

【引用格式】谢虎, 吴维, 董元发, 等. UUV 定深控制模型参数优化设计方法[J]. 数字海洋与水下攻防, 2024, 7(2): 177-185.

# UUV 定深控制模型参数优化设计方法

谢虎<sup>1,2</sup>, 吴维<sup>3</sup>, 董元发<sup>3,\*</sup>, 孙善春<sup>1,2</sup>, 於楷<sup>3</sup>

(1. 清江创新中心, 湖北 武汉 430076; 2. 中国船舶集团有限公司第七一〇研究所, 湖北 宜昌 443003;  
3. 三峡大学 机械与动力学院, 湖北 宜昌 443002)

**摘要** 合适的控制模型参数能够保证被控对象在较快的响应时间和较小的超调量下达到控制目标, 无人水下航行器定深控制模型参数的优化设计对提升水下航行器使用性能具有重要意义。首先, 建立了水下航行器空间运动学方程, 基于 Modelica 建模语言构建了航行器虚拟样机及其定深控制模型。然后, 以响应时间和超调量最小为优化目标, 采用非支配排序差分进化算法建立了水下航行器定深控制模型参数多目标优化流程, 基于 OPTIMUS 平台构建了水下航行器定深控制模型参数优化设计工作流。以某水下航行器为对象的实验结果表明: 所提方法可快速获得较优的 PID 控制模型参数, 优化后的水下航行器定深运动控制特性显著改善。

**关键词** 水下航行器定深; Modelica; 参数优化; OPTIMUS

中图分类号 TJ610; U664.82 文献标识码 A 文章编号 2096-5753(2024)02-0177-09

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2024.02.006

## Research on Parameter Optimization Method for UUV Depth Setting Control Model

XIE Hu<sup>1,2</sup>, WU Wei<sup>3</sup>, DONG Yuanfa<sup>3,\*</sup>, SUN Shanchun<sup>1,2</sup>, YU Kai<sup>3</sup>

(1. Qingjiang Innovation Center, Wuhan 430076, China; 2. No. 710 R&D Institute, CSSC, Yichang 443003, China; 3. College of Mechanical & Power Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

**Abstract** Proper parameters of a control model can ensure that the controlled object realizes its control purpose in a fast response time and with a small overshoot. The optimal design of parameters for UUV depth setting control model is of great significance to improve UUV performance. Firstly, UUV space kinematics equation is established, and a UUV virtual prototype and its depth setting control model are constructed based on Modelica modeling language. Then, to minimize the response time and overshoot, the multi-objective optimization process for parameters of UUV depth setting control model is established by using non-dominated sorting differential evolution algorithm, and the design workflow of parameters optimization is constructed based on OPTIMUS platform. The experimental results of an UUV show that optimal PID control model parameters can be obtained quickly with the proposed method, and the optimized control characteristics of UUV depth setting motion are significantly improved.

**Key words** UUV depth setting; Modelica; parameter optimization; OPTIMUS

收稿日期: 2023-11-07

作者简介: 谢虎 (1986-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事无人水下航行器控制仿真研究。

\*通信作者: 董元发 (1988-), 男, 博士, 教授, 主要从事智能装备系统创新设计与高效运维研究。

基金项目: 国防科工局基础科研项目“虚实结合的\*\*\*多学科敏捷设计技术”(JCKY2021206B005)。

## 0 引言

无人水下航行器是一种能在水中自主推进、控制和导引的航行体,可以用来完成水下勘探、侦测、攻击和防守等任务<sup>[1]</sup>。水下航行器定深控制是指航行器在水下航行过程中维持恰当的深度,以确保水下航行器能够准确命中目标或执行特定的任务。深度控制的准确性对于提高水下航行器航行的稳定性和攻击命中精度至关重要,其关键在于水下航行器定深控制系统的参数优化设计。

在水下航行器动力学模型和洋流干扰模型已知的情况下,水下航行器定深控制主要涉及控制方法及其控制参数。蒋闯等<sup>[2]</sup>给出了无干扰下的鱼雷模型,通过仿真对比了比例积分微分控制(Proportional-Integral-Derivative control, PID)、滑模控制(Sliding Mode Control, SMC)、多维泰勒网(MTN)3种不同控制器的控制效果,仿真表明MTN的控制器效果最好。林洋等<sup>[3]</sup>利用MATLAB通过改进遗传算法,以总线长度及可靠性优化为目标问题对鱼雷控制系统进行了拓扑优化。宋晓茹等<sup>[4]</sup>提出了基于RS-Chaos-LSSVM的鱼雷航向控制方案,该方法提高了鱼雷航向控制的实时精确性,且对于海流海浪干扰具有良好的自适应抗干扰能力。宋明玉<sup>[5]</sup>将模糊控制方法引入到了线导鱼雷的组合导引方法中,该方法可以导引鱼雷按照要求入射目标尾流,且具有较好的弹道特性。陆平<sup>[6]</sup>采用了PFC对鱼雷进行控制仿真。高立娥等<sup>[7]</sup>利用Simulink建立了鱼雷水下空间运动的控制系统数学模型。刘煜<sup>[8]</sup>提出了一种带优化修正函数的非线性PID控制器设计方法,通过对控制器参数离线寻优和对修正函数在线优化调整,该系统具有良好的动、静态特性,且对鱼雷入水条件的变化具有较强的适应性。胡纽等<sup>[9]</sup>基于模糊控制方法,提出了一种基于避碰声呐的远程鱼雷自主避障算法。

