

文章编号: 1000-8152(2000)01-0147-03

H_{∞} 自动舵鲁棒性的海试验证*

张显库 贾欣乐 蒋丹东
(大连海事大学·大连, 116024)

U664.36

摘要: 给出了 H_{∞} 鲁棒自动舵在阳澄湖号油轮上实际海试的结果, 证明了该自动舵能够抑制海况干扰, 具有良好的控制性能, 对航速变化等产生的船舶模型摄动, 具有良好的鲁棒性能。

关键词: 船舶自动舵; H_{∞} 控制; 航向保持; 航迹保持; 鲁棒性; 海试

文献标识码: A

航迹控制

Test on Robustness of H_{∞} Autopilot by Sea Trials

ZHANG Xianku, JIA Xinle and JIANG Dandong

(Dalian Maritime University·Dalian, 116024, P. R. China)

Abstract: The actual sea trial result of H_{∞} robust autopilot tested on YANGCHENGHU oil tanker is presented, which certified the autopilot can resist the disturbance of sea state; with good control performance and has good robustness to model uncertainty caused by the change of surge speed etc.

Key words: autopilot for ship; H_{∞} control; course-keeping; track-keeping; robustness; sea trial

H_{∞} 自动舵能够抑制海况干扰, 对船舶模型摄动具有鲁棒性, 并能保持良好的控制性能, 在计算机仿真环境下得到了验证^[1~4], 但所设计出的鲁棒自动舵对航速变化等情况引起的模型摄动是否能体现鲁棒性, 在实际海况变化时, 其控制性能是否实际上满足性能指标要求, 国内外文献中未见报导, 本研究将设计出的鲁棒自动舵控制算法在研制的样机中实现, 并在实际海试中验证, 给出其海试结果。

1 阳澄湖号油轮船舶参数及船舶模型摄动 (Ship parameters and model uncertainty for YANGCHENGHU oil tanker)

船舶航向保持是一个典型的 SISO 问题, 取舵角 δ 为输入信号, 航偏角 $\Delta\psi$ 为输出信号, 可得到船舶运动的 Nomoto 传递函数数学模型:

$$G_{\psi\delta}(s) = K_0 / (s(T_0 s + 1)).$$

进行海试的阳澄湖号油轮满载时的船舶参数如下: 两柱间长: 149m; 夏季吃水: 9.214m; 型宽: 22m; 排水量: 25123 吨; 营运航速: 13.5Kn; 方形系数: 0.809; 舵叶面积: 20.4m², 重心到中心距离: 3.33m; 由此求出:

$$K_0 = 0.3193 \text{ s}^{-1}, T_0 = 343.119 \text{ s}$$

一般来说, 模型不确定性(模型摄动)有两个来

源^[5], 一是未知的或不可预计的输入(干扰、噪声等), 二是不可预计的动态特性。对于船舶运动控制而言, 如果将海况变化看成是干扰(海况变化可经数学推导等价成模型的参数摄动^[6]), 则装载变化、航速变化及舵机延迟等未建模动态是模型摄动的主要来源, 此次实船试验, 实际海况变化范围为 1 级~3 级, 装载变化不大, 航速变化范围在 12Kn~15Kn 之间, 故航速变化和舵机延迟等未建模动态是此次海上试验模型摄动的主要来源。

2 H_{∞} 自动舵航向航迹控制算法及产品化研究说明 (Track-keeping control algorithm and commercial investigation of autopilot for ships)

借助 MATLAB 软件包的鲁棒控制工具箱, 应用 H_{∞} 控制理论的 S/KS/T 混合灵敏度问题设计船舶航向保持控制器, 具体算法参见文献^[1~4], 这里只给出其权函数的选择及设计出的控制器。

为了保持系统有足够的干扰抑制和信号跟踪能力, 设计中应保证在低频段灵敏度函数 S 尽可能小; 而为了避免执行机构试图抑制高频噪声而进行有害的抖动, 在高频段应让 $S \rightarrow 1$, 加权因子 $W_1(s)$ 即用于实现此要求, 总的要保证 $\|W_1 S\|_{\infty} < 1$, $W_1(s)$

* 基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金(98015101)资助项目。

收稿日期: 1997-11-17; 收修改稿日期: 1999-4-14。

应具有低通特性,选权函数 W_1 为:

$$W_1(s) = \text{gam}(s + 0.04)/(s + 0.002).$$

当模型具有乘性摄动因子 Δ 时,保证鲁棒稳定的充分条件为 $\|W_3 T\|_\infty < 1$,其中加权函数 $W_3(s)$ 实际上应该是 Δ 的上限, W_3 具有高通特性,以保证补灵敏度函数 T 具有低通特性. W_3 一般根据经验选择,也可按机理推导^[3-5],本文根据干扰为船舶实际航行中最恶劣时的频带,增益选择一个权函数 W_3 使补灵敏度函数 T (也是闭环传函)的有效频谱避开海浪的高频频谱($\geq 0.3\text{rad/s}$):

