

基于模糊自整定 PID 的气垫登陆艇航向控制器研究

肖剑波¹, 陆爱杰², 胡大斌¹

(1. 海军工程大学 舰船与海洋学院, 武汉 430033; 2. 中国人民解放军 91278 部队, 辽宁 大连 116000)

摘要: 基于空气舵操纵面开展了气垫艇航向控制研究, 分析了 PID 航向控制器的原理, 设计了基于模糊自整定 PID 的航向控制器; 根据 PID 控制器各参数的控制规律和经验总结, 设计了一种模糊整定器, 并给出了具体设计步骤; 该整定器可以在气垫艇航向控制中实时调节控制器比例、积分和微分参数值; 在相同条件下比较了传统 PID 控制器和模糊自整定 PID 控制器的控制性能, 试验结果表明模糊自整定 PID 控制器鲁棒性加强, 动态、静态性能更好。

关键词: 航向控制器; 自动控制; 模糊整定器; PID 控制; 气垫艇

Research on Air Cushion Landing Craft Course Automatic Control Method Based on Fuzzy Self-tuning PID

Xiao Jianbo¹, Lu Aijie², Hu Dabin¹

(1. College of Naval Architecture & Ocean Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;
2. Unit 91278 of PLA, Dalian 116000, China)

Abstract: The driving and control system of certain typed ACLC was selected as the research object, an automatic control method based on fuzzy self-tuning PID control is introduced into ACLC course control. Air rudder is chosen as the common control surface of ACLC's course control. The basic principle of PID course controller is studied and analyzed. According to the control law and experience summary of the parameters of the PID controller, a fuzzy self-tuning PID controller is designed. The specific design steps are given. The tuner can adjust the proportional and differential parameters of the controller in real time in the course control of the ACLC. The simulation results show that the fuzzy self-tuning PID controller can make the course control smoother and no overshoot, shorten the adjusting time of the controller and improve the robustness of the system.

Keywords: course control; automatic control; fuzzy self-tuning; PID control; air cushion landing craft

0 引言

气垫登陆艇具有航速快、续航力高、装载量大、生命力强、耐波性能强等特点, 具有优良的综合性能和一定的自我防御能力, 在两栖登陆作战中具有重要的意义。但其操控设备众多、控制系统复杂、航速快, 对艇员操纵能力要求很高, 在操纵、避碰方面的难度比普通水面舰艇大很多。且气垫登陆艇的航行状态较多, 分为“浮态”、“气泡状态”、“垫态”3个, 需要艇员根据不同航行条件做出判断, 并进行相应操纵实现艇航行状态转换, 要求艇员具备较高的训练水平和较强的应变能力。在某些特殊环境条件下, 操作不熟练甚至操作不当, 则容易引起该型艇艇体的高速回转与侧滑, 最终可能导致埋艏、甩尾、翻船等重大事故^[1]。因此, 需对气垫登陆艇操纵控制规律开展自动控制算法研究。

船舶航向控制基本方法有 PID 控制、滑模控制、模糊

控制等, 其中基于滑模控制方法衍生出来的有积分滑模控制、终端滑模控制、非奇异终端滑模控制等^[2-4], 这类方法控制效果平滑、速度快、不容易出现抖振, 但是依据这类方法设计控制器一般都需要根据被控对象的数学模型对控制器的进行设计, 其算法会涉及对象模型中的部分参数和表达式, 如果模型不精确, 则控制效果将难以保证。

气垫登陆艇运动涉及多种外力和外力矩, 且控制气垫艇回转、转向、航行的操纵方式相比于常规船舶更加复杂, 有空气舵、空气桨、侧风门等多种操纵方式。参数众多, 无法获取准确的模型^[5-6]。因此, 本文结合传统 PID 控制方法和模糊控制的相关理论进行航向控制器设计。同时, 考虑到气垫艇实际海上航行过程中, 航向的一般通过舵来操控, 侧风门、螺旋桨螺距一般较少使用, 故选择空气舵操纵面对航向控制器进行研究。

1 PID 航向控制器的设计

在传统 PID 控制方法中, 比例 P 用来快速调节系统偏差, 积分 I 用来消除稳态误差, 微分 D 加快调节速度, 防止系统抖振。在气垫艇航向的自动控制中, 由于气垫艇受风的影响非常大, 尤其是在大侧风的情况下, PID 控制中的积分环节和微分环节是必不可少的。本文设计的 PID 航向控制器的原理如图 1 所示, $r(t)$ 为设定航向, $y(t)$ 为

