



航空装备作战 建模与仿真

■ 方洋旺 伍友利 魏贤智 王洪强 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

航空装备作战建模与仿真

方洋旺 伍友利 魏贤智 王洪强 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

全书共分10章,基本内容由五部分组成。第一部分介绍航空武器装备建模与仿真所使用的主要方法;第二部分重点介绍参与航空武器装备作战行动所必需的要件,包括战场环境、航空武器装备、指挥信息系统、计算机兵力生存等建模与仿真方法;第三部分着重介绍航空武器装备作战行动的建模方法;第四部分介绍系统建模与仿真不可或缺的校核、验证与确认理论及方法;第五部分重点介绍上述建模与仿真方法的实际应用,通过具体实例详细介绍航空武器装备作战行动的具体实现过程。

本书可作为武器系统与运用工程、仿真工程、系统工程、军事装备学、军事运筹学以及其他相关专业的高年级本科生和研究生教材,也可供上述专业的武器装备论证、研制人员,部队武器装备管理人员和指挥人员等阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

航空装备作战建模与仿真/方洋旺等编著. —北京:国防工业出版社,2012. 8

ISBN 978-7-118-08113-8

I. ①航... II. ①方... III. ①航空装备—作战模型 ②航空装备—系统仿真 IV. ①E926

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 160883 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)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 18 字数 409 千字

2012年8月第1版第1次印刷 印数1—3000册 定价38.00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

前 言

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基础上形成的交叉科学。如何利用仿真技术提高武器装备发展的研制水平、科学决策水平和作战使用水平是当前研究的热点问题,已经引起相关学者的高度关注。虽然,围绕军事、武器装备作战等建模与仿真的书籍不少,其中也不乏有优秀之作,但目前从研究内容上看,主要包括三类,第一类侧重于军事作战层面,介绍的内容太宏观,建模与仿真的粒度太粗,特别对参与作战的武器装备的建模与仿真,大多数都局限于其功能模型,难以反映武器装备技术性能指标对作战效能的影响,对信息化条件下武器装备论证、研制及武器装备协同作战使用的研究帮助有限。第二类是从武器装备研制层面来讨论建模与仿真问题,对武器装备的仿真粒度太细,而且主要以单个武器平台为主,模型主要是信号级的,可以对武器装备的技术性能及参数进行准确的仿真验证,但基本没有涉及如此细粒度的武器装备参与作战的作战过程的建模与仿真内容,因此难以将其应用到多武器平台协同的大规模实时作战仿真中。第三类是从单武器平台的作战使用层面来讨论建模与仿真的,论述的重点是关于作战效能评估的建模理论和方法,对武器装备本身的建模以及多武器装备体系作战的建模与仿真论述很少,难以满足信息化条件下武器装备协同作战与仿真的需要。从以上分析看,目前大多数书籍对信息化条件下武器装备的论证、科学决策以及武器装备协同作战使用研究等针对性不强,难以提供很好的理论和方法指导。急需一本详细论述武器装备、作战行动以及作战效能评估建模与仿真,以满足信息化条件下武器装备论证、科学决策和作战使用研究要求的专著,本书正是为了满足这样的需求而撰写的。

本书主要吸收了国内外近 10 年来在此方面的最新和最主要的研究成果,侧重于从信息化条件下航空武器装备战术使用层面介绍作战航空武器装备、作战行动以及作战效能评估的建模与仿真;全书紧紧围绕航空武器装备作战行动建模与仿真展开研究,主要内容包括战场环境、航空武器装备、指挥信息系统、计算机兵力生成、作战行动和作战效能评估建模与仿真以及校核、验证与确认和实现等。本书研究内容系统、全面,环环相扣,逐步推

进,具有如下特点:

(1) 选材独特、新颖。本书侧重于从航空武器装备战术使用层面介绍作战航空武器装备、作战行动的建模与仿真,弥补了目前军事运筹方面相关书籍有关武器装备建模介绍粗浅而装备技术方面相关书籍作战行动建模论述不足的缺陷。另外,本书大多数内容都是近 10 年来的最新研究成果,如战场人工环境建模、导弹导引头模型、制导律模型,情报系统中信息融合、指挥决策方法、CGF 的自治行为仿真及作战行动的部分建模等。

(2) 思路清晰。全书紧紧围绕航空武器装备作战行动建模与仿真以及作战效能评估研究展开,内容环环相扣,逐步推进。

(3) 实用性强。本书中最后一章专门介绍如何将前面介绍的主要建模理论和方法应用到航空武器装备作战仿真中,可加深读者对本书研究内容的理解。

从上述介绍可知,本书具有很高的学术理论及实际应用价值,对武器系统与运用工程、仿真工程本身及与之相关的应用领域起到积极的推动作用。

本书第 1、2、3、7 章由方洋旺执笔,第 5 章由方洋旺和魏贤智执笔,第 4、8 章由伍友利执笔,第 6 章由王洪强和魏贤智执笔,第 9 章由伍友利和方洋旺共同执笔。全书由方洋旺统筹定稿。

