

基于改进 DBO 的四旋翼无人机自抗扰参数整定

雷千龙¹ 侯 硕¹ 侯 义¹

LEI Qianlong HOU Shuo HOU Yi

摘 要

针对自抗扰控制器应用于控制四旋翼无人机时参数繁琐且难以达到最优等问题,使用改进的蜣螂优化算法来整定自抗扰控制器参数。首先对自抗扰控制器进行分析,确定其中待整定参数,对四旋翼无人机的六个自由度分别采用改进的蜣螂算法优化整定来确定其参数;其次对传统 PID 控制器、自抗扰控制器以及基于改进蜣螂优化算法参数整定的自抗扰控制器,在四旋翼无人机的轨迹跟踪问题上测试对比控制器的跟踪稳定性,抗干扰能力等。结果表明,基于改进蜣螂优化算法优化后的自抗扰控制器,收敛速度最快,拥有较好鲁棒性。

关键词

四旋翼; 自抗扰控制器; 蜣螂算法; PID; 轨迹跟踪

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.01.041

0 引言

四旋翼无人机能够执行多种人力无法完成的任务,由于其具有低成本,高机动性和多功能性等优势,在各行各业中得到应用。随着执行任务的多样化,对四旋翼无人机的稳定性和应对各种情况的抗干扰性能要求也随之提高,并且四旋翼具有多变量、欠驱动、非线性、强耦合等特点,控制四旋翼飞行的稳定性尤其重要,其稳定性除了受到硬件本身的影响外,主要受到控制算法的影响。

文献[1]提出了一种分数阶模糊粒子群优化(FOFPSO)算法优化四旋翼无人机的 ADRC 参数,将模糊粒子群优化算法(FPSO)与自适应遗传算法-粒子群优化算法(AGA-PSO)进行对比,并将设计的控制器部署到硬件平台上。文献[2]利用非线性函数的滤波特性与相位补偿机理设计调相补偿器,以此解决 NLADRC 应用于无人机姿态跟踪控制响应相位滞后的问题。文献[3]提出了一种新的双闭环主动干扰抑制广义预测控制(ADRC-GPC)。考虑到测量噪声,ADRC-GPC 控制策略比主动干扰抑制控制具有更好的动态性能和对不确定性和外部干扰的鲁棒性。

本文采用融合黄金正弦与其他多种策略的蜣螂优化算法(GDBO)与自抗扰(ADRC)相结合,提出了一种基于 GDBO 的 ADRC 参数整定优化算法,设计相应的控制器参数,建立相关的数学模型并在设定的轨迹上进行传统 PID 控制器、自抗扰控制器以及 GDBO 优化的自抗扰控制器进行跟踪效果对比,验证优化后自抗扰控制器的优越性。

1 四旋翼无人机动力学建模

采用牛顿-欧拉方程建立动力学公式,四旋翼无人机由 4 个电机提供所需动力,电机转速决定着旋翼的转速,通过转速变换实现对位置和姿态的调整^[4]。引入地球固连坐标系和机体坐标系:地球固连坐标系(O_e, X_e, Y_e, Z_e)为惯性坐标系,四旋翼起飞位置为 O_e , $X_e O_e Y_e$ 为水平坐标轴, $O_e Z_e$ 垂直地面向下。机体坐标系(O_b, X_b, Y_b, Z_b), O_b 为四旋翼的重心位置。

将四旋翼的 4 个旋翼转速定义为 $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3, \Omega_4$, 4 个旋翼产生的总的上升力为 u_1 , 绕 $O_b X_b, O_b Y_b, O_b Z_b$ 所产生的滚转力矩 u_1 、俯仰力矩 u_2 及偏航力矩 u_3 。

$$\begin{aligned} u_1 &= \sum_{i=1}^4 F_i = K_L \sum_{i=1}^4 \Omega_i^2, \\ u_2 &= l K_L (\Omega_2^2 - \Omega_4^2), \\ u_3 &= l K_L (-\Omega_1^2 - \Omega_3^2), \\ u_4 &= K_p (\Omega_1^2 - \Omega_2^2 + \Omega_3^2 - \Omega_4^2) \end{aligned} \quad (1)$$

