

一种 UCAV 自主空战智能战术决策方法

唐传林¹, 黄长强¹, 丁达理¹, 杜海文¹, 蔡佳²

(1. 空军工程大学航空航天工程学院, 陕西 西安 710038)

(2. 解放军 94019 部队, 新疆 和田 848099)

摘要: 针对自主空战过程中无人作战飞机自主进行决策的问题, 提出一种基于飞行员空战经验的智能战术决策方法。首先针对飞行员空战决策经验知识难以显化表示的问题, 提出一种基于情境构建的经验型隐性知识表示方法; 然后基于自然决策理论中人类决策是由直觉决策与分析决策综合作用的思想, 设计 UCAV 智能决策框架: 提出认知主导的情境推理方法实现直觉决策, 提出云模型的定性规则推理方法实现分析决策。仿真结果表明: 认知主导的情境推理方法能快速得出决策结果, MAX-MIN 云推理决策方法得到的决策结果符合有人参与决策结果的逻辑, 基于安全的空战知识集重构能改善决策时间, 满足实时性要求。

关键词: 无人作战飞机; 自主空战; 知识表示; 云模型; 战术决策

中图分类号: V325; E917

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1673-3819.2015.05.002

A Method of Intelligent Tactical Decision Making for UCAV Autonomous Air Combat

TANG Chuan-lin¹, HUANG Chang-qiang¹, DING Da-li¹, DU Hai-wen¹, CAI Jia²

(1. Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038;

2. the Unit 94019 of PLA, Hetian 848099, China)

Abstract: Aiming at the problem of independently tactical decision making during UCAV autonomous air combat, a method based on fighter pilot experience in air combat is proposed. Firstly, to cope with the problem of the pilot experience is tacit knowledge and hard to be expressed explicitly, a tacit knowledge representation method is given based on situation construction. Secondly, referencing the idea in the Naturalistic decision making theory that human make decision is mainly dependent on tacit system and deliberate system, an intelligent decision framework is designed, which is composed of two parts: 1) a method of recognition primed situation based reasoning (RPSBR) is developed to fulfil tacit decision making; 2) based cloud model theory, a method of MAX-MIN uncertain reasoning is proposed to fulfil deliberate decision making. Experimental results demonstrate that the method RPSBR is efficient to reach the result; the conclusion from the MAX-MIN uncertain reasoning method is the same with human involved in; reconstructing the air combat tactical knowledge set based on safety can shorten the runtime of decision making and meet requirement of real-time.

Key words: UCAV; autonomous air combat; knowledge representation; cloud model; tactical decision making

未来空战中为了保证飞行员零伤亡, 无人机将从战场保障角色逐渐转变为直接执行作战任务的主角, 无人作战飞机 (Unmanned Combat Aerial Vehicle, UCAV) 甚至有可能取代有人战斗机成为空战主力。当前“人在回路”的地面站控制与决策模式存在明显的局限性^[1], 无法满足空战需求, 因此研究 UCAV 自主作战相关的问题就显得十分必要。文献 [2] 引入专家系统构建无人战斗机智能决策系统, 但专家系统能对已知问题进行求解, 遇到未知问题时仍需要人参与决策, 无法实现完全自主决策。此外, 空战机动决策研究中大

量采用的影响图^[3]、对策方法^[4]、粗糙集^[5]、贝叶斯网^[6]、人工神经网络^[7]等方法, 大多应用于战斗机辅助决策或者地面站控制模式的无人机决策, 是否满足无人作战飞机在线自主决策的要求还有待考证。

战斗机飞行员空战和训练形成的大量作战决策经验为无人作战飞机自主空战决策提供了大量的经验样本, 是无人作战飞机实现自主决策的有效途径。但人的经验知识主要以隐性知识为主, 无人作战飞机无法直接学习。为了使这些丰富的经验能够被无人作战飞机借鉴和学习, 从而为自主决策提供知识来源, 本文在研究飞行员空战经验知识表示方法的基础上, 参考人类决策是由直觉决策与分析决策综合作用的思想, 设计了一种智能决策框架。该框架以本文提出的飞行员空战决策经验知识表示方法为基础, 通过设计基于认知主导的情境推理方法实现直觉决策, 然后基于云模型的定性规则推理实现分析决策, 最终实现智能决策。本文主要研究确定条件下基于飞行员空战决策经验的

