



中国科技期刊卓越行动计划项目入选期刊

# 控制与决策

CONTROL AND DECISION

## 欠驱动水下机器人的最优等效补偿轨迹跟踪控制

李亚鑫, 刘里宵, 王宇

引用本文:

李亚鑫, 刘里宵, 王宇. 欠驱动水下机器人的最优等效补偿轨迹跟踪控制[J]. 控制与决策, 2024, 39(9): 2923–2931.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2023.0845>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

##### 四旋翼无人机抗干扰轨迹跟踪控制

Anti-interference trajectory tracking control of quadrotor UAV

控制与决策. 2021, 36(2): 379–386 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0875>

##### 基于时间延时估计和自适应模糊滑模控制器的双机械臂协同阻抗控制

Coordinated impedance control for dual-arm robots based on time delay estimation and adaptive fuzzy sliding mode controller

控制与决策. 2021, 36(6): 1311–1323 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1701>

##### 纵向速度和艏向角受限的水面艇有限时间协同路径跟踪

Finite-time cooperative path following of surface vessels with surge velocity and yaw angle constraints

控制与决策. 2021, 36(2): 363–370 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0977>

##### 空间机器人双臂捕获卫星操作的事件采样输出反馈神经网络避撞柔顺控制

Collision avoidance and compliance control based on event sampling output feedback neural network for space robot dual arm capture satellite operation

控制与决策. 2021, 36(9): 2113–2122 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1754>

##### 基于免疫优化的平面Acrobot线性自抗扰鲁棒镇定

Robust stabilization of planar Acrobot using linear active disturbance rejection control with immune optimization

控制与决策. 2020, 35(12): 3053–3058 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0289>

# 欠驱动水下机器人的最优等效补偿轨迹跟踪控制

李亚鑫<sup>†</sup>, 刘里宵, 王宇

(西南石油大学 电气信息学院, 成都 610500)

**摘要:** 针对康达效应矢量推进器输出饱和以及矢量力矩耦合等固有推进特性, 为其欠驱动的水下机器人提出一种最优等效补偿控制方法. 以轨迹跟踪误差为基础, 设计滑模控制器, 并利用径向基神经网络和扩张状态观测器对执行器饱和以及外界扰动进行实时估计与补偿. 在此基础上, 最优等效补偿控制借助离散动力学方程构建关于机器人递归状态偏差的代价函数, 通过在推进器推力可达集内寻求等效力矩使代价函数最小, 从而不仅保证控制律满足推进器矢量力矩耦合特性, 还能有效抑制机器人欠驱动方向的扰动. 利用Lyapunov理论最终验证该控制方法在推进器自身特性约束下渐近稳定; 仿真实验数据表明, 欠驱动水下机器人在该方法控制下可实现较精确的轨迹跟踪任务且鲁棒性较强.

**关键词:** 欠驱动自主水下机器人; 执行器饱和; 轨迹跟踪; 滑模控制; 扰动补偿

中图分类号: TP242

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2023.0845

引用格式: 李亚鑫, 刘里宵, 王宇. 欠驱动水下机器人的最优等效补偿轨迹跟踪控制[J]. 控制与决策, 2024, 39(9): 2923-2931.

## Optimal equivalent compensation trajectory tracking control for underactuated underwater robots

LI Ya-xin<sup>†</sup>, LIU Li-xiao, WANG Yu

(School of Electrical Engineering and Information, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

**Abstract:** Towards the underactuated underwater robot, an optimal equivalent compensation control method is proposed with considerations of inherent characteristics of the Coanda-effect vectored thruster, such as actuator saturation and vectored moment coupling. Specifically, a sliding mode controller is designed based on trajectory tracking errors, and then radial basis function networks as well as extended state observers are built to estimate and compensate the actuator saturation and external disturbance. Then, the proposed method formulates the cost function in terms of underwater robot's recursive state deviation by means of the discrete dynamic equation. The equivalent moment can be obtained in the thruster reachable set such that the minimum of the cost function is achieved. The obtained equivalent moment not only satisfies vectored moment coupling of the thruster, but also can eliminate the disturbance for the underactuated robot effectively. It is proved that the proposed control method is asymptotically stable according to the Lyapunov theory. Simulation results also indicate the effectiveness and robustness of the control method when the underwater robot conducts trajectory tracking tasks.

**Keywords:** underactuated autonomous underwater robot; actuator saturation; trajectory tracking; sliding mode control; disturbance compensation

## 0 引言

在海洋、湖泊、水库等环境复杂水域, 水下机器人结合行为决策、路径规划、运动控制等相关技术, 具备开展海洋科学研究、环境资源勘查、水下设施检测等任务的自主作业能力<sup>[1-2]</sup>. 一般情况下, 水下机器人对

预定轨迹的精确跟踪控制是顺利进行目标搜索或观测类任务的前提, 但由于流线型外观的水下机器人多采用欠驱动方式, 且推进器自身也受输出饱和、耦合等条件限制, 在应对未知干扰的水下环境时, 轨迹跟踪控制成为水下机器人提升自主化和智能化的关键

收稿日期: 2023-06-16; 录用日期: 2023-09-14.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51905457); 成都市科技局科普创作项目(2022-HM07-00046-SN); 成都市科普基地建设项目(2022-HM03-00044-SN).

责任编辑: 方勇纯.

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: liyaxin@swpu.edu.cn.

环节之一<sup>[3]</sup>.

在实际设计水下机器人运动控制器时,不论是螺旋桨还是喷水式推进器都会因其物理机构的限制引发推力输出饱和.若设计运动控制器时不考虑执行器饱和和约束,则实际驱动水下机器人的推力将严重偏离期望控制量,进而影响到控制性能甚至稳定性.为此,国内外众多学者在设计控制器时逐渐将执行器饱和和纳入到考量因素中<sup>[4]</sup>.例如在机器人的水平面运动控制中,文献[5]采用反馈线性法将推进器的螺旋桨推力以及操纵舵的转向角分开控制,以便解决执行器饱和下的平面航向点跟踪问题,但该方法只能保证跟踪误差的局部稳定;文献[6]就输入饱和的水平面跟踪问题,先利用位置与航向角的误差设计观测器,进一步引入Nussbaum函数作为近似饱和和输出,结合设计抗饱和控制器,实现了水平跟踪误差在有界区域内收敛;考虑到水下机器人作业的水域复杂且未知,文献[7]在推进器饱和和限制下,针对外界干扰和状态等约束,提出了一种障碍型Lyapunov函数的命令反步滑模控制,确保平面轨迹跟踪误差在有限时间内收敛;类似的,文献[8]采用双曲正弦函数结合反步法和神经网络,解决了无人艇在状态和输入约束情况下的轨迹跟踪问题,且该控制方法在应对运动模型内外不确定性时也具有较好鲁棒性.

同时,为进一步提升机器人适应水下未知环境的能力,考虑水流、风浪等外界扰动因素影响下的轨迹跟踪问题,成为水下机器人运动控制的研究热点之一.针对非线性、强耦合的运动模型特征,文献[9]设计的滑模控制器可在仿真环境下跟踪不同参考轨迹,并对有界干扰有较强的抑制能力;在工程解耦思想的引导下,文献[10]采用非线性迭代滑模控制器,降低了海流干扰对水下机器人三维航迹精确跟踪的影响,同时保障了其快速收敛性.除了上述利用高级控制方法自身的鲁棒特性达到抗扰效果外,为运动控制器引入状态观测器并对扰动进行实时估计和补偿同样也是一种常用手段.文献[11]采用扩张状态观测器对水下机器人各运动自由度的扰动进行估计;文献[12]针对快时变的干扰设计有限时间观测器,保证估计误差在有限时间内收敛至零;文献[13]提出了一种新型的分布式观测器,在证明其观测误差能够收敛的条件下,设计控制器完成轨迹跟踪控制.上述设计观测器的方法能够为控制器提供有效的干扰估计值,便于扰动补偿设计.这在欠驱动水下机器人的推进器直驱自由度上取得了较好的控制效果,但对于横荡这类不存在有效控制输入的自由度,如何补偿欠驱动方向的扰动仍然需要进一步讨论.

