国家数值风洞(NNW)工程关键技术研究进展

陈坚强^{1,2*}

1. 中国空气动力研究与发展中心, 空气动力学国家重点实验室, 绵阳 621000;

2. 中国空气动力研究与发展中心, 计算空气动力研究所, 绵阳 621000

* E-mail: chenjq@cardc.cn

收稿日期: 2020-08-11; 接受日期: 2020-09-25; 网络版发表日期: 2021-04-27

国家数值风洞工程资助项目

摘要 随着高性能计算机和计算流体力学(CFD)的飞速发展, 20世纪80年代末日本率先提出了数值风洞的概念. 美国进一步发展了数值风洞的概念, 认为数值风洞是流体力学、数学、计算机科学和航空工程交叉融合的产物, 并在航空航天飞行器研制中发挥着越来越重要的作用. 2018年, 我国启动了“国家数值风洞(NNW)”工程项目, 旨在联合全国优势力量, 发挥集群优势, 开展协同攻关, 自主研发功能先进、种类齐全的CFD软件系统, 研制国际先进的CFD专用高性能计算机, 建成拥有我国自主知识产权、国内开放共享的空气动力数值模拟平台. 本文介绍了NNW工程的系统构成和主要目标, 总结了国家数值风洞软件框架、并行技术、网格生成、可视化技术、验证与确认、算法与模型等相关研究进展, 展望了工程下一步的技术发展思路.

关键词 国家数值风洞, CFD软件框架, CFD软件工程化, 自主可控

1 引言

“数值风洞(numerical wind tunnel)”的概念最早可追溯到1975年NASA艾姆斯中心的Chapman等人^[1]在 *Astronautics and Aeronautics* 期刊上提及的电子风洞(electronic wind tunnel), 正式术语出现在20世纪80年代末的日本和美国^[2,3]. 20世纪90年代初, Zhang等人^[4]率先在国内提出“数值风洞”概念. 其主要设想是在高性能计算机设备上用计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)软件生产飞行器设计所需的气动数据.

随着高性能计算机和CFD的飞速发展, 数值风洞

的内涵进一步得到了发展, 已不再是单纯的CFD. 除CFD数理模型和算法外, 数值风洞还包含软件开发、并行计算技术、网格技术、可视化技术、验证与确认等多项关键技术. 国际CFD大师Jameson等人^[2,5]认为数值风洞是由流体力学、数学、计算机科学和航空工程交叉融合的产物(图1). 我们认为, 数值风洞是CFD及相关技术与高性能计算机的软硬件组合体, 能够像物理风洞一样生产飞行器设计所需的气动数据, 进行各种复杂外形和复杂流动的数值实验^[6].

数值风洞作为空气动力学研究的三大手段之一, 具有无缩尺效应、无相似律限制、流动信息丰富且易于可视化等优势, 革命性地改变了航空航天飞行器设

引用格式: 陈坚强. 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, 2021, 51: 1326–1347

Chen J Q. Advances in the key technologies of Chinese national numerical windtunnel project (in Chinese). Sci Sin Tech, 2021, 51: 1326–1347, doi: 10.1360/SST-2020-0334

计模式^[7-9]。根据波音公司预测,在未来的气动设计中,从最佳费效比出发,数值风洞占气动设计工作量的比重将从当前的50%增加到70%以上^[9]。目前,数值风洞不仅已广泛应用于航空航天、交通运输、能源动力、桥梁建筑等领域,还可以与其他相关学科如热力学、结构力学、飞行控制、飞行力学、声学、光学、电磁学等计算科学融合,实现多学科耦合模拟及综合优化设计,是促进空气动力学及相关学科发展、提高国家核心竞争力的重大科技基础设施。

长期以来,美欧等发达国家和地区高度重视“数值风洞”开发和研制,并取得了重要进展,推出了一系列网格生成、流场解算、多学科耦合分析与优化、流场可视化等成体系的套装软件,并基本垄断了国际市场。我国CFD从20世纪80年代开始也取得了长足进步,推出了系列流场解算软件包,支撑了我国航空航天领域的技术进步,但在软件体系化、工程化及大规模推广应用方面还存在较大差距。

为此,我国2018年底启动了国家数值风洞(national numerical windtunnel, NNW)工程。该工程由中国空气动力研究与发展中心牵头建设,联合国内外30余所知名高校、10多家优势科研院所、3家高新软件企业协同攻关,旨在自主发展算法模型、自主研发系列通用CFD软件、自主研制高性能计算机,建成拥有自主知识产权、国内开放共享的空气动力数值模拟平台,满足航空航天等领域对自主CFD软件产品的急需。

2 工程简介

NNW工程一期包括5个系统:基础科学问题研究系统、CFD软件及集成框架系统、多学科耦合软件系统、验证与确认系统、高性能计算机系统,如图2所示。其中,基础科学问题研究系统以CFD发展中的瓶颈问题为突破口,设置了先进湍流与转捩模型、多相多介质模型、多物理场耦合模型、高阶精度算法、网格生成与自适应、知识提取与可视化等专题,为NNW软件开发和升级提供理论基础和技术支持。CFD软件及集成框架系统是NNW的核心系统,将兼顾通用性和专用性,在统一的并行框架上构建,主要包括:集成开发环境、网格生成、通用及专用CFD、可视化及数据管理等软件。多学科耦合软件系统包括:多学科优化、气动/结构/运动耦合、数值试飞、热环境与热管理耦

图1 (网络版彩图)构成数值风洞的四大学科^[2]

Figure 1 (Color online) Multidisciplinary nature of numerical wind tunnel [2].

图2 (网络版彩图) NNW工程系统组成

Figure 2 (Color online) Components of NNW project.

合、水/气多相流、气动噪声、流固耦合、气动物理等计算软件。验证与确认系统是NNW软件开发的质量保证,主要包括:验证与确认理论、标模数据库、自动化测试软件、软件可信度评价与认证等。高性能计算机系统将建设CFD专用集群和配套设施,为NNW工程能力计算和容量计算提供硬件基石。

目前,NNW工程从基础科学问题研究到软件开发与推广应用等方面取得了较大进展。在模型算法方面,基于稳定性理论的三维 e^N 转捩预测方法等20多款算法模型已经通过了初步测试,有8种模型正在开展集成^[8];软件开发方面,完成了软件架构设计,研发了原型系统,系列功能模块初步形成实用能力,并在实际工程中得到应用,图3给出CHN-T标模典型应用示范。

在NNW系列软件推广应用方面,在延续用户使用惯性和保证软件产品好用易用的前提下,开展了系列市场推广活动。目前,已面向全国举办了两款软件产品发布会和一款开源软件体验会,同时针对工业部门

图3 (网络版彩图) CHN-T标模计算结果: 表面压力(a)和升力系数(b)
Figure 3 (Color online) Simulation results of CARDC CHN-T Model. Surface pressure coefficient (a) and lift coefficient (b).

及高校开展了软件部署和培训等工作, 取得了很好的反响. NNW工程将建成4款主打软件和若干特色软件, 表1列出NNW主打软件及发布时间, 下一步将从如下5个方面陆续开展大量的线上线下活动, 持续推动NNW系列软件的工业应用.

- (1) 软件产品线下市场推广活动, 包括软件产品发布会、软件专题研讨会和软件用户培训会等;
- (2) 软件产品线上市场推广活动, 包括软件官方网站及技术论坛运营、新媒体平台运营、传统媒体平台宣传活动、线上专题研讨会和线上用户培训会等;
- (3) 软件产品客户服务活动, 包括客户关系管理系统(CRM)建立及维护、客户一对一推广、技术支持和客户需求对接等;
- (4) 软件产品高校联合教学及实践, 包括联合知名高校开设软件产品实践课程、开展研究生软件产品使

表1 NNW主打软件及发布时间

Table 1 The NNW core software and release plan

序号	名称	用途	发布时间
1	NNW-GridStar	网格生成	2019
2	NNW-FlowStar	多体分离流体仿真	2020
3	NNW-PHengLei	开源流体仿真	2020
4	NNW-TopViz	可视化	2021

用培训以及举办软件产品应用竞赛等;

(5) 软件教程出版及宣传材料制作.

3 关键技术

3.1 软件框架

软件框架是大型CFD软件的“骨骼”, 直接影响到软件的可扩展性, 若架构设计不好, 随着软件的扩展, 将变得越来越紊乱, 最终可能导致颠覆性重构. 经过多年的发展, 国内外发展了多个知名的CFD框架. OpenFOAM^[10]是一款CFD开源代码, 其框架特点为: 基于非结构网格, 算法库丰富, 功能多, 封装性好. Moose^[11,12]是一个基于有限元方法的开源库, 主要面向固体力学、弹性力学、热传导等问题. Overture^[13]是基于结构网格的框架, 开发了针对结构算法的数值方法库. SU2^[14]是由斯坦福大学发布的开源CFD代码, 基于非结构网格, 包括网格自适应、气动优化等面向多学科数值模拟的模块. JASMIN/JAUMIN/JCOGIN^[15-17]是由中国工程物理研究院开发的, 分别面向结构网格、非结构网格、无网格数值模拟的编程框架, 为电磁模拟、粒子输运等领域的软件开发提供底层编程框架库.

