

[综述·专论]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2014.03.028

CFD 技术在流体机械中的应用与发展

姜新春¹, 曾劲松^{2*}, 黄煌²

(1. 广东中科天元新能源科技有限公司, 广东 广州 510640;

2. 华南理工大学 轻工与食品学院, 广东 广州 510640)

摘 要:流体机械在轻工行业、化工行业等多种行业都得到广泛应用,通过分析 CFD 技术在流体机械的应用现状和发展趋势,针对湍流模型的选择、网格的分类及使用、计算域和边界条件的确定、计算模型的验证等方面,指出了 CFD 技术计算结果的可信度和二次开发应该引起重视。提出 CFD 技术发展方向应该是:既具有高适应、高速度、集成化和易用性的特点,又有正确合理的 V&V 评价体系。

关 键 词:计算流体力学(CFD);流体机械;湍流模型;评价体系

中图分类号:F713.83

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2014)03-0108-04

Application and Development of CFD Technology in Fluid Machinery

JIANG Xinchun¹, ZENG Jinsong^{2*}, HUANG Huang²

(1. Guangdong Zhongke Tianyuan New Energy Science and Technology Co., Ltd., Guangzhou 510640, China;

2. School of Light Industry and Food Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Fluid machineries in the light industry, chemical industry and other industries are widely used. Based on CFD applications and development in fluid machinery, for the choice of turbulence model, the classification and use of the grid, the determination of computational domain and boundary conditions, the validation of calculation model, etc., CFD technique was considered to be important for the credibility and secondary development. It is concluded that the CFD future development should be both full of high adaptability, high speed, high integration, ease of use and a reasonable V&V evaluation system.

Key words: computational fluid dynamics(CFD); fluid machinery; turbulence model; assessment system

作为现代设计技术之一,CFD 技术是 20 世纪 60 年代起伴随计算机技术迅速崛起的学科,其主要用途是对流态进行数值仿真模拟计算,与实验相比,CFD 数值模拟具有信息量大、成本低、易并行化、能快速响应的特点^[1]。CFD 技术的应用和发展在飞机设计方面尤为突出。据国外资料统计,传统的飞机设计需要进行大量风洞试验,而新的 CFD 设计方法,只需要将几个性能最好的机翼放到风洞里进行试验验证和最终选型^[2-3]。

目前,国内的 CFD 技术的应用逐渐由航空航天领域扩展到与流动和传热有关的各个工程领域,在轻工行业等多个行业中的流体机械中也得到了很好的应用。谷慧芬^[4]等运用 FLUENT 软件对轴流通风风机内

部三维黏性流场进行了数值模拟,并进行了性能分析和预测,为风机的内部结构优化提供了依据和方向。李海峰^[5]通过使用 HyperMesh 对水泵体网格进行划分,生成了质量更好的边界层,且层数多,网格也大大减少,提高了计算精度,缩短了开发周期,为优化设计提供理论依据。侯树强^[6]介绍了叶轮机械内部流场数值模拟的发展历史,并分别介绍了无黏性流、准黏性流、完全黏性流 3 个模拟阶段中各种数值模拟方法的原理、特点及应用。对叶轮机械内流数值模拟在湍流模式、优化设计、计算网络产生和并行处理等方面的发展作了展望。刘厚林^[7]认为网格生成技术是流体机械内部流动数值模拟中的关键技术之一,直接影响数值计算的收敛性,决定着数值计算结果最终的精度及

收稿日期:2013-10-26;修回日期:2013-12-25

作者简介:姜新春(1970),男,湖南津市人,工程师,广东中科天元新能源科技有限公司副总裁,总工程师,主要研究方向为化工机械。通信作者:曾劲松,E-mail:zjs789zjs@126.com

