

扁平型水下滑翔器水动力特性及滑翔性能研究

肖冬林, 张 华, 王习建, 王 健, 徐令令, 张安通

(中国船舶科学研究中心, 江苏 无锡 214082)

摘 要 续航力与水平速度均是水下滑翔器的重要性能指标。采用单位重量滑翔器、单位水平速度所耗功率作为滑翔效率的评价指标, 以一新型扁平型水下滑翔器为研究对象, 利用 CFD 计算结合模型试验验证的方法获取了所需的流体动力系数, 然后进行了滑翔运动分析及垂直面滑翔运动仿真计算, 得到了最优滑翔运动参数。建立的滑翔性能计算方法对扁平型水下滑翔器水动力性能设计及滑翔运动参数优化有着重要的应用价值。

关键词 扁平型; 水动力; CFD 计算; 滑翔效率

中图分类号 U674.941 **文献标识码** A

Research on Hydrodynamic Characteristics and Gliding Performance of Flat Underwater Glider

XIAO Donglin, ZHANG Hua, WANG Xijian, WANG Jian, XU Lingling, ZHANG Antong

(China Ship Science Research Center, Wuxi 214082, China)

Abstract Both endurance and horizontal velocity are important specifications for underwater gliders. In this paper, the power consumption per unit weight glider and unit horizontal velocity is used as the criterion of gliding efficiency. Taking a new flat underwater glider as the studying object, hydrodynamic forces coefficient is acquired by the method of CFD calculation in combination with model test verification, and gliding motion analysis and the vertical plane gliding motion simulation are carried out to obtain the optimized gliding parameters of a new flat underwater glider. The gliding performance calculation method established in this paper has important application value for the hydrodynamic performance design and gliding parameters optimization of flat underwater gliders.

Key words flat type; hydrodynamics; CFD simulation; gliding efficiency

0 引言

水下滑翔器是一种通过剩余浮力做功提供前进动力, 通过内部滑块移动进行姿态调节, 从而实现垂直面内锯齿形运动的新型无人水下航行器。它有着工作时间长、工作范围广、能耗低、噪音低等诸多优点, 在海洋环境监测、水下探测、通信等领域有着重要的应用价值^[1]。

续航力是水下滑翔器的重要性能指标, 为了提

高水下滑翔器的航程, 需要降低能耗, 提高滑翔效率。滑翔器的滑翔效率与水动力外形、滑翔姿态、剩余浮力大小、搭载仪器功耗等诸多因素有关。文献[2]研究了不同类型滑翔器的运动状态、剩余浮力大小等对滑翔器滑翔效率的影响; 文献[3]从做功的角度研究了滑翔姿态对滑翔器滑翔效率的影响; 文献[4]分析了机翼展弦比、后掠角对升阻比的影响。以上文献在分析滑翔效率时均没有综合考

收稿日期: 2019-07-26

作者简介: 肖冬林(1990-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事船舶操纵性及水下潜器总体设计研究。

基金项目: 国家重点研发项目“可变翼型双功能深海无人航行器”(2017YFC0306300); 重点研发计划“海洋运载装备标准研究”(2017YFF0208402)。

虑水平速度。为了使水下滑翔器具有一定的机动性及抵抗海流能力, 水平滑翔速度也是一种重要的滑翔性能指标。

通常的水下滑翔器主体采用回转型, 主要依靠滑翔翼调节水动力中心, 有效载荷量相对较低。扁平构型主体具有升阻比高、有效载荷大的优势, 是中大型远程水下滑翔器的重要发展方向。

本文采用单位重量滑翔器、单位水平速度所耗功率作为滑翔效率的评价指标, 研究了扁平型水下滑翔器的滑翔运动特性, 给出了滑翔效率最高的滑翔姿态, 并进行了垂直面滑翔运动仿真。

1 水下滑翔器滑翔特性分析

1.1 受力分析

对滑翔器垂直面定常滑翔状态进行受力分析, 如图 1 所示。其中: D 表示阻力; L 表示升力; M 表示滑翔器受到的俯仰力矩水动力; α 表示攻角; ξ 表示滑翔角, 即速度与水平方向的夹角; m_0g 表示剩余浮力; 坐标原点 O 位于均衡态滑翔器的浮心。

