

文章编号:1005-9865(2022)03-0083-10

基于 MPS 方法模拟低雷诺数方柱绕流问题

兰小杰¹, 赵伟文¹, 万德成¹, 邹 丽²

(1. 上海交通大学 船海计算水动力学研究中心(CMHL) 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240; 2. 大连理工大学 船舶工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘 要:柱体绕流问题是流体力学领域一个非常经典的问题。当流体流经柱体时,由于黏性的存在,会发生许多复杂的流动现象,如流动分离、涡旋周期性生成与脱落等,经常被作为标准验证算例。同时,柱体绕流广泛存在于实际工程中,并在一定工况下可能对工程产生巨大危害,因此对柱体绕流进行深入研究具有重要意义。研究中,拟将一种无网格类方法——半隐式移动粒子方法(moving particle semi-implicit method,简称 MPS)引入到柱体绕流问题的数值研究中,并对不同雷诺数下二维方柱绕流问题进行数值模拟。首先,使用基于 MPS 方法自主开发的 MLParticle-SJTU 求解器,结合入口边界条件和出口边界条件,模拟了雷诺数 Re 分别为 40、200 和 1 000 时均匀来流条件下的方柱绕流。随后,将模拟的绕流结果与文献中试验和数值计算结果进行了对比,结果吻合较好,并且在雷诺数为 200 和 1 000 时,可以清晰地捕捉到方柱尾流中的卡门涡街现象,验证了 MPS 方法在柱体绕流问题模拟上的有效性和适用性。

关键词: MPS; 方柱绕流; 低雷诺数; MLParticle-SJTU 求解器

中图分类号: P751 **文献标志码:** A **DOI:** 10.16483/j.issn.1005-9865.2022.03.010

Numerical simulation of low- Re flow around a square cylinder by MPS method

LAN Xiaojie¹, ZHAO Weiwen¹, WAN Decheng¹, ZOU Li²

(1. Computational Marine Hydrodynamics Lab (CMHL), School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. School of Naval Architecture, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Flow past a cylinder is a classical problem in the field of fluid mechanics. Because of the viscosity, when the fluid flows past the cylinder, many complex flow phenomena will occur, such as the separation of flow, the periodic generation and shedding of vortices and so on, so the flow around a cylinder is often taken as a standard verification example. At the same time, it widely exists in practical projects where fluid flows through a cylinder, and may cause great harms under some working conditions. Therefore, it is of great significance to take in-depth research on it. In this study, a meshless method, moving particle semi-implicit method (MPS), is proposed to be introduced into the numerical study of the flow around a cylinder, and numerical simulation is carried out for the flow around a two-dimensional square cylinder under different Reynolds Numbers. First of all, the MLParticle-SJTU solver developed independently based on MPS method is used to simulate the flow around the square cylinder when the Reynolds number is 40, 200 and 1 000 respectively, combining the inlet boundary and outlet boundary. Then, the simulated results are found in agreement with the experimental and numerical calculation results in other papers. When the Reynolds number is 200 and 1 000, the phenomenon of Karman vortex in the square cylinder wake can be clearly captured, which verifies the effectiveness and applicability of MPS method in the simulation of flow around the cylinder.

Keywords: MPS; flow around a square cylinder; low Reynolds number; MLParticle-SJTU solver

收稿日期:2021-06-18

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFC0312400, 2019YFB1704200);国家自然科学基金资助项目(51879159)

作者简介:兰小杰(1997-),男,江西赣州人,硕士研究生,主要从事无网格粒子法研究。E-mail: 15970011702@163.com

通信作者:万德成(1967-),男,教授,从事船舶与海洋工程水动力学与计算流体力学的基础理论及应用研究。E-mail: dcwan@sjtu.edu.cn

柱体绕流问题是流体力学领域的经典问题和研究热点之一。当流体流过柱体时,会发生分离流、涡流等很多复杂的流动现象,准确地模拟这些现象一直是计算流体力学的目标之一。同时柱体绕流也是现代工程中经常遇到的问题,风吹过高层建筑物,水流动过桥墩,海流流过海洋平台等都是典型的柱体绕流。当流体流过这些结构物时,结构物会受到很大的作用力,对结构的强度提出了更高的要求。

柱体绕流经常被作为标准验证算例,对其的研究已经进行得相当广泛。Perry 等^[1]、Davis 等^[2]、Okajima 等^[3]许多学者用试验的方式对方柱绕流的流场及方柱受力进行测量,还有大量学者用基于网格的计算流体力学方法对方柱或圆柱绕流进行了相关研究^[4-8]。但是利用无网格粒子法对方柱绕流进行模拟的研究还不算很多。Yildiz 等^[9]提出了一种用于光滑粒子流体动力学(smoothed particle hydrodynamics method,简称 SPH)方法的改进固体边界处理方法,多边界切线法(multiple boundary tangent method,简称 MBT)解决了粒子法不能正确处理复杂流域中弯曲边界的问题,第一次用 SPH 方法模拟了雷诺数为 50 的圆柱绕流。Shadloo 等^[10]用不可压缩光滑粒子法(ISPH)模拟雷诺数为 300 的方柱绕流,说明了 ISPH 方法能够自然地捕获钝体绕流的流分离、涡旋脱落等复杂的物理现象。Marrone 等^[11]使用弱可压缩的 SPH 方法模拟了低雷诺数时钝体周围黏性流的演变。Koshizuka 等^[12]用 MPS 方法对雷诺数为 100 和 200 的柱体绕流进行了模拟,成功地模拟出了存在于圆柱体和方柱体后面的卡门涡街。国内孙鹏楠^[13]对传统光滑粒子法进行改进,并用改进后的方法对方柱绕流进行模拟,对模拟得到的流场进行细致的分析与试验结果进行对比,证明光滑粒子法模拟圆柱绕流是有效的。但相较于圆柱,方柱由于尖锐直角的存在,对其进行模拟更具挑战性。

