

智能感知与自主控制专刊

无人机多机协同对抗决策研究

邵 将, 徐 扬, 罗德林

厦门大学航空航天学院, 福建 厦门 361005

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61673327); 航空科学基金资助项目(20160168001)

通信作者: 罗德林, luodelin1204@xmu.edu.cn 收稿/录用/修回: 2017-11-27/2018-04-03/2018-04-20

摘要

针对多对多无人机之间的空战对抗, 考虑对抗双方具有同等数量无人机的情况, 利用影响图(ID)建立多无人机协同空战连续决策过程, 使用贝叶斯推论对空战态势进行实时评估。根据评估结果, 采用匈牙利算法完成目标的动态分配, 将多无人机之间的对抗转化为动态的多个单架无人机之间的对抗, 无人机在对抗中根据由双方态势所设计的决策规则进行机动决策。红蓝双方多无人机之间对抗仿真实验结果表明了所设计模型的有效性。

关键词

多无人机对抗
空战决策
影响图
目标攻击分配
中图法分类号: TP13
文献标识码: A

Cooperative Combat Decision-making Research for Multi UAVs

SHAO Jiang, XU Yang, LUO Delin

School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China

Abstract

For air combat confrontations involving many - vs. - many unmanned aerial vehicles (UAVs), we consider a situation where each side in the engagement has the same number of UAVs and employ influence diagrams (ID) to establish a continuous decision-making process of a multi-UAVs cooperative air combat. We use Bayesian inference to evaluate the air combat situation in real time and use Hungarian algorithm to achieve the target attack assignment for UAVs dynamically. Therefore, the many - vs. - many cooperative air combat problem is transformed into a series of dynamic one-on-one air combat decision-making processes, where a UAV constantly evaluates the combat situation and maneuvers according to the designed decision-making rules. The simulation experimental results show that the designed air combat model is effective.

Keywords

multi-UAVs confrontation;
air combat decision;
influence diagram;
target attack assignment

0 引言

无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)在硬件成本、机动与操控性能、环境适应性等方面较有人驾驶飞机具有明显优势, 随着无人机技术的提高, 无人机将代替有人驾驶飞机执行拦截敌机或争夺制空权等空战任务。多 UAV 之间通过信息交换协同对目标实施作战任务分配, 有效提高空战效率。多 UAV 协同空战决策技术成为 UAV 应用领域的一项关键技术^[1-3]。多 UAV 协同空战决策主要涉及空战态势评估、多目标分配、协同作战机动决策三个方面^[4]: 1) 态势评估是多 UAV 协同空战的前提, 文[5]利用参数法—朴素贝叶斯法则, 建立了一种混合动态贝叶斯网络对 UAV 空战态势进行评估。文[6]则利用非参数法—层次分析法对两机的相对速度、相对距离、相对角度等参量进行线性加权从而得到每架 UAV 的态势评估值, 但是这种静态的权值设置方法由于具有主观因素并不能很好地适应瞬息

万变的空战情形。为此, 有学者引入了遗传神经网络^[7]对空战各因素进行评估, 取得了不错的结果, 但是该方法耗时长, 难以满足实时性要求。2) 目标分配的合理性直接关系到 UAV 的作战效率及整个空战结果, 要求我方机群在最小的不利态势下获得对敌方机群尽可能大的攻击优势。文[8]使用传统的基于组合优化思想的算法实现了多 UAV 的目标分配, 文[9]则采用改进的蚁群算法对多目标问题进行了优化分配。传统的优化算法^[10]计算简单、使用方便, 但是全局寻优能力较差。智能算法在各领域^[11-13]的寻优问题中都得到了很好的应用, 但是也存在着自身难以克服的问题, 如粒子群算法^[14-15]在离散问题寻优中容易陷入局部最优, 而遗传算法^[16]等计算耗时较长, 难以满足实时性要求。3) 完成态势评估和目标分配后, 需要 UAV 采取如平飞、加力转弯、爬升等机动决策以避开敌机潜在威胁或取得更大的空战对抗优势^[17]。目前虽然在以上 3 个方面进行了诸多研究且取得了不错的结果, 但是难以保证

决策模型的实时性和有效性.

本文考虑双方具有相同数量 UAV 空战对抗时的情形, 采用影响图法^[18]建立了多 UAV 的协同作战决策模型, 使用贝叶斯推论^[19]对空战态势进行评估, 运用匈牙利算法^[20]进行目标分配, 将多对多空战转化为多个动态的一对一的对抗形式, 通过仿真表明了本文给出的多 UAV 协同空战模型的有效性.

1 空战决策模型

考虑红蓝双方的作战场景: 红方雷达发现蓝方 n 架无人机来袭后, 红方派出 n 架无人机对蓝方无人机进行空中拦截, 双方最终进入近距格斗.

1.1 一对一空战几何关系

多 UAV 协同空战一般需要满足 4 个原则: 1) 当我方 UAV 的空战态势处于优势时, 应进一步采取机动措施扩大优势; 2) 当我方 UAV 的空战态势处于劣势时, 应采取机动措施进行规避; 3) 避免出现攻击分配遗漏; 4) 空战的胜利应以双方的 UAV 损失比和最终制空权或其它作战任务的完成情况为判定.

一对一空战对抗是多机对抗的基础, 首先考虑简单的一对一空战情形. 其交战几何关系如图 1 所示. 图中, R 代表红方 UAV, B 代表蓝方 UAV; LOS (line of sight, LOS) 为红方 UAV 对于蓝方的视线; v_u ($u=R, B$) 表示 UAV 的速度; α 为滞后角, 表示红方 UAV 的速度方向与 LOS 的夹角; β 为超前角, 表示蓝方 UAV 的速度方向与 LOS 延长线的夹角, 且有 $\alpha, \beta \in [0, \pi]$; r 为两架 UAV 的欧氏距离, r 为两架 UAV 的矢量距离.

