

基于动态事件触发的动力定位船舶 自适应反步滑模控制

高迪驹*, 白祖超, 刘志全

(上海海事大学 航运技术与控制工程交通运输行业重点实验室, 上海 201306)

摘要:针对动力定位船舶(DPV)在模型参数不确定和未知时变环境干扰下定位精度低、抗干扰性能差以及执行器磨损等问题,提出了一种基于动态事件触发机制(DETM)的自适应反步滑模控制(ABSMC)方法。首先,将滑模控制(SMC)与反步技术相结合,保证了系统对不确定性和干扰的鲁棒性。同时,采用自适应律对未知不确定性项进行估计。基于此,设计了一种自适应反步滑模控制器。最后,设计一种动态事件触发机制,以降低执行器更新频率,从而减少不必要的磨损。为了验证所提出控制方法的有效性和稳定性,采用Lyapunov稳定性理论方法证明系统所有信号一致最终有界,且可有效避免Zeno现象。仿真结果进一步验证了所用控制方法在DPV控制系统中的优越性能和广泛应用前景。

关键词:船舶工程;反步滑模控制;动态事件触发;动力定位船舶;Lyapunov稳定性

中图分类号:U664

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.1000-4653.2026.02.016

Dynamic positioning ship adaptive backstepping sliding mode control based on dynamic event-triggered

Gao Diju*, Bai Zuchao, Liu Zhiquan

(Key Laboratory of Transport Industry of Marine Technology and Control Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: In order to solve the problems of low positioning accuracy, poor anti-interference performance and actuator wear due to the uncertainty of model parameters and unknown time-varying environmental interference in the control of Dynamic Positioning Vessel (DPV), an adaptive backstepping sliding mode control method based on a dynamic event triggering mechanism was proposed. Firstly, sliding mode control is combined with backstepping technology to ensure the robustness of the system to uncertainty and interference. At the same time, the adaptive law is used to estimate the unknown uncertainty term. Based on this, an adaptive backstepping sliding mode control controller is designed. Finally, a dynamic event-triggered mechanism is designed to reduce the frequency of actuator update, thereby reducing unnecessary wear and tear. In order to verify the effectiveness and stability of the proposed control method, the Lyapunov stability theory method is used to prove that all signals in the system are uniformly and ultimately bounded, and Zeno phenomenon can be effectively avoided. The simulation results further verify the superior performance and wide application prospect of the proposed control method in DPV control system.

Key words: naval architecture; backstepping sliding mode control; dynamic event-triggered; dynamic positioning vessel; Lyapunov stability

收稿日期:2025-01-24

基金项目:国家自然科学基金(52001197)资助

作者简介:高迪驹(1978—),男,高级工程师,博士,研究方向为船舶新能源技术、船舶自动控制等。*通信作者:djgao@shmtu.edu.cn

引用格式:高迪驹,白祖超,刘志全.基于动态事件触发的动力定位船舶自适应反步滑模控制[J].中国航海,2026,49(2):135-143.

Gao D J, Bai Z C, Liu Z Q, et al. Dynamic positioning ship adaptive backstepping sliding mode control based on dynamic event-triggered[J]. Navigation of China, 2026, 49(2): 135-143. (in Chinese)

随着海洋资源勘探开发加速,对船舶自动控制技术要求不断提高,更先进的动力定位船舶(Dynamic Positioning Vessel, DPV)控制技术受到广泛关注。其在浮式生产卸载、钻井平台、管道铺设和风电安装等海洋工程领域具有关键作用。然而,复杂多变的海况、系统模型的动态不确定性以及执行器频繁切换导致的磨损等问题,给动力定位(Dynamic Positioning, DP)系统的设计和控制带来了巨大的挑战^[1]。因此,研究执行器磨损和系统模型动态不确定的 DP 问题具有现实应用意义和价值^[2]。

为了应对上述挑战,近年来自适应控制、滑模控制(Sliding mode control, SMC)和事件触发控制等先进控制方法在 DP 系统中的应用逐渐增多。反步法是一种在高阶系统跟踪控制中最基础且广受欢迎的技术。其核心思想是通过递归过程逐步执行控制行为,将多个状态变量视为“虚拟控制量”,并为其依次设计控制律。反步法技术已被广泛应用于水面舰艇的跟踪控制领域,并涌现出许多优秀的研究成果^[3]。自适应控制因其在不确定系统中的良好适应能力,能够在模型参数动态变化的情况下,通过在线调整控制参数来提高系统的鲁棒性,成为处理系统不确定性的有效工具^[4]。滑模控制方法由于其对模型不敏感、快速收敛和对干扰的鲁棒性而在各种实际工程系统中得到了广泛的应用^[5]。

目前,许多研究结果通常假设模型的参数是已知的。然而,由于参数测量误差和海洋中的时变环境扰动,船舶系统模型的参数不可避免地会发生变化,因此需要采用相应的方法来解决这一问题。文献[6]设计了自适应神经网络积分滑模控制方法,该方法可以在未知动态参数存在时,保证较高的跟踪性能。文献[7]结合自适应神经网络方法,实现了未知非线性动力学下水面舰船在有限工作空间内的高精度跟踪控制。文献[8]提出了一种基于模型预测控制的 DPV 控制方法,通过优化控制策略,提高了船舶在复杂环境下的定位精度和稳定性。文献[9]针对船舶动力定位模拟器控制仿真系统需求,考虑海洋环境扰动及船舶推力限制,提出含积分器的模型预测控制算法,使船舶在约束下克服扰动到达期望位置。然而,以上研究并没有兼具收敛速度和鲁棒性的优点,因此对于提高船舶控制精度和鲁棒性的能力有限。

此外,由于控制信号通常是基于时间触发的方式进行连续更新,在这种触发机制下,为保证 DPV 的稳定性和跟踪精度,采样周期一般设置的很小。在这种控制信号更新模式下,控制器的频繁更新可

