

# 小型无人机纵向姿态模糊自适应 PID 控制与仿真

秦世引, 陈 锋, 张永飞

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100083)

**摘 要:**针对某小型实验无人机智能自主飞行的要求,提出了一种无人机纵向姿态的模糊控制方法,设计了模糊自适应 PID 控制器,可有效实现该无人机的纵向姿态控制和纵向航迹跟踪.仿真结果表明,所设计的模糊自适应 PID 控制器较传统的 PID 控制器具有更好的控制性能,其响应快、超调小、精度高,而且鲁棒性和自适应能力也较强,可满足自主飞行的要求.

**关键词:**自主飞行;模糊自适应 PID;纵向姿态控制

**中图分类号:**TP273.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1673-4785(2008)02-0121-08

## A fuzzy adaptive PID controller for longitudinal attitude control of a small UAV

QIN Shi-yin, CHEN Feng, ZHANG Yong-fei

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** A fuzzy adaptive PID controller was developed for longitudinal attitude control of a small unmanned aerial vehicle (UAV). The proposed controller effectively implements longitudinal attitude and trajectory tracking control. Simulation results showed that the proposed fuzzy logic controller provides quicker response, smaller overshoot, higher precision, better robustness, and better adaptive ability than traditional PID controllers. It better satisfies the needs of autonomous flight.

**Key words:** autonomous flight; fuzzy adaptive PID; longitudinal attitude control

无人机完成自主飞行<sup>[1]</sup>,需要控制系统对内回路(姿态回路)和外回路(水平位置和高度回路)都具有良好的控制特性.内回路控制性能是外回路控制的基础,其性能优劣直接影响外回路的控制结果,从而影响无人机自主飞行性能.典型的无人机内回路依靠飞行控制系统分别对纵向、横向和航向3个通道进行协调控制,实现自动飞行.在纵向、横向和航向通道中,纵向通道控制律的设计最为关键且复杂,其控制效果将直接影响无人机的飞行性能.

传统的飞行控制系统设计,包括经典PID、线性二次校正器理论、模型跟踪、特征结构配置等,虽然在现实中有许多成功的应用,但也存在明显的缺点<sup>[2]</sup>,首先,设计中使用的是系统的线性化模型,这是一种近似模型,它忽略了飞机模型的不确定性和未建模特

性.其次,设计中使用的性能参数并不能真正体现飞机的实际性能,随着飞机状态的改变,所设计好的性能参数可能不能满足系统的要求.随后发展起来了一种叫做非线性动态逆控制方法.该方法首先需要得到非线性系统的逆模型,然后将逆模型作用到原系统,使系统的状态/控制输入从非线性系统通过局部微分同胚一一映射到线性系统,将非线性问题转化为线性控制问题.该方法在理论、仿真及试飞中都得到了验证和证明,已成功应用在现实中<sup>[2]</sup>.但是,该方法也存在局限性:它需要构造可信用度高的非线性仿真模型并通过机载计算机进行实时逆变换,计算量大,且不易进行鲁棒性分析等等.因此,针对上述这些方法的不足,以及无人机模型的非线性、时变特性,需寻求更加智能的控制策略和方法.

模糊控制不需要获知系统的精确的数学模型,它是以操作人员的经验为基础,根据操作者经验的语言表达来确定各个参数和控制规律,然后在实际系统中进行调试和整定.实践证明,模糊控制适用于

收稿日期:2007-07-23.

基金项目:国防基础科研基金资助项目(D2120060013);国家自然科学基金重点资助项目(60736025).

通讯作者:陈 锋. E-mail:chenfeng0151002@163.com.

被控参量无精确的表达方法和被控制对象各种参数之间的相互关系难以精确描述的情况. 因此, 本文针对一种小型实验无人机的纵向姿态控制和高度跟踪问题, 设计了一种模糊自适应 PID 控制器, 仿真结果表明, 其性能优于常规的 PID 控制器.

### 1 无人机的纵向姿态模型

本文中采用的小型实验无人机对象的实物如图 1 所示.



图 1 小型实验无人机实物  
Fig. 1 Profile of the SUAV

根据经典飞行控制理论, 可建立小型无人机的 12 阶微分方程模型, 其中包括动力学模型和运动学模型<sup>[3]</sup>, 如式 (1) 所示. 其中, 各符号与变量/参数的对应关系见表 1.

