

doi: 10.7690/bgzdh.2023.06.019

## 基于遗传算法优化的四旋翼控制系统研究

丁 一<sup>1</sup>, 谯超凡<sup>2</sup>, 王世勇<sup>2</sup>, 刘 满<sup>2</sup>

(1. 北京建筑大学机电与车辆工程学院, 北京 102627;

2. 中国兵器装备集团自动化研究所有限公司无人机事业部, 四川 绵阳 621000)

**摘要:** 为提高多自由度、非线性的四旋翼无人机模型控制系统的系统响应与控制效果, 提出一种基于遗传算法优化的模糊 PID 控制策略。将整个控制系统分解为外环位置控制器和内环姿态控制器 2 部分, 对四旋翼无人机系统进行建模仿真。由仿真分析结果得知, 当滚转角度分别为 35°、45°和 65°时, 通过遗传算法优化的模糊 PID 控制相对于模糊 PID 控制的角度误差分别降低 2.58°、3.09°和 3.78°; X 轴误差分别降低了 0.759、0.658 和 0.593 m; Y 轴误差分别降低了 0.157、0.228 和 0.195 m; Z 轴误差分别降低了 0.169、0.237 和 0.514 m。结果表明: 该策略保证了整机的稳定性, 使整机的控制系统能达到更好的控制效果, 保证了四旋翼无人机具有更好的性能。

**关键词:** 四旋翼无人机; 遗传算法; 模糊 PID; 姿态控制

**中图分类号:** V279 **文献标志码:** A

## Research on Quadrotor Control System Based on Genetic Algorithm Optimization

Ding Yi<sup>1</sup>, Qiao Chaofan<sup>2</sup>, Wang Shiyong<sup>2</sup>, Liu Man<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical-electronic and Vehicle Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 102627, China;

2. Department of UAV, Automation Research Institute Co., Ltd. of China South Industries Group Corporation, Mianyang 621000, China)

**Abstract:** In order to improve the system response and control effect of the multi-degree-of-freedom and nonlinear quadrotor UAV model control system, a fuzzy PID control strategy based on genetic algorithm optimization is proposed. The whole control system is divided into two parts: the outer loop position controller and the inner loop attitude controller, and the quadrotor UAV system is modeled and simulated. The simulation results show that when the roll angle is 35°, 45° and 65°, the angle error of the fuzzy PID control optimized by genetic algorithm is reduced by 2.58°, 3.09° and 3.78° compared with the fuzzy PID control, and the X axis error is reduced by 0.759 m, 0.658 m and 0.593 m, respectively; The Y-axis error is reduced by 0.157 m, 0.228 m and 0.195 m, and the Z-axis error is reduced by 0.169 m, 0.237 m and 0.514 m, respectively. The results show that the strategy ensures the stability of the whole aircraft, makes the control system of the whole aircraft achieve better control effect, and ensures the four-rotor UAV has better performance.

**Keywords:** quadrotor UAV; genetic algorithm; fuzzy PID; attitude control

### 0 引言

由于四旋翼无人机结构简单、地形适应力强易于原地起降, 且具有结伴飞行、低成本制造和便于携带等特点, 被广泛应用于军事、数据监测、灾害急救和农林业植保等领域<sup>[1-6]</sup>。同时, 四旋翼无人机是一个非线性、多自由度、强耦合和 4 输入 6 输出欠驱动的复杂系统, 在飞行过程中环境复杂, 会存在诸多因素对其进行干扰, 一旦四旋翼无人机受扰后飞行不稳定, 就极有可能发生炸机等事件, 对人们的财产、生命安全造成影响。目前, 在无人机控制系统中已设计了多种控制方法。常用的控制方法有 PID 控制、最优 LQR 控制、自适应控制和反步控制<sup>[7]</sup>等, 但在实际运用过程中均存在一定的局限

