

基于非线性反馈积分滑模控制的 船舶航向自动舵设计

辛博鹏^{1,2}, 刘 顺¹, Yutaka WATANABE²

(1. 大连海事大学 航海学院, 辽宁 大连 116026; 2. 东京海洋大学 海洋工学部, 东京 135-8533)

摘 要:为设计一种节能并且鲁棒性强的船舶航向保持控制器,将非线性反馈算法与积分滑模控制相结合,设计非线性反馈积分滑模控制器用于船舶航向保持。非线性反馈积分滑模控制器建立在积分滑模控制器的基础上,利用非线性函数处理反馈误差,从而达到节能的作用。证明了积分滑模曲面的李雅普诺夫稳定性,并进行了仿真实验。从仿真结果可以看出,非线性反馈积分滑模控制在不影响航向保持精度的前提下,能够降低舵力,但是,船舶的横漂运动和转舵运动会受到影响。在设计非线性反馈积分滑模控制器的同时,分析了非线性反馈算法对船舶各状态的影响,对非线性反馈算法的进一步改进具有一定的参考价值。

关键词:积分滑模控制;非线性反馈算法;船舶航向自动舵;舵机节能

中图分类号:U661.33+4 **文献标志码:**A

Design of Steering Pilot Featuring Integral Sliding Mode Control with Nonlinear Feedback

XIN Bopeng^{1,2}, LIU Shun¹, Yutaka WATANABE²

(1. Navigation College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;

2. Faculty of Marine Technology, Tokyo University of Maritime Science and Technology,
Tokyo 135-8533, Japan)

Abstract: A pilot is made more robust and energy efficient by combination of integral sliding mode control and nonlinear feedback. Lyapunov stability of the integral sliding surface is proved. Simulations are carried out, which shows that the design reduces the rudder force for same course accuracy. However, the integral sliding mode control with nonlinear feedback does effect transvers drift and turning of the ship. The impact of nonlinear feedback to ship motion is analyzed.

Key words: integral sliding mode control; nonlinear feedback; ship steering pilot; energy saving with steering gear

目前,自动舵已经被绝大多数船舶所使用,自动舵分为航向保持自动舵和航迹保持自动舵。但是,在实际使用中,航向保持自动舵更受驾驶员的青睐。这是由于船舶航向保持自动舵的抗干扰能力更强。

船舶航向保持自动舵以比例积分微分(Proportional Integral Derivative, PID)控制居多。鲁棒PID控制具备较强的鲁棒性,抗干扰能力强^[1],并且已经实现产品化。秦贝贝等人^[2]设计了常规的线性自抗扰控制器和两种在线学习的自抗扰控制器。王薇等^[3]利用自适应神经模糊推理系统(Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System, ANFIS)实现自抗扰控

制器参数的在线调整,设计了自适应(Proportional and Differential, PD)的自抗扰控制器和自适应扩张状态观测器(Extended State Observer, ESO)的自抗扰控制器。从执行机构实际出发构造触发事件并基于反步法设计控制器输入信号,提出了基于事件触发的自适应控制器的设计方法。针对现有船舶航向控制方面采用的传统控制算法,解决了船舶航向数据计算过程中存在数据迭代分析精度失常、无法适应性逻辑推导航向数据量的问题。孙明思^[4]提出基于遗传学习算法的船舶航向智能控制方法。根据线性滑模和非奇异终端滑模在平衡点收敛速度不同

的特点,慕东东等人^[5]提出了具有较快收敛速度的快速非奇异终端滑模航向保持策略。针对船舶模型参数变化和环境干扰条件下的船舶航向跟踪控制问题,钟斌等^[6]设计了一种基于信号的S/KS/T混合灵敏度鲁棒算法。另外,基于一阶闭环增益成形算法对船舶转向过程分三段进行了控制器设计^[7]。利用闭环增益成形算法设计线性控制器,使用一种双极性S函数修饰原线性控制律,通过减小舵角,达到了舵机节能的效果^[8]。

