

引用格式: 周力, 邱中秋, 袁亚帅, 等. 亚临界雷诺数下单圆柱涡激振动研究[J]. 中国舰船研究, 2022, 17(3): 145–152.  
ZHOU L, QIU Z Q, YUAN Y S, et al. Vortex-induced vibration of cylinder under sub-critical Reynolds number[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2022, 17(3): 145–152.

# 亚临界雷诺数下单圆柱 涡激振动研究



扫码阅读全文

周力, 邱中秋\*, 袁亚帅, 宗智

大连理工大学 船舶工程学院, 辽宁大连 116024

**摘要:** [目的] 为了实现亚临界雷诺数下单圆柱涡激振动振幅响应的准确预报, 利用数值模拟方法研究强迫振动时圆柱的升力系数与振幅比( $Cl-A/D$ )之间的关系。[方法] 基于 Realizable  $k-\varepsilon$  湍流模型, 采用有限体积法对圆柱的强迫振动进行二维数值模拟, 计算得到激振频率比  $f_e/f_n=1$  附近范围内不同振幅比下的升力系数曲线。选取圆柱振动速度最大时对应的升力系数, 建立  $Cl-A/D$  关系曲线。[结果] 结果表明,  $Cl-A/D$  拟合曲线总体变化趋势与涡激振动预报程序 SHEAR7 的结果吻合良好。同时, 各激振频率比  $f_e/f_n$  下的零升力系数点均位于振幅比  $A/D=0.8$  附近, 且结构尾涡脱落模式在  $A/D=0.8$  附近发生了转变, 由“P+S”模式转变到“2P”模式(P表示一对旋转方向相反的旋涡脱落, S表示单个旋涡脱落)。在圆柱涡激振动实验中, 发现涡激振动出现“锁定”时的最大振幅在  $0.8D$  附近。[结论] 亚临界雷诺数下强迫振动圆柱  $Cl-A/D$  关系曲线升力系数为零时对应的振幅比与圆柱在涡激振动中的最大响应振幅比基本保持一致, 且圆柱尾涡脱落模式在此振幅比下发生了转变。  
**关键词:** 涡激振动; 强迫振动; 涡脱模式; 振幅比; 频率比  
**中图分类号:** U661.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.19693/j.issn.1673-3185.02694

## Vortex-induced vibration of cylinder under sub-critical Reynolds number

ZHOU Li, QIU Zhongqiu\*, YUAN Yashuai, ZONG Zhi

School of Naval Architecture Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China

**Abstract:** [Objective] In order to achieve the accurate prediction of the amplitude response of a vortex-induced vibrating cylinder under the sub-critical Reynolds number, a method for establishing a  $Cl-A/D$  (lift coefficient-amplitude ratio) model of the forced vibration of the cylinder by numerical simulation is proposed. [Methods] Based on the Realizable  $k-\varepsilon$  model, a two-dimensional numerical simulation of the forced vibration of a cylinder is carried out using the finite volume method. The calculated lift coefficient curves under different amplitude ratios  $A/D$  in the range of excitation frequency ratio  $f_e/f_n=1$  are obtained. The lift coefficient corresponding to the maximum vibration velocity of the cylinder is then selected to establish the  $Cl-A/D$  model. [Results] The results show that the overall trend of the  $Cl-A/D$  fitting curve is in good agreement with the predicted results of SHEAR7. At the same time, it is found that the "zero lift coefficient" points under each excitation frequency ratio  $f_e/f_n$  are all located near the amplitude ratio  $A/D=0.8$ , and the wake shedding mode changes around  $A/D=0.8$  from "P+S" to "2P" (P represents a pair of vortex shedding with opposite rotation directions, and S represents a single vortex shedding). In the vortex-induced vibration experiment of a single cylinder, the maximum amplitude when "lock-in" occurs is around  $0.8D$ . [Conclusions] The amplitude ratio corresponding to the "zero lift coefficient" of the  $Cl-A/D$  model of forced vibrating cylinder under sub-critical Reynolds number is consistent with the maximum response amplitude ratio of the cylinder under vortex-induced vibration, and the shedding mode of the wake vortex changes under this amplitude ratio.

**Key words:** vortex-induced vibration; forced oscillation; vortex shedding mode; amplitude ratio; frequency ratio

收稿日期: 2021-12-07 修回日期: 2022-02-17 网络首发时间: 2022-06-17 17:33

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52192692, 51639003, 52171294)

作者简介: 周力, 女, 1965年生, 副教授, 硕士生导师。研究方向: 涡激振动, 船舶水动力学。E-mail: zhouli@dlut.edu.cn

邱中秋, 男, 1995年生, 硕士生。研究方向: 计算流体力学, 船舶水动力学。E-mail: qzq2960@163.com

宗智, 男, 1964年生, 博士, 教授, 博士生导师。研究方向: 高性能船舶, 船舶水动力学。

E-mail: zongzhi@dlut.edu.cn

\*通信作者: 邱中秋

## 0 引言

海洋立管结构大多以柔性管形式存在,在洋流的作用下自由振动。然而由于海底地形复杂多变,铺设在海底的某段立管两端容易受到约束而形成一定的跨度,在洋流作用下振动并产生破坏。研究中通常把这段立管作为弹性安装的刚性管考虑,利用自激振动或强迫振动的方法对其相关水动力特性进行探讨<sup>[1-2]</sup>。

