

异构无人机编队防御及评估策略研究



左剑凯¹ 吴杰宏¹ 陈嘉彤² 刘泽源³ 李忠智¹

1 沈阳航空航天大学计算机学院 沈阳 110136

2 沈阳航空航天大学航空发动机学院 沈阳 110136

3 沈阳航空航天大学航空宇航学院 沈阳 110136

(sau_zjk@foxmail.com)

摘要 无人机编队对抗问题一直是科学研究的一个热点,但针对无人机群防御部署问题的相关研究较少。文中以防御无人机对普通无人机(如民用、商用、侦查、巡航、勘探)的保护问题为背景,对已有的异构无人机编队的编码解码方案进行改进。从导弹飞行距离和非武装无人机的安全两个方面建立适应度函数,使用遗传算法对无人机防御编队进行优化。针对不同规模 and 不同队形的敌机编队,对我方无人机编队进行优化。求解结果表明,在不同的敌机编队中,遗传算法均能在 30 次迭代内以较快速度收敛于最优值,并给出相应的优化队形。最后通过概率效果评估,绘制了 5 种战况损失曲线,可以看出所设计的防御部署策略是有效的,我方无人机最大损失数量为 6,最小损失数量为 0,平均损失数量为 3,平均损失率为 18.75%。该方法对异构无人机群的防御部署研究具有一定的参考价值。

关键词:遗传算法;编队优化;多智能体;群体防御部署;战损评估

中图分类号 TP181

Study on Heterogeneous UAV Formation Defense and Evaluation Strategy

ZUO Jian-kai¹, WU Jie-hong¹, CHEN Jia-tong², LIU Ze-yuan³ and LI Zhong-zhi¹

1 School of Computer Science, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China

2 School of Aviation Engine, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China

3 School of Aerospace, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China

Abstract The problem of UAV formation confrontation has always been a hot topic in scientific research, and there are few related studies on the deployment of UAV group defense. Based on the protection of defensive UAV against common UAV, such as civil, commercial, reconnaissance, cruise and exploration, the coding and decoding scheme of existing heterogeneous UAV formation is improved. The fitness function is established from the missile flight distance and the safety of unarmed drones, and the genetic algorithm is used to optimize the defense formation of the drone. According to the situation of enemy UAV of different sizes and various formations, the formation of our UAV is optimized. The solution results show that the genetic algorithm can converge to the optimal value in different enemy formations at a high speed within 30 iterations, and the corresponding optimized formation is given. Finally, by evaluating the probability effect and drawing the loss curve of five combat situations, it can be seen that the defense deployment strategy designed in this paper is effective. The maximum loss quantity of our UAVs is 6, minimum loss quantity is 0, average loss quantity is 3, and average loss rate is 18.75%. This method is of great significance for the research of UAV group defense deployment.

Keywords Genetic algorithm, Formation optimization, Multi-agent, Swarm defense deployment, Battle damage assessment

1 引言

20 世纪 20 年代,英国 A. M. 洛教授参与研制的“喉”式单翼无人机在英国海军“堡垒”号军舰上试飞成功。与此同时,英国皇家空军研制出了不同用途的无人机,自此以后,无人机

的技术不断趋于成熟。作为 21 世纪科技的结晶,无人机在很多方面都得到了广泛的应用,如国防领域、救灾应用、新闻行业以及科学研究等。目前,已经有较多学者对无人机空战方面的应用进行了研究。

Zhao 等^[1]提出了一种改进的决策树算法,建立了空战态

到稿日期:2019-11-07 返修日期:2020-01-15 本文已加入开放科学计划(OSID),请扫描上方二维码获取补充信息。

基金项目:航空科学基金(2018ZC54013);辽宁省教育厅创新人才基金(2018059);国家级大学生创新创业训练计划项目(201910143423)

This work was supported by the Aeronautical Science Foundation of China(2018ZC54013), Innovative Talents Foundation of Education Department of Lianing Province(2018059) and National Innovation and Entrepreneurship Training Program for College Students(201910143423).

通信作者:吴杰宏(wujiehong@sau.edu.cn)

势分类规则,对无人机的空战态势进行估计,并将模型应用于一对一、一对二、二对二 3 种场景,所得结果的准确度高于贝叶斯推理方法。Li 等^[2]通过将博弈论与直觉模糊集相结合,建立了求解不确定性环境下的纳什均衡规划模型,并采用改进的差分进化算法对模型进行求解,解决了不确定性环境下的无人机编队决策问题。然而,单无人机存在搜索能力不足、观察范围较小以及完成任务能力有限等缺点,无法满足较为复杂的任务,其适用范围也相对较小。

多智能体技术是分布式人工智能的一个重要分支,同时也是人工智能领域的前沿学科,适用于解决复杂、开放的分布式系统问题。自 1989 年举办第一届国际多智能体欧洲学术会议以来,该技术越来越受到研究人员的重视。而随着多智能体技术的发展,多无人机协同编队技术出现并被应用于众多领域。目前,针对多智能体和多无人机问题的研究方法中,应用较多的是遗传算法:Akopov 等^[3]提出了一种并行多智能体实数编码遗传算法,并将其用于大规模的黑箱系统单目标优化问题;Zhang 等^[4]以层级编码方法为基础对大规模无人机编队进行编码,使用遗传算法和遗传模拟退火算法求解无人机最优编队,并将算法应用于两种敌机编队的情况,实验结果表明遗传模拟退火算法的性能优于遗传算法;Xia 等^[5]在遗传算法的基础上,提出了一种目标分配算法用于评估优化队形,最后分别在 3 种作战场景中进行了仿真,得到了伤亡率较低的优化编队;Qian 等^[6]将遗传算法应用于直升机编队的优化问题,以各机自主优先权为决策思想,使用遗传算法对直升机编队进行求解,从而证明了双机协同作战的效率优于单机进行目标攻击的效率;其他学者也在遗传算法的基础上做了改进,并用于多机编队的研究中^[7-10]。以上针对多智能体问题的研究主要适用于群体内个体无差异的情况。除此之外,有学者使用神经网络方法对多机编队问题进行研究。Pu 等^[11]将 BP 神经网络应用于 2:4 多机对抗问题中,引入威胁指数法计算协同优先权并将计算结果输入 BP 网络,得出较为准确的结果。该研究主要适用于规模较小的多无人机编队问题,当编队规模较大时,神经网络的计算量较大,因而不便执行。

