

DOI:10.7652/xjtuxb201411004

离心浮升力对湍流混合对流换热影响的数值模拟

阳祥¹，陶文铨²

(1. 国家核电技术有限公司北京研发中心，100190，北京；
2. 西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室，710049，西安)

摘要：为研究离心浮升力对旋转设备中流动与换热的影响，采用直接数值模拟方法对径向旋转轴向出流通道内充分发展湍流进行了研究。湍流雷诺数、旋转数和普朗特数分别保持为 300、1.5 和 0.71，对格拉晓夫数分别为 0、9 000、20 000 以及 50 000 情况下的流动与换热特性进行了模拟与分析，结果表明：主流速度、温度和二次流均随离心浮升力的增加而增强，最大主流速度和最小温度出现在非稳定侧；随离心浮升力增加，速度脉动增强，温度脉动在非稳定侧先增强再减弱，在稳定侧则是先减弱再增强；随离心浮升力增加，稳定壁面的换热增强，非稳定壁面换热则是先增强后减弱。

关键词：湍流；直接数值模拟；混合对流换热；离心浮升力

中图分类号：TK124 **文献标志码：**A **文章编号：**0253-987X(2014)11-0020-05

Numerical Simulation of the Effect of Centrifugal Buoyancy on the Turbulent Mixed Convection Heat Transfer

YANG Xiang¹，TAO Wenquan²

(1. Beijing R&D Center of State Nuclear Power Technology Corporation, Beijing 100190, China; 2. Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering of Ministry of Education, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to investigate the influence of centrifugal buoyancy on the fluid flow and heat transfer in rotary machinery, studies have been carried out for a rotary radially outward developed turbulent flow by using direct numerical simulation (DNS) method. The turbulent Reynolds number, rotation number and Prandtl number of the flow are kept at 300, 1.5, 0.71, respectively, then simulations and analysis are conducted for characteristics of flow and heat transfer with Grashof number equal to 0, 9 000, 20 000, and 50 000, respectively. The results indicate that the mainstream velocity, temperature and secondary flow all increase with the centrifugal buoyancy forces. The maximum mainstream velocity and the minimum temperature appear in the side of the unstable wall. With the increase of centrifugal buoyancy forces, the velocity fluctuation is strengthened; the temperature fluctuation increases firstly then decreases in the side of the unstable wall, however it decreases firstly then increases in the side of the stable wall; the heat transfer performance on the stable wall is enhanced and becomes better firstly then worse on the unstable wall.

Keywords: turbulence; direct numerical simulation; heat transfer of mixed convection; centrifugal buoyancy

旋转通道内的湍流流动与换热有着广泛的应用背景，如燃气轮机内通道冷却。由于旋转作用引起的柯氏力、离心力和离心浮升力使流动和换热变得很复杂，因此相关研究起步相对较晚。Wagner 等

在旋转状态下的透平冷却方面做了很多具有开创性的实验研究^[1]。随着计算机技术的发展,精度高、信息量大的模拟技术如直接数值模拟(DNS)和大涡模拟(LES)也陆续用于湍流换热的研究,旋转湍流传热更是研究的热点。Murata 和 Mochizuki 用 LES 方法研究了柯氏力、截面长宽比率及肋的倾角对湍流换热和阻力系数的影响^[2-3]; Pallares 和 Davidson 也采用 LES 方法对旋转方形截面通道内的湍流混合对流换热进行了研究^[4-5]; Tyagi 等用 LES 方法研究了柯氏力和离心浮升力联合作用下对湍流换热的影响,并且用 POD 方法对湍流大尺度进行了提取和分析^[6]。在国内,刘难生研究了旋转系统下柯氏力对槽道湍流的影响^[7],马良栋等研究了柯氏力和离心力在旋转矩形截面通道湍流流动与换热中的影响^[8]。深入研究离心浮升力作用下的旋转通道内的换热机理仍有重要的理论和工程意义。本文用 DNS 方法较深入地研究了离心浮升力对旋转状态下混合对流换热的统计平均速度场、温度场、主要物理量的脉动强度、热流密度和努赛尔数 Nu 沿通道周向分布的影响。

