

复杂军工产品虚拟试验验证技术研究与发展

赵雯, 彭健

(中国运载火箭技术研究院 研发中心, 北京 100076)

摘要: 虚拟试验验证是一种基于数字样机模型的复杂产品关键系统试验数据产生、获取和分析的系统工程过程; 文中从支撑框架、验证范围、试验环境和标准化等方面分析了国外该领域最新的发展趋势, 结合“十一五”国内虚拟试验领域的典型研究和应用现状, 对现阶段军工产品虚拟试验验证领域的研究成果进行了总结; 在此基础上, 分析了“十二五”试验与测试领域的研究重点, 提出了虚拟试验验证技术领域研究的发展设想, 并对 VITA 技术框架进行了着重阐述; 最后, 给出了发展我国虚拟试验验证技术的建议。

关键词: 虚拟试验验证; VITA

Research on Virtual Test and Evaluation Technology of Complex Military—industrial Products

Zhao Wen, Peng Jian

(China Academy of Launch Vehicle Technology R&D Center, Beijing 100076, China)

Abstract: Virtual test and evaluation is a system engineering process which generates, acquires and analyzes test data for the important system of complex product based on digital prototyping. According to the examples of large joint test and evaluation system aboard, this paper analyzed the latest technology developing trends. With the typical application during the period of “11th Five—Year Plan”, the current research result is also summarized. On this basis, we proposed developing plan for virtual test and evaluation technology. The key technology involved in VITA is elaborated. Finally, suggestions for technology developing is given.

Key words: virtual test and evaluation; VITA

0 概述

虚拟试验验证是一种基于数字样机模型的复杂产品关键系统试验数据产生、获取和分析的系统工程过程。它以建模仿真、虚拟现实和知识工程方法为基础, 在一个由性能模型、耦合环境、流程引擎和可视化交互机制构成的数字化试验平台中模拟真实产品的物理试验过程。

目前, 虚拟试验验证正朝着“虚实融合”的方向发展, 即将虚拟试验的支撑性、模拟试验的等效性和实物试验的验证性有机统一起来, 在一个虚实融合的试验环境中考核复杂产品整体功能和性能是否满足设计要求, 在此基础上, 验证多个系统之间互操作的协调性和匹配性, 评价军工产品技术成熟度、产品使用效能以及标准化程度等^[1-3]。

1 国外虚拟试验验证技术发展趋势

国外军工产品的研制试验、使用试验和各类特种试验中大量采用虚拟试验验证技术, 取得了巨大成功。近年来虚拟试验验证技术朝着“虚实融合”方向的发展越发明显, “虚实融合”后的试验验证系统被称为综合试验验证系统。以美国为代表先进国家投入大量资金用于综合试验验证技术的研究, 特别是形成了以 TENA、JMETC 和 AMSTAR 等为代表的大型综合试验验证系统和支撑框架^[4-12], 并在 F-22、JSF、Boeing 787、AEGIs、宙斯盾等武器系统和千年挑战等联合作战任务中得到应用, 其“风险低、效率高、覆盖性强”的特点逐渐

成为与实物验证并重的试验手段。特别是经过多方协作研发, 美国已经逐渐形成了基于虚拟试验验证技术的公共支撑框架 TENA, 并通过 DoD 推广成为军方和工业部门开展联合试验验证和作战使用训练所必需遵循的标准规范。除此之外, 国外对综合试验环境的研究也已非常成熟, 涌现了以 SEDRIS 为代表的大型综合试验环境建模、表示、转换、共享和发布的系统级平台, 其中部分已经成为 IEEE 标准。

总的来看, 国外总体发展趋势可以概括为以下四个方面:

1) 虚拟试验支撑框架研究倍受重视。TENA (Test and Training Enabling Architecture, 简称 TENA) 是美国国防部通过“基础计划工程 2010”开发的试验与训练使能体系结构, 其主要目的是提高虚拟试验验证中的互操作、可重用性和组合性。它可以根据具体的任务将分布在各实验室和靶场设施中的试验、训练、仿真和高性能计算资源集成起来, 构成多个联合试验验证的“逻辑靶场”。TENA 框架的引入, 在军方、工业部门、试验靶场之间构建了支持数据异地传输、模型、人员在一线协同的联合试验验证网, 为解决目前存在的“烟囱式”试验验证系统异构性强的问题, 实现实物、半实物、虚拟试验应用之间的信息交换和数据共享, 最终形成研制试验和作战使用试验一体化的新型试验模式奠定了基础。

