

DOI:10.11918/201909040

回转体并联入水过程空泡及运动特性数值模拟

余德磊, 王聪, 何超杰

(哈尔滨工业大学 航天学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 为研究初始参数对回转体并联入水空泡及运动特性影响, 基于有限体积法, 采用 *realizable k-ε* 湍流模型、VOF (volume of fluid) 多相流模型和 Schnerr and Sauer 空化模型, 并引入重叠网格技术, 对不同入水速度、不同初始净距和不同横流速度的回转体并联入水过程进行数值模拟。首先, 建立了回转体高速并联入水的数值计算模型, 验证了计算方法的有效性。然后, 基于此模型开展不同初始参数的并联入水数值计算, 得到不同参数下的流场及运动特征。最后, 结合计算结果分析了不同参数下并联运动体的空泡形态及特征尺寸变化、侧向与偏航运动规律。研究表明, 随着入水初速度增大, 内侧空化现象越剧烈, 同一量纲一的时刻空泡的外侧极径和限制长度增大, 回转体量纲一的侧向位移和偏航角越大。随着初始净距减小, 同一量纲一的时刻空泡的限制长度越小, 回转体的量纲一的侧向位移和偏航角先增大后减小。小横流作用下, 迎流与背流回转体的外侧空泡径向尺寸与单体基本相同, 而长度略大, 随着横流速度增大, 并联入水状态的空泡尺寸差异同单体相比增大; 内侧空泡的径向尺寸差异较大, 其中迎流回转体的内侧空泡极径较大, 且随着横流速度增大极径的最大值始终维持在 $d + D/2$ 左右。横流速度较小时, 并联入水回转体头部靠近而尾部远离; 横流速度较大时, 两回转体头部远离而尾部靠近。

关键词: 回转体; 并联入水; 空泡形态; 运动特性; 数值计算

中图分类号: TV131.2

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2021)12-0023-10

Numerical simulation of cavitation and motion characteristics of revolution bodies entering water in parallel

YU Delei, WANG Cong, HE Chaojie

(School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: To study the influence of initial parameters on the cavitation and motion characteristics of revolution bodies entering water in parallel, the *realizable k-ε* turbulence model, the volume of fluid (VOF) multiphase flow model, and the Schnerr and Sauer cavitation model were employed based on the finite volume method. The overlapping grid technique was used to simulate the process of water entry in parallel with different initial speeds, initial clearance distances, and cross-flow speeds. First, a numerical calculation model of high-speed water entry in parallel of revolution bodies was established, and the validity of the calculation method was verified. Then, based on this model, numerical calculations of parallel water entry with different initial parameters were performed to obtain the flow field and motion characteristics under different parameters. Finally, combined with the calculation results, the variations of the cavitation morphology and characteristic size, as well as the lateral and yaw movements of the moving bodies under different parameters were analyzed. Results show that with the increase of the initial velocity of water entry, the inner side cavitation phenomenon was more severe. With the outer polar radius and the limit length of the cavitation at the same dimensionless moment increased, the dimensionless lateral displacement and yaw angle of the revolution body were larger. As the initial clearance distance decreased, the limit length of the cavitation at the same dimensionless moment was smaller, and the dimensionless lateral displacement and yaw angle of the revolution body first increased and then decreased. Under the action of small cross-flow, the radial dimensions of the outer cavitation on the outer side of the revolution body in forward and leeward directions were basically the same with that of the single revolution body, while the length was slightly larger. With the increase of the cross-flow speed, the cavity size differences of parallel moving bodies were greater than that of single body. The radial size differences of the inner cavitation were large, where the polar radius of the inner cavitation of face-flow revolution body was greater, and with the increase of the cross-flow speed, the maximum value of the polar radius maintained around $d + D/2$. When the cross-flow speed was small, the two revolution bodies tended to be close to

收稿日期: 2019-09-04

基金项目: 国家自然科学基金(11672094)

作者简介: 余德磊(1994—), 男, 博士研究生;

王聪(1966—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 王聪, alanwang@hit.edu.cn

the head and far away from the tail; when the cross-flow speed was large, the two revolution bodies tended to be close to the tail and far away from the head.

Keywords: revolution body; water entry in parallel; cavity shape; motion characteristics; numerical simulation

并联入水是指两个或多个运动体沿空间平行线同时或在极短时间间隔内穿越自由水面进入水中的过程. 在实际作战中, 往往需要在短时间内连续发射多枚鱼雷和射弹, 对敌方单位造成有效打击, 该过程涉及到了典型的并联入水问题.

国内外对单个运动体入水开展了大量的研究, 包括空泡形态特性、受力特性和弹道特性. Logvinovich^[1]基于能量守恒原理得到了空泡独立膨胀原理, 为后来的空泡形态发展研究提供了理论基础; May 等^[2]开展大量入水实验工作, 对钢球入水初期的流动特点与入水载荷系数进行详细研究; Shi 等^[3]开展了大量子弹高速垂直入水的试验研究, 得到了入水喷溅、回射流等非定常流动特性, 同时发现子弹入水后的弹道偏移与入水深度有关; Aristoff 等^[4]进行了系列疏水球入水试验, 得到了不同入水速度下的空腔形态, 并基于空泡压力平衡理论和势流理论成功预测了不同入水条件下的空腔演化; Guo 等^[5]开展进行高速水平入水试验, 研究了不同头型、不同入水速度运动体的入水空泡形态与运动特性, 并基于 Rayleigh-Besant 方程预测了入水过程中空泡的最大直径; 张伟等^[6]建立了平头运动体入水的空泡形态和弹道预测模型; 王柏秋等^[7]基于动网格技术进行超空泡射弹研究, 得到了超空泡射弹的阻力系数变化规律; 马庆鹏等^[8]基于 VOF 多相流模型研究了锥头柱体高速入水过程, 结果表明运动体入水速度越大航行体头部压力越高, 随着入水深度增加空化泡内空化现象明显; 何乾坤等^[9-15]对采用数值方法, 对超空泡射弹的尾拍特性进行了系统研究.

目前国内外对并联入水的研究较少. 王志东等^[16]通过数值模拟研究了并列航行体的空泡形态及减阻特性; 路丽睿等^[17]开展了回转体低速并联入水过程的运动特性试验, 研究了入水速度对空泡及运动特性的影响, 结果表明两回转体的平均偏转角速度随着入水速度的增大而增大; 卢佳兴等^[18]开展了双圆柱体低速并联入水的试验研究, 结果表明入水空泡整体呈现良好的镜面对称特征, 而圆柱体内外侧空泡存在明显的非对称性; 宋武超等^[19]基于势流理论提出了回转体低速并联入水过程空泡形态发展的预测方法. 综上所述, 对入水问题的研究多针对单体入水, 涉及高速并联入水的研究非常少, 且未考虑空化现象对运动体并联入水流体和运动的影响.