1 物理数学模型

1.1 物理模型

本文所采用的物理模型及坐标系如图 1 所示,通道高和宽均为 H 、长 $L=6H$,并且以角速度 Ω 、旋转半径 R 绕平行于 z 坐标轴的轴旋转。主流方向沿 x 坐标轴, y 轴为法向方向, z 轴为展向方向;通道壁面沿主流方向受均匀恒定的热流加热,沿周向保持恒壁温。流体受均匀压力梯度驱动,并且处于流动与热充分发展状态。为下文中论述的方便, $y=0$ 的壁面称为非稳定壁面, $y=1$ 的壁面称为稳定壁面,其余两个壁面称为侧壁面。

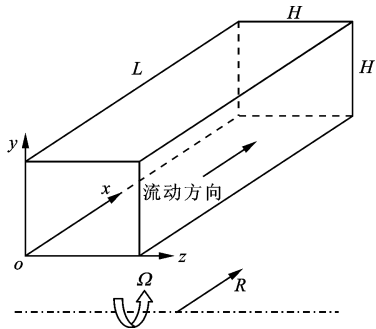


图 1 物理模型

1.2 数学模型

文中采用的控制方程为质量守恒方程、动量守恒

方程和能量守恒方程,考虑浮升力时采用 Boussineq 假设,控制方程的张量形式如下

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{Re_\tau} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + 4\delta_{i1} - e_{ijk} Ro_\tau u_k - \frac{1}{2} \frac{Gr_\tau}{Re_\tau^2} \Theta \frac{\partial R^2}{\partial x_i} \delta_{i1} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} + \frac{\partial u_j \Theta}{\partial x_j} = \frac{1}{Re_\tau Pr} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \Theta}{\partial x_j} \right) - 4\delta_{i1} \frac{u_j}{U_b} \quad (3)$$

式中: $Re_\tau = u_\tau H / \nu$ 为湍流雷诺数;旋转半径满足 $R = (x^2 + y^2)^{1/2}$; δ_{ij} 为克罗尼柯符号; e_{ijk} 为置换符号; $Gr_\tau = R\Omega^2 \beta T_\tau H^3 / \nu^2$ 为格拉晓芙数, β 为体积膨胀系数, ν 为运动黏性系数; Pr 为普朗特数; U_b 为体积平均速度; $\Theta = (T - \langle T \rangle_w) / T_\tau$ 为归一化温度, $\langle T \rangle_w$ 为通道壁面系综平均温度;下标 $i, j, k=1, 2, 3$, 分别对应 x, y, z 坐标分量。式(1)~(3)采用通道高度 H 、摩擦速度 u_τ 、摩擦温度 $T_\tau = q_w / \rho c_p u_\tau$ 作为长度、速度和温度的特征尺度,时间和压力项分别用 H/u_τ 、 ρu_τ^2 进行归一化, q_w 为壁面恒定热流密度, ρ 为流体密度, c_p 为比定压热容。

用有限差分法离散控制方程,空间上采用相容二阶中心差分格式,时间上采用 Adams-Bashforth 格式,这样可保证在时间空间上都有二阶精度。在主流方向采用均匀网格,沿法向和展向则采用局部加密的网格,沿 x, y, z 的网格数为 $256 \times 128 \times 128$ 。沿主流方向,速度、温度均采用周期性边界条件;壁面处速度为无滑移边界条件,温度为恒壁温条件。数值计算中采用投影算法,时间步长为 $5 \times 10^{-5} H / u_\tau$,每隔 5 000 时间步保存计算信息;统计结果时,将 200 个瞬时物理场沿 x 方向和时间上做平均。本文采用的计算程序的正确性和准确性已在文献[9]中得到验证,本文不再给出程序验证的具体内容。

2 结果及分析

2.1 统计平均流场与温度场

图 2 给出了不同 Gr_τ 下统计平均速度和温度的分布,由于速度与温度的分布关于竖直中心线对称,故只给出一半区域中的计算结果,图的左半部分是速度分布,右半部分是温度分布。由图 2 可知:当 $Gr_\tau=0$ 时主流速度最大值(见图 2a 左半部分)出现在非稳定壁面侧,在非稳定壁面与稳定壁面之间主流速度逐渐降低;主流速度等值线在侧壁面附近凸起且顶点位置沿 y 轴正方向越来越靠近壁面,而在

