

【引用格式】崔凯兴, 常开应, 陈海强, 等. 多推进器 AUV 外形优化设计与运动性能分析[J]. 数字海洋与水下攻防, 2025, 8(2): 204-211.

# 多推进器 AUV 外形优化设计与运动性能分析

崔凯兴<sup>1</sup>, 常开应<sup>2</sup>, 陈海强<sup>2</sup>, 陈子崇<sup>3</sup>

(1. 海装广州局, 广东 广州 510000; 2. 昆明船舶设备集团有限公司昆明海威机电研究所, 云南 昆明 210094;  
3. 北京机电工程研究所, 北京 100074)

**摘要** 自主水下无人航行器 (Autonomous Underwater Vehicle, AUV) 的外形布局设计不仅影响着航行器的航行阻力、能耗等总体性能, 也同时决定着快速性、稳定性和机动性的总体性能指标。采用多个推进器联合控制运动行为的多推进器自主水下无人航行器 (Multi-thruster Autonomous Underwater Vehicle, MAUV) 在实际作业中, 低速下的自主能力与操纵性能更强, 明显优于传统采用“推进器+舵”联合操纵的 AUV。因此, 对无舵带鳍的六推进器 AUV 的外形参数化模型和空间运动模型进行建模, 并建立水动力仿真和运动性能仿真系统。随后, 基于克里金代理模型辅助的双归档优化算法, 搭建离线优化框架, 以稳定性和机动性为目标对 MAUV 外形参数进行优化。结果表明: 运动稳定性有显著提升, 与仿真结果相比最大误差低于 4%。

**关键词** MAUV; 外形优化设计; PID 控制; 代理模型; 多目标离线优化

**中图分类号** TJ301

**文献标识码** A

**文章编号** 2096-5753(2025)02-0204-08

**DOI** 10.19838/j.issn.2096-5753.2025.02.012

## Shape Optimization Design and Motion Performance Analysis of Multi-thruster AUVs

CUI Kaixing<sup>1</sup>, CHANG Kaiying<sup>2</sup>, CHEN Haiqiang<sup>2</sup>, CHEN Zichong<sup>3</sup>

(1. Guangzhou Bureau, Guangzhou 510000, China; 2. Kunming Haiwei Institute of Mechanical and Electrical Technology, Kunming Shipbuilding Equipment Co., Ltd., Kunming 210094, China; 3. Beijing Institute of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing 100074, China)

**Abstract** The external layout design of AUVs not only affects the overall performance parameters such as resistance and energy consumption, but also determines the overall performance indicators of speed, stability, and agility. Multi-thruster Autonomous Underwater Vehicles (MAUVs), which utilize multiple thrusters for coordinated control, demonstrate stronger autonomy and maneuverability at low speeds compared to traditional AUVs controlled by a combination of "thrusters + rudder". In this paper, the shape parametric model and spatial motion model of a rudderless six-propeller AUV with fins are constructed, and hydrodynamic simulation and motion performance simulation systems are established. Subsequently, an offline optimization framework is built based on the Kriging surrogate model assisted two-archive algorithm to optimize the MAUV profile parameters with the objectives of stability and maneuverability. The results show that there is a significant improvement in motion stability, and the maximum error is less than 4% compared with the simulation results.

**Key words** multi-thruster AUV; layout optimization design; PID control; surrogate-based optimization model (SBO); multi-objective offline optimization

收稿日期: 2024-11-28

作者简介: 崔凯兴 (1985-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事水下 UUV 设计生产研究。

## 0 引言

自主水下无人航行器(Autonomous Underwater Vehicle, AUV))自主性强并且能够进行大范围空间探索、长续航水下作业。AUV 一般由主体结构、控制系统、导航系统等多系统组合而成的。其中,控制系统的控制效能受到推进装置的限制,其搭载的推进装置类型与推进装置的外形布局方案直接影响着 AUV 的运动性能<sup>[1]</sup>。

对 AUV 进行外形布局设计,主要包括航行器主体、鳍舵、推进器等外形的设计。具体内容是鳍舵、推进器的种类、数量以及在主体的相对位置<sup>[2]</sup>。AUV 推进装置的类型与外形布局方案有推进器加舵<sup>[3]</sup>、多推进器联合推进<sup>[4]</sup>、喷水式矢量推进<sup>[5]</sup>和螺旋桨矢量推进<sup>[6]</sup>等形式。常规 AUV 多采用“推进器+舵”的混合机构,舵控制方向和推进器提供动力,但低速情况下,难以调整航行姿态且回转半径较大。在船舶的推进器布局设计上,常采用双螺旋桨的推进设计,这种设计相对于单螺旋桨的设计来说,既能提升船舶的直航稳定性,也会提高船舶的回转机动性<sup>[7-8]</sup>。同理,多推进器联合推进的 AUV 能够实现多自由度稳定航行,且在低速时操纵性也非常好,相较于常规 AUV 可满足在低速工况下的多种任务需求;但是由于搭载的附体推进器较多,存在多种复杂的推进器工况与运动模式,增大了水下航行的阻力和能耗,所以在对多推进器自主水下无人航行器(Multi-thruster Autonomous Underwater Vehicle, MAUV)进行总体设计时需要深入研究多推进器的外形布局方案,确定其水动力性能和运动性能。GARUS 等<sup>[9]</sup>针对多推进系统,基于功率分配算法,提出 2 种推力分配算法,实现了多推进器系统中单个推进器推力分配策略的自动控制。HE 等<sup>[10]</sup>提出了一种基于分布式并行硬件架构和解耦控制算法的融合分布式控制和现场总线技术的分布式并联运动控制系统(DPMC),对多推进器系统的推力分配进行系统控制,多推进器 AUV 的系统性能得到了明显改善。

