第 38 卷 第 1 期 力 学 进 展 Vol. 38 No. 1
2008 年 1 月 25 日 ADVANCES IN MECHANICS Jan. 25, 2008

干扰剪切流动 (ISF) 和边界层流动及 ISF 理论在计算流体力学 (CFD) 中的应用

高 智 †

中国科学院力学研究所 LHD 实验室, 北京 100080

摘 要 简述作者提出的干扰剪切流动 (ISF) 理论、近壁复杂 ISF 理论、推论和它们在 CFD 中的应用. ISF 是小黏性流体运动中普遍存在的一种基本流动, 如驻点流、近壁黏性 - 无黏干扰流动, 干扰可忽略时 ISF 的黏性部分为熟知的边界层流动. ISF 理论揭示了高 Re 数流动计算的最佳坐标系和最佳网格生成. 由近壁复杂 ISF 理论与流体运动方程组及流速在壁面无滑移条件相结合导出一组壁面相容 (SC) 判据, 该判据提供了利用 CFD 仿真结果判断 CFD 仿真可信度的理论途径、并为近壁网格、算法和边界处理的改进和三者的更好协调、为湍流模型的评估、改进和发展提供了一种理论途径.

关键词 干扰剪切流动, 边界层流动, 计算流体力学 (CFD) 仿真的可信度, 干扰剪切流理论, 壁面相容 (SC) 判据

作者提出的干扰剪切流动 (ISF) 理论 [1~3] 的要点如下: ISF 是小黏性流体 (如空气、水和宇宙中的气云等) 运动中普遍存在的一种基本流动, 例如驻点流动, 近壁黏性 - 无黏干扰流动等. ISF 黏性部分的流动规律是法向对流扩散竞争, 流向对流占优, 数学表达 (对二维不可压缩流动) 是

$$v\frac{\delta f}{\delta y} \cong \gamma\frac{\delta^2 f}{\delta y^2},\ u\frac{\delta f}{\delta x} \gg \gamma\frac{\delta^2 f}{\delta x^2} \tag{1}$$

其中 $f = u, v$; u 和 v 为直角坐标系 x- 和 y- 方向流速分量, y 轴为 ISF 黏性流法向. 由式 (1) 推知, ISF 黏性部分的法向和流向局部长度尺度 l_n 和 l_s 、法向和流向局部速度尺度 v_n 和 u_s 满足 $l_n \cong l_s Re^{-1/2}$, $v_n \cong u_s Re^{-1/2}$, $Re = l_s u_s/\gamma$; 由于 $Re \gg 1$, 因此 ISF 的黏性部分为剪切薄层, 黏性 - 无黏干扰可忽略. 当黏性层局部长度 l_s 和速度尺度 u_s 为常数时, ISF 的黏性部分为熟知的边界层流动 [4]. 对于干扰剪切扰动流的黏性剪切薄层以及干扰剪切湍流的黏性剪切薄层存在类似于式 (1) 的数学关系.

ISF 理论的一组推论:

(1) 近壁黏性 - 无黏干扰流动通常由驻点流、边界层及其无黏外流、分离点流、分离回流区近壁流动、再附点流、再附边界层及其无黏外流和背风驻点流等所组成; 上述近壁诸黏性 - 无黏干扰流动的黏性部分均具有壁面法向对流扩散竞争、壁面切向对流占优的流动特性, 因此贴体正交坐标变量及相应流速分量满足类似于式 (1) 的数学关系式, 近壁流动规律的理论抽象就是近壁复杂 ISF 理论.

(2) 对 ISF 的分析和计算, 由式 (1) 可知, 最佳坐标系是一个坐标轴方向为 ISF 黏性薄层法向的正交坐标系.

(3) 对物体绕流近壁流动计算, 最佳坐标系应是近壁复杂 ISF 的最佳坐标系、即贴体正交坐标系.

(4) 由式 (1) 可知, 最佳网格生成应是网格线与最佳坐标轴线一致的正交网格, 且在黏性薄层法向需局部加密网格. 使用非最佳坐标系和非最佳网格可导致所有坐标方向对流占优, 使分析计算难以捕捉 ISF 的薄层黏性效应.

(5) 贴体正交坐标系并非离壁较远流场中自由 ISF 的最佳坐标系, 因此物体绕流计算的最佳网格

收稿日期: 2007-02-05, 修回日期: 2007-09-03
† E-mail: gaozhi@imech.ac.cn

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

生成在近壁处应是网格线与贴体正交坐标轴线一致的正交网格、而在离壁较远流场中应是能很好捕捉自由 ISF 的自适应网格.

(6) ISF 理论推知，在流体运动方程组数学性质为椭圆型的流场中可求得局部区域的解，驻点流和斜驻点流等已经找到 Navier-Stocks(NS) 方程组精确解的事实证实了该推论的正确性 [4,5]. 因此，对 CFD 仿真可信度验证的精确解比较研究， ISF 理论提供了对计算流场的局部区域做精细计算以获得局部区域流动的精确数值解并用于判断 CFD 仿真可信度的有效方法.

(7) 利用类似于式 (1) 的关系化简 ISF 最佳坐标系中的 NS 方程组得到支配 ISF 的控制方程组 —— ISF 方程组， ISF 方程组形式唯一、与熟知的诸多抛物化 (P) NS 方程组是一类方程组，它们包含的黏性项彼此略有差异，但它们具有同一的扩散抛物化的数学性质 [6].