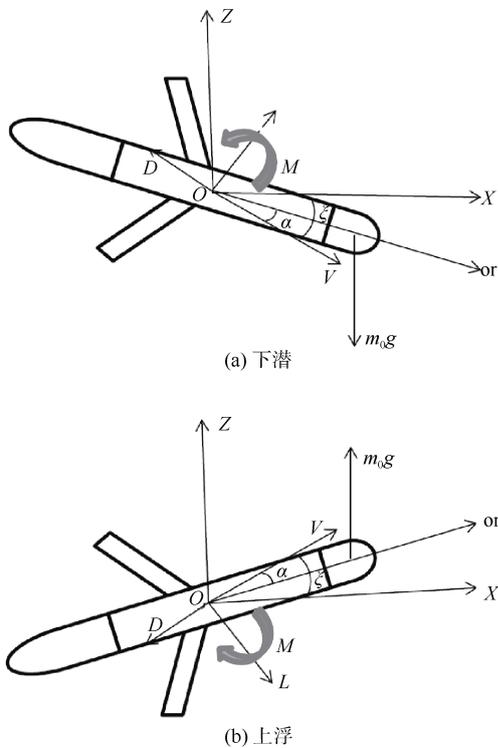


图 1 水下滑翔器受力分析

Fig. 1 Force analysis of underwater glider

受力平衡需满足:

$$D \sin \xi + L \cos \xi - m_0 g = 0 \quad (1)$$

$$D \cos \xi - L \sin \xi = 0 \quad (2)$$

$$M - m_0 g l \cos(\xi + \alpha) - m g h \sin(\xi + \alpha) = 0 \quad (3)$$

式中: l 表示剩余浮力作用中心到坐标原点 O 的距离; h 表示稳心高; m 表示滑翔器质量。滑翔器水动力系数无论滑翔模式或动力推进模式均可以按下式进行简化^[5]:

$$D = \frac{1}{2} \rho L_0^2 V^2 C_D \approx (K_{D0} + K_D \alpha^2) V^2 \quad (4)$$

$$L = \frac{1}{2} \rho L_0^2 V^2 C_L \approx (K_{L0} + K_L \alpha) V^2 \quad (5)$$

$$M = \frac{1}{2} \rho L_0^3 V^2 C_M \approx (K_{M0} + K_M \alpha) V^2 \quad (6)$$

式中: ρ 表示海水密度; L_0 表示滑翔器总长; C_D 、 C_L 、 C_M 分别表示无因次的阻力系数、升力系数及俯仰力矩系数; K_D 、 K_L 等表示滑翔器的水动力系数, 可认为是常数。

1.2 滑翔效率指标

从能耗的角度研究滑翔器的续航力, 本文采用的指标为单位重量水下滑翔器移动单位水平距离所需能耗^[6]:

$$E = \frac{W}{mg \cdot s} = \frac{P}{mg \cdot V_x} = \frac{1}{mg} \left(\frac{\rho L_0^2 C_D}{2 \eta_0 \cos^3 \xi} V_x^2 + \frac{P_1}{V_x} \right) \quad (7)$$

式中: E 表示能耗系数; W 表示重量为 mg 的滑翔器水平移动距离为 S 时的总能耗; V_x 表示平均水平速度; P 表示平均功率, 包括浮力调节系统平均功率 P_0 ; 姿态调节系统、传感器等搭载仪器及通信系统平均功率 P_1 。

$$P_0 = m_0 g V_z / \eta_0 = D V / \eta_0$$

式中: $m_0 g$ 表示平均剩余浮力大小; V_z 表示平均垂直速度大小; η_0 表示剩余浮力调节系统机械效率。

显然, 能耗系数 E 越小, 水下滑翔器滑翔效率越高。

由式 (2)、(4)、(5) 可得:

$$\xi = \arctan \left(\frac{K_{D0} + K_D \alpha^2}{K_{L0} + K_L \alpha} \right)$$

