

领航跟随法和势函数组合的船舶编队控制

李 芸^{1†}, 肖英杰²

(1. 上海海事大学 商船学院, 上海 201306; 2. 航运仿真技术教育部工程研究中心, 上海 201306)

摘要: 多船舶作业在海上越来越盛行, 最常见的运行方式就是船舶编队协控, 本文考虑领航跟随法过于集中控制的不足, 将船舶编队分为领航-跟随控制阶段和跟随-跟随控制两个阶段. 在第1个阶段使用多输入滑模控制以及船舶响应模型进行控制律分配; 第2阶段引入势函数方法, 结合图形拓扑来约束跟随船舶间的间距, 提高队形的稳固性, 弥补单一领航跟随法的不足, 并通过Lyapunov函数验证系统控制的稳定性. 后期通过直线和曲线路径的仿真验证, 得到编队船舶的各状态历时趋势, 船舶间状态最终达到一致性, 实现队形保持的目标, 得出良好效果, 验证了算法的有效性.

关键词: 船舶编队; 领航跟随; 势函数; 图形拓扑

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Combination of leader-follower method and potential function about ship formation control

LI Yun^{1†}, XIAO Ying-jie²

(1. College of Merchant Marine, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China;

2. Engineering Research Center of Simulation Technology, Ministry of Education, Shanghai 201306, China)

Abstract: As multi-vessel operation prevails increasingly at sea, the most common mode is ship formation control. Considering the over-centralized control of leader-follower method, the multi-vessel formation is divided into the leader-follower control stage and follower-follower control stage in this paper. At the first stage, the control law utilizing sliding mode control and ship response model is applied. The potential function method which combines with the graph topology is introduced to constrain the balance distance for follower in the second stage. These methods can improve stability of the formation, to make up for the single leader-follower method. The stability of control system is verified by the Lyapunov function. Finally getting the state diachronic trend of ship formation by the simulation of straight and curve path verification, the ship state achieves consistency, reaching the goal of maintaining the formation, which obtains good results and tests the effectiveness of algorithm.

Key words: formation control; leader-follower method; potential function; graph topology

1 引言(Introduction)

近年来, 除了对单艘船舶的航向控制、轨迹跟踪之外, 船群控制也得到越来越多的重视, 如拖带系统稳定性控制、船舶补给控制以及船舶编队控制, 对于多船之间的协作航行策略已成为当今研究的热点. 船舶编队主要是指控制多艘船舶按照一定的队形, 执行某项任务, 已被广泛地应用于海上勘测、海上搜救、海底作业等多个方面.

目前, 常见的编队控制方法有领航跟随法、基于行为法、虚拟结构法和图论法等, 它们都是通过群体中个体间的信息沟通, 建立控制策略, 再对个体实现逐

一控制来达到预期目标. 针对船舶群体的编队控制, 主要有船队队形保持、船队避障以及自适应3个研究方向, 刘杨等^[1]基于领航跟随法设计非线性速度和路径跟踪控制器, 使得船队之间可以跟踪任意期望队形; 付明玉等^[2]使用虚拟领航者, 结合无源性相关理论, 构建路径跟踪控制器, 进行船队队形保持; 夏盈盈等^[3]设计圆形队形轨迹, 利用反馈控制设计控制策略, 进行轨迹控制; Chao等^[4]结合图论拓扑理论, 进行编队控制律设计, 利用Lyapunov函数验证稳定性能, 保障队形稳定; Khoshnam^[5]根据领航跟随法, 使用径向基函数神经网络进行适应逼近, 来抵抗船舶编队中的

收稿日期: 2016-01-27; 录用日期: 2016-05-11.

[†]通信作者. E-mail: casismile@163.com; Tel.: +86 21-38282912.

本文责任编辑: 费树岷.

上海市科委2009年度创新行动计划项目(09170502000), 上海市教育委员会科研创新项目(11CX49)资助.

Supported by 2009 Annual Innovation Plan of Shanghai Committee of Science and Technology (09170502000) and Scientific Research Innovation Projects of Shanghai Education Commission (11CX49).

