

基于改进 CPSO 算法的四旋翼无人机 姿态控制参数优化方法

高宏建^{1,2}, 陈霖周廷^{1,2}, 胡建兴^{1,3}, 王文举^{1,2}

(1. 贵州理工学院 航空航天工程学院, 贵阳 550003;

2. 贵州省无人机应急减灾信息化工程研究中心, 贵阳 550003;

3. 中航贵州飞机有限责任公司, 贵州 安顺 561000)

摘要: 针对四旋翼无人机控制器参数较多且难以获得最优整定解等问题, 提出了四旋翼无人机姿态控制参数的改进混沌粒子群优化算法; 采用多维混沌映射函数产生初始化种群, 提高初代种群质量; 提出一种全域模糊扰动+邻域精准扰动的多维组合混沌扰动策略, 可生成优质混沌扰动粒子; 为同时兼顾时频域指标要求, 设计了多性能指标约束条件下的加权性能指标函数, 以确保优化结果能够满足各项指标要求; 另外, 进行了四旋翼无人机姿态控制数字仿真, 统计结果表明改进策略可以产生较优初代种群, 且性能指标在第 4 代即可快速收敛至近似最优解附近, 六自由度仿真验证了改进策略的正确性和有效性。

关键词: 四旋翼无人机; 姿态控制; 参数优化; 多维混沌映射; 组合混沌扰动

Parameter Optimization Method for Quadrotor UAV Attitude Control Based on Improved CPSO Algorithm

GAO Hongjian^{1,2}, CHEN Linzhouting^{1,2}, HU Jianxing^{1,3}, WANG Wenju^{1,2}

(1. School of Aerospace Engineering, Guizhou Institute of Technology, Guiyang 550003, China;

2. Guizhou UAV Emergency Disaster Reduction Information Engineering Research Center,
Guiyang 550003, China;

3. Aviation Industry Corporation of China Guizhou Aircraft Company Limited, Anshun 561000, China)

Abstract: In order to solve the problems of multiple attitude control parameters and difficulty in obtaining optimal tuning solutions for quadrotor UAVs, an improved chaos particle swarm optimization (CPSO) algorithm for the parameters of quadrotor UAV attitude control is proposed. The multi-dimensional chaotic mapping function is used to generate initialized population and improve its quality. A multi-dimensional combinational chaotic disturbance strategy of global fuzzy perturbation and neighborhood precise perturbation is proposed, which can generate high-quality chaotic perturbation particles. In order to take into account the requirements of both time and frequency domain indicators, a weighted performance index function under the constraints of multiple performance indicators is designed to ensure that the optimization results can meet the requirements of various indicators. In addition, the digital simulation of attitude control of quadrotor UAVs is carried out, and statistical results show that the improved strategy can produce a better first-generation population. The performance index can quickly converge to an approximate optimal solution in the fourth generation, and six-degree-of-freedom simulation

收稿日期:2024-08-29; 修回日期:2024-10-08。

基金项目: 贵州省基金基础研究计划(自然科学)项目(黔科合基础-ZK[2022]一般 172); 贵州省教育厅普通本科高校青年科技人才成长项目(黔教合 KY 字[2022]350 号); 贵州省普通高等学校工程研究中心项目(黔教合 KY 字[2018]007); 贵州理工学院高层次人才引进科研启动项目(XJGC20190610)。

作者简介: 高宏建(1986-), 男, 硕士, 讲师。

通讯作者: 陈霖周廷(1981-), 男, 博士, 教授。

引用格式: 高宏建, 陈霖周廷, 胡建兴, 等. 基于改进 CPSO 算法的四旋翼无人机姿态控制参数优化方法[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(2): 143-151.

verifies the correctness and effectiveness of the improved strategy.

Keywords: quadrotor UAV; attitude control; parameter optimization; multi-dimensional chaotic mapping; combinatorial chaotic perturbation

0 引言

未来“低空经济”将以无人机产业为支撑^[1]。四旋翼无人机体积小、结构简单,同时具备悬停和垂直起降能力,能够适应多种复杂地形环境^[2],使其在军事和民用众多领域中展现出了广泛可行的应用前景。面对未来潜在的复杂应用任务,四旋翼无人机将不可避免地面临更为苛刻的高性能控制要求^[3]。

目前,已被广泛应用于四旋翼无人机的控制算法有多种,如 PID 控制^[4]、模型预测控制^[5], LQR 控制^[6]、自适应控制^[7]、自抗扰控制^[8]、滑模控制^[9]和基于神经网络的智能控制^[10-11]等。直到今天,仍然有大量的学者不断尝试将先进控制算法应用于四旋翼无人机的控制中,而 PID 依然是目前应用最为广泛的控制算法。为提高四旋翼无人机抗干扰能力,引入姿态角速度反馈控制,形成当前使用较为成熟的串级 PID 控制。然而,在实际应用中串级 PID 控制的参数设计在很大程度上依赖设计者的工程经验,其整定过程较为困难^[3],并且控制效果往往也很难达到最优^[12]。

针对四旋翼飞行器控制参数多、难以获得整定最优解等问题,许多学者在其控制器参数优化方面做了大量的研究工作,包括遗传算法^[13]、粒子群算法^[14-15]、人工蜂群算法^[16]、差分进化算法^[15,17]、蜻蜓算法^[18]、多维泰勒网优化方法^[19]、大爆炸大收敛算法以及布谷鸟搜索算法^[15]等。这些算法在四旋翼无人机控制器参数优化方面取得了一定的研究成果,但也存在一些问题。文献 [13-14, 16, 18] 使用时间乘绝对误差积分 (ITAE) 准则为性能指标,文献 [15] 使用时间乘方误差积分 (ITSE) 准则,文献 [17] 使用时间乘绝对误差积分 (ITAE) 和绝对控制输出变化积分 (IADU) 两个目标作为性能指标函数、文献 [19] 使用绝对误差积分准则 (IAE)。这些性能指标均为综合性能指标,通过误差积分或控制输出积分来集中体现系统的时域综合性能,未考虑频域性能。因此当综合性能指标收敛到极值时,控制系统的某个时域或频域性能仍有可能不满足要求。

