

不同流道宽度下流体掠过方柱的 旋涡脱落特性数值模拟

刘丽芳, 陆道纲

(华北电力大学 核科学与工程学院, 北京 102206)

摘要: 方柱结构的旋涡脱落特性一直是学术研究的热点。流体掠过方柱体时在方柱后产生的旋涡脱落有可能引发方柱的流致振动。文章使用 BELIEF 程序, 通过模拟在不同流道宽度条件下流体掠过方柱的旋涡脱落情况, 研究流道宽度对流体掠过方柱的旋涡脱落特性的影响。结果表明: 流体旋涡脱落斯特鲁哈数 (St) 随着流道变窄而增大; 当流道宽度 (H) 远大于方柱迎流面特征尺寸 (方柱横截面边长 w) 时, St 随流道宽度变窄变化缓慢, 流道宽度的变化对旋涡脱落特性的影响很小; 随着流道宽度继续变窄, 流道宽度对流体旋涡脱落特性的影响逐渐增大。当流道宽度与方柱特征尺寸之比 $B(H/w)$ 减小至一定值时, 旋涡脱落频率随流道变窄而急剧增大。

关键词: 旋涡脱落; 方柱结构; 流道宽度

中图分类号: X946

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2010)12-1436-05

Numerical Simulation on Vortex Shedding Character of Single Square Cylinder in Flowing Fluid With Different Widths of Channel

LIU Li-fang, LU Dao-gang

(School of Nuclear Science and Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Study of vortex shedding character on square cylinder is always hot in the academia. Vortex shedding will appear in the case of fluid flow across square cylinder at a certain flow rate, which may induce cylinder vibration. The impactions of channel width to square cylinders' vortex shedding characteristic were computed by the code in the case of cylinders with different channel widths. The results show that Strouhal number (St) increases along with channel width; impaction of channel width on fluid's vortex shedding character becomes stronger gradually; when the ratio of the channel width (H) and barrier size (w) is up to a certain value, slope of line $St-B(H/w)$ will be more gently. It has a tiny contribution to fluid's vortex shedding character when width of channel increases any longer.

Key words: vortex shedding; square cylinder; channel width

流体以一定的流速冲刷固体部件时可能导致固体部件的振动,即流致振动;而固体部件的振动又会影响到流量和流场的重新分布,流体流动与固体部件振动之间构成强烈的耦合关系。流致振动或流固耦合可能造成固体部件发生撞击破坏、部件磨损、出现噪声、应力疲劳等。圆柱结构的流固耦合研究起始于20世纪50年代,目前已有比较完善的理论体系和物理模型。方柱结构由于其换热效果好、结构强度高等优点也在工程中得到广泛应用,例如,反应堆内的板状燃料组件,控制棒导向筒(下部)、燃料组件等均是方柱结构。高速流动流体与方柱结构的耦合强度比相同尺寸直径的圆柱体的耦合强度高。窄通道内方柱结构的流固耦合研究有很高的学术价值和实际应用价值,是研究的焦点及难点。

方柱结构的流固耦合研究很早就引起了人们的广泛关注^[1-7]。Callander^[1]实验研究了水流冲击条件下纵横比为0.25~5的方柱体的诱发振动。Nakamura等^[6]在风洞中进行了 Re 为200~1 000、不同长厚比条件下方柱的旋涡脱落特性研究,并进行了相应的数值模拟。Shuja等^[2]在壁面附近考虑地面效应的前提下,使用控制体积法数值模拟了层流条件下方柱与流道之间的间隙对方柱后旋涡脱落斯特鲁哈数(St)及传热特性 Stanton 数的影响,并得出了 St 与 Stanton 数之间的关系。Mendez^[3]基于有限点方程模拟了流道宽度为17倍方柱边长、二维非定常流动层流条件下方柱后的尾迹流动。Cuhadaroglu^[4]研究了有流体被均匀注入、吸收的渗水方柱周围流场内 St 、阻力系数、升力系数和注入表面的注入速度、吸出表面的吸出速度之间的关系。张绢花^[7]进行了窄通道中 Re 为200不同流速条件下的单个方柱旋涡脱落特性数值模拟研究。李全星、刘丽芳等^[8-9]进行了 Re 为200条件下板厚对方柱的旋涡脱落特性的影响研究,并进行了不同方柱间距条件下平行双方柱的旋涡脱落特性数值模拟。

