

超空泡航行体流体动力数值研究

李杰^{1,2}, 祝许皓¹

(1. 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院工程力学系, 上海 200240;
2. 水动力学教育部重点实验室, 上海 200240)

摘要: 超空泡技术作为水中航行体增速减阻的重要手段已经成为了共识。超空泡航行体作为目前最具有应用前景的水下航行体, 对其流体动力变化规律的研究具有重要的意义。基于有限体积方法, 结合 N-S 方程与空化模型, 建立了超空泡航行体自由运动的非定常流场求解数值模拟方法。通过对非定常超空泡流场计算结果的分析, 对航行体的流体动力进行分解和建模。结合相关理论分析, 确定了超空泡航行体流体动力公式。研究表明, 尾拍力与空泡壁面形状、航行速度及尾部沾湿面积等密切相关。

关键词: 超空泡航行体; 数值模拟; 尾拍力

中图分类号: O359

文献标识码: A

文章编号: 2096-4080 (2020) 03-0022-06

Numerical Study on Hydrodynamic Characteristics of Supercavitating Vehicle

LI Jie^{1,2}, ZHU Xuhao¹

(1. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
2. MOE Key Laboratory of Hydrodynamics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Supercavity technology is well known as an increasing speed and reducing drag method of underwater vehicles. It is of great significance to study on the hydrodynamic characteristics of supercavitating vehicle which is the most promising under water vehicle. Based on the finite volume method, combined with the N-S equation and cavitation model, a numerical simulation method for the unsteady supercavitating flow field of vehicle is established. Based on the theoretical analysis, the hydrodynamic force of the vehicle is analysed and modeled. The hydrodynamic force is closely related to the shape of cavity which depends on the navigation speed and the wetted area of the tail.

Key words: Supercavitating vehicle; Numerical simulation; Tail-slapping force

0 引言

航行体水下高速航行时, 表面附近的水因低压而发生相变, 形成覆盖航行体大部分的空泡或全部表面的超空泡。由于蒸汽的摩擦系数远小于

水, 使得航行体阻力大幅减小, 从而使水下航行体的航速迅速提升^[1]。近年来, 超空泡现象引起了国内外学者的广泛关注, 在超空泡航行体流体动力方面也开展了一系列的研究工作^[2-4]。在初始扰动或者其他扰动影响下, 往往会引起航行体不同方向的转动。如果航行体在沿轴向运动的同时绕

收稿日期: 2020-03-02; 修订日期: 2020-04-14

基金项目: 国家自然科学基金 (11572194)

作者简介: 李杰 (1977-), 男, 副研究员, 主要研究方向为高速水动力学。E-mail: lijie@sjtu.edu.cn

其头部摆动,尾部会与空泡壁面发生碰撞反弹现象,即尾拍现象^[5]。由于超空泡航行体运动速度高,采用实验手段难以较为完整地获得尾拍时的流动景象。因此,结合现有实验观察所获得的信息,国内外学者在研究尾拍问题时采用了诸多假设和简化。其中,Pratap等^[6]建立了航行体在垂直平面内尾拍飞行时的简化模型。何乾坤等^[7]分析了流固耦合作用对流体动力的影响,给出了尾拍过程中航行体受力的变化规律。王瑞等^[8]通过改变测试工况对尾翼的流体动力特性开展实验研究。张木等^[9]、施红辉等^[10]等分别开展了超空泡航行体的相关实验。

本文结合之前的研究成果,基于商用工程软件 Fluent 对航行体的非定常超空泡流场进行求解,对航行体的流体动力进行分解和建模,获得了包括尾拍力在内的超空泡航行体流体动力公式。

1 数值仿真模型

计算模型及边界条件设置以国外超空泡航行体外形尺寸为参照(图1),其结构外形尺寸及属性见表1。

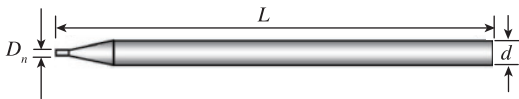


图 1 超空泡航行体模型

Fig. 1 Model of supercavitating vehicle

表 1 超空泡航行体参数

Tab. 1 Parameters of supercavitating vehicle

长 L/m	0.18
直径 d/m	0.01
空化器直径 D_n/m	0.004
密度 $\rho_s/(kg \cdot m^{-3})$	7800
转动惯量 $I_z/(kg \cdot m^2)$	2.9773×10^{-4}