为了使水下机器人运动控制的相关方法在实际应用中达到预期目标,关于轨迹跟踪问题的研究不仅需要考虑到未知环境的干扰因素、推进器输出的饱和限制,还需要结合推进器自身的推力特性及布局,为欠驱动水下机器人在各运动自由度提供具有补偿功能的运动控制器,使其能够稳定、快速且准确地跟踪目标轨迹.因此,基于前期开发的康达效应矢量推进器及其欠驱动的微型水下机器人,本文提出一种最优等效补偿的轨迹跟踪控制方法,在解决由推力饱和以及矢量输出耦合带来的控制输入限制问题的同时,也对外界干扰影响下欠驱动机器人推力进行补偿,以提高运动控制的鲁棒性.主要工作以及创新性总结如下:1)针对平面轨迹跟踪任务,设计滑模控制器并采用径向基神经网络(radial basis function, RBF)预估补偿力矩,避免执行器饱和和导致的控制性能下降.2)采用扩张状态观测器(extended state observer, ESO)对水下未知扰动进行实时估计,提出最优等效补偿控制,不仅可抑制机器人欠驱动方向的扰动,且输出的等效力矩也满足推进器固有的耦合特征.3)结合Lyapunov函数系统分析最优等效补偿控制的稳定性,并通过仿真实验展示该控制器较好的控制效果.

## 1 模型建立与问题描述

### 1.1 康达效应矢量推进的水下机器人

本文研究对象为一款射流矢量推进的水下机器人样机<sup>[14]</sup>.该矢量推进器基于康达效应设计而成,通过调整控制环位置可开启相应控制端口产生压差,使水泵输出的高速射流产生附壁现象发生偏转,并从对应的出口喷出产生矢量推力.康达效应矢量推进器置于流线型对称外形的机器人样机艏部,利用最少驱动单元即可使样机在水下实现包括直行、旋转、上浮、下潜在内的多自由度运动.

### 1.2 数学模型和问题描述

水下机器人一般会先下潜至预定深度再开始执行相应任务,因此本文仅考虑机器人的水平面运动,即纵荡、横荡和艏摇.图1为平面轨迹跟踪及相应坐标系示意图,其中 $O-XY$ 是大地坐标系, $o-x_b y_b$ 是以机体重心为原点的体坐标系.由Fossen<sup>[15]</sup>提出的水下机器人运动学和动力学模型为

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{R}(\psi)\mathbf{v}, \\ \mathbf{M}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{D}(\mathbf{v})\mathbf{v} = \boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{\tau}_D. \end{cases} \quad (1)$$

其中: $\boldsymbol{\eta} = [x, y, \psi]^T$ 为大地坐标系下机器人的位置和艏向; $\mathbf{v} = [u, v, r]^T$ 为体坐标系下机器人纵荡和横荡的线速度以及艏摇的角速度; $\mathbf{M} = \text{diag}(m_{11}, m_{22},$

$m_{33}$ )为惯性矩阵,  $m_{11} = m - X_{\dot{u}}, m_{22} = m - Y_{\dot{v}}, m_{33} = I_{zz} - N_{\dot{r}}, m$ 为机器人质量;  $D = \text{diag}(d_{11}, d_{22}, d_{33})$ 为阻尼矩阵,  $d_{11} = -(X_u + X_{|u|u}|u|), d_{22} = -(Y_v + Y_{|v|v}|v|), d_{33} = -(N_r + N_{|r|r}|r|), X_u, X_{|u|u}, Y_v, Y_{|v|v}, N_r, N_{|r|r}$ 为阻尼系数,  $X_{\dot{u}}, Y_{\dot{v}}, N_{\dot{r}}$ 为附加质量.  $\tau_D = [\tau_{uD}, \tau_{vD}, \tau_{rD}]^T$ 作为外部扰动;  $\tau = [\tau_u, 0, \tau_r]^T$ 为控制输入;  $C(v) \in R^{3 \times 3}$ 为科里奥利力和向心力矩阵,  $R(\psi)$ 为体坐标系到大地坐标系下的旋转矩阵, 分别表示为

$$C(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -m_{22}v \\ 0 & 0 & m_{11}u \\ m_{22}v & -m_{11}u & 0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

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

可见, 水下机器人在横荡运动上没有直接的控制输入, 这种欠驱动方式主要取决于康达效应矢量推进器的布局以及射流输出的矢量特性.

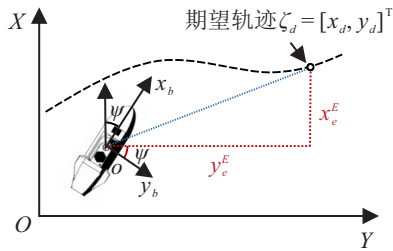
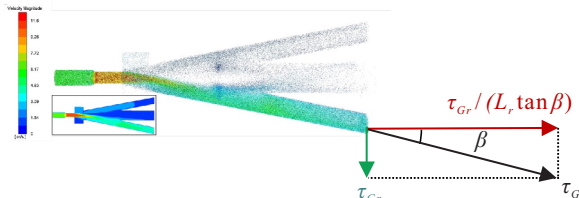
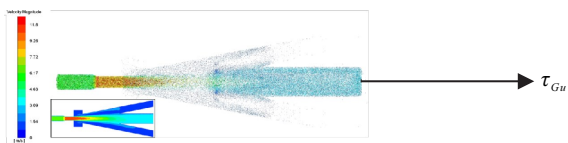


图1 平面轨迹跟踪及坐标系

根据康达效应矢量推进器的工作原理, 开启左端控制端口, 射流将在康达效应的作用下从右侧出口喷出; 反之亦然. 如图2(a)所示, 施加在机器人艏部的矢量射流不仅可以产生艏摇力矩  $\tau_{Gr}$ , 还会耦合纵荡推力  $|\tau_{Gr}/(L_r \tan \beta)|$ . 其中:  $\beta$ 为矢量射流与纵荡方向的夹角,  $L_r$ 为艏摇力矩的力臂. 当关闭所有控制端口时, 其内部不会产生康达效应, 射流将直接从推进器中间出口喷出, 产生纵荡推力  $\tau_{Gu}$ , 如图2(b)所示.



(a) 开启控制端口矢量射流



(b) 关闭控制端口直接射流

图2 康达效应矢量推进器工作示意图

综上, 就康达效应矢量推进的水下机器人而言: 其控制输入一方面在横荡运动上没有直驱动力, 因此机器人处于欠驱动的工作方式; 另一方面推进器受自身固有特性影响, 存在输出饱和以及矢量推力耦合的限制. 在上述实际条件约束下, 本文的主要任务即为水下机器人设计合适的控制输入  $\tau_u$  和  $\tau_r$ , 使其在环境未知干扰影响下仍能跟踪期望轨迹.

