



中国舰船研究
Chinese Journal of Ship Research
ISSN 1673-3185, CN 42-1755/TJ

《中国舰船研究》网络首发论文

题目: 专家控制-改进 S 面算法在近水面航行器运动控制中的应用研究
作者: 李超, 师子锋, 张承科, 艾艳辉, 余湖清
DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.03165
收稿日期: 2022-11-07
网络首发日期: 2023-06-28
引用格式: 李超, 师子锋, 张承科, 艾艳辉, 余湖清. 专家控制-改进 S 面算法在近水面航行器运动控制中的应用研究[J/OL]. 中国舰船研究.
<https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03165>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式 (包括网络呈现版式) 排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊 (光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊 (网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊 (网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物 (ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

引用格式：李超，师子锋，张承科，等. 专家控制—改进 S 面算法在近水面航行器运动控制中的应用研究 [J]. 中国舰船研究. DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.03165.

LI C, SHI Z F, HU Y, ZHANG C K. Application of expert control-improved S-plane algorithm in motion control of near-surface vehicles [J]. Chinese Journal of Ship Research. DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.03165.

专家控制—改进 S 面算法在近水面航行器 运动控制中的应用研究

李超^{*}，师子锋，张承科，艾艳辉，余湖清

宜昌测试技术研究所，湖北 宜昌 443003

摘要：【目的】旨在提高舵板响应速度和效率，以满足近水面航行器在静水及波浪干扰下的深度保持和姿态控制要求。【方法】在 S 面算法的基础上，提出一种具有更快收敛速度的改进型 S 面控制算法，并与专家智能控制相结合，建立闭环专家控制—改进 S 面算法的混合控制模型，构建混合算法控制器。对比分析 PID 算法、S 面算法、改进 S 面算法、专家控制—改进 S 面算法在近水面航行器航行深度、姿态控制间的差异，并进行波浪干扰下的运动预报。【结果】预报结果表明：改进 S 面算法在静水航行控制中可提高收敛速度，波浪干扰下可降低纵摇幅度；专家控制—改进 S 面算法能够提高舵的控制效率，在静水中快速实现航行状态稳定转换，在波浪中有效降低近水面航行器垂荡和纵摇幅值 30% 以上。【结论】所建专家控制—改进 S 面算法对近水面航行器运动稳定性的提高适用性良好。

关键词：改进 S 面算法；专家控制；近水面航行器；波浪干扰；运动稳定性

中图分类号：U664.82

文献标识码：A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.03165

Application of expert control-improved S-plane algorithm in motion control of near-surface vehicles

LI Chao^{*}, SHI Zifeng, ZHANG Chengke, AI Yanhui, SHE Huqing

Yichang Testing Technique Research Institute, Yichang 443003, China

Abstract: [Objectives] In order to improve the response speed and efficiency of rudders, and to meet the requirements of depth keeping and attitude control of near-surface vehicles under static water and wave disturbance. [Methods] An improved S-plane control algorithm with faster convergence speed is proposed based on the S-plane algorithm. The algorithm is combined with expert intelligent control to establish a hybrid model and controller of a closed-loop expert control-improved S-plane algorithm. The differences between the PID algorithm, S-plane algorithm, improved S-plane algorithm, and expert control-improved S-plane algorithm in navigational depth and attitude control of near-surface navigators are compared and analyzed, and the motion prediction under wave disturbance is completed. [Results] The results show that the improved S-plane algorithm can improve the convergence speed in still water and reduce the pitch amplitude under wave disturbance; the expert control-improved S-plane algorithm can improve the rudder control efficiency. In still water, the navigator state can be quickly and stably transitioned, and in waves, the amplitudes of heave and pitch of the near-surface navigator are effectively reduced by more than 30%. [Conclusion] The expert control-improved S-surface algorithm proposed in the paper has good applicability for near-surface vehicle motion stability improvement.

Key words: improved S-plane algorithm; expert control; near surface vehicles; wave disturbance; motion stability

收稿日期：2022-11-07

修回日期：2023-02-20

基金项目：国家部委基金资助项目

作者简介：李超，男，1991 年生，博士生。

师子锋，男，1984 年生，博士生，高级工程师

张承科，男，1984 年生，硕士，高级工程师

*通信作者：李超

0 引言

近水面航行器是一种较新型无人航行器，多用于目标侦察和资源探测^[1]。该类航行器一般设有多个鳍舵，通过鳍舵间配合调节自身航行深度、控制航行姿态，降低水面波浪和其他外力的影响，提高适航性和匿踪性^[2]。为了充分掌握该类航行器运动特性，围绕近水面航行器水动力性能和运动控制的研究取得了一定进展。

Cong^[3]研究了不同前后操舵组合对近水面航行器状态转换的影响，测量了航行过程中舵板和主体的阻力、升力以及纵摇力矩的变化，指出航行器水动力和剩余浮力的变化增加了状态转换的难度，准确测量舵板上的流体动力有助于更好地理解多状态转换过程的机理。谈果戈^[4]研究了航速、浸深、漂角对该类航行器水动力性能的影响，计算了速度、加速度水动力导数，通过添加虚拟推进力的方法模拟了回转运动，之后采用 CFD 方法模拟了自航运动^[5]。近水面航行器相对于水下航行器的区别主要在于受波浪影响更大，这种非线性干扰导致的水动力不确定性增加了控制难度，其运动稳定性的优劣在很大程度上取决于鳍舵控制能力^[6]。Zhou 等^[7-8]设计了一种翼身融合体结构的近水面航行器 BQ-01，利用 CFD 方法分析了航行器主体和桅杆的水动力性能，采用分布式燃料供给系统来减少因燃料变化引起的重浮力失衡。在此基础上进行了航行器深度控制方法的研究^[9]，讨论了自整定 PID 算法在姿态和航行深度控制上的局限性，提出了深度控制的广义模糊规则、状态反馈控制和积分控制，经过试验验证了该类航行器具有良好的耐波性和可控制性^[10]。在近水面航行器水动力性能仿真、运动控制算法研究等方面取得了较大进展，部分控制算法得到了试验

证，但对波浪等非线性因素作用下的运动响应规律及运动控制算法优化仍有较大研究空间。

本文将基于 S 面算法提出一种具有快速收敛的改进型 S 面算法，将其与专家智能控制算法相结合，建立闭环专家控制-改进 S 面算法的混合控制模型，并通过对航行深度切换过程中及海况干扰下近水面航行器的运动控制仿真，对该算法的适用性进行验证。

