

文章编号: 1001-0920(2012)02-0299-05

一种船队编队控制的 backstepping 方法

丁磊, 郭戈

(大连海事大学 信息科学技术学院, 辽宁 大连 116026)

摘要: 针对多船舶之间的协同合作问题, 对船舶的编队控制进行了研究. 通过运用领航者-跟随者方法, 选择在 Cartesian 坐标系下建立新的船队编队控制模型, 基于这种模型, 利用反步技术和李亚普诺夫理论设计了一种可使船队按期望队形航行的船队编队控制器. 通过考虑领航船舶与跟随船舶的航向角误差, 保证了跟随船舶航向角的稳定性, 从而避免其在航行过程中不断振荡. 最后对所设计的控制方法的正确性及有效性进行了仿真实证.

关键词: 欠驱动船舶; 编队控制; 领航者-跟随者; 反步法

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Formation control for ship fleet based on backstepping

DING Lei, GUO Ge

(School of Information Science and Technology, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China. Correspondent: DING Lei, E-mail: dl522@163.com)

Abstract: The problem of formation control of ship fleet is studied. Under Cartesian coordinates, a model for ship formation control is established. Based on backstepping technique and Lyapunov direct method, a controller for formation control of ships fleet is designed by utilizing leader-follower approach. By using the designed control method, the ship fleet can navigate in the desired formations. Considering heading angle errors between leader and follower ships, the stability of the heading angle of follower ship is guaranteed to avoid vibrating follower ship under sail. Numerical simulations show the correctness and effectiveness of the proposed controller.

Key words: underactuated ship; formation control; leader-follower; backstepping technique

1 引言

随着通信、导航及计算机等技术在船舶运动控制领域的快速发展, 使得船舶的编队控制在军事、生产等领域都具有广泛的应用前景, 如舰队协同作战、大洋航行补给、自动牵引作业、环境监测、石油和天然气探测等. 与单个船只相比, 多船协作具有容错性和适应性等优点, 船队在航行中可以形成动态网络, 各船只之间通过分工合作迅速准确地感知船队所在区域的环境信息, 从而加快系统任务的完成, 提高工作效率. 因此, 船舶的编队控制已成为船舶运动控制研究中的热点问题之一.

近几年来, 许多学者已经对船舶的编队控制问题进行了研究^[2-8]. 到目前为止, 船舶编队控制的方法主要分为基于行为、虚拟结构和领航者-跟随者等方法. 文献[3]利用基于行为方法将船队控制任务分解为如

避碰、驶向目标和队形转换等一系列的基本行为, 通过行为的综合实现运动控制. 但是这种方法难以明确设计出能合成指定队形的局部基本行为和局部控制规划, 另外队形控制的稳定性得不到保证. [5]运用虚拟结构方法将船队看作刚体的虚拟结构, 当队形移动时, 船舶跟踪刚体上其对应的固定点即可. 该方法采用集中式实现, 要求队形按一个虚拟结构运动, 缺乏灵活性和适应性. [4]利用领航者-跟随者方法指定船队中的某一船舶作为领航者, 其他船舶作为跟随者, 将编队控制问题转化为跟随着跟踪领航者的位置和方向. 与其他方法相比, 该方法使船队队形结构易于实现和分析, 船队运动完全由领航船舶的轨迹来确定, 控制起来比较简单. 然而, 文献[4]在极坐标下所建立的模型结构比较复杂, 不易于分析与设计, 并且没有直接考虑船舶之间航向角稳定性问题, 同时在该坐标

收稿日期: 2010-09-13; 修回日期: 2010-12-03.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60974013); 霍英东教育基金项目(111066); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2009JC11, 2009QN120).

作者简介: 丁磊(1985—), 男, 博士生, 从事船舶控制研究; 郭戈(1972—), 男, 教授, 博士生导师, 从事控制系统分析与综合、工业过程控制等研究.

