

DOI:10.19651/j.cnki.emt.1802283

## 视轴稳定系统的模糊 PID 控制器设计 \*

唐 瑞 侯宏录 王 秀

(西安工业大学 光电工程学院 西安 710021)

**摘 要:** 为了实现无人机视轴稳定系统的准确测量与跟踪,设计了经典 PID 和模糊控制为基础的视轴稳定控制器。在实际工程中 PID 参数整定过程存在大量不确定性,为了实现 PID 参数的在线整定,将模糊控制算法与经典 PID 控制相结合,构造了参数自整定模糊 PID 控制器,实现了对 PID 控制器的修正。在 MATLAB 中的 Fuzzy Toolbox 和 Simulink 中,将 PID 和参数自整定模糊 PID 进行对比,参数自整定模糊 PID 控制器在无扰动和 10 Hz 的正弦扰动的阶跃响应曲线表明,模糊 PID 相对于模糊控制和 PID 控制有更短的响应时间和更小的隔离度;在输入为 1~10 Hz 的系统正弦响应曲线,模糊 PID 误差最小,控制效果最好。由此可得参数自整定模糊 PID 在视轴稳定系统中有良好的鲁棒性和控制性能。

**关键词:** 模糊控制;自整定;阈值切换;PID 控制器;Simulink

**中图分类号:** TN97      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 535.10

## Design of fuzzy PID controller for LOS stabilization system

Tang Rui Hou Honglu Wang Xiu

(School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

**Abstract:** In order to realize the accurate measurement and tracking of UAV LOS stabilization system, a LOS stabilization controller based on classical PID and fuzzy control is designed. There are a lot of uncertainties in the process of PID parameter tuning in practical engineering. In order to realize the on-line tuning of PID parameters, this paper combines fuzzy control algorithm with classical PID control, and constructs a parameter self-tuning fuzzy PID controller, which realizes the correction of PID controller. In MATLAB Fuzzy Toolbox and Simulink, comparing PID with parameter self-tuning fuzzy PID, the step response curves of parameter self-tuning fuzzy PID controller under no disturbance and 10 Hz sinusoidal disturbance show that fuzzy PID has shorter response time and smaller isolation degree than fuzzy control and PID control, and the fuzzy PID error occurs in the sinusoidal response curve of the system with input from 1~10 Hz. The difference is the smallest and the control effect is the best. Thus, the self tuning PID fuzzy controller has good robustness and control performance in LOS stabilization.

**Keywords:** fuzzy control; self-tuning; threshold switching; PID controller; Simulink

## 0 引 言

无人机小型机载光电成像跟踪<sup>[1]</sup>系统,与车载等路基光电跟踪系统相比,无人机在运动状态下,机体受到的各种干扰力矩会使平台光轴偏离瞄准目标。同时,载体在方位、俯仰方向上的角运动或振动引起平台光电成像传感器瞄准线视轴的晃动造成成像质量变差,跟踪性能下降,因此为了保证工作平台的空间稳定<sup>[2]</sup>,机载平台就必须采用视轴稳定控制技术<sup>[3]</sup>。

视轴稳定控制器将通过稳定控制,输出控制信号,功率

驱动装置,将此信号进行放大和调制,通过控制电机的转速稳定视轴。陀螺仪作为平台角运动的测量元件将测得的角速率信号送入视轴稳定控制器,位置控制器输出的角速率信号和扰动引起的角速率信号的差值作为稳定环的输入值,通过电机控制稳定平台以达到视轴稳定的效果<sup>[4]</sup>。

PID 控制技术是通过线性组合偏差的比例、积分和微分构成控制量对被控对象进行控制,工程实验经验和理论分析均表明 PID 控制具有可靠性高、控制性能良好、使用简单灵活方便等优点。但是在现代工业生产中时变、非线性的复杂系统往往难以获得系统的精确数学模型,经典的

