空泡摆动对超空泡航行体尾拍影响分析

何乾坤 魏英杰 尤天庆 张嘉钟

(哈尔滨工业大学 航天学院, 哈尔滨 150001)

摘 要: 针对超空泡航行体存在尾拍运动与空泡形态变化互相耦合作用的特点,建立了超空泡航行体尾拍耦合运动方程,并对超空泡摆动对超空泡航行体尾拍相互作用过程进行了数值研究,对比分析了不同速度和角速度的超空泡航行体运动过程及空泡摆动对尾拍的影响规律. 研究结果表明:空泡摆动使航行体转角、整体运动周期、尾拍升力和阻力增大;在不同速度下,空泡摆动对航行体转角、整体运动周期及尾拍周期的影响随速度增大而逐渐减小;不同初始角速度下,空泡摆动对航行体转角、整体运动周期、航行体尾拍升力和阻力的影响随角速度增大而逐渐增大.

关 键 词: 超空泡航行体; 超空泡; 尾拍; 空泡摆动

中图分类号: O 353.4

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)04-0509-04

Analysis of tail-slaps of supercavitating vehicle influenced by distortion of cavity shape

He Qiankun Wei Yingjie You Tianqing Zhang Jiazhong

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

Abstract: The tail-slaps of supercavitating vehicle and the distortion of cavity shape are coupling with each other. The coupling motion equation of supercavitating vehicle was established and the tail-slaps of the vehicle influenced by the distortion of cavity shape were also analyzed in different conditions of velocity and initial angel velocity. The research results show that the vehicle's rotating angel, movement cycle, lift force of tail-slaps and drag force of tail-slaps increase by the effect of the distortion of cavity shape. In different velocities, the vehicle's rotating angel, movement cycle and tail-slap cycle, which are influenced by the distortion of cavity shape, decrease by the increment of velocity. In different angel velocities, the vehicle's rotating angel, movement cycle and tail-slap cycle, which are influenced by the distortion of cavity shape, increase by the increment of angel velocity.

Key words: supercavitating vehicle; supercavitation; tail-slap; distortion of cavity shape

当航行体在水下高速运动时,航行体表面附近的水因低压而发生相变,形成覆盖航行体大部分或全部表面的超空泡[1]. 形成超空泡之后,水下航行体的摩擦阻力大幅减小,从而使水下射弹等小尺度水下航行体的航速提高到 1 000 m/s 的量级[2]. 当超空泡射弹在水中以高速运动时,任何小的扰动,如射弹在发射时的扰动及在运动中受重力及其他力的作用,都会使射弹在沿轴向运动的同时绕其头部摆动,射弹的尾部会与空泡壁面发生连续反弹碰撞,即尾拍现象[3]. 近年来,高速超空泡航行体的尾拍现象引起了国内外学者的广泛关注,并开展了一系列的数值研究工作,但这些研究大多忽略了尾拍现象对空泡形态的影响[4-5]. 然而,高速超空泡航行体实际运动过程中

收稿日期: 2010-12-24; **网络出版时间**: 2012-04-01 11:57

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20120401.1157.001.html

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10802026)

作者简介: 何乾坤(1986 -),男,安徽寿县人,博士生,heqiankun@foxmail.com.

空泡形态变化与尾拍现象存在耦合作用,即在尾拍过程中会造成空泡的摆动,而空泡形态的变化又会对航行体尾拍造成影响.

本文针对超空泡航行体存在尾拍运动与空泡形态变化互相耦合作用的特点,建立了考虑尾拍影响的超空泡航行体运动方程,分析了空泡摆动对航行体尾拍过程的影响,并与未考虑空泡摆动的结果进行了对比,给出了空泡摆动对航行体尾拍的影响规律.

1 坐标系定义

根据超空泡航行体在航行过程发生尾拍的规律,可以将超空泡航行体的运动方程分为两个阶段进行处理:①初始阶段,航行体在空泡中运动并且未与空泡壁面发生作用,此时只有航行体的头部受到阻力作用;②尾拍阶段,航行体尾部与空泡壁面发生作用,航行体尾部与气水界面有尾拍力的作用[6].