本文采用数值研究方法, 将数值计算结果与文献[6]中空泡半径的预测公式进行对比, 验证了本文数值模拟方法的有效性, 在此基础上开展不同入水速度、不同初始净距和不同横流速度对回转体并联入水过程的数值模拟, 研究了上述参数对并联回转体空泡特征尺寸、侧向及偏航运动影响规律.

1 数值计算方法

1.1 控制方程及其求解

本文基于有限体积法对雷诺时均的纳维-斯托克斯方程进行离散, 引入 realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型^[20]、VOF 多相流模型和 Schnerr and Sauer 空化模型^[21]来描述湍流流动、各相界面及空化现象, 并利用重叠网格技术处理运动边界, 对并联入水问题进行数值计算.

混合介质的连续性方程为

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

其中, $i = 1, 2, 3$. 下同. 动量方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_m u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_m u_i u_j) = \\ - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu_m + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \end{aligned}$$

式中: $\rho_m = \alpha_l \rho_l + \alpha_g \rho_g + \alpha_v \rho_v$, $\mu_m = \alpha_l \mu_l + \alpha_g \mu_g + \alpha_v \mu_v$, 其中 α_l , α_g 和 α_v 分别为水、空气和水蒸气的体积分率, ρ_l , ρ_g 和 ρ_v 为三相的密度, μ_l , μ_g 和 μ_v 为三相的动力黏度; $\mu_t = \rho_m C_\mu k^2 / \varepsilon$ 为湍流黏性系数, 其中 C_μ 为经验常数, k 为湍动能, ε 为湍动耗散率; u_i , u_j 为速度分量; x_i , x_j 为位移分量; C_μ 由下式确定:

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + \frac{A_s k U^*}{\varepsilon}} \quad (2)$$

式中: $A_0 = 4.04$, $U^* = \sqrt{S_{ij} S_{ij}}$, $A_s = \sqrt{6} \cos \left[\frac{1}{3} \arccos \left(\frac{\sqrt{6} S_{ij} S_{j,k} S_{k,j}}{(S_{ij} S_{ij})^{3/2}} \right) \right]$, 其中 $S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)$.

由于 realizable $k-\varepsilon$ 模型适用于大雷诺数的流动, 因此湍流模型采用 realizable $k-\varepsilon$ 模型, 其湍动能和湍动耗散率的输运方程为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \\ G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (3) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] +$$

$$\rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (4)$$

式中: G_k 为时均速度梯度引起的湍动能; G_b 为浮力引起的湍动能; Y_M 为脉动扩张在湍流耗散率所占当量; $C_1 = \max[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5}]$, $C_2 = 1.9$; $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 和 $C_{3\varepsilon}$ 为预测常数, 一般取 $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$; σ_k 、 σ_ε 分别为 k 和 ε 的湍流普朗特常数, 一般取 $\sigma_k = 1$, $\sigma_\varepsilon = 1.2$; S_k 和 S_ε 为源项。

本文采用 Schnerr and Sauer 空化模型描述空化现象。水蒸气相输运方程为

$$\frac{\partial \alpha_v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\alpha_v u_i) = F_{\text{vap}} \frac{2\alpha_{\text{nuc}}(1 - \alpha_v)\rho_v}{R_B} \cdot \sqrt{\frac{2p_v - p}{3\rho_l}} - F_{\text{cond}} \frac{3\alpha_t \rho_v}{R_B} \sqrt{\frac{2p - p_v}{3\rho_l}} \quad (5)$$

式中: $R_B = 1 \times 10^{-6}$ m 为气核半径, $\alpha_{\text{nuc}} = 5 \times 10^{-4}$ 为不可凝结气体体积分, p 为远场压力, p_v 为饱和蒸气压, $F_{\text{vap}} = 50$, $F_{\text{cond}} = 0.001$ 。

1.2 方法有效性验证

文献[6]中给出了同实验结果符合良好的空泡形态模型, 其表达式为

$$R(z) = \left[R_0^2 + 2R_0 \sqrt{\frac{C_d}{2N}} (z - z_0) - \frac{\sigma}{2N} (z - z_0)^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

式中: R 为空泡半径, R_0 为头部半径, z 为位移, z_0 为初始位移, σ_0 、 σ 分别为初始空化数和空化数, $C_d = C_0(1 + \sigma)$, $0.82 \leq C_0 \leq 0.83$, N 为经验系数, 取为 2。

为验证计算方法的有效性, 采用流体仿真软件 STARCCM + 12.0 对头部半径为 5 mm, 长细比 $\lambda = 6$ 的铝质平头柱体以 98.7 m/s 入水过程进行数值计算。将计算结果和式(6)进行对比, 结果如图 1 所示。可以看出两者较吻合, 说明本文数值计算方法是有效的。

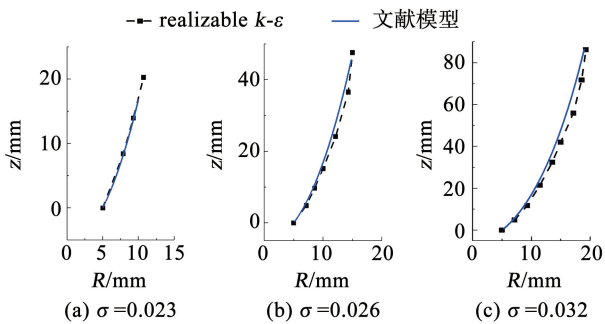


图 1 空泡形态对比

Fig. 1 Comparison of cavity shapes

利用本文问题的对称性, 仅取半边模型进行计算。两回转体之间的重叠区域与背景区域尺寸如

图 2 所示。

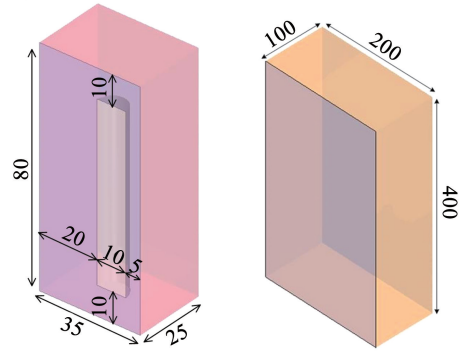


图 2 重叠网格区域与背景域几何示意

Fig. 2 Overlapping grid area and background domain geometry

本文选取了 3 种网格, 3 种网格的参数见表 1。

表 1 不同密度和数量的网格

Tab. 1 Grids of different densities and quantities

编号	最大尺寸/ mm	最小尺寸/ mm	重叠网格 数量(单个)	背景网格 数量	总网格量
1	8	0.10	85 312	337 840	508 464
2	8	0.01	318 176	337 840	974 192
3	10	0.01	436 720	894 824	1 768 264

