

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311897

# 基于 BFO-FPA 参数寻优无人直升机轨迹跟踪自抗扰控制\*

卢艳军<sup>1,2</sup>, 王柏森<sup>1</sup>, 张晓东<sup>1,2</sup>

(1. 沈阳航空航天大学自动化学院 沈阳 110136; 2. 辽宁通用航空研究院 沈阳 110136)

**摘要:**为解决小型无人直升机轨迹跟踪控制受系统数学模型精度、自身低成本微机电系统(MEMS)姿态测量误差及飞行环境干扰的内外扰动影响问题,设计了一种基于线性/非线性混合自抗扰控制(ADRC-LADRC)的无人直升机轨迹跟踪控制器,并提出了一种基于细菌觅食优化-花授粉算法(BFO-FPA)的控制器参数整定方法,提高了BFO算法的收敛速度,增强了FPA算法的全局搜索能力。最后,通过ALIGN无人直升机锁尾螺旋爬升飞行试验,验证了BFO-FPA算法参数寻优后自抗扰轨迹跟踪控制器能有效克服无人直升机受内外扰动的影响,提高了控制器轨迹跟踪精度和鲁棒性。

**关键词:**无人直升机;轨迹跟踪控制系统;线性/非线性混合自抗扰控制;控制器参数整定

**中图分类号:** TP273.2 V249.1 TH82 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.80

## Unmanned helicopter trajectory tracking active disturbance rejection control based on BFO-FPA parameter optimization

Lu Yanjun<sup>1,2</sup>, Wang Baisen<sup>1</sup>, Zhang Xiaodong<sup>1,2</sup>

(1. Automation College, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;  
2. Liaoning General Aviation Academy, Shenyang 110136, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that the trajectory tracking control of small unmanned helicopters is affected by internal and external disturbances such as the accuracy of system mathematical model, the attitude measurement error caused by the low-cost MEMS and the interference of flight environment, a linear/nonlinear hybrid active disturbance rejection control (ADRC-LADRC) method was designed for the unmanned helicopter trajectory tracking controller. Furthermore, a controller parameter tuning method based on bacterial foraging optimization-flower pollination algorithm (BFO-FPA) was proposed, which improved the convergence speed of BFO algorithm and enhanced the global search capability of FPA algorithm. Finally, with the ALIGN unmanned helicopter's tail-locking spiral climb flight test, it was verified that the optimized active-disturbance rejection trajectory tracking controller based on BFO-FPA algorithm can effectively overcome the influence of internal and external disturbances on the unmanned helicopter and improve the trajectory tracking accuracy and robustness of controller.

**Keywords:** unmanned helicopter; trajectory tracking control system; linear/nonlinear hybrid active disturbance rejection control; controller parameter tuning

## 0 引 言

旋翼无人机轨迹跟踪控制系统是一个多输入多输出的非线性强耦合控制系统<sup>[1]</sup>,相比其他旋翼无人机,直升机的线性控制方法一般依赖于机身精确数学模型<sup>[2-3]</sup>,而实际上无人直升机精确的数学模型受自身物理模型精度、携带的低成本微机电系统(microelectro mechanical systems,

MEMS)传感器姿态解算误差等内部扰动以及外界环境的未知扰动影响,难以准确建立。实机控制模型与理论设计模型有一定偏差,无法提高轨迹跟踪控制精度<sup>[4]</sup>。针对这些问题,Kapoor等<sup>[5]</sup>为共轴旋翼直升机设计了自适应控制器,实现当无人直升机桨叶小范围损坏时的有效控制。Patel等<sup>[6]</sup>为传统旋翼直升机设计了线性二次型调节(linear quadratic regulator, LQR)控制器,可在未精确动力学建模下实现直升机鲁棒控制。文献[7-8]将智能控制方

收稿日期:2023-09-09 Received Date: 2023-09-09

\* 基金项目:国家重点研发计划(2022YFC2903805)、辽宁省教育厅重点攻关项目(LJKZZ20220030)资助

法应用于倾转旋翼和多旋翼飞行器,通过对机体精准动力学建模实现稳定飞行。然而,这些方法大多只针对内部扰动或外部扰动。Abdul-Adheem 等<sup>[9]</sup>将被控对象系统内部和外部扰动之和视为总扰动,通过自抗扰控制器(active disturbance rejection control, ADRC)的扩张状态观测器(extended state observer, ESO)估计总扰动,经验调参下实现低精度模型系统控制。

Abdul-Adheem 等<sup>[10]</sup>针对单连杆机械臂的位置控制提出了线性自抗扰控制器(linear ADRC, LADRC)和非线性自抗扰控制器(nonlinear active disturbance rejection control, NADRC),并选择粒子群算法(porticle swarm optimization, PSO)进行参数寻优,从而实现高精度模型系统控制。针对旋翼系统中存在的非线性、强耦合、对扰动敏感等控制问题,周向阳等<sup>[11]</sup>提出细菌觅食寻优的单神经元比例-积分-微分(proportion integration differentiation, PID)自适应复合控制方法,通过对控制器参数寻优实现了惯性平台高精度的基座对准。研究表明,ADRC 抗扰动性能可观,能够有效克服被控对象的内外扰动,但通过经验整定参数以及单独使用 ADRC 控制器使系统控制效果不尽理想。为此,本文设计了基于 ADRC-LADRC 混合控制器的无人直升机轨迹跟踪控制系统,并提出了细菌觅食优化-花授粉算法(bacterial foraging optimization-flower pollination algorithm, BFO-FPA),对 ADRC-LADRC 混合控制器的参数进行寻优,实现了无人直升机的轨迹跟踪控制,提高了控制精度。

