

基于模糊 PID 的四旋翼姿态优化控制^①

席万强^{②*} 林思伟^{③**} 汤寅琪^{**} 李青云^{**} 李 鹏^{***}

(* 无锡学院自动化学院 无锡 214105)

(** 南京信息工程大学自动化学院 南京 210044)

摘 要 比例积分微分(PID)控制是目前主流、行之有效的控制方式,然而随着被控对象越来越复杂,如四旋翼这种具有强耦合、非线性、时变性等特征的数学模型,PID 控制显得难以胜任。基于此,本文提出了一种用粒子群算法(PSO)进行 PID 参数整定,进而完成增量式模糊串级 PID 控制的设计方法。针对模糊规则优化难的问题,提出了用模拟退火算法优化规则表的策略进行四旋翼姿态优化控制研究。Matlab 仿真结果表明,大角度输入的非线性系统在快速性上有大幅提升,且稳定性强。

关键词 四旋翼;参数优化;模糊比例积分微分(PID);模拟退火;模糊规则

0 引 言

无人机最早诞生于军事应用中,近年来随着各国大力推动民用无人机的发展,无人机逐渐进入大众眼底。无人机在我们日常生活中逐渐占据越来越重的地位,如输电线路巡检、森林火情监测^[1]、农业植保^[2]等。无人机控制中,姿态控制是基础。电机产生的总拉力总是垂直机体向上的,只有控制好机体姿态,才能合适地分解出克服重力的升力以及水平方向的分力实现位置控制。姿态控制不稳将导致无人机在飞行中无法及时规避空中障碍物,甚至直接撞向地面。

基于姿态控制的重要性,国内外有大量学者对比进行研究。文献[3]提出了采用混合线性设计的四旋翼块对角姿态控制器,将被控系统线性部分分离出来进行控制,仅能满足小角度控制要求。文献[4]提出了一种非线性比例积分微分(proportional integral derivative, PID)姿态控制器,但固定参数的 PID 难以控制时变性的系统,会产生较长的调节时间或者振荡。文献[5]采用滑模控制,滑模控制时为了

保证系统状态不偏移滑模面常会导致输入抖振,为此文献[5]用模糊补偿器克服了滑模控制引起的抖振现象,说明模糊控制对于时变系统的适应,且这种适应可以使得输入平缓。结合以上考虑采取 PID 控制,可以将控制律设计简化到仅需考虑 3 个参数的设置,设计时具有简便性和不依赖精确的数学模型的性质。针对时变性对 PID 参数随时间、随控制状态进行模糊控制调节,对于大角度的非线性也能有较好的控制。模糊控制对含有未知参数的模型具有良好的控制效果,但常以人为经验进行建立的模糊规则表难以建立。

针对此,本文提出了一种基于模拟退火算法优化模糊规则的方法,将其应用于四旋翼姿态控制中,解决了模糊规则表难以建立的问题。最后通过仿真算例验证了所提方法的有效性。

1 数学模型

四旋翼无人机通过控制电机的转速,产生总拉力以及三轴力矩,从而引起机体姿态和位置的变化。通过特定的控制分配电机转速,以达到想要的控制

① 国家自然科学基金(41075115)和江苏省重点研发计划社会发展项目(BE2015692)资助。

② 男,1989 年生,博士;研究方向:机器人与无人机系统;E-mail:xi_wanqiang@163.com。

③ 通信作者,E-mail: 475827894@qq.com。

(收稿日期:2021-05-19)

效果。图 1 展示了各螺旋桨拉力和反扭力矩的产生。

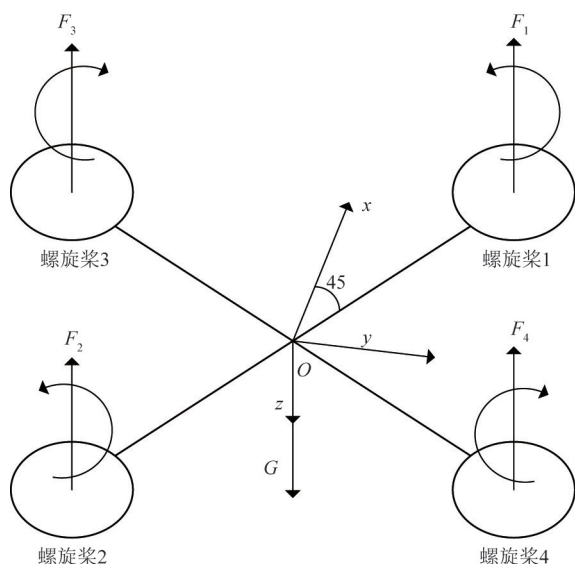


图 1 四旋翼简易机体图

四旋翼控制分配效率模型^[6-8]如下:

