

CFD 数值模拟的系统误差反馈及其实现

湖南大学 赵福云[☆] 汤广发 刘 娣
中南大学 刘志强 王汉青

摘要 回顾了近年来 CFD 数值模拟的系统误差及不确定度的研究进展,分析了系统误差反馈的基本程序及 CFD 在通风空调领域应用过程中所遇到的特殊困难,并介绍了 CFD 数值模拟的系统误差反馈思路。

关键词 CFD 系统误差 反馈 通风空调

Feedback of systematic errors and implementation in CFD numerical simulation

By Zhao Fuyun[★], Tang Guangfa, Liu Di, Liu Zhiqiang and Wang Hanqing

Abstract Reviews the study progress of systematic errors and uncertainties in CFD numerical simulation, analyses general routines of systematic error feedback and special difficulties as CFD applied in the ventilation and air conditioning industry, and presents the way to implement systematic error feedback.

Keywords CFD, systematic error, feedback, ventilation and air conditioning

★ Hunan University, Changsha, China

①

1 系统误差研究综述

在过去的 20 多年里,CFD 技术在暖通空调领域的应用日趋广泛和完善,由层流到湍流,由简单的室内气流到复杂的室外热环境模拟、IAQ 数值分析、SARS 的传播机理模拟、多相流模拟、建筑安全及烟气流动模拟(美国“9·11”事件后得到普遍重视)等^[1]。就目前的几种流体流动与传热的研究方法(理论求解、经验公式、模型试验、CFD 数值模拟等)而言,尽管 CFD 方法具有成本低、速度快、资料完备且可以模拟各种不同的工况等独特的优点,但 CFD 方法的可信度或者其结果的可靠性和对实际问题的可算性,已经成为阻碍 CFD 技术进步的绊脚石^[1~2]。

为了具体地说明这一问题,现在不妨先考察一下用计算机解决科学计算问题时经历的几个过程:

- 实际流动、传热传质过程;
- 数学模型(Navier-Stokes 方程、能量及质

量平衡方程、标量输运方程);

- 数值计算方法(网格生成、扩散项及对流项差分格式、各变量的耦合求解关系);

- 计算机语言及程序实现(code);

- 计算求解结果及后处理(可视化流体流动、传热传质的各个过程)。

由 a)到 e)即完成了通常意义上的数值模拟计算过程。现在的问题是这样反馈过来,由 e)到 a),有如下反馈过程:

第一步反馈(由 e)到 d)),存在计算误差(computational error),由两部分构成,其一为计算过程的舍入误差,即利用计算机作数值计算时,由

①[☆] 赵福云,男,1977 年 7 月生,在读博士研究生
410082 湖南大学土木工程学院建筑环境与设备工程系
(0731)8828207
E-mail: zfyfdnet@163.com
收稿日期:2004-02-25
修回日期:2004-04-29

于计算机的字长有限,原始数据在计算机上表示会产生误差,计算过程又可能产生新的误差,这取决于计算机本身的性能及编程语言的简洁和灵活程度,误差缩小空间并不大;其二为迭代计算不完全误差(倘若不采用迭代计算,此项误差为零)。

第二步反馈(由 d)到 c)),基本上与第一步反馈类似,通常不计入误差。

第三步反馈(由 c)到 b)),由于第二步反馈基本不计入误差,这一步可以讲是从 d)到 b),即对于所编制的程序确认其是否正确地代表了所求解的数学模型的过程,即验证过程(verification)。这一过程历来是计算数学、CFD 等领域的热门话题。因为通常的流体流动、传热传质控制方程具有强非线性耦合性质,直接求得精确解很困难,通常采用数值离散方法(有限差分法 FDM、有限容积法 FVM、有限元法 FEM、边界元法 BEM 等)获得其近似解,所以离散误差(discretization error)和不确定性也就不可避免地产生了^[2]。此外压力速度解耦方法 SIMPLE (semi-implicit method for pressure-linked equations)也会引入误差和不确定性因素,更为严重的是还可能导致整个求解过程的失败(即发散或不收敛)。其他如边界条件的数值处理办法、网格的疏密与分布、网格正交性、非稳态问题中的时间项离散格式等都是该过程中误差产生的根源。

