

潮流能转换装置串列双圆柱振子流致振动 振幅响应研究

王树杰^{1,2}, 蔡云雯¹, 袁 鹏^{1,2}, 谭俊哲^{1,2}, 司先才^{1,2}

(1. 中国海洋大学工程学院, 青岛 266100; 2. 青岛市海洋可再生能源重点实验室, 青岛 266100)

摘 要: 合理的排布方式可显著提高流致振动潮流能装置阵列的总体转换效率。针对串列双圆柱振子排布方式流致振动潮流能转换装置, 利用 ADINA 软件对不同参变量下等直径串列双圆柱流致振动振幅响应进行数值模拟, 得到不同间距、不同流速、不同雷诺数条件下, 上下游圆柱振幅响应规律以及尾流模式和位移时程曲线。制作双振子潮流能装置模型, 进行水槽试验, 试验结果与数值结果的变化趋势基本吻合。结果表明, 在振子间距 $2D$ 的排布方式下, 上下游振子振幅值最大且均大于单振子振幅。

关键词: 流致振动; 潮流能转换装置; 串列双圆柱; 圆柱振幅响应

中图分类号: TK79

文献标识码: A

0 引 言

流致振动装置是不同于水轮机的一种新型潮流能转换装置, 可在较低流速条件下将潮流的动能转化为装置振子的振动, 通过机械传动系统带动发电机进行发电, 具有适合我国潮流能资源区流速偏小、水深较浅的特点, 对于我国潮流能的开发利用具有十分重要的意义^[1]。将多个装置或振子阵列排布, 是进一步提高效率的有效方法, 当振子的排列方式满足一定的条件时, 在一定流速、间距下, 上游振子与下游振子相互作用, 可产生比单振子涡激振动更大的振幅, 显著提高能量转换效率。为了更好地理解振子间的相互作用规律, 为多振子阵列装置的设计提供依据, 对串列双圆柱流致振动的研究非常必要。

考虑上下游双圆柱前后串列排布的情况。水平流动的水绕过钝体时, 使钝体产生周期性脉动力并发生振动, 钝体振动同时抑制流体的旋涡脱落, 这种流固耦合现象简称流致振动。目前对涡激振动的研究主要集中在单圆柱或串列双圆柱静止绕流等工况下, 而串列双圆柱流致振动的研究, 影响因素较多, 现象较为复杂, 所得到的研究成果相对

较少。如毕继红等^[2]利用 CFX 软件建立二维流场模型, 采用有限体积法针对串列双圆柱的静止绕流现象进行了数值模拟计算。陈文曲等^[3]采用 ALE (arbitrary Lagrangian-Eulerian) 方法对低雷诺数条件下 ($Re=200$) 的串列双圆柱绕流下游圆柱两自由度涡致振动进行了数值模拟。及春宁等^[4]利用开源程序 OpenFOAM 和动网格技术对雷诺数 $Re=100$ 条件下串列双圆柱的流致振动进行了数值模拟等。

影响串列双圆柱流致振动的因素很多, 如: 双圆柱的间距比、质量比、雷诺数及约束方式等。以双振子潮流能转换试验装置为对象, 利用 ADINA 软件进行数值模拟, 将模拟结果与试验结果对比分析, 研究雷诺数、约化速度 ($U_r=4\sim 8$) 和间距比 ($L/D=2, 3, 4, 5$) 3 个重要参数对串列双圆柱流致振动振幅的影响。

1 计算模型

假设流场为二维不可压缩流体, 采用有限体积法, 通过求解二维非稳态雷诺纳维-斯托克斯方程组 (URANS), 与 Spalart-Allmaras 湍流模型相结合, 得到串列双圆柱流场的数值解, 流体控制方

程^[5]:

连续性方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial(u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (2)$$

式中, x_i 、 x_j ——位置坐标分量; u_i 、 u_j ——速度分量; ν ——黏度; ρ ——流体密度; p ——压力。

顺流向振子振幅幅值为横流向的 1/10, 与横流向振动的强度相比, 顺流向振动较弱可忽略, 仅考虑振子横向振动。串列双圆柱流致振动潮流能转换装置的物理模型如图 1 所示, 据此建立圆柱振子运动方程。