能导致执行器过度运转,从而引发不必要的磨损。为解决这一问题,在事件触发机制下,仅当预定义的事件为真时,才会触发控制器更新^[10]。文献[11]针对受内外不确定性、输入饱和和制动器故障影响的欠驱动无人船的控制问题,提出了一种事件触发自适应 PID 容错控制方案,且为便于实现基于 PID 的设计框架,将由饱和和约束引起的非光滑非线性用光滑饱和模型表示,从而降低其对控制器设计的影响。文献[12]针对未知控制方向下执行器失效情况,提出了一种基于静态事件触发的自适应输出反馈跟踪控制方法。值得注意的是,由于系统趋于稳定时,阈值会越来越小,导致事件触发会越来越频繁,从而导致不必要的资源浪费。因此,开发更灵活的事件触发机制,以进一步降低控制器信号更新的频率。除此之外,还需要避免事件触发控制的 Zeno 现象,否则会导致系统不稳定甚至失去控制效果。

综上所述,在复杂多变海况条件下,DPV 控制系统中存在系统模型的动态不确定性、误差控制效果不佳以及执行器频繁切换导致的磨损等问题,这些问题将导致船舶可能偏离期望轨迹甚至发生碰撞。为此,本文设计一种基于动态事件触发机制(Dynamic Event Triggering Mechanism, DETM)的自适应反步滑模控制方法(Adaptive Backstepping Sliding Mode Control, ABSMC)。首先,该方法针对模型不确定性、时变环境扰动对 DPV 跟踪性能的影响,提出一种自适应反步滑模控制方法,通过对未知项进行实时估计和补偿,提高系统鲁棒性以及跟踪性能;其次,提出一种动态事件触发机制,相比于传统的静态事件触发和时间触发,能显著降低执行器的磨损程度;最后,设计一种扩展状态观测器观测环境扰动。

1 模型与预备知识

由于 DPV 一般只在低速条件下航行,故只考虑三自由度,即纵移、横移、艏摇。其运动学和动力学模型如下^[13]:

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{R}(\boldsymbol{\psi})\boldsymbol{\nu} \quad (1)$$

$$\mathbf{M}\dot{\boldsymbol{\nu}} + \mathbf{D}(\boldsymbol{\nu})\boldsymbol{\nu} = \boldsymbol{\tau}_c + \mathbf{d}(t) \quad (2)$$

式(1)和(2)中, $\boldsymbol{\eta} = [x, y, \psi]^T$ 表示船舶纵移 x 、横移位置 y 和艏向角 $\psi, \psi \in [0, 2\pi]$ 。 $\boldsymbol{\nu} = [u, v, r]^T$ 表示船舶纵移速度 u 、横移速度 v 和艏摇角速度 r 。 $\boldsymbol{\tau}_c = [\tau_x, \tau_y, \tau_\psi]^T$ 分别为纵向力、横向力和艏向控制力矩。 $\mathbf{d}(t) = [d_x, d_y, d_\psi]^T$ 表示为风、浪、流对船舶造成的扰动力或力矩。 \mathbf{M} 和 \mathbf{D} 分别表示船舶的质量矩阵和阻尼矩阵; $\mathbf{R}(\boldsymbol{\psi})$ 为旋转矩阵,且对于任何艏

摇角 ψ 都满足 $\mathbf{R}^{-1}(\psi) = \mathbf{R}^T(\psi)$ 。

$$\mathbf{R}(\psi) = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 \\ 0 & m_{22} & m_{23} \\ 0 & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{D}(\boldsymbol{\nu}) = \begin{bmatrix} d_{11} & 0 & 0 \\ 0 & d_{22} & d_{23} \\ 0 & d_{32} & d_{33} \end{bmatrix} \quad (5)$$

假设 1 时变环境扰动 \mathbf{d} 是有界且连续的,且导数有界并且满足不等式 $|\dot{\mathbf{d}}| \leq \mathbf{d}_{\max}$, \mathbf{d}_{\max} 为正常数。

假设 2 不确定项 \mathbf{F} 变化缓慢,则有 $\dot{\mathbf{F}} = 0$ 。

备注 1 由于 DPV 执行的任务都是低速运动,因此系统的科里奥/利向心力可以忽略。同时,横摇角和俯仰角与水面低速作业无关。因此,将六自由度的运动学和动力学转换为三自由度的运动学和动力学,如式(1),这是合理的。

备注 2 为便于后续表达, $\mathbf{C}(\boldsymbol{\nu}), \mathbf{D}(\boldsymbol{\nu}), \mathbf{R}(\psi)$ 记为 $\mathbf{C}, \mathbf{D}, \mathbf{R}$ 。

2 控制系统设计及稳定性分析

为满足系统在模型参数不确定、未知时变环境干扰等条件下的稳定性和控制性能的要求,提出一种结合自适应控制技术、反步控制理论、滑模控制理论、动态事件触发机制的 DPV 控制方法。图 1 为本文控制方法的框架。

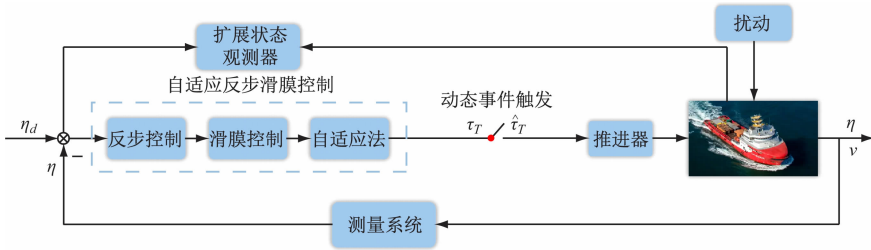


图 1 控制方法框架

Fig. 1 Framework of control method

首先,在反步法的框架上,结合滑模技术,设计自适应反步滑模控制律;然后,利用自适应律估计船舶系统中未知不确定性项的界,从而增强系统的鲁棒性;最后,在控制器到执行器通道设计动态事件触发机制,得到新的控制器输出,通过减少全回转推进器的更新频率,降低其不必要的磨损。全回转推进器根据信号产生推力和力矩驱动船舶,使船舶实际状态趋近期望状态,同时应对外部扰动,形成一个闭环控制系统,确保船舶稳定运行。

