

# 有限元仿真模型 V&V 技术研究

喻强, 李焕, 阮思

(北京安怀信科技股份有限公司, 北京 100024)

**摘要:** 仿真模型建模过程存在多种误差输入, 将引起仿真预测结果的不精确性。采用仿真模型 V&V (Verification and Validation, 验证与确认) 技术, 进行仿真模型的建模误差分析与控制。利用物理试验数据进行仿真模型的精度评估, 基于模型修正算法进行仿真建模参数的自动修正, 提升仿真和试验结果的一致性, 帮助设计师基于精确的仿真模型进行产品的虚拟性能预示, 提升仿真技术在产品研制流程中的地位和作用。阐述了模型 V&V 的概念和流程, 对模型 V&V 的关键技术和原理进行了详细论述, 以 NASA Rotor37 转子验模为例进行了 V&V 案例说明。

**关键词:** 一致性; 验证; 确认; 精度; 修正

**中图分类号:** TB126

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2096-4080 (2022) 01-0038-06

## The Finite Element Analysis Model V&V Method Research

YU Qiang, LI Huan, RUAN Si

(Anwise Technology Co., Ltd, Beijing 100024, China)

**Abstract:** There are multiple error inputs in simulation and modeling process, which will cause inaccuracy in the simulation prediction result. The simulation model V&V (Verification and Validation) techniques is used to conduct the simulation and modeling error analysis and control. By Using the physical test data, Engineers can evaluate the accuracy of the simulation model, automatically update the simulation and modeling parameters based on the model updating algorithm, improve the consistency between the simulation and the test results. This can, help the designers to conduct product virtual performance prediction based on the accurate simulation model, and improve the of the simulation techniques in the product development process. This paper presents the concept and process of model V & V, discusses the key techniques and principles of model V & V in detail, and illustrates how to do model validation with the example of NASA Rotor37.

**Key words:** Consistency; Verification; Validation; Accuracy; Updating

### 0 引言

仿真技术是计算机技术和工程分析技术相结合形成的多学科交叉技术。随着计算机技术及通用 CAE 软件的发展, 仿真技术已融入飞行器研发过程, 改变了传统的飞行器研发流程, 实现以仿真

驱动的产品研发, 以“虚拟样机”替代“物理样机”, 在产品研发的方案设计阶段发现潜在的问题, 寻找最佳的设计方案<sup>[1]</sup>。近年来, 数字孪生技术进一步拓展了仿真的价值, 从产品研发延伸到产品制造、运行和维修等整个生命周期, 方便工程师在特有的工作环境中研究产品性能。通过在数字环境中

收稿日期: 2021-11-03; 修订日期: 2022-01-18

基金项目: 战略火箭创新基金项目

作者简介: 喻强 (1982-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为仿真模型验证和确认、多学科优化。

E-mail: scott.yu@anwiseglobal.com

镜像物理产品系统，工程师可以预测潜在的性能和维护问题，并在问题发生之前解决它们。数字孪生体所收集的实时、真实信息，还可用于加速未来设计迭代，实现持续的产品改进。

因此，随着仿真技术的深入应用，对仿真计算结果的可信度提出了更高的要求，仿真分析结果可信度的研究已经成为仿真领域中非常重要的课题。目前，通常采用模型 V&V (Verification & Validation, 验证与确认) 技术进行仿真模型的可信度评估。该技术起源于美国，通过采用标准的 V&V 流程、理论和方法，进行仿真建模的误差分析与控制，利用修正算法进行仿真建模不准确的参数进行修正，提升仿真模型的置信度<sup>[2]</sup>。

### 1 仿真模型 V&V 验证的基本活动图

V&V 技术是一种科学系统的方法论，通过科学的方法、标准的流程、专业的算法对模型进行验证和确认，不断为模型产生证明，并据此建立模型的可信度。

国内对 V&V 的定义和区别一直在各领域不断发展。早些年标准化程度比较低，定义和术语比较混乱，中文有多种翻译。如针对 verification, validation and accreditation (VV&A) 译为“校核、验证与确认”“校核、验证与验收”“验证、确认与认证”等<sup>[3-4]</sup>，这种情况仍在继续。近几年，

