

【引用格式】李健欣, 阳峻, 张忠彪, 等. 仿生水下滑翔机滑翔运动数值仿真研究[J]. 数字海洋与水下攻防, 2025, 8(2): 117-125.

仿生水下滑翔机滑翔运动数值仿真研究

李健欣¹, 阳 峻¹, 张忠彪¹, 叶 斌¹, 张志国^{2,*}

(1. 中国船舶科学研究中心, 江苏 无锡 214082;
2. 华中科技大学 船舶与海洋工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要 水下滑翔机是一种利用重力与浮力之差获取动力的水下航行器, 其通常具有造价低、隐身性能强等优点。随着人类对海洋环境更深入的探索, 水下滑翔机被广泛应用于观测海洋环境等民事和军事任务。在此背景下, 对水下滑翔机的滑翔运动进行准确地预报并分析影响滑翔运动的因素具有重要意义。使用基于 Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) 方程的计算流体力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 方法, 并结合动态重叠网格方法, 对仿生水下滑翔机的滑翔运动进行了模拟, 研究了航行过程中水下滑翔机的重心位移和净浮力对滑翔运动的影响, 给出了滑翔速度比随重心移动和净浮力变化的趋势, 同时对水下滑翔机所受的横滚和偏航力矩进行了分析。结果显示: 当净浮力大小为 3% 的滑翔机重力时, 仅移动重心即可使滑翔速度比达到 4 以上。该研究能够对水下滑翔机的设计提供一定的参考。

关键词 计算流体力学; 数值模拟; 水下滑翔机; 仿生; 滑翔运动

中图分类号 U674.941 **文献标识码** A **文章编号** 2096-5753(2025)02-0117-09

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2025.02.002

Numerical Simulation of Gliding Motion of Biomimetic Underwater Gliders

LI Jianxin¹, YANG Jun¹, ZHANG Zhongbiao¹, YE Bin¹, ZHANG Zhiguo^{2,*}

(1. China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082, China; 2. School of Naval Architecture & Ocean Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract Underwater gliders use the difference between gravity and buoyancy to obtain power. Underwater gliders usually have the advantages of low cost and high stealth performance. With the deeper exploration of the marine environment, underwater gliders are widely used in civil and military missions such as observing the marine environment. In this context, it is of great significance to accurately predict the gliding movement of underwater gliders and analyze the factors affecting gliding movements. The Computational Fluid Dynamics (CFD) method based on the RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) equation combined with the dynamic overlap method is applied to the direct simulation of a bionic underwater glider. The effects of the center of gravity displacement and net buoyancy of the underwater glider on the gliding motion during the navigation are studied. The trend of gliding speed ratio with the displacement of the center of gravity and net buoyancy is given and the roll and yaw moments experienced by the underwater glider are also analyzed. The results show that when the net buoyancy is 3% of the glider's gravity, the gliding speed ratio can reach higher than 4 by moving the center of gravity. This study can provide a certain reference for the design of underwater gliders.

收稿日期: 2025-02-23

作者简介: 李健欣 (1999-), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事舰船水动力研究。

*通信作者: 张志国 (1962-), 男, 博士, 副教授, 主要从事舰船水动力学研究。

Key words computational fluid dynamics; numerical simulation; underwater gliders; biomimetic; gliding movement

0 引言

随着科学与技术的发展,陆地上未探测到的资源日渐减少,为满足人口增长与经济发展的迫切需求,对海洋资源的探测与开采愈发重要,深海探测与海洋开发成为各国新的竞争点。在这种趋势下,作为海洋探测与开发的重要工具,水下自主航行器(Autonomous Underwater Vehicle, AUV)的性能受到了更多的挑战,而水下滑翔机作为AUV的一种,建造成本低、续航时间长等优点,使其作为一个水下平台能够很好地承担海洋探测等任务,在民用的资源探测、环境监测等领域发挥作用;由于水下滑翔机具有较好的隐身性能,对于军用的侦察等任务,同样具有广阔的应用前景。

水下滑翔机概念的产生可以上溯至 1967 年 BRANDAU^[1]提出水下航行器可以利用重力与浮力的变化作为驱动力,随后在 1974 年,BAZ^[2]等人首次提出了水下滑翔机的概念。美国是世界最早开展水下滑翔机研究的国家,特利丹仪器公司韦伯海事研究所(Teledyne Webb)和伍兹·霍尔海洋研究所(Woods Hole Oceanographic Institution)于 1989 年成功研制出 SLOCUM^[3]水下滑翔机;1999 年,华盛顿大学研发的 Seaglider^[4]水下滑翔机以及斯克利普斯海洋研究所和伍兹·霍尔海洋研究所共同研制的 Spary^[5]水下滑翔机相继问世,以上 3 种水下滑翔机被认为是最经典的 3 种水下滑翔机系列。2003 年,美国斯克利普斯海洋研究所和华盛顿大学共同研发了采用与战斗机类似的翼身融合的造型 X-Ray^[6]水下滑翔机。除美国外,法国、英国、日本等国也逐渐开展了对水下滑翔机的研究^[7-8],而欧洲和澳大利亚分别组建了基于水下滑翔机的观测网络。国内对水下滑翔机的研究起步较晚但发展迅速,目前中国科学院自动化研究所^[9]的“海翼”系列水下滑翔机和天津大学^[10-11]的“海燕”系列的水下滑翔机已形成谱系化,在 2020 年^[12],“海燕-X^{plus}”的下潜深度突破了世界纪录,达到了 10 619 m。除此之外,中国船舶科学研究中心、华中科技大学、宜昌测试技术研究所和

