文章编号:1674-2974(2024)08-0211-08 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2024191

均匀流下水下机械臂涡激振动试验研究

段德荣[1†],刘鑫[1],刘敏[2],代森良[1],张辉[1],杨学锋[1]
(1. 济南大学 机械工程学院,山东 济南 250022;
2. 山东建筑科学研究院有限公司,山东 济南 250031)

摘 要:为了揭示均匀流下水下机械臂的涡激振动响应特性,利用运动水下机械臂与静水间的相对运动,搭建了水下机械臂均匀流场涡激振动测试试验台,采集了不同约化速度下水下机械臂不同位置处的振动位移响应.试验结果表明:随着约化速度的增加,振动主频与无量纲振幅均为增长的趋势,横流向无量纲振幅小于0.04D,顺流向出现显著的多频以及更高的幅值,表明水下机械臂在顺流向受到的阻力更加明显.位移标准差随测试高度的增加先增后减,横流向位移标准差空间分布相较于顺流向对称性明显,主导模态控制在1阶.横流向的涡激振动规律性较强,基本符合圆柱绕流时的斯托哈尔规律.顺流向无因次主导频率在0.3~0.8之间,略大于横流向,斯托哈尔数为横流向工况的1~1.7倍,未出现频率锁定现象,但流速及测试高度对水下机械臂的涡激振动存在一定影响.该研究可为构建准确的水动力学模型保证水下机械臂的精准定位与控制提供一定的理论依据.

关键词:水下机械臂;均匀流;涡激振动;频率分析
中图分类号:TH113 **文献标志码**:A

Experimental Study on Vortex-induced Vibration of Underwater Manipulator under Uniform Flow

DUAN Derong[1†], LIU Xin[1], LIU Min[2], DAI Senliang[1], ZHANG Hui[1], YANG Xuefeng[1]
(1. School of Mechanical Engineering , University of Jinan, Jinan 250022, China;
2. Shandong Academy of Architectural Science Co. ,Ltd. , Jinan 250031, China)

Abstract: To reveal the characteristics of vortex-induced vibration (VIV) responses of an underwater manipulator in a uniform flow, an experimental setup was constructed to test VIV in the uniform flow field of an underwater manipulator by utilizing the relative motion between the moving underwater manipulator and still water. Vibration displalement response at various positions on the underwater manipulator were collected at different reduced velocities. The experimental results indicate that as the reduced velocity increases, both the dominant frequency of vibration and the dimensionless amplitude exhibit an increasing trend. The dimensionless amplitude in the cross-flow direction is less than 0.04D, while the in-line direction shows significant multi-frequency characteristics and higher amplitudes, indicating that the underwater manipulator experiences more noticeable resistance in the in-line direction. The standard deviation of displacement first increases and then decreases with the

* **收稿日期**:2023-06-12
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51905211), National Natural Science Foundation of China(51905211)
作者简介:段德荣(1988—),男,山东济南人,济南大学副教授,博士
† 通信联系人,E-mail: me_duandr@ujn.edu.cn

increase in testing height, and the spatial distribution of the standard deviation of displacement in the cross-flow direction shows more pronounced symmetry compared to the in-line direction, with the first mode being dominant. The VIV in the cross-flow direction follows a strong regularity, generally conforming to the Strouhal pattern observed in cylinder flow. The dimensionless dominant frequency in the in-line direction is between 0.3 and 0.8, which is slightly higher than that in the cross-flow direction, with the Strouhal number being approximately 1 to 1.7 times that of the cross-flow condition. No frequency lock-in phenomenon was observed, but flow velocity and testing height have some influence on the VIV of the underwater manipulator. This study provides a theoretical basis for constructing accurate hydrodynamic models to ensure the precise positioning and control of underwater manipulator.

Key words: underwater manipulator; uniform flow; vortex-induced vibration (VIV); frequency analysis

水下机械臂被广泛应用在海洋工程中,可以辅助完成检修打捞、科研探索等工作[1].但海洋环境较为复杂,水下机械臂在水流扰动及不平衡力的作用下容易出现位置偏移,此问题会随着水下机械臂长径比的增加而愈加明显.为保证水下机械臂的定位精度,现有文献考虑到了水动力的影响[2-5].然而,机械臂等圆柱状结构在水流作用下容易产生涡激振动,这种振动是引起海洋工程装备结构疲劳失效的主要原因.特别的,当漩涡脱落频率与结构的固有频率较接近时,会发生频率"锁定"现象[6-8].涡激振动对水下机械臂的精准定位与控制带来了严峻挑战[9],为建立更为准确的水下机械臂动力学模型,揭示水下机械臂的涡激振动响应规律是很有必要的.