中心区域出现了 $\partial U/\partial z=0$ 的区域,即 Taylor-Proudman 区域^[4]。这是因为在侧壁面附近有柯氏力作用引起了二次流,在二次流驱动下侧壁面附近的流体得到较充分的混合,主流速度有所提高,表现为等值线的凸出。图 2a 右半部的等温线分布与主流速度等值线的分布类似,但温度最小值出现在非稳定侧,最高温度出现于稳定侧。随着 Gr_τ 增加,离心浮升力增强,主流速度和温度都增加,相比于 $Gr_\tau=0$ 的工况, $Gr_\tau=9\,000, 20\,000, 50\,000$ 时图 2 中对应的最大速度分别增加了约 5%、21%、47%,最小温度分别升高了约 17%、22%、39%;二次流强度随着 Gr_τ 的增加而增强。表 1 中总结了文献[5]给出的 $Gr_\tau=0$ 和 $Gr_\tau=9\,000$ 时的流场和温度场,对比

本文的结果可知:文献[5]中采用大涡模拟方法计算,网格数仅为 $66\times66\times66$,小尺度采用亚格子模型处理,获得的计算结果表明浮升力作用对主流速度和温度基本没影响,主要影响二次流流型,非稳定壁面侧出现了明显的涡流。本文采用直接模拟方法,计算网格数为 $256\times128\times128$,分辨率有较大提高,模拟出的结果有更高的可信度,模拟结果表明浮升力作用对主流速度和温度有影响,但二次流流型基本保持不变。

