

模糊自整定 PID 航向控制算法性能测试与优化

郑木坤, 李丽娜, 陈国权

(集美大学航海学院, 福建 厦门 361021)

[摘要] 针对船舶智能操控仿真平台 SIHC (ship intellzgent handle and control) 集成的模糊自整定 PID (proportion integral derivative) 航向控制算法对不同船型存在适应性问题, 分析其原因并加以改进。对于不同船型, 运用 K 、 T 简易计算方法获得高精度的 K 、 T 值, 同时制定不同系统阻尼系数 ξ 取值优化策略, 改进 PID 初始值, 实现对模糊自整定 PID 航向控制算法的优化。Matlab 仿真测试结果表明, 改进的模糊自整定 PID 航向控制算法提高了对不同船型的适应性。

[关键词] 航向控制; 适应性; 阻尼系数; PID 初始值

[中图分类号] U 676.1

Testing and Optimization for Fuzzy Self-tuning PID Course Control Algorithm Performance

ZHENG Mukun, LI Lina, CHEN Guoquan

(Navigation College, Jimei University, Xiamen 361021, China)

Abstract: For the adaptation problems for different types of ships when using SIHC simulation platform integrated fuzzy self-tuning PID control algorithm, the reasons are analyzed with improvements made. For different ship types, different damping factor value optimization strategies are designed to improve the initial value of PID, so as to achieve the optimization of fuzzy self-tuning PID control algorithm. The test results from the simulation of Matlab show that the improved fuzzy self-tuning PID control algorithm effectively improves the course automatic control performance of different kinds of ships.

Keywords: course control; adaptation; damping factor; PID initial value

0 引言

PID (proportion integral derivative) 航向自动舵的产生, 使得船舶自动避碰成为可能^[1]。为了满足船舶自动避碰的需求, 航向自动控制必须具有足够高的航向跟踪精度。另一方面, 控制算法对不同船模的适应性是该算法实用化的前提条件。文献 [2] 实现了一种模糊自整定 PID 航向控制算法, 在船舶智能操纵仿真平台 (SIHC) 上 DMI (丹麦航海技术研究所) 船模自带的普通 PID 自动舵提供的初始值基础上, 该算法实现了自动避碰算法的集成; 为了改善该算法实用性, 在文献 [2] 的基础上, 文献 [3] 运用了文献 [4] 的理论分析研究成果, 实现了选定二次型目标函数加权系数下 PID 初始值的自动确定算法, 该自动确定算法的航向跟踪性能对不同船型控制效果不同。文献 [2-3]

[收稿日期] 2016-10-20

[修回日期] 2017-02-24

[基金项目] 福建省自然科学基金项目 (2012D031)

[作者简介] 郑木坤 (1991—), 男, 硕士生, 从事交通信息工程及控制研究。通信作者: 李丽娜 (1962—), 女, 教授, 硕士生导师, 从事交通信息工程及控制研究, E-mail: ll668@163.com。

分析表明：PID 初始值的合理取值对模糊自整定 PID 航向自动舵性能有较大影响。因此为了提高现有模糊自整定 PID 航向自动舵对不同类型船舶的航向跟踪适应性，可从 PID 初始值着手进行研究。又因系统阻尼系数 ξ 与船舶操纵性指数 K 、 T 值决定着 PID 初始值的大小，因此本文首先利用 K 、 T 简易计算方法获得高精度的 K 、 T 值，然后通过理论分析与仿真试验方法，分析系统不同阻尼系数 ξ 的取值对模糊自整定 PID 航向控制算法跟踪性能的影响，以期达到对不同类型船舶控制算法的阻尼系数综合处理。最终实现模糊 PID 航向控制算法对不同类型船舶适应性的优化效果，满足基于 SIHC 测试仿真平台进行船舶自动避碰算法测试的需求。

1 模糊自整定 PID 航向控制算法

1.1 模糊自整定 PID 航向控制原理

模糊自整定 PID 航向控制算法是由模糊自整定 PID 控制器、限幅环节以及被控对象三个部分组成，其原理如图 1 所示。其中 $\psi_r(t)$ 为给定航向； $\psi(t)$ 为实际航向； $e_c(t)$ 为误差变化率； $u(t)$ 为舵角指令。

