

【引用格式】赵冉, 叶枫桦, 张履霞. 水下航行器无动力悬停仿真研究[J]. 数字海洋与水下攻防, 2025, 8(1): 88-94.

水下航行器无动力悬停仿真研究

赵冉^{1,2}, 叶枫桦^{1,2}, 张履霞^{1,2}

(1. 清江创新中心, 湖北 武汉 430200;
2. 中国船舶集团有限公司第七一〇研究所, 湖北 宜昌 443003)

摘要 水下航行器 (Unmanned Underwater Vehicle, UUV) 在海洋战略中的作用越来越显著, 但是现有 UUV 普遍存在工作时间短、续航里程小的问题, 续航能力是 UUV 的主要短板之一。为研究 UUV 在水下停机后无动力悬停待命以提高续航力的可行性, 通过建立 UUV 空间运动模型、海水密度模型、UUV 密封舱压缩模型、浮力材料压缩吸水模型, 对 UUV 在水下将关键执行机构停机后的自由运动状态进行数值仿真。结果显示: UUV 在海水密度呈正梯度变化的情况下可实现无控条件水下悬浮。

关键词 水下航行器; 悬停; 仿真

中图分类号 U664.82

文献标识码 A

文章编号 2096-5753(2025)01-0088-07

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2025.01.012

Simulation Research of Unpowered Hover of Unmanned Underwater Vehicles

ZHAO Ran^{1,2}, YE Fenghua^{1,2}, ZHANG Lyuxia^{1,2}

(1. Qingjiang Innovation Center, CSSC, Wuhan 430200, China;
2. No. 710 R&D Institute, CSSC, Yichang 443003, China)

Abstract The role of unmanned underwater vehicles (UUVs) in marine strategy is becoming more and more significant, but the existing UUVs generally have the problems of short working time and short endurance, among which, the endurance is one of the main shortcomings of UUVs. In order to study the possibility of UUV suspended without power after underwater shutdown to improve endurance, UUV space motion model, sea water density model, UUV capsule compression model, buoyancy material compression and water absorption model are established to conduct numerical simulation of the free motion state of UUVs after shutting down the key actuator underwater. The results show that UUVs can realize underwater unpowered suspension under the condition of positive gradient change of seawater density.

Key words unmanned underwater vehicle; hover; simulation

0 引言

悬停是指水下航行器在水下停车后不依靠执行机构控制深度和姿态的过程, 也称为悬浮, UUV

在该状态下只受自身衡重和外界环境影响。UUV 水下悬停可降低执行机构的能源消耗, 提升续航力^[1]; 同时也有降低辐射噪声、提高隐蔽性、提高声呐探测范围的作用^[2]。潜艇的水下悬停技术研究

收稿日期: 2024-11-15

作者简介: 赵冉 (1985-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事 UUV 系统建模与仿真研究。

较为成熟, 操艇控制系统一般都装有均衡水舱用于平衡重力和浮力, 实现水下悬停^[3-4]; 但是 UUV 由于排水量远小于潜艇, 其耐压舱在全排水量中的占比也低于潜艇, 其水下悬停可行性和策略需要进一步研究。

UUV 悬停的实现方式主要有以下几种: 1) 用仿生扑翼悬停; 2) 基于垂向辅推实现悬停; 3) 类似潜艇, 安装浮力均衡装置依靠重力、浮力平衡实现悬停^[5]。仿生扑翼悬停需要对外形进行特殊设计; 基于辅推和浮力均衡装置进行都需要实时测量海水温、盐、深数据^[6], 并持续施加动力以控制深度^[7]。如果能实现 UUV 在无动力条件下的悬停, 将大大降低 UUV 工作能耗, 提升 UUV 的续航力和作战效能。

本文通过建立 UUV 运动模型、海水密度模型、UUV 体积压缩模型、浮力材料重力变化及体积压缩模型, 对 UUV 无动力状态下的悬停过程进行了仿真研究, 并对主要影响因素进行了分析。

