

# 多旋翼无人机飞行串联模糊免疫智能 控制系统设计

胡少华

(西安航空职业技术学院 通用航空学院, 西安 710089)

**摘要:** 对多旋翼无人机因分布式电机布局导致的三轴推力耦合特性非线性化问题进行研究; 在处理器与传感器模块中, 设计系统飞行控制的硬件架构, 实现飞行导航数据采集与处理; 在导航模块中, 基于飞行导航数据, 通过融合导航算法实现飞行导航; 在串联模糊免疫飞行控制模块中, 设计模糊控制器与免疫控制器串联的 PID 飞行控制器, 并针对高速飞行时的非线性气动耦合问题, 应用改进遗传算法对串联 PID 飞行控制器的控制参数进行优化, 补偿气动干扰引起的微小偏差, 实现飞行智能控制; 经实验测试, 设计系统的姿态角响应曲线、偏航角响应曲线、高度稳定响应曲线均与期望曲线较为贴近, 表明该系统飞行控制准确性较强。

**关键词:** 多旋翼无人机; 飞行控制; PID; 免疫控制器; 模糊控制器

## Design of Fuzzy Immune Intelligent Control System for Multi-rotor UAV Flight Series

HU Shaohua

(College of General Aviation, Xi'an Aeronautical Polytechnic Institute, Xi'an 710089, China)

**Abstract:** Research on is conducted the nonlinearity of three-axis thrust coupling characteristics caused by a distributed motor layout in multi-rotor unmanned aerial vehicles (UAVs). Design a hardware architecture for the flight control system in the processor and sensor modules, collect and process flight navigation data. In the navigation module, based on the flight navigation data, navigation algorithms are integrated to achieve flight navigation. In the series fuzzy immune flight control module, a PID flight controller is designed by connecting a fuzzy controller and an immune controller in series. To address the nonlinear aerodynamic coupling problem during high-speed flight, an improved genetic algorithm is applied to optimize the control parameters of the series PID flight controller, compensate for small deviations caused by aerodynamic interference, and achieve intelligent flight control. Experimental testing show that, the attitude angle response curve, yaw angle response curve, and altitude stability response curve of the designed system are all close to the expected curves, indicating that the system has a high flight control accuracy.

**Keywords:** multi-rotor UAV; flight control; PID; immune controller; fuzzy controller

## 0 引言

多旋翼无人机能够完成翻滚、定点悬停以及垂直起降等特殊动作, 其飞行控制具有较高的科研价值<sup>[1]</sup>。随着多旋翼无人机飞行控制技术的发展, 多旋翼无人机的应用场景变得更加广泛, 包括农业植保、快递物流、智能科考、应急救援环保整治、电力巡查、以及地质航测

等多个领域, 也使人们对其有了更高的性能期待<sup>[2]</sup>。为深入挖掘多旋翼无人机的应用潜力, 对于其飞行控制的研究愈发深入, 成为当前无人机技术发展中的一个关键课题。

当前, 多旋翼无人机飞行控制的研究逐渐朝着强鲁棒、高机动、高精度及复杂化等方向发展。部分发达国家凭借其在控制理论、电子技术、航空航天等方面的深

收稿日期:2025-05-28; 修回日期:2025-07-22。

基金项目:陕西省教育厅科学研究计划重点项目(25JR091)。

作者简介:胡少华(1989-),男,硕士,讲师。

引用格式:胡少华. 多旋翼无人机飞行串联模糊免疫智能控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2026, 34(4): 88-95.

厚积累，已经取得了显著的研究成果。所研发的多旋翼无人机飞行控制系统目前已经具备高度的自主化与智能化水平。其研究注重将先进技术融合至飞行控制中，如通信技术、传感器技术及人工智能技术等。我国对于该方向的研究也在近几十年间取得了惊人的成果，在系统集成、控制算法优化等方面取得了重大突破。其中，文献 [3] 提出一种结合能量管理的模糊比例、积分和微分 (PID, proportional integral derivative) 油电混动六旋翼无人机飞行控制策略。首先以油电混动六旋翼无人机为研究对象构建 Matlab/Simulink 模型。接着通过模糊算法对转动惯量与变载荷的质量实施模糊化—隶属度函数—规则库—反模糊化处理，以实现 PID 值的实时调整，从而解决油电混动六旋翼无人机姿态响应迟钝的问题。最后，通过巡航工况与设计阶梯来观测油电混动六旋翼无人机的姿态响应情况。然而，燃油消耗导致的质量和转动惯量变化是难以实时精确测量的，依赖模型估计时容易导致误差累积，使模糊 PID 基于错误输入调整参数，导致控制失效。文献 [4] 设计了一种依托非确定性等价的自适应容错飞行控制方案。在设计中，引入了一个辅助系统，并动态调整相关因子。通过这种方式来构建非确定性等价中偏微分方程的近似解，简化了自适应律的设计难度，使控制方案更具高效性与可行性。然而通过辅助系统构造偏微分方程的近似解会造成误差的引入，特别在复杂工况或执行器故障快速变化工况下，近似解容易偏离真实解，使故障估计偏差增大，导致控制输入无法有效补偿故障，带来跟踪误差的累积。文献 [5] 提出了一种基于改进线性扩张状态观测器的四旋翼无人机模糊线性自抗扰控制方法。利用模糊算法实施线性自抗扰控制器参数的自适应调节，通过 Levant 跟踪微分器实现四旋翼无人机姿态角与位置的二阶微分信号跟踪，从而提取无人机系统的总扰动，以总扰动偏差与其微分为输入的模糊控制器，以实现线性扩张观测器 (LESO, linear expanded state observer) 对总扰动的估计精度的优化。然而 LESO 将复杂扰动简化为线性模型后，会带来估计偏差，使总扰动估计不准确，带来控制器补偿不足的问题，导致飞行性能下降。文献 [6] 首先剖析了飞行控制的基本原理，并构建了模态转换飞行控制的框架体系。为增强控制分配的鲁棒性，提出了串级解耦控制分配算法与两种控制分配参数修正手段。为实现稳定的模态转换飞行目标，还通过可达力矩集实施控制权重规划，并制定了一套基于倾转角度与时间的模态转换策略。然而串级解耦算法容易引入额外的计算延迟，特别是在多旋翼耦合严重时，可能由于解耦过程不稳定导致控制分配鲁棒性下降，使无人机飞行性能恶化。