目前获取 AUV 水动力参数的方法可以分为理论经验估算法、试验法和 CFD 数值计算模拟法(Computational Fluid Dynamics, CFD)<sup>[11]</sup>。由于理论经验估算法精度低,只适用于传统 AUV,试

验法耗资巨大,受外界因素影响多,CFD 数值计算模拟法更加适用于 AUV 的水动力性能的估算,不需要制作样机,成本低,精度高,克服了上述 2 种方法的缺点,而且计算水动力性能的数值模拟计算软件很多且比较成熟。从实际的条件、经费和计算精确性 3 个方面综合考虑,CFD 方法最适合用于 AUV 的水动力性能参数的计算<sup>[12]</sup>。

对 AUV 运动性能的研究方式分为实验研究与数值模拟。与 AUV 水动力性能研究的试验法相同,进行运动性能实验研究虽然拥有直接效果的实验数据,但时间成本与经济成本较高,所以目前的运动性能研究多采用数值模拟的方法<sup>[13]</sup>。基于 CFD 数值模拟计算方法获取 AUV 的水动力参数,并对其建立六自由度运动学、动力学模型,结合编程软件对 AUV 的航行运动过程进行模拟仿真计算,得到相关的运动参数及动力参数<sup>[14]</sup>。在工程设计上常采用的控制算法是 PID 控制<sup>[15]</sup>,因为这种策略结构简单、适应性强、包容性好。

MAUV 的外形布局优化设计是基于 CFD 模拟仿真计算与运动仿真计算等数值仿真驱动的方法,对真实物理过程进行模拟实验。由于该优化问题属于昂贵黑箱问题,需要多次调用计算模型进行仿真分析,十分耗时且代价较高。为了减少计算成本,需采用基于代理模型的优化方法解决该优化设计问题。数据驱动的进化优化算法可以分为 2 种情况,在线的数据驱动优化与离线的数据驱动优化<sup>[16]</sup>。2 种方法研究的侧重点不同,在线优化侧重于选择迭代过程中新产生的点来不断更新模型;离线优化侧重于目标函数完全未知的情况下,如何充分利用已有的数据对模型进行更新优化。本文将采用基于克里金代理模型辅助的 MAUV 离线优化算法对 MAUV 外形进行布局优化设计。

## 1 MAUV 模型设计

对 MAUV 进行总体方案设计时,既要保证航行器的推进效率高,也要保证航行阻力低,并且机动性和操控性也要满足任务需求。所以设计制定一种兼顾上述多种需求的外形布局方案,成为了总体设计方案的首要任务。将 MAUV 模型看作刚体,建立坐标系并对其运动参数进行符号标定,得到坐

标系之间的转换关系,得到 MAUV 的运动学模型;根据动量与动量定理,进行外力与外力矩分析,建立动力学模型;耦合建立 MAUV 的空间运动模型。

### 1.1 MAUV 艇体模型设计

采用回转体型主体方案,由格兰韦尔的双参数平方根多项式圆头线型、双参数一般多项式尖尾线型建立主体母线围绕 MAUV 纵轴旋转可以形成一个回转面,此回转面就是 MAUV 主体的外形表面。

表 1 MAUV 主体母线相关设计参数  
Table 1 Design parameters related to MAUV main busbar

项目	参数
总长 $L/\text{m}$	5.0
头部长度 $L_H/\text{m}$	0.8
艏部长度 $L_T/\text{m}$	1
艏端面半径 $R_H/\text{m}$	0.3
艏端面直径 $D_T/\text{m}$	0.15
最大横截面积直径 $D/\text{m}$	0.533
头部格兰维尔系数 $\sqrt{2r_0}$	0.8
头部格兰维尔系数 $k_{s1}$	2
艏部格兰维尔系数 $s_2$	3.5
艏部格兰维尔系数 $k_{s2}$	12

