

# 浮力调节舱进水上浮仿真分析

吴琪, 康宝臣, 郭志军

(山西汾西重工有限责任公司, 山西 太原 030027)

**摘要** 浮力调节舱是一种用于将自身负浮力的水下产品调整为弱浮力或者零浮力的装置, 当水下产品与浮力调节舱分离后, 浮力调节舱上浮。为了避免浮力调节舱上浮出水暴露位置目标, 在浮力调节舱上设计有进水口。通过对浮力调节舱上浮进水和进水上浮的过程进行分析, 验证了上浮进水和进水上浮的边界条件, 为工程应用提供了一定的指导, 并在湖上进行了试验验证。

**关键词** 浮力调节; 进水; 仿真; 水下航行器

中图分类号 TN911

文献标识码 A

文章编号 2096-5753(2021)02-0133-06

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2021.02.010

## Analysis on Up-floating Simulation of Buoyancy-adjusting Cabin

WU Qi, KANG Baochen, GUO Zhijun

(Shanxi Fenxi Heavy Industry Co., Ltd., Taiyuan 030027, China)

**Abstract** Buoyancy-adjusting cabin is a device to adapt the underwater product with negative buoyancy to a state of low-buoyancy or zero-buoyancy. The cabin floats up after separating from the product. To avoid location exposure of the product when the cabin floats up to the surface, some water intakes are designed on the cabin. The processes of water inflow while floating up and floating up after water inflow of the cabin were analyzed to validate their boundary conditions, which can provide guidance for the engineering applications. The simulation results were verified through lake tests.

**Key words** buoyancy adjusting; water inflow; simulation; underwater vehicle

## 0 引言

随着无人化技术的发展, 采用水下航行器进行水下产品的远距离无人投送越来越受到国内外的重视。被投送产品由于其自身的重力大于浮力呈现负浮力状态, 为保障投送的长航时、长航程要求, 采用浮力调节舱进行调节以使得整个产品单元满足零浮力要求。当到达指定投放位置后, 浮力调节舱与被投送产品分离, 此时由于其自身存在较大的正浮力, 分离后浮力调节舱会上浮出水, 不利于产品的隐蔽性。因此在浮力调节舱结构上设计有进水口,

当分离后进水口打开, 浮力调节舱进水, 当重力大于浮力、浮力调节舱上浮速度降为零后, 整个浮力调节舱下潜沉底, 以避免浮力调节舱浮出水面<sup>[1]</sup>。

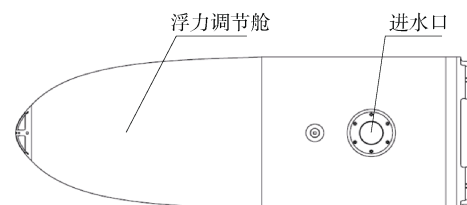


图1 浮力调节舱进水模型

Fig. 1 Model of buoyancy-adjusting cabin

吴晞<sup>[2]</sup>对船舶破损舱室的分类方法、破口的分类原则、进水时间计算、破口处压力计算等进行了论述和仿真模拟。徐邦祯<sup>[3-4]</sup>依据流体力学基本原理建立了船舶破舱瞬时进水速度及进水量的数学模型,对船舶在不同破损及装载条件进行了实际计算,得出了相应的破舱进水参数。郝英泽<sup>[5]</sup>和金涛<sup>[6]</sup>分别对潜艇破损进水的操纵性及进水模型进行了分析改进,对破损情况下如何快速实现操控进行了论述。

本文计算的上浮进水过程,其姿态、位置、速度等都会发生快速变化,与上述进水有所不同。在运输过程中,浮力调节舱呈水平状态;分离过程中,由于存在较大的推冲力和推冲力矩以及浮力调节舱自身的质浮心矩,浮力调节舱迅速旋转并呈竖直状态;分离结束后,浮力调节舱呈竖直状态,在正浮力作用下上浮,进水孔打开后边进水边上浮,当进水质量大于自身净浮力时,开始减速运动,速度减为零时,开始下沉至水底。因此为了保证浮力调节舱不出水,整个上浮过程浮力调节舱的位移不能大于分离时的水深。当进水口打开后,进水速度与水深和进水口大小有关,鉴于设计阶段进水口的尺寸已经确定,因此进水快慢只表现在水深方面。