系下所得到的模型也可能出现奇异点问题。

综上所述, 本文借鉴文献[9]中移动机器人队形控制中的方法, 在 Cartesian 坐标系下建立新的船队控制模型, 并根据所建模型, 将船舶编队控制问题分为运动学任务和动力学任务两个方面来设计, 其中前者为了保证跟随船舶通过选择适当的速度准确地跟踪领航船舶, 后者则旨在使跟随船舶能够按期望的速度对领航船舶进行跟踪。这种新的船舶编队控制器的设计以反步技术和李亚普诺夫理论为依据, 使船队能够按照期望的队形航行。

2 船队系统建模

针对由 n 只船舶所组成的船队系统, 首先给出单只船的运动学模型和动力学模型, 然后根据领航者-跟随者方法建立船队的整体模型。为了简化分析, 对船队分别进行如下假设:

假设 1 对于整个船队而言, 跟随船舶可通过一定的传感器来测量其与领航船舶之间的相对距离和相对角度。船队之间可通过无线通信实时传递前进速度、艏摇角速度、航向角及力矩等信息, 并且不考虑实时通信中的延时及丢包等问题。

1) 单只船舶的运动学和动力学特性

根据文献[1]可知, 对于 $1 \leq i \leq n$, 第 i 只船舶的运动学和动力学特性为如下形式:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = u_i \cos \varphi_i - v_i \sin \varphi_i, \\ \dot{y}_i = u_i \sin \varphi_i + v_i \cos \varphi_i, \\ \dot{\varphi}_i = r_i, \\ \dot{u}_i = \frac{m_{2i}}{m_{1i}} v_i r_i - \frac{d_{1i}}{m_{1i}} u_i + \frac{1}{m_{1i}} \tau_{ui}, \\ \dot{v}_i = \alpha u_i r_i - \beta v_i, \\ \dot{r}_i = \frac{m_{1i} - m_{2i}}{m_{3i}} u_i v_i - \frac{d_{3i}}{m_{3i}} r_i + \frac{1}{m_{3i}} \tau_{ri}. \end{cases} \quad (1)$$

其中: (x_i, y_i) 为第 i 只船的重心位置; φ_i 为第 i 只船的航向角; u_i, v_i, r_i 分别为第 i 只船前进速度、横漂速度和艏摇角速度; m_{1i}, m_{2i}, m_{3i} 为第 i 只船舶分别在船体坐标系上 3 个坐标轴上的惯性分量, 包含船舶重量惯性和水动力附加的惯性; d_{1i}, d_{2i}, d_{3i} 为第 i 只船舶分别在船体坐标系上 3 个坐标轴上的水力阻尼分量; $\alpha = m_{1i}/m_{2i}$, $\beta = d_{2i}/m_{2i}$; τ_{ui}, τ_{ri} 分别为第 i 只船的前进推力和艏摇角力矩即船舶的两个输入量。

2) leader-follower 船队模型

首先, 引入文献[9]中的坐标建立 leader-follower 船队模型, 为简单起见, 考虑将两只船舶作为一组进行研究, 其队形结构如图 1 所示。定义 Vessel i 和 Vessel j 分别为领航船舶和跟随船舶, (x_i, y_i, φ_i) 和 (x_j, y_j, φ_j) 分别为领航船舶和跟随船舶的位置和航向; l_{ij} 和 θ_{ij} 分别为跟随船舶与领航船舶之间的相对距离和相对角度。 l_x 和 l_y 分别为船舶之间的纵向距离

和横向距离。

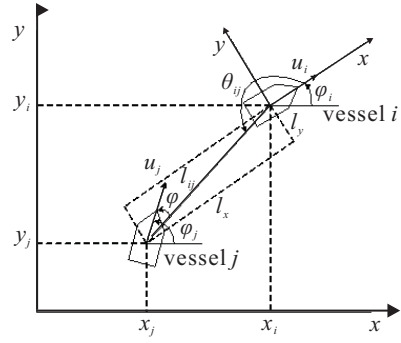


图 1 领航船舶和跟随船舶队形结构

由图 1 可知, 如果给定领航船舶的位置, 只要 l_x 和 l_y 固定, 则跟随船舶的位置是唯一的, 因此船队通过 (l_{ij}, θ_{ij}) 进行编队控制可以转化为通过 (l_x, l_y) 进行控制。领航船舶与跟随船舶之间的 x 方向距离 l_x , y 方向距离 l_y 和航向偏差分别为

$$\begin{cases} l_x = -(x_i - x_j) \cos \varphi_i - (y_i - y_j) \sin \varphi_i, \\ l_y = (x_i - x_j) \sin \varphi_i - (y_i - y_j) \cos \varphi_i, \\ e_\varphi = \varphi_i - \varphi_j. \end{cases} \quad (2)$$

