

头部流线型回转体倾斜入水砰击流场 和运动特性试验研究

李志雨¹, 王恒^{2a}, 孙铁志^{2a}, 王振^{2b}, 赵建^{2a}

(1. 中国船舶工业集团公司第七〇八研究所, 上海 200023; 2. 大连理工大学 a. 船舶工程学院; b. 数学科学学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 针对流线型回转体倾斜入水问题开展了试验研究, 选取了3种回转体的入水角度, 分别为 45° 、 60° 、 75° , 根据试验结果对入水空泡、飞溅皇冠的形态以及回转体的运动特性和受力情况进行了分析。试验结果表明, 回转体入水角度增大会对飞溅皇冠的抑制作用减弱, 使飞溅皇冠的体积增大, 同时使得入水空泡在迎水侧和背水侧壁面的不对称性减弱。入水角度越大时回转体尾部空泡的形成时刻越晚, 当入水角度足够小时头部与尾部的附着空泡会分别脱落。回转体入水角度越大, 在水中运动时所受的合力越小, 加速度也越小。相较于头部为流线型时, 回转体头部为平面时会发生更剧烈的流动分离。

关键词: 回转体; 砰击; 入水角度; 流场特性; 运动特性

中图分类号: O352 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-8020(2020)01-0028-07

在船舶与海洋工程领域广泛存在着结构物入水问题。结构物入水问题涉及到固-液-气三相间的相互作用, 虽然入水过程短暂, 但是会对结构物的受力及在水中的运动产生很大的影响。由于海洋平台一直在海上进行作业且经常可见具有外形为回转体的结构, 例如海洋平台的立柱, 在海浪的作用下时常会发生回转体的入水过程。因此对回转体入水过程中的载荷和运动特性进行研究, 揭示各种现象产生的机理, 对海洋平台的设计与使用具有重要的意义。

由于入水过程的复杂性, 如果只通过理论分析或数值方法进行研究很难对其有足够的认识, 因此开展试验仍然是研究入水问题的基本方法之一。结构物入水过程的试验研究始于 Worthington 和 Cole, 他们运用闪光摄影技术开展了一系列球体入水的试验研究^[1]。Chuang^[2] 针对楔形体入水问题开展了试验研究, 分析了楔形体在入水过程中受到的砰击力。Abelson^[3] 对不同头部形状回转体的不同角度工况下入水时形成的空泡壁面内压力进行了深入研究分析。Backer 等^[4] 对圆锥体垂直入水过程中的现象及圆锥体的运动和受力特性进行了试验研究。Gekle 等^[5] 对圆盘垂直入水过程

中深闭合现象进行了试验研究, 并分析了空泡内部气体流动情况。顾建农等^[6] 开展了两种头型弹体的入水试验, 并通过改变弹体的运动速度和入水角度等运动参数, 分析了这两种弹体所产生的入水空泡演变过程及弹道特性的差别。杨衡等^[7] 开展了不同头型弹体入水空泡试验, 分析了入水空泡和入水弹道与弹体头型、入水速度和入水角度之间的关系。路中磊等^[8] 基于高速摄像技术开展了开放腔体圆柱壳的垂直入水试验, 分析了入水空泡壁面流动现象变化的机理。王瑞琦等^[9] 对平头弹体垂直入水过程开展了试验与数值研究, 发现空泡深闭合产生的向下射流作用在弹体尾部会使其加速度突变。路丽睿等^[10] 开展了不同头型的射弹低速倾斜入水空泡及弹道特性的试验研究, 发现空泡直径随着射弹头部锥角的增大而增大。Louf 等^[11] 对不同角度, 不同入水初速度的锥体入水空泡发生深闭合后的动力学问题进行了试验研究, 发现空泡壁波动的波幅及波长随锥体的初速度线性变化。

针对结构物入水问题的数值方法研究近些年也取得了很大进展。Gekle 等^[12] 针对圆盘垂直入水过程中深闭合产生的高速射流进行了研究并建

收稿日期: 2019-08-28; 修回日期: 2019-09-17

基金项目: 中国博士后科学基金(2018M631791); 中央高校基本科研业务费专项(DUT18RC(4)018)

