

基于输入输出线性化的船舶全局直线航迹控制

周 岗, 姚琼荟, 陈永冰, 周永余

(海军工程大学 电气与信息工程学院, 湖北 武汉 430033)

摘要: 针对水面船舶直线航迹控制系统的非线性数学模型, 基于输入输出线性化技术, 给出了一类重定义输出变量和采用该输出变量的状态反馈控制律, 并得到了保证系统全局渐近稳定的充分条件. 数值仿真和模拟试验结果表明, 所提出的充分条件能够保证船舶航迹控制全局渐近稳定, 设计的控制律具有比较理想的控制效果.

关键词: 船舶航迹控制; 非线性系统; 输入输出线性化; 重定义输出变量; Lyapunov 函数

中图分类号: TP273, U661.33 **文献标识码:** A

Global straight-line tracking control of ships based on input-output linearization

ZHOU Gang, YAO Qiong-hui, CHEN Yong-bing, ZHOU Yong-yu

(College of Electrical and Information Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan Hubei 430033, China)

Abstract: Based on the input-output linearization technique, a class of re-defined output variables and a state feedback control law are presented for ship's straight-line tracking control system. Meanwhile, the sufficient conditions of global asymptotic stability are given in this paper. The results of numerical simulation and experiment on a simulator show the validity of the sufficient conditions. The proposed controller exhibits relatively satisfactory performance.

Key words: ship's tracking control; nonlinear system; input-output linearization; redefinition output variable; Lyapunov function

1 引言 (Introduction)

自动舵是船舶操纵系统中不可缺少的重要设备, 随着对航行安全及营运需求的增长, 人们对自动舵的要求也日益提高. 为节省时间、缩短距离和降低成本, 单纯的航向控制已经不能满足要求, 因此有必要对船舶航迹控制进行研究. 但是, 由于船舶运动呈现大惯性、长时滞、非线性等特点, 又易受模型参数摄动及风浪流等外界干扰的影响, 使得进行船舶航迹控制非常困难. 因此, 进行船舶航迹控制的研究在理论上和实践上都具有极其重要的意义, 其已经成为当今船舶运动控制研究中的一个热点.

近年来, 文献 [1~10] 应用不同的控制理论对船舶航迹控制进行了详细的研究提出了不同的控制律, 取得了一定成果, 但也存在一些不足. 其中, 文献 [10] 指出了文献 [4~6] 中的方法都有一个共同的局限, 即要求船舶艏摇角速度不能为零, 因而它们只能控制船舶在设定参考航迹的某一邻域内, 不能进行直线航迹跟踪.

文献 [10] 针对文献 [4~6] 的局限和船舶运动中

存在的非线性特点, 基于输入输出线性化技术, 给出了一种基于线性组合的重定义输出变量 $z = \phi + ky$, 并据此给出了一种可以保证重定义变量中各组合元素收敛性的状态反馈控制律. 然而本文的研究表明其给出的控制律存在以下不足:

- 1) 由该控制律构成的航迹闭环系统具有多个平衡点;
- 2) 控制律的参数与被控对象的初值有关.

因此该控制律不能保证船舶航迹控制全局渐近稳定, 所以不利于在工程实践中的应用. 产生上述问题的原因是文 [10] 采用了不恰当的重定义输出变量.

为了便于寻找合适的重定义输出变量, 本文给出了一类更一般的重定义输出变量 $z = \phi + f(y)$, 并且利用 Lyapunov 直接法进行稳定性分析, 从而得到了保证系统全局渐近稳定的充分条件:

- 1) 重定义输出变量 z 全局渐近收敛于零;
- 2) 当 $y \neq 0$ 时, $\sin(f(y))y > 0$;
- 3) 当 $|y| \rightarrow \infty$ 时, $\int_0^y \sin(f(y))dy \rightarrow \infty$.

显然,文献[10]给出的重定义输出变量 $z = \phi + ky$ 中的 ky 不满足上述条件.

本文的数值仿真和模拟实验研究表明,该充分条件能够保证船舶航迹控制全局渐近稳定.

