



CFD软件可信度评估平台研制与应用

肖维 吕罗庚 付眸 陈江涛 张培红 吴晓军

Development and application of a credibility assessment platform for CFD software

XIAO Wei, LYU Luogeng, FU Mou, CHEN Jiangtao, ZHANG Peihong, WU Xiaojun

引用本文:

肖维, 吕罗庚, 付眸, 等. CFD软件可信度评估平台研制与应用[J]. 空气动力学学报, 2024, 42(10): 60–68. DOI: 10.7638/kqdlxxb-2023.0142

XIAO Wei, LYU Luogeng, FU Mou, et al. Development and application of a credibility assessment platform for CFD software[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2024, 42(10): 60–68. DOI: 10.7638/kqdlxxb-2023.0142

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2023.0142>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于HyperFLOW平台的客机标模CHN-T1气动性能预测及可信度研究

Aerodynamic performance prediction and credibility study of the transport model CHN-T1 based on HyperFLOW solver

空气动力学学报. 2019, 37(2): 301–309 <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2018.0183>

第一届航空CFD可信度研讨会总结

Summary of the first aeronautical computational fluid dynamics credibility workshop

空气动力学学报. 2019, 37(2): 247–261 <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2018.0219>

国家数值风洞(NNW)软件自动化集成与测试平台设计与研发

Design and development of software automated continuous integration and testing platform for National Numerical Windtunnel project

空气动力学学报. 2020, 38(6): 1158–1164 <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2020.0126>

CFD不确定度量化方法研究综述

A review of uncertainty quantification methods for Computational Fluid Dynamics

空气动力学学报. 2021, 39(4): 1–13 <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2021.0012>

海洋运动对台风过境全过程水平风速特性的影响

Effects of ocean movement on the horizontal wind speed characteristics throughout a typhoon landing process

空气动力学学报. 2021, 39(4): 153–161 <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2021.0075>

国家数值风洞(NNW)验证与确认系统关键技术研究进展

Advances in the key technologies of verification and validation system of National Numerical Windtunnel project

空气动力学学报. 2020, 38(6): 1165–1172 <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2020.0138>

地址: 四川省绵阳市二环路南段8号11信箱9分箱

电话: 0816-2463375

Email: kqdlxxb@163.com



关注微信公众号

获得更多资讯信息

文章编号: 0258-1825(2024)10-0060-09

CFD 软件可信度评估平台研制与应用

肖 维, 吕罗庚, 付 眸, 陈江涛*, 张培红, 吴晓军

(中国空气动力研究与发展中心, 绵阳 621000)

摘 要: 建模和模拟过程中引入的近似或假设会导致 CFD 结果存在可信度问题。科学评估 CFD 软件的可信度对软件研发、推广和应用具有重要意义。为提高软件可信度评价的工作效率, 研制了一款 CFD 软件可信度评估平台。该平台由 CFD 软件管理、评价指标体系管理、CFD 作业过程控制、数据后处理、可信度分析和图表报告生成等模块组成, 能够根据评价指标体系对 CFD 软件开展系统科学的量化评估。通过集成 CFD 软件可信度评价所需的算法工具、标模数据和算力资源, 实现了计算数据下载、CFD 作业组织、仿真结果处理与评估等过程的高度自动化。基于该平台对国家数值风洞工程自主研发的 NNW-FlowStar 软件进行了初步评估, 验证了该平台设计方案的高效性、便捷性和工程实用性。

关键词: 计算流体力学; 验证与确认; 评价体系; 可信度平台

中图分类号: TP311; V211.3

文献标识码: A

doi: 10.7638/kqdlxxb-2023.0142

Development and application of a credibility assessment platform for CFD software

XIAO Wei, LYU Luogeng, FU Mou, CHEN Jiangtao*, ZHANG Peihong, WU Xiaojun

(China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

Abstract: The approximations and assumptions made in computational fluid dynamics (CFD) modeling and simulations undermine the credibility of CFD results and prevent CFD software from playing a more significant role. Therefore, it is of great significance to assess the credibility of CFD software for its development and application. However, traditional credibility assessment by managing thousands of CFD simulations and processing gigantic amount of data correctly is tedious and time-consuming. To improve the efficiency of credibility assessment of CFD software, this paper develops a credibility assessment platform based on the B/S architecture and Spring Boot framework. It incorporates seven modules, including the CFD software management module, the assessment index system management module, the simulation process control module, the data post-processing module, the credibility analysis module, the report generation module, and others. These modules enable systematic and scientific quantitative assessments of CFD software according to the assessment index system. By integrating algorithm tools, standard model data, and computing resources required for CFD software credibility assessment, the platform automates standard model data downloading, sample generation, CFD job calculation and monitoring, data processing, simulation results analysis, and report generation, which remarkably reduces the cost and risk in the data production and processing process. A preliminary application of this platform to the evaluation of NNW-FlowStar, an independently developed software by the National Numerical Wind Tunnel Project, demonstrates that the platform is efficient, convenient, and practical in engineering applications.

Keywords: CFD; verification and validation; evaluation system; credibility assessment platform

收稿日期: 2023-08-29; 修订日期: 2023-12-17; 录用日期: 2023-12-31; 网络出版时间: 2024-03-12

基金项目: 国家数值风洞工程(NNW)

作者简介: 肖维(1993—), 男, 四川绵阳人, 助理工程师, 研究方向: CFD 验证与确认. E-mail: xiaov_19@126.com

通信作者: 陈江涛*(1983—), 山东烟台人, 副研究员, 研究方向: CFD 验证与确认. E-mail: chenjt02@sina.cn

引用格式: 肖维, 吕罗庚, 付眸, 等. CFD 软件可信度评估平台研制与应用[J]. 空气动力学学报, 2024, 42(10): 60–68.

