

文章编号:1000-4653(2026)01-0029-09

船载直升机降落平台预设时间 鲁棒自适应镇定控制

许大禹¹, 李健^{2*}, 杜佳璐²

(1. 中国船级社, 北京 100007;

2. 大连海事大学 船舶电气工程学院, 辽宁 大连 116026)

摘要: 船载直升机降落平台 (SHLP) 能够有效补偿风、浪、流等环境因素引起的船舶摇荡运动, 是保障舰载直升机安全降落的重要技术手段。针对 SHLP 在船舶摇荡、系统动态不确定性以及负载扰动共同作用下的镇定控制问题, 提出一种预设时间鲁棒自适应镇定控制方法。首先, 设计一种新型障碍李雅普诺夫函数, 使 SHLP 支撑面调节至期望水平位置的收敛时间可预先设定; 其次, 构造自适应复合扰动估计器, 实现对 SHLP 复合扰动的在线估计; 最后, 结合反步设计方法与投影算法, 建立 SHLP 的预设时间鲁棒自适应镇定控制律。通过数值仿真验证了所提出控制方法在复合扰动条件下的有效性与鲁棒性。

关键词: 船载直升机降落平台; 镇定控制; 预设时间; 鲁棒自适应控制

中图分类号: U674.73; TP273

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.1000-4653.2026.01.003

Preset-time robust adaptive stabilization control of shipborne helicopter landing platforms

XU Dayu¹, LI Jian^{2*}, DU Jialu²

(1. China Classification Society, Beijing 100007;

2. School of Marine Electrical Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026)

Abstract: The Shipborne Helicopter Landing Platform (SHLP) provides an effective solution for ensuring the safe landing of shipborne helicopters by compensating for ship motions induced by wind, waves, and currents. To address the stabilization control problem of the SHLP subject to compound disturbances caused by ship motions, dynamic uncertainties, and load perturbations, a preset-time robust adaptive stabilization control method is proposed. First, a novel barrier Lyapunov function is designed, which allows the convergence time for regulating the supporting surface of the SHLP to the desired horizontal position to be preset in advance. Then, an adaptive compound disturbance estimator is constructed to achieve online estimation of the compound disturbances acting on the SHLP. Finally, by integrating the backstepping design approach with a projection algorithm, a preset-time robust adaptive stabilization control law for the SHLP is developed. Numerical simulation results demonstrate the effectiveness and robustness of the proposed control method under compound disturbance conditions.

Key words: Shipborne Helicopter Landing Platform; stabilization control; preset-time; robust adaptive control

船载直升机在军事和民用领域具有广泛的应用, 如人员物资转运、人员搜救和侦察等。在海况比

较恶劣的时候, 船载直升机降落在甲板上是非常危险的^[1-3]。具体而言, 由于风、浪和流的作用, 船舶

收稿日期: 2025-01-23

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52301413; 52371362; 52471374) 资助

作者简介: 许大禹 (1990—), 男, 工程师, 研究方向为船舶运动控制。* 通信作者: dlmulj@163.com

引用格式: 许大禹, 李健, 杜佳璐. 船载直升机降落平台预设时间鲁棒自适应镇定控制[J]. 中国航海, 2026, 49(1): 29-37.

XU D Y, LI J, DU J L. Preset-time robust adaptive stabilization control of shipborne helicopter landing platforms[J]. Navigation of China, 2026, 49(1): 29-37. (in Chinese)

产生六个自由度的运动,包括纵荡、横荡、升沉、横摇、纵摇和艏摇,这会影响船载直升机的着降安全^[4]。据统计,船载直升机25%的事故发生在甲板的阶段^[5]。因此,避免船舶摇荡运动对船载直升机着降的不利影响具有重要的实际意义。

提高船载直升机降落安全的常用方法之一是预测船舶的静止期^[6]。文献[7~11]分别采用自回归模型^[7,8]、分量分析方法^[9]、小波分解方法^[10]和最小二乘支持向量机方法^[11]来预报船舶未来时刻的运动,从而预测船载直升机可以安全降落的静止期。这种等待降落时机的方式,是一种保障船载直升机安全降落的被动方式。此外,船载直升机降落在甲板上通常需要6至10秒^[12]。因此,海况越恶劣,船载直升机可安全降落的机会就越小。相对而言,船载直升机降落平台(Shipborne helicopter landing platform, SHLP)可补偿风浪流引起的船舶摇荡运动,是保障直升机降落安全的有效解决方案。这样,即使在恶劣的海况下,船载直升机也能够平稳降落。文献[13]构造了一个三自由度的可移动机械装置作为SHLP,可补偿船舶横摇、横荡和升沉运动,从而保障船载直升机的平稳降落;进一步,构造了一个四自由度的SHLP,增加了补偿船舶纵摇运动的功能^[14]。然而,文献[12~13]仅给出了SHLP的机械结构设计,未讨论其主动运动补偿控制设计方面。文献[15]设计了一个Stewart机构的SHLP,并采用比例-微分控制算法设计了SHLP执行机构的控制器,补偿船舶升沉、纵摇和横摇运动。文献[16]应用模糊比例-积分-微分控制算法设计了液压驱动SHLP的控制器,补偿船舶升沉、纵摇和横摇运动。

需要指出,文献[15~16]这种基于比例-积分-微分控制算法设计的SHLP控制器具有局限性。一方面,SHLP控制系统的调节时间无法被预先设定,即SHLP上支撑面调节到期望水平位姿的时间无法被预设。因此,需要SHLP提前启动来等待船载直升机降落,这不利于节能。此外,DNV标准“DNVGL-OS-E401”要求船载直升机能够紧急降落^[17]。因此,需要SHLP能够在期望的时间内及时的实现镇定控制。文献[18~19]采用超螺旋和非奇异终端积分滑模控制算法设计了船载稳定平台的镇定控制律,能够保证控制误差在有限时间内收敛。然而,这个时间依赖系统的初始状态和控制设计参数。因此,需要为SHLP设计预设时间镇定控制策略,使得SHLP控制系统的调节时间能够被灵活地预先设置。另一方面,SHLP的质量和转动惯量等动态参数随着作业调节时常发生变化,且在实际中难以精

确获得,因此,SHLP显然存在动态不确定;此外,舰载直升机着舰过程中,会造成舰载稳定平台产生突变的动态负载摄动。而比例-积分-微分控制算法对动态不确定和动态负载摄动的鲁棒性较差。文献[20~21]将船载稳定平台的未建模动态和外部扰动视为复合扰动,分别设计了扩张状态观测器和复合扰动观测器估计复合扰动,结合滑模控制和逆推设计方法提出了船载稳定平台镇定控制律,然而,均无法使得扰动估计误差渐近收敛。