收稿日期: 2015-06-25

修回日期: 2015-08-17

作者简介: 唐传林 (1986-) 男, 四川广安人, 博士研究生, 研究方向为无人作战飞机自主空战决策与控制。

黄长强 (1961-) 男, 教授, 博士生导师。

丁达理 (1970-) 男, 副教授。

杜海文 (1965-) 男, 教授。

蔡佳 (1983-) 男, 工程师。

UCAV 自主空战智能决策问题。

1 情境构建的经验型隐性知识表示方法

Michael Polanyi 认为人的知识分为两种类型:一种是以文字、图表、数学公式、公理及定理等表示的知识;另一种是难以用语言表达的知识,如个人经验;前者称为显性知识,后者称为隐性知识^[8]。战斗机飞行员通过教材等书籍获取的知识属于显性知识,而飞行员通过学习与训练,经大脑处理之后形成的经验则属于隐性知识,具有难以程序化、高度情境化和个人化的特征。设计合理的隐性知识表示方法将飞行员的空战决策经验显式地表示出来,是UCAV能够学习战斗机飞行员空战经验的关键所在。目前各个领域由于应用范围和使用目的不同产生了形式各异的知识表示方法,被各国专家学者广泛研究的有谓词逻辑、语义网络、框架表示、产生式规则、面向对象、基于本体的表示法等多种方法。

根据文献[9]关于经验型隐性知识的定义,问题情境是知识能够共享和重用的基础。飞行员空战决策经验属于隐性知识,其高度个人化、情境依赖性特征使其难以直接通过现有的知识表示方法进行表示,需要通过构建空战对抗情境,将决策经验进行显化表示。因此下面对空战对抗情境进行构建并对影响战术决策的各种因素进行分析。

战斗机飞行员空战过程中,战术动作方案的选择取决于当前的态势信息,对于UCAV自主空战而言也不例外。一对一空战条件下空战态势包括了很多信息,敌机的方位、距离、速度、接近率、机动性能、隐身性能、雷达持续照射及锁定情况、武器发射情况、探测距离、武器攻击包线、电子干扰情况,UCAV空间位置、速度、雷达探测距离、武器攻击包线、机动能力等众多因素。决策时若考虑全部因素是不合理的,也是不现实的。需要在满足空战实时性、准确性前提下,提出一个对决策影响较大且不能忽略的关键因素集合。对于敌我双方战机的机动性能、隐身性能、探测距离、攻击包线等固有特性差距比较大的情况,性能优越的一方最终取得空战胜利的可能性要比性能差的一方要大很多。本文设定敌我双方战机的整体性能相当,双方通过运用战术手段,都可能取胜。选择我机位置、接近率、敌机方位距离、敌机航向、雷达锁定情况、武器发射情况、电子干扰情况作为战术决策问题情境的特征,态势示意图如图1所示。

经验型隐性知识具有高度个人化特征,不同飞行员的空战经验存在差异,获取的经验型隐性知识也会出现差异,因此这些经验型隐性知识有具体的适用范

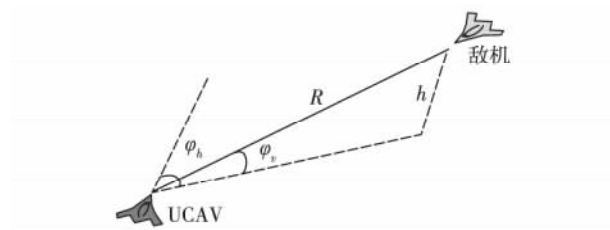


图1 UCAV 自主空战态势示意图

围,因此在隐性知识的表示中应该加入“个体”和“适应度”因子,“个体”表示飞行员个体信息,如攻击型、保守型、稳重型等特征,“适应度”表示该知识的适用范围(如适用于机动攻击战术、规避战术等)和适用程度。此外由于经验型隐性知识属于个人知识,未经他人实证,应当加入“可信度”因子表示知识使用者(UCAV)对该知识使用后的评估,即可信赖程度。通过对经验型隐性知识的研究,本文提出一种结构化的经验型隐性知识表示方法,如下所示:

$$knowledge_of_tactical\langle k \rangle = \langle X, a_r, type, fitness, belief \rangle$$

其中,情境特征集 $X = \{x_i\}_{i=1}^n$, x_i 表示第 i 个特征; a_r 表示该知识元中采取的行动方案; $type$ 表示飞行员的类型; $type$ 取值为飞行员个体信息; $fitness$ 表示适用度; $belief$ 表示该条知识元的可信程度,取 $[0, 1]$ 范围内的值。

2 智能战术决策问题建模

飞行员对于空战态势的把握是基于获取的信息,这些信息来源于机载传感器或者己方信息交互网络。UCAV进行态势的判断首先需要获取态势信息,本文假设这些信息通过传感器或者信息交互网得到。各种信息的集合构成了决策问题的状态空间,设信息集中元素 s_i^t 表示 t 时刻第 i 个信息元, $i = 1, 2, 3, \dots, n$ 。则在时刻 t 的状态空间可表示为

$$S^t = s_1^t \times s_2^t \times s_3^t \times \dots \times s_i^t \times \dots \times s_n^t \quad (1)$$

