



航天科技图书出版基金资助出版

航天任务分布式 视景仿真技术

侯建文 师 鹏 等 编著
贺 亮 赵育善

 中国宇航出版社

航天科技图书出版基金资助出版

航天任务分布式视景仿真技术

侯建文 师 鹏 等 编著
贺 亮 赵育善



中国宇航出版社

· 北 京 ·

版权所有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

航天任务分布式视景仿真技术 / 侯建文等编著. --
北京: 中国宇航出版社, 2013.7
ISBN 978-7-5159-0447-4

I. ①航… II. ①侯… III. ①航天环境模拟—视景模
拟—可视化仿真 IV. ①V524.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 151379 号

责任编辑 刘亚静 杨 洁

责任校对 祝延萍 封面设计 文道思

出 版 社 中国宇航出版社

社 址 北京市阜成路 8 号 邮 编 100830
(010)68768548

网 址 www.caphbook.com

经 销 新华书店

发行部 (010)68371900 (010)88530478(传真)
(010)68768541 (010)68767294(传真)

零售店 读者服务部 北京宇航文苑
(010)68371105 (010)62529336

承 印 北京画中华印刷有限公司

版 次 2013 年 7 月第 1 版 2013 年 7 月第 1 次印刷

规 格 880 × 1230 开 本 1/32

印 张 8.125 字 数 226 千字

书 号 ISBN 978-7-5159-0447-4

定 价 58.00 元

本书如有印装质量问题, 可与发行部联系调换

航天科技图书出版基金简介

航天科技图书出版基金是由中国航天科技集团公司于2007年设立的，旨在鼓励航天科技人员著书立说，不断积累和传承航天科技知识，为航天事业提供知识储备和技术支持，繁荣航天科技图书出版工作，促进航天事业又好又快地发展。基金资助项目由航天科技图书出版基金评审委员会审定，由中国宇航出版社出版。

申请出版基金资助的项目包括航天基础理论著作，航天工程技术著作，航天科技工具书，航天型号管理经验与管理思想集萃，世界航天各学科前沿技术发展译著以及有代表性的科研生产、经营管理译著，向社会公众普及航天知识、宣传航天文化的优秀读物等。出版基金每年评审1~2次，资助10~20项。

欢迎广大作者积极申请航天科技图书出版基金。可以登录中国宇航出版社网站，点击“出版基金”专栏查询详情并下载基金申请表；也可以通过电话、信函索取申报指南和基金申请表。

网址：<http://www.caphbook.com>

电话：(010) 68767205, 68768904

《航天任务分布式视景仿真技术》

作者名单

- 第1章 侯建文（上海航天技术研究院）
师 鹏（北京航空航天大学）
贺 亮（上海航天控制技术研究所）
- 第2章 侯建文（上海航天技术研究院）
陈建光（中国航天系统科学与工程研究院）
韩 飞（上海航天控制技术研究所）
- 第3章 师 鹏（北京航空航天大学）
刘 涛（北京航空航天大学）
谢 冉（北京航空航天大学）
- 第4章 贺 亮（上海航天控制技术研究所）
孙 俊（上海航天控制技术研究所）
卢 山（上海航天控制技术研究所）
- 第5章 赵育善（北京航空航天大学）
吴炳石（陕西应用物理化学研究所）
吴 蕊（上海航天控制技术研究所）
- 第6章 师 鹏（北京航空航天大学）
夏丰领（中国空空导弹研究院）
贾成龙（上海航天控制技术研究所）
- 第7章 贺 亮（上海航天控制技术研究所）
刘宗明（上海航天控制技术研究所）
陈 赟（上海航天控制技术研究所）

前 言

自 1957 年 10 月 4 日，苏联在拜科努尔发射场发射第一颗人造地球卫星（Sputnik）以来，世界航天技术经历了半个多世纪的发展，人类已经逐步掌握了进入空间和利用空间的科学理论和工程技术，世界各航天强国也将越来越多的航天任务列入研发计划。航天任务的研发和实施是一项高技术、高风险和高投入的系统工程，只有经过详细设计、分析与论证的航天任务才能达到设定的目标。仿真和试验是人类进行航天技术探索的主要手段，航天技术的特点使得进行试验的代价十分高昂，普遍的方法是通过仿真进行航天新技术的探索和工程设计，这样既节约了成本，也降低了风险。伴随着航天技术的高速发展，仿真技术在世界各国航天任务的研发中多次发挥过重要作用。在我国的航天任务研发中，从预先研究到任务执行，仿真技术也一直受到航天任务各参研单位的高度重视。