性。P. Foehn 等<sup>[8]</sup>提出一种基于时变系统模型的线性二次调节 (linear quadratic regulation, LQR) 控制方法, 实现了存在扰动时的轨迹跟踪控制。Lin X M 等<sup>[9]</sup>采用深度学习与滑模控制结合的控制方法, 但神经网络隐含层神经元的中心值、宽度和连接权值, 容易存在过拟合学习, 无法保证恒收敛, 缺乏可靠性。郝海燕等<sup>[10]</sup>提出了一种基于粒子群算法全局寻优神经网络, 但实验过程中, 控制器存在抖振的问题, 使得四旋翼无人机电调电压频繁切换, 电机损耗严重。基于上述研究, 笔者提出一种基于遗传算法优化的模糊 PID 控制系统, 通过遗传算法对模糊规则进行优化, 使得模糊控制器对于 PID 参数的控制更加合理, 通过对控制系统的建模仿真, 分析遗

收稿日期: 2023-02-16; 修回日期: 2023-03-11

作者简介: 丁 一 (2001—), 男, 北京人, 从事机械电子研究。E-mail: 1050565428@qq.com。

传算法优化后的控制效果, 验证了该控制系统具有较好的系统响应与控制效果。

### 1 动力学建模

由于四旋翼无人机系统是由 4 个电机所组成的刚性机体结构, 前后 2 个电机带动旋翼逆时针旋转, 左右电机带动旋翼顺时针旋转, 可以通过改变电机速度来改变升力, 进而调整机体的运动。笔者分别选取以四旋翼无人机为原点的机体坐标系( $O_bxyz$ ), 以地面为原点的大地坐标系( $O_eXYZ$ ), 以四旋翼无人机的前进方向为  $x$  轴正向, 以四旋翼前进方向的逆时针  $90^\circ$  方向为  $y$  轴正向, 根据右手定则选取  $z$  轴正方向。同理, 选取东、北和天分别对应为大地坐标系的  $X$ 、 $Y$  和  $Z$  轴的正方向。

定义  $U_1, U_2, U_3, U_4$  分别为四旋翼无人机 4 个独立的控制量, 定义  $W_i(i=1, 2, 3, 4)$  为 4 个电机的转速, 则有:

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= T_1W_1^2 + T_1W_2^2 + T_1W_3^2 + T_1W_4^2 \\ U_2 &= -T_1W_1^2 + T_1W_2^2 + T_1W_3^2 - T_1W_4^2 \\ U_3 &= -T_1W_1^2 - T_1W_2^2 + T_1W_3^2 + T_1W_4^2 \\ U_4 &= -T_2W_1^2 + T_2W_2^2 - T_2W_3^2 + T_2W_4^2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中:  $T_1$  为升力系数;  $T_2$  为反扭矩系数。

动力学模型如下所示:

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x} &= (\sin \alpha \cos \beta \cos \gamma + \sin \beta \sin \gamma)U_1/m + d_1 \\ \ddot{y} &= (\sin \alpha \cos \beta \sin \gamma - \sin \beta \cos \gamma)U_1/m + d_2 \\ \ddot{z} &= (\cos \alpha \cos \beta)U_1/m - g + d_3 \\ \ddot{\alpha} &= (\dot{\beta}\dot{\gamma}(I_{zz} - I_{xx}) + U_3l)/I_{yy} + d_4 \\ \ddot{\beta} &= (\dot{\alpha}\dot{\gamma}(I_{yy} - I_{zz}) + U_2l)/I_{xx} + d_5 \\ \ddot{\gamma} &= (\dot{\alpha}\dot{\beta}(I_{xx} - I_{yy}) + U_4)/I_{zz} + d_6 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中:  $\beta$  为  $y$  轴在  $YO_eZ$  平面投影与  $Y$  轴的夹角即为滚转角;  $\alpha$  为  $z$  轴在  $XO_eZ$  平面的投影与  $Z$  轴的夹角即为俯仰角;  $\gamma$  为  $x$  轴在  $XO_eY$  平面的投影与  $X$  轴的夹角即为偏航角。

将式(2)整理为状态方程:

$$\left. \begin{aligned} \dot{X}_1 &= X_2 \\ \dot{X}_2 &= F(x) + G(x)U + d \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中:

$$\left. \begin{aligned} X_1 &= [x, y, z, \beta, \alpha, \gamma]^T \\ X_2 &= [\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, \dot{\beta}, \dot{\alpha}, \dot{\gamma}]^T \\ U &= [1, 1, U_1, U_2, U_3, U_4]^T \\ D &= [d_1, d_2, d_3 - g, d_4, d_5, d_6]^T \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