2.1 扩张状态观测器设计

利用扩张状态观测器来估计由风、浪、流对船舶造成的扰动,扩张状态观测器定义为

$$\begin{cases} \dot{\hat{\boldsymbol{\eta}}} = -\mathbf{K}_{n1}\tilde{\boldsymbol{\eta}} + \mathbf{R} \cdot \hat{\boldsymbol{\nu}} \\ \dot{\hat{\boldsymbol{\nu}}} = -\mathbf{K}_{n2}\mathbf{R}^T\tilde{\boldsymbol{\eta}} + \hat{\mathbf{d}} + \mathbf{M}^{-1}\boldsymbol{\tau} \\ \dot{\hat{\mathbf{d}}} = -\mathbf{K}_{n3}\mathbf{R}^T\tilde{\boldsymbol{\eta}} \\ \tilde{\boldsymbol{\eta}} = \hat{\boldsymbol{\eta}} - \boldsymbol{\eta} \\ \hat{\boldsymbol{\eta}} = [\hat{x}, \hat{y}, \hat{\psi}]^T \\ \hat{\boldsymbol{\nu}} = [\hat{u}, \hat{v}, \hat{r}]^T \\ \hat{\mathbf{d}} = [\hat{d}_x, \hat{d}_y, \hat{d}_\psi]^T \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中: $\hat{x}, \hat{y}, \hat{\psi}, \hat{u}, \hat{v}, \hat{r}, \hat{d}_x, \hat{d}_y$ 和 \hat{d}_ψ 分别为 $x, y, \psi,$

u, v, r, d_x, d_y 和 d_ψ 的估计值; $\mathbf{K}_{n1}, \mathbf{K}_{n2}$ 和 \mathbf{K}_{n3} 均为增益矩阵且属于对角矩阵。式(5)中的所有向量均为实数。观测器的稳定性证明见文献[14]。

2.2 自适应反步滑模控制器设计

反步法在控制系统的设计中应用广泛。本文在反步法的框架下,引入滑模控制和自适应控制,以提高系统的鲁棒性和应对系统模型参数不确定性的能力。由于参数的不确定性,式(2)可以改写为:

$$\dot{\boldsymbol{\nu}} = (-\mathbf{M}^{-1}\mathbf{D} + \Delta\mathbf{A})\boldsymbol{\nu} + (\mathbf{M}^{-1} + \Delta\mathbf{B})\boldsymbol{\tau}_T + (\mathbf{M}^{-1} + \Delta\mathbf{C})\mathbf{d} = -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{D}\boldsymbol{\nu} + \mathbf{M}^{-1}\boldsymbol{\tau}_T + \mathbf{F} \quad (7)$$

式(7)中, $\mathbf{F} = \Delta\mathbf{A}\boldsymbol{\nu} + \Delta\mathbf{B}\boldsymbol{\tau}_T + (\mathbf{M}^{-1} + \Delta\mathbf{C})\hat{\mathbf{d}}$ 表示实际系统中总的不确定项。

位置误差为:

$$\mathbf{z}_1 = \boldsymbol{\eta} - \boldsymbol{\eta}_d \quad (8)$$

根据式(1),且期望位置 $\boldsymbol{\eta}_d = [x_d, y_d, \psi_d]$ 为常数,可得:

$$\dot{\mathbf{z}}_1 = \dot{\boldsymbol{\eta}} - \dot{\boldsymbol{\eta}}_d = \mathbf{R}\boldsymbol{\nu} \quad (9)$$

定义稳定项:

$$\mathbf{H} = c_1\mathbf{z}_1 \quad (10)$$

式(10)中, c_1 为正的常数。定义误差项:

$$\mathbf{z}_2 = \dot{\mathbf{z}}_1 + \mathbf{H} = \mathbf{R}\boldsymbol{\nu} + \mathbf{H} \quad (11)$$

定义 Lyapunov 函数:

$$V_1 = \frac{1}{2}z_1^2 \quad (12)$$

对式(12)求导得

$$\dot{V}_1 = z_1 \dot{z}_1 = z_1(z_2 - H) = z_1 z_2 - c_1 z_1^2 \quad (13)$$

对式(11)求导,得:

$$\dot{z}_2 = \dot{R}\nu + R(-M^{-1}D\nu + M^{-1}\tau_T + F) + \dot{H} \quad (14)$$

式(14)中, \bar{F} 表示未知项 F 的上界。

定义 Lyapunov 函数:

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2}s_1^2 \quad (15)$$

式(15)中, s_1 为切换函数,定义为

$$s_1 = \lambda z_1 + z_2 \quad (16)$$

式(16)中, λ 为正常数。因此,

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 + s_1 \dot{s}_1 = z_1 z_2 - cz_1^2 + s_1(\lambda \dot{z}_1 + \dot{z}_2) = z_1 z_2 - cz_1^2 + s_1(\lambda(z_2 - c_1 z_1) + \dot{z}_2) \quad (17)$$

结合式(14),故所设计的反步滑模控制律为

$$\tau_T = MR^{-1}[-\lambda R\nu + RM^{-1}D\nu - R\bar{F}\text{sgn}(s_1) - \dot{R}\nu - \dot{H} - h(s_1 + \xi\text{sgn}(s_1))] \quad (18)$$

式(18)中, h 为正常数。

将式(18)带入式(15),得

$$\dot{V}_2 = z_1 z_2 - c_1 z_1^2 - hs_1^2 - h\xi|s_1| + Fs_1 - \bar{F}|s_1| \leq z_1 z_2 - c_1 z_1^2 - hs_1^2 - h\xi|s_1| + |s_1|(|F| - \bar{F}) \leq z_1 z_2 - c_1 z_1^2 - hs_1^2 - h\xi|s_1| \quad (19)$$

