

一种面向大型分布式虚拟仿真试验管控系统

贾长伟, 王晓路, 王长庆

(中国运载火箭技术研究院, 北京 100076)

摘要: 针对航天系统大型仿真试验的特殊需求, 提供了一套面向大型分布式虚拟仿真试验的试验设计与调度管控系统, 支持虚实数据结合设计试验样本输入, 可采用多种试验设计方法完成仿真前的分析; 构建了一套具备航天系统大型仿真试验设计特点的试验设计与仿真调度方法, 以支持试验资源与仿真资源的统一管理和有效调度, 以保证仿真过程的实时性要求并提高资源利用率, 同时, 该系统采用多种试验结果评估方法对试验运行结果进行评估, 辅助用户做出合理决策。

关键词: 仿真试验; 试验设计; 仿真调度

中图分类号: TP319

文献标识码: A

文章编号: 2096-4080 (2022) 01-0013-05

A Control System for Large-Scale Distributed Virtual Simulation Test

JIA Changwei, WANG Xiaolu, WANG Changqing

(China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

Abstract: In response to the special needs of large-scale simulation experiments of aerospace systems, this article provides a set of experimental design and dispatch control systems for large-scale distributed virtual experiments. It supports the input of virtual and real data combined with design test samples, and a variety of test design methods can be used to complete the analysis before simulation. A set of simulation priority configuration templates with the design characteristics of large-scale simulation experiments for aerospace systems have been constructed to support the unified management and effective scheduling of test resources and simulation resources to ensure the real-time requirements of the simulation process and improve resource utilization. At the same time, the system uses a variety of test results evaluation methods to evaluate test operation results, and assist users in making reasonable decisions.

Key words: Simulation test; Test design; Simulation scheduling

0 引言

虚拟仿真试验是通过虚拟化手段将真实的试验设备转换成数学模型, 模拟真实的试验场景开展的试验。通过虚拟仿真试验能大大节约人力、物力成本, 并且先于试验设备开展仿真试验, 及

时发现设计不足, 改进设备^[1]。

经过数年的研究与设计, 已经积累了大量用于开展虚拟仿真试验的仿真应用。虚拟仿真试验包括试验前的试验设计、试验中的运行管控、试验后的结果分析。通过构建试验设计样本完成多种复杂系统试验工况设计, 试验运行结束后, 借

收稿日期: 2021-11-03; 修订日期: 2021-12-31

基金项目: “十三五” 装备预研共用技术 (41401030104)

作者简介: 贾长伟 (1987-), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为数字化和虚拟试验。E-mail: jcwtz452@163.com

助试验结果评估方法对试验进行评估分析,辅助用户做出合理决策。本文设计的面向大型分布式虚拟仿真试验管控系统正是实现了该功能。

1 总体设计

本系统包括试验设计、仿真调度、试验结果评估3大功能模块^[2]。其中,试验设计作为仿真调度和试验结果评估的输入,完成整个虚拟仿真试验的试验样本文件设计,通过正交、全因子、拉丁方等试验设计算法,并可以根据用户试验需求采用自定义试验设计算法。仿真调度作为分布式虚拟仿真试验的核心,负责整个虚拟仿真试验的调度管理,包括试验运行方案生成、试验运行过程管控等功能,运行结果作为试验结果评估模块的输入。试验结果评估收集试验设计和仿真调度的数据,通过试验结果评估算法对试验数据进行预处理、分析评估,最终辅助用户完成方案决策。系统组成结构如图1所示。

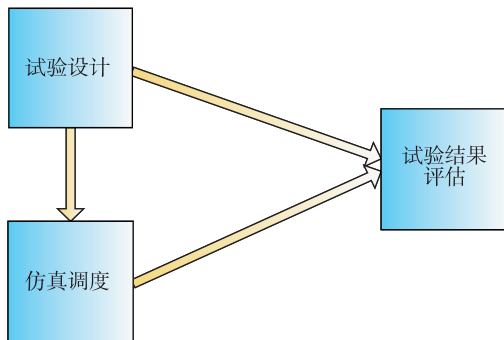


图1 系统组成结构图

Fig. 1 System composition structure

2 试验设计

复杂产品设计过程中,涉及大量的参数及方案选取。如何选取关键参数,如何对已有数据进行分析,如何从多个方案中选取最优方案是设计人员重点关注的问题,试验设计是上述问题的公认解决方案。以多学科集成后的模型作为输入,设计和实现工程上经常使用的试验设计方法,包括中心组合法、拉丁方法、全因子法、正交表、均匀设计法等方法,并将试验设计方法作为可重用的方法模块管理起来,使用户可以根据不同问题的需要从算法库中选取特定算法对问题进行实验。模块支持试验设计中设计矩阵的修改、导入、导出等功能,导出及导入的设计矩阵均按照所提

