

# 计算流体力学验证与确认研究进展

陈江涛<sup>1</sup> 肖 维<sup>1</sup> 赵 炜<sup>1</sup> 张培红<sup>1</sup> 杨福军<sup>1</sup> 金 韬<sup>1</sup> 郭勇颜<sup>1</sup>  
吴晓军<sup>1,\*</sup> 陈坚强<sup>1,†</sup> 王瑞利<sup>2</sup> 李 立<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 中国空气动力研究与发展中心, 四川绵阳 621000

<sup>2</sup> 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094

<sup>3</sup> 航空工业西安航空计算技术研究所, 西安 710000

**摘 要** 计算流体力学 (CFD) 在重大工程领域发挥了日益重要的作用, 可信度是制约其进一步大规模工程应用的关键因素. 国内外普遍认同验证与确认是 CFD 可信度评价和保证的必经途径. 通过系统的验证与确认, 可以有效识别代码中潜在的编程错误, 保证数值求解的可靠性, 客观评价模型在预期用途内的适用性, 在必要时提高模型的预测能力. 本文围绕着什么是验证与确认, 怎么做验证与确认这两个核心问题, 从基本概念、实施流程、主要方法、标模试验和平台工具等角度介绍了国内外在 CFD 验证与确认领域的研究进展, 重点对误差估计和不确定度量化方法展开介绍. 文章最后对现阶段验证与确认研究解决实际工程问题的不足进行了评述和总结, 对未来重点研究方向进行了展望.

**关键词** 验证与确认, 误差估计, 不确定度量化, 标模试验

中图分类号: O355 文献标识码: A DOI: [10.6052/1000-0992-23-012](https://doi.org/10.6052/1000-0992-23-012)

收稿日期: 2023-03-16; 录用日期: 2023-06-05; 在线出版日期: 2023-06-06

\* E-mail: [huang7766@sina.com](mailto:huang7766@sina.com)

† E-mail: [chenjq@cardc.cn](mailto:chenjq@cardc.cn)

引用方式: 陈江涛, 肖维, 赵炜, 张培红, 杨福军, 金韬, 郭勇颜, 吴晓军, 陈坚强, 王瑞利, 李立. 计算流体力学验证与确认研究进展. 力学进展, 2023, 53(3): 626-660

Chen J T, Xiao W, Zhao W, Zhang P H, Yang F J, Jin T, Guo Y Y, Wu X J, Chen J Q, Wang R L, Li L. Advances in verification and validation in computational fluid dynamics. *Advances in Mechanics*, 2023, 53(3): 626-660

© 2023 《力学进展》版权所有

## 1 引言

随着数理模型、数值算法、网格技术、高性能计算机等学科的持续进步, 计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 在航空航天、能源动力、交通运输等国家重大工程领域发挥了日益重要的作用, 已成为装备数字工程关键性、基础性的支撑工具. NASA 发布的 CFD 2030 愿景研究指出, CFD 助推飞行器设计传统模式的变革: 数值仿真可以预测飞行器全包线气动性能, 大幅提升复杂飞行器设计能力, 显著缩短研发周期 (Slotnick et al. 2014). 与此同时, CFD 的可信度备受关注. 高可信度的数值仿真能力, 已成为科技强国核心竞争力的重要标志.

CFD 的基本策略是利用计算机和数值算法来求解流体力学控制方程, 获得关键流场信息. 从实际问题中抽象出来的流体力学控制方程是高度复杂的非线性偏微分方程组, 目前对其解析解的数学理论研究并不充分. 同时, 由于实际物理问题本身的复杂性, 在建模和模拟中不可避免地引入一定的假设和简化. 这也导致 CFD 中存在不可忽视的误差和不确定度, 可信度存疑. 图 1 是第三届 AIAA 高升力预测会议的计算结果汇总 (Rumsey et al. 2019). 可以清楚看到不同软件计算结果散布很大, 特别是在接近失速的大攻角附近. 这其中有不同湍流模型、数值格式、计算网格、初始条件等因素导致的差异. 但即使使用名义上一致的模型和方法, 不同软件的实现细节仍然存在差异, 甚至有的软件存在隐藏的 bug, 计算结果还可能存在差异. CFD 模拟的误差和不确定度给工业部门使用带来很大的困扰. 因此, 为控制工程预测和决策的风险, 对 CFD 可信度进行综合分析和研判非常重要. 目前, 对于数值仿真可信度评价和提升, 国内外公认的必经策略是系统、科学、客观的验证和确认 (verification and validation, V&V), 其核心工作是量化数值仿真中的误差和不确定度. 验证与确认成为工业软件大规模工程应用前必须要完成的工作.

目前, 美国航空航天协会 (AIAA)、美国机械工程师协会 (ASME)、美国航空航天局 (NASA) 和中国空气动力研究与发展中心等研究机构都把验证与确认作为数值仿真领域的重要发展方向. NASA 在《集成的、多尺度材料和结构建模/仿真 2040 年愿景研究公告》中规划了九个关键领域, 其中包括验证与确认、决策制定和不确定度量化两个相关领域 (Liu et al. 2018). NASA CFD 2030 愿景指出误差和不确定度的综合管理是 CFD 应具备六项关键能力之一 (Slotnick et al. 2014). ASME 成立了计算固体力学、计算流体力学和传热学等多个技术委员会, 专门制定验证与确认和不确定度量化方面的标准规范. 美国国家科学院国家研究委员会 (national research council, NRC) 制定了验证的三项核心原则和确认的六项核心准则 (NRC 2012), 并给出了验证与确认的若干最佳实践建议. 美国国防部的计算研究和工程采办工具环境 (CREATE) 遵循这些核心原则, 给出了验证与确认的核心实践做法, 并由单独的质量保证团队进行测试. 中国空气动力研究与发展中心在国家数值风洞工程中, 专门设立验证与确认系统, 建成国内首个完备的 CFD 验证与确认体系 (图 2), 囊括了标准、方法、标模数据和平台工具 (陈坚强 2021, 赵炜等 2020). 在学术界, 验证与确认和不确定度量化也成为研究的热点, 出版了 *Journal of Verification, Validation and Uncertainty Quantification* 和 *International Journal for Uncertainty Quantification* 等专业期刊介绍最新研究进展.

本文从 CFD 可信度评价的迫切需求出发, 通过概念内涵、流程、方法、标模数据、工具平

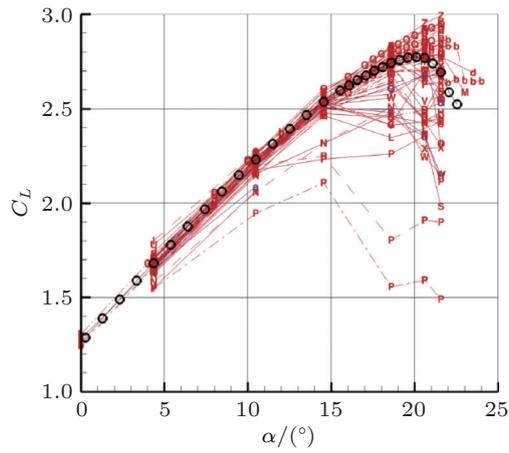


图 1

第三届 AIAA 高升力预测会议计算结果汇总 (Rumsey et al. 2019)

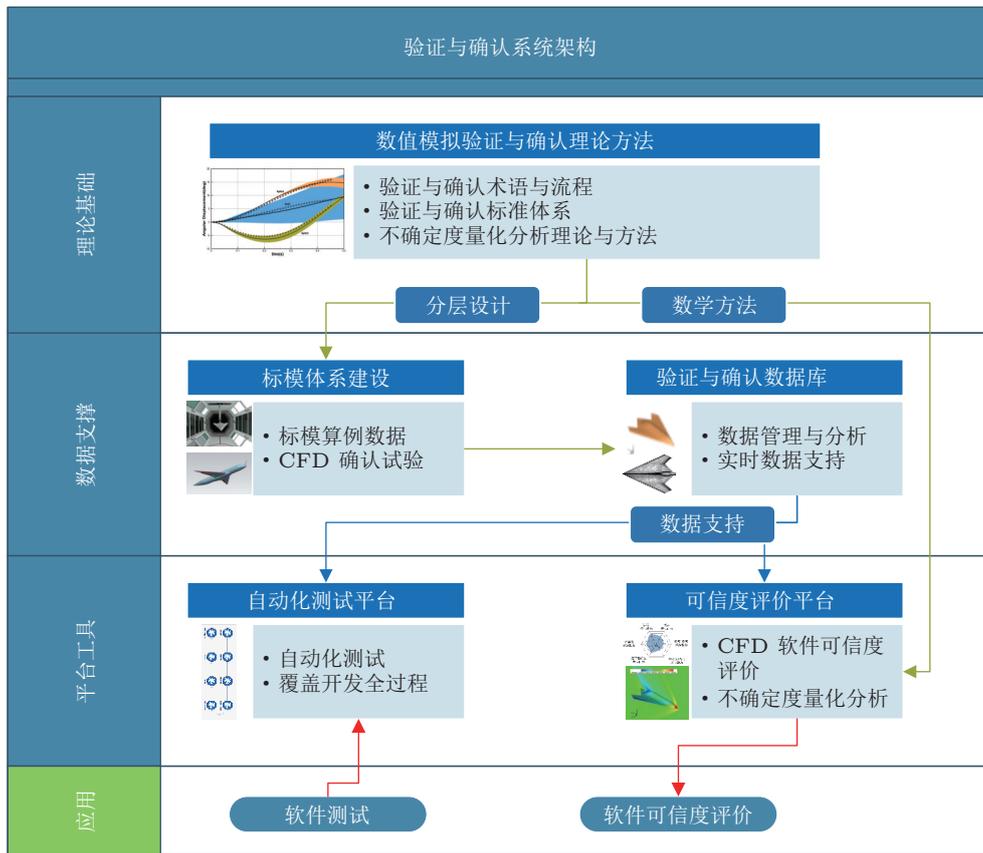


图 2

国家数值风洞工程验证与确认系统架构

台和验证与确认研讨会等方面详细介绍了国内外在 CFD 验证与确认领域的研究进展, 并对其中存在的主要差距进行了分析.

## 2 验证与确认的概念内涵

验证与确认的基本概念由美国计算机模拟协会 (SCS) 于 1979 年首次提出 (Schlesinger 1979). 此后电器与电子工程师协会 IEEE (1984)、AIAA (1998)、ASME (2006, 2009, 2012, 2019)、NASA (2016a)、美国国防部 DoD (1994, 1996, 1997, 2008) 等组织也从自身角度出发对验证与确认的哲学内涵进行阐述. 但即便到现在, 各个领域对验证与确认基本概念的认识也没有完全统一, 对验证与确认、误差与不确定度等核心术语的内涵认知仍然存在分歧.

在众多的术语阐述中, AIAA 发布的 AIAA-G-077-1998 指南 (AIAA 1998), ASME 针对计算固体力学发布的 ASME V&V 10-2006 指南 (ASME 2006) 及后续发展的 ASME V&V 10-2019 标准 (ASME 2019), 针对计算流体力学和传热学发布的 ASME V&V 20-2009 标准 (ASME 2009), 都与数值仿真密切相关, 更具借鉴意义. 其中对于验证和确认两个术语, 这几份文件的释义虽然措辞上有区别, 但内涵基本一致. 通俗意义上讲, 验证指是否正确地求解了方程, 确认指是否求解了正确的方程 (Blottner 1990), 但是在误差和不确定度等其他关键术语上还存在明显分歧.

在国家数值风洞工程支持下, 中国空气动力研究与发展中心联合行业内主要研究机构、高校和工业部门组织开展了多轮针对验证与确认术语释义的专门研讨, 在借鉴国外术语释义的基础上提出了 CFD 验证与确认术语, 统一定义达成共识. 其中关键术语的定义如下:

(1) 模型: 流体系统或过程的物理、数学或其他的逻辑表述, 主要包括概念模型、数学模型和计算模型.

(2) 概念模型: 对关注的流体系统或过程的假设和描述. 概念模型是建立数学模型和开展确认试验的基础, 典型的流体力学概念模型包括连续介质假设、牛顿流体假设、无黏假设等.

(3) 数学模型: 概念模型的数学表述. 主要包括流动控制方程、流体本构方程, 初始条件、边界条件等数学表述.

(4) 计算模型: 数学模型的数值实现形式, 通常包括数值离散、求解算法、收敛准则等.

(5) 建模: 建立或者修正模型的过程.

(6) 模拟: 在计算机上执行计算模型, 获得计算结果的过程.

(7) 验证: 确定计算模型精确实现数学模型的过程.

(8) 代码验证: 确定数值算法在代码中得到正确实现的过程.

(9) 解验证: 确定计算结果精确性的过程.

(10) 确认: 确定模型在预期用途内表征真实流体系统或过程准确程度的过程.

(11) 确认度量: 计算结果和真实结果符合程度的量化表述.

(12) 可信度: 模型、模拟、计算结果以及计算软件可信任的程度.

(13) 误差: 测量/计算值与真实值的定量差异.

(14) 不确定度: 在建模和模拟过程中, 由于系统内在变化或缺乏知识导致的潜在缺陷.

(15) 偶然不确定度: 由系统内在变化导致的不确定度. 也称为随机不确定度、不可减不确定度.

(16) 认知不确定度: 由于缺乏知识导致的不确定度. 也称为主观不确定度、可减不确定度.

(17) 不确定度量: 建模和模拟过程中, 不确定性因素的识别、表征及量化其对计算结果影

响程度的过程.

(18) 基准算例: 经过精心挑选、在验证与确认过程中专门用来进行数据比对的标准算例.

(19) 标模: 确认过程中, 经过精心设计、能够反映典型流动特征或满足特定应用需求的特定模型

(20) 预测能力: 在没有试验数据时, 使用模型获取关注量的能力.

(21) 应用域: 建模和模拟预期使用的区域. 也称为预测域, 预期用途.

(22) 确认域: 建模和模拟的关注量与参考值比较的区域.

(23) 模型适用性: 模型行为或过程与真实流体系统行为或过程的符合程度.

(24) 精确度: 测量/计算值接近参考值/真值的程度.

