

# 空中目标群综合威胁评估技术研究

作者姓名 王昌畅

指导教师姓名、职称 于昕 副教授

申请学位类别 工学硕士

学校代码 10701  
分 类 号 TP18

学 号 20021210991  
密 级 公开

# 西安电子科技大学

## 硕士学位论文

### 空中目标群综合威胁评估技术研究

作者姓名：王昌畅

一级学科：控制科学与工程

二级学科（研究方向）：模式识别与智能系统

学位类别：工学硕士

指导教师姓名、职称：于昕 副教授

学 院：电子工程学院

提交日期：2023 年 6 月

# **Research on Comprehensive Threat Assessment Technology of Air Target Group**

A thesis submitted to  
XIDIAN UNIVERSITY  
in partial fulfillment of the requirements  
for the degree of Master  
in Control Science and Engineering

By

Wang Changchang

Supervisor: Yu Xin    Title: Associate Professor

June 2023

## 摘要

由于现代战争节奏的加快以及战场信息的大幅增加,使得需要处理的战场信息愈加繁多,指战员面临着越来越大的认知压力。而威胁评估的目的就是辅助指战员快速完成对战场态势的量化,使得战术决策的制定更加精准、高效。因此,如何合理高效地完成目标威胁评估是当今战争需要着重考虑的一环。

本文主要以空空作战为背景,研究空中目标威胁评估的相关技术及应用。首先,实现单目标的威胁评估技术。然后,当战场目标增多时,完成对战场目标的合理分群,并依据威胁度最大原则判断敌方作战群对我方群体造成威胁时发挥主要作用的目标,即主要威胁目标。最后,完成群目标的综合威胁值计算以及群目标的打击意图判断。值得注意的是,群目标的综合威胁值并不是群内单目标威胁值的简单相加或相乘,而是需要综合考虑敌我双方作战群的空战能力以及群内各目标对于群威胁系统的增益程度,从而形成的更加客观的量化值。本文的主要工作与创新点如下:

(1) 基于组合权重的单目标威胁值计算与威胁等级确定以及我方优势占比度计算。首先,本文从三个角度考虑空战威胁指标:空战能力、空战机会以及空战意图,通过对这三部分指标进行分析与量化构建了一套空战威胁评估指标体系。然后对现有的威胁评估算法存在的问题进行改进:采用分级多专家评判的方法避免了模糊层次分析法存在的单一专家主观性过强的问题;改进 CRITIC 法解决各个指标平均值相差过大时带来的数据误差问题;并基于博弈论的思想求解指标组合权重,该权重是改进上述算法后求出的指标权重的综合结果。最后根据各威胁指标的组合权重求出单目标的威胁值。并且为了使飞行员对于战场态势有更为直观的认知,本文对目标的威胁程度进行了等级划分,并根据计算出的单目标威胁值求解出此时我方的优势占比度。在确定了敌方目标的威胁等级后,结合此时我方的优势占比度对战场态势进行分析,能够更好地辅助飞行员做好下一步的决策。

(2) 战场目标分群以及群内主要威胁目标判断技术研究。首先,对战场空间的目标进行分群,本文针对战场环境下目标数量多、分群数目未知和目标属性多维度的特点,充分对比现有聚类算法的优缺点,采用了基于 OPTICS 算法的战场目标分群方法,并在目标相似度计算以及算法运行效率上进行了改进,以满足复杂的空战环境对于战场分群准确性和实时性的需求。然后,论文根据计算出的群内单目标威胁值,使用灰色关联算法,判断出此时敌群内在群威胁评估中发挥主要作用的目标,即主要威胁目标,为下一步的群目标综合威胁值计算奠定基础。

(3) 基于增益系数的群目标综合威胁评估及其在打击意图判断中的应用。本文在上述工作的基础上,针对群内各目标之间协同作用难以度量的问题,提出了基于增益

系数的群目标综合威胁评估计算模型。综合考虑敌我作战群空战能力的对比，以及群内各目标对于群威胁系统的增益情况，计算得到群目标的综合威胁值。然后，本文引入粒子群优化算法，通过构建合适的打击意图判断模型，结合计算出的群目标综合威胁值判断敌方群目标的打击意图，判断出的结果可用于后续的任务规划和决策制定。

**关键词：**单目标威胁评估，目标分群，主要威胁目标判断，群综合威胁评估，打击意图判断

## ABSTRACT

Due to the increased pace of modern warfare and the dramatic increase in battlefield information, there is an ever-increasing amount of battlefield information to process and commanders are under increasing cognitive pressure. The purpose of threat assessment is to assist the commander in quickly quantifying the battlefield situation, allowing for more accurate and efficient tactical decision making. Therefore, how to complete the target threat assessment in a reasonable and efficient manner is one of the key considerations in today's warfare.

In this thesis, we focus on air-to-air combat as the background, and study the relevant technologies and applications of air target threat assessment. Firstly, a single-target threat assessment technique is implemented. Then, when the number of battlefield targets increases, a reasonable grouping of battlefield targets is completed, and the targets that play a major role in the threat posed by the enemy battle group to our group are determined based on the principle of maximum threat, i.e. the main threat targets. Finally, the comprehensive threat value of the group targets is calculated and the strike intent of the group targets is determined. It is worth noting that the combined threat value of a group of targets is not a simple addition or multiplication of the threat values of individual targets within the group, but a more objective and quantitative value that takes into account the air combat capabilities of both enemy and enemy groups and the degree of gain of each target within the group to the group threat system. The main work and innovation points of this thesis are as follows:

(1) Calculation of single target threat values based on combined weights and determination of threat levels and calculation of the degree of our dominance. Firstly, this thesis considers air combat threat indicators from three perspectives: air combat capability, air combat opportunity and air combat intent, and constructs a set of air combat threat assessment indicators system by analysing and quantifying these three indicators. Then the existing threat assessment algorithm is improved: the hierarchical multi-expert evaluation method is used to avoid the problem of excessive subjectivity of a single expert in the fuzzy hierarchical analysis method; the CRITIC method is improved to solve the problem of data error when the average value of each indicator is too different; and the weight of the combination of indicators is solved based on the idea of game theory, which is the combined

result of the weights of the indicators derived from the improved algorithm. The combined weight is the result of the improved algorithm. Finally, the threat value of a single target is derived based on the combined weights of the threat indicators. In order to give the pilot a more intuitive understanding of the battlefield situation, the threat level of the target is graded and our dominance at this point in time is solved based on the calculated threat value of the single target. After determining the threat level of the enemy targets, the analysis of the battlefield situation in conjunction with our dominance ratio at this time can better assist pilots in making their next decisions.

(2) Research on battlefield target grouping and the techniques for determining the main threat targets within the group. Firstly, to cluster the targets in the battlefield space, this thesis adopts the battlefield target clustering method based on the OPTICS algorithm, and improves the calculation of the similarity of the targets and the efficiency of the algorithm, in order to meet the needs of the complex air combat environment for the accuracy and real-time of battlefield clustering. and real-time. Then, based on the calculated threat values of single targets within the swarm, the thesis uses the grey correlation algorithm to determine the targets within the enemy swarm that play the main role in the swarm threat assessment at this time, i.e. the main threat targets, laying the foundation for the next step of swarm target integrated threat value calculation.

(3) Integrated threat assessment of group targets based on gain coefficients and its application in the determination of strike intent. Based on the above-mentioned work, this thesis proposes a model for calculating the integrated threat assessment of group targets based on gain coefficients, in view of the problem that it is difficult to measure the synergy between targets in a group. Taking into account the comparison of the air combat capability of the enemy and our combat group, as well as the gain of each target in the group to the group threat system, the integrated threat value of the group target is calculated. Then, this thesis introduces a particle swarm optimisation algorithm to determine the strike intent of enemy swarm targets by constructing a suitable strike intent judgement model and combining the calculated swarm target integrated threat value, and the judgement results can be used for subsequent mission planning and decision making.

**Keywords:** Single Target Threat Assessment, Target Clustering, Main Threat Target Judgment, Group Comprehensive Threat Assessment, Strike Intent Judgment

## 插图索引

图 1.1	决策级融合过程图 .....	1
图 1.2	论文结构安排图 .....	8
图 2.1	威胁评估四级模型 .....	10
图 2.2	空战单目标威胁评估要素框架图 .....	12
图 2.3	空战能力威胁要素评估 .....	13
图 2.4	实时态势威胁层次图 .....	18
图 2.5	角度威胁示意图 .....	19
图 2.6	敌我探测范围与攻击范围示意图 .....	20
图 2.7	模糊层次分析法流程图 .....	25
图 2.8	CRITIC 算法流程图 .....	28
图 2.9	各级专家权重结果对比图 .....	36
图 2.10	客观权重图 .....	38
图 2.11	主客观权重对比图 .....	39
图 2.12	权重对比图 .....	40
图 2.13	威胁值与优势占比度分析图 .....	41
图 3.1	群组作战组成关系图 .....	43
图 3.2	DBSCAN 定义示意图 .....	46
图 3.3	OPTICS 算法流程图 .....	48
图 3.4	灰色关联算法流程图 .....	53
图 3.5	群内主要威胁目标判断算法流程图 .....	55
图 3.6	Iris 数据集标记图 .....	56
图 3.7	不同参数取值下 DBSCAN 算法仿真对比图 .....	56
图 3.8	MinPts=5 时 OPTICS 仿真结果图 .....	58
图 3.9	战场数据集标记状态图 .....	59
图 3.10	改进 OPTICS 算法可达距离图 .....	60
图 3.11	改进 OPTICS 算法分群结果图 .....	60
图 3.12	改进 OPTICS 算法分群结果三视图 .....	61
图 3.13	仿真一战场相对位置图 .....	62
图 3.14	仿真二战场相对位置图 .....	64
图 3.15	仿真三战场相对位置图 .....	66
图 3.16	仿真四战场相对位置图 .....	67



