

基于扩张状态观测器和反步法的非线性超空泡航行体纵向控制

秦华阳¹, 陈增强^{1,2,†}, 孙明玮¹, 周 瑜¹, 孙青林¹

(1. 南开大学 人工智能学院, 天津 300350; 2. 天津市智能机器人重点实验室, 天津 300350)

摘要: 考虑空泡记忆效应的超空泡航行体控制难度较大, 主要体现在滑行力的强非线性、模型中的时延特性以及运动中的未知扰动. 对于此类多输入多输出的复杂非线性系统, 利用传统反步法控制器设计思想, 将其改进以适用于超空泡航行体的纵向运动控制. 为了对系统模型中存在的未知扰动进行观测补偿, 本文设计了线性扩张状态观测器(LESO), 将扰动估计值与控制器设计相结合, 使用Lyapunov方法分析系统稳定性. 最后在不同条件下进行仿真, 结果验证了所设计的LESO估计未知扰动的准确性, 以及所提控制方法对超空泡航行体纵向控制的有效性.

关键词: 空泡记忆效应; 超空泡航行体; 非线性系统; 反步控制; 线性扩张状态观测器; Lyapunov分析

引用格式: 秦华阳, 陈增强, 孙明玮, 等. 基于扩张状态观测器和反步法的非线性超空泡航行体纵向控制. 控制理论与应用, 2023, 40(2): 373 – 380

DOI: 10.7641/CTA.2022.20085

Longitudinal control of nonlinear supercavitating vehicle based on extended state observer and backstepping method

QIN Hua-yang¹, CHEN Zeng-qiang^{1,2,†}, SUN Ming-wei¹, ZHOU Yu¹, SUN Qing-lin¹

(1. College of Artificial Intelligence, Nankai University, Tianjin 300350, China;

2. Key Laboratory of Intelligent Robotics of Tianjin, Tianjin 300350, China)

Abstract: The control of a supercavitating vehicle considering the cavitation memory effect is difficult, which is mainly reflected in the strong nonlinearity of the planing force, time-delay properties in models and unknown perturbations in motion. For this kind of complex nonlinear system with multiple inputs and multiple outputs, the traditional backstepping controller is improved to be suitable for longitudinal motion control of supercavitational vehicle. In order to compensate the unknown disturbances in the system model, a linear extended state observer (LESO) is designed to combine the disturbance estimation with the controller design, and the system stability is analyzed by using the Lyapunov method. Finally, simulations are carried out under different conditions. The results verify the accuracy of the designed LESO for estimating unknown disturbances, and the effectiveness of the proposed control method for the longitudinal control of supercavitating vehicles.

Key words: cavitation memory effect; supercavitation vehicle; nonlinear system; backstepping control; linear extended state observer; Lyapunov analysis

Citation: QIN Huayang, CHEN Zengqiang, SUN Mingwei, et al. Longitudinal control of nonlinear supercavitating vehicle based on extended state observer and backstepping method. *Control Theory & Applications*, 2023, 40(2): 373 – 380

1 引言

超空泡航行体的航行状态具有特殊性. 常规航行体在水下航行时受到的流体阻力远大于在空气中的阻力, 因而其航行速度难以提高. 为突破该限制, 采用超空泡减阻技术, 利用空化器形成空泡层(超空泡)将航行体表面包裹, 使航行体在水中的阻力减少约90%, 可以实现航行体在水下超高速运行. 超空泡减阻技术大幅提高了航行体运行速度, 对于军事应用的研发意

义重大^[1]. 然而, 这种独特的减阻方式也增加了对超空泡航行体的控制难度, 使其运动中存在滑行力的强非线性、模型中的时延特性. 因此, 针对该类系统的特性设计有效的控制方法对超空泡技术的发展具有重要意义.

近二十年来, 诸多学者对超空泡航行体的控制问题展开研究. Dzielski等^[2]建立了非线性的超空泡航行体基准模型, 并设计了线性反馈控制律. Guo等^[3]探索

收稿日期: 2022-01-28; 录用日期: 2022-09-16.

†通信作者. E-mail: chenzzq@nankai.edu.cn; Tel.: +86 13011342991.

本文责任编辑: 龙离军.

国家自然科学基金项目(61973175, 62073177, 61973172)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (61973175, 62073177, 61973172).

了空化数对航行体动力学特性的影响, 提供了线性反馈控制律设计依据. Mao等^[4]考虑航行体的非线性控制, 解决执行器饱和问题, 设计了滑模控制器和线性变参数控制器. 李洋等^[5]建立了非全包裹超空泡航行体模型, 提出了基于反步法的滑模控制律, 实现了对超空泡航行体的纵向控制. Wang等^[6]针对全包裹超空泡航行体提出了自适应滑模控制器, 可以对模型的不确定和未知扰动做出估计. 张珂等^[7]应用圆柱后体的水洞试验方法, 对滑行水动力进行测量实验. 范春永等^[8]对超空泡航行体的侧方来流对航行体的影响进行了研究, 结果表明在受侧方来流冲击时, 航行体的相对来流速度决定航行体所受阻力以及空泡形变大小. 李洋等^[9]研究了超空泡航行体的不确定性问题, 基于Lyapunov分析, 利用反演控制设计航行体的姿轨控制器, 提出了神经网络与自适应控制相结合的控制方法. 文献[10]设计了一种变增益鲁棒控制方法, 通过增加松弛变量和Lyapunov函数来降低控制系统的保守性和实现系统稳定性, 仿真结果表明该系统具有较强的抗干扰性能和鲁棒性. 文献[11]设计了线性二次调节器和鲁棒反演控制两类控制器, 并通过仿真验证了其有效性. 针对模型中存在的时延问题, 庞爱平等^[12-13]通过对比时滞模型与非时滞模型的仿真曲线, 验证了其根据非时滞设计的控制器同样适应于时滞模型.