式中: K_L 为升力系数; Ω_i 为旋翼转速, l 为 O_b 到旋翼中心的距离。假设无人机为刚体,其六自由度动力学模型为:

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= u_1 (\sin \theta \cos \phi \cos \psi + \sin \phi \sin \psi) / m + d_1 \\ \ddot{y} &= u_1 (\sin \theta \cos \phi \sin \psi - \sin \phi \cos \psi) / m + d_2 \\ \ddot{z} &= u_1 (\cos \phi \cos \theta) / m - g + d_3 \\ \ddot{\phi} &= \dot{\theta} \psi \left(\frac{J_{yy} - J_{zz}}{J_{xx}} \right) + \frac{K_L}{J_{xx}} \tau_x + d_4 \\ \ddot{\theta} &= \dot{\phi} \psi \left(\frac{J_{zz} - J_{xx}}{J_{yy}} \right) + \frac{K_L}{J_{yy}} \tau_y + d_5 \\ \ddot{\psi} &= \dot{\theta} \phi \left(\frac{J_{yy} - J_{xx}}{J_{zz}} \right) + \frac{K_L}{J_{zz}} \tau_z + d_6 \end{aligned} \quad (2)$$

式中: d_i 为四旋翼无人机受到的总扰动。对动力学模型进行

简化并加入虚拟控制参数,对模型进行线性化处理,使无人机数学模型由欠驱动变为全驱动。假设虚拟控制量为:

$$\begin{aligned} u_x &= u_1 (\cos \phi \cos \psi \sin \theta + \sin \phi \sin \psi) / m \\ u_y &= u_1 (\cos \phi \sin \psi \sin \theta - \sin \phi \cos \psi) / m \\ u_z &= u_1 (\cos \phi \cos \theta) / m - g \end{aligned} \quad (3)$$

对 $u_x \sin \psi - u_y \cos \psi$ 并反求解得期望的滚转角, 对 $u_x \cos \psi + u_y \sin \psi$ 并反求解为得期望的俯仰角:

$$\begin{aligned} \phi_d &= \arcsin(m(u_x \sin \psi - u_y \cos \psi) / u_1) \\ \theta_d &= \arcsin(m(u_x \sin \psi + u_y \cos \psi) / (u_1 \cos \phi)) \end{aligned} \quad (4)$$

四旋翼无人机轨迹跟踪结构控制系统有五部分组成, 分别为期望轨迹、位置控制器、姿态解算器、姿态控制器、无人机模型五部分组成, 其中期望的轨迹包括期望的 x 轴位置 x_d 、 y 轴位置 y_d 、 z 轴位置 z_d 、期望的偏航角 ψ_d , 将期望位置与实际位置输入给位置环的 3 个 ADRC 算出 u_x 、 u_y 、 u_z , 通过姿态解算器解算得到期望的俯仰角 θ_d 和滚转角 ϕ_d 以及总的上升力 u_1 。姿态环由实际的 3 个角度与期望的角度输入设计的姿态控制器中得到 3 个通道的控制量 u_2 、 u_3 、 u_4 , 将 u_1 、 u_2 、 u_3 、 u_4 输入到四旋翼无人机模型当中, 实现对系统的双闭环多参数控制。

2 基于 GDBO 的 ADRC 参数整定优化

2.1 ADRC 算法

由韩京清^[5]研究员提出的自抗扰 ADRC, 原理为抑制系统中的多种扰动, 其中包括期望与实际的误差、外部扰动、参数的突变以及模型本身的误差。核心思想是将系统中的多源扰动视为集总扰动, 通过一个扩张状态观测器 ESO 来观测估计总扰动, 通过所获取的估计值补偿扰动和消除不确定性, 实现对系统的精准控制。ADRC 主要由跟踪微分器、扩张状态观测器及非线性状态误差反馈控制率三部分组成。