MPS 方法是在 SPH 方法的基础上发展起来的,最先由 Koshizuka 和 Oka^[14]于 1996 年提出,主要用于求解不可压缩流动问题。MPS 继承了 SPH 的无网格思想,用拉格朗日粒子携带空间流场的信息,粒子具有质量、动量、能量等物理量,粒子间的影响通过核函数来实现。近年来,MPS 方法得到了长足的发展,除了在液舱晃动^[15]等粒子法传统优势领域的应用外,研究人员还把 MPS 方法的应用扩展到了多相流动^[16-17]、声学^[18]等领域。采用基于 MPS 方法自主开发的无网格法求解器 MLPparticle-SJTU,对雷诺数分别为 40、200 及 1 000 的方柱绕流进行仿真模拟分析,得到 3 种雷诺数下方柱绕流流场及方柱受力,并与文献中的结果进行对比验证。

1 数值方法

1.1 控制方程

MPS 方法的控制方程包括连续性方程和 N-S 方程,对于不可压缩流体,分别可以写成式(1)、式(2)形式:

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} = -\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{d\mathbf{V}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \nabla^2 \mathbf{V} + \mathbf{f} \quad (2)$$

式中: P 、 \mathbf{V} 分别为压力和速度, ν 、 ρ 分别表示流体的运动黏性系数和密度, \mathbf{f} 表示质量力。MPS 方法的控制方程为拉格朗日形式,因此不存在对流项。

1.2 核函数

与 SPH 方法不同,MPS 中核函数只是起着权函数的作用,求解过程不需要使用核函数的导函数,所以 MPS 方法的核函数只要求连续不要求光滑。采用的核函数选用 Zhang 等^[19]推荐的核函数:

$$W(l) = \begin{cases} \frac{l_e}{0.85l+0.15l_e} - 1 & 0 \leq l \leq l_e \\ 0 & l_e < l \end{cases} \quad (3)$$

其中, $l = |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|$,表示粒子间距, l_e 表示粒子的影响半径,一般根据需要选取合适的值即可。

1.3 不可压缩条件

采用被 Lee 等^[20]改写过的混合源项法,表达式为:

$$\langle \nabla^2 P^{k+1} \rangle_i = (1-\gamma) \frac{\rho}{\Delta t} \nabla \cdot V_i^* - \gamma \frac{\rho}{\Delta t^2} \frac{\langle n^* \rangle_i - n^0}{n^0} \quad (4)$$

式中: γ 是一个系数,代表泊松方程源项中粒子数密度的权重,可取 0~1 之间的任意数值,文中取 0.001, V_i^* 表示粒子 i 的临时速度, k 表示时间步, n^* 表示临时粒子数密度, n^0 表示初始粒子数密度。在 MPS 方法中,通常使用粒子数密度来表示流体粒子分布的疏密程度,粒子数密度 $\langle n^* \rangle$ 表达式为:

$$\langle n^* \rangle_i = \sum_{j \neq i} W(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) \quad (5)$$

其中, \mathbf{r} 是粒子的坐标, i, j 为粒子的编号。

1.4 梯度模型

采用的梯度模型表达式为:

$$\langle \nabla \varphi \rangle_i = \frac{d}{n^0} \sum_{j \neq i} \frac{(\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i)(\varphi_j - \varphi'_i)}{|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|^2} W(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) \quad (6)$$

式中: d 代表计算维数, φ'_i 表示粒子 i 作用域内 φ 的最小值。通过式(6)计算压力梯度可以保证粒子间的作用力始终是排斥力,更符合压力的物理意义,并且使得计算更稳定。

1.5 散度模型

在 MPS 方法的连续性方程中存在散度项,需要用核函数对其进行离散。采用的散度模型表达式为:

$$\nabla \cdot \Pi = \frac{d}{n^0} \sum_{j \neq i} \frac{(\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i) \cdot (\Pi_j - \Pi_i)}{|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|^2} W(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) \quad (7)$$

1.6 Laplacian 模型

在文中 MPS 方法里使用的是 Koshizuka^[14] 所给出的 Laplacian 模型,模型表达式为:

$$\langle \nabla^2 \varphi \rangle_i = \frac{2d}{n^0 \lambda} \sum_{j \neq i} (\varphi_j - \varphi_i) \cdot W(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) \quad (8)$$

其中, λ 是修正系数,引入 λ 是为了修正数值结果,使其与扩散方程的解析结果相一致,其表达式为:

$$\lambda = \frac{\sum_{j \neq i} W(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) \cdot |\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|^2}{\sum_{j \neq i} W(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|)} \quad (9)$$

2 数值模拟

2.1 计算模型

研究中,计算域示意如图 1 所示。设定方柱边长 D 为 0.1 m,计算域大小设置为 $25D \times 12D$ 。为消除入口边界对柱体绕流模拟的影响,计算域流体入口距柱体中心 $7D$,计算域出口与柱体中心的距离为 $18D$,从而确保尾流得到充分发展。为减少壁面边界对柱体周围流场的影响,两侧壁面距柱体中心的距离均设置为 $6D$ 。计算坐标系原点在计算域左下角, x 轴正方向为来流速度方向。粒子间距设置为 $\Delta x/D = 25$,计算雷诺数分别为 $Re = 40, 200$ 及 $1\,000$ 。

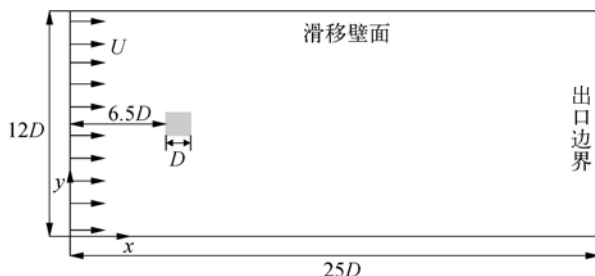


图 1 计算域示意

Fig. 1 Computational domain of flow around square

2.2 边界条件

2.2.1 入口边界条件

图 2 为流入流出边界的示意。图 2(a) 为初始状态, 流入边界上的壁面粒子以指定的流入速度向右移动, 流体颗粒被左侧壁面推动, 也会以指定的速度向右流动, 如图 2(b)。当壁面向右移动距离达到指定值时, 壁面退回初始位置, 原推板位置填入虚粒子(图 2(c)), 赋予原推板位置处的虚粒子速度和压力等物理量, 将虚粒子转变成成为流体粒子, 计算继续进行(图 2(d))。推板不断往复运动, 推动流场中所有流体粒子以指定速度向右流动, 完成流动的模拟。