$$m \frac{dV}{dt} = T \cos(\delta + \tau) \cos \sigma - D - mg \sin \sigma,$$

$$mV \frac{d\delta}{dt} = T[\cos(\delta + \tau) \sin \sigma \sin \sigma_s + \sin(\delta + \tau) \cos \sigma_s] + L \cos \sigma_s - Z \sin \sigma_s - mg \cos \sigma,$$

$$-mV \cos \delta \frac{d\sigma}{dt} = T[-\cos(\delta + \tau) \sin \sigma \cos \sigma_s + \sin(\delta + \tau) \sin \sigma_s] + L \sin \sigma_s + Z \cos \sigma_s,$$

$$\frac{dx_d}{dt} = V \cos \delta \cos \sigma_s,$$

$$\frac{dy_d}{dt} = V \sin \delta,$$

$$\frac{dz_d}{dt} = -V \cos \delta \sin \sigma_s,$$

$$I_x \frac{dp}{dt} = M_x - (I_z - I_y) q \cdot r,$$

$$I_y \frac{dr}{dt} = M_y - (I_x - I_z) p \cdot q,$$

$$I_z \frac{dq}{dt} = M_z - (I_y - I_x) p \cdot r,$$

$$\frac{d\vartheta}{dt} = \frac{1}{\cos \delta} (r \cos \sigma - q \sin \sigma),$$

$$\begin{aligned} \frac{d\vartheta}{dt} &= r \sin \delta + q \cos \delta, \\ \frac{d\sigma}{dt} &= p - \tan \delta (r \cos \sigma - q \sin \sigma). \end{aligned} \quad (1)$$

表 1 无人机参数符号说明

Table 1 List of parameter symbols for UAV

参数名称	符号	参数名称	符号
无人机速度	$V$	滚转角速度	$p$
无人机质量	$m$	俯仰角速度	$q$
发动机推力	$T$	偏航角速度	$r$
飞行阻力	$D$	滚转力矩	$M_x$
飞行升力	$L$	俯仰力矩	$M_z$
侧力	$Z$	偏航力矩	$M_y$
迎角		X 轴转动惯量	$I_x$
侧滑角		Y 轴转动惯量	$I_y$
俯仰角	$\delta$	Z 轴转动惯量	$I_z$
偏航角		X 轴距离	$X_d$
滚转角		Y 轴距离	$Y_d$
航迹角		Z 轴距离	$Z_d$
航迹偏转角	$\sigma$	翼展	$b$
速度滚转角	$\sigma_s$	机翼面积	$S$
升降舵	$\epsilon$	动压	$\bar{q}$
副翼舵	$a$	平均气动弦长	$\bar{c}$

利用水平无侧滑飞行条件  $\sigma = 0$  和  $p = r = 0$ , 将飞机运动方程解耦为不依赖于横侧向状态量  $(x_d, y_d, z_d, p, r, \sigma)$  的纵向运动方程:

$$\begin{cases} m\dot{V} = T \cos \delta - D - mg \sin \delta, \\ mV\dot{\delta} = T \sin \delta + L - mg \cos \delta, \\ \dot{\delta} = q - \dot{\delta}, \\ I_z \dot{q} = M_z. \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $T, D, L$  及  $M_z$  分别为发动机推力、气流阻力、升力及绕俯仰轴力矩, 这些参量的确定需要根据飞机当前的飞行状态实时地确定, 在此以飞机某一平衡状态为基准运动, 小扰动情况下假设这些力和力矩为相应量的线性关系.

若将无人机的定常直线无侧滑飞行作为基准运动, 在小扰动假设下就可得到无人机的纵向近似模型为

$$\begin{cases}
 m\dot{V} = (T_0 + \frac{\partial T}{\partial v} v + \frac{\partial T}{\partial e} e) \cos \delta - (D_0 + \frac{\partial D}{\partial v} v + \frac{\partial D}{\partial q} q + \frac{\partial D}{\partial e} e) - mg \sin \delta, \\
 mV\dot{\delta} = T \sin \delta + (L_0 + \frac{\partial L}{\partial v} v + \frac{\partial L}{\partial q} q + \frac{\partial L}{\partial e} e) - mg \cos \delta, \\
 \dot{q} = q - \dot{\delta}, \\
 I_z \dot{q} = M_{z0} + \frac{\partial M_z}{\partial v} v + \frac{\partial M_z}{\partial q} q + \frac{\partial M_z}{\partial e} e.
 \end{cases} \quad (3)$$

本文中,该小型无人机质量  $m = 9 \text{ kg}$ , 气动弦长  $\bar{c} = 0.28 \text{ m}$ , 机翼展长  $b = 2.8 \text{ m}$ , 飞行推理  $T = 15 \text{ N}$ , 飞机的气动导数可以通过吹风试验并进行计算得到. 在平飞条件下飞行速度  $V_0 = 20 \text{ m/s}$ , 迎角  $\delta_0 = 2.68/57.3 \text{ rad}$ , 高度  $H_0 = 200 \text{ m}$ . 根据试验数据进行一阶近似简化后, 可得在平飞条件下的纵向平面小扰动近似模型为

$$\begin{cases}
 \dot{V} = (0.4877 - 0.0151V) \cos \delta - (-0.4424 + 0.0302V + 0.4840) - g \sin(\delta - \delta_0), \\
 \dot{V} = Vq - (0.4877 - 0.0151V) \sin \delta - (-15.7578 + 0.9800V + 127.4 + 0.0172\dot{\delta} + 0.4040q + 3.1850e) + g \cos(\delta - \delta_0), \\
 \dot{\delta} = q, \\
 \dot{q} = 2.2460 - 48.02\dot{\delta} - 5.7505q - 55.7375e - 0.2401\dot{e}, \\
 \dot{H} = V \sin(\delta - \delta_0).
 \end{cases} \quad (4)$$

