

DOI: 10.3969/j.issn.2096-8248.2026.01.006

引用格式: 夏小明, 赵俊程, 杨天祥, 等. 基于模型补偿的水下机器人滑模轨迹跟踪控制[J]. 江苏海洋大学学报(自然科学版), 2026, 35(1): 46-53.

基于模型补偿的水下机器人滑模轨迹跟踪控制

夏小明, 赵俊程, 杨天祥, 葛亚飞

(江苏海洋大学 海洋工程学院, 江苏 连云港 222005)

摘要: 针对水下机器人 (remotely operated vehicle, ROV) 在强外扰与参数不确定情况下轨迹跟踪误差大、控制抖振明显的问题, 提出一种基于模型补偿的滑模控制方法。该方法构造位姿误差滑模面, 引入参考速度和参考加速度补偿未建模动态与外扰, 并利用李雅普诺夫稳定性定理证明闭环系统的所有信号都是有界的。最后, 所提方法在三自由度运动场景下实现了对直线与复杂弧形轨迹进行跟踪。仿真实验结果显示, 在外界干扰与参数不确定性等不利因素存在时, 所提方法能确保跟踪误差快速收敛, 且稳态误差逼近零附近的零域内; 相比常规滑模控制器, 抖振显著减弱, 鲁棒性提升。

关键词: 水下机器人; 模型补偿; 滑模控制; 轨迹跟踪

中图分类号: TP242.6

文献标志码: A

文章编号: 2096-8248(2026)01-0046-08

Sliding-mode trajectory tracking control of remotely operated vehicle via model compensation

XIA Xiaoming, ZHAO Juncheng, YANG Tianxiang, GE Yafe

(School of Ocean Engineering, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, China)

Abstract: To address the issues of large trajectory-tracking errors and severe control chattering of the remotely operated vehicle (ROV) under strong external disturbances and parameter uncertainties, this paper proposes a model-compensated sliding mode control method. This method constructs a pose error sliding surface, introduces reference velocity and reference acceleration to compensate for unmodeled dynamics and disturbances, and utilizes the Lyapunov stability theorem to prove that all signals in the closed-loop system are bounded. Finally, simulation results demonstrate that the proposed method enables effective tracking of both straight-line and complex arc trajectories in a three-degree-of-freedom motion scenario. Despite adverse factors such as external disturbances and model-parameter uncertainties, the proposed scheme maintains fast convergence and yields an almost zero steady-state error. Compared with conventional sliding mode controllers, the proposed approach exhibits significantly reduced chattering and enhanced robustness.

Key words: remotely operated vehicle; model compensation; sliding mode control; trajectory tracking

随着陆地资源的过度开采, 人们逐渐将目光转向资源更丰富的海洋。水下机器人 (remotely oper-

收稿日期: 2025-07-11; 修订日期: 2025-10-27

作者简介: 夏小明, 讲师, 博士, 研究方向为无人船、水下机器人编队控制, (E-mail) xi Xiaoming@jou.edu.cn。

通信作者: 赵俊程, 硕士研究生, 研究方向为水下机器人控制, (E-mail) Zhao_Jun_Cheng@126.com。

ated vehicle, ROV) 成为深海探索不可或缺的工具之一。ROV 具有水下环境勘探、水下目标搜索识别等功能。水下作业时, 跟踪预期的轨迹对于稳定可靠完成水下作业至关重要^[1-2]。ROV 作业环境复杂多变, 常受到海流的作用, 这直接影响 ROV 运动的稳定性^[3]。此外, 水下机器人的外形结构、自身运动状态的改变都会造成模型参数时变^[4]。因此, ROV 的抗扰动控制问题是一个重要的课题。

解决水下机器人模型参数时变和外部干扰问题的方法可分为主动方法和被动方法两种。主动方法通过引入观测器估计总体的未知扰动, 提前对系统进行补偿; 被动方法通过误差反馈来设计控制器, 提高系统的鲁棒性^[5]。黄博伦等^[6]设计了超螺旋二阶滑模控制器来实现作业型水下机器人的空间路径跟踪, 有效抑制了滑模抖振的现象。王宇梁等^[7]提出一种考虑状态约束以及执行器饱和的轨迹跟踪控制器, 引入二阶命令滤波器对反步法虚拟控制量的微分值进行估计, 并利用滤波误差补偿系统来解决执行器的饱和问题。鲁挺等^[8]设计了一种基于有限时间扩张状态观测器和预设性能变换的积分滑模控制器, 解决了集总非线性项未知及推进器饱和的水下机器人预设性能精准跟踪控制问题。Huang 等^[9]提出了一种双环滑模控制器, 以反正切函数作为新型切换项。Jiang 等^[10]设计了一种基于双曲正切滑模观测器的自适应容错控制方案, 将双曲正切滑模观测器与投影松弛技术相结合, 解决了水下打捞机器人在作业过程中遇到的外部不确定性和执行器故障的深度耦合问题。Shao 等^[11]提出了一种结合超螺旋算法、低通滤波器的自适应滑模控制方案, 引入自适应律实时估计未知扰动的上界, 使得扰动信息不需要先验, 缓解了过估计问题。

