

文章编号: 0255-8297(2006)04-0089-05

空战格斗决策研究

罗德林¹, 沈春林¹, 吴文海², 吴顺祥³

(1. 南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 210016;

2. 海军航空工程学院 青岛分院, 山东 青岛 266041; 3. 厦门大学 自动化系, 福建 厦门 361005)

摘要: 基于敌对的两机空战背景, 利用不断更新的威胁态势作为飞行员的决策依据, 采用影响图分析法描述空战飞行员的决策过程, 建立了空战飞行员的决策模型. 其特点是空战威胁态势的评估及决策方式易于根据飞行员的经验和偏好进行描述与调整. 仿真结果表明, 利用所建立的空战决策模型可以有效地引导战机格斗, 决策过程符合空战格斗理念.

关键词: 空战格斗; 空战决策; 影响图法; 威胁评估

中图分类号: V448 文献标识码: A

Decision-Making for Air Combat Dogfight

LUO De-lin¹, SHEN Chun-lin¹, WU Wen-hai², WU Shun-xiang³

(1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Qingdao Branch of Navy Institute of Aeronautics Engineering, Qingdao 266041, China;

3. Department of Automation, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: Considering a scenario of air combat involving two opposing fighter aircrafts, a decision-making model for the pilot in air combat is established. The model is based on a situation of continually updated threat. An influence diagram analysis method is employed to describe the pilot decision-making process. Evaluation of air combat threat and the decision-making behavior are easy to describe and modify, if necessary, according to the experience and preference of the individual pilot. Simulation results show that the proposed model is effective to guide the fighter aircraft during air combat dogfight, and its decision-making process conforms to the concept of air combat dogfight.

Keywords: air combat dogfight; air combat decision-making; influence diagram method; threat evaluation

近距离格斗是空战最基本的形式之一, 格斗中敌方的信息主要依靠机载光电传感器、目视及通信设备等手段获知, 飞行员需要根据所获得的信息进行机动决策. 决策的主要目标也即格斗理念^[1]: 相对于敌机获得有利的攻击占位, 使得敌机进入我机攻击包络, 而避免进入敌机的攻击包络; 获得并扩大角度优势使我机机头迅速指向敌机; 产生并扩大能量优势, 如获得速度或高度上的优势.

然而, 实际空战中这些决策所依赖的信息是时刻变化的, 也可能是不完全的, 甚至是相互矛盾的. 因此, 飞行员大部分时间内对空战态势并不了解. 而飞行员空战决策辅助系统可以有效地管理和处理获得的目标信息, 及时地帮助飞行员作出明智的机动决策. 其核心是如何建立模拟飞行员进行空战的决策模型, 常用的方法有矩阵对策、微分对策等数学方法以及专家系统、神经网络等智能方法.

收稿日期: 2004-09-15; 修订日期: 2004-11-15

基金项目: 航空科学基金资助项目(02F15001)

作者简介: 罗德林, 博士生, 研究方向: 导航、制导与控制, E-mail: luodelin602@163.com; 沈春林, 教授, 博导, 研究方向: 精确制导、低空突防,

矩阵对策法和实际空战情形有一定差距, 微分对策理论由于求解困难而目前难于用于空战决策中. 因此, 大部分是应用智能决策理论方法^[2,3], 文献[1]中将微分对策和专家系统两种方法相结合, 提出了一种新的空战决策结构, 然而这些方法的不足之处是建模中缺少和难于考虑飞行员在不确定情况下的偏好以及对待风险的态度, 而在实际的决策建模中是应当考虑的. 这类不确定决策问题用影响图法容易得到解决, 因而, 影响图法在空战机动决策中具有良好的应用前景^[4]. 为此, 本文利用空战威胁态势作为飞行员决策的依据, 采用影响图分析法描述空战飞行员的决策过程, 建立了飞行员的空战决策模型, 并通过空战格斗仿真验证其有效性.

1 空战几何与运动方程

鉴于空战三维运动可以分解为两个二维平面运动来描述^[5,6]. 本文以在同一水平面上敌对的两机空战为研究对象, 我机用 P 表示, 敌机用 T 表示, 空战几何如图 1 所示.