在设计完成的主体模型上,增设附体十字形鳍、主推进器、垂向推进器(艏、艉)、侧向推进器(艏、艉),MAUV 初始的外形布局设计采用“首垂推侧推+后垂推侧推+十字型鳍+后螺旋桨主推进器”,如图 1 所示。外形布局设计变化参数为主推进器在航行器纵轴上的坐标值与艏鳍展长,其它参数与主体模型参数同样固定不变,如表 2 所示。MAUV 整体模型,是完全实体模型,所以其重心与浮心位于同一点,在主体模型的纵对称面内。

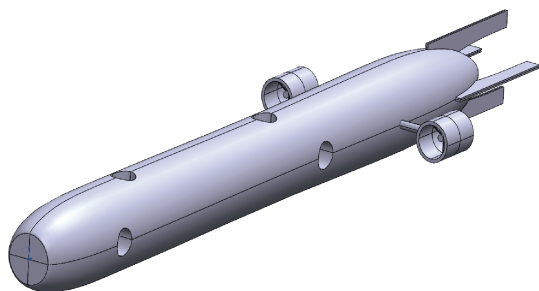


图 1 MAUV 初始外形整体模型

Fig. 1 Overall model of MAUV initial shape

表 2 MAUV 其它主要参数  
Table 2 Other main parameters of MAUV

项目	参数/m	项目	参数/m
鳍的弦长	0.9	鳍的纵向起点位置	4.5
主推的内径	0.2	主推的外径	0.24
侧推槽直径	0.165	垂推槽直径	0.165
侧推槽圆心位置	0.7, 3	垂推槽圆心位置	1.05, 2.65

### 1.2 MAUV 运动模型设计

航行器在水中运动航行的过程中,常被看作刚体运动,会受到复杂的外力作用,外力的大小、方向与作用点的分布情况决定着航行器在水中运动的状态与轨迹。为了研究航行器的受力情况与运动状态,需要根据不同的研究目的,采用不同的坐标系。由于篇幅有限,以下航行器常采用的坐标系类型与相关参数符号定义详细见参考资料<sup>[17]</sup>。

MAUV 的空间运动模型主要由运动学模型与动力学模型组成,其中运动学模型与 MAUV 的运动状态有关,与 MAUV 的外形结构无关。因此,MAUV 的运动学模型与传统 AUV 的运动学模型相同,无需进行修改。

MAUV 在流域中进行任意运动时,受到的外力非常复杂,可分为流体动力、浮力、重力和推力等。其中,流体动力是根据 MAUV 的外形与运动状态决定的,浮力与重力是自身属性,推力与推进器数量与布置相关。由此可以得出:MAUV 与传统 AUV 在动力学模型中的差异是推力及推力矩。传统 AUV 的推进器置于艏端面中心,只产生向前推力,不产生力矩,而六推进器 MAUV 则会产生 3 向推力和推力矩,如下所示:

$$T = \begin{bmatrix} T_1 + T_2 \\ T_3 + T_4 \\ T_5 + T_6 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$M_T = \begin{bmatrix} 0 \\ T_5x_3 - T_6x_4 + z_1(T_1 - T_2) \\ T_3x_1 - T_4x_2 \end{bmatrix}$$

式中:  $T_1, T_2$  为主推的 2 个推力, N;  $T_3, T_4$  为垂推的 2 个推力, N;  $T_5, T_6$  为侧推的 2 个推力, N;  $z_1$  是主推推力距离浮心的  $z$  向距离, m;  $x_1, x_2$  是垂推推力距离浮心的  $x$  向距离, m;  $x_3, x_4$  是侧推推力距离浮心的  $x$  向距离, m。通过修改推力及推力矩,可在原 AUV 运动模型<sup>[17]</sup>基础上获得 MAUV 的运动模型。

## 2 MAUV 性能分析

### 2.1 水动力性能分析

对于 MAUV 水动力性能研究, 通常采用工程预报和 CFD 仿真 2 种方式进行。工程预报采用预估公式对 MAUV 的水动力性能进行预测, 可以很快得到 MAUV 的水动力性能参数, 但是这种方式也存在着预测精度不足的缺点。而 CFD 通过流场仿真, 可以较为准确的得到流体参数, 但是复杂流体动力仿真计算时间较长。综合考虑上述 2 种方式, 对于初步设计的 MAUV 模型的位置导数和附加质量计算采用 CFD 仿真的方式, 旋转导数的计算采用工程预报的方式。

#### 1) 位置力及力矩。

本文基于 Workbench 内部的 Geometry 模块建立 MAUV 与长方体流域统一的几何模型, 流域大小设置为  $35\text{ m} \times 6\text{ m} \times 6\text{ m}$ , 并对其进行区域划分, 设置速度入口、压力出口、滑移壁面, MAUV 表面设置为无滑移壁面。基于 Workbench 内部的 Mesh 模块, 选用非结构面网格 Quad Dominant、体网格 Tetra/Mixed 对 MAUV 进行网格划分。网格划分情况如图 2 所示, 网格数量在 700 万左右, 网格单元质量最低为 0.22, 网格正交质量最低 0.19。

