

文章编号: 1001-0920(2008)10-1139-06

基于修正因子模糊 PID 控制在升力鳍系统中的应用

梁燕华, 金鸿章, 李东松

(哈尔滨工程大学 自动化学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 应用基于量化因子和决策因子自修正的模糊 PID 控制算法来改进升力控制减摇鳍系统, 并利用子模糊系统自动调整量化因子和决策因子, 从而改善基本模糊控制器的稳态和动态性能. 模糊控制算法与传统 PID 控制的有机结合, 使升力鳍系统控制精度、鲁棒性以及自适应性得到显著改善. 基于该算法的某型船舶仿真结果表明, 该复合控制算法使升力鳍系统能够在各种海况下均具有良好的减摇效果.

关键词: 升力控制; 减摇鳍; 模糊 PID 控制; 量化因子; 决策因子

中图分类号: TP13 **文献标识码:** A

Application of fuzzy PID controller based on adjustment factors in lift fin stabilizers

LIANG Yan-hua, JIN Hong-zhang, LI Dong-song

(College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China. Correspondent: LIANG Yan-hua, E-mail: lyhmm2003@yahoo.com.cn)

Abstract: Fuzzy PID controller based on quantizing factors and decision-making factor self-correcting online is proposed to improve the control effect of lift fin stabilizers. A fuzzy subsystem model is introduced to regulate the quantizing and decision-making factors. The dynamic characteristic and the steady-state behavior of fuzzy controller are improved. Combined fuzzy algorithm with PID strategy, the high accuracy and better adaptability are obtained. The numerical simulation of a ship with fuzzy-PID model shows the smooth and favorability of anti-rolling performance in all kinds of sea conditions.

Key words: Lift control; Fin stabilizers; Fuzzy PID control; Quantizing factor; Decision-making factor

1 引言

减摇鳍是目前广泛使用的船舶减摇设备, 传统减摇鳍控制方法主要依据鳍的静态水动力特性, 采用鳍角反馈控制鳍运动^[1,2]. 实际上, 当鳍在流体中作往复运动时, 鳍上的水动力特性比相应的静态水动力特性要复杂得多, 导致实际减摇效果达不到设计指标. 升力反馈控制减摇鳍(简称升力鳍)是为了克服鳍角控制缺点而提出的, 它直接以扶正力矩为反馈信号, 不使用鳍角与升力之间的映射关系, 因而达到很好的减摇效果, 是今后减摇鳍控制一个新的研究方向.

在减摇鳍系统中, 由于被控对象具有时变、非线性以及不确定性等特点^[3], 使得采用传统的 PID 控制器难以达到理想的减摇效果. 将先进控制策略与

传统 PID 控制相结合^[4,5]是解决上述问题的一种有效途径.

PID 控制器具有原理简单、稳定可靠、无静差等优点, 在过程控制中得到广泛应用, 是较经典的控制器, 但它对具有非线性(饱和、时延、回程等)和不确定性等特征的系统很难达到预期效果. 而模糊逻辑控制器(FLC)是从 Zadeh 提出的模糊集概念发展起来的, 适用于无法得到准确数学模型、多输入、具有不确定因素、非线性系统的控制. 为了获得性能更优的控制器, 人们尝试将模糊控制和 PID 控制结合, 提出了多种 Fuzzy-PID 模型, 并应用于各种工程, 取得了满意的控制效果. 应用模糊控制的 PID 控制器既有 PID 的结构简单、控制精度高等优势, 又具有 FLC 的鲁棒性能.

收稿日期: 2007-08-15; 修回日期: 2007-11-13.

基金项目: 黑龙江省博士后基金项目(LBH-Z05052); 国家“十五”211工程“船舶控制工程”重点项目.

作者简介: 梁燕华(1975—), 女, 黑龙江大庆人, 博士生, 从事控制理论与控制工程等研究; 金鸿章(1946—), 男, 上海人, 教授, 博士生导师, 从事控制理论与控制工程、模式识别与智能控制等研究.

