http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2016.0153

航行器低速斜入水运动规律

李永利[1,2], 冯金富[1,*], 齐铎[1], 杨健[1], 胡俊华[1], 徐保伟[3]

(1. 空军工程大学 航空航天工程学院, 西安 710038; 2. 武警工程大学 装备工程学院, 西安 710086;
3. 空军航空大学 飞行教官训练基地, 莱阳 233000)

摘 要: 针对介质跨越航行器控制困难的问题,提出一种空中控制水下非控的单一控制策略;为了分析航行器非控状态下斜入水运动的规律,构建了航行器低速入水动力学模型,并分别使用数值仿真方法和理论模型求解方法进行同一条件下的航行体入水运动仿真,通过对2种方法的仿真结果对比验证本文所构建航行体斜入水动力学模型的正确性。利用构建的入水动力学模型,分别对不同初始速度、角度、攻角条件下的入水过程进行了运动状态仿真并分析,得出了航行体在入水运动过程中的姿态位置变化规律。此入水规律将指导介质跨越航行器后续的水下航行、进而出水的一系列研究。

关 键 词: 入水运动; 动力学模型; 理论模型求解; 弹道; 姿态
中图分类号: TJ76
文献标识码: A **文章编号**: 1001-5965(2016)12-2698-11

近年来,越来越多的国家开始研究一类既能够在空中飞行,又能够在水面和水下航行的跨介质航行器,例如文献[1-2]中提出了一种可潜水飞机详细的设计指标。航行器在水空介质交替反复的运动中,伴随着力和力矩突变、气液扰动及复杂的碰撞现象,会对航行器控制造成不利影响,从而严重制约其航行的稳定性。目前,还没有适用于航行器水空跨越的一体化控制策略,而采用空中和水下分段控制的策略,会造成控制系统的复杂程度增加,可靠性降低,同时,还存在空中和水下控制器切换不稳定的问题。因此,本文提出一种空中控制水下非控的单一控制策略:通过空中控制航行器姿态、速度等,使其能够在非控状态下完成入水、水下航行、进而出水的一系列动作,并在其出水后能够满足空中控制起飞的初始状态要求。本文针对介质跨越航行器非控状态下的入水过程展开研究。

入水过程作为介质跨越武器空中弹道的延续和水中弹道的起始,有着完整性和典型性的特征[3],整个过程涉及空气、水和弹性物体三者之间的相互作用,既是一个具有自由面和特殊空泡的流体力学问题,又是有可能引起结构破坏的高速撞击问题,还有弹性物体运动的动力学问题,研究解决这些问题,实验是必不可少的。Waugh 和 Stubstad[4]系统地介绍了关于入水弹道实验模拟的知识和技术,并观测记录了许多入水实验方法、过程和结果; May[5]汇集了以往有价值的入水知识和实验数据与资讯,系统分析了影响入水弹道的各种因素;文献[6-8]分别针对圆柱体和球体的入水问题开展了实验研究,分析了入水空泡的形成、发展、闭合及溃灭过程。文献[9-11]分别对不同头型物体入水进行研究,得出头部形状对空泡与入水稳定性有着重要影响。

随着计算机数值计算的发展,关于航行器入水

收稿日期: 2016-03-02; **录用日期**: 2016-06-02; **网络出版时间**: 2016-06-30 09:04
网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20160630.0904.002.html
基金项目: 国家自然科学基金 (51541905, 61502534)
* **通讯作者**: Tel.: 029-84787514-601 E-mail: wcsfjf@163.com

引用格式: 李永利, 冯金富, 齐铎, 等. 航行器低速斜入水运动规律[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(12): 2698-2708.
LI Y L, FENG J F, QI D, et al. Movement rule of a vehicle obliquely water-entry at low speed[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2016, 42(12): 2698-2708 (in Chinese).

http://bhxb.buaa.edu.cn

运动的数值仿真计算方法研究越来越多,文献[12-13]应用流体体积函数(VOF)结合动网格技术的方法,对物体垂直入水进行了数值计算研究,并验证了数值计算方法的有效性。文献[14]对某型号圆盘尖拱头型水下航行器 4 种姿态角的高速斜入水冲击进行了探索性的数值仿真研究。文献[15]建立了空投雷弹斜入水的数值模型并对入水初始弹道进行数值模拟。Park 和 Jung[16]利用面元法数值计算了正切尖拱体以任意角度入水的冲击载荷,并对尖拱体的忽扑行为进行了数值计算分析。

可以看出关于航行器入水过程的研究,主要是采用实验和数值计算方法,而且多是针对某一特定工况条件或某一细节方面展开研究,缺乏对整个入水过程运动规律以及弹道特性的理论研究。本文采用理论分析方法,以低速入水的介质跨越航行器为研究对象,忽略自由面变化、喷溅、入水空泡等复杂物理现象细节,通过受力分析,构建入水动力学模型,并对航行器入水运动规律和弹道进行了研究。

1　动力学模型构建

1.1　物理模型

本文采用全长 $l=5.33$ m,质量分布均匀,头部为 30°顶角的尖拱体形状,尾部为线性截断尾部的回转圆柱体为研究对象,其物理模型如图 1 所示,半径 R 计算公式为

$$R(x)=\begin{cases}0 & x\leqslant 0 \text{ 或 } x>5.33\\ 0.2221x+0.13325 & 0<x\leqslant 0.6\\ 0.2665 & 0.6<x\leqslant 5.33-\dfrac{0.2665}{\tan 15^\circ}\\ 0.2665+\sqrt{r_t^2-\left(x+\dfrac{0.2665}{\tan 15^\circ}-5.33\right)^2}-r_t & 5.33-\dfrac{0.2665}{\tan 15^\circ}<x\leqslant 5.33\end{cases} \tag{1}$$

式中:$r_t=\dfrac{0.2665}{2\cdot\sin 15^\circ\cdot\sin 15^\circ}$。

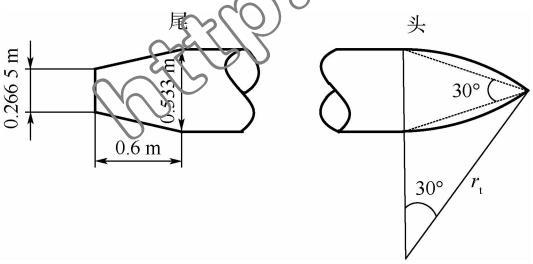


图 1　航行器物理模型示意图

Fig. 1　Schematic diagram of vehicle physical model

1.2　受力分析

如图 2 所示,选取弹体坐标系作为参考坐标系,质心位置为坐标原点,航行器入水角为 θ。由于受到的空气作用力较小,可忽略不计,整个入水过程中仅受到重力 G、浮力 B 和流体作用力 F 的相互作用,其中重力 G 保持不变,浮力 B 和流体作用力 F 都随航行器入水距离 x_a 的变化而变化。

