

基于虚拟领航者的船舶无源协调编队控制研究

付明玉¹ 焦建芳¹

摘 要 随着海上任务越来越复杂,许多作业过程要求多艘船舶相互协调.本文结合了虚拟领航者协调策略和无源性理论控制方法的各自优势,提出了一种基于虚拟领航者的无源协调控制方法,来解决多艘船舶的协调路径跟踪问题.通过对虚拟领航者设计路径跟踪控制器,使其领导作业船舶按着指定的路径进行协调作业,同时定义每艘船舶的队形参考点,应用无源性理论设计同步控制器使所有船舶的参考点趋于一致,最终实现多艘船舶按一定的队形进行协调路径跟踪.最后通过仿真实验验证了所提算法的有效性.

关键词 协调控制, 虚拟领航者, 无源性, 船舶控制, 路径跟踪

引用格式 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. 自动化学报, 2014, 40(3): 439–448

DOI 10.3724/SP.J.1004.2014.00439

Passive Coordinated Formation Control for Vessels Based on Virtual Leader

FU Ming-Yu¹ JIAO Jian-Fang¹

Abstract With the increasing complexity of marine missions, it is necessary to carry out the tasks through coordination of multiple vessels. This study addresses the problem of coordinated path following for multiple vessels. The authors show how the virtual leader strategy and passivity-based techniques are brought together to yield a distributed control strategy. The desired path following is achieved by means of a virtual dynamic leader. Meanwhile, the coordinated path following of multiple vessels with a desired spatial formation is achieved through defining the formation reference point. The consensus of formation reference point is realized by using the synchronization controller based on passivity. Finally, simulation results show the effectiveness of the proposed coordinated algorithm.

Key words Coordinated control, virtual leader, passivity, vessels control, path following

Citation Fu Ming-Yu, Jiao Jian-Fang. Passive coordinated formation control for vessels based on virtual leader. *Acta Automatica Sinica*, 2014, 40(3): 439–448

随着经济的快速发展,陆地资源日趋匮乏,海洋资源的开发和利用逐渐进入人们的视野.同时伴随着通信和计算机技术的快速发展,多艘船舶的协调控制吸引了众多学者.多艘船舶协调作业有广泛的应用前景和潜在的应用优势,如多船在海上形成一定的队形,协同执行海洋资源探测,可以很大程度上提高其作业的效率.远洋在航补给,自动牵引作业,海洋环境监测等作业需要多艘船之间相互协调,共同完成其复杂的海上任务.另外,多艘船协调作业还可以增强整个系统的鲁棒性和容错性,保证能够安全顺利地在海上作业^[1–2].因此,对多艘船的协调控制的研究有重要的学术价值和应用价值.

近年来,对多船的协调控制的研究已经取得了一定的成果^[3–4].常用的协调控制策略主要有主从式方法,行为式方法和虚拟结构方法.在实际作业过程中由于领航者跟随者方法简单,易于实现,被普遍采用^[8–9].Kyrkjebø等采用主从式法研究了在航补给过程中补给船和受补给船之间的协调同步控制^[5].文献[6]中应用基于零空间的行为控制实现多船的协调编队.Peymani和Ihle分别基于虚拟结构方法应用拉格朗日约束函数研究了多船的协调编队控制^[3,7].这些协调策略需要船舶之间的全局通讯方式,然而实际中存在通信带宽受限的问题.而Arcak提出的无源性协调是通过定义辅助的输入函数,使状态变量最终趋于一致,仅需要相邻个体之间的通信^[10].另外无源性利用能量函数来分析设计,这样为李亚普诺夫函数的构造提供了理论支撑,另外无源性还有个很好的性质就是两个无源的子系统通过级联或反馈互联后系统还保持着无源性,这样有利于对复杂问题的分析和设计^[11–12].

随着海上任务的不断细化,许多作业需要多艘船保持期望队形的同时,还能协同跟踪特定的路径.应着这个需求,许多从事船舶运动控制的学者针对

收稿日期 2012-12-07 录用日期 2013-07-09

Manuscript received December 7, 2012; accepted July 9, 2013
高技术船舶科研项目(Z12SJENAO011),国家科技重大专项子课题(2011ZX05027-002)资助

Supported by High Technology of Ships Research Program of China (Z12SJENAO011) and National Technology Momentous Special Program of China (2011ZX05027-002)

本文责任编辑 胡小平

Recommended by Associate Editor HU Xiao-Ping

1. 哈尔滨工程大学自动化学院 哈尔滨 150001

1. College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001

协调路径跟踪做了大量的研究. 如 Børhaug 等, Ghommam 等和 Do 分别利用非线性级联系统理论和李亚普诺夫直接法研究了多欠驱动船的协调路径跟踪问题^[13-15]. Skjetne 等提出了编队参考点的协调策略, 设计了多船的协调路径跟踪控制器^[16]. Ihle 等分别利用约束函数和无源性理论设计了路径参数的同步控制律以实现协调路径跟踪^[17-18]. 前面叙述的文献中都是根据期望路径上的参考点预先定义好每艘船的期望路径, 然后设计相应的控制律使所有船舶的路径参数达到同步, 从而使船舶沿着预设的路径实现协调跟踪控制. 然而在实际作业时经常存在任务变换的情况或有意外发生的可能, 要使多船继续协调作业必须对每艘船的路径进行重新规划.

Wang 等将协调路径跟踪问题进行时空解耦, 应用无源性理论实现其空间的队形控制, 同时对路径参数设计一致性算法来实现时间上的协调控制, 从而完成协调路径跟踪^[19], 该方法也需要预先定义每艘船的期望路径. Thorvaldsen 等通过将协调任务和路径跟踪任务分开进行设计, 应用无源性理论使船舶相互之间形成指定队形后, 再通过指定一艘船为领航者, 使其向其他船舶广播期望速度信号来实现路径跟踪任务^[20], 如果因为作业的需求, 临时更换领航者, 则需要对新指定的领航者设计相应的控制器, 并向其他船舶广播新的期望速度信号. 另外实际作业时船舶的路径经常会发生变化, 还可能要执行协调定位, 协调轨迹跟踪等其他协调任务, 如果任务发生变换, 就需要根据新的任务重新对船舶设计协调控制器. 为了覆盖协调作业时几个基本任务, 用文献 [19-20] 中的方法来实现, 都需要船舶针对所有可能的任务分别设计相应的协调控制器, 而且这些协调控制器之间的安全切换问题, 还有这些控制器的总体集成和测试也都应该考虑. 显然在实际应用中, 这不是最好的选择. 如果设计导引系统, 使其提供不同协调任务所需要的期望的参考状态信号, 再设计一个通用的协调编队控制器来实现协调作业, 这将能提高多艘船舶协调的操纵性能, 并且可以降低成本.

考虑到无源性理论作为协调控制方法的优势, 并针对现有文献中存在的问题, 本文采用 Guidance-control (制导-控制) 结构, 将无源性理论和虚拟领航者的思想结合在一起, 提出了新的多艘船舶协调编队的控制方法. 该方法通过设计船舶的导引系统, 使其根据不同任务给出相应的参考信号, 然后应用给出的参考信号, 基于无源性理论设计一个对各种协调任务通用的协调控制器. 其中导引系统的设计是通过计算机仿真一艘虚拟的船舶, 让其作为领航者领导多艘船舶实现相应的路径跟踪. 而协调作业

时的队形结构是通过定义每艘船 (包括领航者) 的队形参考点, 采用无源性理论来设计相应的控制器使所有的参考点趋于一致来实现的. 本文提出的协调编队控制器, 所用的期望速度信号只需要由虚拟领航者给出, 而不需要利用所有船舶的状态信息, 并且领航者是虚拟的, 不受外界环境干扰, 位置可以随意设置. 另外导引系统的设计可以避免已有文献中任务变换或有意外发生时, 需要对每艘船的路径进行重新规划的弊端, 提高了协调操纵性能, 降低了成本. 最后通过理论分析和仿真验证了所提出的协调控制方法的可行性和有效性.

