

doi:10.3772/j.issn.1002-0470.2019.08.008

水下滑翔蛇形机器人滑翔状态水动力参数计算及外形优化^①

赵凯凯^② * * * * * 李 斌 * * * 张国伟 * * * 常 健^③ * * *

(* 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室 沈阳 110016)

(** 中国科学院机器人与智能制造创新研究院 沈阳 110016)

(*** 中国科学院大学 北京 100049)

摘 要 针对水下滑翔机机动性能较差、运动式单一等问题,提出了一种新型水下滑翔蛇形机器人(UGSR)。该机器人结合了蛇形机器人机动性高、运动方式多样的特点,有效改善了水下滑翔机的不足。为获得水下滑翔蛇形机器人处于滑翔状态时的阻力、升力以及纵倾力矩,本文采用计算流体动力学方法,利用 CFX 软件对第二代新型的水下滑翔蛇形机器人的水动力参数进行了求解。针对机器人升阻比小,滑翔效率低的问题,本文对两种滑翔机的翼型进行分析,通过改变该机器人的头部、尾部的长度进行多组仿真实验,并将仿真实验结果进行有效对比得出最优结果,进一步提升了水下滑翔蛇形机器人滑翔性能。
关键词 水动力性能,水动力参数,外形优化,水下滑翔蛇形机器人(UGSR),水下机器人

0 引 言

近些年来,随着我国对深海探测、海上作业、侦察等方面的重视,水下机器人的研究具有重要的意义。水下滑翔机具有长航时、噪音小、维护简单等特点,逐渐成为水下机器人的热点研究方向之一。水下滑翔机通过调节自身的净浮力,以及机翼产生的水平方向分力,实现滑翔机的上浮和下潜运动。国外具有代表性的水下滑翔机包括 Slocum 滑翔机^[1]、Seaglider 滑翔机^[2]、Spray 滑翔机^[3]等,国内比较典型的水下滑翔机包括中科院沈阳自动化研究所的海翼号水下滑翔机和天津大学的海燕号水下滑翔机等。由于水下滑翔机受到自身结构的限制,导致其速度较慢、机动性较差、运动方式单一。而对于水下蛇形机器人的研究,具有代表性的机器人包括 Eelume^[4]以及水陆两栖的蛇形机器人 ACM-R5^[5]、探查者 III^[6]等,它们通过蛇形步态产生水动力实现运

动,在水中运动灵活,可实现快速转向、上浮及下潜等运动。但是其受制于能源,不能进行长时间的运动。结合这两类机器人的优点,本文提出了一种新型水下滑翔蛇形机器人(underwater gliding snake-like robot, UGSR)^[7],其具有良好的续航能力和较好的机动性。本文的研究平台是以第一代水下滑翔蛇形机器人为基础,并对其进行了相应的改进,使其伸缩关节具有 3 个自由度,柔顺性更好、机动性更强。

目前对水动力计算的主要方法包括:母型估算法、拘束模型试验、实际数据系统辨识以及 CFD 数值计算等。母型估算法计算结果易出错,拘束模型试验成本高、系统辨识耗时,而随着计算能力的不断提高,CFD 计算方法逐渐被广泛应用^[8-11]。本文首先采用 CFD 计算方法,应用 CFX 计算软件对水下滑翔蛇形机器人进行水动力仿真,以获得水动力参数。其次,在对水下滑翔蛇形机器人进行水动力仿真、拟合水动力参数时发现,其升阻比太小,滑翔效

① 国家重点研发计划(2017TFB1300103)和国防科技创新特区资助项目。
② 男,1995 年生,硕士;研究方向:水动力仿真,张拉整体机器人;E-mail: zhaokaikai@sia.cn
③ 通信作者,E-mail: changjian@sia.cn
(收稿日期:2018-11-06)

率低,需要对其进行外形优化。在外形方面,国内外水下滑翔机机体中部多为圆柱体,且机翼多用矩形平板翼。Slocum 滑翔机中间是圆柱体,而头部和尾部线型采用椭圆,机翼采用矩形平板翼。Seaglider 滑翔机外形采用水滴形,机翼选择曲面翼。海翼号和海燕号采用的外形与 Slocum 相似。最后,本文选取两种矩形平板翼对水下滑翔蛇形机器人进行外形优化,提高其滑翔效率。