从方程组(4)可以看出,该模型呈现非线性特性,并且,模型中各参数的逼近只采用了一阶近似,和实际值之间还存在一个高阶偏差量,采用常规PID控制方法不容易进行控制器设计,并且由于模型不准确,对于近似模型设计的最优PID控制器在实际控制中也未必是最优的;此外,由于飞机实际飞行环境复杂,可能导致模型参数的改变,而传统PID控制无法很好地应对这些改变. 因此对于该模型,传统PID控制无法取得很好的控制效果,应当寻求具有自适应功能的智能化控制策略和方法.

## 2 模糊自适应 PID 控制器的组织结构 and 实现算法

### 2.1 模糊 PID 控制器结构及原理

模糊控制是以专家的经验为基础,制定模糊

规则进行推理控制,而不依赖于被控对象精确的数学模型.但是存在一个严重的缺点<sup>[4]</sup>就是它对语言变量值的划分不可能太细,导致对系统的控制精度有一定的影响.由于实际中多采用二维的模糊控制,模糊控制器的输出一般与误差及误差的变化有关,因此这种控制器只具有 Fuzzy 比例-微分控制作用,若模糊控制中不引入积分机制,从理论上讲这种常规的模糊控制器是很难克服稳态误差的.但是传统PID控制器具有积分环节,能很好地消除稳态误差,如果将模糊决策方法与PID控制相融合,那么控制器既具有模糊控制的特点又具有PID的特点.在整定好一组PID控制参数后,采用模糊自适应PID控制器比常规模糊控制器能更好更快的满足系统要求,它既具有模糊控制器的优点,又具有常规PID控制器的优点,因此本文也采用了这种方法来控制无人机姿态.

模糊自适应PID控制器<sup>[6-8]</sup>以误差  $e$  和误差变化率  $e_c$  作为输入,利用模糊控制规则在线对PID参数进行修改,以满足不同时刻的  $e$  和  $e_c$  对PID参数自整定的要求.模糊自适应PID控制器结构<sup>[5-9]</sup>如下图2所示.

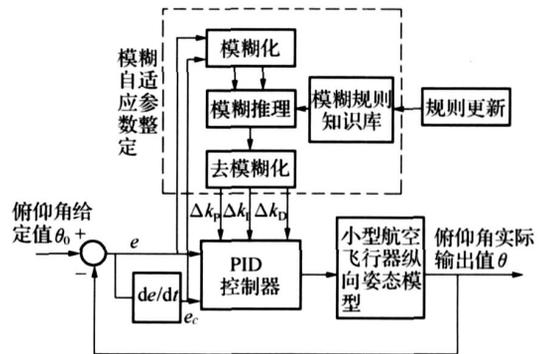


图 2 模糊自适应 PID 控制器结构

Fig. 2 Structure of fuzzy adaptive PID controller

模糊自适应PID控制器的参数模糊自整定是找出PID的3个参数变化量  $K_P$ ,  $K_I$ ,  $K_D$  与误差  $e$  和误差变化率  $e_c$  之间的模糊关系,在运行中通过不断检测  $e$  和  $e_c$ . 根据模糊控制原理来对3个参数进行在线修改,以满足不同  $e$  和  $e_c$  时对控制参数的要求,从而使被控对象有良好的动、静态性能.

### 2.2 模糊PID控制器的设计

模糊控制器选用误差量  $e$  和误差的变化量  $e_c$  作为输入变量,PID控制器的3个参数变化量  $K_P$ ,  $K_I$ ,  $K_D$  作为输出变量.对这5个变量对应的模糊语言集及其论域定义为

这5个变量对应的模糊量  $\tilde{e}$ ,  $\tilde{e}_c$ ,  $\tilde{K}_P$ ,  $\tilde{K}_I$ ,  $\tilde{K}_D$  的模糊语言集均定义为  $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$ . 对应的模糊变量的基本论域定义为  $\tilde{e}$  和  $\tilde{e}_c$ , 基本论域定义为  $[-3, +3]$ ,  $\tilde{K}_P$  基本论域定义为  $[-9, +9]$ ,  $\tilde{K}_I$  基本论域定义为  $[-15, +15]$ ,  $\tilde{K}_D$  基本论域定义为  $[-3, +3]$ .

根据实际无人机飞行得到的数据,可以得到误差  $e$  (单位:度)和误差变化率  $e_c$  的实际取值范围为

$$e: [-10, +10], e_c: [-10, +10];$$

取  $K_P$ ,  $K_I$ ,  $K_D$  的实际取值范围为

$$K_P: [-30, +30], K_I: [-20, +20],$$

$$K_D: [-1, +1].$$

所以,比例因子  $k_e = 3/10$ ,  $k_{e_c} = 3/10$ ;量化因子  $P_{K_P} = 30/9 = 10/3$ ,  $P_{K_I} = 20/15 = 4/3$ ,  $P_{K_D} = 1/3$ .