第四步反馈(由 b)到 a)),即在完成验证过程之后,将计算结果与可靠的实验值或基准解进行对比的过程,即考核过程(validation),分析系统的模型误差(modeling error)。CFD 领域的 3 种模拟方法(直接数值模拟 DNS、大涡模拟 LES 及时均化雷诺方程 RANS (Reynolds averaged Navier-Stokes equation))中,DNS 方法最为可靠,其计算结果可以作为考核其他模拟方法、建立标准实验和模拟数据库的依据,但是该方法对计算机性能、运算速度、内存等要求太高,目前工程应用鲜见^[1];LES 方法对计算机内存和计算时间也要求很高(尽管其要求的内存容量和速度远小于 DNS 方法),并且很难获得独立网格解,尤其用于壁面附近或边界层,网格差异会导致结果的较大差别;由于 RANS 方法编程简单、对计算机性能要求不高(普通 PC 机即可),并且计算结果通常能够满足一般的工程精度要求,故一直倍受青睐,尤其对于湍流

模型的改进和完善更是普遍,如标准 $K-\epsilon$ 模型、修正 $K-\epsilon$ 模型、低 Re 模型、代数应力方程模型等。

上述的模型误差、离散误差及迭代收敛误差合称为系统误差,它是 CFD 数值模拟系统自身固有的特性,是客观存在的,并不依人的主观能动性而消失;而编程及用户操作误差(如程序调试、边界条件的选取、耦合项间的非一致近似等)是主观的,可以通过认真总结经验、熟练应用而消除。

从上述分析不难发现,数值预测的可信度分析也就是围绕第三步反馈及第四步反馈的过程,即 CFD 的验证和考核的讨论来展开的。国际范围内,如 AIAA, ERCOFTAC, ITTC 等,已做了大量的工作,并且也有了一些初步验证和考核的指标体系^[3~5]。1986 年,首先由 Roache, Ghia 及 White 三人为美国机械工程师协会的流体工程刊物(ASME J Fluids Eng)拟定了控制数值精度(numerical accuracy)的稿件编辑要求:凡有关数值计算的论文,如果没有对数值计算结果的截断误差作系统的考核或没有对计算精度作出估计的,概不接受。经过数年实践,越来越多的作者认识到这个问题的重要性。到 1993 年,ASME J Fluids Eng 又概括出了控制数值精度的 10 条规定^[6]。笔者认为,ASME 10 条规定的出台,尽管还存在不少争议,但说明在流体机械、工程热物理等领域,CFD/NHT(numerical heat transfer)的计算误差及不确定度分析问题已有明确的研究内容,并成为了成熟的研究方向。这对于 HVAC 领域通风气流组织数值模拟反馈研究具有一定的启发作用,遗憾的是这些验证和考核的指标体系普遍针对各自领域进行,对于复杂湍流流动,尤其 HVAC 领域的高大空间气流组织、热环境数值分布等的验证和考核更是空白^[1]。

2 CFD 数值模拟系统误差反馈的基本程序

2.1 准备阶段

从上述论述中发现,对于数值计算过程及结果作一定的误差及不确定度的估计与分析(即反馈),第一步必须确定数值模拟的对象、几何参数、初始和边界条件、数值模拟过程中采用的源代码(层流或湍流模型、控制方程的离散方法、离散代数方程的求解方法、各类变量的耦合途径、各种组分的反应式或热力学关系式等)。

2.2 验证方法及验证

目前,就近似求解的误差估计办法共有三大类:单元余量法、通量投射法及外推法。

单元余量法广泛地用于以 FEM 离散的误差估计之中,它主要是估计精确算子的余量,而不是整套控制方程的全局误差。这样就必须假定周围的单元误差并不相互耦合,误差计算采用逐节点算法进行。单元余量法的各种不同做法主要来自对单元误差方程的边界条件的不同处理办法。基于此,该方法能够有效处理局部的残余量,并能成功地用于网格优化程序。

通量投射法的基本原理来自一个很简单的事实:精确求解偏微分方程不可能有不连续的微分,而近似求解却可以存在微分的不连续,这样产生的误差即来自微分本身,即误差为系统的光滑求解与不光滑求解之差。该方法与单元余量法一样,对节点误差采用能量范数,故也能成功地用于网格优化程序。

单元余量法及通量投射法都局限于局部的误差计算(采用能量范数),误差方程的全局特性没有考虑。另外计算的可行性(指误差估计方程的计算时间应小于近似求解计算时间)不能在这两种方法中体现,因为获得的误差方程数量、阶数与流场控制方程相同。

