

船舶双舵同步补偿控制

刘 胜, 常绪成, 李高云

(哈尔滨工程大学 自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 采用双舵配置的船舶, 两套舵伺服系统结构参数和电气参数等具有一定的差异. 在航行过程中, 将会导致船舶双舵的同步误差增大、舵效降低、操纵性能变差. 为了减小双舵同步误差, 本文阐述了一种模糊变论域同步补偿控制方法. 为此首先对舵机系统进行了机理建模, 然后借鉴主从控制策略提出了双舵同步补偿控制系统结构, 针对PID适应性差的问题, 引入变论域模糊控制思想, 进一步设计了变论域模糊PID双舵同步补偿控制器. 最后仿真结果表明所设计的控制器有效地减小了双舵同步误差、提高了船舶航向稳定性, 该方法在船舶双舵同步控制中切实可行, 具有工程指导意义.

关键词: 船舶; 双舵; 同步补偿; 模糊; 变论域

中图分类号: U667.42 **文献标识码:** A

Synchronous-ballistic control for a twin-rudder ship

LIU Sheng, CHANG Xu-cheng, LI Gao-yun

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

Abstract: In a ship with twin-rudder, the structure parameters and electrical parameters are different in two steering gear systems. During the navigation, the error between the angles of the twin-rudder will be increased; and the efficiency of rudder power and ship maneuverability will be reduced. To reduce the error between the angles, we propose a synchronous-ballistic control approach based on fuzzy logic with variable universe. Firstly, the theoretical model of steering gear system is constructed. Secondly, the structure of the synchronous-ballistic control system of twin-rudder is developed based on the master-slave control strategy. Thirdly, fuzzy logic with variable universe theory is introduced to improve the adaptability of PID; thus the variable universe adaptive fuzzy PID synchronous-ballistic controller is designed. Finally, the simulation results show that the error between angles of the twin-rudder can be effectively reduced and the stability is automatically improved by the designed controller. This method is valid and reliable for synchronizing control of twin-rudder and is significant for engineering application.

Key words: ship; twin-rudder; synchronous-ballistic; fuzzy; variable universe

1 引言(Introduction)

对于双舵配置的船舶来说, 在航行过程中要求双舵同步, 双舵同步转动最简单、最可靠的方法是用一台推舵机构, 通过连杆带动两个舵柄同步转动, 但只适用于双舵距离近、单机功率小、负载差别小的场合. 现有的舵机系统基本都是由两套推舵机构分别带动各自的舵柄, 而在实际工作中, 由于两套推舵机构的结构参数及元件电气参数存在一定的差异, 将会导致双舵的同步误差增大, 双舵的不同步将会导致舵效降低, 影响船舶航行操纵性能^[1].

李洪兴首次提出了变论域模糊控制思想^[2]. 在规则形式不变的情况下, 当误差变小时, 调整论域

使其收缩, 相当于增加了可用的模糊规则. 当误差变大时, 调整论域使其伸张, 进而调整模糊控制器的输出, 从而提高系统的控制精度. 近年来变论域在控制系统中得到较好的应用. 利用变论域模糊控制的思想, 文献[3]解决了航机发电机系统的强非线性、强干扰、不确定性等问题; 文献[4]解决了跟踪器瞄准线稳定系统非线性不确定性等问题; 文献[5]提高了暖通空调系统的跟踪速度和鲁棒性.

2 舵机系统模型(Model of steering gear)

舵机伺服系统一般采用电液伺服系统. 本文以泵控型电液伺服舵机系统为分析对象^[6,7], 主要组成部分包括放大器、直流有限转角力矩马达、三通阀

3.2 舵角同步补偿控制器设计(Design of synchro-ballistic controller)

模糊控制器具有不需要精确数学模型、鲁棒性强、工程实现容易等优点, 适合于非线性、时变及纯滞后系统的控制. 本文将模糊控制与常规PID控制相结合, 利用模糊推理判断的思想根据不同的舵角误差 e 和误差变化率 Δe 对PID控制器的参数 k_P, k_I, k_D 进行在线整定, 由于导致舵角不同步的因素有多种, 不同的因素下误差和误差的变化率不同, 导致模糊PID控制器的控制精度降低, 为了有效地提高双舵同步精度, 对舵角同步补偿控制器采用变论域的策略调整不同阶段的控制效果, 通过论域变化来实现模糊推理的更优控制. 变论域模糊PID舵角同步补偿控制器结构如图3所示.