供的XML文本格式进行存储。其内容主要包括过程文件、设计矩阵等内容。

(1) 过程数据文件的导出

当用户打开实验设计与近似建模模块时,系统会自动存储模块运行中所产生的重要数据文件(XML),以供WEB平台及用户的后续验证使用。过程数据文件分为设计矩阵、样本点、灵敏度分析、近似模型误差等4大块。以一个设计变量为2,响应数为2,样本数为3的模型为例,存储格式示例如下所示:

```

<DesignMatrix DOEmethod="中心组合法(CCD)" nVar="2" nRun="3">
  <point Model.Script.a="0.00" Model.Script.b="0.00"/>
  <point Model.Script.a="0.00" Model.Script.b="1.00"/>
  <point Model.Script.a="1.00" Model.Script.b="0.00"/>
</DesignMatrix>
<Sample DOEmethod="中心组合法(CCD)" nVar="2" nObjectVar="2" nRun="3">
  <point Model.Script.a="0.00" Model.Script.b="0.00" Model.Script.x="0.00" Model.Script.y="0.00"/>
  <point Model.Script.a="0.00" Model.Script.b="1.00" Model.Script.x="1.00" Model.Script.y="1.00"/>
  <point Model.Script.a="1.00" Model.Script.b="0.00" Model.Script.x="1.00" Model.Script.y="1.00"/>
</Sample>
  
```

(2) 设计矩阵与样本点的导入与导出

设计矩阵与样本点以规定好的XML格式进行导入与导出操作。

```

<Sample nVar="2" nObjectVar="2" nRun="3">
  <point Model.Script.a="0.00" Model.Script.b="0.00" Model.Script.x="0.00" Model.Script.y="0.00"/>
  <point Model.Script.a="0.00" Model.Script.b="1.00" Model.Script.x="1.00" Model.Script.y="1.00"/>
  <point Model.Script.a="1.00" Model.Script.b="0.00" Model.Script.x="1.00" Model.Script.y="1.00"/>
</Sample>
  
```

试验设计的思路如图2所示。

试验设计模块分为变量设计与设计矩阵两个子模块。用户可在变量定义子模块进行变量的阈值设定,在设计矩阵子模块中进行变量定义及试验设计方法选择,并查看设计矩阵以及对其进行修改、导入、导出等操作。用户可通过ID号按照接口定义要求,增加自定义的试验设计算法或删除已有算法,所有初始设计完成之后,将设计矩阵递交原模型进行计算,从而得到相应的试验设计样本。

试验设计流程包括以下步骤:

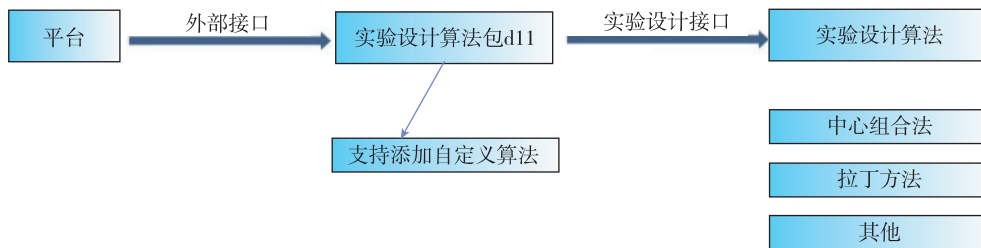


图 2 试验设计模块设计思路

Fig. 2 Experiment design module design ideas

- 1) 在软件界面选择通过试验设计获取样本点；
- 2) 拖入设计变量，并确定各变量上下限；
- 3) 选择合适的试验设计方法；
- 4) 若所选择的试验设计方法支持水平调整，则对设计变量进行水平调整；
- 5) 生成试验设计矩阵，并最终得到试验设计样本。

3 仿真调度

仿真调度是分布式虚拟仿真试验的核心子模块，用于完成整个虚拟仿真试验的调度管理，完成试验应用的分发、部署、运行、过程管控、运行监控等功能。仿真调度模块的输入是试验设计样本文件以及仿真应用，这些文件以独立文件或压缩包的形式存储，并由仿真调度管理服务器分发到应用节点上，这是仿真调度模块的分发功能。应用节点的解压及存储过程是仿真调度模块的部署功能。分发部署完成之后，仿真调度模块可以完成对整个仿真试验的运行管理。为了确保试验的正确性与完整性，试验结束后可对本次试验样本文件及仿真应用进行清除操作。