则:

$$\left. \begin{aligned} F(x) &= \left[ 0, 0, 0, (I_{yy} - I_{zz})\dot{\alpha}\dot{\gamma}/I_{xx}, (I_{zz} - I_{xx})\dot{\beta}\dot{\gamma}/I_{yy}, \right. \\ &\quad \left. (I_{xx} - I_{yy})\dot{\alpha}\dot{\beta}/I_{zz} \right]^T \\ G(x) &= \left[ U_1/m, U_1/m, \cos \beta \cos \alpha/m, \right. \\ &\quad \left. l/I_{xx}, l/I_{yy}, l/I_{zz} \right]^T \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

### 2 控制系统设计

笔者提出一种基于遗传算法优化的模糊 PID 控制器设计方法, 根据四旋翼无人机的动力学特性, 将控制器设计分为外环位置控制器设计和内环姿态控制器设计, 控制系统结构如图 1 所示。控制系统将期望目标位置作为输入外环控制器, 计算出四旋翼无人机所需的输入升力; 同时, 外环向内环输入期望姿态与角速度, 在内环控制器中计算出四旋翼无人机的输入转矩。同时, 将四旋翼无人机的角速度反馈输入到内环控制器中, 为整个控制系统的稳定性分析提供基础。

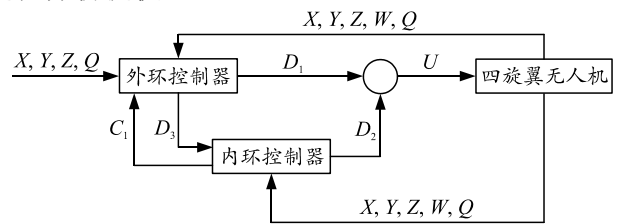


图 1 控制系统结构

#### 2.1 模糊 PID 控制器设计

PID 控制算法以及模糊控制对 PID 参数整定的原理公式为:

$$u(k) = K_p e(k) + K_I \int_{i=0}^k e(i)di + K_D \frac{de(k)}{dk}; \quad (6)$$

$$K_p = K'_p + \Delta K_p; \quad (7)$$

$$K_I = K'_I + \Delta K_I; \quad (8)$$

$$K_D = K'_D + \Delta K_D. \quad (9)$$

式中:  $u(k)$  为控制系统的输出;  $\int_{i=0}^k e(i)di$  为累计误差;  $de(k)/dk$  为误差变化率;  $K'_p$ 、 $K'_I$ 、 $K'_D$  分别为 PID 控制器参数基础值;  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_I$ 、 $\Delta K_D$  分别为 PID 控制器 3 个参数的修正值。

#### 2.2 遗传算法优化模糊控制规则

根据设计中的 7 个模糊状态变量以及双输入三输出可以得知, 仅模糊控制规则就存在  $7^5$  条, 对于需要专家经验来确定模糊规则的模糊控制器来说, 这是一个非常大的数值范围; 因此, 笔者通过遗传算法对该系统所需模糊规则进行寻优求解。

本文中遗传算法选用时间乘绝对误差积分准则 (integrated time absolute error, ITAE) 作为优化的性能指标, 选取为  $H(t)$  ( $H(t)$  为  $X_1$  和  $X_2$ )。适应度值越大, 说明控制效果越优良。其适应度函数表示为

$$J(\text{ITAE}) = 1 / \int_0^{\infty} t |H(t)| dt \quad (10)$$

### 3 仿真分析

针对所设计的四旋翼无人机控制系统模型, 通过遗传算法优化, 得到其对应的模糊规则如表 1—3 所示。

表 1  $K_p$  控制规则

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

表 2  $K_I$  控制规则

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

表 3  $K_D$  控制规则

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

根据所述控制器设计, 将优化后的模糊规则导入模糊控制器, 并对控制模型进行仿真, 通过 Matlab 软件的 Simulink 平台对四旋翼无人机进行仿真实验, 仿真结果如表 4 所示。

表 4 仿真结果

期望滚转角/(°)	角度误差/(°)		X 轴误差/m		Y 轴误差/m		Z 轴误差/m	
	模糊 PID 控制	遗传算法优化模糊 PID 控制	模糊 PID 控制	遗传算法优化模糊 PID 控制	模糊 PID 控制	遗传算法优化模糊 PID 控制	模糊 PID 控制	遗传算法优化模糊 PID 控制
	35	2.870	0.290	0.973	0.214	0.191	0.034	0.197
45	3.660	0.570	0.856	0.198	0.353	0.125	0.334	0.097
65	4.370	0.590	0.714	0.121	0.514	0.319	0.649	0.135

