

## 武器系统虚拟试验验证技术发展研究

赵雯, 胡德凤

(中国运载火箭技术研究院, 北京 100076)

**摘要:** 虚拟试验验证是贯穿军工产品全生命周期的核心技术之一; 它通过将系统工程方法、虚拟现实技术和计算机仿真技术有机地结合起来, 构建数字化的试验和测试环境, 评价军工产品关键系统的功能和性能等是否满足设计要求, 验证系统之间互操作的协调性和匹配性; 该报告以复杂军工产品试验验证过程为背景, 对虚拟试验验证技术的概念和内涵进行了阐述, 对虚拟试验验证应用系统的构成和关键技术进行了分析, 在此基础上介绍了虚拟试验验证的典型应用和发展前景。

**关键词:** 虚拟试验验证; 武器系统; 虚拟试验样机

Towards the Technology Development of  
Weapon System Virtual Test and Evaluation

Zhao Wen, Hu Defeng

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

**Abstract:** Virtual Test and Evaluation (VT & E) is one of the most important technologies through the product lifecycle of weapon system. VT & E combines the theory of system engineering, M & S and virtual reality together to build an integrated virtual test environment. Through the environment, the performance, functionality and the coordination of the core system of military products can be evaluated. The concept and architecture of VT & E are first presented, and the key technologies and applications of VT & E are discussed. Finally, the prospects of VT & E are given.

**Key words:** virtual test and evaluation; weapon system; virtual test prototype

## 0 引言

试验与评价 (Test and Evaluation, T & E, 在我国习惯称为试验验证) 作为现代武器系统采办全生命周期过程中的应用支撑技术之一, 正在发挥着越来越重要的作用<sup>[1]</sup>。如图 1 所示, 试验验证技术贯穿于武器装备需求分析、设计、研制、生产、部署、保障、改进、更新等全生命周期<sup>[2]</sup>。以导弹武器系统为例, 目前的实物试验存在制约其发展的一些问题。

(1) 武器装备实物试验的风险性高, 试验周期长, 严重制约着实物试验的发展。

(2) 系统级试验过程需要各个子系统和装备的协同和集成, 共享设计过程中的模型和参数, 并考虑环境的交互和影响, 目前实物试验状态下很难做到。

(3) 复杂产品研制过程中试验和测试手段不够全面, 导致许多设计参数很难获得。

(4) 导弹等武器装备试验成本高, 使得实物试验不可能多次进行, 因此收集到的试验样本少, 极小样本的实物试验很难反映设计的可靠性。

(5) 由于大型实物试验很难在方案论证和设计阶段组织, 因此缺乏相应的试验手段以验证方案的合理性。基于以上原因, 需要在传统的实物试验验证领域引入新方法, 以适应新型武器系统研制对周期、经费和风险的需求。在美国国防部提出“基于仿真的采办” (Simulation Based Acquisition, SBA) 的概

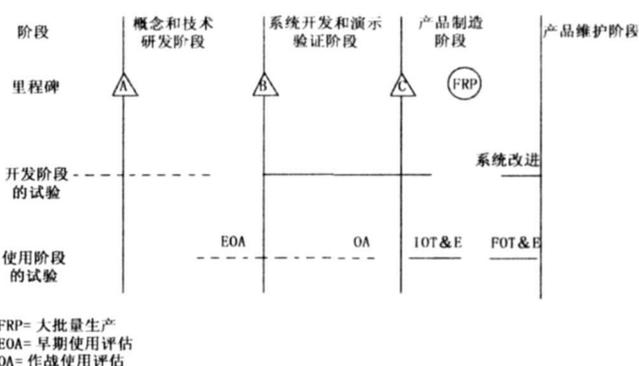


图1 试验验证在现代武器装备采办过程中的作用

念中, 将先进的建模仿真方法和虚拟样机技术应用到装备采办全生命周期, 形成高效的采办仿真体系, 可以完成武器系统概念设计、仿真演练、虚拟试验与评估、虚拟制造、武器系统综合设计、后勤保障等功能<sup>[3]</sup>。SBA在武器装备全生命周期中的作用如图2所示, 其中虚拟试验也成为其核心应用技术之一。