本文对计算流域采用笛卡尔坐标描述,坐标原点坐落在航行体质心,以从头到尾的轴线方向为 x 轴正向,初始时刻沿水平方向, y 向与重力方向相反, z 向与 x 轴、 y 轴方向垂直。整个计算域为圆柱体,总长度为航行体长度 L 的 6 倍,半径为 L ,其中入口到航行体前端为 $1.5L$,尾部距离出口为 $3.5L$ 。

航行体头部前方的平面边界及柱面部分采用速度入口边界条件,航行体尾部后面的端面边界

取压力出口边界条件,环境压力设为一个大气压力 101325 Pa。饱和蒸汽压力取 3540 Pa。在定常来流算例中来流速度为 100 m/s,航行体固定不动;在自由运动算例中来流速度为 0 m/s,航行体具有沿 x 轴负向的初始速度。

采用的计算网格均为六面体结构化网格,如图 2 所示,在压力梯度变化较大的区域如航行体头部附近及空泡闭合区域附近对网格进行加密,边界层网格厚度为 1×10^{-4} m。由于本文还需要对尾拍过程中的流场特性进行研究,因此为了保证航行体发生尾拍时的计算精度,对航行体尾部附近的网格进行了加密处理。

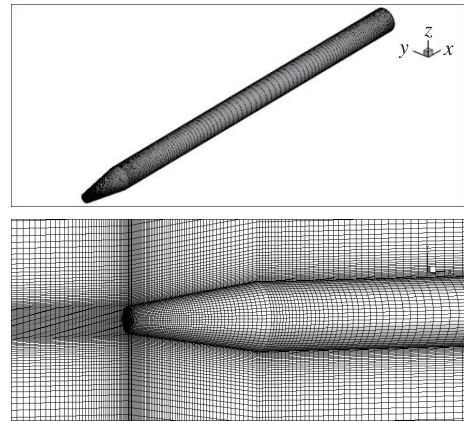
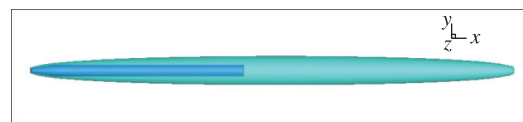


图 2 计算网格

Fig. 2 Computational mesh

2 数值模拟方法的验证

图 3 为定常来流速度为 100 m/s 时数值模拟得到空泡充分发展后某时刻的流场结果,给出了空泡外形及压力云图。可以看出,空泡长度超过了 2 倍航行体长度,空泡基本为长椭球体,表面光滑,剖面形状上下基本对称。空泡内充满水蒸气,整体呈现透明状态,末端存在一定的水汽混合现象。相对于环境压力及航行体头部高压,空泡内基本压力相同,压力在饱和蒸汽压附近变化。在空泡闭合处形成了和航行体头部驻点压力量级相当的高压。



(a) 空泡外形



(b) 纵剖面压力云图

图3 数值模拟结果

Fig. 3 Numerical result

图4为数值模拟空泡外形与Savchenko等经验公式比较结果。 $\bar{R}_c = R_c / R_n$, R_c 为 x 处的超空泡半径, R_n 为超空泡航行体空化器半径。数值模拟结果与经验公式结果基本吻合,见表2。尤其是前段空

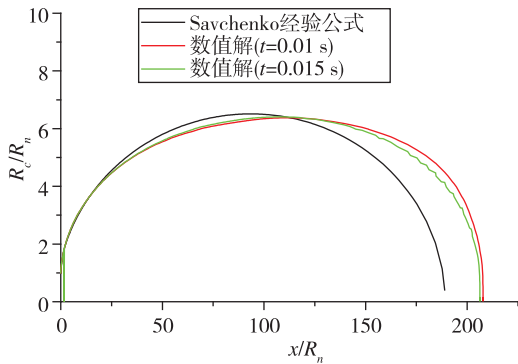


图4 空泡外形与经验公式比较

Fig. 4 Comparison between numerical result and empirical formula in supercavity shape

