

文章编号: 1674-5566(2024)06-1429-10

DOI: 10.12024/jsou.20240204420

三体模块化渔业监测AUV结构设计及外形优化

施 迅, 周 悦, 吴诗昊, 邢博闻, 陈 忠

(上海海洋大学 工程学院, 上海 201306)

摘要: 针对当前渔业养殖监测装备续航能力低、成本高、难以普遍应用, 提出并设计了一种渔业移动与定点监测自主水下机器人(Autonomous underwater vehicle, AUV)。该AUV采用三体模块化结构设计, 3个Myring型舱体呈“品”字型分布以易于坐底稳定, 并采用T形支架进行连接以减少阻力。考虑三体结构3个舱体间阻力干扰作用, 基于计算流体力学方法进行不同舱体间距阻力计算和设计。以直航阻力最小为优化目标, 建立3个舱体和T形支架的参数化模型, 通过改变舱体艏部和艉部曲线方程与T字形支架横截面曲线方程的参数来实现对AUV外形的控制, 进行对AUV外形优化设计。结果表明, T形支架相比于传统的三角形支架直航阻力值降低了26.28%, AUV外形优化后的直航阻力值降低了24.05%, 提高了续航力。研究结果为渔业养殖监测领域提供了一种新装备, 同时也为其他三体结构AUV优化设计提供参考。

关键词: 渔业监测AUV; 三体结构; 模块化; T形支架; 直航阻力; 外形优化

中图分类号: S 969

文献标志码: A

我国是世界第一渔业养殖大国, 目前正着力建设以生态健康养殖为主的现代设施渔业, 对渔业养殖监测装备的机械化、自动化、智能化提出了更高的要求^[1]。目前, 渔业养殖监测通常包括两种方式, 即定点监测和移动监测。定点监测是将水质传感器固定于监测站点或网箱上; 移动监测是将水质传感器搭载于遥控式水下机器人(Remotely operated vehicle, ROV)、浮标或无人船上, 但ROV受作业缆绳长度的限制使得作业范围有限, 浮标搭载式监测仅能观测一定范围内的目标信息, 无人船拖曳监测难以实现不同深度水域的精准立体定点监测^[2]。自主水下机器人(Autonomous underwater vehicle, AUV)具有作业范围广、自主性高、机动性好等优点^[3], 在大范围移动监测领域具有较大应用前景。近年来, 随着AUV研究与应用日益成熟, 国内外用于浅水域渔业监测的AUV取得了一定的进展。美国Aquabotix公司研制的SwarmDiver AUV^[4]面向浅水域环境监测; 德国弗劳恩霍夫(Fraunhofer)应用研究促进协会开发的C Wolf型AUV^[5]主要用于

水质参数的实时监测; 中国科学院沈阳自动化研究所研制的探索100^[4]和天津瀚海蓝帆海洋科技有限公司研制的云帆AUV^[6]主要用于水域观测。为了提高单体AUV的稳定性, 国内针对三体水下机器人进行相关研究。中国科学院沈阳自动化研究所发明了一种水平连接的三体构型水下机器人用于海洋水文数据的观测^[7]; 哈尔滨工程大学发明了一种三体接触连接的水下机器人平台用于配合机械臂精细化作业^[8]; 中国海洋大学发明了一种三角形支架连接的三体水下机器人用于水下探测^[9]。但是, 这类传统AUV运行通常是依靠其携带的自主导航系统、控制系统和推进系统等来实现, 具有结构复杂、造价昂贵、体积大、耗能高等特点, 制约其在渔业养殖领域中的广泛应用。

减少航行阻力, 提高续航能力是渔业监测AUV的重要性能指标之一^[10]。AUV在水下航行时的阻力主要包括摩擦阻力及压差阻力, 其中压差阻力为主要因素, 其与AUV外形结构密切相关^[11]。近年来, 许多学者对AUV的外形优化设计

收稿日期: 2024-02-05

修回日期: 2024-04-23

基金项目: 上海市2022年度科技创新行动计划(22010502200)

作者简介: 施 迅(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为渔业工程装备。E-mail: six02092015@163.com

通信作者: 周 悦, E-mail: y-zhou@shou.edu.cn

版权所有 ©《上海海洋大学学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)

Copyright © Editorial Office of Journal of Shanghai Ocean University (CC BY-NC-ND 4.0)

<http://www.shhydx.com>

展开研究。张贝等^[12]基于B样条方法,提出了一种自由变形的AUV壳体的优化设计方法,并通过全局参数化解决了优化设计变量多和计算量大问题;HU等^[13]将多学科优化设计引入到AUV的设计中,提出一种自适应代理集成(SASE)优化设计方法,提高续航能力;VARDHAN等^[14]基于人工智能优化算法,并结合计算流体力学(Computational fluid dynamics, CFD)仿真,对AUV的外形阻力进行优化设计;MILLER等^[15]通过选择合适的湍流模型并采用CFD进行优化设计,减小外形阻力。以上研究均是针对单体结构AUV的外形优化设计,而针对多体AUV外形优化设计研究较少。戴鹏^[16]提出并设计了一种针对海洋生物颗粒物测量和分析应用的倒三角形的三体组合式AUV,采用两组双回转体结构来分