由于空战态势信息类型比较多,有很多类型的信息其信息值不随时间变化,只需要在空战开始时刻获取即可。对状态空间进行简化,根据上文对空战情境的分析以及从UCAV本机安全性为出发点,选择我机位置、接近率、敌机方位距离、敌机航向、雷达锁定情况、武器发射情况、电子干扰情况这些信息作为决策问题的状态空间构成要素,简化的状态空间表示如下:

$$S^t = s_1^t \times s_2^t \times s_3^t \times s_4^t \times s_5^t \times s_6^t \times s_7^t \quad (2)$$

式中, s_1^t 表示UCAV在大地坐标系下的位置: $s_1^t = pos(x_u^t, y_u^t, z_u^t)$; s_2^t 表示我机与敌机的接近率,为两机速度矢量在相对距离矢量方向的投影之差: $s_2^t = a - b$, a, b 为速度矢量分量; s_3^t 表示敌机相对我机的方位距离: s_3^t

$= (R', \phi_h', \phi_v')$, R 表示相对距离, 方位角 ϕ 的下角标 h 、 v 分别表示敌机在水平面、铅垂面的方位角; s_4' 表示敌机、UCAV 的相对航向关系, 用图 2 中的 θ, φ 进行刻画, θ, φ 分别表示指向敌机的相对距离矢量与 UCAV 速度矢量和敌机速度矢量之间的夹角; s_5' 表示雷达锁定情况: $s_5' = \{0, 1\}$, 0 表示未锁定, 1 表示锁定; s_6' 表示武器发射情况: $s_6' = \{0, 1\}$, 0 表示未发射, 1 表示发射; s_7' 表示电子干扰情况: $s_7' = \{0, 1\}$, 0 表示未实施干扰, 1 表示实施干扰。

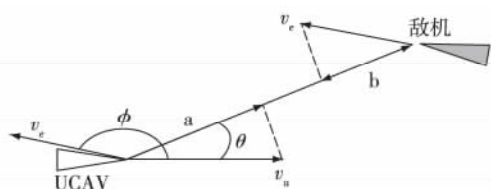


图2 接近率与敌机航向示意图

设战术动作方案集合 $action = [a_1, a_2, a_3, \dots, a_k]$, $f(S^t) \in action$ 则 UCAV 战术决策问题可以表示为 $f: \{S\} \rightarrow [a_1, a_2, a_3, \dots, a_k], \forall S^t \in \{S\}, S^t \rightarrow f(S^t)$
 $s. t. t_d \leq \Delta t$ (3)

式中, f 为决策函数, 在本文中表示决策推理方法; 决策过程必须满足时间约束, t_d 表示决策过程消耗的时间, Δt 表示决策消耗时间的上限。

3 UCAV 智能战术决策框架

根据 Hogarth 关于人决策的研究成果, 人的决策行为由两个子系统共同作用产生: 直觉决策系统和分析决策系统。直觉决策系统以无意识的、快速的、自动化的方式进行工作, 分析决策系统以有意识的、深思熟虑的方式起作用^[10]。在空战态势信息完全确定的情况下, 飞行员习惯使用直觉决策模式进行战术决策, 但是当决策结果与当前态势不相符或者经验中缺少相应的解决办法时, 分析决策系统就会介入并得到适合当前态势的结果。下面分别基于认知主导的情境推理方法实现 UCAV 直觉决策, 基于云模型的定性规则推理方法实现分析决策, 直觉决策与分析决策综合作用形成 UCAV 智能决策。

3.1 安全认知主导的情境推理决策

当载机被敌机雷达持续跟踪锁定后, 机载告警系统会发出告警信息, 飞行员会迅速对此危险态势做出决策, 通过抛撒干扰弹、快速调整飞行方向与高度等一系列操作, 操纵飞机摆脱被锁定状态。可见, 情境中某些态势信息的出现会使飞行员本能地做出反应, 这些信息元构成了飞行员基于安全考虑的态势子集。因此本文出于 UCAV 自身安全考虑, 将该态势子集中的元

素定义为充要条件特征。情境特征集中对 UCAV 安全直接造成影响的有: 雷达锁定情况、武器发射情况、电子干扰情况。在其他情境特征相同的前提下, 这些充要条件特征值的不同会使决策的结果差异巨大。

根据武器发射与攻击条件, 制导武器发射与攻击时雷达必须稳定跟踪锁定目标, 直至目标被击中。因此充要条件特征集形成 6 种组合: 000、001、100、101、110、111, 以此为基础, 将空战经验知识集重构为 6 类子集, 从而将一个大规模数据系统变成 6 个小规模子系统。

人类直觉决策本质上是相似性比较, 具有很强的模糊性, UCAV 很难识别这种模糊性, 需要将比较过程量化, 这涉及到情境特征权值的确定, 需要飞行员或者相关领域专家的参与, 对态势情境特征权值进行打分。权值计算方法参见文献 [11]。权值确定后, 本文采用最邻近算法进行问题的求解, 该算法具有准确率高, 对于小规模数据库的搜索速度快的特点^[12]。