## 1 运动分析

在分离过程中,由于存在较大推冲力矩,分离完成后浮力调节舱迅速旋转至竖直状态,这一阶段进水口也相应地打开,因此在分析时近似认为旋转阶段时间很短,不计入上浮过程。整个上浮过程就变为分析竖直状态的变加速运动。

### 1.1 受力分析

在浮力调节舱上浮的过程中,浮力调节舱受到以下作用力:自身的重力  $G$ , 自身的浮力  $f$ , 进水质量力  $m_s$ , 以及流体阻力  $f_z$ <sup>[7-8]</sup>。

运动学方程

$$\dot{x} = u \quad (1)$$

动力学方程

$$(m + m_{11})\dot{u} = F \quad (2)$$

$$F = f - m_s * g - G - f_z \quad (3)$$

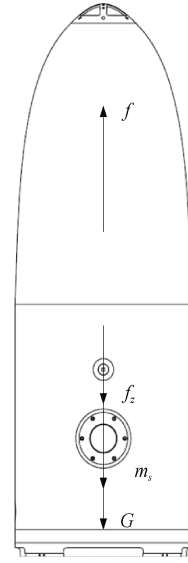


图2 浮力调节舱受力图

Fig. 2 Force diagram of buoyancy-adjusting cabin

$$f_z = X_u u = \frac{1}{2} \rho u^2 S C_s \quad (4)$$

$$\dot{m}_s = C_m \rho v S_1 \quad (5)$$

$$v = \sqrt{2g(-x)} \quad (6)$$

$$S = \pi D^2 / 4 \quad (7)$$

$$S_1 = \pi D_1^2 / 4 \quad (8)$$

式中:  $x$  为水深;  $u$  表示为垂向运动速度;  $m_{11}$  表示为附加质量;  $X_u$  为阻尼力系数;  $F$  为外力和;  $C_s$  为阻尼无因次系数;  $C_m$  为进水损失面积;  $\rho$  为水的密度;  $v$  为进水速度;  $S$  表示为特征湿表面积;  $S_1$  为进水口面积;  $D$  为浮力调节舱直径;  $D_1$  为进水口直径。

### 1.2 上浮进水仿真分析

某浮力调节舱系数如下:  $m=180$  kg;  $m_{11}=170$  kg;  $f=2\ 600$  N;  $C_s=0.4$ ;  $D=0.534$  m;  $D_1=0.08$  m;  $\rho=1\ 000$  kg/m<sup>3</sup>;  $C_m=0.6$ 。

分析不同初始水深条件下的上浮进水运动。

条件 1: 初始水深  $x_0=-0.8$  m。

由图 3-5 可知,浮力调节舱在水深 8 m 分离后, 3.3 s 上浮出水, 最大上浮速度 3.5 m/s, 进水质量约 25 kg, 进水质量小于正浮力, 此时呈正浮力状态加速上浮阶段。

