

后台阶流场大涡模拟的入口边界条件研究

刘春嵘¹, 邓丽颖¹, 呼和敖德²

(1.湖南大学 力学与航空航天学院,长沙 410082 2.中国科学院 力学研究所 北京 100080)

摘要 对不同入口边界条件下后台阶下游三维流场进行了大涡模拟。讨论了层流及湍流入口流速剖面下边界层厚度及湍流度对台阶下游平均流速剖面、再附长度的影响。模拟结果表明,对于层流入口流速剖面,边界层厚度对再附长度的影响很大,随边界层厚度的增大,再附长度将增大。对于湍流入口流速剖面,边界层厚度对再附长度的影响不大,而入口湍流度则对再附长度有较大影响。随着入口湍流度的增加,再附长度将会变短。在雷诺数为 5000 情况下,当采用湍流入口流速剖面并选择湍流度为 0.5% 时,大涡模拟能得到与直接数值模拟基本一致的结果。

关键词 边界条件;大涡模拟;后台阶流

中图分类号:TV131.2

文献标识码:A

文章编号:1002-2333(2009)11-0040-03

1 前言

后台阶流动几何形状虽然简单,但包含了流动分离、再附、湍流及旋涡运动等三维复杂流动的特征,在复杂流动及湍流的研究中占有重要的地位,在工程实践中也具有相当广泛的应用。如燃烧器、供水管道及明渠流动中截面突扩处的流动都可简化为后台阶流动。

长期以来人们对后台阶流动进行了大量的研究。在后台阶流动中,再附点位置距台阶的距离(再附长度)是人们非常关注的问题。Kuehn(1980)^[1]、Durst(1981)^[2]、Ra(1990)^[3]、Y.T.Chen(2006)^[4]等研究了扩展比 $ER=(H+D)/H$ (H 为上游水深, D 为后台阶高度)对再附长度 X_r 的影响,发现随着 ER 的增加 X_r 有所增大。Armaly 等(1983)^[5]采用 LDV 技术对后台阶流动做了大量的实验研究,详细测量了后台阶流动从层流、过渡流到湍流演变过程中再附长度值。发现当 $Re < 1200$, 流动为层流, X_r 随着 Re 的增大而增大;当 $1200 < Re < 6600$, 流动由层流向湍流转变,进入过渡流状态, X_r 随着 Re 的增大而减小;在 $Re = 6600$ 左右, X_r 达到最小值;当 Re 继续增大,流动进入湍流状态, X_r 开始有所增大,然后基本保持不变。Isomoto 等(1989)^[6]研究了来流湍流度对再附长度的影响,发现随着来流湍流度的增加, X_r 将减小。

近年来,随着计算机技术的发展,人们开始对后台阶流进行直接数值模拟(DNS)和大涡模拟(LES)研究。1990 基金项目 国家自然科学基金项目(10602017)

年 Friedrich^[7]等根据大涡模拟结果发现台阶下游大尺度流动结构的振荡现象。1997 年 Le H^[8]采用直接数值模拟方法对台阶下游流场的振荡特性进行了进一步的研究。2004 年王兵等^[9]对后台阶流进行了大涡模拟,讨论了再附长度随雷诺数的变化及大涡拟序结构的瞬时再附过程。在对后台阶流进行数值模拟时,入口边界对模拟的结果影响很大。以往人们一般根据实验结果或经验给出入口边界条件。关于入口边界条件对后台阶模拟结果的影响尚缺乏系统的研究。

本文采用大涡模拟方法模拟了层流和湍流边界层入口流速度剖面情况下的三维后台阶流动。系统地讨论了边界层厚度、入口湍流度对后台阶下游流速剖面及再附点位置的影响。本文的研究可为今后人们在进行大涡模拟时如何确定边界条件提供参考。

2 数学模型

图 1 为本文模拟的后台阶下游流的计算区域及坐标系。计算采用直角坐标系,计算域的范围为 $-2D \leq X \leq 20D$, $0 \leq Y \leq 5D$, D 为台阶高度。大涡模拟采用的控制方程为滤波后的 N-S 方程(包括动量方程和连续性方程)。

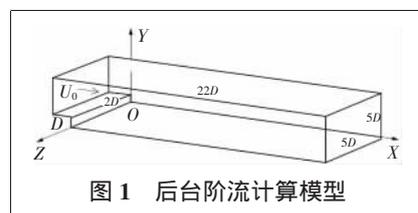


图 1 后台阶流计算模型

隔振系统中的应用提供了一定的理论指导。由于压杆的水平刚度与它所承受的轴向载荷有关,因此,在设计隔振系统具体的结构形式时,需要考虑压杆承载质量发生变化时对隔振系统横向刚度的影响。

[参考文献]

- [1] 刘平成,杨晓红,等.纳米级微动试验台的隔振设计研究[J].机械设计,2000(9):19-21.
[2] 张建卓,李旦,等.超低频精密隔振系统的新进展[J].辽宁工程

技术大学学报,2004,23(4):538-541.

