

基于改进微分进化的无人机编队重构安全控制

吕明海, 魏瑞轩, 许卓凡
(空军工程大学航空航天工程学院, 西安 710038)

摘要: 无人机编队在环境或任务发生变化时,需要进行编队重构。在对无人机编队重构安全控制问题进行分析的基础上,采用分布式模型预测控制(DMPC)的思想,将重构问题转化为一系列在线优化问题。结合安全性约束条件建立其重构代价函数,提出一种基于改进微分进化的分布式模型预测控制算法(DE-DMPC)求解每个时域内的代价函数优化问题。通过仿真证明,该算法能够实现编队重构安全控制,且较标准微分进化算法性能更好。

关键词: 无人机; 编队重构; 安全控制; 模型预测控制; 微分进化

中图分类号: V279 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2014)09-0065-06

Safety Control for UAV Formation Reconfiguration Based on Modified Differential Evolution

LÜ Ming-hai, WEI Rui-xuan, XU Zhuo-fan
(Engineering College of Aeronautics and Astronautics, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: Flight formation of multiple UAVs needs to be reconfigured when the environment changes or missions are modified. Based on the analysis of safety problem during reconfiguration, the process is transformed into a series of on-line optimizations using distributed model predictive control (DMPC). After the setup of cost function with safety restriction taken into consideration, a distributed model predictive control algorithm based on modified differential evolution (DE-DMPC) is put forward to deal with the optimization problems at each interval. Simulations show the effectiveness of the DE-DMPC algorithm for reconfiguration safety control. The algorithm is superior to the standard DE algorithm in terms of performance.

Key words: UAV; formation reconfiguration; safety control; model predictive control; differential evolution

0 引言

无人机编队飞行相对于单机飞行在任务的协同性、环境适应性和完成任务的效率等方面具有显著优势,因此广泛应用于军事侦察、目标打击、战场评估和骚扰诱惑等方面^[1]。然而,当无人机编队的任务或环境发生变化时,需要编队重构,在该过程中,针对无人机编队的特性,寻找一种安全可靠的控制方法是十分必要的。

无人机编队控制作为无人机领域的一项关键技术,国内外学者对其进行了大量的研究,其主要的控制

方法有领航-跟随法^[2]、虚拟领航法^[3]和行为控制法。文献[4]采用微分进化算法对多无人机的紧密编队问题进行了求解;文献[5]针对多智能体的跟踪及编队控制问题,设计了其分布式预测控制器,这些方法对于无人机编队问题研究多集中在编队保持,对其重构问题未给出有效解决方法;文献[6]运用多目标多人博弈理论,将无人机编队重构问题转化为纳什谈判过程;文献[7]采用混合遗传算法进行编队重构控制,有效解决了重构最优时间控制问题。但这些方法没能将编队重构中的状态最优和时间最优有效结合。

本文首先对编队重构安全控制问题进行描述,建立其数学模型,并针对编队重构过程中的安全性问题,从3个方面给出编队重构过程中的安全约束。针对无人机编队的特点,采用分布式模型预测的方法对编队安全重构进行控制,进而采用改进微分进化算法来求

收稿日期:2013-10-21 修回日期:2014-05-04

基金项目:航空科学基金(20135896027)

作者简介:吕明海(1990—),男,山东莱州人,硕士生,研究方向为无人飞行器控制理论与应用。

解安全重构问题,最后在一定的约束条件下对编队重构控制进行仿真。仿真结果表明,该算法能够快速实现编队的重构,且能保证编队重构过程中的安全性。

1 编队重构安全控制问题描述

无人机编队重构安全控制问题是寻找一种安全可靠的编队控制方案,确保紧密飞行和保持特定几何形状,当环境或任务发生变化时能够根据需要变换编队队形,并保证无人机之间不发生碰撞、能有效规避障碍并保持有效的通信距离^[8]。