1 环境及 UUV 重力浮力模型

1.1 海水密度模型

不同海区, 海水水平和垂直密度分布的特点不一样, 同一海区在不同的季节密度变化规律也会不同, 但是海水密度在深度方向上的变化主要呈正梯度变化、均匀变化、负梯度变化及跃变变化^[8]。从全球范围来看, 大部分海域在深度方向上海水密度呈正梯度变化^[9-10], 因此, 本文采用国际热盐方程 (TEOS-10) 计算海水密度, 如下式所示^[11-12]:

$$\rho(S, T, P) = \rho_0 [1 - \alpha(T - T_0) + \beta(S - S_0) + \gamma(P - P_0)] \quad (1)$$

式中: $\rho(S, T, P)$ 为海水在盐度 S 、温度 T 、压强 P 状态下的密度; ρ_0 、 T_0 、 S_0 、 P_0 分别为参考密度、参考温度、参考盐度、参考压力; α 、 β 、 γ 分别为温度、盐度、压力系数。

选择某海域, 在 Python 中调用 teospy 库直接计算得到不同深度的海水密度填入表 1。在模型中建立数据表, 输入深度, 查表获得对应密度值。

表 1 密度随深度变化值
Table 1 Density change with depth

深度/m	密度/(kg/m ³)
0	1 017.2
200	1 024.5
250	1 025.9
300	1 026.6
500	1 031.9
1 000	1 035.5

1.2 密封舱体积变化模型

一般用经验公式计算潜艇的艇体压缩量^[13-14], 但是不同类型的 UUV 由于形状、大小、功能不同, 其密封舱设计无法简化为计算公式。在本文中采用 CFD 方法分别计算 UUV 密封舱在不同深度下的压缩量, 从而拟合出 UUV 排水体积随深度变化的关系。

以最大工作深度处外压的 120% 耐压强度仿真结果进行浮力损失计算, 载荷舱主耐压壳体的位移云图如图 1 所示, 根据端面位移、端盖中心位移、端盖中心凹陷值等量计算耐压舱长度及横截面积变化值, 从而估算出该耐压舱体积压缩量。

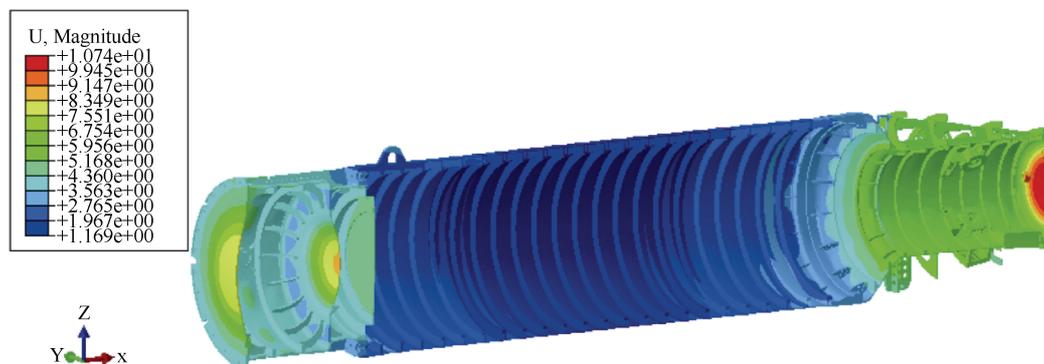


图 1 耐压舱受外压后变形情况云图

Fig. 1 Cloud image of deformation of ballast tank under external pressure

计算方法如下：

耐压舱的体积变化由轴向缩短和径向缩短 2 部分组成，假设耐压舱均为圆柱体，则轴向、径向长度缩短引起的体积变化公式如下：

$$\begin{aligned} \Delta V_L &= \Delta L \times A \\ \Delta V_A &= L \times 2\pi R \times \Delta R \\ \Delta V &= \Delta V_A + \Delta V_L \end{aligned} \quad (2)$$

式中： ΔV_L 为轴向体积变化量； ΔV_A 为径向体积变化量； ΔV 为耐压舱体积变化值； L 为轴向长度； ΔL 为轴向长度缩短量； A 为横截面积； R 为直径； ΔR 为径向长度缩短量。用相同的方法计算其它耐压舱体积变化值，得到最大工作深度外压 120% 的压缩总体积。