### 3 验证与确认的流程

ASME V&V 10-2006 指南给出了验证与确认的主要过程 (ASME 2006), ASME V&V 10-2019 标准对其进一步调整 (ASME 2019), 如图 3 所示, 清晰地表征了建模和模拟的主要过程及验证、确认和不确定度量化在其中的作用. 对于某一具体的确认案例, 采用数值模拟和物理试验两种手段进行研究, 两者实施过程中需要协同配合, 但又相对独立, 保证数据的客观性. 对于数值模拟, 从概念模型出发, 建立数学模型和计算模型, 经过计算不确定度量化得到模拟的输出, 与经过试验不确定度量化的试验输出进行定量比较, 在不满足确认需求时修正模型、模拟或试验. 在数值模拟分析中, 需要代码验证和验证, 保证数值模拟结果精确实现数学模型.

为实现模型评估的目的, 美国 Sandia 实验室发布了完善的验证与确认方法框架, 指导紧密集成建模/试验的项目地开发和执行 (Richard et al. 2015). 为进一步细化验证与确认的实施流程, 中国空气动力研究与发展中心联合北京应用物理与计算数学研究所、航空工业西安航空计算技术研究所、中国航空研究院等单位从 CFD 的特点出发, 将验证与确认划分为四阶段二十节点进行, 如图 4 所示.

#### 3.1 规划阶段

针对 CFD 软件的预期用途或关注的问题, 分析 CFD 建模过程, 确定关注量及其精度要求, 识别关键现象、关键过程和关键因素, 并对其进行排序, 制定 CFD 验证与确认方案.

规划阶段分为三个节点, 分别是:

(1) 节点 1: 问题分析

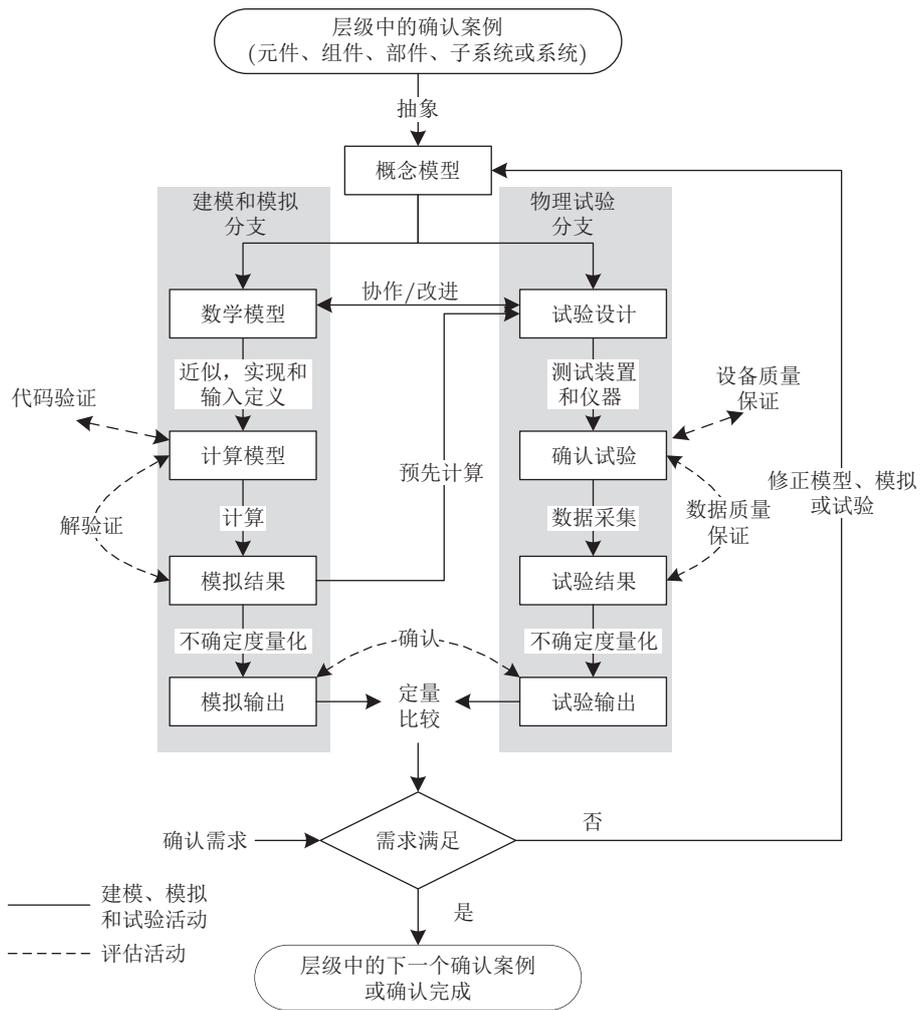
认识 V&V 的对象和目标.

(2) 节点 2: PIRT 分析

创建现象认定和等级划分表 (phenomena identification and ranking table, PIRT), 建立复杂流动系统的层级建构, 指导 V&V 方案制定和实施 (Wilson & Boyack 1998, Mahaffy 2007).

(3) 节点 3: 制定计划

制定验证与确认方案, 使得 V&V 活动可以依序有据实施



注 1: 代码验证使用具有封闭形式的不同模型或人造解实施

图 3

验证与确认的基本过程 (ASME 2019)

### 3.2 验证阶段

采用各种测试手段、数学证明、客观推理等方式证明软件运行逻辑、算法实现、求解过程无错误, 估计数值求解过程的数值误差, 保证数值求解输入和后处理过程正确, 数值解具有物理意义上合理性.

验证是确认的基础. 通过验证, 保证后续分析使用的软件没有会显著影响模拟结果的缺陷或错误, 离散方法 (包括离散格式和计算域离散等) 恰当, 数值求解过程可靠, 数值解能合理地表征模型开发者的意图.

验证可以从代码验证和解验证两个层面展开. 其中代码验证是确定数值算法在代码中得到正确实现的过程, 需要综合软件工程和科学计算两个领域的技术, 从软件质量保证和数值算法验证两部分展开; 解验证是确定模拟结果精确性的过程, 内容包括输入验证、数值误差估计、后处

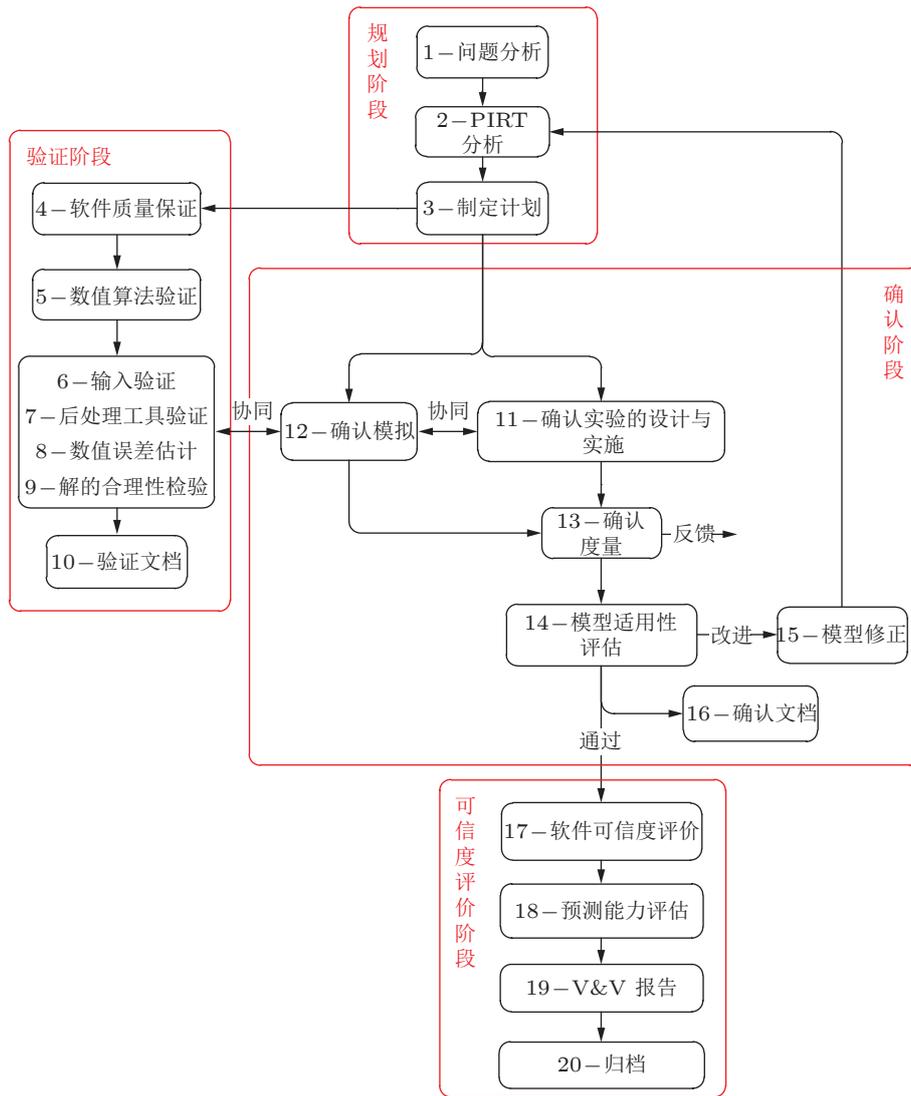


图 4

验证与确认流程图

理验证和解的合理性检验.

验证阶段分为七个节点, 分别是:

(1) 节点 4: 软件质量保证

检验软件代码有无编程错误和运行缺陷.

(2) 节点 5: 数值算法验证

检验数值算法在软件中是否得到正确实现.

(3) 节点 6: 输入验证

确定计算输入数据充分、正确, 保证数值模拟的顺利实施.

(4) 节点 7: 后处理工具验证

保证数值模拟结果后处理正确.

(5) 节点 8: 数值误差估计

检验计算结果的数值误差是否满足要求.

(6) 节点 9: 解的合理性检验

证明数值解具有物理意义上的合理性.

(7) 节点 10: 验证文档

记录验证过程, 保证验证过程可追溯、可复现.

### 3.3 确认阶段

按计划科学地设计并实施确认试验, 开展确认模拟, 量化试验和计算中的不确定度, 采用确认度量方法量化计算结果和试验结果的差异, 评估模型的适用性, 在必要时修正模型.

确认阶段分为六个节点, 分别是:

(1) 节点 11: 确认试验的设计与实施

提供用于确认的高可信试验数据.

(2) 节点 12: 确认模拟

提供用于确认度量的计算数据.

(3) 节点 13: 确认度量

在确认域内计算模型的精度.

(4) 节点 14: 模型适用性评估

确定模型在预期用途 (应用域) 内的适用程度.

(5) 节点 15: 模型修正

利用高可信数据提高模型预测能力.

(6) 节点 16: 确认文档

提供确认活动的书面证据, 保证确认试验和模拟的透明、可重复、可追溯.

### 3.4 可信度评价阶段

评估软件预测能力和 CFD 软件在预期用途的可信度.

可信度评价阶段分为四个节点, 分别是:

(1) 节点 17: 软件可信度评价

客观评价 CFD 软件的可信度.

(2) 节点 18: 预测能力评估

评估模型或软件对特定实际问题的预测能力.

(3) 节点 19: V&V 报告

编写 CFD 验证与确认报告.

(4) 节点 20: 归档

方便查阅和复现 V&V 活动.

## 4 验证的主要方法

### 4.1 代码验证

代码验证可以分为软件质量保证和数值算法验证.

软件质量保证着重确定构成软件系统的代码是否正确实现以及代码在指定的计算机硬件和软件环境中(包括计算机操作系统、编译程序、功能库等)是否得到可重复使用的结果. 软件质量保证综合运用软件工程手段, 要求遵循软件开发、测试和维护的标准化流程, 以控制软件质量或减弱编程随意性带来的软件缺陷, 确保软件系统是可靠稳定的 (Oberkampff et al. 2010). 主要方法是采用静态分析、动态测试和形式分析的测试方法.

数值算法验证对代码执行后的结果进行对比和分析, 用以判断数值算法在程序代码中是否正确实现, 数值算法是否有缺陷. 其主要目的是提供充足的证据来证明程序化的数值算法执行正确且有预期的功能. Oberkampff 等 (2010) 总结了数值算法验证主要方法:

#### (1) 简单测试

根据数值解理论上的行为或性质对程序进行测试. 简单测试主要包括对称性检验、守恒性测试和伽利略不变性测试等. 对称性检验研究问题具有对称的外形、网格和初边值时, 数值解是否也具有对称性. 守恒性测试保证数值解满足质量、动量和能量等物理守恒律. 伽利略不变性测试要求当数学模型满足伽利略不变性时, 数值解也要遵守伽利略不变性.

#### (2) 代码间比较

将待测软件的输出与基准软件进行比较. 待测软件和基准软件应采用完全相同的数学模型和计算模型, 且基准软件通过了严格的代码验证.

#### (3) 离散误差评估

定量地评估数值解误差是否满足需求. 离散误差评估适用于数学模型存在精确解的情况, 由用户主观地判断数值解与精确解的偏差是否满足需求.

#### (4) 收敛测试

测试数值解误差是否随着网格加密或时间步长的减小而减小, 是严格代码验证中的最低标准.

#### (5) 精度阶测试

精度阶测试是最严格的代码验证测试, 主要是考察随着网格加密或时间步长减小, 数值离散误差是否以理论速率减小. 其中理论速率称为形式精度阶, 实际速率称为观测精度阶. 精度阶测试对于代码错误或者数值算法的缺陷非常敏感, 是最值得信赖的代码验证方法, 能够有效识别影响数值解收敛精度的常见编程错误, 例如边界条件处理、网格转换等.

精度阶测试在多套网格或时间步长下进行计算, 将数值解在网格尺度或时间尺度上做级数展开, 估计观测精度阶. Oberkampff 等 (2010) 指出, 在网格加密过程中, 需要满足两个要求: 统一加密和一致加密. 生成一系列逐渐加密的网格是现阶段的难题, 特别是在复杂外形的数值模拟中如何构造多套网格序列开展精度阶分析仍是有待解决的问题.

除了通过网格加密来估计观测精度阶, 还有残差法 (Burg & Murali 2004)、统计法 (Thomas

et al. 2008) 和尺度缩小法 (Hebert et al. 2005) 等方法. 这些方法应用的不如前述方法应用广泛, 所以不再详述.

#### (6) 精确解获得

离散误差评估、收敛测试和精度阶测试等方法通常需要知道数学模型的精确解, 现阶段主要有两种方式获得: 精确解方法和人造解方法.