XIAO W, LYU L G, FU M, et al. Development and application of a credibility assessment platform for CFD software[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2024, 42(10): 60–68(in Chinese). doi: 10.7638/kqdlxxb-2023.0142

0 引 言

CFD 软件作为一种快速、经济的气动分析技术,主要用于数值求解雷诺平均 Navier-Stokes(Reynolds-averaged Navier-Stokes, RANS)方程,在航空、航天、船舶等高端制造领域应用广泛。但由于受数值格式、离散误差及物理模型中转捩、湍流、化学反应等因素的影响,仿真结果存在着不可忽视的误差和不确定性,导致 CFD 可信度存疑,对 CFD 工程预测的准确性造成较大的影响。评估 CFD 软件的可信度,提供软件可信证据,对软件的研发、推广和工程应用意义重大。

验证与确认(verification and validation, V&V)是评估 CFD 软件可信度的主要技术手段^[1]。1998 年, AIAA 发布了第一个面向 CFD 的验证与确认指南^[2]。随后, CFD 验证与确认的概念和重要性逐渐获得普遍认同和广泛关注,成为过去数十年的研究热点,研究内容主要包括标准规范、标模数据、V&V 相关专题研讨会以及理论方法等。在标准建设方面, 2009 年 ASME 发布了计算流体力学和传热学验证与确认标准^[3], 2016 年 NASA 发布了模型和模拟标准^[4]。在标模数据方面, 国外建设了若干具有高可信试验数据的标模算例数据库, 包括 NASA 湍流模拟数据库^[5]、欧洲 ERCOFTAC 数据库^[6]和 AGARD 系列 CFD 确认试验数据库^[7]等; 国内中航工业西安航空计算技术计算所(简称“航空工业计算所”)系统性开展了 CFD 验证与确认数据研究工作, 并开发了数据库系统^[8]。在专题研讨方面, 美国航空航天学会从 2001 年起, 先后组织了多届阻力预测会议^[9]和高升力预测会议^[10]等; 国内同样举办了多场类似的学术交流活动: 2003—2005 年, 航空工业计算所和中国空气动力研究与发展中心(简称“气动中心”)连续组织了两届 CFD V&V 研讨会, 出版了气动计算软件可信度研究专辑^[11]; 2018 年, 气动中心使用国内自主设计的 CHN-T1 标模, 组织召开了航空 CFD 可信度研讨会^[12]。这些会议吸引了大量 CFD 开发者参会, 会议结果充分证实 CFD 存在较大的可信度问题。在理论研究方面, Oberkampf 和 Roy^[13]从科学计算建模与仿真的角度, 详尽地总结和阐述了验证与确认的方法体系, 涉及软件工程、代码验证、精确解、解验证、离散误差、模型确认和不确定度量化等内容。精确解测试、制造解验证方法^[14]、离散误差估计^[15]和不确定度量化^[16]等是 CFD 领域验证与确认研究的热点。国内一方面对国外方法进行跟随、改进和应用^[17-20], 另一方面也在思考和探索工程实用的 CFD 验证与确认方法体

系。2007 年, 邓小刚等介绍了 CFD 验证与确认发展进展, 对我国开展 CFD 验证与确认研究工作提出了若干建议^[21]; 2010 年, 张涵信等综述了 CFD 中不确定度的概念和研究方法, 并参考风洞试验提出了一种 CFD 不确定度的数学表达^[22]; 2018 年, 气动中心启动国家数值风洞(National Numerical Windtunnel, NNW)工程建设, 将 CFD 验证与确认研究作为主要内容之一^[23], 从 V&V 标准、数据、理论方法和工具等多方面同步开展研究工作; 2023 年, 陈江涛等对计算流体力学验证与确认的最新研究进展进行了总结^[24]。

在软件工具方面, 国外公开的资料较少。国内航空工业计算所较早开展了相关工作, 开发了一款 C/S 架构的气动数值模拟软件可信度分析平台 WiseCFD^[25], 该平台基于自动化和流程化的理念, 实现了算例数据管理、计算软件管理、作业管理和结果分析等功能, 支持验证、确认和应用 3 类算例。何磊等针对某大型通用 CFD 软件的研制需求, 开发了 CFD 软件自动化测试平台, 初步实现 CFD 软件的自动化测试功能^[26]。陈树生等基于云计算思想, 研制了一款以自动化测试解决方案为主的验证与确认云平台, 实现了测试过程与数据库一体化, 提高了被测软件质量和开发效率^[27]。综合来看, 相比于 V&V 数据和理论方法研究, 国内外关于 V&V 专用工具的研究工作较少, 且由于早期国内关于 CFD 验证与确认的概念内涵、理论和工程化实施等缺乏统一认识和指南, 导致现有工具对于 V&V 方法和数据的集成不够丰富, 在测评方案或算例的选择上没有统一规范, 对软件的可信度评估不够系统全面。因此, 利用计算机技术集成 V&V 标准、数据和理论方法, 研制自动化软件平台, 实现 CFD 计算数据和评价过程的高效管理, 具有重要的工程应用价值。

为此, 本文研制了一款 CFD 软件可信度评估平台。该平台对 NNW 工程关于 V&V 标准、数据和理论方法等内容的最新建设成果进行了集成, 实现了基于评价指标体系对 CFD 软件进行全面定量评估的功能, 评估过程具有较高的自动化程度。本文首先简要介绍平台使用的可信度评价模型, 然后详细介绍平台的设计、架构、功能模块以及技术方案等内容, 最后展示平台在 NNW 软件可信度评估中的初步应用。