流体掠过方柱体的流致振动机理涉及粘性流体流动与方柱振动之间的强烈耦合,其流动特性受各方面因素的影响,具有较高的理论研究意义。当流道宽度进一步降低时,流固耦合

增强,并可能引发工程实际中的安全问题。因此,该领域的研究有待进一步深入。

目前,方柱体的流固耦合研究多在流道宽度趋于无限大条件下完成,忽略了流道宽度对流体旋涡脱落特性的影响,且研究多集中在来流速度、柱体长度对旋涡脱落特性的影响以及旋涡脱落特性对传热系数的影响等。有些关于流道宽度对旋涡脱落的影响研究也是在一侧靠近壁面、另一侧为自由边界的条件下进行的。而实际应用中,如反应堆内的控制棒导向筒(下部)、板状燃料组件(方柱的特例)等均是在窄通道内流体冲刷下工作的。本工作将在文献[10] BELIEF 程序的基础上进行修改,编写程序,研究 Re 为200,不同流道宽度条件下刚性矩形通道内两端固支方柱的旋涡脱落特性。

1 理论与方法

1.1 旋涡脱落特性

旋涡脱落特性在一定程度上反映了流场中结构的流致振动特性。无量纲 Re 和 St ^[11]是描述流体绕障碍物旋涡脱落特性的重要参数。

$$Re = uD/\mu \quad (1)$$

式中: u 为来流速度; D 为障碍物尺寸; μ 为流体动力粘度。

St 是表明旋涡脱落特性的相似准则数,与障碍物形状和 Re 有关。由 St 可得旋涡脱落频率:

$$f = St\omega \quad (2)$$

式中: f 为涡街旋涡脱落频率,Hz; ω 为引发涡街的障碍物迎流面宽度,m。

1.2 PCBFC 方法

本文所使用的程序是基于陆道纲开发的BELIEF程序^[10]。在BELIEF程序基础上,将方柱作为1个障碍物置于流场中,针对矩形通道内流体掠过方柱引起的旋涡脱落问题编写程序。程序基于物理组成贴体坐标系(PCBFC),结合任意拉格朗日欧拉坐标法(ALE-BFC)实现网格的移动,数值模拟窄通道中流体掠过方柱时流场的分布情况,网格移动后的压力和速度用Lie导数进行修正,从而实现一种新颖的计算流固耦合的方法。

BELIEF程序用于模拟1个二维矩形容器(无障碍物)中流体自由液面的晃动。PCBFC

方法是一种 BFC 方法,它将物理单元(PC)作为变量,并将物理曲线坐标(PCS)作为分析坐标。该方法对于模拟自由液面或其他流动边界具有很好的数值稳定性和精确性。方柱的旋涡脱落问题涉及粘性流体流动与方柱振动之间的相互作用,利用该程序细化方柱周围网格能精细地模拟出局部区域内的旋涡脱落特性。

1.3 程序的验证

张绢花^[7]在 BELIEF 程序基础上开发出新程序,将数值模拟结果与流体掠过圆柱旋涡脱落理论计算结果进行对比,验证了程序的正确性。刘丽芳与李全星等^[9]利用改进后的 BELIEF 程序数值模拟了 Nakamura 等^[6]无限大流道的风洞中拉长矩形柱体的旋涡脱落特性实验。将数值模拟所得的旋涡脱落 St 与文献^[6]中实验结果进行对比,进一步验证了改进后程序的正确性。本文不再对程序进行验证,直接利用程序进行 $Re=200$ 、不同流道宽度条件下方柱体旋涡脱落特性的模拟研究。

