

# 航天器分布式系统仿真验证平台设计与实现

邢涛<sup>1</sup>, 周晖<sup>2</sup>, 魏传锋<sup>1</sup>

(1. 中国空间技术研究院 载人航天总体部, 北京 100094;

2. 中国航天科技集团公司, 北京 100048)

**摘要:** 文章分析了航天器分布式系统仿真平台的特点和需求, 根据分布式集成仿真平台多操作系统、混合架构、分布式结构、模型管理、试验设计、仿真运行、数据管理的技术特点和功能需求, 对相应关键技术进行了攻关, 制定了实施方案, 在此基础上完成了相关设计和实现。平台能够适应全数学与半物理 2 种仿真工况, 满足航天器系统方案设计全面仿真验证需求, 并可方便接入商业或自研软件。最后通过仿真实例对平台的功能性能及通用性进行了验证。

**关键词:** 航天器系统仿真; 分布式仿真平台; 多操作系统; 混合架构

**中图分类号:** TP391.9

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-1379(2015)05-0496-04

**DOI:** 10.3969/j.issn.1673-1379.2015.05.007

## Design and implementation of distributed system simulation platform for spacecraft

Xing Tao<sup>1</sup>, Zhou Hui<sup>2</sup>, Wei Chuanfeng<sup>1</sup>

(1. Institute of Manned Space System Engineering, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China;

2. China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing 100048, China)

**Abstract:** The characteristics and the requirements of the distributed system simulation platform for spacecraft are analyzed, including the characteristics of the multi-operation system, the hybrid architecture and the distributed structure, the model management, the experimental and simulation runs, the data management, and the design of the entire simulation platform. The proposed platform can be used under both the numerical and semi-physical simulation conditions. Comprehensive simulation validation requirements for the schematic design of the spacecraft are satisfied. And the commercial or proprietary software can be conveniently accessed to the platform. A simulation example of manned spacecraft is demonstrated to validate the functions of the platform and to its generality.

**Key words:** spacecraft system simulation; distributed simulation platform; multi-operation system; hybrid structure

## 0 引言

航天器系统仿真作为航天器总体设计分析的重要手段, 在航天器总体设计、航天器工程研制和在轨运行阶段都发挥了巨大作用<sup>[1]</sup>。

最近十几年, 随着网络技术和计算机技术的发展, 航天器仿真技术被认为是迄今为止最有效、经济的综合集成方法, 是推动航天科技进步的战略技术之一<sup>[2-3]</sup>。在以卫星为代表的复杂产品系统仿真领域, 仿真平台分成以 HLA 为典型代表的分布式和以 SMP2 为典型代表的集中式 2 大类。前者通用性、可扩展性强, 能够较好地兼容异构模型, 但仿

真实性较差<sup>[4-7]</sup>; 后者技术难度大, 但仿真实时性好, 效率高, 适用于半物理仿真<sup>[8-10]</sup>。

航天器分布式系统仿真验证平台依托合理配置的高性能工作站、稳定的服务器以及具有强大计算能力的并行计算机, 在一个分布式的网络结构上配置以通用性与扩展性强的仿真支撑环境, 将航天器各分系统数学模型进行集成仿真, 能够兼顾分布式仿真与实时仿真的优点, 实现航天器大系统自动闭环迭代, 从而对系统设计方案进行验证, 获得系统整体最优方案, 有效提高航天器总体仿真水平, 是航天器系统仿真领域未来的发展方向<sup>[8]</sup>。

### 1 系统结构设计

航天器分布式系统仿真验证平台采用以太网、实时网 2 类综合的分布式异构型体系结构,其中以以太网在 Windows 操作系统运行,主要完成数学仿真、仿真回放等对实时性要求不高的仿真任务;实时网在 RedHawk 实时 Linux 操作系统运行,主要利用高性能并行计算机实现对实时性要求非常高的仿真任务。

航天器分布式系统仿真验证平台采用模块化方法进行设计,依据航天器系统仿真的需求,将系统划分为仿真模型集成软件、各分系统仿真模型、仿真数据库、遥控指令子系统、故障仿真子系统、航天器地面综合测试子系统、可视化子系统等多个功能模块(如图 1 所示)。其中,仿真模型集成软件是平台进行航天器系统仿真的控制基础与功能核心,在仿真过程中提供仿真模型管理、仿真试验配置、仿真试验同步、仿真试验进程管理、仿真节点管理和仿真数据管理与评估等功能,还提供仿真人机交互手段和其他功能模块的接口,以实现大系统闭环,完成仿真任务;遥控指令子系统负责航天器遥控指令的生成与输出;故障仿真子系统负责航天器故障生成与输出;可视化子系统负责仿真结果的二维和三维可视化。