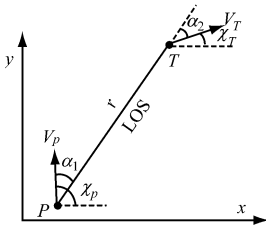


图 1 空战态势几何关系

Fig. 1 Geometry of air combat

飞机的状态矢量为 $X = [x_i, y_i, V_i, X_i]$, $i = P, T$. x, y 代表位置坐标, V 表示速度, X 表示航向角. 空战状态用 $C = [\alpha_1, \alpha_2, r]$ 表示, 其中: α_1 为滞后角, 即视线 LOS 与 P 的速度矢量夹角, α_2 为超前角, 即视线 LOS 的延长线与 T 的速度矢量夹角, $\alpha_1, \alpha_2 \in [0, \pi]$, r 为两机间相对距离. 由几何关系可得

$$\alpha_1 = \arccos \left[\frac{(x_T - x_P) \cos X_P + (y_T - y_P) \sin X_P}{r} \right] \quad (1)$$

$$\alpha_2 = \arccos \left[\frac{(x_T - x_P) \cos X_T + (y_T - y_P) \sin X_T}{r} \right] \quad (2)$$

$$r = \sqrt{(x_T - x_P)^2 + (y_T - y_P)^2} \quad (3)$$

式^[4], 由于本文假设飞机的速度大小不变, 方向由侧向加速度变量控制, 实行机动, 因此, 不考虑切向加速度. 并且在水平面上, 格斗双方除直线飞行外, 作机动时, 通常希望以最大过载左转和右转, 实行 bang-bang 机动^[7], 以求快速完成转弯动作. 因此, 在水平面上, 可将格斗机动方式简化. 本文采用文献[7]中的 3 种空战水平面机动方式, 见图 2 所示.

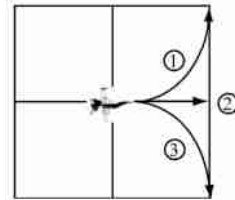


图 2 水平面飞机机动方式

Fig. 2 Maneuver modes of aircraft in horizontal plane

图中, ① 为以最大过载左转 $a_i = a_{i, \max}$; ④ 为直线飞行 $a_i = 0$; ③ 为以最大过载右转 $a_i = -a_{i, \max}$. 其中 $a_{i, \max}$ 是侧向过载最大值, $i = P, T$.

飞机运动方程为

$$\dot{x}_i = V_i \cos X_i, \quad i = P, T \quad (4)$$

$$\dot{y}_i = V_i \sin X_i, \quad i = P, T \quad (5)$$

$$\dot{X} = \frac{a_{i, \max}}{V_i}, \quad i = P, T \quad (6)$$

2 空战决策建模

2.1 影响图分析法

影响图分析法^[8]是一种用于决策分析的图示表征求解方法. 影响图是一个直接的非循环图, 它既可作为表示决策问题中不确定和价值的图形工具, 也可用于求解. 其最大优点是可以直观清晰地表示变量间的概率相关性, 描述决策问题灵活. 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, 同时, 影响图算法允许用同一个图表示约束和作决策的时间顺序. 影响图由节点和弧表示, 节点分为 3 类: 决策节点, 表示不同的决策变量, 用矩形框表示, 相当于每一个变量对应一个数值; 机会节点, 表示不确定事件或随机变量, 用椭圆表示, 其每种结果对应一个数值或概率; 确定量节点, 表示常量或输入的函数, 用园角长方形表示. 弧依照其指向节点分为两类: 条件弧指向机会节点和确定量节点, 表示概率和函数的依赖关系;

信息弧指向决策节点, 表示信息的时间顺序, 即在决策之前哪些量是已知的。

2.2 空战决策模型

空战过程是由连续的机动决策序列组成的, 空

战连续决策过程可用影响图表示^[9], 如图 3 所示, 它表示了时刻 $t_i = i \Delta t, (i = 0, \dots, n-1)$ 的 n 个连续机动决策过程, Δt 是前后两个决策的时间间隔, 称为决策间隔。