2 升力反馈控制减摇鳍

2.1 船舶线性横摇模型

当船舶摇摆运动角度较小时,可以应用线性横摇理论来分析船舶的横摇运动.依照 Conolly 理论,船舶线性横摇可以表示为

$$(I_x + I_x) \ddot{\phi} + 2N_u \dot{\phi} + Dh = -Dh_1 \quad (1)$$

其中: ϕ 为横摇角, I_x 和 I_x 分别为相对于船舶重心纵轴的惯量和附加惯量, $2N_u$ 为单位横摇角速度的船舶阻尼力矩, D 为船舶排水量, h 为横摇稳心高, ϕ_1 为等效波倾角.

2.2 升力反馈控制减摇鳍的减摇原理

升力反馈控制减摇鳍通过安装在鳍轴上的力传感器直接测量鳍上升力,测得信号作为鳍随动系统的反馈信号,取代传统的鳍角反馈信号.从而将鳍角与鳍上动态升力之间的各种不确定因素封装起来,达到提高系统减摇性能的目的,其中控制器的输出为升力控制指令.

当海浪作用于船舶后,产生一个扰动力矩迫使船舶产生摇荡,鳍在减摇鳍控制系统的控制下,根据海浪扰动的规律作相应的转动,产生鳍上的升力,形成抑制船舶横摇的对抗力矩来减小船舶的摇摆.

式(1)中,等号右边是海浪扰动力矩.如果存在一个对抗海浪力矩的控制力矩 K_c ,则式(1)变为

$$(I_x + I_x) \ddot{\phi} + 2N_u \dot{\phi} + Dh = -Dh_1 - K_c \quad (2)$$

鳍上产生的升力控制力矩为

$$K_c = V^2 A_f C_L l_f \quad (3)$$

其中: ρ 为海水密度, V 为来流速度, A_f 为鳍的投影面积, C_L 为鳍升力系数, l_f 为自鳍中心至穿过船重心的纵轴垂直线, ϕ 为鳍角.如果 $K_c = -Dh_1$,则等式右边为零,船舶就会停止横摇.

2.3 升力反馈控制减摇鳍的系统结构

升力鳍系统的关键部件是安装在鳍轴上的升力传感器.当鳍与水流方向形成一攻角时,鳍上产生升力,传感器便获得了与升力成比例的电信号.将该信号与所需抵抗船舶横摇的升力瞬时值进行比较,所得差值驱动每个鳍转动,直到获得所期望的升力,因此鳍会随着不同水流方向而自动调节转动方向.图1是参考美国 Sperry 公司研制的升力鳍系统结构框图.

尽管升力反馈控制可以封存鳍角到升力计算中的不确定性和非线性,但是 Conolly 模型并不能很好地描述那些非线性因素对船舶横摇造成的影响,如被控对象中存在着的时变性、非线性以及不确定性等特征.由于这些因素的存在,采用传统的 PID 控制方法不能达到预期的减摇效果.将 PID 控制与

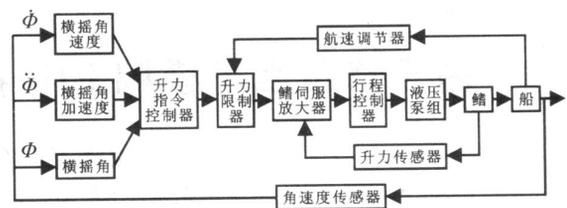


图1 升力反馈控制减摇鳍系统框图

模糊参数自整定模型相结合而构成的新控制器兼备了两种模型的优点,使系统达到更好的减摇效果.

3 升力鳍系统模糊 PID 控制器的设计

3.1 应用模糊 PID 控制的升力指令控制器

在升力反馈控制减摇鳍系统中, PID 控制器的控制算式如下所示:

$$L_{pid}(s) = \left(k_{IL} \frac{1}{T_{I1}s + 1} + K_{PL} + k_{DL} \frac{T_{D1}s}{(T_{D1}s + 1)(T_{D2}s + 1)} \right) (s) \quad (4)$$

其中: k_{PL} , k_{IL} , k_{DL} 分别为升力控制减摇鳍控制器中的比例、积分、微分环节的调节系数;为解决积分漂移,积分环节用惯性环节近似, T_I 为时间常数;微分用间接微分环节来代替以避免高频扰动, T_{D1} , T_{D2} 为对应的时间常数; ϕ 为船舶横摇角.