从计算过程可以发现长度缩短量 ΔL 和直径缩短量 ΔR 是结构变形，其与外载荷（压力）呈线性关系。由上面 ΔV_L 和 ΔV_A 的计算公式可以看出其与 ΔL 和 ΔR 是线性的，因此，总体积变化量 ΔV 与外载荷（压力）呈线性。

根据不同耐压舱数值计算结果计算 UUV 最大工作深度外压 120% 的压缩总体积列入表 2，记为 ΔV 。

表 2 耐压舱最大工作深度的排水量损失

Table 2 Displacement loss at maximum working depth of ballast tank

密封舱	长度缩短引起的体 积变化/L	直径缩短引起的体 积变化/L	排水量损失/L
密封舱 1	0.25	0.23	0.48
密封舱 2	2.41	7.93	10.34
密封舱 3	0.02	0.09	0.11
密封舱 4	0.04	0.23	0.27
密封舱 5	0.05	0.35	0.40
合计	2.77	8.83	11.6

1.3 浮力材料模型

根据阿基米德原理，浮力材料浮力计算公式为

$$F_{\text{浮}} = \rho \cdot g \cdot V_{\text{浮}} \quad (3)$$

浮力材料在水压作用下体积被压缩，设浮力材料体积弹性模量为 K ，海水压强为 P ，浮力块体积缩小值为

$$\Delta V_{\text{浮}} = \frac{P}{K_{\text{浮}}} \quad (4)$$

浮力材料在海水压强作用下会吸收水分，增加浮力材料的重量，公式如下：

$$\Delta G_{\text{浮}} = V_0 \cdot \rho \cdot \eta \cdot g \quad (5)$$

浮力材料的浮力损失

$$\begin{aligned} \Delta F_{\text{浮}} &= \rho \cdot g \cdot \Delta V_{\text{浮}} + \Delta G_{\text{浮}} = \\ &= \rho \cdot g \cdot \Delta V_{\text{浮}} + V_0 \cdot \rho \cdot \eta \cdot g \end{aligned} \quad (6)$$

式中： $\Delta G_{\text{浮}}$ 为浮力材料吸水增加的重力； V_0 为浮力材料初始体积； ρ 为海水密度； η 为浮力材料吸水率； g 为重力加速度。浮力材料吸水率 η 与压强、水下工作时间相关，具体参数需要根据实测数据得到。

本文选用的浮力材料体积按 0.4 m³ 计算，吸水率取最大值 $\eta=0.5\%$ ， ρ 见前文表 1 所示，各参数带入式（6）即可估算出不同深度下浮力材料的浮力损失情况，如表 3 所示，记为 $\Delta F_{\text{浮}}$ 。

表 3 浮力材料在不同深度的浮力损失值

Table 3 Buoyancy loss value of buoyancy material at different depths

深度 /m	浮力材料体积 收缩率/%	水的密度 增加率/%	浮力损失 /N
50	0.033	0.023	0.41
100	0.067	0.045	0.81
200	0.133	0.091	1.62
300	0.200	0.137	2.43
400	0.267	0.182	3.24
500	0.334	0.227	4.04

从表 3 可以看出，浮力材料的浮力损失量较小，粗略计算时可忽略。

2 UUV 悬停仿真方法

2.1 UUV 空间运动模型

水下空间运动数学模型分为动力学模型和运动学模型 2 大部分，其中动力学模型是基于空间刚体运动动量定理和动量矩定理得到，而运动学模型根据水下航行器的速度、角速度和初始值计算 UUV 姿态、速度、位置^[14]，建模原理框图见图 2。

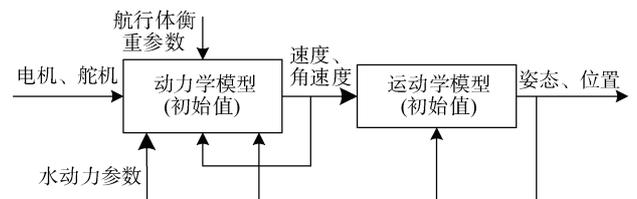


图 2 UUV 空间运动建模原理框图

Fig. 2 UUV space motion modeling principle block diagram

航行体动力学方程由动量和动量矩定理建立^[15-16], 表示为

$$\begin{cases} \frac{dQ}{dt} + \omega \times Q = F \\ \frac{dK}{dt} + \omega \times K + v_o \times Q = M \end{cases} \quad (7)$$

