

⑧

船舶航向非线性系统的鲁棒控制

43-47

于晓利

(大连水产学院 海渔系,辽宁 大连 116023)

摘要:考虑在船舶航向控制系统模型中存在非线性,并假设模型参数和外界干扰有界的情况下,利用 Lyapunov 稳定性理论,提出了一种鲁棒控制新算法。以一艘 5000 t 级杂货船为例,进行了鲁棒控制自动舵设计,并利用 Matlab 工具箱进行了仿真研究,结果证明该算法完全正确。

关键词:非线性系统;鲁棒控制;船舶航向控制

中图分类号: U664.36; TP273.2 **文献标识码:** A

船舶在营运中,由于装载状态、船速、外界干扰等时常发生变化,因此,船舶航向控制系统模型中存在两种明显的不确定性,即系统参数和外界干扰的不确定性。另外,由于船舶的大型化,船舶方型系数的增大,船舶的直线运动变为不稳定,航向控制系统模型成为非线性的。所以,研制开发非线性鲁棒自动舵是当前船舶控制领域中的一个热点研究课题。

作者考虑在船舶航向控制系统模型中存在着非线性,并假设模型参数和外界干扰有界的情况下,利用 Lyapunov 稳定性理论,提出了一种新的船舶航向非线性系统的鲁棒控制算法。最后,以一艘 5000 t 级杂货船为例,进行了鲁棒控制自动舵设计,利用 Matlab 的 Simulink 工具箱进行了仿真研究,结果证明该算法完全正确。

1 船舶航向非线性系统模型

在船舶航向自动舵设计中,船舶航向控制系统模型一般采用线性的野本方程^[1]。作者考虑模型中的非线性和外界干扰的影响,将野本方程中引入非线性项和外界干扰项如下:

$$T\dot{\varphi} + \varphi + \alpha\varphi^3 = K\delta + \omega \quad (1)$$

其中: φ 为航向角; δ 为控制舵角; T 、 K 、 α 为模型的参数,在设计中假设为未知的,但为常数; ω 为外界干扰的不确定项,假设为有界的。

设船舶沿设定的航向 φ_d 航行,为了在控制过程中能够消除静态误差,在控制器中引入积分项,取状态变量为 $e_1 = \int_0^t (\varphi - \varphi_d) dt$, $e_2 = \varphi - \varphi_d$, $e_3 = \dot{e}_2 = \dot{\varphi}$, 控制变量为

收稿日期:1999-08-11

作者简介:于晓利(1960-),男,讲师。

$u_k = \delta$, 则式(1) 改写为状态方程形式如下:

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = e_2 \\ \dot{e}_2 = e_3 \\ \dot{e}_3 = a_1 e_3 + a_2 e_3^3 + bu_k + \omega' \end{cases} \quad (2)$$

其中: $a_1 = -\frac{1}{T}$; $a_2 = -\frac{\alpha}{T}$; $b = \frac{K}{T}$; $\omega' = \frac{\omega}{T}$ 。由于船舶在航行时, 船速、装载状态等都是变化的, 同时还受到风、浪、流等外界干扰的作用, 式(2) 中系数也是变化的, 并不能完全确定, 给自动舵设计带来了困难。但是, 一般可以估计出在最坏情况下这些参数的大小。在此, 假设系统参数 a_1 和 a_2 及外界干扰是具有上界的, 即有

$$|a_1| \leq \psi_1, \quad |a_2| \leq \psi_2, \quad |\omega'| \leq \psi_3 \quad (3)$$