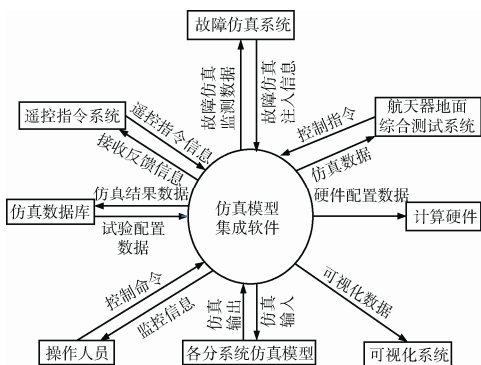


图 1 航天器分布式系统仿真验证平台系统结构  
Fig. 1 System organization of the distributed system simulation platform for spacecraft

### 2 硬件组成

航天器分布式系统仿真验证平台(硬件组成如图 2 所示)采用分布式仿真网络结构,总体上分为 3 个功能区域。

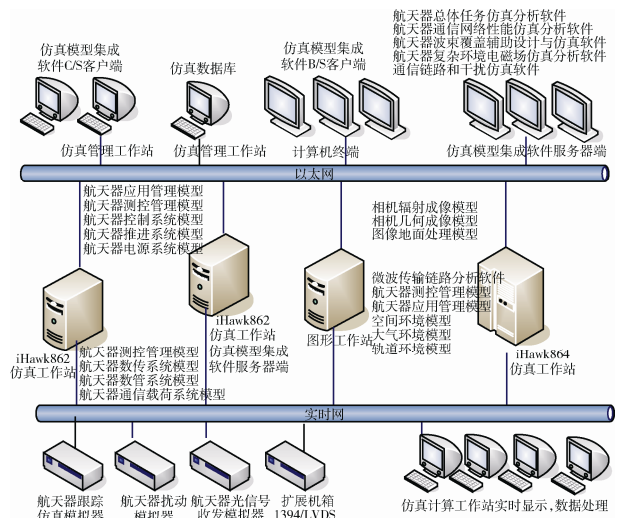


图 2 航天器分布式系统仿真验证平台硬件组成  
Fig. 2 Hardware of the distributed system simulation platform for spacecraft

仿真试验管理调度区部署一台采用 Windows XP 操作系统的高性能计算机安装仿真模型集成软件,作为航天器分布式系统仿真验证平台的中央调度器;再部署一台安装有 Windows Server 操作系统的高性能工作站作为航天器分布式系统仿真验证平台的数据服务器。仿真试验管理调度区各服务器通过以太网接入平台。

仿真子系统部署区部署若干台采用 Windows XP 操作系统的高性能计算机安装航天器各分系统模型软件和可视化系统软件;再部署若干台模拟器作为半物理仿真信号发生器。各服务器和模拟器通过以太网和专用通信网接入平台。

仿真试验计算区部署若干台安装 Windows 操作系统的高性能服务器作为非实时仿真的计算服务器;再部署若干台安装有 RedHawk 实时 Linux 操作系统的 iHawk 实时计算机作为实时仿真的计算服务器,每台 iHawk 计算机都配置有一块反射内存卡和一块 RCIM 时钟卡,反射内存卡用来进行每秒百兆 Byte 级别的高速数据传输,RCIM 时钟卡之间通过专用的菊花线缆连接,用来进行微秒级的时钟同步与校准。非实时计算服务器通过以太网接入平台,实时计算机通过实时网络接入系统。

