

# 均匀流与振荡流作用下圆柱横向振荡水动力特性研究

张楠<sup>1</sup>, 李春<sup>1,2</sup>, 丁勤卫<sup>1</sup>, 郝文星<sup>1</sup>, 王东华<sup>1</sup>

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 上海市动力工程  
多相流动与传热重点实验室, 上海 200093)

**摘要:** 真实海洋环境中由于波浪场的存在, 单纯均匀流较少, 研究均匀流与振荡流共同作用对圆柱横向振荡的影响显得十分必要。为此, 在验证数值方法可靠的基础上, 通过改变振荡流强度和运动圆柱的振幅和频率, 分析圆柱所受作用力的变化特性。研究表明: 升力系数的变化规律既受振荡流强度的影响也受圆柱振幅比的影响; 振荡流弱且圆柱振幅比较小时, 圆柱体受力、锁定和拍频与均匀流单独作用时相似; 增大振荡流强度后, 圆柱体的升力系数幅值一直较大, 且尾流中漩涡脱落没有明显的规律。

**关键词:** 均匀流; 振荡流; 横向振荡; 水动力特性; 计算流体力学(CFD)

中图分类号: TV131; O353 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2017)04-0119-05

## Study on the hydrodynamic characteristics of oscillating cylinder under combined action of uniform flow and oscillating flow

ZHANG Nan<sup>1</sup>, LI Chun<sup>1,2</sup>, DING Qinwei<sup>1</sup>, HAO Wenxing<sup>1</sup>, WANG Donghua<sup>1</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;  
2. Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer in Power Engineering, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** In the real marine environment, due to the existence of the wave field, the simple uniform flow is less, and it is necessary to study the effect of uniform flow and oscillatory flow on the oscillating cylinder. For this reason, the hydrodynamic characteristics of oscillating cylinder were analyzed by changing the intensity of oscillating flow and the amplitude ratio of the moving cylinder on the basis of validating the numerical method. The results show that the variation law of the lift coefficient is affected by the intensity of the oscillation flow and the amplitude ratio of the cylinder; when oscillation flow is weak and the amplitude ratio of the cylinder is small, the lift coefficient, the locking and the beat are similar to the uniform flow; when oscillation flow is strong, the magnitude of the lift coefficient is always large and the vortex shedding in the wake is not obvious.

**Key words:** uniform flow; oscillating flow; oscillating cylinder; hydrodynamic characteristics; computational fluid dynamic(CFD)

## 1 研究背景

海洋工程领域中许多关键结构物都为圆柱体结构, 如 Spar 平台、海洋立管、系泊缆等<sup>[1]</sup>。在来流作用下圆柱体结构物会产生涡激振动进而导致疲劳破坏<sup>[2-3]</sup>。随着深海开发的加速, 为保证安全生产, 需对圆柱体结构物在复杂流场下的水动力学特性进行研究<sup>[4]</sup>。

涡激振动问题中, 圆柱横向振荡是研究的热点领域<sup>[5]</sup>。横向振荡指圆柱以一定的振幅和频率做横向运动, 是一定条件下流体与结构物之间的耦合作用。当漩涡泄放频率与结构运动频率接近时, 会发生“频率锁定”现象, 即在一个较大的  $St$  数范围内泄放频率锁定在圆柱的运动频率附近<sup>[5]</sup>。

早期对圆柱横向振荡的研究主要集中在实验方法<sup>[6-7]</sup>。Meneghini 等<sup>[8]</sup>对雷诺数为 200 的均匀流

收稿日期: 2017-03-03; 修回日期: 2017-03-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(51676131、51176129); 上海市科委项目(13DZ2260900)

作者简介: 张楠(1992-), 女, 山东济南人, 硕士研究生, 研究方向: 风力发电。

通讯作者: 李春(1963-), 男, 北京人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向: 风力利用、动力机械及工程。

中横向振荡圆柱尾流的泄涡频率与锁定现象进行实验研究,并给出锁定区域。近年来,国内外学者越来越多的采用数值模拟方法对圆柱横向振荡问题进行研究<sup>[9]</sup>。文献[10]对圆柱在均匀来流中横向振荡问题进行数值模拟分析,发现雷诺数为200时,振荡圆柱尾涡结构没有明显的三维结构,采用二维方法即可满足精度要求。文献[11]应用格子 Boltzmann 法研究了低雷诺数均匀流作用下近壁圆柱振荡问题。文献[12]利用有限元方法结合 ALE 动网格技术对亚临界雷诺数下的圆柱受迫振动问题开展了数值模拟研究。文献[13]对低雷诺数下多圆柱横向振荡问题进行数值模拟研究。文献[14]研究了振荡流作用下柔性立管涡激振动中漩涡的发展过程。文献[15]初步探讨了小振幅下均匀流和振荡流共同作用时圆柱横向振荡问题。