(8) 对 CFD 仿真可信度确认的流动分类法研究，ISF 理论提供了具有普遍意义的一种流动分类：即小黏性流体绕流流动分为 ISF 、无黏流和全黏性流动. 因此流边的层次结构主要有 [9]：所有方向扩散占优流动、所有方向对流占优无黏流动、部分方向对流占优部分方向对流扩散竞争无黏 - 黏性干扰剪切流动 (ISF) 和所有方向对流扩散竞争全黏性流动.

(9) 近壁复杂 ISF 理论与贴体正交坐标系中的流体运动方程组及壁面上速度无滑移条件相结合导出的一组壁面相容 (SC) 判据在壁面 (壁面曲率很大的点邻域除外) 上处处成立 [3,7,8]. 流体运动方程组解满足 SC 判据是该解在近壁处为可信且准确的必要条件. 因此， SC 判据为 CFD 仿真可信度研究提供了利用 CFD 仿真结果本身直接判断仿真结果好坏的一种标准. 已经证明二维不可压缩流动 (存在固壁) 的熟知的 NS 方程组精确解准确地满足所有的 SC 判据 [3,7,8]. 而利用 Fluent 求解二维不可压驻点流 NS 方程组和求解驻点湍流 Reynolds 平均 NS 方程组的数值解明显偏离 SC 判据 [3,7,8]. 初步说明近壁流动的 CFD 仿真存在一定的问题. 因此，从满足 SC 判据出发，应把近壁网格、算法及边界处理加以改进、把三者加以更好的协调，对湍流应进一步评估、改进和发展湍流模型. 此外应指出，对近壁流动， ISF 方程组与 NS 方程组近似等同，因此对流动控制，高速绕流物理现象等近壁流动为核心内容的计算，使用 ISF 方程组应是正确的选择；对湍流、非平衡流动等物理常数不准确问题的计算，使用 ISF 方程组应是合理的选择；气动部件优化的数值设计需要把 CFD 仿真和优化方案相结合进行大量的追踪计算，使用 ISF 方程组和空间推进计算大大节省了计算机资源和时间，因而得到了应用.

最后指出， ISF 理论在 CFD 中并未得到应有的重视. 文献 [4] 指出对高雷诺数流动计算，边界层理论处于基础地位，不过在 CFD 中仅限于分辨边界层，并在其法向进行网格局部加密. ISF 理论是黏性 - 无黏干扰流动的理论概括，它为小黏性流体 CFD 仿真的最佳坐标系和最佳网格生成、为仿真可信度验证的精确解比较和可信度确认的流动分类、为利用仿真结果本身直接判断仿真结果好坏、为近壁网格生成、算法、边界处理及湍流模式的改进和彼此更好协调等提供了理论依据和方法. ISF 理论在流体力学和小黏性流体 CFD 之间架起了流体运动方程之外的新桥梁， ISF 理论既是流体力学也是 CFD 的基本理论. 作者认为 CFD 教材中应把 ISF 理论作为基础知识，ISF 理论的拓广和应用值得关注.

参 考 文 献

1 高智. 黏性 - 无黏干扰流动理论. 力学学报， 1990, 22(1): 9～19

2 高智. 黏性 - 无黏干扰剪切湍流理论. 中国科学 (A 辑), 1992, 22(6): 605～616

3 Gao Z. A theoretical way to verify creditability of CFD simulations and experimental measurements for near-wall flows. In: Proc. of 9th Asian Symposium on Visualization, Hong Kong. The Hong Kong University of Science & Technology 2007-06-04～08, 2007. 101～107

4 Schlichting H, Gersten K. Boundary Layer Theory. 8th ed. Berlin: Springer, 2000

5 Li G B, Dai M G, Gao Z. An application of interacting shear flows theory: exact solution for unsteady oblique stagnation point flow. *Acta Mechanica Sinica*, 2006, 22(4): 397～402

6 高智. 高雷诺数流动的控制方程组体系和扩散抛物化 NS 方程组的意义和用途. 力学进展， 2005, 35(3): 427～438

7 高智. 壁面相容判据用于计算流体力学 (CFD) 仿真可信度评估. 空气动力学学报， 2007, 25(4): 428～433

8 高智. 干扰剪切流动理论、扩散抛物化 NS 方程组和壁面相容判据及其应用. 中国力学文摘， 2007, 21(3): 13～22

9 Gao Z. Hierarchial structure of the simplified Navier-Stokes equations and its mechanical connotation and application. *Science in Chian (Series A)*, 1989, 19(2): 168～187

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

INTERACTING SHEAR FLOWS (ISF) AND BOUNDARY LAYER FLOWS AND APPLICATION OF ISF THEORY TO COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS

GAO Zhi†

LHD, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China

Abstract Interacting shear flow (ISF) theory and the near surface complex ISF theory proposed by the author and their inferences and applications are discussed in this paper. ISF is a kind of basic flows, that exists universally in the motion of low viscous fluid, such as the stagnation point flows, viscous-inviscid interacting flows near wall surface: For a special case where the viscous-inviscid interaction can be neglected, the ISF's viscous part is just the well-known boundary layer flow. The ISF theory reveals the optimal coordinate system and the optimal mesh generation for computations of high Reynolds number flows over bodies. The wall-surface compatibility (SC) criteria deduced by combining the near wall ISF theory and the equations of fluid motion and the velocity no-slip conditions at the wall surface provide a theoretical basis to evaluate creditability of CFD simulations and to best adjust the near wall grids with scheme and boundary treatment and to evaluate, improve and develop turbulence models.

Keywords interacting shear flows, boundary layer flows, creditability of CFD simulations, interacting shear flow theory, wall-surface compatibility criteria

† E-mail: gaozhi@imech.ac.cn

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net