通过实验对比分析, 当四旋翼无人机分别以 35°、45°和 65°为期望滚转角飞行时, 通过遗传算法优化的模糊 PID 控制相对于模糊 PID 控制的角度误差分别降低 2.58°、3.09°和 3.78°; X 轴误差分别降低了 0.759、0.658 和 0.593 m; Y 轴误差分别降低了 0.157、0.228 和 0.195 m; Z 轴误差分别降低了 0.169、0.237 和 0.514 m, 通过遗传算法优化的模糊 PID 控制系统误差明显小于模糊 PID 控制系统的角度误差, 使得四旋翼无人机控制效果更好。

### 4 结论

笔者分析了模糊 PID 控制和基于遗传算法优化的模糊 PID 控制算法对于四旋翼无人机控制系统的控制效果, 得到结论如下:

1) 该研究结合模糊 PID 算法对系统进行控制, 建立了四旋翼无人机控制系统的控制模型, 通过模糊规则对 PID 控制的参数进行了优化调整, 增强了控制系统的稳定性与抗干扰能力。

2) 通过仿真实验结果分析表明, 当滚转角度分别为 35°、45°和 65°时, 通过遗传算法优化的模糊 PID 控制相对于模糊 PID 控制的角度误差分别降低

2.58°、3.09°和 3.78°; X 轴误差、Y 轴误差、Z 轴误差均有下降, 对于整机的控制系统来说, 通过遗传算法优化后的模糊 PID 控制能够达到更好地控制效果, 保证四旋翼无人机具有更加良好的性能, 为后续四旋翼无人机控制系统的优化提供了研究基础。

### 参考文献:

- [1] ZHOU L, ZHANG J, DOU J, et al. A fuzzy adaptive backstepping control based on mass observer for trajectory tracking of a quadrotor UAV[J]. International journal of adaptive control and signal processing, 2018, 32(12): 1675–1693.
- [2] QI G, HUANG D. Modeling and dynamical analysis of a small-scale unmanned helicopter[J]. Nonlinear Dynamics, 2019, 98(3): 2131–2145.
- [3] 徐九龙, 郝永平. 折叠式共轴反桨无人机飞行控制技术[J]. 兵工自动化, 2022, 41(7): 92–96.
- [4] 符凯, 朱雪耀, 吕全喜, 等. 基于深度学习的无人机指令意图识别技术[J]. 兵工自动化, 2022, 41(10): 41–44.
- [5] 寇昆湖, 刘登攀, 鹿珂珂, 等. 无人机作战效能评估方法研究综述[J]. 兵工自动化, 2022, 41(11): 58–62.
- [6] 曹瑾, 刘晓芬, 李松杰, 等. 受限通信下多基地多无人

机协同搜索多目标任务规划问题[J]. 兵工自动化, 2022, 41(11): 89-92.

- [7] TAN L, LU L, JIN G. Attitude stabilization control of a quadrotor helicopter using integral Backstepping[C]// Automatic Control and Artificial Intelligence (ACAI 2012), International Conference on IET. ACAI, 2013.
- [8] FOEHN P, SCARAMUZZA D. Onboard state dependent LQR for agile quadrotors[C]// IEEE International

\*\*\*\*\*  
(上接第 63 页)

参考文献:

- [1] 郭遨宇, 欧阳中辉, 黄普, 等. 岸舰导弹武器系统训练评估指标体系探究[J]. 舰船电子工程, 2020, 40(1): 139-142.
- [2] 王晶, 武昌. 层次分析法在导弹发射阵地选址中的应用[J]. 电子世界, 2020(6): 157-158.
- [3] 姜子劼, 宋贵宝, 刘战, 等. 基于最大协同毁伤能力的多阵地岸舰导弹射向优化模型[J]. 弹箭与制导学报, 2020, 40(4): 99-102, 109.
- [4] 丁舒忻, 陈晨, 辛斌, 等. 火力单元部署优化问题的现状与进展[J]. 控制理论与应用, 2015, 32(12): 1569-1581.
- [5] 吴家明, 乔士东, 黄金才. 基于 NSGA-II 的防空部署优化方法[J]. 火力与指挥控制, 2011, 36(3): 57-61.
- [6] 耿振余, 毕义明. 并行基因组合型遗传算法求解防空部署优化问题研究[J]. 现代防御技术, 2007, 35(3):