2.2 湍流脉动强度

图 3 给出了不同工况下湍流脉动强度沿通道竖直中心线的分布。图 3a 中是主流速度脉动强度变化曲线,随着 Gr_τ 的增加,在非稳定壁面附近脉动强

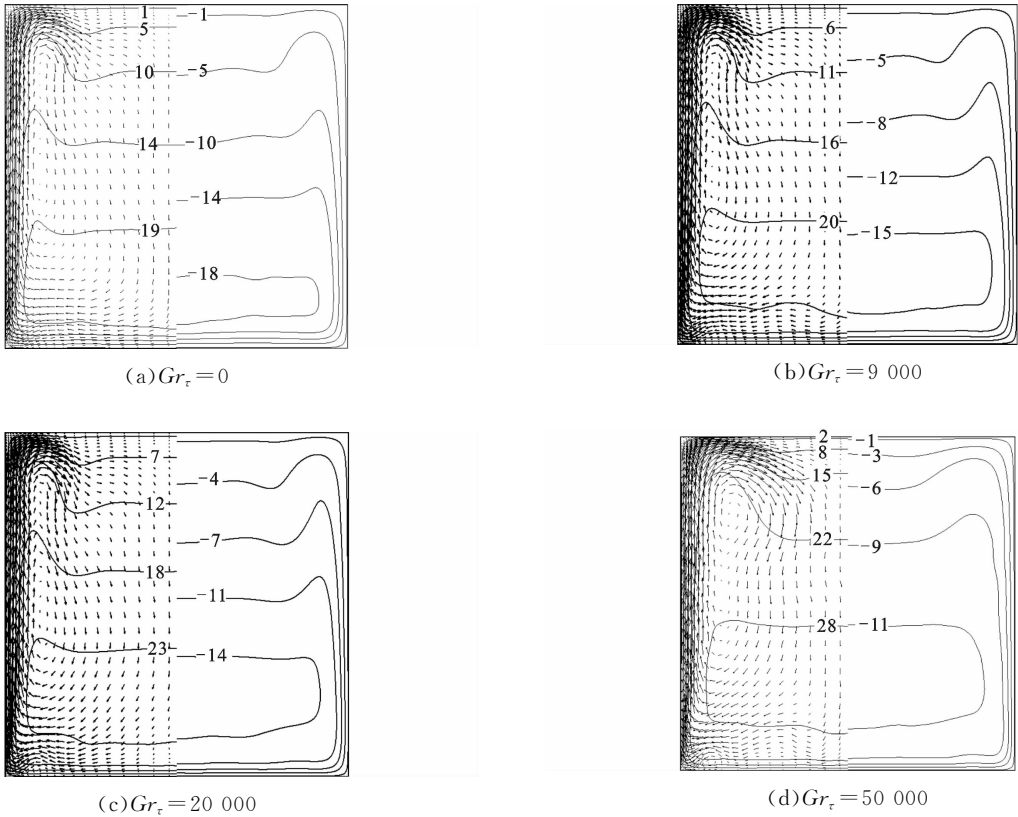


图 2 不同 Gr_τ 下统计平均流场与温度场

表 1 平均流速与温度的比较

工况	最大主流速度		最小主流速度		二次流		最大平均温度		最小平均温度	
	本文	文献[5]	本文	文献[5]	本文	文献[5]	本文	文献[5]	本文	文献[5]
$Gr_\tau=0$	19	18	1	5	无明显涡	非稳定壁面出现涡	-1	-5	-18	-17
$Gr_\tau=9\,000$	20	18	2	5	无明显涡	非稳定壁面有明显的中等尺度涡	-3	-5	-15	-17

