

# 极端海况下 AUV 水环境模拟及定位控制研究

蔡炜, 王俊雄

(上海交通大学 船舶海洋工程国家重点实验室, 上海 200240)

**摘要:** **目的** 优化 PID 控制器, 实现 AUV 在极端海况下的定位控制。**方法** 本文基于 Blendermann 风载荷系数计算公式与 ITTC 双参数波浪谱及漂移力计算公式, 在 Matlab 中建立极端海况风浪模型, 对极端海况进行环境模拟; 利用 Simulink 平台搭建基于 PID 控制器的 AUV 动力定位控制系统, 优化 PID 控制器参数, 对 AUV 进行定位控制研究。**结果** 在该控制作用下, AUV 仍由定位原点顺利抵达目标位置, 在 PID 控制器作用下, 系统约 100 s 后达到目标位置状态附近进行微调, 整体超调量约 8%, 在严峻的风浪环境中展现出理想的控制性能。**结论** 本研究成功模拟了 AUV 的极端工作环境, 并搭建了动力定位仿真台架, 基于优化后的 PID 控制器实现了 AUV 在极端海况下的定位控制, 为自主潜航器在恶劣环境中的作业能力保障及控制器设计研究提供了参考。

**关键词:** 定位控制; 极端海况; 自主潜航器; 环境模拟

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2018.12.013

**中图分类号:** 000 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2018)12-0070-04

## Water Environment Simulation and Positioning Control of AUV under Extreme Sea Condition

CAI Wei, WANG Jun-xiong

(State Key Laboratory of Naval Architecture and Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**ABSTRACT: Objective** To optimize PID controller and realize positioning control of AUV in extreme sea condition. **Methods** A wind wave simulation model was set in Matlab based on Blendermann wind load factor computational formula, ITTC two-parameter wave spectrum and drifting force computational formula to simulate the extreme sea condition. A AUV dynamic positioning control system was set based on the PID controller with Simulink platform to research positioning control of AUV. **Results** The AUV under control successfully reached the targeted position from the positioning origin. It took about 100 seconds for the system to get to the targeted position with only about 8% overstrike, presenting outstanding performance in severe environment. **Conclusion** The study successfully simulates the extreme work environment of AUV, sets up a dynamic positioning Simulink frame and realizes positioning control of AUV in extrem sea condition. The study provides guidance for the research of AUV performance and control system design under severe environment.

**KEY WORDS:** positioning control; extreme sea condition; autonomous underwater vehicle; environment simulation

伴随着海上石油、天然气资源的开发向深海及两极深入, 传统的系泊定位系统和人工作业已经无法满足某些局部的恶劣工作环境, 因此, 自主潜航器 (Autonomous Underwater Vehicle, AUV) 被广泛使

用, 以完成深海作业、跟踪巡视、定点监测等任务。AUV 的作业实现需要满足不同工作环境的考验, 其中, 在恶劣海况下的适应作业能力成为制约其进一步发展的关键要素, 在极端海况下的定位控制成为

AUV 极端作业的研究基础。AUV 的定位控制系统如图 1 所示。

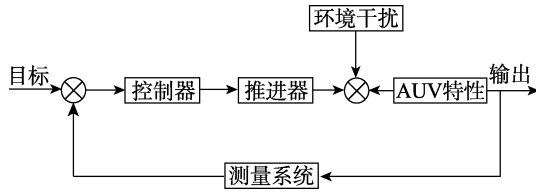


图 1 AUV 动力定位系统

文中基于 Blendermann 风载荷系数计算公式与 ITTC 双参数谱波浪漂移力计算公式，在 Matlab 中建立极端海况风浪模型。利用 Simulink 平台搭建基于 PID 控制器的 AUV 动力定位控制系统，并优化 PID 控制器参数。该研究为自主潜航器在极度恶劣环境中的作业能力保障及控制器设计研究提供了参考。

### 1 数学模型建立

对于 AUV 动力定位控制系统而言，首要工作是建立起水环境、AUV 自身以及推进系统的数学模型。为了描述 AUV 的运动，采用如图 2 所示的固定坐标系  $O_0-x_0y_0z_0$  和运动坐标系  $O-xyz_0$  [1]。

