

具有周期性双层优化结构的无人机集群航路规划模型

赵学军*, 董玉浩, 袁修久, 包壮壮, 李嘉林, 梁晓龙

空军工程大学研究生院, 西安 710051

摘要 针对多种威胁条件下的无人机集群航路规划问题, 提出了集群控制方法和周期性双层优化算法。以定点抵达任务为背景, 将 d -范数、冲击函数与反曲函数结合起来, 构建了能够实现雷诺兹准则的集群动态控制模型, 并采用设计出的周期性双层优化算法求解中心无人机的航路规划问题。通过仿真算例, 验证了该模型的实效性和优化算法的可行性, 与遗传算法-人工势场混合算法相比, 周期性双层优化算法求解效率更高且优化效果更好。

关键词 无人机; 集群航路规划; 军用仿真

随着各类飞行器技术的快速发展, 现代空中战斗环境也日趋复杂, 无人机(UAV)集群凭借其机动性强、适应性强、代价较低等优点逐渐成为执行空中任务的重要手段, 而作为无人机及其集群执行任务的关键核心, 实现集群的动态控制和优化无人机航路也一直作为集群任务规划的研究重点^[1-3]。在无人机集群执行侦察、攻击、救援等任务的过程中, 集群控制能够保证其稳定性, 而航路规划^[4]是无人机自主应对外界威胁和降低任务代价的关键。

实现无人机集群的动态控制主要包括维持队形、稳定速度和防止碰撞3点要求, 通过设计集群协议来实现, 而集群协议的设计遵循自然界中的种群规则。雷诺兹等人在1986年提出雷诺兹准则, 即种群集中准则、防止碰撞准则和速度匹配准则^[5], 并完成了计算机上的群行为演示, 雷诺兹准则符合无人机集群动态控制的要求^[6], 本质上是智能体集群控制的理论基础。根据雷诺兹准则的数学原理, 本文引入了成对势的思想, 并通

过 d -范数、冲击函数和反曲函数构造了光滑成对势, 实现了无人机之间合力的动态变化过程, 达到了集群动态控制的3点要求。

人工势场法(APF)是实现无人机避障的常用算法, 传统人工势场法存在的种种问题在其不断改进中被逐渐克服, 诸如局部最优值、目标点不可达和航迹点无法实现等^[7-10]。遗传算法(GA)及相关智能算法^[11-13]具有收敛速度快的优点, 因此也常与人工市场法相结合, 被用来解决多约束条件下无人机的路径规划问题。

李原和杜于飞^[14-15]提出了一种由周期性快速搜索遗传算法(PFSGA)与人工势场法组合而成的联合算法(PFSGA-APF), 使用这种算法解决无人机集群在多突发威胁条件下的实时路径规划问题, 能够实现距离优化与无人机避障的结合, 但其算法基础是传统的人工势场法, 因此该方法具有距离优化效果不佳的缺点。本文基于改进的速度矢量法与周期进化算法, 设计出双层优化算法, 经算例仿真验证, 具有更好的优化效果。

收稿日期: 2019-03-12; 修回日期: 2019-04-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(61472443; 61703427)

作者简介: 赵学军(通讯作者), 副教授, 研究方向为军用仿真的理论及技术, 电子信箱: 821387717@qq.com; 董玉浩(共同第一作者), 硕士研究生, 研究方向为军用仿真的理论及技术, 电子信箱: 13087696607@163.com

引用格式: 赵学军, 董玉浩, 袁修久, 等. 具有周期性双层优化结构的无人机集群航路规划模型[J]. 科技导报, 2019, 37(13): 53-58; doi: 10.3981/j.

issn.1000-7857.2019.13.007

1 基于雷诺兹准则的集群动态控制模型

1.1 雷诺兹准则及其数学模型

1987年,雷诺兹等人基于种群规则提出了3条启发式准则^[5],即雷诺兹准则。

- (1) 种群集中:邻近个体不可互相远离;
- (2) 防止碰撞:邻近个体不可发生碰撞;
- (3) 速度匹配:邻近个体的速度要尽可能接近。

这些规则分别对应了种群行进过程中的避免落单原则、避免内斗原则和速度适中原则,被认为是智能体(无人机)集群协议的重要基础,雷诺兹准则使得群行为在计算机上的演示成为了可能。

集群中的无人机数量可多可少,当讨论二元群^[16]等无人机数量较少的集群时,可以直接建立模型;但研究无人机数量较多的动态集群时,通常采用分布式状态估计^[17],构建邻近子群是分布式处理动态集群的常见手段。