### 1 轨迹跟踪控制律设计

#### 1.1 无人直升机飞行力学建模

一般小型无人直升机拥有 6 个自由度,其飞行动力学总方程为:

$$\dot{\mathbf{V}} = \frac{\mathbf{F}}{m} - \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{V} \tag{1}$$

$$\dot{\mathbf{S}} = \mathbf{I}^{-1} \times \mathbf{M} - \mathbf{I}^{-1} \times \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{I} \times \mathbf{S} \tag{2}$$

$$\dot{\boldsymbol{\alpha}} = \mathbf{E} \times \mathbf{S} \tag{3}$$

$$\dot{\mathbf{P}} = \mathbf{R}_{EB} \times \mathbf{V} \tag{4}$$

式中:  $\mathbf{V} = [u \ v \ w]^T$  为线速度;  $\mathbf{S} = [p \ q \ r]^T$  为角速度;  $\boldsymbol{\alpha} = [\phi \ \theta \ \psi]^T$  为三轴欧拉角;  $\mathbf{P} = [X \ Y \ Z]^T$  为地面坐标系中的位置矢量;  $m$  为整机质量;  $\mathbf{F}$ 、 $\mathbf{M}$  为机体中各部件的力和力矩;  $\mathbf{I}$  为力矩惯性矩阵;  $\boldsymbol{\Omega}$  为角速度反对称矩阵;  $\mathbf{R}_{EB}$  为机体坐标到地面坐标的转换矩阵;  $\mathbf{E}$  为机体角速度到欧拉角速度的转换矩阵。

$$\boldsymbol{\Omega} = \begin{bmatrix} 0 & -r & q \\ r & 0 & -p \\ -q & p & 0 \end{bmatrix} \tag{5}$$

$$\mathbf{R}_{EB} = \begin{bmatrix} C_\theta C_\psi & S_\theta S_\psi C_\psi - C_\theta S_\psi & S_\theta C_\psi C_\psi + S_\psi S_\psi \\ C_\theta S_\psi & S_\theta S_\psi S_\psi + C_\theta C_\psi & S_\theta S_\psi S_\psi - S_\psi C_\psi \\ -S_\theta & S_\psi C_\theta & C_\psi C_\theta \end{bmatrix} \tag{6}$$

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} 1 & S_\psi T_\theta & T_\theta C_\psi \\ 0 & C_\psi & -S_\psi \\ 0 & S_\psi / C_\theta & C_\psi / C_\theta \end{bmatrix} \tag{7}$$

#### 1.2 轨迹跟踪控制率

小型无人直升机轨迹跟踪控制由姿态控制回路、速度控制回路、位置控制回路组成,如图 1 所示,对应控制回路的自适应控制器阶数由推导的动态模型阶数确立。ADRC 控制器由跟踪微分器(tracking differentiator, TD)、ESO 和状态误差非线性控制律(state error nonlinear control law, SENCL)构成,如图 2 所示,其中 TD 用于快速捕获输入信号的跟踪与差分信号,ESO 则可估计由无人直升机内部物理建模不确定性和外部扰动因素构成的扩张状态,将状态误差的非线性组合作为控制输出,进而实现对无人直升机的轨迹跟踪控制。

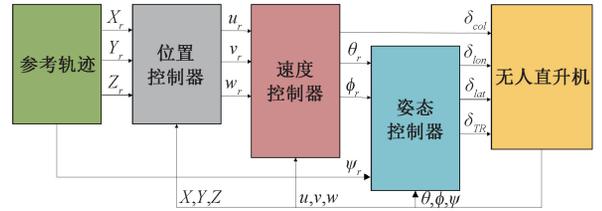


图 1 轨迹跟踪控制框图

Fig. 1 Trajectory tracking control block diagram

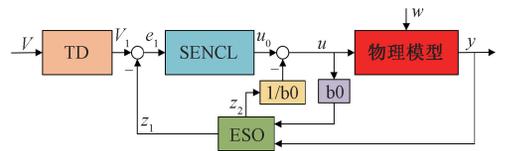


图 2 ADRC 控制器构成框图

Fig. 2 Block diagram of ADRC

#### 1) ADRC 控制器设计

令时间序列输入信号为  $v(t)$ , 其跟踪信号  $x_1(t)$  与差分信号  $x_2(t)$  为:

$$\begin{cases} x_1(t+1) = x_1(t) + h \cdot x_2(t) \\ x_2(t+1) = x_2(t) + h \cdot f_{st}(x_1(t) - v(t), x_2(t), r, h) \end{cases} \tag{8}$$

式中:  $h$  为可调离散采样时间,  $r$  为速度因子, 共同决定了信号滤波效果与跟踪速度。  $f_{st}$  函数如下:

$$f_{st}(x_1, x_2, r, h) = \begin{cases} -r \cdot \text{sign}(a), & |a| > d \\ -r \cdot \frac{a}{d}, & |a| \leq d \end{cases} \tag{9}$$

$$a = \begin{cases} x_2 + \frac{a_0 - d}{2} \cdot \text{sign}(y), & |y| > d_0 \\ x_2 + \frac{y}{h}, & |y| \leq d_0 \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} d = r \cdot h \\ d_0 = d \cdot h \\ a_0 = \sqrt{d^2 + 8r \cdot |y|} \\ y = x_1 + x_2 \cdot h \end{cases} \quad (11)$$

受不确定内外扰动影响的被控对象非线性方程表达式可写为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(x, w, t) + b(t) \cdot u \\ y = x_1 \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $u$  和  $y$  是输入和输出信号; 函数  $f$  为包含扰动的未知非线性系统函数。令  $x_3 = f(x, w, t) + u(b(t) - b_0)$  为包含系统总扰动的扩张状态变量,  $b_0$  为控制器增益常量, 简化后为式 (13), 并可得 ESO。

