

欠驱动水下航行器编队协同控制

肖瑞武, 孙洪飞

(厦门大学信息科学与技术学院, 福建 厦门 361005)

[摘要] 针对复杂海况中欠驱动无人水下航行器(UUV)的水平面上编队问题, 结合路径跟踪控制和一致性算法构建编队运动控制策略. 将编队任务分为两步: 1) 对于每个UUV个体设计路径跟踪控制器, 完成对各自期望路径的跟踪; 2) 对于多个UUV之间设计一致性协同算法, 完成UUV编队的协同运动; 编队控制器设计考虑了外界海流干扰及UUV模型参数不确定性等因素. 针对海流干扰设计干扰观测器, 利用自适应技术对参数不确定性进行在线估计, 最后通过仿真验证了所设计编队控制策略的有效性.

[关键词] 无人水下航行器; 路径跟踪; 干扰观测器; 一致性算法

[中图分类号] TP 273

[文献标志码] A

Coordinated Control over Formation of Under-actuated Underwater Vehicles

XIAO Rui-wu, SUN Hong-fei

(School of Information Science and Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: With regard to above-water formation issues for under-actuated unmanned underwater vehicles (UUVs) in complex sea conditions, a formation movement-control strategy is presented by means of path-tracking control and distributed consensus algorithm. The formation task is decomposed into two steps. Firstly, a path-tracking controller for each single UUV is designed to track their desired paths. Secondly, for multiple UUVs, a distributed consensus algorithm is proposed to implement their coordinated movements. The aggregate influence of parametric uncertainty and current disturbance are taken into account when designing the formation controller. A disturbance observer is designed for the ocean current disturbance, while the adaptive control technique is used to estimate the parameter uncertainty online. Finally, the validity of the formation control strategy is tested through simulation.

Key words: UUV; path-tracking; disturbance observer; consensus algorithm

0 引言

欠驱动无人水下航行器(Under-actuated Underwater Vehicle, UUV)的诞生给人类对海洋的探索和资源开发带来了新的工具. 由于大范围复杂的水下作业, 需要多个UUV协同作业, 因此急需有效的编队控制策略, 来完成整个UUV编队的控制, 合理地分配各UUV的工作任务. 近年来, 编队控制问题成为众多学者研究的热点^[1]. 文献[2]研究了欠驱动水下航行器的领航者-跟随者编队控制问题, 采用反步法设计了编队控制律. 文献[3]提出了分布式框架的虚拟结构法编队控制策略, 研究

[收稿日期] 2015-07-21

[修回日期] 2015-10-18

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(61374037)

[作者简介] 肖瑞武(1990—), 男, 硕士生, 从事水下航行器编队控制研究. 通信作者: 孙洪飞(1970—), 男, 教授, 研究方向为混合系统控制、基于网络的系统控制、非线性控制理论及其在运动体控制上的应用, E-mail: sunhf@xmu.edu.cn.

了多智能体编队运动在固定拓扑和切换拓扑两种情况下的协同一致性。但是传统的编队控制方法只要求 UUV 间的相对位置或者距离达到期望值,对单个 UUV 路径没有限制,无法克服水声通信中断导致的混乱状态,致使 UUV 发生碰撞。

为了防止上述问题的出现,需要对各 UUV 的运动路径加以限制。当水声通信中断时,各 UUV 仍可沿预定的路径运动,因此编队协同路径跟踪具有重要的研究意义。文献 [4] 研究单个 UUV 的路径跟踪问题,基于 Serret - Frenet 坐标系建立 UUV 路径跟踪误差模型,利用反步法设计控制器,完成预期的控制目标。文献 [5] 不仅完成了对路径跟踪控制器的设计,还通过路径参数设计一致性算法实现各 UUV 的协同运动。但是上述研究未同时考虑海流干扰和参数不确定性的影响。有学者将智能算法与控制理论结合应用于水下航行器编队控制的研究,从而提高了控制器的鲁棒性。文献 [6] 考虑了参数不确定性和海流干扰对 UUV 编队控制的影响,采用神经网络自适应动态面方法对其进行在线逼近。但是神经网络控制存在计算上的复杂性,在权值的选择上需要通过反复试验进行优化。本文综合考虑欠驱动、参数不确定性以及外界海流干扰等因素影响下的 UUV 编队问题,提出了基于虚拟结构法、路径跟踪控制和一致性算法的编队控制策略。