$$W_3(s) = 0.3333(10s + 1)/(0.05s + 1).$$

W_2 为对 KS 的加权,KS 称为输入灵敏度函数、被控对象的输入即控制器的输出,故 W_2 也是限制控制器输出而加的权函数. $W_2^{-1}(j\omega)$ 具有低通特性,保证输入灵敏度函数对高频控制信号不敏感以改善控制器的输出.对于船舶自动舵来说,动舵频率太高,即不节能,控制效果又不好,故取动舵频率为 1 次/分即 0.1rad/s 时,输入灵敏度函数开始衰减,动舵频率大于 1.6 次/s (10rad/s),输入灵敏度函数截止即完全不敏感.这样有:

$$W_2(s) = (10s + 1)/(0.1s + 1).$$

H_∞ 航向控制器设计:由已知的名义对象 G 和权函数 W_1, W_2, W_3 ,由 MATLAB 软件包优化 W_1 的增益系统 gam 到 0.371 可设计出 5 阶的 H_∞ 航向控制器,然后通过 Schur 向量法降至 3 阶为:

$$k(s) = \frac{0.001435s^2 + 0.01423s + 0.00005702}{s^3 + 0.2976s^2 + 0.02828s + 1.005e^{-3}} \quad (1)$$

H_∞ 设计框架一般不产生积分控制^[5],故对输入干扰造成的静差无能为力^[5,7],为了去除船舶在航行时风等输入干扰造成的静差,海试时在式(1)的基础上外加了积分器,详细情况参见文献[4].

航迹算法采用自动航行方式以使船舶始终航行在计划航线的允许偏差带内,具体算法见文献[1,2].船舶自动舵产品化研究及样机研制详见文献[6].

3 H_∞ 自动舵海试结果 (Sea trial results of H_∞ auto-pilot)

与中国远洋运输总公司合作,笔者于 1997 年 5 月 24 日 ~ 31 日登“阳澄湖”轮,在大连至黄埔航线上对所研制的 H_∞ 航迹舵进行了实船试验.

图 1 为鲁棒控制器在航迹保持中的执行效果,其控制精度较高,控制动作较少.

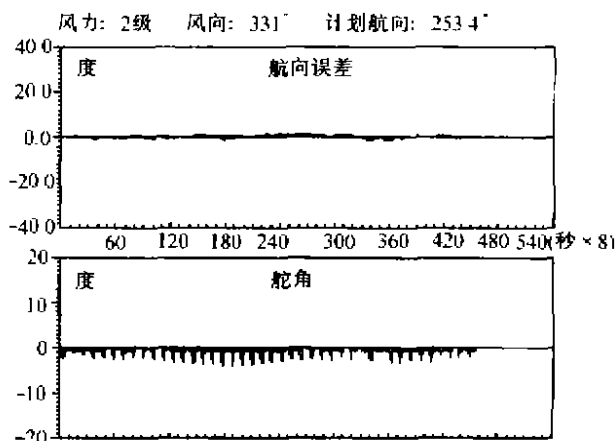


图 1 鲁棒控制效果

Fig. 1 Robust control effect

海试还对不同算法进行了比较,图 2 为鲁棒控制与适应式 PID 之间的比较,第 1 部分为天气开关打到“好”的控制效果,第 2 部分为天气开关打到“坏”的控制效果,第 3 部分为 H_∞ 鲁棒控制器控制效果.从施舵角度看, H_∞ 鲁棒控制动舵优于适应式 PID.图中航向偏差曲线的两个阶跃代表设定航向变化.图 3 为 H_∞ 鲁棒自动舵保持航迹的控制效果,此时风力加大到 4 级,风向稍变,从该图可以看出, H_∞ 鲁棒自动舵在海况变化时能够保持航迹运行.图 4 为航迹自动控制时在转向点处转向的情景,可以看出,自动转向平稳且超调小.

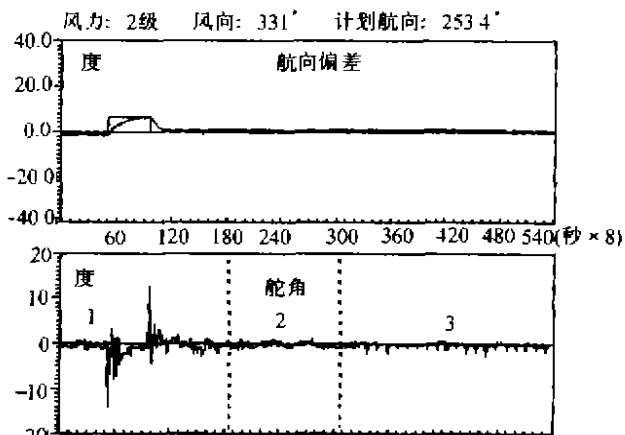


图 2 鲁棒控制与适应式PID比较图

Fig. 2 Comparing of Robust control to adaptive PID

从海试现场控制效果看, H_∞ 控制的打舵慢, 给舵过小, 虽然有利于节能, 但在转向控制时, 达不到实船 30°/分钟转首角速度的要求, 海试后对转向控制算法作了进一步改进^[8], 采用前馈加反馈的转向控制算法; 海试后还探讨了用 μ 分析和 H_∞ 积分算法改进 H_∞ 控制算法^[7]。