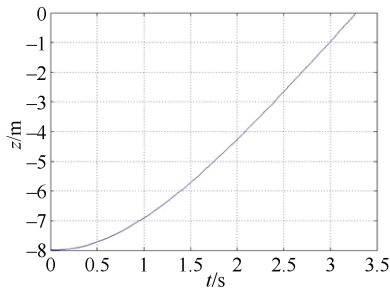


图 3 垂向轨迹曲线  
Fig. 3 Curve of vertical trajectory

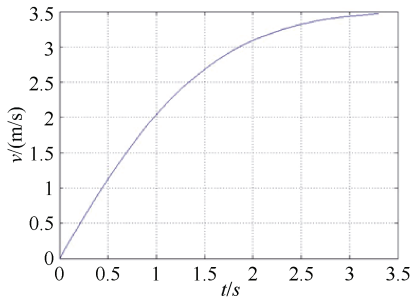


图 4 垂向速度曲线  
Fig. 4 Curve of vertical velocity

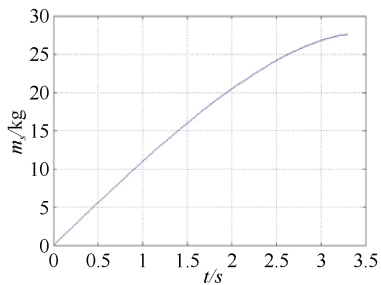


图 5 进水质量曲线  
Fig. 5 Curve of inflow water mass

条件 2: 初始水深  $x_0 = -12$  m。

由图 6-8 可知, 浮力调节舱在水深 12 m 分离后, 4.6 s 上浮出水, 最大上浮速度 3.2 m/s, 进水质量约 46 kg, 进水质量大于正浮力, 此时呈负浮力状态减速上浮阶段。

条件 3: 初始水深  $x_0 = -16$  m。

由图 9-11 可知, 浮力调节舱在水深 16 m 分离后, 6.4 s 上浮出水, 最大上浮速度 3.1 m/s, 进水质量约 70 kg, 进水质量大于正浮力, 此时呈负浮力状态减速上浮阶段。