目前已有工作取得了一定效果, 但考虑空泡记忆效应的超空泡航行体是涉及多参量、多输入与多输出的复杂非线性时延系统, 与其他复杂非线性系统^[14-15]不同, 其非线性和时延特性主要体现在滑行力的计算上, 尾舵与空化器偏转角作为控制输入会同时影响系统的状态, 存在耦合特性. 然而, 控制的核心问题是抑制系统中未知扰动或者不确定性的负面作用^[16]. 为解决此问题, Han^[17]提出了自抗扰控制(active disturbance rejection control, ADRC), 其关键思想是设计扩张状态观测器(extended state observer, ESO), 从被控对象的输入或输出信号中提取未知扰动信息, 并在控制中进行扰动补偿, 可以明显降低扰动带来的负面影响. 为便于参数整定, Gao^[18]将ADRC简化为线性自抗扰控制(linear active disturbance rejection control, LADRC), 设计了线性扩张状态观测器(linear extended state observer, LESO), 上述工作促进了各领域学者对ADRC的研究与应用^[19-26].

超空泡航行体运行过程中会受到未知扰动影响, 借鉴ADRC的思想, 为了估计超空泡航行体运行过程中的未知扰动, 设计了基于该系统的LESO. 进一步尝试采用较为简单的反步法设计控制器, 通过Lyapunov方法分析系统稳定性. 通过与文献[3]中基于极点配置的线性反馈控制方法进行对比仿真, 结果验证了所提

方法的有效性, 对于非线性超空泡航行体的纵向运动, 能够实现较高的控制品质.

2 超空泡航行体的非线性动力学模型

考虑超空泡航行体在俯仰纵向平面内的运动, 首先建立航行体坐标系, 其原点位于航行体空化器的顶端面圆心, x 轴沿航行体中心轴指向前, z 轴垂直于 x 轴指向下, 以地面系为惯性系, z 为航行体深度, θ 为俯仰角, w 为纵向速度且沿航行体 z 轴方向, q 为俯仰角速度, 纵向平面内航行体 x 轴方向速度近似等于空化器的合速度 V , 并假设为常值, 设 $F_o^A = F_g^A + F_p^A [1 \ L]^T$, 其中 F_p^A 为滑行力 F_p 标准化后的值, 定义如下:

$$F_p^A = -\frac{V^2}{mL} \left(\frac{1+h'}{1+2h'} \right) \left[1 - \left(\frac{R'}{h'+R'} \right)^2 \right] \alpha_p, \quad (1)$$

$$F_g^A = \begin{bmatrix} \frac{7}{9} \\ \frac{17}{36}L \end{bmatrix} g. \quad (2)$$

根据Dzielski提出的经典基准模型^[2], 超空泡航行体的俯仰平面动力学方程如下:

$$\begin{cases} \dot{z} = w - V\theta, \\ \dot{\theta} = q, \\ M \begin{bmatrix} \dot{w} \\ \dot{q} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} w \\ q \end{bmatrix} + B \begin{bmatrix} \delta_f \\ \delta_c \end{bmatrix} + F_o^A, \end{cases} \quad (3)$$

其中:

$$A = CV \begin{bmatrix} \frac{1-n}{mL} & \frac{-n}{m} + \frac{7}{9C} \\ \frac{-n}{m} & \frac{-nL}{m} + \frac{17}{36C}L \end{bmatrix},$$

$$B = CV^2 \begin{bmatrix} \frac{-n}{mL} & \frac{1}{mL} \\ \frac{-n}{m} & 0 \end{bmatrix},$$

$$M = \begin{bmatrix} \frac{7}{9} & \frac{17}{36}L \\ \frac{17}{36}L & \frac{11}{60}R^2 + \frac{133}{405}L^2 \end{bmatrix},$$

δ_f 为尾舵偏转角, δ_c 为空化器偏转角,

$$C = \frac{1}{2} C_{x0} (1 + \sigma) \left(\frac{R_n}{R} \right)^2, \quad (4)$$

$$R' = (R_c - R)/R, \quad (5)$$

$$K_a = \frac{L}{R_n} \left(\frac{1.92}{\sigma} - 3 \right)^{-1} - 1, \quad (6)$$

$$K_b = \left[1 - \left(1 - \frac{4.5\sigma}{1+\sigma} \right) K_a^{40/17} \right]^{1/2}, \quad (7)$$

$$R_c = R_n \left[0.82 \frac{(1+\sigma)}{\sigma} \right]^{1/2} K_b. \quad (8)$$

考虑空泡的记忆效应, 浸入深度 h' 和浸入角 α_p 都是含有状态时延变量的函数, 设 $R^0 = R - R_c$, $z'(t, \tau) = z(t) + \theta(t)L - z(t - \tau)$, 根据 Vanek 的文献 [27], 其计算公式如下:

$$h' = \begin{cases} \frac{1}{R}[z'(t, \tau) + R'], & \text{上壁接触,} \\ 0, & \text{无接触,} \\ \frac{1}{R}[R' - z'(t, \tau)], & \text{下壁接触,} \end{cases} \quad (9)$$

$$\alpha_p = \begin{cases} \theta(t) - \theta(t - \tau) + \frac{w(t - \tau) - \dot{R}_c}{V}, & \text{上壁接触,} \\ 0, & \text{无接触,} \\ \theta(t) - \theta(t - \tau) + \frac{w(t - \tau) + \dot{R}_c}{V}, & \text{下壁接触.} \end{cases} \quad (10)$$