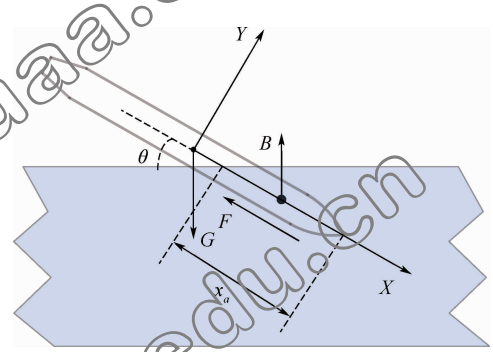


图 2　航行器入水作用力分析

Fig. 2　Force analysis of vehicle water-entry

1.2.1　重力 G

重力 G 在整个入水过程中保持不变,为一定值:

$$\begin{cases}G=mg\\ m=\rho V\\ V=\pi\displaystyle\int_0^L R^2(x)\,\mathrm{d}x\end{cases} \tag{2}$$

式中:$\rho=1.2\times10^3$ kg/m^3 为航行器的密度;V 为航行器的体积;m 为航行器的质量;g 为重力加速度;L 为航行器的长度。

质心(全浸没时的浮心)位置为

$$x_0=\frac{\displaystyle\int_0^L R^2(x)\,x\mathrm{d}x}{\displaystyle\int_0^L R^2(x)\,\mathrm{d}x} \tag{3}$$

1.2.2　浮力 B

浮力 B 的大小和浮心位置均随入水距离 x_a 变化而变化,假设浮力不受自由水面隆起的影响,则浮力和浮心位置分别为

$$B=\pi\rho_0 g\int_0^{L-x_a}R^2(x)\,\mathrm{d}x \tag{4}$$

$$x_{b0}=\frac{\pi\rho_0 g\displaystyle\int_0^{L-x_a}R^2(x)\,x\mathrm{d}x}{B} \tag{5}$$

式中:$\rho_0=1.0\times10^3$ kg/m^3 为海水密度。

1.2.3　流体作用力 F

由于入水过程中流体作用力非常复杂,为便于分析,本文将其分为理想流体作用力和黏性流体作用力两部分分别计算。

http://bhxb.buaa.edu.cn

1）理想流体作用力 F_i

由动量和动量矩定理可得，理想流体对航行器的作用力主矢和主矩分别为

$$-F_i=\frac{\mathrm{d}Q_f}{\mathrm{d}t}+\boldsymbol{\omega}\times Q_f \tag{6}$$

$$-M_i=\frac{\mathrm{d}K_f}{\mathrm{d}t}+\boldsymbol{\omega}\times K_f+\boldsymbol{v}\times Q_f \tag{7}$$

式中：F_i 为理想流体对航行器的作用力；M_i 为理想流体对航行器的力矩；Q_f 和 K_f 分别为理想流体对航行器的动量和动量矩，可由附加质量的方法得出[17]；$\boldsymbol{\omega}$ 和 $\boldsymbol{v}$ 分别为航行器转动角速度和速度矢量。

入水过程中，航行器的浸水体积不断变化，附加质量是随着时间变化的[18]，因此必须充分考虑附加质量变化的影响。本文在分析理想流体作用力时，不仅考虑附加质量的变化，而且还引入了附加质量变化率。依据式(6)和式(7)，并根据附加质量的定义[17]以及航行器的对称性，可得理想流体作用力公式：

$$\begin{cases}F_{ix}=-\lambda_{11}\dot{v}_x-\dot{\lambda}_{11}v_x+\omega_z(\lambda_{22}v_y+\lambda_{26}\omega_z)\\ F_{iy}=-\lambda_{22}\dot{v}_y-\dot{\lambda}_{22}v_y-\lambda_{26}\dot{\omega}_z-\dot{\lambda}_{26}w_z-\omega_z\lambda_{11}v_x\\ M_{iz}=-\lambda_{62}\dot{v}_y-\dot{\lambda}_{62}v_y-\lambda_{66}\dot{\omega}_z-\dot{\lambda}_{66}w_z+\\ \quad v_y\lambda_{11}v_x-v_x(\lambda_{22}v_y+\lambda_{26}\omega_z)\end{cases} \tag{8}$$

式中：F_{ix} 和 F_{iy} 分别为理想流体对航行器在 x 轴和 y 轴方向的作用力；M_{iz} 为理想流体对航行器在 z 轴方向的力矩；v_x 和 v_y 分别为航行器在 x 轴和 y 轴的速度分量；ω_z 为航行器绕 z 轴转动的角速度；λ 为附加质量项。随着航行器的入水运动，其浸没水中的体积逐渐增大，附加质量也随着增大，可采用剖面法进行附加质量及其变化率的计算[19]：

$$\begin{cases}\lambda_{22}=\pi\rho_0\int_0^{x_a}R^2(x)\,\mathrm{d}x\\ \lambda_{26}=\lambda_{62}=\pi\rho_0\int_0^{x_a}R^2(x)x\,\mathrm{d}x\\ \lambda_{66}=\pi\rho_0\int_0^{x_a}R^2(x)x^2\,\mathrm{d}x\end{cases} \tag{9}$$

由于细长体的附加质量 λ_{11} 很小[18]，此处设 $\lambda_{11}=0$，同时有 $\dot{\lambda}_{11}=0$。对式(9)两边求导，可得附加质量变化率：

$$\begin{cases}\mathrm{d}\lambda_{22}=\pi\rho_0R^2\mathrm{d}x_a\\ \mathrm{d}\lambda_{26}=\mathrm{d}\lambda_{62}=\pi\rho_0x_aR^2\mathrm{d}x_a\\ \mathrm{d}\lambda_{66}=\pi\rho_0x_a^2R^2\mathrm{d}x_a\end{cases} \tag{10}$$

式中：$\mathrm{d}x_a$ 为航行器水中部分长度的变化率，其大小为 $\mathrm{d}x_a=v_x\mathrm{d}t$。

2）黏性流体作用力 F_μ

实验和实际理论分析都指出：水下物体运动的升阻力系数与速度、雷诺数和攻角有关[20]。本文研究的航行器入水速度较低，速度变化范围小，可忽略雷诺数变化的影响。由于入水过程的复杂性，使得求解黏性流体作用力非常困难，本文通过采用 CFD 数值仿真方法，计算求得航行器在水下不同速度 v、攻角 α 下的阻力 $F_{\mu x}$、升力 $F_{\mu y}$ 和绕质心的力矩 $M_{\mu z}$，利用式(11)可得到黏性流体动力系数：升力系数 C_l、阻力系数 C_d、俯仰力矩系数 m_z（见图 3）。