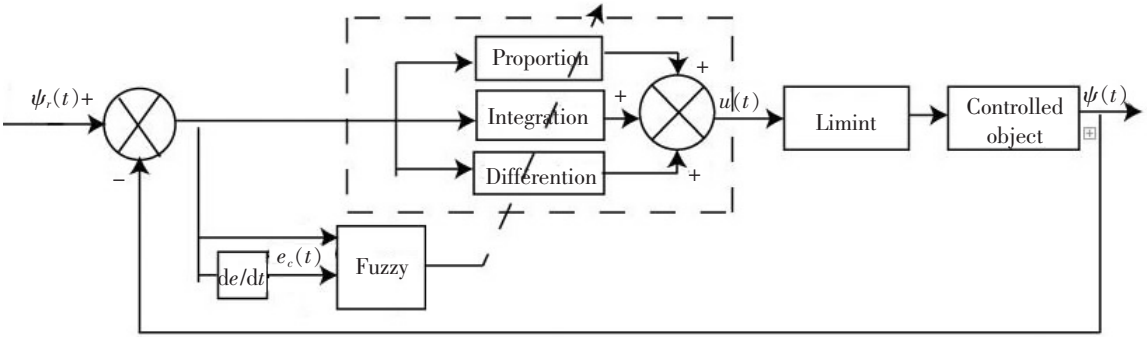


图 1 模糊自整定 PID 控制原理
Fig.1 The fuzzy self-tuning PID control principle

模糊自整定 PID 控制算法在运行过程中，通过对误差 $e(t) = \psi(t) - \psi_r(t)$ 及误差的变化率 $e_c(t) = de(t)/dt$ 不断的检测，然后根据模糊控制规则表（见文献 [2]）对 PID 三个参数 k_p 、 k_i 、 k_d 进行调整，用以满足不同的误差 e 和误差变化率 e_c 对控制参数的要求，因此使得被控对象拥有良好的动、静态性能。

在本设计中，作为输入的 e 和 e_c 的论域为： $e, e_c = \{-5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5\}$ 。

作为输出的修正量 Δk_p 、 Δk_i 、 Δk_d 的论域为： $\Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d = \{-5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5\}$ 。

输入、输出变量词集的选取为： $e, e_c, \Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d = \{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$ 。

词集中的元素 NB, NM, \dots, PB 分别代表负大、负中、负小，零、正小、正中、正大。控制系统通过对模糊逻辑规则结果的处理、查表和计算，实现了对 PID 参数的在线自整定^[2]。

1.2 PID 初始值的确定

由于模糊自整定 PID 自动舵的初始值与控制性能密切相关，因此蒋娇^[3]根据文献 [4-5]，采用二次型最优控制理论分析推演结果，提出了 PID 航向控制初始参数的自动确定算法，即 K_p 、 K_i 、 K_d 为：

$$K_p = 1/\sqrt{\lambda}; \tag{1}$$

$$K_i = \sqrt{K/(T\lambda^{3/2})}/10; \tag{2}$$

$$K_d = (\sqrt{1 + 2KT/\sqrt{\lambda}} - 1)/K。 \tag{3}$$

其中: λ 为加权系数, 取值范围 $0.1 \sim 10^{[6]}$; K 为船舶旋回性能指数; T 为船舶追随性指数。
表 1 为 λ 取值与风速对应表。

表 1 λ 取值与风速对应表
Tab. 1 λ values with wind speed corresponding to the table

风速 Wind speed/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	0 ~ 5	5 ~ 10	10 ~ 14	14 ~ 17	17 ~ 20	20 ~ 30	> 30
λ	0.1	4.0	8.0	8.5	9.0	9.5	10.0

文献 [3] 选取 $\lambda = 0.1$, 从 SIHC 中集成的 DMI 船模库中选取四种不同船型船模, 即集装箱船、散货船、油轮以及小型巡逻艇, 船模具体参数见表 2。根据稳定的航向偏差二阶系统推演可得阻尼系数为^[4]:

$$\xi = \sqrt{2 + \sqrt{\lambda} / (KT)} / 2。$$

(4)