Williamson 等通过强迫振动实验研究对振动立管尾涡脱落的结构模式进行了分类,并依据涡脱模式划分了不同的区域<sup>[3]</sup>。Peppas 等研究分析了低雷诺数下流和立管结构之间的能量传递关系,发现在较低无量纲振幅比时尾涡脱落模式为“2S”(S表示单个旋涡脱落),较高无量纲振幅比时尾涡脱落模式逐渐变得复杂<sup>[4]</sup>。Meneghini 等将立管的振动频率和幅值作为变量,对  $Re=200$  时的横向振动立管尾涡脱落频率与“锁定”现象进行了研究,确定了该雷诺数下发生“锁定”时的最大振幅值及振动频率的变化范围<sup>[5]</sup>。Morse 等<sup>[6-7]</sup>通过圆柱的强迫振动和自激振动组合实验发现了新的尾涡脱落模式,位于“2S”和“2P”模式的过渡区(P表示一对旋转方向相反的旋涡脱落),并将其定义为“2P<sub>0</sub>”模式。

王凯鹏等<sup>[8]</sup>基于紧致插值法对均匀流( $Re=200$ )中圆柱横向强迫振动问题进行了二维数值模拟研究。朱永健等<sup>[9]</sup>通过对定常流中横向振动圆柱的升力突变现象研究,发现随着强迫振动振幅的增加,圆柱脉动升力系数出现了突变衰减,圆柱静止情况下的涡脱频率与受迫振动频率控制的波动出现了相位逆变,使得圆柱与流体的能量传递出现了逆向改变。

从海洋工程应用角度来看,弹性支撑立管强迫振动研究的主要目的是揭示自激振动更深层次的规律,为海洋立管涡激振动预测模型提供可靠的实验数据<sup>[10]</sup>。事实上,大多数涡激振动(vortex-induced vibration, VIV)预测程序是基于强迫振动实验数据形成数据库后建立相应的预报模型,以满足工程应用需要,如 VIVANA 和 SHEAR7<sup>[11-12]</sup>。

自激振动能更直观地观察圆柱受到流体力作用发生 VIV 时的现象,但强迫振动能更深层次地揭示流体力与振动相互作用下的水动力特性<sup>[13]</sup>。强迫振动和自激振动的流场变化及振动响应存在很大的差异,目前鲜有文献对2类实验的内部联系进行深入研究。基于此,本文将结合强迫振动数值计算与自激振动实验2种方法,将强迫振动

的动力响应、涡脱模式的转变与该圆柱自激振动出现“锁定”时的最大振幅联系起来,期望为深入讨论二者之间的联系提供参考。

## 1 数值模型

### 1.1 控制方程

以二维不可压缩黏性流体模拟流场运动,其控制方程 Navier-Stokes 方程组在坐标系下表示为:

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

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

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

式中:  $u$  和  $v$  分别为流体速度在  $x, y$  方向的分量;  $p$  为压力;  $\nu$  为流体运动黏度系数;  $\rho$  为流体密度。

本文采用的求解器为 STAR-CCM+ 软件中的 Realizable  $k-\varepsilon$  湍流模型。标准  $k-\varepsilon$  湍流模型的主要优点是计算快速、稳定,计算结果合理,适用于高雷诺数的流动,但不建议用于分离流动。Realizable  $k-\varepsilon$  湍流模型是标准  $k-\varepsilon$  湍流模型的一个改进模型,可以较好地模拟带有强压力梯度的边界层流动和分离流问题,由 Shih 等<sup>[14]</sup>提出,其流湍动能及其耗散率输运方程为:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} - \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + \nabla \cdot (\rho k u) = G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} - \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \nabla \cdot (\rho \varepsilon u) = \rho C_1 S_\varepsilon + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + S_\varepsilon \quad (5)$$

式中:  $\mu$  为动力黏度系数;  $\mu_t$  为湍流黏度;  $C_1 = \max \left[ 0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right]$ ,  $\eta = \frac{S_k}{\varepsilon}$ ;  $C_{1\varepsilon} = 1.44$ ,  $C_2 = 1.9$ ;  $\sigma_k$  和  $\sigma_\varepsilon$  分别为  $k$  和  $\varepsilon$  湍动能及其耗散率的湍流普朗特数,  $\sigma_k = 1.9$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1.2$ ;  $G_k$  为由平均速度梯度引起的湍动能生成项;  $G_b$  为用于浮力影响引起的湍动能生成项;  $Y_M$  为可压缩湍流中波动膨胀对总耗散率的贡献;  $S_k$  和  $S_\varepsilon$  为用户定义的源项;  $C_{3\varepsilon} = 0$ , 表示流动方向与重力方向垂直。

### 1.2 计算域和边界条件

STAR-CCM+ 软件可以有效地实现圆柱在均匀来流下发生横向强迫振动的模拟。首先对圆柱

作减运算,对包含减运算在内的重叠网格施加不同的场函数,可实现模拟圆柱在不同频率和振幅下的运动。流经圆柱的均匀流速度为  $U_0$ 。

计算域如图1所示,来流速度方向与  $x$  轴平行,圆柱横向振动方向与  $y$  轴平行,圆柱直径  $D=0.05$  m,圆柱中心上下两侧  $20D$  处为对称边界;左端距离圆柱中心  $20D$  处为速度进口,右端距离圆柱中心  $50D$  处为压力出口;圆柱表面为无滑移壁面条件。

