

# 基于规则推理的无人机对地攻击目标选择自主决策\*

冯志峰<sup>1,2</sup>, 刘鸿福<sup>1</sup>, 陈浩<sup>1</sup>

(1. 国防科技大学机电工程与自动化学院, 湖南长沙 410073;

2. 解放军94669部队, 安徽芜湖 241007)

**摘要:**通过研究无人作战飞机对地攻击过程中的目标选择流程及相关因素,分析归纳出确定目标攻击顺序的典型行动和裁决规则,并构建了自主决策问题模型。然后提出了一种适用于不连续通信条件下的基于规则推理的UAV自主决策方法,该方法模拟了Rete算法思路以匹配当前作战情况和决策规则,并采用逼近理想解技术选择出最优决策。实验结果显示该方法可使UAV自主做出合理的决策。

**关键词:**无人机;对地攻击;目标选择;自主决策;规则推理

**中图分类号:**E926.3;V279

**文献标志码:**A

**DOI:**10.3969/j.issn.1673-3819.2015.04.007

## Self-determined Decision-making About Target Selection in Air-to-ground Attacking of UAV Based on Rule Reasoning

FENG Zhi-feng<sup>1,2</sup>, LIU Hong-fu<sup>1</sup>, CHEN Hao<sup>1</sup>

(1. College of Mechatronics and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073;

2. the Unit 94669 of PLA, Wuhu 241007, China)

**Abstract:** This paper focuses on the problem of UAV performing air-to-ground attacking task by researching on the target selection progress and relative factors, and analyzes typical active rules and judgment rules that could be used for UAV to determine attacking order. A self-determined decision-making problem model is also formulated. Aiming to ensure that UAV still has the ability to make strategic decisions independently when the communication is interrupted, it designs an approach that simulates Rete algorithm and matches current attack situation and decision rules, and proposes the technique for order preference by similarity to ideal solution to select the best decision. Finally, the test result demonstrates the designed approach can help UAV make reasonable decisions itself.

**Key words:** UAV; air-to-ground attack; target selection; self-determined decision-making; rule reasoning

目前,无人机(UAV, Unmanned Aerial Vehicle)已广泛用于军事领域执行对地攻击等作战任务。从智能角度看,提高UAV的信息处理能力和自主决策能力是一个有效提升作战效能的方法,而目标选择是作战的第一步,也是直接影响战略企图实现的关键问题之一<sup>[1]</sup>。在实际作战中,为了应对UAV与地面任务控制站之间可能出现的通信中断等突发状况,需要提高UAV的自主决策能力,使用经过提炼的有启发作用的知识以制定有利于己方的一系列作战行动。鉴于规则能总结、表达和抽象知识这一特性,可使用规则来引导目标选择。

### 1 无人机对地攻击中目标选择自主决策问题

目标选择的目的是为UAV选择待攻击的敌方对

象,在信息化条件下,目标选择应准确把握目标间的内部动态关联,以及单个目标在敌方作战系统中的重要性。因此目标选择可理解为不断更新攻击目标清单的活动,需经历分类和排序两个子过程,其主要流程如图1所示。

首先将目标信息(类型、类型优先级、是否必须被探测到等)编制成关注类表,然后通过判断目标类型、运动路径、当前位置等属性,动态添加任务目标(上级指定的目标)和随机目标(机载设备探测到的、目视发现的或突然出现的目标)到目标表中。其中如果任务目标位于可攻击区(机载武器作用范围内)内,则将其添加到目标表中;如果UAV可与随机目标交战,则随机目标会被添加到目标表中,否则不对随机目标做进一步处理。最后从目标表中按攻击优先级确定主要目标、备份目标和随机目标,形成由不同特性的目标组成的待攻击序列。

UAV对敌方目标进行攻击首先要获得其位置、相对距离、运动速度、类型等参数信息,通过信息共享的方式,理论上可实现即时感知任务目标信息及其进行攻击的相关要素,但是鉴于作战快速动态变化的特

收稿日期:2015-04-23

修回日期:2015-05-26

\* 基金项目:国家自然科学基金项目(61403411)