1 S 面算法

S 面控制算法将模糊逻辑与 PID 控制结合，是一种适用于非线性系统的控制算法，其将模糊控制规则库对应的折线面用平稳过渡 S 面曲线面代替，在运动控制中的应用效果显著^[11-13]，S 面曲线和 S 面曲面可表示为^[14]：

$$u = 2 / (1 + e^{-kx}) - 1 \quad (1)$$

$$u = 2 / (1 + e^{-k_1x - k_2y}) - 1 \quad (2)$$

式中： u 为输出量； x ， y 输入变量； k ， k_1 ， k_2 为输入变量控制参数。

设计的 S 面控制器为：

$$u = 2 / (1 + e^{(-k_1x - k_2(dx/dt))}) - 1 \quad (3)$$

式中： x 为目标量与当前状态量之间的偏差； dx/dt 为偏差变化率； u 为输出结果，变化范围为 $[-1, 1]$ ； k_1 ， k_2 为控制参数。S 面算法本质为非线性 PD 控制，该种非线性和模糊特性能够在一定程度上满足航行器运动需求^[15]。通过调节 k 值的大小可以改变偏差和偏差变化率在控制输出结果中所占的比重，从而控制收敛速度和超调量。 k 值变大，函数曲面收敛速度增加，对小偏差响应快，控制力强，但收敛速度过快容易引起振荡，不利于平稳控制，不同 k 值下 S 面函数图象如图 1 所示。

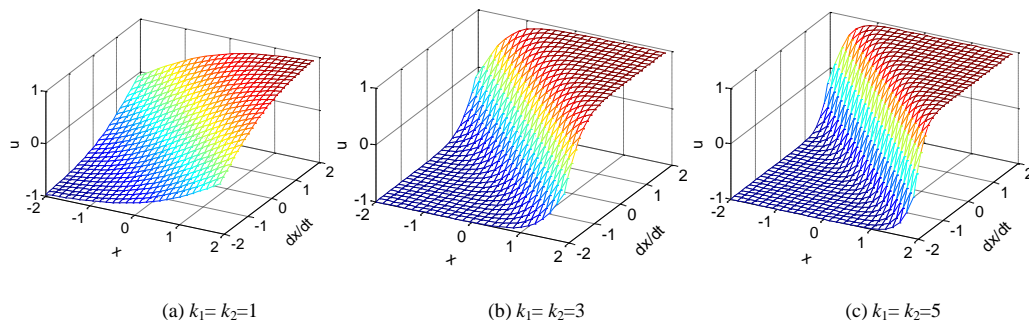


图 1 S 面函数曲面

Fig. 1 Function surface of S-plane

2 改进 S 面算法

2.1 改进 S 面算法介绍

为了便于分析函数性质,对 S 面函数进行格式转换:

$$u = 2 / (1 + e^{-kx}) - 1 = (e^{kx} - 1) / (e^{kx} + 1) \quad (4)$$

根据函数形式可以得到以下结论:

1) 函数值域为 $[-1, 1]$, $\lim_{x \rightarrow +\infty} u(x) = 1$,

$\lim_{x \rightarrow -\infty} u(x) = -1$;

2) 函数是定义域为 $[-\infty, +\infty]$ 的奇函数;

3) k 值越大,函数对 x 的变化越敏感;

4) 在 k 值保持不变的前提下,分子分母同阶,随着 $|x|$ 增加,分子、分母差值越小函数收敛到 1 的速度越快。

根据以上分析,在保持函数基本特性不变的前提下形成不同改进方案:

改进 S 面函数 1: 将常数 1 改为 a , a 为常数, $0 < a < 1$;

改进 S 面函数 2: 将常数 1 改为 e^{-x} , $x \in [-\infty, +\infty]$;

改进 S 面函数 3: 将常数 1 改为 e^{-akx} , a 为调节因子, $1 < a < 2$, 默认取 1.5, $x \in [-\infty, +\infty]$ 。

不同方案形成的改进 S 面曲线见图 2。改进函数 1 控制量 u 在 x 属于 $0 \sim 0.5$ 范围内有较快的响应速度,但函数整体发生了偏移,导致 u 在 x 属于 $-2 \sim 0$ 范围内响应速度降低,改进 S 面函数 2 和改进 S 面函数 3 收敛速度大于 S 面函数,改进函数 2 可以看作是 3 的特殊形式。

基于以上分析形成的改进 S 面函数见式(5),当 a 取 1 时,函数为双曲正切函数 $\tanh(x)$ 。

$$y = (e^{kx} - e^{-akx}) / (e^{kx} + e^{-akx}) \quad (5)$$

为了提高 S 面算法的收敛速度,学者也构建过其他类似函数,文献[16]中提到一种基于极板控制模型的 S 面函数和一种亚 S 面函数,见式(6)和式(7)。极板模型增加了参数 x_0 ,且不同 x_0 对结果以及控制器适用范围有较大影响。

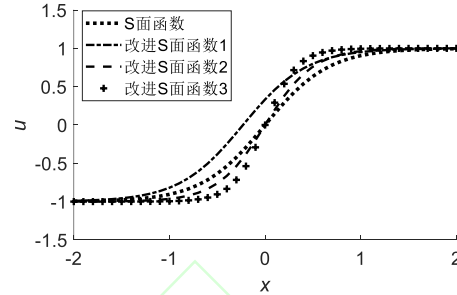


图 2 不同改进 S 面函数方案

Fig. 2 Different schemes for improving S-plane function

$$u = [(x_0 + x)^k - (x_0 - x)^k] / [(x_0 + x)^k + (x_0 - x)^k] \quad (6)$$

$$u = \sqrt{2 / (1 + e^{-ke}) - 1} \operatorname{sign}(2 / (1 + e^{-ke}) - 1) \quad (7)$$

S 面函数、改进 S 面函数、极板函数、亚 S 面函数对比曲线见图 3。极板曲线中的 x_0 皆取 1,由图 3(a)可见,极板曲线呈线性变化,在不对 x_0 进行调整的情况下失去非线性属性, $x \in [-0.5, 0.5]$ 范围内,亚 S 面函数响应较快,此范围外响应速度逊于改进 S 面函数,优于 S 面函数;如图 3(b)所示,极板函数与改进 S 面函数曲线在 $x \in [-1.5, 1.5]$ 范围内重合度较高,超过这个范围后极板函数斜率开始变大,亚 S 面函数曲线与 $k=1$ 时相同;如图 3(c)所示,极板函数与改进 S 面函数进一步接近,响应速度都优于 S 面函数。可以看出改进 S 面函数随 k 的变化曲线形状稳定,响应速度及稳定性是几种函数中最佳的。

