

谐振子几何结构不同导致的水表面波各向异性

杨虹¹, 陈丹¹, 马余全¹, 彭世镠², 毛东风³, 曾双雄¹, 宋昀轩¹, 王彩霞¹

(1. 北京信息科技大学 理学院, 北京 100192; 2. 中国科学院 力学所, 北京 100190;

3. 中国石油大学(北京) 国家安全生产监督管理总局油气安全工程技术研究中心, 北京 102249)

摘要: 利用高速摄像与 Tracker 视频追踪技术, 并结合粒子图像测速处理及数值模拟方法, 研究了水波发生振子在周期性振动过程中对水面漂浮物的排斥或牵引作用及漂浮物的运动轨迹, 揭示了不同几何结构的振子产生的流体表面波各向异性的现象。实验发现表面波对漂浮物的作用主要取决于振子的几何结构, 具体表现为圆柱体振子对表面漂浮物只存在排斥的作用, 三棱柱振子在棱柱角的对应方向上对漂浮物存在定向牵引作用且在其他方向上存在排斥作用。进一步研究表明振子几何结构的不同致使其对水表面漂浮物既有排斥也有定向牵引, 导致表面波对漂浮物的排斥或牵引现象在不同的波线上呈现各向异性。

关键词: 水表面波; 定向牵引; 粒子图像测速; 数值模拟

中图分类号: TV131.2

文献标志码: A

DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2018.13.025

Water surface wave anisotropy phenomenon caused by harmonic oscillator's different geometric structures

YANG Hong¹, CHEN Dan¹, MA Yuquan¹, PENG Shiliu², MAO Dongfeng³,
ZENG Shuangxiong¹, SONG Yunxuan¹, WANG Caixia¹

(1. College of Sciences, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China;

2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3. SAWS Oil-Gas Safety Engineering Center, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China)

Abstract: A high speed video camera and the software Tracker were used and combined with the particle image velocimetry technique and the numerical simulation method to study a water wave generator's repulsion or traction to floating objects on water surface in its periodic oscillation process and motion trajectory of floating objects, and to reveal water surface wave anisotropy phenomenon caused by different resonator structures. The experiment results showed that the action of surface wave on floating objects mainly depends on oscillator's geometric structure; a cylindrical oscillator only has a repulsive action on floating objects, but a tri-prism oscillator has a directional traction action on floating objects along the direction corresponding to the prism angle, and a repulsive action along other directions; different geometric structures of oscillators make their actions on floating objects be not only repulsive but also directional tractive, these actions cause water surface wave along different wave lines is anisotropic.

Key words: water surface wave; directional traction; particle image velocimetry; numerical simulation

近水波研究由来已久, 1847 年 Stokes 开创非线性表面重力水波动力学。1895 年, 荷兰数学家 Korteweg 和他的学生 De Vries 根据流体力学研究了浅水波的运动, 在长波近似和小振幅的假定下, 求得了单向运动的浅水波运动方程即著名的 KdV 方程^[1-2]。王玮等^[3]研究低雷诺数情况下偏心圆柱间定常 streaming 流动问

题。钟万勰等^[4]提出新的理论—浅水位移法孤立波, 是浅水波理论的重要进展, 拥有相当广阔的应用前景。Punzmann 等^[5-10]报道了关于表面流的生成和逆转, 通过改变振源的振动频率实现了对水表面漂浮物的非接触式牵引, 但是对于这种现象的根源, 并没有给出合理的解释。杨虹等^[11]在实验中发现特定结构振源振动对流体表面有定向牵引作用。2016 年浙江大学王振宇等人根据波的折射及衍射性质, 通过控制传播介质折射率的梯度变化来操纵水波的传播, 实现了水波在传输中聚焦、转弯、定向发射等现象^[12-14]。

基金项目: 国家科技重大专项(2011ZX05027-005-001)

收稿日期: 2017-07-12 修改稿收到日期: 2017-10-25

第一作者 杨虹 女, 硕士, 副教授, 硕士生导师, 1965 年生

为了探究振源对水表面漂浮物非接触式作用的原理^[15-18] 本文利用高速摄像,Tracker 视频追踪软件跟踪水波及数值模拟等方法,分析了三棱柱振子和圆柱体振子所产生的水表面波对漂浮物的各向异性作用。研究发现圆柱体振子对表面漂浮物仅存在排斥的作用,三棱柱振子对水表面漂浮物同时具有排斥和牵引两种作用,具体表现在棱柱面方向上为排斥作用,在棱柱角方向上则表现为牵引作用。进一步研究发现,周期性振子的振动对水表面漂浮物都存在着排斥与牵引两种作用形式,其最终效果则取决于振子几何结构引起的表面波各向异性所导致的定向牵引与排斥两种作用形式的主次关系。