作者简介:冯志峰(1974-),男,浙江平湖人,硕士研究生,研究方向为空中作战指挥与任务规划。

刘鸿福(1983-),男,博士,讲师。

陈浩(1991-),男,硕士研究生。

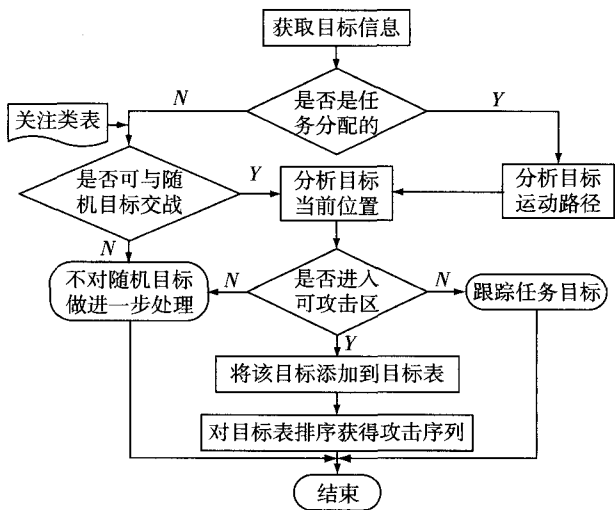


图 1 目标选择流程

性,不能依赖地面站的控制,必须具备一定的自主决策能力,因此在目标选择过程中,UAV 被看作一个智能体 Agent 来循环进行以下 3 个阶段的过程,该过程可看作是一个自主决策的过程:1)通过外界物理设备获取各种战场态势信息;2)依据信息不断搜索匹配相应的军事决策知识;3)结合目标和 UAV 相对位置、机动类型等,定量计算确定各 UAV 待攻击目标的优先级。

2 目标选择自主决策的规则分析与建模

2.1 目标选择规则

目标选择规则是 UAV 执行目标选择过程中必须遵循的依据和规范,它通过描述各作战要素之间的联系,以及支持和制约这些要素与联系的数据环境,将战场态势、作战条件、作战行动计划逻辑串联起来<sup>[2]</sup>。本文将目标选择规则分为行动规则、裁决规则和交互规则<sup>[3]</sup>,其规则体系如图 2 所示。其中交互规则贯穿整个对地攻击任务,可使 UAV 间互通信息协同工作。

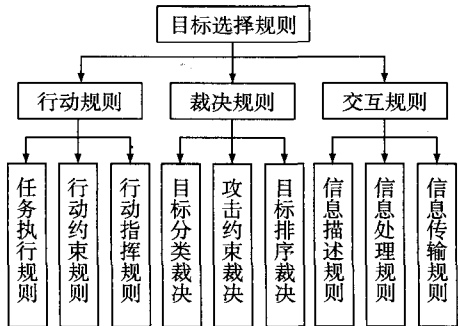


图 2 目标选择规则体系

1) 行动规则

行动规则用于指导 UAV 执行相应的操作,它反映

了对所有 UAV 的行动约束、时序约束等限制。行动规则如表 1 所示。

表 1 行动规则列表

序号	内容
1	如果已起飞,长机执行目标选择。仅当僚机被预先分配了任务目标或接收到长机的指令,僚机才执行目标选择
2	如果 UAV 进入关注区探测到任务分配目标,且目标位于 UAV 攻击范围内,将该目标加入到目标表中,否则追踪该目标  当 UAV 进入关注区,若探测到的目标不是任务分配目标,将该目标做随机目标处理: ①如果该目标类型在关注表中,目标位于可攻击区内,且 UAV 可随时与随机目标交战,则将该随机目标加入目标表中 ②如果 UAV 仅能在它的主要目标完成后才能同随机目标交战,则被探测到的随机目标暂不添加到目标表中,直到 UAV 已与主要目标交战完成并依然具备交战能力
3	
4	如果存在任务目标,UAV 首要攻击该目标;但如果存在人为干预命令,UAV 首要攻击命令中给定的目标
5	如果单个 UAV 面临多个目标,判断目标威胁度和攻击概率,以权衡攻击优先级
6	如果已对目标排序,UAV 首先攻击主要目标,不具备主要目标则攻击备份目标,不具备主要目标、备份目标则攻击随机目标

