

旋转矩形通道内湍流流动与换热的直接数值模拟

马良栋^{1,2}, 李增耀¹, 陶文铨¹

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 大连理工大学土木水利学院, 116024, 大连)

摘要: 对旋转矩形通道内的湍流流动和换热进行了直接数值模拟. 非稳态 N-S 方程的空间离散采用二阶中心差分法, 时间推进采用二阶显式 Adams-Bashforth 格式. 分析了旋转对通道截面上主流平均速度、截面流速以及截面平均温度的影响, 结果表明: 在不考虑离心力的作用时, 随旋转数的增大, 管道截面的平均速度减小, 平均湍动能减小, 与静止时相比, 旋转数为 1.5 时平均湍动能减小了 33%; 在考虑离心力的影响时, 对于径向旋转轴向出流, 平均速度增大, 平均湍动能增大, 而对于径向旋转轴向入流, 结果相反. 在旋转数为 1.5 时, 与不考虑浮升力相比, 对于径向旋转轴向出流, 平均湍动能增大了 17%, 而对于径向旋转轴向入流, 平均湍动能减小了 43%.

关键词: 旋转; 湍流流动与换热; 直接数值模拟

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)05-0013-05

Direct Numerical Simulation of Turbulent Flow and Heat Transfer in a Square Duct Rotating along Its Spanwise Direction

MA Liangdong^{1,2}, LI Zengyao¹, TAO Wenquan¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Turbulent flow and heat transfer in a square duct rotating along its spanwise direction is investigated by direct numerical simulation. The spatial terms in the governing equations are discretized by second-order central difference scheme and the time terms are discretized by the Adams-Bashforth scheme. The influence of rotation on the streamwise velocity, crosswise velocity and the mean temperature is analyzed. The results show that the mean velocity and the mean turbulent kinetic energy decreases with the increase of rotation number when the centrifugal buoyancy force is neglected. The mean turbulent kinetic energy of $Ro\tau = 1.5$ decreases by 15 percent compared with that of $Ro\tau = 0$. If the effect of the centrifugal buoyancy force is taken into account, for the radially outwards flow, the mean velocity and turbulent kinetic energy increase with rotation number compared with those without the effect of centrifugal force, and the results are converse for the flow radially inwards. It is found that the mean turbulent kinetic energy increases by 17 percent for the radially outwards flow at $Ro\tau = 1.5$ compared with that of $Gr\tau_L = 0$, but it decreases by 43 percent for the flow radially inwards.

Keywords: rotation; turbulent flow and heat transfer; direct numerical simulation

旋转通道内的湍流流动与换热现象广泛存在于实际工程领域中, 如涡轮叶片内冷却通道. 受限通道内流体的流动, 在旋转系统下会受到科氏力和离心

力的影响, 旋转效应不仅改变流体的平均运动, 同时也改变湍流的强度和脉动结构. 因此, 深入研究旋转系统下科氏力和离心力对湍流流动影响的物理机

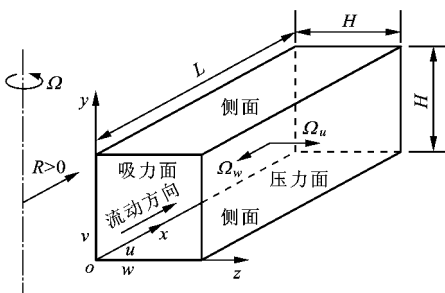
收稿日期: 2008-09-12. 作者简介: 马良栋(1976-), 男, 博士; 李增耀(联系人), 男, 副教授. 基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(50636050); 国家重点基础研究发展规划资助项目(G2007CB206902).

制,是旋转湍流研究的重要方向,同时有利于指导涡轮叶片的设计等工程实际应用.对于平板通道的流向和展向旋转,许多研究者做了大量的数值模拟^[1-5]和试验研究^[6].对于旋转矩形通道内的湍流流动与换热特性的研究还不多见, Pallares 和 Davidson^[7-8]采用大涡模拟的方法进行了数值模拟研究.本文采用直接数值模拟的方法研究旋转效应对矩形通道的湍流流动和换热影响,目的在于研究在科氏力和离心力作用下,管道截面平均速度和温度的变化,为旋转湍流大涡模拟亚格子模型的选择与构建提供理论数据.

