

文章编号: 1006-4710(2012)04-0469-05

并排方柱绕流的大涡数值模拟及显示

赵小军, 魏文礼

(西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 采用大涡模拟的方法对雷诺数为 7.5×10^5 并排双方柱绕流流场进行了数值模拟, 并对所采用的模拟方法进行了实验验证。利用有限体积法和 SIMPLE 算法计算程式, 对双方柱三维物理模型求解不可压缩的 N-S 方程。计算得到了方柱绕流的速度场和涡量场以及不同时刻的速度分量分布情况。对方柱后速度场、涡旋形成、脱落以及波动性等问题进行了分析, 结果符合物理学规律。

关键词: 大涡模拟; 涡量; 流场

中图分类号: TV131.2 文献标志码: A

Large Eddy Numerical Simulation and Display of Hydraulic Characteristics of Flow around Two Parallel Square Cylinders

ZHAO Xiaojun, WEI Wenli

(Faculty of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Large eddy simulation method is adopted to carry out numerical simulation of flow fields around two parallel square cylinders with Reynolds number of 7.5×10^5 , and the adopted simulation method is tested via experiments. The finite volume method and SIMPLE algorithm are used to solve the incompressible N-S equations. The flow velocity and vortices fields around two square cylinders the distribution conditions of velocity components at different time are obtained, and the velocity field, vortex formation, vortex loss and other behaviors are analyzed. The simulation results are in agreement with the laws of physics.

Key words: large eddy simulation; vortices; flow field

当流体绕过非流线型结构时, 在一定的工况下, 会发生结构物后的漩涡脱落现象, 周期性交替产生的漩涡会产生与来流方向垂直的流体作用力, 致使结构产生振动, 严重时会导致结构物的损坏。方柱群广泛应用于工程领域, 对方柱群的水力特性研究具有重要的意义。决定绕流流态的是雷诺数 (Re) 的值, 当 $Re < 5$ 时, 流动不发生分离; $5 < Re < 40$, 在方柱后面出现一对固定的旋涡; $40 < Re < 150$, 旋涡逐渐扩大, 发展到一定大小时从方柱脱落, 柱体周围又产生新的旋涡。随着时间的推移, 在柱后形成周期性摆动的旋涡, 这就是著名的卡门涡街。

针对方柱绕流的研究, 许多学者从不同的方向做了大量的工作。研究方法主要有实验测量和数值模拟等方法, 通过实验数据和模拟结果总结流动规律。文献[1]对绕方柱定常流动和非定常流动进行

了详细的数值模拟, 总结了绕流由定常流动过渡到非定常流动的临界雷诺数范围。文献[2]对单方柱进行了数值模拟研究, 通过模拟方法计算了方柱四周的平均压力系数分布, 与物理模型试验结果吻合较好, 流动现象也得到了模型试验的证实。文献[3]对三维方柱绕流问题作了大涡模拟计算研究, 将基于虚拟压缩方法的不可压缩流动求解程序用于三维方柱不可压缩流的大涡模拟计算, 对比文献结果, 表明该方法应用于复杂湍流的大涡模拟计算是可行的。文献[4]采用大涡模拟(Les)和 $\kappa-\varepsilon$ 紊流模型对方柱绕流进行了数值模拟, 并且结合试验进行了对比, 详细分析了方柱附近区域的流动特性, 认为大涡模拟能够取得更好的模拟结果。文献[5]对雷诺数为 2.2×10^4 非定常方柱绕流进行了计算, 采用两种亚格子湍流模化方法, 计算结果表明, 联合

收稿日期: 2012-04-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51178391)。

作者简介: 赵小军(1986-), 男, 四川合江人, 硕士生, 研究方向为计算流体力学。E-mail: zhao-xiaojun@foxmail.com。魏文礼(1965-), 男, 陕西大荔人, 教授, 博士, 研究方向为计算水力学和环境水力学。E-mail: Wei_wenli@126.com。