3 种情形的判断条件为

$$\begin{cases} \text{上壁接触, } -R^0 < z'(t, \tau), \\ \text{无接触, 其他,} \\ \text{下壁接触, } R^0 > z'(t, \tau), \end{cases} \quad (11)$$

其中: $\tau = L/V$ 表示时间延迟的值, \dot{R}_c 表示空泡半径收缩率, 表达式如下:

$$\dot{R}_c = \frac{-\frac{20}{17}(0.82\frac{1+\sigma}{\sigma})^{1/2}V(1 - \frac{4.5\sigma}{1+\sigma})K_a^{23/17}}{K_b(\frac{1.92}{\sigma} - 3)}. \quad (12)$$

采用超空泡航行体的模型参数见表 1.

表 1 超空泡航行体模型参数

Table 1 Supercavitating vehicle model parameters

名称	参数	值
重力加速度	g	$9.81(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$
航行体半径	R	0.0508 m
航行体长度	L	1.8 m
密度比	m	2
尾翼效率	n	0.5
升力系数	C_{x0}	0.82
空化器半径	R_n	0.0191 m
空化数	σ	0.0241

3 基于 LESO 的反步法控制器设计与稳定性分析

由第 2 节可知, 超空泡航行体是涉及多参量, 多输入与多输出的复杂非线性时延系统, 其非线性和时延特性主要体现在滑力 F_p 的计算上, 此外, 控制输入 δ_f 和 δ_c 会同时影响系统的状态, 存在耦合特性. 上述特性大大增加了对系统的控制器设计难度, 利用反步法, 基于 Lyapunov 分析, 可以在保证系统稳定性的同时有

效简化控制器设计, 对于系统中的未知扰动, 设计 LESO 进行扰动观测并补偿.

在系统模型 (3) 中, M 为非奇异矩阵, 为便于描述, 令 $x_1 = [z \ \theta]^T$, $x_2 = [w \ q]^T$, 考虑系统中存在未知扰动 $D = [d_1 \ d_2]^T$, 可将式 (3) 改写为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = A_1 x_1 + x_2, \\ \dot{x}_2 = A_2 x_2 + B_1 u + F_{gp} + D, \end{cases} \quad (13)$$

其中:

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & -V \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$A_2 = M^{-1}A,$$

$$B_1 = M^{-1}B,$$

$$u = [\delta_f \ \delta_c]^T,$$

$$F_{gp} = M^{-1}(F_g^A + F_p^A \begin{bmatrix} 1 \\ L \end{bmatrix}).$$

设跟踪指令为

$$x_{1d} = [z_d \ \theta_d]^T, \quad (14)$$

跟踪误差为 $E_1 = x_{1d} - x_1$, 对 E_1 求导可得

$$\dot{E}_1 = \dot{x}_{1d} - A_1 x_1 - x_2, \quad (15)$$

由于扰动项 D 未知, 将 D 作为扩张状态 x_3 , 有

$$\begin{cases} \dot{x}_2 = A_2 x_2 + B_1 u + F_{gp} + x_3, \\ \dot{x}_3 = \dot{D}, \end{cases} \quad (16)$$

为估计未知扰动 D , 构建对应的二阶 LESO 如下:

$$\begin{cases} e_1 = Z_1 - x_2, \\ \dot{Z}_1 = Z_2 + A_2 x_2 + B_1 u + F_{gp} - \beta_1 e_1, \\ \dot{Z}_2 = -\beta_2 e_1, \end{cases} \quad (17)$$

其中: Z_1 和 Z_2 分别为状态变量 x_2 和未知扰动 D 的估计值; $\beta_1 = 2\omega_o$, $\beta_2 = \omega_o^2$, ω_o 为观测器带宽; 假设未知扰动 \dot{D} 有界, 则由文献 [18] 可知, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, 有 $Z_1 \rightarrow x_2$, $Z_2 \rightarrow D$. 设虚拟指令

$$x_{2d} = \dot{x}_{1d} - A_1 x_1 + K_1 E_1, \quad (18)$$

误差 $E_2 = x_{2d} - x_2$. 假设 \dot{x}_{1d} , \ddot{x}_{1d} 可获知, 设计控制律

$$u = B_1^{-1}(E_1 + \ddot{x}_{1d} + K_1 \dot{x}_{1d} - (A_1 + K_1)\dot{x}_1 - A_2 x_2 - F_{gp} - Z_2 + K_2 E_2), \quad (19)$$

其中 K_1, K_2 均为二阶正定矩阵. 下面证明在控制律 (19) 下, 系统 (13) 是渐近稳定的.

证 定义 Lyapunov 候选函数

$$V = \frac{1}{2} E_1^T E_1 + \frac{1}{2} E_2^T E_2, \quad (20)$$

则 $V \geq 0$, 对 V 求导有

$$\begin{aligned}
 \dot{V} &= E_1^T \dot{E}_1 + E_2^T \dot{E}_2 = \\
 &E_1^T (\dot{x}_{1d} - A_1 x_1 - x_2) + E_2^T \dot{E}_2 = \\
 &E_1^T (\dot{x}_{1d} - A_1 x_1 - x_{2d} + E_2) + E_2^T \dot{E}_2 = \\
 &-E_1^T K_1 E_1 + E_1^T E_2 + E_2^T \dot{E}_2 = \\
 &-E_1^T K_1 E_1 + E_2^T (E_1 + \dot{E}_2) = \\
 &-E_1^T K_1 E_1 - E_2^T K_2 E_2 < 0.
 \end{aligned}
 \tag{21}$$

故V满足李雅普诺夫定理, 系统(13)渐近稳定. 证毕.