基于上述讨论,同时考虑SHLP不确定动态和船舶摇荡运动对SHLP的影响,本文首次设计一个预设时间鲁棒自适应镇定控制律。主要贡献如下。

1) 设计了一个新型障碍李雅普诺夫函数(barrier Lyapunov function, BLF),使得SHLP上支撑面调节到期望水平位置的时间可被预先设定,为保证船载直升机安全降落提供了更节能的船舶运动主动补偿方案。

2) 将船舶摇荡运动对SHLP的影响、SHLP不确定动态和动态负载摄动视为复合扰动,基于傅里叶分析原理,将复合扰动表示为线性标准模型,从而将复合扰动的估计问题转化为未知参数的自适应问题。这样,可易于采用自适应控制算法实现复合扰动的渐近估计。

1 问题描述

通常,船舶装备动力定位系统,能够补偿船舶横荡、纵荡和艏摇运动。因此,SHLP仅需要补偿船舶升沉、纵摇和横摇运动。本文考虑一个三自由度的并联结构的SHLP,其运动数学模型为^[22]

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G} = \boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{\tau}_w \quad (1)$$

式中, $\mathbf{q} = [z \ \varphi \ \theta]^T$ 为SHLP上支持面的位姿向量,包括升沉位移 z 、横摇角 φ 和纵摇角 θ ; $\boldsymbol{\tau} = [\tau_1 \ \tau_2 \ \tau_3]^T$ 为SHLP的控制输入向量,包括升沉力 τ_1 、横摇力矩 τ_2 和纵摇力矩 τ_3 ; $\boldsymbol{\tau}_w = [\tau_{w,1} \ \tau_{w,2} \ \tau_{w,3}]^T$ 为船舶运动对SHLP的影响和动态负载摄动造成的等效扰动向量; $\mathbf{M}(\mathbf{q}) \in \partial^{3 \times 3}$ 为惯性矩阵; $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \in \partial^{3 \times 3}$ 为科氏向心力矩阵; $\mathbf{G} \in \partial^3$ 为重力向量。 $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ 、 $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ 和 \mathbf{G} 是不确定的,可表示为 $\mathbf{M}(\mathbf{q}) = \mathbf{M}_n(\mathbf{q}) + \Delta\mathbf{M}(\mathbf{q})$ 、 $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \mathbf{C}_n(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \Delta\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ 和 $\mathbf{G} = \mathbf{G}_n + \Delta\mathbf{G}$, 其中, \cdot_n 表示标称部分, $\Delta \cdot$ 表示不确定部分。此外, $\dot{\mathbf{M}}_n(\mathbf{q}) - 2\mathbf{C}_n(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ 为斜对称矩阵。

船载直升机降落的过程可分为两个阶段。在第一阶段,船载直升机经过大约 T_s 秒达到SHLP上支持面的无障碍区域,然后,在第二阶段被上支持面的

单点系留系统固定住。因此,SHLP的上支持面需要在 T_s 秒内调节到期望的水平位姿。根据这一需求,本文的控制目标为:针对SHLP(1),设计一个预设时间鲁棒自适应镇定控制律,使得SHLP上支持面的位姿向量 \mathbf{q} 维持在期望的常值 $\mathbf{q}_d = [z_d, \varphi_d, \theta_d]^T$ 上,同时,保证镇定误差 $e_i (i=1,2,3)$ 在预设的时间 T_s 内调节到给定的误差容许带 $(-e_{i,b}, e_{i,b})$ 内。这里, e_i 为误差向量 $\mathbf{e} = [e_1, e_2, e_3]^T = \mathbf{q} - \mathbf{q}_d$ 的第 i 个元素。

2 SHLP 预设时间鲁棒自适应镇定控制设计

2.1 新型 BLF 设计

根据预设时间控制技术^[23-24],设计新型 BLF

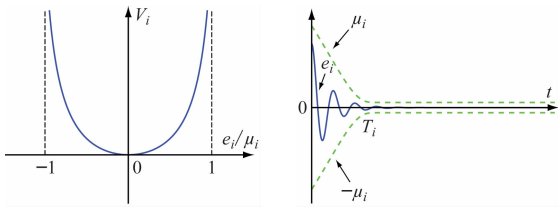
$$V_i = \frac{e_i^2}{1 - \left(\frac{e_i}{\mu_i}\right)^2}, i = 1, 2, 3 \quad (2)$$

式中, μ_i 为如下正的连续衰减的函数

$$\mu_i = \begin{cases} \gamma_i e_i(0) \exp\left(-\frac{T_s t}{T_s - t}\right) + e_{i,b}, & t < T_s \\ e_{i,b}, & t \geq T_s \end{cases} \quad (3)$$

式中, $\exp(\cdot)$ 表示指数函数, $\gamma_i > 1$ 为设计常数, $e_i(0)$ 为误差 e_i 的初值。 V_i 关于 e_i/μ_i 的函数及 e_i, μ_i 的历时曲线如图1所示。

注1:由图1a可见,当 $e_i/\mu_i \rightarrow \pm 1$ 时,有 $V_i \rightarrow +\infty$ 。因此,如果保证 V_i 是有界的,则一定有 $|e_i| < \mu_i$,由图1b可见,这意味着误差 e_i 会在预设的时间 T_s 内调节到给定的误差容许带 $(-e_{i,b}, e_{i,b})$ 内。



(a) BLF V_i 关于 e_i/μ_i 的函数 (b) e_i, μ_i 的历时曲线

图1 V_i 关于 e_i/μ_i 的函数及 e_i, μ_i 的历时曲线

Fig. 1 Sketched graph of the BLF V_i with respect to e_i/μ_i , and duration curves of e_i and μ_i

2.2 镇定控制律设计

将BLF(2)与逆推设计工具^[25]相结合,设计SHLP预设时间鲁棒自适应镇定控制律,包括以下两步。

第1步:对 $\sum_{i=1}^3 V_i$ 求导,并根据式(2)和定义 $\mathbf{e} =$

$\mathbf{q} - \mathbf{q}_d$,可得

$$\sum_{i=1}^3 \dot{V}_i = \sum_{i=1}^3 \frac{2e_i \dot{e}_i - \frac{2e_i^4 \dot{\mu}_i}{\mu_i^3}}{\left[1 - \left(\frac{e_i}{\mu_i}\right)^2\right]^2} = \mathbf{e}^T \mathbf{P}(\dot{\mathbf{q}} - \mathbf{Q}) \quad (4)$$