随着SBA在武器装备采办过程中的广泛应用, 虚拟试验技术和虚拟样机技术<sup>[4]</sup>紧密相连, 其相关理论和方法成为指导虚拟试验发展的重要思想, 虚拟试验验证技术也成为试验验证技术的主要发展方向之一<sup>[5]</sup>。

## 1 建模仿真在虚拟试验验证中的应用

目前, 将建模仿真技术应用到军工产品试验验证领域已经成为趋势, 美国国防部为此提出了仿真、试验和评价过程指南 (Simulation, Test and Evaluation Process, 简称STEP), 对仿

收稿日期: 2007-09-07; 修回日期: 2007-10-29。

基金项目: 国防科工委重大基础能力专项(D0320060539)。

作者简介: 赵雯(1973-), 男, 山东人, 工学博士, 主要从事虚拟试验平台和多学科设计优化方向的研究。

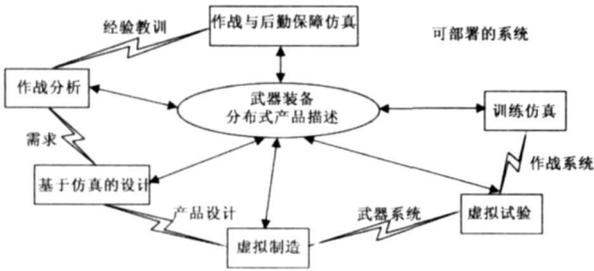


图 2 试验验证在现代武器装备采办过程中的作用

真技术在试验验证过程中的应用提供了可借鉴的标准<sup>[6]</sup>。STEP的核心就是“Model—Test—Model”的试验模式，即通过基于仿真技术的虚拟试验应用系统开发，随着产品模型研制过程的深入，不断地进行系统级虚拟试验，并通过试验结果对模型进行修正，使虚拟试验模型对真实产品描述的可信度不断增加，模型预测真实系统行为和性能的能力也不断增强<sup>[7]</sup>。

基于STEP标准将建模仿真技术应用到试验验证领域，构建虚拟试验验证应用系统，可以达到以下目标。

(1) 对武器装备的作战使用需求进行量化描述，将军方的作战需求转换为虚拟试验模型体系的技术指标。通过自顶向下的需求建模，形成从战略级到战术级，再从战术级到交战级，然后到作战平台和装备级的完整的作战使命要求，直至细化到对单个武器系统的初步战技指标要求。这样既明确了作战系统的层次和武器装备的边界条件，也明确了装备和作战系统之间的接口关系。这对新型号预先研究阶段具有非常重要的意义。

(2) 对武器装备设计方案进行有效的评估。通过在武器装备设计过程的大回路中引入虚拟试验应用系统，可以对设计方案的更改进行及时的验证和评价，辅助设计人员找到稳定的、效率比较高的方案。

(3) “虚实结合”，充分利用实物试验数据。随着研制过程的不断深入，一些部段级或子系统级实物试验也在逐步展开。STEP中利用数据融合和模型近似等手段，将实物实验的结果与虚拟试验模型集成在一起，并通过虚拟靶场等应用系统的构建来考核整体系统的缺陷是否解决，为进行真实条件下的整体系统实物试验提供宝贵的预测数据。

(4) 对研制过程中的装备性能进行再评估。由于武器装备的研制周期长，随着时间的变化，其作战要求和使用寿命可能会发生变化。因此在美军的装备采办过程中，要在一个虚拟的合成战场试验环境中对研制过程中的武器装备当前版本的作战效能进行重新评估(Reassess)，以决定是否要根据当前的作战需求对武器装备的战技指标和作战模式进行必要的修改，这也是美军采用STEP的重要原因之一。

(5) 为下一代装备的研发提供虚拟试验模型和数据支撑。STEP过程并不随着装备的定型、部署而结束，而是贯穿于装备研制的全过程。在武器装备研制过程中采用STEP的结果是形成一套经过彻底测试和有效性验证的武器系统虚拟试验环境，STEP中形成的模型和虚拟试验系统都具有明确的置信