$$\begin{bmatrix} f \\ \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & dc_T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & dc_T & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} \\ 1 & 1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathfrak{G}_1^2 \\ \mathfrak{G}_2^2 \\ \mathfrak{G}_3^2 \\ \mathfrak{G}_4^2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式(1)中 c_T 、 c_M 、 ϖ 、 d 分别为拉力系数、扭矩系数、电机转速、四旋翼机臂长度; f 、 τ_x 、 τ_y 、 τ_z 分别为总拉力以及 x 、 y 、 z 轴力矩。

四旋翼刚体动力模型^[7-9]如下:

$$\mathbf{J} \cdot {}^b \dot{\boldsymbol{\omega}} = - {}^b \boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{J} \cdot {}^b \boldsymbol{\omega}) + \mathbf{G}_a + \boldsymbol{\tau} \quad (2)$$

其中, ${}^b\dot{\omega}$ 表示机体坐标系下的三轴角加速度; ${}^b\omega$ 表示机体坐标系下的三轴角速度; $\mathbf{J} \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ 表示多旋翼的转动惯量, 对于标准四旋翼这样的中心对称物体, 惯性积 J_{xy} 、 J_{yz} 、 J_{xz} 都为零; $\boldsymbol{\tau} = [\tau_x \quad \tau_y \quad \tau_z]^T \in \mathbf{R}^3$ 表示螺旋桨在机体轴上产生的力矩; G_a 表示陀螺力矩, 由于 G_a 影响不大, 建模时可以忽略。

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} J_{xx} & -J_{xy} & -J_{xz} \\ -J_{yx} & J_{yy} & -J_{yz} \\ -J_{zx} & -J_{zy} & J_{zz} \end{bmatrix} \quad (3)$$

2 控制器设计

2.1 控制器结构

增量式模糊串级 PID(P-PID)控制器,先由粒子群算法整定原始串级 PID 控制器,后由得到的整定后参数进行模糊系统的输出论域的范围设定,完成模糊系统控制。将模糊推理机器的输出作为增量叠加到 $kp0$ 、 $ki0$ 、 $kd0$ 上完成控制器的设计。其控制结构如图 2 所示。