串联模糊免疫在多旋翼无人机飞行控制系统中体现了一种创新的控制策略，其通过串联模糊控制器与免疫控制器，并结合智能优化算法，实现了对多旋翼无人机飞行的高精度、高鲁棒性控制。基于上述研究中存在的估计偏差增大、控制器补偿不足等问题，设计多旋翼无人机飞行串联模糊免疫智能控制系统。设计串联模糊免疫 PID 飞行控制器，将模糊控制器与免疫控制器串联，结合模糊控制器适应复杂环境的能力和免疫控制器的动态调整能力，显著提升飞行控制准确性。同时，利用改进遗传算法优化导航坐标系的比例、积分以及微分系数参数，避免了复杂系统建模。在硬件设计上，选用高精度传感器并合理布局，提升系统性能。软件方面，采用多次融合处理的导航算法，使导航更加精准。

## 1 飞行串联模糊免疫智能控制系统设计

系统整体设计如图 1 所示。

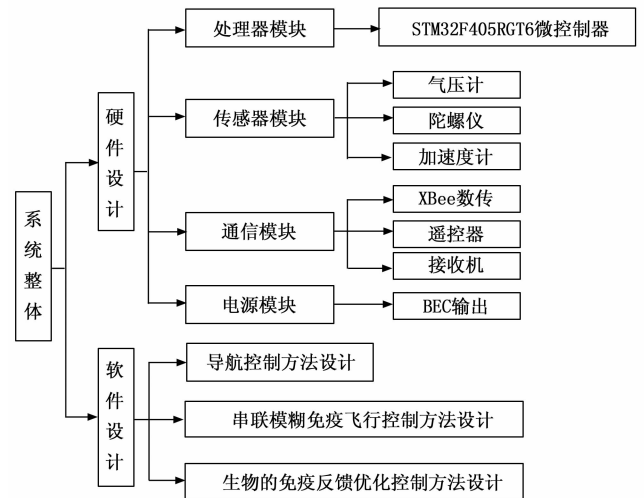


图 1 系统整体程序框图

### 1.1 基于处理器与传感器的硬件系统设计

在处理器模块中，选用型号为 STM32F405RGT6 的 Cortex-M4 内核微控制器，它是一款具备硬件浮点单元和增强 DSP 处理指令的嵌入式微控制器，适合多旋翼无人机飞行导航算法的运行，通过锂电池对其进行供电<sup>[7]</sup>。该微控制器的接口使用设置如表 1 所示。

表 1 该微控制器的接口使用设置

序号	微控制器接口类型	接入传感器
1	I2C	气压计、地磁计
2	UART	Xbee、遥控器与接收机、GPS
3	SPI	STM32 主从数据通信
4	A/D	陀螺仪、加速度计

其中陀螺仪选用单轴 ADXRS620 模拟陀螺仪，利

用其测量多旋翼无人机的航向以及俯仰、滚转角速度。由于其为模拟器件，输出信号为电压值信号，因此需要利用模拟采集电路将其转化为数字量信号。而 STM32F405RGT6 自带 12 bit A/D 转换，只需为其配置 DMA 控制器，不再另外设计模拟采集电路。将分散控制系统 (DMA, direct memory access) 控制器的采集频率设置为 2 000 Hz。然而在将电压值信号转化为数字量信号的过程中，为确保 A/D 采集精度，在 STM32F405RGT6 的基准电压源端配置 VREF3033 基准电压芯片，以实现线性稳定的电压源。同时使用巴特沃斯滤波器对采集的单轴 ADXRS620 模拟陀螺仪数字量信号实施巴特沃斯数字低通滤波处理<sup>[8]</sup>。只是单轴 ADXRS620 模拟陀螺仪输出模拟电压与 STM32F405RGT6 最大可采集模拟电压不同，因此设计电压衰减电路，如图 2 所示。

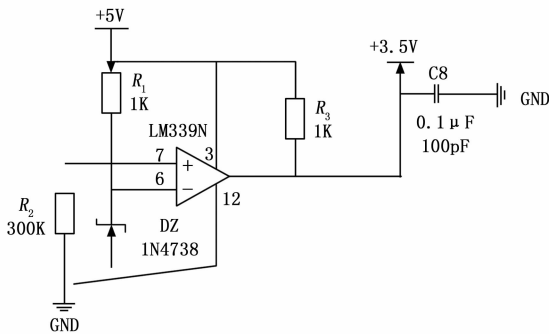


图 2 电压衰减电路

通过电压衰减电路能够将单轴 ADXRS620 模拟陀螺仪输出模拟电压衰减至 STM32F405RGT6 最大可采集模拟电压。地磁计选用飞思卡尔的 MAG3110，用于辅助确定多旋翼无人机机体航向角信息，最终的多旋翼无人机机体航向角<sup>[9]</sup>。

加速度计选用 ADXL335 加速度传感器，与 ADXRS620 模拟陀螺仪仪器共同用于推算多旋翼无人机的姿态角。GPS 选用 UbloxLEA-5H 接收机，输出的是 WGS84 坐标系下多旋翼无人机的速度、高度、经纬度信息。通过气压计<sup>[10]</sup>辅助推算多旋翼无人机的高度信息，选用的气压计为 MS5803。通过气压计计算的多旋翼无人机高度信息  $\zeta$ 。通过 XBee 数传、遥控器与接收机实现多旋翼无人机的无线通信，其中 XBee 数传采用的是 XBee-pro900，用于实现多旋翼无人机与地面监控系统的通信。遥控器 T10CHG 与接收机 R6208SB 用于手动遥控操作多旋翼无人机飞行。

