

横掠管束周期性充分发展通道内流动 与换热的非线性特性

雍青青¹, 杨 茉¹, 苏 丹², 王治云¹, 王金龙¹, 徐文栋³

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 现代都市建筑设计院, 上海 200070;

3. 山东省环能设计院有限公司, 山东 济南 250100)

摘 要: 横掠管束模型抽象于水利工程中的绕流柱体群或换热器中的绕流管束。引用周期性边界条件将模型简化, 通过数值模拟技术考察了不同雷诺数下的流场和温度场。经过比较发现随着 Re 数的增大, 流动由稳态转变为出现较大的涡, 接着涡变小, 随后又变大这样的循环过程。这是由于随着 Re 数的增大, 惯性力、粘性力与不断生成的微小漩涡三者的共同作用导致。换热过程与流动密切相关。此外, 研究了监测点处速度随时间的变化趋势。结果表明: 流动呈现出非线性特性, 随着 Re 数的增大, 数值解从稳态过渡到周期性振荡最后发展为混沌的状态。

关键词: 横掠管束; 流场; 温度场; 周期性边界条件; 非线性特性

中图分类号: TK124

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)03-0029-05

Nonlinear characteristics of periodically fully developed flow and heat transfer in cross-flow tube bundle channel

YONG Qingqing¹, YANG Mo¹, SU Dan², WANG Zhiyun¹, WANG Jinlong¹, XU Wendong³

(1. College of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology,

Shanghai, 200093, China; 2. Modern Urban Architectural Design Institute of Shanghai, Shanghai 200070, China;

3. Huanneng Design Institute of Shandong Province, Jinan 250100, China)

Abstract: The model of cross-flow tube bundle channel look like column body of surrounding flow in water conservancy project or tubes of surrounding flow in heat exchange. The paper introduced periodic boundary condition to simplify model, and investigated flow field and temperature field in different values of Re by numerical simulation. It is discovered that with the increase of Re number, flow changes from stable to the appearance of bigger vortex, then becomes smaller and then grow bigger, which is a circulation process. The reason is that with the increase of Re number, the inertial force, viscous force and micro vortex of continuous generation combine action. The process of heat transfer are closely related to flow. In addition, the change trend of the speed at monitoring point with time is investigated, it is found that the flow exhibits nonlinear properties. With the increase of Re number, the numerical solution from steady state to periodic oscillation and finally develop into a state of chaos.

Key words: bundle corss-flow tube; flow field; temperature field; periodic boundary condition; nonlinear characteristics

1 研究背景

流体横掠管束模型来自于工程实际中的绕流圆柱问题。实际工程中会碰到很多绕流圆柱问题, 如水流对桥梁、海底输运管线、桩基码头等的作用, 又

如风对化工塔设备、高空电缆等的作用, 以及换热器内的绕流管束问题。流体流经柱体时, 由于粘性力的存在, 会在柱体周围形成附面层的分离; 而由于圆柱的存在, 会在圆柱迎水面产生壅水现象, 同时也增加了圆柱的受力, 使得绕流圆柱问题变得十分复杂。

收稿日期: 2013-12-24; 修回日期: 2014-05-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(51306121); 国家自然科学基金项目(51276118); 国家自然科学基金海外合作基金项目(51129602)

