DOI: 10.3901/JME.2020.22.142

一种旋转振动圆柱获取能量的参数化研究

崔致斐 孙瑾静 许斌 黄典贵

(上海理工大学能源与动力工程学院 上海 200093)

摘要: 提出一种旋转振动圆柱从潮流能中主动获取能量的方法。基于 Fluent 软件的用户自定义函数求解旋转振动圆柱升力, 采用动网格技术对一定速度下的旋转振动圆柱获取潮流能进行数值模拟研究。参照相关试验结果, 进行数值模拟结果确认, 得到的最大升力系数幅值与平均阻力系数幅值与试验结果基本吻合。分析相位差、振幅比及转动幅值对旋转振动圆柱获能效率的影响。结果表明, 同振幅比、同转动幅值的旋转振动圆柱, 能量利用率都是随着相位差先逐渐增大后减小; 同相位差、同转动幅值的旋转振动圆柱, 在有效获能范围, 其振幅比越大则能量利用率越高; 同相位差、同振幅比的旋转振动圆柱, 随着转动幅值的增加, 其能量利用率先逐渐增加后减小; 当相位差为 243° , 转动幅值为 3, 振幅比为 2.0 时, 能量利用率最高。
关键词: 潮流能; 旋转振动圆柱; 振幅比; 能量利用率; 相位差

中图分类号: TK79

Parameterized Study on Energy Acquisition of Vibrating Rotating Cylinder

CUI Zhifei SUN Jinjing XU Bin HUANG Diangui

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093)

Abstract: A method of actively acquiring energy from tidal current by a rotating vibration cylinder is proposed. The user-defined function based on Fluent software is used to solve the lifting force of the rotating vibration cylinder, and the dynamic grid technology is applied to numerically simulating study the flow energy obtained by the rotating vibration cylinder at a certain speed. Firstly, according to the test results, the numerical simulation results are confirmed, and it shows that the maximum lift coefficient and the average drag coefficient are consistent with the test results. Secondly, the effects of phase difference, amplitude ratio and rotation amplitude on the energy efficiency of the rotating vibration cylinder are analyzed. The results show that the energy utilization rate of the rotating vibration cylinders with the same amplitude ratio and the same rotation amplitude gradually increases first and then decreases with the phase difference; in the effective energy range, the greater the amplitude ratio, the higher the energy efficiency of the rotating vibration cylinder with the same phase difference and the same rotating amplitude ratio; with the increase of the rotation amplitude, the energy utilization rate of the rotating vibration cylinder with the same phase difference and the same amplitude ratio gradually increases and then decreases. The energy utilization rate is highest when the phase difference is 243° , the rotation amplitude is 3 and the amplitude ratio is 2.0.

Key words: tidal current energy; rotating vibrating cylinder; amplitude ratio; energy utilization rate; phase difference

0 前言

潮流能作为清洁可再生能源, 已成为最具潜力的替代能源之一。传统的潮流能利用方式是通过潮流转换装置获取水流动能。在振荡式潮流能转化装置中, 利用圆柱上下振动获取清洁能源成为了一种新型获能方式。

孙玉东等^[1]对组合体涡激振动, 给出了振幅计

算方法。徐枫等^[2]数值研究了雷诺数 $Re=200$ 的弹性圆柱体的涡激振动, 分析了涡激力系数、柱体位移特征值和尾流涡结构随频率比的变化关系, 得到大质量比可明显抑制流向振动, 高折合阻尼可明显抑制横向振动。密歇根大学 RAGHAVAN 等^[3-4]试验研究了 VIVACE(Vortex induced vibrations for aquatic clean energy)装置在高雷诺数与低雷诺数下的获能, 研究结果表明较于低雷诺数, 高雷诺数下的 VIVACE 装置具有更高的获能效率。袁鹏等^[5]以试验方法研究了涡激振动模型及在潮流中的水动力特性, 验证了涡激振动耦合模型设计的合理性与正确