传感器的供电以电调的 BEC 输出为输入电压，通过隔离稳压芯片 WRB0505ZP-6 与 ASM1117 线性稳压芯片将 BEC 输出的 5 V 电压降至 3.3 V。

## 1.2 软件系统设计

### 1.2.1 导航控制方法设计

在导航控制中，基于通过气压计计算的多旋翼无人机高度信息  $\zeta$  和 GPS 测得的高度信息  $\zeta_{GPS}$  获得融合后的多旋翼无人机高度信息  $\zeta^*$ ：

$$\zeta^* = \frac{S_{baro}^{-1} \zeta + S_{GPS}^{-1} \zeta_{GPS}}{S_{baro}^{-1} + S_{GPS}^{-1}} \quad (1)$$

式中， $S_{baro}^{-1}$ 是指气压计计算的多旋翼无人机高度信息  $\zeta$  的测量噪声协方差； $S_{GPS}^{-1}$ 是指 GPS 高度的测量噪声协方差<sup>[11]</sup>。基于融合后的多旋翼无人机高度信息  $\zeta^*$  与 GPS 测得的坐标信息  $(X, Y)$  获取多旋翼无人机的位置与速度信息：假设  $T_1$  时刻多旋翼无人机的位置为， $T_2$  时刻多旋翼无人机的位置为，通过下式计算多旋翼无人机在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的速度：

$$\begin{cases} u_x = \frac{X_2 - X_1}{\Delta T} \\ u_y = \frac{Y_2 - Y_1}{\Delta T} \\ u_z = \frac{\zeta_2^* - \zeta_1^*}{\Delta T} \\ \Delta T = T_2 - T_1 \end{cases} \quad (2)$$

式中， $\Delta T$  是指  $T_2$  时刻与  $T_1$  时刻的时间间隔。

基于最终的多旋翼无人机机体航向角  $\xi_{fused}$ 、单轴 ADXRS620 模拟陀螺仪测得的多旋翼无人机俯仰、滚转角速度  $\rho_{gyro}$ 、 $\vartheta_{gyro}$  以及加速度计测得的多旋翼无人机在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的加速度  $(A_x, A_y, A_z)$  获得多旋翼无人机的飞行姿态角，具体操作步骤如下：定义多旋翼无人机的导航坐标系与机体坐标系。其中导航坐标系以地理北极为参考， $y$  轴指向北， $x$  轴指向东，而  $z$  轴则指向天顶。机体坐标系以多旋翼无人机的质心为原点， $y$  轴指向多旋翼无人机右侧， $x$  轴指向多旋翼无人机前进方向，而  $z$  轴则垂直于多旋翼无人机机体平面向上<sup>[12]</sup>。基于加速度计测得的多旋翼无人机在机体坐标系  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的加速度  $(A_x, A_y, A_z)$  计算多旋翼无人机的俯仰角与滚转角。

基于单轴 ADXRS620 模拟陀螺仪积分更新多旋翼无人机的俯仰角与滚转角。首先在导航坐标系下对单轴 ADXRS620 模拟陀螺仪测得的多旋翼无人机俯仰、滚转角速度  $\rho_{gyro}$ 、 $\vartheta_{gyro}$  进行积分，获得多旋翼无人机姿态角的变化量，具体公式如下：

$$\Delta \rho = \rho_{gyro} \cdot \Delta T \quad (3)$$

$$\Delta \vartheta = \vartheta_{gyro} \cdot \Delta T \quad (4)$$

基于计算获得的多旋翼无人机俯仰角  $\rho$  与滚转角  $\vartheta$  与获得的多旋翼无人机姿态角的变化量  $\Delta \rho$  与  $\Delta \vartheta$  更新多旋翼无人机的姿态角：

$$\rho^* = \rho(t - \Delta T) + \Delta \rho \quad (5)$$

$$\vartheta^* = \vartheta(t - \Delta T) + \Delta\vartheta \quad (6)$$

式中,  $t$  为当前时刻, 为一个连续变化的时间变量。基于获得的多旋翼无人机的位置与速度信息以及多旋翼无人机姿态角  $\rho^*$ 、 $\vartheta^*$  实现多旋翼无人机导航<sup>[13]</sup>。基于多旋翼无人机导航结果实现多旋翼无人机飞行控制。

### 1.2.2 串联模糊免疫飞行控制方法设计

设计模糊控制器与免疫控制器串联的 PID 飞行控制器, 实现多旋翼无人机的飞行智能控制。首先设计串联模糊免疫 PID 飞行控制器的输入, 包括位置输入、速度输入以及姿态角输入。用  $(X', Y', \zeta'^*)$  表示多旋翼无人机的目标坐标点, 用  $(X, Y, \zeta^*)$  表示多旋翼无人机的当前坐标点, 通过下式计算多旋翼无人机的位置偏差:

$$\begin{cases} \Delta X = X' - X \\ \Delta Y = Y' - Y \\ \Delta \zeta^* = \zeta'^* - \zeta^* \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $\Delta X$ 、 $\Delta Y$ 、 $\Delta \zeta^*$  是指导航坐标系下多旋翼无人机三轴的位置偏差。用  $(v'_x, v'_y, v'_z)$  表示多旋翼无人机的目标速度, 通过下式计算多旋翼无人机的速度偏差:

$$\begin{cases} \Delta v_x = v'_x - v_x \\ \Delta v_y = v'_y - v_y \\ \Delta v_z = v'_z - v_z \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $\Delta v_x$ 、 $\Delta v_y$ 、 $\Delta v_z$  是指导航坐标系下多旋翼无人机三轴的速度偏差<sup>[14]</sup>。用  $(\rho'^*, \vartheta'^*)$  表示多旋翼无人机的目标姿态角, 通过下式计算多旋翼无人机的姿态角偏差:

$$\begin{cases} \Delta \rho^* = \rho'^* - \rho^* \\ \Delta \vartheta^* = \vartheta'^* - \vartheta^* \end{cases} \quad (9)$$

