

引用格式: 于浩森, 王悦, 乔石广. 基于扰动观测器的欠驱动 UUV 预设性能路径跟踪容错控制 [J]. 中国舰船研究, 2026, 21(2): 160–173.

YU H M, WANG Y, QIAO S G. Prescribed performance path-following fault-tolerant control of an underactuated UUV based on a disturbance observer[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2026, 21(2): 160–173 (in both Chinese and English).

基于扰动观测器的欠驱动 UUV 预设性能路径跟踪容错控制



扫码阅读全文

于浩森*, 王悦, 乔石广

大连海事大学 船舶电气工程学院, 辽宁 大连 116026

摘要: [目的] 为了探究无人水下航行器(UUV)面临的水下环境复杂、因自身特性导致执行机构故障频发的问题以及 UUV 安全航行问题, 研究欠驱动 UUV 在洋流扰动、模型不确定和执行器故障下的预设性能路径跟踪容错控制, 设计一种结合改进预设性能函数和障碍李雅普诺夫函数的路径跟踪容错控制器, 实现全状态约束的容错控制。 [方法] 设计一种新的预定义时间扰动观测器, 用以观测 UUV 路径跟踪的集总扰动, 包括洋流扰动、模型参数摄动、未建模动力学和执行器故障引起的推力损失。将带有执行器故障的集总不确定项引入预设性能容错控制器进行补偿以实现容错控制, 将路径跟踪全状态误差限制在预设边界之内。 [结果] 仿真结果表明 UUV 的位置误差、姿态角误差及角速度误差均能快速收敛并严格限制在预设的安全边界内, 其中位置误差稳态边界为 1 m, 姿态角误差边界为 0.05 rad。当执行器出现 80% 推力损失时, 扰动观测器能快速估计集总扰动, 控制器在 1 s 内完成补偿, 路径跟踪偏差未显著增大, 最大瞬态误差不超过预设值的 20%。 [结论] 验证了所提方法对执行器故障的强鲁棒性, 通过统一扰动观测与预设性能约束, 简化了容错架构, 实现故障快速响应与全状态安全约束的双重目标, 为 UUV 在复杂环境下的高可靠性航行提供了普适性解决方案。

关键词: 无人水下航行器; 容错控制; 预设性能控制; 故障诊断; 扰动观测

中图分类号: U644.82

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.04640

0 引言

随着海洋工程技术的不断进步, 海洋探测技术创新, 例如遥感、声呐和无人水下航行器(unmanned underwater vehicle, UUV)的应用, 使得人类对海洋生态系统的了解更为深入^[1]。同时, 全球对海洋资源的需求日益增加, UUV 的自主性、智能化水平和协同作业能力也随着人工智能、大数据和机器人技术的发展而不断提升, 正逐步成为海洋探索与开发的重要工具^[2-3]。UUV 目前主要应用于海洋勘探和军事领域, 能够进行地形勘测、打捞作业、目标打击等任务, 全球范围内各国也在积极推进相关技术研发, 并通过国际合作与竞争推动该领域的迅速发展^[4-5]。

路径跟踪是 UUV 执行任务的基础^[6], 即跟踪预先设定的路径, 且跟踪过程中不考虑时间^[7]。

在实际应用中, 大部分 UUV 为欠驱动 UUV^[8], 因此欠驱动 UUV 的路径跟踪一直是无人水下航行器领域的热点和难点。

在欠驱动 UUV 路径跟踪的实际应用中, 由于 UUV 结构特性导致的强耦合性和非线性, 以及水下环境恶劣多变等原因, 使得 UUV 在执行任务的过程中极易面临传感器和推进器性能下降或失效的情况^[9], 进而影响任务的执行, 因此 UUV 的容错问题不容忽视^[10]。容错控制(fault-tolerant control, FTC)是针对 UUV 在故障情况下如何快速采取措施并在保证设备安全的情况下完成任务的控制方法^[11], 它能够自动检测故障, 并通过一系列策略使 UUV 恢复工作状态并完成任务, 如选择修复、补偿或牺牲一部分性能^[12]。容错控制不仅对 UUV 的安全性保障具有重要的经济和应用价值, 还可以提高 UUV 完成任务的能力^[13]。

收稿日期: 2025-08-06 修回日期: 2025-10-30 网络首发时间: 2026-03-25 13:51

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51809028, 52471374)

作者简介: 于浩森, 男, 1983 年生, 博士, 副教授。研究方向: 水下无人航行器(AUV/UUV)运动建模及仿真技术, 水面无人航行器(ASV/USV)控制理论, 船舶运动智能控制。E-mail: yuhaomiao1983@163.com

*通信作者: 于浩森

路径跟踪是 UUV 水下作业的基本和关键问题之一,目前常见的路径跟踪控制方法有滑模控制^[14-17]、神经网络^[18-19]、自适应控制^[20-21]等方法。滑模控制具有鲁棒性强、收敛速度快等优点,但高频切换控制会导致抖振问题,增加执行器的能耗和机械磨损,且滑模控制需要精确的模型,否则会导致控制性能下降。神经网络控制尽管无需精确模型,但其计算复杂,收敛性难以保证,训练过程中可能出现局部极值或不稳定。自适应控制虽有较为完善的稳定性分析框架,但难以直接保证动态性能指标。

在复杂的水下环境中作业时,性能约束能够确保 UUV 高效、稳定、安全地完成路径跟踪任务,特别是有高精度要求的场景,如深海探测、管道巡检和 underwater 作业。为了进一步确保控制系统的动态和稳态性能,预设性能控制(prescribed performance control, PPC)应运而生^[22],它能够确保系统误差稳定在性能函数预设的范围内^[23]。为了实现更好的性能约束,研究人员不断探索新的方法。Wang 等^[24]将预设性能与事件触发滑模控制相结合,有效减少了传统滑模导致的抖振问题。Du 等^[25]将数据驱动的状态观测器与预设性能控制相结合,实现了 UUV 的三维控制。目前大部分的 PPC 依赖于空间映射,实现约束空间到无约束空间的转换,尽管这种方法能够实现较高的控制精度,但计算复杂度高。尽管研究人员致力于设计低复杂度的映射函数以提升实用性^[26],但该技术路线始终包含空间映射的计算过程。为进一步简化控制器结构,一种替代思路是采用障碍李雅普诺夫(Lyapunov)函数直接处理约束问题。因此本文选用更为简便的障碍 Lyapunov 函数实现预设性能控制。具体来说,传统的预设性能控制大多需要通过复杂的空间映射,将有约束的误差空间映射至无约束的空间后,再进行控制器的设计。这个过程计算量大,设计复杂。而利用障碍 Lyapunov 函数可以直接在原始的约束误差空间内进行控制器设计,不需要进行空间映射,从而简化了控制器的结构。

UUV 长时间在复杂多变的水下环境中运行后,其推进系统可能出现多种故障,如螺旋桨功率降低、电压不稳、叶片堵塞或变形等。这些问题会显著削弱螺旋桨性能,导致无法提供任务所需的推力。其中,功率下降可能由磨损、腐蚀等问题引起;电压波动可能干扰电机运行,影响转速和推力;叶片堵塞或变形则可能直接阻碍旋转,进一步降低推力输出。因此,除预设性能控制外,另一项实现 UUV 在复杂海洋环境中实现

高精度、高可靠性运行的技术便是容错控制^[27]。容错控制可以分为主动容错控制(active fault tolerant control, AFTC)和被动容错控制(passive fault tolerant control, PFTC),AFTC 相比于 PFTC 多了故障检测与诊断(fault detection and diagnosis, FDD)模块^[28],因此 PFTC 只能处理预定义的故障类型,无法主动识别故障,导致 PFTC 相较于 AFTC 的应用效率较低^[29]。AFTC 常见的控制方法有模型预测控制^[30]、模糊控制^[31]和滑模控制^[32]。UUV 的故障类型主要分为传感器故障和执行器故障,本文主要研究 UUV 的执行器故障。近年来,研究人员针对故障诊断和容错控制器设计提出了一些方法。

故障诊断主要有两种方法:基于分析模型和基于数据驱动。在基于模型的故障诊断方法中,滑模观测器是一种常用的技术^[33]。然而,这类基于精确模型的方法通常对系统参数的准确性要求较高,当模型存在不确定性时,其诊断性能可能会受到限制。而基于数据驱动的故障诊断方法无需依赖于精确的模型,例如基于元自注意力多尺度卷积神经网络的故障诊断方法^[34],但其性能高度依赖于训练数据的数量与质量,在真实场景中高质量故障数据的获取往往面临挑战。对于容错控制器的设计,早期的方法是针对不同的故障类型设计一系列的控制律,当故障发生时,根据故障选择适当的控制律进行容错控制^[35]。但这种方法无法满足所有故障场景,因此,Hao 等^[36]提出了一种统一的故障模型,该模型考虑了各种故障类型,扩大了容错控制的应用场景,并避免了设计多种控制律的复杂过程。将故障信息融入控制器是实现主动容错的有效途径之一,例如基于反步法的设计^[37]。但这类方法的普遍挑战在于,随着系统阶次的增加,控制器的设计过程趋于复杂,且在实际应用中可能难以实现对不确定性的完全补偿^[38]。另一种更普遍的方式是进行推力的再分配,但这种方式的计算量大,会导致系统的运行速度下降^[39]。例如,有研究针对过驱动 UUV 提出了一种结合非线性观测器的自适应推力分配策略^[40],通过在线求解二次规划问题来估计各推进器的效率因子,进而重构推力分配模型。此类方法在精确故障补偿方面效果显著,但其设计通常依赖于故障诊断与隔离模块,或需要在线进行优化求解,这在一定程度上增加了控制系统的复杂性。因此,本文选择将执行器故障产生的偏差与外部不确定扰动和模型参数不确定性结合成集总不确定性的方式,这种方式既在考虑各种故障的情况下避免了设计多种控制律,又避免了推力

再分配带来的大量计算。这种方式目前更多地应用于无人机^[41-42]、机械臂^[43]等非线性系统,其在UUV路径跟踪领域中的应用仍有待于进一步的研究。针对集总扰动,我们选用一种全新的预定义时间观测器进行观测,这种观测器能够在预先设定的时间内快速、准确地辨识出集总扰动的变化。其核心优势在于,观测误差的收敛时间上界可以由设计者根据任务需求任意指定,且该时间不依赖于系统的初始状态。这一特性对于容错控制至关重要,因为它保证了无论故障何时、以何种幅度发生,系统都能在可预期的最短时间内完成对故障的精确估计,为后续的快速补偿和系统稳定性恢复提供了严格的时间保障。

针对欠驱动UUV在包含风浪流扰动及自身参数摄动复杂环境下的轨迹跟踪控制难题,本文将重点研究执行器故障下的主动容错控制策略。该策略的核心目标是在处理故障的同时,实现满足预设性能约束的精确路径跟踪。本文的主要工作为:

1) 将执行器故障、未知外部扰动及模型不确定性进行集总化处理,构建一个统一的复合扰动模型。该方法在有效补偿各类故障影响的同时,显著简化了容错控制系统的结构。

2) 为对复合扰动的实时观测,设计一种全新的预定义时间扰动观测器,该观测器能快速、准确地辨识扰动的动态变化。

3) 提出一种融合改进预设性能函数和障碍Lyapunov函数的控制方法,通过该方法构造控制律,能够确保闭环系统的跟踪误差始终保持在预设的安全范围内,从而提升航行可靠性。

1 UUV运动建模与故障模型

在实际场景中,欠驱动UUV常采用具有良好的自稳定特性的纵向对称结构设计。由于欠驱动UUV的横摇运动通常难以有效调控且具有自稳定性,本文将忽略横摇运动选定五自由度模型作为研究对象进行分析。后面将深入探讨UUV的运动模型,并阐述故障模型的相关理论,为后续容错控制系统的开发奠定理论基础。

1.1 欠驱动UUV运动模型

欠驱动UUV的运动控制通常是在北东地(NED)坐标系 $\{E\}$ 和运动坐标系 $\{B\}$ 上进行设计和分析的,其中UUV重心 G 与浮心 B 的几何中心为运动坐标系的原点。UUV在北东地坐标系和固定坐标系下的示意图如图1所示。

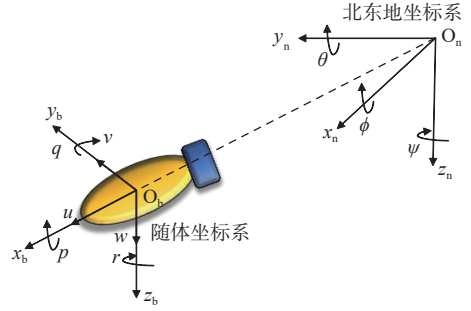


图1 北东地坐标系与随体坐标系

Fig. 1 North-East-Down coordinate system and body-fixed coordinate system

五自由度UUV的运动学和动力学方程为

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

式中: $J(\eta)$ 为转换矩阵,可将随体坐标系下的坐标转化为北东地坐标系下的坐标, $\eta = [x, y, z, \theta, \psi]^T$ 为位置和姿态角向量; $v = [u, v, w, q, r]^T$ 为速度和角速度向量; M 为质量和附加质量矩阵; $C(v) \in \mathbf{R}^{5 \times 5}$ 为科里奥利力和向心力矩阵, $D(v) \in \mathbf{R}^{5 \times 5}$ 为流体阻尼矩阵; $g(\eta) \in \mathbf{R}^5$ 为恢复力矩阵; $\tau_d = [\tau_{ud}, \tau_{vd}, \tau_{wd}, \tau_{qd}, \tau_{rd}]^T$ 为外部环境总扰动与高阶未建模动态; $\tau = [\tau_u, 0, 0, \tau_q, \tau_r]^T$ 为实际的控制输入。 $J(\eta)$ 的具体形式为

$$J(\eta) = \begin{bmatrix} \cos\psi \cos\theta & -\sin\theta & \cos\psi \sin\theta & 0 & 0 \\ \sin\psi \cos\theta & \cos\psi & \sin\psi \sin\theta & 0 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/\cos\theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

将式(1)展开,可得到UUV的分量形式运动模型,其分量形式的运动学方程为

$$\begin{cases} \dot{x} = u \cos\psi \cos\theta - v \sin\psi + w \cos\psi \sin\theta \\ \dot{y} = u \sin\psi \cos\theta + v \cos\psi + w \sin\psi \sin\theta \\ \dot{z} = -u \sin\theta + w \cos\theta \\ \dot{\theta} = q \\ \dot{\psi} = r/\cos\theta \end{cases} \quad (3)$$

其分量形式的动力学方程为

$$\begin{cases} m_{11}\dot{u} = m_{22}vr - m_{33}wq - X_u u - X_{|u|} |u| + \tau_u + \tau_{ud} \\ m_{22}\dot{v} = -m_{11}ur - Y_v v - Y_{|v|} |v| + \tau_{vd} \\ m_{33}\dot{w} = m_{11}uq - Z_w w - Z_{|w|} |w| + \tau_{wd} \\ m_{55}\dot{q} = (m_{33} - m_{11})uw - M_q q - M_{|q|} |q| - \overline{BG}_z W \sin\theta + \tau_q + \tau_{qd} \\ m_{66}\dot{r} = (m_{11} - m_{22})uv - N_r r - N_{|r|} |r| + \tau_r + \tau_{rd} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $M = \text{diag}(m_{11}, m_{22}, m_{33}, m_{55}, m_{66})$,其中 $m_{11} = m - X_u$, $m_{22} = m - Y_v$, $m_{33} = m - Z_w$, $m_{55} = I_y - M_q$, $m_{66} = I_z - N_r$,为质量与附加质量的代数和; X_u, Y_v, Z_w, M_q

和 N_r 为线性阻尼系数; $X_{|u|}$, $Y_{|v|}$, $Z_{|w|}$, $M_{|q|}$ 和 $N_{|r|}$ 为二次阻尼系数; \overline{BG}_z 为稳心高度。接下来, 考虑动力学参数摄动, 可得到如下动力学方程:

$$\begin{cases} \overline{m}_{11}\dot{u} = \overline{m}_{22}vr - \overline{m}_{33}wq - \overline{X}_u u - \overline{X}_{|u|}u|u| + \tau_u + \tau_{ud} + \Delta_u \\ \overline{m}_{22}\dot{v} = -\overline{m}_{11}ur - \overline{Y}_v v - \overline{Y}_{|v|}v|v| + \tau_v + \tau_{vd} + \Delta_v \\ \overline{m}_{33}\dot{w} = \overline{m}_{11}uq - \overline{Z}_w w - \overline{Z}_{|w|}w|w| + \tau_w + \tau_{wd} + \Delta_w \\ \overline{m}_{55}\dot{q} = (\overline{m}_{33} - \overline{m}_{11})uw - \overline{M}_q q - \overline{M}_{|q|}q|q| - \\ \quad \overline{BG}_z W \sin\theta + \tau_q + \tau_{qd} + \Delta_q \\ \overline{m}_{66}\dot{r} = (\overline{m}_{11} - \overline{m}_{22})uv - \overline{N}_r r - \overline{N}_{|r|}r|r| + \tau_r + \tau_{rd} + \Delta_r \end{cases} \quad (5)$$

式中: \cdot 表示欠驱动 UUV 的标称水动力系数; $\cdot - \cdot$ 表示相应的水动力系数, \cdot 表示参数摄动的上确界; $\Delta_u, \Delta_v, \Delta_w, \Delta_q$ 和 Δ_r 为动力学参数摄动引起的模型不确定性。为了方便后续计算推导, 将式(5)进行整合:

$$\begin{cases} \dot{u} = F_u + \tau_u/\overline{m}_{11} + D_u \\ \dot{v} = F_v + D_v \\ \dot{w} = F_w + D_w \\ \dot{q} = F_q + \tau_q/\overline{m}_{55} + D_q \\ \dot{r} = F_r + \tau_r/\overline{m}_{66} + D_r \end{cases} \quad (6)$$

其中:

$$\begin{cases} F_u = (\overline{m}_{22}vr - \overline{m}_{33}wq - \overline{X}_u u - \overline{X}_{|u|}u|u|)/\overline{m}_{11} \\ F_v = -(\overline{m}_{11}ur + \overline{Y}_v v + \overline{Y}_{|v|}v|v|)/\overline{m}_{22} \\ F_w = (\overline{m}_{11}uq - \overline{Z}_w w - \overline{Z}_{|w|}w|w|)/\overline{m}_{33} \\ F_q = ((\overline{m}_{33} - \overline{m}_{11})uw - \overline{M}_q q - \overline{M}_{|q|}q|q| - \\ \quad \overline{BG}_z W \sin\theta)/\overline{m}_{55} \\ F_r = ((\overline{m}_{11} - \overline{m}_{22})uv - \overline{N}_r r - \overline{N}_{|r|}r|r|)/\overline{m}_{66} \end{cases}$$

$$\begin{cases} D_u = (\tau_{ud} + \Delta_u)/\overline{m}_{11} \\ D_v = (\tau_{vd} + \Delta_v)/\overline{m}_{22} \\ D_w = (\tau_{wd} + \Delta_w)/\overline{m}_{33} \\ D_q = (\tau_{qd} + \Delta_q)/\overline{m}_{55} \\ D_r = (\tau_{rd} + \Delta_r)/\overline{m}_{66} \end{cases}$$

将分量形式的动力学方程式(6)改为矢量形式, 可以得到

$$\dot{\mathbf{v}} = \mathbf{f}(\mathbf{v}) + \overline{\mathbf{M}}^{-1} \boldsymbol{\tau} + \mathbf{D} \quad (7)$$

式中: $\mathbf{f}(\mathbf{v}) = [F_u, F_v, F_w, F_q, F_r]^T$; $\mathbf{D} = [D_u, D_v, D_w, D_q, D_r]^T$; $\overline{\mathbf{M}} = \text{diag}(\overline{m}_{11}, \overline{m}_{22}, \overline{m}_{33}, \overline{m}_{55}, \overline{m}_{66})$ 。最终, 欠驱动 UUV 的运动模型可以表示为

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})\mathbf{v} \\ \dot{\mathbf{v}} = \mathbf{f}(\mathbf{v}) + \overline{\mathbf{M}}^{-1} \boldsymbol{\tau} + \mathbf{D} \end{cases} \quad (8)$$

假设: 欠驱动 UUV 的总扰动 D_u, D_v, D_w, D_q 与 D_r 为未知且有界的; 即存在一组常数 $\lambda_i > 0$ ($i = u, v, w, q, r$), 使得上述总扰动满足: $|D_u| \leq \lambda_u, |D_v| \leq \lambda_v, |D_w| \leq \lambda_w, |D_q| \leq \lambda_q$ 且 $|D_r| \leq \lambda_r$ 。

1.2 欠驱动 UUV 执行器故障模型

设 T_f 为故障发生的初始时刻, 假设 $t \geq T_f$ 时, 欠驱动 UUV 的执行器发生了故障, 包括加性故障和乘性故障, τ_f 为在故障状态下执行器损失的输出推力, 其中, 加性故障的故障模型为

$$\kappa_f(t) = \kappa(t) + b_f(t), \quad \forall t \geq T_f \quad (9)$$

式中, $b_f(t)$ 为故障的偏置量, 其绝对值越大, 代表故障越严重, 并且 $b_f(t)$ 关于 t 的导数有界。

乘性故障的故障模型为

$$o_f(t) = m_f(t)o(t), \quad \forall t \geq T_f \quad (10)$$

式中, $m_f(t) \in [0, 1]$, $m_f(t)$ 的数值代表了执行器故障的严重程度。

将式(9)和式(10)结合, 可以得到完整的执行器故障模型:

$$\boldsymbol{\tau}_f = \mathbf{m}(t)\boldsymbol{\tau}_{\text{nom}} + \mathbf{b}(t), \quad \forall t \geq T_f \quad (11)$$