收稿日期: 2019-04-10; 修回日期: 2019-05-20。

基金项目: 国家自然科学基金(51179196)。

作者简介: 肖剑波(1984-), 男, 湖南涟源人, 博士, 讲师, 主要从事机舱自动化与仿真, 视景仿真及虚拟现实技术方向的研究。

胡大斌(1963-), 男, 湖北武汉人, 博导, 教授, 主要从事舰船动力装置仿真及机舱自动化方向的研究。

实际航向。因为仅对航行控制进行研究，采用气垫登陆艇三自由度运动模型。

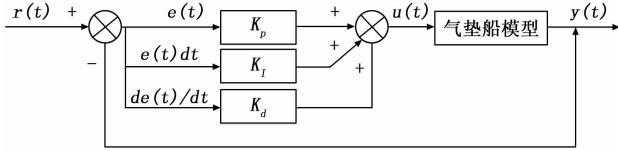


图 1 PID 航向控制器原理图

PID 航向控制器是一种线性控制器，根据设定航向与气垫艇实际航向构成的控制偏差：

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (1)$$

其控制规律的微分方程为：

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2)$$

写成传递函数形式为：

$$G(s) = \frac{u(s)}{E(s)} = K_p + K_i \frac{1}{s} + K_d s \quad (3)$$

式中， K_p 为比例系数， K_d 为微分系数，且 K_d 的值为 K_p 和 T_D （微分时间常数）的乘积。PID 各环节作用如下：

比例单元 K_p 实时成比例地反应气垫艇航向偏差 $e(t)$ ，偏差一旦产生，调节器立即产生作用以减小航向偏差；积分单元 K_i 主要作用是消除航向的稳态误差，即保证气垫艇最终不会偏离设定航向，积分系数 K_i 越小，对应的积分时间常数越大，积分作用越强；微分单元 K_d 能成比例的反应航向偏差的变化率，并能在航向偏差变得太大之前，在航向控制系统中引入一个有效的早期修正信号，从而加快系统调节速度。

2 模糊自整定 PID 航向控制器的设计

2.1 控制器结构

模糊 PID 控制器的原理框图如图 2 所示， $r(t)$ 为设定航向， $y(t)$ 为实际航向。该控制器的核心在于设计模糊自整定算法（以下简称模糊整定器）来动态调整 PID 控制器的比例、积分和微分参数。

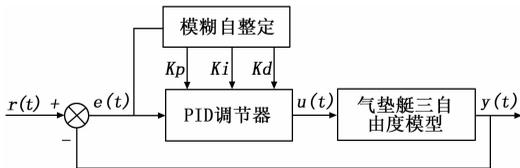


图 2 模糊自整定 PID 控制器原理图

本文设计的参数模糊整定器（图 3）是一个两输入两输出的结构。其中： e 和 ec （输入）是航向偏差和航向偏差变化率； ΔK_p 和 ΔK_d （输出）分别是 PD 控制器的比例、微分参数的调节量； E 、 EC 和 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 分别为航向偏差与偏差变化率和比例、微分参数调节量的语言变量； K_e 、 K_{ec} 为输入量化因子； K_p 、 K_i 、 K_d 为输出量化因子。

航向控制器 PID 参数的模糊自整定过程就是在气垫船运动过程不断测量 e 和 ec ，根据相应的模糊关系，应用设计好的模糊控制器实时调整 PID 参数，以满足 e 和 ec 对 PID

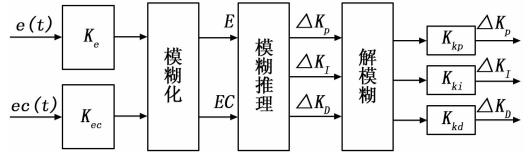


图 3 模糊自整定算法结构图

控制参数的动态要求，从而加快控制器的调节速度，提高控制系统动、静态性能。

2.2 参数模糊整定器的设计

2.2.1 隶属度函数的建立

如图 3 所示，参数模糊整定器采用两输入三输出的结构形式，输入为偏差 e 和偏差变化率 ec ，输出为比例参数调节量 ΔK_p 、积分参数调节量 ΔK_i 和微分参数调节量 ΔK_d 。 E 和 EC 分别为输入量 e 和 ec 的语言变量， ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d 分别为输出量 ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d 的语言变量。 E 、 EC 、 ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d 的语言取值均为“正大”（PB）、“正中”（PM）、“正小”（PS）、“零”（ZO）、“负小”（NS）、“负中”（NM）、“负大”（NB）^[7-8]，对应论域为 $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$ 。