(1) 跟踪微分器

跟踪微分器 TD 通过输入信号估计系统的状态, 对输入信号进行滤波, 消除噪声和高频干扰, 并同时微分, 得到微分信号。ADRC 解决了 PID 控制中一阶微分和二阶微分不能准确趋近输入信号的问题^[6]。跟踪微分器的离散形式为:

$$\begin{cases} x_1(k+1) = x_1(k) + h x_2(k) \\ x_2(k+1) = x_2(k) + r_0 u(k) \end{cases} \quad |u(k)| \leq r_0 \quad (5)$$

(2) 扩张状态观测器

扩张状态观测器 ESO 为 ADRC 的核心环节, 它的核心思想为将系统的未知扰动视为一个额外的状态变量, 并将其纳入状态观测器的设计中, 提高观测器的阶数, 利用系统不断输入和输出信息, 在线估计系统状态和扰动^[7]。在二阶控制系统中, 非线性状态观测器的公式为:

$$\begin{cases} \varepsilon = z_1 - y \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_{01} \varepsilon \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_{02} \text{fal}(\varepsilon, a_1, \delta) + b_u \\ \dot{z}_3 = -\beta_{03} \text{fal}(\varepsilon, a_2, \delta) \end{cases} \quad (6)$$

式中: δ 为连续幂函数线段的区间长度, δ 取值一般为 0.01; β_{01} 、 β_{02} 、 β_{03} 为观测器的增益, 也为本文需要优化的 3 个参数; a_1 需小于 a_2 , $a_1=0.5$, $a_2=0.25$, 且 $\text{fal}(\varepsilon, a, \delta)$ 为非线性函数, 表现形式为连续幂次函数:

$$\text{fal}(\varepsilon, a, \delta) = \begin{cases} \frac{\varepsilon}{\delta^{(1-a)}}, & |\varepsilon| \leq \delta \\ \text{sign}(\varepsilon) |\varepsilon|^a, & |\varepsilon| > \delta \end{cases} \quad (7)$$

(3) 非线性反馈控制率

非线性反馈控制率 NLSEF 利用系统状态的非线性函数计算控制信号, 更适用于非线性系统^[8]。利用 TD 产生的跟踪信号 v_1 、 v_2 与 ESO 产生的状态变量估计值 z_1 、 z_2 反馈求差, 获得误差状态量 e_1 和 e_2 , 通过误差量补偿扰动。表现形式为:

$$\begin{aligned} e_1(k) &= v_1(k) - z_1(k) \\ e_2(k) &= v_2(k) - z_2(k) \\ u_0(k) &= \beta_1 \text{fal}(e_1(k), a_4, \delta_2) + \beta_2 \text{fal}(e_2(k), a_5, \delta_2) \\ u(k) &= u_0(k) - \frac{z_3(k)}{b_0} \end{aligned} \quad (8)$$

式中: β_1 与 β_2 为增益参数同时为本文需要优化整定的参数, 作用于 PID 的 k_p 和 k_i 作用相同。

2.2 DBO 算法

蜣螂优化算法 (DBO) 是一种新型群智能优化算法^[9], 其通过蜣螂的生存繁衍行为, 即蜣螂的滚球、跳舞、觅食、繁殖和偷窃五种行为。蜣螂种群分为滚球蜣螂、繁育蜣螂、小蜣螂和偷窃蜣螂。

2.2.1 滚球蜣螂

蜣螂在滚球时有无障碍模式和有障碍物模式。蜣螂在滚球前行无障碍物时会利用太阳光照寻找方向, 确定滚球的方向。当蜣螂推球时遇到障碍物无法前进时, 它需要进行跳舞行为改变方向来确定能前进的方向, 更新公式为:

$$x_i(t+1) = x_i(t) + \tan(\theta) |x_i(t) - x_i(t-1)| \quad (9)$$

2.2.2 蜣螂繁殖

雌性蜣螂将粪球滚到安全的地方并隐藏起来, 并在安全区域内进行产卵, 产卵的区域会随着迭代次数动态调整, 育雏球的位置也随着迭代次数不断更新, 更新公式为:

$$B_i(t+1) = x_{\text{best}}(t) + b_1 \times (B_i(t) - \text{Lb}^*) + b_2 \times (B_i(t) - \text{Ub}^*) \quad (10)$$