第一作者简介: 李志雨(1988—), 男, 山西大同人, 工程师, 研究方向为船舶总体设计研究。E-mail: zhiyu001@139.com

通信作者简介: 孙铁志(1986—), 男, 吉林洮南人, 讲师, 硕士研究生导师, 研究方向为多相流体动力学。E-mail: suntiezhi@dlut.edu.cn

立了相应的数学模型.王建凯等^[13]使用 FLUENT 软件计算了船体不同剖面在波浪中所受的砰击载荷,并应用边界元软件计算船体在给定海况下相对于波面的垂向运动速度,得到了可用于工程设计确定局部压力系数的经验公式.丁金鸿等^[14]对平板和圆锥体的入水砰击问题进行了三维数值模拟,研究了砰击压力在平板底面各测点上的分布、与圆锥底升角的关系以及与结构物入水速度的关系.王占莹等^[15]对回转体垂直入水过程开展了数值研究,给出了回转体不同入水速度对流体动力分布特性的影响.朱珠等^[16]应用 CFD 软件研究了带攻角圆柱体垂直入水过程中入水攻角和速度对圆柱体水中弹道的影响.Kiara 等^[17]运用数值方法预报了圆柱体水平放置垂直下落入水过程中的运动及动力特性,与试验吻合性较好.宋武超等^[18]对回转体低速倾斜入水进行了数值模拟研究,得到了头型不同对回转体入水空泡形态发展规律以及回转体运动特性及流体动力特性变化规律的影响.王树义等^[19]对半潜式平台立柱入水开展了数值模拟研究,能够实现对立柱砰击载荷的预报.张佳悦等^[20]对航行体尾部向下姿态高速垂直入水过程展开了数值研究,讨论了入水速度对流体动力特性和入水空泡的影响规律.

对于海洋平台的立柱等结构的入水过程来说,倾斜入水较为常见,这方面仍需要进一步研究.本文主要研究流线型回转体相对自由液面具有一定攻角的倾斜入水,重点考察回转体入水过程中空泡的演化过程以及回转体的运动和受力情况.

1 试验设置

本文所用流线型回转体的最大直径为 50 mm,长度为 200 mm,重量为 1.06 kg,材质为铝合金,表面进行了阳极氧化处理.支撑桁架放置于水箱底部,底部装有滚轮,可以起到支撑水箱重量并且便于移动水箱的作用.水箱箱体由厚玻璃粘接而成,长度 1.5 m,宽度 0.8 m,高度 1.2 m,水深为 1 m.在试验时可以根据具体情况进行调节,箱底放有用于缓冲的橡胶垫.图 1 所示为试验装置示意图.

在一定的高度释放回转体,保证回转体的初速度一致,通过调节释放机构的角度可以开展不同角度下的回转体入水试验.本文将释放高度保

持在距离自由液面 1.25 m,相当于回转体的入水初速度为 4.95 m/s.将回转体轴线与自由液面所夹角规定为回转体的入水角度,本文选取的入水角度分别为 45°、60°、75°.