式中, $\mathbf{m}(t) = \text{diag}(m_1(t), m_5(t), m_6(t))$ 为权重矩阵, $m_i(t) \in (0, 1] (i = 1, 5, 6)$ 。当 $m_i(t) = 0$ 代表第 i 个执行器完全失效, 输出的力为 0, 当 $m_i(t) = 1$ 代表执行器未发生故障。 $\mathbf{b}(t) = [b_1(t), b_5(t), b_6(t)]^T$ 为执行器偏置故障矩, 且 $b_i(t) \leq 0$, 执行器发生故障时, 输出的力和力矩一般小于正常状态下输出的力和力矩, 当 $b_i(t) = 0$ 代表执行器处于正常状态。 $\boldsymbol{\tau}_{\text{nom}} = (\tau_1, \tau_5, \tau_6)^T$ 为执行器未发生故障时输出的力和力矩。

本文将执行器故障时损失的力和力矩 $\boldsymbol{\tau}_f$ 与总扰动 \mathbf{D} 一同视为集总扰动 \mathbf{D}_{all} , 可以得到考虑执行器故障情况下的欠驱动 UUV 模型为

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{v}} &= \mathbf{f}(\mathbf{v}) + \overline{\mathbf{M}}^{-1}(\boldsymbol{\tau}_{\text{nom}} + \boldsymbol{\tau}_f) + \mathbf{D} = \\ & \mathbf{f}(\mathbf{v}) + \overline{\mathbf{M}}^{-1} \boldsymbol{\tau}_{\text{nom}} + \mathbf{D}_{\text{all}} \end{aligned} \quad (12)$$

1.3 预备知识

存在如下非线性系统:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(t, \mathbf{x}), \quad \mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0 \quad (13)$$

式中: $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n$ 为状态向量; 非线性函数 $\mathbf{f}(t, \mathbf{x}) : \mathbf{R}_+ \times \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}^n$ 关于时间 t 连续, 关于状态向量 Lipschitz 连续, 且 $\mathbf{f}(t, 0) \equiv 0$ 为初始时刻; \mathbf{x}_0 为初始状态。则该非线性系统的解为 Filippov 意义上的解。

定义 1^[44] 如果上述非线性系统式 (13) 为固定时间稳定, 且稳定时间上界可以任意设定, 那么存在预定义时间 T_p 使任意的初始状态 $\mathbf{x}_0 \in \mathbf{R}^n$ 满足

$$\mathbf{x}(t, \mathbf{x}_0) = \mathbf{0}, \quad \forall t \geq T_p \quad (14)$$

此时称非线性系统 (13) 为预定义时间稳定。

引理 1^[45] 假设存在一个 Lyapunov 函数 $V(\mathbf{x})$: $U \rightarrow \mathbf{R}$, 满足以下条件:

- 1) $V(\mathbf{x})$ 是无界函数;
- 2) $V(\mathbf{x})$ 是正定的且 $V(0) = 0$;
- 3) 存在实数 $T_p > 0$ 且 $\rho \in (0, 1)$ 使 $\dot{V}(\mathbf{x})$ 满足如下方程:

$$\dot{V}(\mathbf{x}) \leq -2\rho T_p (2V + V^{1-\rho/2} + V^{1+\rho/2}) \quad (15)$$

则该系统为预定义时间稳定的, 收敛时间为 T_p 。

引理 2^[46] 对于任意 $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^3$, $y > 0$, 若 $\|\mathbf{x}\| < y$, 那么下式成立:

$$\ln(y^2/(y^2 - \|\mathbf{x}\|^2)) \leq \|\mathbf{x}\|^2/(y^2 - \|\mathbf{x}\|^2) \quad (16)$$

2 预定义时间扰动观测器设计

针对集总扰动 \mathbf{D}_{all} 设计的预定义时间扰动观测器如下:

$$\begin{cases} \dot{\hat{\mathbf{v}}} = \mathbf{f}(\mathbf{v}) + \overline{\mathbf{M}}^{-1} \boldsymbol{\tau}_{\text{nom}} + \hat{\mathbf{D}}_{\text{all}} \\ \dot{\hat{\mathbf{D}}}_{\text{all}} = \alpha_1(\mathbf{v} - \hat{\mathbf{v}}/\boldsymbol{\gamma}) + \alpha_2 \text{sig}^{1-\rho_1}(\mathbf{v} - \hat{\mathbf{v}}/\boldsymbol{\gamma}) + \\ \alpha_3 \text{sig}^{1+\rho_1}(\mathbf{v} - \hat{\mathbf{v}}/\boldsymbol{\gamma}) + \int_0^t \alpha_4 \text{sig}(\mathbf{v} - \hat{\mathbf{v}}/\boldsymbol{\gamma})/\boldsymbol{\gamma} ds \end{cases} \quad (17)$$

式中: $\hat{\mathbf{v}}$ 为速度估计值; $\hat{\mathbf{D}}_{\text{all}}$ 为集总扰动估计值; $\boldsymbol{\gamma} \in \mathbf{R}^{3 \times 5}$ 和 $\rho_1 \in (0, 1)$ 为可调观测器参数, 其中 $\boldsymbol{\gamma}$ 为正定对角矩阵, $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4 > 0$ 为观测器增益。

扰动的观测误差为

$$\boldsymbol{\varsigma} = \mathbf{v} - \hat{\mathbf{v}}/\boldsymbol{\gamma}, \quad \tilde{\mathbf{D}}_{\text{all}} = \mathbf{D}_{\text{all}} - \hat{\mathbf{D}}_{\text{all}} \quad (18)$$

将欠驱动 UUV 动力学方程式 (12) 和观测器式 (17) 代入扰动观测误差的导数 $\dot{\boldsymbol{\varsigma}} = \dot{\mathbf{v}} - \dot{\hat{\mathbf{v}}}/\boldsymbol{\gamma}$ 中, 可得系统误差动态方程为

$$\begin{aligned} \dot{\boldsymbol{\varsigma}} &= \dot{\mathbf{v}} - \dot{\hat{\mathbf{v}}}/\boldsymbol{\gamma} = \overline{\mathbf{M}}^{-1} \tilde{\mathbf{D}}_{\text{all}}/\boldsymbol{\gamma} = \overline{\mathbf{M}}^{-1} (\mathbf{D}_{\text{all}} - \hat{\mathbf{D}}_{\text{all}})/\boldsymbol{\gamma} = \\ &\overline{\mathbf{M}}^{-1} (\mathbf{D}_{\text{all}} - \alpha_1 \boldsymbol{\varsigma} - \alpha_2 \text{sig}^{1-\rho_1}(\boldsymbol{\varsigma}) - \\ &\alpha_3 \text{sig}^{1+\rho_1}(\boldsymbol{\varsigma}) - \int_0^t \alpha_4 \text{sig}(\boldsymbol{\varsigma})/\boldsymbol{\gamma} ds)/\boldsymbol{\gamma} = \\ &\overline{\mathbf{M}}^{-1} (-\alpha_1 \boldsymbol{\varsigma} - \alpha_2 \text{sig}^{1-\rho_1}(\boldsymbol{\varsigma}) - \alpha_3 \text{sig}^{1+\rho_1}(\boldsymbol{\varsigma}))/\boldsymbol{\gamma} + \overline{\mathbf{M}}^{-1} \boldsymbol{\omega}/\boldsymbol{\gamma} \end{aligned} \quad (19)$$

式中, $\boldsymbol{\omega}$ 为辅助变量, 且 $\dot{\boldsymbol{\omega}} = \dot{\mathbf{D}}_{\text{all}} - \alpha_4 \text{sig}(\boldsymbol{\varsigma})/\boldsymbol{\gamma}$ 。

预定义时间稳定性证明: 选择 Lyapunov 函数 $V_{\boldsymbol{\varsigma}} = \boldsymbol{\varsigma}^2/2$, 并将误差动态方程代入其导数方程 $\dot{V}_{\boldsymbol{\varsigma}} = \boldsymbol{\varsigma}^T \dot{\boldsymbol{\varsigma}}$ 中:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{\boldsymbol{\varsigma}} &= \boldsymbol{\varsigma}^T \overline{\mathbf{M}}^{-1} (-\alpha_1 \boldsymbol{\varsigma} - \alpha_2 \text{sig}^{1-\rho_1}(\boldsymbol{\varsigma}) - \alpha_3 \text{sig}^{1+\rho_1}(\boldsymbol{\varsigma}) + \boldsymbol{\omega})/\boldsymbol{\gamma} = \\ &\overline{\mathbf{M}}^{-1} (-\alpha_1 \boldsymbol{\varsigma}^2 - \alpha_2 |\boldsymbol{\varsigma}|^{2-\rho_1} - \alpha_3 |\boldsymbol{\varsigma}|^{2+\rho_1} + \boldsymbol{\omega} \boldsymbol{\varsigma})/\boldsymbol{\gamma} \end{aligned} \quad (20)$$

由 $\boldsymbol{\omega}$ 的动态方程计算可以看出, $\text{sign}(\boldsymbol{\varsigma})$ 和 $\text{sign}(\boldsymbol{\omega})$ 的符号相反, 故 $t > 0$ 时 $\boldsymbol{\omega} \boldsymbol{\varsigma} < 0$ 。令 $\alpha_1 = 2\boldsymbol{\gamma}/T_d \rho_1 \overline{\mathbf{M}}^{-1}$, $\alpha_2 = 2\boldsymbol{\gamma}/2^{1-\rho_1/2} T_d \rho_1 \overline{\mathbf{M}}^{-1}$, $\alpha_3 = 2\boldsymbol{\gamma}/2^{1+\rho_1/2} T_d \rho_1 \overline{\mathbf{M}}^{-1}$, 其中 T_d 为扰动观测器的预定义收敛时间。那么式 (20) 可以改写为

$$\begin{aligned} \dot{V}_{\boldsymbol{\varsigma}} &\leq \overline{\mathbf{M}}^{-1} (-\alpha_1 \boldsymbol{\varsigma}^2 - \alpha_2 |\boldsymbol{\varsigma}|^{2-\rho_1} - \alpha_3 |\boldsymbol{\varsigma}|^{2+\rho_1})/\boldsymbol{\gamma} \leq \\ &-2(\boldsymbol{\varsigma}^2/2) + (\boldsymbol{\varsigma}^2/2)^{(2-\rho_1)/2} + (\boldsymbol{\varsigma}^2/2)^{(2+\rho_1)/2} / \rho_1 T_d \leq \\ &-2(2V_{\boldsymbol{\varsigma}} + V_{\boldsymbol{\varsigma}}^{(2-\rho_1)/2} + V_{\boldsymbol{\varsigma}}^{(2+\rho_1)/2}) / \rho_1 T_d \end{aligned} \quad (21)$$

通过引理 1 和式 (21) 可得观测误差 $\boldsymbol{\varsigma}$ 在预定义时间 T_d 内收敛为 0, $\dot{\boldsymbol{\varsigma}} = \overline{\mathbf{M}}^{-1} \tilde{\mathbf{D}}_{\text{all}}/\boldsymbol{\gamma}$ 也将收敛于 0, 即扰动观测器误差 $\tilde{\mathbf{D}}_{\text{all}}$ 收敛于 0, 证明完毕。