图 4.1 群目标综合威胁值计算流程图 .....	75
图 4.2 粒子群优化算法流程图 .....	83
图 4.3 基于粒子群优化算法的群目标打击意图判断流程图 .....	86
图 4.4 平衡目标打击意图判断示意图 .....	87
图 4.5 不平衡目标打击意图判断示意图 .....	87
图 4.6 实验一仿真结果收敛图 .....	88
图 4.7 实验二仿真结果收敛图 .....	90

## 表格索引

表 2.1	量化标尺对应值表 .....	13
表 2.2	目标类型威胁度表 .....	13
表 2.3	瞄准修正系数表 .....	14
表 2.4	雷达体质衡量系数表 .....	15
表 2.5	光电体质衡量系数取值表 .....	16
表 2.6	操作性能参数表 .....	16
表 2.7	电子对抗能力量化取值表 .....	17
表 2.8	作战行动威胁值表 .....	22
表 2.9	0.1~0.9 标度法 .....	24
表 2.10	威胁等级对应表 .....	32
表 2.11	6 个目标运动信息以及空战意图原始数据表 .....	33
表 2.12	目标空战能力原始数据表 .....	33
表 2.13	敌我双方空战能力指数 .....	33
表 2.14	敌方目标各指标威胁量化值 .....	34
表 2.15	I 级专家决策意见表 .....	34
表 2.16	I 级专家分析结果 .....	35
表 2.17	II 级专家决策意见表 .....	35
表 2.18	II 级专家分析结果 .....	35
表 2.19	III 级专家决策意见表 .....	36
表 2.20	III 级专家分析结果 .....	36
表 2.21	主观权重汇总表 .....	37
表 2.22	原始数据正向化处理表 .....	37
表 2.23	改进 CRITIC 法求解客观权重结果表 .....	38
表 2.24	组合权重结果 .....	39
表 2.25	6 个空中目标的威胁值 .....	40
表 2.26	我方优势度 .....	40
表 2.27	我方优势占比度 .....	41
表 3.1	飞机功能分析表 .....	53
表 3.2	eps=0.5,MinPts=10 聚类情况表 .....	57
表 3.3	eps=0.4,MinPts=10 聚类情况表 .....	57
表 3.4	eps=0.42,MinPts=6 聚类情况表 .....	57

表 3.5	OPTICS 聚类结果表 .....	58
表 3.6	DBSCAN 算法与 OPTICS 算法对比表 .....	58
表 3.7	聚类结果正确率和运行时间对比表 .....	61
表 3.8	仿真一敌方运动信息数据表 .....	62
表 3.9	仿真一我方运动信息数据表 .....	62
表 3.10	仿真一各目标威胁值 .....	63
表 3.11	仿真一各目标灰色关联度 .....	63
表 3.12	仿真二敌方运动信息数据表 .....	63
表 3.13	仿真二各目标威胁值 .....	64
表 3.14	仿真二各目标灰色关联度 .....	64
表 3.15	仿真三敌方运动信息表 .....	65
表 3.16	仿真三我方运动信息表 .....	65
表 3.17	仿真三各目标威胁值 .....	66
表 3.18	仿真三各目标灰色关联度 .....	66
表 3.19	仿真四我方运动信息表 .....	67
表 3.20	仿真四各目标威胁值 .....	68
表 3.21	仿真四各目标灰色关联度 .....	68
表 4.1	作战目标之间的相互增益程度等级划分 .....	72
表 4.2	$E_1$ 群内各目标信息表 .....	76
表 4.3	$G_1$ 群内各单位信息表 .....	76
表 4.4	$E_1$ 群内各目标相互增益表 .....	76
表 4.5	$E_1$ 群内各目标增益系数表 .....	77
表 4.6	$E_1$ 群内各目标威胁值 .....	77
表 4.7	$E_2$ 群内各目标信息表 .....	77
表 4.8	$E_2$ 群内各目标增益系数 .....	78
表 4.9	$E_2$ 群内各目标威胁值 .....	78
表 4.10	$G_2$ 群内各单位信息表 .....	78
表 4.11	$E_3$ 群内各目标的威胁值 .....	79
表 4.12	实验一敌方群目标综合威胁值表 .....	88
表 4.13	实验一敌方作战群打击意图判断结果 .....	89
表 4.14	实验二敌方群目标综合威胁值表 .....	89
表 4.15	实验二敌方作战群打击意图判断结果 .....	90

## 符号对照表

符号	符号名称
$\sqrt{\quad}$	开根号
$\ln$	以常数 e 为底的对数
$\sum$	连加符号
$  $	绝对值
$\min$	最小值
$\max$	最大值
$\  \cdot \ _2$	向量的 2-范数

## 缩略语对照表

缩略语	英文全称	中文对照
AHP	Analytic Hierarchy Process	层次分析法
CRITIC	Criteria Importance Though Intercriteria Correlation	层间相关性的 重要性准则
DBSCAN	Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise	基于密度的噪声应用空 间聚类
FAHP	Fuzzy Analytic Hierarchy Process	模糊层次分析法
FD-TODIM	Fuzzy Dynamic Interactive Multi- criteria Decision-making	模糊动态交互式多准则 决策
JDL	Joint Directors of Laboratories	美国联合领导实验室
OPTICS	Ordering Points To Identify the Clustering Structure	用于识别聚类结构的排 序点
TOPSIS	Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution	逼近理想解排序法

# 目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 国外研究现状.....	2
1.2.2 国内研究现状.....	3
1.3 主要研究内容.....	5
1.4 论文章节安排.....	6
第二章 空战单目标威胁评估技术研究 .....	9
2.1 引言.....	9
2.2 目标威胁评估相关理论研究 .....	10
2.3 空战威胁评估指标选取与量化 .....	11
2.3.1 空战威胁评估指标选取.....	11
2.3.2 空战能力威胁要素评估.....	12
2.3.3 空战机会威胁要素评估.....	18
2.3.4 空战意图威胁要素评估.....	22
2.4 基于组合权重的空战单目标威胁评估算法研究 .....	22
2.4.1 基于改进 FAHP 法求解主观权重.....	22
2.4.2 基于改进 CRITIC 法求解客观权重 .....	26
2.4.3 基于组合权重的空战单目标威胁值计算 .....	29
2.4.4 威胁评级与优势占比度计算.....	31
2.5 实验仿真分析.....	32
2.5.1 仿真场景设定.....	32
2.5.2 威胁指标计算.....	33
2.5.3 主观权重仿真.....	34
2.5.4 客观权重仿真.....	37
2.5.5 单目标威胁评估计算仿真与分析.....	38
2.6 本章小结.....	41
第三章 战场目标分群与群内主要威胁目标判断技术研究 .....	43
3.1 引言.....	43
3.2 空战环境下目标分群算法研究 .....	43
3.2.1 聚类算法介绍.....	43
3.2.2 OPTICS 算法详细介绍 .....	47
3.2.3 基于改进的 OPTICS 算法的空战战场目标分群.....	49
3.3 群内主要威胁目标判断技术研究 .....	50

3.3.1 相关概念介绍.....	50
3.3.2 灰色关联分析算法基本原理.....	51
3.3.3 基于灰色关联分析算法的群内主要威胁目标判断技术研究 .....	53
3.4 实验仿真分析.....	55
3.4.1 战场目标分群实验仿真.....	55
3.4.2 群内主要威胁目标判断实验仿真.....	62
3.5 本章小节.....	68
第四章 群目标综合威胁评估及其在打击意图判断中的应用研究 ....	71
4.1 引言.....	71
4.2 空战群目标综合威胁评估算法设计 .....	71
4.2.1 群内目标相互增益评估.....	71
4.2.2 基于熵权法的增益矩阵计算.....	72
4.2.3 基于增益系数的群威胁值计算.....	74
4.2.4 群威胁计算仿真与分析.....	76
4.3 基于粒子群优化算法的目标打击意图判断技术研究 .....	79
4.3.1 相关算法介绍.....	79
4.3.2 粒子群优化算法详细介绍.....	80
4.3.3 群目标打击意图判断模型的建立.....	83
4.3.4 基于粒子群优化算法的打击意图判断技术研究 .....	85
4.3.5 群目标打击意图判断仿真分析.....	86
4.4 本章小节.....	90
第五章 总结与展望 .....	91
5.1 研究工作总结.....	91
5.2 未来工作展望.....	92
参考文献.....	93

## 第一章 绪论

### 1.1 研究背景及意义

在现代战争中，随着世界军事技术的发展和战争形态的改变，传统的空军作战模式已经无法适应现代战争的节奏，全方位一体化作战方式成为了信息化条件下空军的基本作战模式。而随着科学技术的不断发展，武器装备的更新换代使得敌我双方军事力量构成更加多元化，海量的战场信息与战争环境的巨大改变给指挥决策人员快速研判战场态势带来了巨大挑战。因此在这种复杂环境下，构建更加精准高效的威胁评估模型，使指战员能够基于该模型计算出的威胁评估结果更为有效的制定战术决策，具有重大的军事意义。

威胁评估是信息融合的重要概念之一，它属于信息融合中的决策级融合。一般来说，信息融合<sup>[1-2]</sup>大致可以分为三个级别，即数据级融合、特征级融合和决策级融合。层级不同，信息融合需要的信息不相同，其作用也不尽相同。数据级融合的作用是将传感器接收到的目标原始数据进行融合，它是最基础也是最底层的信息融合；而特征级融合处于中间位置，它位于数据级融合之后，决策级融合之前，作用是将从数据级融合处接收到的较为抽象的特征信息进行融合后传给决策级融合；而决策级融合则是对接收到的信息进行最终的分析处理，融合结果将作为指战员制定决策的依据。决策级融合过程如图 1.1 所示。