1.1 无人机编队重构安全控制过程

基于模型预测控制的思想,建立如图 1 所示的无人机编队重构安全控制过程。

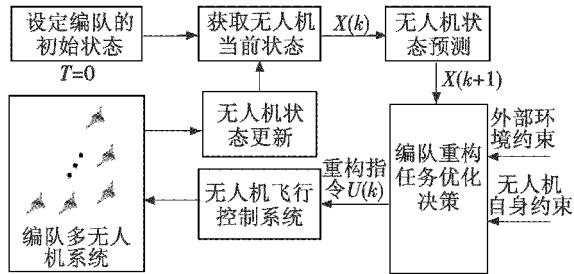


图 1 无人机编队重构安全控制过程

Fig. 1 Safety control process of UAV formation reconfiguration

设 $T=0$, 为编队重构初始时刻, 无人机编队重构安全控制过程分以下 3 个步骤进行: 1) 编队中每架无人机状态的预测, 通过无人机的当前状态 $X(k)$ 预测下一时刻的无人机状态 $X(k+1)$; 2) 编队无人机根据各项安全约束进行实时编队重构任务的优化决策, 通过优化决策得到无人机的安全重构指令 $U(k)$; 3) 通过飞控系统实施重构, 并更新无人机的状态。

1.2 无人机编队重构数学模型

假定无人机在无侧滑的情况下飞行, 且发动机推力沿飞行速度方向, 结合无人机质心在航迹坐标系下的运动方程, 采用欧拉积分法进行近似离散化得到离散时不变状态方程为

$$\begin{cases} x(k+1) = x(k) + V(k) \cos \gamma(k) \cos \chi(k) \tau \\ y(k+1) = y(k) + V(k) \cos \gamma(k) \sin \chi(k) \tau \\ h(k+1) = h(k) - V(k) \sin \gamma(k) \tau \\ V(k+1) = V(k) + g(n_x(k) - \sin \gamma(k)) \\ \chi(k+1) = \chi(k) - \frac{g}{V(k)}(n_z(k) \cos \mu(k) + \cos \gamma(k)) \\ \gamma(k+1) = \gamma(k) - \frac{g}{V(k)} \left(\frac{n_z(k) \sin \mu(k)}{\cos \gamma(k)} \right) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $n_x = \frac{T-D}{Mg}$; $n_z = \frac{L \cos \mu}{Mg}$; τ 为采样周期; g 为重力加速度。

设无人机 v_i 的状态变量和控制变量为: $x_i(k) = [x_i(k) \ y_i(k) \ h_i(k) \ V_i(k) \ \chi_i(k) \ \gamma_i(k)]^T$ 和 $u_i(k) = [n_{x_i}(k) \ n_{z_i}(k) \ \mu_i(k)]^T$, 无人机 v_i 的运动方程可简写为

$$x_i(k+1) = f_i(x_i(k), u_i(k)) \quad (2)$$

1.3 无人机编队重构安全约束

1) 编队机间碰撞约束。编队重构过程中, 机间防碰撞是重构过程中首先需要满足的约束条件。设无人机间距为 $d_{i,j}(v_i(k), v_j(k))$, 编队重构的安全间距为 d_s , 约束条件可表示为

$$d_{i,j}(v_i(k), v_j(k)) \geq d_s, \quad \forall_{i \neq j}, i, j \in \{1, \dots, N_v\} \quad (3)$$

式中, $k \in [1, n-1]$, n 为采样次数。间距的表达式为 $\{(x_i(k) - x_j(k))^2 + (y_i(k) - y_j(k))^2 + (h_i(k) - h_j(k))^2\}^{1/2}$ 。

2) 编队机间通信约束。无人机编队重构过程中, 为了保持有效通信, 必须保持一定距离, 用 N_i 表示与无人机 v_i 相邻的无人机, 设无人机间最大通信距离为 d_c , 其表达式为

$$d_{i,j}(v_i(k), v_j(k)) \leq d_c, \quad i \in \{1, \dots, N_v\}, \quad j \in N_i \quad (4)$$