2) 虚拟试验验证的范围日益扩大, 单点和单机的虚拟试验正在向系统级、体系级的联合试验发展, 系统间的交互能力大大提高。特别是 2000 年以后, 以 JMETC 为代表的多个大型 LVC (Live, Virtual and Constructive) 试验系统的实施, 把试验系统间的交互能力提高到一个新的水平。

收稿日期: 2011-04-27; 修回日期: 2011-05-19。

作者简介: 赵雯(1973-), 男, 山东淄博人, 研究员, 主要从事虚

拟试验验证技术、数字化设计与仿真技术方向的研究。

3) 试验环境模拟技术日益成熟, 形成了若干典型的环境模拟系统, 开展了大气、海洋、电磁、力、热及多物理场耦合等环境模拟研究工作, 积累了大量的环境模型, 并通过 SEDRIS 模型等手段将环境描述标准化。

4) 试验的标准化机制逐渐完善, 有力地支撑了联合试验系统的构建。美国等发达国家非常注重由权威部门主导的试验验证标准规范的制定和推广应用, 特别是以 TENA 为核心构建联合试验验证系统过程中, 为了集成多领域、多专业、多形态的模型和试验资源, 美国国防部提出了多项 ISO、IEEE 等标准, 用以规范试验系统集成过程中数据交换和流程再造。

2 “十一五”军工产品虚拟试验验证技术研究综述

通过国防基础科研试验与测试领域“十一五”的攻关, 在军工产品虚拟试验验证关键技术和系统应用方面取得了初步成果形成了以导弹、飞机、舰船为代表的典型应用系统, 为构建“虚实融合”的多系统联合试验验证系统打下了技术基础。“十一五”期间虚拟试验领域主要研究成果体现在以下四方面:

1) 虚拟试验验证平台技术研究:

航天科技集团公司围绕导弹全程飞行过程中的不同剖面, 开展了“一个平台、五个应用”的总体性能虚拟试验验证和应用工作已取得初步成果; 中国飞机强度研究所以全尺寸飞机结构强度虚拟试验为牵引, 构建了飞机结构强度试验过程(从加载到测量等)虚拟试验软件平台, 并形成了虚拟试验数据库和知识库; 航天科工集团构建了网络化弹用吸气式发动机虚拟试验平台, 从而对涡轮部件的气动性能进行虚拟试验验证和预估。

2) 虚拟试验应用系统建模技术研究:

船舶工业集团公司对船舶水动力性能试验建模方法进行了深入研究; 北京强度环境研究所完成了运载火箭模态虚拟试验方法研究, 用模态虚拟试验技术成功预示了某型号运载火箭全箭模态参数; 南京航空航天大学振动工程研究所对振动台虚拟试验的建模和验证技术进行了研究, 建立了电磁振动台的有限元虚拟试验模型, 利用试验结果对虚拟试验模型进行了频率和振型修正。

3) 虚拟现实技术在虚拟试验中的应用研究:

船舶工业集团公司采用虚拟现实技术, 将实船试验数据、舰船电子样机、仿真设计数据等数据建立舰船总体虚拟试验系统, 完成总体性能试验的虚拟化; 北京航空航天大学使用虚拟现实技术, 建立了三轴虚拟转台可视化系统; 哈尔滨工程大学建立了潜艇航行训练三维可视化仿真系统; 南京理工大学机械工程学院对虚拟战场环境构建及实时漫游实现技术进行了初步研究。

4) 虚拟试验验证中的实时性技术研究:

航天科技集团开展了基于实时网和实时操作系统的分布虚拟试验软总线系统研究, 并在 Windows 和 RTX 平台上实现了实时任务处理, 完成了工程实践验证。航空工业集团在飞行品质评估与飞控系统虚拟试验中, 对系统协同虚拟试验时实时传输时间延迟进行了深入研究, 取得了良好效果。

通过“十一五”各个军工集团对虚拟试验验证关键技术的研究, 为“十二五”进一步开展基于虚拟试验支撑框架支持下的多系统联合虚拟试验验证打下了坚实基础。

3 “十二五”军工产品虚拟试验验证技术研究重点

针对军工产品实物试验环境难构建、试验样本少、试验覆盖面窄、试验资源异构性强、技术风险大等问题, “十二五”期间, 在试验与测试领域将重点围绕以下几个方面开展研究:

1) 虚拟试验验证通用支撑框架技术:

虚拟试验验证通用支撑框架是开展虚拟试验验证应用的基础, 也是开展虚拟试验技术领域研究的核心。通过该技术研究, 构建具有自主知识产权的, 行业通用的虚拟试验研制支撑框架, 提高虚拟试验系统的互操作性、可重用性和组件化能力。同时支撑框架的设计也充分考虑“虚实结合”的特点, 把实物试验设施也作为虚拟试验验证的重要环节进行统一管理, 在实物试验资源和虚拟试验验证工具之间建立一个数据交换的桥梁。