图1.1 决策级融合过程图

从决策级融合过程图可以看出，威胁评估处于承上启下的阶段，它将接收到的态势评估数据如敌目标属性以及运动状态等信息，结合实际的战场态势，综合考虑敌我双方战机的作战效能、运动信息(速度、航向角等)以及敌方的作战行动等多方面因素后，对目标各个作战指标进行融合量化，最终形成综合的战场威胁评估报告，将其传递给决策制定者，即指战员，指战员通过报告制定合理的战术决策。威胁评估是根据敌方作战能力以及战场态势来评估敌方作战平台威胁程度的过程，由于现代战争是信息化的战争，赢得战争的前提与关键是指战员能够快速了解与掌握当前的战场局势以及敌方目标对我方作战单位的威胁高低，以便做出合理的决策进行应对。但是对于空战平台而言，在信息化战争时代的大背景下，所需要面临的情况越来越复杂，这使得



威胁评估相关技术在军事领域中的地位愈发重要,研究的必要性也在逐渐增强。

空战威胁评估是一个涉及因素众多、系统结构复杂的工程,由于战争实时性极强的特点,对于威胁评估以及决策制定的容错率要求更低。在短时间内进行大量数据的处理,对于战术指挥而言是一项巨大挑战,因此建立一套合理的威胁评估体系势在必行。由于威胁评估自身的复杂性,在对目标进行威胁评估时,需要将威胁评估的过程分解为若干个子模块(如指标选取、指标量化等),然后分析、解决各个子模块,最后综合各个子模块的结果形成综合的目标威胁值。如前文所言,威胁评估属于高层次的数据融合,通过预警雷达探测识别获取所需要的战场信息,如目标的类型、速度、航向角、位置等关键信息,然后根据此时的态势信息推断出目标的作战意图,结合敌我双方的作战能力,以定量的方式对目标的威胁大小做出估计。而威胁评估实时性极强的特点就要求我方需要不断的捕获战场信息对敌方作战能力与作战行动进行分析,然而交战过程中敌方能够采取欺骗、干扰等手段,使得我方获得的数据具有不确定性、不完整性的特点,威胁评估领域仍然具有极大的挑战性。

综上,在信息化战争时代的大背景下,威胁评估已经成为现代战争体系中的重要一环。合理的目标威胁评估可以有效提高指战员作战指挥的能力并极大的减少主观臆断存在的风险,优化我方作战部署,提高我方的作战效率和作战质量,因此建立起科学准确的威胁评估体系已迫在眉睫。同时,由于现代战争节奏的加快以及战场信息的大幅增加,威胁评估面临着更加艰巨的挑战。因此,更加深入细致的研究威胁评估相关技术具有较强的必要性。

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 国外研究现状

国外关于 STA<sup>[3]</sup> (Situation and Thread Assessment,态势和威胁评估) 技术研究较早,发展也较为迅速,其概念在二十世纪八十年代被美国国防部提出以后,各国专家对相关领域展开了广泛的研究工作。

美国联合领导实验室(Joint Directors of Laboratories,JDL)<sup>[4]</sup>认为:威胁评估作为高层次的数据融合处理过程,重点是在对敌方的作战性能、作战意图以及当前运动信息等因素评估的基础上,量化判断敌方对我方的威胁程度。1997年,R.T.Antony<sup>[5]</sup>提出了与 JDL 基本一致的观点:威胁评估不仅仅需要对敌方的威胁程度进行量化,还需要推断敌方的作战意图。对于威胁评估而言,其更侧重对敌方威胁程度的量化,其量化结果可以直白的显示出敌方对我方的威胁大小;而态势估计则侧重于呈现敌方的行为模式。1999年,Alan N. Steinberg<sup>[6]</sup>对相关概念进行了扩充,他认为要想得到更为准确的威胁评估结果,除了要考虑敌方作战能力以及作战意图以外,还需要考虑我方防

御能力的强弱对于威胁评估的影响。同年, Lambert<sup>[7]</sup>则提出威胁评估应该是从我方利益最大化的角度出发, 评估当前态势下敌方对我方的威胁程度的想法。2000 年, Gonsalves<sup>[8]</sup>等人提出了基于遗传算法的威胁评估方法, 运用遗传算法预测目标的行为, 但是受限于迭代次数, 算法结果会出现些许误差, 而且无法满足战场实时性的需求。2002 年, Wright<sup>[9]</sup>等人针对战场信息不确定的问题, 将目标各个威胁指标作为目标节点, 战场态势作为关键节点, 使用贝叶斯理论构建了威胁评估体系。但是贝叶斯网络存在明显缺点, 计算时过于依赖专家经验, 主观性过强且精度无法保证, 并且评估时需要进行大量的计算, 无法满足作战实时性的需求。同年, Hinman M<sup>[10]</sup>等人在对数据融合技术研究的基础上, 对传统的融合算法和启发式推理技术进行了创新, 对威胁评估技术进行了改进。2007 年, Alessio Benavoli<sup>[11]</sup>等人提出了基于证据网络的威胁评估方法, 基于评估系统(VBS)框架, 通过实体网络和实体之间的关系进行威胁建模。关系中的不确定性由证据理论中定义的信念函数表示, 由此产生证据网络。通过证据网络实现了空中监视背景下的威胁模型表示和威胁的定量评估。2015 年, Ehsan 和 Javad<sup>[12]</sup>在对模糊集理论研究的基础上, 提出了一种基于模糊集理论的威胁评估方法, 构建了防空环境下的威胁评估模型, 并且为了提高威胁评估结果的精度, 在考虑较优参数的基础上, 引进了 11 个参数作为威胁评估指标。并通过实验仿真验证了该方法的有效性。2017 年, Hoyeop<sup>[13]</sup>等人基于神经网络的马尔科夫链建模构建了空中目标威胁评估模型, 该模型是一种利用雷达信息对敌方目标进行威胁评估的自动方法。根据防空导弹的射程将我方防区分为多个不连续的独立单元, 通过马尔科夫链预测敌方空中目标即将进入的区域, 并通过神经网络对其进行建模, 根据预测结果计算目标威胁值。

### 1.2.2 国内研究现状

相较于欧美国家而言, 我国对于威胁评估相关技术的研究起步较晚, 但随着近些年来国际形势的突变, 国家对于军事相关领域技术研究的愈发重视, 国内学者在威胁评估技术研究中投入了大量精力, 也取得了大量科研成果, 逐渐填补了我国关于威胁评估方法<sup>[14-15]</sup>和应用的空白。2000 年, 曲长文<sup>[16]</sup>等人根据战场态势变化复杂、实时性极强的特点, 提出了基于多属性决策的威胁评估模型和方法。通过建立决策模型, 使用层次分析法<sup>[17]</sup>对敌方目标的属性进行赋权, 并运用 TOPSIS 法根据各目标威胁值大小进行排序<sup>[18-19]</sup>。2008 年, 王永杰<sup>[20]</sup>提出基于 TOPSIS 方法的空中多目标威胁评估方法, 通过仿真验证, 该方法计算复杂度低, 能够有效的解决空中多目标来袭时各个目标的威胁值评估和目标的威胁排序。同年, 张堃和周德云<sup>[21]</sup>提出了新的多目标威胁评估方法。该方法针对传统 TOPSIS 方法在计算权重系数上存在的不足, 综合考虑了专家主观经验和客观属性对于评估系统的影响。在计算指标主观权重时, 将聚类算法

运用到威胁评估主观权重计算之中,通过聚类算法计算出各专家在专家群组中占据的个人权重,将其运用到群组 AHP 法中得到各威胁指标的主观权重。在计算指标客观权重时,使用熵权法计算各个威胁指标的客观权重,最后将二者计算的权重综合得到各个威胁指标的组合权重。并通过实验仿真验证了改进 TOPSIS 方法在空战威胁评估问题中的有效运用。2010 年,黄大荣和姜辉<sup>[22]</sup>在防空武器系统针对集群目标防御的火力分配问题上,提出了基于信息熵的威胁评估模型。该模型针对集群目标的特点,建立了合适的威胁评估指标体系,并给定了各个威胁指标的赋值规则,通过仿真验证了模型的有效性和合理性。同年,朱胜伟<sup>[23]</sup>结合威胁评估的特点,改进了主成分分析法,将原始数据转为主成分,充分反映了各指标之间的内部关系。2015 年,闵绍荣<sup>[24]</sup>等人针对舰艇防空的威胁评估问题,提出了基于变权 TOPSIS 法的威胁评估模型,针对常权重加权求和在威胁评估中所带来的评估结果不合理的问题,在威胁评估计算中引入变权理论,使得权重随着战场态势的改变而进行调整,通过实例仿真验证了该方法的合理性。同年,晏师励和李德华<sup>[25]</sup>提出了基于动态贝叶斯网络的威胁评估方法,使用贝叶斯网络推理软件 Netica 进行实验,验证了该方法用于评估空袭目标对我方作战阵地威胁程度的可行性。2017 年,针对防空作战中的目标威胁评估问题,张浩为<sup>[26]</sup>等人提出了基于改进灰色关联算法(IGCA)的空中来袭目标威胁评估方法。针对传统威胁评估方法仅评估目标当前时刻态势的问题,该方法对时间序列赋予权重,构造多时刻目标的威胁评估模型。实验证明,融合多个时刻目标信息的评估方法更加准确。2021 年,方诚喆<sup>[27]</sup>等人提出了一种基于 AHP-CRITIC 组合赋权的 VIKOR 空战威胁评估方法,先使用 AHP 方法给出专家对指标权重重要程度判断的量化结果,再使用 CRITIC 方法确定各指标之间的客观联系,求解出客观权重;使用 AHP-CRITIC 算法既避免了主观赋权法主观性过强的缺点,又避免了客观赋权法过于片面的问题,最后在使用 VIKOR 算法完成空战目标的威胁排序。同年,奚之飞等人<sup>[28]</sup>运用了灰色关联算法计算目标各威胁指标的权重,利用主成分分析(PCA)方法分析各个威胁指标之间的联系,去掉互相关联的指标,简化了威胁指标体系,提出了改进 GRA-TOPSIS 法计算目标的威胁值,并通过仿真验证了算法的有效性。2022 年,李威<sup>[29]</sup>等人为了避免 AHP 法确定指标权重时存在的单一专家主观性过强的问题,提出了一种基于聚类组合赋权的威胁评估方法。采用聚类分析下的群组 AHP 法确定主观权重,综合使用变异系数法得到的客观权重,进而得到各威胁指标的组合权重。同年,毋嘉伟<sup>[30]</sup>提出了模糊层次分析法-改进 D-S 证据理论(F-IDS)算法用于空中目标威胁评估。从仿真结果可以看出, F-IDS 算法计算出的威胁结果更具有多元性,并且不同目标之间的威胁度能够显著区分。同年,张堃<sup>[31]</sup>等人基于混杂态势信息,提出了基于 FD-TODIM 算法的空战多目标威胁评估方法。针对传统威胁评估方法“状态失衡”的问题,提出了基于变权理论的态势权重求解办法,并采用正态累计分布函数生成时间序列权重,解决