3) 空间障碍(禁飞区)约束。当空间中存在障碍时, 必须考虑无人机重构过程中的避障问题。设定空间障碍(禁飞区) j 为无限高的圆柱体, 其中心点坐标为 (o_{x_j}, o_{y_j}) , 半径为 o_{r_j} , 障碍的集合为 $O_a = \{1, 2, \dots, N_o\}$, 编队重构的避障约束可表述为

$$\begin{cases} \sqrt{(x_i(k) - o_{x_j})^2 + (y_i(k) - o_{y_j})^2} \geq o_{r_j}, \\ k \in [1, n-1], i \in \{1, \dots, N_v\}, j \in O_a \end{cases} \quad (5)$$

2 分布式模型预测控制

2.1 模型预测控制的原理

模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)的主要思想是在线滚动优化^[9]。每一次的优化能够得到时刻 k 的优化控制域即一系列的控制作用, 并将一系列控制作用的第一部分作用于系统, 直至下一个采样时刻。模型预测控制采取预测模型—优化—执行—反馈校正模型的闭环滚动优化机制, 能够有效地解决控制过程中变量维数较高、需要满足物理约束和控制指标变化等问题。

2.2 基于分布式模型预测控制的无人机编队重构安全控制结构

在无人机编队重构的过程中, 各无人机在其动力学特性上是解耦的, 不同无人机间是相对独立地进行控制, 并通过状态和控制的约束发生相互作用, 这种由多个相对独立的子系统构成的大系统, 可采用分布式模型预测控制(DMPC)的控制结构^[10], 如图 2 所示。

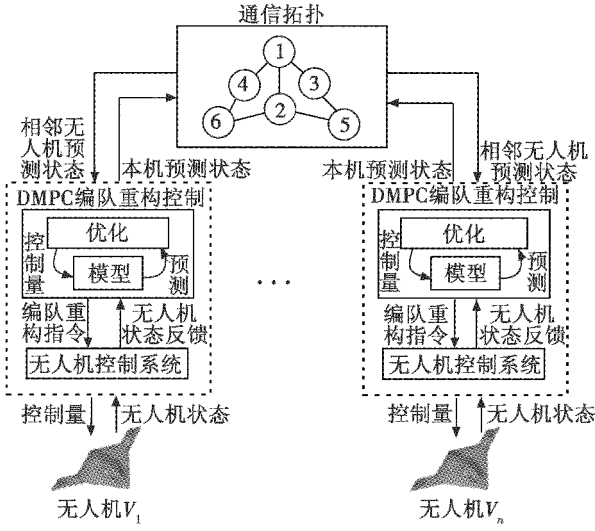


图2 基于 DMPC 的编队重构安全控制结构

Fig.2 DMPC based structure for formation reconfiguration safety control

3 安全重构控制策略求解

3.1 安全重构代价函数的计算

编队无人机的控制是相对独立的,因此,其总体的代价函数可由各无人机的代价之和表示,即

$$J(\tilde{x}(k), \tilde{u}(k)) = \sum_{i=1}^{i=N_e} J_i(X_i(k), X_{\bar{i}}(k) | U_i(k)) \quad (6)$$

式中: $X_i(k)$ 为 k 时刻的 N 步预测状态集; $U_i(k)$ 为 k 时刻的预测输入控制集; $X_{\bar{i}}(k) = \{X_j(k) | j \in N_i\}$,为与该无人机进行通信的无人机的 N 步预测状态集。为了使无人机在状态和时间上协同,定义状态代价函数和时间协同代价函数。

3.1.1 状态代价函数

为使编队无人机能够到达所要求的重构队形,并保证其控制的效率较高,取状态代价函数为

$$J_{iF}(k) = \|x_i(k+N|k) - x_{if}\|_P^2 + \sum_{q=0}^{N-1} (\|x_i(k+q|k) - x_{if}\|_Q^2 + \|u_i(k+q|k)\|_R^2) \quad (7)$$