德国宇航中心(DLR)的Digital-X项目^[18,19], 其CFD求解器基础模块主要来源于非结构求解代码TAU^[20], 并建立了模块化的编程框架, 将时空离散方法、并行通信、数据结构等具体的底层算法抽象为类库, 形成了多层并行模式编程框架. 美国国防部高性能计算现代化计划(DoD HPCMP)实施的CREATE项目^[21], 其飞行器分析软件Kestrel^[22]遵循两大设计原则: 一是具备高度线性扩展性的万核量级并行计算能力, 二是通过代码重写或模块分解的方式集成已有的传统软件.

由此可见, 新一代主流CFD软件的通行做法, 是在有成熟应用的、以流动模拟为核心的In-House代码基

基础上,采用面向对象思想,设计具有构件化、模块化、高内聚、低耦合特性的大型CFD软件框架,并在此基础上,开发适应新一代大规模并行计算和多学科模拟的CFD软件.

NNW作为我国新一代CFD软件重大工程,为降低多学科模拟过程中的软件复杂度,提高多学科耦合求解能力,实现CFD求解模块复用,采用C++语言,以面向对象的思想,设计开发了具有高可复用性、高并行可扩展性和高灵活多学科耦合性等特点的软件框架^[23]. NNW框架设计的关键技术是数据抽象、继承和绑定.通过数据抽象使接口实现分离,达到构件化、模块化、高内聚、低耦合的设计目的;通过继承和绑定,实现模板特化的各种对象统一调用.将不同的求解器之间的共性部分提取出来,以类库的形式为其他求解器提供“公共基础”,形成通用CFD软件编程框架^[24].基于该编程框架,开发者只需关注逻辑设计和特定算法的研发,而不必再考虑底层,可以大大提高开发效率.同时,使用统一的框架,使得整个软件体系具有良好的结构和扩展性.编程框架自身也可以不断升级,在不影响上层应用的情况下提高性能(如异构并行算法的改进),系统中所有的CFD应用都可以同时得到框架升级带来的好处.

为适应隐式线化物理方程求解, NNW工程编程框架采用了分层结构(图4),分层结构主要包括4层. (1) 内核底层. 该层模块将控制参数、数据结构、第三方库、并行通信等基础模块抽象为类库,供上层调用,并可根据计算机硬件特点优化、适配,从而使开发者与硬件隔离. (2) 数值算法层. 主要抽象数值算法,如

通量格式、限制器、梯度、边界条件、文件IO等模块,还可为开发者提供日志、时间统计等工具类. (3) 功能层. 主要是将与计算数据交换相关的模块抽象为API接口. (4) 应用层. 按照给定的多重网格控制流,基于编程框架开发求解器,从而使得求解器天然具备多重网格加速能力.

分层结构能同时满足结构、非结构网格类型大规模并行计算,其优点主要体现在以下两方面:

(1) 通过对体系结构分层封装,用户仅通过顶层的API接口,就能完成CFD的软件开发,从而将用户不关心的底层数据封装,如并行、网格;

(2) 将整个框架分层后,各层之间仅通过定义好的接口交换数据,因此,各层内部的模块可以任意重构,有利于采用敏捷实践的方法升级软件框架.

3.2 并行技术

CFD属于计算、访存密集型的科学计算领域,并行计算是其实现工程应用的关键.目前,以MPI和OpenMP等为代表的并行编程环境已在CFD数值模拟中得到广泛应用,CFD工程应用普遍实现了千至万核量级的并行化^[7,25].

计算网格的数据结构是CFD软件的并行基础.国内外主流并行计算框架,大多都是单独针对结构网格(Overture, JASMIN)或者非结构网格(SU2, OpenFOAM, JAUMIN, MOOSE)开发的,难以做到并行通信对网格类型的无关性. NNW-PHengLEI软件设计了兼容结构、非结构网格的大规模并行框架,采用了将二者数据标准化后再通信的思想,将并行细节隔

图4 NNW编程框架模块及分层结构^[24]

Figure 4 Programming framework modules and hierarchical structure of NNW [24].

离至底层, 有效实现了与网格类型无关的并行化编程^[24].

为了实现与网格类型无关的并行通信, NNW-PHengLEI将结构、非结构网格的数据压缩并标准化后再通信. 为实现数据压缩, 设计了一种能适应于任意类型数据的“数据容器”(图5). “数据容器”的信息交换机制包括“数据压缩-MPI通信-数据解压”三个过程. 通过数据标准化, 不同进程间只进行“数据容器”中被标准化后数据的通信, 从而实现对任意类型网格并行计算的兼容性.

基于NNW-PHengLEI并行计算框架, 测试了典型工程应用级CFD算例^[26~28]. 对于图3所示的客机标模外形, 并行测试结果如图6所示, 非结构网格规模33.2亿, 分别在“天河二号”上进行了近10万核测试以及国产定制集群上进行了16.38万核测试, 国产集群在16.38万核下并行效率保持在83%以上(相对于2048核), “天河二号”上在近10万核下并行效率保持在95%以上(相对于3072核). 采用31亿结构网格, 在32768核下相对于4096核的并行效率能保持在60%以上. 可见, NNW-PHengLEI并行计算框架不仅同时适合结构和非结构网格类型, 还具有较好的并行计算效率.

3.3 网格技术

网格生成是CFD的重要瓶颈技术之一^[29], 目前网格生成耗时约占CFD任务周期的70%. 网格质量也在很大程度上决定了CFD计算结果的精准度. 因此, 如何提高网格生成的自动化程度、减少人工耗时、提高网格与CFD算法的适应性, 是目前网格技术的主要发展方向^[30~34].

在网格软件方面, 依然是少数几个大型商业化软件凭借其功能丰富度和工程鲁棒性, 占据主导地位. 但各种针对典型问题或特殊网格方法的开源软件发展迅速, 成熟度不断提升, 成为不容忽视的一支发展力量, 同时也迫使商业软件加快了技术升级速度.

综合国内外网格技术发展趋势, 以及CFD算法在技术工程化中面临的问题, 2019年11月, NNW向全国发布了结构网格软件NNW-GridStar, 并在70余家单位推广应用. NNW-GridStar软件具如下特点.

(1) 网格生成自动化: 发展了处理“脏几何”的表面网格自动化技术, 大大提高了网格生成的工程鲁棒性; 发展了工程实用的网格生成自动化技术, 降低了CFD工程应用对人力和人工经验的依赖^[35~39].

(2) 网格自适应: 发展了各向异性网格生成技术,

图5 (网络版彩图)底层数据通信: 压缩(左)、解压(右)^[23]

Figure 5 (Color online) Data communication: compress (left) and decompress (right) [23].

提高CFD算法处理精度; 发展了与流场结构相匹配的网格自适应技术, 提升了对激波、分离等物理突变现象的模拟能力^[40-46].

(3) 不同类型网格数据交换: 发展了适应于各种网格拓扑类型的重叠网格技术, 拓展了运动现象的模拟能力; 发展了异构求解器的网格插值技术, 拓展以气动为核心的多学科求解能力^[47-49].

NNW-GridStar结构网格软件的几项特色技术包括以下几个方面.

(1) 表面网格自动化生成技术. 引进共形几何技术, 探索出一条表面网格自动化生成的新方法. 具体步骤(图7): 构造数模的粗糙离散表达; 利用计算共形

图6 (网络版彩图) 结构/非结构网格并行效率

Figure 6 (Color online) Parallel performance of structured and unstructured solvers.

图7 (网络版彩图) 基于共形几何的结构表面网格生成示例
Figure 7 (Color online) An example of structural surface mesh generation based on conformal geometry.

几何将离散表达的复杂外形映射到一个二维参数空间; 在二维参数域上构造等势场, 通过等势场标架追踪技术自动构造二维结构网格拓扑, 从而实现二维网格自动生成; 最后采用共形逆变换技术将自动生成的二维网格转换到真实空间的复杂几何外形上, 通过修型调整实现通用三维表面网格自动生成.

(2) 附面层网格自动生成技术. 提出了不同于传统推进算法的整体构造方法. 具体方法: 从表面网格出发, 通过提取表面网格/几何特征构造表面网格的框架, 然后利用法向量寻优算法计算附面层网格的关键支撑线, 与表面框架一起构造出边界层网格框架, 再进行内部网格节点填充实现附面层网格自动生成. 该技术仅需根据不同计算条件输入附面层高度、网格密度、增长率即可生成满足要求的高质量附面层网格, 具有很强的工程实用性. 附面层网格生成过程如图8所示, 从上至下依次为提取数模特征线、网格拓扑构造、附面层网格自动生成.

(3) 脏数模修补技术. 针对CAD数模普遍存在破损这一难题, 提出了将数模修补技术迁移到网格算法中的独特技术. 该技术用CFD计算目标约束和限制数模修补的算法自由度, 利用几何特征分类识别方法自动辨别数模破损区域, 通过网格数据修补实现在破损严重的数模上生成满足计算条件的表面网格(图9). 该技术使破损数模的网格生成通过率由早期的不足80%提高到接近100%, 避免了传统数模修补技术因对象而变

图8 (网络版彩图) 框架构造法附面层网格自动生成示例
Figure 8 (Color online) An example of automatic generation of boundary mesh using frame construction method.

图9 (网络版彩图)破损数模上生成物面网格示意图

Figure 9 (Color online) Sketch of generating surface mesh on damaged model.

