

# 入水参数对“水漂式”航行体跨介质运动影响数值仿真分析

刘祥, 李天雄, 李林, 孙宇新

(南京理工大学瞬态物理国家重点实验室, 南京 210094)

**摘要:** 以“水漂式”跨介质航行体为背景, 采用 AUTODYN 软件建立了不同入水角度, 不同入水速度的“水漂式”跨介质航行体的入水模型, 通过对数值仿真结果的分析, 得到了入水角度、入水速度对出水角度、运动速度及运动轨迹的影响。有效地验证了该“水漂式”航行体功能实现的可能性。结果表明, 在同一入水速度下, 随着入水角度的增加, 出水角增大; 在同一入水角度下, 随着入水速度的增加, 出水角增大。

**关键词:** 跨介质航行体; 入水弹道; 流固耦合; AUTODYN

中图分类号: TJ760.2

文献标识码: A

文章编号: 2096-4080 (2020) 03-0062-09

## Analysis of Influence of Water Entry Parameters on Cross-Medium Movement of “Water Drift” Aerial-Aquatic Vehicle

LIU Xiang, LI Tianxiong, Li Lin, SUN Yuxin

(Nation Key Laboratory of Transient Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** Based on the “water drift” aerial-aquatic vehicle, this paper used AUTODYN to establish the water entry model of the “water drift” aerial-aquatic vehicle with different water entry angles and speeds. Through the analysis, the influence of the water entry angle, the water entry speed on the water outlet angle, the speed and the trajectory were obtained. These results effectively verified the possibility of the realization of the “water drift” warhead function. The results show that with the same water entry speed, the vehicle’s water outlet angle increases with the increase of the water entry angle, and with the same water entry angle, the vehicle’s water outlet angle increases with the increase of water entry velocity.

**Key words:** Aerial-aquatic vehicle; Water trajectory; Fluid-solid coupling; AUTODYN

### 0 引言

“水漂式”跨介质航行体主要利用了物体入水的忽扑现象。顾建农<sup>[1]</sup>对忽扑现象的描述为: 对于轴对称细长体, 当作用于其鼻部的水动力不通过其重心的时候, 就发生俯仰角速度的变化。形成机理是斜入水时其下部会产生一个细长的空泡,

高速侵水过程中, 空泡内的压力低于大气压力, 形成低压力, 造成入水时所受力矩不平衡, 从而导致入水后姿态发生较大变化。猛烈的忽扑会使航行体出现穿出水面的轨道。航行体重心位于前部, 使得航行体在出水飞行过程中向下低头, 再次斜入水并产生忽扑。借助以上原理, 跨介质航行体在水面上下波动, 所以被称为“水漂”。水漂

收稿日期: 2019-10-26; 修订日期: 2020-03-02

作者简介: 刘祥 (1994-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为新型毁伤及特种防护。E-mail: sxdtstnclxx@163.com

通信作者简介: 孙宇新 (1970-), 男, 博士生导师, 主要研究方向为新型毁伤及特种防护。E-mail: yxsun@163.com

式跨介质航行体通过在水面反复上下运动，能有效增强隐蔽性与航程。

跨介质航行体的入水到出水的运动过程非常复杂，入水和出水运动涉及介质突变及液体与固体的运动耦合，跨介质航行体的头部结构、入水速度以及入水角度对其空泡及弹道特性有重要影响。Logvinovich<sup>[2]</sup>基于独立膨胀原理分析了入水空泡演化规律，为空泡壁运动的研究提供了理论基础。肖海燕等<sup>[3]</sup>使用 Fluent 对航行体高速小角度入水进行了仿真，分析沾湿对流体动力及运动姿态的影响，验证了航行体的不对称沾湿是入水失稳的重要原因。朱珠等<sup>[4]</sup>采用流场与弹道耦合算法对回转体在推力作用下的较小角度入水问题进行了研究。宋武超等<sup>[5]</sup>针对回转体低速倾斜入水过程空泡的生成机理和演化特性开展研究，研究了入水速度和入水角度对入水空泡、回转体速度、俯仰角及阻力系数的影响规律。杨衡等<sup>[6]</sup>针对航行体低速入水空泡，通过试验对比分析了入水速度、入水角度对入水空泡的影响。路丽睿等<sup>[7]</sup>研究了头型对低速倾斜入水空泡及弹道特性的影响，得出了锥形航行体在入水后能保持较好稳定性的结论。马庆鹏<sup>[8]</sup>研究了航行体不同头型、密度、后体长度、直径等参数对入水空泡形态发展、空泡扩张规律以及多相流场分布的影响，并给出了上述各参数对头部压力载荷的影响规律。胡青青<sup>[9]</sup>对不同头型的钝体以不同倾斜角入水产生空泡流这一过程进行了观察，分析了不同工况下空泡产生和发展的规律。目前对于忽扑的机理认识还不清晰，具体影响因素不明确，缺少定量的研究分析结果。因此，以上研究的重点在于航行体入水后的运动情况，不涉及因强烈忽扑导致的航行体入水后的再出水现象及反复跨介质运动。