泡外形基本一致。另外从不同时刻空泡末端的空泡形状是不稳定的,使空泡长度呈现一定程度的振荡。超空泡长度及最大半径与经验公式比较误差在10%以内。

表2 超空泡参数与经验公式比较

Tab. 2 Comparison between numerical supercavity parameters and empirical formula

	空泡长度 $\frac{l_c}{R_n}$	最大空泡半径 $\frac{R_k}{R_n}$
经验公式	188.9	6.52
数值解	207.5	6.38
误差	9.85%	2.14%

3 流场计算结果

针对初始速度 $V_x^0 = -400$ m/s, 初始俯仰角速度为 8 rad/s 的自由运动流场进行模拟。受到初始俯仰转动的影响, 航行体尾部首先撞击空泡上表面, 在尾拍力的作用下, 转动速度衰减之后反向, 速度逐渐增加, 之后又撞击空泡下表面, 航行体在向前行进过程中, 尾部在空泡上下表面之间多次摆动。图5为其中一次尾拍过程空泡形态的变化。尾拍过程中, 从航行体尾部开始, 沾湿面积逐渐增加, 空泡面与航行体表面相互撞击。

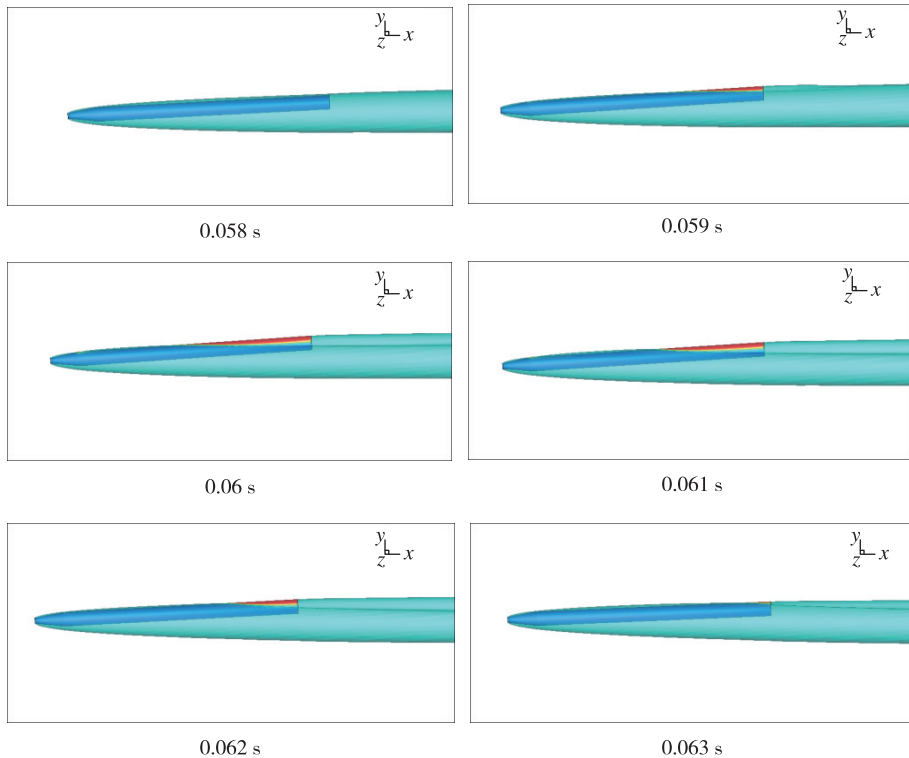


图5 尾拍过程空泡形态变化 (初始俯仰转动 $\omega_z^0 = 8$ rad/s)

Fig. 5 Supercavity shape change during tail-slapping with $\omega_z^0 = 8$ rad/s

图 6 (a) ~图 6 (f) 分别为一个周期内航行体受力、速度和俯仰角速、位移和俯仰角的变化情况。在一个周期内，航行体向上、向下出现两次尾拍现象。在尾拍过程中，俯仰角速度剧烈变化，速度、角速度的变化均呈现方波的特征，受力呈现先陡后缓的波动特征。航行体尾部进入超

