

# 旋转对平板通道内湍流流动和换热影响的直接模拟

李光熙, 陶文铨, 李增耀, 宇波

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安)

**摘要:** 直接模拟了展向旋转数等于 0~15 时平板通道内的湍流流动和换热, 分析了科氏力对湍流平均特性、湍流统计特性、雷诺应力输运和湍流结构的影响。采用有限差分法离散非稳态 N-S 方程, 湍流雷诺数和普朗特数分别为 150 和 0.71, 网格数为  $64 \times 128 \times 64$ 。计算结果表明, 随着旋转数的增加, 压力面附近湍流强度增大, 换热增强, 而吸力面附近换热减小。雷诺应力输运方程中的旋转项在各应力中的能量分配作用远大于压力分配项, 且旋转项使得雷诺应力输运方程的各项分布和相对关系发生了较大的变化。由于科氏力的作用, 压力面附近的条带间距减小, 条带变细、变短, 而吸力面流动脉动衰减, 有层流化的趋势。

**关键词:** 湍流; 直接模拟; 旋转

**中图分类号:** TK124; O357.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2005)05-0441-04

## Direct Numerical Simulation of Spanwise Rotating Channel Flow and Heat Transfer

Li Guangxi, Tao Wenquan, Li Zengyao, Yu Bo

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** The effects of spanwise rotation on the turbulent channel flow and heat transfer were examined with direct numerical simulation (DNS). The unsteady N-S equations were discretized by finite difference method. The Reynolds number based on half channel width and friction velocity and the Prandtl number were set to be 150 and 0.71, respectively. Grid number was  $64 \times 128 \times 64$ . Our computational results indicate that the turbulent intensity increased and heat transfer is enhanced at the pressure side with increasing rotation number, while heat transfer is suppressed at the suction side. Moreover, the rotation terms in the Reynolds stress transport equations play more important role in the redistribution of energy among different direction than the pressure redistribution terms, and they change drastically the budget of Reynolds stress equations. In addition, in the pressure side, the effect of Coriolis force makes the low-speed streaks slenderer and the space between streaks smaller, and in the suction side, streaks almost disappear and the flow has the tendency to become laminar.

**Keywords:** turbulence; direct numerical simulation; rotation

旋转系统内的湍流流动有着广泛的应用背景, 如涡轮机、地球物理、天体物理等。因此, 研究科氏力和离心力对涡轮叶片冷却通道中流动的影响, 有助于指导涡轮叶片的设计; 研究旋转对大气环流的影响, 可以提高对天气情况预报的准确度。旋转所产生的科氏力在流动的动量和能量传递中起着重要的作用, 所以许多研究人员对此进行了大量的实验研

究<sup>[1,2]</sup>和数值模拟<sup>[3]</sup>。

近年来, 随着计算机的迅速发展, 通过直接求解非稳态 N-S 方程来模拟研究湍流问题受到越来越多的重视。直接数值模拟<sup>[4,5]</sup>(DNS) 不仅可以提供丰富的脉动信息和一些实验中很难观察或观测的物理量, 以加深对湍流机理的理解, 而且 DNS 数据还可为评价和改进现有的各种湍流模型, 发展新的模

型提供依据。

本文通过 DNS 研究沿展向旋转平板通道内的湍流流动和换热,旨在查明旋转对湍流统计特性和湍流结构的影响。

## 1 数值方法

对于高度为  $2h$  的平行板通道内的充分发展湍流(图 1),  $x$  方向为流动方向,  $y$  方向是垂直壁面方向,  $z$  方向为展向, 计算区域取  $7.5h \times 2h \times 2.5h$ , 控制方程参考文献[6]。

根据本文的物理模型,  $x$  方向和  $z$  方向取周期性边界条件, 固体壁面对速度为无滑移边界, 对温度是等热流边界。计算中取湍流雷诺数  $Re_t$  和普朗特数  $Pr$  分别为 150 和 0.71。

控制方程采用有限差分法离散, 时间离散采用显式二阶的 Adams-Bashforth 格式, 对流项离散格式采用 Kuwamura 证明的相容二阶中心差分[7], 其他项均采用二阶中心差分。网格非均分, 近壁面较密, 中心疏, 节点总数为  $64 \times 128 \times 64$ 。文献[8]已经对 DNS 程序进行了考核验证, 这里不再赘述。