定义1:无人机 a_j 是无人机 a_i 的邻近个体,当且仅当

$$\|a_j - a_i\|_d \leq d_i \quad (1)$$

式中, $\| \cdot \|_d$ 是衡量集群中无人机之间位置关系的范数, d_i 是无人机 a_i 的安全半径。 a_i 的全部邻近个体称之为 a_i 的邻近子群。

由此,集群的动态控制问题被转化为无人机邻近子群的动态控制问题,即制定如下群协议,使得邻近子群中的无人机满足雷诺兹准则。

$$u_i^d = c_i^d + v_i^d \quad (2)$$

群协议包含两个部分,第一部分使集群满足集中和防撞规则,第二部分使集群满足速度匹配规则,后者容易实现,本文通过光滑的引力、斥力成对势来实现第一部分。

1.2 光滑成对势

为了实现对邻近子群中无人机相对位置的动态控制,成对势被引入该模型:当无人机之间的距离较近时,智能体互相排斥,无人机的距离较远时,智能体互相吸引;两者的合力随着相对位置的光滑变化而共同改变,使得机间距离始终维持在满足规则的受力平衡点附近。

机间距离的衡量标准在本文中被设计成一种光滑的范数,即 d -范数。

定义2:若 R_m 到 R_l 的非负映射 $\| \cdot \|_d$ 满足:

$$\|z\|_d = \frac{1}{\varepsilon} \left[\sqrt{1 + \varepsilon \|z\|^2} - 1 \right] \quad (3)$$

式中 $x \in R^n$, $\varepsilon > 0$;则该映射被称为 d -范数。

下面证明 d -范数在0处可微。

证明:因为 $\|x\|_d$ 的梯度 $\nabla \|x\|_d$ 可以表示为

$$\nabla \|x\|_d = \left[\frac{1}{\varepsilon} \left(\sqrt{1 + \varepsilon \|x\|^2} - 1 \right) \right]' = \frac{x}{\sqrt{1 + \varepsilon \|x\|^2}} = \frac{x}{1 + \varepsilon \|x\|_d} \quad (4)$$

所以 $\lim_{x \rightarrow 0} \nabla \|x\|_d = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{x}{1 + \varepsilon \|x\|_d} = 0$,即 $\|x\|_d$ 在0处可微;事实上, d -范数处处可微,这一性质使它被用来构造光滑成对势。在 d -范数的基础上,本文采用冲击函数和不均匀反曲函数来实现有限截止点的受力平衡和合力的变化过程。

冲击函数^[18]也称测试函数,它将光滑(n 阶连续可导)且紧支撑的 R^n 上的自变量映射到 R^1 上。为实现合力的平滑变化和有限截止点的受力平衡,构造具有有限截止点的冲击函数如下:

$$b_h(x) = \begin{cases} 1, & x \in [0, h) \\ \frac{1}{2} \left[1 + \cos \left(\frac{\pi(x-h)}{(1-h)} \right) \right], & x \in [h, 1) \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (5)$$

式中, $h \in (0, 1)$,是冲击函数的下降点, $b_h'(x)$ 一阶光滑,且在 $[1, \infty)$ 上满足 $b_h'(x) = 0$, $|b_h'(x)|$ 关于 x 一致有界。

当 $h=0.5$ 时, $b_h(x)$ 在 $[0, \infty)$ 上的部分图像如图1所示。

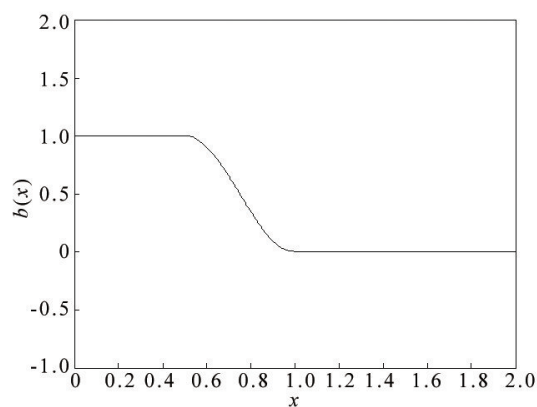


图1 具有有限截止点的冲击函数

Fig. 1 Bump function with finite cutoff point

$b_h(x)$ 在区间 $[0, 1]$ 上平滑下降,点 $(1, 0)$ 为其下降的有限截止点,即 $b_h(x)$ 在 $x > 1$ 时保持不变;因为不同智能体区域的影响半径 d 并不一定相同,所以在应用 $b_h(x)$