2 不同流道宽度下方柱的旋涡脱落特性数值模拟

2.1 数值模型及说明

取与文献^[6]中相同的参数设置。选取的物理模型为一边长 $w=0.2\text{ m}$ 的方柱,两侧固定在 1 个长为 $L=6\text{ m}$ 的刚性矩形通道内,流体以 $u=0.1\text{ m/s}$ 的初始流速冲刷方柱(图 1)。通过改变流道宽度 H 模拟 $Re=200$ 、不同流道宽度情况下方柱周围流场内的旋涡脱落情况。在下文中,以宽厚比 $B(H/w)$ 表示流道宽度与方柱厚度的比值。

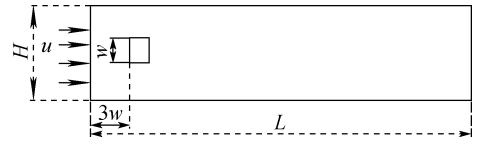


图 1 数值模拟几何模型图

Fig. 1 Model used in numerical simulation

方柱的绕流涉及方柱与流体之间的流固耦合,流场内流速和流量的重新分配会引起方柱的振动,方柱的振动又会影响流场的分布。本文暂不考虑方柱体振动,方柱体两侧固定在矩形通道内,认为方柱为刚性固体,将方柱体网格设置为障碍物单元。

2.2 数值模拟结果

分别取 B 为 25、20、15、13、11、9、7、6、5、4、3 等 11 种情况。使用 BELIEF 程序,划分网格,进行数值模拟,并计算出各种情况下的速度流场图、旋涡脱落频率。由数值模拟得出如下结果。

1) 在各工况下,流场内均有明显的卡门涡脱落现象,随着流道宽度变窄,流场内出现的最大横向流速呈现增大趋势。方柱周围速度流场示于图 2。 $B=25$ 时方柱后方旋涡脱落示意图示于图 3。

2) 方柱周围各点压力随时间周期性波动,图 4 为 $B=6$ 时方柱后点 $A(x=0.75\text{ m}, y=0.75\text{ m})$ 处的压力时程图。方柱后压力的波动频率(阻力变化频率)近似等于方柱正上方、正下方压力波动频率(升力变化频率)的 2 倍,该规律不随流道宽度的改变而改变。