1 水下滑翔蛇形机器人

该机器人为第二代滑翔蛇形机器人,如图 1 所示,其机构设计采用模块化设计。滑翔蛇形机器人长 1.8 m,直径为 0.12 m,一共包括 5 个关节,其中包括两个伸缩关节,用于调节浮力的大小,其余 3 个关节都具有两个自由度,用于改变运动方向;机翼和尾翼采用矩形平板翼,机翼安装在机体体长的 60% 处,位于远离头部的一端,翼展为 750 mm。图 1 中 1、9 为半球体,2 为尾翼,3、5、8 为普通俯仰偏转关节,4、7 为伸缩关节,5 为机翼。相比于第一代滑翔蛇形机器人,该机器人每个伸缩关节具有 3 个自由度,即可实现俯仰、偏转和伸缩运动,其机动性有了很大的提高。当伸缩关节进行伸缩时,通过改变机器人的长度,使得浮心和重心发生变化,从而实现上浮和下潜运动。利用尾部关节的偏转,可实现转向,其转弯半径小,表明机器人的机动性较高。

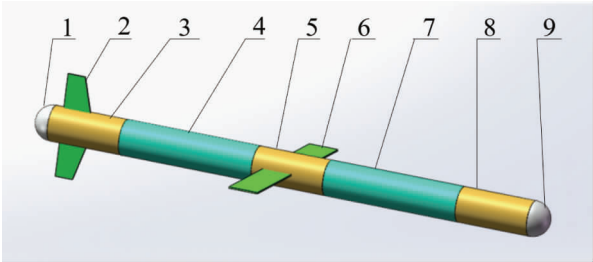
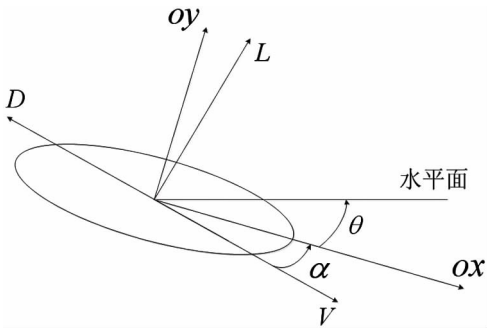


图 1 水下滑翔蛇形机器人外形图

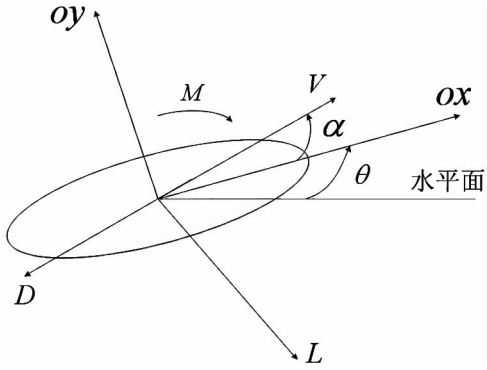
2 水下滑翔蛇形机器人滑翔状态水动力参数计算

水下滑翔蛇形机器人在水中运动时会受到水动力的影响,而水动力的大小对机器人的运动有着重要的作用。机器人在水中上浮和下潜,受力情况如

图 2 所示。假设其体坐标系原点在其质心处, x 轴沿着机身轴线,指向头部为正。 z 轴垂直于纸面,向外为正,采用右手坐标系。可知机器人受到阻力 D 、升力 L 以及纵倾力矩 M 。其中 θ 是俯仰角, α 为攻角(在这里定义:下潜时,攻角为正;上升时,攻角为负)。



(a) 下潜状态



(b) 上浮状态

图 2 机器人受力分析

文献[12]中提到,升力、阻力与纵倾力矩与攻角存在以下关系:

$$D \approx (K_{D0} + K_D \alpha^2) V^2$$

$$L \approx (K_{L0} + K_L \alpha) V^2$$

$$M \approx (K_{M0} + K_M \alpha) V^2$$

其中, V 是滑翔机的速度,而 K_{D0} 、 K_D 、 K_{L0} 、 K_L 、 K_{M0} 、 K_M 是水动力参数,可通过水动力计算的方法进行求解。为计算水下滑翔蛇形机器人的升力、阻力及纵倾转矩,需要对水动力系数进行求解。本文采用计算流体力学的方法进行求解。