相较于其他参数优化算法,粒子群优化 (PSO, particle swarm optimization) 算法易于实现,但容易陷入局部最优^[20],且收敛速度有可能不满足快速收敛条件。为此,众多学者将混沌优化思想引入到粒子群算法中,利用混沌运动的遍历性和随机性等^[21],形成混沌粒子群优化 (CPSO, chaotic particle swarm optima-

tion) 算法,主要工作体现在如下几个方面:一是研究、分析、设计性能优良的混沌映射函数^[22-23],而对于多参数优化问题,多次重复使用同一类型的一维混沌映射来产生混沌粒子;二是利用群体统计特性来判断早熟收敛,并对当代最优个体进行混沌扰动,然后用扰动后粒子更新种群^[24-25],未对劣质粒子进行筛选判断。

本文针对上述问题,设计一种改进 CPSO 算法,实现四旋翼无人机多维控制器参数的优化设计。改进策略主要体现在以下几方面:1) 依据给定的时域和频域性能指标要求,设计一个能够同时约束各项指标要求的性能指标函数;2) 引入多维混沌映射,直接产生多维混沌变量;3) 对当代最优粒子施加全域模糊扰动+邻域精准扰动的多维组合混沌扰动策略,依据拉依达准则^[26]判别劣质粒子,并将混沌搜索后的最优粒子置换劣质粒子。最后通过仿真验证了本文改进策略的有效性和正确性。

1 四旋翼无人机数学模型

1.1 坐标系定义

机体坐标系 $O_b X_b Y_b Z_b$: 本文研究对象以图 1 所示的 X 字型四旋翼无人机为例,原点 O_b 取在四旋翼无人机质心处; $O_b X_b$ 轴垂直于电机 1 和电机 3 连线; $O_b Z_b$ 轴在无人机纵向对称平面内,指向机身下方并与 $O_b X_b$ 轴垂直, $O_b Y_b$ 轴可根据右手定则确定,图中 d 为机臂长度。

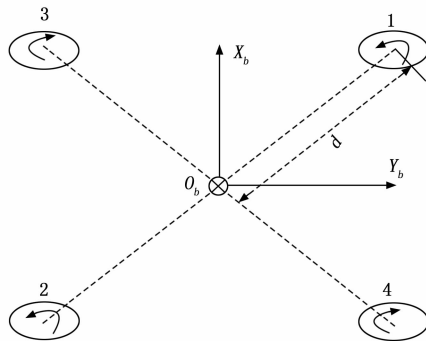


图 1 X 字型四旋翼机体坐标系俯视示意图

地面坐标系 $O_e X_e Y_e Z_e$: 原点 O_e 取为四旋翼无人机起飞点; $O_e X_e$ 轴在水平面内并指向某一方向; $O_e Z_e$ 轴指向地心并垂直于地面; $O_e Y_e$ 轴也在水平面内并垂直于 $O_e X_e$ 轴,其指向按照右手定则确定。

按上述坐标系定义,由地面坐标系旋转至机体坐标

系的旋转矩阵^[27]为:

$$\mathbf{R}_e^b = \begin{bmatrix} \cos\vartheta\cos\psi & \cos\vartheta\sin\psi & -\sin\vartheta \\ \sin\vartheta\cos\psi\sin\gamma - \sin\vartheta\cos\gamma & \sin\vartheta\sin\psi\sin\gamma + \cos\psi\cos\gamma & \cos\vartheta\sin\gamma \\ \sin\vartheta\cos\psi\cos\gamma + \sin\vartheta\sin\gamma & \sin\vartheta\sin\psi\cos\gamma - \cos\psi\sin\gamma & \cos\vartheta\cos\gamma \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, ϑ 为俯仰角, ψ 为偏航角, γ 为滚转角。

1.2 四旋翼无人机动力学模型

在建立四旋翼无人机动力学模型时,作如下假设:

- 1) 机体质量不变且为刚体,忽略弹性影响;
- 2) 将地面坐标系视为惯性坐标系;
- 3) 采用“平板地球假设”,忽略地球曲率;
- 4) 重力加速度不随飞行高度变化且为常数;
- 5) 四旋翼无人机的惯性积 $J_{xy} = J_{xz} = J_{yz} = 0$;
- 6) 忽略无人机受到的阻力以及大气运动等因素,不考虑桨叶挥舞效应。

1.2.1 合外力作用下质心运动的动力学方程

四旋翼无人机飞行过程中,受到的作用力主要包括重力以及螺旋桨产生的拉力。

在地面坐标系下,根据牛顿第二定律,可建立合外力作用下四旋翼无人机的质心运动方程:

$$m \frac{d\mathbf{V}_e}{dt} = \mathbf{F}_{Te} + \mathbf{G} \quad (2)$$

式中, m 为无人机质量; $\mathbf{V}_e = [V_{xe} \ V_{ye} \ V_{ze}]^T$ 为地面坐标系下无人机速度, $\frac{d\mathbf{V}_e}{dt} = [\ddot{X}_e \ \ddot{Y}_e \ \ddot{Z}_e]^T$ 为无人机质心加速度; $\mathbf{F}_{Te}$ 表示旋翼产生的拉力; $\mathbf{G} = [0 \ 0 \ -mg]^T$ 为重力, g 为重力加速度。

四旋翼无人机单个旋翼产生的拉力沿机体坐标系 O_bZ_b 轴,可表示为:

$$\mathbf{F}_{T_i} = [0 \ 0 \ -c_T\omega_i^2]^T \quad (3)$$

式中, $i=1, 2, 3, 4$ 表示旋翼序号, c_T 为螺旋桨拉力系数, ω_i 为旋翼转速。根据地面坐标系与机体坐标系之间的旋转关系,可将拉力在地面坐标系下表示为 $\mathbf{F}_{Te} =$

$$\mathbf{R}_e^b \sum_{i=1}^4 \mathbf{F}_{T_i}, \text{ 且 } \mathbf{R}_e^b = (\mathbf{R}_e^b)^T.$$

将式(3)代入式(2),并记 $\mathbf{U}_1 = \sum_{i=1}^4 \mathbf{F}_{T_i}$,则可得四旋翼无人机质心运动方程:

$$\begin{bmatrix} \ddot{X}_e \\ \ddot{Y}_e \\ \ddot{Z}_e \end{bmatrix} = \frac{1}{m} \mathbf{R}_e^b \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ U_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} \quad (4)$$

1.2.2 合外力矩作用下绕质心转动的动力学方程

作用在四旋翼无人机上的力矩主要考虑旋翼产生的扭矩。旋翼产生的扭矩在机体坐标系各轴的分量为:

$$\mathbf{M}_{Tb} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} dc_T (-\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2) \\ \frac{\sqrt{2}}{2} dc_T (\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2) \\ c_Q (\omega_1^2 + \omega_2^2 - \omega_3^2 - \omega_4^2) \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, c_Q 为旋翼扭矩系数。可将上式记为 $\mathbf{M}_{Tb} = [U_2 \ U_3 \ U_4]^T$ 。