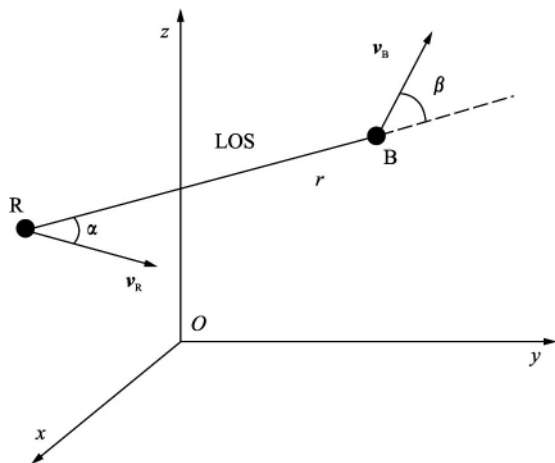


图 1 UAV 一对一对抗几何关系

Fig.1 UAV one-on-one confrontation geometric relationships

由图 1 的空间几何关系, 可以得到 UAV 一对一空战对抗的几何参数:

$$\begin{cases} r = \| \mathbf{r} \| = \sqrt{(x_B - x_R)^2 + (y_B - y_R)^2 + (z_B - z_R)^2} \\ v_u = \| \mathbf{v}_u \| \\ \alpha = \arccos \left(\frac{\mathbf{v}_R \cdot \mathbf{r}}{\| \mathbf{v}_R \| \cdot r} \right) \\ \beta = \arccos \left(\frac{\mathbf{v}_B \cdot \mathbf{r}}{\| \mathbf{v}_B \| \cdot r} \right) \end{cases} \quad (1)$$

1.2 多对多协同空战影响图模型

影响图可以直观清晰地表示变量间概率相关性, 对问题表示灵活、简洁且修改方便. 当要添加一个变量时, 可在图中增加一个节点和相应的弧线表示相关性^[21]. 此外, 影响图可以使用同一个图表示约束和决策行为的时间顺序, 适用于大规模决策分析建模. 为描述多 UAV 的对抗过程, 本文在一对一空战模型的基础上, 使用影响图对整个敌我双方机群的 UAV 进行分析. 首先需要对参与空战 UAV 的相对作战态势进行计算, 并预测下一时刻的态势. 根据预测的 UAV 空战态势评估值, 在空战决策原则的指导下进行目标分配. 接着需要 UAV 根据目标分配的结果做出有利于己方的机动决策, 以此往复直至空战结束. 图 2 描述了基于影响图的多 UAV 协同作战的连续决策过程. 其中, 相邻两个决策点的决策时间间隔为 Δt , 由此可以得到整个决策过程的总时间为 $T = i \cdot \Delta t$ ($i=0, 1, \dots, k-1$), 连续机动决策的关联性由箭头表示, 对抗双方战机数量均为 n .

由图 2 可知, 使用影响图解决多 UAV 协同空战决策问题有 3 个优点: 1) 相较于决策树法, 影响图模型的复杂度并不会随着 UAV 数量的增加而呈指数式增大, 对于解决 NP 类问题^[22]有非常好的效果; 2) 可以清晰地表现 UAV 协同空战总体方案及其原理, 即把多机对抗降维分解成多个一对一对抗问题. 分析过程为: 1) 首先根据 UAV 的空战状态进行态势评估; 2) 接着根据评估结果进行目标分配; 3) 最后各 UAV 根据实时的空战态势评估值和目标匹配方案按照空战原则做出机动决策; 3) 直观地体现了 UAV 的空战态势、目标分配和机动决策的时变连续决策特点.

2 空战态势评估

根据实际空战形式, 结合图 2 可知, UAV 协同空战的态势评估由当前时刻的 UAV 状态值和前一时刻的态势评估结果决定, 本文采用贝叶斯推理理论对空战态势进行预测. 由于所得评估结果为概率值, 故定义 t_i 时刻空战态势的 4 种形式^[21]:

- (1) 我方有利 θ_1 : 此时有 $\alpha=0, \beta=0$, 对应的空战态势符号为 $P(\Theta_i = \theta_1)$.
- (2) 敌方有利 θ_2 : 此时有 $\alpha=\pi, \beta=\pi$, 对应的空战态势符号为 $P(\Theta_i = \theta_2)$.
- (3) 处于均势 θ_3 : 此时有 $\alpha=\pi, \beta=0$, 对应的空战态势符号为 $P(\Theta_i = \theta_3)$.
- (4) 双方不利 θ_4 : 此时有 $\alpha=0, \beta=\pi$, 对应的空战态势符号为 $P(\Theta_i = \theta_4)$.

图中 t_i 时刻的威胁态势 $P(\Theta_i = \theta_q)$ ($q=1, 2, 3, 4$) 即为贝叶斯公式中的先验信息. 根据实际的空战训练信息, 设计 UAV 一对一空战过程中的似然函数, 如表 1 所示, 其中 $\lambda > 0$ 且为常数. 根据得到的先验信息和似然函数, 引入贝叶斯推论, 可以得到 t_{i+1} 时刻的 UAV 空战评估值公式:

$$\begin{aligned} P(\Theta_{i+1} = \theta_q) \\ \triangleq P(\Theta_{i+1} = \theta_q | \alpha_{i+1}, \beta_{i+1}, r_{i+1}) \\ = \frac{P(\Theta_i = \theta_q) \cdot P(\alpha_i, \beta_i, r_i | \Theta_i = \theta_q)}{\sum_{c=1}^4 P(\Theta_i = \theta_c) \cdot P(\alpha_i, \beta_i, r_i | \Theta_i = \theta_c)} \end{aligned} \quad (2)$$