又因为

$$z^T Q z = [z_1 \quad z_2] \begin{bmatrix} c_1 + h\lambda^2 & h\lambda - \frac{1}{2} \\ h\lambda - \frac{1}{2} & h \end{bmatrix} [z_1 \quad z_2]^T =$$

$$c_1 z_1^2 + h\lambda^2 z_1^2 + 2h\lambda z_1 z_2 - z_1 z_2 + h z_2^2 = c_1 z_1^2 - z_1 z_2 + h s_1^2 \quad (20)$$

故式(19)可为

$$\bar{V}_2 \leq -z^T Q z - h\xi|s_1| \quad (21)$$

又因为

$$|Q| = h(c_1 + h\lambda^2) - (h\lambda - \frac{1}{2})^2 = h(c_1 + \lambda) - \frac{1}{4} \quad (22)$$

通过选择合适的 h, c_1, λ , 可以使得 $|Q| > 0$, 从而保证 Q 为正定矩阵, 故

$$\dot{V}_2 \leq 0 \quad (23)$$

由于不确定项的上界难以表示, 因此引入自适应控制律估计未知项。自适应律为

$$\dot{\hat{F}} = \rho s_1 \quad (24)$$

式(24)中, ρ 是一个正常数, 它决定了估计值的收敛速度。

证明: 为确定 \hat{F} 并证明稳定性, 考虑如下的 Lyapunov 候选函数

$$V_3 = V_2 + \frac{1}{2\rho}\tilde{F}^2 \quad (25)$$

$$\tilde{F} = F - \hat{F} \quad (26)$$

对式(26)求导得

$$\dot{\tilde{F}} = \dot{F} - \dot{\hat{F}} = -\dot{\hat{F}} \quad (27)$$

结合假设 1 与式(27), 对式(25)求导

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 = \dot{V}_2 - \frac{1}{\rho}\tilde{F}\dot{\hat{F}} = z_1 z_2 - cz_1^2 + s_1[\lambda R(\psi)\nu + R(M^{-1}D\nu - M^{-1}\tau_T + F) + \dot{R}\nu + \dot{H}] - \frac{1}{\rho}\tilde{F}\dot{\hat{F}} = z_1 z_2 - cz_1^2 + s_1[\lambda R\nu + R(M^{-1}D\nu - M^{-1}\tau_T + \hat{F}) + \dot{R}\nu + \dot{H}] - \frac{1}{\rho}\tilde{F}(\dot{F} - \rho s_1) \end{aligned} \quad (28)$$

故所设计的自适应反步滑模控制律为

$$\tau_T = MR^{-1}[-\lambda R\nu + RM^{-1}D\nu - R\hat{F} - \dot{R}\nu - \dot{H} - h(s_1 + \xi\text{sgn}(s_1))] \quad (29)$$

将 τ_T 带入式(28), 得

$$\bar{V}_3 = z_1 z_2 - cz_1^2 - hs_1^2 - h\xi|s_1| \quad (30)$$

结合式(19)可得

$$\bar{V}_3 = -z^T Q z - h\xi|s_1| \leq 0 \quad (31)$$

因此证明了 DPV 控制系统的状态变量一致最终有界。

2.3 动态事件触发机制设计

自适应反步滑模控制方法虽保证了系统的控制性能, 但忽略了周期性高频更新执行机构的时间触发控制方案可能会导致设备的过度磨损甚至发生故障的问题, 因此, 传统的时间触发机制在动力定位船舶智能化发展的趋势下需要进一步地改进。针对这一问题, 本文引入动态事件触发机制, 通过在两次触发时刻内参数 $\tau_T(t)$ 界内变化保持控制信号不变, 从而降低执行器磨损。动态事件触发机制如下所示:

$$\tau_T(t) = \hat{\tau}_T(t_k), \forall t \in [t_k, t_{k+1}), \quad k \in N \quad (32)$$

$$t_{k+1} = \inf\{t \in \partial_0^+ \mid \gamma + a(b - \|\tau_T(t) - \hat{\tau}_T(t_k)\|) \leq 0\} \quad (33)$$

式(33)中, $a > 0$ 为设计参数, $b > 0$ 为阈值, $\kappa \in \partial^+$ 为设计参数, 表示内部动态变量 γ 的收敛速率; $\hat{\tau}_T(t)$ 为当前控制律更新值, $\tau_T(t)$ 为上次触发时刻的控制输入。

为了获得比静态事件触发更大的平均间执行时间,在动态事件触发中引入内部动态变量 γ 作为 $b - \|\tau_T(t) - \hat{\tau}_T(t_k)\|$ 的滤波值,由以下动态滤波器产生:

$$\dot{\gamma} = -\kappa\gamma + (b - \|\tau_T(t) - \hat{\tau}_T(t_k)\|) \quad (34)$$

具体地, γ 通过式(33)跟踪累积当前误差与阈值 b 之差。当控制误差小于阈值 ($\|\tau_T(t) - \hat{\tau}_T(t_k)\| < b$) 时, $(b - \|\tau_T(t) - \hat{\tau}_T(t_k)\|) > 0$, 此时 γ 增加; 当误差增大超过阈值时, γ 减小。这意味着在误差一直低于阈值的情况下, γ 会逐渐变大, 使得触发条件中 $\gamma + a(b - \|\tau_T(t) - \hat{\tau}_T(t_k)\|)$ 保持, 从而抑制重复触发; 只有当当前控制律更新值 $\hat{\tau}_T(t)$ 与上次触发时刻的控制输入 $\tau_T(t)$ 差距接近阈值 b 时, 或 γ 本身衰减足够(由参数 κ 控制), 触发条件才成立。最终一旦触发事件发生, 系统将把最新的 $\hat{\tau}_T(t)$ 传递给执行器, 即实际控制输入得到更新, $\|\tau_T(t) - \hat{\tau}_T(t_k)\|$ 归零, γ 则根据式(34)开始新的积分过程。