设置相同的时间步长 1×10^{-6} s 进行计算。数值计算结果表明 3 种网格的阻力系数计算结果差异不大; 而网格 1 与网格 2 和网格 3 在纵向速度和角速度的计算上较大偏差。本文为减少计算成本, 综合比较后决定选取网格 2 进行后续计算。

2 数值计算结果与分析

2.1 入水速度对并联入水空泡及运动特性影响

本文中的参考截面为对称平面, 根据对称平面的特征提取可以获得空泡外侧极径 r_w 、内侧极径 r_n 、空泡长度 L 、限制长度 L_1 、 L_1' 和喷溅高度 h 等空泡特征, 如图 3 所示。其中 d 为并联净距, D 为回转体直径。由于对称性, 如非特别说明, 本文仅考察左侧回转体得空泡于运动特性。

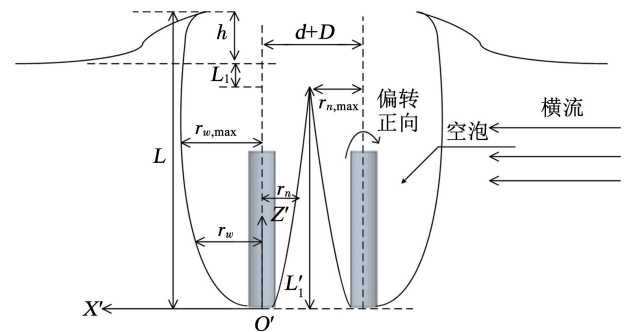


图 3 参考截面空泡形态参数示意

Fig. 3 Schematic diagram of cavitation morphology parameters in reference section

为研究入水初速度对回转体并联入水过程的影响,本文取初始净距为 $0.4D$, 入水初速度分别为 69.67 、 79.64 和 89.48 m/s (即初始空化数分别为 0.040 、 0.031 、 0.024) 的 3 种情况进行数值计算,并比较入水初速度对流场和运动特性的影响。

图 4、5 分别为不同入水速度下外侧空泡形态和

限制长度演化过程。从图中可以发现,较大的入水初速度为回转体头部的液体提供了较大的初始动能,相应的液体径向运动的初始速度较大,同一量纲一的时刻空泡的外侧极径和限制长度都随入水初速度增大而增大。

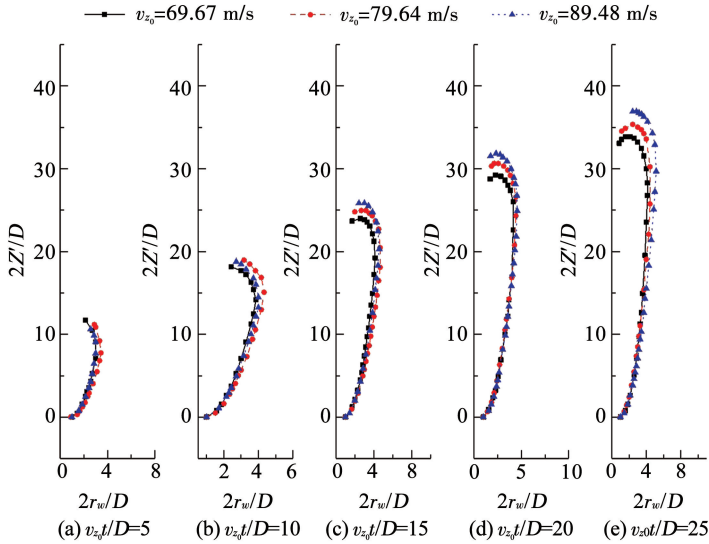


图 4 入水初速度对外侧空泡形态的影响

Fig. 4 Influence of initial velocity of water entry on outer cavitation

图 6、7 分别给出了不同入水速度下的回转体头部压力及侧向压差分布。可以看到入水速度对回转体头部的压力分布影响较大,随着速度增大,压力峰值增大。对比图 7 的侧向压差发现,较小的入水速

度时回转体初期分布特征明显不同,其主要原因为空泡内部的水蒸气分布差异较大,此时存在明显的回射流作用. 在入水一段时间后,侧向压差的峰值随着入水速度的增大而增大。

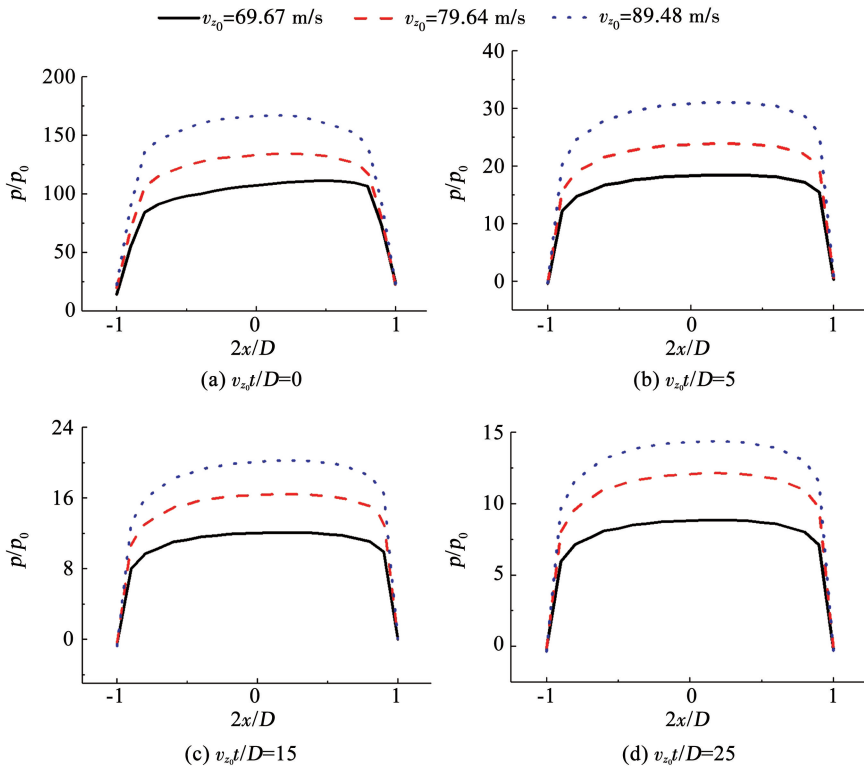


图 6 入水速度对头部压力分布的影响

Fig. 6 Influence of initial velocity of water entry on head pressure distribution