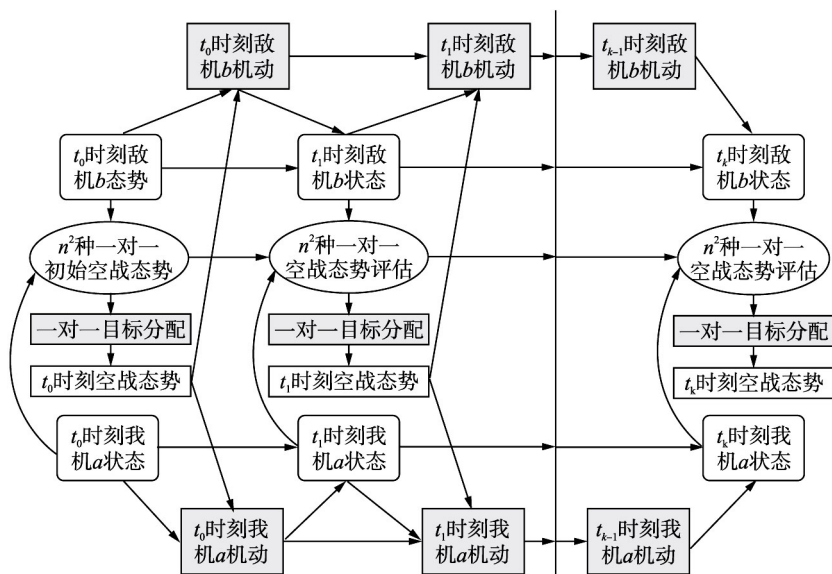


图2 多无人机协同空战的连续决策过程影响图

Fig.2 Influence diagrams of multi-UAV cooperative air combat continuous decision-making processes

式中, $P(\alpha_i, \beta_i, r_i | \Theta_i = \theta_q)$ 为似然函数, α, β, r 为相互独立的随机变量. 根据贝叶斯的独立性条件, 可以得到:

$$P(\alpha_i, \beta_i, r_i | \Theta_i = \theta_q) = P(\alpha_i | \Theta_i = \theta_q) \cdot P(\beta_i | \Theta_i = \theta_q) \cdot P(r_i | \Theta_i = \theta_q) \quad (3)$$

表1 不同态势下的似然函数

Tab.1 Likelihood functions for different situations

空战态势	似然函数
我方有利	$\begin{cases} P(r \theta_1) = e^{-r/\lambda} \\ P(\alpha \theta_1) = 1 - \alpha/\pi \\ P(\beta \theta_1) = \beta/\pi \end{cases}$
敌方有利	$\begin{cases} P(r \theta_2) = e^{-r/\lambda} \\ P(\alpha \theta_2) = \alpha/\pi \\ P(\beta \theta_2) = 1 - \beta/\pi \end{cases}$
双方均势	$\begin{cases} P(r \theta_3) = e^{-r/\lambda} \\ P(\alpha \theta_3) = \alpha/\pi \\ P(\beta \theta_3) = \beta/\pi \end{cases}$
双方不利	$\begin{cases} P(r \theta_4) = e^{-r/\lambda} \\ P(\alpha \theta_4) = 1 - \alpha/\pi \\ P(\beta \theta_4) = 1 - \beta/\pi \end{cases}$

3 目标分配

目标分配方案的原则就是在所有一对一匹配中寻求使我方总体优势最大和整体损失最小. 由于敌我双方 UAV 数量相同, 故采用匈牙利算法进行目标分配. 匈牙利算法是一种求解二分图最大匹配问题的有效方法, 文[23]对匈牙利算法的收敛性等问题进行了分析. 根据空战原则 4), 定义敌方有利态势和我方有利态势的比值作为 UAV 协同

空战决策问题的损失:

$$C^{ab} = \frac{P_{(\Theta_i = \theta_2)}^{ab}}{P_{(\Theta_i = \theta_1)}^{ab}} = \frac{P_2^{ab}}{P_1^{ab}} \quad (4)$$

式中, C^{ab} 表示红方战机 a 与敌方战机 b 对抗时的损失; $P_{(\Theta_i = \theta_2)}^{ab}$ 表示 t_i 时刻时红方战机 a 的空战态势为 θ_2 (敌方有利), P_2^{ab} 为 $P_{(\Theta_i = \theta_2)}^{ab}$ 的简写形式. 对抗的损失矩阵 C 为:

$$C = \begin{bmatrix} \frac{P_2^{11}}{P_1^{11}} & \frac{P_2^{12}}{P_1^{12}} & \cdots & \frac{P_2^{1n}}{P_1^{1n}} \\ \frac{P_2^{21}}{P_1^{21}} & \frac{P_2^{22}}{P_1^{22}} & \cdots & \frac{P_2^{2n}}{P_1^{2n}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{P_2^{n1}}{P_1^{n1}} & \frac{P_2^{n2}}{P_1^{n2}} & \cdots & \frac{P_2^{nn}}{P_1^{nn}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

对损失矩阵 C 使用匈牙利算法, 由算法运行结果得到分配方案, 匈牙利算法的流程图如图 4 所示.

4 机动决策

设 UAV 在空战中的机动动作主要分为: 直线飞行、左转、右转、爬升、俯冲、左转爬升、右转爬升、左转俯冲和右转俯冲 9 种, 如图 4 所示. 由影响图决策模型可知: 产生目标分配方案后, 需要每一架 UAV 根据空战原则做出有利于己方的机动决策, 使 UAV 的空战状态 $S = [\alpha, \beta, r]$ 发生改变. 对于红方 UAV, 机动决策的最直观改变就是减小滞后角 α . 以红方 UAV 的质心位置为原点; 速度方向为 x 轴, y 轴与 x 轴垂直, 水平指向右边为正; z 轴按右手定则确定, 建立如图 5 所示的速度坐标系 $O - x_1 y_1 z_1$.