外推法是指采用后向数值误差估计思想由精确解推出近似解的误差值。各类文献中较多地采用 Richardson 外推方法来估计截断误差^[7]。无论是低阶还是高阶格式,随着网格的加密,数值计算结果都会趋近于准确解。但由于计算机内存与计算时间的限制,实际上不能采用这种网格无限加密的办法。由 Richardson 所发展起来的外推方法,可以利用在不同疏密网格上得出的结果估计相应的收敛解,可以估计所用离散方法截断误差的阶数及所得数值计算结果的截断误差。该方法有很大的局限性,不能简单地用于复杂湍流流动,并且在数值计算中数值解必须单调地趋近于其收敛值^[8~9]。而文献[10]提出的单网格后向误差估计思想,在采用有限元法 FEM、有限容积法 FVM 时均有应用^[10~11],并且还用于网格优化程序,但该方法也不能用于复杂湍流流动的数值分析^[12]。

最近有文献运用或然率思想(如 Monte-Carlo 方法、瞬态误差估计方法、多态混沌理论等)来量化 CFD 求解的误差值。尽管此类方法能够用于复杂

湍流流动的误差分析,但对于矢量强度、压力差值、壁面剪切应力等缺乏相应的误差方程或不能作出准确估计。

总之,如何结合 HVAC 领域的流体流动及换热的实际,建立一套能够分析复杂流场的简单高效的验证方法还有待努力。现就数值离散、网格分布及迭代计算过程中常见的几个问题予以分析。

a) 对流项离散格式截断误差的分析

截断误差是造成数值解误差的主要原因。对流—扩散方程离散形式的截断误差来自对流项与扩散项的离散。在对流项与扩散项中,当 Re 数较大时,对流项的作用是主要的(扩散项一般采用具有二阶截差的中心差分格式)。同时,由于对流项的离散还会引起稳定性、假扩散等问题,因而对流项自然成为分析的重点。对于截断误差,有一般分析方法及 Leonard 分析方法两种,一般将两者结合起来分析。

对一维线性的纯对流问题,在通用的网格分布下,截断误差阶数越高,数值计算误差越小;截断误差首项的系数绝对值越小,数值计算的误差越小。

为了估计与某一个具体的数值解相对应的离散方程实际的截断误差,还需根据实际的数值计算结果加以估计。如在三套不同疏密的网格上进行数值计算,当网格足够细密,在截差中首项已占优势时,可以对同一地点的某一个计算值分别采用不同网格系统表示,并计算出误差阶数。

b) 低阶格式的假扩散特性

迎风格式、指数格式、混合格式及乘方格式等一阶格式应用于实际问题时都可能引起较严重的假扩散,这在 HVAC 领域的高大空间流体流动及传热计算中尤为明显,因为大空间尺度会使网格雷诺数增大;复杂风口边界或多风口会导致速度矢量由一维变为多维并致使其与网格线斜交,这些因素都易引起假扩散。

因此,为了有效地克服或减轻假扩散所带来的计算误差,空间导数应当采用二阶或更高阶的格式(如 QUICK 格式、二阶迎风差分格式等)。

c) 网格分布特性对数值计算误差的影响

通常 HVAC 领域所作的 CFD 研究都是采用结构化网格,其优点是信息存储简便,网格编号有规律可循。但其固定的网格高宽比(grid aspect ratio)、正交特性及均匀性对数值计算误差有很大

影响,尤其是在确定了离散格式的截断误差以后,网格的疏密及其分布特性就成了决定离散误差的关键因素。

网格高宽比及正交性的影响可以参阅文献[13~14]。文献[15]研究了相邻两个单元之间尺度变化对计算结果误差的影响。

对于非稳态问题,如果采用显式格式,空间步长受数值稳定性的限制;如果采用隐式格式,数值解的准确度则受 Courant 数(时间步长内的位移与网格间距之比)的限制^[16]。