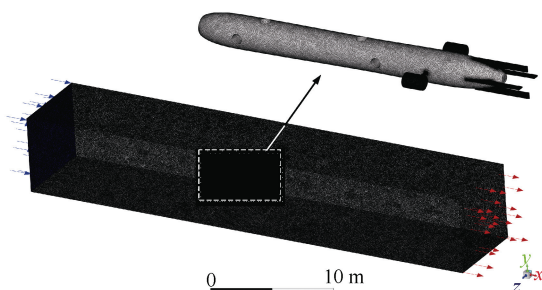


图2 位置力及力矩模型网格划分情况  
Fig. 2 Mesh division of positional force and moment model

由于 MAUV 模型关于  $xoy$  面和  $xoz$  面对称, 对 MAUV 模型进行变攻角  $0^\circ \sim 4^\circ$  与变侧滑角  $0^\circ \sim 4^\circ$  工况下的位置力与力矩的流体仿真计算, 设定航行速度为  $5.14\text{ m/s}$  ( $10\text{ kn}$ )。对得到的数据进行最小二乘法曲线拟合 (角度单位为  $^\circ$ ), 即可获得对应的位置力及力矩参数。

#### 2) 阻尼力及力矩。

由于需要通过对不同回转半径下绕  $y$  轴或  $z$  轴旋转时的阻尼力和阻尼力矩进行拟合得到旋转导数, 所以需要设置多个不同回转半径弧形环状流域的几何模型进行网格划分, 回转半径  $R$  分别取  $30\text{ m}$ ,  $50\text{ m}$ ,  $80\text{ m}$ ,  $110\text{ m}$ , 通道半径  $R_t$  取  $12.5\text{ m}$ 。边界条件与网格划分同位置力网格。

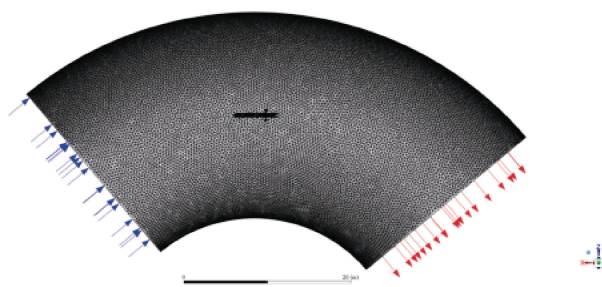


图3 30 m 偏航轴 ( $y$  轴) 网格划分情况  
Fig. 3 Mesh delineation of yaw axis ( $y$ -axis) with turning radius of  $30\text{ m}$

将求解旋转运动的非定常问题转变为定常问题进行求解, 需要将 N-S 方程由绝对速度转为相对速度。参考文献[18]添加广义动量源项法将绝对运动转换成相对运动, 旋转中心设置在大地坐标系的原点。设定航行速度为  $5.14\text{ m/s}$  ( $10\text{ kn}$ ), 对得到的变回转半径数据进行最小二乘法曲线拟合, 可得到阻尼力及力矩参数。

#### 3) 附加质量。

附加质量的本质就是航行器在做变速运动时产生的力和力矩的增量。所以本节基于动网格技术, 在 C 语言软件中编写 UDF 函数, 并将 UDF 函数录入到 FLUENT 软件平台中, 使 MAUV 按照 UDF 函数设定的运动规律做变速运动 (匀变速直线运动或匀变速旋转运动), 对比力或力矩的增量, 即可得到 MAUV 的附加质量。

UDF 函数设定 MAUV 运动规律: 每半个周期 ( $T/2$ ) 加速度与角加速度方向会变化一次, 匀变速直线运动的加速度  $a$ , 匀变速旋转运动的角加速度为  $\omega_a$ , 大小分别为  $1\text{ m/s}^2$  和  $57.3^\circ/\text{s}^2$ , 变化周期  $T=0.02\text{ s}$ 。

完成附加质量计算后, 可以得到 MAUV 所受各个力和力矩随时间变化的规律。

## 2.2 运动性能分析

基于建立的 MAUV 空间运动模型,在 Simulink 平台上搭建运动仿真系统,如图 4 所示。其中,mauv-model 部分主要修改了程序中流体作用力及力矩(去除舵的作用力及力矩)和推进器作用力及力矩(添加了多个推进器作用力及力矩)。运动

控制部分则是根据  $\psi, \theta, \varphi, y, \text{ref}\psi, \text{ref}y$  6 个状态量作为控制器的输入,经控制器对偏航、俯仰与横滚等姿态参数的控制来控制 6 个推进器推力  $T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6$ ,以此来控制 MAUV 的运动状态,如图 5 所示。为了简化分析过程和仿真难度,将运动分解到垂直面和水平面分别进行仿真分析。

