

基于高层体系结构的探空火箭可视化仿真和协同设计系统框架设计

彭涛^{1,2}, 刘波², 王孜^{1,2}

1. 中国科学院研究生院, 北京 100190
2. 中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100190

摘要 探空火箭是临近空间实地探测的唯一探测工具和各学科空间科学实验的良好载体。利用探空火箭, 可以进行中高层大气立体剖面探测、微重力科学实验、空间生物技术实验、星载有效载荷先期原理性飞行验证实验等, 具有其他飞行器不可替代的优势和作用。发展探空火箭技术、构建探空火箭仿真系统将有力地推动探空火箭综合实验平台建设, 促进中国空间科学发展。针对构建探空火箭可视化仿真和协同设计系统(VSCSSR)的需求, 本文对探空火箭仿真的相关技术——视景仿真技术、分布式交互仿真及高层体系结构(HLA)进行了介绍, 设计了系统的主要功能、软硬件结构和联邦成员的划分, 给出了仿真系统的框架设计。

关键词 探空火箭仿真; 分布式交互仿真; 视景仿真; 高层体系结构

中图分类号 TP391.9

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)21-0021-05

Frame Design of a Visual Simulation and Co-design System for Sounding Rockets Based on High Level Architecture

PENG Tao^{1,2}, LIU Bo², WANG Zi^{1,2}

1. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China
2. Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract The sounding rocket is the only method for near space field detection and a good carrier for various space scientific experiments. Currently, the sounding rocket is widely used in middle and upper atmosphere stereo profile detection, microgravity scientific experiment, space biology, spaceborne payload verification test and others, where the sounding rocket shows irreplaceable advantages and functions. Developing the sounding rocket technology and building up a simulation system for sounding rockets will help the construction of the Sounding Rockets Comprehensive Experiment Platform and promote the development of space science in China. With a high flight speed and a short flight time, it is difficult to observe the attitude change during the flying of a sounding rocket. The visual simulation for the sounding rocket can solve this problem. So far, the visual simulations are limited to some simple visual simulations and applications. This paper proposes a distributed visual simulation frame for sounding rockets, based on High Level Architecture (HLA), and a distributed co-design. According to the requirements of building a visual simulation and co-design system for sounding rockets (VSCSSR), some related technologies are introduced, such as visual simulation, distributed interactive simulation and HLA. The main functions, the software and hardware architecture of the system, and the partition of federates are included in the frame design of the system.

Keywords sounding rockets simulation; distributed interactive simulation; visual simulation; High Level Architecture

收稿日期: 2010-07-21; 修回日期: 2010-10-20

基金项目: 中国科学院知识创新工程领域前沿项目

作者简介: 彭涛, 博士研究生, 研究方向为探空火箭仿真, 电子信箱: pengtao@cssar.ac.cn; 刘波(通信作者), 研究员, 研究方向为空间信息与仿真技术, 电子信箱: boliu@cssar.ac.cn

0 引言

探空火箭是在 50~300km 高度范围内进行空间原位探测(也即实地探测)的唯一手段,也是进行各学科空间科学实验的良好载体。探空火箭飞行高度介于高空气球和低轨人造地球卫星之间,能够进行中高层大气探测、有效载荷飞行验证实验、元器件飞行验证实验、微重力科学实验和空间生物技术实验等。自从 1945 年美国发射第一枚探空火箭以来,火箭探空得到了世界各国的重视。中国从 1958 年开始发展探空火箭事业,第一枚探空火箭于 1960 年 9 月发射成功。经过不同动力装置三代探空火箭的发展,中国多种探空火箭的技术指标或使用性能均已达到国外同类产品的水平。经历了 20 世纪 80 年代末的低谷之后,中国于 2008 年开始的国家大科学工程“子午工程”中,需要利用包括探空火箭在内的多种手段对中高层大气参数进行综合探测,将成为重振中国火箭探空事业的重要一步^[1]。