1 问题描述

1.1 船舶数学模型

对于水面船舶, 一般只考虑其在纵荡、横荡和转艏三个方向上的运动, 本文中用 $\boldsymbol{\eta} = [n \ e \ \psi]^T$ 表示船舶在大地坐标系下的北向位置、东向位置和艏向, $\boldsymbol{v} = [u \ v \ r]^T$ 表示船舶在船体坐标系下的纵荡速度、横荡速度和艏摇速度. 根据文献 [2], 水面船舶的自由度数学模型可描述为

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = R(\psi)\boldsymbol{v} \quad (1)$$

$$M_v\dot{\boldsymbol{v}} + C_v(\boldsymbol{v})\boldsymbol{v} + D_v(\boldsymbol{v})\boldsymbol{v} + \boldsymbol{g}_v(\boldsymbol{\eta}) = \boldsymbol{\tau}_v \quad (2)$$

其中, M_v 为包含水动力附加质量的惯性矩阵, $C_v(\boldsymbol{v})$ 为包含附加质量的科里奥利向心力矩阵, $D_v(\boldsymbol{v})$ 为阻尼系数矩阵, $\boldsymbol{g}_v(\boldsymbol{\eta})$ 为重力向量, $\boldsymbol{\tau}_v$ 为船舶的执行器给出的外力或力矩输入. $R(\psi)$ 为从船体坐标系到大地坐标系的转换矩阵, 其矩阵形式为

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

由此可知: $R^{-1}(\psi) = R^T(\psi)$. 船舶在大地坐标系下的数学模型方程为

$$M(\boldsymbol{\eta})\ddot{\boldsymbol{\eta}} + C(\boldsymbol{\eta}, \dot{\boldsymbol{\eta}})\dot{\boldsymbol{\eta}} + D(\boldsymbol{\eta}, \dot{\boldsymbol{\eta}})\dot{\boldsymbol{\eta}} + \boldsymbol{g}(\boldsymbol{\eta}) = \boldsymbol{\tau} \quad (3)$$

其中

$$M(\boldsymbol{\eta}) = R(\psi)M_vR^{-1}(\psi)$$

$$C(\boldsymbol{\eta}, \dot{\boldsymbol{\eta}}) = R(\psi)[C_v(\boldsymbol{v}) - M_vR^{-1}(\psi)\dot{R}(\psi)]R^{-1}(\psi)$$

$$D(\boldsymbol{\eta}, \dot{\boldsymbol{\eta}}) = R(\psi)D_v(\boldsymbol{v})R^{-1}(\psi)$$

$$\boldsymbol{g}(\boldsymbol{\eta}) = R(\psi)\boldsymbol{g}_v(\boldsymbol{\eta})$$

$$\boldsymbol{\tau} = R(\psi)\boldsymbol{\tau}_v$$

上述大地坐标系下的船舶数学模型有如下的性质:

1) $M(\boldsymbol{\eta})$ 是正定对称惯性矩阵, 且满足 $\lambda_{\min}(M)\|\boldsymbol{x}\|_2^2 \leq \boldsymbol{x}^T M \boldsymbol{x} \leq \lambda_{\max}(M)\|\boldsymbol{x}\|_2^2$, $\forall \boldsymbol{x} \neq 0$;

2) $\dot{M}(\boldsymbol{\eta}) - 2C(\boldsymbol{\eta}, \dot{\boldsymbol{\eta}})$ 是斜对称的, 即:
 $\boldsymbol{\eta}^T (\dot{M}(\boldsymbol{\eta}) - 2C(\boldsymbol{\eta}, \dot{\boldsymbol{\eta}})) \boldsymbol{\eta} = 0, \forall \boldsymbol{\eta} \in \mathbf{R}^3$;

3) 阻尼矩阵 $D(\boldsymbol{\eta}, \dot{\boldsymbol{\eta}})$ 是正定的, 满足
 $\boldsymbol{\eta}^T D(\boldsymbol{\eta}, \dot{\boldsymbol{\eta}}) \boldsymbol{\eta} > 0, \forall \boldsymbol{\eta} \neq \mathbf{0}$.

1.2 控制目标

本文主要研究的是多艘船舶能够按指定的队形进行协调路径跟踪, 为了避免之前文献中出现任务转换或意外发生时需要对所有船的路径重新规划的弊端, 本文通过定义一个虚拟领航者来设计导引系统, 让其给出期望参考信号, 从而驱动作为跟随者的船舶执行相应路径跟踪任务. 假设有 n 艘船舶需要协调, 根据不同的作业需求可以确定船与船之间期望的相对位置关系, 通过定义每艘船的队形参考点和其实际位置的相对位置向量为 $\mathbf{l}_i = [x_i, y_i, \psi_i]^T$, $i = 0, 1, 2, \dots, n$, 其中虚拟领航者的相对位置向量定义为 $\mathbf{l}_0 = \mathbf{0}$, 可以将确定的相对位置关系转变为所有船的队形参考点的位置关系. 则船舶在队形控制中相应的位置关系可用图 1 表示.

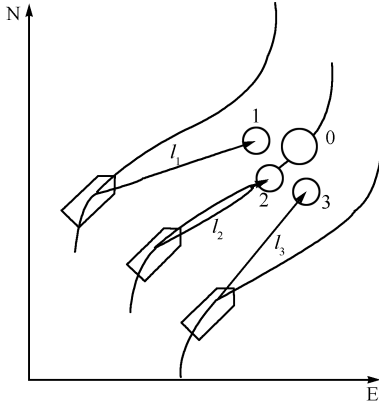


图 1 队形控制中船舶的位置关系

Fig. 1 The position relation of vessels in the formation

通过设计合适的控制律使船舶之间达到期望的相对位置关系, 即所有的队形参考点都趋于一致, 共同执行路径跟踪任务. 根据上述对控制目标的描述, 可以用下面的数学语言进行描述.

通过对虚拟领航者设计控制器, 使其沿期望的路径运动, 将其运动速度作为下面协调控制器设计中的期望速度信号. 文中用 $\boldsymbol{\eta}_0(t)$ 表示虚拟船舶的实际位置, 沿路径运动的期望速度为 $v_s(\theta)$. 定义每艘船的队形参考点的位置向量为: $\mathbf{x}_i = \boldsymbol{\eta}_i(\theta) + R(\psi_i(\theta))\mathbf{l}_i$, $i = 0, 1, 2, \dots, n$, 其中, $\theta(t)$ 表示期望的路径参数, 一般路径分为离散的路径点, 连续的路径和混合路径, 相应的路径参数的表示形式见文献 [21]. 要使所有作业的船舶形成指定的队形, 需要设计控制律使 $\mathbf{x}_0 = \mathbf{x}_1 = \dots = \mathbf{x}_n$. 综上所述, 假设虚拟船舶的期望路径为 $\boldsymbol{\eta}_d(\theta(t))$, 本文

的控制目标可以描述为

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} |\boldsymbol{\eta}_0(t) - \boldsymbol{\eta}_d(\theta(t))| &= 0 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} |\dot{\theta}(t) - v_s(\theta)| &= 0 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} |\mathbf{x}_i(t) - \mathbf{x}_j(t)| &= 0 \end{aligned}$$

为方便之后的讨论, 假设如下的记号, 物理意义在下文中将详细定义和说明.

$$\mathbf{x} = [\mathbf{x}_0^T, \dots, \mathbf{x}_n^T]^T \in \mathbf{R}^{3(n+1)}$$

$$\boldsymbol{\alpha}(\mathbf{z}) = [\boldsymbol{\alpha}_0(\mathbf{z})^T, \dots, \boldsymbol{\alpha}_n(\mathbf{z})^T]^T \in \mathbf{R}^{3(n+1)}$$

$$\Phi(\mathbf{z}) = [\varphi_0(\mathbf{z}_0)^T, \dots, \varphi_p(\mathbf{z}_p)^T]^T \in \mathbf{R}^{3p}$$

$$\boldsymbol{\xi} = [\boldsymbol{\xi}_0^T, \dots, \boldsymbol{\xi}_n^T]^T \in \mathbf{R}^{3(n+1)}$$

$$\mathbf{v} = [\mathbf{v}_d^T, \dots, \mathbf{v}_d^T]^T \in \mathbf{R}^{3(n+1)}$$

2 协调路径跟踪控制器设计

2.1 控制器设计的总体思路

本文设计协调控制器的主要思想是基于制导-控制的结构, 相应的协调控制结构框图如图 2 所示.

