

运载火箭测试仿真系统体系结构设计及实现

李 辉¹ 毛万标² 敬锦¹

(1 电子科技大学空天科学技术研究院 2 西昌卫星发射中心)

摘 要 以 CZ 系列运载火箭为研究对象, 开发了基于高层体系架构的全数字飞行仿真系统。通过建立运载火箭控制系统的数值仿真模型, 围绕“模型实时驱动”这一核心功能设计了运载火箭全数字飞行仿真的总体结构并对其实现方法进行了描述, 开发了 Matlab-RTI 中间件和 OGRE-RTI 适配器, 较好地解决了数值仿真与视景仿真在高层体系中的集成并保证了系统的实时性。应用本方法完成的火箭飞行仿真系统已应用于某航天靶场的测发训练中, 取得了较好的应用效果。

关键词 仿真模型 运载火箭 六自由度运动 MATLAB/Simulink

1 引言

缺少实训装备一直是困扰我国航天靶场日常训练的一个重要问题, 而利用实装火箭进行任务训练, 存在以下突出问题: (1) 训练成本高、风险大; (2) 训练准备复杂, 周期长, 难以定量评估训练效果; (3) 人机比例矛盾突出, 训练效率低。因此利用信息技术提高发射中心的任务承担能力和任务成功率, 已成为我国航天靶场现代化建设的重要任务。实践证明, 通过应用全数字仿真系统构成的训练平台, 能够有效解决上述的诸多问题。

全数字仿真又称计算机仿真, 是指根据相似原理, 利用计算机来逼真模仿研究对象, 将研究对象进行数学描述, 建立仿真模型, 并且在计算机中运行实现。数字仿真技术在运载火箭飞行仿真中运用比较广泛的主要有两种: 数值仿真技术和视景仿真技术。运载火箭飞行数值仿真主要是通过 Matlab/Simulink 等工具, 建立正确的箭体六自由度运动仿真模型, 模拟出火箭飞行的六自由度数据。

类似运载火箭飞行仿真的系统通常具有结构复杂、开发难度大、占用资源多等特点, 因此, 如何提高仿真部件的互操作性 (interoperability) 和可重用性 (reusability), 以及从局部到整体的可扩展性 (scale ability), 得到了普遍的重视和研究。高层 (High Level Architecture, 高层体系结构) 正是基于该目标应运而生的新一代分布交互仿真体系结构标准。它由美国国防部 (DoD) 的国防建模与仿真办公室 (DMSO) 提

出和开发, 是对原有 DIS (Distributed Interactive Simulation) 和 ALSP (Aggregate Level Simulation Protocol) 标准的继承和发展, 在 DoD、北大西洋公约组织 (NATO) 以及国际范围内得到了广泛接纳^[2]。2000 年 9 月, 在高层 1.3 版本基础上, IEEE 正式确立了开放的国际化标准, 即 IEEE 1516 系列。目前在高层上已有大量的研究和开发成果, 商业化应用的发展也十分迅速^[3]。

目前, 国内外相关机构在高层仿真框架下, 运用数值仿真技术或视景仿真技术已成功开发了大量飞行仿真系统, 如美国在研制北极星、海神计划等^[1,4]。但这些系统都是基于数值或视景其中一种仿真技术建立的, 将这两种仿真技术在高层体系中进行集成的相关研究和系统报道较少。本文所介绍的运载火箭飞行仿真系统是在高层体系下, 将数值仿真与视景仿真有效集成的全数字仿真系统, 具有一定的创新性。

2 运载火箭飞行仿真系统的应用需求

2.1 模型实时驱动

模型实时驱动是运载火箭飞行仿真系统需要实现的最主要功能, 控制系统数值模型的实时计算结果必须无延迟的传输到视景系统中, 对运载火箭的飞行过程进行驱动。要实现此功能, 运载火箭飞行仿真系统需要满足以下几方面的要求:

(1) 数值仿真与视景仿真的集成与互操作。飞行仿真系统由控制系统数值仿真系统和视景仿真系

统两种不同仿真类型的部分组成, 所以需要一个能够兼容二者的低耦合度仿真平台。同时, 使得两者之间能够传输数据, 达到基于数值仿真结果驱动视景仿真的目的。

(2)实时性。数值仿真的结果必须及时传输到视景仿真中, 无延迟, 基本保持同步。

2.2 视景仿真要求

飞行视景仿真是视景仿真技术在运载火箭飞行仿真系统中的应用, 主要需要对以下物体进行仿真: 运载火箭本身和飞行过程中周围的实际景物, 包括地形地貌、地表物、空中飞行物、气象、光线以及其它特殊效果等。

2.3 数值仿真要求

数值仿真的对象是运载火箭控制系统。该系统通过箭上飞控机构, 完成测算火箭运动参数, 根据预定的飞行状态参量产生制导信号, 控制火箭按照预定轨道飞行, 同时测量出火箭的飞行姿态, 通过相应的姿态控制运算, 产生姿态控制信号, 纠正火箭的姿态偏差, 使火箭保持正常的飞行姿态。

3 运载火箭飞行仿真系统体系结构设计

运载火箭飞行仿真系统体系结构的设计主要围绕“模型实时驱动”这一核心功能展开, 该体系结构必须保证系统的高实时性, 同时兼顾系统的互操作性、可重用性、可扩展性和可靠性。

通过对运载火箭飞行仿真系统需实现功能的理解, 从运载火箭飞行仿真系统逻辑功能角度分析, 它应是一个以“模型实时驱动”为核心, 兼容多个仿真类型、多层次并适用于多个应用领域的一体化飞行模拟系统。以“模型实时驱动”为核心是指运载火箭飞行仿真系统围绕模型实时驱动这一核心功能构建, 是系统的重中之重; 兼容多个仿真类型是指运载火箭飞行仿真系统横向包含视景仿真和武器制导控制系统数值仿真; 多层次是指按照分层设计思想将飞行仿真系统纵向分为多个相关联的不同功能的层次, 如建立数值、视景模型和数据交互等; 多个应用领域是指在以训练为主的情况下, 适应飞行测试和飞行设计方案论证等多个领域。基于此而设计出的飞行仿真系统的总体体系结构如图 1。