2 输入-输出线性化(Input-output linearization)

考察以下SISO非线性系统

$$\begin{cases} \dot{\xi} = f(\xi) + g(\xi)u, \\ z = h(\xi). \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\xi \in \Omega \subset \mathbb{R}^n$, f, g 为 \mathbb{R}^n 上的矢量场, h 为光滑非线性函数, z 为系统输出. 所谓输入输出线性化,就是要获得输入输出之间的一个线性微分关系.

得到线性输入输出关系的基本方法就是简单地对输出函数 z 进行微分,以便得到与输入的直接关系

$$\dot{z} = \nabla h(f + gu) = L_f h(\xi) + L_g h(\xi)u. \quad (2)$$

在区域 Ω 内,对于所有的 ξ ,如果李导数 $L_g h = 0$,可以对 \dot{z} 继续进行微分,直至 $L_g L_f^{R-1} h(\xi) \neq 0$,然后通过状态反馈控制律

$$u = \frac{1}{L_g L_f^{R-1} h} (-L_f^R h + v). \quad (3)$$

可得到输入 v 到输出 z 之间的高阶线性系统

$$z^{(n)} = v. \quad (4)$$

为了使输入 u 出现,需要对 z 进行微分的次数 R 称为系统的相对阶.

3 船舶航迹控制系统数学模型(Mathematical model of ship's tracking control system)

图1为船舶航迹控制示意图,其中 x, y —船舶重心相对于固定坐标系 XOY 的坐标, ϕ —航向角, U —船舶前进速度.

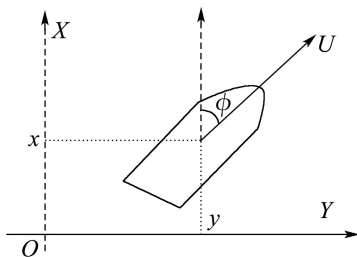


图1 船舶航迹控制坐标图

Fig. 1 Coordinate system for track control

假定设定的直线航迹与 X 轴(真北)重合,则艏偏角就等于航向角 ϕ . 文献[10]给出了船舶直线航迹控制的非线性数学模型

$$\dot{y} = U \sin \phi, \quad \dot{\phi} = r, \quad \dot{r} = -\frac{1}{T}r - \frac{\alpha}{T}r^3 + \frac{K}{T}\delta. \quad (5)$$

其中: r 为艏摇角速度, δ 为输入舵角, T, K, α 为船

操纵性能参数. 由图1可看出,船舶直线航迹控制的目标就是在全局范围内保证横偏位移 y 、艏偏角 ϕ 和艏摇角速度 r 都趋近于零.

4 控制系统的设计(Design of control system)

欲使系统式(5)具有与式(1)相同的形式,须构造一个输出函数. 为此,重定义输出变量

$$z = \phi + f(y). \quad (6)$$

式中: $f(y)$ —关于横偏位移 y 的连续可导函数.

显然,式(6)和式(5)的组合系统具有系统式(1)的形式,于是可以采用输入输出线性化方法进行控制器的设计.

首先确定以下几个中间变量:

设 $s_1 = f(y)$, 沿式(5)的轨迹对 s_1 求时间导数有

$$s_2 = \dot{s}_1 = f'(y)U \sin \phi. \quad (7)$$

进一步沿式(5)的轨迹对 s_2 求时间导数有

$$s_3 = \dot{s}_2 = f''(y)(U \sin \phi)^2 + f'(y)Ur \cos \phi. \quad (8)$$

为了得到线性输入输出关系,对式(6)沿式(5)的轨迹求时间导数可得

$$\dot{z} = r + s_2. \quad (9)$$

为使输入 δ 出现,继续对 \dot{z} 进行微分

$$\ddot{z} = -\frac{1}{T}r - \frac{\alpha}{T}r^3 + \frac{K}{T}\delta + s_3. \quad (10)$$

此时, $L_f^2 h = -\frac{1}{T}r - \frac{\alpha}{T}r^3 + s_3$, $L_g L_f^{2-1} h = \frac{K}{T} \neq 0$, 输入 δ 被导出,由此可知,系统的相对阶 R 为2. 由式(3)可得反馈控制律

$$\delta = \frac{1}{L_g L_f^{2-1} h} (-L_f^2 h + v) = \frac{T}{K} \left(\frac{1}{T}r + \frac{\alpha}{T}r^3 - s_3 + v \right). \quad (11)$$

代入式(10)可得二阶线性微分方程

$$\ddot{z} = v. \quad (12)$$

观察上式,如果取

$$v = -k_1 z - k_2 \dot{z} \quad (13)$$

代入式(12),可得到闭环系统

$$\ddot{z} + k_2 \dot{z} + k_1 z = 0. \quad (14)$$

式中: k_1, k_2 —大于零的实数,由设计者选定.

