

## 无人机空对地多目标攻击的满意分配决策技术

黄捷, 陈谋, 姜长生  
(南京航空航天大学自动化学院, 南京 210016)

**摘要:** 任务分配是多无人机协同控制的重要内容。建立了多机协同多目标攻击排序的数学模型, 并提出基于满意决策的攻击分配算法, 根据参与目标分配的每架无人机完成任务的预估效益和预估代价提出满意集, 建立拒绝函数和选择函数从而获得满意分配结果, 最后在 Matlab 环境下进行了数值仿真。仿真结果表明, 所研究的基于满意决策的多无人机协同攻击的目标分配方法是有效的。

**关键词:** 无人机; 满意决策; 多机协同; 空对地攻击

**中图分类号:** V279      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1671-637X(2014)07-0010-04

## Satisficing Decision-Making on Task Allocation for UAVs in Air-to-Ground Attacking

HUANG Jie, CHEN Mou, JIANG Chang-sheng  
(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** Target allocation is an important job in cooperative control of multiple UAVs. The mathematic model for multi-UAV cooperative target assignment was established and a multi-UAV target assignment algorithm based on the satisficing decision-making theory was given. A satisficing set was proposed according to the estimated benefits and costs when each UAV complete the task. A satisfied allocation result was obtained by establishing a reject function and a selection function. Numerical simulations were made under the Matlab environment. The simulation results show that the developed satisficing allocation decision-making algorithm is effective for the cooperative task allocation of the UAVs.

**Key words:** unmanned aerial vehicle (UAV); satisficing decision-making theory; multi-UAV cooperation; air-to-ground attack

### 0 引言

无人机空对地攻击是指无人机使用机载武器打击地面、海面目标以完成近距离的对空支援、隔断战场、纵深遮断, 以及压制防空作战的任务<sup>[1]</sup>。由于无人机具有优秀的隐身性能和自主能力, 并且能够大大减少人员伤亡, 在现代战争中已被广泛使用, 特别是群集无人机联合作战模式已成为主要的攻击模式之一。为了使无人机编队打击地面多目标的效率得到进一步提高, 有必要深入研究无人作战飞机空对地攻击多目标攻击决策技术。

目前, 多目标攻击的决策技术已有很多的研究成果, 如利用动态网络流方法<sup>[2]</sup>、粒子群算法<sup>[3]</sup>和遗传算法<sup>[4]</sup>等对空对地多无人机的任务分配问题进行了建模和优化求解。文献[5]较为全面地描述了多无人机协同任务, 并将任务分配的目标函数设置为完成任务的效费比, 但此方法迭代次数多、消耗时间长, 而完成任务的快速性是反映无人机作战效能的重要指标之一, 因而在进行空地攻击决策时应多加考虑; 文献[6]采用基于市场机制的合同网方法研究分布式多无人机协同控制, 在控制的过程中达到了通信量少、鲁棒性好的效果, 但忽略了各无人机自身的战术指标, 仅仅在任务平衡的基础上对单个无人机的收益和代价进行了评估。

但是, 实战中的无人机空对地多目标的攻击排序受到各种不确定性影响, 往往无法达到真正意义上的最优, 某些无人机需要做出折衷选择以配合整体要求<sup>[7]</sup>。基于上述思路, 本文通过研究基于满意决策的

收稿日期: 2013-08-21

修回日期: 2013-09-10

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-11-0830); 航空科学基金(20105152029)

作者简介: 黄捷(1989—), 女, 江苏南京人, 硕士生, 研究方向为武器系统与应用工程。

多无人机目标分配方法来解决这个问题。

满意决策方法是一种建立在博弈理论基础之上的集合论思想,最初起源于 Simon 提出的“最小标准概念”,实质上是一种改进的穷举法<sup>[7-10]</sup>。首先对参与分配的个体提出个体满意集,以此为搜索空间,排除不可行和效率低的分配策略,从而提高了搜索效率,在分配个体数目不多时,是一种相当实用的方法,通过有效地选择函数和拒绝函数,以量化的形式度量决策职能体决策全集中的每一个决策接近成功达成目标的程度和执行该决策的代价<sup>[7]</sup>。满意决策论(satisficing decision theory)在控制、多 Agent 交互以及目标分配等方面都有成功的应用,同时该理论在经济学方面也有较为广泛的应用。文献[8]根据地下水管理的特点,按照多层次满意决策支持系统的思路提出了地下水管理决策方法;文献[9]分析了交通行为建模的经济学假设,引入有限理性满意决策原则构建了出发时间选择模型。