收稿日期:2018-11-02

\* 基金项目:陕西省工业科技攻关项目(2016GY-051)、陕西省教育厅重点实验室科研计划项目(15JS035)资助

PID 控制方法已经满足不了实时变化的工作情况。因此,将 PID 进行优化产生了许多先进 PID 控制技术如自适应 PID 控制器<sup>[5]</sup>、自适应滑模控制器<sup>[6]</sup>、自适应模糊控制器<sup>[7]</sup>和模糊 PID 控制器等。其中模糊 PID 控制器将经典 PID 控制理论与模糊控制理论相结合,模糊控制算法根据被控对象的动态信息,进行模糊推理,其控制精度高、实时性强、鲁棒性好,能够良好的弥补 PID 控制的缺点。因此本文采用模糊 PID 作为视轴稳定回路的控制器,以获得良好的动静态性能,达到较好的控制效果。

## 1 模糊 PID 控制器

### 1.1 模糊 PID 结构

1964 年,模糊控制和模糊数学的概念被 Zadeh 教授提出,10 年后世界第 1 台模糊控制器诞生了<sup>[8]</sup>,自此模糊控制理论开始受到学者们的广泛关注。模糊控制器根据模糊输入的个数主要分为一维、二维和三维模糊控制器,其中二维模糊控制器在现代工业领域广泛使用。

1987 年,Ying 提出了模糊 PID 控制器<sup>[9]</sup>后,各种模糊 PID 控制器层出不穷,例如模糊 PI+模糊 D 结构<sup>[10]</sup>、模糊 P 控制+常规 ID 控制、模糊 PI、模糊 PD 并行的结构<sup>[11]</sup>等等。本文采用参数自整定模糊 PID 结构<sup>[12]</sup>的控制器,首先找出 PID 3 个参数  $e$  与  $ec$  之间的模糊关系<sup>[13]</sup>,建立模糊规则<sup>[14]</sup>,进行模糊推理,即根据模糊控制原理<sup>[15]</sup>来对  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  进行在线实时修改,提高了系统控制精度。模糊 PID 控制原理如图 1 所示。

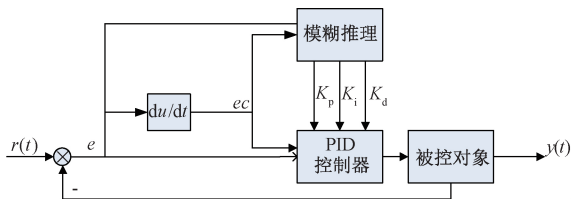


图 1 模糊 PID 控制原理

模糊 PID 控制器最主要的是 PID 控制器的初始参数  $K'_p$ 、 $K'_i$ 、 $K'_d$  及对 PID 3 个参数的模糊化。

$$\begin{cases} K_p = K'_p + \{e, ec\} K_p = K'_p + \Delta K_p \\ K_i = K'_i + \{e, ec\} K_i = K'_i + \Delta K_i \\ K_d = K'_d + \{e, ec\} K_d = K'_d + \Delta K_d \end{cases} \quad (1)$$

其中  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  分别为 PID 控制器的比例、积分和微分系数。

### 1.2 PID 初始参数的整定

为了对控制系统进行建模,首先需要对视轴稳定系统所搭载的视轴稳定平台进行建模。根据平台及负载对力矩的要求,选取了直流力矩电机作为方位轴的驱动电机,根据力平衡和电平衡方程通过拉式变化,最终得到电机的传递函数。

$$\frac{M(s)}{u'(s)} = \frac{C_m}{(Js + b)(Ls + R) + C_m Ce} \quad (2)$$

式中:  $u'(s)$ 、 $M(s)$  分别为调制电压输入和力矩输出;  $J$  为转动惯量;  $b$  为阻尼系数;  $L$  为电感;  $R$  为电机绕组电阻;  $C_m$  为电机电力矩系数;  $C_e$  为电机反电势系数。

