

# 面向虚拟试验的可信度评估工具设计与实现

杨亮, 沈志军, 胡叶楠, 完颜振海, 聂蓉梅

(北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

**摘要:** 虚拟试验技术在航天领域得到了越来越广泛的应用, 尤其是在多专业耦合仿真方面, 但是面向虚拟试验的可信度评估工具方面的建设与研究未得到充分关注; 针对虚拟试验分析阶段的工程需求, 设计并实现了虚拟试验可信度评估工具, 涵盖了评估对象管理、评估专家管理、指标体系构建、可信度评估等功能模块; 此外, 该工具还提供了虚拟试验与实物试验的数据库接口, 有效地支撑了虚实对比工作, 进一步规范了虚拟试验的分析流程与分析内容, 有效提升了工作效率。

**关键词:** 虚拟试验; 可信度评估; 数据分析

## Design and Implementation of a Reliability Evaluating Tool in Virtual Test

Yang Liang, Shen Zhijun, Hu Yanan, Wanyan Zhenhai, Nie Rongmei

(Beijing Institute of Aerospace Systems Engineering, Beijing 100076, China)

**Abstract:** Virtual test techniques have been more and more widely utilized in the aerospace field, especially about multidisciplinary coupling simulation. However, the study on reliability evaluating tool has not been paid enough attention to in virtual test. In consideration of the engineering requirement during test analyzing phase, we have designed and implemented a reliability evaluating tool, which includes functional modules like evaluating-objects management, evaluating-experts management, index-system construction. Moreover, it offers interfaces to virtual test and physical test databases, which effectively helps the contrast work between the two tests, standardizes the analyzing flow and content of virtual test, and highlights the work efficiency.

**Keywords:** virtual test; reliability evaluation; data analysis

### 0 引言

近二十年来, 虚拟试验技术得到了飞速的发展, 已经广泛用于航空、航天、国防、军事等领域, 取得了令人瞩目的成果<sup>[1-3]</sup>。国外比较成功的应用是美国的推进系统数值仿真(NPSS)项目<sup>[4]</sup>。它用来实现发动机推进系统气动、传热、燃烧等多学科三维动态集成设计与分析, 最终实现推进系统/飞行器的一体化综合仿真。国内航天方面, 虚拟试验技术正在得到越来越广泛的应用, 目前主要通过利用各类 CAE 专业仿真分析软件、数字化的虚拟样机等手段, 对产品的动力学特性及响应、疲劳强度、振动、冲击等性能和飞行状态等参数进行模拟和计算, 进行反复验证和分析, 为提高航天产品的设计质量提供了有力保障, 为实物试验提供了可靠的分析依据和指导作用。从上可看出, 利用虚拟试验技术开展精细化设计与仿真分析已逐渐成为航天等复杂产品设计领域的重要技术手段。

目前, 国内针对可信度评估方面的研究, 已开展了大量的工作, 但大多集中在理论研究方面<sup>[5-7]</sup>。对军工行业而言, 其工作主要集中在具体的产品领域, 如雷达产品<sup>[8]</sup>。虚拟试验领域相关的可信度评估方面缺乏从评估实施的角度出发, 构建虚拟试验指标体系模型, 结合虚、实两类试验数据库, 采用先进的数据处理方法, 系统地将各类定性定量评估方法集中起来, 充分利用评估专家资源, 逐级验证整个虚拟试验的成效, 从功能与流程两方面, 保证虚拟试验可信度评估工作。

本文针对虚拟试验领域的可信度评估工作需求, 首先给出

了虚拟试验的工作流程与应用概述, 详细介绍了可信度评估工具的功能设计、总体设计与详细设计, 给出了工具实现情况, 达到为虚拟试验可信度评估工作规范流程与提升效率的目的。

### 1 虚拟试验流程概述

虚拟试验流程共分为试验准备阶段、试验设计阶段、试验运行阶段与试验分析阶段, 如图 1 所示。具体如下:

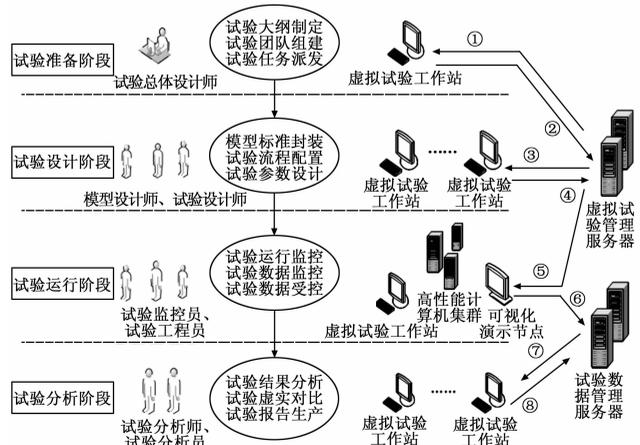


图 1 虚拟试验的工程流程

- 1) 试验准备阶段: 负责发布虚拟试验总体试验大纲, 包括试验目的、试验方案、试验参数和试验内容等; 并负责组建虚拟试验团队, 分解总体试验大纲进行任务派发, 向各专业模型设计师、虚拟试验设计师等各类人员发送试验任务书, 最后将各类试验信息进行入库管理;
- 2) 试验设计阶段: 根据虚拟试验模型设计任务书, 实现

收稿日期: 2015-11-04; 修回日期: 2015-11-26。

作者简介: 杨亮(1983-), 男, 山西五台人, 博士, 工程师, 主要从事虚拟试验方向的研究。

流体、结构、控制等专业模型软件的开发和模型标准化封装，并进行入库受控管理，然后由虚拟试验设计师按照虚拟试验设计任务书，对各专业的标准化模型进行资源配置、流程配置和参数设计，待试验设计完毕，再将项目进行受控管理；

3) 试验运行阶段：负责组织分配好各类试验人员和试验软硬件资源，并从试验管理系统下载对应的项目，启动虚拟试验总控节点，进行模型分发、开展多专业节点协同计算的虚拟试验，在此阶段可进行数据监控、状态监控，以及实时可视化分析。待试验结束后，将过程数据传至试验数据管理系统。

4) 试验分析阶段：负责从试验数据管理系统下载实物试验数据和虚拟试验相关专业数据进行数据综合分析，开展可信度评估工作，并生成试验报告。

虚拟试验领域产品投资大，周期长、信息化程度高、参与人员多、协同性强，使得仿真系统开发风险增大，必须通过有效的管理和技术手段来保证仿真系统具有足够的可信性，支撑其应用的需要。可信度评估工具是虚拟试验达到预期的性能、确保可靠运行的保证。影响虚拟试验可信度的因素是多层次多方面的，而基于指标体系的评估是定性 with 定量相结合的决策分析方法，它体现了人们决策思维的基本特征，即“分解—判断—综合”。虚拟试验可信度评估工具是以评估指标体系为架构、以数据一致性分析为支撑的辅助工具，具有可操作性强、理论基础清晰、所得结论合理的优点，能够满足虚拟试验工作的可信度评估和模型验证需求。

## 2 可信度评估工具的设计

### 2.1 功能设计

结合虚拟试验可信度评估工作的需求，可信度评估工具设计主要有以下功能：评估对象管理、评估专家管理、评估指标体系管理、可信度评估、数据处理、数据分析、可信度缺陷检测、评估结果统计与报告生成等功能。如图 2 所示，在利用所设计工具开展虚拟试验可信度评估工作时，主要分为以下工作步骤：

- 1) 由试验评估人员完成指标评估体系各层节点的设计，然后评估人员分配每一级不同叶节点的权重分配，完成评估专家选择，并明确是定性还是定量评估，至此完成指标体系构建。
- 2) 每位评估专家登陆系统，完成自己所负责节点的评估工作，选定数据预处理方法、数据分析算法等，完成节点评估。
- 3) 等每位专家完成评估工作以后，会完成缺陷节点检测、评估结果统计，最后生成评估报告。

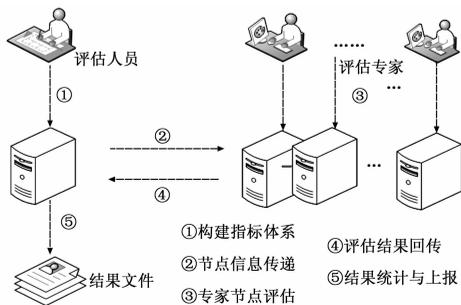


图 2 可信度评估的工作流程

### 2.2 总体设计

虚拟试验可信度评估工具的总体设计主要分为以下三层：  
基础层：底层支撑框架。采用 VC++ 面向对象的编程方法，以 C/S 架构为工具使用模式，应用数据接口配置、VC 与