本文针对多无人机空对地多目标攻击的分配问题,建立多无人机协同对地多目标分配的数学模型,针对协同目标任务分配问题,通过采用满意决策的空对地多目标分配方法进行研究。仿真结果表明,所研究的基于满意决策的多无人机协同攻击的目标分配方法是有效的。

## 1 无人机编队对地攻击协同任务分配数学模型

假定由无人机组成的对地攻击编队对地面目标进行打击,不考虑空中拦截和特殊武器。地面目标包括防空火炮、预警雷达和对空导弹组成的防御系统和固定目标<sup>[9]</sup>。当无人机编队进入攻击范围后,对无人机进行任务规划,形成目标分配决策方案,决策目标为哪架无人机分配给那个目标。

### 1.1 目标分配函数

假设  $x_{ij}$  为分配结果,  $i=1,2,\dots,n$ ,  $n$  为无人机的数量;  $m$  为目标数量。  $x_{ij}=1$ , 表示第  $j$  个目标分配给第  $i$  架无人机, 否则  $x_{ij}=0$ ;  $C$  表示  $x_{ij}$  的攻击收益, 即第  $i$  架无人机攻击第  $j$  个目标获得的收益为对该目标的杀伤效率与该目标的价值量的乘积, 即

$$C = v_j \cdot x_{ij} \cdot p_{ij} \quad (1)$$

式中:  $v_j$  表示第  $j$  个目标的价值量;  $x_{ij}$  为决策变量(取值为 0 或 1);  $p_{ij}$  为第  $i$  架无人机对第  $j$  个目标的杀伤概率。

若有  $S$  架飞机同时对第  $j$  个目标进行攻击, 各架飞机单独攻击该目标的毁伤概率为  $p_i$ , 则在  $S$  架飞机的协同攻击下, 该目标的毁伤概率为<sup>[5]</sup>

$$P_j = 1 - \prod_{i=1}^S (1 - p_i) \quad (2)$$

编队成员攻击目标  $j$  所产生的毁伤带来的预估价值效

果可表示为<sup>[5]</sup>

$$C_j = v_j \cdot \left[ 1 - \prod_{i=1}^n (1 - x_{ij} \cdot p_{ij}) \right] \quad (3)$$

则在一次编队打击中, 产生的总体攻击收益为

$$C_z = \sum_{j=1}^m v_j \cdot \left[ 1 - \prod_{i=1}^n (1 - x_{ij} \cdot p_{ij}) \right] \quad (4)$$

无人机编队任务分配问题的目标可描述为, 使得目标毁伤最大的同时无人机自身毁伤最小, 目标的选择依赖于目标态势、无人机的战术任务。在无人机编队攻击地面目标的同时, 也有可能受到地面防空火力系统的攻击。假设第  $i$  架无人机的价值量为  $v_i$ , 面对  $k$  个地面目标, 各目标对其产生毁伤的概率为  $p'_i$ , 则该飞机的损失价值可以表示为<sup>[5]</sup>

$$U_i = v_i \cdot \left[ 1 - \prod_{j=1}^k (1 - p'_i) \right] \quad (5)$$

考虑到式(5), 则在一次攻击任务中无人机编队所遭受的总的损失价值为

$$U_z = \sum_{i=1}^n v_i \cdot \left[ 1 - \prod_{j=1}^m (1 - p'_{ij}) \right] \quad (6)$$