随着现代科技的不断发展,优化算法和模型的引入为鱼雷等水下航行器的深度控制系统的设计提供了新的思路和方法。袁晓宇等<sup>[10]</sup>应用模糊控制算法对UUV定深进行了快速控制。王洪斌等<sup>[11]</sup>针对垂直面欠驱动自主水下机器人(AUV)的定深控

制问题,提出了基于粒子群优化的AUV定深跟踪有限时间控制方法。杨洋等<sup>[12]</sup>基于改进鱼群算法对UUV路径跟踪控制参数整体进行了研究。丁浩等<sup>[13]</sup>采用了滑模模糊控制方法,提高了UUV水平运动的稳定性。朱春磊等<sup>[14]</sup>提出了一种水下机器人艏向及垂向控制的预测控制优化算法。周浩等<sup>[15]</sup>提出了一种模糊化控制策略,提高了UUV航向运动中的稳定性与抗扰性。

其中,OPTIMUS作为一种强大的参数优化工具,具备全局搜索能力和高效算法,被广泛应用于各种优化问题的解决。苏明慧<sup>[16]</sup>以某型战术导弹为研究对象,采用OPTIMUS软件平台构建了其总体设计仿真分析自动化流程。袁艳丽等<sup>[17]</sup>利用OPTIMUS集成平台开展了地震条件下反应堆冷却剂系统动力响应对输入变量的敏感性分析。袁正等<sup>[18]</sup>在OPTIMUS中针对外轮转角误差最大值对叉车转向机构运动学参数模型进行了优化。张海军等<sup>[19]</sup>基于OPTIMUS优化平台对ANSYS建立的盘状摇头型超声电机定子参数化模型进行了动力学优化,根据优化结果制作的样机试验结果与优化设计结果相符。

综上所述,无人水下航行器控制系统参数寻优是控制器设计的关键环节,现有研究主要集中在算法的应用创新,PID参数整定多半以经验为主,缺乏一种高效的PID参数自动化寻优手段。基于此,本文基于Modelica建模语言构建水下航行器虚拟样机及其定深控制模型,以响应时间和超调量最小为优化目标,采用非支配排序差分进化算法<sup>[20]</sup>建立水下航行器定深控制模型参数多目标优化流程,基于OPTIMUS平台构建了水下航行器定深控制模型参数优化设计 workflow,提出一套水下航行器定深控制模型参数优化设计方法。

## 1 水下航行器运动学与动力学模型

水下航行器可以视为刚体,在发动机推力、舵机转向力和洋流的综合作用下产生运动。如图1所示,选取地面坐标系 $Oxyz$ 为固定参考坐标系,以发射点为原点, $O_0y_0$ 轴铅直向上, $O_0x_0$ 轴选定为前进方向, $O_0z_0$ 轴垂直于 $O_0x_0$ 轴和 $O_0y_0$ 轴。 $\theta$ 表示水下航行器的俯仰角, $\psi$ 为偏航角, $\varphi$ 表示

横滚角,  $x_0$ ,  $y_0$ ,  $z_0$  分别为体坐标系在地面坐标系的位置。

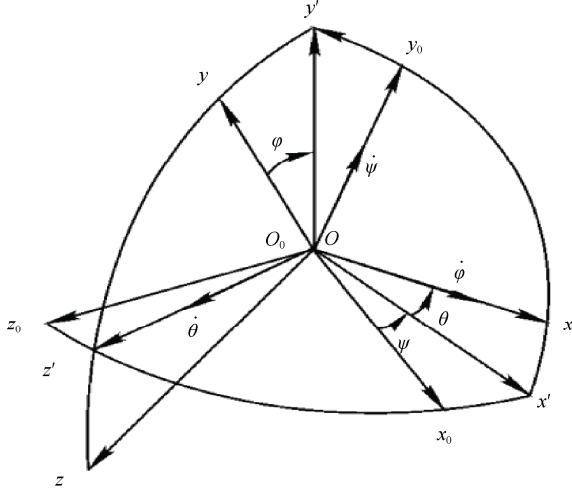


图 1 体坐标系与地面坐标系的相对位置

Fig. 1 Positions of body coordinate system relative to ground coordinate system

水下航行器的运动学方程如式 (1) - (9) 所示。

$$\dot{\theta} = \omega_y \sin \varphi + \omega_z \cos \varphi \quad (1)$$

$$\dot{\varphi} = \omega_y \sec \theta \cos \varphi - \omega_z \sec \theta \sin \varphi \quad (2)$$

$$\dot{\psi} = \omega_x - \omega_y \tan \theta \cos \varphi + \omega_z \tan \theta \sin \varphi \quad (3)$$

$$\dot{x}_0 = v_x \cos \theta \cos \psi + v_y (\sin \psi \sin \varphi - \sin \theta \cos \psi \cos \varphi) + v_z (\sin \psi \sin \varphi + \sin \theta \cos \psi \cos \varphi) \quad (4)$$

$$\dot{y}_0 = v_x \sin \theta + v_y \cos \theta \cos \varphi - v_z \cos \theta \sin \varphi \quad (5)$$

$$\dot{z}_0 = -v_x \cos \theta \sin \psi + v_y (\cos \psi \sin \varphi + \sin \theta \sin \psi \cos \varphi) + v_z (\cos \psi \cos \varphi - \sin \theta \sin \psi \sin \varphi) \quad (6)$$