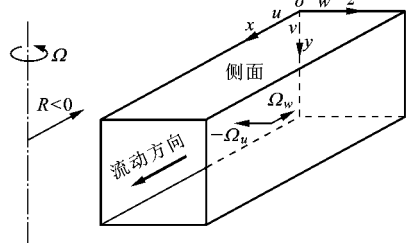
1 物理数学模型

直通道的旋转有 3 种典型情况:径向旋转轴向出流、径向旋转轴向入流和轴向旋转.本文主要研究径向旋转轴向出流和径向旋转轴向入流两种情况,分别见图 1a、1b.旋转矩形截面通道绕平行于 y 轴的旋转轴以正角速度(逆时针方向)旋转,旋转半径 R 为常数.对于径向旋转轴向出流,左侧壁面为吸力面,右侧壁面为压力面,上下壁面为侧面.通道的高和宽均为 H ,长为 L , x 方向为流动方向, y 和 z 方向为展向.流体在常压驱动下流动,假设流动和换热均已充分发展,矩形通道 4 个壁面光滑且具有均匀热流条件.采用 Boussinesq 假设,直接数值模拟所采用的控制方程如下^[9]

$$\frac{\partial w_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$



(a) 径向旋转轴向出流



(b) 径向旋转轴向入流

图 1 矩形通道物理模型及坐标系

表 1 计算条件及参数

$Re\tau$	$Gr_{\tau L}$	Ro_{τ}	平均统计时间	时间步长	计算环境
400	0, 9 000, - 9 000	0, 0 15, 0 3, 0 6, 0 9, 1 2, 1 5	$40H u\tau^{-1}$	$5 \times 10^{-5} H u\tau^{-1}$	上海超级计算中心曙光 4000A

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{Re\tau} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + F_i \tag{2}$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} + \frac{\partial(u_j \Theta)}{\partial x_j} = \frac{1}{Re\tau Pr} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \Theta}{\partial x_j} \right) - 4 \delta_j \frac{u_j}{U_b} \Theta \tag{3}$$

式中: u 为速度; p 为压力; Θ 为温度; U_b 为通道截面的平均速度; $Re\tau$ 为基于摩擦速度的雷诺数; Pr 为普朗特数. 速度、长度和温度的归一化特征量分别为壁面摩擦速度 $u\tau$ 、管道宽度 H 和摩擦温度 $T\tau$, 其中 $T\tau = q_w / (\rho_p u\tau)$, q_w 为壁面热流.

在径向旋转中,对于细长通道,假设所研究的区域离旋转轴较远,则 F_i 在 x 、 y 和 z 方向可以分别表示为

$$F_i = \begin{pmatrix} - Ro_{\tau} w - \frac{Gr_{\tau L}}{Re\tau^2} \Theta + 4 \\ 0 \\ Ro_{\tau} u \end{pmatrix} \tag{4}$$

式中: Ro_{τ} 为旋转数; $Gr_{\tau L}$ 为格拉晓夫数

$$Gr_{\tau L} = \frac{R \Omega^2 \beta T H^3}{\nu^2} \tag{5}$$

其中 Ω 为旋转角速度, β 为容积膨胀系数, ν 为运动黏滞系数.

在固体壁面上,速度采用无滑移边界条件,温度的边界条件为 $\Theta_w = 0$.由于假设湍流流动和换热均已完全充分发展,所以速度和温度沿主流方向周期性变化.控制方程的求解采用 MAC 算法,对流项和扩散项均采用二阶中心差分,时间推进采用二阶显式 Adams-Bashforth 格式,其中计算条件及区域网格划分分别见表 1 和表 2.

表 2 计算区域及网格划分

计算区域	计算网格	网格间距		归一化网格间距	
		Δx	$\Delta y, \Delta z$	Δx^+	$\Delta y^+, \Delta z^+$
6. $4H \times H \times H$	$256 \times 128 \times 128$ (4.1943×10^6)	$0.025H$	$0.0015H \sim 0.0127H$	10	0.60~ 5.08

2 结果分析

2.1 平均速度和温度分布

为了分析离心力的影响, 当 $Ro\tau = 1.5$ 时, 取 3 个不同的 $Gr_{\tau L}(0, 9000, -9000)$, 这 3 个数值是参照文献[8]选定的. 表 3 给出了不同计算条件下的归一化平均速度、归一化平均温度、阻力系数、基于平均速度的雷诺数 Re_m ($Re_m = Re\tau U_b$) 和体积平均的湍动能 E_k , 其中平均湍动能定义为

$$E_k = \frac{1}{2V} \int_0^V \langle (u')^2 + (v')^2 + (w')^2 \rangle dv \quad (6)$$

式中: $\langle \rangle$ 表示系综平均. 可以看出, 在不考虑离心力作用的条件下, 随旋转数的增大, 平均速度、平均温度及 Re 均减小, 阻力系数与换热系数增大, 平均湍动能减小, 与 $Ro\tau = 0$ 相比, $Ro\tau = 1.5$ 时平均湍动能减小了 33%. 当旋转数一定时, 若考虑离心力的影响, 对于径向旋转轴向出流, 平均速度与湍动能增大, 但平均温度减小而换热增强. 对于径向旋转轴向入流, 结果与径向旋转轴向出流相反. 在 $Ro\tau = 1.5$ 时, 与 $Gr_{\tau L} = 0$ 相比, 对于径向旋转轴向出流, 平均湍动能增大了 17%, 而对于径向旋转轴向入流, 平均湍动能减小了 43%.