式中, $\mathbf{P} = \text{diag}(P_1, P_2, P_3)$, $P_i = \frac{2}{[1 - (e_i/\mu_i)^2]^2}$, $\mathbf{Q} =$

$$\left[\frac{e_1^3 \dot{\mu}_1}{\mu_1^3} \quad \frac{e_2^3 \dot{\mu}_2}{\mu_2^3} \quad \frac{e_3^3 \dot{\mu}_3}{\mu_3^3} \right]^T$$

设计中间控制向量 $\alpha \in \partial^3$

$$\alpha = -\mathbf{K}_1 \mathbf{P}^{-1} \mathbf{e} + \mathbf{Q} \quad (5)$$

式中, $\mathbf{K}_1 = \mathbf{K}_1^T \in \partial^3$ 为正定设计矩阵。

第2步:定义误差向量 $\mathbf{z} \in \partial^3$

$$\mathbf{z} = \dot{\mathbf{q}} - \alpha \quad (6)$$

选取李雅普诺夫预选函数

$$V = \sum_{i=1}^3 V_i + \frac{1}{2} \mathbf{z}^T \mathbf{M}_n(\mathbf{q}) \mathbf{z} \quad (7)$$

对 V 求导,并根据式(1),式(4)~式(6)和 $\dot{\mathbf{M}}_n(\mathbf{q}) - 2\mathbf{C}_n(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ 斜对称矩阵的性质,可得

$$\begin{aligned} \dot{V} = & \mathbf{e}^T \mathbf{P}(\mathbf{z} + \alpha - \mathbf{Q}) + \mathbf{z}^T \mathbf{M}_n(\mathbf{q})(\ddot{\mathbf{q}} - \dot{\alpha}) + \\ & \frac{1}{2} \mathbf{z}^T \dot{\mathbf{M}}_n(\mathbf{q}) \mathbf{z} = -\mathbf{e}^T \mathbf{K}_1 \mathbf{e} + \mathbf{e}^T \mathbf{P} \mathbf{z} + \mathbf{z}^T [(\tau + \tau_w - \\ & \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}} - \mathbf{G} - \Delta \mathbf{M}(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}}) - \mathbf{M}_n(\mathbf{q}) \dot{\alpha}] + \\ & \frac{1}{2} \mathbf{z}^T \dot{\mathbf{M}}_n(\mathbf{q}) \mathbf{z} = -\mathbf{e}^T \mathbf{K}_1 \mathbf{e} + \mathbf{e}^T \mathbf{P} \mathbf{z} + \mathbf{z}^T [(\tau - \\ & \mathbf{C}_n(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})(\mathbf{z} + \alpha) - \mathbf{G}_n + \mathbf{f}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}, \tau_w)) - \\ & \mathbf{M}_n(\mathbf{q}) \dot{\alpha}] + \frac{1}{2} \mathbf{z}^T \dot{\mathbf{M}}_n(\mathbf{q}) \mathbf{z} \end{aligned} \quad (8)$$

式中 $\mathbf{f}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}, \tau_w) = [f_1 \quad f_2 \quad f_3]^T = \tau_w - \Delta \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}} - \Delta \mathbf{G} - \Delta \mathbf{M}(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}}$ 为船舶摇摆运动对SHLP的影响、SHLP不确定动态和动态负载扰动引起的复合扰动。

下面,为处理复合扰动,将复合扰动的估计问题转化为未知参数的自适应问题。

首先,根据傅里叶分析原理,复合扰动能够被分解为 κ 个正弦信号的叠加

$$f_i = \sum_{j=1}^{\kappa} \lambda_{i,j} \sin(a_{i,j} t + \zeta_{i,j}), i = 1, 2, 3 \quad (9)$$

式中, $\lambda_{i,j}$, $a_{i,j}$ 和 $\zeta_{i,j}$ 分别为第 j 个信号的未知幅值、频率和相位。因此,根据内模原理式(9),复合扰动可表示为如下外部系统的输出^[26]

$$\dot{\boldsymbol{\chi}} = \boldsymbol{\Gamma} \boldsymbol{\chi} \quad (10)$$

$$\mathbf{f} = \mathbf{H} \boldsymbol{\chi} \quad (11)$$

式中, $\boldsymbol{\chi} \in \partial^{2\kappa}$ 为状态向量, $\boldsymbol{\Gamma} \in \partial^{2\kappa \times 2\kappa}$ 为系统矩阵, $\mathbf{H} \in \partial^{3 \times 2\kappa}$ 为输出矩阵。 $\boldsymbol{\Gamma}$ 的所有特征值均位于虚轴上, $(\boldsymbol{\Gamma}, \mathbf{H})$ 为可观测对。

然后,定义矩阵 $\boldsymbol{\Omega} \in \partial^{2\kappa \times 2\kappa}$, $\mathbf{L} \in \partial^{3 \times 2\kappa}$ 和 $\mathbf{F} \in$

$\partial^{2\kappa \times 2\kappa}$, Ω 为赫尔维兹的, (Ω, L) 为可控对, F 为如下方程的解

$$FF - \Omega F = LH \quad (12)$$

定义向量 $\delta = F\chi \in \partial^{2\kappa}$, 根据式(12), 外部系统可被转换为如下标准型

$$\dot{\delta} = \Omega\delta + Lf \quad (13)$$

$$f = \Theta^T \delta \quad (14)$$

式中, $\Theta = [\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3]^T = (HF^{-1})^T \in \partial^{2\kappa \times 3}$ 为未知常值矩阵。

进一步, 构造观测器估计 δ

$$\hat{\delta} = \Omega\hat{\delta} + L(M_n(q)\ddot{q} + C_n(q, \dot{q})\dot{q} + G_n - \tau) \quad (15)$$

根据式(1)、式(13)和式(15)可知, δ 的估计误差动态为

$$\begin{aligned} \dot{\bar{\delta}} = \hat{\delta} - \delta = \Omega\hat{\delta} + L(M_n(q)\ddot{q} + C_n(q, \dot{q})\dot{q} + G_n - \\ \tau) - \Omega\delta - Lf = \Omega\hat{\delta} + Lf - \Omega\delta - Lf = \Omega\bar{\delta} \end{aligned} \quad (16)$$