随着对仿真技术 VV&A 定义和用法的深入理解，逐渐变得标准化，使得交流/通信变得更加高效和精确，基本上形成两大派别<sup>[5-6]</sup>：仿真系统 VV&A (校核、验证与确认) 和数值仿真 V&V (验证与确认)。

1) 仿真系统 VV&A。在以确定性过程为核心的仿真系统领域，verification, validation and accreditation (VV&A) 被译为校核、验证和确认。

2) 数值仿真 V&V。在以微分方程及其数值求解过程为核心的数值仿真领域，verification, validation (V&V) 被译为验证、确认。该定义得到了中国力学大会、中国核工程物理研究院等学术机构研究人员的认同和采用。

美国机械工程师协会发布的计算固体力学验证和确认指南《Guide for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics, V&V 10-2006》，对 V&V 的基本内涵做了如下定义<sup>[2]</sup>：

1) Verification (验证)：确定计算模型精确表示了其潜在的数学模型及解的过程，其关注的是数学模型在软件实现过程中的误差识别与消除。

2) Validation (确认)：从模型的预期用途角度出发，确定模型多大程度的精确表示了真实世界的过程，通过对比计算模型的仿真输出和试验数据，量化模型的精度。

典型的模型 V&V 活动流程<sup>[7]</sup>如图 1 所示。

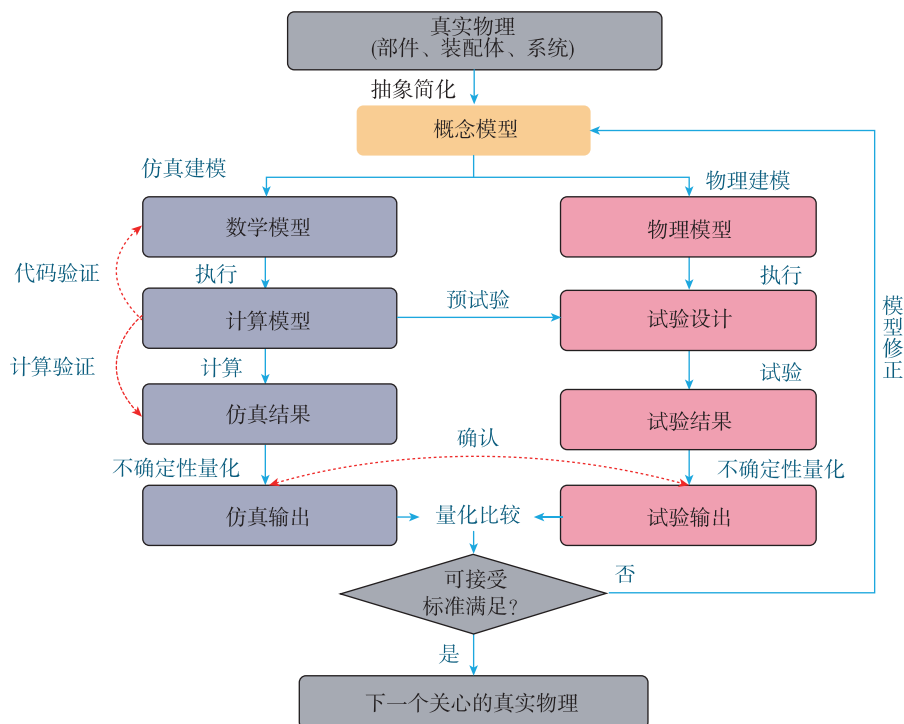


图 1 ASME 标准中典型的验证和确认活动图

Fig. 1 Typical workflow of Verification and Validation in ASME standard

在验证和确认活动图的左边建模活动中, 仿真人员根据真实物理对象建立概念模型, 再在概念模型的基础上通过程序设计建立计算模型, 并开展验证工作。

在验证和确认活动图右侧分支的前两个活动中, 确认试验通过物理建模活动构建, 并被设计为实施活动的一部分。通过实施确认试验, 得到用于量化仿真模型精度的数据。

利用确认物理试验数据, 开展仿真模型和试验模型的对比, 量化仿真模型的精度, 并判断其是否满足要求。如果不满足要求, 则需要对模型进行修正, 直至精度满足要求, 再进入下一个层级仿真模型的验证和确认研究。