式中: $B_i(t+1)$ 为第 i 个育雏球在第 t 次迭代时的位置; b_1 、 b_2 为 $1 \cdot D$ 的独立随机向量。

2.2.3 蜣螂觅食

一些孵化出来的小蜣螂需要寻找食物，其更新公式为：

$$x_i(t+1)=x_i(t)+C_1\times(x_i(t)-Lb^l)+C_2\times(x_i(t)-Ub^l) \quad (11)$$

式中： $R=1-t/T$ ； Lb^l 和 Ub^l 为小蜣螂觅食区域的下界和下界。

2.2.4 蜣螂偷窃

蜣螂种群中有些蜣螂会选择偷窃其他蜣螂的食物，偷窃行为的更新公式为：

$$x_i(t+1)=x_{lbest}(t)+s\times g\times(|x_i(t)-x_{lbest}(t)|+|x_i(t)-x_{lbest}(t)|) \quad (12)$$

式中： g 为服从正态分布的 $1\cdot D$ 的随机向量； s 为一个常数设定值； x_{lbest} 为当前种群的全局最优位置； x_{lbest} 为种群局部最优位置。

2.3 GDBO 算法

对蜣螂优化算法的 4 种行为改进提高算法的搜索能力和种群多样性，将改进后的蜣螂优化算法命名为 GDBO。

2.3.1 跳舞行为改进

为了提高跳舞行为的搜索鲁棒性，引入黄金正弦策略 Gold-SA^[10]，Gold-SA 能够使算法遍历所有正弦函数的值，能够在跳舞时寻找更优方向，其公式为：

$$\begin{aligned} x_i(t+1) &= x_i(t)|\sin R_1|-R_2\sin R_1|\theta_1P_i(t)-\theta_2X_i(t)| \\ \theta_1 &= -\pi+2\pi(1-\lambda) \\ \theta_2 &= -\pi+2\pi\lambda \end{aligned} \quad (13)$$

式中： t 为当前迭代次数； $X_i(t+1)$ 为迭代 t 次时个体 i 的位置； R_1 为 $[0, 2\pi]$ 内随机值； R_2 为 $[0, \pi]$ 内随机值； $P_i(t)$ 为最优位置。 $\lambda=0.618$ 称为黄金分割数。

2.3.2 觅食行为改进

为了提高小蜣螂的觅食搜索能力和增加搜索路径多样性，在算法后期保证较好的搜索能力，引入螺旋搜索算法同时动态调整螺旋搜索形状将公式改进为：

$$\begin{aligned} x_i(t+1) &= x_i(t)+\beta_1\times(x_i(t)-Lb^l)+\beta_2\times(x_i(t)-Ub^l) \\ \beta &= e^{al}\times\cos(2\pi a) \\ l &= e^{4\cos(\frac{l-t}{l_{max}}+1)\pi} \end{aligned} \quad (14)$$

式中： a 为 0~1 的随机数； l 为随迭代次数动态变化的值。

2.3.3 偷窃行为改进

偷窃行为会根据目前最优个体更新位置，若此时最优位置已处于局部最优则有可能造成停止迭代，加入 levy 飞行策略^[11]使偷窃行为行为遍布更广的搜索空间。偷窃公式更新为：

$$x_i(t+1)=levy(x_{lbest}(t))+C_1\times|x_i(t)-x_{lbest}(t)|+|x_i(t)-w^*x_{lbest}(t)| \quad (15)$$