- [3] 丁文镜.减振理论[M].北京:清华大学出版社,1988.
[4] 倪振华.振动力学[M].西安:西安交通大学出版社,1989.
[5] 刘鸿文.材料力学[M].北京:高等教育出版社,1992:212-229.

(编辑 毕 胜)

作者简介 路纯红(1973-),女,博士研究生,讲师。

收稿日期 2009-08-15

动量方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}) - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (1)$$

连续性方程：
$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

式中， \bar{u}_i, \bar{p} 分别为滤波后的流速分量和压强， ρ, μ 分别为流体的密度和动力粘性系数， $x_i (i=1, 2, 3)$ 代表 X, Y, Z ， τ_{ij} 为亚格子应力，它体现了小尺度扰动对大尺度运动的影响，本文采用标准 Smagorinsky-Lilly 模式模拟亚格子应力：

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} = -2\mu_t \bar{S}_{ij}, \bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} (\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i}), \mu_t = \rho (C_s V^{1/3})^2 \sqrt{2S_{ij} \bar{S}_{ij}} \quad (3)$$

式中， V 为网格体积， C_s 为经验系数，其值和流动有关，本文取 $C_s=0.08$ 。

为了对流体运动进行数值模拟，除控制方程外，还需给出边界条件。在后台阶流计算中，边界包括：(1)入口边界 ($X=-2D$)；(2)上边界 ($Y=5D$)；(3)侧边界 ($Z=0, 5D$)；(4)台阶上游底边界 ($-2D \leq X \leq 0, Y=D$)；(5)台阶面 ($X=0, 0 \leq Y \leq D$)；(6)台阶下游底边界 ($-2D \leq X \leq 0, Y=0$)；(7)出口边界 ($X=20D$)。

在这些边界条件中，台阶上游底边界、台阶面及台阶下游底边界上的边界条件很容易给出，一般都采用无滑移条件：

$$\bar{u}_x=0, \bar{u}_y=0, \bar{u}_z=0 \quad (4)$$

出口边界一般采用无反射边界条件

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + u_x \frac{\partial \phi}{\partial X} = 0 \quad (5)$$

其中 ϕ 代表待求的物理量。

在本文的计算中，为了减少计算量，我们对计算域的上侧和两侧进行了截断。并假设在截断的人工边界上满足对称边界条件。由此得到上边界条件和侧边界条件分别为式(6)、(7)：

$$\bar{u}_y=0, \frac{\partial \bar{u}_x}{\partial Y} = \frac{\partial \bar{u}_z}{\partial Y} = 0 \quad (6)$$

$$\bar{u}_z=0, \frac{\partial \bar{u}_x}{\partial Z} = \frac{\partial \bar{u}_y}{\partial Z} = 0 \quad (7)$$

根据我们的计算结果发现，当水深大于 $5D$ ，水槽宽度大于 $10D$ 时，假设上边界条件和侧边界上满足对称边界条件是合理的。

入口边界条件对计算结果的影响很大，也是本文研究的重点。因此，我们将其作为独立的一节进行详细讨论。

3 入口边界条件

在入口边界，通常的做法都是给出流速剖面。根据我们的计算结果发现，计算结果对流速剖面的形状非常敏感。不同流速剖面下得到的计算结果相差很大。为了讨论入口边界条件的影响。我们分别讨论了湍流度为零和湍流度不为零时的边界条件。流速剖面的形状大致分为3类：(1)壁面附近采用层流边界层速度剖面，边界层上的速度剖面为均匀流；(2)壁面附近采用湍流边界层速度剖面，边界层上的速度剖面为均匀流；(3)整个入口均为湍流边界层速度剖面(满槽流动)。在(1)、(2)两种情况下，我们分别模拟了3个边界层厚度。对于湍流边界层，我们还考虑了入口湍流度的影响。表1列出了本文大涡模拟所采用的所有入口速度剖面。

