

多艘拖轮协助大型船舶靠泊的编队控制方法

林安辉, 曾建平*

(厦门大学航空航天学院, 福建 厦门 361102)

摘要: 为了研究多艘拖轮协助欠驱动大型船舶靠泊的控制, 提出了一种采用拖轮编队来解决大型船舶靠泊问题的控制方法. 在拖轮的水动力学模型中, 将大型船舶对拖轮的反作用力视为未知输入, 给出了一种干扰估计误差方程和原状态方程形成互联系统的干扰观测器. 该干扰观测器使得拖轮速度实际值与期望值误差能够快速收敛. 在干扰观测器的基础上给出了拖轮编队控制器设计, 并分析了闭环系统的稳定性. 仿真结果验证了该方法的有效性.

关键词: 大型船舶; 靠泊; 拖轮编队控制; 干扰观测器; 互联系统

中图分类号: TP 273

文献标志码: A

文章编号: 0438-0479(2019)01-0096-07

编队控制在航天、航海、机器人等领域有着广泛的应用前景, 成为近年来的研究热点^[1]. 在航海领域, 船舶编队控制的研究大多集中于编队在大洋中航行时的控制问题^[2-9]. 相对于船舶在大洋中的航行, 因港口水域受限及地理条件的复杂性, 船舶的靠泊操纵具有一定的复杂性和困难性. 船舶的靠泊控制研究从 20 世纪 90 年代起受到关注, 现已有较多文献报道应用各种控制算法使船舶依靠靠泊、舵、侧推器等自身动力实现靠泊^[10-15].

大型船舶在靠泊过程中, 为了安全需在低航速下行驶. 但大型船舶在低航速下, 易失去舵效, 缺少侧推器的情况下一般需要多艘拖轮协助其靠泊. 目前多艘拖轮协助大型船舶靠泊控制的研究大多数是以大型船舶为核心, 在已知或估计大型船舶水动力学模型的基础上计算大型船舶靠泊所需的力和力矩, 再通过一定的算法将控制力和力矩分配到多艘拖轮中, 并未考虑拖轮的运动控制^[16-20].

拖轮与大型船舶之间的连接并不是固定的, 一旦拖轮与大型船舶脱离, 其控制输入将变化为零, 需重新进行控制分配. 拖轮的控制输入应为自身运动需要的和所分配的控制量相叠加. 现有多艘拖轮的协调多由引航员人工处理, 但当拖轮数量较多时, 人工协调存在困难. 因此, 研究拖轮编队控制具有一定的实际意义. 已有干扰观测器的研究表明其能够很好地估计慢变的外扰和系统的不确定性^[21]. 目前, 基于干扰观测器的补偿控制方

法所用的闭环系统是干扰实际值与估计值的误差方程同原状态方程之间没有耦合相级联的系统, 即级联系统. 但耦合并不都是有害的, 而是可以利用的. 文献^[22-23]中利用耦合实现了一类闭环系统的镇定控制.

本研究以拖轮为研究对象, 多艘拖轮组成队形为虚拟刚性结构的编队, 通过控制拖轮编队的运动来带动大型船舶的运动. 将大型船舶靠泊轨迹规划为两个步骤, 并应用贝塞尔曲线将大型船舶靠泊过程规划成两个步骤. 使用 leader-follower 的方法, 将已规划好路径和速度的虚拟船作为领航船, 拖轮作为跟随船, 进而将靠泊控制问题转化为拖轮编队的控制问题. 在拖轮的水动力学模型中, 将大型船舶靠泊所需的力和力矩视为每艘拖轮的未知输入. 受文献^[22-23]的启发, 本研究给出了一种干扰估计误差方程和原始状态方程形成互联系统的干扰观测器, 将闭环系统看成拖轮和大型船舶相互耦合的系统. 基于此干扰观测器的补偿控制能使得拖轮速度实际值与期望值误差快速收敛. 然后对闭环系统进行了稳定性分析.

1 问题描述与靠泊规划

记 $\{O\}$ 表示惯性坐标系, 不失一般性, 设坐标系 $\{O\}$ 的横轴与泊位平行, 泊位的中心位置在坐标系 $\{O\}$ 中的坐标为 (x_{do}, y_{do}) , 大型船舶船体中心需停靠

收稿日期: 2017-07-16 录用日期: 2018-11-18

基金项目: 国家自然科学基金(61374037)

*通信作者: jpzeng@xmu.edu.cn

引文格式: 林安辉, 曾建平. 多艘拖轮协助大型船舶靠泊的编队控制方法[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2019, 58(1): 96-102.

Citation: LIN A H, ZENG J P. The formation control method for multiple tugboats assist the large ship berthing[J]. J Xiamen Univ Nat Sci, 2019, 58(1): 96-102. (in Chinese)



<http://jxmu.xmu.edu.cn>

在该位置,航向角为 0.5π .大型船舶靠泊轨迹的规划如图 1 所示.首先大型船舶在拖轮的协助下航行至泊位前方 (x_{d1}, y_{d0}) 处并停止;然后在拖轮的推动下移动至泊位,即将大型船舶靠泊过程分成运动轨迹 1 和运动轨迹 2 两个过程.

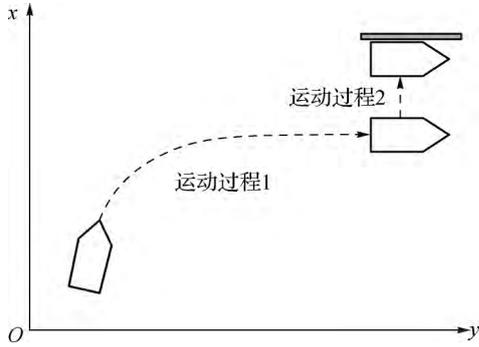


图 1 大型船舶靠泊过程的规划

Fig.1 Planning of the large ship berthing path

在运动轨迹 1 中,对大型船舶的期望航行轨迹进行规划,采用 5 个坐标控制点确定的四阶贝塞尔曲线来表示轨迹,表达式为^[24]:

$$\begin{cases} x_p = \sum_{l=0}^4 C_l^4 \lambda_1^l (1-\lambda_1)^{4-l} x_{pl}, \\ y_p = \sum_{l=0}^4 C_l^4 \lambda_1^l (1-\lambda_1)^{4-l} y_{pl}, \end{cases} \quad (1)$$

其中, $C_l^4 = \frac{4!}{l!(4-l)!}$, $\lambda_1^0 = 1$, (x_{pl}, y_{pl}) 为坐标系 $\{O\}$ 中的 5 个坐标点, $\lambda_1 = \lambda_1(t) \in [0, 1]$.