式中, $\bar{\delta} = \hat{\delta} - \delta$ 。由于 Ω 为赫尔维兹的, 因此, $\bar{\delta}$ 能够指数收敛到零。

根据式(14), 可得

$$f = \Theta^T \hat{\delta} - \Theta^T \bar{\delta} \quad (17)$$

注2: 可见, 复合扰动被表示为了带有未知参数矩阵 Θ 的参数化方程。由于 $\bar{\delta}$ 是指数收敛的, 可以通过设计 Θ 的自适应律, 得到复合扰动的估计 $\hat{f} = \hat{\Theta}^T \hat{\delta}$, 即自适应复合扰动估计器 (Compound Disturbance Estimator, CDE)。这样, 可方便使用自适应控制算法来解决复合扰动的抑制问题。

基于上述, 设计 SHLP 预设时间鲁棒自适应镇定控制律

$$\tau = -Pe - K_2 z + C_n(q, \dot{q})\alpha + G_n + M_n(q)\dot{\alpha} - \hat{\Theta}^T \hat{\delta} \quad (18)$$

$$\hat{\Theta}_i = K_{0,i} \text{Proj}(z_i \hat{\delta}, \hat{\Theta}_i), i = 1, 2, 3 \quad (19)$$

式中, $K_2 = K_2^T \in \partial^3$ 和 $K_{0,i} = K_{0,i}^T \in \partial^3$ 为正定设计矩阵, $\text{Proj}(\cdot)$ 表示投影算子^[25]。这里, 应用投影算子(19)设计自适应律一方面为了防止时间趋于无穷的时候参数估计值 $\hat{\Theta}_i$ 发生漂移, 另一方面有助于使得参数估计误差 $\tilde{\Theta}_i = \hat{\Theta}_i - \Theta_i$ 渐近收敛。

注3: 本文仅设计了 SHLP 的高级控制律, 计算 SHLP 的合力及合力矩向量 τ 。借助于 SHLP 的雅可比矩阵的转置 J , 可获得 SHLP 三个执行机构的期望力, 然后, 各执行机构的力跟踪控制器会使得各执行机构产生期望的力, 从而三个执行机构产生合力及合力矩向量 τ 。

为 SHLP 闭环镇定控制系统选取李雅普诺夫预选函数

$$V_a = V + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \tilde{\Theta}_i^T K_{0,i}^{-1} \tilde{\Theta}_i + \bar{\delta}^T P \bar{\delta} \quad (20)$$

式中, P 为如下矩阵方程的解

$$\Omega^T P + P \Omega = -\Theta \Theta^T \quad (21)$$

根据式(9)~式(11)和投影算子的性质, 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_a = \dot{V} + \sum_{i=1}^3 \tilde{\Theta}_i^T K_{0,i}^{-1} \dot{\tilde{\Theta}}_i + \bar{\delta}^T P \dot{\bar{\delta}} + \bar{\delta}^T P \dot{\bar{\delta}} = -e^T K_1 e - \\ z^T K_2 z - z^T (\hat{\Theta}^T \hat{\delta} - \Theta^T \hat{\delta} + \Theta^T \bar{\delta}) + \\ \sum_{i=1}^3 \tilde{\Theta}_i^T K_{0,i}^{-1} \dot{\tilde{\Theta}}_i + \bar{\delta}^T P \dot{\bar{\delta}} + \bar{\delta}^T P \dot{\bar{\delta}} = -e^T K_1 e - \\ z^T K_2 z - z^T \tilde{\Theta}^T \hat{\delta} - z^T \Theta^T \bar{\delta} + \sum_{i=1}^3 \tilde{\Theta}_i^T \text{Proj}(z_i \hat{\delta}, \hat{\Theta}_i) + \\ \bar{\delta}^T P \dot{\bar{\delta}} + \bar{\delta}^T P \dot{\bar{\delta}} \leq -e^T K_1 e - z^T K_2 z - z^T \Theta^T \bar{\delta} + \\ \bar{\delta}^T P \dot{\bar{\delta}} + \bar{\delta}^T P \dot{\bar{\delta}} \end{aligned} \quad (22)$$

根据杨氏不等式, 有

$$-z^T \Theta^T \bar{\delta} \leq \frac{1}{4} \|z\|^2 + \|\Theta^T \bar{\delta}\|^2 \quad (23)$$

根据式(16)和式(21), 有

$$\dot{\bar{\delta}}^T P \bar{\delta} + \bar{\delta}^T P \dot{\bar{\delta}} = -\bar{\delta}^T (\Theta \Theta^T) \bar{\delta} \quad (24)$$

将式(23)和式(24)代入式(22), 可得

$$\dot{V}_a \leq -e^T K_1 e - z^T \left(K_2 - \frac{1}{4} I_{3 \times 3} \right) z \quad (25)$$

式中, K_2 需满足 $\lambda_{\min}(K_2) > \frac{1}{4}$ 。

因此, 有如下定理。

定理1: 考虑由 SHLP(1)和带有中间控制律(5)、观测器(15)、自适应律(19)的预设时间鲁棒自适应镇定控制律(18)构成的 SHLP 闭环镇定控制系统, SHLP 上支撑面的位姿向量 q 能够维持在期望的常值 q_d 上, 同时, 镇定误差 e_i ($i = 1, 2, 3$) 能够在预设的时间 T_s 内调节到给定的误差容许带 $(-e_{i,b}, e_{i,b})$ 内, 并最终渐近收敛到零, 且 SHLP 闭环镇定控制系统中的所有信号是一致有界的。

证明: 根据式(20)、式(25)和 LaSalle-Yoshizawa 定理^[25], V_i ($i = 1, 2, 3$)、 V 和 V_a 是一致有界的, 因此, $\hat{\Theta}_i$ 和 $\hat{\delta}$ 是一致有界的。根据注1, 误差 e_i ($i = 1, 2, 3$) 能够在预设的时间 T_s 内调节到给定的误差容许带 $(-e_{i,b}, e_{i,b})$ 内。此外, 可得 z 是一致有界的, 进一步, 结合式(5)和式(18), 中间控制向量 α 和控制律 τ 均是有界的。则由 $e = q - q_d$ 和式(6)可知, q 和 \dot{q} 是有界的。因此, SHLP 闭环镇定控制系统中的所有信号是一致有界的。进一步, 根据式(25)和 Barbalat 引理^[25], 误差 e_i 会渐近收敛到零。定理1证毕。