式中, P, Q, R 为对称正定矩阵,表示每个分量的重要程度,其选取方法可根据经验和反复试验比较,其中, $\|u_i(k+q|k)\|_R^2 = (u_i(k+q|k))^T R (u_i(k+q|k))$,其他项类似于该项。

3.1.2 时间协同代价函数

为使编队无人机的重构时间趋于一致,采用 Dubins 路径来计算两终端点间的期望时间,仅考虑在二维平面运动时对时间的影响,则运动过程可以简化为:按原速度 V_0 进行首次转弯,在直线段对速度的大小进行调整,以规定的速度 V_f 再次进行转弯,调整过程如图3所示。

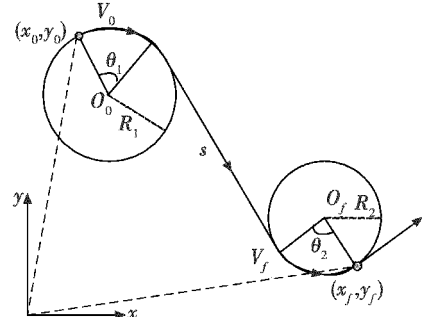


图3 无人机运动调整过程

Fig.3 UAV motion adjustment process

在调整过程中各段所需时间为

$$\begin{cases} t_1 = \frac{\theta_1 R_1}{V_0} = \frac{\theta_1 V_0}{g \sqrt{n_{\max}^2 - 1}} \\ t_2 = \frac{\theta_2 R_2}{V_f} = \frac{\theta_2 V_f}{g \sqrt{n_{\max}^2 - 1}} \\ t_3 = \frac{|V_f - V_0|}{a_{\max}} + \frac{\|a_s\| - s}{V_f} \end{cases} \quad (8)$$

式中: s 为速度调整阶段所需距离,即

$$s = \int_0^{|V_f - V_0|/a_{\max}} (V_0 \pm a_{\max} t) dt; \quad (9)$$

转弯半径 R_1 与 R_2 为无人机在当前速度下的最小转弯半径,其算式为

$$\begin{cases} R_1 = \frac{1}{g} \frac{V_0^2}{\sqrt{n_{\max}^2 - 1}} \\ R_2 = \frac{1}{g} \frac{V_f^2}{\sqrt{n_{\max}^2 - 1}} \\ n_{\max} = \frac{1}{\cos \phi_{\max}} \end{cases} \quad (10)$$

式中, ϕ_{\max} 为最大滚转角。此时设 $T = t_1 + t_2 + t_3$,时间协同代价可以表示为

$$J_{iT}(k) = \sum_{j \in N_i} \omega_{ij} [T_i(x_i, u_i, x_{if}) - T_j(x_j, u_j, x_{if})]^2 \quad (11)$$

式中, ω_{ij} 为两架存在通信关系的无人机时间代价的权重系数。

综合重构过程中的状态代价函数和时间协同代价函数,并加入相应的约束条件,可以将无人机 i 的编队安全重构代价函数表示为

$$\begin{aligned} J_i(k) = & \|x_i(k+N|k) - x_{if}\|_P^2 + \\ & \sum_{q=0}^{N-1} (\|x_i(k+q|k) - x_{if}\|_Q^2 + \|u_i(k+q|k)\|_R^2) + \\ & \sum_{j \in N_i} \omega_{ij} [T_i(x_i, u_i, x_{if}) - T_j(x_j, u_j, x_{if})]^2 \\ & \begin{cases} x_i(k+q+1|k) = f_i(x(k+q|k), u(k+q|k)) \\ x_i(k+q|k) \in \Xi, u_i(k+q|k) \in \Theta \\ x_i(k|k) = x_i^0(k) \\ x_i(k+N|k) \in \Xi_{if} \\ G(X_i(k), X_{\bar{i}}(k)) \leq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (12)$$

式中: $q=0,1,\dots,N-1$; $x_i^0(k)$ 为在 k 时刻编队无人机状态反馈, 将其作为此次预测的初始状态; \mathcal{E} 为该架无人机的可行状态集; \mathcal{E}_f 为该架编队无人机的终端状态约束集; Θ 为无人机的容许输入控制集; $G(X_i(k), X_{\bar{i}}(k))$ 为 v_i 的各项约束。