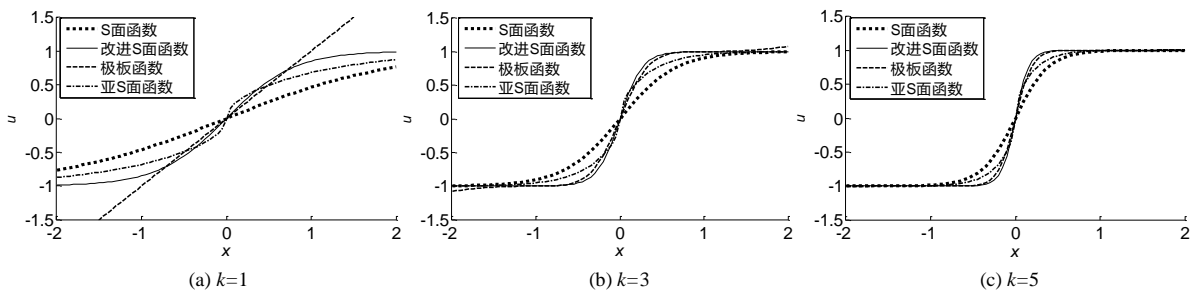


图 3 不同改进 S 面函数曲线对比

Fig. 3 Contrast of different improved S-plane function curves

基于改进 S 面函数形成改进的 S 面控制算法 见式(8):

$$u = (e^{k_1 x_E + k_2 (dx_E/dt)} - e^{-ak_1 x_E - ak_2 ((dx_E/dt))}) / (e^{k_1 x_E + k_2 (dx_E/dt)} + e^{-ak_1 x_E - ak_2 (dx_E/dt)}) + \Delta u \quad (8)$$

式中: x_E 为监测量与目标值的差值, k_1 , k_2 为 控制参数,用于调节偏差和偏差变化率的占比,

k_1 增加, 比例调节能力增强, 系统响应迅速, 过大的 k_1 值容易引起执行结构超调和高频振荡, k_2 增加, 对偏差的预测效果加强, 有助于减小超调, 提高收敛速度, 过大的 k_2 也会降低系统调节精度。控制算法中的分子和分母的控制参数可保持一致, 也可分别设置, 但二者差异不可过大。 Δu 为执行结构的调整量, Δu 使该算法具有一定的自适应性。

2.2 改进 S 面算法自适应调节

Δu 为改进 S 面控制的偏移纠正量, 能够使 S 面以平移的方式来达到整体调节输入量的目的, 该量的存在能够进一步增加 S 面算法的调节精确度。改进 S 面算法仍能体现出 PD 控制的原理, Δu 主要负责消除稳定偏差。文献[17]将 Δu 的调整策略以 \dot{x} 的变化来定义, 本文提供 Δu 的另一种调节思路, 表达式如式(9)所示。

$$\Delta u = I \int_0^t x_E(t) dt \approx \alpha T \sum_{j=s}^b x_E(j) \quad (9)$$

式中: I 为调节系数; T 为时间间隔; s 为将要形成稳定偏差时对应的迭代步; b 为终止迭代步。 Δu 以积分形式给出, 为了防止积分对控制的滞后影响, 控制偏差大时, 通过设置惩戒因子和增益因子调节 Δu 。该表达方式能够根据当下偏差来判断是否需要引入偏移量调节, 稳定偏差大时, 通过增益因子提高 Δu 的作用效果, 稳定偏差较小时通过惩戒因子降低 Δu 的作用效果, 具体表述为:
 $\Delta x_E = x_E(j) + x_E(j-2) - 2x_E(j-1) = \varepsilon$ (ε 为接近 0 的数), $|\varepsilon| \approx 0$; 表明偏差基本稳定, 从该步开始 Δu 发挥积分调节功能。

$x_E(j) > e_1$ (e_1 为偏差精度, 根据控制目标要求进行设置, 对于近水面航行器而言, 高海况航行过程中该值可适当放大), 需要引入增益因子 α , $1 < \alpha < 2$; $x_E(j) \leq e_1$, 增益因子作用降低, $\alpha = d * \alpha$, $0 < d < 1$, d 表示惩戒因子。

3 专家控制-改进 S 面控制算法

3.1 专家智能控制算法

对于不同控制算法, 其参数调节一直是重点关注问题, 也是控制算法能否发挥效果的关键, S 面算法及改进 S 面算法可以通过试凑法对参数进行调节, 在较小外界干扰的情况下使执行结构仍然可以具有相当的控制精度, 但真实海洋环境具有复杂性和未知性, 加之近水面航行器航行深度变化引起水动力性能改变, 这些因素参数整定

带来很大困难。近水面航行器在航行过程中, 通过搭载的传感器, 具有收集、存储自身位置、状态信息的能力, 为了将该部分获取的信息实时反馈到控制机构, 需要一种在线处理信息的智能控制算法来提高改进 S 面算法的控制精度和适应性。

专家控制^[18]是智能控制的重要分支, 在传统控制的基础上加入有经验的控制工程师, 实现控制能力。通过对控制领域知识的获取与组织, 按某种策略及时地选用恰当规则, 实现对实际的控制, 尤其适用于带有时变、非线性和强干扰的控制, 基本结构如图 4 所示。

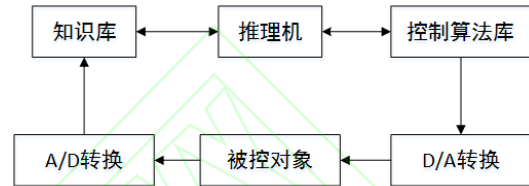


图 4 专家控制基本结构

Fig. 4 The basic structure of expert control

按照系统知识库的结构, 相关知识可以分类组织, 形成数据库和规则库, 从而构成专家控制的知识源, 是决定专家系统能力的重要因素。通常知识是不完善的, 这导致了不确定性, 要处理不确定性一种简单的办法就是将数值和信息关联起来, 专家系统可以对不确定性的规则和数据进行推理, 利用一种 if-then 规则 (if 控制局势, 事实和数据, then 操作结论) 从初始数据推导出解决问题的方案, 多条 if-then 规则所构成的规则库是专家控制的关键, 要求尽可能全面覆盖可能出现的情况, 又不能有过冗余, 否则会影响运行速度。