根据动量矩定理 $\frac{d\mathbf{L}}{dt} = \sum \mathbf{M}$,可以得到四旋翼无人机绕质心的转动方程为:

$$\begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{[U_2 - (J_z - J_y)qr]}{J_x} \\ \frac{[U_3 - (J_x - J_z)pr]}{J_y} \\ \frac{[U_4 - (J_y - J_x)pq]}{J_z} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, p, q, r 分别为机体坐标系相对于地面坐标系的转动角速度在机体坐标系各轴上的分量; J_x, J_y, J_z 分别为绕机体坐标系 3 个轴向的转动惯量。

由式(4)和式(6),即可得到四旋翼无人机的动力学模型为:

$$\begin{cases} \ddot{X}_e = \frac{U_1(\sin\vartheta\cos\psi\cos\gamma + \sin\vartheta\sin\gamma)}{m} \\ \ddot{Y}_e = \frac{U_1(\sin\vartheta\sin\psi\cos\gamma - \cos\psi\sin\gamma)}{m} \\ \ddot{Z}_e = \frac{U_1\cos\vartheta\cos\gamma}{m} + g \\ \dot{p} = \frac{[U_2 - (J_z - J_y)qr]}{J_x} \\ \dot{q} = \frac{[U_3 - (J_x - J_z)pr]}{J_y} \\ \dot{r} = \frac{[U_4 - (J_y - J_x)pq]}{J_z} \end{cases} \quad (7)$$

2 改进混沌粒子群优化算法

2.1 PSO 算法基本流程

PSO 算法是一种群体智能优化算法,其基本思想是模拟生物群体(如鸟群或鱼群等)的行为,利用种群中个体之间的信息交流和协作来寻找最优解。下面是 PSO 算法的基本流程:

1) 初始化粒子群的位置 $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id})$ 和速度 $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id})$, 其中 $i = (1, 2, \dots, n)$, n 为种群大小, d 为待求解问题的维度。每个粒子的位置表示解空间中的一个候选解,速度表示粒子在解空间中的搜索方向和步长。

2) 计算每个粒子的适应度值 $f(x_i)$ 。适应度值能够衡量粒子所对应解的优劣程度,可以根据具体问题来设计。

3) 更新粒子的位置和速度。根据种群中个体最优

解、全局最优解、当前粒子的位置以及速度信息,对第 $k+1$ 代粒子的速度和位置按如下公式进行更新:

$$\begin{cases} v_{ij}(k+1) = \omega v_{ij}(k) + c_1 r_1 [P_{\text{best}_i} - x_{ij}(k)] + \\ \quad c_2 r_2 [G_{\text{best}} - x_{ij}(k)] \\ x_{ij}(k+1) = x_{ij}(k) + v_{ij}(k+1) \end{cases} \quad (8)$$

式中, $i = (1, 2, \dots, n)$; $j = (1, 2, \dots, d)$; ω 为惯性因子; r_1, r_2 为 $[0, 1]$ 之间的随机数; c_1, c_2 为大于零的加速度因子; P_{best_i} 为当前第 i 个粒子的个体最优解; G_{best} 为当前种群的全局最优解; $v_{ij}(k)$ 和 $x_{ij}(k)$ 分别表示第 i 个粒子的第 j 维变量在第 k 代的速度和位置。

4) 更新全局最优解和个体最优解。将当前最优解与个体最优解进行比较,更新全局最优解。

5) 判断终止条件。可以设置迭代次数或适应度值收敛等作为终止条件。

6) 如果终止条件未满足,则返回流程 3); 否则,输出全局最优解。

2.2 改进 CPSO 算法流程

混沌是广泛存在于自然界中的一种非线性现象,可以按照给定规律在一定范围内不重复地遍历所有状态,具有遍历性、随机性以及初始条件敏感性等特性。将混沌思想引入到 PSO 算法中,形成 CPSO 算法,其基本思想是利用混沌序列来增加粒子的搜索能力和多样性,以更好地探索解空间。

在 PSO 算法的基础上,通常通过两种方式引入混沌:一是利用一维混沌映射(如 Logistic 映射、Tent 映射、Sine 映射、An 映射等^[22-23]),产生具有混沌特性的初始化种群;二是对当前种群的最优位置进行混沌扰动,并用扰动后的最优位置随机替代当前种群中的某个粒子位置^[24-25]。本文对上述两种混沌方式进行改进。首先,针对多变量参数的优化,采用多维混沌映射函数,直接产生多个变量具有混沌特性的初始化种群,避免多次重复使用同一类型的一维混沌映射;其次,对当代最优粒子施加全域模糊扰动+邻域精准扰动的多维组合混沌扰动,依据 3σ 准则判别劣质粒子,然后用混沌搜索后的最优粒子置换劣质粒子。

下面是改进 CPSO 算法的基本流程:

1) 采用多维混沌映射函数,产生 $(0, 1)$ 之间的多维初始化混沌变量。多维离散混沌映射采用如下系统^[28]:

$$X(i+1) = AX(i) \pmod{1} \quad (9)$$

式中, $X(i) \in R^d$; $A = (a_{pq})_{d \times d}$, $a_{pp} > 0$, $|a_{pp}| - \sum_{q=1, q \neq p}^d |a_{pq}| > 1$ ($p = 1, 2, \dots, d$); $\pmod{1}$ 表示对 1 求余。

2) 根据待优化变量的变化范围 $x_{ij} \in [x_{j\min}, x_{j\max}]$,将初始化混沌变量转换为初始化优化变量:

$$x_{ij}(0) = \frac{X_j(i) - x_{j\min}}{x_{j\max} - x_{j\min}} \quad (10)$$

3) 计算每个粒子 $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id})$ 的适应度值 $f(x_i)$ 。

4) 根据公式 (8) 更新粒子的速度和位置。

5) 计算群体适应度平均值和群体适应度方差:

$$E(f) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f(x_i) \quad (11)$$

$$\sigma^2(f) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [f(x_i) - E(f)]^2 \quad (12)$$

然后根据 3σ 法则,判断满足如下条件的粒子为劣质粒子:

$$x_y = x_i \{f(x_i) > E(f) + 3\sigma(f)\} \quad (13)$$

式中, $y = 1, 2, \dots, ym$, 且 ym 为劣质粒子个数。

6) 对群体最优粒子施加多维组合混沌扰动:

首先,在全域范围内施加多维模糊混沌扰动。以全局最优值粒子作为初值,采用流程 1) 中的多维混沌映射函数,生成的 m 个全域混沌变量。

$$X_1(r+1) = A_1 X_1(r) \pmod{1} \quad (14)$$

式中, $X_1(1) = G_{\text{best}}$, $r = 1, 2, \dots, m$, $X_1(r) \in R^d$, A_1 满足前述条件。

在全域范围内,将 m 个全域模糊混沌变量转换为待优化变量:

$$x_{rj} = \frac{X_{1j}(r) - x_{j\min}}{x_{j\max} - x_{j\min}} \quad (15)$$

其次,在邻域范围内施加多维精准混沌扰动。仍以全局最优值粒子作为初值,采用流程 1) 中的多维混沌映射函数,生成的 n 个邻域混沌变量:

$$X_2(s+1) = A_2 X_2(s) \pmod{1} \quad (16)$$

式中, $X_2(1) = G_{\text{best}}$, $s = 1, 2, \dots, n$, $X_2(s) \in R^d$, A_2 应满足前述条件。

设置邻域范围 $[x_{j\inf}, x_{j\sup}]$,以全局最优粒子位置为中心,区间大小为全域的等比收缩,记 k 为比例系数 ($k < 1$),则邻域下限为:

$$x_{j\inf} = G_{\text{best}_j} - k(x_{j\max} - x_{j\min}) \quad (17)$$

邻域上限为:

$$x_{j\sup} = G_{\text{best}_j} + k(x_{j\max} - x_{j\min}) \quad (18)$$

在上述邻域范围内,即可将 n 个邻域精准混沌变量转换为待优化变量。

$$x_{sj} = \frac{X_{2j}(s) - x_{j\inf}}{x_{j\sup} - x_{j\inf}} \quad (19)$$

最后,由 m 个全域模糊混沌变量和 n 个邻域精准混沌变量 ($m+n \geq ym$) 组合形成混沌扰动粒子,并计算 $m+n$ 个组合混沌扰动粒子的适应度值,筛选出其中前 ym 个较优粒子,用于置换 ym 个劣质粒子。

7) 更新全局最优解和个体最优解。

8) 判断终止条件。可以通过设置迭代次数或适应度值收敛阈值等作为终止条件。

9) 如果终止条件未满足,则返回流程 3); 否则输

出全局最优解。

3 改进 CPSO 优化四旋翼无人机姿态控制参数

3.1 被控对象传递函数

本文以四旋翼无人机姿态控制的俯仰通道为例展开介绍,滚转通道和偏航通道的设计过程与此类似。通过对四旋翼无人机动力学模型的线性化处理,可以得到俯仰通道被控对象模型为:

$$G(s) = \frac{\Delta q(s)}{\Delta \omega(s)} = \frac{4\sqrt{2}dc_7\omega_0}{J_y s} \quad (20)$$

式中, $\Delta q(s)$ 为俯仰角速度增量, $\Delta \omega(s)$ 为旋翼旋转角速度增量, ω_0 为平衡点处的旋翼旋转角速度,其他参数如前所述。

3.2 姿态控制回路结构

俯仰通道姿态控制回路结构如图2所示。图中, u_z 为控制指令, $\Delta\theta$ 为俯仰角增量。

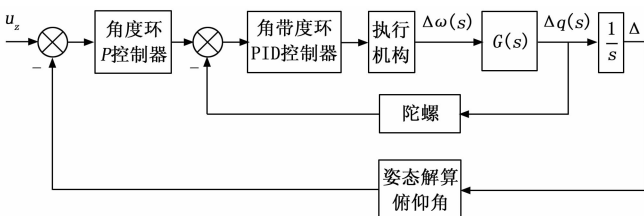


图2 俯仰通道姿态控制回路结构图

对四旋翼无人机来说,执行机构由电机和螺旋桨组成,其数学模型为:

$$G_1(s) = \frac{1}{T_1 s + 1} \quad (21)$$

式中, $T_1 = 0.05$ 为电机时间常数。

陀螺用于测量机体运动的角速度,其数学模型为:

$$G_2(s) = \frac{1}{T_2 s + 1} \quad (22)$$

式中, $T_2 = 0.0016$ 为陀螺时间常数。

控制回路中,角度环采用纯比例 P 控制,传递函数为 $G_{c1}(s) = K_{\theta p}$ 。角速度环采用比例 P+积分 I+微分 D 控制,传递函数为 $G_{c2}(s) = K_{\theta p} + \frac{K_{\theta i}}{s} + K_{\theta d}s$ 。这样的控制器结构能够保证当存在外界有界扰动时系统是无静差的。

现在问题可以归结为:如何根据四旋翼无人机姿态控制系统的性能指标要求(如时域指标和频域指标等)来设计控制器参数 $K_{\theta p}$ 、 $K_{\theta i}$ 、 $K_{\theta d}$ 和 $K_{\omega d}$,这将由改进 CPSO 算法对其进行参数优化设计。

3.3 姿态控制器参数优化设计

本节主要包括适应度函数的设计和参数优化过程的设计。采用改进 CPSO 算法对四旋翼无人机姿态控制器参数进行优化设计的具体过程为:

1) 初始参数设置。种群大小和迭代次数影响优化时间,设置种群大小为 30,最大迭代次数为 100;加速度因子 c_1 和 c_2 表示粒子向个体极值和全局极值趋近的权值,设置加速度因子 $c_1 = c_2 = 2$;惯性因子的大小影响搜索能力,惯性因子较小有利于局部搜索,而较大的惯性因子有利于全局搜索,设置惯性因子 $\omega = 0.8$;粒子 $x = (K_{\theta p}, K_{\theta i}, K_{\theta d}, K_{\omega d})$ 的范围参考经验设计结果,将范围设置为 $[0.01, 10]$ 。

2) 设计多维混沌映射矩阵 A 。根据公式(9),应使多维混沌映射矩阵的主对角线元素和其余行元素之和满足 $|a_{pp}| - \sum_{q=1, q \neq p}^d |a_{pq}| > 1$ 。因此,位置量混沌映射矩阵可取为:

$$A_p = \begin{bmatrix} 4 & -1 & -0.2 & 1 \\ 0.25 & 4 & -0.165 & 2.214 \\ 0.432 & 1.235 & 4 & -0.267 \\ 1.07 & -0.786 & -0.345 & 4 \end{bmatrix} \quad (23)$$

