

# 火箭飞行仿真系统 VV&A 应用技术研究

陶久亮, 于一帆, 王 晨, 马 成, 彭 博

(北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

**摘 要:** 火箭飞行仿真系统作为一个复杂仿真系统, 具有多专业强耦合、多偏差模式、连续离散混合仿真等特点, 如何保证仿真系统可信度, 是一个亟待解决的问题。校核、验证与确认 (Verification, Validation and Accreditation, VV&A) 是保证火箭飞行仿真系统正确性和可用性的重要方法。系统地总结了 VV&A 活动各阶段的常用技术和特点, 根据 VV&A 活动一般过程, 从工程化角度重点研究了飞行仿真系统 VV&A 各阶段的具体实现过程, 为其他仿真系统 VV&A 活动提供参考, 具有较好的推广应用价值。

**关键词:** 飞行仿真系统; VV&A; 可信度评估

**中图分类号:** TP391.9      **文献标识码:** A      **文章编号:** 2096-4080 (2022) 01-0022-09

## Research on VV&A Application Technology of Launch Vehicle Flight Simulation System

TAO Jiuliang, YU Yifan, WANG Chen, MA Cheng, PENG Bo

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

**Abstract:** As a complex simulation system, the launch vehicle flight simulation system features the characteristics of strong coupling of multiple disciplines, multiple deviation failure modes, continuous discrete hybrid simulation, etc. How to ensure the credibility of the simulation system is an urgent problem to be solved. Verification, Validation and Accreditation (VV&A) is the key technology to ensure the correctness and availability of the launch vehicle flight simulation system. This work systematically summarizes the common technical methods and characteristics of each stage of VV&A activities, and focuses on the specific implementation process of each stage of the launch vehicle flight simulation system VV&A process on the basis of general process of VV&A activities from the perspective of engineering. This study provides a reference for other simulation system VV&A activities and is of good promotion and application value.

**Key words:** Flight simulation system; VV&A; Credibility evaluation

### 0 引言

运载火箭的研制具有系统复杂、难度大、关键技术多等特点, 对总体设计与研制提出越来越高的要求, 需要充分借助先进的飞行仿真技术手段, 开

展快速地分析验证工作, 评估火箭在各种偏差和故障工况下的总体综合性能, 进一步确保飞行试验和发射任务的成功。可信性是仿真科学与技术的生命线, 缺乏足够可信度的仿真没有意义, 建立的仿真系统也缺少应用价值。运载火箭飞行仿真系统作为

收稿日期: 2021-11-03; 修订日期: 2021-12-17

基金项目: 战略火箭创新基金项目

作者简介: 陶久亮 (1986-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为飞行性能仿真与评估。

E-mail: taojiuliang1986@163.com

一个复杂的仿真系统，具有多专业强耦合、多飞行工况、多偏差故障模式、连续离散混合仿真等特点，如何保证仿真系统的可信度是一个亟待解决的问题。校核、验证与确认（Verification, Validation and Accreditation, VV&A）是可信度评估工作的基础，是保证运载火箭飞行仿真系统正确性和可用性的关键技术。

本文结合 VV&A 活动一般过程，从实际工程化角度，重点研究了运载火箭飞行仿真系统 VV&A 过程各阶段的具体实现过程，为其他仿真系统 VV&A 活动提供参考，具有较好的推广应用价值。