了属性参数与权重动态匹配的问题。

近年来,随着人工智能的快速发展,国内专家对智能算法在威胁评估领域的应用展开了探索。于博文<sup>[32]</sup>等人以 M-ANFIS-PNN 模型为基础,构建了基于神经网络的目标威胁评估模型。该模型在自适应模糊神经推理系统的基础上,针对威胁指标数量多、属性杂的问题,引入了前件影响矩阵和后件影响矩阵对威胁指标进行处理,并使用多项式神经网络替换自适应模糊神经推理系统的输出层,提高了威胁评估的数据精度。宁云晖和黄昱申<sup>[33]</sup>针对传统威胁评估适用性不强的问题,提出了基于深度学习的威胁评估方法,构建深度神经网络并使用相关数据集进行了训练,验证了该方法在威胁值计算方面的准确性。

### 1.3 主要研究内容

威胁评估的正确性在于战场原始数据的处理,本文将从战场原始数据的提取与处理出发,首先完成单目标威胁评估技术,然后对战场目标进行分群并且判断此时群内的主要威胁目标,最后构建合理的群目标综合威胁评估计算模型,并探讨其在群目标打击意图判断中的应用。本文的主要研究内容如下:

#### (1) 空战单目标威胁评估技术研究

单目标的威胁评估是整个空战综合威胁评估体系的基础,在敌我双方进行空中对抗的时候,单目标的威胁值既是敌方目标的威胁等级判定以及我方优势占比度计算的重要评估指标,又是后续敌方群内主要威胁目标判断以及群目标综合威胁评估计算的基础指标。单目标威胁评估技术是在对战场原始数据处理的基础上,将敌方各个目标的威胁指标进行量化,进而计算出目标威胁程度的技术。本文从三个角度考虑空战威胁指标:空战能力、空战机会以及空战意图,首先,对每个部分的威胁指标进行合理量化,然后再对传统的威胁评估算法存在的问题进行改进,最终形成基于组合权重的单目标威胁值计算方法。通过单目标威胁值评判此时敌方目标的威胁等级,并计算出此时战场环境下,我方作战单位的优势占比度。最后通过仿真验证本文提出的空战单目标威胁评估技术的合理性。

#### (2) 战场目标分群算法研究

由于现代空战并不是单对单的战斗,而是群组与群组之间的对抗,因此在研究群目标综合威胁评估技术之前要确定敌方目标的分群情况。本文对现有的聚类算法进行了充分研究,针对战场环境下目标数量多、分群数目未知和群内目标属性多维度的特点,使用基于密度的聚类算法来完成战场空间中目标的分群。在对常用的 DBSCAN 算法与 OPTICS 算法研究对比后,确定使用改进的 OPTICS 算法完成战场目标分群的效果更优。最后通过实验仿真验证 OPTICS 算法相比于 DBSCAN 算法关于目标分群

方面的优越性以及改进 OPTICS 算法相较于传统 OPTICS 算法在效率上的提升。

### (3) 群内主要威胁目标判断技术研究

由于空战环境下，每个作战群在当前战场态势下都会有一个主要进攻发起者，它相较于群内其他目标而言，在群威胁系统内发挥主要威胁作用，本文将其称为群内主要威胁目标。在计算出单目标威胁值以后，使用灰色关联算法判断出当前作战群内的主要威胁目标，进而为后续的群目标综合威胁评估计算提供有效支撑。最后通过实验仿真验证本文想法的合理性。

### (4) 空中群目标综合威胁评估技术研究

本文在实验室项目的基础上，就战场空间内敌方来袭群的综合威胁评估技术进行了研究。在完成战场目标的分群以及判断出群内主要威胁目标以后，本文提出了基于增益系数的群目标综合威胁评估计算方法。首先，通过熵权法求出群内各目标对于群系统的增益程度，即增益系数，然后基于空战单目标威胁评估模型计算出的群内各个敌方目标对我方作战单位的威胁值，结合双方群组的空战能力，最终得到敌方群目标的综合威胁值。通过实验仿真验证了本文提出的空战群目标综合威胁评估计算模型的合理性，为后续的敌群打击意图判定提供数据支持。

### (5) 群目标打击意图判断技术研究

由于威胁评估属于决策级融合的第二步，而一个完整的空战威胁评估体系仅仅计算到群综合威胁值就截止是没有办法让指战员对当前战场态势有更加直观的认知。为了能够更加高效直观的展现出此时双方群组的战场态势，还需要进一步对敌方群目标的打击意图进行判断，以方便我方指战员能够更加高效合理的做出战术决策。由于本文主要研究的是空战中目标的综合威胁评估技术，因此对于群目标的打击意图判断仅从现有算法的研究基础上进行，在对常用的多目标寻优算法研究分析以后，本文采用了粒子群优化算法对敌方群目标的打击意图进行判断。通过构建合适的打击意图判断模型，结合计算出的敌方目标群对我方作战群的群综合威胁值，实现敌方群目标的打击意图判断。最后通过实验仿真验证群目标综合威胁值在群目标打击意图判断中应用的合理性。

## 1.4 论文章节安排

第一章：绪论。首先，详细阐述了课题的研究背景与意义。然后，对威胁评估国内外发展现状进行了详细介绍。最后，对本文主要的研究内容以及论文的整体结构进行了详细说明。

第二章：空战单目标威胁评估技术的研究。首先对威胁评估的相关理论进行了介绍，然后从空战能力、空战机会以及空战意图三个角度考虑目标的威胁指标，对各部

分威胁指标进行了分析与量化。紧接着通过改进 FAHP 算法和改进 CRITIC 算法求出目标各威胁指标的主观权重与客观权重，最后基于博弈论的思想求出组合权重，结合各威胁指标的量化结果求出目标的威胁值，对敌方目标的威胁程度进行等级划分，并计算我方作战单位此时的优势占比度。最后通过举例对本章的算法进行仿真验证。

第三章：对战场环境下目标分群以及群内主要威胁目标判断技术进行研究。首先，对敌方目标进行战场分群，在对各聚类算法研究的基础上，采用改进的 OPTICS 算法完成战场目标分群。然后对本文提出的主要威胁目标概念进行了介绍，结合计算出的敌方群内各个目标的威胁值，使用灰色关联算法完成群内主要威胁目标的判断。最后，对本章提出的算法进行仿真验证。

第四章：群目标综合威胁评估计算以及群目标打击意图判断技术研究。本章主要分为两个部分，第一部分是在第二章和第三章的基础上，对于群目标综合威胁评估计算进行初步探索。本文提出了基于增益系数的群目标威胁计算的想法，构建群内各目标的相互增益评估矩阵，使用熵权法计算出各个目标对于群系统的增益系数，然后结合双方作战群的空战能力，以群内主要威胁目标作为群威胁的主要贡献者，结合各个次要威胁目标的单目标威胁值和增益系数求出群目标的综合威胁评估值。第二部分是对来袭群目标的打击意图进行判断，在对现有多目标寻优算法的研究基础上，通过构建合适的群目标打击意图判断模型，采用粒子群优化算法完成敌方群目标的打击意图判断。最后，对本章的群目标综合威胁评估算法和群目标打击意图算法进行了仿真验证。