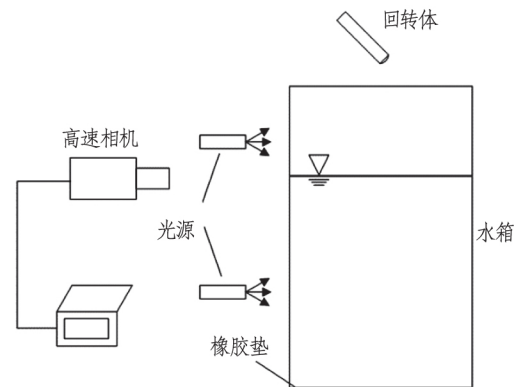


图 1 试验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental device

2 试验结果分析

图 2 给出了流线型回转体在 60° 入水角度下的空泡演化过程,通过该工况分析回转体倾斜入水过程的特点.回转体头部砰击自由液面后,由于回转体的运动具有不对称性,且回转体抑制了迎水面一侧喷溅皇冠的向上发展,因而自由液面上方形成了一个不对称的喷溅皇冠,皇冠顶部向背水侧倾斜.同时,自由液面下方形成了一个不对称的入水空泡,可以看到迎水面一侧的空泡壁面到回转体壁面的距离相较于背水面一侧要窄一些,这种现象是两侧压力分布的不对称引起的,迎水面受到的压力要更大一些.回转体向下运动的同时,其两侧的空泡壁面也在不断地向外扩张,到 60 ms 时,回转体尾部也没入了自由液面以下,但由于空泡壁面的扩张,整个回转体除头部附近以外均处于不沾湿的状态.到 90 ms 时,由于空泡中部的壁面向内收缩,迎水面一侧尾部到中部附近的区域穿出空泡壁面,变成了沾湿状态,同时在回转体尾部后方形成了附着空泡.空泡壁面持续收缩,最终在 120 ms 时刻附近达到了闭合状态,可以看到回转体头部携带的不对称的附着空泡,该空泡在迎水面一侧壁面长度较短,背水面一侧壁面长度较长,并且该空泡在背水面不断地脱落后形成链状的细小气泡,气泡末端连接到上方空泡的底端.同时,回转体尾部也形成了完整的附着空泡,

该空泡相对于回转体轴线对称,尾部同样脱落出了一系列细小的气泡.随后在 150 ms 左右,回

转体头部及尾部的附着空泡脱落的气泡聚集在一起脱落.

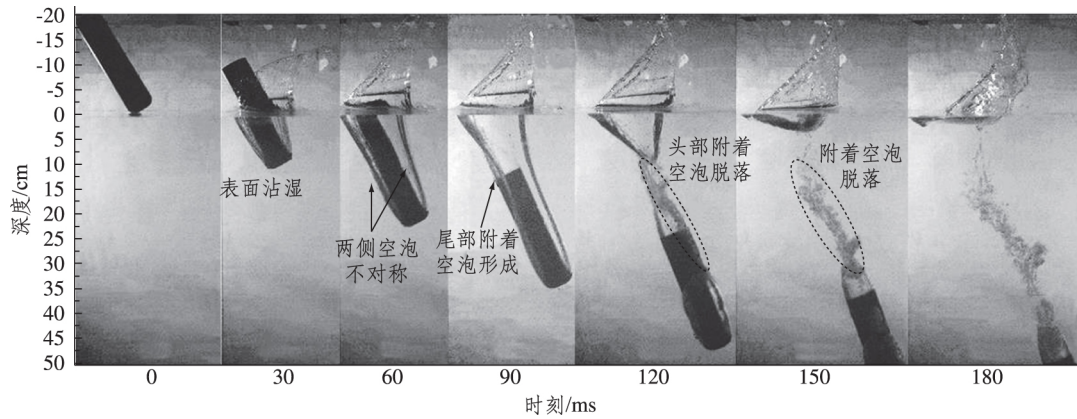


图 2 头部流线型回转体 60°角倾斜入水过程空泡形态变化

Fig.2 Revolution of cavity morphology during the 60° oblique water entry process of a revolved body with streamline head

图 3 为回转体在入水角度为 45°时的入水过程.可以看到该工况下具有与 60°入水角度工况下相似的现象,但具体细节有较大差异.两种工况下喷溅皇冠均呈现出不对称的特征,但 45°下这种不对称性更加明显.由于回转体的倾斜角度较大,喷溅皇冠受到的抑制作用更强,喷溅皇冠的体积相较于 60°下小了很多.虽然两种工况下回转体头部形成的空泡闭合后同样在回转体头部形成了一个不对称的附着空泡,但 45°入水角度下头部附着空泡的不对称性更强.同时,回转体头部形成的

空泡壁面向迎水面一侧的扩张受到了回转体壁面的抑制,这就使得迎水面一侧的壁面在整个入水过程中除头部附近以外均处于沾湿状态,给尾部空泡的形成创造了条件.不同于 60°工况下回转体尾部附着空泡的形成,该尾部空泡与自由液面相连,是与头部空泡相互独立的,同时尾部空泡也会进行深闭合,但闭合的时刻较头部空泡晚一些.尾部空泡闭合后,在回转体尾部形成附着空泡,与头部附着空泡分别进行脱落,形成两条相互独立的轨迹.