发展探空火箭技术,建立探空火箭综合实验平台,可以形成能够兼顾中高层大气立体剖面探测、微重力科学实验、空间生物技术实验、星载有效载荷先期原理性飞行实验验证的综合实验能力,为卫星等航天器的发射提供高空大气环境保障,能够有效地促进空间探测、微重力科学、空间生命科学与技术及相应有效载荷技术的快速发展,是航天器发射、有效载荷研制和微重力科学、空间生命科学与生物技术等研究领域的共同需求。

计算机仿真几乎与计算机同步诞生和发展。从仿真软件的角度,计算机仿真可分为 5 个相互交叉的发展阶段:仿真程序包和仿真语言、一体化仿真环境、智能化仿真环境、面向对象的仿真和分布式交互仿真^[2]。高层体系结构(High Level Architecture, HLA)是为了解决分布式交互仿真中多个仿真器之间互操作和重用性的最新标准。从仿真技术诞生之日起,可视化和仿真就有着密切的联系,通常把实现三维空间信息可视化的仿真称为“视景仿真”。视景仿真是计算机技术、图形处理与图像生成技术、立体影像和音响技术、信息合成技术、显示技术等诸多高新技术的综合运用。它有利于缩短试验和研制周期,提高试验和研制质量,节省试验和研制经费,已经广泛使用于许多领域。

探空火箭飞行速度快,飞行时间相对较短,不容易观察其飞行过程中的姿态变化。对探空火箭进行视景仿真,可以有效地解决这个问题。目前,大多数视景仿真的研究都是针对某一应用的单纯的视景仿真,本文针对探空火箭应用,提出并设计了基于 HLA 技术、支持分布式协同设计的分布式视景仿真系统框架。此外,探空火箭视景仿真及协同设计系统也是探空火箭综合实验平台的重要组成部分。

1 探空火箭仿真相关技术

1.1 可视化与视景仿真

从概念上来说,可视化就是一种用图形或图像表征数据的计算方法,即利用计算机图形图像技术将一维数据转化为

可观察的二维或三维几何表示,从而达到增强人们对抽象信息认知的目的。可视化技术的应用领域非常广,大体上可以分为科学计算的可视化和空间信息的可视化两类,其中前者多应用于科学和工程计算,以数学模型为中心实现计算过程的可视化和计算结果的可视化。而这里提到的可视化仿真属于后者,具体而言就是实现三维空间信息的可视化,也常把这种可视化仿真称为“视景仿真”,目标是使用户能够与真实三维世界的可视化模型进行实时的可控制的交互,即在虚拟环境中体验真实世界^[3]。

视景仿真是仿真动画的高级阶段,也是虚拟现实技术的最重要的表现形式,它是使用户产生身临其境感觉的交互式仿真环境,实现了用户与该环境直接进行自然交互。视景仿真采用计算机图形图像技术,根据仿真的目的,构造仿真对象的三维模型或再现真实的环境,达到逼真的仿真效果。视景仿真系统的构建可分为仿真环境制作和仿真驱动两部分。仿真环境制作主要包括:模型设计、场景构造、纹理设计制作、特效设计等,它要求构造出逼真的三维模型和制作逼真的纹理和特效;仿真驱动主要包括:场景驱动、模型调动处理、分布交互和大地形处理等,它要求高速逼真地再现仿真环境,实时响应交互操作等^[4]。

视景仿真已经广泛应用于许多领域,如城市规划仿真、大型工程漫游、名胜古迹虚拟旅游、虚拟现实房产推销系统、虚拟现实模拟培训、交互式娱乐仿真等。特别是它非常适于应用在军事领域的作战训练和武器研制,例如运用场景模拟技术建立起一个虚拟的、非常逼真的电子战场环境,使攻防双方的作战人员沉浸在由计算机产生的作战环境中,它为武器装备研制、战术演练和训练提供了非常有效、经济的手段和途径,具有十分明显的经济效益并成为军事领域里重要的高科技手段。现在在很多领域,视景仿真技术已经成为仿真系统软件的一个主要组成部分,是虚拟现实技术、分布式交互仿真技术研究的主要内容之一。