仿真调度管理主要包括调度方案生成与管理模块、应用分发部署模块、应用运行控制模块、运行资源监控 4 部分，如图 3 所示。

3.1 调度方案生成与管理

调度方案生成与管理模块包括方案生成和方案管理，用户在分发方案配置界面可以选择要分发的目标客户端，然后对文件列表中的文件进行目标客户端的配置，配置方式主要有手动分发和自动分发两种。若选择手动分发，用户需对每一个客户端的分发文件在界面上进行添加，用户还需在界面上提供试验次数的输入（试验次数的取值范围为 1~100，取默认值 1），在用户选择“分

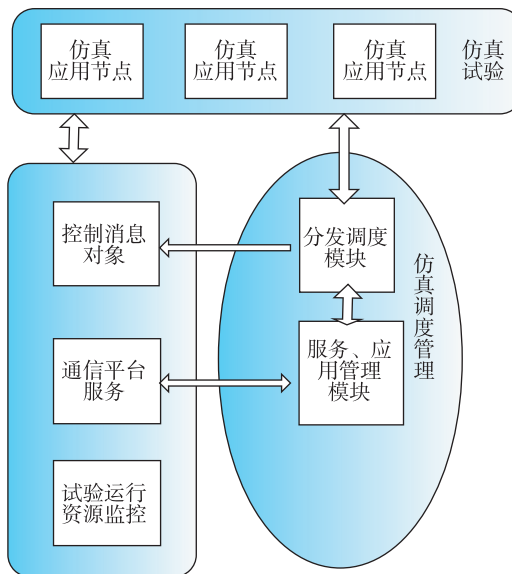


图 3 试验过程调度与管理交互图

Fig. 3 Simulation scenario logic

发”按钮时，程序会自动保存一次调度方案，在配置工作完毕后，用户可以点击工具栏的“保存”按钮来保存调度方案到文件中，文件名和保存路径由用户指定。若选择自动分发，用户在每一次向文件列表中添加仓库文件或者向分发方案中添加目标客户端时，程序都会自动生成调度方案，并实时在界面上进行更新。用户可以点击工具栏的“保存”按钮来保存调度方案到文件中，文件名和保存路径由用户指定。在调度方案文件浏览树中可对调度方案进行管理，包括方案的新建、导入、修改、保存、删除。

3.2 应用分发部署

应用分发部署模块分为应用分发和应用部署，根据用户所选的手动分发或自动分发，服务器端向各客户端分发应用程序。客户端在接收完一个应用文件后，就创建一个子线程来对该文件进行解压，文件将被解压到指定的文件夹下，若解压完毕，则向服务端反馈“应用部署成功”或“应用部署失败”

信息。在试验运行完毕后，用户可以选择是否对该试验的所有应用进行清理。客户端在接收到“清理资源”命令后，将收到的应用压缩包进行删除，然后向服务器反馈是否清理成功的信息。

3.3 应用运行控制

应用运行控制模块实现对应用的运行控制，包括试验启动、试验暂停、试验停止。试验分发调度服务器需记录剩余运行次数。在停止试验之后，需计算试验的剩余次数，若剩余次数不为零，则可以继续进行试验。在每次启动试验成功后，剩余试验次数减 1。由于试验每次运行的初始化参数可能不一样，这些参数应在配置文件中依次列出，配置文件提供在应用程序数据包中。

3.4 试验运行资源监控

试验运行资源监控包括对象静态信息收集与发布、对象动态信息收集与发布、程序状态信息收集与发布、计算机节点性能信息收集与发布 4 部分，如图 4 所示。

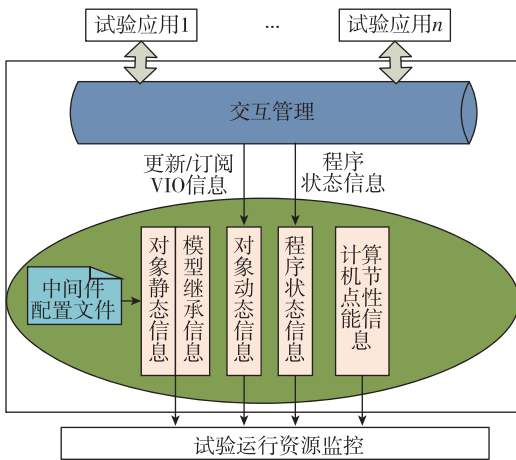


图 4 试验运行资源监控结构图

Fig. 4 Test operation resource monitoring structure diagram

对象静态信息收集与发布用于收集试验域应用的相关模型信息、试验域类层次关系。其中模型信息包括名字 VIO 实例名、所属应用名、属性的个数以及各个属性的名字、发布订阅信息。

对象动态信息收集与发布用于收集试验运行动态信息并统计，包括试验运行期间交互的动态信息：更新/接收更新次数、更新总数据大小；采用心跳机制定时发布收集的对象动态信息。

程序状态信息收集与发布用于收集程序状态信息，包括域名称、域内的应用情况（包括应用数量、各应用名称、应用所在机器的 IP、应用句柄、应用运行状态（包括正常、暂停和故障）、应用的时间管理参数（包括 regulating、constrained、LBTS、Lookahead、Current Time））。