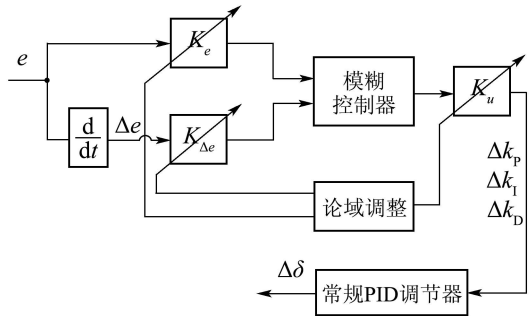


图 3 双舵同步补偿控制器结构图

Fig. 3 Scheme of fuzzy PID controller based on variable universe

3.3 模糊整定规则(Fuzzy controller rules)

根据经验和PID控制器三参数的作用及相互关系, 为了提高响应速度、避免产生积分饱和和超调, 在调节初期比例作用和微分作用应强一些, 积分作用应弱一些; 调节中期保持比例作用, 积分作用适当增加, 微分作用减弱; 为了提高稳定性、减少稳态误差和抑制扰动, 在调节后期比例作用应适当减弱, 积分作用适当增强, 微分作用适当减弱. Δk_P 的模糊规则可归纳如表1所示($\Delta k_I, \Delta k_D$ 的模糊规则表类似).

表 1 Δk_P 模糊控制规则

Table 1 Fuzzy control rules of Δk_P

e	Δe						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZE	ZE
NM	PB	PB	PM	PS	NS	ZE	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZE	NS	NS
ZE	PM	PM	PS	ZE	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZE	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZE	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZE	ZE	NM	NM	NM	NB	NB

3.4 变论域的实现(Realization of variable universe)

变论域是指论域可以随着误差或误差变化率的变化而自行调整, 记输入 e 的论域为 $[-U \ U]$, 变化后的论域为 $[-\alpha U \ \alpha U]$, 其中 α 为伸缩因子. 输出论域的伸缩因子同理记为 γ .

变论域的实现方法有多种, 从系统实现简单和容易的角度考虑, 本文是根据 e 和 Δe 的变化实时调整量化因子、比例因子 $K_e, K_{\Delta e}, K_u$ 的大小来实现论域的变化, 量化因子和比例因子大小的调整通过除以和乘以对应的伸缩因子实现. 与文献[8,9]相比, 该方法调整规则明确, 设定参数少, 运算时间短, 保证了系统的实时性. 可以满足不同时刻的误差和误差变化率对PID参数的自整定的要求.

根据文献[10]选择两个输入论域和三个输出论域的伸缩因子如下:

$$\alpha(e) = 1 - 0.7 \exp(-0.8e^2), \quad (7)$$

$$\alpha(\Delta e) = 1 - 0.7 \exp(-0.8\Delta e^2), \quad (8)$$

$$\gamma_P = 2|e|, \gamma_I = \frac{1}{|e| + 0.6}, \gamma_D = 2|\Delta e|. \quad (9)$$

4 仿真分析(Simulation and analysis)

仿真对象船的参数如下: 排水量 $D = 67200 \text{ t}$, 船长 $L = 220 \text{ m}$, 水线宽 $B = 31.1 \text{ m}$, 吃水 $d = 11.6 \text{ m}$, 航速 $V = 16.5 \text{ kn}$, 方形系数 $C_b = 0.826$, 舵面积 $A_R = 33 \text{ m}^2$. 舵机模型采用第1节给出非线性模型, 船舶运动数学模型采用一阶野本模型^[11], 其中 $K = 0.1736, T = 33.6934$. 为了验证本文所设计的同步补偿控制器的控制效果, 针对两种导致双舵不同步的典型因素, 对双舵同步及其对航向的影响问题进行了仿真. 仿真海情为有义波高3.8 m, 遭遇浪向角分别为 $30^\circ, 90^\circ, 150^\circ$. 舵角限制 $|\delta| \leq 35^\circ$, 舵角速度限制 $|\dot{\delta}| \leq 3^\circ/\text{s}$, 为节约篇幅只给出了有义波高3.8 m, 浪向角 90° 的双舵舵角误差和航向角仿真曲线, 给出了有义波高3.8 m, 遭遇浪向角分别为 $30^\circ, 90^\circ, 150^\circ$ 的仿真统计值结果. 其中: E表示均值, STD表示均方差.

4.1 系统结构参数变化时(Change of machinery parameter)

对于任意两套舵伺服系统来说, 其结构参数难以达到完全匹配, 再加上环境变化引起的结构参数变化, 都会增大双舵同步误差. 以活塞有效面积 A_{h2} 为例, A_{h2} 的变化对输出有直接的影响, 随着活塞有效面积的增加, 系统输出响应时间变慢. 仿真时假设R2舵机活塞面积 A_{h2} 变化10%.