3) 当 $B>13$,即流道宽度相对于方柱横截面边长较大时,在方柱后及方柱上、下方局部区域均有明显而规整的旋涡脱落现象。在远离方

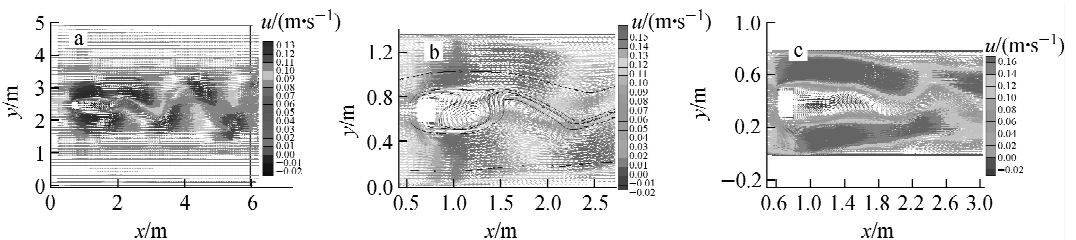


图 2 方柱周围速度流场

Fig. 2 Velocity field around plate

a— $B=25$; b— $B=6$; c— $B=4$

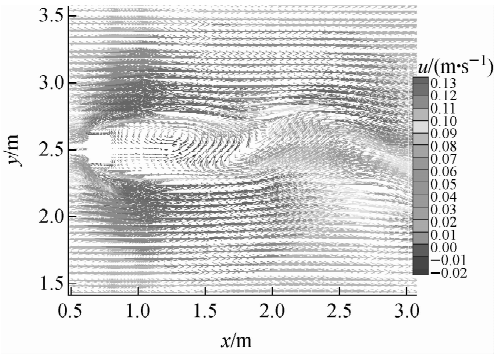


图3 B=25时方柱后方的旋涡脱落
Fig.3 Vortex shedding behind square cylinder in case B=25

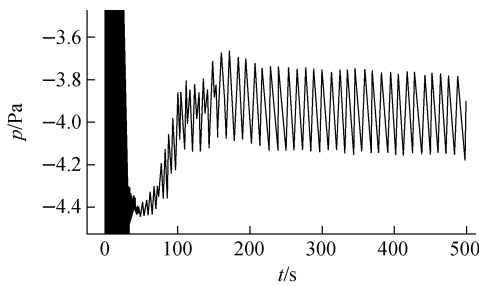


图4 B=6时方柱上方(0.75 m,0.75 m)处
压力时程

Fig.4 Time history of pressure at point (0.75 m, 0.75 m) in case B=25

柱而靠近流道壁面区域,流场比较均匀,无旋涡脱落现象发生(图 1,2a)。流道宽度对方柱周围流体旋涡脱落特性影响较小。随着流道宽度变窄,流场分布变化不大,旋涡脱落周期缓慢变小。

4) 当 $B \leq 4$ 时,即流道宽度相对于方柱横截面边长较窄时,流场分布较宽流道情况下有所变化,整个流场内几乎均可看到旋涡脱落现象,流场内几乎无速度分布均匀区域。最大流速较宽流道情况呈现增大趋势。流道宽度对方柱周围流体旋涡脱落特性影响较大,随流道宽度的变窄,旋涡脱落周期呈现变小的趋势,且变化急剧,如图 2c 为流道宽度为 4 倍方柱尺寸情况下方柱周围的流场图所示。

5) 当 $4 < B \leq 13$ 时,流场内速度分布均匀的区域逐渐减小,流体旋涡脱落频率随流道宽度的变化快慢程度介于 3)、4) 两种情况之间,如图 2b 为 $B=6$ 条件下方柱周围流场图所示。

6) 根据方柱后方旋涡脱落频率得到旋涡脱落频率与流道宽度间的关系(图 5)。

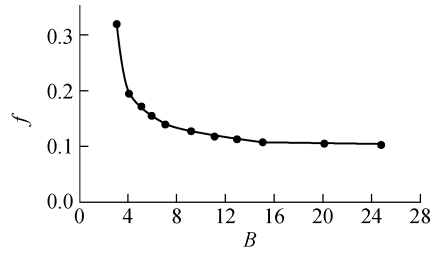


图5 Re=200 情况下 f-B 关系
Fig.5 Variation of fluid vortex shedding frequency with ratio of channel width and square cylinder size in case Re=200

3 模拟结果分析

根据以上 11 组工况数值模拟结果,由式 (2)算得各种工况下的 St ,得到无量纲 St 随流道宽度变化的曲线。在 $Re=200$ 情况下,随着流道宽度变窄,无量纲 St 逐渐升高,且增幅逐渐增大。根据 St 随流道宽度改变而变化的剧烈程度,将刚性矩形通道内方柱扰流划分为 3 个区,即宽流道区($B > 13$)、过渡区($4 < B \leq 13$)、窄流道区($B \leq 4$)(图 6)。

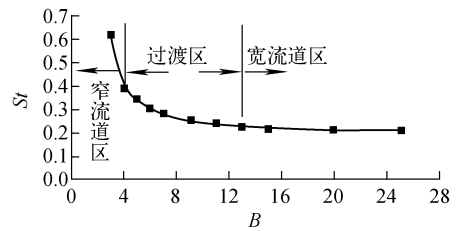


图6 Re=200 情况下 St-B 关系
Fig.6 Variation of Strouhal number with ratio of channel width and square cylinder size in case Re=200

在矩形流道内,流体轴向冲刷两侧刚性固支的方柱,整个系统相当于 1 个固体障碍物将 1 个刚性矩形运输通道均分为 2 个子通道。流体流入流道,并不断撞击方柱,在迎面面后产生横向流动。流体除了本身的质量力、粘性力外,还受到方柱及刚性通道壁面给它的摩擦力和限制其外流的作用力。流体所受的合力为流体本身提供了 1 个产生旋涡脱落的离心力。在这里,由于壁面对流体的限制作用力垂直于壁面,从而引起流体在通道内的横向流动,如图 2b 内流线所示。这里,将引起流体横向流动的力称