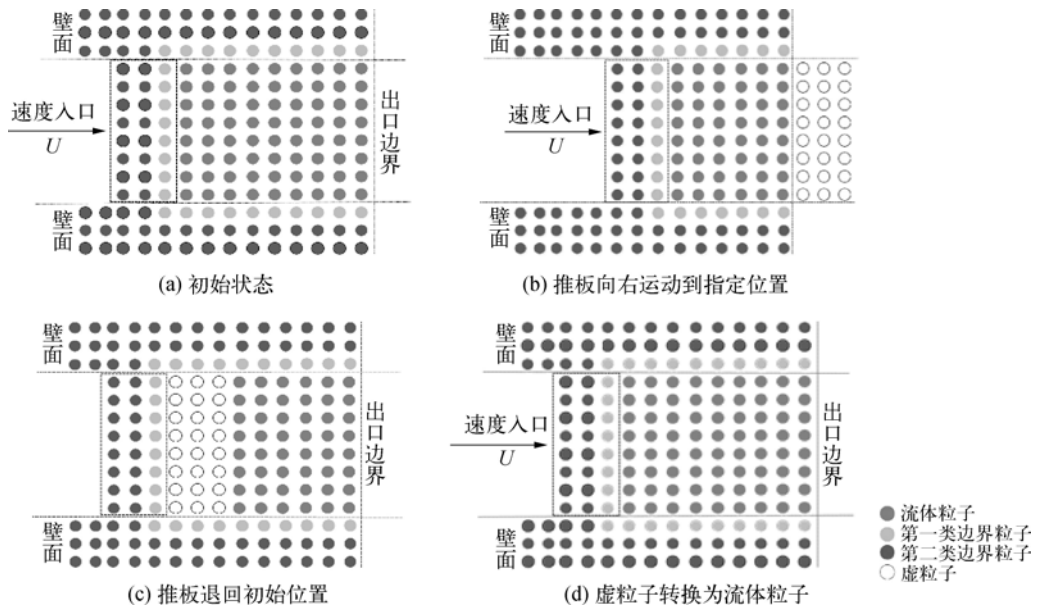


图 2 流入流出边界示意

Fig. 2 Diagrammatic drawing of inlet and outlet

2.2.2 出口边界条件

如图 2 所示, 当流体粒子流出计算域时, 把流体粒子转换成虚粒子, 不影响其它流体粒子。虚粒子的质量、密度等物理量都是 0, 等待替补到入口边界。虚粒子填入由于推板后退产生的空隙中后, 会被赋予相应的物理性质, 变成新的流体粒子, 重新进入计算域。

2.2.3 壁面边界条件

在 MPS 方法中, 壁面边界由多层粒子组成, 如图 2 中所示。内层与流体颗粒相邻的边界粒子称为第一类边界粒子, 第一类边界粒子参与压力 Poisson 方程的求解。外层由第二类边界粒子组成, 第二类边界粒子的压力通过周围的流体粒子和第一类边界粒子外插出来。柱体壁面边界粒子除了速度始终设为 0 以外, 其它属性如作用域半径、密度和质量等与流体粒子完全相同, 柱体壁面为无滑移壁面。上下边界壁面给滑移壁面条件, 可以更好地模拟均匀来流。

2.3 来流条件

文中来流条件设定为均匀来流, 通过模拟管道内均匀流对均匀来流条件进行验证。选取柱体绕流雷诺数 $Re = 40$ 的工况, 设定来流速度为 0.0004 m/s , 模拟没有柱体时的管道流动。图 3 为模拟得到的整体速度云图, 管道整体速度都在 0.0004 m/s 附近。图 4 为流动充分发展后 $x/D = 7, 9, 12, 17, 22$ 处的 x 方向时均速度, 其中 $x/D = 7$ 处是放置方柱的位置。从图 4 中可以看见, 不同位置下的 x 方向速度剖面都呈直线且在 0.0004 m/s 处, 误差小于 0.1% , 精确模拟均匀管道流。

3 结果分析

3.1 水动力系数

在方柱绕流问题中, 方柱主要受到的水动力包括阻力和升力。一般为了方便对比研究, 需要对方柱受力

进行无量纲化处理,得到时均阻力系数 C_d 、升力系数 C_l 和斯特劳哈尔数 St ,分别为:

$$C_d = \frac{2F_d}{\rho U^2 D}, C_l = \frac{2F_l}{\rho U^2 D}, St = \frac{f_s U}{D} \quad (10)$$

式中: F_d 和 F_l 分别为圆柱受到的阻力和升力; ρ 为流体密度; U 为流速; f_s 为斯特劳哈尔涡泄频率。表 1 为文中模拟计算得到的方柱绕流水动力系数结果。

