

DOI:10.11918/201909017

有限长波浪形圆柱绕流数值模拟

赵桂欣, 桂洪斌, 王晓聪

(哈尔滨工业大学(威海)船舶与海洋工程学院, 山东 威海 264209)

摘 要: 为研究一端固定在壁面上,另一端为自由端的有限长波浪形圆柱的减阻抑振效果,对有限长波浪形圆柱进行了计算. 首先,采用大涡模拟数值模型的方法,对雷诺数为3 900时的有限长直圆柱和不同波长、波幅组合后的12种有限长波浪形圆柱进行了计算;其次,针对计算结果进行后处理,得到并比较了不同组合形式下的有限长波浪形圆柱的升、阻力系数大小,结合升、阻力大小分析其减阻抑振效果;最后,对减阻抑振效果较好的组合形式进行流场分析并研究了有限长波浪形圆柱的减阻抑振机理. 研究表明:在12种波浪形圆柱组合形式中,大多数组合形式都能减小圆柱受到的升力系数均方根值,起到抑振作用,减阻效果最好的组合形式阻力系数均值减小可达5.36%;有限长直圆柱与有限长波浪形圆柱周围有相似的流动特征,但波浪形圆柱由于马鞍面和节点面的存在,使流体在圆柱展向产生交互,削弱了圆柱后方尾涡的发展,从而起到减阻抑振的作用. 所得结果可对有限长波浪形圆柱的减阻抑振效果进行比较全面的总结,对研究有限长波浪形圆柱的减阻抑振机理有一定的帮助.

关键词: 圆柱绕流;有限长;波浪形圆柱;减阻;振动控制

中图分类号: U664 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2021)06-0163-08

Numerical simulation of flow around finite-length wavy cylinders

ZHAO Guixin, GUI Hongbin, WANG Xiaocong

(School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Harbin Institute of Technology, Weihai, Weihai 264209, Shandong, China)

Abstract: To study the drag reduction and vibration suppression effect of finite-length wavy cylinder which has a fixed end and a free end, the finite-length wavy cylinder was calculated. First, large eddy simulation numerical model was adopted to calculate finite-length straight cylinder and 12 finite-length wavy cylinders with different combinations of wavelength and amplitude at $Re = 3\ 900$. Then, after post-processing the results, the lift and drag coefficients of the finite-length wavy cylinders with different combinations were compared, and corresponding drag reduction and vibration suppression effect was analyzed. Finally, flow field analysis was carried out on the combination forms with better drag reduction and vibration suppression effect, and the mechanism of drag reduction and vibration suppression of finite-length wavy cylinder was studied. Results show that for the 12 kinds of wavy cylinders, most of the wavy cylinder forms could reduce the root mean square value of the lift coefficient, which could suppress the vibration, and the best combination form reduced the mean drag coefficient by 5.36%. The flow characteristics around finite-length straight cylinder were similar with those around finite-length wavy cylinder. While due to the existence of saddle and nodal surfaces of wavy cylinder, the fluid interacted in the direction of the cylinder, weakening the development of the vortex behind the cylinder, which reduced the drag reduction and vibration suppression effect. The research results can summarize the drag reduction and vibration suppression effect of finite-length wavy cylinders, which is helpful to investigate the drag reduction and vibration suppression mechanism of finite-length wavy cylinders.

Keywords: flow around cylinder; finite length; wavy cylinder; drag reduction; vibration control

作为一种经典的钝体绕流物理现象,圆柱绕流现象广泛存在于自然界中,流体经过圆柱时,会产生周期性脱落的漩涡,漩涡脱落使圆柱受到流体的脉动载荷从而导致结构振动^[1],当结构振动严重时,会导致结构疲劳甚至损坏^[2],造成损失.降低结构受到的脉动载荷,抑制结构体振动、减少结构损坏,

在工程实际应用中有很大的意义.如何有效的减阻抑振是圆柱绕流问题的研究热点.

目前应用于圆柱绕流上的减阻抑振方法主要有主动控制和被动控制两种,被动控制不需要额外的能量输入,应用比较方便^[3],在圆柱绕流中主要通过破坏圆柱体表面的压力分布以改变圆柱体受力^[4],来达到减阻抑振的效果.波浪形圆柱采用改变圆柱外形的方法来破坏圆柱体表面的压力分布,具有减阻抑振的效果^[5-6].

收稿日期: 2019-09-02

作者简介: 赵桂欣(1996—),女,硕士研究生

通信作者: 桂洪斌,guihongbin@sina.com

现有的波浪形圆柱的减阻抑振研究主要集中于无限长边界条件下,然而实际工程中,大多数的圆柱结构是有限长的,其周围的流场受到固定壁面和圆柱自由端面的影响,与无限长时相差很大,因而只分析无限长边界条件下波浪形圆柱减阻抑振的效果不能满足工程需要. 考虑到实际工程中的流动大多处于亚临界流动区域,本文在对无限长圆柱绕流分析和有限长圆柱绕流分析^[7-8]的基础上,采用大涡模拟的方法,对 $Re = 3\ 900$ 时的有限长波浪形圆柱绕流进行了数值模拟,研究波浪形圆柱减阻抑振的机理并得出一定组合情况下减阻较好的圆柱波浪外形.

