

引用格式:朱杰,鲁艺.基于诱骗策略的无人机协同航迹规划[J].电光与控制,2018,25(11):52-56. ZHU J, LU Y. Cooperative path planning for UAVs based on decoy strategy[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(11):52-56.

## 基于诱骗策略的无人机协同航迹规划

朱杰, 鲁艺

(空军工程大学,西安 710038)

**摘要:** 针对威胁联网条件下应对机动火力威胁拦截的无人机突防问题,提出了一种基于“任务机+诱饵机”的协同作战方法,以实现火力覆盖区域的突防。该方法根据己方任务需求,在建立诱饵机与火力威胁相对运动数学模型的基础上,通过分析诱饵机在探测威胁中运动速度及方向的改变对火力威胁运动距离和时间的影 响,确定了任务机与诱饵机的协同原则。仿真结果表明,该方法能够有效应对联网威胁且适用于有人机与无人机间的协同作战。

**关键词:** 协同作战; 相对运动数学模型; 威胁联网; 航迹规划

中图分类号: V279 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2018.11.010

## Cooperative Path Planning for UAVs Based on Decoy Strategy

ZHU Jie, LU Yi

(Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of UAV penetration under networked threat against maneuvering fire, a cooperative operation method based on “the task vehicle and the bait vehicle” is proposed to realize the penetration through fire coverage area. According to the task requirements on our part, the mathematical model of the relative motion between the bait vehicle and the fire threat is built. On this basis, the impact of the changes in the speed and direction of the bait vehicle when detecting the threat on the moving distance and time of the fire threat is analyzed, and the principles of the synergy between the task vehicle and the bait vehicle are determined. The simulation results show that the proposed method can effectively deal with the networked threat and be applied to the cooperative operation of the manned aircraft and UAV.

**Key words:** cooperative operation; mathematical model of relative motion; threat networking; path planning

### 0 引言

航迹规划最基本的要求是在保证无人机可以完成预定任务的基础上,综合油耗、飞行时间和威胁分布态势等因素规划出最优航迹<sup>[1]</sup>。现代战争中,威胁联网<sup>[2-3]</sup>凭借信息融合共享的优势,能够对入侵目标高效感知并快速调整防御态势,极大程度上增大了无人机的突防难度。现有航迹规划研究主要集中在新型算法的应用和改进方面,如微分进化算法<sup>[4]</sup>、蚁狮优化算法<sup>[5]</sup>和布谷鸟搜索算法<sup>[6]</sup>等,但随着地面防空武器性能的提升和部署密集度的增大,特别是威胁联网对防

御态势的影响,仅依靠优化算法并通过函数寻优获得可行路径的航迹规划,实用意义越来越小。

“任务机+诱饵机”的协同作战方法,能够利用诱饵机介入威胁探测网的方式,在敌方探测网信息系统中形成入侵假象,使敌方调整其战略部署,从而为任务机突防提供机会,这种方法往往能达到更好的作战效果。在文献[7-8]中,提出了利用假目标无人机,通过电子欺骗干扰的方式掩护战斗机完成作战任务,但由于无人机为保证干扰效果,需要尽量将干扰方向指向探测威胁,容易被敌方识别,难以达到理想的效果;文献[9]提出了利用多机协同对组网探测进行欺骗干扰的策略,提高了干扰的效果,但同时也增加了干扰系统的复杂性和不稳定性;文献[10]中,分析了无人机作为电子诱饵实施欺骗干扰的优势,肯定了利用无人机进行战术诱骗的作战价值。纵观现有文献,均没有

收稿日期:2018-02-05

修回日期:2018-04-23

作者简介:朱杰(1993—),男,甘肃平凉人,硕士生,研究方向为无人机航迹规划。

深入分析进行诱骗策略下的协同作战对于威胁联网环境中作战效果的影响。

针对上述问题,通过研究诱饵机运动策略对于联网威胁的影响,提出了无人机协同作战模型,并建立了诱饵机与火力威胁的相对运动数学模型。其次,考虑到火力威胁运动对于任务机规划航迹的影响,提出了任务机航迹规划的原则并改进了代价函数,规划出了合理航迹。同时,该诱骗策略也适用于有人机与无人机间的协同作战<sup>[11]</sup>。