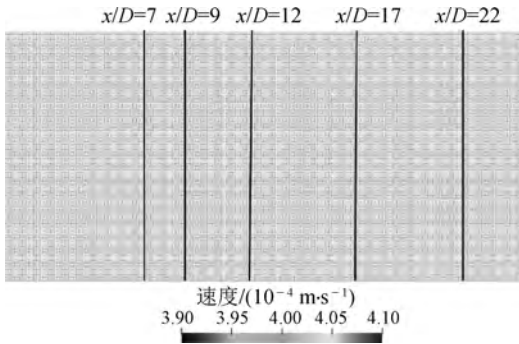


图 3 均匀管道流速度云图

Fig. 3 Velocity nephogram of uniform flow

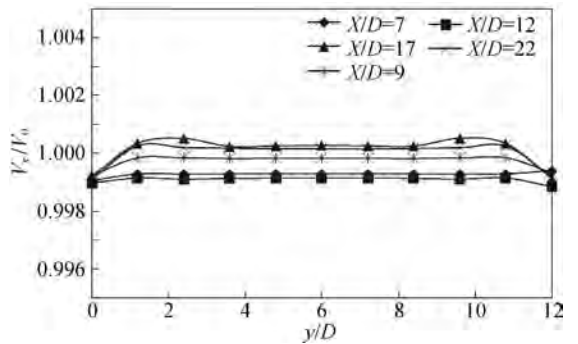


图 4 不同流向位置处 x 方向速度

Fig. 4 The velocity in the x direction at different positions

表 1 阻力系数和斯特劳哈尔数
Tab. 1 Drag coefficient and Strouhal number

文献	Re	C_d	St
Sen 等 ^[21] (FEM)	40	1.67	—
文中模拟(MPS)	40	1.724	—
Okajima ^[3] (EXP)	200	—	0.145
Gera 等 ^[22] (FVM)	200	1.487	0.143
文中模拟(MPS)	200	1.496	0.141
Okajima ^[3] (EXP)	1 000	2.1	0.120~0.130
王建春 ^[23] (FVM)	1 000	2.23	0.122
文中模拟(MPS)	1 000	2.396	0.124

以 Sen 等^[21]的数值计算结果为参考,比较雷诺数 $Re = 40$ 时方柱的阻力系数 C_d 。文中计算得到 $Re = 40$ 时方柱的阻力系数为 1.724,略大于 Sen 等^[21]的计算结果 1.67,误差为 3.23%。平均升力系数为 $-0.009 2$,接近于 0,与试验结果及理论结果相符合。图 5 和图 6 分别是 $Re = 40$ 时升力系数时历曲线和升力功率谱密度,此时的升力系数曲线没有呈现出周期性,其中升力功率谱密度纵坐标 $|P_l(f)|$ 表示升力在各频率下的功率分量大小。

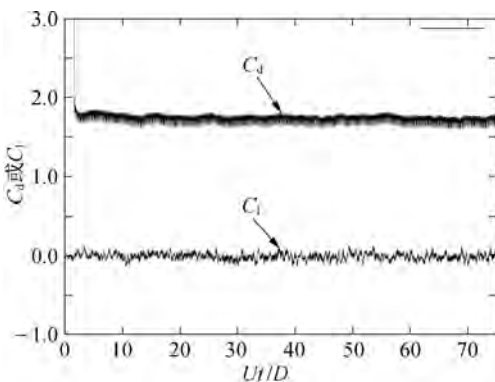


图 5 $Re = 40$,阻力系数和升力系数时历曲线

Fig. 5 Time history of the drag and lift at $Re = 40$

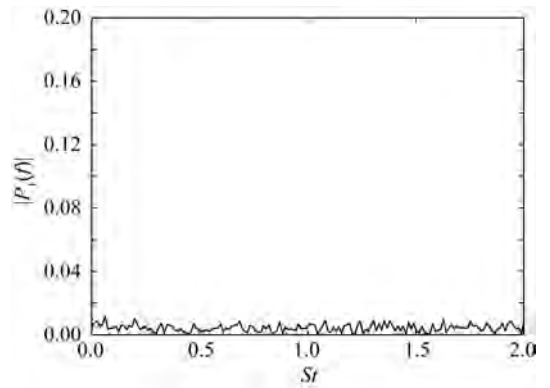


图 6 $Re = 40$,升力功率谱密度

Fig. 6 Power spectral density of lift at $Re = 40$

在 $Re=200$ 的工况下, Gera 等^[22] 计算得到的阻力系数为 1.487, 文中模拟计算得到的阻力系数平均值为 1.496, 误差为 0.605%。图 7 为 $Re=200$ 时计算得到的阻力系数和升力系数时历曲线。在流动充分发展之后, 图中升力系数曲线有明显的周期性, 升力变化频率即为泄涡频率。图 8 为升力功率谱密度, 最高的尖峰对应的横坐标为斯特劳哈尔数 $St=0.14$, 与 Okajima^[3] 试验结果 0.145 相比, 误差为 3.57%。

$Re=1\ 000$ 时, 阻力系数和升力系数时历曲线如图 9、图 10 所示, 计算得到的阻力系数为 2.396, 比王建春^[23] 用 FVM 方法计算的结果大 7.44%, 斯特劳哈尔数 St 为 0.124, 与王建春^[23] 的计算结果及前人试验结果相近。

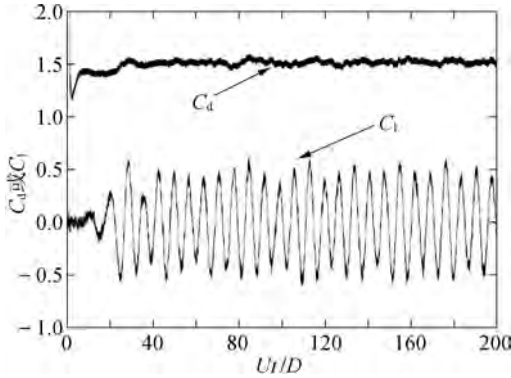


图 7 $Re=200$, 阻力系数和升力系数时历曲线
Fig. 7 Time history of the drag and lift at $Re=200$

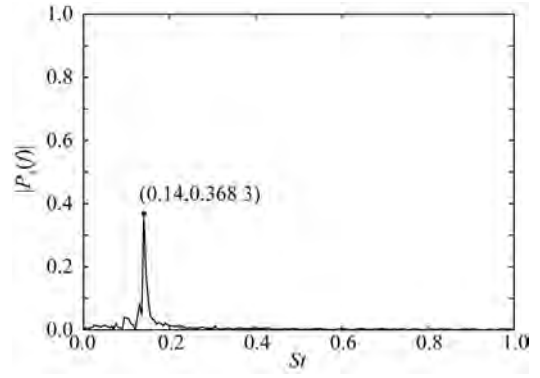


图 8 $Re=200$, 升力功率谱密度
Fig. 8 Power spectral density of lift at $Re=200$

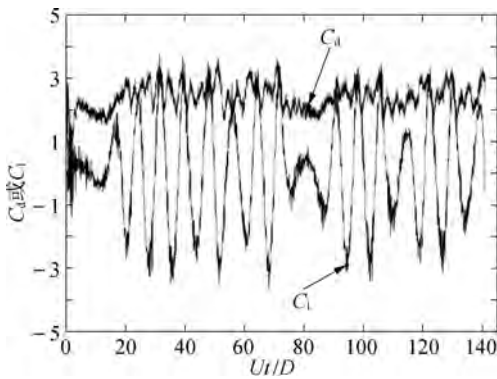


图 9 $Re=1\ 000$, 阻力系数和升力系数时历曲线
Fig. 9 Time history of the drag and lift at $Re=1\ 000$