空泡壁面过程中，空泡壁面与航行体相互作用力大，运动响应迅速；航行体尾部离开超空泡壁面过程中，空泡壁面与航行体相互作用力小，运动响应缓慢。因此，无论是尾拍力、尾拍力矩等均呈现先陡增后缓降的特征。

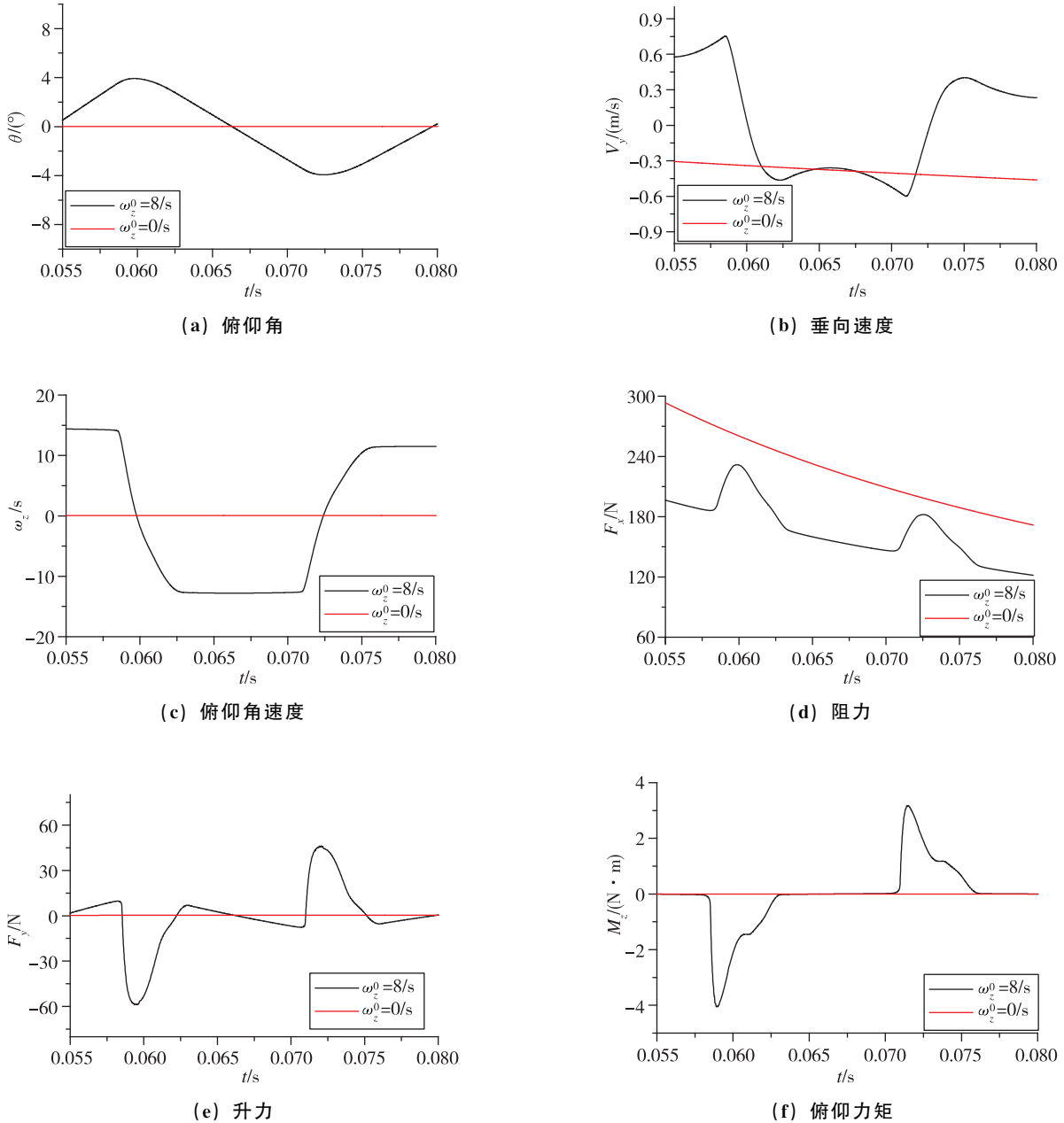


图 6 一个周期内弹道数据及受力变化

Fig. 6 Trajectory and force change in one cycle

4 超空泡航行体的流体动力

假设航行体在水中以速度 V 在铅垂平面内运动，在航行过程中超空泡航行体受力包括：空化

器所受阻力 F_D 、升力 F_L ，尾部所受升力 R_D 、阻力 R_L 。

空化器阻力和升力表达为

$$\begin{cases} F_D = \frac{1}{2} \rho A_n C_D V^2 \\ F_L = \frac{1}{2} \rho A_n C_L V^2 \end{cases} \quad (1)$$

式中, A_n 为空化器截面面积, C_D 和 C_L 分别为阻力系数和升力系数。

在头部为圆平头时, 航行体阻力系数 C_D 取 0.88, $C_L = C_D \cos\theta$, θ 为轴线和空泡轴线之间的夹角。将头部空化器受力从合力中剔除, 可以得到尾拍阻力、升力、力矩。在未发生尾拍阶段, 尾拍力为 0; 在尾拍阶段, 尾拍力大小与航行体尾部的浸没深度直接相关。本文基于航行体末端压差力及黏性力的两部分构成, 构建尾拍力的公式如下

$$\begin{cases} R_D = 0 \\ R_L = 0 \end{cases}, \quad \xi \leq 0 \quad (2)$$

$$\begin{cases} R_D = \rho A_1 V^2 \left(\mu \cos\theta + \frac{(V \sin\theta - l_t \omega_z)^2}{V^2} C_1 \sin\theta \cdot \text{sgn}(\theta) \right) \\ R_L = \rho A_1 V^2 \left(\mu \sin\theta - \frac{(V \sin\theta - l_t \omega_z)^2}{V^2} C_1 \cos\theta \cdot \text{sgn}(\theta) \right) \end{cases}, \quad \xi > 0 \quad (3)$$