性。白旭等^[6]对单圆柱体涡激振动发电装置进行了数值模拟,分析了约化速度、阻尼比和质量比对获能效率的影响。结果表明,在约化速度 12.5、阻尼系数 0.081 及质量比 1.48 的条件下,获能效率达到最大值 24.885%。罗竹梅等^[7]数值模拟了二维弹性支撑圆柱体在均匀流中横向涡激振动,分析了质量比、阻尼比和固有频率对圆柱体获能效率的影响,结果表明,存在质量比为 2、质量阻尼比为 0.24 和固有频率为 0.69 的最优值,使得获能效率最大。

目前对于圆柱获能的研究,大多是基于涡激振动是被动式的。本文提出了圆柱体主动获能方式,利用带有一定旋转速度的圆柱在垂直于来流方向上下振动,当圆柱上所受升力与圆柱运动方向一致时,升力对圆柱做功获能,即对流场中的单个柱体结构施加旋转、振动运动,并采用数值方法研究相位差和转动幅值对圆柱能量利用率的影响。

1 物理模型与数值方法

1.1 物理模型

本文以直径 D 为 0.1 m 的单圆柱作为二维简化模型,圆柱体横向上下位移为定常态谐波运动,呈正弦规律变化,因此可将单位长度圆柱体上下位移 $y(t)$ 与上下运动速率 $v(t)$ 表达为

$$y(t) = A \sin(2\pi ft) \quad (1)$$

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

式中, A 为圆柱体振动幅值; f 为圆柱振动频率, Hz。

圆柱体在水流中上下振荡的同时做旋转运动。旋转运动 $\Omega(t)$ 和旋转速度 $\omega(t)$ 分别定义为

$$\Omega(t) = A_w \sin(2\pi ft + \theta) \quad (3)$$

$$\omega(t) = 2\pi f A_w \cos(2\pi ft + \theta) \quad (4)$$

式中, A_w 为转动幅值; θ 为旋转速度与上下运动速度相位差。

1.2 能量利用率

旋转振动模型利用圆柱绕流的卡门涡街,使其表面产生交替变化的升力,推动圆柱体作往复运动,其升力^[8]

$$F_y = \frac{1}{2} \rho U^2 D C_y \sin(2\pi ft) \quad (5)$$

式中, C_y 为升力系数幅值。

流体在一个振动周期对圆柱体做功的大小

$$P_s = \frac{1}{T} \int_0^T F_y v(t) dt \quad (6)$$

圆柱体从流体中获得的总功率

$$P_f = \frac{1}{2} \rho U^3 (D + 2A) \quad (7)$$

式中, U 为来流速度。

则能量利用率

$$\eta = \frac{P_s}{P_f} \quad (8)$$

1.3 数值方法

使用 Pointwise 划分网格, C 型计算域如图 1 所示,上游区域为半径 $20D$ 的半圆,下游区域为一个 $41D \times 40D$ 的长方形。计算域整体分为 I 与 II 两个区域,其中 I 区域边界采用结构网格, II 区域为动网格,采用光顺和重构两种方法,为保证圆柱体近壁面 $y^+ \approx 1$ ^[9], II 区域采用结构与非结构的混合网格,其中圆柱体表面采用结构化网格且设置为刚体(图 2)。进出口边界条件分别设置为速度进口和压力出口,圆柱体表面设置为无滑移边界条件;上下边界为对称性边界条件。选取工质为水。

图 1 计算域模型

图 2 圆柱表面附近网格示意图

本文采用了 Fluent17.0 商业软件进行计算,求解器为可用于不可压的基于压力的求解器,求解方法为隐式求解方法,速度压力耦合算法采用 SIMPLE 算法,湍流模型选取 $k-\omega$ SST 湍流模型。

2 模型验证

为了验证该动网格技术的可靠性,本文参考

GOPALKRISHNAN^[10]圆柱振动试验,以单圆柱模型为基础进行模拟计算验证。相关参数为雷诺数 $Re=10\,000$, 振幅比 $A/D=0.3$, 无量纲频率为 $f^*=0.2$ 。