速度量混沌映射矩阵可取为:

$$A_v = \begin{bmatrix} 5 & -0.712 & -0.23 & 1.11 \\ 0.235 & 5 & -0.265 & 1.254 \\ 0.632 & 1.435 & 5 & -0.667 \\ 1.47 & -0.286 & 0.345 & 5 \end{bmatrix} \quad (24)$$

3) 设计适应度函数 $f(x)$ 。为衡量控制回路响应性能,姿态控制参数的设计除了要考虑时域指标(包括过载上升时间、超调量、振荡次数等),还要选用频域的稳定裕度为评估准则(包括幅值裕度、相位裕度等)。因此,适应度函数的设计原则为:综合体现各项指标要求,并且考虑到各项指标的性质、量纲不统一等因素,从而将适应度函数设计为如下形式的多目标加权适应度函数:

$$f(x) = \sum_{i=1}^m W_i |P_i(x) - P_{i0}| \quad (25)$$

式中, m 为性能指标个数, P_i 为受待优化参数 $K_{\theta p}$ 、 $K_{\theta i}$ 、 $K_{\theta d}$ 和 $K_{\omega d}$ 影响的第 i 项实际性能, P_{i0} 为第 i 项性能指标要求, W_i 为第 i 项性能的权重系数。考虑到各项性能指标量级不同,将 W_i 设计为第 i 项性能指标的无量纲系数。

4) 对群体最优粒子施加多维组合混沌扰动。混沌扰动矩阵可以同 2) 中的 A_p ,全域模糊混沌扰动范围取为 1) 中设置的范围,邻域精准混沌扰动范围以最优粒子位置为中心,区间大小为全域的等比缩小,比例系数具体视具体问题而定,邻域区间越大,扰动范围越大,邻域区间越小,扰动范围越小,仿真表明此比例系数取值为 0.1~0.3 时优化效果较好,本文设置此比例系数为 0.1。

其他过程可结合前述 2.2 节改进 CPSO 算法基本流

程以及图 3 所示的参数优化过程。

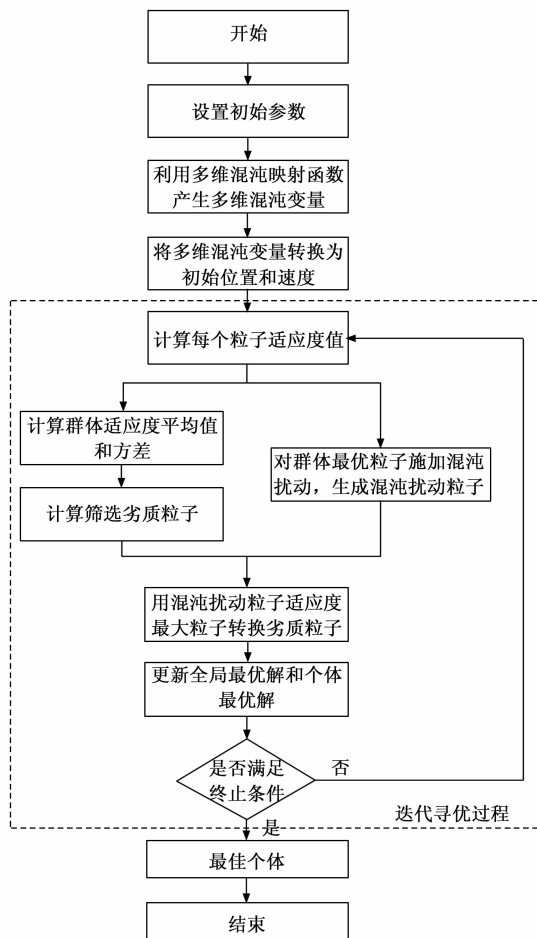


图 3 四旋翼无人机姿态控制参数优化过程

4 仿真验证及分析

为了验证算法的有效性,进行了仿真验证。首先将 PSO 算法与改进 CPSO 算法的优化过程及其结果进行对比,分析改进 CPSO 算法的能力提升性能;其次将改进 CPSO 算法的优化结果应用于四旋翼无人机的姿态控制,通过六自由度仿真验证优化结果的有效性。

4.1 PSO 算法与改进 CPSO 算法优化性能对比分析

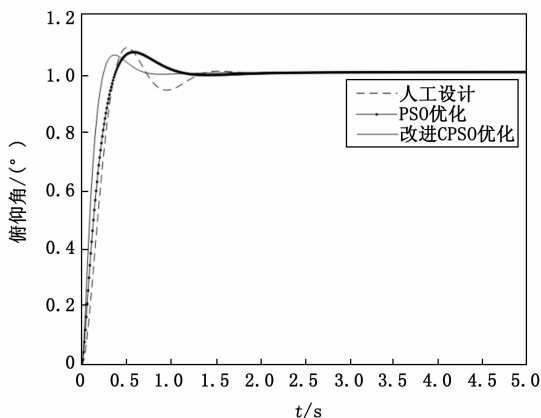
四旋翼无人机俯仰通道被控对象参数为: $d = 0.225 \text{ m}$, $J_y = 0.071 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $\omega_0 = 816.4 \text{ rad/s}$, $c_T = 5.517 \times 10^{-6} \text{ N/(rad/s)}^2$ 。PSO 算法与改进 CPSO 算法使用相同的适应度函数,见公式 (19),相同的基本参数:迭代次数为 100,种群大小 $n = 30$,惯性因子 $\omega = 0.8$,加速度因子 $c_1 = c_2 = 2$;改进 CPSO 算法的其他参数见 3.3 节。

采用上述仿真参数,分别利用 PSO 算法与改进 CPSO 算法对四旋翼无人机的俯仰通道控制器参数进行优化设计。表 1、图 4 和图 5 为一次优化结果与人工设计结