3 仿真试验

3.1 所设计控制律下的仿真

为了验证所设计的 SHLP 预设时间鲁棒自适应镇定控制律的有效性,基于一个三自由度并联 SHLP 进行仿真试验,其数学模型参数见表 1^[22]。

表 1 SHLP 数学模型参数的标称值

Tab.1 Nominal values of SHLP model parameters

参数	数值
M_p/kg	300
$I_x/\text{kg} \cdot \text{m}^2$	10.59
$I_y/\text{kg} \cdot \text{m}^2$	10.59
$I_z/\text{kg} \cdot \text{m}^2$	19.85
$G/(\text{m}/\text{s}^2)$	9.8

采用无人直升机 AR-500B^[27] 作为船载直升机,其最大起飞重量为 500 kg。船载直升机在 6 s 时进入软降落阶段,此时,对 SHLP 产生一个降落负载摄动力 d_L ,根据直升机的降落负载分析^[28], d_L 可近似为

$$d_L = \frac{1}{0.1 s^2 + 0.8 s + 1} \bar{d}_L \quad (26)$$

其中,

$$\bar{d}_L = \begin{cases} 0, & t < 6 \\ -3\,000 - 500\sin(2\pi(t-6)), & 6 \leq t < 10 \\ -5\,000, & t \geq 10 \end{cases} \quad (27)$$

选取挪威科技大学开发的海洋系统仿真器^[4]中的一艘补给船作为承载 SHLP 的对象,其主要参数见表 2。

表 2 补给船的主要参数

Tab.2 Main particulars of the supply ship

参数	数值
长度/m	82.8
宽度/m	19.2
吃水/m	6
干舷/m	10
质量/kg	$6.362\,2 \times 10^6$
排水体积/ m^3	$6.207\,0 \times 10^3$

仿真分别在两种海况下进行,对应的海浪参数值见表 3^[4]。此外,SHLP 的惯性矩阵、科氏向心力矩阵和重力向量摄动 10%。

补给船的升沉位移、横摇角和纵摇角的初始值

表 3 海浪参数值

Tab.3 Wave parameter values

参数	海况等级	
	2	4
海浪谱类型	ITTC	
有义波高/m	0.5	2.5
峰值频率/(r/s)	0.8	0.6
平均波向/(°)	30	120
波浪扩散因子	2	3

分别设置为 0 m、0.03 rad 和 0.03 rad。SHLP 基座的中心置于补给船的中线上距离船尾 10 m 处,假设 SHLP 执行机构自然状态是 3 m,则不加控制的 SHLP 上支持面的升沉位移为 $z = z_{\text{ship}} - 31.4\sin(\theta_{\text{ship}}) - 13\cos(\varphi_{\text{ship}})\cos(\theta_{\text{ship}})$,横摇角和纵摇角与补给船的一致。因此,SHLP 上支持面的初始位姿向量为 $\mathbf{q}(0) = [-13.935\,4\text{ m}, 0.03\text{ rad}, 0.03\text{ rad}]^T$ 。

预先设定 SHLP 镇定误差 e_1 、 e_2 和 e_3 在 $T_s = 6$ 秒内分别调节到给定的误差容许带 (-0.01 m , 0.01 m)、(-0.005 rad , 0.005 rad) 和 (-0.005 rad , 0.005 rad) 内。这里,未考虑 SHLP 的传感器测量误差,实际中,应结合传感器测量精读设置合适的误差容许带。控制设计参数选取为 $\mathbf{K}_{o,i} = \text{diag}(10^{-5}, 10^{-5}, 10^{-5})$ 、 $\mathbf{K}_1 = \text{diag}(1, 1, 1)$ 、 $\mathbf{K}_2 = \text{diag}(10, 10, 10)$ 、 $\mathbf{\Omega} = \text{diag}(-1, -1, -1, -1)$ 和 $\mathbf{L} = \text{diag}(1, 1, 1, 1)$ 。

海况 2 下的仿真结果绘制在图 2 ~ 图 6 中。控制性能指标总结在表 4 中。由图 2 ~ 图 4 和表 4 可见,SHLP 上支撑面的位姿向量 \mathbf{q} 能够维持在期望的常值 \mathbf{q}_d 上,同时,镇定误差能够在预设的时间 T_s 内调节到给定的误差容许带内。图 5 表明,SHLP 的控制输入是有界合理的。由图 6 可见,所设计的自适应 CDE 能够在线实时估计复合扰动。海况 4 下的仿真结果绘制在图 7 ~ 图 11 中。由图 7 ~ 图 9 和表 4 可见,所设计的 SHLP 预设时间鲁棒自适应镇定控制律展现了与海况 2 同样令人满意的控制效果,表明其对 SHLP 存在的不确定动态、船舶摇荡运动对 SHLP 的影响和负载摄动未知具有良好的鲁棒性。

3.2 仿真比较

为了验证本文所提出控制律的优越性,本小节将其与如下不带有预设时间的鲁棒自适应镇定控制律 $\tau_{\text{com},1}$ 和不带有复合扰动估计器的预设时间镇定控制律 $\tau_{\text{com},2}$ 进行仿真比较:

$$\begin{aligned} \tau_{com,1} = & -e - K_2 z + C_n(q, \dot{q}) \alpha_{com,1} + G_n + \\ & M_n(q) \dot{\alpha}_{com,1} - \hat{\Theta}^T \hat{\delta} \end{aligned} \quad (28)$$

带有自适应律

$$\hat{\Theta}_i = K_{0,i} \text{Proj}(z_i \hat{\delta}, \hat{\Theta}_i), i = 1, 2, 3 \quad (29)$$

和中间控制向量

$$\alpha_{com,1} = -K_1 e \quad (30)$$

$$\tau_{com,2} = -P e - K_2 z + C_n(q, \dot{q}) \alpha + G_n + M_n(q) \dot{\alpha} \quad (31)$$

式中,未说明的变量和设计参数均与所设计控制律 τ 中的一致。

控制律 $\tau_{com,1}$ 和 $\tau_{com,2}$ 分别由本文所设计控制律 τ 去掉预设时间部分和自适应CDE部分得到,基于它们的仿真比较可保证比较的公平性。在3.1节中的两种海况下进行仿真,仿真中,SHLP的初始状态和设计参数与4.1中相同。仿真结果分别用虚线和和点划线绘制在图2~图4和图7~图9中,控制性能指标总结在表4中。