本文利用积分滑模控制设计控制器,而后利用非线性反馈算法处理反馈误差,设计一种鲁棒性强,并且可降低舵机能耗的船舶航向保持控制器。

1 船舶运动数学模型

如图1所示,船舶在空间中为六自由度运动。在研究船舶航向保持控制时,大部分研究更关注船舶的纵荡、横荡及首摇运动。本文采用福森(Fossen)设计的船舶运动数学模型^[9],其数学表达式为:

$$\begin{cases} \dot{x} = u\cos(\psi) - v\sin(\psi) \\ \dot{y} = u\sin(\psi) + v\cos(\psi) \\ \dot{\psi} = r \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \dot{u} = f_u(\boldsymbol{v}) + \frac{\tau_u}{m_u} + \frac{\tau_{wu}}{m_u} \\ \dot{v} = f_v(\boldsymbol{v}) + \frac{\tau_{wv}}{m_v} \\ \dot{r} = f_r(\boldsymbol{v}) + \frac{\tau_r}{I_r} + \frac{\tau_{wr}}{I_r} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中,

$$f_u(\boldsymbol{v}) = \frac{m_v}{m_u}vr - \frac{d_{u1}}{m_u}u - \frac{d_{u2}}{m_u}|u|u - \frac{d_{u3}}{m_u}u^3$$

$$f_v(\boldsymbol{v}) = \frac{m_u}{m_v}ur - \frac{d_{v1}}{m_v}v - \frac{d_{v2}}{m_v}|v|v - \frac{d_{v3}}{m_v}v^3$$

$$f_r(\boldsymbol{v}) = \frac{(m_u - m_v)}{I_r}uv - \frac{d_{r1}}{I_r}r - \frac{d_{r2}}{I_r}|r|r - \frac{d_{r3}}{I_r}r^3$$

$[x, y]$ 表示船舶的位置, ψ 为船舶艏向与正北的夹角,即船舶航向, $\boldsymbol{v} = [u, v, r]^T$ 表示船舶的纵向、横向速度及转舵角速度, $(\tau_{wu}, \tau_{wv}, \tau_{wr})$ 表示船舶未知动态和外界干扰, $(f_u(\boldsymbol{v}), f_v(\boldsymbol{v}), f_r(\boldsymbol{v}))$ 为高阶水动力导数, (m_u, m_v, I_r) 分别表示船舶纵向、横向包含附加质量的船舶质量和船舶绕Z轴的转动惯量, $(d_{u1}, d_{u2}, d_{u3}, d_{v1}, d_{v2}, d_{v3}, d_{r1}, d_{r2}, d_{r3})$ 表示水动力导数参数, $\boldsymbol{\tau} = [\tau_u, 0, \tau_r]^T$ 表示控制输入,其中, τ_u 为螺旋桨给出的沿船舶纵向的推力, τ_r 为舵机产生的使船舶发生转舵运动的力矩。本文旨在设计船舶航向自动舵,所以,推力大小 τ_u 在本文不发生变化。

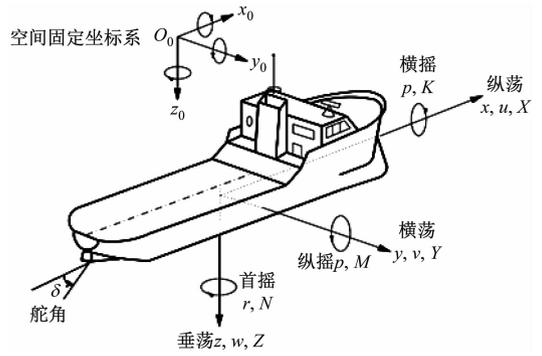


图1 船舶运动坐标系

为了方便设计控制器,本文将式(1)和式(2)所示的船舶运动数学模型写为状态空间方程的形式,即

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{\eta}} = \boldsymbol{J}(\boldsymbol{\eta})\boldsymbol{v} \\ \dot{\boldsymbol{v}} = \boldsymbol{G}(\boldsymbol{v}) + \boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{\tau} \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中,

$$\boldsymbol{J}(\boldsymbol{\eta}) = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \boldsymbol{M} = \begin{bmatrix} m_u & 0 & 0 \\ 0 & m_v & 0 \\ 0 & 0 & I_r \end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{G}(\boldsymbol{v}) = \begin{pmatrix} f_u(\boldsymbol{v}) \\ f_v(\boldsymbol{v}) \\ f_r(\boldsymbol{v}) \end{pmatrix} + \boldsymbol{M}^{-1} \begin{pmatrix} \tau_{wu} \\ \tau_{wv} \\ \tau_{wr} \end{pmatrix}, \boldsymbol{\tau} = [\tau_u, 0, \tau_r]^T$$