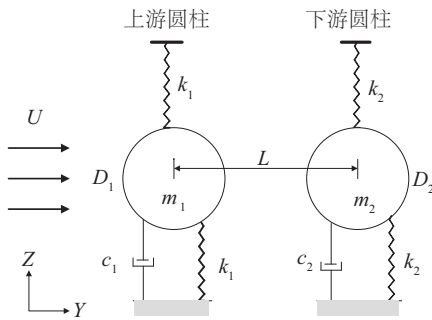


图1 串列双圆柱物理模型

Fig. 1 Physical model of two circular cylinders in tandem

将串列双圆柱流致振动潮流能转换装置简化为质量-弹簧-阻尼系统的二维物理模型。图 1 中, 串列双圆柱振子简化为直径、质量均相等 ($D=D_1=D_2$, $m=m_1=m_2$) 的 2 个圆, 其由相同刚度 ($k=k_1=k_2$) 的弹簧支撑, 受装置相同阻尼 ($c=c_1=c_2$) 影响, 在一定的流速 U 和间距 L 下, 发生流致振动。

圆柱振子运动方程:

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} + c \frac{dz}{dt} + kz = F_z(t) \quad (3)$$

上式方程可以化简为:

$$\ddot{z} + 2\xi\omega\dot{z} + \omega^2 z = F_z(t)/m \quad (4)$$

式中, ξ ——阻尼比; ω ——振动频率; z 、 \dot{z} 、 \ddot{z} ——圆柱横向振动时的位移、速度、加速度^[6]。若 $F_z(t)$ 已知, 将方程转化为一阶常微分方程组, 使用四阶龙格-库塔法即能求出圆柱的位移和圆柱横向振动振幅^[3]。

2 串列双圆柱流致振动数值仿真模型

借助先进非线性流固耦合分析软件 ADINA (automatic dynamic incremental nonlinear analysis) 对上述模型进行数值仿真。

2.1 模型计算区域

在等直径串列双圆柱流致振动的数值模拟中, 双圆柱的计算区域如图 2 所示。研究表明: 入口边界(inflow)距离上游圆柱前滞点的距离约为 $8D$, 将入口边界设置在上游圆柱前方 $10D$ 处, 既提高了计算效率, 节省了计算时间, 同时又保证了计算准确性; 为避免计算域上下边界对振子振动的干扰, 选取上下边界距离圆柱中心 $10D$; 考虑旋涡脱落在柱后 $20D$ 处已呈稳定状态, 故出口边界在下游圆柱后 $30D$ 处^[7]。两圆柱的圆心在同一条水平直线上, 图中 L 为圆柱间距, D 为圆柱直径。

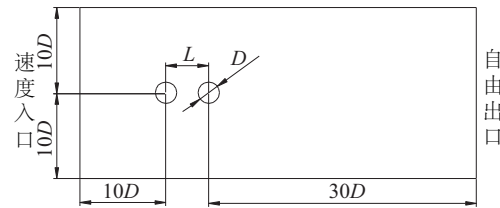


图2 计算域

Fig. 2 Computational domain

2.2 湍流模型的选择

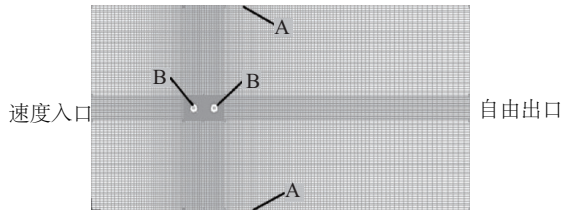
ADINA 中, 湍流模型可分为: Turbulent $k-\varepsilon$ 、Turbulent $k-\omega$ /SST 和 Turbulent Spalart-Allmaras。鉴于 Spalart-Allmaras 模型对网格粗糙带来的数值误差不太敏感, 是相对简单的单方程模型, 只需求解湍流粘性的输运方程, 计算简单, 求解速度快。选取 Spalart-Allmaras 湍流模型来模拟流体运动的情况。