航天任务分布式视景仿真是系统仿真技术与航天工程相结合的产物，是以航天器动力学原理、相似原理、系统工程理论、虚拟现实技术、分布式仿真技术及应用领域相关专业技术为基础，以计算机、各种模拟器以及专用设备为工具，利用所建立的航天器系统模型对真实的或假想的航天器系统进行动态演示、分析和研究的一门多学科的综合技术。除了仿真技术所具有的一般性特点之外，航天任务分布式视景仿真还具有运行效率高、可靠性高、可信度高、分析能力强、可视化效果好、展示效果逼真等显著特点，这些特点促使航天任务分布式视景仿真技术成为当今航天任务仿真和未来仿真技术发展的重点和热点，航天任务分布式视景仿真技术也必将在未

来世界航天技术的发展中占据重要地位。

本书内容分为7章,深入浅出地介绍了航天任务分布式视景仿真技术的研究概况、基本理论、关键技术和相关软件,重点对航天任务分布式视景仿真中的数学模型、仿真框架、信息流和时间同步管理等关键技术进行了阐述,同时结合分布式仿真平台和三维视景仿真软件对相关仿真原理和方法进行了说明。读者可参考本书利用相关仿真工具软件搭建航天任务分布式视景仿真系统,从而开展更深层的研究和开发工作。

本书的完成是集体智慧的结晶,本书的作者来自航天、航空、兵器等多个领域的科研单位、高等院校和情报机构,力求本书所述内容系统、全面。支撑本书的除了作者们近几年发表的论文和技术报告(列于各章参考文献中),还有8篇重要的博士学位论文(详见本书附录),在此一并对论文和报告的作者表示感谢。最后,特别感谢航天科技图书出版基金对本书的资助,以及中国宇航出版社为本书出版所做的大量工作。

本书是作者们多年来从事航天工程技术研发的经验总结,内容丰富、全面,具有很强的实用性。限于作者的水平,书中难免有疏漏和不妥之处,敬请广大读者批评指正,不吝赐教。

作 者

2013年7月

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 航天任务仿真的背景	2
1.2 国内外研究现状	5
1.3 分布式交互仿真的发展	10
1.4 视景仿真技术	19
1.4.1 Creator	20
1.4.2 Vega Prime	23
1.5 小结	26
参考文献	27
第 2 章 航天任务仿真技术	31
2.1 航天任务仿真的发展	31
2.2 航天任务系统仿真	33
2.2.1 系统、模型与仿真	33
2.2.2 仿真的一般过程和步骤	35
2.3 航天任务系统仿真理论	38
2.3.1 相似理论	39
2.3.2 建模方法理论	40
2.3.3 仿真方法理论	40
2.3.4 支撑系统技术	45
2.3.5 应用理论	46
2.4 系统仿真分类	47
2.4.1 根据仿真对象的特征分类	47

2.4.2 根据仿真时间和自然时间的比例关系分类	47
2.4.3 根据仿真系统的结构和实现手段分类	48
2.5 系统仿真技术在航天领域的应用	49
2.6 小结	50
参考文献	52
第3章 航天任务仿真的动力学与数学基础	53
3.1 常用坐标系	53
3.1.1 地心赤道惯性坐标系	53
3.1.2 地心赤道旋转坐标系	54
3.1.3 航天器轨道坐标系	54
3.1.4 航天器本体坐标系	55
3.2 航天器动力学基础	56
3.2.1 轨道动力学	56
3.2.2 近距离相对轨道动力学	66
3.2.3 姿态动力学	75
3.3 典型变轨理论与模型	80
3.3.1 远距离变轨理论	80
3.3.2 近距离变轨理论	86
3.4 卫星星下点与覆盖区计算模型	88
3.4.1 卫星的星下点轨迹计算	88
3.4.2 地面覆盖区数学模型	91
3.5 小结	94
参考文献	95
第4章 分布式航天任务仿真框架	96
4.1 航天任务系统仿真的界定	96
4.1.1 仿真对象的界定	96
4.1.2 航天测控系统	98
4.1.3 航天器系统	99