第五章：总结与展望。对全文内容进行了总结与回顾，详细分析了本文研究工作中的优点与不足，并对未来进一步的研究方向提出了展望。

论文的整体结构及各个章节的主要研究内容如图 1.2 所示。

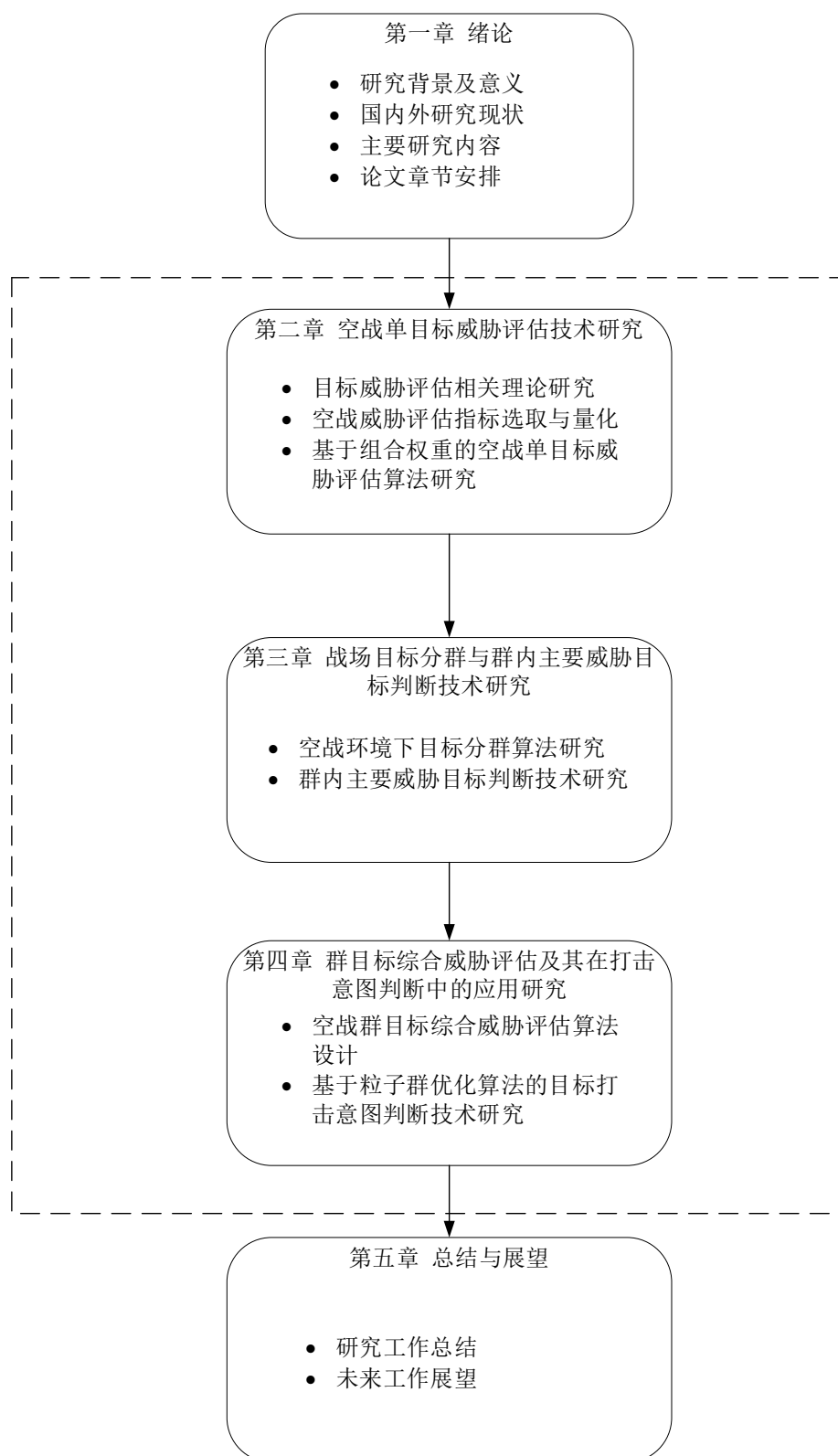


图1.2 论文结构安排图

## 第二章 空战单目标威胁评估技术研究

### 2.1 引言

随着现代战争技术的发展,各种高科技装备逐渐应用在作战领域,往往单个作战实体就会携带更多的作战信息,目标之间的影响程度也会加深,因此指挥员如何高效合理的进行决策是现代作战体系中值得研究的一环。战场威胁评估(Threat Assessment)作为信息融合(Information Fusion)中的第三级融合,属于高级信息融合,是指战员做出战术决策的重要参考指标之一。在对已有的文献研究中发现,威胁评估一般处于目标战场态势评估之后,在对已有的战场信息进行进一步的处理后,评估出此时目标对于我方作战单位的威胁程度,是敌我相对态势的一种分析。它又处于指挥决策之前,为指挥员分析情报以及做出战术部署提供有效的信息。

单目标威胁评估作为整个战场威胁评估体系的基础,它可以定量的计算出敌方目标对我方的威胁程度,既可以辅助我方飞行员做出战术决策,而且其结果还能作为群目标内主要威胁目标判断以及群目标综合威胁值计算的支撑。本章将对空战单目标威胁评估进行详细分析,主要包括目标威胁评估相关理论研究,单目标威胁评估要素的选取与量化以及单目标威胁评估技术的实现。

目标威胁评估相关理论研究主要介绍了目标威胁评估的相关内容,包括威胁要素的提取,威胁要素的量化,威胁值的计算以及威胁等级的确定。

单目标威胁评估指标的选取与量化则是在理论研究的基础上,结合本文空战的相关场景,对于单目标威胁评估中涉及到的相关指标进行量化,为后续单目标威胁值的计算提供相关数据支撑。

对于单目标威胁评估值的计算,首先要计算各个指标所占的权重。传统的威胁评估大多是采用主观赋权法,如层次分析法(Analytic Hierarchy Process,AHP)计算各指标的威胁权重,这种赋权方法过于依赖专家的个人经验,形成的权重过于主观,缺乏客观性。与之对应的赋权方法是客观赋权法,但是这种方法只依赖数据客观之间的联系,容易导致计算出的结果过于片面。因此,本文在对两种赋权方法的研究基础上,采用组合赋权的方式,即使用改进的模糊层次分析法计算威胁指标的主观权重,使用改进的 CRITIC 法计算威胁指标的客观权重,最后基于博弈论的思想计算出主观权重的主观因子与客观权重的客观因子,形成组合权重。通过组合权重计算出的单目标威胁值兼顾了主观赋权法的优点和客观赋权法的优点,形成的威胁值也更为客观合理。

在计算出目标的威胁值以后需要对目标的威胁程度进行等级划分,再结合计算出的我方优势占比度,能够使得飞行员对战场态势有更为直观的认知,更好的辅助飞行



员做好下一步的决策。

## 2.2 目标威胁评估相关理论研究

目标威胁评估<sup>[34]</sup>是根据敌我双方此时的作战态势来评估当前敌方的作战能力对我方作战单位威胁的大小,是敌方在当前态势下对我方威胁程度的量化评估,并且能为我方决策的制定提供信息支撑。常见的目标威胁评估有四级模型,主要包含以下四个内容:威胁要素的提取,威胁要素的量化,威胁值计算以及威胁等级确定。威胁评估四级模型如图 2.1 所示:



图2.1 威胁评估四级模型

### (1) 威胁要素提取

在战场环境中,敌方目标是一个携带大量信息的作战实体,其各种属性会影响最终的威胁评估结果。威胁要素根据属性可分为静态威胁要素与动态威胁要素,静态威胁要素是指目标本身的作战能力指标,是目标的固有能力。在目标自身不发生变化的情况下,即使时间发生了变化,但是指标并不会发生改变。而动态威胁要素指的是目标受到当前战场态势的影响而发生改变的指标,随着作战过程的不断推进,指标随着时间的变化而发生改变。

①目标静态威胁要素。主要包括目标类型以及目标固有能力。目标类型根据作战场景的不同,主要分为空、天、地和海四种场景目标:空天场景中主要作战单位有战斗机、侦察机等载人飞行器以及导弹、无人机等无人飞行器;陆地场景中主要作战单位有坦克、步战车等移动目标以及打击阵地等固定目标;海上/下主要作战单位主要有舰艇,潜艇等。目标固有能力则包含目标的具体型号、机动能力、火力配置、探测能力等作战能力信息。

②目标动态威胁要素。指的是战场中目标的各种动态信息,主要是目标的位置、航向角和速度等动态数据,这类信息随机性更强,在目标威胁评估中占据重要位置。

在实际作战中,目标的静态威胁要素与动态威胁要素并不是孤立存在的,其指标之间存在着直接或间接的联系,需要全面分析各个指标之间的联系,综合化评估目标的威胁程度,使结果更加合理准确。

### (2) 威胁要素量化

威胁要素量化在威胁要素提取以后,其主要作用是以定量的方式描述目标各个威胁要素,而量化结果是否合理直接影响威胁结果的合理性。由于目标威胁要素分为静

态和动态两种类型，类型不同，其量化方式也不相同。如静态威胁要素，通常使用经验函数进行量化，得到的量化值相对客观。而动态威胁要素，一般没有经验函数，需要结合敌我双方的实时运动数据来计算。如在空战中对于速度威胁要素的量化，既要考虑当前目标的速度，也要考虑我方的速度。

### (3) 威胁值计算

威胁值计算是在威胁要素的提取和威胁要素量化的基础上，使用合理的算法计算出目标威胁值，从而完成对敌方目标威胁程度的量化。

### (4) 威胁等级确定

威胁等级确定是在威胁值计算之后，根据计算出的目标威胁值可以对目标进行威胁排序，使作战员清楚知道当前战场环境下对其威胁程度最高的目标，但无法主观描述敌方目标对我方单位威胁程度的高低。此时可以根据计算出的威胁结果值，确定目标的威胁等级，这更有利于作战员了解当前的战场态势，采取更加合理的战术措施。

## 2.3 空战威胁评估指标选取与量化

### 2.3.1 空战威胁评估指标选取

空空作战环境下，威胁评估指标选取的是否合理直接影响后续的威胁值计算的准确性。因此，在构建威胁评估指标体系时，应该结合空中战场的实际情况，构建合理科学的指标评估体系。

本文在查阅大量文献以及实验室项目的基础上，将空战威胁要素中目标的静态威胁要素和动态威胁要素进一步细化，从三个角度考虑空战威胁评估指标：空战能力、空战机会以及空战意图。其中，空战能力和空战机会指的是对目标的固有属性以及实时的运动信息进行定量分析；空战意图则是根据目标类型和当前的行为方式进行定性分析，判断目标此时的作战状态，这对于后续的威胁值计算是否合理有很大的影响。

综上所述，本文构建了空战威胁评估指标体系。其中，空战能力主要是目标的类型、各项性能参数等，空战机会则包含目标的位置、速度、高度等，空战意图则是指目标此时的作战行动。如图 2.2 所示：