在模糊控制系统设计过程中,各语言值的隶属函数形状对控制性能也有很大的影响,隶属函数形状尖,则该模糊子集的分辨率高,控制灵敏度高;反之,隶属函数较平缓,控制特性也越平缓,系统稳定性越好.基于以上原因,在设计模糊控制器时,在小误差区间应提高量化等级,或增加隶属函数的分辨率.而在大误差区间,则适当减小量化等级(即加大量化区间)或设定分辨率较低的隶属函数.这样可以有效地改善系统的动、静态特性,增强抗干扰能力.因此,结合经验,这5个变量的隶属度函数的设计如下,给出误差的隶属度函数如图3所示.

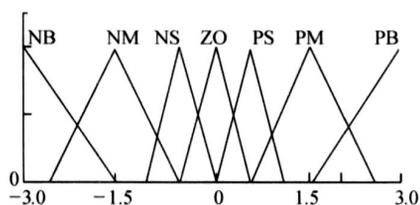


图3 误差的隶属度函数

Fig. 3 Membership function for error

针对不同的  $e$  和  $e_c$ ,  $K_P$ ,  $K_I$ ,  $K_D$  的整定原则为

1) 当  $|e|$  较大时,为使系统具有较好的跟踪性能,应取较大的  $K_P$  与较小的  $K_D$ ,同时为避免系统响应出现较大的超调,应对积分作用加以限制,通常取  $K_I = 0$ .

2) 当  $|e|$  和  $|e_c|$  中等大小时,为使系统具有较小的超调,  $K_P$  应取小一些,在这种情况下,  $K_D$  的取值对系统的影响较大,也应取小一些,  $K_I$  的取值要适当.

3) 当  $|e|$  较小时,为使系统具有较好的稳定性,  $K_P$  和  $K_I$  均应取大些.同时,为避免系统在设定值时出现振荡,并考虑系统抗干扰的性能,当  $|e_c|$  较

大时  $K_D$  可取小些;  $|e_c|$  较小时,  $K_D$  可取得较大些.

本文中,选取误差和误差变化率作为模糊 PID 控制器输入,每个输入选取7个语言变量,这样共能提取49条模糊规则,其基本结构为

1) if  $\tilde{e}$  is PB and  $\tilde{e}_c$  is PB, then  $\tilde{k}_p$  is NB,

$\tilde{K}_I$  is ZO,  $\tilde{K}_D$  is PB;

2) if  $\tilde{e}$  is NB and  $\tilde{e}_c$  is NB, then  $\tilde{k}_p$  is NB,

$\tilde{K}_I$  is ZO,  $\tilde{K}_D$  is PS.

其他47条规则也是按照上面的原则提取的,在初步制定规则之后,用于无人机的姿态控制中进行仿真,根据仿真结果,不断调整规则,最终得到的49条规则如表2~4所示.

表2  $\tilde{K}_P$  的模糊规则

Table 2 Fuzzy rules of  $\tilde{K}_P$

$\tilde{e}$	$\tilde{e}_c$						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	NS	ZO
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	PS
NS	NM	NM	NM	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZO	PS	PM	PM	PB
PM	NS	ZO	PS	PM	PB	PB	PB
PB	ZO	PS	PM	PB	PB	PB	PB

表3  $\tilde{K}_I$  的模糊规则

Table 3 Fuzzy rules of  $\tilde{K}_I$

$\tilde{e}$	$\tilde{e}_c$						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
NM	NM	NM	NS	NS	NS	ZO	ZO
NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	NS	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
PM	ZO	ZO	PS	PS	PS	PM	PM
PB	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO

模糊规则确定后,接着就要进行模糊推理.采用 Mamdani 型模糊推理算法.设模糊控制器的输入模糊量为:  $\tilde{e}$  是 A 和  $\tilde{e}_c$  是 B,则根据模糊控制规则进

行近似推理,可以得出输出模糊量  $\bar{u}$ (用模糊集合  $C$  表示)为

$$\begin{cases} R_i = (A_i \text{ and } B_i) & C_i, \\ R = \bigcap_{i=1}^n R_i, \\ R_i = (A_i \text{ and } B_i) & C_i. \end{cases} \quad (5)$$

表 4  $\tilde{k}_d$  的模糊规则

Table 4 Fuzzy rules of  $\tilde{k}_d$

$\tilde{e}$	$\tilde{e}_c$						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO
NS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZO
ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PM	PB	NS	PS	PS	PM	PM	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

其中包括 3 种主要的模糊逻辑运算:and 运算,合成运算“ $\circ$ ”,蕴含运算“ $\supset$ ”。

本文 and 运算采用求交(取小)方法:

$$\mu_{(A \text{ and } B)}(x, y) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)]. \quad (6)$$