对式 (2) 两边求导并将 (1) 代入可得

$$\begin{cases} \dot{l}_x = -u_i + u_j \cos e_\varphi + v_j \sin e_\varphi + l_y r_i, \\ \dot{l}_y = -v_i - u_j \sin e_\varphi + v_j \cos e_\varphi - l_x r_i, \\ \dot{e}_\varphi = r_i - r_j. \end{cases} \quad (3)$$

假设领航船舶和跟随船舶之间 x 方向期望距离 l_x^d 和 y 方向期望距离 l_y^d 分别为

$$l_x^d = l_{ij}^d \cos \theta_{ij}^d, \quad l_y^d = l_{ij}^d \sin \theta_{ij}^d,$$

其中 l_{ij}^d 和 θ_{ij}^d 分别为期望的距离和相对角度。定义 x 方向距离误差和 y 方向距离误差分别为

$$e_x = l_x - l_x^d, \quad e_y = l_y - l_y^d. \quad (4)$$

对式 (4) 两边求导可得

$$\begin{cases} \dot{e}_x = u_j \cos e_\varphi + v_j \sin e_\varphi + e_y r_i + f_1, \\ \dot{e}_y = -u_j \sin e_\varphi + v_j \cos e_\varphi - e_x r_i + f_2. \end{cases} \quad (5)$$

其中

$$f_1 = -u_i - l_x^d + l_y^d r_i, \quad f_2 = -v_i - l_y^d - l_x^d r_i.$$

综上所述, 得到基于 leader-follower 方法的船队模型为

$$\begin{cases} \dot{e}_x = u_j \cos e_\varphi + v_j \sin e_\varphi + e_y r_i + f_1, \\ \dot{e}_y = -u_j \sin e_\varphi + v_j \cos e_\varphi - e_x r_i + f_2, \\ \dot{e}_\varphi = r_i - r_j, \\ \dot{u}_j = \frac{m_{2j}}{m_{1j}} v_j r_j - \frac{d_{1j}}{m_{1j}} u_j + \frac{1}{m_{1j}} \tau_{uj}, \\ \dot{v}_j = \alpha u_j r_j - \beta v_j, \\ \dot{r}_j = \frac{m_{1j} - m_{2j}}{m_{3j}} u_j v_j - \frac{d_{3j}}{m_{3j}} r_j + \frac{1}{m_{3j}} \tau_{rj}. \end{cases} \quad (6)$$

3) 编队控制目标

基于假设 1, 根据船队模型 (6) 可将船队的编队

控制目标分为以下两个部分:

①运动学目标: 给定 x 方向期望距离 l_x^d 和 y 方向期望距离 l_y^d , 通过对跟随船舶期望的前进速度 u_j^α 及艏摇角速度 r_j^α 进行选取, 使 $l_x \rightarrow l_x^d, l_y \rightarrow l_y^d$, 即

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|l_x - l_x^d\| = \lim_{t \rightarrow \infty} \|e_x\| = 0,$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|l_y - l_y^d\| = \lim_{t \rightarrow \infty} \|e_y\| = 0.$$

②动力学目标: 通过选取适合的跟随船舶的控制输入 τ_{uj} 和 τ_{rj} , 使得跟随船舶的实际前进速度 $u_j \rightarrow u_j^\alpha$, 实际的艏摇角速度 $r_j \rightarrow r_j^\alpha$, 即

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|u_j - u_j^\alpha\| = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \|r_j - r_j^\alpha\| = 0.$$

3 控制器设计

本节将针对 2.2 节中的控制目标分别从运动学和动力学两个方面进行控制器设计.

3.1 运动学控制设计

为了得到更简便的模型以便于控制器设计, 首先引入两个坐标变换 z_1 和 z_2 , 具体形式如下:

$$z_1 = e_x \cos e_\varphi - e_y \sin e_\varphi,$$

$$z_2 = e_x \sin e_\varphi + e_y \cos e_\varphi.$$

对等式两边求导可得

$$\dot{z}_1 = u_j + f_1 \cos e_\varphi - f_2 \sin e_\varphi + z_2 r_j,$$

$$\dot{z}_2 = v_j + f_1 \sin e_\varphi + f_2 \cos e_\varphi - z_1 r_j.$$

然后, 根据变换后的系统进行控制设计.

Step 1: 镇定 (z_1, z_2) 子系统.