近年来,研究者针对柔性圆柱进行了大量涡激振动实验.黄维平等[10]研究了柔性圆柱振动频率与振幅的关系,结果表明在非锁定区,横流向与顺流向的振动频率比与振幅比都接近1.高云等[11]分析了不同测点下应变主导频率与无量纲振幅,并且比较了柔性立管与刚性圆柱之间锁定特性与水动力系数的差异.高喜峰等[12]利用拖曳水池模型实验,观测了柔性圆柱的控制模态、斯托哈尔数以及应变与位移均方根,其中横流向与顺流向的位移均方根分别能够达到0.60D(D为圆柱直径)与0.30D.唐国强等[13]通过位移与频谱分析,得到了响应频率、位移标准差随流速的变化规律,并探究了立管模型不同测点的运动轨迹与影响因素.Wang等[14]测试得到了立管在不同工况下的涡激振动响应,包括位移、频率等,研究发现在相同的流速下,随着立管顶张力的增加,立管的主导频率与位移均方根逐渐减小.张建侨[15]通过试验得出,在较高的约化速度下,立管模型的响应频率处于自振频率和漩涡脱落频率之间,其中空管的响应频率随约化速度的增大而增大,在同一流速下质量比大的立管响应位移小.

为了达到试验要求,模拟海洋中的流场环境,许多涡激振动试验都是在拖曳水池中进行的,刘雨等[16]在拖曳水池里进行了均匀流下自由悬挂式立管涡激振动试验,分析了立管应变时程响应、主导频率等参数规律,随着约化速度的不断增大,各管节在横向上应变响应出现较为明显差异.徐万海等[17]通过拖车的拖动来模拟均匀流,发现了大长径比、小质量比柔性圆柱结构的响应幅值较大,最大接近3D,并通过控制频率数据,得到了斯托哈尔数为3.Huera-huarte等[18]在拖曳水池中完成了低质量比、长柔性圆柱体涡激振动试验,结果表明横流向和顺流向响应振幅增加明显,其中横流向最大振幅可达3D,顺流向最大振幅可达1.5D,平均阻力非常大,最大阻力系数高达4.5.Morooka等[19]在拖曳水池中进行了悬链线立管的模型试验,在雷诺数Re=400~600之间,研究了行波对立管模型横流向的影响,并通过分析进行了验证.

通过上述研究,本文参照拖曳水池试验搭建了水下机械臂均匀流涡激振动测试试验台,测试并分析不同约化速度下水下机械臂的涡激振动特性.

1 模型试验

1.1 试验设置

如图1(a)所示,为了克服拖曳水池试验受场地及运动路径的限制,本文通过旋转运动代替直线运动达到机械臂与静水间的瞬时均匀流状态[20].如图

1(b)所示,利用TRIZ(发明问题解决理论,Theory of Inventive Problem Solving)和AHP(层次分析法,Analytic Hierarchy Process)共同完成了水下机械臂涡激振动测试装置的创新设计[21],利用该试验台采集不同约化速度下水下机械臂不同位置的涡激振动响应信号,揭示均匀流场下水下机械臂的涡激振动响应规律.

如图1(c)所示,测试模型采用相似准则进行结构设计,材料采用铝合金,长700 mm,内径15 mm,外径30 mm.采集系统主要包括SENTHER三轴加速度传感器与东华DH5981数据采集系统,其中传感器型号为530AM,灵敏度500 mV/g,测量范围为10 g.试验在常温常压下进行,6组流速工况分别为0.40 m/s、0.53 m/s、0.67 m/s、1.00 m/s、1.13 m/s、1.27 m/s,1号、2号、3号、4号位置的测试高度分别为20 mm、155 mm、375 mm、550 mm.水流的来流方向为顺流向(IL),垂直于顺流向的测试方向为横流向(CF).

1.2　试验参数

为了方便叙述,对试验参数进行无量纲化处理,使其反映不同圆柱结构涡激振动研究中的客观规律.

1.2.1　约化速度U_r

约化速度U_r为圆柱结构在一个周期内振动的路径与该结构特征尺寸的比值.具体表达式为:

$$U_r = \frac{U}{f_n D} \tag{1}$$

式中:f_n为圆柱结构在静水中的固有频率;U为外流流速;D为圆柱结构外径.

1.2.2　无量纲振幅A^*

无量纲振幅A^*用来表示涡激振动位移最大值的无量纲量,表达式为:

$$A^* = \frac{A}{D} \tag{2}$$

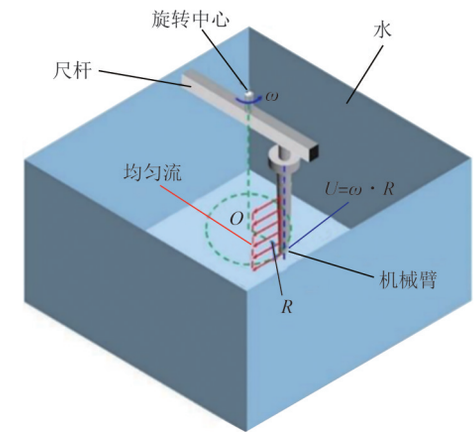
式中:A为圆柱结构物的振幅,用来描述圆柱体振动位移的最大值.