式中,  $\Delta \rho^*$ 、 $\Delta \vartheta^*$  是指多旋翼无人机的俯仰、滚转角偏差<sup>[15]</sup>。设计多旋翼无人机飞行位置的免疫控制器。其设计依据免疫反馈机理, 具体如下式:

$$\begin{cases} s_{px} = -G_x \{1 - \gamma_x h[\Delta X, \Delta(\Delta X)]\} x_r - \\ \quad g_{ix} \int x_r dt - g_{dx} \dot{x}_r + \ddot{x}_f + k_p \dot{x}_f / n \\ s_{py} = -G_y \{1 - \gamma_y h[\Delta Y, \Delta(\Delta Y)]\} y_r - \\ \quad g_{iy} \int y_r dt - g_{dy} \dot{y}_r + \ddot{y}_f + k_{i2} \dot{y}_f / n \\ s_{pz} = -G_z \{1 - \gamma_z h[\Delta Z, \Delta(\Delta Z)]\} z_r - \\ \quad g_{iz} \int z_r dt - g_{dz} \dot{z}_r + \ddot{z}_f + k_d \dot{z}_f / n + g \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $G_x$ 、 $G_y$ 、 $G_z$  为控制反应速度;  $\gamma_x$ 、 $\gamma_y$ 、 $\gamma_z$  为控制稳定效果;  $g$  是指多旋翼无人机的重力加速度;  $h$  是指任一的非线性函数, 用于表征细胞抑制刺激能力的强弱, 也就是细胞对于刺激反应的敏感度, 需要使用模糊集进行逼近;  $\Delta(\Delta X)$ 、 $\Delta(\Delta Y)$ 、 $\Delta(\Delta Z)$  是指导航坐标系下多旋翼无人机三轴的位置偏差变化率;  $x_r$ 、 $y_r$ 、 $z_r$  是

指机体坐标系三轴转动后和导航坐标系之间的转换关系矩阵;  $g_{ix}$ 、 $g_{iy}$ 、 $g_{iz}$  是指多旋翼无人机绕机体坐标系三轴的转动惯量;  $g_{dx}$ 、 $g_{dy}$ 、 $g_{dz}$  是指多旋翼无人机绕导航坐标系三轴的转动惯量;  $\dot{x}_r$ 、 $\dot{y}_r$ 、 $\dot{z}_r$  是指机体坐标系绕三轴转动后和导航坐标系之间的转换关系矩阵  $x_r$ 、 $y_r$ 、 $z_r$  的一阶矩阵;  $\ddot{x}_f$ 、 $\ddot{y}_f$ 、 $\ddot{z}_f$  是指机体坐标系绕三轴转动后和导航坐标系之间的位置关系矩阵  $x_f$ 、 $y_f$ 、 $z_f$  的二阶矩阵;  $k_p$ 、 $k_i$ 、 $k_d$  是指导航坐标系的比例、积分以及微分系数;  $\dot{x}_f$ 、 $\dot{y}_f$ 、 $\dot{z}_f$  是指机体坐标系绕三轴转动后和导航坐标系之间的位置关系矩阵  $x_f$ 、 $y_f$ 、 $z_f$  的一阶矩阵;  $n$  是指生物反馈作用进行到第  $k$  代后的抗原数目<sup>[16]</sup>。接着构建多旋翼无人机飞行速度的免疫控制器, 具体如下式:

$$\begin{cases} s_{px} = -G_x \{1 - \gamma_x h[\Delta v_x, \Delta(\Delta v_x)]\} x_r - \\ \quad g_{ix} \int x_r dt - g_{dx} \dot{x}_r + \ddot{x}_f + k_p \dot{x}_f / n \\ s_{py} = -G_y \{1 - \gamma_y h[\Delta v_y, \Delta(\Delta v_y)]\} y_r - \\ \quad g_{iy} \int y_r dt - g_{dy} \dot{y}_r + \ddot{y}_f + k_i \dot{y}_f / n \\ s_{pz} = -G_z \{1 - \gamma_z h[\Delta v_z, \Delta(\Delta v_z)]\} z_r - \\ \quad g_{iz} \int z_r dt - g_{dz} \dot{z}_r + \ddot{z}_f + k_d \dot{z}_f / n + g \end{cases} \quad (11)$$

式中,  $\Delta(\Delta v_x)$ 、 $\Delta(\Delta v_y)$ 、 $\Delta(\Delta v_z)$  是指导航坐标系下多旋翼无人机三轴的速度偏差变化率<sup>[17]</sup>。最后设计多旋翼无人机飞行姿态角的免疫控制器, 具体如下式:

$$\begin{cases} s_{px} = -G_x \{1 - \gamma_x h[\Delta \rho^*, \Delta(\Delta \rho^*)]\} x_r - \\ \quad g_{ix} \int x_r dt - g_{dx} \dot{x}_r + \ddot{x}_f + \frac{k_p}{L} \dot{x}_f / n \\ s_{py} = -G_y \{1 - \gamma_y h[\Delta \vartheta^*, \Delta(\Delta \vartheta^*)]\} y_r - \\ \quad g_{iy} \int y_r dt - g_{dy} \dot{y}_r + \ddot{y}_f + \frac{k_i}{L} \dot{y}_f / n \\ s_{pz} = -G_z \{1 - \gamma_z h[\Delta(\Delta \rho^*), \Delta(\Delta \vartheta^*)]\} z_r - \\ \quad g_{iz} \int z_r dt - g_{dz} \dot{z}_r + \frac{k_d}{L} \dot{z}_f / n + g \end{cases} \quad (12)$$

式中,  $L$  为阻力系数;  $\Delta(\Delta \rho^*)$ 、 $\Delta(\Delta \vartheta^*)$  为导航坐标系下多旋翼无人机的姿态角偏差变化率。算法控制的伪代码如下:

```

初始化模糊控制器与免疫控制器参数
fuzzy_controller=FuzzyController()
immune_controller=ImmuneController()
# 主控制循环
while True:
# 获取当前时刻多旋翼无人机的状态信息
current_position=get_current_position() # 当前坐标点
current_velocity=get_current_velocity() # 当前速度
current_attitude=get_current_attitude() # 当前姿态角
# 计算偏差及偏差变化率