图 5 入水初速度对限制长度的影响

Fig. 5 Influence of initial velocity of water entry on limit length

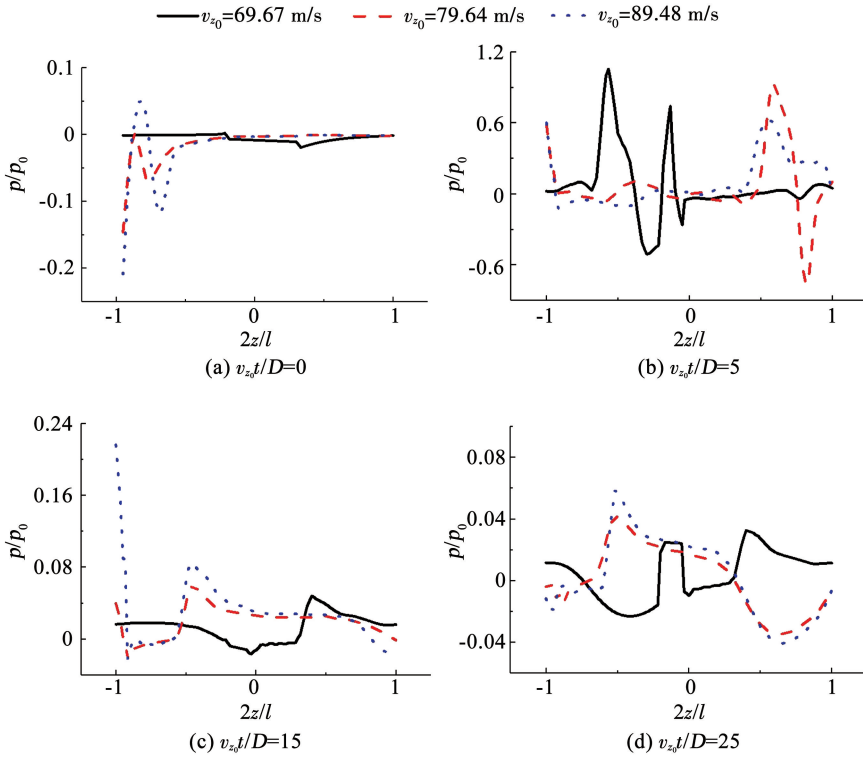


图 7 入水速度对侧向压差分布的影响

Fig. 7 Influence of initial velocity of water entry on lateral pressure difference distribution

图 8 为不同入水速度下回转体的侧向位移与偏航角变化规律. 从图中可以看到速度增大, 回转体的侧向位移和偏航角均呈增大趋势. 该趋势与较大的头部压力密切相关. 入水初速度越大, 头部压力造成的偏航力矩和附加侧力越大, 从而对侧向和偏航运

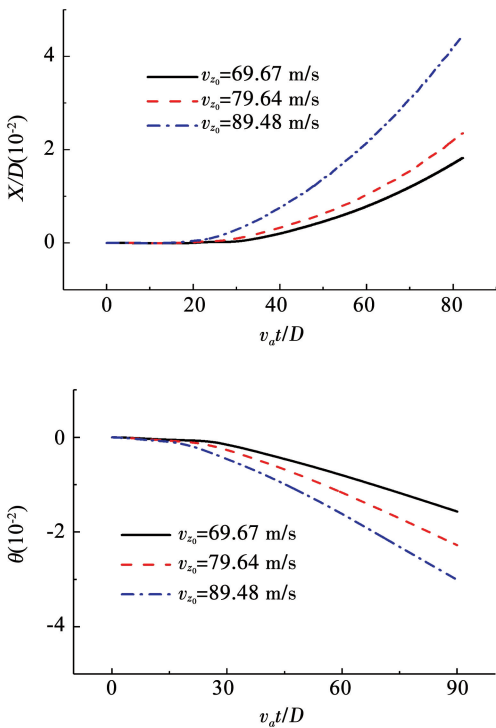


图 8 入水速度对回转体运动特性的影响

Fig. 8 Influence of initial velocity of water entry on motion characteristics of revolution body

动的促进作用越强. 另外, 随着空泡内侧的水蒸气含量增大, 回转体受到的侧向压差增加, 进一步促进了侧向运动.

2.2 初始净距对并联入水空泡及运动特性影响

为说明初始净距对无横流情况下回转体并联入水过程的影响, 本文取入水初速度为 98.7 m/s (即初始空化数为 0.02), 初始净距分别为 0.2D、0.4D、0.6D 和 1.0D 这 4 种情况进行数值计算, 比较其对流场和运动特性的影响.

图 9、10 分别为不同初始净距下回转体的空泡形态和限制长度演化过程. 基于独立膨胀原理, 外侧空泡的形态基本相同. 内侧空泡的限制长度 L_1' 差异明显. 从图 10 中可以看到限制长度 L_1' 随初始净距增大而增大, 这是由于较小的初始间距造成头部的速度驻点靠近内侧, 回转体内侧流体的分离速度较大, 剧烈的空化作用促使内侧空泡在较小区域内快速融合, 限制长度反而越小.

图 11、12 分别为初始净距对回转体头部压力及侧向压差分布的影响. 可以发现初始净距对回转体头部压力峰值影响不大, 但入水初期较小间距的头部压力分布不对称性明显, 且压力峰值越靠近内侧. 通过侧向压差分布发现, 在入水初期回转体的侧向压力存在短暂振荡, 这与剧烈的空化过程有关. 一段时间后初始间距越小侧向压差峰值越靠近回转体头部, 这与上文中的较小限制长度相吻合.