3.2 基于改进微分进化算法的重构问题求解

对式(12)的求解为非线性优化问题, 计算十分复杂, 因此本文采用改进的微分进化算法 (Differential Evolution, DE) 求解该问题。

3.2.1 标准 DE 算法

DE 算法是 Storn 和 Price 在 1995 年提出的采用矢量编码能够在连续空间中进行随机搜索的智能优化算法。该算法主要包括 3 个基本操作: 变异、交叉和选择。对当前种群进行变异和交叉获得新的种群, 然后利用选择操作对两个种群进行一对一的选择, 从而产生新的种群^[11]。首先在问题的解空间初始化种群 $X^0 = \{x_1^0, x_2^0, \dots, x_N^0\}$, N 为种群大小, 个体 $x_i^0 = (x_{i1}^0, x_{i2}^0, \dots, x_{id}^0)$ 为求解问题的可行解。

1) 变异。在种群中随机选取 3 个不同个体, 执行式(13)从而产生新的变异个体。

$$v_i^{t+1} = x_{i1}^t + Z(x_{i2}^t - x_{i3}^t) \quad (13)$$

式中: Z 为缩放因子; r_1, r_2, r_3 不与 i 相同, 且之间互不相同。

2) 交叉。将变异个体 v_i^{t+1} 和上一代个体 x_i^t 进行交叉操作, 得到新的个体。

$$u_i^{t+1} = \begin{cases} v_i^{t+1}, & \text{若 } b \leq C_R \\ x_i^t, & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

式中: b 为 $[0,1]$ 之间的随机数; C_R 为 $[0,1]$ 之间的交叉概率。

3) 选择。将经过变异交叉后得到的个体 $u_i^{t+1} = (u_{i1}^{t+1}, u_{i2}^{t+1}, \dots, u_{id}^{t+1})^T$, $x_i^t = \{x_{i1}^t, x_{i2}^t, \dots, x_{id}^t\}$ 分别代入到评价函数 $f(x)$ 中去, 选取优势的新种群个体为

$$x_i^{t+1} = \begin{cases} u_i^{t+1}, & \text{若 } f(u_i^{t+1}) < f(x_i^t) \\ x_i^t, & \text{其他} \end{cases} \quad (15)$$

DE 算法实现起来较为简单, 具有收敛速度较快、计算精度高的特点, 但该算法易陷入局部最优。

3.2.2 改进 DE 算法求解无人机编队重构问题

本文在标准 DE 算法的基础上引入自适应缩放因子调整的方法提高了算法的优化效率, 同时可以避免出现早熟现象。

1) 初始种群的确定。

DE 算法将采用模型预测控制 N 步得到的预测值作为其进化的初始种群, 每 3 个数据作为 1 组, 分别对应控制输入 $u(k) = [n_x(k) \quad n_z(k) \quad \mu(k)]^T$ 的 3 个分量。在 DE 算法求解过程中, 把每组数据作为 1 个

基因来进行交叉迭代, 其初始种群的结构如图 4 所示。

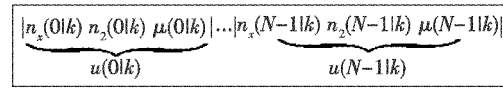


图4 初始种群结构示意图

Fig.4 The initial population structure

2) 种群个体代价函数优化。

在求解最优控制作用时, 可将优化问题的约束反映到代价函数中去, 在代价函数中加入辅助优化代价函数项, 从而将原问题转化为无约束问题。以编队机间碰撞约束为例, 其辅助优化代价函数为

$$L_i(x_i(k)) = \max[0, (d_s - d_{ij}(v_i(k), v_j(k)))^2] \quad (16)$$

当满足约束时, $L_i(x_i(k)) = 0$, 否则, $L_i(x_i(k)) > 0$ 。同理可处理其他约束, 各项约束构成辅助优化函数向量 $L(x(k))$, 同时定义向量 η 为辅助优化因子, 则单架无人机的代价函数可定义为

$$F(x_i(k), u_i(k)) = J_i(x_i(k), u_i(k)) + \eta L(x_i(k), u_i(k)) \quad (17)$$

计算过程中, 辅助优化因子 η 的选取是十分重要的, 它必须保证当无人机状态不满足某一约束时, 其代价函数的值将超过满足约束的无人机状态的函数值, 因此 η 一般取较大的正数。

