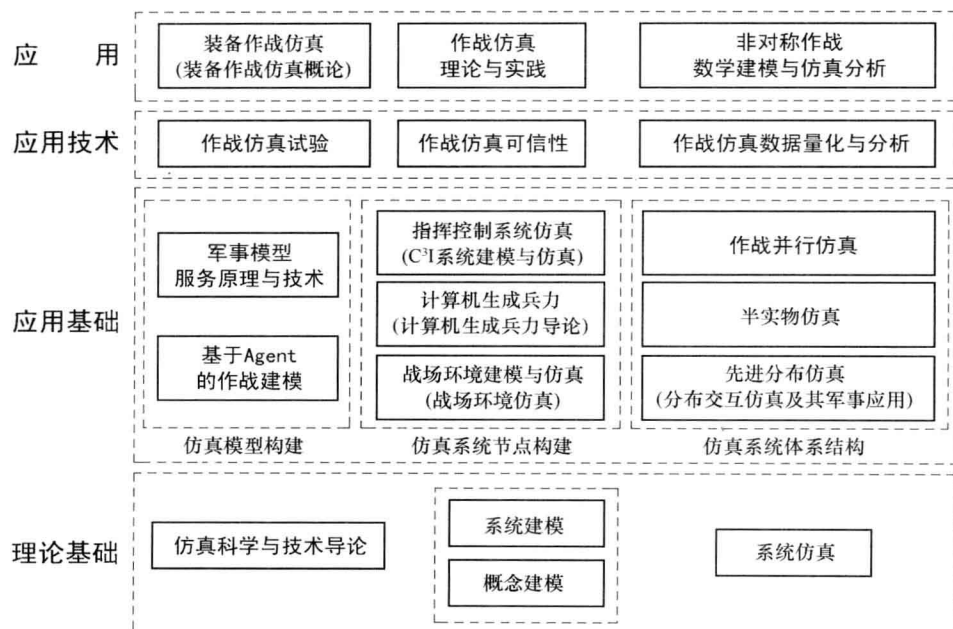
序 言

系统建模与仿真已成为人类认识和改造客观世界的重要方法,在关系国家实力和安全的关键领域,尤其在作战试验、模拟训练和装备论证等军事领域发挥着日益重要的作用。为了培养军队建设急需的仿真专业人才,装甲兵工程学院从1984年开始进行理论研究和实践探索,于1995年创办了国内第一个仿真工程本科专业。结合仿真工程专业创建实践,我们在国防工业出版社策划出版了“系统建模与仿真及其军事应用系列丛书”。该丛书由“基础—应用基础—应用”三个层次构成了一个完整的体系,是国内第一套成体系的系统仿真丛书,首次系统阐述了建模与仿真及其军事应用的理论、方法和技术,形成了由“仿真建模基本理论—仿真系统构建方法—仿真应用关键技术”构成的仿真专业理论体系,为仿真专业开设奠定了重要的理论基础,得到了广泛的应用,产生了良好的社会影响,丛书于2009年获国家级教学成果一等奖。

仿真科学与技术学科是以建模与仿真理论为基础,以计算机系统、物理效应设备及仿真器为工具,根据研究目标建立并运行模型,对研究对象进行认识与改造的一门综合性、交叉性学科,并在各学科各行业的实际应用中不断成长,得到了长足发展。经过5年多的酝酿和论证,中国系统仿真学会2009年建议在我国高等教育学科目录中设置“仿真科学与技术”一级学科;教育部公布的2010年高考招生专业中,仿真科学与技术专业成为23个首次设立的新专业之一。

最近几年,仿真技术出现了与相关技术加速融合的趋势,并行仿真、网格仿真及云仿真等先进分布仿真成为研究热点;军事模型服务与管理、指挥控制系统仿真、作战仿真试验、装备作战仿真、非对称作战仿真以及作战仿真可信性等重要议题越来越受到关注。而“系统建模与仿真及其军事应用系列丛书”中出版最早的距今已有8年多时间,出版最近的距今也有5年时间,部分内容需要更新。因此,为满足仿真科学与技术学科建设和人才培养的需求,适应仿真科学与技术快速发展的形势,反映仿真科学技术的最新研究进展,我们组织国内8家高校和科研院所的专家,按照“继承和发扬原有特色和优点,转化和集成科研学术成果,规范和统一编写体例”的原则,采用“理论基础—应用基础—应用技术—应用”的编写体系,保留了原“系列丛书”中除《装备效能评估概论》外的其余9本,对内容进行全面修订并修改了5本书的书名,另增加了10本新书,形成“仿真科学与技术及其军事应用丛书”,该丛书体系结构如下图所示(图中粗体表示新增加的图书,括号中为修改前原