然而, 现有轨迹跟踪控制方法在抖振、收敛速度和抗扰性能等方面仍存在不足。水下机器人轨迹跟踪控制的核心问题在于, 在模型参数不确定和外部干扰存在的条件下实现高精度、快速的轨迹跟踪。本研究的目标是使跟踪误差渐进收敛并保持在尽可能小的范围内, 以满足系统的精度要求。基于上述分析, 针对模型不确定和外界干扰问题, 本文提出一种基于模型补偿的滑模控制器, 来提高轨迹跟踪响应精度, 抑制滑模抖动并加快误差收敛。首先, 通过位置误差和期望速度来构建参考速度, 通过速度误差和期望加速度来构建参考加速度; 其次, 选取基于位置误差和速度误差的滑模面, 设计参考

速度和参考加速度补偿模型的滑模控制器 (model compensation sliding mode controller, MCSMC); 最后, 采用李雅普诺夫直接法证明系统的稳定性, 使用仿真结果验证所提策略的有效性。将提出的 MCSMC 法进行了仿真试验对比, 验证了所提出的控制方法可以有效抑制滑模控制器的抖动, 加快了跟踪误差的收敛速度。

1 模型建立与问题描述

1.1 水下机器人建模

为了更好地描述 ROV 的位置速度以及姿态信息, 建立如图 1 所示的附体坐标系 ($O-xyz$) 和惯性坐标系 ($E-XYZ$) 来描述其本体的运动^[12]。附体坐标系的原点位于 ROV 本体的重心上, x 轴的正向是水下机器人的前进方向, y 轴的正向指向其右侧, z 轴的正向指向其正下方。惯性坐标系也常被称为大地坐标系, 常被用来描述水下机器人的运动任务以及导航位置, 该坐标系的 X, Y, Z 分别指向北 (North)、东 (East)、地心 (Down), 因此大地坐标系也被称为 NED-frame。

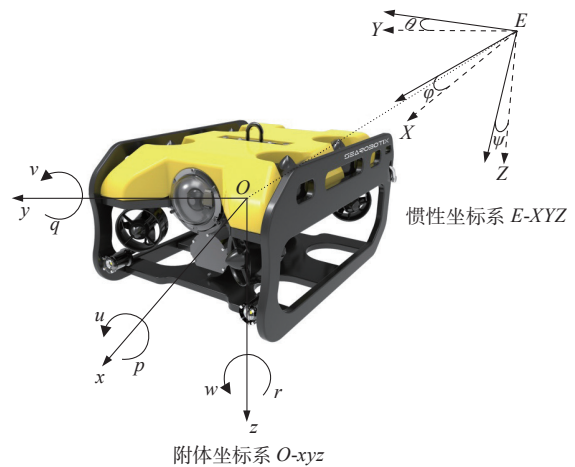


图 1 附体坐标系和惯性坐标系
Fig. 1 Body-fixed coordinate system and inertial coordinate system

水下机器人符号量示意如表 1 所示。

表 1 坐标系中的参量定义
Table 1 Definition of parameters in the coordinate system

参考系	位姿惯性参考系	速度体坐标系	力与力矩体坐标系
纵荡	x	u	F_X
横荡	y	v	F_Y
垂荡	z	w	F_Z
横滚	φ	p	M_K
俯仰	θ	q	M_M
偏航	ψ	r	M_N

为方便进行研究,在附体坐标系上使用牛顿定律和欧拉运动定律进行分析。在以下两个前提下对ROV进行数学分析^[12]:①ROV被认为是一个理想的刚体,其受到的所有力学作用可以等效为合外力(矩);②地球自转对其产生的作用力不会对定义在地球的惯性坐标系产生影响。因此水下机器人系统的6自由度动力学和运动学方程可以描述为

$$\begin{cases} \dot{\eta} = J(\eta)v, \\ M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau_T + \tau_d. \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\eta = [x, y, z, \varphi, \theta, \psi]^T$ 为ROV在惯性坐标系下的位置和姿态角,其中 $x, y, z, \varphi, \theta, \psi$ 分别为惯性坐标系下的纵向位移、横向位移、垂向位移以及横滚角、俯仰角与偏航角; $v = [u, v, w, p, q, r]^T$ 为ROV在附体坐标下的速度和角速度矩阵,其中 u, v, w, p, q, r 分别为随体坐标系下的纵向速度、横向速度、垂向速度以及横滚角速度、俯仰角速度与偏航角速度。 $J(\eta)$ 为附体坐标系和惯性坐标系的位姿转换矩阵;其中 $M = M_{RB} + M_A$,惯性力矩阵 M 是由质量惯性矩阵 M_{RB} 与附加质量矩阵 M_A 两部分相加而成; $C(v)$ 为科里奥利力和向心力矩阵; $D(v)$ 为流体阻尼矩阵; $g(\eta)$ 为恢复力与力矩; τ_T 和 τ_d 分别为驱动力与环境干扰力。

1.2 问题描述

控制目标:针对环境干扰和模型不确定下ROV的轨迹跟踪问题,设计基于模型补偿的双闭环滑模控制器,使水下机器人以期望距离和期望角度跟踪给定的轨迹,同时确保跟踪误差是有界的,即

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|\eta - \eta_d\| \leq c. \quad (2)$$

其中, η_d 与 η 分别表示ROV的期望位置角度和实际位置角度,将误差定义为 $\eta_e = \eta - \eta_d$ 。 c 是未知的正常数,可以通过调节控制器的设计参数使 c 尽可能小。

为了验证控制器在外部干扰和模型不确定性下保证满意跟踪性能的能力,本文将常规滑模控制器与模型补偿滑模控制器进行比较。根据式(1)表示的动力学作出如下假设,便于控制器的设计和闭环系统稳定性的分析^[13-14]。

假设1 对于ROV系统中所有的模型不确定性和外界干扰的影响 τ_{di} 都是有界的,即存在正常数 ξ ,使得 $|\tau_{di}| \leq \xi, i=1, 2, 3, 4, 5, 6$ 。