时,应根据无人机的安全半径对自变量进行放缩,令 $x = x/d$ 。

反曲函数是一类具有S型曲线的函数。为体现引力和斥力随距离变化时此消彼长的过程,设计反曲函数如下:

$$s(x) = \frac{1}{2}[(a+b)g(x+c) + (a-b)] \quad (6)$$

式中, x 是自变量, $g(x) = x/\sqrt{1+x^2}$ 是为了确保 $s(0)=0$, 参数满足 $0 < a < b$, $c = |a-b|/\sqrt{4ab}$ 。

当 $a=1, b=2$ 时, $s(x)$ 在 $(0,0)$ 附近的图像如图 2 所示。

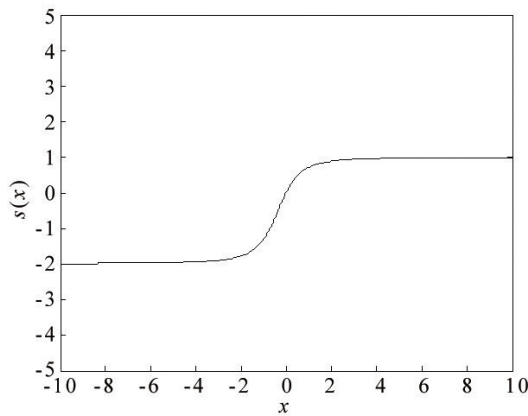


图2 体现合力变化的反曲函数

Fig. 2 Uneven sigmoidal function reflecting the change of resultant force

以处处可微的 d -范数为基础,通过冲击函数 $b_h(x)$ 实现了有限截止点上的受力平衡,通过反曲函数 $s(x)$ 实现了合力随距离的变化,得到平滑变化的力函数

$$p(x) = \rho_h(x/d)s(x-d_0) \quad (7)$$

其中, d 是无人机的影响半径,基于力函数,构造积分上限函数。

$$P(x) = \int_{d_0}^x p(s)ds \quad (8)$$

$P(x)$ 即为光滑成对势(图 3), d_0 是使得 $P(x)$ 取得最小值的点。

光滑成对势可以实现对无人机集群的动态控制(图 4),使得集群前进时始终围绕着相对位置处于中心的无人机(红色无人机),基于这种技术,通过智能算法来求解中心无人机的最优路径,即可完成集群的航路规划。

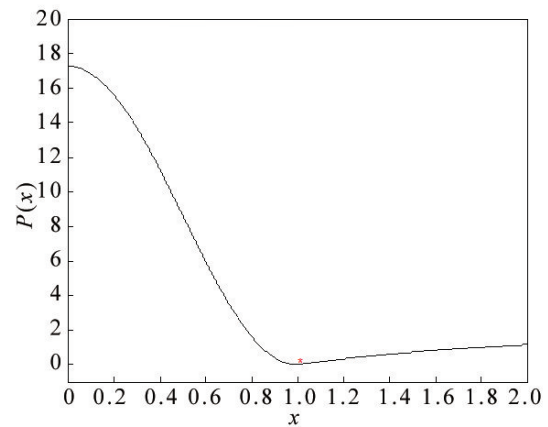


图3 光滑成对势

Fig. 3 Smooth paired potential based on the force function

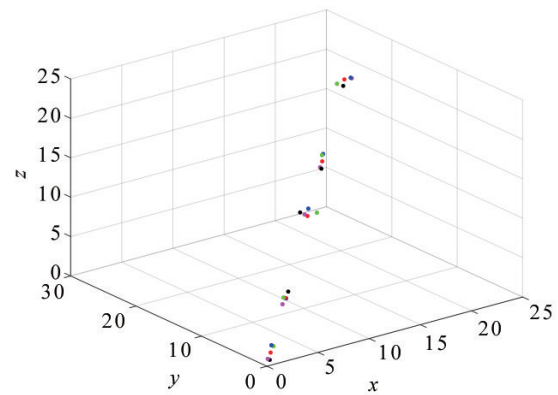


图4 不同时刻的无人机集群示意

Fig. 4 UAV cluster at different times

2 基于速度矢量法的周期性双层优化

2.1 速度矢量法

速度矢量法是解决路径规划问题的新方法,其物理依据是:基于周围环境中的威胁区域和目标点的位置,人为地构造速度矢量,使无人机沿特定方向前进一段距离;而后无人机根据其于威胁区域、目标点的位置关系更新速度,并在下一时间节点到达特定位置;依次更新速度,得出它在每一时间节点上的位置,最终完成避障并抵达目标点。

