超视距多机协同空战目标分配算法

高 永 向锦武

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院，北京 100083)

摘 要：针对未来超视距条件下多机协同空战中的威胁估计与多目标分配，结合超视距空战特点，在综合考虑参战双方飞机性能、几何态势的基础上，提出了一种以参战双方飞机空战效能优势与当前态势优势的加权和为最终结果的超视距空战威胁估计的非参量法模型；在威胁估计的基础上，探讨了一种以空战优势函数为依据，多机之间相互配合、相互支援、协同作战过程的多目标分配算法，并进行了仿真. 仿真结果证实了算法的有效性.

关 键 词：超视距；空战；目标分配；威胁估计

中图分类号：V 271.4；E 926

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2007)03-0286-04

Target assignment in BVR air combat

Gao Yong Xiang Jinwu

(School of Aeronautic Science and Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Aiming at the key problem of threat estimation and target assignment in beyond-visual-range(BVR) air combat, a new non-parameter threat estimation model was formulated based on characteristics of BVR air combat, which takes into account aircraft's combat effectiveness and situation superiority including angle superiority, distance superiority and velocity superiority. A new multi-target assignment algorithm was put forward on the basis of the threat estimation model. The new multi-target assignment algorithm emphasizes the cooperating and supporting process during BVR air combat and can be calculated easily. Simulation is carried out and the result shows the validity of the algorithm.

Key words: beyond-visual-range; air combat; target assignment; threat estimation

超视距多目标攻击是指在超视距范围内，一架飞机同时攻击空中多个目标或 2 架以上的飞机协同攻击空中的多个目标. 超视距多机协同空战起源于编队空战的思想，但突破了传统编队空战的限制：各参战飞机之间长僚机之分淡化，作战过程中，各战机在指挥中心的统一指挥下相互协同、相互配合共同完成作战任务，在攻击目标时，互为犄角，互相支援，可以更充分发挥僚机的主动性、积极性. 多机协同攻击中的一个关键问题就是如何根据战场态势，合理分配目标，以避免重复攻击、并相互支援，充分发挥作战飞机的打击效能. 美、俄等军事强国在协同空战方面已开展多年的研究，且已形成战斗力[1-7]. 国内近几年也做了大量的工作. 本文在研究超视距空战特点的基础上，探讨了一种综合考虑空战威胁指数与优势指数的目标分配的枚举法模型.

1 超视距空战的威胁估计

威胁估计是目标分配的前提和基础. 目前常用的威胁估计算法有参量法和非参量法，非参量法模型简单、易用，便于机载火控计算机实时运算，受到国内外学者的青睐并得到广泛应用. 本文结合超视距空战的特点，根据空战双方作战飞机性能参数及相对战术几何关系(图 1)，建立了威

收稿日期：2006-04-20

基金项目：新世纪优秀人才支持计划(NCET-04-0169)

作者简介：高 永(1973—)，男，山东新泰人，讲师，gaoyongbh@sina.com.cn.

胁估计的非参量法模型,图 1 中:

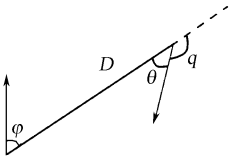


图 1　双机相对几何态势示意图

目标线,又称为视线(D):从本机到目标机的连线;

目标方位角(φ):本机航向与目标线的夹角;

目标航向角(θ):目标机航向与目标线的夹角;

目标进入角(q):目标机航向与目标线延长线的夹角.

方位角与进入角的方向一致规定为右偏为正,左偏为负.则有 $0<|q|<180°$,$0<\varphi<180°$ 且 $|\theta|+|q|=180°$.