假设2 期望轨迹是连续光滑的曲线,其一阶和二阶的导数 $\dot{\eta}_d, \ddot{\eta}_d$ 存在。

引理1 V 是从时间区间 $[0, +\infty)$ 映射到实数集 \mathbb{R} 的函数,存在不等式方程 $\dot{V} \leq -\alpha V + f, f$ 为对时间的

非负函数,对于 $\forall t \geq t_0, t_0$ 为 ≥ 0 的时间常数,那么

$$V(t) \leq e^{-\alpha(t-t_0)} V(t_0) + \int_{t_0}^t e^{-\alpha(t-\tau)} f(\tau) d\tau. \quad (3)$$

其中, α 为任意正常数。

如果 $f=0$,则 $\dot{V} \leq -\alpha V$ 的解为

$$V(t) \leq e^{-\alpha(t-t_0)} V(t_0). \quad (4)$$

引理2 考虑下面的非线性函数:

$$\dot{x} = f(x), x(0) = x_0. \quad (5)$$

其中 x 为实数, $f(\cdot)$ 函数在实数范围内为连续的函数,并且 $f(0)=0$ 。如果一个正定的函数 $V(x)$ 满足下面的不等式:

$$\dot{V}(x) \leq -c(V(x))^\alpha. \quad (6)$$

其中 c 和 α 都为正实数,且 α 满足条件 $0 < \alpha < 1$,那么此系统是有限时间稳定的,并且收敛时间满足

$$T \leq \frac{1}{c(1-\alpha)} (V(x_0))^{1-\alpha}. \quad (7)$$

引理3 存在与 t_0 无关的正常数 b 和 c ,对于每个 $a \in (0, c)$,存在与 t_0 无关的 $T = T(a, b) \geq 0$,使得

$$|x(t_0)| \leq a \Rightarrow \|x(t)\| \leq b, \forall t \geq t_0 + T, \quad (8)$$

则称系统的解是一致最终有界的,且最终边界为 b 。

2 控制器设计

2.1 常规滑模控制器 (conventional sliding mode controller, CSMC) 设计

设计常规线性滑模面函数为

$$S = \dot{\eta}_e + A\eta_e. \quad (9)$$

式中, A 为正定矩阵。

对式(1)进行求导得

$$\dot{\eta} = J(\eta)v + J(\eta)\dot{v}, \quad (10)$$

$$\dot{v} = M^{-1}[\tau + \tau_d - (C(v)v + D(v)v + g(\eta))]. \quad (11)$$

对式(9)求导,并将式(10)(11)代入式(9)得

$$\begin{aligned} \dot{S} &= j(\eta)v + J(\eta)\dot{v} - \dot{\eta}_d + A(\dot{\eta} - \dot{\eta}_d) = \\ &= j(\eta)v + J(\eta)M^{-1}[\tau_T + \tau_d - (C(v)v + D(v)v + \\ &\quad g(\eta))] + A(\dot{\eta} - \dot{\eta}_d). \end{aligned} \quad (12)$$

针对式(12)采用指数趋近律,将切换项改用饱和函数代替传统的符号函数,饱和函数定义如下:

$$\text{sat}(S/\phi) = \begin{cases} 1, & S > \phi; \\ tS, & |S| \leq \phi, t=1/\phi; \\ -1, & S < -\phi. \end{cases} \quad (13)$$

式中, ϕ 为边界层的厚度,并满足 $\phi > 0$ 。

令 $\dot{S} = -\varepsilon \text{sat}(S/\phi) - kS$,其中 $\varepsilon > 0, k > 0$,将式(12)带入指数趋近律得

$$j(\eta)v + J(\eta)M^{-1}[\tau_T + \tau_d - (C(v)v + D(v)v + g(\eta))] + A(\dot{\eta} - \dot{\eta}_d) + \varepsilon \text{sat}(S/\phi) + kS = 0. \quad (14)$$

对上式进行整理后得到控制律 τ_T , 即

$$\tau_T = MJ^{-1}[\ddot{\eta}_d - A(\dot{\eta} - \dot{\eta}_d) - j(\eta)v - \varepsilon \text{sat}(S) - kS] + C(v)v + D(v)v + g(\eta) - \tau. \quad (15)$$

设计李雅普诺夫函数为

$$V = \frac{1}{2}S^T S. \quad (16)$$

采用指数趋近律, 则可得到

$$\dot{V} = S^T \dot{S} = \begin{cases} -\varepsilon|S| - kS^2 & |S| > \phi; \\ -\varepsilon t S^2 - kS^2 & |S| \leq \phi. \end{cases} \quad (17)$$

采用引理 1, 针对不等式方程 $\dot{V} \leq -2kV$, 有 $\alpha = 2k$, $f = 0$, 解为

$$V(t) \leq e^{-2k(t-t_0)} V(t_0). \quad (18)$$

可见, $V(t)$ 指数收敛至零, 从而 S 指数收敛于零, 收敛速度取决于 k 。其中等速趋近项 $\dot{S} = -\varepsilon \text{sat}(S/\phi)$, 使当 S 接近于零时, 趋近速度是 ε 而不是零, 可以保证有限时间到达。

在指数趋近中, 趋近速度从一较大值逐步减小到零, 不仅缩短了时间, 而且使运动点到达切换面时的速度很小。因此, 为保证快速趋近的同时削弱抖动, 选择合适参数 k 和 ε , 在增大 k 的同时减小 ε 。