式中, l_t 为航行体末端距离质心的距离, ω_z 为俯仰角速度(尾拍运动平面内的转动角速度)。 $A_1 = \lambda l_w l_\theta$ 为航行体尾部浸入液体边界层的特征面积, $\lambda = 0.5$ 为经验常数, ξ 为航行体尾部侵入液体的深度。假设航行体尾部空泡半径为 R_c , 则计算公式为

$$\xi = |L \sin\theta| + d/2 \cos\theta - R_c \quad (4)$$

l_w , l_θ 为航行体沾湿长度、尾部沾湿周长(按照航行体与空泡面相对位置的几何关系求得), 二者均为 ξ 的函数。其中, $l_w = \frac{\xi}{\sin\alpha}$, $l_\theta = \arccos$

$\frac{d-2\xi}{d} \cdot d$ 。其中, α 尾拍位置的局部攻角, 数值上 $\alpha = \theta - \beta$ 。 β 为航行体末端对应的空泡壁面切线与航行体运动方向之间的角度。当航行速度较大, 而转动速度较小, 即尾拍过程 $|V \sin\theta| \gg |l_t \omega_z|$ 时, 且 θ 是小量, 尾拍力公式可以简化为

$$\begin{cases} R_D = \mu \rho A_1 V^2 \\ R_L = -C_1 \rho A_1 V^2 \sin^2\theta \cdot \text{sgn}(\theta) \end{cases}, \quad \xi > 0 \quad (5)$$

式中, μ 为摩擦系数, 应该为 Re 的函数, 在本计算工况中 Re 数值较大, 忽略 μ 的变化, 这里取常值

0.0018; C_1 为经验常数, 这里取 0.55。尾拍阻力以黏性力为主, 尾拍升力以压差阻力为主。图 7 为数值模拟过程中尾拍阻力和升力的结果与简化公式的比较, 从数值上来看, 尾部受到的升力与阻力量级相当, 在同一次尾拍过程中, 升力峰值要略大于阻力峰值, 简化公式与数值结果之间吻合很好。