析间距对阻力的干扰作用,并通过多目标遗传算法对AUV的浮体和主舱体进行优化设计,且未考虑连接支架对水动力性能的影响。

本文结合渔业养殖的低成本、低能耗、立体移动和定点监测需求,提出并设计一种三体模块化结构的渔业监测AUV,进而开展三体结构及其连接框架的水动力性能分析与外形优化设计。

1 渔业监测AUV的三体模块化结构设计

水产动物对食物的需求不同,栖息活动主要分布在水体中下层,越接近水底,水产动物密度越大,大多数水产动物喜欢群居且喜欢安静^[17]。考虑水产动物的分布特点和生活习性,满足全水域监测需求,渔业监测AUV分别设有定点作业模式和运动作业模式,如图1所示。

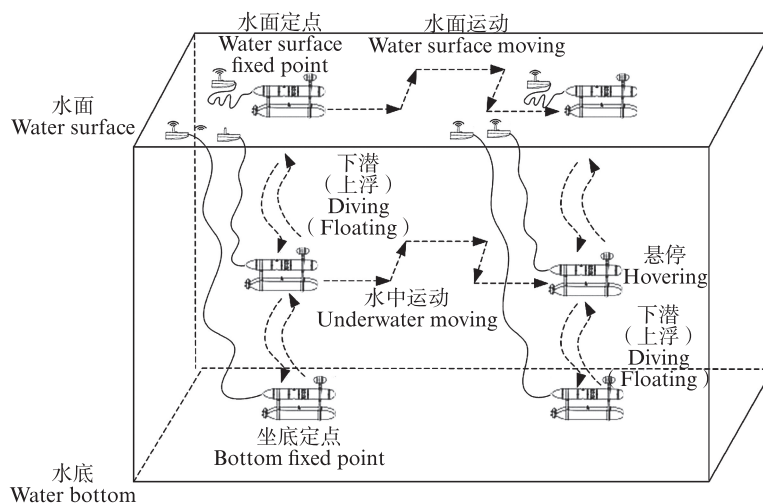


图1 渔业监测AUV定点和运动作业模式

Fig. 1 Fishery monitoring AUV fixed-point and moving operation mode

AUV常用多推进器组合实现悬停来进行定点作业,但推进器产生较大的噪声,容易引起水产动物应激反应,影响其生长。同时,AUV靠自身携带的电池供电,推进器持续工作耗能大,难以满足长期作业需求。为了保证在水底安静地定点观测生物的生长状况和对环境的监测,提出并设计一种易于稳定坐底三体结构渔业监测AUV,即AUV由3个回转体形的舱体构成“品”字形结构,即1个上舱体和2个下舱体,如图2所示。考虑整体结构的稳定性、搭载监测仪器装置的空间需求,及兼顾坐底定点监测所搭载摄像头高度等,3个舱体呈正三角形分布。另外,为了便于灵活搭载不同的传感器,及组装拆卸、升级和维护方便,渔业监测

AUV的3个舱体均采用模块化结构设计。

渔业监测AUV的上舱体主要负责水面、水中而坐底观测、电控与通信、浮力调节等,由水面通信浮标模块、视频监控模块、照明模块、浮力调节模块、电控模块和上舱体艏部模块组成。传统的AUV大多采用水下惯性导航系统和水声通信进行导航定位和通信,成本高,传输速率低。为此,本渔业监测AUV设计了一种内置4G、LoRa和GNSS天线的低成本水面通信浮标模块,实现AUV定位导航及与岸基实时通信等功能。为了减少推进器对渔业环境的影响和降低能耗,浮力调节模块主要是通过控制外置油囊注油调节排水体积,实现无动力下潜上浮垂直运动。另外,

浮力调节模块还包括一个辅助垂直推进器,当油囊浮力调节机构产生的浮力不足以克服水底黏

土的吸附力或浮力调节机构出现故障时,提供额外上浮动力。

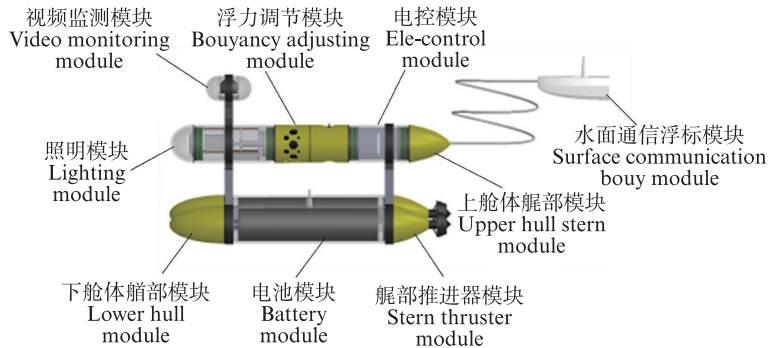


图2 渔业监测 AUV 三体模块化结构
Fig. 2 Fishery monitoring AUV three-body modular structure

为了保证渔业监测 AUV 正常工作和安全作业,通过压载重量及其分布的衡重设计,保证 AUV 在水中呈水平姿态,且浮心和重心之间垂直距离大,上轻下重,即保证足够的稳心高度,以保持 AUV 航行姿态平稳。为此,渔业监测 AUV 设计 2 个相同的下舱体,并将沉重的电池布放在下舱体。另外,下舱体还包括艏部模块和艉部推进器模块。