其中:

$$Q = m \cdot v_c \quad (8)$$

$$K = J_0 \cdot \omega + r_c \times m \cdot v_o \quad (9)$$

式中: F 、 M 分别为载体所受力、力矩; Q 、 K 分别为动量、动量矩; m 、 J_0 、 r_c 分别为质量、质心至浮心的矢径、转动惯量矩阵; v_c 、 v_o 分别为质心处的速度矢量、浮心处速度矢量。

根据动量定理和动量矩定理, 得到水下航行器动力学模型的一般表达式简化形式^[17]。

$$\begin{cases} \frac{dQ}{dt} + \omega \times Q = \begin{cases} \Delta G_x + T + R_x \\ \Delta G_y + T + R_y \\ \Delta G_z + R_z \end{cases} \\ \frac{dK}{dt} + \omega \times K + v_o \times Q = \begin{cases} M_{Gx} + M_{Rx} \\ M_{Gy} + M_{Ry} \\ M_{Gz} + M_{Rz} \end{cases} \end{cases} \quad (10)$$

式中: ΔG 、 T 、 R 分别为重浮力差、推力、流体动力; M_G 、 M_R 分别为重力矩、流体动力矩; x 、 y 、 z 代表力和力矩在 3 个坐标轴上的投影。

根据动力学模型解算出 UUV 的速度和角速度, 再根据运动学模型结合初始值即可解算 UUV 的姿态角和空间位置。

2.2 UUV 重力浮力处理方法

UUV 分为密封部分和透水部分, 其中密封部分的重量不随密度变化, 但是其体积随深度变化存在排水量损失, 其浮力同时受密度变化和排水量变化影响^[18]。假设 UUV 深度增加后外轮廓不发生变化, 则总排水体积不变, 全排状态浮力仅受密度变化影响。

UUV 重力、浮力计算公式分别如下:

$$G = [m_1 + (V_2 + \Delta V) \cdot \rho] \cdot g + \Delta F_{\text{浮}} \quad (11)$$

$$B = V \cdot \rho \cdot g \quad (12)$$

密封舱的重力、浮力计算公式分别为

$$G_1 = m_1 \cdot g \quad (13)$$

$$B_1 = (V_1 - \Delta V) \cdot \rho \cdot g \quad (14)$$

式中: m_1 为密封部分重量; ρ 随深度变化; V 为总

排水量; V_1 、 V_2 分别为密封舱、透水部分排水量; ΔV 为密封舱排水量变化值 (见表 2); $\Delta F_{\text{浮}}$ 为浮力材料随深度变化产生的浮力损失 (见表 3)。式 (11) 和 (12) 用于数值仿真, 式 (13) 和 (14) 用于理论分析。

3 数值仿真分析

UUV 能否实现水下悬停, 不仅受海洋环境的影响, 也受自身状态的影响。因此根据上文所述模型, 设置不同初始参数及环境影响参数进行仿真, 以分析 UUV 实现水下悬停的关键因素。

3.1 不同剩余浮力情况下仿真结果

UUV 的剩余浮力是很难消除的, 即使在水面进行了完美配平, 平台的衡重也会在实际运行过程中由于海水密度变化、水舱渗漏水等原因发生变化。设置 UUV 初始深度为水下 250 m, 初始前向速度为 0.2 m/s, 在初始负浮力分别为 +40 kg、+20 kg、-20 kg、-40 kg 时的仿真情况, 如图 3 所示。