### 1 VV&A 技术简介

VV&A 分为 3 部分：校核、验证与确认<sup>[1-5]</sup>。

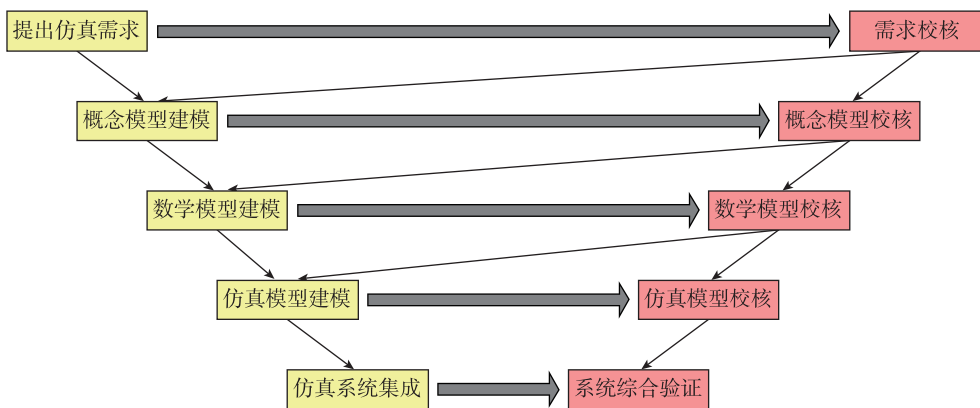


图 1 运载火箭飞行仿真系统 VV&A 工作流程

Fig. 1 Working process of launch vehicle simulation system VV&A

需求校核是指检查和评估建模需求是否符合一致性、清晰性、无二义性及逻辑上的完备性等要求，是否正确反应用户需要以及能否在仿真系统开发全过程中得到满足的过程；概念模型校核是评估概念模型所包括的各种实体、对象、算法、关系、数据以及假设条件和限制条件等是否正确和可信的过程；数学模型校核是指评估数学模型是否准确地表达了概念描述和规范的过程；仿真模型校核是在预期应用范围内以及规定的仿真精度条件下，测试和评估仿真模型的运行行为、结果是否与真实对象一致的过程；系统综合验证是将仿真模型集成形成综合仿真系统后，对不同仿真模型的校核信息作分别处理，然后进行综合，从而确定仿真系统的整体可信度。

一般地，对仿真系统的 VV&A 过程就是可信度的评估过程。仿真系统的创建过程是不断校核、

校核是确定一个模型是否准确地代表了开发者的概念描述和规范的过程；验证是从仿真应用目的出发，确定建模与仿真代表真实世界的正确程度的过程；确认是指所有仿真工程及相应的可信性评估步骤完成后，接受由各方面专家组成的权威机构对其进行验收。VV&A 的重要性已经为仿真系统用户和开发者所认识，仿真 VV&A 的研究已成为系统仿真研究和应用中的关键性技术<sup>[6]</sup>。针对仿真系统，主要开展的 VV&A 工作包括 5 个环节：仿真需求提出与校核、概念模型建模与校核、数学模型建模与校核、仿真模型建模与校核、仿真系统集成与系统综合验证。运载火箭飞行仿真 VV&A 工作流程如图 1 所示。

验证与确认评估的过程，VV&A 过程与仿真系统可信度评估是不断实现与反馈的关系，如图 2 所示。

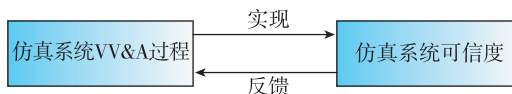


图 2 仿真系统 VV&A 与可信度的关系

Fig. 2 The relationship between VV&A and credibility of simulation system

从仿真系统构建的过程看，需求校核、概念模型校核、数学模型校核、仿真模型校核与系统综合验证都将影响最后的仿真结果，其可信性影响关系如图 3 所示。所以，基于仿真结果的评估可作为仿真系统可信度的具体度量方式，而基于 VV&A 过程分析可作为研究影响仿真系统可信度因素的方法，也是提高仿真系统可信度的方法。

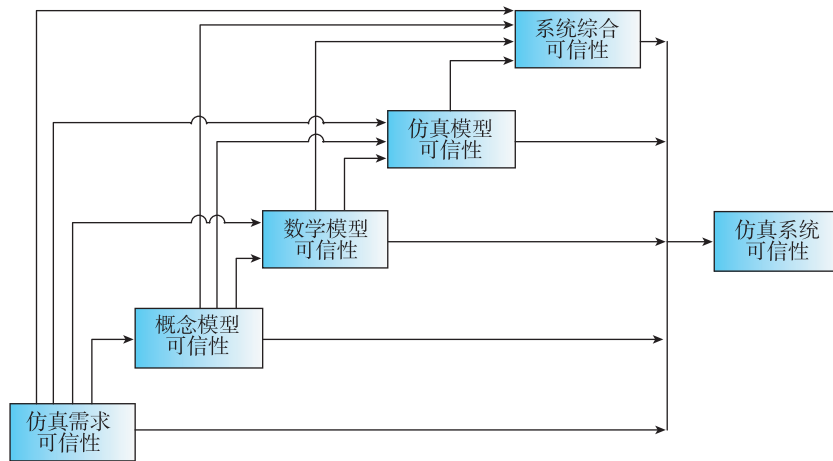


图3 基于VV&amp;A的可信性影响关系

Fig. 3 The relationship of VV&amp;A credibility affects

## 2 飞行仿真系统 VV&A 方法

运载火箭飞行仿真的目标是实现运载火箭在数字化条件下的多专业联合仿真，通过数字仿真试验对火箭系统进行全方位的系统综合验证，为总体性能评估、设计改进和故障预案制定等提供支持。运载火箭飞行仿真系统包含了弹道、控制、动力、气动等 13 个专业仿真模型。其中考虑了 200 余个故障模式，具备一定的飞行故障仿真能力，并可根据任务需求不断完善和更新火箭的故障模式。

为了得到运载火箭飞行仿真系统的可信性程度，必须对模型的组成部分以及建设阶段进行校核与验证的研究，确定运载火箭飞行仿真系统全生命周期的一整套可信性评估方法，结合航天飞行器型号设计数据、同类型商业软件仿真数据、实际飞行试验数据、地面试验数据以及专家评审等参考依据，实现建模需求、概念模型、数学模型、仿真模型、系统模型的校核与验证，完成运载火箭飞行仿真系统的可信度评估，进而充分保证运载火箭飞行仿真系统的整体可信度，为型号应用奠定基础。