在实际的多机编队问题中,机群规模通常为 6~12 架,并且群体中的个体可能是多样化的,不具有相同的特性。这种情况下的多智能体问题可能更加复杂,因此在对其研究的过程中需要对现有方法进行改进。本文在前人所做研究的基础上,针对无人机群的防御部署问题进行研究,主要针对规模为 16 架无人机的编队问题。同时,此项研究对于实际应用具有较好的适用性。例如,美俄在近年来的作战行动中开始使用高度智能化无人作战平台,并将其列为指挥控制的重点要素;美海军提出了由 F-35 战斗机引导多架隐形无人机遂行超视距、网络化空中打击和空战的战法。战法是 1 架 F-35 引导 2~3 架 MQ-9“死神”攻击型无人机组成一个单元,一个编队由 2~4 个单元组成,与敌防空军发动空战。其中,F-35 数量为 2~4 架,无人机数量为 6~12 架,总机数为 8~16 架。从美海军提出的空战战法的无人机编队规模中可以看出,本文所研究的 16 机编队问题解决方案能够满足实际的技术应用需求。

该问题的研究背景如下:假设我方现有一定数量的非武装无人机正在进行某种科学研究,为防止其他无人机编队进行干扰,我方需要派出一定数量的防御型无人机进行部署。本文以遗传算法为基础针对该问题提出一种解决方案:首先根据防御部署问题,对已有的无人机群编码解码方案进行改进,然后从导弹飞行距离和非武装无人机的安全两个方面建立遗传算法的适应度函数。最后在不同规模、不同队形的敌机编队下进行仿真,得出了各种情况下我方无人机群的最优防御队形。

2 编码方案与解码方案

2.1 基本编码单元与解码方案

大规模飞机编队的编队方案^[12]采用多个基本单元的不同组合方式来实现多无人机的编队。基于层级方式组建起来的多无人机编队可以有效地对不同的无人机编队队形进行编码和解码,目前的多无人机基本编队队形主要分为 4 种,如图 1 所示。

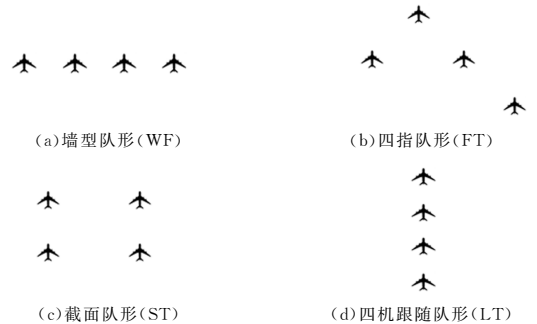


图 1 空战编队四机编队队形

Fig. 1 Air combat four aircraft formation

采用二进制编码方案进行编码,基本单元编码方案如表 1 所列。

表 1 基本四机编队编码方案

Table 1 Basic four-machine formation coding scheme

编码队形	对应编码
WF	00
FT	01
ST	10
LT	11

采用层级编码方案进行编码:本文研究的是 16 架无人机编队方案,按照层级编码方法,分为父队形和子队形两级编码。整个无人机编队由 4 个四机基本编队队形(子队形)组成,4 个基本队形根据父队形进行组合。而父队形同样为 4 种基本编队队形之一,其中每个单机表示一个子队形。因此确定表示队形部分的二进制编码为 10 位,其中前 2 位表示父队形,后 8 位表示子队形。

在本文所研究的问题中,需要在我方队形中对防御型无人机和非武装无人机进行区分,因此需要对以上编码方案进行改进:利用 4 位二进制码对 16 架无人机进行编号,即二进制编码 0000 到 1111 分别对应十进制序号 1 到 16。一串 4 位二进制码可以表示一架防御无人机对应的序号,则需要原先的 10 位编码后添加相应数量的 4 位二级制码以表示每一架防御机的序号。

2.2 解码方案

解码过程主要是将一串二进制码通过一定的方法转换为其对应的无人机编队队形,即每一架无人机的位置坐标。以某一编队队形为例,图2为解码过程示意图。

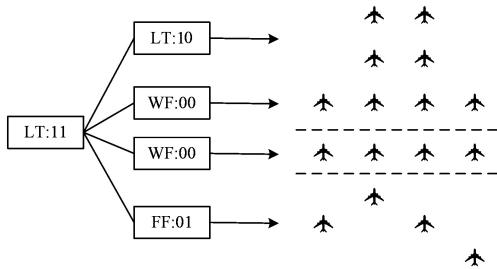


图2 无人机编队队形的解码过程

Fig. 2 UAV formation configuration coding process

从图2可以看出,解码过程主要分为两个部分:第一部分是对父队形编码进行解码,以确定每一个基本编队队形的相对位置;第二部分是对每一个基本编队队形进行解码,以确定每一架飞机的具体坐标位置。具体实现过程如下。

(1)计算每个基本编队的局部坐标:将每一个四机编队单独置于直角坐标系中,使得该队形中心点处与坐标原点重合,并根据各无人机之间的距离关系计算出此时编队中每一架无人机的坐标位置。在此将每两个相邻无人机的纵横距离规定为200m,则4种队形的坐标如图3所示。

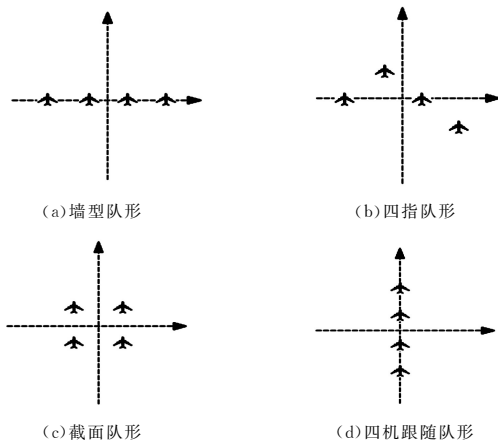


图3 4种基本编队的局部坐标分布情况

Fig. 3 Local coordinate distribution of four basic formations

对于每一个基本队形,确定其局部坐标后,规定该队形任意两架飞机之间 x 方向的最大距离,即该队形宽度为 W ;规定任意两架飞机之间 y 方向的最大距离,即队形长度为 L 。