(case by case)的繁琐途径,大幅度提高了网格软件工程实用性。

(4) 动态网格重叠技术. 发展了重叠网格隐式装配法, 包括与网格拓扑类型无关的重叠单元装配算法、与解算器同构的重叠关系并行处理算法、适应于不同网格拓扑类型的数据适配算法(图10(a)); 改进了网格动态重构技术, 包括基于原始网格表面变形的网格动态重构算法、并行动网格技术、面向多学科数据交换的表面网格高效插值算法(图10(b)). 动网格技术已成功应用于实际型号工程。

3.4 可视化技术

流场可视化技术使用图形图像来描述流场数据, 便于从海量流场数据中洞察流场结构, 捕获流场特征、分析流动机理, 是数值风洞的关键技术之一。面对海量复杂流场数据带来的可视化挑战, 欧美等率先开展了高效可视化技术的大量研究, 并相继推出Vis-It^[50], ParaView^[51], EnSight[®], Tecplot[®]等多款软件。日本也成立了高级可视化研究团队, 研究易于表现精密计算的可视化方法和能够有效利用大规模数据的可视化系统^[52]。近年来, 国内也开展了一些并行可视化的相关研究^[53], 但美欧等国家和地区的可视化软件几乎垄断了我国CFD后处理市场。

随着CFD模拟规模的剧增及流动模拟保真度的提高, 数据复杂度持续增加, 对可视化技术也提出了更高挑战, 主要体现在: (1) 现有可视化软件算法并行度和可扩展性, 已难以适配高性能计算机软硬件发展; (2) 现有可视分析方法极大地受到超级计算机的I/O速度和

存储容量的限制; (3) 现有可视分析工具流场特征提取时间开销大、结果不够精确。

为此, NNW工程研制了一套低耦合、高内聚的可视化算法模块库, 开发形成了可视化软件系统NNW-TopViz(图11)。该软件目前已具备海量流场数据的并行可视化、原位可视化和可视特征智能提取能力, 其主要特点包括: (1) 通过异构协同计算、多层次并行度开发等技术来加速CFD数据可视化, 有效提高了可视化算法的效率和并行可扩展性; (2) 基于深度学习实现了流场数据压缩, 降低了原位可视化对计算和内存资源的占用; (3) 提出一种基于数据增强和目标检测网络的流场旋涡和激波自动提取方法。

NNW-TopViz的关键技术主要包括以下几个方面。

(1) 并行可视化技术. NNW-TopViz发展了高并发度混合多层级并行优化技术^[54,55], 采用“MPI+X”多级混合并行策略与编程模型, 建立了可视化计算任务与高性能计算系统硬件结构的映射关系, 根据可视化算法特征将计算负载分配至合适的计算硬件; 基于多层级并行优化技术, 成功实现了流水线并行和访存优化。

(2) 大规模原位可视化技术. 建立了基于深度学习的CFD流场数据压缩网络FCN^[56]。FCN是一个由两个CNN组成的GAN网络, 这两个CNN相互协作并同时优化, 在实现流场数据高质量压缩的同时减少了压缩时间, 有效解决原位可视化计算过程中由海量数据造成的存储开销大的问题。

(3) 智能特征提取算法. 发展了基于卷积神经网络的流场旋涡提取方法^[57~59]和激波探测方法^[60]。基于卷积神经网络的流场旋涡提取方法计算原理如图12所示, 主要包括涡量场计算、网格转换、采样、模型推理和后处理。涡量场融合了物理网格信息, 因此特征提取精度更高; 使用采样方法训练局部数据块, 能够有效提高旋涡检测精度。图13比较了多种漩涡结构提取方法, 可见基于卷积神经网络的方法(图13(g)和(h))能更加清晰地提取流场。

3.5 验证与确认

随着CFD在众多工业领域发挥日益重要的作用, CFD的可信度也受到广泛关注。验证与确认(verification and validation, V&V)是评价CFD可信度的唯一途径, 也是CFD软件质量的重要保证。

国外在V&V的基本概念^[61]和理论方法方面开展

图 10 (网络版彩图) NNW动网格技术示意图. (a) 重叠网格隐式装配技术; (b) 网格动态重构技术

Figure 10 (Color online) Sketch of dynamic grid technique for NNW. (a) Implicit assembly technique for overlapping mesh; (b) technology of grid dynamic reconstruction.

图 11 (网络版彩图) NNW-TopViz软件界面

Figure 11 (Color online) User interface of NNW-TopViz.

了大量的工作, 提出了一系列的标准^[61~65]、指南^[66,67]和指导性文件^[68~72]。同时为了支撑CFD可信度评价工作, 收集并整理了若干具有代表性的、较可靠的实验数据、并且经过检验的标准范例形成数据集^[73~77]。针对复杂流动问题的CFD方法和软件, 先后组织开展了系列验证与确认专题研讨会^[78~91]。

国内CFD V&V的相关研究也取得了一定的进展。张涵信^[92]、陈坚强和张益荣^[93]、王瑞利和温万治^[94]等在基础理论方面开展了富有特色的研究工作。邓小

图 12 (网络版彩图)基于CNN的流场涡提取方法架构图

Figure 12 (Color online) The overall architecture of vortex detection method based on CNN.

图 13 (网络版彩图)三维激波旋涡干扰流场中的旋涡结构提取结果对比. (a) Q 准则; (b) Ω 准则; (c) Δ 准则; (d) λ_2 准则; (e) 随机森林; (f) 迭代网络; (g) 流场涡网络; (h) 流场分割网络; (i) 真值

Figure 13 (Color online) Visual results for different methods in the shockwave vortex interaction flow field. (a) Q criterion; (b) Ω criterion; (c) Δ criterion; (d) λ_2 criterion; (e) random forest; (f) Adaboost; (g) Vortex-Net; (h) Vortex-Seg-Net; (i) Ground Truth.

刚等人^[95]综述了国内外CFD V&V的发展, 并对中国如何开展相关研究提出了若干建议. 在CFD确认方面, 国内针对CHN-T1运输机标模^[96]等模型召开了数值模拟研讨会, 有力地促进了国内CFD软件可信度的提升.

但总体来说, 国内CFD V&V方面的研究较为分散, 严重制约了我国CFD软件的可信度. 因此NNW工程正在开发成体系的V&V框架、研制标模体系和共享数据库、建立软件自动化测试平台和可信度评价平

台,为NNW工程软件及国内同行CFD软件开发和可信度评价提供技术支撑。

NNW-V&V的主要关键技术研究进展主要有以下几个方面。

(1) 误差估计和不确定度量化方法. NASA在《CFD 2030展望研究报告》中指出,误差和不确定度的管理是未来CFD需要具备的六大能力之一^[7]. NNW工程发展了基于最小二乘拟合方法的数值误差估计方法,给出了物理模型真实解的置信区间,即

$$f_{\text{exact}} \subseteq [f_i - \Delta, f_i + \Delta], \quad (1)$$

$$\Delta = F_s |f_i - f_0| + \sigma + |f_i - f_{\text{fit}}|. \quad (2)$$

针对CFD模拟中存在参数不确定性, NNW工程发展了一整套完整的参数不确定度量化方法,如图14所示,已经形成了从试验设计到不确定度传播再到不确定度量化和敏感性分析全过程的完整方法链条,具备了量化工程问题参数不确定度的能力. 图15给出了SA湍流模型系数的不确定度对RAE2822翼型跨声速绕流模拟的影响分析结果^[97].

针对CFD模拟中存在的模型形式不确定性, NNW工程发展了贝叶斯模型平均方法来量化模型选择引入的不确定度. 针对具体工程问题, 通过贝叶斯定理:

$$p(M_i|D) = \frac{p(M_i) \times p(D|M_i)}{\sum_{j=1}^n p(M_j) \times p(D|M_j)}, \quad (3)$$

可得到模型的后验概率。

(2) 标模体系与共享数据库. NNW工程根据流动问题的复杂程度对标模算例进行了系统的分解, 选择和设计一系列标模算例, 包含层流、湍流、边界层转捩、流动分离与再附等流动特征, 涵盖飞行器巡航气动特性、高升力特性、大攻角气动特性、分离投放特性等关键气动典型问题, 初步构建了CFD研究的标模体系。

标模数据通过共享数据库实现共享, 共享数据库平台采用基于数据管理与流程管理的框架开发, 其中数据管理框架提供数据基本操作, 包括数据建模、组织、导入等。

(3) CFD软件可信度评价. 按照多属性综合评价一般模式, 将CFD软件可信度评价研究分解为评价指标体系研究、仿真实验数据一致性量化方法研究和指标

图14 (网络版彩图)参数不确定度量化流程

Figure 14 (Color online) Flowchart of parameter uncertainty quantification.

图15 (网络版彩图) SA模型系数不确定度造成的RAE2822翼型跨声速绕流问题马赫数方差云图

Figure 15 (Color online) Contours of Mach number variance induced by the uncertainties of SA model closure coefficients in the simulation of transonic flow over RAE2822 airfoil.

赋权方法研究三个基础问题。

设计评价指标体系是CFD软件可信度评价的基础和前提, 针对CFD开发者和用户, 重点设计了基本流动特征模拟可信度指标, 用于描述软件对复杂流场中的激波、旋涡、激波干扰以及流动分离等基本流动现象的模拟能力. 指标设计遵循目的性、完备性、独立性、显著性以及可操作性等原则, 通过对复杂问题和评级目标逐级分解, 形成流动物理及几何复杂性均从简单到复杂的、层次分明的指标体系. 目前已经基本完成气动力、热软件可信度评价指标体系。

一致性度量(确认度量)方法是验证与确认领域的研究热点, 对于软件可信度评价, 度量方法必须要保证客观性. NNW工程发展了适用于处理CFD计算和实验数据一致性的相对误差法和面积法, 对图16示意的两个算例开展确认度量评分. 对于图16(a)算例, 相对误差法得到的度量值为0.9925, 面积法得到的度量值为

图 16 (网络版彩图) 确认度量算例示意. (a) NACA-0012翼型的压力系数; (b) 颤振临界速度

Figure 16 (Color online) Illustration of validation metric cases. (a) C_p of NACA-0012 airfoil; (b) critical flutter speed.