单级的 PID 姿态控制,不能很好地跟踪设定的角度,而串级 PID 因其多了一个角速度环在角度动态追踪上更具有优势。在实验中可以得到,外角度

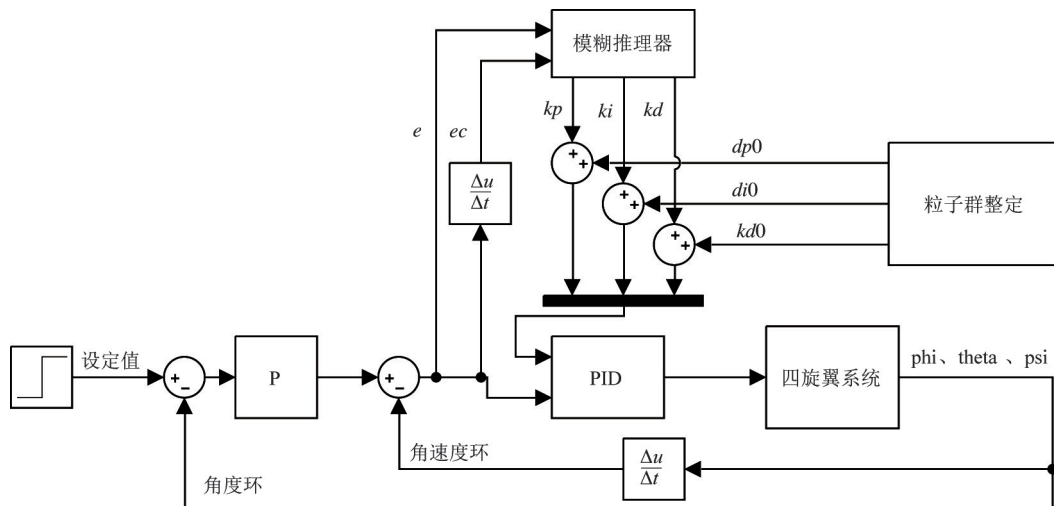


图2 增量式模糊 P-PID 控制结构图

环仅用比例控制就能达到较好的控制效果,而强行用 PID 控制,反而会造成超调,而内环控制对姿态控制起到决定性作用。因此,通过以角速度的偏差 e 及偏差变化率 ec 作为模糊控制器的输入量,得到增量参数 kp, ki, kd , 可对整体控制效果起到优化的效果。将整定后的 $ki0$ 取为 0, 同时适当加大 ki 的论域实现一种类似积分分离^[9]的控制效果,给后面优化规则表提供了实现积分分离的可能性。

2.2 参数整定

粒子群算法(PSO)是一种具有鸟群相互协作特性的启发式优化算法,能够在大范围的搜索空间内,快速收敛到局部最优解。由于其可实现性,被广泛应用于多学科领域。文献[10]即将改良后的 PSO 应用于 PID 参数整定中。本文基于一种自带惯性系数的粒子群速度及位置更新公式进行 PID 参数整定,具体如下:

$$v_{id}(t+1) = w \times v_{id}(t) + c1 \times r1 \times (P_{id} - X_{id}(t)) + c2 \times r2 \times (P_{gd} - X_{id}(t)) \quad (4)$$

$$X_{id}(t+1) = X_{id}(t) + V_{id}(t+1) \quad (5)$$

式中, w 为惯性因子,取 0.8; $c1$ 为种群学习因子,取 0.5; $c2$ 为全局学习因子,取 0.5; $r1, r2$ 为 0 ~ 1 的随机数。

将需要整定的 PID 参数设为多维变量 $\mathbf{X}$, 通过评估函数式(6), 求取以当前 PID 参数进行控制的误差平方累积和, 通过迭代搜寻 $\min f(\mathbf{X})$ 可以得到设定范围内的参数较优解。避免了凭经验整定 PID 参数的繁琐。

$$f(\mathbf{X}) = \int_0^t (r(\tau) - y(\tau))^2 d\tau \quad (6)$$

式(6)表示求得目标曲线 r 与 $\mathbf{X}$ 中 PID 参数对应的输出曲线 y 的差值平方和, 其中 t 表示仿真总时长。

2.3 模糊 PID

定义模糊子集为 $\{NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB\}$, 用以将由数值描述的信息变为由语言进行描述, 由隶属度来进行划分, 以便根据规则表进行求解输出 PID 参数。模糊控制器为两输入、三输出系统。输入为角速度的偏差 e 和偏差变化率 ec , 输出为内环 PID 增量参数 kp, ki, kd 。两输入论域范围皆为 $\{-0.075, 0.075\}$, 输出论域范围分别为 $\{-0.075, 0.075\}$ 、 $\{-0.03, 0.03\}$ 、 $\{-0.003, 0.003\}$ 。输入

变量隶属度曲线见图 3, 输出变量隶属度曲线如图 4 ~ 图 6 所示, 模糊控制规则见表 1 ~ 表 3。文献[11]利用描述函数法分析了模糊 PID 控制器的稳定性, 并进行了实例证明。