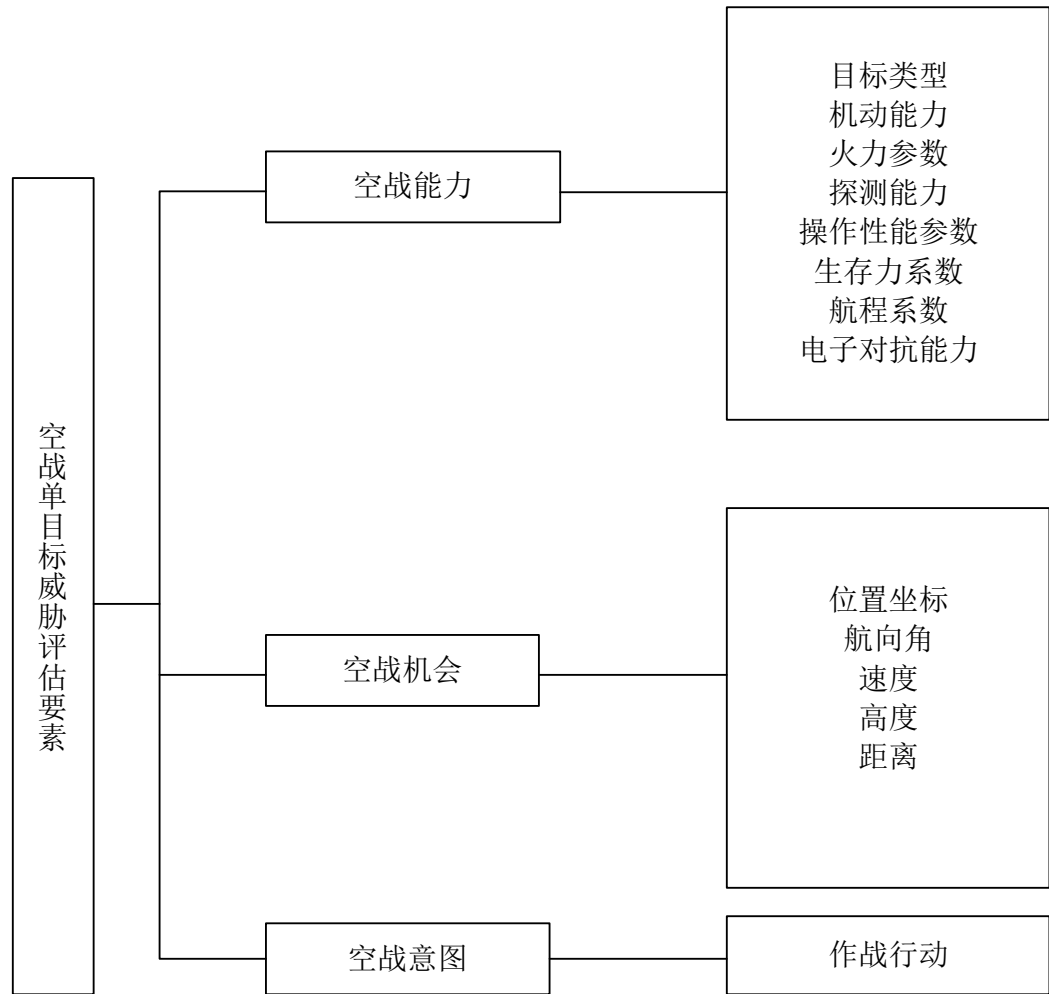


图2.2 空战单目标威胁评估要素框架图

### 2.3.2 空战能力威胁要素评估

飞机的空战能力指的是飞机的固有属性，本节在实验室项目的基础上，选取以下指标作为目标空战能力组成要素，分别为：目标类型、机动能力、火力参数、雷达探测能力、操作性能参数、生存力系数、航程系数以及电子对抗能力<sup>[35]</sup>。本文将空战能力威胁要素评估总共分为三层，结合图 2.3 分析，首先，提取目标的空战能力组成要素。其次，计算敌我双方的空战能力指数，即对各个组成要素进行量化。最后评估敌方的空战能力威胁值。

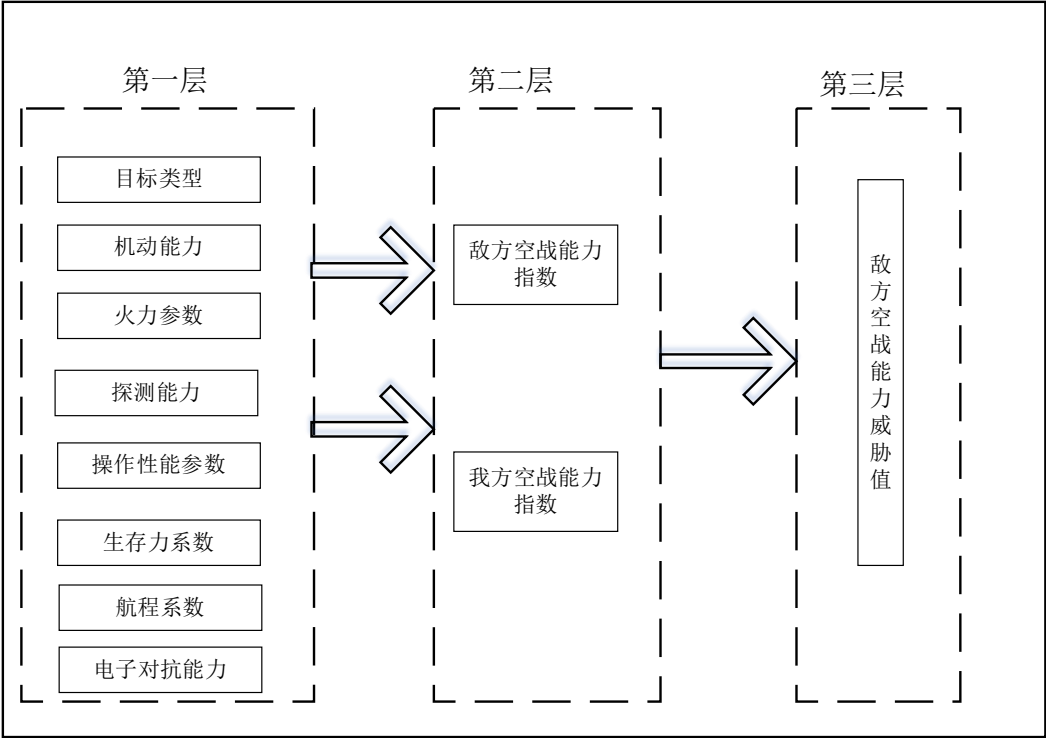


图2.3 空战能力威胁要素评估

(1) 目标类型

目标类型直接反映了目标的特点和性能，决定了目标的作战能力和在战场上起到的作用。空战场景中常见的目标主要有战斗机、侦察机、电子战飞机等，不同类型的目标所携带的武器装备不尽相同，其战术侧重点也不相同，因此如何对目标类型进行合理量化是对空战能力定性分析的重要支撑。由于目标类型的威胁程度是一种定性判断，因此使用模糊评价语言对其进行定性判断。使用指标标度法对目标类型的威胁度进行划分，总共分为 7 级<sup>[36]</sup>，并通过标尺量化法将定性分析的语言值映射为量化值，具体的对应值如表 2.1 所示<sup>[37]</sup>。

表2.1 量化标尺对应值表

等级	很大	大	稍大	中等	稍小	小	很小
分数	0.9	0.7	0.6	0.5	0.4	0.2	0.1

表 2.2 给出简单例子，实际计算时，威胁度可根据专家经验给出。

表2.2 目标类型威胁度表

目标类型	战斗机	侦察机	电子战飞机	武装直升机	轰炸机
威胁度	很大	小	小	稍小	很小

## (2) 机动能力

目标机动能力指的是目标在飞行过程中迅速改变飞行姿态的能力,其作为目标空战能力的重要指标之一,机动性能越强的飞机,在战斗时的突防、攻击以及遇险时撤离战场的能力也越强,机动能力的计算公式如式(2-1)。

$$T_{JD} = N_{y_{\max}} + N_{y_{\text{盘}}} + \frac{SEP * 9}{300} \quad (2-1)$$

式中,  $N_{y_{\max}}$  为最大允许过载,  $N_{y_{\text{盘}}}$  表示最大稳定盘旋过载,  $SEP$  表示目标最大单位重量剩余功率。

## (3) 火力参数

火力参数是目标空战能力的直接体现。常见的武器装备有航炮和导弹两种,计算公式如式(2-2)。

$$T_{HL} = Fir_1 + Fir_2 \quad (2-2)$$

式中,  $Fir_1$  表示航炮的火力系数,  $Fir_2$  表示导弹的火力系数。

对于航炮的火力系数,其计算如式(2-3)。

$$Fir_1 = K * \frac{Rpm}{1200} * \left(\frac{Srpm}{1045}\right)^2 * \frac{G}{400} * \frac{D}{30} * N \quad (2-3)$$

式中,  $K$  为瞄准修正系数、 $Rpm$  为弹速、 $Srpm$  为弹初速、 $G$  为弹重、 $D$  为弹口直径、 $N$  为航炮配置数量,各常数均为标准值。 $K$  为瞄准修正系数,取值情况如表 2.3 所示<sup>[38]</sup>。

表2.3 瞄准修正系数表

类型	瞄准系数
固定光环瞄准具	0.4~0.6
陀螺活动光环瞄准具	1.0
快速瞄准具	1.2~1.5

而导弹的火力参数计算如式(2-4)所示。

$$Fir_2 = R_{射} * H_{射} * P_k * \frac{\theta_{功}}{360} * \frac{N_y}{35} * \frac{\theta_{跟}}{20} * \frac{\theta_{离}}{40} * \sqrt{N} \quad (2-4)$$

式中,  $R_{射}$  表示导弹有效射程,  $H_{射}$  表示允许发射高度差,  $P_k$  表示导弹单发杀伤概率,  $\theta_{功}$  表示总攻击角,  $N_y$  表示导弹最大过载,  $\theta_{跟}$  表示最大跟踪角速度,  $\theta_{离}$  表示总离轴发射角,  $N$  表示该类型导弹挂载数量<sup>[39]</sup>。

#### (4) 探测能力

飞机探测能力主要指的是空战时发现目标的能力, 探测能力的强弱往往左右着战斗的胜负, 探测能力越强, 发现目标的概率就越大, 在战斗时往往处于有利地位。因此, 飞机探测能力的强弱对于目标的威胁评估而言有着重要影响。其计算公式如式(2-5)。

$$T_{TC} = D_{radar} + D_{red} + D_{see} \quad (2-5)$$

式中,  $D_{radar}$  指的是雷达探测能力,  $D_{red}$  表示红外激光等光电探测能力,  $D_{see}$  表示飞行员目视能力。如果是无人机, 则不考虑飞行员目视能力。