当 $0 < \alpha < \frac{\pi}{2}$, $0 < \beta < \frac{\pi}{2}$ 时, 此时 UAV-R 处于有利的

态势,因此UAV-R依据原则1)进行机动决策,即减小 α 并飞向UAV-B。UAV-R的机动方向如图6所示。其中, B' 为UAV-B在 $O-x_1y_1z_1$ 坐标系中 Oy_1z_1 平面上的投影; a_R 为UAV-R的机动能力, a_R^1 为 a_R 沿UAV-R速度方向的机动分量, a_R^2 为UAV-R减小滞后角 α 的机动分量。对抗中,UAV-R不断依据空战态势和战术规则进行空战机动决策。

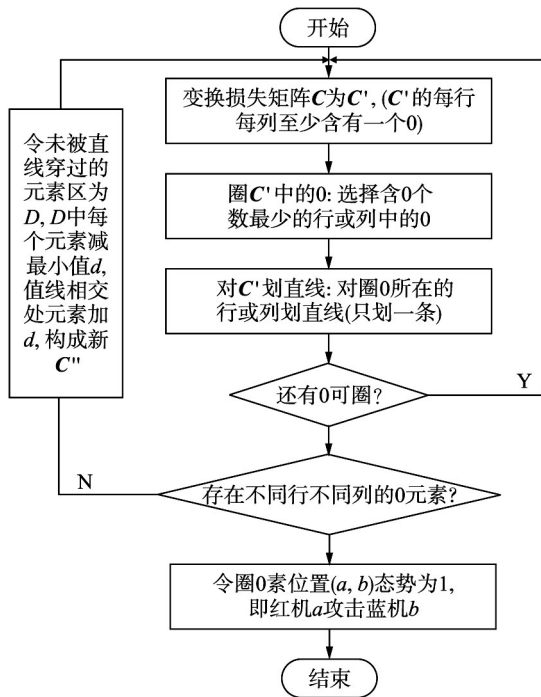


图3 匈牙利算法流程图

Fig.3 Flowchart of Hungarian algorithm

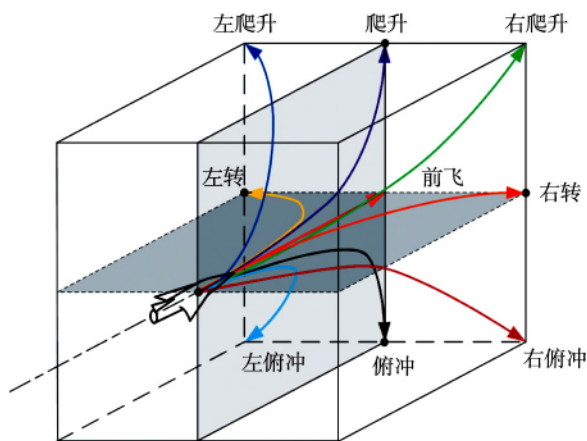


图4 UAV 机动方式

Fig.4 Maneuvers of UAV

5 仿真结果及分析

通过仿真实验模拟红蓝双方各四架 UAV 进行空中对抗,UAV 的机动性能及初始位置等条件参数见表 2。对抗双方均采用本文给出的基于影响图的多 UAV 协同空战决策方法,红蓝双方 UAV 的连续对抗轨迹如图 7 所示。

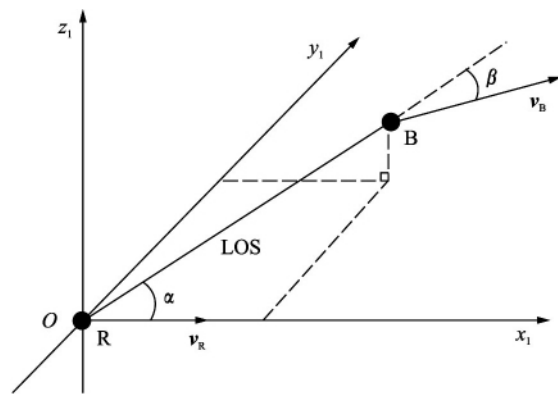


图5 红蓝 UAVs 在速度坐标系中的相对位置关系

Fig.5 Relative position in the state coordinate system of the red and blue UAVs

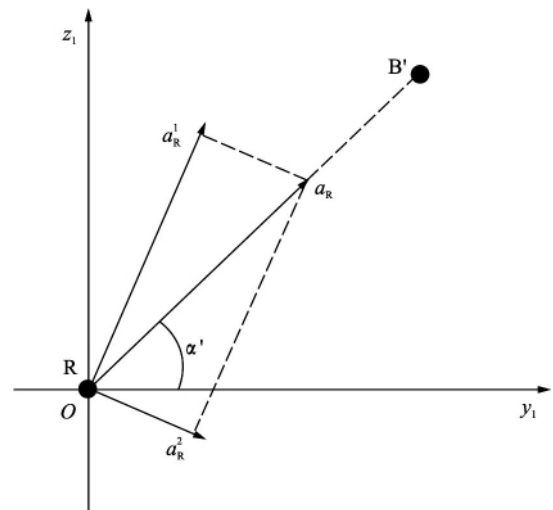


图6 UAV-R 机动方向示意图

Fig.6 Schematic diagram of the maneuvering of the UAV-R

表2 空战对抗初始条件

Tab.2 Initial conditions of the air combat confrontation

无人机	位置坐标 /m	速度 v /(m/s)	机动能力 a_u ($u = R, B$) /(m/s^2)
R001	(0 , 1 000 , 6 000)	(0 , 0 , - 300)	$a_R = 90$
R002	(- 500 , 500 , 6 500)	(300 , 0 , 0)	
R003	(500 , - 1500 , 5 500)	(0 , 300 , 0)	
R004	(1 000 , 2000 , 5 000)	(0 , - 300 , 0)	
B001	(1 000 , - 1 000 , 4 000)	(0 , 290 , 0)	$a_B = 60$
B002	(1 000 , 1 000 , 4 500)	(- 290 , 0 , 0)	
B003	(- 1 000 , 1 000 , 4 250)	(0 , - 290 , 0)	
B004	(- 1 000 , - 1 000 , 4 500)	(290 , 0 , 0)	

对抗过程的动态目标分配结果如图 8 所示。该图显示在对抗初期双方 UAVs 对抗目标的分配方案随着空战态势的变化而不断调整。而一段时间后,对抗分配不再变化,说明此阶段空战对抗形式已趋于明朗。匹配双方进行机动

对抗,以达到捕获对方或摆脱对方追击的目的,此时的目标分配结果见表 3.