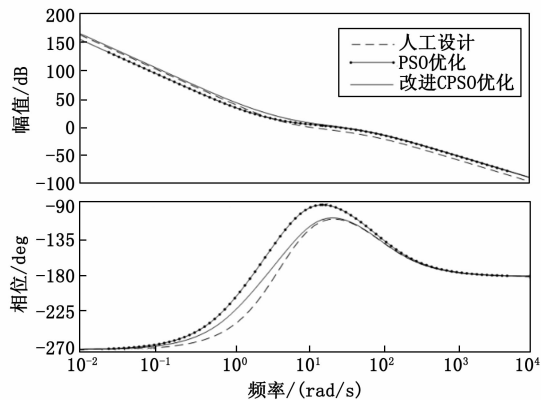
果。由表 1、图 4 (a) 和图 4 (b) 可知,PSO 算法与改进 CPSO 算法的优化效果相当,且二者的时域指标(上升时间和超调量)和频域指标(幅值裕度和相位裕度)均优于人工设计结果,终代适应度值(−3.992、−3.991)均小于人工设计适应度值(−2.194)。另外,由图 5 所示的 PSO 算法与改进 CPSO 算法的适应度进化曲线可知,采用多维混沌映射函数产生初始化种群的策略,使得改进 CPSO 算法初代适应度值(−3.41)明显小于 PSO 算法的初代适应度值(−1.219);通过群体适应度均值和方差判断劣质粒子并引入多维组合混沌扰动的策略,使得改进 CPSO 算法适应度曲线的收敛速度明显快于 PSO 算法。这表明采取本文改进 CPSO 算法有利于算法的快速收敛。

表 1 PSO 算法与改进 CPSO 算法一次优化结果

方法	上升时间/s	超调量/%	幅裕度/dB	相裕度/(°)	适应度值
人工设计	0.326	8.300	13.031	55.763	−2.194
PSO 优化	0.310	6.790	24.546	86.327	−3.992
改进 CPSO 优化	0.200	5.758	24.998	71.794	−3.991



(a) 单位阶跃俯仰响应曲线



(b) 频域响应曲线

图 4 时域和频域响应曲线(一次优化)

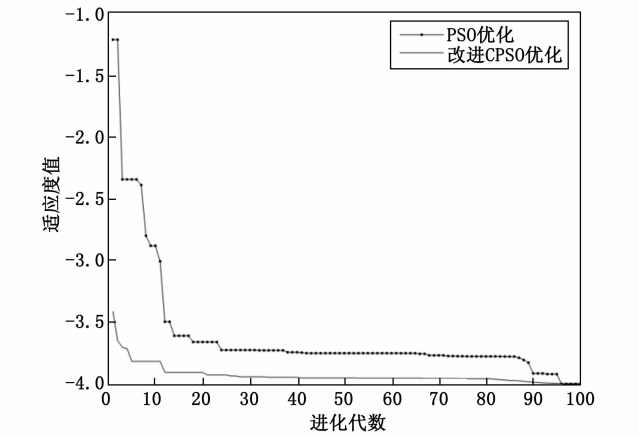
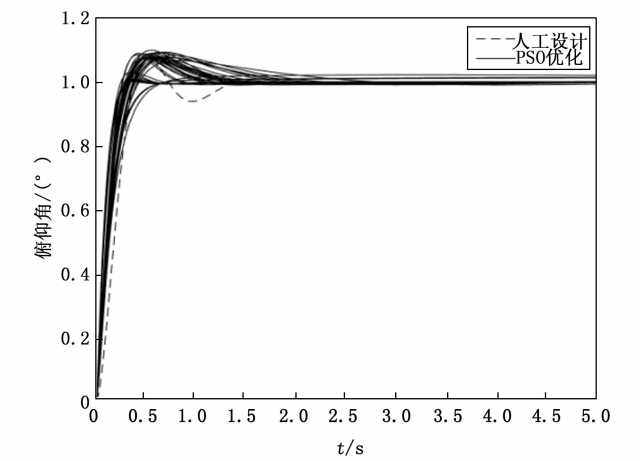


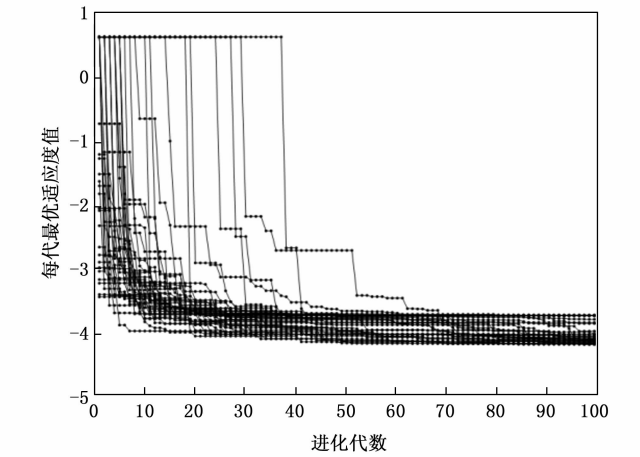
图 5 适应度进化曲线（一次优化）

为了进一步验证改进效果，避免单次优化差异，按上述仿真条件，分别采用 PSO 算法和改进 CPSO 算法重复仿真 50 次，仿真结果如表 2、图 6 和图 7 所示。由表 2 统计结果以及图 6（a）和图 7（a）可知，50 次 PSO 优化和改进 CPSO 优化，二者的时域指标均值（上升时间 0.259 s 和 0.292 s、超调量 4.691% 和 7.303%）和频域指标均值（幅值裕度 24.94 dB 和 24.966 dB、相位裕度 79.648° 和 90.486°）均优于人工设计结果，适应度最大值（-3.741、-3.991）均小于人工设计适应度值（-2.194）；改进 CPSO 算法适应度值的最小值（-4.207）、最大值（-3.991）、均值（-4.158）和标准差值（0.062）均优于 PSO 算法适应度值的最小值（-4.2）、最大值（-3.741）、均值（-4.012）和标准差值（0.172）。另外，图 6（b）和图 7（b）所示的 PSO 算法与改进 CPSO 算法的 50 次优化适应度进化曲线表明，改进 CPSO 算法的第一代初始适应度值较优（-3.293），并在第 4 代左右即收敛到 -3.709，而 PSO 算法的收敛速度慢，散布大。这与前述一次优化结论相同。表明采取本文的改进措施后，适应度值能够更快地向最优解收敛。滚转和偏航通道的验证结果与此类似，不再赘述。

表 2 PSO 算法与改进 CPSO 算法 50 次优化统计结果						
方法	统计特性	上升时间/s	超调量/%	幅裕度/dB	相裕度/(°)	适应度值
人工设计	——	0.326	8.300	13.031	55.763	-2.194
PSO 优化	最小值	0.190	0.000	24.546	58.434	-4.200
	最大值	0.380	9.832	25.000	99.313	-3.741
	均值	0.259	4.691	24.940	79.648	-4.012
	标准差	0.052	3.616	0.100	13.293	0.172
改进 CPSO 优化	最小值	0.200	1.181	24.783	71.794	-4.207
	最大值	0.330	9.918	25.000	96.651	-3.991
	均值	0.292	7.303	24.966	90.486	-4.158
	标准差	0.028	2.980	0.049	3.757	0.062