### 1 问题描述

#### 1.1 无人机协同作战原理

无人机对威胁网进行战术诱骗的基本原理是采用“任务机+诱饵机”的协同模式,通过诱饵机入侵敌防空区域,迫使其调动火力单元进行机动拦截<sup>[12]</sup>,任务机借助火力调动产生的缺防空隙进行快速突防。如图 1 所示, $U_M$  和  $U_B$  分别表示任务机和诱饵机, $W_F$  和  $W_R$  分别表示火力威胁和探测威胁。两架无人机经过  $O_1$  点后,诱饵机以速度  $v_B$  按  $\overline{O_1P}$  方向飞行经过  $P$  点进入  $W_R$  探测范围内,诱骗  $W_F$  以速度  $v_F$  对诱饵机进行拦截。任务机在诱饵机诱骗成功后,利用  $W_F$  缺陷间隙以速度  $v_M$  快速突防。其中, $\theta_M$  为  $U_M$  和  $W_F$  间的连线与  $U_M$  飞行方向的夹角, $\theta_B, \theta_F$  分别为  $U_B$  和  $W_F$  的运动方向与  $\overline{PW_F}$  间的夹角。

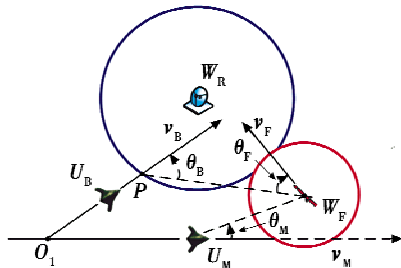


图 1 无人机协同作战态势图  
Fig. 1 The situational figure of multi-UAV cooperative operation

#### 1.2 协同作战实现流程

无人机协同作战的具体运行流程如图 2 所示。战场态势信息获取是整个作战行动的前提保证,主要包括敌方威胁源位置、地形、天气等各类在航迹规划中所需考虑的因素,战场态势获取直接影响战术决策实施的准确性。战术决策是作战行动的核心,基于获取的敌方部署情况,通过预测火力威胁及己方参数,调控诱饵机和任务机的运动轨迹,以达到预期目的。诱饵机的运动直接决定火力威胁的机动策略,而任务机通过对火力威胁运动情况的判读,评估火力威胁对自身的威胁程度,从而调整自己的运动轨迹。

进行战术决策前需要准确获取各类信息,为无人机协同提供决策依据。在战术实施阶段,首先通过调整诱饵机的运动参数  $v_B$  和  $\theta_B$ ,对火力威胁实施诱骗并实时获取火力威胁的运动参数  $v_F$  和  $\theta_F$ 。其次,分析任务机与火力威胁的位置关系,结合火力威胁的运动参数  $v_F$  和  $\theta_F$ ,评估火力威胁的威胁程度并调整  $v_M$  和  $\theta_M$  使得任务机顺利突防。战术决策流程如图 3 所示。

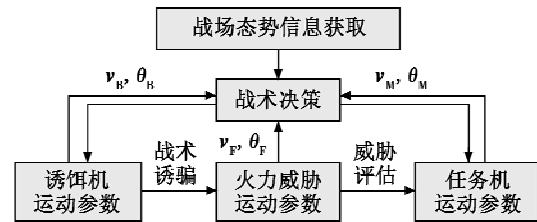


图 2 协同作战流程  
Fig. 2 The process of UAV cooperative operation

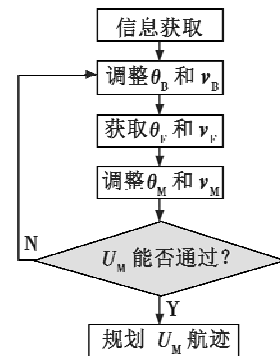


图 3 战术决策流程  
Fig. 3 The process of tactical decision-making

### 2 数学模型

为了精确分析战术诱骗对航迹规划的影响,首先必须建立诱饵机与火力威胁的相对运动数学模型,以确定两者的运动关系。当诱饵机进入敌方探测威胁覆盖区域时,探测威胁会将诱饵机信息发送给火力威胁,火力威胁将根据所给信息进行机动,拦截诱饵机。假设某一个时刻,诱饵机位于  $G$  点,火力威胁位于  $W$  点。连线  $GW$  称为目标瞄准线,选取  $Ax$  为参考线,它可以任意选取且选取位置不同不会影响模型的运动分析。具体模型如图 4 所示。