舵角误差和航向角仿真曲线如图4和图5所示, 统

计值如表2和表3所示,不同步表示不采用同步补偿控制器, PID同步表示采用常规PID双舵同步补偿控

制器,变论域同步表示采用变论域模糊自适应PID双舵同步补偿控制器。

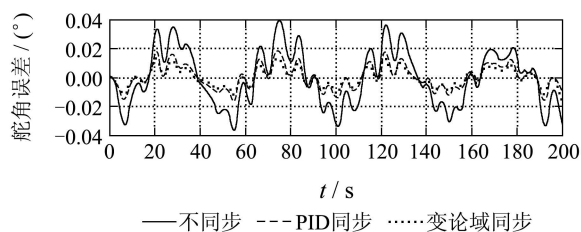


图4 舵角误差对比曲线

Fig. 4 Curves of twin-rudder standard deviation

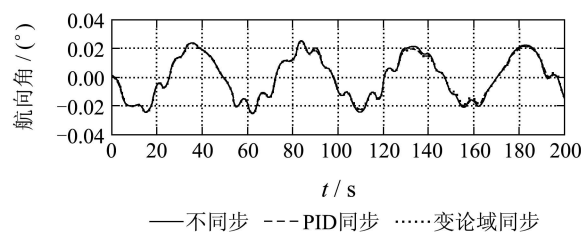


图5 航向角对比曲线

Fig. 5 Curves of course

表2 不同浪向角下双舵舵角误差的统计值

Table 2 Statistics of twin-rudder deviation with different encounter angle

遭遇角	不同步		PID同步		变论域同步	
	E	STD	E	STD	E	STD
30	0.0186	0.1756	0.0072	0.0724	0.0051	0.0519
90	-0.0415	0.0194	-0.0012	0.0083	-0.0024	0.0060
150	-0.0145	0.0303	-0.0011	0.0125	-0.0041	0.0090

表3 不同浪向角下航向角的统计值

Table 3 Statistics of course with different encounter angle

遭遇角	不同步		PID同步		变论域同步	
	E	STD	E	STD	E	STD
30	0.0702	1.4718	0.0714	1.4662	0.0715	1.4640
90	-0.0024	0.1502	-0.0031	0.1448	-0.0032	0.1437
150	-0.0061	0.2383	-0.0071	0.2297	-0.0073	0.2279

由统计值可知,在有义波高3.8 m,浪向角30°情况下,双舵不同步时舵角同步误差的均方差值在0.18°范围内,航向角的均方差在1.48°范围内,采用常规PID同步补偿控制器误差减低约59%,航向精度提高约0.4%,采用变论域模糊自适应PID同步补偿控制器误差减低约70%,航向精度提高约0.5%。

4.2 系统电气参数变化时(Change of electric parameter)

考虑系统中电气设备控制元件,如测量元件、前向放大器等。由于温度、压力的变化及元件的自然老化等原因,元件的参数将会发生变化。以放大器系数 K_0 的变化对舵角输出影响为例, K_0 增大,舵角输出振荡加剧,并且舵角输出值增大; K_0 减小,舵角跟踪快速性及稳态精度降低。仿真时假设前向放大系数变化25%。

舵角误差和航向角仿真曲线如图6和图7所示,

统计值如表4和表5所示。

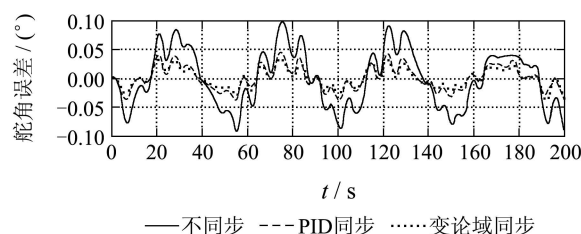


图6 舵角误差对比曲线

Fig. 6 Curves of twin-rudder standard deviation

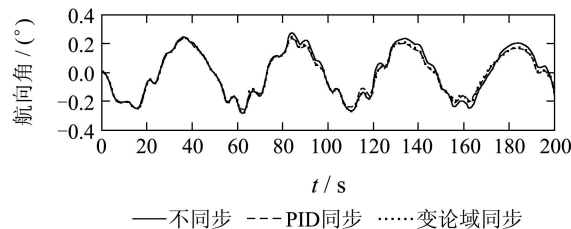


图7 航向角对比曲线

Fig. 7 Curves of course

表 4 不同浪向角下双舵舵角误差的统计值

Table 4 Statistics of twin-rudder deviation with different encounter angle

遭遇角	不同步		PID同步		变论域同步	
	E	STD	E	STD	E	STD
30	0.0466	0.4305	0.0184	0.2290	0.0129	0.1283
90	0.0415	0.0505	-0.0142	0.0206	-0.0235	0.0148
150	-0.0013	0.0797	-0.0014	0.0315	-0.0101	0.0225

