

非线性船舶动力定位控制器设计

赵大威, 边信黔, 丁福光

(哈尔滨工程大学 自动化学院 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 针对船舶在海上的定位和作业受到海洋环境的扰动力影响, 其动力定位控制具有很强的非线性特性. 本文基于自抗扰控制技术, 设计了船舶动力定位控制器. 该控制器通过非线性观测器估计出船舶运动速度和系统的总扰动, 并采用非线性反馈进行补偿, 实现对船舶的动力定位控制. 通过仿真实验验证了控制器具有很强的抗干扰能力和鲁棒性.

关键词: 船舶动力定位; 海洋运载器; 非线性控制; 自抗扰控制

中图分类号: U661.338 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7043(2011)01-0057-05

Design of a nonlinear controller for dynamic ship positioning

ZHAO Dawei, BIAN Xinqian, DING Fuguang

(College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: A vessel suffers from environmental disturbance while keeping its position and throughout offshore operation processes. There is some nonlinearity in the dynamic positioning (DP) control. A new dynamic positioning controller was proposed based on the active disturbance rejection control (ADRC) technique. The controller used a nonlinear state estimator to give an estimation of the vessel speed and the general disturbances, and it applied the nonlinear feedback to compensate for the disturbances. The simulation experiments indicate that the controller has strong anti-disturbance ability and robustness.

Keywords: dynamic positioning; marine vehicles; nonlinear control; active disturbance rejection control

船舶动力定位(dynamic positioning, DP)系统是一种船舶位置闭环控制系统,在不借助锚泊系统的情况下,利用船舶自身的动力抵抗外界干扰(风、浪、流),动态控制船舶停在某确定位置或沿着一定的预定航迹行驶的技术^[1]. 动力定位技术是在深海钻井平台上率先得到应用从而发展起来的,是深海钻井、海底铺缆、海上作业的关键技术,在资源勘探船、铺管船、救助船等都得到了应用. DP控制系统的研究经历了从PID控制器到线性最优控制的发展过程. 目前常用的是线性随机最优控制,即LQG控制方法. 该方法对线性化的模型计算卡尔曼滤波和输出反馈增益,其中卡尔曼滤波的作用是得出无噪声的位置和速度估计值. 采用上述方法时系统的在

线计算量很大,而且其中的很多协方差值很难调整^[2]. 船舶在海上不断受到风、海浪、海流的扰动,其过程是一个复杂的非线性系统. 设计抗干扰、鲁棒性强的控制器,是DP控制研究的重要问题. 近年来有研究者提出了滑模控制^[3]、 H_∞ 控制^[4]、反步控制^[5]、神经网络^[6]等控制方法用于动力定位控制. 上述非线性控制方法更好地处理了船舶动态运动的固有非线性,但其适应参数变化和环境扰动的能力有限,而且计算量也比较大. 自抗扰控制器(ADRC)由韩京清提出,是一种综合控制方法,目前已应用于电机控制、化工、机器人等领域. 文献[7]采用了二阶自抗扰控制器用于船舶运动控制,但没有利用扩张状态观测器对船舶运动速度进行估计. 本文针对船舶动力定位控制的特点,提出将自抗扰控制器引入到船舶动力定位控制器中. 采用三阶扩张状态观测器估计船舶位置、速度和未建模动态,利用非线性反馈对误差和扰动进行补偿,设计具有较强鲁棒性和适应性的控制器来解决动力定位控制问题.

收稿日期: 2009-09-11.

基金项目: 中央高校基本科研专项资金资助项目(HEUCF100419); 黑龙江省博士后基金资助项目(LBH-Z08245).

作者简介: 赵大威(1974-),男,讲师,博士, E-mail: dwzhao2003@Yao.hoo.com.cn;

边信黔(1941-),男,教授,博士生导师.

通信作者: 赵大威.

1 船舶动力定位控制系统

船舶动力定位系统主要由 3 部分组成: 位置测量系统、控制系统和推进器系统. 测量系统一般包括差分 GPS、电罗经、姿态传感器和气象站等. 控制系统是动力定位系统的核心部分, 它包括动力定位控制器和推力分配器. DP 控制器根据位置和艏向的误差, 产生期望推力, 再由推力分配器将这个期望推力合理地分配给船舶的各个推进器. 本文主要研究动力定位控制器的设计问题. 无约束的船舶运动具有 6 个自由度, 而动力定位控制一般只考虑其中的纵荡、横荡和艏摇 3 个自由度运动.