衷心感谢空军工程大学杨晓铁教授、张凤鸣教授、于雷教授、杨建军教授,工程学院李学仁教授、肖明清教授、田松副教授等的关心、鼓励和帮助;感谢空军工程大学导弹学院王明宇副教授、王刚副教授的支持和帮助;还要感谢空军工程大学及工程学院领导、同仁的大力支持。

博士生肖冰松、张平、蔡文新、高翔、张磊、刁兴华和硕士生朱剑辉、刘洪于、杨鹏飞(大)、杨鹏飞(小)参与了本书部分文稿的录入及插图的绘制,在此表示感谢。

感谢航空科学基金、空军工程大学工程学院科研创新基金的资助。

本书引用了一些作者的论著及其研究成果,在此,向他们表示深深的谢意。

由于水平有限,缺点甚至错误之处在所难免,望读者批评指正。

编著者

2011 年 12 月于西安

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 航空武器装备体系概述	1
1.1.1 基本构成	1
1.1.2 航空武器装备参与作战的样式	1
1.2 航空武器装备建模与仿真概述	2
1.2.1 概念及特点	2
1.2.2 建模与仿真分类	2
1.2.3 军事仿真技术的应用	3
1.3 航空武器装备建模与仿真研究现状与发展趋势	3
1.3.1 分布交互式仿真技术	3
1.3.2 综合环境仿真技术	4
1.3.3 虚拟现实技术	5
1.3.4 智能仿真技术	6
1.3.5 先进武器系统研制中的半实物仿真技术	7
1.3.6 虚拟样机技术	8
第 2 章 模型构建基本方法	9
2.1 连续时间系统建模	9
2.1.1 常用的数学模型	9
2.1.2 模型转换方法	10
2.1.3 系统状态初始值设置	14
2.2 离散时间系统建模	15
2.2.1 常用的数学模型	15
2.2.2 连续系统数学模型的离散化	16
2.3 基于 Petri 网建模	18
2.3.1 概述	18
2.3.2 数学描述	19
2.3.3 变迁条件和规则	19
2.3.4 Petri 网的执行机制	20
2.3.5 应用实例	21
2.4 多分辨率建模	22
2.4.1 基本概念	23

2.4.2	建模方法	23
2.4.3	模型的聚合与解聚	24
2.5	元建模方法	24
2.5.1	概述	24
2.5.2	建模方法	26
2.6	基于智能技术的 Agent 建模	28
2.6.1	Agent 与 MAS 体系结构及组成	28
2.6.2	建模方法及步骤	30
第 3 章	战场环境建模	31
3.1	引言	31
3.2	地理环境建模	31
3.2.1	陆战场建模	31
3.2.2	海战场的描述及海战场描述的定量方法	40
3.3	气象环境建模	44
3.3.1	气象环境概述	44
3.3.2	气象环境建模方法及步骤	47
3.4	电磁环境建模	49
3.4.1	电磁环境建模方法	50
3.4.2	电磁环境的数据描述	50
3.4.3	战场电磁环境建模分析	51
3.4.4	雷达电磁环境建模	53
3.5	战场人工环境建模	58
3.5.1	基于粒子系统的战场火焰模型	58
3.5.2	基于细胞自动 S 机的火焰模型	63
3.5.3	基于粒子系统的爆炸效果建模	64
第 4 章	武器装备系统建模	67
4.1	飞机仿真建模	67
4.1.1	常用飞行坐标系	67
4.1.2	作用在飞机上的力和力矩	68
4.1.3	飞机运动模型	70
4.1.4	飞控系统模型	74
4.1.5	起落架动力学建模	76
4.2	导弹武器系统建模	79
4.2.1	常用坐标系及坐标系之间的关系	79
4.2.2	导弹的运动学建模	81
4.2.3	导引头建模	86
4.2.4	常用制导律	103