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 + b_0 \cdot u \\ \dot{x}_3 = g(t) \\ y = x_1 \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} e = z_1 - y \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_1 \cdot e \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_2 \cdot \text{fal}(e, \lambda_1, \zeta) + b_0 \cdot u \\ \dot{z}_3 = -\beta_3 \cdot \text{fal}(e, \lambda_2, \zeta) \end{cases} \quad (14)$$

$$\text{fal}(e, \lambda, \zeta) = \begin{cases} \frac{e}{\zeta^{1-\lambda}}, & |e| \leq \zeta \\ |e|^\lambda \cdot \text{sign}(e), & |e| > \zeta \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $\lambda_i > 0 (i = 1, 2, 3)$ ;  $\beta_i (i = 1, 2, 3)$  为增益;  $\zeta$  为步长;  $\text{fal}(e, \lambda, \zeta)$  为非线性函数。对式 (13) 构造 LESO 可得:

$$\begin{cases} e = z_1 - y \\ \dot{z}_1 = z_2 + \beta_{11} \cdot e \\ \dot{z}_2 = z_3 + \beta_{12} \cdot e + b_0 \cdot u \\ \dot{z}_3 = \beta_{13} \cdot e \\ \hat{y} = z_1 \end{cases} \quad (16)$$

其中,  $z_1, z_2, z_3$  用于补偿控制量的 ESO 观测值, 选取  $\beta_{11}, \beta_{12}, \beta_{13}$  分别为  $3w_0, 3w_0^2, w_0^3$  观测器带宽。

SENCL 由 TD 和 ESO 对应的状态偏差非线性组合构成, 即:

$$\begin{cases} e_1 = v_{11} - z_1 \\ e_2 = v_{21} - z_2 \\ u_0 = \beta_{01} \cdot \text{fal}(e_1, \alpha_1, s) + \beta_{02} \cdot \text{fal}(e_2, \alpha_2, s) \end{cases} \quad (17)$$

式中:  $\beta_{01}, \beta_{02}$  为可调增益。函数  $\text{fal}(e, \alpha, s)$  可以有效抑制信号震荡的发生, 具有良好的滤波效果。

### 2) 姿态控制回路

将式 (2) 和 (3) 展开可得:

$$\dot{\alpha} = F_1(\alpha) \times S \quad (18)$$

$$\dot{S} = F_2(\alpha, S, V, \Omega, w) + B(\alpha, S, V, \Omega, w) \times U_c \quad (19)$$

式中:  $w$  为外部扰动;  $U_c = [\delta_{lon} \ \delta_{lat} \ \delta_{TR}]$  为纵向桨距、横向桨距和尾桨桨距构成的矢量。结合式 (18) 和 (19) 可以得到二阶状态方程如下:

$$\ddot{\alpha} = \frac{dF_1}{dt} \times S + \dot{S} \times F_1 = F_3 \times S + F_1 \times (F_2 + B \times U_c) \quad (20)$$

其中,  $F_3 = dF_1/dt, F_1, F_2, B$  是相应的缩写。令总扰动表示为  $\bar{f}_\alpha = F_3 \times S + F_1 \times (F_2 + B \times U_c) - B_{0\alpha} \times U_c$ , 则式 (20) 可改写为:

$$\ddot{\alpha} = \bar{f}_\alpha + B_{0\alpha} \times U_c \quad (21)$$

式中:  $B_{0\alpha}$  为姿态控制的增益矩阵;  $U_c$  与  $\alpha$  形成单输入输出关系。姿态控制回路设计为二阶 LADRC 控制结构, 控制器阶数由推导的动态模型阶数确立, 如图 3 所示。速度控制回路的输出作为俯仰角和横滚角的控制指令输入, 偏航角的指令由控制器指令信号直接给出, 姿态控制回路的输出与微调偏移  $\delta_{col}$  叠加, 共同构成无人直升机控制输入, 如图 4 所示。根据上述分析, 俯仰角纵向控制回路设计如下:

$$\begin{cases} e = \theta - z_1 \\ \dot{z}_1 = z_2 + \beta_{\theta 1} \cdot e \\ \dot{z}_2 = z_3 + \beta_{\theta 2} \cdot e + b_{\theta 0} \cdot \delta_\theta \\ \dot{z}_3 = \beta_{\theta 3} \cdot e \\ u_0 = w_c^2 \cdot (\theta_r - z_1) - 2w_c \cdot z_2 \\ \delta_\theta = \frac{u_0 - z_3}{b_{\theta 0}} \\ \delta_{lon} = \delta_\theta + \delta_\theta^{trim} \end{cases} \quad (22)$$

式中:  $\theta_r$  为纵向速度回路的输出信号;  $\theta$  为俯仰角信号;  $\delta_\theta^{trim}$  是纵向控制偏置;  $b_{\theta 0}$  为控制增益。横滚角姿态控制回路的设计与之类似。