美国学者 Patankar 曾经提及:如果这种(数值)方法只是对足够细的网格才能给出合理的解,那么一个试探性的由粗网格求得的解将是无用的^[17]。由此论断,是否可以对不同疏密程度网格上的计算结果作出一种统一的评估?即以计算中所采用的最密一套网格的解为依据,将拟采用的一套粗网格中的解与之相比,这样得出的百分数是否可认为是所给的数值解与精确解的偏差百分数的一种估计。学者 Roache 建议采用所谓网格收敛指标(grid convergence index,GCI)作为这种评估的方法^[18],但是实际计算发现,GCI 是一个偏于保守的误差估计办法,仍需加以改进。

d) 不完全迭代误差分析

所谓不完全迭代误差,是指由数值计算所得出的当前解与在同一套网格上离散方程的精确解之间的偏差,亦即迭代终止时离散方程的解与精确解的偏差。

由于离散方程采用迭代方法求解时不可能绝对满足收敛性,必须在一定的条件满足后停止迭代。这种用以判断迭代收敛的条件很多,一般分成两大类:规定相邻两次迭代的解的相对偏差小于允许值;规定离散方程的余量小于一定值。按照 Ferziger 提出的线性分析理论,第一种判别指标常常不能真正反映迭代收敛的程度^[19]。总之,各种收敛范数指标是值得推敲的。

另外有三种不同的收敛情况:单调收敛;振荡收敛;发散。对于第一种情形,采用广义 Richardson 插值方法估计误差及不确定度;对于第二种情形,结果振荡的上下边界是最好的误差估计;对于第三种情形,误差与不确定度无法估计。如何将各类情形统一分析,或者结合收敛指标及迭代误差探讨数值系统误差,还有待研究。

2.3 考核及考核途径

先探讨传热与流体流动问题的基准解(benchmark solution)问题。在学术界,通常指为各专家普遍认同的可以用作对比依据的一些典型问题的精确解或高精度的数值计算结果,包括如下两个方面。

2.3.1 典型问题的精确解

在 CFD/NHT 中所应用的精确解可以分为两类,即只满足偏微分方程而不管边界条件的精确解(人为构筑的精确解)及同时满足控制方程及初始、边界条件的精确解。显然这类方法过于简单,对于绝大多数流体流动及传热计算是不能求得精确解的。

a) 人为构筑的精确解

为了检验所发展的对流项离散格式的有界性及其假扩散的程度,常采用一些具有精确解的强制对流问题进行对比,如阶梯型标量场在均匀的平行流场中的传递、与网格线成斜交的两股同流速不同温度的平行气流的相互作用等^[20]。对于一维或二维的模型方程,对某个变量人为地选定一个精确解的表达式,然后将它代入模型方程,由该方程中的源项来承担使模型方程成立的任务^[21]。对于三维不可压缩流体问题,文献[22]给出了相应的精确解。

b) 由不可压缩 Navier-Stokes 方程及相应的定解条件所描述的定解问题的精确解

包括平行流(parallel flow)、Beltrami 流动、相似解(similarity solution,如外掠楔型物体的流动)等。

2.3.2 高精度的数值解

自 1981 年由 Davis 与 Jones 发起对正方形空腔内的层流自然对流这样基本的流动与换热问题进行数值模拟结果的对比以来^[23],高精度的数值计算结果取得了基准解的名义,并在流体流动及传热数值计算领域的发展过程中起到了考核算法、格式及开发程序的作用。流动与传热计算的主要基准解如下^[24~30]:

二维方腔顶盖驱动流 $Re=10^2 \sim 10^4$

二维方腔自然对流 $Ra=10^3 \sim 10^{10}$

$Pr=0.7$

二维倾斜空腔顶盖驱动流 $Re=100, 1\ 000$

$\beta=30^\circ, 45^\circ (\beta \text{ 为})$

侧面与水平底面
的夹角)

二维 L 型腔中的顶盖驱动流 $Re=100, 1\ 000$
后台阶流动与换热 $Re=10, 20, 50, 100,$
 $200, 500, 800$

入口与出口的宽度之比
为 $1.25\sim 2$

$Pr=10^{-4}\sim 10^3$

后台阶分层流动 $Pr=1\ Re=800$

$Gr=3.6\times 10^5$

三维顶盖驱动流 $Re=1\ 000, 2\ 000, 3\ 200$

可以发现这种高精度的数值解适用于几何形状简单、流态简单的流体流动及传热计算的考核,是机械、工程热物理、热能动力等领域较为成熟的做法,但仍然不能简单地推广至建筑环境领域的流体流动及传热的考核,并且每个计算结果的可靠性值得论证,如对于三维顶盖驱动流, $Re=1\ 000$ 时,各学者都能获得一致的解; $Re=2\ 000$ 时无基准解;而 $Re=3\ 000$ 时无稳态解^[30]。寻找比数值解更可靠的检验办法——实验测定,也就成为了 CFD/NHT 领域考核研究的必然内容之一。