```

```

position_error = target_position - current_position # 位置
偏差
velocity_error = target_velocity - current_velocity # 速度
偏差
attitude_error = target_attitude - current_attitude # 姿态
角偏差
position_error_rate = calculate_error_rate(position_error)
# 位置偏差变化率
velocity_error_rate = calculate_error_rate(velocity_error)
# 速度偏差变化率
attitude_error_rate = calculate_error_rate(attitude_error)
# 姿态角偏差变化率
# 模糊控制器处理
fuzzy_output = fuzzy_controller.process(
    position_error, velocity_error, attitude_error,
    position_error_rate, velocity_error_rate, attitude_error
_rate)
# 免疫控制器处理
immune_output = immune_controller.process(
    position_error, velocity_error, attitude_error,
    position_error_rate, velocity_error_rate, attitude_er
ror_rate,
    fuzzy_output # 将模糊控制器的输出作为免疫控
制器的输入之一)
# 协调控制输出:模糊控制器提供基础调整,免疫控制
器进行动态补偿
control_output = fuzzy_output + immune_output
# 应用控制输出到多旋翼无人机
apply_control_output(control_output)
# 更新目标状态(根据任务需求)
update_target_state()
    
```

上述研究中设计了模糊控制器与免疫控制器串联的 PID 飞行控制器,实现了多旋翼无人机的飞行智能控制。这一设计通过结合模糊控制器的适应复杂环境能力和免疫控制器的动态调整能力,显著提升了飞行控制的准确性。然而,要使这一控制策略在实际应用中发挥最佳效果,还需要对控制器的参数进行精细优化,以适应不同飞行条件和任务需求。因此,设计了生物的免疫反馈优化控制方法。

### 1.2.3 生物的免疫反馈优化控制方法设计

通过免疫模糊控制的动态补偿和遗传算法参数优化的全局适配,从而抑制三轴推力耦合的非线性影响,从而提升了控制精度,避免了复杂系统建模,适用于实际工程中参数难以精确测量的场景。

多旋翼无人机飞行位置、速度与姿态角的模糊控制器设计如下:对于非线性函数  $h$ ,设计如下的模糊规则:对于任意一个输入变量,包括导航坐标系下多旋翼

无人机三轴的位置偏差及位置偏差变化率、导航坐标系下多旋翼无人机三轴的速度偏差及速度偏差变化率、导航坐标系下多旋翼无人机三轴的姿态角偏差及姿态角偏差变化率,分别采用“负”(N)与“正”(P)两个模糊集对其实施模糊化。对于多旋翼无人机飞行位置的免疫控制器与多旋翼无人机飞行速度的免疫控制器的任一输出变量,则采用“负”(N)、“正”(P)与“零”(Z)3个模糊集对其实施模糊化,且将多旋翼无人机飞行位置、速度与姿态角模糊控制器的模糊输入与模糊输出的隶属度函数均定义在实数区间内<sup>[18]</sup>。接着以生物的免疫反馈原理为依据,定义4条模糊规则,如表2所示。

表2 模糊规则设计

模糊规则序号	设计的模糊规则
1	当多旋翼无人机飞行位置、速度与姿态角的偏差为 P,且偏差变化率为 P,则模糊控制器的输出为 N
2	当多旋翼无人机飞行位置、速度与姿态角的偏差为 P,且偏差变化率为 N,则模糊控制器的输出为 Z
3	当多旋翼无人机飞行位置、速度与姿态角的偏差为 N,且偏差变化率为 P,则模糊控制器的输出为 Z
4	当多旋翼无人机飞行位置、速度与姿态角的偏差为 N,且偏差变化率为 N,则模糊控制器的输出为 P

对于模糊控制器与免疫控制器串联的 PID 飞行控制器,其导航坐标系的比例、积分以及微分系数  $k_p$ 、 $k_i$ 、 $k_d$  的取值对于多旋翼无人机的飞行智能控制效果有较大影响。为获取  $k_p$ 、 $k_i$ 、 $k_d$  的最优取值,应用改进遗传算法实施参数优化。具体的参数优化步骤如下:

1) 对改进遗传算法中各染色体的位置、速度实施初始化操作,为每个染色体(即导航坐标系的比例、积分以及微分系数  $k_p$ 、 $k_i$ 、 $k_d$  的参数优化的候选解)随机分配初始位置和速度。将搜索空间大小设为  $c$  维,以明确导航坐标系的比例、积分以及微分系数  $k_p$ 、 $k_i$ 、 $k_d$  参数优化问题的维度,则各染色体中含有的变量数量为  $c$  个。并实施全局最优位置  $\alpha_{best}$  以及当前历史最优位置  $\beta_{best}$  的初始化,以为染色体种群提供初始的  $k_p$ 、 $k_i$ 、 $k_d$  参数优化目标方向以及记录每个染色体的个人经验。

2) 随着迭代次数的增加,计算当前选择压力的变化,以控制导航坐标系的比例、积分以及微分系数  $k_p$ 、 $k_i$ 、 $k_d$  参数优化中的收敛速度与稳定性,平衡参数优化中的全局探索与局部开发,并适应不同阶段的参数优化搜索需求。具体计算公式如下:

$$\bar{\omega} = \bar{\omega}_{max} - \frac{\mathcal{J}(\bar{\omega}_{max} - \bar{\omega}_{min}) p_i}{\mathcal{J}_{max} p_o} \quad (13)$$

式中,  $\bar{\omega}_{\max}$  为指选择压力的最大值;  $\vartheta$  为指迭代次数;  $\bar{\omega}_{\min}$  为指选择压力的最小值;  $\vartheta_{\max}$  为指最大迭代次数;  $p_l$  为指改进遗传算法的交叉概率;  $p_o$  为指改进遗传算法的变异概率。