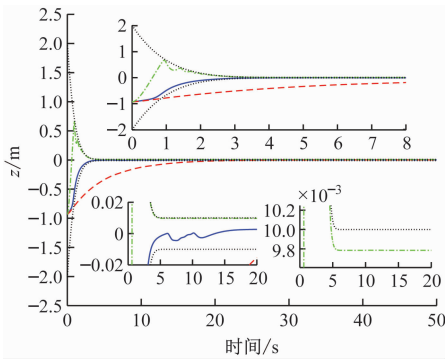


图2 海况2下SHLP的升沉位移(- τ 下的升沉位移,-- $\tau_{com,1}$ 下的升沉位移,- $\tau_{com,2}$ 下的升沉位移,; μ_1 和 $-\mu_1$)

Fig.2 The heave displacement of the SHLP in the sea state 2 (-The heave displacement under τ ,--The heave displacement under $\tau_{com,1}$, -The heave displacement under $\tau_{com,2}$, ; μ_1 and $-\mu_1$)

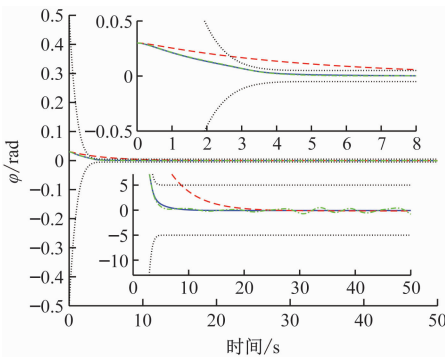


图3 海况2下SHLP的横摇角(- τ 下的横摇角,-- $\tau_{com,1}$ 下的横摇角,- $\tau_{com,2}$ 下的横摇角,; μ_2 和 $-\mu_2$)

Fig.3 The roll angle of the SHLP in the sea state 2 (-The roll angle under τ ,--The roll angle under $\tau_{com,1}$, -The roll angle under $\tau_{com,2}$, ; μ_2 and $-\mu_2$)

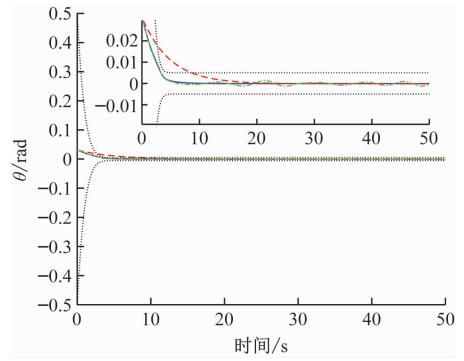


图4 海况2下SHLP的纵摇角(- τ 下的纵摇角,-- $\tau_{com,1}$ 下的纵摇角,- $\tau_{com,2}$ 下的纵摇角,; μ_3 和 $-\mu_3$)

Fig.4 The pitch angle of the SHLP in the sea state 2 (-The pitch angle under τ ,--The pitch angle under $\tau_{com,1}$, -The pitch angle under $\tau_{com,2}$, ; μ_3 and $-\mu_3$)

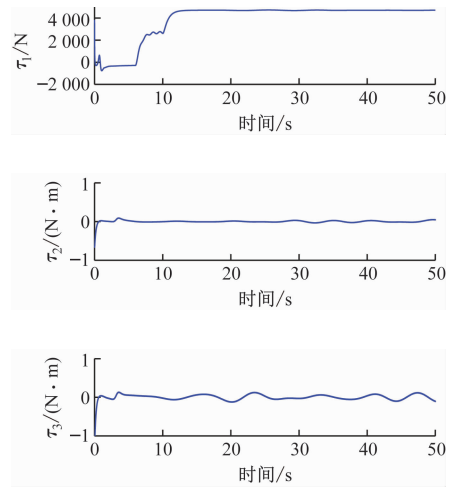


图5 海况2下SHLP的控制输入

Fig.5 Control inputs e of the SHLP in the sea state 2

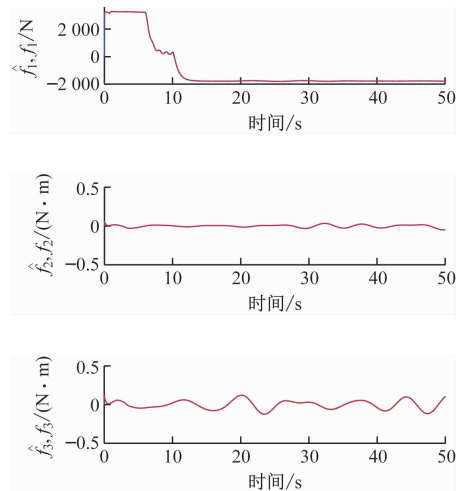


图6 海况2下复合扰动的估计值

Fig.6 The estimates of compound disturbance angle of the SHLP in the sea state 2

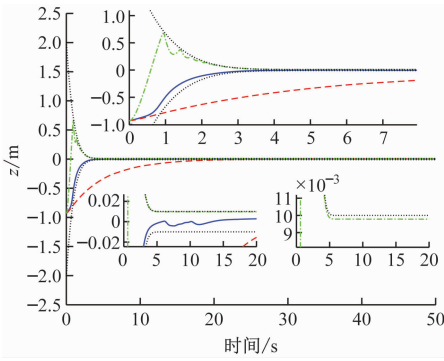


图7 海况4下SHLP的升沉位移(- τ 下的升沉位移, $-\tau_{com,1}$ 下的升沉位移, $-\tau_{com,2}$ 下的升沉位移, $;\mu_1$ 和 $-\mu_1$)
 Fig.7 The heave displacement of the SHLP in the sea state 4 (-The heave displacement under τ , -The heave displacement under $\tau_{com,1}$, -The heave displacement under $\tau_{com,2}$, $;\mu_1$ and $-\mu_1$)

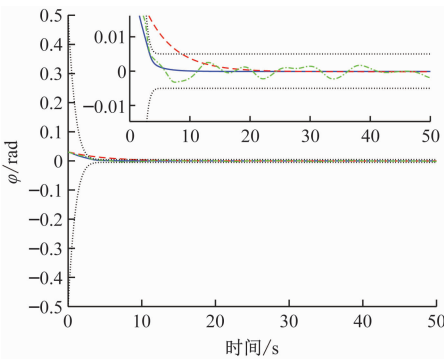


图8 海况4下SHLP的横摇角(- τ 下的横摇角, $-\tau_{com,1}$ 下的横摇角, $-\tau_{com,2}$ 下的横摇角)
 Fig.8 The roll angle of the SHLP in the sea state 4 (-The roll angle under τ , -The roll angle under $\tau_{com,1}$, -The roll angle under $\tau_{com,2}$, $;\mu_2$ and $-\mu_2$)