根据 RPD 思想^[10], 建立认知主导的情境推理 (Recognition Primed Situation Based Reasoning, RPSBR) 决策模型。RPSBR 决策模型推理过程为: 在研究飞行员态势情境认知的基础上, 通过基于情境构建的隐性知识表示方法, 建立飞行员空战决策经验知识集; 对当前态势情境进行感知理解, 建立结构化的目标态势情境; 将目标态势情境与经验知识子集进行情境匹配, 找到满足阈值的相似情境集以及对应的战术动作方案序列, 在确定最终战术动作方案时, 根据有无时间压力约束分成两种情况进行确定: 1) 在时间压力约束较弱的条件下, 对战术动作方案序列进行未来态势预测, 评估待选战术动作方案序列的优劣, 并选择其中最优的战术动作方案进行实施; 2) 在有时间压力约束条件下, 将第一个满足匹配度阈值约束的经验知识元对应的战术动作方案作为最终战术动作方案并加以实施。

3.2 云模型的不确定推理决策

由于空战态势的广域性和复杂性, 基于情境构建的空战决策知识集规模将会变得非常庞大。当认知主导的情境推理无法得出满足要求的结果时, 本文提出基于云模型的定性规则推理方法进行决策, 使用自然语言建立规则集, 用云模型描述自然语言规则中的定性概念, 并根据概念的不同语言值划分构成概念云族, 设计 MAX-MIN 云推理方法进行不确定性推理。云模型是李德毅院士提出的一种描述定性定量关系的不确定性转换模型, 能很好地表达数据的模糊性和随机性特征^[13]。

定义 1: 设一个精确量值的论域 U , C 是论域上的定性概念。存在一个精确量值 $x \in U$, 且 x 是 C 上的一次

随机实现, x 对概念 C 的确定度 $\mu(x)$ 是具有稳定倾向的随机数, $\mu(x) \in [0, 1]$, 如果有下面的关系:

$$\mu: U \rightarrow [0, 1], \forall x \in U, x \rightarrow \mu(x) \quad (4)$$

则 x 在 U 上的分布称为云, 每个 x 称为云滴 $drop(x, \mu(x))$, 即概念 C 的一次随机实现。云用期望、熵、超熵表示语言值的数学性质, 期望用 Ex 表示, 熵用 En 表示, 超熵 He 用表示。 Ex 表示概念量化后的最能代表该概念的数值, En 表示被概念接受的取值范围大小, He 表示 En 的不确定性程度^[14], 因此云可以表示为 $Cloud(Ex, En, He)$ 。

基于自然语言的空战决策规则可以表示为 if A then B 的形式。在战术决策中使用定性规则进行决策, 首先应对规则中的特征概念进行云化, 构建特征云模型。规则中的特征的选取应当与探测系统获取的定量数据形成对应关系。然后对特征根据不同语言值进行论域划分, 构建由同一特征不同论域组成的概念云族。

定义 2: 设 U 为定性概念 D 的精确量值论域, U_1, U_2, \dots, U_k 是论域 U 的一个划分, 且满足以下条件: 1) $\bigcup_{i=1}^k U_i = U$; 2) $\bigcap_{i=1}^k U_i = \emptyset$; 3) 对 $\forall u_i \in U_i, u_j \in U_j$, 若 $i < j$, 则 $u_i < u_j$ 。 D_1, D_2, \dots, D_k 为定性概念 D 相对于 U 的划分的定性语言值。对于 $\forall u \in U$, 若 u 对 $D_i (i = 1, 2, \dots, k)$ 的确定度 $\mu_{D_i}(u) \in [0, 1]$ 是具有稳定倾向的随机数, 则 u 在 D_i 上的分布称为云 C_{D_i} , 每个 u 称为一个云滴, 表示为 $drop(u, \mu_{D_i}(u))$ 。将 $C_{D_1}, C_{D_2}, \dots, C_{D_k}$ 集合称为概念 D 的云族。

以敌我距离为例, 将这一概念划分为近、中、远三个语言值, 对应的精确量值论域为 $[0, 150]$ km, 划分为 $[0, 30]$ 、 $[30, 80]$ 、 $[80, 150]$ 三个子域; 设“近”的数字特征为 $(15, 8, 0.5)$, “中”的数字特征为 $(55, 15, 1)$, “远”的数字特征为 $(115, 20, 1)$ 。构成的敌我距离概念的云族如图 3 所示。