2.3 网格划分及边界条件设置

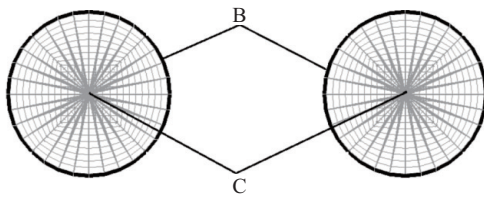
网格划分采用局部加密方法, 流体与固体的网格划分如图 3 所示。对双圆柱周围采用加密网格, 距离圆柱越远, 网格越疏。ADINA 模拟计算时, 流体与结构的网格可以根据自身情况独立划分。

流体介质为海水, 是不可压流体。边界条件设置如图 3 所示, 入口边界为速度载荷, 出口边界(outflow)为自由边界; 流体域上下边界 A 为固壁, 即边界固定, 位移量为零; 流体域与结构体中的圆

柱表面边界 B 为流固耦合边界 (fluid structure interaction), 二者在模拟计算时, 相互耦合; 结构体中双圆柱圆心 C 是弹簧连接的端点; 设置圆柱振子的自由度为 Z-Translation, 即只允许横向自由振动。



a. 流体域网格划分及边界条件



b. 结构体网格划分及边界条件

图3 流体域和结构体的网格划分及边界条件

Fig. 3 Meshing and boundary condition of fluid domain and structures

2.4 流体与结构体模型建立

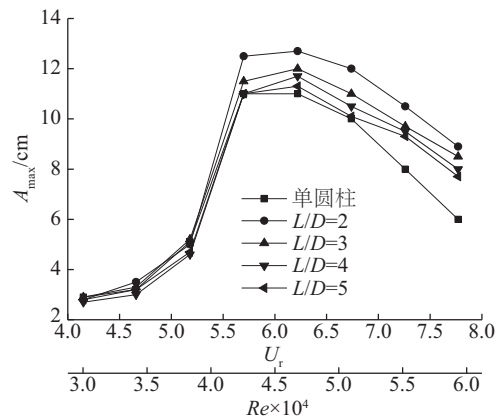
ADINA 与其他仿真软件不同, 流体与结构体单独建模。流体采用 ADINA-F 模型, 选择瞬态分析, 复合时间积分法。结果处理选用 FCBI-C, 该单元具有更好的稳定性和精确度, 在瞬态分析中与复合时间积分一起使用, 可模拟涡街问题。

结构体建模采用 ADINA-S 模型, 选择隐式分析, 设置自动时间步长求解, 减小计算出错率。结构体模型与流体模型相对应。

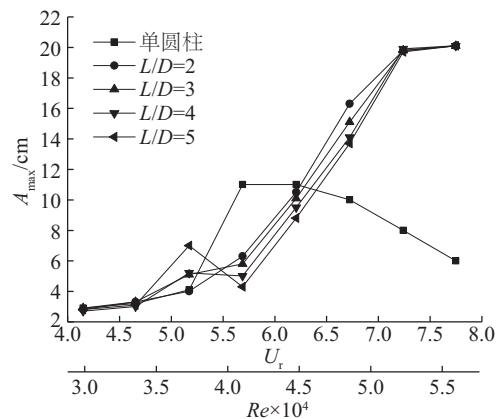
流体与结构体模型分别设置求解后, 利用流固耦合求解器 (ADINA-FSI) 将两者求解结果做流固耦合分析计算, 得到相应模拟结果。

2.5 数值模拟结果

依照网格划分、边界条件设定及模型建立等数值仿真方法, 对单圆柱涡激振动和串列双圆柱流致振动, 圆柱直径 $D=120\text{ mm}$, 受相同刚度系数 ($k=600\text{ N/m}$) 的弹簧支撑, 不同间距 ($L=2D, L=3D, L=4D, L=5D$), 不同流速 ($v=0.40\sim0.75\text{ m/s}$), 间隔 0.05 m/s 进行仿真分析, 得到不同工况下串列双圆柱振动响应规律曲线, 如图 4 所示。



a. 上游



b. 下游

图4 不同间距比下, 上、下游圆柱振幅

Fig. 4 Amplitude of upstream and downstream cylinder at different spacing ratios (L/D)

