

基于 FFD 的翼身融合水下滑翔机外形优化设计

李靖璐, 王鹏, 陈旭, 董华超

(西北工业大学 航海学院, 陕西 西安 710002)

摘要:水下滑翔机发展至今大体上可以分成2个大类:常规布局外形水下滑翔机与非常规布局水下滑翔机。翼身融合水下滑翔机作为一种非常规布局水下滑翔机,因其独特的流体外形布局,具有更好的流体动力特性。但设计出具有优秀水动力性能的水下滑翔机外形较为困难,因此开展翼身融合水下滑翔机外形优化设计研究工作具有十分重要的意义。开展基于自由变形(FFD)的翼身融合水下滑翔机外形优化设计研究,以 FFD 参数化方法为核心,与 CFD 求解器、优化算法、网格变形方法相耦合,组成了完整的自动外形优化设计框架,并用该框架开展了翼身融合水下滑翔机外形优化设计工作。以翼身融合水下滑翔机下沉和上浮一个工作周期的平均阻力系数为目标函数,在考虑体积约束的条件下开展外形优化设计,优化结果表明翼身融合水下滑翔机的滑翔性能得到了明显提升。

关键词:海洋工程;翼身融合水下滑翔机;自由变形;外形优化设计框架

中图分类号: TP242

文献标志码: A

文章编号: 1000-2758(2020)03-0459-06

作为一种新型水下航行器,水下滑翔机因其航行时间长、航行距离远、监测范围广的特点成为了探测海洋环境的首选。水下滑翔机发展至今,按照其外形可以分为常规布局水下滑翔机和非常规布局水下滑翔机。翼身融合水下滑翔机作为一种非常规的水下滑翔机,采用机翼与机体平滑连接的方式,增大了升力面积,减小了表面阻力,因此具有更好的升阻比特性^[1]。但是这种独特的外形也带来了设计上的困难。随着计算流体力学(CFD)、最优化等学科的发展,基于 CFD 的外形设计在工业上取得了极大进步^[2]。

利用 CFD 开展外形优化设计首要的就是参数化方法。现有的参数化方法包括基于 CAD 的参数化、PARSEC 参数化、CST 参数化、B 样条参数化、FFD 参数化等^[3]。对于翼身融合水下滑翔机而言,基于 CAD 的参数化方法是将三维设计空间分割为一些二维截面,通过对二维截面的优化,得到优化后的三维几何外形^[4]。PARSEC 参数化、CST 参数化^[5]、B 样条参数化等作为成熟的翼型参数化方法,是将翼身融合水下滑翔机分割为几个翼型截面,通过对翼型的优化实现对整机的优化。而 FFD 参数

化方法通过对控制体的变形来操作所映射外形的变形,很好地保证了所研究外形的光滑性和连续性,且保留了相当好的局部变形能力,适用于复杂的三维外形。近年来,越来越多的学者在工程实际中选用这种参数化方法,包括气动外形优化^[6],车辆外形优化^[7]等,均取得了较好的效果。

本文旨在利用 FFD 参数化方法,实现对翼身融合水下滑翔机精细化变形;配合 CFD 求解器,优化算法及网格变形算法,形成一套外形优化设计框架,并对一种翼身融合水下滑翔机开展外形优化设计工作,以提升其水动力性能。

1 外形优化设计框架

本文搭建的外形优化设计框架如图 1 所示^[8],运行过程如下:

- 绘制几何外形初始网格及 FFD 控制体;
- 使用 FFD 参数化方法建立 FFD 控制体与几何目标的映射关系;
- 将网格文件导入 CFD 求解器中求解目标函

数及其梯度;

- 将计算结果传递至 SQP 算法,确定 FFD 控制体的变形量,间接变形几何外形;
- 根据几何表面网格变形更新整个计算域网格;
- 重复迭代输出最优外形;