2.4 规则表优化

模拟退火是一种通过模拟物理退火的启发式算法。模拟退火过程中粒子从高温降低到低温时会进行自由运动和重新排列, 由于退火冷却时速度较慢,

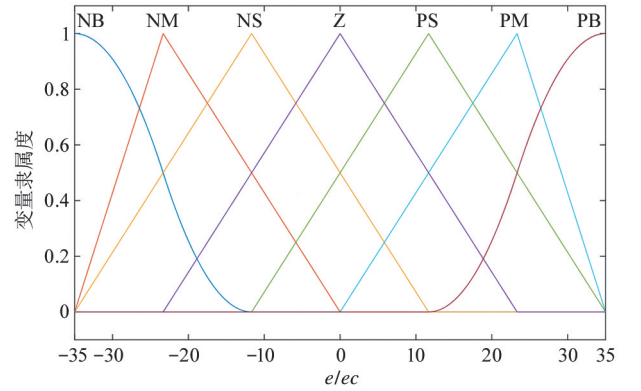


图 3 输入变量 e/ec 隶属度曲线

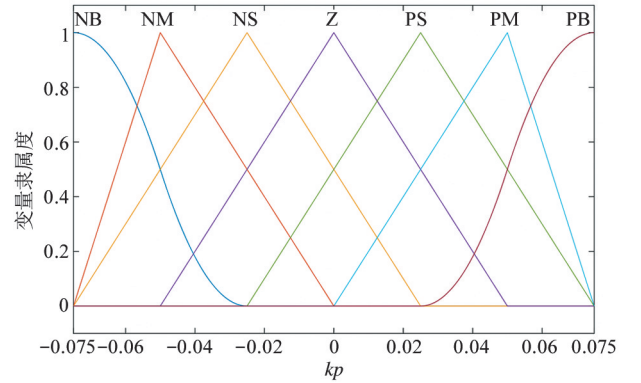


图 4 kp 隶属度曲线

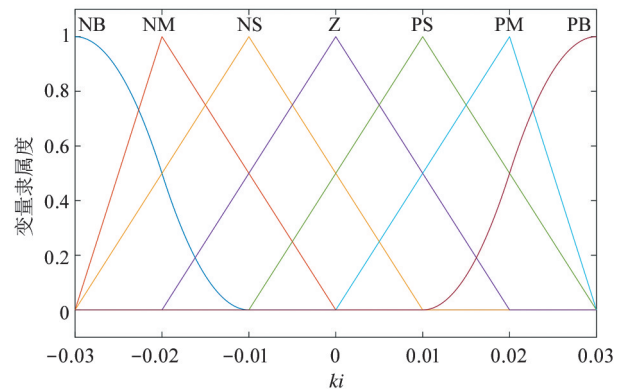


图 5 ki 隶属度曲线

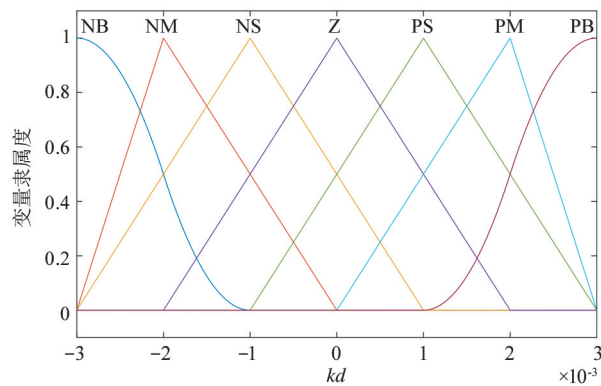


图 6 kd 隶属度曲线

表 1 kp 模糊规则表

e/ec	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	PS	Z
NM	PB	PB	PM	PM	PS	Z	Z
NS	PM	PM	PM	PS	Z	NS	NM
Z	PM	PS	PS	Z	NS	NM	NM
PS	PS	PS	Z	NS	NS	NM	NM
PM	Z	Z	NS	NM	NM	NM	NB
PB	Z	NS	NS	NM	NM	NB	NB

表 2 ki 模糊规则表

e/ec	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NM	NM	Z	Z
NM	NB	NB	NM	NM	NS	Z	Z
NS	NM	NM	NS	NS	Z	PS	PS
Z	NM	NS	NS	Z	PS	PS	PM
PS	NS	NS	Z	PS	PS	PM	PM
PM	Z	Z	PS	PM	PM	PB	PB
PB	Z	Z	PS	PM	PB	PB	PB

表 3 kd 模糊规则表

e/ec	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	PS	PS	Z	Z	Z	PB	PB
NM	NS	NS	NS	NS	Z	PS	PM
NS	NB	NB	NM	NM	Z	PS	PM
Z	NB	NM	NM	NM	Z	PS	PM
PS	NB	NM	NS	NS	Z	PS	PS
PM	NM	NS	NS	NS	Z	PS	PS
PB	PS	Z	Z	Z	Z	PB	PB

原子有机会进行足够的状态转移,使得能够位于内能更低的位置,从而得到最优解。

在进行状态转移时用到的 Metropolis 算法,以一个简单的概率选择的方式描述了退火过程中原子状态转移过程。假设材料处于状态 s_i 时的能量为 $E(s_i)$,那么材料在温度 T 下从状态 s_i 转变为状态 s_j 的概率为

$$p(s_i \rightarrow s_j) = \begin{cases} 1 & E(s_i) \leq E(s_j) \\ \exp\left\{\frac{E(s_i) - E(s_j)}{K_B T}\right\} & E(s_i) > E(s_j) \end{cases} \quad (7)$$