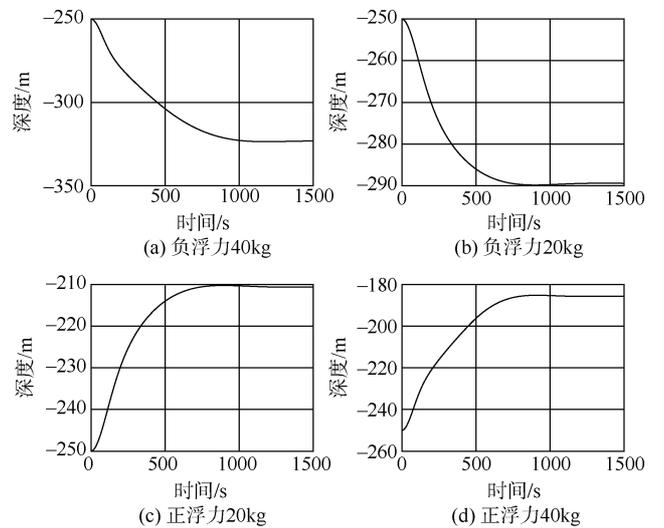


图 3 初始剩余浮力下 UUV 的深度曲线

Fig. 3 UUV depth curve under initial residual buoyancy

从图中曲线结果结合空间运动模型可以发现: 当存在初始负浮力时平台的重力和浮力无法在当前深度平衡, 负浮力时平台向下运动, 深度增加使密度变大, 导致浮力增加, 增加的浮力与初始负浮力平衡后平台稳定在某一深度。图 3 (a) 中在约 320 m 处的重力浮力平衡; 图 3 (b) 中初始负浮力 20 kg, 在约 290 m 处即可平衡。

由此可见, 初始剩余浮力将导致深度变化, 变

化数值与初始剩余浮力数值相关。

3.2 不同质浮心距情况下仿真结果

设置 UUV 初始深度水下 250 m，初始前向速度 0.2 m/s，在质心侧移分别为-4 mm、-2 mm、+2 mm、+4 mm 时的仿真情况，如图 4 所示。

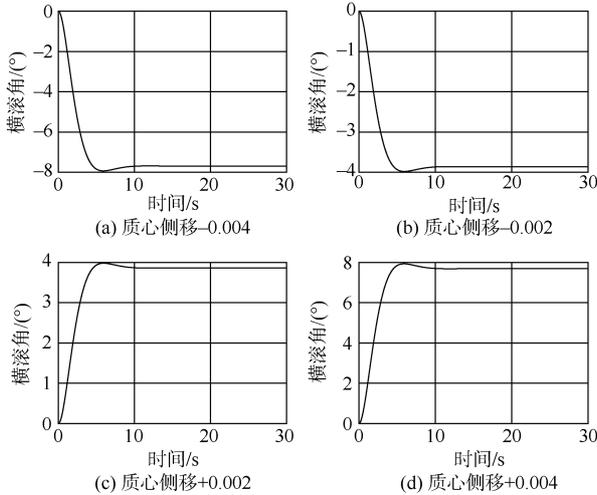


图 4 不同质心侧移情况下的横滚角曲线
Fig. 4 Roll angle curve with different sideward movements of centroid

当存在质心侧移时，平台重力和浮力产生横滚力矩导致平台横滚，当重力和浮力作用在同一条直线上时达到平衡。从图中可以看出：质心侧移导致横滚角变化，横滚角变化值由质心侧移量决定。

设置 UUV 质心前移分别为-4 mm、-2 mm、+2 mm、+4 mm，进行数值仿真，如图 5 所示。

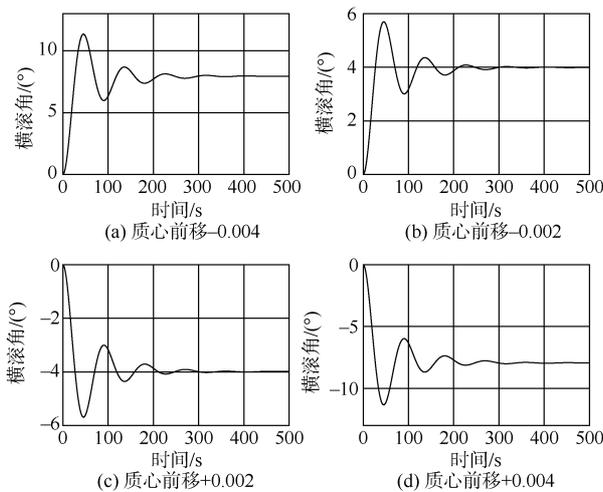


图 5 不同质心前移情况下的俯仰角曲线
Fig. 5 Pitch angle curve with different forward movements of centroid