1.2 分布式交互仿真

随着计算机技术、信息技术和系统技术的飞速发展,计算机仿真的应用领域不断拓宽,已广泛应用于航天、航空、通信、船舶、交通运输、军事、化工、生物、医学、社会经济系统等自然科学与社会科学的各个领域。计算机仿真需要解决的问题也越来越复杂,许多问题靠单个仿真系统已无法解决,必须依靠多个仿真系统进行联合协同仿真,从而引出了分布交互仿真的研究和实践^[5]。

分布式交互仿真(Distributed Interactive Simulation, DIS)是指采用协调一致的结构、标准和数据库,通过局域网或广域网,将分散在各地的仿真设备互联,形成可参与的综合性仿真环境^[2]。分布交互仿真是计算机技术的进步与仿真需求不断发展的结果,其特点主要表现在 5 个方面,即:分布性、交互性、异构性、时空一致性和开放性。分布式交互仿真已经成为了计算机仿真领域的前沿和热点之一。

国外对分布交互仿真研究与实践始于 20 世纪 70 年代。

1978年, J. A. Thorpe 发表了文章“Future Views: Aircrew Training 1980—2000”, 提出了联网仿真的思想, 首次系统地描述了联网仿真技术的功能及要求, 希望实现受训人员在分布虚拟战场环境中分辨不出训练系统与真实系统。1983年, 美国国防部高级研究计划局(DARPA)制定了 SIMNET(Simulation Networking)计划, 希望将各军兵种、单兵使用的仿真器连接到网络上, 形成一个共享的仿真环境, 进行各种复杂任务的综合训练。SIMNET 形成了新的分布仿真的概念; 将多种仿真应用集中到同一个时空环境中。其基本技术原则被以后的发展所继承, 在 SIMNET 的基础上, 美国军方与工业界进一步发展了异构型网络互联的分布式交互仿真技术 DIS, 目的是集成不同时期的仿真技术、不同厂家的仿真产品和不同用途的仿真平台, 实现交互功能。DIS 标准和协议的核心是建立通用的数据交换环境, 通过协议数据单元(Protocol Data Unit, PDU)的使用, 支持异地分布的真实、虚拟和构造的平台级仿真之间的互操作。在 DIS 发展的同时, DARPA 发起了一个聚合级分布式作战仿真实验, 随后委托 Mitre 公司对实验进行分析研究。Mitre 公司对照 SIMNET 进行了技术分析, 提出了聚合级仿真协议(Aggregate Level Simulation Protocol, ALSP)。ALSP 的目标是使现有的多个聚合级作战仿真应用可以通过局域网或广域网交互。ALSP 吸取了 SIMNET 技术中的一些原理, 发展了系列聚合级仿真所需的技术: 时间管理、数据管理和体系结构等。

SIMNET、DIS、ALSP 都是同类功能仿真应用的互联, 互操作性有限, 不能满足越来越复杂的作战仿真需求。为此, 美国国防部于 1995 年发布了建模与仿真主计划(M&S Master Plan, MSMP), 决定在国防部范围内建立一个通用的仿真技术框架, 保证国防部范围内各种仿真应用间的互操作性。技术框架的核心是 HLA。HLA 在 1996 年 8 月完成基础定义, 随后为北约各国采纳, 并于 2000 年 9 月被 IEEE 接受为标准。

20 世纪 90 年代后, 很多软件公司开始提供较成熟的分布交互仿真软件, 主要包括虚拟样机和虚拟现实软件, 虚拟样机商业软件如加拿大 VPI 公司的 STAGE、FLSIM; 虚拟现实商业软件如美国 MultiGen-Paradigm 公司的 VEGA 和 Creator, Coryphaeus 公司的 DWB, Easy T 和 Easy Scene 等; 可以提供 DIS/HLA 功能函数库的中间件软件, 如美国 MAK 公司的 VR-LINK 软件、瑞典 PITCH 公司的 pRTI 等。目前, 在美国、欧洲和亚洲一些国家和地区分布交互仿真实践中, 商用软件被广泛使用, 大大简化了分布交互仿真的难度和工作量。可以认为, 采用符合标准的商用软件是快速构建分布交互仿真的普遍方式^[5]。