2) 虚拟试验环境构建技术:

虚拟试验环境是开展虚拟试验验证的边界, 环境的真实程度直接影响虚拟试验验证的结果的正确性, 通过开展虚拟试验环境统一描述方法研究、复杂战场环境模拟、虚拟试验建模与验模、虚拟现实可视化等技术, 形成虚拟试验验证的环境统一描述规范和模型体系。在消化吸收 SEDRIS 等环境规范的基础上, 结合军工产品研制的现状, 提出大气、海洋、红外、电磁等专业化、可重用的环境组件, 在此基础上形成若干个“虚拟试验风洞”、“虚拟试验水池”、“虚拟振动台”等试验环境模拟系统, 从而提高虚拟试验环境模拟的真实度。

3) 军工复杂产品虚拟试验应用系统构建技术:

基于统一的虚拟试验支撑框架, 以重点军工产品系统级试验验证的需求为牵引, 构建支持军工产品研制试验的虚拟试验验证应用平台, 从而实现虚拟试验与实物试验数据的相互验证和数据融合, 达到“以虚辅实, 互为验证”的目的。

通过上述方向的深入研究, 力争突破虚拟试验中间件、虚拟试验过程模型集成、虚拟现实交互与接口、虚拟现实过程可视化、虚实数据融合、虚拟试验环境模拟、试验对象建模、虚拟试验评价、虚拟试验 VV & A 等关键技术, 使虚拟试验验证技术成为评价型号产品实物试验技术成熟度的重要手段, 全面提升军工产品基于通用支撑平台的系统级试验能力、复杂系统试验体系建模与评价能力、虚拟试验过程规范化能力, 在军工产品研制过程中实现虚拟试验与实物验证的同期开展, 以提高型号系统级实物试验的效率。

4 虚拟试验验证技术支撑框架 VITA

“十二五”期间, 军工产品虚拟试验领域将形成自主知识产权的通用支撑技术框架 VITA (Virtual Test and evaluation enabling Architecture, 简称 VITA)。VITA 框架将以复杂产品研制试验和靶场试验过程中对系统级虚拟试验验证技术的需求为牵引, 以形成武器系统级虚拟试验验证平台为核心, 以解决目前军工产品研制试验过程中的异构性问题为目标, 按照“虚实融合”的层次化思路构建虚拟试验验证支撑框架, 为提升军工产品的设计与虚拟试验验证同步开展的能力和试验验证过程的规范化能力提供技术支撑。

如图 1 所示, VITA 支撑框架由三部分构成, 即 VITA 数据资源层、VITA 基础组件层和 VITA 信息交互层。



图 1 基于 VITA 支撑框架的军工产品虚拟试验验证应用体系架构

VITA 数据资源层对虚拟试验验证过程中涉及的试验模型、数据、知识和试验资源进行统一存储, 并完成这些资源的重用和统一管理。这些资源包括: 试验模型库、设计模型库、环境模型库、试验数据库和实物试验设备资源等。VITA 数据资源层中负责将产品设计的模型引入到试验验证中, 既充分利用了设计的结果, 也为虚拟试验验证中导入和简化模型提供了数据来源。

VITA 基础组件层为虚拟试验验证提供底层的试验资源的存取、访问、监测与控制功能, 试验过程数据的动态收集、存储功能等, 并为实物试验资源提供实时接入接口。VITA 基础组件层包含的组件有: 试验管理组件、数据收集组件、存储管理组件、公共接口组件和实时组件。其中, 试验管理组件负责提供试验过程的监控功能, 部署在每个参加试验的资源中, 像探针一样将试验资源的状态反馈给信息交互和核心服务层; 数据收集组件负责对试验过程中产生的数据进行动态收集, 它并不负责对数据的解析工作, 只是确保能够按照实时性和可靠性要求拿到需要的数据; 存储管理组件负责将试验数据以表格形式存储到试验数据库中, 提供独立于数据库类型的试验数据存储函数供上层的服务调用; 实时组件是专门针对实时板卡、实物转台等实时性要求较高的试验资源而设计的特殊组件, 负责将实时设备的输入输出接口进行封装, 并把接口数据转换成为共享内存或者实时网络上的数据对象。