1 数值模型

1.1 控制方程

本文中流体湍流模型采用大涡模拟^[9]的形式,大涡模拟通过滤波函数将大尺度和小尺度涡分离开,大尺度的涡直接模拟,小尺度的涡选用亚网格尺度(SGS)模型来封闭. 经过滤波函数处理后,不可压缩黏性流体的控制方程 Navier-Stokes 方程和连续性方程分别为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \bar{u}_i) = 0. \quad (2)$$

式中: ρ 为流体密度; p 为压力; μ 为流体的动力黏性系数; u_i, u_j 为速度分量; x_i, x_j 为位移分量; t 为时间; $\bar{u}_i, \bar{u}_j, \bar{p}$ 分别为滤波函数过滤后的相关参数; $\tau_{ij} = -\overline{\rho u_i u_j} + \overline{\rho u_i u_j}$ 为亚网格尺度应力,它可与大尺度应变速率张量 $\bar{S}$ 按下式联系:

$$\tau_{ij} - 1/3 \delta_{ij} \tau_{kk} = 2\mu_{sgs} \bar{S}_{ij}, \quad (3)$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right). \quad (4)$$

式中: δ_{ij} 为 Kronecker 符号; τ_{kk} 为亚网格尺度应力各向同性部分; μ_{sgs} 为亚网格湍流黏度.

1.2 几何模型

选用的波浪形圆柱几何外形如图 1^[10]所示,它的直径定义如下:

$$D_z = D_m + 2a \cos(2\pi z/\lambda), \quad (5)$$

$$D_m = 1/2(D_{\max} + D_{\min}). \quad (6)$$

式中: D_z 为波浪形圆柱的直径; D_m 为波浪形圆柱平均直径; a 为波浪形圆柱表面的波幅; λ 为波浪形圆柱表面波长. 定义波浪形圆柱的最小直径处为马鞍面(saddle),最大直径处为节点面(noddle)^[11].

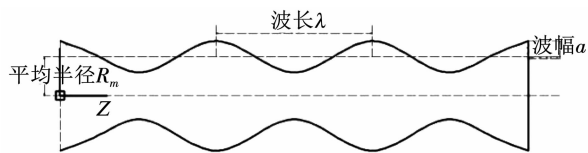


图 1 波浪形圆柱外形示意

Fig. 1 Schematic diagram of wavy cylinder

为对比波浪形圆柱的减阻效果,本文选用的直圆柱直径为 D_m ,长度与波浪形圆柱长度相同,保证波浪形圆柱与直圆柱有相同的阻塞比.

将圆柱(直圆柱或波浪形圆柱)模型放入 $20D_m \times 10D_m \times (3\lambda + 3D_m)$ 的流体域中,形成计算域几何模型,如图 2 所示,原点在底面圆心处, x 方向为顺流向, y 方向为横流向, z 方向为展向. 圆柱底面圆心距速度入口为 $5D_m$,距压力出口为 $15D_m$,圆柱顶面即自由端面距流体域顶面为 $3D_m$,以保证圆柱后方以及圆柱顶端流场的发展.

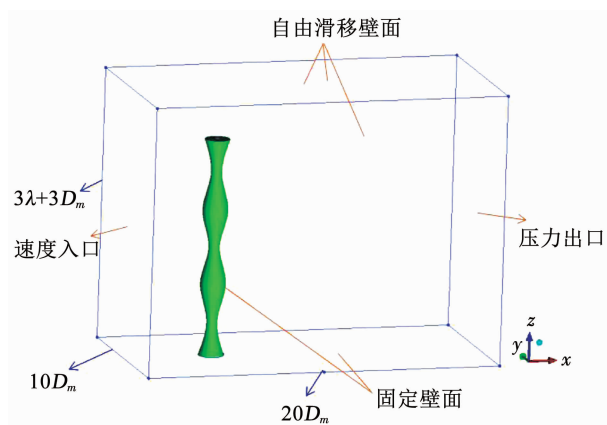


图 2 圆柱绕流场示意

Fig. 2 Schematic diagram of flow field around cylinder

波浪形圆柱网格划分如图 3 所示,直圆柱的网格划分与波浪形圆柱的网格划分方式相同. 圆柱周围为 O 型网格,圆柱近壁面网格大小为 $0.001D_m$,圆柱周围网格通过指数分布律进行局部加密,越靠近圆柱网格越小,以便捕捉圆柱体周围流动情况.

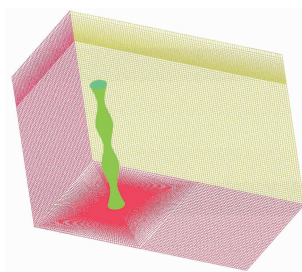


图 3 网格划分

Fig. 3 Grid division

1.3 边界条件和计算工况设置

流场的边界条件设置如图 2 所示,设置速度入口,压力出口,流体域底面为固定壁面,顶面及两侧面为自由滑移壁面,圆柱体表面均为固定壁面。

流体的进口速度 U_0 满足以圆柱平均直径 D_m 和动力黏性系数 μ 为特征的雷诺数为 3 900。

在大涡模拟 (LES) 问题的计算过程中,时间步的选择要使库朗数 (Courant number) 在 0.5 ~ 1.0 范围内, $C = u\Delta t/\Delta x$, 其中: Δt 为时间步, Δx 为网格尺寸, u 为流体速度。选择 Δx 为最小网格尺寸, u 为来流速度 U_0 。计算时间步取 2.5×10^{-3} s, 相应库朗数为 0.975, 满足计算条件。

在计算工况选择时,为分别研究波浪形圆柱波长及波幅的影响,选择不同的波长和波幅进行组合,波浪形圆柱的高度为 3λ ^[12], 波长选择有 3 种: $\lambda/D_m = 2, 3, 4$, 波幅选择有 4 种: $a/D_m = 0.05, 0.10, 0.15, 0.20$ 。 λ/D_m 和 a/D_m 分别是波长和波幅的量纲一的量。为研究不同波长及波幅下的减阻作用,设置高度 L 为 3λ 的光滑有限长直圆柱做对照组,根据无因次波长为 2, 3, 4, 将直圆柱工况对应设定为 C2, C3, C4。波浪形圆柱的工况组合见表 1。