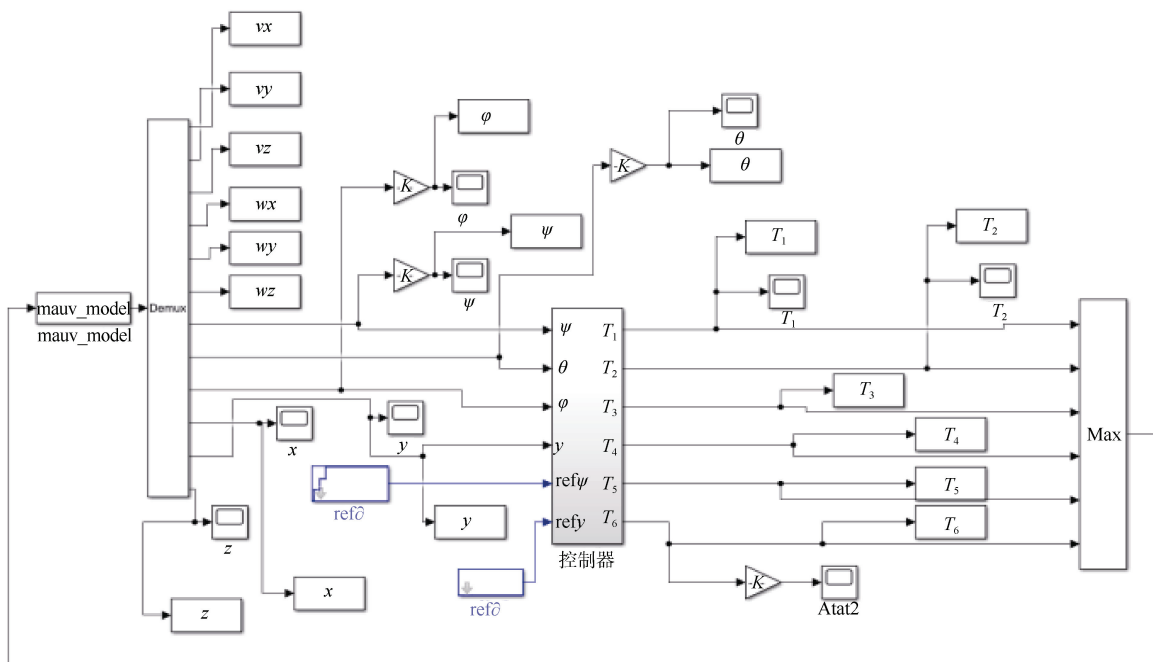


图 4 运动仿真系统

Fig. 4 Motion simulation system

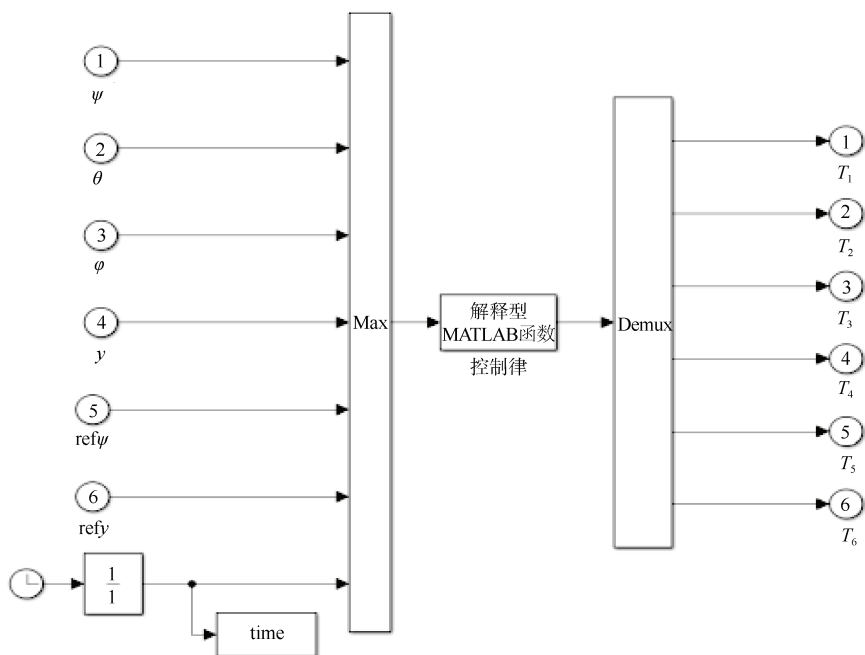


图 5 控制器模块

Fig. 5 Controller module



### 1) 垂直面运动性能。

在进行垂直面内的分析前, 首先要对 MAUV 的稳定性进行求解, 垂直面稳定性裕度  $G_y$  可由下式求得:

$$G_y = 1 - \frac{m_z^\alpha (\mu - C_y^{\omega_z})}{C_y^\alpha (\mu x_c - m_z^{\omega_z})} \quad (2)$$