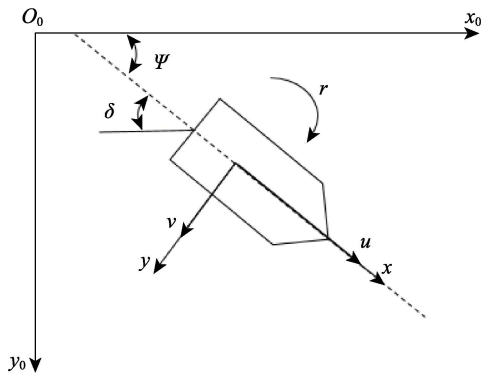


图 2 AUV 坐标系

作业形态的无人潜航器，其横摇角  $\phi$  和纵摇角  $\theta$  均很小，可以简化为三自由度（横荡、纵荡、艏摇）运动。以位置向量  $\eta=[x,y,\psi]^T$  表示固定坐标系下 AUV 的位置及艏向角，以速度向量  $v=[u,v,r]^T$  表示运动坐标系下 AUV 的三自由度运动速度。

坐标系转换下的速度关系式为：

$$\dot{\eta}=R(\psi)v \tag{1}$$

$$\text{式中：} R(\psi)=\begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

#### 1.1 风载荷模型

在极端海况下，AUV 在近海面航行作业时，同

样也将受到风力的强有力影响，致使其航行偏离预计航线或对控制操纵系统带来极大挑战。风载荷在三自由度上的作用力通常由经验公式计算 [2]：

$$\begin{cases} F_x = \frac{1}{2} \rho V_{wi}^2 C_x A_f \\ F_y = \frac{1}{2} \rho V_{wi}^2 C_y A_l \\ F_n = \frac{1}{2} \rho V_{wi}^2 C_n A_l L_{oa} \end{cases} \tag{2}$$

式中： $\rho$  为空气密度； $V_{wi}$  为风速； $C_x, C_y, C_n$  为风载荷系数； $L_{oa}$  为潜航器总长； $A_f, A_l$  分别为潜航器正投影面积和侧投影面积。

风载荷系数的计算常利用 Blendermann 公式 [3]：

$$\begin{cases} C_x = -C_{l,AF} \frac{\cos\alpha}{1 - \frac{\varepsilon}{2} \left(1 - \frac{C_l}{C_t}\right) \sin^2 2\alpha} \\ C_y = C_t \frac{\sin\alpha}{1 - \frac{\varepsilon}{2} \left(1 - \frac{C_l}{C_t}\right) \sin^2 2\alpha} \\ C_n = \left[ \frac{S_l}{L_{oa}} - 0.18 \left( \alpha - \frac{\pi}{2} \right) \right] C_y \end{cases} \tag{3}$$

式中： $C_{l,AF}, C_t, \varepsilon$  的取值参见文献 [3]；

$C_l = C_{l,AF} \frac{A_f}{A_l}$ ； $\alpha$  为风与  $x$  轴的夹角； $S_l$  为潜航器侧投影的形心距潜航器中心的距离。

#### 1.2 不规则波浪模型

不规则波可以看作各种频率规则波的线性叠加，对于长峰波，海面上任一点的波高可表示为 [4]：

$$\zeta(t) = \sum_{i=1}^n \zeta_{ai} \cos(\omega_i t + \varepsilon_i) = \tag{4}$$

$$\sum_{i=1}^n \sqrt{2S_{\zeta\zeta}(\omega_i)\Delta\omega_i} \cos(\omega_i t + \varepsilon_i)$$

式中： $\zeta_a$  为波幅； $\omega$  为波浪频率； $\varepsilon$  为初相位，在区间  $[0, 2\pi]$  内均匀分布； $S_{\zeta\zeta}(\omega)$  为波谱密度函数； $\Delta\omega$  为采样频率间隔。

波谱密度函数表征不同频率波的能量密度分布情况，其中，ITTC 双参数谱应用广泛，以有义波高  $h_{1/3}$  和海浪特征周期  $T_1$  为谱参量，表达式为 [5]：

$$S_{\zeta\zeta}(\omega) = \frac{173h_{1/3}^2}{T_1^4 \omega^5} \exp\left(-\frac{691}{T_1^4 \omega^4}\right) \tag{5}$$