3 预设性能控制器设计

控制目标为 UUV 跟踪期望路径, 并使位置误差满足性能函数的约束, 即 $\|\mathbf{e}_{\eta}\| < \rho_{\eta}(t)$, 其中 \mathbf{e}_{η} 为系统位置误差, $\mathbf{e}_{\eta} = \boldsymbol{\eta} - \boldsymbol{\eta}_d$, $\boldsymbol{\eta}_d$ 为期望路径。性能函数能够对系统位置误差的瞬态和稳态性能进行约束, 性能函数为

$$\rho_{\eta}(t) = (\rho_{\eta 0} - \rho_{\eta \infty}) e^{-l_{\eta} t} + \rho_{\eta \infty} \quad (22)$$

式中, $\rho_{\eta 0}$, $\rho_{\eta \infty}$ 和 l_{η} 均为常数, $\rho_{\eta 0}$ 决定了位置误差的初始性能边界, $\rho_{\eta \infty}$ 决定了位置误差的稳态性能边界, l_{η} 决定了位置误差的收敛速率。为了确保 \mathbf{e}_{η} 满足性能函数的约束, 需要引入障碍 Lyapunov 函数防止位置误差超过性能函数的边界 ρ_{η} , 当 \mathbf{e}_{η} 接近 ρ_{η} 时, 障碍 Lyapunov 函数的值就会趋于无穷大, 其具体表达式为

$$V_1 = \ln(\rho_{\eta}^2 / (\rho_{\eta}^2 - \mathbf{e}_{\eta}^T \mathbf{e}_{\eta})) / 2 \quad (23)$$

那么, V_1 的导数为

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= 2\rho_{\eta} \dot{\rho}_{\eta} (\rho_{\eta}^2 - \mathbf{e}_{\eta}^T \mathbf{e}_{\eta})^2 / 2\rho_{\eta}^2 (\rho_{\eta}^2 - \mathbf{e}_{\eta}^T \mathbf{e}_{\eta})^2 - \\ &\rho_{\eta}^2 (\rho_{\eta}^2 - \mathbf{e}_{\eta}^T \mathbf{e}_{\eta}) (2\rho_{\eta} \dot{\rho}_{\eta} - 2\mathbf{e}_{\eta}^T \dot{\mathbf{e}}_{\eta}) / 2\rho_{\eta}^2 (\rho_{\eta}^2 - \mathbf{e}_{\eta}^T \mathbf{e}_{\eta})^2 = \\ &(-\dot{\rho}_{\eta} \mathbf{e}_{\eta} \rho_{\eta} / \rho_{\eta} + \mathbf{e}_{\eta}^T \dot{\mathbf{e}}_{\eta}) / (\rho_{\eta}^2 - \mathbf{e}_{\eta}^T \mathbf{e}_{\eta}) \end{aligned} \quad (24)$$

\mathbf{e}_{η} 的导数为

$$\dot{\mathbf{e}}_{\eta} = \dot{\boldsymbol{\eta}} - \dot{\boldsymbol{\eta}}_d \quad (25)$$

将 $\dot{\mathbf{e}}_{\eta}$ 代入式 (24), 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= (-\dot{\rho}_{\eta} \mathbf{e}_{\eta}^T \mathbf{e}_{\eta} / \rho_{\eta} + \mathbf{e}_{\eta}^T \dot{\mathbf{e}}_{\eta}) / \rho_{\eta}^2 - \mathbf{e}_{\eta}^T \mathbf{e}_{\eta} = \\ &[-\dot{\rho}_{\eta} \mathbf{e}_{\eta}^T \mathbf{e}_{\eta} / \rho_{\eta} + \mathbf{e}_{\eta}^T (\dot{\boldsymbol{\eta}} - \dot{\boldsymbol{\eta}}_d)] / \rho_{\eta}^2 - \mathbf{e}_{\eta}^T \mathbf{e}_{\eta} = \\ &(-\dot{\rho}_{\eta} \mathbf{e}_{\eta}^T \mathbf{e}_{\eta} / \rho_{\eta} + \mathbf{e}_{\eta}^T (R(\boldsymbol{\eta}) \mathbf{v}) - \dot{\boldsymbol{\eta}}_d) / (\rho_{\eta}^2 - \mathbf{e}_{\eta}^T \mathbf{e}_{\eta}) \end{aligned} \quad (26)$$

为使 $\dot{V}_1 \leq 0$, 设计如下虚拟控制律 \mathbf{v}_d :

$$\mathbf{v}_d = R^{-1}(\boldsymbol{\eta})(\dot{\boldsymbol{\eta}}_d - \mathbf{K}_1 \mathbf{e}_\eta + \mathbf{e}_\eta \dot{\rho}_\eta / \rho_\eta) \quad (27)$$

式中, \mathbf{K}_1 为正定常数增益矩阵。

令速度误差为 $\mathbf{e}_v = \mathbf{v} - \mathbf{v}_d$, 与位置误差同理, 速度误差需满足目标 $\|\mathbf{e}_v\| < \rho_v(t)$, 速度误差的性能函数为

$$\rho_v(t) = (\rho_{v0} - \rho_{v\infty})e^{-l_v t} + \rho_{v\infty} \quad (28)$$

针对 \mathbf{e}_v 设计的障碍 Lyapunov 函数为

$$V_2 = V_1 + \ln(\rho_v^2 / (\rho_v^2 - \mathbf{e}_v^T \mathbf{e}_v)) / 2 \quad (29)$$

V_2 的导数为

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \dot{V}_1 + 2\rho_v \dot{\rho}_v (\rho_v^2 - \mathbf{e}_v^T \mathbf{e}_v) / 2\rho_v^2 (\rho_v^2 - \mathbf{e}_v^T \mathbf{e}_v)^2 - \\ &\rho_v^2 (2\rho_v \dot{\rho}_v - 2\mathbf{e}_v^T \dot{\mathbf{e}}_v) / 2\rho_v^2 (\rho_v^2 - \mathbf{e}_v^T \mathbf{e}_v)^2 = \\ &\dot{V}_1 + (-\dot{\rho}_v \mathbf{e}_v^T \mathbf{e}_v / \rho_v + \mathbf{e}_v^T \dot{\mathbf{e}}_v) / (\rho_v^2 - \mathbf{e}_v^T \mathbf{e}_v) \end{aligned} \quad (30)$$

\mathbf{e}_v 的导数为

$$\dot{\mathbf{e}}_v = \dot{\mathbf{v}} - \dot{\mathbf{v}}_d \quad (31)$$

将 $\dot{\mathbf{e}}_v$ 代入式(30), 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \dot{V}_1 - \dot{\rho}_v \mathbf{e}_v^T \mathbf{e}_v / \rho_v (\rho_v^2 - \mathbf{e}_v^T \mathbf{e}_v) + \mathbf{e}_v^T \dot{\mathbf{e}}_v / \rho_v^2 - \mathbf{e}_v^T \mathbf{e}_v = \\ &\dot{V}_1 + (-\dot{\rho}_v \mathbf{e}_v^T \mathbf{e}_v / \rho_v + \mathbf{e}_v^T (\mathbf{f}(\mathbf{v}) + \overline{\mathbf{M}}^{-1} \boldsymbol{\tau}_{\text{nom}} + \\ &\mathbf{D}_{\text{all}} - \dot{\mathbf{v}}_d)) / (\rho_v^2 - \mathbf{e}_v^T \mathbf{e}_v) = \\ &-(\mathbf{e}_\eta^T \mathbf{K}_1 \mathbf{e}_\eta / (\rho_\eta^2 - \mathbf{e}_\eta^T \mathbf{e}_\eta)) + (\mathbf{e}_v^T / \rho_v^2) - \\ &\mathbf{e}_v^T \mathbf{e}_v (-\dot{\rho}_v \dot{\rho}_v / \rho_v + \mathbf{f}(\mathbf{v}) + \overline{\mathbf{M}}^{-1} \boldsymbol{\tau}_{\text{nom}} + \mathbf{D}_{\text{all}} - \dot{\mathbf{v}}_d) = \\ &-(\mathbf{e}_\eta^T \mathbf{K}_1 \mathbf{e}_\eta / (\rho_\eta^2 - \mathbf{e}_\eta^T \mathbf{e}_\eta)) + \mathbf{e}_v^T (-\dot{\rho}_v \dot{\rho}_v / \rho_v + \\ &\overline{\mathbf{M}}^{-1} \boldsymbol{\tau}_{\text{nom}} + \mathbf{f}(\mathbf{v}) + \mathbf{D}_{\text{all}} - \dot{\mathbf{v}}_d + \\ &(\mathbf{e}_v / 2(\rho_v^2 - \mathbf{e}_v^T \mathbf{e}_v))) / (\rho_v^2 - \mathbf{e}_v^T \mathbf{e}_v) - \mathbf{e}_v^T \mathbf{e}_v / 2(\rho_v^2 - \mathbf{e}_v^T \mathbf{e}_v)^2 \end{aligned} \quad (32)$$

为使 $\dot{V}_2 \leq 0$, 设计控制:

$$\boldsymbol{\tau}_{\text{nom}} = \overline{\mathbf{M}}(\mathbf{e}_v \dot{\rho}_v / \rho_v - \mathbf{f}(\mathbf{v}) - \mathbf{e}_v / 2(\rho_v^2 - \mathbf{e}_v^T \mathbf{e}_v) - \hat{\mathbf{D}}_{\text{all}} + \dot{\mathbf{v}}_d - \mathbf{K}_2 \mathbf{e}_v) \quad (33)$$

将式(33)代入式(32), 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= -\mathbf{e}_\eta^T \mathbf{K}_1 \mathbf{e}_\eta / (\rho_\eta^2 - \mathbf{e}_\eta^T \mathbf{e}_\eta) + \\ &\mathbf{e}_v^T (-\mathbf{K}_2 \mathbf{e}_v + \mathbf{D}_{\text{all}} - \hat{\mathbf{D}}_{\text{all}}) / (\rho_v^2 - \mathbf{e}_v^T \mathbf{e}_v) - \\ &\mathbf{e}_v^T \mathbf{e}_v / 2(\rho_v^2 - \mathbf{e}_v^T \mathbf{e}_v)^2 = -\mathbf{e}_\eta^T \mathbf{K}_1 \mathbf{e}_\eta / (\rho_\eta^2 - \mathbf{e}_\eta^T \mathbf{e}_\eta) - \\ &\mathbf{e}_v^T \mathbf{K}_2 \mathbf{e}_v / (\rho_v^2 - \mathbf{e}_v^T \mathbf{e}_v) + \mathbf{e}_v^T \hat{\mathbf{D}}_{\text{all}} / (\rho_v^2 - \mathbf{e}_v^T \mathbf{e}_v) - \\ &\mathbf{e}_v^T \mathbf{e}_v / 2(\rho_v^2 - \mathbf{e}_v^T \mathbf{e}_v)^2 \end{aligned} \quad (34)$$