## 2 轨迹跟踪控制系统设计

### 2.1 滑模控制器设计

在大地坐标系中, 期望轨迹连续可微, 依据水下机器人跟踪轨迹的期望位置  $\zeta_d = [x_d, y_d]^T$  与当前位置  $\zeta = [x, y]^T$  可定义大地坐标系下的跟踪误差

$$\zeta_e^E = [x_e^E, y_e^E]^T = \zeta - \zeta_d. \quad (4)$$

根据几何关系, 大地坐标系下的误差与机器人自身运动状态之间的运动关系可以描述为

$$\dot{\zeta}_e^E = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi \\ \sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{x}_d \\ \dot{y}_d \end{bmatrix}. \quad (5)$$

为了使机器人实现精确的轨迹跟踪, 本文以镇定跟踪误差  $\zeta_e^E$  为目标, 建立 Lyapunov 函数

$$V_1 = \frac{1}{2}(x_e^E)^2 + \frac{1}{2}(y_e^E)^2, \quad (6)$$

对其求导得到

$$\dot{V}_1 = x_e^E(u \cos \psi - v \sin \psi - \dot{x}_d) + y_e^E(u \sin \psi + v \cos \psi - \dot{y}_d). \quad (7)$$

为了满足 Lyapunov 函数导数  $\dot{V}_1 \leq 0$ , 可进一步引入辅助控制量  $u_{aux}$ 、 $v_{aux}$ , 并设计相应的辅助控制律保证位置跟踪控制器稳定:

$$\begin{bmatrix} u_{aux} \\ v_{aux} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi \\ -\sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_d - k_u x_e^E / e^{1/D} \\ \dot{y}_d - k_v y_e^E / e^{1/D} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

其中: 参数  $k_u > 0, k_v > 0$  为待设计的常数;  $D = \sqrt{(x_e^E)^2 + (y_e^E)^2}$  可使辅助控制律具有一定自适应调节能力, 避免其在误差较小时产生较大的辅助控制量, 导致控制器输出发生剧烈突变. 至此, 式(8)的引入将原来位置跟踪目标转换为速度跟踪任务, 结合水下机器人动力学模型, 即可通过消除下式所示的速度跟踪误差为欠驱动水下机器人设计控制输入量  $\tau_u$  和  $\tau_r$ :

$$\begin{cases} u_e = u - u_{aux}, \\ v_e = v - v_{aux}. \end{cases} \quad (9)$$

相较于横荡运动, 镇定机器人纵荡方向的速度跟踪误差  $u_e$  相对简单, 此处选取积分滑模面  $s_1 = u_e + \lambda_1 \int_0^t u_e(\rho) d\rho$ , 其中  $\lambda_1$  为大于零的待设计参数, 暂不考虑外界干扰的情况下, 结合水下机器人动力学模型

对积分滑模面  $s_1$  进行求导, 可得

$$\dot{s}_1 = \frac{1}{m_{11}}(m_{22}vr - d_{11}u + \tau_u) + \lambda_1 u_e - \dot{u}_{\text{aux}}. \quad (10)$$

同时选取幂次函数  $\dot{s}_1 = -k_1 |s_1|^{\alpha_1} \text{sgn}(s_1)$  ( $k_1 > 0$  且  $0 < \alpha < 1$ ) 作为式(10)的趋近率, 则纵荡运动的控制律可表示为

$$\tau_u = -m_{11} \left( \frac{m_{22}}{m_{11}} vr - \frac{d_{11}}{m_{11}} u + \lambda_1 u_e - \dot{u}_{\text{aux}} + k_1 |s_1|^{\alpha_1} \text{sgn}(s_1) \right). \quad (11)$$

与此同时, 欠驱动的水下机器人由于缺少横荡方向的直驱控制量, 本文借助模型强耦合特性采用艏摇力矩  $\tau_r$  间接镇定  $v_e$ . 对式(1)动力学方程中的  $\dot{v}$  求导, 同时用艏摇方向的动力学方程替换, 整理后可获得关于艏摇力矩的横荡动力学方程

$$\ddot{v} = \frac{-m_{11}m_{33}\dot{u}_r - m_{33}d_{22}\dot{v}}{m_{22}m_{33}} + \frac{-m_{11}(m_{11} - m_{22})u^2v + m_{11}d_{33}ur - m_{11}u\tau_r}{m_{22}m_{33}}. \quad (12)$$

此处基于导数关系选取微分滑模面  $s_2 = \dot{v}_e + \lambda_2 v_e$ . 通过对式(8)中辅助控制律  $v_{\text{aux}}$  连续求导, 有

$$\dot{v}_{\text{aux}} = -ru_{\text{aux}} + [-\sin \psi, \cos \psi] \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \dot{x}_d - k_u x_e^E / e^{1/D} \\ \dot{y}_d - k_v y_e^E / e^{1/D} \end{bmatrix}, \quad (13)$$

$$\ddot{v}_{\text{aux}} = -\dot{r}u_{\text{aux}} - r\dot{u}_{\text{aux}} + \dot{\Theta}. \quad (14)$$

将式(12)~(14)代入微分滑模面  $s_2$  表达式可以得到

$$\dot{s}_2 = \frac{-m_{11}m_{33}\dot{u}_r - m_{33}d_{22}\dot{v}}{m_{22}m_{33}} + \frac{-m_{11}(m_{11} - m_{22})u^2v + m_{11}d_{33}ur - m_{11}u\tau_r}{m_{22}m_{33}} + u_{\text{aux}} \left( \frac{m_{11} - m_{22}}{m_{33}} uv - \frac{d_{33}}{m_{33}} r + \frac{1}{m_{33}} \tau_r \right) + r\dot{u}_{\text{aux}} - \dot{\Theta} + \lambda_2 (\dot{v} - \dot{v}_{\text{aux}}). \quad (15)$$

进一步结合幂次趋近律  $\dot{s}_2 = -k_2 |s_2|^{\alpha_2} \text{sgn}(s_2)$ , 得到实际的艏摇控制律  $\tau_r$  如下:

$$\tau_r = \frac{m_{22}m_{33}}{(m_{22}u_{\text{aux}} - m_{11}u)} [-k_2 |s_2|^{\alpha_2} \text{sgn}(s_2) - \Omega]. \quad (16)$$

其中

$$\dot{\Theta} = \frac{d}{dt} \left\{ [-\sin \psi, \cos \psi] \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \dot{x}_d - k_u x_e^E / e^{1/D} \\ \dot{y}_d - k_v y_e^E / e^{1/D} \end{bmatrix} \right\}, \quad (17)$$

$$\Omega = \frac{-m_{11}m_{33}\dot{u}_r - m_{33}d_{22}\dot{v}}{m_{22}m_{33}} + \frac{-m_{11}(m_{11} - m_{22})u^2v + m_{11}d_{33}ur}{m_{22}m_{33}} +$$

$$u_{\text{aux}} \left( \frac{m_{11} - m_{22}}{m_{33}} uv - \frac{d_{33}}{m_{33}} r \right) + r\dot{u}_{\text{aux}} - \dot{\Theta} + \lambda_2 (\dot{v} - \dot{v}_{\text{aux}}). \quad (18)$$

## 2.2 执行器饱和和补偿

在实际应用中, 水下机器人轨迹跟踪的控制性能受执行器推力输出饱和的影响较大, 甚至有运行不稳定的情况发生. 因此, 本节就上文设计的滑模控制尝试对推进器输出实际推力  $\tau_{Gu}$  和  $\tau_{Gr}$  进行补偿, 即  $\tau_{Gu} = \tau_u + \Delta\tau_u$ ,  $\tau_{Gr} = \tau_r + \Delta\tau_r$ , 其中  $\Delta\tau_u$  和  $\Delta\tau_r$  为补偿力矩. 经过补偿后的滑模面可表示为

$$\begin{cases} \dot{s}_1 = \frac{1}{m_{11}} [m_{22}vr - d_{11}u + (\tau_u + \Delta\tau_u)] + \lambda_1 u_e - \dot{u}_{\text{aux}}, \\ \dot{s}_2 = \frac{(m_{22}u_{\text{aux}} - m_{11}u)}{m_{22}m_{33}} (\tau_r + \Delta\tau_r) + \Omega. \end{cases} \quad (19)$$