表 5 不同浪向角下航向角的统计值

Table 5 Statistics of course with different encounter angle

遭遇角	不同步		PID同步		变论域同步	
	E	STD	E	STD	E	STD
30	0.0661	1.4811	0.0710	1.4781	0.0714	1.4726
90	-0.0012	0.1646	-0.0025	0.1506	-0.0028	0.1478
150	-0.0034	0.2614	-0.0062	0.2390	-0.0067	0.2345

由统计值可知,在有义波高3.8 m,浪向角30°情况下,双舵不同步时舵角同步误差的均方差值在0.44°范围内,航向角的均方差在1.48°范围内,采用常规PID同步补偿控制器误差减低约46%,航向精度提高约0.2%,采用变论域模糊自适应PID同步补偿控制器误差减低约70%,航向精度提高约0.6%。

5 结论(Conclusion)

通过对双舵舵角误差、航向角仿真曲线及统计值的比较分析可知,对于两类不同因素导致的双舵不同步情况,加入本文设计的同步控制器后,双舵同步运动得到明显的改善。而且航向角的精度也得到提高,说明双舵同步以后,可以提高航向的精度和稳定性。针对不同因素导致的不同步问题,采用了基于变论域思想的自适应模糊PID控制器,根据误差的变化实时在线调整PID控制器的参数,调整规则明确、实时性强,解决了船舶双舵同步控制中PID适应性差的问题,提高了系统的自适应能力、鲁棒性能和控制精度。

参考文献(References):

- [1] YEON G K, SUN Y K, HYOUNG T K, et al. Prediction of the maneuverability of a large container ship with twin propellers and twin rudders[J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2007, 12(3): 130 – 138.
- [2] 李洪兴. Fuzzy控制的本质与一类高精度Fuzzy控制器的设计[J]. *控制理论与应用*, 1997, 14(6): 868 – 872.
(LI Hongxing. The essence of fuzzy control and a kind of fine fuzzy controller[J]. *Control Theory & Applications*, 1997, 14(6): 868 – 872.)
- [3] 郑宏, 徐红兵, 朱贵平. 变论域自适应模糊控制在航机发电中的应用[J]. *控制理论与应用*, 2008, 25(2): 253 – 256.
(ZHENG Hong, XU Hongbing, ZHU Guiping. Adaptive fuzzy control based on variable universe and its application to aero engine turbine power generator[J]. *Control Theory & Applications*, 2008, 25(2): 253 – 256.)
- [4] 姬伟, 李奇. 自适应模糊PID控制器在跟踪器瞄准线稳定系统中的应用[J]. *控制理论与应用*, 2008, 25(2): 278 – 282.
(JI Wei, LI Qi. Application of adaptive fuzzy PID controller to tracker line of sight stabilized system[J]. *Control Theory & Applications*, 2008, 25(2): 278 – 282.)
- [5] 吕红丽, 段培永, 崔玉珍, 等. 新型模糊PID控制及在HVAC系统的应用[J]. *控制理论与应用*, 2009, 26(11): 1277 – 1281.
(LU Hongli, DUAN Peiyong, CUI Yuzhen, et al. Novel fuzzy PID control and application to HVAC systems[J]. *Control Theory & Applications*, 2009, 26(11): 1277 – 1281.)
- [6] 余武斌, 李德远, 黄亚农, 等. 潜艇舵机液压伺服控制系统数学模型分析[J]. *船舶工程*, 2002, 24(4): 38 – 42.
(YU Wubin, LI Deyuan, HUANG Yanun, et al. Analysis of mathematical model of hydraulic servo system of submarine steering gear[J]. *Ship Engineering*, 2002, 24(4): 38 – 42.)
- [7] 霍学亮, 任光, 张均东, 等. 基于Simulink的船舶舵机系统的建模与动态仿真[J]. *大连海事大学学报*, 2007, 33(6): 74 – 76.
(HUO Xueliang, REN Guang, ZHANG Jundong, et al. Modeling and dynamic simulation of steering gear system of ship based on Simulink[J]. *Journal of Dalian Maritime University*, 2007, 33(6): 74 – 76.)
- [8] 李丽娜, 柳洪义, 罗忠, 等. 模糊PID复合控制算法改进及应用[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2009, 30(2): 274 – 278.
(LI Lina, LIU Hongyi, LUO Zhong, et al. Study on improved fuzzy PID composite control arithmetics and its applications[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2009, 30(2): 274 – 278.)
- [9] 梁燕华, 金鸿章, 李东松. 基于修正因子模糊PID控制在升力鳍系统中的应用[J]. *控制与决策*, 2008, 23(10): 1139 – 1144.
(LIANG Yanhua, JIN Hongzhang, LI Dongsong. Application of fuzzy PID controller based on adjustment factors in lift fin stabilizers[J]. *Control and Decision*, 2008, 23(10): 1139 – 1144.)
- [10] 李洪兴, 苗志宏, 王加银. 非线性系统的变论域稳定自适应模糊控