度，具有较好的可重用性。只要给这些虚拟试验模型和系统输入新的数据即可组织新的虚拟试验，这对于武器装备的改型研制具有重要作用。

## 2 虚拟试验验证技术的研究重点

### 2.1 虚拟试验验证的层次化研究体系

近年来，在虚拟试验验证应用技术研究呈现出分布式、层次化、虚拟化和协同化的特点<sup>[8]</sup>。军工产品虚拟试验技术研究内容的层次化描述如图3所示。从图中可以看出，虚拟试验验证技术研究的重点体现在3个层次。

(1) 最底层是虚拟试验验证技术的资源层，主要研究虚拟试验样机模型、虚拟测试设备和相关数据库的构建、描述、管理和接口技术，这是一个虚拟试验验证应用系统构建的基础。资源层的研究需要大量已有的实物试验数据和设计过程中产生的试验对象数学模型信息，在此基础上，构建虚拟试验验证的模型簇，并通过标准接口与半实物、实物试验设备进行数据交换，实现试验过程中的“虚实结合”。

(2) 中间层是虚拟试验验证的流程层，主要研究虚拟试验系统的过程建模、控制，监控相关的内容。它负责按照试验的环境要求和验证的目的，对虚拟试验过程进行建模，并充分利用虚拟试验模型簇中提供的数据、模型和试验条件等。从设计过程中引入的原始数字化产品设计模型，可以作为虚拟试验验证应用的模型输入，经过一个数字化的试验流程，获取虚拟试验的过程数据，并进行分析、评估。分析结果一方面可以验证数字化设计产生的模型的合理性，另一方面还可以为真实试验如靶场或者大型地面试验的顺利开展提供数字化的试验判据和试验参数分析报告。流程层中的建模方法、试验过程控制技术等都采用了建模仿真中的相关理论方法作为支撑，并针对应用特点进行实现。

(3) 虚拟试验验证应用层研究的重点是如何针对不同的产

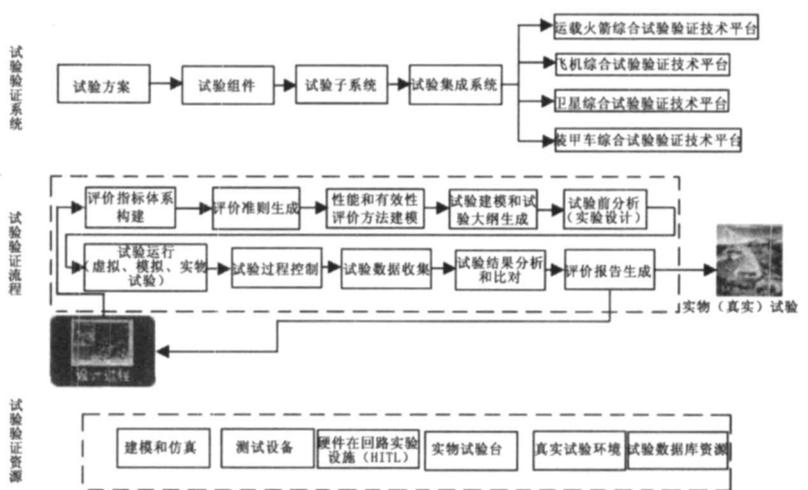


图 3 虚拟试验验证技术研究的分层描述示意图

品试验需求，构建不同的试验验证应用系统。在流程和资源的支撑下，应用层针对不同产品的特点，定义试验应用的系统边界、试验环境、试验条件、需要集成的模型等。这些工作与应用相关，针对不同产品所建立的应用系统不同，但底层的支撑技术和支撑软件可以是相同或者类似的。

## 2.2 虚拟试验验证的关键技术

虚拟试验验证的技术内涵包括环境、模型和参数3个部分,其中环境研究的内容主要包括虚拟试验过程中对试验对象所处的自然、力学、振动、电磁等环境影响进行建模,为虚拟试验过程的进行提供外部环境的输入,提高试验模拟的逼真度;模型研究的主要内容是试验对象的内在物理特性和运行机制,根据具体应用目的不同,模型的类型也不同,主要包括数字、等效器、半实物、实物等,参数研究则主要针对试验数据配置、产生和分析的全过程,研究试验参数的提取、收集、分析、评估和可视化方法。虚拟试验验证研究中的关键技术包括:

(1) 虚拟试验样机(Virtual Test Prototype,简称VTP)技术。VTP是近年来从虚拟样机概念延伸而来的一种新型复杂产品试验验证方法,是一种新型的、基于集成化产品和过程开发策略的新的试验验证手段。VTP将系统建模方法、系统集成分析和验证方法有机地结合起来,构建支持复杂产品虚拟试验验证的模型簇,为产品开发过程中的试验验证提供数字化的模型生成、表现、评估标准规范,并在此基础上构建虚拟试验验证应用系统提供模型和数据来源。VTP技术的研究为在虚拟设计样机和试验样机之间的模型映射和数据交换提供了技术基础。

(2) 虚拟试验环境和平台技术。该技术用来支持构建一个支持多个虚拟试验应用在统一的分布式框架上进行多次运行的环境。

(3) 数学模型与半实物试验模型异构集成技术。该技术用来实现虚拟试验过程中异构模型之间的协议转换和数据交换,为“虚实结合”的试验验证过程提供统一的模型接口标准。

(4) 虚拟试验方案生成和实验设计技术。用来根据用户的要求生成数字化的虚拟试验大纲,为试验运行和分析提供模型和环境输入边界条件。

(5) 基于虚拟现实技术的试验过程可视化技术。该技术主要解决试验过程逼真度的问题,利用先进的视觉、听觉、触觉模拟软件和硬件系统,构建一个具有高度沉浸感的虚拟试验环境。通过将试验系统虚拟化,逼真地模拟试验过程,并通过体数据可视化技术对试验数据进行多维空间的分析。

(6) 试验环境数据库管理技术。该技术主要研究试验数据的组织、试验数据分布式存储、检索和挖掘等。

(7) 实物模型和虚拟试验样机之间映射技术。VTP模型是虚拟试验的基础,虚拟试验模型的正确与否和精确度直接影响到虚拟试验的置信度。映射技术主要研究虚拟试验模型与实物样机之间的相似性关系,利用模型近似方法建立真实模型和虚拟试验模型之间的对应关系。

(8) 虚拟试验验证分析、评估与参数修正技术。主要对试验过程中收集到的数据进行分析,确定试验结果的合理性,分析试验参数的灵敏度,为产品设计和实物试验提供技术支撑。

## 3 虚拟试验验证技术的应用

在先进国家,虚拟试验验证系统已成为武器系统试验与评价工作的重要组成部分,而且有些场合可以部分地取代物理试验,成为武器系统试验与评价的新途径。

在美军F-22、JSF等四代战斗机的气动载荷计算、油箱方案优化、流场分析等方面采用虚拟试验验证技术;美国航空业两巨头波音和洛克·马公司在竞标JSF项目时,除设计新战机外,都建立了虚拟试验验证系统,用作研发和测试新战机,并

用于训练飞行员和地勤人员<sup>[9]</sup>。在两家公司的飞机真正试飞前,已在虚拟系统上进行了数千小时的虚拟试验。

美军的试验与训练使能体系结构TENA(Test & Training Enabled Architecture,简称TENA)是美国国防部正在开发的导弹试验与训练领域的通用体系结构,其目的是能以快速、高效益的方式实现用于试验和训练的靶场、设施和数字模型之间的互操作,促进这些资源的重用和可组合。TENA设计了一个无缝集成的虚拟试验验证框架,整合导弹飞行试验靶场和其它各种虚拟资源,包括训练靶场、半实物仿真实验室、数字化试验验证节点等。

虚拟试验验证技术也广泛应用在宙斯盾武器系统的“战备完好性”测试平台,爱国者防空导弹的虚拟试验验证系统,战斧导弹地面的功能虚拟试验台FGT中,大大提高了产品研制水平和作战使用性能,降低了成本和风险。