在运动轨迹 2 中,大型船舶的期望航行轨迹是直线,采用二阶贝塞尔曲线表示:

$$\begin{cases} x_q = \sum_{l=0}^2 C_l^2 \lambda_2^l (1-\lambda_2)^{2-l} x_{ql}, \\ y_q = y_{d0}, \end{cases} \quad (2)$$

其中, $C_l^2 = \frac{2!}{l!(2-l)!}$, $\lambda_2^0 = 1$, (x_{ql}, y_{d0}) 为坐标系 $\{O\}$ 中的 3 个坐标点, $\lambda_2 = \lambda_2(t) \in [0, 1]$.

令

$$\begin{cases} \lambda_1 = 1 - \cos(0.5\pi(1 - e^{k_1 t})), \\ \lambda_2 = 1 - \cos(0.5\pi(1 - e^{k_2(t-t_1)})), \end{cases}$$

其中, $k_1 < 0$ 和 $k_2 < 0$ 为可调参数, t_1 为运动过程 1 切换到运动过程 2 的时刻.

由贝塞尔曲线的性质可知,运动过程 1 的起始点是 (x_{p0}, y_{p0}) , 终点是 (x_{p4}, y_{p4}) , 选择坐标控制点 $(x_{p4}, y_{p4}) = (x_{d1}, y_{d0})$. 同理,运动过程 2 选择坐标控制点 $x_{q0} = x_{d1}, x_{q2} = x_{d0}$.

设一虚拟船从 (x_{p0}, y_{p0}) 出发并沿曲线式(1)和

(2)运动,则当 $t \rightarrow \infty$ 时,虚拟船停在 (x_{d0}, y_{d0}) 处.那么,运动过程 1 中虚拟船的航向 $\tilde{\Psi}_0$ 、纵向速度 \tilde{u}_0 、横荡速度 \tilde{v}_0 和艏摇角速度 \tilde{r}_0 为

$$\begin{cases} \tilde{\Psi}_0 = \arctan\left(\frac{\dot{y}_p}{\dot{x}_p}\right), \\ \tilde{u}_0 = \sqrt{\dot{x}_p^2 + \dot{y}_p^2}, \\ \tilde{v}_0 = 0, \\ \tilde{r}_0 = \frac{\dot{x}_p \ddot{y}_p - \ddot{x}_p \dot{y}_p}{\dot{x}_p^2 + \dot{y}_p^2}. \end{cases} \quad (3)$$

其中 \dot{x}_p, \dot{y}_p 与 \ddot{x}_p, \ddot{y}_p 为 x_p, y_p 对时间的一阶与二阶微分.由式(3),为了使得虚拟船在 (x_{d1}, y_{d0}) 处的航向 $\tilde{\Psi}_0$ 为 0.5π ,应取 $x_{p3} = x_{d1}, y_{p3} < y_{d0}$.

同理可得,运动过程 2 中虚拟船的航向 $\tilde{\Psi}_0$ 、纵向速度 \tilde{u}_0 、横荡速度 \tilde{v}_0 和艏摇角速度 \tilde{r}_0 为

$$\begin{cases} \tilde{\Psi}_0 = 0.5\pi, \\ \tilde{u}_0 = 0, \\ \tilde{v}_0 = -\dot{x}_q, \\ \tilde{r}_0 = 0. \end{cases} \quad (4)$$

其中 \dot{x}_q 为 x_q 对时间的一阶微分.

引入虚拟船后,若大型船舶在拖轮的协助下能够跟踪虚拟船的运动,则大型船舶最终能停止在 (x_{d0}, y_{d0}) 处且航向角在 0.5π 处.

将协助大型船舶靠泊的多艘拖轮视为拖轮编队.拖轮编队的运动过程如图 2 所示.在运动过程 1 中,在大型船舶船舷两侧用 2~6 艘拖轮采用顶推或吊拖方式控制大型船舶的艏摇角速度和横荡速度,位于船艏采用 1 艘拖轮使用吊拖方式协助控制大型船舶的纵向速度.在运动过程 2 中,撤除岸边一侧的拖轮.设拖轮已经聚集在大型船舶周围,拖轮编队的队形为虚拟刚性结构.拖轮编队运动时,相当于一虚拟刚体携带大型船舶在运动,从而实现大型船舶的靠泊.

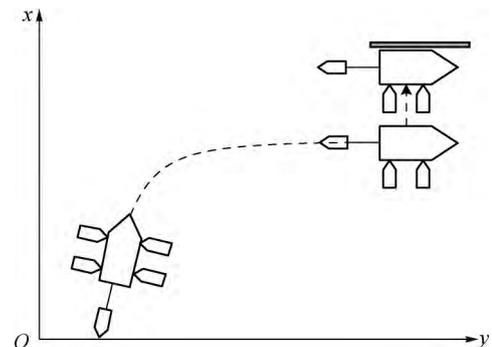


图 2 拖轮编队的运动过程

Fig.2 Motion of the tugboats formation

记 $\{B_0\}$ 和 $\{B_i\}$ 分别表示大型船舶的船体坐标系

和拖轮 i 的船体坐标系 ($i=1, 2, \dots, n$). $(x_{0/i}, y_{0/i})$ 表示大型船舶船体中心在坐标系 $\{B_i\}$ 中的坐标, (x_0, y_0) 和 (x_i, y_i) 分别表示大型船舶船体中心和拖轮 i 船体中心在坐标系 $\{O\}$ 中的坐标. Ψ_i 表示拖轮 i 与坐标系 $\{O\}$ 纵轴偏差角度即航向, u_i, v_i 和 r_i 分别表示在坐标系 $\{O\}$ 中拖轮 i 船体中心的纵向速度、横荡速度和艏摇角速度, Ψ_0 表示在坐标系 $\{O\}$ 中大型船舶的航向, u_0, v_0 和 r_0 分别表示在坐标系 $\{O\}$ 中大型船舶船体中心的纵向速度、横荡速度和艏摇角速度. 拖轮 i 与大型船舶的运动示意图如图 3 所示.