由文献[8]可以得到动力定位船舶的线性低频运动方程式:

$$M\dot{v} + Dv = \tau + J(\varphi)b, \quad (1)$$

$$\tau = Bu. \quad (2)$$

$$M = \begin{bmatrix} m - X_v & 0 & 0 \\ 0 & m - Y_v & mx_G - Y_r \\ 0 & mx_G - Y_r & I_z - N_r \end{bmatrix},$$

$$D = \begin{bmatrix} -X_u & 0 & 0 \\ 0 & -Y_v & -Y_r \\ 0 & -Y_r & -N_r \end{bmatrix}.$$

式中: v 为随船坐标系下的船舶运动速度; J 为转换矩阵; τ 为推进器产生的控制力和力矩; B 为描述推进器系统的静态矩阵; b 为未建模的风、浪、流等外部扰动作用力; 惯量矩阵 M 包括水力附加质量; D

为线性水动力阻尼系数; m 是船舶质量; I_z 是转动惯量. 环境作用力是由于二级波浪漂力、风、流及未建模动态特性等多种环境因子共同作用引起的. 环境对船舶在横荡、纵荡和艏摇方向上的扰动作用力可以认为是一个缓慢变化的参数^[9], 因此在船舶控制中可以采用如下模型:

$$\dot{b} = -T^{-1}b + E_b\omega_b. \quad (3)$$

式中: T 为包含时间常数的三维对角矩阵; ω_b 为零均值高斯白噪声向量; E_b 为三维对角矩阵, 表明环境作用力的幅值范围. 由于船舶对象中存在时变和非线性因素, 再加上环境对船舶位置的扰动是随机和时变的, 这些因素对船舶动力定位控制器的鲁棒性和稳定性提出了很高的要求.

2 自抗扰控制器设计

本文利用自抗扰控制器解决 DP 控制的以下问题: 1) 由于很难建立精确的船舶模型, 因此避免使用基于模型方法; 2) 船舶位置信息的滤波和运动状态估计; 3) 对环境扰动进行补偿; 4) 实现控制的快速性和较小的超调.

自抗扰控制器 (ADRC) 是一种综合的控制方法, 它包括: 跟踪微分器 (TD)、扩张状态观测器 (ESO)、非线性反馈 (NFSEF) 3 个环节. 其控制具有超调小、精度高、适应性和鲁棒性强的特点. 自抗扰控制器是不依赖于模型的控制方法, 避免了船舶模型存在误差的问题.

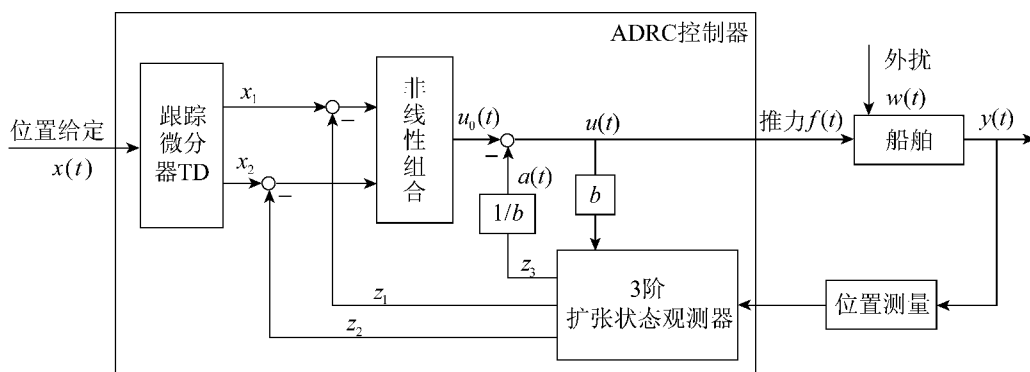


图 1 ADRC 控制器结构

Fig. 1 Structure of ADRC controller

本文设计的用于船舶动力定位的自抗扰控制器的结构如图 1 所示. 二阶离散跟踪微分器 (TD) 的结构为

$$e_0 = x_1(k) - V(k), \quad (4)$$

$$x_1(k+1) = x_1(k) + hx_2(k), \quad (5)$$

$$x_2(k+1) = x_2(k) + hfst(e_0, x_2(k), r, h_0), \quad (6)$$

$$fst = \begin{cases} -ra/d, & |a| \leq d; \\ -rsgn(a), & |a| > d. \end{cases} \quad (7)$$