除了加强虚拟试验验证的应用外,国外还加强了对虚拟试验验证标准规范的研究,以标准的形式规范和确定虚拟试验验证在军工产品研制过程中的作用<sup>[10]</sup>。如美国2003年5月新修订的5000系列防务采办文件和2005年1月颁布的试验与评价管理指南中特别强调了虚拟试验与评价方法。指南中要求在武器系统整个采办过程中,装备研制部门应与用户以及试验与评价机构一起,将研制试验和评价(DT&E)、使用试验和评价(OT&E)、实弹试验和评价(LFT&E)、系统交互性试验以及建模和仿真(M&S)活动协调成为有效的连续体。还要求采用单一的试验大纲,形成统一和连续的试验活动,尽量避免武器研制阶段进行单一试验和重复性试验,通过一次试验获得多个参数,以显著地减少试验资源和缩短研制时间。

虚拟试验验证技术的应用带来了明显效果。如美国陆军利用虚拟试验验证系统对长弓海尔法导弹进行小批量生产和大批量生产的验收试验,明显减少了传统的飞行试验的次数,提高了导弹批次验收试验的可信度<sup>[11]</sup>。据保守的估计使用上述验收设施的虚拟试验比实际试验每年至少节省500万美元,最高能达到1000万美元。再如,美军完成M1改进型主战坦克的作战试验,采用实物模拟,需花费两年时间,耗资4000万美元,而采用虚拟试验,则只需3个月时间,耗资仅640万美元,其效果显而易见。

我国在“十五”末期逐渐认识到虚拟试验验证技术在辅助实物试验,降低研制风险和成本等方面的重要作用,并初步展开了虚拟试验相关的技术研究<sup>[12]</sup>。“十一五”期间,我国将加大虚拟试验验证技术的研究力度,在科工委等上级单位的领导下,以“构建平台、突出重点、强化应用、提升水平”为指导思想,在航天、船舶、兵器等领域选取典型型号开展虚拟试验验证支撑平台技术研究,加快虚拟试验验证技术的应用。

## 4 结论

虚拟试验验证技术适应于包括航空、航天、兵器、船舶等在内的国防工业各领域,是军工产品试验和测试技术发展的必然趋势。建模仿真技术使虚拟试验验证技术的研究和应用有了更可靠的技术保障。虚拟试验验证技术适用于武器装备可行性论证、方案论证、研制生产、使用与训练等全生命周期。通过各个阶段的虚拟试验验证获得充分可信的、与武器装备性能的相关信息,可以减少武器装备研制过程中的盲目性和不确定因素,增强了决策的合理性和科学性。(下转第7页)

络获取信息的基本途径和手段, 如图 4 所示。



图 4 网络仪器成为人与自然之间的桥梁

#### 4 结论

以 Internet 为代表的网络技术的成熟以及它与仪器技术的结合, 为仪器技术的发展带来了前所未有的空间和机遇, 可以肯定, 网络化测试技术的时代已经来临。网络仪器正是在这一背景下的产物, 它的出现解决了测试仪器与信息高速公路的“接轨”问题, 实现了测试技术与网络技术的完美融合。网络仪器的构建在实践上还有大量的工作要做: 首要的是从理论与技术的结合上分析, 总结出合理的网络仪器体系结构。以此作为指导, 使测试技术领域与网络技术领域的技术人员协同工作, 共同创建一种普遍适用的网络仪器开放体系结构, 使各种测试仪器能够便捷地融进纵横交错的信息高速公路之中, 实现信息资源的广域开放共享, 使信源和信宿之间无缝连接, 为构筑人类真正的数字化生活打下良好的基础。

#### 参考文献:

- [1] 王大珩, 丁先华. 现代仪器仪表技术与设计 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [2] 金吾伦. 塑造未来——信息高速公路通向新社会 [M]. 武汉: 武汉出版社, 1998.
- [3] 孙亚飞, 陈仁文, 周 勇, 等. 测试仪器发展概述 [J]. 仪器仪表学报, 2003, 24 (5): 480—484.