MATLAB 混合编程等技术，通过不同的数据库 API 函数，实现对虚拟试验及实物试验数据的快速、分类获取。

模型层：以基础层的数据作为输入，依次创建指标体系模型、评估算法模型与评估专家模型，实现节点与数据关联，保证模型的一致性，为应用层提供支撑。

应用层：包括指标体系构建、模型节点评估、试验数据处理、试验数据分析、模型缺陷检测、评估结果统计等应用。这些具体的应用将在工具界面中直观地提供给评估工作人员与评估专家以便使用。

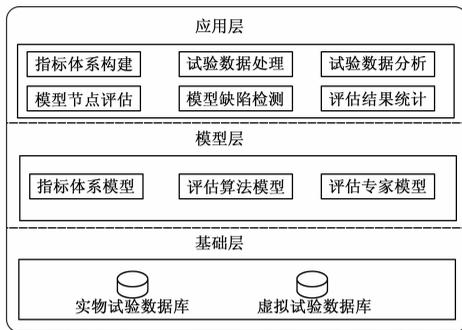


图 3 可信度评估工具的总体设计

### 2.3 详细设计

虚拟试验可信度评估工具主要采用模块化设计的思想，系统共含有评估对象管理、专家管理等八个模块。该工具在局域网内的客户机上运行，同时访问服务器端的虚拟试验数据库和实物试验数据库。

#### 2.3.1 评估对象管理

评估对象管理模块包括新建、删除、编辑和保存评估对象。用户可在对应界面指定评估对象名称、标识、描述等信息。该模块使用 CObjectManage、CAddObjectDlg 和 CMyListCtrl 3 个类，定义了不同用途的函数以实现该模块的各项功能。

#### 2.3.2 评估专家管理

评估专家管理模块主要包括新建、删除、编辑和保存评估专家档案。用户可在对应界面编辑评估专家姓名、ID、专业领域等信息。该模块在设计过程共使用 CPersonManagement 和 CExpertClass 两个类。

#### 2.3.3 指标体系构建

该模块包括新建、删除、编辑评估节点流程，以及设置节点权重流程。指标体系构建模块设计过程中共使用了 4 个类，分别为 CAddItemDlg、CTreeCreate、CMyTreeCtrl 和 CWeightMethod。

#### 2.3.4 可信度评估

本模块主要包括节点评估和指标体系重载。这里给出节点评估的流程：选择叶节点，找到节点评估子选项，调出节点评估对话框，对叶节点进行定性或定量评估。特别注意的是，该工具不支持对非叶节点直接进行评估，非叶节点的评估值由系统自动根据其子节点的评估值和节点权重计算得到。

为了实现该模块的各项功能，本模块使用了 4 个类，分别为：CTreeValue、CMyTreeCtrl、CConnectValue 和 CConnectValueSelect。

#### 2.3.5 数据预处理

数据预处理模块包括奇异值剔除、正态性检验和时间序列

一致性处理等功能。其中,这几个处理方法的代码均以动态链接库的方式封存,同时提供接口函数,提高程序的可移植性。

### 2.3.6 数据分析

数据分析模块根据虚拟试验和实物试验数据情况以及评估节点上所定义的方法来确定执行流程,每种方法在进行数据分析时的流程也不尽相同。

在数据分析模块中,算法设计方法包括图灵测试、参数估计、假设检验、TIC、灰色关联、谱窗估计、最大熵谱估计和特征匹配。本模块采用 VC 与 MATLAB 混合编程技术,将函数封装在动态链接库中,实现统计量的计算功能与调用功能。

### 2.3.7 可信度缺陷检测

模块根据用户提交的可信度缺陷检测请求,在用户完成指标体系内所有节点评估的前提下,使用二维搜索算法在深度和广度上遍历指标体系进行缺陷节点检测。

在可信度缺陷检测模块中,主要算法是缺陷节点的二维搜索算法。该算法即一个同时在深度和广度上搜索指标体系所有节点评估结果的遍历算法,具体代码实现使用了递归设计。下图显示了该搜索算法的原理。

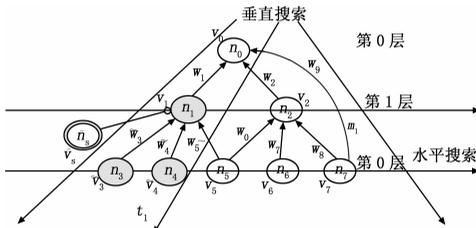


图 4 二维搜索算法的原理

### 2.3.8 评估结果统计与报告生成

本模块包括评估结果统计和报告生成功能。其中,主要算法是评估结果的统计算法。此算法与可信度缺陷检测算法类似,支持同时在深度和广度上搜索指标体系的所有节点评估结果的遍历功能。