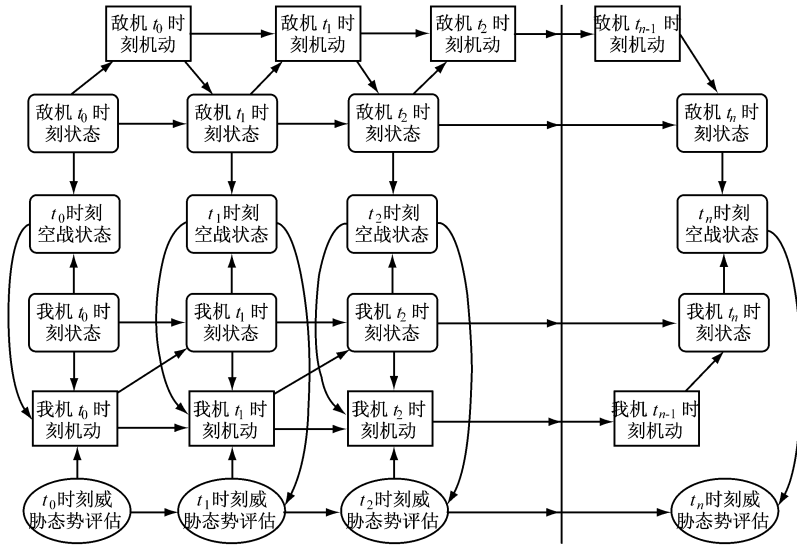


图 3 n 步决策过程影响图

Fig. 3 An influence diagram for n steps decision-making process

t_i 时刻状态节点用于描述当前的飞机状态和空战状态, 飞机状态由前一时刻的状态参数和机动参数, 通过飞机运动方程积分求得. 其节点之间的弧为函数关系。

t_i 时刻威胁态势评估机会节点是从决策者的角度, 根据当前时刻的空战状态观测值和前一时刻空战威胁态势评估值, 对当前的威胁态势进行推断. 当前威胁态势设置为 4 种, 评估值均用概率表示, 分别为:

- (1) 均势, 用 θ_1 表示. 当 $\alpha_1 = \pi, \alpha_2 = 0$ 时, $P(\Theta_i = \theta_1) = 1$;
- (2) 有利, 用 θ_2 表示. 当 $\alpha_1 = 0, \alpha_2 = 0$ 时, $P(\Theta_i = \theta_2) = 1$;
- (3) 不利, 用 θ_3 表示; 当 $\alpha_1 = \pi, \alpha_2 = \pi$ 时, $P(\Theta_i = \theta_3) = 1$;
- (4) 双方不利, 用 θ_4 表示. 当 $\alpha_1 = 0, \alpha_2 = \pi$ 时, $P(\Theta_i = \theta_4) = 1$.

可以假设在决策时刻 t_i , 决策者对威胁态势的评估值满足 $\sum_{k=1}^4 P(\Theta_i = \theta_k) = 1$. 根据影响图, 将 t_i 时刻的威胁态势 $P(\Theta = \theta_k), k = 1, \dots, 4$, 作为先验

概率, 以 t_{i+1} 时刻空战状态节点的空战状态观测值 C_{i+1} 为新获得信息, 利用贝叶斯(Bayes)定理进行威胁态势判断更新, 可获得 t_{i+1} 时刻的威胁态势评估值

$$P(\Theta_{i+1} = \theta_k) = \hat{P}(\Theta_{i+1} = \theta_k | \alpha_{1,i+1}, \alpha_{2,i+1}, r_{i+1}) = \frac{P(\Theta_i = \theta_k) P(\alpha_{1,i+1}, \alpha_{2,i+1}, r_{i+1} | \Theta_i = \theta_k)}{\sum_{m=1}^4 P(\Theta_i = \theta_m) P(\alpha_{1,i+1}, \alpha_{2,i+1}, r_{i+1} | \Theta_i = \theta_m)}$$

$$k = 1, \dots, 4, i = 0, 1, \dots, i-1. \quad (7)$$

设空战状态变量 α_1, α_2 及 r 是条件独立的随机变量, 则有

$$P(\alpha_{1,i+1}, \alpha_{2,i+1}, r_{i+1} | \Theta_i = \theta_k) = P(\alpha_{1,i+1} | \Theta_i = \theta_k) P(\alpha_{2,i+1} | \Theta_i = \theta_k) P(r_{i+1} | \Theta_i = \theta_k) \quad (8)$$