### 1.2 目标分配约束

#### 1.2.1 目标覆盖约束

为保证攻击到所有被发现的目标, 应至少分配一架无人机去攻击一个目标, 即<sup>[5]</sup>

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} \geq 1, \quad i \in [1, n] \quad (7)$$

为保证无人机均衡分配, 在攻击过程中要求每架无人机至少分配有一个地面目标<sup>[5]</sup>, 即满足

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} \geq 1, \quad i \in [1, m] \quad (8)$$

#### 1.2.2 毁伤阈值约束

为达到攻击毁伤目的, 要求对每个目标的毁伤程度达到一定阈值, 记对各目标的毁伤概率阈值为  $p_j^0$ , 则在一次打击中对目标的毁伤概率应不小于该阈值<sup>[5]</sup>, 即有

$$1 - \prod_{i=0}^n (1 - x_{ij} \cdot p_{ij}) \geq p_j^0, \quad i \in [1, m] \quad (9)$$

#### 1.2.3 任务分配的平衡度约束

为了使编队内所有无人机的作战效能得到最好的发挥, 应防止兵力集中在一个目标上, 以保证兵力分配的平衡, 记允许协同攻击各个目标无人机的最大数量为  $b_i$ <sup>[5]</sup>, 则有

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} \leq b_i, \quad i \in [1, m] \quad (10)$$

另外, 为保证攻击无人机的安全, 不应使无人机长时间滞留于目标攻击区域, 于是, 要求每架无人机仅能攻击有限个目标。记各无人机可攻击目标的最大个数为  $e_j$ , 则有<sup>[5]</sup>

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} \leq e_j, \quad j \in [1, n]。 \quad (11)$$

## 2 基于满意决策的无人作战飞机对地多目标攻击分配

本文所研究的基于满意决策的无人作战飞机对地多目标攻击分配决策算法就是在上文所给出的目标分配约束条件式(7)~式(11)下,找到满意的分配结果使得总体攻击收益式(4)和总的损失价值式(6)之间达到一个有效的平衡,该平衡也许并非最优,但可以达到战术要求,完成攻击任务。为了清楚地描述基于满意决策的无人作战飞机对地多目标攻击排序方法,首先给出满意决策的一般求解过程。满意决策问题的一般求解过程,可分为以下 5 步<sup>[10]</sup>:1) 识别满意问题;2) 建立问题模型;3) 建立满意度;4) 求解模型;5) 求解结果的评估。满意决策问题一般求解过程的流程图见图 1。

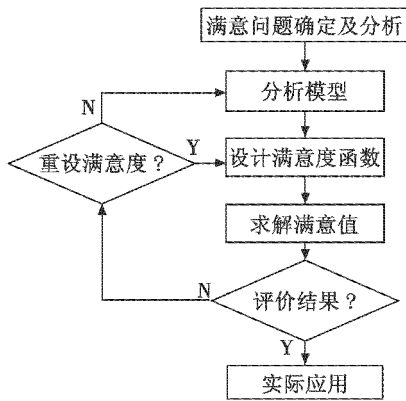


图 1 满意决策求解过程的流程图  
Fig.1 Flow chart of satisficing decision

根据上述满意决策问题的一般求解过程,所研究的采用满意决策理论的多目标空对地攻击排序的分配算法步骤如下。

1) 根据地面目标数量决定是否进行初始分配。如果地面待攻击目标数量较多(超过 8 个),则需进行地面目标初始分配。

2) 由参与目标分配的每架无人机根据自己完成任务的预估效益和预估代价获得个体选择函数和个体拒绝函数,计算出个体满意集,即无人机个体可以接受的攻击目标集合。

满意决策理论的个体满意集(Satisficing Set)定义为<sup>[7]</sup>

$$S_q = \{u \in U : w_s(u) \geq qw_r(u)\} \quad (12)$$

式中: $S_q$  为  $q$  水平下的满意集; $U$  为个体决策空间;参数  $q$  为满意调节因子,表示决策的谨慎程度; $w_s(u)$  和  $w_r(u)$  分别为定义在决策空间上的接受函数和拒绝