本文基于“水漂式”跨介质航行体，通过使用 AUTODYN 软件对航行体入水过程中进行模拟，分别设计了 3 种入水角 ( $9^\circ$ ,  $12^\circ$ ,  $15^\circ$ ) 以及 3 种入水速度 (100 m/s, 200 m/s, 300 m/s)，不同入水角与入水速度组合共计 9 种工况，结合仿真结果验证了“水漂式”跨介质航行体入水穿出水面弹道实现的原理及可行性，并分析了入水角度、入水速度对出水角度、运动速度及空泡的影响。

## 1 数值仿真方法

### 1.1 仿真模型

本文研究对象的几何结构如图 1 所示。主要包括航行体头部、航行体身部及固定侧翼，头部长度 37.5 mm，身部长度 105 mm，内部装有配重块控制身部重心，位于前部，使得航行体在飞行过程中向下低头。楔形头部用于入水时在上下表面产生流速差，进而产生升力使航行体向上偏转，在水面发生弹跳。两边侧翼用于维持航行体左右平衡，在入水后维持稳定。本文研究对象的入水示意图如图 2 所示。

计算水域长 1.2 m，宽 0.045 m，深 0.335 m，初始时刻航行体轴线与水平面夹角为入射角，初始时刻水平方向速度沿 X 轴负方向，铅垂方向速度沿 Z 轴负方向。

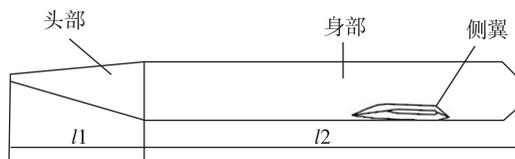


图 1 “水漂式”跨介质航行体模型示意图

Fig. 1 Simulation model of the “water drifting” aerial-aquatic vehicle

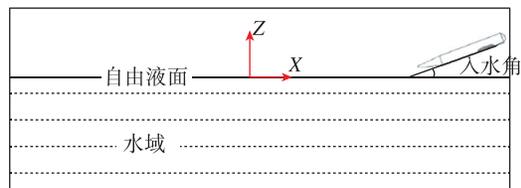


图 2 “水漂式”跨介质航行体入水示意图

Fig. 2 Diagram of “water floating” aerial-aquatic vehicle entering water

### 1.2 计算模型

由于涉及流体与固体的相互作用，因此流固耦合数值模拟采用 AUTODYN-3D 拉格朗日-欧拉耦合技术，对如表 1 所示的 3 种入水速度和 3 种入水角度的航行体入水进行研究。航行体采用拉格朗日建模，水采用欧拉建模。整体模型如图 3 所示，航行体部分网格如图 4 所示。

表1 入水角度及速度

Tab. 1 Water entry angle and speed of "water drifting" aerial-aquatic vehicle

入水角/(°)	入水速度/(m/s)
9	100
	200
	300
12	100
	200
	300
15	100
	200
	300



图3 “水漂式”跨介质航行体入水流域仿真模型示意图  
Fig. 3 The flow field of the "water drifting" aerial-aquatic vehicle penetrating into water

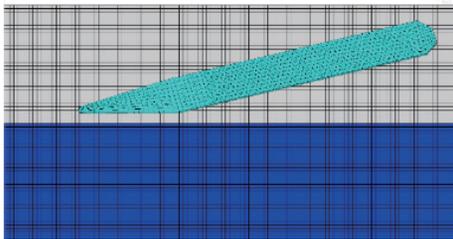


图4 航行体及部分水域网格示意图  
Fig. 4 Grid of aerial-aquatic vehicle and water

### 1.3 水的状态方程

水的 SHOCK 状态方程为

$$P = P_H + \Gamma \rho (e - e_H) \quad (1)$$

式中,  $P_H$  和  $e_H$  分别为材料冲击 Hugoniot 态的压力和比动能,  $\Gamma$  为 Gruneisen 系数。

假设  $\Gamma_\rho = \Gamma_0 \rho_0 = \text{常数}$ , 且

$$P_H = \frac{\rho_0^2 e_0 \mu (1 + \mu)}{[1 - (\lambda - 1)\mu]^2} \quad (2)$$

$$e_H = \frac{P_H \mu}{2\rho_0 (1 + \mu)}$$

式(2)为冲击波关系式, 式中  $\rho_0$  和  $c_0$  分别为材料初始密度和声速,  $\mu$  为材料的压缩比,  $\lambda$  为冲击 Hugoniot 参数。 $\lambda$  和  $c_0$  为常数, 由以下冲击波实验关系式确定

$$D = \lambda u + c_0 \quad (3)$$

式中,  $D$  为冲击波速度,  $u$  为波后质点速度。取  $\rho_0 = 0.998 \text{ g/cm}^3$ ,  $C_0 = 1.647 \times 10^3 \text{ m/s}$ ,  $\lambda = 1.921$ ,  $\Gamma = 0$ 。