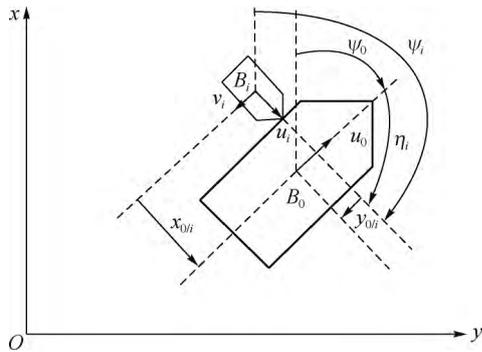


图 3 拖轮与大型船舶的运动示意图

Fig.3 Motion sketch map of the tugboats and the large ship

由图 3, 拖轮 i 与大型船舶位置偏差和航向偏差的运动学模型为

$$\begin{cases} \dot{x}_{0/i} = -u_i + u_0 \cos \eta_i - v_0 \sin \eta_i + r_i y_{0/i}, \\ \dot{y}_{0/i} = -v_i + u_0 \sin \eta_i + v_0 \cos \eta_i - r_i x_{0/i}, \\ \dot{\eta}_i = r_0 - r_i, \end{cases} \quad (5)$$

其中, $\eta_i = \Psi_0 - \Psi_i$.

将虚拟船作为领航船, 拖轮作为跟随船. 同式 (5), 拖轮 i 与虚拟领航船位置偏差和航向偏差的运动学模型为

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}}_{0/i} = -u_i + \tilde{u}_0 \cos \tilde{\eta}_i - \tilde{v}_0 \sin \tilde{\eta}_i + r_i \tilde{y}_{0/i}, \\ \dot{\tilde{y}}_{0/i} = -v_i + \tilde{u}_0 \sin \tilde{\eta}_i + \tilde{v}_0 \cos \tilde{\eta}_i - r_i \tilde{x}_{0/i}, \\ \dot{\tilde{\eta}}_i = \tilde{r}_0 - r_i, \end{cases} \quad (6)$$

其中, $(\tilde{x}_{0/i}, \tilde{y}_{0/i})$ 表示虚拟领航船在坐标系 $\{B_i\}$ 中的坐标, $\tilde{\eta}_i = \tilde{\Psi}_0 - \Psi_i$.

在靠泊过程中, 将大型船舶对拖轮 i 的反作用力 X_{0i}, Y_{0i} 和 N_{0i} 视为未知, 作为拖轮 i 的输入. 拖轮 i 在纵向、横荡和艏摇 3 个自由度的水动力学模型为^[25]

$$\begin{cases} (m_i - X_{\dot{u}_i}) \dot{u}_i = m_i v_i r_i + m_i x_{G_i} r_i^2 + X_{H_i} + X_{0i} + X_{w_i} + X_{c_i}, \\ (m_i - Y_{\dot{v}_i}) \dot{v}_i + (m_i x_{G_i} - Y_{\dot{r}_i}) \dot{r}_i = -m_i u_i r_i + Y_{H_i} + Y_{0i} + Y_{w_i} + Y_{c_i}, \\ (m_i x_{G_i} - Y_{\dot{r}_i}) \dot{v}_i + (I_{z_i} - N_{\dot{r}_i}) \dot{r}_i = -m_i x_{G_i} u_i r_i + N_{H_i} + N_{0i} + N_{w_i} + N_{c_i}, \end{cases} \quad (7)$$

其中, X_{H_i}, Y_{H_i} 和 N_{H_i} 为拖轮 i 的黏性水动力和力矩, I_{z_i} 为拖轮 i 的惯性矩, $X_{\dot{u}_i}, Y_{\dot{v}_i}, Y_{\dot{r}_i}$ 和 $N_{\dot{r}_i}$ 为拖轮 i 的附加质量和附加惯性矩, X_{w_i}, Y_{w_i} 和 N_{w_i} 为风、浪、流对拖轮 i 所产生的外扰, $(x_{G_i}, 0)$ 为拖轮 i 船体重心在坐标系 $\{B_i\}$ 中的坐标点.

设拖轮 i 与虚拟领航船的期望距离偏差和航向偏差 $(x_{di}, y_{di}, \eta_{di})$ 为常数, 速度 u_{ci}, v_{ci} 和 r_{ci} 为拖轮 i 的运动学虚拟控制输入. 令拖轮 i 纵向速度、横荡速度和艏摇角速度与虚拟控制输入的误差分别为 $u_{ei} = u_i - u_{ci}, v_{ei} = v_i - v_{ci}, r_{ei} = r_i - r_{ci}$, 拖轮 i 与虚拟领航船纵向、横向距离偏差和航向偏差与期望值误差分别为 $x_{ei} = \tilde{x}_{0/i} - x_{di}, y_{ei} = \tilde{y}_{0/i} - y_{di}, \eta_{ei} = \tilde{\eta}_i - \eta_{di}$. 则误差满足方程:

$$\begin{cases} \dot{x}_{ei} = -u_{ei} - u_{ei} + \tilde{u}_0 \cos \tilde{\eta}_i - \tilde{v}_0 \sin \tilde{\eta}_i + r_i (y_{ei} + y_{di}), \\ \dot{y}_{ei} = -v_{ei} - v_{ei} + \tilde{u}_0 \sin \tilde{\eta}_i + \tilde{v}_0 \cos \tilde{\eta}_i - r_i (x_{ei} + x_{di}), \\ \dot{\eta}_{ei} = \tilde{r}_0 - r_{ei} - r_{ei}, \\ (m_i - X_{\dot{u}_i}) \dot{u}_{ei} = X_i + X_{\Delta i} + X_{c_i} - (m_i - X_{\dot{u}_i}) \dot{u}_{ci}, \\ (m_i - Y_{\dot{v}_i}) \dot{v}_{ei} + (m_i x_{G_i} - Y_{\dot{r}_i}) \dot{r}_{ei} = Y_i + Y_{\Delta i} + Y_{c_i} - (m_i - Y_{\dot{v}_i}) \dot{v}_{ci} - (m_i x_{G_i} - Y_{\dot{r}_i}) \dot{r}_{ci}, \\ (m_i x_{G_i} - Y_{\dot{r}_i}) \dot{v}_{ei} + (I_{z_i} - N_{\dot{r}_i}) \dot{r}_{ei} = N_i + N_{\Delta i} + N_{c_i} - (m_i x_{G_i} - Y_{\dot{r}_i}) \dot{v}_{ci} - (I_{z_i} - N_{\dot{r}_i}) \dot{r}_{ci}, \end{cases} \quad (8)$$

其中, $X_{\Delta i} = X_{0i} + X_{w_i}, Y_{\Delta i} = Y_{0i} + Y_{w_i}, N_{\Delta i} = N_{0i} + N_{w_i}, X_i = m_i v_i r_i + m_i x_{G_i} r_i^2 + X_{H_i}, Y_i = -m_i u_i r_i + Y_{H_i}, N_i = -m_i x_{G_i} u_i r_i + N_{H_i}$.

综上所述, 若系统 (8), (9) 最终一致有界, 则拖轮编队组成虚拟刚性结构队形并带动大型船舶运动, 从而实现大型船舶停靠在泊位邻近处. 因此, 本文中解决拖轮编队协助大型船舶靠泊控制问题转化为系统 (8), (9) 的镇定控制问题.

2 基于拖轮编队的大型船舶靠泊控制

设矩阵 $A = (a_{ij}) \in \mathbf{R}^{n \times n}, \bar{A} = (\bar{a}_{ij}) \in \mathbf{R}^{n \times n}, \tilde{A} =$

<http://jxmu.xmu.edu.cn>

$(\tilde{a}_{ij}) \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 为拖轮编队的加权邻接矩阵. 加权邻接矩阵中 $a_{ii} = 0, \bar{a}_{ii} = 0, \tilde{a}_{ii} = 0$. 若拖轮 j 为拖轮 i 的邻居, 则

$$a_{ij} > 0, \bar{a}_{ij} > 0, \tilde{a}_{ij} > 0,$$

否则

$$a_{ij} = 0, \bar{a}_{ij} = 0, \tilde{a}_{ij} = 0.$$

令拖轮 i 运动学虚拟控制输入为

$$\begin{cases} u_{\tau i} = \tilde{u}_0 \cos \tilde{\eta}_i - \tilde{v}_0 \sin \tilde{\eta}_i + r_i y_{di} + k_{u_i} x_{ei} + \sum_{j \in \Pi_i} a_{ij} (x_{ei} - x_{ej}), \\ v_{\tau i} = \tilde{u}_0 \sin \tilde{\eta}_i + \tilde{v}_0 \cos \tilde{\eta}_i - r_i x_{di} + k_{v_i} y_{ei} + \sum_{j \in \Pi_i} \bar{a}_{ij} (y_{ei} - y_{ej}), \\ r_{\tau i} = \tilde{r}_0 + k_{r_i} \eta_{ei} + \sum_{j \in \Pi_i} \tilde{a}_{ij} (\eta_{ei} - \eta_{ej}), \end{cases} \quad (10)$$

其中, $\Pi_i \subset \{1, 2, \dots, i-1, i+1, \dots, n\}$ 为拖轮 i 的周围邻居拖轮集合, $k_{u_i} > 0, k_{v_i} > 0$ 和 $k_{r_i} > 0$ 为可调参数.

令

$$\begin{cases} X'_{\tau i} = -X_i + (m_i - X_{\dot{u}_i}) \dot{u}_{\tau i} + X''_{\tau i}, \\ Y'_{\tau i} = -Y_i + (m_i - Y_{\dot{v}_i}) \dot{v}_{\tau i} + (m_i x_{Gi} - Y_{\dot{r}_i}) \dot{r}_{\tau i} + Y''_{\tau i}, \\ N'_{\tau i} = -N_i + (m_i x_{Gi} - Y_{\dot{r}_i}) \dot{v}_{\tau i} + (I_{z_i} - N_{\dot{r}_i}) \dot{r}_{\tau i} + N''_{\tau i}, \\ X''_{\tau i} = -k_{X_i} (m_i - X_{\dot{u}_i}) \text{sign}(u_{ei}) |u_{ei}|^{\alpha_{X_i}}, \\ Y''_{\tau i} = -k_{Y_i} (m_i - Y_{\dot{v}_i}) \text{sign}(v_{ei}) |v_{ei}|^{\alpha_{Y_i}}, \\ N''_{\tau i} = -k_{N_i} (I_{z_i} - N_{\dot{r}_i}) \text{sign}(r_{ei}) |r_{ei}|^{\alpha_{N_i}}, \end{cases} \quad (11)$$

其中, $k_{X_i} > 0, k_{Y_i} > 0, k_{N_i} > 0, 0 < \alpha_{X_i} < 1, 0 < \alpha_{Y_i} < 1$ 和 $0 < \alpha_{N_i} < 1$ 为可调参数.