仿真结果显示：与质心侧移类似，质心前移主要影响俯仰角，质浮心距的数值和方向决定了平衡后俯仰角的大小的方向。

3.3 不同初速度情况下仿真结果

UUV 初始深度水下 250 m，前向速度 0.2 m/s，垂向速度(天向为正方向)分别为-0.2 m/s、-0. m/s、0.1 m/s、0.2 m/s 并进行仿真，深度和俯仰角结果分别如图 6 和图 7 所示。

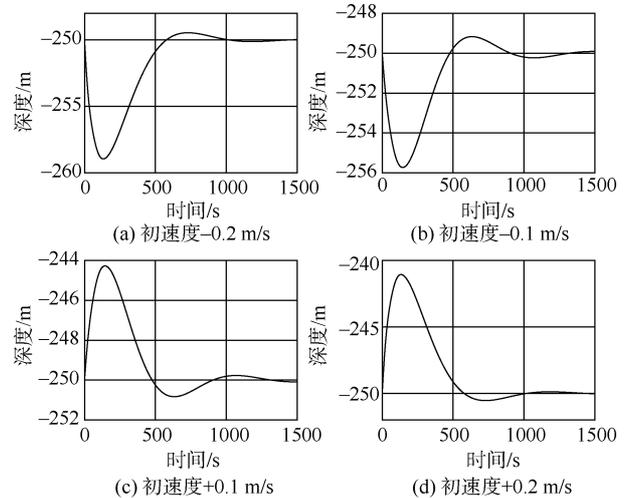


图 6 不同垂向初速度下的深度变化曲线

Fig. 6 Depth curve at different vertical initial velocities

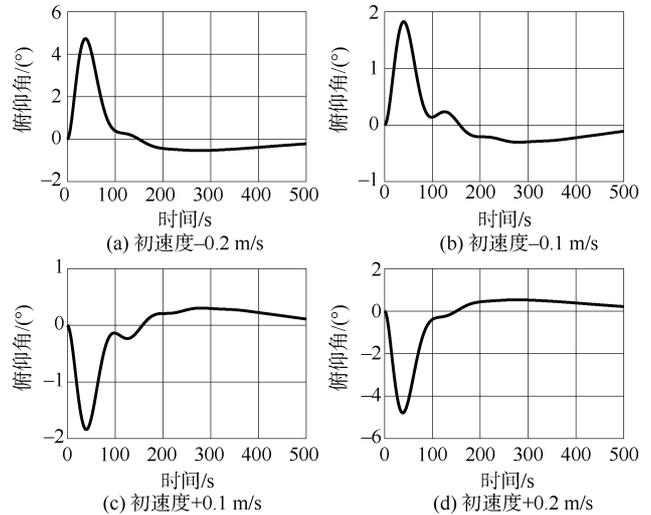


图 7 不同垂向初速度下的俯仰角曲线

Fig. 7 Pitch angle curve at different vertical initial velocities

仿真结果显示：不同垂向速度会导致平台深度和俯仰角发生变化，但最终会在重力和浮力作用下重新达到平衡。结合式 (11) 和式 (12)，垂向速

度不是重力、浮力平衡的影响因素, 只能影响瞬态过程。

3.4 不同初始姿态下的仿真结果

设置 UUV 初始深度水下 250 m, 初始前向速度 0.2 m/s, 初始俯仰角分别为 -10° 、 -5° 、 5° 、 10° 并进行仿真, 结果如图 8 所示。