许多学者分别对均匀流和振荡流单独作用下圆柱横向振荡问题进行研究,并取得一系列丰富的成果。但均匀流与振荡流共同作用下的研究却鲜有报道。真实海洋环境中由于波浪场的存在,单纯均匀流较少。因此,研究均匀流与振荡流共同对圆柱横向振荡的影响显得十分必要。

本文通过 UDF (User Defined Function, 用户自定义函数) 编程实现速度入口均匀流和振荡流叠加,以及圆柱的横向振荡,结合 FLUENT 求解器进行求解。先通过改变圆柱振荡频率和振幅,验证雷诺数为200时均匀流单独作用下圆柱横向振荡的水动力特性,并与相关模型实验对比。然后,分析改变振荡流强度和运动圆柱的振幅和频率对圆柱水动力特性的影响。

## 2 理论基础

### 2.1 控制方程<sup>[16]</sup>

基于连续介质假设,直角坐标系中,二维不可压缩黏性流体连续性方程和动量方程分别为:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

式中:  $u$  和  $v$  分别为  $x$ 、 $y$  方向的速度,  $\text{m/s}$ ;  $p$  为压力,  $\text{Pa}$ ;  $\nu$  为流体的运动黏性系数,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $\rho$  为流体的密

度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

### 2.2 圆柱横向振荡主要参数

尾涡的交替发会产生作用在圆柱上的横向和流向力。横向力通常比流向力大一个数量级,因此圆柱更易发生横向振荡<sup>[17]</sup>。圆柱横向振荡的位移  $y(t)$  为:

$$y(t) = A \sin(2\pi f_n t) \quad (4)$$

式中:  $A$  为振动幅值,  $\text{m}$ ;  $f_n$  为圆柱的振动频率,  $\text{Hz}$ ;  $t$  为运动时间,  $\text{s}$ 。

故圆柱的运动速度  $u(t)$  为:

$$u(t) = 2\pi f_n A \cos(2\pi f_n t) \quad (5)$$

通过  $A/D$  和  $f_n/f_s$  分别对横向振荡幅度和频率进行无量纲化处理。其中,  $f_s$  为静止圆柱绕流的泄涡频率。根据参考文献[10],圆柱振荡的幅值和频率如表1所示。

表1 圆柱振荡幅值和频率

振幅 $A/D$		频率比 $f_n/f_s$				
0.2	0.75	0.85	0.95	1.05	1.12	1.20
0.4	0.70	0.75	0.95	1.05	1.12	1.20

### 2.3 均匀流和振荡流特征参数

流域入口及侧面均设置为速度入口,来流方向为  $x$  轴正向;出口为压力出口,忽略纵向速度梯度;圆柱表面满足无滑移固壁条件。表征来流的主要特征参数有雷诺数  $Re$  和柯莱根-卡彭特数  $KC$  数。单一均匀流较为简单,只采用雷诺数即可。

$$Re = U_{\max} D / \nu \quad (6)$$

$$KC = U_{\max} / fD \quad (7)$$

振荡流模型需同时采用两个参数表征。以正弦  $x(t) = B \sin(2\pi ft)$  变化的振荡流为例,速度  $v(t)$  和  $KC$  数分别为:

$$v(t) = 2\pi f B \cos(2\pi ft) \quad (8)$$

$$KC = 2\pi B / D \quad (9)$$

式中:  $U_{\max}$  为最大速度,  $\text{m/s}$ ;  $f$  为振荡流频率,  $\text{Hz}$ ;  $B$  为振荡流幅值,  $\text{m}$ ;  $D$  为圆柱直径,  $\text{m}$ 。

### 2.4 计算网格和边界条件

计算域如图1所示,  $x$  轴平行于来流方向,  $y$  轴垂直于来流方向。圆柱直径  $D = 0.02 \text{ m}$ , 上下边距圆柱中心为  $12D$ , 左端速度入口到圆柱中心为  $22D$ , 右端压力出口距圆柱中心为  $90D$ 。圆柱中心  $12D$  范围内的网格是运动的,动静网格之间通过滑移面 (interface) 来连接,由于中心区域流动状态变化较为剧烈,对整个流场影响较大,因此对其进行局部加密处理如图2所示。