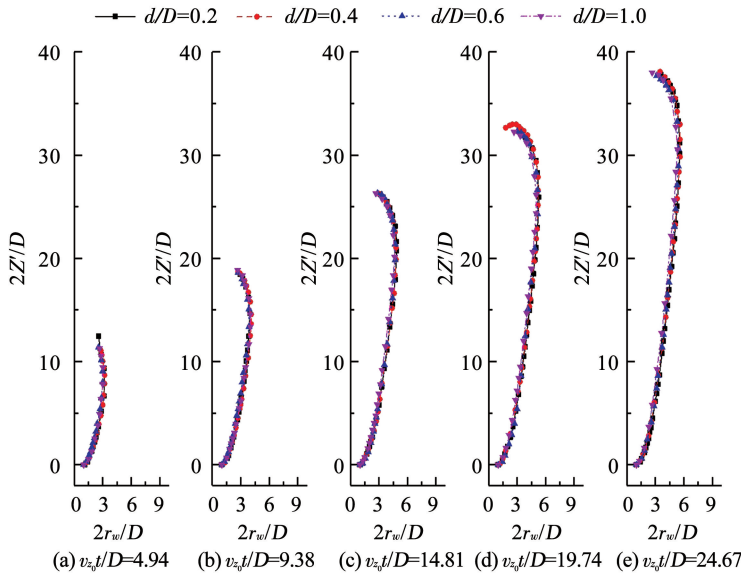


图 9 初始净距对外侧空泡形态的影响

Fig. 9 Influence of initial clearance distance on the shape of outer cavitation

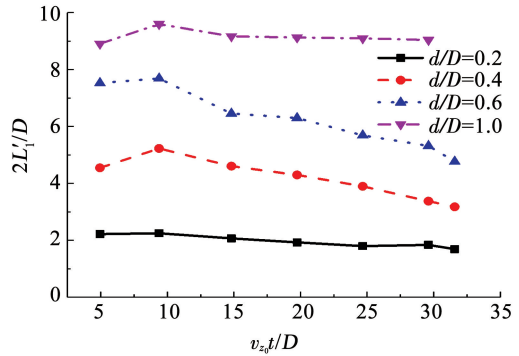


图 10 初始净距对限制长度的影响

Fig. 10 Influence of initial clearance distance on limit length

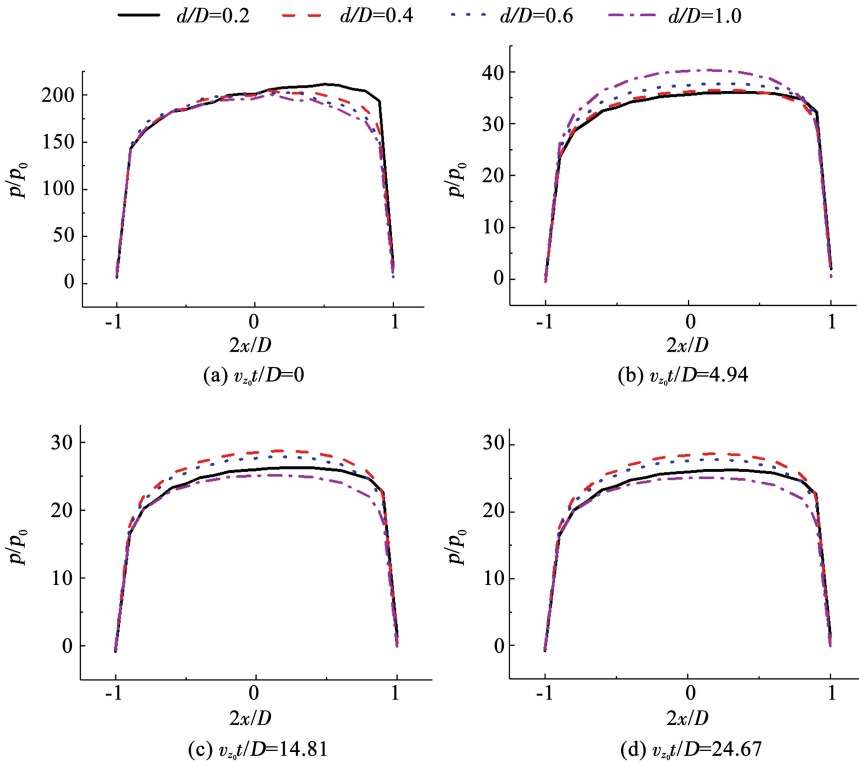


图 11 初始净距对头部压力分布的影响

Fig. 11 Influence of initial clearance distance on head pressure distribution

图 13 为初始净距对侧向运动和偏航运动的影响规律。从图中可以发现,回转体的侧向位移和偏航角随初始净距增大呈现先增大后减小的趋势。这是由于初始净距较小时侧向压差显著地抑制了头部压力对侧向运动的促进作用,从而起到限制侧向运动的作用。当初始净距足够大时,随着初始净距的

减小,头部压力造成的附加侧力和偏航力矩越大,此时初始净距越小,侧向位移和偏航角越大;当初始净距小于某一临界值时,速度驻点几乎不再向内侧偏移,但内侧靠近头部由于水蒸气的存在而使得内侧靠近头部压力较大,于是回转体会受到正方向力矩,使偏航力矩减小,进而使附加侧力减小。

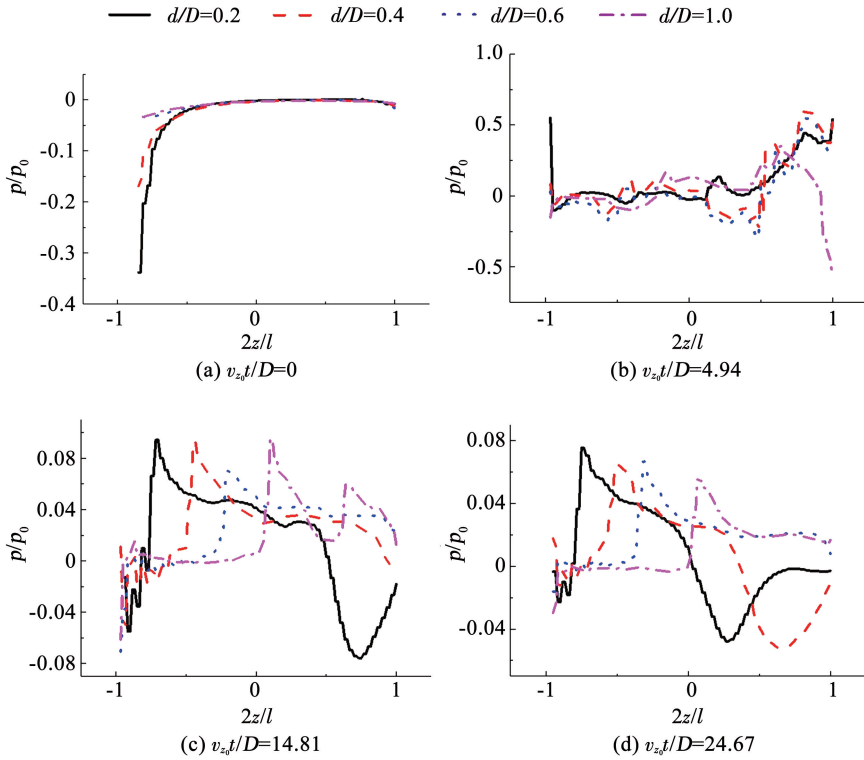


图 12 初始净距对侧向压差分布的影响

Fig. 12 Influence of initial clearance distance on lateral pressure difference distribution