计算过程的效率。同时,许多学者对搅拌器、流化床、风机、电液比例阀、太阳能、疏水泵、热泵系统、换热器等进行了 CFD 数值模拟研究^[8-22]。

1 CFD 技术的应用现状

根据以上大量的文献介绍,目前 CFD 技术的应用现状主要表现在湍流模型的应用及其模型的可信度、网格划分、计算域以及验证等方面。

1) 湍流模型的选择

目前大涡模拟 LES 和直接数据模拟 DNS 较少用于流体机械内部湍流场的计算,因为 LES 法和 DNS 法均需要很好的网格划分,需要很大的计算代价,只有计算机硬件性能大幅提高,或者采用并行运算,才可能用于实际工程。更多的是通过求解平均 $N-S$ 方程来进行数值模拟,湍流模型的选用成为轻工业中影响流体机械内流数值模拟精度的重要因素,但是目前还没有普遍适用的湍流模型。FLUENT 软件中除了大涡模拟模型(LES)以外,还提供 Spalart-Allmaras 模型, $k-\varepsilon$ 模型, $k-\omega$ 模型,雷诺应力模型(RSM)等湍流模型^[23],目前模拟研究工作是根据下面的内容进行湍流模型的选择。

Spalart-Allmaras 模型是相对简单的单方程模型,不适合流动尺度变换比较大的流动问题:如平板射流问题等,也不适合预测均匀衰退的各向同性湍流。 $k-\varepsilon$ 模型分为标准 $k-\varepsilon$ 模型、RNG $k-\varepsilon$ 模型、可实现的 $k-\varepsilon$ 模型。其中标准 $k-\varepsilon$ 模型只适合完全湍流的流动过程模拟,RNG $k-\varepsilon$ 模型在形式上与标准 $k-\varepsilon$ 模型相似,更加适用于流线曲率大、有旋涡和旋转的流体机械内部流场中;可实现的 $k-\varepsilon$ 模型在旋转流动、强逆压梯度的边界层流动、流动分离和二次流的模拟方面有较强的优势。

$k-\omega$ 模型分为标准 $k-\omega$ 模型和 SST $k-\omega$ 模型。标准 $k-\omega$ 模型可预测尾流、混合流动、平板绕流、圆柱绕流和放射状喷射、墙壁束缚流动等,而 SST $k-\omega$ 模型比标准 $k-\omega$ 模型有更高的精度和可信度。

RSM 雷诺应力流动方程对复杂流动有更高的精度预测的潜力,如飓风流动、燃烧中高速旋转流、管道中二次流。

2) CFD 计算结果的可信度

由于计算流体力学领域的流场实验研究难度和耗费均比较大,不少使用者对计算过程和计算结果缺少深度分析和严格验证,甚至有的研究人员随意修正计算结果,使 CFD 软件及其计算工作在设计、分析中的指导作用没有可信度^[24]。

3) 二次开发和工程应用

CFD 商业软件的使用方便带来了研究者的依赖性,所以对 CFD 理论理解不够,无法进行二次开发和工程应用^[25]。

4) 网格的应用

目前使用的网格主要有结构化网格、非结构化网格以及混合网格等。结构化网格主要适用于形状规则的几何结构。非结构化网格技术适用于流体机械中复杂结构模型网格的生成,比较容易生成高质量的网格,但不能较好地处理黏性问题。结合结构网格和非结构网格优势的混合网格技术能够处理复杂边界问题,有三棱柱/四面体网格和矩形/非结构混合等混合网格^[26]。目前也有部分工程师开始使用 HyperMesh 等有限元软件进行网格划分,可以使 CAE 工程师有更多的精力和时间进行分析计算,提高了工作效率。

5) 计算域和边界条件的考虑

由于计算机的限制,在进行数值计算时需要对所研究的模型进行简化,对几何模型和物理模型的简化以及边界条件近似都会带来模型误差。计算域与实际机器尽量一致,往往会带来计算网格数目很大,造成计算时间太长甚至无法计算,因此只对机器的一部分进行数值模拟工作,但在与实验结果进行比较时,需要清楚这些简化所带来的影响^[27]。