2.2 旋转矩形通道强迫对流 ($Gr_{\tau L} = 0$)

图 2a 给出了 $Ro\tau_2 = 0$ 时的平均温度、主流平均

速度和横截面上平均的二次流速度分布, 由于对称性, 因此只给出了计算区域的一半, 其中主流速度与横截面上二次流的速度分布表示在同一个图中. 从图中可以看出, 在矩形通道的每一个象限内分布着两个流动方向相反的涡, 主流速度的等值线在每一个拐角处向顶角弯曲, 表明随主流速度增大, 等温线的分布趋势与主流速度的等值线的分布趋势是一致的, 同时表明在顶角处, 温度值增大. 因此, 二次流动带动低温的高动量流体质点沿角平分线向顶角流动, 使流体质点的温度升高. 同时, 高温的流体质点在二次流作用下沿壁面向壁面平分线流动, 温度降低. 对于目前的计算, $U_b = 15.3u\tau$, 本文的计算结果与 Kajishima 和 Miyakey^[10] 的结果 ($U_b = 15.5u\tau$) 是一致的.

图 2b、2c 给出了矩形旋转通道在不同旋转数下的平均速度和平均温度分布. 在科氏力 (见式 (4) 中 $Ro\tau$ 项) 的作用下, 流体从吸力面流向压力面. 从图中可以看出, 随着旋转数的增大, 在吸力面 ($z = 0$) 附近主流速度减小, 而在压力面 ($z = 1$) 附近, 主流速度增大, 其最大值点向压力面和侧壁面移动. 当 $Ro\tau_2 = 1.5$ 时, 与无旋转的流动相比较, 其平均速度减小了 6%. 平均温度的分布与平均主流速度的分布是一致的, 其最小值点随旋转数的增大向压力面和侧壁移动.

表 3 不同计算条件下各物理量的平均值 ($Re\tau = 400$)

$Ro\tau$	$Gr_{\tau L}$	U_b	Θ_b	Re_m	$10^3 f$	Nu	$100 E_k U_b^{-2}$
0.00	0	15.3	-14.3	6120	8.54	19.8	0.94
0.30	0	15.3	-14.3	6105	8.58	19.8	0.88
0.60	0	15.2	-14.3	6099	8.60	19.7	0.81
0.90	0	15.2	-14.3	6091	8.62	19.7	0.77
1.20	0	17.9	-14.2	5998	8.89	20.0	0.69
1.50	0	14.5	-13.8	5836	9.39	20.5	0.64
1.50	9000	16.3	-13.1	6512	7.54	21.7	0.75
1.50	-9000	12.4	-14.1	4982	12.89	20.0	0.36

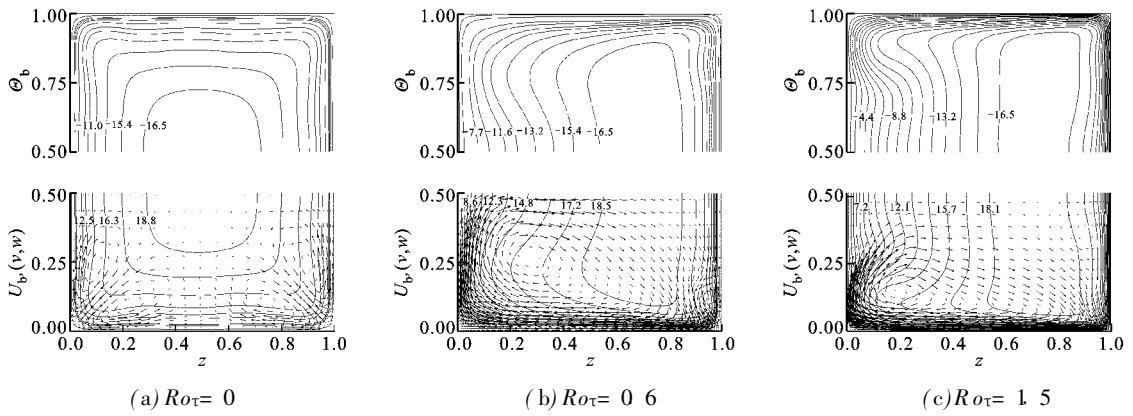


图 2 平均速度及温度分布($Gr_{\tau L} = 0$)