1 可信度评价模型

可信度评价模型^[28]由“评价指标体系”和“一致性度量方法”两部分组成, 前者解决可信度评价的“系统性”和“科学性”问题, 后者解决可信度评价

的“客观性”和“量化”问题。

1.1 评价指标体系

评价指标体系是由评价目标、评价指标、评价算例及三者间的层次化结构关系构成的整体,如图1所示,它研究评价哪些内容、对比哪些气动参数、选用什么算例等问题。

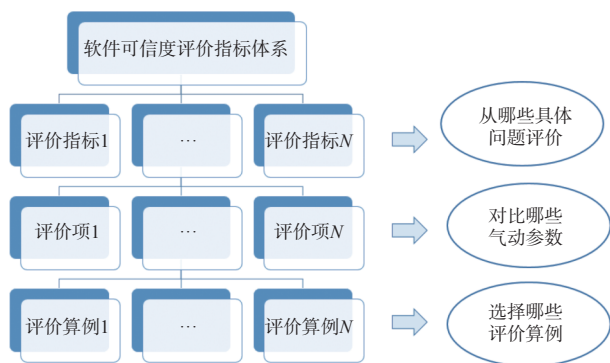


图1 评价指标体系示意图

Fig. 1 Schematic diagram of assessment index system

可信度评价指标体系的设计思路融合了AIAA提出的确认分层^[2]和邓小刚建议的流动分类^[21]思想。根据流动类型及流动特征耦合度,将复杂问题逐级分解,形成流动物理特征由简单到复杂的多级评价指标。为了保证指标体系的科学性,指标分解遵循目的性、系统性、典型性、可操作、可量化和可拓展6个原则。按照关注的主要流动类型,初步针对定常气动力问题、非定常气动力问题、动态气动力问题、气动热问题和气动弹性问题等5类流动问题,分别建立评价指标体系,指标涵盖从低速到高速等不同速域下的基本流动现象,如附着流、分离流、激波等,以及典型的飞行器工程问题,共收录140余个标模算例,可为CFD软件可信度评估提供科学的指导方案。

1.2 一致性度量方法

一致性度量方法用于量化描述CFD和试验结果的吻合程度。传统CFD评价中,一般定性地描述计算结果的好坏,具有较强的随意性和主观性。为了提高评价结果的客观性,有必要使用定量的评价方法。Oberkampf和Trucano^[29]提出了一种度量方法,可以较为有效地量化评价仿真/试验结果的一致性,其公式如下:

$$V = 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tanh \left| \frac{y_c^i - y_e^i}{y_e^i} \right| \quad (1)$$

式中: V 表示一致性度量结果,度量分数区间位于 $(0,1]$,仅当仿真和试验结果完全一致时,评分为1; y_c^i 、 y_e^i 分别表示第 i 个测点处的CFD结果和试验结

果。该方法基于相对误差,计算简单、内涵清晰,引入的双曲正切函数使度量结果归一化,并且在一定范围内,度量结果与相对误差能保持近似线性关系。

2 平台设计与研制

2.1 概述

可信度评估平台的主要功能是基于评价指标体系,对仿真和试验结果的一致性进行系统化和定量化的评估。平台通过流程集成,实现了CFD软件集成、标模数据下载、CFD作业组织管理、CFD数据处理、量化评价和报告生成等评价过程的高度自动化,极大地降低了CFD计算、监控、管理和数据处理的成本和风险。

2.2 整体架构

可信度评估平台的总体设计方案如图2所示,其思想是:以验证、确认及可信度评价方法为理论基础,以验证与确认标模数据库为数据基础,将算法、数据、软件管理、CFD作业过程管理、数据分析比较、报告生成等功能集成到统一的平台。通过平台,用户可便捷地使用CFD验证、确认及可信度评价所需要的资源和工具。

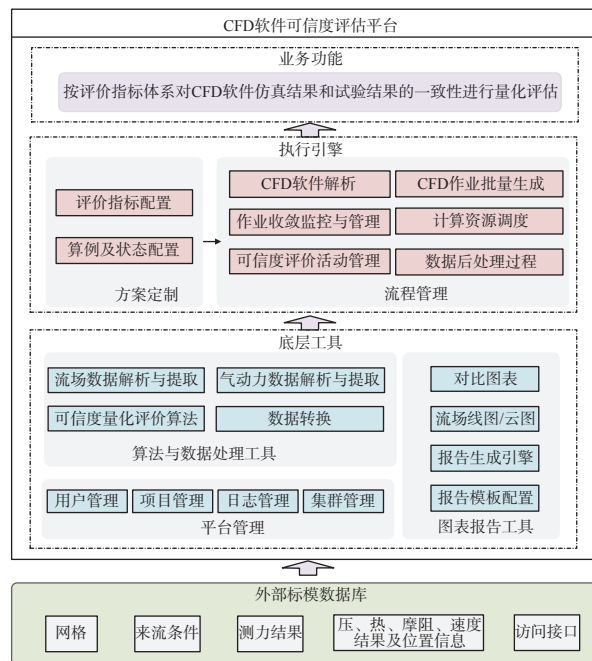


图2 可信度评估平台总体设计方案

Fig. 2 Overall design scheme of credibility evaluation platform

平台基于浏览器/服务器(Browser/Sever, B/S)架构设计,采用Vue2+ElementUI+Spring Boot+Mybatis-plus技术框架,并利用Docker容器化技术实现动态扩缩容和跨平台应用,具有很好的可移植性和安全

性。图 3 是平台的物理架构说明,包括平台内部服务器、外部标模数据库服务器和高性能计算机集群等设备。其中,平台服务器负责业务的请求与响应、CFD 可信度评价活动的管理等任务;高性能计算机集群提供算力资源和计算调度服务;标模服务器提供 CFD 计算和评价所需的标模数据资源,包括网格、来流参数等计算输入和用于对比的试验(参考)结果,通过 SOAP 协议与可信度平台进行数据传输^[30]。执行评价任务时,平台自动从标模库获取计算参数和试验结果,然后在集群上发布和监控 CFD 作业,待计算完成后提取仿真结果进行评价分析。