当  $0 < G_y < 1$  时, MAUV 处于动稳定状态, 满足稳定性条件。

MAUV 在垂直面的运动工况主要分定深直航和变深航行。

定深航行是指 MAUV 在固定深度向前直行的运动工况。可知, 在定深直航的过程中, MAUV 要保证横滚角、俯仰角、侧滑角等姿态参数稳定, 且能够固定向前直航。因此, 在控制策略中要将  $T_1$  和  $T_2$  定为等大的定值, 提供前进动力;  $T_3$  和  $T_4$  以俯仰角  $\theta$  为比例项, 以  $\omega_z$  为微分项, 平衡俯仰力矩;  $T_5$  和  $T_6$  为 0。

变深运动就是 MAUV 在深度上的改变, 因此在控制程序中将距离目标深度的差值  $\text{deltay}$  作为比例项添加到  $T_3$ ,  $T_4$  中。由于试验模型关于模型横截面对称, 因此只需进行下潜运动进行仿真, 上浮运动同理。

### 2) 水平面运动性能。

在进行回转的分析前, 首先要对 MAUV 的稳定性进行求解, 水平面稳定性裕度  $G_z$  可由下式求得:

$$G_z = 1 - \frac{m_y^\beta (\mu + C_z^{\omega_y})}{C_z^\beta (m_y^{\omega_y} - \mu x_c)} \quad (3)$$

当  $0 < G_z < 1$  时, MAUV 处于动稳定状态, 满足稳定性条件。

水平面内的运动分析, 由于负浮力的存在, 除了考虑水平面内的参数, 还需要对航行深度进行平衡调节。因此, 水平面运动需要垂推对俯仰角, 侧推对横滚角进行调节, 使其能保证在固定深度进行运动。水平面内的运动, 由于横向航行时, 受流体作用的面积过大, 所以此种航行运动在实际情况中一般不会进行, 故只研究 MAUV 的回转运动。将  $\text{deltay}$  与对应的旋转角速度作为比例项来进行运动控制。

## 3 MAUV 外形优化设计

### 3.1 优化问题数学建模

外形布局优化设计的数学模型如下:

$$\begin{cases} \min R_h \\ \max G_y \\ \max G_z \\ 0 < G_y < 1 \\ 0 < G_z < 1 \\ 3.3 < X_T < 4.4 \\ 0.1 < L_{QZ} < 0.2 \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $R_h$  为运动仿真系统仿真得到的回转半径, m;  $G_y$  为 MAUV 垂直面运动稳定性裕度;  $G_z$  为 MAUV 水平面运动稳定性裕度;  $X_T$  为主推进器在航行器纵轴上的坐标值, m;  $L_{QZ}$  为 MAUV 艏鳍展长, m。

### 3.2 KT-Arch2 算法

双归档算法 (Two\_Arch) [19] 是一种低复杂度算法, 它将非支配的解划分存入为 2 个档案中, 分别关注了优化过程中的收敛性和多样性, 可以称为收敛性存档 (Convergence Archive, CA) 与多样性存档 (Diversity Archive, DA), 因此该算法称为双归档算法。WANG 等人 [20] 在 Two\_Arch 的基础上, 提出了一种显著改进的针对多目标问题的双归档算法, 即 Two\_Arch2, 通过不同的支配关系独立更新进行收敛性存档与多样性存档。

克里金模型 [21] 又被称为高斯回归过程 (Gaussian Process Regression)。高斯回归时的内插建模得到克里金模型, 然后将高斯过程用做先验分布来对数据进行回归分析。其不仅可以根据已知的数据信息无偏预测拟合未知的目标函数, 而且可以得到合适的预测误差, 这也使得其在多个领域得到了广泛应用。

对克里金模型与改进的双存档优化算法进行整理归纳, 构建克里金辅助的双存档离线优化算法 KT-Arch2。算法主要由 2 部分组成: 数据初始化与迭代优化。初始化过程中采用网格采样 (GS) [22] 方法获得初始样本点, 根据已知数据建立克里金代理模型, 并生成优化算法的初始种群。在迭代优化中, 初始种群通过交叉变异得到子代, 经克里金预测得目标最优集; 基于存档筛选策略, 对目标最优集进行双存档优化, 然后输出新一代的种群。最后根据双档案的最大容量值 (阈值) 结束迭代优化, 输出 CA 与 DA 保存的最优值集合, 根据目标值考虑的权重不同, 挑选出最优值。

根据 GS 采样方法对于设计变量进行采样,得到 9 组设计变量数据集。然后根据设计变量数据集单元,进行运动性能分析,得到了 9 组优化目标数据集。每一组优化目标数据集由 MAUV 的垂直面的运动稳定性裕度、水平面的运动稳定性裕度与回转半径组成。设计变量数据集与优化目标数据集组合形成离线数据库。根据离线数据库的数据,建立 KT-Arch2 优化