2.2 模型补偿滑模控制器 (model compensation sliding mode controller, MCSMC) 设计

期望轨迹 η_d 与实际值 η 的误差定义为 $\tilde{\eta} = \eta - \eta_d$, 期望速度和角速度 v_d 与实际值 v 的误差定义为 $\tilde{v} = v - v_d$, 定义参考速度误差和参考加速度误差分别为 $v_r = v_d - \sigma \tilde{\eta}$, $\dot{v}_r = \dot{v}_d - \sigma \dot{\tilde{\eta}}$ 。

MCSMC 控制律引入参考速度和参考加速度构成模型前馈补偿, 用来提前抵消模型不确定性对跟踪的影响。通过在控制输入中预先对期望加速度和速度的校正, 系统减少了控制量的突变与延迟现象, 从而平滑了响应过程, 提高了误差收敛速度并降低了控制抖动。具体而言, 该控制律融合了期望轨迹导数信息, 用于构建参考速度与参考加速度。参考速度根据期望速度与位置误差的差异提前提供额外控制输入以弥补速度误差, 参考加速度根据期望加速度与速度误差提供前馈控制力, 抵消外界干扰力、系统惯性力等不利影响。

设计滑模函数为

$$S = \tilde{v} + \sigma \tilde{\eta}. \quad (19)$$

其中, σ 是一个正定矩阵。

设计基于模型补偿的滑模控制律为

$$\tau = M\dot{v}_r + Cv_r + Dv_r + g - K_D S - K_s \text{sat}(S/\phi). \quad (20)$$

其中, K_D 和 K_s 是一个正定矩阵, 定义 $\tau_{ff}(\dot{v}_r, v_r) = M\dot{v}_r + Cv_r + Dv_r + g$, $\tau_{ff}(\dot{v}_r, v_r)$ 为模型前馈控制项。

该控制律设计中未显式考虑对 τ_d 的补偿, 而是利用模型前馈补偿及滑模控制的固有鲁棒性抵御外界扰动的影响。如果需要进一步提高抗扰性能, 可在控制框架中引入扰动观测器或自适应补偿项, 但本文侧重于利用模型前馈补偿策略和滑模控制本身的鲁棒性来应对扰动。

对式 (19) 进行求导可得

$$\dot{S} = \dot{\tilde{v}} + \sigma \dot{\tilde{\eta}} = \dot{v} - \dot{v}_d + \dot{v}_d - \dot{v}_r = \dot{v} - \dot{v}_r. \quad (21)$$

将式 (20)、(21) 代回动力学模型并化简, 可得

$$M(v)\dot{S} + (C(v) + D(v))S = -K_D S - K_s \text{sat}(S/\phi) + \Delta_r. \quad (22)$$

其中, $\Delta_r = \tau_d + \tau_{r_{ff}} + \tau_{v_r}$, $\tau_{r_{ff}}$ 为模型失配导致的误差, τ_{v_r} 为外环产生 \dot{v}_r , v_r 的近似误差。

此时, $\tau_{ff}(\dot{v}_r, v_r)$ 用参考速度与参考加速度结合名义模型, 把该给的力与力矩提前算好直接给到执行器, 参考相关项在误差方程中被抵消, $\|\Delta_r\|$ 变小。

为分析系统的稳定性, 给出如下两个水下机器人系统的动力学特性。

性质 1 水下机器人运动模型中的惯性矩阵 M 是正定对角矩阵, 即 $M = M^T$, 且 $M > 0$ 。

性质 2 $M - 2C$ 是一个斜对称矩阵, 即对 $\forall x$, 都满足 $x^T (M - 2C) x = 0$ 。

$$V(t) = \frac{1}{2}S^T M S. \quad (23)$$

则

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= S^T M \dot{S} + \frac{1}{2}S^T \dot{M} S = S^T M (\dot{v} - \dot{v}_r) + \frac{1}{2}S^T \dot{M} S = \\ &S^T M (M\dot{v} - M\dot{v}_r) + \frac{1}{2}S^T \dot{M} S = \\ &S^T (\tau - Cv - Dv - g - M\dot{v}_r) + \frac{1}{2}S^T \dot{M} S = \\ &S^T (M\dot{v}_r + Cv_r + Dv_r + g - K_D S - K_s \text{sat}(S/\phi) + \Delta_r - \\ &Cv - Dv - g - M\dot{v}_r) + \frac{1}{2}S^T \dot{M} S = \\ &S^T (C + D)(v_r - v) - S^T K_D S - K_s S^T \text{sat}(S/\phi) + \\ &S^T \Delta_r + \frac{1}{2}S^T \dot{M} S = -S^T D S - K_D S^T S - K_s S^T \text{sat}(S/\phi) + \\ &S^T \Delta_r + \frac{1}{2}S^T (\dot{M} - 2C) S. \end{aligned} \quad (24)$$

又由于 $-S^T D S \leq 0$ 且根据性质 2 可得, $S^T (\dot{M} - 2C) S = 0$ 。于是有

$$\dot{V} \leq -S^T K_D S - K_s S^T \text{sat}(S/\phi) + S^T \Delta_r. \quad (25)$$

再用范数不等式 $S^T K_D S \geq \lambda_{\min}(K_D) \|S\|^2$, $|S^T \Delta_r| \leq \|S\| \|\Delta_r\|$, 即

$$\dot{V} \leq -\lambda_{\min}(K_D) \|S\|^2 + \|S\| \|\Delta_r\| - K_s S^T \text{sat}(S/\phi). \quad (26)$$