VITA 信息交互层以 VITA 对象模型为基础, 为虚拟试验验证过程中的各类对象提供数据流、信息流和控制流的交互机

制, 提供试验过程中的试验对象管理、通信 QoS 管理、信息的发布与订购、通信网关和通信管理等功能。对象管理负责按照 VITA 对象描述规范的要求来实现虚拟试验中对象的共享和重用。VITA 对象模型建立了 VITA 系统体系结构中的实体类, 定义了类属性和类方法, 描述了虚拟试验系统组成之间的静态或动态的结构关系。信息交互层中主要的功能是围绕 VITA 对象的产生、使用、管理维护等方面, 提供必要的状态更新、传输质量功能支持, 这些功能的实现需要依赖底层基础组件提供的 API 接口。

虚拟试验核心服务层主要解决的是试验过程中的流程驱动和计算复杂度问题。围绕大型综合试验验证过程开展过程中的试验资源调度、试验资源状态监控、试验过程驱动、细粒度计算模型效率提升等问题, 重点开展流程管理服务和试验网格服务。试验流程管理服务为试验验证过程的任务规划、过程驱动和监控管理提供工具。试验网格服务为调度和优化试验资源, 提高计算机网络的并行计算分析能力提供手段。

虚拟试验资源集成层对试验验证过程中涉及的三种要素(试验对象、试验环境和试验交互控制接口)进行分类管理。试验样机生成与管理主要负责管理虚拟试验验证应用中试验样机模型、试验模型模板和试验流程模板等资源。该系统提供一个可视化的试验验证应用开发环境, 辅助试验总体规划人员将试验验证中需要参与的试验资源对象模型、试验人员角色、试验环境、试验边界、试验设施等进行有机地装配和集成。系统生成的试验应用系统又可以作为模板指导新的试验应用系统建模。多物理场耦合环境模拟系统负责虚拟试验验证环境的建模和管理, 包括自然环境、大气环境、电磁环境、对抗环境和多物理场耦合环境等, 这些环境模型以统一的 SEDRIS EDCS^[1] 接口公布给试验验证模型和应用, 便于存取; 虚拟试验过程交互控制与可视化系统则对试验过程进行本地和异地协同的在线可视化表现, 并支持试验过程中高逼真度, 基于虚拟现实的沉浸式人机交互。

虚拟试验验证应用层以复杂军工产品研制和使用过程为主线, 构建导弹虚拟试验、飞机虚拟试验、船舶虚拟试验和靶场虚拟试验等试验验证应用系统, 从而实现对复杂军工产品系统方案的有效验证。VITA 框架的设计过程中充分考虑了对工业部门研制型试验验证和靶场试验的需求, 可以同时支撑两类试验过程中对异构数据、模型的集成和共享。

5 结语

国内在武器装备研制过程中, 以实物试验为主的试验模式仍占主导地位。大型实物试验的费用占型号研制费用的比例较大, 并且往往成为型号研制周期上的短线。而虚拟试验与实物试验相比具有环境覆盖率高、试验成本低和试验周期短等优点, 适合在军工产品试验过程中推广应用。同时目前军工产品试验验证系统的建设都是各自按照自己的方式开展, 缺乏统一的试验验证基础设施来保证系统间的数据交换和共享能力, 形成了许多“烟囱式”的异构试验验证系统。因此迫切需要从军工产品的研制和靶场试验验证的需求出发, 尽快构建我国的通用的试验验证支撑框架 VITA。

(下转 1277 页)

础,利用 MUSIC 算法检测信号频率,利用 PHD 谐波分解算法检测信号的振幅;根据位移和加速度的关系重构隔水管 VIV 响应的时间历程,最后估计隔水管的位移均方根。

仿真结果表明,与 Welch 位移均方根检测算法相比,本文所提出了新算法的应用范围更广,相同条件下,该算法具有抗噪能力强,精度高等特点。

本文所提的算法为隔水管的 VIV 检测提供了新的思路。

参考文献:

- [1] Dynamic risers [EB/OL], DNV-OS-F201, 2001.
- [2] API RECOMMENDED PRACTICE 16Q [S].
- [3] Riser Fatigue [EB/OL], DNV-RP-F204, 2005, 07.
- [4] Riser Integrity Management [EB/OL]. DNV-RP-F206, 2008, 04.
- [5] Y. Modarres-Sadeghi, H. Mukundan, J. M. Dahl et al. The effect of higher harmonic forces on fatigue life of marine risers [J]. Journal of Sound and Vibration, 2010, 329: 43-55.
- [6] H. Mukundan, Y. Modarres-Sadeghi, J. M. Dahl, et al. Monitoring VIV fatigue damage on marine risers [J]. Journal of Fluids and Structures, 2009, 25: 617-628.
- [7] Himanshu Maheshwari, Wolfgang Ruf, Dave Walters. Riser Integrity Monitoring Techniques and Data Processing Methods [C]. SOPE-2008-EF-01.
- [8] M at Podskarbi, Dave Walters. Integrated approach to riser design and integrity monitoring [A]. International Offshore Pipeline Forum (IOPF) [C]. 2006, IOPF2006-004.
- [9] M at Podskarbi, David Walters. Review and evaluation of riser in-

tegrity monitoring systems and data processing [C]. Deep Offshore Technology 2006.