## 2 仿真模型 V&V 验证的关键技术

基于模型验证和确认的方法及理论, 利用试验数据量化仿真模型的误差, 并且可以利用模型修正算法进行仿真模型参数的自动修正, 提升仿真模型的精度。针对实际型号产品的仿真模型(例如结构力学模型、传热模型、流体力学模型)验证, 可以按照如图 2 所示的流程进行 V&V 验证。

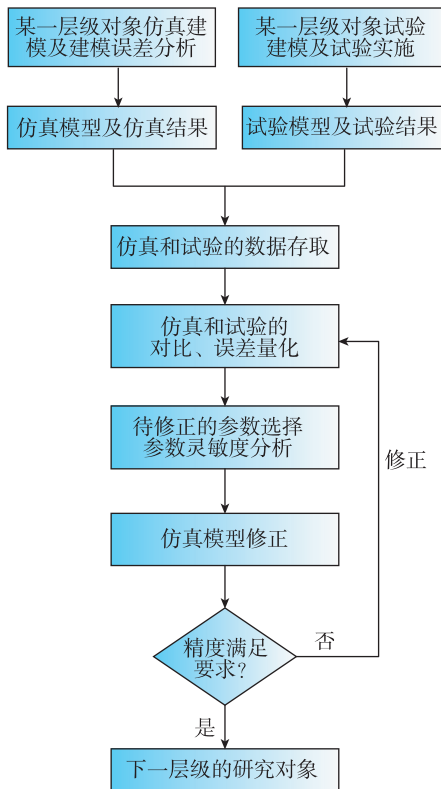


图 2 模型 V&V 的工程应用流程

Fig. 2 Workflow of model V&V in application

### 2.1 网格离散误差分析

基于 GCI<sup>[8]</sup> (Grid Converge Index, 网格收敛因子) 或最小二乘法等方法, 进行网格离散误差分析, 得到精度阶、外推精确解等指标, 并评估网格离散误差。细化网格数值解的网格收敛指标被定义为

$$GCI = \frac{F_s}{r^p - 1} \left| \frac{f_2 - f_1}{f_1} \right| \quad (1)$$

式中,  $p$  为精度阶,  $f_1$  为细网格解,  $f_2$  为粗网格解,  $r = \frac{h_2}{h_1}$ ,  $h_1$  为细网格平均网格尺度,  $h_2$  为粗网格平均网格尺度,  $F_s$  为安全系数。

最小二乘法就是网格收敛指标的一个变体, 局部计算观测精度阶常常会大大偏离离散格式的形式精度阶, 导致这种偏离的原因有很多, 包括离散解未渐近、输运自其他区域的误差(尤其是双曲线问题)、迭代误差、舍入误差、将解插入常用网格和网格细化的不均匀性等。

由广义理查德森外推法可得出级数展开, 对于常规网格级数  $k$ , 可以写为

$$f_k = \bar{f} + g_p h_k^{\hat{p}} \quad (2)$$

在该方法中, 该函数进行了最小化

$$S(\bar{f}, g_p, \hat{p}) = \left\{ \sum_{k=1}^{NG} [f_k - (\bar{f} + g_p h_k^{\hat{p}})]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

