

基于集对分析的预警机指挥多机编队空战态势评估

郑东良, 黄文卿, 孙亮
(空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

摘要:多机编队空战态势评估是预警机指挥多机群协同空战战术决策的重要组成部分。分析了预警机指挥下的多机编队空战态势评估。结合态势评估的常用方法建立了一种综合距离优势、角度威胁因子、速度威胁因子的集对分析的态势评估模型。该方法在既定编队间进行态势评估不仅考虑双方的各个态势因素,还考虑敌方友机编队、我方友机编队等因素对态势评估结果的影响。态势评估的组合方式表明态势评定是在敌我双方所有的编队中进行的,仿真结果表明:集对分析中势的概念可以直观反映空中态势的优劣,对不确定值*i*的分析全面反映了态势变化。

关键词:预警机系统;多机编队;空战态势评估;集对分析;势值

中图分类号: V271 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2008)01-0009-05

战场态势是指敌对双方部署和行为所形成的状态和形势。战场态势随时间动态变化并且变化几乎无穷,预警机所分析的空中态势,是在敌我机群按照一定的战术分组关系和特定的作战背景下所进行的。这是由现代空战的特点决定的,现代空战中,单机对单机的战斗已经很少存在,更多的是机群对机群的对抗^[1-2]。

按照 JDL 数据融合模型^[3],态势评估接收一级融合的结果,处理过程常采用贝叶斯网络、模糊推理、黑板模型、模板匹配、计划识别、D-S 证据理论、指数法、对策论、多属性决策理论、条件事件代数、统计时间推理、主动权指数、Lanchester 方程、案例推理、专家系统与机器学习等诸多方法^[4-5]。这些方法各有其优缺点,分别适应不同的情形。但是这些方法或者计算复杂度较高,或者对当前战场态势的综合系统评价不足^[6]。在空战态势评估中经常采用的有两类方法——参量法和非参量法。参量法需要知道目标的特征概率分布,典型的是 Bayes 法。非参量法主要根据空战中敌我飞机的战术几何关系,包括相对距离、角度和飞行速度、方向等进行空战态势评估。非参量法具有简明实用、便于实时计算的特点,在实际中应用非常广泛。例如威胁因子法、优势函数法^[7]和多参数线性加权法等^[8]。威胁因子法和优势函数法都综合考虑了空战态势中的关键因素,在一些仿真程序中得到了较好的应用。但是这两种方法主要用于单机的评估,在预警机针对多机组编队的复杂空情条件下就显得力不从心。

1 集对分析原理

1.1 集对分析原理简介

集对分析(Set Pair Analysis, SPA)是赵克勤提出的一种关于确定不确定系统同异反定量分析的系统分析方法^[9-10]。集对分析的基本思路则是在具体的问题背景下,对集对的某一特性展开分析,对集对在该特性上的联系进行分类定量刻画。该理论认为,不确定性是事物的本质属性,并将不确定性与确定性作为一个系统进行综合考察。集对分析将确定性分为“同一”与“对立”两个方面,而将不确定称为“差异”,从“同一”、“差异”和“对立”(简称同异反)三个方面分析,并研究其转化。引入联系度描述同异反三个分量,并将其统一于一个数学表达式 $\mu = a + bi + cj$ 中。

收稿日期:2007-09-05

作者简介:郑东良(1968-),男,江苏武清人,副教授,主要从事装备管理等研究。E-mail:zhengdl@pub.xaonline.com

对于集对分析的理论推导本文不再赘述,可参考文献[9]、[10],这里只给出其基本步骤。对于规范化矩阵 $X = [X_{ij} \times m]$,可定义最理想的状况为 $P^+ = (g_1, g_2, \dots, g_m)$,其中 $g_j = \max_{1 \leq i \leq m} \{x_{ij}\}$, ($j = 1, 2, \dots, m$)。其物理意义是选取每个指标度量值的最大值作为一种最理想的状况。

相应地,可以定义最差的情况为 $P^- = (h_1, h_2, \dots, h_m)$,其中 $h_j = \min_{1 \leq i \leq m} \{x_{ij}\}$, ($j = 1, 2, \dots, m$)。其物理意义是选取每个指标度量值的最小值作为最差的情况。

对于集对 $\{P^+, P^-\}$ 的联系度 $u\{P^+, P^-\} = a_i + b_i i + c_j$,有:

$$a_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m a_{ij} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \frac{x_{ij}}{h_j + g_j} \quad (1) \quad b_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m b_{ij} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \frac{(g_j - x_{ij})(x_{ij} - h_j)}{x_{ij}(h_j + g_j)} \quad (2)$$

$$c_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m c_{ij} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \frac{h_j - g_j}{x_{ij}(h_j + g_j)} \quad (3)$$