1 预备知识与问题描述

1.1 水下航行器的数学模型

研究水平面上运动的 n 艘 UUV 组成的编队运动系统,用 $i = 1, 2, 3, \dots, n$ 对编队成员进行编号。基于文献 [7], 对第 i 艘欠驱动 UUV 考虑海流干扰和参数不确定性的因素建立如下运动学和动力学模型:

$$\Sigma_1: \begin{cases} \dot{x}_i = u_i \cos \psi_i - v_i \sin \psi_i + w_{cx_i}, \\ \dot{y}_i = u_i \sin \psi_i + v_i \cos \psi_i + w_{cy_i}, \\ \dot{\psi}_i = r_i; \end{cases} \quad \Sigma_2: \begin{cases} \dot{u}_i = m_{2i} v_i r_i / m_{1i} - X_{ui} u_i / m_{1i} + \tau_{ui} / m_{1i}, \\ \dot{v}_i = -m_{1i} u_i r_i / m_{2i} - Y_{vi} v_i / m_{2i}, \\ \dot{r}_i = (m_{1i} - m_{2i}) u_i v_i / m_{3i} - N_{ri} r_i / m_{3i} + \tau_{ri} / m_{3i}. \end{cases}$$

其中 $\dot{x}_i, \dot{y}_i, \dot{\psi}_i$ 为向量 $\boldsymbol{\eta} = [x_i, y_i, \psi_i]^T$ 中元素,表示第 i 艘 UUV 在惯性坐标系下的广义位置信息 (ψ_i 表示其航向角); u_i, v_i, r_i 分别表示其前进速度、横移速度和艏摇角速度; m_{1i}, m_{2i}, m_{3i} 表示包括 UUV 附加质量在内的惯性参数; X_{ui}, Y_{vi}, N_{ri} 表示 UUV 系统的不确定水动力阻尼系数; τ_{ui} 和 τ_{ri} 分别表示 UUV 的前进推力和转向力矩; w_{cx_i}, w_{cy_i} 表示外界海流干扰在 UUV 运动学上的分量。对外界干扰的要求为慢变量,即 $\dot{w}_{cx_i} \approx 0, \dot{w}_{cy_i} \approx 0$ 。

1.2 基于虚拟结构法的编队控制策略

如图 1 所示,坐标系 C_0 为惯性坐标系,编队坐标系 C_F 固定在编队的虚拟结构中心上, C_i 表示第 i 个 UUV 的体坐标系, C_i^d 表示第 i 个 UUV 的期望位置。虚拟领航者选为虚拟结构的中心,虚拟领航者在惯性坐标系 C_0 下的运动路径表示为预先给定的期望路径 $\eta_0(x_0(s_i), y_0(s_i))$, 其中, s_i 为路径参数。由期望队形确定各跟随者在编队坐标系中坐标 $[a_i, b_i]^T$, 由此得到各跟随者在惯性坐标系下的期望路径为

$$\boldsymbol{\eta}_{di}(s_i) := \boldsymbol{\eta}_0(s_i) + \boldsymbol{R}_{OF} [a_i, b_i]^T = [x_{sfi}(s_i), y_{sfi}(s_i)]^T.$$

其中, \boldsymbol{R}_{OF} 为坐标系 C_0 相对坐标系 C_F 的旋转矩阵。

1.3 UUV 路径跟踪

下面以第 i 艘 UUV 为例来说明路径跟踪问题^[4]。如图 2 所示,预先给定惯性坐标系 C_0 下的参考路径 $\boldsymbol{\eta}_{di} = [x_{sfi}(s_i), y_{sfi}(s_i)]^T$ 。 P 点是路径上的自由参考点,路径坐标系 $\{SF\}$ 是以 P 点为原点, x_{sfi}

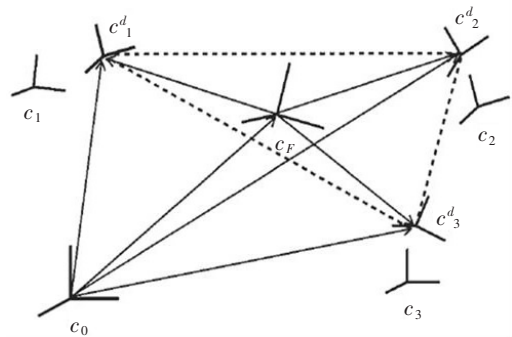


图 1 虚拟结构法示意图

Fig.1 The schematic diagram of virtual structure method

轴的方向为 P 点处的切线方向, y_{sfi} 轴的方向为 P 点处的法线方向. x_{sfi} 轴与惯性坐标系的 x 轴的夹角为

$\psi_{Fi}(s_i) = \arctan(y_{sfi}/x_{sfi})$, 其对应的角速率为 $r_{pi} = \partial \psi_{Fi} \dot{s}_i / \partial s_i$. 自由参考点 P 点沿路径的运动速率为 $U_{pi} = \sqrt{\dot{y}_{sfi}^2 + \dot{x}_{sfi}^2}$, 第 i 艘 UUV 在路径坐标系 $\{SF\}$ 中的坐标路径跟踪误差为 $\eta_{ei} F = [x_{ei}, y_{ei}]^T$, 那么存在关系式:

$$\eta_{eiSF} = \mathbf{R}_F \eta_{eiC_0}, \quad (1)$$

其中, $\eta_{ei} C_0 = \eta_i C_0 - \eta_{di} C_0$, \mathbf{R}_F 为惯性坐标系到路径坐标系之间的旋转矩阵: $\mathbf{R}_F = \begin{bmatrix} \cos \psi_{Fi} & \sin \psi_{Fi} \\ -\sin \psi_{Fi} & \cos \psi_{Fi} \end{bmatrix}$.

对式 (1) 两边求导得到跟踪误差方程:

$$\begin{cases} \dot{x}_{ei} = -U_{pi} + r_{pi} y_{ei} + v_{ti} \cos \psi_{ei} + w_{cxi} \cos \psi_{Fi} + w_{cyi} \sin \psi_{Fi}, \\ \dot{y}_{ei} = -r_{pi} x_{ei} + v_{ti} \sin \psi_{ei} - w_{cxi} \sin \psi_{Fi} + w_{cyi} \cos \psi_{Fi} \end{cases}, \quad (2)$$

其中, $v_{ti} = \sqrt{u_i^2 + v_i^2}$; $\psi_{ei} = \psi_i + \beta_i - \psi_{Fi}$, $\psi_{ei} = r_i + \beta_i - r_{pi}$; $\beta_i = \arctan(v_i/u_i)$ 为侧滑角.

式 (2) 中, U_{pi} 和 ψ_{ei} 分别决定了自由参考点的运动速率和运动方向, 视为路径跟踪的导引律. 由此, 将路径跟踪问题转化为跟踪误差的镇定问题.

1.4 问题描述

本文的主要控制目标是设计编队控制策略, 完成某个水平面上满足通信拓扑无向连通的多 UUV 编队按照事先指定的队形运动. 由虚拟结构法, 将编队的运动问题转化为多个 UUV 个体的协同路径跟踪问题. 为了达到该目标, 分两部分来完成编队控制器的设计.

1) 内环回路设计: 单个 UUV 路径跟踪控制器设计. 利用反步法从运动学和动力学两个方面进行设计. 运动学控制设计: 对于式 (2) 所示的误差方程, 设计导引律 U_{pi} 和 ψ_{ei} , 使得路径跟踪误差满足 $\lim_{t \rightarrow \infty} (x_{ei}, y_{ei}) \rightarrow (0, 0)$, 并且通过 ψ_{ei} 设计期望的艏摇角速度 r_{di} . 动力学控制设计: 设计 UUV 的控制输入前进推力 τ_{ui} 和转向力矩 τ_{ri} , 使得前进速度和艏摇角速度能够渐近收敛于各自的期望值, 并设计干扰观测器和自适应更新律, 分别对慢时变的外界海流干扰和参数不确定性进行补偿.

2) 外环回路设计: 多个 UUV 之间的编队协同控制器设计. 基于路径跟踪问题, 设计一致性算法, 使得各路径参数趋于一致: $\lim_{t \rightarrow \infty} (s_i - s_j) = 0, \forall i, j \in \{1, \dots, n\}$. 从而实现各自由参考点沿各自的期望路径以相同的速度运动.

2 内环回路设计

2.1 运动学控制设计

选取李雅普诺夫函数^[8]: $V_1 = (x_{ei}^2 + y_{ei}^2)/2$, 对其两边求导, 将式 (2) 代入得到

$$\dot{V}_1 = x_{ei}(-U_{pi} + v_{ti} \cos \psi_{ei} + w_{cxi} \cos \psi_{Fi} + w_{cyi} \sin \psi_{Fi}) + y_{ei}(v_{ti} \sin \psi_{ei} \psi_{ei}/\psi_{ei} - w_{cxi} \sin \psi_{Fi} + w_{cyi} \cos \psi_{Fi}).$$

选择航向角误差 ψ_{ei} 为中间控制量, 设计导引律 U_{pi} 和 ψ_{ei} 为

$$\begin{cases} U_{pi} = v_{ti} \cos \psi_{ei} + \hat{w}_{cxi} \cos \psi_{Fi} + \hat{w}_{cyi} \sin \psi_{Fi} + k_{1i} x_{ei}, \\ \psi_{ei} = (-k_{2i} y_{ei} + \hat{w}_{cxi} \sin \psi_{Fi} - \hat{w}_{cyi} \cos \psi_{Fi}) / (v_{ti} \sin \psi_{ei} / \psi_{ei}). \end{cases} \quad (3)$$