$$v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2 \quad (7)$$

$$\alpha = -\arctan\left(\frac{v_y}{v_x}\right) \quad (8)$$

$$\beta = \arctan\left(\frac{v_z}{\sqrt{v_x^2 + v_y^2}}\right) \quad (9)$$

水下航行器的动力学方程组如式 (10) - (15) 所示。

$$(m + \lambda_{11})\dot{v}_x + m z_c \dot{\omega}_y - m y_c \dot{\omega}_z + m[v_z \omega_y - v_y \omega_z + y_c \omega_x \omega_y + z_c \omega_x \omega_z - x_c (\omega_y^2 + \omega_z^2)] = T - C_{xS} \frac{1}{2} \rho v^2 S - \Delta G \sin \theta \quad (10)$$

$$(m + \lambda_{22})\dot{v}_y + (m x_c + \lambda_{26})\dot{\omega}_z - m z_c \dot{\omega}_x + m[v_x \omega_z - v_z \omega_x + z_c \omega_y \omega_z + x_c \omega_x \omega_y - y_c (\omega_z^2 + \omega_x^2)] = \frac{1}{2} \rho v^2 S (C_y^a \alpha + C_y^{\delta_e} \delta_e + C_y^{v_z} \varpi_z) - \Delta G \cos \theta \cos \varphi \quad (11)$$

$$(m + \lambda_{33})\dot{v}_z + m y_c \dot{\omega}_x - (m x_c - \lambda_{35})\dot{\omega}_y + m[v_y \omega_x - v_x \omega_y + x_c \omega_z \omega_x + y_c \omega_y \omega_z - z_c (\omega_x^2 + \omega_y^2)] = \frac{1}{2} \rho v^2 S (C_z^b \beta + C_z^{\delta_r} \delta_r + C_z^{\varpi_y} \varpi_y) + \Delta G \cos \theta \sin \varphi \quad (12)$$

$$(J_{xx} + \lambda_{44})\dot{\omega}_x + m y_c \dot{v}_z - m z_c \dot{v}_y + m y_c (v_y \omega_x - v_x \omega_y) + m z_c (v_z \omega_x - v_x \omega_z) + (J_{zz} - J_{yy}) \omega_y \omega_z = \frac{1}{2} \rho v^2 S L (m_x^b \beta + m_x^{\delta_r} \delta_r + m_x^{\delta_d} \delta_d + m_x^{\varpi_x} \varpi_x + m_x^{\varpi_y} \varpi_y) + G \cos \theta (y_c \sin \varphi + z_c \cos \varphi) + \Delta M_{xp} \quad (13)$$

$$(J_{yy} + \lambda_{55})\dot{\omega}_y + m z_c \dot{v}_x - (m x_c - \lambda_{35})\dot{v}_y + m z_c (v_z \omega_y - v_y \omega_z) + m x_c (v_x \omega_y - v_y \omega_x) + (J_{xx} - J_{zz}) \omega_z \omega_x = \frac{1}{2} \rho v^2 S L (m_y^b \beta + m_y^{\delta_r} \delta_r + m_y^{\varpi_x} \varpi_x + m_y^{\varpi_y} \varpi_y) - G (x_c \cos \theta \sin \varphi + z_c \sin \theta) \quad (14)$$

$$(J_{zz} + \lambda_{66})\dot{\omega}_z + (m x_c + \lambda_{26})\dot{v}_y - m y_c \dot{v}_x + m x_c (v_x \omega_z - v_z \omega_x) + m y_c (v_y \omega_z - v_z \omega_y) + (J_{yy} - J_{xx}) \omega_x \omega_y = \frac{1}{2} \rho v^2 S L (m_z^a \alpha + m_z^{\delta_e} \delta_e + m_z^{\varpi_z} \varpi_z) + G (y_c \sin \theta - x_c \cos \theta \cos \varphi) \quad (15)$$

为便于后续控制系统参数的仿真与优化设计, 采用多领域物理统一建模语言 Modelica 建立空间运动虚拟样机。考虑深度  $y$  变化由升降舵角  $\delta_e$  来调控, 俯仰角  $\theta$  在水下航行器运动过程中需要被限定在一定范围内, 以升降舵角  $\delta_e$  为输入信号, 深度  $y$  和俯仰角  $\theta$  为响应输出, 水下航行器空间运动虚拟样机代码如下:

```

model model_name
/*variables definition
Modelica.Blocks.Interfaces.RealInput delta_e;
Modelica.Blocks.Interfaces.RealOutput y0;
Modelica.Blocks.Interfaces.RealOutput theta;

```

```

equation
/*Equations expression
...
//Insert Differential equations here
...
end model_name;

```

## 2 水下航行器定深控制系统

### 2.1 水下航行器定深 PID 控制模型

PID 控制策略由于其算法简单、鲁棒性好和可靠性高，被广泛应用于工业过程控制。水下航

行器定深控制一般由俯仰角与深度双闭环实现，俯仰角控制回路用于提高深度控制阻尼，避免深度控制过程的震荡。图 2 所示为 OpenModelica 设计的水下航行器定深 PID 控制模型，其数学表达式如下：

$$\text{delta\_e} = [kp_1 * (y_0 - y) - \theta] * (kp_2 + \frac{ki}{s}) \quad (16)$$

式中： $y_0$  为深度指令； $y$  为实时测量的深度值； $\text{delta\_e}$  为升降舵角； $\theta$  为俯仰角； $kp_1$  为深度控制器增益； $kp_2$  为俯仰角控制器增益；积分系数  $ki$  值在传递函数 `transferFunction` 模块中表达。

