

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2107821

基于粒子群优化的串级模糊PID 无人机飞行控制系统*

沈跃杰¹ 行鸿彦¹ 王水璋²

(1.南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心 南京 210044; 2.南京多基观测技术研究院 南京 211599)

摘要:为了解决无人机飞行控制系统存在的平稳控制响应慢、自适应能力差、抗干扰能力弱的问题,分析了无人机飞行控制系统的原理,建立了无人机飞行控制模型,在串级模糊PID控制的条件下,利用粒子群优化算法的迭代寻优能力,实时确定模糊控制中的量化因子、比例因子以及初始PID参数,通过模糊控制在线调整PID参数,使平稳控制中的参数时刻保持最优化,设计了一种基于粒子群优化的串级模糊PID的飞行控制系统。实验结果表明,当量化因子 e 、 ec 的值分别为3、0.75,比例因子 k_1 、 k_2 、 k_3 的值分别为0.5、2、0.5时,系统稳定性达到最优。相比于串级PID控制与串级模糊PID控制,通过粒子群优化后的控制系统具有更优的控制精度和稳定性,能较好地提高系统的性能指标,满足快速高效调平的飞行要求。

关键词:无人机;飞控;粒子群优化;模糊控制;PID

中图分类号: V279;V249.1;TP273 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.80

UAV flight control system of cascade fuzzy PID based on particle swarm optimization

Shen Yuejie¹ Xing Hongyan¹ Wang Shuizhang²

(1. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Nanjing Institute of Multi-based Observation Technology, Nanjing 211599, China)

Abstract: In order to solve the problems of slow smooth control response, poor adaptive ability, and weak anti-interference ability of the UAV flight control system, this article analyzes the principle of UAV flight control system and establishes a drone flight control model, under the condition of cascade fuzzy PID control, using the iterative optimization ability of PSO algorithm, the quantization factor, scale factor and initial PID parameters in fuzzy control are determined. PID parameters are adjusted online through fuzzy control, so that the parameters in the smooth control are kept optimized at all times. Therefore, a cascade fuzzy PID flight control system based on particle swarm optimization is designed. The experimental results show that when the values of the quantization factors e and ec are 3 and 0.75, and the values of the scale factors k_1 , k_2 , and k_3 are 0.5, 2 and 0.5, respectively, the system stability is optimal. compared with cascade PID control and cascade fuzzy PID control, the control system optimized by PSO has better control accuracy and stability, and can better improve the performance of the system and meet the flight requirements of fast and efficient leveling.

Keywords: drone; flight control; particle swarm optimization; fuzzy control; PID

0 引言

近年来,传感器的设计在科技发展的背景下逐渐朝着小而精的方向发展。由于小型无人机搭载着多种微小而又精密的传感器渐渐成为研究热点。无人机是一种可以执行

特定飞行任务的飞行器,它凭借制作成本,易部署、灵活性高,飞行条件限制少等优点^[1],在日常拍摄、地图测绘、情报侦察、任务搜救以及军事国防中都有着自身独特的优势^[2-4]。其控制方式也从简单的遥控逐渐向自主控制方向发展,这对无人机飞行控制提出了更高的要求。由于无人

收稿日期:2021-09-08

* 基金项目:国家重点研发计划(2021YFE0105500)、国家自然科学基金(62171228)项目资助

机飞行系统并不是简单的线性关系,在飞行过程中容易遭到外界环境干扰,改变其当前姿态、航向,影响工作的有效实施。因此,针对环境的不确定性,设计具有强抗干扰性和自适应性的无人机飞行控制系统是很有必要的。

针对无人机飞行平稳性的问题,大多都是通过传统的PID控制、滑模控制、反步法、鲁棒控制等算法来实现的^[6],虽然能有效提高无人机抗干扰能力,但由于模型简单,参数的精确度较低,对无人机飞行平稳的控制效果不明显。因此,有学者便在传统单级PID控制的基础上增加一级PID控制,提出串级PID控制^[6],降低了无人机飞行时内外环受到的干扰;还有将串级PID控制结合模糊控制,提出了串级模糊PID控制^[7],在降低干扰的同时,提高了无人机的自适应性;刘洋等^[8]将变论域加入到串级模糊PID中,对模糊规则进行优化,提高了模糊规则在不同干扰下的适用性与精确性;同时,有学者提出将多种算法组合的控制方法,例如反步滑模控制、神经网络PID控制等^[9-10]。由于无人机飞行模型复杂,其控制系统参数的动态性以及建模的不精确性,对设计抗干扰能力强,调平响应快的飞行控制器提出了更高的要求。

因此,为了能更好地提高无人机飞行控制的适应性,本文结合无人机飞行原理和飞行控制模型,提出了一种基于粒子群优化算法(particle swarm optimization, PSO)的串级模糊PID控制算法。由内外环控制形成闭合回路,降低干扰;同时,利用模糊控制实现控制系统的自适应调整;最后,采用粒子群优化算法,确定系统中各参数的最优选取,提高调平精度。通过搭建系统仿真模型并进行实验分析,验证了优化后的控制系统性能。