## 3 可信度评估工具的实现

为充分说明面向虚拟试验的可信度评估工具,本节将结合工具的使用流程,说明该工具的功能实现情况。

首先,打开可信度工具界面,选择“模型与专家管理”子选项,即可实现对评估专家、评估指标体系的增加、删除、修改等操作与管理,这样便于评估过程各模型节点状态的过程监控、历史查询等;

然后,选择“可信度评估”子选项,接下来以某次飞行器仿真系统的虚拟试验可信度评估为例进行说明软件实现情况。

1) 点击“指标体系创建”,将特定的评估专家指派到评估对象,并分配评估专家权重;

2) 按照逐级、分层思想当前评估对象的可信度评估指标体系;

3) 由评估专家执行当前对象的可信度评估,在定性节点上可使用专家评定法和模糊综合评价法,在定量节点上则需先完成服务器端虚拟试验数据和实物试验数据的接入,再根据数据情况使用图灵测试、参数估计、假设检验、TIC、灰色关联、谱窗估计、最大熵谱估计、特征匹配等方法,图 5 给出了熵谱分析法的界面操作窗口;

4) 点击“缺陷节点检测”,即可完成检测结果输出,如图

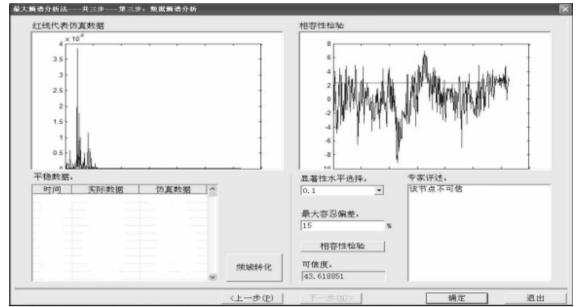


图 5 熵谱分析法窗口操作

6 所示;

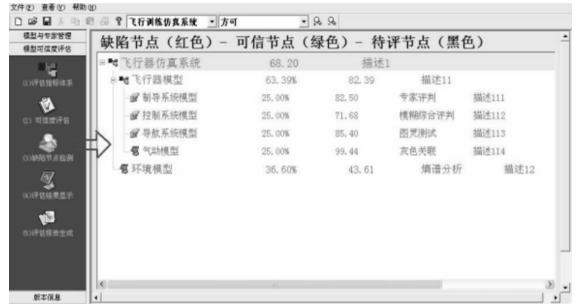


图 6 可信度缺陷检测结果输出

5) 点击“评估结果显示”,则自动收集所有的后台数据,计算量化可信度结果和标定可信度等级,完成可信度结果统计;

6) 点击“评估结果显示”,自动生成评估报告。

## 4 结论

虚拟试验可信度评估工具作为试验分析阶段的重要工具,通过采用可视化界面和向导式应用,提供评估对象定义、指标体系建立、数据一致性分析、辅助评估等功能,为模型验证、VV&A 等工作提供支撑,帮助解决虚拟试验仿真模型可信度评估的问题,为该虚拟试验的正确应用提供支持。同时,该工具还可扩展应用至其它建模与仿真可信度评估工作中,尤其是对大型复杂仿真系统的帮助作用更大。

### 参考文献:

[1] 杨 亮,沈志军,胡叶楠. 虚拟试验技术研究及平台应用 [A]. 中国宇航学会计算机应用专业委员会 2013 年度技术交流会文集 [C]. 2003: 204-209.

[2] 赵 雯,彭 健. 复杂军工产品虚拟试验验证技术研究与发展 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (6): 1257-1259, 1277.

[3] 赵 雯,胡德风. 武器系统虚拟试验验证技术发展研究 [J]. 计算机测量与控制, 2008, 16 (1): 1-3, 7.

[4] Follen G, Buchon M. Numerical zooming between a NPSS engine system simulation and a one-dimensional high compressor analysis code [M]. NASA, 2000.

[5] 吴 静,吴晓燕,高忠长. 复杂仿真系统可信性评估的特点及评估对策 [J]. 系统仿真技术, 2009, 5 (4): 247-254.

[6] 郑帮涛,胡 云. 国外武器装备建模与仿真可信度评估方法研究 [J]. 质量与可靠性, 2015, 2 (176): 6-9.

[7] 邓红莉,杨 韬. 定性定量及半定量综合评估方法 [J]. 信息通信, 2015 (4): 42-43.

[8] 王 涛,欧阳林涛,毕增军,等. 一种雷达质量评估结果可信度分析方法 [J]. 空军雷达学院学报, 2015 (1): 27-29.