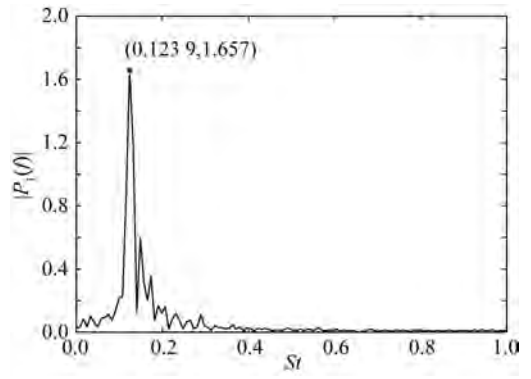


图 10 $Re=1\ 000$, 升力功率谱密度
Fig. 10 Power spectral density of lift at $Re=1\ 000$

3.2 尾流流态分析

$Re=40$ 时, 流场充分发展后, 流动会趋于稳定, 方柱后面出现一对上下对称的尾涡, 不会发生涡脱落等现象, 与前人试验及计算结果一致, 图 11 为流场稳定后方柱周围流场示意。从图 11 可以看到, 方柱周围流场是对称的, 方柱前后速度较低, 两侧速度较大。图 12 为模拟计算得到流场稳定后流线图, 可以明显观察到方柱后方由于回流形成的对称尾涡, 与 Sen 等^[21] 在文献中给出的结果相似。图 13 为 $y/D=6$ 处即方柱中心线上 x 方向时均速度, 图中速度小于 0 区域即为回流区, $Re=40$ 时回流区长度 L 与方柱边长 D 的比值 $L/D=2.38$, 根据 Sen 等^[21] 给出的经验公式 $L/D=-0.078\ 3+0.072\ 4\times Re\ (5<Re<60)$ 计算得到结果为 2.81, 模拟结果略小于 Sen 等^[21] 的结果。图 14 为流场稳定后不同流向位置处 x 方向时均速度, 方柱处时均速度呈“U”型, 其余方柱后方不同位置的时均速度都呈“V”字形, 且随着与方柱距离的增大, “V”的形状逐渐趋于平缓。

$Re=200$ 工况下, 流场充分发展后, 方柱后会出现旋涡周期性生成、脱落和卡门涡街现象。图 15 为两个不同时刻方柱周围速度场。从图 15 中可以看到, 随着来流速度的增加, 方柱周围流场越来越复杂, 在雷诺数 200 时, 方柱周围速度场不再呈现对称的性质, 而是尾迹不停摆动。

图 16 展示了 $Re=200$ 时一个周期里不同时刻方柱周围的流线, 图 17 为不同时刻的涡量云图。从图 16 可以明显看到一个周期内, 方柱尾涡的生成和脱落, 一个周期开始时, 方柱左下角的涡即将脱落; $T/5$ 时右上角的涡不断发展壮大, 同时左下角重新生成小涡; 之后左下角的小涡发展壮大, 右上角的大涡开始迁移脱落,

到 $2T/5$ 时,右上角的涡完全脱落;然后左下角的涡迁移脱落,右上角生成小涡,再发展壮大, T 时刻的流线与开始时刻几乎相同,方柱尾流中的旋涡完成一个周期的运动。此后尾涡将重复上面过程,不断生成小涡,发展,迁移,脱落,在下游形成著名的卡门涡街现象,从图 17 涡量云图中可以清晰地看到卡门涡街现象。

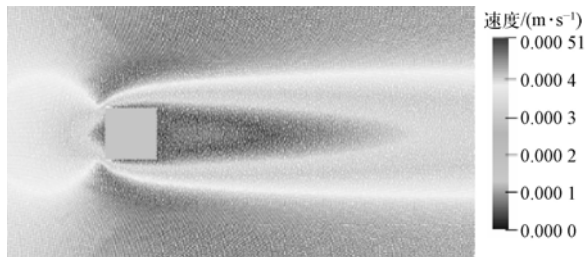


图 11 $Re=40$ 方柱周围流场

Fig. 11 Flow field around the square at $Re=40$

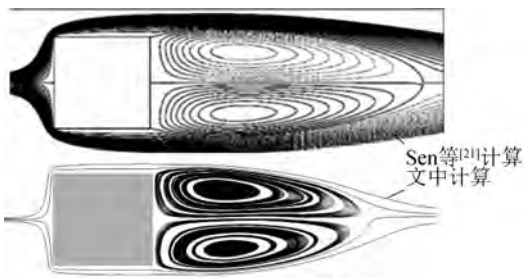


图 12 $Re=40$ 方柱周围流线对比

Fig. 12 Stream-line around the square at $Re=40$

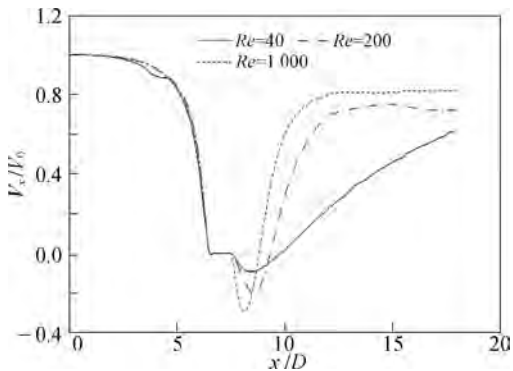


图 13 不同雷诺数下 $y/D=6$ 处 x 方向时均速度
Fig. 13 Time-mean velocity in x direction of $y/D=6$