表 1 波浪形圆柱计算工况设置

Tab. 1 Wavy cylinder calculation condition settings					
工况	无因次波长 λ/D_m	无因次波幅 a/D_m	波长 λ/m	波幅 a/m	平均直径 D_m/m
1	2	0.05	0.2	0.005	0.1
2		0.10		0.010	
3		0.15		0.015	
4		0.20		0.020	
5		0.05		0.005	
6	3	0.10	0.3	0.010	0.1
7		0.15		0.015	
8		0.20		0.020	
9	4	0.05	0.4	0.005	0.1
10		0.10		0.010	
11		0.15		0.015	
12		0.20		0.020	

1.4 模型验证

计算在 ANSYS Fluent 流体计算软件中进行,压力速度耦合采用 SIMPLE 算法,对流项为二阶离散格式,扩散项为二阶中心差分。

为保证计算结果的有效性,将计算结果与文献[13-15]所做的实验、数值模拟结果进行对比验证,有限长直圆柱的验证结果见表 2,其中: AR 为长径比; Sim1、Sim2、Sim3 为不同网格下的数值模拟结

果; Exp1、Exp2 和 Exp3 分别为实验结果,它们的阻力系数均值见表 2,从结果可以看出, Sim2 与 Sim3 数值模拟的结果与实验结果相差不大。为减小计算时间选择网格数量相对较少,计算结果与文献值接近的 Sim2 网格进一步对流场的计算结果进行验证。本次计算中有限长直圆柱的雷诺数选择为 3 900,为保证计算结果的准确性,同样寻找雷诺数为 3 900 时的文献[16]计算结果,并进行对比,流场的计算结果与文献[16]中的结果如图 4 所示,从图 4 中曲线可以看出,模拟得到的结果与文献中的结果曲线趋势一致,计算结果相差不大,证明模拟的有限长圆柱计算结果是可靠的。

表 2 有限长圆柱计算验证

Tab. 2 Finite-length cylinder calculation verification				
Case	网格数	Re	AR	$\bar{C}_d$
Sim1	1 083 251	3 900	π	0.746
Sim2	1 822 972	3 900	π	0.784
Sim3	2 411 610	3 900	π	0.782
Exp1 ^[13]	—	32 000	2	0.780
Exp2 ^[14]	—	47 000	2	0.730
Exp3 ^[15]	—	2 900	π	0.770

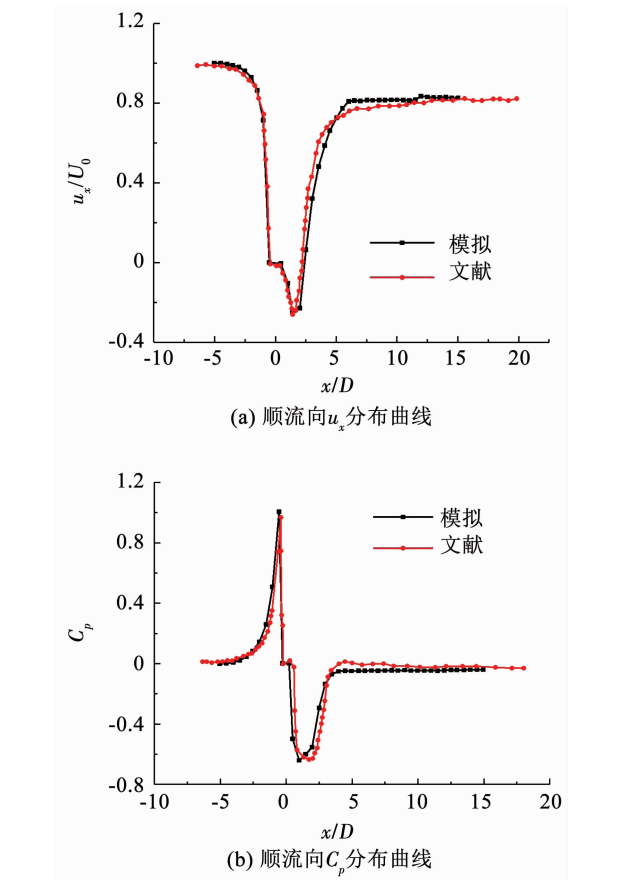


图 4 有限长圆柱流场参数 u_x 、 C_p 分布曲线

Fig. 4 Distribution curves of flow field parameters u_x , C_p of finite-length cylinder

对波浪形圆柱计算进行验证,得到图 5 所示,其网格划分方式与 Sim2 相同,图片中 WY-A 和 WY-B 分别是雷诺数为 3 000 时 $a/D_m=0.091$ 和 $a/D_m=0.152$ 的文献中计算结果^[12],其余为本文中数值模拟雷诺数同样为 3 000 时的计算结果, a/D_m 略有差异,但差别非常小,在 0.01 之内.从图中可以看出,模拟得到的结果与文献中的结果曲线趋势一致,数值相差不大,说明波浪形圆柱的计算结果同样比较可靠.

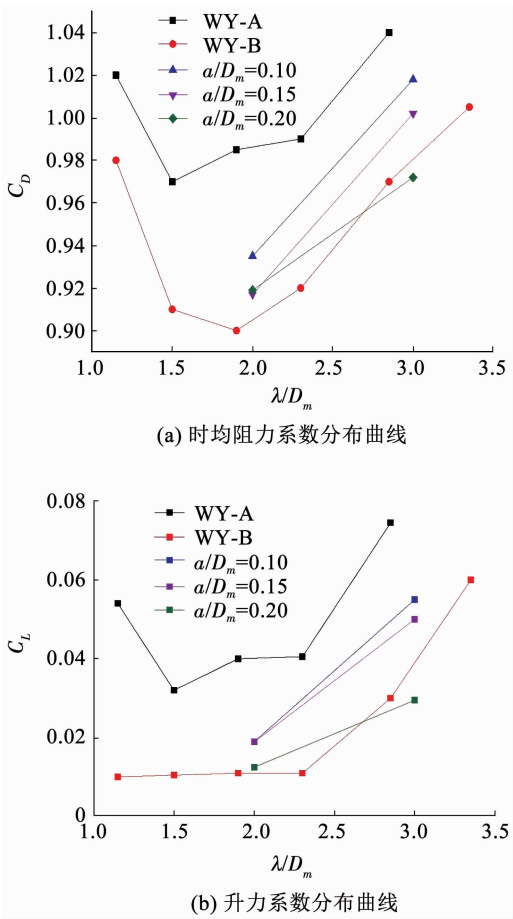


图 5 波浪形圆柱升、阻力系数分布曲线
Fig. 5 Distribution curves of lift and drag coefficients of wavy cylinder