跟踪微分器能够快速跟踪输入信号, 并能给出较好品质的微分信号. 利用这个特点, 对输入的给定信号进行预处理, 可以提高控制器的鲁棒性^[10].

船舶的测量系统只能提供带有测量噪声的船舶位置和艏向信息, 而且船舶的运动速度不能直接测

量, 只能通过状态观测器估计得到. 因此, 滤波和状态估计在动力定位控制中起着非常重要的作用. 扩张状态观测器(ESO)是自抗扰控制技术的重要组成部分, 它可以通过船舶位置信号估计船舶速度, 更重要的是它不但能够得到不确定对象的状态, 还能获得对象模型中的内扰和外扰的实时作用量^[11]. 如果将这个实时作用量补偿到控制器中去, 就相当于反馈线性化方法, 可以将非线性系统转化为积分器串联型标准结构系统. 将扩张状态观测器观测到的扰动补偿到控制器中去, 就能有针对性地对扰动进行抑制. 动力定位系统为二阶系统, 因此构造的 ESO 应为三阶:

$$e = z_1(k) - y(k), \quad (8)$$

$$z_1(k+1) = z_1(k) + h(z_2(k) - \beta_{01}e), \quad (9)$$

$$z_2(k+1) = z_2(k) + h(z_3(k) - \beta_{02}\text{fal}(e/\alpha_1\delta_1) + bu(k)), \quad (10)$$

$$z_3(k+1) = z_3(k) - h\beta_{03}\text{fal}(e/\alpha_2\delta_1), \quad (11)$$

$$\text{fal}(e/\alpha\delta) = \begin{cases} |e|^\alpha \text{sgn}(e), & |e| < \delta; \\ e/\delta^{1-\alpha}, & |e| \leq \delta. \end{cases} \quad (12)$$

只要调节扩张状态观测器 ESO 中的参数 β_{01} 、 β_{02} 、 β_{03} 、 δ_{01} 、 δ_{02} 、 α_{01} 选择合适, 稳态时 ESO 状态将有如下收敛关系: $z_1 \rightarrow y$; $z_2 \rightarrow \dot{y}$; $z_3 \rightarrow a$. 扩张状态观测器的输入是位置参考系统测得的带噪声的船舶位置信号. 三阶 ESO 有 3 个输出, 其中 z_1 是船舶反馈位置的跟踪, 也就是滤除了噪声的位置信号. z_2 是位置跟踪的微分信号, 即估计的船速, 可以用于控制器的输入. 对准确的位置控制是很重要的. z_3 是对系统参数变化和外扰的总的估计. 船舶在海上不断受到环境的扰动, 如果利用 z_3 即估计的扰动, 对系统实施动态反馈补偿就能有针对性地对抑制扰动的影响:

$$u = u_0 - z_3. \quad (13)$$

则系统被动态反馈线性化为双积分器系统. 动态补偿后, 实现了反馈线性化. 非线性反馈控制律中的误差、误差微分是由预处理 TD 输出和 ESO 的输出之差来产生. 用这些状态误差和非线性函数 $\text{fal}(e/\alpha\delta)$ 进行“非线性组合”来实现的“非线性状态误差反馈律”:

$$e_1 = x_1 - z_1, \quad e_2 = x_2 - z_2. \quad (14)$$

$$u_0(k) = \beta_1 \text{fal}(e_1/\alpha_1\delta) + \beta_2 \text{fal}(e_2/\alpha_2\delta). \quad (15)$$

动态反馈补偿律:

$$u(k) = u_0(k) - (z_3(k) + f_0(z_1(k), z_2(k)))/b. \quad (16)$$

非线性状态误差反馈律式(15)和动态反馈补

偿律(16)即构成了自抗扰控制器的控制律. 非线性误差反馈(NLSEF)控制器以数量级方式抑制扰动, 并将系统误差在有限时间内快速衰减^[12-13], 极大地提高了效率. 对于水面船舶来说, 有 3 个自由度的运动需要控制(x 轴位移, y 轴位移, 艏摇), 每个运动控制均采用自抗扰控制器.