2 三体结构 AUV 水动力分析及设计

三体结构 AUV 水下航行过程中,阻力的影响因素较为复杂。不同于单体结构 AUV,三体结构 AUV 的阻力分析,不仅需要研究舱体的外形,还需要研究各舱体间流场扰动影响所产生的航行阻力,进而设计合适的舱体间距;另外,三体结构 AUV 为保持结构稳定性,需要通过连接支架进行固定连接。不同结构的连接支架会对 AUV 的水动力性能产生影响,设计易于搭载仪器装置和低阻力的连接支架很重要。

2.1 舱体间距水动力分析

采用 CFD 进行数值模拟时,复杂的模型结构使得网格数量和计算资源需求增加,从而影响网格质量和计算结果的精度^[18]。为此,在研究舱体间距水动力分析时,忽略水面通信浮标模块、连接支架、搭载传感器等次要附件,对三体结构 AUV 三维模型进行简化,只保留 3 个舱体的回转体形外壳,其中外壳包括艏段,平行中体和艉段,外壳形体为常用的 Myring 型回转体。

由于 3 个舱体左右对称,为减少计算量,取一半模型建立半径为 $1.5L_c$ 的圆柱体计算域,其中 L_c 为舱体整体纵向长度,如图 3a 所示。为提高数值

计算的精度和效率,对计算域和网格划分进行了无关性验证,设舱体的艏部距离流场速度入口为 $1.5L_c$,舱体艉部距离流场压力出口为 $3L_c$ 。网格划分采用具有适应性强且网格数量少的六面体核心网格,并对舱体局部加密处理。考虑舱体特征尺寸较小,航速较低,属于低雷诺数流动,因此利用雷诺时均 (Reynolds-averaged navier stokes, RANS) 方程进行数值求解,并选择 $k-w$ SST 湍流模型。

由于舱体间呈正三角形,间距相等。以间距 w 为自变量,控制其余变量不变,分析不同间距对直航阻力 F 的影响。为了提高计算效率,将 w 进行参数化设置,利用 Isight 实现舱体间距的变更、网格划分、数值模拟和数据读取,同时确保计算结果的一致性。考虑到本 AUV 在水下主要进行水平直航运动,则计算中攻角设为 0,考虑到实际监测中对航速的需求,航速设为 1 m/s,直航阻力 F 计算结果如图 3b 所示。

由图 3b 可知,舱体间距越近,直航阻力 F 数值越大,表明舱体间水动力扰动越强,即舱体间距对三体结构 AUV 的水动力影响较大。当 $w=4D$ 和 $w=5D$ 时,直航阻力 F 曲线变化较为缓慢,可忽略舱体之间干扰,其中 D 为舱体直径,本 AUV 的 3 个舱体直径均相同,为 130 mm。在满足支架上搭载相关传感器设备以及对监测高度的需求情况下, w 取为 520 mm ($4D$)。

2.2 连接支架结构设计与水动力分析

传统的三体结构 AUV 连接方式,即连接支架形状大多采用三角形支架,其抗风浪性能较好,但安装拆卸较麻烦,不利于升级维护^[4]。考虑池

塘渔业养殖环境风浪较小,对抗风浪性能要求较低,且3个舱体采用模块化设计,即需要组装拆卸,升级和维护方便。为此,提出并设计一种结构简单的T形连接支架。

为了分析连接支架的水动力性能,将T形支架与三角形支架对比。按照上文设计,舱体间距

一定的情况下,支架连接在相同位置且横截面形状都为水动力性能较好的椭圆形,建立对应的简易模型,计算两种连接支架在航速分别为0.25、0.5、0.75和1 m/s时的直航阻力 F 。两种连接支架模型在不同航速下的直航阻力值如图4a所示,航速为1 m/s时两种模型的压力云图如图4b所示。

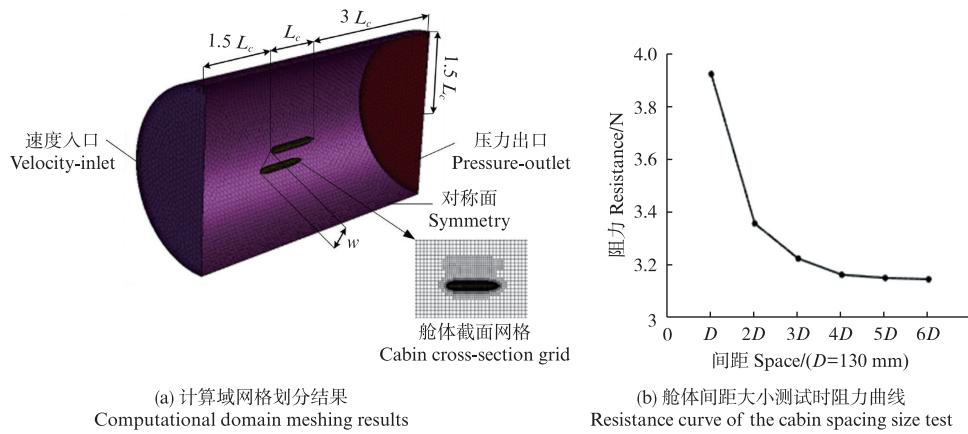
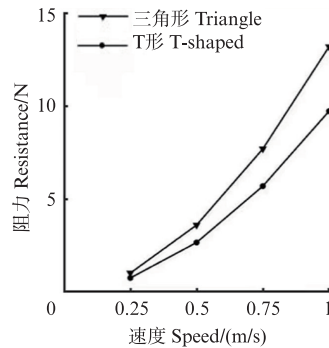
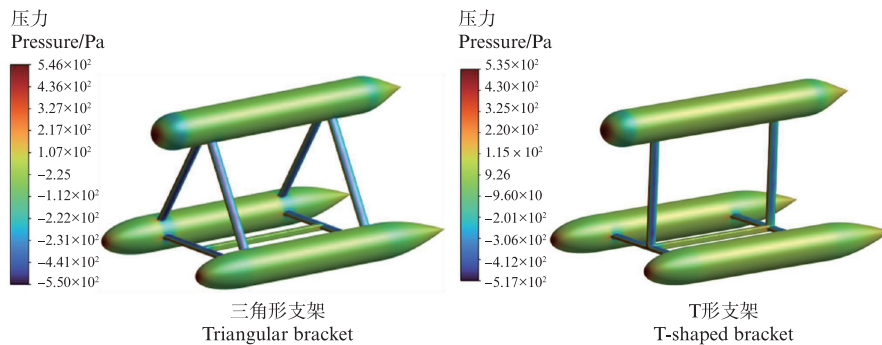