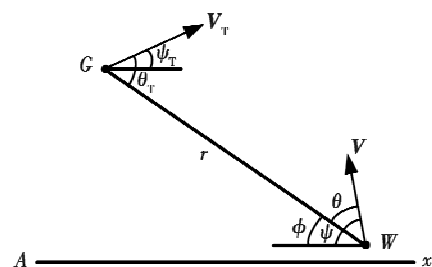


图 4 相对运动模型  
Fig. 4 Relative motion model

图4中,  $V, V_T$  分别为火力威胁和诱饵机的速度矢量;  $\theta, \theta_T$  为速度矢量与目标瞄准线间的夹角;  $\psi, \psi_T$  为速度矢量与参考线间的夹角;  $\phi$  为目标瞄准线与参考线间的夹角,  $r$  为诱饵机与火力威胁的相对距离。角度旋转逆时针方向为正, 则由此可得描述相对距离  $r$  和角  $\phi$  变化率的方程为

$$\dot{r} = V_T \cos \theta_T - V \cos \theta \quad (1)$$

$$\dot{\phi} = \frac{1}{r} (V \sin \theta - V_T \sin \theta_T) \quad (2)$$

同时考虑到角度关系和追踪关系可得如下方程

$$\phi = \psi - \theta, \quad (3)$$

$$\phi = \theta_T - \psi_T. \quad (4)$$

$\varepsilon = 0$  为火力威胁追踪诱饵机的运动关系控制方程, 一般可表示为

$$\varepsilon = \dot{\psi} - K\dot{\phi} = 0. \quad (5)$$

敌方通过控制参数  $K$  的大小, 确定追击诱饵机的运动关系, 同时也决定追击目标的难易程度。将式(3)求导并代入式(5)可得

$$\dot{\theta} = \frac{K-1}{K} \dot{\psi} \quad (6)$$

$$\dot{\theta} = (K-1) \dot{\phi}. \quad (7)$$

由式(6)、式(7)可得:

1) 跟随式拦截法。当  $K=1$  时,  $\dot{\theta}=0$ , 即  $\theta$  为常数, 表示火力威胁根据诱饵机位置, 以超前的固定角度拦截目标。这种拦截方式只需获得目标的位置, 因此容易实现, 但由于相对速度无法与目标保持一致, 火力单元的调整过程滞后, 因此火力威胁运动轨迹比较弯曲, 拦截目标所需时间较多。

2) 直线式拦截法。当  $K \rightarrow \infty$  时,  $\dot{\phi} \rightarrow 0$ , 即  $\phi$  为常数, 此时火力威胁的相对速度始终指向诱饵机, 因此如果目标速度方向不发生变化, 火力威胁将以直线接近目标。这种拦截方式除需获得目标位置信息外, 还需实时掌握目标速度的大小和方向, 对于目标信息获取要求高, 但能够以最短的路线拦截目标, 拦截关系为

$$\theta = \arcsin \left( \frac{V_T}{V} \sin \theta_T \right). \quad (8)$$

### 3 基于遗传算法的任务机航迹规划

遗传算法是模拟自然选择和遗传进化过程的计算模型, 是一种通过模拟自然进化过程寻求最优解的方法。由于遗传算法具有全局搜索能力强、不受函数约束条件限制并具有并行搜索特征, 而且优化计算不依赖于梯度信息, 不要求目标函数连续可导等优点, 可广泛用于解决各类大规模、非线性组合优化问题。

#### 3.1 航迹坐标编码

在遗传算法中, 航迹坐标的编码方式在一定程度

上会影响算法的计算性能。本文在适当约束下, 简化了航迹的编码方法, 如图5所示, 建立直角坐标系  $xoy$ 。在坐标系中, 将航迹起点到终点的横坐标按固定步长均分为  $N$  段, 长度为  $l$ 。由于不同航迹相应步长处的横坐标是相同的, 而区别仅在于其纵坐标不同, 因此, 利用遗传算法仅将航迹点的纵坐标作为基因位进行编码。考虑到无人机自身性能约束, 通过调整步长和转弯角, 使得  $l \geq l_{\min}$ , 且  $|\Delta\theta_i| \leq \theta_{\max}$ 。

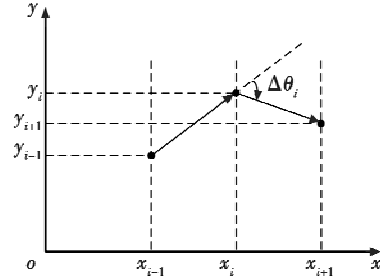


图5 航迹编码示意图

Fig. 5 Path coding figure

#### 3.2 适应度函数确定

任务机在飞行过程中, 一方面必须实时掌握火力威胁的位置信息, 首先保证不会进入火力覆盖范围内, 其次考虑整体航迹的代价最小; 另一方面, 任务机是否能够顺利穿越火力威胁区域, 不仅由规划出的航迹决定, 其飞行速度也会影响任务的完成。