对于特定水下滑翔器, 总长 L_0 、 η_0 、 P_1 均可认为是定值。忽略雷诺数的影响, 式 (7) 中阻力系

数 C_D 及滑翔角 ξ 可认为仅与滑翔姿态（攻角 α ）有关。因而能耗系数 E 与水平滑翔速度 V_x 及滑翔姿态（攻角 α ）有关。

式（7）括号中第 1 项表示滑翔器克服水动力阻力的功耗，与滑翔姿态和水平滑翔速度有关；第 2 项表示滑翔器搭载仪器设备功耗，仅与水平滑翔速度有关。定义仅与滑翔姿态相关的滑翔效率函数 $f(\alpha)$ ：

$$f(\alpha) = \frac{C_D}{\cos^3 \xi} \quad (8)$$

显然， $f(\alpha)$ 越大，剩余浮力调节系统功耗越大，能耗系数越大。定义使 $f(\alpha)$ 在定义域内取得最小值的 α 为最优滑翔姿态攻角，最优攻角记为 α_p ，再对式（7）求导，可得到使得 E 取得极小值最优水平速度 V_{xp} ：

$$V_{xp} = \sqrt[3]{\frac{\eta_0 P_1}{\rho L_0^2 f(\alpha_p)}} \quad (9)$$

得到了最优滑翔姿态及最优水平速度，并获取最优滑翔状态下的水动力。根据受力平衡方程（1）-（3）可得到水下滑翔器的设计最优剩余浮力 $m_0 g$ 及相应的剩余浮力力臂 l 或稳心高 h 。

本文研究的问题是相同水平速度下，不同姿态角的滑翔效率。

2 扁平型水下滑翔器水动力特性计算分析

2.1 水动力 CFD 计算及试验验证

本文研究的扁平型水下滑翔器水动力外形主要由主体、滑翔翼及舵操纵面组成。主体为长 3.7 m、最大宽度 0.76 m、最大高度 0.35 m 的扁平形体，滑翔翼展长 2.1 m。

采用商用 CFD 计算软件 STAR CCM+ 对扁平型水下滑翔器进行了操纵性水动力仿真计算。计算网格采用六面体网格，计算域为艇首向前 1.5 倍艇长，艇尾向后 3 倍艇长，周向 2 倍艇长。网格数量约 150 万，艇体表面 y^+ 取 50。^[7]

计算速度 2 kn（雷诺数 $Re=3.52 \times 10^6$ ），不同攻角下，垂向力系数 Z' 及俯仰力矩系数 M' 与风洞试验结果比较见图 2。风洞试验模型缩尺比 1 : 1.2，试验模型与滑翔器满足雷诺数相似，试验风速对应滑翔器水中航速为 1.028 8 m/s。

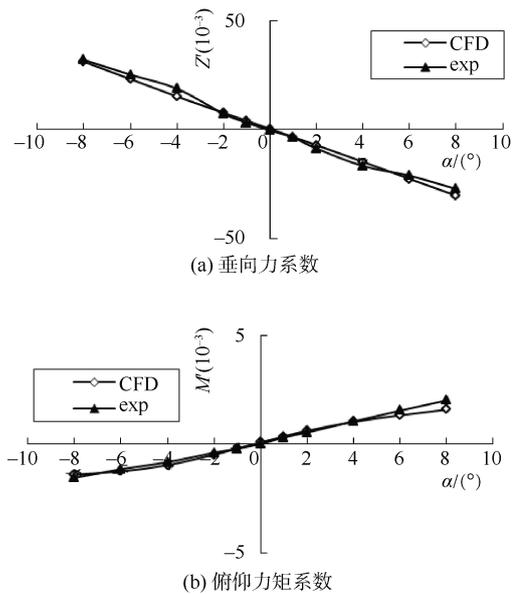


图 2 计算结果与试验结果对比
Fig. 2 Comparison of CFD results with experimental results

计算结果与试验结果吻合较好，由小角度回归得到的位置导数 Z_w' 相对误差 4.1%， M_w' 相对误差 14.6%。 M_w' 相对误差偏大，这主要是因为航速较低、水动力中心位置靠近潜航器中心，小攻角下俯仰力矩绝对值较小。整体上计算误差在可接受范围内，因此计算位置导数所采用的数值计算方法是可信的。