3 仿真实验

为了验证所设计的自抗扰控制器的性能, 本文以某动力定位船舶为仿真对象进行了仿真实验, 仿真环境为 MATLAB7.0. 该船的主要尺寸为: 船长 175 m, 船宽 25.4 m, 排水量 $24\,009 \times 10^4 \text{ m}^3$, 吃水 9.5 m. 仿真海洋环境设定为有浪和流. 浪的模型为 PM 谱模型, 有义波高 5 m, 峰值频率为 0.8 rad/s, 浪向为 120° , 流速为 0.2 m/s, 流向为 90° . 船舶模型参数:

$$\begin{aligned} M &= \begin{bmatrix} 2.6415 \times 10^7 & 0 & 0 \\ 0 & 33\,455\,476 & 14\,917\,351 \\ 0 & 14\,917\,351 & 6.5209 \times 10^{10} \end{bmatrix}, \\ D &= \begin{bmatrix} 22\,204 & 0 & 0 \\ 0 & 2.2204 \times 10^5 & -1.7746 \times 10^6 \\ 0 & -1.7746 \times 10^6 & 7.1506 \times 10^8 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (17)$$

船的初始位置为 (0 m, 0 m), 给定位置为 (20 m, 20 m). 位置响应曲线如图 2 所示. 可以看到船能够快速达到给定位置, 超调很小. 在浪和流的作用下, 位置保持在给定位置的 3 m 的范围内.

ESO 输出曲线为图 3 所示, 分别为对反馈位置的跟踪曲线(a)、位置跟踪的微分曲线(b)和 ESO 估计的总扰动(c).

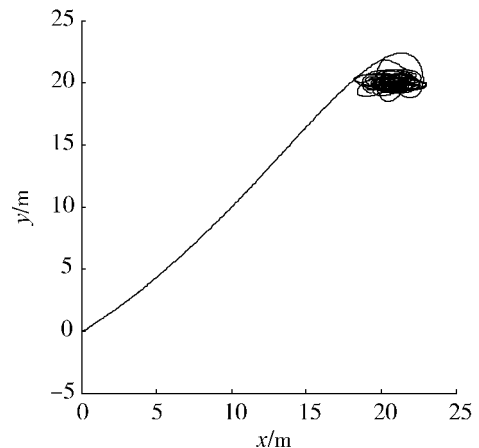
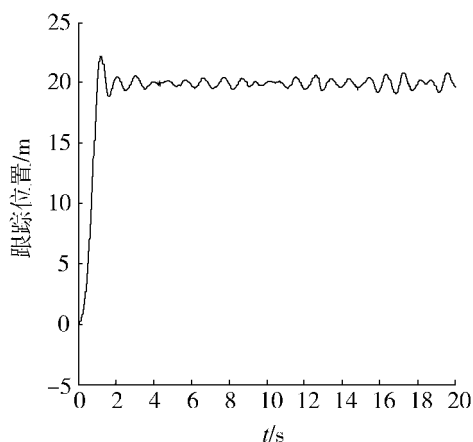
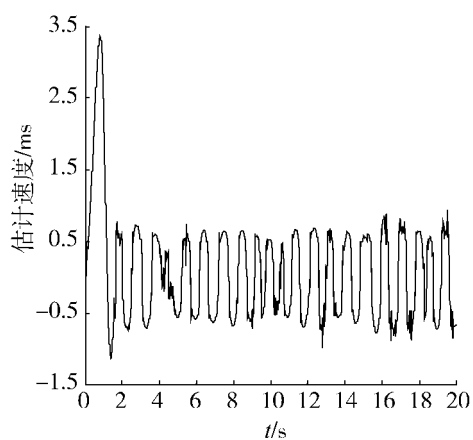