单圆柱振动无量纲频率

$$f^* = f_d D / U_\infty \quad (9)$$

式中, f_d 为实际圆柱振动频率, Hz; D 为圆柱直径, m; U_∞ 为来流速度, m/s。

表1给出了在上述参数条件下, 本文计算得到的最大升力系数幅值 $C_{l_{\max}}$ 和平均阻力系数 $C_{d_{\text{mean}}}$ 与 GOPALKRISHNAN^[10] 试验结果及赵静等^[11] 模拟结果对比。可以看出本文的数值模拟结果与文献[10-11]吻合良好。因此, 本文采用的计算方法及动网格技术是可靠有效的。

表1 $Re=10\,000$ 圆柱上下振动与文献[10-11]对比

文献	$C_{l_{\max}}$	$C_{d_{\text{mean}}}$
文献[10]	1.587	1.352
文献[11]	1.962	1.552
本文结果	1.661	1.489

3 计算结果分析

本文取来流速度 $U=1.4$ m/s, 研究了不同振幅比 A/D , 不同相位差 θ 及不同转动幅值 A_w 下对旋转振动圆柱获能的影响。

3.1 相位差对旋转振动圆柱获能效率的影响

本节研究旋转振动圆柱旋转运动与上下运动之间的相位差对旋转振动圆柱获能的影响。此时, 固定振幅比及转动幅值。图3给出了振幅比 $A/D=1.0$ 及转动幅值 $A_w=5$ 时, 能量利用率随相位差变化曲线。由图3可见, 圆柱能量利用率以 360° 为周期, 随着相位差的增加, 能量利用率逐渐增加到 12.692% , 然而, 当相位差持续增加时, 圆柱获能效率反而下降。当 $\theta=45^\circ\sim 153^\circ$ 及 $297^\circ\sim 360^\circ$ 范围内, 能量利用率为负值, 说明旋转振动圆柱没有获能, 反而在消耗能量。当 θ 在 $153^\circ\sim 297^\circ$ 范围内, 能量利用

图3 振幅比 A/D 为 1.0 时, 不同相位差的能量利用率

率为正值, 此时旋转振动圆柱在获能, 为有效获能范围。同时证明了这种主动获能方法的可行性。

为了更详细地研究同转动幅值、不同振幅比, 相位差与旋转振动圆柱的能量利用率之间的关系, 我们进行了大量的数值计算, 计算结果见图4, 从图4中可以看出不同振幅比对能量利用率具有显著的影响, 在相位差 $\theta=45^\circ\sim 153^\circ$ 时, 圆柱体在所研究的振幅比范围内, 能量利用率均为负值, 且振幅比越大, 耗能越多; 在相位差 θ 大于 153° 时, 圆柱体能量利用率开始为正值, 振幅比越大, 能量利用率增加速率越快, 在相位角 $\theta=243^\circ$, 各个振幅比下其能量利用率均达到其最大。其中, 最大能量利用率在相位角 $\theta=243^\circ$, 振幅比 $A/D=2.5$ 获得, 达到 22.557% ; 在相位角 θ 小于 243° 时, 能量利用率开始下降, 且振幅比越大, 下降速率越快。振幅比 $A/D=2.5$, 在相位角 $\theta=297^\circ$ 时, 圆柱已开始耗能, 而振幅比 $A/D=0.1$, 在相位角 $\theta=351^\circ$ 才开始耗能, 因此振幅比并不是越大越好。

图4 不同振幅比能量利用率总结

为说明旋转振动圆柱的获能原理, 选取振幅比 $A/D=2.0$ 进行研究, 图5给出了 $0.6T$ 时刻, 相位差 θ 在 45° 、 171° 和 243° 时的压力及涡量云图。由压力云图可见, 在相位差 $\theta=45^\circ$ 时, 旋转振动圆柱受到的合力总体向上, 与旋转振动圆柱运动方向相反, 此时耗能, 表现为能量利用率为负值, 其值为 -38.428% ; 在相位差 $\theta=171^\circ$ 时, 正压面积略大于负压面积, 旋转振动圆柱合力方向与运动方向一致, 此时略获能, 能量利用率仅为 0.845% ; 在相位差 $\theta=243^\circ$ 时, 圆柱上表面正压面积远大于 $\theta=171^\circ$ 时的正压面积, 圆柱合力方向向下, 此时获能大幅增加, 能量利用率为 21.672% 。从涡量云图可见, 不同相位差时, 圆柱尾部上下两侧都产生了一对方向相反的涡, 随着相位差的增加, 圆柱上侧顺时针涡逐渐增大, 下侧逆时针涡逐渐减小。