中国海洋大学等单位都开展了水下滑翔机样机的研制并进行了相应的海试^[13]。浙江大学、西北工业大学和上海交通大学也对水下滑翔机进行了相关的研究^[14-17]。综上所述,从外形来看,目前各大水下滑翔机谱系,其水下滑翔机主体外形主要以鱼雷形(或称水滴型)、低阻层流型和扁平椭球形为主。从设计方法来看,通常通过水池试验或在实际水域试验获取水动力系数用于建立水下滑翔机的运动方程用于预报滑翔机的运动过程。随着 CFD 方法的发展,其逐渐被用于代替试验方法来获取水动力系数,但对水下滑翔机滑翔运动直接开展数值仿真的研究很少。

本文以一种具有仿生外形的水下滑翔机为研究对象,基于 CFD 方法对水下滑翔机的滑翔运动直接开展数值模拟,为水下滑翔机的设计提供支撑。本文的数值模拟采用了基于 RANS 方法的求解器,结合动态重叠网格方法,通过改变净浮力与重心位置,研究了净浮力和重心位置对该水下滑翔机滑翔运动的影响。结果表明:当净浮力不变时,重心位移对水下滑翔机俯仰角和滑翔速度的影响均较大;重心位移不变时,净浮力对俯仰角的影响较小而对滑翔速度影响较大。在各工况中最大的滑翔速度比可以达到 4.17。

1 研究对象

1.1 几何模型

本文以一种具有仿生外形的水下滑翔机模型为研究对象,几何模型如图 1 所示,滑翔机主体仿鱼形,下半部分为回转体,上半部分为椭圆形,无平行中体,带有 4 个鱼鳍形尾舵。滑翔翼采用扫掠翼的外形,其几何参数如图 2 所示。滑翔机主要尺度参数如表 1 所示。

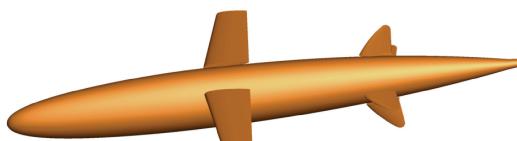


图 1 水下滑翔机模型
Fig. 1 Underwater glider model

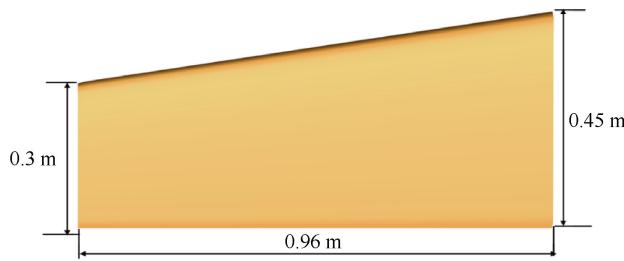


图 2 滑翔翼几何模型

Fig. 2 Gliding wing geometry model

表 1 仿生水下滑翔机主尺度参数

Table 1 Main scale parameters of biomimetic underwater glider

主要参数	数值
艇长 L / m	4.96
最大直径 B_{wl} / m	0.54
最大高度 D (距基线) / m	0.59
排水量 Δ / kg	743
重心垂向距离 D_p (距基线) / m	0.27

1.2 仿真工况

以下研究中, 净浮力的变化通过改变重力进行调节, 分别在净浮力不变与重心位置不变的情况下对水下滑翔机的下潜运动进行了模拟。对于重心位移不变、改变重力的工况, 重心位置设定在原始重心位置向前移动 0.1% 的艇长处, 重力分别增加 1.5%、3% 和 4.5%; 对于净浮力不变、变重心的工况, 净浮力大小选择为水下滑翔机所受重力 G 的 3%, 重心位置分别为原始重心位置向前移动 0.1% L 、0.2% L 和 0.3% L 。数值模拟的工况如表 2 所示。

表 2 数值模拟工况
Table 2 Numerical simulation conditions

序号	重力改变 $G / \%$	重心位移 $L / \%$
1	1.5	-0.1
2	3	-0.1
3	4.5	-0.1
4	3	-0.2
5	3	-0.3

2 数值方法

2.1 控制方程

本文中的数值仿真均采用基于 RANS 方法的

求解器进行计算, 该方程包括连续性方程和动量方程 2 部分, 张量表示如下:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j \right) \quad (2)$$

式中: U_i ($i = 1, 2, 3$) 和 u_i ($i = 1, 2, 3$) 分别为时均和瞬时速度; ρ 为流体密度; P 为时均压力; μ 为动力粘度; $-\rho \bar{u}_i \bar{u}_j$ 为雷诺应力项。通过引入 SST $k-\omega$ 湍流模型^[18] 来封闭控制方程。