中国的仿真技术从 20 世纪 90 年代开始起步和发展, 取得了一些理论与软件成果。目前仿真方法正逐步走向成熟, 并且得到初步应用。一方面, 国内分布交互仿真也采用了结合商用软件快速构建的实现方式, 另一方面, 国内的一些大学和科研机构, 如国防科技大学、北京航空航天大学等开始拥有分布交互仿真软件。

2 HLA 及其优点

HLA 的出现为整个分布交互仿真系统的开发过程带来了革命性的变化。基于 HLA 标准的仿真系统具有模型的可重用性、互操作性, 能提供更大规模的将构造仿真、虚拟仿真、实物仿真集成在一起的综合环境, 可以建立不同层次和不同粒度的对象模型等优点, 能满足多方面的应用需求。

HLA 作为一种标准仿真总线, 其目的是解决不同类型仿真应用之间的互操作及重用问题。HLA 主要由三部分组成: HLA 规则、HLA 接口规范和 HLA 对象模型模板。HLA 规则定义了联邦设计阶段的准则; HLA 对象模型模板定义了数据交互的标准; HLA 接口规范定义了仿真运行过程中的各种基础服务, 包括联邦管理服务、声明管理服务、对象管理服务、时间管理服务、所有权管理服务和数据分发服务^[6]。HLA 的实现软件形式为 RTI, 即运行时间基础结构。

HLA 按照面向对象的思想方法来构建仿真系统, 它是在面向对象分析与设计的基础上划分仿真成员, 构建仿真联邦的技术, 图 1 展示了 HLA 仿真系统的层次结构^[2]。

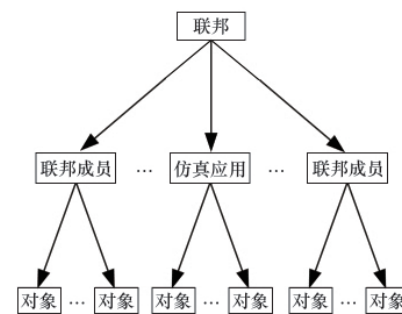


图 1 基于 HLA 的仿真系统的层次结构
Fig. 1 Hierarchical structure diagrams of HLA based simulation system

在基于 HLA 的仿真系统中, 联邦是指用于达到某一特定仿真目的的分布式仿真系统, 它由若干个相互作用的联邦成员构成。所有参与联邦运行的应用程序都可以称为联邦成员。联邦中的成员有多种类型, 其中最典型的一种联邦成员是仿真应用。仿真应用是使用实体的模型产生联邦中某一实体的动态行为。联邦成员由若干相互作用的对象构成, 对象是联邦的基本元素。HLA 定义了联邦和联邦成员构建、描述和交互的基本准则和方法。需要说明的是, 联邦可以作为一个成员加入一个更大的联邦。

HLA 不考虑如何由对象构建成员, 而是在假设已有成员的情况下如何进行联邦集成。HLA 主要考虑在联邦成员的基础上如何进行联邦集成, 即如何设计联邦成员间的交互达到仿真目的。HLA 的基本思想是采用面向对象的方法设计、开发和实现仿真系统的对象模型, 以获得仿真联邦的高层次的互操作和重用。HLA 具有的特点适应现在和未来的仿真的需求^[7]。