式中,  $k$  为网格级,  $NG$  为网格级总数 ( $NG > 3$ )。

这可以通过基于  $\bar{f}$ ,  $g_p$ ,  $\hat{p}$  将  $S$  的导数设置为零来实现, 从而形成以下表达式

$$\bar{f} = \frac{\sum_{k=1}^{NG} f_k - g_p \sum_{k=1}^{NG} h_k^{\hat{p}}}{NG} \quad (4)$$

$$g_p = \frac{NG \sum_{k=1}^{NG} f_k h_k^{\hat{p}} - \sum_{k=1}^{NG} f_k \sum_{k=1}^{NG} h_k^{\hat{p}}}{NG \sum_{k=1}^{NG} h_k^{2\hat{p}} - \sum_{k=1}^{NG} h_k^{\hat{p}} \sum_{k=1}^{NG} h_k^{\hat{p}}} \quad (5)$$

$$\sum_{k=1}^{NG} f_k h_k^{\hat{p}} \ln h_k - \bar{f} \sum_{k=1}^{NG} h_k^{\hat{p}} \ln h_k - g_p \sum_{k=1}^{NG} h_k^{2\hat{p}} \ln h_k = 0 \quad (6)$$

通过迭代法求解上述方程中的  $\hat{p}$ 。最小二乘法的主要缺点在于它要求 4 个或 4 个以上系统细化网格上的解。尽管原方法实际上将不确定度估值用到外推值  $\bar{f}$  中, 但随后的研究均通过求解得到的精度阶, 将不确定度估值应用于细网格解中。

### 2.2 仿真和试验的一致性分析

以对标试验数据、标模算例、解析解等标准数据为基准, 基于多种对比分析方法, 实现计算

结果与标准数据定量对比, 量化误差结果, 评估数值模拟的精度, 计算结果与标准数据的对比与精度评估方法可以实现单值点、曲线、全域特征点的综合误差量化。单值点数据的误差算法包括相对误差法, 曲线数据误差量化的方法包括 Theil 不一致系数法、 $R$  方、灰色关联度法等。

还可以采用不确定性分析的误差量化方法进行仿真和试验的一致性对比分析, 算法包括面积指标法。面积度量法是对程序输出量与试验响应量之间的统计分布的差进行量化。

设  $F_{x_i}^s(\cdot)$  是程序输出量在可控参数  $x = x_i$  处的累积概率分布,  $F_{x_i}^e(\cdot)$  是试验响应量在  $x = x_i$  处的经验累积概率分布, 那么面积尺度是

$$d(F_{x_i}^s, F_{x_i}^e) = \int_{-\infty}^{+\infty} |F_{x_i}^s(x) - F_{x_i}^e(x)| dx \quad (7)$$

面积尺度可以用图 3 来表示,  $d(F_{x_i}^s, F_{x_i}^e)$  就是斜线区域所占的面积。

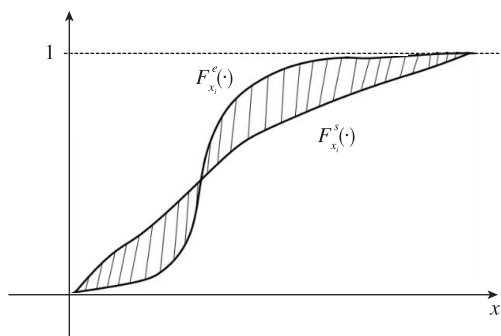


图 3 面积度量法的误差评估

Fig. 3 Area metric method in error evaluation

### 2.3 仿真模型参数灵敏度分析

进行仿真参数灵敏度分析, 对仿真模型的参数进行研究。计算参数的敏感度因子, 判断参数对产品性能的影响大小, 为后续的模式修正提供指导。通过开展仿真参数灵敏度分析, 研究参数对性能结果的影响程度, 并进行参数灵敏度排序。灵敏度分析是参数降维的重要环节, 准确的灵敏度分析有助于选择和确定仿真模型的待修正参数, 也有利于提高模型修正收敛速度和修正精度<sup>[9]</sup>。

参数灵敏度分析之前, 需要通过 DOE (Design of Experiment, 试验设计) 方法, 进行参数采样, 采样算法包括: 蒙特卡洛法、拉丁超立方、中心复合法等。参数采样时, 要保证参数采样遍历参数分布空间, 并且保证采样的均匀性。执行