4 集成方法

运载火箭飞行仿真系统采用在高层架构下对数值仿真和视景仿真进行集成, 由于高层难以解决系

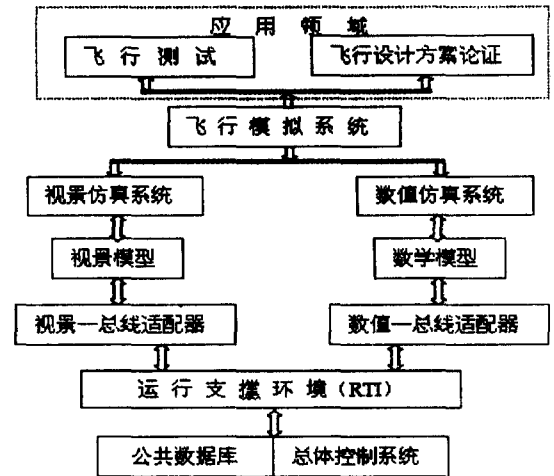


图 1 运载火箭飞行仿真系统总体体系结构

统的实时性问题, 故针对此难题, 在运载火箭飞行仿真系统中开发了 Matlab_RTI 中间件和 OGRE_RTI 适配器, 以保证系统的实时性。

4.1 控制系统数值模型

控制系统总体仿真模型由 6 个分模块构成, 分别是 Aerodynamic 模块, 输入空气动力系数, 输出为空气动力和空气动力矩; TPUSH 模块, 输入为火箭的推力和发动机的摆角, 输出为推力和推力矩; Forces and Moments 输入为 Aerodynamic 和 TPUSH 模块的输出, 输出为合力和合力矩; 6DoF 模块, 输入为 Forces and Moments 模块的输出, 输出为火箭的六自由度; Environment Model 模块, 输入为六自由度, 输出为大气密度, 重力以及其它大气环境参数; Alpha, Beta, Mach 模块, 输入为大气环境参数, 输出为计算飞行过程中的攻角以及侧滑角, 其输出反馈回 Aerodynamic 模块。根据各个分模块的输入输出关系, 可以构建得到整个箭体的仿真模型^[1,5], 其仿真模型结构如图 2 所示。

通过建立决定箭体运动的空气动力、推力和运

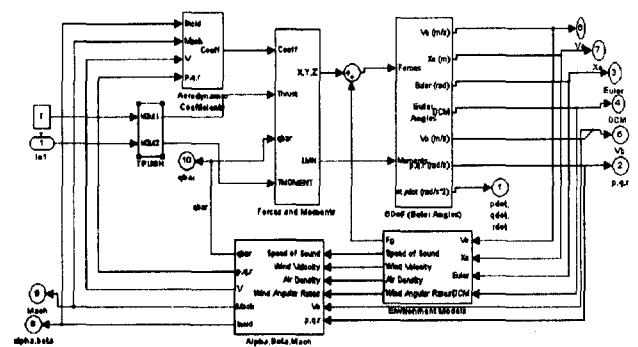


图 2 箭体仿真模型

动学数学模型,然后分模块建立基于 MATALB/SIM-LINK 的仿真模型并引入 MALTAB 中大气环境模块,从而实现了运载火箭的六自由度运动计算机仿真,对仿真结果进行了定性分析,验证模型能正确地反映火箭的飞行特性。整个模型由各个分模块集成后得到,结构清晰,便于按模块进行参数设置和调试,能够很好地实现火箭 6 自由度运动体的仿真。

4.2 Matlab-RTI 中间件

运载火箭飞行仿真系统中,视景模型中火箭飞行过程是完全基于控制系统的 Matlab 数值模型的仿真结果实时驱动。数值仿真中,每个测试项目或测试系统进行仿真计算时将其计算结果实时填充到 Matlab 引擎,并通过高层平台传输到数值仿真前台进行展示。

因此,为了使 Matlab 数值模型计算的结果数据能够在高层标准仿真平台上进行实时发布,需要开发一个连接 Matlab 数值仿真和高层分布式仿真的中间件,以支持数据在高层与 Matlab 平台之间的互相传递和能对仿真过程进行实时控制;最后,为了协调 Matlab 的仿真推进过程和高层的仿真推进过程,需要开发时间同步机制。这个中间件就是 Matlab_RTI,其体系结构如图 3 所示。

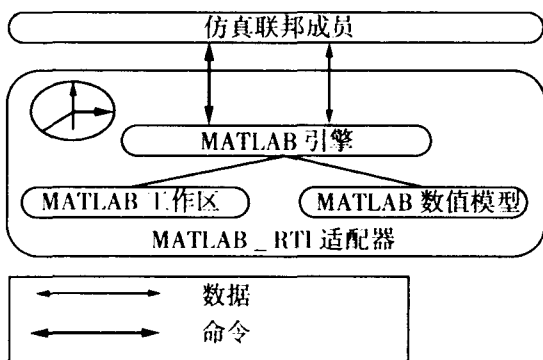


图 3 Matlab-RTI 中间件体系结构图

Matlab_RTI 中间件是连接高层分布仿真和 Matlab 数值仿真的中介机构。首先,由于 Matlab 存储在工.作区中的数据是 mxArray 结构类型,而高层仿真数据交互模板是 FOM 和 SOM 表格形式,因此,实现 FOM 或 SOM 表格数据到 mxArray 结构类型的数据映射是该中间件的功能之一。其次,高层仿真需要对 Matlab 数值模型的仿真运行进行实时控制,因此,命令交互是该中间件的功能之二;最后,Matlab 数值模型的仿真运行的速度和高层仿真运行的速度可能存在匹配冲突,因此,同步机制是 Matlab-RTI 中间