风浪干扰影响,维持船队稳定;K.D. Do^[6]建立椭圆状的船舶领域防止船队间碰撞,并结合控制律设计实现期望队形,仿真得出较好表现;胡凤娟^[7]在论文中研究基于领航跟随法的编队控制,以及模糊改进的人工势场避障方法,得到良好效果;赵园等^[8]运用虚拟结构法,构造碰撞函数,研究船队避障策略;刘杨等^[9]采用神经网络方法,建立船舶之间协调的自适应控制律,保证编队系统的跟踪误差一致有界;彭周华^[10]选择反演法、动态面法以及神经网络法进行鲁棒自适应控制设计,分析编队的稳定性能,并相互对比控制效果.以上方法都是利用船舶个体间的运动关联对个体进行分别控制,设计运动学和动力学两方面的控制策略,保障船队间编队稳定协调.

本文延续这个思路,使用领航跟随法结合图形拓扑理论,而跟随法过于集中控制,一旦领航者失效,则影响整个编队性能.为弥补领航者集中式控制的不足,文中引入混合式模式,将船舶编队分为领航-跟随控制阶段和跟随-跟随控制阶段.参照各阶段的运动响应模式,分别构建控制策略,降低对领航者的依赖,减小跟踪误差,达到一致性协议.并构造Lyapunov函数验证其稳定性能,最终实现队形稳定.

2 问题描述(Problem description)

2.1 船舶系统模型(Ship system model)

对于水面船舶,考虑三自由度的欠驱动模型,由动力学模型推导得到的响应模型如下^[11]:

$$\begin{cases} m_{11}\Delta\dot{u} = X_u\Delta u, \\ \ddot{v} + \left(\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2}\right)\dot{v} + \frac{1}{T_1T_2}v = \frac{K_v}{T_1T_2}(\delta + T_{3v}\delta), \\ \ddot{r} + \left(\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2}\right)\dot{r} + \frac{1}{T_1T_2}r = \frac{K}{T_1T_2}(\delta + T_3\delta). \end{cases} \quad (1)$$

运动学模型为

$$\begin{cases} \dot{x} = u \cos \varphi - v \sin \varphi, \\ \dot{y} = u \sin \varphi + v \cos \varphi, \\ \dot{\varphi} = r, \end{cases} \quad (2)$$

其中: K, K_v, T_1, T_2 为船舶操纵参数, δ 为舵角, u, v, r 为船舶的纵向、横向和艏摇角速度, m_{11} 为船舶惯性分量, φ 为船舶航向, x, y 为船舶在地球坐标系下的位移.

2.2 船舶编队模式(The mode of ship formation)

为了使得队形中的船舶保持固定的间距和同样的航向航行,使用领航跟随法,将队形控制问题转化为跟随船舶跟踪领航者的航向和位置的问题.从船队中选择一艘船舶作为船舶领航者,给予期望路线航行,队中其他船舶将通过设计合适的控制律,跟随领航船舶进行航行调节,使得船队整体保持一致性按照一定的队形航行.

根据图1可以得到领航者与跟随者之间相对距离关联.

$$\begin{cases} l_x = -(x_l - x_f) \cos \varphi_l - (y_l - y_f) \sin \varphi_l, \\ l_y = (x_l - x_f) \sin \varphi_l - (y_l - y_f) \cos \varphi_l, \end{cases} \quad (3)$$

其中: x_l, y_l 为领航船舶位置坐标, x_f, y_f 为跟随船舶位置坐标, φ_l, φ_f 分别为领航船舶和跟随船舶航向, l 为领航与跟随船舶间距离, l_x, l_y 为间距的横、纵分量.

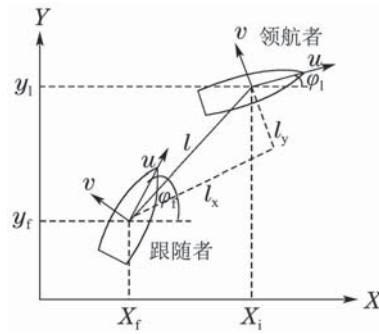


图1 领航-跟随者结构图

Fig. 1 The structure of leader-follower system

由于船舶间要保证固定的距离,即 $l_x \rightarrow l_{x_d}, l_y \rightarrow l_{y_d}$. 则对式(3)求导得出

$$\begin{cases} \dot{l}_{x_e} = -u_l + u_f \cos e_\theta + v_f \sin e_\theta + l_{y_e} r_l + l_{y_d} r_l - \dot{l}_{x_d}, \\ \dot{l}_{y_e} = -v_l - u_f \sin e_\theta + v_f \cos e_\theta - l_{x_e} r_l - l_{x_d} r_l - \dot{l}_{y_d}, \\ \dot{e}_\theta = r_l - r_f, \end{cases} \quad (4)$$

其中: l_{x_d}, l_{y_d} 为横纵间距分量期望值, l_{x_e}, l_{y_e} 为横纵间距分量的误差值, u_l, v_l, r_l 为领航者的纵向、横向和艏摇角速度, u_f, v_f, r_f 为跟随者的纵向、横向和艏摇角速度.