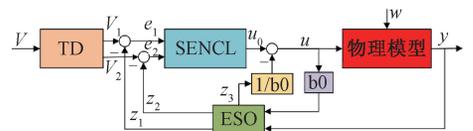


图 3 二阶 LADRC 控制器框图

Fig. 3 Block diagram of second-order LADRC controller

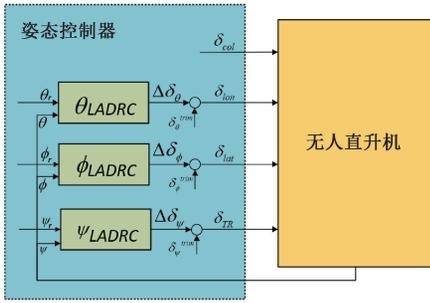


图4 姿态控制回路

Fig.4 Attitude control loop

## 3) 速度控制回路

将式(1)展开,定义扰动  $\bar{f}_v = F_4(\alpha, S, V, w) - B_{0v} \times \alpha$ , 代入可得:

$$\dot{V} = F_4(\alpha, S, \bar{V}, w) \quad (23)$$

$$\dot{V} = \bar{f}_v + B_{0v} \times \bar{\alpha} \quad (24)$$

式中:  $B_{0v}$  为速度控制增益矩阵。式(23)为系统一阶动态系统,设计相应的一阶 ADRC 控制器(图2);  $\bar{\alpha}$  为虚拟控制量,与纵向、横向和垂直速度  $V$  构成单输入输出系统,速度控制回路如图5所示,位置控制回路的输出作为速度控制指令输入。

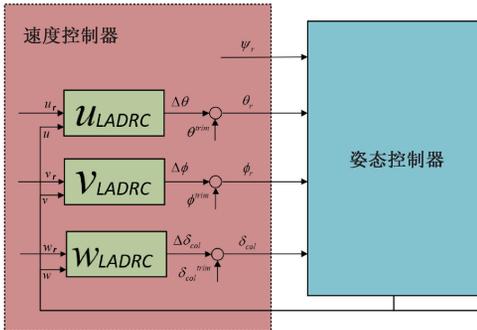


图5 速度控制回路

Fig.5 Velocity control loop

纵向速度回路的控制输出  $\theta_r$  设计如下:

$$\begin{cases} \dot{v}_1 = -h \cdot fst(v_1 - u_r, r, h) \\ e = z_{11} - u \\ \dot{z}_{11} = z_{12} - \beta_1 \cdot fal(e, 0.5, s) + b_{0u} \cdot \theta \\ \dot{z}_{12} = -\beta_2 \cdot fal(e, 2, s) \\ e_1 = v_1 - z_{11} \\ u_0 = \beta_{01} \cdot fal(e, 2, s) \\ \theta = u_0 - \frac{z_{12}}{b_{0u}} \\ \theta_r = \theta + \theta^{trim} \end{cases} \quad (25)$$

式中:  $v_1$  为 TD 的跟踪信号;  $u_r$  为纵向位置控制回路的输出;  $\theta^{trim}$  为纵向速度的偏置值;  $b_{0u}$  为控制增益。横向速度

控制回路和垂直速度控制回路设计类似。

## 4) 位置控制回路

将式(4)展开,定义扰动  $\bar{f}_p = (F_5(\alpha, w) - B_{0p}) \times V$ , 代入可得:

$$\dot{P} = F_5(\alpha, w) \times V \quad (26)$$

$$\dot{P} = \bar{f}_p + B_{0p} \times V \quad (27)$$

式中:  $B_{0p}$  为位置控制增益矩阵。式(26)为一阶系统,设计相应的一阶 ADRC 控制器构成三轴位置控制回路。位置指令为预先规划好的轨迹输入,其控制输出为速度控制回路的输入,如图6所示。纵向位置控制回路的控制输出  $u_r$  设计如下:

$$\begin{cases} \dot{v}_1 = -h \cdot fst(v_1 - X_r, r_1, h_1) \\ e = z_{11} - u \\ \dot{z}_{11} = z_{12} - \beta_{11} \cdot fal(e, 0.5, s_r) + b_{0x} \cdot R_{EB} \cdot u \\ \dot{z}_{12} = -\beta_{12} \cdot fal(e, 2, s_r) \\ e_1 = v_1 - z_{11} \\ u_0 = \beta_{02} \cdot fal(e, 2, s_r) \\ u = R_{EB} \times (u_0 - \frac{z_{12}}{b_{0x} R_{EB}}) \\ u_r = u + u^{trim} \end{cases} \quad (28)$$

式中:  $X_r$  为 TD 的跟踪信号;  $u^{trim}$  为纵向位置偏差;  $b_{0x}$  为控制增益。横向位置控制回路和垂直位置控制回路的设计类似。

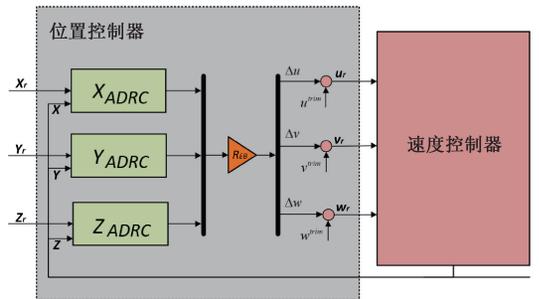


图6 位置控制回路

Fig.6 Position control loop

## 2 控制参数整定

## 2.1 参数整定原理

不同的控制器参数对 ADRC 和 LADRC 控制器的性能有不同的影响。相关参数的意义及其变换对控制器的影响如表1所示。

## 2.2 BFO-FPA 算法

FPA 算法是一种受花朵授粉现象启发的元启发式算法<sup>[12]</sup>。FPA 采用长程跳跃式随机游走机制(levy flight)并设置切换概率,更好地实现了局部搜索和全局搜索之

表 1 ADRC/LADRC 混合控制参数

Table 1 ADRC/LADRC hybrid control parameters

控制器	参数	描述
	$w_0$	用于消除稳态误差,太大会引起震荡
LADRC	$w_c$	用于缩短上升时间,过大会引起超调,甚至震荡
	$b_0$	用于抑制震荡,过大将导致上升时间过长响应慢
TD	$r$	此参数越大 TD 跟踪速度越快,噪声放大越明显
	$h$	增大此值,TD 滤波效果更好,跟踪相位损失越严重
	$\beta_1$	增加此值抑制系统超调量,过大导致上升时间增长
ESO	$\beta_2$	增加此值减少 ESO 对被控系统总扰动的估计滞后
	$\zeta_1$	此值过大将导致 ESO 不能良好估计系统总扰动
SENCL	$\beta_{01}$	此值过大系统的超调量增大,上升时间会缩短
	$\zeta_2$	此值过大将导致 ESO 不能良好估计系统总扰动