其中, 上标 “ $\hat{\cdot}$ ” 表示对干扰的观测值. 可得到 $\dot{V}_1 = -k_{1i} x_{ei}^2 - k_{2i} y_{ei}^2 + v_{ti} \sin \psi_{ei} y_{ei} \tilde{\psi}_{ei} / \psi_{ei} + \alpha_i$, 其中,

$$\alpha_i = \tilde{w}_{cxi}(x_{ei} \cos \psi_{Fi} - y_{ei} \sin \psi_{Fi}) + \tilde{w}_{cyi}(x_{ei} \sin \psi_{Fi} + y_{ei} \cos \psi_{Fi}), \tilde{\psi}_{ei} = \psi_{ei} - \psi_{edi}.$$

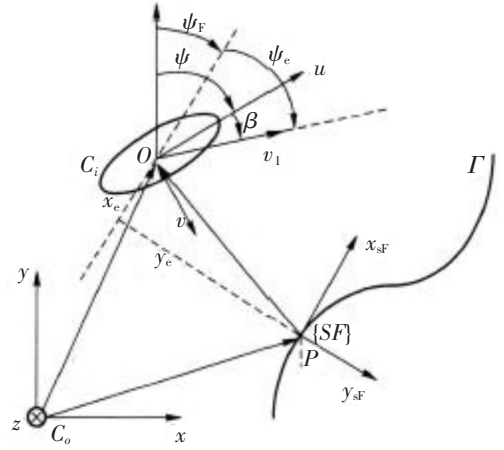


图 2 水平面路径跟踪

Fig.2 Path-following in a horizontal plane

选取李雅普诺夫函数 $V_2 = V_1 + \tilde{\psi}_{ei}^2/2$, 对其求导, 得到

$$\dot{V}_2 = -k_{1i} \dot{x}_{ei}^2 - k_{2i} \dot{y}_{ei}^2 + \tilde{\psi}_{ei}(\dot{r}_i + \dot{\beta}_i - \dot{r}_{pi} - \dot{\psi}_{edi} + v_{ti} \sin \psi_{ei} \dot{y}_{ei} / \psi_{ei}) + \alpha_i,$$

得到期望的艏摇角速度为: $\dot{r}_{di} = -\dot{\beta}_i + \dot{r}_{pi} + \dot{\psi}_{edi} - \dot{y}_{ei} v_{ti} \sin \psi_{ei} / \psi_{ei} - k_{3i} \tilde{\psi}_{ei}$.

2.2 动力学控制设计

定义前进速度跟踪误差为: $u_{ei} = u_i - u_{di}$; 定义航向角速度跟踪误差为: $r_{ei} = r_i - r_{di}$.

选取李雅普诺夫函数为 $V_3 = V_2 + u_{ei}^2/2 + r_{ei}^2/2$, 对其求导, 得到

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 = & -k_{1i} \dot{x}_{ei}^2 - k_{2i} \dot{y}_{ei}^2 - k_{3i} \tilde{\psi}_{ei}^2 + \alpha_i + u_{ei}(m_{2i} v_i r_i / m_{1i} - X_{ui} u_i / m_{1i} + \tau_{ui} / m_{1i} - \dot{u}_{di}) + \\ & r_{ei}((m_{1i} - m_{2i}) u_i v_i / m_{3i} - N_{ri} r_i / m_{3i} + \tau_{ri} / m_{3i} + \tilde{\psi}_{ei} - \dot{r}_{di}). \end{aligned}$$

得到控制器为:

$$\begin{cases} \tau_{ui} = m_{1i}(-k_{4i} u_{ei} + \dot{u}_{di}) - m_{2i} v_i r_i + \hat{X}_{ui} u_i, \\ \tau_{ri} = m_{3i}(-k_{5i} r_{ei} + \dot{r}_{di} - \tilde{\psi}_{ei}) - (m_{1i} - m_{2i}) v_i u_i + \hat{N}_{ri} r_i. \end{cases} \quad (4)$$

其中, 上标 “^” 表示对不确定参数的估计值.