1 无人机姿态控制

1.1 运动状态

四旋翼无人机是通过改变两个垂直机架上4个旋翼的转速来实现自身6个不同的运动状态,如图1所示。因此,对无人机进行姿态控制就是要控制无人机不同旋翼的转速,跟踪系统所期望的转速值。图1所示为“X”型四旋翼无人机,旋翼1和2为无人机飞行正方向,且相邻旋翼转向相反,以此来消除旋翼转动时所产生的扭矩作用。当1、2、3、4转速都相等时,无人机不发生偏转,此时,当同时改变4个旋翼转速大小,无人机便会做垂直运动,如图1(a)所示;当1、2旋翼转速小于3、4旋翼时,无人机正方向便会低于后部,使其做俯仰运动,如图1(b)所示;同理,当1、4和2、3旋翼转速不等时,无人机便会做横滚运动,如图1(c)所示;最后当对角旋翼转速不同时,由于扭矩作用,无人机便会实现偏航运动,如图1(d)所示。

当无人机旋翼转速发生变化时,便会使无人机产生角速度变化,由角速度变化可以使无人机位置发生变化,实现无人机飞行。因此,要了解无人机飞行原理,需确定无人机角运动和线运动之间的关系,才能对无人机飞行进行稳定控制。

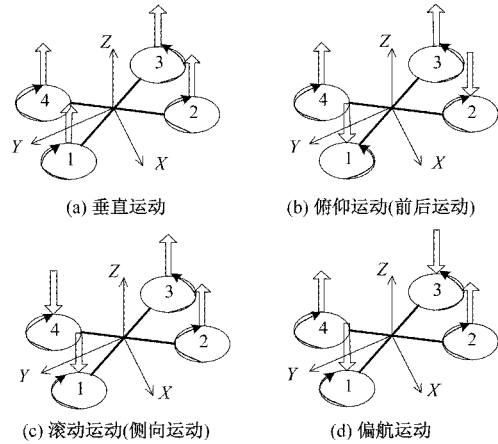


图1 无人机各个自由度的运动方向示意图

1.2 模型分析

为了得到电机控制量和无人机线运动、角运动之间的关系,需要建立无人机运动模型。首先选用地面坐标系 Γ_e 和机体坐标系 Γ_b 作为系统研究的参考坐标系^[11],如图2所示。

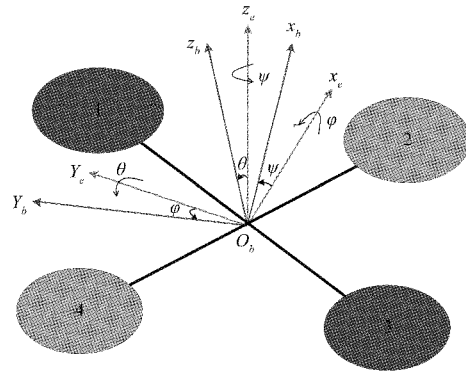


图2 地面坐标系与机体坐标系

由地面坐标系可得无人机具体位置信息,而飞行姿态的确定需要引进无人机姿态角,即俯仰角 θ 、滚动角 ϕ 、偏航角 ψ 。

由图2可知,无人机每一次姿态的改变都可看作是绕某一轴作旋转运动,因此,无人机所有的姿态变化都可用旋转矩阵来表示^[12], $\Gamma_b \sim \Gamma_e$ 的转换矩阵为:

$$R_b^e = \begin{bmatrix} \cos\phi\cos\theta & \sin\theta\cos\phi\sin\psi - \sin\phi\cos\psi & \sin\theta\cos\phi\cos\psi - \sin\phi\sin\psi \\ \sin\phi\cos\theta & \sin\theta\sin\phi\sin\psi - \cos\phi\cos\psi & \sin\theta\sin\phi\cos\psi + \cos\phi\sin\psi \\ -\sin\theta & \cos\theta\sin\psi & \cos\theta\cos\psi \end{bmatrix} \quad (1)$$

由于四旋翼无人机飞行系统不是传统的线性关系,且较复杂,为了方便建立无人机的运动学模型,需要先对系统进行理想化假设^[13-14]:

- 1)研究对象为刚体结构,且运动过程中物理状态不发生改变;
- 2)研究对象沿中心轴对称且对象的质心为系统中心;
- 3)空气阻力不计;

4)旋翼产生的升力和反扭力都与旋翼转速的平方成正比。

通过受力分析可设旋翼产生的升力大小为 $F_i(i = 1, 2, 3, 4)$, 总升力为 T , 因此, 在机体坐标系中, 无人机获得的升力为: $F_B = [0 \ 0 \ T]^T$