3.2 专家控制-改进 S 面算法

将专家控制算法与改进 S 面算法相结合, 位置、状态信息、假设和目标融入改进 S 面算法, 利用专家规则来进一步优化改进 S 面算法, 提升其收敛速度和鲁棒性。专家控制-改进 S 面算法运行结构如图 5 所示。

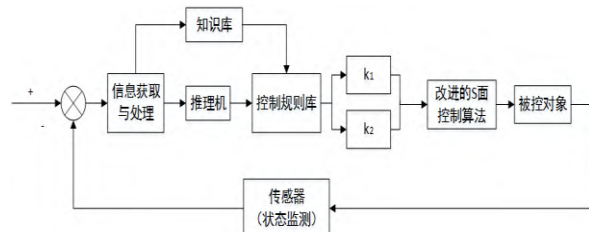


图 5 算法运行结构

Fig. 5 The operational structure of the algorithm

为了更好地描述专家控制算法, 规定 $x_d(j)$ 表示第 j 时刻目标, $x(j)$ 表示 j 时刻的状态参数 (姿

态、航行深度等), $x_E(j) = x_d(j) - x(j)$ 表示 j 时刻偏差, $dx_E(j)/dt$ 表示 j 时刻偏差变化率。根据专家控制算法和改进 S 面算法制定基本的控制策略:

1) $|x_E(j)| > M_1$, 此时航行器距指定目标偏差较大, 应增加控制量, 达到迅速调整偏差的目的, 为了避免过大超调, 引起系统响应过快, 该种情况下仍然需要将运动信息的反馈结果传递到执行

$$\delta(j) = A \frac{(e^{k_1(j)x_E(j)+k_2(j)(dx_E(j)/dt)} - e^{-ak_1(j)x_E(j)-ak_2(j)(dx_E(j)/dt)})}{(e^{k_1(j)x_E(j)+k_2(j)(dx_E(j)/dt)} + e^{-ak_1(j)x_E(j)-ak_2(j)(dx_E(j)/dt)})} + \Delta u \quad (10)$$

式中: A 为执行机构所输出的最大值。

2) $x_E(j)\Delta x_E(j) > 0$, 即偏差和偏差增长量具有同一变化趋势, 说明偏差朝绝对值增大的方向发展;

(1) $|x_E(j)| \geq M_2$, 表明偏差较大, 需要增加控制力度, 执行机构的参数 $k_1(j) = kh(j)k_1(j-1)$, $k_2(j) = kh(j)k_2(j-1)$, $kh(j) = kh(j-1) > 1$ (增益系数)。执行机构表达式与 1) 相同。

(2) $|x_E(j)| < M_2$ 表明偏差不大, 可以继续维持目前控制, 执行机构的参数 k_1 , $x \in [-\infty, +\infty]$ 维持不变, 执行机构表达式不变, 通过式(11)表示。

$$\delta(j) = \delta(j-1) \quad (11)$$

3) $\Delta x_E(j) = 0$ 即 $x_E(j) = x_E(j-1)$, 表明偏差保持不变, 需要增加控制稳定误差的能力, 执行

$$\delta(j) = A \frac{(e^{k_1(j)x_E(j)+k_2(j)(dx_E(j)/dt)} - e^{-ak_1(j)x_E(j)-ak_2(j)(dx_E(j)/dt)})}{(e^{k_1(j)x_E(j)+k_2(j)(dx_E(j)/dt)} + e^{-ak_1(j)x_E(j)-ak_2(j)(dx_E(j)/dt)})} + \Delta u + kz(j)x_E(j) \quad (13)$$

(2) $|x_E(j)| < M_2$ 表明偏差绝对值小, 降低控制强度, 设置抑制系数 $0 < kd(j) = kd(j-1) < 1$, $k_1(j) = kd(j)k_1(j-1)$, $k_2(j) = kd(j)k_2(j-1)$ 执行机构表达式与 5)-(1) 相同:

6) $|x_E(j)| \leq \varepsilon$ (ε 为偏差精度) 表明偏差已经较小, 执行机构表达式与 3) 相同。

以上策略涵盖了所能预见的偏差变化情况, 通过改进 S 面控制算法增加了系统收敛速度, 通过引进专家控制算法进一步优化了 k 值的选择, 使系统具有更优的局部调节能力, 执行机构能够根据状态监测量与目标值的偏差情况进行机动, 消除了滞后性。 M_1 和 M_2 是许用偏差阈值, $M_1 > M_2$ 。为避免高海况下频繁操舵引起的舵机可靠性降低和扭矩增大的问题, 这两个数值可根据实际情况设置许用偏差范围。

4 算法应用

4.1 应用模型及操舵规律

如图 6 所示的近水面航行器长 6 m, 桅杆高 6 m, 静浮态水线垂向位置距离重心 1 m。通过前

结构, 在传统开环控制的基础上, 通过对改进 S 面方法设置大增益系数提高变化幅度, 实现闭环控制。改进 S 面控制算法中的系数 $k_1(j) = kh(j) * k_1(j)$, $k_2(j) = kh(j) * k_2(j)$, 增益系数 $kh(j) = kh(j-1) + 2(kh(j-1)-1)$ 。得到的执行机构表达式如式(10)所示。

机构输入策略与 2)-(1) 相同, 此时用于自适应调节 Δu 开始发挥作用。

4) $x_E(j)\Delta x_E(j) < 0$

$\Delta x_E(j)\Delta x_E(j) > 0 | x_E(j) = 0$, 表明偏差绝对值朝减小的方向变化或者已经达到平衡, 执行机构表达式不变, 通过式(12)表示。

$$\delta(j) = \delta(j-1) \quad (12)$$

5) $x_E(j)\Delta x_E(j) < 0$, $\Delta x_E(j)\Delta x_E(j) < 0$ 表明偏差曲线存在拐点。

(1) $|x_E(j)| \geq M_2$, 表明偏差绝对值大, 增加控制强度, $k_1(j) = kh(j)k_1(j-1)$, $k_2(j) = kh(j)k_2(j-1)$, $kz(j)$ 为扩大系数, 执行机构表达式见式(13)。