1.1　方位角优势函数

$$T_\varphi=\begin{cases}0.3\left(1-\dfrac{|\varphi|-\varphi_{M\max}}{\varphi_{R\max}-\varphi_{M\max}}\right) & \varphi_{M\max}\leqslant|\varphi|\leqslant\varphi_{R\max}\\ 0.8-\dfrac{|\varphi|-\varphi_{Mk\max}}{2(\varphi_{M\max}-\varphi_{Mk\max})} & \varphi_{Mk\max}\leqslant|\varphi|\leqslant\varphi_{M\max}\\ 1-\dfrac{|\varphi|}{5\varphi_{Mk\max}} & 0\leqslant|\varphi|<\varphi_{Mk\max}\\ 0 & |\varphi|>\varphi_{R\max}\end{cases}\tag{1}$$

式中,$\varphi_{R\max}$ 为雷达最大搜索方位角;$\varphi_{M\max}$ 为空空导弹最大离轴发射角;$\varphi_{Mk\max}$ 为不可逃逸区圆锥角.

进入角优势函数:

$$T_q=\begin{cases}\dfrac{|q|}{50°} & |q|<50°\\ 1-\dfrac{|q|-50°}{130°} & 50°\leqslant|q|<180°\end{cases}\tag{2}$$

整机的角度优势取为二者乘积:

$$T_A=T_q^{\gamma_1}T_\varphi^{\gamma_2}\tag{3}$$

式中,$0\leqslant\gamma_1,\gamma_2\leqslant1$ 为权重系数,用以调整二者在乘积中的比例,该值可由专家评定法确定,本文中取为 $\gamma_1=\gamma_2=1$.

1.2　速度优势

速度优势函数取为[1,6]:

$$T_v=\begin{cases}1.0 & v>1.5v_T\\ -\dfrac{1}{2}+\dfrac{v}{v_T} & 0.6v_T\leqslant v\leqslant1.5v_T\\ 0.1 & v<0.6v_T\end{cases}\tag{4}$$

式中,v 表示载机速度;v_T 表示目标机速度.

1.3　距离优势函数

$$T_D=\begin{cases}0 & D\geqslant D_{R\max}\\ 0.5e^{-\frac{D-D_{M\max}}{D_{R\max}-D_{M\max}}} & D_{M\max}\leqslant D<D_{R\max}\\ 2^{-\frac{D-D_{Mk\max}}{D_{M\max}-D_{Mk\max}}} & D_{Mk\max}\leqslant D<D_{M\max}\\ 2^{-\frac{D-D_{Mkmin}}{10-D_{Mkmin}}} & 10\leqslant D<D_{Mkmin}\\ 1 & D_{Mkmin}\leqslant D<D_{Mk\max}\end{cases}\tag{5}$$

式中,$D_{R\max}$ 为雷达最大搜索距离;$D_{M\max}$,$D_{M\min}$ 分别表示导弹最大最小攻击距离;$D_{Mk\max}$,$D_{Mk\min}$ 为导弹最大最小不可逃逸区距离.

1.4　超视距空战效能优势函数

空战效能用对数法公式表示[1]:

$$C=\left[\ln B+\ln\left(\sum A_1+1\right)+\ln\left(\sum A_2\right)\right]\varepsilon_1\varepsilon_2\varepsilon_3\varepsilon_4\tag{6}$$

式中,B,A_1 和 A_2 分别为飞机的机动性参数、火力参数和探测能力参数;而 ε_1,ε_2,ε_3 和 ε_4 分别为操纵效能系数、生存力系数、航程系数和电子对抗能力系数.

C 的值可以通过查表求得,将空战效能优势指数定义为

$$T_M=\begin{cases}1 & C_i/C_j\geqslant1.5\\ 0.75 & 1.5\geqslant C_i/C_j>1\\ 0.5 & C_i/C_j=1\\ 0.25 & 1>C_i/C_j\geqslant0.3\\ 0 & C_i/C_j<0.3\end{cases}\tag{7}$$

1.5　总体优势函数

载机对目标机的超视距空战综合优势指数表示为[6]

$$T=k_1T_M+k_2T_G\tag{8}$$

式中,T_M 为空战效能优势指数;T_G 为空战几何态势优势指数;k_1,k_2 为权重,且 $k_1+k_2=1$,考虑到超视距空战的特点,本文取:$k_1=0.4$,$k_2=0.6$.