2.3.3 可靠的实验测定结果

除了与基准解作比较外,考核所开发软件或计算方法的另外一种重要方法是与可靠的实验测定结果作比较。包括流场、温度场等高准确度的定量测定结果及采用可视化技术所获得的流动的定性图像。定量的实验测定结果当满足以下几个条件时,可以称之为 CFD/NHT“考核数据”(validation data)。

a) 测定结果的准确度比较高,是以数字而不是以图线形式给出;

b) 数据及有关的信息比较完整;

c) 数据容易获得;

d) 有不确定度的分析。

这里所谓的数据比较完整是指获得这批数据的边界条件、进口或初始条件叙述明确,以使数值计算工作者可依这些条件来进行数值模拟。这种考核数据的获得与收集,对于发展计算传热学的计算软件具有特别重要的意义。ASME J Fluids Eng 专门设立了一个数据库,以收集汇总有关的实测结果。为了使这种作为考核软件的实验数据表述规范化,相互间有一定可比性,文献[31]提出了

记录实验数据的格式,如下:a) 实验设备;b) 试验段;c) 试验条件;d) 进口与边界条件;e) 所测定的量;f) 实验设备的诊断说明(即对该测定设备本身可靠性的考查);g) 本试验中独特的测试方法;h) 实验方案;i) 质量控制方法;j) 误差分析;k) 数据提供方式;l) 参考文献;m) 实验数据。

在实验流体力学及传热学方面,实际例子很多,比较常见且广为引用的有如下几种^[32~36]:

a) 长方形截面 90° 弯头中压力系数的分布;

b) 圆管突然收缩区的轴向流速分布;

c) Benard 流动;

d) 竖直狭缝中二维自然对流;

e) 方形空腔内弧形平板的自然对流;

f) 三维顶盖驱动分层流。

显然这类实验也是针对工业管道流动及换热的特点进行设计或布置的,具有明显的局限性,即不能直接为建筑环境领域的 CFD 研究者所采用。

近些年来,在建筑环境领域也悄然兴起了室内气流组织实验、自然通风建筑原型比例实验、通风测试、室外环境测试等浪潮,美国、日本等国家建筑环境的 CFD 专家更是乐于于此^[1,37~38]。但是这些测试或实验普遍不属于规范性实验,并且实验数据难以共享,更为严峻的是,对流体流动及传热计算所需的边界条件缺乏详细说明或规定。总之,建筑环境领域可靠的通风气流组织标准化测试实验还有很长一段路要走。

3 通风空调领域 CFD 系统误差反馈的研究

文献[1]作者所作的建筑环境领域 CFD 的验证与考核研究,其基本思路局限于二维或三维的自然对流、强迫对流或混合对流等具体实例的计算比较,实验手段及程序缺乏规范性,还没有上升到理论研究高度。另外,前文业已陆续讲到 CFD 在通风空调领域应用中的系统误差研究所存在的不足,现从系统误差反馈的全局出发,继续深入探讨该问题。

3.1 流体流动及换热的新特点及研究难点

在通风空调领域,普遍遇到的是建筑室内外空气的流动状况及热分布规律问题,其中主要的特点和难点在于:

a) 高大空间(热边界、速度矢量边界等条件难以确定),多风口多障碍物(包括出入风口参数的确定),几何外形复杂(如圆形屋顶);

b) 自然对流与强迫对流并存(如置换通风),

温差及浓度差驱动流并存(双扩散效应,如烟气流、壁面有机物材料扩散等);

c) 热辐射(室内辐射供暖、灯光照明,室外太阳辐射等)及墙体耦合换热;

d) 室内外气流的相互干扰,活动人员及出入建筑空调区域的设备等对气流组织的干扰。

1933年,英国人 Thom 首次用数值方法求解了二维黏性流体偏微分方程,CFD由此诞生,但是针对流体流动及换热模型的讨论就从来没有停止过。同样地,对于建筑环境流体应用研究为主的领域,模型问题更是如此,并且在上述新的特点下又有了新的困难。综合目前的相关文献,有如下内容:

a) 湍流模型不完备。近年来,Q. Chen 等人提出了新的零方程模型,主要用于室内气流计算,其计算结果的精度、可信度及模型本身的适用范围值得考核;Murakami 等人考虑了室外气流模拟时标准 $K-\epsilon$ 模型的不足及其改进方案^[38],但局限性依然存在;当室内气流受温差影响较大时,必须对湍流模型进行修正,Markatos 等人早在 20 世纪 80 年代初就已开始研究,但结果及适用范围仍不尽如人意。

b) 壁面边界的处理没有规范。采用湍流模型的最大问题之一是壁面附近层流黏性底层及过渡区的处理,目前通行的做法是在壁面附近添加大量的网格,采用小雷诺数湍流模型,使模型由固体壁表面一直用到湍流核心,但耗费的计算时间是显而易见的;若采用不断尝试各种壁面网格间距的办法,会使计算过程及实践变得复杂,且引入了人的主观因素;另外,过去应用较多的壁面函数法,其中大量的经验常数已经使人们怀疑它的生命力。

c) 辐射模型及计算方法亟待改进。从一些国际传热及流体杂志中可以发现,近些年来科研及工程技术人员对辐射现象及其计算愈加重视,但是考虑复杂几何形体的空间辐射计算却很少见,尤其是考虑室外太阳辐射得热的流体流动及传热计算。国际领域盛行的 Monte-Carlo 概率统计方法或 DTM(discrete transfer method)方法仅限于解决小型空间的辐射问题,并且计算的收敛性能有待改进。

3.2 数值模拟的基本思想

鉴于 HVAC 领域通风气流组织的实际情况,一般采用 RANS 方法(以标准 $K-\epsilon$ 双方程模型为

代表)建模、FVM 离散(对流项采用 QUICK 等格式,扩散项采用具有二阶精度的中心差分格式)、SLUR(successive linear under-relaxation,逐线迭代松弛法)求解离散代数方程、SIMPLE 类压力速度预估校正思想耦合等组合过程对所选实际的通风气流组织进行数值计算。故主要的分析和研究对象是:湍流模型误差、对流项离散格式误差(雷诺数偏大时)、代数方程迭代求解误差、SIMPLE 类方法预估校正的收敛性、边界条件及初始条件的实施、网格分辨率(网格雷诺数的影响)、时间截差(非稳态问题)等几个方面,除湍流模型误差、初始和边界条件误差、物性参数误差等属考核阶段外,其他皆归于验证阶段的分析和探讨。

4 CFD 数值模拟系统误差反馈思路

4.1 验证

从普通雷诺时均控制方程组可以发现,湍流流动的动量输运方程与层流流动的动量输运方程除了湍流扩散黏性系数与源项有差别外,其他并无差异。在假设湍流扩散黏性系数已知的情况下,完全可以采用层流的验证方法获得相同的误差动量输运方程及质量方程。即:湍流动量方程的系统误差可以转化为层流动量方程的系统误差与基于湍流扩散系数下的湍流动量源项误差之和;而层流动量方程的系统误差可以分解为对流项离散误差、扩散项离散误差、网格分布误差、迭代求解误差等可以求解或分析的各类误差之和。

采用前述的单网格后向误差估计方法或更加高效可行的方法,对采用 FVM 离散的层流控制方程,得出其误差控制方程组(包括对流项离散格式的截断误差分析),再根据网格分布、动量边界等已知的信息获得层流动量方程的系统误差。显然,收敛的计算结果所获得的湍流扩散黏性系数没有任何问题;但若是在耦合湍流动能及湍流动能耗散率方程计算过程中,并未获得收敛解,则谈论其反馈的意义也就消失了。这样,问题就简化成了湍流黏性系数对湍流流动的动量输运误差方程的影响了。对此,笔者提出两种思路:一种是将此误差因素计入下面的考核之中,即湍流模型误差之中;另一种是作更多的迭代计算,考虑迭代误差的影响因素,但同时需保证获得收敛解或迭代不完全的解。

4.2 考核

复杂湍流流动的验证是很困难的,从 3.2 节可

以发现,因为湍流黏性系数的原因,仍需对湍流模型进行校核,即湍流模型的考核是必然的;另外,模型本身的不完善,也促使了这项内容的诞生。根据流体流动的实际特征,以下三步是必需的考核项目:

a) 经典数值计算或实验模型:顶盖驱动空腔流、热力驱动封闭空腔流、后掠台阶流等。

考核源程序和计算思想的正确性。

b) 二维或三维混合对流数值实验, $Re_c = Re_r$, $Ra_c = Ra_r$, $Pr_c = Pr_r$ (下角 c 指上述经典算例, r 指实际考核算例)。