图6与图7分别给出了一个周期内, 振幅比 $A/D=2.0$, 相位差 $\theta=243^\circ$ 的旋转振动圆柱在不同时刻

图 5 $0.6T$ 时刻, 振幅比 $A/D=2.0$, 相位差 $\theta=45^\circ$, 171° 及 243° 时圆柱流场的压力和涡量云图

图 6 一个周期内, 振幅比 $A/D=2.0$, 相位差 $\theta=243^\circ$ 的旋转振动圆柱的压力云图

的压力云图及能量利用率, 并标注了圆柱在不同时刻的上下运动及旋转运动的方向。在 $0.2T$ 、 $0.4T$ 及 $0.8T$ 时刻, 旋转振动圆柱受力方向与运动方向基本为

90° , 对升力做功基本没有帮助, 由图 7 可见, 其能量利用率最高仅为 4.705%。在 $0.6T$ 与 $1T$ 时刻, 其顺时针旋转振动圆柱受力方向与上下运动方向的夹角远小于 90° , 能量利用率随之也大幅度增加到 27.433%。

图 7 一个周期内, 振幅比 $A/D=2.0$, 相位差 $\theta=243^\circ$ 的旋转振动圆柱的能量利用率

3.2 转动幅值对旋转振动圆柱获能效率的影响

由上文, 选取能量利用率较高的相位差 225° 、 243° 及 261° , 研究不同振幅比下转动幅值与获能效率之间的关系。图 8、图 9 及图 10 分别给出了相位差在 $\theta=225^\circ$, 243° 及 261° 下, 振幅比 $A/D=2.0$, 1.5 及 1.0 时转动幅值与能量利用率的关系。从图 8 可知, 在相位差 $\theta=225^\circ$ 时, 随着转动振幅增加, 能量利用率先增大后减小。当 $A_w=3$, $A/D=2.0$ 时, 能量利用率取最大值 27.323%。当转速振幅 A_w 小于 6 时, 振幅比越大, 能量利用率越高; 当 A_w 大于 6 小于 10 时, 振幅比越大, 能量利用率反而降低, 越早的进入了负值区域。由图 9 可知, 在相位差 $\theta=243^\circ$,

图 8 圆柱在相位差 $\theta=225^\circ$, 振幅比 $A/D=2.0$, 1.5 和 1.0 时改变转动幅值 A_w 的效率总结

图 9 圆柱在相位差 $\theta=243^\circ$, 振幅比 $A/D=2.0$, 1.5 和 1.0 时改变转动幅值 A_w 的效率总结

$A_w = 3$, $A/D = 2.0$ 时, 能量利用率取得最大值 29.446%。当转速幅值 A_w 小于 7 时, 振幅比越大, 能量利用率越高; 转速幅值 A_w 大于 7 小于 10 时, 振幅比越大, 能量利用率越低。由图 10 可知, 在相位差 $\theta=261^\circ$, $A_w=3$, $A/D=2.0$ 时, 能量利用率取得最大值 26.191%。因此, 最佳能量利用率在相位差 $\theta=243^\circ$, $A_w=3$, $A/D=2.0$ 时取得为 29.446%。

图 10 圆柱在相位差 $\theta=261^\circ$, 振幅比 $A/D=2.0, 1.5$ 和 1.0 时改变转动幅值 A_w 的效率曲线

4 结论

本文通过对流场中的单个柱体结构施加旋转、振动运动, 采用数值模拟方法对影响旋转振动圆柱获取能量的参数进行了研究, 分析了振幅比 A/D 、旋转速度与上下运动速度相位差 θ 以及转动幅值 A_w 对能量利用率的影响。在所研究范围内, 得出以下结论。