上式中, 似然概率函数 $P(\cdot | \theta_k)$ 可以根据飞行员经验确定, 在一定程度上反映了决策者或飞行员对于空战态势的主观认识和经验. 这里选定^[10,11]

(1) 均势

$$\begin{cases} P(r | \theta_1) = 1 - e^{-r/\lambda} \\ P(\alpha_1 | \theta_1) = \alpha_1/\pi \\ P(\alpha_2 | \theta_1) = 1 - \alpha_2/\pi \end{cases} \quad (9)$$

(2) 有利

$$\begin{cases} P(r | \theta_2) = e^{-r/\lambda} \\ P(\alpha_1 | \theta_2) = 1 - \alpha_1/\pi \\ P(\alpha_2 | \theta_2) = 1 - \alpha_2/\pi \end{cases} \quad (10)$$

(3) 不利

$$\begin{cases} P(r | \theta_3) = e^{-r/\lambda} \\ P(\alpha_1 | \theta_3) = \alpha_1/\pi \\ P(\alpha_2 | \theta_3) = \alpha_2/\pi \end{cases} \quad (11)$$

(4) 双方不利

$$\begin{cases} P(r | \theta_4) = e^{-r/\lambda} \\ P(\alpha_1 | \theta_4) = 1 - \alpha_1/\pi \\ P(\alpha_2 | \theta_4) = \alpha_2/\pi \end{cases} \quad (12)$$

其中, $\lambda > 0$ 为常数.

t_i 时刻我机机动决策节点用于机动决策. 我机根据当前时刻本机状态、空战状态及威胁评估值进行机动方式的选择. 由于对空战态势的威胁评估在一定程度上反映了决策者的偏好, 不同的决策者面对威胁的态度不同, 或偏向冒险, 或偏向保守. 因此, 采取决策的方式可以不同. 这里决策根据威胁态势的最大值确定: 当有利最大, 采取扩大有利的决策; 当不利最大, 采取减少不利的决策; 当双方均势时, 采取扩大有利的决策; 当双方不利时, 采取回避对方决策. 其前后节点之间的关系表示时间顺序关系.

当某个时刻我机满足对敌机的攻击条件, 即

$$\begin{cases} r \leq D \\ \alpha_1 \leq \phi \end{cases} \quad (13)$$

可以认为敌机被击毁. 其中, D 为允许攻击距离, ϕ 为攻击锥角.

3 空战仿真与分析

仿真 1: 目标 T 作一般机动.

设 P 与 T 双方进行近距空战格斗, 速度 $V_p = 350 \text{ m/s}$, $V_T = 300 \text{ m/s}$, P 、 T 可选控制集分别为 $a_p = [90, 0, -90]$ 、 $a_T = [60, 0, -60]$, 单位为 m/s^2 . P 的初始位置为 $(0, 1000)$, 初始航向角 $x_p = -90^\circ$, T 的初始位置为 $(2000, 0)$, 初始航向角 $x_T = 0^\circ$, 选择决策间隔 $\Delta t = 0.25 \text{ s}$, 取初始威胁态势值 $P_0(\theta_1) = P_0(\theta_2) = P_0(\theta_3) = P_0(\theta_4) = 0.25$, 并假设双方攻击条件为^[11]: $D \leq 500 \text{ m}$, $\phi \leq 10^\circ$.