合成运算“ $\circ$ ”采用最大-最小(max-min composition)方法:

$$\mu_C(z) = \max_{x,y} [\min_{x,y} \{\mu_{(A \text{ and } B)}(x, y), \mu_R(x, y, z)\}]. \quad (7)$$

蕴含运算“ $\supset$ ”采用求交(取小)方法:

$$\begin{aligned} R_i &\leftarrow \mu_{(A_i \text{ and } B_i)}(x, y, z) = \\ &\mu_{(A_i \text{ and } B_i)}(x, y) \wedge \mu_{C_i}(z) = \\ &\min\{\mu_{(A_i \text{ and } B_i)}(x, y), \mu_{C_i}(z)\}. \end{aligned} \quad (8)$$

去模糊化采用重心法:

$$u_0 = \frac{\sum_{i=1}^n u_i \mu_C(u_i)}{\sum_{i=1}^n \mu_C(u_i)}. \quad (9)$$

经过去模糊化后的输出值再乘以比例因子就是实际的用于控制的真实值。

以上模糊规则的设计是基于已获得一整定好(但不是最优)的 PID 参数的基础之上的.因此,根据模糊规则表进行推理最终得到 3 个参数的自适应修正值,修正参数按式(10)计算:

$$\begin{cases} K_P = k_{p0} + \Delta K_P, \\ K_I = k_{i0} + \Delta K_I, \\ K_D = k_{d0} + \Delta K_D. \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $K_P$ 、 $K_I$ 、 $K_D$  为模糊控制器输出的 3 个自适应修正值,  $k_{p0}$ 、 $k_{i0}$ 、 $k_{d0}$  为已整定好的 PID 的 3 个初始参数值。

### 2.3 稳定性分析

为了保证系统稳定,需要针对所设计的模糊自适应 PID 控制器,采用输入/输出(I/O)稳定性理论<sup>[10]</sup>进行分析。

为讨论方便,在此采用线性近似法<sup>[11]</sup>对无人机模型进行简化,从而将其改写成单输入单输出的形式,输入为升降舵偏转角  $\delta$ ,输出为俯仰角偏转角  $\theta$ ,这样就得到传递函数模型为

$$G(s) = \frac{-55.7(s+6.271)(s+0.4526)}{(s^2+0.3861s+0.2714)(s^2+12.45s+84.34)}.$$

根据 I/O 稳定性定理,只要分别证明传递函数  $G(s)$  和模糊 PID 控制器分别为钝性和严格钝性,就能导出系统稳定的充分条件。

由钝性定理可知,被控对象  $G(s)$  本身不是钝性的,因此,参照文献[10],对被控对象和控制器分别乘以  $\frac{s}{s^2 + p_1s + p_2}$  和  $\frac{s}{s^2 + p_1s + p_2}$ . 由钝性定理可知,当  $p_1$ 、 $p_2$  满足一定的条件时,就能保证被控对象是钝性的,在此,通过计算,选取  $p_1 = 1$ ,  $p_2 = 2$ . 经变换后的模糊自适应 PID 控制器的等效传递函数为

$$G_c(s) = \frac{s}{s^2 + (s+1)(s+2)} (K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s).$$

由钝性定理可知,要使  $G_c(s)$  为严格钝的,需满足  $\text{Re}(G_c(j\omega)) < 0$ , 其中  $\omega > 0$ . 因而有,

$$\begin{aligned} \text{Re}(G_c(j\omega)) &= \text{Re} \left[ \frac{K_P j + K_I + K_D (j\omega)^2}{-(j\omega + 1)(j\omega + 2)} \right] = \\ &= \text{Re} \left[ -\frac{(K_I - K_D \omega^2) + j K_P}{2 - \omega^2 + 3j\omega} \right] = \\ &= \text{Re} \left[ -\frac{((K_I - K_D \omega^2) + j K_P)(2 - \omega^2 - 3j\omega)}{(2 - \omega^2)^2 + 9\omega^2} \right] = \\ &= -\frac{(K_I - K_D \omega^2)(2 - \omega^2) + 3 K_P \omega^2}{(2 - \omega^2)^2 + 9\omega^2} = \\ &= -\frac{K_D \omega^4 + (3 K_P - K_I - 2 K_D) \omega^2 + 2 K_I}{(2 - \omega^2)^2 + 9\omega^2} \end{aligned} \quad (11)$$

由式(11)可知,要使  $\text{Re}(G_c(j\omega)) < 0$ , 必须使  $K_I < 0$ ,  $K_D > 0$ ,  $3 K_P - K_I - 2 K_D > 0$ .