下面主要介绍框架中的 FFD 参数化方法、网格变形算法及 SQP 优化算法。

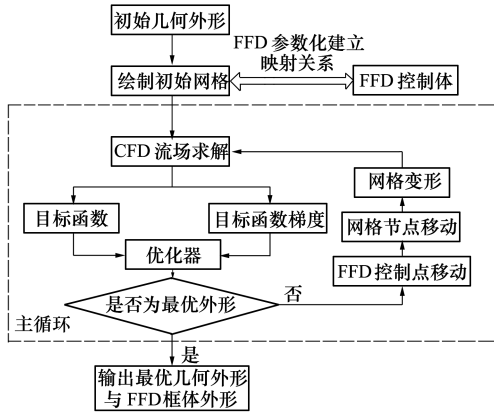


图 1 外形优化设计框架

1.1 FFD 参数化方法

FFD 参数化方法通过建立 FFD 控制点与目标外形表面点之间的数学映射关系,实现通过控制点的移动变形目标外形的目的,从而实现目标外形的参数化^[9]。其基本原理如下:

首先在 FFD 控制体上添加一个局部坐标系 $O'-STU$,任何点 X 在这个系统中具有 (s,t,u) 坐标,所以在全局坐标系 $O-XYZ$ 里,任意点 X 具有如下形式

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_0 + s\mathbf{S} + t\mathbf{T} + u\mathbf{U} \quad (1)$$

式中, \mathbf{X}_0 为局部坐标系的原点在全局坐标系下的向量表示。

任意点 \mathbf{X} 的局部坐标 (s,t,u) 很容易用线性代数方式表达,写成向量形式为

$$\begin{cases} s = \frac{\mathbf{T} \times \mathbf{U} \cdot (\mathbf{X} - \mathbf{X}_0)}{\mathbf{T} \times \mathbf{U} \cdot \mathbf{S}} \\ t = \frac{\mathbf{S} \times \mathbf{U} \cdot (\mathbf{X} - \mathbf{X}_0)}{\mathbf{S} \times \mathbf{U} \cdot \mathbf{T}} \\ u = \frac{\mathbf{S} \times \mathbf{T} \cdot (\mathbf{X} - \mathbf{X}_0)}{\mathbf{S} \times \mathbf{T} \cdot \mathbf{U}} \end{cases} \quad (2)$$

由(2)式可知, \mathbf{X} 的局部坐标 (s,t,u) 应满足

$$0 \leq s, t, u \leq 1$$

接下来在 FFD 控制体上建立控制点 $P_{i,j,k}, P_{i,j,k}$ 为 FFD 控制体上第 (i,j,k) 个控制点 (i,j,k 表示 FFD 控制体上分别沿着坐标轴 U, V, W 方向上的下标,每个方向被分为 l, m, n 份)。则 $P_{i,j,k}$ 可表示为

$$\mathbf{P}_{i,j,k} = \mathbf{X}_0 + \frac{i}{l}\mathbf{S} + \frac{j}{m}\mathbf{T} + \frac{k}{n}\mathbf{U}$$

$$i = 0, 1, \dots, l; j = 0, 1, \dots, m; k = 0, 1, \dots, n \quad (3)$$

故而,FFD 控制体空间内任一点的笛卡尔坐标 $\mathbf{X}(s,t,u)$ 可表示为

$$\mathbf{X} = \sum_{i=0}^l \sum_{j=0}^m \sum_{k=0}^n N_{i,p}(s)N_{j,q}(t)N_{k,r}(u) \quad 0 \leq s, t, u \leq 1 \quad (4)$$

式中, $N_{i,p}(s), N_{j,q}(t), N_{k,r}(u)$ 为以 s, t, u 为变量的 p, q, r 次基函数。

在按照(4)式建立了初始模型与 FFD 控制体上控制点的映射关系后,就可以通过改变 FFD 控制体上控制点 $P_{i,j,k}$ 的位置来改变内部几何模型的形状。

1.2 网格变形算法

在 1.1 节中,FFD 参数化方法建立了控制点与几何外形表面网格节点之间的映射关系,当控制点移动时,表面网格节点也会发生变形,为了对变形后的网格进行 CFD 求解,需要对空间网格更新,这就离不开网格变形。网格变形算法发展至今分成 3 大类:代数法、物理模型法和混合方法^[10]。其中代数法运算速度快,求解效率高,易于编程实现。本文采用的网格变形算法为基于弧长的代数型方法,其基本原理如下

$$\mathbf{X}_v = \mathbf{F} \cdot \mathbf{X}_s \quad (6)$$

式中: \mathbf{X}_s 是几何外形表面网格点的位移; \mathbf{X}_v 是空间网格节点的位移。二者通过弧长的归一化数 \mathbf{F} 进行求解。 \mathbf{F} 的求解以 i 方向为例,如(7)式所示。