### 1.4 航行体的材料状态方程及强度模型

头部和身部材料均采用 SHOCK 状态方程、Johnson-Cook 强度模型。为控制航行体重心位置, 头部采用 STEEL S-7, 身部采用 AL 7039, 两种材料的 SHOCK 状态方程参数如表 2 所示。

表2 身部材料的 SHOCK 状态方程参数

Tab. 2 SHOCK equation of state parameters of the aerial-aquatic vehicle body material

材料	$\rho_0/(\text{g/cm}^3)$	$c_0/(\text{m/s})$	$\Gamma$	$\lambda$
AL 7039	2.77	5328	2	1.3
STEEL S-7	7.75	4569	2.2	1.5

Johnson-Cook 屈服应力为

$$\sigma_y = [A + B \epsilon_p^n][1 + C \lg \dot{\epsilon}_p^*][1 - T_H^m] \quad (4)$$

式中,  $\sigma_y$  为材料屈服强度, 单位为 Pa;  $\epsilon$  为材料应变;  $\dot{\epsilon}$  为应变率, 单位为  $S^{-1}$ ;  $T$  为温度, 单位为 K;  $\epsilon_p$  为等效塑性应变; 参考应变率  $\dot{\epsilon}_p^* = 1S^{-1}$ ;  $A, B, n, C, m$  为材料常数,  $A$  为材料在准静态下的屈服强度,  $B$  为硬化常数,  $n$  为硬化指数,  $C$  为应变速率常数,  $m$  为温度软化系数。

两种材料的 Johnson-Cook 强度模型参数如表 3 所示。

表3 身部材料的 Johnson-Cook 强度模型参数

Tab. 3 Johnson-Cook strength model parameters for aerial-aquatic vehicle body materials

材料	剪切模量/ GPa	A/GPa	B/GPa	$n$	C
AL 7039	27.6	0.337	0.343	0.41	0.01
STEEL S-7	81.8	1.53	0.477	0.18	0.012

### 1.5 仿真方法验证

为了验证数值计算的可靠性, 对郭子涛<sup>[10]</sup>实验研究的平头圆柱垂直入水问题进行数值模拟计算, 实验采用的平头圆柱长为 25.4 mm, 直径 12.56 mm, 质量为 25.1 g, 初速度为 397 m/s。计算采用 AUTODYN 的欧拉-拉格朗日流固耦合算法, 身部采用 STEEL S-7 材料, 水采用 SHOCK 状态方程。对比实验结果与仿真结果入水后的侵彻位移和速度衰减随时间的变化, 如图 5 所示。可以看出, 仿真结果和实验结果吻合良好,

有效地验证了数值模拟的正确性。

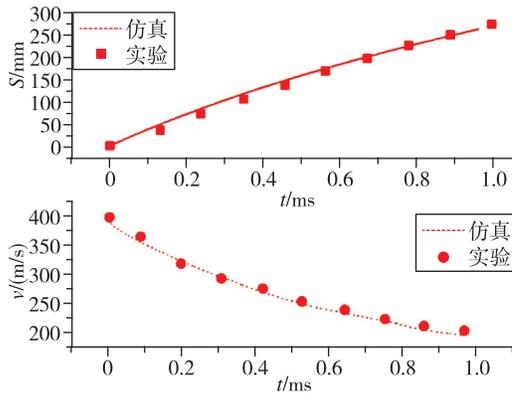


图 5 平头圆柱位移与速度变化曲线

Fig. 5 Displacement and velocity of the flat head cylinder

## 2 结果分析

对跨介质航行体在入水速度 100 m/s, 200 m/s 和 300 m/s, 入水角度为 9°, 12° 和 15° 情形下的运动过程和速度变化、出水角度进行了分析。

### 2.1 运动过程分析

图 6 为入水速度 300 m/s, 入水角度 15° 的航行体在三维空间的入水轨迹。图中显示入水空泡经历了入水撞击、空泡形成和开空泡阶段。航行体撞击水面时航行体上下表面与水的接触面积不同, 即沾湿面积不同。这使得航行体传递给流体质点的动能不一样, 形成不对称的空泡, 航行体下表面的空泡发展快于上表面, 进而产生流速差, 形成上升力使航行体向上偏转, 航行体由入水姿态转为出水姿态。同时可以看到, 航行体侧翼划水产生的小空泡, 侧翼处产生额外的升力使航行体保持平衡, 防止在铅锤方向发生偏转。