系统需要功率放大电路对电机进行控制,由于系统中功率放大器截止频率远大于电机的截止频率,所以简化其传递函数为比例环节。即有:

$$G_{PWM}(s) = K_{PWM} \quad (3)$$

根据选取的电机信号和设计的功率放大电路可知稳定控制器的控制对象的传递函数为:

$$G(s) = \frac{1.5 \times 1000}{0.0045s^2 + 17s + 60} \quad (4)$$

得到控制对象的模型后,采用临界比例法计算 PID 参数的初始值。首先令  $K_i = 0$ 、 $K_d = 0$ ,通过调节  $K_p$  的值,当曲线波动呈等幅振荡时,得到临界比例度  $\delta_k$  和临界周期  $T_k$  值,根据临界比例度法参数计算表,得到 PID 3 个参数的计算公式,即  $K_p = 1.78\delta_k$ 、 $K_i = 0.5T_k$ 、 $K_d = 0.125T_k$ 。

由于视轴稳定回路搭载在无人机上,大部分无人机的扰动主频在 13 Hz,所以稳定回路的带宽选择在 20 Hz 以上。最终经过调整得到 PID 参数  $K_p = 400$ 、 $K_i = 9$ 、 $K_d = 0.003$ 。

校正后的传递函数为:

$$G_p(s) = \frac{0.09s^2 + 12000s + 270}{0.0045s^3 + 17s^2 + 60s} \quad (5)$$

校正后的传递函数的 bode 图如图 2 所示。

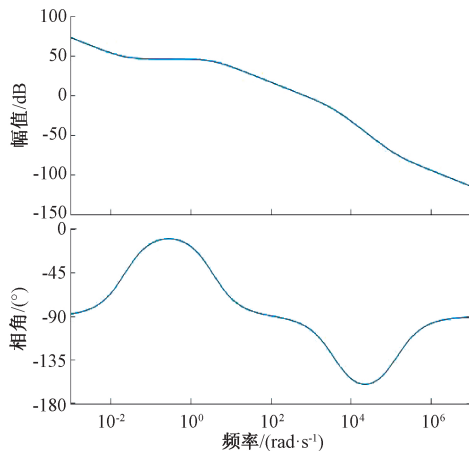


图 2 校正后的 bode 图

根据图 2 可知系统相角裕度为  $\gamma = 80.16^\circ$ ,截止频率为  $\omega_c = 110$  Hz,带宽为 135 Hz,高频信号能通过系统并输出,系统响应时间比校正前更快,满足系统要求,校正后相角裕度大于  $30^\circ$ ,保证了控制的稳定性和对抗扰动的抑制能力。

### 1.3 隶属函数和模糊规则的确定

在系统误差  $e$  和变化率  $ec$  模糊论域选取上,  $e, ec = \{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$ ,模糊子集为  $e, ec = \{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$ ,子集中元素分别代表负大、负中、负小、零、正小、正中、正大。设  $e, ec$  和  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  服从正

态分部,因此 NB 与 PB 的隶属函数选择 Sig-moid 型,其他均采用三角形隶属度函数。

在确定 PID 参数的模糊控制规则时需要考虑 PID 参数对控制性能的影响,如表 1 所示。

表 1 PID 参数对控制性能的影响

PID 参数	优点	缺点
$K_p$	提高灵敏度、调节速度	引起振荡
$K_i$	消除稳态误差	引起系统振荡、
$K_d$	加快响应、减少超调量	引起系统的不稳定

因此,模糊规则的建立应综合考虑各方面因素,反复检验,以期得到最佳的控制效果。

在 MATLAB 中对本文  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$  的模糊规则进行三维建模,结果如图 3~5 所示。