2) 裁决规则

裁决规则利用 UAV 间、UAV 与目标间交互形成的结果,分析交互行动后战场态势的变化、双方/多方的状态变化及兵力变化,对 UAV 执行行动后所产生结果进行进一步判断。裁决规则如表 2 所示。

表 2 裁决规则列表

序号	内容
1	如果目标选择过程刚开始,目标按照运动状态分为固定目标和时敏目标两大类
2	如果目标开始运动不足 1 分钟或未给定预计活动区域,时敏目标被当作固定目标处理
3	如果已获得目标信息,裁决目标特性,如只要目标具有红外辐射特性,均认为其能被红外成像设备探测到
4	如果已确定某 UAV 的一条攻击航线,必须确定该航线上的一个主要目标  当攻击航线经过关注区时, ①如果 UAV 装备反辐射导引头武器,所有电磁辐射目标均是随机目标 ②如果 UAV 装备光学成像导引头和常规非制导武器,可计算得到目标的发现能见度 ③如果 UAV 装备红外导引头武器并装载红外探测设备,可攻击所有符合该设备红外识别分辨率的目标
5	
6	如果 UAV 装备设备定位导引头武器,则 UAV 不会与随机目标交战

2.2 基于规则的自主决策模型

为解决目标选择自主决策问题,需要的规则数量

较大,且规则需要同时作用于参战各方的作战实体,可能造成规则冗余和规则冲突,如果基于规则为自主决策问题建模,可便于描述规则与实体、行动间的关系。模型包括局中人、约束因素、策略集和支付4个要素。局中人指参战的 UAV 和敌方目标;约束因素指影响决策产生结果的因素,包括任务规划、目标特性、战场环境、威胁特性、平台特性;策略集是以行动规则和裁决规则为基础得到的目标攻击顺序;支付是指选择某个策略后,UAV 执行攻击策略中主要目标得到的效益。效益值越大,代表 UAV 优势越大,损失越小,反之则优势越小,损失越大。

### 3 基于规则推理的自主决策方法

#### 3.1 规则的知识表示

以上的行动规则和裁决规则是人类思维对军事知识做出的抽象描述,需要将它们转化成适当的形式供 UAV 识别、存储及正确解读。本文引用“决策规则”这一概念,指代对行动规则、裁决规则的条件属性和决策属性经过提炼、赋值后形成的改进知识,形式上是作战实体在某种态势下满足约束条件而执行的战术动作的决策(集合)。要注意的是,UAV 自主决策是指 UAV 使用军事知识进行智能行动,随着作战的深入,待处理的数据规模更加庞大,决策规则属性的复杂程度也会不断增长,因此决策规则要具备可扩展性才能表达诸多不精确或难以量化的知识。本文采用基于逻辑的知识表示方法——产生式表示法来表示决策规则<sup>[4]</sup>,该表示法的 BNF 描述如下:

〈规则〉::=〈条件〉〈决策〉〈规则可信度〉

〈条件〉::=〈触发条件1〉〈逻辑关系〉〈触发条件2〉  
[〈逻辑关系〉…〈触发条件*i*〉]

〈决策〉::=〈决策子句〉〈逻辑关系〉〈决策子句2〉  
[〈逻辑关系〉…〈决策子句*j*〉]

〈逻辑关系〉::=与(∧)∣或(∨)

〈规则可信度〉::=〈(0,1]内的实数值〉。

另外,不同的场景下规则的条件属性取值不同,会影响到结果属性的变化,需要增加一个规则可信度来表示规则的信任程度。因此,决策规则形式应写作

If〈条件〉Then〈决策〉with〈规则可信度〉。

以行动规则 Rule1 为例,其决策规则写作:

1. If〈起飞〉Then〈长机执行目标选择程序〉with  
〈1〉

2. If〈起飞〉∧ $\left(\begin{array}{l} \langle \text{僚机有预先计划的目标} \rangle \vee \\ \langle \text{僚机接收到长机的指令分配} \rangle \end{array}\right)$   
Then〈僚机执行目标选择程序〉with〈1〉。