由于火力威胁的位置是不断变化的, 因此任务机必须保证在任意时刻都不会进入火力覆盖范围。设在  $t$  时刻任务机坐标为  $(x(t), y(t))$ , 火力威胁坐标为  $(x_w(t), y_w(t))$ , 则任务机航迹代价为

$$\min J = \begin{cases} wJ_w + (1-w)J_L & K_p = 1 \\ \infty & K_p = 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $J_w$  为威胁代价;  $J_L$  为航程代价;  $w$  为代价权值, 取值范围是  $0 \sim 1$ , 威胁及航程代价采用文献[13]中提出的计算方法;  $K_p$  为开关函数, 计算方法为

$$K_p = \begin{cases} 1 & R > R_p, V_{\min} \leq V \leq V_{\max} \\ 0 & R \leq R_p, V \leq V_{\min} \text{ 或 } V \geq V_{\max} \end{cases} \quad (10)$$

$$R = \sqrt{(x_w(t) - x(t))^2 + (y_w(t) - y(t))^2} \quad (11)$$

式中:  $R$  为  $t$  时刻任务机和火力威胁之间的距离;  $R_p$  为火力威胁的覆盖半径;  $V_{\min}$  为任务机可以穿越威胁区域的最小速度;  $V_{\max}$  为任务机的最大飞行速度。开关函数判断规划航迹的可行性, 保证任务机能够顺利突防。若  $X_i$  表示第  $i$  条航迹, 则航迹的适应度函数为

$$\text{Fitness}(X_i) = 1/J(X_i). \quad (12)$$

### 4 仿真分析

#### 4.1 战术诱骗模型仿真分析

进行战术诱骗的目的是为了诱导火力威胁离开原

来部署地点,为任务机突防提供机会,评价指标为火力威胁机动后距离原部署地的距离和火力威胁拦截诱饵机所需时间,分别用  $l$  和  $t$  表示。诱饵机入侵敌方探测网的角度和速度会使评价指标发生变动,而进行战术诱骗的目的就是通过调整诱饵机的运动参数以获得利于任务机顺利突防的最佳评价指标。

由 1.1 节定义参数,初始取  $PW_F = 150 \text{ km}$ ,  $\theta_B \in [0^\circ, 45^\circ]$ 。一般情况下,当火力威胁拦截到诱饵机时,仿真结束,若诱饵机速度或入侵角度较大时,火力威胁将无法拦截,此时  $l$  取仿真结束时所测值。火力威胁速度  $v_F = 20 \text{ m/s}$ ,诱饵机速度  $v_B = Mv_F$ ,  $M$  为速率比。由于敌方探测威胁对诱饵机的探测存在时延,  $K \neq \infty$ ,为了便于仿真分析,  $K$  分别取 1 和 100。

图 6 所示分别为两种  $K$  值下,速率比  $M$  取不同值时,诱饵机(目标)的偏离角度  $\theta_B$  与火力威胁追击到诱饵机时间  $t$  的关系曲线。

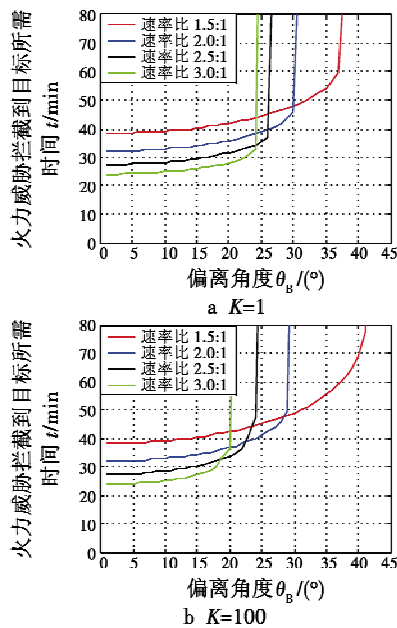


图 6 不同  $K$  值时  $\theta_B$ - $t$  对比

Fig. 6  $\theta_B$  versus  $t$  at different  $K$  values

当  $K$  值一定时,从图 6a 中可以得出:1) 相同速率比情况下,日标飞行方向偏离火力威胁越远,火力威胁拦截目标所需时间越长;2) 相同偏离角度情况下,速率比越小,火力威胁拦截目标所需时间越长;3) 速率比越大,火力威胁拦截到目标的时间发生突变,即火力威胁能否拦截日标的临界值(偏离角度)越小。对比图 6a、图 6b 可得:在相同速率比情况下,  $K$  值较小,速率比较大时,火力威胁能否拦截目标的临界值越大;反之,  $K$  值较大,速率比较小时,火力威胁能否拦截目标的临界值也越大。