1.2.3　无因次主导频率f^*

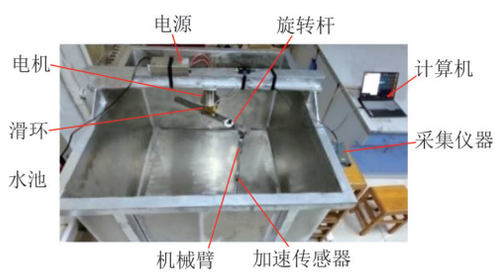
无因次主导频率是圆柱结构振动频率的无量纲值,定义为振动频率与固有频率的比值,表达式为:

$$f^* = \frac{f}{f_n} \tag{3}$$

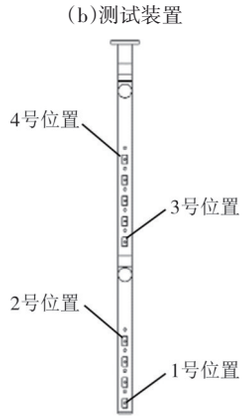
式中:f为圆柱体实际的振动响应频率;f_n为圆柱体在静水中的固有频率.



(a)均匀流原理图



(b)测试装置



(c)测试位置示意图

图1　涡激振动试验示意图

Fig.1　Schematic diagram of vortex-induced vibration test

1.2.4　斯托哈尔数St

斯托哈尔数St表示边界层分离及流动的不稳定性与相对稳定的漩涡脱落频率的关系,表达式为:

$$St = \frac{f_s U}{D} \tag{4}$$

式中:f_s为圆柱体的斯托哈尔频率,即流经固定状态下圆柱结构时的尾涡脱落频率.

1.3　误差分析

当U=1.26 m/s时,对水下机械臂1号位置横流向的振动响应进行了多次测量,使用标准差来验证试验结果的可靠性.标准差表示数据的离散情况,即偏离平均数的程度,标准差值越小,说明数据越接近平均值,测试更为准确.此外在涡激振动试验中,标准

差也可以反映圆柱涡激振动的主导模态及其响应幅度的变化量.标准差公式如下:

$$S=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(X_i-\bar{X}\right)^2}{n}} \tag{5}$$

式中:n代表测试次数;X_i为测试所得的位移;$\bar{X}$为位移平均值.结果如表1所示.多次测试所得到的振动主频均在13.67 Hz附近,位移幅值的标准差值为0.01 mm.在不同时刻,多次测试所得位移幅值与其平均值的最大相对误差为0.7%.综上分析可知:试验结果具有较好的稳定性和可靠性,水下机械臂涡激振动测试装置具有运行稳定以及测试准确等特点.

表1 多次测试得到的振动主频及位移幅值

Tab.1 Vibration dominant frequency and displacement amplitude from multiple tests

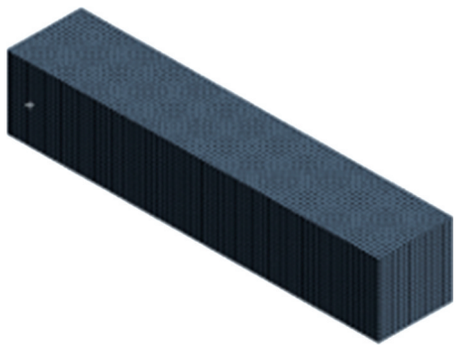
测试序号	振动主频/Hz	位移幅值/mm
1	13.67	1.07
2	13.65	1.05
3	13.67	1.07
4	13.67	1.06

2 试验结果与分析

2.1 湿模态分析

为了完成试验参数的无量纲化以及振动分析,利用ANSYS软件对水下机械臂进行了湿模态分析,获得水下机械臂的固有频率.

如图2所示,首先,建立200 mm×200 mm×1 000 mm的水环境及水下机械臂三维模型并进行网格划分,水下机械臂选用六面体网格,网格尺寸为3 mm;水环境模型选用Mechanical网格类型,网格尺寸为10 mm,机械臂内部定义填充空气.然后,借助Modal Acoustics模块求解,将海水模型与空气模型设置为Acoustic-Body,分别输入声速.最后,定义水下机械臂流固耦合面,在机械臂顶端设置固定约束,并设定求解阶数,开始湿模态计算.通过分析即可得到水下机械臂前6阶固有频率,如表2所示.