#### 3.2 自主决策方法描述

使用决策规则的目的是利用军事知识对 UAV 作战过程中需要完成的战术动作和各类突发事件进行决策指导,即通过构建得到的系统的规则库,采用将事实与作战规则对比的匹配方法,推理形成实用的作战决策<sup>[2]</sup>。自主决策推理过程由特殊机制——智能代理(IA, Intelligent Agent)执行,IA 负责感知来自外部环境的信息并与决策规则对比,将所得结论反馈给外部环境<sup>[5]</sup>。为了降低推理复杂度,本文中 IA 采用由数据驱动的正向推理法,其推理流程如图3所示。

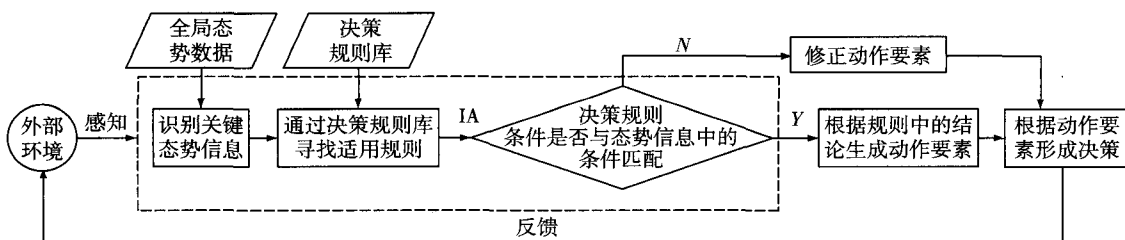


图3 基于规则的决策推理流程

通常,当前作战事实是一个新知识对象,在决策规则库中可能没有前提与态势完全相同的决策规则,在此提出一种利用 Rete 算法思路特点<sup>[6]</sup>和逼近理想解技术的自主决策方法,该方法从当前事实的条件属性出发,正向依次匹配决策规则库中各规则的 If 部分,若匹配成功则该规则适用,规则 Then 部分加入决策结论集,直到事实的属性被全部匹配完或再无可匹配规则,则推理完成,具体的操作步骤如下:

Step 1: 约简事实属性。作战事实中有些属性可省

略而不影响属性信息的完整性,可利用信息量对属性集进行约简<sup>[7-8]</sup>。设  $P$  是属性集,  $p_i$  是其中一个属性,  $\theta$  是信息量变化阈值,信息量是  $IC(p_i|P)$ 。当去掉  $p_i$  后的信息量  $IC'(-p_i|P) - IC(p_i|P) > \theta$ ,则去掉的属性不可约简。

Step 2: 仿 Rete 算法思路,匹配决策规则模式和事实。Rete 网络中  $\alpha$  节点代表每个规则的每个模式,事实与之匹配成功的属性存入工作记忆(Working Memory)中,在  $\beta$  节点处对属性间逻辑关系进行处理并

连接(Join)计算。最后提取“根节点 $\rightarrow\alpha$ 节点 $\rightarrow\beta$ 节点 $\rightarrow$ 终端节点”路径上各节点记忆中存储的属性,形成一个完整的规则模式,依照该模式匹配决策知识库,提取符合的所有决策规则。

$$\text{Compare}(F, R) = 1 - \sum_{i=1}^{|C'|} \sum_{j=1}^{|C|} w_i \xi(c'_i, c_j) \quad (1)$$

$$\xi(c'_i, c_j) = \begin{cases} 1 & c'_i \text{ 和 } c_j \text{ 相同} \\ 0 & c'_i \text{ 和 } c_j \text{ 不同} \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $F$  是当前事实;  $c'_i$  为  $F$  的某一条件属性,  $w_i$  是其权值;  $R$  是决策规则,  $c_j$  是  $R$  的某一条件属性。  $\text{Compare}(F, R)$  值越大代表两者间相似度越低, 应选择距离最近的决策规则决定决策规则模式。

Step 3: 规则排序。若事实与某决策规则的属性值完全匹配, 则该规则的决策直接投入使用, 否则利用各个决策的正理想解和负理想解为所属的决策规则排序<sup>[9]</sup>。

决策矩阵  $A = \{a_{ij}\}$ , 规范化决策矩阵  $B = \{b_{ij}\}$ 。

$$b_{ij} = a_{ij} / \sqrt{\sum_{i=1}^m a_{ij}^2}, i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n \quad (3)$$