由于该水下滑翔蛇形机器人在水下运动时多处于滑翔状态,故该机器人在进行水动力仿真时,可当作水下滑翔机。而由于其伸缩关节的伸缩位移相对

于机器人长度来说较小,故可取其处于中性状态,即机器人长度为 1.8 m。水下滑翔蛇形机器人的水动力参数计算流程见图 3。

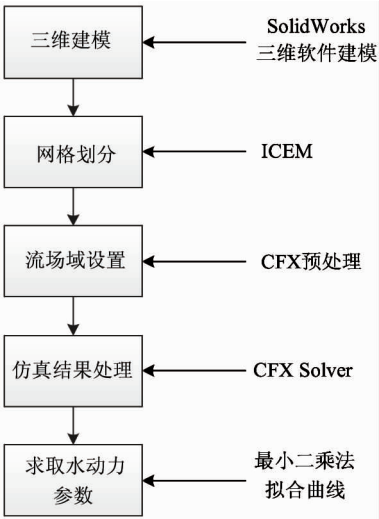


图 3 水动力参数计算流程

2.1 网格划分

网格划分是利用 ICEM 工具进行划分,包括对滑翔蛇形机器人外表面网格、流体域的体网格以及边界层网格。计算域设置为圆柱体,其直径为水下滑翔蛇形机器人在直径方向的特征长度的 10 倍,水流入口距离滑翔蛇形机器人头部为机器人长度的 3 倍;流体域出口距离滑翔蛇形机器人尾部为体长的 4 倍。如图 4 所示。

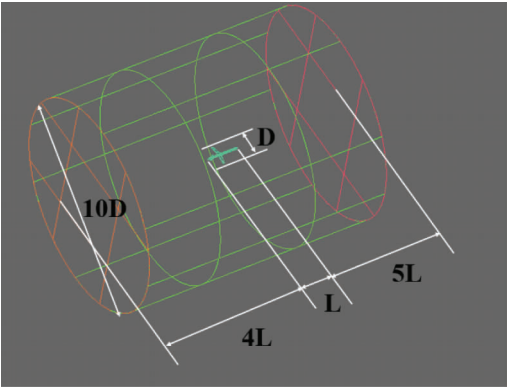


图 4 流体域

对于网格尺寸,利用文献[13]的方法,求出平均体网格尺寸、平均面网格尺寸、棱柱层总高、棱柱层起始高度以及膨胀系数。将滑翔蛇形机器人的长度以及给定的速度带入公式中可计算出平均体网格

尺寸为 358.9 mm,平均面网格尺寸为 23.9 mm,棱柱层起始高度为 0.18 mm,膨胀系数为 1.24。设置棱柱层数为 15 层。其中建立长方体作为加密区(见图 5),对水下滑翔蛇形机器人机体附近的流域进行加密。采用四面体非结构网格进行网格划分,网格划分结果见图 6。此外,网格质量在 0.3 以上,满足网格质量要求。

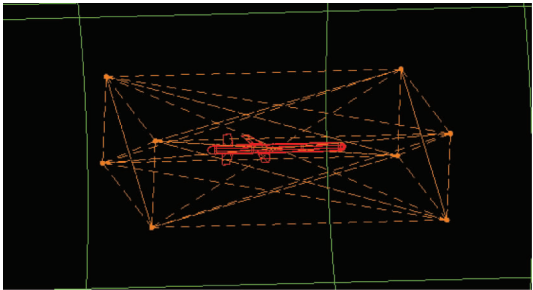
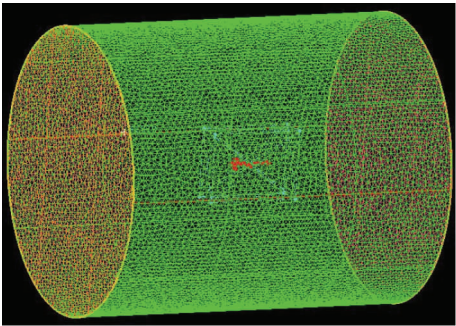
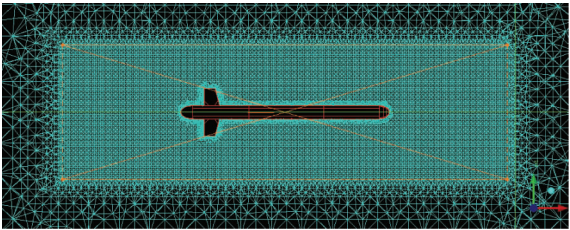