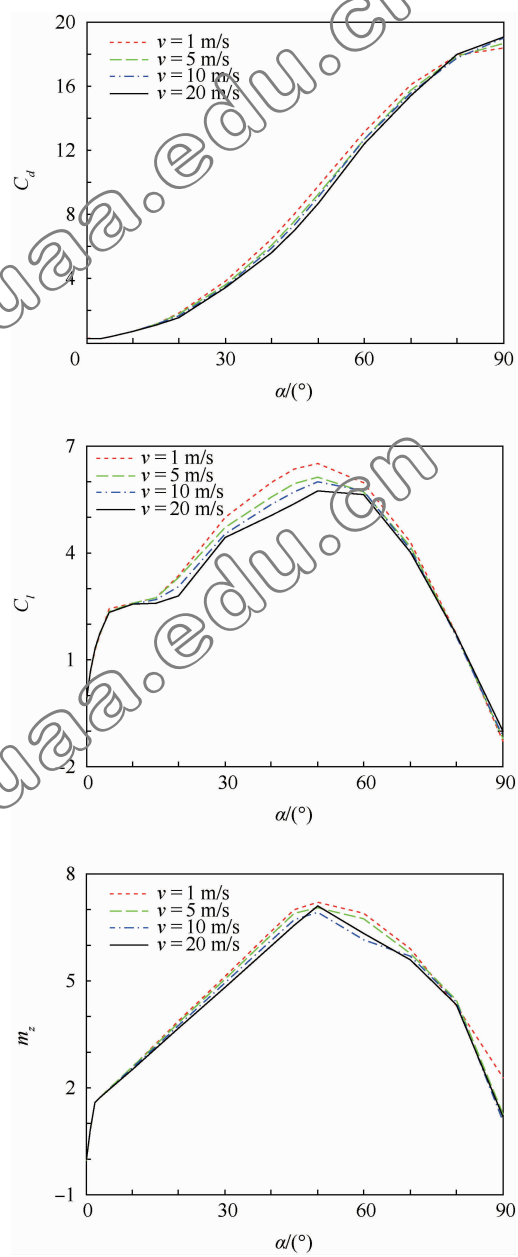


图 3 CFD 仿真得到的黏性流体动力系数与攻角、速度的关系

Fig. 3 Relationship between dynamic coefficients of simulation by CFD and attack angle and speed

http://bhxb.buaa.edu.cn

$$\begin{cases} C_d = \dfrac{F_{\mu x}}{0.5\rho_0 v^2} \\ C_l = \dfrac{F_{\mu y}}{0.5\rho_0 v^2} \\ m_z = \dfrac{M_{\mu z}}{0.5\rho_0 v^2} \end{cases} \tag{11}$$

通过 CFD 计算得知,黏性流体动力系数随着攻角、速度的变化关系是一一对应的。故可制作 3 张行为速度、列为攻角的黏性流体动力系数二维插值表,则黏性流体动力系数可由计算得到的当前速度和攻角插值得到,进而求解入水过程中的黏性流体动力。

黏性流体动力系数可由式(12)插值求得

$$\begin{cases} C_d = f_1(v,\alpha) \\ C_l = f_2(v,\alpha) \\ m_z = f_3(v,\alpha) \end{cases} \tag{12}$$

则可求得入水过程中黏性流体作用力为

$$\begin{cases} F_{\mu x} = -\dfrac{1}{2S_0} C_d \rho_0 v^2 S \\ F_{\mu y} = \dfrac{1}{2S_0} C_l \rho_0 v^2 S \\ M_{\mu z} = F_{\mu y} \cdot \dfrac{1}{2} x_a \\ S_0 = 2\pi \int_0^L R(x)\,\mathrm{d}x \\ S = 2\pi \int_0^{x_a} R(x)\,\mathrm{d}x \\ v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \end{cases} \tag{13}$$

式中:S_0 为航行器表面积;S 为航行器入水过程中的浸水面积。当航行器完全进入水中之后,黏性流体作用产生的俯仰力矩为

$$M_{\mu z} = \frac{1}{2} m_z \rho_0 v^2 \tag{14}$$

1.3　动力学模型

根据 1.2 节受力分析,构建航行器入水运动动力学模型计算公式:

$$\begin{cases} F_{ix} + F_{\mu x} + (B - G)\sin\theta = m(\mathrm{d}v_x/\mathrm{d}t - v_y\omega_z) \\ F_{iy} + F_{\mu y} + (B - G)\cos\theta = m(\mathrm{d}v_y/\mathrm{d}t + v_x\omega_z) \\ M_{iz} + M_{\mu z} + Bx_b\cos\theta = J \cdot \mathrm{d}\omega_z/\mathrm{d}t \end{cases} \tag{15}$$

式中:x_b 为浮心与重心之间的距离;J 为航行器的转动惯量,可根据圆盘形转动惯量计算公式及平行移轴定理求得

$$J = \pi\rho_0 \int_0^L R^2(x)\left[\frac{1}{4}R^2(x) + (x - x_0)^2\right]\mathrm{d}x \tag{16}$$

式(1)~式(16)构成了可描述航行器入水运动的微分方程组,给定初值条件可进行求解。初值条件包括初始速度(v_{x0},v_{y0})、入水角度 θ_0、转动角速度 ω_{z0} 和初始航行器头部顶点在轴线方向距水面的距离 x_{a0}。

2　模型验证

为验证第 1 节所构建的动力学方程的正确性,本文采用 Fluent 动网格技术,对同一工况条件下的入水运动进行仿真,并比较 2 种计算方法的仿真结果。仿真初始条件同取为:入水速度 20 m/s,入水角度 45°,转动角速度为 0 rad/s,攻角为 0°,初始航行器头部顶点在轴线方向距水面的距离取为 2 倍航行器直径[21]。数值仿真方法求得的航行器入水过程如图 4 所示,每个图中上部为空气,下部为海水,从 $t = 0.04$ s开始,相邻

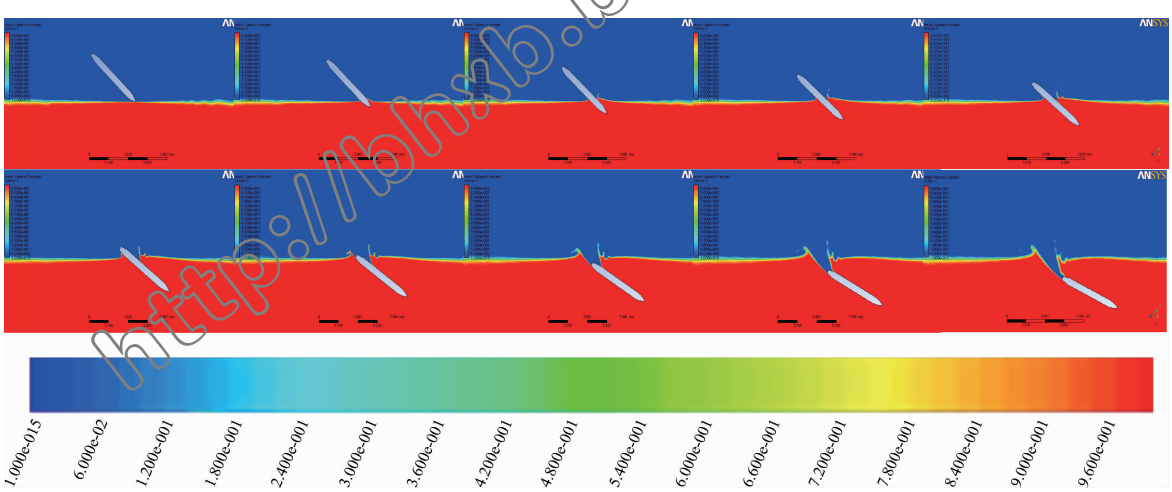


图 4　航行器入水过程 CFD 仿真结果

Fig. 4　Results of vehicle water-entry process simulated by CFD

http://bhxb.buaa.edu.cn

两图的时间间隔为0.04 s,结束时间 $t=0.4$ s。

在同等初始条件下,本文构建的理论模型计算得到的航行器入水过程如图5所示。其中水平虚点线为水平面,蓝色粗实线为理论模型计算得到质心运动轨迹,红色细实线为航行器轮廓,红色虚划线为数值仿真计算得到质心运动轨迹。为便于比较,将红色虚划线的质心运动轨迹整体左移2 m。从图4、图5中可看出,2种方法计算得到的质心运动轨迹基本吻合;入水初期弹道较为平直,随着头部接触水面开始,弹道开始向上弯曲。图6为入水倾斜角度变化曲线,入水初期倾斜角几乎保持不变,而后迅速减小,到后期又趋于平直;2种方法所得结果基本吻合。图7、图8分别为2种方法计算得到的轴向、径向位移变化曲线,吻合较好。在入水初期,2种方法计算得到的轴向、径向位移近似成线性增大;而后增大逐渐变缓,数值计算的结果略大于理论方法的结果。图9为入水速度变化曲线,航行器初始运动时,头部距水面有一定高度,此时只受到重力作用,故入水速度略微增大,待头部接触水面开始,受到重力、浮力和流体作用力的综合作用,入水速度迅速减小;2种方法所得结果基本吻合。图10为2种方法计算得到的转动角速度变化曲线,结果基本吻合。