但考虑到补偿力矩未知, 本文选取径向基神经网络并利用控制输入量  $\tau_u$  和  $\tau_r$  对补偿力矩进行拟合, 其中  $\Delta\hat{\tau}_u$  和  $\Delta\hat{\tau}_r$  为待估计值. 结合式(11)与(16)抗饱和和控制器的控制律可表示为如下方程:

$$\begin{cases} \tau_u = -m_{11} \left( \frac{m_{22}}{m_{11}} vr - \frac{d_{11}}{m_{11}} u + \lambda_1 u_e - \dot{u}_{\text{aux}} + k_1 |s_1|^{\alpha_1} \text{sgn}(s_1) \right) - \Delta\hat{\tau}_u, \\ \tau_r = \frac{m_{22}m_{33}}{(m_{22}u_{\text{aux}} - m_{11}u)} [-k_2 |s_2|^{\alpha_2} \text{sgn}(s_2) - \Omega] - \Delta\hat{\tau}_r. \end{cases} \quad (20)$$

将上述控制律代入方程(19), 得到滑模面导数

$$\begin{cases} \dot{s}_1 = -k_1 |s_1|^{\alpha_1} \text{sgn}(s_1) + (\Delta\tau_u - \Delta\hat{\tau}_u) / m_{11}, \\ \dot{s}_2 = -k_2 |s_2|^{\alpha_2} \text{sgn}(s_2) + (\Delta\tau_r - \Delta\hat{\tau}_r) (m_{22}u_{\text{aux}} - m_{11}u) / (m_{22}m_{33}). \end{cases} \quad (21)$$

选取高斯基函数  $\mathbf{h}_u(\tau_u)$  和  $\mathbf{h}_r(\tau_r)$  作为 RBF 神经网络的基函数, 输出为

$$y = \mathbf{h}(x) = \exp \left( -\frac{\|x - \mu_j\|^2}{2\delta_j^2} \right).$$

网络理想权值  $\mathbf{W}^*$  与实际估计权值  $\hat{\mathbf{W}}$  之间的误差为  $\tilde{\mathbf{W}} = \hat{\mathbf{W}} - \mathbf{W}^*$ . 补偿力矩在 RBF 网络逼近误差  $\varepsilon$  的约束下, 可以将式(21)改写为

$$\begin{cases} \dot{s}_1 = -k_1 |s_1|^{\alpha_1} \text{sgn}(s_1) - (\tilde{\mathbf{W}}_u^T \mathbf{h}_u(\tau_u) - \varepsilon_u) / m_{11}, \\ \dot{s}_2 = -k_2 |s_2|^{\alpha_2} \text{sgn}(s_2) - \frac{(\tilde{\mathbf{W}}_r^T \mathbf{h}_r(\tau_r) - \varepsilon_r) (m_{22}u_{\text{aux}} - m_{11}u)}{m_{22}m_{33}}. \end{cases} \quad (22)$$

进一步定义增广 Lyapunov 函数  $V_{21}$  和  $V_{22}$  为

$$\begin{cases} V_{21} = \frac{1}{2}s_1^2 + \frac{1}{2}\gamma_1 \tilde{W}_u^T \tilde{W}_u, \\ V_{22} = \frac{1}{2}s_2^2 + \frac{1}{2}\gamma_2 \tilde{W}_r^T \tilde{W}_r. \end{cases} \quad (23)$$

对式(23)增广 Lyapunov 函数求导可以得到

$$\begin{cases} \dot{V}_{21} = -k_1 |s_1|^{\alpha_1+1} + s_1 \varepsilon_u / m_{11} + \\ \tilde{W}_u^T [\gamma_1 \dot{\tilde{W}}_u - s_1 \mathbf{h}_u(\tau_u) / m_{11}], \\ \dot{V}_{22} = -k_2 |s_2|^{\alpha_2+1} + \frac{(m_{22}u_{aux} - m_{11}u)}{m_{22}m_{33}} s_2 \varepsilon_r + \\ \tilde{W}_r^T [\gamma_2 \dot{\tilde{W}}_r - \frac{(m_{22}u_{aux} - m_{11}u)}{m_{22}m_{33}} s_2 \mathbf{h}_r(\tau_r)]. \end{cases} \quad (24)$$

由此可以设计 RBF 网络的权值自适应律

$$\begin{cases} \dot{\tilde{W}}_u = \frac{1}{\gamma_1 m_{11}} s_1 \mathbf{h}_u(\tau_u), \\ \dot{\tilde{W}}_r = \frac{m_{22}u_{aux} - m_{11}u}{\gamma_2 m_{22}m_{33}} s_2 \mathbf{h}_r(\tau_r). \end{cases} \quad (25)$$

### 2.3 扰动观测器设计

$$\begin{cases} \dot{u} = \frac{m_{22}}{m_{11}} vr - \frac{d_{11}}{m_{11}} u + \frac{1}{m_{11}} \tau_u + \frac{1}{m_{11}} \tau_{uD}, \\ \dot{v} = -\frac{m_{11}}{m_{22}} ur - \frac{d_{22}}{m_{22}} v + \frac{1}{m_{22}} \tau_{vD}, \\ \dot{r} = \frac{m_{11} - m_{22}}{m_{11}} uv - \frac{d_{33}}{m_{33}} r + \frac{1}{m_{33}} \tau_r + \frac{1}{m_{33}} \tau_{rD}. \end{cases} \quad (26)$$

基于式(26)所示的机器人动力学模型,采用扩张状态观测器对未知扰动进行观测,便于后续设计相应控制律. 由于本设计为非线性系统,文献[16]中已经证明在观测器增益足够大的条件下,非线性系统利用高增益观测器以及全局有界状态反馈控制器,可以保证系统渐近稳定,不会出现时间逃逸问题.

此处假设扰动  $\tau_{\nabla D}(\nabla = u, v, r)$  有界且可导,同时动力学模型具有一定的耦合性,考虑将其拆分为3个子系统  $\dot{\nabla} = f_{\nabla} + p_{\nabla} + \tau_{\nabla D}$ . 同时在3个运动自由度上建立扩张状态观测器,估计未知的扰动因素,其一般表达式如下:

$$\begin{cases} e_{\nabla} = \hat{\nabla} - \nabla, \\ \dot{\hat{\nabla}} = f_{\nabla}(\hat{\nabla}, \tau_{\nabla}) + \hat{d}_{\nabla}(t) - g_{\nabla 1}(e_{\nabla}), \\ \dot{\hat{d}}_{\nabla}(t) = -g_{\nabla 2}(e_{\nabla}). \end{cases} \quad (27)$$

其中:  $g_{\nabla i}(e_{\nabla})(\nabla = u, v, r, i = 1, 2)$  为非线性函数,且有

$$g_{\nabla i}(e_{\nabla}) = \begin{cases} \beta_{\nabla i} |e_{\nabla}|^{\alpha_{\nabla i}} \text{sgn}(e_{\nabla}), & |e_{\nabla}| > \delta_{\nabla i}; \\ \beta_{\nabla i} \frac{e_{\nabla}}{\delta_{\nabla i}^{1-\alpha_{\nabla i}}}, & |e_{\nabla}| \leq \delta_{\nabla i}, \delta_{\nabla i} > 0. \end{cases} \quad (28)$$

以纵向  $u$  上的观测为例,可以得到误差导数

$$\begin{aligned} \dot{e}_u &= \left[ \frac{m_{22}}{m_{11}} (\hat{v}\hat{r} - vr) - \frac{d_{11}}{m_{11}} e_u \right] + \\ & [\hat{d}_u(t) - d_u(t)] - g_{u1}(e_u). \end{aligned} \quad (29)$$