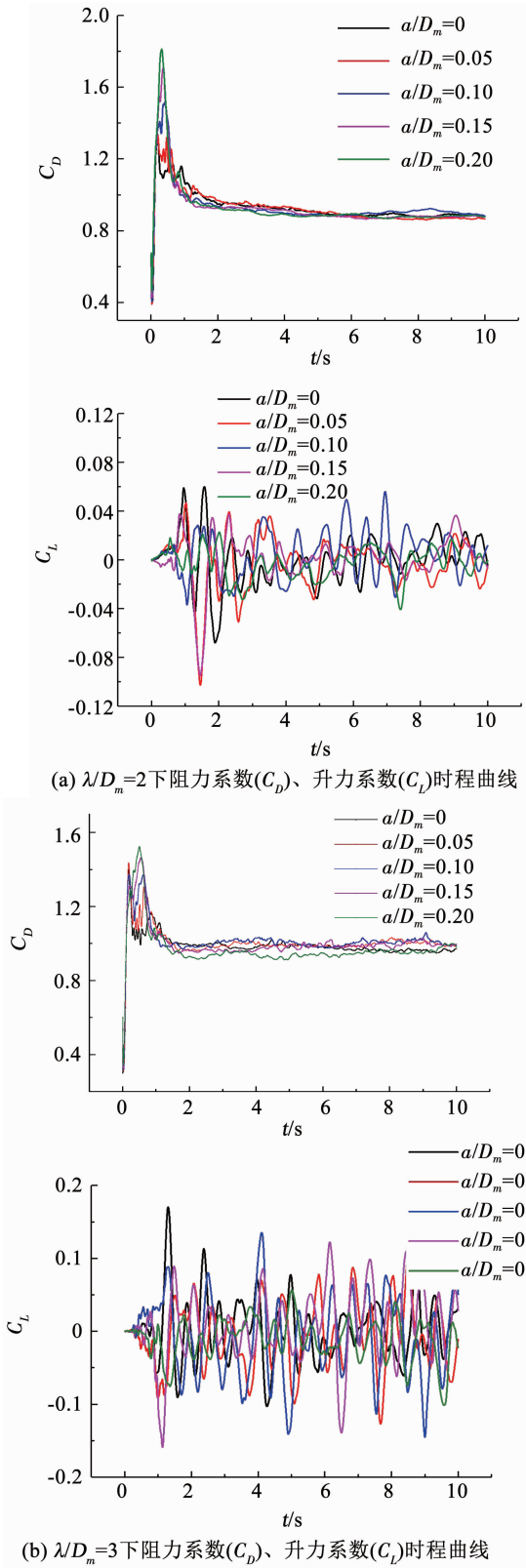
2 结果及分析

2.1 时均流场

图 6 为 $\lambda/D_m=2,3,4$ 的波浪形圆柱与相同长径比(L/D_m)的直圆柱的升、阻力系数在雷诺数 $Re=3\ 900$ 时的对比曲线,直圆柱的波幅 a 可以看做为 0,将之无量纲化可得 $a/D_m=0$.

对于升力时程曲线,无论波浪形圆柱还是直圆柱其升力曲线都波动复杂并且无规律,这是有限长圆柱绕流特有的性质.对于阻力时程曲线,在阻力达到稳定时波浪形圆柱和直圆柱的阻力系数都围绕一均值上下波动.

为了进一步研究波浪形圆柱的波长和波幅对圆柱升、阻力产生的影响,根据已经得到的时程曲线得到阻力系数均值与升力系数均方根值并作图,3 个作对比的直圆柱计算结果为 C2、C3、C4.从阻力系数图 7(a)中可以看出,无因次波长 $\lambda/D_m=2$ 时只有 $a/D_m=0.10$ 工况下波浪形圆柱阻力系数比直圆



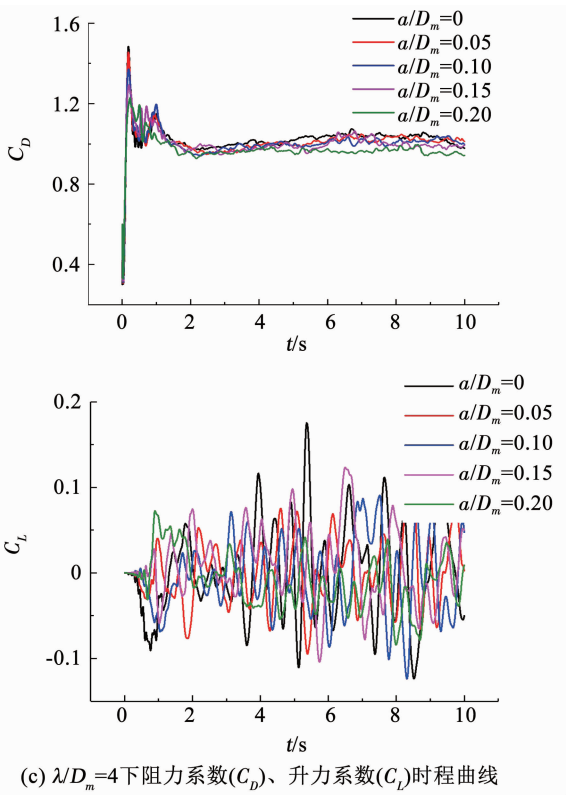


图 6 各波长下圆柱升、阻力系数时程曲线

Fig. 6 Variation of lift and drag coefficients with time at different wavelengths