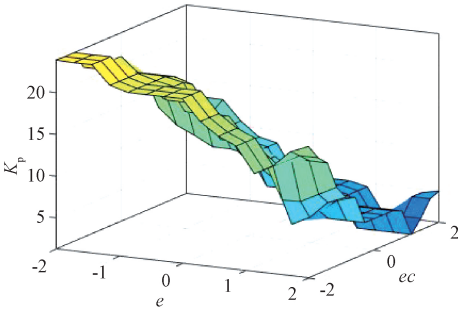


图 3  $\Delta K_p$  的模糊规则三维图

1.4 解模糊

在建立模糊规则之后,系统的输出得到模糊化的结果,解模糊可以得到精确的输出值。本文采用重心法,重心法取隶属度函数曲线与横坐标围成面积的重心作为模糊推理的最终输出值,即:

$$v_0 = \frac{\int_v v \mu_v(v) dv}{\int_v \mu_v(v) dv} \tag{6}$$

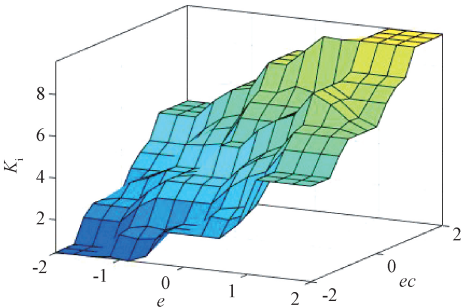


图 4  $\Delta K_i$  的模糊规则三维图

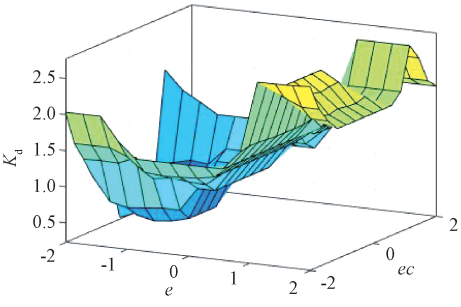


图 5  $\Delta K_d$  的模糊规则三维图

重心法的输出推理控制较为平滑,并且输入信号的微小变化也会影响输出结果。

2 仿真实验

根据文中的受控对象,选取速率误差  $e$  的论域为  $[-0.1, 0.1]$ ,  $ec$  的论域为  $[-1, 1]$ 、量化因子为 10;  $K_p$  的论域设定  $[0, 20]$ 、量化因子为 30;  $K_i$  为  $[0, 20]$ 、量化因子为 2;  $K_d$  为  $[0, 3]$ 、量化因子为 0.001; PID 初始参数为  $K'_p = 400$ 、 $K'_i = 9$ 、 $K'_d = 0.003$ 。图 6 所示为参数自整定 PID 仿真,根据受控对象分别设计了 PID 控制器,模糊控制器,参数自整定 PID 控制器,分别进行仿真。