件的第三个重要功能。

4.3 OGRE 视景渲染引擎

运载火箭飞行仿真系统采用的图形渲染技术是面向对象的图形渲染引擎 (object-oriented graphics rendering engine,OGRE),OGRE 是用 C++开发的面向对象且使用灵活的 3D 引擎。它拥有高效率和高高度可配置性的资源管理器,并且支持多种场景类型。引擎中的类库对更底层的系统库(direct3D 和 openGL)的全部使用细节进行了抽象,并提供了基于现实世界对象的接口和其它类。OGRE 系统包括很多的插件和特效功能。图 4 是整个 OGRE 的核心部分框图。

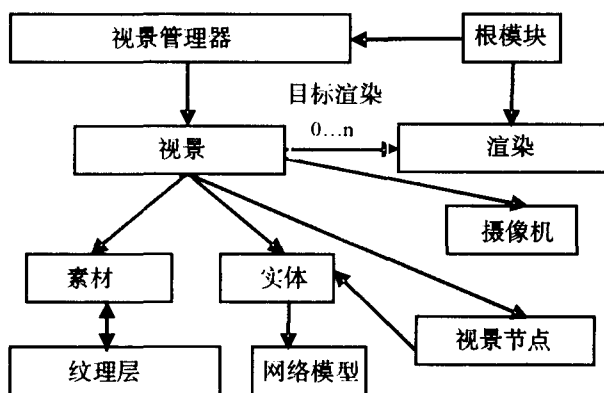


图 4 OGRE 核心部分框图

4.4 OGRE-RTI 适配器

运载火箭飞行仿真系统中,基于 OGRE 渲染引擎的视景系统需要在高层体系结构下获得控制系统数值仿真结果,从而对视景模型进行驱动和展示。因此需要对系统中的 OGRE 渲染引擎和高层体系进行集成,方法是开发一个连接 OGRE 渲染引擎和高层分布仿真的中介机构 OGRE-RTI 适配器,这样可以有效地增强仿真成员之间的互操作性和实时性。OGRE-RTI 适配器的体系结构如图 5 所示。

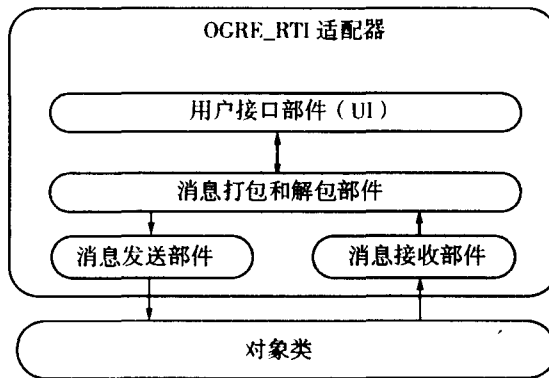


图 5 OGRE-RTI 适配器体系结构图

OGRE_RTI 适配器由用户接口部件、消息打包和解包部件、消息发送部件、消息接收部件四个组件组成。用户接口部件完成获取 OGRE 场景中用户操作命令的功能；消息打包和解包部件完成 OGRE 中相关操作消息的打包和解包过程；消息发送部件完成 OGRE 中相关操作消息的发送；消息接收部件完成 OGRE 中相关操作消息的接收。