1.2 应用集对分析进行态势评估的基本步骤

- 1) 将初始数据进行规范化处理;
- 2) 选取最理想的状况为 $P^+ = (g_1, g_2, \dots, g_m)$, 最差的情况为 $P^- = (h_1, h_2, \dots, h_m)$;
- 3) 按照式(1)、式(2)和式(3),分别计算集对 $\{P^+, P^-\}$ 的同一度 a_i 、差异度 b_i 和对立度 c_i ;
- 4) 计算集对势 a_i/c_i ,从表1的三维态势表中选出对应的级别;
- 5) 对于每一种状况,可以分析由势值变化所引起的态势变化,从而能够从总体上把握战场的局势。

在应用集对分析进行态势评估的过程中,“同势 ($a/c > 1$)”对应于我方处于优势,“反势 ($a/c < 1$)”对应于我方处于劣势,“均势 ($a/c = 1$)”表示我方与敌方呈现出“势均力敌”的状态^[11]。其中同一度 a 的计算结果表示了对我方态势有利的数值大小,差异度 b 表示双方态势不确定的数值大小,对立度 c 表示对我方态势不利的数值大小;同理,我方的同一度 a 可以表示对敌方态势不利的数值,我方的对立度 c 可以表示对敌方态势有利的数值。在应用集对分析处理问题时,归根结底是要对所建立的数学模型求出各自的同一度值 a 、差异度值 b 、对立度值 c ,再通过进行 a 、 b 、 c 三者的数值大小比较,并对照三维态势表1进行态势分析,以得到态势的优劣判断,这也是本文基于集对分析的态势评估过程。

表1 三维态势表

Tab.1 Three dimensions system situation sort table

态势	级别	a, b, c 的大小关系	系统趋势
同势 ($a/c > 1$)	1级	$a > c, a > b, b > c$	系统内同一的趋势很强
	2级	$a > c, a > b, b = c$	系统内同一的趋势强
	3级	$a > c, a > b, b < c$	系统内同一的趋势较强
	4级	$a > c, a = b, b > c$	系统内同一的趋势较弱
	5级	$a > c, a < b, b > c$	系统内同一的趋势微弱
均势 ($a/c = 1$)	1级	$a = c, a < b, b > c$	系统内同一与对立的均等趋势强
	2级	$a = c, a = b, b = c$	系统内同一、差异、对立的趋势恰好相等
	3级	$a = c, a < b, b > c$	系统内同一与对立均势的程度微弱
反势 ($a/c < 1$)	1级	$a < c, a > b, b < c$	系统内对立的趋势为主,对立程度很强
	2级	$a < c, a = b, b < c$	系统内对立的趋势为主,对立程度强
	3级	$a < c, a < b, b < c$	系统内对立的趋势为主,对立程度较强
	4级	$a < c, a < b, b = c$	系统内对立的趋势为主,对立程度弱
	5级	$a < c, a < b, b > c$	系统内对立的趋势为主,对立程度微弱

2 预警机指挥下的多机编队空战态势评估模型

预警机对多编队的态势评估,通常的评估方法已经不能满足这样的多机组条件的要求,在既定编队间进行态势评估不仅要考虑双方的各个态势因素,还要考虑对方友机编队等因素对我方编队的影响。把一对要评估的敌我双方的编队作为一个集对,将其距离优势、角度威胁因子、速度威胁因子等因素作为影响系统的因素加以分析,这就是本文基于集对分析的态势评估思想。

本文结合如下的多机编队空战态势建立评估模型,空中态势如图 1。该战场态势图可以一般化为 m 个敌机机组、 n 个我方机组及 w 个我方要保护的目标,这里假设 $m = 2, n = 2, w = 2$ 。

如何求编队之间的优势值和威胁因子呢? 首先,找出敌、我各个编队的质心坐标,在以预警机质心为原点建立的地理坐标系中,敌编队中第 i 个飞机的坐标为 (x_i, y_i, z_i) , 其中 $i \in (1, n)$, 则敌编队质心坐标为 $O_D: (\sum_{i=1}^n x_i/n, \sum_{i=1}^n y_i/n, \sum_{i=1}^n z_i/m)$; 我截击编队中第 j 个飞机的坐标为 (x_j, y_j, z_j) , 其