第 5 章 指挥信息系统建模	112
5.1 指挥信息系统建模仿真特点	112
5.1.1 指挥信息系统建模仿真的意义	112
5.1.2 指挥信息系统模型的基本要求	112
5.1.3 指挥信息系统建模仿真特点	113
5.2 指挥信息系统一般模型	113
5.3 通信系统建模	116
5.3.1 通信系统的基本组成	116
5.3.2 通信网络的建模与仿真	117
5.3.3 通信信道建模与仿真	124
5.4 情报系统建模	134
5.4.1 信息融合模型	135
5.4.2 信息融合方法	139
5.4.3 目标识别方法	143
5.4.4 威胁估计模型及方法	145
5.5 指挥决策建模	147
5.5.1 指挥决策知识的表示与获取	148
5.5.2 基于专家系统的指挥决策模型	150
5.5.3 基于案例的指挥决策模型	155
5.5.4 基于 Agent 结构的指挥决策模型	161
第 6 章 计算机兵力生成 (CGF)	166
6.1 概述	166
6.1.1 CGF 的地位	166
6.1.2 CGF 的应用及特点	167
6.1.3 CGF 的研究内容	167
6.2 CGF 的体系结构	169
6.2.1 基于 DIS 的 CGF 体系结构	169
6.2.2 基于 HLA 的 CGF 体系结构	170
6.2.3 基于多 Agent 的 CGF 体系结构	172
6.3 CGF 的物理行为仿真	173
6.3.1 CGF 建模分析	173
6.3.2 战斗机模型	173
6.3.3 机载雷达模型	174
6.3.4 机载航炮模型	175
6.3.5 机载导弹模型	175
6.4 CGF 的自治行为仿真	176
6.4.1 战场感知模型	176
6.4.2 CGF 的决策方法	176

6.4.3	CGF 的决策控制模块	177
6.4.4	CGF 实体对象行为协同	179
6.5	CGF 中的人工智能技术	180
6.5.1	知识表示技术	180
6.5.2	知识获取	181
6.5.3	CGF 中的智能体技术	182
6.6	CGF 的实现	183
6.6.1	CGF 开发特点	183
6.6.2	CGF 系统的需求分析	183
6.6.3	CGF 系统的程序开发	184
6.6.4	CGF 系统的一些关键技术	185
第 7 章	作战行动建模	187
7.1	引言	187
7.2	飞机引导过程建模	187
7.2.1	截击行动引导过程	187
7.2.2	突防引导过程	188
7.3	目标搜索建模	190
7.3.1	目标发现过程描述	190
7.3.2	搜索发现目标建模	196
7.4	目标分配建模	204
7.4.1	地面防空系统目标分配	204
7.4.2	空中截击目标分配	207
7.5	进攻作战建模	214
7.5.1	空空导弹作战	215
7.5.2	空地导弹作战	224
7.6	防御作战建模	226
7.6.1	地空导弹作战	226
7.6.2	高炮防空作战	230
7.7	电子对抗建模	231
7.7.1	通信对抗效果计算模型	232
7.7.2	雷达对抗效果计算模型	233
第 8 章	建模与仿真的校核、验证与确认	237
8.1	VV&A 的基本概念	237
8.2	可信度的基本概念以及它与 VV&A 的关系	238
8.3	VV&A 的基本原则	239
8.4	VV&A 技术与方法	241
8.4.1	模型校核方法	241
8.4.2	模型验证方法	242

8.5	VV&A 的过程	244
8.5.1	复杂 VV&A 过程	244
8.5.2	VV&A 过程的优化	244
8.5.3	简单 VV&A 过程	244
8.6	HLA 作战仿真的 VV&A 过程	245
8.6.1	HLA 作战仿真概述	245
8.6.2	HLA 作战仿真的 VV&A 过程	246
第 9 章	航空装备作战仿真及效能评估系统实现	251
9.1	作战仿真及效能评估系统总体设计	251
9.1.1	HLA 仿真技术简介	251
9.1.2	作战仿真及效能评估系统结构组成	253
9.1.3	仿真流程	253
9.2	作战仿真及效能评估系统主要子系统设计	261
9.2.1	基于 HLA 仿真联邦设计概述	261
9.2.2	战斗机成员设计	265
9.2.3	机载导弹联邦成员设计	267
9.2.4	效能评估联邦成员设计	268
9.3	作战仿真及效能评估系统实现	268
9.4	仿真结果分析	271
9.4.1	作战态势想定	271
9.4.2	仿真结果分析	272
参考文献	273

第1章 绪论

1.1 航空武器装备体系概述

1.1.1 基本构成

当今的武器装备已发展成为庞大而复杂的武器装备体系。武器装备体系的构成要素按照其在战争中的作用,大致可以分为主战装备/平台系统、综合电子信息系统、综合保障系统三大类;按其完成作战任务的功能,可分为预警、侦察、情报和战场监视系统,作战指挥、通信和战场管理系统,电子战/信息战系统,火力打击平台或主战武器系统,作战支援和技术/后勤综合保障系统^[1]。