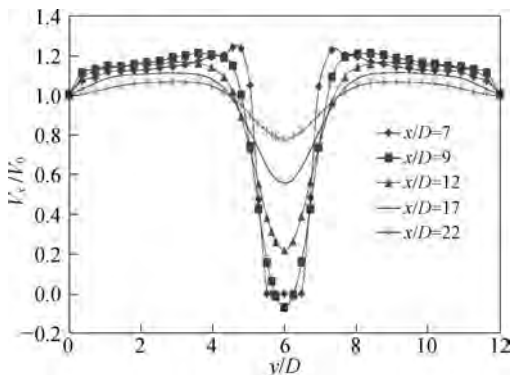


图 14 $Re=40$ 时,不同流向位置处 x 方向时均速度
Fig. 14 Velocity in x direction at different positions at $Re=40$

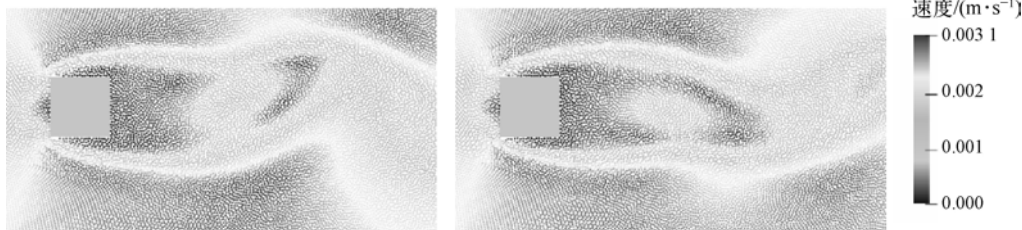


图 15 $Re=200$,方柱周围流场

Fig. 15 The flow field around the square at $Re=200$

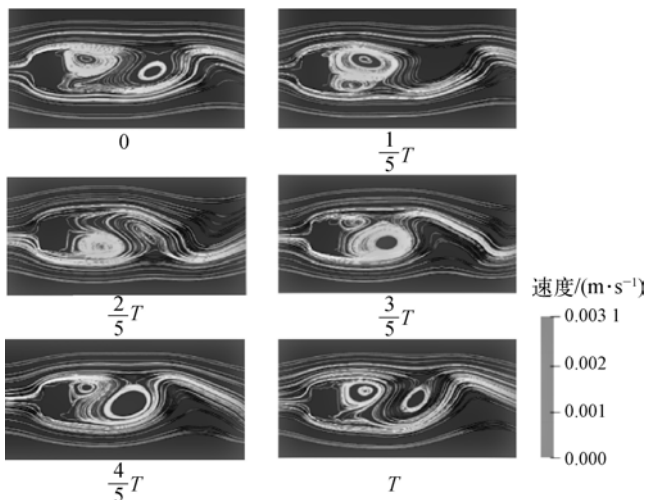


图 16 $Re=200$,一个周期内方柱周围流线

Fig. 16 Stream-line around the square in a period at $Re=200$

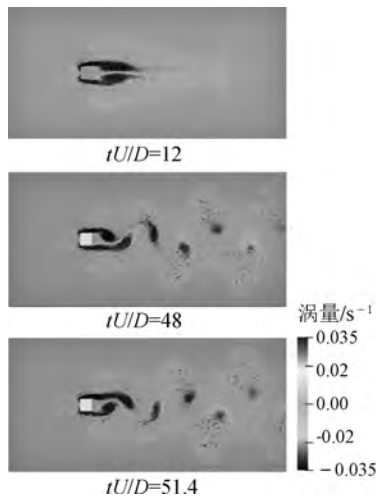


图 17 $Re=200$,整体涡量云图

Fig. 17 Vorticity contours at $Re=200$

在 MPS 方法中,粒子按拉格朗日描述法进行自由运动,可以跟踪粒子每个时间步的位置,得到粒子的运动轨迹,即迹线图。图 18 为 $Re=200$ 时,某两个粒子的迹线,从迹线中可以明显看到由于绕流的发生,当粒子运动到方柱后方时,发生了回流的现象。

当 $Re=1\ 000$ 时,与 $Re=200$ 时观察到的方柱绕流现象相似,方柱后方仍存在涡交替脱落现象。图 19 为方柱周围平均压强系数 C_p 与文献[24]结果对比,A-B 与 B-C 两个区域的平均压强系数与前人模拟结果吻合较好,C-D 区域结果比文献结果略大。图 20 为方柱周围涡量图与王建春^[23]的模拟结果对比,对比结果较好。还可以看到,由于流速增加,对流影响加强,涡的稳定性受到影响,两个涡脱周期内的涡脱落形式有一定的差别。图 13 中可以看到雷诺数为 1 000 时的回流区长度小于雷诺数为 200 时的长度,可能也是因为涡稳定性降低,脱落需要的发展长度变短。

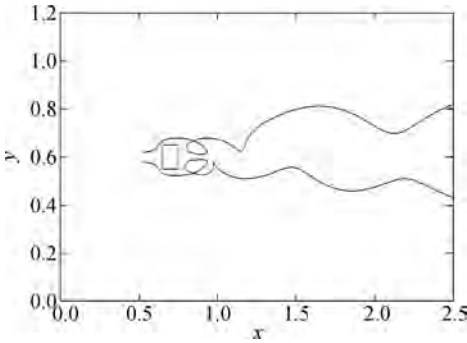


图 18 $Re=200$,某两粒子运动轨迹
Fig. 18 Trajectory of two particles at $Re=200$

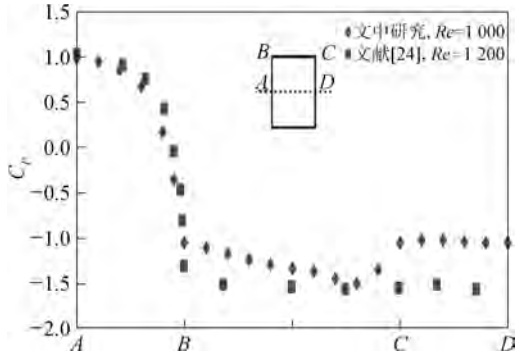


图 19 $Re=1\ 000$,方柱周围平均压强系数
Fig. 19 Mean-pressure coefficient over the cylinder at $Re=1\ 000$