图 7 所示分别为两种  $K$  值下,速率比  $M$  取不同值

时,诱饵机(目标)偏离角度  $\theta_B$  与火力威胁离初始位置距离  $l$  的关系曲线。

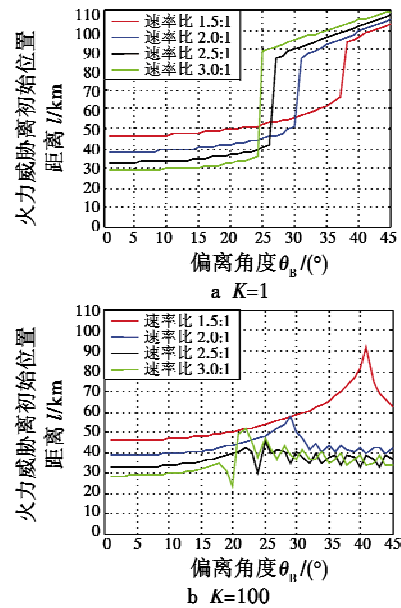


图 7 不同  $K$  值时  $\theta_B$ - $l$  对比

Fig. 7  $\theta_B$  versus  $l$  at different  $K$  values

从图 7 中可以得出,偏离角度变化时,火力威胁离初始位置距离的变化趋势与火力威胁拦截目标所需时间的变化趋势相同,但  $K=100$ ,速率比一定,当偏离角度超过火力威胁能够拦截到目标的角时,火力威胁将不能再继续追击目标。

综上所述,诱饵机诱骗需要满足在保证火力威胁能够成功拦截的情况下,以较低的速率和较大的偏离角度进入敌方探测威胁覆盖区域。

#### 4.2 无人机协同航迹规划

选取威胁区域为  $500 \text{ km} \times 500 \text{ km}$  的航迹规划空间,该空间内有探测和火力两种类型的威胁,其中探测威胁有两种威胁权重,参数设置如表 1 所示。

表 1 威胁参数

Table 1 Threat parameters

序号	威胁类型	覆盖半径/km
a	探测威胁	70
b	探测威胁	50
c	火力威胁	35

将该规划空间分为 10 个航迹段,即令  $N = 10$ ,则需要标记的航迹基因位个数为 9。基因位取值范围为  $[0, 500]$ ,无人机的最大转弯角  $\theta_{\max} = 30^\circ$ 。为了较好地达到战术欺骗效果,假设火力威胁能够实时获取目标信息,且当诱饵机进入探测威胁的覆盖区域时,火力威胁开始机动,则取  $K = 100$ ,诱饵机与火力威胁的速率比  $M = 1.5$ ,诱饵机偏离角度  $\theta_B = 30^\circ$ 。设两架无人机分离点为  $A$ ,诱饵机进入探测威胁区域点为  $P$ ,火力

威胁初始位置点为  $F$ , 其拦截到诱饵机的位置点为  $W$ , 诱饵机进入火力威胁区域点为  $Q$ 。其中,  $P$  点为探测威胁边界上距离火力威胁初始位置为  $\overline{PW}_F$  的点, 即  $\overline{PW}_F = \overline{PF} = 150$  km;  $SP$  为诱饵机从初始点到进入探测威胁点的最优路径。在实际作战过程中, 敌方火力部署的运动态势是不定的, 任务机必须实时掌控敌方火力威胁的运动信息, 并快速调整靶机和自身机动, 以实现有效突防, 这时要求任务机航迹的规划算法必须满足较高的实时性。但本文中, 为了便于问题分析, 通过分析靶机运动参数变化对火力威胁的影响, 预测出火力威胁的运动情况。在已知火力威胁运动情况的基础上, 对遗传算法的实时性没有要求。算法基本参数设置为: 种群网结构为  $9 \times 9$ , 种群大小 PopSize 为 100, 最大进化代数 MaxGen 为 300, 交叉概率  $P_c = 0.9$ , 变异概率  $P_m = 0.05$ , 代价权值  $w = 0.4$ 。采用 Matlab 软件进行仿真, 仿真结果如图 8 所示。