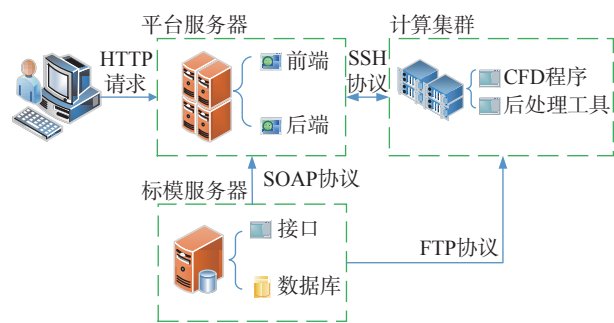


图 3 物理架构
Fig. 3 Physical architecture

2.3 功能模块

可信度评估平台包括 CFD 软件管理模块、评价指标体系管理模块、CFD 作业过程控制模块、数据后处理模块、可信度分析模块、图表报告生成模块和平台系统管理模块等 7 个模块。

1) CFD 软件管理模块。CFD 软件管理模块用于将 CFD 软件集成到平台,并配置软件的“使用说明”,包括软件执行过程、指令、输入输出文件和参数等信息。

2) 评价指标体系管理模块。评价指标体系管理模块用于创建和管理评价指标体系。评价指标体系由平台管理员创建和发布,供普通用户使用。创建评价指标体系时,需要配置评价指标,然后从标模库中选择评价算例、计算状态,明确需要对比的气动数据(如升力、压力等)。评价指标体系在可信度评价过程中具有非常重要的作用。在创建 CFD 作业时,平台根据评价指标体系选择算例和计算状态,从标模库下载计算网格和计算参数;在 CFD 计算完成后,根据评价指标体系配置对比数据,从标模库下载试验结果,调用后处理模块提取相应的仿真结果。

3) CFD 作业过程控制模块。CFD 作业过程控制模块用于发布、监控和管理 CFD 计算作业。模块根据评价指标体系的配置信息,下载标模数据生成

CFD 控制文件,然后在集群上批量发布 CFD 作业,保存作业 ID,并定时查询 CFD 作业的运行状态,对作业进行收敛性判断和管理,比如提前终止已收敛的作业和重新计算发散的作业等。在浏览器前端,模块为用户提供可视化的 CFD 作业监控面板,可查看可信度评估的计算进度,检查确认作业收敛性。

4) 数据后处理模块。数据后处理模块用于提取 CFD 仿真结果,包括升力、阻力、压力和速度等。对于升力、阻力等积分量,平台可直接从 CFD 软件输出的文本文件中获取。对于流场数据,如压力和速度等,平台需要解析流场文件,识别流场中的目标部件和目标截面,提取待对比的参数。该过程要求标模数据按照统一规范录入数据库,如参数命名规范、测点坐标规范和网格边界命名规则等。根据标模数据录入规范和业务需求,基于 Visualization toolkit(VTK) 库定制开发了流场解析与数据提取程序,可以解析 CGNS、PLT 等不同格式的流场文件,支持在直角坐标系和柱坐标系下提取静压、压力系数、速度、摩阻、热流等结果,并进行插值及无量纲化处理。数据后处理流程见图 4。

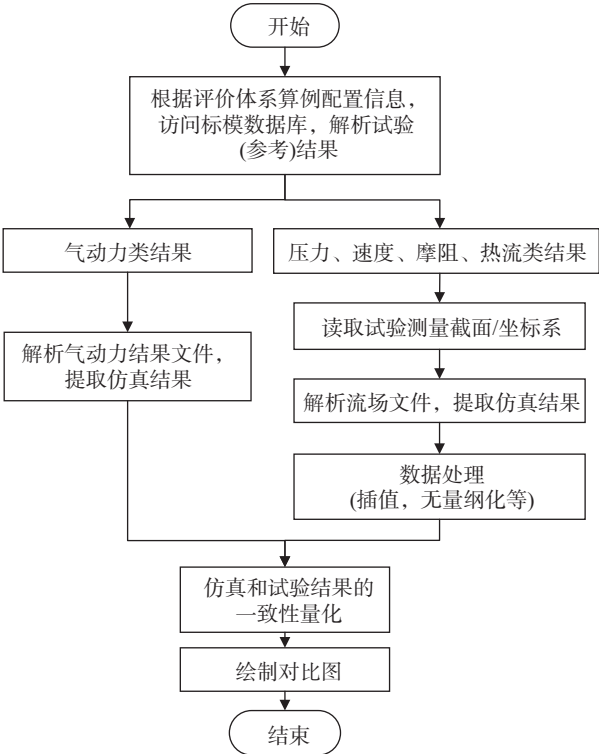


图 4 数据处理与一致性量化流程图
Fig. 4 Flowchart of data processing and quantization comparison

5) 可信度分析模块。可信度分析模块的功能是对仿真结果和试验结果的一致性进行量化评价,然后将评分结果和对应的评价指标关联,再按照评价体系

的层次结构和指标权重关系,将评分逐级加权汇总,最后获得各指标的综合评价结果。

6) 图表报告生成模块。图表报告生成模块基于 Echarts 图表框架和 Poi-tl 模板引擎开发,用于生成仿真和试验数据的对比图表和评估报告。

7) 平台系统管理模块。平台系统管理模块用于平台的角色访问控制、用户管理、权限管理、密码策略管理、安全管理和日志管理等。

2.4 软件集成及作业管理方案

CFD 软件集成与作业管理方案是正确驱动 CFD 软件进行数值模拟,实现可信度评估过程自动化的关键。

2.4.1 软件集成方案

将 CFD 软件集成到可信度平台后,需要配置软件的“使用说明”,平台通过解析配置信息,控制和驱动 CFD 程序正确运行。由于 CFD 软件没有统一开发规范,为了最大化兼容不同软件,通过调研提出了一种较为通用的配置方案,配置内容包括:程序组成及运行流程、文件系统和参数映射关系。

程序组成及运行流程配置是指定义 CFD 软件的计算流程及程序。CFD 仿真过程一般包括前处理、流场解算和后处理,但不同软件在实现方式上有一定差异。为此,平台支持自定义仿真过程,每个步骤分别设置执行程序、路径和指令等内容。