将式(13)代入式(11),可得控制律为

$$\delta = \frac{T}{K} \left(-k_1 z - k_2 \dot{z} + \frac{1}{T}r - s_3 + \frac{\alpha}{T}r^3 \right). \quad (15)$$

式(15)即为所求航迹控制律.

5 稳定性分析(Stability analysis)

输入输出线性化控制方法的实质是一种对控制问题进行降维处理的控制策略,从其几何意义上看

该控制策略首先在整个状态空间中预设一条过原点的曲线(也可能是一个过原点曲面或包括原点的微分流形, 以下仅讨论过原点的曲线), 这样的曲线具有一个重要的特点, 即位于该曲线上的状态点会自动的收敛到原点. 此时控制器的作用不再是控制系统收敛到零平衡点, 而是强迫系统的所有状态点当 $t \rightarrow \infty$ 时, 稳定到预设的曲线上, 进而自动的沿着该预设的曲线收敛到零平衡点. 可见输入输出线性化控制方法的控制目的不再以收敛到状态空间的原点为控制目的, 而是以收敛到状态空间中的某条特定的曲线为控制目的, 从而实现了对控制问题的降维处理.

以上阐述表明, 为保证输入输出线性化方法能够得到全局渐近稳定的结论, 须解决如下 3 个问题:

1) 设计的控制器能否保证状态空间中的所有点收敛到预设的曲线上. 输入输出线性化设计方法应用微分几何精确线性化方法和线性控制理论, 能够保证状态空间中的所有点当 $t \rightarrow \infty$ 时, 收敛到预设的曲线上;

2) 在预设的曲线上的所有点能否收敛到零平衡点. 输入输出线性化的设计方法不能直接解决这个问题, 必须根据稳定性理论严格证明;

3) 状态空间中的所有点是否均能够稳定到预设的曲线并沿着该曲线收敛到零平衡点. 前面两个问题成立并不能直接导致第 3 个问题必然成立, 本文在后面的论述中给出了反例, 为了解决此问题也必须根据稳定性理论严格证明.

针对本文的航迹控制问题, 这条预设的曲线就是 $z = 0$ 和 $\dot{z} = 0$ 所描述的曲线, 即 $\phi = -f(y)$ 和 $r = -s_2 = -f'(y)U \sin \phi$ 所描述的曲线.

下面将按上述 3 个问题对船舶航迹控制系统的稳定性进行分析.

针对问题 1), 提出定理 1.

定理 1 针对式 (5) 和式 (6) 构成的组合系统, 控制律 (15) 可以使所得闭环系统 (14) 全局渐近稳定, 即状态空间中的所有点全局渐近收敛于曲线 $z = 0$ 和 $\dot{z} = 0$.

证 由线性系统理论可知, 式 (14) 中系数 k_1, k_2 大于零是该系统全局渐近稳定的充分必要条件, 所以闭环系统 (14) 是全局渐近稳定 (GAS) 的, 定理 1 得证.

针对问题 2), 提出定理 2.

定理 2 针对式 (5) 和式 (6) 构成的组合系统, 当控制律式 (15) 使得 z 全局渐近收敛于零时, 若函数 $f(y)$ 满足条件, 当 $y \neq 0$ 时, $\sin(f(y))y > 0$, 可以保证 z 和 \dot{z} 中组合元素 y, ϕ 和 r 的收敛性, 即在曲线上的所有状态点收敛到零平衡点.