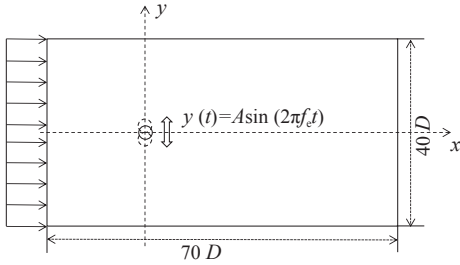


图1 圆柱受迫振动计算域示意图

Fig. 1 Schematics of the forced-oscillation computational domain

圆柱垂直于来流方向沿  $y$  轴做横向强迫振动,瞬时位移:

$$y(t) = A \sin(2\pi f_e t) \quad (6)$$

式中:  $A$  为圆柱横向振动振幅;  $f_e$  为圆柱强迫振动的激振频率。

圆柱强迫振动过程中沿  $y$  轴方向的瞬时速度:

$$v_y(t) = 2\pi f_e A \cos(2\pi f_e t) \quad (7)$$

圆柱开始振动时的瞬时速度  $v_y(0) = 2\pi f_e A$ 。

## 2 计算可行性验证

### 2.1 固定圆柱验证计算

网格划分及其数量会直接影响到计算结果的准确性。为此,采用多边形和棱柱层的网格划分方法,对圆柱横向振动的延展区域和尾部区域进行了局部加密,在圆柱周围区域设置包裹圆柱运动的运动重叠网格,重叠区域大小为  $2D \times 5D$ 。网格划分如图2所示,计算模型是具有较高精度的结构化网格。采用壁面函数法进行圆柱体近壁面处理,圆柱体表面第1层网格满足  $y^+ \approx 1$  条件。由  $Re=20\,000$ ,计算得到来流速度  $U_0=0.356$  m/s。流体的密度取为  $997$  kg/m<sup>3</sup>,其动力黏度取为  $0.895 \times 10^{-3}$  kg/(s·m),则可计算得到紧邻壁面第1层网格的厚度为  $\Delta s=0.04$  mm。设置棱柱层数  $n=10$ ,增长率  $q=1.3$ ,由  $\delta = (\Delta s(1-q^n))/(1-q)$ ,则可计算得到边界层总厚度为  $1.67$  mm。

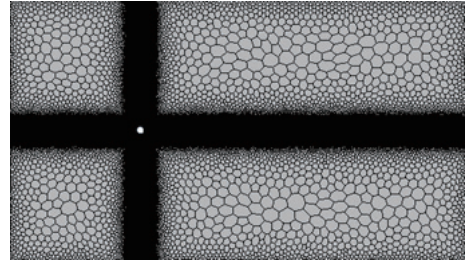


图2 固定网格划分示意图

Fig. 2 Schematics of fixed mesh division

对网格、时间步长进行了无关性验证,在保证计算精度的同时,应节约计算成本,最终选取网格数为39万,时间步长为0.01 s。为了验证计算模型的可靠性,对雷诺数  $Re=20\,000$  均匀流中固定圆柱和振动圆柱的绕流问题进行了数值计算,如图3所示,通过观察升力系数的能量谱密度曲线,确定圆柱涡街脱落的特征频率为1.46 Hz。

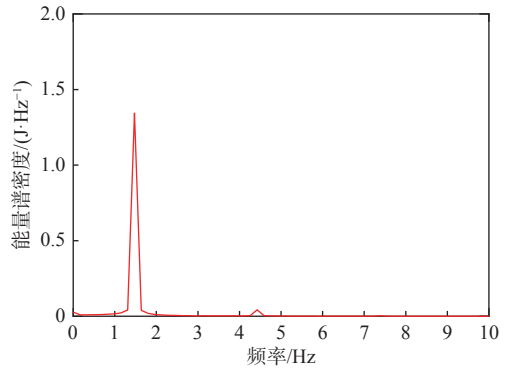


图3  $Re=20\,000$  固定圆柱升力系数能量谱密度

Fig. 3 Energy spectral density of lift coefficient of fixed cylinder with  $Re=20\,000$

根据公式:

$$S_l = \frac{f_{ov} \cdot D}{U_0} \quad (8)$$

其中,  $f_{ov}$  为圆柱尾涡脱落频率,可得到该固定圆柱在  $Re=20\,000$  时的斯特劳哈尔数  $S_l=0.2048$ ,与文献[15]中  $S_l=0.2$  基本保持一致。

### 2.2 圆柱强迫振动计算

在相同来流条件下对圆柱进行强迫振动数值计算,将振幅比  $A/D=0.5$ ,强迫振动频率比范围  $0.5 \leq f_e/f_s \leq 1.5$  ( $f_s$  为斯特劳哈尔频率)时的数值计算结果与喻晨欣等<sup>[16]</sup>的数值结果和 Sarpkaya<sup>[17]</sup>的实验结果进行对比验证。从图4可以看出,本文计算结果与文献[16-17]的最大升力系数幅值变化趋势保持一致,随着频率比的增大,均呈现不断增大的趋势,并在  $f_e/f_s=1$  附近出现了跳跃<sup>[18-19]</sup>。由于本文与参考工况对应的雷诺数存在差异,对应的频率比也有所不同,导致结果存在偏差,与