\*\*\*\*\*  
(上接第 80 页)

- [3] ACKERMAN E. A Robot for the Worst Job in the Warehouse: Boston Dynamics' Stretch can move 800 heavy boxes per hour[J]. Ieee Spectrum, 2022, 59(1): 50-51.
- [4] 熊安迪. 消毒配送机器人: 以钢铁之躯阻断病毒传输通道[J]. 机器人产业, 2020(2): 41-45.
- [5] ZHANG H, TAO W, HUANG J, et al. Development of an in-building transport robot for autonomous usage of elevators[C]//2018 IEEE International Conference on Intelligence and Safety for Robotics (ISR). IEEE, 2018: 44-49.
- [6] 赵新洋. 基于激光雷达的同时定位与室内地图构建算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [7] 王忠立, 赵杰, 蔡鹤皋. 大规模环境下基于图优化 SLAM 的图构建方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47(1): 11.
- [8] ABDELRASOUL Y, SAMAN A B S H M, SEBASTIAN P. A quantitative study of tuning ROS gmapping parameters and their effect on performing indoor 2D SLAM[C]//2016

- Conference on Robotics andAutomation. NJ, USA: IEEE, 2018: 6566-6572.
- [9] LIN X M, WANG Y L, LIU Y F. Neural - network - based robust termin-al sliding - mode control of quadrotor[J]. Asian Journal of Control, 2022, 24(1): 427-438.
- [10] 郝海燕, 王新军. 基于改进 PSO-RBF 滑模控制的光伏系统控制方法[J]. 电源技术, 2020, 44(8): 1148-1151.
- [10] \*\*\*\*\*  
21-24, 41.
- [7] 冯卉, 刘付显, 毛红保. 基于遗传算法的防空部署优化方法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2006, 7(4): 32-35.
- [8] 陈晓艳, 张东洋, 苏学斌, 等. 基于改进遗传算法和多目标决策的货位优化策略[J]. 天津科技大学学报, 2020, 35(4): 75-80.
- [9] 赵民全. 基于改进遗传算法的多无人机协同任务规划[J]. 舰船电子对抗, 2020, 43(4): 44-47.
- [10] ZHANG W S, XIE J R, ZHUO X J. An evolutionary approach to genetic algorithm on minimizing network coding resources[C]//2012 3rd IEEE International Conference on Network Infrastructure and Digital Content. Beijing, 2012: 275-279.
- [11] 刘宏波, 孟进, 刘琴涛. 地空超短波数据链站点选址及覆盖优化[J]. 兵工学报, 2019, 40(10): 2105-2110.
- [12] CHANG F S, WU J S, LEE C N, et al. Greedy-search-based multi-objective genetic algorithm for emergency logistics scheduling[J]. Expert Systems with Applications, 2014, 41(6): 2947-2956.
- [12] \*\*\*\*\*  
2nd IEEE international symposium on robotics and manufacturing automation (ROMA). IEEE, 2016: 1-6.
- [9] WANG T, WU Y, LIANG J, et al. Analysis and experimental kinematics of a skid-steering wheeled robot based on a laser scanner sensor[J]. Sensors, 2015, 15(5): 9681-9702.
- [10] 余冬冬. 移动机器人避障与轨迹规划[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [11] BOCHKOVSKIY A, WANG C Y, LIAO H. Yolov4: Optimal speed and accuracy of object detection[J]. ArXiv preprint arXiv: 2004.10934, 2020.
- [12] 丁吉祥, 杜姗姗. 基于针孔模型与相机空间操作的机械臂视觉定位方法[J]. 计算机工程, 2015, 41(12): 317-320.
- [13] LEE D H, LEE S S, KANG H H, et al. Camera position estimation for uavs using solvepnp with kalman filter[C]//2018 1st IEEE International Conference on Hot Information-Centric Networking (HotICN). IEEE, 2018: 250-251.
- [14] ZHANG Z. A Flexible New Technique for Camera Calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.