制[J]. 中国科学(E辑), 2002, 32(2): 211 – 223.

(LI Hongxing, MIAO Zihong, WANG Jiayin. Adaptive fuzzy control based on variable universe for nonlinear system[J]. *Science in China (Series E)*, 2002, 32(2): 211 – 223.)

- [11] 洪碧光, 于洋. 船舶操纵性指数K、T的统计分析[J]. 大连海事大学学报, 2000, 26(4): 29 – 33.

(HONG Biguang, YU Yang. Ship's K, T indices statistics analysis[J]. *Journal of Dalian Maritime University*, 2000, 26(4): 29 – 33.)

附录 舵机模型参数值(Appendix Parameter value of steering gear)

放大器 $K_0 = 2$,

力矩马达增益 $K_{ai} = 0.0060 \text{ Nm/V}$,

力矩马达频率 $\omega_a = 632 \text{ rad/s}$,

三通伺服阀增益 $K_v = 1.9 \times 10^{-4} \text{ m/N}$,

三通伺服阀阻尼比 $\xi_v = 0.14$,

三通伺服阀固有频率 $\omega_v = 158 \text{ rad/s}$,

阀套反馈杠杆的比例系数 $K_g = 0.2$,

阀芯拨叉与力矩马达转子轴中心距 $R_0 = 0.015 \text{ m}$,

阀芯粘性阻尼系数 $B_{f1} = 9.1 \text{ N/(m} \cdot \text{s}^{-1})$,

稳态液动力刚度 $K_{Rs} = 4800 \text{ N/m}$,

三通阀流量增益 $K_q = 0.5 \text{ m}^2/\text{s}$,

流量压力系数 $K_c = 7.1 \times 10^{-12} (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})/\text{Pa}$,

差动液压缸增益 $K_{h1} = 318 \text{ m/s}$,

差动液压缸固有频率 $\omega_{h1} = 2018 \text{ rad/s}$,

差动液压缸阻尼比 $\xi_{h1} = 0.04$,

差动液压缸控制腔初始容积 $V_{01} = 6 \times 10^{-5} \text{ m}^3$,

差动液压缸活塞头面积 $A_{h1} = 1.6 \times 10^{-3} \text{ m}^2$,

液压油弹性模量 $\beta_{e1} = 6.9 \times 10^8 \text{ Pa}$,

泄露系数 $C_{i1} = 4.5 \times 10^{-12} (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})/\text{Pa}$,

变量泵的排量 $D_p = 500 \text{ cm}^3$,

变量泵的排量梯度 $K = 0.001$,

变量泵电机转速 $n = 1200 \text{ r/min}$,

转舵机构液压缸增益 $K_{h2} = 12 \text{ m}^{-2}$,

转舵机构液压缸固有频率 $\omega_{h2} = 158 \text{ rad/s}$,

转舵机构液压缸阻尼比 $\xi_{h2} = 0.4$,

舵轴中心到转舵液压缸撞杆中心线的距离 $R = 0.9 \text{ m}$,

转舵液压缸控制腔初始容积 $V_{02} = 0.06 \text{ m}^3$,

转舵液压缸撞杆头面积 $A_{h2} = 0.09 \text{ m}^2$,

液压油弹性模量 $\beta_{e2} = 6.9 \times 10^8 \text{ Pa}$,

泄露系数 $C_{i2} = 5.1 \times 10^{-9} (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})/\text{Pa}$.

作者简介:

刘 胜 (1957—), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为船舶航行与姿态控制、人工智能理论及其应用等, E-mail: Liu.sch@163.com;

常绪成 (1983—), 男, 博士研究生, 目前研究方向为先进控制理论与应用, E-mail: changxucheng@hrbeu.edu.cn;

李高云 (1981—), 男, 博士研究生, 目前研究方向为先进控制理论与应用, E-mail: ligaoyun@163.com.