编队中要保证式(4)中差值趋于零,可导出 $u_f \rightarrow u_l, v_f \rightarrow v_l$. 则领航船舶和跟随船舶速度、航向和间距趋于一致,实现了队形控制.但是领航法这种集中式控制,忽略了跟随者个体之间的交流关联.因此还需要考虑跟随者与跟随者间的互联,增强整个队形的稳控能力.

2.3 控制形式(The mode of control)

根据上节所知,将编队控制分为领航-跟随和跟随-跟随两个控制阶段.其领航-跟随主要是利用式(4)中关联设计控制律,使得跟随船舶可以很好地跟进领航船舶,到达与领航者运动一致的目的;跟随-跟随主要是指跟随船舶间通过控制律设计,维持一定的船间距离,从而提高整个队形稳定态势.跟随船舶*i*的控制流程如图2所示.

最终领航船舶按照期望规定路径航行,跟随船舶与领航船舶达到一致,它们都按照固定队形航行,即

保证

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} |\eta_1 - \eta_i| = 0, \\ \lim_{t \rightarrow \infty} |\eta_i - \eta_j| = 0, \\ \lim_{t \rightarrow \infty} |l_x - l_{x_d}| = 0, \\ \lim_{t \rightarrow \infty} |l_y - l_{y_d}| = 0, \end{cases} \quad (5)$$

其中 $\eta = [u \ v \ r]^T$, 实现维持船队队形的控制目的.

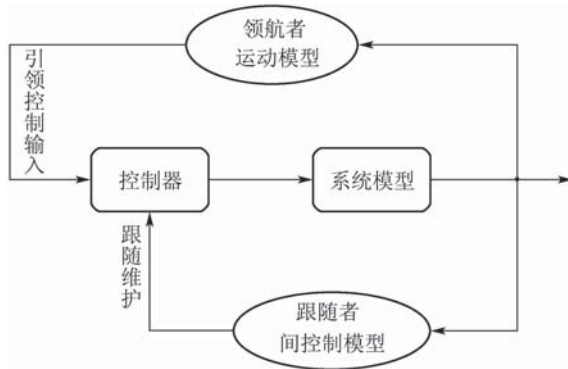


图 2 跟随船舶控制流程

Fig. 2 The control process of follower

3 编队控制(Formation control)

3.1 队形拓扑(Formation topology)

在编队船舶中, 由于彼此之间需要获取对方的位置、自由度等信息, 通过感知沟通来进行队形协调, 从而形成了一个彼此关联的拓扑结构. 本文运用图论理论, 将船舶编队转化为某种拓扑结构, 船队形式化为具有数学意义的简化模式.

图是指有序三元组 (V, E, ϕ) , V 是非空顶点集, E 是边集, ϕ 是边集到顶点集中元素有序对或无序对簇 $V \times V$ 的函数, 称为关联函数. 对于船舶编队来说, 每艘船舶可以看作一个节点, 即 V 中元素, 根据不同的队形, 其间的通信链路形成边集 E , 节点间构成的无序对形成关联集 ϕ . V 与 E 的关联关系可以体现在邻接矩阵中, 邻接矩阵是指: $A = (a_{ij})$, 其中 a_{ij} 在无向图中表示连接节点 i 和节点 j 的边的数目^[12-13].

图的Laplacian矩阵定义为: $L = \Delta - A$, n 维Laplacian矩阵定义为 $\hat{L} = L \otimes I_n$, \otimes 为Kronecker积. 对于无向图, 满足 $x^T \hat{L} x = \frac{1}{2} \sum_{i,j} a_{ij} (x_i - x_j)^2$, 即为正半定矩阵.

根据具体的队形形式, 将含有领航与跟随模式的船队建立为图形拓扑, 运用邻接矩阵分析之间的连通性能, 得出其约束关联. 进而根据领航-跟随阶段与跟随-跟随阶段的不同, 分别设计控制律.

3.2 领航-跟随阶段控制设计(The controller design of leader-follower stage)

领航-跟随阶段, 主要是根据领航船舶与跟随者的

间距关联(见式(4)), 来指导跟随船舶调整自身信息按照期望航行.