为控制输入力矩,另外,船舶未知动态及外界干扰为 $\boldsymbol{\tau}_w = [\tau_{wu}, \tau_{wv}, \tau_{wr}] = \boldsymbol{M}\boldsymbol{R}(\psi)\boldsymbol{\delta}(t)$, $\boldsymbol{\delta}(t) = [\delta_1(t), \delta_2(t), \delta_3(t)]^T$ 。

2 航向控制器设计

为了实现船舶航向保持,本文采用滑模控制算法设计船舶航向自动舵。张显库等^[8]在对船舶航向自动舵进行设计时,提出了以减小控制舵角大小,进而减小舵机摆动幅度大小达到节省能量的目的。另外,考虑到舵角大小会影响船舶横摇角,为了减小控制过程中的舵角,达到节能、减小船舶横摇角度的效果,在本文的滑模控制中引入非线性反馈算法。

定义滑模曲面:

$$S = \ddot{\psi} + 2\lambda\dot{\psi} + \lambda^2 \int_0^t \tilde{\psi}(t)dt, \lambda > 0 \quad (4)$$

式(4)中, $\tilde{\psi} = \psi - \psi_d$, ψ_d 表示要求航向, λ 表示船舶状态趋近滑模曲面速率的大小。为了获得舵力矩的控制律,使 $\dot{S} = 0$,即

$$\begin{aligned} \dot{S} &= \ddot{\psi} + 2\lambda\dot{\psi} + \lambda^2\tilde{\psi} = \\ &\ddot{\psi} + 2\lambda\dot{\psi} + \lambda^2(\psi - \psi_d) = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

在设计控制器时,暂时不考虑模型未知动态和

外界干扰,结合式(2)和式(5)可得

$$\begin{aligned} \dot{S} &= \dot{r} + 2\lambda r + \lambda^2(\psi - \psi_d) = \\ f_r(\boldsymbol{\nu}) + \frac{\tau_r}{m_r} + 2\lambda r + \lambda^2(\psi - \psi_d) &= 0 \quad (6) \end{aligned}$$

所以

$$\tau_r = -m_r(\hat{f}_r(\boldsymbol{\nu}) + 2\lambda r + \lambda^2(\psi - \psi_d)) \quad (7)$$

式(7)中,由于数学模型与实船的差异性,所以将在多力矩中使用 $\hat{f}_r(\boldsymbol{\nu})$ 代替 $f_r(\boldsymbol{\nu})$ 。

另外,为减小抖震,令

$$\tau'_r = \tau_r - k\text{sat}\left(\frac{S}{\kappa}\right), \kappa > 0 \quad (8)$$

式(8)中,

$$\text{sat}\left(\frac{S}{\kappa}\right) = \begin{cases} 1, & S \geq \kappa \\ \frac{S}{\kappa}, & |S| < \kappa \\ -1, & S < -\kappa \end{cases} \quad (9)$$

其中,“ $\hat{\cdot}$ ”表示对参数的估计值。

在滑模控制器的基础上,利用非线性函数修饰反馈误差,从而构成非线性反馈控制,该算法在船舶减摇,航向保持等领域已经做了比较多的研究。本文中,令非线性函数 $g(e) = \arctan(\omega e)$,其具体应用如图2所示。

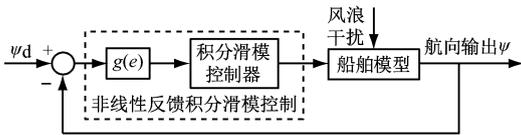


图2 非线性反馈积分滑模控制仿真框图

式(7)中,估计值与真实值之间的差距有限,即 $|m_i - \hat{m}_i| < M$, $|f_r - \hat{f}_r| < F$ 。设计李雅普诺夫函数为

$$V = \frac{1}{2}m_r S^2 \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \dot{V} &= S\dot{S} \\ &= S\left(f_r(\boldsymbol{\nu}) + \frac{\tau_r}{m_r} + 2\lambda r + \lambda^2(\psi - \psi_d) - k\text{sat}\left(\frac{S}{\kappa}\right)\right) \\ &= S\left(f_r(\boldsymbol{\nu}) - \hat{f}_r(\boldsymbol{\nu}) - 2\lambda r - \lambda^2(\psi - \psi_d) + 2\lambda r + \lambda^2(\psi - \psi_d) - k\text{sat}\left(\frac{S}{\kappa}\right)\right) \\ &= S\left(f_r(\boldsymbol{\nu}) - \hat{f}_r(\boldsymbol{\nu}) - k\text{sat}\left(\frac{S}{\kappa}\right)\right) \quad (11) \end{aligned}$$