(a)流体域网格划分



(b)水下机械臂网格划分

图2 流体域与机械臂网格划分

Fig.2 Fluid domain and manipulator meshing

表2 水下机械臂前6阶固有频率

Tab.2 The first six natural frequency of underwater manipulator

阶数	固有频率/Hz
1	28.25
2	32.54
3	176.78
4	198.61
5	524.89
6	556.93

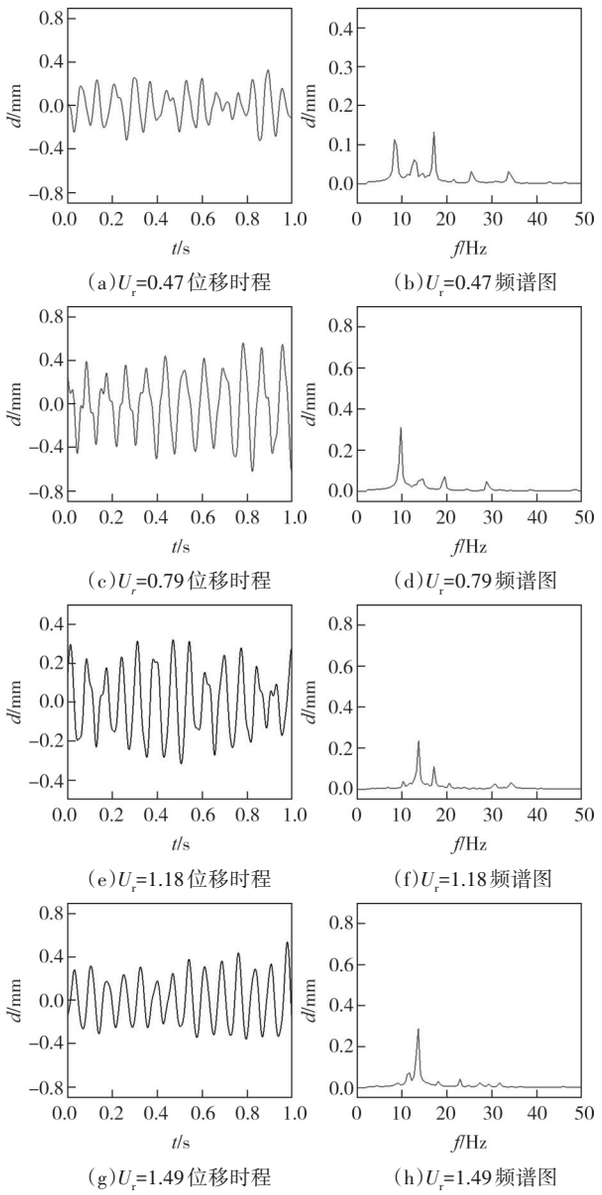
2.2 水下机械臂涡激振动响应分析

2.2.1 横流向涡激振动响应

图3为不同约化速度下,1号位置横流向位移时程曲线及频谱图.不难看出,横流向的位移响应呈现出稳定的周期性波动,频谱图中振动主频与位移幅值较为明显.当U_r=0.47时,位移的幅值较小,频谱图中存在两个峰值,分别为主导频率8.79 Hz以及17.09 Hz.随着约化速度的增大,横流向的位移响应增强,振动频率中的高频成分减弱,振动主频更加明显.U_r=0.79、1.18、1.49下的振动主频分别为10.74 Hz、13.23 Hz、13.67 Hz.虽然处于较低约化速度工况下,但随着速度增大,1号位置横流向涡激振动的振动频率与对应位移幅值均为增加的趋势,该结果与以往研究相类似[22].

2.2.2 顺流向涡激振动响应

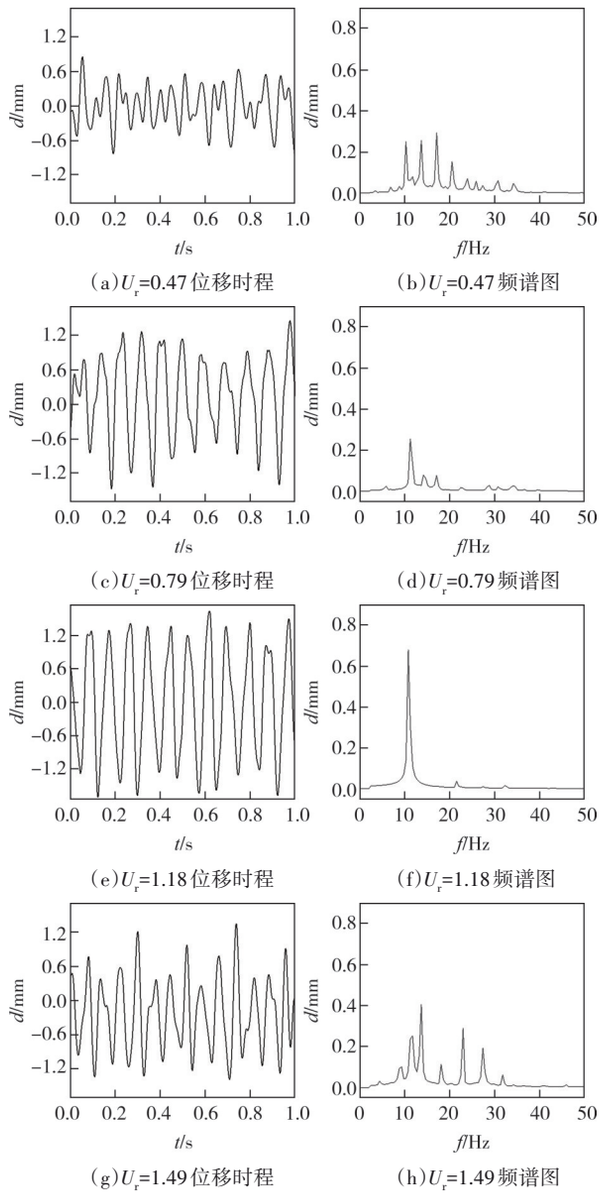
图4是不同约化速度下,1号位置顺流向涡激振动位移时程曲线及频谱图.通过频率分析发现,顺流向振动频率出现了数目增多以及幅值增大的现象.当流速较低时,受到水动力的影响,在频谱图中出现了多个幅值接近的振动频率.与横流向相比,顺流向涡激振动位移同样随流速的增加而增大,两个方向