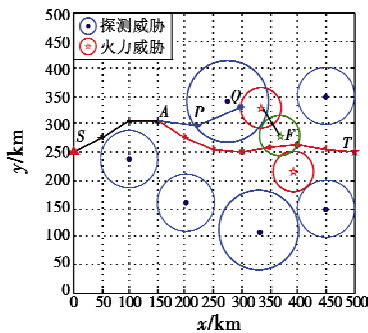


图 8 协同航迹规划

Fig. 8 Cooperative path planning

图 8 中起点和终点分别用  $S$  和  $T$  标注。为了防止暴露任务机的存在, 在初始飞行段, 诱饵机和任务机飞行同一条航迹。当两架无人机飞行至  $A$  点时, 诱饵机沿  $AP$  飞行进行战术诱骗, 任务机沿  $AT$  飞行进行突防。绿色虚线所显示为火力威胁机动前的火力覆盖范围, 当诱饵机在  $P$  点进入探测区域时, 火力威胁进行机动并在  $Q$  点拦截到诱饵机, 而任务机通过预估火力威胁最终的运动位置, 利用遗传算法获得突防路径。

## 5 总结

本文在建立诱饵机与火力威胁的相对运动数学模型基础上, 通过改变诱饵机飞行速度和方向, 分析了诱饵机运动参数改变对火力威胁运动距离和拦截时间的影响, 提出了诱饵机与任务机的协同原则。所建立的数学模型虽然不能完全模拟实际战场环境, 但通过调节数学模型参数可以得到诱骗过程中敌我的整体运动态势, 为决策者提供了相对合理的参考。另一方面, 利

用无人机进行协同战术诱骗以达到突防目的的方法, 为应对威胁联网下的无人机航迹规划提供了新的思路。但由于实战环境复杂多变及无人机战术协同的实时性要求, 航迹的规划应具备较强的局部调整能力, 这还需进一步研究完善。仿真结果表明, 利用战术上的诱骗可以实现无人机在威胁联网环境下的突防, 这证明了合理的战术运用也能获得较好的作战效果。

## 参考文献

- [1] 丁明跃, 郑昌文, 周成平, 等. 无人飞行器航迹规划[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- [2] 符小卫, 李金亮, 高晓光. 防空威胁联网建模与分析[J]. 兵工学报, 2013, 34(7): 904-909.
- [3] 张淘沙, 鲁艺, 吕跃, 等. 威胁联网下的飞行器航迹规划研究[J]. 电光与控制, 2014, 21(9): 29-33.
- [4] ZHANG X Y, DUAN H B. An improved constrained differential evolution algorithm for unmanned aerial vehicle global route planning[J]. Applied Soft Computing, 2015, 26: 270-284.
- [5] XIE C, ZHENG H Q. Application of improved cuckoo search algorithm to path planning unmanned aerial vehicle[C]// Intelligent Computing Theories and Application, 2016: 722-729.
- [6] YAO P, WANG H L. Dynamic adaptive ant lion optimizer applied to route planning for unmanned aerial vehicle[J]. Soft Computing, 2017, 21(18): 5475-5488.
- [7] 赵兵, 周刚, 梁敬平. 无人机多假目标欺骗式干扰效能研究[J]. 舰船电子对抗, 2009, 32(6): 37-39.
- [8] 李子杰, 刘湘伟, 刘畅, 等. 探测假目标干扰无人机航迹规划研究[J]. 现代探测, 2013, 35(8): 84-88.
- [9] 孙琳, 李小波, 毛云祥, 等. 基于多无人机协同的组网探测欺骗干扰策略[J]. 电子信息对抗技术, 2016, 31(3): 51-54.
- [10] 胡鹏, 陈康. 无人机的优势及在航母编队电子战中的运用[J]. 海军学术研究, 2014(8): 16-18.
- [11] 马向玲, 雷宇曜, 孙永芹, 等. 有人/无人机协同空地作战关键技术综述[J]. 电光与控制, 2011, 18(3): 56-60.
- [12] 娄寿春. 地空导弹射击指挥控制模型[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [13] ARANTES J D, TOLEDO F M, CHARLESWILLIAMS B. Heuristic and genetic algorithm approaches for UAV path planning under critical situation[J]. International Journal on Artificial Intelligence Tools, 2016, 26(1): 1-30.