具体到航空武器装备体系,按功能可分为综合指挥信息系统、信息化主战武器装备、信息对抗装备、信息化综合保障装备等。

综合指挥信息系统又分为指控控制、预警探测、情报侦察、通信、导航、航管、气象保障、地面测绘等系统,装备平台有路基、空基和天基平台。其中预警指控系统包括地面各类指挥控制系统以及空中预警机、指通机等;预警探测系统包括警戒雷达、引导雷达、目标指示雷达、超视距雷达及其组网系统等;情报侦察系统包括侦察卫星、侦察飞机以及地面侦察站等;通信系统包括平面通信网、地空通信网、空空通信网、卫星通信网等。基础信息保障包括导航、航管、地理、气象等信息保障。

主战武器装备包括空天作战武器装备、航空武器弹药、地面防空防天武器装备、空降作战装备等。空天作战武器装备包括战斗机、攻击机、轰炸机,临近空间作战装备,空天作战飞行器等。地面防空防天武器装备包括反导系统、中远程地空导弹、近程地空导弹等。空降作战装备包括空投装备、武装/运输直升机、战斗车/突击车、单兵武器装备、空降作战信息系统等。

信息对抗装备包括电子进攻、电子防护、网络攻防以及心理战等。其中,空中电子信息进攻装备包括远距离支援干扰飞机、随队干扰飞机、反辐射无人机/反辐射导弹、电磁脉冲炸弹以及心理战飞机等装备;电子防护装备包括末端制导干扰、电磁屏蔽、诱饵等;网络攻防装备包括病毒攻击与防护、网络接管与防护、拒绝服务攻击与防护等。

1.1.2 航空武器装备参与作战的样式

航空武器装备主要参与信息化战争中的空中主战,其作战样式主要包括综合电子进攻、夺取制空权、远程战略精确打击、空中战役进攻、战场火力支援、协同防空、战术反导、战役空降、远程力量投送、空基反卫星作战样式^[1]。

1.2 航空武器装备建模与仿真概述

1.2.1 概念及特点

建模就是按照一定的目的对所研究的系统特征进行提取、描述的过程,是利用模型代替系统原型的抽象化过程。军事仿真是指那些应用于军事目的的仿真模型,有多种不同的类型,采用多种不同的技术,可以有许多不同的分类方法^[2]。军事仿真主要包括武器装备仿真和作战仿真两大部分。武器装备仿真是武器装备研制阶段必不可少的实验和验证手段。在武器装备研制的全寿命阶段,即论证阶段、方案阶段、设计阶段、生产布置阶段和使用保障,包括主战装备、支持装备、保障装备等全系统都离不开武器装备仿真。而本书主要研究航空武器装备作战建模与仿真的相关内容,既包含了武器装备仿真的内容,又包含了航空武器装备参与作战的仿真内容,因此,它不同于一般军事作战模拟、作战仿真方面的书籍,它是站在武器装备技术层面讨论装备参与作战的模拟与仿真的问题,对武器装备建模的粒度要求更细,同时对武器装备作战过程的模拟过程也要求更详细、更精确。

1.2.2 建模与仿真分类

军事模型有多种划分形式,就构成虚拟战场而言,其主要模型包括实体模型、行为模型和环境模型^[2]。其中,实体模型描述武器平台、传感器、无线电通信设备等;行为模型描述机动、交战、碰撞等;环境模型描述地形、电磁、大气、气象、海洋等。而作战模型可分为解析模型、仿真模型以及作战对抗模型^[2]。

军事仿真分为连续系统、离散系统仿真,实物、半实物仿真,数学仿真,数字仿真,模拟仿真,构造仿真,虚拟仿真,实况仿真等^[2]。而航空武器装备作战仿真是军事仿真的一部分,上述仿真方法也都适用。

军事仿真按战争模型的对象、问题及范围的不同进行划分,可以将军事仿真划分为三大层次,即武器装备系统及平台仿真、作战指挥仿真、战略决策仿真。武器装备系统及平台仿真是对单件武器平台或多件武器装备构成的武器系统进行仿真,主要目的是对新武器系统进行研制设计,对武器系统的性能进行评估,以及利用仿真系统对使用该武器的人员进行训练。作战指挥仿真也称作战模拟,是利用计算机构造出模型的战场环境,用于对参与作战的指挥员和作战人员进行指挥和作战训练,对作战方案进行评估,对武器装备的作战效能进行评估等。作战模拟按所用模型对现实的抽象程度或所采用的模拟方法,可分为解析模拟、计算机仿真、作战对抗模拟和实兵演习^[3]。战略决策仿真是指利用计算机仿真技术,建立起虚拟的国家安全环境,对战略层次决策的问题进行研究、评估、预测和模拟,利用高层模型的定量与定性的运用,以期获得对高层决策比较可信的结果。本书所讨论的航空武器装备作战仿真是在比较详细地讨论武器装备系统及平台仿真的基础上对武器装备参与作战指挥的模拟,因此,航空武器装备作战建模与仿真的目的就是要弥补作战指挥仿真研究中对武器装备系统及平台仿真粒度不够精细,导致武器装备的技术指标与其战术指标关联程度不高的问题。