1) HLA 具有更强的功能和更好的适应性, 它能支持各种类型仿真混合应用, 支持混合时钟(逻辑时钟与物理时钟)管

理,加强了整个系统的时空耦合性,允许实体级、聚合级的联合仿真,因而具有更好的互操作性。

2) 由于从更高的角度出发规定了模型模版、规则和接口规范等仿真活动开展全过程的一系列标准,具有更好的可重用性。

3) 提供了高效的时间管理、数据过滤和联邦管理机制,为大规模仿真提供了有力的技术支持。

4) 结合了当代软件技术发展的最新成果,提供通用的仿真支持平台,方便了仿真应用的开发。

3 探空火箭可视化仿真和协同设计系统的主要功能

探空火箭可视化仿真和协同设计系统用于对探空火箭及其搭载的有效载荷进行可视化仿真,支持探空火箭应用的协同设计,从而在一定程度上辅助新有效载荷通过探空火箭进行实验的可行性论证。通过可视化仿真,可以直观地看到火箭发射试验的仿真效果,还可以对各种有效载荷进行虚拟装配,从而辅助探空火箭的设计。该系统还可以对探空火箭实验环境的热学、力学及有效载荷的数据通信等方面进行仿真论证,进而不断扩展探空火箭在多方面的应用。

探空火箭可视化仿真和协同设计系统的主要功能如下。

1) 对探空火箭及其搭载的有效载荷进行可视化仿真。系统基于 HLA 的体系结构,支持基于网络的分布式应用。系统支持扩展名为 .flt 的 OpenFlight 格式模型的添加和导入,这样可以事先采用三维可视化建模工具,如 Multigen Creator 对不同型号探空火箭及其相关有效载荷进行三维静态仿真建模,然后导入本系统。不同载荷设备的研发人员可以通过本系统,在各自的终端对探空火箭及其有效载荷进行分布式虚拟组装和展开讨论,从而支持探空火箭的协同设计,辅助新有效载荷通过探空火箭进行实验的可行性论证。

2) 探空火箭发射试验过程的可视化仿真。在探空火箭和有效载荷静态建模仿真的基础上,对探空火箭的发射和飞行进行视景仿真。探空火箭飞行速度快,飞行时间相对较短,不容易观察其飞行过程中的姿态变化和某些有效载荷与箭体分离后的工作状态。对探空火箭的发射和飞行试验进行视景仿真,可以有效地解决这个问题。

3) 探空火箭发射试验过程中载荷舱实验环境的热学仿真、力学仿真。探空火箭发射试验中载荷舱所能提供的实验环境对开展以探空火箭为载体的科学实验和科学探测活动有着至关重要的作用。载荷舱内的载荷设备在一定温度范围内才能有效工作,如通常要求载荷舱内温度不能高于 70℃。火箭发射准备阶段,在地面会受到太阳辐射的加热,载荷设备提前开机,也会放出一定热量;火箭发射飞行阶段,除太阳辐射、设备散热还会受到与大气摩擦的气动加热、大气散射的加热和不同大气层温度的影响。热学仿真需要综合考虑各种影响温度的因素,仿真载荷舱内温度变化和分布情况,为探空火箭应用设计提供参考。火箭发射飞行时,载荷舱可以提供超重和失重的环境,对载荷舱进行力学仿真,可以模拟

火箭飞行不同阶段所能提供的超重和失重程度和持续时间,对利用探空火箭开展微重力实验有着重要的意义。

4) 探空火箭发射试验过程中,各载荷设备与地面设备数据通信链路通信状态仿真。探空火箭发射试验中,各种载荷设备要将相应的工程数据和探测得到的科学数据通过箭载发射机传送给地面的遥测设备。对它们之间的数据通信链路状态进行仿真,可以模拟出火箭发射试验中的通信数据量和通信链路带宽占用,为探空火箭的设计提供参考。

探空火箭可视化仿真和协同设计系统是面向分布式协同设计、集成工程数据、任务和系统模型并以模型为驱动的在线实时设计的协作、交互式系统^[8],硬件和软件结构如图 2 和图 3 所示。