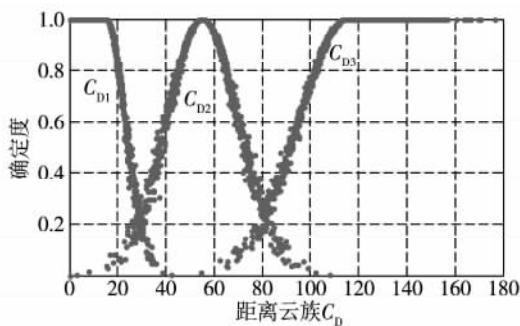


图3 敌我距离云族

针对空战自然语言规则集, 依据现代空战常识, 合

理设置特征的不同语言值的数字特征, 构建所有特征的云族。对于某些模糊性和随机性很弱或者不模糊的特征如UCAV是否被锁定等此类概念, 则无需建立云模型, 推理过程中直接匹配即可。

设空战规则集中的特征数量为 m , 假设全部特征都需要进行云化, T_i 表示规则集中第 i 个特征, 其语言值的数量为 N_i , 则规则集的规模为: $sum = \prod N_i, i = 1, 2, \dots, m$ 。设 T_i 的语言值为 $v_j, j = 1, 2, \dots, N_i$ 。自然语言空战规则集可以形式化为如下形式:

规则 1: if $T_1(v_1), T_2(v_1), \dots, T_m(v_1)$ then a_1 .

规则 2: if $T_1(v_1), T_2(v_1), \dots, T_m(v_2)$ then a_2 .

.....

规则 i : if $T_1(v_j), T_2(v_i), \dots, T_m(v_k)$ then a_l .

.....

式中, 规则 i 中的下角标 j, i, k 分别表示对应特征的语言值序号, $j = 1, 2, \dots, N_1; i = 1, 2, \dots, N_2; k = 1, 2, \dots, N_m; a_l$ 表示战术动作方案集中第 l 个战术方案, l 的取值与前面下角标没有任何关系。

设探测系统提供的信息为 q_1, q_2, \dots, q_m , MAX-MIN 云推理过程如下:

首先, 根据各个特征语言值的前件云发生器, 将信息(云滴) q_i 作为发生器的输入, 求 q_i 属于特征 T_i 的确定度 $\mu_{T_i}(q_i)$:

$$\mu_{T_i}(q_i) = \max\{\mu_{T_i(v_1)}(q_i), \dots, \mu_{T_i(v_{N_i})}(q_i), \dots\}, j = 1, 2, \dots, N_i \quad (6)$$

式中, $\mu_{T_i(v_j)}(q_i)$ 是 q_i 对特征 T_i 中各个语言值的确定度。在确定 $\mu_{T_i}(q_i)$ 值后, 保存该特征对应的语言值及其在规则集中的位置。

然后, 根据各个特征的云滴的确定度, 最终确定选定的规则, 并得到该规则的确定度 μ^* :

$$\mu^* = \min\{\mu_{T_1(v_j)}(q_1), \dots, \mu_{T_m(v_k)}(q_m), \dots\}, i = 1, 2, \dots, m \quad (7)$$

式中, 下标 a, b, c 表示各个特征的语言值序号, 由式(6)确定。

在确定 μ^* 后, 根据 $\{\mu_{T_1(v_j)}(q_1), \dots, \mu_{T_m(v_k)}(q_m)\}$ 对应的语言值确定定性规则在规则集中的位置, 得到该条规则对应的战术动作方案。