其中,  $D_{radar}$  的计算公式如式(2-6)。

$$D_{radar} = \left( \frac{dis^2}{4} \right) * \frac{angl}{360} * p * k * (num_1 * num_2)^{0.05} \quad (2-6)$$

式中,  $dis$  表示最大发现目标距离,  $angl$  表示最大搜索方位角,  $p$  表示发现目标概率,  $k$  表示雷达体质衡量系数, 取值如表 2.4 所示。  $num_1$  表示同时跟踪目标数量,  $num_2$  表示同时攻击目标数量。

表2.4 雷达体质衡量系数表

仪器说明	取值
测距器	0.3
无角跟踪能力雷达	0.5
圆锥扫描雷达	0.6
单脉冲雷达	0.7
脉冲多普勒雷达	0.8~1.0

对于光电探测能力, 计算方式与雷达探测能力计算公式一致, 唯有衡量系数不同, 其公式如 (2-7)。

$$D_{red} = \left( \frac{dis^2}{4} \right) * \frac{angl}{360} * p_r * k_r * (num_1 * num_2)^{0.05} \quad (2-7)$$

式中，除了 $k_r$ ，其余指标与雷达探测能力计算时所用指标基本一致。 $k_r$ 的取值如表 2.5 所示。

表2.5 光电体质衡量系数取值表

光电仪器说明	单元件亮点式红外探测器	多元固定式探测装置	搜索跟踪装置
$k_r$ 取值	0.3	0.5	0.7-0.9

#### (5) 操作性能参数

飞机的操作性能与飞机操纵系统和数据显示装置有关，操纵系统与显示装置越先进，飞机的操作性能也就越高，其取值如表 2.6 所示。

表2.6 操作性能参数表

仪器	一般仪表及液压 助力操纵系统	平视显示器	电传操纵+平显	平显+下显+数据 总线及双杆技术
量化值	0.70	0.75	0.80	0.90

在表 2.6 的基础上，如果采用更加先进的 AR 技术，其操作性能量化值可以适当提高。

#### (6) 生存力系数

飞机的生存能力主要与飞机的几何尺寸(翼展和全长)以及雷达反射截面有关，其计算公式如式(2-8)所示。

$$T_{sc} = \left( \frac{10}{S} * \frac{15}{L} * \frac{5}{RCS} \right)^{0.0625} \quad (2-8)$$

其中， $S$  表示的是飞机的翼展， $L$  表示飞机的全长， $RCS$  表示雷达发射截面。

#### (7) 航程系数

航程系数关乎着飞机作战时的留空时间，是体现其空战能力强弱的重要因素之一，航程越远，其参与作战的作用也越大。计算公式如(2-9)所示。

$$T_{HC} = (voya / 1400)^{0.25} \quad (2-9)$$

式中,  $voya$  表示飞机的最大航程。

#### (8) 电子对抗能力

随着信息化技术的发展, 越来越先进的电子系统被安装在飞机上, 其在飞机作战过程中的作用也越来越重要。在空战环境中, 电抗能力强的飞机对敌方电子干扰、破坏的能力也越强, 能发挥的作战效能也越高。由于军事保密的需求, 电子对抗能力参数难以确定, 只能给出粗略的量化值, 其取值情况如表 2.7 所示<sup>[40]</sup>。

表2.7 电子对抗能力量化取值表

机载电子对抗设备	量化值
全向雷达告警系统	0.6
全向雷达告警系统+消极干扰投放系统	0.7
全向雷达告警系统+消极干扰投放系统+红外及电磁波积极干扰器	0.85
全向雷达告警系统+消极干扰投放系统+红外及电磁波积极干扰器+导弹预警系统	0.95

#### (9) 空战能力威胁值

空战中, 飞机空战能力的强弱, 与它的类型、机动性能、火力参数、雷达探测能力等息息相关, 综合上述因素的考量, 本文采用式(2-10)来计算作战单位的静态能力威胁值。

$$C = \lfloor \ln T_{JD} + \ln(\sum T_{HL} + 1) + \ln(\sum T_{TC}) \rfloor T_{LX} T_{HC} T_{CZ} T_{SC} T_{DK} \quad (2-10)$$

式中,  $C$  表示目标的静态能力威胁值,  $T_{JD}$  表示目标的机动能力,  $T_{HL}$  表示目标的火力参数,  $T_{TC}$  表示目标的雷达探测能力,  $T_{LX}$  表示目标类型量化值,  $T_{HC}$  表示航程系数,  $T_{CZ}$  表示操作性能参数,  $T_{SC}$  表示生存力系数,  $T_{DK}$  表示电子对抗能力。而敌方空战能力威胁值的计算需要综合考虑敌我双方的静态能力威胁值, 根据双方静态威胁值的比值大小来确定空战能力威胁值, 如式(2-11)所示。

$$STC = \frac{C_e}{C_m} \quad (2-11)$$

其中,  $C_e$  表示敌方静态能力威胁值,  $C_m$  表示我方静态能力威胁值。



### 2.3.3 空战机会威胁要素评估

在实际空战时,目标的空战机会威胁值受到其实时运动状态的影响,是一种实时性极强的指标。通过飞机上携带的各种电子侦察设备等获取敌方目标的实时运动状态,主要包括角度、速度、高度、位置等信息,将传感器探测到的各种信息进行数学建模,量化出具体的指标威胁值。结合图 2.4 进行分析,空战机会威胁评估主要包含三层,首先是获取战场目标的实时信息,然后对目标信息进行提取与量化,最后得到各指标的威胁量化值。

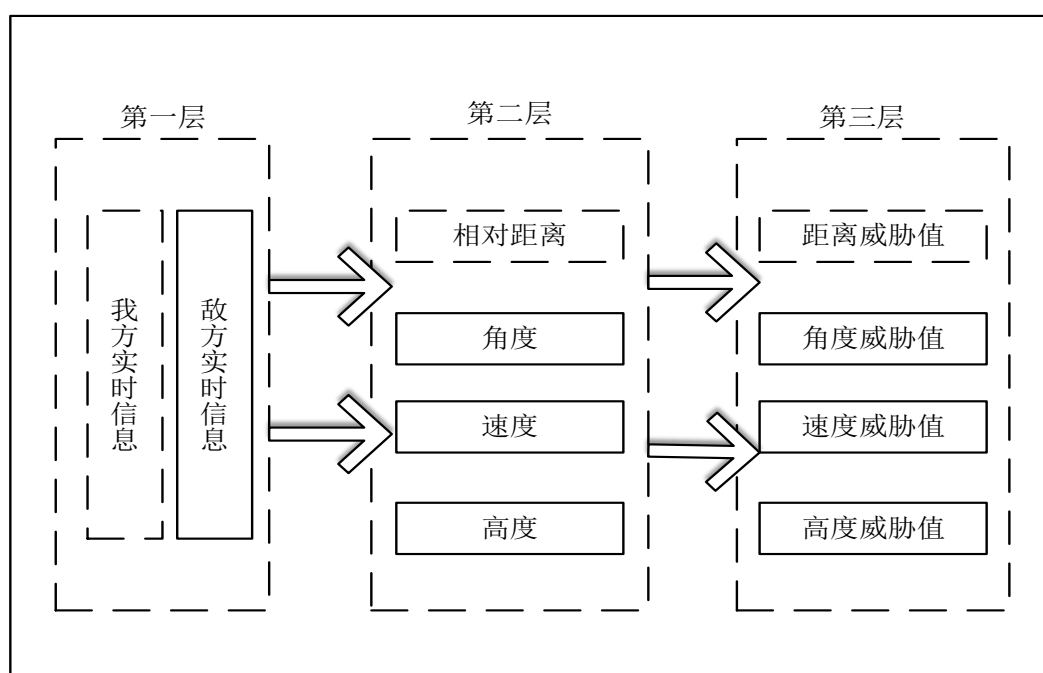


图2.4 实时态势威胁层次图

#### (1) 角度威胁值

衡量角度威胁值之前首先要明确角度的定义,角度指的是目标运动方向与欲攻击目标连线的夹角,进入角越大,目标对我方作战单位的威胁值越大,否则,威胁越小。

假设某次空战中我方作战飞机与敌方目标的相对位置如图 2.5 所示。图中 M 表示我方作战单位, E 表示敌方目标,  $v_m$  表示我方速度,  $v_e$  表示敌方速度,  $\alpha$  表示敌方航向与我方目标线的夹角(进入角),其取值范围为  $\alpha \in [-180^\circ, 180^\circ]$ ,  $\beta$  取值范围与  $\alpha$  一致。当目标进入角越大,其对我方发动进攻的可能性越大,其角度威胁值也越大。角度威胁值计算公式如(2-12)所示。

$$T_\alpha = \frac{|\alpha| + |\beta|}{360} \quad (2-12)$$

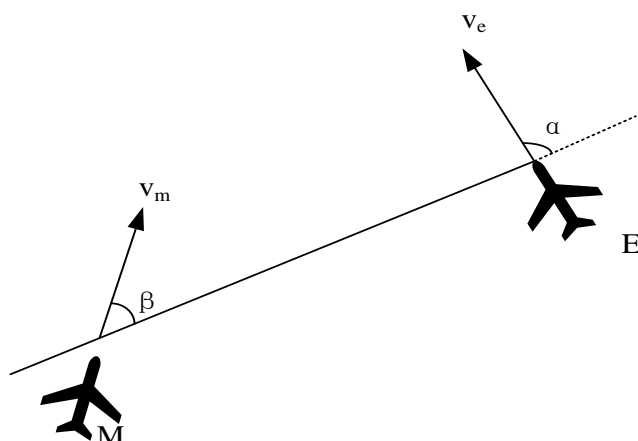


图2.5 角度威胁示意图

### (2) 速度威胁值

在空战过程中，根据敌方的作战速度可以在一定程度上判断出敌方的作战倾向。当目标的速度越大时，其做出决策的变化也就越强，我方单位对其做出战术预测以及拦截的难度也就越大，因此造成的威胁值也就越大。当敌方速度与我方速度相比的比值越大，则我方单位被打击的可能性也就越大。其计算公式如式(2-13)。

$$Tv = \begin{cases} 0.1 & v_e < 0.6v_m \\ -0.5 + \frac{v_m}{v_e} & 0.6v_m \leq v_e \leq 1.5v_m \\ 1.0 & v_e > 1.5v_m \end{cases} \quad (2-13)$$