- [10] Pierre Beynet, Roy Shilling, Mike Campbell, et al. Full scale VIV response measurements of a drill pipe in Gulf of Mexico loop currents [A]. Proceedings of the ASME 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering [C]. 2008-57610.
- [11] Nicholas M. Dale, Christopher D. Bridge. Measured VIV Response of a Deepwater SCR [C]. ISOPE-2007-JSC-473.
- [12] Paolo Simantiras, Neil Willis. Steel catenary risers - Allegheny offshore VIV monitoring campaign and large scale simulation of seabed interaction [OL]. 2H Offshore Engineering Ltd Woking, Surrey, UK.
- [13] H. Lie, K. E. Kaasen. Modal analysis of measurements from a large-scale VIV model test of a riser in linearly sheared flow [J]. Journal of Fluids and Structures, 2006, 22: 557-575.
- [14] A. D. Trim, H. Braaten, H. Lie et al. Experimental investigation of vortex-induced vibration of long marine risers [J]. Journal of Fluids and Structures, 2005, 21: 335-361.
- [15] T. Sarpkaya. A critical review of the intrinsic nature of vortex-induced vibrations [J]. Journal of Fluids and Structures, 2004, 19: 389-447.
- [16] 胡广书. 数字信号处理理论、算法与实现(第二版)[M]. 北京:清华大学出版社, 2007.
- [17] Pisarenko V F. the retrieval of harmonics from a covariance function [J]. Geophys. J. R. Astron. Soc 1973, 33: 347-366.
- [18] 廉保旺, 邹晓军. 子空间分解在 FPGA 上的高效实现 [J]. 计算机测量与控制, 2009, 17(8): 1629-1631.

(上接 1259 页)

由于虚拟试验验证技术的应用主要围绕大型复杂军工产品的研制过程,因此建议以工业部门的应用需求为牵引,国内专业研发中心和院校为支撑,建设虚拟试验验证技术研发的国家队,以形成合力,共同推进我国虚拟试验验证技术的发展。

参考文献:

- [1] Skelley M L. Integrated Test and Evaluation for the 21st Century [EB/OL]. <http://www.aiaa.org>, 2008.
- [2] DoD Live Virtual Constructive (LVC) Integrating Architecture Study [EB/OL]. <http://www.jfcom.mil>.
- [3] Test and evaluation management guide [M]. Nov. 2001 Fourth edition. Published by the Defense Acquisition University Press, 2001.
- [4] TENA and JMETC Enabling Technology in Distributed LVC Environments [EB/OL]. <https://www.tena-sda.org>, 2010.
- [5] Gene Hudgins and Keith Poch. The Test and Training Enabling Architecture (TENA) Enabling Technology For The Joint Mission Environment Test Capability (JMETC) and Other Emerging Range Systems [EB/OL]. <http://www.jmetc.org>, 2010.
- [6] Improved Operational Testing and Evaluation [R]. Phase I Report,

The National Academies Press, 2003.

- [7] Donald Paul Waters [EB/OL]. Integrating Modeling and Simulation with Test and Evaluation Activities. <http://www.aiaa.org>.
- [8] Development of a Space Vehicle Test and Evaluation Handbook [EB/OL]. Alan J. Peterson *, Dan W. Hanifen, <http://www.aiaa.org>.
- [9] Eileen Bjorkman. Joint Test and Evaluation Methodology (JTEM) JT &E Overview [EB/OL]. <http://jte.osd.mil>.
- [10] The Test and Training Enabling Architecture (TENA) Overview Briefing-2 January 2008 [EB/OL]. <http://www.fi2010.org>.
- [11] Rumford G J, Vuong M, Bachinsky S T, et al. Foundation Initiative 2010: The Foundation for Test and Training Interoperability [EB/OL]. OIS-SIW-056, March 2001.
- [12] TENA Middleware Release 6 - Promoting Interoperability Between Functionally and Geographically Dispersed Ranges [EB/OL]. <https://www.tena-sda.org>, 2010.
- [13] The Importance of Establishing Common Methods and Terminologies in Data Mappings [EB/OL]. <http://www.sisostds.org>, 2010.