间的自由转换。该算法参数较少并且易于整定,因此广泛用于控制器参数寻优<sup>[13]</sup>。然而,FPA 具有较低的全局搜索能力,且易于陷入局部最优问题<sup>[14]</sup>。BFO 算法模仿大肠杆菌的觅食行为,利用趋化、繁殖和迁移算子的循环执行来获得全局最优解<sup>[15]</sup>。迁移算子规定细菌在完成固定数量的繁殖操作后,将以一定概率迁移到搜索空间中的任意位置。因此,BFO 算法具有可靠的全局收敛能力,但收敛速度和收敛精度不够高<sup>[16]</sup>。为此,本文将花授粉算法与细菌觅食优化算法相结合,提出了 BFO-FPA 优化算法,针对 BFO 算法趋化过程中的游动运算采用了 FPA 算法优化,提高了 BFO 算法的收敛速度,并增强了 FPA 算法的全局搜索能力,BFO-FPA 算法参与整定 ADRC-LADRC 控制器参数的示意图如图 7 所示。

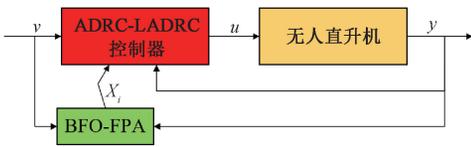


图 7 BFO-FPA 算法与 ADRC-LADRC 控制系统相结合

Fig. 7 BFO-FPA algorithm combined with the ADRC-LADRC control system

### 1) 参数初始化

BFO-FPA 算法需对迁移次数  $Ned$ 、繁殖次数  $Nre$ 、趋化次数  $Nc$ 、迁移概率  $Ped$ 、切换概率  $Pd$  等参数进行初始化。

### 2) 细菌位置初始化

细菌位置初始化即为 ADRC-LADRC 控制器参数的初始化。位置初始化和细菌适应度  $J$  如下:

$$X = x_{\min} + rand(x_{\max} - x_{\min}) \quad (29)$$

$$J = \sum_{i=1}^H \int_0^{\infty} t \cdot \left| \frac{e_i(t)}{Q_i(t)} \right| dt \quad (30)$$

式中:  $rand$  为  $[0,1]$  的随机数;  $x_{\min}$  和  $x_{\max}$  分别为参数的上下边界;  $e_i(t)$  为控制系统的期望输入与实际输出的差值;  $H$  表示控制系统的回路个数;  $Q_i(t)$  为控制回路的输入信号。

### 3) 趋化循环

首先进行翻转,更新细菌位置:

$$P(i, j + 1, k, l) = P(i, j, k, l) + C(i) \cdot \mu(i) \quad (31)$$

$$\mu(i) = \frac{(i)}{\sqrt{T(i) \Delta(i)}} \quad (32)$$

式中:  $C(i)$  为所选方向的步长,  $(i)$  是在方向变化中产生的任意方向向量;  $\mu(i)$  为方向调整后选取的单位步长向量;  $P(i, j, k, l)$  表示第  $i$  个细菌的空间载体位置,即处于第  $j$  个趋化循环、第  $k$  个繁殖循环和第  $l$  个迁移循环。若翻转后细菌的适合度值降低,则继续在翻转后的方向上游动,否则游动不变,游动算子采用 FPA 算法,在当前细菌种群中寻找最优解  $g_*$  及其适应度值  $f(g_*)$ , 如果  $rand < Pd$ , 则通过式 (33) 全局最优解搜索进行异花授粉, 否则通过式 (35) 局部最优解搜索进行自花授粉。

$$x_i^{j+1} = x_i^j + L(x_i^j - g_*) \quad (33)$$

$$L \sim \frac{\lambda \cdot \Gamma(\lambda) \cdot \sin(\pi\lambda/2)}{\pi} \cdot \frac{1}{s^{1+\lambda}}, s \gg s_0 \gg 0 \quad (34)$$

$$x_i^{j+1} = x_i^j + \varepsilon_h \cdot (x_{im}^j - x_{in}^j) \quad (35)$$

式中:  $x_i^j$  为花粉  $i$  在第  $j$  次迭代中的位置;  $L$  为授粉强度,服从 Levy 分布的随机步长;  $\Gamma(\lambda)$  为标准伽马函数;  $\varepsilon_h$  为  $[0,1]$  分布均匀的随机数;  $x_{im}^j$  和  $x_{in}^j$  是来自同一花粉在不同时刻的两个花粉位置。

## 3 试验设计与测试

### 3.1 BFO-FPA 参数整定验证

通过将 ALIGN-470 与 ALIGN-550 级无人直升机分别固定在地面调试架进行实验,遥测输入角度控制指令来验证 BFO-FPA 算法参数整定效果。图 8 所示为课题组自研无人直升机飞行测试平台,该平台可分别独立实现俯仰、横滚、偏航以及高度 4 自由度调试。首先通过输入期望控制量分析无人直升机在地面时姿态响应特性。表 2 为 BFO-FPA 算法的初始化参数,BFO-FPA 和 BFO 算法的姿态响应过程曲线如图 9 所示。表 3 为两种优化算法的参数整定对比结果,由图 9 可知,BFO 算法在俯仰和横滚回路中具有明显的抖动,BFO-FPA 算法在姿态回路中具有更短的调整时间,优于单独使用 BFO 算法参数寻优效果。