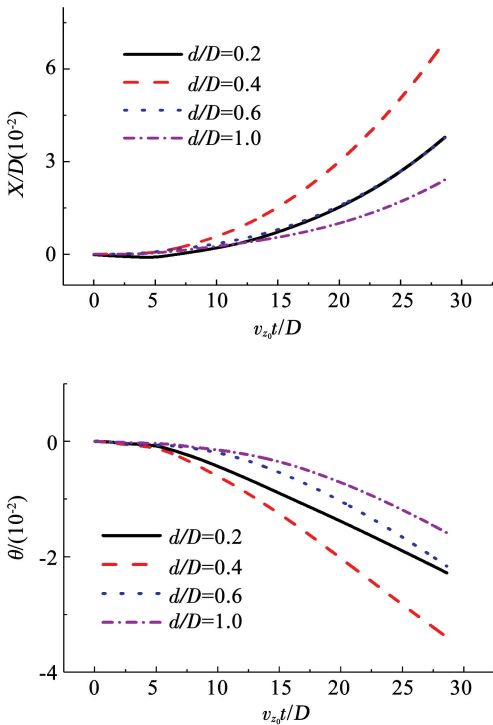


图 13 初始净距对回转体运动特性的影响

Fig. 13 Influence of initial clearance distance on motion characteristics of revolution body

2.3 横流速度对并联入水空泡及运动特性影响

为研究横流对回转体并联入水影响, 本文基于相同的入水条件 ($v_0 = 98.7 \text{ m/s}$; $d/D = 0.6$), 进行横流速度分别为 5 m/s 和 20 m/s 的入水数值仿真。

图 14 为有横流情况下单体入水和并联入水的

参考截面处空泡形态对比。可以看出, 横流作用下单回转体的迎流和背流侧空泡形态差异明显, 且随着横流速度增大, 空泡的径向尺寸差异增大; 在并联入水状态下, 迎流与背流回转体的外侧空泡径向尺寸差异与单回转体基本相同, 由于空泡开口较大, 较小的压差作用导致迎流回转体外侧空泡较晚发生回卷与闭合, 因此长度略长。背流回转体外侧空泡独立膨胀, 但迎流方向的回转体的阻碍与两回转体中间液体的能量转化, 导致其空泡极径减小; 迎流与背流回转体的内侧空泡主要受到径向间距限制, 横流作用下迎流回转体内侧空泡略大于背流回转体, 最大极径接近 $d + D/2$; 随着横流速度增大, 迎流与背流回转体的外侧空泡尺寸与单回转体的差异增大, 并联运动体的内侧空泡尺寸差异增大。

图 15 给出了两种横流速度下的水蒸气相分布。可以看到较大的横流速度导致空泡不对称增强, 相应的内部水蒸气分布更靠近横流方向。

图 16 为横流对并联入水运动体的侧向运动和偏航运动的影响。当横流速度较小时, 空泡内水蒸气集中在两回转体中间区域, 因此较大的侧向压差导致迎流回转体向迎流方向运动, 这与单独入水时相反; 当横流速度较大时, 横流对回转体的冲击作用占主导地位, 运动方向与有横流情况下单回转体的运动方向相同, 但由于侧向压差的差异, 单体入水的运动较大。对于背流回转体, 在头部绕流产生的侧向力作用下向外侧移动, 且随着横流速度增大而增大。