最后, 根据选定规则的结论和当前战场态势, 对战术动作方案进行规划并加以执行, 然后对方案进行评价并确定是否进行知识集更新。

通过对认知主导的情境推理与云模型的定性规则推理的研究, 建立UCAV智能战术决策推理模型如图4所示。

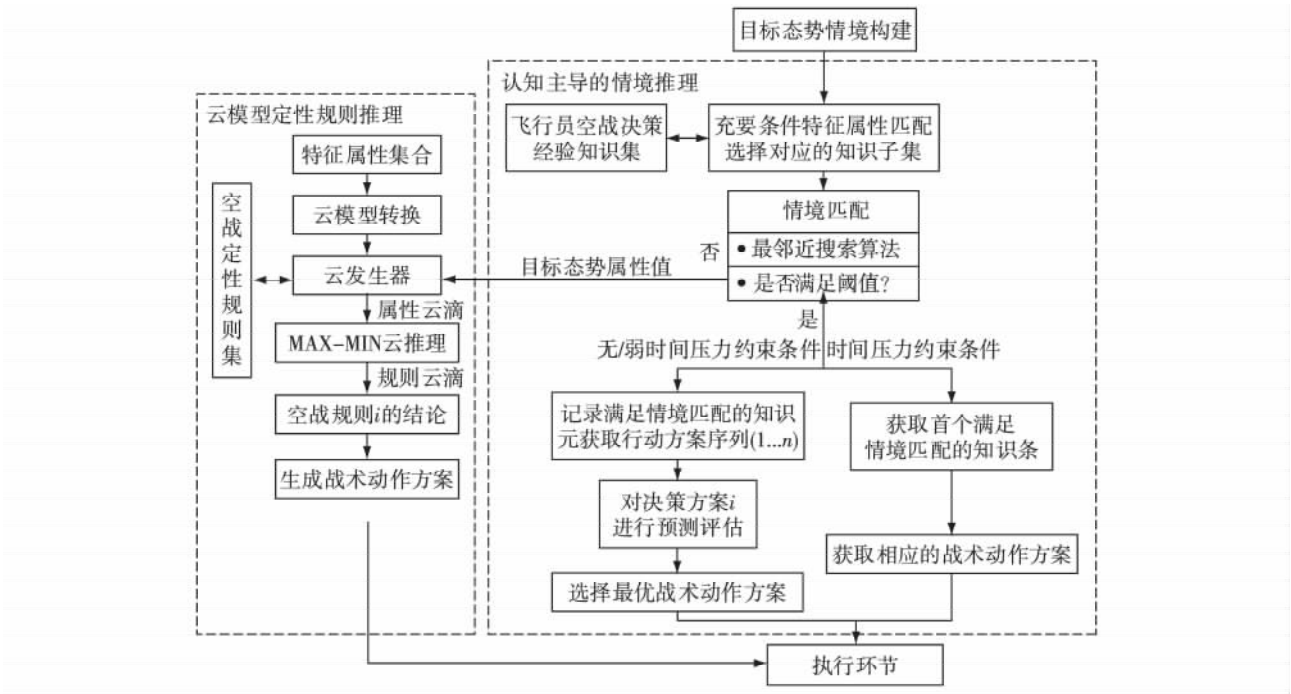


图 4 UCAV 智能战术决策模型

4 仿真分析

智能战术决策的研究目的是将“人在回路中”决策模式转变为 UCAV 自主决策模式,地面指挥中心进行实时监控。为演示本文提出的智能决策框架,基于 Matlab 环境对决策系统进行构建,并进行仿真分析。

首先根据战斗机飞行员战术决策经验建立知识集,设置匹配度阈值为 0.8。设交战双方最大飞行速度为 300m/s,设情境特征权值为(0.1037,0.1156,0.197,0.1988,0.2109,0.1739)。态势情境特征云模型设置如下:接近率云族 $\{C_{g_1}(-150,50,3),C_{g_2}(0,30,4),C_{g_3}(180,50,3)\}$;相对距离云族如上文所示;方位角 ϕ_h 云族 $\{C_{\phi_{h_1}}(0,30,1),C_{\phi_{h_2}}(70,15,1),C_{\phi_{h_3}}(120,30,1)\}$;方

位角 ϕ_v 云族 $\{C_{\phi_{v_1}}(-45,20,1),C_{\phi_{v_2}}(0,5,0.5),C_{\phi_{v_3}}(45,20,1)\}$;敌航向 θ 云族 $\{C_{\theta_1}(0,30,1),C_{\theta_2}(90,30,1),C_{\theta_3}(180,70,2)\}$;敌航向 φ 云族 $\{C_{\varphi_1}(0,10,0.7),C_{\varphi_2}(45,10,0.7),C_{\varphi_3}(80,10,0.7),C_{\varphi_4}(120,50,1)\}$ 。

如图 5 所示的空战态势:敌机未进行雷达锁定、武器攻击与电子干扰行为,处于 UCAV 前半球,飞行高度大致相同,双方相距 56km,敌机与 UCAV 构成侧迎面对态势,UCAV 战术决策系统进行 RPSBR 推理,得到最相似战术知识元,其相似度值为 0.92294,大于设定的阈值,因此在当前态势下,UCAV 选择 2 号战术方案进行实施。仿真中对战术知识集进行重构前的决策消耗时间为 0.0484s,重构后的决策消耗时间为 0.0119s。