(2)计算子队形中心点坐标:得出每种基本队形的局部坐标和长宽后,每个子队形的中心点坐标按照下式计算:

$$X_i' = X_i \pm (L + 0.5L_i) \quad (1)$$

$$Y_i' = Y_i \pm (W + 0.5W_i) \quad (2)$$

其中, X_i' 和 Y_i' 分别表示第 i 个子队形中心点的横坐标和纵坐标; X_i 和 Y_i 分别表示第 i 个子队形对应的父队形局部坐标; L_i 和 W_i 分别表示第 i 个子队形的长度和宽度; L 表示第 i 个子队形对应父队形中的单机与 x 轴之间的其他单机所对应子队形的长度, W 表示第 i 个子队形对应父队形中的单机与 y 轴之间的其他单机所对应子队形的宽度。

通过式(1)和式(2)可以确定每个子队形的中心点在实际

编队队形中的位置坐标。

(3)计算每架无人机的坐标:根据每个子队形中心点的位置坐标和不同队形的长和宽,可以通过下式计算每一架飞机的坐标:

$$x_{ij} = X_i' \pm L_i \quad (3)$$

$$y_{ij} = Y_i' \pm W_i \quad (4)$$

其中, x_{ij} 和 y_{ij} 分别表示第 i 个子队形的第 j 架飞机的横坐标和纵坐标。

(4)确定防御型无人机对应的序号:在确定无人机编队队形后,需要根据其余编码得出防御型无人机对应的序号。由上文所述,确定一架防御型无人机的序号需要一串4位的二进制编码,因此将剩下的编码以4位为单位分为若干组,将每一组编码转换为对应的十进制数,从而确定防御型无人机对应的序号。

3 适应度函数

3.1 无人机编队适应度函数的构建

适应度函数衡量了遗传算法中某一个体的优劣,是父代种群进化出子代种群的过程中用于筛选优良个体的重要依据。在非武装无人机防御问题中,适应度函数可以理解某种编队队形中防御机对非武装无人机进行保护的有效程度。本文从防御机和非武装无人机的角度分别建立计算编队适应度的指标函数。

(1)对于防御机而言,其任务是拦截敌机用于攻击我方非武装无人机的导弹。对于指定的某一架敌机、非武装无人机和防御机而言,其拦截过程如图4所示。其中, R 表示防御机到拦截点的距离, S_1 和 S_2 分别表示敌机到拦截点的距离和非武装无人机到拦截点的距离。

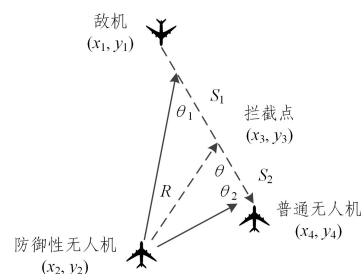


图4 防御机拦截过程

Fig. 4 Defense UAV interception process diagram

从降低防御机拦截难度的角度出发,定义导弹飞行距离指标:

$$\alpha_1 = \frac{R}{S_1} \quad (5)$$

式(5)表示拦截弹的飞行距离与敌机导弹的飞行距离之比。由于不同武器具有不同的毁伤原理,某些防空武器单纯或者在很大程度上依靠直接碰撞的方式来达到摧毁效果,如毒刺、前卫-1型和标枪系列导弹等武器都是依靠物理碰撞摧毁敌机,因此它们的速度都较高。为了降低拦截难度,最简单也是最高效的方法就是缩短我方拦截导弹的飞行距离,增大敌方导弹的飞行距离,使我方拦截系统留有更多的反应时间,并减少外界因素对我方拦截导弹精确度的影响,从而增加我方拦截导弹的拦截概率。

从降低拦截难度的角度看, α_1 越小, 即拦截弹的飞行距离相对敌机导弹的飞行距离越短时, 拦截难度越低。 α_1 的降低从两方面减小了拦截难度: 1) 当拦截点距离我方防御机较近时, 有助于防御无人机进行精确定位和快速拦截; 2) 当飞行距离较长时, 由于空气阻力和风向等原因, 拦截弹在飞行过程中可能会出现较大的制导误差, 从而降低拦截成功率。 缩短我方防御机拦截弹的飞行距离, 有助于减小空气阻力对制导精度的影响。

(2) 对于非武装无人机而言, 在拦截成功的前提下, 当敌机导弹的爆炸点距离非武装无人机较近时, 爆炸产生的能量以及弹片等可能会对非武装无人机产生一定影响, 甚至可能会损坏无人机。 带有爆破式战斗部、子母式战斗部和破片式战斗部的防空导弹都是通过自身战斗部的化学爆炸来摧毁敌方战机, 如西北风、SA-2、爱国者和游隼等防空导弹。

根据文献[13], 爆炸产生的冲击波峰值超压随爆点距离的关系符合下式:

$$\Delta p_m = \bar{A} \frac{\omega^{\frac{2}{3}}}{S_2^{\frac{2}{3}}} \quad (6)$$

其中, \bar{A} 为经验系数, 一般取 $2.26 \text{ MPa} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^{2/3}$; ω 为导弹战斗部的等效 TNT 当量; S_2 表示距爆点的距离。 在保证能够成功拦截敌机导弹的条件下, 应当尽量使爆炸点远离非武装无人机。 本文定义爆炸损伤指标如下:

$$\alpha_2 = e^{-S_2} \quad (7)$$

由式(6)可以看出, 冲击波的传播速度随着峰值超压的降低而急剧下降, 下降速度会逐渐趋于平稳, 符合递减的函数特性。 α_2 只要是一个关于爆炸点与非武装无人机距离的递减函数即可。 当 S_2 为 0 时, α_2 取最大值 1; 当 S_2 逐渐增大时, α_2 随之减小。 通过后期仿真, 指数形式优于其他函数形式(如反比例、幂函数等), 因此本文选用指数形式构建适应度函数(见式(7))。

综合以上两方面的因素, 本文在一架敌机、一架非武装无人机和一架防御机的情况下的建立适应度函数:

$$\alpha = \frac{1}{k_1 \alpha_1 + k_2 \alpha_2} \quad (8)$$

其中, k_1 和 k_2 代表指标权重系数, 数值取决于敌方导弹的弹头类别, 如 AIM-120, AIM-9L 等导弹的弹头采用聚能穿透弹头, 主要采用物理碰撞方式摧毁敌机, 其 k_1 值大于 k_2 值; 而西北风、SA-2、爱国者等导弹的弹头采用化学爆破式, 采用近距离爆炸方式来摧毁敌机, 其 k_1 值小于 k_2 值。