设定

$$\begin{aligned} e_u \dot{e}_u &= e_u [\hat{d}_u(t) - d_u(t)] + \\ e_u & \left\{ \frac{m_{22}}{m_{11}} (\hat{v}\hat{r} - vr) - \frac{d_{11}}{m_{11}} e_u - g_{u1}(e_u) \right\} = \\ & - e_u \left\{ \underbrace{\int [g_{u2}(e_u) + \dot{d}_u(t)] dt}_{O_1} \right\} - \\ e_u & \left\{ \underbrace{g_{u1}(e_u) - \left[ \frac{m_{22}}{m_{11}} (\hat{v}\hat{r} - vr) - \frac{d_{11}}{m_{11}} e_u \right]}_{O_2} \right\}. \end{aligned} \quad (30)$$

对于  $O_1$  部分,由于扰动  $d(t)$  变换较为缓慢,即  $\dot{d}(t)$  有界,当增益  $\beta$  很大时,有

$$\begin{aligned} -e_u \cdot O_1 &\approx \\ - & \begin{cases} \beta_{u2} |e_u|^{\alpha_{u2}+1}, & |e_u| > \delta_{u2}; \\ \beta_{u2} \frac{|e_u|^2}{\delta_{u2}^{1-\alpha_{u2}}}, & |e_u| \leq \delta_{u2}, \delta_{u2} > 0 \end{cases} < 0. \end{aligned} \quad (31)$$

对于  $O_2$  部分,当增益  $\beta$  很大时,  $g_{u1}(e_u)$  占主导地位,进而可认为其余项远远小于  $g_{u1}(e_u)$ , 即有  $-e_u \cdot O_2 \approx -e_u g_{u1}(e_u) < 0$ . 进一步可以推广至  $e_{\nabla} \dot{e}_{\nabla} < 0$ , 且有  $e_{\nabla}^2 > 0$ , 可判定渐近稳定. 同时较大的增益系数  $\beta$  可以使得观测器和控制器满足分离条件,保证了系统的稳定<sup>[16]</sup>. 通过分析子状态观测器函数可以得到,当  $\hat{\nabla} \rightarrow \nabla$  时,有  $g_{\nabla i}(e_{\nabla}) \rightarrow 0$ , 即  $\dot{\hat{\nabla}} \rightarrow f_{\nabla} + d_{\nabla}$ , 同时有  $\hat{d}_{\nabla}(t) \rightarrow d_{\nabla}(t)$ , 实现了利用状态观测器对扰动量的观测. 文献[17]已经对 ESO 的稳定性以及收敛性进行了更严苛的论述分析,此处不再赘述.

### 2.4 最优等效补偿控制

就搭载康达效应矢量推进器的水下机器人样机而言,欠驱动的推进方式使其运动控制器很难依据扰动观测直接补偿推力,抑制来自横荡方向的外界扰动. 除此之外,康达效应矢量推进器固有的矢量推力耦合特征,也导致了轨迹跟踪运动控制器的设计复杂化. 基于此,本文提出一种最优等效补偿控制方法,不仅能近似补偿推力抑制横荡扰动,且控制输入也符合推进器固有的矢量推力耦合特征. 具体而言,首先根据水下机器人在  $t_0$  时刻的状态与控制输入,将动力学方程式(26)通过泰勒展开进行线性化,其中截断误差满足文献[18]中提出的可镇定条件,即通过取有限项泰勒展开代替精确展开,得到

$$\dot{\nabla}(t) - \dot{\nabla}(t_0) = -\frac{d_{nn}}{m_{nn}} [\nabla(t) - \nabla(t_0)] +$$

$$\frac{1}{m_{nn}}[\tau_{\nabla}(t) - \tau_{\nabla}(t_0)]. \quad (32)$$

其中:  $\nabla$  分别取值  $u, v$  和  $r$  时,  $nn$  分别对应 11、22 和 33. 为了不改变原系统收敛性, 采用零阶保持器离散化对其进行离散化处理, 可以得到

$$S_{\nabla}(k+1) = e^{-\frac{d_{nn}}{m_{nn}}t_s} S_{\nabla} + \int_0^{t_s} e^{-\frac{d_{nn}}{m_{nn}}\rho} d\rho \cdot \frac{1}{m_{nn}} T_{\nabla}(k). \quad (33)$$

其中:  $S_{\nabla}(k)$  为第  $k$  次采样的输入状态量增量,  $S_{\nabla}(k) = [\nabla(t) - \nabla(t_0)](k)$ ;  $T_{\nabla}(k) = [\tau_{\nabla}(t) - \bar{\tau}_{\nabla}(t_0)](k)$  为第  $k$  次采样的输入力矩增量, 这里  $\bar{\tau}_{\nabla}(t) = \tau_{\nabla}(t) + \tau_{\nabla D}(t)$  包含了两部分, 力矩  $\tau_{\nabla}$  和扰动量  $\tau_{\nabla D}$ , 输出量为  $k+1$  时刻的状态量增量  $S_{\nabla}(k+1)$ ;  $t_s$  为采样时间. 当输入力矩为扰动补偿后的力矩增量  $T_{\nabla}^{ide}(k)$  时, 可以得到补偿后的理想状态量增量  $S_{\nabla}^{ide}(k+1)$ , 但往往  $T_{\nabla}^{ide}(k)$  中的推力  $\bar{\tau}_u$  和扭矩  $\bar{\tau}_r$  受扰动的影响, 并不能够满足推进器固有的输出耦合关系. 若此时有一个力矩增量  $T_{\nabla}^*(k)$ , 其中所包含的实际推力  $\bar{\tau}_u^*$  和扭矩  $\bar{\tau}_r^*$  均能够满足康达效应推进器的实际耦合输出推力, 并使得在状态  $S_{\nabla}(k)$  条件下, 输出的状态量增量趋近于理想状态, 即  $S_{\nabla}^*(k+1) \rightarrow S_{\nabla}^{ide}(k+1)$ , 则此时可以认为这个等效力矩增量  $T_{\nabla}^*(k)$  为当前的最优控制. 即问题可化为, 从设定推力集  $T$  中寻找一组  $\bar{\tau}_u$  和  $\bar{\tau}_r$ , 组成最优力矩增量  $T_{\nabla}^*(k)$ , 使得  $S_{\nabla}^*(k+1) \rightarrow S_{\nabla}^{ide}(k+1)$ , 即建立以输出增量误差  $\Delta S_{\nabla}(k+1) = S_{\nabla}^*(k+1) - S_{\nabla}^{ide}(k+1)$  为目标的最优控制问题:

$$\min_{T_{\nabla}(k)} C_k(|\Delta S_{\nabla}(k+1)|);$$

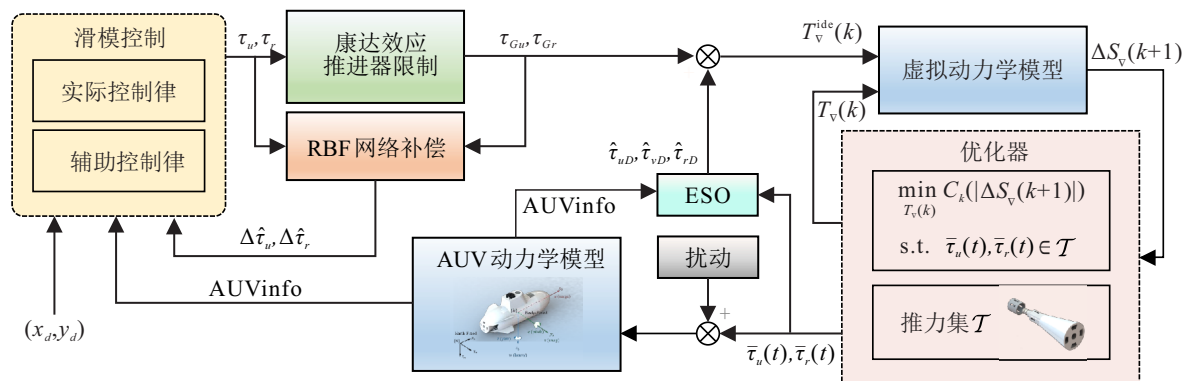


图3 最优等效补偿控制

### 3 稳定性分析

考虑扰动因素后, 滑模面方程将表示为

$$\dot{s}_1 = \frac{1}{m_{11}}[m_{22}vr - d_{11}u + (\tau_u + \Delta\tau_u + \tau_{uD})] + \lambda_1 u_e - \dot{u}_{aux},$$