首先, 假设 u_j 和 v_j 为 (z_1, z_2) 子系统的输入量, u_j^α 和 v_j^α 分别为 u_j 和 v_j 的虚拟量. 定义李亚普诺夫函数 V_1 为如下形式:

$$V_1 = \frac{1}{2} z_1^2 + \frac{1}{2} z_2^2,$$

对其两边求导可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= z_1(u_j + f_1 \cos e_\varphi - f_2 \sin e_\varphi + z_2 r_j) + \\ & z_2(v_j + f_1 \sin e_\varphi + f_2 \cos e_\varphi - z_1 r_j). \end{aligned} \quad (7)$$

如果选择

$$u_j^\alpha = -k_1 z_1 - f_1 \cos e_\varphi + f_2 \sin e_\varphi,$$

$$v_j^\alpha = -k_2 z_2 - f_1 \sin e_\varphi - f_2 \cos e_\varphi,$$

则将其代入式 (7) 可得

$$\dot{V}_1 = -k_1 z_1^2 - k_2 z_2^2 \leq 0.$$

由此可知, (z_1, z_2) 子系统渐近稳定.

Step 2: 镇定 e_φ .

首先引入横向速度误差变量

$$v_e = v_j - v_j^\alpha,$$

对其两边求导, 整理可得

$$\dot{v}_e = -\beta v_j - \alpha u_j r_j + k_2(v_j + f_1 \sin e_\varphi + f_2 \cos e_\varphi -$$

$$z_1 r_j) + (f_1 \cos e_\varphi - f_2 \sin e_\varphi)(r_i - r_j) +$$

$$\dot{f}_1 \sin e_\varphi + \dot{f}_2 \cos e_\varphi. \quad (8)$$

如果选取 $k_1 = \beta/\alpha, k_2 = \beta$, 代入式 (8) 整理可得

$$\begin{aligned} \dot{v}_e &= (\alpha - 1)(f_1 \cos e_\varphi - f_2 \sin e_\varphi)r_j + (f_1 \cos e_\varphi - \\ & f_2 \sin e_\varphi)r_i + \dot{f}_1 \sin e_\varphi + \dot{f}_2 \cos e_\varphi. \end{aligned} \quad (9)$$

定义李亚普诺夫函数

$$V_2 = \frac{1}{2} v_e^2 + k_3(1 - \cos e_\varphi),$$

对其两边求导可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= v_e[(\alpha - 1)(f_1 \cos e_\varphi - f_2 \sin e_\varphi)r_j + \\ & (f_1 \cos e_\varphi - f_2 \sin e_\varphi)r_i + \dot{f}_1 \sin e_\varphi + \\ & \dot{f}_2 \cos e_\varphi] + k_3 \sin e_\varphi(r_i - r_j). \end{aligned} \quad (10)$$

假设 r_j^α 为 r_j 的虚拟量, 根据式 (10) 选 r_j^α 为

$$\begin{aligned} r_j^\alpha &= r_i + k_4 \sin e_\varphi - k_5(\alpha - 1)v_e(f_1 \cos e_\varphi - \\ & f_2 \sin e_\varphi) + \Delta. \end{aligned} \quad (11)$$

其中: k_3, k_4, k_5 为正实数;

$$\Delta = \frac{\|v_e\| [(k_4 + k_3 k_5) \|\alpha - 1\| (\|f_1\| + \|f_2\|)]}{\|\alpha - 1\| \|v_e\| (\|f_1\| + \|f_2\|) + k_3}.$$

将式 (11) 代入 (10) 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= -k_5(\alpha - 1)^2(f_1 \cos e_\varphi - f_2 \sin e_\varphi)^2 v_e^2 - \\ & k_3 k_4 \sin^2 e_\varphi - v_e[(f_1 \cos e_\varphi - f_2 \sin e_\varphi) \times \\ & (\alpha r_i + (\alpha - 1)(k_4 + k_3 k_5) \sin e_\varphi) + \\ & \dot{f}_1 \sin e_\varphi + \dot{f}_2 \cos e_\varphi] + [(\alpha - 1)v_e \times \\ & (f_1 \cos e_\varphi - f_2 \sin e_\varphi) - k_3 \sin e_\varphi] \Delta \leq \\ & -k_5(\alpha - 1)^2(f_1 \cos e_\varphi - f_2 \sin e_\varphi)^2 v_e^2 - \\ & k_3 k_4 \sin^2 e_\varphi + \|v_e\| [(\|\alpha r_i\| + (k_4 + k_3 k_5) \times \\ & \|\alpha - 1\| (\|f_1\| + \|f_2\|) + \|\dot{f}_1\| + \|\dot{f}_2\|) + \\ & \|\alpha - 1\| \|v_e\| (\|f_1\| + \|f_2\|) + k_3) \|\Delta\| \leq \\ & -k_5(\alpha - 1)^2(f_1 \cos e_\varphi - f_2 \sin e_\varphi)^2 v_e^2 - \\ & k_3 k_4 \sin^2 e_\varphi + \varepsilon, \end{aligned}$$