取干扰观测器为

$$\begin{cases} \dot{\xi}_{X_i} = -\beta_{X_i} X''_{\tau i} + \beta_i u_{ei}, \\ \dot{\xi}_{Y_i} = -\beta_{Y_i} Y''_{\tau i} + \beta_i v_{ei}, \\ \dot{\xi}_{N_i} = -\beta_{N_i} N''_{\tau i} + \beta_i r_{ei}, \\ \dot{X}_{\Delta i} = \xi_{X_i} + \beta_{X_i} (m_i - X_{\dot{u}_i}) u_{ei}, \\ \dot{Y}_{\Delta i} = \xi_{Y_i} + \beta_{Y_i} ((m_i - Y_{\dot{v}_i}) v_{ei} + (m_i x_{Gi} - Y_{\dot{r}_i}) r_{ei}), \\ \dot{N}_{\Delta i} = \xi_{N_i} + \beta_{N_i} ((m_i x_{Gi} - Y_{\dot{r}_i}) v_{ei} + (I_{z_i} - N_{\dot{r}_i}) r_{ei}), \end{cases} \quad (12)$$

其中, $\beta_{X_i} > 0, \beta_{Y_i} > 0, \beta_{N_i} > 0$ 和 $\beta_i > 0$ 为可调参数.

记干扰实际值与估计值误差为 $X_{\Delta ei} = X_{\Delta i} - \hat{X}_{\Delta i}, Y_{\Delta ei} = Y_{\Delta i} - \hat{Y}_{\Delta i}$ 和 $N_{\Delta ei} = N_{\Delta i} - \hat{N}_{\Delta i}$, 则误差满足方程:

$$\begin{cases} \dot{X}_{\Delta ei} = -\beta_{X_i} X_{\Delta ei} - \beta_i u_{ei} + \dot{X}_{\Delta i}, \\ \dot{Y}_{\Delta ei} = -\beta_{Y_i} Y_{\Delta ei} - \beta_i v_{ei} + \dot{Y}_{\Delta i}, \\ \dot{N}_{\Delta ei} = -\beta_{N_i} N_{\Delta ei} - \beta_i r_{ei} + \dot{N}_{\Delta i}. \end{cases} \quad (13)$$

由式(11)和(12), 则拖轮 i 水动力学控制器为

$$\begin{cases} X_{\tau i} = X'_{\tau i} - \hat{X}_{\Delta i}, \\ Y_{\tau i} = Y'_{\tau i} - \hat{Y}_{\Delta i}, \\ N_{\tau i} = N'_{\tau i} - \hat{N}_{\Delta i}. \end{cases} \quad (14)$$

记矩阵 K_u, K_v, K_r 和 M_i 分别为

$$\begin{aligned} K_u &= A - \text{diag} \left\{ k_{u1} + \sum_{j \in \Pi_1} a_{1j}, \dots, k_{un} + \sum_{j \in \Pi_n} a_{nj} \right\}, \\ K_v &= \bar{A} - \text{diag} \left\{ k_{v1} + \sum_{j \in \Pi_1} \bar{a}_{1j}, \dots, k_{vn} + \sum_{j \in \Pi_n} \bar{a}_{nj} \right\}, \\ K_r &= \tilde{A} - \text{diag} \left\{ k_{r1} + \sum_{j \in \Pi_1} \tilde{a}_{1j}, \dots, k_{rn} + \sum_{j \in \Pi_n} \tilde{a}_{nj} \right\}, \\ M_i &= \begin{bmatrix} m_i - X_{\dot{u}_i} & 0 & 0 \\ 0 & m_i - Y_{\dot{v}_i} & m_i x_{Gi} - Y_{\dot{r}_i} \\ 0 & m_i x_{Gi} - Y_{\dot{r}_i} & I_{z_i} - N_{\dot{r}_i} \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

若拖轮 i 运动学虚拟控制输入、干扰观测器和水动力学控制器分别取式(10)、(12)和(14), 则系统(8)~(9)和干扰估计误差系统(13)构成的闭环系统为

$$\dot{z} = Kz + Hv, \quad (15)$$

$$M\dot{v} = \text{ksgn}(v) + \zeta, \quad (16)$$

$$\dot{\zeta} = B_1 \zeta + B_2 v + \zeta_{\Delta}, \quad (17)$$

其中, 向量 $z = [x_{e1}, \dots, x_{en}, y_{e1}, \dots, y_{en}, \eta_{e1}, \dots, \eta_{en}]^T$, 向量 $v = [u_{e1}, v_{e1}, r_{e1}, \dots, u_{en}, v_{en}, r_{en}]^T$, 向量 $\zeta = [X_{\Delta e1}, Y_{\Delta e1}, N_{\Delta e1}, \dots, X_{\Delta en}, Y_{\Delta en}, N_{\Delta en}]^T$, 向量 $\zeta_{\Delta} = [\dot{X}_{\Delta 1}, \dot{Y}_{\Delta 1}, \dot{N}_{\Delta 1}, \dots, \dot{X}_{\Delta n}, \dot{Y}_{\Delta n}, \dot{N}_{\Delta n}]^T$, 矩阵 $K = \text{diag} \{K_u, K_v, K_r\}$, 矩阵 H 满足 $[u_{e1}, \dots, u_{en}, v_{e1}, \dots, v_{en}, r_{e1}, \dots, r_{en}]^T = Hv$, 矩阵 $M = \text{diag} \{M_1, \dots, M_n\}$, 向量 $\text{ksgn}(v) = [X''_{\tau 1}, Y''_{\tau 1}, N''_{\tau 1}, \dots, X''_{\tau n}, Y''_{\tau n}, N''_{\tau n}]^T$, 矩阵 $B_1 = -\text{diag} \{\beta_{X_1}, \beta_{Y_1}, \beta_{N_1}, \dots, \beta_{X_n}, \beta_{Y_n}, \beta_{N_n}\}$, 矩阵 $B_2 = -\text{diag} \{\beta_1, \beta_1, \beta_1, \dots, \beta_n, \beta_n, \beta_n\}$.

对闭环系统(10)进行稳定性分析, 得到本研究的主要结果:

定理 1 若拖轮 i 运动学虚拟控制输入、干扰观测器和水动力学控制器分别取式(10)、(12)和(14), 则闭环系统(15)~(17)最终一致有界.