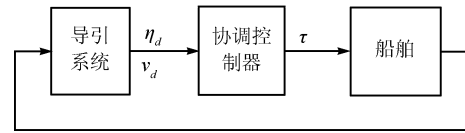


图 2 协调控制结构图

Fig. 2 The frame of coordination controller

导引系统是基于虚拟领航者的思想设计的, 即用计算机仿真一艘虚拟的船作为所有船舶的领航者, 该虚拟船具有和实际船舶相同或相近的运动学和动力学特性, 根据不同的任务要求设计不同的控制器, 使其能够给出船舶执行协调任务的控制器设计中所用位置和速度的期望参考信号, 并将其广播给所有的船舶; 然后利用无源性理论, 设计一种对不同协调任务通用的协调编队控制器, 使所有船舶能够形成并保持期望的队形, 并根据导引系统给出的期望状态信号, 驱动所有船舶实现相应的协调作业.

本文针对协调路径跟踪, 利用提出的控制结构来设计相应的协调控制器, 即对虚拟船设计路径跟踪控制器, 使其广播船舶协调路径跟踪控制器的期望状态信号, 并应用无源性理论设计协调编队控制器. 以下是整个协调控制器的详细设计过程.

2.2 导引系统的设计

通过设计具有与船舶相同或相近的运动学和动力学特性的虚拟船作为领航者, 由其给出下文中实现协调所用的期望路径 $\boldsymbol{\eta}_d(\theta)$ 和期望速度 $\mathbf{v}_d$, 从而完成导引系统的设计. 本节利用反推法设计虚拟船

的控制输入, 使其沿着期望的路径运动. 导引系统给出的期望状态信号直接广播给各艘船舶, 驱动船舶沿着给定的路径运动. 为了保证船舶顺利执行协调路径跟踪任务, 应该将其初始位置设定在实际船舶相应的位置附近. 以下是路径跟踪控制器的详细设计过程.

定义虚拟领航者的位置跟踪误差为

$$\mathbf{p} = \boldsymbol{\eta}_0 - \boldsymbol{\eta}_d(\theta) \quad (4)$$

对上式求导, 得:

$$\dot{\mathbf{p}} = R(\psi_0)\mathbf{v}_0 - \frac{d\boldsymbol{\eta}_d(\theta)}{d\theta}\dot{\theta} \quad (5)$$

其中, $\dot{\theta} = \frac{u_d}{\sqrt{\dot{\eta}_d(\theta)^2 + \dot{e}_d(\theta)^2}}$, u_d 为船舶航行的期望速度.

假定该虚拟船的参考速度为 $\mathbf{v}_r$, 并定义速度误差信号为

$$\mathbf{q} = \mathbf{v}_0 - \mathbf{v}_r \quad (6)$$

根据任务确定的路径的运动速度误差:

$$w = v_s - \dot{\theta} \quad (7)$$

定义相应的李亚普诺夫函数:

$$V_p = \frac{1}{2}\mathbf{p}^T\mathbf{p} \quad (8)$$

将上式对时间进行求导可得:

$$\dot{V}_p = \mathbf{p}^T\dot{\mathbf{p}} = \mathbf{p}^T(R(\psi_0)(\mathbf{v}_r + \mathbf{q}) + \dot{\boldsymbol{\eta}}_d(\theta)(w - v_s)) \quad (9)$$

根据式 (9), 可以选择虚拟船舶的参考速度为: $\mathbf{v}_r = R^{-1}(\psi_0)(\dot{\boldsymbol{\eta}}_d(\theta)v_s - \Lambda\mathbf{p})$, 则可以得到:

$$\dot{V}_p = -\mathbf{p}^T\Lambda\mathbf{p} + \mathbf{p}^TR(\psi_0)\mathbf{q} + \mathbf{p}^T\dot{\boldsymbol{\eta}}_d(\theta)w \quad (10)$$

重新定义一个新的李亚普诺夫函数:

$$V_q = V_p + \frac{1}{2}\mathbf{q}^TM_{v0}\mathbf{q} \quad (11)$$

并将上式对时间求导:

$$\begin{aligned} \dot{V}_q &= \dot{V}_p + \mathbf{q}^TM_{v0}\dot{\mathbf{q}} = \\ &= -\mathbf{p}^T\Lambda\mathbf{p} + \mathbf{p}^TR(\psi_0)\mathbf{q} + \mathbf{p}^T\dot{\boldsymbol{\eta}}_d(\theta)w + \\ &+ \mathbf{q}^T(\boldsymbol{\tau} - C_{v0}\mathbf{v}_0 - D_{v0}\mathbf{v}_0 - \mathbf{g}_{v0} - M_{v0}\dot{\mathbf{v}}_r) \end{aligned} \quad (12)$$

对前面定义的参考速度进行求导:

$$\dot{\mathbf{v}}_r = \boldsymbol{\sigma}_1 + \dot{\mathbf{v}}_r^\theta \dot{\theta} \quad (13)$$

由于

$$\dot{R}(\psi_0) = r_0 \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} R(\psi_0)$$

如果定义常数矩阵 $S = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$, 式 (13) 中:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\sigma}_1 &= -r_0 S\mathbf{v}_r - R^{-1}(\psi_0)\Lambda R(\psi_0)\mathbf{v}_0 + \\ &+ R^{-1}(\psi_0)\dot{\boldsymbol{\eta}}_d(\theta)v_s^t \\ \dot{\mathbf{v}}_r^\theta &= R^{-1}(\psi_0)(-\Lambda\dot{\boldsymbol{\eta}}_d(\theta) + \ddot{\boldsymbol{\eta}}_d(\theta)v_s + \dot{\boldsymbol{\eta}}_d(\theta)\dot{v}_s^\theta) \\ \dot{\mathbf{v}}_r^\theta &= \frac{d\mathbf{v}_r}{d\theta}, \dot{\mathbf{v}}_s^\theta = \frac{d\mathbf{v}_s}{d\theta}, \dot{v}_s^\theta = \frac{dv_s}{dt} \end{aligned}$$

选择控制输入为

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\tau} &= C_{v0}\mathbf{v}_0 + D_{v0}\mathbf{v}_0 + \mathbf{g}_{v0} + \\ &+ M_{v0}(\boldsymbol{\sigma}_1 + \dot{\mathbf{v}}_r^\theta v_s) - R(\psi_0)\mathbf{p} - T\mathbf{q} \end{aligned} \quad (14)$$

式中 $T = T^T > 0$ 为正定控制参数矩阵.

令 $\Gamma = \mathbf{p}^T\dot{\boldsymbol{\eta}}_d(\theta) + \mathbf{q}^TM_{v0}\dot{\mathbf{v}}_r^\theta$, 式 (12) 可变为

$$\dot{V}_q = -\mathbf{p}^T\Lambda\mathbf{p} - \mathbf{q}^TT\mathbf{q} + \Gamma w \quad (15)$$

选用文献 [14] 中的滤波-梯度更新方法对定义的路径速度调节函数进行在线更新:

$$\begin{aligned} \dot{\theta} &= v_s - w \\ \dot{w} &= -\lambda w - \lambda\mu\Gamma \end{aligned} \quad (16)$$

式中, λ, μ 为正数.