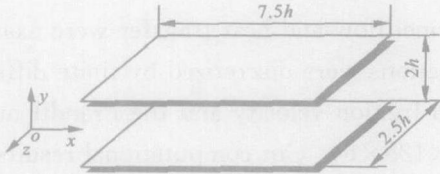


图 1 计算区域示意图

## 2 结果分析与讨论

本文计算了展向旋转数<sup>[6]</sup>(沿  $z$  轴逆时针旋转)  $Ro_z$  为 2.5、5、7.5、10、12.5 和 15 等 5 种工况下, 湍流流动和换热的变化, 并不旋转的情况相比较, 分析了科氏力对湍流平均特性、统计特性和流动结构等的影响。

### 2.1 统计特性

图 2 给出了不同旋转数下压力面和吸力面上的努塞尔数  $Nu$ 、范宁摩擦系数  $C_f$  与旋转数为 0 时的  $Nu_0$ 、 $C_{f0}$  比值的变化。可以看出: 由于旋转的影响, 压力面上的换热增强, 相应的阻力系数也增大, 而在吸力面上换热和阻力都减小; 旋转速度对压力面上的换热和阻力系数的影响比对吸力面上的大。当旋转速度增加时, 压力面上的换热逐渐增强,  $Ro_z$  超过一定值后开始减小, 阻力系数在  $Ro_z = 15$  时几乎减小到不旋转时的阻力系数; 压力面的换热增强的比例

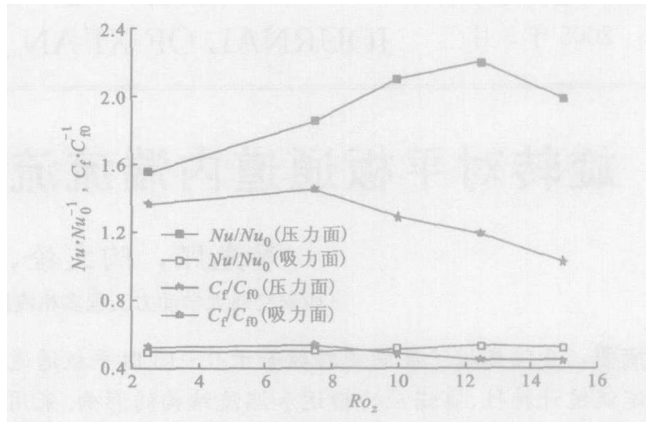


图 2  $Nu$  和  $C_f$  的变化曲线

远大于阻力增加的比例, 这在一般的强化换热措施中是罕见的。

图 3 显示了不同旋转数下通道截面无量纲平均速度  $u^+$  的分布。为方便起见, 图中每隔 3 个计算点做一次显示, 以下图中也采用此方法。沿  $z$  轴逆时针旋转时, 通道下平板为压力面, 上平板为吸力面。从图中可以看出: 随着旋转速度的增加, 截面速度呈现非对称分布, 压力面附近速度减小, 吸力面附近速度增大; 在较大的旋转数下, 中间有一段速度近似呈线性分布。图 4 给出了不同旋转速度下沿通道截面无量纲温度  $\theta^+$  的分布。可以看出, 随着旋转速度的增大, 温度分布曲线先变得平缓, 而后压力面附近温度减小, 吸力面附近温度增大。

图 5 显示了  $y$  方向上湍流强度  $v'^+_{rms}$  沿通道截面的分布。从图中可以看出: 随旋转数的增大, 压力面附近的湍流强度峰值迅速增大, 吸力面附近的峰值逐渐消失, 当旋转数超过一定值后, 峰值增加缓慢; 当旋转数  $Ro_z = 5$  时, 壁面附近的  $y$  方向湍流强度极大值增大到不旋转时的 2 倍左右。由于压力面的湍流强度的增大, 从而导致压力面的阻力增大, 换热增强, 而在吸力面, 当旋转数增大时, 科氏力使得壁面