计算机节点性能信息收集与发布用于收集计算机节点的性能信息：机器名、CPU 频率、CPU 占有率、内存使用率、IP 地址、网络的使用状况。

4 试验结果评估

试验结果评估获取试验记录得到的试验运行结果，从算法库中提取出试验结果分析算法对试验运行结果进行评估，以图表的形式提供给用户，并将结果分析数据导出到 Origin 或 Matlab 中，辅助用户评估出最优解决方案，总体框图如图 5 所示。

试验结果数据管理支持从试验记录的数据库中提取出试验运行结果数据，并自动加载试验方案文件及实验设计模块设计得到的试验样本文件，从而提取出试验的静态信息和动态信息。对提取出的试验数据信息进行试验数据的预处理，预处理包括数据筛选、数据剔除与增补、规范化处理、排序等。

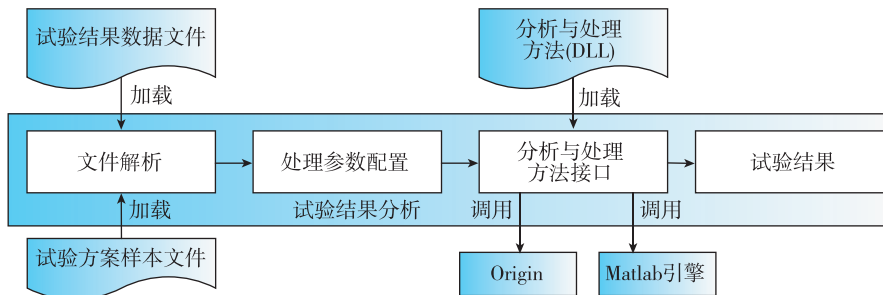


图 5 试验结果评估总体框图

Fig. 5 Overall block diagram of test results evaluation

试验结果数据评估方法配置,该模块为结果评估算法提供可扩展的接口,用户可根据系统运行需求自行编写设计所需的数据处理方法(.dll文件),然后对数据处理方法进行相应的注册、编辑、删除等操作,最终为试验结果分析提供算法库。同时,该模块为 Matlab 和 Origin 提供了统一的数据访问接口,可以将试验分析结果导出到 Matlab 和 Origin 中,为用户提供直观的分析结果。

试验结果数据评估方法包括试验数据灵敏度分析、试验数据统计分析、试验数据相关性分析。试验灵敏度分析包括方差分析、极差分析、摄动分析,试验数据统计分析包括最大值、最小值、均值、方差、Pareto 分析等,试验数据相关性分析包括单相关系数、偏相关系数、复相关系数、典型的非线性相关分析等。

5 结论

一种面向大型分布式虚拟仿真试验的试验设计与调度管控系统,包括试验设计模块、仿真调度模块以及试验结果评估模块;试验设计模块设计试验变量,通过多种试验设计算法得到试验样本文件;仿真调度模块将试验样本文件以及仿真应用作为输入,完成分布式虚拟仿真试验的分发、

部署、过程管控等功能,提高了试验运行过程的效率;试验结果评估模块在试验运行结束后得到试验方案每条试验样本对应的试验数据,对试验数据进行数据预处理,通过试验结果数据评估方法评估试验结果,并将结果通过图形化界面直观显示给用户,辅助系统用户做出合理决策。采用常用工程级试验设计方法,通过试验多次运行及结果评估,完成对试验参数的影响度分析,实现了复杂产品虚拟仿真试验评估。

参考文献

- [1] 黄柯棣. 系统仿真技术[M]. 长沙:国防科技大学出版社, 2000.
- [2] 廖建,赵雯,彭健,等.复杂产品虚拟试验支撑框架[J]. 计算机测量与控制, 2015, 23(4): 1249-1252.
- [3] 刘晓铖,张柯,陈彬,等.分布仿真实验管理系统中运行控制工具的设计[J].系统仿真学报, 2008, 20(24): 6646-6649.
- [4] 刘永文,张会生,苏明,等.分布式实时仿真平台的实现策略[J].计算机仿真, 2002(3): 110-112+39.
- [5] 崔海靖. 非结构化档案数据的存储及检索研究[D]. 沈阳:辽宁大学, 2019.
- [6] 胡坚才. 面向小文件的高性能分布式文件系统研究与设计[D]. 广州:华南理工大学, 2018.

引用格式: 贾长伟,王晓路,王长庆. 一种面向大型分布式虚拟仿真试验管控系统[J].宇航总体技术, 2022, 6(1): 13-17.

Citation: Jia C W, Wang X L, Wang C Q. A control system for large-scale distributed virtual simulation test[J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2022, 6(1): 13-17.