模型与克里金代理模型,进行迭代优化,独立运行 30 次(每次迭代寻优次数达到 10 000 次),终止优化迭代,得到优化集合。设定 9 组不同的垂直面稳定性裕度、水平面稳定性裕度与回转半径对于本次优化目标的权重比,根据权重占比选取最优值集合。

### 3.3 优化结果及分析

最优集结果如图 6 所示。

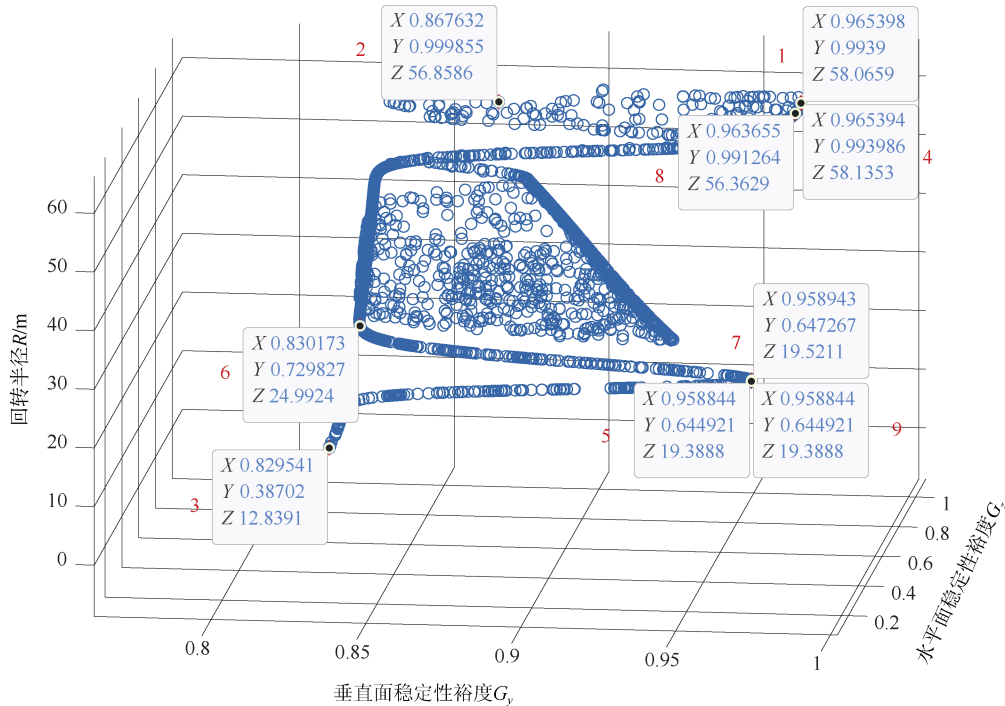


图 6 设计方案最优集

Fig. 6 Optimal set of design solutions

根据不同权重比方案取得的对应的设计变量数据与预测目标数据的最优集合整理总结,数据结果如表 3 所示。

表 3 不同权重比下的变量与目标值的最优集

Table 3 Optimal set of variables and objective values for different weight ratios

序号	主推进器 坐标值 $X_T$	艏鳍展 长/m	垂直面稳 定性裕度	水平面稳 定性裕度	回转 半径/m
1	3.866 9	0.200 0	0.965 4	0.993 9	58.065 9
2	3.566 1	0.204 8	0.867 6	0.999 8	56.858 6
3	3.450 2	0.120 9	0.829 5	0.387 0	12.839 1
4	3.873 4	0.200 0	0.965 4	0.994 0	58.135 3
5	3.300 0	0.149 8	0.958 8	0.644 9	19.388 8
6	3.300 0	0.160 0	0.830 1	0.729 8	24.992 4
7	3.300 0	0.150 1	0.958 9	0.647 2	19.521 1
8	3.705 8	0.200 0	0.963 7	0.991 2	56.362 9
9	3.300 0	0.149 8	0.958 8	0.644 9	19.388 8

对于 MAUV 外形的布局优化设计,主要考虑提高 MAUV 模型的机动性,同时运动稳定性应满足工程的应用需求。所以,回转半径的权重占比应最高,稳定性裕度的权重占比略低。综合考虑,第 9 组最优集最符合实际情况,于是得到最优外形设计的 MAUV 模型。将仿真试验结果与优化得到的最优预测目标值和初步设计的 MAUV 模型的基准值进行对比,如表 4 所示。其中预测值与基准值之间的比较,从左至右结果分别为预测优、预测优、预测差,预测值与仿真值之间的误差,从左至右依次为 1.18%、-3.96%、-0.74%。可以得到最优 MAUV 模型与初步设计的 MAUV 模型的稳定性相比,稳定性有显著提升,机动性略差。与运动仿真结果相比,稳定性存在最大误差在 4%之内,回转半径存