舵、后舵配合实现航行深度保持和纵摇控制。

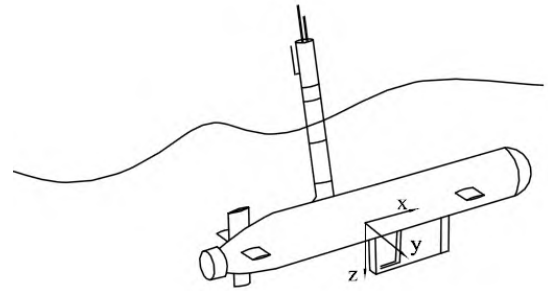


图 6 模型示意图

Fig. 6 Model diagram

式(14)为所建立的近水面航行器纵平面运动模型。

$$M \begin{bmatrix} \dot{w} \\ \dot{q} \\ \dot{\zeta} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = c \begin{bmatrix} w \\ q \\ \zeta \\ \theta \end{bmatrix} + A_b \delta_b + A_s \delta_s + F + T_p + F_{wave} \quad (14)$$

式中: M , c , A_b , A_s , F , T_p 分别为质量属性矩阵、流体动力系数矩阵、前舵舵角系数矩阵、后舵舵角系数矩阵、静力矩阵、推进力矩阵, 各

矩阵具体表达式见文献[19]。 $w, q, \zeta, \theta, \delta_b, \delta_s$ 分别表示垂向速度、纵摇角速度、航行深度、纵摇角、前舵舵角、后舵舵角。 F_{wave} 为波浪干扰力矩阵, 通过式(15)表示。

$$F_{\text{wave}} = \begin{bmatrix} F_3 \\ M_5 \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中: F_3, M_5 为波浪在各个方向上的分力和力矩, 通过式(16)进行计算。

$$\left. \begin{aligned} F_3 &= \rho \nabla [1 + K_{33} \frac{\omega_e}{\omega}] \omega^2 k_1 e^{\frac{-\omega^2}{g} \zeta} \zeta_a e^{i\omega_e t} \\ M_5 &= [I_y (1 + K_{55} \frac{\omega_e}{\omega}) \frac{\omega^4}{g} k_2 \cos \beta - \rho \nabla K_{33} U k_1 \omega] e^{\frac{-\omega^2}{g} \zeta} \zeta_a e^{i\omega_e t} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

式中: ρ 为海水密度; ∇ 为排水量; K_{33} 为垂向附加质量系数; ω_e 为遭遇频率; k_1, k_2 为缩减系数; ω 为圆频率; g 为重力加速度; t 为时间; ζ 为纵向长度坐标; ζ_a 为波幅; I_y 为惯性矩; K_{55} 为纵倾附加质量惯性矩系数; β 为浪向角; U 为航速。

专家控制-改进 S 面算法通过监测航行深度

和纵摇角的偏差来调整 k_1, k_2 的大小, 进而实现对前后舵的控制, 提高航行深度和纵摇角的控制品质。算法中的 x_E 分别用航行深度误差 ζ_E 和纵摇误差 θ_E 表示, Δx_E 分别用 $\Delta \zeta_E$ 和 $\Delta \theta_E$ 表示, 根据专家控制-改进 S 面算法, 表 1 和表 2 分别对前、后舵操舵规律进行了规定。

表 1 前舵操舵规律
Table 1 Steering rules of the front rudder

编号	监测量与阈值关系	前舵操舵规律
1)	$ \zeta_E(k) > M_1$	$\delta_b(j) = \delta_{b\max} \frac{(e^{k_1(j)\zeta_E(j)+k_2(j)d\zeta_E(j)/dt} - e^{-ak_1(j)\zeta_E(j)-ak_2(j)d\zeta_E(j)/dt}))}{(e^{k_1(j)\zeta_E(j)+k_2(j)d\zeta_E(j)/dt} + e^{-ak_1(j)\zeta_E(j)-ak_2(j)d\zeta_E(j)/dt})} + \Delta u$
2)-(1)	$\zeta_E(j)\Delta\zeta_E(j) > 0 \cap \zeta_E(j) \geq M_2$	$\delta_b(j)$ 与 1) 相同
2)-(2)	$\zeta_E(j)\Delta\zeta_E(j) > 0 \cap \zeta_E(j) < M_2$	$\delta_b(j) = \delta_b(j-1)$
3)	$\Delta\zeta_E(j) = 0$	$\delta_b(j)$ 与 1) 相同
4)	$\zeta_E(j)\Delta\zeta_E(j) < 0 \cap (\Delta\zeta_E(j)\Delta\zeta_E(j) > 0 \zeta_E(j) = 0)$	$\delta_b(j) = \delta_b(j-1)$
5)-(1)	$\zeta_E(j)\Delta\zeta_E(j) < 0 \cap \zeta_E(j) \geq M_2$	$\delta_b(j) = \delta_{b\max} \frac{(e^{k_1(j)\zeta_E(j)+k_2(j)d\zeta_E(j)/dt} - e^{-ak_1(j)\zeta_E(j)-ak_2(j)d\zeta_E(j)/dt}))}{(e^{k_1(j)\zeta_E(j)+k_2(j)d\zeta_E(j)/dt} + e^{-ak_1(j)\zeta_E(j)-ak_2(j)d\zeta_E(j)/dt})} + \Delta u + kz(j)\zeta_E(j)$
5)-(2)	$\zeta_E(j)\Delta\zeta_E(j) < 0 \cap \zeta_E(j) < M_2$	$\delta_b(j)$ 与 5)-(1) 相同
(6)	$ \zeta_E(j) \leq \varepsilon$	$\delta_b(j)$ 与 1) 相同