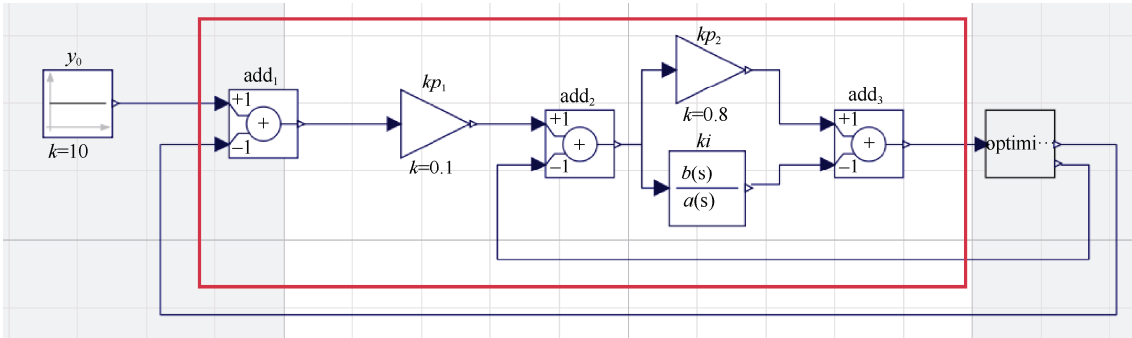


图 2 水下航行器定深 PID 控制模型  
Fig. 2 PID control model for UUV depth setting

### 2.2 控制模型的正确性检验

为检验所建 PID 控制模型的正确性，以深度  $y_0$  在 10 m 为控制目标进行仿真验证。初始设计变量选择  $kp_1$  为 0.03， $kp_2$  为 2， $ki$  为 0.1，仿真配置中选择开始时间为 0，结束时间为 20 s，仿真间隔为

0.04 s，间隔数量为 500，积分方法默认选择 `dassl`。最终  $y_0$  仿真曲线如图 3 所示。可以看到，建立的水下航行器深度 PID 控制模型可以实现水下航行器的定深控制，但依然存在响应时间较长、稳态误差较大的缺点。

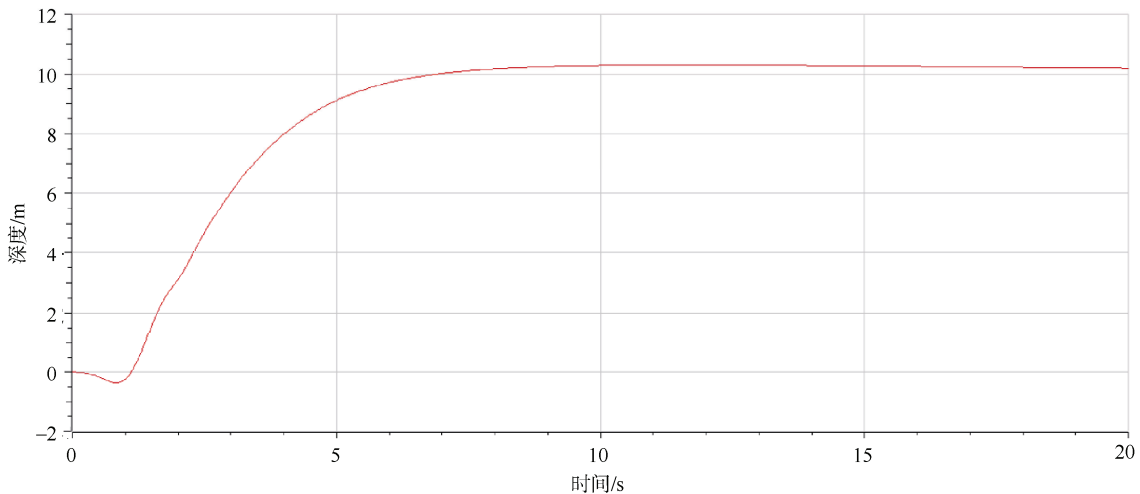


图 3 水下航行器定深控制仿真曲线  
Fig. 3 Simulation curve of UUV depth setting control

### 3 水下航行器定深控制模型参数优化设计方法

#### 3.1 水下航行器定深 PID 控制模型

##### 3.1.1 决策变量

本优化问题选择的决策变量包括 2 个放大器 gain 模块的参数值  $kp_1$ 、 $kp_2$ , 传递函数 transferFunction 模块的参数值  $ki$ 。

##### 3.1.2 目标函数

在评估 PID 控制效果好坏时, 响应时间  $t$  和稳态误差  $\sigma$  是最重要的 2 个评价指标。响应时间  $t$  为阶跃起始到首次到达期望值的时间, 超调量  $\sigma$  表示系统的被控量偏离最终稳态值的程度, 可表达为

$$\sigma = \frac{y(t_p) - y(\infty)}{y(\infty)} \times 100\% \quad (17)$$

式中:  $y(t_p)$  是被控对象的第 1 个峰值;  $y(\infty)$  是系统达到稳态时被控对象的值。故选定响应时间  $t$  最小和超调量  $\sigma$  最小为目标函数。

##### 3.1.3 约束条件

控制模型中各决策变量和模型参数需满足以下约束:

$$kp_{1\_min} \leq kp_1 \leq kp_{1\_max} \quad (18)$$

$$kp_{2\_min} \leq kp_2 \leq kp_{2\_max} \quad (19)$$

$$ki\_min \leq ki \leq ki\_max \quad (20)$$

$$\theta \leq \theta_{max} \quad (21)$$

$$y_{aim} < y_{max} \quad (22)$$

式中:  $kp_{1\_min}$ 、 $kp_{1\_max}$  为能使水下航行器定深控制模型正常运行的上下限值;  $kp_{2\_min}$ 、 $kp_{2\_max}$  为能使水下航行器定深控制模型正常运行的上下限值;  $ki\_min$ 、 $ki\_max$  为能使水下航行器定深控制模型正常运行的上下限值;  $\theta_{max}$  为水下航行器深度控制变化过程中俯仰角的最大值;  $y_{aim}$  为水下航行器深度控制过程中目标值;  $y_{max}$  为水下航行器深度控制过程中最大值。