左端为速度进口,来流速度为 0.01 m/s;右端为压力出口;圆柱采用无滑移固壁条件;侧壁采用对称边界条件;压力-速度耦合采用 SIMPLE 算法处理;时间项采用二阶隐式积分方法;对流项采用二阶迎风离散格式。

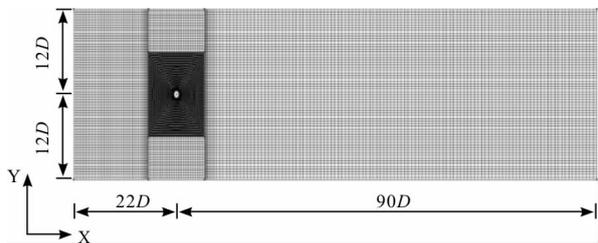


图 1 计算区域网格模型

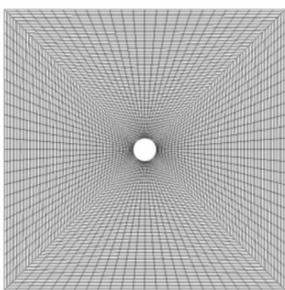


图 2 圆柱周围(12 D × 12 D)的局部网格

### 3 计算结果及分析

#### 3.1 计算模型可靠性验证

为验证计算模型的正确性,首先对  $Re$  为 200 的均匀流中静止圆柱绕流问题进行数值模拟。表 2 给出了静止圆柱绕流计算得到的斯特罗哈尔数  $St$  ( $St = f_s D / U$ ,  $f_s$  为固定圆柱的漩涡脱落频率)与实验结果。可知,本文对静止圆柱绕流的模拟结果真实可靠。

表 2  $S_t$  数值模拟准确性验证

本文结果	文献[18]	文献[8]	文献[19]
0.196	0.200	0.196	0.198

为进一步验证动网格的可靠性。图 3 给出了  $Re = 200$  时均匀流作用下圆柱横向振荡发生“锁定现象”的范围。图中正方形标记为本文计算结果,其他符号和曲线为文献[9]通过实验得到的锁定现象的频率范围。

由图 3 可知,计算结果真实可靠。 $A/D = 0.2$ , 横向振荡频率比  $f_n/f_s$  为 0.85、0.95 和 1.05 时,圆柱发生“锁定现象”。当  $A/D = 0.4$  时,锁定上限的频率比不变,仍为 1.05,而锁定下限的频率比变为 0.70。由此可知,增加圆柱振荡的幅值会使锁定频率比的

下限降低,进而扩展锁定频率比范围,且锁定范围不是以  $f_n/f_s = 1.0$  为中心对称分布的。

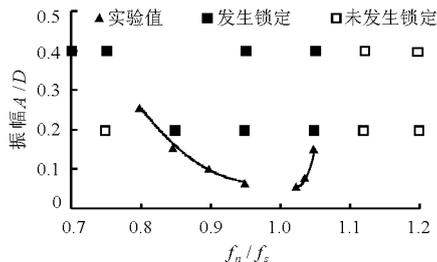


图 3  $Re = 200$  均匀来流中锁定范围

#### 3.2 均匀流单独作用下研究

振幅  $A/D = 0.2$  时,3 种典型振幅比  $f_n/f_s = 0.75$ 、0.95 和 1.12 下升阻力系数时域图及升力系数频谱图如图 4 所示。

由图 4(a) 和 4(c) 可知,当振荡频率在非锁定区域内,升阻力系数既受到振荡频率  $f_n$  的作用,又受到  $St$  频率  $f_s$  的影响,出现明显的拍频( beating )现象。

当  $f_n/f_s = 0.75$  时主控频率为  $f_s$ , 而  $f_n/f_s = 1.20$  时主控频率为  $f_n$ , 可知随振荡频率的增加,泄涡频率逐渐由静止圆柱泄放频率即  $St$  频率  $f_s$  转变到振荡频率  $f_n$ 。