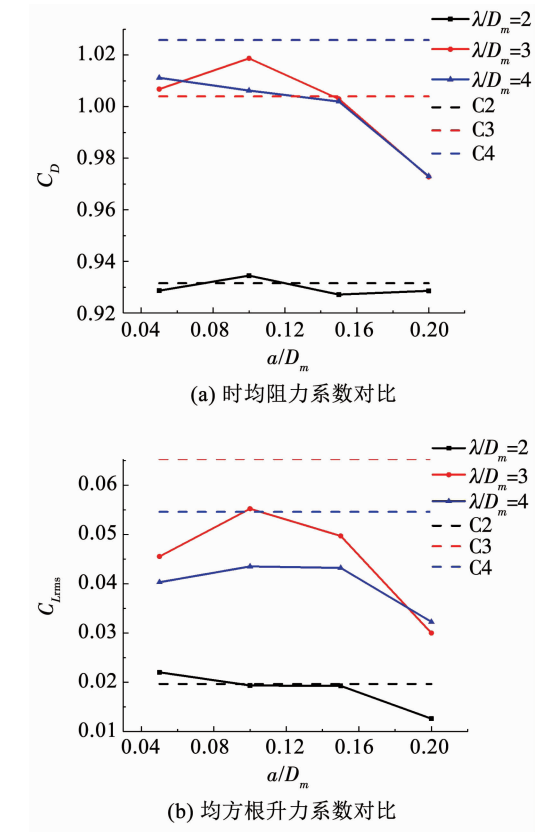


图 7 波浪形圆柱时均阻力系数和均方根值升力系数对比图
Fig. 7 Comparison of mean drag coefficient and root mean square lift coefficient of wavy cylinder

柱大,其余 3 种工况波浪形圆柱阻力系数均有降低,但降低程度较小,降低约 0.31% ~ 0.48% 左右; $\lambda/D_m = 3$ 时,当 $a/D_m \geq 0.15$ 工况下波浪形圆柱阻力系数降低明显,其中在 $a/D_m = 0.20$ 工况下阻力系数降低 3.11%; $\lambda/D_m = 4$ 时,4 种波幅均能较大程度减小阻力系数,最大降低 5.36%。由此可见,波长相同时不是所有波幅都能起到减阻效果,不同的波幅在不同波长下的减阻效果也不同。在本次计算的 12 种工况中 $\lambda/D_m = 4$, $a/D_m = 0.20$ 时的工况计算减阻效果最好。

升力系数均方根值如图 7(b) 所示,圆柱体受到流体作用的升力,升力均方根值越大,升力的波动程度越大,结构体振动越剧烈。从图中可以看出大多数工况下相对于直圆柱,波浪型圆柱的升力系数波动减小。当波长 $\lambda/D_m = 3, 4$ 时,升力系数均方根值明显减小,最高可减小 40.9% ~ 54.1%,能更有效的抑制升力波动。这说明在该圆柱外形下,流体漩涡的发展与脱落受到了抑制并发生改变。

从圆柱压力系数最小处对应的角开始研究圆柱周围的漩涡发展,按从下到上的顺序将波浪形圆柱的马鞍面、节点面命名为 Saddle1、Noddle1、Saddle2、Noddle2、Saddle3, Saddle1 为最底端的马鞍面。定义圆柱前方靠近速度入口处为 0° ,顺指针方向为角度增长的方向,做不同位置处圆周压力曲线,并定义圆周压力最低点处对应的角为 θ_{sep} ,可得到表 3 中直圆柱和波浪形圆柱的 θ_{sep} 。其中 $a1$ 、 $a2$ 、 $a3$ 、 $a4$ 分别表示 a/D_m 为 0.05、0.10、0.15、0.20 时的工况。从表中可以看出,直圆柱的 θ_{sep} 在展向发生的变化较小,变化幅度最大在 $2^\circ \sim 3^\circ$ 左右,而波浪形圆柱的 θ_{sep} 波动幅度较大,以 $a4$ 、 $\lambda/D_m = 4$ 时的结果为例, θ_{sep} 最大可相差 6° ,并且位于马鞍面处的 θ_{sep} 明显小于节点面处的 θ_{sep} 。

为更加直观的观察圆周压力系数随角度的变化以及圆周压力系数最低点对应角度的差异,现在在此展现 C4(波幅为 0)以及波幅为 $a4$ 、 $\lambda/D_m = 4$ 时的圆周压力系数曲线如图 8 所示, θ 为角度,从图中可发现直圆柱压力系数最低点处对应的角度即 θ_{sep} 在不同高度上相差不大,波浪形圆柱不同高度上的 θ_{sep} 存在明显差异,马鞍面处的值明显小于节点面处的值,这说明在流体流经圆柱时节点面处压力系数先到达最低点,这种节点面与马鞍面处圆周压力最低点对应的角度的差异会影响圆柱在该位置处的前后压差,影响圆柱壁面上的流动,从而影响圆柱尾涡脱落,影响圆柱后方漩涡的发展,使波浪形圆柱为流漩涡与直圆柱尾流漩涡不同,从而使波浪形圆柱的升、阻力与直圆柱不同。

表 3 各波长下不同波幅的圆周压力系数最小值对应角

Tab. 3 Corresponding angle of minimum circular pressure coefficient at different wave amplitudes and wave wavelengths

波长	位置/波幅	0/(°)	a1/(°)	a2/(°)	a3/(°)	a4/(°)
$\lambda = 2D_m$	Saddle1	69	67	65	63	69
	Noddle1	70	70	73	75	70
	Saddle2	70	68	70	64	70
	Noddle2	71	73	75	77	71
	Saddle3	72	69	68	66	72
	Saddle1	70	69	68	66	67
$\lambda = 3D_m$	Noddle1	70	71	73	74	74
	Saddle2	71	68	68	67	67
	Noddle2	70	72	74	73	76
	Saddle3	72	70	70	69	68
	Saddle1	70	69	69	69	69
	Noddle1	71	72	73	73	74
$\lambda = 4D_m$	Saddle2	71	70	70	68	68
	Noddle2	71	71	72	74	72
	Saddle3	70	69	70	69	69