$$\text{s.t. } \bar{\tau}_u(t), \bar{\tau}_r(t) \in \mathcal{T}. \quad (34)$$

以实际平均划分共计 300 种推力组合作为康达效应推进器的实际推力可达集  $\mathcal{T}$ , 设计代价函数为

$$C_k(|\Delta S_{\nabla}(k+1)|) = \sum_{\nabla=u,v,r} c_{\nabla} \Delta S_{\nabla}^2(k+1). \quad (35)$$

取  $c_u = 1, c_v = 10, c_r = 2$ . 由于推力集较小, 可直接采用穷举法寻找使得  $C_k(|\Delta S_{\nabla}(k+1)|)$  最小的等效力矩增量  $T_{\nabla}^*(k)$ . 与最优补偿力矩增量  $T_{\nabla}^{ide}(k)$  相比, 二者存在的偏差可以记为  $\Delta T(k)$ , 由下式给出:

$$\Delta T = T_{\nabla}^* - T_{\nabla}^{ide} = \bar{\tau}_{\nabla}^* - \bar{\tau}_{\nabla}^{ide} = \bar{\tau}_{\nabla}^* - (\tau_{\nabla} + \Delta\hat{\tau}_{\nabla} + \hat{\tau}_{\nabla D}). \quad (36)$$

实际控制律可表示为

$$\begin{cases} \tau_u = m_{11}[-k_1|s_1|^{\alpha_1} \text{sgn}(s_1) + \dot{u}_{aux} - \lambda_1 u_e] - \\ \quad m_{22}vr + d_{11}u - \Delta T_u - \Delta\hat{\tau}_u - \hat{\tau}_{uD}, \\ \tau_r = \frac{m_{22}m_{33}}{m_{22}u_{aux} - m_{11}u} \left[ -k_2|s_2|^{\alpha_2} \text{sgn}(s_2) - \right. \\ \quad \left. \left( \lambda_2 - \frac{d_{22}}{m_{22}} \right) \left( \frac{1}{m_{22}} \hat{\tau}_{vD} \right) - \Omega_1 \right] - \\ \quad \Delta T_r - \Delta\hat{\tau}_r - \hat{\tau}_{rD}, \end{cases} \quad (37)$$

其中

$$\Omega_1 = \frac{(m_{22}u_{aux} - m_{11}u)}{m_{22}m_{33}} [(m_{11} - m_{22})uv - d_{33}r] - \frac{m_{11}\dot{u}r}{m_{22}} + r\dot{u}_{aux} - \dot{\theta} - \lambda_2\dot{u}_{aux} - \left( \lambda_2 - \frac{d_{22}}{m_{22}} \right) \left( \frac{m_{11}}{m_{22}}ur + \frac{d_{22}}{m_{22}}v \right). \quad (38)$$

综上所述, 针对执行器饱和、矢量推力耦合约束而设计的抗扰轨迹跟踪控制可概括为框图 3.

$$\dot{s}_2 = \frac{(m_{22}u_{aux} - m_{11}u)}{m_{22}m_{33}} (\tau_r + \Delta\tau_r + \tau_{rD}) + \Omega. \quad (39)$$

为确保最优等效补偿控制方法的最终稳定性, 需考虑推广 Lyapunov 函数为  $V = V_1 + V_{21} + V_{22}$ . 对其进行求导后代入辅助控制律 (8)、控制律 (37) 及 RBF 网络自适应律 (25), 得到

$$\begin{aligned} \dot{V} = & \underbrace{-k_u(x_e^E)^2/e^{1/D} - k_v(y_e^E)^2/e^{1/D}}_{P_1} + \underbrace{s_1/m_{11}(\varepsilon_u + \varepsilon_{uD}) - k_1|s_1|^{\alpha_1+1}\text{sgn}(s_1)}_{P_2} + \\ & \underbrace{(m_{22}u_{\text{aux}} - m_{11}u)s_2(\varepsilon_r + \varepsilon_{rD})/(m_{22}m_{33}) + s_2\frac{1}{m_{22}}\left(\lambda_2 - \frac{d_{22}}{m_{22}}\right)\varepsilon_{vD} - k_2|s_2|^{\alpha_2+1}\text{sgn}(s_2)}_{P_3} - \\ & \underbrace{\left[\frac{s_1}{m_{11}}\Delta T_u + \frac{m_{22}u_{\text{aux}} - m_{11}u}{m_{22}m_{33}}s_2\Delta T_r\right]}_{P_4}. \end{aligned} \quad (40)$$

最优补偿力矩增量和等效力矩增量存在偏差  $\Delta T_{\nabla}$ , 使得式(33)中的下一时刻状态量增量产生偏差  $\Delta S_{\nabla}(k+1)$ , 由此代替  $\Delta T_{\nabla}$ , 则式(40)中  $P_4$  为

$$\begin{aligned} P_4 = & \Delta S_u \frac{s_1}{m_{11}} \frac{d_{11}}{e^{-\frac{d_{11}}{m_{11}}t_s-1}} + \\ & \Delta S_r s_2 \frac{m_{22}u_{\text{aux}} - m_{11}u}{m_{22}m_{33}} \frac{d_{33}}{e^{-\frac{d_{33}}{m_{33}}t_s-1}}. \end{aligned} \quad (41)$$

由于式(41)中  $e^{At_s-1}$  可进一步展开, 有  $e^{At_s-1} \sim At_s + o(At_s) \approx At_s$ , 因此式(41)存在不等式关系

$$\begin{aligned} |P_4| \leq & \left| \frac{\Delta S_u}{t_s} s_1 \right| + \left| \left( \frac{m_{22}u_{\text{aux}} - m_{11}u}{m_{22}} \right) \frac{\Delta S_r}{t_s} s_2 \right| = \\ & |\Delta A_u s_1| + \left| \left( \frac{m_{22}u_{\text{aux}} - m_{11}u}{m_{22}} \right) \Delta A_r s_2 \right|. \end{aligned} \quad (42)$$

加速度增量偏差值  $\Delta A_{\nabla} = \Delta A_{\nabla}^* - \Delta A_{\nabla}$  由差分  $\{[S_{\nabla}^*(k+1) - S_{\nabla}(k)] - [S_{\nabla}(k+1) - S_{\nabla}(k)]\}/t_s$  得到, 其中采样时间  $t_s$  较小, 同时加速度增量  $A_{\nabla}$  由扰动力矩决定, 由于扰动不能跳变, 加速度增量有界且无跳变, 即存在一个上界  $\varepsilon_{A_{\nabla}}$  使得  $|\Delta A_{\nabla}| \leq \varepsilon_{A_{\nabla}}$ . 至此, 式(40)的Lyapunov方程可写为

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & P_1 - \underbrace{|s_1|[k_1|s_1|^{\alpha_1} - (\varepsilon_u + \varepsilon_{uD})/m_{11}]}_{P_2} - \\ & \underbrace{|s_2|[k_2|s_2|^{\alpha_2} - \mathcal{K}_r(\varepsilon_r + \varepsilon_{rD}) - \mathcal{K}_v\varepsilon_{vD}]}_{P_3} - \\ & \underbrace{|s_1|[(\varepsilon_{Au}m_{11})/m_{11}] - |s_2|[\mathcal{K}_r(m_{33}\varepsilon_{Ar})]}_{P_4}. \end{aligned} \quad (43)$$