若使得 $\dot{V} < 0$,令 $k = F + \vartheta$, $\vartheta > 0$ 。则可得出

$$V\dot{V} < -\vartheta |S| \quad (12)$$

另外,利用非线性函数修饰反馈误差不会对系统的稳定性造成影响,该结论已经在文献[10]中证

明,在此不再赘述。

3 仿真与讨论

为了证明本文设计的船舶航向控制器的有效性,对图2所示的系统进行仿真实验。

仿真过程中,风浪干扰设置为

$$\delta(t) = \begin{bmatrix} 0.8\cos(0.1\pi t - \pi/3) \\ \cos(0.2\pi t + \pi/4) \\ 1.2\cos(0.3\pi t + \pi/6) \end{bmatrix} \quad (13)$$

其他仿真参数设置为 $\lambda = 2, \omega = 0.5$ 。

图3给出了航向保持控制仿真结果。图3a、图3b说明了非线性函数处理反馈误差后,船舶的纵向速度和航向基本不受影响,但是,船舶的其他状态会发生改变。图3b说明非线性反馈算法影响船舶的横向速度,其横漂运动会更加剧烈。图3c给出了转舵角速度的变化,可以看出,非线性反馈滑模控制下,船舶的往复转舵运动加大。另外,图3d、图3e、图3f分别为非线性力 G_1, G_2, G_3 ,与式(3) $G(\boldsymbol{\nu})$ 相对应,即 $G(\boldsymbol{\nu}) = [G_1, G_2, G_3]^T$ 。从图3e、图3f中也

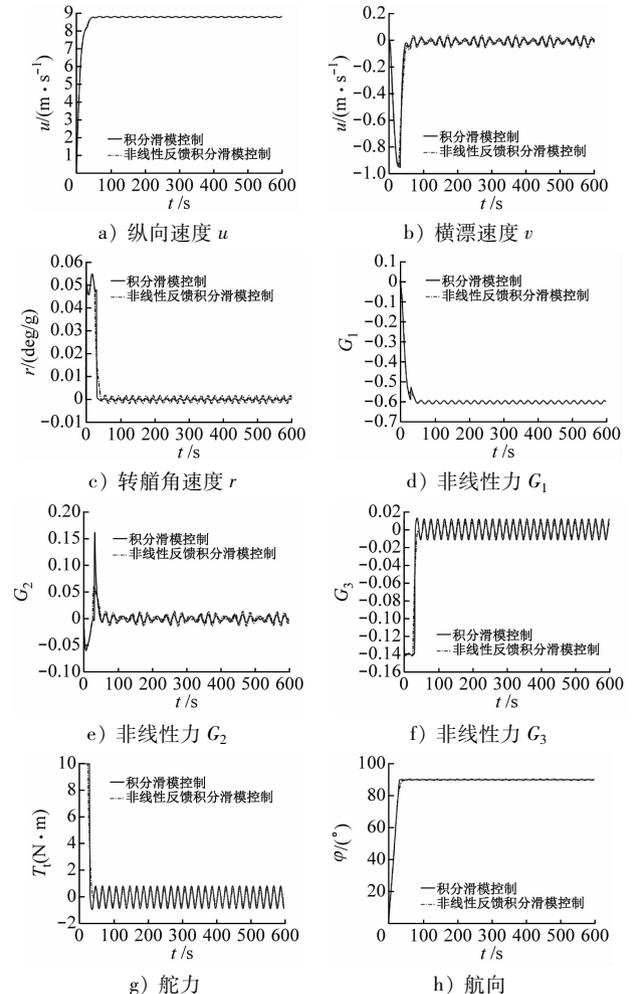


图3 控制作用下船舶状态输出

(下转第72页)