考核该数值模型的计算稳定性,以及对于高大空间或复杂流动的适应性(建议采用三套单网格系统或多重网格系统,逐步加密,以考核网格分布特性及固壁边界的流态转化);保证网格雷诺数的相近,以实现从小空间流场计算到大空间流场计算的可持续性。

c) 标准建筑环境气流室(建议参照文献[31]提出的实验数据记录格式提供)。

考核该数值模型在建筑环境流体计算领域的可行性,由此推广至建筑环境的其他应用。

4.3 CFD 计算反馈文件

将模型建立、计算对象、初始和边界条件、验证过程及结果、考核内容及分析结论整理成文(暂未考虑辐射):

a) RANS 方法建模,采用的湍流模型(零方程、一方程、双方程等);

b) 计算对象为高大空间、室内置换通风、室外流场分布或烟气流动等;

c) 设置边界条件,实验测得参数应注明仪器的精度,尤其对湍流模型的壁面边界条件、热流或物料流边界需要加以详细说明;

d) 验证过程采用的方法、误差方程、湍流黏性系数的计算等需要详尽说明,验证得到的误差及不确定度分析需要详细说明;

e) 考核过程所采用的经典数值计算或实验模型及计算比较结果、三套网格系统下二维或三维混合对流数值实验及比较结果、标准建筑环境气流室的模拟及比较结果。

需要说明的是,若 d) 所得结果不能令人满意(置信度取 95%,不确定度为 5%),进行第 e) 步是毫无意义的,也是徒劳的。由此可见,对离散方程的离散误差、尤其是对流项的截断误差分析显得极

为重要,它关系到 CFD 数值模拟及其反馈计算的全局。

需要补充的是,对于辐射的涉入,可以有两种办法,一是采用独立网格系统对辐射单独计算,然后耦合计算结果,需单独列出辐射能的误差分析方程;二是对同一套网格系统,将辐射能耦合入能量方程,不需单独列出辐射能的误差分析方程,但要注意区分边界上的一般热流与净辐射得热。

参考文献

- 1 Chen Qingyan, Zhai Zhiqiang. How realistic is CFD as a tool for indoor environment design and studies without experiment. In: The 4th International Symposium on HVAC, Beijing, 2003, 62-77
- 2 Fred Stern, Robert V W, Hugh W C, et al. Verification and validation of CFD simulations. In: IIHR (Iowa Institute of Hydraulic Research) Report No 407. University of Iowa, 1999
- 3 AIAA- G077 - 1998. Guide for the verification and validation of computational fluid dynamics simulations
- 4 ERCOFTAC Special Interest Group on "quality and trust in industrial CFD". Best Practice Guidelines, Version 1.0. 2000
- 5 Hkoekstra M, Eca L. An efficient method for ship stern flow calculation. Third-Osaka Colloquium on Advanced CFD Applications to Ship Flow and Hull Form Design, Osaka, Japan, 1998
- 6 陶文铨. 数值传热学的近代进展. 北京:科学出版社, 2000
- 7 Roache P J. Verification and validation in computational science and engineering. Hermosa Publishers, 1998
- 8 Eca L, Hoekstra M. On the numerical verification of ship stern flow calculations. 1st Marnet CFD Workshop, Barcelona, 1999
- 9 Eca L, Hoekstra M. On the numerical verification procedures in computational fluid dynamics. 2nd Marnet CFD Workshop, Copenhagen, 1999
- 10 Jasak H. Error analysis and estimation in the finite volume method with applications to fluid flow; [Ph D thesis]. London; University of London, 1996
- 11 Oden J T, Prudhomme S. New approaches to error estimation and adaptivity for Navier-Stokes equation. Tenth International Conference on Finite Elements in Fluids, Tucson, 1998
- 12 Van Brian S. A posteriori error estimation for finite