设计升力反馈控制减摇鳍模糊 PID 控制器的关键问题,是如何通过模糊规则来确立升力控制指令、模糊控制器中的 PID 参数、量化因子、决策因子的定义.

3.2 模糊 PID 控制器的设计

模糊控制器的设计有多种方法,简单且常用的是查表式模糊控制器,具体设计步骤如下:

Step1: 确定模糊控制器的输入、输出语言变量,即模糊控制器的维数.以系统偏差 e 和偏差变化率 ec 为输入语言变量,取 PID 控制器的 3 个增量参数 K_P , K_I , K_D 为模糊控制器的输出语言变量.

Step2: 根据实际需要确定各个输入、输出变量的变化范围,然后确定它们的量化等级和量化、决策因子.

Step3: 在每个变量的量化论域(变量的变化范围)内定义模糊子集.首先确定模糊子集个数,再确定每个模糊子集的语言变量,然后为每一个语言变量取适宜的隶属度函数.

Step4: 确定模糊控制规则,实质上是将操作人员的控制经验加以总结得出的若干条模糊条件语句的集合.确定模糊规则的原则是保证控制器的输出能够使系统输出响应的动静态性能达到最佳.

Step5: 模糊推理.根据所确定的模糊控制规则

对系统的输入制定出一套模糊推理方案,从而能够对每一个输入得到相应的输出控制量,来驱动控制对象.

Step6: 模糊控制表的求取,即精确化过程.在推理得到的模糊集合中取一个能最佳代表这个模糊推理结果可能性的精确值的过程称为精确化过程,又称为反模糊化.反模糊化可以采用多种不同的方法,较为广泛的是重心法.

所有输入语言变量的各种组合通过模糊推理的一套方法离线计算出每一个状态对应的模糊控制器输出,从而生成模糊控制表并存入存储器中,这样就设计完成了模糊控制器.

3.3 PID 控制参数模糊整定规则

针对该系统中不同的 e 和 ec ,将 PID 参数的整定规则归纳如下:

1) 当偏差 e 较大时,为加快系统的响应速度,应取较大的 K_p .同时,为避免由于开始时偏差 e 的瞬时变大可能出现的微分过饱和而使控制作用超出许可的范围,应取较小的 K_d .为防止系统响应出现较大的超调,产生积分饱和,应对积分作用加以限制,通常 $K_i = 0$,去掉积分作用.

2) 当 e 和 ec 处于中等大小时,为使系统响应应具有较小的超调, K_p 应取小一些, K_i 的取值要适当,这种情况下 K_d 的取值对系统响应的影响较大,取值要大小适中,以保证系统的响应速度.

3) 当 e 较小即接近于设定值时,为使系统有良好的稳态性能,应增加 K_p 和 K_i 的取值.同时,为避免系统在设定值附近出现振荡,并考虑系统的抗干扰性能, K_d 取值是相当重要的.一般当 ec 较小时, K_d 应取大一些;当 ec 较大时, K_d 应取小一些. ec 的大小表明偏差变化的速率, ec 值越大,则 K_p 的取值越小, K_i 取值越大.

这些规则可归纳成表 1 所示的 K_p (K_i , K_d 同理可推) 的模糊控制规则表.设相应的语言变量为 f (负大 (NB), 负中 (NM), 负小 (NS), 零 (ZO), 正小 (PS), 正中 (PM), 正大 (PB)).

表 1 K_p 的模糊控制表

	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

4 模糊控制器中量化、决策因子的修正

一般情况下,模糊控制器可以根据经验通过公式简单标度变换做出适当地整定.这样,无须对被控对象作深入的了解,也能获得可行的控制效果,并且可以通过适当细分论域区间来进一步改善控制质量,这正是模糊控制器最宝贵的优点之一.该方法给设计过程本身带来了很大的方便,并为获得理想的控制效果提供了可能性.但也不可避免地给整定过程带来盲目性,使量化因子 K_e , K_{ec} 和决策因子 K_u 的取值有较大的主观随意性,要真正得到一个理想的控制效果仍须做大量的分析和实验研究.因此,这里讨论应用变论域思想来设计模糊控制器.