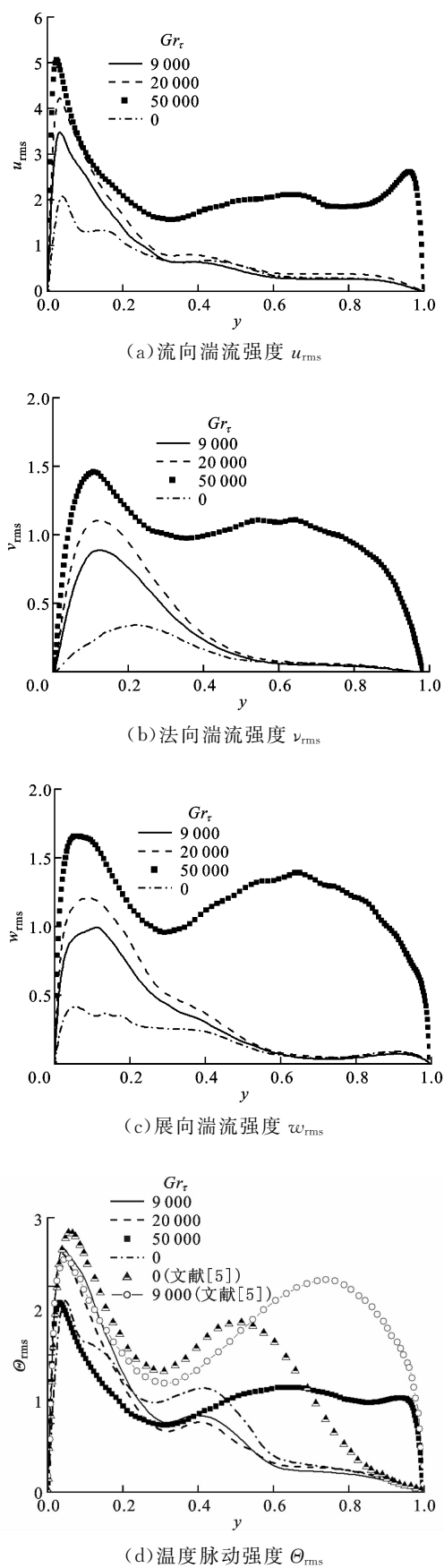


图 3 湍流脉动强度随 Gr_c 的变化

度增强;在稳定壁面附近当 $Gr_c=0,9\ 000,20\ 000$ 时脉动强度没有明显的变化, $Gr_c=50\ 000$ 时稳定壁面 ($y=1$) 附近脉动强度明显增强。图 3b、3c 分别是法向脉动强度变化曲线和展向脉动强度变化曲线,可看出法向脉动强度变化趋势和展向脉动强度变化趋势与图 3a 中基本一致:非稳定壁面速度脉动强度较大,稳定壁面脉动强度较小,随 Gr_c 的增加脉动强度增强。图 3d 中是温度脉动强度的变化曲线,随着 Gr_c 的增加,非稳定侧温度脉动强度出现先增强后减弱的现象, $Gr_c=50\ 000$ 对应的脉动强度已稍低于 $Gr_c=0$ 对应的脉动强度,稳定侧温度脉动强度则先减弱再增强。图 3d 同时给出了文献[5]中采用大涡模拟获得的数据曲线,在 $Gr_c=0$ 的情况下,本文模拟的温度脉动强度在变化趋势上与文献[5]中类似,在非稳定侧温度脉动强度值比较接近,而在中心区域和稳定壁面侧文献[5]中的温度脉动强度明显高于本文的计算结果;在 $Gr_c=9\ 000$ 的情况下,本文计算结果与文献[5]中的结果相比具有与 $Gr_c=0$ 时相同的趋势和表现。从图 3d 可知,文献[5]中的大涡模拟方法可以捕捉到较强烈的脉动,对于较小的脉动获得的结果明显偏大。综合图 2 与图 3 可知: Gr_c 增加速度增大,速度脉动强度增强;温度升高,温度脉动强度在非稳定壁面先增强后减弱,在稳定壁面侧则是先减弱再增强。这是因为离心浮升力增加,二次流增强并驱动流体循环增加了流体的混合程度,主流区流体速度和温度更加均匀,脉动强度在稳定壁面与非稳定壁面之间也有趋向均匀的趋势。

2.3 壁面热流密度与努赛尔数

2.3.1 壁面热流密度

图 4 给出了不同 Gr_c 对应的热流密度 q_w 沿通道周向的变化(热流密度也关于通道竖直中心线对称,故只给出了沿上、下壁面左半部和左侧壁面上的热流密度变化)。图 4 的左半部分是非稳定壁面的热流密度变化曲线: $Gr_c=0$,在 $0< z<0.2$ 的范围内热流密度较低,在 $0.2< z<0.5$ 的范围内热流密度升高,在非稳定壁面中心处($z=0.5$)热流密度甚至超过了在壁面附近的最大热流密度; Gr_c 增加到 $9\ 000$, q_w 在绝大部分区间范围内均有较明显的升高,但在左下角壁面附近几乎没有变化; Gr_c 升高到 $20\ 000$,左下角壁面附近的 q_w 降低,在中心区域则进一步明显地升高; Gr_c 增加到 $50\ 000$,不稳定壁面上的 q_w 整体下降,尤其在左下角壁面附近的区域下降得尤为厉害。这说明在主流区适当提高离心浮升力有利于增强换热,但离心浮升力过高反而不利于换热;在左下角壁面附近区域

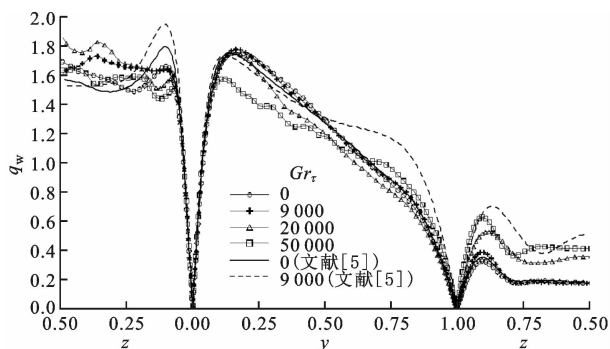


图4 不同 Gr_τ 下 q_w 沿通道周向的分布

内,增加浮升力不利于换热。

与文献[5]中的结果相比较,主流区的热流密度是吻合得较好的,而在左下角壁面附近本文获得的热流密度稍小,这主要是本文采用了DNS方法而文献[5]中采用LES方法所致。图4的中间部分是沿侧壁面的 q_w 变化曲线,随着 Gr_τ 的增加 q_w 的变化趋势类似:在 $0 < y < 0.15$ 的范围内, q_w 从0几乎线性地增长到 $1.5 \sim 1.8$;在 $0.15 < y < 0.85$ 的范围内, q_w 从 $1.5 \sim 1.8$ 近乎线性地下降到 $0.8 \sim 0.9$,然后以更大的下降速度在稳定壁面迅速下降为0。 $Gr_\tau = 0$ 时文献[5]中的结果与本文的模拟结果吻合得很好; $Gr_\tau = 9000$ 时,文献[5]中的结果与本文的结果在 $0 < y < 0.5$ 的区间内仍然吻合得较好,而在 $0.5 < y < 1.0$ 的区间内,文献[5]中对应的热流密度值大于本文的计算结果。随着 Gr_τ 的进一步增加,侧壁面下半部分的 q_w 下降,上半部分的 q_w 变化不大。图4右侧部分是稳定壁面的 q_w 变化曲线,不同 Gr_τ 下对应的 q_w 均较非稳定壁面低,在 $0.9 < z < 1.0$ 的范围内热流密度几乎线性地增加到 $0.3 \sim 0.6$;在 $0.5 < z < 0.9$ 的范围内, $Gr_\tau \leq 9000$ 时 $q_w = 0.2$,基本保持不变,而 $Gr_\tau = 20000$ 和 $Gr_\tau = 50000$ 时, q_w 分别保持 0.4 和 0.5 不变。