3) 缩放因子 (Z) 自适应调整。

采用自适应调整的方法可调节缩放因子 (Z), 即

$$Z = \begin{cases} Z_0 \times \frac{\sum_{i=1}^N F[x_i^{t-1}(k), u_i^{t-1}(k)]_n}{\sum_{n=1}^N F[x_n^0(k), u_n^0(k)]_n}, & Z > Z_1 \\ Z_1, & Z \leq Z_1 \end{cases} \quad (18)$$

式中: $\sum_{i=1}^N F[x_i^{t-1}(k), u_i^{t-1}(k)]_n$ 为进化到第 $t-1$ 代的代价和; $\sum_{n=1}^N F[x_n^0(k), u_n^0(k)]_n$ 为进化初始阶段代价和; Z_0 为进化初值, 根据文献[12], 在求解变量维数较高的问题时, Z 一般取 $[0.2, 0.6]$, 因此, 在进化的初始阶段取 $Z_0 = 0.6, Z_1 = 0.2$ 。由于 Z 的作用是控制差异向量的缩放程度, 因此进化初期 Z_0 较大有利于种群多样性, 避免早熟, 进化后期 Z 减小, 收敛速度加快, 较早取得最优解。

4) 迭代结束条件。

在采用 DE 算法对式(12)进行求解时, 为保证控制的实时性要求, 需要对其迭代结束的条件进行约束, 即

$$a = \begin{cases} 1, & \text{若 } \frac{\sum_{i=1}^N F[x_i^{t-1}(k), u_i^{t-1}(k)]_n}{\sum_{n=1}^N F[x_n^{t-2}(k), u_n^{t-2}(k)]_n} < \zeta \text{ 且 } t < n_{\max} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (19)$$

式中： $\zeta=0.99$ ，为迭代结束系数； n_{max} 为最大迭代次数。当 $a=1$ 时进行迭代，当 $a=0$ 时迭代结束，即第 $t-1$ 代的个体代价之和与第 $t-2$ 代的个体代价之和的比值小于 ζ 且迭代次数小于最大迭代次数时进行迭代，否则终止迭代。

4 仿真实验

本文仿真采用的是 IAI Pioneer 无人机模型，其速度约束为 $[20\text{ m/s}, 80\text{ m/s}]$ ，其切向过载和法向过载为 $[-5g, 5g]$ 。

仿真场景设定：在初始情况下，4架无人机沿 x 轴方向以菱形编队运动，其速度为 60 m/s ，在 $t=20\text{ s}$ 时由地面站发出编队重构命令，无人机编队由菱形变换为“一”字形，同时速度调整为 50 m/s 。设定无人机编队重构过程中机间防撞间距为 40 m ，机间通信距离为 350 m ，在编队重构的空域中有2个半径为 100 m 的空间障碍（禁飞区），无人机在重构过程中，必须对空间障碍进行有效规避，场景如图5所示。