军事建模方法种类繁多,包括定量和定性建模两大类^[2]。定量建模方法包括:①理论建模,如连续系统、离散系统以及离散事件系统建模方法等;②实验建模,如随机变量模型建模方法、基于系统辨识的建模方法、基于神经网络的建模方法和基于灰色系统理论的建模方法。定性建模方法包括:①基于模糊数学的建模方法;②基于 Kuipers 的建模方法;③基于 SDG 的定性建模方法。定性和定量相结合的建模方法包括:①基于系统动力学的建模方法;②基于层次分析法的建模方法;③基于 Agent 的行为建模方法。上述建模方法也都适用于航空武器装备作战建模。

1.2.3 军事仿真技术的应用

军事仿真技术的应用主要包括^[2]:①运用仿真手段进行战略分析与战略规划,军事仿真已成为各国中长期发展规划和实施决策的一个必不可少的环节,其作用主要体现在国家目标与国家战略研究、国防战略和作战方针研究、武装力量的规划等。②运用军事仿真进行战法研究,主要包括高新技术和新概念武器的先期技术演示和新的战法研究、检验和评估部队编制和作战方案,以信息战为先导,以 C⁴ISR 为中枢的联合作战研究。③运用军事仿真进行指战员训练,主要包括单武器平台操作技能训练和多武器平台协同作战训练、分队战术和合同战术训练、联合作战训练。④运用军事手段支撑并参与武器装备建设,主要包括制定武器装备发展战略与规划,支撑武器装备发展的全寿命周期和基于仿真的武器装备采办(Acquisition)。全寿命周期一般包括确定战术技术指标、可行性论证、方案论证、工程设计和试制、飞行试验、鉴定和定型、批量生产、部署使用等 8 个阶段,而采办是指为实现军方提出的某项军事任务目标,完成所需武器及相关系统的概念建模、立项、设计、开发、测试、签约、生产、部署、后勤保障、改良以及报废的过程。⑤指挥自动化是现代作战模拟技术最广泛的应用领域之一。例如,美国在海湾战争中使用的现代计划程序作战指挥系统,就是通过计算机的处理能力,根据各类侦察手段获得的准确情报,把数以百万计的数据进行融合分类和模拟,然后提供最符合实际的关键作战准备程序的。

1.3 航空武器装备建模与仿真研究现状与发展趋势

军事仿真技术在很多方面都有了长足的发展。主要包括分布交互式仿真技术、综合环境仿真技术、虚拟现实技术、智能仿真技术、半实物仿真技术及虚拟样机技术等。对于航空装备作战模拟或仿真,主要应用前四项技术,而后两项技术通常是一高粒度小规模仿真,在必要时也可以采用嵌入式、多分辨仿真技术,将半实物仿真或虚拟样机子系统集成到分布式仿真系统中进行仿真。但在大多数情况下,主要通过后两种仿真技术获得可信度很高的武器装备性能参数对航空装备作战模拟或仿真系统的模型进行验模、校核和置信水平评估,或以后两种仿真系统中的模型进行低粒度的简化,以满足航空装备分布式作战模拟或仿真的要求。基于以上分析,本书侧重于对前四项仿真技术的发展趋势及展望进行详细的讨论。

1.3.1 分布交互式仿真技术

分布交互式仿真包括军事上公认的实况仿真(Live Simulation)、虚拟仿真(Virtual

Simulation)和构造仿真(Constructive Simulation)^[2]。为了解决建模与仿真领域存在的两大问题,即仿真器之间的交互性和重用性差以及开发、使用、维护时成本高与置信水平差等问题,军事仿真从分布交互式仿真系统(Distributed Interactive Simulation, DIS)发展到今天的高层体系结构(High Level Architecture, HLA)。自从美国国防部20世纪80年代提出先进分布仿真(Advanced Distributed Simulation, ADS)的概念后,先进分布式仿真技术与系统经历了SIMNET(Simulator Networking)、分布交互式仿真(Distributed Interactive Simulation, DIS)、聚合层仿真协议(Aggregation Level Simulation Protocol, ALSP)、高层体系结构(High Level Architecture, HLA)几个发展阶段。