由以上分析可得, α_1 和 α_2 的取值越小, 越有利于我方编队对非武装无人机的防御作用。 而本文规定遗传算法的父代一律选择种群中适应度值较大的个体, 因此在原基础上对 $k_1 \alpha_1 + k_2 \alpha_2$ 取倒数。 而对于一架非武装无人机而言, 其适应度值为所有可以攻击到该非武装无人机的敌机所对应的适应度值之和。 整个无人机编队的适应度值为所有非武装无人机对应的适应度值之和:

$$\alpha_i = \sum_{j=1}^{q(i)} \alpha_{ij} \quad (9)$$

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \alpha_i \quad (10)$$

其中, i 表示第 i 架非武装无人机; j 表示第 j 架非武装无人机对应的第 j 架敌机; $q(i)$ 表示可以攻击到第 i 架非武装无人机的敌机总数; α_{ij} 表示第 j 架敌机攻击第 i 架非武装无人机时的总适应度值; n 表示非武装无人机的数量; λ 表

示整个编队的适应度值。

3.2 适应度函数的优化

式(8)综合考虑了防御机的拦截难度以及成功拦截后对非武装无人机的损伤。 而在实际计算中, 算法还需要考虑多种实际因素。 因此, 本文对 3.1 节的函数进行以下改进。

(1) 均衡防御力量: 为了能够尽量将现有的防御力量均衡地分配到每一架非武装无人机上, 防止出现各非武装无人机受保护程度不均衡的情况, 本文对原适应度值做如下优化:

$$\alpha_i = f\left(\sum_{j=1}^{q(i)} \alpha_{ij}\right) \quad (11)$$

$$f(x) = \frac{2}{1 + e^{-2x}} - 1 \quad (12)$$

式(12)是一个在 $[0, +\infty)$ 上单调递增的函数, 由 0 逐渐趋向于 1, 其部分图像如图 5 所示。

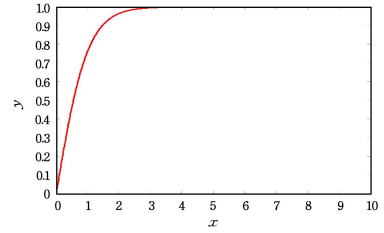


图 5 函数 $f(x)$ 图像

Fig. 5 Function $f(x)$ image

该函数表明, 当同一架非武装无人机对应敌机的总适应度值越高时, $f(x)$ 的取值越高, 但是随着 x 的增加, $f(x)$ 的上升速度逐渐减缓。 因此, 当某一架非武装无人机的适应度值过高时, 其对应的 $f(x)$ 函数取值变化不大, 遗传算法就会趋向于把防御力量分配给其他适应度值较低的非武装无人机, 从而达到均衡的目的, 提高整体防御效果。

(2) 优化拦截弹飞行方向: 在实际的空空导弹拦截过程中, 机载导弹的发射方向基本为向前发射。 尽管世界上已有部分国家研制出了可以向后发射的机载导弹, 但实用性仍然不强, 具有影响飞机和导弹的机动性以及无法避开自身发动机尾焰的红外特性等缺点。 因此, 本文在进行编队适应度值计算的过程中, 限制每一架防御机只能保护处于自身位置的前方以及两侧的非武装无人机, 不对处于自身后方的非武装无人机进行保护。

4 仿真实验验证

为了验证算法的性能, 本节将其应用于几种不同的场景。 计算机硬件条件为 i7-9750H 处理器, GTX1660Ti 6 GB 独立显卡, 16 GB 内存, 512 GB 固态硬盘, 仿真环境为 Windows 10 操作系统, MATLAB2016。 针对每种情况本文给出了相应的优化结果编队以及遗传算法粒子适应度变化过程。 本方法中遗传算法的取值情况如表 2 所列, 整体流程框架如图 6 所示。

表 2 参数取值

Table 2 Parameter value

参数名称	参数取值
遗传算法最大进化次数	30
种群规模	100
交叉概率	0.6
变异概率	0.01
两机群间距/km	10

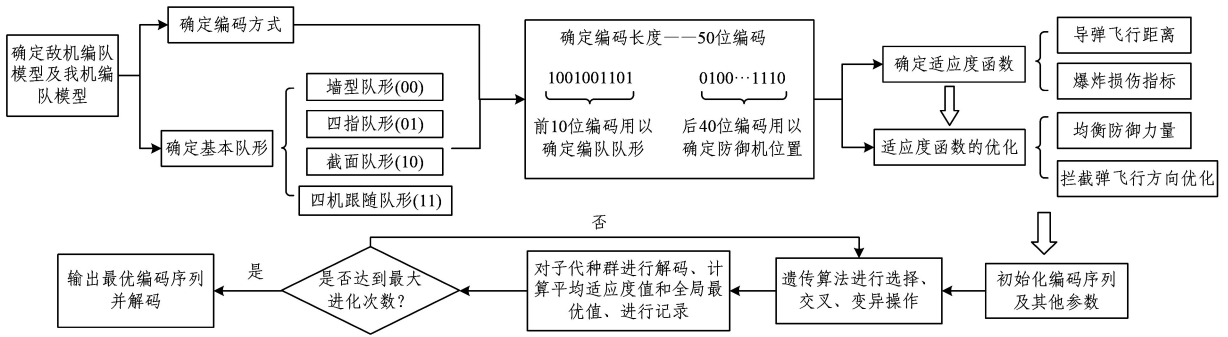


图6 异构无人机编队防御部署整体流程框架

Fig. 6 Overall process framework of heterogeneous UAV formation defense deployment

本文对5类战况进行了仿真:

第2种战况是敌方8机单编队 vs 我方10架防御机+6

第1种战况是敌方16机单编队 vs 我方10架防御机+6

架非武装无人机,仿真结果如图9和图10所示。

架非武装无人机,仿真结果如图7和图8所示。

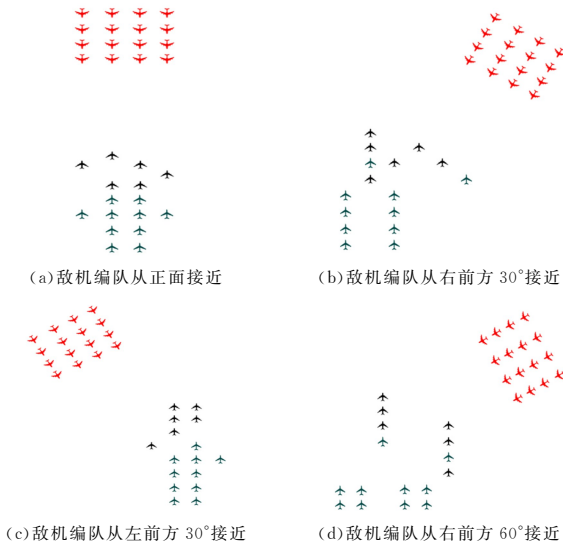


图7 敌方16机单编队下优化后的编队

Fig. 7 Optimized formation under the enemy 16 UAVs

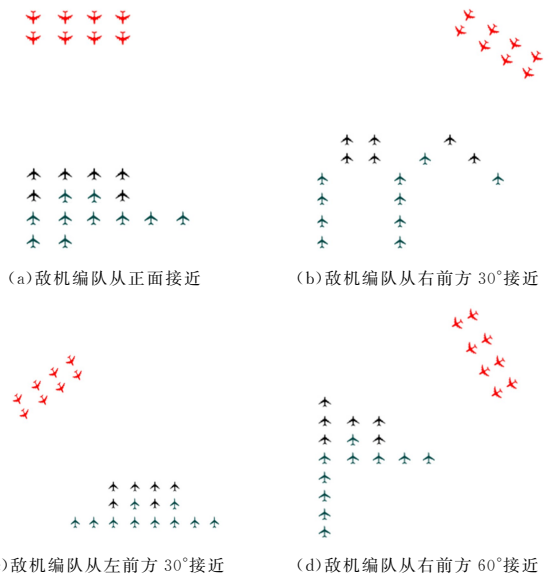


图9 敌方8机单编队下优化后的编队

Fig. 9 Optimized formation under enemy 8 UAVs

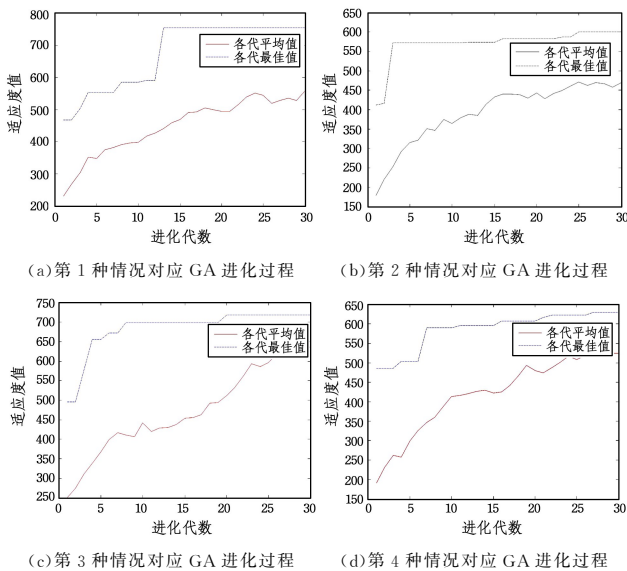


图8 第1种战况的遗传算法进化曲线

Fig. 8 Evolutionary curve of genetic algorithm in the first war situation

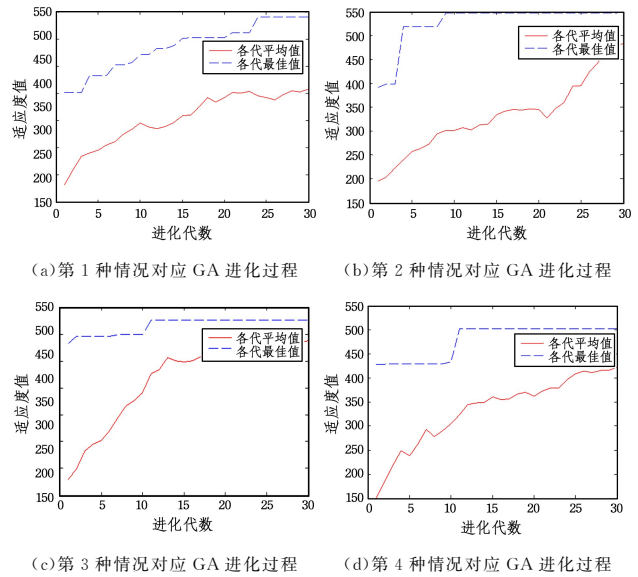


图10 第2种战况的遗传算法进化曲线

Fig. 10 Evolutionary curve of genetic algorithm in the second war situation

第 3 种战况是敌方 8 机双编队 vs 我方 10 架防御机 + 6 架非武装无人机, 仿真结果如图 11 和图 12 所示。

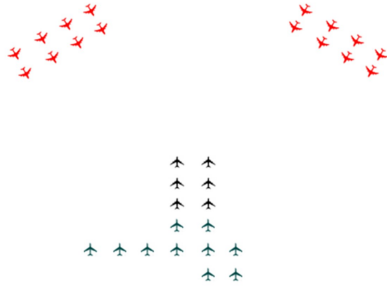


图 11 敌方 8 机双编队下优化后的编队

Fig. 11 Optimized formation under enemy 8 UAVs

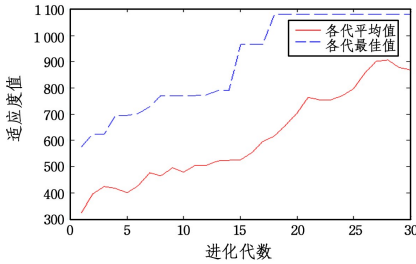


图 12 第 3 种战况的遗传算法进化曲线

Fig. 12 Evolutionary curve of genetic algorithm in the third war situation

第 4 种战况是敌方 4 机四编队 vs 我方 10 架防御机 + 6 架非武装无人机, 仿真结果如图 13 和图 14 所示。

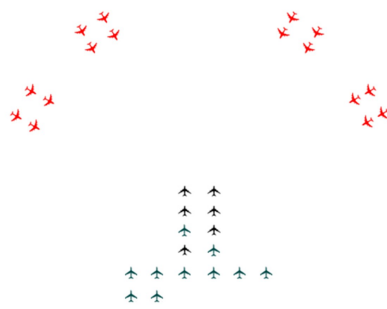


图 13 敌方 4 机四编队优化结果

Fig. 13 Optimized formation under enemy 4 UAVs

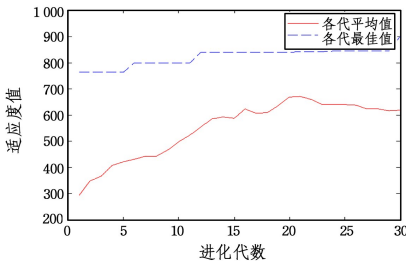


图 14 第 4 种战况遗传算法进化曲线

Fig. 14 Evolutionary curve of genetic algorithm in the fourth war situation

第 5 种战况是敌方 16 机单编队 vs 我方 12 架防御机 + 4 架非武装无人机, 仿真结果如图 15 和图 16 所示。

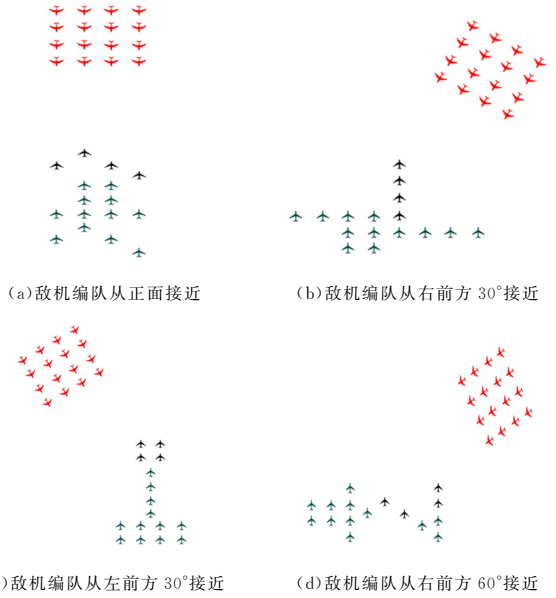
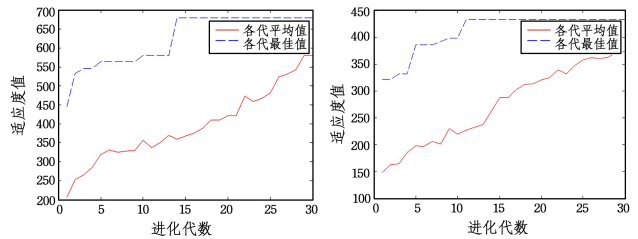
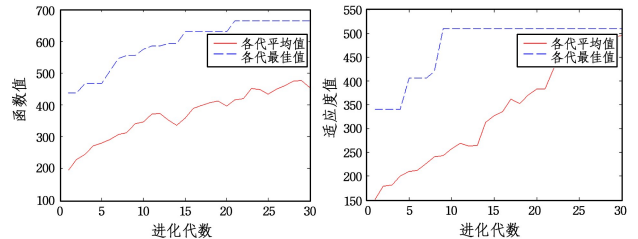


图 15 敌方 16 机单编队下优化后的编队

Fig. 15 Optimized formation under enemy 16 UAVs



(a) 第 1 种情况对应 GA 进化过程 (b) 第 2 种情况对应 GA 进化过程