其中的空战态势优势指数为

$$T_G=\begin{cases}0 & T_A=0\text{ 或 }T_D=0\\ c_1T_A+c_2T_D+c_3T_V & \text{否则}\end{cases}\tag{9}$$

式中,c_1,c_2,c_3 分别为红方相对于蓝方的角度优势、距离优势和速度优势的权系数且 $c_1+c_2+c_3=1$.文中考虑到超视距空战条件下,随着“发射后不管”全向攻击中远距空空导弹的出现,角度优势与近距格斗相比不明显,并且角度与距离优势的相关性减弱,故此处取 $c_1=0.2$,$c_2=c_3=0.4$.

双方参数互换,可得敌方的优势指数.双方优

势指数的对比可作为战术选择的依据.

2 目标分配算法

目标分配以威胁估计为基础.假定红方参战飞机共有 m 架,兰方作战飞机 n 架;其中第 $i(i=1,2,\cdots,m)$ 架红机可同时攻击 q_i 个目标,其相对于兰方第 $j(j=1,2,\cdots,n)$ 架飞机的优势指数为 α_{ij},而第 j 架兰方飞机对第 i 架红方飞机的优势指数为 β_{ij},由此,可构造双方的优势函数矩阵.

红方优势函数矩阵:

$$\boldsymbol{\alpha}=\begin{bmatrix}\alpha_{11},\alpha_{12},\cdots,\alpha_{1j},\cdots,\alpha_{1n}\\ \alpha_{21},\alpha_{22},\cdots,\alpha_{2j},\cdots,\alpha_{2n}\\ \vdots\quad\vdots\quad\quad\vdots\quad\quad\vdots\\ \alpha_{m1},\alpha_{m2},\cdots,\alpha_{mj},\cdots,\alpha_{mn}\end{bmatrix}\tag{10}$$

兰方优势函数矩阵:

$$\boldsymbol{\beta}=\begin{bmatrix}\beta_{11},\beta_{12},\cdots,\beta_{1j},\cdots,\beta_{1n}\\ \beta_{21},\beta_{22},\cdots,\beta_{2j},\cdots,\beta_{2n}\\ \vdots\quad\vdots\quad\quad\vdots\quad\quad\vdots\\ \beta_{m1},\beta_{m2},\cdots,\beta_{mj},\cdots,\beta_{mn}\end{bmatrix}\tag{11}$$

由上述分析,双方的空战决策是一个典型二人有限非合作一般和的对策问题,应用对策论加以分析研究,然而,由于目前对策论模型的求解存在一定的困难,尤其是对大规模的空战对抗,计算量惊人,不利于机载火控计算机实时运算,且对于这种二人有限非合作一般和的对策问题,其 Nash 平衡点可能不存在,因而需要研究混合策略:即某种目标分配方式均以一定的概率方式出现.在瞬息多变的空战环境下,给飞行员提供这种以概率形式出现的混合策略只能是贻误战机,造成指挥混乱,为此,本文发展了一种综合考虑敌机威胁程度与我机优势函数的枚举法模型,其分配的基本原则如下:①优先攻击对我方飞机威胁度高的目标,以掩护友机,保存实力;②一架目标机只能分给一架红机,避免重复分配,造成优势滥用;③一架红机可分配的目标数不大于其可同时攻击的目标数.

结合该分配原则,目标分配算法流程图如图2所示.

1)如果敌机对我机的最大威胁指数小于0.5,则采用优势最大原则进行目标分配;

2)若敌机对我方某机威胁指数大于 0.5,而我方所有飞机对该敌机优势函数小于 0.5,我机应规避;

3) 除上述两种情况外,按程序流程顺序分配,直到分配完毕.

