

多机协同空战中的威胁排序

刘正敏¹, 姜长生², 陈志伟²

(1 四川航天技术研究院, 成都 610100; 2 南京航空航天大学, 南京 210016)

摘 要: 提出了一种基于最大隶属度原则的多机协同空战威胁排序的方法。结合实际空战特点, 首先评估各架敌机的空战能力, 分析空战态势, 计算三维空战威胁指数, 进而求出威胁因素矩阵, 并对威胁矩阵模糊规范化处理, 在此基础上建立最大隶属度模型。最后结合 Matlab 软件对实例中敌机的威胁度仿真计算, 求出敌机的威胁度大小, 验证该方法的正确性。仿真结果表明, 最大隶属度方法简单易于实现, 能有效解决多机多目标协同空战中的目标威胁排序问题。

关键词: 协同空战; 威胁指数; 威胁排序; 最大隶属度

中图分类号: V271.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2011)02-0030-04

Threat Sequencing for Multi-Aircraft Cooperative Air Combat

LIU Zhengmin¹, JIANG Changsheng², CHEN Zhiwei²

(1. Sichuan Research Institute of Space Technology, Chengdu 610100, China;

2. College of Automation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: A method of target threat sequencing was proposed for multi-aircraft cooperative air combat according to the maximum degree of membership. Based on the features of actual air combat, the enemy aircraft's fighting capability was assessed and air combat situation was analyzed. Then, the 3D air combat threat indexes were calculated out, the threat matrix was obtained and normalized, based on which the model of maximum membership degree was established. To verify the correctness of the method, the threat level of the enemy aircraft was simulated and calculated out by using Matlab. Simulation results show that the maximum membership degree method is simple and can effectively implement threat level sequencing of the targets in multi-aircraft multi-target cooperative air combat.

Key words: cooperative air combat; threat index; threat sequencing; the maximum degree of membership

0 引言

随着航空火控技术的发展, 战斗机的作战性能有了飞跃的提高。作战模式也由单机对单机作战向多机对多机的大机群作战转变, 多目标攻击成为大机群空战的主要作战方式。相对于编队空战, 多机协同空战具有信息共享、资源互补、分工明确、合理分配目标以及优化攻击火力等优点, 有利于战术决策, 大大提高我方战机的对敌攻击能力。在多机协同空战中, 对多个敌方目标进

行威胁评估和排序就显得非常重要, 它是空战目标分配的基础, 对于提高我机生存力和有效杀伤敌机都具有十分重要的意义。美、俄、西欧等军事强国在这方面都给予了极大地关注, 并已应用于实际空战中。

在实际空战环境中, 影响目标威胁程度的因素很多, 威胁评估的方法也很多。本文在综合考虑敌我双方态势的基础上, 采用威胁指数法, 基于最大隶属度原则, 求解多机协同空战目标威胁评估值, 得到敌机对我各机相对威胁程度的大小, 最后根据威胁值大小对目标进行合理分配。

1 空战目标威胁评估

威胁评估是多机协同空战的基础, 它能使我方对敌方进行有效打击, 从而取得制空权的主动权。

收稿日期: 2010-05-07

修回日期: 2010-06-04

基金项目: 航空科学基金和电光控制技术国防科技重点实验室联合基金

作者简介: 刘正敏 (1981-), 男, 四川自贡人, 博士, 研究方向为武器系统总体设计。

1.1 目标空战能力指数

对飞机空战能力的评估,采用简单易行的空战能力指数法。在某次空战中,双方的武器装备水平是不变的,因此采用空战能力指数法对各战机空战能力进行评估是可行的。在综合考虑敌我双方态势及空战能力对比的基础上,本文选择影响空战的7个主要因素:机动性、火力、探测目标能力、操纵效能、生存力、航程和电子对抗能力^[1]。定义第j架敌机的空战能力指数 C_j 为^[2]

$$C_j = [\ln B + \ln(\sum A_i' + 1) + \ln(\sum A_e')] A_3' A_4' A_5' A_6' \quad (1)$$

