

液体火箭发动机虚拟试验与仿真技术应用

杨思锋,段 娜,张登攀,朱子环,李 斌

(北京航天试验技术研究所,北京 100074)

摘 要:阐述了虚拟试验与仿真验证技术的基础理论,列举了美国喷气实验室、美国马歇尔空间飞行中心、美国肯尼迪空间中心、美国格林研究中心、俄罗斯科学试验中心、美国斯坦尼斯研究中心、德国 DLR 中心、日本 Kakuda 空间推进中心、法国宇航局等液体火箭发动机研制试验机构在虚拟试验与仿真领域的研究应用案例。分析了其应用成果均以成熟产品的形式推广应用,同时对比了我国在该领域的应用产品。最后综述了本项技术的发展趋势和试验台应用与相关研究的建议。通过总结分析可知国外的液体火箭发动机仿真工作覆盖面广、可信度高,从系统级到部件级的全工作过程都可以实时精准模拟,所有模型都经过了真实试车或飞行数据的校验和修正,为发动机试验领域实施和应用虚拟试验与仿真平台提供了技术参考。

关键词:仿真验证;虚拟试验;液体火箭发动机

中图分类号:V433 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-9374(2021)04-0087-09

Summary of virtual test and simulation technology application in LRE field

YANG Sifeng, DUAN Na, ZHANG Dengpan, ZHU Zihuan, LI Bin

(Beijing Institute of Aerospace Testing Technology, Beijing 100074, China)

Abstract: This article describes the fundamental theory of virtual test and simulation verification technology, including the application cases of Jet Laboratory (US), Marshall Space Flight Center (US), Kennedy Space Center (US), Green Research Center (US), Russian Science Test Center, Stennis Research Center (US), DLR Center (Germany), Kakuda Space Propulsion Center (Japan), French Aerospace Agency and other liquid rocket engine development and test institutions in the field of virtual test and simulation research. Their application results are promoted and applied in the form of mature products, and the application products of China in this field are compared. Finally, the development trend of this technology, test bed application and related research suggestions are reviewed. Through the summary and analysis, it can be seen that the simulation work of foreign liquid rocket engines has wide coverage and high credibility, and the whole working process from the system level to the component level can be accurately simulated in real time. All models have been verified and corrected by real test runs or flight data, providing technical references for the implementation and application of virtual test and simulation

收稿日期:2019-07-25;修回日期:2020-05-18

基金项目:中国航天科技集团自主创新课题

作者简介:杨思锋(1966—),男,研究员,研究领域为液体火箭发动机试验与测试。

platforms in the field of engine testing.

Keywords: simulation validation; virtual test; liquid rocket engine (LRE)

0 引言

液体火箭发动机由于试验费用大、研制周期长、事故破坏面大等特点,一直存在试验样本少、极限工况参数测不全、测不到等问题,影响了发动机性能的有效评估,制约了发动机产品的快速高可靠性交付。国外航天单位广泛采用虚拟试验与仿真验证技术,应用到试验的各个阶段,预测评估物理试验性能特征,也可以模拟极限工况和故障模式,在一定程度上简化、减少、甚至替代传统的物理试验。

虚拟试验是系统仿真实论的一支,指的是采用数值模拟手段代替部分或全部硬件来建立虚拟的试验对象,在各种虚拟试验环境中试验者按照真实标准试验流程完成各种预定的试验项目,使所取得的试验效果接近或等价于在真实环境中所取得的效果。虚拟试验系统通过高逼真度的仿真模型的建立和历史试验数据的深度利用,使一些复杂系统和非线性系统的仿真验证从定性向定量转变,并以物理现象的形式展现系统模型仿真结果,更加直观地表现物理试验与仿真结果的对比,为复杂物理现象的机理分析提供有效手段。

因此,为了满足现代液体火箭发动机研制需

求,弥补真实试验与单纯数值计算的不足,液体火箭发动机领域越来越多的研究单位采用虚拟试验及验证技术,并以工程平台的形式进行了推广应用,对辅助真实试验,优化试验流程管理和资源配置,缩短研制周期、降低研制成本和风险有显著意义。

1 国内外研究应用综述

1.1 国外方面

1.1.1 喷气推进实验室的 IVTB

集成虚拟试验平台 IVTB (integrated virtual test bed)^[1]于 2002 年研发完成,部署在喷气推进实验室,其目的是支持第二代可重复性运载器项目的功能性表征和验证。IVTB 可以被用来进行运载器及其部件的地面试验,任务设想试验。X-34RLV 的推进系统为它的初次试验,整个系统是由若干子系统组成,相互独立又相互联系,采用模块化模型作为其仿真基础,预测各种不同操作模式下的动态特性,分析传感器测量对试验精度的影响。IVTB 是系统集成和试验设施。对第二代可重复性运载器项目来说,IVTB 提供了类似飞行的实时和非实时环境去模拟集成操作和客户端评估、定义运载器框架下的操作(见图 1)。