表 2 后舵操舵规律

Table 2 Steering rules of the aft rudder

编号	监测量与阈值关系	后舵操舵规律
1)	$ \theta_E(j) > M_1$	$\delta_s(j) = \delta_{s \max} \frac{(e^{k_1(j)\theta_E(j)+k_2(j)d\theta_E(j)/dt}) - e^{-ak_1(j)\theta_E(j)-ak_2(j)d\theta_E(j)/dt}}{(e^{k_1(j)\theta_E(j)+k_2(j)d\theta_E(j)/dt}) + e^{-ak_1(j)\theta_E(j)-ak_2(j)d\theta_E(j)/dt}} + \Delta u$
2)-(1)	$\theta_E(j)\Delta\theta_E(j) > 0 \cap \theta_E(j) \geq M_2$	$\delta_s(j)$ 与 1)相同
2)-(2)	$\theta_E(j)\Delta\theta_E(j) > 0 \cap \theta_E(j) < M_2$	$\delta_s(j) = \delta_s(j-1)$
3)	$\Delta\theta_E(j) = 0$	$\delta_s(j)$ 与 1)相同
4)	$\theta_E(j)\Delta\theta_E(j) < 0 \cap (\Delta\theta_E(j)\Delta\theta_E(j) > 0 \theta_E(j) = 0)$	$\delta_s(j) = \delta_s(j-1)$
5)-(1)	$\theta_E(j)\Delta\theta_E(j) < 0 \cap \theta_E(j) \geq M_2$	$\delta_s(j) = \delta_{s \max} \frac{(e^{k_1(j)\theta_E(j)+k_2(j)d\theta_E(j)/dt}) - e^{-ak_1(j)\theta_E(j)-ak_2(j)d\theta_E(j)/dt}}{(e^{k_1(j)\theta_E(j)+k_2(j)d\theta_E(j)/dt}) + e^{-ak_1(j)\theta_E(j)-ak_2(j)d\theta_E(j)/dt}} + \Delta u + kz(j)\theta_E(j)$
5)-(2)	$\theta_E(j)\Delta\theta_E(j) < 0 \cap \theta_E(j) < M_2$	$\delta_s(j)$ 与 5)-(1)相同
(6)	$ \theta_E(j) \leq \varepsilon$	$\delta_s(j)$ 与 1)相同

表中参数计算公式见式(17),式(18)以饱和函数形式规定了前、后舵操舵范围。

$$\begin{cases} \zeta_E(j) = \zeta_d(j) - \zeta(j) \\ \Delta\zeta_E(j) = \zeta_E(j) - \zeta_E(j-1) \\ \theta_E(j) = \theta_d(j) - \theta(j) \\ \Delta\theta_E(j) = \theta_E(j) - \theta_E(j-1) \\ d\zeta_E(j)/dt = -u(j)\sin\theta(j) + w(j)\cos\theta(j) \\ d\theta_E(j)/dt = q(j) \end{cases} \quad (17)$$

$$\text{sat}(\delta(j)) = \begin{cases} \delta_{\max}, & \delta(j) \geq \delta_{\max} \\ \delta(j), & \delta_{\min} < \delta(j) < \delta_{\max} \\ \delta_{\min}, & \delta(j) \leq \delta_{\min} \end{cases} \quad (18)$$

式中: u 为纵向速度; q 为纵摇角速度。

4.2 算法结果分析

4.2.1 静水中航行深度、姿态控制

近水面航行器在航行深度变化过程中因水动力性能的变化存在失稳风险,为了研究各算法在航行器深度变化过程中的鲁棒性和适应性,对连续变深过程中航行器姿态进行预报和算法对比。

航行器初始状态 $u(0) = 6\text{kn}$, $\zeta(0) = 1\text{m}$, $\delta_{\max} = 15^\circ$, $\delta_{\min} = -15^\circ$, 剩余参数初始值皆取 0,

无流和波浪干扰,航行时间 150 s,航行器航行深度目标 $\zeta_d(j) = 3 \sim 5\text{m}$,纵倾角 $\theta_d(j) = 0^\circ$,前舵阈值 M_1 取 0.2 m, M_2 取 0.1 m,后舵阈值 M_1 取 0.1°, M_2 取 0.05°,增益系数 $kh(j)$ 取 1.2,抑制系数 $kd(j)$ 取 0.9,调节因子 a 取 1.5。对 S 面算法、改进 S 面算法、PID 算法参数整定后进行仿真。图 7 为近水面航行器连续深度状态转换过程,在四种算法控制下航行器能够安全完成连续深度机动,航行深度和纵倾角都可较好收敛到目标值。四种算法的收敛速度、稳定误差和航行器响应幅值存在一定差异。如图 7(a)和图 7 (b)所示,专家控制-改进 S 面算法在航行深度变化过程中保持平稳,其算法优势在深度变化过程中表现得更加明显,航行深度 3 m 向 4 m 以及更大航行深度变化过程中,可以实现 0°纵倾角下潜,稳定误差优于剩余两种算法,且未发生超调现象,相较 S 面算法收敛速度平均提高 30%以上,相较 PID 算法收敛速度平均提高 50%。该种算法控制下的舵角幅值也是最大,具体见图 7(c)和图 7 (d);改进 S 面算法比 S 面算法收敛速度更快和超调更小,能够更合理地分配舵效,相较 S 面算法收敛速度平均提高 15%,超调幅值平均降低 5%,验证了改进后的算法合理性和有效性。