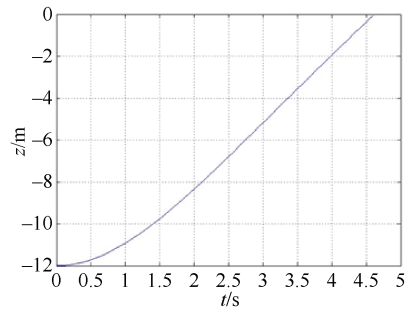


图 6 垂向轨迹曲线  
Fig. 6 Curve of vertical trajectory

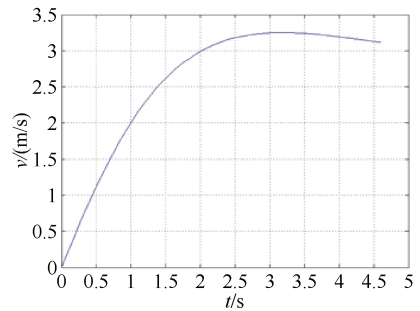


图 7 垂向速度曲线  
Fig. 7 Curve of vertical velocity

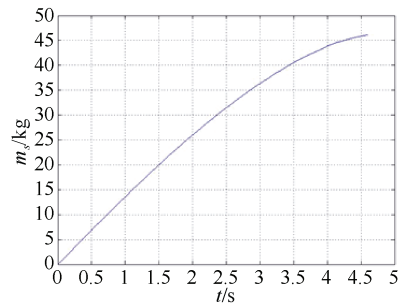


图 8 进水质量曲线  
Fig. 8 Curve of inflow water mass

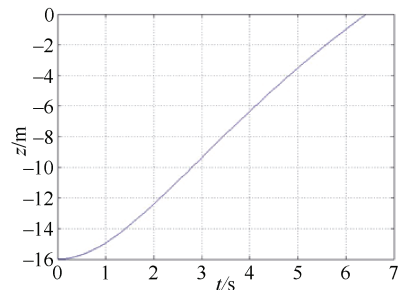


图 9 垂向轨迹曲线  
Fig. 9 Curve of vertical trajectory

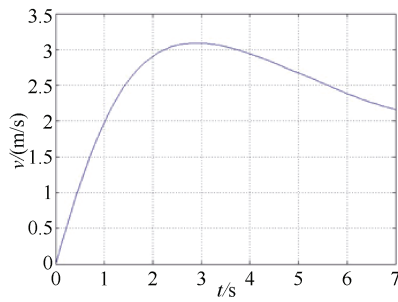


图 10 垂向速度曲线

Fig. 10 Curve of vertical velocity

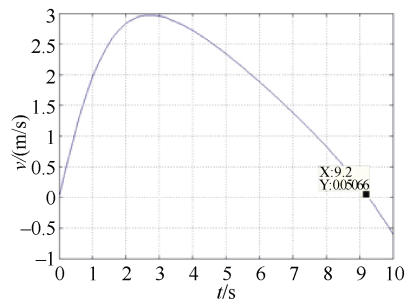


图 13 垂向速度曲线

Fig. 13 Curve of vertical velocity

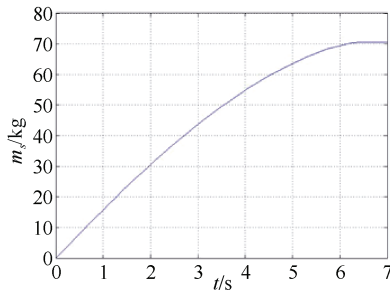


图 11 进水质量曲线

Fig. 11 Curve of inflow water mass

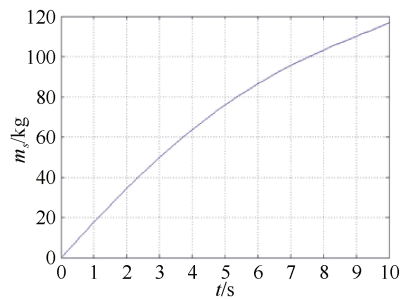


图 14 进水质量曲线

Fig. 14 Curve of inflow water mass

条件 4: 初始水深  $x_0 = -20$  m。

由图 12-14 可知, 浮力调节舱在水深 20 m 分离不会上浮出水, 9.2 s 时到达上浮最高点, 距离水面约 2.7 m, 最大上浮速度 3 m/s, 进水质量约 118 kg, 进水质量大于正浮力, 此时呈负浮力状态下沉阶段。

通过对不同水深条件下的浮力调节舱的上浮运动进行仿真分析, 结果可知在初始水深  $x_0 = -20$  m 时, 浮力调节舱进水上浮不能出水, 满足隐蔽性的要求。

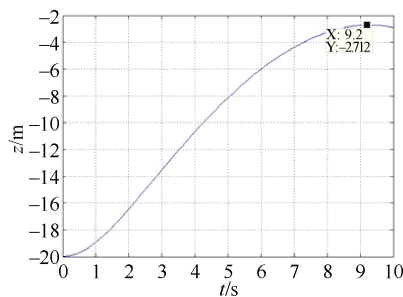


图 12 垂向轨迹曲线

Fig. 12 Curve of vertical trajectory

### 1.3 进水上浮仿真分析

在实际水下产品的运输投送过程中, 水下航行器有其预先设置的航行轨迹, 因此其航行水深是固定的。若水下航行器的航行水深大于 20 m, 则不必考虑浮力调节舱的上浮出水情况。在某些情况下, 水下航行器的航行水深小于 20 m, 这样就需要在分离前先进水若干秒, 之后再分离以保证浮力调节舱不会在分离后上浮出水。针对这一运动模型, 水深固定时打开进水口不同时间进水质量不同, 可以间接作用在动力学方程 (2) 中的初始质量  $m$  上, 相对进水质量有所减小。

已知水下航行器的航行水深为 16 m, 经过前文分析知, 需要先进水再分离才能保证浮力调节舱不会出水。

条件 1: 进水 1 s 后分离。

由图 15-17 可知, 浮力调节舱在进水 1 s 后分离, 7.9 s 后上浮出水, 最大上浮速度 2.7 m/s, 进水质量约 70 kg, 进水质量大于正浮力, 此时呈负浮力状态减速上浮阶段。