(1) 同振幅比 A/D 、同转动幅值时, 能量利用率随着相位差 θ 的增大先增大后减小, 最佳获能相位差为 $\theta=243^\circ$; 同相位差时, 在有效获能区间, 振幅比越大, 能量利用率越高。

(2) 同相位差、同振幅比时, 能量利用率随着转动幅值增加呈现先增大后减小的趋势, 最佳转动幅值为 $A_w=3$ 。

(3) 最佳能量利用率相位差 $\theta=243^\circ$, 转动幅值 $A_w=3$, 振幅比 $A/D=2.0$ 时取得为 29.446%。

参 考 文 献

[1] 孙玉东, 王伟东, 刘忠族, 等. 圆柱及其组合体水动力与涡激振动计算[J]. 水动力学研究与进展, 2005, 20(3): 313-320.
SUN Yudong, WANG Weidong, LIU Zhongzu, et al. Hydrodynamic forces and vortex-induced vibration calculation for a cylinder and its combination[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2005, 20(3): 313-320.

[2] 徐枫, 欧进萍. 低雷诺数下弹性圆柱体涡激振动及影响参数分析[J]. 计算力学学报, 2009(5): 613-619.
XU Feng, OU Jinping. Analysis of vortex-induced vibration of an elastic cylinder and influence parameters at low Reynolds[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2009(5): 613-619.

[3] RAGHAVAN K, BERNITSAS M M. Experimental investigation of Reynolds number effect on vortex induced vibration of rigid circular cylinder on elastic supports[J]. Ocean Engineering, 2011, 38(5-6): 719-731.

[4] RAGHAVAN K, BERNITSAS M M. Enhancement of high damping VIV through roughness distribution for energy harnessing at $8 \times 10^3 < Re < 1.5 \times 10^5$ [C]// ASME 2008 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2008: 871-882.

[5] 袁鹏, 陈东旺, 王树杰, 等. 涡激振动潮流能转换装置获能实验研究[J]. 中国海洋大学学报, 2015, 45(10): 114-120.
YUAN Peng, CHEN Dongwang, WANG Shujie, et al. Experimental study on vortex-induced vibration tidal current energy conversion[J]. Periodical of Ocean University of China, 2015, 45(10): 114-120.

[6] 白旭, 仇北平, 乐智斌. 圆柱体涡激振动海流能捕获效率影响参数分析[J]. 可再生能源, 2017, 35(5): 784-790.
BAI Xu, QIU Beiping, LE Zhibin. Analysis of the parameters influencing the ocean current energy harvesting efficiency of circular cylinder VIV[J]. Renewable Energy Resources, 2017, 35(5): 784-790.

[7] 罗竹梅, 张立翔. 影响从涡激振动中获取能量的参数研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(9): 12-15.
LUO Zhumei, ZHANG Lixiang. Influence of spacing ratio on energy harvesting from water current by cylinder arrays[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(9): 12-15.

[8] SUN H, MA C, KIM E S, et al. Flow-induced vibration of tandem circular cylinders with selective roughness: Effect of spacing, damping and stiffness[J]. European Journal of Mechanics-B/Fluids, 2019, 74: 219-241.

[9] 陈志乐, 刘桦. 床面上直立圆柱绕流问题的湍流模型比较[J]. 水动力学研究与进展, 2008(6): 633-638.
CHEN Zhile, LIU Hua. Comparisons of different turbulence models based on the flow around a bottom-mounted cylinder[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2008(6): 633-638.

- [10] GOPALKRISHNAN R. Vortex-induced forces on oscillating bluff cylinders[D]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 1993.
- [11] 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. ZHAO Jing, LÜ Lin, DONG Guohai, et al. Two dimensional numerical simulation of forced oscillating cylinder at sub-critical Reynolds numbers[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2012, 29(1): 74-80.

作者简介: 崔致斐, 男, 1992 年出生。主要研究方向为流体机械。

E-mail: guicui@yeah.net

黄典贵(通信作者), 男, 1963 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为空气动力学、水动力学、及叶轮机械气动热力学。

E-mail: dghuang@usst.edu.cn