现对式(4)做非奇异线性变换, 引入新的状态变量 z :

$$\begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} l_{x_e} \\ l_{y_e} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中 $T = \begin{bmatrix} \cos e_\theta & -\sin e_\theta \\ \sin e_\theta & \cos e_\theta \end{bmatrix}$.

则式(4)转化为

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & r_1 \\ -r_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_f \\ v_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

其中:

$$\begin{aligned} D_1 &= (-u_1 + l_{y_d} r_1 - \dot{l}_{x_d}) \cos e_\theta + \\ &\quad (v_1 + l_{x_d} r_1 + \dot{l}_{y_d}) \sin e_\theta, \\ D_2 &= (-u_1 + l_{y_d} r_1 - \dot{l}_{x_d}) \sin e_\theta - \\ &\quad (v_1 + l_{x_d} r_1 + \dot{l}_{y_d}) \cos e_\theta. \end{aligned}$$

为了求解式(7)中的跟随者的速度信息, 利用滑模变结构思想^[14], 建立多输入的滑模面函数

$$s(t) = z_1 + m z_2, \quad (8)$$

其中 $m > 0$, 为增益参数.

采取指数趋近律 $\dot{s} = -k_1 s(t) - \varepsilon \text{sgn} s(t)$ 来减弱系统抖振, 其中 $k_1 > 0, \varepsilon > 0$. 将 s 代入得出

$$\begin{aligned} u t &= -r_1 z_2 - D_1 + m r_1 z_1 - m D_2 - \\ &\quad k_1 (z_1 + m z_2) - \varepsilon \text{sgn} (z_1 + m z_2). \end{aligned} \quad (9)$$

将其分解, 得到对纵、横速度的控制律:

$$\begin{cases} u_f = -r_1 z_2 - D_1 - k_1 z_1 - \varepsilon_1 \text{sgn} (z_1 + m z_2), \\ v_f = r_1 z_1 - D_2 - k_1 z_2 - \varepsilon_2 \text{sgn} (z_1 + m z_2). \end{cases} \quad (10)$$

定义Lyapunov函数

$$V_1 = \frac{z_1^2}{2} + \frac{z_2^2}{2}. \quad (11)$$

令参数 $\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_0}{m}, \varepsilon_2 = \varepsilon_0$, 代入式(10), 求导得出

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= z_1 \dot{z}_1 + z_2 \dot{z}_2 = -k_1 z_1^2 - k_1 z_2^2 - \\ &\quad \frac{\varepsilon_0}{m} (z_1 + m z_2) \text{sgn} (z_1 + m z_2) \leq 0. \end{aligned} \quad (12)$$

则式(10)系统, 在对应的控制律下保持稳定.

由此得出跟随船舶预期的纵向速度和横向速度 u_f, v_f , 接下来根据此预期, 将进行跟随船舶的动力学控制.

现依据式(1)进行跟随船舶自身航行的调节. 将纵速方程展开为

$$\dot{u} - \dot{u}_d = k'(u - u_d), \quad (13)$$

式中 $k' = \frac{X_u}{m_{11}}$.

根据上面运动学推导出的预期纵向速度, 为实现与领航船舶的间距保持, 令 $u_d \rightarrow u_f$.

再把式(1)中横向速度二阶方程进行增广展开:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = -\left(\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2}\right)x_2 - \frac{1}{T_1 T_2}x_1 + \frac{K_v}{T_1 T_2}\mu, \end{cases} \quad (14)$$

其中: $x_1 = v, \mu = \delta + T_{3v}\dot{\delta}$. 同样使用滑模控制和指数趋近律得出控制律为

$$\begin{aligned} \mu = & \frac{T_1 T_2}{K_v}(-k_3 s' - k_4 \text{sgn } s' - c\dot{e} + \ddot{x}_d) + \\ & \frac{T_1 + T_2}{K_v}(\dot{x}_d + \dot{e}) + \frac{1}{K_v}(x_d + e), \end{aligned} \quad (15)$$

其中: $X_d = [x_d \ \dot{x}_d]^T$ 为期望的横向速度量, 其误差向量 $E = X - X_d = [e, \dot{e}]$, 这里 $s' = ce + \dot{e}, c, k_3, k_4$ 为可调的增益参数.

此时, 构造 $V_2 = \frac{s'^2}{2}$, 得出

$$\dot{V}^2 = s' \dot{s}' = s'(-k_3 s' - k_4 \text{sgn } s') \leq 0,$$

则横向速度控制系统达到稳定, 同样为保持与领航船舶的间距, 令 $x_d \rightarrow v_f$.