式中： w 为动态惯性权重。

2.4 基于 GDBO 的 ADRC 参数优化

自抗扰参数中 r 、 h 、 h_0 、 δ 、 a_{01} 、 a_{02} 、 β_1 、 β_2 、 β_{01} 、 β_{02} 、 β_{03} 、 b 、 b_0 为控制器参数。 r 取值为 100； $h_0=0.01$ ， h 的值与 h_0 相同； δ 取值为 2； $a_1=0.5$ ， $a_2=0.25$ ； b 与 b_0 大小近似相等取 $b=b_0=0.8$ 。除此之外 β_1 、 β_2 、 β_{01} 、 β_{02} 、 β_{03} 为 GDBO 所需要优化的参数。算法初始化的参数中，种群数量为 30，种群划分比例为 6:6:7:11，Tmax 为最大迭代次数设置为 50， λ 为无障碍模式的比例， β_1 、 β_2 、 β_{01} 、 β_{02} 、 β_{03} 五个参数优化的上下界为 $[0\sim500, 0\sim500, 0\sim12\ 000, 0\sim12\ 000, 0\sim12\ 000]$ 。

3 仿真实验

3.1 仿真参数

除控制器的参数外，参数 m 、 g 、 l 、 J_{xx} 、 J_{yy} 、 J_{zz} 、 K_L 及 K_t 四旋翼无人机结构参数如表 1 所示。

表 1 系统结构参数表

参数符号	参数意义	数值
m	无人机的质量	0.85 kg
g	重力加速度	9.8 m/s ²
l	旋翼中心与质心之间的距离	0.023 m
J_{xx}	x 轴转动惯量	0.0035 kg·m
J_{yy}	y 轴转动惯量	0.0035 kg·m
J_{zz}	z 轴转动惯量	0.0063 kg·m ²
K_L	升力系数	2.56×10^{-5}
K_t	转矩系数	1.2×10^{-6}

在 MATLAB/Simulink 软件中搭建基于改进蜣螂优化算法的自抗扰控制器和 PID 控制器设计的四旋翼无人机模型，进行对比实验。

3.2 动力学仿真

通过动力学仿真实验对传统 PID、ADRC 以及基于算法改进的 ADRC 三个控制器效果进行对比，设置的参数如表 2 所示，经过算法优化更新后的参数值如表 3 所示。

表 2 ADRC 参数表

	参数	俯仰角	横滚角	偏航角	x 轴	y 轴	z 轴
ESO	β_{01}	30	30	30	24	24	24
	β_{02}	300	300	300	192	192	192
	β_{03}	1000	1000	1000	512	512	512
NLSEF	β_1	900	900	8800	3	3	10
	β_2	2900	2900	11 600	20	20	30

表 3 优化后 ADRC 参数表

参数	俯仰角	横滚角	偏航角	x 轴	y 轴	z 轴
β_{01}	35.6	35.7	28.6	22.5	24.8	19.6
β_{02}	348.8	349.8	338.7	200.3	209.8	188.9
β_{03}	980.7	1 013.2	1 022.6	511.6	498.9	510.6
β_1	887.0	901.3	9 034.2	7.2	5	16
β_2	3 031.1	2 998.4	11 680.8	18.7	18.8	32.2

3.3 轨迹跟踪实验

设计轨迹跟踪实验进一步测试控制器的性能，仿真时间 30 s，设定偏航角为 0°，设定的轨迹为：

$$\begin{cases} x_d = 4 \times \sin(0.5\pi t) \\ y_d = 4 \times \sin(0.5\pi t) \cos(0.5\pi t) \\ z_d = 0.2t \end{cases} \quad (16)$$

基于改进 GDBO 算法的自抗扰控制器在对四旋翼无人机进行跟踪时，大多数情况下相比于 ADRC 和传统的 PID 控制器响应速度更快，超调量更小，控制性能更优。最终的轨迹跟踪结果图如图 1 所示。GDBO-ADRC 为图中的黑色虚线，由图 1 可知基于 GDBO 的 ADRC 的飞行轨基本与期望轨迹重合，具有较好的跟踪效果。PID 控制器控制的四旋翼无人机的飞行轨迹超调量较大，跟踪的速度相对较。