当无人机集群进入待规划区域后,任意位置、任意一个体的速度矢量均由两部分合成:目标点的牵引速度和障碍物的排开速度,这类似于人工势场法,但比后者更加直观,容易控制。两类速度表示为:

$$v_a(d_g) = -\nabla F_a(d_g) \quad (9)$$

$$v_r(d_i) = \sum -\nabla F_r(d_i) \quad (10)$$

式(9)描述了无人机的牵引速度 v_a 与牵引作用 F_a 的关系,后者由当前位置到目标点的距离 d_g 决定;式(10)中,无人机的排开速度 v_r 是各威胁区域对其排开速度的向量和,每个区域的排开作用 F_r 由当前位置到威胁区域中心的距离 d_i 决定; ∇ 表示求梯度, Σ 表示求向量和。

基于速度向量法和改进后的人工势场法^[7],无人机的速度 v 可以表示为

$$v = \alpha \cdot v_a(d_g) + \beta \cdot v_r(d_i) \quad (11)$$

式中, α 和 β 分别是牵引速度和排开速度的惩罚因子,代表两种速度对无人机的影响程度。

其中牵引速度可以表示为

$$v_a(d_g) = \begin{cases} \frac{1}{2}d_g^2 & d_g \leq d_c \\ d_c d_g - \frac{1}{2}d_c^2 & d_g > d_c \end{cases} \quad (12)$$

排开速度可以表示为

$$v_r(d_i) = \begin{cases} \left(\frac{1}{d_i} - \frac{1}{d}\right) \frac{d_g^2}{d_i^2} + \left(\frac{1}{d_i} - \frac{1}{d}\right)^2 d_g & d_i \leq d \\ 0 & d_i > d \end{cases} \quad (13)$$

式(12)中 d_c 是人为设置的距离控制因子,当无人机距离目标点过远时,用 d_c 控制无人机的前进,从而避免 $v_a(d_g)$ 过大造成的无人机穿过威胁区域的情况;式(13)中的 d 表示无人机的影响半径,它决定了只有临近威胁区域会影响到无人机的飞行,在排开速度中加入 d_g 以减少无人机靠近目标点时附近威胁区域的影响。

2.2 周期性双层优化算法

遗传算法是从自然界的种群遗传出发,通过遗传算子处理每代种群中适应度较高的个体,进而得到新的种群。在解决路径优化问题时,周期进化算法比传统遗传算法的敛速更快,具有更好的优化效果,其生物学基础是自然界的“突变学说”,即整体环境(地球)会周期性地发生毁灭性灾变,导致所有物种退化,并出现新的物种,这种设计思路使得适应度函数在迭代中螺旋上升,全局性更强。

在求解最优航路的过程中,先用周期进化算法优化出距离代价最小的全局路径,在此路径基础上应用速度向量法进行修正,使无人机集群达到躲避威胁区域的目的,双层优化的过程如图5所示。