2.3 自适应更新律设计

对于简化模型引起的参数不确定性, 设计鲁棒自适应更新律对其进行在线估计和补偿^[9]. 定义不确定性参数估计误差为: $\tilde{X}_{ui} = X_{ui} - \hat{X}_{ui}$, $\tilde{N}_{ri} = N_{ri} - \hat{N}_{ri}$. 对于动力学方程中的不确定参数, 设计更新律为:

$$\dot{\tilde{X}}_{ui} = u_i u_{ei}, \dot{\tilde{N}}_{ri} = r_i r_{ei}. \quad (5)$$

在式 (4) 所示控制器作用下, 得到

$$\dot{V}_3 = -k_{1i} \dot{x}_{ei}^2 - k_{2i} \dot{y}_{ei}^2 - k_{3i} \tilde{\psi}_{ei}^2 - k_{4i} u_{ei}^2 - k_{5i} r_{ei}^2 + u_{ei} \tilde{X}_{ui} u_i / m_{1i} + r_{ei} \tilde{N}_{ri} r_i / m_{3i} + \alpha_i. \quad (6)$$

选取李雅普诺夫函数为 $V_4 = V_3 + \tilde{X}_{ui}^2/m_{1i}/2 + \tilde{N}_{ri}^2/m_{3i}/2$, 对其求导得到

$$\begin{aligned} \dot{V}_4 = & -k_{1i} \dot{x}_{ei}^2 - k_{2i} \dot{y}_{ei}^2 - k_{3i} \tilde{\psi}_{ei}^2 - k_{4i} u_{ei}^2 - k_{5i} r_{ei}^2 + \tilde{X}_{ui}(u_i u_{ei} + \dot{\tilde{X}}_{ui}) / m_{1i} + \tilde{N}_{ri}(r_i r_{ei} + \dot{\tilde{N}}_{ri}) / m_{3i} + \alpha_i = \\ & -k_{1i} \dot{x}_{ei}^2 - k_{2i} \dot{y}_{ei}^2 - k_{3i} \tilde{\psi}_{ei}^2 - k_{4i} u_{ei}^2 - k_{5i} r_{ei}^2 + \alpha_i. \end{aligned}$$

2.4 干扰观测器设计

对于外界海流干扰的影响, 设计状态及干扰观测器^[10]. 由于位置状态不易测量, 故设计状态观测器. 定义位置状态 x, y 的观测值为 \hat{x}, \hat{y} , 位置状态误差为: $\tilde{x}_i = x_i - \hat{x}_i, \tilde{y}_i = y_i - \hat{y}_i$.

状态观测器设计为:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_i = u_i \cos \psi_i - v_i \sin \psi_i + \hat{w}_{cxi} + \lambda_{1i} \tilde{x}_i, \\ \dot{\hat{y}}_i = u_i \sin \psi_i + v_i \cos \psi_i + \hat{w}_{cyi} + \lambda_{2i} \tilde{y}_i. \end{cases}$$

得到 $\dot{\tilde{x}}_i = -\lambda_{1i} \tilde{x}_i + \tilde{w}_{cxi}, \dot{\tilde{y}}_i = -\lambda_{2i} \tilde{y}_i + \tilde{w}_{cyi}$.

选取李雅普诺夫函数 $V_1^* = (\tilde{x}_i^2 + \tilde{y}_i^2)/2$, 对其求导得到: $\dot{V}_1^* = -\lambda_{1i} \tilde{x}_i^2 - \lambda_{2i} \tilde{y}_i^2 + \tilde{x}_i \tilde{w}_{cxi} + \tilde{y}_i \tilde{w}_{cyi}$.

选取李雅普诺夫函数 $V_2^* = V_1^* + (\tilde{w}_{cxi}^2 + \tilde{w}_{cyi}^2)/2$, 对其求导得到: $\dot{V}_2^* = -\lambda_{1i} \tilde{x}_i^2 - \lambda_{2i} \tilde{y}_i^2 + \tilde{w}_{cxi}(\tilde{x}_i + \dot{\tilde{w}}_{cxi}) + \tilde{w}_{cyi}(\tilde{y}_i + \dot{\tilde{w}}_{cyi})$.

由于考虑慢变量干扰的影响, 可得 $\dot{\tilde{w}}_{cxi} = 0 - \dot{\tilde{w}}_{cxi}, \dot{\tilde{w}}_{cyi} = 0 - \dot{\tilde{w}}_{cyi}$. 因此, 干扰观测器设计为:

$$\dot{\tilde{w}}_{cxi} = \lambda_{3i} \tilde{w}_{cxi} + \tilde{x}_i, \dot{\tilde{w}}_{cyi} = \lambda_{4i} \tilde{w}_{cyi} + \tilde{y}_i. \quad (7)$$

得到 $\dot{V}_2^* = -\lambda_{1i} \tilde{x}_i^2 - \lambda_{2i} \tilde{y}_i^2 - \lambda_{3i} \tilde{w}_{cxi}^2 - \lambda_{4i} \tilde{w}_{cyi}^2 < 0$. 根据 Lyapunov 渐近稳定性定理可知, 观测器观测误差系统全局渐近稳定, 所设计的观测器能够实现对运动学上海流干扰的观测.