中 $j \in (1, m)$, 则我编队的质心坐标为 $O_D: (\sum_{j=1}^m x_j/n, \sum_{j=1}^m y_j/n, \sum_{j=1}^m z_j/m)$ 。

预警机上敌、我编队主导轨迹的方向和速度分量分别视为长机的速度方向和速度分量,则编队的优势值、威胁因子求解就转化为位于 $O_D、O_w$ 点的两个单机之间的因素值求解。图 1 经计算可简化为图 2, $R_1、R_2$ 分别为 4 架我机编队求质心后得到的位置点, $B_1、B_2$ 为分别为 4 架敌机编队求质心后得到的位置点,其中 $V_{R_1} = 330 \text{ km/s}, V_{R_2} = 300 \text{ km/s}, V_{B_1} = 310 \text{ km/s}, V_{B_2} = 330 \text{ km/s}$; 各个飞机高度均为 10 km, 角度和距离标注于图 2 上。在该双机编队态势评估中,对每一对组合进行集对分析,把其他的双方战斗机编队优势值及威胁值等要素作为集对的因素进行分析,这样综合所有集合的结果就是对敌我双方所有的编队进行的综合态势评定。方式如图 3。

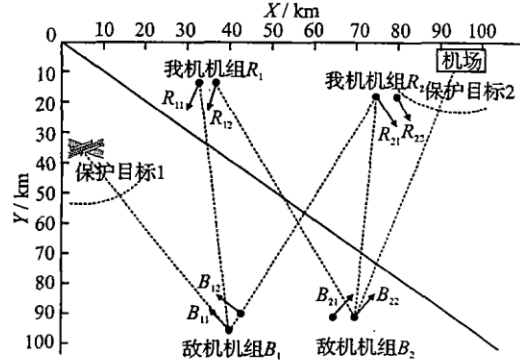


图 1 空中态势
Fig. 1 Aerial situation

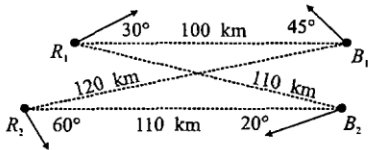


图 2 双机编队态势简化图
Fig. 2 Simplified situation figure between two flight formations

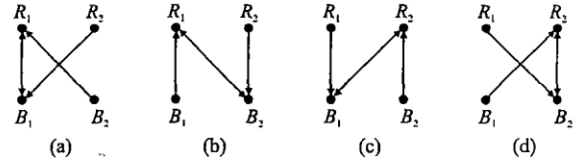


图 3 态势评估组合方式
Fig. 3 Arranging mode of situation assessment

图 3 中(a)指选择 (R_1, B_1) 为一个评估的系统,则 R_2 和 B_2 就是系统的因素,其作用方式如箭头所示; (b)、(c)、(d) 分别以 $(R_1, B_2)、(R_2, B_1)、(R_2, B_2)$ 作为评估的系统,系统的因素作用方式分别如箭头所示。

3 仿真分析

对上述建立的模型进行仿真计算,距离优势 S_r 、角度威胁因子 T_a 及速度威胁因子 T_v 的求解方法参见文献[8],经计算得到各个集对之间各要素值如表 2 所示。

表 2 距离优势 S_r 、角度威胁因子 T_a 及速度威胁因子 T_v
Tab. 2 Range advantage S_r , angle threaten factor T_a and velocity threaten factor T_v

序号	红方机组(我方)			蓝方机组(敌方)								
	S_r	T_a	T_v	我友方机组			敌友方机组					
	S_r	T_a	T_v	S_r	T_a	T_v	S_r	T_a	T_v	S_r	T_a	T_v
1	0.70	0.46	0.44	0.56	0.54	0.52	0.70	0.54	0.56	0.63	0.28	0.53
2	0.63	0.53	0.47	0.63	0.61	0.55	0.63	0.28	0.53	0.70	0.54	0.56
3	0.56	0.54	0.52	0.70	0.46	0.44	0.56	0.46	0.48	0.63	0.39	0.45
4	0.63	0.61	0.55	0.63	0.53	0.47	0.63	0.39	0.45	0.56	0.46	0.48