接着利用求解出的控制律 μ 转为 δ 变化, 根据式(1)中航向角速度模型求解出跟随船舶航向变化, 完成跟随船舶的自身调控.

在这个控制阶段, 主要是实现跟随与领航船舶之间的间距、速度等信息的一致调节, 引入滑模变结构控制特色, 有效地抵抗内部参数干扰以及外部干扰影响, 实现系统的稳定控制. 整个流程如图3所示.

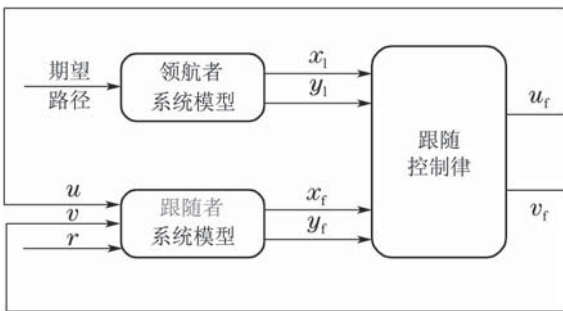


图3 领航-跟随阶段控制流程

Fig. 3 The control process of leader-follower stage

3.3 跟随-跟随阶段控制设计 (The controller design of follower-follower stage)

在领航法中所有跟随信息都是来自领航船舶, 而不关心相邻跟随者的信息, 造成集中式的控制方式, 忽略了跟随者之间的行为. 而跟随者与跟随者之间的间距关联也影响着整个编队保持, 一旦某个跟随者没能及时接收领航者信息, 可靠相邻跟随者的信息进行

补偿, 缓解信息交流不畅或延时等状况造成的影响.

船舶编队属于多智能体问题, 跟随船舶之间由于要保持一定的距离, 相当于在整个群体中存在一定的虚拟场来维持距离平衡. 势函数就是描述个体间距离关联的函数, 如机器人碰撞中有避碰势函数, 以及队形势函数, 现将其引用到跟随船舶间的距离保持^[15-16].

定义 群内部势函数 U_{ij} 是一个关于两个智能体 i, j 之间相对距离 $\|r_{ij}\|$ 的非负、可微、无界的函数, $r_{ij} = r_i - r_j$, 并满足以下条件:

- 1) 当 $\|r_{ij}\| \rightarrow 0$ 时, $U_{ij}(\|r_{ij}\|) \rightarrow \infty$.
- 2) 当个体 i 与个体 j 之间距离 $\|r_{ij}\|$ 达到一定值时, U_{ij} 存在最小值.

则根据定义构造如下势场函数^[11]:

$$U_{ij}(\|r_{ij}\|) = c_1 \left[\frac{d^2}{\|r_{ij}\|^2} + \ln(\|r_{ij}\|^2) \right], \quad (16)$$

其中: $c_1 > 0$ 为增益系数, d 是预先设定的两个相邻个体间的平衡距离. 则在一定队形拓扑下, 跟随者 i 的控制输入为

$$\xi = \sum_{j \in N} a_{ij} \nabla U_{ij} \vec{n}_{ij} + \lambda \sum_{j \in N} a_{ij} (\dot{r}_i - \dot{r}_j), \quad (17)$$

其中: $\lambda > 0, \vec{n}_{ij} = \frac{r_i - r_j}{\|r_i - r_j\|}$ 为单位向量表示方向. 这个控制输入体现了跟随船舶与其相关连的跟随船舶间距离的制衡, 控制时根据图2的思想, 将每个跟随者之间的势函数控制律 ξ 映射到船舶坐标系 $u - v$ 分量后附加到图3的 u, v 控制中, 完成总体的控制输入.

构造Lyapunov函数为^[17]

$$V_i = \sum_{j \in N} U_{ij}(\|r_{ij}\|) + \frac{1}{2} \dot{r}_i^T \dot{r}_i, \quad (18)$$

求导得出

$$\dot{V}_i = - \sum_{j \in N} a_{ij} \nabla U_{ij} \vec{n}_{ij} \dot{r}_i^T + \dot{r}_i^T \dot{r}_i. \quad (19)$$

在船舶坐标系下 $\dot{r}_i = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}$, 将控制律 ξ 转化为 $u - v$ 分量后代入式(19), 并利用图论中Laplacian矩阵可得

$$\dot{V}_i = -\lambda \dot{r}_i^T (L \otimes I_2) \dot{r}_i = -\lambda \sum_{j \in N} a_{ij} (\dot{r}_i - \dot{r}_j)^2 \leq 0. \quad (20)$$

因此, 跟随船舶间逐渐趋于期望的平衡距离, 同时速度亦趋于一致.