实际情况相符。以上算例验证了本文模型可用于求解亚临界雷诺数下圆柱的强迫振动问题。

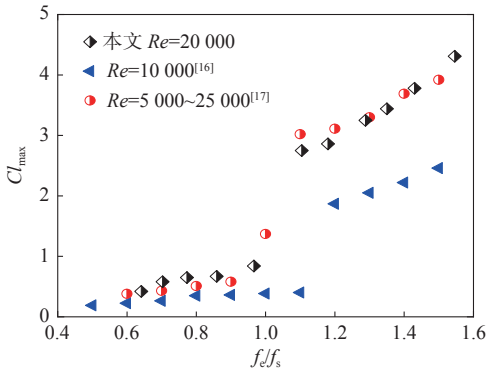


图4  $A/D=0.5$  时最大升力系数  $Cl_{max}$  随  $f_e/f_n$  变化曲线  
Fig. 4  $Cl_{max}$  variation versus  $f_e/f_n$  with  $A/D=0.5$

### 3 计算结果分析

#### 3.1 强迫振动数值结果分析

本文采用外加激励的方法,使圆柱在均匀来流下做类似自激振动的运动。通过控制振幅  $A$  和激振频率  $f_e$ ,可以实现使圆柱位移时域曲线呈简谐运动的规律,无量纲振幅比  $A/D$  和激振频率比  $f_e/f_n$  如表1所示( $f_n$ 为结构固有频率,考虑附加水质量)。涡激振动达到“锁定”时对应的振幅存在阈值<sup>[3]</sup>,最小振幅比取  $A/D=0.3$ 。通过自由衰

表1 无量纲频率比及振幅比范围

Table 1 Non-dimensional frequency ratio and amplitude ratio

$A/D$	$f_e/f_n$
0.3~1.2	0.83, 0.91, 1.00, 1.11, 1.25, 1.42

减振动实验测得  $f_n=0.7142$  Hz。

考虑到强迫振动过程中圆柱受到流体力和激振力的双重作用,假定在数值计算中得到的升力为  $F_m$ ,完全由流体力提供的升力为  $F_1$ ,强迫振动对圆柱升力的影响用惯性力  $F_i$  表示,三者关系可用式(9)来表示:

$$F_m = F_1 + F_i \tag{9}$$

当流体力  $F_1$  与惯性力  $F_i$  方向相同时,  $F_m > F_1$ ; 当  $F_1$  与  $F_i$  方向相反时,  $F_m < F_1$ ; 当圆柱固定即  $A/D=0$  时,  $F_i=0, F_m=F_1$ 。另外,当圆柱振动速度值达到最大时,即振动加速度为零时,  $F_i=0, F_m=F_1$ 。可见在单振动周期内当圆柱振动速度达到最大时,监测得到的升力仅由流体力提供。

图5为频率比  $f_e/f_n=0.83$  时不同振幅比下,单周期内圆柱振动速度  $v_y$  曲线及相应升力系数  $Cl$  曲线。从图中可以看到,振动速度曲线始终遵循简谐运动规律,但由于受到强迫振动带来的惯性力影响,单周期内升力系数曲线不再规则变化。当振幅比  $A/D$  足够大时,可观察到升力系数