4.1 变论域思想的应用

李洪兴在文献[6,7]中提出了变论域概念.变论域实际上是使输入和输出的基本论域随着控制需求按一定准则在适当的时刻进行伸缩变化,定义在基本论域上的模糊划分也随之变化.变论域的目的是为了解决各种模糊控制器在设计及控制时出现的问题,使设计更简单而控制效果更好.

1) 简化初始论域的选择.

模糊控制的初始论域选择较难,过大或过小都会严重影响控制效果.通过论域的适当伸缩,可以避免由论域选择不当造成的影响.其思想是使论域在控制的适当时刻随控制需求伸缩变化,对于初始论域确定不准确的控制器,也能够获得较好的控制量.因此合理地变论域能够解决模糊控制器初始论域确定的难题.

2) 解决模糊规则数量与控制精度之间的矛盾.

改善对象动态性能,提高稳态精度.实际控制中,当误差 e 较大时,可根据实际控制需求,对论域进行伸缩处理,得到更适当的控制量.例如当误差较小时,可用模糊规则大量减少,一般集中在与 PS 或者 NS 有关的规则,根据模糊推理得到的控制量精度不够,会出现稳态静差和振颤.通过压缩论域,使模糊划分集中分布在较小的论域范围,增加可用规则数量,控制精度会相应增加,稳态性能也会提高.

变论域思想可用于任何一种模糊控制器,只要确定论域实时变化的规律,就能获得比一般控制器更好的控制效果^[8].

4.2 量化、决策因子与变论域的关系

当量化因子 K_e 增大时,基本论域 $[-e_{max}, e_{max}]$ 缩小,输入 e 对控制的作用就增强;当 K_e 减小时,基本论域扩大, e 对控制的作用减弱.量化因子 K_{ec} 增大时,基本论域 $[-e_{max}, e_{max}]$ 缩小,输入 ec 对控制的作用增强;当 K_{ec} 减小时,基本论域扩大, ec 对控制的作用减弱.而当决策因子 K_u 增大时,输出基本

论域扩大, K_u 的作用增强, 使控制量增大; 当 K_u 减小时, 输出基本论域也缩小, K_u 的作用减弱, 使控制量相应减小。

量化、决策因子的大小变化实际上反映了相应论域的伸缩变化, 且对控制效果有明显的作用。鉴于量化、决策因子对论域的伸缩作用, 以及对控制的影响, 本文采用了在不同阶段分别采用不同的量化因子和决策因子来调整不同阶段的控制效果, 即在基本模糊PID控制器基础上单独建立另一个子模糊控制器, 用来修正量化因子和比例因子参数^[9,10], 如图2所示。

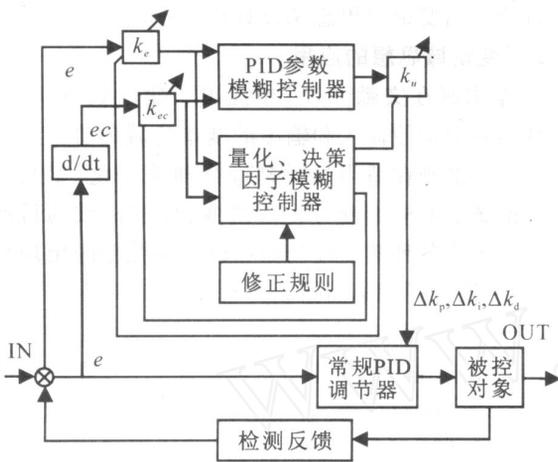


图2 在线自动修正量化、决策因子的模糊PID控制器

在控制器中, 设定输入量 e 和 ec 各自论域的伸缩只与自身变化有关, 则输入论域的量化因子 K_e 和 K_{ec} 的模糊规则就易于确定。表2是 K_e 和 K_{ec} 的整定规则, 设模糊划分为B, M, S和ZE。

表2 K_e 和 K_{ec} 的修正规则表

		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
e	K_e	B	M	S	ZE	S	M	B
ec	K_{ec}	B	M	S	ZE	S	M	B