图1为系统的控制原理框图.

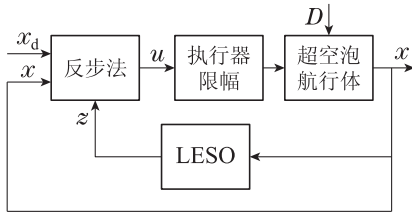


图1 控制原理框图
Fig. 1 Control block diagram

4 仿真结果

为测试所提反步法控制律(19)和LESO(17)观测未知扰动的有效性, 使用Simulink进行仿真, 设计不同情形的未知扰动 $D = [d_1 \ d_2]^T$, 与文献[3]中的极点配置线性反馈法进行对比, 该方法对应本文模型的控制律如下:

$$u = -(B^T B)^{-1} B^T (C + A x_d) - K_f \tilde{x},$$

其中: $x_d = [z_d \ \theta_d \ 0 \ 0]^T$, $\tilde{x} = x - x_d$, 反馈矩阵 K_f 使用极点配置法计算得到, 仿真中将极点配置为-2, -3, -4, -5.

预设系统(13)的状态变量初值 $[z_0 \ \theta_0 \ w_0 \ q_0]^T = [0 \ 0 \ 3 \ 0.02]^T$, 跟踪指令 $x_{1d} = [z_d \ \theta_d]^T = [1 \ 0]^T$, 考虑实际中舵角的限幅特性, 仿真设定尾舵偏角 δ_f 和空化器转角 δ_c 的范围均为 $\pm 25^\circ$, 根据经验选取观测器带宽 $\omega_o = 10$, $K_1 = \begin{bmatrix} 3 & 0 \\ 0 & 80 \end{bmatrix}$, $K_2 = \begin{bmatrix} 80 & 0 \\ 0 & 15 \end{bmatrix}$.

情形1 未知扰动 $D = [0 \ 0]^T$.

理想情况下, 模型中不存在未知扰动, 此时仿真结果如图2-6所示.

图2中, 由于系统状态初值较大, 出现了大小约为500 N的非线性滑力, 在控制器作用下, 该滑力快速消失, 4种状态均可在2 s内收敛并稳定至期望值(见图3), 控制过程中尾舵偏角和空化器转角都能保证在限幅范围内(见图4-5).

图6中, LESO所估计未知扰动的量级在 10^{-6} , 接近于0, 这与未知扰动为0的情形符合, 此时, 有

LESO的反步法控制效果几乎一致, 而极点配置线性反馈法存在超调现象.

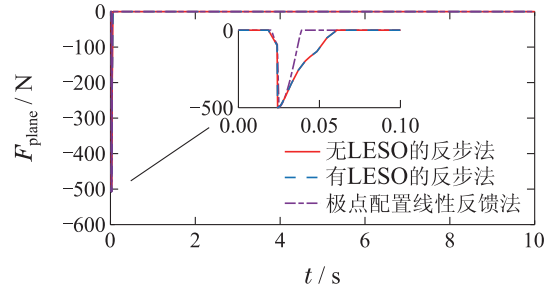
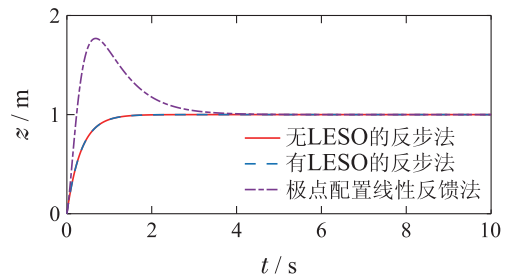
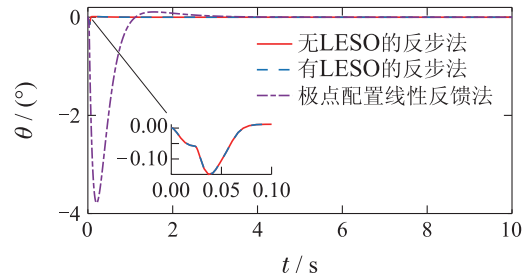