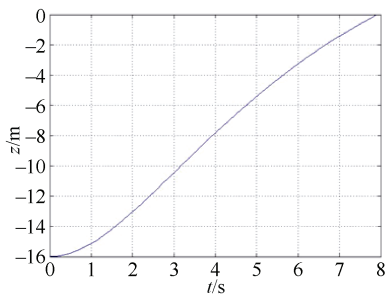


图 15 垂向轨迹曲线  
Fig. 15 Curve of vertical trajectory

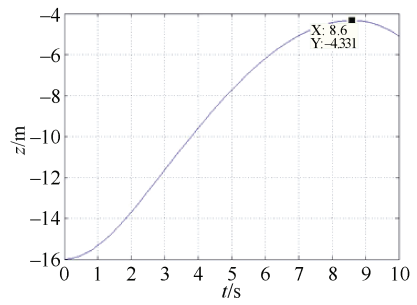


图 18 垂向轨迹曲线  
Fig. 18 Curve of vertical trajectory

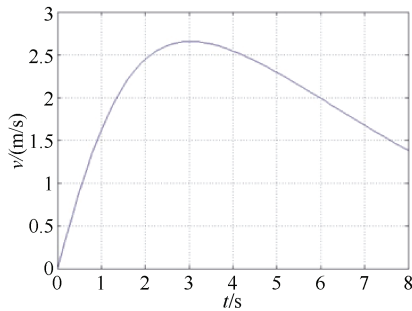


图 16 垂向速度曲线  
Fig. 16 Curve of vertical velocity

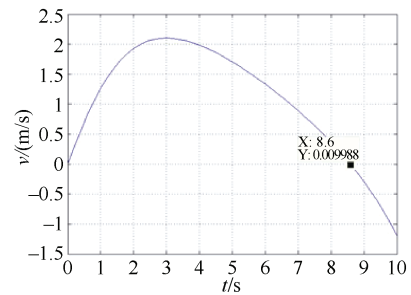


图 19 垂向速度曲线  
Fig. 19 Curve of vertical velocity

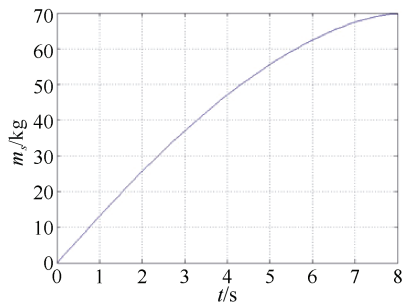


图 17 进水质量曲线  
Fig. 17 Curve of inflow water mass

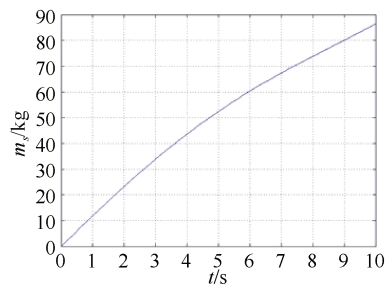


图 20 进水质量曲线  
Fig. 20 Curve of inflow water mass

条件 2: 进水 2 s 后分离。

由图 18-20 可知, 浮力调节舱在进水 2 s 后分离不会上浮出水, 8.6 s 到达上浮最高点, 距离水面约 4.3 m, 最大上浮速度 2.1 m/s, 进水质量约 86 kg, 进水质量大于正浮力, 此时处于负浮力状态下沉阶段。

通过对同一水深 (16 m) 不同进水条件下的浮力调节舱的上浮运动进行仿真分析, 结果可知在进水 2 s 后分离, 浮力调节舱不能出水, 满足隐蔽性的要求。

## 2 试验验证

基于上述仿真结果, 在湖上进行不同深度进水上浮测试, 将浮力调节舱与重块相连, 利用绞车定深放索, 使得舱体在水下一定深度, 给出动作信号后, 依次上浮进水或者进水上浮。为使得上浮过程与实际使用工况尽可能的一致, 将舱体与重块水平放置, 甩出动作信号电缆至母船, 根据时序给出动作信号。上浮验证结构如图 21。