根据式(1), 可得在地面坐标系下旋翼受到的升力为:

$$F_E = R_B^T F_B = \left(\sum_{i=1}^4 F_i \right) \begin{bmatrix} \sin\theta \cos\phi \cos\psi + \sin\phi \sin\psi \\ \sin\theta \cos\phi \sin\psi - \sin\phi \cos\psi \\ \cos\phi \cos\theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

将无人机在地面坐标系下的线位移表示 $[x \ y \ z]^T$, 则运动速度为 $[\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{z}]^T$ 、运动加速度为 $[\ddot{x} \ \ddot{y} \ \ddot{z}]^T$; 设无人机总质量为 m , 可得无人机在地面坐标系下的线位移运动方程:

$$\begin{cases} \ddot{x} = \left(\sum_{i=1}^4 F_i (\sin\theta \cos\phi \cos\psi + \sin\phi \sin\psi) - K_1 \dot{x} \right) / m \\ \ddot{y} = \left(\sum_{i=1}^4 F_i (\sin\theta \cos\phi \sin\psi - \sin\phi \cos\psi) - K_2 \dot{y} \right) / m \\ \ddot{z} = \left(\sum_{i=1}^4 F_i (\cos\phi \cos\theta) - mg - K_3 \dot{z} \right) / m \end{cases} \quad (3)$$

由欧拉方程可得无人机转动过程得运动学公式:

$$\begin{cases} I_x \ddot{\theta} = (F_1 + F_2 - F_3 - F_4)l + \dot{\phi}\dot{\psi}(I_z - I_x) - K_4 \dot{\theta} \\ I_x \ddot{\phi} = (F_1 + F_4 - F_2 - F_3)l + \dot{\theta}\dot{\psi}(I_y - I_x) - K_5 \dot{\phi} \\ I_x \ddot{\psi} = (M_1 + M_3 - M_2 - M_4)l + \dot{\theta}\dot{\phi}(I_x - I_y) - K_6 \dot{\psi} \end{cases} \quad (4)$$

其中, l 为旋翼中心到无人机质心的距离; $\dot{\theta}$ 、 $\dot{\phi}$ 、 $\dot{\psi}$ 为各个运动方向的角速度; $\ddot{\theta}$ 、 $\ddot{\phi}$ 、 $\ddot{\psi}$ 为各个运动方向的角加速度; I_x 、 I_y 、 I_z 为对应轴的转动惯量; M_i 为对应旋翼旋转时产生的旋转力矩; K_i 为各方向的空气阻力。

结合电机控制量关系, 在理想条件下, 忽略空气阻力, 则无人机运动的数学模型为:

$$\begin{cases} \ddot{x} = F_x/m = \left(\sum_{i=1}^4 F_i (\sin\theta \cos\phi \cos\psi + \sin\phi \sin\psi) \right) / m \\ \ddot{y} = F_y/m = \left(\sum_{i=1}^4 F_i (\sin\theta \cos\phi \sin\psi - \sin\phi \cos\psi) \right) / m \\ \ddot{z} = (F_z - mg)/m = \left(\sum_{i=1}^4 F_i (\cos\phi \cos\theta) - mg \right) \\ \ddot{\theta} = [u_1 l + \dot{\phi}\dot{\psi}(I_z - I_x)] / I_x \\ \ddot{\phi} = [u_2 l + \dot{\theta}\dot{\psi}(I_y - I_x)] / I_x \\ \ddot{\psi} = [u_3 l + \dot{\theta}\dot{\phi}(I_x - I_y)] / I_x \end{cases} \quad (5)$$

由此可以得出无人机飞行系统中线运动和角运动之间的关系, 它们只是单方面的影响, 因此, 该系统并不是全耦合系统, 这给无人机飞行控制提供了研究方向。

2 无人机平稳控制

根据无人机运动模型可知系统角运动影响线运动, 影响过程为单向。因此, 可以将飞行系统分成两个分系统, 定为外环和内环。由位置控制外环, 使无人机能够按照指定航迹飞行, 达到目标位置; 姿态控制内环, 通过调整无人机飞行姿态和飞行角速度, 来影响无人机位置控制, 而外环的干扰对内环不产生影响, 从而确保无人机平稳飞行。

由于无人机系统的半耦合关系, 在飞行控制过程中, 最核心的控制环节是姿态控制。PID 算法是一种广泛应用于控制领域的经典控制算法, 其原理如图 3 所示。

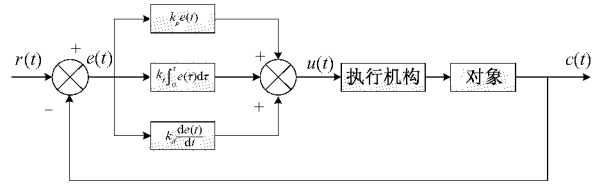


图 3 PID 控制系统原理

串级 PID 在单级 PID 控制的基础上增加了一项 PID 控制, 使其分为内环和外环双项控制, 如图 4 所示。在单级 PID 控制中, 控制器只能针对一项指标进行调节, 性能较差。采用串级 PID 控制后, 系统由内外环控制共同调节, 将角度变化和角速度变化串联在一起, 若飞行角度发生剧烈变化, 无人机也不会因为跟踪角度而发生猛烈晃动, 而是先调节无人机的角速度, 增强了无人机抵抗外界干扰的能力, 使系统更加稳定。