此时取 $K_s > \Delta_r$, 在边界层外层 $\|S\|_\infty > \phi$, 此时 $S^T \text{sat}(S/\phi) > \|S\|$, 故

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -\lambda_{\min}(\mathbf{K}_D) \|\mathbf{S}\|^2 - (\mathbf{K}_s - \Delta_r) \|\mathbf{S}\| \leq \\ &\quad - (\mathbf{K}_s - \Delta_r) \|\mathbf{S}\| \leq 0. \end{aligned} \quad (27)$$

则 $\dot{V} \leq -\mu \|\mathbf{S}\|$, 其中 $\mu = \mathbf{K}_s - \Delta_r$ 。

因 $M > 0$, 存在最小特征值 $\lambda_{\min}(M)$ 与最大特征值 $\lambda_{\max}(M)$, 满足

$$\lambda_{\min}(M) \|\mathbf{S}\|^2 \leq 2V \leq \lambda_{\max}(M) \|\mathbf{S}\|^2. \quad (28)$$

因此有

$$\|\mathbf{S}\| \geq \sqrt{\frac{2V}{\lambda_{\max}(M)}}, \quad \|\mathbf{S}\| \leq \sqrt{\frac{2V}{\lambda_{\min}(M)}}. \quad (29)$$

将式(29)代入式(27)可得

$$\dot{V}(t) \leq -\mu \frac{2V(t)}{\lambda_{\max}(M)} = -cV(t)^\alpha. \quad (30)$$

其中 $c = \frac{2}{\lambda_{\max}(M)}$, $\alpha = \frac{1}{2}$ 。

根据引理2, 可推得

$$T \leq \frac{1}{c(1-\alpha)} V(t_0)^{1-\alpha} = \sqrt{\frac{2\lambda_{\max}(M)V(t_0)}{\mu}}, \quad (31)$$

所以边界层外系统有限时间稳定。

在边界层内层 $\|\mathbf{S}\|_\infty \leq \phi$, 此时 $\mathbf{S}^T \text{sat}(\mathbf{S}/\phi) > \|\mathbf{S}\|^2/\phi$,

$$\dot{V} \leq -(\lambda_{\min}(\mathbf{K}_D) + \frac{\mathbf{K}_s}{\phi}) \|\mathbf{S}\|^2 + \|\mathbf{S}\| \Delta_r. \quad (32)$$

将式(28)和(29)代入式(32)得

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -(\lambda_{\min}(\mathbf{K}_D) + \frac{\mathbf{K}_s}{\phi}) \frac{2V}{\lambda_{\max}(M)} + \\ &\quad \sqrt{\frac{2V}{\lambda_{\min}(M)}} \Delta_r, \end{aligned} \quad (33)$$

那么

$$\dot{V} \leq -\vartheta_1 V + \vartheta_2 \sqrt{V}. \quad (34)$$

其中 $\vartheta_1 = \frac{2(\lambda_{\min}(\mathbf{K}_D) + \frac{\mathbf{K}_s}{\phi})}{\lambda_{\max}(M)}$, $\vartheta_2 = \sqrt{\frac{2}{\lambda_{\min}(M)}} \Delta_r$ 。

通过变量代换 $W = \sqrt{V}$ 代入式(33)整理得

$$\dot{W} \leq -\frac{\vartheta_1}{2} W + \frac{\vartheta_2}{2}. \quad (35)$$

通过求解此一阶线性微分不等式得

$$W(t) \leq (W(t_0) - \frac{\vartheta_2}{\vartheta_1}) e^{-\frac{\vartheta_1}{2}(t-t_0)} + \frac{\vartheta_2}{\vartheta_1}, \quad (36)$$

从而回代得

$$V(t) = W(t)^2 \leq \left[(W(t_0) - \frac{\vartheta_2}{\vartheta_1}) e^{-\frac{\vartheta_1}{2}(t-t_0)} + \frac{\vartheta_2}{\vartheta_1} \right]^2. \quad (37)$$

当 $t \rightarrow \infty$, 有

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} \sup V(t) &\leq \left(\frac{\vartheta_2}{\vartheta_1} \right)^2, \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \sup \|\mathbf{S}(t)\| &\leq \sqrt{\frac{2}{\lambda_{\min}(M)} \frac{\vartheta_2}{\vartheta_1}}. \end{aligned} \quad (38)$$

根据引理3, 在边界层内, 系统满足一致最终有界性, 且最终边界为 $\sqrt{\frac{2}{\lambda_{\min}(M)} \frac{\vartheta_2}{\vartheta_1}}$, 其收敛半径随

控制增益 \mathbf{K}_D 和 \mathbf{K}_s 增大而减小, 随扰动上界 Δ_r 增大而增大。

3 仿真试验与分析

为了验证本文所提出的基于模型补偿的滑模控制方法的有效性, 采用 MATLAB 数值仿真对所设计的模型补偿控制器 (MCSMC) 与提出的常规滑模控制器 (CSMC) 进行对比试验。其中, 边界层参数统一选取 $\phi = \text{diag}\{5, 5, 5, 5, 5, 5\}$ 。CSMC 控制器参数设置为: $\mathbf{A} = \text{diag}\{10, 10, 10, 10, 10, 10\}$, $\epsilon = \text{diag}\{2.5, 2.5, 2.5, 2.5, 2.5, 2.5\}$, $\mathbf{k} = \text{diag}\{3, 3, 3, 3, 3, 3\}$ 。MCSMC 控制器参数设置为: $\sigma = \text{diag}\{10, 10, 10, 10, 10, 10\}$, $\mathbf{K}_D = \text{diag}\{900, 900, 900, 400, 900, 400\}$, $\mathbf{K}_s = \text{diag}\{900, 900, 900, 900, 900, 900\}$ 。