在 Matlab 命令行窗口中输入 fuzzy，回车进入模糊逻辑编辑工具箱。借助该工具箱建立 E 、 EC 、 ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d 的隶属度函数，NB 为 Z 型隶属度函数，PB 为 S 型隶属度函数，其他均选择高斯函数，分别如图 4、5 所示。

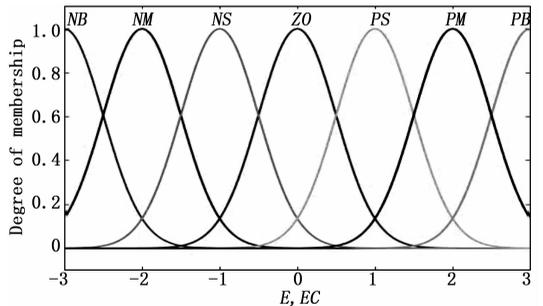


图 4 E 、 EC 的隶属度函数曲线

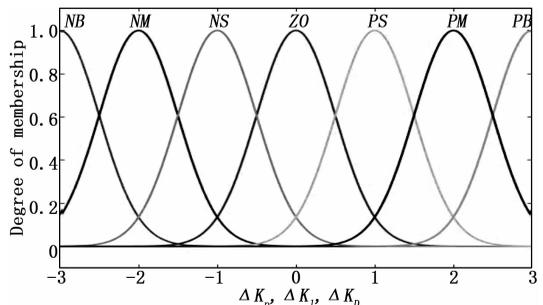


图 5 ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d 的隶属度函数曲线

2.2.2 模糊控制规则

PID 参数的整定必须考虑不同时刻这两个参数的不同作用以及两者的互联关系^[8]，因此，根据前述比例、积分、微分参数 K_p 、 K_i 、 K_d 在控制系统的调节作用，结合相关实践经验，得出在不同偏差 e 和偏差变化率 ec 时的 K_p 、

K_i 、 K_d 的调整原则。

1) 当偏差的绝对值 $|e|$ 很大时, 为了提高响应速度, 不论偏差的变化率为何值, 都应优先考虑让控制器按最大值输出, 以最大速度调整误差, 从而使 $|e|$ 迅速减小。同时系统响应瞬间 ec 很大, 故 K_d 的值应该减小, 同时, 应对积分作用加以限制。

2) 当偏差的绝对值 $|e|$ 处于中等大小时, 为了降低控制系统的超调, K_p 应取值应当减小一些, 但是也不能过小, 减慢系统的相应速度。

3) 当偏差的绝对值 $|e|$ 很小, 系统输出值接近设定值时, 应当增大 K_d 的值, 减小 K_i 的值, 而当 $|ec|$ 较小时, 可取相对大一些的 K_d , 当 $|ec|$ 较大时取较小一些的 K_d 。

根据上述 PID 参数调整原则, 得到了 ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d 三个参数模糊控制规则表。如表 1、2、3 所示。

表 1 ΔK_p 模糊控制规则表

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

表 2 ΔK_i 模糊控制规则表

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

表 3 ΔK_d 模糊控制规则表

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

2.2.3 去模糊化

按照模糊控制规则表得到的结果是一个模糊向量, 要用作控制量还需将去模糊化。本章采用重心法去模糊化来得到, 该方法实际上是工业控制中广泛使用的加权平均法

的一种特殊情况^[9-11]。

其计算方法如下:

$$x_0 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i u(i)}{\sum_{i=1}^n u(i)} \quad (4)$$

本节使用 Matlab 模糊逻辑工具建立了隶属度函数, 模糊控制规则, 选择了重心法解模糊, 最后得到了模糊整定器输入与输出的关系图像。图 6 为 ΔK_p 与 E 和 EC 的关系图, 图 7 为 ΔK_i 与 E 和 EC 的关系图, 图 8 为 ΔK_d 与 E 和 EC 的关系图。