作者简介: 雍青青(1984-), 女, 宁夏中卫人, 博士研究生, 主要从事传热及数值技术的研究。

通讯作者: 杨 茉(1958-), 男, 吉林省吉林人, 教授, 博士生导师, 主要从事传热及数值技术的研究。

目前有大量研究致力于绕流圆柱的流动机理和水动力学规律的研究。唐士芳等^[1]通过试验综合考察了斜坡码头以及港口各种建筑物之间的相互遮流现象,对圆柱墩进行了遮流试验研究。试验得出,因后墩处在前墩的旋涡区内,水流脉动强度增大、频率增高;并测出在旋涡区内流速与来流方向相反,即为负流速。Ball^[2]指出来流方向与桩群所成角度越大,桩群的干扰作用越大,水流阻力也相应增大。廖俊^[3]等人使用表面涡量法研究了高雷诺数下不同排列方式的绕流双圆柱的流动状态。戴绍仕^[4]对低雷诺数($Re < 3 \times 10^5$)时孤立圆柱及双圆柱的水动力特性进行了数值试验计算,并分析了各种阻力系数随 Re 的变化规律。茹卡乌斯卡斯^[5]对绕流管束问题做了大量详尽的实验,为后人研究此类问题提供了宝贵的实验数据做参考。Sparrow 等^[6]用数值模拟技术比较分析了带翅片和不带翅片的管束传热问题。

通过对文献的分析总结可以看出,对绕流圆柱中的水流结构影响的研究主要集中在均匀流条件下单柱及双柱绕流上,对圆柱群绕流的研究大多通过数值模拟的方法来研究。当多个柱体进行纵向排列、横向排列及圆柱群排列时,柱体周围的水流结构更加复杂化,流动和换热出现振荡、分岔及混沌等非线性现象。作为混沌研究的一部分,振荡、分岔和突变现象等问题一直倍受关注^[7]。在传热学领域,国内外学者也早已开始关注此类非线性特性问题,但绝大多数研究集中于经典、成熟的物理模型。如 Ozoe 等^[8]研究了 Pr 和 Ra 在较宽变化范围内的 Bernard 对流;孔祥言等^[9-10]用高阶差分计算方法研究了底部加热的方腔内多孔介质中的对流中的分岔和混沌问题;Wang 等^[11]研究了弯管内混合对流的分岔, Mitsuyuki 等^[12]研究了振荡的自然对流。Deshpande 等^[13]报导了顶部驱盖流方腔内混合对流换热解的振荡和分岔现象。

对于绕流管束问题,当管束数量较多时,用数值方法计算这样数量庞大的管束要求有很高的计算机硬件配置,而且也会耗费大量时间。Patankar 等^[14]将周期性充分发展概念引入后,可对管束群模型做简化。简化后的周期性横掠管束模型更为简便,也更为清晰地呈现了流场与温度场。对于横掠管束的周期性充分发展流动的非线性特性这方面的研究还相对较少的。这是由于周期性充分发展流动模型近几年才发展起来,非线性问题的引入也较为新颖。近期对这方面所做的研究工作主要有:杨荣等^[15],

在对横掠管束周期性充分发展对流换热系统的数值计算中,所取计算条件都与时间无关,但在某些参数下,流场和温度场的数值解是振荡的,说明本是确定性的系统出现非稳定性现象。赵明等^[16]在对横掠管束周期性充分发展对流换热系统的数值计算中,指出解存在分岔。

本文所研究的模型背景正是从锅炉膜式省煤器抽象而来,主要工作是在杨荣等^[17]已研究工作基础上,用非稳态模型对横掠管束周期性充分发展流动问题进行数值模拟,观察不同 Re 数下流动所出现的振荡和分岔特性。

2 基本模型与数学描述

2.1 基本模型

由于膜式省煤器具有防磨,减少积灰等特点^[18],本文所研究的模型背景正是从如图 1(a)所示锅炉膜式省煤器抽象而来。计算模型为流体通道的一个几何周期模型,如图 1(b)所示。管壁温度 T_w ,迎面而来的流体温度为 T_∞ 。流体假设为牛顿流体,取 $Pr = 0.7$,即为空气。通道的几何结构相应的符号已在图 1 中标示出。管子直径取无量纲尺寸 D ,选取模型长为无量纲尺寸 XL ,宽为无量纲尺寸 YL 。本文中 $D = 0.48$, $XL = 2.6$, $YL = 1.5$ 。