其中, K_B 为波尔兹曼常数,本文仿真中取 $K_B = 1$ 。式(7)表明,如果 $E(s_i) \leq E(s_j)$,则接受状态的转变概率为 1,否则以概率 $\exp\{[E(s_i) - E(s_j)]/K_B T\}$ 接受状态的转变。随着温度降低,材料会趋向于进入能量小的状态^[12]。

图 7 表示模拟退火算法实现的流程图。

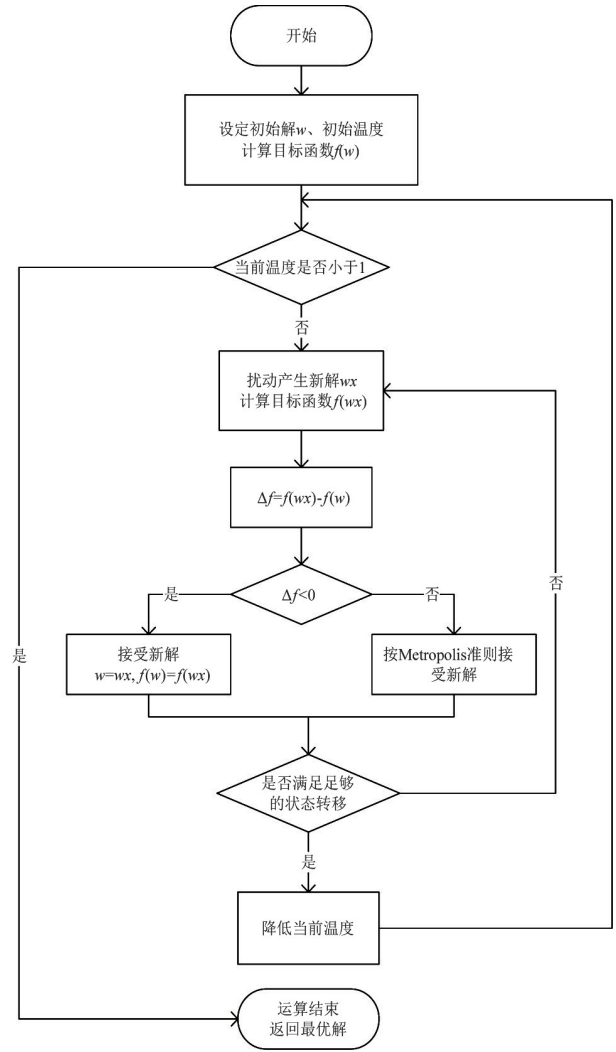


图 7 路径规划流程图

当温度下降足够缓慢,状态转移次数足够时,找到全局最优解。因此,模拟退火算法所得解依概率收敛至全局最优解^[13]。

通过每次对随机的规则位置赋予随机的模糊子集得到临近解,并以评估函数式(8)、(9)寻求最优解。

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (8)$$

$$f(rule) = \int_0^{t_1} e^2(t) dt + \int_{t_1}^{\text{end}} 10te^2(t) dt \quad (9)$$

式中以每次生成的规则表作为变量得到输出曲线, $e(t)$ 是设定值与输出曲线之差,通过对输出曲线稳定前的 $0 \sim t_1$ 时刻对 $e(t)$ 求平方和,对输出曲线稳定后的一段时间 $t_1 \sim \text{end}$ 求 $e(t)$ 平方乘上10倍的时间 t 之和,进行评估,可以得到具有快速性且静态误差小的优化曲线。

3 实验仿真及分析

$$\text{选取 } J = \begin{bmatrix} 0.0211 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0216 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0366 \end{bmatrix}, d =$$

0.225 m, $C_T = 1.105\text{E-}5$, $C_M = 1.779\text{E-}7$,在 Matlab 2020b 下建立模型。固定步长仿真,求解器选为 ode4,仿真采样时间为 0.001 s。选用经典的 Mamdani 模糊模型^[14]进行控制,由 M 文件生成模糊系统文件 fis。模糊集合合成的与运算采用最大隶属法(MAX Implication),去模糊化方法采用重心法(centroid)。