表1 LES 计算工况信息表

工况名	入口速度剖面类型	边界层厚度	湍流度/%	再附长度
LES1	层流	0.1D	0	6.4D
LES2	层流	0.5D	0	9.6D
LES3	层流	0.5255D	0	10D
LES4	湍流	4D	2	5D
LES5	湍流	2D	0.5	5.8D
LES6	湍流	1.75D	0	7.6D
LES7	满槽流动	-	0	8D
LES8	湍流	2D	2	4.8D
LES9	湍流	2D	1.2	5D

在本文的计算中，入口湍流度的模拟是通过在平均速度剖面 $\bar{u}_x(Y)$ 基础上叠加一扰动速度 $\hat{u}_i(Y, Z, t)$ 来实现的。扰动速度由下式给出：

$$\hat{u}_i(Y, Z, t) = I \varphi \hat{u}_x(Y) \quad (8)$$

其中 I 为入口湍流度， φ 为满足高斯分布的随机数。

4 模拟结果及讨论

在本文的数值模拟中，台阶下游边界层内的区域采用长方体网格，最小网格尺度为 $0.0001m$ ，边界层以外的区域均采用立方体网格，在 $-0.5D \leq X \leq 10D, 0 \leq Y \leq 2D, 0 \leq Z \leq 5D$ 区域内采用加密网格，网格尺度为 $0.00125m$ 。网格总数目为 144.3943 万。图2给出了本文计算所采用的网格。计算的时间步长为 $0.005s$ 。我们大约模拟了 $1min$ 的流动。此刻的流动已达到充分发展。流场从静止到充分发展大约需要 $10s$ 的时间。因此，我们采用 $10s$ 以后的数据进行统计平均，得到台阶下游的平均流度剖面。

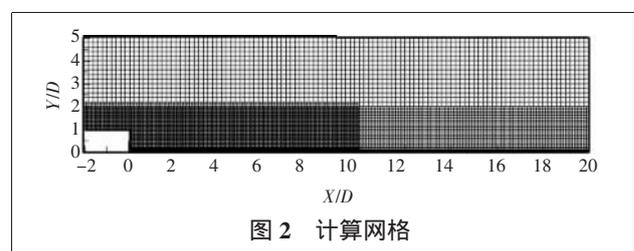


图2 计算网格

图3~图5给出了当雷诺数 $Re=5000 (Re=U_0 D/\nu, U_0$ 为入口的平均流速， ν 为运动粘性系数) 下，不同入口流速剖面情况下由本文大涡模拟得到的台阶下游的平均流速剖面，同时也出了文献[8]的直接数值模拟结果。无论大涡模拟和直接数值模拟都能模拟出边界层的分离和再附过程。但在回流区平均流速剖面的模拟结果对不同的入口流速剖面差别很大。

当我们采用层流入口流速剖面时，无论怎样调整边界层的厚度，大涡模拟结果都和直接数值模拟结果有很大差别。当采用湍流入口流速剖面时，若能给出合适的边界层厚度和入口湍流度，大涡模拟可得到与直接数值模