式中: B 为机动性参数; A_i' 为火力参数; A_e' 为探测能力参数; A_3' 是操纵效能参数; A_4' 是生存力参数; A_5' 是航程系数; A_6' 是电子对抗能力系数。根据式(1)可计算出敌我双方各种类型飞机的空战能力指数,并由数据通讯系统传递给我机。为了更加清晰地表示出敌机对我机的威胁程度,对 C_j 作进一步规范化处理^[3],以得到无量纲的归一化威胁指数,取空战能力 C_j 的相对值 M 作为目标的空战能力指数:

$$M = C_j / \max(C_j) \quad (2)$$

根据式(2)计算出一定时期内敌方各种类型飞机的空战能力指数,制成数据库,并实时地根据敌方装备改装升级情况更新数据库内容。

另外,也可以定义 M' 为敌机空战能力指数与我机空战能力指数之比^[4],用公式表示为

$$M' = C_j / C_i \quad (3)$$

式中: C_j 为敌机空战能力指数; C_i 为我机空战能力指数。当 $M' < 1$ 时我机空战能力指数大于敌机,我机对敌机的威胁大;当 $M' > 1$ 时,敌机空战能力指数大于我机,敌机对我机的威胁大;当 $M' = 1$ 时敌我双方威胁均等。

1.2 三维空战态势威胁指数

在实际空战中,敌我双方都要根据战场的形势作出相应的态势分析。态势分析需要考虑双方的各种情况,本文从4个主要方面来考虑:双方战机的角度、相对距离、战机的飞行速度以及战机的高度。由于空战中各机一般不都在同一平面内,故本节考虑的三维空战态势威胁指数主要是从角度威胁指数、距离威胁指数、速度威胁指数和高度威胁指数考虑。

敌我双方空战态势关系示意图如图1所示。其中: $|D_{ji}|$ 为目标距离; $|V_i|$ 为我机速度大小; $|V_j|$ 为敌机速度大小; β_{ji} 为目标位置角,定义为目标速度矢量方向偏离目标线延长线的角度; φ_{ji} 为我机位置角,定义为我机速度矢量方向偏离目标线的角度,以相对目标线右偏为正,则 $0 \leq |\beta_{ji}| \leq 180^\circ$, $0 \leq |\varphi_{ji}| \leq 180^\circ$ 。

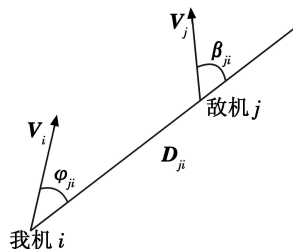


图1 敌我双方空战态势示意图

Fig 1 Schematic diagram of air combat situation

定义我机和敌机的高度差为 h_{ji} =我机高度-敌机高度,在图1的基础上,定义三维空战态势威胁指数如下所述。

1) 角度威胁指数。

$$T_{a_{ji}} = (|\beta_{ji}| + |\varphi_{ji}|) / 360^\circ \quad (4)$$

2) 距离威胁指数。

由敌我双方战机导弹射程和雷达最大探测距离分情况讨论距离威胁指数,设我机i的导弹射程是 r_{mi} ,雷达最大探测距离是 r_{ri} ,敌机j的导弹射程是 r_{mj} ,雷达最大探测距离是 r_{rj} ,则:

$$T_{r_{ji}} = \begin{cases} ① \text{ 敌机 } j \text{ 性能优于我机 } i \text{ 即 } r_{mi} < r_{mj} < r_{ri} < r_{rj} \\ 0.5, |D_{ji}| < r_{mi}, r_{mj} < |D_{ji}| < r_{ri}, |D_{ji}| > r_{rj} \\ 0.5 + 0.2 \cdot \frac{|D_{ji}| - r_{mi}}{r_{mj} - r_{mi}}, r_{mi} < |D_{ji}| < r_{mj} \\ 0.5 + 0.1 \cdot \frac{|D_{ji}| - r_{ri}}{r_{rj} - r_{ri}}, r_{ri} < |D_{ji}| < r_{rj} \end{cases} \quad (5)$$