其中 ε 为一有界任意小正常数. 因此, 系统 (v_e, e_φ) 是渐近稳定的.

3.2 动力学控制设计

根据前面所选取的期望前进速度和艏摇角速度, 利用反步法求得相应的系统控制输入 τ_{uj} 和 τ_{rj} .

Step 1: 选取输入量 τ_{uj} .

首先, 定义前进速度误差为

$$u_e = u_j - u_j^\alpha,$$

对 u_e 求导可得

$$\dot{u}_e = \frac{m_{2j}}{m_{1j}} v_j r_j - \frac{d_{1j}}{m_{1j}} u_j + \frac{1}{m_{1j}} \tau_{uj} - \dot{u}_j^\alpha.$$

选择李亚普诺夫函数 $V_3 = \frac{1}{2} u_e^2$, 则有

$$\dot{V}_3 = u_e \left(\frac{m_{2j}}{m_{1j}} v_j r_j - \frac{d_{1j}}{m_{1j}} u_j + \frac{1}{m_{1j}} \tau_{uj} - \dot{u}_j^\alpha \right), \quad (12)$$

于是, 选择 τ_{uj} 为

$$\tau_{uj} = m_{1j} \left(-k_6 u_e - \frac{m_{2j}}{m_{1j}} v_j r_j + \frac{d_{1j}}{m_{1j}} u_j + \dot{u}_j^\alpha \right). \quad (13)$$

其中 k_6 为正常数, 将其代入式 (12) 可得

$$\dot{V}_3 = -k_6 u_e^2 \leq 0.$$

Step 2: 选取输入量 τ_{rj} .

定义艏摇角速度误差变量为

$$r_e = r_j - r_j^\alpha,$$

对 r_e 求导可得

$$\dot{r}_e = \frac{m_{1j} - m_{2j}}{m_{3j}} u_j v_j - \frac{d_{3j}}{m_{3j}} r_j + \frac{1}{m_{3j}} \tau_{rj} - \dot{r}_j^\alpha.$$

选择李亚普诺夫函数 $V_4 = \frac{1}{2} r_e^2$, 则有

$$\dot{V}_4 = r_e \left(\frac{m_{1j} - m_{2j}}{m_{3j}} u_j v_j - \frac{d_{3j}}{m_{3j}} r_j + \frac{1}{m_{3j}} \tau_{rj} - \dot{r}_j^\alpha \right). \quad (14)$$

如果选取控制输入量 τ_{rj} 为

$$\tau_{rj} = m_{3j} \left(-k_7 r_e - \frac{m_{1j} - m_{2j}}{m_{3j}} u_j v_j + \frac{d_{3j}}{m_{3j}} r_j + \dot{r}_j^\alpha \right), \quad (15)$$

其中 k_7 为正常数, 将其代入 (14) 可得

$$\dot{V}_4 = -k_7 r_e^2 \leq 0.$$

根据 3.1 节和 3.2 节, 给出本文的主要结论:

定理 1 对于由 n 只船舶组成的船队系统 (6), 指定第 i 只船舶为领航船舶, 如果假设 1 中的条件能够满足, 则选择适合的 k_i ($1 \leq i \leq 7$), 通过式 (13) 和 (15) 所给定控制输入 τ_{uj} 和 τ_{rj} 可使船队按照期望的队形航行, 即船队之间能够保持期望的距离和相对的角度.