##### ① 精确解方法

对于流体力学控制方程, 在特定的计算域和初/边值条件下, 或者对流场变量做一些假设 (如平行流假设) 后, 可以得到方程的精确解. 在测试格式精度时, 经常使用线性对流、扩散、Laplace、Burgers 方程等. 对于 Euler 方程, 经常使用行波解、等熵涡 (Shu 1998)、Sod (1978) 和 Lax (1954) 激波管等精确解. 对 Navier-Stokes 方程, 常使用 Couette 流 (邵帅等 2018) 等精确解. Norman 和 Philip (2006) 从平面约束的稳态流动、轴对称稳态流动、平面约束的非稳态流动和轴对称非稳态流动四个分类总结了 Navier Stokes 方程的精确解.

在 CFD 领域, 复杂的非线性方程很少有精确解, 一般都是经过简化之后的方程解析解, 而简化后的方程并不能完整地体现原方程中的各项, 过多的简化增大和代码验证目标的差距, 很难起到检验程序的作用. 例如 Couette 流动中, 扩散项基本为零, 从而无法验证程序中扩散项模块编写是否有问题.

##### ② 人造解方法 (method of manufactured solutions, MMS)

人造解方法将人为构造的解析解代入到原始偏微分方程组中, 将方程重新进行排序, 把所有超过原始方程组的项当成强制源项, 得到修正控制方程 (Roy et al. 2004). 广义上看, MMS 方法也是一种精确解方法: 人为构造的解满足修正控制方程. 人为构造的解可能没有任何物理意义, 但有助于测试程序实施的正确性.

MMS 可以方便地处理复杂的非线性、耦合方程组问题 (包含非恒定系数、不规则计算域、高维、多重子模型等问题), 测试代码中的众多模块 (包括时间推进、扩散、对流、源项等). MMS 对离散中的错误非常敏感, 是代码验证活动中普遍使用的方法. MMS 方法的缺点主要是需要针对构造的人造解, 修改源项、边界条件和初始条件等部分的代码.

在 CFD 领域, MMS 方法已经成功应用到了 NS 方程 (Murali & Burg 2002)、RANS 方程 (Eca et al. 2016)、高阶精度格式 (Navah & Nadarajah 2016)、浸入边界法 (Brehm et al. 2015)、等离子体流动模拟 (Ricci et al. 2015)、多相流模拟 (Choudhary et al. 2014) 等代码验证工作. Marshall (2011) 基于 MMS 开发了用以代码验证的 C++ 函数库. 国内王瑞利 (2010) 和王年华 (2017) 也开展了人造解的研究. Ghia 等 (2010) 在分析了人造解方法和精确解方法的优缺点之后, 指出采用 MMS 进行代码验证和数值算法测试具有很高的准确性. 除了在光滑流场中得到应用之外, MMS 还被拓展到具有间断特征的流场求解验证中 (Grier et al. 2014, 2015, Woods & Starkey 2015).

## 4.2 解验证

解验证主要目的是确保数学模型的求解在其预期用途内足够准确. 开展解验证的前提是程

序已经通过了代码验证,即确保有相容、收敛的数值算法和无错误的代码.解验证主要估计数学模型离散和求解过程中产生的误差,依据数值求解流程分为三个来源:(1)数值模拟输入过程中的错误或误差;(2)计算机求解数学模型过程中的数值误差,包括:舍入误差、统计抽样误差、迭代误差和离散误差;(3)处理模拟输出数据过程产生的错误或误差.针对三类误差的处理和估计,解验证活动分为三部分:输入数据的验证、数值误差估计和后处理工具的验证,其中第二类误差源是解验证活动的主要对象.此外,解验证活动还应确定数值解是否符合真实的物理特征,比如检验对称翼型正迎角的计算是否能得到正的升力系数.通过解的合理性检验可以避免对包含错误的计算软件进行确认.

下面针对最重要的数值误差估计展开介绍.

#### 4.2.1 舍入误差估计

评估舍入误差的影响时,一般先在通常计算机精度下运行 CFD 程序,再在更高计算机精度下运行程序,比较两者的偏差,计算过程中其他参数保持一致.通常情况下,目前计算机机器字长可以满足工程应用的需求,认为舍入误差可以忽略不计.

#### 4.2.2 统计抽样误差估计

统计抽样误差一般出现在数学模型具有内在随机性的情况下,比如粒子类模拟方法 (DSMC, lattice Boltzmann 等).在非定常模拟中,需要通过时间平均来计算流动平均量,这时不同统计时长导致的平均量计算的偏差也归为统计抽样误差.

统计抽样误差可以通过评估关注输出量在增加粒子数目、统计时长等情况下的收敛特性来估计.

#### 4.2.3 迭代误差估计

迭代误差出现在使用迭代方法求解代数方程(组)的情况下,具体是指方程某一迭代步的数值解与方程精确解的偏差.针对线性收敛和振荡收敛,学者们提出了由多个迭代步的数值解估计迭代误差的方法 (Ferziger 1996, 1998, 2002, Golub & Van Loan 1996, Roy & Blottner 2003),但是面对实际问题中无明显规律的更一般的收敛情况暂没有可靠的估计方法.

验证与确认不同活动对迭代误差提出了不同的需求.在精度阶测试或者离散误差估计中,通常要求迭代误差不超过离散误差的 1% (Oberkampf et al. 2010).大批量的参数不确定度计算对迭代误差的容忍度稍高.

#### 4.2.4 离散误差估计

离散误差是指离散方程精确解和数学方程精确解的偏差,通常是四类数值误差中最大的误差来源.与使用一系列加密网格测试空间精度阶的方法类似,也可以使用该方法估计空间离散误差.

##### (1) 广义 Richardson 外推

将数值解以其网格特征尺度做级数展开.假定有满足加密要求的两套网格,其网格特征尺度分别为  $h$  和  $rh$  ( $r > 1$ ),数值离散解可以展开为

$$\left. \begin{aligned} u_h &= u_{h=0} + g_p h^p + O(h^{p+1}) \\ u_{rh} &= u_{h=0} + g_p (rh)^p + O(h^{p+1}) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

经过简单的代数运算可以得到  $u_{h=0}$  的估计  $\bar{u}$  满足

$$\bar{u} \triangleq u_h + \frac{u_h - u_{rh}}{r^p - 1} = u_{h=0} + O(h^{p+1}) \quad (2)$$

由于实际工程问题中方程精确解通常是未知的, 需要增加一套网格的计算结果来判断数值离散解是否位于渐近区域, 再利用这几套网格结果, 根据式 (1) 使用最小二乘法估计方程精确解和离散误差.

### (2) GCI 方法

在实际问题中, 很可能出现观测精度阶与形式精度阶不一致的情况, 这时离散误差估计的可信度是存疑的, 该问题也转化为数值不确定度量化问题. 由于方程精确解未知, 数值不确定度为认知不确定度. Roache (1998) 提出了网格收敛指标 (grid convergence index, GCI) 来估计数值不确定度.

$$\text{GCI} = \frac{F_s}{r^p - 1} |f_2 - f_1|$$

式中,  $f_1$  和  $f_2$  分别是密网格和粗网格的数值解,  $F_s$  是安全因子. 由此可以得到密网格数值解的不确定度为  $f_1 \pm \text{GCI}$ , 该估计区间具有 95% 的置信度. Roache 指出如果只有两套网格计算结果, 此时无法估计观测精度阶, 因此式中的  $p$  取形式精度阶, 为安全起见  $F_s$  取为 3. 如果有三套以上的网格, 可以估计观测精度阶  $\hat{p}$ , 与形式精度阶  $p_f$  进行对比, 根据表 1 确定估计中使用的  $p$  和  $F_s$ .

表 1 使用 GCI 估计数值离散误差时  $p$  和  $F_s$  的取值 (Roache 1998)

$\left  \frac{\hat{p} - p_f}{p_f} \right $	$F_s$	$p$
$\leq 0.1$	1.25	$p_f$
$> 0.1$	3.0	$\min(\max(0.5, \hat{p}), p_f)$

### (3) 混合展开方法

考虑到大量工程实用的 CFD 求解器都是空间二阶精度格式, 学者们在式 (1) 的基础上, 增加了以下三种级数展开形式 (Eça & Hoekstra 2014), 分别为

一阶展开:

$$f_i = f_0 + \alpha h_i \quad (3)$$

二阶展开:

$$f_i = f_0 + \beta h_i^2 \quad (4)$$

一阶/二阶混合展开:

$$f_i = f_0 + \alpha h_i + \beta h_i^2 \quad (5)$$

将式 (1) 与式 (3) ~ (5) 结合, 选择拟合误差最小的展开作为数值误差估计的展开形式.

#### (4) 离散伴随误差估计方法

Richardson 分析方法需要至少在三套全局同一比例加密的网格上进行计算, 对于实际三维复杂外形来说, 网格生成和计算都是非常耗时的过程. 针对这一难题, Venditti 和 Darmofal (2000) 提出了基于离散伴随的误差估计方法. 密网格上的关注量并不是直接求解, 而是使用粗网格上计算得到的流场解和伴随方程解修正得到, 但整个过程中仍然需要获得密网格完整的网格点分布.

在计算资源有限的约束下, 对工程复杂构型, 生成满足统一加密和一致加密要求的网格序列仍是亟待解决的难题. 分析中使用到了光滑解假定, 但是在工程问题中, 有可能流场局部存在间断等结构, 对于非光滑问题的离散误差估计仍然理论上存在缺陷.

## 5 确认的主要方法

### 5.1 确认分层

复杂系统建模往往面临模型复杂度高、试验数据不丰富完备且干扰因素多、多物理场耦合作用不清楚等难题. 因此 AIAA G-077-1998 指南, ASME V&V 10-2006 指南及 ASME V&V 10-2019 标准都提出对确认应采用层级分解方法, 将复杂系统难度逐层降低, 逐个层级逐个元素地开展确认.

典型的确认分层结构为四层, 从上到下依次为: 完整系统层、子系统层、基准层和单元层, 关注重点从完整系统转移到单一物理现象 (AIAA 1998). 图 5 从应用问题角度给出了高超声速巡航导弹确认层级示例. 系统层对应的完整硬件、几何结构、完整物理和化学特征, 如推进系统、机身系统; 子系统层对应的是功能性系统硬件、相对独立的大块几何结构、一些相关的物理和化学特征, 如气动/热防护子系统; 基准层对应特定的流动特征问题、简化的几何结构, 如带烧蚀的高超声速层流; 单元层对应非常简单的几何结构、流动特征, 如简单外形高超声速层流等.

### 5.2 计算的不确定度量化

数值仿真和物理试验都是对真实自然现象的建模, 都存在不可忽视的误差和不确定度, 只有协同地充分量化两者的不确定度, 才能更科学地表征两者的差异, 避免决策的风险.

NASA (2016b) 认为数值仿真不确定度量化的关键活动包括: 不确定因素分类和表征、解的偏差不确定度估计、模型预测偏差不确定度、不确定度传播、不确定度外插、不确定度聚合和裕度评估等 (图 6). 可以说不确定度量化是一个庞大的体系, 其中不确定度分类从不确定因素的来源或数学特征出发对各因素进行分类; 不确定度表征使用区分、分布等数学方法建立不确定因素的定量数学描述; 解的偏差不确定度估计使用解验证方法估计数值求解引入的不确定度; 模型预测偏差不确定度估计数学模型选择或形式引入的不确定度; 不确定度传播量化输入不确定度对模拟结果的影响; 不确定度外插估计由确认域外推至应用域时的不确定度; 不确定度聚合估计多源因素综合作用下的整体不确定度; 裕度评估基于不确定度量化结果进行性能裕度分析.

现阶段 CFD 不确定度量化工作主要集中在以下几个方面.

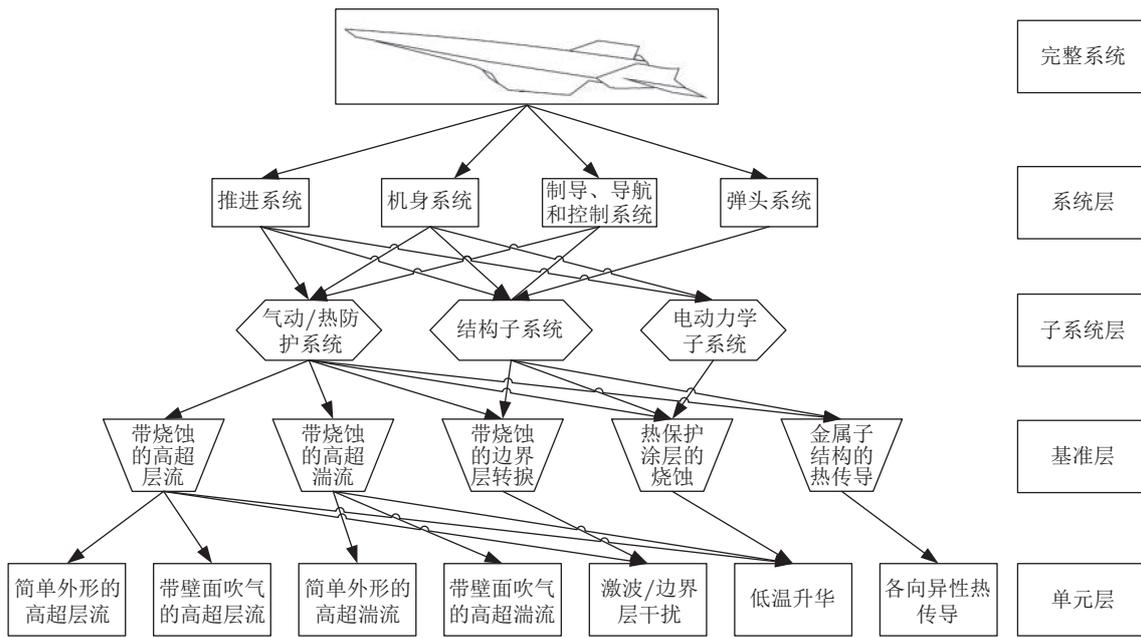


图 5

高超声速巡航导弹确认层级示例 (Oberkampf & Trucano 2000)

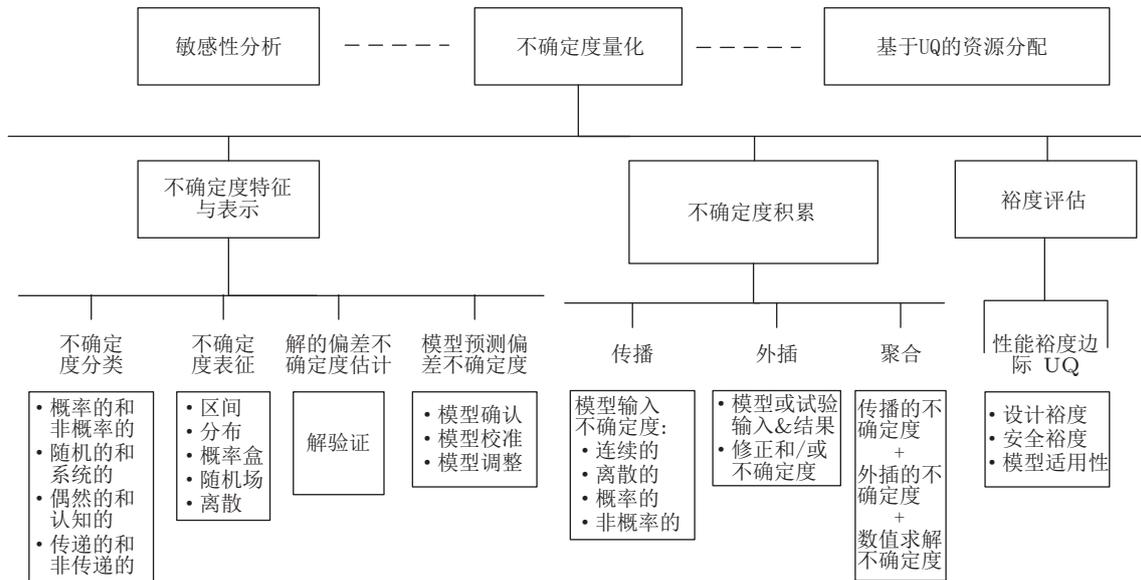


图 6

不确定度量化的关键活动 (NASA 2016b)

### 5.2.1 来源和表征

数值仿真建模和模拟过程中存在大量的不确定因素. NASA (2016b) 将不确定因素来源归纳为以下几类: (1) 模型形式; (2) 参数; (3) 模型预测偏差; (4) 数值解偏差; (5) 模拟结果后处理和推断.

