三维斜掠后台阶流动数值模拟

江立军 高 歌 张常贤

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院，北京 100191)

摘 要：介绍了开源计算流体力学软件OpenFOAM(Open Field Operation and Manipulation)及面向对象编程技术，并利用其对三维斜掠后台阶流动进行了数值模拟. 通过对无斜掠角度情况下用OpenFOAM计算得到的流场速度型和展向涡强度场分布与实验数据的对比研究，证明其具有良好的计算精度和可靠性. 通过对不同斜掠角度台阶下游流线与压力分布的详细研究发现随着斜掠角度从0°增加到60°，回流区涡团结构和再附距离均发生了显著变化. 其总体趋势是再附距离在30°后会急剧缩小，旋涡强度也会减弱.

关 键 词：计算流体力学；湍流流动；涡团结构；面向对象编程

中图分类号：V 231.1

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2010)01-0087-04

Numerical simulation of a swept backward-facing step flow

Jiang Lijun Gao Ge Zhang Changxian

(School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: 3-dimensional separated and reattaching flow over a swept backwark-facing step of height h at $Re=28000$ with turbulent upstream conditions was studied for sweep angles up to $\Lambda=60°$ using open field operation and manipulation (OpenFOAM). This new open source software was validated by comparison with experimental data, special attention is focus on the 0° condition. Velocity profile, vortex structure, and pressure distribution were released. The results show that the reattachment length and vortex structure vary with the swept angles from $\Lambda=0°$ to 60°. Generally the reattachment length and spanwise vorticity decrease dramatically after $\Lambda=30°$. Object-orientation techniques and the open source computational fluid dynamics(CFD) package named OpenFOAM are also introduced.

Key words: computational fluid dynamics; turbulence flow; vortex structure; object-orientation programming

流动分离和再附一直是实际工程中需要解决的核心问题之一. 它不仅涉及到流动分离，旋涡的生成和脱落，还涉及到旋涡和固壁以及旋涡和旋涡之间的相互作用等复杂流动过程. 特别是在航空领域，不管是外流还是内流，如大攻角机翼绕流，压气机内部流动分离研究中，都在积极寻找一种能控制分离从而使流动损失最小的方法. 因此，研究流动的分离和再附现象的特性对相关的工程应用具有重大意义. 二维后台阶湍流边界层分离和再附流动由于其几何结构简单、分离点固定和来流条件容易控制等特征受到了国内外实验研究人员的广泛关注. 但对于三维斜掠后台阶的流动特性的研究，关注较少. 本文利用开源CFD软件OpenFOAM，采用RNG k-ε 湍流模型，对三维斜掠后台阶流动进行了数值模拟，得到了不同斜掠角度下的分离涡结构和再附距离的变化规律.

1 OpenFOAM简介

OpenFOAM是一个用于计算流体力学和结构分析的面向对象的C++类库，集中了CFD中

收稿日期：2008-12-19

作者简介：江立军(1982—)，男，湖南常德人，博士生，jiang0604102@126.com.

可能用到的大部分元素，比如网格类，场类，时间类，矩阵类，物理模型类等. 正如文献[1]中介绍的，它采用操作符形式的方法描述偏微分方程的有限体积离散化，支持多面体网格，可以处理复杂的几何外形. 由于它完全在 Linux 系统下编译，因此天生具有强大的并行计算能力. OpenFOAM 同时也包括前、后处理环境. 其总体结构如图 1 所示.

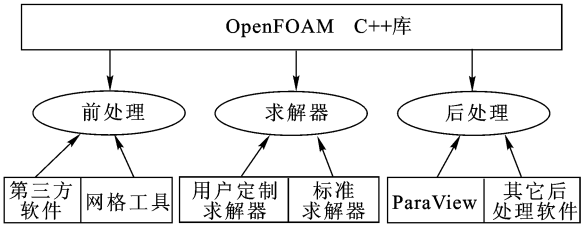


图 1 OpenFOAM 的总体结构

作为目前最为成功的开源 CFD 软件之一，OpenFOAM 的功能非常完善，不仅支持层流模型和基于雷诺平均的各式湍流模型，也支持 LES 和 DNS. 在网格方面，可以使用它自带的网格工具，也可以转换其他商业软件生成的复杂网格，包括各种网格差分格式以及动态网格技术. 在后处理方面，它使用同是开源软件的 ParaView 作为后处理器，同时也提供与 EnSight，Fieldview，Tecplot 等后处理软件之间的转换接口.