从而可知,本文针对小型无人机非线性被控对象所设计的模糊自适应 PID 器,整体系统满足 I/O 稳定的充分条件为

$$K_I < 0, K_D = 0, K_P = \frac{K_I + 2K_D}{3}$$

在本文中,选取  $K_P$ 、 $K_I$ 、 $K_D$  的初值为  $K_{P0} = -30, K_{I0} = -20, K_{D0} = -1$ ,  $K_P$  的调节范围为  $[-30, +30]$ ,  $K_I$   $[-20, +20]$ ,  $K_D$   $[-1, +1]$ ,因此,调节后的参数值  $K_{P0} + K_P$ 、 $K_{I0} + K_I$ 和  $K_{D0} + K_D$  始终小于零,而且,程序中设定使  $(K_{P0} + K_P) \frac{(K_{I0} + K_I) + 2(K_{D0} + K_D)}{3}$ ,如果调节过程中此条件不满足,则让  $K_P$  保持上式右端值。同时,为进一步确保在调节过程中  $K_I$ 、 $K_D$  始终满足稳定性条件,在程序中设定:当前调节如果不满足稳定性条件,则让  $K_I$ 、 $K_D$  保持上前一次的值不变。因此,可确保本文中模糊自适应 PID 参数在调节过程中满足上述的稳定性条件,详细情况可参见后文中的仿真实例。

### 3 仿真实例

针对上面给出的小型实验无人机模型进行仿真,系统输入为阶跃输入,仿真结果如下。

#### 3.1 俯仰姿态保持/控制模式仿真

采用模糊自适应 PID 控制器,初始值  $k_{P0} = -30, k_{I0} = -20, k_{D0} = -1$ ,满足稳定性条件,其俯仰角单位阶跃输出响应曲线如图 4 所示。

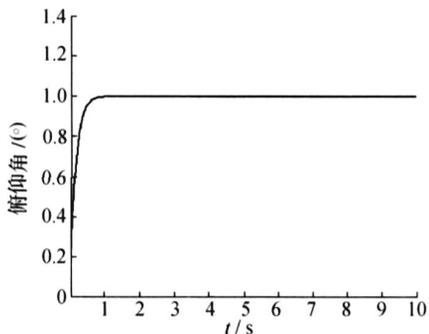


图 4 模糊自适应 PID 俯仰角单位阶跃响应  
Fig. 4 Simulation results of fuzzy adaptive PID controller

为了便于比较,采用传统 PID 控制俯仰角姿态, PID 3 个参数选取与模糊自适应 PID 3 个参数初始值相同,输出响应如图 7 所示,可以看出系统输出具有一定的超调,且调节时间较长。

比较图 4 和图 7 可知,采用模糊自适应 PID 控制方法能改善系统的动、静态响应,加快了系统的响应时间,系统超调也大大减小,系统动、静态性能都得到了提高。同时从图 6 可以看出, PID 参数在调节过程中始终满足稳定性条件。

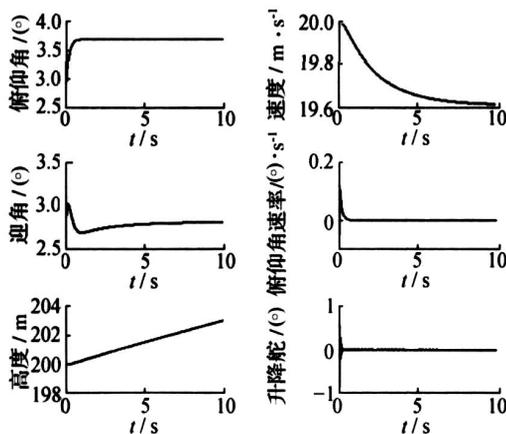


图 5 俯仰姿态保持和控制回路的阶跃响应特性  
Fig. 5 Step response characteristics of pitching attitude holding and control loop

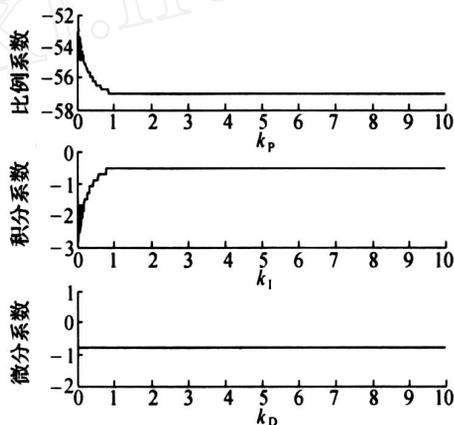


图 6 模糊自适应 PID 3 个参数的自适应调整  
Fig. 6 Adaptive adjustment of fuzzy PID controller

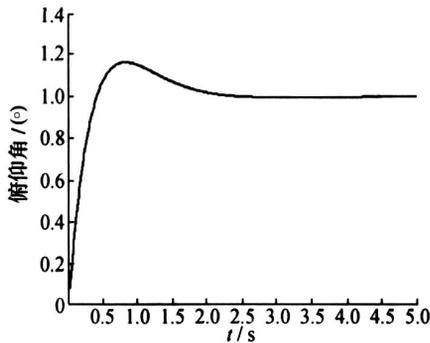


图 7 常规 PID 俯仰角保持仿真结果  
Fig. 7 Simulation results of pitching holding based on general PID controller

#### 3.2 高度保持/控制模式的仿真

在设计高度控制系统时通常不再改变已设计好的姿态控制系统,当需要单独对飞机的姿态角进行保持和控制时,只需简单地将高度差测量装置断开即可,从而使飞行状态的转换非常方便。

因此,在上面姿态保持/控制模态设计好的基础上,采用本文提出的模糊自适应 PID 控制器控制高度保持模态,高度输入为 5 m,仿真结果图 8.