综上所述, 通过以上两个阶段的控制设计, 实现了跟踪领航船舶以及协调相邻跟随船舶间距的目标. 同时经验证分析, 保障了编队队形的稳定性能.

4 仿真实例 (Simulation and experiment)

船舶编队采用人字状态, 根据图论原理, 结构中船舶间信息流图是连通的, 具体见图4.

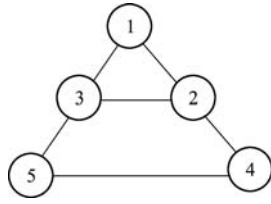


图 4 船舶编队结构

Fig. 4 The structure of ship formation

1 为领航船舶, 此时邻接矩阵为

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

船舶和控制律中参数取 $\alpha_1 = \frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} = 3.4$, $\alpha_2 = \frac{1}{T_1 T_2} = 0.371$, $K = 0.943$, $K_v = 9.7$, $k_1 = 3.5$, $k_3 = 0.16$, $k_4 = 0.15$, $\varepsilon_0 = 0.5$, $m = 2$, $c = 1.84$, $c_1 = 2$, $\lambda = 1.8$.

船舶的初始状态设为

$$u_i = 1 \text{ m/s}, v_i = 0 \text{ m/s}, \varphi_i = 0^\circ.$$

5 艘船舶的初始位置依次设为 $[22, 22]$, $[15, 15]$, $[7, 33]$, $[0, 0]$, $[0, 40]$, 队形间距为 15.

先研究直线路径时编队状况, 预期航线为 $\varphi_d = 30^\circ$, $u_d = 3 \text{ m/s}$, 领航船舶按照此路线航行. 对跟随船舶进行编队控制, 得到仿真结果.

图 5 显示初期由于受到初始位置影响, 编队间距不一致. 随着整体的控制调节, 间距逐渐保持一致, 队形稳定实现编队的跟踪. 为了保持队形一致, 同时进行速度和舵角的调整, 见图 6 和图 7 中的纵向速度、横向速度、航向变化以及舵角趋势, 在编队初期各状态呈现波动变化, 跟随船舶通过控制律进行姿态调整, 逐渐向期望目标靠近, 最终每艘船舶趋于一致, 达到编队控制目的.