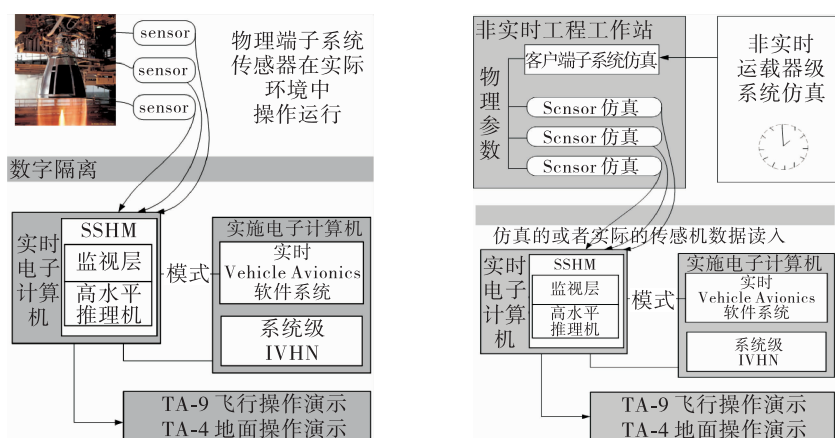


图 1 实际试验与虚拟试验中的客户端系统(物理客户端和仿真客户端)

Fig. 1 Client system of actual test and virtual test(physical client & simulation client)

如图 1 所示,实际试验和虚拟试验中的客户端系统和子系统健康管理构架中,子系统都将产生大量连续的物理参数(例如:温度、压力、流量)。虚拟试验系统客户端不是实时系统,而是要提前于真实试验,反馈各种故障传感器数据流对硬件系统的影响。每一个假设的执行过程是把一个子系统输出的物理量,在下一个步长提供给另一子系统作为输入量。总之,IVTB 丰富了试验台集成仿真和分析能力,使系统能够检测异常状态,确定异常原因及其影响,预测未来的异常趋势,并给使用者(可以是操作者、用户或管理者)提供一个综合的系统信息。

1.1.2 肯尼迪空间中心的 VTB

2003 年,美国 NASA 的肯尼迪空间中心进行了虚拟试验平台 VTB^[2]的开发研制,主要是开发一种计算机的协作环境,这样仿真模型就可以集合到一个无缝模式中。这个协作的计算机环境重点是操作模型,主框架是仿真、数据库、管理系统的集成。

其设计的 VTB 主要技术特征有:

1) 基于网络。VTB 必须可以使用网络资源,可以保证其分布特性,满足不同区域应用的需求。

2) 即插即用。模型应该能够随时被使用,不用复杂的连接与重写。

3) 不同模型无缝集成。VTB 应该能够支持模型增长,模型又是有所不同的,例如:①基于物理和化学现象的非线性第一原则模型;②分析稳态系统输入/输出数据的线性回归模型;③专家预测的模糊数学模型;④神经网络模型;⑤离散事件模型。

4) 多模型。不同部件的不同过程需要用多模型描述。

5) 假设引擎。假设可以表征一些特殊情况。

6) 可扩展知识存储。数据库和知识库要有处理大量数据、声音、图片、音频等的能力,另外,还要有在不同形式的知识集成能力。

7) 灵活的建模环境。为了满足 VTB 的建模需求,必须可以允许建立请求和各种假设。

8) 实时环境。实时仿真和决策需要实时环境,尤其是需要实时基线和快速反馈。

9) 安全层。架构、密码、IP 地址和软件模块的设计都要提供不同等级的安全要求。

10) 集成图形环境。虚拟试验结果需要智能化的可视化表征。用户应该可以用不同媒介和方式查看结果。可视化环境通过虚拟请求语言(VQLs)集成。

11) 控制应用逻辑的独立性/架构。VTB 架构里的各个知识块是独立的。这样各个软件模块的维护和评估可以容易实施。

1.1.3 马歇尔空间飞行中心的 ROCETS

马歇尔空间飞行中心 MSFC 联合普惠公司、刘易斯研究中心、斯坦尼斯空间中心共同开发、校验和应用的火箭发动机瞬态仿真系统(ROCETS)^[3]。1989 年开始应用至今,是最早将模块化建模思想应用到液体火箭发动机领域。ROCETS 采用模块化建模仿真思想,将发动机系统中依照工作原理的不同划分出几大类模型模板,并依据系统组成生成系统模型。这样使程序不再局限于特定的发动机形式,具有很强的适应性、灵活性和通用性。系统库有上百系统、组件、运行过程模型,每个模型都通过百次以上飞行或试验台热试数据校验和修正过。其建立了瞬态和稳态两类模型,可进行发动机的静、动态过程的仿真,应用案例很多,包括普惠公司研制的上面级发动机 RL10 系列、SSC 试验台、X-34 主推进系统、核热推进等等。