2.2 运动方程

水下滑翔机滑翔时会受到重力、浮力和水动力的作用, 这些力及力矩会基于大地坐标系被求解, 求解后转换至随体坐标系, 坐标系定义如图 3 所示。水下滑翔机滑翔时会受到重力、浮力和水动力的作用, 这些力及力矩会基于大地坐标系被求解, 求解后转换至随体坐标系。在仿真过程中, 水下滑翔机视为刚体, 不发生任何形变, 通常以随体坐标系原点 (即重心) 为其旋转中心, 则基于随体坐标系的六自由度运动方程如下所示:

$$m[u - vr + wq] = X \quad (3)$$

$$m[v - wp + ur] = Y \quad (4)$$

$$m[w - uq + vp] = Z \quad (5)$$

$$I_X p + [I_Y - I_Z] qr = K \quad (6)$$

$$I_Y q + [I_X - I_Z] rp = M \quad (7)$$

$$I_Z r + [I_Z - I_X] pq = N \quad (8)$$

式中: m 表示水下滑翔机质量; I_X 、 I_Y 和 I_Z 是相对于中心的转动惯量分量; X 、 Y 、 Z 和 K 、 M 、 N 是水下滑翔机受到的外力和力矩的分量; u 、 v 、 w 、 p 、 q 和 r 为 6 个运动的速度。

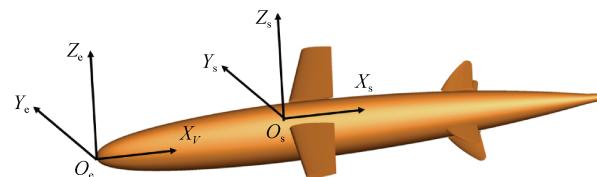


图 3 数值仿真坐标系定义
Fig. 3 Definition of numerical simulation coordinate system

水下滑翔机在滑翔运动过程中会产生俯仰运动，其随体坐标系的 X_s 轴会与大地坐标系的 X_e 轴产生一夹角，此角度称为水下滑翔机的俯仰角，用 θ 表示，依据第 2 章所述坐标系设置，水下滑翔机的旋转方向为绕 Y 轴正方向逆时针旋转为正，顺时针旋转为负，即水下滑翔机头部偏离水平面，向上为正，向下为负；滑翔机的速度方向也会与大地坐标系的 X_e 轴产生一夹角，此为水下滑翔机的滑翔角，用 β 表示，方向定义与俯仰角相同；滑翔机的速度方向与随体坐标系的 X_s 轴的夹角称为攻角，用 α 表示， $\alpha=\beta-\theta$ 。3 个角度的关系如图 4 所示。

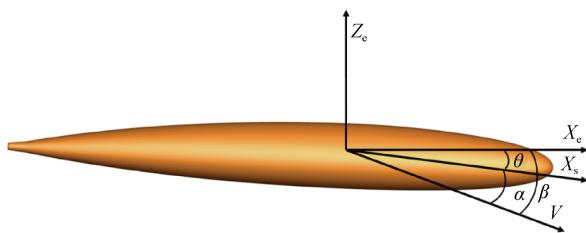


图 4 水下滑翔机俯仰角、滑翔角与攻角的关系
Fig. 4 Relationship between pitch angle, glide angle and angle of attack of underwater glider

2.3 网格模型与边界条件

数值仿真中采用全结构化网格模型。为得到更准确水下滑翔机的运动姿态，将水下滑翔机和计算域分别建立网格模型，通过自研结构化重叠网格程序将各部分网格进行组装，最终形成完整的网格模型；在计算过程中采用动态重叠网格技术，即每一个迭代步中，网格模型都会根据计算所得的水下滑翔机当前姿态进行重新重叠。以滑翔机艏部某处为例，重叠前与重叠后的网格如图 5 所示，本文所用的重叠网格方法在有关文献^[19]中有更详细的介绍。图 6 为艏部和艉部的网格细节。

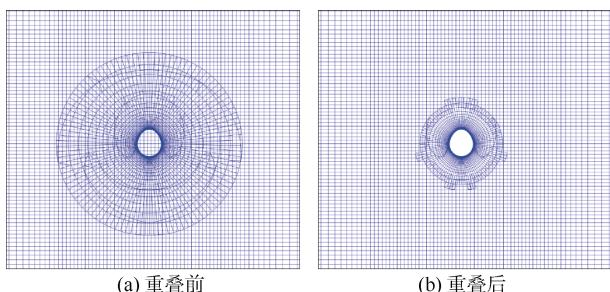


图 5 重叠前、后的网格模型
Fig. 5 Grid before and after overset

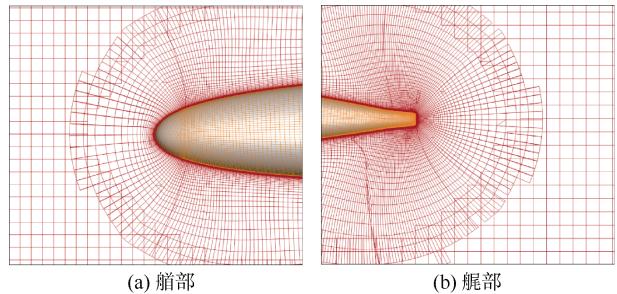


图 6 艏部与艉部网格细节
Fig. 6 Bow and stern mesh details

在 CFD 的数值仿真计算过程中，计算域的边界会对计算的收敛性和精度造成影响。在本文中，计算域在 X 、 Y 、 Z 这 3 个方向的尺寸分别被设置为 $-1L < X < 4L$, $-1L < Y < 1L$, $-1L < Z < 1L$ 。水下滑翔机首部沿上游方向（沿 X 轴负方向）距离边界 1 倍艇长，尾部沿下游方向距离边界 3 倍艇长，轴线距离上下左右（即以 Z 轴为法向的 2 个面和以 Y 轴为法向的 2 个面）4 个面的距离均为 1 倍艇长，此距离用于保证边界不对水下滑翔机造成影响。计算域大小及边界条件设置如图 7 所示，边界条件的意义如表 3 所示。