0.9895; 对于图16(b)算例相对误差法得到的度量值为0.8520, 面积法得到的度量值为0.8773. 可以看出, 这两种方法基本可以有效地辨识数据间的一致性.

在CFD软件可信度评价中, 需要对指标的权重进行科学区分. 为此, 重点开展了层次分析法^[98,99] (analytic hierarchy process, AHP)在CFD软件可信度评价指标赋权中的应用研究. 该方法能较好地反映评价者对元素重要性的学术认知, 又不失科学性, 可以有效支撑CFD软件可信度综合评价.

3.6 模型与算法

能体现流动物理机制的高保真模型和高精度算法是提高CFD计算结果精准度的两个至关重要的基础. NASA在《CFD 2030展望研究报告》^[7]中指出, 未来模拟能力的提高需要在物理模型、数值算法、高性能计算、几何与网格生成技术、知识提取、多学科优化等六个领域加强基础研究. 本节简要介绍我国学者依托NNW工程目前发展的特色模型与算法.

3.6.1 转捩/湍流预测模型与方法

(1) $C-\gamma-Re_0$ 转捩模型

高超声速边界层转捩机制复杂, 通常有第一模态、第二模态、横流失稳等; 马赫数/可压缩效应对转捩有显著影响; 普遍缺乏可用于模型标定的转捩数据. 中国空气动力研究与发展中心(以下简称气动中心)针对这些问题, 在 $\gamma-Re_0$ 转捩模型的基础上, 添加了压力梯度修正模块、湍流普朗特数修正模块、横流转捩模

块, 开展了模型参数不确定度量化分析和敏感性分析^[100], 提高了横流转捩预测能力. 图17给出了高超声速HIFiRE-5椭圆锥模型的计算结果, $C-\gamma-Re_0$ 转捩模型计算结果与风洞实验较为一致, 优于原始模型.

(2) 转捩/湍流一体化计算模型

清华大学^[101,102]发展了一种三方方程模型, 该模型是以SST湍流模型为基础, 在SST湍流模型上增加了一个间隙因子输运方程, 通过间隙因子控制层流脉动和湍流脉动对涡黏系数的贡献. NNW工程在此基础上添加了一个描述分布式粗糙度影响的方程, 从而形成一个新的四方程转捩模式^[103].

(3) 改进的 e^N 方法

转捩预测的另一条途径是 e^N 方法. e^N 方法的理论

图 17 (网络版彩图) HIFiRE-5椭圆锥模型的横流转捩结果. (a) $C-\gamma-Re_0$ 转捩模型的计算结果; (b) 风洞实验结果

Figure 17 (Color online) Crossflow transition on the surface of HIFiRE-5 elliptic cone. (a) Numerical result of $C-\gamma-Re_0$ transition model; (b) experimental result of a wind tunnel.

基础是线性稳定性理论, 预测转捩时尽可能地利用边界层转捩机理, 具有较强的物理背景, 是目前比较公认的相对精确的转捩预测方法. NNW工程在已有的 e^N 方法^[104-106]基础上, 天津大学等联合气动中心正在开展感受性、三维边界层积分路线、不同模态的转捩判据和天地相关性等方面的研究. 目前, 已经发展出适合复杂三维附着流动的转捩预测 e^N 方法, 并对风洞实验和飞行实验的转捩 N 值进行了关联, 发展了一种适合高超声速钝锥的转捩 N 值关联公式^[107].

(4) SED-SL模型

北京大学把工程复杂边界层效应看作是规范边界层的变形, 用结构系综理论(SED)对复杂边界层进行精确刻画, 在RANS框架下发展了SED-SL转捩模型^[108,109]. SED-SL利用应力长来封闭雷诺应力, 通过实验和高分辨率计算数据确定结构系综的基本参数, 描述边界层转捩中结构系综的演化, 用于工程转捩模拟.

(5) CKDO湍流模型

北京航空航天大学基于湍动能输运方程构建了单方程湍流模型KDO (kinetic dependence only)^[110]. KDO模型借助结构系综理论中的标度律, 利用平板边界层DNS数据, 对模型中的经验公式进行标定, 整个模型不含任何可调参数. 目前KDO主要应用于低速和超声速范围内的流动, 在高超声速方面涉及较少. NNW工程计划利用高超声速DNS数据和结构系综理论, 将KDO向高超声速范围进行推广, 发展CKDO (compressible KDO)模型, 使其能够适用较广的速度范围和较多的流动类型.

(6) LES模型

气动中心提出了一种涡拉伸模型, 并采用西班牙马德里理工大学的DNS数据进行了参数标定^[111]. 南方科技大学针对可压缩各向同性湍流开展了多过程分析方法和高保真度大涡模拟, 通过使用人工神经网络方法, 结合可压缩湍流的物理机理, 发展了一类高保真度大涡模拟模型^[112]. 中国科学院力学研究所发展了积分方程形式的大涡模拟壁模型, 该模型为大涡模拟方程提供近似边界条件, 避免完全解析近壁流动, 可使大涡模拟所需的网格量大幅减少^[113]. NNW工程还将在北京大学提出的基于雷诺应力和雷诺热流约束的CLES (constrained LES)模型^[114,115]基础上, 针对可压缩湍流进行改进.

(7) 基于人工智能的湍流模型

西北工业大学基于人工智能, 发展出了适用于高雷诺数附着湍流、可实现与求解器的双向迭代且稳定性较好的面向用户自身需求的雷诺应力封闭模型. 测试结果显示翼型的评价阻力预测偏差不大于2%, 打开了人工智能应用于工程湍流模拟的新局面^[116,117].

3.6.2 高精度算法

(1) DG算法改进

DG类方法的关键技术包括曲边处理、激波捕捉、黏性项离散、加速收敛等. 气动中心将DG/FV混合格式与简洁高效的黏性项离散DDG格式相结合, 发展了新的DDG/FV混合格式^[119], 并在黏性流动模拟中体现出较好效果. 通过平板、NACA-0012翼型、圆球等算例测试表明, 相比三阶精度DG, 典型定常问题总收敛效率提升2~4倍, 内存使用节省约30%. 气动中心还针对RANS方程组, 首先基于主控方程高阶DG求解、湍流模型方程FV求解的松耦合策略实现工程湍流数值模拟, 然后针对三维非结构混合网格建立了LUSGS及GMRES隐式时间迭代方法和方程组右端项残值雅可比精确计算方法, 实现计算效率量级的提升^[119].

(2) 高阶精度有限体积方法

高精度FV的关键技术包括鲁棒的显式/紧致重构、激波捕捉、黏性项离散等. 清华大学建立了非结构混合网格高精度有限体积方法的理论框架, 完成了紧致高精度非结构网格有限体积算法架构设计, 在梯度重构、激波捕捉、高效高精度时间推进、曲边网格处理等方面形成了完整的解决方案. 所提出的泛函重构方法对于大长宽比、强扭曲网格具有一定的适用性, 保证了紧致高精度有限体积方法的精度、分辨率、计算效率和鲁棒性^[120,121].

(3) WCNS改进

NNW工程的结构网格高精度CFD软件以WCNS格式为主, 兼顾WENN和WENO格式. 结构网格高精度算法的关键技术包括激波捕捉、边界处理、极值点附近保真、对低质量网格的适应性等. 气动中心在改进极值点精度和激波捕捉方面取得一定进展. 针对WCNS创新性发展了一种具有极值点一致高阶精度的非线性权, 在保证激波捕捉能力的前提下, 显著提高了格式对极值点的分辨率^[122]. 在结构/非结构混合网格

上发展了区域混合WCNS-CPR混合方法, 具有全场高精度和满足几何守恒特性, 一定程度上实现了计算效率和网格适应性的平衡^[123]. 发展了满足几何守恒律的多重导数组合耗散紧致格式, 数值测试与初步应用表明该格式不仅分辨率高, 而且对复杂流动具有良好适应性^[124,125].

(4) WENO改进

光滑因子是WENO格式非线性权的核心组成部分, 通常由子模板上重构多项式的导数确定. NNW工程针对经典的WENO格式在执行过程中容易混淆小尺度波动与较弱间断的问题, 提出了光滑因子对某类连续函数为常数的原则, 基于该原则设计了一种新的光滑因子, 该光滑因子在极值点附近变化较小, 而在间断附近变化较大, 对于单色波会退化为线性基底格式, 以此为基础构造的七阶WENO格式具有更好的间断稳定性和良好的小尺度结构分辨率^[126].

3.6.3 多物理场耦合计算方法

多物理场耦合计算是CFD概念的横向扩张, 此处简要介绍NNW工程在多物理耦合计算方面的典型进展.

清华大学利用线性稳定性框架, 建立了考虑高温真实气体效应的高超声速三维边界层稳定性分析方法, 热化学非平衡流动稳定性计算结果与国际相关研究符合较好^[127].