图2 情形1-滑力变化曲线

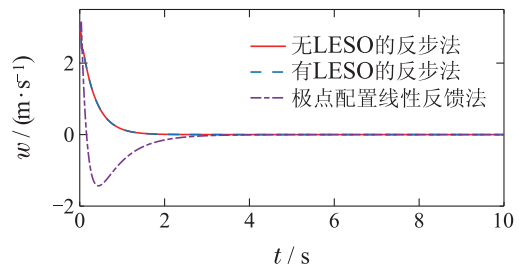
Fig. 2 F_{plane} curves of Case 1



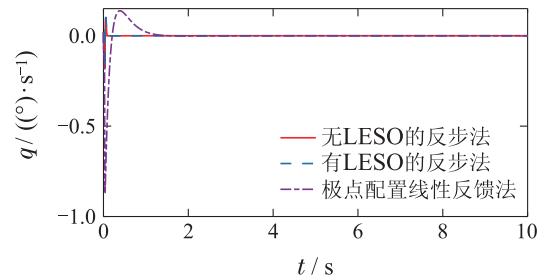
(a) 深度



(b) 俯仰角



(c) 纵向速度



(d) 俯仰角速度

图3 情形1 状态变化曲线

Fig. 3 State curves of Case 1

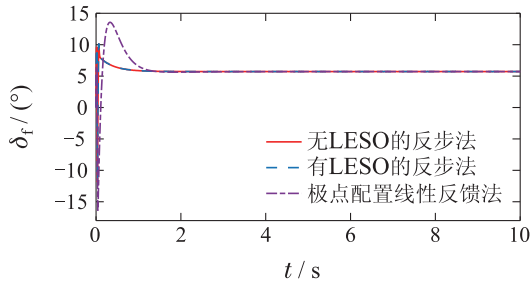


图 4 情形1- δ_f 变化曲线
Fig. 4 δ_f curves of Case 1

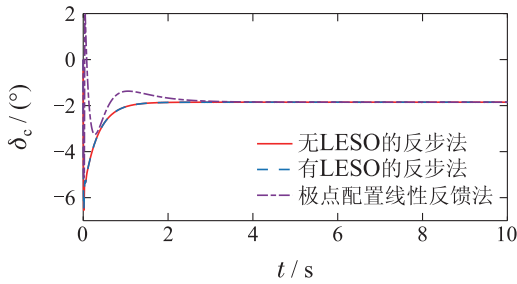


图 5 情形1- δ_c 变化曲线
Fig. 5 δ_c curves of Case 1

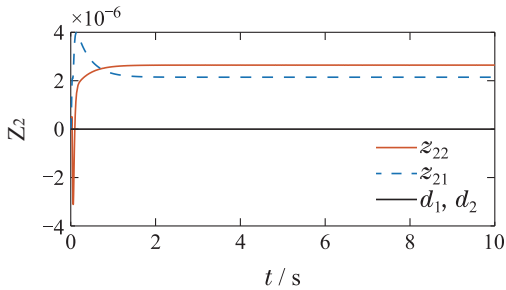
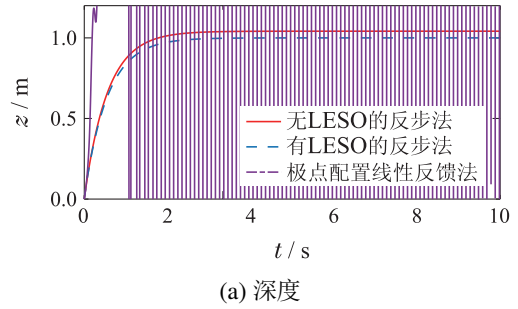
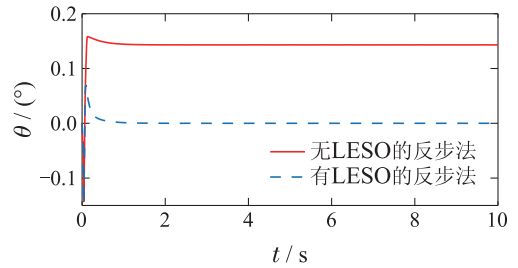


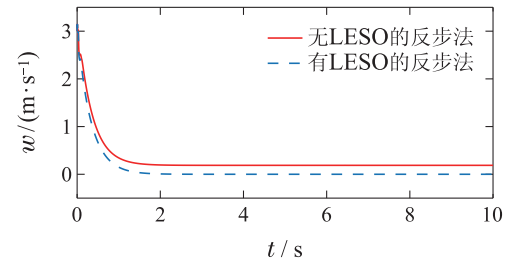
图 6 情形1-LESO估计未知扰动
Fig. 6 Z_2 curves of Case 1



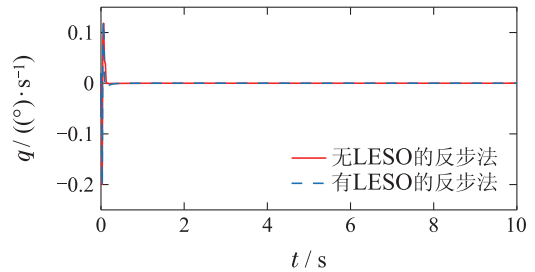
(a) 深度



(b) 俯仰角



(c) 纵向速度



(d) 俯仰角速度

图 7 情形2-状态变化曲线

Fig. 7 State curves of Case 2

情形 2 未知扰动 $D = [10 \ 3]^T$.

将模型中的未知扰动设置为常数值, 仿真结果如图7-11所示.

由于此时极点配置线性反馈法控制下的系统失稳发散, 因此仅在图7(a)中绘制了失稳状态下的深度曲线. 图8中, 由于系统初值和未知扰动的存在, 导致滑行力初值达到600 N, 在反步法控制作用下, 非线性滑行力会快速消失. 由图7和图11可知, 系统状态仍能在2s内收敛, 利用所设计的LESO可以准确估计未知扰动, 加入LESO补偿未知扰动的反步法控制器可以消除由扰动引起的稳态误差, 使系统状态更精确地达到期望值.

将图9-10与情形1中的图4-5对比可知, 要抵消扰动的作用需要更大的舵角变化范围, 由于扰动为常数值, 当系统达到稳态时, 控制量也会稳定于常值, 这与经验相符. 对比结果表明, 所提方法具有较好的鲁棒性.

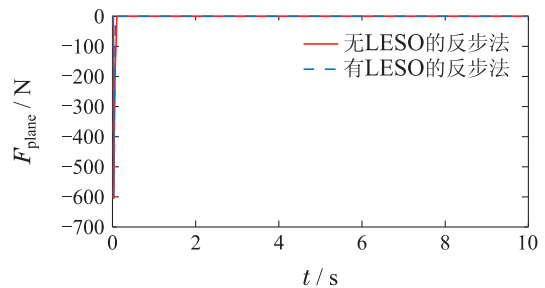


图 8 情形2-滑行力变化曲线

Fig. 8 F_{plane} curves of Case 2

情形 3 未知扰动 $D = [10 \sin t \ 3 \sin t]^T$.