(a) PSO 算法 50 次优化单位阶跃响应曲线



(b) PSO 算法 50 次优化最优适应度进化曲线

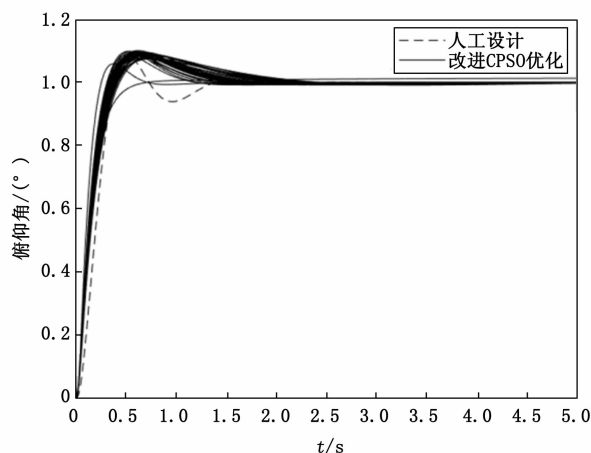
图 6 PSO 算法 50 次优化结果

4.2 六自由度仿真验证及分析

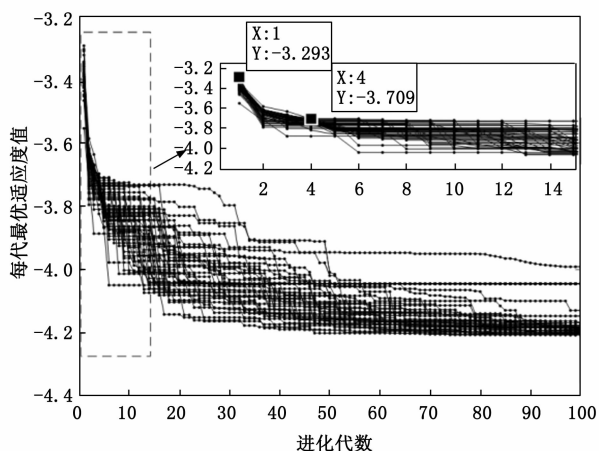
采用本文的改进 CPSO 算法对四旋翼无人机俯仰、滚转和偏航通道的控制器参数进行优化设计，机体参数以及控制器参数优化结果见表 3，将优化结果应用于 1.2 节建立的四旋翼无人机模型中，进行六自由度仿真以验证姿态控制的动态性能，仿真结果见图 8 和图 9，可见四旋翼无人机姿态控制的时域响应性能同 4.1 节的分析结论，验证了设计结果的有效性及正确性。

表 3 四旋翼无人机机体参数以及控制器优化结果

参数	单位	值	参数	值
m	kg	1.500	俯仰/滚转角度 P	8.350
d	m	0.225	俯仰/滚转角速度 P	1.182
$J_x、J_y$	/kg·m ²	0.071	俯仰/滚转角速度 I	2.466
J_z	kg·m ²	0.033	俯仰/滚转角速度 D	0.353
ρ	kg/m ³	1.290	偏航角度 P	2.538
c_T	N/(rad/s) ²	5.517×10^{-6}	偏航角速度 P	3.894
c_Q	N/(rad/s) ²	4.026×10^{-7}	偏航角速度 I	2.036
g	m/s ²	9.807	偏航角速度 D	0.354



(a) 改进CPSO算法50次优化单位阶跃响应曲线



(b) 改进CPSO算法50次优化最优适应度进化曲线

图 7 改进 CPSO 算法 50 次优化单位阶跃响应曲线

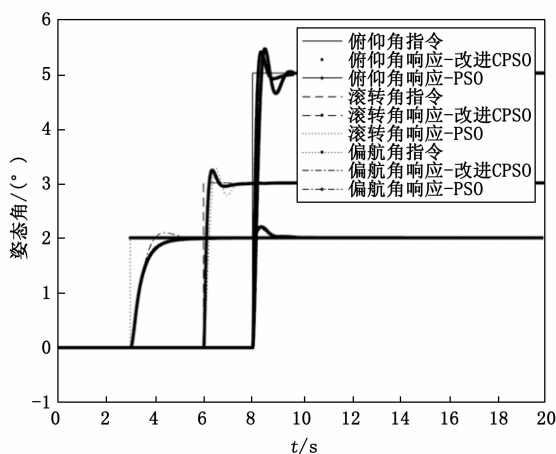


图 8 六自由度仿真姿态角响应曲线

5 结束语

针对四旋翼无人机控制器参数较多且难以获得最优整定解等问题, 本文利用混沌粒子群算法, 采用多维混

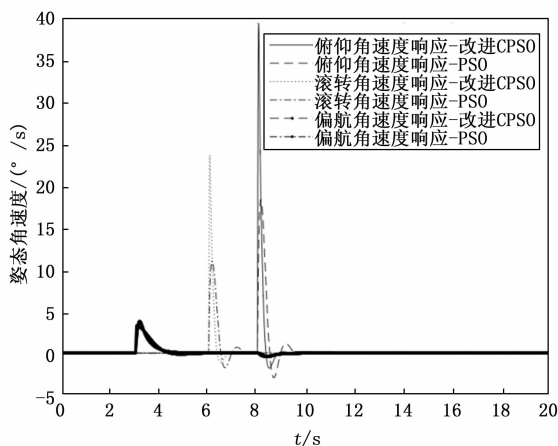


图 9 六自由度仿真姿态角速度响应曲线

沌映射函数产生初始化种群, 采用全域模糊扰动+邻域精准扰动的多维组合混沌扰动策略生成优质混沌扰动粒子, 并设计多性能指标约束条件下的加权性能指标函数。将改进 CPSO 算法应用于某四旋翼无人机姿态控制参数的优化, 结果表明各次优化均能同时满足各项时域和频域性能指标要求, 且优化过程收敛速度较快, 验证了本文改进策略的有效性和正确性。但是由于使用了两种组合混沌扰动策略, 增加了算法的计算量, 导致了计算时间的增加。考虑到本文改进 CPSO 算法快速收敛的优点, 可以通过减少迭代次数来节省计算时间。本文研究结果对于提高四旋翼无人机控制参数优化的快速性, 进而提高其控制性能具有一定的工程实践意义。

参考文献:

- [1] 沈映春. 低空经济: “飞”出新赛道 [J]. 人民论坛, 2024 (8): 74-79.
- [2] 王 辰. 多旋翼无人机在军事后勤领域中的应用及发展趋势分析 [J]. 飞航导弹, 2021 (8): 56-60.
- [3] 姚博文. 四旋翼无人机高精度飞行控制算法研究及实现 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2018.
- [4] KARAHAN M, KASNAKOGLU C. Modeling and simulation of quadrotor UAV using PID controller [C] // 2019 11th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI). Pitesti, Romania, 2019: 1-4.
- [5] 叶大鹏, 陈书达, 张之得. 基于在线高斯模型驱动 MPC 的四旋翼轨迹跟踪控制 [J/OL]. 飞行力学, <https://doi.org/10.13645/j.cnki.f.d.20240409.001>.
- [6] ARGENTIM L M, REZENDE W C, SANTOSPE, et al. PID, LQR and LQR-PID on a quadcopter platform [C] // 2013 International Conference on Informatics, Electronics and Vision (ICIEV). IEEE, 2013: 1-6.
- [7] LIAN S, MENG W, LIN Z, et al. Adaptive attitude control of a quadrotor using fast nonsingular terminal sliding

- mode [J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2021, 69 (2): 1597–1607.
- [8] 刘勇, 杨浩, 盘宏斌, 等. 基于改进线性自抗扰的四旋翼无人机姿态控制 [J]. 电光与控制, 2023, 30 (7): 8–14.
- [9] HASSANI H, MANSOURI A, AHAITOUF A. Robust autonomous flight for quadrotor UAV based on adaptive nonsingular fast terminal sliding mode control [J]. International Journal of Dynamics and Control, 2021, 9: 619–635.
- [10] YOGI S C, TRIPATHI V K, BEHERA L. Adaptive integral sliding mode control using fully connected recurrent neural network for position and attitude control of quadrotor [J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2021, 32 (12): 5595–5609.
- [11] 梁吉, 王立松, 黄昱洲, 等. 基于深度强化学习的四旋翼无人机自主控制方法 [J]. 计算机科学, 2023, 50 (s2): 13–19.
- [12] 徐峰, 李东海, 薛亚丽. 基于ITAE指标的PID参数整定方法比较研究 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (8): 206–210.
- [13] 丁一, 譙超凡, 王世勇. 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.
- [14] 胡文华, 曹仁赢. 改进粒子群优化算法的四旋翼ADRC姿态控制 [J]. 电光与控制, 2019, 26 (12): 12–16.
- [15] 郑凯琪. 基于优化算法的四旋翼飞行器的控制研究 [D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2020.
- [16] 顾明琨, 钟小勇. 改进人工蜂群算法的四旋翼自抗扰控制参数优化 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22 (14): 5693–5699.
- [17] 成利梅, 张春美, 郭红戈. 基于差分进化算法的四旋翼自适应滑模控制 [J]. 计算机仿真, 2023, 40 (6): 66–71.
- [18] 李茂林, 王勇杰, 介丹. 基于多种群蜻蜓算法的四旋翼自抗扰姿态优化控制 [J]. 计算机应用与软件, 2022, 39 (12): 328–334.
- [19] 周浩. 多旋翼无人机飞行的多维泰勒网优化控制 [D]. 南京: 东南大学, 2018.
- [20] 康岩松, 臧顺来. 基于多种策略的改进粒子群优化算法 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2023, 44 (8): 1089–1097.
- [21] 高鹰, 谢胜利. 混沌粒子群优化算法 [J]. 计算机科学, 2004 (8): 13–15.
- [22] 刘磊, 姜博文, 周恒扬. 融合改进Sine混沌映射的新型粒子群优化算法 [J]. 西安交通大学学报, 2023, 57 (8): 182–193.
- [23] ALATAS B, AKIN E, OZER A B. Chaos embedded particle swarm optimization algorithms [J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2009, 40 (4): 1715–1734.
- [24] 张智轩, 李涛, 伍鹏飞, 等. 改进混沌粒子群算法的四旋翼PID姿态控制 [J]. 电光与控制, 2022, 29 (3): 16–20.
- [25] 贺兴时, 杨旭日. 混沌映射的粒子群算法分析比较 [J]. 纺织高校基础科学学报, 2023, 36 (1): 86–93.
- [26] 盛骤, 谢式千, 潘承毅. 概率论与数理统计 [M]. 第三版, 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [27] 高宏建, 薛九天, 苏小东. 无人机导航与飞行控制技术 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2023.
- [28] ZANG H Y, LIU J Y, LI J. Construction of a class of high dimensional discrete chaotic systems [J]. Mathematics, 2021, 9 (4): 365.
- [29] SHI P, SUN W, YANG X, et al. Master-slave synchronous control of dual-drive gantry stage with cogging force compensation [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2022, 53 (1): 216–225.
- [30] HUANG Y, ZHENG Y, WANG N, et al. Peg-in-hole assembly based on master-slave coordination for a compliant dual-arm robot [J]. Assembly Automation, 2020, 40 (2): 189–198.
- [31] KHANZADEH P, AHMADI A A. Synchronization of single-master multi-slave teleoperation systems with communication delays [J]. International Journal of Intelligent Robotics and Applications, 2022, 6 (3): 483–496.
- [32] 崔旭东, 邓少丰, 王平江. 面向六关节机器人的位置域控制 [J]. 工程科学学报, 2022, 44 (2): 244–253.
- [33] 曹学鹏, 包翔宇, 张弓, 等. 基于模糊自适应和优化阻抗的双机器人/位主从协同控制方法 [J]. 四川大学学报 (工程科学版), 2020, 52 (4): 226–234.
- [34] ZHOU W, GUO S, GUO J, et al. A surgeon's habits-based novel master manipulator for the vascular interventional surgical master-slave robotic system [J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22 (10): 9922–9931.
- [35] 邓益昭, 涂海燕, 宋明俊. 基于改进RRT的机器人路径规划算法 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2024 (6): 6–11.
- [36] LI K, JI S, NIU G, et al. Master-slave control and evaluation of force sensing for robot-assisted minimally invasive surgery [J]. Industrial Robot: the International Journal of Robotics Research and Application, 2020, 47 (6): 903–914.
- [37] XU C, WANG Y, ZHOU C, et al. Application research of master-slave cranio-maxillofacial surgical robot based on force feedback [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine, 2021, 235 (5): 583–596.

(上接第136页)