丛书中的书名)：



中国工程院院士、中国系统仿真学会理事长李伯虎教授在百忙之中为本丛书作序。丛书的出版还得到了中国系统仿真学会副秘书长、中国自动化学会系统仿真专业委员会副主任委员、《计算机仿真》杂志社社长兼主编吴连伟教授,空军指挥学院作战模拟中心毕长剑教授,装甲兵工程学院训练部副部长王树礼教授、装备指挥与管理系副主任王洪炜副教授和国防工业出版社相关领导的关心、支持和帮助,在此一并表示衷心的感谢!

仿真科学与技术涉及多学科知识,而且发展非常迅速,加之作者理论基础与专业知识有限,丛书中疏漏之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

郭齐胜
2012年3月

总序

系统建模与仿真及其军事应用系列丛书

仿真技术具有安全性、经济性和可重复性等特点,已成为继理论研究、科学实验之后第三种科学研究的有力手段。仿真科学是在现代科学技术发展的基础上形成的交叉科学。目前,国内出版的仿真技术方面的著作较多,但系统的仿真科学与技术丛书还很少。郭齐胜教授主编的“系统建模与仿真及其军事应用系列丛书”在这方面作了有益的尝试。

该丛书分为基础、应用基础和应用三个层次,由《概念建模》、《系统建模》、《半实物仿真》、《系统仿真》、《战场环境仿真》、《C³I系统建模与仿真》、《计算机生成兵力导论》、《分布交互仿真及其军事应用》、《装备效能评估概论》、《装备作战仿真概论》10本组成,系统、全面地介绍了系统建模与仿真的理论、方法和应用,既有作者多年来的教学和科研成果,又反映了仿真科学与技术的前沿动态,体系完整,内容丰富,综合性强,注重实际应用。该丛书出版前已在装甲兵工程学院等高校的本科生和研究生中应用过多轮,适合作为仿真科学与技术方面的教材,也可作为广大科技和工程技术人员的参考书。

相信该丛书的出版会对仿真科学与技术学科的发展起到积极的推动作用。

中国工程院院士



2005年3月27日

序 言

系统建模与仿真及其军事应用系列丛书

仿真科学与技术具有广阔的应用前景,正在向一级学科方向发展。仿真科技人才的需求也在日益增大。目前很多高校招收仿真方向的硕士和博士研究生,军队院校中还设立了仿真工程本科专业。仿真学科的发展和仿真专业人才的培养都在呼唤成体系的仿真技术丛书的出版。目前,仿真方面的图书较多,但成体系的丛书极少。因此,我们编写了“系统建模与仿真及其军事应用系列丛书”,旨在满足有关专业本科生和研究生的教学需要,同时也可供仿真科学与技术工作者和有关工程技术人员参考。

本丛书是作者在装甲兵工程学院及北京理工大学多年教学和科研的基础上,系统总结而写成的,绝大部分初稿已在装甲兵工程学院和北京理工大学相关专业本科生和研究生中试用过。作者注重丛书的系统性,在保持每本书相对独立的前提下,尽可能地减少不同书中内容的重复。

本丛书部分得到了总装备部“1153”人才工程和军队“2110 工程”重点建设学科专业领域经费的资助。中国工程院院士、中国系统仿真学会副理事长、《系统仿真学报》编委会副主任、总装备部仿真技术专业组特邀专家、哈尔滨工业大学王子才教授在百忙之中为本丛书作序。丛书的编写和出版得到了中国系统仿真学会副秘书长、中国自动化学会系统仿真专业委员会副主任委员、《计算机仿真》杂志社社长兼主编吴连伟教授,以及装甲兵工程学院训练部副部长王树礼教授、学科学位处处长谢刚副教授、招生培养处处长钟孟春副教授、装备指挥与管理系主任王凯教授、政委范九廷大校和国防工业出版社的关心、支持和帮助。作者借鉴或直接引用了有关专家的论文和著作。在此一并表示衷心的感谢!