文件系统配置用于帮助平台准确读写 CFD 软件的输入和输出文件。设计了一种通用的文件目录结构规范,如图 5 所示,其以算例为根目录,根路径下可以有一个网格文件夹和多个状态文件夹。平台基于文件目录规范,配置和解析 CFD 软件的输入和输出文件。考虑到输出结果的多样性,输出文件采用分类配置的方案,将标模库中的试验结果标记为 8 类,见表 1。通过对每类结果设置对应的输出文件名称及路径等内容,确保结果的正确解析。

参数映射关系配置指建立平台内部数据库、外部标模数据库、CFD 软件文件系统之间相同参数的变量名称的对应关系,解决相同变量在各系统间的命名不一致的问题。

2.4.2 作业管理方案

对 CFD 的计算进度和收敛状态进行监控和管理可以大幅提高评价效率。CFD 计算没有严格的收敛标准,错误判断收敛性将会导致评价失信。为了兼顾效率和准确性,平台采取“自动判断+主动确认”的作业管理策略。作业收敛判定方法为:当前迭代步的残差相较于最大残差的下降值达到收敛标准,且气动

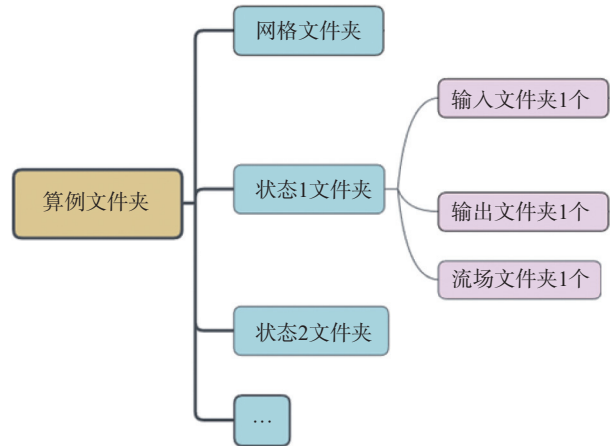


图 5 文件目录结构

Fig. 5 File directory structure

表 1 数据分类标签

Table 1 Data classification labels

数据标签	结果类型
Force	定常气动力结果
Force_unsteady	非定常气动力结果
Derivative	气动导数结果
DOF	六自由度结果
Pressure	压力结果
Heat	热流结果
Velocity	速度结果
Friction	摩阻结果

力结果的波动幅度小于设定阈值。作业发散的判定方法为:倒数 N 个计算步的平均残差比初始残差升高一定数量级或出现“NAN”等非法数值。用户可以为每个算例设置收敛和发散的标准,如图 6 所示。

图 6 收敛规则配置界面截图

Fig. 6 Screenshot of convergence rule configuration interface

对于收敛的作业,平台将作业状态标记为收敛,并停止作业;对于发散的作业,平台将修改 CFL (Courant-Friedrichs-Lewy number) 数后重新发起作业,直到重发次数达设定上限;对于计算步数达到设定值但仍未收敛或发散的作业,平台将增加计算步数进行续算,直到收敛或续算次数达设定上限。

上述规则对明显收敛或发散的 CFD 作业比较适用。当无法判断收敛状态或重发和续算次数达到上限后,作业会被标记为其他状态。用户可在作业监控

界面, 检查每个作业的残差曲线, 对于误判或标记为其他状态的作业, 可在线修改控制文件, 然后对作业进行重算, 支持批量操作。为了确保可信度评价结果的正确性, 必须由用户主动确认所有 CFD 作业“真正”收敛后, 平台方可执行后续步骤。

3 平台应用

NNW-FlowStar(简称 FlowStar)是 NNW 工程自主研发的一款基于非结构网格的大型通用 CFD 软件^[31], 面向航空航天领域复杂流动问题的数值模拟需求。本节使用研制的 CFD 软件可信度评估平台, 初步评估分析 FlowStar 软件对定常气动力/热问题的模拟可信度。

3.1 评价指标体系

定常气动力/热评价指标体系的一级评价指标分为基本流动问题指标和工程问题指标。其中: 基本流动问题指标按照速域分解为低速、亚跨声速、超声速和高超声速等二级指标, 各速域再根据流动特征, 分解为附着流动、分离流动、激波和激波/边界层干扰等三级指标, 评价参数主要为压力、速度、热流和摩阻等直接计算量, 评价算例为简单模型; 工程问题指标按飞行器特征分解为大展弦比飞机、小展弦比飞机、弹箭类飞行器和高超飞行器等二级指标, 各飞行器按照飞行状态继续分解为巡航气动特性、高升力气动特性、大迎角气动特性和气动热特性等三级指标, 评价参数主要为气动力和气动力矩等积分量, 评价算例多为复杂工程模型。评价选用的标模算例共 32 个, 涵盖平板、后台阶、二维翼型、三维机翼、多段翼、锥柱球类模型、翼身组合体、旋成体、大钝头体等外形。

3.2 评估过程

使用可信度平台进行软件评价的流程如图 7 所示。

本文案例的主要过程如下:

- 1) 登录平台, 导入和配置 CFD 软件。
- 2) 配置评价指标体系。配置界面如图 8 所示, 在页面左侧, 使用树状图结构配置和组织评价指标。在页面右侧, 可先通过算例名称或流动特征等信息检索标模算例, 然后选择评价算例和状态。为方便筛选, 页面展示了每个状态的马赫数和迎角等信息, 并以表 1 中的数据分类标签标注该状态具有的试验结果类型。
- 3) 创建评价任务, 设置算例信息, 包括计算核数、控制文件模板和收敛性判断标准等。
- 4) CFD 作业自动生成、发布和监控。图 9 是作业监控界面的示意图。