北京航空航天大学通过引入解耦算法, 提高了高温化学非平衡流动刚性方程的计算效率, 并设计了典型包含高温空气化学反应的高超声速可压缩湍流边界层标准算例, 实现了高温化学非平衡流动高精度DNS模拟. 图18给出了高温化学反应平板湍流的典型结果.

南京航空航天大学以空气化学反应模型为基础, 通过敏感性分析方法, 对燃烧反应中的反应速率系数进行修正, 发展了一种新的更加符合物理实际的混合化学反应模型. 通过与实验和文献结果对比(图19), 验证了这种修正方法的正确性.

香港科技大学和西北工业大学^[128]从粒子微观演化机制出发, 结合UGKS多尺度输运过程, 将宏观平衡态波的描述与微观非平衡粒子的描述进行耦合, 发展了波粒自适应描述的跨流域多尺度数值方法(UGKWP), 初步实现从连续到稀薄、低速到高速的全流域全速域的高效模拟.

华中科技大学研究团队^[129]发展了单原子气体USP-ESBGK多尺度随机粒子方法, 并实现了与DSMC的耦合求解, 在保证计算准确度的情况下, 计算效率大幅提升.

气动中心基于自适应笛卡儿网格, 通过研究Boltzmann模型方程数值算法与Navier-Stokes(N-S)方程CFD计算方法之间进行区域耦合的有效信息交换技术, 建立了稀薄跨尺度非平衡流动的Boltzmann/N-S耦合数值模拟方法. 相对于DSMC方法, 计算结果更加光滑无统计波动; 相对于纯粹的Boltzmann模型方程数值算法, 计算效率显著提高. 图20给出了两种典型工况下的圆柱绕流计算结果.

3.6.4 多相多介质计算方法

多相多介质数值模拟是CFD的难点之一, 此处简要介绍NNW工程在多相多介质数值模拟方法方面的典型进展.

气动中心与中国科学院过程工程研究所联合建立

图18 (网络版彩图)化学反应模型的DNS结果. (a) 瞬时温度云图; (b) 瞬时密度云图

Figure 18 (Color online) DNS result of chemical reaction model. (a) Instantaneous temperature contour; (b) instantaneous density contour.

图 19 (网络版彩图)亚爆轰燃烧流场温度云图对比. (a) 计算与实验对比; (b) 本文模型与Shang模型对比

Figure 19 (Color online) Comparison of temperature contours of sub-detonation flow. (a) Comparison of computed result with schlieren image; (b) comparison of present model with Shang's model.

图 20 (网络版彩图)圆柱绕流密度云图. (a) $Ma=3.0, Kn=0.5$; (b) $Ma=3.0, Kn=0.05$

Figure 20 (Color online) Density gradient of cylinder flow. (a) $Ma=3.0, Kn=0.5$; (b) $Ma=3.0, Kn=0.05$.

了基于分子动力学(molecular dynamics, MD)的表面反应边界模型, 解决了具有多相态动力学机制和材料属性依赖性的流动/材料界面表征难题, 克服了表面催化氧化效应建模依赖于经验系数的局限性, 提升了含表面反应跨尺度特征的高超声速非平衡气动加热预测能力. 图21给出了MD方法的原理示意图.

西安交通大学等基于介观格子Boltzmann方法, 建立了高效辐射传输模型, 并耦合导热模型, 发展了介观尺度导热-辐射耦合传热模型, 解决了高温条件下复合材料细观结构传热特性的计算问题. 图22给出了介观

尺度导热-辐射耦合传热模型的典型计算结果.

西北工业大学与气动中心联合发展了一种基于深度学习方法的非线性结构温度场和结构热模态降阶方法, 克服了现有结构热传导和结构热模态降阶模型难以描述非线性特征的局限, 解决了高效低维降阶模型的普适性难题, 有效提升了飞行器热气动弹性特性预测能力.

气动中心与西安交通大学联合发展了一种基于微结构重建的多孔介质复合传热特性数值预测方法, 采用深度卷积生成对抗网络(DCGAN)和热格子Boltzmann

图 21 (网络版彩图)基于MD方法的表面反应边界模型

Figure 21 (Color online) The reaction boundary model based on MD method.

(TLBM)相结合的方法实现了二/三维微结构重建及导热/对流/辐射复合传热特性预测,有效解决了现有代表性单元法难以真实反映局部随机微细特征的难题。

4 总结与展望

国家数值风洞(NNW)工程自2018年立项以来,研

图 22 (网络版彩图)介观尺度导热-辐射耦合传热模型

Figure 22 (Color online) The mesoscopic conduction-radiation coupled heat transfer method.

制进程已历时两年。在中国空气动力研究与发展中心 NNW研发团队及全国参研单位的共同努力下,工程取得了良好进展:已公开发布NNW-GridStar结构网格生成软件并在70多家型号院所推广应用;将陆续发布以非定常复杂流动模拟为特色的NNW-FlowStar软件、以高温非平衡模拟为特色的NNW-HyFlow软件、以气动热与热防护/热管理耦合分析为特色的NNW-Capter等多款独具特色的气动力/热计算软件,加快我国CFD工业软件自主可控进程。本文总结了NNW工程的一系

图 23 (网络版彩图)基于2D/3D微结构重建的多孔介质复合传热特性预测模型。(a) 2D微结构重建及流场; (b) 3D微结构重建及温度场

Figure 23 (Color online) The porous media conjugate heat transfer characteristic prediction model based on 2D/3D microstructure reconstruction. (a) 2D porous media reconstruction and flow field; (b) 3D porous media reconstruction and temperature.

列关键技术问题和取得的研究进展,并展望了下一步的技术发展思路。

(1) 软件框架问题. NNW工程软件框架采用分层架构设计,定义了明确接口,避免了开发者重复劳动且方便二次开发,在封装性和效率间保持了较好平衡,并提出了基于区域分解的结构/非结构耦合策略,提升了计算效率. 下一步,软件框架将向适用于多学科耦合求解方向演化。

(2) 并行计算问题. NNW工程采取提升抽象层次,并将并行细节隔离至底层的技术方案,保证了不熟悉并行技术的CFD专家可直接开发并行软件. 下一步,并行框架将向适用于多种异构计算机体系方向发展。

(3) 网格生成问题. NNW工程从体系上对CFD网格技术进行了系统规划,开发了表面网格和边界层网格自动生成技术、网格自适应和动网格技术等,并基于此发布了国内首款可替代国际主流商业软件的CFD结构网格生成软件NNW-GridStar. 下一步,工程将着重开发非结构生成技术及软件,并公开发布和推广应用。

(4) 可视化与知识提取问题. NNW工程发展了高可扩展多层次并行和大规模/原位可视化技术、流场特征智能提取算法,并基于此开发了NNW-TopViz可

视化软件系统. 下一步,工程将着重完成NNW-TopViz的测试和并行版本开发。

(5) 验证与确认问题. NNW工程制定了《CFD验证与确认术语》并经过国内同行专家研讨达成共识,构建了涵盖基本流动特征和典型工程应用的标模体系. 下一步,将编制CFD V&V的标准指南、研制自主标模数据库并公开发布。

(6) 算法和模型问题. NNW工程发展了 e^N 方法的三维转捩预测能力,改进了转捩模型、湍流模型与壁模型,改进了WCNS, WENN, DG/FV等高精度算法,增强了算法的激波捕捉能力和极值点精度等,有望在摩阻、热流等长期算不准的难题上显著提高数值预测精度. 下一步NNW模型与算法的发展目标将从面向常规问题向跨尺度、多物理场、极端条件等模拟方向发展。

未来, NNW工程将继续通过基础研究持续推进关键技术问题突破,发展数值风洞软件框架、核心流动模拟软件、多学科耦合模拟软件、网格生成软件、可视化软件等NNW系列软件等,与高性能计算机系统一起,为武器装备、航空航天、能源动力、地面交通和科学研究等提供自主可控的强力支撑。

致谢 感谢NNW工程专家委员会和用户委员会对工程技术方案等的咨询与建议,全国相关高等院校、科研院所、高新软件企业等全体参研人员的共同努力,刘刚、张来平、江雄、任玉新等对工程技术路线的贡献以及袁先旭、杜雁霞、涂国华、赵钟、周乃春、孙岩、庞宇飞、王昉、吴晓军、赵丹、陈江涛、陈波、傅亚陆等对本文形成的贡献。

参考文献

- 1 Chapman D R, Mark H, Pirtle M W. Computers vs. wind tunnels for aerodynamic flow simulations. *Astron Aerons*, 1975, 13: 22–35
- 2 Jameson A. Numerical wind tunnel—Vision or reality. In: *Proceedings of the AIAA 24th Fluid Dynamics Conference*. Orlando, 1993. AIAA 93-3021
- 3 Kobayashi T. Numerical wind tunnel: New technology for flow analysis. *J Soc Instrum Control Eng*, 1992, 31: 986–990
- 4 Zhang H X, Zhuang F G. NND schemes and their applications to numerical simulation of two- and three-dimensional flows. *Adv Appl Mech*, 1991, 29: 193–265
- 5 Witherden F D, Jameson A. Future directions of computational fluid dynamics. In: *Proceedings of the 23rd AIAA Computational Fluid Dynamics Conference*. Denver, 2017
- 6 Zhang H X, Shen M Y. *Computational fluid dynamics—Fundamentals and Applications of Finite Difference Methods* (in Chinese). Beijing: National Defense Industry Press, 2003 [张涵信, 沈孟育. 计算流体力学——差分方法的原理和应用. 北京: 国防工业出版社, 2003]
- 7 Slotnick J, Khodadoust A, Alonso J, et al. CFD vision 2030 study: A path to revolutionary computational aerosciences. Technical Report, 2014. NASA/CR–2014-218178
- 8 Yuan X X. Progress on basic research system of the National Numerical Windtunnel Project (in Chinese). CARD C Report, 2020 [袁先旭. 国家