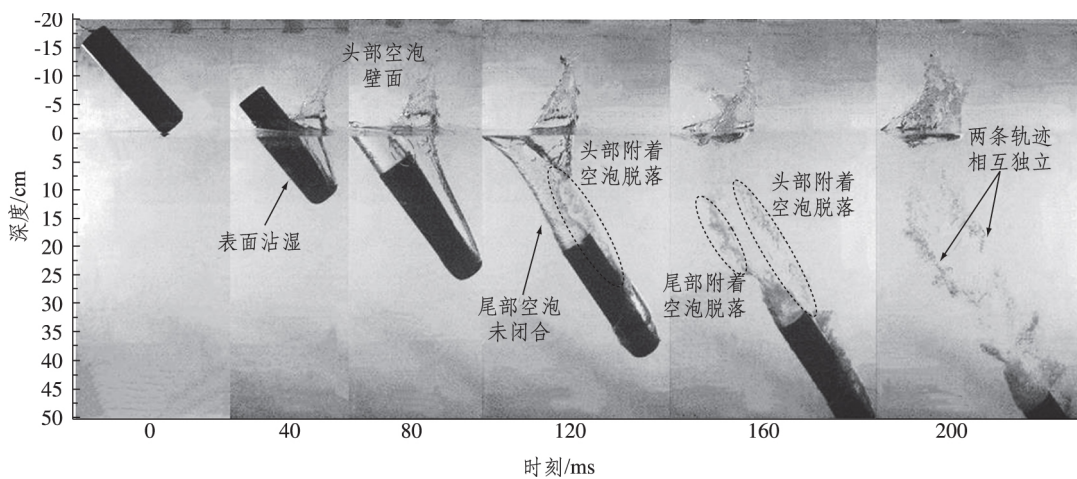


图 3 头部流线型回转体 45°角倾斜入水过程空泡形态变化

Fig.3 Revolution of cavity morphology during the 45° oblique water entry process of a revolved body with streamline head

入水角度为 75°时,由于回转体的倾斜程度较 60°时更小,回转体对喷溅皇冠的抑制作用要更弱一些,喷溅皇冠也更大.直到头部产生的空泡发生深闭合,除回转体头部外的其他区域均保持

不沾湿状态,因此尾部及头部的附着空泡均在深闭合后形成,并且两个附着空泡在空泡闭合后脱落的气泡聚集在一起,与入水角度为 60°的区别在于脱落的空泡是不连续的.在回转体的整个运

动过程中,迎水侧与背水侧空泡壁面的不对称性相对较弱,说明回转体在迎水侧与背水侧所受的压力分布较为均匀.

通过以上分析可以得出:随着回转体入水角度的增加,由于迎水面一侧的壁面对喷溅皇冠的抑制作用减弱,喷溅皇冠的体积增大;同时,由于

迎水面和背水面的压力分布变得均匀,使得入水空泡在迎水面一侧和背水面一侧壁面的不对称性减弱;回转体尾部空泡的形成也与入水角度有关,入水角度越大回转体尾部空泡的形成时刻越晚;回转体入水角度的变化还会对附着空泡的脱落情况造成影响.