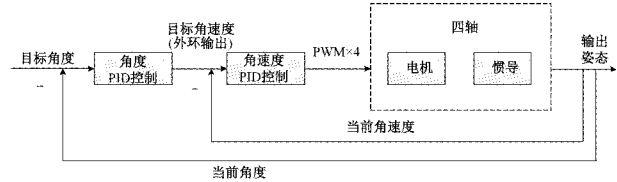


图 4 串级 PID 对无人机角度和角速度的控制

2.1 串级模糊 PID 控制

在串级 PID 控制作用下, 无人机基本能保持平稳飞行, 但由于 PID 算法的系数是常数, 使得在任何情况下, PID 控制的算法是相同的, 若无人机所处环境改变, PID 算法的系数也应随之改变, 并重新调整, 这使得飞行任务变得繁琐, 因此, 为了算法更加灵活, 适用性更加广泛, 便在串级 PID 控制的基础上加入能够自动调节参数的模糊 PID 控制。

模糊 PID 控制是一种非线性控制, 针对无人机系统的半耦合、非线性特点有着更加显著的作用。其原理是建立 PID 控制参数与偏差 E 和偏差率 EC 之间的关系^[15], 并根据模糊规则对 PID 参数进行实时优化、调整, 弥补了传统 PID 需要手动调整 PID 参数的不足。其控制原理可分为模糊化、模糊推理、清晰化 3 个基本步骤, 基本框图如图 5 所示。

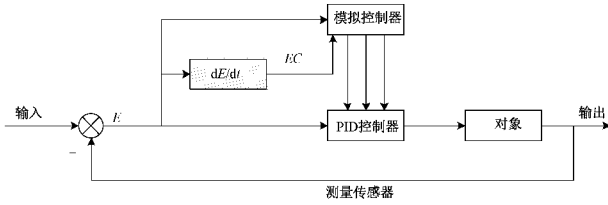


图5 模糊PID控制基本框图

根据图5可知,模糊控制器由偏差E和偏差率EC作为输入, ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 作为输出^[16]。在仿真过程中,首先是输入输出数据的模糊化,即将精确数据根据模糊论域划分为不同的集合。基于飞行经验,设置偏差E的模糊论域范围为[-3, 3],偏差率EC的模糊论域范围为[-1.5, 1.5], ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 的模糊论域分别设为[0, 3]、[-0.03, 0.03]、[0, 4];模糊子集设为{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB},设置如图6所示。

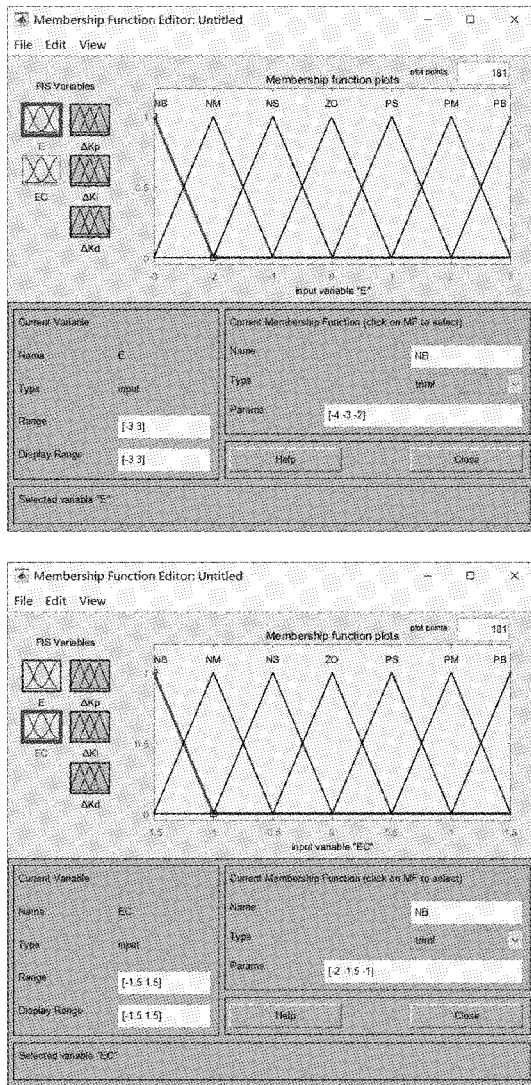


图6 模糊控制器中E、EC的隶属度函数

根据输入的隶属度函数可以对 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 进行

模糊推理,按照模糊规则得出输出值所对应的隶属度, ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 模糊规则的选取如下。