数值风洞工程基础研究系统进展报告. CARDC研究报告, 2020]

- 9 Johnson F T, Tinoco E N, Yu N J. Thirty years of development and application of CFD at Boeing Commercial Airplanes, Seattle. *Comput Fluids*, 2005, 34: 1115–1151
- 10 OpenFOAM. The Open Source CFD Toolbox, User Guide. Boston: Free Software Foundation Inc., 2015
- 11 Tonks M R, Gaston D, Millett P C, et al. An object-oriented finite element framework for multiphysics phase field simulations. *Comput Mater Sci*, 2012, 51: 20–29
- 12 Williamson R L, Hales J D, Novascone S R, et al. Multidimensional multiphysics simulation of nuclear fuel behavior. *J Nucl Mater*, 2012, 423: 149–163
- 13 Henshaw W. Overture—An object-oriented framework for overlapping grid applications. In: Proceedings of the 32nd AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit. St. Louis, 2002. AIAA-2002-31389
- 14 Economou T D, Palacios F, Copeland S, et al. SU2: An open-source suite for multiphysics simulation and design. *AIAA J*, 2016, 54: 828–846
- 15 Guo H, Mo Z Y, Zhang A Q. A parallel module for the multiblock structured mesh in JASMIN and its applications (in Chinese). *Comput Eng Sci*, 2012, 34: 69–74 [郭红, 莫则尧, 张爱清. JASMIN框架中多块结构网格拼接并行计算及其应用. 计算机工程与科学, 2012, 34: 69–74]
- 16 Sun Y J, Sun L. Isoparametric element algorithm framework design based on Jaumin (in Chinese). *Comput Aided Eng*, 2015, 24: 63–67 [孙运见, 孙乐. 基于Jaumin的等参单元算法框架设计. 计算机辅助工程, 2015, 24: 63–67]
- 17 Mo Z Y. Progress on high performance programming framework for numerical simulation (in Chinese). *E-sci Tech Appl*, 2015, 6: 11–19 [莫则尧. 高性能数值模拟编程框架研究进展. 科研信息化技术与应用, 2015, 6: 11–19]
- 18 Kroll N, Abu-Zurayk M, Dimitrov D, et al. DLR project Digital-X: Towards virtual aircraft design and flight testing based on high-fidelity methods. *CEAS Aeronaut J*, 2016, 7: 3–27
- 19 Leicht T, Jägersküpper J, Vollmer D, et al. DLR-project Digital-X—Next generation CFD solver “Flucs”. In: Deutscher Luft und Raumfahrtkongress. Braunschweig, 2016. 420027
- 20 Schwaborn D, Gerhold T, Heinrich R. The DLR TAU code: Recent applications in research and industry. In: Proceedings of European Conference on Computational Fluid Dynamics. Delft, 2006
- 21 Arevalo S, Atwood C, Bell P, et al. A new DoD initiative: The Computational Research and Engineering Acquisition Tools and Environments (CREATE) program. *J Phys-Conf Ser*, 2008, 125: 012090
- 22 Morton S A, Meakin R E. HPCMP CREATE™-AV Kestrel architecture, capabilities and long term plan for fixed-wing aircraft simulations. In: Proceedings of the 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting. San Diego, 2016. AIAA-2016-0565
- 23 Zhao Z, Zhang L P, He L, et al. PHengLEI: A large scale parallel CFD framework for arbitrary grids (in Chinese). *Chin J Comput*, 2019, 42: 2368–2383 [赵钟, 张来平, 何磊, 等. 适用于任意网格的大规模并行CFD计算框架PHengLEI. 计算机学报, 2019, 42: 2368–2383]
- 24 Zhao Z, He L, He X Y. Design of general CFD software PHengLEI (in Chinese). *Comput Eng Sci*, 2020, 42: 210–219 [赵钟, 何磊, 何先耀. 风雷(PHengLEI)通用CFD软件设计. 计算机工程与科学, 2020, 42: 210–219]
- 25 Jiang Q G, Jin Z Y. The hybrid MPI and OpenMP parallel scheme of GRAPES global model (in Chinese). *J Appl Meteorol Sci*, 2014, 25: 581–591 [蒋沁谷, 金之雁. GRAPES全球模式MPI与OpenMP混合并行方案. 应用气象学报, 2014, 25: 581–591]
- 26 He X, Zhao Z, Zhang L P. Validation of the structured/unstructured hybrid CFD software HyperFLOW (in Chinese). In: Proceedings of the 15th Conference on Computational Fluid Dynamics. Yantai, 2012. 1282–1287 [赫新, 赵钟, 张来平. 结构非结构耦合计算CFD软件HyperFlow初步验证. 见: 第15届全国计算流体力学会议论文集. 烟台, 2012. 1282–1287]
- 27 Zhao Z, He X, Zhang L P. Numerical research of NASA high-lift trap wing model based on HyperFLOW (in Chinese). *Acta Aerodyn Sin*, 2015, 33: 594–602 [赵钟, 赫新, 张来平. HyperFLOW软件数值模拟Trap Wing高升力外形. 空气动力学学报, 2015, 33: 594–602]
- 28 He X, Zhao Z, Ma R, et al. Validation of HyperFLOW in subsonic and transonic flow. *Acta Aerodyn Sin*, 2016, 34: 267–275
- 29 Baker T J. Mesh generation: Art or science? *Prog Aerospace Sci*, 2005, 41: 29–63
- 30 Dey S, Aubry R M, Karamete B K, et al. CAPSTONE: A geometry-centric platform to enable physics-based simulation and system design. *Comput Sci Eng*, 2015, 18: 32–39
- 31 Zhang L P, He X, Chang X H, et al. Recent progress of static and dynamic hybrid grid generation techniques over complex geometries (in Chinese). *Phys Gases*, 2016, 1: 42–61 [张来平, 赫新, 常兴华, 等. 复杂外形静态动态混合网格生成技术研究新进展. 气体物理, 2016, 1: 42–61]
- 32 Xiao Z F. Automatic hybrid mesh generation for viscous flow simulations with complex geometries (in Chinese). Dissertation for Doctoral

- Degree. Hangzhou: Zhejiang University, 2017 [肖周芳. 面向复杂外形黏性流动数值模拟的混合网格全自动生成方法研究. 博士学位论文. 杭州: 浙江大学, 2017]
- 33 Alauzet F, Marcum D. A closed advancing-layer method with connectivity optimization-based mesh movement for viscous mesh generation. *Eng Comput*, 2015, 31: 545–560
 - 34 Wang F, di Mare L. Hybrid meshing using constrained Delaunay triangulation for viscous flow simulations. *Int J Numer Meth Engng*, 2016, 108: 1667–1685
 - 35 Fang X, Xu W, Bao H, et al. All-hex meshing using closed-form induced polycube. *ACM Trans Graph*, 2016, 35: 1–9
 - 36 Wang Z, Quintanal J, Corral R. Accelerating advancing layer viscous mesh generation for 3D complex configurations. *Procedia Eng*, 2017, 203: 128–140
 - 37 Garanzha V A, Kudryavtseva L N. Hyperelastic springback technique for construction of prismatic mesh layers. *Procedia Eng*, 2017, 203: 401–413
 - 38 Aubry R, Dey S, Mestreau E L, et al. Boundary layer mesh generation on arbitrary geometries. *Int J Numer Meth Engng*, 2017, 112: 157–173
 - 39 Chen J, Zhao D, Zheng Y, et al. Domain decomposition approach for parallel improvement of tetrahedral meshes. *J Parallel Distributed Comput*, 2017, 107: 101–113
 - 40 Zheng Y, Xiao Z, Chen J, et al. Novel methodology for viscous-layer meshing by the boundary element method. *AIAA J*, 2018, 56: 209–221
 - 41 Chen J, Xiao Z, Zheng Y, et al. Scalable generation of large-scale unstructured meshes by a novel domain decomposition approach. *Adv Eng Software*, 2018, 121: 131–146
 - 42 Gan Y K, Liu J F. Automatic viscous boundary layer mesh generation (in Chinese). *Chin J Theoret Appl Mech*, 2017, 49: 1029–1041 [甘洋科, 刘剑飞. 黏性边界层网格自动生成. *力学学报*, 2017, 49: 1029–1041]
 - 43 Lei N, Zheng X, Jiang J, et al. Quadrilateral and hexahedral mesh generation based on surface foliation theory. *Comput Methods Appl Mech Eng*, 2017, 316: 758–781
 - 44 Lei N, Zheng X, Luo Z, et al. Quadrilateral and hexahedral mesh generation based on surface foliation theory II. *Comput Methods Appl Mech Eng*, 2017, 321: 406–426
 - 45 Lei N, Zheng X, Si H, et al. Generalized regular quadrilateral mesh generation based on surface foliation. *Procedia Eng*, 2017, 203: 336–348
 - 46 Park M A, Loseille A, Krakos J, et al. Unstructured grid adaptation: status, potential impacts, and recommended investments toward CFD vision 2030. In: *Proceedings of the 46th AIAA Fluid Dynamics Conference*. Washington D C, 2016. AIAA 2016-3323
 - 47 Chawner J R, Dannenhoffer J, Taylor N J. Geometry, mesh generation, and the CFD 2030 vision. In: *Proceedings of the 46th AIAA Fluid Dynamics Conference*. Washington D C, 2016. AIAA 2016-3485
 - 48 Gammon M R, Fellows C D, Whyman S H. Enabling virtual topology for high quality CFD surface meshing of complex CAD geometry. In: *Proceedings of the 2018 Fluid Dynamics Conference*. Atlanta, 2018. AIAA 2018-3721
 - 49 Kleb B, Park M A, Wood W A, et al. Sketch-to-solution: An exploration of viscous CFD with automatic grids. In: *Proceedings of the AIAA Aviation 2019 Forum*. Dallas, 2019. AIAA 2019-2948
 - 50 WiscIt. Department of Energy, 2000. <http://wci.llnl.gov/simulation/computer-codes/visit>
 - 51 ParaView, Kitware Inc, 2001. <http://www.paraview.org/>
 - 52 Nonaka J, Ono K, Fujita M. 234Compositor: A flexible parallel image compositing framework for massively parallel visualization environments. *Future Generation Comput Syst*, 2018, 82: 647–655
 - 53 Wang S, Wang H Y. Application of large-scale CFD flow field visualization analysis system (in Chinese). *J Aerospace Power*, 2017, 32: 1138–1147 [王松, 王海洋. 大规模CFD流场可视化分析系统的应用. *航空动力学报*, 2017, 32: 1138–1147]
 - 54 Wang F, Liu Y, Zhao D, et al. UIA: A uniform integrated advection algorithm for steady and unsteady piecewise linear flow field on structured and unstructured grids. *J Vis*, 2018, 21: 267–280
 - 55 Chen C, Yang W, Wang F, et al. Reverse offload programming on heterogeneous systems. *IEEE Access*, 2019, 7: 10787–10797
 - 56 Liu Y, Wang Y, Deng L, et al. A novel in situ compression method for CFD data based on generative adversarial network. *J Vis*, 2019, 22: 95–108
 - 57 Deng L, Wang Y, Liu Y, et al. A CNN-based vortex identification method. *J Vis*, 2019, 22: 65–78
 - 58 Wang Y, Deng L, Yang Z, et al. A rapid vortex identification method using fully convolutional segmentation network. *Vis Comput*, 2020, 37: 261–273