此外 ROCETS 系统的另一个显著特点就是并不局限于发动机系统的仿真,经过简单的适应性修改还可用于其他领域。当前 ROCETS 系统的改进版本已经比较广泛的应用到了 NASA 的液体火箭发动机以及增压输送系统的研制中。

1.1.4 格林研究中心的 PITEX 和 NPSS

推进系统 IVHM 技术试验(propulsion IVHM technology experiment, PITEX)隶属于 SLI 项目(空间发射主动性项目)^[4-5],由格林研究中心主要研发。其系统框架包括遥测远程输入系统、监视系统、实时交互、仿真系统、结果输出系统和地面过程单元。同时,为开发和测试诊断系统,虚拟推进系统提供仿真数据支持。

为了校核和验证诊断软件,在推进系统并没有真的进行系统级试验的情况下,虚拟推进系统作为一个支持部件,提供了 X-34 主推进系统的物理原

型的仿真数据。仿真模型提供 X-34 主推进系统的稳态和非稳态状态的仿真,可以仿真许多非稳态假设(包括:阀门黏着或打开、阀门自发关闭或打开、减压器失效、传感器失效等)。这一部件包括在不同操作模式下的各种物理模型的行为预测(例如:推进剂调节和泄出)。这些模式产生了不同的参数和样本率的输出文件。在虚拟推进系统部件里有着各种类似飞行状态的数据集。这些输出数据与传感器进行对应,并应用随机噪声对数据进行处理,插入离散信号(例如:命令和开关指示)。最后的数据集以二进制文件格式存储,并且包含记录文件内容和时间的头信息。

1.1.5 斯坦尼斯中心的 RPTA 和 IVHM

斯坦尼斯中心 SSC 开发和特制了试验设备的流体系统分析工具——火箭推进试验分析系统(rocket propulsion test analysis, RPTA)^[6],目的是在试验生命周期中提供可理解的推进系统热动力建模和试验仿真。这些工具被用来预测推进系统的行为,该技术转化为有活力的试验能力。集成设施仿真分析可以从本质上为试验台节约成本,合理安排各项进度,提高效率,同时完成知识获取和累积,为未来试验工程的生命周期管理提供分析工具。

SSC 的 RPTA 在模型和 CFD 能力的发展,保障了高精度的试验工程推进系统需求分析,以及在工程生命周期的早期开展相关试验设施设计和操作。

同时,NASA 斯坦尼斯航天中心(Stennis Space Center)、NASA 埃姆斯研究中心(Ames Research Center)和普惠公司(Pratt & Whitney Rocketdyne)以 A-1 试验台和 J-2X 发动机为中心实施 IVHM 的核心功能(见图 2),包括异常检测和基于故障模式与影响分析(FMEA)方法的要因分析,最终由用户界面来监测试验台与发动机系统的工作状况。演示系统在 J-2X 发动机测试过程中验证了 IVHM 系统的有效性。同时,系统的结构设计 with 实施方法采用模块化的方法,允许系统性地增加新的程序模块来扩展 IVHM 的功能。IVHM 在该项目中被用于斯坦尼斯航天中心的试验台,在 A-1 试验台的 IVHM 系统包括底层传感器和顶层健康管理系统。以燃料供应系统为例,IVHM 监控推进剂、氧化剂加注以及工艺系统的吹洗的压力状态,传感器向智能处理层提供处理过的数据信息,由 IVHM 来评估传感器的情况,并通过智能算法处理诸如压力过高、泄露、压力消失、破裂、腐蚀、剥落、漂移、磨损、噪声等异常过程状态,进一步决定系统的管理决策。