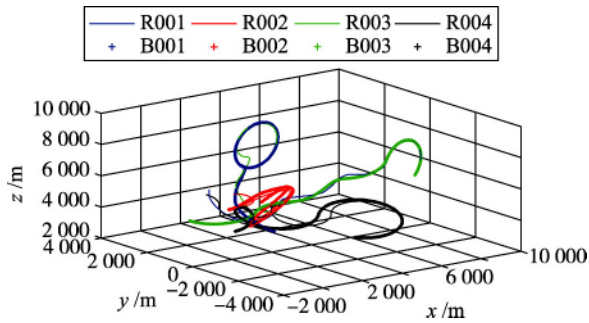


图 7 四对四协同空战的对抗轨迹

Fig.7 Trajectories of four VS four collaborative air combat

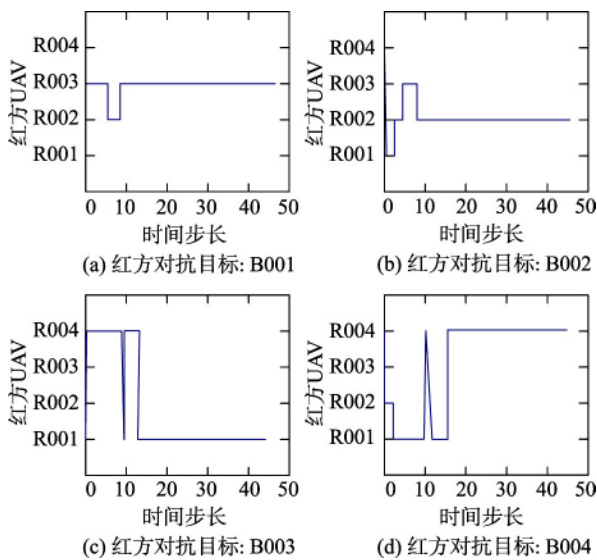


图 8 目标匹配的动态过程

Fig.8 Dynamic processes of the target matching

表 3 对抗后期目标分配结果

Tab.3 Target allocation results in the late period

红方 UAV	蓝方 UAV
R001	B003
R002	B002
R003	B001
R004	B004

对抗阶段的空战状态: 红方 UAV 滞后角 α 、蓝方 UAV 超前角 β 、双方距离 r 的变化情况分别如图 9 ~ 图 11 所示. 可以看出: 在红蓝双方 UAV 对抗的前中期, 红方 UAV 并非占据绝对优势, 在时间步长 10 ~ 20 时间段内, 红蓝双方各自的滞后角和超前角接近且蓝方 UAV 通过机动决策在间断的拉开和红方 UAV 的距离, 说明此时战局基本处于均势状态. 在对抗后期, 红方 UAV 的滞后角逐渐趋于 0, 而蓝方 UAV 的超前角则逐渐趋于 π , 说明红方 UAV 绕到了各自目标的后方, 在保证自身安全的前提下对蓝方获得

了有利态势, 且红方 UAV 距离各自分配目标的距离越来越近, 此时空战态势演变成红蓝双方的追逃情形^[24], 显然红方 UAV 取得了空战的主动权; 当蓝方 UAV 进入红方 UAV 的火力覆盖范围 500 米内时, 红方 UAV 取胜.

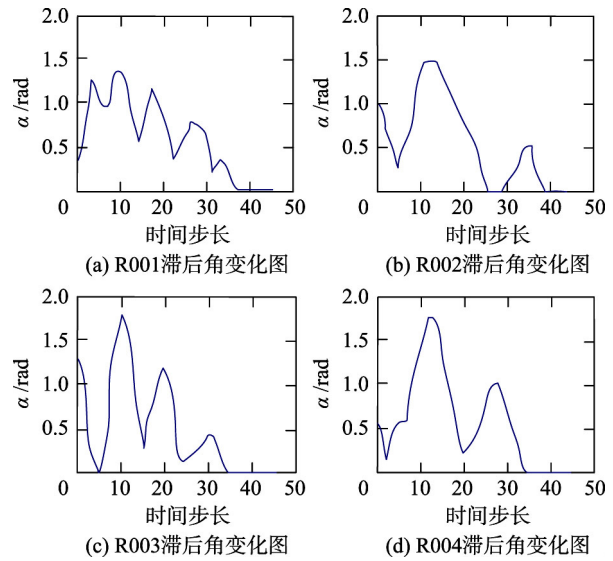


图 9 红方 UAV 的滞后角

Fig.9 Lag angles of the red

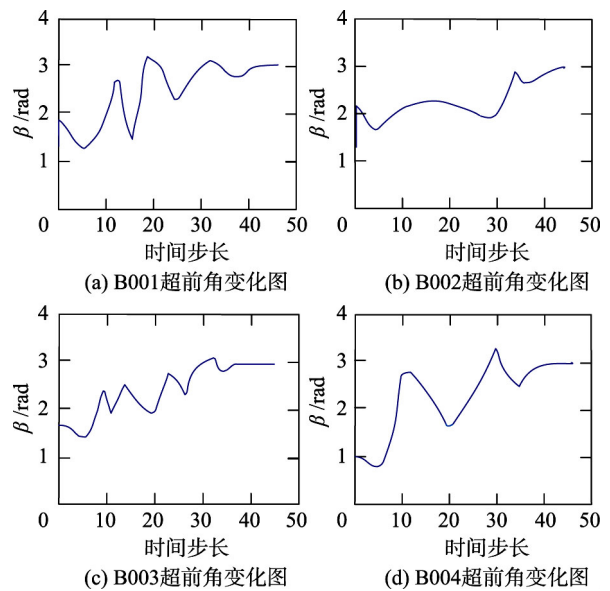


图 10 蓝方 UAV 的超前角

Fig.10 Advanced angles of the blue

分析红方 UAVs 获胜主要原因: 1) 红方 UAV 的起始位置较蓝方有利, 根据空战经验, 飞行高度较高的战机更容易对飞行较低的战机产生压制, 形成能量优势; 2) 红方 UAV 的机动性能较蓝方更佳, 红方 UAV 可以依靠机动性能优势拉大或缩小与蓝方 UAV 的距离, 并且逐渐绕到蓝方 UAV 的后方, 进而获得空战优势. 图 12 为红方机群的态势变化图, 初始时刻红蓝双方处于均势态势, 由于红方具有更好的机动性能, 随着空战的进行, 红方 UAVs 相对蓝方

UAVs最终全部处于有利态势. 图 13 所示的红方 UAV 机群相对于蓝方机群的全局有利态势变化图也印证了上述分析.