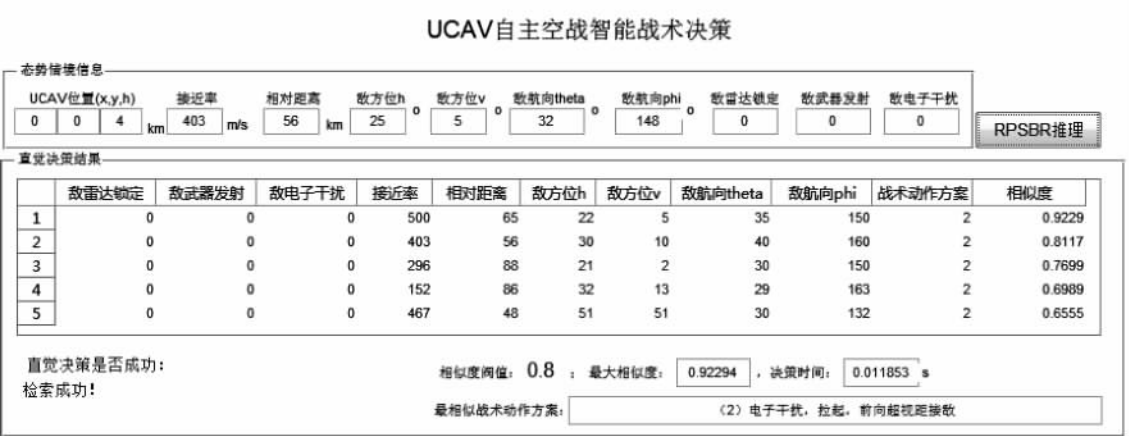


图 5 RPSBR 推理仿真结果

在上述相似空战态势中,敌机对UCAV进行雷达锁定并实施了电子干扰的情况下,通过RPSBR推理得到的战术知识元相似度值最大为0.7785,小于给定的阈值,因此需要进行MAX-MIN云模型定性规则推理。通过推理得到的定性规则,当前态势对该条规则的确

定度为0.62614,如图6所示。仿真中决策消耗时间为0.065s。决策结果通过领域专家分析,UCAV通过定性规则推理的决策结果符合人在回路中参与决策的逻辑思维。设UCAV以最大速度飞行,在决策消耗时间内UCAV的行程约22m,理论上满足实时性要求。

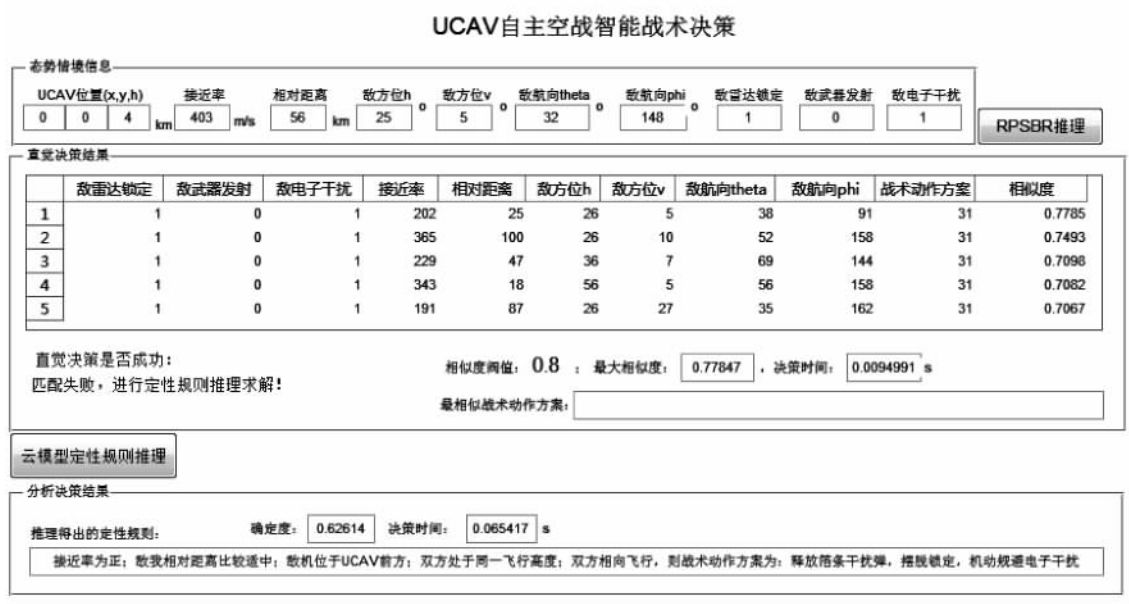


图6 云模型定性规则推理仿真结果

图7给出了不同规模的战术知识集($10^2 - 10^5$)重构前后的决策消耗时间对比,从中可以看出随着知识集规模的增大,将知识集与决策时间进行对数处理后,其变化趋势呈近似线性增长;在相同规模下,重构后的决策时间比重构前的决策时间短,随着规模的增大,这一趋势逐渐明显。为了清晰地表示,图中将横纵坐标进行了对数处理。

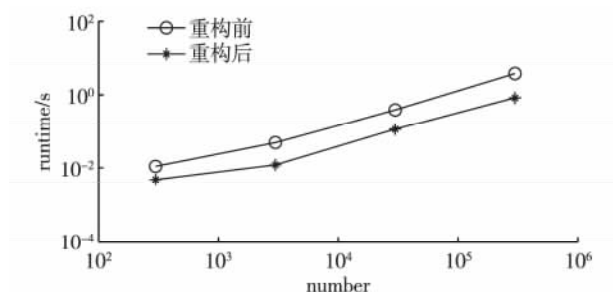


图7 重构前后决策时间对比

5 结束语

针对自主空战过程中UCAV自主进行决策的问题,本文提出了一种基于飞行员空战经验的智能战术决策方法。从仿真结果看:本文基于安全因素对战术知识集的重构行为有效的节省了RPSBR的推理决策