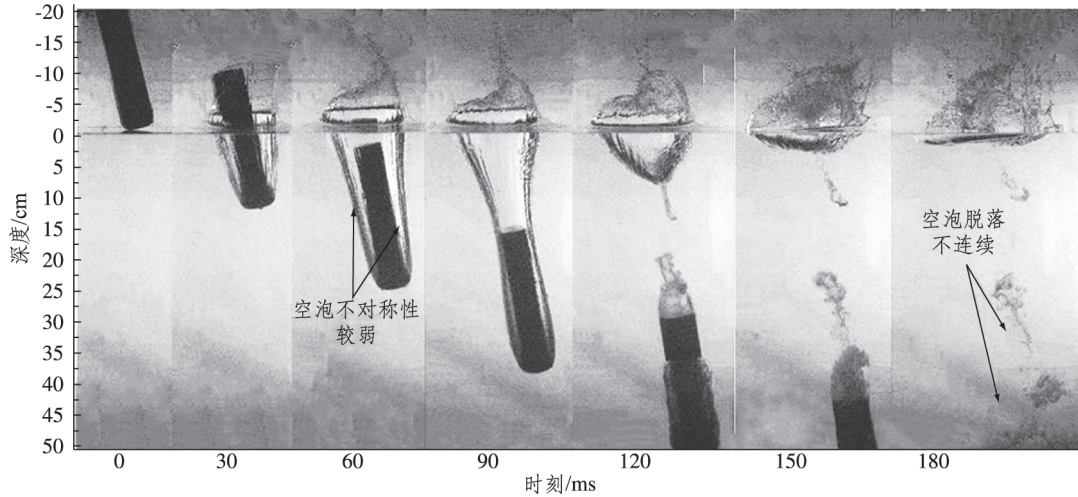


图 4 头部流线型回转体 75°角倾斜入水过程空泡形态变化

Fig.4 Revolution of cavity morphology during the 75° oblique water entry process of a revolved body with streamline head

提取试验图片中的坐标点,可以获得回转体在某一时刻的位置信息,进而可以获得回转体的运动轨迹和运动参数随时间的变化曲线.图 5 为回转体在三种入水角度下质心的运动轨迹,横、纵坐标分别代表回转体的水平位移和垂直位移.

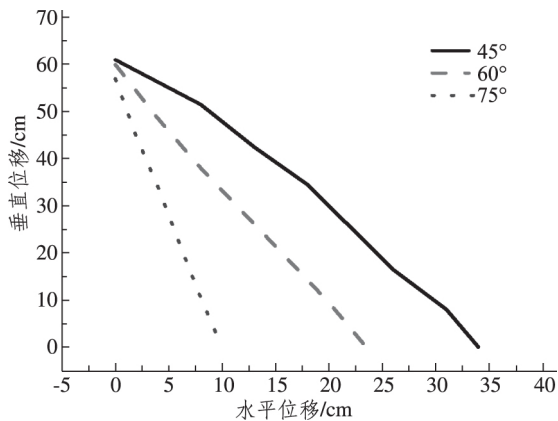


图 5 头部流线型回转体倾斜入水时运动轨迹变化情况
Fig.5 The trajectory of oblique water entry process of a revolved body with streamline head

从图 5 中可以看出,随着回转体入水角度的减小,在水中运动到同一深度的时候质心偏离原水平位置的程度增大,这是因为入水角度较小的

回转体水平分速度越大,在同一时刻的水平位移也较大.

图 6 给出了初速度为 4.95 m/s 的流线型回转体在 3 种入水角度下速度随时间的变化规律,可以看到在 3 种入水角度下回转体均呈现出先减速、后接近匀速的变化规律.回转体入水角度越大,同一时刻的速度也越大,这是因为入水角度较大时回转体具有较小的润湿面积,在水中运动时所受的阻力也更小,因此速度衰减较慢.入水角度为 45°、60°、75°回转体达到匀速运动时的速度分别约为 4.45、4.62、4.81 m/s.

图 7 为流线型回转体入水后竖直方向加速度随时间变化的曲线.可以看出:入水角度为 45°和 60°的回转体入水后做加速度先增大后减小的减速运动,而入水角度为 70°的回转体一直做加速度逐渐减小的减速运动;并且所有时刻的加速度均具有随着入水角度的增大而减小的关系,说明入水角度越小,同一时刻回转体所受阻力越大.随着回转体速度的不断减小引起所受阻力的不断减小,最终回转体所受外力接近平衡状态,使得回转体的加速度趋于 0.