##### 3.1.4 优化模型

$$\min t_s = f_1(kp_1, kp_2, ki) \quad (23)$$

$$\min \sigma = f_2(kp_1, kp_2, ki) \quad (24)$$

$$\text{s.t. } g_1(kp_1, kp_2, ki) = \theta_{max} - \theta \geq 0 \quad (25)$$

$$g_2(kp_1, kp_2, ki) = y_{max} - y_{aim} \geq 0 \quad (26)$$

$$kp_{1\_min} \leq kp_1 \leq kp_{1\_max} \quad (27)$$

$$kp_{2\_min} \leq kp_2 \leq kp_{2\_max} \quad (28)$$

$$ki\_min \leq ki \leq ki\_max \quad (29)$$

#### 3.2 水下航行器定深控制模型参数优化算法

由 3.1 可知, 该优化问题包含响应时间  $t$  和超调量  $\sigma$  两个优化目标, 属于多目标约束优化问题, 选择非支配排序差分进化 (Non-dominated Sorting Differential Evolution, NSDE) 进行求解。首先初始化种群, 假设初始种群包含  $N$  个解, 每个解  $X$  表示为

$$X_i = (kp_{1i}, kp_{2i}, ki_i), i = 1, 2, \dots, N \quad (30)$$

接着计算每个解的目标函数值, 即

$$t\_s_i = f_1(X_i) \quad (31)$$

$$\sigma_i = f_2(X_i) \quad (32)$$

随后会根据每个解的  $t\_s_i$ ,  $\sigma_i$  的值进行非支配排序, 用以确定 Pareto 前沿。对于每个解  $X_i$ , 计算其拥挤度距离  $D_i$ :

$$D_i = \sum_{j=1}^N \text{dist}(X_i, X_j) \quad (33)$$

式中,  $\text{dist}(X_i, X_j)$  表示解  $X_i$  和  $X_j$  之间的距离。紧接着对被选择的解使用差分进化策略生成新的解, 首先对当前种群进行变异操作, 第 GEN 代变异个体:

$$V_i(\text{GEN}) = X_{r1}(\text{GEN}) + F \times (X_{r2}(\text{GEN}) - X_{r3}(\text{GEN})) \quad (34)$$

式中:  $X_{r1}(\text{GEN})$ 、 $X_{r2}(\text{GEN})$ 、 $X_{r3}(\text{GEN})$  是从当前群体中随机选择的 3 个互不相同的个体, 且不与目标个体  $X_i$  相同;  $F$  为变异因子;  $V_i(\text{GEN})$  为目标个体  $X_i(\text{GEN})$  对应的变异个体。

随后对种群进行交叉。对每一个分量按照一定的概率选择子代变异向量来生成试验个体:

$$U_{i,j}(\text{GEN}) = \begin{cases} V_{i,j}(\text{GEN}), & \text{if rand}(0,1) \leq \text{CR or } j = j_{\text{rand}} \\ X_{i,j}(\text{GEN}), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (35)$$

式中: CR 为交叉概率因子;  $j_{\text{rand}}$  为随机的一个分类, 确保交叉后的试验个体至少有一维向量由变异个体提供。然后进行选择操作, 从目标个体和试验个体中选择更优的作为下一代:

$$X_i(\text{GEN}+1) = \begin{cases} U_i(\text{GEN}), & \text{if } f(U_i(\text{GEN})) \leq f(X_i(\text{GEN})) \\ X_i(\text{GEN}), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (36)$$

通过以上的变异、交叉、选择操作, 种群进化

到下一代并反复循环,直到算法迭代次数达到预定最大次数,或种群最优解达到预定误差精度时算法结束,随后进行非支配排序将种群中的解划分为不同的前沿,算法流程如图 4 所示。