1) K_p 值决定系统响应速度。在系统调节初期适当选取较大的 K_p 值来提高系统响应速度,中期可相对降低,后期再调大来减小误差^[17]。

2) 积分控制 K_i 主要是为了消除系统的稳态误差。调节初期, K_i 的选取应相对小一点,调节中期可适当增大,以保持系统的稳定;最后,为了减小误差可调大 K_i 值^[18]。

3) 微分控制 K_d 主要是为了消除系统惯性带来的误差。调节初期,可以适当加大 K_d 值,避免超前制动;而中期可以适当减小或者不变;在调节后期应减小 K_d 值,降低系统制动作用,加快系统到达目标姿态^[19]。

据以上分析,制定 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 的模糊规则,如表1~3所示。

表1 ΔK_p 的模糊规则

ΔK_p	EC						
	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
E	ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	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

表2 ΔK_i 的模糊规则

ΔK_i	EC						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
E	ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM
PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

表3 ΔK_d 的模糊规则

ΔK_d	EC						
	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
E	ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	ZO
PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PM	PB	NS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

已知 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 的模糊规则,即可根据输入数据的隶属度函数得到 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 的模糊量,结合输入数据的隶属度函数,就可以通过解模糊得到具体的输出量大小。

2.2 粒子群优化 PID 参数

模糊控制能较好地针对环境变化实时调整 PID 参数,但初始 PID 参数以及量化因子和比例因子都需要手动修正,这很难是系统达到最优性能,因此,利用粒子群算法对系统中各参数进行优化,寻找最优参数,使系统更加平稳,响应速度更快。

粒子群优化算法属于元启发式算法,其搜索过程可类比于鸟类捕食的行为。由于它可以求解多维问题的优点,可应用于多个参数的优化,对模糊 PID 的参数选取有着很好的适应性。

粒子群算法公式如式(6)、(7)所示。

$$v_{i+1} = \omega * v_i + c_1 r_1 (P_i - x_i) + c_2 r_2 (G_i - x_i) \quad (6)$$

$$x_{i+1} = x_i + v_{i+1} \quad (7)$$

其中, i 为粒子序号; x_i 为第 i 个粒子位置; ω 为惯性权重; c_1 、 c_2 均为学习因子; r_1 、 r_2 是 $[0,1]$ 范围内随机数; P_i 是到 i 时粒子搜索到的最优位置; G_i 是到 i 时粒子群搜索到的最优位置。