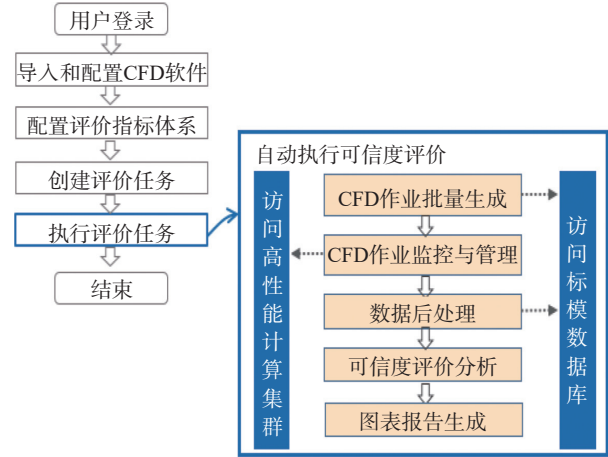


图 7 可信度评价流程
Fig. 7 Credibility assessment process



图 8 评价指标体系配置界面截图
Fig. 8 Screenshot of assessment indicator system configuration interface

5) 数据自动处理。计算全部收敛后, 根据评价指标体系, 下载试验结果, 提取仿真结果, 生成对比图表。图 10 是平台生成的压力分布曲线和气动特性曲线的示意图。

6) 可信度综合评价。首先使用 1.2 节的方法对仿真和试验结果的一致性进行量化评分, 比如图 10(a、b)的评分结果分别是 0.951 和 0.988。然后按照评价指标体系逐级进行汇总, 图 11 给出了“大展弦比飞机-高升力气动特性”指标按照层次结构的评价汇总结果(括号内为分数)。在本文案例中, 未考虑不同算例和指标间的权重差异。

7) 报告自动生成。评价完成后, 自动生成报告, 内容包括评价方案、评价算例简介、综合评价结果、所有算例的数据对比图及其对应分数等。

3.3 评估结果

图 12(a)和图 12(b)分别是 FlowStar 软件在基本流动问题和工程问题上的评分雷达图, 评分越高表示 CFD 结果与试验结果越接近, 可信度越高。整体而言, 基于本次选择的考核算例, FlowStar 软件各指



图 9 作业监控界面

Fig. 9 Screenshot of job monitoring interface

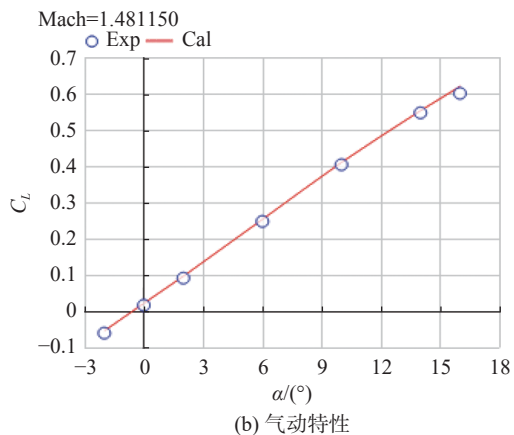
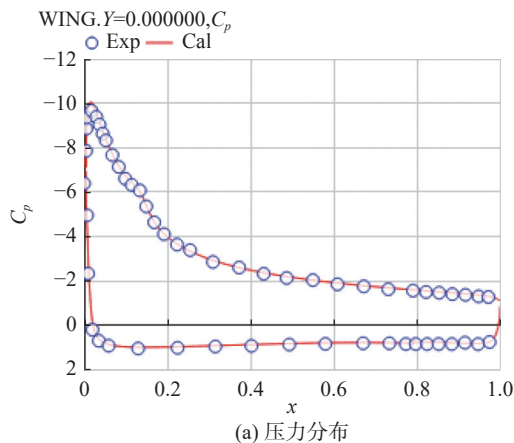


图 10 平台生成的压力分布曲线和气动特性曲线

Fig. 10 Pressure distribution curve and aerodynamic characteristic curve generated by the platform

标的综合评分较高,表明软件在各类问题上均具有较高模拟可信度。同时,评价结果直观地展示了软件在不同问题上的模拟能力的差异。以基本流动问题为例,FlowStar 在附着流和激波指标上评分很高,在分离流和激波/边界层干扰指标上则评分略低。对分离流等复杂湍流的模拟能力不佳是 CFD 普遍存在的问题^[32],这也间接说明了平台使用的评价模型的有

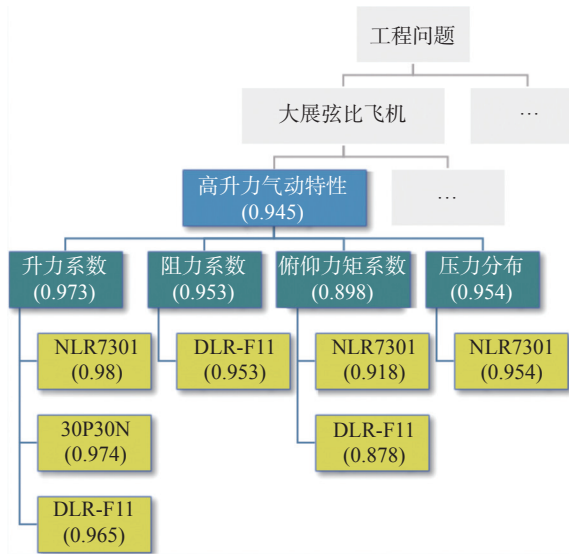


图 11 综合评价示意图

Fig. 11 Schematic diagram of comprehensive assessment

效性。

通过该案例,可以验证本文研制的可信度评估平台能够高效便捷地对 CFD 软件进行系统全面的可信度评估。但本次评估中,每个指标选择的评价算例仍较少,后续将增加标模算例,并加入更多软件的评价结果进行横向对比,进行更全面充分的评估。