并且参数 b 具有下界, 即有

$$|b| \geq b_{\min} \quad (4)$$

其中 ψ_1, ψ_2, ψ_3 及 b_{\min} 都为已知的常数。

2 船舶航向鲁棒控制自动舵设计

为了设计的需要, 将式(2) 改写成下式

$$\dot{e} = Ae + B[f(e) + bu_k + \omega'] \quad (5)$$

$$\text{其中: } A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -k_1 & -k_2 & -k_3 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, f(e) = k_1 e_1 + k_2 e_2 + (k_3 + a_1)e_3 + a_2 e_3^3,$$

k_1, k_2, k_3 是线性状态反馈的增益, 它们的选择使特征方程 $s^3 + k_3 s^2 + k_2 s + k_1 = 0$ 的根具有负实部。

笔者提出下列的鲁棒控制律为

$$u_1 = -b_{\min}^{-1} \rho \tanh\left(\frac{\rho B^T P x}{\epsilon}\right) \quad (6)$$

其中: $\rho \geq k_1 |e_1| + k_2 |e_2| + (k_3 + \psi_1) |e_3| + \psi_2 |e_3|^3 + \psi_3$; $\epsilon \in (0, \infty)$ 是由设计者选择的常数, $P = P^T, P > 0$ 是下列 Lyapunov 方程

$$A^T P + PA = -Q \quad (7)$$

的解。 $Q = Q^T$ 是设计者选择的半正定矩阵。

定理 2.1 针对不确定系统(5), 在假设不确定界式(3) 和式(4) 存在的条件下, 控制律式(6) 是系统(5) 的鲁棒镇定控制, 并且使闭环系统以速率 $\mu/2$ 全局一致指数收敛到余集 $\Phi(r)$, 其中 $\mu = \lambda_{\min}(Q)/\lambda_{\max}(P)$, $r = \sqrt{\epsilon/\mu}$ 。

在证明定理 2.1 之前, 先给出一个常用的引理。

引理 2.1 对于任意 $\epsilon > 0$ 和 $\eta \in \mathbf{R}$, 下列不等式成立

$$0 \leq |\eta| - \eta \tanh(\eta/\epsilon) \leq k\epsilon \quad (8)$$

其中: k 是满足 $k = e^{-(k+1)}$ 的常数, 即 $k = 0.2785$ 。

定理 2.1 的证明, 取 Lyapunov 预选函数 $V = x^T P x$ 。沿式(5) 的轨迹对 V 求时间导

数,有

$$\begin{aligned} \dot{V} &= x^T P x + x^T P x \\ &= x^T (A^T P + P A) x + u_1^T b^T B^T P x + x^T P B b u_1 + f^T B^T P x + x^T P B f \end{aligned} \quad (9)$$

分别讨论上式中的有关项如下

$$\begin{aligned} &u_1^T b^T B^T P x + x^T P B b u_1 \\ &= -b_{\min}^{-1} \tanh\left(\frac{\rho B^T P x}{\varepsilon}\right) [b^T \rho B^T P x + \rho x^T P B b] \\ &\leq -2\rho B^T P x \tanh\left(\frac{\rho B^T P x}{\varepsilon}\right) \end{aligned} \quad (10)$$

$$f^T B^T P x + x^T P B f \leq 2 \|f\| \|B^T P x\| = 2 \|\rho B^T P x\| \quad (11)$$

将式(7)、(10)和式(11)代入式(9)得

$$\dot{V} \leq -x^T Q x + 2 \|\rho B^T P x\| - 2\rho B^T P x \tanh\left(\frac{\rho B^T P x}{\varepsilon}\right)$$

若取 $\eta = \rho B^T P x$, 应用引理 2.1 可得

$$\dot{V} \leq -x^T Q x + 2k\varepsilon \leq -x^T Q x + 2\varepsilon \leq -\frac{\lambda_{\min}(Q)}{\lambda_{\max}(P)} V + 2\varepsilon = -\mu V + 2\varepsilon$$