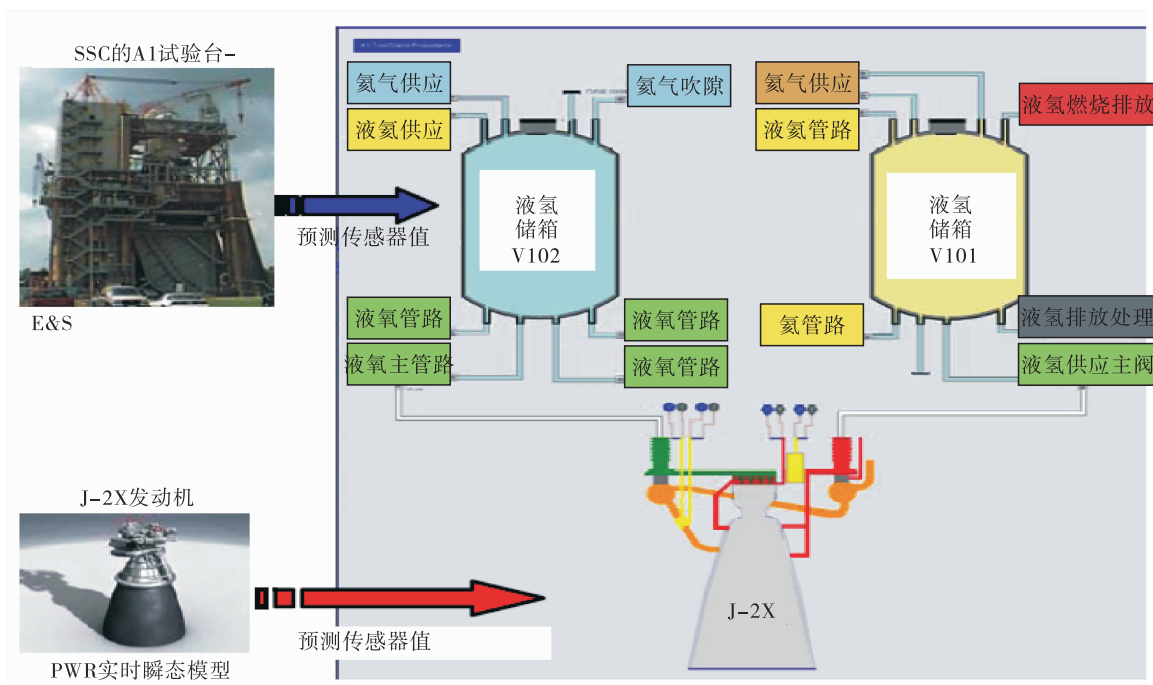


图2 试验台应用案例

Fig. 2 Application case of test bed

2.1.6 俄罗斯科学试验中心的 ЛОГОС и ЛЭГАЗ-ДК

俄罗斯火箭宇航科学试验中心等国家企业实施了“用于新型火箭宇航系统试验的基于超级计算机的信息技术”研究项目。其目的是研制与实施基于超级计算机的虚拟设计和计算机建模,以便制造和试验新型火箭航天器,并提高其可靠性、质量和技术经济性。建设了超级计算机系统,研发了 ЛОГОС и ЛЭГАЗ-ДК 软件。

建造新型火箭航天系统的计算机模型包括火箭航天器部件的虚拟模型。重点是:

- 1) 液体火箭发动机部件虚拟模型;
- 2) “试验台-发动机”系统虚拟模型;
- 3) 运载火箭虚拟模型。

与之前采用商用软件相比,应用此软件在超级计算机上对火箭扰流过程进行建模可以获取更多的气动信息量和预测能力,可以优化试验规划阶段的试验过程,从而大幅减少真实试验高空模拟试验发动机 ПД0146 数量。借助模型库对“发动机-试验台”系统中承载最大的部件的临界状态进行建模,可以确定所允许的参数极限,从而完善事故自动防护系统的算法,进而火箭航天器提高试验安全性。

1.1.7 德国 DLR 中心的 GESSP

德国空间技术研究院推进分部 DLR 中心在 20 世纪 90 年代发展了一种用于液体火箭发动机系统分析的标准组件方法,即从预先定义的标准组件库中选择组件模型搭建一个发动机循环的仿真模型^[7]。该建模方法已成功用于模拟采用低温推进剂的航天飞机主发动机(SSME),使用液氧煤油的 RD-120 发动机以及一个三组元发动机。该研究院的 Hagen-D. Sabnick 等发展了模拟低温推进剂火箭发动机系统过渡过程的数学模型。利用这个模型可以近似地描述这一类发动机的有关启动和关机过程的动态性能。使用上述方法对氢管道的预冷充填过程,氢氧发动机的启动过程,液氧供给管路的关闭过程中的低温推进剂流动特性,阀门开关时序,涡轮泵特性等进行了计算和分析。所得结果能较好地反映各个过程的重要特征,但在数值精度上与试验数据仍有差距。

1.1.8 日本 Kakuda 空间推进中心的 REDS

日本 Kakuda 空间推进中心开发了用于仿真 LE-7A 发动机启动关机瞬变过程的 REDS 程序

(rocket engine dynamic simulator)^[8],该程序采用了有限单元交错网格方法对发动机系统组部件进行仿真,已经成功应用于日本氢氧发动机产品研制,并推广应用到了其他发动机型号的研制与试验。