3) 依据当前选择压力更新  $c$  维空间中第  $i$  个染色体的速度, 以控制染色体在导航坐标系的比例、积分以及微分系数  $k_p$ 、 $k_i$ 、 $k_d$  的参数优化中的搜索步长和方向。具体如下式:

$$U_{i,j}(\vartheta+1) = \bar{\omega}U_{i,j}(\vartheta) + \varphi_1\gamma_1[\beta_{i,j} - \mu_{i,j}(\vartheta)] + \varphi_2\gamma_2[\beta_{i,j} - \mu_{i,j}(\vartheta)]$$

$$j = 1, 2, \dots, c \quad (14)$$

式中,  $U_{i,j}(\vartheta+1)$  是指在第  $\vartheta+1$  次迭代中,  $c$  维空间中第  $i$  个染色体的速度;  $U_{i,j}(\vartheta)$  是指在第  $\vartheta$  次迭代中,  $c$  维空间中第  $i$  个染色体的速度;  $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$  是指学习因子;  $\beta_{i,j}$  是指第  $i$  个染色体历史最优位置 (该染色体在搜索过程中迄今为止找到的最优导航坐标系的比例、积分以及微分系数  $k_p$ 、 $k_i$ 、 $k_d$  参数优化解) 的第  $j$  维分量;  $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$  是指介于  $[0, 1]$  范围内均匀分布且独立的随机数;  $\beta_{i,j}$  是指第  $l$  个染色体历史最优位置的第  $j$  维分量;  $\mu_{i,j}(\vartheta)$  是指算法运算至当前迭代数据时第  $i$  个染色体的第  $j$  维分量, 能够控制染色体在导航坐标系的比例、积分以及微分系数  $k_p$ 、 $k_i$ 、 $k_d$  参数优化搜索空间中的移动方向和步长。

4) 通过下式更新第  $c$  维参数优化搜索空间中第  $i$  个染色体的位置, 以直接探索导航坐标系的比例、积分以及微分系数  $k_p$ 、 $k_i$ 、 $k_d$  参数优化解空间, 逼近参数优化最优解:

$$\beta_{i,j}(\vartheta+1) = U(\vartheta+1) + \beta_{i,j}(\vartheta) \quad (15)$$

式中,  $\beta_{i,j}(\vartheta)$  是指第  $\vartheta$  次迭代中第  $c$  维参数优化搜索空间中第  $i$  个染色体的位置。

5) 计算适应度。由于待优化的参数为导航坐标系的比例、积分以及微分系数  $k_p$ 、 $k_i$ 、 $k_d$ , 共有 3 个, 因此将染色体的长度定为 3。采用的适应度函数为通过导航坐标系下多旋翼无人机三轴的位置偏差、速度偏差及姿态角偏差、采样时间  $T$ 、导航坐标系下多旋翼无人机三轴的位置偏变化率、速度偏差变化率及姿态角偏差变化率、上升时间  $T'$  构造的适应度函数, 具体如下式:

$$O =$$

$$\frac{f}{T} \int_0^T \left\{ \theta_1 + \theta_2 \begin{bmatrix} \Delta(\Delta X), \Delta(\Delta Y), \Delta(\Delta \zeta^*) \\ \Delta(\Delta v_x), \Delta(\Delta v_y), \Delta(\Delta v_z) \\ \Delta(\Delta \rho^*), \Delta(\Delta \vartheta^*) \end{bmatrix}, dt + \theta_3 T' \right\} \quad (16)$$

式中,  $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_3$  为权重系数;  $f$  为调节系数。保存各染色体的最优位置及适应度, 选出适应度最优的染色体, 通过适应度最优染色体的位置更新染色体种群的最

优位置。比较更新后的染色体种群最优位置的适应度值与每个染色体当前位置的适应度值<sup>[19]</sup>。以比较结果为依据选择或放弃染色体个体最优位置的更新, 从而获得导航坐标系的比例、积分以及微分系数  $k_p$ 、 $k_i$ 、 $k_d$  的当前迭代最优参数优化结果。当改进遗传算法迭代次数达到上限, 停止迭代, 结束算法运行, 输出导航坐标系的比例、积分以及微分系数  $k_p$ 、 $k_i$ 、 $k_d$  最终参数优化结果。软件系统的实现流程如图 3 所示。

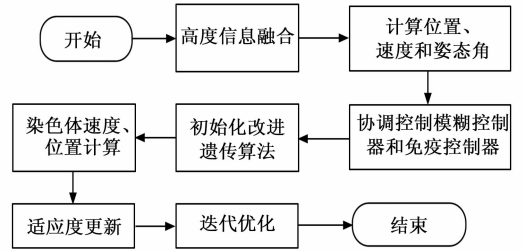


图 3 软件系统实现流程图

## 2 系统测试

### 2.1 实验过程

对于设计的多旋翼无人机飞行串联模糊免疫智能控制系统, 对其实施系统表现测试。在实验测试中, 选择的飞行器为电动四旋翼飞行器。在实验四旋翼无人机上布设多旋翼无人机飞行串联模糊免疫智能控制系统的硬件, 包括处理器、各种传感器及其相关电路。

利用 22.2 V 的 3S 锂电池对处理器进行供电。电调的 BEC 输出为输入电压, 通过隔离稳压芯片 WRB05-05ZP-6 与 ASM1117 线性稳压芯片将 BEC 输出的 5 V 电压降至 3.3 V 实现各传感器的供电。通过 XBee 数传、遥控器与接收机实现实验四旋翼无人机的无线通信。布设后, 需要检查通讯是否连接、供电是否正常以及传感器是否正常工作, 确保各部分能够正常运行后开始测试。