K_u 的取值根据 e 和 ec 当前取值所反映的系统响应状态来确定, 从而决定输出论域该进行多大程度的扩大或者缩小。表3为 K_u 的修正规则表, 其模糊划分为VB, B, SB, S和ZE, 横向为 e 相应的语言变量。

表3 K_u 的修正规则表

		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	VB	VB	VB	B	SB	S	ZE	
NM	VB	VB	B	B	MB	S	VS	
NS	VB	MB	B	VB	VS	S	VS	
ZE	S	SB	MB	ZE	MB	SB	S	
PS	VS	S	VS	VB	B	MB	VB	
PM	VS	S	MB	B	B	VB	VB	
PB	ZE	S	SB	B	VB	VB	VB	

言变量, 纵向为 ec 相应的语言变量。

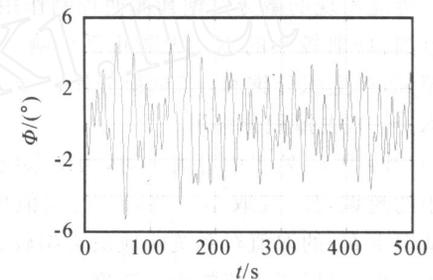
因此, 量化、决策因子相当于输入输出论域的伸缩因子, 它们能把相应量从初始论域大致映射到规范化论域, 论域具体的变化程度由伸缩因子完成。

5 应用模糊PID的升力鳍系统的仿真

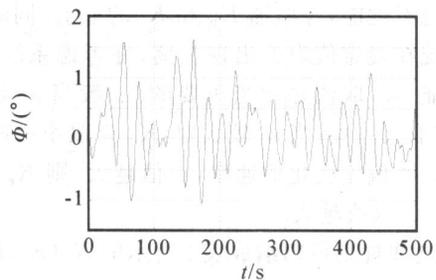
仿真参照某船参数: 排水量 $D = 1457.26t$, 船长 $L = 98.0m$, 水线宽 $B = 10.2m$, 吃水 $T = 3.1m$, 稳心高 $h = 1.15m$, 谐振周期 $T = 7.8s$, 鳍型选用NACA0015翼型。仿真过程中, 模拟海浪的波谱为ITTC单参数谱。

在有义波高 $3.8m$, 航速 $22km$, 浪向分别为 $45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 的情况下, 对该减摇鳍闭环控制系统的仿真结果如图3~图5所示。

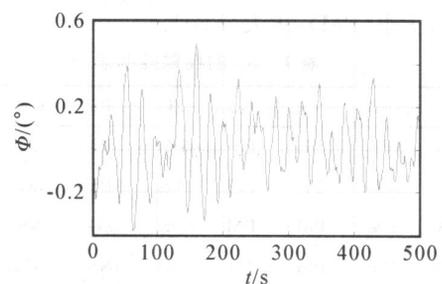
从仿真图可以看出, 基于量化、决策因子自修正模糊PID控制的升力鳍系统比传统的鳍角PID控制有更好的减摇性能。表4给出了更多海况下升力鳍系统的统计值分析。