### 2.1 需求校核与概念模型校核

需求校核可以确保每一项需求的内容正确并具备了所需的质量属性。概念模型验证是评估概念模型所包括的各种实体、对象、算法、关系、数据以及假设条件和限制条件等是否正确和可信的过程。对建模需求的校核和概念模型的校核指标总体上可归纳为需求的正确性、完整性、可追

溯性、清晰性、可行性。正确性是指对要仿真的系统的功能、假设、条件或使用环境等信息描述的准确性；完整性是指表达实际系统的功能、使用条件等相关内容的全面性，不缺失有关结构、元素和行为；可追溯性是指需求分析与用户的原始需求能够准确地联系对应，以及所创建的模型符合实际系统的功能意图；清晰性是指建模需求及概念模型的描述需尽可能的让人理解，表达无歧义性、无二义性；可行性是指保证需求及概念模型在仿真系统及其运行环境的已知能力以及现有技术、时间、资金等约束条件下可实现。

### 2.2 数学模型校核

数学模型用数学结构的形式来反映实际系统的行为特性，通过对系统的数学模型的研究可以揭示系统的内在运动和系统的动态性能。飞行仿真系统数学模型验证主要考核的内容有：1) 模型在建模目标、思路、结构上的清晰性；2) 模型与研究目的和内容的相关性；3) 模型的合理性与正确性；4) 模型假设、简化、结构、变量选用及参数设计的合理性；5) 模型建模信息、数学公式与模型简化的精确性。

### 2.3 仿真模型校核

基于运载火箭飞行仿真模型是参数与方程的组合，针对其特点，仿真模型验证与校准工作应当首先确保仿真模型与数学模型的一致性和完整性，仿真模型代码正确性、规范性、平衡性与互操作性，以及仿真模型解算结果相对于参考数据或专家经验的正确性与可信性，最后通过模型校

准优化模型结构与模型参数，使模型与真实系统趋向一致，从而完成仿真模型验证与校准工作。

### 2.4 系统综合验证

在实际建模过程中，基于仿真模型层次化建模特征，通常是将系统模型分解成分系统分别建模，然后集成仿真，故在此构建基于模型组织的层次化验证指标体系。基于仿真模型面向对象的特点，不同分系统或不同产品之间的仿真模型相对独立，因此，以航天飞行器（运载火箭）为顶层节点，按照分系统划分为下层节点，按照分系统内单机和各单机参数逐层往下拆解复杂的模型，提取各层模型验证评估指标，从而形成模型可信度的验证指标体系。根据层次化的指标体系可知，模型可信度是由多层次、多指标共同确定的<sup>[7]</sup>。对应此体系，相应的验证算法架构如图 4 所示。

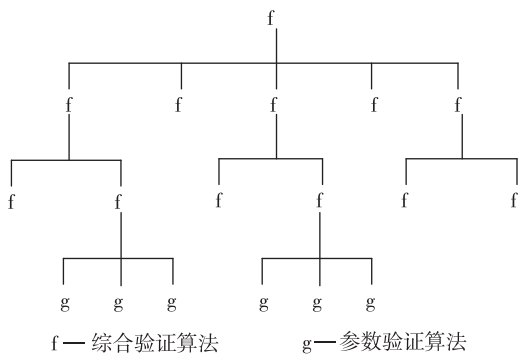


图 4 系统综合可信度评估算法架构

Fig. 4 The algorithm architecture of system comprehensive credibility evaluation

### 3 飞行仿真系统 VV&A 示例

针对某型运载火箭的飞行仿真系统，主要开展的 VV&A 工作有：

1) 针对型号某技术状态，根据型号仿真试验需求，首先进行需求校核，确定仿真系统的状态基线和对应的技术文档，完成仿真系统建设并收集仿真系统相关文档；然后请相关人员对仿真系统设计方案、实施方案和数学模型进行确认，完成概念模型验证和数学模型验证。

2) 对飞行仿真系统仿真模型进行验证，首先对仿真代码进行静态审查，然后针对型号仿真试验的具体需求，采用仿真试验的形式对仿真系统进行动态测试，在此基础上将设计数据与仿真数据进行对比分析，找到数据之间存在的差异，分析造成误差的原因，通过原因定位，针对性地改

进仿真模型，迭代验证，最终实现各项仿真结果数据精度在型号可接受范围内。

3) 按照分系统内单机和各单机参数逐层往下拆解复杂的模型，提取各层仿真模型验证评估指标，从而形成模型可信度的验证指标体系，采用定量与定性相结合验证方法，最终得到仿真系统综合可信度指标。