由于动态事件触发实现了实际控制信号在以下条件下保持常数

$$u_c(t) - \hat{u}_c(t) \leq b + \frac{1}{a}\gamma \quad (35)$$

由式(35)可得, a 越大时, $\frac{1}{a}\gamma$ 越小, 下一次执行时间更短。这意味着如果 a 变为正无穷, 则下界趋向于静态事件触发获得的阈值 b 。因此可以得出, 动态事件触发中参数 a 的值越小, 下一次执行时间的值就越大于静态事件触发。

2.4 避免 Zeno 现象分析

Zeno 现象是指在事件触发控制系统中, 由于触发条件的设定, 系统可能在有限的时间内触发无限次控制更新, 导致系统的状态和控制信号在时间上出现“无穷次”跳跃的行为。因此, 为确保系统的稳定性和资源的有效利用, 避免 Zeno 现象的发生是必要的。

针对 DPV 控制系统式(1)和式(2), 本文设计了动态事件触发机制式(32)和式(33), 并需进一步证明所提出的事件触发控制律能够有效避免 Zeno 现象。

定义误差向量

$$\mathbf{e}_1(t) = \hat{\tau}_T - \tau_T \quad (36)$$

对式(36)求导可得

$$\frac{d\|\mathbf{e}_1\|}{dt} = \frac{d\|\hat{\tau}_T - \tau_T\|}{dt} \leq \frac{d\|\hat{\tau}_T\|}{dt} + \frac{d\|\tau_T\|}{dt} \leq \|\dot{\tau}_T\| \quad (37)$$

根据式(37), 显然 τ_T 是可微且有界的, 因此存在一个正常数 $\tilde{\omega}$ 满足 $\|\tau_T\| \leq \tilde{\omega}$ 。因此, 可以得到 $\tau_T(t)$ 导

数的有界性, 从而避免了 Zeno 现象^[15]。

3 仿真与分析

通过仿真将说明本文提出的基于动态事件触发控制方法的有效性。本文以一艘微缩比为 30 的 Cybership III^[16-17] 船舶模型作为研究对象, 其参数见表 1。仿真时间 300 s, 模拟步长设置为 0.1 s。期望位置为 (10, 10, 30), 初始状态设置为 $\boldsymbol{\eta} = [0, 0, 0]$, $\boldsymbol{\nu} = [0, 0, 0]$, 扰动 $\mathbf{d} = [300\sin 0.04t\cos 0.03t, 200\cos 0.02t, 50\cos 0.02t\cos 0.04t]$ 。为验证所提出控制方法的有效性, 选取常用的 SMC 和 PID 控制方法对比; 同时, 为验证动态事件触发机制的有效性, 选取静态事件触发和时间触发作对比, 其中, 静态事件触发机制 (Static Event Triggering Mechanism, SETM) 阈值为 b_1 , 开展以下模拟对比试验。系统所用控制方法的参数, 见表 2。

表 1 CyberShip III 的主要参数

参数	1:30 模型	实船
长度/m	1.97	59
宽度/m	0.44	13.2
吃水深度/m	0.16	4.8
质量/kg	89	2.4×10^6

表 2 控制系统参数

控制方法	参数
ABSMC	$c_1 = 0.001, \xi = 0.01, \rho = 20$ $h = 0.95, \lambda = 0.02$
SMC	$c_2 = \text{diag}(1.5, 1.5, 1.5)$ $\xi_2 = [1, 10, 2]$
PID	$K_p = \text{diag}(0.536, 30, 0.28)$ $K_i = \text{diag}(1, 1, 1)$ $K_d = \text{diag}(0.5, 0.5, 0.5)$
DETM	$a = [500, 500, 500]$ $b = [1.5, 1.5, 1.5]$ $\kappa = [0.1, 0.1, 0.1]$
SETM	$b_1 = 0.1$
ESO (扩张状态观测器, Extended State Observer)	$K_{n1} = K_{n2} = K_{n3} \text{diag}(16, 16, 16)$

1) SMC 控制律^[18]: $\tau_T = D\nu - MR^{-1}(\dot{R}\nu - c_2R\nu - \xi_2 \text{sgn}(s_2))$, 其中 $s_2 = c_2e + \dot{e}$

2)PID 控制律^[19]: $\tau_2 = K_p R^T (\eta - \eta_d) + K_i R^T (\frac{1}{s_3}(\eta - \eta_d)) + K_d v$, 其中 $\frac{1}{s_3}$ 为积分器。

图 2 展示了 DPV 在时变干扰下, 所提出的控制方法与 SMC 和 PID 的航行轨迹。图 3 ~ 图 5 展示了三种控制方法下, 船舶在三自由度的收敛性能对比。图 6 ~ 图 8 展示了三种控制方法下, 船舶在三自由度的跟踪误差变化比。图 9 展示了所提出算法下, 船舶航行过程中, 横移、纵移、艏摇方向上的力和力矩变化情况。图 10 展示了扰动观测结果。图 11、图 12 分别展示了 SETM 和 DETM 下的触发次数。

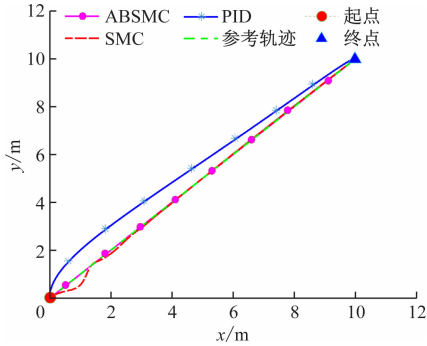


图 2 不同控制方法控制效果

Fig. 2 Control effect of different control methods

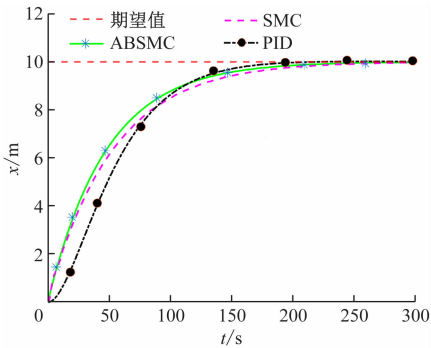


图 3 控制方法比较(横荡位置)

Fig. 3 Comparison of control methods (Sway)