接下来定义一个扩展的李亚普诺夫函数:

$$V = V_q + \frac{1}{2\lambda\mu}w^2 \quad (17)$$

求式 (17) 的导数为

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \dot{V}_q + \frac{1}{\lambda\mu}w\dot{w} = \\ &= -\mathbf{p}^T\Lambda\mathbf{p} - \mathbf{q}^TT\mathbf{q} + \Gamma w + \\ &+ \frac{1}{\lambda\mu}w(-\lambda w - \lambda\mu\Gamma) = \\ &= -\mathbf{p}^T\Lambda\mathbf{p} - \mathbf{q}^TT\mathbf{q} - \frac{1}{\mu}w^2 \end{aligned} \quad (18)$$

由此可得选择合理的矩阵和参数, 可以保证领航者的稳定性. 根据领航者的运动速度, 可以确定协调编队控制中用到的期望速度为 $\mathbf{v}_d = \dot{\mathbf{x}}_0(t) = \dot{\boldsymbol{\eta}}_0(\theta(t)) = R(\psi_0)\mathbf{v}_0 = R(\psi_0)\mathbf{v}_r$, 其导数为: $\dot{\mathbf{v}}_d = R(\psi_0)\dot{\mathbf{v}}_r + \dot{R}(\psi_0)\mathbf{v}_r$. 以上虚拟船的控制正

好完成了导引系统的设计, 给出协调控制器的期望速度输入信号并将其广播给每艘船, 以便实现协调路径跟踪作业。

2.3 协调编队控制器的设计

引理 1 (嵌套 Matrosov 定理^[22]). 非线性系统 $\dot{x} = f(t, x)$ 的原点是一致全局渐近稳定 (Uniformly globally asymptotically stable, UGAS), 如果同时满足以下几个条件:

1) $\dot{x} = f(t, x)$ 的原点是一致全局稳定的 (Uniformly globally stable, UGS).

2) 对于任意 $\Delta > 0$, 整数 $j, m > 0$, 存在一个常数 $\mu > 0$, 一个局部 Lipschitz 连续函数 $V_i: \mathbf{R}_{\geq 0} \times \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}$, 一个函数 $\varphi: \mathbf{R}_{\geq 0} \times \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}_m$, 和一个连续函数 $Y_i: \mathbf{R}^n \times \mathbf{R}^m \rightarrow \mathbf{R}, i \in \{1, \dots, j\}$, 使得对于所有的 $(t, x) \in \mathbf{R}_{\geq 0} \times B(\Delta)$ 和所有的 $i \in \{1, \dots, j\}$ 都满足 $\max\{|V_i(t, x)|, |\varphi(t, x)|\} \leq \mu; \dot{V}_i(t, x) \leq Y_i(x, \varphi(t, x))$.

3) 对于任意的 $k \in \{1, \dots, j\}$, 下面关系式成立: $Y_i(z, \varphi) = 0|_{(z, \varphi) \in B(\Delta) \times B(\mu)}, \forall i \in \{1, \dots, k-1\} \Rightarrow Y_k(z, \varphi) \leq 0|_{(z, \varphi) \in B(\Delta) \times B(\mu)}$.

4) 对于 $\forall i \in \{1, \dots, j\}, Y_i(z, \varphi) = 0|_{(z, \varphi) \in B(\Delta) \times B(\mu)} \Rightarrow z = 0$.

本文协调控制器的设计是基于船舶之间的通信拓扑图是无向平衡图的假设, 构造一个辅助的控制输入, 并作为闭环系统的前馈信号, 用船舶自身的模型构造的关系作为反馈, 设计相应的控制律以保证从辅助控制输入到由速度误差构成的输出是无源的, 利用无源性的相关理论, 我们可以证明整个闭环系统是李亚普诺夫稳定的, 从而实现多艘船的协调路径跟踪控制. 本文的协调控制结构框图如图 3 所示. 图中符号的定义将在下文中详细定义。

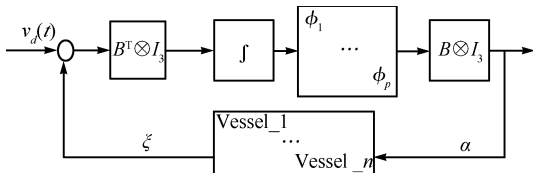


图 3 编队控制器结构框图

Fig. 3 The frame of the formation controller structure

根据文献 [7], 用每艘船和其相邻的船舶之间的同步误差作为反馈信息, 定义辅助的控制输入 $\alpha = [\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_n]^T$, 其表达形式为

$$\alpha_i = - \sum_{k=1}^p b_{ik} \varphi_k(z_k), \quad i = 0, 1, \dots, n \quad (19)$$

式中的 $B = \{b_{ik}\} \in \mathbf{R}^{(n+1) \times p}$ 表示船舶之间的相互通信的拓扑图的关联矩阵, 假设船舶 i 和 j 可以通

过拓扑图的第 k 条信息链相互通信, 则船舶 i 和 j 之间的同步位置误差可表示为

$$z_k = \sum_{i=1}^n b_{ik} x_i$$

上式中如果 i 是起始端, $z_k = x_i - x_j$; 如果 i 是末端, $z_k = x_j - x_i$.

为了保证前馈通路的无源性, 定义由相邻的船舶之间位置的同步误差决定的非线性函数为 $\Phi = \text{diag}\{\varphi_1, \dots, \varphi_p\}$, 其具体形式为

$$\varphi_k(z_k) = \frac{\partial P_k(z_k)}{\partial z_k} \quad (20)$$

式中的 $P_k(z_k)$ 是非负的二次连续函数, 且满足以下条件:

$$\begin{aligned} P_k(z_k) &> 0, \quad \forall |z_k| \neq 0 \\ P_k(z_k) &\rightarrow \infty, \quad |z_k| \rightarrow \infty \\ z_k^T \frac{\partial P_k(z_k)}{\partial z_k} &> 0, \quad \forall z_k \neq 0 \end{aligned}$$

定义船舶参考点运动的速度误差为

$$\xi_i = \dot{x}_i - v_d \quad (21)$$

由 $x_i = \eta_i(\theta) + R(\psi_i(\theta))l_i$, 可得: $\eta_i(\theta) = x_i - R(\psi_i(\theta))l_i$. 为了方便计算, 我们定义 $f_i = R(\psi_i(\theta))l_i$. 将 $\eta_i(\theta)$ 代入到船舶的模型中, 可得:

$$M_i(\ddot{x}_i - \ddot{f}_i) + C_i(\dot{x}_i - \dot{f}_i) + D_i(x_i - f_i) + g_i = \tau_i \quad (22)$$

其中, $i \in 1, 2, \dots, n$.

选择每艘船的控制输入为

$$\begin{aligned} \tau_i &= (C_i + D_i)(v_d - \dot{f}_i) + M_i(\ddot{v}_d - \ddot{f}_i) + \\ &g_i - K_{di}(\dot{x}_i - v_d) + \alpha_i \end{aligned} \quad (23)$$

式中 $K_{di} = K_{di}^T > 0$ 为控制增益矩阵, 可以使船舶实现协调路径跟踪。

定理 1. 对于具有模型方程 (3) 的 n 艘水面船舶, 船舶之间的相互通信拓扑图是无向平衡图, 且是连通的, 应用控制律 (23), 可以使整个闭环系统的状态向量 $\chi = [z^T, \xi^T]^T = 0$ 全局一致渐近稳定, 即 $[(x_i - x_j)^T, (\dot{x}_i - v_d)^T]^T = 0$ 是一致全局渐近稳定, 各船的队形参考点和速度趋于一致, 从而保证 n 艘水面船舶实现了协调路径跟踪。

证明. 定义前馈通路的存储函数为

$$V_f(z) = \sum_{k=1}^p P_k(z_k) \quad (24)$$

其中, $\mathbf{z} = (B^T \otimes I_3)\mathbf{x}$. 对上式进行求导得:

$$\dot{V}_f(\mathbf{z}) = \left[\frac{\partial}{\partial \mathbf{z}} \left(\sum_{k=1}^p P_k(\mathbf{z}_k) \right) \right]^T \dot{\mathbf{z}} = \Phi(\mathbf{z})^T (B^T \otimes I_3) \dot{\mathbf{x}} \quad (25)$$

由于 $\dot{\mathbf{x}} = \boldsymbol{\xi} + \mathbf{v}$, 且 $(B^T \otimes I_3)\mathbf{v} = \mathbf{0}$, 所以上式变为

$$\dot{V}_f(\mathbf{z}) = \Phi(\mathbf{z})^T (B^T \otimes I_3) \boldsymbol{\xi} = [(B \otimes I_3)\Phi(\mathbf{z})]^T \boldsymbol{\xi} = -\boldsymbol{\alpha}^T \boldsymbol{\xi} \quad (26)$$

从而可知前面的闭环控制结构图中的前馈部分从输入 $\boldsymbol{\xi}$ 到 $-\boldsymbol{\alpha}$ 是无源的.