由于水平和时间所限,不妥之处在所难免,欢迎批评指正。

郭齐胜

2005 年 10 月

前言

半实物仿真是系统仿真科学与技术的重要分支,是系统仿真技术在工程领域尤其是飞行器制导控制领域的最早、也是最成功的应用。半实物仿真技术充分体现了系统仿真中系统、模型和仿真的关系,以及仿真基本原理——相似原则的具体体现和实现方法,涉及面广,是数学、物理、力学等基础学科,以及机械、电气、电子、光电、信息、计算机、网络和控制技术的具体应用。

仿真系统尤其是半实物仿真系统,其建设与具体仿真对象密切相关,与系统仿真中的系统、模型和仿真作为其核心技术和概念相类似,作为系统仿真中最重要的相似关系,半实物仿真的核心就是上述概念在半实物仿真系统中的具体体现以及相似关系的构建和实现。如果抛开具体的仿真对象——实际系统,一般可以按照自然环境中存在的物理现象的特性及其效应作为共性的相似关系,研究这些物理现象的机理属性、实验室模拟方法,从而结合实际系统对该物理现象的具体应用方法,构建半实物仿真系统、开展半实物仿真试验,这就是半实物仿真的技术内涵。

本书力图脱离具体的仿真对象,分析半实物仿真中系统、模型和仿真等概念的具体内涵,根据运动、力、光、电、声、磁等常见物理现象,从传感器的角度,对物理现象及其效应的机制、基本原理入手,按照系统的物理特性、相似关系及其实现方法等方面,全面而系统地总结和介绍半实物仿真的模拟器技术,并以飞行器制导控制半实物仿真系统为例介绍了半实物仿真系统集成。

本书按照半实物仿真中涉及的单项技术和系统技术两个层次进行组织。首先从仿真计算技术、视景仿真技术、目标与环境的物理特性及其仿真技术、运动特性仿真技术、力与力矩特性仿真技术、卫星导航信号仿真技术、半实物仿真系统网络与接口技术 7 个方面介绍了半实物仿真的单项技术,然后从半实物仿真系统总体设计、飞行器半实物仿真系统集成以及半实物仿真试验技术 3 个方面对半实物仿真的系统技术作了详细介绍。

第 1、2 章,介绍了系统仿真和半实物仿真的基本概念,重点阐述了系统仿真和半实物仿真中系统、模型的关系及其具体体现。

第 3 章,从仿真计算机技术、仿真软件技术和仿真算法 3 个方面介绍了仿真技术,读者可以从中学了解到半实物系统仿真中软硬件实时性实现技术的多种方案,便于根据实际情况,从经济、使用、技术角度加以选择。

第4章,针对人眼和光学成像设备的视景仿真问题,介绍了三维视觉建模理论和方法,如何采用计算机实现三维图形生成、显示和输出方法,如何构建视景仿真系统。

飞行器是利用目标和环境的物理特性对其目标和环境进行探测,从而获取目标与飞行器的相对或绝对信息进行工作的,因此第5章从目标和环境的光学、电磁等物理特性建模入手,详细介绍了典型目标及其环境的物理特性模型,根据特性及其仿真方法的不同,分别介绍可见光、红外成像、激光、雷达射频、声波目标,以及复合的目标特性等各种半实物仿真方案和技术。

针对飞行器最基本的物理模拟设备——飞行运动模拟器,第6章从运动特性仿真的角度,重点介绍了其中的基本原理——运动伺服控制系统技术,详细介绍了分别用于姿态运动模拟——转台、姿态和质心运动模拟——平台和质心运动模拟——离心机的组成原理和技术方案。

第7章,从力与力矩特性的仿真技术和力伺服控制技术入手,并详细介绍了舵机负载模拟器、力/触觉模拟器、压力模拟器等几种典型仿真设备及其实现技术。

与利用目标的物理特性进行制导的原理不同,卫星制导利用的是卫星定位信号这类特殊的主动发射含有信息的射频信号。第8章针对这类系统,首先介绍了卫星定位原理及其数学模型,然后从原理、模型、软件和射频信号生成等方面详细介绍了卫星信号模拟器技术。

第9章,力图从系统论、方法论的角度介绍半实物仿真系统的总体设计,介绍了半实物仿真系统设计的一般思路,强调了设计中的基本原则,相似关系和系统组成的确定原则,然后详细介绍了半实物仿真系统中仿真设备的指标论证方法、系统VV&A方法。

第10章,介绍了半实物仿真系统实现不同仿真设备、对象和模型间信号传递的最基本和最先进的数据交换技术,重点论述了网络的时间同步和实时控制技术。

针对飞行器这类典型系统,第11章重点总结了各类飞行器制导控制系统的基本组成、原理,从仿真建模的角度,归纳了主要环节详细的数学模型、转换关系,分析给出了其中存在的各种相似关系及其实现方法,并对系统集成具体工作给出了步骤和方法。