4.1.4 航天应用系统	102
4.1.5 人-机交互功能	102
4.2 航天任务系统仿真框架的组件化分析	103
4.2.1 航天任务系统仿真框架的组件化	103
4.2.2 仿真系统的组合方案	107
4.2.3 组件间的交互数据分析	110
4.3 航天任务系统仿真框架	111
4.3.1 数据处理组件	112
4.3.2 航天任务仿真系统的组成与分类	114
4.3.3 复合模块	119
4.4 基于框架的航天任务仿真系统开发流程	119
4.5 分布式航天任务仿真中的几个问题	122
4.5.1 逻辑时间系统	122
4.5.2 物理时间系统	130
4.5.3 仿真同步	133
4.6 小结	137
参考文献	138
第5章 信息流	140
5.1 信息流的任务	140
5.2 确定仿真系统的数据分发机制	142
5.2.1 维定义	144
5.2.2 各维的区间划分	147
5.3 航天任务建模	148
5.3.1 地面通信	149
5.3.2 航天器测控	150
5.3.3 航天器	154
5.3.4 载荷应用	157
5.4 联邦对象定义	158
5.4.1 对象类及其属性	158

5.4.2 交互类及其参数	162
5.5 小结	164
参考文献	165
第6章 时间同步管理	168
6.1 时间同步管理的概念与目标	168
6.1.1 分布式科学仿真对时间管理的需求	168
6.1.2 时间同步管理的目标	169
6.2 影响仿真系统推进效率的因素	171
6.2.1 单进程计算与分布式并行计算的对比	172
6.2.2 无数据传递的情况	174
6.2.3 单联邦成员组建仿真系统的情况	175
6.2.4 影响分布式仿真系统推进效率的主要因素	175
6.3 航天任务仿真系统的时间同步管理	179
6.3.1 航天任务仿真系统时间推进的特点	179
6.3.2 步长自适应推进	182
6.3.3 事件即时处理	187
6.3.4 成员推进逻辑	192
6.4 小结	196
参考文献	198
第7章 航天任务三维视景仿真技术	201
7.1 三维视景实时应用	201
7.1.1 三维视景实时应用的软硬件组成	201
7.1.2 三维视景实时应用的工作原理	203
7.1.3 视景仿真实时应用程序的开发过程	206
7.1.4 技术路线	207
7.2 MultiGen Creator 实体建模	208
7.2.1 OpenFlight 数据格式介绍	208
7.2.2 MultiGen Creator 地形建模	213

7.2.3 高级建模技术	218
7.3 Vega Prime 视景驱动技术	221
7.3.1 使用 VP 和 LP	221
7.3.2 Vega Prime 坐标系转换	221
7.3.3 DOF 节点控制	227
7.3.4 自然环境设置	227
7.3.5 碰撞检测	228
7.4 基于 MFC 的三维视景仿真系统框架	229
7.4.1 基于 MFC 的 VP 应用开发方法	229
7.4.2 三维视景仿真软件框架结构	235
7.4.3 类设计	236
7.5 OpenGL 特效制作	238
7.5.1 OpenGL 介绍	238
7.5.2 Vega Prime 与 OpenGL 的混合编程	238
7.5.3 航天任务特效的 OpenGL 实现	240
7.6 小结	242
参考文献	243
附录 参考博士学位论文目录	246

第 1 章 概论

人类认识客观世界的主要手段是实践，人类只有通过不断的实践才能认清事物发展的客观规律。纵观人类漫长的文明史，一直是生产活动在推动着人类文明的发展。在科学技术日益发达的今天，生产活动比历史上任何时候都更具规模，人类的知识也相应地呈现爆炸式的增长。另一方面，人类为组织生产而进行的实践活动也更宽广，生产活动对未知领域所进行的探索活动转变为独立的科学实验，它已经成为人类探知客观世界的主要手段。

科学实验分为两种，一种是原型实验，一种是仿真实验。原型实验通过对物理原型直接进行实验来获取相关的信息。这种方法比较直接，但是风险大，周期长，投入高。仿真实验是对物理原型的模型进行实验，按照所采用模型的不同，又分为物理模型仿真、半物理仿真和数字仿真。

在科学实验方面，面向工程应用的实验多以物理模型和半物理模型方式进行仿真，而数字仿真则在理论研究方面应用得比较多。

在计算机技术迅速发展的今天，数字仿真技术在科学技术的各个方面扮演着越来越重要的角色。一方面，数字仿真可以通过计算机验证新理论和新方法的正确性，同时提供一种风险规避手段，特别是在一些特殊的领域，例如核爆炸、空间飞行任务等，数字实验与工程实验相比，在投入和风险承受能力方面具有十分明显的优势。另一方面，通过数字仿真可以模拟人类的实践活动，仿真过程可控性和可观测性的存在，方便了对客观世界的观察和研究，能够指导新理论和新方法的开发。