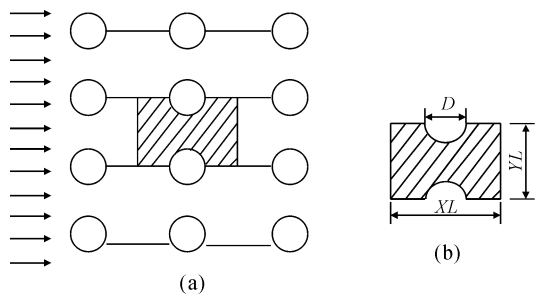


图 1 计算几何模型示意图

2.2 数学描述

假定流动和换热为常物性二维并且已进入了所谓的周期性充分发展,其无量纲化的控制微分方程组及相应边界条件如下:

连续性方程:

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial U}{\partial F} + U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial F} + U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) \quad (3)$$

能量方程:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial F} + U \frac{\partial \Theta}{\partial X} + V \frac{\partial \Theta}{\partial Y} = \frac{1}{RePr} \left(\frac{\partial^2 \Theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial Y^2} \right) \quad (4)$$

无量纲变量:

$$F = \frac{tu_R}{D}, X = \frac{x}{D}, Y = \frac{y}{D}, U = \frac{u}{u_R}, V = \frac{v}{u_R}$$

$$P = \frac{p}{\rho u_R^2}, \Theta = \frac{T - T_w}{T_{b,x} - T_w}, T_{b,x} = \frac{\int_0^A \rho u c_p T dS}{\int_0^A \rho u c_p dS},$$

$$Re = \frac{u_R D}{\nu}$$

式中: F 为无量纲时间, ν 为动力粘度。

因为换热器内管子数量较多,若将整个换热器模型作为计算区域,则会耗费大量时间和要求计算机有较高配置,显然是不合理的,并且也不能清楚捕捉到单根管周围的流动细节。根据周期性充分发展的假设,计算区域选定为流动与换热已经进入充分发展的某个单元,如图 1(b) 所示。左右边界给出周期性条件:

$$U(X, Y) = U(X + XL, Y) \quad (4)$$

$$V(X, Y) = V(X + XL, Y) \quad (5)$$

$$\Theta(X, Y) = \Theta(X + XL, Y) \quad (6)$$

上下边界给出固体无滑移边界条件:

$$Y = 0, V = 0, U = 0, \Theta = 0.5$$

$$Y = YL, V = 0, U = 0, \Theta = 0.5$$

计算时采用了大系数法处理圆管部分,使得 U 、 V 的值接近为无穷小,其上附加了以下条件:

$$U = 1 \times 10^{-15}, V = 1 \times 10^{-15}, \Theta = 1 \times 10^{-15}$$

计算的初始条件为:

$$U = 1, V = 0, \Theta = 0.5$$

2.3 数值方法

数值计算采用基于原始变量的有限差分法, QUICK 差分格式,并用 SIMPLE 方法处理压力与速度耦合。圆管轮廓用阶梯逼近近似,整体求解整个计算区域,圆管区域速度采用大系数法处理^[18]。计算区域网格为均分网格,非稳态模型,时间步长取 $\Delta F = 0.001$ 。

茹卡乌斯卡斯^[5]曾在实验条件下对流体外掠管束做了大量实验,总结出相应的实验关联式。本论文模型的 Nu 数可通过下面关联式计算得到:

$$Nu_f = 0.52 Re_f^{0.5} Pr_f^{0.36} (Pr_f / Pr_w)^{0.25}, Re = 10^2 \sim 10^3$$

为了验证数值结果的可靠性,将相同工况下所得数值结果与实验关联式计算结果作对比,发现在网格数为 244×162 的时候,两者误差在 2.78%,吻

合基本良好。

3 结果与分析

3.1 流场与温度场特性分析

本文首先对不同的 Re 进行了流场计算,得出图 2 所示具有代表性流场的图,流体流动方向为从左至右。经过大量计算发现, Re 在 5 到 95 之间流场都呈现稳定流动,当 Re 增大到 100 的时候,在两个管的后方出现两个对称的涡,流动一度出现滞止区。图 2(b) 为 $Re = 100$ 时对应的流线图。增大 Re 数,管后的涡变小变集中,滞止区变小,图 2(c) 为 $Re = 195$ 的流线情形。 Re 再增大时,管与管之间的涡再次增大,图 2(d) 为 $Re = 275$ 的情形,当 $Re = 300$,如图 2(e),流场情况和 Re 数为 275 类似。接着增大 Re 数,一个颇为有趣的现象发生,那就是 $Re = 400$,图 2(f) 时的流线和 $Re = 195$ 的流场图颇像。类似的,增大 Re ,发现当 $Re = 500$ 时的流线图(图 2g)和 Re 数为 300 时的颇像。通过分析可知,当 Re 增大,速度增大,惯性力比粘性力大很多,于是出现了分层脱离,形成了较大的涡。 Re 继续增大,速度进一步增大,此时许多微小漩涡形成,破坏了之前形成的大涡,于是新的相对平衡出现,即形成了较小的涡。此时接着增大 Re 数,涡渐渐增大,当 Re 增大到一定程度,新形成的微小漩涡又一次打破了原来大涡的流场,形成小的速度梯度较大的涡,于是新的平衡出现。此情况周而复始直到强烈的湍流脉动作用下,出现不对称的卡门涡的形成与脱落。此情况将在后续工作中展开。

图 3、4 所示为 Re 为 275 时标上数值的流场与温度场的细节图。从图 3 流线图可以看出,上方管前后出现为顺时针漩涡,下方管出现逆时针漩涡。从图 4 温度等值线图可看出,由于受管前后漩涡流的影响,等温线发生弯曲。这是因为流体被涡卷吸,导致等温线发生弯曲。

3.2 非线性特性分析

对不同 Re 进行大量的数值计算后,发现当 Re 改变时,无量纲速度 U 随着时间 F 的变化有的渐渐趋于稳定,有的却出现了振荡。图 5 所示为具有代表性的 Re 分别为 95、175、500 时监测点处无量纲速度 U 随时间的变化趋势。从图 5(a) 可看出,当 Re 为 95 时速度值经过一段时间后趋于稳定,速度值不再随着时间改变,这时候为稳态。增大 Re ,速度值渐渐开始出现振荡。从图 5(b) 中可以看出速度值刚开始是稳定的,经过一段时间速度值开始出现振