证 由式 (6) 可以得

$$\phi = z - f(y). \quad (16)$$

代入式 (5) 中的第一个方程, 得

$$\dot{y} = U \sin(z - f(y)). \quad (17)$$

取 Lyapunov 预选函数 $V = \frac{1}{2}y^2$, 沿式 (17) 的轨迹对 V 求时间导数

$$\dot{V} = y\dot{y} = U \sin(z - f(y))y. \quad (18)$$

由定理 1, 当控制律 (15) 使 $z = 0$ 时, 将 $z = 0$ 代入式 (18) 得

$$\dot{V} = -U \sin(f(y))y. \quad (19)$$

根据定理 2 中的条件可得, $\dot{V} < 0$.

由 Lyapunov 稳定性理论可知, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, $y \rightarrow 0$.

又因为当 $z = 0$ 和 $\dot{z} = 0$ 时, 可直接得到 $\phi = -f(y)$ 和 $r = -s_2 = -f'(y)U \sin \phi$, 所以当 $y \rightarrow 0$ 时, $\phi \rightarrow -f(0)$, 由定理 2 的条件可知 $f(0) = 0$, 所以 $\phi \rightarrow 0$. 再由 $r = -s_2 = -f'(y)U \sin \phi$ 可知, $r \rightarrow 0$.

所以当 $t \rightarrow \infty$ 时, 曲线上的所有状态点均收敛到零平衡点, 定理 2 得证.

至此问题 1、问题 2 得到了解决, 但是定理 1 和定理 2 并不能保证状态 y, ϕ 和 r 全局趋近于零, 仍然只能得到局部渐近稳定 (LAS) 的结论.

例 函数 $f(y) = \frac{ky}{(1+k^2y^2)^2}$ 符合定理 2 给出的条件, 仿真表明闭环系统不能全局渐近稳定(限于篇幅, 对采用此函数不能实现全局渐近稳定的理论分析从略).

可见定理 1、定理 2 不能保证船舶航迹控制系统全局渐近稳定, 为此进一步提出定理 3.

定理 3 针对式 (5) 和式 (6) 构成的组合系统, 若函数 $f(y)$ 在定理 2 的基础上进一步满足条件, 当 $|y| \rightarrow \infty$ 时, $\int_0^y \sin(f(y))dy \rightarrow \infty$, 则控制律 (15) 与系统 (5) 构成的闭环系统的零平衡状态是全局渐近稳定的.

证 将式 (15) 代入式 (5) 可得

$$\begin{cases} \dot{y} = U \sin \phi, \\ \dot{\phi} = r, \\ \dot{r} = -k_1 z - k_2 \dot{z} - s_3. \end{cases} \quad (20)$$

令 $\xi_1 = z, \xi_2 = \dot{z}$, 由式 (6) 和式 (9) 可得 $\phi = \xi_1 - f(y), r = \xi_2 - s_2$, 代入式 (20) 则有

$$\begin{cases} \dot{y} = U \sin(\xi_1 - f(y)), \\ \dot{\xi}_1 - f'(y) = \xi_2 - s_2, \\ \dot{\xi}_2 - \dot{s}_2 = -k_1 \xi_1 - k_2 \xi_2 - s_3. \end{cases} \quad (21)$$

由式(7)(8)可知 $s_2 = \dot{f}(y)$, $s_3 = \dot{s}_2$, 代入式(21), 可得

$$\begin{cases} \dot{y} = U \sin(-f(y) + \xi_1), \\ \dot{\xi}_1 = \xi_2, \\ \dot{\xi}_2 = -k_1 \xi_1 - k_2 \xi_2. \end{cases} \quad (22)$$

为了方便寻取Lyapunov函数进行稳定性分析, 可应用中值定理对式(22)进行变换, 由中值定理可知, 必存在 $\theta \in [-f(y), -f(y) + \xi_1]$ 使得下式成立

$$\begin{aligned} U \sin(\xi_1 - f(y)) &= U \sin(-f(y)) + U \cos \theta \cdot \xi_1 = \\ &= -U \sin(f(y)) + U \cos \theta \cdot \xi_1. \end{aligned} \quad (23)$$

由此可将式(22)进一步写为如下形式

$$\begin{cases} \dot{y} = -U \sin(f(y)) + U \cos \theta \cdot \xi_1, \\ \dot{\xi}_1 = \xi_2, \\ \dot{\xi}_2 = -k_1 \xi_1 - k_2 \xi_2. \end{cases} \quad (24)$$