图3 舱体间距水动力分析
Fig. 3 Hydrodynamic analysis of cabin spacing



(a) 不同速度下两种连接支架直航阻力
Direct navigation resistance of two kinds of connecting brackets at different speeds



(b) 两种连接支架压力云图 Two kinds of connection bracket pressure nephogram

图4 连接支架水动力分析
Fig. 4 Hydrodynamic analysis of connecting bracket

由图4a可知,三角形连接支架的直航阻力明显大于T形连接支架的,当航速为1 m/s时,通过T

形支架连接的AUV直航阻力相比于三角形支架连接的AUV降低了26.28%,可见T形支架连接水

动力性能较好。另外,由图4b可知,除了舱体的艏部对直航阻力影响较大外,连接支架迎流面受压也明显,为了减小AUV的直航阻力,需进一步对AUV的外壳形状和连接支架进行优化设计。

由前述分析与设计,通过结构设计、电控系统设计、各模块组装和系统联调等,研制的渔业监测AUV样机,如图5所示。

3 AUV外形优化设计与分析

以渔业监测AUV直航阻力 F 最小为优化目标,采用参数化建模方法,在Isight上通过试验设计生成多组样本点来构造近似模型,进而使用全局优化算法基于近似模型对AUV的外形进行优化设计。

3.1 参数化建模

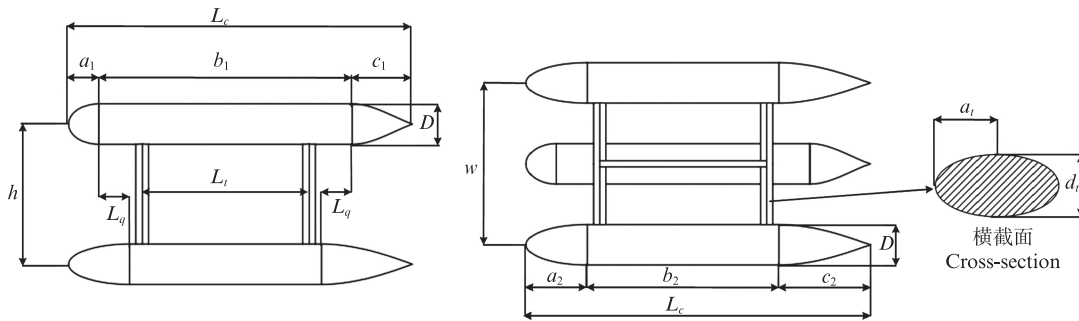
本文渔业监测三体结构AUV相比于单体AUV,外形难以由明确的公式直接表达,考虑优化

设计时需要计算不同参数下外形的直航阻力,普通建模方式需要反复建模,计算效率低。因此,为提高计算效率,对渔业监测AUV进行参数化建模。渔业监测AUV的外形主要包括3个回转体舱体和T字形连接支架,如图6所示。



图5 渔业监测AUV样机

Fig. 5 Fishery monitoring AUV prototype



a_1 为上舱体艏段长度; b_1 为上舱体平行中体长度; c_1 为上舱体为艏部长度; L_q 为上下舱体端面距离; L_t 为T字形支架长度; h 为上下舱体距离; a_2 为下舱体艏段长度; b_2 为下舱体平行中体长度; c_2 为下舱体艏部长度; d_t 为支架厚度; a_t 为支架半椭圆长度。
 a_1 is the length of the bow section of the upper hull; b_1 is the length of the parallel center body of the upper compartment; c_1 is the length of the upper hull for the transom; L_q is the distance between the upper and lower hull end faces; L_t is the T-bracket length; h is the upper and lower hull distance; a_2 is the length of the bow section of the lower hull; b_2 is the length of the parallel center body of the lower hull; c_2 is the lower hull transom length; d_t is the thickness of the bracket; a_t is the half-ellipse length of the bracket.