$$T_{r_{ji}} = \begin{cases} ② \text{ 我机 } i \text{ 性能优于敌机 } j \text{ 即 } r_{mj} < r_{mi} < r_{rj} < r_{ri} \\ 0.5, |D_{ji}| < r_{mj}, r_{mi} < |D_{ji}| < r_{rj}, |D_{ji}| > r_{ri} \\ 0.5 - 0.2 \cdot \frac{|D_{ji}| - r_{mj}}{r_{mi} - r_{mj}}, r_{mj} < |D_{ji}| < r_{mi} \\ 0.5 - 0.1 \cdot \frac{|D_{ji}| - r_{rj}}{r_{ri} - r_{rj}}, r_{rj} < |D_{ji}| < r_{ri} \end{cases} \quad (6)$$

当两机都能进攻对方,或者都只能探测到却无法攻击对方,或者都无法探测到对方时,取均势 $T_{r_{ji}} = 0.5$;

③ 速度威胁指数,

$$T_{v_{ji}} = \begin{cases} 0.1, & |V_j| < 0.6 |V_i| \\ -0.5 + |V_j| / |V_i|, & 0.6 |V_i| \leq |V_j| \leq 1.5 |V_i| \\ 1.0, & |V_j| > 1.5 |V_i| \end{cases} \quad (7)$$

④ 高度威胁指数,

$$T_{h_{ji}} = \begin{cases} 1, & h_{ji} < -5 \text{ km} \\ 0.5 - 0.1 h_{ji}, & -5 \text{ km} \leq h_{ji} < 5 \text{ km} \\ 0.1, & h_{ji} \geq 5 \text{ km} \end{cases} \quad (8)$$

1.3 数学模型

由上面的讨论,可以得到关于空战能力、角度、距离、速度和高度等威胁因素的因素特征矩阵:

$$Q=(q_{ij})_{5\times n}\tag{9}$$

式中, q_{ij} 为目标 j 关于因素 i 的因素特征值,即采用 1.2 节中各式解得的威胁指数值。设各威胁所占的权重 $W=(w_1,w_2,w_3,w_4,w_5)$, 并有 $w_i>0,\sum_{i=1}^5w_i=1$ 。

由于特征矩阵 Q 中的特征值有各种不同的类型, 为消除不同物理量纲对决策的影响, 将目标的相对威胁程度进行模糊规范化。一般情况下, 评估指标分为效益型、成本型、固定型和区间型, 本文采用效益型指标的模糊规范化方法对目标的相对威胁程度进行模糊规范化^[5]。模糊规范化公式如下:

$$g_{ij}=[(q_{ij}-q_{\min})/(q_{\max}-q_{\min})]^M\tag{10}$$

式中, M 是由决策者确定的参数, 一般取 $M=1$ 。设 $G=(g_{ij})_{5\times n}$ 为决策矩阵, $g_{i1},g_{i2},\cdots,g_{in}$ 为关于某个因素各目标的隶属度。

因此, 基于最大隶属度建立如下模型^[6]:

$$\begin{aligned} \max y(j) &= \sum_{i=1}^5 w_i g_{ij} \quad j=1,2,\cdots,n \\ \text{s.t. } W &= (w_1,w_2,w_3,w_4,w_5) \in H \\ w_i &> 0, \sum_{i=1}^5 w_i &= 1 \end{aligned}\tag{11}$$

表 1 双方空战态势值

Table 1 Air combat situation values of both sides

编 号	红机位 置角 / (°)	蓝机位 置角 / (°)	两机距离 / km	两机高度差 / m	红机速度 / (m·s ⁻¹)	蓝机速度 / (m·s ⁻¹)	红机空战能力 指 数	蓝机空战能力 指 数
红 1vs蓝 1	-18	22	52	1 000	578	612	17.9	19.8
红 1vs蓝 2	-88	-56	50	1 500	578	561	17.9	17.9
红 1vs蓝 3	-12	34	55	-500	578	544	17.9	13.5
红 1vs蓝 4	-78	-46	65	1 000	578	510	17.9	8.2
红 2vs蓝 1	48	85	72	1 200	527	612	16.8	19.8
红 2vs蓝 2	151	-169	39	-1 500	527	561	16.8	17.9
红 2vs蓝 3	90	133	85	-2 300	527	544	16.8	13.5
红 2vs蓝 4	-153	-120	60	-800	527	510	16.8	8.2