利用导航模块实施各次测试中的实验四旋翼无人机导航工作。首先基于通过气压计计算的实验四旋翼无人机高度信息和 GPS 测得的高度信息获得融合后的实验四旋翼无人机高度信息。并综合 GPS 测得的坐标信息获取实验四旋翼无人机的位置与速度信息。基于最终的实验四旋翼无人机机体航向角、单轴 ADXRS620 模拟陀螺仪测得的实验四旋翼无人机俯仰、滚转角速度以及加速度计测得的实验四旋翼无人机在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的加速度获得实验四旋翼无人机的飞行姿态角。基于获得的位置与速度信息以及姿态角实现实验四旋翼无人机导航。基于实验四旋翼无人机导航结果实现实验四旋翼无人机飞行控制。在该步骤中, 以姿态控制测试为例, 飞行导航结果示例如表 3 所示。

表 3 飞行导航结果示例

时间 /s	飞行位置 (x,y,z)/m	俯仰角 /(^{\circ})	滚转角 /(^{\circ})	x 方向速度 / (m/s)	y 方向速度 / (m/s)	z 方向速度 / (m/s)
1	(1.02,0.52,0.27)	2.02	1.03	1.36	1.95	1.23
2	(2.11,1.23,0.68)	3.51	1.51	1.96	1.85	1.54
3	(3.31,2.14,1.25)	2.04	2.06	1.45	1.62	1.58
4	(4.67,3.24,2.01)	1.52	1.62	1.52	1.68	1.58
5	(6.08,4.53,3.03)	8.06	3.14	1.96	1.87	1.75
6	(7.54,6.08,4.23)	5.55	5.56	1.45	1.65	1.47
7	(9.14,7.73,5.61)	4.04	2.11	1.63	1.58	1.74
8	(10.84,9.60,7.28)	3.49	4.62	1.65	1.62	1.77
9	(12.64,11.72,9.01)	8.11	5.14	1.68	1.85	1.69

利用设计的模糊控制器与免疫控制器串联的 PID 飞行控制器实现实验四旋翼无人机的飞行智能控制。其中实验参数设置情况如下： $g$  为  $9.81 \text{ m/s}^2$ 。

最后为获取  $k_p$ 、 $k_i$ 、 $k_d$  的最优取值，应用改进遗传算法实施参数优化。其中实验参数设置情况如表 4 所示。

表 4 实验参数设置情况

序号	实验参数项目	实验参数设置
1	最大迭代次数 $\vartheta_{\max}$	200 次
2	$c$	8
3	$f$	1
4	权重系数 $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_3$	0.35、0.35、0.30
5	染色体种群数量	50 个
6	学习因子 $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$	0.28、0.36
7	随机数 $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$	0.56、0.87
—	—	—

在系统测试中，测试设计系统的飞行控制准确性。测试项目具体如下：在姿态控制测试中，主要测试设计系统的飞行姿态控制性能及位置保持性能。在试飞实验中，实验四旋翼无人机从姿态稳定模式开始起飞，接着完成一系列姿态飞行，最后转入定高模式。在测试中通过 XBee-pro900 将实验四旋翼无人机的飞行数据传输至测控计算机中。第一个测试项目为姿态角响应曲线，以俯仰角为例进行测试。第二个测试项目为偏航角。观察姿态角响应曲线与偏航角响应曲线与期望姿态角、期望偏航角曲线之间的偏差，偏差越小表明设计系统的飞行控制准确性越高。当转入定高模式后，测试设计系统的定高控制性能。具体测试项目为高度稳定响应曲线，观察设计系统的高度稳定响应曲线与期望高度稳定响应曲线之间的偏差，同样，偏差越小表明设计系统的飞行控制准确性越高。

在测试中，将基于油电混动六旋翼无人机的模糊 PID 飞行控制策略、无人机非确定性等价自适应容错飞

行控制方法作为对比测试方法，共同进行测试。

## 2.2 飞行控制准确性测试结果

### 2.2.1 姿态角响应曲线测试结果分析

在上节的实验参数设置下，将设计系统与两种对比方法在强风干扰下进行对比测试，分析姿态角响应曲线对比结果，如图 4 所示。

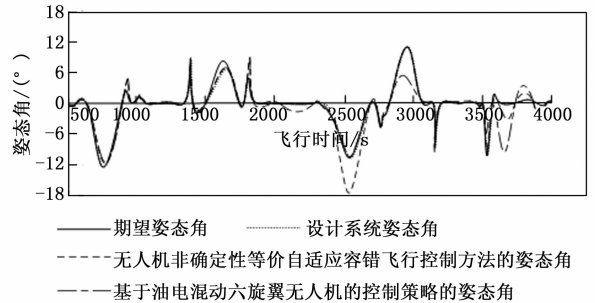


图 4 姿态角响应曲线对比测试结果

由图 4 可知，整体来看，设计系统的姿态角响应曲线与期望姿态角响应曲线是最贴合的，姿态角波动在  $-12 \sim 12^{\circ}$  之间，其表现优于两种对比方法。这说明设计系统的飞行姿态控制性能更强。这是由于设计系统的导航算法中通过气压计和 GPS 的高度信息进行融合处理，以及基于加速度计和陀螺仪的姿态角计算，使姿态角信息更加准确和稳定。这种多次融合处理的方式，有效提升了导航的精准度，进而间接提升了姿态角控制的准确性。

### 2.2.2 偏航角曲线测试结果分析

在上节的实验参数设置下，设计系统与两种对比方法的偏航角响应曲线对比测试结果如图 5 所示。

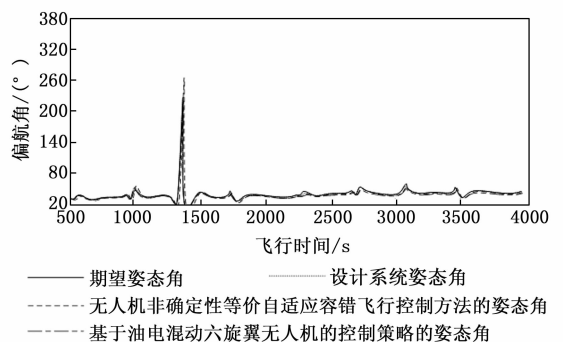


图 5 偏航角响应曲线对比测试结果

设计系统的偏航角响应曲线与期望偏航角响应曲线最为贴合，波动范围在  $20 \sim 230^{\circ}$  之间，整体误差较小，这表明设计系统的飞行姿态控制性能更强。这是由于设计系统融合了模糊控制器与免疫控制器的协同作用。模糊控制器与免疫控制器的串联不仅提升了姿态角控制的准确性，也间接提升了偏航角控制的准确