在最小误差在 1%之内, 可以认为离线优化结果真实有效且可信。

表 4 优化与仿真结果对比  
Table 4 Comparison of optimization and simulation results

项目	垂直面稳定性 裕度	水平面稳定性 裕度	回转半径/m
预测值	0.958 8	0.644 9	19.388 8
基准值	0.724 6	0.295 1	16.183 2
仿真值	0.947 6	0.671 5	19.533 4

#### 4 结束语

本研究针对 MAUV 外形的布局设计进行研究。主要研究内容包括 MAUV 模型设计, 设计并构建合适的 MAUV 仿真 3D 模型, 并基于常规 AUV 的空间运动模型建立符合 MAUV 的空间运动模型。同时, 完成了 MAUV 的水动力性能分析与运动性能分析。最后基于 KT-Arch2 算法, 构建了 MAUV 外形离线优化框架, 对 MAUV 外形进行了布局优化设计, 得到外形的最优布局方案。

从优化结果可知: 艏鳍展长越大, 侧向稳定性裕度越接近于 1, 回转半径越大, 机动性越弱。同时, 纵向稳定性裕度呈现出周期性变化。

下一步, 可对不同附体布局类型进行研究, 对比分析其对 MAUV 的性能影响。

#### 参考文献

- [1] 张宇文. 鱼雷总体设计理论与方法[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1998.
- [2] 姜军, 宋保维, 潘光, 等. 超低速小型 AUV 外形及流体动力布局研究[J]. 鱼雷技术, 2011, 19(5): 321-324.
- [3] KUKULYA A, PLUEDDEMANN A, AUSTIN T, et al. Under-ice operations with a REMUS-100 AUV in the Arctic[C]// 2010 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles. Monterey: IEEE, 2010.
- [4] 宋寿山. 基于多推进器的 AUV 建模与控制器设计[D]. 西安: 西北工业大学, 2006.
- [5] 宫颖博. 一种矢量型自主式水下航行器的结构设计与研究[D]. 杭州: 中国计量大学, 2021.
- [6] 吕建良. AUV 两自由度矢量推进机构的设计与控制算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [7] MUJAL-COLILLES A, CASTELLS M L, LLULL T, et al. Stern twin-propeller effects on harbor infrastructures. experimental analysis[J]. Water, 2018, 10(11): 10111571.
- [8] NAJAFI S, POURMOSTAFA M. Investigating the performance of twin marine propellers in different ship wake fields using an unsteady viscous and inviscid solver[J]. Journal of Marine Science and Application, 2022, 21(2): 92-105.
- [9] GARUS J, ŽAK B. The practical aspects of implementation of the thrust allocation procedure for a multi-propulsor underwater robot[J]. Polish Hyperbaric Research, 2018, 65(4): 39-48.
- [10] HE B, WANG R B, YAN H T, et al. A distributed parallel motion control for the multi-thruster autonomous underwater vehicle[J]. Mechanics Based Design of Structures and Machines, 2013, 41(2): 236-257.
- [11] 董苗苗, 张喜秋, 于昌利, 等. 潜海水动力系数计算研究综述[J]. 舰船科学技术, 2019, 41(1): 1-6.
- [12] 余金伟, 冯晓峰. 计算流体力学发展综述[J]. 现代制造技术与装备, 2013(6): 25-6, 8.
- [13] 潘世轩. 大推力作用下水下航行器运动位姿模拟研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- [14] 周则兴. 流线型水下作业机器人操纵性能分析与运动仿真[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
- [15] 董路. 小型复合式水下航行器的设计与控制研究[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2023.
- [16] 黄鹏飞. 离线数据驱动的进化优化研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.
- [17] 秦玉峰. 小型长航程 AUV 结构设计及动力学分析[D]. 天津: 国家海洋技术中心, 2018.
- [18] 刘帅, 葛彤, 赵敏. 基于源项法的潜艇旋臂试验模拟[J]. 大连海事大学学报, 2011, 37(2): 1-4.
- [19] PRADITWONG K, YAO X. A new multi-objective evolutionary optimisation algorithm: the two-archive algorithm[C]// 2006 International Conference on Computational Intelligence and Security. Guangzhou: IEEE, 2006.
- [20] WANG H, JIAO L, YAO X. Two\_Arch2: an improved two-archive algorithm for many-objective optimization[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2015, 19(4): 524-541.
- [21] 马鑫鑫. 基于高斯过程的多元高斯分布估计离线优化算法[D]. 广州: 华南理工大学, 2022.
- [22] 何炳蔚. 激光-机器视觉测量系统的数据采样及网格化[J]. 现代制造工程, 2006(6): 89-91, 118.

(责任编辑: 曹晓霖)