2.1 输入为幅值为 1 的阶跃响应

输入幅值为 1 的系统阶跃响应如图 7 所示。

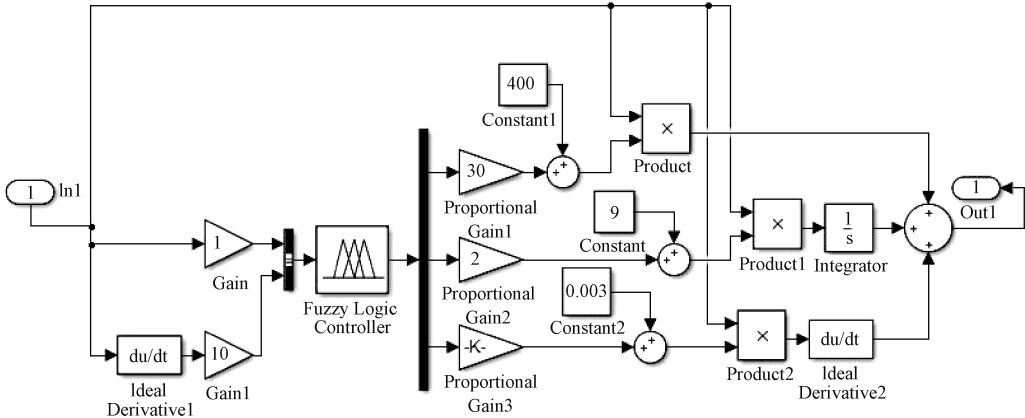


图 6 参数自整定模糊 PID 仿真

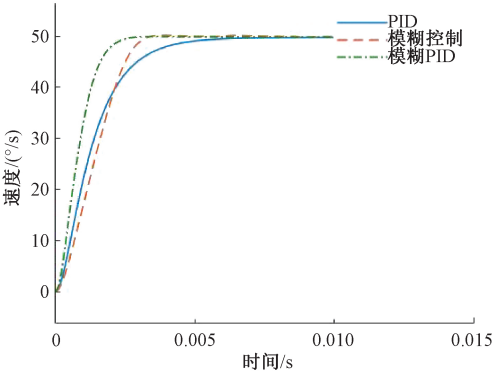


图 7 阶跃响应对比

根据效果图 7 可知,PID 上升时间为 0.002 8 s,超调量为 0,模糊控制器上升时间为 0.002 5 s,超调量为 0.4%,参数自整定模糊 PID 上升时间为 0.001 6 s,超调量为 0.09%。PID 响应时间短,但 PID 响应的稳态误差大,将两者结合后有良好的响应特性。当载体速率扰动为  $y_d=3\sin(20\pi t)(^\circ)/s$ ,系统阶跃响应如图 8 所示。

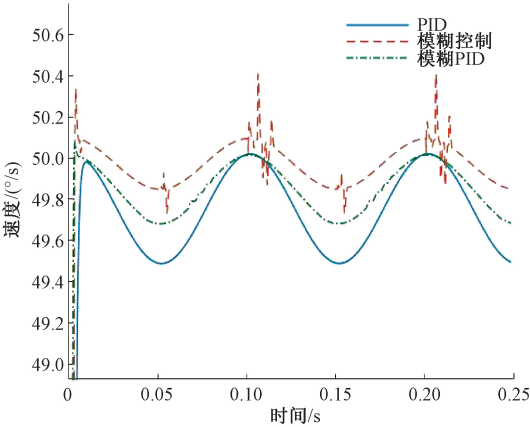


图 8 10 Hz 正弦扰动下的阶跃响应对比

由图 8 可知系统能较好地隔离频率为 10 Hz 的扰动信号。通过计算可以得出 3 种控制器在稳定回路的隔离度。表 2 为在 1 Hz 和 10 Hz 扰动情况下,3 种控制器的隔离度对比情况。

表 2 扰动为 1、10 Hz 隔离度对比 (%)

控制器	隔离度	
	1 Hz 扰动	10 Hz 扰动
PID	9.13	16.83
模糊控制器	14.88	12.63
模糊 PID	5.53	10.67

根据表 2 可知,当扰动为 1 Hz 的扰动时,模糊控制的隔离度不如 PID,当扰动为 10 Hz 时,模糊控制隔离度优于

PID,但是在 1~10 Hz 的扰动范围内,模糊 PID 控制器都明显优于 PID 控制器和模糊控制器,更能有效的隔离干扰信号。

2.2 输入为幅值为 2 的正弦响应

当输入信号为  $2\sin(2\pi t)(^\circ)/s$ ,幅值为 2,频率为 1 Hz,系统的误差如图 9 所示。

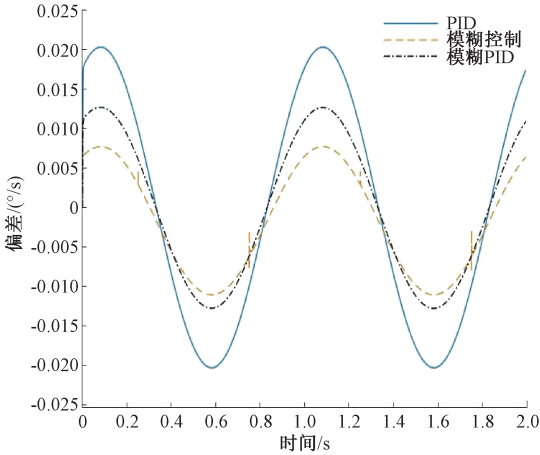


图 9 频率为 1 Hz 的正弦响应曲线

由图 9 可知响应曲线无失真,3 种方法模糊控制误差最小,但是模糊控制仿真图出现毛刺,不够稳定,由此可得正弦响应效果最好的是模糊 PID 控制。

经过仿真实验,在频率为 1、10、100 Hz 的正弦输入情况下,响应曲线无失真,模糊 PID 控制正弦响应效果最好。由此可得在系统带宽范围内的正弦输入都不会失真,并且模糊 PID 的正弦响应效果最好。