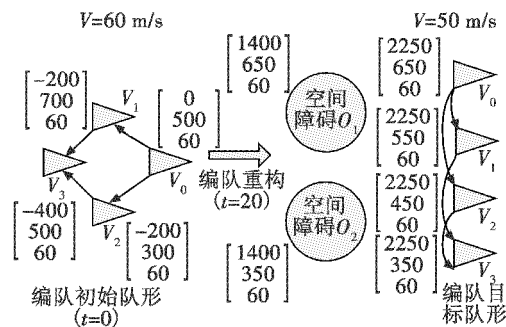


图5 编队重构仿真场景示意

Fig. 5 Simulation of formation reconstruction

取采样周期为 $\tau=0.05$ ，预测步长 $N=10$ ，改进DE算法的初始种群数目为100，最大迭代次数为500次，辅助优化因子 $\eta=10^4$ ，根据无人机的通信关系，时间代价函数的权重系数 $w_{10}=w_{20}=100$ ， $w_{31}=w_{32}=50$ ， $R=\text{diag}([0.1, 10, 30]^T)$ ， $P=Q=\text{diag}([10, 10, 10, 1, 1, 1]^T)$ ，仿真时间 45 s ，时间为 20 s 时下达重构指令。

图6所示为整个重构过程的航迹曲线。从图中可以看出，编队无人机能够通过所提控制算法实现无人机编队重构安全控制。

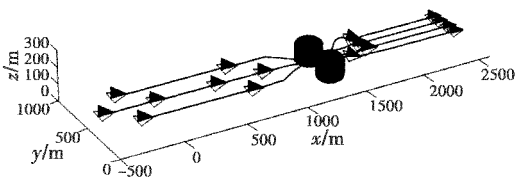


图6 无人机编队重构航迹曲线

Fig. 6 Trajectory of UAV formation reconfiguration

图7为编队中无人机机间间距变化曲线。从图7中可以看出，重构过程中，编队既能满足机间碰撞约

束，也能满足最大通信距离的约束。

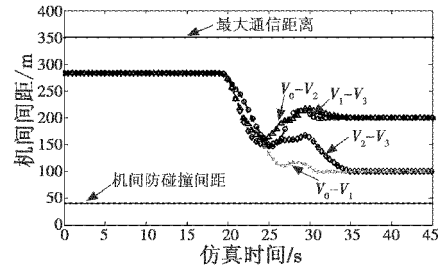


图7 机间间距变化曲线

Fig. 7 The distance between the UAVs

图8a、图8b分别表示各无人机与障碍中心 O_1, O_2 间的距离变化曲线。从中可以看出，每架无人机都能够与障碍中心 O_1, O_2 保持 100 m 以上的安全距离。

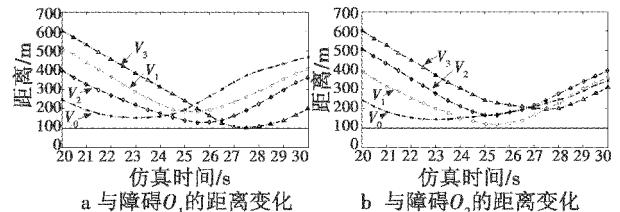


图8 编队无人机与空间障碍之间的距离变化

Fig. 8 The distance between UAV formation and the obstacles

图9为重构过程中无人机速度的变化，从中可以看出无人机能够根据自身的动力学特性，按要求达到指定速度。图10为无人机期望到达时间，从图中可以看出，重构指令下达之后，在第 40 s 时各无人机的期望到达时间趋于一致，保证了编队的协同到达重构区域。在第 45 s 时，无人机的期望到达时间趋向于0，表示无人机编队已经顺利到达了指定的重构区域。

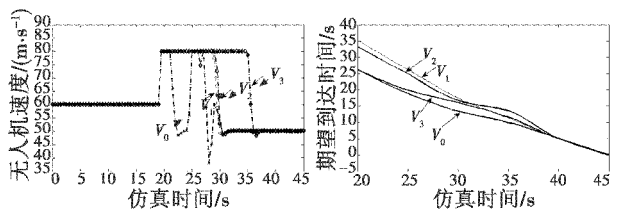


图9 编队无人机速度变化曲线

图10 编队无人机期望到达时间曲线

Fig. 9 Velocity curve of UAV formation

Fig. 10 Expected arrival time curve of UAV formation

图11为改进DE算法与标准DE算法性能对比。

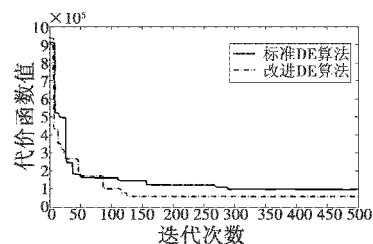


图11 改进DE算法与标准DE算法性能对比
Fig. 11 Performance of the improved and the standard DE algorithm