- 59 Deng L, Wang Y, Chen C, et al. A clustering-based approach to vortex extraction. *J Vis*, 2020, 23: 459–474
- 60 Liu Y, Lu Y, Wang Y, et al. A CNN-based shock detection method in flow visualization. *Comput Fluids*, 2019, 184: 1–9
- 61 Schlesinger S. Terminology for model credibility. *Simulation*, 1979, 32: 103–104
- 62 IEEE. IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronics Terms. ANSI/IEEE Std 100-1984. New York, 1984
- 63 AGARD Working Group. Assessment of Experimental Uncertainty with Application to Wind Tunnel Testing. AIAA S-071A-1999
- 64 American Society of Mechanical Engineers (ASME). Standard for Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics and Heat Transfer. ASME V&V 20-2009
- 65 National Aeronautics and Space Administration (NASA). Standard for Models and Simulations. NASA-STD-7009A, 2016
- 66 American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA). Guide for the Verification and Validation of Computational Fluid Dynamics Simulations. AIAA-G-077-1998
- 67 American Society of Mechanical Engineers (ASME). Guide for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics. ASME V&V 10-2006
- 68 American Society of Mechanical Engineers (ASME). An Illustration of the Concepts of Verification and Validation in Computational Solid Mechanics. ASME V&V 10.1-2012
- 69 DoD. DoD Directive No. 5000.59: Modeling and Simulation (M&S) Management. Washington D C: Department of Defense, 1994
- 70 DoD. DoD Instruction 5000.61: Modeling and Simulation (M&S) Verification, Validation, and Accreditation (VV&A). Washington D C: Defense Modeling and Simulation Office, Office of the Director of Defense Research and Engineering, 1996
- 71 DoD. DoD Modeling and Simulation Glossary. Washington D C: Department of Defense, 1997. <http://www.msco.mil>
- 72 DoD. Department of Defense Standard Practice: Documentation of Verification, Validation, and Accreditation (VV&A) for Models and Simulations. Washington D C: Department of Defense, 2008
- 73 NASA. Turbulence Modeling Resource. 2008. <http://turbmodels.larc.nasa.gov/>
- 74 Casey M, Wintergerste T, Innotec S. ERCOFTAC special interest group on quality and trust in industrial CFD: Best practice guidelines. Brussels: European Research Community on Flow, Tutbulence and Combusion, 2000
- 75 Charles H. The development of a framework for CFD validation and best practice: The QNET-CFD knowledge base. *Chin J Aeronaut*, 2008, 19: 105–113
- 76 Vidanovic N D, Rasuo B P, Damljanovic D B, et al. Validation of the CFD code used for determination of aerodynamic characteristics of nonstandard AGARD-B calibration model. *Therm Sci*, 2014, 18: 1223–1233
- 77 Marini M, Paoli R, Grasso F, et al. Verification and validation in computational fluid dynamics: The FLOWNET database experience. *JSME Int J Ser B*, 2002, 45: 15–22
- 78 Obara C J, Lamar J E. Overview of the cranked-arrow wing aerodynamics project international. *J Aircraft*, 2009, 46: 355–368
- 79 Levy D W, Zickuhr T, Vassberg J, et al. Data summary from the first AIAA computational fluid dynamics drag prediction workshop. *J Aircraft*, 2003, 40: 875–882
- 80 Laflin K R, Klausmeyer S M, Zickuhr T, et al. Data summary from second AIAA computational fluid dynamics drag prediction workshop. *J Aircraft*, 2005, 42: 1165–1178
- 81 Vassberg J C, Tinoco E N, Mani M, et al. Abridged summary of the third AIAA computational fluid dynamics drag prediction workshop. *J Aircraft*, 2008, 45: 781–798
- 82 Vassberg J C, Tinoco E N, Mani M, et al. Summary of the fourth AIAA CFD drag prediction workshop. In: *Proceedings of the 28th AIAA Applied Aerodynamics Conference*. 2010
- 83 Vassberg J C, Tinoco E N, Mani M, et al. Summary of the fourth AIAA computational fluid dynamics drag prediction workshop. *J Aircraft*, 2014, 51: 1070–1089
- 84 Levy D W, Laflin K R, Tinoco E N, et al. Summary of data from the fifth computational fluid dynamics drag prediction workshop. *J Aircraft*, 2014, 51: 1194–1213
- 85 Derlaga J M, Morrison J H. Statistical analysis of the sixth AIAA drag prediction workshop solutions. *J Aircraft*, 2018, 55: 1388–1400
- 86 Rumsey C L, Slotnick J P, Long M, et al. Summary of the first AIAA CFD high-lift prediction workshop. *J Aircraft*, 2011, 48: 2068–2079
- 87 Rumsey C L, Slotnick J P. Overview and summary of the second AIAA high-lift prediction workshop. *J Aircraft*, 2015, 52: 1006–1025
- 88 Rumsey C L, Slotnick J P, Sclafani A J. Overview and summary of the third AIAA high lift prediction workshop. *J Aircraft*, 2019, 56: 621–644