由公式 (4) 可知, 通过逆推的方法, 可由阻尼系数 ξ 求得加权系数 λ 。

由于船模库参数没有提供船舶操纵性指数 K 、 T 值, 故初始值所需 K 、 T 值运用经验公式获取, PID 初始值由公式 (1) - (3) 确定。基于 SIHC 仿真平台集成的模糊自整定航向控制算法, 在静态环境下做船舶改向 30° 的性能测试, 四种船型的航向跟踪曲线如图 2 所示。

表 2 船模基本信息

Tab. 2 Basic information of ship model

序号 Number	船型 Ship type	船长 Length /m	船宽 Breadth /m	排水量 Displacement / m^3
I	集装箱船 Container	349.8	45.60	147700.00
II	散货船 Bulk	289.6	44.20	150100.00
III	油轮 Tanker	259.8	39.90	48851.00
IV	巡逻艇 Patrol boat	18.0	3.06	20.76

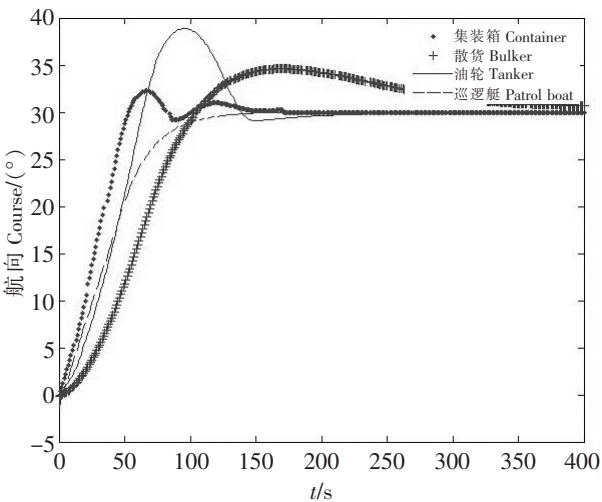


图 2 四种船型航向跟踪曲线图

Fig.2 Four kinds of ship course tracking curve

1.3 存在问题原因分析

从二阶系统性能特点可知, 阻尼系数取 $0.7 \sim 0.8$ 具有良好的跟踪性能。前期的航向控制算法中加权系数 λ 为统一取值, 根据式 (4) 可知, 不同的加权系数必然产生不同的阻尼系数, 从而得到不同的控制效果, 这正是其适应性问题产生的原因之一。另一方面由于经验公式是用于计算 10° 舵角的 K 、 T 值, 直接用于替代 20° 舵角的 K 、 T 值必然使初始值产生误差, 从而影响到二次型最优化推演的 PID 初始值的最优性。

2 模糊自整定 PID 航向控制算法跟踪性能测试

2.1 仿真系统的构建

为了便于仿真船模的替换, 本文采用野本 KT 响应模型^[7]:

$$T\dot{r} + r = K\delta。$$

(5)

其中: K 为旋回性指数, 单位 $1/\text{s}$, 表示旋回性优劣, K 大, 旋回性好; T 为追随性指数, 单位为 s , 表示追随性优劣, T 小, 追随性好。

基于 Nomoto 的 KT 响应模型, 利用 Simulink 仿真工具, 加入模糊自整定 PID 航向控制算法, 完成

响应模型的船舶航向自动控制仿真系统的搭建。响应模型建立的船舶运动仿真系统，如若需要对仿真船模进行更改，仅需改变船模的操纵性指数 K 、 T 值。

为了减少船模仿真的误差，针对船模的不同航向跟踪改向角分别选取不同舵角所对应的 K 、 T 指数。一般航行情况通常选用小舵角（10°）或中舵角（20°）对应的 K 、 T 指数。初步测试及设计要求表明，船舶航向跟踪 10°改向时，最大舵角 10°左右，因此一阶响应模型选用 10°舵角对应的 K 、 T 指数。30°以上改向角时，最大舵角小于或等于 20°，因此一阶响应模型选用 20°舵角对应的 K 、 T 指数。

2.2 K 、 T 简易计算方法

由于 DMI 船模没有提供相应的 K 、 T 值，借助 SIHC 仿真平台对船模做 10°舵角和 20°舵角旋回试验时，利用文献 [8] 提供的 KT 简易计算方法，分别计算出表 2 中四种船型的 10°舵角和 20°舵角所对应的 K 、 T 值，计算结果见表 3。根据测试方案代入响应模型。