(c) 第 3 种情况对应 GA 进化过程 (d) 第 4 种情况对应 GA 进化过程

图 16 第 5 种战况遗传算法进化曲线

Fig. 16 Evolutionary curve of genetic algorithm in the fifth war situation

综上, 本文仿真主要分为五大种战况, 针对每一种战况又分别在敌机编队从不同的方向接近我方编队的情况下使用遗传算法求解给出了优化编队。结果表明, 一方面, 在不同的战况下, 本文设计的适应度函数利用 GA 算法能够在 30 次进化内收敛于最优解, 并给出优化后的编队队形。另一方面, 经过 GA 算法的进化选择, 本文从以下两个角度对防御编队进行了有效优化: 1) 降低了我方防御型无人机拦截弹的飞行距离, 大大提高了制导精度; 2) 有效减少了敌机导弹爆炸产生的冲击波对我方非武装无人机的伤害。

5 效果评估

为验证本方法的有效性, 本文以具体导弹进行了模拟测试。“前卫-2”是中国迄今研制的最先进的便携式防空导弹,

其部分指标领先于国外同类型武器。该武器系统不仅具有便于携带、机动灵活、易于操作等传统便携式防空导弹系统的特征,还应用了高级探测技术,最重要的是采用了独有的红外滤光和成像技术,对目标释放的各种频谱的红外诱饵有极强的抗干扰能力,并且能够在复杂的天气条件下准确地捕捉到目标。“前卫-2”还可以发展为车载多联装防空导弹系统和直升机与无人机的自卫用空空导弹,其武器参数如表3所列。

表3 “前卫-2型防空导弹”武器参数

Table 3 Weapon parameters of QW-2 air defense missile

参数名称	数值	参数名称	数值
重量	11.32 kg	导弹速度	600 m/s
导弹长度	1.59 m	最小射程	500 m
弹径	72 mm	最大射高	3500 m
弹头重	1.42 kg	最小射高	10 m
拦截高度	10-3500 m	最大作战斜距	6000 m

本文忽略了无人机的机动与导弹击落无人机产生的碎片对未被击落的无人机的影响,以及空气阻力与重力的影响,将无人机与导弹看成质点,导弹飞行轨迹近似成直线且匀速飞行。所有无人机都按初始方向沿直线飞行,相邻无人机间距都为200 m。由于敌方与我方非武装无人机的距离远大于我方拦截机与非武装无人机的距离,即在敌方导弹飞抵拦截点时我方拦截弹也抵达拦截点。假设敌方飞机与我方无人机在同一水平面上,都携带6枚前卫-2型防空导弹。前卫-2型导弹通过碰撞与爆炸两种方式摧毁敌机,这两种方式对敌机的伤害近似相等, k_1 和 k_2 都取值为1。

(1)根据式(13),计算拦截点的位置坐标,再计算敌方导弹飞到拦截位置的时间 t :

$$x_3 = x_4 + x_2 \times (x_1 - x_4) \quad (13)$$

$$y_3 = y_4 + y_2 \times (y_1 - y_4)$$

$$t = \frac{S_1}{v} \quad (14)$$

其中,敌方飞机坐标为 (x_1, y_1) ,我方拦截飞机坐标为 (x_2, y_2) ,拦截点的坐标为 (x_3, y_3) ,我方非武装无人机坐标为 (x_4, y_4) , S_1 为敌机到拦截点的距离, v 为导弹的飞行速度,设为600 m/s。

(2)计算出当时我方拦截飞机的坐标 $(x_2 + v't, y_2 + v't)$,非武装无人机坐标 $(x_4 + v't, y_4 + v't)$,再计算出 a, S_2, R (a 为非武装无人机到防御机的距离, S_2 为拦截点到非武装无人机的距离, R 为拦截点到防御机的距离, v' 为无人机飞行速度,为20 m/s)。