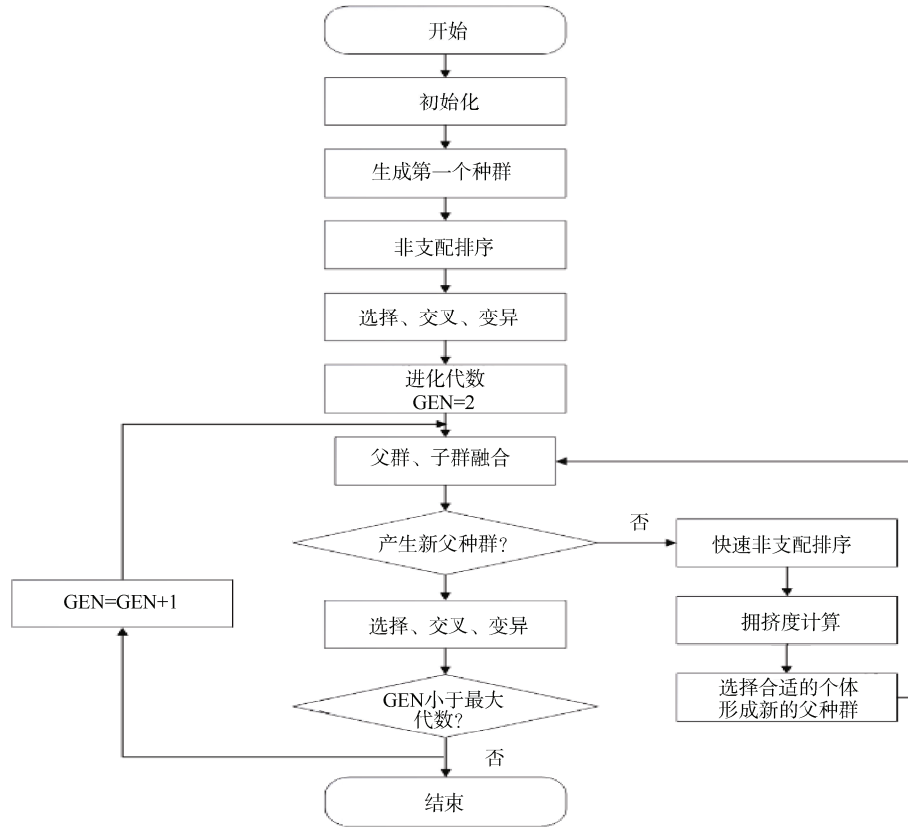


图 4 水下航行器定深控制模型参数优化算法流程图

Fig. 4 A flow chart of parameter optimization algorithm for UUV depth setting control model

#### 4 仿真实验与分析

为验证本文所提方法的可行性,以某 324 口径

水下航行器为例,结合 OPTIMUS 优化设计平台开展仿真验证,其部分参数<sup>[1]</sup>如表 1 所示。

表 1 某 324 口径水下航行器相关数据

Table 1 Data related to an UUV with caliber of 324

符号	注释	数值	单位
$\rho$	海水的密度	1 024	kg/m <sup>3</sup>
$V$	水下航行器的体积	0.184 3	m <sup>3</sup>
$m$	水下航行器的质量	215	kg
$G$	水下航行器的重力, $G = mg$	2 107	N
$L$	水下航行器的长度	2.79	m
$B$	水下航行器的浮力, $B = \rho g V$	1 841	N
$S$	水下航行器的最大横截面积, $S = \pi(0.3237/2)^2$	0.082 3	m <sup>2</sup>
$x_c$	水下航行器质心距浮心的距离, 质心在前为正	-0.016	m
$y_c$	质心下移量, 向下移为负	-0.003 3	m
$z_c$	质心侧移量, 向右移为正	0.003 5	m
$T$	螺旋桨的推力	1 947.3	N
$J_{xx}$	水下航行器绕体坐标系 $x$ 轴转动的转动惯量	3.234	kg·m <sup>2</sup>
$J_{yy}$	水下航行器绕体坐标系 $y$ 轴转动的转动惯量	131.124	kg·m <sup>2</sup>
$J_{zz}$	水下航行器绕体坐标系 $z$ 轴转动的转动惯量	131.124	kg·m <sup>2</sup>

### 4.1 OPTIMUS 工作流的建立

Noesis Optimus 是由 Noesis Solutions 开发过程集成和多学科协同优化设计软件。它是工程和制造行业中流程集成、设计探索和多学科优化的强大平台。OPTIMUS 可帮助工程师和设计师自动执行仿真和优化过程, 以提高产品性能、缩短开发时间并最大限度地降低成本。根据第 3 章节构建的水下航

行器定深控制模型, 在 OPTIMUS 中搭建以放大系数  $kp_1$ 、 $kp_2$ , 积分系数  $ki$  的参数值为优化设计变量, 以水下航行器的响应时间  $t$  和超调量  $\sigma$  为优化目标, 最大俯仰角  $\theta_{max}$  为约束条件的工作流。如图 5 所示, 从左到右分别对应: 设计变量输入、OPTIMUS 文本输入、仿真引擎调用、仿真文本输出、设计目标输出。

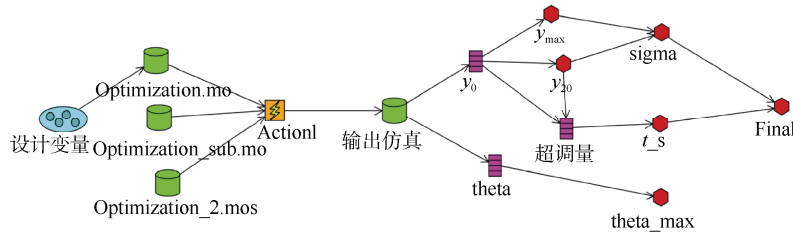


图 5 OPTIMUS 工作流模型  
Fig. 5 OPTIMUS workflow model

根据前期随机试验定义设计变量初始值及其范围如表 2 所示。

表 2 初始设计变量及范围  
Table 2 Initial design variables and ranges

设计变量	初始值	变化范围
放大系数 $kp_1$	0.03	[0.01, 0.05]
放大系数 $kp_2$	2	[1, 10]
积分系数 $ki$	0.1	[0.05, 2]

### 4.2 试验设计与分析

OPTIMUS 提供了多种 DOE 试验设计方法, 为使获得的代理模型精度更高, 采用拉丁超立方 (Latin-Hypercube) 算法进行试验设计, 选择泰勒多项式 (Taylor Polynomial) 方法对实验数据进行拟合得到最终的代理模型。设计变量和输出变量的相关性散点图如图 6 所示, 可以看到最大俯仰角  $\theta_{max}$  与放大系数  $kp_1$  有很强的正相关性, 即随着放