应用文献 [2] 的引理 1.1 可证定理 2.1。

3 仿真例

笔者以一艘 5000 t 级杂货船为例进行仿真研究, 该船的船长 L 为 99 m, 船宽 B 为 16 m, 满载吃水 d 为 6.5 m, 方形系数 C_b 为 0.703, 船速 V 为 7.5 m/s。野本船舶非线性运动模型的无量纲参数通过计算得 $K' = 8.01$, $T' = 12.1$, $\alpha = 30$ 。

$$\text{取 } k_1 = 0.005, k_2 = 0.07, k_3 = 15, \text{ 并取 } Q = \begin{pmatrix} 0.0003 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0300 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \text{ 则}$$

$$P = \begin{pmatrix} 0.0355 & 0.4524 & 0.0300 \\ 0.4524 & 100.1590 & 6.6770 \\ 0.0300 & 6.6770 & 0.4785 \end{pmatrix}$$

$$u_1(t) = -b_{\min}^{-1} \rho \tanh\left(\frac{\rho(0.03e_1 + 6.677e_2 + 0.4785e_3)}{\varepsilon}\right)$$

在仿真时, 假设由于操纵船舶使速度下降一半, 并且风速在 7 级, 波高 6 m 的情况下, 取 $\psi_1 = 0.01$, $\psi_2 = 0.3123$, $\psi_3 = 3$, $b_{\min} = 0.303$, $\varepsilon = 5$ 。

在进行仿真研究时, 为了更接近实际, 作者采用了一个非线性船舶操纵运动数学模型, 该模型为状态空间表示的形式, 即

$$\begin{cases} (m + m_x) \dot{u} - (m + m_y) v r = X_H + X_P + X_R + X_A + X_W \\ (m + m_y) \dot{v} + (m + m_x) u r = Y_{HP} + Y_R + Y_A + Y_W \\ (I_{zz} + J_{zz}) \dot{r} = N_{HP} + Y_R + Y_A + Y_W \end{cases}$$

其中: m , m_x , m_y 分别为船舶质量和附连质量; I_{zz} , J_{zz} 分别为船舶绕重心的转动惯性矩

和附连惯性矩; u, v 分别为船舶纵向和横向速度; r 为首摇角速度; X, Y, N 分别为作用于船体上的外力和外力矩。下标 H, P, R, A, W 分别表示船体、螺旋桨、舵及风、波浪, N_{HP} 表示船体和螺旋桨产生的流体力 and 力矩的合并。上述变量的计算方法参见文献①。作者已用 Matlab 软件中 Simulink 编写了一个全面的程序, 在该程序中, 不仅考虑规则风、浪等扰动的影响, 还考虑不规则风、浪的影响。在此基础上, 对上述航向非线性系统的鲁棒自适应控制器进行了仿真研究, 其结果见图 1~图 4。