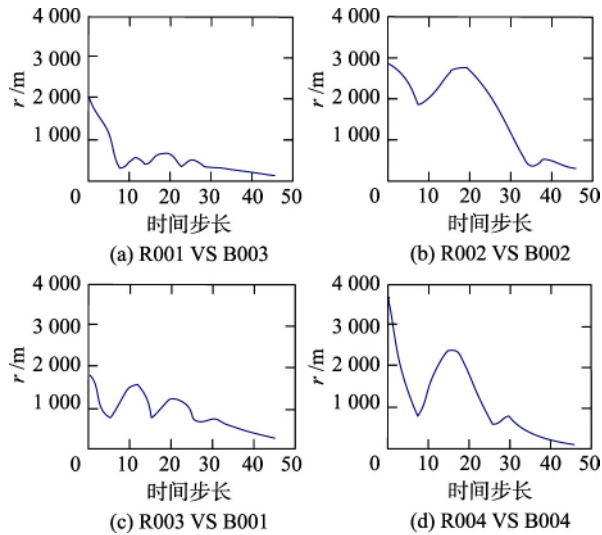


图 11 红蓝双方 UAV 间的距离
Fig.11 Distances between the red and the blue

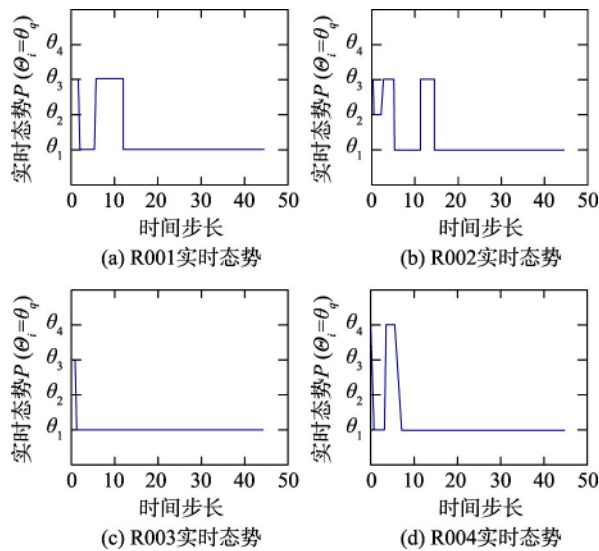


图 12 红方机群态势
Fig.12 Situation of the red

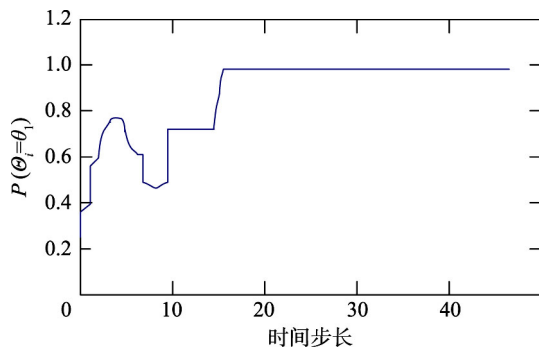


图 13 红方机群整体的相对有利态势
Fig.13 Relatively favorable of the red in the overall

空战中, 将一方处于另一方的火力覆盖范围 500 m 内时作为捕获条件, 并将一方全部的无人机被捕获的时间作为空战持续时间 T . 当红蓝双方具有不同机动性能和初始速度时, 得到如表 4 所示的空战时间及对抗后期的分配方案, 由于篇幅所限, 这里仅给出仿真序号 23 的空战对抗轨迹, 如图 14 所示. 表中, 速度标量 250 表示蓝方 UAVs 的初速度分别为 $(0, 250, 0)$ 、 $(-250, 0, 0)$ 、 $(0, -250, 0)$ 和 $(250, 0, 0)$, 以此类推; 分配方案 $(1-2, 2-1, 3-3, 4-4)$ 表示 R001 对抗 B002、R002 对抗 B001、R003 对抗 B003 和 R004 对抗 B004, 以此类推. 双方初始位置、红方初始速度与机动能力采用表 1 数据.

表 4 不同机动性能和初速度下的对抗时间及分配方案

Tab.4 Antagonistic time and allocation schemes for different maneuverabilities and initial velocities

仿真序号	速度标量 v_B /(m/s)	蓝方 UAV 机动能力 a_B /(m/s ²)	空战时间 T (时间步长)	作战后期 分配方案
1	250	60	18	1-2, 2-1, 3-3, 4-4
2	255	60	28	1-3, 2-1, 3-2, 4-4
3	260	60	29	1-3, 2-1, 3-2, 4-4
4	265	60	30	1-3, 2-1, 3-2, 4-4
5	270	60	32	1-3, 2-1, 3-2, 4-4
6	275	60	36	1-3, 2-1, 3-2, 4-4
7	280	60	38	1-3, 2-2, 3-1, 4-4
8	285	60	39	1-3, 2-2, 3-1, 4-4
9	290	60	40	1-3, 2-2, 3-1, 4-4
10	295	60	43	1-3, 2-2, 3-1, 4-4
11	300	60	45	1-3, 2-2, 3-1, 4-4
12	290	40	27	1-3, 2-2, 3-1, 4-4
13	290	45	28	1-3, 2-2, 3-1, 4-4
14	290	50	32	1-3, 2-2, 3-1, 4-4
15	290	55	37	1-3, 2-2, 3-1, 4-4
16	290	60	40	1-3, 2-2, 3-1, 4-4
17	290	65	46	1-3, 2-2, 3-1, 4-4
18	290	70	49	1-3, 2-1, 3-2, 4-4
19	290	75	50	1-3, 2-1, 3-2, 4-4
20	290	80	76	1-3, 2-1, 3-2, 4-4
21	290	85	∞	1-3, 2-1, 3-2, 4-4
22	290	90	∞	1-3, 2-1, 3-2, 4-4
23	300	90	∞	1-3, 2-1, 3-2, 4-4