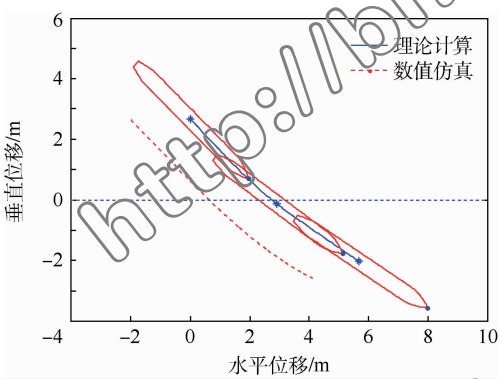


图5 质心运动轨迹变化对比

Fig. 5 Comparison of centroid trajectory

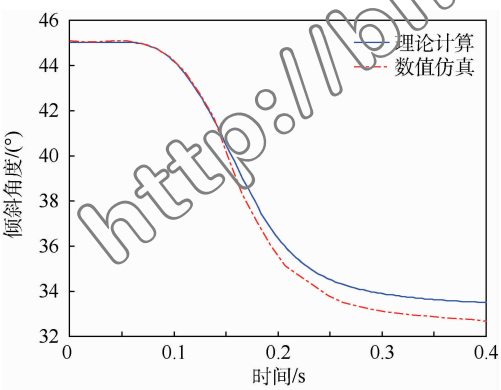


图6 倾斜角度对比

Fig. 6 Comparison of inclination angle

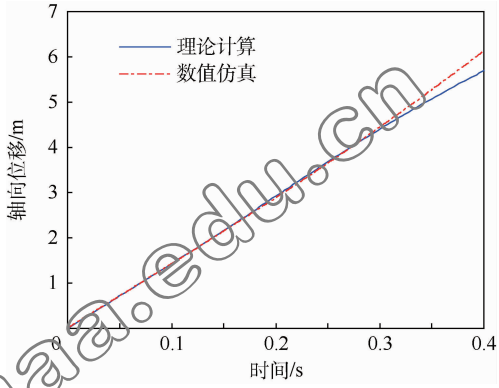


图7 轴向位移对比

Fig. 7 Comparison of axial displacement

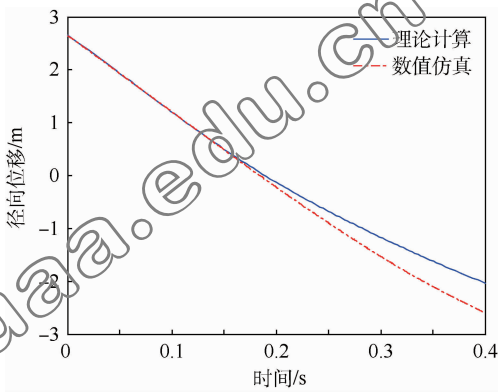


图8 径向位移对比

Fig. 8 Comparison of radial displacement

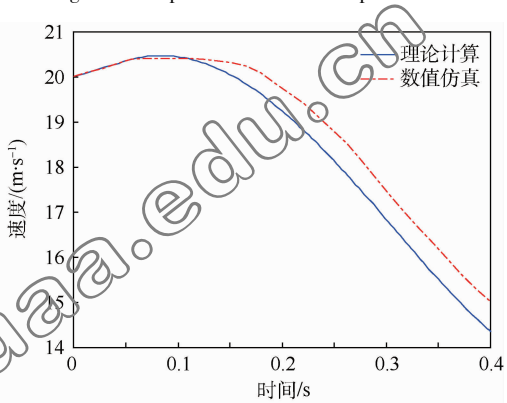


图9 速度对比

Fig. 9 Comparison of velocity

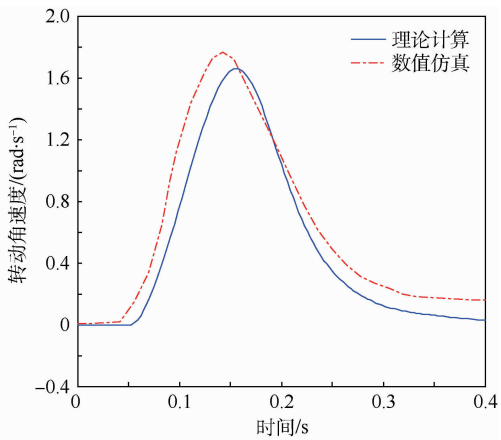


图10 转动角速度对比

Fig. 10 Comparison of rotational angular velocity

http://bhxb.buaa.edu.cn

通过图 4 ~ 图 10 对比可知,在同等工况条件下,2 种方法仿真计算所得的航行器入水过程质心轨迹、倾斜角度、轴向位移、径向位移、速度和转动角速度的变化规律基本吻合,可验证本文所构建的理论模型的正确性,并能够准确描述航行器入水运动的轨迹姿态。但也存在一定的误差:相对于数值仿真方法计算结果,理论计算方法得到的质心轨迹、倾斜角度、轴向位移和径向位移的变化趋势较为缓慢,而速度和转动角速度的变化较快。

产生误差的原因主要有 2 个方面:①理论模型求解忽略了入水过程中水面的扰动作用、黏性流体动力系数采用插值法求解,存在一定误差。②数值仿真计算方法会由于网格的划分、湍流模型和参数选择等原因产生计算误差。

3　模型仿真

为了分析不同入水速度、入水角度和攻角下航行器入水运动的规律,对模型进行多次不同条件的仿真,并进行对比。

3.1　仿 真 1

仿真初始入水速度对航行器入水的影响。设置入水初始条件:初始位置 $x_{a0} = -1$ m;初始入水角度为 45°;初始转动角速度为 0 rad/s;初始攻角为 0°;本文研究的是航行器低速入水过程,最大初始入水速度取为 30 m/s,设初始入水速度以 5 m/s 的间隔由 10 m/s 逐渐增加到 30 m/s。仿真结果如图 11 ~ 图 16 所示。

通过对比图 11 ~ 图 16 可知:相同入水角度下,入水速度越大,轴向速度变化越大,而径向速度变化越小,航行器姿态变化越小,即倾斜角、转动角速度变化越小,对应的攻角变化越小,弹道越容易保持稳定,越不易发生弯曲,入水深度和水平位移越大。