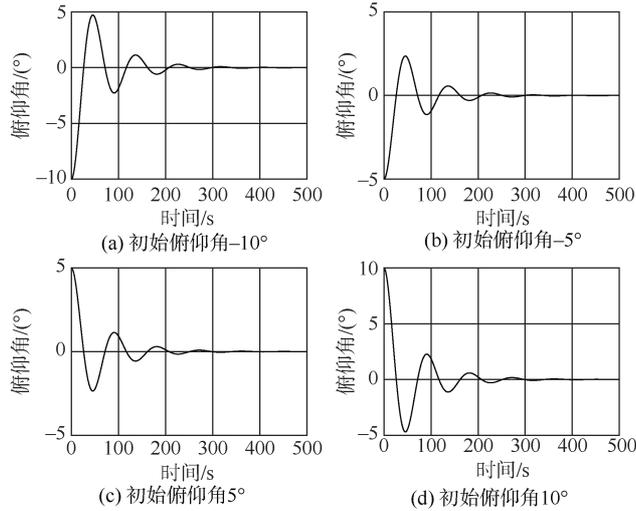


图 8 不同初始俯仰角情况下的俯仰角曲线
Fig. 8 Pitch angle curve under different initial pitch angles

仿真结果显示: 不同初始俯仰角会在重力和浮力作用下重新恢复到 0° 。结合式 (11) 和式 (12), 初始俯仰角不是重力、浮力平衡的影响因素, 只能影响瞬态过程。

3.5 不同海水密度的仿真结果

1) 海水密度负梯度变化时的仿真结果。

现设置海水密度为负梯度变化, 变化速率为 $0.009\ 3\ \text{kg/m}^3$, UUV 初始深度水下 250 m, 初始前向速度 0.2 m/s, 初始负浮力分别为 +40 kg、+20 kg、-20 kg、-40 kg, 仿真结果如图 9 所示。

仿真结果显示: 初始负浮力 +40 kg 时, 重力大于浮力, 平台下沉, 但海水密度也在减小, 式 (14) 计算的浮力值减小, 总负浮力变大, 因此平台深度呈现图 9 (a) 和图 9 (b) 所示不断下沉的趋势; 正浮力时情况相反。

2) 海水密度为定值时的仿真结果。

现设置海水密度为固定值 $1\ 025.9\ \text{kg/m}^3$, UUV 初始深度水下 250 m, 初始前向速度 0.2 m/s, 初始负浮力分别为 +40 kg、+20 kg、-20 kg、-40 kg,

仿真结果如图 10 所示。

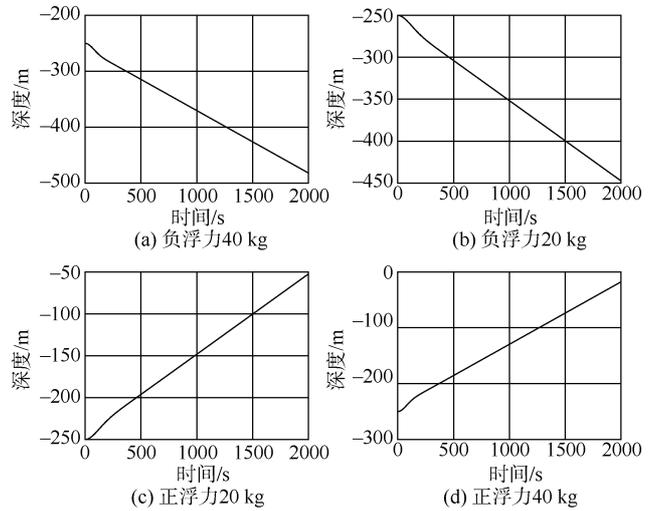


图 9 海水密度负梯度变化时的仿真结果
Fig. 9 Depth curve of seawater with negative changes in density

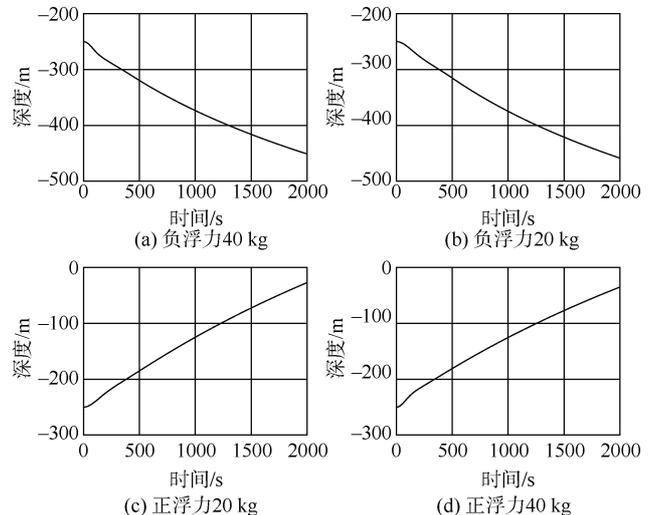


图 10 海水密度均匀变化时的仿真结果
Fig. 10 Depth curve of seawater with uniform changes in density