参数灵敏度分析后, 按照输出参数对响应量的影响大小, 绘制灵敏度排序图。

### 2.4 仿真模型参数自动修正

完成仿真和试验结果的一致性对比分析, 如果二者的误差不满足精度要求, 可以选择模型修正算法, 基于物理试验数据, 自动对仿真模型进行参数修正。通过修正算法计算仿真与试验值偏差最小时的仿真模型输入量, 最终给出满足精度要求的仿真模型输入参数取值<sup>[10]</sup>。模型修正算法的分类包括:

- 1) 全局优化算法: 在全局中找到近似最优解, 不依赖初始值, 一般需要较多的迭代步数, 故速度较慢。
- 2) 局部优化算法: 在校准优化开始之前, 对函数的输入参数进行赋值, 利用局部优化算法进行分析后, 其分析过程会围绕输入参数的初始值附近进行搜索, 速度较快。
- 3) 组合优化算法: 包括全局优化与局部优化算法的组合。

## 3 NASA Rotor37 转子模型验证案例

采用北京安怀信科技股份有限公司研发的仿真模型验模工具软件 SimV&Ver, 选取经典 Rotor37 转子模型进行 V&V 验模分析, 开展模型的参数自动修正, 提升仿真模型的精度。

### 3.1 模型说明

NASA Rotor37 跨声速压气机转子以其优良的叶栅基元级结构设计、气动性能设计以及丰富的实验数据而被广泛地用于各种 CFD 仿真验证。本案例 NASA Rotor37 转子为研究对象, 采用 SimV&Ver 验模工具进行了 V&V 验模。Rotor37 单通道流道几何如图 4 所示。

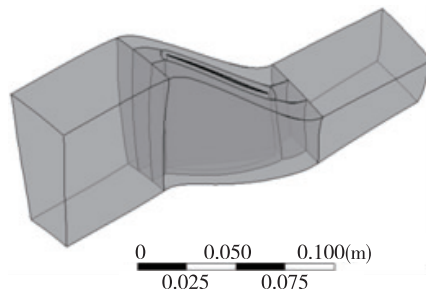


图 4 NASA Rotor37 单通道流道几何模型

Fig. 4 Single flow channel geometry of NASA Rotor37

采用流体仿真软件CFX建立NASA Rotor37的CFD流体仿真模型,如图5所示。

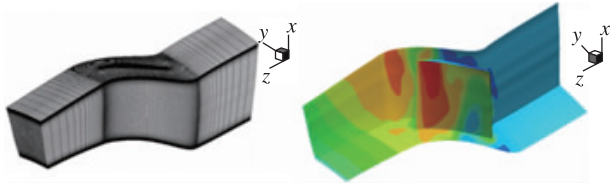


图5 NASA Rotor37 CFD仿真模型

Fig. 5 CFD simulation model of NASA Rotor37

建立仿真分析模型,提取仿真结果,如效率、流量、压比,并进行仿真和试验结果的对比,如表1所示。

表1 仿真和试验结果对比误差

Tab. 1 The error between simulation and experiment

响应量	仿真结果	试验结果	仿真和试验的误差/%
效率	0.78	0.844	-7.6
流量/(kg/s)	19	20.9	-9.1
压比	1.9	1.79	6.1

### 3.2 模型修正结果

针对Rotor37转子的仿真模型,通过试算与流动机理分析,将效率作为响应量,采用SimV & Ver仿真验模V&V工具进行验模分析。

初步仿真分析表明,来流中的水蒸气含量、来流湍流度、机匣壁面粗糙度、机匣壁面换热系数、轮毂壁面换热系数分别会对计算出的性能产生影响。因此,选取上述参数作为输入参数,进行V&V研究分析。