#### 3.1 飞行仿真系统需求校核

某型号飞行仿真系统的建模需求主要来自《某型号仿真需求》文档，文档中明确了仿真需求、现有条件、任务状态基线、仿真模型功能、偏差量设置、试验工况和试验输出要求。详细的建模需求校核结论如表 1 所示。

表 1 建模需求校核表

Tab. 1 Modeling requirements check list

序号	建模需求校核项目	校核结论	校核依据
1	仿真系统的建模状态基线是否明确	<input checked="" type="checkbox"/> 完全符合	《某型号仿真需求》
		<input type="checkbox"/> 符合	
		<input type="checkbox"/> 基本符合 <input type="checkbox"/> 不符合	
2	各项仿真试验的目的和内容是否明确	<input checked="" type="checkbox"/> 完全符合	《某型号仿真需求》
		<input type="checkbox"/> 符合	
		<input type="checkbox"/> 基本符合	
		<input type="checkbox"/> 不符合	
3	各项仿真试验的拉偏原则和故障工况是否明确	<input checked="" type="checkbox"/> 完全符合	《某型号仿真需求》
		<input type="checkbox"/> 符合	
		<input type="checkbox"/> 基本符合	
		<input type="checkbox"/> 不符合	
4	仿真试验的输出需求是否明确	<input checked="" type="checkbox"/> 完全符合	《某型号仿真需求》
		<input type="checkbox"/> 符合	
		<input type="checkbox"/> 基本符合	
		<input type="checkbox"/> 不符合	
5	对各仿真子模型的功能需求是否明确	<input type="checkbox"/> 完全符合	《某型号仿真需求》
		<input checked="" type="checkbox"/> 符合	
		<input type="checkbox"/> 基本符合	
		<input type="checkbox"/> 不符合	
6	仿真试验的计划节点是否明确	<input checked="" type="checkbox"/> 完全符合	《某型号仿真需求》
		<input type="checkbox"/> 符合	
		<input type="checkbox"/> 基本符合	
		<input type="checkbox"/> 不符合	

#### 3.2 飞行仿真系统概念模型校核

某型号飞行仿真系统的概念模型校核主要是对《某型号飞行仿真系统研发实施方案》和《某型号飞行仿真系统总体设计方案》两份文档中的概念模型相关内容进行审核。设计方案中明确了仿真系统的运行模式、仿真平台方案、模型体系

方案、现有技术基础和工作流程等，研发实施方案明确了仿真系统拟开展的仿真试验、总体设计思路和系统建设计划等内容，针对仿真需求从多个角度和层面对仿真系统的概念模型进行阐述，某型号飞行仿真系统概念模型的校核结果如表 2 所示。

表 2 概念模型校核表

Tab. 2 Conceptual model check list

序号	概念模型校核项目	校核结论	校核依据
1	仿真系统的建模需求是否被正确定义、分解和转换为概念模型	<input checked="" type="checkbox"/> 完全符合 <input type="checkbox"/> 符合 <input type="checkbox"/> 基本符合 <input type="checkbox"/> 不符合	《某型号飞行仿真系统研发实施方案》第 2 节
2	仿真系统的基本框架和体系结构是否合理	<input checked="" type="checkbox"/> 完全符合 <input type="checkbox"/> 符合 <input type="checkbox"/> 基本符合 <input type="checkbox"/> 不符合	《某型号飞行仿真系统研发实施方案》第 3 节，《某型号飞行仿真系统总体设计方案》第 4 节
3	模型体系设计能否满足各项仿真试验中模型功能的需求	<input checked="" type="checkbox"/> 完全符合 <input type="checkbox"/> 符合 <input type="checkbox"/> 基本符合 <input type="checkbox"/> 不符合	《某型号飞行仿真系统研发实施方案》第 3.3 节，《某型号飞行仿真系统总体设计方案》第 4.2 节
4	试验平台能否满足仿真试验中试验功能的需求，如参数配置、运行控制、数据存储与分析等功能	<input checked="" type="checkbox"/> 完全符合 <input type="checkbox"/> 符合 <input type="checkbox"/> 基本符合 <input type="checkbox"/> 不符合	《某型号飞行仿真系统研发实施方案》第 3.2 节，《某型号飞行仿真系统总体设计方案》第 4.1 节
5	现有技术基础是否能够完成型号仿真任务需求	<input checked="" type="checkbox"/> 完全符合 <input type="checkbox"/> 符合 <input type="checkbox"/> 基本符合 <input type="checkbox"/> 不符合	《某型号飞行仿真系统总体设计方案》第 5 节
6	模型体系的接口关系是否清晰	<input checked="" type="checkbox"/> 完全符合 <input type="checkbox"/> 符合 <input type="checkbox"/> 基本符合 <input type="checkbox"/> 不符合	《某型号飞行仿真系统研发实施方案》第 3.3 节
7	交互模型之间的接口是否具有一致性	<input checked="" type="checkbox"/> 完全符合 <input type="checkbox"/> 符合 <input type="checkbox"/> 基本符合 <input type="checkbox"/> 不符合	《某型号飞行仿真系统研发实施方案》第 3.3 节