荡,但仔细观察这种振荡,还是有规律的,呈周期性振荡规律,从图 5(c)中可看出,当 Re 为 500 时,速

度值随时间的推进出现了较大的振荡,且振荡没有规律。

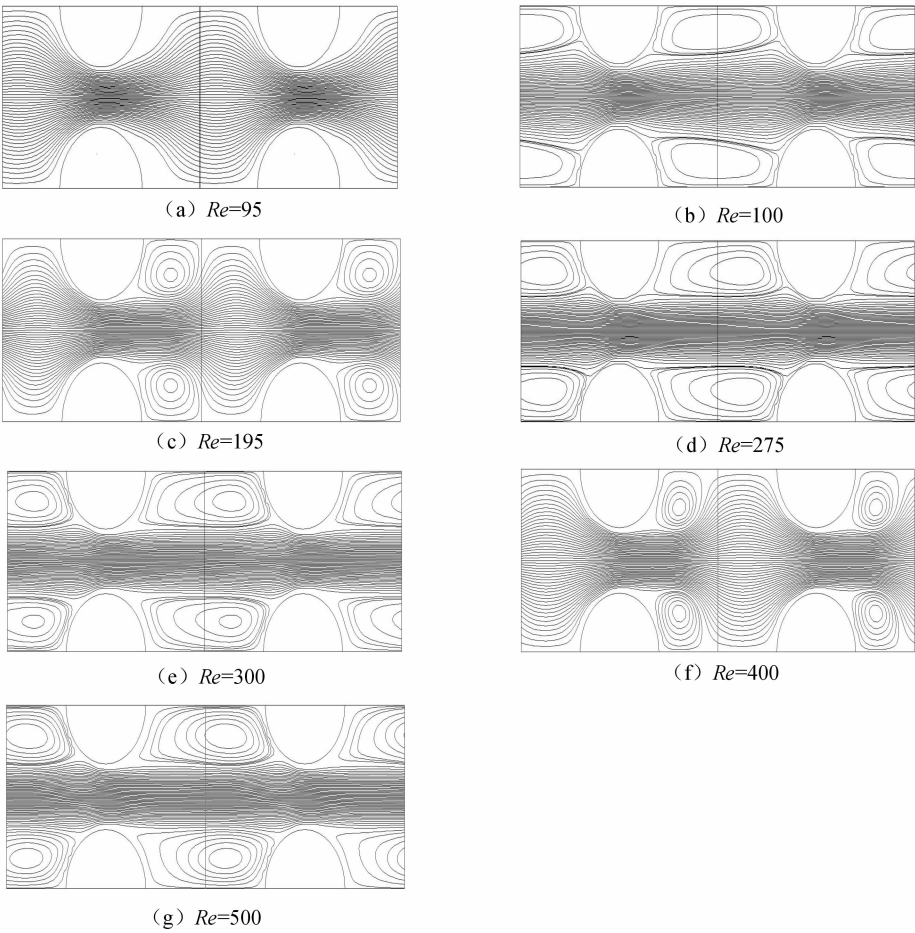


图 2 不同 Re 数对应的流线图

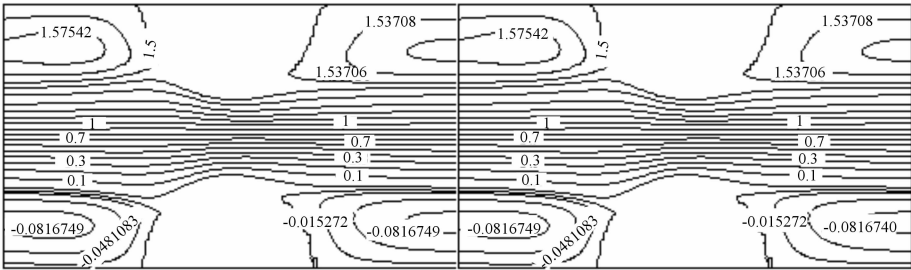


图 3 Re 为 275 时的流线图

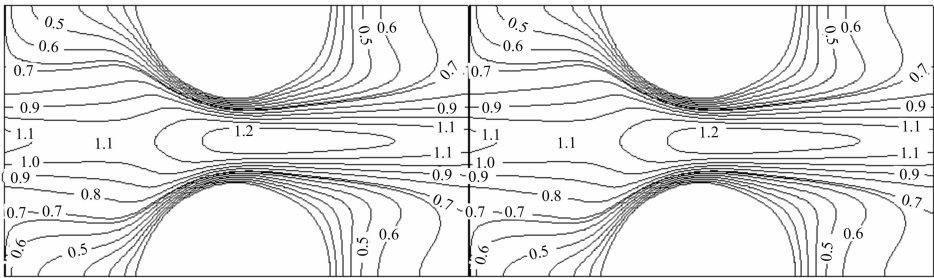


图 4 Re 为 275 时的温度等值线图

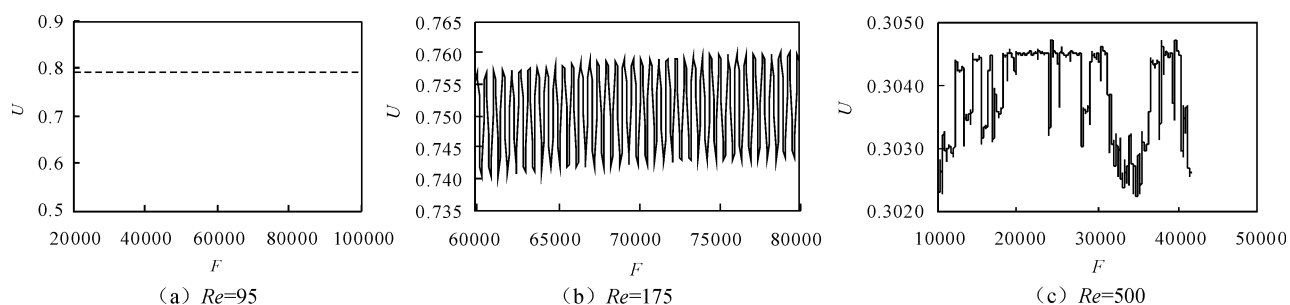


图5 不同 Re 数时监测点处速度 $U(180,80)$ 随时间 F 的变化趋势

4 结 语

本文考察了流体横掠管束的流动换热特性,以及在这期间出现的非线性特性,得出以下结论:

(1)通过对不同雷诺数的数值计算发现,随着 Re 的增大,流动由稳态转变为出现较大的涡,接着涡变小,接着又变大这样的一个循环过程。换热过程与流动密切相关。

(2)随着雷诺数增大,数值解由稳态转变为周期性振荡,最后发展为混沌。

参考文献:

- [1] 唐士芳,李 蓓. 桩群阻力影响下的潮流数值模拟研究[J]. 中国港湾建设,2001(5):25-29.
- [2] Ball D J. Simulation of piers in hydraulic models[J]. Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division, 1974, 100(1): 23-34.
- [3] 廖 俊,景思睿. 高雷诺数下双圆柱绕流的数值模拟[J]. 水动力学研究与进展(A辑),2001,16(1):101-110.
- [4] 戴绍仕. 孤立圆柱及串列双圆柱水动力数值实验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2004.
- [5] 茹卡乌斯卡斯. 换热器内的对流传热[M]. 马昌文,等译. 北京:科学出版社,1986.
- [6] Sparrow E M, Kang S S. Longitudinally finned cross-flow tube banks and their heat transfer and pressure drop characteristics[J]. International Journal of Heat Mass Transfer, 1985, 28(2): 339-350.
- [7] 郝柏林. 从抛物线谈起一混沌动力学引论[M]. 上海:上海科技教育出版社,1993.
- [8] Ozoe H, Ukeba H, Churchill S W. Numerical analysis of natural convection of low Prandtl number fluids heated from below[J]. Numerical Heat Transfer, Part A:Applications; An International Journal of Computation and Methodology, 1994, 26(3): 363-374.
- [9] 孔祥言,余 敏. 多孔介质中对流的周期性解与混沌[J]. 力学学报,1997,29(6):655-661.
- [10] 孔祥言,鹿蓬勃,吴建兵. 多孔介质中二维对流传热的分叉[J]. 计算力学学报,2000,17(3):253-259.
- [11] Wang L Q, Yang T L. Numerical simulation of multiplicity and stability of mixed convection in rotating curved ducts[J]. International Journal of Rotating Machinery, 2005(2):168-178.
- [12] Hatanaka M, Tagawa T, Ozoe H. Numerical computation of oscillatory rayleigh-benard natural convection of gallium in a rectangular region with aspect ratios equal to five [C]//Proc. of Symposium on Energy Engineering in the 21st century (SEE 2000), 2000.
- [13] Deshpande M D, Srinidhi B G. Mixed convection in a lid-driven cavity: Appearance of bifurcation, periodicity and hysteresis[J]. Current Science, 2005, 89(10):1720-1728.
- [14] Patankar S V, Liu C H, Sparrow E M. Fully developed flow and heat transfer in ducts having streamwise-periodic variations of cross sectional area[J]. Heat Transfer, 1997,99(2):180-186.
- [15] 杨 茉,赵 明,叶剑军,等. 非稳态横掠管束周期性充分发展对流传热的数值模拟[J]. 工程热物理学报,2003,24(6):988-991.
- [16] 赵 明,杨 茉,李 娟. 横掠管束周期性充分发展对流传热的混沌分析[J]. 工程热物理学报,2004,25(2):278-280.
- [17] 杨 茉,郜时旺,金 虹. 横掠膜片管束周期性充分发展流动的数值模拟[J]. 东北电力学院学报,1994,14(3):38-43.
- [18] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安:西安交通大学出版社,2001.