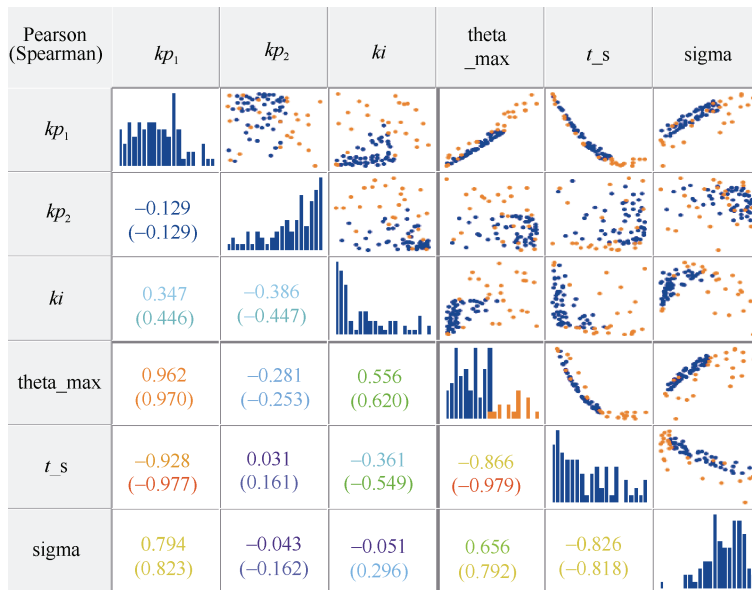


图 6 设计变量与输出变量相关性散点图  
Fig. 6 Scatter plot of correlation between design variables and output variables

大系数  $kp_1$  的数值变大最大俯仰角  $\theta_{max}$  也会随之变大,同时和积分系数  $ki$  存在较弱的正相关性。在水下航行器定深控制过程中,需严格控制俯仰角小于  $\pi/3$ , 因此放大系数  $kp_1$ 、积分系数  $ki$  的值不能无限制的取大。响应时间  $t$  主要受放大系数  $kp_1$  影响,呈明显的负相关。超调量  $\sigma$  受放大系数  $kp_1$  影响最大呈正相关,与放大系数  $kp_2$ , 积分系数  $ki$  的取值存在较弱的负相关。

### 4.3 优化结果

由图 6 可知,响应时间  $t$  与超调量  $\sigma$  之间皮尔逊 (Pearson) 相关系数为  $-0.826$ , 斯皮尔曼 (Spearman)

相关系数为  $-0.818$ , 可以认为这 2 个输出变量之间存在明显的负相关性,因此在优化过程中很难达到使响应时间  $t$  与超调量  $\sigma$  这 2 个输出变量同时最小的目标。

采用第 3.2 章节的 NSDE 算法进行多目标优化,目标前沿数设置为 20,缩放因子  $F$  设置为 0.7,交叉概率因子  $CR$  设置为 0.85,选择响应时间  $t$  与超调量  $\sigma$  的最小化为优化目标。Pareto 前沿如图 7 所示,横轴为响应时间  $t$ ,纵轴为超调量  $\sigma$ 。在水下航行器的控制过程中,可以根据实际情况赋予响应时间和超调量不同的权重,将 Pareto 前沿的可行解转化为单目标优化问题,获得最终优化结果。

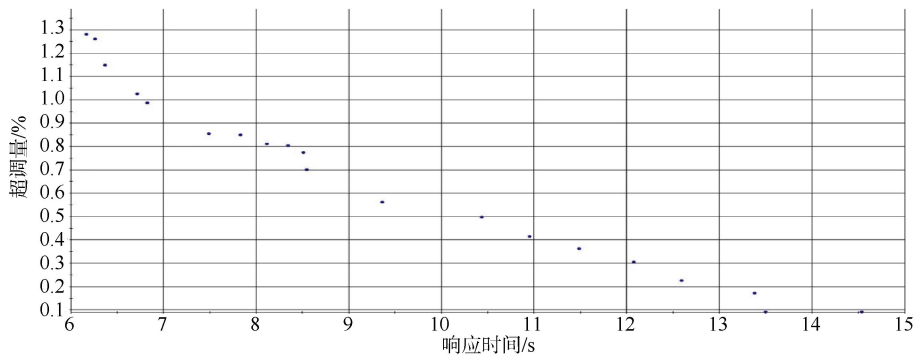


图 7 非支配排序差分进化算法优化后 Pareto 前沿图

Fig. 7 Pareto frontier map optimized by non-dominated sorting differential evolution algorithm

为进一步说明本文所提方法的应用效果,设置 3 个对照组,分别是:①优化前,即不对设计参数进行任何优化;②手动优化,即通过手动设置参数,不断尝试选出仿真数据最优的一组设计参数;③自动优化,即按本文所提方法通过 OPTIMUS 自动完成参数优化设计。仿真数据如表 3 所示,优化前后的水下航行器定深过程  $y_0$  变化曲线如图 8 所示。在保证最大俯仰角  $\theta_{max}$  在限制范围内的前提下,应用自动优化后的设计参数,深度  $y_0$  的响应曲线拥有更小的超调量及更快的响应时间。