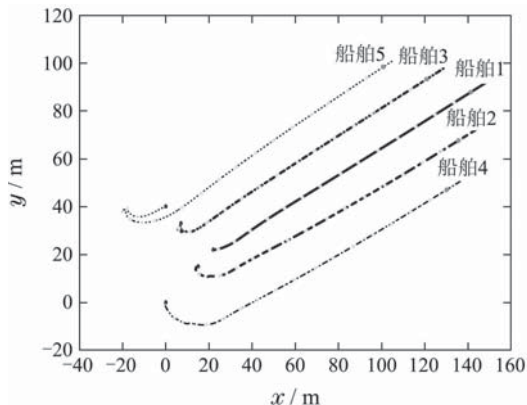


图 5 编队轨迹图

Fig. 5 The trajectory of ship formation

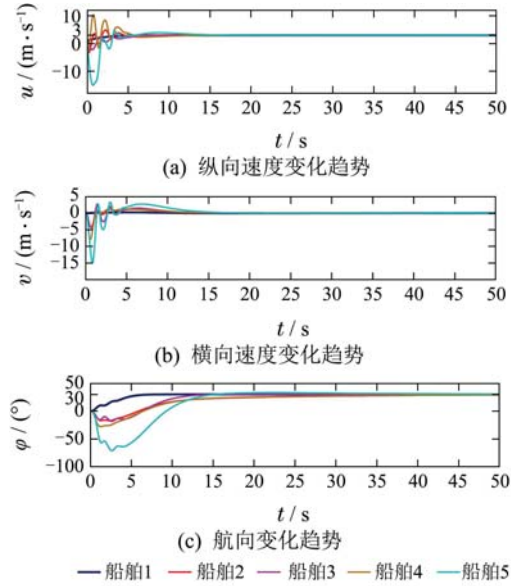


图 6 编队各状态变化趋势

Fig. 6 The state trend of ship formation

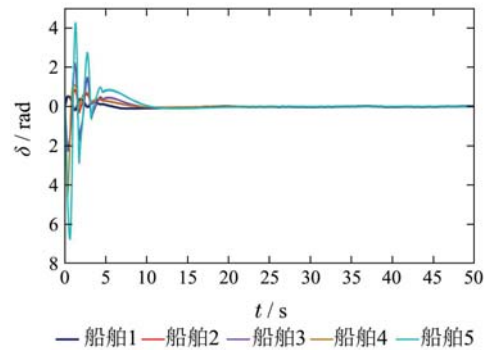


图 7 编队舵角状态变化趋势

Fig. 7 The rudder trend of ship formation

当期望路径选取 $r_d = \begin{cases} 0.06 \text{ rad/s}, & t \leq 30 \text{ s} \\ 0 \text{ rad/s}, & t > 30 \text{ s} \end{cases}$ 时, 观

测编队大转弯的曲线变化趋势. 如图 8 和图 9 所示, 初期轨迹变化波动较大, 由于转弯曲率不同, 为了保持间距使得速度发生较大变化, 到后期渐渐平稳, 速度和间距都趋于一致. 因此, 在转弯时会发生船舶编队产生不利影响, 但随着控制调整最终可以保持预期队形.

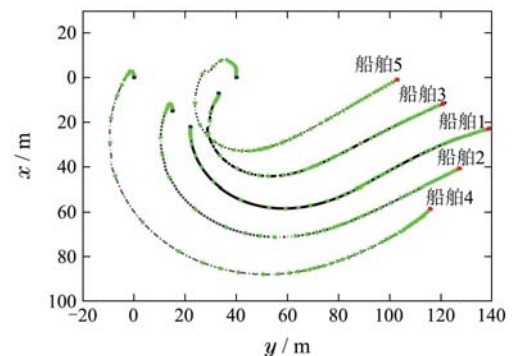


图 8 编队轨迹图

Fig. 8 The trajectory of ship formation

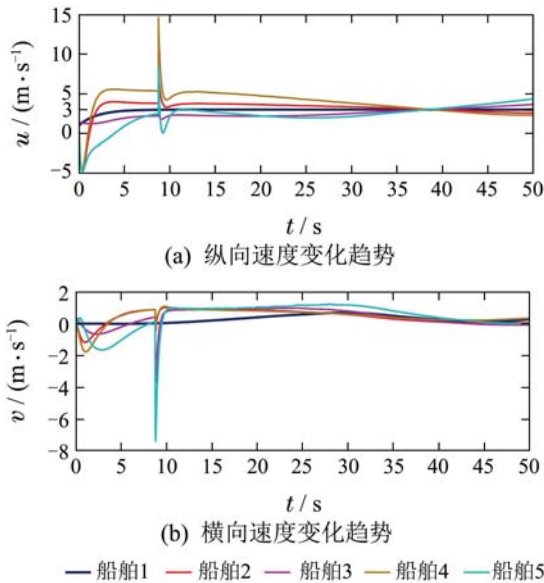


图9 编队速度变化趋势

Fig. 9 The speed trend of ship formation

5 结论(Conclusions)

本文针对船舶编队控制进行算法设计, 改进了领航跟随法的过于集中问题. 利用势函数实现跟随者之间的相互协调控制, 提高队形的稳固性, 结合图论思想和滑模理论, 提出新型编队控制律运用于队形维持, 并使用Lyapunov函数验证了队形的稳定性. 后期通过仿真验证, 得到良好的效果, 对船舶编队航行提供参考, 今后可对大风浪干扰影响下的队形恢复能力进行进一步研究.

参考文献(References):