将模型中的未知扰动设置为随时间变化的正弦信号, 仿真结果如图12-16所示.

图13中,滑翔力在控制器作用下,能从较大的初值500 N快速衰减至0. 对照图12-16可知,LESO可以较为准确地估计未知时变扰动,加入扰动补偿后的反步法控制效果更好,可以明显减弱由谐波扰动带来的振荡现象,能使系统在2s内达到稳态. 此外,结合情形1-2不难发现,空化器转角对航行体的俯仰角影响较大,尾舵偏角主要用于航行体的升降运动,与实际情况相符. 而对比方法控制下的系统无法抑制正弦扰动带来的影响,未能将系统状态收敛至期望值.

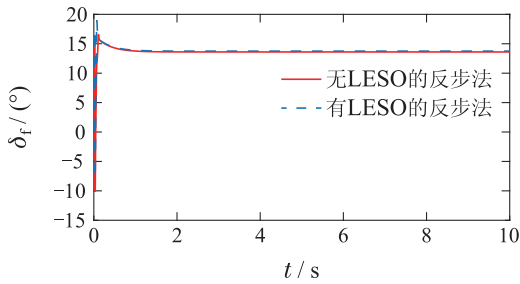


图9 情形2- δ_f 变化曲线

Fig. 9 δ_f curves of Case 2

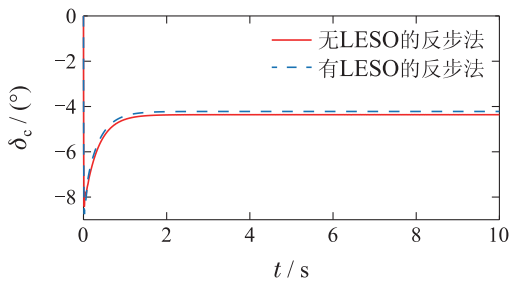


图10 情形2- δ_c 变化曲线

Fig. 10 δ_c curves of Case 2

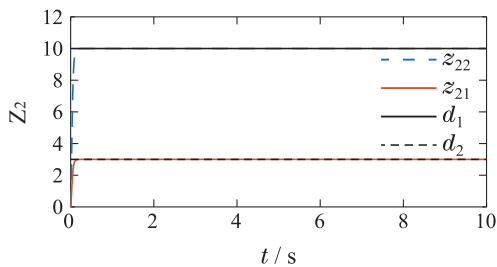
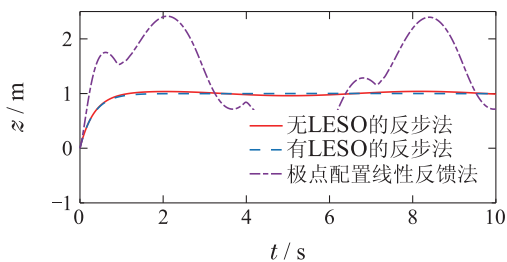
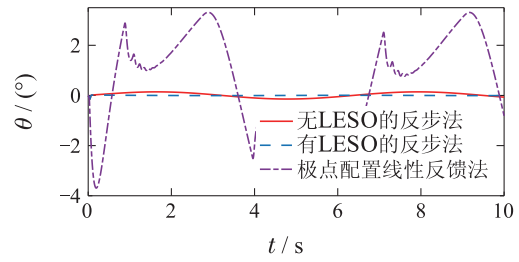