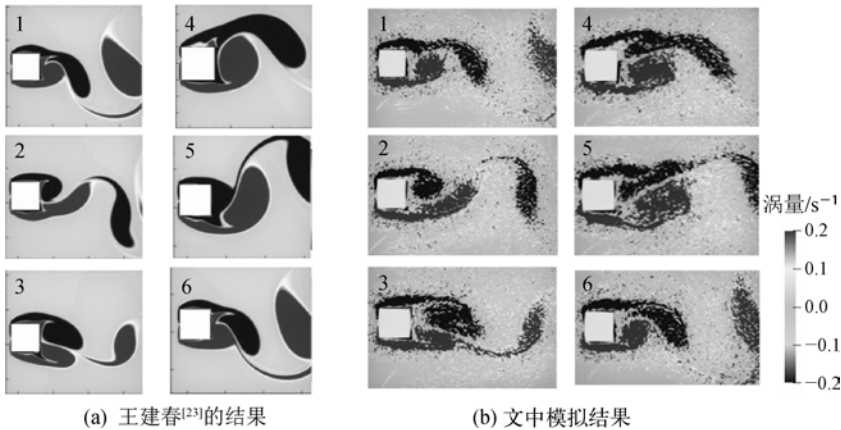


图 20 $Re=1\ 000$ 时方柱周围涡量云图
Fig. 20 Vorticity contours around the square at $Re=1\ 000$

4 结 语

运用 MPS 方法,建立入口、出口边界条件,精确模拟出均匀流。在此基础上,成功模拟了雷诺数分别为 40、200、1 000 的二维方柱绕流。计算结果表明:

- 1) 在雷诺数为 40 时,方柱后方的尾涡不会脱落,随着雷诺数增加,方柱绕流流场流动状态由定常涡转变为周期性旋涡脱落状态,雷诺数为 200 和 1 000 时,尾涡都会脱落,出现明显的卡门涡街,且雷诺数为 1 000 时涡的稳定性比雷诺数为 200 时低,回流区长度比雷诺数为 200 时短。
- 2) 用 MPS 方法计算得到的方柱升阻力系数、斯特劳哈尔数等特性与前人试验结果及计算结果接近,流场特征与前人结果相符,验证了 MPS 方法模拟低雷诺数下方柱绕流问题的可靠性及有效性。

但从图 17 和图 20 涡量云图中可以看到,模拟结果存在一定的数值噪声,造成这种噪声的原因之一可能是粒子分布不完全均匀。而且如果雷诺数继续增大,流速增加会加剧这种分布不均,进而造成模拟结果偏差

较大。引入粒子位移修正技术 (particle shifting technique) 可能可以解决这个问题,减小模拟误差的同时增大可模拟的雷诺数。

参考文献:

- [1] PERRY E, CHONG M S, LIM T T. The vortex-shedding process behind two-dimensional bluff bodies[J]. *Journal Fluid Mech*, 1982, 116: 77-90.
- [2] DAVIS R W, MOORE E F, PURTELL L P. A numerical-experimental study of confined flow around rectangular cylinders[J]. *Journal of Physics of Fluids*, 1984, 27(1): 46-59.
- [3] OKAJIMA A. Strouhal numbers of rectangular cylinders[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1982, 123: 379-398.
- [4] NOBARI M R H, GHAZANFARIAN J. A numerical investigation of fluid flow over a rotating cylinder with cross flow oscillation [J]. *Computers & Fluids*, 2009, 38(10): 2026-2036.
- [5] SAEEDI M, LE POUUDRE P P, WANG B C. Direct numerical simulation of turbulent wake behind a surface-mounted square cylinder[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2014, 51: 20-39.
- [6] 赵西增, 付英男, 张大可. 柱体绕流的 CIP 方法模拟[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2016, 37(3): 297-305. (ZHAO Xizeng, FU Yingnan, ZHANG Dake. Numerical simulation of flow past a cylinder using a CIP-based model [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2016, 37(3): 297-305. (in Chinese))
- [7] 邹帅, 徐加辉, 周杰, 等. 中雷诺数圆柱、方柱绕流 PIV 试验对比研究[J]. *机械设计与制造*, 2016(6): 81-84. (ZOU Shuai, XU Jiahui, ZHOU Jie, et al. Experimental and comparative study on the flow past a circle and square cylinder at moderate Reynolds numbers[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2016(6): 81-84. (in Chinese))
- [8] 谢志刚, 许春晓, 崔桂香, 等. 方柱绕流大涡模拟[J]. *计算物理*, 2007, 24(2): 171-180. (XIE Zhigang, XU Chunxiao, CUI Guixiang, et al. Large eddy simulation of flows around a square cylinder[J]. *Chinese Journal of Computation-Al Physics*, 2007, 24(2): 171-180. (in Chinese))
- [9] YILDIZ M, ROOK R A, SULEMAN A. SPH with the multiple boundary tangent method[J]. *International Journal for Numerical Method in Engineering*, 2009, 77(10): 1416-1438.
- [10] SHADLOO M S, ZAINALI A, SADEK S H, et al. Improved in Incompressible Smoothed Particle Hydrodynamics method for simulating flow around bluff bodies [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2011, 200(12): 1008-1020.
- [11] MARRONE S, COLAGROSSIA A, ANTUONOA M, et al. An accurate SPH modeling of viscous flows around bodies at low and moderate Reynolds numbers[J]. *Journal of Computational Physics*, 2013, 245: 456-475.
- [12] KOSHIZUKA S, MUROTANI K, SAKAI M, et al. Boundary conditions for simulating Karman vortices using the MPS method [J]. *Japan Society for Simulation Technology*, 2015, 2(2): 235-254.
- [13] 孙鹏楠. 物体与自由液面耦合作用的光滑粒子流体动力学方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018. (SUN Pengnan. Study on SPH method for the simulation of object-free surface interactions [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018. (in Chinese))
- [14] KOSHIZUKA S, OKA Y. Moving-particle semi-implicit method for fragmentation of incompressible fluid[J]. *Nuclear Science and Engineering*, 1996, 123(3): 421-434.
- [15] 张雨新, 万德成, 日野孝则. MPS 方法数值模拟液舱晃荡问题[J]. *海洋工程*, 2014, 32(4): 24-32. (ZHANG Yuxin, WAN Decheng, HIROSHI H. Application of MPS method in liquid sloshing[J]. *The Ocean Engineering*, 2014, 32(4): 24-32. (in Chinese))
- [16] DUAN Guangtao, SEIICHI K, AKIFUMI Y, et al. An accurate and stable multiphase moving particle semi-implicit method based on a corrective matrix for all particle interaction models[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2018, 115(10): 1287-1314.
- [17] 文潇, 万德成. 用 MPS 方法数值模拟含多相流体的液舱晃荡[C]//第十九届中国海洋(岸)工程学术讨论会. 北京: 海洋出版社, 2019: 157-163. (WEN Xiao, WAN Decheng. Numerical simulation of tank containing multiphase fluid sloshing based on MPS method [C]//Proceedings of the 19th China Ocean and Coastal Engineering Academic Conference. Beijing: Ocean Press, 2019: 157-163. (in Chinese))
- [18] 周子祺, 孙一颢, 韩沛东, 等. 基于 MPS-WP 的声传播数值求解方法研究[J/OL]. *西安交通大学学报*, 2021: 1-7[2021-06-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20210609.1355.002.html>. (ZHOU Ziqi, SUN Yijie, HAN Peidong, et al. Numerical method of acoustic propagation based on MPS-WP [J/OL]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2021: 1-7