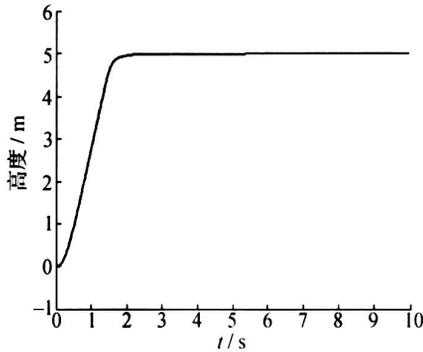


图 8 模糊自适应 PID 控制器高度保持响应  
Fig. 8 Height holding response based on fuzzy PID controller

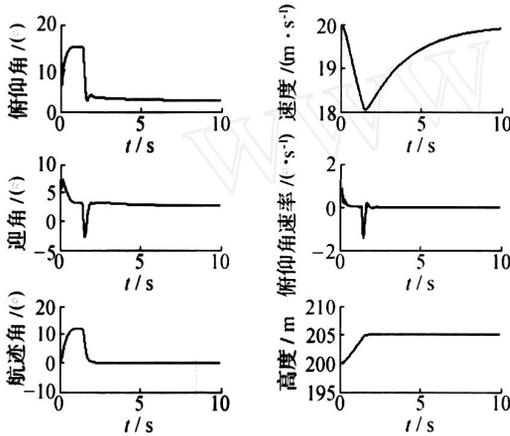


图 9 高度保持回路响应特性

Fig. 9 Response characteristics of high holding loop

为了比较分析,采用传统的 PID 控制方法控制高度保持模态,仿真结果如图 10.

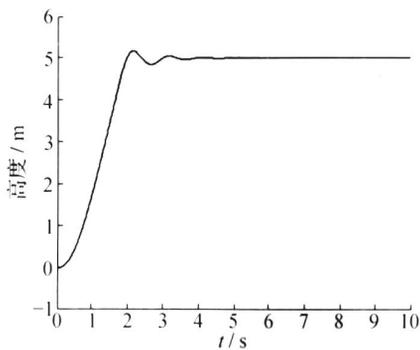


图 10 传统 PID 高度保持响应

Fig. 10 Height holding response based on general PID controller

比较分析图 8~10 的仿真结果可知,采用模糊自适应 PID 控制方法控制高度比采用传统的 PID

控制方法好,前者加快了系统的响应时间,系统超调也大大减小,提高了系统的动、静态性能,进一步说明了本文提出的方法的优越性.

### 3.3 鲁棒性检验

为了研究模糊控制器的鲁棒性,现假定无人机俯仰角保持飞行过程中在 5 s 时受到一大大小为 5 N·m 的干扰力矩,仍采用模糊自适应 PID 控制器,且控制器各参数都不变,系统输入为单位阶跃信号.响应曲线如图 11 所示,从图中可以看出,俯仰角受扰动力矩影响非常小,说明该模糊控制器具有很强的鲁棒性.

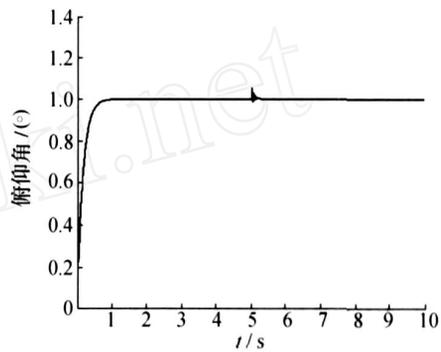


图 11 模糊控制器鲁棒性仿真结果

Fig. 11 Robustness test of fuzzy adaptive PID controller

## 4 结束语

本文设计了一种无人机纵向姿态控制的模糊自适应 PID 控制方法,有效地实现了纵向姿态的控制和纵向航迹的跟踪,该方法适用于无人机这类非线性、时变对象的控制.仿真结果表明,采用这种姿态控制方法的控制器性能比常规 PID 控制器有明显的改善,其响应速度快,超调小,稳态精度高,系统的动、静态性能都有很大的提高,且具有更强的自适应能力,可满足自主飞行的要求.然而,应当指出的是,本文给出的只是仿真实验结果,还未能直接应用于实际试飞过程,进一步的研究工作还在进行之中.