图 2 位置响应曲线

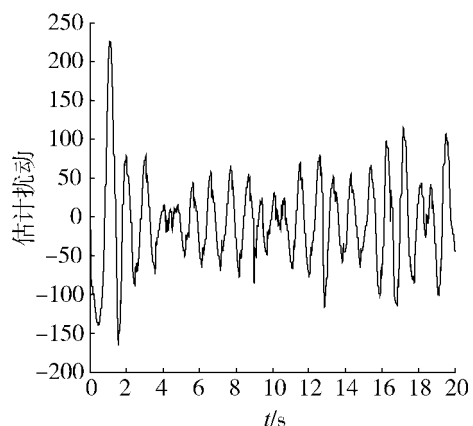
Fig. 2 Curve of position response



(a) x 方向位置响应



(b) ESO 估计的速度曲线



(c) ESO 观测的总扰动

图 3 ESO 输出曲线

Fig. 3 Curve of ESO output

ADRC 控制器的每个模块可以单独调整参数, 参数调整结果为:

TD 参数为: $r = 10$ $h = 0.01$.

ESO 参数为: $\alpha_{01} = 0.99$, $\alpha_{02} = 0.5$, $\alpha_{03} = 0.25$, $\beta_{01} = 15$, $\beta_{02} = 100$, $\beta_{03} = 1000$, $\delta = 0.01$, $b = 3.5$.

NLSEF 参数为: $\alpha_1 = 0.9$, $\alpha_2 = 0.2$, $\beta_1 = 20$, $\beta_2 = 15$, $\delta = 0.05$.

为了验证控制器的鲁棒性, 改变环境设置, 将

浪、流产生的作用在船舶上的环境力突然增加, 环境力变化如图 4 所示. ADRC 控制器参数不变, 得到位置响应曲线如图 5 所示. 可以看到, 环境力突然增加时 ADRC 控制器仍然可以使船舶保持位置在 ± 3 m 的范围内, 证明 ADRC 控制器对外扰的变化有很强的适应性. 改变船舶仿真模型参数, 参数从 (17) 改变为 (18), ADRC 控制器参数不变, 位置响应结果如图 6 所示, 可以看出试验结果仍然满足控制要求, 证明该控制器对于模型参数变化具有很强的鲁棒性.

$$\begin{aligned} M &= \begin{bmatrix} 1.6415 \times 10^7 & 0 & 0 \\ 0 & 23455476 & 14917351 \\ 0 & 14917351 & 5.5209 \times 10^{10} \end{bmatrix}, \\ D &= \begin{bmatrix} 12204 & 0 & 0 \\ 0 & 1.2204 \times 10^5 & -1.7746 \times 10^6 \\ 0 & -1.7746 \times 10^6 & 5.1506 \times 10^8 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (18)$$