2.2 扁平型水下滑翔器水动力特性

通过系列 CFD 计算，得到了扁平型水下滑翔器水动力系数 K_{D0} 、 K_D 、 K_{L0} 、 K_L 、 K_{M0} 、 K_M 。

得到水动力系数后，根据式（4）-（6）可得到升阻比 λ ($\lambda=L/D$) 随攻角 α 的变化曲线。

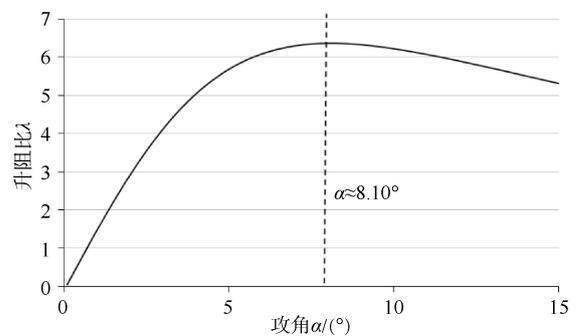


图 3 升阻比-攻角曲线
Fig. 3 Curve of lift drag ratio-attack angle

由图 3 可知, 扁平型水下滑翔器最大升阻比约为 6.4, 对应的攻角约 8.10°。传统回转体构型的水下滑翔器即使在搭载了高展弦比滑翔翼的情况下, 最大升阻比只能达到 5 左右^[8]。本文研究的扁平型水下滑翔器较传统回转型水下滑翔器具有更大的最大升阻比。

3 滑翔性能计算及运动仿真

3.1 滑翔性能计算

据式 (1) – (8) 可得到 $f(\alpha)$ 随攻角 α 的变化曲线, 见图 4。

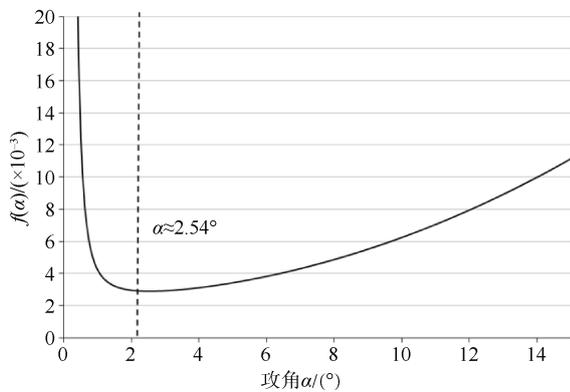


图 4 $f(\alpha)$ – 攻角曲线

Fig. 4 Curve of $f(\alpha)$ – attack angle

由图 4 可知, 扁平型水下滑翔器最优滑翔姿态攻角约为 2.54°。根据 $f(\alpha)$ 随攻角 α 的变化曲线, 要使剩余浮力做功较最优滑翔角增幅 10% 以内, 则扁平型水下滑翔器设计攻角范围应为 1.54°~4.27°, 对应的滑翔角范围为 10.8°~23.8°; 要使剩余浮力做功较最优滑翔角增幅 5% 以内, 则扁平型水下滑翔

器设计攻角范围应为 1.75°~3.73°, 对应的滑翔角范围为 11.7°~21.3°。

由式 (1) – (6) 可得到水平滑翔速度为

$$V_x = \sqrt{\frac{2m_0g}{\rho L_0^2 C_D} \sin \xi \cos^2 \xi} \quad (10)$$

给定剩余浮力, $g(\alpha) = \sqrt{\frac{\sin \xi}{C_D} \cos \xi}$ 可以表示

不同滑翔姿态下的水平速度大小。 $g(\alpha)$ 最大的攻角即为水平滑翔速度最大的滑翔姿态。扁平型水下滑翔器 $g(\alpha)$ 随 α 的变化曲线如图 5 所示。