由图 4(b) 可知,在锁定范围内,升阻力处于平稳的振荡状态,没有出现拍频现象,且漩涡发放频率等于圆柱横向振荡频率。

图 5 为均匀流中不同振幅条件下,最大升力系数随圆柱振荡频率的变化规律。由图 5 可知,随圆柱振荡频率的增加,升力系数幅值在频率比  $f_n/f_s = 1$  附近发生突变。这是因为,此时自然涡脱落频率等于横向振荡频率,发生“锁定现象”。对比不同振幅下的最大升力系数可知,频率比低于“锁定现象”下限时,  $A/D = 0.2$  条件下的最大升力系数大于  $A/D = 0.4$  条件下的最大升力系数;频率比高于“锁定现象”上限时,则相反。可知,振荡圆柱的受力依赖于振荡幅值和频率。

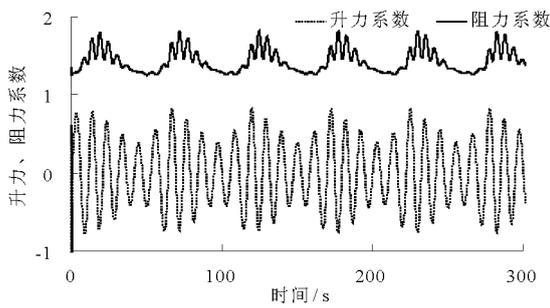
#### 3.3 均匀流与振荡流共同作用下影响研究

图 6 为均匀流与振荡流共同作用时,不同振幅下,3 种典型频率比下的升力系数曲线。其中均匀流  $Re = 200$ , 振荡流  $Re = 15$ ,  $KC = 0.56$ 。叠加振荡流后的雷诺数变化范围为 185 ~ 215。

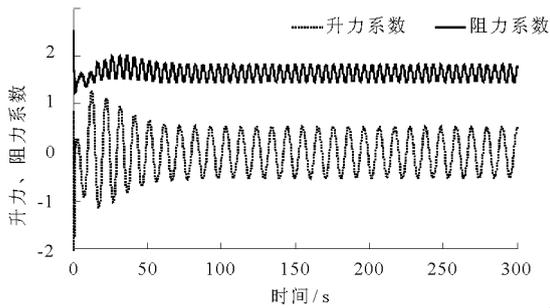
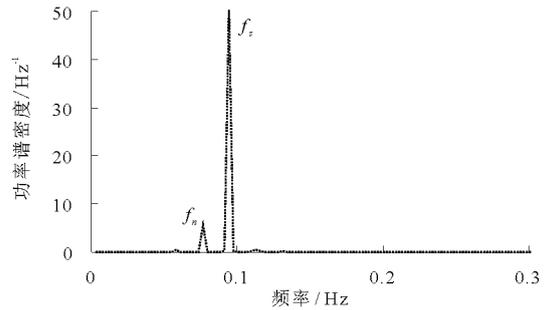
由图 6 可知,振幅比  $A/D = 0.2$  下,频率比为 0.75 和 1.12 时升力系数出现了“拍频”现象,而频率比为 0.95 时,升力系数的变化频率恒定,振幅变化很小,基本处于锁定状态。此时,叠加振荡流后升

力系数与均匀流单独作用时的变化规律相似。这是因为振荡流  $Re$  相对于均匀流  $Re$  较小, 振荡流影响

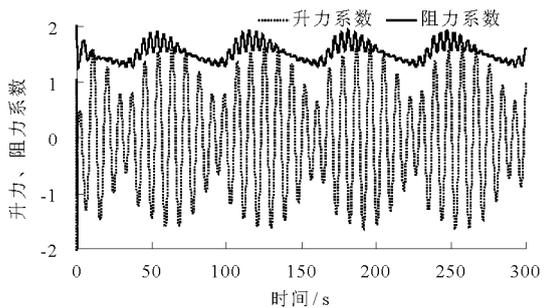
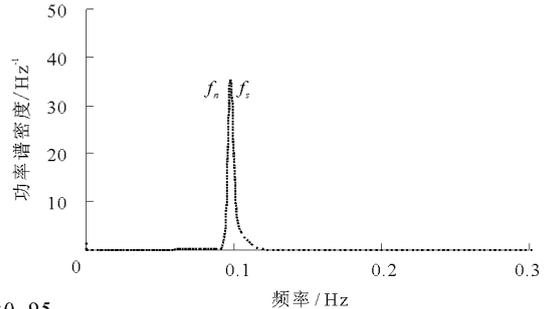
有限。