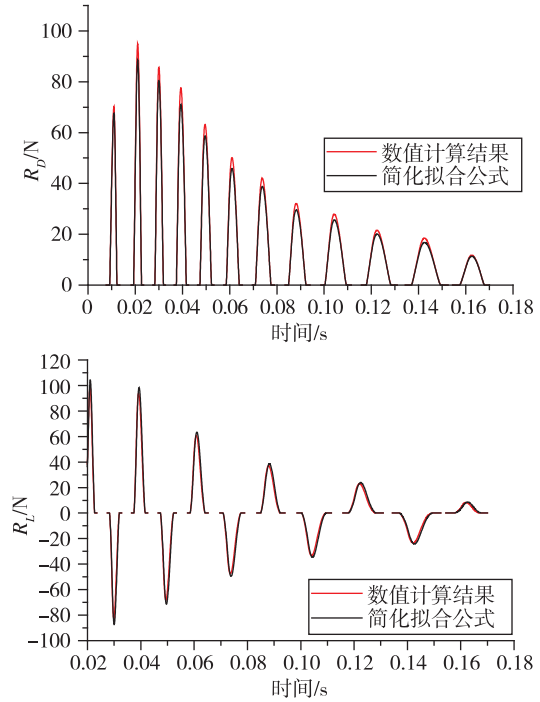


图 7 尾拍力数值结果与简化模型比较

Fig. 7 Comparison of numerical results of tail-slapping forces with simplified model

5 结论

本文采用数值模拟方法, 对航行体定常及自由航行流场进行了仿真研究。通过常速航行时空泡参数与相关经验公式的比较, 验证了数值模拟方法的有效性和准确性。通过超空泡航行体自由航行过程的仿真计算, 分析了尾拍流体动力的形成及演化规律。

基于对流场计算结果的总结和综合分析, 给出了超空泡航行体的受力模型, 并且给出其简化形式。结合相关理论分析, 确定了超空泡航行体流体动力公式, 流体动力与空泡壁面形状、航行速度等密切相关。尾拍流体动力正比于尾部沾湿面积。在俯仰角、浸湿深度相同时, 尾拍位置的空泡面切线方向不同, 引起沾湿面积的变化。相对于以往不考虑空泡面切线方向的公式, 本文提

出的尾拍作用力可以适用于航行体超空泡航行的整个阶段。

参考文献

- [1] Savchenko Y N. Control of supercavitation flow and stability of supercavitating motion of bodies [C]. VKI Special Course on Supercavitating Flows, Brussels: RTO2AVT and VKI, 2001: 313-341.
- [2] 贾力平. 空化器诱导超空泡特性的数值仿真与试验研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- [3] 吕志民, 申超, 陈永奎. 超空泡射弹技术探讨 [J]. 舰船科学技术, 2007, 29(1): 92-94.
- [4] 易文俊, 熊天红. 高速航行体的自然超空泡流阻力特性研究 [J]. 舰船科学技术, 2009, 31(1): 38-42.
- [5] 孟庆昌, 张志宏, 顾建农, 等. 超空泡射弹尾拍分析与计算 [J]. 爆炸与冲击, 2009, 29(1): 56-60.
- [6] Pratap R, Rand R. Inflight dynamics of highspeed underwater projectiles [C]. AHSUM Project Progress Report, Cornell University, 1996.
- [7] 何乾坤, 王聪, 魏英杰. 超空泡射弹尾拍运动流固耦合动力学响应研究 [J]. 动力学与控制学报, 2014, 12(3): 225-229.
- [8] 王瑞, 党建军, 姚忠. 超空泡射弹尾翼流体动力特性实验分析 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(10): 137-142.
- [9] 张木, 谭俊杰, 易文俊, 等. 高速自然超空泡射弹阻力特性试验研究 [J]. 实验流体力学, 2012, 26(4): 33-37.
- [10] 施红辉, 周素云, 王昀, 等. 攻角变化超空泡射弹冲击水面的流体物理现象研究 [J]. 弹道学报, 2019, 31(1): 68-74.

引用格式: 李杰, 祝许皓. 超空泡航行体流体动力数值研究 [J]. 宇航总体技术, 2020, 4(3): 22-27.

Citation: Li J, Zhu X H. Numerical study on hydrodynamic characteristics of supercavitating vehicle [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2020, 4(3): 22-27.