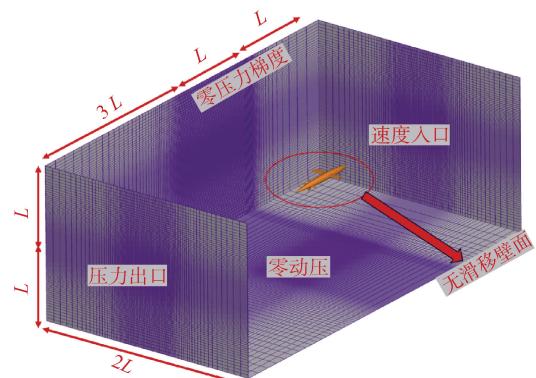


图 7 计算域大小及边界条件
Fig. 7 Size of computational domain and boundary conditions

表 3 边界条件设置

Table 3 Setting of boundary conditions

边界条件	速度 U	动压 P
速度入口	自定义或计算值	$\frac{\partial P}{\partial x} = 0$
压力出口	$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = 0$	$\frac{\partial P}{\partial x} = 0$
零压力梯度	$\frac{\partial U}{\partial x} = 0$	$\frac{\partial P}{\partial x} = 0$
零动压	$\frac{\partial U}{\partial x} = 0$	0
无滑移壁面	0	$\frac{\partial P}{\partial x} = 0$

3 结果与分析

以表2中工况2为例, 图8为在仿真时间为81.84 s和93 s之间水下滑翔机的姿态与垂直面内的流场, 从图中可见, 水下滑翔机的姿态未发生明显变化, 尾部流场呈现为稳定的周期性变化。图9为工况2中水下滑翔机在水平和垂直方向合力的时历曲线, 从时历曲线来看, 水下滑翔机水平方向所受的合力在仿真进行至40 s后就稳定在0附近, 水下滑翔机在垂直方向上受到初始向下的净浮力, 随着时间推移, 下潜的速度增大, 所以在开始一段时间内迅速减小, 最终同样在40 s之后在0附近稳定波动。当受力稳定时, 这2个方向运动速度也会随之稳定, 这一点与图10的速度时历曲线相对应。结合受力、速度和俯仰角的时历数据以及滑翔机的姿态和流场图, 可以判定工况2中的水下滑翔机最终达到了稳定的滑翔状态。为了避免大量的重复论述, 其余工况仅展示了速度和俯仰角的时历曲线。同样的, 其余工况的速度时历曲线与工况2类似, 在40~50 s后速度趋于稳定, 即本章所得到的速度和俯仰角等结果, 均为水下滑翔机进行定常滑翔运动时的运动参数。此外, 水下滑翔机的性能通常通过滑翔比(水平位移与垂直位移之比), 考虑到数值仿真中水下滑翔机初始为静止状态, 那么即使水下滑翔机进入了稳定滑翔状态, 其滑翔比也会随时间增加而发生变化, 虽然滑翔比最终会收敛于一个稳定值, 但考虑到仿真时间的要求, 应当选择一合适的值代替滑翔比, 考虑到水下滑翔机进入稳态滑翔的阶段后, 水平速度与垂直速度之比 v_x/v_z 显然与收敛的滑翔比的大小相等, 因此后文主要以滑翔速度比来评判不同工况下水下滑翔机滑翔性能的优劣。

当水下滑翔机重心位移不变, 仅改变净浮力时, 仿真中水下滑翔机的位移轨迹、俯仰角和速度时历曲线如图10所示。水下滑翔机进入稳定滑翔状态后的运动参数如表4所示。结合时历曲线与运动参数进行分析, 水平速度和垂直速度是随净浮力增大而增大的, 由于垂直速度增加的更多, 滑翔速度比在逐渐减小。俯仰角随净浮力增加而逐渐变

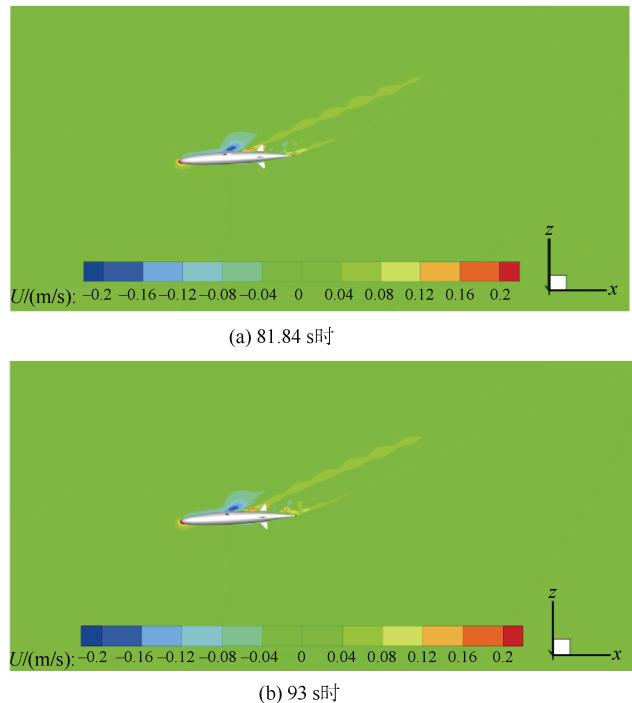


图8 水下滑翔机的姿态与垂直面内的流场
Fig. 8 Attitude of underwater glider and flow field in vertical plane