之为横向流体应力。流体到近壁面的速度越大,横向流体应力越大。

当流道宽度较大时,流体粘性、轴向来流的流体交混等使得横向流动的流体在其到达壁面前能量大幅减弱,故通道壁面对流体的限制作用较小,横向流体应力对旋涡脱落的贡献不大。离心力较小使得旋涡有足够的时间充分发展后脱落,旋涡脱落周期较长。这里,将流道壁面对流体的限制作用称之为壁面效应。当流道变窄到一定程度时,向两边横向流动的流体以较高流速撞击到刚性通道壁面,壁面效应增强,横向流体应力增大,离心力增大,使得旋涡尚未充分发展业已进入了下一个周期,缩短了旋涡脱落周期。流道宽度越窄,壁面效应越强。流体受到的反作用力越大,横向流体力对旋涡脱落的贡献越大,卡门涡街的旋涡脱落周期越短,旋涡脱落频率越快。

4 结论

1) 在以上各种工况下,阻力变化频率始终是升力变化频率的2倍,与单圆柱体结构的流动诱发旋涡脱落特性一致,证明了此程序计算结果的正确性。

2) 不同流道宽度条件下,流场内均有明显的卡门涡脱落现象。流道宽度逐渐变窄时,流场内出现的最大横向流速呈现增大趋势。当流道宽度远大于方柱横截面边长($H \geq 13w$)时,横向流体应力较小,流道宽度对 St 的影响甚微,可忽略不计。当流道宽度小($H < 13w$)到一定程度时,随着流道宽度的减小,横向流体应力增大,导致流道宽度对流体旋涡脱落特性的影响逐渐增大。

参考文献:

[1] CALLANDER S J. Flow-induced vibration of rectangular cylinders[J]. ASCE Journal of Hydraulic Engineering, 1989, 115: 1 316-1 330.

[2] SHUJA S Z, YILBAS B S, BUDAIR M O. Vortex shedding over a rectangular cylinder with ground effect; Flow and heat transfer characteristics [J]. International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, 2002, 12(8): 916-929.

[3] MENDEZ B. Finite point based numerical study

on the unsteady laminar wake behind square cylinders[J]. International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, 2006, 17(1): 108-132.

- [4] CUHADAROGLU B. A numerical study on turbulent flow around a square cylinder with uniform injection or suction[J]. International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, 2008, 19(6): 708-727.
- [5] WANG X K, TAN S K. Comparison of flow patterns in the near wake of a circular cylinder and a square cylinder placed near a plane wall[J]. Ocean Engineering (UK), 2008, 35: 458-462.
- [6] NAKAMURA Y, OHYA Y, OZONO S, et al. Experimental and numerical analysis of vortex shedding from elongated rectangular cylinders at low Reynolds numbers 200-1000[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1996, 65(97): 301-308.
- [7] 张娟花,陆道纲. 窄通道中柔性单板流固耦合数值模拟研究[J]. 原子能科学技术, 2009, 43(10): 903-909.
- ZHANG Juanhua, LU Daogang. Numerical simulation on flow-structure interaction for flexible plate in narrow flow channel[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2009, 43(10): 903-909 (in Chinese).
- [8] LIU Lifang, LU Daogang, LI Quanxing. Numerical simulation of vortex shedding from elongated rectangular cylinders in a rectangular channel[C]// The 18th International Conference on Nuclear Engineering. Xi'an: [s. n.], 2010.
- [9] 李全星,陆道纲,刘丽芳. 掠过双板流动引起的旋涡脱落特性数值模拟[J]. 工程热物理学报, 2011, 32(1): 39-42.
- LI Quanxing, LU Daogang, LIU Lifang. Simulation on the vortex shedding characteristic of double-plate in flowing fluid[J]. Journal of Engineering Thermohydraulics, 2011, 32(1): 39-42 (in Chinese).
- [10] LU Daogang. Analysis of overflow-induced vibration of the weir coupled with sloshing in the downstream tank using physical component BFC method[D]. Tokyo: University of Tokyo, 1995.
- [11] CHEN Shoeisheng. Flow-induced vibration of circular cylindrical structures[M]. Washington D. C.: Hemisphere Pub. Corp., 1987.