### 3.3 飞行仿真系统数学模型校核

某型号仿真系统中的各专业数学模型均来自《某型号飞行仿真各专业数学建模方案》文档，仿真偏差量设置如产品偏差量、方法误差模型、工

具误差模型、刚晃弹系数偏差、仿真拉偏原则、故障工况设置等也在该文档中有明确描述。数学模型的详细验证结果如表 3 所示。

表 3 数学模型验证表

Tab. 3 Mathematical model check list

序号	数学模型验证项目	验证结论	验证依据
1	数学模型的来源是否明确	<input checked="" type="checkbox"/> 完全符合 <input type="checkbox"/> 符合 <input type="checkbox"/> 基本符合 <input type="checkbox"/> 不符合	型号某状态基线文档
2	数学模型是否经过相关专业设计师确认	<input checked="" type="checkbox"/> 完全符合 <input type="checkbox"/> 符合 <input type="checkbox"/> 基本符合 <input type="checkbox"/> 不符合	确认人
3	数学模型中的公式能否采用 C++ 语言进行代码实现	<input checked="" type="checkbox"/> 完全符合 <input type="checkbox"/> 符合 <input type="checkbox"/> 基本符合 <input type="checkbox"/> 不符合	确认人
4	数学模型是否能在现有条件下进行仿真求解并得到唯一的解	<input checked="" type="checkbox"/> 完全符合 <input type="checkbox"/> 符合 <input type="checkbox"/> 基本符合 <input type="checkbox"/> 不符合	确认人
5	模型参数是否完备	<input checked="" type="checkbox"/> 完全符合 <input type="checkbox"/> 符合 <input type="checkbox"/> 基本符合 <input type="checkbox"/> 不符合	型号某状态基线文档
6	随机变量的分布函数是否明确	<input checked="" type="checkbox"/> 完全符合 <input type="checkbox"/> 符合 <input type="checkbox"/> 基本符合 <input type="checkbox"/> 不符合	《某型号飞行仿真各专业数学建模方案》第 5 节
7	偏差仿真试验中偏差量的设置是否明确	<input checked="" type="checkbox"/> 完全符合 <input type="checkbox"/> 符合 <input type="checkbox"/> 基本符合 <input type="checkbox"/> 不符合	《某型号飞行仿真各专业数学建模方案》第 5 节
8	故障仿真试验中的故障模式选取是否明确	<input checked="" type="checkbox"/> 完全符合 <input type="checkbox"/> 符合 <input type="checkbox"/> 基本符合 <input type="checkbox"/> 不符合	《某型号飞行仿真各专业数学建模方案》第 6 节

### 3.4 飞行仿真系统仿真模型校核

#### 3.4.1 静态测试

对某型号飞行仿真系统的仿真模型进行代码审查，主要是对源程序进行编程规则检查，依据参考



文档审查代码实现功能与建模需求、概念模型和数学模型的一致性。在各仿真模型代码无错误地通过编译和测试之后，对模型代码进行审查，以弹道仿真模型为例，代码审查的详细内容如表 4 所示。