1.1.9 法国宇航局的 CARINS

法国宇航局的 CARINS 液体火箭推进系统瞬态特性仿真软件^[9],其特点是可用于预测液体火箭推进系统时域频域特性(启动和关机特性、充填过程、工作点变化等过程),界面友好、拥有模型库和模型自动生成器 AMG,可扩展、具有通用性和系统组织能力。

CARINS 系统结构包括三方面:其一就是界面友好的图形化用户接口;其二就是模型库,它们是依据能量和力学原理以数学结构的形式加以体现;其三就是模型自动生成器(AMG)。工程人员可以在 CARINS 的 GUI 界面上构建他所需要仿真的系统,并在该界面上对该系统进行赋值或者确定属性等操作。在完成建模后,计算机代数系统 CAS 就会对方案进行分析,以确定一组优化方程,然后自动生成该系统的基于 Fortran 语言的仿真系统。仿真的最后一步就是自动生成该仿真系统的优化后代码,然后该代码和常微分求解器链接对整个系统求解。已比较完整的应用到了 Ariane4 第三级发动机 HM7B 的动态仿真上,该发动机目前也已应用到了 Ariane5 ESC-A 上。利用 CARINS 得到的仿真结果同热试数据相当接近。另外,从 CARINS 的仿真原理上来看,它的应用范围并不局限于发动机系统,而是可以进行扩展,具有通用性和系统组织能力。

此外,法国 IMAGINE 公司开发的高级工程系统仿真建模环境 AMESim 是一个综合性仿真平台,具有标准化、规范化和图形化的二次开发平台 AME-Set,具有适合各个层次用户使用的多种建模方式,具有与其他软件(Matlab、Adams 等)连接的接口,并且实现了多学科领域的建模与仿真,为火箭发动机系统动态建模与仿真提供了一个开放平台,适用范围广。

综上,国外主流液发研制试验机构、其虚拟试验与仿真平台产品和功能描述如表 1 所示^[10-48]。

表 1 国外平台研究现状对比分析
Tab. 1 Comparativeanalysis of research status for abroad test beds

序号	年代	研究机构	虚拟试验与仿真平台	功能描述
1	2002	美国喷气实验室	集成虚拟试验平台 IVTB	应用于 X-34RLV 的推进系统,预测各种不同操作模式下的动态特性,分析传感器测量对试验精度的影响
2	2003	美国马歇尔空间飞行中心	马歇尔空间飞行中心的 ROCETS	应用于 RL10 系列、SSC 试验台、X-34 主推进系统、核热推进等等,具有通用化仿真能力
3	2003	美国肯尼迪空间中心	虚拟试验平台 VTB	应用于阿姆斯研究中心的智能发射项目,形成基于仿真模型的计算机协作环境
4	2004	美国格林研究中心	PITEX 和 NPSS	应用于 X-34 等推进系统,具有故障诊断和推进系统仿真功能
5	2012	俄罗斯科学试验中心	ЛОГОС и ЛЭГАС-ДК	应用于 РД0146,具有试验台及发动机自主仿真计算能力
6	2006	美国斯坦尼斯研究中心	RPTA 和 IVHM	应用于 A-1 试验台和 J-2X 发动机等,可以为试验生命周期中提供可理解的推进系统热动力建模和试验仿真及健康管理
7	1994	德国 DLR 中心	GEESP	应用于 RD120 液氧煤油发动机,具有标准模块化仿真功能
8	1995	日本 Kakuda 空间推进中心	REDS	应用于 LE-7A 发动机启动关机瞬变过程仿真
9	2005	法国宇航局	CARINS	液体火箭推进系统瞬态特性仿真软件用于预测液体火箭推进系统瞬态特性

1.2 国内方面

各国都将虚拟试验技术视为国防体系的核心技术之一,国内尚处于起步阶段,相关的研究和应用还很少,和国外先进的技术比较还相当不成熟,因此,在我国液体火箭发动机领域开展虚拟试验技术的研究还是一个全新的课题。

1.2.1 航天一院的 VITA

基于 VITA 的综合试验验证系统项目,开发了具有自主知识产权的综合试验框架 VITA^[49],VITA 主要完成两方面的工作,一是以复杂军工产品为研究对象开展“虚实结合”的试验验证共性需求,突破了中间件技术、试验对象模型生成技术、合成环境模拟技术、试验资源管理技术和试验过程可视化技术等关键技术,形成一个支持多种试验领域虚拟试验的计算机物理架构环境;另一方面针对研究对象的试验应用提出了基于其基本计算机物理构架环境的联合仿真试验,例如动力系统与控制系统的联