2.3.2 努塞尔数 图5给出了不同 Gr_τ 下通道壁

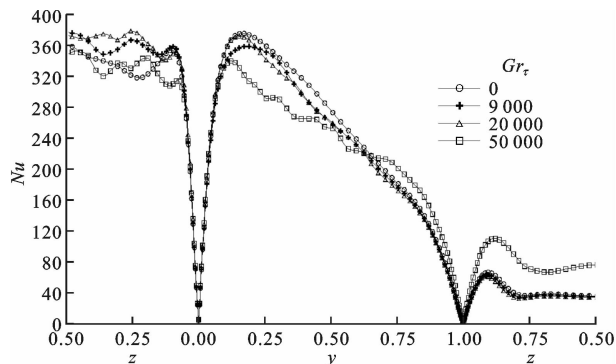


图5 不同 Gr_τ 下 Nu 沿通道周向的分布

面周向 Nu 的变化。根据 q_w 和 Nu 的定义

$$q_w = (-1/Re_\tau Pr) \partial \Theta / \partial x_i \Big|_w$$

$$Nu = -\partial \Theta / \partial x_i \Big|_w \quad i = 2, 3$$

可知 Nu 与 q_w 的分布趋势是一样的。由图5可知,最大的 Nu 位于非稳定侧,等于380,而最小的 Nu 位于稳定侧,约等于40,稳定壁面的换热性能相比于非稳定壁面处于劣势,强化通道内的传热要从强化稳定侧的换热着手。

3 结 论

通过对径向旋转方通道内的湍流混合对流在4个 Gr_τ 工况下的直接数值模拟,以及与大涡模拟结果进行比较,并对计算结果的统计数据进行分析,得到了以下结论。

(1)湍流直接数值模拟与大涡模拟获得的计算结果在平均速度和温度模拟方面差别不大,二次流结构有较明显的不同,一阶统计量如脉动强度会出现明显的差别。

(2)最大平均主流速度和最小温度出现在非稳定侧,并且在通道中心区域出现了 Taylor-Proudman 区域,速度和温度都随 Gr_τ 的增加而增大。

(3)速度脉动强度随 Gr_τ 的增加而增强;温度脉动强度在非稳定壁面先增强后减弱,在稳定壁面则先减弱再增强。

(4)在柯氏力和离心浮升力作用下非稳定壁面的换热能力最强,侧壁面次之,稳定壁面的换热能力最弱,应强化稳定壁面的换热。

参考文献:

- [1] 韩介勤,杜达 S,艾卡德 S V. 燃气轮机传热与冷却技术 [M]. 程代京,等译. 西安:西安交通大学出版社,2004:305-307.
- [2] MURATA A, MOCHIZUKI S. Large eddy simulation with a dynamic subgrid-scale model of turbulent heat transfer in an orthogonally rotating rectangular duct with transverse rib turbulators [J]. Int J Heat Mass Transfer, 2000, 43(7): 1243-1259.
- [3] MURATA A, MOCHIZUKI S. Effect of centrifugal buoyancy on turbulent heat transfer in an orthogonally rotating square duct with transverse or angled rib turbulators [J]. Int J Heat Mass Transfer, 2001, 44(20): 2739-2750.
- [4] PALLARES J, DAVIDSON L. Large-eddy simulations of turbulent flow in a rotating square duct [J].

(下转第43页)