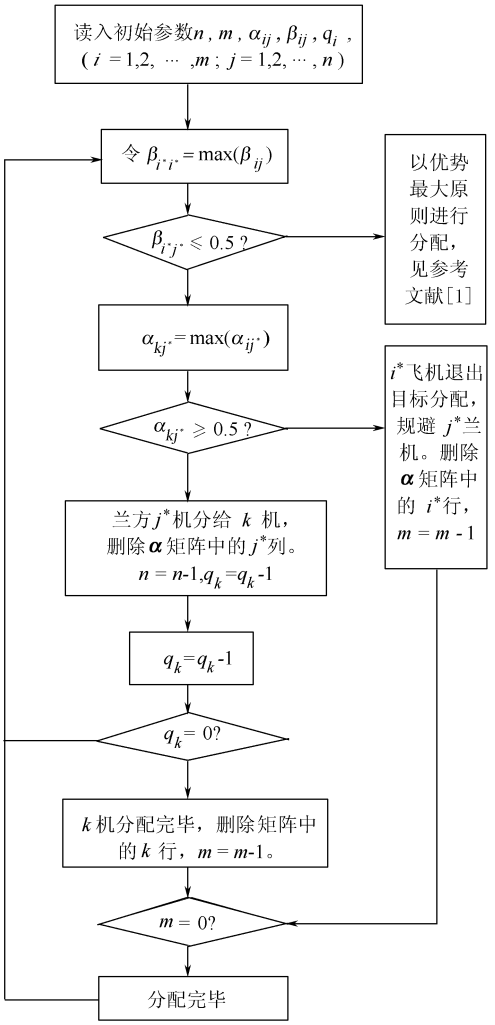


图 2 目标分配流程图

3 算 例

红方 4 架同类战机对兰方 12 架同类飞机.其中红方战机可同时攻击 4 架敌机,假定根据战场某一时刻的空战态势,由模型(1)~(8)计算得红兰双方的优势函数矩阵分别见表 1,表 2,红机目标分配结果见表 3.

表 1 红方优势函数表

兰机序号	红机序号			
	1	2	3	4
1	0.5709	0.4406	0.1961	0.1923
2	0.3081	0.8336	0.5449	0.3306
3	0.1633	0.0132	0.5708	0.6354
4	0.5395	0.0676	0.0150	0.4819
5	0.2879	0.3647	0.4838	0.0209
6	0.3934	0.6042	0.8667	0.3625
7	0.1020	0.0177	0.1277	0.3687
8	0.9040	0.0649	0.1336	0.9508
9	0.7554	0.5782	0.4201	0.2021
10	0.0931	0.1835	0.2551	0.9277
11	0.5984	0.0902	0.8910	0.3230
12	0.3791	0.3080	0.3955	0.5082

表 2 兰方优势函数表

兰机序号	红机序号			
	1	2	3	4
1	0.3217	0.5704	0.4648	0.3628
2	0.4041	0.9218	0.2850	0.3713
3	0.9027	0.7050	0.7793	0.8338
4	0.6088	0.2745	0.5569	0.2279
5	0.7098	0.3943	0.1890	0.4730
6	0.8979	0.8713	0.7555	0.0286
7	0.6479	0.9824	0.4014	0.6914
8	0.5699	0.6285	0.1820	0.9904
9	0.4529	0.1938	0.3915	0.7196
10	0.1590	0.4906	0.6852	0.5966
11	0.8924	0.5604	0.0171	0.1616
12	0.0685	0.5793	0.4932	0.1052

表 3　红机目标分配表

参数	红机序号			
	1	2	3	4
状态	0	0	1	1
目标机	5	7	6	8
	0	0	11	3
	0	0	2	10

注:状态“1”表示进攻,“0”表示规避.