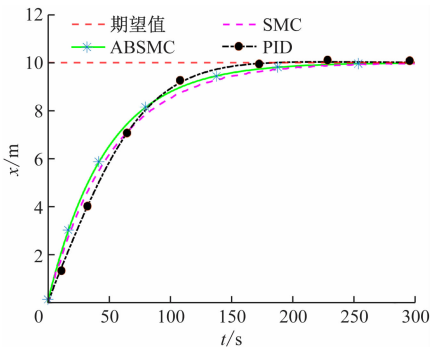


图 4 控制方法比较(纵荡位置)

Fig. 4 Comparison of control methods (Surge)

图 2 为船舶 DP 系统三自由度状态向量对比图, 可以看出在相同外界干扰的情况下, 相比于 SMC

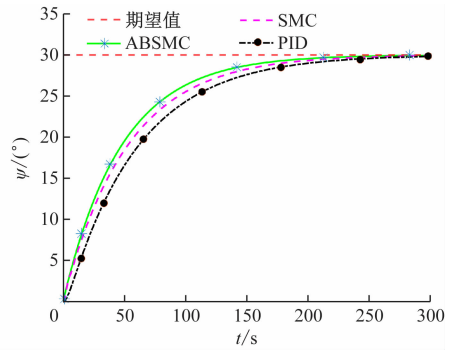


图 5 控制方法比较(艏向)

Fig. 5 Comparison of control methods (Heading)