从数学特征上分析, 不确定度可以分为随机不确定度 (或偶然不确定度) 和认知不确定度. 随机不确定度指由系统内在变化导致的不确定度, 表现为随机特性, 增加认识也不能减少. 通常采用精确概率理论表征为随机变量或随机过程, 具体表征手段有概率密度函数、累计概率密度函数、概率转移矩阵、相关长度等 (中国科学院 2018). 认知不确定度指由于缺乏知识导致的不确定度, 可以随着知识增加而减少. 认知不确定度需要根据认知水平或已知信息采用不同的数学表征方法, 包括证据理论、可能性理论、区间分析、凸集模型、随机模糊理论等 (中国科学院 2018). 如果对某一个具体的不确定因素, 随机不确定和认知不确定同时存在, 则称为混合不确定. 可以采用非精确概率方法进行表征, 常用表征方式为概率盒 (probability-box, p-box). 概率盒是概率论与区间理论相结合的不确定度表征的方法, 由上、下界分布函数曲线构成封闭区域.

具体到 CFD 领域, 模型 (湍流模型、化学反应模型、状态方程等)、参数 (模型参数、来流条件、外形参数等) 和数值求解是重要的不确定来源.

### 5.2.2 参数不确定度传播

参数不确定度传播的主要工作是在给定不确定参数的数学表征情况下, 研究不确定度在系统中的传播规律, 分析输出的不确定特征.

汤涛和周涛 (2015) 将不确定度传播的主要方法总结为如下五类: (1) Monte Carlo 类方法 (Fishman 1996, Loh 1996, Niederreiter 1992, 1998, Stein 1987). 该类方法简单直接, 但是需要使用大量样本才能得到较稳定的统计结果. (2) 摄动方法 (Liu et al. 1986a, 1986b). 该方法将随机变量在其均值处做 Taylor 级数展开, 一般只应用于小尺度的随机输入问题. (3) 矩方程方法 (Zhang 2002). 该方法由原始随机方程出发, 推导随机解的各阶统计矩满足的方程, 但需要引入一定假设对方程进行封闭. (4) 多项式逼近方法 (Wiener 1938, Ghanem & Spanos 1991, Xiu & Karniadakis 2002), 也为嵌入式混沌多项式方法. 该方法将随机解在随机输入变量的多项式空间里展开, 根据多项式的正交性质得到展开系数的联立方程组. 但该方法需要深入代码内部修改程序, 展开系数的联立方程组十分复杂, 求解困难. (5) 随机配置法 (Babuska et al. 2007, Smolyak 1963, Bungartz & Griebel 2004, Xiu & Hesthaven 2005, Xiu 2007), 也为非嵌入式混沌多项式方法. 该方法同样基于正交多项式展开, 使用离散样本点通过数值积分或者回归分析得到展开系数. 国内外学者们使用混沌多项式研究了 SA 湍流模型系数 (Schaefer et al. 2017, 赵辉等 2019),  $k-\varepsilon$  湍流模型系数 (Dunn et al. 2011, Platteuw et al. 2008)、来流条件 (张伟等 2018, 宋赋强等 2018, 郭晓敬等 2015, Mariotti et al. 2016, Avdonin & Polofke 2019, Zhu et al. 2020, Wang & Zhang 2016)、翼型参数 (Loeven & Bijl 2008, Liu et al. 2017)、转子叶顶间隙尺寸 (刘智益等 2013) 等不确定参数对整体气动特性的影响. 随着输入参数维度和展开阶次增加, 混沌多项式方法需要的样本点数据急剧增加, 产生维数灾难问题. 因此学者们提出了各种改进方法, 包括自适应方法 (Blatman & Sudret 2010)、稀疏重构方法 (Blatman & Sudret 2011) 和减基法 (Nair & Keane 2002, Raisee et al. 2015) 等, 以此来降低随机展开空间的维数. 结果表明这些方法与完整的混沌多项式方法相比能够在相对较小的计算成本下产生精度大体相当的结果.

当前, 面对复杂系统数据生成耗时耗力的困难, 许多学者研究使用代理模型替代复杂模拟系统, 结合优化的试验设计方法, 降低不确定传播研究对样本的需求量. 常见的代理模型包括多项

式回归模型、高斯过程回归模型和支持向量机等, 通过结合重要性抽样方法或自适应采样方法, 已经有了成功的工程应用 (章超 等 2020, Bhattacharyya 2022, Huang & Giacobello 2022, Kawai & Shimoyama 2014, Liu et al. 2020, Rumpfkeil et al. 2017).

### 5.2.3 认知不确定度量化

认知不确定度需要根据认知水平采用不同的量化方法, 包括证据理论、可能性理论、区间分析、凸集模型、随机模糊理论等 (中国科学院 2018). 当认知信息足够到能给出贝叶斯观点下的参数概率分布时, 可以采用与随机参数不确定度量化一致的方法. 当认知信息不足, 只能给出参数上、下限范围时, 可以采用区间分析获得关注输出量的不确定区间范围. 当认知信息介于两者之间时, 可以采用证据理论、可能性理论等方法量化其影响. 其中证据理论 (Shafer 1976, Sentz & Ferson 2002) 依据某命题已知信息利用基本概率分配来描述命题所有可能答案的信任程度. 进一步, 利用信任函数、似然函数来量化命题某种可能答案为真的概率上、下界, 信任函数与似然函数之间的差值即表征不确定度.

### 5.2.4 混合不确定度量化

当系统中既有随机不确定参数, 又有认知不确定参数, 或者一个参数本身是随机不确定参数, 但是描述其数学特征的值是认知不确定时, 需要采用混合不确定度量化方法. 通常做法是采用双 (多) 层嵌套方法将随机和认知不确定分开采样, 获得关注量的概率盒分布 (Eldred & Swiler 2009, Swiler et al. 2009).

### 5.2.5 模型不确定度量化

模型不确定度来源于建模过程中的假设、抽象、简化、近似和省略, 具体表现为: (1) 存在多种可能的模型, 也称为模型选择引入的不确定度; (2) 单一模型即使能够精确求解, 也跟真实现象存在一定的预测偏差. 第一种情况是多模型加权融合问题, 常用的方法包括贝叶斯模型平均 (Park et al. 2010) 和调整参数法 (Zio & Apostolakis 1996). 贝叶斯模型平均通常是在有试验数据的情况下, 通过贝叶斯定理获得模型后验概率, 进行多模型的加权平均. 而调整参数法通常是在无试验数据的情况下, 通过专家意见等方式获得模型概率, 进行多模型的加权平均. Riley 和 Grandhi (2011) 利用贝叶斯模型平均研究了 AGARD 445.6 机翼颤振问题的模型选择不确定度. 对于第二种情况, Voyles 和 Roy (2015) 通过面积确认度量算子获得不确定框架下仿真和试验的差异, 据此对仿真结果的累积分布函数进行扩展, 依此来表征模型的不确定度. Kennedy 和 O'Hagan (2001) 提出能够同时完成参数校准和预测偏差建模的贝叶斯方法 KOH 框架,  $y^e(x) = \rho \cdot y^m(x, \theta) + \delta(x) + \varepsilon$ , 其中  $\delta(x)$  是表征数值仿真和物理试验差异的偏差项, 假定为高斯过程.

### 5.2.6 不确定度综合管理

数值仿真结果受到模型、参数、网格等多种因素协同影响, 工业部门更关心的是多源不确定因素下仿真结果整体的不确定度. Eça 等讨论了数值和参数不确定度的关系, 指出了数值解在渐进区域下两者才不相关 (Eça et al. 2019), 以及网格较粗时离散误差会显著影响不确定度量化

结果 (Eça et al. 2020). 因此在不不确定度量化时, 识别所有可能的不确定因素, 建立综合管理框架对于预测和风险决策至关重要. NASA CFD 2030 愿景指出需要综合考虑物理建模的误差和不确定度、数值误差、参数的随机和认知不确定度.

Roy 和 Oberkampf (2011) 提出概率盒扩展方法, 依次考虑了参数、数值和模型引入的不确定度, 将概率盒的上、下边界进行扩展, 得到模拟结果综合的不确定度. KOH 框架将参数、模型预测偏差和试验观测的不确定度统一考虑, 具备部分多源不确定度综合量化能力. 熊芬芬等提出基于贝叶斯统计方法的不确定度综合量化框架 (熊芬芬等 2023), 为数值模拟综合不确定度量化提供了一个可行思路.

### 5.2.7 敏感性分析

影响 CFD 仿真结果的不确定性因素众多, 穷举并详细分析所有因素是不经济的, 通行有效的办法是采用敏感性分析方法筛选出重要因素, 降低问题复杂性. 针对敏感性分析的作用范围, 可以分为局部敏感性分析方法和全局敏感性分析方法. 现有的大部分局部敏感性分析方法都是在特定的局部坐标处, 对所研究模型进行近似 Taylor 展开, 将输出变量对不确定参数的偏导数作为敏感性指标. 该方法计算简便, 但不能反映单个参数或者多个参数的交互作用对输出不确定度的贡献, 应用有限. 全局敏感性分析方法可以衡量不确定输入参数在整个取值空间内的变化对关注输出量的综合影响. 常用的方法包括基本效应法、导数法、方差分析法和矩独立法等. Gan 等人 (2014) 结合样本数量和抽样方法详细讨论了各种敏感性分析方法在水动力学问题中的实际表现. 肖思男等 (2018) 对全局敏感性分析方法进行了总结.

### 5.3 试验的不确定度量化

确认试验是获取用于确认的高品质数据的重要手段, AIAA、ASME 的标准和 Sandia 实验室的报告都强调了确认过程计算和试验数据对比的重要性. AIAA 指南中总结了确认试验设计和实施的准则 (AIAA 1998), Oberkampf 等比较了确认试验不同于传统试验的几个方面, 并提出了从 6 个独立属性来评估确认试验 (Oberkampf & Smith 2017).

CFD 验证与确认中通常采用风洞试验数据作为基准对比数据, 对试验数据的精准度提出了较高的要求. 风洞试验是一个多环节的复杂过程, 每一环节所产生的数据测量量都会受到各种误差源的影响, 并影响到最终试验结果. 为准确量化试验测量不确定度, 20 世纪 90 年代, 国际标准化组织出版发行了《测量不确定度表示指南》, 把误差与不确定度分为两大类: 采用统计方法得到的标准差的不确定度称为 A 类不确定度, 采用非统计方法得到的不确定度称为 B 类不确定度. AMSE 出版了《试验不确定度标准》(ASME 2005), AIAA 出版了《应用于风洞试验的不确定度评估》标准 (AIAA 1999, 2003), 在方法上与国际标准化组织标准保持一致. AIAA 标准描述了风洞试验流程中的 57 项误差源, 主要包括标模外形、风洞流场品质、测量仪器、数据修正的数学模型等误差源. 除此之外, 标准还提供了评定试验不确定的方法和评估试验误差源的技术, 对不确定度评估方法、系统不确定度、随机不确定度、结果不确定度的概念、系统极限及随机极限向实验结果的传播、风洞误差源、不确定度评估方法的应用等均做了说明, 在国际上被广泛用于风洞测力、测压等试验中.

## 5.4 确认度量

确认度量用以量化计算结果和真实结果的差异. 根据输出的分散性特征, 确认度量分为确定性下的确认度量和不确定性下的确认度量. 传统的确定性下的确认度量直接利用计算结果和试验结果的绝对误差或相对误差. 不确定性下的确认度量则是全面考虑数值仿真和物理试验中可能存在的不确定度.

不确定性下的确认度量主要包括随机不确定性框架下的确认度量和认知不确定性框架下的确认度量. Liu 等 (2011) 提出确认度量方法应该具备六个基本性质, 在国内外被广泛认可. 在随机不确定性框架下, 确认度量方法主要分为四种: (1) 经典的假设检验 (Classical Hypothesis Testing); (2) 贝叶斯因子 (Bayes Factor); (3) 频率度量 (Frequentist's Metric); (4) 面积度量 (Area Metric). 前两者属于假设检验的方法, 能给出计算与真实试验数据是否一致的结论以及置信度, 但不可避免第一类错误 (即“弃真”错误) 和第二类错误 (即“纳伪”错误) (Jiang & Mahadevan 2007, Ling & Mahadevan 2013); 后两者是基于距离的方法, 能在统计意义上给出仿真结果与真实试验数据的偏离程度, 而并非直接判断仿真模型与真实试验数据是否一致 (Ferson & Oberkampf 2009). 面积度量使用仿真输出的累积分布函数与试验数据的经验分布函数之间的面积来量化模拟与真实物理试验的一致性, 如图 7 所示.