合仿真,既保证时序的统一一致、又保证动力性能参数的有效控制传递。同时实现真实试验与仿真数据的比对。

1.2.2 国防科大的 LRETMS

国防科大的发动机瞬态过程模块化建模与仿真软件(LRETMS)针对新一代发动机的启动特性进行了仿真建模^[50]。提出了一种可以表征元件模块和模块连接信息的矩阵,以及组件模块联合仿真计算。软件采用 C++ 语言编写而成,可以应用到大型氢氧发动机和液氧煤油发动机系统仿真。采用了起源于德国的模块化仿真方法,自开发成功以来已经在我国液体火箭发动机研制中发挥了重要作用。LRETMS 软件采用图 3 所示的结构,其模型库由事先划分好的 21 个组件模型组成,没有模型自动生成和页面前置添加功能。因此该软件在针对不同类型液体火箭发动机进行仿真时需要改进其模型库。

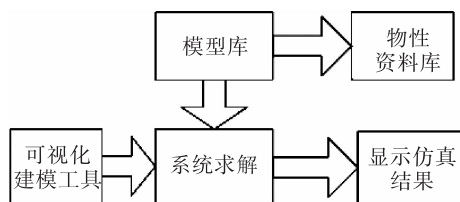


图 3 LRETMMs 软件架构

Fig. 3 Software architecture of LRETMMs

1.2.3 北京航天试验技术研究所的 GSim

北京航天试验技术研究所模块化仿真方向开发了液体火箭发动机的通用仿真软件 GSim。软件系统由六大部分组成,如图 4 所示。模型添加单元和代码生成单元是本软件的核心部分,可以实现模型单元的动态添加和可视化界面内的代码调试,大大降低了发动机设计仿真人员对计算机编程的基础储备和工作量。已经应用本仿真软件及元件的模型类库对液氧煤油补燃循环发动机、姿轨控动力系统进行了仿真研究,仿真得到的参数变化趋势和过渡时间与试车结果是基本一致的。

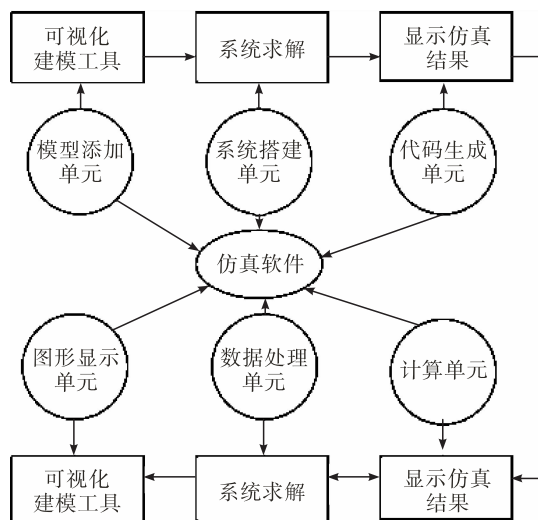


图 4 软件结构示意图

Fig. 4 Sketch map of software architecture

2 技术发展趋势

通过对国内外液体火箭发动机虚拟试验与仿真验证技术的应用分析,可以从成熟案例中总结推断出未来本领域技术的发展趋势。

1) 系统模型模块化与可扩充性,仿真模型的应

用性与模块的完备性都亟需高耦合性和独立性的模型建立。模型自动生成器增强了软件的应用范围,且仿真模型为多模型状态,一维模型中增加流场等耦合仿真等。

2) 更高标准的准确性和实时性。高准确性的仿真模型是虚拟试验开展基础,更高准确度保证更大应用价值。实时性是保证仿真与实物同步执行取得更好的应用效果的必要条件。

3) 虚拟试验平台的集成性和智能化。液体火箭发动机虚拟试验研究内容涉及多个领域,如仿真模型、数据库、可视化、人机交互、工作流、信息化等,满足各项功能模块之间数据传递的需求。无论是对数据、模型、知识的集成管理与应用,还是对设计、仿真、分析功能技术的应用都需要高效综合应用环境并融入智能算法,支撑快速高可靠的设计与试验研究。

3 结语

通过国内外虚拟试验仿真平台调研,总体研究应用情况总结如下:

1) 国外的液体火箭发动机仿真工作覆盖面广、可信度高,从系统级到部件级的全工作过程都可以实时精准模拟,所有模型都经过了真实试车或飞行数据的校验和修正,这是整个虚拟试验技术的核心和基础。

2) 国外的虚拟试验平台多由试验研究机构 and 设计单位共同实施,由发动机设计单位提供产品模型,应用平台首先应用在试验台设备上,研制校准成熟后再推广应用到飞行器上,同时,其平台产品应用度高,仿真产品能够与真实试验并行执行,实现了在线异常数据诊断、本因分析与措施建议。