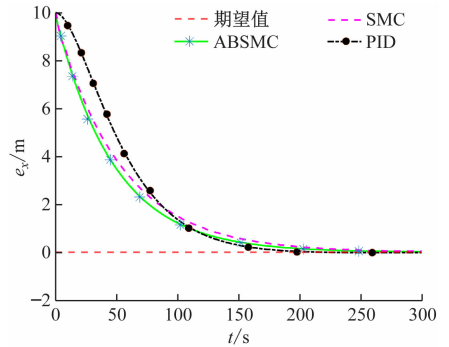


图 6 横荡跟踪误差 e_x

Fig. 6 Swing tracking error e_x

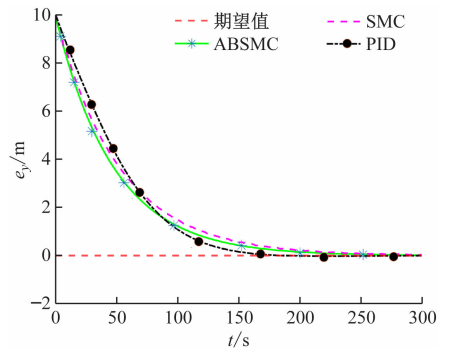


图 7 纵荡跟踪误差 e_y

Fig. 7 Surge tracking error e_y

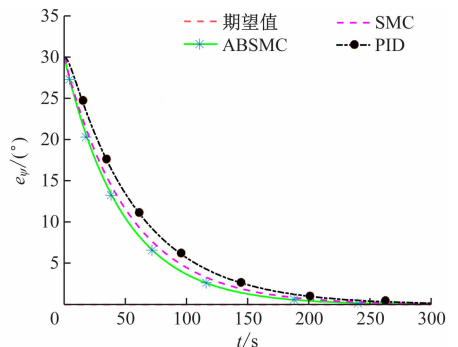


图 8 艏向跟踪误差 e_ψ

Fig. 8 Heading tracking error e_ψ

和 PID, 本文所提出的 ABSMC 初始阶段即可跟踪上期望轨迹且一直保持着较好的效果。在初始阶段,

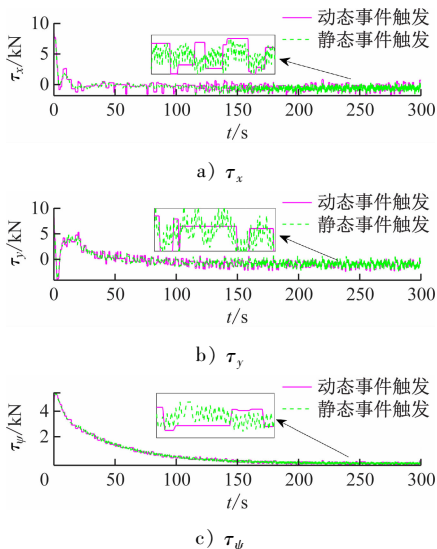


图9 船舶力与力矩
Fig. 9 Ship torque

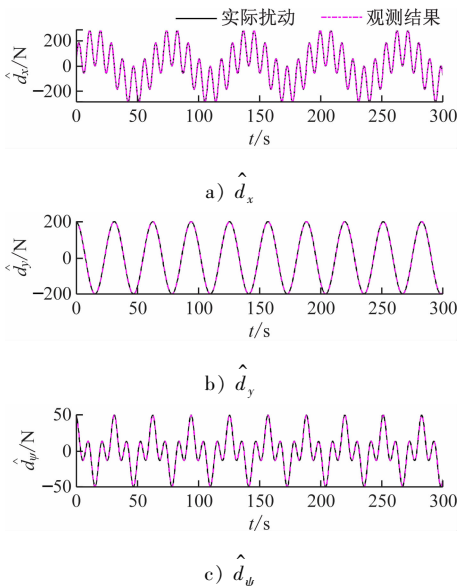


图10 扰动观测结果

Fig. 10 Results of disturbance observation

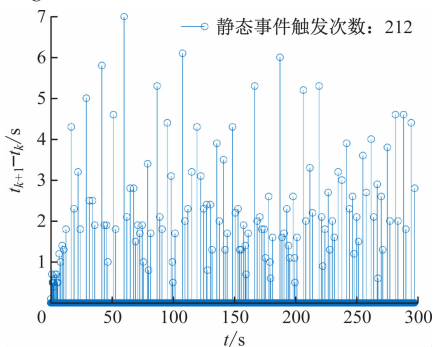


图11 静态事件触发机制下的触发次数
Fig. 11 Trigger times of SETM

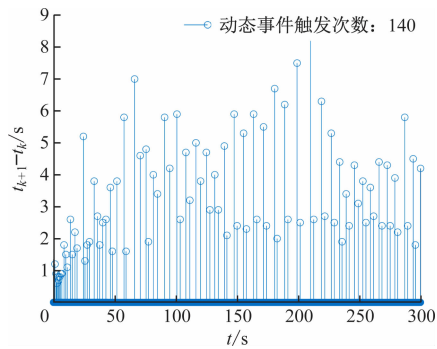


图12 动态事件触发机制下的触发次数
Fig. 12 Trigger times of DETM

度状态向量对比,在经过一段时间后,本文所研究三种控制方法均可使模型船稳定在期望位置。初始阶段的纵荡和横荡方向,在仿真时间的前120 s, ABSMC 具有最快的收敛速度,SMC 的收敛速度仅次于 ABSMC。此后模型船快速调整,逐渐趋于稳定,缓慢接近期望状态,此时 PID 在后期的收敛速度具有部分优势。在艏摇方向,ABSMC 的优势最为明显,其收敛速度始终最快,其次为 SMC 和 PID。

为进一步验证所提控制方法的性能,引入了积分绝对误差 (IAE) 和时间加权绝对误差积分 (ITAE) 两个性能指标来量化三种控制方法的跟踪性能。IAE 表示为 E_{IA_i} 和 ITAE 表示 E_{ITAE_i} 具体定义如下

$$E_{IA_i} = \int_0^t |e_i| dt \quad (37)$$

$$E_{ITAE_i} = \int_0^t t |e_i| dt, i = x, y, \psi \quad (38)$$

IAE 是控制系统性能评估的一种指标,它表示系统误差的绝对值随时间的累计和,衡量系统在一段时间内的总误差。ITAE 是一种时间加权绝对误差积分,常用于衡量控制系统性能,特别是在动态系统的误差评估中。ITAE 指标的主要作用是评估系统响应的误差在时间上的分布,以及误差的积累。IAE 和 ITAE 指标可用于评价所提出的控制器跟踪误差,结果如表 3 所示。图 6 ~ 图 8 展示了三自由度状态向量误差对比,结合图 3 ~ 图 5 的控制效果,利用 IAE 和 ITAE 两个性能指标来量化三种控制方法的跟踪性能。在三种控制方法中,本文设计的 ABSMC 在三自由度上的 IAE 和 ITAE 均最小,其次为 SMC 与 PID,从而验证了所提出控制方法具有最高的跟踪精度。此外,在存在相同外界干扰的情况下,本文所提出的控制方法与另外两种算法相比,还具有较快的收敛速度。本文还计算了三种控制方法下 DPV 累计航行的距离,结果如表 4 所示,其结果分别为 14.372 4 m, 14.941 7 m 和 15.881 2 m,其中到

SMC 和 PID 控制方法具有一定程度的波动性。SMC 初始阶段具有较小的波动,但在 $x = 3$ m 附近开始跟踪上期望轨迹,PID 的效果较差,且相对期望轨迹一直存在部分偏差。图 3 ~ 图 5 展示了三自由

表3 三种控制方法的 IAE 和 ITAE

Tab.3 Three control methods of IAE and ITAE

控制方法	E_{IA_x}/m	E_{IA_y}/m	$E_{IA_\psi}/(^{\circ})$	E_{ITAx}/m	E_{ITAy}/m	$E_{IT\psi}/(^{\circ})$
ABSMC	157.98	157.979	473.966	745 533.11	223 203.778 1	669 881.365 9
SMC	174.28	174.199	523.123	271 476.024 2	268 319.056 5	810 575.315 0
PID	190.52	164.965	609.514	239 684.382 7	195 835.558 2	103 1640.4077

达期望位置的直线距离为 14.142 1 m,进一步验证了所提控制方法的优越性,即能够在到达期望位置的过程中,航行最短里程,在能耗方面具有一定优势。

图9展示了所提出控制方法在 DETM 和 SETM 下,三自由度状态向量上的力矩变化情况,其中锯齿状波形为事件触发机制所带来的表现,值得注意的是在后期趋于稳定时,DETM 下的力矩相对 SETM 波动频率较低,表明其在降低执行器更新频率方面的优越性。图10展示了三自由度状态向量上的扰动观测结果,其平均误差分别为 0.18 N,0.42 N,0.02 N。图11和图12分别展示了不同事件触发机制下的触发次数,其中 SETM 的触发次数为 212 次,DETM 的触发次数为 140 次,相比于 SETM 降低了 34% 的触发次数,意味着执行器的更新次数降低了 34%,展示了 DETM 在实际应用中降低执行器磨损的优势。

表4 不同控制器下航行里程对比

Tab.4 Comparison of mileage under different controllers

单位:m

控制方法	轨迹里程
ABSMC	14.372 4
SMC	14.941 7
PID	15.881 2

4 结束语

为解决在复杂多变海况条件下,DPV 控制系统中存在系统模型的动态不确定性、控制效果不佳以及执行器频繁切换导致的磨损等问题,提出了一种基于动态事件触发机制的自适应反步滑模控制方法。先将反步法与滑模控制相结合,并引入自适应律设计了一种高性能控制器,增强系统的收敛性以及自适应能力。然后采用了 DETM,相比于 SETM 降低了 34% 的触发次数,验证了该方法在降低执行器磨损方面的可行性。最后,通过对比试验,证明了所提出 ABSMC 方法相比于 SMC 和 PID,在三自由度状态变量的累计误差减少了 8.2% 和 18.1%,在