- volume simulations of fluid flow; [Master thesis]. Waterloo:University of Waterloo, 1996
- 13 Demuren A O, Wilson R V. Estimating uncertainty in computations of two-dimensional separated flows. *ASME J Heat Transfer*, 1994, 116(2):216 – 220
- 14 Duraiswami R, Prosperetti A. Orthogonal mapping in two dimensions. *J Comput Phys*, 1992, 98(2):254 – 268
- 15 Huang Huaxiong, Prosperetti A. Effect of grid orthogonality on the solution accuracy of the two-dimensional convection-diffusion equation. *Numerical Heat Transfer*, 1994, 26 (Part B):1 – 20
- 16 Douglass R W, Ramshaw J D. Perspective: future research directions in computational fluid dynamics. *J of Fluid Engineering*, 1994, 116(1):212 – 215
- 17 Patankar S V. *Numerical heat transfer and fluid flow*. Hemisphere, NewYork, 1980
- 18 Roache P J. Prospective: a method for uniform reporting of grid refinement studies. *ASME J Fluids Eng*, 1994, 116(3):405 – 413
- 19 Ferziger J H. Estimation and reduction of numerical error. In: *ASME Winter Annual Meeting*, 1993, 158: 1 – 7
- 20 Zurigat Y H, Ghajar A J. Comparative study of weighted upwind and second order upwind difference scheme. *Numerical Heat Transfer*, 1990, 18 (Part B):61 – 80
- 21 Braga W. On the use of some weighted upwind schemes for strongly convection flows. *Numerical Heat Transfer*, 1990, 18 (Part B):43 – 60
- 22 Ethier C R, Steinman D A. Exactly fully 3D Navier-Stokes solution for benchmarking. *Int J Numer Methods Fluids*, 1994, 19(5):369 – 376
- 23 Lewis R W, Morgan K, Schrefler B A. *Numerical methods in thermal problems*. London: Pineridge Press, 1981. 552 – 572
- 24 Ghia U, Ghia K N, Shin C T. High-Re solutions for incompressible flow using the Navier-Stokes equations and a multigrid method. *J Comput Phys*, 1982, 48 (2):387 – 411
- 25 Barakos G, Misoulis E. Natural convection flow in a square cavity revisited: laminar and turbulent models with wall functions. *Int J Numer Methods Fluids*, 1994, 18(7):695 – 719
- 26 Ooserlee C W, Wesseling P, Segal A, et al. Benchmark solutions for the incompressible Navier-Stokes equations in general co-ordinates on staggered grids. *Int J Numer Methods Fluids*, 1993, 17(1):301 – 321
- 27 Demirdzic I, Lilek Z, Peric M. Fluid flow and heat transfer test problems for non-orthogonal grids: benchmark solutions. *Int J Numer Methods Fluids*, 1992, 15(1):339 – 354
- 28 Gartling D K. A test problem of outflow boundary conditions-flow over a backward facing step. *Int J Numer Methods Fluids*, 1990, 11(3):953 – 967
- 29 Leone J M, Jr. Open boundary condition symposium benchmark solution: stratified flow over a backward-facing step. *Int J Numer Methods Fluids*, 1990, 11 (3):969 – 984
- 30 Tang L Q, Cheng T, Tsang T T H. Transient solutions for three-dimensional lid-driven cavity flows by a least squares finite element method. *Int J Numer Methods Eng*, 1995, 21:413 – 432
- 31 Faeth G M, Samuelsen G S. Fast reduction noproremixed combustion. *Progr Energy Combustion*, 1986, 12(4):305 – 370
- 32 Kim W J, Patel V C. An experimental study of boundary-layer flow in a curved rectangular duct. *ASME Fluids Engineering Division*, 1993, 115(1):13 – 28
- 33 Buckle U, Durst F. Investigation of laminar flow in a pipe with sudden contraction of cross sectional area. *ASME Fluids Engineering Division*, 1993, 115(1):61 – 78
- 34 Fahadieh R, Tankin R S. Interferometric study of two-dimensional Benard convection cells. *J Fluids Mech*, 1974, 66(4):739 – 752
- 35 Veit C M, Arpaci V. Stability of natural convection in a vertical slot. *J Fluids Mech*, 1969, 36(1):1 – 5
- 36 Mohamad A A, Viskanta R. Flow and heat transfer in a lid-driven cavity filled with a stably stratified fluid. *Appl Math Modeling*, 1995, 19(2):465 – 472
- 37 Weathers J W, Spitler J D. A comparative study of room airflow: numerical prediction using computational fluid dynamics and full-scale experimental measurements. In: *ASHRAE Trans*. 1993, 99(1):144 – 157
- 38 Murakami S. Numerical prediction of flow around a building with various turbulence models: comparison of EVM, ASM, DSM, and LES with wind tunnel tests. In: *ASHRAE Trans*. 1996, 102(2):741 – 753