在优化过程中,粒子速度由粒子自身惯性,个体认知以及群体认知组成,并通过惯性、个体极值和群体极值进行移

动^[20],选取最优参数组合,使系统达到最优性能。

PSO 算法优化模糊 PID 控制器流程如图 7 所示。

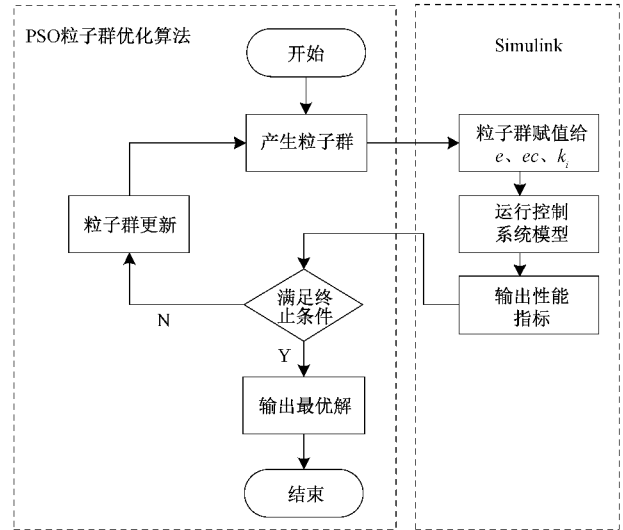


图 7 PSO 算法优化模糊 PID 控制器流程

3 控制系统仿真与分析

串级模糊 PID 控制器的仿真模型只需要在串级 PID 的外环角度控制上添加一个模糊控制器,3 种控制器的仿真模型如图 8~10 所示。

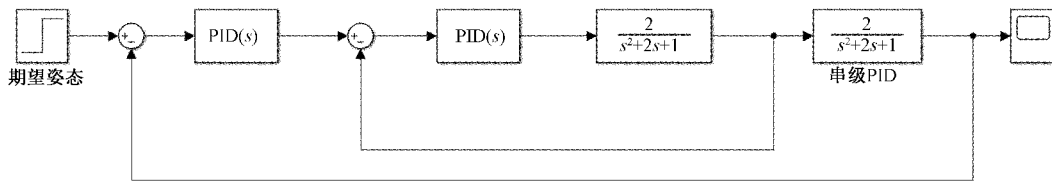


图 8 串级 PID 仿真模型

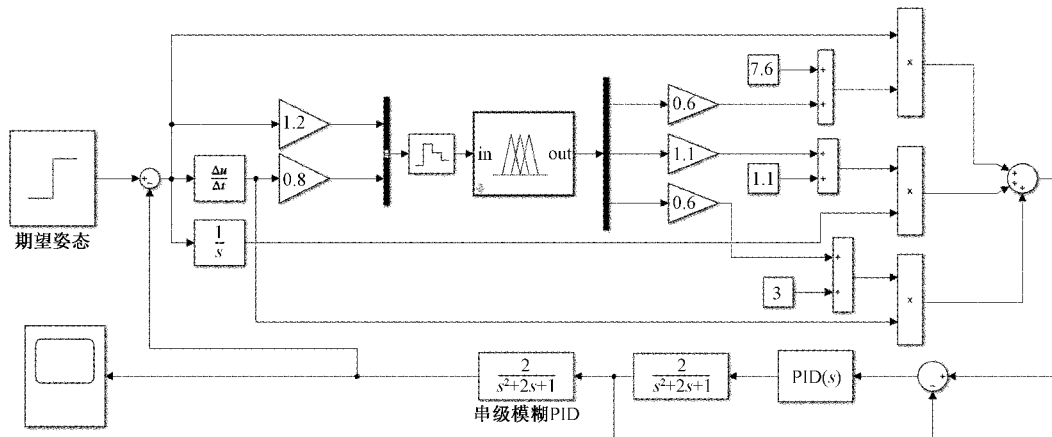


图 9 串级模糊 PID 仿真模型

由于量化因子和比例因子都需要手动调整,因此引入 PSO 优化算法对各参数进行迭代筛选,寻找最选项。

首先对 PSO 算法中各数据进行初始化选取,粒子种群数量 $N=30$,维数 $Dim=5$,惯性因子 $\omega=0.2$,学习因子

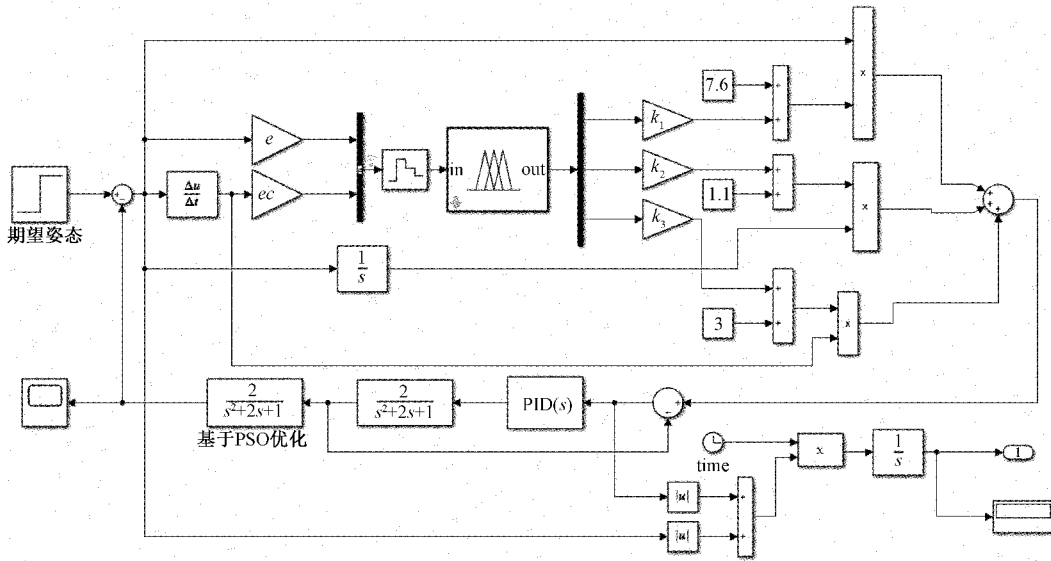


图10 基于 PSO 优化的串联模糊 PID 仿真模型

$c_1 = c_2 = 2$, 搜索空间上限 $V_{max} = 1$, 下限 $V_{min} = -1$, 最大迭代次数 $MaxIter = 50$ 。再选取时间误差绝对值为适应度函数, 即 ITAE 准则:

$$J = \int_0^{\infty} t |e| dt \quad (8)$$

此时粒子群对各参数进行赋值, 并进行适应度比较, 当迭代次数达到设定次数或适应度小于设定值, 则输出选取的最优解。

本文计算的各量化因子, 比例因子以及适应度函数变化如图 11~12 所示, 经 PSO 优化所得到的参数分别为: $e = 3, ec = 0.75, k_1 = 0.5, k_2 = 2, k_3 = 0.5$ 。由图 12 可知, 粒子群迭代 7 次时取得最优解, 此时的适应度值为 $J = 1.143 93$ 。