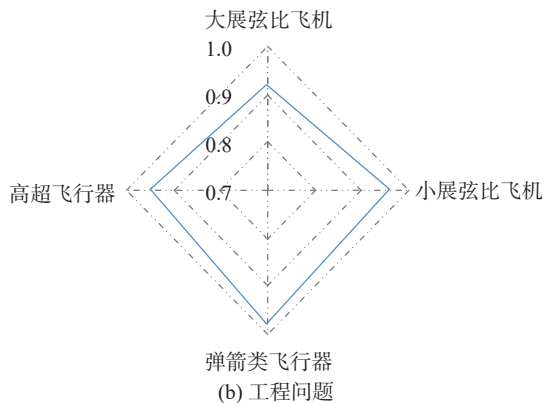
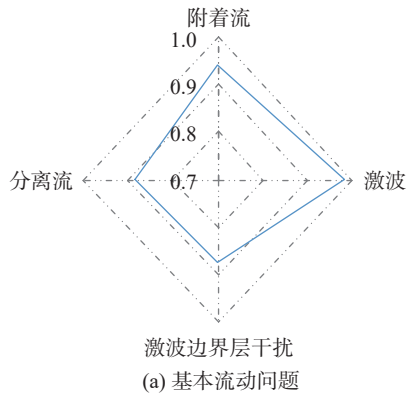


图 12 基本流动问题和工程问题的评估结果

Fig. 12 Evaluation results of basic flow problems and engineering problems

4 结 论

本文研制了一款 B/S 架构的 CFD 软件可信度评估平台,具备对 CFD 软件开展系统化和定量化可信度评估的功能。平台集成了 CFD 软件可信度评估所需要的算法资源、数据资源和算力资源,可以高度自动化地完成 CFD 作业组织与管理、数据后处理和可信度分析等评估过程。基于平台,初步评估了 NNW 研发的 FlowStar 软件,证明了可信度评估平台技术方案的便捷性和实用性。下一步,将完善 CFD 软件验证与确认的功能,优化可信度评估模型,增加标模算例,建成功能全面的 CFD 软件验证与确认平台。

参 考 文 献:

- [1] MEHTA U B. Credible computational fluid dynamics simulations[J]. AIAA Journal, 1998, 36: 665–667.
doi: 10.2514/3.13878
- [2] AIAA. Guide for the verification and validation of computational fluid dynamics simulations, G-077-1998 [R]. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics & Astronautics, 1998.
doi: 10.2514/4.472855
- [3] ASME. ASME V&V 20-2009, Standard for verification and validation in computational fluid dynamics and heat transfer[S]. American Society of Mechanical Engineers, 2009.
- [4] NASA. NASA-STD-7009A, Standard for models and simulations[S]. Washington, D. C. : NASA, 2016.
- [5] PUMSEY C. Turbulence modeling resource[EB/OL]. (2021) [2023-12-31]. <http://turbmodels.larc.nasa.gov/>.
- [6] CASEY M, WINTERGERSTE T. ERCOFTAC special interest group on “quality and trust in industrial CFD”: Best Practice Guidelines[M]. Brussels: European Research Community on Flow, Turbulence and Combustion, 2000.
- [7] VIDANOVIC N, RASUO B, DAMLJANOVIC D, et al. Validation of the CFD code used for determination of aerodynamic characteristics of nonstandard Aeronautics[J]. Thermal Science, 2006, 19(2): 105–113.
- [8] 齐志敏, 曹平宽. CFD 软件验证确认数据库系统的建设研究[J]. 电子科技, 2014, 27(6): 153–155.
QI Z M, CAO P K. Construction of CFD software verification and validation of database systems[J]. Electronic Science and Technology, 2014, 27(6): 153–155(in Chinese).
- [9] TINOCO E N, BRODERSEN O P, KEYE S, et al. Summary data from the sixth AIAA CFD drag prediction workshop: CRM cases[J]. Journal of Aircraft, 2018, 55(4): 1352–1379.
doi: 10.2514/1.c034409
- [10] RUMSEY C L, SLOTNICK J P, SCLAFANI A J. Overview and summary of the third AIAA high lift prediction workshop[J]. Journal of Aircraft, 2019, 56(2): 621–644.
doi: 10.2514/1.C034940
- [11] 陈作斌, 白文. 气动计算分析软件可信度研究专辑[J]. 航空计算技术, 2004, 32(S).
CHEN Z B, BAI W. Special edition for credibility aerodynamic computation[J]. Aeronautical Computer technique, 2004, 32(S) (in Chinese).
- [12] 王运涛, 刘刚, 陈作斌. 第一届航空 CFD 可信度研讨会总结[J]. 空气动力学学报, 2019, 37(2): 247–261.
WANG Y T, LIU G, CHEN Z B. Summary of the first aeronautical computational fluid dynamics credibility workshop[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2019, 37(2): 247–261(in Chinese).
doi: 10.7638/kqdlxxb-2018.0219
- [13] OBERKAMPF W L, ROY C J. Verification and validation in scientific computing[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2010.
- [14] ROACHE P J. Code verification by the method of manufactured solutions[J]. Journal of Fluids Engineering, 2002, 124(1): 4–10.
doi: 10.1115/1.1436090
- [15] CELIK I B, GHIA U, ROACHE P J, et al. Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications[J]. Journal of Fluids Engineering, 2008, 130(7): 078001.
doi: 10.1115/1.2960953
- [16] MEHTA U, EKLUND D, ROMERO V, et al. Simulation credibility: Advances in verification, validation, and uncertainty quantification: NASA/TP-2016-219422[R]. Washington, D. C. : NASA, 2016.
- [17] 王年华, 张来平, 赵钟, 等. 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[J]. 力学学报, 2017, 49(3): 627–637.
WANG N H, ZHANG L P, ZHAO Z, et al. Accuracy verification of unstructured second-order finite volume discretization schemes based on the method of manufactured solutions[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2017, 49(3): 627–637(in Chinese).
- [18] 陈坚强, 张益荣. 基于 Richardson 插值法的 CFD 验证和确认方法的研究[J]. 空气动力学学报, 2012, 30(2): 176–183.
CHEN J Q, ZHANG Y R. Verification and validation in CFD based on the Richardson extrapolation method[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2012, 30(2): 176–183(in Chinese).
- [19] 陈江涛, 章超, 吴晓军, 等. 考虑数值离散误差的湍流模型选择引入的不确定度量化[J]. 航空学报, 2021, 42(9): 226–237.
CHEN J T, ZHANG C, WU X J, et al. Quantification of turbulence model-selection uncertainties considering discretization errors[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(9): 226–237(in Chinese).
doi: 10.7527/S1000-6893.2021.25741
- [20] 陈鑫, 王刚, 叶正寅, 等. CFD 不确定度量化方法研究综述[J]. 空气动力学学报, 2021, 39(4): 1–13.
CHEN X, WANG G, YE Z Y, et al. A review of uncertainty quantification methods for Computational Fluid Dynamics[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2021, 39(4): 1–13(in Chinese).
doi: 10.7638/kqdlxxb-2021.0012
- [21] 邓小刚, 宗文刚, 张来平, 等. 计算流体力学中的验证与确认[J]. 力学进展, 2007, 37(2): 279–288.
DENG X G, ZONG W G, ZHANG L P, et al. Verification and validation in computational fluid dynamics[J]. Advances in Mechanics, 2007, 37(2): 279–288(in Chinese).
- [22] 张涵信, 查俊. 关于 CFD 验证确认中的不确定度和真值估算[J]. 空气动力学学报, 2010, 28(1): 39–45.
ZHANG H X, ZHA J. The uncertainty and truth-value assessment in the verification and validation of CFD[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2010, 28(1): 39–45(in Chinese).
- [23] 赵炜, 陈江涛, 肖维, 等. 国家数值风洞 (NNW) 验证与确认系统关键技术研究进展[J]. 空气动力学学报, 2020, 38(6): 1165–1172.
ZHAO W, CHEN J T, XIAO W, et al. Advances in the key technologies of verification and validation system of National Numerical Windtunnel Project[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2020, 38(6): 1165–1172(in Chinese).
doi: 10.7638/kqdlxxb-2020.0138
- [24] 陈江涛, 肖维, 赵炜, 等. 计算流体力学验证与确认研究进展[J]. 力学进展, 2023, 53(3): 626–660.
CHEN J T, XIAO W, ZHAO W, et al. Advances in verification and