有界系数  $\mathcal{K}_r = (m_{22}u_{\text{aux}} - m_{11}u)/(m_{22}m_{33})$ ,  $\mathcal{K}_v = (\lambda_2 m_{22} - d_{22})/m_{22}^2$ , 其中  $P_1$  部分恒小于等于0, 当取系数  $k_1 > (\varepsilon_u + \varepsilon_{uD} - \varepsilon_{Au}m_{11})/(m_{11}|s_1|^{\alpha_1})$  以及  $k_2 > [\mathcal{K}_r(\varepsilon_r + \varepsilon_{rD} - m_{33}\varepsilon_{Ar}) + \mathcal{K}_v\varepsilon_{vD}]/|s_2|^{\alpha_2}$  时, 即可保证  $\dot{V} < 0$ . 同时, 由于采用了零阶保持器离散化方式, 保证了离散情况以及连续情况下的敛散性不变, 在展开域内可以保证本文提出的最优等效控制具有渐近稳定性.

### 4 仿真研究

通过重叠网格技术模拟机器人平面运动机构测试, 确定表1所示的样机动力学参数.

表1 搭载康达效应矢量推进器样机水动力学参数

参数	取值	参数	取值
$m$	2.540	$Y_{ v v}$	3.643
$I_{zz}$	0.004	$Y_{\dot{v}}$	-1.108
$X_u$	1.014	$N_r$	0.062
$X_{ u u}$	1.877	$N_{ r r}$	2.094
$X_{\dot{u}}$	-0.409	$N_{\dot{r}}$	1.421
$Y_v$	1.740		

针对目标点时变的期望轨迹, 设计如图4所示的参考轨迹. 初始位姿为  $\eta_0 = [-1, -1, 0]^T$ ; 初始速度为  $\mathbf{v}_0 = [0, 0, 0]^T$ ; 综合考虑工况后, 在3个自由度上设置扰动量为  $\tau_{uD} = 0.05 \text{sgn}[\cos(0.1t)]$ ,  $\tau_{vD} = 0.02 \sin(0.12t)$  以及  $\tau_{rD} = 0.005 \cos(0.1t)$ .

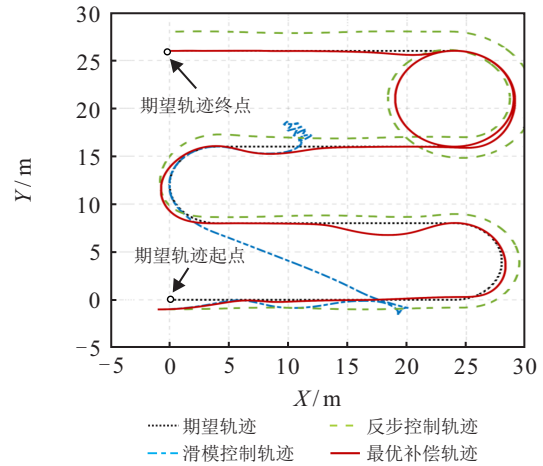


图4 水平面轨迹跟踪的性能对比

在控制相关参数设定方面, 滑模控制参数设定为  $\lambda_1 = k_1 = 0.05, \lambda_2 = 0.2, \alpha_1 = 0.6, k_u = k_v = 0.2, k_2 = 0.12, \alpha_2 = 0.5$ . 扰动观测器参数设定为  $\beta_{\nabla 1} = 100, \beta_{\nabla 2} = 3000, \delta_{u1} = \delta_{u2} = \delta_{v1} = \delta_{v2} = 0.05, \delta_{r1} = \delta_{r2} = 0.01, \alpha_{\nabla 1} = \alpha_{\nabla 2} = 0.5$ . 在针对执行器饱和现象搭建RBF网络时, 估测  $\Delta \hat{\tau}_u$  用的RBF网络神经元个数为5, 高斯基函数中心值为  $[-1, -0.5, 0, 0.5, 1]$ , 方差为1, 网络的权值自适应律系数为  $\gamma_1 = 10$ ; 估测  $\Delta \hat{\tau}_r$  用的RBF网络神经元个数为9, 高斯基函数中心值为  $[-0.05, -0.0375, -0.025, -0.0125, 0, 0.0125, 0.025, 0.0375]$ , 方差为1, 网络的权值自适应律系数  $\gamma_2 = 40$ .

为了直观地展示机器人样机在最优等效补偿控制下的轨迹跟踪性能,本文在控制器参数配置一致的情况下将反步控制与滑模控制作为对照组,并为这两种控制方法在艏摇运动上添加了扰动补偿.图4对比了机器人样机分别在3种控制方法下跟踪期望轨迹的运动情况.受外界干扰因素影响,尽管滑模控制在艏摇运动上存在扰动补偿,但若不考虑推进器自身固有特性以及欠驱动的运动本质,随着轨迹误差的积累很容易导致控制器自身发生崩溃.反步控制虽然能够近似地跟随期望轨迹,但由于无法为欠驱动的自由度补偿推力,始终无法消除在横荡方向上产生的轨迹误差.相比之下,最优等效控制不仅针对执行器饱和和补偿了控制输入量,还在平面运动中有效地抑制了扰动对控制精度的干扰作用,从而使欠驱动机器人样机较好地完成了轨迹跟踪任务.

针对执行器输出饱和现象,图5展示了RBF网络对补偿力矩的估计情况.由于为机器人设置了起始跟踪误差,RBF网络在纵向补偿力矩的估计性能欠佳.但是,随着机器人不断逼近期望轨迹,无论是纵向上平滑的力矩误差,还是转艏方向上的快速跳变误差,都能够快速且稳定地跟踪,避免了由执行器饱和和导致的控制器出现偏移、抖振以及发散等问题,为后面扰动估计与补偿设计奠定了基础.

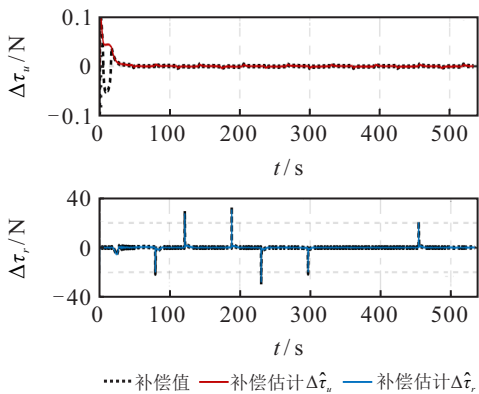


图5 RBF执行器补偿效果

图6展示了扩张状态观测器在上述轨迹跟踪任务中对设置扰动项的估计能力.不难发现,本文实现的观测器可稳定、准确且快速地跟踪外部扰动信息,这是最优等效控制在各自由度上实现推力补偿的前提.

图7分别展示了轨迹跟踪任务中的最优补偿力矩 $T_{ad}$ 、等效力矩 $T^*$ 以及代价函数.相比于 $T_{ad}$ ,优化后的 $T^*$ 不仅满足矢量推进器自身纵荡推力与艏摇力矩之间的耦合关系,还符合欠驱动水下机器人缺少横荡方向直驱动力的客观情况;与之相对应,代价函数虽然随着扰动而波动,但整体数值较小,这说明通过

调整 $\tau_u$ 和 $\tau_r$ 近似补偿横荡扰动的控制方法取得了较好的运动性能.