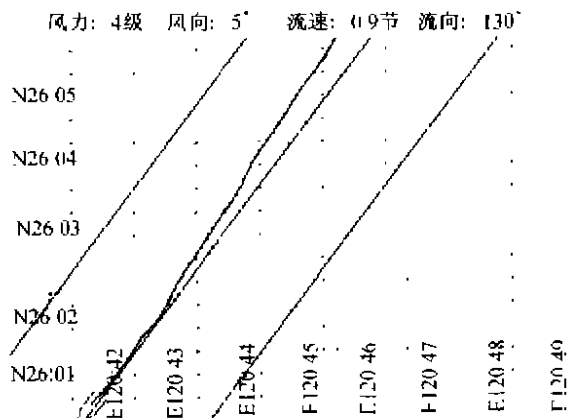


图3 H_∞鲁棒自动舵航迹控制结果

Fig. 3 Track control effect of H_∞ robust autopilot for ships

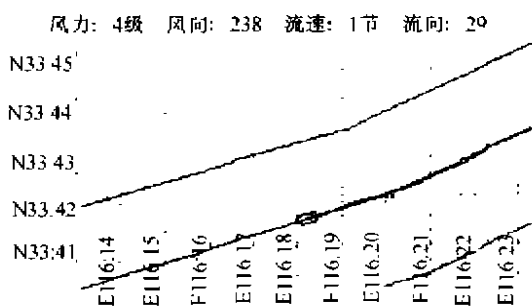


图4 自动转向

Fig. 4 Automatic course changing

4 结论 (Conclusion)

从海试结果可以看出, H_∞ 鲁棒自动舵能够抑制海况干扰, 同时具有良好的控制性能, 对航速变化等产生的船舶模型扰动, 具有良好的鲁棒性能, 在船舶运动控制研究领域, 应用 H_∞ 优化理论于船舶自动舵, 在国外已进行过一些工作, 但全部属于仿真研究^[9,10], 实际的海上试验研究, 尚未见报导, 尽管海试时未遇恶劣的海况, 可能某些权函数选择不理想, 但本研究立志于将理论成果转化为生产力, 率先

在国内开展这方面的工作, 所进行的海上试验, 给出了本研究领域的第一批试验数据和首次的 H_∞ 实时控制结果, 该成果对于该学术领域有参考价值, 对于今后的研究工作具有指导意义, 已有成果为新一类的高新技术型自动舵的打入市场创造了条件。

参考文献 (References)

- [1] 张显库, 蒋丹东, 贾欣乐. 船舶自动舵的研究[J]. 大连海事大学学报, 1997, 23(1): 7-11
- [2] Zhang X K, Jia X L, Wang X C. Robust track-keeping autopilot for ships [A]. IFAC Workshop on CAMS'95 [C]. Trondheim, Norway, 1995, 138-142
- [3] 张显库, 贾欣乐等. 鲁棒控制工具箱的应用开发[J]. 大连海事大学学报, 1995, 21(2): 58-63
- [4] 贾欣乐, 张显库. H_∞ 控制器应用于船舶自动舵[J]. 控制与决策, 1995, 10(3): 250-254
- [5] Zhou Kemin, Doyle J C and Glover K. Robust and Optimal Control [M]. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1996
- [6] 蒋丹东, 朱利民, 贾欣乐. 智能式航迹舵的海上试验研究[J]. 中国造船, 1998, (3): 22-30
- [7] 张显库. H_∞ 鲁棒控制理论及其在船舶自动舵中的应用[D]. 大连: 大连海事大学, 1998
- [8] 贾欣乐, 蒋丹东, 张显库. 船舶转向控制器研究[J]. 大连海事大学学报, 1998, 24(1): 23-28
- [9] Lozowski A and Zwierzewicz Z. On adaptation of H_∞ control to the ship trajectory tracking problem [A]. Proc. IFAC Workshop on Control Applications in Marine Systems' 95 [C]. Trondheim, 1995: 131-137
- [10] Messer A C and Grimble M J. Robust track keeping control Proc [A]. IFAC Workshop on Control Applications in Marine Systems' 92 [C]. Genova, 1992: 371-380

本文作者简介

张显库 1968年生, 博士, 副教授, 目前研究方向: 鲁棒控制, 计算机软件开发, 轮机工程. 近五年在著名国际会议及国内重要学术刊物共发表论文 20 多篇, 计算机应用专著 2 部。

贾欣乐 1932年生, 博士生导师, 研究方向: 鲁棒控制, 轮机工程等. 在国际会议及国内刊物共发表论文 40 多篇, 船舶运动控制专著 1 部。

蒋丹东 1970年生, 博士, 工程师, 研究方向: 智能控制及应用, 发表论文 8 篇。