定义闭环系统反馈通路的存储函数为

$$V_b(\boldsymbol{\xi}) = \sum_{i=1}^n S_{\xi_i}(\boldsymbol{\xi}_i) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \boldsymbol{\xi}_i^T M_i \boldsymbol{\xi}_i \quad (27)$$

将每艘船的控制输入代入到船舶模型 (3) 中可得:

$$M_i \dot{\boldsymbol{\xi}}_i = -C_i \boldsymbol{\xi}_i + (D_i + K_{di}) \boldsymbol{\xi}_i + \boldsymbol{\alpha}_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (28)$$

对式 (27) 进行求导可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_b(\boldsymbol{\xi}) &= \sum_{i=1}^n \dot{S}_{\xi_i}(\boldsymbol{\xi}_i) = \\ &= \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \boldsymbol{\xi}_i^T \dot{M}_i \boldsymbol{\xi}_i + \boldsymbol{\xi}_i^T M_i \dot{\boldsymbol{\xi}}_i = \\ &= \boldsymbol{\xi}_i^T \left(\frac{1}{2} \dot{M}_i - C_i \right) \boldsymbol{\xi}_i - \\ &= \boldsymbol{\xi}_i^T (D_i + K_{di}) \boldsymbol{\xi}_i + \boldsymbol{\xi}_i^T \boldsymbol{\alpha}_i \leq \\ &= \sum_{i=1}^n (-\boldsymbol{\xi}_i^T K_{di} \boldsymbol{\xi}_i + \boldsymbol{\xi}_i^T \boldsymbol{\alpha}_i) = \\ &= -\sum_{i=1}^n (\boldsymbol{\xi}_i^T K_{di} \boldsymbol{\xi}_i) + \boldsymbol{\xi}^T \boldsymbol{\alpha} \end{aligned} \quad (29)$$

根据无源性的定义我们可得从辅助控制输入 $\boldsymbol{\alpha}$ 到输出 $\boldsymbol{\xi}$ 是无源的. 由无源性的性质, 可知前面构造的闭环系统是无源的, 且该闭环系统是稳定的.

定义 $\boldsymbol{\chi} = [\mathbf{z}^T, \boldsymbol{\xi}^T]^T$, 用上述的两个存储函数之和定义候选李亚普诺夫函数:

$$V_{z\xi}(t, \boldsymbol{\chi}) = V_f(\mathbf{z}) + V_b(\boldsymbol{\xi}) \quad (30)$$

根据船舶模型的性质 1), 可得:

$$\lambda_{\min}(M) \|\boldsymbol{\xi}\|_2^2 \leq V_b(\boldsymbol{\xi}) \leq \lambda_{\max}(M) \|\boldsymbol{\xi}\|_2^2 \quad (31)$$

显然 $V_f(\mathbf{z})$ 和 $V_b(\boldsymbol{\xi})$ 的上界和下界是确定的, 且分别对于 $\mathbf{z}$ 和 $\boldsymbol{\xi}$ 是径向无界的, 所以对于 $V_{z\xi}(t, \boldsymbol{\chi})$, 存在

κ_∞ 函数 γ_1 和 γ_2 使得下式成立:

$$\gamma_1(|(\mathbf{z}, \boldsymbol{\xi})|) \leq V_{z\xi} \leq \gamma_2(|(\mathbf{z}, \boldsymbol{\xi})|) \quad (32)$$

对式 (30) 进行求导可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{z\xi}(t, \boldsymbol{\chi}) &= \dot{V}_f(\mathbf{z}) + \dot{V}_b(\boldsymbol{\xi}) \leq \\ &= -\boldsymbol{\alpha}^T \boldsymbol{\xi} + \sum_{i=1}^n (-\boldsymbol{\xi}_i^T K_{di} \boldsymbol{\xi}_i) + \boldsymbol{\xi}^T \boldsymbol{\alpha} = \\ &= -\sum_{i=1}^n (\boldsymbol{\xi}_i^T K_{di} \boldsymbol{\xi}_i) \leq 0 \end{aligned} \quad (33)$$

由于 $\dot{V}_{z\xi}(t, \boldsymbol{\chi}) \leq 0$, 因此对于存在于最大的时间间隔 $[t_0, T)$ 内的所有时间 t , 都满足 $V_{z\xi}(t) \geq V_{z\xi}(t_0)$. 由于式 (32) 成立, 可得: $|(\mathbf{z}(t), \boldsymbol{\xi}(t))| \leq \gamma_3(|(\mathbf{z}(t_0), \boldsymbol{\xi}(t_0))|)$, 且式中的 $\gamma_3(\cdot) = \gamma_1^{-1}(\cdot) \circ \gamma_2(\cdot) \in \kappa_\infty$. 由此可得: 该系统的原点是一致全局稳定的 (UGS), 满足了嵌套 Matrosov 定理的条件 1).

定义:

$$V_0(\boldsymbol{\chi}) = V_{z\xi}(\mathbf{z}, \boldsymbol{\xi}) \quad (34)$$

根据式 (33) 可得:

$$\dot{V}_0(\boldsymbol{\chi}) \leq -\sum_{i=1}^n (\boldsymbol{\xi}_i^T K_{di} \boldsymbol{\xi}_i) \leq 0, \quad \forall \boldsymbol{\chi} \quad (35)$$

定义一个辅助函数:

$$V_1(t, \boldsymbol{\chi}) = \mathbf{z}^T B^+ M \boldsymbol{\xi} \quad (36)$$

其中, $M = \text{diag}\{M_1, \dots, M_n\} \in \mathbf{R}^{3n \times 3n}$, B^+ 是 $(B \otimes I_3)$ 的伪逆矩阵, 满足以下关系式: $(B \otimes I_3)B^+(B \otimes I_3) = (B \otimes I_3)$. 对式 (36) 求导, 可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= \dot{\mathbf{z}}^T B^+ M \boldsymbol{\xi} + \mathbf{z}^T B^+ \dot{M} \boldsymbol{\xi} + \mathbf{z}^T B^+ M \dot{\boldsymbol{\xi}} = \\ &= \dot{\mathbf{x}}^T (B \otimes I_3) B^+ M \boldsymbol{\xi} + \\ &= \mathbf{z}^T B^+ (\dot{M} \boldsymbol{\xi} + M \dot{\boldsymbol{\xi}}) \end{aligned} \quad (37)$$

由于每艘船接收到的期望速度信号 $\mathbf{v}_d$ 都是相同的, 且 B 为无向平衡图的关联矩阵, 根据之前定义的向量 $\mathbf{v} = [\mathbf{v}_d^T, \dots, \mathbf{v}_d^T]^T \in \mathbf{R}^{3(n+1)}$, 所以可得:

$$\mathbf{v}^T (B \otimes I_3) B^+ M \boldsymbol{\xi} = 0 \quad (38)$$

根据式 (21) 定义的 $\boldsymbol{\xi}_i = \dot{\mathbf{x}}_i - \mathbf{v}_d$, 可以将所有船的该误差状态写成向量形式, 即: $\boldsymbol{\xi} = \dot{\mathbf{x}} - \mathbf{v}$, 从而式 (37) 可以写成为

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= \boldsymbol{\xi}^T (B \otimes I_3) B^+ M \boldsymbol{\xi} + \mathbf{z}^T B^+ (\dot{M} \boldsymbol{\xi} + M \dot{\boldsymbol{\xi}}) = \\ &= \dot{V}_1(\boldsymbol{\chi}, M \boldsymbol{\xi}, \dot{M} \boldsymbol{\xi}, M \dot{\boldsymbol{\xi}}) = \\ &= \dot{V}_1(\boldsymbol{\chi}, \varphi(t, \boldsymbol{\chi})) \end{aligned} \quad (39)$$

由前面定义的李亚普诺夫函数, 可得: $V_0(\chi)$, $V_1(t, \chi)$, $\frac{\partial V_0(\chi)}{\partial \chi}$, $\frac{\partial V_1(t, \chi)}{\partial \chi}$ 在任何定义域 $[a, b] \times D$ 内都是连续的, 其中 $[a, b] \subset [t_0, \infty)$, $D \subset \mathbf{R}^{3(n+p+2)}$. 由此可知: $V_i(t, \chi)$, $i = 0, 1$ 在 $[t_0, \infty) \times \mathbf{R}^{3(n+p+2)}$ 上是局部 Lipschitz 的. 由前面的分析可得对于任意给定的 χ 存在一致上界时, $V_0(\chi)$ 存在一致上界. $M\dot{\xi}$, $\dot{M}\xi$, $M\dot{\xi}$ 显然也存在一致上界, 从而 $\varphi(t, \chi)$ 在 χ 存在一致上界时, 也存在一致上界. 满足了嵌套 Matrosov 定理的条件 2).