### 3 系统软件设计

航天器分布式系统仿真验证平台具有良好的开放性与可扩展性。平台的软件系统主要由仿真模型集成软件、仿真数据库、各分系统专用仿真软件、

商用软件、可视化系统软件等组成。

仿真模型集成软件是平台的核心,也是平台良好的通用性和可扩展性的保证。它承担着仿真模型管理、图形化试验设计、仿真调度与进程控制、仿真数据后处理等任务。仿真模型集成软件分主控端软件、节点端软件 2 个配置项。主控端软件安装在仿真试验管理调度区的计算机上,采用 C#语言利用面向对象的方法开发,实现仿真数据库读取访问、仿真模型信息显示、仿真试验设计配置、仿真试验运行管理、仿真数据处理与评估、网络通信、可视化数据配置、仿真模式控制等 8 大项功能。节点端软件安装在仿真子系统部署区的分系统计算机和信号模拟器信号采集计算机上,采用 C#语言利用面向对象的方法开发,实现模型信息获取与配置、试验运行控制、试验状态监控、数据通信等功能。根据航天器系统仿真的实际需求,节点端内置的分系统软件接口模块可以实现与 C++源代码、C++、C#动态库、MATLAB 程序 (.m, .mdl 格式文件)、可执行文件 (.exe 格式的专用或商用软件)等多种形式的分系统仿真模型之间的数据与指令接口,保证了平台的通用性与可扩展性。

航天器分布式系统仿真验证平台工作流程如图 3 所示。

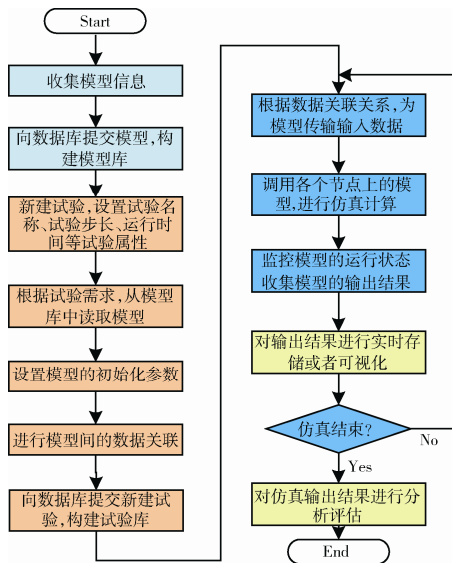


图 3 航天器分布式系统仿真验证平台工作流程  
Fig. 3 Operation flow chart of the distributed system simulation platform for spacecraft

仿真数据库分为 3 个子库: 1) 仿真模型数据库,用来存储试验所需的仿真模型并提供相应读写

接口; 2) 仿真试验数据库,用来存储试验配置文件并提供相应的读写接口; 3) 仿真结果数据库,用来存储仿真过程中的单步仿真数据和最终的仿真结果数据,并提供相应的读写接口。

仿真模型软件可以是使用 C++、C#、MATLAB 等语言开发的航天器分系统专业软件,也可以是通用型的商业软件,只要是符合航天器分布式系统仿真验证平台的接口规则,都可以接入平台进行系统仿真计算。

### 4 系统应用

以某型号卫星方案设计全面仿真验证为仿真应用背景,对其进行在轨姿轨控专项方案仿真。仿真试验中使用了轨道模型、姿态控制模型、推进分系统模型、飞程序、空间链路模型、电源分系统模型、数传分系统模型、空间环境模型、姿态动力学模型,以及起辅助作用的全零输出、整型多常数输出等模型。其中,轨道分系统模型、控制分系统模型、推进分系统模型、空间链路模型、电源分系统模型、数传分系统模型是以.exe 形式接入系统;其他模型是以动态链接库形式接入系统。各模型数据输入输出关系如图 4 所示。