3 外环回路设计

定义由多个 UUV 系统之间通信联系构成的无向图 $G_n = (v_n, \varepsilon_n)$, 其中 v_n 表示图的顶点集合, ε_n 表示边的集合. N_i 表示第 i 个 UUV 的邻居构成的集合. $A = [a_{ij}]_{n \times n}$ 用来表示 UUV 之间联系的邻接矩阵. 度矩阵 $D = \text{diag}\{d_i\}$, 其中 $d_i = \sum_{j \in N_i} a_{ij}$. 拉普拉斯矩阵定义为: $L = D - A$. 假设 n 艘 UUV 完

成编队路径跟踪的目标^[11], 根据式 (3) 导引律得到路径参数的导数, 用 ϑ_i 表示如下: $\vartheta_i = U_{pi}/\sqrt{\dot{y}_{sfi}^2 + \dot{x}_{sfi}^2}$. 取其平均值 $\bar{\vartheta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \vartheta_i$, 重新设计路径参数的导数如下: $\dot{s}_i = \bar{\vartheta} - \sum_{j \in N_i} a_{ij}(s_i - s_j)$.

其中, 第一项保证各 UUV 沿各自的期望路径航行; 第二项为一致性算法, 实现各路径参数 s_i 同步. 其对应的矩阵形式为: $\dot{s} = \bar{\vartheta}1 - Ls$. 其中, $1 = [1, \dots, 1]^T \in R^n$. 为了验证路径参数能够实现一致, 引入如下变换: $\tilde{s} = s - \int_0^t \bar{\vartheta}1 ds$, 对其求导得到: $\dot{\tilde{s}} = -Ls = -L(\tilde{s} + \int_0^t \bar{\vartheta}1 ds) = -L\tilde{s}$.

由于矩阵 $-L$ 满足主对角线以外的元素均非负且行和为 0, 当 UUV 之间的通信拓扑无向连通时, $\exists \lambda_0 \in R$, 使得 $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{s} = \lambda_0 1$. 因此 $\lim_{t \rightarrow \infty} (s_i - s_j) = 0, \forall i, j \in \{1, \dots, n\}$.

4 稳定性分析

引理 1 考虑非线性级联系统: $\begin{cases} \dot{x} = f(x, z), \\ \dot{z} = g(z), \end{cases}$ 若满足子系统 $\dot{x} = f(x, 0)$ 在平衡点 $x = 0$ 上全局渐近稳定且子系统 $\dot{z} = g(z)$ 在平衡点 $z = 0$ 上全局渐近稳定, 那么级联系统在平衡点 $(x, z) = (0, 0)$ 上局部渐近稳定^[8].

定理 1 对于 n 艘 UUV 编队协同控制问题, 假设通信拓扑满足无向连通, 设计式 (4) 所示控制器 τ_{ui} 和 τ_{ri} 、式 (5) 所示的参数不确定性自适应更新律和式 (7) 干扰观测器, 可实现 UUV 对各自期望路径的渐近跟踪. 前进速度跟踪期望值 u_{di} , 且能够保证横移速度有界, UUV 之间完成编队协同, 实现对期望队形的形成与保持.

证明 1) 编队稳定性分析: 综上所述, 得到如下级联系统:

$$\Sigma_1: \begin{cases} \dot{x}_{ei} = r_{pi} y_{ei} + \tilde{w}_{cxi} \cos \psi_{Fi} + \tilde{w}_{cyi} \sin \psi_{Fi} - k_{1i} x_{ei}; \\ \dot{y}_{ei} = -r_{pi} x_{ei} - \tilde{w}_{cx} \sin \psi_F + \tilde{w}_{cy} \cos \psi_F - k_{2i} y_{ei} + \tilde{\psi}_{ei} v_{ti} \sin \psi_{ei} / \psi_{ei}; \\ \dot{\tilde{\psi}}_{ei} = -k_{3i} \tilde{\psi}_{ei} - y_{ei} v_{ti} \sin \psi_{ei} / \psi_{ei}; \\ \dot{u}_{ei} = -k_{4i} u_{ei} - \tilde{X}_{ui} u_i / m_{1i}; \\ \dot{r}_{ei} = -k_{5i} r_{ei} - \tilde{N}_{ri} r_i / m_{3i}; \\ \dot{\tilde{X}}_{ui} = -u_i u_{ei}, \dot{\tilde{N}}_{ri} = -r_i r_{ei}, \dot{s} = -L\tilde{s}. \end{cases} \quad \Sigma_2: \begin{cases} \dot{\tilde{x}}_i = -\lambda_{1i} \tilde{x}_i + \tilde{w}_{cxi}; \\ \dot{\tilde{y}}_i = -\lambda_{2i} \tilde{y}_i + \tilde{w}_{cyi}; \\ \dot{\tilde{w}}_{cxi} = -\lambda_{3i} \tilde{w}_{cxi} - \tilde{x}_i; \\ \dot{\tilde{w}}_{cyi} = -\lambda_{4i} \tilde{w}_{cyi} - \tilde{y}_i. \end{cases}$$