- 89 Schuster D, Chwalowski P, Heeg J, et al. A summary of data and findings from the first Aeroelastic Prediction Workshop. In: Proceedings of the 7th International Conference on Computational Fluid Dynamics. Hawaii, 2012. ICCFD7-2012
- 90 Heeg J, Chwalowski P, Schuster D M, et al. Plans and example results for the 2nd AIAA Aeroelastic Prediction Workshop. In: Proceedings of the 56th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Kissimmee, 2015. AIAA 2015-0437
- 91 NASA. 4th Propulsion and Aerodynamic Propulsion Workshop, 2017. <https://paw.larc.nasa.gov>
- 92 Zhang H X. On the uncertainty about CFD results (in Chinese). *Acta Aerodyn Sin*, 2008, 26: 47–49 [张涵信. 关于CFD计算结果的不确定度问题. *空气动力学学报*, 2008, 26: 47–49]
- 93 Chen J Q, Zhang Y R. Verification and validation in CFD based on the Richardson extrapolation method (in Chinese). *Acta Aerodyn Sin*, 2012, 30: 176–183 [陈坚强, 张益荣. 基于Richardson插值法的CFD验证和确认方法的研究. *空气动力学学报*, 2012, 30: 176–183]
- 94 Wang R L, Wen W Z. Verification and validation of modeling and simulation of complex engineering (in Chinese). *Comput Aid Eng*, 2014, 23: 61–68 [王瑞利, 温万治. 复杂工程建模和模拟的验证与确认. *计算机辅助工程*, 2014, 23: 61–68]
- 95 Deng X G, Zong W G, Zhang L P, et al. Verification and validation in computational fluid dynamics (in Chinese). *Adv Mech*, 2007, 37: 279–288 [邓小刚, 宗文刚, 张来平, 等. 计算流体力学中的验证与确认. *力学进展*, 2007, 37: 279–288]
- 96 Wang Y T, Liu G, Chen Z B. Summary of the first aeronautical computational fluid dynamics credibility workshop (in Chinese). *Acta Aerodyn Sin*, 2019, 37: 247–261 [王运涛, 刘刚, 陈作斌. 第一届航空CFD可信度研讨会总结. *空气动力学学报*, 2019, 37: 247–261]
- 97 Zhao H, Hu X Z, Zhang J, et al. Effects of the uncertainty in turbulence model closure coefficients on the simulation of flow over airfoil (in Chinese). *Acta Aeronaut Astronaut Sin*, 2019, 40: 122581 [赵辉, 胡星志, 张健, 等. 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*, 2019, 40: 122581]
- 98 Oberkampf W L, Roy C J. Verification and Validation in Scientific Computing. Cambridge: Cambridge University Press, 2010
- 99 Saaty T L. The Analytic Hierarchy Process. New York: McGraw-Hill, 1980
- 100 Xiang X H, Zhang Y F, Chen J Q, et al. Uncertainty analysis and application research on the cross-flow transition model (in Chinese). *J Astronaut*, 2020, 41: 1141–1150 [向星皓, 张毅锋, 陈坚强, 等. 横流转捩模型参数不确定度量化分析与应用研究. *宇航学报*, 2020, 41: 1141–1150]
- 101 Wang L, Fu S. Modelling flow transition in a hypersonic boundary layer with Reynolds-averaged Navier-Stokes approach. *Sci China Ser G-Phys Mech Astron*, 2009, 52: 768–774
- 102 Fu S, Wang L. RANS modeling of high-speed aerodynamic flow transition with consideration of stability theory. *Prog Aerosp Sci*, 2013, 58: 36–59
- 103 Yang M, Xiao Z. Distributed roughness induced transition on wind-turbine airfoils simulated by four-equation $k-\omega-\gamma$ -Ar transition model. *Renew Energy*, 2019, 135: 1166–1177
- 104 Su C H, Zhou H. Transition prediction of a hypersonic boundary layer over a cone at small angle of attack—With the improvement of e^N method. *Sci China Ser G-Phys Mech Astron*, 2009, 52: 115–123
- 105 Su C H, Zhou H. Transition prediction of the supersonic boundary layer on a cone under the consideration of receptivity to slow acoustic waves. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2011, 54: 1875–1882
- 106 Huang Z F, Xiao L C, Luo J S. Transition prediction e^N method and its software development for supersonic boundary layers (in Chinese). *Acta Aerodyn Sin*, 2018, 36: 279–285 [黄章峰, 肖凌晨, 罗纪生. 超声速边界层转捩预测 e^N 方法及其软件开发. *空气动力学学报*, 2018, 36: 279–285]
- 107 Yuan X X, Wan B B, Chen J F, et al. Investigation on correlation between wind tunnel and flight for boundary layer stability and transition of MF-1 blunt cone (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2019, 49: 124701 [涂国华, 万兵兵, 陈坚强, 等. MF-1钝锥边界层稳定性及转捩天地相关性研究. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2019, 49: 124701]
- 108 Chen X, Hussain F, She Z S. Non-universal scaling transition of momentum cascade in wall turbulence. *J Fluid Mech*, 2019, 871: R2
- 109 Xiao M J, She Z S. Symmetry-based description of laminar-turbulent transition. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2019, 62: 994711
- 110 Xu J, Zhang Y, Bai J. One-equation turbulence model based on extended bradshaw assumption. *AIAA J*, 2015, 53: 1433–1441
- 111 Deng X B, Dong S. Sub-grid modelling based on vorticity-stretching. *J Phys-Conf Ser*, 2020, 1522: 012021
- 112 Xie C, Wang J, Li H, et al. Spatially multi-scale artificial neural network model for large eddy simulation of compressible isotropic turbulence. *AIP Adv*, 2020, 10: 015044
- 113 Liao F, Wang S, Yang X, et al. A simulation-based actuator surface parameterization for large-eddy simulation of propeller wakes. *Ocean Eng*,

- 2020, 199: 107023
- 114 Chen S Y, Chen Y C, Xia Z H, et al. Constrained large-eddy simulation and detached eddy simulation of flow past a commercial aircraft at 14 degrees angle of attack. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2013, 56: 270–276
- 115 Xia Z H, Shi Y P. Some thoughts on constrained large-eddy simulation method (in Chinese). *Acta Aerodyn Sin*, 2020, 38: 217–223 [夏振华, 史一蓬. 关于约束大涡模拟方法的一些思考. *空气动力学学报*, 2020, 38: 217–223]
- 116 Zhu L, Zhang W, Kou J, et al. Machine learning methods for turbulence modeling in subsonic flows around airfoils. *Phys Fluids*, 2019, 31: 015105
- 117 Zhang W W, Zhu L Y, Liu Y Y, et al. Progresses in the application of machine learning in turbulence modeling (in Chinese). *Acta Aerodyn Sin*, 2019, 37: 444–454 [张伟伟, 朱林阳, 刘溢阳, 等. 机器学习在湍流模型构建中的应用进展. *空气动力学学报*, 2019, 37: 444–454]
- 118 Shao S, Li M, Wang N H, et al. An efficient DDG/FV hybrid method for 3D viscous flow simulations on tetrahedral grids. *Commun Comput Phys*, 2019, 27: 725–752
- 119 Gong X Q, Jia H Y, Chen J T, et al. Applications of GMRES based on exact calculations of Jacobian matrix in discontinuous Galerkin methods (in Chinese). *Acta Aerodyn Sin*, 2019, 37: 121–132 [龚小权, 贾洪印, 陈江涛, 等. 基于雅可比矩阵精确计算的GMRES隐式方法在间断Galerkin有限元中的应用. *空气动力学学报*, 2019, 37: 121–132]
- 120 Wang Q, Deiterding R, Pan J, et al. Consistent high resolution interface-capturing finite volume method for compressible multi-material flows. *Comput Fluids*, 2020, 202: 104518
- 121 Zhang Y S, Ren Y X, Wang Q. Compact high order finite volume method on unstructured grids IV: Explicit multi-step reconstruction schemes on compact stencil. *J Comput Phys*, 2019, 396: 161–192
- 122 Yan Z, Liu H, Mao M, et al. New nonlinear weights for improving accuracy and resolution of weighted compact nonlinear scheme. *Comput Fluids*, 2016, 127: 226–240
- 123 Zhu H, Yan Z, Liu H, et al. High-order hybrid WCNS-CPR schemes on hybrid meshes with curved edges for conservation laws I: Spatial accuracy and geometric conservation laws. *Commun Comput Phys*, 2018, 23: 1355–1392
- 124 Tu G H, Deng X G, Min Y B, et al. Method for evaluating spatial accuracy order of CFD and applications to WCNS scheme on four typically distorted meshes (in Chinese). *Acta Aerodyn Sin*, 2014, 32: 425–432 [涂国华, 邓小刚, 闵耀兵, 等. CFD空间精度分析方法及4种典型畸形网格中WCNS格式精度测试. *空气动力学学报*, 2014, 32: 425–432]
- 125 Jiang Y. Multiderivative combined dissipative compact scheme satisfying geometric conservation law I: Basic formulations and performance evaluation. *Adv Appl Math Mech*, 2019, 11: 255–284
- 126 Zhang S, Zhu J, Shu C W. A brief review on the convergence to steady state solutions of Euler equations with high-order WENO schemes. *Adv Aerodyn*, 2019, 1: 16
- 127 Chen X L, Fu S. Linear stability analysis of hypersonic boundary layer on a flat-plate with thermal-chemical non-equilibrium effects (in Chinese). *Acta Aerodyn Sin*, 2020, 38: 316–325 [陈贤亮, 符松. 热化学非平衡高超声速平板边界层线性稳定性分析. *空气动力学学报*, 2020, 38: 316–325]
- 128 Liu C, Zhu Y, Xu K. Unified gas-kinetic wave-particle methods I: Continuum and rarefied gas flow. *J Comput Phys*, 2020, 401: 108977
- 129 Fei F, Liu H, Liu Z, et al. A benchmark study of kinetic models for shock waves. *AIAA J*, 2020, 58: 2596–2608

Advances in the key technologies of Chinese national numerical windtunnel project

CHEN JianQiang^{1,2}

¹ State Key Laboratory of Aerodynamics, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China;

² Computational Aerodynamics Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China

The rapid advancements in computational fluid dynamics (CFD) and high-performance computers (HPC) have led to the terminology of numerical windtunnel (NW) which first appeared in late 1980s in Japan. The concept of NW has been further developed in the United States of America. It is considered that NW is the product of the cross integration of fluid mechanics, mathematics, computer science and aeronautical engineering, and plays an increasingly important role in the development of aerospace vehicles. In 2018, China launched the national numerical windtunnel (NNW) project. The project aims to unite domestic superior partners, take advantage of the whole national forces, carry out collaborative researches, independently develop a CFD software system with advanced functions and complete categories, build world-leading CFD dedicated HPC, develop a domestic-open/shared aerodynamic numerical simulation platform with independent intellectual property rights in China. In this paper, we first introduce the system components and the key goals of the NNW project. Then, we summarize the latest advances on key technologies including the software framework, the parallel techniques, the grid generation methods, the visualization techniques, the verification and validation processes, the algorithms and models, etc. Finally, the next technological development plan of the NNW project is prospected.

national numerical windtunnel, CFD software framework, CFD software engineering, autonomous and controllable

doi: [10.1360/SST-2020-0334](https://doi.org/10.1360/SST-2020-0334)