图 4a 可以看出, 上游圆柱振幅响应分 3 个阶段: 1) 初始分支, 由非锁定区域转向锁定区域, 随约化速度 U_r (雷诺数 Re) 的不断增大, 上游圆柱振幅呈明显上升趋势; 2) 上端分支, 圆柱振幅较大并达到最大值, 增长速度缓慢; 3) 下端分支, 上游圆柱振动振幅从最大值开始减小, 下降趋势相比初始阶段上升趋势较缓慢; 这与单圆柱涡激振动圆柱振幅响应规律一致。

由图 4b 可看出, 从约化速度 $U_r=5.7$ ($Re=4.10\times 10^4$) 时开始, 下游圆柱由涡激振动 (VIV) 初始分支进入上端分支, 此时圆柱间距较近, 上游圆柱发生涡激振动, 脱落的旋涡附着在下游圆柱表面, 随着雷诺数的不断增加, 上游圆柱剪切层和旋涡脱落的强度增大, 下游圆柱受到上游圆柱的影响增强, 圆柱振幅迅速增大。当约化速度 $U_r=7$ ($Re=5.04\times 10^4$) 时, 下游圆柱发生“共振”, 振幅达到最大值后趋于稳定。

随约化速度 U_r (雷诺数 Re) 不断增大, 圆柱振幅呈非线性增长趋势, 上下游圆柱振幅达到最大值时, 约化速度存在差异。圆柱的固有频率 $f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$ 与旋涡脱落频率 $f_s = \frac{S_t U}{D}$ 接近时发生“共振”, 此时圆柱振幅达到最大。上、下游圆柱尺寸相同, 在相同条件下其固有频率 f_n 相同, 达到共振时的涡脱落频率 f_s 相同, f_s 与来流速度成正比, 上游圆柱振动导致尾流速度减弱使下游圆柱达到最大振幅时的约化速度比上游圆柱偏大。

当 $U_r = 6.0 (Re = 4.32 \times 10^4)$ 、 $L = 2D$ 时, 上游圆柱振幅达到最大 $A_{\max} = 12.7 \text{ cm}$, 比单圆柱最大振幅 $A_{\max} = 11 \text{ cm}$ 增大了 0.15 倍; 当 $U_r = 7.0 (Re = 5.04 \times 10^4)$ 时, 各间距下游圆柱振幅均达到最大值 $A_{\max} = 20.1 \text{ cm}$, 比单圆柱最大振幅 $A_{\max} = 11 \text{ cm}$ 增大了 1.8 倍, 与文献[8]的结论一致。但与文献[8]相比存在线性阻尼, 抑制了圆柱的振动, 导致下游圆柱最大振幅与文献相比略小。

为分析低流速下串列双圆柱流致振动不同尾流模式, 选取流速 $v = 0.5 \text{ m/s}$, 弹簧刚度系数 $k = 600 \text{ N/m}$, 3 个间距 ($L = 1.5D$, $L = 3D$, $L = 5D$) 对串列双圆柱流致振动与相同条件下单圆柱涡激振动仿真结果对比分析, 得到相应的位移曲线和流场速度云图分布, 如图 5 和图 6 所示。

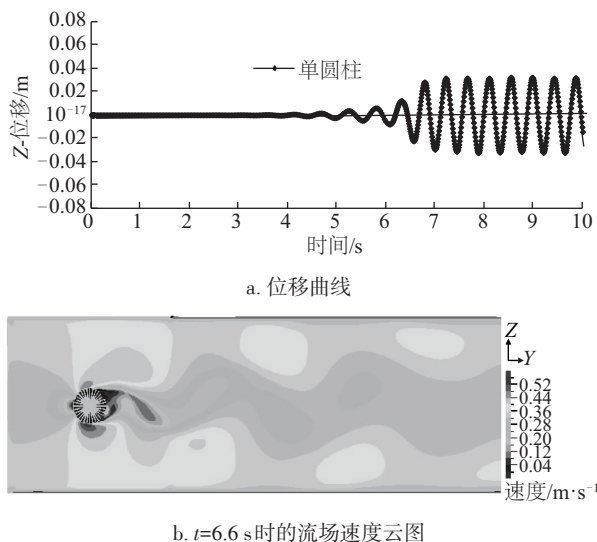


图5 单圆柱涡激振动位移曲线和流场速度云图

Fig. 5 Time histories of displacements and flow field velocity contours of a single cylinder VIV