航行器入水开始时,头部距水面有一定高度,在重力作用下,轴向速度、径向速度有小幅度增大,并形成一个小的正攻角;相同入水角度下,头部距水面的轴向距离相等,入水速度越大,头部接触水面的时刻越早,重力作用时间越短,轴向速度、径向速度以及攻角的增加量越小,弹道、倾斜角度和转动角速度保持不变。航行器接触水面时,头部下表面形成法向力和抬头力矩,以及正攻角,攻角进一步增大,转动角速度开始增大,弹道开始向上弯曲,倾斜角变小,轴向速度、径向速度继续增大;入水速度越大,抬头力矩作用于航行器的时间越短,依据刚体的动量矩定理,获得的转动角速度越小,倾斜角、攻角、轴向速度和径向速度变化越小,弹道向上弯曲程度越小。头部完全进入水中后,不再提供抬头力矩,航行器以前期获得的转动角速度继续转动,转动角速度迅速减小,回转半径增大,弹道轨迹趋于平直,倾斜角继续减小,攻角、轴向速度和径向速度迅速减小。

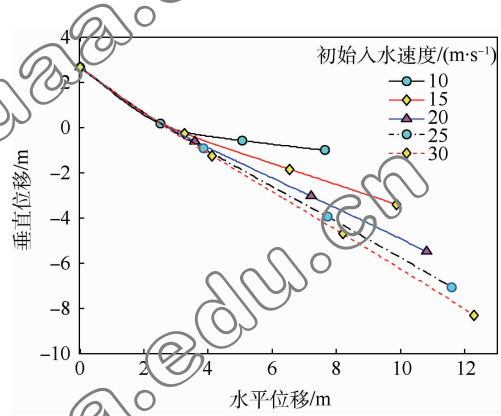


图 11　初始入水速度对质心运动轨迹的变化

Fig. 11　Change of centroid trajectory under different initial water-entry velocities

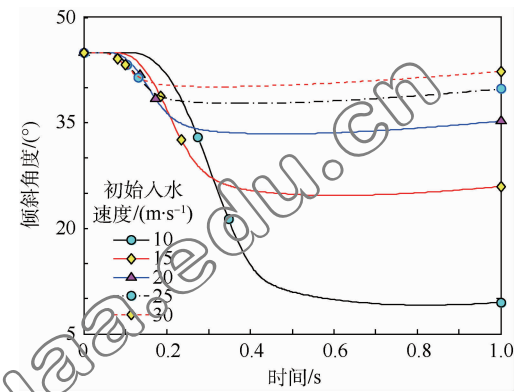


图 12　初始入水速度对倾斜角度的变化

Fig. 12　Change of inclination angle under different initial water-entry velocities

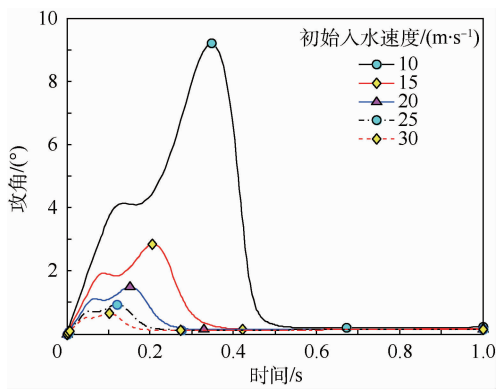


图 13　初始入水速度对攻角的变化

Fig. 13　Change of attack angle under different initial water-entry velocities

http://bhxb.buaa.edu.cn

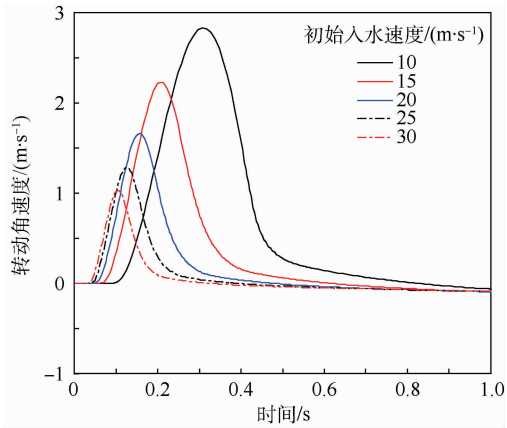


图 14 初始入水速度对转动角速度的变化

Fig. 14 Change of rotational angular velocity under different initial water-entry velocities