证明 由文献[25]可知, M_i 为对称正定矩阵, 则 M 也为对称正定矩阵.

对于子系统(16)和(17), 取 Lyapunov 函数为 $V_1 = -v^T B_2 M v + \zeta^T \zeta$, 则

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= -2v^T B_2 \text{ksgn}(v) - 2v^T B_2 \zeta + 2\zeta^T B_1 \zeta + 2\zeta^T B_2 v + 2\zeta^T \zeta_{\Delta} \leq -2v^T B_2 \text{ksgn}(v) + 2\zeta^T B_1 \zeta + 2\zeta^T \zeta_{\Delta}. \end{aligned}$$

显然, 由于 ζ_{Δ} 有界, 则存在正常数 ϵ_1 , 当 $\|v\| > \epsilon_1$ 时, $\dot{V}_1 < 0$. 即存在初始时刻 $t_0 \geq 0$ 及与 t_0 无关

的时刻 $T_1 \geq 0$, 当 $t \geq t_0 + T_1$ 时, $\|v\| \leq \epsilon_1$. 由此可得, 子系统(16)和(17)最终一致有界.

由于矩阵 K 每个对角元素绝对值大于所在行的非对角元素绝对值之和, 则 K 为严格行对角占优矩阵. 根据 Gerschgorin 圆盘定理, 且矩阵 K 每个对角元素为负实数, 容易得到矩阵 K 所有特征根具有负实部. 从而存在对称正定矩阵 P 满足

$$K^T P + PK < 0.$$

进一步, 对于子系统(15), 取 Lyapunov 函数为 $V_2 = z^T Pz$, 则

$$\dot{V}_2 = z^T(K^T P + PK)z + z^T H v + v^T H^T z = z^T(K^T P + PK)z + 2z^T H v.$$

当 $t \geq t_0 + T_1$ 时,

$$\dot{V}_2 \leq z^T(K^T P + PK)z + 2\|z\| \|v\| \leq z^T(K^T P + PK)z + 2\epsilon_1 \|z\|.$$

同理可得, 存在正常数 ϵ_2 , 初始时刻 $t_0 \geq 0$ 及与 t_0 无关的时刻 $T_2 \geq 0$, 当 $t \geq t_0 + T_1 + T_2$ 时, $\|z\| \leq \epsilon_2$. 由此可得, 子系统(15)最终一致有界.

综上所述, 闭环系统(15)~(17)最终一致有界. 由此定理得证.

注 1 式(12)和文献[21]中的干扰观测器结构有差异, 这里引入了 $\beta_i u_{ei}$ 、 $\beta_i v_{ei}$ 和 $\beta_i r_{ei}$ 的反馈, 使得系统(8)和(9)和干扰估计误差系统(13)组成的系统是互联系统而不是级联系统. 由定理 1 的证明可知, 若 β_i 取高增益系数, 则减小了 u_{ei} 、 v_{ei} 和 r_{ei} 的最终边界值, 且 u_{ei} 、 v_{ei} 和 r_{ei} 能够快速收敛. 此外, 提高参数 β_{x_i} 、 β_{y_i} 、 β_{N_i} 、 k_{u_i} 、 k_{v_i} 和 k_{r_i} 的增益也能够减小闭环系统(15)~(17)的最终边界.

3 仿 真

对 5 艘拖轮协助大型船舶靠泊进行仿真. 大型船舶两柱间长为 304 m, 船宽为 52.5 m. 所有拖轮两柱间长为 29 m, 船宽为 9.8 m, 方形系数为 0.566. 设大型船舶在坐标系 $\{O\}$ 的位置初值均为 $(0, 0, 0)$, 速度 (u_0, v_0, r_0) 初值为 $(2, 0, 0)$, 停泊位置的坐标 (x_{d0}, y_{d0}) 为 $(1\ 000, 2\ 000)$, 泊位前方坐标 (x_{d1}, y_{d0}) 为 $(900, 2\ 000)$.

贝塞尔曲线式(1)中的 5 个坐标控制点取 $(x_{p0}, y_{p0}) = (0, 0)$, $(x_{p1}, y_{p1}) = (900, 0)$, $(x_{p2}, y_{p2}) = (900, 100)$, $(x_{p3}, y_{p3}) = (900, 1\ 800)$, $(x_{p4}, y_{p4}) = (900, 2\ 000)$. 贝塞尔曲线式(2)中的 3 个坐标控制点取 $(x_{q0}, y_{q0}) = (x_{q1}, y_{q1}) = (900, 2\ 000)$, $(x_{q2}, y_{q2}) = (1\ 000, 2\ 000)$. 取 $\lambda_1 = 1 - \cos(0.5\pi(1 - e^{-0.004t}))$. 当 $t > 1\ 400$ 时, $\lambda_1 \approx 1$, 大型船舶进入运动过程 2. 取 $t_1 = 1\ 400$, λ_2

$$= 1 - \cos(0.5\pi(1 - e^{-0.01(t-1\ 400)})).$$

在运动过程 1 中, 拖轮 1 和 2 分别位于大型船舶船舷右侧的艏部和艉部, 使用顶推方式; 拖轮 3 和 4 位于大型船舶船舷左侧的艏部, 使用顶推方式; 拖轮 5 位于大型船舶的船艏处, 使用吊拖方式. 在坐标系 $\{B_i\}$ 中, 虚拟领航船与所有拖轮的距离航向偏差期望值分别为 $(40.75, -130, 0.5\pi)$ 、 $(40.75, 130, 0.5\pi)$ 、 $(40.75, 130, -0.5\pi)$ 、 $(40.75, -130, -0.5\pi)$ 和 $(-180, 0, \pi)$. 在运动过程 2 中, 撤除大型船舶船舷左侧的拖轮, 只保留船舷右侧和船艏处的拖轮.