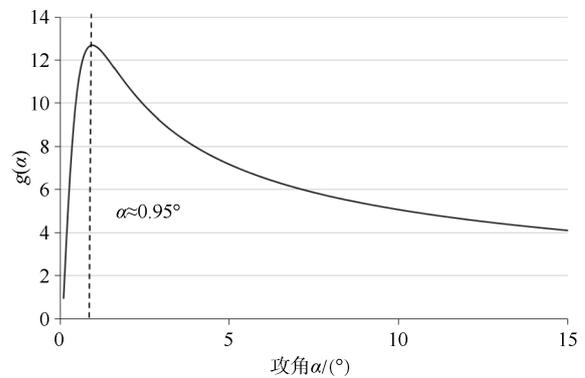


图 5 $g(\alpha)$ – 攻角曲线

Fig. 5 Curve of $g(\alpha)$ – attack angle

由图 5 可知, 当攻角约为 0.95° 时, 扁平型水下滑翔器水平滑翔速度最大。

假定设计水平滑翔速度为 0.77 m/s, 则在水平速度最大的滑翔姿态 ($\alpha \approx 0.95^\circ$)、最优滑翔姿态 ($\alpha \approx 2.54^\circ$)、升阻比最大的滑翔姿态 ($\alpha \approx 8.10^\circ$) 3 种滑翔状态下, 对应的设计剩余浮力及滑翔运动参数如表 1 所示。

表 1 相同水平速度下典型状态滑翔运动参数比较

Table 1 Comparison of typical gliding motion parameters at same horizontal speed

攻角 $\alpha / (^\circ)$	设计剩余浮力 m_0g/N	滑翔角 $\xi / (^\circ)$	升阻比 λ	$f(\alpha) / (\times 10^{-3})$	滑翔速度 $V / (m/s)$
0.95	25.8	35.8	1.4	4.47	0.95
2.54	43.3	15.6	3.6	2.90	0.80
8.10	130.4	8.9	6.4	4.93	0.78

根据表 1, 结合式 (7), 以相同水平滑翔速度运动, 升阻比最高的滑翔姿态 ($\alpha \approx 8.10^\circ$) 较最优滑翔姿态 ($\alpha \approx 2.54^\circ$) 剩余浮力做功增大

70%, 水平速度最大的滑翔姿态 ($\alpha \approx 0.95^\circ$) 则较最优滑翔姿态 ($\alpha \approx 2.54^\circ$) 剩余浮力做功增大

3.2 滑翔运动仿真计算研究

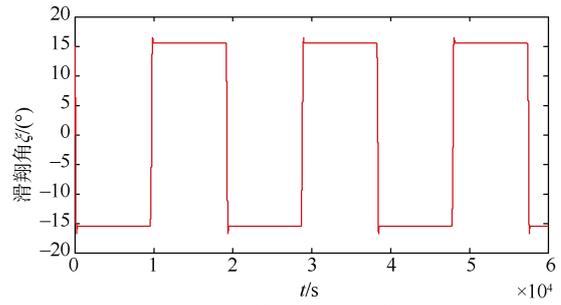
由式 (1) – (3) 可知, 对于水动力外形一定的水下滑翔器, 可以通过改变剩余浮力力臂或稳心高来调节滑翔姿态角。通过设置不同的剩余浮力及稳心高, 对 3 种典型滑翔状态进行仿真计算。仿真计算模型采用六自由度操纵运动数学模型, 根据扁平型水下滑翔器的水动力特性对数学模型进行了适当简化。

3.2.1 不考虑环境因素改变的运动仿真

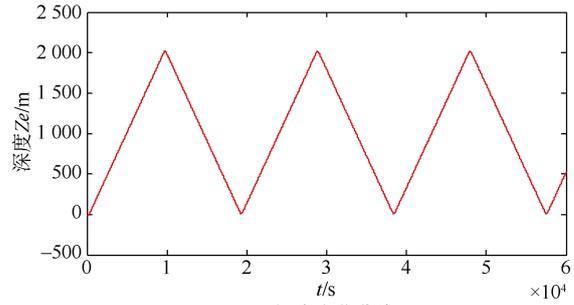
不考虑海水密度随深度的变化及艇体压缩等导致剩余浮力变化, 对水平滑翔速度最大的滑翔状态、最优滑翔状态及升阻比最高的滑翔状态 3 种典型滑翔姿态进行了 2 000 m 滑翔运动仿真。