根据蓝机空战能力指数, 假定部分权重信息如下: $0.3\leqslant w_1\leqslant 0.7;0.1\leqslant w_2,w_3,w_4,w_5\leqslant 0.5$ 。

采用第 1.2 节介绍的方法, 利用威胁指数法计算出各个威胁指数, 从而得到因素特征矩阵 $Q(Q_1,Q_2)$, 在此基础上根据式 (11) 对矩阵进行模糊规范化, 得到决策矩阵 $G(G_1,G_2)$ 。最后根据最大隶属度原则计算敌机对我机的威胁程度, 见表 2。

表 2 相对威胁值

Table 2 The relative threat value

我 机	敌 机			
	蓝机 1	蓝机 2	蓝机 3	蓝机 4
红机 1	0.825 0	0.801 1	0.276 3	0.505 6
红机 2	0.500 0	0.709 5	0.618 4	0.303 2

由表 2 可以看出, 敌机对我机 1 的威胁度排序为

其中: $y(j)$ 为目标 j 对我机的威胁程度; H 为已知权重信息的向量集。

由上式确定 $W=(w_1,w_2,w_3,w_4,w_5)$, 进而求得综合决策向量 WR , 据此可得各目标的威胁程度大小。

2 仿真实验

在 Matlab 软件和空战经验的基础上, 本文主要考虑我方 2 架战机 (红机) 协同攻击 4 架敌机 (蓝机) 的情况。蓝机的机型可通过我预警机测得, 这样我红机就能直接从我方数据库里调出我机所需的敌方对应机型的各种数据。由于我方数据库是长期研究敌机的结果, 所以在实战中具有一定的参考价值。以下数据均来自我方数据库。红机 1 的导弹最大射程为 60 km, 雷达最大探测距离为 150 km; 红机 2 导弹最大射程为 50 km, 雷达最大探测距离为 120 km; 蓝机 1 导弹最大射程为 70 km, 雷达最大探测距离为 200 km; 蓝机 2 导弹最大射程为 55 km, 雷达最大探测距离为 130 km; 蓝机 3 导弹最大射程为 50 km, 雷达最大探测距离为 100 km; 蓝机 4 导弹最大射程为 50 km, 雷达最大探测距离为 92.6 km^[7]。双方战机空战态势数据^[8]如表 1 所示。

蓝 1>蓝 2>蓝 4>蓝 3; 对我机 2 的威胁度排序为蓝 2>蓝 3>蓝 1>蓝 4。综合起来, 我机 1 应先攻击对我机威胁最大的敌机 1, 然后攻击敌机 4; 我机 2 应先攻击敌机 2, 然后攻击敌机 3。

$$Q_1=\begin{bmatrix} 19.8 & 17.9 & 13.5 & 8.2 \\ 0.111 & 0.400 & 0.128 & 0.344 \\ 0.500 & 0.500 & 0.400 & 0.500 \\ 0.559 & 0.471 & 0.441 & 0.382 \\ 0.400 & 0.350 & 0.550 & 0.400 \end{bmatrix}$$
$$Q_2=\begin{bmatrix} 19.8 & 17.9 & 13.5 & 8.2 \\ 0.369 & 0.889 & 0.619 & 0.758 \\ 0.650 & 0.500 & 0.500 & 0.500 \\ 0.661 & 0.565 & 0.532 & 0.468 \\ 0.380 & 0.650 & 0.730 & 0.580 \end{bmatrix}$$

$$G_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0.836 & 0.457 & 0 \\ 0 & 1 & 0.059 & 0.806 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0.503 & 0.333 & 0 \\ 0.250 & 0 & 1 & 0.250 \end{bmatrix}$$
$$G_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0.836 & 0.457 & 0 \\ 0 & 1 & 0.481 & 0.748 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0.503 & 0.332 & 0 \\ 0 & 0.771 & 1 & 0.571 \end{bmatrix}$$