不再上升,该角度即为流动的分离角,直圆柱的分离角相差不大,在波浪形圆柱中马鞍面处分离角较小,节点面处分离角较大;这种分离角的差异是由于旋涡分离存在差异引起的,它影响波浪形圆柱后方旋涡脱落,使波浪形圆柱升阻力与直圆柱存在差异。

2.2 瞬时流场

为研究波浪形圆柱减阻抑振周围流场流动机理,现以本次计算中减阻抑振明显的工况 12 为例,用 C4 工况做对比,作出两种工况的涡量图和在马鞍面和节点面高度处的基于 Q 涡准则的涡量等值线和圆柱涡量图,得到图 9。

从图 9 中可以看出,从总体而言,有限长的波浪形圆柱和直圆柱靠近自由端处的下游流场都受到自由端面的影响呈现为“三角形”,体现了有限长圆柱绕流的圆柱后方流场特征;自由端上方漩涡分布复杂,从图 9(b)可发现,在自由端顶部两圆柱上都有涡产生,被称为“顶涡”;流体流经自由端后,继续向圆柱后下方发展,形成“梢涡”产生下洗作用,影响圆柱的尾涡分布;从图 9(a)中的涡量等值线可以发现在底部圆柱的固定端处,两圆柱前缘都出现“马蹄”形状的涡,该涡被称为马蹄涡。这说明有限长的波浪形圆柱具有与直圆柱类似的流动特征。波浪形圆柱的流动具有其特有的性质,波浪形圆柱的直径不断发生变化,使波浪形圆柱的后方漩涡发展呈现出“分段”特性,使流经波浪形圆柱的流体流动更加复杂,并且从图 9(c)中可发现相同的涡量准则下波浪形圆柱下游流场形成的涡长度更长,这说明波浪形圆柱的产生的尾流可以将形成的漩涡输送到离圆柱较远处,漩涡在距离圆柱更远的位置处耗散,在一定程度上削弱了漩涡的交替脱落,而交替脱落的漩涡是因起圆柱受到交替变化升力的主要原因,因此波浪形圆柱的流场特征决定了它受到较小的脉动升力,能更有效的减阻抑振。

沿水平方向做速度云图和流线图得到图 10,其中 L2、L4 为节点面位置,L1、L3、L5 为马鞍面位置。从图中可以看出马鞍面的回流区长度大于节点面回流区长度,对 L3 和 L2 处的回流区长度作差得到 L_r 并进行无量纲化处理可得到 $L_r/D_m = 0.3$,即马鞍面回流区长度比节点面回流区长度长 $0.3D_m$ 。而直圆柱的回流区长度在两者之间并且在不同平面间相差不大。马鞍面更长的回流区使漩涡耗散过程发生在距离圆柱较远处,减弱了升力的波动,同时使圆柱基础压力系数较高,造成了阻力系数的降低。从波浪形圆柱各位置处的回流区宽度来看,节点面的回流区宽度明显小于马鞍面回流区宽度,更小的回流区宽度使节点面附近的分离剪切层获得了加速流动,而更宽的回流区使漩涡分离更加容易,这就是马鞍面处分离角更小的原因。从漩涡脱落情况来看靠近自

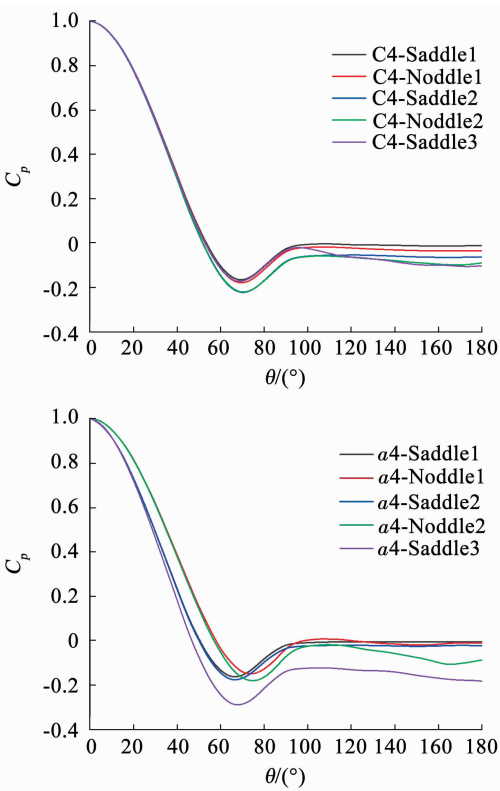


图 8 $\lambda = 4D_m$ 时直圆柱 (C4) 和波浪形圆柱 (a4) 圆周压力系数分布对比

Fig. 8 Comparison of circular pressure coefficient of straight cylinder (C4) and wavy cylinder (a4) at $\lambda = 4D_m$