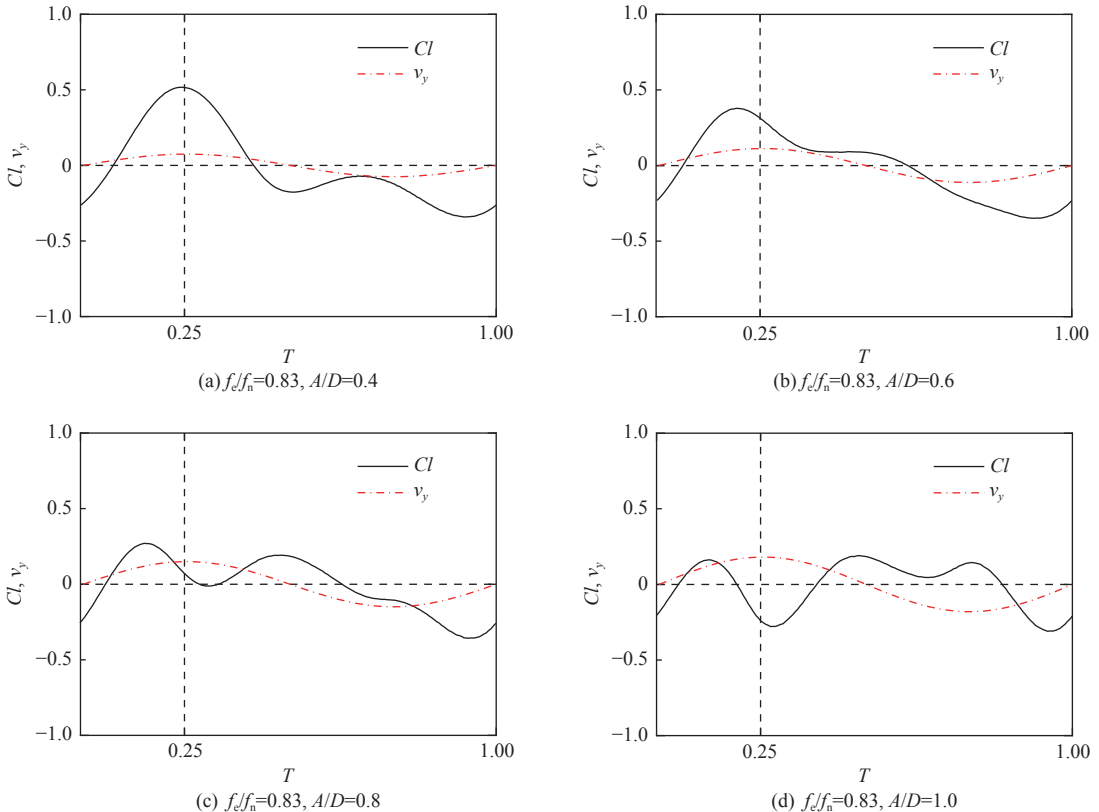


图5 单周期内振动速度及升力系数变化曲线

Fig. 5 Oscillating speed and lift coefficient varies within a single period

曲线单周期内包含多个峰值。

同时可以发现,随着振幅比  $A/D$  的增大,在圆柱上升阶段(0~0.5T),最大振动速度(0.25T)对应的升力系数值会由正值转变为负值;而在圆柱下降阶段(0.5T~T),最大振动速度(0.75T)对应的升力系数值由负值转变为正值。强迫振动研究中通常取圆柱固定( $A/D=0$ )时的升力系数为正值,所以在接近  $A/D=0$  一端,升力系数应取正值。在本文圆柱强迫振动数值计算中,将在上升阶段圆柱振动速度达到最大时(0.25T)的位置选为升力系数监测位置。

图6为VIV预测程序SHEAR7中的保守模型,各无量纲频率比下的  $Cl-A/D$  曲线通常由强迫振动实验所得数据点(0,  $Cl_0$ ),  $((A/D)^*, Cl_{max})$ 、 $((A/D)_{max}, 0)$ 通过二次函数拟合得到,其中 $(A/D)^*$ 和 $(A/D)_{max}$ 分别表示升力系数为零和最大值时对应的无量纲振幅比<sup>[19]</sup>。该模型呈现升力系数  $Cl$  随着振幅比  $A/D$  的增大先上升后下降、由正升力系数逐渐转变为负升力系数的趋势。

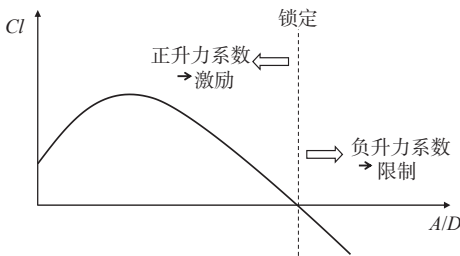


图6 升力系数随无量纲振幅比变化曲线

Fig. 6 Variation of lift coefficient with dimensionless  $A/D$

流体力具有增大圆柱振幅趋势的作用,而振动则会限制圆柱的振幅继续增大<sup>[20]</sup>。在两者的相互作用下,当升力系数为正时,说明振动对流体力的限制能力有限,此时若继续增大来流速度,立管振幅仍有增大趋势,因此涡激振动未达到“锁定”状态时圆柱振幅会随着来流速度的增大而增大。随着振幅比的增大,振动对流体力的限制能力也进一步增强,直至平衡位置处的升力系数为零,二者达到平衡,振幅达到最大且不再有增大的趋势。值得一提的是,在涡激振动中,振动的限制作用不会超过流体力的激励作用,即升力系数不可能取负值,所以达到“锁定”状态时,在一定流速范围内,即使增加流速,圆柱的振幅仍能保持最大值不变。

圆柱在外加激励作用下发生强迫振动,通过改变振幅比  $A/D$ ,观察监测位置处的升力系数,可拟合出各激振频率比  $f_e/f_n$  下的升力系数随振幅比  $A/D$  的变化曲线。对各工况下数值计算所得结果进行三阶多项式拟合,并控制拟合条件  $Cl_0=0.168$

( $Re=20\ 000$  时固定圆柱的升力系数),可得拟合曲线。在VIV预测程序SHEAR7中输入相关参数条件,同样可得预报的拟合曲线。将同一频率比下的2种拟合曲线进行对比分析,结果如图7所示。