针对认知不确定框架下的确认度量, 国内外学者在面积度量的基础上进行了扩展, 肖钊等 (2014) 将区间变量转化为均匀分布, 利用均匀分布的累积分布函数量化了试验区间响应与模拟区间响应, 并用两条累积分布函数之间的面积作为模型确认度量. Wang 等 (2018) 拓展了传统的面积度量, 提出了一种区间面积度量用于有限试验数据情况下的模型确认. 对于混合不确定下的确认度量, 国内外学者在概率盒框架下对面积度量算子进行了扩展. 具体可以参考夏侯唐凡等人 (2022) 的综述文章.

## 5.5 模型参数校准

模型参数校准是不确定度量化反问题研究的重要内容, 可以简单分为确定性框架下的参数校准和不确定性框架下的参数校准. 确定性框架下的参数校准优化, 主要有 Shuffled Complex Evolution (Duan et al. 1992), 模拟退火法 (Kirkpatrick et al. 1983) 和基于代理模型的优化法 (Wang et al. 2014) 等方法. 这些方法寻找某一套模型参数使得数值仿真和物理试验结果之间的某种距离度量最小, 面临的主要问题有收敛区间、局部极小点等. 不确定性框架下的参数校准考虑数值模拟和试验数据的不确定度, 通常使用贝叶斯方法. 该方法通过专家意见、理论分析等手段给出参数的先验估计, 通过试验数据更新参数分布, 即后验估计. 贝叶斯方法通常需要马尔可夫链蒙特卡罗 (markov chain monte carlo, MCMC) 等方法得到参数的离散样本表征. 贝叶斯方法的核心是似然函数构建. KOH 框架使用高斯随机过程建模, 可以方便给出试验数据出现的概率. Arendt 等 (2012) 基于 KOH 框架, 提出了模块化的贝叶斯方法, 被国内外广泛使用.

## 6 标模试验

CFD 验证与确认离不开基准算例数据. 4.1 节介绍了验证中使用的精确解和人造解. 对于确

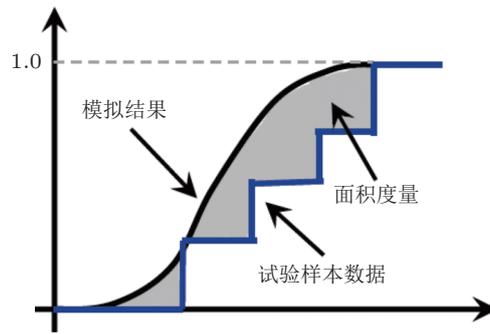


图 7

面积度量方法示意图 (夏侯唐凡等 2022)

认活动, 国外收集并整理了若干具有代表性、有可靠试验数据的标准算例, 如 NASA 的湍流模拟算例 (<https://turbmodels.larc.nasa.gov>)、ERCOFTAC 科学数据库 (Casey et al. 2000)、NPARC 验证与确认算例 (<https://www.grc.nasa.gov/www/wind/valid/archive.html>)、QNET-CFD 主题网络 (Hirsch 2008)、AGARD 系列 CFD 确认试验数据集 (Vidanovic et al. 2014)、FLOWNET 数据库 (Marini et al. 2002) 等. 这其中欧盟于 2000—2004 年间组织进行了名为“关于 CFD 工业应用的质量和可信度的主题网络 QNET-CFD”的大型研究项目, 参研单位多达 43 家, 主要研究成果包括 CFD 知识库和最佳实践建议. QNET-CFD 覆盖了下属工业部门的 6 个主题, 分别为: 外流空气动力学; 燃烧和传热; 化学过程、热水力学和核安全; 土木建筑和 HVAC; 环境; 涡轮及内流. 其主要成果是建立了具有面向用户界面以及丰富的试验和 CFD 数据的知识库, 分为 53 种应用挑战和 43 种基本流动状态. 除了对上述每一个主题领域的科学发展动态给出评述, 知识库还包含了对大多数应用挑战如何利用 CFD 的最实际的建议, 这被视为 QNET-CFD 最有意义的贡献, CFD 的可信度和质量水平将因此得到进一步提高 (Hirsch 2008).

此外, 作为落实 NASA CFD 2030 愿景中发展规划的一部分, 美国国防部近期倡导设立的 CREATE-AV 项目提出, 软件质量测试应包括基于质量保证测试矩阵中一组用于功能正确性验证算例进行的软件验证工作, 以及基于一组感兴趣的物理问题进行的软件确认工作 (Hallissy et al. 2014). 这些物理问题实际上就是根据软件具体应用目标所定义的一组反映流动特点、兼顾几何复杂性和流动复杂性的考核算例, 如图 8 所示. 这些算例与具体的一组基本流动相关, 能兼顾软件开发方、评价第三方及用户方对 CFD 软件及其模拟可信度的需求.

中国空气动力研究与发展中心针对 CFD 验证与确认的标模数据需求, 完成数值模拟方法验证与确认标模、典型流动特征验证与确认标模、工程问题验证与确认标模以及特种需求验证与确认标模四个部分标模的收集整理与风洞试验. 其中数值模拟方法类标模主要是为 CFD 软件的验证活动提供相应的标准算例, 形式为基本数学模型的精确解. 基本 (典型) 流动特征标模用于评估 CFD 软件对附着边界层、分离、激波、激波干扰以及漩涡等基本流动的模拟能力, 以速域划分, 共 40 个标模. 工程问题验证与确认标模用于评估 CFD 软件对航空航天飞行器巡航、高升力、大攻角等气动特性的预测能力, 按照工业部门的不同需求, 分为大展弦比飞机、小展弦比飞



图 8

验证与确认感兴趣的物理问题 (Hallissy et al. 2014)

机、弹箭类飞行器、升力主导高超飞行器和阻力主导高超飞行器, 共 21 个标模. 特种需求验证与确认标模用于评估 CFD 软件对工业型号发展中特种问题的解决能力. 中国空气动力研究与发展中心联合中国航空气动力研究院、航空工业空气动力研究院、南京航空航天大学、中国科学院力学所、中南大学、西北工业大学、清华大学、西南科技大学等单位开展了 14 项特种需求标模试验, 包括大展弦比翼身组合体标模 (CHN-T1) 试验 (图 9)、小展弦比飞翼标模 (CHN-F1) 试验、高升力布局标模气动力试验、平板-楔模型和锥-柱-裙模型气动热试验、TSTO 空天飞行器级间分离试验、大展弦比运输类飞机低速增升装置标模雷诺数影响试验、典型入射激波附面层干扰试验、高超声速三维边界层转捩试验、旋转飞行器与舵面振荡耦合试验、高速列车动模型试验、旋成体模型高速入水试验、典型压缩楔气动力/热/结构多场耦合标模试验等, 获得了各种测力、测压、热流数据以及流场结果, 为 CFD 确认提供了高可信度的标模数据.

## 7 平台工具

### 7.1 数据库

验证与确认数据库建设意在针对数值模拟软件验证与确认的具体需求, 在标模体系建设的基础上, 建立一个系统、完整、可扩充的专用标准算例数据库平台.

中国空气动力研究与发展中心开发了验证与确认数据库平台, 能够存储和管理风洞试验和数值计算得到的完整标模算例数据集, 具有数据装入、数据管理、数据应用、文件在线展示、质量检验、元数据管理、接口管理、系统管理等功能, 能为用户提供标模算例的查询、展示和下载服务, 并通过接口为 CFD 软件自动化测试和可信度评价平台提供数据支撑. 目前该数据库——“国家数值风洞验证与确认数据库”正式上线国家空间科学数据中心, 面向全国免费发布

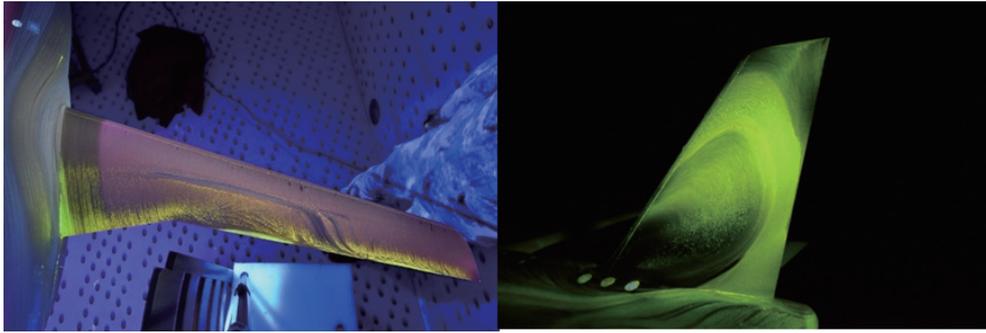


图 9

CHN-T1 标模高速风洞油流试验结果

([https://www.nssdc.ac.cn/mobile/nssdc\\_zh/html/task/cfd.html](https://www.nssdc.ac.cn/mobile/nssdc_zh/html/task/cfd.html)). 此次发布的数据资源包括 89 个国内外典型标准算例, 涵盖 12 类基本流动特征、10 类典型工程应用问题、15 种气动特性以及 10 种数据类型.

航空工业西安航空计算技术研究所持续开展了验证确认数据库的开发及国际标模的梳理工作, 确立了验证确认算例收集、整理和入库标准, 及质量保证程序. 以支持分布式存储及面向网络共享为目标, 建立基于 Web 方式的 CFD 验证确认数据库, 既可作为可信度平台的配套支持工具, 也可作为独立数据库应用系统产品应用. 基于 Wiki 技术, 初步建立了一套 CFD 软件最佳实践知识库原型软件系统, 提供知识分类管理、知识内容管理、知识版本追踪、知识检索、知识图谱展示、用户及权限管理、系统管理等实用功能, 集成全套气动力/热 CFD 软件可信度评价知识库知识档案.

## 7.2 自动化测试平台

自动化测试在国外发展起步较早, 配套工具建设成熟. Thoughtworks 公司开发的 Web 开源自动化测试工具 Selenium, 能验证应用程序在不同浏览器和操作系统上运行的正确性. Telerik 公司开发的 Web 自动化测试工具 Telerik Test Studio, 可用于 Web、WPT 应用的界面、功能测试. Apache 组织的开源压力测试工具 Apache JMeter, 能够对 HTTP 和 FTP 服务器进行压力、性能测试. 与传统软件测试不同的是, 以 CFD 为代表的科学计算过程包括逻辑运算和浮点运算, 除了要开展常规的静态扫描、单元测试及逻辑正确性测试外, 还要开展针对不同科学算例的集成测试和回归测试. 上述每款主流自动化测试工具都有其侧重点, 但均没有对 CFD 软件的集成测试和回归测试提供支持.

为有效管理自研软件研发基础过程, 中国空气动力研究与发展中心建立了一套以自动化测试平台为核心的持续集成平台. 平台通过建立规范统一算例数据库输入和输出标准, 研制在 CFD 软件代码更改的情况下, 利用交互式 GUI 操作界面, 自动进行代码编译, 自动对指定算例和备选算例实时远程计算, 自动收集计算结果并对计算结果进行对比分析, 并将该信息反馈给开发人员. 目前, 通过平台管理, 提升了软件的开发、测试效率, 助力了开发团队打造规范化、可

视化、自动化的软件研发体系。

### 7.3 不确定度量化工具

目前国内外开发了多款不确定度量化软件平台。美国 Lawrence Livermore 实验室开发了基于 C++ 的开源程序包 PSUADE (Tong 2005), 为大量复杂模型的 UQ 分析提供完整的设计和分析环境, 通过命令行语句在 Linux 系统下运行。Sandia 国家实验室研发的 DAKOTA (Adams et al. 2009) 工具包采用 C++ 语言编写, 在超级计算机平台运行, 它为仿真代码和迭代分析方法之间提供灵活且可扩展的接口。SIMLAB1 (Saltelli et al. 2004) 是专注于敏感度分析的软件平台, 提供了多种全局灵敏度分析工具。Open TURNS (Andrianov et al. 2007) 包含不确定度分析和敏感度分析, 可以在 Windows 和 Linux 系统下运行, 需要调用 Python 函数。UQLab (Marelli & Sudret 2014) 基于 Matlab 软件进行不确定度量化分析, 包含许多非嵌入式方法, 如混沌多项式法。UQ-PyL 平台 (Wang et al. 2016) 为大量复杂的计算模型执行多方面的 UQ 任务提供一个整体的设计和分析环境, 该平台整合了 UQ 过程中的问题定义、试验设计、统计分析、敏感度分析、代理模型和参数优化等部分, 集合常用的 UQ 算法, 最终整装成一个图形用户界面, 可以运行批量的脚本程序, 可以跨平台运行。中国空气动力研究与发展中心针对 CFD 特点开发了不确定度量化分析平台。该平台基于 Java 语言开发, 由试验设计、参数灵敏度分析、代理模型、不确定性分析和参数校准 5 大模块组成, 各模块可独立、可耦合、可扩展, UQ 分析流程高度可配置。平台集成了多种经典的 UQ 算法, 如: Sobol 灵敏度分析、概率盒 (P-box)、Kriging 模型、PCE 模型、MCMC 等。

### 7.4 可信度评价工具

为了提高验证与确认和可信度评价的效率和自动化程度, 国内利用计算机技术集成相关理论工具, 开发了多款验证与确认和可信度评价平台。梁益华等 (2004) 提出并开发了气动数值模拟软件可信度分析平台 WiseCFD。平台集成了典型验证确认策略和方法, 并提供基础性的验证确认算例库, 提供开放式数值模拟软件管理、评价指标管理、评测项目组织管理、计算项目组织管理、算例数据管理、计算作业管理、数据分析和比较以及自动化报告生成、用户管理等实用功能, 为 CFD 软件的可信度评估提供了强有力的支持工具。陈树生等 (2017) 开发了一款 CFD 软件验证确认云平台, 可以自动化地实现加载算例、提交计算、监测进度、后处理、输出结果和报告等功能, 可以有效地提高 CFD 软件开发质量和测试效率。中国航天气动研究院针对目前 CFD 的自动化和智能化程度低等问题, 以大数据分析和机器学习算法为核心, 实现 CFD 计算流程的自动优化、物理和数学专业模型的自动进化, 实现机器根据任务需求的上下文自动完成网格生成、解算和数据处理能力。中国空气动力研究与发展中心针对国家数值风洞工程自研 CFD 软件的验证与确认需求, 研制以软件集成、数据集成、算法集成及评价流程集成为核心的高度自动化的 CFD 软件可信度评价平台, 平台可根据软件评价目标 (评价指标体系), 自动化、可视化地开展 CFD 作业组织与管理、流场解析与数据后处理、数据对比及一致性量化分析、图表和报告生成等评价活动, 为软件验证、确认及可信度评估提供了高效可靠的工具支持。

## 8 验证与确认研讨会

为评估当前 CFD 技术对航空航天工程问题的仿真能力,国内外科研机构组织了多次基于航空标模的验证与确认专题研讨会. AIAA 针对运输机构形组织召开了系列研讨会,包括 AIAA 阻力预测会议 (Tinoco et al. 2018)、AIAA 高升力预测会议 (Rumsey et al. 2019)、AIAA 气动弹性预测会议 (Heeg et al. 2016) 等. 研讨会通常选取包含关注流动现象的相对简单、有代表性的构型开展数据对比,主要目标是对当前 CFD 技术及预测能力进行综合评估,提出下一步重点发展的方向和目标. 其中阻力会议聚焦于类似民航客机的翼身组合体阻力精细预测,分别针对 DLR-F4、DLR-F6 和 CRM (common research model, 通用研究模型) 等开展数据对比. 高升力预测会议聚焦于类似民航客机的多段翼构型开展数据对比. 阻力预测会议、高升力预测会议等已成为 CFD 验证与确认领域最具代表性的国际会议,迄今已举办多届,获得了很多宝贵经验,有力推动了 CFD 相关软件及技术的发展,并对相关国际性研讨活动的组织和开展提供了参考和示范.