作为半实物仿真系统建设最终目的是开展仿真试验,第12章则从试验目的与要求的制定、试验方案内容和流程设计、试验的启动与终止、试验故障处理、试验数据分析和处理等方面,从操作层面,对半实物仿真试验给予了详细分析和总结。

本书各位编者多年从事系统建模与仿真、拟实系统理论和设计方法、计算机控制、控制工程基础、微机原理与应用、导弹制导控制系统原理课程的教学工作,承担了多项空军、陆军和海军的制导武器型号、预研项目的制导控制系统设计、研制和半实物仿真工作,结合教学、学科建设和型号科研,建立了可兼容激光、电视、捷联/

卫星组合制导,电动/气动舵机控制的大型飞行器制导控制半实物仿真试验系统。

本书是编者多年从事飞行器制导控制与仿真教学与科研工作的总结,单家元教授、孟秀云教授、丁艳副教授、贾庆忠讲师分别承担了第1、2、6章,第3、12章,第4、5章,第7、8、9、10章的编写工作,第11章由单家元、贾庆忠共同编写,全书最后由单家元统稿。

本书引用、借鉴和参考了国内外同行专家的研究成果,不能一一标注,深表歉意,并表示衷心的感谢。虽然编者尽力避免,但仍难免挂一漏万,不足和错误之处,敬请读者批评指正。

本书的编写过程得到了北京理工大学宇航学院系统与仿真实验室各位教师的大力协助,相关研究生参与了资料收集、整理和排版工作,李钟武教授、刘藻珍教授对全书进行了审阅,提出了很多宝贵意见,在此深表谢意。

编者

2012年4月于北京

目 录

第 1 章 半实物仿真基本概念	001
1.1 系统仿真	001
1.1.1 系统仿真的定义	002
1.1.2 系统仿真的一般过程	003
1.1.3 系统仿真的作用和意义	003
1.2 模型与仿真	004
1.3 系统仿真分类	007
1.4 仿真系统与仿真实体	009
1.4.1 仿真系统	009
1.4.2 仿真实体	011
1.5 半实物仿真与半实物仿真技术	014
第 2 章 半实物仿真系统	018
2.1 半实物仿真系统的组成与功能	018
2.2 半实物仿真系统中的模型	020
2.2.1 对象模型与环境模型	020
2.2.2 物理模型与数学模型	021
2.3 半实物仿真系统中相似原理与相似方法	022
2.3.1 相似性原理	023
2.3.2 相似方法	023
2.3.3 相似关系的实现	024
第 3 章 仿真计算技术	026
3.1 模拟混合仿真计算机技术	026
3.1.1 模拟计算机简介	026

3.1.2	混合计算机简介	027
3.2	全数字仿真计算机技术	028
3.2.1	ADI 实时仿真工作站	029
3.2.2	MAXION	031
3.2.3	dSPACE	032
3.2.4	“银河”仿真工作站	033
3.2.5	“海鹰”仿真工作站	034
3.2.6	RT-LAB	035
3.2.7	美国并行仿真工作站	037
3.3	仿真语言与仿真软件	040
3.3.1	仿真语言	040
3.3.2	仿真软件	042
3.4	一体化建模仿真系统	055
3.4.1	ADI 集成开发环境	055
3.4.2	“银河”一体化仿真环境	058
3.4.3	“海鹰”仿真集成开发环境	059
3.4.4	美国并行仿真建模环境	064
3.5	实时仿真算法	066
3.5.1	仿真算法基本概念及内容	066
3.5.2	实时数字仿真	068
3.5.3	实时仿真算法	070
第4章	视景仿真技术	072
4.1	三维图形建模技术	073
4.1.1	虚拟环境的建模	073
4.1.2	三维视觉建模理论与方法	073
4.2	三维视景的图形生成与显示	076
4.2.1	图形生成算法	076
4.2.2	三维视景生成的实现办法	082
4.2.3	三维立体显示技术	087
4.3	视景仿真系统及其应用	090
4.3.1	视景仿真系统	090
4.3.2	视景仿真技术应用	092