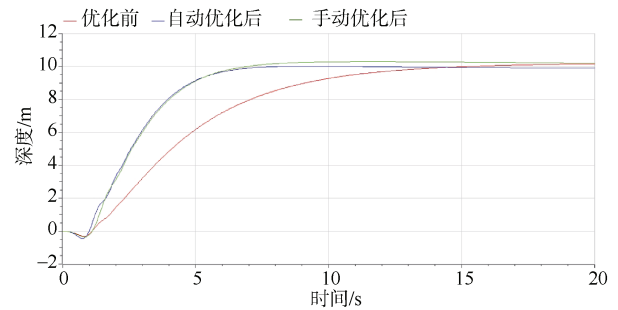


图 8 优化前后深度  $y_0$  随时间变化情况

Fig. 8 Change of depth  $y_0$  with time before and after optimization

表 3 优化前后仿真数据对比

Table 3 Comparison of simulation data before and after optimization

仿真数据	优化前	手动优化后	自动优化后
$kp_1$	0.01	0.03	0.030 96
$kp_2$	3.5	2	4.978 16
$ki$	1.9	0.1	1.240 02
$\theta_{max} / \text{rad}$	0.212 44	0.447 13	0.523 51
$t / \text{s}$	13.123 52	7.768 87	6.072 59
$\sigma / \text{m}$	0.004 15	0.012 53	0.011 52
Final	0.606 82	0.154 88	-0.062 48

## 5 结束语

针对水下航行器定深控制模型参数自动寻优问题,建立了水下航行器空间运动学方程,基于 Modelica 建模语言构建了水下航行器虚拟样机及其定深控制模型。以响应时间和超调量最小为优化目标,采用非支配排序差分进化算法建立了水下航行器定深控制模型参数多目标优化流程。基于 OPTIMUS 平台构建了水下航行器定深控制模型参



数优化设计 workflow, 提出了一套基于 OPTIMUS 的水下航行器定深控制模型参数优化设计方法。以某 324 口径水下航行器实验结果表明所提方法可快速获得较优的 PID 控制模型参数, 优化后的水下航行器定深运动控制特性显著改善。未来可以结合水下航行器数字孪生模型实现复杂海况下水下航行器运动控制参数的实时在线自适应寻优。

## 参考文献

- [1] 严卫生. 鱼雷航行力学[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2005.
- [2] 蒋闯, 严洪森, 杨龙. 无海流扰动的鱼雷航行多维泰勒网优化控制与仿真[J]. 电子技术, 2018, 47(3): 10-13.
- [3] 林洋, 孙炯, 刘凯, 等. 基于遗传算法的鱼雷控制系统拓扑优化[J]. 鱼雷技术, 2017, 25(1): 27-31.
- [4] 宋晓茹, 宋保维, 罗德柱. 基于 RS-Chaos-LSSVM 的鱼雷航向控制研究[J]. 弹箭与制导学报, 2012, 32(6): 41-44, 54.
- [5] 宋明玉. 基于模糊控制的线导鱼雷组合导引方法[J]. 鱼雷技术, 2008, 16(3): 52-56.
- [6] 陆平. PFC 在鱼雷控制系统中的应用[J]. 科技广场, 2008(5): 182-184.
- [7] 高立娥, 康凤举, 张金涛, 等. 基于 Simulink 的鱼雷控制系统仿真[J]. 计算机仿真, 2005, 22(2): 12-14, 25.
- [8] 刘煜. 用带优化的非线性 PID 控制方法设计鱼雷控制器[J]. 舰船电子工程, 2004, 24(3): 62-65.
- [9] 胡纽, 董春凯, 王志强. 基于避碰声呐的远程鱼雷水下自主障碍规避算法研究[J]. 舰船科学技术, 2016, 38(5): 116-120, 151.
- [10] 袁晓宇, 龚喜. 模糊控制算法在 UUV 定深控制中的应用[J]. 水雷战与舰船防护, 2012, 20(3): 76-79.
- [11] 王洪斌, 苏博, 王跃灵, 等. 基于粒子群优化的 AUV 定深跟踪有限时间控制[C]// 第 37 届中国控制会议论集. 北京: 中国自动化学会控制理论专业委员会, 2018.
- [12] 杨洋, 王征, 周帅, 等. 基于改进鱼群算法的 UUV 路径跟踪控制参数整定研究[J]. 兵器装备工程学报, 2023, 44(11): 126-132.
- [13] 丁浩, 刘国平, 崔沁青. UUV 水平航行稳定性分析与仿真[J]. 计算机仿真, 2023, 40(6): 18-20.
- [14] 朱春磊, 曾庆军, 徐鹏程, 等. 观察型水下机器人预测控制器优化设计研究[J]. 计算机仿真, 2020, 37(6): 332-337.
- [15] 周浩, 龙景豪. 模糊变结构控制策略在 UUV 航向运动中的应用与分析[J]. 兵器装备工程学报, 2023, 44(6): 232-238, 271.
- [16] 苏明慧, 任全彬, 罗志清, 等. 基于 OPTIMUS 的小型战术导弹多学科设计优化[J]. 固体火箭技术, 2021, 44(2): 285-292.
- [17] 袁艳丽, 张毅雄, 叶献辉, 等. 基于 OPTIMUS 的反应堆冷却剂系统动力响应敏感性分析[J]. 核动力工程, 2022, 43(S2): 171-176.
- [18] 袁正, 高静轩, 李戈操, 等. 基于 OPTIMUS 的叉车转向机构的优化设计[J]. 智能制造, 2016(11): 34-37.
- [19] 张海军, 刘卫东, 吴文才, 等. 基于 OPTIMUS 的盘状摇头型超声电机定子参数优化设计[J]. 机械科学与技术, 2015, 34(8): 1248-1253.
- [20] 莫涵. 基于非支配排序一差分进化算法的给水管网多目标优化设计研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2019.

(责任编辑: 曹晓霖)