国内最早从 2003 年开始,基本与国外同步策划、组织了系列可信度分析研究的专题研讨活动. 第 1 次活动在 2003 年举办,称为“统一算例研讨”. 选择了 3 个算例,包括亚、跨声速标准气动模型两套 (含 DLR-F4 运输机模型和 NLR7301 高升力两段模型)、高超声速标准气动模型一套 (钝锥模型). 研究的重点是阻力和热流计算精度,由组织单位提供统一几何数据和计算网格. 各参加单位必须采用统一网格进行计算;在此基础上,鼓励另行生成网格计算,但按统一格式提供结果.

第 2 次活动在 2005 年举办,专门研讨“大攻角计算的可信度问题”,选择了大攻角 CT-1 标准模型. 基于同样的策略和方法开展多家软件的对比验证,尽管当时的计算结果相当分散,但是达到了评估我国 CFD 技术水平和确定近期研究方向的预定目标.

第 3 次、第 4 次活动分别在 2009 年、2013 年举办,统称为“航空高可信 CFD 专题研究”. 第 3 次活动选择了 2 个算例,包括 DLR-F6 翼身标准/修形模型 (巡航构型)、NASA 高升力机翼全展/半展襟翼模型 (高升力构型). 与以往研讨活动的组织模式不同,此次活动历时时间较长,同时通过建立航空高可信 CFD 专题研究活动专门网站、开通 5TB 存储空间 of 公开 FTP 数据服务器、发布统一的参考网格等模式,组织多轮研讨活动,对参与单位的自研及商业 CFD 软件的技术水平进行综合评估. 第 4 次活动则是基于第 3 次活动的成果和经验,选择 NASA 高升力机翼全展构型开展研讨,DLR-F6 翼身标准模型作为备选模型.

第 5 次活动在 2018 年举办. 选择国内自行研制的 CHN-T1 标模开展专题研讨 (王运涛等 2019). CHN-T1 标模是国内自主开发的、专门用于大型客机 CFD 确认计算的标模,走出了国内从跟踪走向自主的关键一步.

除了上述活动,国内多家工程单位 (如航天一院、航天三院) 也出于考察商业软件和多家单位自研软件 CFD 技术水平的目的,结合型号计算任务,开展了多家软件比对的研讨活动,推动了 CFD 技术及面向工程的自主可控 CFD 软件进步.

## 9 存在的主要问题

国内外在 CFD 验证与确认领域开展了广泛深入的研究工作, 但作者认为在以下几个方面仍存在较大差距.

(1) 现行的指南、规范和标准偏向于原则性的约束, 缺少可操作性.

现有的指南、规范和标准侧重于验证与确认的术语内涵、基本原则、主要流程等, 缺少具有可操作性的实施过程和落地的研究方法, 这也造成具体科研人员仍然对如何进行验证与确认无所适从.

(2) 误差估计和不确定度量化方法解决工程实际问题的能力不足.

国内外在误差估计和不确定度量化方面的研究工作还是集中在处理解析函数和简单流动问题, 鲜有在实际工程问题中发挥作用.

① 复杂工程问题数值离散误差估计理论有欠缺.

现有的数值离散误差估计方法都是基于网格尺度的 Taylor 级数展开, 这其中要求数值解满足光滑假定. 在许多工程问题中流场局部存在间断, 理论上不能使用 Taylor 级数展开, 但是许多学者选择忽视该缺陷, 依然分析全局量 (如气动积分量) 的数值误差. 这种方式对离散误差估计的影响暂无法评估.

离散误差估计需要多套逐渐加密的网格, 并且满足一致加密和统一加密原则. 对于工程问题, 这并不是轻松的工作. 不管是结构网格还是非结构网格, 不管是采取从粗网格出发依次加密的方式还是从密网格出发依次粗化的方式, 实施中都需要考虑到计算成本、外形保型、渐近尺度等多种限制, 这对网格生成技术提出了严峻的挑战, 也影响了离散误差估计的可信度. AIAA 阻力预测会议和高升力预测会议等标模计算研讨会只是给出了简单的加密网格生成指南, 最终得到的网格是否满足一致加密和统一加密要求, 是否能用网格量来表征网格特征尺度, 并没有严格的证明. 因此, 如何构造相容的网格序列开展离散误差估计仍是有待解决的问题.

② 不确定度量化工作停留在理论方法研究, 未真正落地.

不确定度量化是 CFD 验证与确认的核心工作. NASA 在 CFD 2030 路线图: 进展与展望一文中指出, 不确定度量化介入 CFD 问题进展缓慢 (Cary et al. 2021). 现阶段在不确定度量化领域, 学术界和工业界的工作结合不够或者说有些脱节.

a. 不确定因素的表征过于理想化.

不确定因素的有效识别和合理数学表征是不确定度量化研究的前提, 但是现阶段很多研究都简单地将不确定因素假设为高斯或均匀分布, 在原始设定值基础上扰动. 这样获得的不确定度量化结果可能对工程分析没有实质的帮助.

对于真实工程问题而言, 不确定因素来源广泛、种类多样, 包括但不限于系统内部 (材料性质、加工/装配误差等)、外界环境 (激励、来流条件等) 和数学模型 (有/无明确物理意义的参数) 等. 如何合理辨识复杂物理过程中的随机/认知以及混合不确定因素并建立合理的数学描述, 是阻碍不确定度量化解解决工程问题的一大难点. 不确定因素的表征应考虑信息不足、信息多源等各种情况, 发展相应的小样本和多源数据融合方法.

b. 多源不确定度的综合量化理论不完备.

工业部门在产品优化设计、性能评估等关键决策活动中,最关心的是多源不确定因素协同作用下仿真结果的整体不确定度.5.2.6节介绍了两种不确定度综合管理的方法,但是多源不确定度的综合量化理论仍然不完备、不严格. ASME V&V 20-2009 标准中假设参数、数值和试验的不确定度是相互独立的,通过简单的算术累加给出模型的不确定度.考虑到各不确定因素之间可能存在非线性强耦合作用,这一做法显然是不合理的,可能给决策评估带来潜在的风险.如何识别并综合量化所有的不确定因素影响,又不高估仿真结果总的确定度,需要理论方法上的突破.

c. 小样本给不确定度传播模型的建立带来挑战.

CFD 计算的高耗时、高资源消耗限制了样本数量,当前基于代理模型的不确定度传播方法往往是数据驱动的,小样本意味着模型不精确甚至不可靠.另一方面,CFD 模拟所具有的复杂性高、不确定因素多、耦合关系不清楚的特征给模型建立造成了很大困难,也使得当前的不确定度传播模型在物理上往往是“不清楚的”.如何更少的消耗资源,建立泛化能力更强,具有某种物理意义的不确定度传播模型是持续的、有挑战性的研究课题.

d. 不确定度的应用域插值存在潜在风险.

在建模过程中,模型的近似、假设和简化会带来模型不确定度,通常需要高可信的试验数据来量化.将经过确认的模型用于预测活动时,需要将不确定度从确认域推广到应用域.由于物理试验受到尺寸、复杂度、工况等条件的限制,工程实际中往往只有少量确认点,真实运行系统可能与基准试验系统有较大差异,这也导致由确认条件外推到应用环境极具挑战.如何量化模型和预测在应用环境下的置信度,即模型外推的不确定度量,仍是悬而未决的难题.

(3) CFD 验证与确认基准数据不满足日益增长的验证与确认需求.

各国科研人员设计、策划和实施了数目众多的 CFD 基准试验,为验证与确认和可信度评价打下了坚实的基础,但目前离系统、定量评价尚有明显差距.

① 现有标模算例的全面性距离系统评价 CFD 软件可信度尚有明显差距.

CFD 已经广泛深入到航空航天、能源动力、交通运输等重大工程领域,应用场景也拓宽到高超声速飞行、化学反应和燃烧、出水入水多相流动、多部件受控分离等复杂多物理场耦合过程,现有的标模算例无法支撑日益扩展的 CFD 软件可信度评价需求,导致无法客观评价 CFD 是否算的准.这其中试验装置设备、测量手段技术等方面的限制使得获取基准算例数据十分困难.

② 现有标模算例的精细化距离客观评价 CFD 软件可信度尚有明显差距.

确认试验是用于确认模型的专门试验,不同于用于物理发现、标定参数和性能或可靠性测试的传统试验,更强调对试验环境和试验过程不确定因素的识别和量化.但很多标模算例缺少对系统和周围环境的可变性、装置设备干扰等误差和不确定来源的精细量化,这也导致无法给确认计算提供完整的物理建模数据、初始条件和边界条件以及系统激励信息等必要信息.而且很多标模算例侧重于全局目标量的测量,缺少对流场局部细节的定量描述.这导致无法客观评价 CFD 软件的可信度.因此,需要进一步开展精细的风洞试验研究,包括采用非接触测量技术准确获取流场局部细节.

## 10 展 望

CFD 业内普遍存在着“重开发, 轻 VV”的观念, 这一方面是由于科研人员对自己开发的模型、算法和软件比较自信, 另一方面是由于科研人员普遍不清楚全面地进行验证与确认. 随着 CFD 在装备设计和研制中发挥日益重要的作用, CFD 也从常规问题模拟扩展到极端问题模拟, 从单物理场模拟扩展到多物理场耦合模拟, 可信度已成为关乎 CFD 能否大规模工程应用的核心问题, 验证与确认也更受重视. 验证与确认标准、不确定度量化方法、CFD 权威标模数据、验证与确认支撑工具等是 CFD 验证与确认领域重点的研究方向.

验证与确认标准方面, 美国 ASME 和 AIAA、中国空气动力研究与发展中心等机构正持续推进验证与确认标准的制定. 未来验证与确认标准应在现有标准的基础上, 颁布具体的实施细则和详细的研究方法, 或者给出具体的实施示例, 从宏观上、原则上的规范逐渐细化到可操作性强的指导, 通过规范、指南、示例、说明等多种形式全面指导 CFD 软件全流程的验证与确认, 使得相关人员可以有章可循.

不确定度量化方法方面, 需要针对真实复杂工程问题, 联合学术界和工业界共同开展研究. 在此过程中, 需要关注的问题包括:

(1) 合理辨识多物理场耦合过程中的随机/认知以及混合不确定因素 (包括系统内部、外界环境和数学模型等), 并建立合理的概率/区间/证据等数学描述.

(2) 提升高维不确定度量化的分析效率, 平衡不确定度分析的精度需求和效率需求.

(3) 落地认知/混合不确定度量化方法, 从理论方法研究到解决实际工程问题.

(4) 创新多源不确定度综合量化方法, 建立不同来源和数学特征的不确定度统一量化框架, 综合评估数值模拟的整体不确定度.

CFD 权威标模数据方面, 需要适应 CFD 软件多学科耦合、精细预测的发展趋势, 在拓展数据的覆盖范围的同时, 提升数据的完备性. 未来面向大型客机的机翼气弹现象、高超声速飞行器的气动热防护等问题, 需要国内优势单位共同执行系列一体化试验测试与计算确认活动, 一方面获取气动/多学科耦合等全局目标量, 另一方面要更加注重解析流场特征信息的定量数据, 并使传统的确定性标模数据向包含不确定信息的精细化数据发展, 服务国家大型仿真软件研发需求.

验证与确认支撑工具方面, 需要实现验证与确认全流程的定制化、自动化, 科学高效的评估 CFD 软件的代码正确性与模拟可信度. 支撑工具应具备数值误差估计、数值算法验证等功能, 也要具备可信度评价流程定制功能. 另外, 平台需要持续开发和集成验证与确认的最新算法成果, 实现对复杂工程外形数值仿真的误差和不确定度量化的能力, 增加多源误差和不确定因素的量化算法、数据处理算法等, 解决软件解决验证与确认的工程实用化难题.

**致谢** 本文工作得到国家数值风洞工程和国家自然科学基金委员会-中国工程物理研究院 NSAF 联合基金 U2230208 资助.

## 参考文献

陈坚强. 2021. 国家数值风洞 (NNW) 工程关键技术研究进展. *中国科学:技术科学*, 51: 1326-1347 (Chen J Q. 2021.