波浪力包括两部分：一是一阶波浪力引起的高频往复运动；二是二阶波浪力引起的慢漂运动，使 AUV 缓慢地漂离原来的位置。高频运动位置变化频繁，动力定位系统很难也没有必要对其进行控制，因为这样会大大加速推进系统的磨损和能量损耗 [6]。

规则波的二阶波浪力通常采用 Daidola 公式进行

计算<sup>[7]</sup>:

$$\begin{cases} F_x = \frac{1}{2} \rho L \zeta_a^2 \cos \chi C_x^D \\ F_y = \frac{1}{2} \rho L \zeta_a^2 \sin \chi C_y^D \\ M_n = \frac{1}{2} \rho L^2 \zeta_a^2 \sin \chi C_n^D \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $\rho$  为水流密度;  $L$  为潜航器长度;  $\chi$  为波向角, 即航行方向与波浪方向的绝对夹角;  $C_x^D, C_y^D, C_n^D$  为波浪力系数。

Daidola 波浪力系数的经验公式为:

$$\begin{cases} C_x^D(l_0) = 0.05 - 0.2l_0 + 0.75l_0^2 - 0.51l_0^3 \\ C_y^D(l_0) = 0.46 + 6.83l_0 - 15.65l_0^2 + 8.44l_0^3 \\ C_n^D(l_0) = -0.11 + 0.68l_0 - 0.79l_0^2 + 0.21l_0^3 \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $l_0 = \frac{2\pi g}{\omega^2 L}$ 。

### 1.3 操纵运动数学模型

在图 2 所示的坐标系下, AUV 三自由度低频运动学方程可表示为如下矩阵形式<sup>[8]</sup>:

$$M\dot{v} + Dv = \tau_t \quad (8)$$

式中:  $\dot{v}$  为加速度矩阵,  $\dot{v} = [\ddot{u}, \ddot{v}, \ddot{r}]^T$ ;  $\tau_t$  为合外力矩阵,  $\tau_t = [\tau_{tx}, \tau_{ty}, \tau_m]^T$ ;  $M$  为质量矩阵,

$$M = \begin{bmatrix} m - X_{\ddot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & m - Y_{\ddot{v}} & mx_G - Y_{\ddot{r}} \\ 0 & mx_G - N_{\ddot{v}} & J_z - N_{\ddot{r}} \end{bmatrix}; D \text{ 为阻尼矩阵,}$$

$$D = \begin{bmatrix} -X_u & 0 & 0 \\ 0 & -Y_v & -Y_r \\ 0 & -N_v & -N_r \end{bmatrix}; X_{\ddot{u}}, Y_{\ddot{v}}, Y_{\ddot{r}}, N_{\ddot{v}}, N_{\ddot{r}}, X_u, Y_v, Y_r,$$

$N_v, N_r$  均为水动力导数。

### 1.4 PID 控制模型

在工业控制应用中, PID 控制器是一种常见的控制反馈回路部件, 由比例环节 (P)、积分环节 (I) 和微分环节 (D) 组成, 对控制对象进行调节控制。PID 系统原理如图 3 所示<sup>[9]</sup>。

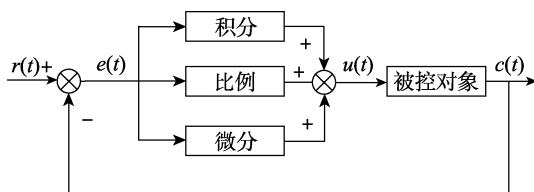


图 3 PID 系统原理

AUV 动力定位系统的 PID 控制算法为:

$$u(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (9)$$

式中:  $e(t)$  为位置偏差值;  $K_p$  为比例系数;  $T_i$  为积分时间常数;  $T_d$  为微分时间常数。

PID 参数的整定与优化是 PID 控制器设计实现的核心, 工程上通常依据经验进行整定, 随着智能控制理论的发展, 出现了蚁群算法、粒子群算法、遗传算法等 PID 参数优化方法<sup>[10]</sup>。