表 3 四种船型不同舵角的 K 、 T 值
Tab.3 Four kinds of ship type K/T value of different rudder Angle

船型 Ship type	K 值		T 值	
	10°	20°	10°	20°
集装箱 Container	0.0580	0.042	34.800	29.580
散货 Bulker	0.0390	0.028	59.220	50.820
油轮 Tanker	0.0514	0.043	49.810	39.190
巡逻艇 Patrol boat	0.1260	0.112	12.317	11.028

2.3 加权综合评判法

加权综合评判算法数学表达式为：

$$J = \sum a_i \cdot x_i。$$
 (6)

其中： J 为评判结果； a_i 为第 i 个指标的权重，一般要求 $\sum a_i = 1$ ； x_i 指第 i 个指标值。算法的评判指标为振荡次数、跟踪延迟时间、超调量、操舵次数、最大舵值。其中，跟踪延迟时间定义为：船舶在航向控制算法作用下由初始航向首次转到设定航向的时间，与船模以初始服务速度由初始航向满舵旋回到设定航向的时间之差。利用权值将该五个指标组织起来，形成了一个包含各个侧面的综合指标^[9]。其中无量纲化的处理采用均值化方法即：

$$x'_i = x_i / \bar{x_i}。$$
 (7)

式中： $\bar{x_i}$ 为指标值； x_i 的样本平均值。

表 4 为加权综合评判法的评判指标和权值，来自问卷调查结果^[10]。值得注意的是，在该评判算法中，评判的结果是航向偏差、能耗等因素的综合值，由此可知，评判值越大，则航向跟踪性能越差^[5]。

表 4 航向跟踪性能指标权值表
Tab.4 Course tracking performance index weight table

评判指标 Evaluation index	超调量 Overshoot	航向跟踪延迟时间 Course tracking delay time	操舵次数 Steering frequency	最大舵值 Maximum value of the rudder	振荡次数 Oscillation frequency
权值 Weight	0.45	0.36	0.06	0.06	0.07

2.4 测试方案

本文着重测试静态情况下的航向跟踪对船型的适应性，即无风浪流干扰情况下的测试，此时 K_i 取 0。由式 (1)—式 (4) 可知，初始值 K_p 、 K_i 和 K_d 的确定取决于阻尼系数 ξ 的选取。文献 [3] 通过人工经验的方法，得出了一组适应集装箱航向控制的理想 PID 初始值，再由公式 (4) 得出，该组理想 PID 初始值所对应的阻尼系数 ξ 为 0.793，然后取 $\xi = 0.793$ ，利用式 (4) 计算其他四种类型船舶的 λ 值，再由式 (1)—式 (3) 分别计算得到 PID 控制器的初始值。分别对四种船型不同改向角

进行测试, 根据测试结果的指标取值, 采用加权综合评判法进行定量分析。根据得到的评判结果, 适当调整 ξ 值, 直到四种类型均得到理想的 ξ 值为止。

2.5 测试结果分析

当 $\xi = 0.793$ 时, 测试结果如表 5 所示。

表 5 $\xi = 0.793$ 时船舶改向测试结果
Tab. 5 $\xi = 0.793$ ship redirection test results

船型 Ship type	λ	跟踪延迟时间 Course tracking delay time/s		超调量 Overshoot /($^{\circ}$)		操舵次数/次 Steering frequency		最大舵值 Maximum value of the rudder/($^{\circ}$)		振荡次数/次 Oscillation frequency		评判结果 Result	
		10 $^{\circ}$	30 $^{\circ}$	10 $^{\circ}$	30 $^{\circ}$	10 $^{\circ}$	30 $^{\circ}$	10 $^{\circ}$	30 $^{\circ}$	10 $^{\circ}$	30 $^{\circ}$	10 $^{\circ}$	30 $^{\circ}$
集装箱 Container	1.08	122	147	0	0	2	2	7.5	20.0	0	0	0.3824	0.4527
散货 Bulker	1.42	202	214	0	0	2	2	7.0	20.0	0	0	0.5533	0.6095
油轮 Tanker	1.74	265	193	0	0	2	2	6.2	20.0	0	0	0.6912	0.5604
巡逻艇 Patrol boat	0.64	69	61	0	0	3	4	8.3	19.4	0	0	0.2997	0.2975