面向对象程序设计，其基本思想就是如何更好地创建软件重用代码，使之具备更好地模拟现实世界环境的能力. 它通过给程序中加入扩展语句，把函数“封装”进编程所必需的“对象”中. 面向对象的编程使得复杂的工作条理清晰、编写容易. 其区别于面向过程编程方法的特征是：抽象，继承，重载和多态.

OpenFOAM 最初的设计考虑是：如何在面向对象的框架下，直观地将描述连续介质力学的基本语言——偏微分方程翻译为程序语言. 通过下面的例子可以说明.

要求解在雷诺平均下湍动能方程：

$$\frac{\partial k}{\partial t}+\nabla\cdot(\boldsymbol{u}k)-\nabla\cdot[(\upsilon+\upsilon_t)\nabla k]=$$
$$\upsilon_t\left[\frac{1}{2}(\nabla\ \boldsymbol{u}+\nabla\ \boldsymbol{u}^{\mathrm{T}})\right]^2-\frac{\varepsilon_0}{k_0}k \qquad (1)$$

在 OpenFOAM 中可以表达为

```
solve
(
    fvm::ddt(k)
  + fvm::div(phi,k)
  - fvm::laplacian(nu() + nut,k)
 == nut * magSqr(symm(fvc::grad(U)))
  - fvm::Sp(epsilon/k,k)
);
```

以上是湍动能方程在 OpenFOAM 中的表达式. 很容易发现，方程(1)和上述语句之间的对应关系一目了然，即使对面向对象编程或 C++所知不多也能看懂. 这就是面向对象编程的优点之一.

文献[2]指出，现代数值模拟软件的开发，均以集成型且能解决各种复杂物理问题的通用软件包为目标. 如果继续采用面向过程的编程方法，随着软件的日益庞大，在大量物理模型和求解器之间的交互方面将变得异常复杂，最后导致软件调试和维护困难重重. 面向对象编程方法的成熟，必将深刻影响现代 CFD 软件的开发和推广. OpenFOAM 全部以 C++语言编写，将不同类型的元素制作成不同的类库，具有极强的扩展性和可维护性，是一个极好的应用和研究平台，正受到越来越广泛的关注.

2 计算模型

本文采用文献[3]的实验模型(见图 2)，其中，xyz 是沿来流方向坐标系，$x'y'z'$是以台阶面为 $y'z'$坐标面的坐标系. 台阶高度 h 为 1.27 cm，来流速度 22.4 m/s，文献[3]只提供了斜掠角度 Λ 分别为 0°，15°，30°下的实验结果，本文在此基础上增加了 45°，60°两个不同工况.

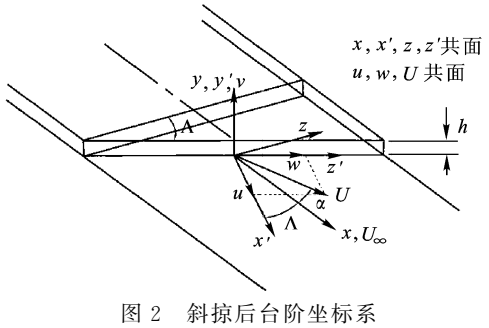


图 2 斜掠后台阶坐标系

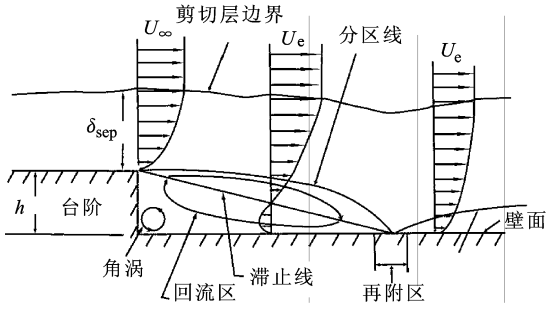


图 3 斜掠后台阶流场简图

对于后台阶流动,其流动机理如图 3 所示. 台阶前可以看作是充分发展的湍流边界层,在台阶处发生强迫分离并产生回流,由分区线将回流区与外剪切区分开. 回流区下游就是再附区,在此区域内边界层重新发展为湍流边界层.

3　计算结果

3.1　数值方法及相关参数

计算程序基于求解三维定常雷诺平均的 N-S 方程,采用空间离散的有限体积法、时间离散的隐式离散方法,对流通量采用二阶 TVD 格式,离散的线化方程组采用预处理双共轭梯度法求解. 湍流模型为 RNG k-ε 二方程模型. 计算取沿流向 131 个网格点,沿展向 61 个网格点,垂直于壁面 91 个网格点,在台阶前后和回流区适当加密.