表 4 给出了对抗双方在不同初始条件下的对抗结果. 可以看出, 当蓝方 UAVs 具有不同的初始速度和机动能力时, 空战对抗时间和分配方案都出现动态变化, 蓝方 UAVs 的速度大小和机动能力对空战过程具有较大影响. 仿真结果表明了所给出的多机空战对抗模型的有效性.

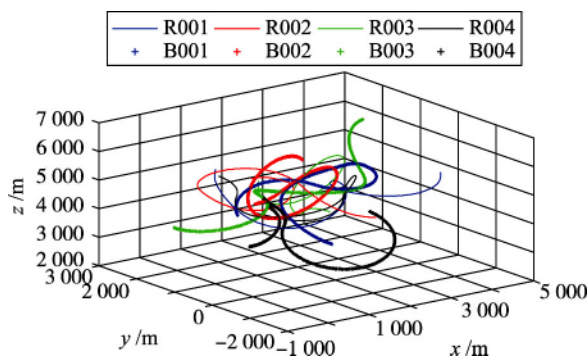


图 14 相同初速度和机动能力下的四对四协同空战的对抗轨迹

Fig.14 Trajectories of four VS four collaborative air combat with same initial velocities and maneuverabilities

6 结论

无人机代替有人驾驶飞机执行多机对抗空战任务是无人机应用和智能化技术发展的一个重要方向. 本文针对空战对抗双方具有同等数量 UAV 情况, 给出了一种基于影响图的多 UAV 协同空战决策方案, 并采用匈牙利算法实现目标快速分配, 将多对多分解为多个动态的一对一对抗. 对战术规则、态势评估、机动决策方法进行了详细设计, 通过大量仿真实验验证了所给出的对抗机动决策方法的有效性. 对于对抗双方具有任意数量的 UAV 对抗情况, 还有待于在此基础上进一步扩展.

参考文献

- [1] Zong Q, Wang D, Shao S, et al. Research status and development of multi UAV coordinated formation flight control[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(3): 1-14.
- [2] Wang Y, Zhang W, Li Y. An efficient clonal selection algorithm to solve dynamic weapon-target assignment game model in UAV cooperative aerial combat[C]//35th Chinese Control Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2016: 9578-9581.
- [3] Nicholas E, Kelly C, Elad K, et al. Genetic fuzzy trees and their application towards autonomous training and control of a squadron of unmanned combat aerial vehicles[J]. Unmanned Systems, 2015, 3(03): 185-204.
- [4] Xie R Z, Li J Y, Luo D L. Research on maneuvering decisions for multi-UAVs air combat[C]//IEEE International Conference on Control & Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2014: 767-772.
- [5] 孟光磊, 马晓玉, 刘昕, 等. 基于混合动态贝叶斯网的无人机空战态势评估[J]. 指挥控制与仿真, 2017, 39(4): 1-6.
Meng G L, Ma X Y, Liu X, et al. Situation assessment for unmanned aerial vehicles air combat based on hybrid dynamic Bayesian network[J]. Command Control and Simulation, 2017, 39(4): 1-6.
- [6] 姜长生, 丁全心, 王建刚, 等. 多机协同空战中的威胁评估与目标分配[J]. 火力与指挥控制, 2008, 33(11): 8-12.
Jiang C S, Ding Q X, Wang J G, et al. Threat assessment and target allocation in multi-aircraft cooperative air combat[J]. Fire and Command Control, 2008, 33(11): 8-12.
- [7] 肖亮, 黄俊, 徐钟书. 基于空域划分的超视距空战态势威胁评估[J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(10): 1309-1313.
Xiao L, Huang J, Xu Z S. Assessment of situation threat of BVR air combat based on spatial division[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(10): 1309-1313.
- [8] Sujit P B, Beard R. Multiple MAV task allocation using distributed auctions[R]. AIAA-2007-6452, 2007.
- [9] 罗德林, 段海滨, 吴顺祥, 等. 基于启发式蚁群算法的协同多目标攻击空战决策研究[J]. 航空学报, 2006, 27(6): 1166-1170.
Luo D L, Duan H B, Wu S X, et al. Research on air combat decision-making for cooperative multiple target attack using heuristic ant colony algorithm[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2006, 27(6): 1166-1170.
- [10] Francis M S. Design of next generation unmanned air systems issues and opportunities[R]. AIAA-2008-8978, 2008.
- [11] Trsek R B. The last manned fighter: Replacing manned fighters with unmanned combat air vehicle[M]. Austin, TX, USA: BibleScholars, 2012.
- [12] 黄宜庆, 彭凯, 袁梦茹. 基于多策略混合人工鱼群算法的移动机器人路径规划[J]. 信息与控制, 2017, 46(3): 283-288.
Huang Y Q, Pen K, Yuan M R. Path planning for mobile robots based on multi-strategy hybrid artificial fish swarm algorithm[J]. Information and Control, 2017, 46(3): 283-288.
- [13] 夏禹, 吴朋. 带基因交换和动态网格的多目标粒子群优化算法[J]. 信息与控制, 2017, 46(5): 593-600.
Xia Y, Wu P. Multi-objective particle swarm optimization with gene exchange and dynamic mesh[J]. Information and Control, 2017, 46(5): 593-600.
- [14] Li J P, Wood A S. Species-conserving particle swarm optimization for multimodal function[J]. International Journal of Modelling, Identification and Control, 2009, 8(4): 290-300.
- [15] Chen W N, Zhang J, Lin Y, et al. Particle swarm optimization with an aging leader and challengers[J]. IEEE Transaction on Evolutionary Computation, 2013, 17(2): 241-258.
- [16] Zhang T, Yu L, Zhou Z L, et al. Decision-making for air combat maneuvering based on variable weight pseudo-parallel Genetic Algorithm[J]. Flight Dynamics, 2012, 30(5): 470-474.
- [17] 王锐平, 高正红. 无人机空战仿真中基于机动动作库的决策模型[J]. 飞行力学, 2009, 27(6): 72-75.