根据航向定义的标准范围, 水下机器人的艏向角通常限制在一个有限的范围内, $[-180^\circ, 180^\circ]$ 作为其物理约束。本文侧重于 x, y, z 方向上的轨迹运动, 艏向角的方向对整体轨迹运动的影响忽略不计。为了验证水下的轨迹跟踪效果, 设置水下机器人的初始位置向量 $\boldsymbol{\eta} = [-2 \text{ m}, 4 \text{ m}, -2 \text{ m}, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ]^T$, 初始速度向量 $\mathbf{v} = [0 \text{ m/s}, 0 \text{ m/s}, 0 \text{ m/s}, 0^\circ/\text{s}, 0^\circ/\text{s}, 0^\circ/\text{s}]^T$, 采样周期为 0.1 s, 仿真时间为 200 s, 姿态角期望值均为 0° , 期望轨迹如式(39)所示。

$$\begin{aligned} x_d(t) &= \begin{cases} 0.2t, & 0 \leq t < 50; \\ 2\sin(\pi/20(t-50) - \pi/2) + 12, & 50 \leq t < 100; \\ 0.5t - 38, & 100 \leq t \leq 200; \end{cases} \\ y_d(t) &= \begin{cases} 0.2t, & 0 \leq t < 50; \\ 2\cos(\pi/20(t-50) - \pi/2) + 10, & 50 \leq t < 100; \\ 3\sin(0.1(t-100)) + 12, & 100 \leq t \leq 200; \end{cases} \\ z_d(t) &= \begin{cases} -0.5t, & 0 \leq t < 50; \\ -0.5t, & 50 \leq t < 100; \\ -0.1t - 40, & 100 \leq t \leq 200. \end{cases} \end{aligned} \quad (39)$$

为验证该控制器在外部扰动情况下具备良好的鲁棒性和稳定性, 采用正弦函数模拟真实水下环境中的周期性干扰, 并叠加余弦函数描述多频扰动环境, 近似整体的随机干扰。引入随机干扰式(40),

$$\boldsymbol{\tau}_d = \begin{cases} \tau_{dx} = 50\sin(\pi t/3 + 7\pi/15) + 40, \\ \tau_{dy} = 100\cos(\pi t/2 - 3\pi/5) + 50\sin(\pi t/2 + \pi/2), \\ \tau_{dz} = 100\cos(\pi t/5 - 9\pi/5) - 50, \\ \tau_{du} = 10\sin(\pi t + 7\pi/15) + 70, \\ \tau_{dv} = 20\cos(\pi t/4 - 3\pi/5) + 50\sin(\pi t/4 + \pi/5), \\ \tau_{dw} = 10\cos(\pi t/2 + 11\pi/4) - 50. \end{cases} \quad (40)$$

图 2 为三维空间内轨迹跟踪的整体表现。从三维轨迹图中可以更加直观地看出, MCSMC 控制算法的跟踪轨迹与期望轨迹几乎完全重合, 表明模型补偿机制有效降低了模型不确定性和外界干扰对控制性能的影响, 显著提升了轨迹跟踪精度。相比之下, 传统 CSMC 算法在轨迹转折和弯曲处存在较明显的偏离, 这体现了传统滑模控制算法在处理复杂轨迹跟踪任务时的不足。

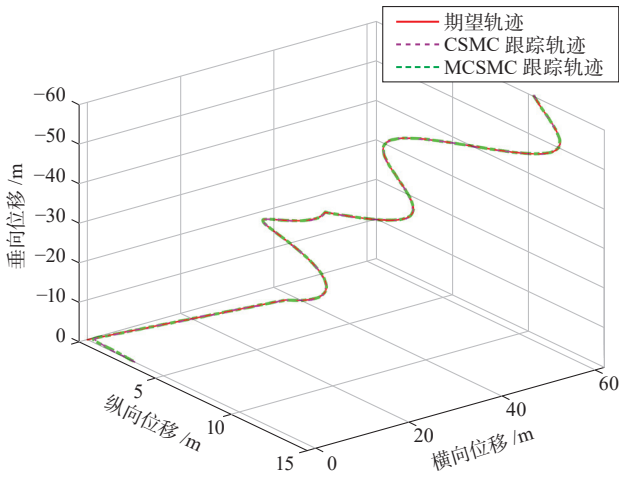


图 2 ROV 空间轨迹跟踪曲线

Fig. 2 3D trajectory tracking curve of ROV

由图 3 和图 4 局部放大图可以看出, 在横向位移跟踪上, CSMC 控制算法在轨迹初始阶段存在一定幅度的动态误差, 表现为明显的振荡和延迟响应, 而 MCSMC 控制算法则表现出较为平滑的响应特性, 初始阶段的误差显著减小, 且收敛速度明显加快; 纵

向位移上, 两种控制算法均能较好地跟随目标轨迹, 但 MCSMC 控制器在初期具有更小的响应误差和更快的稳定速度, 稳态误差更低, 且在整个仿真周期内波动幅值更小, 表现出明显的鲁棒性优势; 在垂向位移上, CSMC 控制器在初始阶段振荡明显, 存在较大的瞬态超调, 稳定阶段与期望轨迹存在持续的微小偏差; 相比之下, MCSMC 控制器不仅有效抑制了初始阶段振荡现象, 而且在整个跟踪过程中紧密贴合期望轨迹, 体现出更优的控制精度与鲁棒性。