(a)  $f_n/f_s=0.75$



(b)  $f_n/f_s=0.95$



(c)  $f_n/f_s=1.12$

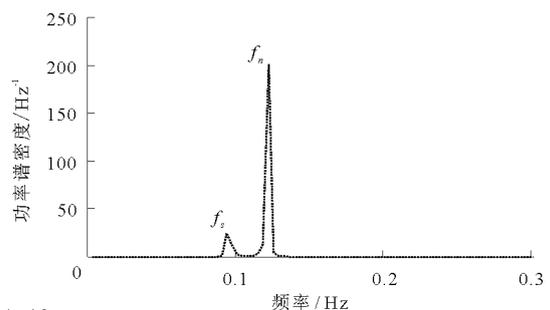


图4  $A/D = 0.2$  时不同振荡频率比下升、阻力系数及升力系数频谱图变化

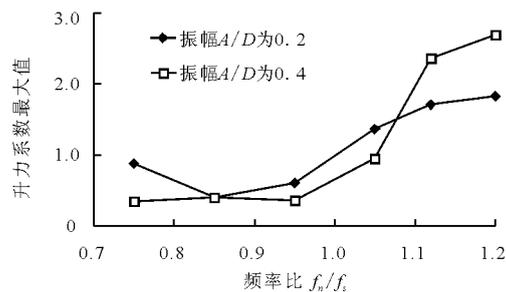


图5 均匀流作用下升力系数最大值

振幅比  $A/D = 0.4$  下, 频率比为 0.75 时, “拍频”现象消失, 升力系数变化不规则, 表明此时尾流的发放频率已不再是原来的振动频率和斯特罗哈尔频率; 频率比为 0.95 时, 升力系数的变化频率唯一, 振幅变化很小, 也可认为处于锁定状态; 频率比为

1.12 时再次出现了“拍频”现象。

对比不同振幅比下升力系数的可知, 频率比为 0.75 和 0.95 时, 振幅比大时, 其升力系数幅值反而小, 频率比为 1.12 时, 振幅比大时, 升力系数也大。

### 3.4 振荡流强度影响研究

为进一步研究振荡流强度的影响, 本节选取均匀流  $Re = 200$ , 振荡流  $Re = 100$ ,  $KC = 2.51$ , 此时振荡流的叠加后的雷诺数变化范围为 100 ~ 300。

图 7 为不同振荡流强度、不同振幅比时, 升力系数最大值随频率比的变化。由图 7 可知, 强振荡流时, 升力系数最大值变化幅度不大, 振幅比  $A/D = 0.2$  和  $A/D = 0.4$  时升力系数最大值分别在 1.8 ~ 2.3 和 2.1 ~ 2.6 之间; 随频率比  $f_n/f_s$  的增加, 升力系数最大值变大; 相同频率比时, 振幅比越大, 升力系数的最大值也越大。弱振荡流时, 升力系数最大值

变化幅度较大,振幅比  $A/D = 0.2$  和  $A/D = 0.4$  时升力系数最大值分别在  $0.9 \sim 1.8$  和  $0.3 \sim 2.5$  之间;升力系数最大值随频率比的增加而变大,在频率比

为  $0.95 \sim 1.12$  的区间内发生突变,且频率比小于  $1.12$  时,振幅比  $A/D = 0.2$  时升力系数最大值较大,频率比大于  $1.12$  时则相反。

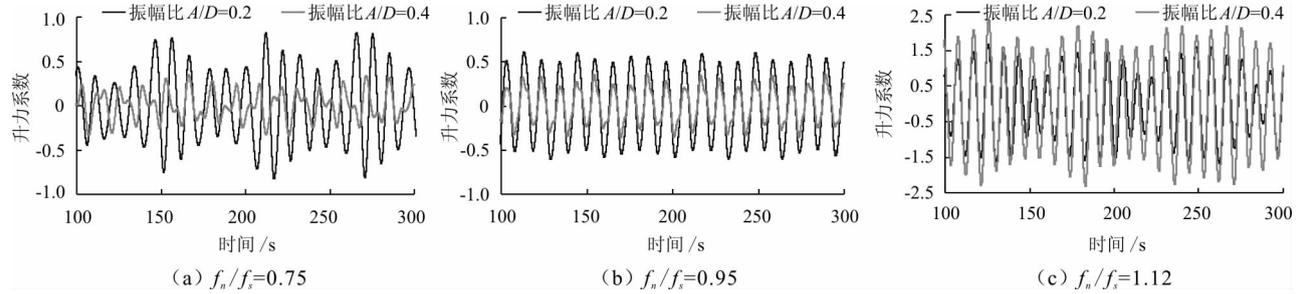


图 6 均匀流与振荡流作用下升力系数

图 8 为均匀流与强振荡流作用下,频率比为  $0.95$ ,振幅比不同时升力系数随时间的变化曲线,由图 8 可知,叠加强振荡流时,升力系数变化没有明显的周期性和固定的幅值,且并非沿  $0$  对称,说明此时尾流中漩涡脱落没有明显的规律。