### 3.2 轨迹跟踪仿真与结果分析

首先通过对比 ALIGN-550 级无人直升机在 ADRC-LADRC 控制器、ADRC 控制器以及 PID 控制器算法下螺

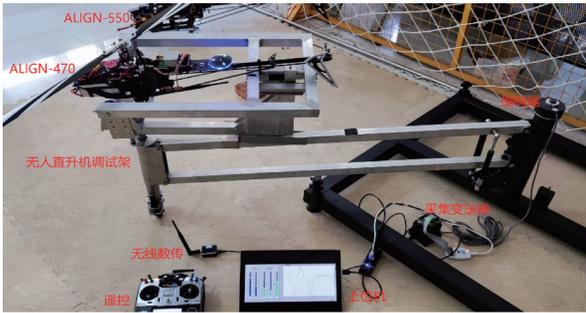


图8 无人机直升机飞行调试系统

Fig. 8 Unmanned helicopter flight debugging system

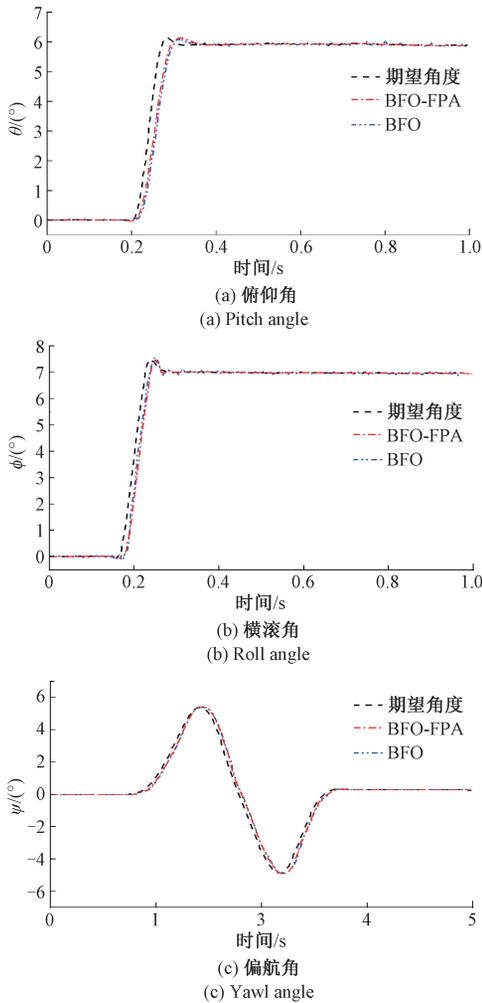


图9 不同参数寻优算法下姿态响应曲线

Fig. 9 Attitude response curves with different parameter optimization

表2 BFO-FPA 算法参数

Table 2 BFO-FPA algorithm parameters

参数	描述	取值
$NG$	迭代次数	400
$sizepop$	种群规模	20
$Ned$	迁移次数	5
$Nc$	趋化次数	50
$Nre$	繁殖次数	10
$Ped$	迁移概率	0.25
$Pd$	游动概率	0.6

表3 BFO-FPA 与 BFO 参数寻优结果对比

Table 3 Comparison of BFO-FPA and BFO parameter optimization results

姿态角	参数	BFO-FPA	BFO
横滚角	$r$	9.2	8.7
	$h$	0.01	0.01
	$\beta_{01}$	31	35
	$\beta_{02}$	7.6	6.4
俯仰角	$K$	[319 497]	[409 418]
	$r$	7.7	8.1
	$h$	0.01	0.01
	$\beta_{01}$	72	54
	$\beta_{02}$	12.5	7.8
	$K$	[247 195]	[106 126]

表4 无人机直升机主要参数

Table 4 Main parameters of unmanned helicopter

参数	取值
机体重量/kg	7.5
主桨转速/( $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ )	160
尾桨转速/( $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ )	750
机体转动惯性系数/( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ )	0.029
$I_x$ 惯性系数/( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ )	0.215
$I_y$ 惯性系数/( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ )	0.133
$I_z$ 惯性系数/( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ )	0.181

旋爬升飞行轨迹来验证轨迹跟踪控制器的跟踪精度与鲁棒性,本文主要研究俯仰横滚位置跟踪精度,因此采用锁尾航向保持简化控制。表4为实验所用ALIGN-550级无人直升机物理模型参数,实际目标跟踪轨迹中加入一定

强度高斯噪声代表外部扰动,三维轨迹跟踪结果如图10所示,由图10可知,3种控制器均可基本跟踪目标飞行轨迹,ADRC-LADRC、ADRC、PID经计算后得到控制器的轨迹跟踪误差分别为3.2%、6.6%、8.9%。

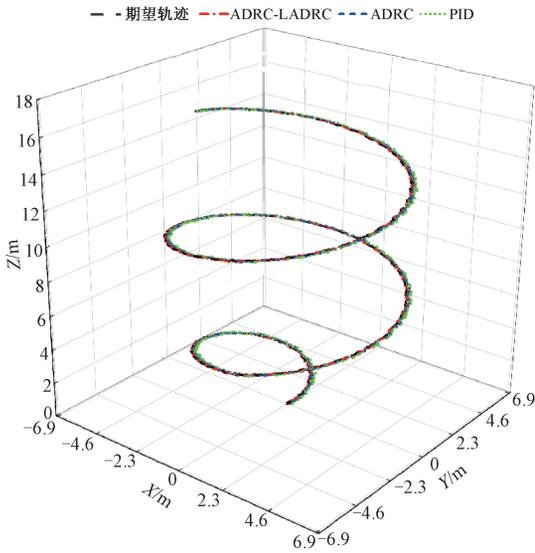


图 10 3D 轨迹跟踪响应

Fig. 10 3D trajectory tracking response

当无人直升机模型只受外部干扰时,表 5 为 BFO-FPA 算法整定的 ADRC-LADRC 混合控制器参数值,各个轴的锁尾螺旋轨迹跟踪控制过程如图 11 所示,由图可知,在航向保持飞行状态下无人直升机飞行轨迹的曲率变化越大,ADRC 和 PID 控制器的误差越大,ADRC-LADRC 控制器的控制效果优于 ADRC 和 PID 控制器,具有更快的跟踪速度和更好的控制精度,实现了高精度的锁尾螺旋轨迹跟踪控制。