取平方型加积分型的Lyapunov预选函数

$$\begin{aligned} V &= \int_0^y \sin(f(y)) dy + \frac{U}{2k_2 k_1} (k_2 \xi_1 + \xi_2)^2 + \\ &= \frac{U}{k_2} \xi_1^2 + \frac{U}{2k_2 k_1} \xi_2^2. \end{aligned}$$

沿式(24)的轨迹对 V 求时间导数, 有

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -U \sin^2(f(y)) + U \sin(f(y)) \cos \theta \cdot \xi_1 - \\ &= U \xi_1^2 - \frac{U}{k_1} \xi_2^2 \leq \\ &= -U \sin^2(f(y)) + \frac{U(\sin^2(f(y)) + \cos^2 \theta \cdot \xi_1^2)}{2} - \\ &= U \xi_1^2 - \frac{U}{k_1} \xi_2^2 = \\ &= -\frac{U \sin^2(f(y))}{2} - U \left(1 - \frac{\cos^2 \theta}{2}\right) \xi_1^2 - \frac{U}{k_1} \xi_2^2. \end{aligned}$$

显然, 由于 $U > 0$, $k_1 > 0$, $k_2 > 0$, 同时由定理2的条件可知 $\int_0^y \sin(f(y)) dy > 0$, 所以 $V > 0$ 即 V 为正定. 同样由定理2的条件可知, 除了点 $(y = 0, \xi_1 = 0, \xi_2 = 0)$ 外, 均有 $\dot{V} < 0$, 所以 \dot{V} 负定.

设 $\mathbf{x} = [y \ \xi_1 \ \xi_2]^T$, 如果函数 $f(y)$ 在定理2的基础上进一步满足条件:

$$|y| \rightarrow \infty, \int_0^y \sin(f(y)) dy \rightarrow \infty.$$

则显然有 $V \rightarrow \infty$, 当 $\|\mathbf{x}\| \rightarrow \infty$.

根据Lyapunov稳定性理论可断言, 式(24)描述的非线性闭环系统的零平衡状态是全局渐近稳定(GAS)的.

将 $y = 0$, $\xi_1 = 0$, $\xi_2 = 0$, 即 $y = 0$, $z = 0$, $\dot{z} = 0$ 代入式(6)和式(9), 即代入方程

$$\begin{cases} \dot{z} = \phi + f(y), \\ \dot{z} = r + f'(y)U \sin \phi. \end{cases}$$

解方程得到 $y = 0$, $\phi = 0$, $r = 0$, 所以如果重定义输出变量 $z = \phi + f(y)$ 满足引言中给出的充分条件, 则式(5)描述的船舶航迹控制非线性系统的原点平衡状态是全局渐近稳定(GAS)的. 定理3得证.

注 满足充分条件的函数 $f(y)$ 有无数个, 这里仅给出两个满足该条件的函数:

$$f(y) = \arctan(ky), \quad f(y) = \frac{\pi ky}{2\sqrt{1+k^2y^2}}.$$

式中: k —大于零的实数, 由设计者选定.

6 数字仿真(Numerical simulation)

以文[10]中实习船为例进行航迹控制设计. 船长为126 m, 船宽为20.8 m, 满载吃水为8.0 m, 方形系数为0.681, 船速为7.7 m/s. 通过计算得 $K = 0.478$, $T = 216$, 取 $\alpha = 30$; 各设计参数为 $k_1 = 0.0082$, $k_2 = 0.15$, $f(y) = \arctan(0.0017y)$, 代入式(15)得到控制律为

$$s_2 = \frac{0.0131 \sin \phi}{1 + (0.0017y)^2},$$

$$s_3 = -0.0034y \cdot s_2 + \frac{0.0131r \cos \phi}{1 + (0.0017y)^2},$$

$$\delta = -3.7054(\phi + \arctan(0.0017y)) - 65.6904r - 67.7824s_2 - 451.8828s_3 + 62.761r^3.$$

为了便于比较, 这里给出文献[10]中的控制律

$$\begin{aligned} \delta &= -0.0038y - 0.9941\phi - 1.9833 \sin \phi - \\ &= (65.6903 + 13.2221 \cos \phi)r + 62.761r^3. \end{aligned}$$

显然, 该控制律与式(5)构成的闭环系统的平衡点为 $y = -\frac{0.9941}{0.0038}(2k+1)\pi$, $\phi = (2k+1)\pi$, $r = 0$, 其平衡点不唯一是零平衡点.