(1) 均匀流单独作用时增加圆柱振荡的幅值会使锁定频率比的下限降低,进而扩展锁定范围,且锁定范围不是以  $f_n/f_s = 1.0$  为中心对称分布的。

(2) 均匀流与振荡流共同作用下,升力系数的变化规律既受振荡流强度的影响,也受圆柱振幅比大小的影响。

(3) 振荡流较弱 ( $Re = 15, KC = 0.56$ ) 同时圆柱的振幅比较小 ( $A/D = 0.2$ ) 时,圆柱体受力、锁定和拍频与均匀流单独作用时相似。

(4) 振荡流较强 ( $Re = 100, KC = 2.51$ ) 时,不同频率比和振幅下,升力系数幅值一直较大,且尾流中漩涡脱落没有明显的规律。

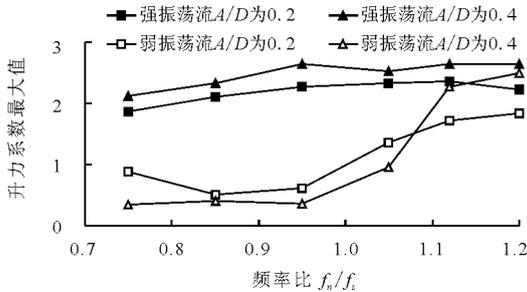


图 7 均匀流与振荡流作用下升力系数最大值随频率比的变化

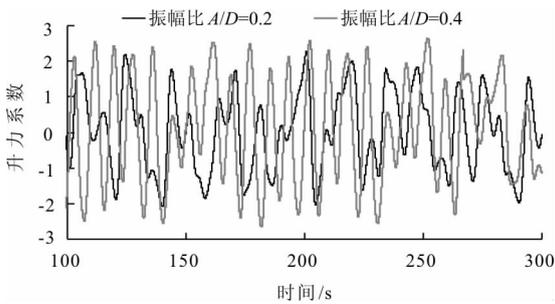


图 8 均匀流与强振荡流下  $f_n/f_s = 0.95$  时不同振幅比下升力系数

### 4 结 论

本文通过编程实现速度入口均匀流和振荡流的叠加,以及圆柱的横向振荡,结合 FLUENT 求解器进行求解。与模型实验验证对比后,分析了叠加强振荡流强度不同及圆柱振幅比不同时,圆柱的水动力特性。得到如下结论:

### 参考文献:

[1] Yue Deng, Huang Weiping, Zhao Jingli. Combined action of uniform flow and oscillating flow around marine riser at low keulegan-carpenter number[J]. Journal of Ocean University of China, 2014, 13(3): 390-396.

[2] 丁勤卫,李春,王东华,等.螺旋侧板对漂浮式风力机平台动态响应的影响[J]. 动力工程学报, 2016, 36(8): 629-637.

[3] 吴应湘,林黎明,钟兴福,等.带有新型涡激振动抑制罩的圆柱体的水动力特性[J]. 力学学报, 2016, 48(2): 307-317.

[4] 王东华,叶舟,郝文星,等.海上漂浮式风力机 Spar 平台波频与慢漂响应性能分析[J]. 动力工程学报, 2016, 36(11): 907-913.

[5] 樊娟娟,唐友刚,张若瑜,等.高雷诺数下圆柱绕流与大振幅比受迫振动的数值模拟[J]. 水动力学研究与进展, 2012, 27(1): 24-32.

[6] Williamson C H K. Sinusoidal flow relative to circular cylinders[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1985, 155: 141-174.

[7] Williamson C H K, Roshko A. Vortex formation in the wake of an oscillating cylinder[J]. Journal of Fluids and Structures, 1988, 2(4): 355-381.