(a) 系统未减摇横摇角

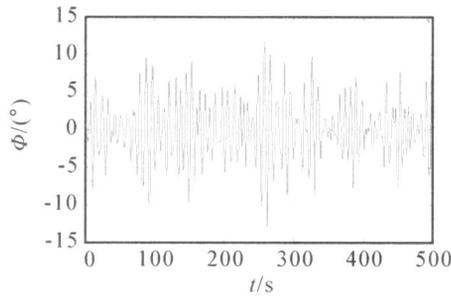


(b) 鳍角控制横摇角

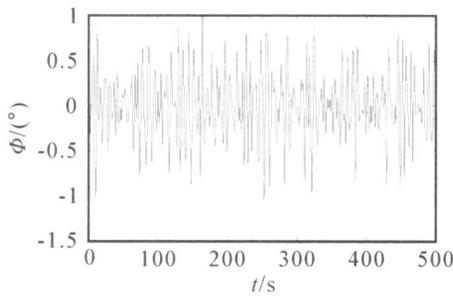


(c) 升力模糊PID控制横摇角

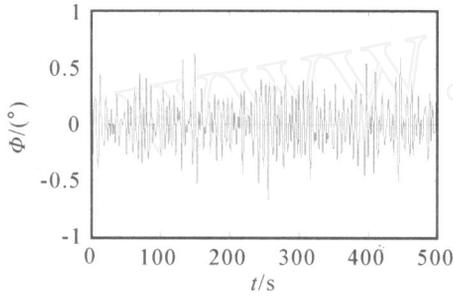
图3 船横摇角在浪向 45° 时仿真结果



(a) 系统未减摇横摇角

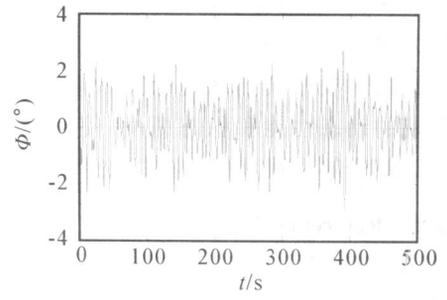


(b) 鳍角控制横摇角

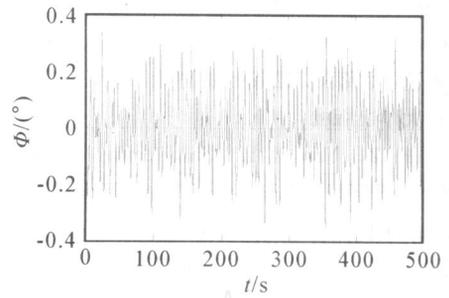


(c) 升力模糊PID控制横摇角

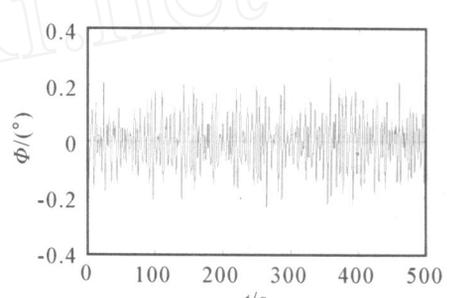
图 4 船横摇角在浪向 90° 时仿真结果



(a) 系统未减摇横摇角



(b) 鳍角控制横摇角



(c) 升力模糊PID控制横摇角

图 5 船横摇角在浪向 135° 时仿真结果

表 4 不同浪向下船舶横摇角绝对值的统计值

浪向/(°)	未减摇		传统鳍角 PID 控制			升力模糊 -PID 控制		
	均值/(°)	方差	均值/(°)	方差	减摇效果/(%)	均值/(°)	方差	减摇效果/(%)
30	0.917	0.505	0.275	0.048	70.0	0.077	0.004	91.6
45	1.617	1.343	0.465	0.131	71.2	0.110	0.007	93.2
60	2.578	2.838	0.540	0.139	79.1	0.163	0.014	93.7
90	3.470	7.045	0.243	0.036	92.9	0.231	0.033	93.3
120	1.793	1.852	0.150	0.010	91.6	0.128	0.010	92.8
135	1.182	0.756	0.098	0.005	91.7	0.103	0.006	91.3
150	0.680	0.280	0.059	0.002	91.3	0.050	0.001	92.6

在减摇鳍控制系统中使用 PID 控制器时,确定其参数是一件很困难的事.由于船舶的自然横摇周期 T 和无因次横摇阻尼的不确定性,需要在海试阶段调试 PID 控制器的参数.当实际船舶的 T 和随时间而变化时,往往因为 PID 控制器的参数选择不当,使控制系统的质量很差,导致达不到预期的减摇效果,而只能在海试确定的横摇周期和横摇阻尼数值附近情况下达到高效的控制精度,在其他海况下就不能完成较好的减摇效果.从表 4 可以看出,采用传统鳍角 PID 控制在 135° 左右浪向情况下,达到

非常好的减摇效果,而在其他海况下不能获得理想的减摇效果.因此,单一的 PID 控制器缺乏模糊 PID 控制器的灵活性和适应性,而应用模糊 PID 控制器的升力反馈控制减摇鳍系统可以在各种海况下均具有平稳的减摇特性.