在运动过程 1 中, 取拖轮编队的加权邻接矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 2 & 0 & 1 & 1 \\ 2 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 2 & 1 \\ 2 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 2 & 2 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0.5 & 0.5 \\ 1 & 0 & 0.5 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0 & 1 & 0.5 \\ 1 & 0 & 0.5 & 0 & 0.5 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0.5 & 0 & 0.25 & 0.25 \\ 0.5 & 0 & 0.25 & 0.25 & 0 \\ 0 & 0.25 & 0 & 0.5 & 0.25 \\ 0.5 & 0 & 0.25 & 0 & 0.25 \\ 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

在运动过程 2 中, 只有拖轮 1, 2 和 5 参与拖轮编队, 取拖轮编队的加权邻接矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 2 & 1 \\ 2 & 0 & 0 \\ 2 & 2 & 0 \end{bmatrix}, \bar{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0.5 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0.5 & 0.25 \\ 0.5 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0 \end{bmatrix}.$$

当大型船舶与拖轮接触在一起时, 其相互作用力相对于两船的间距变化很快. 对于这类刚性问题, 数值仿真时间过长. 为简化仿真, 将大型船舶靠泊过程所需的控制力和力矩设为

$$\begin{aligned} X_{\tau 0} &= -X_{H_0} - 4.198\ 1 \times 10^8 v_0 r_0 - \\ &\quad 2.420\ 5 \times 10^8 (u_0 - \tilde{u}_0 - \dot{\tilde{u}}_0), \\ Y_{\tau 0} &= -Y_{H_0} - 2.420\ 5 \times 10^8 u_0 r_0 - \\ &\quad (4.198\ 1 \times 10^8 (v_0 - \tilde{v}_0 - \dot{\tilde{v}}_0) - \\ &\quad 8.321\ 4 \times 10^9 (r_0 - \tilde{r}_0 - \dot{\tilde{r}}_0)), \\ N_{\tau 0} &= -N_{H_0} - (2.985\ 0 \times 10^9 (v_0 - \tilde{v}_0 - \dot{\tilde{v}}_0) - \end{aligned}$$

$$1.9597 \times 10^{12} (r_0 - \tilde{r}_0 - \dot{\tilde{r}}_0),$$

其中, X_{H_0} 、 Y_{H_0} 和 N_{H_0} 的表达式见文献[10].

所有拖轮已经聚集在大型船舶周围,使用吊拖方式的拖轮已完成和大型船舶的系统,即位置误差 $(x_{ei}, y_{ei}, \eta_{ei})$ 初值均为 $(0, 0, 0)$, 速度 (u_i, v_i, r_i) 初值分别为 $(0, 2, 0)$ 、 $(0, 2, 0)$ 、 $(0, -2, 0)$ 、 $(0, -2, 0)$ 和 $(-2, 0, 0)$, $(\xi_{X_i}, \xi_{Y_i}, \xi_{N_i})$ 初值均为 $(0, 0, 0)$.

所有拖轮运动学虚拟控制输入(10)中的参数均为 $k_{u_i} = 5, k_{v_i} = 2, k_{r_i} = 1$. 式(11)中的参数均为 $k_{X_i} = k_{Y_i} = k_{N_i} = 4, \alpha_{X_i} = \alpha_{Y_i} = \alpha_{N_i} = 0.5$.

干扰观测器(12)中的参数均为 $\beta_{X_i} = \beta_{Y_i} = \beta_{N_i} = 3, \beta_i = 5 \times 10^6$. 风、浪、流对所有拖轮的纵向干扰力、横向干扰力和船摇干扰力矩分别为 $X_{wi} = 5 \times 10^5 \sin(0.05t)$ 、 $Y_{wi} = 5 \times 10^5 \sin(0.06t)$ 和 $N_{wi} = 5 \times 10^5 \sin(0.04t)$. 假设大型船舶对所有拖轮只在纵向有反作用力, 仿真结果如图 4 所示.

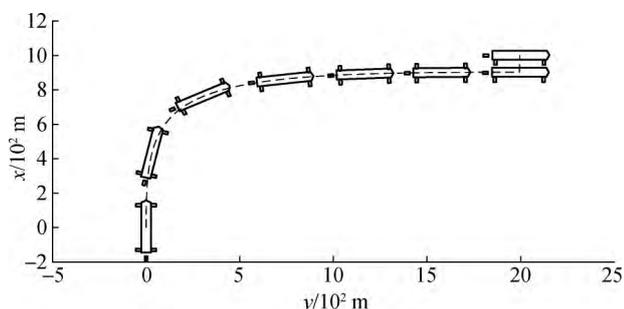


图 4 大型船舶的靠泊运动过程
Fig.4 Motion of the large ship berthing

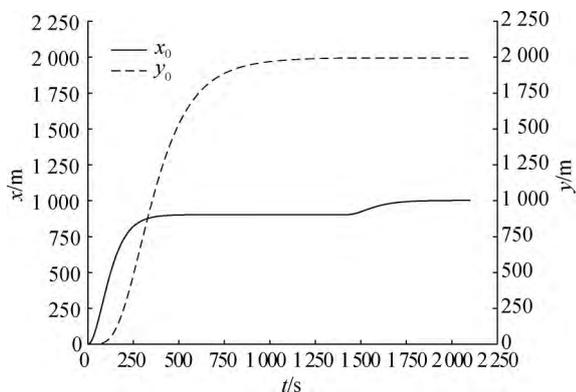


图 5 大型船舶的位置变化过程
Fig.5 Position changes of the large ship

从图 4 和 5 可看出大型船舶能够靠泊在相应的泊位上,拖轮编队队形保持虚拟刚性结构.

4 结 论

本文中提出了应用拖轮编队控制方法来解决缺少侧推器的大型船舶靠泊问题.使用 leader-follower 方法,将已规划好路径和速度的虚拟船作为领航船,拖轮作为跟随船.当拖轮聚集在大型船舶周围时,组成虚拟刚性结构队形,拖轮编队的运动将带动大型船舶运动.采用干扰观测器来估计大型船舶对拖轮的未知反作用力并在控制器中补偿,适用于大型船舶水动力学模型未知情形.当拖轮不在大型船舶四周时,可将大型船舶作为领航船,拖轮作为跟随船,来实现拖轮的聚集.但在拖轮聚集过程中,需考虑大型船舶对拖轮的阻挡作用,否则拖轮可能无法到达期望位置,对此研究需进一步的工作.