为了便于推导超空泡航行体的运动方程,文中建立了如图 1 所示的坐标系. 地面坐标系 $O(x,y,z)$ 为惯性系,定义在空化器上的弹体坐标系 $O_1(x_1,y_1,z_1)$ 为非惯性系. 假设航行体在平面内运动,速度 $\boldsymbol{V}(t)$ 始终沿航行体轴向,航行体绕空化器的转动角速度为 $\boldsymbol{\omega}(t)$,则非惯性系 $O_1(x_1,y_1,z_1)$ 绕惯性系 $O(x,y,z)$ 具有转动角速度 $\boldsymbol{\omega}(t)$. 在非惯性系 $O_1(x_1,y_1,z_1)$ 中,航行体以速度 $\boldsymbol{V}(t)$ 沿 x_1 轴平动. 因此,航行体在惯性系 $O(x,y,z)$ 具有科氏加速度 $a_c=2[\boldsymbol{\omega}(t)\times\boldsymbol{V}(t)]$.

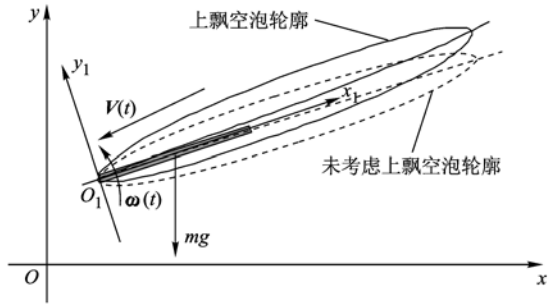

图 1 超空泡航行体运动示意图

在轴对称体超空泡的研究中,一般基于这样的假设:空泡的外形近于椭球体,横截面为圆,空泡的对称轴称为空泡中心线. 根据空泡膨胀独立性原理,空泡各个截面是以空泡中心线上的点为圆心按一定规律膨胀的,然而航行体实际航行时,重力作用、空泡自身浮力及航行体机动偏转等都会引起空泡中心线偏离航行体轴线,使空泡发生变形,导致轴对称性被破坏[7]. 因此,超空泡航行体在尾拍过程中产生的科氏加速度将会引起空泡轴线的偏移.

2 尾拍运动的数学模型

超空泡航行体在高速航行过程中,由于任何微小的扰动都将会导致航行体尾部与超空泡壁面发生相互作用并产生巨大的冲击载荷[8]. 因此,超空泡航行体在航行过程中受力可以总结为:空化器受到阻力 F_D、升力 F_L,尾拍作用的升力 R_L、阻力 R_D(图 2、图 3). 为了更清晰地研究空泡摆动对航行体尾拍的影响,假设航行体头部在直线上运动[8],弹体头部初始空泡轴线与 x_1 重合,弹体绕空化器摆动,弹体摆动时与 x_1 轴的角度为 θ. 且文中假设航行体在水中以恒定大小速度航行.

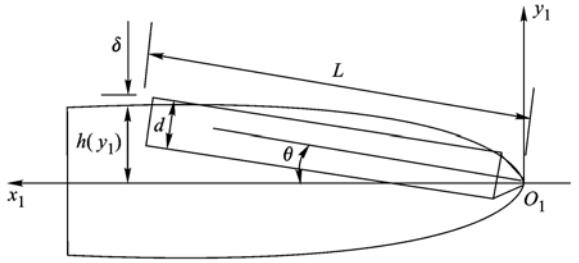

图 2 超空泡航行体尾部撞击示意图

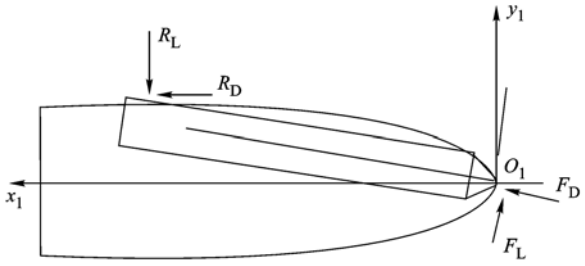

图 3 超空泡水下航行体受力示意图

空化器阻力和升力表达为

$$\left.\begin{aligned}F_D&=\frac{1}{2}\rho AC_DV^2\\F_L&=\frac{1}{2}\rho AC_LV^2\end{aligned}\right\}\tag{1}$$

式中,ρ 为液体密度;A 为空化器截面面积;V 为航行体速度;C_D 和 C_L 分别为阻力系数和升力系数. 小攻角下,圆盘空化器的阻力系数和升力系数关系可以表达为 $C_L/C_D=\cot\alpha_t$[9].