## 参考文献:

[1]唐 强,朱志强,王建元.国外无人机自主飞行控制研究[J].系统工程与电子技术,2004,26(3):418-422.  
TANG Qiang, ZHU Zhiqiang, WANG Jianyuan. Survey of foreign researches on autonomous flight control for unmanned aerial vehicles[J]. Systems Engineering and Electronics, 2004, 26(3): 418-422.

[2]刘 波,何清华,邹湘伏.无人机飞行控制技术初探[J].飞行力学,2007,25(2):5-8.  
LIU Bo, HE Qinghua, ZOU Xiangfu. Elementary discussion of flight control technology for an unmanned air

vehicle[J]. Flight Dynamics, 2007, 25(2) :5-8.

[3]张明廉. 飞行控制系统[M]. 北京:航空工业出版社, 1994.

[4]孙增圻. 智能控制理论与技术[M]. 北京:清华大学出版社, 1997:4-15.

[5]DOITSIDIS L, VALAVANIS K P, TSOURVELOUDIS N C, et al. A framework for fuzzy logic based UAV navigation and control[C]// Proceeding of the 2004 IEEE International Conference on Robotics & Automation. New Orleans, 2004:4041-4046.

[6]曾丽兰, 王道波, 樊春霞. 基于模糊 PID 的无人直升机解耦控制研究[J]. 应用科学学报, 2004, 22(4) :498-502. ZENG Lilan, WANG Daobo, FAN Chunxia. An unmanned helicopter decoupling control based on the fuzzy PID control method [J]. Journal of Applied Sciences, 2004, 22(4) :498-502.

[7]黄向华, 彭召勇. 无人驾驶直升机发动机模糊自适应 PID 控制[J]. 航空动力学报, 2005, 20(3) :487-493. HUANG Xianghua, PENG Zhaoyong. Fuzzy adaptive PID control for an unmanned helicopter engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(3) : 487-493.

[8]杨建新, 杜永贵. 模糊自适应整定 PID 控制及其仿真[J]. 机械工程与自动化, 2006, 5:110-112. YANG Jianxin, DU Yonggui. Self-adaptive tuning of fuzzy PID controller and its simulation[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2006, 5:110-112.

[9]PEI Jian, ZHAO Liming, WANG Dejun, et al. Fuzzy PID control of traction system for vehicles [C]// Proceedings of the Fourth International Conference on Machine Learning and Cybernetics. Guangzhou, China, 2005:773-777.

[10]修智宏, 任光. TS-PID 模糊控制器的 IO 稳定性分析[J]. 系统工程与电子技术, 2004, 26(4) : 509-513.

XIU Zhihong, REN Guang. IO stability analysis of TS-PID fuzzy controller[J]. Systems Engineering and Electronics, 2004, 26(4) :509-513.

[11]吴忠强, 许世范, 岳东. 模糊控制系统稳定性的分析与综合[J]. 计算机自动测量与控制, 2001, 9(6) :19-22. WU Zhongqiang, XU Shifan, YUE Dong. Analysis and synthesis of stability of fuzzy control systems[J]. Computer Automated Measurement & Control, 2001, 9(6) :19-22.

作者简介:



秦世引,男,1955年生,教授,博士生导师,主要研究方向为复杂系统的智能控制、图像处理与模式识别等。作为负责人主持完成(或在研)国家攀登计划项目的子项目、国家重点基础研究(973)项目的子课题、国家863项目、国家自然科学基金项目、国防科技预研基金项目、武器装备预研基金项目等18项,1999年获全国优秀科技图书奖暨科技进步奖(科技著作)一等奖,1999年获国家第五届工程设计优秀软件金奖,发表学术论文110余篇,出版学术著作1部,研究生教材1部,译著2部。



陈锋,男,1983年生,硕士研究生,主要研究方向为无人机智能自主控制技术。



张永飞,男,1982年生,博士研究生,主要研究方向为智能控制、模式识别。

## International Conference on Intelligent Robotics and Application 智能机器人与应用国际会议

The International Conference on Intelligence and Robotics and Applications (IRA 2008), will be held on October 15 to 17, 2008 in Wuhan, China. The goal is for broad coverage and dissemination of foundational research on intelligent robotics and its applications among researchers, academicians, and industry practitioners. The theme is on scientific methods and industrial applications for manufacturing robotics. Selected papers will be published by SCI/ SCIE indexed Journals. Selected papers will be published by SCI/ SCIE indexed Journals.

Papers describing original work on abstractions, algorithms, theories, methodologies, and case studies are invited including but not limited to the following areas: 1) Robot Motion Planning and Manipulation; 2) Robot Control; 3) Cognitive Robotics; 4) Rehabilitation Robotics; 5) Health Care and Artificial Limb; 6) Robot Learning; 7) Robot Vision; 8) Human-Machine Interaction & Coordination; 9) Mobile Robotics; 10) Micro/ Nano Mechanical Systems; 11) Manufacturing Automation; 12) Multi - Axis Surface Machining; 13) Realworld Applications.

<http://www.irobotica.org>