由基本不等式, 可得

$$\mathbf{e}_v^T \hat{\mathbf{D}}_{\text{all}} / (\rho_v^2 - \mathbf{e}_v^T \mathbf{e}_v) \leq \mathbf{e}_v^T \mathbf{e}_v / 2 (\rho_v^2 - \mathbf{e}_v^T \mathbf{e}_v)^2 + \hat{\mathbf{D}}_{\text{all}}^T \hat{\mathbf{D}}_{\text{all}} / 2 \quad (35)$$

且由预定义时间稳定性定理可知, 所设计的

扰动观测器的扰动估计误差满足 $\|\hat{\mathbf{D}}_{\text{all}}\|^2 \leq \zeta$, 即收敛至一个原点附近的小邻域内, 故 \dot{V}_2 满足如下不等式:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &\leq -\mathbf{e}_\eta^T \mathbf{K}_1 \mathbf{e}_\eta / (\rho_\eta^2 - \mathbf{e}_\eta^T \mathbf{e}_\eta) - \\ &\mathbf{e}_v^T \mathbf{K}_2 \mathbf{e}_v / (\rho_v^2 - \mathbf{e}_v^T \mathbf{e}_v) + \hat{\mathbf{D}}_{\text{all}}^T \hat{\mathbf{D}}_{\text{all}} / 2 \leq \\ &-\mathbf{e}_\eta^T \mathbf{K}_1 \mathbf{e}_\eta / (\rho_\eta^2 - \mathbf{e}_\eta^T \mathbf{e}_\eta) - \mathbf{e}_v^T \mathbf{K}_2 \mathbf{e}_v / (\rho_v^2 - \mathbf{e}_v^T \mathbf{e}_v) + \varepsilon \end{aligned} \quad (36)$$

式中, $\varepsilon = \zeta / 2 > 0$ 。其中, \mathbf{K}_1 和 \mathbf{K}_2 均为正定常数对角矩阵, $\mathbf{K}_1 = \text{diag}(k_{11}, k_{12}, k_{13}, k_{14}, k_{15})$, $\mathbf{K}_2 = \text{diag}(k_{21}, k_{22}, k_{23}, k_{24}, k_{25})$ 。根据引理2, 可知 \dot{V}_2 满足如下不等式:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &\leq -k_1 \ln(\rho_\eta^2 / (\rho_\eta^2 - \mathbf{e}_\eta^T \mathbf{e}_\eta)) - \\ &k_2 \ln(\rho_v^2 / (\rho_v^2 - \mathbf{e}_v^T \mathbf{e}_v)) + \varepsilon \leq -k_1 \rho_\eta^2 / (\rho_\eta^2 - \mathbf{e}_\eta^T \mathbf{e}_\eta) - \\ &k_2 \rho_v^2 / (\rho_v^2 - \mathbf{e}_v^T \mathbf{e}_v) + \varepsilon \leq -kV_2 + \varepsilon \end{aligned} \quad (37)$$

式中, $k = \min\{2k_{ij} | i = 1, 2, j = 1, 2, \dots, 5\}$, 且 k 为一个正系数。该微分不等式表明, 当 $V_2 > \varepsilon / k$ 时, \dot{V}_2 恒为负, 因此 Lyapunov 函数 V_2 是一致最终有界的。由于 V_2 的有界性保证了其对数函数内的项有界, 这直接证明了跟踪误差将始终被约束在预设的性能边界之内, 闭环系统稳定。

由式(37), 可以解出

$$V_2(t) \leq e^{-kt} V_2(0) + \varepsilon(1 - e^{-kt}) / k \quad (38)$$

当 $t \rightarrow \infty$ 时, 由式(38), 可得

$$\limsup_{t \rightarrow \infty} V_2(t) \leq \varepsilon / k \quad (39)$$

进一步, 可以得到如下式子:

$$\limsup_{t \rightarrow \infty} \|\mathbf{e}_\eta\| \leq \rho_{\eta\infty} \sqrt{1 - e^{-2\varepsilon/k}} \quad (40)$$

$$\limsup_{t \rightarrow \infty} \|\mathbf{e}_v\| \leq \rho_{v\infty} \sqrt{1 - e^{-2\varepsilon/k}} \quad (41)$$

4 仿 真

为证明扰动观测器和预设性能容错控制器的有效性, 本文通过 Matlab 仿真实验进行验证。

相关实验参数如下: UUV 的初始位置和姿态为 $x = 1 \text{ m}$, $y = 1 \text{ m}$, $z = -1 \text{ m}$, $\theta = \pi / 18$, $\psi = 2\pi / 9$; UUV 的初始速度为 $u = 0 \text{ m/s}$, $v = 0 \text{ m/s}$, $w = 0 \text{ m/s}$, $q = 0 \text{ rad/s}$, $r = 0 \text{ rad/s}$; 位置误差边界为 $\rho_{\eta 0} = 5$, $\rho_{\eta\infty} = 1$, $l_\eta = 0.1$; 角度误差边界为 $\rho_{\eta 0} = 1.6$, $\rho_{\eta\infty} = 0.05$, $l_\eta = 0.1$; 速度误差边界为 $\rho_{v0} = 2$, $\rho_{v\infty} = 0.1$, $l_v = 0.1$; 角速度误差边界为 $\rho_{v0} = 3$, $\rho_{v\infty} = 0.2$, $l_v = 0.1$; 扰动观测器参数为 $\gamma_1 = 0.1$, $\gamma_2 = 0.01$, $\gamma_3 = 0.01$, $\alpha_1 = 12$, $\alpha_2 = 12$, $\alpha_3 = 0.1$, $\alpha_4 = 0.12$, $\rho_1 = 0.5$ 。

UUV 的期望路径为

$$x_d(t) = \begin{cases} 100 \cos(0.005\pi t), & 0 \leq t < 1000 \\ -100, & 1000 < t < 1100 \\ 100 \cos(0.005\pi(t-1100)) - 200, & 1100 < t < 1200 \\ -t + 1000, & 1200 < t < 1300 \\ 100 \cos(0.005\pi(t-1200)) - 300, & 1300 < t < 1400 \\ -400, & 1400 < t < 1500 \\ 100 \cos(0.005\pi(t-1500)) - 500, & 1500 < t < 1600 \\ -t + 1100, & 1600 < t < 2000 \end{cases} \quad (42)$$

$$y_d(t) = \begin{cases} 100 \sin(0.005\pi t), & 0 \leq t < 1000 \\ -t + 1000, & 1000 < t < 1100 \\ -100 \sin(0.005\pi(t-1100)) - 100, & 1100 < t < 1200 \\ -200, & 1200 < t < 1300 \\ -100 \sin(0.005\pi(t-1200)) - 100, & 1300 < t < 1400 \\ t - 1500, & 1400 < t < 1500 \\ 100 \sin(0.005\pi(t-1500)), & 1500 < t < 1600 \\ 100, & 1600 < t < 2000 \end{cases} \quad (43)$$

$$z_d(t) = \begin{cases} 0.1t, & 0 \leq t < 1000 \\ 100, & 1000 < t < 1700 \\ -0.2t + 440, & 1700 < t \leq 2000 \end{cases} \quad (44)$$

4.1 案例 1

在案例 1 中, 当仿真实验进行至 900 s 时, 令执行器 $F_5^{\text{fault}} = 0.2F_5$, 即其实际输出的推力仅为正常状态下输出推力的 20%。

仿真结果如下, 由图 2~图 4 可以看出, 在模拟执行器严重失效的情况下, 所设计的控制律仍具有良好的故障抑制能力和动态性能, 确保欠驱动 UUV 的运动路径与参考路径之间并未出现明显的偏差, 证明所设计的控制律在外部扰动、模型参数摄动、执行器故障等情况的影响下具有优秀的控制效果。反步法尽管也能完成控制任务, 但从图 3 可以直观地看出其在遭受同等强度的故障冲击时, 由于缺乏对误差过程的直接约束, 更容易出现较大的瞬时跟踪偏差。这直观地体现了预设性能控制方法卓越的鲁棒性。其优势在于, 通过对所有底层误差施加严格约束, 从根本上保证了整体轨迹的精确性。

图 5 直观地展示了 UUV 的位置误差动态响应。仿真结果表明, 无论是在受初始状态影响的暂态阶段, 还是在最终的稳态阶段, 位置跟踪误差始终严格收敛于预设的性能边界之内, 完全满

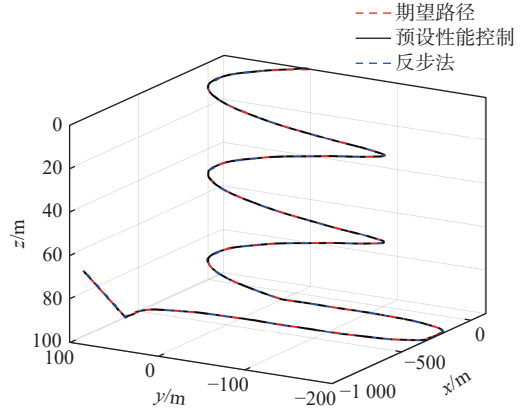


图 2 路径跟踪任务中的三维路径图

Fig. 2 Three-dimensional path view in path following task

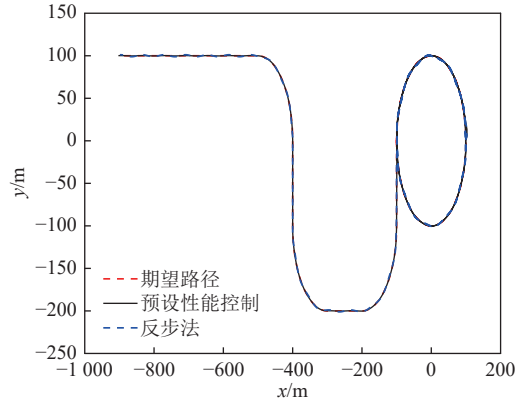


图 3 三维路径图在 x-y 轴上的投影图

Fig. 3 Three-dimensional path diagram projection on the x-y axis

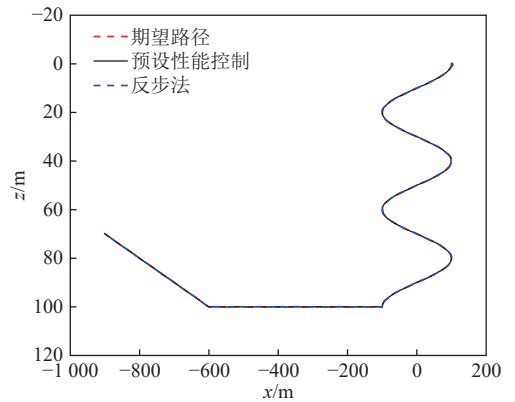


图 4 三维路径图在 x-z 轴上的投影图

Fig. 4 Three-dimensional path diagram projection on the x-z axis

足了预设性能控制指标。证明在执行器严重故障的情况下, 本文所设计的将执行器故障等效为集总扰动, 由扰动观测器进行快速、准确地估计和补偿的控制策略, 能够将故障对位置跟踪精度的影响被降至最低, 显著提升 UUV 的航行安全性。而反步法控制的位置误差曲线出现了误差大于预设边界的情况, 因此, 预设性能控制能够实现误差边界的可量化约束, 而反步法提供的是最终的稳定性, 前者在可靠性要求高的应用中更加优越。