1983年,美国国防部高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)和美国陆军共同制定了一项合作研究计划,即SIMNET研究计划,到20世纪80年代末SIMNET计划结束时,它已发展成为具有260个地面车辆仿真器和飞机飞行模拟器、通信网络、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。SIMNET计划的成功,推动了仿真器联网运行技术的发展。

1989年3月,由美国佛罗里达大学(Central Florida University)的仿真与训练研究所(Institute of Simulation & Training, IST)主办召开了第一届DIS研讨会。在1992年3月的第六届DIS研讨会上,美国陆军仿真训练装备司令部(Simulation Training and Instrumentation Command, STRICOM)提出了DIS的结构,并着手制定DIS协议。随着计算机技术、网络技术和仿真技术的迅速发展,DIS在技术和体系结构方面表现出一定的局限和不足。

1996年8月,美国国防部正式颁布了针对建模和仿真领域的通用技术框架。该框架由高层体系结构、任务空间概念模型(Conceptual Models of the Mission Space, CMMS)和一系列数据标准三部分组成,被认为是下一代的分布交互式仿真标准。2000年9月,由IEEE标准协会投票批准正式将IEEE M&S HLA标准系列IEEE P1516、1516.1、1516.2/D5列为IEEE标准。2001年5月,HLA被正式接受为IEEE标准。同时美国国防部规定2001年后所有国防部门的仿真必须与HLA相容。

目前分布交互式仿真的主要发展方向是“基于网格技术的仿真”,即“仿真网格”^[4]。网格技术的核心是解决网络上各种资源(如计算资源、存储资源、软件资源、数据资源等)的动态共享与协同应用。军事网格是由各种通信卫星、微波中继站、地面光缆、无线电台、野战地域网等通信基础设施以及各种计算机、存储器、网格软件平台、数据库、地理信息系统等计算信息设施组成,具有广域分布、无缝连接、动态扩展和高度集成的特点^[5]。基于网格的仿真就是构建在网格(软硬件)基础之上,并且利用网格服务来支持仿真过程中的建模、想定制作、运行时集成、实验设计和实验分析等系列活动的一种新型仿真方法。

1.3.2 综合环境仿真技术

综合环境仿真包括动力学、电磁、水声、光学环境仿真,视觉、听觉、动感、力反馈等环境感知仿真以及虚拟战场环境的综合仿真^[2]。综合自然环境建模与仿真的研究与发展主要经历了原始技术的积累和先进技术的形成两个阶段。第一阶段从20世纪80年代至90年代中期,主要研究集中在地形数据库、可视化仿真和动态地形仿真等方面;第二阶段自20世纪90年代中期至今,主要研究集中在包括综合自然环境数据表示与交换、环境数据模型、综合自然环境数据的自动生成和重用以及动态自然环境仿真等方面的技术、方法

和工具。目前研究的主要内容集中在环境数据模型、综合自然环境数据表示与交换、综合自然环境剧情的快速自动生成、分布式综合自然环境数据库和模型库及其重用、多表示和多分辨率综合自然环境、动态自然环境仿真,研究的重点和难点在于综合自然环境建模与仿真中的一致性、动态性、分布性、权威性。

美军在环境仿真方面逐步建立了各种完善的数据库和模型库,用虚拟现实技术建立了虚拟仿真环境。美国国防部高级研究计划局已设立“综合环境计划”,正在研究用于平台级仿真的大气与海洋的数据系统,以满足分布交互式仿真的需要。

我国在综合自然环境建模与仿真领域的研究主要是科研院所和工业部门在地形建模、视景仿真、雷达和红外仿真以及大气和海洋等方面的研究。比较突出的研究成果应是国防科技大学军用仿真实验室开发的采用 C/C++ 设计实现的 mslCTDB 格式的地形数据库。同时,考虑与训练、实验以及战术级、战役级的仿真系统互联的需要,还开发了联合建模与仿真环境。此外,在综合自然环境数据的语法和语义一致性检查和分析方面,还提出了基于综合环境数据表示与交换规范和谓词断言表达式的自动分析评估方法。在动态自然环境建模与仿真方面,则开发了具有较复杂动态地形仿真能力的环境联邦。

随着国防领域建模与仿真的需求不断扩大,综合自然环境建模与仿真的发展方向将集中在以下几个方面:①环境数据模型和公共数据模型框架;②综合自然环境数据表示与交换意见数据的语法;③语义一致性;④综合自然环境剧情的快速自动生成和分布式自然环境数据库与模型库以及重用;⑤多表示和多分辨的综合自然环境与一致性;⑥动态自然环境仿真;⑦基于多 Agent 和 HLA 综合战场环境仿真。