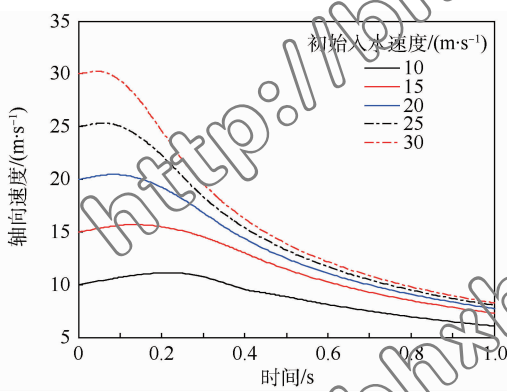


图 15 初始入水速度对轴向速度的变化

Fig. 15 Change of axial velocity under different initial water-entry velocities

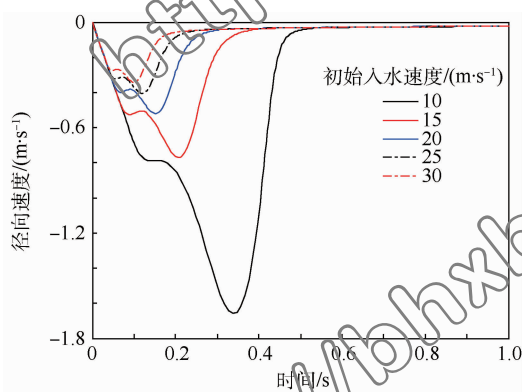


图 16 初始入水速度对径向速度的变化

Fig. 16 Change of radial velocity under different initial water-entry velocities

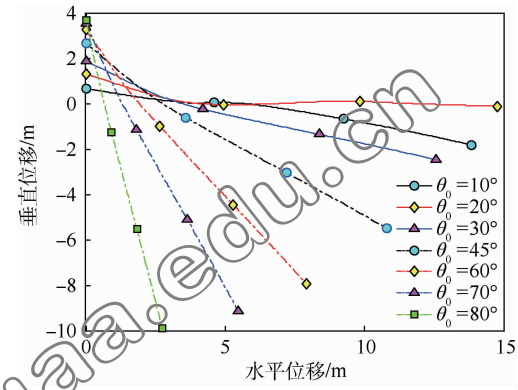


图 17 初始入水角度对质心运动轨迹的变化

Fig. 17 Change of centroid trajectory under different initial water-entry angles

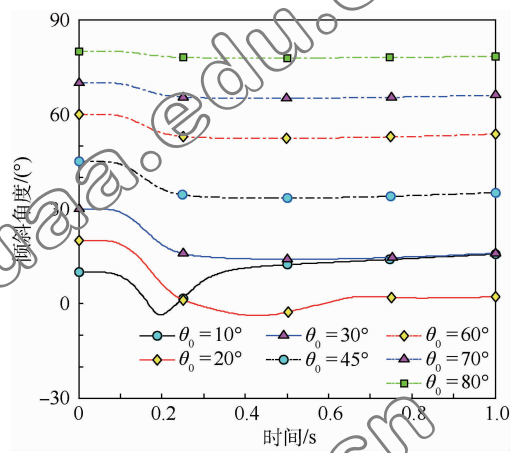


图 18 初始入水角度对倾斜角度的变化

Fig. 18 Change of inclination angle under different initial water-entry angles

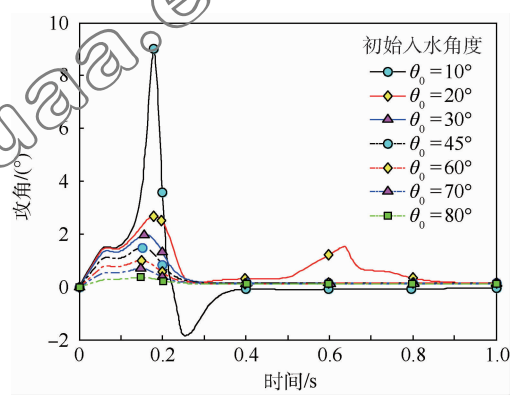


图 19 初始入水角度对攻角的变化

Fig. 19 Change of attack angle under different initial water-entry angles

3.2 仿真 2

仿真初始入水角度对航行器入水的影响。入水初始条件:初始位置 $x_{a0} = -1$ m;初始入水速度 20 m/s;初始转动角速度为 0 rad/s;初始攻角为 0°;初始入水角度分别为 10°、20°、30°、45°、60°、70°、80°。仿真结果如图 17 ~ 图 22 所示。

通过仿真发现,初始入水角度为 10°、20°时,航行器头部未完全入水,尾部即已接触水面,造成了航行器入水极不稳定,在此不进行讨论。通过对比图 17 ~ 图 22 可知:相同入水速度下,入水角度越大,倾斜角变化越小,同时转动角速度越小,姿态变化越小,对应的攻角和径向速度变化越小,

http://bhxb.buaa.edu.cn

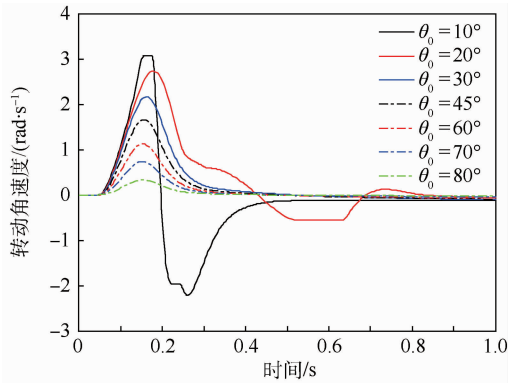


图 20　初始入水角度对转动角速度的变化

Fig. 20　Change of rotational angular velocity under different initial water-entry angles

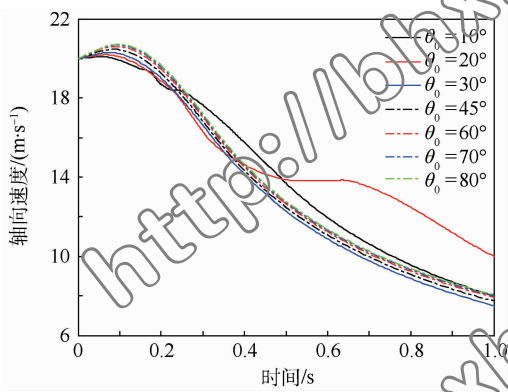


图 21　初始入水角度对轴向速度的变化

Fig. 21　Change of axial velocity under different initial water-entry angles

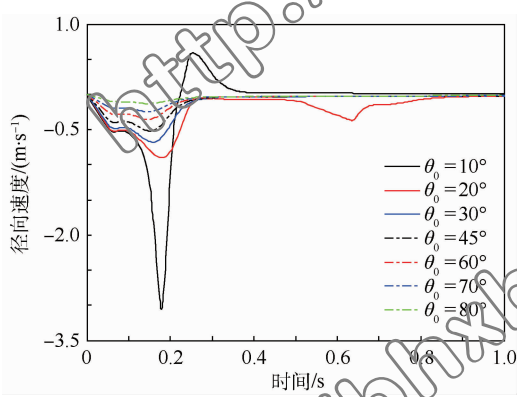


图 22　初始入水角度对径向速度的变化

Fig. 22　Change of radial velocity under different initial water-entry angles

而轴向速度变化基本一致,弹道越容易保持稳定,越不易发生弯曲,入水深度越大,水平位移越小。

航行器入水开始时,不同初始入水角度下,头部距水面有一定高度,且轴向距离相等,在重力作用下,入水角度越大,重力在轴向的分力越大,径向分力越小,轴向速度增加越大,径向速度以及攻角的增加量越小,弹道、倾斜角度和转动角速度保持不变。航行器接触水面时,头部下表面形成法向力和抬头力矩,以及正攻角,攻角进一步增大,转动角速度开始增大,弹道开始向上弯曲,倾斜角变小,轴向速度开始减小,径向速度继续增大;入水角度越大,头部完全入水时间越短,即抬头力矩作用时间越短,依据刚体的动量矩定理,获得的转动角速度越小,倾斜角、攻角、轴向速度和径向速度变化越小,弹道越趋于平直。头部完全进入水中后,不再提供抬头力矩,航行器以前期获得的转动角速度继续转动,转动角速度、攻角和径向速度减小至零,轴向速度迅速减小,倾斜角趋于定值,弹道轨迹趋于平直。

3.3　仿 真 3

仿真初始攻角对航行器入水的影响。设置入水初始条件:初始位置 $x_{s0}=-1$ m;初始入水速度 20 m/s;初始入水角度 45°;初始转动角速度 0 rad/s;本文研究的航行器入水过程与空头鱼雷入水过程类似,为减小入水冲击对内部结构的影响,入水攻角不可太大,故初始攻角 α_0 分别取为 0°、±5°、±10°。仿真结果如图 23 ~ 图 28 所示。