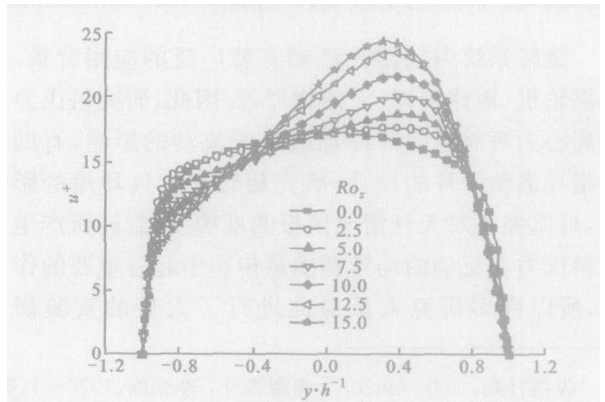


图 3 流向速度分布

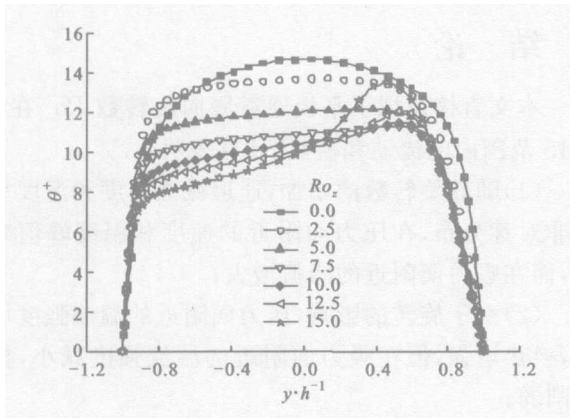


图 4 无量纲温度分布

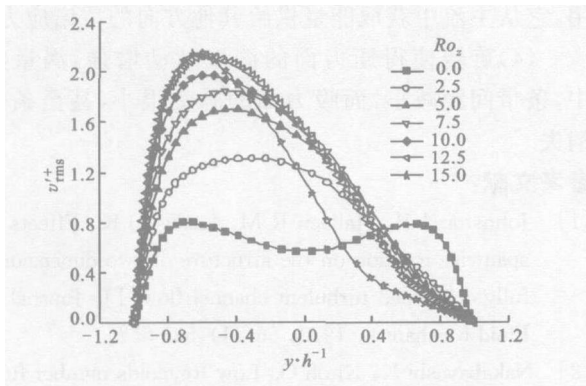


图 5 y 方向湍流强度分布

附近的湍流强度减小, 阻力减小, 同时换热减弱.

### 2.2 雷诺应力方程平衡分析

图 6~ 图 8 给出了  $Ro_z = 7.5$  时, 雷诺应力方程中的产生项  $P_{ij}$ 、旋转项  $R_{ij}$ 、再分配项  $\Pi_{ij}$ 、湍流输运项  $T_{ij}$ 、黏性扩散项  $D_{ij}$  和黏性耗散项  $\epsilon_{ij}$  的变化, 其他旋转数下的结果分析与之相似.

首先可以看到, 雷诺应力方程中各项不是沿通道中心对称的, 压力面附近的值增大, 而吸力面附近的值减小, 其中图 6 中显示的值几乎减小到 0. 在图 6 中: 压力壁面附近的产生项、黏性扩散项、耗散项和湍流扩散项都增大 1 倍左右, 它们之间的相对关系变化不大; 在黏性支层内, 分子的黏性扩散和黏性耗散相平衡, 随着  $y^+$  的增大, 应力产生项逐渐增大, 流体从主流获得的能量被其他各项所平衡, 其中旋转项在总能量平衡中起很大作用, 远大于压力分配项. 在图 7 中, 旋转项在通道壁面附近和中间部分起不同的作用, 在壁面附近, 旋转项起消耗作用, 抑制剪应力的产生, 而在  $y^+ = 25 \sim 200$  内, 旋转项和压力分配项则提供能量, 被应力产生项所平衡. 图 8 表明, 垂直壁面的雷诺应力主要由旋转项从主流获取能量, 并被其他项消耗, 这一点和不旋转时完全不同. 在不旋转时的  $\langle v'+ v'+ \rangle$  方程中, 能量由压力分

配项提供, 旋转以后它的角色发生了较大的变化, 不但没有提供能量反而消耗能量. 上述分析表明, 由于旋转项的存在, 雷诺应力方程中各项的相对关系发生了较大的变化, 这有助于理解旋转条件下湍流中动量、能量的传递. 明确了雷诺应力方程中各项的变化行为, 就可以评价和改进旋转条件下的湍流模型, 从而使模型能更好地预测工程应用中的旋转特性, 指导工程设计.