- validation in computational fluid dynamics[J]. *Advances in Mechanics*, 2023, 53(3): 626–660(in Chinese).
doi: [10.6052/1000-0992-23-012](https://doi.org/10.6052/1000-0992-23-012)
- [25] 梁益华, 杨永, 朱朝, 等. CFD 可信度分析平台 WiseCFD[C]//第十二届全国计算流体力学会议, 西安, 2004.
LIANG Y Y, YANG Y, ZHU C, et al. Analyze platform of CFD reliability-wiseCFD[C]//12th National Computational Fluid Dynamics Conference, Xi'an, 2004 (in Chinese).
- [26] 何磊, 赫新, 马戎, 等. 大型 CFD 软件自动化测试平台的初步设计与实现[J]. *空气动力学学报*, 2016, 34(4): 418–425.
HE L, HE X, MA R, et al. Preliminary design and application of CFD software automatic testing platform[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2016, 34(4): 418–425(in Chinese).
doi: [10.7638/kqdlxxb-2014.0102](https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2014.0102)
- [27] 陈树生, 刘丽媛, 阎超, 等. CFD 软件自动化验证确认云平台设计与实现[J]. *航空学报*, 2017, 38(3): 120209.
CHEN S S, LIU L Y, YAN C, et al. Design and realization of automated testing cloud platform for CFD verification and validation[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2017, 38(3): 120209(in Chinese).
doi: [10.7527/S1000-6893.2016.0173](https://doi.org/10.7527/S1000-6893.2016.0173)
- [28] 肖维, 赵娇, 陈江涛, 等. CFD 软件可信度评价原型系统研究[C]//第19届全国计算流体力学会议, 南京, 2021.
XIAO W, ZHAO J, CHEN J T, et al. Research on prototype system for credibility assessment of CFD software[C]//19th National Computational Fluid Dynamics Conference, Nanjing, 2021 (in Chinese).
- [29] OBERKAMPF W L, TRUCANO T G. Verification and validation in computational fluid dynamics[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2002, 38(3): 209–272.
doi: [10.1016/s0376-0421\(02\)00005-2](https://doi.org/10.1016/s0376-0421(02)00005-2)
- [30] 付晔, 唐怡, 沈盈盈, 等. 基于气动标模数据的接口设计与实现[J]. *航空计算技术*, 2023, 53(1): 62–66.
FU M, TANG Y, SHEN Y Y, et al. Design and implementation of interface based on data of aerodynamic standard model[J]. *Aeronautical Computing Technique*, 2023, 53(1): 62–66(in Chinese).
- [31] 陈坚强, 吴晓军, 张健, 等. FlowStar: 国家数值风洞 (NNW) 工程非结构通用 CFD 软件[J]. *航空学报*, 2021, 42(9): 1–22.
CHEN J Q, WU X J, ZHANG J, et al. FlowStar: General unstructured-grid CFD software for National Numerical Windtunnel (NNW)Project[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2021, 42(9): 1–22(in Chinese).
doi: [10.7527/S1000-6893.2021.25739](https://doi.org/10.7527/S1000-6893.2021.25739)
- [32] 阎超. 航空 CFD 四十年的成就与困境[J]. *航空学报*, 2022, 43(10): 21–57.
YAN C. Achievements and predicaments of CFD in aeronautics in past forty years[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, 43(10): 21–57(in Chinese).
doi: [10.7527/S1000-6893.2021.26490](https://doi.org/10.7527/S1000-6893.2021.26490)

(本文责编: 周奇杰)