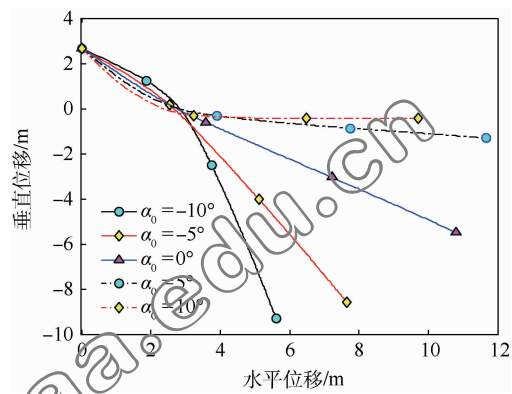


图 23　初始攻角对质心运动轨迹的变化

Fig. 23　Change of centroid trajectory under different initial attack angles

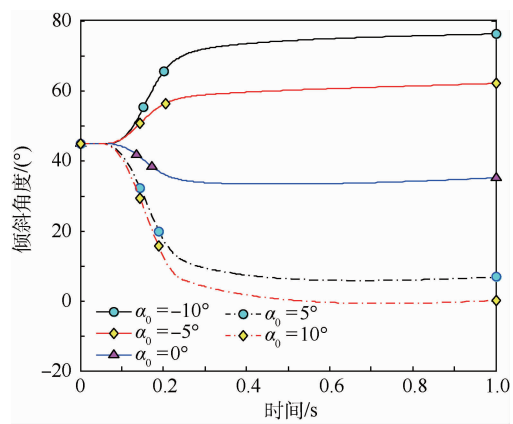


图 24　初始攻角对倾斜角度的变化

Fig. 24　Change of inclination angle under different initial attack angles

http://bhxb.buaa.edu.cn

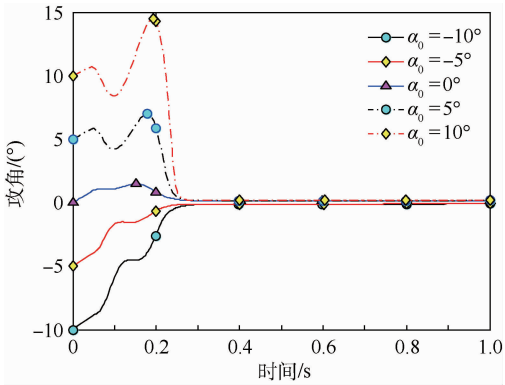


图 25 初始攻角对攻角的变化

Fig. 25 Change of attack angle under different initial attack angles

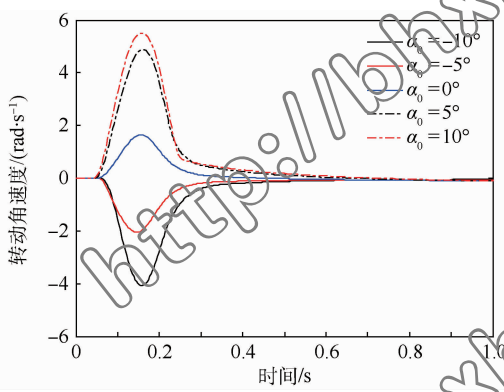


图 26 初始攻角对转动角速度的变化

Fig. 26 Change of rotational angular velocity under different initial attack angles

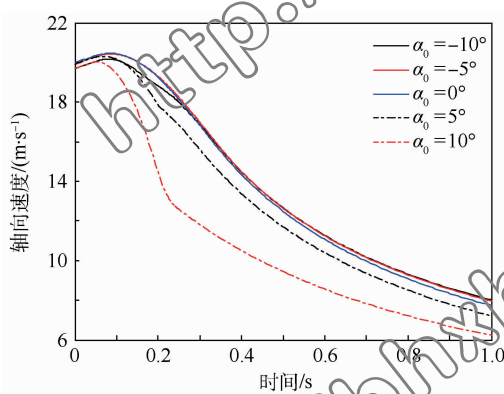


图 27 初始攻角对轴向速度的变化

Fig. 27 Change of axial velocity under different initial attack angles

通过对比图 23~图 28 可知:当 $\alpha_0 \geqslant 0°$时,初始攻角越大,倾斜角变小趋势越大,同时正向转动角速度越大,对应的攻角变化越大;轴向速度和径向速度变小趋势越大,弹道越容易向上弯曲,入水深度和水平位移越小。

当 $\alpha_0 < 0°$时,初始攻角越大,倾斜角变大趋势越大,负向转动角速度越大,对应的攻角变化越

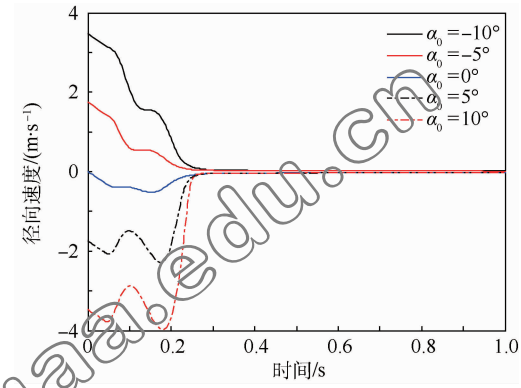


图 28 初始攻角对径向速度的变化

Fig. 28 Change of radial velocity under different initial attack angles

大;径向速度变小趋势越大,而轴向速度变小趋势基本一致,弹道越容易向下弯曲,入水深度越大,水平位移越小。

航行器入水开始时,入水速度相等,攻角越大,径向速度越大,轴向速度越小。头部距水面有一定高度,在重力作用下,轴向速度在正方向有小幅度增大,径向速度在负方向有小幅度增大,并形成一个小的正攻角。因此,当 $\alpha_0 \geqslant 0°$时,攻角、轴向速度、径向速度均有所增大,弹道向上弯曲,攻角越大,弯曲程度越大;当 $\alpha_0 < 0°$时,轴向速度有小幅度增大,而攻角、径向速度均有所减小,弹道向下弯曲,攻角值越大,弯曲程度越大。航行器接触水面时,头部下表面形成法向力和抬头力矩;当 $\alpha_0 \geqslant 0°$时,由于攻角为正,形成向上的流体作用力矩,在 2 个力矩的综合作用下,攻角先减小后增大,转动角速度开始增大,弹道继续向上弯曲,倾斜角迅速变小,轴向速度、径向速度开始减小;当 $\alpha_0 < 0°$时,由于攻角为负,形成向下的流体作用力矩,在 2 个力矩的综合作用下,攻角持续减小,转动角速度开始负向增大,弹道继续向下弯曲,倾斜角变大,轴向速度、径向速度减小;攻角值越大,形成的流体作用力矩越大,弹道、倾斜角、攻角、转动角速度、轴向速度、径向速度变化趋势越大。头部完全进入水中后,不再提供抬头力矩,随着前期攻角的减小,流体作用力矩也在减小直至为零,航行器转动角速度开始减小,攻角、轴向速度和径向速度迅速减小,倾斜角趋于定值,弹道轨迹逐渐趋于平直。

4 结 论

针对介质跨越航行器控制困难的问题,提出一种空中控制水下非控的单一控制策略;针对其非控状态下的入水过程进行分析,以航行器为研

http://bhxb.buaa.edu.cn

究对象,引入时变的浮力、附加质量等参量,构建了适用于航行器低速入水的动力学模型,可以实现航行器入水运动姿态的仿真,仿真结果和数值计算方法仿真结果相吻合。使用此动力学模型进行航行器入水运动规律研究,得到以下结论:

1)航行器入水过程中,受初始状态影响较大。

2)入水速度越大,航行器姿态变化越小,弹道越容易保持稳定,入水深度和水平位移越大。

3)入水角度越大,弹道越容易保持稳定,越不易发生弯曲,入水深度越大,水平位移越小。

4)攻角的大小和方向对航行器入水过程影响较大,攻角的值越大,姿态变化越大,弹道越容易弯曲。

参考文献(References)

[1] EASTGATE J, GODDARD R. Submersible aircraft concept design study[C]// 11th International Conference on Fast Sea Transportation FAST 2011. Alexandria: American Society of Naval Engineers, 2011: 813-820.

[2] KATHRYN W. Submersible aircraft concept design study-Amendment1: NSWCCD-CISD-2011/015[R]. Carderock, MD: Naval Surface Warfare Center Carderock Division, 2011.