## 2 仿真结果与分析

该研究以挪威康斯堡·西姆莱德公司研制的 hugin3000AUV 为研究对象, 主要船体参数见表 1。依据国际标准海况等级, 选择极端海况环境参数, 见表 2。基于 Blendermann 风载荷系数计算公式、ITTC 双参数波浪谱和 Daidola 漂移力公式, 在 Matlab/Simulink 中模拟 AUV 极端作业环境。

表 1 AUV 主参数

物理量	数值
长度/m	5.2
直径/m	0.8
质量/kg	1230.0
最大航速/(km·h <sup>-1</sup> )	11.1
转动惯量/(kg·m <sup>2</sup> )	5543.2

注: 数据来源于挪威康斯堡·西姆莱德公司研制的 hugin3000AUV。

表 2 极端海况参数

物理量	数值
风速/(m·s <sup>-1</sup> )	18.5
风向/(°)	0.0
浪向/(°)	30.0
有义波高/m	9.5
特征周期/s	24.3

选取仿真环境为 9 级极端海况, 风速约为 18.5 m/s, 有义波高为 9.5 m, 特征周期为 24.3 s, 假设浪向为 30° 方向。随机海浪仿真结果如图 4 所示。

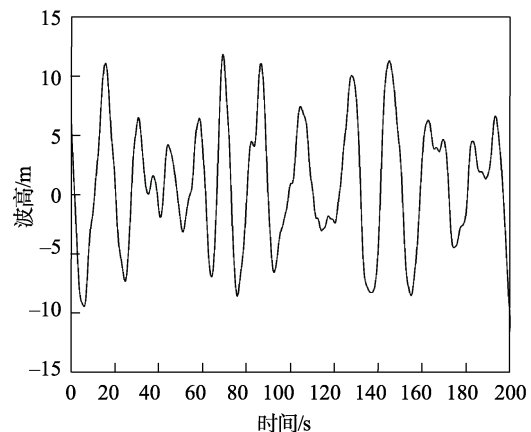


图 4 随机波浪波高时变曲线

AUV 初始位置向量为  $[0, 0, 45^\circ]^T$ ，若不施加控制作用，则在如图 4 所示的随机波浪作用下，AUV 将以波浪方向为轴，做逐渐远离原点的慢漂运动，艏向角绕浪向  $30^\circ$  方向做往复摆动。

在 Simulink 中搭建基于 PID 控制器的定位控制系统，粒子群算法优化 PID 控制参数，最终选取如下： $K_p = 3.524, T_i = 1.425, T_d = 0.753$ 。给定 AUV 的初始位置向量  $[0, 0, 45^\circ]^T$  和目标位置向量  $[500, 500, 30^\circ]^T$ ，AUV 运动仿真结果如图 5—8 所示。