如果定义 $Y_0(\chi) = -\sum_{i=1}^n (\xi_i^T K_{di} \xi_i)$, 根据式 (35) 可知: $Y_0(\chi) \leq 0$, $\forall \chi$ 是成立的. 并且可得:

$$Y_0(\chi) = 0 \rightarrow \xi = 0 \quad (40)$$

同时定义 $Y_1(\chi, \varphi(t, \chi)) = \dot{V}_1(\chi, M\xi, \dot{M}\xi, M\dot{\xi})$, 将 $M_i \dot{\xi}_i = -C_i \xi_i + (D_i + K_{di}) \xi_i + \alpha_i$, $i = 1, 2, \dots, n$ 代入到 $Y_1(\chi, \varphi(t, \chi))$ 中, 当 $\xi = 0$ 时, 可得:

$$\begin{aligned} Y_1(\chi, \varphi(t, \chi))|_{\xi=0} &= \\ z^T B^+ M \dot{\xi}|_{\xi=0} &= \\ z^T B^+ \alpha(z) &= \\ -x^T (B \otimes I_3) B^+ (B \otimes I_3) \Phi(z) &= \\ -x^T (B \otimes I_3) \Phi(z) &= \\ -z^T \Phi(z) < 0, \quad \forall z \neq 0 \end{aligned} \quad (41)$$

综合式 (40) 和 (41), 也可以得到: $Y_0(\chi) = 0 \Rightarrow Y_1(\chi, \varphi(t, \chi)) \leq 0$, $\forall \chi$.

综上可得:

$$\begin{cases} Y_0(\chi) \leq 0, \quad \forall \chi \\ Y_0(\chi) = 0 \Rightarrow Y_1(\chi, \varphi(t, \chi)) \leq 0, \quad \forall \chi \end{cases}$$

满足了嵌套 Matrosov 定理的条件 3).

根据式 (41) 可得: $Y_1(\chi, \varphi(t, \chi))|_{\xi=0} = 0 \Rightarrow z = 0$. 结合式 (40) 可以得到下面的关系式:

$$\begin{cases} Y_0(\chi) = 0 \Rightarrow \xi = 0 \\ Y_1(\chi, \varphi(t, \chi))|_{\xi=0} = 0 \Rightarrow z = 0 \end{cases}$$

也成立. 即当 $Y_0 = 0$, $Y_1 = 0$ 同时成立时, $\chi = [z^T, \xi^T]^T = 0$ 成立. 满足了嵌套 Matrosov 定理的条件 4).

综上所述, 原点 $\chi = [z^T, \xi^T]^T$ 是全局一致渐近稳定的, 即 $[(x_i - x_j)^T, (\dot{x}_i - v_d)^T]^T = 0$ 是全局一致渐近稳定的. n 艘水面船舶实现了协调路径跟踪. $\square$

3 仿真分析验证

为了验证本文提出的协调控制方法的有效性, 进行了以下仿真实验. 假设实验中有 4 艘船舶, 且所

有的船舶都是相同的, 船舶模型采用非线性的, 其动力学模型系数的具体数值见文献 [20]. 同时设计了一艘虚拟船以领导船舶做相应的路径跟踪. 实验中假设所有船舶 (包括虚拟领航者) 之间的通信拓扑图的关联矩阵为

$$B = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

每艘船舶的初始位置分别为

$$\begin{aligned} \eta_1 &= \begin{bmatrix} 80 & 831 & -\frac{7\pi}{30} \end{bmatrix}^T \\ \eta_2 &= \begin{bmatrix} -94 & 753 & -\frac{\pi}{2} \end{bmatrix}^T \\ \eta_3 &= \begin{bmatrix} 40 & 700 & -\frac{\pi}{4} \end{bmatrix}^T \\ \eta_4 &= \begin{bmatrix} -50 & 800 & -\frac{\pi}{3} \end{bmatrix}^T \end{aligned}$$

将虚拟船的初始位置设定为: $\eta_0 = [27 \ 782 \ -\frac{\pi}{3}]^T$. 选取所有船舶的队形参考点和船舶实际位置的相对位置向量分别为 $l_0 = [0 \ 0 \ 0]^T$, $l_1 = [0 \ 100 \ 0]^T$, $l_2 = [0 \ -100 \ 0]^T$, $l_3 = [0 \ 50 \ 0]^T$, $l_4 = [0 \ -50 \ 0]^T$. 根据相应的协调作业任务, 由领航者即导引系统给出作业时的期望路径表达式为 $\eta_d(\theta) = [n_d(\theta) \ e_d(\theta) \ \psi_d(\theta)]^T$, 其中, $n_d(\theta) = \theta$, $e_d(\theta) = 1000 \sin(\frac{\theta}{600})$, $\psi_d(\theta) = \arctan(\frac{\dot{e}_d(\theta)}{\dot{n}_d(\theta)})$, 式中 $\dot{\theta} = \frac{u_d}{\sqrt{\dot{n}_d(\theta)^2 + \dot{e}_d(\theta)^2}}$, $u_d = 3 \text{ m/s}$ 为虚拟船航行的期望速度. 仿真实验时, 控制器的辅助控制输入中 $P_k(z_k) = \frac{1}{2}(a_k z_{k1}^2 + a_k z_{k2}^2 + b_k z_{k3}^2)$ ($z_k = [z_{k1} \ z_{k2} \ z_{k3}]^T$). 则可得 $\varphi_k(z_k) = [a_k z_{k1} \ a_k z_{k2} \ b_k z_{k3}]^T$. 导引系统中虚拟船舶控制器的参数选择为: $\Lambda = \text{diag}\{0.01, 0.01, 0.2\}$, $T = 10^5 \times \text{diag}\{6.5, 6.5, 6.5\}$, $\lambda = \mu = 20$. 而实际船舶的控制器参数为 $K_{di} = 10^5 \times \text{diag}\{6.5, 6.5, 1350\}$, $a_k = 3000$, $b_k = 6 \times 10^5$. 假设仿真时间为 2500 s. 具体仿真结果如图 4~图 8 所示.

图 4 为船舶按一字型队形执行协调曲线路径跟踪的平面运动曲线. 其中船舶由初始位置到完成编队的运动曲线如图 5 所示. 各船在协调作业时的艏向变化曲线如图 6 所示. 由图可知, 所有的船舶都在虚拟领航者的领导下协同执行路径跟踪任务, 并且所有船的艏向在一定时间内趋于一致. 执行协调曲线路径跟踪时各艘船舶在船体坐标系下的纵荡和

横荡速度变化曲线分别如图 7 和图 8 所示. 由图可知, 船舶在协调作业时的速度基本趋于一致. 而当作业船舶执行到曲线的拐点处, 船舶的速度未能达到一致, 但是过了拐点, 船舶纵向和横向的速度还能趋于一致. 这是因为作业船舶运动的惯性较大, 且作业时沿着曲线路径运动, 为了在拐点处还能保证期望的队形, 各船舶的速度将会发生短暂性的变化, 最终还是趋于一致的.