从图 6 和图 7 可以看出, 在整个仿真过程中,

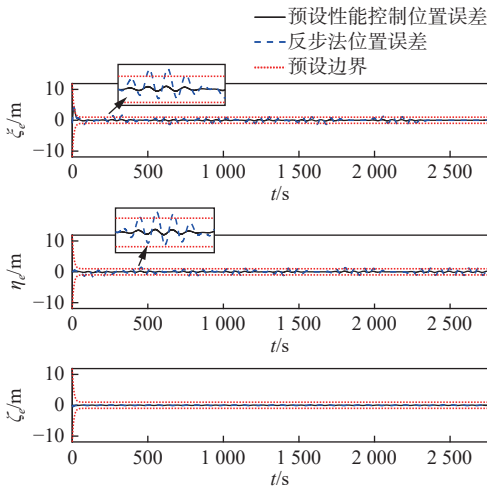


图 5 位置误差曲线

Fig. 5 The curves of position error

本文所设计的控制器能够始终确保俯仰角误差满足预设的性能约束函数。具体来,该控制器不仅在任务初始阶段展现出优良的暂态性能,使误差快速收敛;在参考路径进入水平作业阶段、回收阶段及执行器发生故障并直接影响纵倾力矩后,它同样能够及时响应,将姿态误差迅速拉回到允许范围内。整个过程无明显超调,并严格遵守了 ± 0.05 弧度的稳态边界和动态过程中的性能包络。而图 7 直观地展示出反步法控制无法将艏向

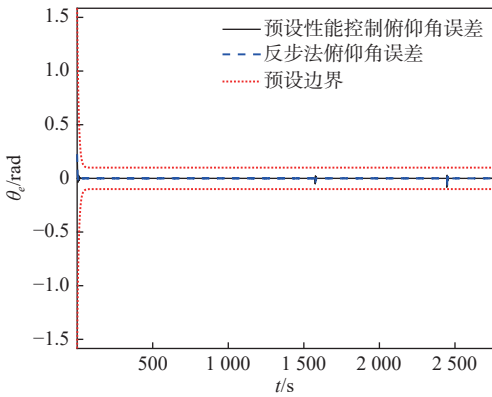


图 6 俯仰角误差曲线

Fig. 6 The curves of pitch angle error

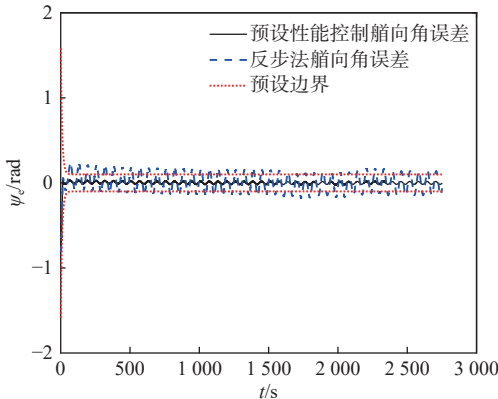


图 7 艏向角误差曲线

Fig. 7 The curves of heading angle error

角误差限制在预设范围内,进一步印证了预设性能控制展现出的强大的鲁棒性与故障恢复能力。

图 8 的结果有力地证实了所提控制器对俯仰角速度误差的有效约束能力。在整个任务期间,包括故障发生时刻,该误差始终被严格限制在预设的性能边界内。控制器不仅在初始阶段能以较小的超调量实现误差的快速收敛,在参考路径发生导致俯仰角速度突变后同样能迅速抑制扰动、使系统恢复稳定。值得注意的是,在俯仰角速度发生突变后,控制器能快速使角速度误差回到一个比较小的范围进行收敛,这种现象能够全面展现出控制器的高性能。

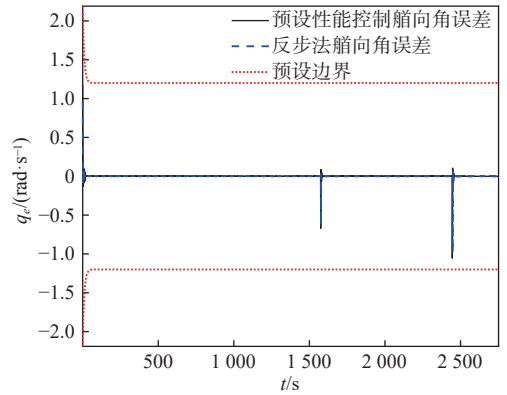


图 8 俯仰角速度误差曲线

Fig. 8 The curves of pitch angular velocity error

艏向角速度的控制效果如图 9 所示。结果显示,该状态误差在经历短暂的初始振荡后,便能迅速镇定并收敛于一个极小的邻域内。重要的是,整个动态过程均被严格限制在预设的性能包络线以内,展现了控制器优良的动态品质。预设性能控制通过直接约束角速度误差,从目标上就规定了运动的平顺性。这种方法天然地抑制了剧烈的角速度变化,从而避免了对执行器的高频、高幅值指令,有助于减少能耗、降低机械磨损,并避免了“微分爆炸”问题带来的负面影响。

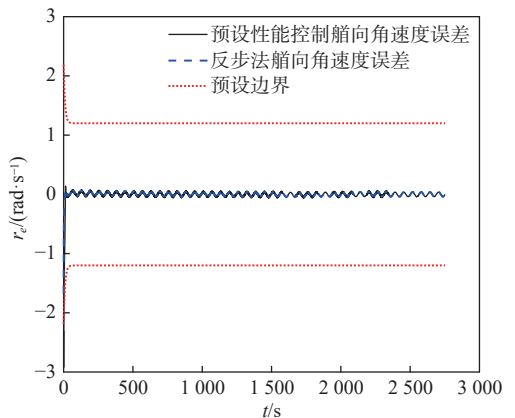


图 9 艏向角速度误差收敛曲线

Fig. 9 Convergence curves of heading angular velocity error

总体而言,案例1的仿真结果系统地证明了所提控制方案的优越性。通过将位置、线速度和角速度等所有关键状态误差全程限制在预设的性能函数范围内,该控制器不仅确保了系统具有良好的稳定裕度,更显著提升了UUV在执行路径跟踪任务时的整体安全与可靠性。

本文设计的扰动观测器是实现容错控制的关键,图10验证了其有效性。该观测器将执行器故障视为集总扰动的一部分进行在线估计。仿真结果显示,在900s时注入执行器故障并且参考路径发生改变后,总扰动的实际值产生阶跃变化。观测器的估计值能够立刻捕捉到这一突变,并快速完成对新实际值的跟踪。这一灵敏的动态响应表明,该观测器能够有效辨识故障信息,从而为控制器进行容错补偿提供了可靠的实时依据。

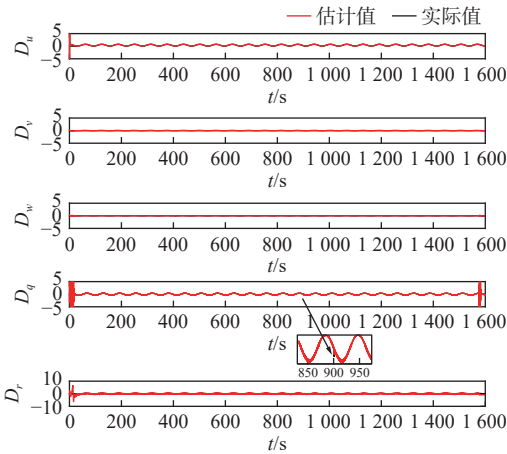


图10 预定义时间扰动观测器收敛曲线

Fig. 10 Predefined time disturbance observer convergence curves

控制器的输出响应如图11所示,在故障发生时刻以及在参考路径发生改变时,为实现容错和路径跟踪,控制指令相应地产生一次阶跃,以快速抵消故障带来的影响。重要的是,所有控制指令的幅值始终保持在物理约束范围内,证明了该控制律在故障下仍能生成安全、有效的控制输出,符合工程应用要求。

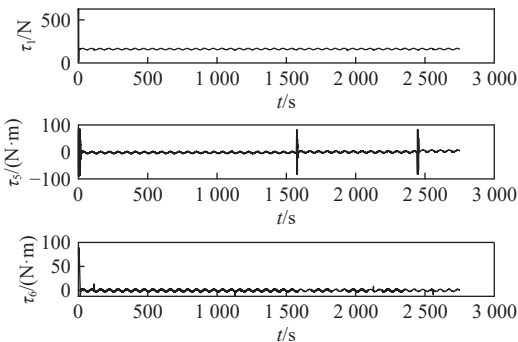


图11 控制力与力矩曲线

Fig. 11 Control force and torque curves

4.2 案例2

在案例2中,当仿真实验进行至900s时,令执行器 $F_4^{fault} = 0.3F_4$, 即其实际输出的推力仅为正常状态下输出推力的30%。

仿真结果如下,由图12~图14可以看出,即使在70%推力的损失下,预设性能控制的跟踪轨迹依然保持了极高的精度,与案例1的表现几乎没有差异。在图13中尽管两种算法轨迹大致重合,但结合后续的误差曲线图分析发现,反步法在稳态阶段仍存在较大的偏离,无法像预设性能控制那样将误差收敛在极小范围内。

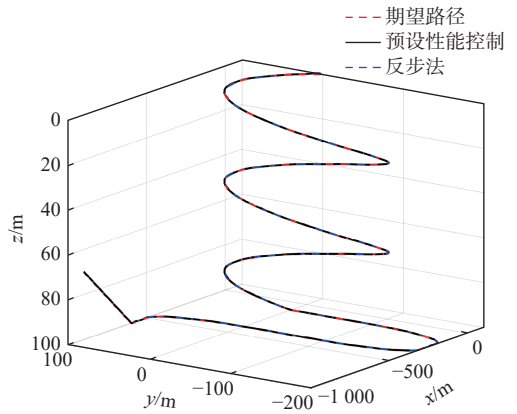


图12 路径跟踪任务中的三维路径图

Fig. 12 Three-dimensional path view in path following task

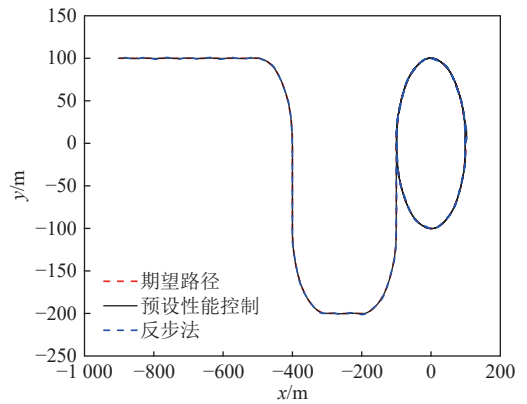


图13 三维路径图在x-y轴上的投影图

Fig. 13 The projection of the three-dimensional path diagram on the x-y axis

从图15可以看出,预设性能控制的位置误差再次被完美地限制在±1m的稳态性能边界内。反步法控制的位置误差依旧会超过所设定的性能边界范围。预设性能控制的优势在于其控制目标的可指定性。工程师可以直接将任务要求的性能指标作为设计参数输入到控制器中。反步法则需要通过反复试凑增益参数来间接地影响性能,过程繁琐且结果不直观,也无法提供硬性保证。