1 实验

1.1 Tracker 视频追踪浮子运动

实验在长宽高均为 800 mm、水深 500 mm 的水箱 1 中进行,实验器材包括:索尼摄像机一台,观察用浮子 1 个,水波驱动装置一套,三棱柱体和圆柱体振子各一个,以及 Tracker 视频追踪软件。实验前在水表面上均匀撒一层工业金粉并静置 4 小时使金粉均匀覆盖。进行实验时水波驱动装置的振动频率 1 Hz,振幅 ± 1.5 cm。用摄像机记录浮子运动情况并用 Tracker 软件进行分析。

1.2 高速摄像记录振子振动上升、下降过程

实验在长宽高分别为 1 500 mm、1 200 mm、400 mm,水深度为 280 mm 的水箱 2 中进行,实验器材包括:高速摄像机一台,水波驱动装置一套,三棱柱体及圆柱体振子,用于水表面优化的工业银粉若干。实验前在水表面撒上一层工业银粉并搅拌、静置 4 小时使银粉均匀覆盖。水波驱动装置振动频率 1 Hz,振幅 ± 1.5 cm。用高速摄像机记录实验结果。

高速摄像机主要参数:分辨率 1 280 × 800 dpi,采样率 3 200 fps,曝光时间 310 μ s。

1.3 Particles Image Velocimetry(PIV) 分析流线流速

实验在长宽高分别为 1 500 mm、1 200 mm、400 mm,水深度为 280 mm 的水箱 2 中进行,实验器材包括:索尼摄像机一台,水波驱动装置一套,三棱柱体及圆柱体振子各一个,用于水表面优化的工业金粉若干。水面均匀撒金粉,设置实验和拍摄条件,摄像记录振子周期运动视频,用 PIV 软件对视频进行处理,得到水表面流线及流速。

2 实验现象与分析

本文分别对三棱柱体和圆柱体作为振子产生的现象进行分析。

2.1 三棱柱体的实验现象与分析

图 1(a) 为三棱柱在垂直方向上做周期性振动时的水表面的局部流线图,从图中能明确地看到三棱柱面对应方向上流线轨迹方向是远离三棱柱面的(如实心箭头所示),棱柱角对应的地方则有很多条流线合并并且都向着三棱柱角尖的位置聚集(如空心箭头所示);图 1(b) 是以三棱柱的几何中心为原点建立坐标轴用 Tracker 视频软件追踪实验中的一个漂浮物图 1(c) (横轴 t 为浮子运动时间,纵轴 r 为浮子运动产生的位移)中的曲线和跟踪图对应的位置证实了棱柱面的水流驱动漂浮物背离原点,而且曲线可以近似拟合为直线,表明了这种驱动是稳定的。图 1(d) 为三棱柱角对应位置水流驱动漂浮物的位移轨迹,轨迹整体呈下降趋势的同时有轻微的上下起伏,波浪曲线说明棱柱角方向上水流对表面漂浮物的驱动形式可能既有排斥也有定向牵引,但在柱角对应位置以牵引最用为主,图 1(c)、(d) 的结论与流线图 1(a) 一致;图 1(i)、(j) 分别为振子下降、上升过程模拟图^[19],可以看出在振子振动过程中水流运动情况,与实验数据比较相似。

通过观察振子下降(图 1(e)、(f))、上升(图 1(g)、(h))的分过程,发现振子下降过程中,漂浮物(图 1(e)、(f) 圆圈内)向外移动了一小段距离,这是因为振子在下降过程中挤压水面占据空间迫使水往外排,水外排时产生的水波在扩散传输过程中受到表面张力和空气摩擦等阻尼作用,导致能量耗散由直线型的波纹逐渐变为弧波,并且处于边缘的水波在传输过程中由于能量损失而逐渐消失。根据浅水波能量耗散公式^[20]