图6 AUV外形示意图

Fig. 6 AUV shape diagram

渔业监测AUV舱体选用Myring型回转体,Myring型回转体包括艏部、平行中体和艏部3段曲线,其曲线方程表达式参见文献[19]。

艏部曲线方程:

$$y(x) = \frac{d}{2} \left[1 - \left(\frac{x-a}{a} \right)^2 \right]^{\frac{1}{n}}, (0 \leq x < a) \quad (1)$$

平行中体方程:

$$y(x) = \frac{d}{2}, (a \leq x < a + b) \quad (2)$$

艏部曲线方程:

$$y(x) = \frac{d}{2} - \left(\frac{3d}{2c^2} - \frac{\tan \theta}{c} \right) (x - a - b)^2 + \left(\frac{d}{c^3} - \frac{\tan \theta}{c^2} \right) (x - a - b)^3, (a + b \leq x \leq L) \quad (3)$$

式中: x 为长轴上点到艏部顶点的距离; a 为艏段长度; b 为平行中体长度; c 为艏部长度; d 为平行中体直径; n 为艏部锐度因子; θ 为艏部离去角; L 为舱体总长。

T形支架迎流面由其横截面椭圆曲线方程控制,椭圆曲线方程表达式为

$$y(x) = \frac{d_t}{2} \left[1 - \left(\frac{x-a_t}{a_t} \right)^2 \right]^{\frac{1}{n_t}}, (0 \leq x \leq 2a_t) \quad (4)$$

式中: n_t 为支架截面椭圆锐度因子。

考虑渔业监测AUV各模块的结构和所需搭载器件和仪器对内部空间的要求因素,本文渔业监测AUV首先设计并确定的几何尺寸如下表1所示。

表1 渔业监测AUV设计确定的几何尺寸
Tab.1 Geometric size determined by the design of fishery monitoring AUV

参数名称 Parameter name	参数尺寸 Parameter size/mm
D	130
d_i	20
b_1	820
b_2	620
w	520
h	450.33
L_q	100
L_i	540

同时由图6可知, a_2 和 c_2 可表示为

$$a_2 = a_1 + L_q \tag{5}$$

$$c_2 = c_1 + L_q \tag{6}$$

结合公式(1)~(6)和表1参数,得到AUV的外形曲线表达式为

上舱体:

$$\left\{ \begin{aligned} y(x) &= 65 \left[1 - \left(\frac{x - a_1}{a_1} \right)^2 \right]^{\frac{1}{n_1}}, (0 \leq x < a_1) \\ y(x) &= 65, (a_1 \leq x < a_1 + 820) \\ y(x) &= 65 - \left(\frac{195}{c_1^2} - \frac{\tan \theta_1}{c_1} \right) (x - a_1 - 820)^2 \\ &\quad + \left(\frac{130}{c_1^3} - \frac{\tan \theta_1}{c_1^2} \right) (x - a_1 - 820)^3, (a_1 + 820 \leq x \leq a_1 + c_1 + 820) \end{aligned} \right. \tag{7}$$

T字形支架:

$$y(x) = 10 \left[1 - \left(\frac{x - a_i}{a_i} \right)^2 \right]^{\frac{1}{n_i}}, (0 \leq x \leq 2a_i) \tag{8}$$

下舱体:

$$\left\{ \begin{aligned} y(x) &= 65 \left[1 - \left(\frac{x - a_1 - 100}{a_1 + 100} \right)^2 \right]^{\frac{1}{n_2}}, (0 \leq x < a_1 + 100) \\ y(x) &= 65, (a_1 + 100 \leq x < a_1 + 720) \\ y(x) &= 65 - \left[\frac{195}{(c_1 + 100)^2} - \frac{\tan \theta_2}{c_1 + 100} \right] (x - a_1 - 720)^2 + \\ &\quad \left[\frac{130}{(c_1 + 100)^3} - \frac{\tan \theta_2}{(c_1 + 100)^2} \right] (x - a_1 - 720)^3, (a_1 + 720 \leq x \leq a_1 + c_1 + 820) \end{aligned} \right. \tag{9}$$

根据AUV的曲线方程组公式(6)~(8),取设计变量为 $a_1, c_1, n_1, \theta_1, n_2, \theta_2, a_i$ 和 n_i 。在表1参数的基础上,考虑AUV具有合适的长径比及兼顾T形支架连接位置等,给出设计变量可行域范围,如表2所示。

表2 渔业监测AUV设计变量可行域范围
Tab.2 Feasible region range of AUV design variables for fishery monitoring

设计变量 Design variable	初始值 Initialization value	取值范围 Value ranges
a_1	97.5 mm	(65 mm, 130 mm)
c_1	195 mm	(130 mm, 220 mm)
n_1	2	(1, 3)
θ_1	20°	(10°, 30°)
n_2	2	(1, 3)
θ_2	20°	(10°, 30°)
a_i	20 mm	(10 mm, 35 mm)
n_i	2	(1, 3)

在Solidworks中设置设计变量为全局变量参数,以渔业监测AUV外形曲线方程为驱动方程组,并在拟合曲线上建立图形约束,完成参数化模型的建立,即由全局变量参数值直接控制模型的变化。

3.2 试验设计与近似模型

为保证近似模型的拟合精度以及提高计算效率,需要安排合理的试验设计方法。理论上试验设计生成的样本点越多精度会越高,但样本点数量过大,计算量激增导致优化流程时间过长。考虑最优拉丁超立方设计(Optimal latin hypercube design, OLHD)生成的样本点在设计空间内具有更好的均衡性和填充性,能够使所有样本点均匀覆盖在可行域范围内^[20]。本文采用OLHD生成80组试验设计样本点,计算航速为1 m/s时的直航阻力值。