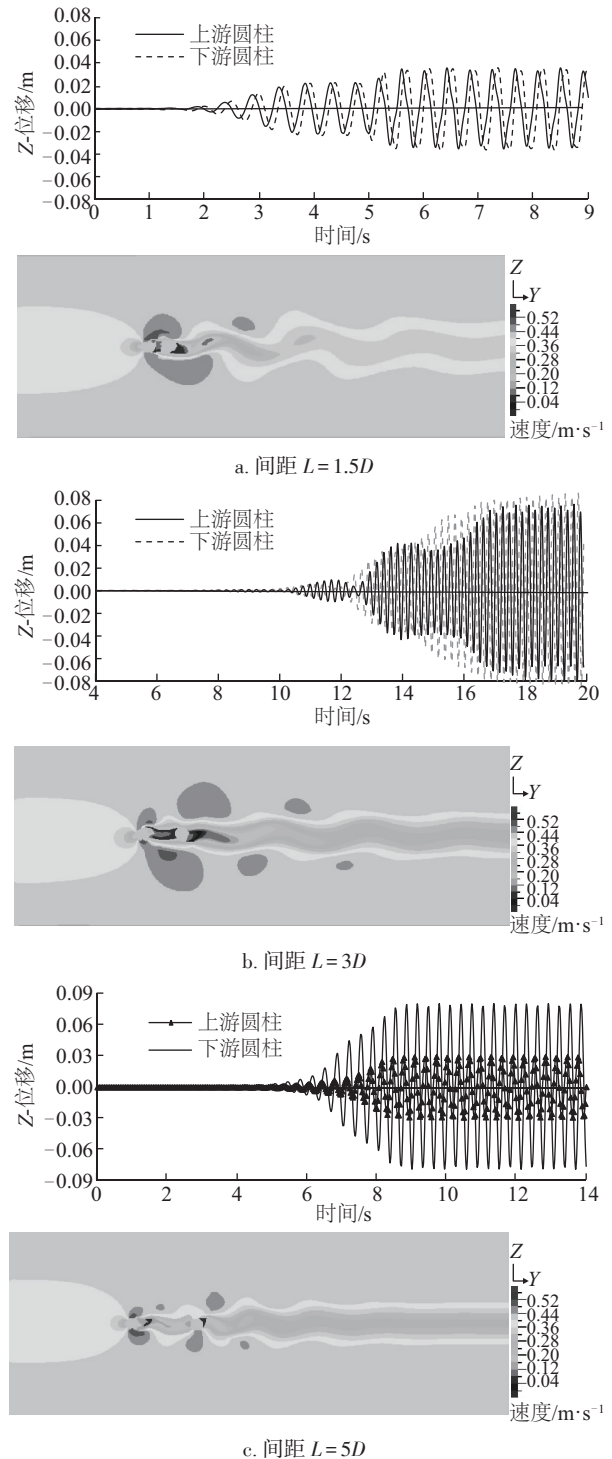


图6 不同间距的串列双圆柱流致振动位移曲线和流场速度云图

Fig. 6 Time histories of displacements and flow field velocity contours of upstream and downstream cylinder at different spacing ratios

由图 6a 可看出, 间距 $L = 1.5D$ 时, 圆柱间距非常近, 下游圆柱产生负阻力, 同时上游圆柱产生的

旋涡脱落受到抑制,圆柱间没有产生旋涡脱落。上游圆柱对下游圆柱振动的影响较弱,上下游圆柱像一个整体,旋涡脱落在下游圆柱产生。振动响应规律和位移曲线与单圆柱涡激振动(如图4)基本相同,此时为单一的涡激振动模式,但下游圆柱比上游圆柱起振滞后。