若对于第一个子系统 Σ_1 有 $\tilde{w}_{cxi} = 0, \tilde{w}_{cyi} = 0$, 则选取李雅普诺夫函数为: $V_5 = V_4 + \tilde{s}^T \tilde{s} / 2$, 对其两边求导, 得 $\dot{V}_5 = -k_{1i} x_{ei}^2 - k_{2i} y_{ei}^2 - k_{3i} \tilde{\psi}_{ei}^2 - k_{4i} u_{ei}^2 - k_{5i} r_{ei}^2 - \tilde{s}^T L \tilde{s} < 0$.

由 Lyapunov 渐近稳定性定理可知, 第一个子系统 Σ_1 在平衡点上全局渐近稳定. 据 2.4 节所述, 第二个子系统 Σ_2 在平衡点上全局渐近稳定. 根据引理 1 可知, 整个级联系统局部渐近稳定.

2) 关于横移速度有界性的证明在此不详细推导, 可参考文献 [12]. 结合第 3 节可知, UUV 路径参数趋于一致, 而实现了编队的协同控制.

5 数值仿真

为了验证编队控制策略的有效性, 对由 7 艘 UUV 组成的编队进行仿真实验. UUV 模型的相关参数如下: $m_{1i} = 215 \text{ kg}$, $m_{2i} = 265 \text{ kg}$, $m_{3i} = 80 \text{ kg}$; $X_{ui} = 70 \text{ kg}$, $Y_{vi} = 100 \text{ kg}$, $N_{ri} = 50 \text{ kg m}^2/\text{s}$. 为

为了方便对编队仿真结果的比较分析,令虚拟结构中心运动的期望路径为: $x_{d0}(s) = s$, $y_{d0}(s) = 10 \sin 0.1 s$.

在 +20% 参数摄动和外界干扰共同影响下的编队路径跟踪仿真如图3所示. 考虑外界海流干扰的影响为: $w_{cxi} = 0.05 \sin 0.1 t$, $w_{cyi} = 0.05 \cos 0.1 t$, 受海流干扰以及模型参数不确定性的影响,所设计的控制器仍然能够较好地完成路径跟踪任务,只是需要较长的收敛时间. 设计干扰观测器和参数自适应更新律进行补偿后,编队运动曲线如图4-图5所示,跟踪误差较快收敛到零,验证了所设计的编队控制策略的有效性.