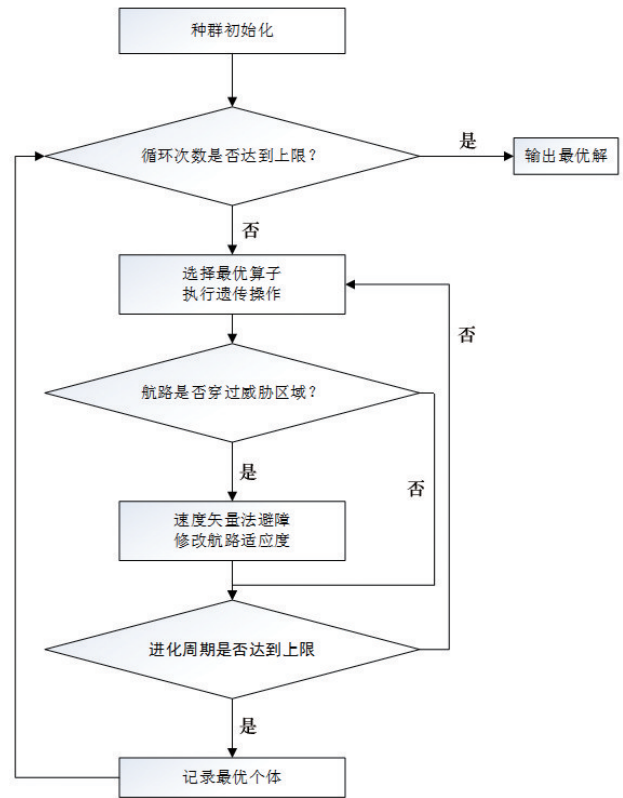


图5 周期性双层优化算法

Fig. 5 Periodic bilevel optimization algorithm

3 仿真算例

在考虑威胁区域和距离代价的前提下,用以下算例验证算法的性能:假设中心无人机由起点向终点飞行,燃料充足且自身不会突发故障,各相关数据见表1。

表1 仿真算例相关数据

Table 1 Relevant data of the example

起点	威胁区1 中心	威胁区2 中心	威胁区3 中心	威胁区4 中心	终点
坐标	(0,0)	(2.5,2.5)	(3.95,3.05)	(7.5,7.5)	(9.4,11.9)
半径		0.5	0.75	1.5	1.9

分别用人工势场法和周期性双层优化算法求解该算例,所得最优路径分别如图6所示。

虽然两种方法均达到了终点,但周期性双层优化算法收敛速度更快,它所求得的最优路径在距离上比人工势场法缩短了约14.5%。

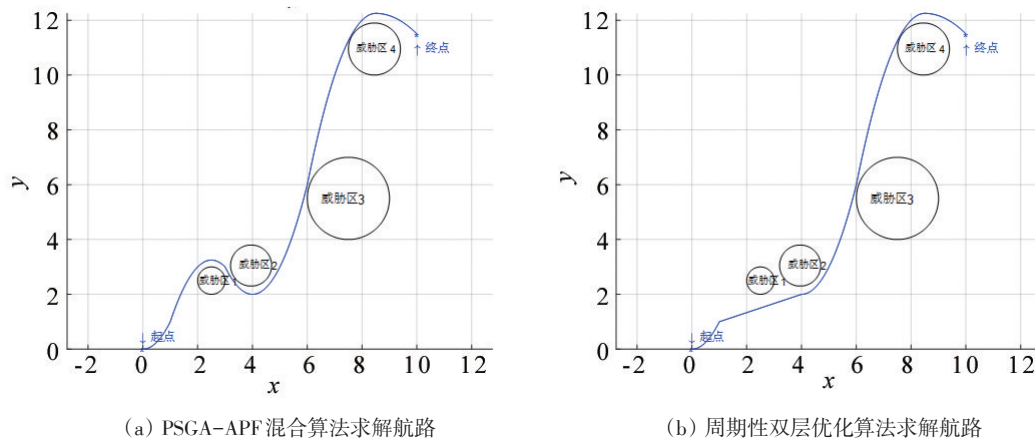


图6 两种算法求解的最优航路

Fig. 6 Optimal route solved by two algorithms

4 结论

根据雷诺兹准则的实际意义,本研究构造了基于 d -范数、冲击函数和反曲函数的光滑成对势,并据此提出了动态控制无人机集群的方法,实现了无人机集群的编队飞行。分析并融合了周期进化算法与速度矢量法,设计出周期性双层优化算法,仿真结果显示,该算法收敛速度更快,优化结果更加明显。

参考文献(References)