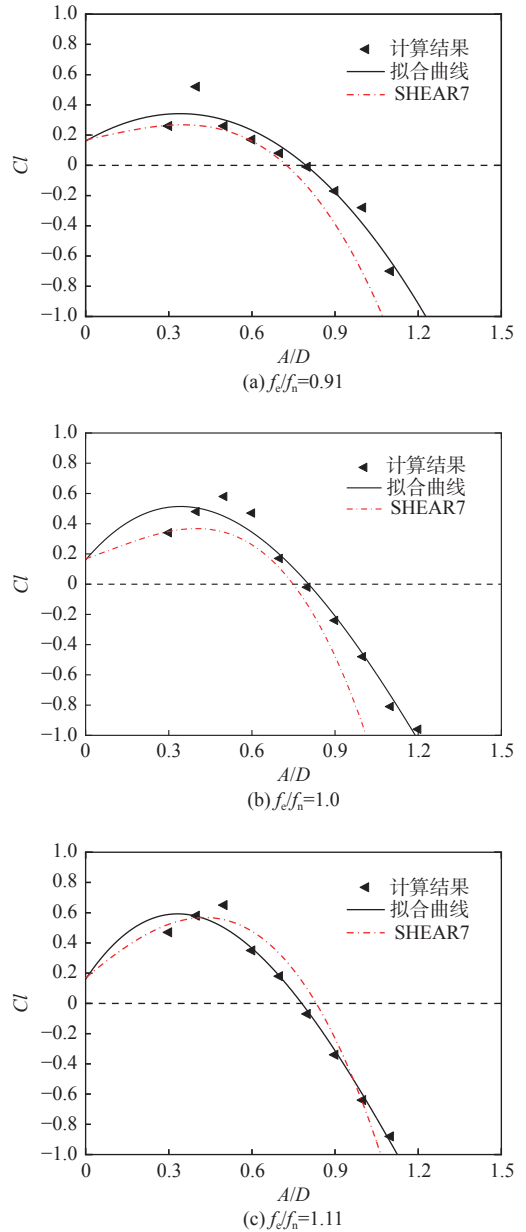


图7 各激振频率下升力系数拟合曲线

Fig. 7 Fitting curves of lift coefficient at each excitation frequency

由图7可见,各激振频率下数值计算结果拟合曲线与SHEAR7拟合曲线的变化趋势高度吻合,均呈现出升力系数随着振幅比  $A/D$  增大先上升后下降的变化规律。传统强迫振动计算中升力系数的取值方法往往未呈现该规律,说明选取上升阶段最大振动速度时的升力系数,对于建立VIV预测模型是适合的。

为了进一步了解数值计算结果拟合曲线与涡激振动振幅响应之间的联系,从频率比  $f_e/f_n=1$  附

近的零升力系数点着手分析。如图8所示,可观察到圆柱平衡位置处的零升力系数点均保持在振幅比 $A/D=0.8$ 附近。通过类比SHEAR7预测模型进行分析,可知在亚临界雷诺数下该圆柱涡激振动出现“锁定”状态时最大振幅应保持在 $0.8D$ 左右。由此可对该圆柱在自激振动频率比 $f_{ov}/f_n \approx 1$ 时的最大响应振幅做出预测,其中 $f_{ov}$ 为自激振动时圆柱的尾涡脱落频率。

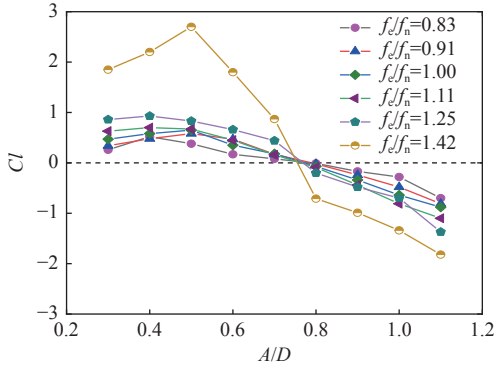


图8 各工况下 $Cl$ 随振幅比 $A/D$ 变化曲线

Fig. 8 Variation of lift coefficient with  $A/D$  under all conditions

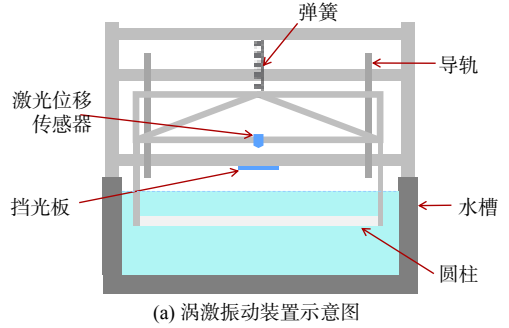
同时由图8可见,在同一振幅比下,随着频率比的增大,升力系数逐渐增大。当频率比 $f_e/f_n=1.42$ 时,相对于其他组,升力系数大幅升高,发生了突增现象<sup>[12]</sup>,相关机理有待进一步探讨。

### 3.2 自激振动实验对比分析

强迫振动数值计算结果表明,监测位置处升力系数为零时对应的振幅比均保持在 $A/D=0.8$ 附近。在自激振动工况下,预测弹性安装时该圆柱在亚临界雷诺数下发生涡激振动的最大振幅为 $0.8D$ 左右,且此时处于“锁定”状态(自激振动频率比 $f_{ov}/f_n \approx 1$ )。为了验证预测结果,设计并进行了圆柱自激振动实验。

图9为自激振动实验装置图,振动圆柱嵌合在振动框架中,并弹性安装于固定装置。弹簧具有一定的弹簧系数,振动框架可带动圆柱沿两侧的滑轨做垂向往复运动。为了尽量减小三维效应,固定圆柱两端的U型架端口尽可能采用厚度较薄、质量较轻的端板。实验所采用圆柱的直径与数值计算中保持一致,弹簧系数 $K=230.48$  N/m,均匀来流速度的取值范围为 $0.13\sim 0.34$  m/s,对应的约化速度 $U_r$ 取值范围为 $3.7\sim 9.4$  m/s。

通过改变来流速度,监测得到圆柱振动幅度及相应的自激振动频率比 $f_{ov}/f_n$ ,可观察到振动圆柱发生“锁定”时的最大振幅,以及对应的频率比范围。图10为自激振动实验中振幅比 $A/D$ 和频率比 $f_{ov}/f_n$ 随约化速度 $U_r$ 的变化情况。由图可见,



(a) 涡激振动装置示意图



(b) 涡激振动装置实物图

图9 圆柱涡激振动实验装置

Fig. 9 Experimental device setup of cylindrical vortex-induced vibration

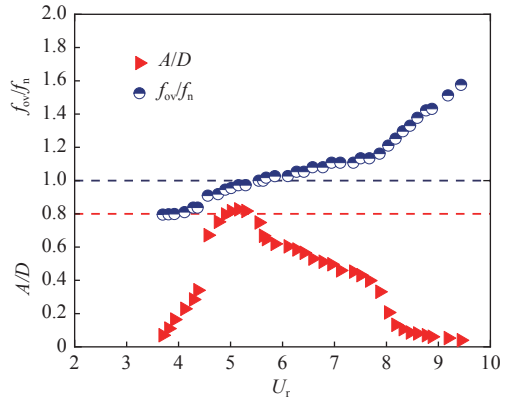


图10 圆柱振幅比及自激振动频率比随约化速度变化图

Fig. 10 Changes in the amplitude ratio and self-induced vibration frequency ratio of the cylinder at different reduced speeds