图 7 为入水速度 300 m/s, 入水角度 9° 的航行

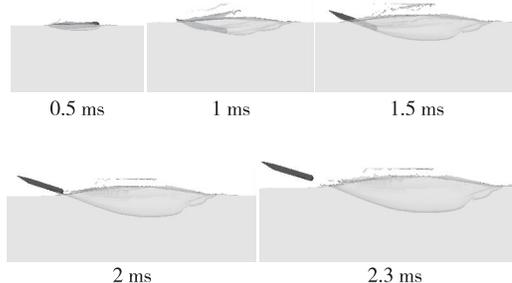


图 6 入水速度 300 m/s, 入水角度 15° 航行体三维空间入水轨迹

Fig. 6 Trajectory of the aerial-aquatic vehicle with water entry speed of 300 m/s and angle of 15°

体在三维空间的入水轨迹, 对比入水速度为 300 m/s 时, 入水角 9° 和 15° 的空泡图。随着航行体入水角减小, 在入水时航行体下表面沾湿面积增大, 同时上表面沾湿面积减小。在相同入水速度下, 小角度入水的航行体下表面传递给流体质点的动能更大, 因此航行体获得的升力更大, 更早转变为出水姿态。

图 8 为入水速度 100 m/s, 入水角度 15° 的航行体在三维空间的入水轨迹。对比入水角 15°, 入水速度为 100 m/s 和 300 m/s 时的空泡图。随着速度增大, 航行体传递给流体质点的动能更大, 因此空泡发展更快, 速度差产生的升力同样增大。但由于初始速度较大, 入水速度 300 m/s 的航行体转变为出水姿态所需时间仍长于入水速度 100 m/s 的航行体, 同时受到的水阻力也更大。

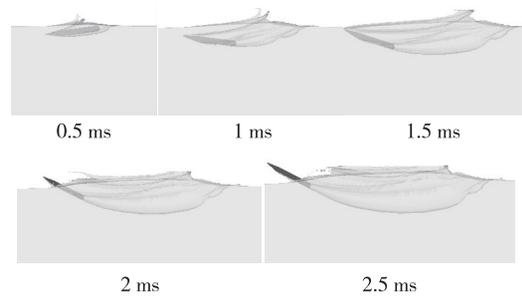


图 7 水速度 300 m/s, 入水角度 9° 航行体三维空间入水轨迹  
Fig. 7 Trajectory of the aerial-aquatic vehicle with water entry speed of 300 m/s and angle of 9°

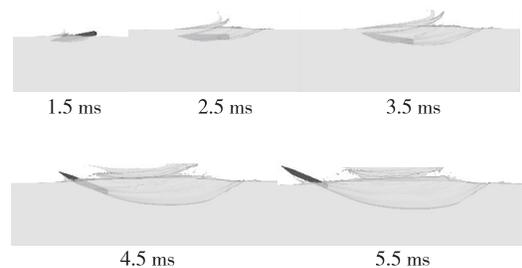


图 8 水速度 100 m/s, 入水角度 15° 跨介质航行体三维空间入水轨迹

Fig. 8 Trajectory of the aerial-aquatic vehicle with water entry speed of 10 m/s and angle of 15°

将 9 种工况下航行体从入水到偏转出水的运动轨迹进行对比, 如图 9 所示。可以看出, 航行体轨迹在入水后先近似保持直线, 之后逐渐向上偏转。在相同入水速度下, 随着入水角度增大入水深度增加, 航行体的偏转程度加剧。在相同入水角度下, 随着入水速度增加, 入水深度同样加深。在

入水角为  $9^\circ$  时，入水速度对入水弹道的影响较为明显。而在入水角为  $12^\circ$  和  $15^\circ$  时，航行体速度超过 200 m/s 后的弹道近似，速度对弹道的影响减弱。9 种工况的具体入水深度及出水水平距离如表 4 所示。

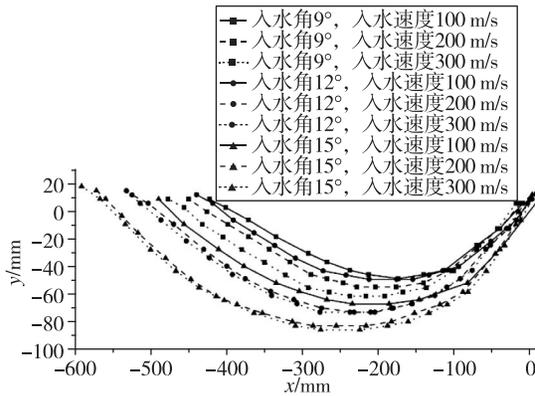


图 9 9 种工况航行体的入水轨迹

Fig. 9 Trajectories of aerial-aquatic vehicle in nine working conditions

表 4 航行体入水深度及出水距离

Tab. 4 The depth and distance of the aerial-aquatic vehicle after left water

入水角/ $^\circ$	入水速度/ (m/s)	入水深度/mm	出水水平 距离/mm
9	100	48.3	413.1
	200	54.3	437.5
	300	60.9	458.7
12	100	48.7	436.4
	200	72.4	526.4
	300	72.5	531.9
15	100	63.4	500.3
	200	82.2	574.2
	300	85.3	596.9