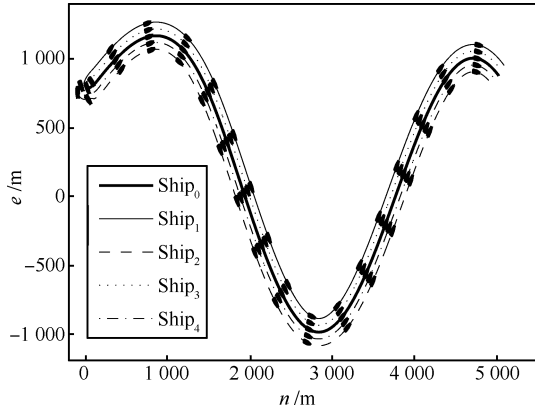


图 4 船舶的协调路径跟踪曲线

Fig. 4 Coordinated path following of the vessels

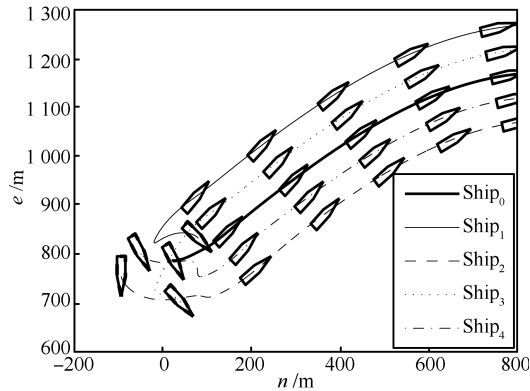


图 5 船舶实现编队过程曲线

Fig. 5 Coordinated formation of the vessels

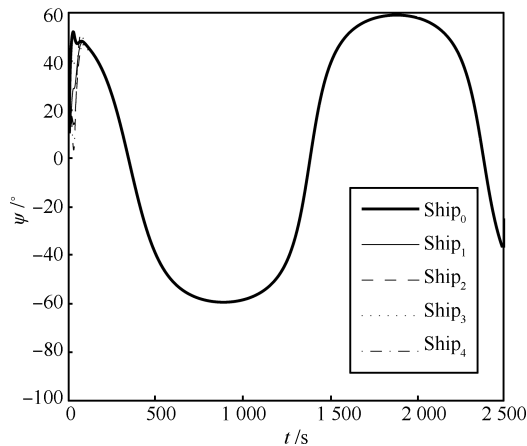


图 6 船舶的艏向变化曲线

Fig. 6 Heading change of the vessels

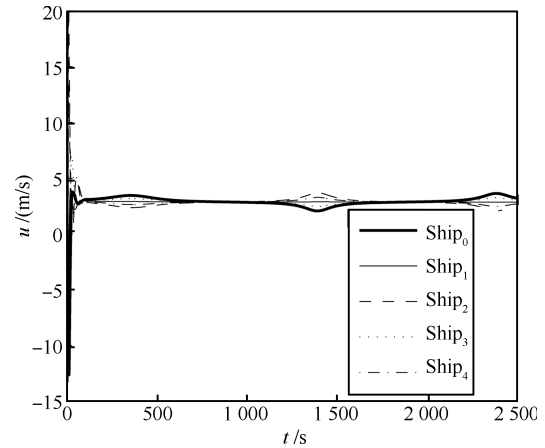


图 7 船舶的纵向速度变化曲线

Fig. 7 Surge velocity change of the vessels

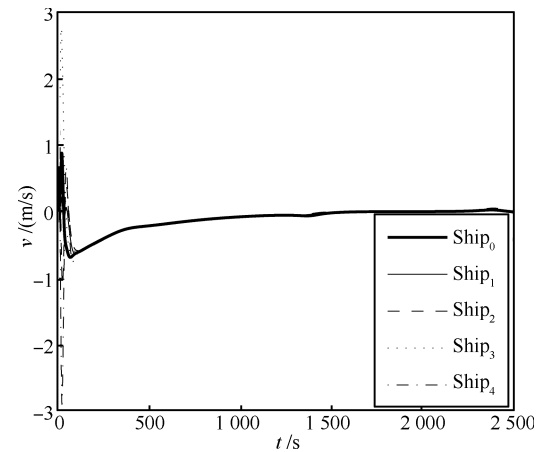


图 8 船舶的横向速度变化曲线

Fig. 8 Sway velocity change of the vessels

另外, 由于海洋环境的变化, 多艘船协调作业时, 经常会出现任务转换的可能. 例如, 在作业时存在海风的影响, 一般都希望船舶能够顶风操作. 此时为了保证船舶能够顺利作业, 其作业的路径和艏向需要变换. 而本文中的控制算法不需要重新对每艘船进行路径规划, 只需要改变虚拟领航者的期望路径和艏向, 从而改变协调作业时的期望速度信号, 以便驱动船舶沿着新的路径进行作业.

为了验证本文提出的算法应对这类情况的有效性, 假设总的仿真时间为 1500s. 在 $t = 1000$ s 时, 海况由风平浪静海况变为有较大海风的海况, 此时需要改变路径和船舶的艏向. 假设当 $t < 1000$ s 时, 取曲线路径, 艏向为沿曲线的切向方向. 即: $n_d(\theta) = \theta$, $e_d(\theta) = 1000 \sin(\frac{\theta}{600})$, $\psi_d(\theta) = \arctan(\frac{e_d(\theta)}{n_d(\theta)})$, 当 $t > 1000$ s 时, 海况发生变化, 此时取直线路径, 即 $n_d(\theta) = \theta$; $e_d(\theta)$ 为虚拟船上次作业的最终位置, 将船舶艏向都设为顶风方向. 假设来风方向为 180° , 则船舶的期望艏向为 $\psi_d(\theta) = 0$. 具体仿真结果如下.

为了直观地说明船舶路径的变化, 我们用虚拟船在大地坐标系下参考速度的改变来表示, 如图 9 所示. 该速度可以通过转换关系 $U = R(\psi_0)\mathbf{v}_r$ 得到.