以下称本文的控制律为控制律1, 文[10]的控制律为控制律2. 取初值 $y_0 = 100$ m, $\phi_0 = 10^\circ$, 仿真结果如图2所示. 取初值 $y_0 = 3000$ m, $\phi_0 = 160^\circ$, 仿真结果如图3所示. 图2表明, 初始偏离较小, 控制律1和控制律2的控制性能相似. 图3表明, 当初始偏离较大, 控制律1能够使横偏位移 y 和艏偏角 ϕ 收敛到零, 而控制律2则不能使 y 和 ϕ 收敛到零.

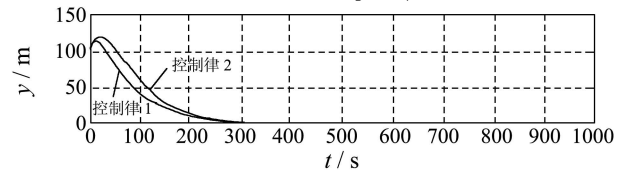
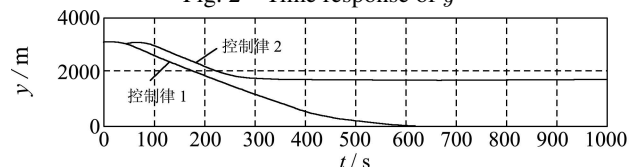


图2 横偏位移历时曲线

Fig. 2 Time response of y



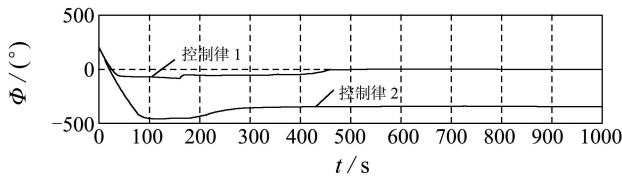


图 3 船舶横偏位移和船偏角历时曲线

Fig. 3 Time response of y and ϕ

7 模拟试验(Experiment on simulator)

为进一步验证该充分条件的正确性,进行了船舶航迹控制的模拟试验. 模拟试验系统中所有信号与实船一致.

图 4 为采用控制律 1 得到的船舶运动轨迹. 模拟条件: 航速 18 n/h、初始航向 $\phi_0 = 195^\circ$, 初始经纬度(110°36'E, 20°37'N). 如图 5 所示在大的初始偏离条件下, 船舶首先迅速的接近 W027 至 W021 航线, 然后沿着预定的航线 W021 至 W024 至 W025 至 W026 航行.

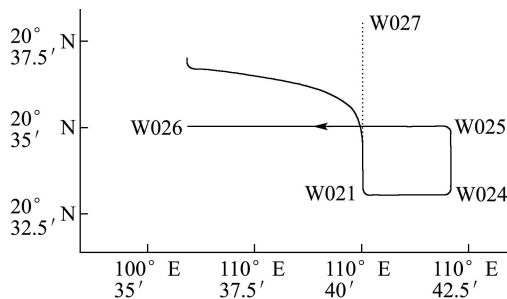


图 4 采用控制律 1 的船舶运动轨迹

Fig. 4 Ship path under control law 1

图 5 为采用控制律 2 得到的船舶运动轨迹, 模拟条件: 初始航向 $\phi_0 = 180.7^\circ$, 其他模拟条件同图 4. 如图 5 所示, 船舶不能跟踪设定航线.