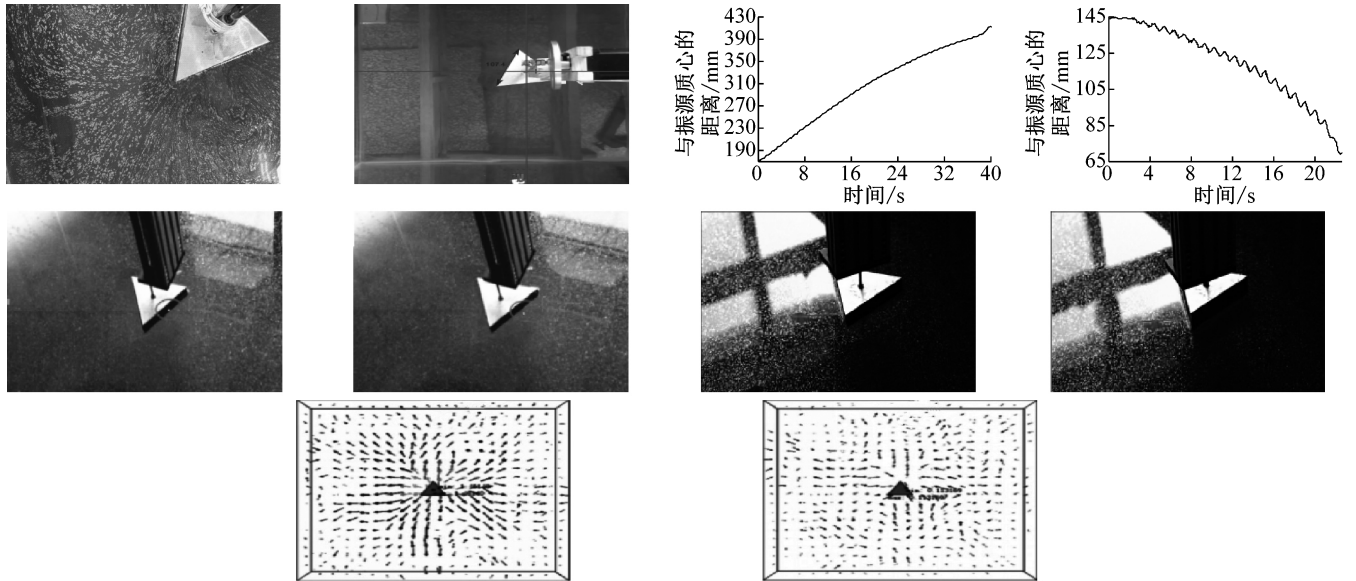
$$w_b = \frac{K_d c_g}{h} \left[1 - \left(\frac{\Gamma h}{H} \right)^2 \right]$$

式中: K_d 为衰减系数,为稳定因子; H 为波高; h 为水深; c_g 为波速,波纹振幅及频率迅速衰减。如图 1(g)、(h) 所示,能明显看到横线所在区域内的漂浮物整体向振子移动了一小段距离,这是因为振子在上升的过程中空出的空间被水迅速回流填充。在振子上升和下降这一个周期里水体积外排和回流补充两种形式交替进行,在棱柱面对应的方向上水体积外排强度明显大于水回流填充而整体呈排斥现象,而在棱柱角对应的方向上由于能量耗散的缘故水体积外排强度小于水回流补充整体呈回流现象(即对表面漂浮物产生牵引作用)并且在振子振动的整个周期内两种现象是分时间段出现的,所以处于水表面的漂浮物在被驱动运动的过程中既有被牵引也有被排斥两种现象,这正和 Tracker 跟踪的数据相吻合。这说明根据图 1(c)、(d) 位移数据所推导出的结论是合理的。

图 2 为基于粒子图像测速技术的流线图,通过观察图 2(a) 中三棱柱尖角和柱面方向的流线,可以看出

在三棱柱体下降过程中流线向外; 图 2 (b) 图中流线方向指向三棱柱, 说明三棱柱上升时水流向里; 图 2 (c)、(d) 为三棱柱体周期性振动的流线图, 说明三棱柱周期性振动过程中流线方向既有向里也有向外。从图中还

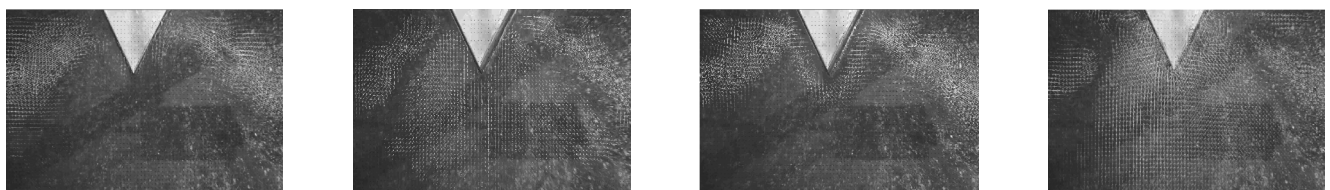
能看出: 三棱柱面中间部分流线的颜色最深, 而三棱柱角方向颜色最浅。这也说明了三棱柱面中间部位水表面的移动速度最快、能流密度高, 进一步验证了关于图 1 的发现。