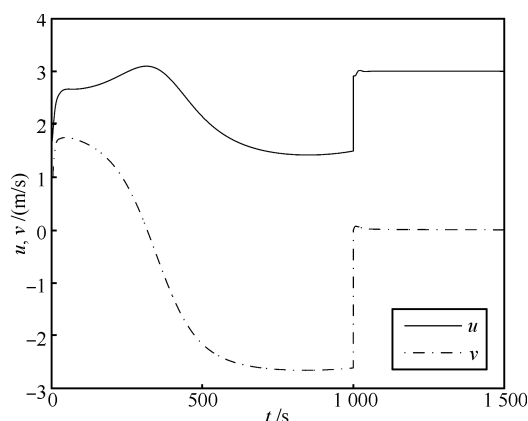


图 9 虚拟船的参考速度

Fig. 9 Reference velocities of virtual vessel

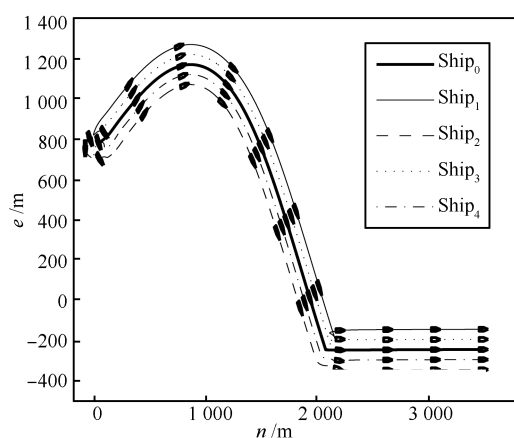


图 10 路径改变时的协调路径跟踪曲线

Fig. 10 Coordinated path following with path changing

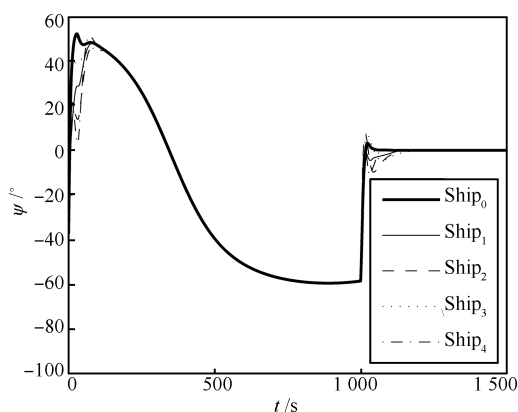


图 11 路径改变时船舶的艏向变化曲线

Fig. 11 Heading curves of vessels with path changing

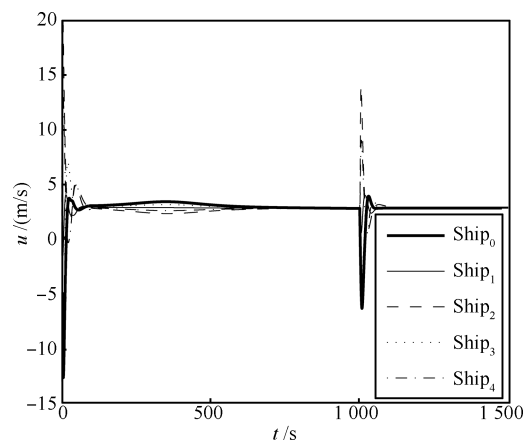


图 12 路径改变时船舶的纵向速度变化曲线

Fig. 12 Surge velocity curves of vessels with path changing

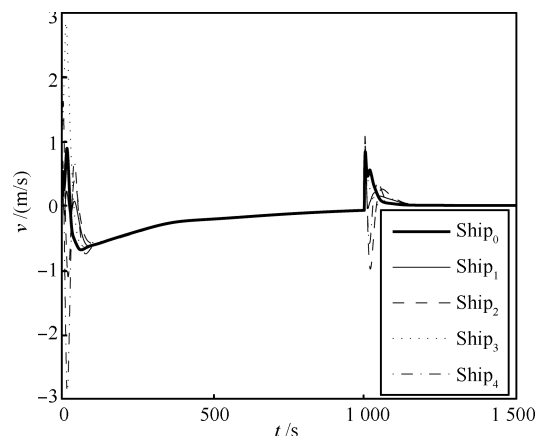


图 13 路径改变时船舶的横向速度变化曲线

Fig. 13 Sway velocity curves of vessels with path changing

在作业过程中, 路径发生改变时, 船舶执行协调路径跟踪的平面运动曲线如图 10 所示, 图 11 为船舶的艏向变化曲线. 船舶协调作业时的在船体坐标系下的纵荡和横荡速度曲线分别如图 12 和图 13 所示. 由上述仿真结果可知, 如果因某些情况改变作业时的路径, 本文提出的控制器通过变换导引系统的输入, 从而得到新任务时的期望速度信号, 驱动各船舶执行新的协调作业任务.

综上所述, 通过本文设计的协调算法, 多艘船舶可以很好地实现协调路径跟踪控制, 且控制精度较高, 协调的响应较快.

4 结论

本文针对多艘船的协调路径跟踪问题, 提出了一种基于虚拟领航者的无源协调编队控制算法, 这种新的协调控制算法可以避免之前研究成果中任务

变化或出现意外时都要对每艘船的路径进行重新规划的弊端. 同时引入虚拟领航者来设计导引系统, 让其给出协调控制器中需要的期望状态. 这样即使任务有变化或出现意外情况, 只要把虚拟船的期望路径输入更改了, 得到新的期望速度信号仍然可以驱动船舶按指定的队形协调作业. 另外本文采用无源性理论来设计协调控制器只需要相邻船舶之间的通信, 且基于能量函数构造李亚普诺夫函数, 这样对稳定的分析也提供了更好的理论支撑. 最后通过仿真验证了所提算法的有效性.

References

- Murray R M. Recent research in cooperative control of multivehicle systems. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2007, **129**(5): 571–583
- Fossen T I. *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. New York: Wiley-Sons Ltd, 2011
- Peymani E, Fossen T I. Leader-follower formation of marine craft using constraint forces and lagrange multipliers. In: *Proceedings of IEEE 51st Annual Conference on Decision and Control*. Hawaii, USA: IEEE, 2012. 2447–2452
- Almeida J, Silvestre C, Pascoal A M. Cooperative control of multiple surface vessels with discrete-time periodic communications. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2012, **22**(4): 398–419
- Kyrkjebø E, Pettersen K Y, Wøndergem M, Nijmeijer H. Output synchronization control of ship replenishment operations: theory and experiments. *Control Engineering Practice*, 2007, **15**(6): 741–755
- Arrichiello F, Chiaverini S, Fossen T I. Formation control of underactuated surface vessels using the null-space-based behavioral control. In: *Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Beijing, China: IEEE, 2006. 5942–5947
- Ihle A I F, Joffroy J, Fossen T I. Formation control of marine surface craft: a Lagrangian approach. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2006, **31**(4): 922–934
- Min Hai-Bo, Liu Yuan, Wang Shi-Cheng, Sun Fu-Chun. An overview on coordination control problem of multi-agent system. *Acta Automatica Sinica*, 2012, **38**(10): 1557–1570 (闵海波, 刘源, 王仕成, 孙富春. 多个体协调控制问题综述. *自动化学报*, 2012, **38**(10): 1557–1570)
- Mei Jie, Zhang Hai-Bo, Ma Guang-Fu. Adaptive coordinated tracking for networked Euler-Lagrange systems under a directed graph. *Acta Automatica Sinica*, 2011, **37**(5): 596–603 (梅杰, 张海博, 马广富. 有向图中网络 Euler-Lagrange 系统的自适应协调跟踪. *自动化学报*, 2011, **37**(5): 596–603)
- Arcak M. Passivity as a design tool for group coordination. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2007, **52**(8): 1380–1390
- Wang Jiu-He. *Passivity-Based Control Theory and Its Applications*. Beijing: Electronic Industry Publisher, 2010. 10–20 (王久合. 无源控制理论及其应用. 北京: 电子工业出版社, 2010. 10–20)
- Chen Gang, Yu Ming. Synchronizing control and analysis of distributed passive systems. *Acta Automatica Sinica*, 2012, **38**(5): 882–888 (陈刚, 余名. 分布式无源性系统的同步控制与分析. *自动化学报*, 2012, **38**(5): 882–888)
- Børhaug E, Pavlov A, Panteley E, Pettersen K Y. Straight line path following for formations of underactuated marine surface vessels. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2011, **19**(3): 493–506
- Ghommam J, Mnif F. Coordinated path-following control for a group of underactuated surface vessels. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, **56**(10): 3951–3963
- Do K D. Formation control of multiple elliptical agents with limited sensing ranges. *Automatica*, 2012, **48**(7): 1330–1338
- Skjetne R, Sonja M. Nonlinear formation control of marine craft. In: *Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control*. Vegas, USA: IEEE, 2002. 1699–1704
- Ihle I A F, Skjetne R, Fossen T I. Nonlinear formation control of marine craft with experimental results. In: *Proceedings of the 43rd IEEE Conference on Decision and Control*. Atlantis, Paradise Island, Bahamas: IEEE, 2004. 680–685
- Ihle I A F, Arcak M, Fossen T I. Passivity-based designs for synchronized path-following. *Automatica*, 2007, **43**(9): 1508–1518
- Wang Y, Yan W, Li J. Passivity-based formation control of autonomous underwater vehicles. *IET Control Theory & Application*, 2012, **6**(4): 518–525
- Thorvaldsen C F L, Skjetne R. Formation control of fully-actuated marine vessels using group agreement protocols. In: *Proceedings of the 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference*. Orlando, USA: IEEE, 2011. 4132–4139
- Skjetne R. The Maneuvering Problem [Ph.D. dissertation], Norwegian University of Science and Technology, Norway, 2005
- Loria A, Panteley E, Popovic D, Teel A R. A nested matrosov theorem and persistency of excitation for uniform convergence in stable nonautonomous systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2005, **50**(2): 183–198



付明玉 哈尔滨工程大学自动化学院教授. 2005 年获哈尔滨工程大学控制理论与控制工程专业博士学位. 主要研究方向为船舶运动控制, 船舶动力定位.
E-mail: fumingyu@hrbeu.edu.cn
(**FU Ming-Yu** Professor at the College of Automation, Harbin Engineering University. She received her Ph.D. degree from Harbin Engineering University in 2005. Her research interest covers ship motion control, ship dynamic positioning system.)



焦建芳 哈尔滨工程大学自动化学院博士研究生. 2010 年获得哈尔滨商业大学电子信息工程学士学位. 主要研究方向为多船协调编队控制. 本文通信作者.
E-mail: jiao-jianfang@163.com
(**JIAO Jian-Fang** Ph.D. candidate at the College of Automation, Harbin Engineering University. She received her bachelor degree from Harbin University of Commerce in 2010. Her research interest covers coordinated formation control for multiple vessels. Corresponding author of this paper.)