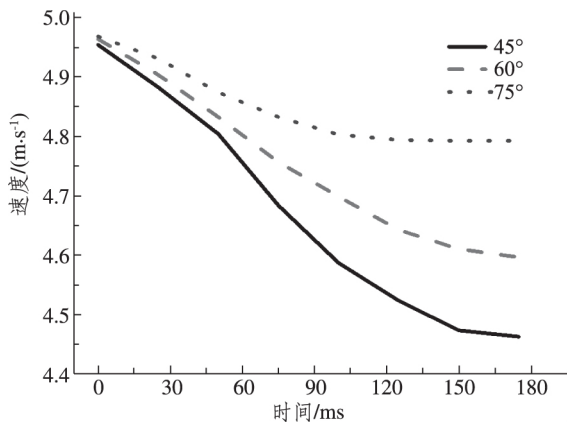


图 6 头部流线型回转体倾斜入水时运动过程速度变化情况
Fig.6 Speed change of oblique water entry process of a revolved body with streamline head

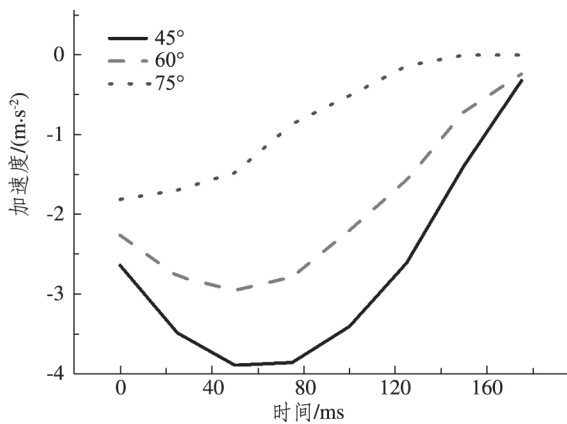


图 7 头部流线型回转体倾斜入水时运动过程加速度变化情况
Fig.7 Acceleration change of oblique water entry process of a revolved body with streamline head

图 8 中的回转体头部为平面,尾部为流线型,回转体的入水角度为 45°,入水初速度为 4.95 m/s,时间间隔取 40 ms.与入水角度为 45°、头部为流线型的回转体进行对比,可以发现以下几点不同之