2.2 速度分析

在仿真模型中，航行体在入水前垂直于水面的速度如图 10 所示，分量指向 Z 轴负向，整个入水阶段头部与尾部垂直于水面的速度分量都为负值。当两者数值都转化为正值，说明航行体开始进入出水阶段。以头部与尾部垂直于水面的速度分量转化为正值的时刻为出水阶段开始时刻。

航行体出水阶段开始时刻、出水时刻如表 5 所示。对比表中数据，入水角度增大会使航行体出水时间变长。在相同的入水角度下，出水时间随

着入水速度加快而缩短。

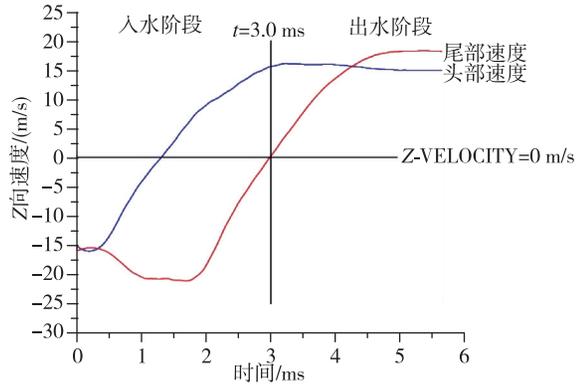


图 10 入水角度  $9^\circ$ ，入水速度 100 m/s 的航行体 Z 方向速度分量

Fig. 10 Z-direction velocity component of the vehicle with a water entry angle of  $9^\circ$  and a water entry velocity of 100 m/s

表 5 航行体出水阶段开始时刻、出水时刻表

Tab. 5 The starting time of leaving water and the time of left water

入水角/ $^\circ$	入水速度/ (m/s)	出水阶段开始时刻/ms	出水时刻/ms
9	100	3.0	5.6
	200	1.6	2.8
	300	1.1	2.1
12	100	3.3	6.1
	200	1.8	3.5
	300	1.2	2.2
15	100	3.6	6.4
	200	1.9	4.1
	300	1.3	2.3

观察速度曲线（图 11~14）可以发现，航行体入水后，由于水阻力的影响，在入水阶段动能不断降低，速度下降。在出水阶段初期速度仍然有所下降，之后速度相对稳定。进一步对比不同入水速度的变化曲线，入水速度增大，航行体入水的深度增大，水下运动距离增长，且随着速度增大，阻力增大，阻力与运动方向相反，动能损失与速度损失的增大。

通过对比相同速度下不同入水角度的速度变化曲线，结合弹道图对比可以发现，随着入水角度增大，航行体入水的深度增大，动能损失与速度损失随之增加。具体速度损失量如表 6 所示，分析发现，入水速度对速度损失的影响强于入水角的影响。

表 6 航行体出水速度

Tab. 6 Velocity difference of the aerial-aquatic vehicle in nine working conditions

入水角/(°)	入水速度/(m/s)	出水速度/(m/s)	出入水速差值/(m/s)	速度损失比例/%
	100	90.9	9.1	9.1
9	200	180.0	20.0	10.0
	300	268.8	31.2	10.4
12	100	86.7	13.3	13.3
	200	172.3	27.7	13.9
15	100	82.7	17.3	17.3
	200	163.7	36.3	18.2
	300	243.7	56.3	18.8

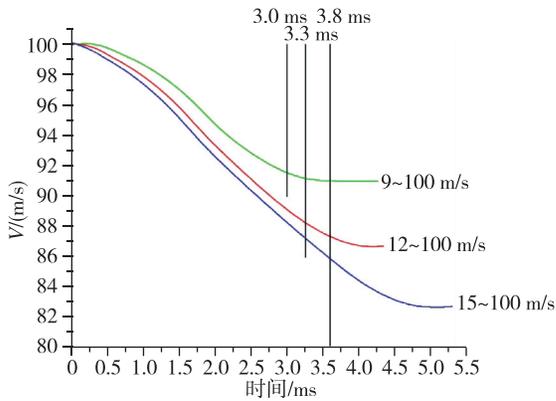


图 11 入水速度 100 m/s 的航行体速度曲线

Fig. 11 The velocity of the aerial-aquatic vehicle at a water entry velocity of 100 m/s