为了对比优化系统的控制效果差异,将 P-PID、未优化前的串级模糊控制(old)、优化后的串级模糊控制(new)进行仿真实验对比。为了避免小角度输入对于实际非线性系统仿真难度的简单化,将输入设为 35° 的大角度进行仿真验证,并选取滚转角(roll)及俯仰角(pitch)进行说明。

图 8 和图 9 所示分别为控制 roll、pitch 单通道下的输出仿真。上部分是各算法的输出曲线,下部分是各控制算法的误差曲线,后面遇到类似表示不再赘述。

从上述两图中可以看出,单单加上模糊控制后的输出效果曲线与原本的串级控制输出曲线基本拟合并未有明显的优化效果,可能是由于初始的规则表不适合四旋翼系统。在经过模拟退火算法的优化下,新的输出曲线的反应时间由其他控制算法的约 0.7 s 缩短为 0.3 s,且引起的超调量变动在 1% 以内。从而说明模拟退火算法在处理非线性系统上具有良好的优化效果,可以将较差的规则表进行优化。

为了验证所提算法是否在强耦合的非线性系统上也同样具有良好的效果,令 roll、pitch 通道同时输入 35° ,并令偏航角以 $2^\circ/\text{s}$ 的速度进行旋转,得到如图 10 和图 11 的仿真输出。

从上述两图中可以看出,new 在快速性上存在一定的优化效果,但是就总体控制效果来说意义不大。表 4 和表 5 中列出了各算法在不同通道下的均方根误差及平均误差,单位为度。