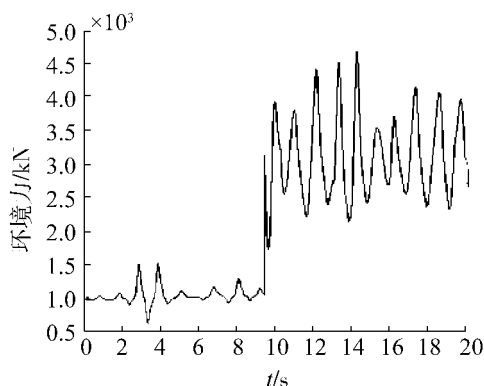


图 4 环境力曲线

Fig. 4 Curve of environment force

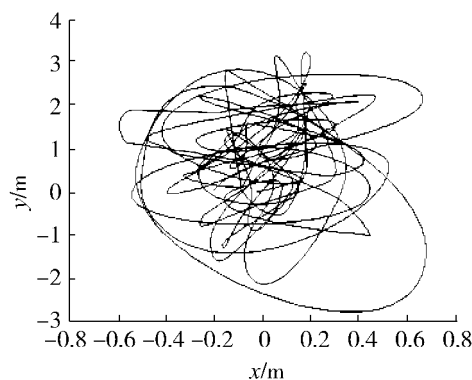


图 5 位置保持曲线

Fig. 5 Curve of position keeping

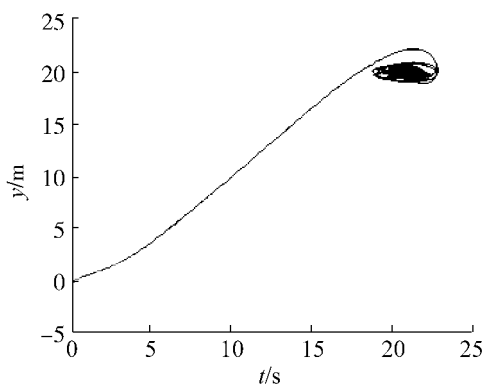


图6 船舶模型参数变化时的位置响应曲线

Fig. 6 Curve of position response with changed ship model parameters

4 结束语

本文基于自抗扰控制技术设计了非线性控制器,用于动力定位船舶控制.进行了模型仿真实验,实验证明该控制器不但可以有效地抑制海洋环境对动力定位船舶的扰动,并且对模型参数变化具有较强的鲁棒性和适应性.控制具有快速、超调小的特点.

参考文献:

- [1] TORSETNES G, JOUFFROY J, FOSSEN T I. Nonlinear dynamic positioning of ships with gain-scheduled wave filtering [C]//Proceeding of 43rd the IEEE Conference on Decision and Control. Atlantis, Paradise Island, Bahamas, 2004: 5340-5347.
- [2] SÆLID S, JENSEN N A, BALCHEN J G. Design and analysis of a dynamic positioning system based on Kalman filtering and optimal control [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1983, 28(3): 331-339.
- [3] TANNURI E A, PESCE C P. Comparing two different control algorithms applied to dynamic positionings of a pipeline launching barge [C]//Proceedings of the 10th Mediterranean Conference on Control and Automation. Lisbon, Portugal, 2002.
- [4] KATBI M R, GRIMBLE M J, ZHANG Y. H robust control design for dynamic ship positioning [J]. Marine Control, IEE Proc-Control Theory Appl, 1997, 144(2): 110-118.
- [5] FOSSEN T I, GROVLEN A. Nonlinear output feedback control of dynamically positioned ships using vectorial observer backstepping [J]. IEEE Transactions on Control Technology, 1998, 6(1): 121-128.
- [6] ZHANG YAO, HEARN G E, SEN P. A neural network approach to ship tracking-keeping control [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1995, 20(1): 65-72.
- [7] RUAN Jiu hong, LI Yibin. ADRC based ship course controller design and simulations [C]//2007 IEEE Automation and Logistics. Jinan, China, 2007: 2731-2735.
- [8] 贾欣乐, 杨盐生. 船舶运动数学模型 [M]. 大连: 大连海事大学出版社, 1999: 30-35.
- [9] FOSSEN T I, STRSND J P. Passive nonlinear observer design for ships using Lyapunov methods: full-scale experiments with a supply vessel [J]. Automatic, 1999, 35(1): 3-16.
- [10] 韩京清, 王伟. 非线性跟踪-微分器 [J]. 系统科学与数学, 1994, 14(2): 177-183.
HAN Jingqing, WEI Wang. Nonlinear tracking-differentiator [J]. System Science and Mathematics, 1994, 14(2): 177-183.
- [11] 韩京清. 一类不确定对象的扩张状态观测器 [J]. 控制与决策, 1995, 10(1): 85-88.
HAN Jingqing. The extended state observer of a class of uncertain system [J]. Control and Decision, 1995, 10(1): 85-88.
- [12] 韩京清. 非线性状态误差反馈律-NLSEF [J]. 控制与决策, 1995, 10(3): 221-225.
HAN Jingqing. Nonlinear state error feedback control law-NLSEF [J]. Control and Decision, 1995, 10(3): 221-225.
- [13] 韩京清. 自抗扰控制器及其应用 [J]. 控制与决策, 1998, 13(1): 19-23.
HAN Jingqing. Auto disturbances rejection control technique and application [J]. Control and Decision, 1998, 13(1): 19-23.

[责任编辑: 陈 峰]