6) 计算模型的验证与确认

关于 CFD 技术的 V&V (Verification & Validation 正确性与准确性)验证工作,美国和欧洲从 1987 年就开始开展了大规模、有组织、有计划地进行,美国的 ASME 非常重视 V&V 工作,多次组织会议研讨 CFD 技术的验证工作。其中 2013 年 5 月 22 - 23 日举行“2nd Annual ASME Verification and Validation Symposium”会议,就组织了全球计算流体模拟领域的科研人员到他们机构开会,目的就是为了完善他们的 V&V 评价体系。目前我国的工作更多地停留在 CFD 应用和模型的正确性工作上,除了在航空航天方面花了大量的人力、物力进行 CFD 验证工作,在 V&V 验证方面形成了比较成熟的评价体系以外,其余领域在 V&V 验证和确认工作方面,支持力度不够,CFD 的 V&V 验证工作需要大幅提高^[28]。

2 CFD 技术的发展趋势

从上面 CFD 技术应用现状进行分析,其发展趋势用如下几个方面来阐述。

1) 优化设计计算系统,将流体机械的设计与流场的数值模拟有机地结合起来,从而得到优化的设计结

果。利用 CFD 技术解决工程实际问题,优化设计高效、清洁的生产工艺和设备。

2) 目前网格生成技术比较成熟,能生成较高质量的网格,但是还有待进一步提高,需要突破 CFD 结果对网格的依赖性。网格生成技术的发展方向:①几何造型系统、化工工艺计算模拟软件、智能制造系统等与网格自动生成系统的集成成为发展的必然趋势,使整个过程更具效率性。②网格生成需要智能化,需要采用多重网格加速来提高收敛的速度及稳定性。③网格需要多种算法的结合,即算法应当具有较高的通用性、可靠性和高效性,尽可能地减少人为的干预。④如何使生成的自适应网格完全“自适应”,建立高效、精确、灵活、方便的复杂网格技术,是网格划分技术发展的必然趋势。

3) 分区并行计算、共享内存的多 CPU 并行计算、分布式内存的大规模并行计算、工作站集群方式进行的网络化大规模并行计算等,都可以提高 CFD 技术的计算速度。云计算的出现是并行计算技术、软件技术、网络技术发展的必然结果,其成熟发展将会大大提高 CFD 技术的计算能力。

4) 发展基于 CFD 的集成化技术,在 CFD 软件提供可靠的流场分析结果的基础上,利用优化、反设计、神经网络等手段,与 CAD/UG/PROE 及 CAM 等模块集成化,对方案进行筛选,使优化设计中的“试错”过程得以更为合理、快捷、准确地自动实现,使方案达到设计要求时,再进行生产制造;在 CFD 技术的基础上,结合多目标优化准则、多学科约束设定、收敛速度和结果合理等方面,注重与工业工艺计算模拟软件如 HYSIS 或者 ASPEN 等平台的有效结合,建立一体化平台,使整体设计工艺过程更加合理,设备结构更加优化、节能减排更加达标。针对不同机器应用的不同特点,建立专门的分析模块。

5) 参照国外的先进经验,建立和不断完善 VALIDATION & VERIFICATION (V&V) 评价体系,针对计算机上进行 CFD 数值模拟时采用的方法、手段及结果,评价其正确性和精确性,在没有进行工程应用时就已经知道模型的效果。到目前为止,现有商用 CFD 软件的 VALIDATION 问题,不难解决,而准确评价 CFD 的计算精度,是一个比较突出的问题。为了提高 CFD 技术水平,需要改进和提高流场模拟和测试手段和水平,建立 CFD 技术的 V & V 评判体系。为了推广 CFD 技术的工程应用,将在 CFD 技术具有实用性和时效性的基础上,建立和完善 CFD 技术的评价体系,验

证 CFD 技术的数值模型,数值公式和计算程序的正确性和适用范围。

3 结语

未来 CFD 技术在流体机械的发展方向,可以概括为:高适应性、高精度、高速度、集成化与模块化、易用性以及评价体系的建立和不断完善。在这个基础上,CFD 技术会越来越引起国家政府以及研发部门、使用部门的充分重视和认可,从而得到广泛地应用,降低企业的实验成本,减少人力和物力,提高企业的竞争力和经济回报率。