- [4] Agilent Technologies (Grant Drenkow). LXI 揭开未来测试的面纱 [J]. 计算机测量与控制, 2006, 14 (6): 145—146.
- [5] 范永凯. 第四代仪器——三层网络化仪器概念的提出 [J]. 计算机工程与应用, 2003, 39 (14): 208—209.
- [6] 杜金榜, 王跃科, 王湘祁, 等. 军用自动测试设备的发展趋向 [J]. 计算机测量与控制, 2001, 9 (5): 1—3.
- [7] 刘根旺, 赵利军, 马瑞萍. 测试仪器的发展及其对军用测试领域的影响 [J]. 计算机测量与控制, 2001, 9 (2): 1—2.
- [8] 林玉池. 测量控制与仪器仪表前沿技术及发展趋势 [M]. 天津: 天津大学出版社, 2005.
- [9] 中国仪器仪表学会. 中国测量控制与仪器仪表中长期科技发展规划建议 [R]. 2004.
- [10] Ko C C, Chen B M, Chen J, et al. Development of a Web-based laboratory for control experiments on a coupled tank apparatus [C]. IEEE Transactions on Education, 2001, 44 (1): 76—86.
- [11] Matteo Bertocco, Franco Ferraris, Carlo Offelli, Marco Parvis. A Client-Server Architecture for Distributed Measurement Systems. IEEE Trans. Instrum. Meas. [C]. 1998, 47 (5): 1143—1147.
- [12] Kang B Lee, Schneeman R D. Distributed measurement and control Based on the IEEE 1451 Smart Transducer Interface Standards. IEEE Trans. Instrum. Meas. [C]. 2000, 49 (3): 621—627.
- [13] Lee K B, Schneeman R D. Internet-based distributed measurement and control applications [J]. IEEE Instrum. & Meas. Magazine, 1999, (6): 23—27.
- [14] 于功敬, 等. 虚拟仪器测试环境软总线体系结构 [J]. 计算机测量与控制, 2006, 14 (2): 141—143.
- [15] LXI Consortium, Inc. LXI Standard Revision 1. 0 [S]. 2005. 9.
- [16] LXI Consortium, Inc. LxiSync Interface Specification Revision 1. 0 [S]. 2005. 9.

(上接第 3 页)

#### 参考文献:

- [1] Test and evaluation management guide [M]. 2001 Fourth edition. Published by the Defense Acquisition University Press. 2001.
- [2] Test and evaluation management guide [R]. Mar. 1998. Third edition. Published by the Defense Systems Management College Press.
- [3] Air Force Instruction [R]. Development Test and Evaluation. Nov. 1996.
- [4] Wang G G. Definition and review of virtual prototyping [M]. University of Manitoba. Canada.
- [5] Rolince D. Applying virtual test principles to digital test program development [A]. AUTOTESTCON [C]. 1997.
- [6] Defense Acquisition Guidebook [R]. DoD 2004.
- [7] Collaborative Virtual Prototyping [M]. Johns Hopkins APL Technical Digest, VOLUME 17, NUMBER 3, 1996.
- [8] José Sepúlveda. Implementing the high level architecture in the virtual test bed [M]. Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference, 2004.
- [9] Joint synthetic battlespace: applying simulation to acquisition, mission effectiveness, and course of action analysis [R]. 2001.

- [10] Integrated product and process development handbook [R]. August 1998.
- [11] Kraft E M. Integrated test and evaluation—a knowledge-based approach to system development [R]. AIAA95-3982.
- [12] 赵 雯. 协同虚拟样机技术研究 [J]. 系统仿真学报, 2001, 13 (1).

### 美国 ZTEC 公司新推出 ZT4612 LAN 数字存储示波器

美国 ZTEC 仪器公司是 VXI、PXI 的主要联盟商, 独家提供 VXI 数字示波器模块, 是唯一一家在一个模块上实现完整数字示波器功能的厂商。作为先进的仪器设计和制造商, ZTEC 提供具有独特优势的 VXI、PXI、PCI、LXI 模块, 将于 08 年年初正式推出 ZT4612 LAN 数字存储示波器, 早些时候还交推出 LXI 数字示波器。ZT4612 LAN 数字存储示波器的主要性能参数: 4 通道, 8 位精度, 带宽为 1GHz, 采样率为 4GS/s。

(北京汉通达科技有限公司供稿)