由仿真结果可知，在极端海况下，AUV 仍由定位原点顺利抵达目标位置。在 PID 控制器作用下，系

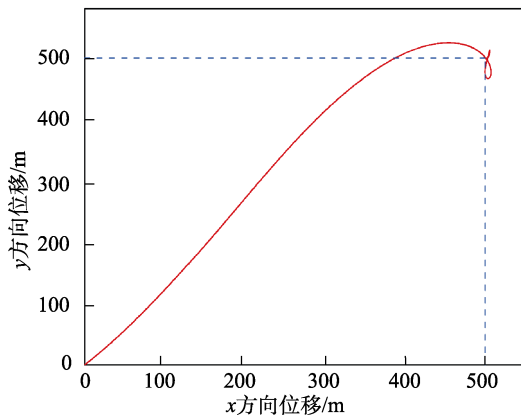


图 5 PID 控制下的 x-y 运动轨迹

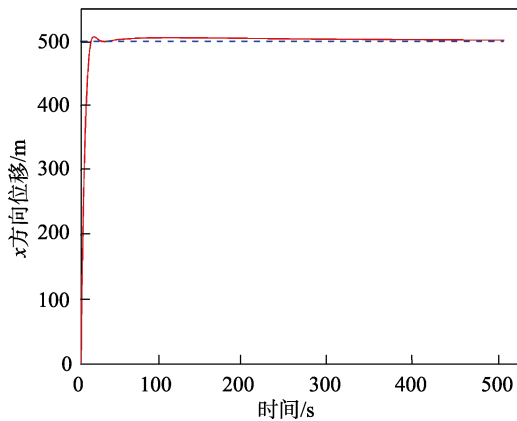


图 6 PID 控制下的横向位移-时间变化曲线

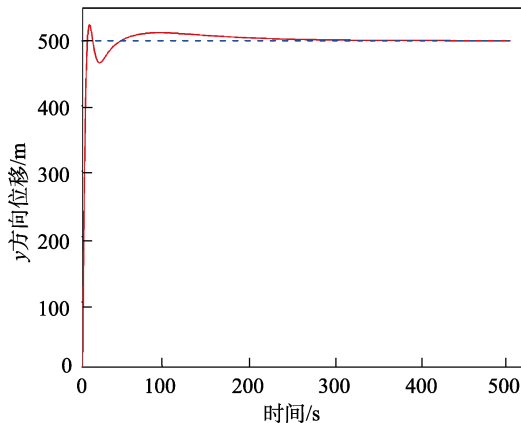


图 7 PID 控制下的纵向位移-时间变化曲线

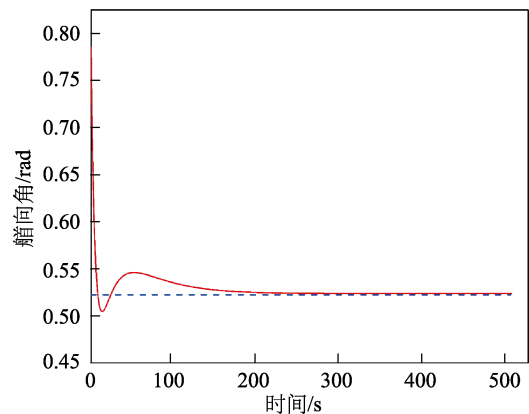


图 8 PID 控制下的艏向角-时间变化曲线

统约 100 s 后达到目标位置状态附近进行微调，整体超调量约 8%，在严峻的风浪环境中展现出理想的控制性能。

### 3 结语

伴随着深海资源的开发深入，自主潜航器(AUV)被广泛应用于深海作业、跟踪巡视、定点监测等任务，AUV 在极端海况下的适应作业能力成为制约其进一步发展的关键要素。文中基于 Blendermann 风载荷模型和不规则随机长峰波浪理论，模拟了极端海况下的 AUV 作业环境，并基于 PID 控制器搭建了动力定位控制仿真系统，优化了 PID 调节参数，实现了 AUV 的定位控制，获取了较好的控制性能。实现 AUV 在极端海况下的定位控制，为自主潜航器在恶劣环境中的作业能力保障及控制器设计研究提供了一定的指导。

#### 参考文献：

- [1] 徐海祥, 冯辉. 船舶动力定位系统原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016: 15-17.
- [2] 林一, 胡安康, 蒋玮. 海洋平台风载荷的数值分析[J]. 船舶工程, 2014(1): 104-108.
- [3] BLENDERMANN W. Parameter Identification of Wind Loads on Ships[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 1994, 51(3): 339-351.
- [4] 钱小斌, 尹勇, 张秀凤, 等. 海上不规则波浪扰动对船舶运动的影响[J]. 交通运输工程学报, 2016, 16(3): 116-124.
- [5] 吴喜德. 波浪谱形对不规则波数值模拟的影响[J]. 海岸工程, 2013, 32(4): 1-7.
- [6] 谢业海. 海况变化时的船舶定点定位切换自适应控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
- [7] 魏泽, 赵战华, 刘家瑞. 二阶波浪力数值计算与试验方法研究[J]. 船舶力学, 2017(z1): 251-257.
- [8] 梁海军, 闫超. 环境干扰力作用下船舶操纵运动仿真数学模型研究[J]. 舰船科学技术, 2015, 37(7): 153-156.
- [9] 韩春生, 刘剑, 汝福兴, 等. 基于 PID 算法的船舶航迹自动控制[J]. 自动化技术与应用, 2012, 31(4): 9-12.
- [10] 彭秀艳, 张文颖, 贾书丽. 基于 BP 算法的船舶航向模糊 PID 控制研究[J]. 控制工程, 2013, 20(4): 623-626.