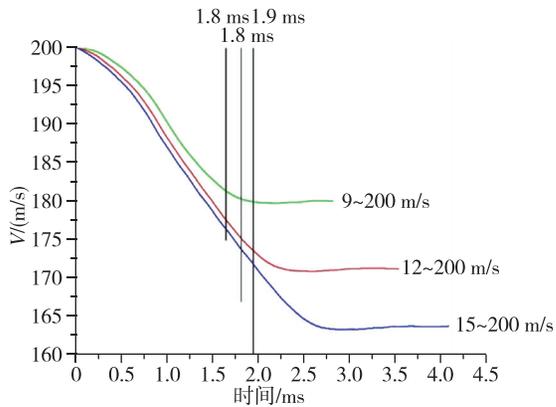


图 12 入水速度 200 m/s 的航行体速度曲线

Fig. 12 The velocity of the aerial-aquatic vehicle at a water entry velocity of 200 m/s

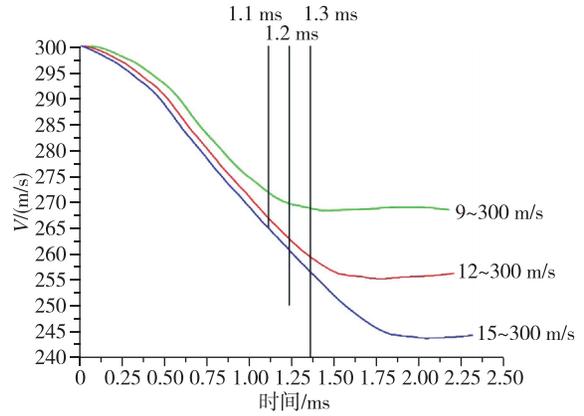


图 13 入水速度 300 m/s 的航行体速度曲线

Fig. 13 The velocity of the aerial-aquatic vehicle at a water entry velocity of 300 m/s

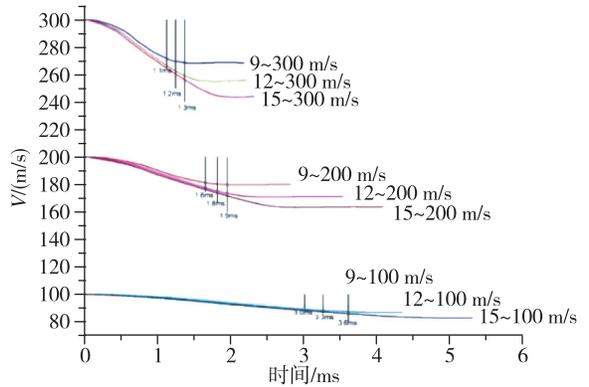


图 14 9 种工况速度曲线

Fig. 14 The velocity of aerial-aquatic vehicle in nine working conditions

### 2.3 出水角分析

航行体的俯仰角随时间变化曲线如图 15~20

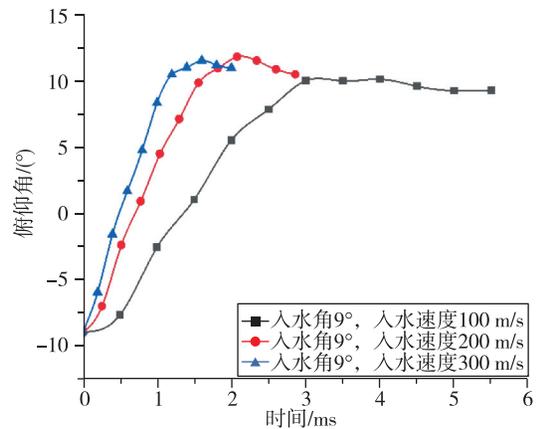


图 15 入水角 9° 航行体俯仰角随时间变化曲线

Fig. 15 The pitch angle curve of the aerial-aquatic vehicle at a water entry angle of 9°

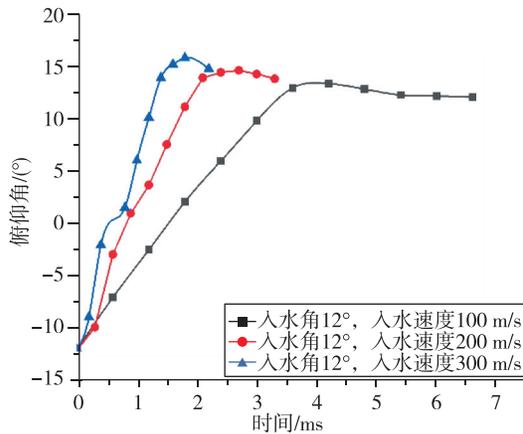
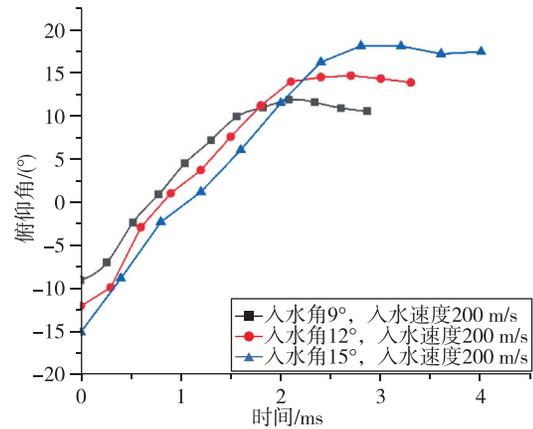
图 16 入水角  $12^\circ$  航行体俯仰角随时间变化曲线Fig. 16 The pitch angle curve of the aerial-aquatic vehicle at a water entry angle of  $12^\circ$ 