RANS/LES方法即使在较粗的网格上也能得到较好的结果。亚尺度湍流模化与计算网格的关联程度对结果有较大的影响。文献[6]对三方柱绕流进行了大涡模拟,模拟得到了上下游方柱的升力系数并对其进行了频谱分析,方柱尾流存在强烈的非对称相互干扰,三维特性非常明显。文献[7]等对雷诺数为21 400的方柱绕流进行了数值模拟,并将模拟结果与多普勒激光测速仪的测试结果进行对比,着重分析比较方柱近壁区域涡街和流速分布。

本文采用水作为绕流流体,对高雷诺数情况下双方柱绕流的流动分离和涡街形成、脱落以及旋涡的推移演变过程进行了模拟。得到了不同时刻绕流场和涡量场以及方柱的阻力系数,并对绕流过程进行了频谱分析。

1 控制方程和数值方法

大涡模拟是介于传统雷诺平均方法和直接数值模拟方法之间的一种数值计算方法,其基本思想是:通过滤波函数把流场的所有变量分成大尺度量和小尺度量,大尺度量通过数值计算得到,而小尺度量通过亚格子模型建立与大尺度量的关系。把流场结构分成大尺度结构和小尺度结构,对大尺度结构,大涡模拟得到的是真实的结构状态,而小尺度结构虽然可以进行模拟,但是由于其具有各向同性的特点,对各方向影响相同,因而建立亚格子模型更具有普遍意义。在选择合适模型的条件下,大涡模拟可以得到很高的精度。经过空间滤波的大涡模拟控制方程如下:

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

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_i} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + v \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_i \partial x_j} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

($\bar{\cdot}$)表示格子滤波后的变量,方程(2)中 $\bar{\tau}_{ij} = -(\bar{u}_i \bar{u}_j - \bar{u}_i \bar{u}_j)$ 为亚格子湍流尺度应力,反映了大涡和小涡尺度间的作用,需要通过SGS(Sub-Grid Scale)模型来封闭,利用涡粘性模型。

$$\bar{\tau}_{ij} - \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} = 2 \nu_{\tau} \bar{s}_{ij} \quad (3)$$

式中, $\bar{s}_{ij} = \frac{1}{2} (\bar{u}_{i,j} - \bar{u}_{j,i})$, $\nu_{\tau} = C \bar{\Delta}^2 |\bar{s}|$, $|\bar{s}| = |2 \bar{s}_{ij} \bar{s}_{ij}|^{1/2}$, $\bar{\Delta}$ 表示网格滤波尺度, C 为模型系数。

Germano等人^[8]利用二次滤波和最小二乘法将 C 由当时当地的湍流大涡确定出来。

$$C = - \frac{\langle L_{ij} M_{ij} \rangle_p}{2 \bar{\Delta}^2 \langle M_{ij} M_{ij} \rangle_p} \quad (4)$$

其中, $\langle \cdot \rangle_p$ 代表某种空间平均方法, $L_{ij} = \bar{u}_{ij} \hat{u}_{ij} -$

$\hat{u}_i \hat{u}_j$, $M_{ij} = (\hat{\Delta}/\bar{\Delta})^2 |\bar{s}| \hat{s}_{ij} - |\hat{s}| \hat{s}_{ij}$, (\cdot) 代表经过滤波后的变量。

求解控制方程时,对流项的时间推进利用Runge-Kutta方法,黏性项通过二阶半隐 Crank-Nicolson 格式计算。黏性项和对流项中的空间导数采用二阶中心差分离散。整个数值方法在时间和空间上都是二阶精度。

2 模型验证及边界条件

2.1 模型验证

文献[9]对方柱绕流进行了比较系统全面的实验研究,本文采用该实验成果对本文所采用的大涡模拟方法进行验证。文献中采用的实验模型如图1所示。图2为中间截面沿水流方向时均速度分布图。从图2可以看出,采用该模拟方法计算得到的 X 方向时均速度和实验值吻合比较好。