3) 每个研究机构都有自己知识产权的仿真平台,且其仿真技术已经作为其一项重要试验能力进行建设,其软件产品均具有可扩展、可移植等特点。

鉴于液体火箭发动机虚拟试验与仿真验证技术在国外相关领域的成功应用与技术引领需求,我国在现有工作的基础上要适时开展:

1) 更精细的模型校准工作,对自主研发的发动机和试验台各关键部件机理更深入研究,需要大量实物试验的经验数据提供支持。

2) 加强数据有效性评估,并建设新型测试手

段,用更多更准确的测试数据对关键数学模型参数进行校准。

3)与物理试验台一比一对应的虚拟试验平台重点建设其无缝接口环境、通用模型和共享数据平台。

参考文献:

- [1] JAMES M L, BAROTH E, MELLINGER L, et al. Integrated virtual test bed for ivhm systems on 2nd generation RLV[C]//2003 IEEE Aerospace Conference Proceedings Big Sky. MT: IEEE, 2003.
- [2] RABELO L. The virtual test bed project[Z]. 2004.
- [3] FOLLETT R, TAYLOR R, NUNEZ S. Liquid rocket propulsion dynamic flow modeling using the ROCETS engineering modules in the EASY5x environment[C]//29th Joint Propulsion Conference and Exhibit. Monterey, CA. Reston, Virginia: AIAA, 1993.
- [4] MAUL W, CHICATELLI A, FULTON C, et al. Addressing the real-world challenges in the development of propulsion IVHM technology experiment (PITEX)[C]//AIAA 1st Intelligent Systems Technical Conference. Chicago, Illinois. Reston, Virginia: AIAA, 2004.
- [5] LYTTLE K, FOLLEN J, NAIMAN G, et al. Numerical Propulsion System Simulation (NPSS) 2000 industry review[Z]. NASA Glenn Research Center, 2001.
- [6] Fernando Figueroa and Randy Holland. ISHM implementation for constellation systems[R]. AIAA 2006-4410.
- [7] SASSNICK H D, KRUELLE G. Numerical simulation of transients in feed systems for cryogenic rocket engines[C]//31st Joint Propulsion Conference and Exhibit. San Diego, CA. Reston, Virginia: AIAA, 1995.
- [8] YAMANISHI N, KIMURA T, TAKAHASHI M, et al. Transient analysis of the LE-7A rocket engine using the rocket engine dynamic simulator (REDS)[C]//40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Fort Lauderdale, Florida. Reston, Virginia: AIAA, 2004.
- [9] ORDONNEAU G, ALBANO G, LEUDIERE V. CARINS: a new versatile and flexible tool for engine transient prediction development status[C]//6th International Symposium on Launcher Technologies. Munich, Germany: [s. n.], 2005.
- [10] CROWDER J. Multiple information agents for real-time, ISHM: Architectures for real-time warfighter support[R]. AIAA 2010-3478.
- [11] JOHN S, FERNANDO F, MARK S, et al. Anomaly detection toolkit for integrated systems health management (ISHM)[R]. AIAA2010-3498.
- [12] FIGUEROA A F, MORRIS J, NICKLES D, et al. Intelligent sensors and components for on-board ISHM[C]//42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Sacramento, California. Reston, Virginia: AIAA, 2006.
- [13] PISANICH G, BAJWA A, SANDERFER D, et al. An abort failure detection, notification, & response system: overview of an ISHM development process[C]//2008 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT: IEEE, 2008.
- [14] RUSSELL M J, LECAKES G D, MANDAYAM S, et al. The "intelligent" valve: a diagnostic framework for integrated system-health management of a rocket-engine test stand[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2011, 60(4): 1489-1497.
- [15] FIGUEROA F, AGUILAR R. Test stand and J-2X engine end-to-end integrated system health management demonstration[C]//43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Cincinnati, OH. Reston, Virginia: AIAA, 2007.
- [16] FIGUEROA F, SCHMALZEL J, AGUILAR R, et al. Integrated system health management (ISHM) for test stand and J-2X engine: core implementation[C]//44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Hartford, CT. Reston, Virginia: AIAA, 2008.
- [17] FERNANDO F. Integrated systems health management (ISHM) enabling intelligent systems[C]//NASA/ESA conference on Adaptive Hardware and Systems (AHS-2011). San Diego, California: NASA, 2011.
- [18] 王绪智, 张宝珍. 国外 PHM 技术的发展动态及经验教训[J]. 测控技术. 2010, 29: 216-219.
- [19] 张宝珍. 国外综合诊断、预测与健康管理技术的发展及应用[J]. 计算机测量与控制, 2008, 16(5): 591-594.
- [20] NASA Marshall Space Flight Center. Balanced flow metering and conditioning technology for fluid systems[Z]. 2006.
- [21] GROSSE M. Effect of a diaphragm on performance and fuel regression of a laboratory scale hybrid rocket motor using nitrous oxide and paraffin[C]//45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Denver, Colorado: AIAA, 2009.