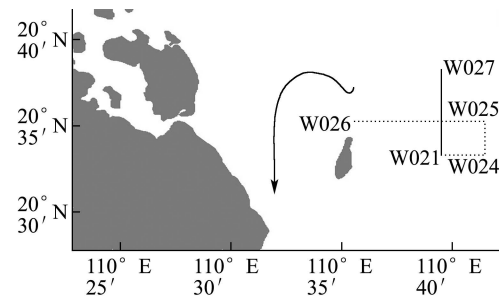


图 5 采用控制律 2 的船舶运动轨迹

Fig. 5 Ship path under control law 2

模拟试验表明, 控制律 1 可以保证船舶航迹控制全局渐近稳定, 而控制律 2 不能保证 y, ϕ 和 r 全局渐近收敛到零. 模拟试验进一步说明了该充分条件的正确性.

8 结论(Conclusion)

本文针对船舶直线航迹跟踪系统的非线性数学模型, 给出了一类重定义输出变量和基于该输出变量的状态反馈控制律, 并得到了保证系统全局渐近稳定的充分条件.

计算机仿真和模拟试验的结果表明, 所提出的充分条件是正确的. 另外由于该条件易于达到, 所以文中的结论对工程实践具有明显的指导意义和理论参考价值.

本文所建模型中没有考虑具有参数和外界扰动不确定项的情况, 同时得到的控制律仍然较为复杂, 因此探索更简化的控制律和进行充分的实船海上试验将是进一步的研究方向.

参考文献(References):

- [1] HOLZHUETER T, SCHULTZE R. Operating experience with a high precision track controller for commercial ships[J]. *Control Eng Practice*, 1996, 4(3): 343 – 350.
- [2] FOSSEN T I. *Recent Developments in Ship Control Systems Design*[M]. London: World Superyacht Review, Sterling Publications Limited, 2000: 115 – 116.
- [3] GOPALSWAMY S, HEDRICK J K. Tracking nonlinear non-minimum phase systems using sliding mode[J]. *Int J Control*, 1993, 57(5): 1141 – 1158.
- [4] REYHANOGLU M. Exponential stabilization of an underactuated autonomous surface vessel[J]. *Automatica*, 1997, 33(12): 2249 – 2254.
- [5] GODHHAVN J M, FOSSEN T I, BERGE S P. Nonlinear and adaptive backstepping designs for tracking control of ships[J]. *Int J of Adaptive Control Signal Processing*, 1998, 12(8): 649 – 670.
- [6] PETTERSEN K Y, NIJMEIJER H. Underactuated ship tracking control: theory and experiments[J]. *Int J Control*, 2001, 74(14): 1435 – 1446.
- [7] JIANG Z P. Global tracking control of underactuated ships by Lyapunov's direct method[J]. *Automatica*, 2002, 38(2): 301 – 309.
- [8] DO K D, JIANG Z P, PAN J. Underactuated ship global tracking under relaxed conditions[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2002, 47(9): 1529 – 1536.
- [9] DO K D, JIANG Z P, PAN J. Robust global stabilization of underactuated ships on a linear course: state and output feedback[J]. *Int J Control*, 2003, 76(1): 1 – 17.
- [10] 李铁山, 杨益生, 郑云峰. 不完全驱动船舶航迹控制输入输出线性化设计[J]. *系统工程与电子技术*, 2004, 26(7): 945 – 948. (LI Tieshan, YANG Yansheng, ZHENG Yunfeng. Input-output linearization designs for straight-line tracking control of underactuated ships[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2004, 26(7): 945 – 948.)

作者简介:

周岗 (1973—), 男, 博士研究生, 研究方向为舰船自动驾驶控制系统, E-mail: jyzgztt@163.com;

姚琼荟 (1946—), 男, 1981年获南京航空航天大学飞行器自动控制硕士学位, 1989年到俄罗斯圣彼得堡理工大学研究自动控制系统, 现为海军工程大学电气与信息工程学院教授, 博士生导师, 研究方向为数字控制系统、变结构控制等;

陈永冰 (1964—), 男, 1992年获海军工程大学导航制导及控制硕士学位, 现为海军工程大学电气与信息工程学院副教授, 导航工程系副主任, 研究方向为数字控制系统、舰船自动驾驶控制系统、舰船组合导航系统等;

周永余 (1950—), 男, 现为海军工程大学电气与信息工程学院副教授, 研究方向为数字控制系统、舰船自动驾驶控制系统、舰船组合导航系统等.