(3)根据拦截概率公式,计算不同情况下的拦截敌方导弹的成功率 P :

$$\theta = \arccos\left(\frac{S_2^2 + R^2 - a^2}{2 \times S_2 \times R}\right) \quad (15)$$

$$P = |-\beta \times \theta + 1|, \theta \in (\theta_1, \theta_2] \quad (16)$$

其中, θ 为拦截点到非武装无人机的距离 S_2 与拦截点到防御机的距离 R 之间的夹角; β 为概率常数,取值区间为 $[0, 1]$; P 为拦截敌方导弹的成功率,实际情况为锐角拦截,我方导弹方向与敌方导弹方向的夹角越小,拦截成功概率越高。

(4)计算拦截敌方导弹的数学期望 E_1 :

$$E_1 = \sum_{i=0}^n X_i \times P(X_i) \quad (17)$$

其中, E_1 为拦截导弹数目的数学期望, $P(X_i)$ 为拦截下 X_i 枚

导弹($i=0, 1, 2, \dots$)的概率, X_i 为拦截下 i 枚导弹。

(5)计算出敌方发射导弹剩余数量 Q :

$$Q = W - E_1 \quad (18)$$

其中, Q 为敌方发射导弹的剩余数量, W 为敌方发射的所有导弹数量。

(6)计算敌方导弹命中我方飞机的概率 $P(Y_i)$,因为被击落,所以拦截点就在我方无人机所在位置,此时 $\theta = \pi$ 。

$$P' = |-\beta \times \theta + 1|, (\theta = \pi) \quad (19)$$

$$P(Y_i) = C_Q^i \times (P')^i \times (1 - P')^{Q-i} \quad (20)$$

(7)计算敌方导弹命中我方 i 架飞机的期望:

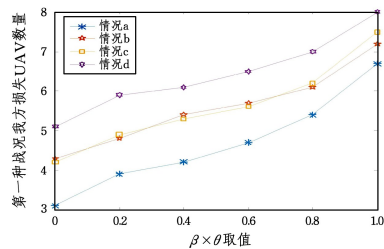
$$E_2 = \sum_{i=0}^n Y_i \times P(Y_i) \quad (21)$$

其中, E_2 为击落我方无人机的数学期望, $P(Y_i)$ 为击落我方 i 架飞机的概率($i=0, 1, 2, \dots$), Y_i 为击落我方 i 架飞机。

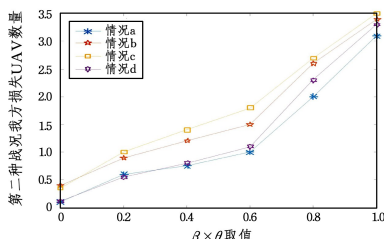
(8)计算我方剩余飞机的数量 T :

$$T = M - E_2 \quad (22)$$

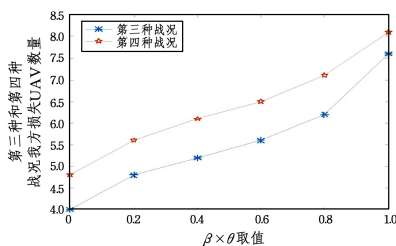
其中, M 为我方所有飞机的数量, T 为我方剩余飞机的数量。最后绘制出如图17所示的全部战损结果。



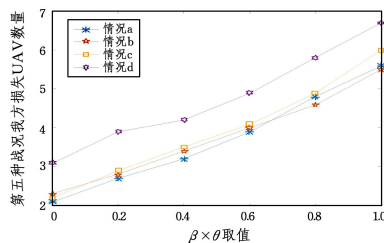
(a) 第一战况



(b) 第二战况



(c) 第三种和第四战况



(d) 第五战况

图17 5种战况的损失曲线

Fig. 17 Situation Loss curves of five wars

表 4 所列为事件最大概率情况下的综合评估结果。

表 4 综合评估结果

Table 4 Comprehensive assessment results

五大战况	情况	损失
敌方 16 架单编队 VS 我方 10 架防御机 + 6 架非武装无人机	(a) 敌机编队从正面接近	4 架
	(b) 敌机编队从右前方 30° 接近	5 架
	(c) 敌机编队从左前方 30° 接近	5 架
	(d) 敌机编队从右前方 60° 接近	6 架
敌方 8 架单编队 VS 我方 10 架防御机 + 6 架非武装无人机	(a) 敌机编队从正面接近	0 架
	(b) 敌机编队从右前方 30° 接近	1 架
	(c) 敌机编队从左前方 30° 接近	1 架
	(d) 敌机编队从右前方 60° 接近	0 架
敌方 8 架双编队 VS 我方 10 架防御机 + 6 架非武装无人机	双编队各从左右 30° 接近	5 架
敌方 4 架四编队 VS 我方 10 架防御机 + 6 架非武装无人机	四编队接近	6 架
敌方 16 架单编队 VS 我方 12 架防御机 + 4 架非武装无人机	(a) 敌机编队从正面接近	3 架
	(b) 敌机编队从右前方 30° 接近	3 架
	(c) 敌机编队从左前方 30° 接近	3 架
	(d) 敌机编队从右前方 60° 接近	4 架

本文提出的编队优化算法能够较大地提高我方导弹的拦截率,通过分析表 4 中的 5 种战况模拟测试结果可以看出,在敌机数量大于防御拦截机的劣势情况下,经过我方拦截后,我方仍能保留多架飞机,最大损失数为 6 架;在我方武装防御无人机多于敌方进攻飞机的优势情况下,我方能够拦截下大部分的敌方导弹,几乎保留了所有的飞机,最小损失数为 0 架。所提算法的平均损失数为 3 架,平均损失率为 18.75%。由此可见,本文算法的防御效果是有效的。

结束语 本文将遗传算法应用于无人机群的防御部署问题中。首先以二进制编码和层级编码方案为基础,制定了无人机编队的编码和解码规则。然后从导弹飞行距离和导弹对非武装无人机的损伤两个角度出发,根据不同类型的攻击导弹建立遗传算法的适应度函数。从均衡防御力量的角度出发,引入适应度平衡系数以保证防御力量能够均衡地分配到每一架非武装无人机中,并对适应度函数进行了优化。最后根据敌机编队的规模、队形和进攻角度,以及我方武装与非武装无人机的数量,列举具有代表性的 5 种战况。运行结果表明,在不同的情况下,GA 均能够在 30 次进化内收敛于最优解,能够在短时间内得出结果并给出优化后的无人机群防御队形。