(a)U_r=0.47位移时程　(b)U_r=0.47频谱图
(c)U_r=0.79位移时程　(d)U_r=0.79频谱图
(e)U_r=1.18位移时程　(f)U_r=1.18频谱图
(g)U_r=1.49位移时程　(h)U_r=1.49频谱图

图3　1号位置横流向涡激振动位移时程曲线及频谱图

Fig.3　The cross-flow displacement time history curve and spectrum diagram of vortex-induced vibration at position 1



(a)U_r=0.47位移时程　(b)U_r=0.47频谱图
(c)U_r=0.79位移时程　(d)U_r=0.79频谱图
(e)U_r=1.18位移时程　(f)U_r=1.18频谱图
(g)U_r=1.49位移时程　(h)U_r=1.49频谱图

图4　1号位置顺流向涡激振动位移时程曲线及频谱图

Fig.4　The in-line displacement time history curve and spectrum diagram of vortex-induced vibration at position 1

的振动主频较为接近,但顺流向的幅值更高.由此可见,受到水流冲击后,顺流向振动频率更加复杂,振动响应更强且涡激振动响应规律性弱.此现象表明,水下机械臂顺流向涡激振动的研究是不可忽略的.

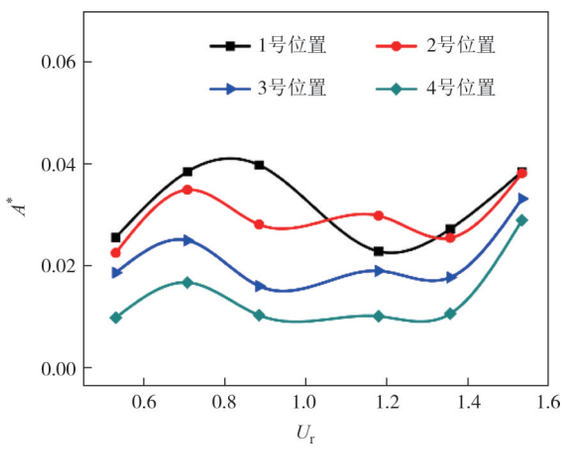
2.3　涡激振动响应影响因素分析

2.3.1　流速对涡激振动的影响

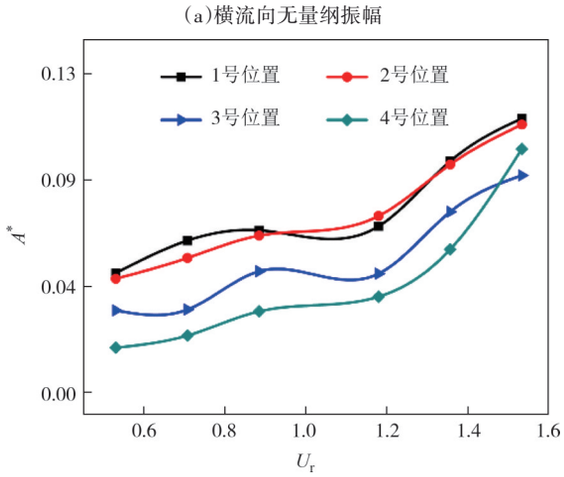
图5(a)、(b)分别表示水下机械臂横流向、顺流向无量纲振幅随约化速度的变化曲线.由图5(a)可知,横流向无量纲振幅在0.04D以下,1号位置振幅出现了更大的波动.当U_r=0.54~0.72时,无量纲振幅均呈现上升的趋势,1号位置在此流速区间的增幅能够达到50.86%.当U_r=0.72~1.36时,无量纲振幅短暂下降,2号、3号和4号位置的无量纲振幅分别在0.03D、0.02D与0.015D附近浮动,而1号位置表现出更大的波动范围,其无量纲振幅在约化速度区间0.9~1.18的降低幅度达到42.57%.当U_r=1.54时,横流向无量纲振幅再次上升.不难发现,横流向无量纲振幅随约化速度的增长呈现增长的趋势,振幅变化曲线处于“初始分支”,此阶段特点为振幅较小,同时,随约化速度的增长而缓慢上升[23-24].

从图5(b)可以看出,水下机械臂顺流向的无量纲振幅明显大于横流向工况,并且随着约化速度的增加表现出更明显的上升趋势.当U_r=1.54时,1号、2号、3号、4号位置的顺流向无量纲振幅达到最大

值,分别为0.11D、0.10D、0.088D、0.098D,分别为横流向无量纲振幅的1.86倍、1.62倍、2.04倍、1.96倍.发生此现象的原因有两点:第一,试验中工况处于涡激振动的起步阶段,规律较为复杂;第二,水下机械臂在顺流向受到的阻力更加显著,导致顺流向位移迅速增大.