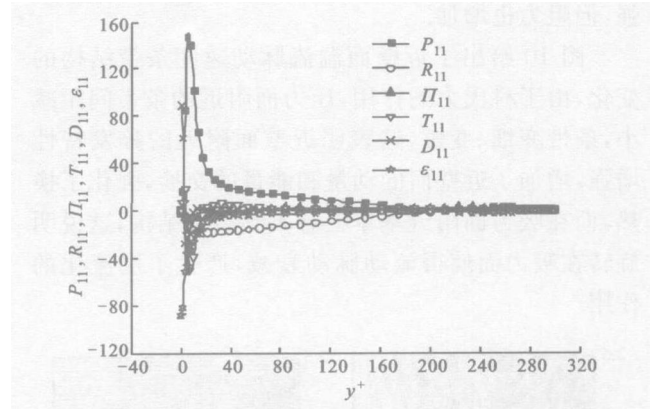


图 6  $\langle \dot{u}^+ \dot{u}^+ \rangle$  平衡方程中的各项分布

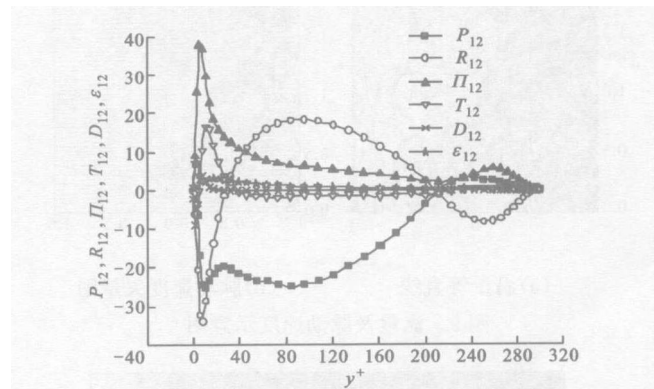


图 7  $\langle \dot{u}^+ \dot{v}^+ \rangle$  平衡方程中的各项分布

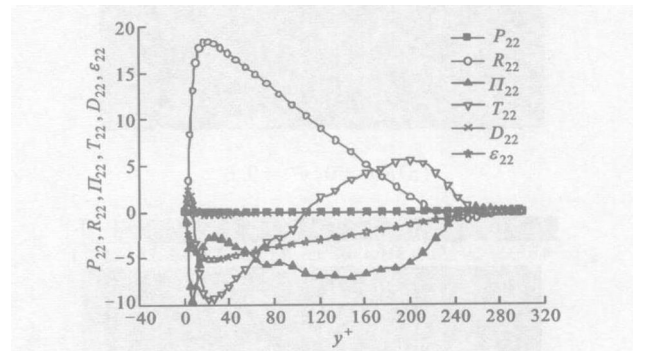


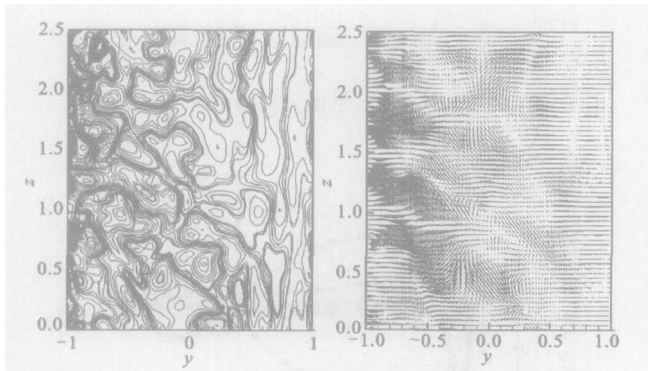
图 8  $\langle \dot{v}^+ \dot{v}^+ \rangle$  平衡方程中的各项分布

### 2.3 湍流结构

旋转产生的科氏力对湍流脉动速度和涡量都会有很大的影响. 图 9a 给出了旋转数  $Ro_z$  为 7.5 时  $y-z$  平面的涡量分布. 当  $Ro_z = 0$  时, 涡量主要集中在