- Wang R P, Gao Z H. Decision model of UAV combat maneuver library simulation-based[J]. *Flight Mechanics*, 2009, 27(6): 72–75.
- [18] Virtanen K, Raivio T, Hamalainen R P. Modeling pilot's sequential maneuvering decisions by a multistage influence diagram[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2004, 36(4): 665–677.
- [19] Albert J. Discrete Bayes with R[J/OL]. *Technology Innovations in Statistics Education*, 2009, 3(2) [2017–10–20]. <https://escholarship.org/uc/item/9kb6x0bw>.
- [20] 黄兰, 鲁珍珍, 尹倩华, 等. 图论及其算法在数学建模中的应用[J]. *数学学习与研究*, 2016(5): 106–107.
Huang L, Lu Z Z, Yin Q H, et al. Application of graph theory and Its algorithm in mathematical modeling[J]. *Mathematics Learning and Research*, 2016(5): 106–107.
- [21] 罗德林, 沈春林, 吴文海, 等. 空战格斗决策研究[J]. *应用科学学报*, 2006, 24(1): 89–93.
Luo D L, Shen C L, Wu W H, et al. Research on air combat decision-making[J]. *Journal of Applied Sciences*, 2006, 24(1): 89–93.
- [22] Traversa F L, Ramella C, Bonani F, et al. Memcomputing NP-complete problems in polynomial time using polynomial resources and collective states[J]. *Science Advances*, 2015, 1(6): e1500031.
- [23] 顾大权, 左莉, 侯太平, 等. "匈牙利法"存在的问题及改进方法[J]. *计算机技术与发展*, 2003, 13(4): 76–78.
Gu D Q, Zuo L, Hou T P, et al. The problems and improvements of the Hungarian algorithm[J]. *Computer Technology and Development*, 2003, 13(4): 76–78.
- [24] Brooks R R, Pang J E, Griffin C. Game and information theory analysis of electronic countermeasures in pursuit-evasion games[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part A: Systems and Humans*, 2008, 38(6): 1281–1294.

作者简介

邵 将(1993–), 男, 硕士生. 研究领域为无人机协同控制.

徐 扬(1988–), 男, 博士生. 研究领域为飞行器协同编队和任务规划.

罗德林(1968–), 男, 博士, 副教授. 研究领域为飞行器制导与控制, 无人机协同控制和计算智能.

(上接第340页)

- [9] Wu J, Zhang L Y, Bai Y. Fast second-order consensus via predictive mechanisms[J]. *Epl*, 2015, 109(1): 10–19.
- [10] Qin J, Gao H, Zheng W X. Second-order consensus for multi-agent systems with switching topology and communication delay[J]. *Systems & Control Letters*, 2011, 60(6): 390–397.
- [11] Zhou L, Li S Y. Distributed model predictive control for consensus of sampled-data multi-agent systems with double-integrator dynamics[J]. *IET Control Theory & Applications*, 2015, 9(12): 1774–1780.
- [12] Gao Y, Dai L, Xia Y. Distributed model predictive control for consensus of nonlinear second-order multi-agent systems[J]. *International Journal of Robust & Nonlinear Control*, 2017, 27(5): 830–842.
- [13] 季虹菲, 席裕庚, 李晓丽. 多智能体一致性预测控制协议及其仿真研究[J]. *计算机仿真*, 2010, 27(12): 186–190.
Ji H F, Xi Y G, Li X L. Simulation study on multi-agent system under MPC[J]. *Computer Simulation*, 2010, 27(12): 186–190.
- [14] Zhang H T, Chen M Z Q, Zhou T. Ultrafast consensus via predictive mechanisms[J]. *Epl*, 2009, 83(4): 4003p1–4003p6.
- [15] Liu G P. Consensus and stability analysis of networked multiagent predictive control systems[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2017, 47(4): 1114–1119.
- [16] Xie D, Liang T. Second-order group consensus for multi-agent systems with time delays[J]. *Neurocomputing*, 2015, 153: 133–139.
- [17] 黄红伟, 黄天民, 吴胜. 基于事件触发的二阶多智能体系统平均一致性[J]. *信息与控制*, 2016, 45(6): 729–734.
Huang H W, Huang T M, Wu S. Event-triggered average consensus of second-order multi-agent systems[J]. *Information and Control*, 2016, 45(6): 729–734.
- [18] Xie D, Wang S. Consensus of second-order discrete-time multi-agent systems with fixed topology[J]. *Journal of Mathematical Analysis & Applications*, 2012, 387(1): 8–16.
- [19] Ren W, Beard R W. Consensus seeking in multiagent systems under dynamically changing interaction topologies[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2005, 50(5): 655–661.
- [20] Ren W, Atkins E. Distributed multi-vehicle coordinated control via local information exchange[J]. *International Journal of Robust & Nonlinear Control*, 2007, 17(10/11): 1002–1033.

作者简介

戴 欣(1991–), 男, 硕士生. 研究领域为多自主体协调控制, 预测控制.

刘成林(1981–), 男, 博士, 教授, 研究生导师. 研究领域为多自主体协调控制, 非线性控制.

刘 飞(1965–), 男, 博士, 教授, 博士生导师. 研究领域为先进控制理论及其应用.