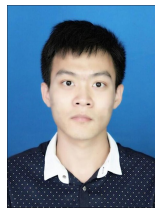
对于解决多智能体协同工作和无人机群部署问题方面,GA 与其他算法(机器学习、神经网络)相比具有以下优点:1)遗传算法适合解决复杂编码问题;2)遗传算法不是盲目穷举,而是启发式搜索,不受经验数据的影响;3)群体搜索,易于并行化处理;4)适应度函数不受连续、可微等条件的约束,适用范围很广。同时,本文给出的优化编队有效提高了拦截成功率并降低了我方非武装无人机被干扰或受损的风险。在此基础上,未来工作是研究出可以根据战场情况快速做出反应、

攻防兼备的新型无人机编队部署策略。

参 考 文 献

- [1] ZHAO K X, HUANG C Q, WEI Z L, et al. Estimation of Air Combat Situation of UAVs Based on Improved Decision Tree [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(4): 66-73.
- [2] LI S H, DING Y, GAO Z L. Aircraft maneuver decision making of drone based on intuitionistic fuzzy game [J]. System Engineering and Electronics, 2019, 41(5): 1063-1070.
- [3] AKOPOV A S, BEKLARYA N L A, THAKUR M, et al. Parallel Multi-agent Real-coded Genetic Algorithm for Large-scale Black-box Single-objective Optimisation [J]. Knowledge Based Systems, 2019, 174: 103-122.
- [4] ZHANG K S, WANG Z P. Research on Air Combat Formation Optimization Based on Genetic Simulated Annealing Algorithm [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2003 (4): 477-480.
- [5] XIA Q J, ZHANG A N, ZHANG Y Z. Large-scale formation air combat formation optimization algorithm [J]. Control Theory & Applications, 2010, 27(10): 1418-1422.
- [6] QIAN B, JIANG C S. Application of Genetic Algorithm in Air Combat Formation Optimization of Helicopter [J]. Electronics Optics & Control, 2008(1): 6-9.
- [7] MULGUND S, HARPER K, KRISHNAKUMAR K, et al. Large-scale Air Combat Tactics Optimization Using Genetic Algorithms [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2001, 24: 140-142.
- [8] XIONG W, DING Q X, CHEN Z J, et al. Optimal allocation method of fleet formation based on genetic fuzzy clustering [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008(2): 193-196, 214.
- [9] LUO D L, WANG B, GONGH J, et al. Collaborative multi-target attack decision based on SAGA [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007(7): 1154-1158.
- [10] XING X J, XI A, YAN J G. Study on the Optimal Robust Control Method for Multi-UAV Cooperative Formation [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2013, 31 (5): 722-726.
- [11] PU P, ZHANG J C, SUN X J. Research on Tactical Decision-making of Multi-machine Cooperative Multiple Target Assignment [J]. Tactical Missile Technology, 2007(2): 57-61.
- [12] ZHANG K S. Research on Air Combat Formation Optimization Based on Genetic Algorithm [D]. Shaanxi: Northwestern Polytechnical University, 2003.
- [13] CHEN W, ZHANG Q M. Preliminary Study on Dynamic Analysis Model of Missile Structure under Explosive Shock Wave [J]. Explosion and Shock, 2009, 29(2): 199-204.
- [14] NAGATA T. A Multi-agent Based Micro-grid Operation Method Considering Charging and Discharging Strategies of Electric Vehicles [J]. IEEE Transactions on Power and Energy, 2018, 138(7): 598-604.

- [15] SHALASH N A, AHMAD A Z, JABER A S. Multi-agent Approach to Reliability Assessment of Power System Generation Using Fuzzy Logic[J]. *International Journal of Simulation; Systems, Science and Technology*, 2016, 17(32).
- [16] LI C, WANG Y, ZHOU H, et al. Intelligent Decision-making Method for Air Combat Formation of Multi-Unmanned Combat Aircraft[J]. *Fire Control & Command Control*, 2018, 43(7): 26-31.
- [17] WANG W, WANG D, PENG Z H. Cooperative Learning Neural Network Output Feedback Control of Uncertain Nonlinear Multi-agent Systems Under Directed Topologies[J]. *International Journal of Systems Science*, 2017, 48(12): 2590-2598.
- [18] EZUGWU A E, FRINCU M E, ADEWUMI A O. Neural Network-based Multi-agent Approach for Scheduling in Distributed Systems[J]. *Concurrency Computation*, 2017, 29(1): 10.
- [19] JOLLY K G, SREERAMA K R, VIJAYAKUMAR R. Intelligent Task Planning and Action Selection of a Mobile Robot in a Multi-agent System through a Fuzzy Neural Network Approach [J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2010, 23(6): 923-933.
- [20] CHANG Y Z, LI Z W, KOU Y X, et al. A Method for Selecting the Formation of Air Combat in Uncertain Information[J]. *System Engineering and Electronics*, 2016, 38(11): 2552-2560.
- [21] XIAO B S, FANG Y W, XU Y S. Research on Coordinated Formation Target Assignment Model for beyond Visual Range Air Combat[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2010, 32(7): 1476-1479.
- [22] DIAO X H, FANG Y W, XIAO B S, et al. Task Allocation in Cooperative Air Combat Based on Multi-agent Coalition[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2014, 40(9): 1268-1275.
- [23] YE X D, CHEN B, LI P, et al. A Simulation-based Multi-agent Particle Swarm Optimization Approach for Supporting Dynamic Decision Making in Marine Oil Spill Responses[J]. *Ocean and Coastal Management*, 2019, 172: 128-136.
- [24] KUMAR R, SHARMA D, SADU A. A Hybrid Multi-agent Based Particle Swarm Optimization Algorithm for Economic Power Dispatch[J]. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2011, 33(1): 115-123.
- [25] XU P, XIE G M, WEN J Y, et al. Event-driven reinforcement learning multi-agent formation control[J]. *Journal of Intelligent Systems*, 2019, 14(1): 93-98.
- [26] WANG X C. Research on multi-robot collaborative coordination based on reinforcement learning and clustering intelligent method[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2005.
- [27] ZHENG Y B, XI P X, WANG L L, et al. Multi-agent formation obstacle avoidance method based on artificial potential field method[J]. *Journal of Computer Applications*, 2018, 38(12): 3380-3384, 3413.



ZUO Jian-kai, born in 1997, Ph.D student. His main research interests include machine learning, deep learning, pattern recognition and computer vision.



WU Jie-hong, born in 1971, Ph.D, professor, prominent teacher. Her main research interests include correspondence security, collaborative obstacle avoidance, autonomous flocking control and power consumption optimization of unmanned autonomous systems.