图 19 入水速度 200 m/s 航行体俯仰角随时间变化曲线

Fig. 19 The pitch angle curve of the aerial-aquatic vehicle at a water entry velocity of 200 m/s

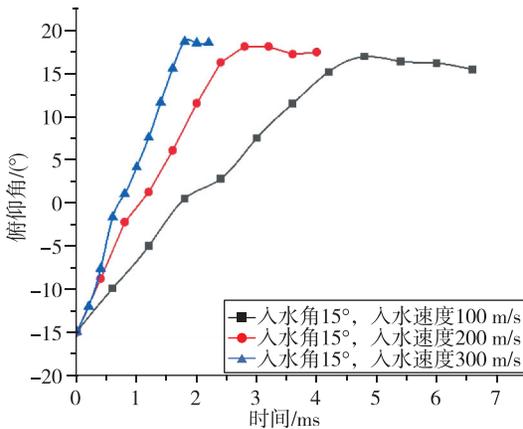
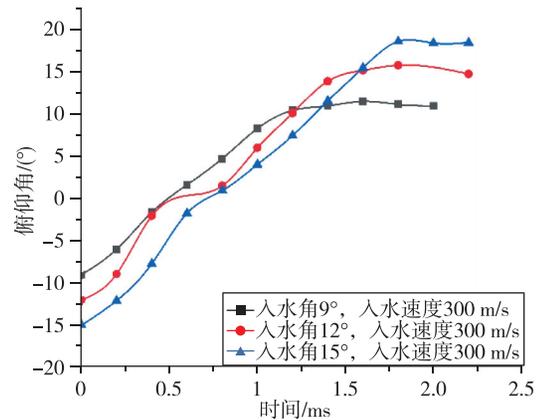
图 17 入水角  $15^\circ$  航行体俯仰角随时间变化曲线Fig. 17 The pitch angle curve of the aerial-aquatic vehicle at a water entry angle of  $15^\circ$ 

图 20 入水速度 300 m/s 航行体俯仰角随时间变化曲线

Fig. 20 The pitch angle curve of the aerial-aquatic vehicle at a water entry velocity of 300 m/s

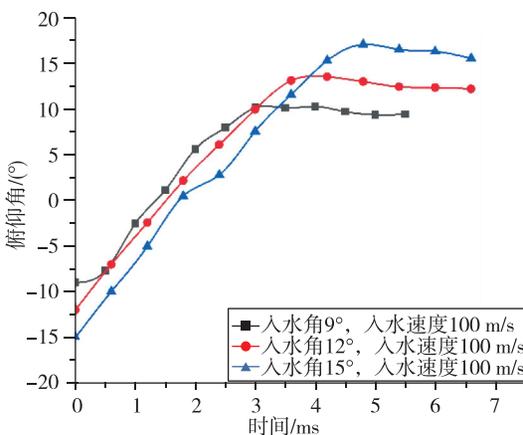


图 18 入水速度 100 m/s 航行体俯仰角随时间变化曲线

Fig. 18 The pitch angle curve of the aerial-aquatic vehicle at a water entry velocity of 100 m/s

所示。在撞击水面前，航行体的俯仰角近似不变，之后俯仰角逐渐减小，在航行体下表面沾湿后，俯仰角的变化加快，到最后俯仰角由正变负，说明航行体此时已经发生抬头弹跳。

航行体出水角度如表 7 所示。由表 7 做不同入水速度及不同入水角对应的出水角曲线如图 21, 22 所示。在同一入水速度下，随着入水角增大垂直于水面方向的速度分量增大，同时航行体由上下表面流速差获得的升力减小，使得航行体入水深度加深，入水阶段所需时间更长，航行体平行于水面方向的速度损失随着入水角增加而增大。进而导致出水角随入水角增大而增大，即入水速度一定时，入水角增加，航行体入水后的向上偏转趋势增加。

表 7 航行体出水角度表  
Tab. 7 Water outlet angle

入水角/(°)	入水速度/(m/s)	出水角度/(°)	出入水角度差值/(°)
9	100	9.26	0.26
	200	10.50	1.50
	300	11.24	2.24
12	100	12.28	0.28
	200	13.84	1.84
	300	14.56	2.56
15	100	15.38	0.38
	200	17.72	2.72
	300	18.71	3.71