为减小计算量并且缩短计算周期,采用二阶多项式响应面模型(Response surface model, RSM)构造近似模型,二阶多项式响应面模型数学表达式为^[21]

$$\hat{y}(x) = m_0 + \sum_{i=1}^k e_i x_i + \sum_{i=1}^k f_{ii} x_i^2 + \sum_{1 \leq i < j \leq k} g_{ij} x_i x_j \tag{10}$$

式中: m_0, e_i, f_{ii}, g_{ij} 分别为常数项、一次项、二次项和交叉项的待定系数; x_i 为设计变量; k 为设计变量的个数。

利用二阶多项式回归技术对OLHD得到的80组样本点和响应阻力进行最小二乘拟合得到二阶多项式拟合模型,拟合曲线系数如表3所示。

由生成的二阶多项式响应面模型,重新选取20个样本点进行误差分析,得到阻力的复相关系数 R^2 为0.962 48,大于工程要求0.9,可以用于后续优化设计。

表 3 拟合曲线系数
Tab. 3 Fitting curve coefficient

常数项系数 Constant term coefficient	m_0							
	31.0740							
一次项系数 Monomial coefficient	e_1	e_2	e_3	e_4	e_5	e_6	e_7	e_8
	-0.048 6	-0.062 6	-0.459 9	-0.126 1	-0.537 7	-0.079 3	-0.475 7	-2.708 3
二次项系数 Quadratic coefficient	f_{11}	f_{22}	f_{33}	f_{44}	f_{55}	f_{66}	f_{77}	f_{88}
	0.000 1	0.000 1	0.086 0	0.000 5	0.094 9	0.000 7	0.004 7	0.417 4
交叉项系数 Cross term coefficient	g_{12}	g_{13}	g_{14}	g_{15}	g_{16}	g_{17}	g_{18}	
	7.453 4	-0.001 2	-0.000 1	0.001 2	0.000 2	0.000 2	0.002 1	
	g_{23}	g_{24}	g_{25}	g_{26}	g_{27}	g_{28}	g_{34}	
	0.001 0	0.000 4	-0.000 6	-1.047 7	7.305 7	-0.001 1	0.000 7	
	g_{35}	g_{36}	g_{37}	g_{38}	g_{45}	g_{46}	g_{47}	
	-0.015 3	0.006 3	-0.003 3	0.007 0	0.005 3	0.000 3	0.000 6	
g_{48}	g_{56}	g_{57}	g_{58}	g_{67}	g_{68}	g_{78}		
	0.005 9	-0.003 2	-0.001 4	0.094 1	0.000 5	0.002 0	0.017 9	

3.3 优化与分析

自适应模拟退火算法 (Adaptive security algorithm, ASA) 具有良好的全局搜索能力, 计算效率高, 广泛应用于工程领域^[22]。本文利用 ASA 对生成的二阶响应面近似模型进行全局优化, 以获得阻力最小的 AUV 外形, 其目标函数可表示为

$$f(a_1, c_1, n_1, \theta_1, n_2, \theta_2, a_l, n_l) = \min(F) \quad (11)$$

在 Isight 中采用 ASA, 设定初温为 1, 最大迭代次数为 10 000, 当迭代到 6 460 步时得到优化结果 $F_{\min}=7.379$ N。相比初始值计算得到的阻力, 阻力降低了 24.05%。

为了验证优化结果的准确性, 将优化结果中的数据重新进行 CFD 仿真分析, 验证结果如表 4 所示, 近似模型寻优结果与 CFD 仿真结果相差 0.75%, 误差较小, 优化结果可靠。

表 4 计算结果对比
Tab. 4 Calculation and analysis

参数名称 Parameter name	a_1/mm	c_1/mm	n_1	$\theta_1/(\text{°})$	n_2	$\theta_2/(\text{°})$	a_l/mm	n_l/mm	F/N
初始 Initial	97.50	195.00	2.00	20	2.00	20.00	20	2.00	9.716
优化 Optimized	65.25	218.92	1.62	10	2.59	27.69	35	2.19	7.379
CFD	65.25	218.92	1.62	10	2.59	27.69	35	2.19	7.435

优化前后, 渔业监测 AUV 的数值仿真结果如图 7 所示。由图 7a 可知, 优化前后 AUV 的压力分布总体未发生较大变化, 高压区均集中在舱体的艏部前端、艉部后端和连接支架的迎流面; 低压区均集中在舱体艏部后端的交界处和连接支架的迎流面与背流面的交界处。优化后压力值明显小于优化前, 且连接支架迎流面高压区显著降低, 低压区优化后的分布更均匀。由图 7b 可知, 优化前后 AUV 周围流场分布未发生明显改变, 但优化后舱体艉部和连接支架背流面的流动情况有明显改善, 有效避免流动分离带来的阻力增加, 使 AUV 获得较好的流动性。同时, 优化仿真结果表明优化设计使 AUV 具有更好的水动力性能。

4 结论

本文结合渔业养殖监测领域的现状和需求, 提出并设计研制了一台三体稳定结构的渔业监测 AUV。AUV 设有定点和运动两种作业模式, 同时采用模块化结构设计方法, 设计各个功能模块, 其中浮力调节模块和水面通信浮标模块降低了能耗和成本。基于计算流体力学方法, 分析了三体结构舱体间距的干扰作用, 确定了舱体间距为 520 mm, 进而针对渔业监测 AUV 的三体结构连接提出并设计了一种 T 形支架, 通过与传统的三角形支架对比分析, T 形支架直航阻力相比于三角形支架降低了 26.28%, 表明 T 形