尾拍作用形成的升力 R_L、阻力 R_D 分别表达为[10]

$$\left.\begin{aligned}R_D&=0\\R_L&=0\end{aligned}\right\}\delta\leqslant 0\qquad\left.\begin{aligned}R_D&=\rho A_1V^2(1-\cos\theta)\\R_L&=\rho A_1V^2\sin\theta\end{aligned}\right\}\delta\geqslant 0\tag{2}$$

式中,θ 为弹体轴线和空泡轴线之间的夹角;A_1 =

$\lambda\delta d$ 为航行体尾部浸入液体边界层的特征面积,λ 为系数,文中取 $\lambda=0.5$;δ 为航行体尾部浸液体的深度,其表达式为

$$\delta = L\sin\theta + \left(\frac{d}{2}\right)\cos\theta - h(y) \tag{3}$$

式中,$h(y)$ 为当前空泡轴线距空泡壁面距离,$h(y)=R(y)+y_c$.

$R(y)$ 为 y 处的空泡半径,表达为[7]

$$R(y) = \frac{1}{2}D_{\max}\left[1-\left(\frac{y-L_c/2}{L_c/2}\right)^2\right]^{1/2.4} \tag{4}$$

式中,$D_{\max}$ 与 L_c 分别为空泡最大截面直径和空泡长度,表达为

$$\left.\begin{aligned} D_{\max} &= D_n\sqrt{\frac{C_D(\sigma,0)}{\sigma}} \\ L_c &= D_n\sqrt{\frac{C_D(\sigma,0)}{\sigma^2}\ln\left(\frac{1}{\sigma}\right)} \end{aligned}\right\} \tag{5}$$

式中,D_n 为空化器的直径.

y_c 为空泡轴线受弹体加速度影响而产生的偏移,表达为

$$y_c = \frac{D_n a_{\text{turn}}}{F_r^2\ g}\left(\frac{x}{D_n}\right)^2 \tag{6}$$

式中,$F_r \triangleq \dfrac{V}{\sqrt{gD_n}}$ 为傅劳德数;a_{turn} 在本文中即航行体运动过程中产生的科氏加速度 a_c.

因此,由力矩平衡 $\sum M = I\ddot{\theta}$ 可知,航行体在尾拍阶段的动力学方程可以表达为

$$I\ddot{\theta} = -R_D a\sin\theta - R_L a\cos\theta \tag{7}$$

当航行体尾部完成撞击并反弹进入空泡内部,根据动量矩守恒可知,航行体在初始阶段的动力学方程可以表达为

$$\int_{-\frac{\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}} M\mathrm{d}t = I/\dot{\theta}_t \tag{8}$$

式中,$M=-R_D a\sin\theta - R_L a\cos\theta$;$\dot{\theta}_t$ 为撞击结束后航行体角速度;I 为航行体转动惯量.

根据式(7)和式(8)可以确定航行体在航行状态中发生尾拍的振动方式,如图 4 所示为角加速度振动,图中 T 定义为航行体整体振动周期,τ 定义为尾拍振动半周期.

文中以射弹外形尺寸为参照,建立图 5 所示的航行体简化模型,其结构外形尺寸及属性见表 1.

表 1　航行体尺寸及属性

参数	长 L/m	直径 d/m	空化器半径 R_n/m	密度 ρ_s/(kg·m^{-3})	转动惯量 I/(kg·m^2)
数值	0.18	0.01	0.002	7 800	0.000 025 7

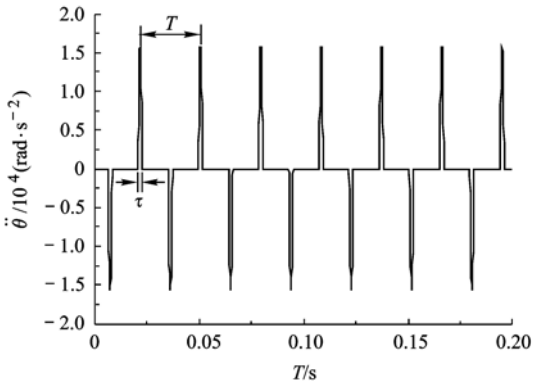

图 4　航行体角加速度振动

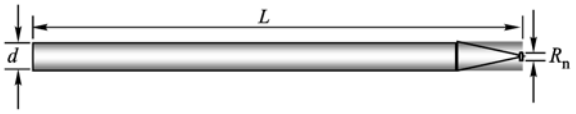

图 5　航行体结构示意图

3　数值计算结果及分析

基于文中模型,本文分别对比分析了不同速度及不同初始角速度下,空泡摆动对超空泡航行体运动及尾拍的影响.