在 $f_{ov}/f_n$ 接近1时,振幅比大幅升高;且在一定的 $f_{ov}/f_n$ 范围内,振幅比 $A/D$ 不发生大的改变,说明发生了“锁定”现象。同时可观察到“锁定”范围对应的约化速度使圆柱的最大振幅达到 $0.8D$ 左右。

### 3.3 涡脱模式转变分析

Williamson等<sup>[3]</sup>对振动圆柱尾流中漩涡脱落模式进行了实验研究,并按尾涡脱落时的结构形式划分了不同的区域,发现“锁定”区域附近的主要涡脱落模式为2S, 2P和P+S。随着无量纲振幅比的增加,在涡脱模式转变临界线附近,通常会

从2S模式转变为P+S或2P模式。实验研究表明,在低雷诺数下( $Re < 300$ ),P+S模式会取代2P模式,以至于整个区域只出现P+S模式,而未出现2P模式。而在较大雷诺数时,P+S和2P模式之间的边界与临界线基本一致。可见,随着雷诺数的改变,同一区域内涡脱模式发生转变后不确定呈现2P模式或P+S模式,但转变临界线基本保持不变。

在同一强迫振动频率比下,选取振幅比范围

为 $A/D=0.6\sim 1.0$ 内同一时刻的涡量图。如图11所示,各频率比工况中的振幅比由 $A/D=0.6$ 至 $A/D=1.0$ 依次增大。可以发现,在振幅比小于0.8时,如 $A/D=0.7$ 时红色线圈所标记涡对,圆柱尾涡脱落模式为P+S模式;当振幅比大于0.8时,如 $A/D=0.9$ 时红色线圈所标记涡对,圆柱尾涡脱落模式为2P模式。说明在圆柱强迫振动中 $A/D=0.8$ 附近是尾涡脱落模式发生转变的临界线,监测位置零升力系数点与尾涡脱落模式转变同时发生。

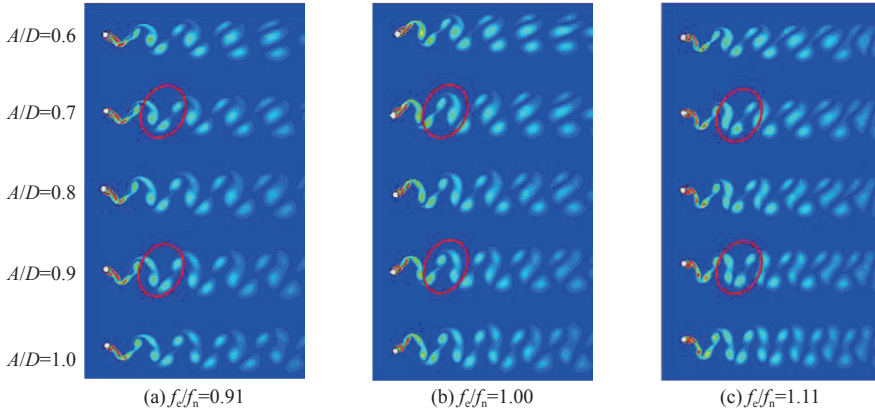


图11 各频率比下涡量随振幅比变化图

Fig. 11 Variation of vorticity with amplitude ratio at various frequency ratios

## 4 结论

本文研究了圆柱强迫振动时升力系数响应值的选取位置,并进行相关机理分析,对圆柱发生涡激振动“锁定”时的最大振幅进行了预报和对比验证,对平衡位置升力系数为零时的涡脱模式转变进行了探讨。通过分析,得到如下结论:

1) 亚临界雷诺数下圆柱强迫振动时的升力系数响应与自激振动相比存在较大差异,当强迫振动中圆柱速度达到最大时,监测到的升力仅由流体力提供,将圆柱在上升阶段的振动速度达到最大时( $0.25T$ )对应的升力系数作为计算结果是合理的。

2) 数值模拟计算结果拟合曲线与VIV预测程序SHEAR7的相关拟合曲线吻合较好,且变化规律保持高度一致,升力系数均随着振幅比的增大,呈现出先增大后减小的趋势,提供了一种以强迫振动数值计算结果建立 $Cl-A/D$ 模型用于涡激振动响应振幅预测的方法。

3) 数值计算结果表明,圆柱在强迫振动过程中平衡位置处的零升力系数点均保持在振幅比 $A/D=0.8$ 附近,采用自激振动实验方法对预测结果进行了对比验证。实验结果表明,当自激振动频率比 $f_v/f_n$ 接近于1时,振幅比大幅升高,且在

一定的自激振动频率比 $f_v/f_n$ 范围内,振幅比 $A/D$ 没有较大改变,说明发生了“锁定”现象。同时确定了圆柱在“锁定”时对应的最大振幅为 $0.8D$ 左右,证明了该预报方法具有可行性。