对表 2 给出的数据进行规范化处理,我方优势值和敌方对我方的威胁因子都是效益型指标,利用式(4)进行规范化。敌方的优势值和敌方对我方的威胁因子正是我方的劣势,因此这里作为成本型指标来对待,利用式(5)进行规范化。由式(4)、(5)得到如下规范化矩阵(6)。

$$x_{ij} = \frac{s_{ij}}{\max_i s_{ij}}, i = 1, 2, \dots, n; j \in Q_1 \quad (4)$$

$$x_{ij} = \frac{\max_i s_{ij}}{s_{ij}}, i = 1, 2, \dots, n; j \in Q_2 \quad (5)$$

$$X = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0.8 & 0.85 & 0.85 & 0.8 & 1 & 1 & 0.89 & 0.52 & 0.95 \\ 0.9 & 0.87 & 0.94 & 0.9 & 0.75 & 0.8 & 0.89 & 0.52 & 0.95 & 0.8 & 1 & 1 \\ 0.8 & 0.85 & 0.85 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0.85 & 0.86 & 0.89 & 0.72 & 0.80 \\ 0.9 & 0.75 & 0.8 & 0.9 & 0.87 & 0.94 & 0.89 & 0.72 & 0.80 & 1 & 0.85 & 0.86 \end{bmatrix} \quad (6)$$

根据规范化矩阵,可得最理想的状况为 $P^+ = (1, 1, \dots, 1)$ 。

最差的状况为 $P^- = (0.8, 0.75, 0.8, 0.8, 0.75, 0.8, 0.8, 0.52, 0.80, 0.8, 0.52, 0.80)$ 。

代入式(1)、式(2)和式(3)计算出每一种状况的同一度 a_i 、差异度 b_i 和对立度 c_i , 得到表 3。

表 3 态势分析结果

Tab.3 Situation analysis result

序号	联系数	a, b, c 的大小关系	态势变化(势值 a/c)
1	$\mu = 0.5089 + 0.0067i + 0.4844j$	$a > c, a > b, b < c$	同势 3 级(1.0506)
2	$\mu = 0.4929 + 0.0032i + 0.5039j$	$a < c, a > b, b < c$	反势 1 级(0.9782)
3	$\mu = 0.5075 + 0.0097i + 0.4828j$	$a > c, a > b, b < c$	同势 3 级(1.0512)
4	$\mu = 0.4915 + 0.0107i + 0.4978j$	$a < c, a > b, b < c$	反势 1 级(0.9873)

在本问题中,“同势”对应于我方处于优势,“反势”对应于我方处于劣势,“均势”表示我方与敌方呈现出“势均力敌”的状态。对于次好状况 4,对联系数中的 i 取不同值时进行态势变化分析,结果如表 4 所示。

表 4 i 值变化引起状况 4 的态势变化

Tab.4 The situation change due to the variety of i in state 4

i 值	新的联系数	a, b, c 的大小关系	态势变化(势值 a/c)
-1	$\mu = 0.4915 + 0i + 0.5085j$	$a < c, a > b, b < c$	反势 1 级(0.9666)
-0.5	$\mu = 0.4915 + 0.0053i + 0.5031j$	$a < c, a > b, b < c$	反势 1 级(0.9769)
0	$\mu = 0.4915 + 0.0107i + 0.4978j$	$a < c, a > b, b < c$	反势 1 级(0.9873)
0.5	$\mu = 0.4968 + 0.0053i + 0.4978j$	$a < c, a > b, b < c$	反势 1 级(0.9980)
1	$\mu = 0.5022 + 0i + 0.4978j$	$a > c, a > b, b < c$	同势 3 级(1.0088)

结果分析:

1) 从表 3 可以看出,1、3 两种状况均处于同势 3 级,这是一种较强的同势,说明在这两种状况中我方处于有利的主动地位,而且这种有利的主动地位较为明显;而第 2 种和第 4 种状况处于反势 1 级,在这种反势中,系统的对立程度很强,说明在此状况中我方处于不利的被动地位,并且这种被动地位很明显。

2) 势值 a/c , 状况 3 的势值 1.0512 最大,因而它所处于的状况是最好的。对于最好状况 1 和次好状况 3,我们应该采取主动选择的措施;而对状况 2 和 4,这两种态势处于反势 1 级,对我方是很不利的,应该尽力避免。

3) 对于不确定值 b_i ,取 i 从 -1 到 +1 对每个态势结果进行讨论,从而对系统可以更准确的把握,在上例中对第四种状况进行了讨论。由表 4 可见,随着 i 由 -1 变化到 +1,势值 a/c 逐渐变大,状况 4 由同势逐渐变为反势,这说明不能小看不确定因素的影响,它对系统有非常重要的作用,有时甚至会影响到态势的变化,因而应充分考虑各种可能因素的影响。

4 结论

本文应用集对分析法研究预警机指挥下多机编队之间的态势评估,主要工作与价值体现在如下几点:

1) 把一对要评估的敌我双方的编队作为一个集对,敌、我友机编队作为该系统的因素加以综合,从系统的角度对空中战场进行态势分析。这种评估方法更有利于预警机从整体上把握战场态势以作出及时、合理的部署。

2) 通过求敌、我各编队的质心坐标,把编队之间的优势值和威胁因子求解转化为单机对单机的因素值求解。在复杂空中态势下,通过这种处理可以简化计算的复杂度,提高预警机态势评估的实时性。

3)采用集对分析中同势的概念反映空中态势的优劣更加直观,同时对不确定值的分析能全面反映态势变化,为我方及时作出合理的战术决策提供理论依据。

参考文献:

- [1] 郇能敬. 预警机系统导论[M]. 北京:国防工业出版社,1998.
LI Nengjing. System Conspectus of AWACS[M]. Beijing: National Defence Industry Publishing Company, 1998. (in Chinese)
- [2] 于雷. 航空数据链支持下的战斗机战术引导理论与方法[D]. 西安:西北工业大学,2006.
YU Lei. Fighter Plane Tactics Guiding Theory and Methods Supporting by Aviation Data Link [D]. Xi'an: Northwest Industry University, 2006. (in Chinese)
- [3] Llinas J, Hall D L. An introduction to multi - sensor data fusion; Proceedings of the IEEE International Symposium on Circuits and Systems [C]. Monterey California USA: IEEE Press, 1998, 6: 537 - 540.
- [4] 徐毅, 金德琨, 敬忠良. 数据融合研究的回顾与展望[J]. 信息与控制, 2002, 31(3): 250 - 255.
XU Yi, JIN Dekun, JING Zhongliang. Status and Development of Data Fusion [J]. Information and Control, 2002, 31(3): 250 - 255. (in Chinese)
- [5] 王三民. 模糊推理及态势估计研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2004.
WANG Sanmin. Study on Fuzzy reasoning and Situation Assessment [D]. Xi'an: Xidian University, 2004. (in Chinese)
- [6] 雷英杰, 王宝树, 王毅. 基于直觉模糊决策的战场态势评估方法[J]. 电子学报, 2006, 34(12): 2175 - 2179.
LEI Yingjie, WANG Baoshu, WANG Yi. Technique of Battlefield Situation Assessment Based on Intuitionistic Fuzzy Decision [J]. Acta electronica sinic, 2006, 34(12): 2175 - 2179. (in Chinese)
- [7] Austin F. Automated Maneuvering Decisions for Air - to - Air Combat [R]. AIAA Paper 87 - 2393.
- [8] 董彦非. 空中作战效能评估与智能决策[D]. 西安:空军工程大学,2001.
DONG Yanfei. Aerial Campaign Efficiency and Aptitude Decision - making [D]. Xi'an: Air force Engineering University, 2001. (in Chinese)
- [9] 张斌. 同异反集合理论及其应用[J]. 系统工程理论与实践, 2000, 2(2): 126 - 130.
ZHANG Bin. The Theory and Application of Same - Indefinite - Contrary Set [J]. Systems Engineering Theory and Practice, 2000, 2(2): 126 - 130. (in Chinese)
- [10] 赵克勤. 集对分析中的不确定性理论[J]. 大自然探索, 1995, 14(54): 87 - 88.
ZHAO Keqin. Uncertainty theory of Set Pair Analysis [J]. Nature Exploring, 1995, 14(54): 87 - 88. (in Chinese)
- [11] 陈绍顺, 宁伟华, 张琳. 防空战斗中的态势评估模型[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2004, 5(4): 30 - 33.
CHEN Shaoshun, NING Weihua, ZHANG Lin. The Model of Situation Assessment in Anti - air Fight [J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2004, 5(4): 30 - 33. (in Chinese)

(编辑:姚树峰)

Aerial Combat Situation Assessment of Multi - group Aircraft under Command of AWACS Based on Set Pair Analysis

ZHENG Dong - liang, HUANG Wen - qing, SUN Liang

(The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: This paper analyzes the aerial combat situation assessment of Multi - group aircraft under Command of AWACS. Combined with the conventional methods in situation assessment, a model integrating with distance - superiority, angle - threaten factor and speed - threaten factor is founded based on Set Pair Analysis. In this method both mutual factors and other factors are taken into account. The combination mode explains that the situation assessment is performed among all the formations. Numerical examples of simulation show that the concept of Potency in SPA can directly reflect the state of aerial combat situation, and the analysis of uncertainty reflects the situation change comprehensively.

Key words: airborne warning and control system (AWACS); multi - group aircraft; air combat situation assessment; Set Pair Analysis (SPA); potency