3.1　不同速度下空泡摆动对航行体尾拍影响

假设超空泡航行体航行初始角速度保持 10 rad/s不变,计算了航行体在不同速度下空泡摆动对航行体运动的影响.

图 6 和图 7 给出了不同速度下空泡摆动对航行体转角和周期的影响,可以看出:空泡摆动使航行体尾拍最大转角及整体振动的周期加大,且随着速度的增大,空泡摆动对尾拍转角及整体振动的周期影响越来越小;然而,空泡摆动减小了航行体尾拍的周期,且随着速度的增大,空泡摆动对尾

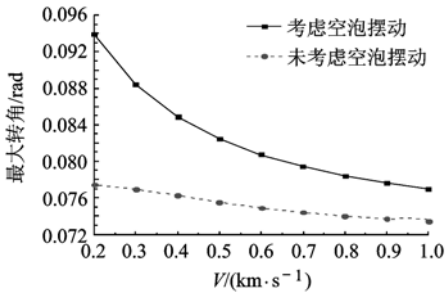

图 6　不同速度下航行体最大转角对比

拍周期的影响越来越小. 图 8 和图 9 给出了不同速度下空泡摆动对航行体尾拍升力和阻力极值的影响,可以看出:空泡摆动使航行体尾拍的升力和阻力都有所增加,且随着速度的增加,航行体尾拍的升力和阻力都呈近似线性增长,但空泡摆动并不影响尾拍升力和阻力随速度增大的斜率.

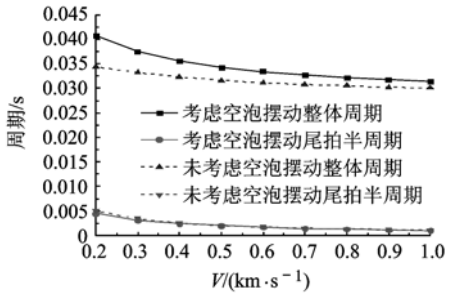

图 7 不同速度下航行体振动周期对比

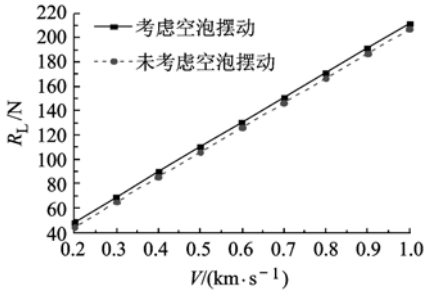

图 8 不同速度下航行体尾拍升力对比

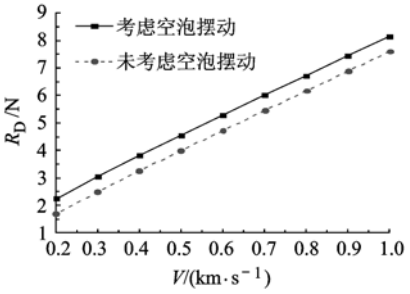

图 9 不同速度下航行体尾拍阻力对比

3.2 不同初始加速度下空泡摆动对航行体尾拍影响

假设超空泡航行体航行速度保持 500 m/s 不变,计算了航行体在不同初始角速度下空泡摆动对航行体运动的影响.

图 10 和图 11 给出了不同初始角速度下空泡摆动对航行体转角和周期的影响,可以看出:空泡摆动使航行体尾拍最大转角及整体振动的周期加大,且随着初始角速度的增大,空泡摆动对尾拍转角及整体振动的周期影响越来越大;然而,空泡摆动并不影响航行体尾拍的周期,且初始角速度的变化对航行体的尾拍周期也几乎没有影响.