表 4 代码规范性检查表  
Tab. 4 Code inspection Table

代码审查单	模块名称	弹道仿真模型	模块代码	TrajDemoFunction
	版本号	_ Trajectory _ V01	提交日期	
	编码人		编码时间	
	代码审查时间			
审查项	审查内容与通过标准			结论
与设计的一致性	是否实现了需求要求的所有功能 模块接口是否符合标准	<input type="checkbox"/> 否 <input checked="" type="checkbox"/> 是		
	所用数学公式、参数量纲应与仿真输入文档严格一致	<input type="checkbox"/> 不符合 <input checked="" type="checkbox"/> 符合		
	是否存在需求设计中没有要求的内容	<input checked="" type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 是		
	把数学公式实现成计算机程序时，保证输入输出和中间结果不超出计算机数值表示范围	<input type="checkbox"/> 不符合 <input checked="" type="checkbox"/> 符合		
注释要求	每个模块注释行数必须占代码总行数的 20% 以上	<input type="checkbox"/> 不符合 <input checked="" type="checkbox"/> 符合		
	每个函数（方法），都有函数（方法）头说明函数（方法）的目的/功能、输入参数、输出参数、返回值、异常说明等	<input type="checkbox"/> 不符合 <input checked="" type="checkbox"/> 符合		
	典型算法必须有注释，说明算法的原理、数学公式、物理意义，必要时列出参考书籍及在数学模型文档中的位置	<input type="checkbox"/> 不符合 <input checked="" type="checkbox"/> 符合		
	在循环和逻辑分支的地方必须写上注释	<input type="checkbox"/> 不符合 <input checked="" type="checkbox"/> 符合		
程序结构要求	为了防止头文件被重复引用，应当用 ifndef/define/endif 结构产生预处理块	<input type="checkbox"/> 不符合 <input checked="" type="checkbox"/> 符合		
	用 #include <filename.h> 格式来引用标准库和系统库头文件	<input type="checkbox"/> 不符合 <input checked="" type="checkbox"/> 符合		
	不应包含不需要的头文件	<input type="checkbox"/> 不符合 <input checked="" type="checkbox"/> 符合		
	不存在多余的无用代码（如从未调用过的函数与变量等）	<input type="checkbox"/> 不符合 <input checked="" type="checkbox"/> 基本符合 <input checked="" type="checkbox"/> 符合		
	函数功能单一，不允许一个函数实现两个及以上的功能	<input type="checkbox"/> 不符合 <input checked="" type="checkbox"/> 符合		
	if、for、do、while、case、switch、default 等语句自占一行，且语句的执行语句部分无论多少都要加括号 {}	<input type="checkbox"/> 不符合 <input checked="" type="checkbox"/> 符合		
质量保证要求	对函数的所有参数输入进行合法性检查，如空指针、取值范围、内存越界等	<input type="checkbox"/> 不符合 <input checked="" type="checkbox"/> 符合		
	对函数的所有非参数输入进行有效性检查，如数据文件、全局变量等	<input type="checkbox"/> 不符合 <input checked="" type="checkbox"/> 符合		
	共有 405 个逻辑分支，对每个逻辑的非正常处理是否正确	<input type="checkbox"/> 否 <input checked="" type="checkbox"/> 是		
	该模块共有 443 个全局变量，是否都进行了正确初始化	<input type="checkbox"/> 否 <input checked="" type="checkbox"/> 是		
	对数组是否越界进行检查，在 C++ 编程中推荐使用容器	<input type="checkbox"/> 不符合 <input checked="" type="checkbox"/> 符合		
	不允许使用 goto 语句	<input type="checkbox"/> 不符合 <input checked="" type="checkbox"/> 符合		
	switch 的 case 语句必须由 break 终止	<input type="checkbox"/> 不符合 <input checked="" type="checkbox"/> 符合		
	必须为 switch 语句提供 default 分支用于处理异常情况	<input type="checkbox"/> 不符合 <input checked="" type="checkbox"/> 符合		
	使用括号明确表达式的操作顺序，避免使用默认优先级	<input type="checkbox"/> 不符合 <input checked="" type="checkbox"/> 符合		
	尽量使用标准库函数	<input type="checkbox"/> 不符合 <input type="checkbox"/> 基本符合 <input checked="" type="checkbox"/> 符合		
	禁止使用 “==” 和 “!=” 来对浮点数进行比较	<input type="checkbox"/> 不符合 <input checked="" type="checkbox"/> 符合		
	不允许出现可能的除零运算	<input type="checkbox"/> 不符合 <input checked="" type="checkbox"/> 符合		
审查全局变量使用的必要性，全局变量在命名上必须有明显标示，如加 “g_” 前缀	<input type="checkbox"/> 不符合 <input type="checkbox"/> 符合 <input checked="" type="checkbox"/> 未使用			

审查项	审查内容与通过标准	结论
内存	变量使用前必须初始化	<input type="checkbox"/> 不符合 <input checked="" type="checkbox"/> 符合
	内存拷贝时是否判断了长度	<input type="checkbox"/> 不符合 <input type="checkbox"/> 符合 <input checked="" type="checkbox"/> 未使用
	申请内存后是否判断了内存申请成功	<input type="checkbox"/> 不符合 <input type="checkbox"/> 符合 <input checked="" type="checkbox"/> 未使用
	申请的内存是否被释放, 尤其是在异常情况下是否释放	<input type="checkbox"/> 不符合 <input type="checkbox"/> 符合 <input checked="" type="checkbox"/> 未使用
	申请内存和释放内存应对出现	<input type="checkbox"/> 不符合 <input type="checkbox"/> 符合 <input checked="" type="checkbox"/> 未使用
	文件句柄的释放 open 对应 close	<input type="checkbox"/> 不符合 <input type="checkbox"/> 符合 <input checked="" type="checkbox"/> 未使用
	指针被 free 或 delete 后, 应被赋值为 NULL	<input type="checkbox"/> 不符合 <input checked="" type="checkbox"/> 符合 <input type="checkbox"/> 未使用
审查人员签字		
问题记录 (可附页)		

### 3.4.2 动态测试

对仿真模型进行动态测试时, 主要是考察仿真模型是否能够满足该模型的功能设计指标要求, 以及是否正确实现了数学模型的计算功能。下面以传递函数模块为例, 说明如何开展仿真模型动态测试。传递函数仿真模型动态测试主要分为功能测试和性能测试两个方面。