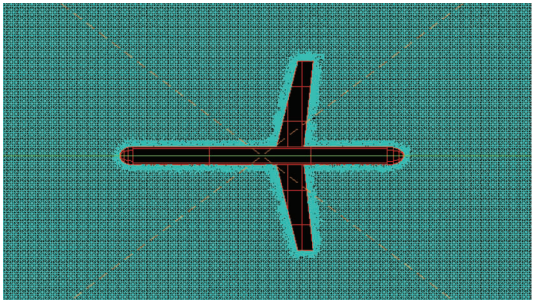
图 5 加密区



(a) 全局网格划分效果图



(b) 网格划分正视截面图



(c) 网格划分俯视截面图

图 6 网格划分结果

2.2 流体域设置及求解

对于流场域,设置流体域入口为速度入口,流体域出口为压力出口,由于是远场,故设置出口压力为 0。滑翔蛇形机器人外表面设置为无滑移壁面,流体域表面设置为自由滑移壁面。设置机器人的滑翔速度为 0.25 m/s。在 20 ℃ 时,水的运动粘性系数 ν 为 $1.01 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$,则雷诺数 Re 约为 4.46×10^{-5} ,因此,应选择湍流模型。在进行仿真时,认为流体为不可压缩且为连续性介质,流体动力学控制方程采用描述牛顿流体的连续方程以及 N-S 方程^[13],湍流方程采用 $k-\omega$ 模型对该机器人的水动力进行求解。攻角取 -8° 、 -5° 、 -2° 、 0° 、 2° 、 5° 、 8° 。

通过一系列仿真,可分别得到滑翔蛇形机器人在 x 、 y 轴受到的力以及绕 z 轴的力矩。根据力的矢量分解,将滑翔蛇形机器人受到 x 轴、 y 轴的力分解,可得到滑翔蛇形机器人受到的阻力和升力。之后利用最小二乘法拟合可得到升力系数、阻力系数以及纵倾力矩系数,见表 1。

表 1 水动力参数						
K_D	K_{D1}	K_{D0}	K_L	K_{L0}	K_M	K_{M0}
12.95	0.29	5.57	10.58	0.22	-0.78	-0.09

同时,也可得到水下滑翔蛇形机器人在不同攻角下的升阻比,见图 7。

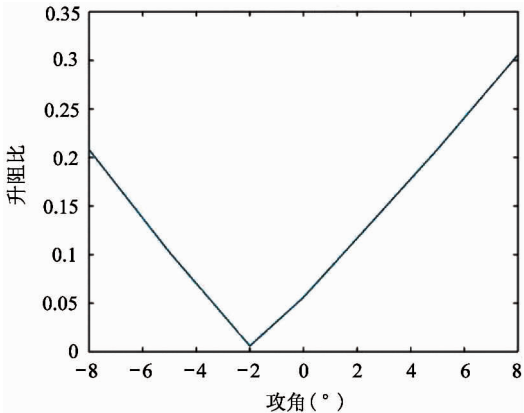


图 7 升阻比与攻角的关系

从图 7 可以看出仿真结果与理论值有偏差,但是升阻比最大不超过 0.35,即滑翔蛇形机器人受到

的阻力约为升力的 3 倍,表明该机器人的滑翔效率比较低,需要对其外形进行优化。

3 水下滑翔蛇形机器人外形优化

对于水下滑翔机外形,大多采用两种机体外形:水滴形与低阻层流形。由于水滴形外形复杂,且不适合对现有滑翔蛇形机器人进行外形优化,故选择低阻层外形。采用该方法,对于机体中部的圆柱体可不做改变,只需对头部和尾部的半球体进行优化,可取椭圆形。对于滑翔机的机翼可分为矩形平板翼和曲面翼,由于前者加工简单、水动力性能能满足一般的滑翔机,故大多数采用矩形平板翼。这里选用两种翼型进行优化:一种是矩形平板翼^[14](记为一号翼),另一种是沈阳自动化研究所的海翼号机翼(记为二号翼)。