- [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2014, 44:214-230.
- [10] KRENCZYK D, DA VIDRAJUH R, SKOLUD B. An Activity-Oriented Petri Net Simulation Approach for Optimization of Dispatching Rules for Job Shop Transient Scheduling [C]// *International Workshop on Soft Computing Models in Industrial and Environmental Applications Computational Intelligence in Security for Information Systems Conference International Conference on European Transnational Education*. 2017.
- [11] VF CARIDÁ, MORANDIN O, TUMA C. Approaches of Fuzzy Systems Applied to an AGV Dispatching System in a FMS [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 79(1-4):615-625.
- [12] CHANG X, DONG M, YANG D. Multi-objective real-time dispatching for integrated delivery in a Fab using GA based simulation optimization [J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2013, 32(4):741-751.
- [13] SONG S, LI A, XU L. AGV Dispatching Strategy Based on Theory of Constraints[C]// *2008 IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics*. IEEE, 2008: 922-925.
- [14] LYSGAARD J, LETCHFORD A N, EGLESE R W. A new branch-and-cut algorithm for the capacitated vehicle routing problem[J]. *Mathematical Programming*, 2004, 100(2):423-445.
- [15] RAHMANIANI R, CRAINIC T G, GENDREAU M, et al. The Benders Decomposition Algorithm: A Literature Review[J]. *European Journal of Operational Research*, 2017, 259(3):801-817.
- [16] GMIRA M, GENDREAU M, LODI A, et al. Tabu Search for the Time-Dependent Vehicle Routing Problem with Time Windows on a Road Network[J]. *European Journal of Operational Research*, 2020(1): 129-140.

(上接第 65 页)

可以看出,在非线形反馈积分滑模控制下,其横漂系统的非线性力增大,转艏系统的非线性力减小。

综上,由上述仿真结果可以得到以下结论:非线性反馈滑模控制器能够在不影响航向保持性能的前提下减小舵机的输出,达到节能的效果。但是这种效果是以牺牲一定的转艏稳定性和横漂运动稳定性为代价的。

4 结束语

本文将非线性反馈算法与滑模控制相结合,设计了非线性反馈滑模控制器。相比于滑模控制来说,该控制器能够以较小的舵机输出达到与滑模控制相同的航向保持效果,从而在保证性能的情况下减小了舵机的能耗。但是,该控制器在舵机输出减小的情况下,对横漂运动的控制作用下降。在以后的研究中,将着重改善这一缺点。

参 考 文 献

- [1] 杨盐生,于晓利,贾欣乐. 船舶航向鲁棒 PID 自动舵设计[J]. *大连海事大学学报*, 1999, 25(4): 11-15.
- [2] 秦贝贝,陈增强,孙明玮,等. 基于自适应神经模糊推理系统的船舶航向自抗扰控制[J/OL]. *智能系统*
- [3] 王薇,罗云霞,蔡建平. 基于事件触发的船舶航向自适应控制研究[J]. *火力与指挥控制*, 2019, 44(9): 159-161 + 168.
- [4] 孙明思. 基于遗传学习算法的船舶航向智能控制方法[J]. *舰船科学技术*, 2019, 41(18): 43-45.
- [5] 慕东东,王国峰,范云生,等. 吊舱推进无人水面艇的航向保持[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2018, 39(2): 274-281.
- [6] 钟斌,邹丑田,贾玉柱. 一种船舶航向跟踪的混合灵敏度控制算法[J]. *海军工程大学学报*, 2017, 29(4): 103-106.
- [7] 王立军,张显库. 基于鲁棒模糊控制的船舶转向及航向保持[J]. *中国航海*, 2011, 34(2): 1-4 + 29.
- [8] 张显库,杨光平,张强. 一种双极性 S 函数修饰的非线性船舶航向保持算法[J]. *大连海事大学学报*, 2016, 42(3): 15-19.
- [9] Fossen, T. I. *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*[M]. New York: Wiley, 2011: 417-454.
- [10] LIANG C L, ZHANG X K. Concise and Economical Control Implemented on Ship Fin Stabilizer System Based on Nonlinear Feedback Algorithm[J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2020, DOI: 10.1007/s00773-020-00723-8.