平均温度的分布(图 2 中上半部的实线)与主流平均速度的分布(图 2 中下半部的实线)是相当一致的. 由于旋转的影响, 平均温度在吸力面侧升高, 而在压力面侧减小. 当 $Ro_{\tau} = 1.5$ 时, 在管道中心区域平均温度的分布呈现分层化(表现为等温线几乎互相平行), 因此在 y 方向的换热减小.

图 3 给出了沿壁面局部换热量的分布与文献[8]结果的对比. 从图中可以看出, 在压力面侧, 随旋转数的增大传热增强, 而在吸力面侧, 随旋转数的增大传热减弱, 这是由科氏力的作用造成的. 当 $Ro_{\tau} = 1.5$ 时, 本文的结果与文献[8]有所差别, 主要是: 一方面计算雷诺数有所不同(文献[8]中主流雷诺数

$Re_{\tau} = 300$), 另一方面本文计算结果的层流化趋势减弱(文献[8]中总体湍动能减小 44%, 而本文的计算结果为 32%), 因此横截面上二次流的分布在相同旋转数下有所变化, 从而导致局部换热量的变化.

2.3 旋转矩形通道混合对流

图 4 给出了考虑离心力时管道截面平均速度和平均温度的分布. 由图 4a 可知, 在压力面中心附近, 由雷诺应力所产生的二次流涡受到了抑制, 并且在侧壁面附近的大涡也进一步分离成两个小涡, 平均速度减小. 由图 4b 可知, 与 $Gr_{\tau L} = 0$ 相比, 其二次流涡变小, 平均速度增大, 并且平均速度的最大点也进一步向压力面及靠近压力面侧的拐角处移动.

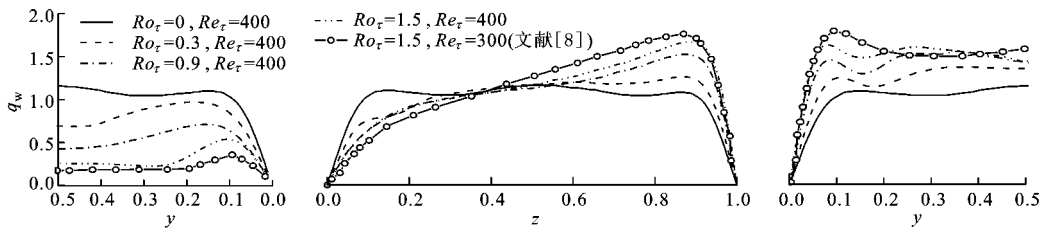


图 3 沿管道壁面局部换热量的分布 ($Gr_{\tau L} = 0$)

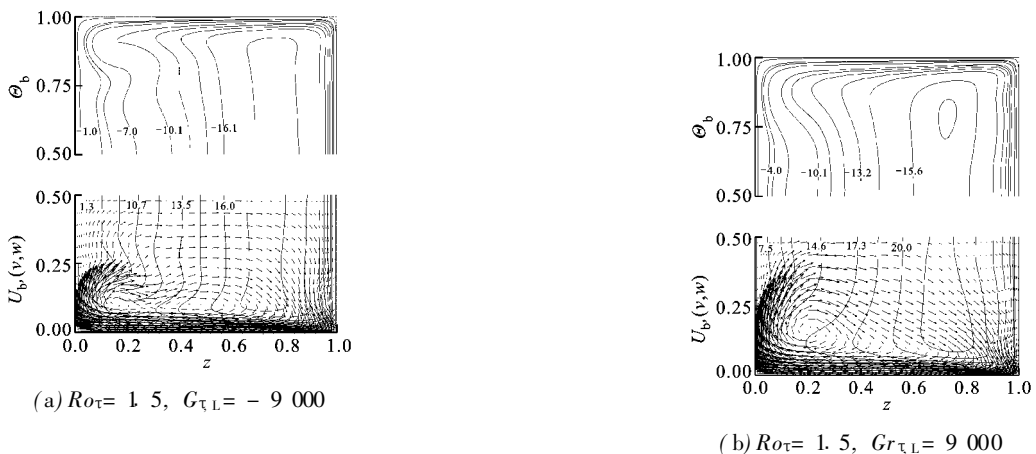


图 4 在离心力作用下平均速度及温度分布 ($Re_{\tau} = 400$)