6 结 论

升力反馈控制减摇鳍是在克服鳍角反馈控制减摇鳍所存在的缺陷而提出的,它封存了鳍角到升力计算过程的影响.本文阐述了升力鳍的控制原理,采用直接测量升力的方法,避免了动态水动力因素造

成的计算误差.应用基于修正因子的模糊 PID 控制器在升力鳍系统中,使模糊控制器的量化因子、决策因子能够通过模糊规则来进行在线修正,改善了升力鳍系统的动态性能和稳态精度,使系统可以在各种海况下都能够取得良好的减摇效果.

参考文献(References)

- [1] 金鸿章,李国斌.船舶特种装置控制系统[M].北京:国防工业出版社,1995:93-120.
(Jin H Z, Li G B. Control systems of marine equipments [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1995: 93-120.)
- [2] 金鸿章,姚绪良.船舶控制理论[M].哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2001.
(Jin H Z, Yao X L. Ship control principle [M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2001.)
- [3] Zhang H P, Yao X L, Chen F, et al. Research on lift feedback fin stabilizer and its nonlinear controller[C]. SICE Annual Conf. Fukui: Fukui University, 2003.
- [4] 金鸿章,王科俊,吉明.智能技术在船舶减摇鳍系统中的应用[M].北京:国防工业出版社,2003.
(Jin H Z, Wang K J, Ji M. The application of intelligent technology used in fin stabilizers[J]. Beijing: National Defence Industry Press, 2003.)
- [5] Surendran S, Lee S K, Kim S Y. Studies on an algorithm to control the roll motion using active fins[J]. Ocean Engineering, 2007, 34(3/4): 542-551.
- [6] 李洪兴.变论域自适应模糊控制器[J].中国科学, 1999, 29(1): 32-42.
(Li H X. Adaptive fuzzy logic controllers with variable universe[J]. Science of China, 1999, 29(1): 32-42.)
- [7] 李洪兴.非线性系统的变论域稳定自适应模糊控制器[J].中国科学, 2000, 32(2): 211-223.
(Li H X. Adaptive fuzzy logic controllers of non-linear system with variable universe [J]. Science of China, 2000, 32(2): 211-223.)
- [8] 王亚英,张春慨,邵惠鹤.变论域知识约简算法[J].上海交通大学学报, 2002, 36(4): 566-569.
(Wang Y Y, Zhang C K, Shao H H. Variable universal knowledge reduction algorithm [J]. J of Shanghai Jiaotong University, 2002, 36(4): 566-569.)
- [9] Guzelkaya M, Eksin I, Yesil E. Self-tuning of PID-type fuzzy logic controller coefficients via relative rate observer [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2003, 16(3): 227-236.
- [10] Amin Haj-Ali, Hao Ying. Structural analysis of fuzzy sets in relation to nonlinear PID control with variable gains[J]. Automatica, 2004, 40(9): 1551-1559.
- [5] Shi Y, Eberhart R. A modified particle swarm optimizer [C]. IEEE World Congress on Computation Intelligence. Anchorage, 1998: 69-73.
- [6] 谢晓锋,张文俊,杨之廉.微粒群算法综述[J].控制与决策, 2003, 18(2): 129-134.
(Xie X F, Zhang W J, Yang Z L. Overview of particle swarm optimization[J]. Control and Decision, 2003, 18(2): 129-134.)
- [7] 汪镭,康琦,吴启迪.基于形式化描述的逻辑分层延迟 PSO 算法及应用[J].控制与决策, 2005, 20(6): 611-615.
(Wang L, Kang Q, Wu Q D. Logical layered-and-delayed PSO algorithm and application based on formalization description [J]. Control and Decision, 2005, 20(6): 611-615.)
- [8] Xie X E, Zhang W J, Yang Z L. A dissipative particle swarm optimization [C]. Proc IEEE Congress on Evolutionary Computation. Honolulu, 2002, 2: 1456-1461.
- [9] Ratnaweera A, Halgamuge S K, Watson H C. Self-organizing hierarchical particle swarm optimizer with time-varying acceleration coefficients[J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 2004, 8(3): 240-255.
- [10] Mahfouf M, Chen M, Linkens D A. Multi-objective optimal design of alloy steels using adaptive weighted particle swarm optimisation [C]. Proc of Parallel Problem Solving from Nature-PPSN. Birmingham, 2004: 762-771.

(上接第 1138 页)