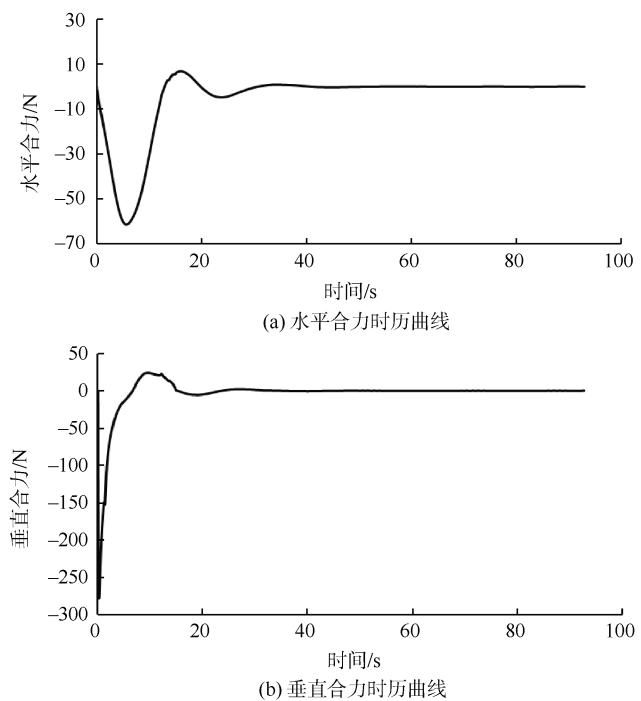


图9 工况2中水下滑翔机受到水平和垂直方向合力的时历曲线
Fig. 9 Time history curve of underwater glider subjected to horizontal and vertical force in condition 2

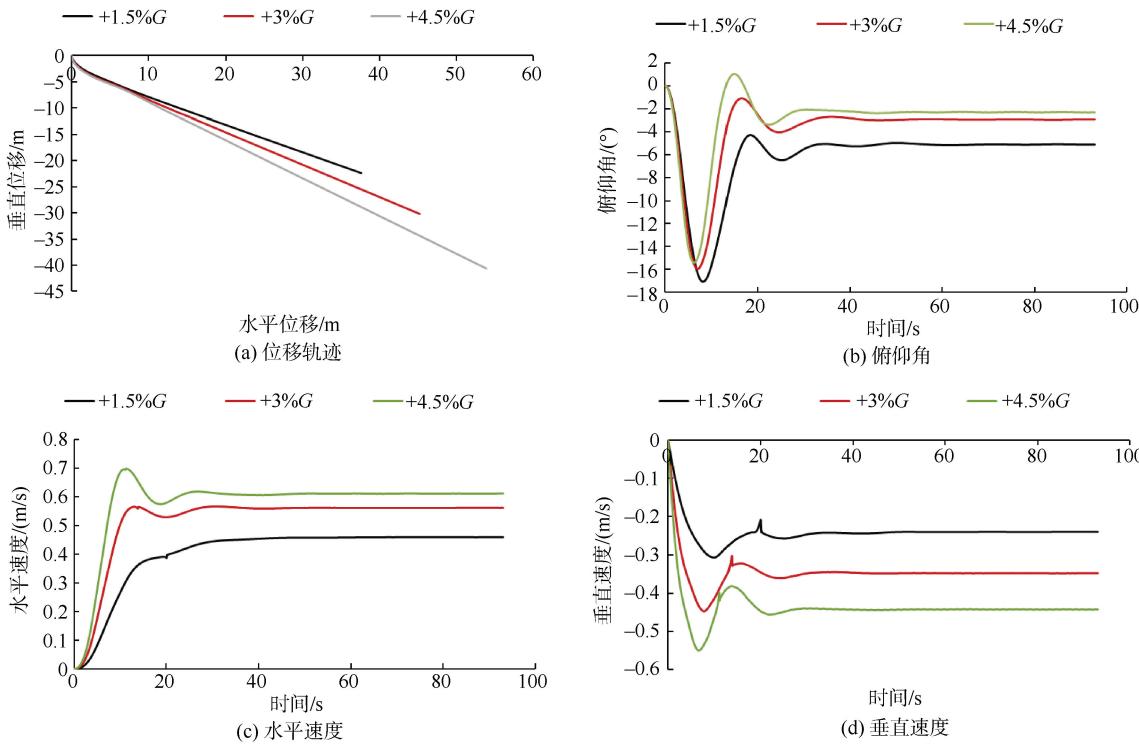


图 10 改变净浮力时水下滑翔机的位移轨迹、俯仰角和速度时历曲线

Fig. 10 Displacement trajectory, pitch angle and velocity-time curve of underwater glider when net buoyancy is changed