## 参考文献:

- [1] 贾本有,钟平安,朱非林. 水库防洪优化调度自适应拟态物理学算法[J]. 水力发电学报,2016,35(8):32-41.
- [2] 彭勇,唐国磊,薛志春. 基于改进人工鱼群算法的梯级水库群优化调度[J]. 系统工程理论与实践,2011,31(6):1118-1125.
- [3] Luo J, Chen C, Xie J. Multi-objective immune algorithm with preference-based selection for reservoir flood control operation[J]. Water Resources Management,2015,29(5):1447-1466.
- [4] Kumar D N, Baliarsingh F, Raju K S. Optimal reservoir operation for flood control using folded dynamic programming[J]. Water Resources Management,2010,24(6):1045-1064.
- [5] 万星,丁晶,张少文,等. 基于灰色动态规划的梯级电站防洪发电优化调度研究[J]. 水电能源科学,2005,23(3):17-19.
- [6] 纪昌明,吴月秋,张验科. 混沌粒子群优化算法在水库防洪优化调度中的应用[J]. 华北电力大学学报(自然科学版),2008,35(6):103-107.
- [7] 邹强,王学敏,李安强,等. 基于并行混沌量子粒子群算法的梯级水库群防洪优化调度研究[J]. 水利学报,2016,47(8):967-976.
- [8] 王本德,许海军. 水库防洪实时调度决策模糊推理神经网络模型及其应用[J]. 水文,2003,23(6):8-11.
- [9] 王森,程春田,李保健,等. 防洪优化调度多约束启发式逐步优化方法[J]. 水科学进展,2013,24(6):869-876.
- [10] 罗军刚,解建仓,陈田庆,等. 基于事例推理技术的水库洪水调度研究与应用[J]. 水科学进展,2009,20(1):32-39.
- [11] 王本德,朱永英,张改红,等. 应用中央气象台24h降雨预报的可行性分析[J]. 水文,2005,25(3):30-34.
- [12] 程春田,王本德. 启发式与人机交互相结合的水库防洪模糊优化调度模型[J]. 水利学报,1995,26(11):71-76.
- [13] 董子敖. 水库群调度与规划的优化理论及应用[M]. 济南:山东科学技术出版社,1989.
- [14] 秦旭宝,董增川,费如君,等. 基于逐步优化算法的水库防洪优化调度模型研究[J]. 水电能源科学,2008,26(4):60-62.
- [15] 钱镜林,张松达,夏梦河. 逐次优化算法在梯级水库防洪优化调度中的应用[J]. 中国农村水利水电,2014(8):22-25.

(上接第123页)

- [8] Meneghini J R, Bearman P W. Numerical simulation of high amplitude oscillatory flow about a circular cylinder[J]. Journal of Fluids & Structures,1995,9(4):435-455.
- [9] Placzek A, Sigrist J F, Hamdouni A. Numerical simulation of an oscillating cylinder in a cross-flow at low Reynolds number: Forced and free oscillations[J]. Computers & Fluids,2009,38(1):80-100.
- [10] 梁亮文,万德成. 横向受迫振荡圆柱低雷诺数绕流问题数值模拟[J]. 海洋工程,2009,27(4):45-53+60.
- [11] 李薇. 格子 Boltzmann 方法研究近壁面圆柱涡激振动[D]. 大连:大连理工大学,2014.
- [12] 赵静,吕林,董国海,等. 亚临界雷诺数下圆柱受迫振动的数值研究[J]. 计算力学学报,2012,29(1):74-80.
- [13] 吴浩,孙大鹏,吕林. 低雷诺数下多根圆柱横向受迫振动的数值模拟研究[J]. 中国海洋平台,2015,30(2):48-56.
- [14] 王俊高,付世晓,许玉旺,等. 正弦振荡来流下柔性立管涡激振动发展过程[J]. 力学学报,2014,46(2):173-182.
- [15] 邓跃. 低雷诺数下均匀流和振荡流共同作用的圆柱体受迫振动和涡激振动研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2014.
- [16] 安德森. 计算流体力学基础及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,2007.
- [17] 盛磊祥. 海洋管状物结构涡激振动流体动力学分析[D]. 东营:中国石油大学(华东),2008.
- [18] Braza M, Chassaing P, Ha M H. Numerical study and physical analysis of the pressure and velocity field in the near wake of a circular cylinder[J]. Journal of Fluid Mechanics,1986,165:79-130.
- [19] Stewart B, Leontini J, Hourigan K, et al. Vortex wake and energy transitions of an oscillating cylinder at low Reynolds number[J]. Anziam Journal,2005,46(6):181-195.