在初始时刻 T 发现 P , 并采取最大机动 $a_T = 60 \text{ m/s}^2$, 试图绕到 P 的后方对 P 进行攻击. P 采用本文提出的决策导引律与 T 进行格斗. 图 4 中的 (a)、(b)、(c) 分别为整个格斗过程的双方轨迹、 P 的威胁态势、滞后角和超前角等参数的变化曲线. 从图 4 可以看出: P 从 T 的后方追踪, 保持对 T 的有利态势, 整个过程中 T 的超前角 $\alpha_2 < 52.5^\circ$, 不构成对 P 的攻击条件, 而 $t > 10 \text{ s}$ 后, P 的滞后角 α_1 很小, 机头几乎对准目标. 在 $t = 23.7 \text{ s}$ 时, P 、 T 之间的距离 $r = 488.9 \text{ m}$, $\alpha_1 = 0.5^\circ$, 满足攻击条件式 (13), 这时 $\alpha_2 = 18.96^\circ$.

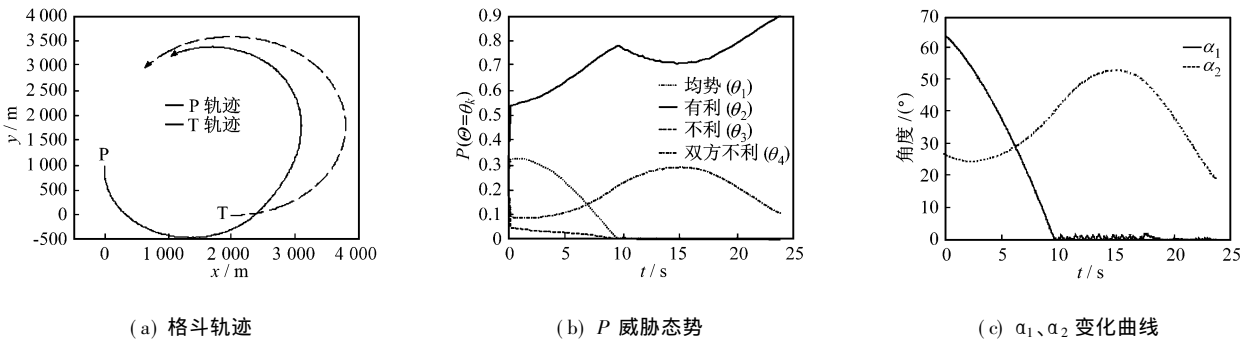


图 4 仿真 1 中 P 、 T 空战过程

Fig. 4 The air combat history for P vs T in simulation 1

仿真 2: 双方均采用本文建立的决策模型格斗.

考虑在实际空战中, 格斗双方在飞机性能上有所差别外, 双方在格斗中都设法使自己处于有利态势. 因此, 双方在格斗中要不断根据对方采取的策略来选择对己方有利的策略进行对抗. 设对抗双方

为 P 、 T , P 信息占优, 即 P 先根据 T 的信息进行机动, T 再根据 P 的信息采取机动对策. P 的初始位置为 $(0, 0)$, 初始航向角 $x_p = 0^\circ$, T 的初始位置为 $(2000, 0)$, 初始航向角 $x_T = 180^\circ$, P 、 T 的速度及可选控制集同仿真 1, 其他参数设定同仿真 1, 格斗

过程如图(5)所示,其中(a)、(b)、(c)分别为 P 与 T 的轨迹、 P 的威胁态势以及参数 α_1 与 α_2 的变化曲线。由(a)可以看出,这是一种典型的空中遭遇战,初始时双方相对飞行, P 首先为避免双方不利态势进行规避,同样, T 也尽量为避免这种不利进行规避,双方很快进入均势阶段,见(b)。接着,为使己方处于优势,双方均设法绕到对方后方进行攻击,在双方决策模型相同的情况下,由于 P 性能上的优

势而最终获胜。整个格斗过程持续了约40 s。由(c)可以看出在空战过程前5 s, T 的超前角迅速减小, P 的滞后角迅速增大,表明相互规避,接着双方进入真正的格斗较量阶段。此后, $\alpha_2 \leq 91.8^\circ$,因此, T 不构成对 P 的威胁。在 $t = 39.9$ s时, P 与 T 之间的距离 $r = 482.9$ m, $\alpha_1 = 0.25^\circ$, P 机头几乎正对 T ,满足攻击条件式(13),此时, $\alpha_2 = 70.7^\circ$ 。