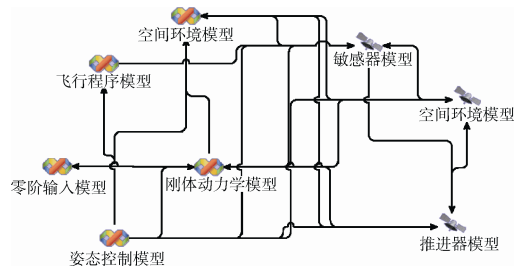


图 4 仿真模型数据输入输出关系  
Fig. 4 Output input relation of the simulation model

通过仿真模型录入、仿真试验设计、仿真调度、试验数据评估 4 个步骤完成了该次仿真试验。方案设计中关键参数的仿真结果见图 5~图 7。

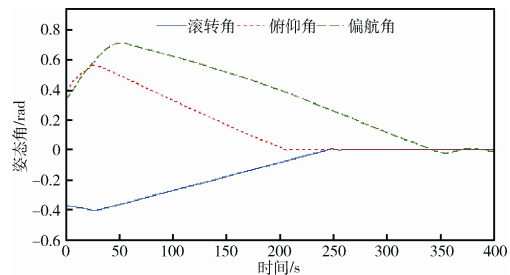


图 5 卫星姿态控制曲线  
Fig. 5 Curves of the satellite attitude control

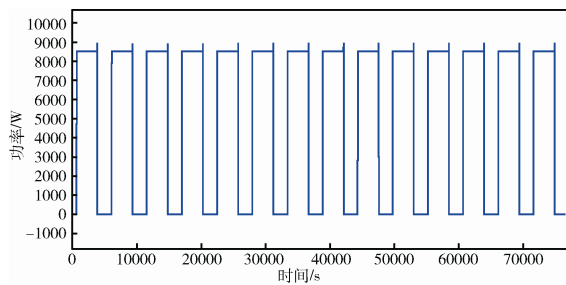


图6 太阳能电池阵输出功率  
Fig. 6 Output Power of the solar array

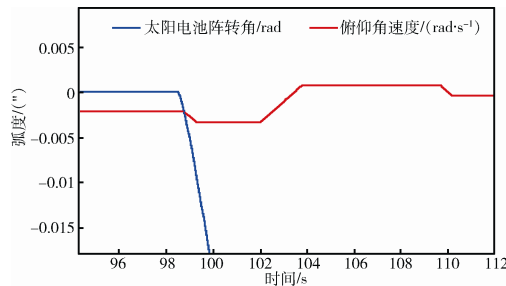


图7 太阳能电池阵启控时星体俯仰角速度变化曲线  
Fig. 7 Pitch rate changes under solar array control

与传统仿真试验相比,本系统兼顾数学仿真的多学科耦合特性与半物理仿真的实时性能,且操作简便,仿真效率高,仿真结果准确,能够满足型号总体设计方案不同阶段的系统仿真验证需求。

## 5 结束语

本分布式系统仿真验证平台主要用于航天器的系统仿真工作,以期解决航天器系统仿真中集成平台的体系结构、数据集成、设计过程集成、应用集成等关键技术问题。本仿真系统运行稳定,通用性强,操作简单,用户界面友好,较好地满足了用户的需求,已应用于相关部门的科研工作中,具有较大的应用价值。同时,在系统设计实现过程中遇到并解决的部分理论问题和实际问题,有助于推进基于不同系统环境和网络环境下的分布式集成仿真系统的应用。

## 参考文献 (References)

- [1] 包为民. 对航天器仿真技术发展趋势的思考[J]. 航天控制, 2013, 31(2): 4-8  
Bao Weimin. The development trend of aerospace craft simulation technology[J]. Aerospace Control, 2013, 31(2): 4-8
- [2] 徐海洋. 航天测控系统仿真测试软件的设计与实现[D]. 南京: 南京理工大学, 2013: 6-7
- [3] 李群. 综合化航空电子系统仿真可信度仿真[D]. 西安: 西北工业大学, 2006: 24-30
- [4] 唐颖倩, 王文福. 小型仿真系统同步方法研究与开发[C]//第十五届全国遥测遥控技术年会. 昆明, 2008: 305-308
- [5] 刘璟, 郑建华, 张皓. 基于 HLA 的小卫星编队飞行仿真[J]. 计算机仿真, 2010, 27(5): 66-70  
Liu Jing, Zheng Jianghua, Zhang Hao. HLA distributed simulation for small satellite formation flying[J]. Computer Simulation, 2010, 27(5): 66-70
- [6] 董云峰, 陈士明, 苏建敏, 等. 卫星姿态控制动态模拟技术[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 11-13
- [7] 战玉芝, 刘怀勋, 王丽芹, 等. 基于 HLA 的仿真程序设计研究及其应用[J]. 计算机仿真, 2007, 24(7): 146-148  
Zhan Yuzhi, Liu Huaixun, Wang Liqin, et al. Study and application of simulation program design based on HLA[J]. Computer Simulation, 2007, 24(7): 146-148
- [8] 李传庆, 黄传红, 唐霜天, 等. 一种分布式视景仿真软件系统通用框架[C]//第八届全国仿真器学术年会. 昆明, 2013: 376-382
- [9] 宋其江, 王日新, 徐敏强. 基于HLA的深空探测系统仿真平台[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(4): 905-909  
Song Qijiang, Wang Rixin, Xu Minqiang. System simulation platform for deep space exploration based on HLA[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(4): 905-909
- [10] 潘晓宁. 分布交互式实时三维飞行仿真平台的综合设计[J]. 计算机仿真, 2007, 24(1): 285-290  
Pan Xiaoning. Integrated design of a distributed interactive real-time 3D flight simulation platform[J]. Computer Simulation, 2007, 24(1): 285-290

(编辑: 冯妍)