构成加权规范阵  $X = \{x_{ij}\}$ , 给定权值  $w = [w_1, \dots, w_n]^T$ , 其中,

$$x_{ij} = w_j \times b_{ij}, i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n \quad (4)$$

对效益型属性, 正理想解  $x^+ = \max x_{ij}$ , 负理想解  $x^- = \min x_{ij}$ , 成本型属性的理想解求解方法相反。计算各决策到正、负理想解的距离分别为:

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (x_{ij} - x_j^+)^2}, i = 1, \dots, m \quad (5)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (x_{ij} - x_j^-)^2}, i = 1, \dots, m \quad (6)$$

计算每个决策的综合价值:

$$E_i = d_i^- / (d_i^- + d_i^+), i = 1, \dots, m \quad (7)$$

## 4 想定与实验

针对 UAV 对地攻击作战的具体任务想定, 给出 UAV 执行目标选择的简单实例, 给出基于决策推理的自主决策方法的使用结论。

### 1) 作战想定

假设有两个 UAV 执行对地攻击任务, 上级指定重点攻击电磁目标, 已知存在 5 个敌方目标且所有目标均已进入 UAV 的可攻击区。目标信息如表 3 所示。

### 2) 实验过程

针对给定作战想定, 各目标特征属性均能影响 UAV 的目标选择效益。将目标特征属性集作为输入量传给 UAV, UAV 依照 Rete 算法思路, 得到目标选择决策规则的模式如下:

条件属性集  $C = \{S, V, W, T\}$

决策属性集  $D = \{V\_A, D\_V\}$

①  $S$ : 目标被单次攻击的成功率, 取值区间  $[0, 100\%]$ ;

②  $V$ : 目标自身价值, 取值区间  $[1, 10]$ ;

③  $W$ : 目标对己方造成威胁的最大范围;

④  $T$ : 目标所属的类型, 量化后取值区间  $[1, 10]$ ;

⑤  $V\_A$ : 目标被攻击后己方获得的价值增益;

⑥  $D\_A$ : 目标被攻击的优先级。

结合式(1)、(2), 决策规则库中符合以下模式的决策规则可作为决策建议:

If  $\langle S? \rangle \wedge \langle V? \rangle \wedge \langle W? \rangle \wedge \langle T? \rangle$

Then  $\langle? \rangle [\dots \langle? \rangle]$ 。

表 3 目标特征属性

序号	成功率 (UAV <sub>1</sub> )	成功率 (UAV <sub>2</sub> )	目标价值	威胁 范围	目标 类型
1	80%	70%	5	1 km	红外目标
2	80%	80%	6	3 km	红外目标
3	70%	75%	7	2 km	红外目标
4	95%	90%	10	5 km	电磁目标
5	90%	85%	8	6 km	电磁目标
权值	0.4	0.4	0.3	0.2	0.1

## 3) 实验结果

由式(3)~(7), 使用 Matlab 仿真计算得到攻击各目标的决策价值见表 4。

表 4 攻击决策价值

	Target <sub>1</sub>	Target <sub>2</sub>	Target <sub>3</sub>	Target <sub>4</sub>	Target <sub>5</sub>
UAV <sub>1</sub>	0.1335	0.3892	0.2907	0.9615	0.6946
UAV <sub>2</sub>	0.5177	0.5189	0.6083	0.4035	0.7086
攻击优先级					
UAV <sub>1</sub> : 4 > 5 > 2 > 3 > 1	UAV <sub>2</sub> : 5 > 3 > 2 > 1 > 4				

由结果可知, 目标 4 是 UAV<sub>1</sub> 的主要目标, 目标 5 是 UAV<sub>2</sub> 的主要目标。

## 5 结束语

结合无人机对地攻击的特点, 本文提出基于作战规则以实现无人机自主决策的方法。从规则的作用分析着手, 通过描述决策时所依据的军事知识, 总结了无人机对地攻击过程中确定目标选择的典型行动规则和裁决规则。然后引入决策规则这一概念, 具体介绍了可使无人机自主识别的规则的知识表示方法和决策推理流程。文中设计的自主决策方法在判定作战事实属性的重要度后, 构建作战属性集, 并依据 Rete 算法思路选取符合既定的作战属性集模式的决策规则进行推