从图 8 还可以发现经过 θ_{sep} 后随角度增大圆周压力系数明显上升,到达一定角度后圆周压力系数

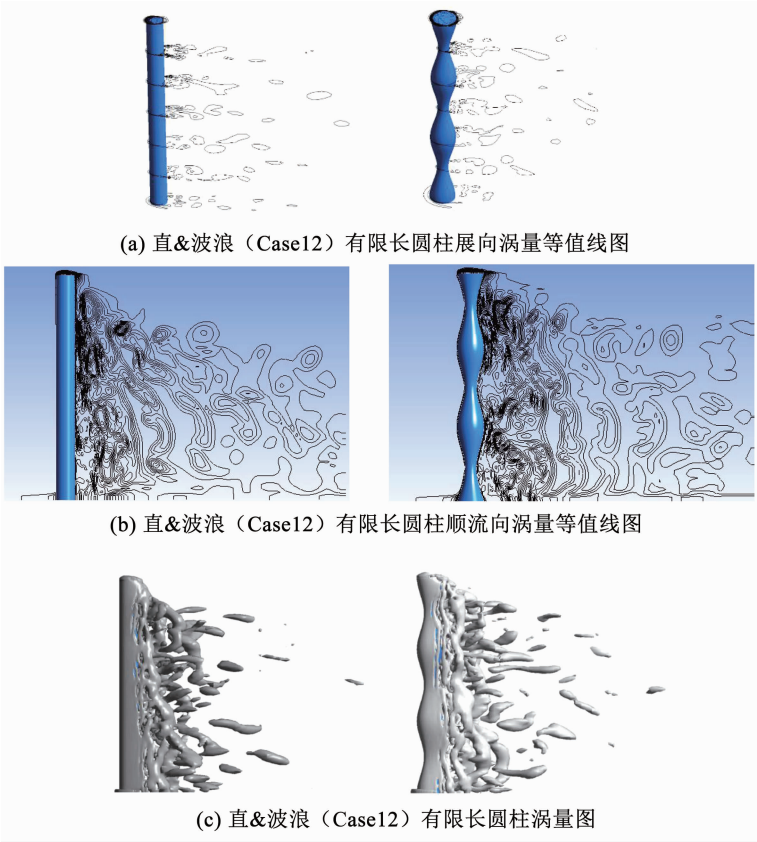


图 9 基于 Q 涡准则涡量图

Fig. 9 Vorticity distribution map based on Q-criterion

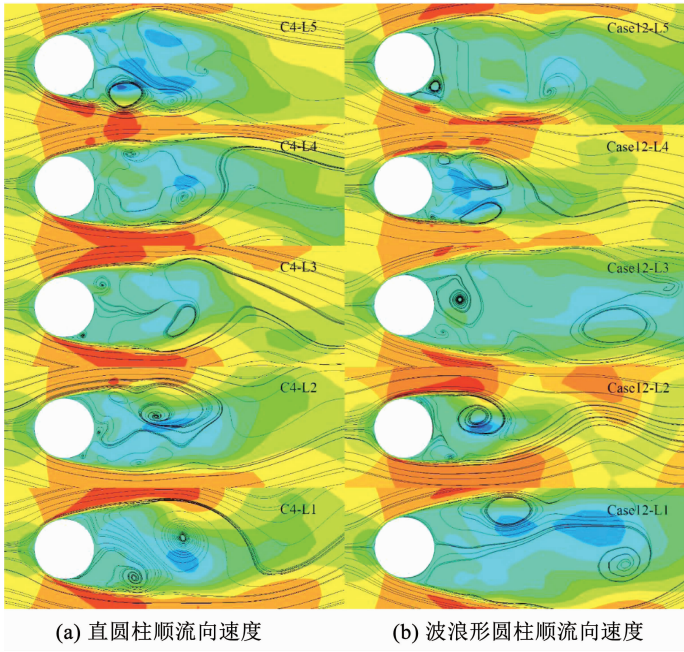


图 10 直圆柱和波浪形圆柱顺流向速度云图对比

Fig. 10 Comparison of on-line velocity contour of a straight cylinder and a wavy cylinder

由端面处的 L5 与其他高度上的漩涡脱落形式有明显差异,这主要受到自由端面下洗作用的影响,是直圆柱和波浪形圆柱共有的流动特征,但是二者的漩涡脱落形式却不同,这是由于圆柱波形的存在影响了下洗作用产生的涡,使波浪形圆柱周围的流动更加复杂.

从图 11 近壁面流线继续分析波浪形圆柱能减阻抑振的原因. 流线的交汇处即为流动的分流线. 沿圆柱展向直圆柱的分流线大致成一条直线,而波浪形圆柱的分流线有较小幅度的波动,这与图 8 中分离角统计结果一致. 局部放大波浪形圆柱壁面流线,发现流经马鞍面的流体除向圆柱后方流去的尾流

外,还有一部分向两侧的节点面流去,形成了展向上的流动,而直圆柱只有极少部分流体在展向上发生流动,波浪形圆柱壁面流体展向交互运动严重扰乱了展向各位置的尾流形成过程,在一定程度上改变了尾流场,抑制了升力波动,造成了阻力损失,使波浪形圆柱阻力系数降低。

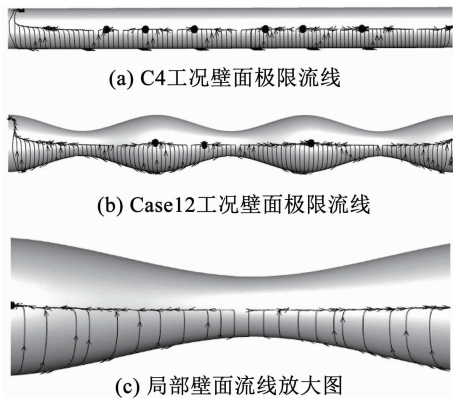


图 11 圆柱近壁面流线图

Fig. 11 Near wall streamline diagram of cylinder

3 结 论

1) 采用大涡模拟的方法计算得到了有限长直圆柱的阻力系数、顺流向速度、压力分布与波浪形圆柱的阻、升力系数,得到的计算结果与文献中结果对比发现吻合良好,表明大涡模拟的方法可准确模拟有限长波浪形圆柱问题。

2) 有限长波浪形圆柱与有限长直圆柱受到的升、阻力系数时程曲线变化趋势基本一致,升力系数时程曲线均波动剧烈无规律,体现有限长圆柱的流动性质;但二者阻力系数均值与升力系数均方根值存在差异,与有限长直圆柱相比,12 种波浪形圆柱中有 9 种阻力系数均值降低约 0.31% ~ 5.14%,11 种工况下的升力系数均方根值降低,降低幅度最高达 54.1%,升力系数均方根值降低可起到抑振作用;说明在一定波幅和波长下波浪形圆柱具有较好的减阻抑振作用。从升阻力系数的降低幅度来看,圆柱外形对升力系数的影响程度较大。