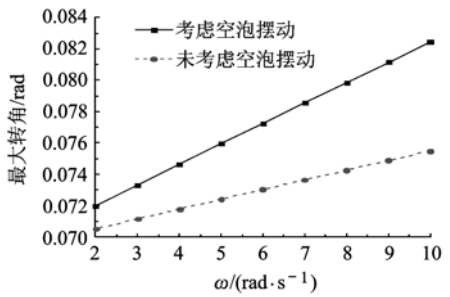

图 10 不同初始角速度下航行体最大转角对比

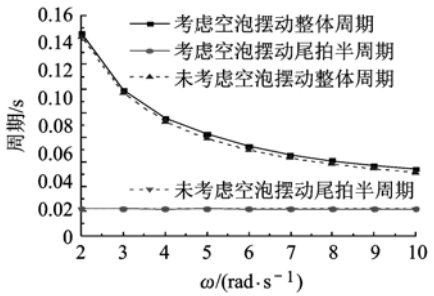

图 11 不同初始角速度下航行体振动周期对比

图 12 和图 13 给出了不同初始角速度下空泡摆动对航行体尾拍升力和阻力的影响,可以看出:空泡摆动还使航行体尾拍的升力和阻力都有所增加,且随着初始角速度的增加,空泡摆动对航行体尾拍的升力和阻力影响越来越大.

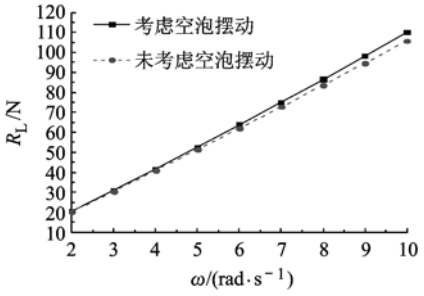

图 12 不同初始角速度下航行体尾拍升力对比

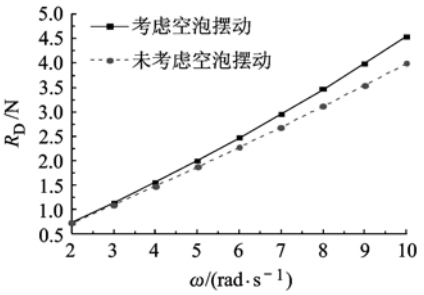

图 13 不同初始角速度下航行体振动周期对比

4 结 论

本文结合超空泡航行体尾拍运动与空泡形态变化互相耦合的特征,建立了超空泡航行体运动方程,分析了空泡摆动对超空泡航行体尾拍造成的影响,并得出以下结论:

1) 空泡摆动使航行体转角、整体运动周期、尾拍升力和阻力增大;

2) 随着速度增大,空泡摆动对航行体转角、整体运动周期及尾拍周期影响越来越小,而对航行体尾拍升力和阻力变化趋势几乎没有影响;

3) 随着初始角速度增大,空泡摆动对航行体转角、整体运动周期、航行体尾拍升力和阻力影响越来越大.

(下转第 518 页)

3）基于上述方案和技术，已完成航天器近距离导引轨迹规划仿真系统的开发. 通过运行仿真算例，验证了方案的可行性和价值. 所研究的设计方案，对于开发同类的仿真系统具有一定的参考价值.

参考文献（References）

[1] 余力凡. 虚拟现实技术在航天控制领域的应用[J]. 航天控制，2004，22(3)：79－83
Yu Lifan. Application of virtual reality technology in aerospace control field[J]. Aerospace Control，2004，22(3)：79－83(in Chinese)

[2] 张汉清，李言俊. 月球探测器可视化仿真系统的开发[J]. 空间科学学报，2008，28(3)：236－241
Zhang Hanqing，Li Yanjun. Design of a moon exploration probe simulation and visualization system[J]. Chin J Space Sci，2008，28(3)：236－241(in Chinese)

[3] 夏丰领，赵育善. 基于 HLA 的地空导弹仿真系统设计[J]. 系统仿真学报，2007，19(2)：296－299
Xia Fengling，Zhao Yushan. Surface-to-air missile simulation system design based on HLA[J]. Journal of System Simulation，2007，19(2)：296－299(in Chinese)

[4] 周剑勇，王跃峰，罗汝斌. 导弹攻防对抗仿真可视化系统的设计与实现[J]. 宇航学报，2009，21(18)：5779－5782
Zhou Jianyong，Wang Yuefeng，Luo Rubin. Design and realization of missile attack and defense visual simulation system[J]. Journal of System Simulation，2009，21(18)：5779－5782(in Chinese)