以天体力学和飞行力学为基础，伴随着计算机计算能力、计算数学和仿真技术的发展，数字仿真在空间飞行器的设计和飞行任务

的设计过程中也扮演着越来越重要的角色, 仿真技术在理论研究和任务分析中应用的深度和广度都得到了很大的拓展。

1.1 航天任务仿真的背景

1957 年 10 月 4 日, 世界上第一颗人造地球卫星发射升空, 标志着人类进入航天科技时代。按忧思科学家联盟 (Union of Concerned Scientists, UCS) 的统计, 截至 2007 年 1 月 4 日, 在轨运行的航天器总数为 844 颗, 其类型从军用的侦察卫星到民用的通信卫星、气象卫星, 还有军民两用的导航卫星等, 几乎囊括了人类生活的各个方面。

目前, 国际上正掀起新一轮的航天热。自从有人类文明以来, 对空间科学的探索从来没有停止过。在经历了长期的积累之后, 人类终于在 20 世纪 50—70 年代突破了航天基础技术, 相继开展了载人航天、交会对接和载人登月等重大工程。从 20 世纪 80 年代开始, 人类的航天活动趋于理性, 把重点放在了空间应用研究方面, 设计并发射了一大批具有较高技术水平的空间应用卫星, 推动了民用航天领域的发展。进入 21 世纪, 许多国家和组织相继出台了宏大的航天活动计划。美国继续加大其在空间应用和深空探测方面的投入, 并制定了 2020 年前实现再次载人登月的计划; 俄罗斯随着其国内经济的增长, 逐步加大对航天科技的支持力度, 试图恢复苏联时代在空间的影响力; 欧洲继续走在空间科学研究的前列, 努力提高独立航天能力; 日本则斥巨资发展航天技术, 以实现其成为政治大国的目的; 印度大力发展航天技术, 并计划在 2020 年前实现载人登月。

我国在 1956 年 10 月 8 日成立了第一个火箭导弹研究机构——国防部第五研究院, 并于 1970 年 4 月 24 日发射了自主设计制造的第一颗人造地球卫星——东方红 1 号。经过 50 多年的发展, 中国已经成功发射了多种类型的无人航天器和神舟系列载人飞船, 能够独立开展较为先进的空间技术开发活动。2006 年发布的《中国的航天》

白皮书指出：中国在 2001—2005 年期间发射了 22 颗不同种类和用途的人造地球卫星，形成六个卫星系列——返回式遥感卫星系列、“东方红”通信广播卫星系列、“风云”气象卫星系列、“实践”科学探测与技术试验卫星系列、“资源”地球资源卫星系列和“北斗”导航定位卫星系列；继 1999 年发射神舟 1 号无人飞船后，又成功发射了 3 艘无人飞船和 2 艘载人飞船，突破了载人航天的关键技术。

中国航天 50 多年来取得了巨大的成绩，但与国际先进水平相比还存在相当大的差距。就在轨运行的卫星规模来讲，中国只有 39 颗，远低于美国的 444 颗和俄罗斯的 91 颗（UCS 数据）；就应用类型来说，中国还没有自己的空间站；就空间应用技术的水准来看，在航天器总体技术、有效载荷的开发和任务的规划能力等方面还有明显差距。在可以预见的将来，随着中国国力的日益提升，中国必将在航天活动中投入更多的人力和物力，取得与国家地位相符的航天技术地位，展开一系列的空间应用项目和空间探测计划，继续推动航天事业的快速发展，为国家的发展和腾飞助力。

航天工程是高技术、高风险和高投入的系统工程，只有经过详细设计、分析与论证的航天任务才能达到设定的目标。仿真和试验是人类进行航天技术探索的主要手段，由于航天技术的“三高”特征，使得进行试验的代价十分高昂，普遍的方法是通过仿真进行新技术的探索和工程设计，对于重大原理性的技术则通过发射试验航天器的方法进行工程验证，既节约了成本，又降低了风险。