从仿真结果可以看出,基于最大隶属度原则的威胁评估方法能够有效地对敌机进行威胁评估和目标分配。该方法计算量小,有很好的实时性,有利于提高多机协同空战的智能化水平。

3 结论

本文针对多机协同空战的作战特点,根据最大隶属度原则,介绍了一种目标威胁评估与分配的综合决策方法。该方法综合考虑了敌我双方的态势及空战能力对比,准确、全面、客观地反映了实际空战的目标威胁真实情况。从仿真实验结果可以看出,该方法能够有效地解决多机协同空战中的威胁评估和目标分配问题,同时具有算法简洁、有较好的实时性等特点,有很好的应用前景。

(上接第 21 页)

5 结论

实验结果表明本组合导航方案的设计是成功的,基于双层容错结构的卡尔曼滤波算法可以有效地抑制由于多普勒雷达系统的失锁、测速异常等因素造成的组合定位误差快速发散的问题,显著提高了光纤惯导/多普勒雷达 气压高度表组合导航系统的定位精度,故本方案具有较高的工程应用价值。

参考文献

[1] 李洪烈,陈定荣.高精度中远程导航系统发展述评[J].航空电子技术,2008,39(1):14-17.

[2] 潘永生,王浩.现代直升机导航系统及其仿真[J].电光与控制,2008,15(6):96-97.

[3] 张志君.基于光纤陀螺的寻北定向技术研究[D].北京:中国科学院,2005.

[4] 杨波,秦永元,柴艳.基于非线性滤波的无人机组导航新方法研究[J].传感技术学报,2007,20(10):

参考文献

[1] 朱宝璠,朱荣昌,熊笑非.作战飞机效能评估[M].北京:航空工业出版社,1993:64-73.

[2] 董彦非,郭基联,张恒喜.多机空战目标威胁评估算法[J].火力与指挥控制,2002,27(4):73-76.

[3] 蓝伟华,陈晓风.单机多目标攻击的目标威胁排序[J].电光与控制,2006,13(5):16-18.

[4] 朱秋芳.歼击机超机动飞行控制及多机协同多目标攻击技术研究[D].南京:南京航空航天大学,2007.

[5] 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.

[6] 范春彦,韩晓明,王献峰.基于最大隶属度的目标威胁评估与排序法[J].系统工程与电子技术,2003,25(1):47-67.

[7] 嵇亮亮,姜长生.基于协同攻防的多机空战目标分配及排序[J].电光与控制,2008,15(9):14-17.

[8] 俞卫树.无人机攻防一体化智能火控系统与导弹制导律研究[D].南京:南京航空航天大学,2008.

[9] 刘栋,谷志勇,任波,等.电子对抗环境下的多机协同空战态势评估方法[J].电光与控制,2008,15(7):30-33.

[10] 蓝伟华,喻蓉.多机编队协同空战的概念及关键技术[J].电光与控制,2005,12(6):12-15.

2259-2262

[5] 舒东亮.惯性基容错组合导航系统设计理论研究[D].西安:西北工业大学,2007.

[6] 陈帅,管雪元,薛晓中,等.航空制导炸弹 SNS/GPS组合导航系统的设计[J].航天控制,2007,25(1):13-17.

[7] 马云峰.MSNS/GPS组合导航系统及其数据融合技术研究[D].南京:东南大学,2006.

[8] XU Fan, FANG Jiancheng Velocity and position error compensation using strapdown inertial navigation system / celestial navigation system integration based on ensemble neural network[J]. Aerospace Science and Technology, 2008(12): 302-307.

[9] PACTER M, PORTER A. Bearings-only measurements for INS aiding Theory for the three-dimensional case[C]// AIAA Guidance Navigation and Control Conference & Exhibit Austin, USA, 2003: 343-356.

[10] WENDEL J, MEISTER O, SCHLAILE C, et al An integrated GPS/MEMS-MU navigation system for an autonomous helicopter[J]. Aerospace Science and Technology, 2006(10): 527-533.