支架水动力性能更好。为了进一步减小直航阻力,对 AUV 的 3 个舱体和 T 形支架进行了参数化建模,选取舱体艏部和艉部与 T 形支架的曲线方程参数为设计变量,在 Isight 中采用 OLHD 生成

样本点,并通过二阶多项式响应面模型和 ASA 得到了优化后的 3 个舱体的艏部和 T 形支架外形,使相同工况下阻力降低了 24.05%,提高了 AUV 的续航能力。

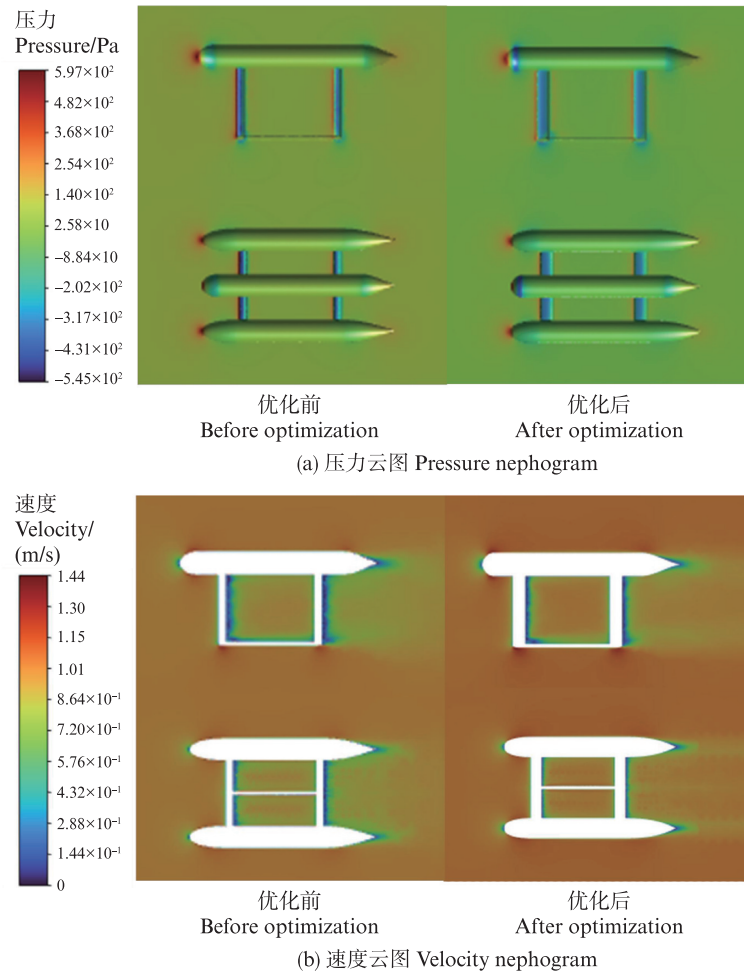


图 7 优化前后仿真结果

Fig. 7 Simulation results before and after optimization

参考文献:

- [1] 毛晓雅, 祖爽. 现代设施农业如何走得稳?[N]. 农民日报, 2023-11-10(008).
MAO X Y, ZU S. How can modern facility agriculture walk steadily?[N]. Farmers' Daily, 2023-11-10(008).
- [2] 吴诗昊, 周悦, 敖琪, 等. 渔业养殖监测用 AUV 及其控制系统[J]. 上海海洋大学学报, 2023, 32(5): 953-966.
WU S H, ZHOU Y, AO Q, et al. AUV for aquaculture monitoring and its control system[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2023, 32(5): 953-966.
- [3] BAO H M, ZHANG Y, SONG M P, et al. A review of underwater vehicle motion stability [J]. Ocean Engineering, 2023, 287: 115735.
- [4] 康帅, 俞建成, 张进. 微小型自主水下机器人研究现状 [J]. 机器人, 2023, 45(2): 218-237.
KANG S, YU J C, ZHANG J. Research status of micro autonomous underwater vehicle[J]. Robot, 2023, 45(2): 218-237.
- [5] 许裕良, 杜江辉, 雷泽宇, 等. 水下机器人在渔业中的应用现状与关键技术综述[J]. 机器人, 2023, 45(1): 110-128.
XU Y L, DU J H, LEI Z Y, et al. Review: applications status and key technologies of underwater robots in fishery [J]. Robot, 2023, 45(1): 110-128.
- [6] 天津瀚海蓝帆海洋科技有限公司. 智帆 AUV-ZF-01 [EB/OL]. (2024-03-28) [2024-01-15]. <http://tjhhl.com/h-col-111.html>.
Tianjin Hanhai Lanfan Marine Technology Co., Ltd.