表 4 不同净浮力的滑翔运动仿真结果

Table 4 Gliding motion simulation results of different net buoyancy

运动参数	+1.5%G	+3%G	+4.5%G
水平位移/m	37.58	48.34	53.86
垂直位移/m	-22.36	-32.12	-40.61
滑翔比	1.68	1.51	1.33
水平速度/(m/s)	0.46	0.56	0.61
垂直速度/(m/s)	-0.24	-0.35	-0.44
滑翔速度/(m/s)	0.52	0.66	0.75
滑翔速度比	1.92	1.62	1.38
俯仰角/(°)	-5.11	-2.93	-2.32

小, 分析水下滑翔机所受的俯仰力矩, 可分为 2 个分力矩, 其一是静力矩, 是来自净浮力与重心位移导致的力矩并且其方向与俯仰角的方向相同, 其二是动力矩, 是滑翔机开始运动后水动力(包括动压力和摩擦力)导致的力矩, 该力矩的方向与速度的方向有关。当净浮力变大时显然其导致的力矩会变大, 此时俯仰角应当增大, 但本文结果与这其相反, 这说明净浮力增加导致了垂直速度增加, 进一步导致了水动力矩的增大, 因此才导致俯仰角变小。图

11 为水下滑翔机稳定滑翔时, 俯仰动力矩的时历曲线, 可以看到, 从 1.5%重力的净浮力到 4.5%重力的净浮力, 动力矩的大小是逐渐增加的, 与上述结论相对应。

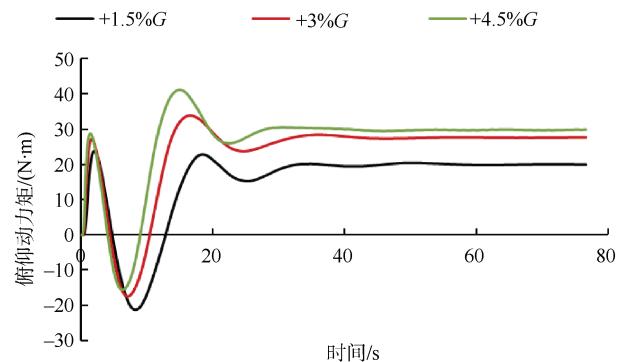


图 11 俯仰力矩时历曲线

Fig. 11 Pitch moment time history curve

当水下滑翔机净浮力不变, 仅改变重心位移时, 仿真中水下滑翔机的位移轨迹、俯仰角和速度时历曲线如图 12, 下滑翔机进入稳定滑翔状态后的运动参数如表 5 所示。随着重心逐渐向后移动, 水下滑翔机的水平位移与水平速度逐渐增加, 并且

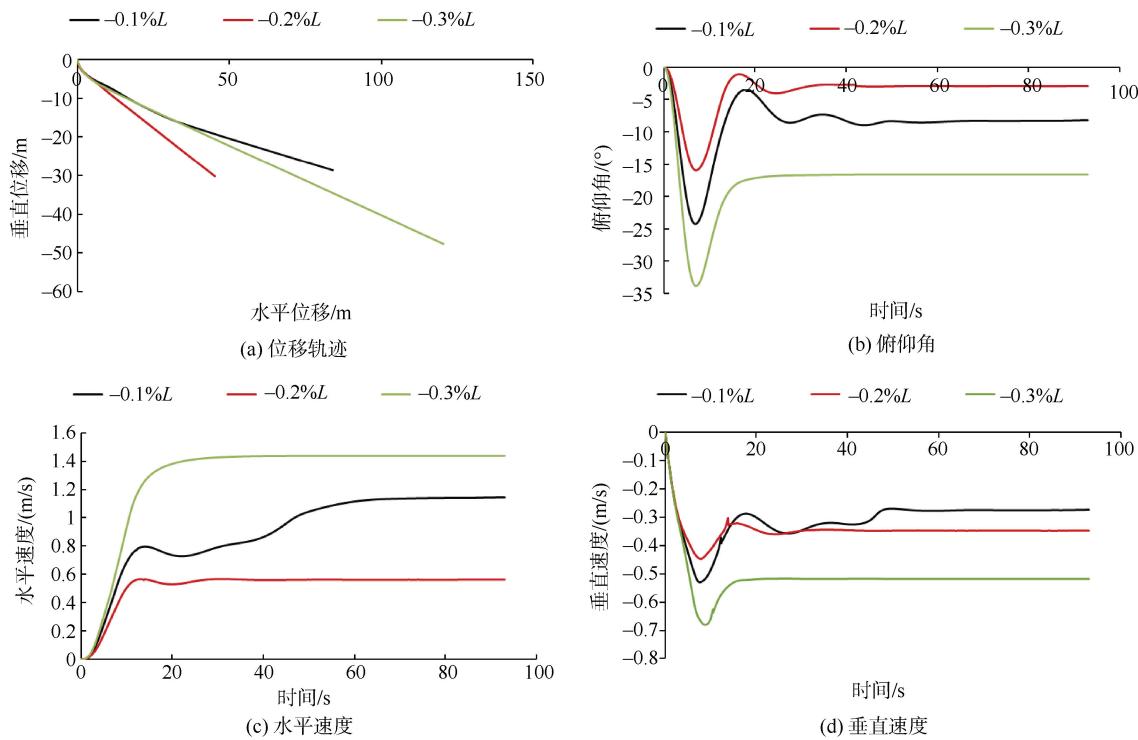


图 12 改变重心位移时水下滑翔机的位移轨迹、俯仰角和速度时历曲线

Fig. 12 Displacement trajectory, pitch angle and velocity-time curve of underwater glider when center of gravity displacement is changed