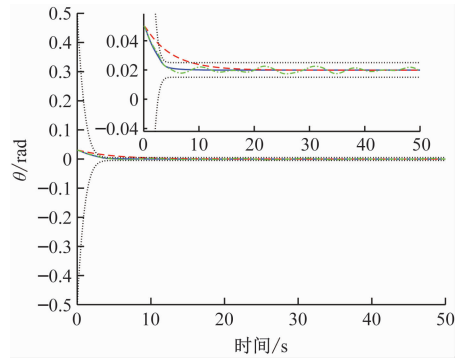


图9 海况4下SHLP的纵摆角(- τ 下的纵摆角, $-\tau_{com,1}$ 下的纵摆角, $-\tau_{com,2}$ 下的纵摆角)
 Fig.9 The pitch angle of the SHLP in the sea state 4 (-The pitch angle under τ , -The pitch angle under $\tau_{com,1}$, -The pitch angle under $\tau_{com,2}$, $;\mu_3$ and $-\mu_3$)

比较本文所设计的预设时间的鲁棒自适应镇定控制律 τ 和不带有预设时间的鲁棒自适应镇定控制律 $\tau_{com,1}$ 下的仿真结果,瞬态控制性能方面: $\tau_{com,1}$ 不能像 τ 一样保证 SHLP 的镇定误差在预设的时间内调节到给定误差容许带。在海况 2 中,控制律 τ 下的升沉、横摇和纵摇方向的调节时间分别比控制律 $\tau_{com,1}$ 下对应方向的调节时间快了 17.5 秒、5.4 秒和 5.4 秒,收敛时间分别加快了 500%、163.6% 和 163.6%;在海况 4 中,控制律 τ 下的升沉、横摇和纵摇方向的调节时间分别比控制律 $\tau_{com,1}$ 下对应方向的调节时间快了 18.5 秒、5.4 秒和 5.4 秒,收敛时间分别加快了 528.6%、163.6% 和 163.6%。稳态控制性能方面:25 秒之后的绝对误差积分指标表明,在两种海况中,控制律 τ 和控制律 $\tau_{com,1}$ 下稳态

表4 控制性能指标

Tab.4 Performance metrics

控制律海况	τ		$\tau_{com,1}$		$\tau_{com,2}$	
	2	4	2	4	2	4
调节时间(升沉)/s	3.5	3.5	21	22	4.8	4.8
调节时间(横摇)/s	3.3	3.3	8.7	8.7	3.5	3.4
调节时间(纵摇)/s	3.3	3.3	8.7	8.7	3.5	3.3
$\int_{25}^{50} e_1 dt / (m/s)$	0.068	0.070	0.028	0.030	0.245	0.245
$\int_{25}^{50} e_2 dt / (r/s)$	0.002	0.002	0.003	0.003	0.007	0.022
$\int_{25}^{50} e_3 dt / (r/s)$	0.002	0.002	0.003	0.003	0.014	0.029

控制精度在一个数量级,对复合扰动具有相似的鲁棒性,因为它们均具有自适应 CDE。

比较本文所设计的预设时间的鲁棒自适应镇定

控制律 τ 和不带有复合扰动估计器的预设时间镇定控制律 $\tau_{com,2}$ 下的仿真结果,瞬态控制性能方面:在两种海况下,控制律 τ 和控制律 $\tau_{com,1}$ 均能保证

SHLP 的镇定误差在预设的时间 6 秒内调节到给定误差容许带,因为它们均采用了预设时间方法;控制律 τ 下的收敛时间比控制律 $\tau_{com,1}$ 下的收敛时间稍短,这是由于 $\tau_{com,2}$ 不具有自适应 CDE,对复合扰动的鲁棒性较差,因此,复合扰动造成 $\tau_{com,2}$ 下的瞬态性能稍差一点。稳态控制性能方面:25 秒之后的绝对误差积分指标表明,在海况 2 中,控制律 τ 下的升沉、横摇和纵摇方向的控制精度比控制律 $\tau_{com,2}$ 下对应方向的控制精度提高了 260.3%、250% 和 600%;在海况 4 中,控制律 τ 下的升沉、横摇和纵摇方向的控制精度比控制律 $\tau_{com,2}$ 下对应方向的控制精度提高了 250%、1 000% 和 1350%;可见,控制律 τ 比控制律 $\tau_{com,1}$ 提高了对复合扰动的鲁棒性。

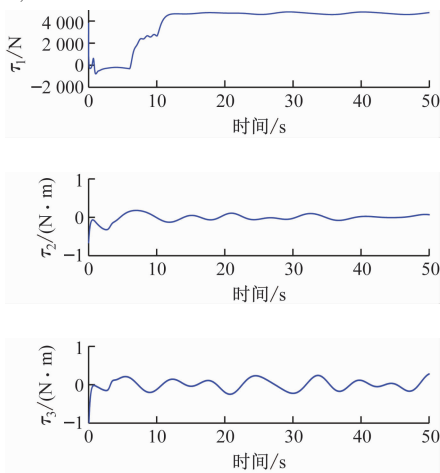


图 10 海况 4 下 SHLP 的控制输入

Fig. 10 Control inputs of the SHLP in the sea state 4

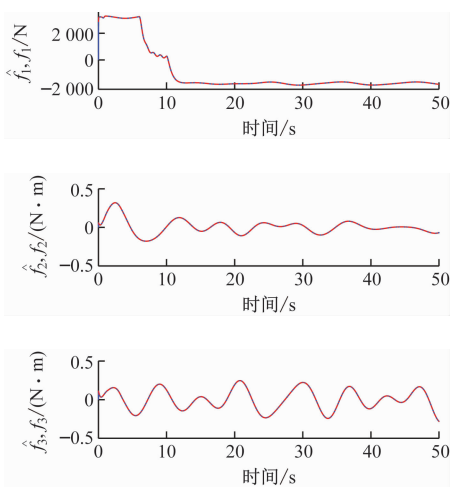


图 11 海况 4 下复合扰动的估计值

Fig. 11 Estimation of the compound disturbance angle of the SHLP under sea state 4