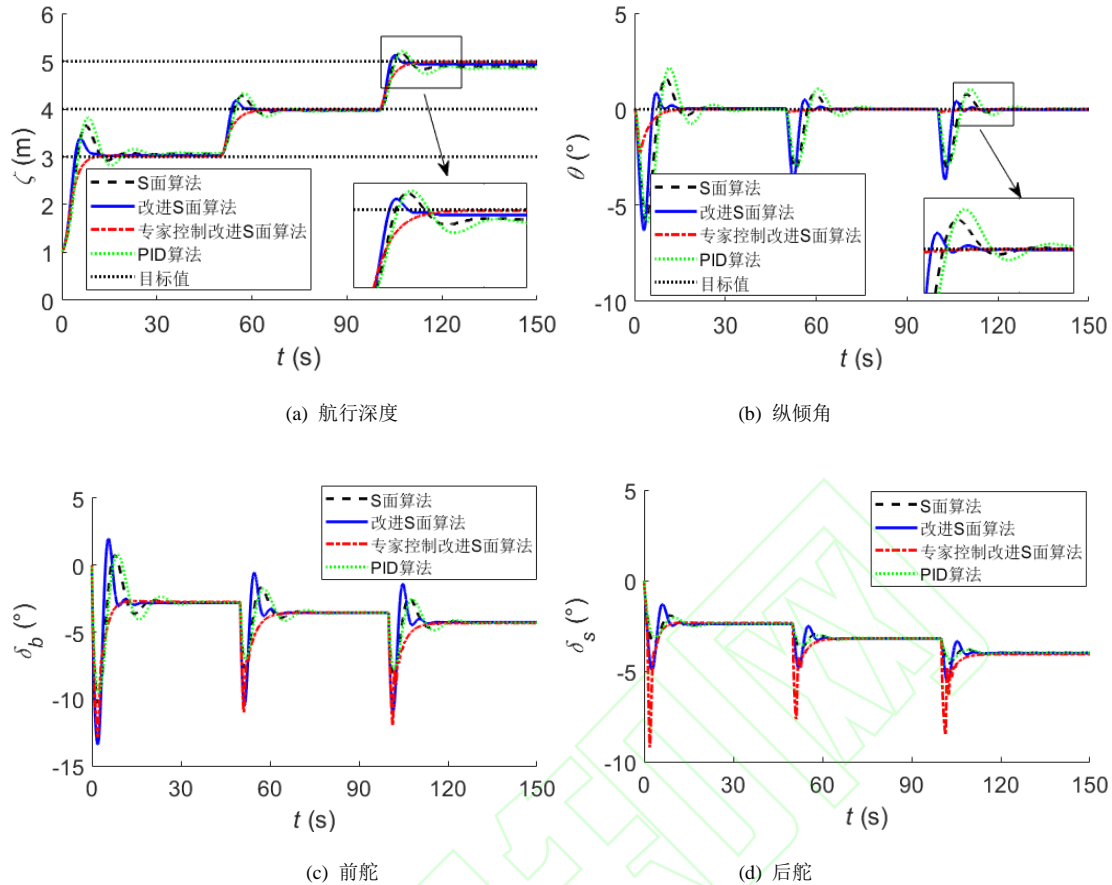


图 7 静水中控制结果对比

Fig. 7 Comparison of control results in still water

4.2.2 波浪中航行深度、姿态控制

波浪会影响航行器运动幅度,引起航行器产生摇、荡,通过对波浪干扰下近水面航行器运动响应的仿真可进一步反映专家控制-改进 S 面算法的适用性。

有义波高取 1.25 m,波周期 7.5 s,迎浪航行,初始状态与静水相同。航行时间 50 s,航行器航行深度目标 $\zeta_d(j) = 3\text{ m}$,纵摇角 $\theta_d(j) = 0^\circ$,前舵阈值 M_1 取 0.5 m, M_2 取 0.2 m,后舵阈值 M_1 取 0.2°, M_2 取 0.1°,增益系数 $kh(j)$ 取 1.4,抑制系数 $kd(j)$ 取 0.8。阈值参数的调整可使舵在波浪中的负载降低,避免波浪中频繁操舵。图 8 为波浪干扰下航行运动响应对比,四种控制算法下的航行器都可实现动态稳定航行,垂荡和纵摇角在波浪力作用下呈规律性振荡。如图 8(a)和图 8(b)所示,改进 S 面算法在波浪中的垂荡控制效果与 S 面相近,

纵摇控制效果优于 S 面算法,垂荡和纵摇幅值大于专家控制-改进 S 面算法,对于垂荡和纵摇的控制效果皆优于 PID 算法。S 面算法控制下的航行器垂荡、纵摇单幅值有义值为 3.56 m 和 4.05°,与 S 面算法相比,改进 S 面算法控制下的垂荡、纵摇有义值分别减少 0.2%和 34.6%,专家控制-改进 S 面控制下的有义值分别减少 10.7%和 67.9%。前 20 秒时间航行器刚入水航行,专家控制-改进 S 面算法能够以较小的纵摇角达到下潜目标,表明该种算法更加有益于航行安全。如图 8(c)和图 8(d)所示,前后舵操舵幅值均未达到最大舵角限制,专家控制-改进 S 面算法的舵角操纵幅值更小,舵效更高。PID 算法舵角操纵幅值与 S 面算法和改进 S 面算法相差不大,但对垂荡和纵摇角的控制效果很难满足工程需求,表明 PID 算法对于复杂海况干扰下的近水面航行器运动控制具有一定局限性。