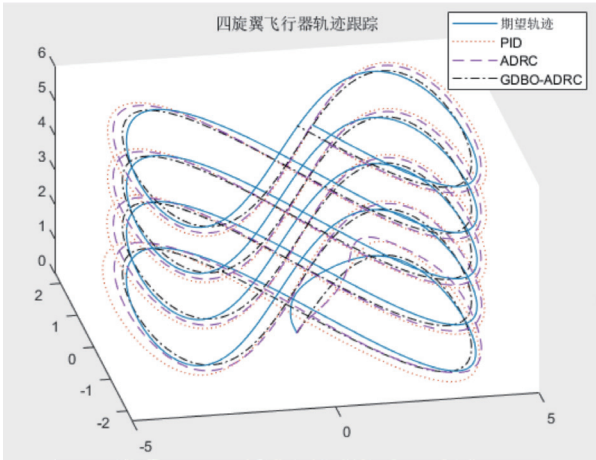


图 1 四旋翼无人机螺旋跟踪曲线

4 结语

本文采用 GDBO 与 ADRC 相结合，提出了一种基于 GDBO 的 ADRC 参数整定优化算法，设计相应的控制器参数，建立相关的数学模型并在设定的轨迹上进行传统 PID 控制器、自抗扰控制器以及 GDBO 优化的自抗扰控制器进行跟踪效果对比，验证优化后自抗扰控制器的优越性。目前优化 ADRC 参数相比于其他两种控制器来说所需要花费更长的时间来迭代更新优化，也是后续需要解决的问题。

参考文献：

[1] ZHANG Q, WEI Y X, LI X.Quadrotor attitude control by fractional-order fuzzy particle optimization-based rejection control[J].Applied sciences , 2021,11(24): 11583.

[2] 周浩, 暴小鹏, 张洪刚 .UAV 自抗扰控制的调相补偿改进设计与抑扰实现 [J/OL]. 兵工学报 ,1-11[2024-07-16].http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2176.TJ.20240219.1333.004.html.

[3] CHENG Y, DAI L Y, LI A, et al. Active disturbance rejection generalized predictive control of a quadrotor uav via quantitative feedback theory[J]. IEEE access, 2022, 10(4): 37912-37923.

[4] ZHAO K, SONG J, HU Y L, et al. Deep deterministic policy gradient-based active disturbance rejection controller for quad-rotor UAVs[J]. Mathematics, 2022, 10(15): 2826.

[5] 韩京清. 从 PID 技术到“自抗扰控制”技术 [J]. 控制工程, 2002(3): 13-18.

[6] 陈城, 刘云平, 鲁倍辰, 等. 基于 IBSA 的四旋翼 ADRC 参数优化 [J/OL]. 控制工程 ,1-11[2024-04-15].https://doi.org/10.14107/j.cnki.kzgc.20220746.

[7] 赵振华, 肖亮, 姜斌, 等. 基于扩张状态观测器的四旋翼无人机快速非奇异终端滑模轨迹跟踪控制 [J]. 控制与决策, 2022, 37(9): 2201-2210.

[8] 丁一, 谯超凡, 王世勇, 等. 基于遗传算法优化的四旋翼控制系统研究 [J]. 兵工自动化, 2023, 42 (6): 85-88.

[9] 韦为, 吴艳, 李芳, 等. 基于改进自抗扰的四旋翼无人机轨迹跟踪控制 [J]. 电工电能新技术, 2023, 42 (5): 1-13.

[10] 张宇轩, 贺勇. 基于自适应状态观测器的无人机自耦 PD 轨迹跟踪 [J]. 信息化研究, 2022, 48 (6): 7-13.

[11] 陆佳欢, 曹宇轩, 羊钊, 等. 基于 LSTM 的四旋翼无人机轨迹预测方法 [J]. 哈尔滨商业大学学报 (自然科学版), 2022, 38 (6): 699-704.

【作者简介】

雷千龙（2000—），男，陕西渭南人，硕士研究生，研究方向：无人机控制。

侯硕（1999—），男，陕西渭南人，硕士研究生，研究方向：目标检测及机器学习。

侯义（2001—），男，山东泰安人，硕士研究生，研究方向：嵌入式开发、机器学习。

（收稿日期：2024-09-23）