(a)横流向无量纲振幅



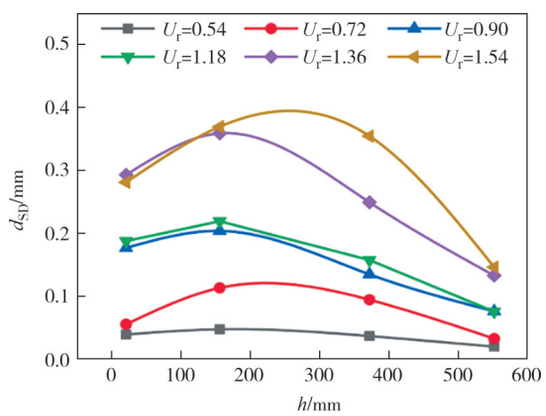
(b)顺流向无量纲振幅

图5 水下机械臂无量纲振幅变化曲线

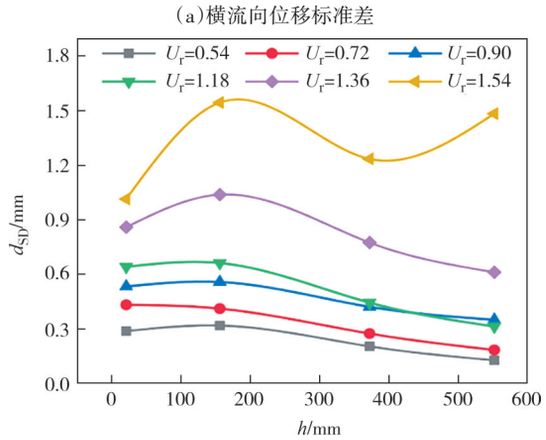
Fig.5 The variation curve of dimensionless amplitude of underwater manipulator

2.3.2 测试高度对涡激振动的影响

图6(a)、(b)分别描述了不同约化速度下,横流向、顺流向位移标准差随测试高度的变化规律,位移标准差表示水下机械臂的平均位移情况以及主导模态.由图6(a)可知,在横流向,随着测试位置高度的增加,位移标准差的变化趋势为先增加后减小,峰值主要集中在水下机械臂的中间位置,该流速下主导模态维持在1阶.当U_r=0.54时,位移标准差幅值较小,1号与4号位置的位移标准差之间的变化幅度仅为0.02 mm;当U_r=0.72时,位移标准差先增加后减小的变化规律较为明显,其空间分布基本对称.与无量纲振幅相比,涡激振动位移标准差同样随约化速度的增大而增大.由图6(b)可知,当U_r=0.54~1.18时,随着测试高度的增加,4号位置的位移标准差出现了明显的下降幅度.当U_r=1.36时,变化规律类似于横流向工况,位移标准差随测试高度呈现出先增大后减小的趋势.当U_r=1.54时,2号、4号位置均出现了较大的偏移,位移标准差先增加后减小再增加.不难看出,在较高流速下,涡激振动存在多个模态,通过观察发现,该现象与立管涡激振动试验结果类似.当立管两端固定约束时,由于各位置刚度及阻尼的变化,中间位置出现较大振幅[25-26],在本研究中,水下机械臂为一端固定约束,最大振幅向机械臂末端偏移.



(a)横流向位移标准差



(b)顺流向位移标准差

图6 水下机械臂位移标准差变化曲线

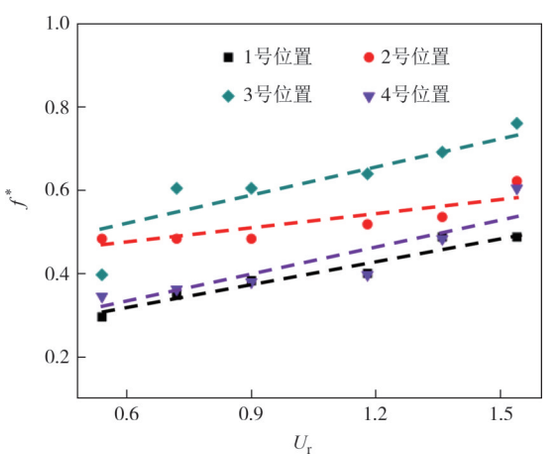
Fig.6 The variation curve of displacement standard deviation of underwater manipulator

2.4 无因次主导频率分析

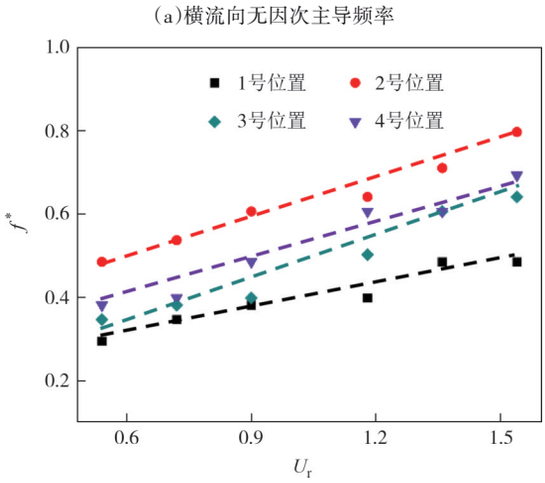
图7(a)、(b)分别表示水下机械臂横流向、顺流向无因次主导频率.随着约化速度的增加,无因次主导频率保持增长.经过计算与拟合,主导频率变化曲线的斜率为斯托哈尔数.试验中的主导频率均小于水下机械臂的固有频率,并未发生共振现象.