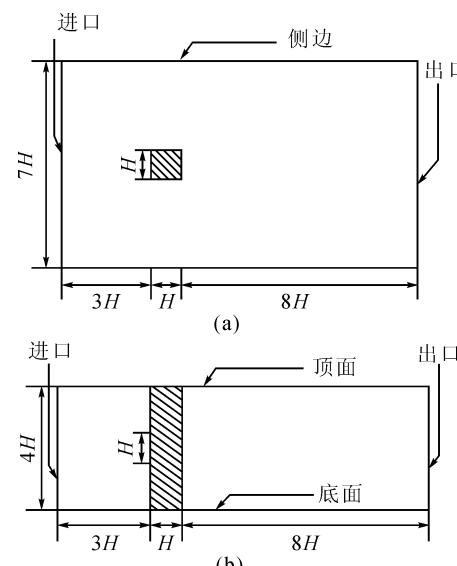


图1 实验模型

Fig. 1 Geometry of the experiment

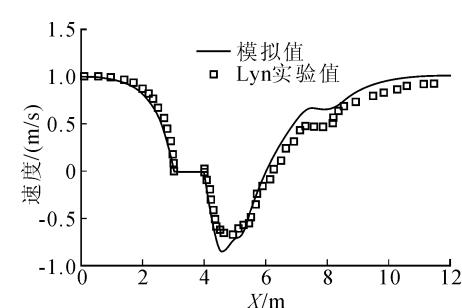


图2 时均顺流向速度

Fig. 2 Time-averaged streamwise velocity

2.2 几何模型和边界条件

计算区域如图 3 所示,双方柱之间距离 l 与方柱边长 D 比值 l/D 等于 1,横向长度 X 为 $10l$,纵向长度 Y 为 $6l$ 。Z 方向高度为 $2l$ 。方柱贯穿于整个计算区域内,整个计算区域均采用结构化网格进行划分。因为涡街在方柱附近区域产生,并随着时间推移向下游脱落,所以在方柱附近以及下游区域进行网格加密,网格划分示意图如图 4 所示。

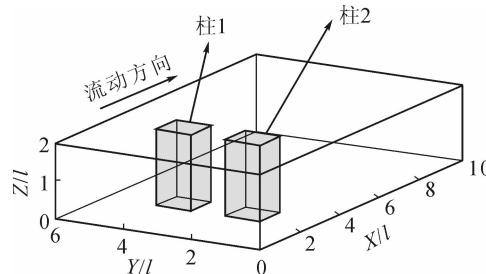


图 3 计算区域
Fig. 3 Computational domain

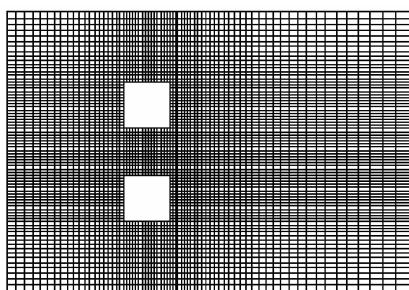


图 4 计算网格
Fig. 4 Grid of the computational domain

假设流动为充分发展紊流,进口边界按本质边界条件给出:入口边界为速度进口,雷诺数为 7.5×10^5 。出口为自由出流。两侧和上下边界按对称边界给出,方柱表面采用标准壁面函数进行处理。入口速度大小按均匀流给出。时间步长取为 0.01,残差精度控制在 10^{-5} ,保证开始迭代的库朗数较小。

3 计算结果显示与分析

3.1 速度场显示与分析

图 5 给出了某时刻方柱绕流速度矢量图。从图 5 可以看出,沿流动方向出现大小不同的涡结构,并随着流动向下游移动。

图 6 为双方柱间距比 $l/D = 1$ 时,不同时刻速度等值线分布图。从图 6 可以看出,由于方柱的束窄作用,在方柱中间和两边区域存在一个高速区。随着时间的推移,形成高速区和低速区相间波动有规律地流向下游。

图 7、8、9 为不同时刻速度分量等值线图,图 10 为某时刻三维速度空间分布图。

从图 6、7 可以看出,沿 X 轴方向速度分量等值线分布与速度等值线分布规律相似,在沿主流方向和主流法向方向均有一个高速区,并随着时间推移向下游移动。沿主流垂向速度等值线分布如图 8 所示,速度在 Y 方向呈正负交替对称分布,说明有涡街产生并且呈现对称分布。