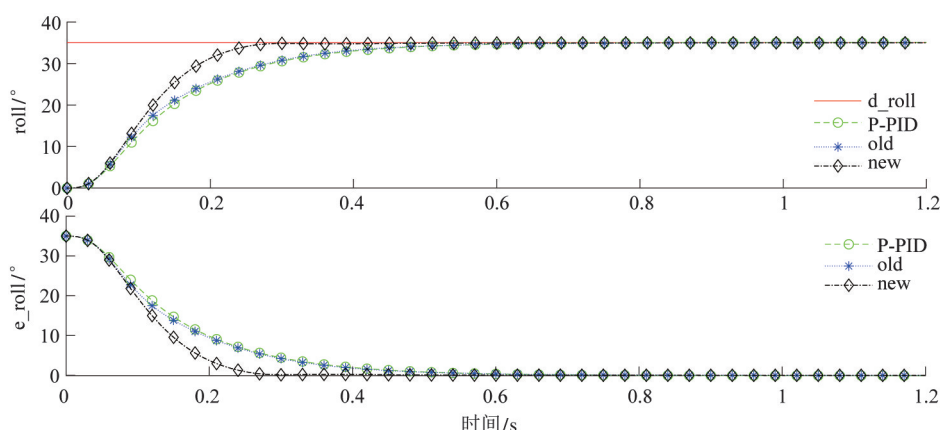


图 8 单通道输入滚转角控制算法对比图

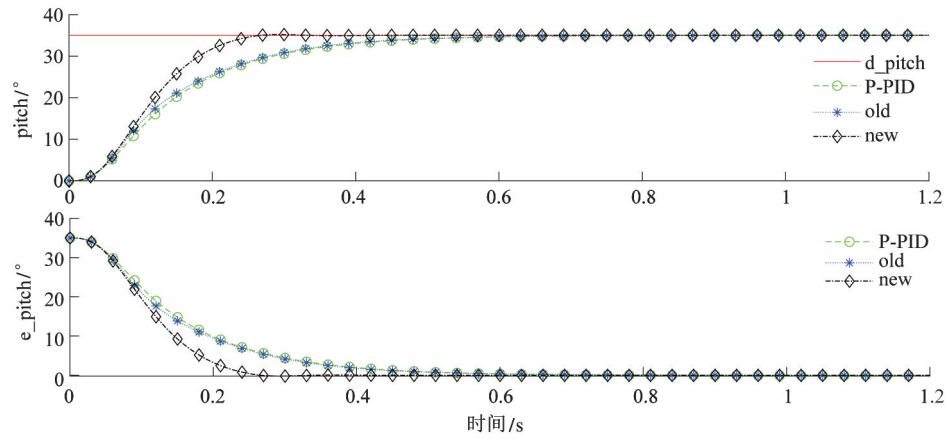


图 9 单通道输入俯仰角控制算法对比图

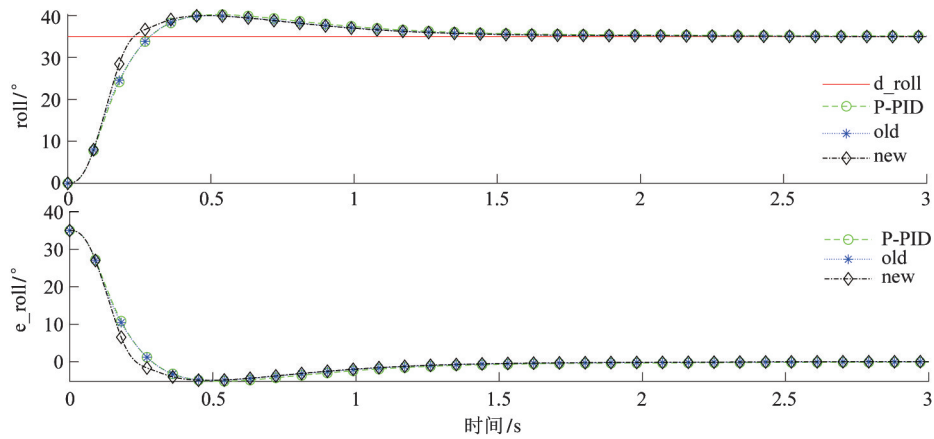


图 10 混合通道滚转角控制算法对比图

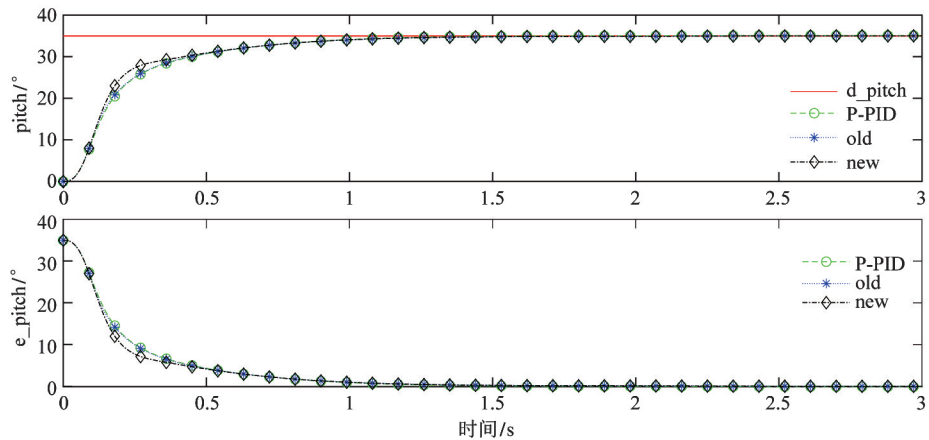


图 11 混合通道俯仰角控制算法对比图

表 4 单通道误差统计表

通道	单通道 $e_roll/^\circ$			单通道 $e_pitch/^\circ$		
算法	P-PID	old	new	P-PID	old	new
均方根误差	10.2004	9.9677	9.3002	10.2290	9.9988	9.2976
平均误差	4.8233	4.6585	3.4902	4.8266	4.6581	3.4218

表 5 混合通道误差统计表

通道 算法	混合通道 $e_{roll}/^{\circ}$			混合通道 $e_{pitch}/^{\circ}$		
	P-PID	old	new	P-PID	old	new
均方根误差	6.9995	6.9015	6.7744	7.2940	7.2324	7.0136
平均误差	3.0258	2.8252	2.6966	2.8797	2.8806	2.7129

从表中数据可以看出,无论是均方根误差还是平均误差,new 算法都是最小的,证明了用模拟退火算法优化规则表的合理性。由于混合通道的仿真时间长于单通道,因此不能以上表说明混合通道的控制效果更好。综上所述单通道的优化效果更好。

由于仿真设定的 J_{xx} 和 J_{yy} 值是差不多大的,所以图 8、图 9 呈献出来的效果是差不多的。然而,当进行混合通道控制时,从图 10、图 11 可以看出差别开始变大,并不能像单通道控制优化那么简单,控制就开始存在耦合。