改进 DE 算法在迭代 130 次就趋于稳定且代价为 5×10^4 , 而标准 DE 算法需要迭代 300 次才趋于稳定且代价为 9.7×10^4 。可以看出, 改进 DE 算法性能更为优越。

5 结束语

无人机编队重构控制是无人机协同控制的一项关键技术。本文提出了一种基于改进微分进化的无人机编队重构安全控制方法, 并通过构建障碍环境下的仿真, 验证了算法的有效性。下一步工作将研究如何针对实际无人机编队平台来使用该方法, 达到重构安全控制的目的。

参 考 文 献

- [1] 樊琼剑, 杨忠, 方挺, 等. 多无人机协同编队飞行控制的研究现状[J]. 航空学报, 2009, 30(4): 683-691.
FAN Q J, YANG Z, FANG T, et al. Research status of coordinated formation flight control for multi-UAVs[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2009, 30(4): 683-691.
- [2] FASANO G, ACCARDO D, MOCCIA A, et al. Multisensor based fully autonomous non-cooperative collision avoidance system for UAVs[C]//Proceedings of the AIAA Infotech @ Aerospace Conference and Exhibit, Rohnert Park, California, 2007: AIAA-2007-2847.
- [3] KUWATA Y, HOW J P. Robust cooperative decentralized trajectory optimization using receding horizon MILP[C]//Proceedings of the American Control Conference, New York, USA; IEEE, 2007: 522-527.
- [4] ZHANG X X, DUAN H B, YU Y X. Receding horizon control for multi-UAVs close formation control based on differential evolution[J]. Science China: Information Sciences, 2010, 53(2): 223-235.
- [5] 王鹏, 丁宝苍, 韩崇昭. 多智能体系统的分布式预测控制器设计[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2012, 9(1): 82-87.
WANG P, DING B C, HAN C Z. Distributed model predictive controller design for multi-agent systems[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2012, 9(1): 82-87.
- [6] 茹常剑, 魏瑞轩, 戴静, 等. 基于纳什议价的无人机编队自主重构控制方法[J]. 自动化学报, 2013, 39(8): 1349-1359.
RU C J, WEI R X, DAI J, et al. Autonomous reconfiguration control method for UAV's formation based on Nash bargain[J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(8): 1349-1359.
- [7] 熊伟, 陈宗基, 周锐. 运用混合遗传算法的多机编队重构优化方法[J]. 航空学报, 2008, 29(s): 209-214.
XIONG W, CHEN Z J, ZHOU R. Optimization of multiple flight vehicle formation reconfiguration using hybrid genetic algorithm[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2008, 29(s): 209-214.
- [8] REN W. Consensus strategies for cooperative control of vehicle formations[J]. Control Theory & Applications, 2007, 1(2): 505-512.
- [9] MAYNE D Q, RAWLINGS J B, RAO C V, et al. Constrained model predictive control: Stability and optimality[J]. Automatica, 2000, 36(6): 789-814.
- [10] TRODDEN P, RICHARDS A. Multi-vehicle cooperative search using distributed model predictive control[C]//Proceedings of AIAA Conference on Guidance, Navigation and Control, 2008: AIAA 2008-7138.
- [11] STORN R, PRICE K. Differential evolution—A simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces[R]. Technical Report International Computer Science Institute, 1995.
- [12] 袁俊刚, 孙治国, 曲广吉. 差异演化算法的数值模拟研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(20): 4646-4648.
YUAN J G, SUN Z G, QU G J. Simulation study of differential evolution[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(20): 4646-4648.

欢迎关注新浪微博 @电光与控制