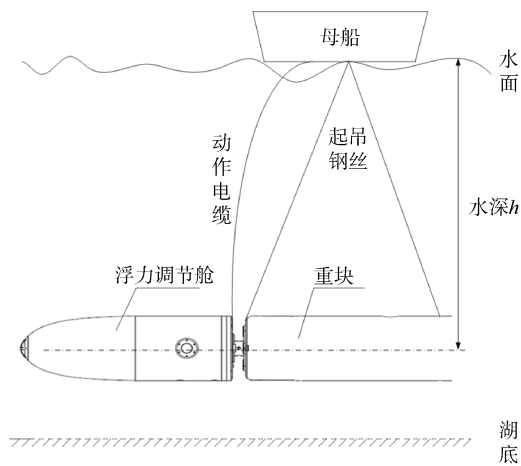


图 21 湖上验证示意图

Fig. 21 Schematic diagram of lake test

试验结果见表 1。

表 1 不同水深进水时间  
Table 1 Time of water inflow at different depths

水深 $h/m$	进水时间 $t/s$
8	8
12	5
16	2

参照 1.3 节 16 m 水深条件下的进水后上浮结果, 可知仿真计算结果与湖上试验结果相一致, 需先打开进水口, 进水 2 s 后再进行分离, 浮力调节舱不会上浮出水。

从结果可知, 随着水深增大, 所需进水时间减小, 主要原因是随着水深增大上浮距离增加, 且进水速率增大, 整个运动过程所需时间加长, 有足够的时间、空间裕度来完成速度降为零的要求, 从而保证舱体不会浮出水面。对于不同航行深度, 可根据水深来设定进水时间以保证不出水的要求, 从而避免进水时间过长使得整个产品的纵倾姿态角过大, 影响后续动作过程。

### 3 结束语

本文通过对浮力调节舱的运动过程进行分析得到了受力模型及运动方程, 对不同水深条件下的上浮进水过程进行了仿真分析, 从结果可知: 1) 水下航行器航行深度大于 20 m 可保证浮力调节舱上浮进水后不会出水; 2) 随着水深的增加, 进水速率亦增加; 3) 上浮最大速度在 2~3 s 之间达到最大。通过对典型航行水深 16 m 工况进行了分析计算, 从结果可知: 进水 2 s, 进水质量约 31 kg, 8.6 s 到达上浮最高点, 距离水面约 4.3 m, 此时浮力调节舱不会出水, 满足布放要求, 湖上试验验证了仿真结果的有效性。

通过湖上试验摸底, 得到了不同深度进水后分离上的试验数据, 可根据实际航行深度来确定进水时间, 以得到更加合理的动作时机和纵倾角度。

### 参考文献

- [1] 侯二虎, 张宇文, 蔡帆, 等. 潜射运载器尾部分离体水下运动仿真[J]. 计算机仿真, 2012, 29(8): 31-34.
- [2] 吴晞, 韩晓光, 李宇辰, 等. 舰船损管模拟训练系统中破损进水过程仿真[J]. 广州航海学院学报, 2013(4): 15-18.
- [3] 徐邦祯, 杜嘉立, 田佰军. 船舶破舱进水及其影响因素[J]. 大连海事大学学报, 2004(1): 52-54.
- [4] 杜嘉立, 徐邦祯, 沈江. 船舶破舱进水速度与时间的计算[J]. 大连海事大学学报, 2002(2): 22-24.
- [5] 郝英泽, 胡坤, 何斌. 潜艇水下破损进水应急操纵模型[J]. 四川兵工学报, 2011: 32(4): 4-6.
- [6] 金涛, 杨枫. 大攻角情况下破损进水潜艇水下机动性[J]. 华中科技大学学报, 2008, 36(12): 79-82.
- [7] 李晔. 微小型水下机器人运动控制技术[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007.
- [8] 余湖清. 水雷总体技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.

(责任编辑: 张曼莉)