[3] 严忠汉. 试论鱼雷入水问题[J]. 中国造船, 2002, 43(3): 88-93.
YAN Z H. A brief neview of water-entry problems for torpedo [J]. Ship Building of China, 2002, 43(3): 88-93 (in Chinese).

[4] WAUGH J G, STURSTAD G W. Hydroballistics modeling: AD A 007529[R]. Washington, D. C.: NASA, 1975.

[5] MAY A. Water-entry & cavity running behavior of missiles: AD A 020429[R]. Washington, D. C.: NASA, 1975.

[6] 何春涛,王聪,何乾坤,等. 圆柱体低俗入水空泡试验研究[J]. 物理学报, 2012, 61(13): 134701.
HE C T, WANG C, HE Q K, et al. Low speed water-entry of cylindrical projictile[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(13): 134701 (in Chinese).

[7] 何春涛,王聪,魏英杰,等. 圆柱体垂直入水空泡形态试验[J]. 北京航空航天大学学报, 2012, 38(11): 1542-1546.
HE C T, WANG C, WEI Y J, et al. Vertical water entry cavity of cylinder body[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2012, 38(11): 1542-1546 (in Chinese).

[8] 马庆鹏,何春涛,王聪,等. 球体垂直入水空泡实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2014, 34(2): 174-180.
MA Q P, HE C T, WANG C, et al. Experiment investigation on vertical water-entry cavity of sphere[J]. Explosion and Shock Waves, 2014, 34(2): 174-180 (in Chinese).

[9] 胡青青. 不同倾角下钝体入水后的超空泡流动的实验观察及数值计算[D]. 杭州:浙江理工大学, 2014: 32-35.
HU Q Q. Experimental observation and numerical calculation of supercavity flow of blunt body under different inlination angle into the water[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2014: 32-35 (in Chinese).

[10] 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): 579-584.
ZHANG W, GUO Z T, XIAO X K, et al. Experimental investigations on behaviors of projectile high-speed water entry[J]. Explosion and Shock Waves, 2011, 31(6): 579-584 (in Chinese).

[11] 顾建农,张志宏,王冲,等. 旋转弹头水平入水空泡及弹道实验研究[J]. 兵工学报, 2012, 33(5): 540-544.
GU J N, ZHANG Z H, WANG C, et al. Experimental research for cavity and ballistics of a rotating bullet entraining water level[J]. Acta Armamentarii, 2012, 33(5): 540-544 (in Chinese).

[12] 陈宇翔,郜冶,刘乾坤. 应用 VOF 方法的水平圆柱入水数值模拟[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2011, 32(11): 1439-1442.
CHEN Y X, GAO Y, LIU Q K. Numerical simulation of water-entry in a horizontal circular cylinder using the volume of fluid (VOF) method[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2011, 32(11): 1439-1442 (in Chinese).

[13] 何春涛,王聪,闵景新,等. 回转体匀速垂直入水早期空泡数值模拟研究[J]. 工程力学, 2012, 29(4): 237-243.
HE C T, WANG C, MIN J X, et al. Numerical simulation of early air-cavity of cylinder cone with vertical water-entry[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(4): 237-243 (in Chinese).

[14] 魏照宇,石秀华,王银涛,等. 水下航行器高速斜入水冲击的探索仿真研究[J]. 西北工业大学学报, 2010, 28(5): 718-723.
WEI Z Y, SHI X H, WANG Y T, et al. Exploring high-speed oblique water entry impact of an underwater vehicle[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2010, 28(5): 718-723 (in Chinese).

[15] 王永虎,石秀华. 空投鱼雷斜入水初始弹道数值分析[J]. 弹道学报, 2012, 24(2): 92-95.
WANG Y H, SHI X H. Numerical analysis for initial hydroballistics of airborne missile during oblique water-entry impact [J]. Journal of Ballistics, 2012, 24(2): 92-95 (in Chinese).

[16] PARK M S, JUNG Y R. Numerical study of impact force and ricochet behavior of high speed water-entry bodies[J]. Computers & Fluids, 2003, 32(7): 939-951.

[17] 严卫生. 鱼雷航行力学[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2005: 26.
YAN W S. Torpedo mechanics[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2005: 26 (in Chinese).

[18] 廖剑晖,由小川,吕海波,等. 发展时变附加质量方法模拟飞行器出水过程[J]. 工程力学, 2012, 29(4): 202-209.
LIAO J H, YOU X C, LV H B, et al. Development of a time-varying added mass method in the simulations of the water-exit process of underwater vehicles[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(4): 202-209 (in Chinese).

[19] 罗格维诺维奇·T·B. 自由边界流动的水动力学[M]. 施红辉,译. 上海:上海交通大学出版社, 2012: 129-131.
ЛОГВИНООВЧ Г В. Hydrodynamics of free-boundary flows [M]. SHI H H, translated. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2012: 129-131 (in Chinese).

[20] WILSON M B, KELLEY T R. Low froude number hydrodynamic performance of a flat plate hydrofoil[J]. Drag Forces,

http://bhxb.buaa.edu.cn

1976:77.
[21] 刘曜.波浪对运载器出水姿态角的影响[J].舰船科学技术,2005,27(3):32-34.
LIU Y. Wave effect on a submerged missile capsule traveling near-surface[J]. Ship Science and Technology, 2005, 27(3): 32-34(in Chinese).

作者简介:

李永利 男,博士研究生。主要研究方向:新概念武器设计与仿真。
Tel.:029-84787514-602
E-mail:672719405@qq.com

冯金富 男,博士,教授,博士生导师。主要研究方向:新概念武器设计与仿真。
Tel.:029-84787514-601
E-mail:wcsfjf@163.com

Movement rule of a vehicle obliquely water-entry at low speed

LI Yongli[1,2], FENG Jinfu[1,*], QI Duo[1], YANG Jian[1], HU Junhua[1], XU Baowei[3]

(1. School of Aeronautics and Astronautics Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;
2. College of Equipment Engineering, Engineering University of CAPF, Xi'an 710086, China;
3. Flying Instructor Training Base, Air Force Aviation University, Bengbu 233000, China)

Abstract: This paper proposes a single control strategy to solve the problem of difficult transmedia vehicle control. The proposed control strategy is just to control the vehicle's air navigation, but not to control the underwater navigation. The hydrodynamic model of a vehicle obliquely water-entry at low speed is founded to analyze the motion characteristics. Two methods are used to simulate the vehicle's water-entry in the same condition: numerical simulation method and theoretical model calculation method. And the results of the two methods can validate the hydrodynamic model founded in this paper. The water-entry movement in the conditions of different initial velocities, different angles, and different attack angles is simulated by this hydrodynamic model and the simulation is analyzed. And the change rule of the vehicle's gestures and position when water-entry is obtained by analysis. This water-entry rule will guide a series of follow-up researches, such as underwater navigation and water-exit process.

Key words: water-entry movement; dynamic model; theoretical model calculation; ballistic trajectory; gesture

Received: 2016-03-02; **Accepted**: 2016-06-02; **Published online**: 2016-06-30 09:04
URL: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20160630.0904.002.html
Foundation items: National Natural Science Foundation of China (51541905, 61502534)
* **Corresponding author**. Tel.: 029-84787514-601 E-mail: wcsfjf@163.com

http://bhxb.buaa.edu.cn