(a) 三棱柱振源波的流线图; (b) 浮子跟踪界面; (c) (d) 排斥、牵引浮子位移图; (e) (f) 图分别为振子下降过程不同时刻的高速摄像图; (g) (h) 图分别上升过程不同时刻的高速摄像图; (i) (j) 分别为基于 Ansys 的振子下降、上升过程模拟图

图 1 三棱柱体振动瞬态及 PIV 流线分析

Fig. 1 Vibration transient and PIV streamline analysis figures of triangular prism



(a) 三棱柱体下降时水表面流线图; (b) 三棱柱体上升时水表面流线图; (c) (d) 三棱柱体周期性振动时水表面流线图

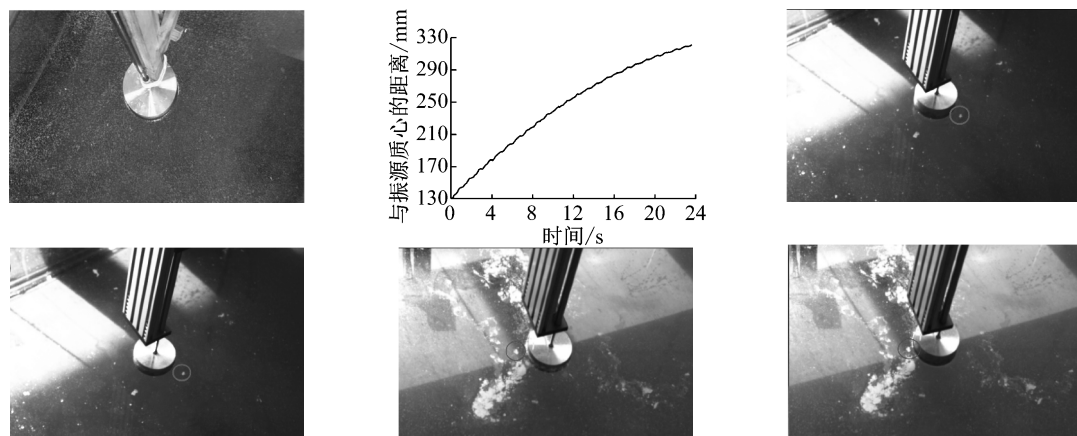
图 2 基于 PIV 粒子图像处理的三棱柱波源水表面流线图

Fig. 2 Triangular prism source water surface streamlines based on particle image processing technique

2.2 圆柱体的实验现象与分析

图 3 (a) 为圆柱形振子实物图, 图中没有发现明显

的流线条纹; 图 3 (b) 为 Tracker 视频追踪漂浮物位移轨迹图, 曲线同样近似直线且不光滑, 说明浮子在运动过



(a) 圆柱振子工作时的实物图; (b) 浮子跟踪位移轨迹图; (c) (d) 为圆柱体振子下降过程不同时刻的高速摄像截图; (e) (f) 图分别上升过程不同时刻的高速摄像截图

图 3 圆柱体振动瞬态及 PIV 流线分析

Fig. 3 Vibration transient and PIV streamline analysis figures of cylinder

程中受到向内定向牵引的作用力,同时也受到了向外排斥的作用力;图3(c)、(d)为振子下降过程高速摄像截图,可以看到当振子下降过程中圆圈内的漂浮物背向振子移动了一小段距离;图3(e)、(f)为振子上升过程高速摄像截图,此过程中圆圈内的漂浮物向振子移动了一小段距离。图3(c)、(d)、(e)、(f)证实了圆柱体振子振动产生的水波对水表面的漂浮物既有向外排斥作用又有牵引作用,产生这种作用的机理与三棱柱一样。然而圆柱振子周期性振动过程中只发现漂浮物运动轨迹整体呈向外排斥的现象,说明在圆柱体对应的各个方向上水波对漂浮物的作用形式都以排斥为主。