- Zhifan AUV-ZF-01 [EB/OL]. (2024-03-28) [2024-01-15]. <http://tjhhlf.com/h-col-111.html>.
- [7] 郑荣, 胡志强, 朱兴华, 等. 一种三体构型的长期定点观测型水下机器人: 中国, 105644743B[P]. 2017-06-16.
- ZHENG R, HU Z Q, ZHU X H, et al. A three-body configuration of long-term fixed observation underwater robot: CN, 105644743B[P]. 2017-06-16.
- [8] 黄海, 周浩, 许锦宇, 等. 一种三体流线型自主作业水下机器人平台: 中国, 106477008B[P]. 2018-07-31.
- HUANG H, ZHOU H, XU J Y, et al. A three-body streamlined autonomous operational underwater robotic platform: CN, 106477008B[P]. 2018-07-31.
- [9] 杨睿, 冯旭琛, 于辉, 等. 三体水下机器人: 中国, 114670996B[P]. 2022-08-23.
- YANG R, FENG X C, YU H, et al. Three-body underwater robot: CN, 114670996B[P]. 2022-08-23.
- [10] 赵月. 水下航行器阻力及流噪声特性数值预报[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- ZHAO Y. Numerical prediction of resistance and flow noise characteristics of underwater vehicles [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021.
- [11] 李宏源, 吕鹏宇, 杜增智, 等. 水下滑移边界减阻技术研究综述[J]. 舰船科学技术, 2022, 44(9): 1-6.
- LI H Y, LYU P Y, DU Z Z, et al. A review of drag reduction technology for underwater slip boundary [J]. Ship Science and Technology, 2022, 44(9): 1-6.
- [12] 张贝, 张代雨, 王志东, 等. 基于自由变形的自主水下航行器壳体优化设计方法研究[J]. 船舶力学, 2022, 26(9): 1315-1325.
- ZHANG B, ZHANG D Y, WANG Z D, et al. A free-form deformation optimization design approach for AUV hull shape [J]. Journal of Ship Mechanics, 2022, 26(9): 1315-1325.
- [13] HU F, HUANG Y, XIE Z B, et al. Conceptual design of a long-range autonomous underwater vehicle based on multidisciplinary optimization framework [J]. Ocean Engineering, 2022, 248: 110684.
- [14] VARDHAN H, SZTIPANOVITS J. Search for universal minimum drag resistance underwater vehicle hull using CFD [C]//International Conference on Computational and Experimental Simulations in Engineering. Cham: Springer, 2024: 1297-1303.
- [15] MILLER L M, NJAKA T, BRIZZOLARA S, et al. Drag reduction and power optimization due to an innovative, toroidal hull form of an AUV [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2023, 1288(1): 012039.
- [16] 戴鹏. 基于参数化的三体组合式自主水下航行器多目标优化设计研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- DAI P. Research on multi-objective optimal design of three-body combined autonomous underwater vehicle based on parameterization [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
- [17] 李为, 荣宽, 覃丽蓉, 等. 水产动物行为及其在渔业中的应用研究进展[J]. 水生生物学报, 2021, 45(5): 1171-1180.
- LI W, RONG K, QIN L R, et al. Research progress of aquatic animal behavior and its application in fisheries [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2021, 45(5): 1171-1180.
- [18] 丑晴. 湍流环境下垂直轴双风机气动性能优化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- CHOU Q. Optimization analysis of aerodynamic performance of twin vertical-axis wind turbines in turbulent environments [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [19] 姜宜辰, 赵月, 熊济时, 等. 水下航行器艇体形状对阻力及流噪声综合影响[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2022, 43(1): 76-82, 138.
- JIANG Y C, ZHAO Y, XIONG J S, et al. Comprehensive influence of underwater vehicle hull shape on resistance and flow noise [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2022, 43(1): 76-82, 138.
- [20] 郭斌, 杨雷, 倪庆, 等. 新一代载人飞船气动外形设计与优化[J]. 宇航学报, 2023, 44(9): 1337-1349.
- GUO B, YANG L, NI Q, et al. Aerodynamic shape design and optimization of China's next-generation manned spacecraft [J]. Journal of Astronautics, 2023, 44(9): 1337-1349.
- [21] 何隆, 张亚, 李世中, 等. 基于响应面方法的 AUV 水动力外形优化[J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43(12): 43-50.
- HE L, ZHANG Y, LI S Z, et al. Hydrodynamic profile optimization of AUV based on response surface method [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2022, 43(12): 43-50.
- [22] LUO W L, GUO X M, DAI J W, et al. Hull optimization of an underwater vehicle based on dynamic surrogate model [J]. Ocean Engineering, 2021, 230: 109050.

Structural design and shape optimization of three-body modular fishery monitoring AUV

SHI Xun, ZHOU Yue, WU Shihao, XING Bowen, CHEN Zhong

(College of Engineering Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: The current fishery aquaculture monitoring equipment is low in endurance, high in cost and difficult to be widely used. An autonomous underwater vehicle AUV for fishery moving and fixed-point monitoring is proposed and designed. The AUV adopts a three-body modular structure design, with three Myring shaped cabins distributed in a balanced three-cabin shape to facilitate bottom stability and connected by T-brackets to reduce resistance. Considering the resistance interference between the three cabins of the three-body structure, the resistance calculation and design of different cabin spacing are carried out based on the computational fluid dynamics method. With the optimization objective of minimizing the direct navigation resistance, the parametric models of three cabins and the T-shaped bracket are established. The control of the AUV shape is realized by changing the parameters of the bow and stern curve equations of the cabin and the cross-section curve equation of the T-shaped bracket, which in turn leads to the shape optimization design of the AUV. The results show that the T-shaped bracket reduces the direct navigation resistance value by 26.28% compared to the traditional triangular bracket, and the AUV shape optimization reduces the direct navigation resistance value by 24.05%, which improves the endurance. The results of the study provide a new equipment in the field of fishery aquaculture monitoring, as well as a reference for the optimized design of other three-body structure AUVs.

Key words: fishery monitoring AUV; three-body structure; modular; T-shaped bracket; direct navigation resistance; shape optimization