参考文献:

- [1] 王福军. 计算流体动力学分析—CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004:1-10.
- [2] 沈烨良. 大型飞机气动设计中的 CFD 技术[J]. 科技向导,2011(30):220.
- [3] 阎超,都彦喆. CFD 技术及其在大飞机研制中的应用[J]. 航空制造技术,2008(14):42-44.
- [4] 谷慧芳,顾平道,张曦. 基于 CFD 的空调用轴流风机内部流场研究[J]. 流体机械,2007,35(11):29-33.
- [5] 李海峰,吴冀川,刘建波,等. 有限元网格剖分与网格质量判定指标[J]. 中国机械工程,2012,23(3):368-377.
- [6] 侯树强,王灿星,林建忠. 叶轮机械内部流场数值模拟研究综述[J]. 流体机械,2005,33(5):30-33.
- [7] 刘厚林,董亮,王勇. 流体机械 CFD 中的网格生成方法进展[J]. 流体机械,2010,38(4):32-37.
- [8] HOLLANDER E D. Numerical scale-up study for ortho kinetic agglomeration in stirred vessels[J]. American Institute of Chemical Engineers Journal,2001,47:2425-2440.
- [9] 张锴, BRANDANI S. 流化床内颗粒流体两相流的 CFD 模拟[J]. 化工学报,2010,61(9):2192-2207.
- [10] 仇嘉,魏文建,张绍志,等. 基于 CFD 数值模拟的板式换热器分配器性能研究[J]. 机械工程学报,201,46(14):130-136.
- [11] 付强,陈娟,钱建勾,等. 低比速疏水泵改善汽蚀性能的 CFD 优化设计[J]. 中国新技术产品,2010(9):19-20.
- [12] 任海伟,李金平,刘增光,等. 太阳能干燥室内部气流场分布 CFD 数值模拟[J]. 农业机械学报,2012,43(增刊1):235-238.
- [13] 张弓,黄静,邱容. 基于 CFD 的电液比例阀液动力分析[J]. 机械设计,2010,27(6):93-96.
- [14] 李建龙,李书营. 离心风机 CFD 模拟分析[J]. 机械与电子,2011(13):86-87.
- [15] 高亚南,李永安. 基于地道风的空气源热泵系统工程研究及应用[J]. 建筑科学,2010,26(10):277-280.
- [16] ZENG J S, CHEN K F. Effect of S-type discharger structure on flow field in dilution zone at bottom of tower[J]. CIESC Journal,2011,62(3):685-691.
- [17] DRAUM C, BART H-J. Hydrodynamics in a RDC extractor; single and two-phase PIV measurements and CFD simulations[J]. Chemical Engineering and Technology, 2006, 29(11):1297-1302.

- [18] OLAIWOLA B O, SCHALDCH G. Average crossflow velocity in laminar flow systems with periodic finned surfaces [J]. Chemical Engineering and Technology, 2009, 32(10):1605-1616.
- [19] NANDUE I C. Direct prediction of the flows induced by a propeller in an agitated vessel using an unstructured mesh [J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 1998(76): 631-641.
- [20] DRUMM C, HLAWITSCHKA M W, BART H-J. CFD simulations and particle image velocimetry measurements in an industrial scale rotating disc contactor [J]. American Institute of Chemical Engineers Journal, 2011, 57(1):10-16.
- [21] 王福军,黎耀军,王文娥,等. 水泵 CFD 应用中的若干问题与思考 [J]. 排灌机械, 2005, 23(5):1-10.
- [22] 彭林斌. 能量回收向心透平设计及内部流动分析 [D]. 上海:上海交通大学, 2010.
- [23] Fluent Inc. Fluent 6 user's guide [G]. Lebanon, NY, USA: Fluent Inc, 2001.
- [24] 蔡荣泉,冯学梅. 漫谈舰船计算流体力学 (CFD) 实用化 [J]. 船舶, 2012, 23(2):75-84.
- [25] 王军,伍晓芳. 计算机应用多翼离心通风机的参数化 CAD/CFD 前处理的二次开发 [J]. 风机技术, 2005(4):34-36.
- [26] 蔡巧言,杜涛. 网格计算技术在大规模 CFD 计算上的应用 [J]. 空气动力学学报, 2009, 27(6):695-700.
- [27] 康顺. 计算域对 CFD 模拟结果的影响 [J]. 工程热物理学报, 2005, 26(2):35-39.
- [28] 张涵信,查俊. 关于 CFD 验证确认中的不确定度和真值估算 [J]. 浙江工业大学学报, 2003, 31(3):39-45.