经过参数灵敏度分析,辨识出对目标性能的重要影响参数。所考察的5种输入参数中,如图6所示来流中的水蒸气含量影响最为敏感,选取为下一步修正的主要参数。利用模型修正算法,进行参数的自动修正,如图7所示仿真模型的效率的误差从7.6%下降到小于1%。

## 4 结论

利用仿真模型V&V验证与确认技术,进行仿真模型的建模误差分析。通过仿真模型参数灵敏度分析识别仿真模型参数的重要度,为模型修正变量的选择提供参考。通过模型修正技术,进行仿真模型参数的自动修正,提升仿真和试验结果

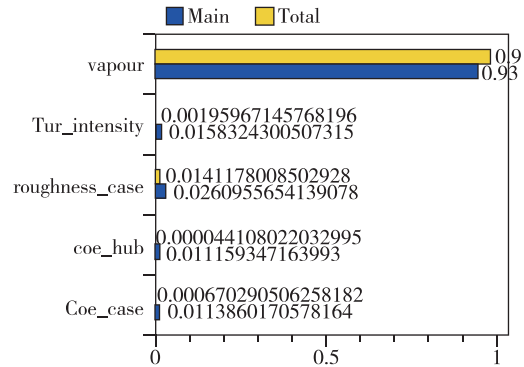


图6 参数灵敏度排序图

Fig. 6 Parameter sensitivity ranking diagram

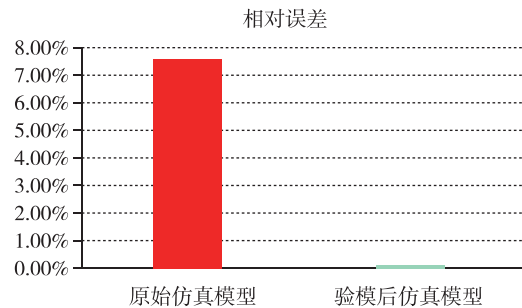


图7 修正前后仿真模型的误差对比

Fig. 7 The error comparison between initial model and updated model

的一致性。仿真模型V&V技术,可用于流体力学、传热、结构力学、0-1D系统仿真等专业的仿真模型的精度验证,帮助仿真人员总结仿真建模的知识并完善企业仿真建模规范,逐步建立企业的高精度仿真模型库。

### 参考文献

- [1] 张令弥.计算仿真与模型确认及在结构环境与强度中的应用[J].强度与环境,2002,29(2):42-47.
- [2] Kumar M, ASME. Guide for verification and validation in computational solid mechanics [R]. ASME V&V 10-2006,2006.
- [3] 伞冶,胡安斌.飞行仿真系统的确认、验证和认证研究[J].系统仿真学报,2002,14(4):432-435+461.
- [4] 郭丹,谢文昊,张克,等.飞航导弹攻防对抗仿真系统的模型构成与VV&A研究[J].战术导弹技术,2007(1):83-88+94.
- [5] 焦鹏.导弹制导仿真系统VV&A理论和方法研究[D].长沙:国防科技大学,2010.
- [6] 孙勇成.M&S的相关VV&A技术研究[D].南京:南京理工大学,2010.
- [7] Oberkampf W L, Roy C J. Verification and validation

- in scientific computing: model validation fundamentals[M]. Cambridge University Press, 2010.
- [ 8 ] American A N. An illustration of the concepts of verification and validation in computational solid mechanics[R]. ASME V&V 10.1-2012, 2012.
- [ 9 ] 梁霄,王瑞利. 爆轰流体力学模型敏感度分析与模型确认[J]. 物理学报, 2017, 66(11): 270-279.
- [10] 王瑞利,梁霄,喻强. 流体力学仿真软件可信度评估与预测能力[J]. 计算机辅助工程, 2017, 26(06): 1-8.

**引用格式:** 喻强,李焕,阮思. 有限元仿真模型 V&V 技术研究[J]. 宇航总体技术, 2022, 6(1): 38-43.

**Citation:** Yu Q, Li H, Ruan S. The finite element analysis model V&V method research[J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2022, 6(1): 38-43.