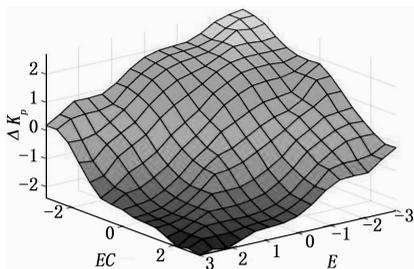


图 6 ΔK_p 与 E 和 EC 的关系图

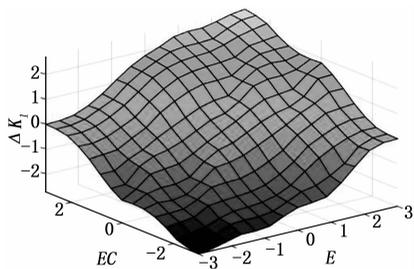


图 7 ΔK_i 与 E 和 EC 的关系图

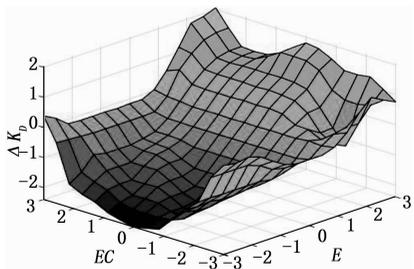


图 8 ΔK_d 与 E 和 EC 的关系图

3 气垫艇航向控制器仿真试验

根据上节设计的模糊自整定 PID 航向控制器, 经多重调试, 输入量化因子取 K_e 取值为 0.05, K_{ec} 取值为 0.0001; 输出量化因子 K_k 取值为 3, K_{k_i} 取值为 0.001, K_{k_d} 取值为 20。同时必须注意的是, 控制器的输出必须加以限值, 范围为 $-30 \sim 30$, 即舵角满舵的范围。仿真过程中气垫船初始航向为 0° (正北方向), 设定航向为 30° , 气垫艇初始航速为 30 节, 运动过程中保持螺旋桨转速不变, 外界条件为无风。试验中比例参数 K_p 的值为 8, 积分参数 K_i 取 0.025, 微分参数 K_d 的值为 80, 先进行 PID 控制器航向控制的试验, 然后保持 K_p 、 K_i 和 K_d 的不变, 使用模糊整定

器在气垫船航行过程中动态调节 K_p 、 K_i 和 K_d 两个参数, 试验结果如图 9 所示。

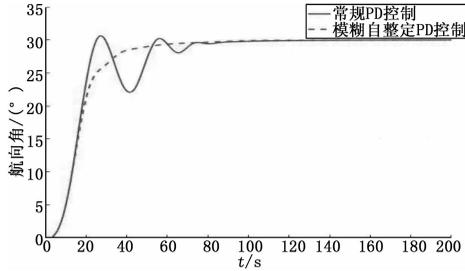


图 9 两种控制下航向变化曲线

从图 9 中可知, 加入了模糊自整定调节器的 PID 控制器对航向的控制变得十分平滑, 航向控制过程中没有振荡, 没有超调, 速度也有所加快, 说明设计的模糊自整定器是十分有效的。

为了进一步检验航向控制器性能, 设置有风条件, 风向 20° , 风速 10 m/s 。其余设定参数都不变。仿真结果如图 10 所示。

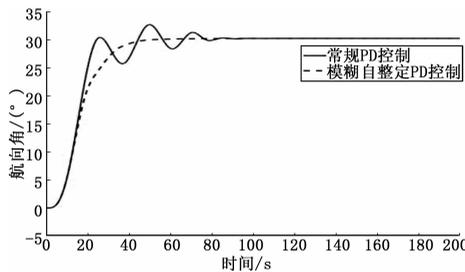


图 10 20° 10 m/s 风速下航向变化曲线

对比图 9 和图 10 可以看出 PID 控制器受到风速的影响比较大, 相比之下, 模糊自整定 PD 控制器对风有较好的抗干扰性, 控制器的鲁棒性较强。

综上所述, 在无风和小角度风的条件下, 设计的模糊自整定航向控制器具有良好的动态性能、稳态性能和较强的鲁棒性。

在气垫船航向控制中, 受风速和风向的影响是非常大的, 为了保证该模糊自整定 PID 航向的可靠性, 设置大侧风条件, 风向 90° , 风速 10 m/s , 即从气垫船侧面吹来的强风。其余设定参数都不变, 仿真结果如图 11 所示。