4 仿真实例

本节根据上一节中所设计的控制器进行仿真实验, 以由 3 艘船舶所组成的船队为例, 仿真采用文献 [10] 中的船舶参数: $m_{11} = 120 \times 10^3 \text{ kg}$, $m_{22} = 217.9 \times 10^3 \text{ kg}$, $m_{33} = 636 \times 10^5 \text{ kg}$, $d_{11} = 215 \times 10^2 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$, $d_{22} = 117 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$, $d_{33} = 802 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$.

首先假设船队中每只船舶的航向角相同, 并给定跟随船舶与领航船舶间的期望距离和角度分别为 $l_{12}^d = 5 \text{ m}$, $\varphi_{12}^d = \pi/2$, $l_{13}^d = 5 \text{ m}$, $\varphi_{13}^d = -\pi/2$. 接下来, 根据船队的初始位置不同分两种情况进行仿真.

1) 初始队形为理想情况

给定船队的初始位置分别为: $[x_1(0), y_1(0)] = [0, 0]$, $[x_2(0), y_2(0)] = [0, 5]$, $[x_3(0), y_3(0)] = [0, -5]$. 领航船舶的线速度取为 $u_1 = 1 \text{ m/s}$, 而角速度分为 3 段: 起

初 30 s 取 $r_1 = 0.1 \text{ rad/s}$; 中间 50 s 取 $r_1 = 0 \text{ rad/s}$; 最后 20 s 内 $r_1 = 0.05 \text{ rad/s}$. 这种选择意味着船队在前 20 s 进行曲线运动, 在接下来的 50 s 内作匀速直线运动, 最后 30 s 按曲线轨迹航行.

图 2 和图 3 给出了船队整体的运动轨迹及航向角度误差 e_φ 的曲线图. 值得注意的是, 从图 3 所示的航向角度误差曲线 e_φ 可知, 当领航船舶直线运动时, 航向角误差很快达到零; 当领航船舶作曲线运动时, 跟随船舶不能实时跟踪领航船舶的航向, 但可与领航船舶之间航向角误差保持某一较小稳态值, 从而保证跟随船舶航行的稳定性.

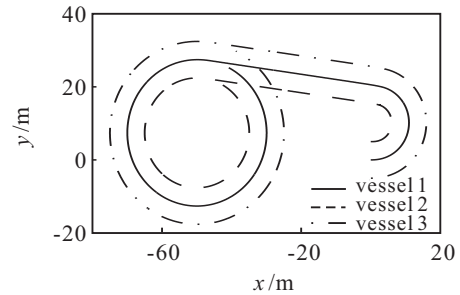


图 2 船队航行轨迹

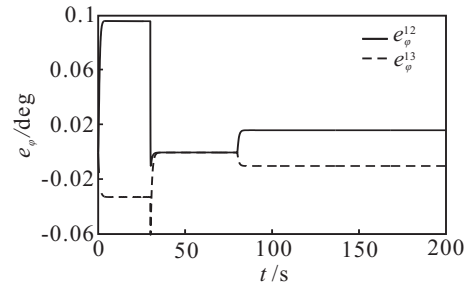


图 3 领航船舶与跟随船舶之间航向角误差

2) 初始队形不规则情况

给定船队的初始位置为 $[x_1(0), y_1(0)] = [0, 0]$, $[x_2(0), y_2(0)] = [-10, 10]$, $[x_3(0), y_3(0)] = [-10, -10]$. 领航船舶的线速度为 $u_1 = 1 \text{ m/s}$, 角速度仍然分 3 段: 前 40 s 为 $r_1 = 0 \text{ rad/s}$; 随后 20 s 为 $r_1 = 0.1 \text{ rad/s}$; 最后 40 s 为 $r_1 = 0 \text{ rad/s}$. 即船队在前 40 s 进行直线运动, 然后进行 20 s 的曲线运动, 最后按直线轨迹航行 40 s.