由图6b可知,间距 $L=3D$ 时,上下游圆柱与单圆柱涡激振动位移曲线走势(如图4)基本相同。圆柱间距较近,上游圆柱分离剪切层周期性交替附着在下游圆柱表面上,下游圆柱振动受上游圆柱的影响,振动幅值略小,稳定后二者振动位移均呈现周期性。

由图6c可看出,间距 $L=5D$ 时,间距比较大,上下游圆柱均发生旋涡脱落,为双圆柱尾涡脱落模式,圆柱间产生旋涡脱落,此时上游圆柱脱落的旋涡“撞击”下游圆柱,加强了下游圆柱的振动,下游圆柱产生比上游圆柱大且稳定的振幅。

低流速下,其他条件相同,上下游圆柱的尾流模式和位移曲线随间距不同,呈现不同的变化规律,与Zdravkovich^[9]提出的圆柱的运动响应与它们的间距密切相关的结论一致。

3 试 验

为验证数值模拟结果的准确性和可靠性,进行串联双圆柱流致振动试验。

3.1 试验装置

双振子流致振动潮流能转换试验装置如图7所示,采用相同长度尼龙棒作为双圆柱振子;拉伸弹簧作为圆柱体的弹性支承,为得到试验所需有效刚度,采用双弹簧并联;试验地点为中国海洋大学海工动力学实验室清水槽,试验装置自身具有一定的阻力,故试验流速从0.4 m/s起,间隔0.05 m/s;试验中主要参数如表1所示。数据采集设备及测量工具:ADV数据采集系统测流速、测力计、米尺、秒表、游标卡尺等。

3.2 数值试验结果对比分析

将数值与试验结果进行对比如表2所示,上游圆柱振动振幅数值结果与试验值基本相同,误差较小,在允许的范围内。下游圆柱振动振幅试验值比数值结果偏小,误差相对较大,其原因在于数值模

拟利用串联双圆柱装置的简化物理模型进行仿真计算,忽略了摩擦等阻力的影响,条件相对理想,但误差在允许的范围内。

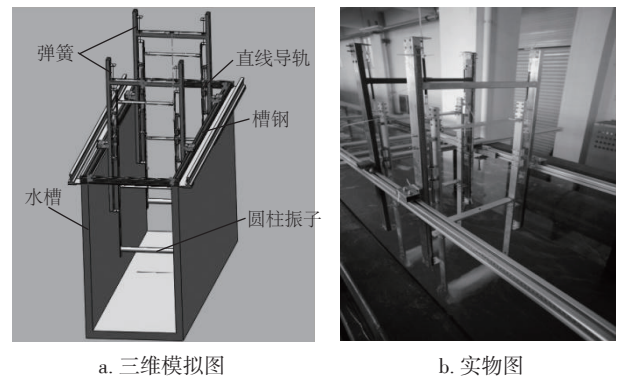


图7 双振子流致振动潮流能转换试验装置

Fig. 7 Tidal current energy conversion devices of flow induced vibration of double vibrator

表1 试验主要参数

Table 1 Main parameters in experiment

参 数	数 值
水槽长度/m	30
水槽宽度/m	1.2
水槽高度/m	1
流速范围/ ms^{-1}	0~0.75
试验流速/ ms^{-1}	0.4~0.75
振子直径/mm	120
振子长度/mm	375
间距比 L/D	2,3,4,5
弹簧刚度 k/m^{-1}	100,150,200,300

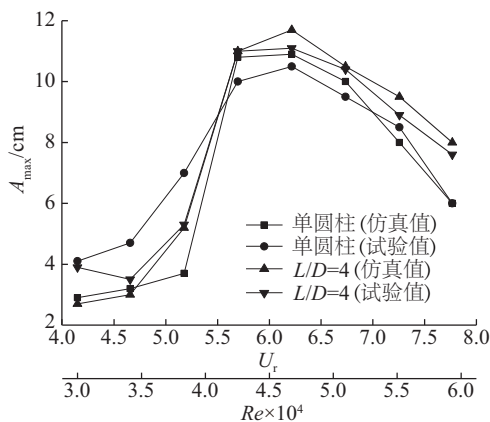
表2 上/下游圆柱最大振幅 A_{max} (cm)的数值
计算结果与试验结果对比