3) 有限长波浪形圆柱存在与有限长直圆柱相似的流动特征,二者均存在顶涡、梢涡和马蹄涡;波浪形圆柱近壁面展向,流经马鞍面的流体一部分向节点面流去,影响漩涡脱落,使波浪形圆柱马鞍面处圆周压力系数最低点对应角比节点面处小,影响尾流形成,抑制升力波动,造成了阻力损失,起到减阻抑振的作用;同时,波浪形圆柱马鞍面处有更宽、长的回流区,更宽的回流区使马鞍面处分离剪切层速度比节点面处小,漩涡分离更加容易,更长的回流区使漩涡耗散发生在距离圆柱更远处,减弱了升力波动。

参考文献

[1] 王露,李天匀,朱翔,等. 浸没边界格子 Boltzmann 方法的改进

- 及转动圆柱绕流模拟[J]. 中国舰船研究, 2016, 11(6): 98
WANG Lu, LI Tianyun, ZHU Xiang, et al. Improved immersed boundary lattice Boltzmann method and simulation of flow over rotating cylinder[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2016, 11(6): 98. DOI:10.3969/j.issn.1673-3185.2016.06.015
- [2] NAUDASCHER E, ROCKWELL D. Flow-induced vibrations: An engineering guide: IAHR hydraulic structures design manuals 7 [M]. Boca Raton: CPC Press, 1994
- [3] ZHU Hongjun, YAO Jie, MA Yue, et al. Simultaneous CFD evaluation of VIV suppression using smaller control cylinders[J]. Journal of Fluids and Structures, 2015, 57: 66. DOI:10.1016/j.jfluidstructs.2015.05.011.
- [4] MITTAL S. Effect of a "slip" splitter plate on vortex shedding from a cylinder[J]. Physics of Fluids, 2003, 15(3): 817. DOI:10.1063/1.1540632
- [5] LAM K, LIN Yufeng. Drag force control of flow over wavy cylinders at low Reynolds number[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2007, 21(9): 1331. DOI: 10.1007/BF03177417
- [6] 邹琳,林玉峰. 亚临界雷诺数下波浪形圆柱绕流的数值模拟及减阻研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2010, 25(1): 31
ZOU Lin, LIN Yufeng. Numerical simulation of turbulent flow around wavy cylinders at a subcritical Reynolds number and the investigation on drag reduction [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2010, 25(1): 31. DOI:10.3969/j.issn.1000-4874.2010-01.005
- [7] 乔永亮,桂洪斌. 无限长圆柱绕流的三维数值模拟研究[J]. 船舶工程, 2015, 37(9): 22
QIAO Yongliang, GUI Hongbin. Three-dimensional numerical simulation of flow past infinite-length circular cylinder[J]. Ship Engineering, 2015, 37(9): 22. DOI:10.13788/j.cnki.cbge.2015.09.022
- [8] 王晓聪,桂洪斌,刘洋. 三维有限长圆柱绕流数值模拟[J]. 中国舰船研究, 2018, 13(2): 27
WANG Xiaocong, GUI Hongbin, LIU Yang. Numerical simulation of three-dimensional flow around a circular cylinder of finite length[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2018, 13(2): 27. DOI:10.3969/j.issn.1673-3185.2018.02.004
- [9] 乔永亮,桂洪斌,刘祥鑫. 三维圆柱绕流数值模拟湍流方法的选择[J]. 水利水运工程学报, 2016(3): 119
QIAO Yongliang, GUI Hongbin, LIU Xiangxin. Analysis of three-dimensional numerical simulation methods for turbulent flow past circular cylinder[J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(3): 119. DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2016.03.016
- [10] 王晓聪. 三维有限长圆柱绕流机理及减阻研究[D]. 威海: 哈尔滨工业大学, 2018
WANG Xiaocong. Study of the mechanism and force reduction method for 3-D flow around a circular cylinder of finite length[D]. Weihai: Harbin Institute of Technology, 2018
- [11] LAM K, LIN Yufeng. Effects of wavelength and amplitude of a wavy cylinder in cross-flow at low Reynolds numbers[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2009, 620(620): 199. DOI: 10.1017/S0022112008004217
- [12] LAM K, LIN Yufeng. Large eddy simulation of flow around wavy cylinders at a subcritical Reynolds number[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2008, 29(4): 1071. DOI:10.1016/j.ijheatfluidflow.2008.01.006
- [13] KAWAMURA T, HIWADA M, HIBINO T, et al. Flow around a finite circular cylinder on a flat plate: Cylinder height greater than turbulent boundary layer thickness[J]. Bulletin of JSME, 1984, 27(232): 2142. DOI: 10.1299/jsme1958.27.2142
- [14] OKAMOTO S, SUNABASHIRI Y. Vortex shedding from a circular cylinder of finite length placed on a ground plane[J]. Journal of Fluids Engineering, 1992, 114(4): 512. DOI: 10.1115/1.2910062
- [15] SEYED-AGHAZADEH B, BENITZ M A, CARLSON D W, et al. CFD simulations and experimental measurements of flow past free-surface piercing, finite length cylinders with varying aspect ratios[J]. Computers and Fluids, 2016, 136: 247. DOI: 10.1016/j.compfluid.2016.06.013
- [16] ZHANG Hui, YANG Jianmin, XIAO Longfei, et al. Large eddy simulation of the flow past both finite and infinite circular cylinders at $Re = 3\ 900$ [J]. Journal of Hydrodynamics, 2015, 27(2): 195. DOI:10.1016/S1001-6058(15)60472-3

(编辑 张 红)