性。两者协同工作，能够分层解耦复杂的飞行控制任务，使得偏航角控制能够更快速地响应目标变化，并减少误差。

### 2.2.3 高度稳定响应曲线测试结果分析

在上节的实验参数设置下，设计系统与两种对比方法的高度稳定响应曲线对比测试结果如图6所示。

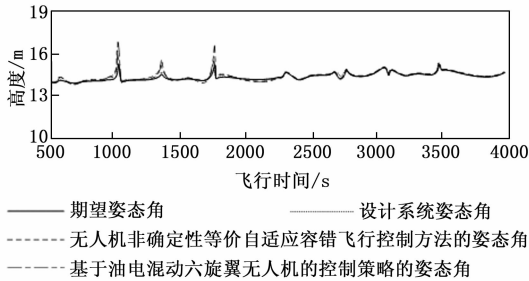


图6 高度稳定响应曲线

设计系统的飞行高度与期望飞行高度最接近，波动范围在14~17 m之间，而两种对比方法均与期望飞行高度表现出一定误差，这表明设计系统的位置保持性能更好。这是由于设计系统通过改进遗传算法对导航坐标系的比例、积分以及微分系数进行优化，使模糊控制器与免疫控制器串联的PID飞行控制器的控制性能得到进一步提升。这种优化方式能够根据实际飞行情况调整控制参数，使高度控制更加精确和稳定。

## 3 结束语

本文围绕多旋翼无人机飞行串联模糊免疫智能控制系统展开设计。硬件系统选用STM32F405RGT6微控制器，搭配多种传感器，通过合理接口设置与电路设计实现数据采集与处理。软件系统方面，先设计导航控制方法，融合多种传感器信息获取无人机位置、速度与姿态角。然后设计串联模糊免疫PID飞行控制器，实现智能控制，最后通过生物免疫反馈优化控制方法提升控制精度。系统测试中，以电动四旋翼飞行器为对象，进行姿态控制、偏航角及高度稳定响应曲线测试，并与两种对比方法对比。结果表明，设计系统在姿态角、偏航角及高度控制上均表现更优，飞行控制准确性更高，验证了系统的有效性与优越性。

### 参考文献：

[1] 李云鹏, 张立宪, 韩岳江, 等. 基于模型预测控制的子母式无人机编队飞行控制方法[J]. 自动化学报, 2025, 51(2): 312-326.

[2] 杨宗月, 刘磊, 刘晨. 基于PPO算法的四旋翼无人机位置控制[J]. 计算机仿真, 2024, 41(2): 462-467.

[3] 陈伟, 涂钊, 刘建宏, 等. 基于油电混动六旋翼无人机的模糊PID飞行控制策略研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2024, 43(8): 124-132.

[4] 季海宁, 陈谋, 雍可南. 无人机非确定性等价自适应容错飞行控制[J]. 控制理论与应用, 2024, 41(4): 587-596.

[5] 李壮举, 杜朋达, 王宁. 基于改进LESO的四旋翼无人机模糊线性自抗扰控制方法[J]. 电子学报, 2024, 52(9): 3185-3194.

[6] 余立, 贺光, 王祥科, 等. 倾转三旋翼无人机控制设计与飞行实验[J]. 控制理论与应用, 2024, 41(9): 1698-1706.

[7] 祝长鑫, 赵伟霞, 单志杰, 等. 变量灌溉处方图设计中无人机飞行高度和起飞时间确定[J]. 农业工程学报, 2023, 39(5): 61-69.

[8] 戴峻峰. 基于视觉的无人机自主着舰地面模拟系统[J]. 电子器件, 2023, 46(5): 1307-1313.

[9] 刘肩山, 唐毅, 谢志明. 四旋翼无人机吊挂飞行减摆控制[J]. 电光与控制, 2023, 30(8): 74-79.

[10] 王玉杰, 陈清阳, 高显忠, 等. 无人机动态撞网回收制导控制方法与飞行试验[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 51(2): 487-497.

[11] 李继广, 董彦非, 刘天栋, 等. 基于MPC方法无人机避障路径规划研究[J]. 火力与指挥控制, 2023, 48(3): 78-83.

[12] 康宇航, 毛凯, 程俊, 等. 联合连通有向切换拓扑条件下无人机集群鲁棒编队控制[J]. 中国科学: 技术科学, 2023, 53(12): 2115-2126.

[13] 叶镇豪, 陈宏, 巩伟杰, 等. 一种新型单涵道式无人机控制系统设计[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(8): 3527-3534.

[14] 钱儿, 孙耀程, 方文逸, 等. 一种太阳能无人机降落阶段横浆功能实现策略[J]. 微特电机, 2024, 52(11): 48-50.

[15] 徐吉辉, 徐西蒙, 符颖, 等. 基于能量约束的无人机集群侦察最优航迹规划[J]. 电光与控制, 2023, 30(12): 44-50.

[16] 苟进展, 吴宇, 邓嘉宁. 基于群智能一致性理论的无人机编队全过程飞行航迹规划方法[J]. 控制与决策, 2023, 38(5): 1464-1472.

[17] 刘树光, 王欢, 刘荣华. 基于距离的无人机编队路径跟踪控制[J]. 飞行力学, 2023, 41(1): 27-33.

[18] 张园, 郑鸿基, 刘海涛, 等. 基于自适应RBF神经网络具有模型不确定性的四旋翼无人机指定时间预设性能控制方法[J]. 农业机械学报, 2024, 55(4): 64-73.

[19] 程永红, 王萌. 基于语音识别处理的植保无人机飞行路径控制研究[J]. 农机化研究, 2024, 46(2): 44-48.