- [1] LIU Yang, LIU Meijie. Stability analysis and antiwindup design of uncertain discrete-time switched linear systems subject to actuator saturation [J]. *Control Engineering*, 2013, 20(5): 980 – 989.
(刘杨, 刘美杰. 基于领导跟随的欠驱动船舶编队跟踪控制 [J]. 控制工程, 2013, 20(5): 980 – 989.)
- [2] FU Mingyu, JIAO Jianfang. Passive coordinated formation control for vessels based on virtual leader [J]. *Acta Automatica Sinica Applications*, 2014, 40(3): 439 – 448.
(付明玉, 焦建芳. 基于虚拟领航者的船舶无源协调编队控制研究 [J]. 自动化学报, 2014, 40(3): 439 – 448.)
- [3] XIA Yingying, SUN Hongfei. Circular formation control of a ship fleet based on the cyclic - pursuit strategy [J]. *Journal of Xiamen University*, 2015, 54(1): 93 – 98.
(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, 2015, 54(1): 93 – 98.)
- [4] MA C, ZENG Q S. Distributed formation control of 6-DOF autonomous underwater vehicles networked by sampled-data information under directed topology [J]. *Neurocomputing*, 2015, 154: 33 – 40.
- [5] SHOJAEI K. Leader - follower formation control of underactuated autonomous marine surface vehicles with limited torque [J]. *Ocean Engineering*, 2015, 105: 196 – 205.
- [6] DO K D. Formation control of underactuated ships with elliptical shape approximation and limited communication ranges [J]. *Automatica*, 2012, 48(7): 1380 – 1388.
- [7] HU Fengjuan. *The research of ship formation and obstacle avoidance under the dynamic environment* [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2013.
(胡凤娟. 动态环境下多船编队及避障研究 [D]. 广州: 广东工业大学, 2013.)
- [8] ZHAO Yuan, GUO Ge, DING Lei, et al. Collision/obstacle avoidance control of vessel formation [J]. *Information and Control*, 2012, 41(4): 425 – 433.
(赵园, 郭戈, 丁磊, 等. 舰船编队的避障/避碰控制 [J]. 信息与控制, 2012, 41(4): 425 – 433.)
- [9] LIU yang, GUO Chen, LIU Zhengjiang, et al. Control method of underactuated surface ship formation based on stable adaptive neural network control law [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2014, 14(3): 120 – 126.
(刘杨, 郭晨, 刘正江, 等. 基于神经网络稳定自适应的欠驱动水面船舶编队控制方法 [J]. 交通运输工程学报, 2014, 14(3): 120 – 126.)
- [10] PENG Zhouhua. *Robust adaptive control for formations of marine surface vessels* [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2011.
(彭周华. 舰船编队的鲁棒自适应控制 [D]. 大连: 大连海事大学, 2011.)
- [11] JIA Xinle, YANG Yansheng. *Mathematical Model of Ship Motion: The Mechanism Modeling and Identification Modeling* [M]. Dalian: Dalian Maritime University Press, 1999.
(贾欣乐, 杨盐生. 船舶运动数学模型: 机理建模与辨识建模 [M]. 大连: 大连海事大学出版社, 1999.)
- [12] XU Junming. *Graph Theory and Its Application* [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2004.
(徐俊明. 图论及其应用 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2004.)
- [13] LUO Xiaoyuan, LI Xu, LI Shaobao, et al. Distributed discrete-time formation control of multi-agent systems under fixed and switching topologies [J]. *Control and Decision*, 2013, 28(12): 1869 – 1873.
(罗小元, 李旭, 李绍宝, 等. 分布式离散多智能体系统在固定和切换拓扑下的编队控制 [J]. 控制与决策, 2013, 28(12): 1869 – 1873.)
- [14] YU Chi, GONG Minglong. Design of sliding mode controller for MIMO system and its application [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2012, 33(4): 473 – 475.
(于驰, 宫明龙. 多输入多输出系统的滑模控制器设计及其应用 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2012, 33(4): 473 – 475.)
- [15] YU Hui. *Multi-agent robot coordinated control study and stability analysis* [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007.
(俞辉. 多智能体机器人协调控制研究及稳定性分析 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.)
- [16] SONG Yanrong, WANG Xingping, ZHANG Shudong, et al. Safe-guarded formation control via the artificial potential method [J]. *Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University*, 2011, 26(6): 622 – 627.
(宋艳荣, 王兴平, 张术东, 等. 基于势函数的护卫队形控制 [J]. 海军航空工程学院学报, 2011, 26(6): 622 – 627.)
- [17] CHU Fufang, YANG Hongyong. Flocking motion and speed synchronization of multi-agent system with disturbance [J]. *Complex Systems and Complexity Science*, 2015, 12(1): 85 – 91.
(褚福芳, 杨洪勇. 具有干扰的多自主体系统的群集运动与速度同步 [J]. 复杂系统与复杂性科学, 2015, 12(1): 85 – 91.)

作者简介:

李芸 (1988–), 女, 博士研究生, 目前研究方向为船舶运动控制及品质, E-mail: casismile@163.com;

肖英杰 (1959–), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为港航论证、载运工具与应用工程.