- Advances in the key technologies of Chinese national numerical windtunnel project. *Scientia Sinica Technologica*, **51**: 1326-1347).
- 陈树生, 刘丽媛, 闫超, 等. 2017. CFD 软件自动化验证确认云平台设计与实现. 航空学报, **38**: 120209 (Chen S S, Liu L Y, Yan C, et al. 2017. Design and realization of automated testing cloud platform for CFD verification and validation. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, **38**: 120209).
- 梁益华, 杨永, 朱朝. 2004. CFD 可信度分析平台 WiseCFD. 第十二届全国计算流体力学会议论文, 775-780 (Liang Y H, Yang Y, Zhu C. 2004. CFD credibility analysis platform WiseCFD. XT, 775-780.)
- 刘智益, 王晓东, 康顺. 2013. 叶顶间隙尺度的不确定性对压气机性能影响的 CFD 模拟. 工程热物理学报, **34**: 628-631 (Liu Z Y, Wang X D, Kang S. 2013. CFD simulation of uncertain tip clearance effect on compressor performance. *Journal of Engineering Thermophysics*, **34**: 628-631).
- 邵帅, 李明, 王年华, 等. 2018. 基于非结构/混合网格模拟黏性流的高阶精度 DDG/FV 混合方法. 力学学报, **50**: 1470-1482 (Shao S, Li M, Wang N H, et al. 2018. High-order DDG/FV hybrid method for viscous flow simulation on unstructured/hybrid grids. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, **50**: 1470-1482).
- 宋赋强, 阎超, 马宝峰, 等. 2018. 锥导乘波体构型的气动特性不确定度分析. 航空学报, **39**: 121519 (Song F Q, Yan C, Ma B F, et al. 2018. Uncertainty analysis of aerodynamic characteristics for cone-derived waverider configuration. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, **39**: 121519).
- 汤涛, 周涛. 2015. 不确定性量化的高精度数值方法和理论. 中国科学:数学, **45**: 891-928 (Tang T, Zhou T. 2015. Recent developments in high order numerical methods for uncertainty quantification. *Scientia Sinica:Mathematica*, **45**: 891-928).
- 王年华, 张来平, 赵钟, 等. 2017. 基于制造解的非结构二阶有限体积离散格式的精度测试与验证. 力学学报, **49**: 627-637 (Wang N H, Zhang L P, Zhao Z, et al. 2017. Accuracy verification of unstructured second-order finite volume discretization schemes based on the method of manufactured solutions. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, **49**: 627-637).
- 王瑞利, 林忠, 袁国兴. 2010. 科学计算程序的验证和确认. 北京理工大学学报, **30**: 353-360 (Wang R L, Lin Z, Yuan G X. 2010. Verification and validation in scientific computing code. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, **30**: 353-360).
- 王运涛, 刘刚, 陈作斌. 2019. 第一届航空 CFD 可信度研讨会总结. 空气动力学报, **37**: 247-261 (Wang Y T, Liu G, Chen Z B. 2019. Summary of the first aeronautical computational fluid dynamics credibility workshop. *Acta Aerodynamica Sinica*, **37**: 247-261).
- 邬晓敬, 张伟伟, 宋述芳, 等. 2015. 翼型跨声速气动特性的不确定性及全局灵敏度分析. 力学学报, **47**: 587-595 (Wu X J, Zhang W W, Song S F, et al. 2015. Uncertainty quantification and global sensitivity analysis of transonic aerodynamics about airfoil. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, **47**: 587-595).
- 熊芬芬, 王瑞利, 吴晓军, 等. 2023. 不确定性量化方法及应用. 北京: 科学出版社.
- 夏侯唐凡, 陈江涛, 邵志栋, 等. 2022. 随机和认知不确定性框架下的 CFD 模型确认度量综述. 航空学报, **43**: 025716 (Xiahou T F, Chen J T, Shao Z D, et al. 2022. Model validation metrics for CFD numerical simulation under aleatory and epistemic uncertainty. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, **43**: 025716).
- 肖思男, 吕震宙, 王薇. 2018. 不确定性结构全局灵敏度分析方法概述. 中国科学:物理学 力学 天文学, **48**: 014601 (Xiao S N, Lv Z Z, Wang W. 2018. A review of global sensitivity analysis for uncertainty structure. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, **48**: 014601).
- 肖钊, 韩旭, 杨刚. 2014. 基于区间技术的模型确认方法及应用. 机械工程学报, **50**: 177-184 (Xiao Z, Han X, Yang G. 2014. Model validation method and its application based on the interval techniques. *Journal of Mechanical Engineering*, **50**: 177-184).
- 赵辉, 胡星志, 张健, 等. 2019. 湍流模型系数的不确定度对翼型绕流模拟的影响. 航空学报, **40**: 122581 (Zhao H, Hu X Z, Zhang J, et al. 2019. Effects of uncertainty in turbulence model coefficients on flow over airfoil simulation. *Acta*

- Aeronautica et Astronautica Sinica*, **40**: 122581).
- 赵炜, 陈江涛, 肖维, 等. 2020. 国家数值风洞工程 (NNW) 验证与确认系统关键技术研究进展. *空气动力学学报*, **38**: 1165-1172 (Zhao W, Chen J T, Xiao W, et al. 2020. Advances in the key technologies of verification and validation system of national numerical windtunnel project., *Acta Aerodynamica Sinica*, **38**: 1165-1172).
- 章超, 刘骁, 陈江涛, 等. 2020. 烧蚀热响应计算中的不确定性传播分析方法研究. *宇航学报*, **41**: 1401-1409 (Zhang C, Liu X, Chen J T, et al. 2020. Study on uncertainty propagation analysis method in ablative thermal response calculation. *Journal of Astronautics*, **41**: 1401-1409).
- 张伟, 王小永, 于剑, 等. 2018. 来流导致的高超声速气动热不确定度量化分析. *北京航空航天大学学报*, **44**: 1102-1109 (Zhang W, Wang X Y, Yu J, et al. 2018. Uncertainty quantification analysis in hypersonic aerothermodynamics due to freestream uncertainties. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, **44**: 1102-1109).
- 中国科学院. 2018. 新型飞行器中的关键力学问题. 北京: 科学出版社.
- AIAA (American Institute of Aeronautics and Astronautics). 1998. Guide for the verification and validation of computational fluid dynamics simulations, AIAA-G-077-1998.
- AIAA. 1999. Assessment of experimental uncertainty with application to wind tunnel testing, AIAA S-071A-1999.
- AIAA. 2003. Assessing experimental uncertainty supplement to AIAA S-071A-1999, AIAA G-045-2003.
- Arendt P D, Apley D W, Chen W. 2012. Quantification of model uncertainty: calibration, model discrepancy, and identifiability. *Journal of Mechanical Design*, **134**: 100908.
- ASME (American Society of Mechanical Engineers). 2005. Test uncertainty. ASME PTC 19.1-2005.
- ASME. 2006. Guide for verification and validation in computational solid mechanics. ASME V&V 10-2006.
- ASME. 2009. Standard for verification and validation in computational fluid dynamics and heat transfer.
- ASME. 2012. An illustration of the concepts of verification and validation in computational solid mechanics. ASME V&V 10.1-2012.
- ASME. 2019. Standard for verification and validation in computational solid mechanics. ASME V&V 10-2019.
- Andrianov G, Burriel S, Cambier S, et al. 2007. OpenTURNS, an open source initiative to treat uncertainties, Risks'N statistics in a structured industrial approach. In: Proceedings of the ESREL'2007 Safety and Reliability Conference, Stavanger: Norway.
- Avdonin A, Polofke W. 2019. Quantification of the impact of uncertainties in operating conditions on the flame transfer function with nonintrusive polynomial chaos expansion. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, **141**: 011020.
- Babuska I, Nobile F, Tempone R. 2007. A stochastic collocation method for elliptic partial differential equations with random input data. *SIAM J Numer Anal*, **45**: 1005-1034.
- Bhattacharyya B. 2022. Uncertainty quantification of dynamical systems by a POD-kriging surrogate model. *Journal of Computational Science*, **60**: 101602.
- Blatman G, Sudret B. 2010. An adaptive algorithm to build up sparse polynomial chaos expansions for stochastic finite element analysis. *Probab Eng Mech*, **25**: 183-97.
- Blatman G, Sudret B. 2011. Adaptive sparse polynomial chaos expansion based on least angle regression. *Journal of Computational Physics*, **230**: 2345-67.
- Blottner F G. 1990. Accurate Navier-Stokes results for the hypersonic flow over a spherical nosetip. *Journal of Spacecraft & Rockets*, **27**: 113-122.
- Brehm C, Hader C, Fasel H F. 2015. A locally stabilized immersed boundary method for the compressible Navier-Stokes equations. *Journal of Computational Physics*, **295**: 475-504.
- Bungartz H J, Griebel M. 2004. Sparse grids. *Acta Numer*, **13**: 1-123.
- Burg C, Murali V K. 2004. Efficient code verification using the residual formulation of the method of manufactured solution. AIAA Paper, 2628.

- Cary A W, Chawner J R, Earl P N, et al. 2021. CFD vision 2030 roadmap: progress and perspectives. AIAA Aviation Forum.
- Casey M, Wintergerste T, Innotec S. 2000. Ercoftac special interest group on quality and trust in industrial CFD: Best practice guidelines. Brussels: European Research Community on Flow, Turbulence and Combustion.
- Choudhary A, Roy C J, Dietiker J F, et al. 2014. Code verification for multiphase flows using the method of manufactured solutions. *International Journals of Multiphase Flow*, **80**: 150-163.
- DoD. 1994. DoD Directive No. 5000.59: Modeling and simulation (M&S) management.
- DoD. 1996. DoD Instruction 5000.61: Modeling and simulation (M&S) verification, validation, and accreditation (VV&A). Defense Modeling and Simulation Office, Office of the Director of Defense Research and Engineering.
- DoD. 1997. DoD Modeling and simulation glossary. from www. msco. mil.
- DoD. 2008. Department of defense standard practice: documentation of verification, validation, and accreditation (VV&A) for models and simulations. US Washington, DC, Department of defense.
- Duan Q, Sorooshian S, Gupta V. 1992. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water Resour. Res.*, **28**: 1015-1031.
- Dunn M C, Shotorban B, Frendi A. 2011. Uncertainty quantification of turbulence model coefficients via Latin hypercube sampling method. *Journal of Fluids Engineering*, **133**: 2913-2921.
- Eça L, Hoekstra M. 2014. A procedure for the estimation of the numerical uncertainty of CFD calculations based on grid refinement studies. *Journal of Computational Physics*, **262**: 104-130.
- Eca L, Klaij C M, Vaz G, et al. 2016. On code verification of RANS solvers. *Journal of Computational Physics*, **310**: 418-439.
- Eça L, Vaz G, Pereira F S, et al. 2019. Numerical and parameter uncertainties: Are they independent?// Verification and Validation Symposium, VVS 2019.
- Eça L, Pereira F S, et al. 2020. On the role of discretization errors in the quantification of parameter uncertainties. Proceedings of ASME 2020 verification and validation symposium, VVS2020-8825, virtual, online.
- Adams B M, Bauman L E, Bohnhoff W J, et al. 2009. Dakota, a multilevel parallel object-oriented framework for design optimization, parameter estimation, uncertainty quantification, and sensitivity analysis: Version 5.4 user's manual. Sandia Technical Report SAND2010-2183.
- Ferson S, Oberkampf W L. 2009. Validation of imprecise probability models. *International Journal of Reliability and Safety*, **3**: 3-22.
- Ferziger J H, Peric M. 1996. Further discussion of numerical errors in CFD. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, **23**: 1263-1274.
- Ferziger J H. 1998. A note on numerical accuracy. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, **8**: 995-996.
- Ferziger J H, Peric M. 2002. Computational methods for fluid dynamics/ 3rd edn. Berlin, Springer-Verlag.
- Fishman G S. 1996. Monte carlo: concepts, algorithms, and applications. New York: Springer-Verlag.
- Gan Y J, Duan Q Y, Gong W, et al. 2014. A comprehensive evaluation of various sensitivity analysis methods: A case study with a hydrological model. *Environmental Modelling & Software*, **51**: 269-285.
- Ghanem R, Spanos P. 1992. Stochastic finite elements: A spectral approach. New York: Springer-Verlag.
- Ghia U, Bayyuk S, Roy C, et al. 2010. The AIAA code verification project-test cases for CFD code verification. AIAA Paper, 125.
- Golub G H, Van Loan C F. 1996. Matrix computations, 3rd edn. Baltimore. The Johns Hopkins University Press.
- Grier B, Alyanak E, White M, et al. 2014. Numerical integration techniques for discontinuous manufactured solutions. *Journal of Computational Physics*, **278**: 193-203.
- Grier B, Figliola R, Alyanak E, et al. 2015. Discontinuous solutions using the method of manufactured solutions on finite volume solvers. *AIAA J*, **53**: 2369-2378.

- Hallissy B P, Hariharan N S, Laiosa J P, et al. 2014. CREATETM-AV quality assurance: best practices for validating and supporting computation-based engineering software. AIAA Paper, 0918.
- Hebert S, Luke E A. 2005. Honey, I shrunk the grids! A new approach to CFD verification studies. AIAA Paper, 685.
- Heeg J, Wieseman C D, Chwalowski P. 2016. Data comparisons and summary of the second aeroelastic prediction workshop. AIAA 2016-3121.
- Hirsch C. 2008. The development of a framework for CFD validation and best practice: the QNET-CFD knowledge base. *Chinese Journal of Aeronautics*, **19**: 105-113.
- Huang H, Giacobello M. 2022. Uncertainty quantification in store separation analysis using kestrel, Design of experiments and surrogate modelling. AIAA2022-1318. AIAA Scitech 2022 Forum San Diego, CA & Virtual.
- IEEE. 1984. IEEE standard dictionary of electrical and electronics terms. ANSI/IEEE Std 100-1984, New York.
- Jiang X, Mahadevan S. 2007. Bayesian risk-based decision method for model validation under uncertainty. *Reliability Engineering & System Safety*, **92**: 707-718.
- Kawai S, Shimoyama K. 2014. Kriging-model-based uncertainty quantification in computational fluid dynamics. 32nd AIAA Applied Aerodynamics Conference.
- Kennedy M C, O'Hagan A. 2001. Bayesian calibration of computer models. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B*, **3**: 425-464.
- Kirkpatrick S, Gelatt C D, Vecchi A. 1983. Optimization by simulated annealing. *Science*, **220**: 671-680.
- Lax P D. 1954. Weak solutions of nonlinear hyperbolic equations and their numerical computation. *Commun. Pure Appl. Math.*, **7**: 159-193.
- Ling Y, Mahadevan S. 2013. Quantitative model validation techniques: new insights. *Reliability Engineering & System Safety*, **111**: 217-231.
- Liu D, Litvinenko A, Schillings C, et al. 2017. Quantification of airfoil geometry-induced aerodynamic uncertainties--comparison of approaches. *Society for Industrial and Applied Mathematics*, **5**: 334-352.
- Liu S, Wang Y, Qin N, et al. 2020. Quantification of airfoil aerodynamic uncertainty due to pressure-sensitive paint thickness. *AIAA J*, **58**: 1432-1440.
- Liu W, Belytschko T, Mani A. 1986a. Probabilistic finite elements for nonlinear structural dynamics. *Comput Methods Appl Mech Engrg*, **56**: 61-81.
- Liu W, Belytschko T, Mani A. 1986b. Random field finite elements. *Internat J Numer Methods Engrg*, **23**: 1831-1845.
- Liu X, Furrer D, Kosters J, et al. 2018. Vision 2040: A roadmap for integrated, multiscale modeling and simulation of materials and systems. NASA/CR-2018-219771.
- Liu Y, Chen W, Arendt P, et al. 2011. Toward a better understanding of model validation metrics. *ASME Journal of Mechanical Design*, **133**: 071005.
- Loeven A, Bijl H. 2008. Airfoil analysis with uncertain geometry using the probabilistic collocation method. 49th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Schaumburg, IL, AIAA 2008-2070.
- Mahaffy, J. 2007. Best practice guidelines for the use of CFD in nuclear reactor safety applications. OECD, Nuclear Energy Agency, Technical Report, NEA/CSNI/R(2007)5.
- Marelli S, Sudret B. 2014. UQLab: A framework for uncertainty quantification in matlab. *Int Conf on Vulnerability, Risk Analysis & Management*, 2554-2563.
- Marini M, Paoli R, Grasso F, et al. 2002. Verification and validation in computational fluid dynamics: The flownet database experience. *Bulletin of the JSME*, **45**: 15-22.
- Mariotti A, Salvetti M V, Omrani P S, et al. 2016. Stochastic analysis of the impact of freestream conditions on the aerodynamics of a rectangular 5: 1 cylinder. *Computers & Fluids*, **136**: 170-192.
- Marshall D D. 2011. A scientific software verification library based on the method of manufactured solutions. AIAA