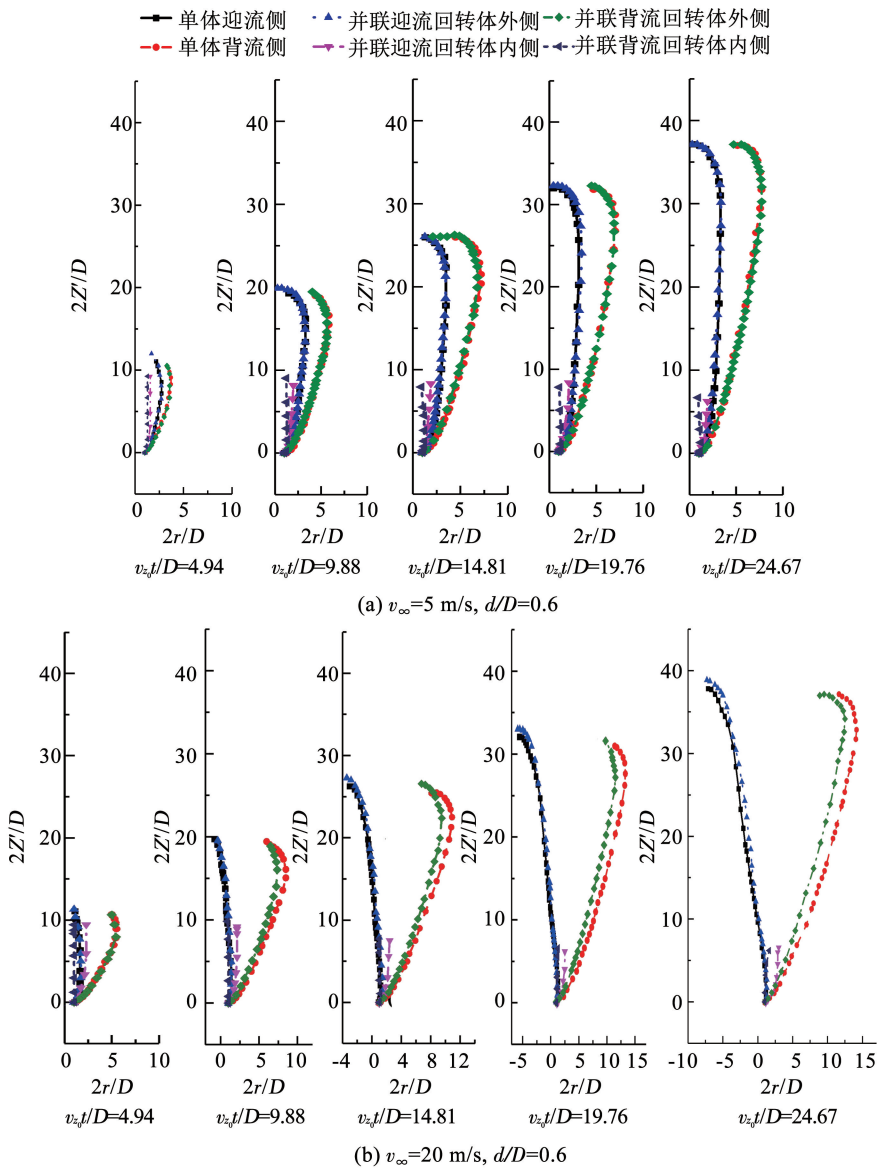


图 14 有横流情况下单体和并联入水过程参考截面空泡形态对比

Fig. 14 Comparison of cavitation morphologies of parallel moving bodies and single body in reference section under cross-flow condition

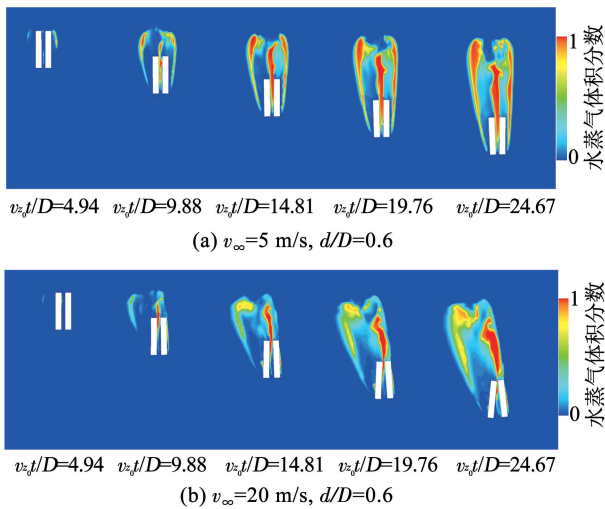


图 15 有横流情况下并联入水蒸气相分布

Fig. 15 Vapor phase distribution of water entry in parallel under cross-flow condition

对于偏航运动,较小的横流速度形成了较为均匀的头部分布,因此迎流回转体偏航角基本为零。背流回转体头部分布在横流作用下更加不对称,且稀疏的水蒸气分布导致该处侧向压差较大,形成负方向的偏航力矩,在相反方向的力矩作用下出现两回转体头部靠近而尾部远离的运动状态,这与无横流情况下并联入水过程中回转体的相对姿态相似;横流速度较大时,迎流回转体尾部受到横流的侧向冲击力远大于侧向压差力,背流回转体下部受到内侧流体的较大冲击作用,在上述机理下两回转体分别产生负/正方向力矩,形成了两回转体头部远离而尾部靠近的运动状态,这与无横流情况下并联入水过程中回转体的相对姿态相反。

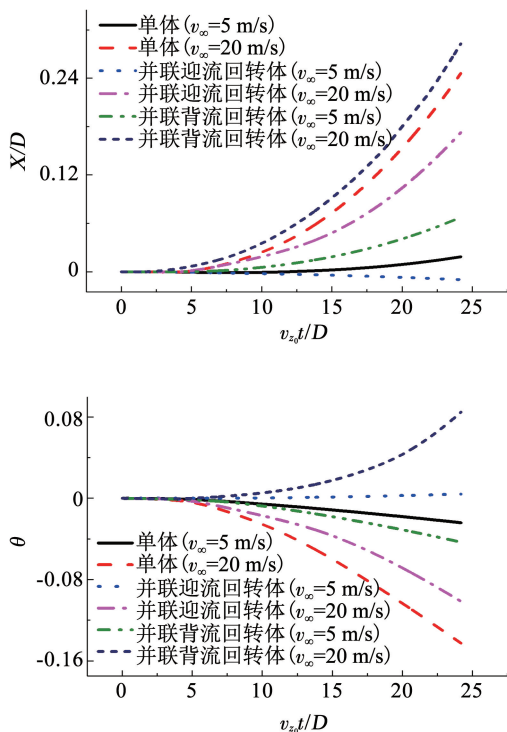


图 16 横流速度对回转体运动特性的影响

Fig. 16 Influence of cross-flow speed on motion characteristics of revolution body

3 结 论

1) 高速并联入水运动时, 两运动体之间的空化程度与入水初始速度正相关, 且同一量纲一的时刻空泡的外侧极径和限制长度增大, 回转体量纲一的侧向位移和偏航角越大。

2) 随着初始净距减小, 同一量纲一的时刻空泡的限制长度越小, 回转体的量纲一的侧向位移和偏航角先增大后减小。

3) 小横流作用下, 迎流与背流回转体的外侧空泡径向尺寸与单体基本相同, 而长度略大, 随着横流速度增大, 并联入水状态的空泡尺寸差异同单体相比增大; 内侧空泡的径向尺寸差异较大, 其中迎流回转体的内侧空泡极径较大, 且随着横流速度增大极径的最大值始终维持在 $d + D/2$ 左右。

4) 横流速度较小时, 并联入水回转体头部靠近而尾部远离; 横流速度较大时, 两回转体头部远离而尾部靠近。

参 考 文 献

[1] LOGVINOVICH G V. Hydrodynamics of flow with free boundaries [M]. Kiev: Naukova Dumka, 1969

[2] MAY A, WOODHULL J C. Drag coefficients of steel spheres entering water vertically[J]. Journal of Applied Physics, 1948, 19(12): 1109. DOI:10.1063/1.1715027

[3] SHI Honghui, TAKAMI T. Hydrodynamic behavior of an underwater moving body after water entry[J]. Acta Mechanica Sinica (English

Series), 2001, 17 (1): 35. DOI:10.1007/BF02487768

[4] ARISTOFF J M, BUSH J W M. Water entry of small hydrophobic spheres[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2009, 619: 45. DOI:10.1017/s0022112008004382

[5] GUO Zitao, ZHANG Wei, WANG Cong. Experimental and theoretical study on the high-speed horizontal water entry behaviors of cylindrical projectiles[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 2012, 24(2): 217. DOI:10.1016/S1001-6058(11)6023-0