沿方柱展向速度分布如图 9 所示,从图 9 可以看出,在绕过方柱以后,速度沿 Z 轴方向呈现出上下波动的现象,表明方柱绕流呈现出明显的三维特性。

图 10 表示速度的空间分布图,从速度的空间分布可以形象地观察到速度分布的规律性。

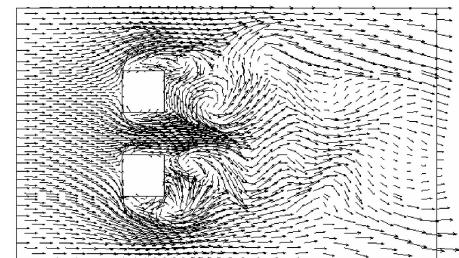


图 5 速度矢量图
Fig. 5 Velocity vector distribution

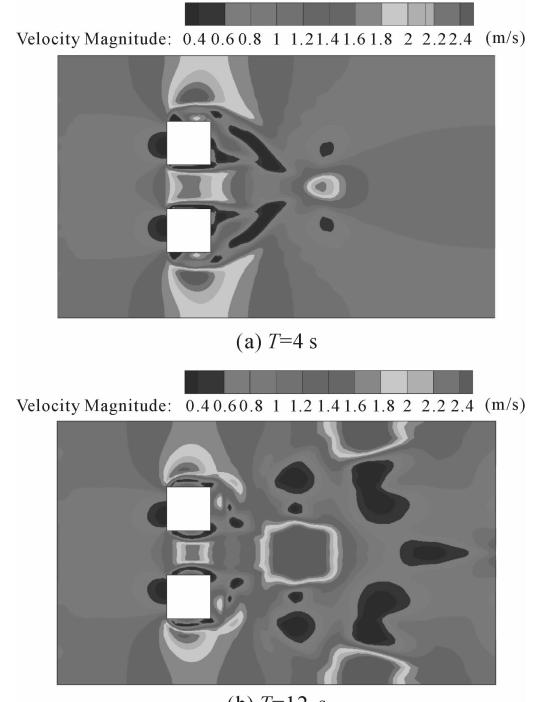


图 6 速度等值线图
Fig. 6 Velocity contour distribution

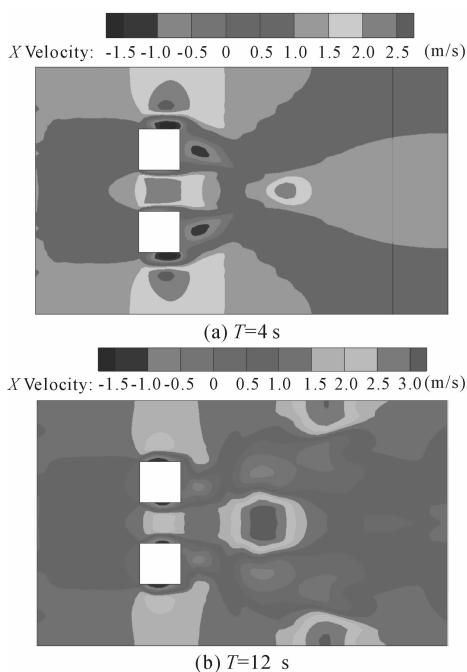


图 7 X 方向速度等值线图
Fig. 7 Velocity distribution in X direction

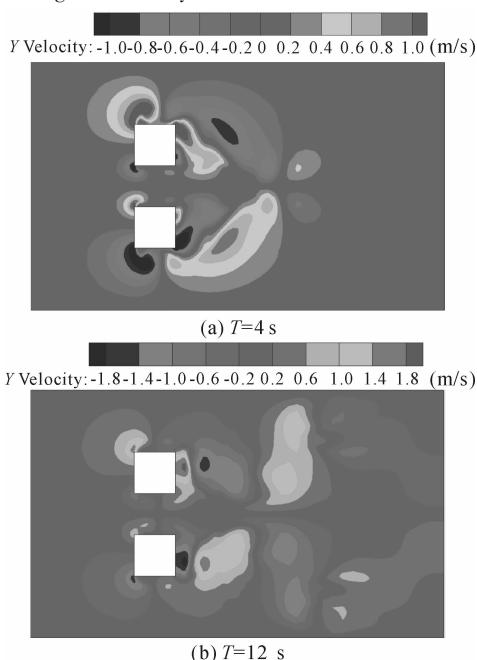


图 8 Y 方向速度等值线图
Fig. 8 Velocity distribution in Y direction

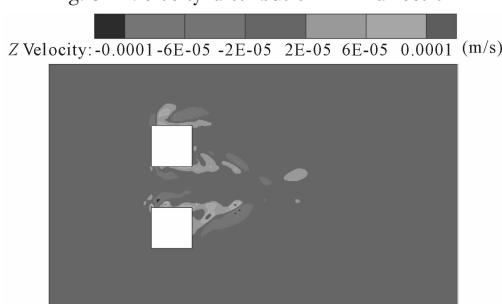


图 9 Z 方向速度等值线图
Fig. 9 Velocity distribution in Z direction

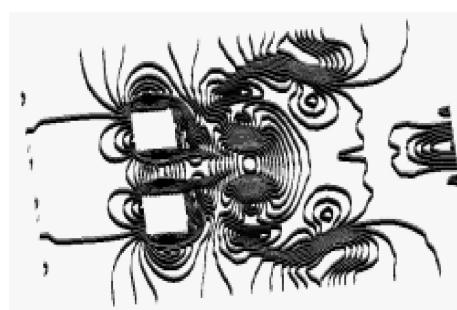