Table 2 Comparison of calculated and experimental results about amplitude of upstream and downstream cylinder

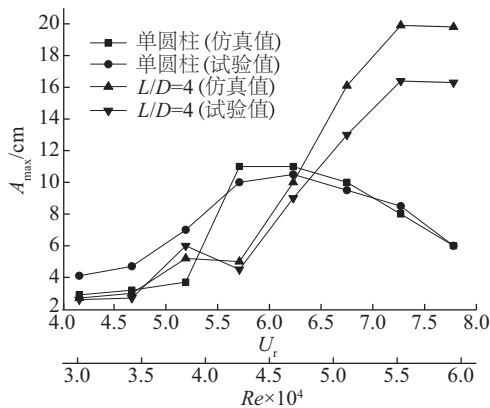
L/D	计算结果	试验结果	误差/%
2	12.7/20.1	12.0/14.5	5.8/38.6
3	12.0/20.0	11.5/14.8	4.3/35.1
4	11.7/19.8	11.1/16.4	5.4/20.7
5	11.2/20.1	10.4/15.7	7.7/28.0

为了更直观地显示数值结果与试验值的对比结果,以单圆柱和间距 $L/D=4$ 时的串联双圆柱为例,绘制圆柱振子振动振幅规律曲线如图8所示。从图8中可看出,单圆柱与串联上游圆柱振动振幅

的数值结果与试验值随约化速度(雷诺数)的增大,变化趋势基本一致,误差较小。当约化速度 $U_r < 6.0 (Re < 4.32 \times 10^4)$ 时,该区间内流速较小,串列下游圆柱数值结果与试验值吻合较好;随着约化速度的不断增大,串列下游圆柱的试验值与数值结果在数值大小上存在一定的差异,但圆柱振动幅响应规律曲线走势基本一致。



a. 上游



b. 下游

图8 间距比 $L/D=4$ 时,串列双圆柱振幅Fig. 8 Amplitude of tandem circular cylinder at spacing ratio $L/D=4$

4 结 论

1) 流速较低,圆柱间距比不同,串列双圆柱振幅响应不同。间距 $L=1.5D$ 时,上、下游圆柱振幅基本相同;间距 $L=3.0D$ 时,上游圆柱振幅大于下游圆柱;间距 $L=5.0D$ 时,下游圆柱振幅较大且稳定。

2) 下游圆柱能否发生尾流驰振与间距比和流速有关,发生尾流驰振时,能得到比涡激振动更大的振幅。

3) 当约化速度较小时,下游圆柱振动振幅主要受间距的影响;当约化速度大到圆柱振子发生“共振”时,下游圆柱振动的最大振幅与间距无关,数值基本相同。

4) 随着间距的改变,上游圆柱始终以涡激振动的形式振动,当 $L=2.0D$, $U_r=6.0 (Re=4.32 \times 10^4)$ 上游圆柱振幅最大 $A_{\max}=1.1D$,比单圆柱最大振幅 $A_{\max}=11 \text{ cm}$ 增大了 0.15 倍;下游圆柱受上游圆柱振动的影响,存在涡激振动和尾流驰振 2 种振动形式。当 $U_r=7.0 (Re=5.04 \times 10^4)$ 时,各间距下游圆柱振幅均达到最大值 $A_{\max}=1.7D$,比单圆柱 $A_{\max}=11 \text{ cm}$ 增大了 1.8 倍。无论间距如何变化,上下游圆柱的最大振幅均大于单圆柱的最大振幅。

研究表明:在一定工况下,串列双圆柱流致振动与单圆柱涡激振动相比,振幅大、转化效率高,在实际工程中具有广泛的应用前景。为更全面地分析不同影响因素对串列双圆柱流致振动振幅的影响,还需进一步对影响串列双圆柱流致振动的其他因素如不等直径、不同约束方式、不同振子外形等进行研究。