如图7(a)所示,横流向的无因次主导频率维持

在0.3~0.78之间,而1号、2号、3号、4号位置的St分别为0.19、0.15、0.22、0.22,数值上与0.2较为接近,所以横流向基本符合圆柱绕流时的斯托哈尔规律[27].由图7(b)可知,顺流向的无因次频率、斯托哈尔数与横流向工况并不是固定的倍数关系,顺流向的无因次主导频率在0.3~0.8之间,1号、2号、3号、4号位置的St分别为0.19、0.26、0.34、0.29,分别为横流向工况1倍、1.7倍、1.5倍、1.3倍.综上所述,在较低流速下,顺流向的无因次主导频率略大于横流向的主导频率,而斯托哈尔数为横流向工况的1~1.7倍;虽然处于均匀流下,但不同测试位置的无因次主导频率并不一致,原因是不规则截面形状影响了机械臂表面的漩涡脱落.



(a)横流向无因次主导频率



(b)顺流向无因次主导频率

图7　水下机械臂无因次主导频率

Fig.7　The dimensionless dominant frequency of underwater manipulator

3　结 论

水下机械臂作为水下机器人的重要执行机构,其圆柱状结构受水流影响易产生涡激振动,影响水下机械臂的精准定位与控制.为了建立更为准确的水下机械臂动力学模型,本文自主搭建了水下机械臂均匀流涡激振动测试试验台,揭示了不同约化速度下水下机械臂的涡激振动特性,主要结论如下.

1)通过位移时程曲线与频谱图分析发现,随着流速的增大,横流向与顺流向振动主频与位移幅值均为增加的趋势.在横流向上某些工况,振动频率成分掺杂了顺流向的影响,在顺流向上,受到水流的冲击,位移幅值更高,在频谱图中多频现象更加明显.

2)水下机械臂的无量纲振幅随着约化速度的增加而增加,顺流向受到阻力影响而振动更加明显.通过不同测试位置的位移标准差分析可以发现,水下机械臂的位移标准差随测试高度的增加先增后减,峰值单一且集中在机械臂中间位置,横流向空间分布相较于顺流向更加对称,主导模态为1阶.

3)本次试验中并未发生频率锁定与共振现象,试验工况中水下机械臂横流向与顺流向的无因次主导频率都小于1,并且无因次主导频率随约化速度而增长.横流向上涡激振动规律性较强,基本符合圆柱绕流时的St规律.在顺流向上,无因次主导频率略大于横流向,斯托哈尔数为横流向工况的1~1.7倍.

参考文献

[1]　丛明, 刘毅, 李泳耀, 等. 水下捕捞机器人的研究现状与发展[J]. 船舶工程, 2016, 38(6): 55-60.
CONG M, LIU Y, LI Y Y, et al. Research and development of underwater fishing robot[J]. Ship Engineering, 2016, 38(6): 55-60.(in Chinese)

[2]　王懿, 张爱霞, 郭瑞岩, 等. 六自由度水下机械臂动力学模型及流阻影响研究[J]. 北京理工大学学报, 2020, 40(11): 1143-1149.
WANG Y, ZHANG A X, GUO R Y, et al. Dynamic model of 6-DOF underwater manipulator and its influence of flow resistance[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2020, 40(11): 1143-1149.(in Chinese)

[3]　袁凯, 刘延俊, 孙景余, 等. 基于模糊RBF神经网络的水下机械臂控制研究[J]. 工程设计学报, 2019, 26(6): 675-682.
YUAN K, LIU Y J, SUN J Y, et al. Research on control of underwater manipulator based on fuzzy RBF neural network[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2019, 26(6): 675-682.(in Chinese)

[4]　MCLAIN T W, ROCK S M. Development and experimental validation of an underwater manipulator hydrodynamic model[J]. The International Journal of Robotics Research, 1998, 17(7): 748-759.

[5]　ZHONG Y G, YANG F. Dynamic modeling and adaptive fuzzy sliding mode control for multi-link underwater manipulators[J].

Ocean Engineering,2019,187:106202.

[6] 孙一飞, 邵林媛, 刘庆宽, 等. 波浪形斜拉索的气动力及风致振动特性[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2022, 49(5): 44-54.
SUN Y F, SHAO L Y, LIU Q K, et al. Aerodynamic forces and wind induced vibrations characteristics of wavy stay cables[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2022, 49(5): 44-54.(in Chinese)

[7] LIU G J, LI H Y, QIU Z Z, et al. A mini review of recent progress on vortex-induced vibrations of marine risers[J]. Ocean Engineering, 2020, 195:106704.

[8] 陈伟民,付一钦,郭双喜,等. 海洋柔性结构涡激振动的流固耦合机理和响应[J]. 力学进展,2017,47:25-91.
CHEN W M, FU Y Q, GUO S X, et al. Fluid-solid coupling and dynamic response of vortex-induced vibration of slender ocean cylinders[J]. Advances in Mechanics, 2017, 47: 25-91.(in Chinese)

[9] KOŁODZIEJCZYK W. Some considerations on an underwater robotic manipulator subjected to the environmental disturbances caused by water current[J]. Acta Mechanica et Automatica, 2016,10(1):43-49.