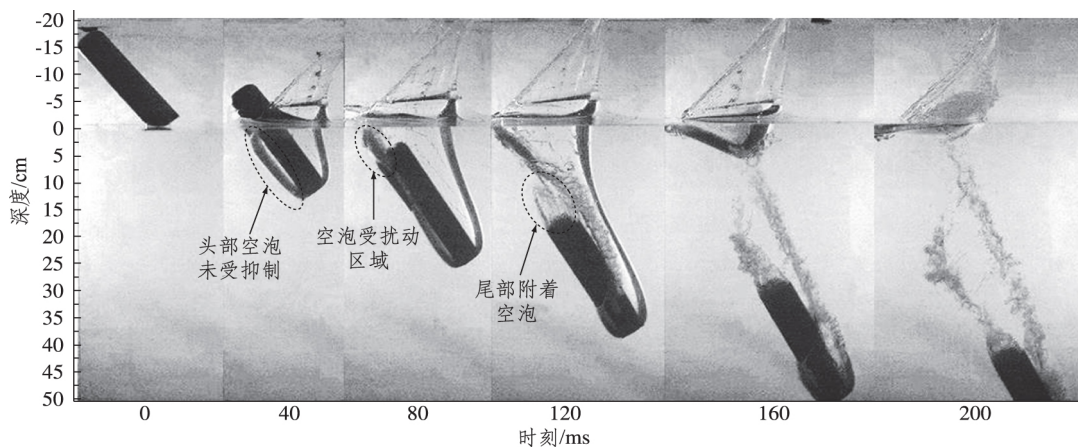


图 8 头部平面型回转体入水过程

Fig.8 Process of a rotary body with plane head water entry

处:头部为平面的回转体产生的喷溅皇冠相较于头部为流线型的回转体体积更大;头部为平面的回转体产生的入水空泡,由于迎水面一侧空泡壁面扩张的速度较快,并没有出现空泡壁面受到抑制、尾部产生入水空泡的现象,而是尾部对迎水面一侧靠近自由液面的空泡壁面产生了扰动,之后随着空泡发生闭合,尾部出现附着空泡,空泡深闭合后尾部附着空泡与头部附着空泡分别脱落.以上现象说明,回转体头部形状对入水空和喷溅皇冠均有影响,在速度相同时平头形状的回转体会使流体发生更剧烈的流动分离.

3 结论

通过对试验结果进行上述分析,可以得到以下 4 点结论:

- 1) 回转体入水角度增大,回转体对喷溅皇冠的抑制作用减弱,喷溅皇冠的体积增大.同时,入水空泡在迎水侧和背水侧壁面的不对称性减弱.
- 2) 回转体尾部空泡的形成也与入水角度有关,入水角度越大回转体尾部空泡的形成时刻越晚,当入水角度足够小时头部与尾部的附着空泡会分别脱落.
- 3) 回转体入水角度越大,水平分速度越小,相同时刻水平位移越小,并且回转体在水中运动时所受的阻力更小.
- 4) 回转体头部为平面时相较于头部为流线型时会发生更剧烈的流动分离,表现为产生的喷溅皇冠更大,入水空泡壁面向外扩张的速度更快.

参考文献:

- [1] WORTHINGTON A M ,COLE R S.Impact with aliquid surface studied by the aid of instantaneous photography [J].Philosophical Transactions of the Royal Society of London.Series A ,Containing Papers of a Mathematical or Physical Character ,1897: 137-148.
- [2] CHUANG S L. Experiments onslamming of wedge - shape S bodies [J].Journal of Ship Research ,1967 ,11 (3) : 190-198.
- [3] ABELSON H I.Pressure measurements in the water - entry cavity [J].Journal of Fluid Mechanics ,1970 ,44 (1) : 129-144.
- [4] BACKER G D ,VANTORRE M ,BEELS C ,et al.Experimental investigation of water impact on axisymmetric bodies [J]. Applied Ocean Research ,2009 ,31: 143 ~ 156.
- [5] GEKLE S ,PETERS I R ,GORDILLO ,et al.Supersonic air flow due to solid - liquid impact [J]. Physical Review Letters ,2010 ,104(2) : 024501.
- [6] 顾建农 ,张志宏 ,范武杰. 旋转弹丸入水侵略规律 [J].爆炸与冲击 ,2005 25(4) : 341-34.
- [7] 杨衡 ,张阿漫 ,龚小超 ,等. 不同头型弹体低速入水空泡试验研究 [J].哈尔滨工程大学学报 ,2014 ,35 (9) : 1060-1066.
- [8] 路中磊 ,魏英杰 ,王聪 ,等. 基于高速摄像实验的开放腔体圆柱壳入水空泡流动研究 [J].物理学报 ,2016 ,65(1) : 014704.
- [9] 王瑞琦 ,黄振贵 ,朱世权 ,等. 平头弹丸入水空泡闭合实验研究及数值模拟 [J].兵器装备工程学报 ,2017 ,38(12) : 36-39.
- [10] 路丽睿 ,魏英杰 ,王聪 ,等. 不同头型射弹低速倾斜入水空泡及弹道特性试验研究 [J].兵工学报 ,2018 ,39(7) : 1364-1371.
- [11] LOUF J F ,CHANG B ,ESHRAAGHI J ,et al. Cavity ripple dynamics after pinch - off [J]. Journal of Fluid Mechanics ,2018 ,850: 611-623.
- [12] GEKLE S ,GORDILLO J M ,VAN DER MEER D ,et al. High - speed jet formation after solid object impact [J]. Physical Review Letters ,2009 ,102(3) : 034502.
- [13] 王建凯 ,王言英. 波浪中船体砰击荷载局部压力系数的数值预报 [J].中国海洋平台 ,2009 ,24(4) : 21 -25.
- [14] 丁金鸿 ,谭家华. 平板与圆锥体入水的三维数值模拟 [J].中国海洋平台 ,2010 25(3) : 1-5.
- [15] 王占莹 ,王冠军 ,尤天庆 ,等. 回转体垂直入水过程数值模拟 [J]. 导弹与航天运载技术 ,2014(5) : 22 -25.
- [16] 朱珠 ,袁绪龙 ,刘维. 柱体大攻角入水弹道建模与仿真 [J].火力与指挥控制 ,2015 ,40(2) : 13-18.
- [17] KIARA A ,PAREDES R ,YUE D K P.Numerical Investigation of the Water Entry of Cylinders without and with Spin [J].Journal of Fluid Mechanics ,2017 ,814: 131-164.
- [18] 宋武超 ,王聪 ,魏英杰 ,等. 不同头型回转体低速倾斜入水过程流场特性数值模拟 [J].北京理工大学学报 ,2017 ,37(7) : 661-666.
- [19] 王树义 ,王志东 ,凌宏杰. 半潜式平台立柱入水砰击特性数值模拟 [J/OL].哈尔滨工程大学学报 ,2019 ,40(3) : 623 - 627 [2019-06-20] <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1390.u.20190107.1058.003.html>.
- [20] 张佳悦 ,李达钦 ,吴钦 ,等. 航行体回收垂直入水空泡流场及水动力特性研究 [J/OL].力学学报 ,2019 ,51(3) : 803 - 812 [2019-06-20] <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2062.03.20190121.1558.006.html>.