5.1	概 述	095
5.2	目标与目标特性	095
5.2.1	目标与环境光学特性	096
5.2.2	激光目标特性的研究	103
5.2.3	雷达目标特性	108
5.3	可见光图像仿真技术	111
5.3.1	基于球形屏幕分区投影的图像目标半实物仿真方案	111
5.3.2	基于平面直角大屏幕的图像目标半实物仿真方案	111
5.3.3	基于非球面反射镜的图像目标半实物仿真方案	112
5.3.4	多目标源的图像目标半实物仿真方案	114
5.3.5	其他可见光图像目标半实物仿真系统	115
5.4	红外成像目标半实物仿真技术	115
5.4.1	红外影像生成技术简介	116
5.4.2	非实时的红外成像目标背景模拟器半实物仿真方案	120
5.4.3	基于 CIG 系统的实时红外成像目标背景模拟器半实物仿真 方案	120
5.4.4	基于变焦系统的红外成像目标背景模拟器半实物仿真 方案	121
5.4.5	红外成像目标模拟器应用实例及关键技术	122
5.4.6	红外影像模拟器性能评估的研究	125
5.5	激光目标特性仿真技术	127
5.5.1	激光目标特性仿真	127
5.5.2	基于半导体发光二极管的仿真方案	128
5.5.3	利用 LD 馈电系统和衰减片的仿真方案	129
5.5.4	基于渐变衰减片和变焦光学系统的激光目标模拟器的仿真 方案	130
5.5.5	基于模拟靶板的半实物仿真方案	131
5.6	射频特性仿真技术	133
5.6.1	射频信号特性分析及建模	133
5.6.2	射频目标/环境物理模拟技术	135
5.6.3	射频目标仿真计算机控制系统	141
5.6.4	射频目标仿真技术	143
5.7	声音特性仿真技术	144

5.7.1	三维声场的特性与建模	144
5.7.2	目标声音定位与仿真	146
5.7.3	目标背景信号模拟	148
5.7.4	声音目标仿真技术	150
5.8	多模复合制导及其仿真技术	152
5.8.1	多模复合制导的意义	152
5.8.2	常用的复合制导体制	153
5.8.3	多模复合制导技术的半实物仿真	154
第6章	运动特性仿真技术	162
6.1	运动特性仿真技术	162
6.2	运动控制系统技术	162
6.2.1	运动控制系统的分类及基本组成	162
6.2.2	角速度控制——调速系统	163
6.2.3	位置控制——位置随动系统	165
6.2.4	数字控制系统	165
6.2.5	液压控制系统	166
6.3	角运动仿真技术——转台	167
6.3.1	转台的组成及工作原理	167
6.3.2	转台的分类	168
6.3.3	飞行模拟转台控制技术	171
6.3.4	转台的技术指标及发展趋势	172
6.4	线运动仿真技术——平台	174
6.4.1	平台的组成及工作原理	174
6.4.2	平台结构原理	174
6.4.3	平台的运动空间位置关系	175
6.5	过载特性仿真技术——线加速度模拟器	176
6.5.1	线加速度模拟器的组成	176
6.5.2	离心机的控制原理	177
6.5.3	离心机的主要技术指标	177
6.6	国内外研究发展状况	178
第7章	力与力矩特性仿真技术	182
7.1	概 述	182

7.2	力伺服控制系统技术	183
7.3	舵机负载特性仿真技术	184
7.3.1	舵机力矩平衡方程	184
7.3.2	负载模拟器	184
7.3.3	舵机负载模拟器的技术指标及关键技术	187
7.4	触觉/力反馈技术	190
7.4.1	触觉/力反馈概念	190
7.4.2	触觉/力反馈接口技术分类	190
7.4.3	触觉/力反馈技术及工具	191
7.5	压力仿真技术	192
7.5.1	气压仿真	192
7.5.2	水压仿真	194
第8章 卫星导航信号仿真技术		195
8.1	GPS 卫星导航动态定位信号数学模型	195
8.1.1	动态绝对定位及其观测方程	195
8.1.2	动态相对定位及观测方程	197
8.1.3	误差分析	199
8.1.4	GPS 信号	205
8.2	卫星定位信号模拟器技术	206
8.2.1	概述	206
8.2.2	系统组成与工作原理	207
8.2.3	主要技术指标	210
8.2.4	关键技术分析	211
8.2.5	卫星导航信号模拟器的应用	213
第9章 半实物仿真系统总体设计		216
9.1	半实物仿真系统设计原则	216
9.1.1	总体方案设计思想	216
9.1.2	总体方案设计准则	219
9.2	仿真对象与相似性关系	221
9.2.1	仿真对象与仿真需求	221
9.2.2	相似性关系	222