控制器各参数值保持不变,适当增强外部高斯噪声扰动,表 6 为对比实验所用 ALIGN-470 级无人直升机物理参数。新构建的锁尾螺旋爬升轨迹跟踪控制过程如图 12 所示,结果更清楚地表明了被控模型物理参数发生变化时 ADRC-LADRC 混合控制器仍能保证良好的轨迹跟踪精度,ADRC 与 PID 控制器跟踪控制误差较大,随着轨迹跟踪误差积分累加,轨迹将逐渐发散,综上所述说明 ADRC-LADRC 混合控制器具有更强的抗扰动性和鲁棒性,能够有效保障无人直升机轨迹跟踪控制精度。

表 5 ADRC-LADRC 混合控制器参数值

Table 5 ADRC-LADRC hybrid controller parameter values

姿态环	参数	取值	速度环	参数	取值	位置环	参数	取值
横滚角	$w_{01}$	486	Y 轴	$\beta_{e1}$	98	Y 轴	$\beta_{x1}$	89
	$w_{c1}$	4.8		$\beta_{e2}$	4.1		$\beta_{x2}$	5.1
	$b_{01}$	9.1		$\beta_{e01}$	1.9		$\beta_{x01}$	1.1
俯仰角	$w_{02}$	1 263	X 轴	$\beta_{e1}$	62	X 轴	$\beta_{y1}$	84
	$w_{c2}$	3.9		$\beta_{e2}$	3.2		$\beta_{y2}$	5.8
	$b_{02}$	2.4		$\beta_{e01}$	1.1		$\beta_{y01}$	1.1
偏航角	$w_{03}$	284	Z 轴	$\beta_{e1}$	184	Z 轴	$\beta_{z1}$	98
	$w_{c3}$	3.8		$\beta_{e2}$	4.8		$\beta_{z2}$	1.9
	$b_{03}$	0.26		$\beta_{e01}$	2.1		$\beta_{z01}$	3.1

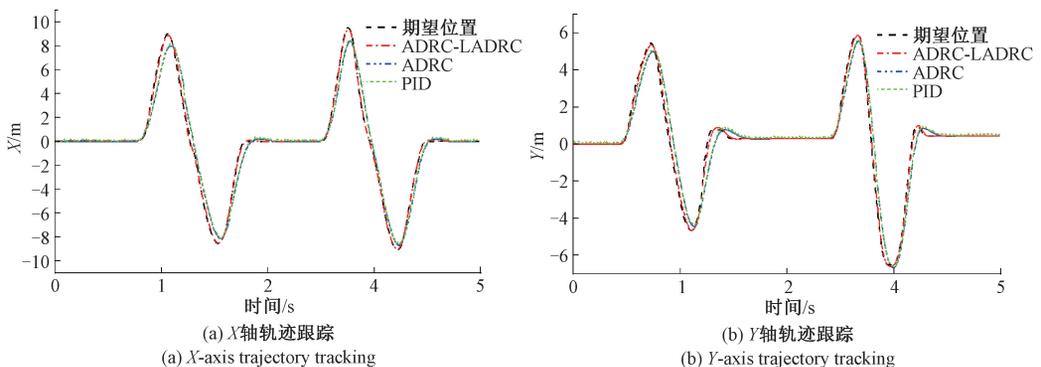


图 11 三轴轨迹跟踪响应

Fig. 11 Trajectory tracking response in X, Y and Z

表6 改变无人直升机内部物理参数

Table 6 Change the internal physical parameters of the unmanned helicopter

参数	取值
机体重量/kg	6.2
主桨转速/(rad·s <sup>-1</sup> )	140
尾桨转速/(rad·s <sup>-1</sup> )	600
机体转动惯性系数/(kg·m <sup>2</sup> )	0.019
$I_x$ 惯性系数/(kg·m <sup>2</sup> )	0.158
$I_y$ 惯性系数/(kg·m <sup>2</sup> )	0.093
$I_z$ 惯性系数/(kg·m <sup>2</sup> )	0.104