Experimental Study on Fluid Filed and Motion Characteristics of Inclined Water Entry of a Revolving Body with Streamline Head

LI Zhiyu¹ , WANG Heng^{2a} , SUN Tiezhi^{2a} , WANG Zhen^{2b} , ZHAO Jian^{2a}

(1.Marine Design & Research Institute of China ,Shanghai 200023 ,China; 2.a.School of Ship Engineering;
b.School of Mathematical Sciences ,Dalian University of Technology ,Dalian 116024 ,China)

Abstract: Experiment was carried out to research the water entry process of revolving bodies. Three kinds of water entry angles were selected ,which are 45 ° ,60 ° and 75 ° respectively. According to the experimental results ,the shape of water entry cavity ,splash crown ,the kinetic characteristics and force situation of the revolv-

ing body were analyzed. The experimental result shows that the increase of the revolving body's water entry angle can increase the splash crown's volume. At the same time, it can weaken the asymmetry of the cavity's walls. The larger the angle of entering the water is, the later the cavity at the tail of the revolving body forms. When the water entry angle is sufficiently small, the cavities at the revolving body's head and tail fall off respectively. The larger the angle of entering the water is, the smaller the resultant force acting on the revolving body is, then the smaller the acceleration is. Compared with the revolving body with streamline head, the revolving body with flat head makes flow separation more intense.

Keywords: revolving body; slamming; water entry angle; fluid filed characteristics; motion characteristics

(责任编辑 李秀芳)

(上接第16页)

Abstract ID: 1673-8020(2020)01-0009-EA

Anti-disturbance Control Based on Adaptive Nonlinear Disturbance Observer for a Class of Stochastic Systems

LI Xinqing, WEI Xinjiang

(School of Mathematics and Statistics Science, Ludong University, Yantai 264039, China)

Abstract: The anti-disturbance control problem was investigated for a class of stochastic systems with multiple heterogeneous disturbances in this paper. The multiple heterogeneous disturbances include white noise and non-harmonic disturbances coupled with system state and control input. An adaptive nonlinear disturbance observer was designed to estimate non-harmonic disturbances. On this basis, an adaptive nonlinear disturbance observer-based control was proposed. Simulation example was given to show its effectiveness of the proposed method.

Keywords: stochastic system; multiple heterogeneous disturbances; anti-disturbance control; adaptive nonlinear disturbance observer

(责任编辑 李秀芳)