3.1 一号翼水动力仿真

水下滑翔蛇形机器人机翼选取一号翼,机体中间空心圆柱体长度不变,改变头尾的长度,进行水动力仿真,通过观察升阻比,选取最佳的一组头尾长度参数。参考已有的滑翔机的参数,随机选取一组参数进行仿真。当选取头部长度为 80 mm,尾部长度为 120 mm 时,计算出的升阻比有明显提升,因此以这组参数作为参照,逐步对比,得到实验方案,见表 2。攻角均取 -8° 、 -4° 、 0° 、 4° 、 8° 。

表 2 一号翼仿真实验方案(mm)				
尾部长度 头部长度	尾部长度			
	100	110	120	130
70	---	---		---
80				
85	---	---		---
90	---	---		---

注: ---表示未做实验

为了与原有的外形做对比,速度仍取 0.25 m/s,设置相同的参数,进行仿真。最后得到各组实验的升阻比,见图 8。

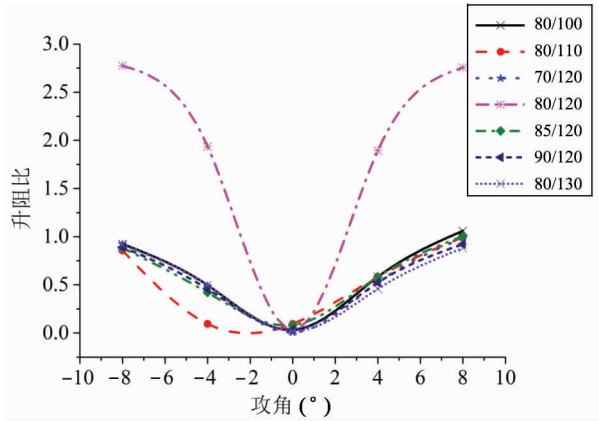


图8 一号翼仿真结果

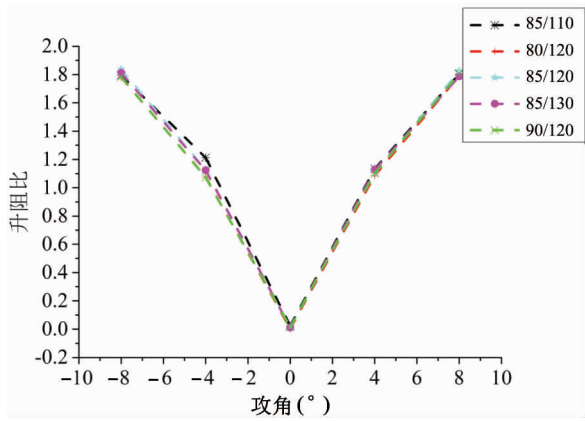


图9 二号翼仿真结果

从图中可知,当头部长度为 80 mm,尾部长度为 120 mm 时,升阻比最大,机器人的水动力性能最好。

3.2 二号翼水动力仿真

水下滑翔蛇形机器人机翼选取二号翼,机体中间空心圆柱体长度不变,改变头尾的长度,进行水动力仿真,通过观察升阻比,选择最优头尾长度参数。先取图 8 中最优的头尾长度进行仿真,根据仿真结果逐步更改头尾长度进行优化。最后实验方案见表 3。

表 3 二号翼实验方案(mm)

尾部长度 头部长度			
	110	120	130
80	---		---
85			
90	---		---

注: ---表示未做实验

为了与原有的外形做对比,速度仍取 0.25 m/s,设置相同的参数,进行仿真。最后可得各组实验的升阻比,见图 9。

由图 9 可知,机翼采用二号机翼仿真得到的升阻比相差不大。当头部长度为 85 mm,尾部长度为 120 mm 时,升阻比最大。与原样机相比,机器人的水动力性能有明显的提升效果。但是与采用一号翼的结果相比,水动力性能较差。