1.3.3 虚拟现实技术

虚拟现实技术(Virtual Reality, VR)起源于1994年Burdea和Coiffet描述的Virtual Reality的3个基本特征,即想象、交互和沉浸(Imagination, Interaction, Immersion, 3I)。因VR技术的硬件、软件和领域不同,3I的偏重也各有不同。想象是指虚拟现实技术具有广阔的可想象空间,可拓宽人类认知范围,可再现真实环境,也可以随意构想客观不存在的环境;沉浸即临场感,指用户感到作为主角存在于模拟环境中的真实程度,虚拟现实能提供给用户一个真实的虚拟环境,用户在其生理和心理的角度上,对虚拟环境难以分辨真假,如同在现实世界中的感觉;交互是指用户实时地对虚拟空间的对象进行操作和反馈^[6]。多感知交互是虚拟现实的灵魂。为了更真实地表现虚拟现实中人的心理和生理的感觉,日本于2004年开发出一种嗅觉模拟器^[7],2009年3月英国的工程和物理科学研究会上展示了能提供味觉、嗅觉和皮肤温度感受的原型虚拟茧(Virtual Cocoon)^[8]。

硬件产品在虚拟现实系统的发展中具有非常重要的作用,以至于人们将虚拟现实描述为“头盔式显示器、数据手套”,而忽略了其最本质的定义,即“真实感体验”^[9]。沉浸感离不开头盔显示器(Helmet-Mounted Displays),第一个头盔显示器于1966年由麻省理工学院林肯实验室研制成功。1985年产生了第一个数据手套,集成了传感器技术和光导纤维技术等,能感知手指关节的弯曲状态,精确定位,产生力反馈,能进行抓取、移动和旋转等动作。1987年发明了多方位体验真实感的传感数据服。

VR技术的发展是与VR软件相辅相成的。OpenGL是通用共享的开放式三维图形标准;WorldToolKit(WTK)是提供完整的三维虚拟环境开发平台;Vega主要应用于实时视觉

模拟;Open Inventor 是面向对象和交互式的专业三维图形开发工具包;OpenGVS 用于场景图形的实时开发;EON 是实时视觉效果与物理机制以及真实的人体动作有机结合体;VRML 和 X3D 常用于基于 Internet 的网络虚拟现实;AVS/Express 涉及工程分析、航空航天、遥感和国防等领域;STK 用于航天和卫星的虚拟仿真;STAGE Scenario 是作战指挥等高度灵活开放的开发平台;CG2 VTree 是基于便携平台的图像开发包;VRAX 和 NavMode 的沉浸感做得比较好^[10];VirSSPA 通常用于虚拟医学手术流程^[11];VEStudio 主要应用在三维地理信息、展示和古迹复原等方面。国内虚拟现实软件包的研发相对美欧国家较晚,主要有 WEBMAX、VRP、“通用分布式虚拟现实软件开发平台”^[12]、北京航空航天大学分布交互仿真开发与运行平台 BH HLA/RTI^[13]、华南农业大学的“视景仿真系统”^[14]等。

虚拟现实技术的发展方向主要包括:虚拟现实技术的真实感主要体现在视觉和听觉上,“多感知交互”正在成为热点;对力反馈系统的进一步研究、嗅觉、味觉和体表感受都是未来虚拟现实的内容,而基于互联网的虚拟现实伴随互联网的发展而成为热点。当前 VR 研究中一个热门课题是分布式虚拟环境(Distributed Virtual Environment, DVE),也称网络虚拟环境(Net Virtual Environment, NVE)。如美国陆军的“洞穴式自动虚拟环境室(Cave Automatic Virtual Environment, CAVE)”就是一个典型的 VR 仿真应用系统。

1.3.4 智能仿真技术

基于建模与仿真技术研究人类智能系统机理,以及各类基于知识的仿真系统已成为仿真技术的重要研究与应用领域。典型的如基于仿真的嵌入式智能系统。目前,应用智能体(Agent)对复杂社会系统进行仿真是这一领域的研究热点。下面重点介绍智能体的仿真支撑平台以及应用现状及发展趋势。

1. 智能体的仿真支撑平台

1) 单机 MABS 平台

目前,具有代表性的单机平台有:SFI 的 Swarm,Source Forge 的 Repast,芝加哥大学社会与经济动态性研究中心的 Ascape^[14],麻省理工学院媒体实验室的 StarLogo^[15],Sandia 国家实验室的 Aspen 项目^[16],法国的 CORMAS 平台,以及 LIRMM 的多 Agent 开发包 MadKit 等。