函数。

在无人机空对地攻击模型下,根据式(4)和式(6)求出的总体攻击效益  $C_z$  和总体攻击代价  $U_z$ ,得出无人机空对地攻击满意决策中的总体选择函数和总体拒绝函数<sup>[7]</sup>

$$W_s(x) = C_z \cdot f \cdot \frac{v_j}{v_{\max}} \quad (13)$$

$$W_r(x) = U_z \cdot f \cdot \frac{v_i}{v_{\max}} \quad (14)$$

$$f = \frac{1}{1 + e^{-\gamma(\sigma - m_j)}} \quad (15)$$

式中: $f$  为惩罚因子,对过于集中的分配结果进行惩罚; $\gamma \in (0, +\infty)$ ,为惩罚调节因子; $m_j$  为攻击目标  $j$  的无人机的数目; $\sigma$  为允许攻击目标的最大无人机数目,当  $m_j$  超过阈值  $\sigma$  时, $f$  会迅速减小,对无人机过于集中攻击某一目标的行为进行惩罚; $v_j/v_{\max}$  用于对函数进行归一化处理, $v_{\max}$  为最大价值量值。

3) 根据总体选择函数和总体拒绝函数实现无人机目标分配。

根据上述算法步骤,基于满意决策的空对地多目标攻击排序流程图见图 2。

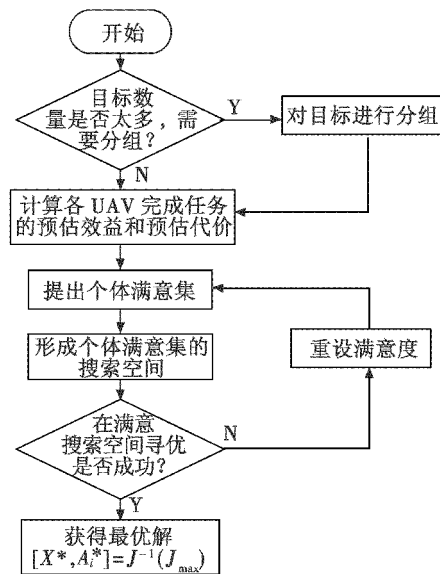


图 2 基于满意决策的空对地多目标攻击排序流程图  
Fig.2 Flow chart of air-to-ground attacking based on satisficing decision

## 3 仿真分析

为了验证本文所研究基于满意决策方法的无人机空对地攻击多目标分配的有效性,本节进行数值仿真研究。仿真场景为 4 架无人机攻击 6 个地面目标。在基于满意决策的无人机空对地攻击多目标分配算法中,根据总体选择函数  $W_s(x)$  和总体拒绝函数  $W_r(x)$ ,

定义  $L = W_s(x) - \alpha W_r(x)$ , 为目标分配函数, 以此进行分配结果的寻优, 通过满意调节因子的选取获得目标分配的满意函数值。该仿真实例中, 取满意调节因子  $\alpha = 0.2$ 。

数值模型参考文献[5]。仿真实验中, 无人机对各目标的单一杀伤概率见表1, 各架飞机攻击不同目标时遭受的毁伤概率见表2, 各架飞机的自身价值见表3, 而目标的初始位置在表4中给出, 在上述仿真场景下利用所研究的满意决策方法的无人机空对地攻击多目标分配结果见表5和图3。

表1 无人机对各目标的单一杀伤概率

Table 1 Kill probability of UAV to each target

	T1	T2	T3	T4	T5	T6
V1	0.46	0.87	0.79	0.65	0.98	0.70
V2	0.66	0.80	0.85	0.79	0.80	0.87
V3	0.68	0.78	0.75	0.70	0.77	0.93
V4	0.41	0.36	0.40	0.35	0.42	0.36