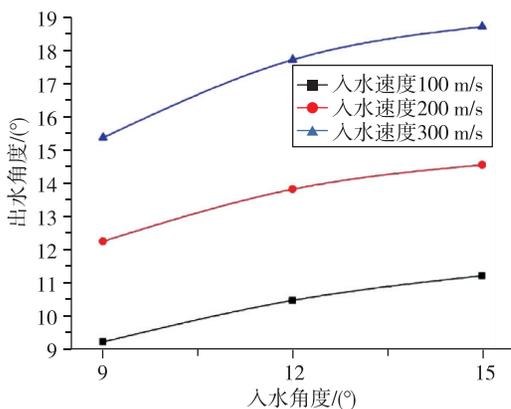


图 21 不同入水速度航行体出水角曲线

Fig. 21 Curve of outlet water angle of aerial-aquatic vehicle with different water entry speed

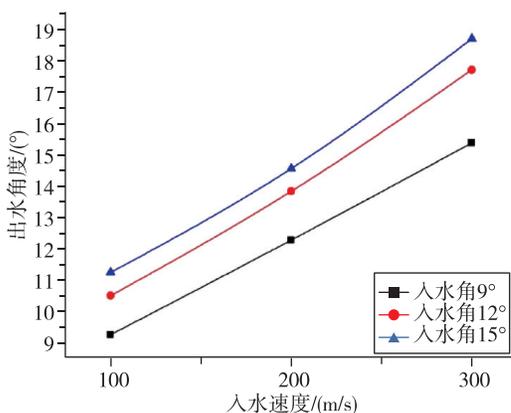


图 22 不同入水角度航行体出水角曲线

Fig. 22 Curve of outlet water angle of aerial-aquatic vehicle with different water entry angle

在同一入水角度下，随着入水速度增大垂直于水面方向的速度分量增大，航行体入水深度加深，入水阶段所需时间更长，航行体平行于水面

方向的速度损失随着入水速度增加而增大，进而导致出水角随入水速度增大而增大，即入水角一定时，入水速度增加，航行体入水后的向上偏转趋势增加。

### 3 结论

本次仿真初步验证了跨介质航行体功能实现的可行性，同时分析了入水角度与入水速度的航行体运动过程中速度变化及出水时速度与角度的影响。

1) 航行体入水撞击水面时，上下表面与水的接触面积不同，这使得航行体上下表面传递给流体质点的动能不同，形成不对称的空泡，航行体下表面的空泡发展快于上表面，进而产生流速差形成上升力使航行体向上偏转，航行体由入水姿态转为出水姿态。

2) 在同一入水速度下，随着入水角度的增加，航行体下表面与水接触面积减小，上表面与水接触面积增大。在相同入水速度下，小角度入水的航行体下表面传递给流体质点的动能更大，因此航行体获得的升力更大，更早转变为出水姿态。同时由于受水阻力影响，时间也随着入水角度增加而加长，导致动能与速度的损失增大。

3) 在同一入水角度下，随着入水速度的增加，航行体传递给流体质点的动能更大，因此空泡发展更快，速度差产生的升力同样增大。但由于初始入水速度高，航行体入水深度加深，入水阶段所需时间更长，受水阻力影响的时间也随着入水角度增加而加长，导致动能与速度的损失增大。

4) 入水角与入水速度的增加都会增加航行体入水后的向上偏转趋势以及最终出水的出水角，而其中入水速度对出水角的影响更为明显。

### 参考文献

[1] 顾建农, 张志宏, 郑学龄, 等. 弹体入水弹道研究综述 [J]. 海军工程大学学报, 2000(1): 18-23.

[2] Logvinovich G V. Hydrodynamics of flows with free boundaries [M]. Kiev: Naukova Dumka, 1969.

[3] 肖海燕, 罗松, 朱珠, 等. 高速射弹小角度入水弹道特性研究 [J]. 北京理工大学学报, 2019, 39(8): 784-791.

[4] 朱珠, 袁绪龙, 王亚东. 推力对高速入水流场特性影响 [J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2014, 15(1): 10-14.

- [5] 宋武超,王聪,魏英杰,等.回转体倾斜入水空泡及弹道特性实验[J].北京航空航天大学学报,2016,42(11):2386-2394.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 马庆鹏.高速射弹入水过程多相流场特性研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
- [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.
- [10] 郭子涛.弹体入水特性及不同介质中金属靶的抗侵彻性能研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.

引用格式:刘祥,李天雄,李林,等.入水参数对“水漂式”航行体跨介质运动影响数值仿真分析[J].宇航总体技术,2020,4(3):62-70.

Citation: Liu X, Li T X, Li L, et al. Analysis of influence of water entry parameters on cross-medium movement of “water drift” aerial-aquatic vehicle [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2020, 4(3): 62-70.