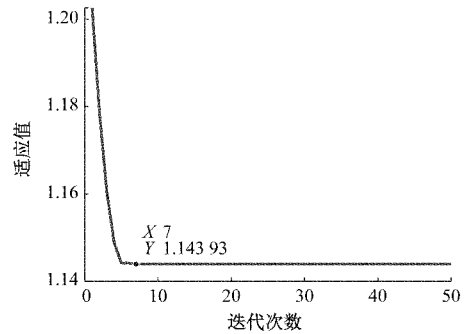


图12 最优个体适应值变化曲线

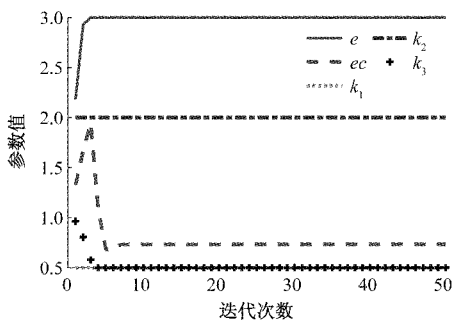


图11 系统各参数优化曲线

图 13 为串联 PID 控制、传统经验得各参数的串联模糊 PID 控制和基于 PSO 优化的串联模糊 PID 控制所对应的阶跃响应信号。由仿真曲线可知, 当系统受到阶跃信号影响, 经 3 种控制的系统都在 3 s 内回到稳定状态, 说明它们都有着自身的抗干扰性, 相比之下经 PSO 整定参数的串联模糊 PID 响应速度较快, 能够更加精确地到达期望姿态, 并保持稳定状态。若此时对系统内环加入若干个阶跃

信号作为干扰输入, 测试系统内环的抗干扰性, 其仿真结果如图 14 所示。

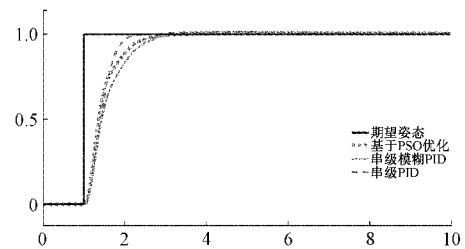


图13 串联 PID 控制和串联模糊 PID 控制仿真对比

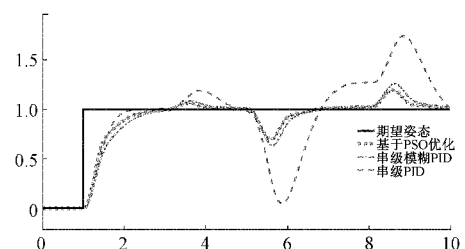


图14 内环加入干扰后的仿真图

由图 14 可知,虽然 3 种控制策略在输入阶跃信号时都能使系统迅速响应,但针对内环产生的干扰时就表现出了不同的调平能力。由于传统串级 PID 控制中仅使用两个 PID 控制器,系统结构简单,因此无法适应动态的干扰,其超调量和调整时间都相应较长;传统串级模糊 PID 能够有效抑制系统内环干扰,系统响应速度也较快,但依旧由于量化因子和比例因子的固定化,无法跟踪优化,容易陷入经验最优;基于 PSO 优化的控制系统响应速度快,且响应速度和超调量都优于前两种,摆脱了参数的经验主义,使得调平控制有明显提升,3 种控制方法系统性能指标对比如表 4~5 所示。

表 4 3 种控制策略超调量对比 %

控制策略	第 1 秒	第 3 秒	第 5 秒	第 8 秒
超调量	$\epsilon(t)$	$\epsilon(t)$	$-5\epsilon(t)$	$3\epsilon(t)$
串级 PID 控制	0	18	95	74
串级模糊 PID 控制	0	8	37	26
基于 PSO 优化的串级模糊 PID	0	6	30	19

表 5 内环加入干扰后系统响应时间 s

控制策略	第 1 秒	第 3 秒	第 5 秒	第 8 秒
响应时间	$\epsilon(t)$	$\epsilon(t)$	$-5\epsilon(t)$	$\epsilon(t)$
串级 PID 控制	1.6	2.1	1.8	9.366
串级模糊 PID 控制	2.01	0.9	1.46	6.86
基于 PSO 优化的串级模糊 PID	1.6	0.7	0.83	0.77

由表 4~5 可知,系统在受到阶跃信号干扰时 3 种控制策略都能使系统迅速回到稳定姿态,且三者的超调量都较小。在传统串级 PID 控制下,系统响应时间约为 1.6 s;在传统串级模糊 PID 控制下,由于模糊规则的作用,系统在即将到达期望姿态时会变平缓,避免系统因惯性而产生超调量,因此,响应时间较前者稍慢,约为 2.01 s,但其稳定性增加了;而经过 PSO 优化后的串级模糊 PID 控制因各参数达到最优化,系统性能极好,约在 1.6 s 即可响应。

当内环受到若干个干扰时,模糊控制就发生了作用。由表中可知,利用模糊控制的系统超调量和响应时间要远远优于传统串级 PID,因为模糊控制可以根据干扰动态调整自身的 PID 参数,具有自适性,这就保证系统不会因内环发生故障而崩溃。而由于 PSO 优化能使串级模糊 PID 控制性能达到最优,因此,在 3、5、8 s 时所表现的平稳能力要优于传统串级模糊 PID,响应速度也快。因此,利用 PSO 对串级模糊 PID 控制进行优化能够很好地保证无人机应付外界不确定的干扰。