仿真结果显示: 初始负浮力 +40 kg 时, 重力大于浮力, 平台下沉, 但海水密度不变, 同时由于密封舱体积压缩, 式 (14) 计算的浮力值减小, 总负浮力变大, 因此平台深度呈现图 10 (a) 和图 10 (b) 所示不断下沉的趋势; 正浮力时情况相反。

4 结束语

从仿真结果可以得出以下结论: 1) UUV 在海水密度正梯度变化时可实现无控水下悬停; 2) UUV

水下悬停受自身衡重参数影响, 剩余浮力值影响深度变化, 质心侧移和前移分别影响横滚角、俯仰角; 3) UUV 进入悬停工况的初始速度、姿态影响时间较短, 最终速度和姿态会由初始值趋近于 0。下一步将研究如何基于现有浮力均衡控制器实现在设定深度的无动力精确悬停。

参考文献

- [1] CHEN Y, WANG G X, XU G H, et al. Hovering control of submarine based on L1 adaptive theory via ballast tanks[J]. *International Journal of Advanced Robotic System*, 2017, 14 (4): 172988141772419.
- [2] 胡坤. 初始不均衡量对潜艇悬停操纵的影响[J]. *兵器装备工程学报*, 2022, 43 (2): 65-71.
- [3] FONT R, GARCÍA-PELÁEZ J. On a submarine hovering system based on blowing and venting of ballast tanks[J]. *Ocean Engineering*, 2013, 72 (1): 441-447.
- [4] 潘国良. 潜艇水下悬停运动的操纵控制研究[D]. 南京: 东南大学, 2005.
- [5] 宋保维. 无人水下飞行器悬停过程分析与仿真[J]. *机械与电子*, 2012 (12): 56-58
- [6] 卢海洋, 查智. 基于 CTD 的浮力补偿系统研究[J]. *机电工程技术*, 2013, 42 (1): 92-96.
- [7] 卢海洋, 林平. 基于模糊 PID 控制的 UUV 定深控制系统设计[J]. *重庆理工大学学报*, 2011, 25 (6): 58-62.
- [8] 胡坤. 海洋环境因素对潜艇悬停操纵影响仿真研究[J]. *计算机仿真*, 2021, 38 (12): 7-12
- [9] LIU Q, LI L Y, ZHOU Y, et al. A global seawater density distribution model using a convolutional neural network[J]. *Sensors*, 2024, 24 (6): 24061972.
- [10] JOHNSON G C, WIJFFELS S E. Ocean density change contributions to sea level rise[J]. *Oceanography*, 2011, 24 (2): 112-121.
- [11] GLADKIKH V, TENZER R. A mathematical model of the global ocean saltwater density distribution[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2012, 169: 249-257.
- [12] ROQUET F, MADEC G, MCDUGALL T J, et al. Accurate polynomial expressions for the density and specific volume of seawater using the TEOS-10 standard[J]. *Ocean Modelling*, 2015, 90: 29-43.
- [13] 应东. 潜艇水下悬停运动建模与操纵方法研究[J]. *科学技术创新*, 2018 (34): 47-48.
- [14] 俞科云, 戴余良, 施生达. 潜艇水下悬停运动控制仿真研究[J]. *中国舰船研究*, 2010, 5 (2): 47-48
- [15] 严卫生. 鱼雷航行力学[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2005.
- [16] 张宇文. 鱼雷流体力学[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1989.
- [17] 赵冉. 基于实航数据的定常海流动力学模型验证评估[J]. *数字海洋与水下攻防*, 2021, 4 (4): 294-300.
- [18] 熊瑛, 颜俐, 许建. 潜艇悬停运动模糊控制[J]. *舰船科学技术*, 2013, 35 (7): 42-50.

(责任编辑: 曹晓霖)