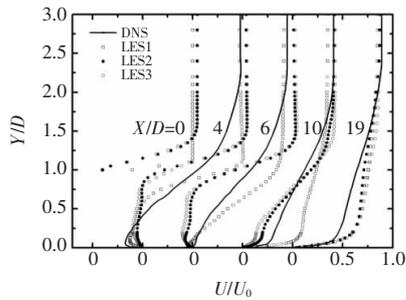


图3 层流入口速度剖面比较 $Re=5000$

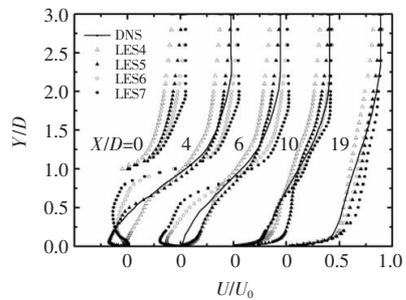


图4 湍流入口速度剖面比较图 $Re=5000$

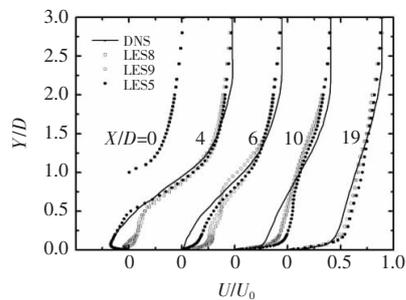


图5 不同湍流度速度剖面比较图 $Re=5000$

拟比较一致的结果。在本文研究的雷诺数下,当入口边界层厚度为 $2D$,湍流度为 0.5% 时,大涡模拟得到的台阶下游平均流速剖面与直接数值模拟结果比较一致。

根据台阶下游的平均流速剖面可计算出再附点的位置。本文再附点的定义为

$$\frac{\partial U}{\partial Y} \Big|_{Y=0} = 0 \quad (9)$$

其中 U 为时平均的流向速度。不同入口边界条件下的再附长度 X_r 见表 1。由表 1 可知,对于层流入口流速剖面,边界层厚度对再附长度的影响很大,随着边界层厚度的增大,再附长度将显著增长。对于湍流层流入口流速剖面,边界层厚度对再附长度的影响不大,而湍流度则对再附长度有很大影响。随着入口湍流度的增加,再附长度将会变短。文献[8]直接数值模拟给出的再附长度为 $6.28D$,这与本文入口湍流度为 0.5% 时的大涡模拟结果 ($X_r=5.8D$)基本一致。如上文所述,入口湍流度为 0.5% 时大涡模拟得到的台阶下游平均流速剖面与直接数值模拟结果也是一致的。这说明,当雷诺数为 5000 情况下,采用湍流层流入口流速剖面并取入口湍流度为 0.5% 时,大涡模拟能得到与直接数值模拟基本一致的结果。

5 结论

本文对不同入口边界条件下,后台阶下游三维流场进行了大涡模拟。模拟结果表明,对于层流入口流速剖面,边界层厚度对再附长度的影响很大,随边界层厚度的增大,再附长度将增大。对于湍流入口流速剖面,边界层厚度对再附长度的影响不大,而入口湍流度则对再附长度有较大影响。随着入口湍流度的增加,再附长度将会变短。

在雷诺数为 5000 情况下,当采用湍流入口流速剖面并选择合适的湍流度,大涡模拟能得到与直接数值模拟基本一致的结果。

[参考文献]

[1] Kuehn D M. Some effects of adverse pressure gradient on the incompressible reattaching flow over a rearward-facing step[J]. AIAA, 1980(18) 343-344.

[2] Durst F, Tropea C. Turbulent backward-facing step flows in two-dimensional ducts and channels[C]//Proc 3rd Intl Symp on Turbulent Shear Flows, 1981. Davis: University of California, 1981:18.1-18.5.

[3] Ra S H, Chang P K. Effects of pressure gradient on reattaching flow downstream of a rearward-facing step[J]. Aircraft, 1990(27): 93-95.

[4] Chen Y T, Nie J H, Armaly B F, Hsieh H T. Turbulent separated convection flow adjacent to backward-facing step-effects of step height [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006, 49: 3670-3680.

[5] Armaly B F, et al. Experimental and theoretical investigation of backward-facing step[J]. Fluid Mech, 1983, 127: 473-496.

[6] Isomoto K, Honami S. The effect of inlet turbulence intensity on the reattachment process over a backward-facing step[J]. Fluids Engrg ASME, 1989, 111: 87-92.

[7] Friedrich R, Arnal M. Analysing turbulent backward-facing step flow with the low pass-filtered Navier-Stokes equations [J]. Wind Engrg Indust Aerodyn, 1990, 35: 101-128.

[8] Le H, Moin P and Kim J. Direct numerical simulation of turbulent flow over a backward-facing step [J]. Fluid Mech, 1997, 330: 349-374.

[9] 王兵, 张会强, 王希麟, 等. 后台阶流动再附着过程的大涡模拟研究[J]. 应用力学学报, 2004, 21(3): 17-20. (编辑 吴天)

作者简介:刘春嵘(1972-)男,副教授,博士,研究方向为计算流体力学。
收稿日期:2009-09-18

10月16日,总投资达3.5亿元的烟台米兰德数控机床项目在山东烟台市经济开发区举行开工奠基仪式。

该项目规划建筑面积为10.8万平方米,一期工程计划2010年上半年建成投产。建成后将采用国内外先进技术和设备研发生产数控导轨磨床、数控铣床、数控车床等系列数控机床产品,年可生产各类数控机床6000台,实现销售收入8亿元。据了解,该项目的多个产品被列入山东省科技创新项目,部分产品还将出口到海外市场。

米兰德数控机床项目在烟台奠基