- [1] Yang J, You X H, Wu G X, et al. Application of reinforcement learning in UAV cluster task scheduling[J]. *Future Generation Computer Systems*, 2019(95): 140-148.
- [2] Cui L, Zhang L F, Zhang Y H, et al. Study on modeling threat for flight path planning of UAV[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2017, 45(24): 149-153.
- [3] Kang M, Liu Y, Zhao Y. A threat modeling method based on Kalman filter for UAV path planning[C]//2017 29th Chinese Control And Decision Conference (CCDC). IEEE, 2017: 3823-3828.
- [4] Shen H, Chen J, Li H, et al. Research on Real-Time flight path planning of UAV based on grey prediction[C]//2016 9th International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID). IEEE, 2016(1): 62-67.
- [5] Reynolds C W. Flocks, herds, and schools: A distributed behavioral model[J]. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, 1987, 21(4): 25-34.
- [6] Olfati-Saber R. Flocking for multi-agent dynamic systems: algorithms and theory[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2006, 51(3): 401-420.
- [7] Zhang J L, Yan J G, Zhang P. Fixed-Wing UAV formation control design with collision avoidance based on an improved artificial potential field[J]. *MATEC Web of Conferences*, 2018(6): 78342-78351.
- [8] 卢艳军, 李月茹. 基于改进人工势场法的四旋翼飞行器航迹规划[J]. *火力与指挥控制*, 2018, 43(11): 121-124.
Lu Yanjun, Li Yueru. Path planning for quadrotor based on improvement of artificial potential field[J]. *Fire Control & Command Control*, 2018, 43(11): 121-124.
- [9] 杨丽春, 顾颖彦, 白宇. 基于改进人工势场法的无人机在线航路规划算法[J]. *电子技术应用*, 2018, 44(4): 5-9.
Yang Lichun, Gu Yingyan, Bai Yu. UAV's online route planning algorithm based on improved artificial potential field[J]. *Application of Electronic Technique*, 2018, 44(4): 5-9.
- [10] 叶彬强, 王一. 基于人工势场法的机器人避障算法[J]. *重庆理工大学学报(自然科学版)*, 2012, 26(9): 82-85.
Ye Binqiang, Wang Yi. Research of obstacle avoidance algorithm for robot based on artificial potential field[J]. *Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science Edition)*, 2012, 26(9): 82-85.
- [11] 林诗洁, 董晨, 陈明志, 等. 新型群智能优化算法综述[J]. *计算机工程与应用*, 2018, 54(12): 1-9.
Lin Shijie, Dong Chen, Chen Mingzhi, et al. Summary of new group intelligent optimization algorithms. *Computer Engineering and Applications*, 2018, 54(12): 1-9.
- [12] 任波, 何迈, 周焘. 改进遗传模拟退火算法的航迹规划方法研究[J]. *飞行力学*, 2008, 26(2): 85-88.
Ren Bo, He Mai, Zhou Tao. Study on route planning based on an improved genetic simulated annealing algorithm[J].

- Flight Dynamics, 2008, 26(2): 85–88.
- [13] 郑锐, 冯振明, 陆明泉. 基于遗传算法的无人机航路规划优化研究[J]. 计算机仿真, 2011, 28(6): 88–91.
Zheng Rui, Feng Zhenming, Lu Mingquan. Application of particle genetic algorithm to path planning of unmanned aerial vehicle. Computer Simulation, 2011, 28(6): 88–91.
- [14] 李原, 张会, 吴思瑾. 多基地多无人机协同侦察规划模型和模型求解方法[J]. 系统仿真学报, 2016, 28(10): 2540–2545.
Li Yuan, Zhang Hui, Wu Sijin. Planning model and model solve method of multi-base multi-UAV cooperative reconnaissance. Journal of System Simulation. 2016, 28(10): 2540–2545.
- [15] 杜于飞, 覃太贵, 邓秀方, 等. 多无人机协同任务规划问题[J]. 数学的实践与认识, 2017, 47(14): 52–62.
Du Yufei, Qin Taigui, Deng Xiufang, et al. Mission planning of multiple unmanned aerial vehicles. Mathematics in Practice and Theory. 2017, 47(14): 52–62.
- [16] Wang X, Wang L, Wu J. Impacts of time delay on flocking dynamics of a two-agent flock model[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2019(70): 80–88.
- [17] Xie D, Zhang S, Xie J. Distributed dynamic state estimation with flocking mobile agents[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2018(509): 1195–1206.
- [18] Hájek P, Johanis M. Smoothing of bump functions[J]. Journal of Mathematical Analysis & Applications, 2008, 338(2): 1131–1139.

Route planning of UAV cluster via periodic bilevel optimization

ZHAO Xuejun*, DONG Yuhao, YUAN Xiujiu, BAO Zhuangzhuang, LI Jialin, LIANG Xiaolong

Graduate School of Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China

Abstract Aiming at route planning of UAV cluster under various threats, this paper proposes a cluster control method and periodic bilevel optimization algorithm. Based on a fixed-point arrival mission, a cluster dynamic control model is constructed by combining d-norm, impact function and inverse function, which can realize Reynolds rules. A periodic bilevel optimization algorithm is designed to solve the route planning problem of central UAV. Effectiveness of the model and feasibility of the optimization algorithm are verified by simulation examples. Compared with the hybrid genetic algorithm ie. artificial potential field algorithm, the periodic bilevel optimization algorithm has a higher efficiency and better optimization effect.

Keywords UAV; cluster route planning; military simulation ●



(编辑 徐丽娇)