3.2　无斜掠角度的计算结果

在 Λ 为 0°时,计算模型退化为二维. 因为二维后台阶流动有大量的实验数据可供比较,为了验证 OpenFOAM 的适用性,先予以详细研究.

图 4 是文献[3]中由实验测定的速度型分布图. x 从 0 到 0.19. 实验表明,从台阶处到 $x/h=6$ 均为回流区,从 $x/h=6$ 开始流动已经基本恢复. 图 5 是 OpenFOAM 的计算结果. 与实验值基本吻合,可以清楚地看到图 3 中的滞止线轨迹. 再附距离大约位于 7 倍台阶高度处.

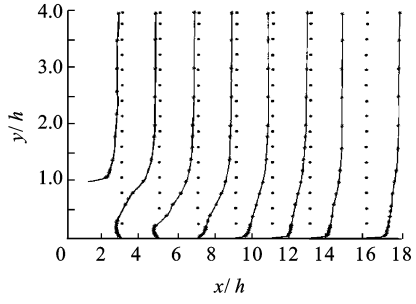


图 4　实验测得的速度型分布

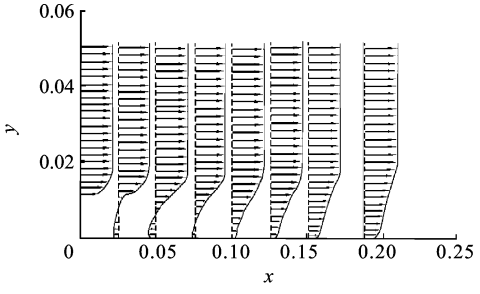


图 5　计算的速度型分布

图 6 的实验结果取自文献[4],为后台阶分离流动的展向涡量场. 由图 6 可见,在分离流动区域前半部,分离剪切层类似于普通平面混合层. 分离流线稍微有些弯曲,剪切层很薄,不受壁面的影响. 高强度涡量区域也集中在沿台阶前缘所形成的分区线附近. 且最大涡量主要集中在 x/h 小于 1 的范围内. 这与文献[4]的结果吻合得很好.



a　实验　　b　计算

图 6　涡量分布对比

以上与实验结果的比较证明,OpenFOAM 作为一款相对成熟的 CFD 软件,其计算精度和可靠性可以得到良好的保证.

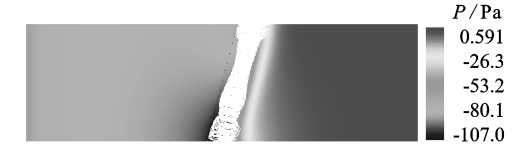
3.3　有斜掠角度的计算结果

回流区的大涡结构是人们普遍关心的. 即使在无斜掠角的后台阶流动中,董宇飞等人的研究[5]表明,再附区上游的湍流结构已完全三维化,大涡展向长度尺度与台阶高度相当. 在有斜掠角度的后台阶流动中,展向涡的存在更是对回流区的流动速度,雷诺应力分布等起着主导作用.

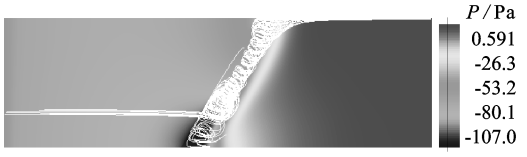
从图 7 可以看出,有斜掠角度时,来流在最先遇到台阶处发生强迫剪切从而产生分离泡,随着斜掠角度的增加,三维后台阶流动逐渐表现出差距性. 在 $\Lambda=15°$ 和 30°时,分离区大小、旋涡强度等仍与无斜掠角度时近似,15°时还未出现从台阶前缘角向后方(图 7a)的展向流动,30°时也只有少许. 到 45°和 60°时,沿垂直于台阶,即 x'轴方向,分离泡活动区域明显受到很强的抑制,再附距离明显缩短,旋涡强度也大大削弱,特别是当角度增大至 60°(图 7d)时,流线几乎顺台阶而下,没有形成明显的旋涡结构. 从台阶后缘角处下行的流动对下游的影响区域也显著增大. 这与文献[6－7]得到的结论一致.