理,减少了匹配事实和规则的工作量。最后设计示例进行实验,从实验结果来看,基于规则推理出接近人类思维的合理决策是可行的。后续将重点研究如何保证规则的覆盖度、支持度、精确度以及置信度等。

#### 参考文献:

- [1] 孔祥骏. 无人机对地攻击仿真研究[D]. 西安:西北工业大学,2003.
- [2] 李益龙,喻涛. 基于规则的对海作战指挥控制应用[J]. 指挥信息系统与技术, 2011, 2(5): 47-48.
- [3] 叶雄兵,董献洲,季明,等. 作战模拟规则探讨[J]. 军事运筹与系统工程. 2009, 23(4): 56-58.
- [4] 申耀德,杜晓明,葛涛,等. 基于规则的装备保障指挥决策模型研究[J]. 计算机测量与控制, 2012, 20(1): 135-137.
- [5] Joshua Redding, Jayesh Amin, Jovan D. Boskovic, et al.

Collaborative Mission Planning, Autonomy and Control Technology( CoMPACT) for Unmanned Surface Vehicles [C]. In: AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. 10-13 August 2009: 7.

- [6] 陈帅均,蒋平,吴钦章. 基于代价模型的 RETE 优化算法[J]. 光电工程, 2014, 41(7): 44-48.
- [7] 胡丹,李洪兴,余先川. 规则与规则库信息量的度量及其应用[J]. 中国科学 F 辑:信息科学, 2009, 39(2): 218-233.
- [8] Gago P, Bento C. A metric for selection of the most promising rules[C]. In: Proceedings of European Conference on the Principle of Data Mining and Knowledge Discovery. 1998, 1510:19-27.
- [9] 张国栋,黄亮,刘忠. 基于目标运动特征和 TOPSIS 决策的多目标选择方法[J]. 海军工程大学学报, 2011, 26(1):104-106.

(上接第24页)

因此,为使预警直升机的规避更具有可操作性,不应连续更改规避航向,而应保持不变或在适当时机更改,但更改次数不易过多。

预警直升机在进行规避飞行时,应采用不影响机载雷达工作的最大速度,同时将自己和敌机的运动要素(位置、高度、速度、航向)等通报编队和无人机控制平台,此时,编队组织对敌机实施拦截,无人机操纵员根据预警直升机的运动要素,保持无人机相对预警直升机的阵位,并根据敌机相对预警直升机的方位实施电子干扰,掩护预警直升机。

## 4 结束语

使用无人机对敌航空兵机载雷达进行干扰,不仅可掩护预警直升机,同时也可干扰敌机对水面舰艇的探测,从而在一定程度上保护水面舰艇编队免遭敌空射反舰导弹的攻击。虽然使用无人机掩护预警直升机可取得一定的效果,但仅凭一种方法可能难以确保预警直升机的安全,为此,应综合使用航空兵掩护、无人

机干扰、预警直升机机动规避等多种方法。

#### 参考文献:

- [1] 郭江龙,王震波. 信息化海战场中 SEH 作战能力特点及环境影响研究[J]. 舰船电子工程, 2011, 31(9): 9-13.
- [2] 仇安全,鲁明. 预警直升机在舰艇编队作战中的运用浅析[J]. 海军学术研究, 2009(2): 26-28.
- [3] 胡铮涛,王震波,谭安胜. 舰载无人机系统在海战场上的运用与发展[J]. 海军大连舰艇学院学报, 2009, 32(4): 15-17.
- [4] 杨军,赵锋,宫颖. 舰载无人机雷达对抗的建模研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(3): 949-951.
- [5] 张中南,钟志通,马其东. 某型倾斜发射舰空导弹射击禁危区研究[J]. 弹道学报, 2006, 18(2): 88-90.
- [6] 张云阁,等. 世界飞机手册[M]. 北京:航空工业出版社, 2001.
- [7] 谭安胜,郭江龙,尹成义. 舰载预警直升机线式搜索模型研究[J]. 指挥控制与仿真, 2014, 36(5): 12-14.