3 结论

本实验由步进电机精准控制振子的振动,实验装置工作稳定,实验数据可靠。通过实验观察到三棱柱体的周期振动可以在尖角方向实现对水面漂浮物的定向牵引。通过实验得出结论:三棱柱体作为水波振源产生的水波对表面漂浮物既有排斥作用又有牵引作用,而且作用稳定。三棱柱柱面方向对漂浮物的作用形式为排斥,三棱柱柱角方向对漂浮物的作用形式为牵引。数值模拟及基于PIV得到的数据与实验数据吻合的比较,说明定向牵引和排斥并非偶然现象。因圆柱体柱面方向结构上的各向同性,圆柱体作为水波振源产生的水波对表面漂浮物仅存在排斥现象。研究振源非接触作用原理将有助于利用定向牵引作用实现低能耗地打捞湖面垃圾、海上泄漏的原油等。后续工作将对同种结构不同规格以及不同结构的振子进行系统研究。

参考文献

- [1] HOGAN S J. Particle trajectories in nonlinear gravity-capillary waves[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1984, 143(143): 243-252.
- [2] 吴云岗,陶明德. 水波动力学基础[M]. 上海: 复旦大学出版社, 2011.
- [3] 王玮,浦群,林同骥. 低 Re 数偏心圆柱间定常整流流动[J]. *水动力学研究与进展*, 1993, 8(2): 172-175.
WANG Wei, PU Qun, LIN Tongji. Low Re steady streaming flow between two eccentric circular cylinders[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 1993, 8(2): 172-175.
- [4] 钟万勰,姚征. 位移法浅水孤立波[J]. *大连理工大学学报*, 2006, 46(1): 151-156.
ZHONG Wanxie, YAO Zheng. Shallow water solitary waves based on displacement method[J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2006, 46(1): 151-156.

- [5] PUNZMANN H, FRANCOIS N, XIA H, et al. Generation and reversal of surface flows by propagating waves[J]. *Nature Physics*, 2014, 10(8): 658-663.
- [6] CONSTANTIN A. On the deep water wave motion[J]. *Journal of Physics A*, 2001, 34: 1405-1417.
- [7] MATIOC A V. On particle trajectories in linear water waves[J]. *Nonlinear Anal Real World Applications*, 2010, 11(5): 4275-4284.
- [8] XIA H, SHATS M, PUNZMANN H. Modulation instability and capillary wave turbulence[J]. *Europhysics Letters*, 2010, 91(1): 14002.
- [9] VON K A, HUH N F, FERNÁNDEZGARCÍA G, et al. Double cascade turbulence and Richardson dispersion in a horizontal fluid flow induced by Faraday waves[J]. *Physical Review Letters*, 2011, 107(7): 074502.
- [10] XIA H, SHATS M. Propagating solitons generated by localized perturbations on the surface of deep water[J]. *Physical Review E*, 2012, 85(2): 026313.
- [11] 杨虹,彭世铎,毛东风,等. 特定结构振源振动时流体表面波的定向吸引作用[J]. *石油勘探与开发*, 2016, 43(5): 816-819.
YANG Hong, PENG Shiliu, MAO Dongfeng, et al. Directional attraction of fluid surface wave caused by vertically oscillating prisms[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(5): 816-819.
- [12] WANG Z Y, ZHANG P, NIE X F, et al. Focusing of liquid surface waves by gradient index lens[J]. *Europhysics Letters*, 2014, 108(2): 24003.
- [13] WANG Z Y, ZHANG P, NIE X F, et al. Manipulating water wave propagation via gradient index media[J]. *Scientific Reports*, 2015(5): 16846.
- [14] WANG Z Y, NIE X F, ZHANG P. Unidirectional transmission of water waves through a one-dimensional combination immersed system[J]. *Physica Scripta*, 2014, 89(9): 095201.
- [15] 张阿漫,戴绍文. 流固耦合动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [16] 邹志利. 水波理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [17] 孙涛,陶建华. 波浪作用下近岸区污染物输移扩散的数学模型及其实验验证[J]. *海洋学报*, 2003, 25(3): 1-9.
SUN Tao, TAO Jianhua. Numerical modeling and experimental verification of pollutant transport under waves in the near shore zone[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2003, 25(3): 1-9.
- [18] 戴遗山,段文洋. 船舶在波浪中运动的势流理论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [19] 陈艳霞,陈磊. ANSYS Workbench 工程应用案例精通[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- [20] 陶建华. 水波的数值模拟[M]. 天津: 天津大学出版社, 2005.