从图16和图17可以看出,再次严格遵守了

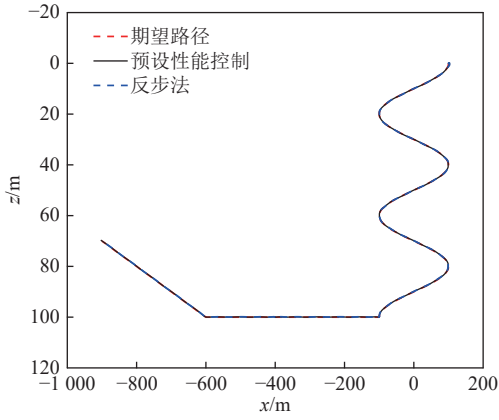


图 14 三维路径图在 $x-z$ 轴上的投影图

Fig. 14 Three-dimensional path diagram projection on the $x-z$ axis

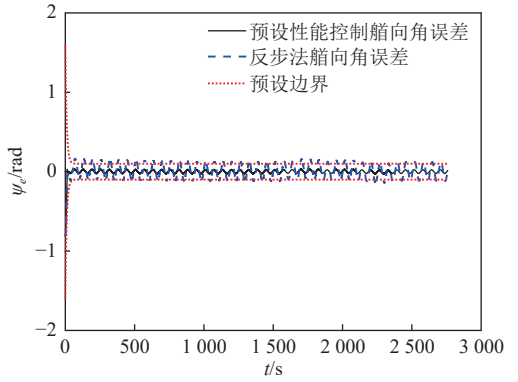


图 17 艏向角误差曲线

Fig. 17 The curves of heading angle error

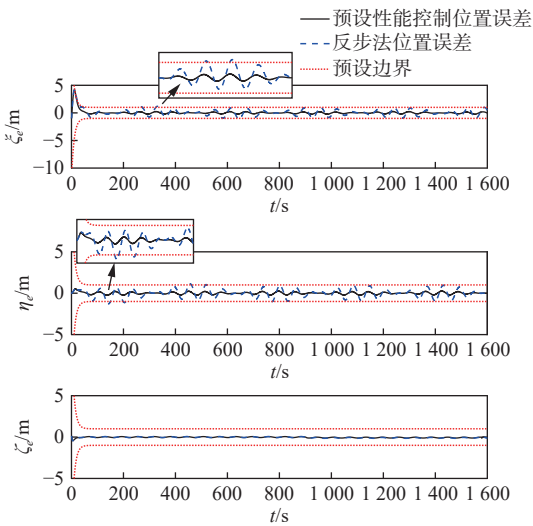


图 15 位置误差曲线

Fig. 15 The curves of position error

± 0.05 rad 的姿态误差稳态边界, 展现了与案例 1 一致的稳定性能。而反步法控制的姿态误差依旧超过所设定的稳态边界, 因此可以得出所设计的预设性能控制方法具有更强的鲁棒性。

从图 18 的结果可以得出, 所设计的预设性能控制器对俯仰角速度误差具有有效的约束能力。在整个任务期间, 包括 900 s 的故障发生时刻以及

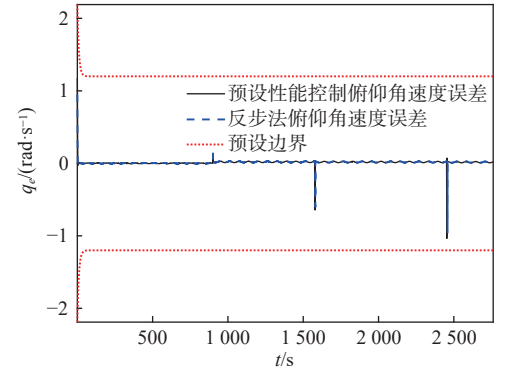


图 18 俯仰角速度误差曲线

Fig. 18 The curves of pitch angular velocity error

所跟踪的路径发生突变时刻, 该误差依旧被严格限制在预设的性能边界内。这种现象能够全面展现出控制器的高性能。

从图 19 的结果可以看出, 该状态误差在经历短暂的初始振荡后, 依旧能够迅速镇定, 并收敛于一个极小的邻域内。整个动态过程依旧被严格限制在预设的性能包络线以内, 与案例 1 体现的控制器性能相同, 展现了控制器优良的动态品质。

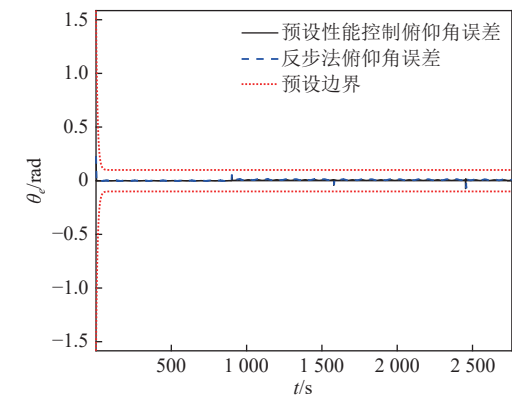


图 16 俯仰角误差曲线

Fig. 16 The curves of pitch angle error

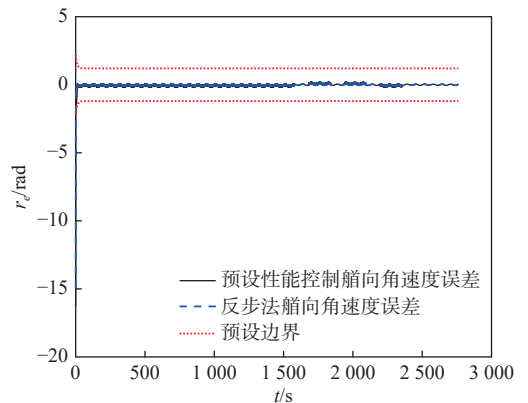


图 19 艏向角速度误差收敛曲线

Fig. 19 The convergence curves of heading angular velocity error

图 20 的曲线展示出扰动观测器的动态性能。当仿真在第 900 s 引入执行器失效并且路径发生改变时, 总扰动的真实值发生了急剧跳变。

观测器的估计值立即捕捉到了变化,并以极快的速度完成了对新实际值的追踪。从而证明了该观测器能成功识别故障所引发的扰动,从而为控制器的容错环节提供了准确、实时的补偿依据。

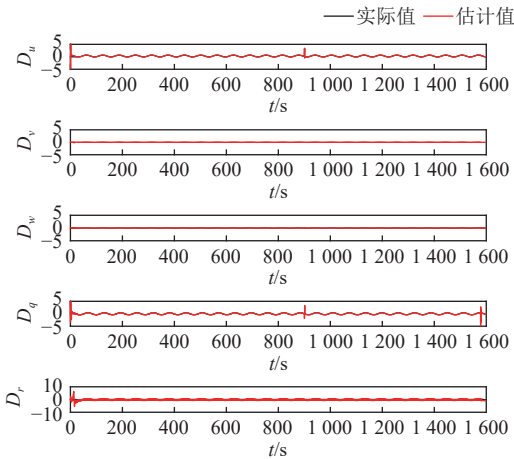


图 20 预定义时间扰动观测器收敛曲线

Fig. 20 Predefined time disturbance observer convergence curves

控制器的输出力矩曲线如图 21 所示。在故障发生及参考路径变化的时刻,控制指令相应地产生阶跃,以实现快速补偿,并确保路径跟踪的精确性。尤为重要的是,控制指令的幅值始终处于物理可行范围内,这验证了所提出的控制律在故障工况下生成安全、有效控制信号的能力,符合工程实践的要求。

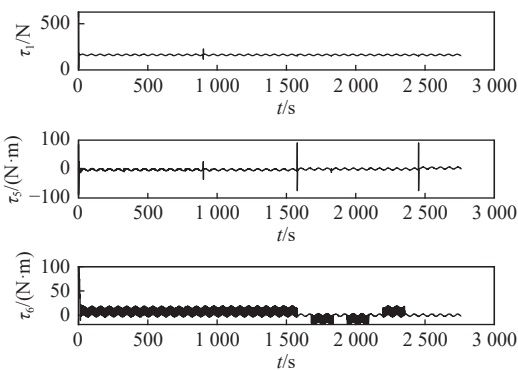


图 21 控制力与力矩曲线

Fig. 21 Control force and torque curves

5 结 语

确保 UUV 在复杂的海洋作业中精确遵循预定路径,是一项基础性却极具挑战的任务。UUV 固有的欠驱动、高度耦合与非线性动态特性,为其高精度控制设置了巨大障碍。此外,水下环境的严苛性容易导致执行器故障频发,因此,发展有效的容错控制方法对保障 UUV 的安全自主运行至关重要。本研究聚焦于 UUV 在面临未知外部扰动、模型参数摄动、存在未建模动力学及执

行器故障时,如何实现高性能的路径跟踪容错控制。首先,为处理集总扰动,设计了一个预定义时间扰动观测器,它能将上述所有不确定性作为一个整体进行快速、精确的估计,并对执行器故障进行有效补偿。其次,为保证 UUV 的绝对安全,通过集成一个改进的预设性能函数和障碍 Lyapunov 函数,设计了全状态预设性能容错控制器,旨在将所有系统的状态误差严格约束在性能函数规定的范围内,并将扰动估计值前馈给控制器,系统最终实现了优秀的路径跟踪并达到了较好的容错性能。

仿真实验表明,所设计的扰动观测器能够精确且快速地识别包括执行器故障在内的集总扰动,而预设性能控制器则成功地将 UUV 的所有状态锁定在既定的安全误差区间之内。

尽管如此,本工作仍存在需要进一步研究的问题:

- 1) 扩展容错控制的范围:目前方案主要关注执行器故障,但现实中传感器亦可能失效。未来的研究应致力于开发能同时应对执行器与传感器双重故障的控制系统,以构建更全面的容错能力。
- 2) 增强故障处理的复杂度:当前方法仅限于应对单一执行器故障。为了处理更严峻的工况,下一步的关键是开发能够诊断并补偿多个执行器并发故障的策略,从而显著提升 UUV 在复杂任务中的可靠性。

参考文献:

- [1] BAO H M, ZHANG Y, SONG M P, et al. A review of underwater vehicle motion stability[J]. Ocean Engineering, 2023, 287: 115735.
- [2] CHEN X, BOSE N, BRITO M, et al. A review of risk analysis research for the operations of autonomous underwater vehicles[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2021, 216: 108011.
- [3] RIDOLFI A, SPACCINI D, FANELLI F, et al. An autonomous underwater vehicle and sunset to bridge underwater networks composed of multi-vendor modems [J]. Annual Reviews in Control, 2018, 46: 295–303.
- [4] 王旭. 人文性海洋资源及其战略运用——海洋强国建设的演进探析 [J]. 亚太安全与海洋研究, 2024(6): 75–90. WANG X. Humanistic marine resources and their strategic use—analysis on the evolution of building a strong maritime nation[J]. Asia-Pacific Security and Maritime Affairs, 2024(6): 75–90 (in Chinese).
- [5] DING S S, ZHANG T D, LEI M, et al. Robust visual-based localization and mapping for underwater vehicles: a survey[J]. Ocean Engineering, 2024, 312: 119274.
- [6] 吕昊高, 古楠, 刘陆, 等. 基于动态事件触发的多无人船