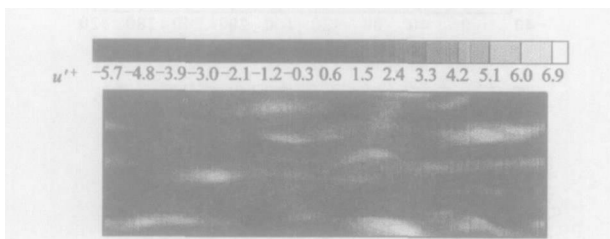
壁面附近,上、下平板的涡量分布相当,但  $Ro_z = 7.5$  时,涡量主要集中在压力面附近,吸力面附近的涡量很小.图9b给出了  $Ro_z = 7.5$  时  $y-z$  平面的脉动速度矢量图,同样可以看到在压力面附近的脉动速度较大,吸力面附近的脉动速度较小.旋转对脉动速度大小和涡量分布的影响,是造成在压力面和吸力面附近流动阻力和换热特性差异的直接原因.由于压力面附近的脉动速度增大,涡量增大,使得换热增强,但阻力也增加.

图10给出了近壁面湍流脉动速度条带结构的变化,由于科氏力的作用,压力面附近的条带间距减小,条带变细、变短,这表明近壁面附近的猝发特性增强,增加了近壁面的动量和能量的交换,强化了换热,而在吸力面附近基本上看不到条带结构,这说明旋转在吸力面使得流动脉动衰减,产生了层流化的作用.

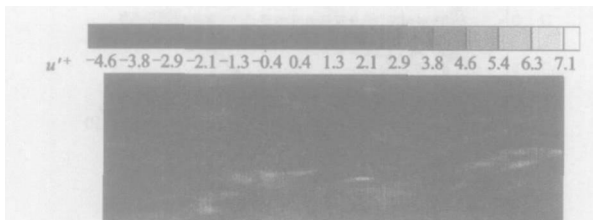


(a) 涡量等直线 (b) 脉动速度矢量图

图9 涡量及脉动速度示意图



(a)  $Ro_z = 0, y^+ = 9.6$



(b)  $Ro_z = 7.5, y^+ = 9.6$

图10  $x-z$  平面脉动速度  $u'+$  的等直线分布

### 3 结论

本文直接模拟了平板通道展向旋转数  $Ro_z$  在  $0 \sim 15$  范围内的流动和换热,计算表明:

(1) 随着旋转数的增加,通道截面速度和温度呈现非对称分布,在压力面附近的速度和温度峰值减小,而在吸力面附近的峰值增大;

(2) 由于旋转的影响,压力面附近的湍流强度增大,换热增强,但在吸力面附近的湍流强度减小,换热削弱;

(3) 旋转项在雷诺应力输运方程中起着重要作用,它从主流中获取能量供给其他方向的雷诺应力;

(4) 旋转使得压力面的湍流脉动增强,涡量集中,条带间距减小,而吸力面的脉动很小,甚至条带消失.

参考文献:

- [1] Johnston J P, Halleen R M, Lezius D K. Effects of spanwise rotation on the structure of two dimensional fully developed turbulent channel flow [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1972, 56(11): 533-557.
- [2] Nakabayashi K, Kitoh O. Low Reynolds number fully developed two dimensional turbulent channel flow with system rotation [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1996, 315(1): 1-29.
- [3] Kristoffersen R, Anderson H I. Direct simulation of low Reynolds number turbulent flow in a rotating channel [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1993, 256(11): 163-197.
- [4] Moin P, Mahesh K. Direct numerical simulation: a tool in turbulence research [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1998(30): 539-578.
- [5] Kim J, Moin P, Moser R D. Turbulence statistics in fully developed channel flow at low Reynolds number [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1987, 177(1): 133-166.
- [6] Wu H B, Kasagi N. Effects of arbitrary directional system rotation on turbulent channel flow [J]. Physics of Fluids, 2004, 16(4): 979-990.
- [7] Kawamura H, Abe H, Matsuo Y. DNS of turbulent heat transfer in channel flow with respect to Reynolds and Prandtl number effects [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 1999, 20(3): 196-207.
- [8] 李光熙,陶文铨,宇波,等.平板通道内充分发展湍流直接数值模拟 [J]. 工程热物理论, 2004, 25(6): 1031-1033.

(编辑 荆树蓉)