图 10 某时刻速度等值线图
Fig. 10 Velocity distribution

3.2 涡量场显示与分析

很多学者对柱体绕流的研究表明:当流体绕过柱体,雷诺数达到一定大小的条件下,在方柱后面会产生周期性的卡门涡街,并随着时间的推移向下游脱落。

同一雷诺数下,不同时刻方柱绕流涡量分布如图 11 所示。

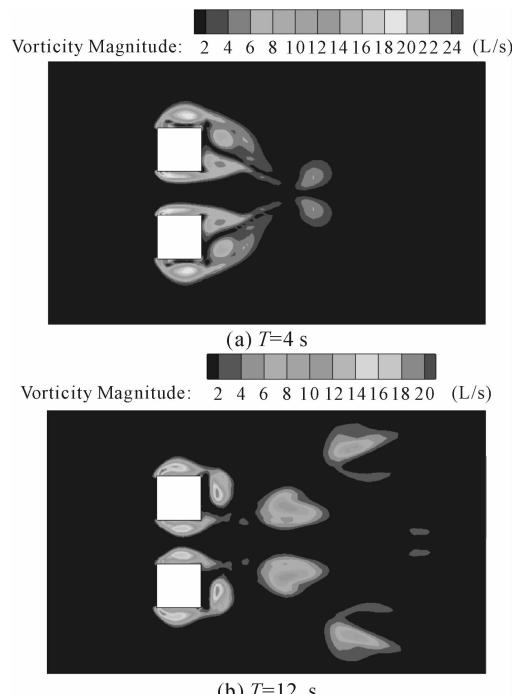


图 11 涡量等值线图
Fig. 11 Vorticity magnitudes

起始阶段,在方柱后面产生两个较大的涡街,随着时间的推进,涡街脱离方柱向下游移动,涡街能量也随着流动而逐渐耗散。由于流动不间断,在方柱后面又产生新的旋涡。随着时间的推移,在方柱下游,形成了规律的涡街分布。

图 12 表示某时刻涡量空间分布图。在方柱附近,涡量值最大,越往下游,涡旋脱落分离,涡量值越小。

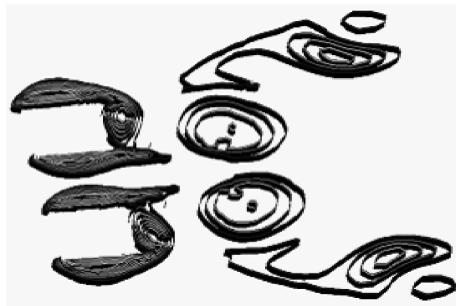


图 12 某时刻涡量等值线图

Fig. 12 Computed vorticity magnitudes at a transient

3.3 周期性分析

方柱 1 和 2 阻力系数(C_d)随时间(t)变化如图 13 所示。从图 13 可以看出,上游来流经过方柱的束窄断面,流速变大,压强变小,方柱迎流面与背流面产生压差阻力。同时可知,卡门涡街从方柱近壁区域产生,脱落到最后传递到下游,漩涡交替脱落过程较稳定,这一过程的周期约为 5 s。