- [2021-06-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20210609.1355.002.html>. (in Chinese))
- [19] ZHANG Y X, WAN D C. Apply MPS method to simulate motion of floating body interacting with solitary wave[C]//Proceedings of the Seventh International Workshop on Ship Hydrodynamics. 2011: 275-279.
- [20] LEE B H, PARK J C, KIM M H, et al. Step-by-step improvement of MPS method in simulating violent free-surface motions and impact-loads[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2010, 200(9): 1113-1125.
- [21] SEN S, MITTAL S, BISWAS G. Flow past a square cylinder at low Reynolds numbers[J]. Internationaly Journal for Numerical Methods in Fluids, 2011, 67: 1160-1174.
- [22] GERA B, PAVAN K S, SINGH R K. CFD analysis of 2D unsteady flowaround a square cylinder[J]. International Journal of Applied Engineering Research, 2010, 1(3): 602-610.
- [23] 王建春. 中等雷诺数方柱绕流的直接数值模拟研究[D]. 无锡: 中国船舶科学研究中心, 2016. (WANG Jianchun. Direct numerical simulation of medium Reynolds flow past square cylinder[D]. Wuxi: China Ship Scientific Research Center, 2016. (in Chinese))
- [24] 陶善聪, 郝克理, 周毅. 单方柱绕流的直接数值模拟[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(2): 445-452. (TAO Shancong, HAO Keli, ZHOU Yi. Direct numerical simulation of flow around a square cylinder[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(2): 445-452. (in Chinese))

.....

(上接第 74 页)

- [9] 蔡郁, 孙大鹏, 赵沛泓, 等. 开孔率对明基床上开孔沉箱波浪反射系数影响的数值研究[J]. 海洋工程, 2018, 36(5): 30-37. (CAI Yu, SUN Dapeng, ZHAO Peihong, et al. Numerical investigation of the influence of opening rate on reflection coefficient of perforated caisson with rubble foundation[J]. The Ocean Engineering, 2018, 36(5): 30-37. (in Chinese))
- [10] CHEN K H, CHEN J T, CHOU C R, et al. Dual boundary element analysis of oblique incident wave passing a thin submerged breakwater[J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2002, 26: 917-928.
- [11] 竺艳蓉. 海洋工程波浪力学[M]. 天津: 天津大学出版社, 1991: 61-62. (ZHU Yanrong. Wave mechanics for ocean engineering[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1991: 61-62. (in Chinese))
- [12] 赵程程. 大型双壁钢吊箱在海黄大桥主塔承台施工中的应用[J]. 青海交通科技, 2019(3): 95-105. (ZHAO Chengcheng. Application of large double-wall steel suspension box in construction of main tower cap of haihuang bridge[J]. Qinghai Transportation Technology, 2019(3): 95-105. (in Chinese))
- [13] 王晓敬, 马行政. 海上承台双壁钢吊箱围堰设计与施工[J]. 铁道标准设计, 2012(8): 45-48. (WANG Xiaojing, MA Xingzheng. Design and construction of double wall steel-boxed cofferdam for offshore pile cap[J]. Railway Standard Design, 2012(8): 45-48. (in Chinese))
- [14] 程晨. 南京大胜关长江大桥主桥 4 号墩双壁钢吊箱围堰整体吊装设计与施工[J]. 桥梁建设, 2008(4): 20-23. (CHENG Chen. Design and construction of integral lifting and installation of double-wall steel boxed cofferdam for main pier No. 4 of Dashengguan Changjiang River bridge in Nanjing[J]. The Bridge Design, 2008(4): 20-23. (in Chinese))
- [15] 连延金. 三门峡黄河公铁两用特大桥 6~#墩双壁钢套箱围堰设计[J]. 铁道建筑, 2018, 58(4): 41-44. (LIAN Yanjin. Design of double-walled steel cofferdam for No. 6 pier of Sanmenxia Yellow River rail-cum-road super long bridge[J]. The Railway Construction, 2018, 58(4): 41-44. (in Chinese))