5 体系结构的实现

技术实现上，运载火箭飞行仿真系统的总体技术结构以 MVC 模式实现，其结构如图 6 所示。

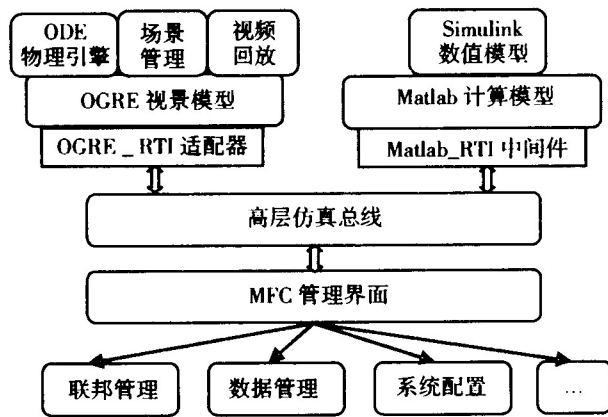


图 6 系统体系结构技术实现图

其中，仿真总线采用高层结构，总体控制系统界面基于 MFC 构建，分布式数据库系统采用 MYSQL 实现。数值模型采用 Matlab 中的 Simulink 进行建模，视景模型采用基于 OGRE 驱动，结合场景管理器插件完成各种特殊场景的渲染等。系统将数值模型仿真由专门的 Matlab 服务器来完成，通过高层总线来提供数据支持，这种独立设置数据服务器的方式大大提高了仿真效率。

另外，MFC 管理界面实现的功能包括联邦管理、数据管理和系统配置等。联邦管理实现联邦的启动仿真、暂停仿真、中止仿真、回放仿真等功能。而在数据管理模块则提供数据展示、仿真数据分析、拟合评价报告、数据备份等功能。在系统配置模块中，主要

完成确定仿真方式(单独仿真、协同仿真)、作业方式(一次作业,多次作业)、确定 Matlab 服务网络位置等功能。

最后,为了实现 Matlab 数值模型和 OGRE 视景模型之间的数据实时传输和仿真调用,根据高层 OMT 模板和高层仿真同步模型,由 Matlab_RTI 中间件以及 OGRE_RTI 适配器实现。

运载火箭飞行仿真系统已经在总体体系结构的基础上实现,其部分效果如图 7 所示。◇

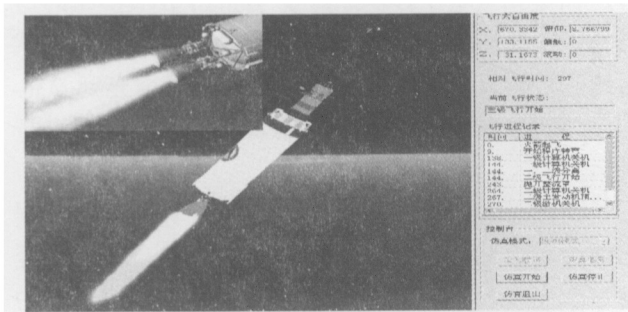


图 7 运载火箭飞行实时仿真系统的视景仿真结果

参考文献

- [1] 李辉,敬晓刚,徐利梅.基于 Matlab/Simulink 的运载火箭 6 自由度运动仿真.宇航学报,2005,5:616-619,652.
- [2] Judith S.Dahmann,Chief Scientist.High Level Architecture for Simulation.IEEE,1997.
- [3] Lehmer, R.D.; Malsom, S.J. Distributed system architecture in VAST- RT for real-time airspace simulation, Collect. Tech. Pap. AIAA Model. Simul. Technol. Conf.2004: 870-879.
- [4] 林新,宋焱,王行仁.战斗机飞行仿真系统高层互联系统.系统仿真学报,2004,12:2751-2753.
- [5] 李辉,王波,郝兴伟.运载火箭导航计算子系统建模与仿真.系统仿真学报,2006,2:267-270,277.
- [6] 李京伟,张莉萍.基于虚拟现实技术的飞行视景仿真.计算机工程与设计,2005,5:1935-1937,1952.
- [7] 马亚平,李柯,王振宇.联合作战模拟系统体系结构设计.计算机仿真,2004,8:34-37.
- [8] 梁彦刚 唐国金 王锋.基于高层仿真系统的实时性改进策略研究.系统仿真学报,2005,2:55-59