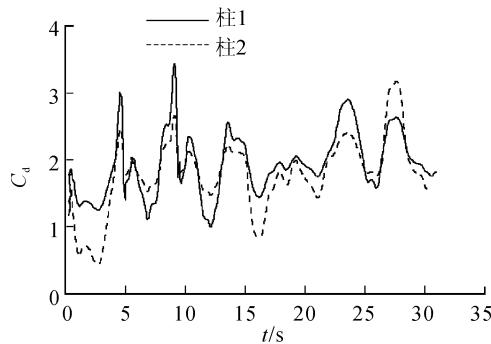


图 13 阻力系数

Fig. 13 Drag coefficient

4 结 论

本文采用大涡模拟的方法对定常来流条件下两并排方柱的绕流进行了数值模拟,计算了方柱绕流的速度场和涡量场。速度大小呈规律性的交替分布,在主流方向有三个稳定的高速区,方柱展向具有明显的波动性。涡街在方柱附近产生,放大并随着时间的推移向下游脱落。通过观察每个时间段方柱下游涡街的变化,结合速度场分布以及方柱阻力系数的分析可知,涡街从方柱近壁区域产生、脱落到最后传递到下游的周期大约为 5 s。

参考文献:

[1] 张宁. 混合对流方柱涡旋脱落及对传热影响的数值模拟研究[D]. 武汉:华中科技大学,2004.

Zhang Ning. Numerical study of the vortex shedding from a square cylinder and its effects on the heat transfer of mixed convection[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2004.

- [2] 蒋定国,戴会超,王玲玲,等. 方柱绕流的大涡模拟[J]. 三峡大学学报:自然科学版,2007,1(4):16-19.
Jiang Dingguo, Dai Huichao, Wang Lingling, et al. Large eddy simulation of flow around a square cylinder[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Science), 2007, 1(4):16-19.
- [3] 邓小兵,张涵信,李沁. 三维方柱不可压缩绕流的大涡模拟计算[J]. 空气动力学报,2008,26(2):167-173.
Deng Xiaobing, Zhang Hanxin, Li Qin. Large eddy simulation of 3-dimensional incompressible flow around a square cylinder[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2008, 26(2): 167-173.
- [4] Yoshihide Tominaga, Akashi Mochidai, Shuzo Murakami, et al. Comparison of various revised $\kappa-\epsilon$ models and LES applied to flow around a high-rise building model with 1:1:2 shape placed within the surface boundary layer[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96(4): 389-411.
- [5] 唐鹏,韩省思,叶桃红,等. 联合 RANS/LES 方法数值模拟方柱绕流[J]. 中国科学技术大学学报,2010,40(12):1287-1292.
Tang Peng, Han Xingsi, Ye Taohong, et al. Hybrid RANS/LES simulation of flow past a square cylinder[J]. Journal of University of Science, 2010, 40(12): 1287-1292.
- [6] 赵心广. 三方柱绕流的大涡模拟及频谱分析[J]. 水科学与工程技术,2011,28(4):28-32.
Zhao Xinguang. Large eddy simulation and spectrum analysis of flow around three square cylinders[J]. Water Science and Engineering Technology, 2011, 28(4): 28-32.
- [7] Minguez M, Brun C, Pasquetti R, et al. Experimental and high-order LES analysis of the flow in near-wall region of a square cylinder[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2011, 32:558-566.
- [8] Germano M, Piomelli U, Moin P. A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model[J]. Phys Fluids A, 1991, 3(7): 1760-1765.
- [9] Lyn D A, Einav S, Rodi W, et al. A laser-Doppler velocimetry study of ensemble averaged characteristics of turbulent near-wake of a square cylinder[J]. J Fluid Mech, 1995, 304:285-319.

(责任编辑 王卫勋)