4 结 论

本文针对四旋翼无人机飞行控制,提出了一种基于

PSO 优化的串级模糊 PID 控制系统,通过对无人机飞行模型分析,结合其闭环姿态控制系统特点,外环采用模糊 PID 控制系统调整角度,使系统对 PID 控制器的参数进行自主调整,实时保证 PID 参数的最优;内环采用 PID 控制调整角速度,减少内环对系统的干扰;并利用 PSO 算法对系统中比例因子和量化因子进行迭代寻优,使系统达到最优的控制效果。通过在 Simulink 组件中仿真分析,比较了系统在传统串级 PID 控制、串级模糊 PID 控制以及基于 PSO 优化的串级模糊 PID 控制下的阶跃响应曲线,结果表明,经 PSO 优化后的串级模糊 PID 控制有着调节速度快,抗干扰性强的优点,对无人机平稳控制的研究提供了一种新的思路。

参 考 文 献

- [1] 张海军,陈映辉. 四旋翼无人机飞控系统的研究与实现[J]. 计算机测量与控制, 2019, 27(5): 105-108, 113.
- [2] 白玉. 四旋翼无人机的应用与发展综述[J]. 广西农业机械, 2020(2): 7, 9.
- [3] 周嵩. 无人机技术在地质灾害防治中的应用[J]. 冶金管理, 2020(21): 87-88.
- [4] 任广山,常晶,陈为胜. 无人机系统智能自主控制技术发展现状与展望[J]. 控制与信息技术, 2018(6): 7-13.
- [5] 王成,杨杰,姚辉,等. 四旋翼无人机飞行控制算法综述[J]. 电光与控制, 2018, 25(12): 53-58.
- [6] 赵洁,陈至坤,张瑞成. 基于串级 PID 的多旋翼精确定点悬停控制研究[J]. 电光与控制, 2021, 28(8): 17-20, 30.
- [7] 盛广润,高国伟,李璇烨,等. 四旋翼飞行器串级模糊自适应 PID 优化控制系统研究[J]. 现代电子技术, 2020, 43(22): 67-71.
- [8] 刘洋,行鸿彦,侯天浩. 四旋翼无人机串级变论域模糊 PID 姿态控制研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(10): 46-52.
- [9] 肖英楠,孙抒雨. 基于反步滑模算法的无人机姿态鲁棒控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(7): 95-99.
- [10] 范怡敏,罗云飞,魏春英. 基于自适应神经网络的无人机 PID 控制器研究[J]. 电子测量技术, 2021, 44(9): 163-167.
- [11] 张垚,鲜斌,殷强,等. 基于 ARM 处理器的四旋翼无人机自主控制系统研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2012, 42(9): 753-760.
- [12] ZHOU L, XU S, JIN H, et al. A hybrid robust adaptive control for a quadrotor UAV via mass observer and robust controller [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2021, 13(3), DOI: 10.1177/16878140211002723.
- [13] 梁文凯,张晓龙,谢晓全,等. 基于 Matlab 的四旋翼控制仿真与抗干扰验证[J]. 软件, 2020, 41(1): 143-147.

- [14] FENDY S, MATTHEW G, SREENATHA A. Hybrid PD-fuzzy and PD controllers for trajectory tracking of a quadrotor unmanned aerial vehicle: Autopilot designs and real-time flight tests [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2019: 1-13.
- [15] 厉彦一, 王健, 李志远. 适用于测绘四旋翼无人机的模糊PID控制算法及仿真[J]. 测绘通报, 2020(S1): 1-5, 12.
- [16] 曾振华, 郑汇峰, 祝玉杰, 等. 多旋翼无人机自主精准降落的控制研究[J]. 广东工业大学学报, 2020, 37(1): 87-94.
- [17] 高彬娜. 数字PID控制在运动控制系统中的应用[J]. 中国电子科学研究院学报, 2006(6): 564-567, 579.
- [18] 肖奇军, 李胜勇. 模糊自整定PID控制器设计以及MATLAB仿真分析[J]. 计算机仿真, 2005(9): 242-244.
- [19] 荆学东, 潘翔, 汪泽涛. 农药喷洒四轴飞行器的模糊PID姿态控制[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36(5): 454-460.
- [20] 李翔宇, 肖峻, 潘运平, 等. 基于PSO的模糊PID车载平台调平控制系统研究[J]. 现代制造工程, 2021(2): 58-65.

作者简介

沈跃杰, 硕士研究生, 主要研究方向为无人机控制系统、仪器仪表技术、信号检测与处理。

E-mail: shenyuejie@163.com

行鸿彦(通信作者), 博士研究生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为气象仪器设计与计量、信号检测与处理等。

E-mail: xinghy@nuist.edu.cn

王水璋, 硕士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为低空安全与无人机应用系统、信号与信息处理、物联网信息系统等。

E-mail: shuimu@163.com