仿真系统之所以在航天工程中具有如此重要的地位，是因为它具有相应物理系统无法比拟的特性，具体是指：1) 可操作性；2) 可观测性；3) 经济性；4) 可预测性。有资料表明，仿真对于工程的投入产出比可以达到 1:100 的高水平。对于发展中的中国来说，资金问题仍然是限制我国进行航天活动的主要因素，为了更快、更好地进行航天活动，仿真技术的研究与发展应该起到更为重要的作用。

美国于 1958 年成功发射其第一颗人造地球卫星，有关航天器气

浮仿真台的报导最早出现在 1960 年,可以说,航天仿真技术是与航天技术同步发展的。目前,航天任务越来越复杂,为辅助航天器设计和航天器飞行任务规划,伴随航天任务实施的不同阶段,不同的仿真系统被开发出来执行相关的仿真工作。

为了对航天器飞行任务进行操作仿真,包括航天器发射前的系统仿真和航天器运行期间指令上传前的验证仿真,其设计过程中的各阶段仿真元素被集成到一个仿真系统中。出于系统设计便利和避免工作重复开展的考虑,一类仿真系统框架被建立起来。框架提供弹性的仿真系统组织结构,通过分阶段建模与集成,伴随航天任务的实施过程,提供不同阶段的仿真服务。

随着仿真技术的发展,仿真模型越来越精确,为了组建可信的仿真系统,系统的集成度也越来越大,系统复杂度也相应地达到了空前的高度,给仿真系统的设计、集成与测试带来了障碍,也对计算机的计算能力提出了更高的要求。

软件组件是指具有规范接口和明确依附关系的独立单元,仿真组件有助于降低仿真系统的复杂程度,对复杂仿真系统的设计与实现具有重要的意义。微型计算机和计算机网络性能的发展,使得仿真系统得以按分布式的方式组织:各个仿真组件运行在不同的计算机上,通过网络进行彼此之间的通信,共同完成仿真任务。这种分布式的仿真系统特别适用于以微机和局域网(local area network, LAN)为基础的教学、科研活动。

近年来,研究人员对分布式系统投入了越来越多的关注,并在许多方面开展了研究工作,如协调和同步、扩展性、通信、安全、容错、异构和管理等。

目前,用于分析仿真的分布式仿真系统绝大多数都通过自行开发的网络通信模块进行系统集成,例如 Agent,系统仿真工具箱(system simulation toolkit, SST)等。高层体系结构(high level architecture, HLA)技术是分布式建模与仿真领域的新技术标准,目标是推动组件的重用和互操作,为分布式的虚拟场景仿真和分析

仿真提供系统集成基础。由于 HLA 技术是因虚拟场景仿真，特别是战场仿真的需求开发的，因此在组建分析仿真系统时，针对物理系统的特点，例如系统构建、组件同步等问题，需要深入地研究和分析。

为了实现对航天器飞行任务的建模与仿真，为工程大总体提供强有力的分析、论证支持，本书把 HLA 分布式仿真技术引入航天任务系统仿真中，就仿真系统的组建、系统组件的扩展与重用、系统的严格同步策略和仿真系统的推进效率等问题，对 HLA 的相关技术进行深入地研究和评估，设计出适合航天任务仿真需求的系统组建方案，为基于 HLA 技术组建航天任务仿真系统解决基本的系统组织原则、组件数据交互基础、组件时间同步策略和组件软件构架等问题。

本书结合航天任务系统仿真的特点，运用 HLA 分布交互式仿真技术和软件工程技术，设计航天任务系统仿真框架，包括系统组织原则、组件数据通信方案、组件时间同步机制和组件软件构架。该框架在系统组织层面上为航天任务仿真系统的组建提供组织基础和依据，为解决仿真系统组建问题而采取若干旨在减少对系统开发人员在 HLA 技术、航天任务系统建模与分析技术和软件工程技术三方面知识需求的技术，降低系统开发的难度，对系统的设计与实现具有重要意义，也有力地支持了系统的团队开发。

1.2 国内外研究现状

目前，航天任务仿真主要集中在虚拟航天任务仿真系统的开发与组建方面，目的是为航天任务设计、规划、验证、操作提供仿真和分析服务。航天任务仿真主要在航天器尚未发射升空前对航天器的任务操作进行仿真，对航天器的有效载荷进行性能评估，验证和分析航天器各主要子系统的功能。

喷气推进实验室 (Jet Propulsion Laboratory, JPL) 从 1996 年开始进行虚拟任务 (virtual mission, VM) 项目的开发，负责人是