[6] 张伟, 郭子涛, 肖新科, 等. 弹体高速入水特性实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2011, 31(6): 579

ZHANG Wei, GUO Zitao, XIAO Xinke, et al. Experimental investigations on behaviors of projectile high-speed water entry[J]. Explosion and Shock Waves, 2011, 31(6): 579

[7] 王柏秋, 王聪, 魏英杰, 等. 超空泡射弹阻力系数数值模拟[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2013, 45(3): 22

WANG Baiqiu, WANG Cong, WEI Yingjie, et al. Drag coefficients of supercavitating projectile based on dynamic mesh[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2013, 45(3): 22. DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.2013.03.004

[8] 马庆鹏, 魏英杰, 王聪, 等. 锥头圆柱体高速入水空泡数值模拟[J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(2): 204

MA Qingpeng, WEI Yingjie, WANG Cong, et al. Numerical simulation of high-speed water-entry cavity of cone cylinder[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 40(2): 204. DOI:10.13700/j.bh.1001-5965.2014.02.022

[9] 何乾坤, 魏英杰, 尤天庆, 等. 空泡摆动对超空泡航行体尾拍影响分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2012, 38(4): 509

HE Qiankun, WEI Yingjie, YOU Tianqing, et al. Analysis of tail-slaps of supercavitating vehicle influenced by distortion of cavity shape[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2012, 38(4): 509. DOI:10.13700/j.bh.1001-5965.2012.04.025

[10] 魏英杰, 何乾坤, 王聪, 等. 超空泡射弹尾拍问题研究进展[J]. 舰船科学技术, 2013, 35(1): 7

WEI Yingjie, HE Qiankun, WANG Cong, et al. Review of study on the tail-slap problems of supercavitating projectile[J]. Ship Science and Technology, 2013, 35(1): 7. DOI:10.3404/j.issn.1672-7649.2013.1.002

[11] 何乾坤, 张嘉钟, 魏英杰, 等. 水下通气空泡航行体结构模态及冲击响应研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(3): 1

HE Qiankun, ZHANG Jiazhong, WEI Yingjie, et al. Mode and impulse response of ventilated cavitating underwater vehicles[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2012, 44(3): 1. DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.2012.03.001

[12] 何乾坤, 张嘉钟, 王聪, 等. 潜射导弹水下发射的模式研究[C]. 杭州: 全国动力学与控制学术会议, 2008

HE Qiankun, ZHANG Jiazhong, WANG Cong, et al. Modal study on submarine-launched underwater launching [C]. Hangzhou: National Conference on Dynamics and Control, 2008

[13] 何乾坤. 超空泡射弹尾拍运动多相流场及结构动力学特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012

HE Qiankun. Research on multiphase flow and structural dynamics of supercavitating projectile during tail-slapping [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012

[14] 魏英杰, 何乾坤, 王聪, 等. 亚音速超空泡射弹尾拍动力学响应分析[J]. 振动与冲击, 2012, 31(18): 67

WEI Yingjie, HE Qiankun, WANG Cong, et al. Impact dynamic responses of a supercavitating projectile in subsonic compressible

fluid flow[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(18): 67. DOI:10.3969/j.issn.1000-3835.2012.18.016

[15] 何乾坤, 魏英杰, 王聪, 等. 超空泡射弹尾拍结构动力学响应分析[J]. 工程力学, 2012, 29(11): 370
HE Qiankun, WEI Yingjie, WANG Cong, et al. Dynamic responses of supercavitating projectile impacted by tail forces[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(11): 370. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2011.03.0157

[16] 王志东, 李洋, 付佳, 等. 串、并航行体自然超空泡数值分析方法研究[J]. 船舶工程, 2015, 37(9): 17
WANG Zhidong, LI Yang, FU Jia, et al. Research on Numerical analysis method of parallel and tandem vehicles with natural supercavity flow[J]. Ship Engineering 2015, 37(9): 17. DOI: 10.13788/j.cnki.cbge.2015.09.017

[17] 路丽睿, 魏英杰, 王聪, 等. 双圆柱体低速并联入水过程空泡及运动特性试验研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(7): 42
LU Lirui, WEI Yingjie, WANG Cong, et al. Tests for cavities and motion characteristics in process of two-cylinder in parallel water entry at low speed[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(7): 42. DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2019.07.007

[18] 卢佳兴, 魏英杰, 王聪, 等. 圆柱体并联入水过程空泡演化特性实验研究[J]. 力学学报, 2019, 51(2): 450
LU Jiaying, WEI Yingjie, WANG Cong, et al. Experimental study on cavity evolution characteristics in the water-entry process of parallel cylinders[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2019, 51(2): 450. DOI: 10.6052/0459-1879-18-288

[19] 宋武超, 魏英杰, 路丽睿, 等. 基于势流理论的回转体并联入水双空泡演化动力学研究[J]. 物理学报, 2018, 67(22): 224702
SONG Wucao, WEI Yingjie, LU Lirui, et al. Dynamic characteristics of parallel water-entry cavity based on potential flow theory[J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(22): 224702. DOI: 10.7498/aps.67.20181375

[20] SHIH T H, LIOU W W, SHABBIR A, et al. A new $k-\epsilon$ eddy viscosity model for high reynolds number turbulent flows [J]. Computers Fluids, 1995, 24(3): 227. DOI: 10.1016/0045-7930(94)00032-T

[21] SCHNERR G H, SAUER J. Physical and numerical modeling of unsteady cavitation dynamics [C]//Proceedings of the 4th International Conference on Multiphase Flow. New Orleans; ICMF, 2001

(编辑 张 红)

封面图片说明

封面图片来自论文“主动射流控制对直升机着舰飞行的影响分析”。是针对不同主动射流方案对侧风状态下直升机着舰过程中的影响的研究。直升机在舰船上的起降任务极具挑战性,因此对舰船舰流进行流动控制,削弱其非定常特征,则可改善直升机在甲板上的起降安全性。采用 DES 方法获得舰船舰流数据,基于单向耦合策略与飞行动力学模型结合。从非定常载荷水平与操纵特性的角度,分析不同主动射流方案对舰船舰流场的非定常特征的影响。结果表明:射流装置安装在机库迎风侧水平边缘及垂直边缘均可以有效抑制直升机着舰过程中的非定常载荷水平。随着射流速度增加,垂直边缘射流方案控制效果会不断降低;水平边缘射流方案控制效果会先增后降。

(图文提供:李光印,徐国华,史勇杰,等.南京航空航天大学直升机旋翼动力学国家级重点实验室)