图 5 给出了 CSMC 与模型补偿滑模控制在横滚、纵倾和偏航角跟踪中的对比结果。可以看出, 虽然两种方法均能实现较快收敛, 但 CSMC 存在明显的抖振现象且稳态误差较大; 相比之下, MCSMC 过渡过程更平滑, 稳态误差及振荡幅度均显著降低。

图 6 显示了纵向速度、横向速度及垂向速度的跟踪结果。与仅基于位置误差的滑模面相比, MCSMC 控制器的滑模面额外引入速度误差, 相当于构成一个内环速度反馈, 增强了对误差变化率的控制作用。从图中可以看出, 两种控制器均能实现较快的收敛并跟踪期望速度, 但 CSMC 存在较大抖振, 而 MCSMC 表现出更平滑的动态特性, 稳态误差也更小。表明这种双闭环结构使系统在轨迹偏离时能够更快速地产生纠偏动作, 减少超调和振荡幅度, 显著改善系统的瞬态性能。

图 7 采用状态扩张状态器对干扰值进行观测, 结果显示能够较为准确地观测出总扰动。尽管本文所提出的控制器能有效跟踪期望轨迹, 但接下来将考虑干扰估计项补偿到控制器里以达到更好的跟踪效果。

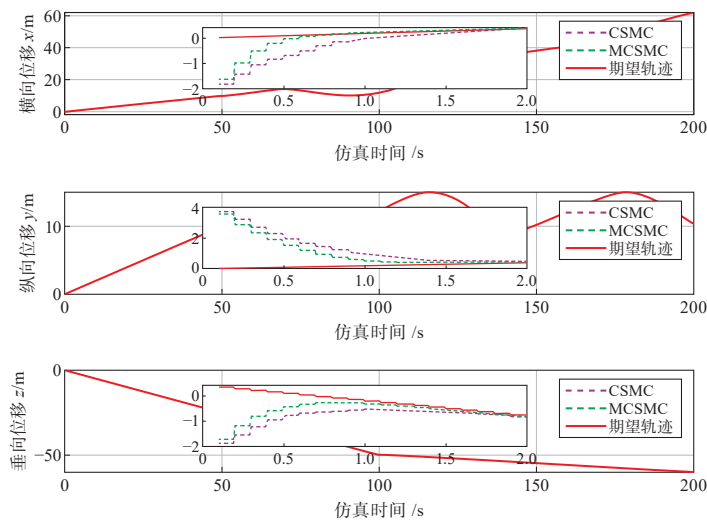


图 3 位置跟踪曲线

Fig. 3 Pose tracking curves

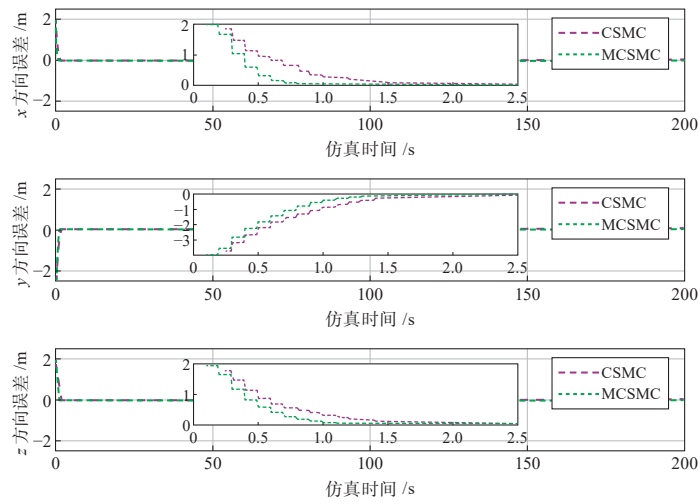


图4 位置跟踪误差曲线
Fig. 4 Position tracking error curves

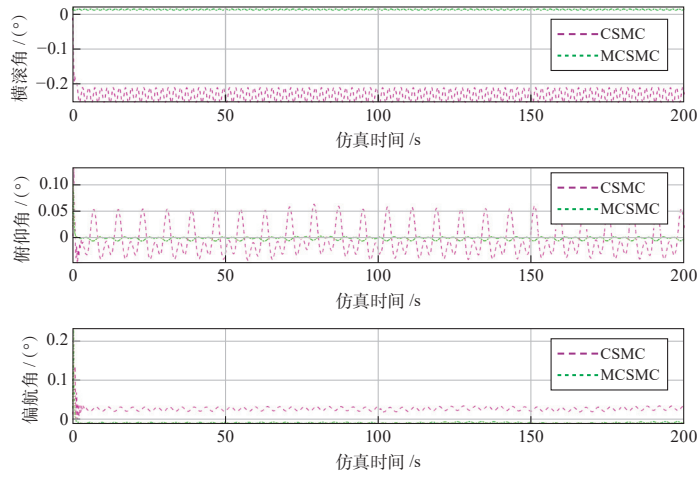


图5 姿态跟踪曲线
Fig. 5 Posture tracking curves

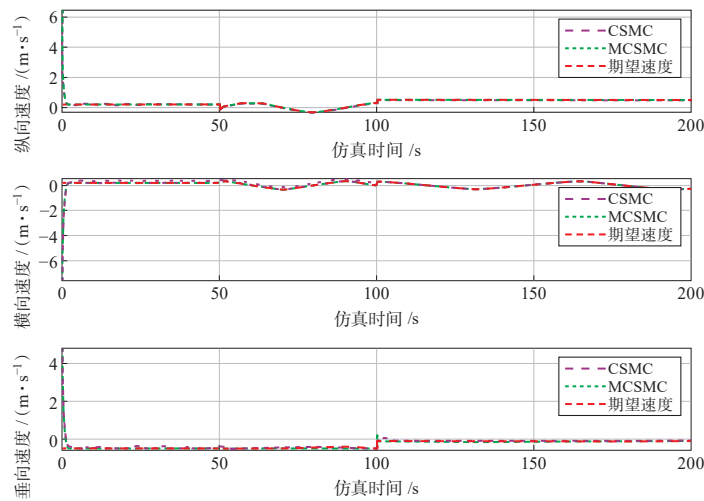


图6 速度跟踪曲线
Fig. 6 Speed tracking curves

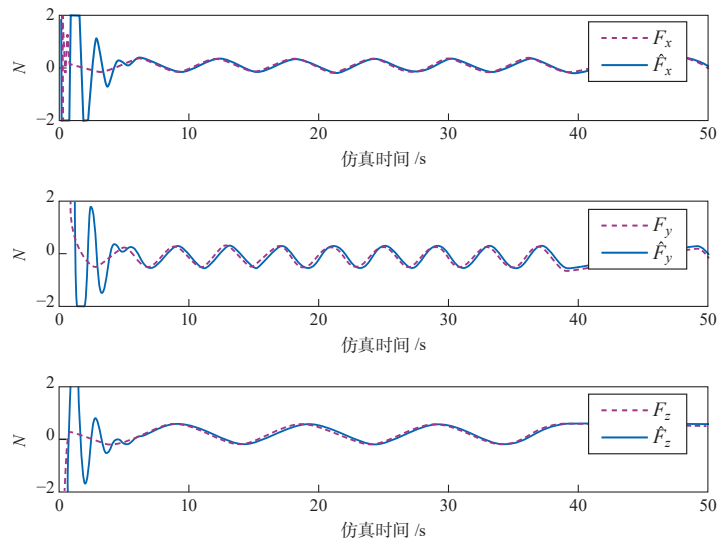


图 7 扰动实际值与估计值

Fig. 7 Actual value of disturbance and estimated value of disturbance

4 结语

针对 ROV 的运动控制存在外界干扰和参数不确定性的特点设计了基于模型补偿的滑模控制器, 来实现水下机器人的空间轨迹跟踪, 利用 Lyapunov 方法, 从理论上证明了系统稳定, 跟踪误差最终能够实现收敛。将提出的 CSMC 控制器与设计的 MCSMC 控制器进行仿真对比, 结果表明, MCSMC 控制策略明显改善了轨迹跟踪的精度与收敛速度, 抑制了控制过程中的超调与振荡, 更适用于高精度、高可靠性的实际控制场景。后续将针对参数整定进行优化改进, 并在控制器中加入干扰补偿等方式以解决更复杂的工况。

参考文献:

- [1] 张泽禹, 李宏然. 虚假数据注入攻击下线性系统的非模型预测控制[J]. 江苏海洋大学学报(自然科学版), 2022, 31(2): 72-77.