在进行 P-PID 参数整定选择中,基于轨迹跟踪的思想令输出值追踪设定值,所以当迭代出较为合适的 P-PID 参数值时,就算是在该参数基础上进行增量式 P-PID 模糊控制,在没有进行规则表优化时这两者的控制效果是差不多的。所以不难预知 new 算法将优于 old 算法和 P-PID,而且 old 算法和 P-PID 控制效果的仿真结果。

4 结 论

本文采用一种基于改进粒子群算法的 PID 整定方法得到了较好的 PID 参数,接着在 P-PID 内环上添加了带有积分分离思想的模糊控制算法,并提出了以模拟退火算法优化模糊规则表以达到进一步优化的目的。为了避免小角度输入对于非线性系统仿真难度的简单化,以 35° 作为输入量,分别对单通道输入和混合通道输入进行仿真,结果显示在单通道控制上,可以达到较好的优化;当同时对滚转、俯仰、偏航进行控制时,在其他通道输入较小的情况下,主控制通道仍能有较好的控制效果,而当其他通道输入较大时,由于耦合过强,本文的优化算法难以达到较优的控制效果。

可见,本文所提方法对于非线性系统具有较好的控制优化效果,然而对于强耦合非线性系统难以

达到较优的效果,后期将针对强耦合系统展开研究。

参考文献

- [1] 黄晶,敖子航,张友民,等. 一种面向森林火情监测的四旋翼无人机系统[J]. 控制与信息技术,2021(2):1-7
- [2] 刘思奕,周航. 双旋翼横列式无人机在农业植保领域的应用[J]. 湖北农机化,2020(16):8-9
- [3] 赵国荣,何云凤,韩旭,等. 采用混合线性设计的四旋翼块对角姿态控制器[J]. 飞行力学,2021,39(3):34-40
- [4] 宿敬亚,樊鹏辉,蔡开元. 四旋翼飞行器的非线性 PID 姿态控制[J]. 北京航空航天大学学报,2011,37(9):1054-1058
- [5] NOORDIN A, BASRI M, MOHAMED Z, et al. Adaptive PID controller using sliding mode control approaches for quadrotor UAV attitude and position stabilization[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2021, 46(2):963-981
- [6] BRESCIANI T. Modelling, Identification and Control of a Quadrotor Helicopter[D]. Sweden: Lund University, 2008
- [7] DE OLIVEIRA M. Modeling, Identification and Control of A Quadrotor Aircraft[D]. Prague: Czech Technical University, 2011
- [8] POUNDS P, MAHONY R, CORKE P. Modelling and control of a large quadrotor robot[J]. Control Engineering Practice,2010,18(7):691-699
- [9] 刘金坤. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真[M]. 第 4 版. 北京:电子工业出版社,2016:26-31
- [10] 王博华. 粒子群算法的改进及其在 PID 参数整定中的应用[D]. 长沙:湖南大学信息科学与工程学院,2017
- [11] 朱峰,过晓芳. 模糊 PID 控制系统稳定性分析[J]. 科技信息:科学教研,2008(9):4-6
- [12] 司守奎,孙玺菁. 数学建模算法与应用[M]. 北京:国防工业出版社,2011:450-456
- [13] 李元香,项正龙,夏界宁. 模拟退火算法的动力系统模型及收敛性分析[J]. 计算机学报,2019,42(6):1161-

- 1173
- [14] MAMDANI E H. Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant[J]. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 1974, 121 (12): 1585-1588

Attitude optimization control of quadrotor based on fuzzy PID

XI Wanqiang^{*}, LIN Siwei^{**}, TANG Yinqi^{**}, LI Qingyun^{**}, LI Peng^{**}

(^{*} College of Automation, Wuxi University, Wuxi 214105)

(^{**} College of Automation, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044)

Abstract

Proportional integral derivative (PID) control is the mainstream and effective control method. However, as the controlled object becomes more and more complex, such as the quadrotor, a mathematical model with strong coupling, nonlinearity and time-varying characteristics, PID control appears to be difficult to perform. Based on this, this paper proposes a design method of using particle swarm optimization (PSO) for PID parameter rectification, and then an incremental fuzzy P-PID control is completed. Aiming at the problem of difficult fuzzy rule optimization, a strategy of optimizing the rule table with simulated annealing algorithm is proposed for quadrotor attitude optimal control research. Matlab simulation results verify that the nonlinear system with large angle input has substantial improvement in rapidity and stability.

Key words: quadrotor, parameter optimization, fuzzy proportional integral derivative (PID), simulated annealing, fuzzy rule