表2 各无人机攻击目标时遭受的毁伤概率

Table 2 Damage probability of each UAV by the targets

	T1	T2	T3	T4	T5	T6
V1	0.40	0.11	0.12	0.25	0.12	0.14
V2	0.22	0.13	0.11	0.14	0.10	0.06
V3	0.35	0.14	0.15	0.19	0.13	0.09
V4	0.41	0.13	0.42	0.25	0.16	0.52

表3 各无人机的价值量

Table 3 Value of UAV

	V1	V2	V3	V4
价值量	35	25	30	8

表4 目标初始位置

Table 4 Initial position of each target

	T1	T2	T3	T4	T5	T6
X/km	0	10	30	40	10	20
Y/km	0	20	20	40	40	0

表5 目标分配结果

Table 5 Target distribution result

	分配结果	分配目标总数
V1	目标 2,5	2
V2	目标 1	1
V3	目标 3,6	2
V4	目标 4	1

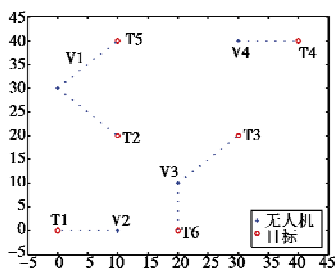


图3 目标分配结果

Fig. 3 Target distribution result

由表5和图3可知, 本文提出的多目标攻击模型及满意决策算法在空对地多目标分配任务中能够完成打击要求, 且具有良好的目标分布特性。

### 4 结论

本文对空对地多目标攻击中的目标分配问题进行了研究, 针对多机协同空对地建立了目标分配模型, 并根据战术任务和战术目标提出相关约束, 减小搜索范围提高攻击效率。同时引入满意决策理论, 根据攻击满意集来搜索目标分配最优解, 大大提升了搜索效率, 最后给出实验数据和实验结果。由实验结果可知, 所研究的空对地多目标攻击目标分配方法可行, 模型正确有效。

### 参考文献

- [1] 韩志刚, 贺建良, 孙隆和, 等. 现代空对地攻击技术[J]. 电光与控制, 1999, 6(4): 17-22.  
HAN Z G, HE J L, SUN L H, et al. Modern air-to-ground attack techniques[J]. Electronics Optics & Control, 1999, 6(4): 17-22.
- [2] 霍霄华, 陈岩, 朱华勇, 等. 多UCAV协同控制中的任务分配模型及算法[J]. 国防科学技术大学学报, 2006, 28(3): 83-88.  
HUO X H, CHEN Y, ZHU H Y, et al. Study on task allocation model and algorithm for multi-UCAV cooperative Control[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2006, 28(3): 83-88.
- [3] 张立彪, 周春光, 马铭, 等. 基于粒子群算法求解多目标优化问题[J]. 计算机研究与发展, 2005, 41(7): 1286-1291.  
ZHANG L B, ZHOU C G, MA M, et al. Solutions of multi-objective optimization problems based on particle optimization[J]. Journal of Computer Research and Development, 2005, 41(7): 1286-1291.
- [4] 黄家成, 谢奇峰. 基于遗传算法的协同多目标攻击空战决策方法[J]. 火力与指挥控制, 2004, 29(1): 49-52.  
HUANG J C, XIE Q F. Air combat decision of cooperative multi-target attack based on genetic algorithms[J]. Fire Control & Command Control, 2004, 29(1): 49-52.
- [5] 金庭, 陈璟. 协同空对地攻击中的目标分配方法[J]. 计算机仿真, 2008, 25(11): 40-43.  
JIN T, CHEN J. Target allocation in cooperative air-to-ground attacking[J]. Computer Simulation, 2008, 25(11): 40-43.
- [6] 龙涛, 陈岩, 沈林成. 基于合同机制的多UCAV分布式协同任务控制[J]. 航空学报, 2007, 28(2): 352-357.