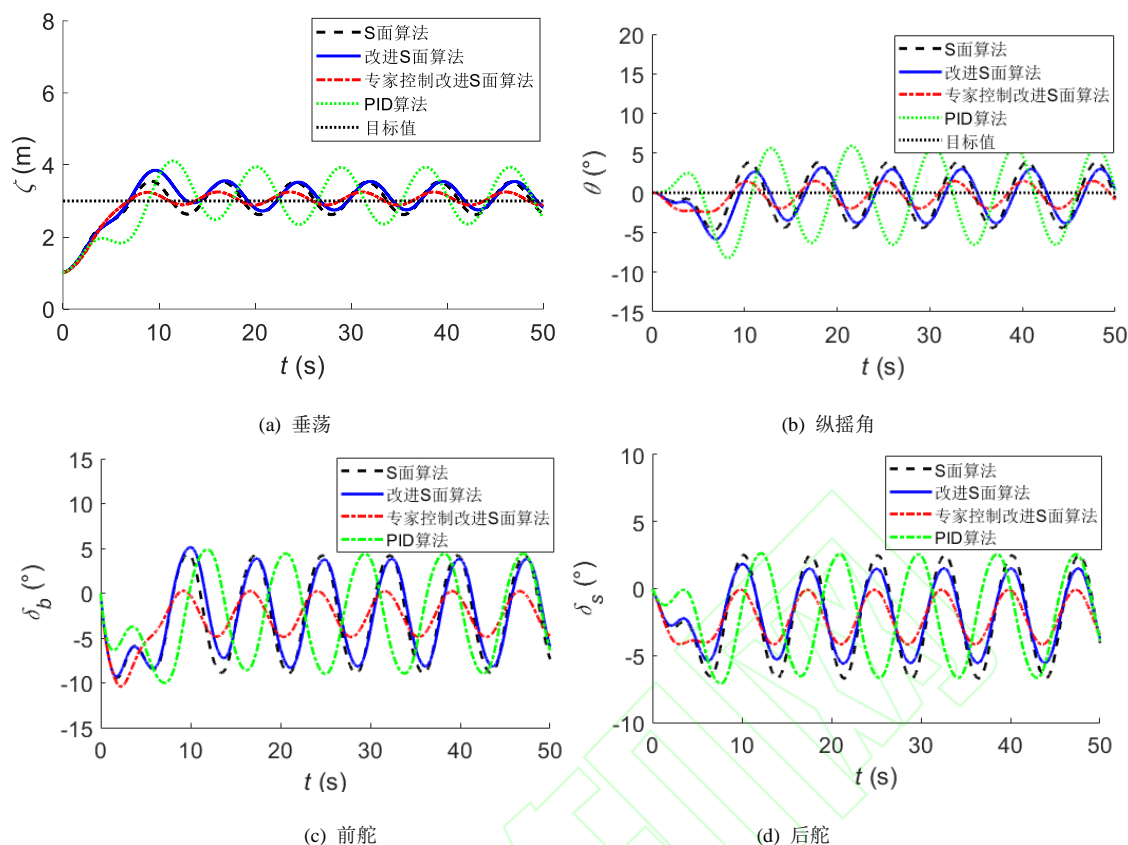


图 8 波浪中控制结果对比

Fig. 8 Comparison of control results in waves

5 结 论

为提高近水面航行器在波浪干扰或状态转换过程中的运动稳定性, 提高操舵响应速度, 提出了改进 S 面控制算法, 优化了自适应调节量, 该算法与传统 S 面及其他改进 S 面算法对比收敛速度更快。为进一步优化改进 S 面算法的参数控制, 将该算法与专家相结合, 构建了专家控制-改进 S 面算法。改进 S 面算法相较 S 面算法具有更快的收敛速度, 静水中收敛速度平均提高 15%, 波浪中算法优势主要体现在对于纵摇角的控制; 专家控制-改进 S 面算法能够提高舵的控制效率, 在静水中可实现快速稳定航行状态转换, 在波浪中可有效降低近水面航行器运动幅值。

参考文献:

- [1] CHEN H B, LI J, XUAN Y J, et al. First rocketsonde launched from an unmanned semi-submersible vehicle[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2019, 36(4): 339-345.
- [2] UENO M, TSUKADA Y, SAWADA H. A prototype of submersible surface ship and its hydrodynamic characteristics[J]. Ocean Engineering, 2011, 38(14-15):

1686-1695.

- [3] HUO C, ZHENG Y, GAO X P. Free-running tests on a self-propelled submersible multi-state vehicle model[J]. Ocean Engineering, 2021, 236: 109575.
- [4] 谈果戈. 双尾半潜无人艇近自由液面操纵性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
- [5] ZOU J, TAN G G, SUN H B, et al. Numerical simulation of the ducted propeller and application to a semi-submerged vehicle[C]//Proceedings of the ASME 2019 38th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Glasgow, Scotland: ASME, 2019: 1-11.
- [6] WANG B, FEI Q, HUANG X S, et al. Design of control system for an unmanned semi-submersible vehicle[C]//13th IEEE International Conference on Control & Automation. Ohrid, Macedonia: IEEE, 2017: 805-810.
- [7] ZHOU H Y, LI Y P, HU Z Q, et al. Identification state feedback control for the depth control of the studied underwater semi-submersible vehicle[C]//2015 IEEE International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER). Shenyang, China: IEEE, 2015: 875-880.

- [8] 周焕银, 刘亚平, 胡志强, 等. 基于辨识模型集的无人半潜水下机器人系统深度动态滑模控制切换策略研究[J]. 兵工学报, 2017, 38(11): 2198-2206.
- ZHOU H Y, LIU Y P, HU Z Q, et al. Switching strategy of dynamic sliding mode control based on multiple identification model set for unmanned semi-submersible vehicle[J]. Acta Armamentarii, 2017, 38(11): 2198-2206. (in Chinese)
- [9] ZHOU H Y, LIU K Z, XU H L, et al. Experimentally verified depth control of an unmanned semi-submersible vehicle[J]. IEEE Access, 2019, 7: 94254-94262.
- [10] CHEN P Y, HAN Y, ZHANG P F, et al. Intelligent S-plane controller for micro unmanned aerial vehicle[J]. IEEE Access, 2018, 6: 68096-68103.
- [11] HOU D D, WANG K, DU J M, et al. The impulse output control of multiple thrusters AUV based on the S-plane algorithm[C]//2022 14th International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. Changsha, China: IEEE, 2022: 264-268.
- [12] 李文魁, 周铸, 宦爱奇, 等. 自主水下航行器自适应 S 面三维轨迹跟踪的仿真验证[J]. 中国舰船研究, 2022, 17(4): 38-46, 91.
- LI W K, ZHOU Z, HUAN A Q, et al. Simulation and verification of an adaptive S-plane three-dimensional trajectory tracking control for autonomous underwater vehicles[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2022, 17(4): 38-46, 91. (in Chinese)
- [13] YANG Q S, XU H P, MENG J E. S-plane-based trajectory tracking control of underactuated ship[C]//2021 4th International Conference on Intelligent Autonomous Systems. Wuhan, China: IEEE, 2021: 296-301.
- [14] 董早鹏, 万磊, 宋利飞, 等. 基于自适应专家 S 面算法的微型 USV 控制系统设计[J]. 中国造船, 2017, 58(2): 178-188.
- DONG Z P, WAN L, SONG L F, et al. Design of control system for micro-USV based on adaptive expert S plane algorithm[J]. Shipbuilding of China, 2017, 58(2): 178-188. (in Chinese)
- [15] ZHAO X C, YUAN M N, CHENG P Y, et al. Robust H_∞ /S-plane controller of longitudinal control for UAVs[J]. IEEE Access, 2019, 7: 91367-91374.
- [16] 王建国, 吴恭兴, 万磊, 等. 广义 S 面的水下机器人控[制器设计[J]. 电机与控制学报, 2009, 13(S1): 144-148.
- WANG J G, WU G X, WAN L, et al. Controller design of underwater robots based on generalized S-plane[J]. Electric Machines and Control, 2009, 13(S1): 144-148. (in Chinese)
- [17] 李岳明, 庞永杰, 万磊. 水下机器人自适应 S 面控制[J]. 上海交通大学学报, 2012, 46(2): 195-200, 206.
- LI Y M, PANG Y J, WAN L. Adaptive S plane control for autonomous underwater vehicle[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2012, 46(2): 195-200, 206. (in Chinese)
- [18] MIAO R L, DONG Z P, WAN L, et al. Heading control system design for a micro-USV based on an adaptive expert S-PID algorithm[J]. POLISH MARITIME RESEARCH, 2018, 25(2): 6-13.
- [19] DU X X, CUI H, ZHANG Z D. Dynamics model and maneuverability of a novel AUV with a deflectable duct propeller[J]. Ocean Engineering, 2018, 163: 191-206.