#### (1) 功能测试

通过加入测试输入信号 (一般为阶跃信号) 考察模块输出是否满足物理规律。功能测试记录如表 5 所示。

表 5 功能测试记录表

Tab. 5 Function test table

单元名称	传递函数模型	
标识符	Transfer. cpp	
用例名称	$\frac{s^2 + 5s + 6}{s^5 + 8s^4 + 23s^3 + 34s^2 + 26s + 8}$	
测试输入	单位阶跃信号	
期望结果	正确计算经传递函数变换后的信号	
测试结果	正确输出经传递函数变换后的信号	
测试日期	年 月 日	
测试人员		
测试项目	结论	
功能	✓	完成设计功能
接口	✓	内外部接口正确
合理输入	✓	接受合理输入
不合理输入	✓	对于不合理输入, 通过不同的返回标识错误
可执行语句	✓	160 行
分支	✓	覆盖 100%
处理错误	✓	无

#### (2) 性能测试

将传递函数模块与 Matlab/Simulink 工具中的传递函数模块进行对比分析, 考察仿真模块动态仿真偏差。

##### 1) 明确验证测试对象

##### (a) 单个连续传函模型

单个连续传递函数模型设定为五阶传递函数, 其模型为

$$G(s) = \frac{s^2 + 5s + 6}{s^5 + 8s^4 + 23s^3 + 34s^2 + 26s + 8} \quad (1)$$

##### (b) 连续传函模型串联

两个串联验证测试的连续传递函数分别设定为三阶和二阶传递函数, 其模型分别为:

##### 三阶对象模型

$$G_1(s) = \frac{s^2 + 5s + 6}{s^3 + 6s^2 + 10s + 8} \quad (2)$$

##### 二阶对象模型

$$G_2(s) = \frac{1}{s^2 + 2s + 1} \quad (3)$$

##### (c) 连续传函模型并联

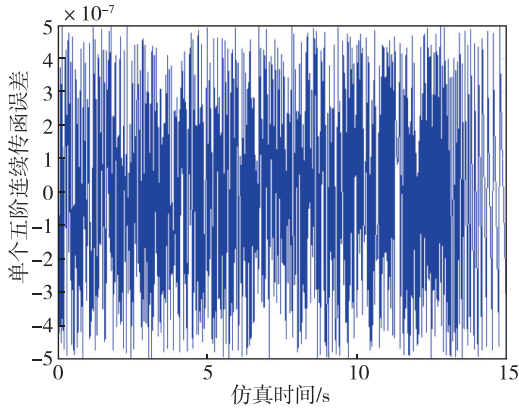
两个并联验证测试的连续传递函数分别设定为三阶和二阶传递函数, 其模型与串联模型相同。

#### 2) 验证测试结果

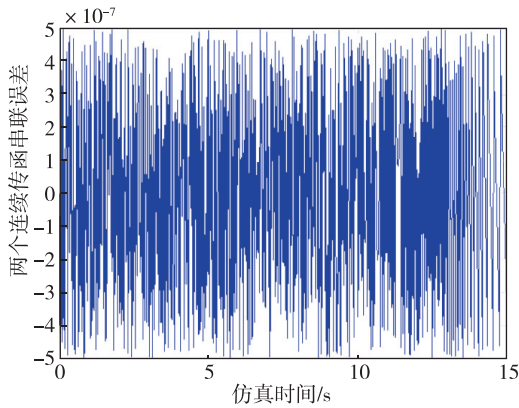
将 C++ 代码实现的连续传函模块的输出与同条件下 Matlab/Simulink 连续传函模块的输出结果作差计算得到两者的误差值, 然后作出该误差与仿真时间的二维图, 如图 5 所示。可以看出, 各个仿真测试结果与同条件下的 Matlab/Simulink 模型仿真结果之间的误差均达到了  $10^{-7}$  数量级, 表明算法符合要求, 验证通过。

### 3.5 飞行仿真系统综合验证

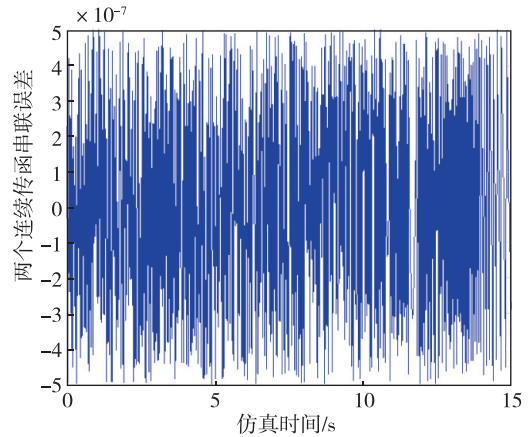
基于仿真模型验证结果，采用层次分析法，可



(a) 单个五阶模型对比误差



(b) 三阶和二阶模型串联对比误差



(c) 两个传函并联对比误差

图 5 仿真模型结果与 Matlab/Simulink 对比误差

Fig. 5 Comparison discrepancy between simulation results and Matlab/Simulink results