不同滑翔姿态, 仿真计算得到的单周期运动参数如表 2 所示。

表 2 中单周期深度差 ΔZe 表示下潜最大深度和上浮最小深度之差。不同滑翔姿态下平均水平滑翔速度略有差异, 是由于受到了转换段的影响。单周期剩余浮力做功 $W_0=2m_0g \Delta Ze/\eta_0$ 。



(a) 滑翔角变化曲线



(b) 深度变化曲线

图 6 最优滑翔姿态滑翔运动仿真结果 ($m_0g = 43.3 \text{ N}$)
Fig. 6 Simulation results of optimal gliding attitude ($m_0g= 43.3 \text{ N}$)

表 2 典型状态滑翔运动仿真结果

Table 2 Simulation results of typical gliding attitudes

剩余浮力 m_0g/N	稳定滑翔角 $\xi / (^\circ)$	单周期深度差/m	单周期水平距离 s/m	平均水平速度 / (m/s)
25.8	35.8	2 035.0	5 753	0.752
43.3	15.6	2 010.9	14 571	0.763
130.4	8.9	1 997.4	25 763	0.767

假定剩余浮力调节系统机械效率 $\eta_0=0.4$, 扁平型水下滑翔器质量 650 kg, 则不同滑翔姿态下单周期剩

余浮力做功、仅考虑剩余浮力做功的能耗系数 E_0 及根据式 (7) – (8) 得到的 $f(\alpha)$ 的比较如表 3 所示。

表 3 典型状态滑翔运动效率分析

Table 3 Gliding efficiency analysis of typical gliding attitudes

剩余浮力 m_0g/N	稳定滑翔角 $\xi / (^\circ)$	剩余浮力做功 W_0/KJ	$E_0 / (\times 10^{-3})$	$f(\alpha) / (\times 10^{-3})$
25.8	35.8	262.5	71.6	4.72
43.3	15.6	435.4	46.9	3.00
130.4	8.9	1 302.3	79.3	5.03

仿真结果表明, 最优滑翔姿态下, 单位水平距离浮力调节系统做功远低于水平滑翔速度最大滑翔姿态及升阻比最大的滑翔姿态。

3.2.2 考虑环境因素的运动仿真

随着下潜深度的变化, 由于海水密度变化及艇体压缩, 水下滑翔器受到的剩余浮力会产生变化。

海水密度随深度的变化特性采用中国南海典型海域实测数据^[9]。滑翔器艇体排水体积变化量近似认为随海水深度线性变化, 根据有限元分析结果, 艇体排水体积随深度的变化量 $d\nabla$ 可表示成如下形式:

$$d\nabla = -k \cdot Z_e \tag{11}$$

根据有限元分析结果, k 可取为 1.56×10^{-6} 。

设定剩余浮力 43.3 N, 考虑海水密度变化及艇体压缩的 2 000 m 滑翔运动仿真结果如图 7 所示。

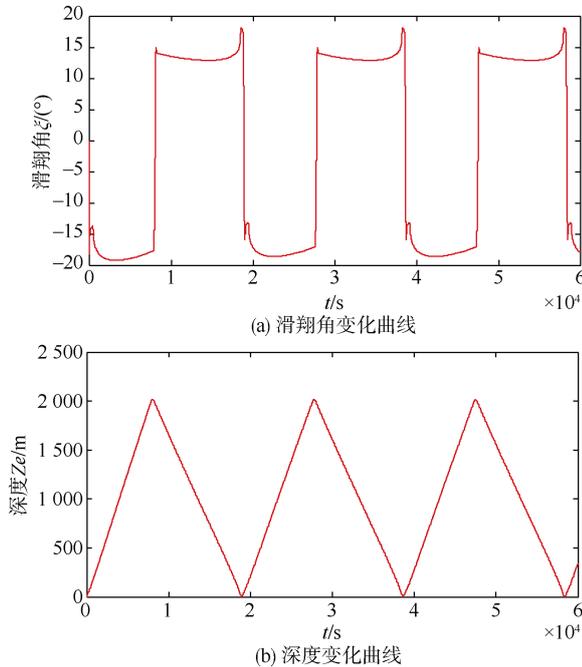


图 7 考虑环境因素的最优滑翔姿态滑翔运动仿真结果 ($m_0g = 43.3 \text{ N}$)