由表 5 可知, 四种船型的航向控制效果均有改善, 但油轮和散货船略差于集装箱和小船。因此通过改变 ξ , 找到各类船型对应的理想 ξ 值, 测试结果汇总如表 7 所示。

表 6 不同 ξ 取值船舶改向航行跟踪测试结果
Tab. 6 Four kinds of ship type in ξ different values situation of course tracking test results of ship redirection

船型 Ship type	$\xi = 0.793$		$\xi = 0.774$		$\xi = 0.7515$		$\xi = 0.730$	
	10 $^{\circ}$	30 $^{\circ}$	10 $^{\circ}$	30 $^{\circ}$	10 $^{\circ}$	30 $^{\circ}$	10 $^{\circ}$	30 $^{\circ}$
集装箱 Container	0.3824	0.4527	0.4277	0.4573	0.4705	0.4743	0.4687	0.5094
散货 Bulker	0.5533	0.6095	0.6068	0.6280	0.6009	0.6300	0.5233	0.5094
油轮 Tanker	0.6912	0.5604	0.5938	0.4968	0.5276	0.5130	0.6092	0.5628
巡逻艇 Patrol boat	0.2997	0.2975	0.2918	0.3380	0.3209	0.3225	0.3187	0.3384

由表 6 可知, 对于油轮而言, 当 $\xi = 0.774$ 时, 油轮的 30 $^{\circ}$ 航向改向效果比较理想。当 $\xi = 0.7515$ 时, 油轮的 10 $^{\circ}$ 航向改向情况有所改善。对于散货而言, 当 $\xi = 0.73$ 时, 散货船的 10 $^{\circ}$ 和 30 $^{\circ}$ 改向测试结果得到改善。

3 改进型模糊自整定 PID 航向控制算法

3.1 ξ 取值的选择优化策略

根据表 6 可知, 不同类型船舶在不同改向角时所对应的 ξ 取值不同。因此, ξ 值选择优化算法表述如下:

如果船型为集装箱船或小型巡逻艇, 则 ξ 取 0.793; 如果船型为散货船, 则 ξ 取 0.73;
如果船型为油轮, 当改向角为 10 $^{\circ}$ 时, ξ 取 0.7515; 当改向角为 30 $^{\circ}$ 时, ξ 取 0.774。

3.2 改进的模糊自整定 PID 航向控制算法

鉴于初始值的最优性与船舶的 K 、 T 值的精度密切相关, 同时航向跟踪响应曲线的性能取决于 ξ 的合理取值。本文在文献 [3] 优化模糊自整定 PID 控制算法的基础上, 综合考虑了上述四种船型的 K 、 T 取值和 ξ 取值优化策略, 得到了改进后的模糊自整定 PID 控制算法。由此可得集装箱船在不同 ξ 值下的航向跟踪曲线, 以及四种类型船舶对应的理想 ξ 值下 30 $^{\circ}$ 改向角的理想航向跟踪性能曲线图, 如图 3 和 4 所示。

经过阻尼系数 ξ 的优化选择, 由 MTALAB 仿真结果可知, 四种船型在 30 $^{\circ}$ 改向时基本无超调, 振荡次数减少, 达到了航向跟踪性能的优化效果。