4 结束语

同时考虑船舶摇荡运动对 SHLP 的影响、SHLP

不确定动态和动态负载摄动,通过设计一个新型 BLF 和构造一个自适应 CDE,提出了 SHLP 预设时间鲁棒自适应镇定控制律,使得 SHLP 上支撑面在预先设定的时间内调节到期望的水平位姿,并且具有良好的鲁棒性。理论分析和仿真试验结果表明,本文实现了预期的控制目标。在未来的工作中,将开展基于稳定平台样机的试验研究来验证所提出控制策略的有效性。

参 考 文 献

- [1] SHUKLA S, SINGH S N, SINHA S S, et al. Comparative assessment of URANS, SAS and DES turbulence modeling in the predictions of massively separated ship airwake characteristics [J]. Ocean Engineering, 2021, 229: 108954.
- [2] SU D C, XU G H, HUANG S L, et al. Numerical investigation of rotor loads of a shipborne coaxial-rotor helicopter during a vertical landing based on moving overset mesh method [J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2019, 13 (1): 309-326.
- [3] SHI Y J, SU D C, XU G H. Numerical investigation of the influence of passive/active flow control on ship/helicopter dynamic interface [J]. Aerospace Science and Technology, 2020, 106: 106205.
- [4] FOSSEN T I. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control [M]. Chichester: John Wiley & Sons, 2011.
- [5] MU Z T. The using feature analyze on safety flight of shipboard helicopter [J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2000, 4: 28-29.
- [6] CADEMARTORI G, ONETO L, VALDENAZZI F, et al. A review on ship motions and quiescent periods prediction models [J]. Ocean Engineering, 2023, 280: 114822.
- [7] 蔡烽, 侯建军, 万林, 等. 提高直升机起降海情的频域时域综合预报模式 [J]. 船舶工程, 2003, 25(2): 15-20.
- [8] CAI F, HOU J J, WAN L, et al. An integrated frequency-domain and time-domain prediction model for improving helicopter launch and recovery sea states [J]. Ship Engineering, 2003, 25(2): 15-20. (in Chinese)
- [9] YANG X L. Displacement motion prediction of a landing deck for recovery [J]. International Journal of Control Automation and Systems, 2013, 11(1): 58-64.
- [9] 万林, 石爱国, 周波, 等. 船载直升机着船预报系统及评估方法 [J]. 中国航海, 2005, 1: 11-13.
- WAN L, SHI A G, ZHOU B, et al. Shipborne

- helicopter landing prediction system and evaluation method[J]. *Navigation of China*, 2005, 1: 11-13. (in Chinese)
- [10] RIOLA J M, DIZA J J, GIRON-SIERRA J M. The prediction of calm opportunities for landing on a ship: aspects of the problem[C]. *Proceedings of the Oceans 2011, Santander, Spain, June 6-9, 2011*.
- [11] ZHOU G J, ZHOU B. Forecasting method for shipborne helicopter deck-landing[C]. *Proceedings of the International conference on education, management, commerce and society, Shenyang, China, Jan. 29-31, 2015*.
- [12] GIRON-SIERRA J M, ESTEBAN S. The problem of quiescent period prediction for ships: A review[J]. *IFAC-Papers Online*, 2010, 43(20):307-312.
- [13] BREWCZYNSKI D, TORA G. Dynamic positioning system of helicopter pad on the ship[J]. *Journal of KONES Powertrain and Transport*, 2014, 21(4): 21-27.
- [14] BREWCZYNSKI D, TORA G. Dynamics model of stabilization mechanism for helicopter pad[J]. *Journal of KONES Powertrain and Transport*, 2016, 23(2): 61-68.
- [15] CAMPOS A, QUINTERO J, SALTAREN R, et al. An active helideck testbed for floating structures based on a stewart-gough platform[C]. *Proceedings of the 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Nice, France, Sept. 22-26, 2008*.
- [16] CHEN Y M, YE J W, Zhang X L, et al. Experimental study on a stabilized platform system for shipborne helicopter[J]. *Proceedings of the 21st International Offshore and Polar Engineering Conference, Hawaii, USA, June 19-24, 2011*.
- [17] DNV GL AS. *Offshore standard, DNVGL-OS-E401: Helicopter decks*. 2015.
- [18] 刘文吉,杜佳璐,李健,等. 基于超螺旋滑模的船载稳定平台镇定控制[J]. *系统工程与电子技术*, 2022, 44(5): 1662-1669.
- LIU W J, DU J L, LI J, et al. Stabilization control of shipborne stabilized platform based on super-twisting sliding mode[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2022, 44(5): 1662-1669. (in Chinese)
- [19] WEN Y, LI W K, ZHOU S L, et al. Robust sliding mode control with adaptive gravity estimation of shipborne Stewart platform for wave compensation[J]. *Applied ocean research*, 2024, 148: 104004.
- [20] CHEN W X, WANG S Y, LI J, et al. An ADRC-based triple-loop control strategy of ship-mounted Stewart platform for six-DOF wave compensation[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2023, 184: 105289.
- [21] HU X, GONG Q. Composite disturbance observer-based backstepping stabilization for 3-dof ship-borne platform with unknown disturbances[J]. *Ships and offshore structures*, 2024, 19(1): 45-55.
- [22] LIU W J, DU J L, LI J. Stabilization control of 3-DOF parallel vessel-borne platform with dynamic uncertainties and unknown disturbances[J]. *Applied Ocean Research*, 2022, 126: 103271.
- [23] LI J, DU J L, CHEN C L P. Command-filtered robust adaptive NN control with the prescribed performance for the 3-D trajectory tracking of underactuated AUVs[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2022, 33(11): 6545-6557.
- [24] LI J, DU J L. Predefined-time tracking control of a class of nonlinear systems via a novel C^∞ performance function[J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2024, 34(5): 3586-3601.
- [25] KRSTIC M, KANELAKOPOULOS I, KOKOTOVIC P V. *Nonlinear and adaptive control design*[M]. John Wiley & Sons Inc., New York, 1995.
- [26] NIKIFOROV V O. Nonlinear servocompensation of unknown external disturbances[J]. *Automatica*, 2001, 37(10): 1647-1653.
- [27] China's New Military Weapons, 2020. <https://www.china-arms.com/2020/12/ar500b-unmanned-helicopter-first-flight/> (accessed 9 September, 2022).
- [28] STANISŁAWSKI J. A simulation model for computing the loads generated at landing site during helicopter take-off or landing operation[J]. *IEEE Transactions on Aerospace Research*, 2019, 2(255): 65-81.