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] THORVALDSEN C F L,SKJETNE R.Formation control of fully-actuated marine vessels using group agreement protocols[C]//Proceedings of the 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference, Orlando; IEEE, 2011; 4132-4139.
- [3] BREIVIK M, HOVSTEIN V E, FOSSEN T I. Ship formation control;a guided leader-follower approach[C]//Proceedings of the 17th IFAC World Congress, Seoul; IFAC, 2008; 16008-16014.
- [4] 王昊,王丹,彭周华,等.多自主船协同路径跟踪的自适应动态面控制[J].控制理论与应用,2013,30(5):637-643.
- [5] XIANG X B, LAPIERRE L, JOUVENCEL B, et al. Coordinated path following control of multiple nonholonomic vehicles [C] // Proceedings of Oceans'09, Bremen; IEEE, 2009; 1-7.
- [6] CUI R, GE S S, HOW B V E, et al. Leader-follower formation control of underactuated autonomous underwater vehicles [J]. Ocean Engineering, 2010, 37(9): 1491-1502.
- [7] PENG Z H, WANG D, CHEN Z Y, et al. Adaptive dynamic surface control for formations of autonomous surface vehicles with uncertain dynamics [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013, 21(2): 513-520.
- [8] PEYMANI E, FOSSEN T I. Leader-follower formation of marine craft using constraint forces and lagrange multipliers [C] // Proceedings of the 51st IEEE Conference on Decision and Control. [S.l.]; IEEE, 2012, 2447-2452.
- [9] 夏盈盈,孙洪飞.基于循环追踪的船舶圆形编队控制[J].

- 厦门大学学报(自然科学版),2015,54(1):93-98.
- [10] HASEGAWA K, KITERA K. Mathematical model of manoeuvrability at low advance speed and its application to berthing control[C]//Proceedings of the 2nd Japan-Korea Joint Workshop on Ship and Marine Hydrodynamics. Nantes:Oceans,1993:144-153.
- [11] IM N, LEE S K, BANG H D. An application of ann to automatic ship berthing using selective controller[J]. International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation,2007,1(1):101-105.
- [12] BUI V P, KIM Y B, YONG W C, et al. A study on automatic ship berthing system design[C]//Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control.Okayama;IEEE,2009:181-184.
- [13] AHMED YA, HASEGAWA K. Experiment results for automatic ship berthing using artificial neural network based controller[C]//Proceedings of the 19th IFAC World Congress.Oxford;IFAC-Elsevier Ltd,2014:2658-2663.
- [14] 杜佳璐,杨杨,郭晨.基于高增益观测器的船舶动力定位系统的输出反馈控制[J].控制理论与应用,2013,30(11):1486-1491.
- [15] DU J, HU X, KRSTIĆ M, et al. Robust dynamic positioning of ships with disturbances under input saturation[J].Automatica,2016,73(11):207-214.
- [16] ESPOSITO J, FEEMSTER M, SMITH E. Cooperative manipulation on the water using a swarm of autonomous tugboats[C]//Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Robotics & Automation.Pasadena;IEEE,2008:1501-1506.
- [17] BUI V P, KAWAI H, KIM Y B, et al. A ship berthing system design with four tug boats [J]. Journal of Mechanical Science & Technology, 2011, 25 (5) : 1257-1264.
- [18] JI S W, BUI V P, BALACHANDRAN B, et al. Robust control allocation design for marine vessel [J]. Ocean Engineering, 2013, 63 (3) : 105-111.
- [19] BIDIKLI B, TATLICIOGLU E, ZERGEROGLU E. Robust control design for positioning of an unactuated surface vessel[C]//Proceedings of the 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems.Hamburg;IEEE,2015:1071-1076.
- [20] BIDIKLI B, TATLICIOGLU E, ZERGEROGLU E. Robust dynamic positioning of surface vessels via multiple unidirectional tugboats[J].Ocean Engineering,2016,113(3):237-245.
- [21] CHEN W H, YANG J, GUO L, et al. Disturbance — observer-based control and related methods; an overview [J].IEEE Transactions on Industrial Electronics,2016,63(2):1083-1095.
- [22] DUAN Z S, WANG J Z, HUANG L. Special decentralized control problems in discrete-time interconnected systems composed of two subsystems [J]. Systems & Control Letters,2007,56(3):206-214.
- [23] DUAN Z S, WANG J Z, CHEN G R, et al. Stability analysis and decentralized control of a class of complex dynamical networks [J]. Automatica, 2008, 44 (4) : 1028-1035.
- [24] 陈成,何玉庆,卜春光,等.基于四阶贝塞尔曲线的无人车可行轨迹规划[J].自动化学报,2015,41(3):486-496.
- [25] FOSSEN T I, STRAND J P. A tutorial on nonlinear backstepping, applications to ship control[J].Modeling, Identification and Control,1999,20(2):83-134.

The formation control method for multiple tugboats assist the large ship berthing

LIN Anhui, ZENG Jianping*

(School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361102, China)

Abstract: This paper addresses the control for multiple tugboats assisting the under-actuated large ship berthing. The control method is proposed for the large ship berthing by using tugboats formation. In the tugboats hydrodynamics model, reaction forces produced by the large ship are seen as the unknown input. The disturbance observers are given such that interconnected systems composed by disturbance — estimated error equations and original state equations are produced. These disturbance observers can accelerate the convergence of tugboats actual velocities and expected velocities. Then, based on them, the design of the tugboats formation controllers is given, and the stability of the closed-loop systems is analyzed. The simulation result shows that the method is effective.

Keywords: large ship; berthing; tugboats formation control; disturbance observers; interconnected systems

<http://jxmu.xmu.edu.cn>