总的航行里程方面,减少了 3.8% 和 9.5%。综上所述,本文提出的控制策略为 DPV 的控制提供了一种高效的解决方案。

参 考 文 献

- [1] Li J, Xiang X, Dong D, et al. Error-Constrained Fixed-Time Dynamic Positioning of MSV With Saturated Event-Triggered Inputs [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2024, 25(11): 17247-17259.
- [2] Wang H, Xie W, Wang P, et al. Prescribed performance control for dynamic positioning vessels with a dynamic event-triggered mechanism [J]. Ocean Engineering, 2023, 281: 114878.
- [3] Yu W Z, Xu H X, Feng H. Robust adaptive fault-tolerant control of dynamic positioning vessel with position reference system faults using backstepping design [J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2018, 28(2): 403-415.
- [4] 范锦宇,唐利钢,王磊,等. 执行器饱和情况下的动力定位船自适应轨迹跟踪控制[J]. 舰船科学技术, 2024,46(16):43-50.
Fan J Y, Tang L G, Wang L, et al. Adaptive trajectory tracking control of dynamic positioning ship with actuator saturation [J]. Ship Science and Technology, 2024,46(16):43-50. (in Chinese)
- [5] Hu C, Wu D, Liao Y, et al. Sliding mode control unified with the uncertainty and disturbance estimator for dynamically positioned vessels subjected to uncertainties and unknown disturbances [J]. Applied Ocean Research, 2021, 109: 102564.
- [6] 姚明启,张国庆,宋纯羽,等. 动力定位船舶鲁棒自适应异步自触发控制[J]. 哈尔滨工程大学学报,2024, 45(7):1376-1383.
Yao M Q, Zhang G Q, Song C Y, et al. Robust adaptive asynchronous self-triggered control of dynamic positioning ships [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2024,45(7):1376-1383. (in Chinese)
- [7] Dong S, Shen Z, Zhou L, et al. Event-triggered trajectory tracking control of marine surface vessels with time-varying output constraints using barrier functions [J]. International Journal of Control, Automation and

- Systems, 2023, 21(8): 2708-2717.
- [8] Zhang W, Wang Q, Du X, et al. Real-time NMPC for three-dimensional trajectory tracking control of AUV with disturbances [J]. Ocean Engineering, 2025, 319: 120267.
- [9] 钱小斌,尹勇,张秀凤,等. 模型预测控制在船舶动力定位模拟器中的应用[J]. 系统仿真学报, 2016, 28(10):2620-2625.
- Qian X B, Yin Y, Zhang X F, et al. Application of Model Prediction Control in Ship Dynamic Positioning Simulator [J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(10):2620-2625. (in Chinese)
- [10] Liu S, Zhang G, Guo G, et al. Adaptive output-feedback event-triggered formation control for underactuated ships with obstacle avoidance mechanism [J]. Ocean Engineering, 2024, 299: 117373.
- [11] Zhu G, Ma Y, Hu S. Event-triggered adaptive PID fault-tolerant control of underactuated ASVs under saturation constraint [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2023, 53(8): 4922-4933.
- [12] Zhang C H, Yang G H. Event-triggered adaptive output feedback control for a class of uncertain nonlinear systems with actuator failures[J]. IEEE transactions on cybernetics, 2018, 50(1): 201-210.
- [13] 王元慧,张潇月,王成龙. 船舶系泊动力定位控制技术综述[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2023, 44(2): 172-180.
- Wang Y H, Zhang X Y, Wang C L. A survey on ship position mooring control technology [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2023, 44(2): 172-180. (in Chinese)
- [14] Peng Z, Wang J. Output-feedback path-following control of autonomous underwater vehicles based on an extended state observer and projection neural networks[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2017, 48(4): 535-544.
- [15] Hu X, Gao X, Li T, et al. Dynamic event-triggered prescribed performance disturbance rejection fault-tolerant trajectory tracking for surface vehicles [J]. Ocean Engineering, 2024, 312: 119063.
- [16] Zhu W, Wang Y C, Gao D J, et al. Fault-Tolerant Control Strategy of Intelligent Ship Based on Model Predictive Control [J]. Ship Engineering, 2022, 44(11):98-104.
- [17] Mou J, Zhu Q, Liu Y, et al. Multi-objective optimal thrust allocation strategy for automatic berthing of surface ships using adaptive non-dominated sorting genetic algorithm III [J]. Ocean Engineering, 2024, 299: 117288.
- [18] 夏元清,付梦印,邓志红,等. 滑模控制和自抗扰控制的研究进展[J]. 控制理论与应用, 2013, 30(2): 137-147.
- Xia Y Q, Fu M Y, Deng Z H, et al. Recent developments in sliding mode control and active disturbance rejection control [J]. Control Theory and Applications, 2013, 30(2): 137-147. (in Chinese)
- [19] 朱昱雯,肖健梅,王锡淮. 基于改进 SHADE 算法的船舶电力系统推力分配[J]. 中国舰船研究, 2020, 15(4): 173-182.
- Zhu Y W, Xiao J M, Wang X H. Thrust distribution of marine power system based on improved SHADE algorithm[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2020, 15(4): 173-182. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 134 页)

- [14] 刘志华,翟朔,骆飞洋. 共翼型舵特性及其对潜艇潜浮运动影响研究[J]. 船舶力学, 2021, 25(6): 726-738.
- Liu Z H, Zhai S, Luo F Y. Study on the characteristics of conformal rudders and their influence on vertical plane maneuver of submarines [J]. Journal of Ship Mechanics, 2021, 25(6): 726-738. (in Chinese)
- [15] 叶金铭,王威,于安斌,等. 抗空化扭曲舵的设计及其水动力性能分析[J]. 上海交通大学学报, 2017, 51(3): 314-319.
- Ye J M, Wang W, Yu A B, et al. Design and Numerical Analysis of Hydrodynamic Performance for Anti-Cavitation Twisted Rudder[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2017, 51(3): 314-319. (in Chinese)
- [16] 郭海鹏. 基于 CFD 的双桨双舵船四自由度 MMG 模型建模及操纵性预报研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2019.
- Guo H P. Research on the CFD-based modeling of 4-DoF MMG model and maneuverability prediction for a twin-propeller twin-rudder ship [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2019. (in Chinese)
- [17] Guo H P, Zou Z J. CFD and system-based investigation on the turning maneuver of a twin-screw ship considering hull-engine-propeller interaction [J]. Ocean Engineering, 2022, 251: 110893.