在本文的计算中,平均压力梯度不变,当考虑离心力时,主流方向动量方程的归一化形式为^[8]

$$1 = \langle u^* \rangle_w^2 + \frac{Gr_{\tau,L} \langle \Theta \rangle_V}{4Re_{\tau}^2} \quad (7)$$

式中: $\langle u^* \rangle_w$ 表示在管道4个壁面上的平均摩擦速度; $\langle \Theta \rangle_V$ 表示系综平均温度. 由式(7)可知,在常压

力作用下,考虑离心力的影响时,在管道进口和出口之间的平均压力梯度与壁面切应力和离心力相平衡. 当 $Gr_{\tau,L} = -9\,000$ 时,管道壁面的平均摩擦速度减小,而 $Gr_{\tau,L} = 9\,000$ 时,管道壁面的平均摩擦速度增大. 图5给出了局部壁面切应力的变化,图中的变化趋势与式(7)的计算结果是一致的.

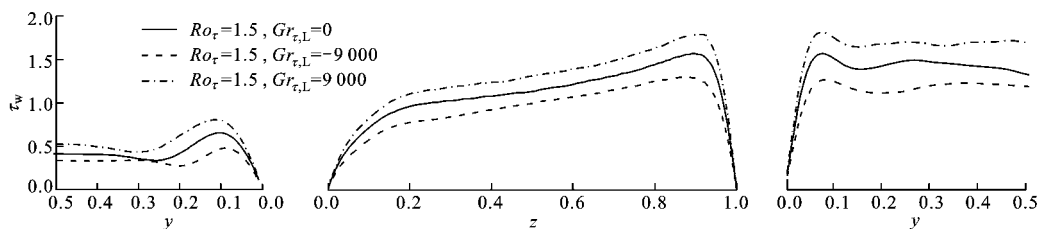


图5 不同 $Gr_{\tau,L}$ 时局部壁面切应力的分布

3 结论

本文对旋转矩形通道内的湍流流动和换热进行了直接数值模拟,分析了旋转对湍流流动和换热的影响. 结果表明,离心力对湍流和换热有重要影响,在不考虑离心力的作用下,随旋转数的增大,管道截面的平均速度减小,平均湍动能减小. 在旋转数一定且考虑离心力的影响时,与相同旋转数不考虑离心力时相比,对于径向旋转轴向出流,平均速度增大,平均湍动能增强,而对于径向旋转轴向入流,结果相反. 在压力侧面,随旋转数的增大传热增强,而在吸力侧面,随旋转数的增大传热减弱.

参考文献:

- [1] 刘难生. 旋转湍流的直接数值模拟和大涡模拟研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学力学与机械工程系, 2003.
- [2] LAUNDER B E, TSELEPIDAKIS D P, YOUNIS B A. A second-moment closure study of rotating channel flow [J]. J Fluid Mech, 1987, 183: 63-75.
- [3] MIYAKE Y, KAJISHIMA T. Numerical simulation of the effects of Coriolis force on the structure of turbulence [J]. Bull JSME, 1986, 29(256): 3347-3351.
- [4] NAKABAYSHI K, KITO O. Low Reynolds num-

ber fully developed two-dimensional turbulent channel flow with system rotation [J]. J Fluid Mech, 1996, 315: 1-29.

- [5] PIOMELLI U, LIU J. Large-eddy simulation of rotating channel flows using a localized dynamic model [J]. Physics Fluids, 1995, 7(4): 839-848.
- [6] JOHNSTON J P, HALEEN R M, LEZIUS D K. Effects of spanwise rotation on the structure of two-dimensional fully developed turbulent channel flow [J]. J Fluid Mech, 1972, 26: 533-557.
- [7] PALLARES J, DAVIDSON L. Large-eddy simulations of turbulent flow in a rotating square duct [J]. Physics of Fluids, 2000, 12(11): 2878-2894.
- [8] PALLARES J, DAVIDSON L. Large-eddy simulations of turbulent heat transfer in a stationary and rotating square duct [J]. Physics of Fluids, 2002, 14(8): 2804-2816.
- [9] 马良栋. 矩形截面通道内强化对流换热机理的研究及湍流换热的高级数值模拟 [D]. 西安: 西安交通大学能源与动力工程学院, 2007.
- [10] KAJISHIMA T, MIYAKE Y. A discussion on eddy viscosity models on the basis of the large eddy simulation of turbulent flow in a square duct [J]. Computers Fluids, 1992, 21(2): 151-161.

(编辑 荆树蓉)