图 4 和图 5 给出了船队在初始队形不规则情况下的运动轨迹和船舶之间的航向误差变化曲线. 当船

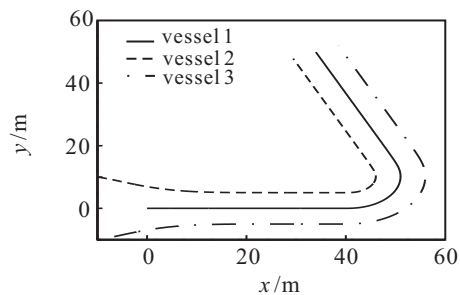


图 4 船队航行轨迹

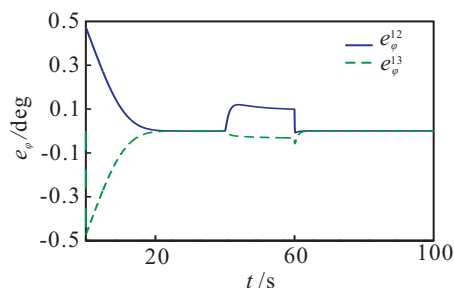


图5 领航船舶与跟随船舶之间航向角误差

队的初始位置没有达到期望位置时,所设计的控制器通过调节前进速度和角速度的大小来调整每只船舶的位置,最终使船队达到期望的队形。

讨论:从前面所给出的两组仿真可知,所设计的船舶编队控制器不仅可以使船队在航行中保持期望的队形,并且还可以进行队形之间的转换。

5 结 论

本文利用领航者-跟随者方法,建立了新的船舶编队控制模型,并在此基础上采用反步技术和李亚普诺夫方法设计出了一种新的船舶编队控制器。仿真实验表明,所设计的编队控制器能使船队按照设定的队形航行,实现了预期的控制目标。

本文的研究中没有考虑外部扰动对船队系统的影响及船舶之间的通信受限问题,该问题将是今后深入研究的方向。

参考文献(References)

- [1] Fossen T I. Guidance and control of ocean vehicles[J]. Chichester: John Wiley and Sons Ltd. 1994.
- [2] Meng Ji, Magnus Egerstedt. Distributed coordination control of multi-agent systems while preserving connectedness[J]. IEEE Trans on Robotics, 2007, 23(4): 693-703.

- [3] Filippo Arrichiello, Stefano Chiaverini, Thor I Fossen. Formation control of underactuated surface vessels using the null-space-based behavioral control[C]. Proc IEEE/RSJ Int Conf on Intelligent Robots and Systems. Beijing, 2006: 5942-5947.
- [4] Farbod Fahimi. Sliding-mode formation control for underactuated surface vessels[J]. IEEE Trans on Robotics, 2007, 23(3): 617-622.
- [5] Ghommam J, Mnif F, Poisson G, et al. Nonlinear formation control of a group of underactuated ships[C]. OCEANS 2007-Europe. Aberdeen, 2007: 1-8.
- [6] Ivar-Andre F Ihle, Jerome Jouffroy, Thor I Fossen. Formation control of marine surface craft: A lagrangian approach[J]. IEEE J of Oceanic Engineering, 2006, 31(4): 922-934.
- [7] Even Borhaug, Alexey Pavlov, Kristin Y Pettersen. Cross-track formation control of underactuated surface vessels[C]. Proc of 45th IEEE Conf on Decision and Control. San Diego, 2006: 5955-5961.
- [8] Ivar-Andre F Ihlel, Jerome Jouffroy, Thor I Fossen. Formation control of marine surface craft using lagrange multipliers[C]. Proc of IEEE Conf on Decision and Control, and the European Control Conf 2005. Seville, 2005: 572-578.
- [9] Xiaohai Li, Jizhong Xiao, Jindong Tan. Modeling and controller design for multiple mobile robots formation control[C]. Proc of IEEE Int Conf on Robotics and Biomimetics. Shenyang, 2004: 838-843.
- [10] Do K D, Jiang Z P, Pan J. Underactuated ship global tracking under relaxed conditions[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2002, 47: 1529-1536.

(上接第298页)

- [4] 李祖枢,涂亚庆. 仿人智能控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
(Li Z S, Tu Y Q. Human-simulated intelligent control[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2003.)
- [5] 费祥俊. 浆体的物理特性与管道输送流速[J]. 管道技术与设备, 2000, 12(1): 1-4.
(Fei X J. The physical property of slurry and its velocity of pipeline transportation[J]. Pipeline Technique and

Equipment, 2000, 12(1): 1-4.)

- [6] Kokpinar M A, Gogus M. Critical flow velocity in slurry transporting horizontal pipelines[J]. J of Hydraulic Engineering, 2001, 127(9): 763-771.
- [7] 岳伟,郭戈. 自主车队的非线性建模与控制[J]. 控制与决策, 2009, 24(7): 996-1000.
(Yue W, Guo G. Nonlinear modeling and control of autonomous platoon[J]. Control and Decision. 2009, 24(7): 996-1000.)