表 5 不同重心位移的滑翔运动仿真结果

Table 5 Gliding motion simulation results of different center of gravity displacement

运动参数	$-0.1\%L$	$-0.2\%L$	$-0.3\%L$
水平位移/m	48.34	84.03	120.60
垂直位移/m	-32.12	-28.63	-47.69
滑翔比	1.51	2.94	2.53
水平速度/(m/s)	0.56	1.14	1.44
垂直速度/(m/s)	-0.35	-0.27	-0.52
滑翔速度/(m/s)	0.66	1.17	1.53
滑翔速度比	1.62	4.17	2.78
俯仰角/($^{\circ}$)	-2.93	-8.20	-16.61

水平速度的增加量先增大后减小，在重心位移由 0.2% 的水下滑翔机长度变为 0.3% 后，垂直速度增大为原来的 1.9 倍以上，因此导致滑翔速度比是先增加后减小的趋势。当重心位移为 0.2% 的水下滑翔机长度时，滑翔速度比可以超过 4，此时俯仰角也并未超过 10° 。从俯仰角的时历曲线可以看到，在所选的 3 个重心位移中，重心位移越大，滑翔运动初始阶段俯仰角就会越大，但俯仰角进入稳

定状态也越快，水下滑翔机拥有较为平稳的运动姿态。

本文进行的仿真均为垂直面内的三自由度运动仿真，没有设置横滚与偏航运动的自由度，但对于水下滑翔机的偏航与横滚力矩进行了监测，其时历曲线如图 13 所示。由图可见，在改变净浮力时，横滚力矩最终都稳定在 0 附近波动，并且波动的幅度约为 $0.3 \text{ N}\cdot\text{m}$ ；在改变重心位移时，横滚力矩最终稳定在了 0 附近，重心位移为 $-0.2\%L$ 时的横滚力矩进入稳定状态所需的时间最长。观察偏航力矩，在改变净浮力的工况中，水下滑翔机的偏航力矩的大小随着净浮力的增大逐渐增大；在改变重心位移的工况中，在 3 种重心位移中，重心位移为 $-0.1\%L$ 时，偏航力矩大小最大且偏航力矩进入稳定状态所需的时间最长，重心位移为 $-0.2\%L$ 时，偏航力矩的稳定值要比其余 2 个重心位移时的偏航力矩稳定值更接近于 0，重心位移为 $-0.3\%L$ 时，偏航力矩的稳定值与重心位移为 $-0.2\%L$ 时非常接近，但其进入稳定状态所需的时间更短。

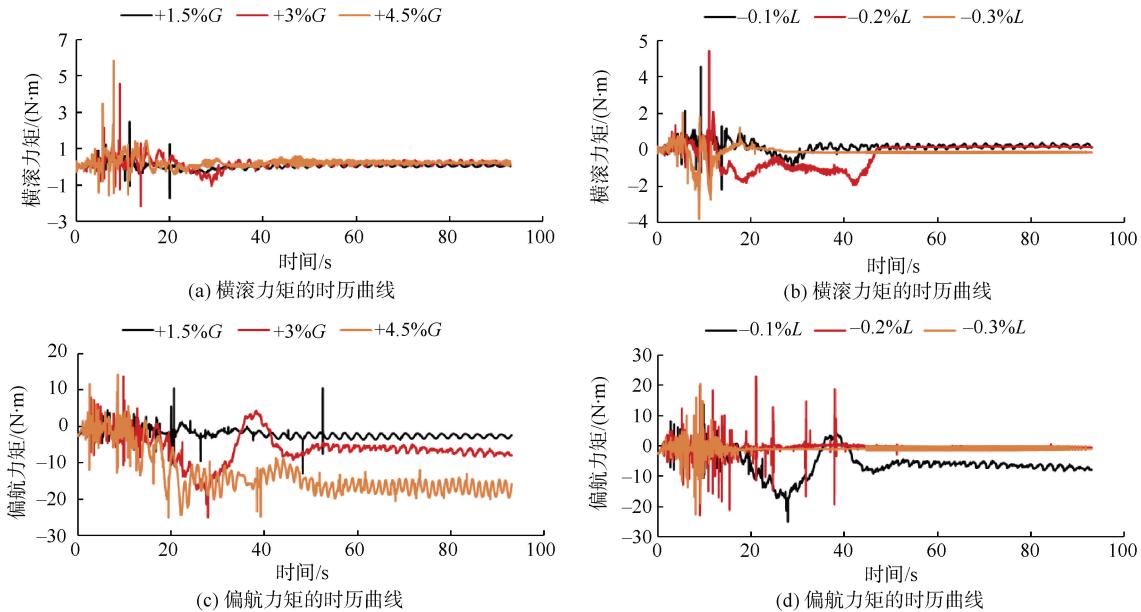


图 13 横滚与偏航力矩随速度的变化曲线

Fig. 13 Variation curves of roll and yaw moment with speed

4 结束语

本文使用 CFD 方法对一种仿生外形的水下滑翔机的滑翔运动进行了直接模拟, 研究了重心位移和净浮力分别对滑翔运动的影响, 以期能够为水下滑翔机的设计工作提供参考。最终得到结论如下:

1) 当净浮力不变时, 对于姿态来说, 重心位置的改变对水下滑翔机的俯仰角影响很大, 重心位移越大, 俯仰角越大, 当重心由 $-0.1\%L$ 移动至 -0.3% 时, 俯仰角增大为原来的 5.67 倍; 对于速度来说, 水平速度随重心位移增大而增大, 垂直速度则是先减小后增大, 当重心由 $-0.1\%L$ 移动至 -0.3% 时, 水平速度增大为原来的 2.57 倍。

2) 在重心位移不变的情况下, 对于姿态来说, 净浮力变化导致的俯仰角变化幅度较小, 当净浮力由 $1.5\%G$ 增大至 $4.5G$ 时, 俯仰角仅为原来的 45%, 这由净浮力变化导致的力矩变化引起的; 净浮力增大会使水平速度和垂向速度同时增大, 当净浮力由 $1.5\%G$ 增大至 $4.5G$ 时, 水平速度增大了 33%, 水平速度增大了 83%, 可见垂向速度增大的相对幅度更大, 因此滑翔速度比也会随之降低; 对于速度来说, 由于增大净浮力使得

垂直速度的增量较大, 因此无论上浮还是下潜, 总的滑翔速度都会增加。

参考文献

- [1] BRANDAU J H. Aspects of performance evaluation of waterjet propulsion systems and a critical review of the state-of-the-art[J]. Journal of Hydraulics, 1967, 2 (2): 108051550.
- [2] BAZ A, SEIREG A. Optimum design and control of underwater gliders[J]. Journal of Engineering for Industry, 1974, 96 (1): 304-310.
- [3] WEBB D C, SIMONETTI P J, JONES C P. SLOCUM: an underwater glider propelled by environmental energy[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2001, 26 (4): 447-452.
- [4] ERIKSEN C C, OSSE T J, LIGHT R D, et al. Seaglider: a long-range autonomous underwater vehicle for oceanographic research[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2001, 26 (4): 424-436.
- [5] RUDNICK D L, DAVIS R E, SHERMAN J T. Spray underwater glider operations[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2016, 33 (6): 1113-1122.
- [6] D'SPAIN G L, JENKINS S A, ZIMMERMAN R, et al. Underwater acoustic measurements with the Liberdade/X-ray flying wing glider[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2005, 117: 2624.

- [7] WOOD S L, MIERZWA C E. State of technology in autonomous underwater gliders[J]. Marine Technology Society Journal, 2013, 47 (5): 84-96.
- [8] CLAUSTRE H, BEGUERY L, PATRICE P L A. SeaExplorer glider breaks two world records multisensor UUV achieves global milestones for endurance, distance[J]. Sea Technology, 2014, 55 (3): 19-22.
- [9] 屈新雨, 王征. 水下滑翔机研究应用现状及未来展望[J]. 船电技术, 2023, 43 (11): 27-32.
- [10] 王树新, 王延辉, 张大涛, 等. 温差能驱动的水下滑翔器设计与实验研究[J]. 海洋技术, 2006, 25 (1): 1-5.
- [11] 曹俊, 胡震, 刘涛, 等. 深海潜水器装备体系现状及发展分析[J]. 中国造船, 2020, 61 (1): 204-218.
- [12] 杨绍琼, 李元昊, 孙通帅, 等. “海燕”号谱系化水下滑翔机技术发展与应用[J]. 水下无人系统学报, 2023, 31 (1): 68-85.
- [13] YU J C, ZHANG A Q, JIN W M, et al. Development and experiments of the sea-wing underwater glider[J]. China Ocean Engineering, 2011, 25 (4): 721-736.
- [14] TIAN W L, SONG B W, DU X X, et al. Modeling and simulation of a novel autonomous underwater vehicle with glider and flapping-foil propulsion capabilities[J]. China Ocean Engineering, 2012, 26 (4): 603-622.
- [15] YANG C J, PENG S L, FAN S S. Performance and stability analysis for ZJU glider[J]. Marine Technology Society Journal, 2014, 48: 88-103.
- [16] JIA L J, QI Z F, ZHANG S, et al. Dynamic analysis of the acoustic velocity profile observation underwater glider[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 475-476: 50-54.
- [17] ZHANG D Y, WANG Z D, LING H J, et al. Kriging-based shape optimization framework for blended-wing-body underwater glider with nurbs-based parametrization[J]. Ocean Engineering, 2021, 219: 108212.
- [18] MENTER F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications[J]. AIAA Journal, 1994, 32 (8): 12149.
- [19] LIU L W, FENG D K, WANG X Z, et al. Study on extreme roll event with capsizing induced by pure loss of stability for the free-running ONR Tumblehome[J]. Ocean Engineering, 2022, 257: 111656.

(责任编辑: 曹晓霖)