[10] 黄维平,曹静,张恩勇,等. 大柔性圆柱体两自由度涡激振动试验研究[J]. 力学学报,2011,43(2):436-440.
HUANG W P, CAO J, ZHANG E Y, et al. On vortex induced vibration in two-degree-of-freedoms of flexible cylinders[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2011, 43(2):436-440.(in Chinese)

[11] 高云,任铁,付世晓,等. 柔性立管涡激振动响应特性试验研究[J]. 振动与冲击,2015,34(17):6-11.
GAO Y, REN T, FU S X, et al. Tests for response characteristics of VIV of a flexible riser[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015,34(17):6-11.(in Chinese)

[12] 高喜峰,周丽丹,徐万海,等. 圆柱结构涡激振动拖曳水池实验研究[J]. 振动与冲击,2017,36(23):131-136.
GAO X F, ZHOU L D, XU W H, et al. Towing tank tests for vortex-induced vibrations of a circular cylinder[J]. Journal of Vibration and Shock,2017,36(23):131-136.(in Chinese)

[13] 唐国强,吕林,滕斌,等. 大长细比柔性杆件涡激振动实验[J]. 海洋工程,2011,29(1):18-25.
TANG G Q, LV L, TENG B, et al. Laboratory measurement of vortex-induced vibration of long flexible riser[J]. The Ocean Engineering,2011,29(1):18-25.(in Chinese)

[14] WANG C X, WANG Y, LIU Y, et al. Experimental and numerical simulation investigation on vortex-induced vibration test system based on bare fiber Bragg grating sensor technology for vertical riser[J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering,2021,13:223-235.

[15] 张建侨.细长柔性立管涡激振动的实验研究[D].大连:大连理工大学,2009.
ZHANG J Q. Experimental investigation of vortex-induced vibration of long-flexible marine risers [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009.(in Chinese)

[16] 刘雨,蒋玉峰,王树青,等. 自由悬挂分段式柔性立管涡激振动试验[J]. 振动、测试与诊断,2023,43(4):661-668.
LIU Y, JIANG Y F, WANG S Q, et al. Vortex-induced vibration of free hanging segmented flexible riser[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis,2023,43(4):661-668.(in Chinese)

[17] 徐万海,马烨璇,袁曦林,等.细长柔性圆柱结构涡激振动实验研究[C]//第十七届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(上).南宁:海洋出版社, 2015: 42-45.
XU W H, MA Y X, YUAN X L, et al. Experimental study vortex-induced vibration of slender flexible cylindrical structures[C]// Proceedings of the 17th China Ocean (offshore) Engineering Symposium(above). Nanning: China Ocean Press, 2015: 42-45.(in Chinese)

[18] HUERA-HUARTE F J, BANGASH Z A, GONZÁLEZ L M. Towing tank experiments on the vortex-induced vibrations of low mass ratio long flexible cylinders[J]. Journal of Fluids and Structures,2014,48:81-92.

[19] MOROOKA C K, TSUKADA R I. Experiments with a steel catenary riser model in a towing tank [J]. Applied Ocean Research,2013,43:244-255.

[20] FU X P, FU S X, REN H J, et al. Experimental investigation of vortex-induced vibration of a flexible pipe in bidirectionally sheared flow[J]. Journal of Fluids and Structures, 2022, 114: 103722.

[21] 刘鑫,段德荣,高常青,等. 水下机械臂涡激振动测试装置创新设计[J]. 制造技术与机床, 2022(10): 133-139.
LIU X, DUAN D R, GAO C Q, et al. Innovative design of vortex induced vibration testing device for underwater manipulator[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool,2022(10):133-139.(in Chinese)

[22] 金国庆, 邹丽, 宗智, 等.深海采矿系统中悬臂式立管涡激振动分析[J].力学学报, 2022, 54(6): 1741-1754.
JING G Q, ZOU L, ZONG Z, et al. Analysis of vortex-induced vibration for a cantilever riser in a deep-sea mining system[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2022, 54(6): 1741-1754.(in Chinese)

[23] ZANG Z P, CHEN Z X, ZHAO M, et al. Experimental study on dynamic responses of a tensioned flexible vertical cylinder under waves and combined current and waves[J]. Ocean Engineering, 2022,266(Pt5):113159.

[24] CHEN W L, WANG H F, CHEN C. Experimental investigation of the vortex-induced vibration of a circular cylinder near a flat plate [J]. Ocean Engineering,2023,272:113794.

[25] 陈天赐,王瑞金,朱泽飞. 立管涡激振动流固耦合数值模拟[J]. 杭州电子科技大学学报(自然科学版),2022,42(3):64-71.
CHEN T C, WANG R J, ZHU Z F. Vortex induced vibration of riser based on FSI numerical simulation[J]. Journal of Hangzhou Dianzi University (Natural Sciences), 2022, 42(3): 64-71.(in Chinese)

[26] SONG L J, FU S X, CAO J, et al. An investigation into the hydrodynamics of a flexible riser undergoing vortex-induced vibration [J]. Journal of Fluids and Structures, 2016, 63: 325-350.

[27] 孙洪源,黄维平,李磊,等. 低长径比浮式圆柱涡激运动实验研究[J]. 船舶力学,2019,23(4):405-411.
SUN H Y, HUANG W P, LI L, et al. Experimental study on vortex induced motions of a floating cylinder with low aspect ratio [J]. Journal of Ship Mechanics, 2019, 23(4): 405-411.(in Chinese)