- [2] 徐晨晨, 杨瑞, 吴一非, 等. 基于聚集一置换策略的机器人路径规划方法[J]. 江苏海洋大学学报(自然科学版), 2023, 32(1): 27-36.
- [3] 盛智彬. 水下机器人滑模控制研究[D]. 连云港: 江苏海洋大学, 2021.
- [4] 刘金琨, 孙富春. 滑模变结构控制理论及其算法研究与进展[J]. 控制理论与应用, 2007, 24(3): 407-418.
- [5] 张本伟, 陈旭, 郭恒宇. 基于预设性能的动力定位船舶出反馈避障控制[J]. 船舶工程, 2025, 47(3): 99-106.
- [6] 黄博伦, 杨启. 基于 super-twisting 二阶滑模算法的作业型水下机器人路径跟踪控制方法[J]. 水下无人系统学报, 2021, 29(1): 14-22.
- [7] 王宇梁, 李一平, 李良. 考虑状态约束与执行器饱和的水下机器人轨迹跟踪控制[J]. 控制与决策, 2024, 39(6): 1778-1786.
- [8] 鲁挺, 王宁, 王仁慧. 推力受限的水下机器人预设性能精准跟踪控制[J]. 中国舰船研究, 2023, 18(3): 48-56.
- [9] HUANG Bolun, QI Yang. Double-loop sliding mode controller with a novel switching term for the trajectory tracking of work-class ROVs[J]. Ocean Engineering, 2019, 178: 80-94.
- [10] JIANG Yuan, ZHANG Qiang, HU Yancai. Fault-tolerant trajectory tracking control of underwater salvage robots based on super-twisting sliding mode[J]. Ocean Engineering, 2024, 312: 119340.
- [11] SHAO Ke, ZHENG Jinchuan, YANG Chao, et al. Chattering-free adaptive sliding-mode control of nonlinear systems with unknown disturbances[J]. Computers & Electrical Engineering, 2021, 96: 107538.
- [12] 吴乃龙. 水下机器人建模与非线性自适应控制研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
- [13] 张富程. 基于滑模控制的全驱动水下机器人自稳定系统研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2023.
- [14] 台立钢, 徐龙, 张禹. 基于自适应非奇异终端滑模自抗扰的水下机器人控制[J]. 舰船科学技术, 2024, 46(10): 87-91.

(责任编辑: 褚金红)