$$s(1,j,k) = 0$$

$$s(i,j,k) =$$

$$\sum_{l=2}^i \sqrt{(x_l - x_{l-1})^2 + (y_l - y_{l-1})^2 + (z_l - z_{l-1})^2},$$

$$i = 2, 3, \dots, i_{\max}$$

$$\mathbf{F}_{i,j,k} = s_{i,j,k} / s_{i_{\max},j,k} \quad (7)$$

这样就可以实现根据几何表面网格节点的位移实现更新空间网格的目的。

1.3 SQP 优化算法

序列二次规划法(SQP)是目前公认的求解非线性优化问题的最有效方法之一,其收敛性好、计算效率高^[11]。SQP 的算法分为两部分,主迭代和子迭

代。主迭代产生一个序列,并求其收敛。在主迭代的每步迭代上,新产生一个二次规划子问题,用来指定主迭代的迭代方向,而子迭代本身的求解也是一个迭代过程。

SQP 算法迭代如下:

- ① 给定初始点 x^0 、收敛精度 ε 、令二次导数矩阵 $H^0 = E$,置 $k = 0$;
- ② 在点 x^k 简化原问题为二次规划问题;
- ③ 求解二次规划问题,并令 $S^k = S^*$;
- ④ 在方向 S^k 上对原问题目标函数进行一维搜索,得点 x^{k+1} ;
- ⑤ 判断 x^{k+1} 是否满足给定精度,符合则令 $k = k + 1$, $f^* = f(x^{k+1})$,输出最优解,终止计算,否则转⑥;
- ⑥ 修正二次导数矩阵 H^{k+1} ,令 $k = k + 1$,转到步骤②继续迭代。

2 外形优化仿真实例

2.1 前处理

利用外形优化设计框架对翼身融合水下滑翔机开展外形优化设计研究。初始水下滑翔机由 5 个 NACA 翼型放样得到,如图 2 所示。考虑到数值模拟的计算量及直接优化整机可能造成左右不对称问题,因此选用一半的滑翔机外形进行优化。

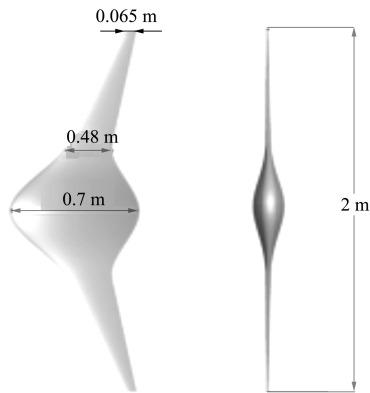


图 2 翼身融合式水下滑翔机

使用 ICEM 软件绘制结构化网格,计算域为长方体域,大小为 $20\text{ m} \times 20\text{ m} \times 8\text{ m}$,水下滑翔机位于计算域中心。设置入口边界条件为速度入口,速度大小为滑翔机航速 0.514 m/s ,出口压力设置为 0。边界层采用 O-Block 来模拟,取 y^+ 值为 1,第一层网格为 $0.000\ 2\text{ m}$,最终网格数共计 $932\ 432$ 。数值模拟

采用 RANS 方程作为控制方程, $k-\omega$ 湍流模型作为封闭方程,计算稳态条件下的滑翔机流体动力参数。数值离散采用二阶迎风格式,设置收敛条件为迭代 2 000 步或残差收敛小于 1×10^{-6} 。此外,求解器耦合有 Adjoint 方法^[12],可以快速高效地求得目标函数对设计变量的梯度。

绘制其外形 FFD 控制体如图 3 所示。控制体共计 120 个控制点,内部嵌有滑翔机表面网格,利用 FFD 参数化实现建立控制点与几何表面网格节点的映射关系。

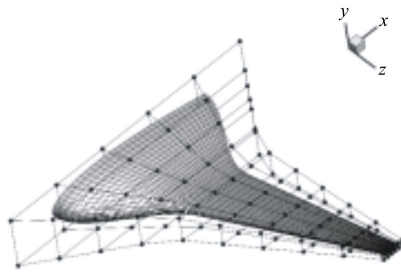


图 3 FFD 控制体

2.2 网格无关性分析

在开展外形优化设计工作之前,需要对网格无关性进行验证。对 4 种不同大小的网格进行数值仿真,网格量分别为 $385\ 235 (y^+ = 1)$, $485\ 938 (y^+ = 1)$, $932\ 432 (y^+ = 1)$, $205\ 058\ 9 (y^+ = 0.5)$ 。分别计算在 $0^\circ, 1^\circ, 2^\circ, 3^\circ, 4^\circ, 5^\circ$ 攻角下的升力因数和阻力因数,计算结果如图 4 所示。结果表明,随着网格量的增加,仿真结果越趋于一致。考虑到数值模拟和优化过程的计算量,最终选用 $932\ 432$ 的网格。