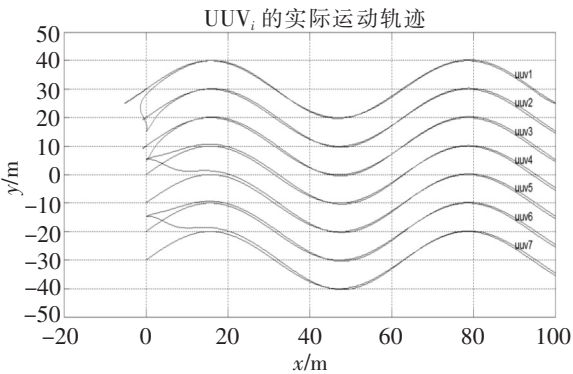


图3 外扰影响下编队运动曲线

Fig.3 The formation movement curves under the external disturbances

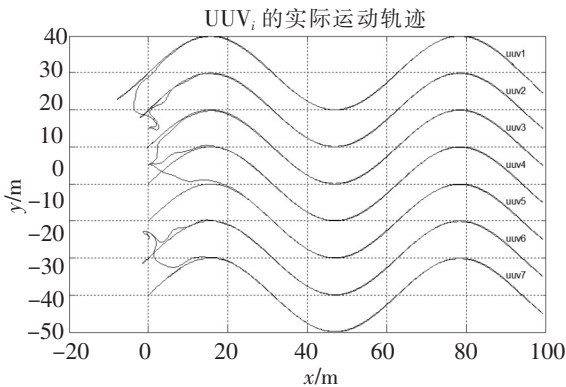


图4 基于干扰观测器的编队运动曲线

Fig.4 The formation movement curves based on disturbance observers

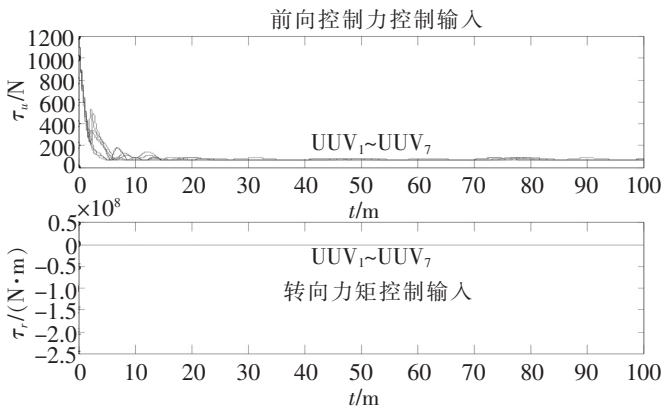


图5 基于干扰观测器的控制输入

Fig.5 The path-following control input based on disturbance observers

6 结论

针对建模参数不确定以及外界海流干扰影响下的欠驱动 UUV 编队协同控制问题,基于路径跟踪、虚拟结构法的编队控制策略,利用反步法和李雅普诺夫函数法设计了前进推力控制器和转向力矩控制器. 对外界干扰设计干扰观测器,对参数不确定性设计自适应更新律进行在线估计,并分别证明了各自动态误差的稳定性. 设计编队协同一致性算法实现编队的协同控制. 仿真结果表明所设计的编队控制策略能够快速完成 UUV 队形的形成和保持. 但是论文并未考虑 UUV 个体之间的通信时延和编队通信拓扑的切换等因素对编队协同控制的影响,这将是今后进一步的研究方向.

[参考文献]

[1] 王祥科,李迅,郑志强. 多智能体系统编队控制相关问题研究综述 [J]. 控制与决策, 2013, 28(11): 1601-1613.

[2] DING L, GUO G. Formation control for ship fleet based on backstepping [J]. Control and Decision, 2012, 27(2): 299-303.

[3] REN W. Decentralization of virtual structures in formation control of multiple vehicle systems via consensus strategies [J]. European Journal of Control, 2008, 14(2): 93-103.

[4] LAPIERRE L, SOETANTO D, PASCOAL A. Nonlinear path following with applications to the control of autonomous un-

- derwater vehicles [C/OL]. Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control, Maui, Hawaii, USA, 2003: 1256-1261. [2014-10-12]. <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=1272781&newsearch=true&queryText=Nonlinear%20path%20following%20with%20applications%20to%20the%20control%20of%20autonomous%20underwater%20vehicles&fname=&mname=&lname=&title=&volume=&issue=&spage=>.
- [5] WANG Y, YAN W, HUANG Y. Path parameters consensus based formation control for multiple mobile robots [C/OL]. Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Xi'an, China, August 4-7, 2010: 1598-1602. [2015-04-15]. <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=5588935&queryText=Path%20parameters%20consensus%20based%20formation%20control%20for%20multiple%20mobile%20robots&newsearch=true>.
- [6] WANG H, WANG D, PENG Z. Robust adaptive dynamic surface control for synchronized path following of multiple underactuated autonomous underwater vehicles [C/OL]. Proceedings of the 33rd IEEE Conference on Chinese Control Conference, Nanjing, China. 2014: 1949-1954. [2014-12-10]. <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6896928&newsearch=true&queryText=Robust%20adaptive%20dynamic%20surface%20control%20for%20synchronized%20path%20following%20of%20multiple%20underactuated%20autonomous%20underwater%20vehicles>.
- [7] FOSSEN T I. Nonlinear modeling and control of underwater vehicles [D]. Trondheim: Norwegian Institute of Technology, 1991.
- [8] ISIDORI A. Nonlinear control systems II [M]. London: Springer, 1999.
- [9] 毕凤阳. 欠驱动自主水下航行器的非线性鲁棒控制策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [10] BI F Y, WEI Y J, ZHANG J Z. Position-tracking control of under-actuated autonomous underwater vehicles in the presence of unknown ocean currents[J]. Control Theory and Applications, 2010, 4(11): 2369-2380.
- [11] MOREAU L. Stability of continuous-time distributed consensus algorithms [C/OL]. Proceedings of the 43th IEEE Conference on Decision and Control, Atlantis, Paradise Island, Bahamas, 2004: 3998-4003. [2015-04-26]. <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=1429377&queryText=Stability%20of%20continuous-time%20distributed%20consensus%20algorithms&newsearch=true>.
- [12] GHOMMAM J, MNIF F. Coordinated path-following control for a group of underactuated surface vessels [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(10): 39-3963.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 周云龙)