4 结 论

本文利用CFX软件对水下滑翔蛇形机器人的

水动力参数进行建模分析,并根据仿真结果对机器人的外形结构进行了重新设计,仿真结果证明机构改进的有效性。主要结果如下:

- (1) 获得滑翔蛇形机器人处于滑翔状态时的升力、阻力以及纵倾力矩,对该机器人进行了水动力仿真,求取其水动力参数。
- (2) 为提高滑翔蛇形机器人的滑翔效率,本文选取两种机翼,并且改变头尾的长度,对滑翔蛇形机器人进行外形优化,通过将仿真结果进行对比,找到最佳的一组参数。

未来将继续对水下滑翔蛇形机器人的水动力性能提升开展研究,以提高该类型机器人的运动性能。

参考文献

[1] 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

[2] 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: 424-436

[3] Sherman J, Davis R E, Owens W B, et al. The autonomous underwater glider ‘Spray’ [J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2001, 26:437-446

[4] Liljeback P, Mills R. Eelume: A flexible and subsea resident IMR vehicle [C]. In: *Oceans Aberdeen Conference, Aberdeen, UK, 2017. 1-4*

[5] Yamada H, Chigisaki S, Mori M, et al. Development of

amphibious snake-like robot ACM-R5 [C], In: Proceedings of the 36th International Symposium on Robotics, Tokyo, Japan, 2005. 433-440

[6] 李立,王明辉,李斌,等. 蛇形机器人水下 3D 运动建模与仿真[J]. 机器人,2015,37(3):336-342

[7] 唐敬阁,李斌,李志强,等. 水下蛇形机器人的滑翔运动性能研究[J]. 高技术通讯,2017,27(3):269-276

[8] Javaid M Y, Ovinis M, Hashim F B M, et al. Effect of wing form on the hydrodynamic characteristics and dynamic stability of an underwater glider[J]. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2017,9(4):382-389

[9] Li C, Wang P, Dong H C, et al. A simplified shape optimization strategy for blended-wing-body underwater gliders [J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2018, 58: 2189-2202

[10] 胡克,俞建成,张奇峰. 水下滑翔机器人载体外形设计与优化[J]. 机器人,2005,27(2):108-112 + 117

[11] 俞建成,张奇峰,吴利红,等. 水下滑翔机器人运动调节机构设计与运动性能分析[J]. 机器人,2005,27(5):390-395

[12] Leonard N E, Graver J G. Model-based feedback control of autonomous underwater gliders [J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2001, 26(4):633-645

[13] 胡志强. 海洋机器人水动力数值计算方法及其应用研究[D]. 沈阳:中国科学院沈阳自动化研究所,2013. 85-91

[14] 徐世勋,刘玉红,朱亚强,等. 翼型对水下滑翔机滑翔性能影响分析[J]. 中国机械工程,2017,28(3):286-29

Calculation of hydrodynamic parameters and shell optimization of gliding state of underwater gliding snake-like robot

Zhao Kaikai * * * * *, Li Bin * * *, Zhang Guowei * * *, Chang Jian * * *

(* State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016)

(** Institute for Robotics and Intelligent Manufacturing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016)

(*** University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract

Aiming at the problems of underwater glider, such as poor maneuverability, single motion and so on, we propose a novel underwater gliding snake-like robot (UGSR). The robot combine the characteristics of high mobility and various motion modes of the snake-like robot, which effectively improves the disadvantages of underwater glider. To obtain the drag, lift and pitch moment of the robot in the gliding state, this paper use the computational fluid dynamics method to solve the hydrodynamic parameters of the second generation of the new UGSR using CFX software. For the little lift-drag ratio of the robot and low gliding efficiency, this paper analyzes the airfoil of the two underwater gliders, and dose multiple simulation experiments by changing the length of the head and tail of the robot. The results are effectively compared to obtain the best result, which further improves UGSR's gliding performance.

Key words: hydrodynamic performance, hydrodynamic parameters, shell optimization, underwater gliding snake-like robot (UGSR), underwater robot