从图中可以看出, 大侧风的情况下, 常规 PID 的航向控制曲线会有抖动, 而模糊自整定 PID 航向控制曲线十分平滑, 控制速度更快, 可以看出, 在大侧风情况下模糊自整定 PID 控制器也具有良好的动态性能、稳态性能和较强的鲁棒性。

4 结论

本文基于空气舵操纵面开展了气垫艇航向控制研究, 分析了 PID 航向控制器的原理, 重点研究了模糊自整定 PID 参数的航向控制器, 分析了该控制器的结构和控制流程, 阐述了 PID 参数模糊自整定器设计方法和步骤, 建立了

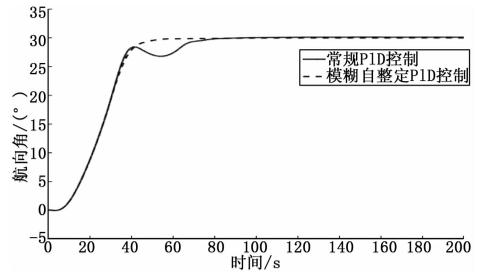


图 11 90° 10 m/s 风速下航向变化曲线

E 、 EC 、 ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d 五个语言变量的隶属度函数, 根据基本理论和实践经验设计了模糊自整定器的模糊规则, 说明了解模糊的方法——重心法, 得出了 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 与 E 和 EC 的关系。通过仿真试验, 在相同条件下比较了 PID 控制器和模糊自整定 PID 控制器的控制性能, 试验结果表明模糊自整定器能够使航向控制变得更加平滑、无超调, 使控制器调节时间缩短, 系统鲁棒性加强, 动态、静态性能更好。

为简化算法, 本文仅通过三自由模型对气垫艇航向控制进行了研究, 三自由度模型只能有效反映气垫艇在中低航速以及中等强度操纵以下的运动情况, 后续应建立 4 个乃至 6 个自由度的运动模型, 且解决相应模型的解算方法问题, 力求速度快、精度高。在控制输入方面, 也仅仅考虑了空气舵操纵面, 后续将引入侧风门、螺距等多个控制量, 并考虑其相互耦合关系, 从而实现更为准确地运动控制建模, 以满足气垫艇操纵控制需求。

参考文献:

- [1] 付明玉, 张洪雨, 施小成, 等. 气垫船操纵性能理论分析 [J]. 中国造船, 2006, 47 (3): 14-20.
- [2] 林雄伟, 胡大斌, 等. 潜艇操纵控制方法 [J]. 舰船科学技术, 2013, 35 (5): 7-10.
- [3] 吴浩溶, 胡大斌, 林雄伟, 等. H_∞ 控制在潜艇深度控制的应用 [J]. 舰船科学技术, 2014, 36 (9): 98-101.
- [4] 赵越, 王仁强, 缪克银. 基于新型滑膜控制的船舶航向自动舵设计 [J]. 船舶工程, 2015, 37 (9): 58-62.
- [5] 颜俐, 许建, 等. 船舶运动的模糊控制研究 [J]. 舰船科学技术, 2013, 35 (5): 1-6.
- [6] 张晨, 薛文涛, 侯小燕. 水面无人艇航向的新型变结构全局快速终端滑膜控制方法 [J]. 江苏科技大学学报 (自然科学版), 2018, 32 (3): 383-413.
- [7] 吴红欣. 双舵双桨船的航向/航迹自适应滑膜控制 [D]. 大连: 大连海事大学, 2018.
- [8] 常满波, 胡鹏飞. 基于 Matlab 的模糊 PID 控制器的设计与仿真研究 [J]. 机车电传动, 2002 (5): 34-36.
- [9] 刘金琨. 先进 PID 控制 Matlab 仿真 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2016, 6.
- [10] 李友善. 模糊控制理论及其在过程控制中的应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1993.
- [11] 戴余良, 林俊兴. 潜艇空间机动的多变量滑膜模糊控制 [J]. 武汉理工大学学报, 2009, 33 (6): 1040-1043.