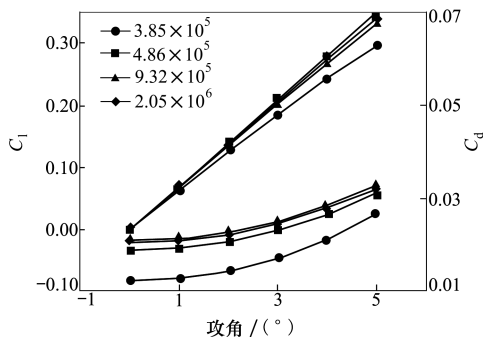


图 4 网格无关性验证

2.3 优化问题

浮力驱动式的水下滑翔机通过重浮心调节,实现水下的周期性、锯齿形运动。考虑水下滑翔机的

周期性上浮与下沉运动,以 3° 攻角下沉和 -3° 攻角上浮,0° 侧滑角,1 节流速,环境温度 20℃,海水密度 998.2 kg/m³,一个标准大气压作为工作条件。外形优化设计应满足:

- 一个运动周期内实现总的阻力因数最小。具体为:分别计算在 3° 和 -3° 攻角下的阻力系数,取其均值为总的阻力因数,即令 $C_{d,total} = (C_{d,下沉} + C_{d,上浮})/2$ 达到最小;

- 体积应约束在合理范围内,确保内部空间足够安装设备及电路。具体为优化后外形与初始外形体积比约束在 0.99 ~ 1 之间,即 $0.99 \leq V/V_{base} \leq 1$ 。

按照以上要求提出外形优化问题:

目标函数为最小化一个周期运动的阻力因数。

设计变量为 FFD 控制点的位移,控制点可以沿 x, y, z 3 个方向运动(命名为 x, y, z)。

约束条件为体积不等式约束。

完整的外形优化设计问题如表 1 所示。

表 1 优化问题表述

描述	定义	数量
目标函数	$\min(C_{d,total})$	1
设计变量	x	120
	y	120
	z	120
约束	$0.99 \leq V/V_{base} \leq 1$	1

2.4 优化结果与分析

优化迭代收敛曲线如图 5 所示,共迭代 43 次,相比于初始外形,一个运动周期的总阻力系数降低了 16.45%,同时,最优外形与初始外形的体积比为 0.9971,满足 0.99~1 的体积比约束条件。

对比优化前后的 FFD 控制体外形如图 6 所示,其中红色方点为初始控制点位置,绿色圆点为优化后控制点位置。在优化过程中,控制点产生位移进行移动,由于控制体和几何外形之间存在的映射关系,初始外形形状产生相应的变形。以滑翔机机梢、机翼与机体连接处、纵向对称面处的 3 个纵向截面和 1 个横向对称处截面为例,对比优化前后的外形变形如图 7 所示,绿色圆点代表优化后截面形状,红色方点代表优化前的截面形状。优化后滑翔机后缘机翼与机体连接处附近弦长减少;机翼处的厚度减少,后掠角略微增大;其余位置也进行了调整。