由分配结果可知:红机 4 与兰机 8 双方优势相当,因而由红机 4 发起对兰机 8 的进攻.而红机 2 对兰机 7 的优势为 0.0177,兰机 7 对红机 2 的优势为 0.9824,而所有红机中对兰机 7 优势最大者是红机 4,仅为 0.3687,因而,为避免红机 2 被歼灭,2 应采取规避战术,退出分配矩阵.兰机 3 对红机 1 的优势为 0.9027,而红机 1 对兰机 3 的优势仅为 0.1633,处境危险,所幸红机 4 对兰机 3 的优势为 0.6354,大于 0.5,处于其可攻击范围内,因而,由红机 4 同时对兰机 3 发起进攻,以掩护红机 1.其他分析类似,不再赘述.

4　结 束 语

多目标攻击技术是目前和将来高技术条件下超视距多机协同空战的主要发展方向之一,而威胁估计和目标分配,是多目标攻击火控系统的核心内容,对发挥编队优势,提高参战飞机的作战效能具有重要意义[8-9].本文在对超视距空战威胁估计算法研究的基础上,提出了一种可体现参战飞机之间相互支援的协同多目标分配算法,该算法简捷易行,便于编程,便于机载火控计算机的运行解算.

参考文献(References)

[1] 董彦非,冯惊雷,张恒喜.多机空战仿真协同战术决策方法[J].系统仿真学报,2002,14(6):723-725
Dong Yanfei, Feng Jinglei, Zhang Hengxi. Cooperative tactical decision methods for multi-aircraft air combat simulation [J]. Journal of System Simulation, 2002, 14(6): 723-725 (in Chinese)

[2] 蓝伟华,丁海龙.多机协同多目标攻击目标全面分配算法[J].电光与控制,2003,20(2):21-22
Lan Weihua, Ding Hailong. Overall target assignment althorithm for multi-aircraft attacking cooperatively on multi-target[J]. Electronics Optics & Control, 2003, 20(2): 21-22 (in Chinese)

[3] Geng Yanluo, Jiang Changsheng, Li Weihao. Multi-fighter coordinated multi-target attack system[J]. Transations of Nanjing University of Aeronautics & Astrinautics, 2004, 21(1): 18-23

[4] 高文正,丁全心.多机协同中的目标分配研究[J].电光与控制,2003,10(4):10-18
Gao Wenzheng, Ding Quanxin. Target allocation in multi-fighter cooperative attacking[J]. Electronics Optics & Control, 2003, 10(4): 10-18(in Chinese)

[5] 程红斌,张凤鸣,张晓丰.多机协同空战目标分配算法[J].空军工程大学学报(自然科学版),2005,6(2):7-10
Cheng Hongbin, Zhang Fengming, Zhang Xiaofeng. Multi-aircraft coordination target assignment[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2005, 6(2): 7-10(in Chinese)

[6] 王小兵,王宝树.空对空多机协同攻击多目标的决策研究[J].电光与控制,2003,10(1): 28-31
Wang Xiaobing, Wang Baoshu. Study on attacking strategy of multi-fighter attacking cooperatively on multi-target in air-to-air combat[J]. Electronics Optics & Control, 2003, 10(1): 28-31(in Chinese)

[7] 罗德林,吴文海,沈春林.空战多目标攻击决策研究[J].电光与控制,2005,12(4):4-8
Luo Delin, Wu Wenhai, Sheng Chunlin. A survey on decision-making for multi-target attacking in air combat[J]. Electronics Optics & Control, 2005, 12(4): 4-8(in Chinese)

[8] Virtanen K, Raivio T, Hamalainen R P. Modeling pilot's sequential maneuvering decisions by a multistage influence diagram[R]. AIAA-2001-4267, 2001

[9] Akbaris, Menhaj M B. A new framework support system for air to air tasks [C]// IEEE International Conference on SMC, Proceedings, [S. l.]: [s. n.], 2000: 2019-2022

(责任编辑:张　嵘)