图 8 是在不同的斜掠角度下沿 x 方向不同 z 值处剖面压力等值线图,从上至下依次 $z=10,5,0,-5,-10$ h. 可以更清楚的看出,在台阶处突扩开始,流体必然发生剪切形成回流,伴随压力突降形成大的低压区,但随后压力很快恢复. 在 $\Lambda=0°$ 和 $\Lambda=15°$时,由于斜掠角度不大,虽然台阶附近壁面产生了展向旋涡,回流区流动呈现的三维特性,但台阶后沿 z'方向压力变化不明显,在此方向的压力差不足以驱动展向流动. 随着斜掠角度 Λ 的增加,在最先遇到台阶处的流体已经压力已经恢复,但同 x 处的沿 z'正向的流动区域还处于分离状态,压力还处于较低的水平,所以产生沿

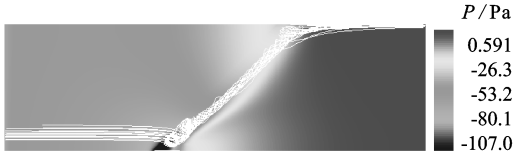
z'正向的展向流动.这种流动给沿途带来足够的流体以填充台阶后低压区,并具有足够大的沿主流向分速,这使得沿着z'正方向,低压区越来越小,因为强剪切形成的旋涡也逐渐消失,使再附距离反而大大缩小.



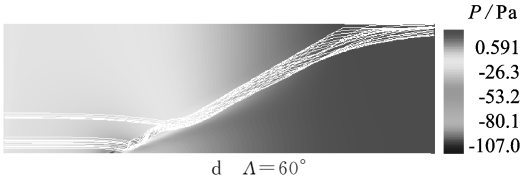
a $\Lambda=15°$



b $\Lambda=30°$

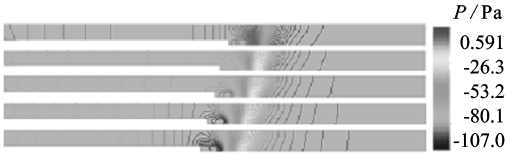


c $\Lambda=45°$

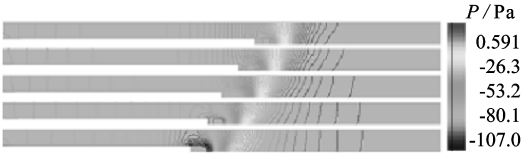


d $\Lambda=60°$

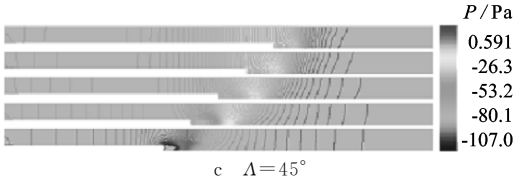
图7 Λ为15°～60°壁面压力分布和回流区流线



a $\Lambda=15°$



b $\Lambda=30°$



c $\Lambda=45°$

图8 Λ为15°～45°切面压力等值线

4 结 论

采用开源CFD软件OpenFOAM对不同斜掠角度,特别是0°时三维后台阶流动进行的数值模拟,得到了与实验值基本吻合的结果,证明OpenFOAM对各种复杂流动具有较强的模拟能力.

随着斜掠角度的增加,回流区的大涡结构和再附距离发生显著改变,总体趋势是再附距离在30°后会急剧缩小,旋涡强度也会减弱.其主要原因是先分离区压力先升高,迫使流动沿台阶方向发展,形成明显的展向涡.当这种作用大到一定程度,又反过来抑制大尺度涡的形成,使再附距离大大缩小.

参考文献(References)

[1] Weller H, Tabor G, Jasak H, et al. A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques[J]. Computers in Physics, 1998, 12(6): 620－631

[2] Gloth O. An object-oriented finite volume framework and its application to fluid dynamics problems[D]. Duisburg: Department of Mechanical Engineering, University of Duisburg-Essen, 2003

[3] Weber J, Danberg E. Correlation of mean velocity measurements downstream of a swept backward-facing step[J]. AIAA Journal, 1992, 30(11): 2701－2706

[4] 刘应征,朴英守,成亨镇.后台阶分离再附湍流流动的实验研究[J].上海交通大学学报,2005,39(5):117－120
Liu Yingzheng, Park Youngsoo, Sung Hyungjin. Experimental investigation on the turbulent separated and reattaching flow over backward-facing step[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2005, 39(5): 117 － 120(in Chinese)

[5] 董宇飞,魏中磊.分离再附的实验研究[J].力学进展,1999,29(21):87－96
Dong Yufei, Wei Zhonglei. Review on experimental investigation of separated and reattaching flow[J]. Advances in Mechanics, 1999, 29(21): 87－96(in Chinese)

[6] Kaltenbach H. The effect of sweep-angle variation on the turbulence structure in a separated, three-dimensional flow [J]. Theoret Comput Fluid Dynamics, 2003, 16: 187－210

[7] Kaltenbach H. Turbulent flow over a swept backward-facing step[J]. European Journal of Mechanics B/Fluids, 2004, 23: 501－518

(编 辑:张 嵘)