[信息·简讯]

· 行业简讯 ·

西门子与北汽合资生产高效电驱动系统

在 2014 年北京国际汽车展览会上,全球领先电驱动系统供应商西门子公司携手中国主要汽车制造商之一北京汽车集团有限公司(以下简称“北汽”),成功签署协议,双方组建合资公司——“北京西门子汽车电驱动系统有限公司”,共促中国新能源汽车驱动技术发展。

合资公司将生产包括电机和电力电子设备在内的电驱动动力总成,应用于北汽 S, C 和 L 系列车型中。全新电驱动系统由电机和与之匹配的逆变器组成,电机的功率范围为 45 ~ 200 kW,其安全性、功率密度以及效率更高。2014 年起产品开始应用于样车,并实现小批量生产。预计到 2015 年,位于北京的新工厂将实现量产,年产或将达到 10 万台,并继续保持增长态势。

“这次合作将会进一步加强双方在高效电驱动技术方面的领导地位。”西门子股份公司管理委员会成员、工业业务领域首席执行官鲁思沃(Prof. Siegfried Russwurm)表示,“北汽是中国这个增速最快的电动汽车市场的主要厂商,西门子是全球电驱动解决方案的创新先锋,双方的合作将助力中国新能源汽车市场的未来发展。”

北汽董事长徐和谊表示:“此次北汽集团与西门子在电机方面深入合作,是北汽集团坚持开放创新、集成创新,积极整合全球资源,发展新能源汽车产业的重要举措,由此将极大地提升北汽集团新能源汽车产品的技术水平。有了世界一流的电机作心脏,北汽新能源汽车将如虎添翼,一定会在中国新能源汽车的产业化导入期大显身手。”

可以预见,凭借双方强大的技术和生产投入,全新的合资公司将进一步推动中国新能源汽车技术的发展、助力中国汽车行业实现更高环保标准。做为合资公司的首个客户,北汽将把电驱动系统应用于其电动汽车平台中。

(西门子(中国)有限公司工业业务领域市场与传播部)

· 行业简讯 ·

中国轻工机械协会第五次会员代表大会在北京召开

2014 年 4 月 21 日在北京召开中国轻工机械协会第五次会员代表大会。协会领导和来自全国的造纸机械、酿酒饮料机械、乳品机械、塑料机械、洗涤机械、皮革机械、服装机械和制糖机械等轻工机械行业企业的会员代表和科研院所、大专院校、地方轻工机械协会的会员代表以及特邀媒体代表参加了会议。

中国轻工业联合会步正发会长在会上做了重要讲话。大会审议通过了中国轻工机械协会第四届理事会会长李建国同志所做的题为《回首过去·展望未来》的第四届理事会工作报告。为下一阶段协会开展工作奠定了基础,提供了依据。大会选举产生了中国轻工机械协会第五届理事会,选举出了中国轻工机械协会第五届理事会常务理事单位和副理事长单位。中国联合装备集团有限公司执行董事、总经理刘安江当选为中国轻工机械协会第五届理事会理事长。中国联合装备集团有限公司总经理助理王欣当选为中国轻工机械协会第五届理事会副理事长兼秘书长。大会在团结奋进的气氛中完成了各项议程,高效务实地完成了既定任务,获得了圆满成功。

(叶涛)