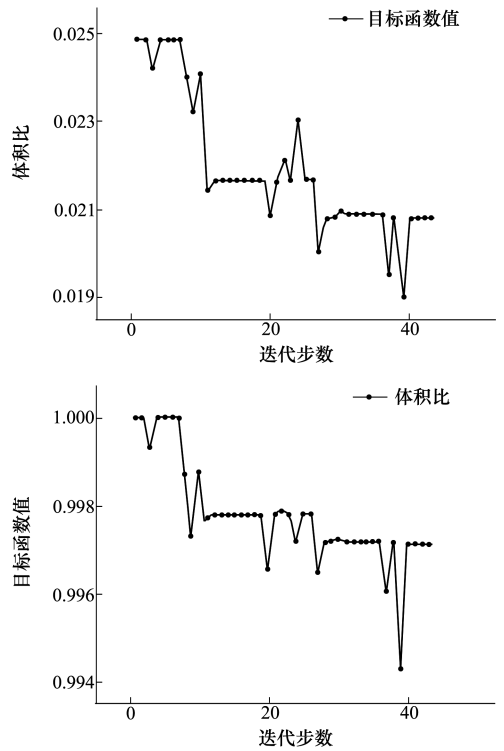


图 5 迭代过程

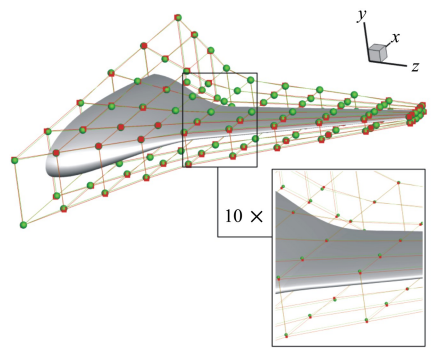


图 6 优化前后 FFD 控制体

对比优化前后的相关流体参数如表 2 所示。

表 2 优化前后相关参数

参数	优化前	优化后	变化率/%
下沉阻力因数	0.024 87	0.020 91	15.95
上浮阻力因数	0.024 87	0.020 65	17.00
总阻力因数	0.024 87	0.020 78	16.45

滑翔机下沉和上浮的阻力因数均得到降低,一个周期的总阻力因数大大降低。分析阻力因数降低的原因,水下滑翔机的阻力主要为摩擦阻力和压差

阻力,其中摩擦阻力主要与表面积大小有关,压差阻力与外形表面压力分布有关。图 7d) 明显可以看出优化后外形的表面积减少。对比优化前后在 3° 攻

角下的压力云图,如图 8 所示。可以看出在保持原有流线平行分布的同时,头部低压区减小,压力分布得到调整。

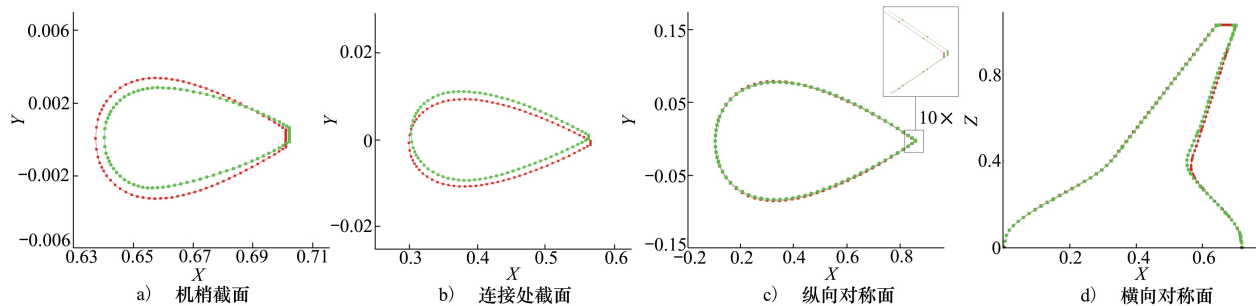


图 7 优化前后截面形状对比

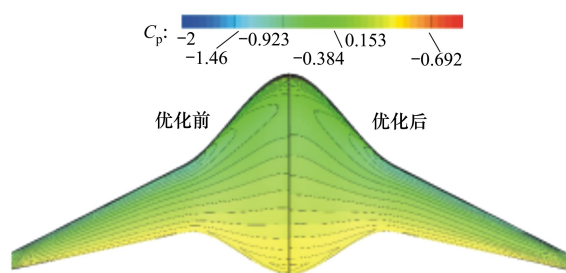


图 8 压力云图

3 结论

本文对一种翼身融合水下滑翔机开展了外形优化设计研究,提出了一套外形优化框架,包括 FFD 参数化方法用于参数化,CFD 求解器用于数值模拟,网格变形算法用于计算网格更新,SQP 算法用于优化迭代。外形优化设计以最小化一个周期运动的平均阻力系数为目标函数,在保证体积约束的情况下,翼身融合水下滑翔机一个周期的平均阻力系数降低了 16.45%,同时在下沉与上浮阶段的阻力系数均得到了降低。

参考文献:

- [1] DHANAK M R, XIROS N I. Springer Handbook of Ocean Engineering[M]. Cham, Switzerland: Springer, 2016: 301-322
- [2] CARMICHAEL R L, ERICKSON L L. Pan Air-a Higher Order Panel Method for Predicting Subsonic or Supersonic Linear Potential Flows about Arbitrary Configurations[C]//AIAA 14th Fluid & Plasma Dynamics Conference, 1981
- [3] 王丹. 飞行器气动外形优化设计方法研究与应用[D]. 西安:西北工业大学,2015
WANG Dan. Approach and Application Research on Aerodynamic Shape Optimization Design[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2015 (in Chinese)
- [4] 孙春亚. 翼身融合水下滑翔机外形设计与运动分析[D]. 西安:西北工业大学,2017
SUN Chunya. Shape Design and Motion Analysis of Blended-Wing-Body Underwater Glider [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2017 (in Chinese)
- [5] CHENGSHAN L, PENG W, HUACHAO D, et al. A Simplified Shape Optimization Strategy for Blended-Wing-Body Underwater Gliders[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2018, 58: 2189-2202
- [6] 陈颂,白俊强,史亚云,等. 民用客机翼/机身/平尾构型气动外形优化设计方法研究[J]. 航空学报, 2015, 36(10): 3195-3207
CHEN Song, BAI Junqiang, SHI Yayun, et al. Aerodynamic Optimization Design of Civil Jet Wing-Body-Tail Configuration[J]. Acta Aeronauticaet Astronautica Sinica, 2015, 36(10): 3195-3207 (in Chinese)
- [7] 汪怡平,王涛,黎帅. 基于自由变形技术的汽车气动减阻优化[J]. 机械工程学报, 2017, 53(9): 135-143

- WANG Yiping, WANG Tao, LI Shuai. Aerodynamic Drag Reduction of Vehicle Based on Free Form Deformation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(9): 135-143 (in Chinese)
- [8] LI J, WANG P, DONG H, et al. Shape Optimisation of Blended-Wing-Body Underwater Gliders Based on Free-Form Deformation[J]. Ships and Offshore Structures, 2020, 15(3): 227-235
- [9] WANG X, SONG B, PENG W, et al. Hydrofoil Optimization of Underwater Glider Using Free-Form Deformation and Surrogate-Based Optimization[J]. International Journal of Naval Architecture & Ocean Engineering, 2018, 10(6): 730-740
- [10] 张来平, 邓小刚, 张涵信. 动网格生成技术及非定常计算方法进展综述[J]. 力学进展, 2010, 40(4): 424-447
ZHANG Laiping, DENG Xiaogang, ZHANG Hanxin. Reviews of Moving Grid Generation Techniques and Numerical Methods for Unsteady Flow[J]. Advances in Mechanics, 2010, 40(4): 424-447 (in Chinese)
- [11] GILL P E, MURRAY W, SAUNDERS M A. SNOPT: an SQP Algorithm for Large-Scale Constrained Optimization[J]. Society for Industrial and Applied Mathematics, 2005, 47(1): 99-131
- [12] WU X, WANG P, LI J, et al. Adjoint-Based Optimization for Blended-Wing-Body Underwater Gliders' Shape Design[C]// Oceans-MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans Conference, 2018

Shape Optimization of Blended-Wing-Body Underwater Gliders Based on Free-Form Deformation

LI Jinglu¹, WANG Peng¹, CHEN Xu¹, DONG Huachao¹

(School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710002, China)

Abstract: Currently developed underwater gliders can be roughly divided into the two types: traditional configuration and unconventional configuration. As a type of underwater gliders with unconventional configuration, a blended-wing-body (BWB) underwater glider has better fluid dynamic performances because of its unique shape. However, it is difficult to design the shape of the BWB underwater glider that has excellent hydrodynamic performances. Therefore, it is of great significance to optimize its shape, which this paper carries out by using the free-form deformation (FFD). The complete and automatic shape optimization framework is established by jointly using FFD parameterization method, CFD solver, optimization algorithm and mesh deformation method. The framework is used to optimize the shape of a BWB underwater glider. The average drag coefficient of the BWB underwater glider during its sinking and floating in one working period is used as the objective function to optimize its shape, with the volume constraints considered. The optimization results show that the gliding performance of the BWB underwater glider is remarkably enhanced.

Keywords: BWB underwater glider; shape optimization framework; free-form deformation