图11 情形2-LESO估计未知扰动

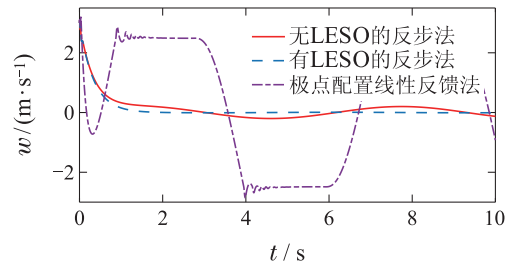
Fig. 11 Z_2 curves of Case 2



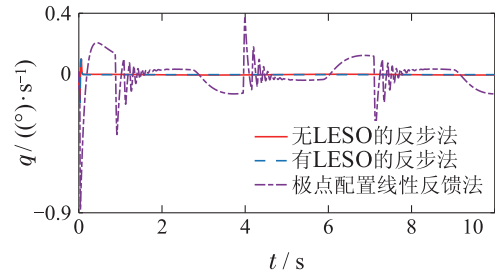
(a) 深度



(b) 俯仰角



(c) 纵向速度



(d) 俯仰角速度

图12 情形3-状态变化曲线

Fig. 12 State curves of Case 3

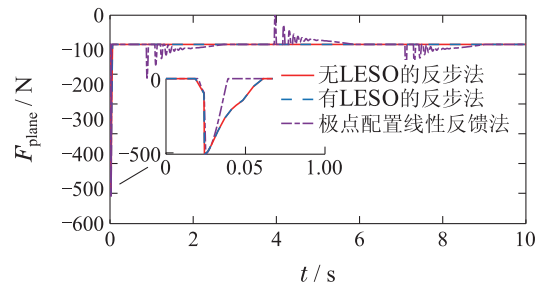


图13 情形3-滑翔力变化曲线

Fig. 13 F_{plane} curves of Case 3

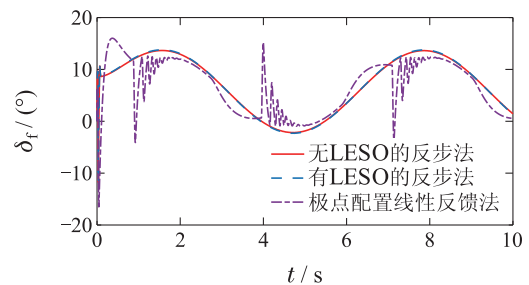


图14 情形3- δ_f 变化曲线

Fig. 14 δ_f curves of Case 3

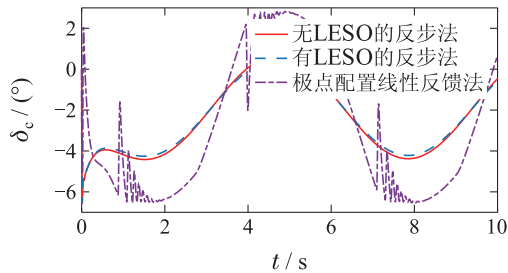
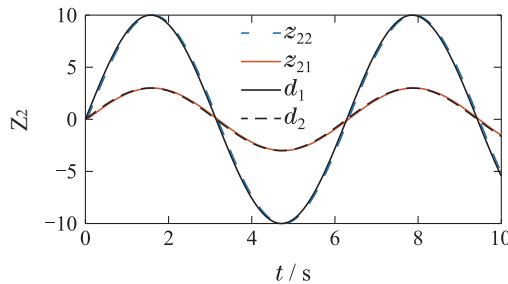
图 15 情形3- δ_c 变化曲线Fig. 15 δ_c curves of Case 3

图 16 情形3-LESO估计未知扰动

Fig. 16 Z_2 curves of Case 3

综合3种情形下的对比仿真结果可知,所设计基于LESO的反步控制方法可以精确估计并补偿系统中存在的未知扰动,对于非线性超空泡航行体的纵向运动,能够实现较高的控制品质。

5 结论

考虑非线性超空泡航行体的纵向控制问题,主要难点:空泡记忆效应产生滑力行的强非线性、耦合特性以及模型中存在的未知不确定性。为了降低控制难度,设计了基于LESO的反步法控制器,使用李雅普诺夫方法分析系统稳定性。在不同的未知扰动情形下进行对比仿真,结果验证了所提方法的有效性。未来工作可以考虑:优化所提控制器的参数,以达到更优的控制效果;将所提控制器改进完善并应用于其他复杂非线性系统。

参考文献:

- [1] PANG Aiping, HE Zhen, WANG Jinghua, et al. H_∞ state feedback design for supercavitating vehicles. *Control Theory & Applications*, 2018, 35(2): 146 – 152.
(庞爱平, 何朕, 王京华, 等. 超空泡航行体 H_∞ 状态反馈设计. 控制理论与应用, 2018, 35(2): 146 – 152.)
- [2] DZIELSKI J, KURDILA A. A benchmark control problem for supercavitating vehicles and an initial investigation of solutions. *Journal of Vibration and Control*, 2003, 9(7): 791 – 804.
- [3] GUO J, BALACHANDRAN B, ABED E H. Dynamics and control of supercavitating vehicles. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2008, 130(2): 021003.
- [4] MAO X, WANG Q. Nonlinear control design for a supercavitating vehicle. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2009, 17(4): 816 – 832.
- [5] LI Yang, LIU Mingyong, YANG Panpan, et al. Modeling and attitude-orbit control for incomplete-encapsulated supercavitating vehicles. *Control Theory & Applications*, 2017, 34(7): 885 – 894.
(李洋, 刘明雍, 杨盼盼, 等. 非全包裹超空泡航行体建模与姿轨控制. 控制理论与应用, 2017, 34(7): 885 – 894.)
- [6] WANG J, LIU Y, CAO G, et al. Design of RBF adaptive sliding mode controller for supercavitating vehicle. *IEEE Access*, 2021, 9: 39873 – 39883.
- [7] ZHANG Ke, LI Peng, WANG Zhi, et al. Experimental study of planning force on supercavitating vehicle tail. *Journal of Ship Mechanics*, 2020, 24(1): 8 – 17.
(张珂, 李鹏, 王志, 等. 超空泡航行体尾部滑力实验研究. 船舶力学, 2020, 24(1): 8 – 17.)
- [8] FAN Chunyong, LI Zengliang, LIU Bin. Investigation of the influence of lateral flow on the supercavitation for underwater vehicle. *Computer Simulation*, 2019, 36(7): 182 – 186.
(范春永, 李增亮, 刘斌. 水下航行体在侧方来流作用下超空化现象研究. 计算机仿真, 2019, 36(7): 182 – 186.)
- [9] LI Yang, LIU Mingyong, ZHANG Xiaojian. Adaptive RBF neural network based backstepping control for supercavitating vehicles. *Acta Automatica Sinica*, 2020, 46(4): 734 – 743.
(李洋, 刘明雍, 张小件. 基于自适应RBF神经网络的超空泡航行体反演控制. 自动化学报, 2020, 46(4): 734 – 743.)
- [10] HAN Yuntao, CHENG Zhanglong, LI Panpan, et al. Robust variable gain control for supercavitating vehicle based on LPV. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2017, 45(7): 127 – 132.
(韩云涛, 程章龙, 李盼盼, 等. 超空泡航行体LPV鲁棒变增益控制. 华中科技大学学报(自然科学版), 2017, 45(7): 127 – 132.)
- [11] ZHANG X, WEI Y, HAN Y, et al. Design and comparison of LQR and a novel robust backstepping controller for supercavitating vehicles. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 2017, 39(2): 149 – 162.
- [12] PANG Aiping, HE Zhen, CHAO Fan, et al. Time delay analysis for supercavitating vehicles. *Control Engineering of China*, 2019, 26(12): 2241 – 2245.
(庞爱平, 何朕, 钞凡, 等. 超空泡航行体时滞特性分析. 控制工程, 2019, 26(12): 2241 – 2245.)
- [13] HE Zhen, PANG Aiping. Feedback control design for supercavitating vehicles. *Electric Machines and Control*, 2017, 21(8): 101 – 108.
(何朕, 庞爱平. 超空泡航行体的反馈控制设计. 电机与控制学报, 2017, 21(8): 101 – 108.)
- [14] LONG L J. Synchronous vs asynchronous switching-based output-feedback control for switched nonlinear systems with measurement noise sensitivity. *Systems & Control Letters*, 2021, 152: 104935.
- [15] LUO H, SUN Z D, SUN W J, et al. Modeling of dielectrophoretic forces and electrorotational torque towards nonlinear control of micromanipulation system. *The 35th Chinese Control Conference (CC-C)*. Chengdu, China: 2016: 1135 – 1140.
- [16] GAO Zhiqiang. Research on thought of ADRC. *Control Theory & Applications*, 2013, 30(12): 1498 – 1510.
(高志强. 自抗扰控制思想探究. 控制理论与应用, 2013, 30(12): 1498 – 1510.)
- [17] HAN J Q. From PID to active disturbance rejection control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56(3): 900 – 906.
- [18] GAO Z Q. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning. *Proceedings of the 2003 American Control Conference*. Denver, CO, USA: IEEE, 2003: 4989 – 4996.
- [19] LI Jie, QI Xiaohui, WAN Hui, et al. Active disturbance rejection control: Summary and prospect of research results. *Control Theory & Applications*, 2017, 34(3): 281 – 295.
(李杰, 齐晓慧, 万慧, 等. 自抗扰控制: 研究成果总结与展望. 控制理论与应用, 2017, 34(3): 281 – 295.)