以对仿真系统进行可信度评估。以某型号飞行仿真系统为例，该系统由 6 个仿真模型组成，各分系统的验证结果为： $q(u_1)$  为 0.820 1， $q(u_2)$  为 0.800 3， $q(u_3)$  为 0.780 6， $q(u_4)$  为 0.9， $q(u_5)$  为 0.85， $q(u_6)$  为 0.750 8。

按照层次分析法，系统验证过程为：

(1) 构造两两比较判断矩阵

为了使得所构造的判断矩阵满足一致性条件，采用指数标度法构造判断矩阵，如表 6 所示。

表 6 指数标度及其具体含义

Tab. 6 Exponential scale and its specific meaning

参数 K	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
元素对比重要程度	相同	稍微重要		明显重要			强烈重要			极其重要
指数标度法	1	1.276	1.628	2.080	2.654	3.387	4.327	5.515	7.037	9

由此得到判断矩阵如表 7 所示。

表 7 判断矩阵  
Tab. 7 Judgment matrix

A	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	1	1.277	0.783	1.63	0.783	1.277
C2	0.783	1	0.783	1.63	0.783	1.277
C3	1.277	1.277	1	1.277	1.63	1.63
C4	0.613	0.613	0.783	1	0.783	1.277
C5	1.277	1.277	0.613	1.277	1	1.63
C6	0.783	0.783	0.613	0.783	0.613	1

(2) 计算各层次影响因素的权重，并进行一

致性检验

由和法计算得其最大特征根为 6.072 7，其对应的特征向量为  $[0.426 2, 0.393 1, 0.524 8, 0.322 6, 0.445 2, 0.293 5]^T$ ，归一化后的特征向量为  $[0.177 2, 0.163 4, 0.218 2, 0.134 1, 0.185 1, 0.122 0]^T$ 。

对比较矩阵进行一致性检验，由  $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$

得  $CI = \frac{6.0727 - 6}{6 - 1} = 0.0145$ ，所以  $RI = 1.24$ ，从

而  $CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0.0145}{1.24} = 0.0117 < 0.1$ ，可知判断矩



阵具有良好的一致性。

(3) 计算总体可信度

代入下式得到

$$Q(A, B) = \frac{n}{k+L-n} \sum_{i=1}^n \beta_i q(\mu_i) = \frac{6}{6+6-6} \times (0.1772 \times 0.8201 + 0.1634 \times 0.8003 + 0.2182 \times 0.7806 + 0.1341 \times 0.9 + 0.1851 \times 0.85 + 0.1220 \times 0.7508) = 0.816.$$

#### 4 结论

本文提出了一种运载火箭飞行仿真系统 VV&A 的流程与方法,并给出了具体的应用示例,可供飞行仿真系统建设相关研发人员参考,提高 VV&A 方法对运载火箭飞行仿真系统进行可信性研究的效率。较目前看来,研究成果仍有改进空间,还有内容值得研究,例如各种先进非线性、智能化处理方法(如神经网络、模糊推理、人工智能、专家系统等<sup>[8]</sup>) 在复杂仿真系统建模与验模及可信度评估中的应用等。本文的研究内容也可以为其他仿真系统 VV&A 活动提供参考,具有较好的推广应用价值。

#### 参考文献

- [1] 焦鹏. 导弹制导仿真系统 VV&A 理论和方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.
- [2] Pace D K. Modeling and simulation verification and validation challenges[J]. Johns Hopkins APL Technical Digest, 2008, 25(2):163-172.
- [3] 黄柯棣, 查亚兵. 系统仿真可信性研究综述[J]. 系统仿真学报, 1997(1):7-12.
- [4] 王子才, 张冰, 杨明. 仿真系统的校核、验证与验收(VV&A): 现状与未来[J]. 系统仿真学报, 1999(5): 321-325+340.
- [5] 徐学文. 美国校核、验证与确认实践指南[M]. 北京: 海潮出版社, 2001.
- [6] 廖瑛, 邓方林, 梁加红, 等. 系统建模与仿真的校核、验证与确认(VV&A)技术[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2006.
- [7] 王曙钊, 刘兴堂, 吴晓燕, 等. 关于 VV&A 基层指标度量模型的研究[J]. 系统仿真学报, 2007(19): 4367-4370.
- [8] 樊浩, 黄树彩, 周延延. 导弹武器仿真系统 VV&A 方法与实现过程研究[J]. 现代防御技术, 2010, 38(1): 121-127.

引用格式: 陶久亮, 于一帆, 王晨, 等. 火箭飞行仿真系统 VV&A 应用技术研究[J]. 宇航总体技术, 2022, 6(1): 22-30.

Citation: Tao J L, Yu Y F, Wang C, et al. Research on VV&A application technology of launch vehicle flight simulation system[J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2022, 6(1): 22-30.