4) 对平衡位置处的零升力系数与相应的圆柱尾涡脱落模式进行了探讨。计算结果表明:在振幅比小于0.8时,圆柱尾涡脱落模式为P+S模式;当振幅比大于0.8时,圆柱尾涡脱落模式为2P模式。强迫振动圆柱 $Cl-A/D$ 拟合曲线零升力系数对应的振幅比与圆柱在涡激振动中“锁定”时的最大响应振幅比基本一致,且圆柱尾涡脱落模式在此振幅比下发生了转变。

未来可通过对不同雷诺数工况下的圆柱振动进行计算,对圆柱在均匀来流下发生“锁定”的频率比区间进行预报。

## 参考文献:

- [1] WILLIAMSON C H K, GOVARDHAN R. Vortex-induced vibrations[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2004, 36(1): 413-455.
- [2] 侯磊,丁云峰,王晴,等.高雷诺数下水翼涡脱落频率预报方法[J].*中国舰船研究*, 2019, 14(6): 88-97.  
HOU L, DING Y F, WANG Q, et al. Prediction method of hydrofoil vortex shedding frequency at high Reynolds numbers[J]. *Chinese Journal of Ship Research*,

- 2019, 14(6): 88–97 (in Chinese).
- [3] 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.
- [4] PEPPA S, KAIKTSIS L, TRIANTAFYLLOU G S. Hydrodynamic forces and flow structures in flow past a cylinder forced to vibrate transversely and inline to a steady flow[J]. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2016, 138(1): 011803.
- [5] MENEGHINI J R, BEARMAN P W. Numerical simulation of high amplitude oscillatory flow about a circular cylinder[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 1995, 9(4): 435–455.
- [6] MORSE T L, WILLIAMSON C H K. Fluid forcing, wake modes, and transitions for a cylinder undergoing controlled oscillation[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2009, 25(4): 697–712.
- [7] MORSE T L, WILLIAMSON C H K. Prediction of vortex-induced vibration response by employing controlled motion[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2009, 634: 5–39.
- [8] 王凯鹏, 赵西增. 横向受迫振荡圆柱绕流升阻力系数研究[J]. *江苏科技大学学报(自然科学版)*, 2017, 31(5): 579–585.  
WANG K P, ZHAO X Z. Research about lift and drag coefficient of circular cylinder oscillating transverse to the flow[J]. *Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2017, 31(5): 579–585 (in Chinese).
- [9] 朱永健, 宗智. 定常流中横向振动圆柱的升力突变现象研究[J]. *水动力学研究与进展A辑*, 2020, 35(5): 592–600.  
ZHU Y J, ZONG Z. Study on the sharp change of lift force of a cylinder with transverse vibration in the steady flow[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2020, 35(5): 592–600 (in Chinese).
- [10] 邓迪, 王哲, 万德成. 振荡流中二维圆柱的涡激振动数值模拟[J]. *中国舰船研究*, 2018, 13(增刊 1): 7–14.  
DENG D, WANG Z, WANG D C. Numerical simulation of vortex-induced vibration of a 2D cylinder in oscillatory flow[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2018, 13(Supp 1): 7–14 (in Chinese).
- [11] WU J, M. LEKKALA K R, ONG M C. Numerical investigation of vortex-induced vibrations of a flexible riser with staggered buoyancy elements[J]. *Applied Sciences-Basel*, 2020, 10(3): 905.
- [12] VANDIVER J K, LI L. SHEAR7 program theory manual [M]. [S.l.]: Department of Ocean Engineering, MIT, 1999.
- [13] 段金龙, 周济福, 王旭, 等. 剪切流场中含内流立管横向涡激振动特性[J]. *力学学报*, 2021, 53(7): 1876–1884.  
DUAN J L, ZHOU J F, WANG X, et al. Cross-flow vortex-induced vibration of a flexible riser with internal flow in shear current[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2021, 53(7): 1876–1884 (in Chinese).
- [14] SHIH T H, LIOU W W, SHABBIR A, et al. A new  $k-\epsilon$  viscosity model for high Reynolds number turbulent flows[J]. *Computers & Fluids*, 1995, 24(3): 227–238.
- [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.  
DENG Y. Study on forced oscillation and vortex-induced vibration (VIV) of circular cylinder under combined uniform flow and oscillatory flow at low Reynolds number[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014 (in Chinese).
- [16] 喻晨欣, 王嘉松, 郑瀚旭. 高分辨率 TVD-FVM 方法求解二维圆柱受迫振动问题[J]. *水动力学研究与进展A辑*, 2018, 33(5): 593–600.  
YU C X, WANG J S, ZHENG H X. Two-dimensional simulation on forced oscillations of a circular cylinder using high-resolution TVD-FVM method[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2018, 33(5): 593–600 (in Chinese).
- [17] SARPKEYA T. Hydrodynamic damping, flow-induced oscillations, and biharmonic response[J]. *Journal of offshore Mechanics and Arctic engineering*, 1995, 117(4): 232–238.
- [18] GOPALKRISHNAN R. Vortex-induced forces on oscillating bluff cylinders[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1993.
- [19] 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A辑*, 2012, 27(1): 24–32.  
FAN J J, TANG Y G, ZHANG R Y, et al. Numerical simulation of viscous flow around circular cylinder at high Reynolds numbers and forced oscillating at large ratio of amplitude[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2012, 27(1): 24–32 (in Chinese).
- [20] PARK K S, KIM Y T, KIM D K, et al. A new method for strake configuration design of Steel Catenary Risers[J]. *Ships and Offshore Structures*, 2016, 11(4): 385–404.