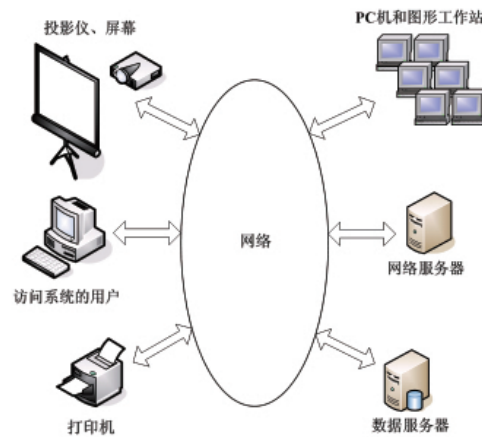


图 2 系统硬件结构

Fig. 2 Hardware architecture of the system

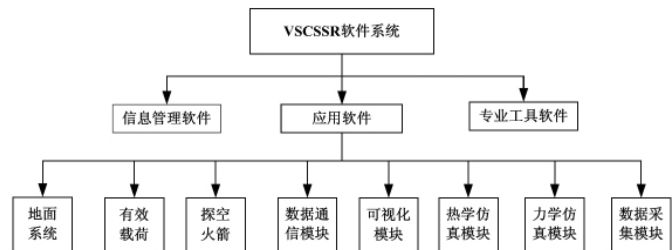


图 3 系统软件结构

Fig. 3 Software architecture of the system

4 仿真系统框架设计

4.1 系统总体设计

为了实现探空火箭及其载荷在分布式环境下的虚拟组装、协同设计和可视化仿真,构建一个可扩展的系统,探空火箭可视化仿真和协同设计系统采用集同工程^[9]的概念和方法,基于 HLA 分布式仿真体系结构进行设计。系统总体上分为两个仿真阶段:协同设计阶段和发射试验阶段。在协同设计阶段,主要实现发射前的探空火箭和有效载荷的分布式视景仿真,支持火箭的协同设计和虚拟组装;在发射试验阶段,主要实现探空火箭发射、飞行的可视化仿真以及载荷舱内实验环境状态仿真和各载荷设备与地面设备数据通

信链路状态仿真。系统仿真阶段如图 4 所示。

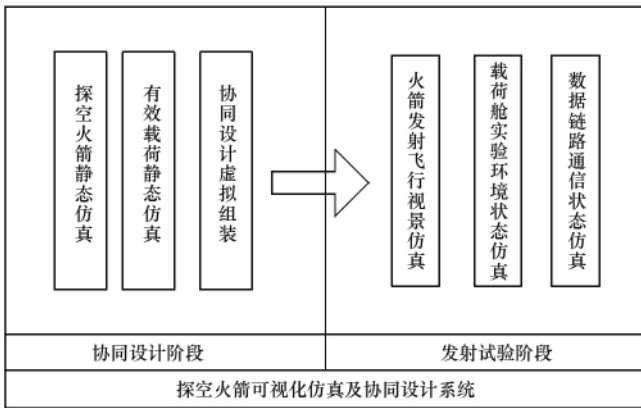


图 4 系统仿真阶段

Fig. 4 Simulation stages

4.2 仿真系统联邦成员设计

在仿真系统总体设计基础上, 基于 HLA/RTI 和通信网络, 设计如下的 9 类联邦成员, 如图 5 所示。

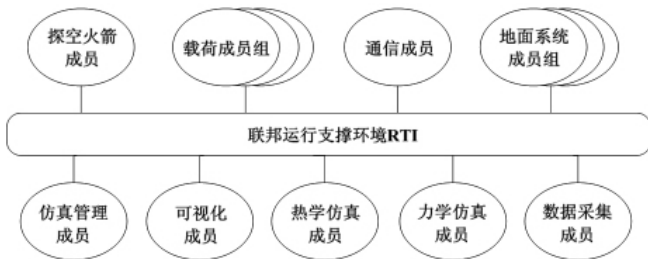


图 5 联邦成员设计

Fig. 5 Federates design

1) 探空火箭成员: 探空火箭本身单独作为一个联邦成员。在协同设计阶段, 对探空火箭相关参数进行配置; 在发射试验阶段, 计算火箭的空间位置、姿态参数和状态。

2) 载荷成员组: 包括将要安装到探空火箭上的各种有效载荷和公用设备, 以及系统扩展时新添加的载荷设备。

3) 通信成员: 对整个通信链路进行仿真, 计算空间通信网连通情况; 转发通信数据; 计算通信链路的传输速率和误码率数据等。

4) 地面系统成员组: 包括各类地面站成员和地面数据处理系统成员等。在发射试验阶段模拟实际地面站状态, 接收并显示通信网的链路状态信息, 记录并存储下行数据。

5) 仿真管理成员: 系统的核心管理模块, 负责系统资源的加载和系统初始化配置; 实现仿真全程的推进控制、同步控制、分辨率控制等运行管控; 对系统运行模式和网络资源占用情况进行维护; 对演示内容进行控制等。