- [22] DENIEL A, VINEET A. Computational pluma modeling of conceptual ARES vehicle stage test[R]. AIAA2006-3411.
- [23] BALEPIN V. Concept of the third fluid cooled liquid rocket engine [C]//42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Sacramento, California; AIAA, 2006.
- [24] MATTHIJSEN R. Ultrasonic flow meter for satellite propellant gauging and ground test facilities[R]. AIAA 2008-4854.
- [25] 谭永华. 中国重型运载火箭动力系统研究[J]. 火箭推进, 2011, 37(1):1-6.
TAN Y H. Research on power system of heavy launch vehicle in China [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2011, 37(1):1-6.
- [26] JAMES M L, BAROTH E, MELLINGER L, et al. Integrated virtual test bed for ivhm systems on 2nd generation RLV[C]//2003 IEEE Aerospace Conference Proceedings (Cat. No. 03TH8652). Big Sky, MT: IEEE, 2003.
- [27] 闫少光, 门昱, 周彬文, 等. 卫星真空热试验数据库的设计与实现[J]. 航天器环境工程, 2006, 23(4):201-204.
- [28] 张育林, 刘昆, 程谋森. 液体火箭发动机动力学理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [29] 李家文, 张黎辉, 张振鹏. 液体火箭发动机数值模拟的计算模型建立方法[J]. 推进技术, 2002, 23(5):363-365.
- [30] 高芳, 陈阳, 张振鹏, 等. 液体火箭发动机实验台液路系统工作过程仿真[J]. 航空动力学报, 2006, 21(2):417-420.
- [31] 刘昆, 张育林. 液体推进系统充填过程的有限元状态变量模型[J]. 推进技术, 2001, 22(1):19-21.
- [32] 黄卫东, 朱恒伟, 王克昌, 等. 液体火箭发动机静态仿真通用模块化方法[J]. 航空动力学报, 1998, 13(1):53
- [33] 杨雪, 张振鹏, 杨思锋. 基于 AHP 的液体火箭发动机地面试验监测参数的选取方法研究[J]. 航空动力学报, 2006, 21(3):615-620.
- [34] 刘杰. 基于 HLA 飞行仿真系统框架的构建[D]. 济南: 山东大学, 2005.
- [35] 黄柯棣. 系统仿真技术[M]. 长沙: 国防科学技术大学出版社, 1998.
- [36] 王国权. 虚拟试验技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [37] 朱名铨, 张树生. 虚拟制造系统与实现[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2001.
- [38] 何江华. 计算机仿真导论[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [39] 冯润明, 王国玉, 黄柯棣. TENA 及其与 HLA 的比较[J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(2):288-291.
- [40] 齐欢, 代建民, 吴义明, 等. HLA 仿真与 UML 建模[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [41] JORGE B, AJKUMAR T. Intelligent launch and range operations virtual test bed (ILRO-VTB) [EB/OL]. [http://ic-www. are. nasa. gov/Publications/Pdf/0489. Pdf](http://ic-www.are.nasa.gov/Publications/Pdf/0489.Pdf), 2006.
- [42] 孙磊. Windows 系列操作系统下的底层驱动技术在实时控制系统中的应用[D]. 西安: 中国科学院研究生院, 2007.
- [43] 张奕. Windows2000 WDM 驱动程序开发技术的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2001.
- [44] 耶国栋. Windows 下三类典型驱动程序的设计与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2005.
- [45] 徐君. Windows2000 平台与下层工控机的信息交互[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2005.
- [46] 吴延林. 仿真模型库系统的研究与实现[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2005.
- [47] WHITTLE J, ARAUJO J. Scenario modelling with aspects[J]. IEE Proceedings-Software, 2004, 151(4):157-171.
- [48] 王军. 遵循 IEEE1516 标准的对象模型开发工具研究与实现[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2004.
- [49] 彭健, 赵雯, 章乐平, 等. 虚拟试验支撑框架 VITA 研究与实现[J]. 计算机测量与控制, 2017, 25(8):289-293.
- [50] 刘昆, 张育林, 程谋森. 液体火箭发动机系统瞬变过程模块化建模与仿真[J]. 推进技术, 2003, 24(5):401-405.