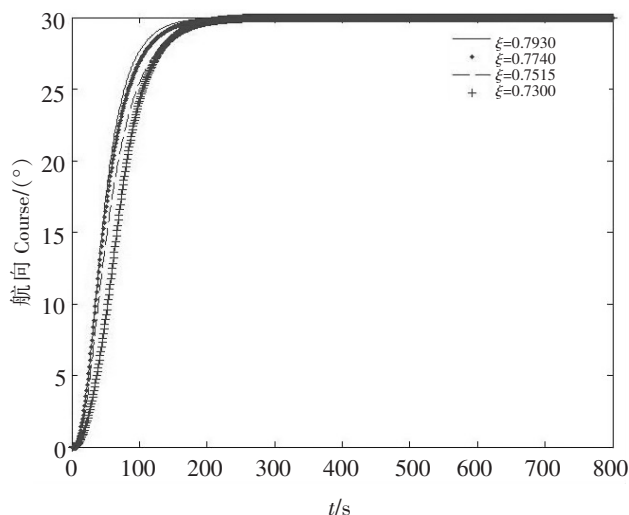
图 3 集装箱船在不同 ξ 值下的航向跟踪曲线

Fig.3 Course tracking curve of container ship in 30° redirection

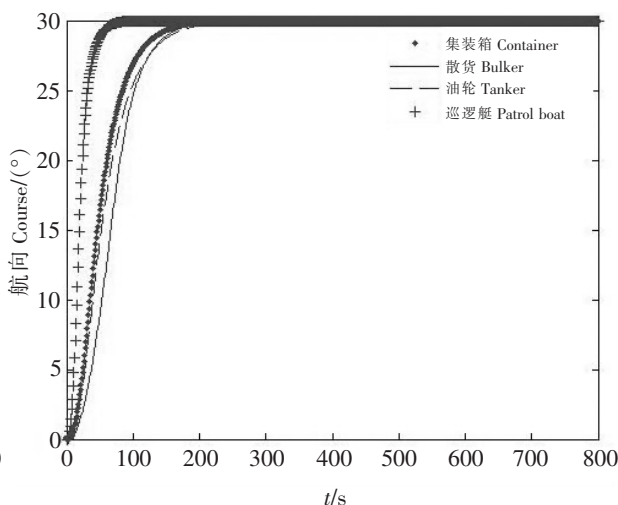


图 4 船舶 30°改向的理想航向跟踪曲线

Fig.4 Ideal course tracking curve of the ship in ξ different values

4 结束语

本文分析了影响现有模糊自整定 PID 航向控制算法航向跟踪性能的两个因素, 采用野本 KT 响应模型, 利用 MATLAB 仿真软件对模糊自整定 PID 航向控制算法进行四种船型适应性测试。通过加权综合评判法对同一种船型不同 ξ 值的测试结果进行定量分析, 根据分析结果设计 ξ 取值优化策略, 实现对模糊自整定 PID 航向控制算法的优化 (限于文章篇幅, 本文仅给出 ξ 的优化策略, 对于 PID 初始值的最优选取, 将在后续文章给予讨论)。仿真结果表明, 改进型的模糊自整定 PID 航向控制算法, 提高了四种船型的控制性能, 尤其是油轮及散货船的控制性能得到较大提高, 提高了对不同类型船舶航向跟踪的自适应性。

限于时间及篇幅, 本文仅讨论静态环境下算法对不同船型的适应性, 环境干扰影响下以及同一种船型同一系统参数的适应性问题, 有待日后进一步研究。

[参考文献]

- [1] 李丽娜, 张寿贵. 航海自动化 [M]. 2 版. 北京: 人民交通出版社, 2012.
- [2] ZHAO QING, LI LINA, CHEN GUOQUAN. Research on fuzzy self-tuning of PID autopilot [C] //ICTE2011-Proceeding of the 3rd International Conference on Transportation Engineering. Chengdu, China: American Society of Civil Engineers (ASCE), 2011: 985-990.
- [3] 蒋娇. 一种航迹智能控制算法优化研究 [D]. 厦门: 集美大学, 2014.
- [4] 徐健平. 船舶自适应舵的一种算法研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2012.
- [5] VAN AMERONGEN J, VAN NAUTA LERAKE H R. Criteria for Optimum Steering of Ships [M]. Genova: The Symposium on Ship Steering Automatic Control, 1980.
- [6] 杨文辉. 船舶航向智能控制研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
- [7] 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.
- [8] 张彬. 船舶操纵性指数 K/T 计算方法及其应用研究 [D]. 厦门: 集美大学, 2015.
- [9] 韩轶, 唐小我. 满足一定分布规律的多指标综合评价方法的优化选择 [J]. 管理工程学报, 1999, 13(3): 55-58.
- [10] 赵晴. 船舶航迹智能控制算法的研究 [D]. 厦门: 集美大学, 2012.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 周云龙)