- 协同路径跟踪控制[J]. 中国舰船研究, 2025, 20(1): 213–222.
- LÜ M G, GU N, LIU L, et al. Dynamic event trigger based cooperative path following control for multiple unmanned surface vehicles[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2025, 20(1): 213–222 (in Chinese).
- [7] WU C X, KARIMI H R, SHAN L, et al. Data-driven iterative learning cooperative trajectory tracking control for multiple autonomous underwater vehicles with input saturation constraints[J]. Journal of Field Robotics, 2024, 41(7): 2475–2487.
- [8] YU H M, GUO C, YAN Z P. Globally finite-time stable three-dimensional trajectory-tracking control of underactuated UUVs[J]. Ocean Engineering, 2019, 189: 106329.
- [9] MENG Y H, ZHANG Y, YE H, et al. Trajectory tracking control for unmanned amphibious surface vehicles with actuator faults[J]. Applied Ocean Research, 2024, 152: 104182.
- [10] TABATABAEE-NASAB F S, MOOSAVIAN S A A, KHALAJI A K. Adaptive fault-tolerant control for an autonomous underwater vehicle[J]. Robotica, 2022, 40(11): 4076–4089.
- [11] LIU F Q, MA Z X, MU B X, et al. Review on fault-tolerant control of unmanned underwater vehicles[J]. Ocean Engineering, 2023, 285: 115471.
- [12] CHE G F, YU Z. ADP based output-feedback fault-tolerant tracking control for underactuated AUV with actuators faults[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2023, 45(4): 5871–5883.
- [13] SHEN Q K, SHI P, LIM C P. Fuzzy adaptive fault-tolerant stability control against novel actuator faults and its application to mechanical systems[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2024, 32(4): 2331–2340.
- [14] HU Y H, SONG Z K, ZHANG H C. Adaptive sliding mode control with pre-specified performance settings for AUV's trajectory tracking[J]. Ocean Engineering, 2023, 287: 115882.
- [15] AN S, WANG X Y, WANG L J, et al. Observer based fixed-time integral sliding mode tracking control for underactuated AUVs via an event-triggered mechanism[J]. Ocean Engineering, 2023, 284: 115158.
- [16] XIA G Q, ZHANG Y, ZHANG W, et al. Robust adaptive super-twisting sliding mode formation controller for homing of multi-underactuated AUV recovery system with uncertainties[J]. ISA Transactions, 2022, 130: 136–151.
- [17] DU P Z, YANG W C, WANG Y Q, et al. A novel adaptive backstepping sliding mode control for a lightweight autonomous underwater vehicle with input saturation[J]. Ocean Engineering, 2022, 263: 112362.
- [18] WANG H Q, TONG M, ZHAO X D, et al. Predefined-time adaptive neural tracking control of switched nonlinear systems[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2023, 53(10): 6538–6548.
- [19] XU R K, TANG G Y, XIE D, et al. Neural network for 3D trajectory tracking control of a CMG-actuated underwater vehicle with input saturation[J]. ISA Transactions, 2022, 123: 152–167.
- [20] CUI J K, HOU M X, PENG Z, et al. Hamiltonian based AUV navigation using adaptive finite-time trajectory tracking control[J]. Ocean Engineering, 2025, 320: 120329.
- [21] WANG H J, REN J F, HAN M X, et al. Robust adaptive three-dimensional trajectory tracking control for unmanned underwater vehicles with disturbances and uncertain dynamics[J]. Ocean Engineering, 2023, 289: 116184.
- [22] BECHLIOLIS C P, ROVITHAKIS G A. Robust adaptive control of feedback linearizable MIMO nonlinear systems with prescribed performance[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2008, 53(9): 2090–2099.
- [23] SUN Y C, LIU M Q, QIN H D, et al. Full prescribed performance trajectory tracking control strategy of autonomous underwater vehicle with disturbance observer[J]. ISA Transactions, 2024, 151: 117–130.
- [24] WANG C, WANG J, QIN Y C, et al. An adaptive characteristic model-based event-triggered sigmoid prescribed performance control approach for tracking the trajectory of autonomous underwater vehicles[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2024, 12(9): 1473.
- [25] DU J L, LI J, LEWIS F L. Distributed 3-D time-varying formation control of underactuated AUVs with communication delays based on data-driven state predictor[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2023, 19(5): 6963–6971.
- [26] ZHANG H T, JIANG Y Q, GAO R, et al. Prescribed performance formation tracking control for underactuated AUVs under time-varying communication delays[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2024, 12(9): 1533.
- [27] GAO Z W, CECATI C, DING S X. A survey of fault diagnosis and fault-tolerant techniques—Part I: fault diagnosis with model-based and signal-based approaches[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(6): 3757–3767.
- [28] JIANG J, YU X. Fault-tolerant control systems: a comparative study between active and passive approaches[J]. Annual Reviews in Control, 2012, 36(1): 60–72.
- [29] LIU F Q, TANG H, QIN Y, et al. Review on fault diagnosis of unmanned underwater vehicles[J]. Ocean Engineering, 2022, 243: 110290.
- [30] ZHU D Q, ZHANG H P, LIU C X. Tracking controller based on model prediction control for remotely operated vehicle for thruster fault[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2022, 27(2): 840–855.
- [31] HOU C, LI X G, WANG H B, et al. Fuzzy linear extended states observer - based iteration learning fault -

- tolerant control for autonomous underwater vehicle trajectory - tracking system[J]. *IET Control Theory & Applications*, 2023, 17(3): 270–283.
- [32] LV T, ZHOU J L, WANG Y J, et al. Sliding mode based fault tolerant control for autonomous underwater vehicle[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 216: 107855.
- [33] LIU X, ZHANG M J, YAO F. Adaptive fault tolerant control and thruster fault reconstruction for autonomous underwater vehicle[J]. *Ocean Engineering*, 2018, 155: 10–23.
- [34] CHEN Y M, WANG Y Z, YU Y, et al. A fault diagnosis method for the autonomous underwater vehicle via meta-self-attention multi-scale CNN[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, 11(6): 1121.
- [35] NI L L, FULLER C R. Control reconfiguration based on hierarchical fault detection and identification for unmanned underwater vehicles[J]. *Journal of Vibration and Control*, 2003, 9(7): 735–748.
- [36] HAO L Y, ZHANG H, GUO G, et al. Quantized sliding mode control of unmanned marine vehicles: various thruster faults tolerated with a unified model[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2021, 51(3): 2012–2026.
- [37] BAI Y L, BIGGS J D, ZHANG Z C, et al. Adaptive fault-tolerant control for longitudinal motion of supercavitating vehicles[J]. *European Journal of Control*, 2021, 57: 263–272.
- [38] YAN Y, GUAN D Y, JIANG T, et al. Event-triggered adaptive predefined-time sliding mode control of autonomous surface vessels with unknown dead zone and actuator faults[J]. *Ocean Engineering*, 2024, 304: 117851.
- [39] LIU F Q, XU D M, YU J, et al. Fault isolation of thrusters under redundancy in frame-structure unmanned underwater vehicles[J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2018, 15(2): 1–11.
- [40] 王观道, 向先波, 李锦江, 等. 面向过驱动 UUV 推进器容错控制的非线性观测自适应推力分配 [J]. *中国舰船研究*, 2022, 17(5): 175–183.
- WANG G D, XIANG X B, LI J J, et al. Nonlinear observer-based adaptive thruster allocation for thruster fault tolerant control of over-actuated UUV[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2022, 17(5): 175–183 (in Chinese).
- [41] TANG P, LIN D F, ZHENG D, et al. Observer based finite-time fault tolerant quadrotor attitude control with actuator faults[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2020, 104: 105968.
- [42] WU Q L, ZHU Q D. Prescribed performance fault-tolerant attitude tracking control for UAV with actuator faults [J]. *Drones*, 2024, 8(5): 204.
- [43] ZHANG L Y, LIU H, TANG D F, et al. Adaptive fixed-time fault-tolerant tracking control and its application for robot manipulators[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, 69(3): 2956–2966.
- [44] XIA J W, ZHANG J, SUN W, et al. Finite-time adaptive fuzzy control for nonlinear systems with full state constraints[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2019, 49(7): 1541–1548.
- [45] 刘洋, 井元伟, 刘晓平, 等. 非线性系统有限时间控制研究综述 [J]. *控制理论与应用*, 2020, 37(1): 1–12.
- LIU Y, JING Y W, LIU X P, et al. Survey on finite-time control for nonlinear systems[J]. *Control Theory & Applications*, 2020, 37(1): 1–12 (in Chinese).
- [46] HU Q L, SHAO X D, GUO L. Adaptive fault-tolerant attitude tracking control of spacecraft with prescribed performance[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2018, 23(1): 331–341.

Prescribed performance path-following fault-tolerant control of an underactuated UUV based on a disturbance observer

YU Haomiao*, WANG Yue, QIAO Shiguang

College of Marine Electrical Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China

Abstract: [**Objectives**] To address frequent actuator failures caused by complex underwater environments and the inherent characteristics of unmanned underwater vehicles (UUVs), this study investigates a prescribed performance path-following fault-tolerant control scheme for an underactuated UUV subject to ocean current disturbances, model uncertainties, and actuator faults. To ensure safe UUV navigation, a path-following fault-tolerant controller is designed by integrating an improved prescribed performance function with a barrier Lyapunov function, enabling full-state-constrained fault-tolerant control. [**Methods**] A novel predefined-time disturbance observer is developed to estimate the lumped disturbances arising in UUV path-following, including ocean currents, parameter perturbations, unmodeled dynamics, and thrust loss caused by actuator faults. The lumped uncertainties with actuator faults are incorporated into the prescribed performance fault-tolerant controller for compensation, ensuring that all path-following state errors remain within predefined bounds. [**Results**] Simulation results demonstrate that the position error, attitude angle error, and angular velocity error converge rapidly while strictly satisfying the prescribed safety constraints, achieving a steady-state position error bound of 1 meter and an attitude angle error bound of 0.05 radians. When the actuators suffer up to 80% thrust loss, the disturbance observer rapidly estimates the lumped disturbances, and the controller compensates for the faults within 1 second without significant path-following deviation. The maximum transient error does not exceed 20% of the prescribed limit. These findings validate the strong robustness of the proposed method against actuator faults. By unifying disturbance observation with prescribed performance constraints, the fault-tolerant control structure is simplified, achieving both fast fault response and full-state safety guarantees. [**Conclusions**] This work provides a universal solution for high-performance UUV navigation in complex underwater environments.

Key words: unmanned underwater vehicle; fault-tolerant control; prescribed performance control; fault diagnosis; disturbance observation