Fig. 7 Simulation results of optimal gliding attitude considering environmental factors ($m_0g = 43.3 \text{ N}$)

仿真结果表明: 下潜滑翔角为 $13.2^\circ \sim 18.6^\circ$, 上浮滑翔角 $12.9^\circ \sim 18.1^\circ$, 深度差 $\Delta Ze = 2\ 013.2 \text{ m}$, 单周期水平滑翔距离 $14\ 759 \text{ m}$, 单周期时间为 $19\ 719 \text{ s}$, 平均水平滑翔速度 0.748 m/s 。计算得到 $f(\alpha)$ 为 3.08, 较不考虑环境因素的仿真结果略有增大, 这是由于滑翔角大都处在滑翔效率较优的范围内。

4 结束语

本文采用单位重量滑翔器、单位水平速度所耗功率作为滑翔效率的评价指标, 研究了扁平型水下滑翔器的滑翔运动特性, 得到了如下结论:

1) 本文采用 CFD 方法获取了扁平型水下滑翔器操纵性水动力系数, CFD 计算结果与风洞试验结果符合良好;

2) 本文研究的扁平型水下滑翔器最大升阻比为 6.4, 大于传统回转型主体的水下滑翔器;

3) 基于本文滑翔效率评价指标得到的最优滑翔姿态攻角约 2.54° , 相同水平滑翔速度下, 浮力调节系统功耗远低于水平滑翔速度最大的滑翔姿态及升阻比最高的滑翔姿态;

4) 本文给出了扁平型水下滑翔器滑翔效率较优的滑翔姿态设计范围: 剩余浮力做功较最优滑翔姿态增幅 5%、10% 以内的攻角范围分别为 $1.75^\circ \sim 3.73^\circ$ 、 $1.54^\circ \sim 4.27^\circ$, 对应的滑翔角范围分别为 $11.7^\circ \sim 21.3^\circ$ 、 $10.8^\circ \sim 23.8^\circ$ 。

5) 本文对扁平型水下滑翔器进行了典型滑翔姿态下的 2 000 m 滑翔运动仿真, 仿真结果对滑翔性能分析结论进行了进一步验证。

参考文献

- [1] BACHMAVER R, LEONARD N E, GRAVER J, et al. Underwater gliders: recent developments and future applications[C]// IEEE International Symposium on Underwater Technology (UT04). US: IEEE, 2004.
- [2] JENKINS S A, HUMPHREYS D E, SHERMAN J, et al. Underwater glider system study[R]. UC San Diego: Scripps Institution of Oceanography, 2003.
- [3] 马冬梅, 马峥, 张华, 等. 水下滑翔机水动力性能分析及滑翔姿态优化研究[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2007, 22(6): 703-708.
- [4] 武建国, 陈超英, 王延辉, 等. 水下滑翔器浮力驱动效率分析[J]. 机械工程学报, 2009, 45(4): 172-176.
- [5] GRAVER J G. Underwater gliders: dynamics, control and design[D]. Princeton: Princeton University, 2005.
- [6] 肖冬林, 张华, 李迎华, 等. 混合驱动水下滑翔器滑翔效率及优化研究[J]. 船舶力学, 2018, 22(8): 977-984.
- [7] 张楠, 杨仁友, 沈泓萃, 等. 数值拖曳水池与潜艇快速性 CFD 模拟研究[J]. 船舶力学, 2011, 15(1): 17-24.
- [8] 李志伟, 崔维成. 水下滑翔机水动力外形研究综述[J]. 船舶力学, 2012, 16(7): 829-837.
- [9] 肖冬林. 混合驱动水下滑翔器效率分析与运动性能研究[D]. 北京: 中国舰船研究院, 2016.

(责任编辑: 曹晓霖)