这些平台有如下一些特点:支持层次仿真方式和层次式的调度方式;支持多种平台,模型可重用性强;技术成熟,对于小规模复杂系统建模方便,仿真速度快。

但是,它们也存在一些不足之处:

(1) 单机仿真方式。这些平台针对的是单处理器平台,而目前的并行化工作是利用 SMP 等多处理器及其操作系统所提供的底层并行计算支持能力,支持平台中各个 Agent 的并发调度执行,Agent 之间的逻辑时序关系需要由操作系统提供保证。

(2) 各个仿真对象之间不能实现充分的并行性。由于这些平台把仿真事件放到队列中进行调度,不能充分仿真 Agent 之间事件的随机性,因而不能真实地反映复杂系统。

(3) Agent 调度不灵活。这些平台采用的调度机制通常为预定义的,在 Agent 创建时设置,因此灵活性不够。

2) 分布 MABS 平台

多智能体分布仿真的基础工作由 Uhrmacher 在 1996 年提出^[18],并在 2000 年实现基

于 Java 的智能体建模仿真环境;JAMES Gasser 和 Kakugawa^[19]在 2002 年提出一种大规模粗粒度的通用智能体仿真平台 MACE3J^[20];J. Cass Riley^[21]等在 2003 年提出基于离散事件仿真器的智能体并行系统 SPADES^[22];Schutez 等在 2005 年提出基于网格中间件的自适应分布多 Agent 仿真算法和计算平台 SWAGES^[23]。这些工作的共同点是对通用 MABS 平台进行分布化,同时各种平台在设计和实现中采用了不同思路和方法。这些 MABS 分布仿真平台的代表性工作显示了以下主要特点^[24]:

- (1) 主要研究基于 Agent 计算模型的分布仿真技术。
- (2) 面向大规模应用。
- (3) Agent 本身逻辑复杂。

MABS 分布仿真平台的另一部分工作主要是在 HLA/RTI 上展开的。Lees、Logan 等人利用他们开发的 Agent 软件包 Sim_Agent,在 HLA/RTI 上进行了基于 Agent 的分布仿真^[25]。新加坡南洋大学 Wang、Turner 等人利用 HLA/RTI 作为底层平台,由网关邦员(Gateway Federate)和 JADE(Java Agent DEvelopmentframework)构成中间件开发了基于 Agent 的原型系统^[26]。Davila、Uzcagegu 等人在 HLA/RTI 上开发了基于 DEVS 框架和逻辑型 Agent 的多 Agent 仿真平台 GALATEA^[27]。

这些平台的优势是利用了 HLA/RTI 提供的各种底层服务,使得平台开发相对较容易,开发周期短,同时与 HLA/RTI 兼容,也容易与这类系统连接、合成。但也正因为它是建立在 HLA/RTI 之上,因而不可避免地受制于 HLA/RTI。这种限制主要表现在:

- (1) 平台功能受限于 HLA 的仿真框架,因而,难以充分体现复杂系统的特点。
- (2) 平台的性能受制于具体底层 RTI 的性能。

2. MABS 应用现状

MABS 仿真应用经历了以下三个阶段:

(1) 第一阶段的仿真应用着重验证多 Agent 方法学在 CAS 研究领域的可行性。该阶段的代表是糖果模型(Sugarscape)^[28]和蚁群模型(Ant Colony)^[29]。该阶段的特点是 Agent 类型多为反应式 Agent,能力较为简单,Agent 组织结构扁平,很少考虑 Agent 的社会特性和结构特性对复杂系统适应性的影响。

(2) 第二阶段的仿真应用为基于 Agent 的复杂系统建模仿真技术在各个领域的推广。该阶段 MABS 与具体的学科领域结合衍生了新的研究方向,如 ACE,空间规划(Spatial Planning)^[30],生态仿真(Ecological Simulation)^[31]等。该阶段的特点体现在基于 Agent 的复杂系统应用领域不断拓广。

(3) 第三阶段即当前 MABS 的仿真应用是 MAS 研究与复杂系统研究领域更为紧密的结合。该阶段的趋势是 MABS 目标系统指向高级认知能力个体构成的社会结构和社会关系,以及 MABS 与建模仿真技术的深化集成。

1.3.5 先进武器系统研制中的半实物仿真技术

美军首先在武器研制中采用半实物仿真技术,并广泛应用于武器装备的研制与鉴定。重点研究新型武器装备精确制导体制下的红外成像制导、毫米波制导和多频谱复合制导的半实物仿真,以实现定量确定目标和环境在所需频段的辐射特性的实时动态仿真。先后建成美国空军动能杀伤拦截器(Kinetic Kill Vehicle, KKV)半实物仿真系统,美国陆军