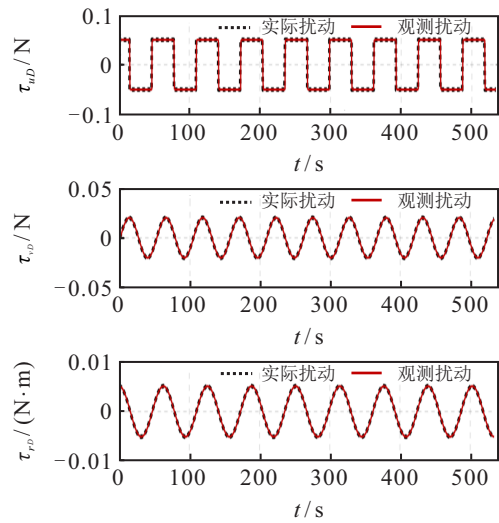


图6 扰动观测器性能

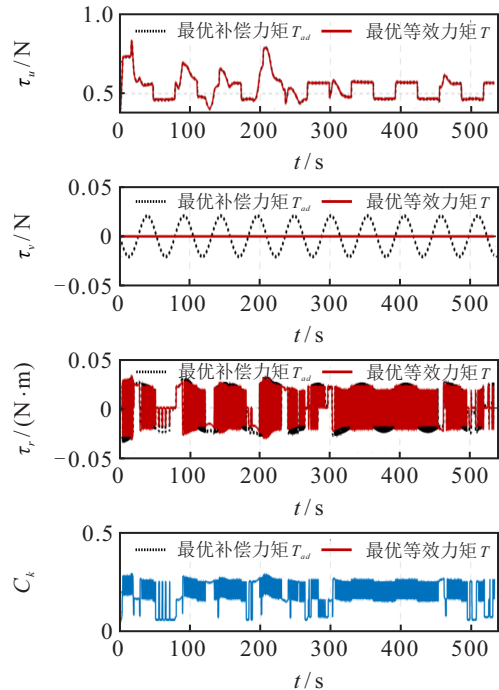


图7 控制输入

### 5 结论

本文针对推进器固有输出特性以及外界未知扰动,研究了欠驱动水下机器人的轨迹跟踪控制问题.基于滑模控制为机器人跟踪平面轨迹设计了控制律,并在执行器饱和的情况下采用RBF网络估计待补偿力矩,实现了抗饱和控制.在此基础上,构建了扰动观测器并提出了最优等效补偿控制,一方面解决了机器人样机难以直接补偿欠驱动方向的未知扰动问题,另一方面结合推进器实际情况,保证了控制律符合推进器矢量推力耦合的特点.最后,本文不仅验证了该控制方法的稳定性,仿真结果也表明,欠驱动

水下机器人样机能够较精确地跟踪期望轨迹且鲁棒性较强。

### 参考文献(References)

- [1] Mohan S, Kim J. Coordinated motion control in task space of an autonomous underwater vehicle-manipulator system[J]. *Ocean Engineering*, 2015, 104: 155-167.
- [2] 黄琰, 李岩, 俞建成, 等. AUV智能化现状与发展趋势[J]. *机器人*, 2020, 42(2): 215-231.  
(Huang Y, Li Y, Yu J C, et al. State-of-the-art and development trends of AUV intelligence[J]. *Robot*, 2020, 42(2): 215-231.)
- [3] Li D L, Du L. AUV trajectory tracking models and control strategies: A review[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021, 9(9): 1020.
- [4] 赖文馨, 李元龙, 林宗利. 抗饱和控制系统研究综述[J]. *厦门大学学报: 自然科学版*, 2022, 61(6): 916-926.  
(Lai W X, Li Y L, Lin Z L. A brief survey of anti-windup control[J]. *Journal of Xiamen University: Natural Science*, 2022, 61(6): 916-926.)
- [5] Kim D W. Tracking of REMUS autonomous underwater vehicles with actuator saturations[J]. *Automatica*, 2015, 58: 15-21.
- [6] 江梦洁, 李家旺, 吕艳芳, 等. 饱和输入限制下欠驱动自主水下航行器水平面航迹跟踪控制[J]. *兵工学报*, 2017, 38(11): 2207-2213.  
(Jiang M J, Li J W, Lyu Y F, et al. Path tracking control of underactuated autonomous underwater vehicles on horizontal plane within input saturation limit[J]. *Acta Armamentarii*, 2017, 38(11): 2207-2213.)
- [7] 王宇梁, 李一平, 李良, 等. 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.  
(Wang Y L, Li Y P, Li L, et al. Trajectory tracking control of underwater vehicle considering state[J]. *Control and Decision*, 2024, 39(6): 1778-1786.)
- [8] Qin H D, Li C P, Sun Y C, et al. Finite-time trajectory tracking control of unmanned surface vessel with error constraints and input saturations[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2020, 357(16): 11472-11495.
- [9] Elmokadem T, Zribi M, Youcef-Toumi K. Trajectory tracking sliding mode control of underactuated AUVs[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2016, 84(2): 1079-1091.
- [10] 贾鹤鸣, 张利军, 程相勤, 等. 基于非线性迭代滑模的欠驱动UUV三维航迹跟踪控制[J]. *自动化学报*, 2012, 38(2): 308-314.  
(Jia H M, Zhang L J, Cheng X Q, et al. Three-dimensional path following control for an underactuated UUV based on nonlinear iterative sliding mode[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2012, 38(2): 308-314.)
- [11] Huang F, Xu J, Yin L G, et al. A general motion control architecture for an autonomous underwater vehicle with actuator faults and unknown disturbances through deep reinforcement learning[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 263: 112424.
- [12] 华长春, 陈传虎, 陈健楠, 等. 基于干扰观测器的水下机器人预定性能控制[J]. *控制与决策*, 2022, 37(5): 1160-1166.  
(Hua C C, Chen C H, Chen J N, et al. Prescribed performance control of underwater robot based on disturbance observer[J]. *Control and Decision*, 2022, 37(5): 1160-1166.)
- [13] 王敏, 倪俊, 时昊天. 基于分布式观测器的多自主水下机器人确定学习控制[J]. *控制与决策*, 2023, 38(2): 388-394.  
(Wang M, Ni J, Shi H T. Deterministic learning control of multiple autonomous underwater vehicles based on a distributed observer[J]. *Control and Decision*, 2023, 38(2): 388-394.)
- [14] Li Y X, Liu L X, Wang Y, et al. Hydrodynamic analysis and motion control of the Coanda-effect jet thruster for underwater robots[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 266: 113096.
- [15] Fossen T I. *Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control*[M]. Chichester: Wiley, 2011: 133-186.
- [16] Atassi A N, Khalil H K. A separation principle for the stabilization of a class of nonlinear systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1999, 44(9): 1672-1687.
- [17] Zhao Z L, Guo B Z. A novel extended state observer for output tracking of MIMO systems with mismatched uncertainty[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2018, 63(1): 211-218.
- [18] 汪志鸣. 连续时间非线性控制系统的采样镇定控制器的设计——基于近似离散化模型上的方法[D]. 上海: 华东师范大学, 2003: 20-29.  
(Wang Z M. Sampled-data stabilization controller design of continuous-time nonlinear control systems: An approach based on their approximate discrete-time models[D]. Shanghai: East China Normal University, 2003: 20-29.)

### 作者简介

李亚鑫(1987—), 男, 副教授, 博士, 从事矢量推进器、水下机器人、仿生机器人的设计及控制等研究, E-mail: liyaxin@swpu.edu.cn;

刘里宵(1998—), 男, 硕士生, 从事矢量推进器、水下机器人控制、最优控制与强化学习等研究, E-mail: Liulixiaoswpu@163.com;

王宇(1988—), 女, 副教授, 博士, 从事水下机器人、两栖仿生机器人运动控制等研究, E-mail: yuwang@swpu.edu.cn.