6) 可视化成员: 对分布式仿真的各种输出结果进行可视化显示。在协同设计阶段, 对探空火箭和有效载荷设备进行可视化显示, 实现坐标系和视点的各种转换; 在发射试验阶段, 对火箭的发射、飞行进行可视化显示。

7) 热学仿真成员: 对探空火箭载荷舱中的温度分布和变化进行计算。

8) 力学仿真成员: 对探空火箭发射试验过程中载荷舱内的微重力变化情况和火箭自旋情况进行计算。

9) 数据采集成员: 对仿真过程中的交互数据以及各成员记录的数据进行记录收集, 标准化存储, 为分析提供依据。

5 结论

本文针对构建探空火箭可视化仿真及协同设计系统的需求, 介绍了探空火箭仿真的相关技术: 视景仿真技术、分布式交互仿真和 HLA, 设计了系统的主要功能和软硬件结构, 并给出了仿真系统的框架设计和系统联邦成员的划分, 为下一步进行详细设计和系统实现打下了基础, 对其他分布式仿真系统的设计和开发也有一定的参考作用。

参考文献 (References)

[1] 姜秀杰, 刘波, 于世强, 等. 探空火箭的发展现状及趋势 [J]. 科技导报, 2009, 27(23): 101-110.
Jiang Xiujie, Liu Bo, Yu Shiqiang, et al. Science & Technology Review, 2009, 27(23): 101-110.

[2] 周彦, 戴剑伟, 等. HLA 仿真程序设计 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.
Zhou Yan, Dai Jianwei, et al. HLA simulation programming [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002.

[3] 王乘, 周均清, 李利军. Creator 可视化仿真建模技术 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2005: 3.
Wang Cheng, Zhou Junqing, Li Lijun. Visual simulation modeling technology use creator [M]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 2005: 3.

[4] 朱雨香. 视景仿真技术的研究与实现 [D]. 南京: 南京理工大学, 2004.
Zhu Yuxiang. Research and realization of visual simulation technology [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2004.

[5] 刘畅. 分布交互仿真若干问题的研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2008.
Liu Chang. Analysis for some questions of distributed interactive simulation [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2008.

[6] 唐剑, 汪红兵, 吴跃, 等. 飞行仿真系统的软件架构研究 [J]. 计算机应用, 2006, 26(6): 1482-1484.
Tang Jian, Wang Hongbing, Wu Yue, et al. Computer Applications, 2006, 26(6): 1482-1484.

[7] 冯蕊. 基于空间任务的卫星平台仿真研究 [D]. 北京: 中国科学院空间科学与应用研究中心, 2009.
Feng Rui. The research of satellite simulation based on space mission [D]. Beijing: Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, 2009.

[8] 宋凭, 张仲敏, 刘波, 等. 空间科学与探测任务论证仿真系统的设计与实现 [J]. 计算机科学, 2009, 36(2): 248-250.
Song Ping, Zhang Zhongmin, Liu Bo, et al. Computer Science, 2009, 36(2): 248-250.

[9] 蔡启新, 张立荣. 集同工程在空间任务评估中的应用 [C]//中国空间科学学会空间探测专业委员会第十八次学术会议论文集: 下册. 北京: 中国空间科学学会, 2005: 373-381.
Cai Qixin, Zhang Lirong. The application of concurrent engineering in space mission evaluation [C]//Proceedings of 18th Conference of Space Exploration Committee. Beijing: Chinese Society of Space Research, 2005, 2: 373-381.

(责任编辑 朱宇)