- [20] CHEN Sen, XUE Wenchao, HUANG Yi. Adrc design and control allocation for thrust vector aircraft. *Control Theory & Applications*, 2018, 35(11): 1591 – 1600.
(陈森, 薛文超, 黄一. 推力矢量飞行器的自抗扰控制设计及控制分配. 控制理论与应用, 2018, 35(11): 1591 – 1600.)
- [21] CHEN Zengqiang, WANG Yongshuai, SUN Mingwei, et al. Global asymptotic stability of auto-disturbance rejection control for second-order nonlinear systems. *Control Theory & Applications*, 2018, 35(11): 1687 – 1696.
(陈增强, 王永帅, 孙明玮, 等. 二阶非线性系统自抗扰控制的全局渐近稳定性. 控制理论与应用, 2018, 35(11): 1687 – 1696.)
- [22] LIU Junjie, CHEN Zengqiang, SUN Mingwei, et al. Application of active disturbance rejection control in high-angle-of-attack maneuver for aircraft with thrust vector. *Chinese Journal of Engineering*, 2019, 41(9): 1187 – 1193.
(刘俊杰, 陈增强, 孙明玮, 等. 自抗扰控制在推力矢量飞机大迎角机动中的应用. 工程科学学报, 2019, 41(9): 1187 – 1193.)
- [23] ZHONG Sheng, HUANG Yi, HU Jinchang. Active disturbance rejection control for deep space spacecraft attitude. *Control Theory & Applications*, 2019, 36(12): 2028 – 2034.
(钟声, 黄一, 胡锦昌. 深空探测航天器姿态的自抗扰控制. 控制理论与应用, 2019, 36(12): 2028 – 2034.)
- [24] LIU Shengfei, SUN Qinglin, CHEN Zengqiang, et al. Anti-disturbance commutation hysteresis compensation backstep control for proportional valve-controlled electro-hydraulic systems. *Control Theory & Applications*, 2020, 37(7): 1521 – 1534.
(刘胜斐, 孙青林, 陈增强, 等. 比例阀控电液系统抗扰换向滞后补偿反步控制. 控制理论与应用, 2020, 37(7): 1521 – 1534.)
- [25] TAN Panlong, QIN Huayang, SUN Mingwei, et al. Sliding mode active disturbance rejection control for underactuated RTAC. *Control Theory & Applications*, 2021, 38(12): 2085 – 2093.
(檀盼龙, 秦华阳, 孙明玮, 等. 欠驱动RTAC的滑模自抗扰镇定控制. 控制理论与应用, 2021, 38(12): 2085 – 2093.)
- [26] QIN Huayang, CHEN Zengqiang, SUN Mingwei, et al. Extended state observer based on sliding window real-time wavelet denoising and active disturbance rejection control. *Control Theory & Applications*, 2022, 39(1): 23 – 30.
(秦华阳, 陈增强, 孙明玮, 等. 基于滑动窗实时小波降噪的扩张状态观测器及自抗扰控制. 控制理论与应用, 2022, 39(1): 23 – 30.)
- [27] VANEK B, BOKOR J, BALAS G J, et al. Longitudinal motion control of a high-speed supercavitation vehicle. *Journal of Vibration and Control*, 2007, 13(2): 159 – 184.

作者简介:

秦华阳 硕士研究生, 目前研究方向为超空泡航行体建模与控制、自抗扰控制、智能控制;

陈增强 教授, 博士生导师, 目前研究方向为智能控制、预测控制、自抗扰控制, E-mail: chenzq@nankai.edu.cn;

孙明玮 教授, 博士生导师, 目前研究方向为飞行器制导与控制、自抗扰控制;

周 瑜 硕士研究生, 目前研究方向为超空泡航行体建模与控制;

孙青林 教授, 博士生导师, 目前研究方向为自抗扰控制、自适应控制、嵌入式控制系统、柔性飞行器建模与控制。