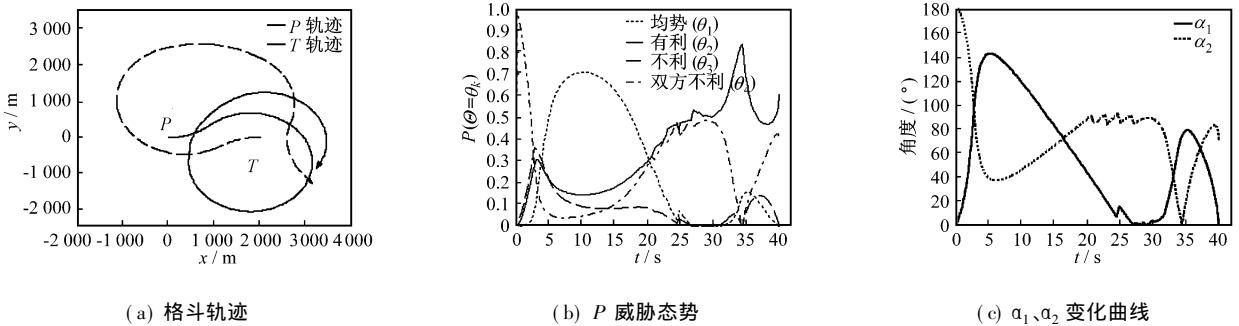


图5 仿真2中 P 、 T 空战过程

Fig. 5 The air combat history for P vs T in simulation 2

4 结束语

由于空战的复杂性、不确定性及快速性,一般很难找到最佳的决策方案。而用模仿有经验的飞行员对空战态势的判断与决策的过程建立的空战决策模型可以取得较好的效果,也是空战决策研究的一个主要课题。本文建立的空战决策模型,易于融合飞行员的经验,通过空战仿真验证了它的有效性,且其决策过程是符合空战实际的。这为下一步进行更复杂、逼真的模拟三维立体空战格斗决策的仿真研究奠定了良好的基础。

参考文献:

- [1] Akbari S, Menhaj M B. A new framework of a decision system for air to air combat tasks. *Proc of IEEE Int Conf on Systems, Man, and Cybernetics* [C]. Nashville, Tennessee, Oct, 2000. 3: 2019– 2022.
- [2] Lazarus E. The application of value-driven decision-making in air combat simulation. *Proc of IEEE Int Conf on Systems, Man, and Cybernetics* [C]. Orlando, Florida, 1997. 3: 2302 – 2307.
- [3] Akbari S, Menhaj M B. A fuzzy guidance law for modeling offensive air to air combat maneuver. *Proc of 9th IFSA World Congress and 20th NAFISP International Conference* [C].

Vancouver, Canada, 2001. 5: 3027– 3031.

- [4] 董彦非,郭基联,张恒喜.空战机动决策方法研究[J].火力与指挥控制,2002,27(2):75–78.
- [5] Ching-Fang Lin. *Modern Navigation, Guidance, and Control Processing* [M]. Prentice-Hall Inc, Englewood Cliffs, New Jersey, 1991.
- [6] 吴文海.针对机动目标的现代战机追踪拦截导引律研究[D].南京:南京航空航天大学,2003.12.
- [7] Shinar J, Glizer V J. Application of receding horizon control strategy to pursuit-evasion problems [J]. *Optimal Control Applications & Methods*, 1998, 16(1): 127– 141.
- [8] 詹原瑞.影响图理论方法与应用[M].天津:天津大学出版社,1995.
- [9] Vitanen K, Raivio T, Hamalainen R P. Modeling pilot's sequential maneuvering decisions by a multistage influence diagram. *Proc of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit* [C]. Montreal, Canada, Aug, 2001. AIAA- 2001- 4267.
- [10] Austin F, Carbone G, Falco M, Hingz H, Lewis M. Game theory for automated maneuvering during air-to-air combat [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1990, 13(6): 1143– 1149.
- [11] Huynh H T, Costes P, Aumasson C. Numerical optimization of air combat maneuvers. *Proc of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference* [C]. Monterey, California, Aug, 1987, AIAA- 87- 2392.

(编辑:秦巍)