3 结 论

为了满足视轴稳定回路较高的动静态特性和控制要求,视轴稳定系统中采用参数自整定模糊 PID 控制器作为稳定控制器。文中介绍了模糊 PID 的结构和设计方法,首先利用临界比例法对 PID 初始参数进行整定,然后根据模糊控制器来自动调整 PID 的系数增量,从而实现 PID 参数的在线整定。根据仿真实验,对比 PID、模糊控制器、参数自整定模糊 PID 控制器的控制效果,发现在无扰动情况下,模糊 PID 控制器阶跃响应时间最短,系统稳定;在加入扰动的情况下,模糊 PID 控制器隔离度最低,控制效果好。相较而言,模糊 PID 控制器有着更好的动静态性能,并提高了视轴稳定回路的控制性能。文中所设计的模糊 PID 控制器的控制性能明显优于经典 PID 控制器和单一的模糊控制器,在视轴稳定系统中达到了预期的稳定控制效果。

参考文献

[1] 姬伟.陀螺稳定光电跟踪平台伺服控制系统研究[D].南京:东南大学,2006.  
[2] BUKLEY J W, CRAMBLITT R M. Comparison of

- image processing algorithms for tracking illuminated targets[C]. SPIE Conference on Acquisition, Tracking, and Pointing XIII, 1999:234-243.
- [3] 张秉华,张守辉.光电成像跟踪系统[M].成都:电子科技大学出版社,2003.
- [4] 赖文娟.陀螺稳定光电平台伺服控制系统设计与实现[D].成都:电子科技大学,2015.
- [5] 孙增圻,邓志东,张再兴,等.智能控制理论与技术[M].第2版.北京:清华大学出版社,2011.
- [6] 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.
- [7] TAN K K, LEE T H, KHOH C J. PID-Augmented adaptive control of a gyro mirror los system[J]. Asian Journal of Control,2002,4(2):240-245.
- [8] 杨蒲,李奇.陀螺稳定平台自适应分层滑模速度控制[J].兵工学报,2008,29(7):864-869.
- [9] Li H X, CHEN C L P. Relationship between fuzzy controller and PID controller[C].Proceeding of 1999 IEEE/RAJ International Conference on Intelligent Robot and System,1999.
- [10] MUDI R K, PAL N R. A robust self-tuning scheme for PI- and PD-type fuzzy controllers [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 1999, 7(1):2-16.
- [11] YING H. Analytical relationship between the fuzzy PID controllers and the linear PID controller[R]. The University of Alabama at Bermingham,1987.
- [12] 孙航,韩红霞,曹丽华,等.大型光电经纬仪速度环 PID 参数模糊自整定研究[J].仪器仪表学报,2013,34(10):2388-2394.
- [13] 谢宏,杨鹏,陈海滨,等.遗传优化模糊 PID 融合算法的 5 自由度机械手控制[J].电子测量与仪器学报,2015,29(1):21-30.
- [14] 贾森,王新华,龚华军,等.基于模糊 PID 的直升机增稳控制系统设计与实现[J].电子测量技术,2015,38(11):70-73.
- [15] 黄永梅,傅承毓.模糊控制对精密实时跟踪控制系统性能的改善[J].光电工程,1999,26(1):16-22.

### 作者简介

**唐瑞**,硕士研究生,主要研究方向为视轴稳定技术、自动控制技术。

E-mail:darrytang@163.com

**侯宏录**(通信作者),教授、博士生导师,主要研究方向为光电测试、信息融合、复杂系统工程建模及仿真与作战效能评估。

E-mail:hllhou@sina.com