[参考文献]

- [1] Sarpkaya T. A critical review of the intrinsic nature of vortex-induced vibrations[J]. Journal of Fluids and Structures, 2014, 19(4): 389—447.
- [2] 毕继红,任洪鹏,丁代伟,等.串列双圆柱静止绕流的二维数值仿真分析[J].工程力学,2012,(Sup1): 8—11.
- [2] Bi Jihong, Ren Hongpeng, Ding Daiwei, et al. Two-dimensional numerical simulation of static flow interference between two circular cylinders in tandem [J]. Engineering Mechanics, 2012, (Sup1): 8—11.
- [3] 陈文曲,任安禄,李广望.串列双圆柱绕流下游圆柱两自由度涡致振动研究[J].力学学报,2004,36(6): 732—738.
- [3] Chen Wenqu, Ren Anlu, Li Guangwang. The numerical study of two-degree-of-freedom vortex-induced vibration of the downstream cylinder in tandem arrangement [J]. Acta Mechanica Sinica, 2004, 36(6): 732—738.
- [4] 及春宁,陈威霖,黄继露,等.串列双圆柱流致振动的数值模拟及其耦合机制[J].力学学报,2014,46(6): 862—870.
- [4] Ji Chenning, Chen Weilin, Huang Jilu, et al.

- Numerical investigation on flow-induced vibration of two cylinders in tandem arrangements and its coupling mechanisms[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2014, 46(6): 862—870.
- [5] 丁林, 张力, 姜德义. 串列双圆柱流致振动及能量转换特性[J]. 工程热物理学报, 2015, 36(10): 2146—2149.
- [5] Ding Lin, Zhang Li, Jiang Deyi. Flow-induced motion and energy conversion of two circular cylinders in tandem[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2015, 36(10): 2146—2149.
- [6] Mays R C, Kaboudian A, Jaiman R K. On the origin of wake-induced vibration in two tandem circular cylinders at low Reynolds number[J]. Journal of Fluids & Structures, 2016, 61: 76—98.
- [7] 崔肖娜. 并列双圆柱绕流的水动力特性研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [7] Cui Xiaona. Hydrodynamic characteristics of viscous flow past two side-by-side cylinders[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.
- [8] Tu Jiahuang, Zhou Dai, Bao Yan, et al. Flow-induced vibrations of two circular cylinders in tandem with shear flow at low Reynolds number[J]. Journal of Fluids & Structures, 2015, 59: 224—251.
- [9] Zdravkovich M M. Review of flow interference between two circular cylinders in various arrangements[J]. Journal of Fluids Engineering, 1977, 99(4): 618—633.

STUDY OF AMPLITUDE RESPONSE OF FLOW-INDUCED VIBRATION OF TANDEM DOUBLE-CYLINDERICAL OSCILLATORS IN TIDAL CURRENT ENERGY CONVERTER

Wang Shujie^{1,2}, Cai Yunwen¹, Yuan Peng^{1,2}, Tan Junzhe^{1,2}, Si Xiancai^{1,2}

(1. College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

2. Ocean Engineering Key Lab of Qingdao, Qingdao 266100, China)

Abstract: The overall conversion efficiency of flow-induced vibration tidal energy device arrays with reasonable arrangement can be significantly improved. Aiming at flow-induced vibration tidal current energy conversion device with arrangement of tandem double-cylinder oscillators, ADINA software is used to carry out numerical simulation of amplitude response of flow-induced vibration with equal diameter tandem double-cylinder under different parameters, the amplitude response rules of up and down-stream cylinders, wake pattern and displacement time travel curves under different spacing, different flow rates and different Reynolds numbers are obtained. The two-oscillator tidal current energy converter model is manufactured and the experiment in flume is performed, the experiment results are in good agreement with the numerical results. The results show that the amplitudes of upstream and downstream oscillators reach maximum in the arrangement of the oscillators spacing $2D$, and both are greater than the amplitude of the single oscillator.

Keywords: flow-induced vibration; tidal current energy converter; tandem double cylinders; amplitude response of cylinder