时间,提高了推理效率;基于云不确定推理理论,提出的MAX-MIN云推理方法将飞行员的定性空战经验与UCAV定量的空战态势相结合,实现了UCAV现有战术知识不完备条件下的不确定推理决策,决策结果符合人在回路中参与决策的逻辑,将此结果作为新知识加入UCAV空战战术知识集,能不断扩大知识量,提高RPSBR决策的有效性。从两个仿真实例的决策时间看,该方法能满足决策的实时性要求。本文提出的决策方法主要用于UCAV自主空战中针对空战态势做出战术级决策,为机动动作的底层决策、规划与执行提供依据。对于底层机动动作与机动轨迹的决策与规划方法将在后面的研究继续进行。

参考文献:

- [1] Tsach S, Peled A, Penn D, et al. Development trends for next generation UAV systems [C]. Rohnert Park, California: 2007.
- [2] 魏强,周德云. 基于专家系统的无人战斗机智能决策系统[J]. 火力与指挥控制, 2007, 32(2): 5-7.
- [3] 周思羽,吴文海,孔繁峨,等. 基于随机决策准则的改进多级影响图机动决策方法[J]. 北京理工大学学报, 2013, 33(3): 296-301.
- [4] Andrey Perelman, Tal Shima, et al. Cooperative differen-

- [4] tial games strategies for active aircraft protection from a homing missile [J]. Journal of guidance, control, and dynamics, 2011, 34(3) : 761-773.
- [5] 胡杰, 曹林平, 黄长强. 基于扩展不完备信息的无人战斗机综合战术灰色粗决策方法 [J]. 兵工学报, 2010, 31(9) : 1279-1284.
- [6] 任佳, 杜文才, 白勇. 基于贝叶斯网络自适应推理的无人机任务决策 [J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(10) : 2575-2582.
- [7] 钟麟, 佟明安, 张圣云. 粗糙集-神经网络集成在编队空战中的应用 [J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(6) : 881-884.
- [8] 何明芮. 个体层面的隐性知识及显化研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2011.
- [9] 刘利军, 蒋祖华, 宋博. 一种经验型隐性知识表征及获取方法研究 [J]. 管理学报, 2013, 10(8) : 1194-1200.
- [10] 孙慧明, 傅小兰. 直觉在军事决策中的应用 [J]. 心理科学进展, 2013, 21(5) : 893-904.
- [11] 黄长强, 唐传林, 黄汉桥, 等. 考虑目标重要性及历史任务信任度的无人机任务决策方法 [J]. 兵工学报, 2013, 34(3) : 339-345.
- [12] 周世波, 熊振南. 基于案例推理的船舶避碰案例库设计与实现 [J]. 中国航海, 2012, 35(3) : 71-75.
- [13] 李德毅, 刘常昱, 杜鹃, 等. 不确定性人工智能 [J]. 软件学报, 2004, 15(11) : 1583-1594.
- [14] 张银燕, 李炳程. 基于 MIN-MAX 云重心推理的目标威胁评估方法 [J]. 系统仿真学报, 2014, 26(2) : 411-418.

(上接第4页)

参考文献:

- ### 参考文献:
- [1] 王钰洁. 网络中心战概念及其网格体系结构研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2006.
 - [2] 张巍. 国外网络中心战技术的发展动向与分析[J]. 舰船电子工程, 2009(8): 26-29.
 - [3] 和红杰, 张涛, 李传勇, 等. 实现网络中心战的必要因素探析[J]. 飞航导弹, 2006(4): 17-18, 37.
 - [4] 仲里, 拜丽萍, 郝政疆, 等. 构建网络中心化的军事电子信息系统[J]. 国防技术基础, 2009(7): 47-53.
 - [5] 陈立新. 防空导弹网络化体系效能评估[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
 - [6] 邱连龙, 刘军尧. 防空导弹网络化作战研究[J]. 航天电子对抗, 2009, 25(5): 1-3.
 - [7] 刘洪青, 李陆冀, 王文宏. 美军网络中心战指挥控制的特点[J]. 火力与指挥控制, 2007, 32(7): 1-3.
 - [8] 唐立军. 网络中心战下指挥控制决策系统研究[D]. 太原: 中北大学, 2008.
 - [9] 肖冰松, 方洋旺, 许蕴山, 等. 航空武器系统协同作战样式及关键技术[J]. 火力与指挥控制, 2010, 35(4): 5-8.
 - [10] 张海劲, 刘海欧. 网络中心战攻防技术[J]. 舰船电子工程, 2009, 182(8): 33-36.
 - [11] 杨欣, 杨作宾, 杨阳. 赛博空间作战安全研究[C]. 北京: 2013 中国指挥控制大会论文集, 2013: 717-720.
 - [12] 齐飞. 飞机防撞系统的现状及发展[J]. 导航与雷达动态, 2000(8): 1-7.
 - [13] 郭齐胜, 鄧志刚, 等. 装备效能评估概论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.