[5] 崔海英，李俊峰，高云峰. 卫星编队飞行中 Lawden 方程的误差分析[J]. 工程力学，2006，23(12)：188－192
Cui Haiying，Li Junfeng，Gao Yunfeng. Error analysis of lawden's equations in satellite formation flying[J]. Engineering Mechanics，2006，23(12)：188－192(in Chinese)

[6] 李保军，师鹏，张皓，等. 卫星编队队形重构中的模型选择[J]. 宇航学报，2010，31(9)：2101－2107
Li Baojun，Shi Peng，Zhang Hao，et al. Model selection for satellite formation flight reconfiguration[J]. Journal of Astronautics，2010，31(9)：2101－2107(in Chinese)

[7] Clohessy W H，Wiltshire R S. Terminal guidance system for satellite rendezvous[J]. Journal of the Aerospace Sciences，1960，27(9)：653－674

[8] 朱彦伟. 航天器近距离相对运动轨迹规划与控制研究[D]. 长沙：国防科学技术大学航天与材料工程学院，2009
Zhu Yanwei. Trajectory planning and control for spacecraft proximity relative motion[D]. Changsha：College of Aerospace and Material Engineering，National University of Defense Technology，2009(in Chinese)

[9] Ichimura Y，Ichikawa A. Optimal impulsive relative orbit transfer along a circular orbit[J]. Journal of Guidance，Control and Dynamics，2008，31(4)：1014－1027

[10] Yamanak K，Ankersen F. New state transition matrix for relative motion on an arbitrary elliptical orbit[J]. Journal of Guidance，Control，and Dynamics，2002，25(1)：60－66

[11] 刘维. 精通 Matlab 与 C/C++混合程序设计[M]. 2 版. 北京：清华大学出版社，2008：177－198
Liu Wei. Master the matlab and C/C++ hybrid program design[M]. 2 ed. Beijing：Tsinghua University Press，2008：177－198(in Chinese)

（编　辑：张　嵘）

（上接第 512 页）

参考文献（References）

[1] 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
Lü Zhimin，Shen Chao，Chen Yongkui. The research of supercavitation projectile technology[J]. Ship Science and Technology，2007，29(1)：92－94(in Chinese)

[2] 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

[3] 张劲生，张嘉钟，魏英杰，等. 超空泡水下航行体的结构动力响应特性[J]. 北京航空航天大学学报，2010，36(4)：411－414
Zhang Jingsheng，Zhang Jiazhong，Wei Yingjie，et al. Structural dynamic response characteristics of supercavitating underwater vehicles[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2010，36(4)：411－414(in Chinese)

[4] Kulkarni S，Pratap R. Studies on the dynamics of a supercavitating projectile[J]. Applied Mathematical Modeling，2000，24(2)：113－129

[5] 杨传武，王安稳. 冲击载荷作用下超空泡水下航行体的结构响应[J]. 华中科技大学学报：自然科学版，2008，36(7)：129－132
Yang Chuanwu，Wang Anwen. Structural response of supercavitating underwater vehicles subjected to impact loads[J]. J Huazhong Univ of Sci & Tech：Natural Science Edition，2008，36(7)：129－132(in Chinese)

[6] 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
Meng Qingchang，Zhang Zhihong，Gu Jiannong，et al. Analysis and calculation for tail-slaps of supercavitating projectiles[J]. Explosion and Shock Waves，2009，29(1)：56－60(in Chinese)

[7] Kirschner I N，Kring D C，Stokes A W，et al. Control strategies for supercavitating vehicles[J]. Journal of Vibration and Control，2002，8(2)：219－242

[8] Ruzzene M，Soranna F. Impact dynamics of elastic stiffened supercavitating underwater vehicles[J]. Journal of Vibration and Control，2004，10(2)：243－267

[9] Wu T，Yao T. A free streamline theory for two-dimensional fully cavitated hydrofoils[J]. J Math and Phys，1956，35：236－265

[10] Rand R，Pratap R，Ramani D，et al. Impact dynamics of a supercavitating underwater projectile[R]. DETC97/VIB-3929，1997

（编　辑：李　晶）