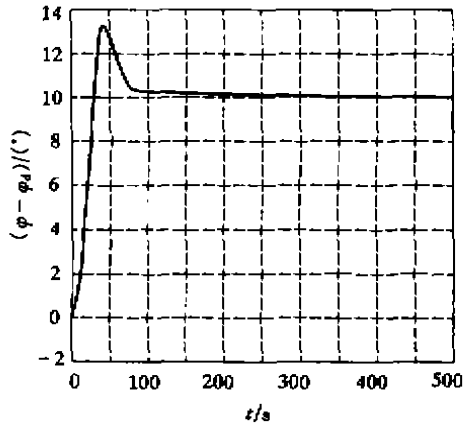


图1 无风流时航向变化曲线

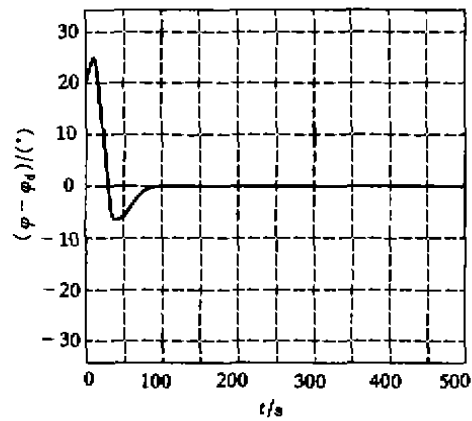


图2 控制舵角的变化曲线

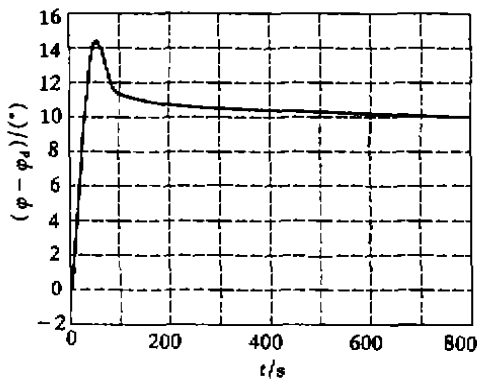


图3 定常风状态下航向变化曲线

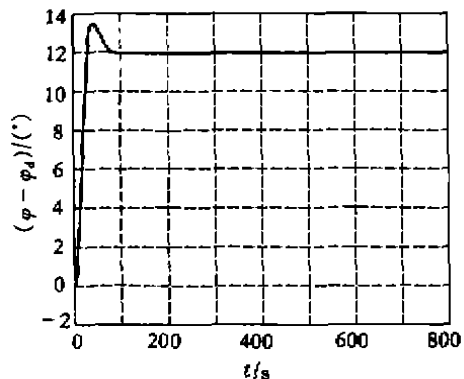


图4 无积分状态下航向变化曲线

图 1 和图 2 是无风、无流、无浪时, 船舶改向 10° 的历时曲线和控制舵角。

图 3 给出了定常风下, 当风速 6 级, 绝对风向 90° , 船舶改向 10° 的历时曲线。为了便于比较, 作者还研究了无积分功能的鲁棒控制自动舵, 图 4 给出了与图 3 相同条件下, 船舶改向 10° 的历时曲线。

图 4 一直具有 2° 静差, 不能消除。因此, 从两图的比较来看, 作者提出的具有积分

① YANG Yan-sheng. Study on ship manoeuvring mathematical model in shiphandling simulator. In: CHISLETT M S ed. MARSIM' 96. Copenhagen Denmark, 1996. 607 - 615.

功能的鲁棒控制自动舵, 确实具有渐步消除静差的能力, 根据经验消除静差不能太快, 否则可能使积分效果饱和而失去积分作用。

4 结论

- 1) 建立了具有不确定性的船舶航向非线性系统模型, 为鲁棒控制设计奠定了基础。
- 2) 针对船舶航向非线性系统, 考虑到在定常风等一些静态作用下产生的静态误差, 利用极点配置法, 提出了一个具有积分功能的鲁棒控制算法, 该算法仅要求已知系统参数和外界干扰的不确定性界。
- 3) 利用 Lyapunov 稳定性理论证明了所提出的鲁棒控制算法可以确保闭环系统是一致最终有界的, 并且闭环系统的解以某个给定的速率全局指数收敛于一个余集。
- 4) 以一艘 5000 t 级杂货船为例, 进行了鲁棒控制自动舵设计, 经 Matlab 的 Simulink 工具箱仿真研究表明, 控制性能令人满意。

参考文献:

- [1] NOMOTO K. On the steering quality of ships[J]. *International Shipbuilding Progress*, 1957, 35: 354-370.
- [2] 杨益生, 贾欣乐. 不确定线性系统的鲁棒控制新算法及其应用[J]. *大连海事大学学报*, 1999, 25(增刊): 1-7.

Robust control algorithm applied to ship steering autopilot with nonlinear system

YU Xiao-li

(Dept. of Marine Fisheries, Dalian Fisheries Univ., Dalian 116023, China)

Abstract: A robust control algorithm is proposed for autopilot with nonlinear system based on known parameter boundness of the system and known boundness of input disturbance by use of the theory of Lyapunov stability. An example illustrating the method described is presented for a 5000 t general cargo ship. The simulation shows that the controller can make the designed system guarantee the required performance.

Key words: nonlinear system; robust control; ship autopilot