- updating in timed influence nets [C]//Proceedings of 2004 Command and Control Research and Technology Symposium, San Deigo, 2004.
- [5] HAIDER S, LEVIS A H. Finding effective course of action using particle swarm optimization[C]//IEEE Congress on Evolutionary Computation, 2008:1135-1150.
- [6] ZHU Y G, LEI Y L. Stochastic timed influence nets [C]//Proceedings of the IEEE 2010 International Conference on Computer Application and System Modeling, Taiyuan, 2010:634-638.
- [7] 朱延广, 朱一凡. 基于影响网络的联合火力打击目标选择方法研究[J]. 军事运筹与系统工程, 2010, 24(3):64-69.  
ZHU Y G, ZHU Y F. Method of joint fire strike target selected based on influence nets [J]. Military Operations Research and Systems Engineering, 2010, 24(3):64-69.
- [8] 朱延广, 朱一凡, 雷永林, 等. 基于随机时间影响网络的联合火力打击方案评估[J]. 国防科学技术大学学报, 2011, 33(5):97-102.  
ZHU Y G, ZHU Y F, LEI Y L, et al. Stochastic timed influence net based joint fire strike plan assessment [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2011, 33(5):97-102.
- [9] 朱延广, 朱一凡, 雷永林, 等. 随机时间影响网络建模方法——扩展事件影响网络的确定性时间延迟[J]. 系统工程理论与实践, 2012, 32(8):1814-1825.  
ZHU Y G, ZHU Y F, LEI Y L, et al. A new timed influence net model with stochastic delay [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2012, 32(8):1814-1825.
- [10] 杨翠蓉, 王明哲, 廖晶静. 用影响网分析复杂系统关键事件[J]. 应用科学学报, 2010, 28(6):639-645.  
YANG C R, WANG M Z, LIAO J J. Analysis of key events in complex systems using influence nets [J]. Journal of Applied Sciences, 2010, 28(6):639-645.
- [11] 杜正军, 陈超, 姜鑫. 基于影响网络与不完全信息多阶段博弈的作战行动序列模型及求解方法[J]. 国防科学技术大学学报, 2012, 34(3):63-67, 84.  
DU Z J, CHEN C, JIANG X. Modeling and solution method of course of action based on influence net and multi-stage gamed with incomplete information [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2012, 34(3):63-67, 84.
- [12] 程恺, 张宏军, 张睿, 等. 基于扩展时间影响网络的作战任务效能计算方法[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(12):2492-2497.  
CHENG K, ZHANG H J, ZHANG R, et al. Calculation of operational task effectiveness based on extended timed influence nets [J]. Systems Engineering and Electronics, 2012, 34(12):2492-2497.
- [13] 张杰勇, 姚佩阳, 阳东升, 等. 基于 DINs 和 PSO 的组织行动过程选择方法[J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(10):1985-1993.  
ZHANG J Y, YAO P Y, YANG D S, et al. Approach to organizational course of actions selection based on DINs and PSO [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2011, 31(10):1985-1993.
- [14] ZAIDI A K, PAPANTONI T P. Theory of influence networks [J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2010, 60(4):457-491.

(上接第 13 页)

- LONG T, CHEN Y, SHEN L C. Distributed cooperative mission control based on contract mechanism for multiple unmanned combat aerial vehicles [J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2007, 28(2):352-357.
- [7] 叶媛媛, 闵春平, 沈林成, 等. 基于满意决策的多 UAV 协同目标分配方法[J]. 国防科学技术大学学报, 2005, 27(4):116-120.  
YE Y Y, MIN C P, SHEN L C, et al. Satisficing-decision-based targets assigning for cooperative UCAVs [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2005, 27(4):116-120.
- [8] 汤连生. 基于满意决策支持系统的地下水管理研究[J]. 水文地质工程地质, 1992, 19(6):23-28.  
TANG L S. Satisficing-decision-based underground water management [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1992, 19(6):23-28.
- [9] 李静. 基于有限理性满意决策原则的出发时间选择模型[J]. 山东交通学院学报, 2007, 15(2):15-18.  
LI J. Departure time choice model based on bounded rational satisficing decision [J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2007, 15(2):15-18.
- [10] BACHARACH M. The epistemic structure of a theory of a game [J]. Theory and Decision, 1994, 37:7-48.