- Paper, 615.
- NRC (National Research Council). 2012. Assessing the reliability of complex models: mathematical and statistical foundations of verification, validation, and uncertainty quantification. *The National Academies Press*, **Washington**: D.C.
- Murali V K, Burg C. 2002. Verification of 2D Navier-Stokes codes by the method of manufactured solutions. AIAA Paper, 3109.
- NASA (National Aeronautics and Space Administration). 2016a. Standard for models and simulations. NASA-STD-7009A, superseding NASA-STD-7009, 2008.
- NASA. 2016b. Simulation credibility advances in verification, validation and uncertainty quantification. NASA/TP-2016-219422 JANNAF/GL-2016-0001.
- Navah F, Nadarajah S. 2016. On the verification of high-order CFD solvers. *VII European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering*, **Crete**: Greece.
- Niederreiter H. 1992. Random number generation and quasi-monte carlo methods. Philadelphia: SIAM.
- Niederreiter H, Hellekalek P, Larcher G, et al. 1998. Monte carlo and quasi-monte carlo methods. New York: Springer-Verlag.
- Norman R, Philip D. 2006. The Navier-Stokes equations: a classification of flows and exact solutions. Cambridge University Press.
- Oberkampf W L, Roy C J. 2010. Verification and validation in scientific computing. Cambridge University Press.
- Oberkampf W L, Smith B L. 2017. Assessment criteria for computational fluid dynamics model validation experiments. *ASME J. Verif., Validation Uncertainty Quantif.*, **2**: 031002.
- Oberkampf W L, Trucano T G. 2000. Validation methodology in computational fluid dynamics. Fluids 2000 Conference AIAA 2000-2549.
- Park I, Amarchinta H K, Grandhi R V. 2010. A bayesian approach for quantification of model uncertainty. *Reliab Eng Syst Saf*, **95**: 777-785.
- Nair P B, Keane A J. 2002. Stochastic reduced basis methods. *AIAA J*, **40**: 1653-64.
- Platteeuw P, Loeven G, Bijl H. 2008. Uncertainty quantification applied to the k-epsilon model of turbulence using the probabilistic collocation method. 49th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Schaumburg, IL. Reston, Virginia: AIAA.
- Raisee M, Kumar D, Lacor C. 2015. A non-intrusive model reduction approach for polynomial chaos expansion using proper orthogonal decomposition. *Int J Numer Methods Eng*, **103**: 293-312.
- Ricci P, Riva F, Theiler C, et al. 2015. Approaching the investigation of plasma turbulence through a rigorous verification and validation procedure: A practical example. *Physics of Plasma*, **22**: 055704.
- Richard G H, David C M, Jonathan W N. 2015. V&V framework. Sandia National Labs. Rept. SAND2015-7455, Albuquerque, NM.
- Riley M E, Grandhi R V. 2011. Quantification of model-form and predictive uncertainty for multi-physics simulation. *Computers and Structures*, **89**: 1206-1213.
- Roache P J. 1998. Verification and validation in computational science and engineering. Albuquerque, NM, Hermosa Publishers.
- Roy C J, Oberkampf W L. 2011. A comprehensive framework for verification, validation, and uncertainty quantification in scientific computing. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, **200**: 2131-2144.
- Roy C, Blottner F G. 2003. Methodology for turbulence model validation: application to hypersonic flows. *Journal of Spacecraft and Rockets*, **40**: 313-325.
- Roy C J, Nelson C C, Smith T M, et al. 2004. Verification of Euler/Navier-Stokes codes using the method of manufactured solutions. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, **44**: 599-620.
- Rumpfkeil M P, Hanazaki K, Beran P S. 2017. Construction of multi-fidelity locally optimized surrogate models for

- uncertainty quantification. 19th AIAA Non-Deterministic Approaches Conference.
- Rumsey C L, Slotnick J P, Sclafani A J. 2019. Overview and summary of the third AIAA high lift prediction workshop. *Journal of Aircraft*, **56**: 621-644.
- Saltelli A, Tarantola S, Campolongo F, et al. 2004. Sensitivity analysis in practise: a guide to assessing scientific models. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, West Sussex.
- Schlesinger S. 1979. Terminology for model credibility. *Simulation*, **32**: 103-104.
- Schaefer J A, Cary A W, Mani M, et al. 2017. Uncertainty quantification and sensitivity analysis of sa turbulence model coefficients in two and three dimensions. 55th AIAA Aerospace Sciences Meeting.
- Sentz K, Ferson S. 2002. Combination of evidence in Dempster-Shafer theory. Contemporary Pacific.
- Shafer G. 1976. A mathematical theory of evidence. Princeton University Press.
- Shu C W. 1998. Essentially non-oscillatory and weighted essentially non-oscillatory schemes for hyperbolic conservation laws. *Institute for Computer Applications in Science and Engineering (ICASE)*, **1697**: 325-432.
- Slotnick J, et al. 2014. CFD vision 2030 study: A path to revolutionary computational aerosciences. NASA/CR-2014-218178.
- Smolyak S. 1963. Quadrature and interpolation formulas for tensor products of certain classes of functions. *Dokl Akad Nauk SSSR*, **4**: 1042-1045.
- Sod G. 1978. A survey of several finite difference methods for systems of nonlinear hyperbolic conservation laws. *J. Comput. Phys.*, **27**: 1-31.
- Stein M. 1987. Large sample properties of simulations using latin hypercube sampling. *Technometrics*, **29**: 143-151.
- Swiler L P, Eldred M S. 2009. Efficient algorithms for mixed aleatory-epistemic uncertainty quantification with application to radiation-hardened electronics. Sandia National Labs, Rept. SAND2009-5805, Albuquerque, NM.
- Swiler L P, Mayes R L, Eldred M S. 2009. Epistemic uncertainty in the calculation of margins. 50th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, AIAA Paper, 2249, Palm Springs, CA.
- Thomas J L, Diskin B, Rumsey C L. 2008. Toward verification of unstructured-grid solvers. *AIAA J*, **46**: 3070-3079.
- Tinoco E N, Brodersen O P, Keye S, et al. 2018. Summary data from the sixth AIAA CFD drag prediction workshop: CRM cases. *Journal of Aircraft*, **55**: 1352-1379.
- Tong C. 2005. Psuade user's manual. Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL), Livermore: CA.
- Venditti D A and Darmofal D L. 2000. Adjoint error estimation and grid adaptation for functional outputs: application to quasi-one-dimensional flow. *Journal of Computational Physics*, **164**: 204-227.
- Vidanovic N, Rasuo B, Damljjanovic D, et al. 2014. Validation of the CFD code for determination of aerodynamic characteristics of nonstandard AGARD-B calibration model. *Thermal Science*, **18**.
- Voyles I T, Roy C J. 2015. Evaluation of model validation techniques in the presence of aleatory and epistemic input uncertainties. AIAA 2015-1374. AIAA SciTech, Kissimmee, Florida.
- Wang C, Duan Q Y, Gong W, et al. 2014. An evaluation of adaptive surrogate modeling based optimization with two benchmark problems. *Environ. Model. Softw.*, **60**: 167-179.
- Wang C, Duan Q Y, Charles H T, et al. 2016. A GUI platform for uncertainty quantification of complex dynamical models. *Environmental Modelling & Software*, **76**: 1-12.
- Wang N, Yao W, Zhao Y, et al. 2018. A new interval area metric for model validation with limited experimental data. *ASME Journal of Mechanical Design*, **140**: 1-11.
- Wang Y J, Zhang S D. 2016. Uncertainty quantification of numerical simulation of flows around a cylinder using non-intrusive polynomial chaos. *Chinese Physics Letters*, **33**: 090501.
- Loh W. 1996. On Latin hypercube sampling. *Ann Statist*, **24**: 2058-2080.
- Wiener N. 1938. The homogeneous chaos. *Amer J Math*, **60**: 897-936.

- Wilson G E, Boyack B E. 1998. The role of the PIRT process in experiments, code development and code applications associated with reactor safety analysis. *Nuclear Engineering and Design*, **186**: 23-37.
- Woods C N, Starkey R P. 2015. Verification of fluid-dynamic codes in the presence of shocks and other discontinuities. *Journal of Computational Physics*, **294**: 312-328.
- Xiu D, Karniadakis G E. 2002. The wiener-askey polynomial chaos for stochastic differential equations. *SIAM J Sci Comput*, **24**: 619-644.
- Xiu D, Hesthaven J S. 2005. High-order collocation methods for differential equations with random inputs. *SIAM J Sci Comput*, **27**: 1118-1139.
- Xiu D. 2007. Efficient collocational approach for parametric uncertainty analysis. *Commun Comput Phys*, **2**: 293-309.
- Zhang D X. 2002. Stochastic methods for flow in porous media. New York: Academic Press.
- Zhu H Y, Wang G, Liu Y, et al. 2020. Numerical investigation of transonic buffet on supercritical airfoil considering uncertainties in wind tunnel testing. *International Journal of Modern Physics B*, **34**: 2040083.
- Zio E, Apostolakis G E. 1996. Two methods for the structured assessment of model uncertainty by experts in performance assessments of radioactive waste repositories. *Reliab Eng Syst Saf*, **54**: 225-241.

(责任编辑: 倪明玖)

## Advances in verification and validation in computational fluid dynamics

CHEN Jiangtao<sup>1</sup> XIAO Wei<sup>1</sup> ZHAO Wei<sup>1</sup> ZHANG Peihong<sup>1</sup> YANG Fujun<sup>1</sup>  
JIN Tao<sup>1</sup> GUO Yongyan<sup>1</sup> WU Xiaojun<sup>1,\*</sup> CHEN Jianqiang<sup>1,†</sup> WANG Ruili<sup>2</sup> LI Li<sup>3</sup>

<sup>1</sup> China Aerodynamics Research and Development Centers, Mianyang Sichuan 621000, China

<sup>2</sup> Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China

<sup>3</sup> Xi'an Aeronautics Computing Technique Research Institute, AVIC, Xi'an 710000, China

**Abstract** Computational fluid dynamics (CFD) has played an increasingly important role in major engineering fields, and its credibility is the key constraint to its further extensive engineering application. It is widely accepted home and abroad that verification and validation is the only way to evaluate and guarantee the credibility of CFD. Through systematic verification and validation, the potential programming errors can be effectively identified, the reliability of numerical solving process can be guaranteed, the adequacy and prediction capability of mathematical models in the intended use can be objectively evaluated and improved when necessary. In this paper, with regard to two key issues, ‘what is verification and validation’ and ‘how to perform verification and validation’, the research progress of verification and validation in CFD is introduced from the aspects including basic concept, implementation processes, main methods, calibration model experiments and platform tools, with focusing on numerical error estimation and uncertainty quantification. At the end, the shortcomings of current research are reviewed and the key research directions are prospected.

**Keywords** verification and validation, error estimation, uncertainty quantification, calibration model experiment

---

Received: 16 March 2023; accepted: 5 June 2023; online: 6 June 2023

\* E-mail: [huang7766@sina.com](mailto:huang7766@sina.com)

† E-mail: [chenjq@cardc.cn](mailto:chenjq@cardc.cn)

© 2023 *Advances in Mechanics*.



陈江涛, 中国空气动力研究与发展中心副研究员, 主要从事 CFD 验证与确认及不确定度量化工作. 主持和参与国家数值风洞 (NNW) 工程验证与确认理论方法专题、共用技术项目、国家自然科学基金重点项目等 10 余项重大项目. 牵头制定 CFD 验证与确认标准, 填补国内领域空白. 出版验证与确认领域专著 1 部, 译著 3 部, 发表相关论文 40 余篇.



吴晓军, 中国空气动力研究与发展中心研究员, 国家数值风洞 (NNW) 工程副总设计师, 验证与确认系统总设计师, 计算空气动力学 CFD 专委会委员. 长期从事飞行器气动布局设计、飞行器气动关键技术攻关和 CFD 验证与确认等研究. 先后主持完成国家和省部级重大项目 56 项, 获省部级科技进步二等奖 5 项, 三等奖 2 项, 发表学术论文 50 余篇, 译著 3 部.



陈坚强, 中国空气动力研究与发展中心研究员, 空天飞行空气动力学科学与技术全国重点实验室主任, 长期从事计算流体力学方法研究、高速复杂流动及工业 CFD 软件研发等领域的研究工作. 担任国家数值风洞 (NNW) 工程总设计师, 国家重大研发计划重点专项项目首席科学家. 现任中国空气动力学会副理事长, 计算流体力学专委会主任委员, 《Advances in Aerodynamics》创刊主编及多个杂志编委. 主持研发的自主可控 NNW 套装软件面向全国发布和开源, 应用于 120 余家航空航天工业部门和研究院所. 获部委级科技进步一等奖 2 项, 二等奖 8 项, 三等奖 5 项, 发表学术论文 160 余篇, 出版专著 1 部.