## 参考文献

- [1] 范云生, 何智平, 曹健, 等. 四旋翼飞行器非线性轨迹跟踪控制[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(10): 247-256.  
FAN Y SH, HE ZH P, CAO J, et al. Nonlinear trajectory tracking control of quadrotor aircraft [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(10): 247-256.
- [2] 叶杨, 徐志伟, 陈仁文, 等. 基于KPCA和SVM的直升机旋翼桨叶损伤源定位[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(4): 118-123.  
YE Y, XU ZH W, CHEN R W, et al. Damage source location of helicopter rotor blade based on KPCA and SVM [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(4): 118-123.
- [3] SHI X, CHENG Y, YIN C, et al. Adaptive fractional-order SMC controller design for unmanned quadrotor helicopter under actuator fault and disturbances [J]. IEEE Access, 2020, 8: 103792-103802.
- [4] WANG Z, GONG Z, YANG Y, et al. Guidance law for autonomous takeoff and landing of unmanned helicopter on mobile platform based on asymmetric tracking differentiator[J]. Mathematics, 2022, 11(1): 66.
- [5] KAPOOR D, DEB D, SAHAI A, et al. Adaptive failure compensation for coaxial rotor helicopter under propeller failure[C]. 2012 American Control Conference (ACC), IEEE, 2012: 2539-2544.
- [6] PATEL R, DEB D, MODI H, et al. Adaptive backstepping control scheme with integral action for quanser 2-DOF helicopter [C]. 2017 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI), IEEE, 2017: 571-577.
- [7] WANG Z, ZU R, DUAN D, et al. Tuning of ADRC for QTR in transition process based on NBPO hybrid algorithm[J]. IEEE Access, 2019, 7: 177219-177240.
- [8] MAHMOODABADI M J, BABAK N R. Robust fuzzy linear quadratic regulator control optimized by multi-objective high exploration particle swarm optimization for a 4 degree-of-freedom quadrotor[J]. Aerospace Science and Technology, 2020, 97: 105598.
- [9] ABDUL-ADHEEM W R, IBRAHEEM I K, HUMAIDI A J, et al. Model-free active input-output feedback linearization of a single-link flexible joint manipulator: An improved active disturbance rejection control approach[J]. Measurement and Control, 2021, 54(5-6): 856-871.
- [10] ABDUL-ADHEEM W R, AZAR A T, IBRAHEEM I K, et al. Novel active disturbance rejection control based on nested linear extended state observers [J]. Applied

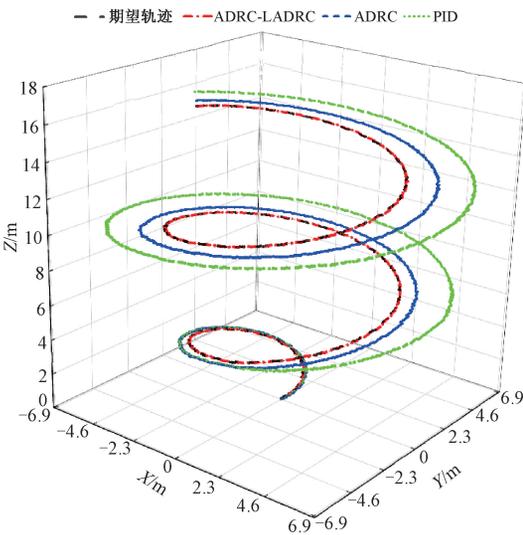


图12 3D轨迹跟踪响应(参数改变后)

Fig. 12 3D trajectory tracking response after the parameter are changed

## 4 结 论

在进行无人直升机轨迹跟踪控制系统设计时难以精确建立系统内部模型以及定量预估环境外部的不确定性扰动,利用ADRC技术设计轨迹跟踪控制器可以有效解决上述问题,为进一步增强未精确建模的无人直升机轨迹跟踪控制抗扰动能力,本文提出了一种基于BFO-FPA算法参数寻优的轨迹跟踪ADRC-LADRC混合自抗扰控制系统,试验结果表明通过BFO-FPA算法进行参数寻优后的ADRC-LADRC小型无人直升机轨迹跟踪控制器具有更好的抗干扰能力与鲁棒性。但实验时有待进一步验证非锁尾状态下轨迹跟踪飞行控制,实际无人直升机航向改变时轨迹跟踪飞行亦会影响姿态响应。

- Sciences, 2020, 10(12): 4069.
- [11] 周向阳, 时延君. 惯性稳定平台单神经元/PID 自适应复合控制与参数优化[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(11): 189-196.  
ZHOU X Y, SHI Y J. Single neuron/PID adaptive compound control and parameter optimization of inertial stable platform [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(11): 189-196.
- [12] YANG X S. Flower pollination algorithm for global optimization [C]. Unconventional Computation and Natural Computation: 11th International Conference, UCNC 2012, 2012: 240-249.
- [13] 郭庆, 惠晓滨, 张贾奎, 等. 多模函数优化的改进花朵授粉算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44(4): 828-840.  
GUO Q, HUI X B, ZHANG J K, et al. Improved flower pollination algorithm based on multimodal function optimization[J]. Journal of Beihang University, 2018, 44(4): 828-840.
- [14] 刘二辉, 姚锡凡, 陶韬, 等. 基于改进花授粉算法的共融 AGV 作业车间调度[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(9): 2219-2236.  
LIU ER H, YAO X F, TAO T, et al. Co-integrated AGV job shop scheduling based on improved flower pollination algorithm [J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2019, 25(9): 2219-2236.
- [15] PASSINO K M. Biomimicry of bacterial foraging for distributed optimization and control [J]. IEEE Control Systems Magazine, 2002, 22(3): 52-67.
- [16] 王雪松, 程玉虎, 郝名林. 基于细菌觅食行为的分布估计算法在预测控制中的应用[J]. 电子学报, 2010, 38(2): 333-339.  
WANG X S, CHENG Y H, HAO M L. Application of distribution estimation algorithm based on bacterial foraging behavior in predictive control [J]. Electronic Journal, 2010, 38(2): 333-339.

### 作者简介



卢艳军(通信作者), 1990 年于西安公路学院获得学士学位, 2000 年于东北大学获得硕士学位, 2005 年于东北大学获得博士学位, 现为沈阳航空航天大学教授, 主要研究方向为复杂系统故障诊断技术、飞行器控制技术和测试技术。

E-mail: shlyj2004@126.com

**Lu Yanjun** (Corresponding author) received her degree from Xi'an Highway Transportation University in 1990, M. Sc. degree and Ph. D. degree both from Northeastern University in 2000 and 2005, respectively. She is currently a professor at Shenyang Aerospace University. Her main research interests include fault diagnosis technology of complex system, flight control of aircrafts and testing technology.