### (3) 高度威胁值

空战环境下，敌我双方的飞行高度影响着被对方雷达锁定的可能性大小，当敌方目标飞行高度高于我方战机时，我方雷达锁定它的可能性变小，其威胁值相对较高，具体公式如式(2-14)所示。

$$Th = \begin{cases} 1 & h_e - h_m > 5km \\ 0.5 + 0.1 * (h_e - h_m) & 5km \geq h_e - h_m \geq -5km \\ 0.1 & h_m - h_e > 5km \end{cases} \quad (2-14)$$

式中， $h_e$ 表示敌方目标的飞行高度， $h_m$ 表示我方单位的飞行高度。

### (4) 距离威胁值

距离威胁值指的是由于敌我双方攻击距离以及雷达探测距离的不同,导致双方在作战过程中,威胁指数也不相同。双方的相对距离是威胁评估中的重要指标之一,图2.6给出了敌我双方攻击范围和雷达探测范围示意图,当敌方雷达以及攻击范围都大于我方单位时,此时我方受到敌方先手打击的可能性大大增加,其威胁值也越大。距离威胁值的计算可以分为六种情况计算,设我方雷达的探测距离为  $d_{m-radar}$ ,我方飞机携带导弹射程为  $d_{m-missile}$ ,敌方雷达的探测距离为  $d_{e-radar}$ ,敌方飞机携带导弹射程为  $d_{e-missile}$ ,双方距离为  $d$ ,其计算公式如下所示。

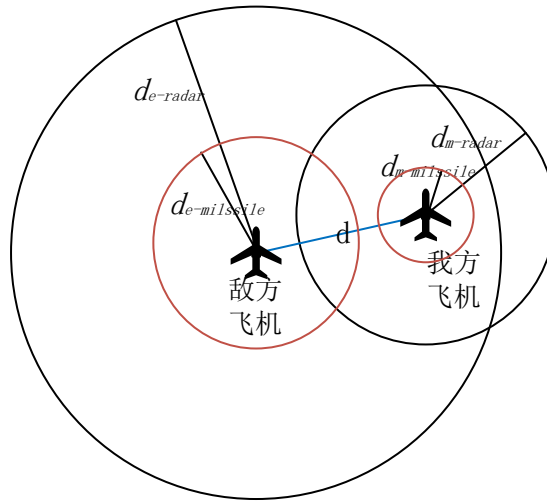


图2.6 敌我探测范围与攻击范围示意图

$$\textcircled{1} d_{e-radar} > d_{m-radar} > d_{e-missile} > d_{m-missile}$$

$$T_d = \begin{cases} 0.5 + \frac{0.3d}{d_{m-missile}} & 0 \leq d < d_{m-missile} \\ 0.3 + 0.5 \frac{d - d_{e-missile}}{d_{m-missile} - d_{e-missile}} & d_{m-missile} \leq d < d_{e-missile} \\ 0.3 + 0.7 \frac{d - d_{e-missile}}{d_{m-radar} - d_{e-missile}} & d_{e-missile} \leq d < d_{m-radar} \\ \frac{d - d_{e-radar}}{d_{m-radar} - d_{e-radar}} & d_{m-radar} \leq d < d_{e-radar} \\ 0 & d \geq d_{e-radar} \end{cases} \quad (2-15)$$

$$\textcircled{2} d_{e-radar} > d_{e-missile} > d_{m-radar} > d_{m-missile}$$

$$T_d = \begin{cases} 0.5 + \frac{0.3d}{d_{m-missile}} & 0 \leq d < d_{m-missile} \\ 0.8 + 0.2 \frac{d - d_{m-missile}}{d_{m-radar} - d_{m-missile}} & d_{m-missile} \leq d < d_{m-radar} \\ 1 & d_{m-radar} \leq d < d_{e-missile} \\ \frac{d - d_{e-radar}}{d_{e-missile} - d_{e-radar}} & d_{e-missile} \leq d < d_{e-radar} \\ 0 & d \geq d_{e-radar} \end{cases} \quad (2-16)$$

$$\textcircled{3} d_{e-radar} > d_{m-radar} > d_{m-missile} > d_{e-missile}$$

$$T_d = \begin{cases} 0.5 - \frac{0.3d}{d_{e-missile}} & 0 \leq d < d_{e-missile} \\ 0.2 + 0.1 \frac{d - d_{e-missile}}{d_{m-missile} - d_{e-missile}} & d_{e-missile} \leq d < d_{m-missile} \\ 0.3 + 0.7 \frac{d - d_{m-missile}}{d_{m-radar} - d_{m-missile}} & d_{m-missile} \leq d < d_{m-radar} \\ \frac{d - d_{e-radar}}{d_{m-radar} - d_{e-radar}} & d_{m-radar} \leq d < d_{e-radar} \\ 0 & d \geq d_{e-radar} \end{cases} \quad (2-17)$$

$$\textcircled{4} d_{m-radar} > d_{e-radar} > d_{m-missile} > d_{e-missile}$$

$$T_d = \begin{cases} 0.5 - \frac{0.3d}{d_{e-missile}} & 0 \leq d < d_{e-missile} \\ 0.2 + 0.1 \frac{d - d_{e-missile}}{d_{m-missile} - d_{e-missile}} & d_{e-missile} \leq d < d_{m-missile} \\ \frac{0.3(d - d_{e-radar})}{d_{m-missile} - d_{e-radar}} & d_{m-missile} \leq d < d_{e-radar} \\ 0 & d \geq d_{e-radar} \end{cases} \quad (2-18)$$

$$\textcircled{5} d_{m-radar} > d_{m-missile} > d_{e-radar} > d_{e-missile}$$

$$T_d = \begin{cases} 0.5 - \frac{0.3d}{d_{e-missile}} & 0 \leq d < d_{e-missile} \\ \frac{0.2(d_{e-radar} - d)}{d_{e-missile}} & d_{e-missile} \leq d \leq d_{e-radar} \\ 0 & d > d_{e-radar} \end{cases} \quad (2-19)$$

$$\textcircled{6} d_{m-radar} > d_{e-radar} > d_{e-missile} > d_{m-missile}$$

$$T_d = \begin{cases} 0.5 + \frac{0.5d}{d_{m-missile}} & 0 \leq d < d_{m-missile} \\ 0.3 + 0.7 \frac{d - d_{m-missile}}{d_{e-missile} - d_{m-missile}} & d_{m-missile} \leq d < d_{e-missile} \\ \frac{0.3(d - d_{e-radar})}{d_{e-missile} - d_{e-radar}} & d_{e-missile} \leq d < d_{e-radar} \\ 0 & d \geq d_{e-radar} \end{cases} \quad (2-20)$$

### 2.3.4 空战意图威胁要素评估

目标的空战意图是空战威胁评估的重要影响指标之一。因为在现代空战中，不同类型的飞机会根据不同的作战需求采取对应的作战行动，而不同的作战行动会对我方产生不同程度的威胁。一般空战中敌方的作战行动主要有攻击、空中拦截、巡逻、电子干扰、撤退逃逸、返航等。

由于本文主要考虑的是目标空战意图对于目标威胁评估的影响，具体的意图识别算法不在本文的讨论范围之内，因此仅在本节给出作战行动相应的量化结果。本文采用文献<sup>[41]</sup>的作战行动模型，给出空战意图量化值的简单例子，如表 2.8 所示。

表2.8 作战行动威胁值表

行动	攻击	空中拦截	电子干扰	巡逻	撤退逃逸
威胁值	1	0.8	0.5	0.3	0.2

## 2.4 基于组合权重的空战单目标威胁评估算法研究

### 2.4.1 基于改进 FAHP 法求解主观权重

目标的威胁评估是一个多属性决策的过程，它涉及到众多的威胁指标，并且没有合适的数学公式来表示各个威胁指标之间存在的联系。因此，就需要依赖于专家经验

判断指标的相对重要程度。在传统的威胁评估算法中,常使用层次分析法<sup>[42]</sup>来求解各指标的权重,虽然该方法是一种被广泛使用的多属性评价方法,但是其依然存在有许多缺点。层次分析法的关键步骤在于建立各指标之间的判断矩阵,而判断矩阵是否具有 consistency 将会直接影响到计算结果。在实际运用中,可以发现层次分析法具有以下不足:

缺点一:只由单个专家评判指标权重,选取结果严重依赖于该专家的偏好,主观性较大,一旦判断结果出现误差,影响最终的威胁评估结果。

缺点二:判断矩阵进行 consistency 检验比较困难。当指标涉及过多时,构造的判断矩阵阶数也越高,此时计算最大特征值也越困难。

缺点三:当判断矩阵不符合 consistency 检测时,需要专家重新调整判断矩阵,然后再检验是否符合 consistency 结果,效率过低。

为了避免 AHP 以上的缺点,本文在对现有主观赋权算法的研究基础上,采用了改进的模糊层次分析法(FAHP)<sup>[43]</sup>来求解各个威胁要素的主观权重。相比较于 AHP 法,FAHP 法计算更为简单快捷,且改进了传统 AHP 法存在的问题,提高了决策的合理性。

#### (1) 模糊层次分析法的算法步骤

模糊层次分析法的算法流程图如图 2.7 所示。其基本步骤如下所示:

Step1:明确评估问题,如威胁评估中所包含的各要素。

Step2:建立层次结构。

Step3:构造模糊判断矩阵  $A$ , 其中各个指标两两比较得到的值为  $A_{ij}, 1 \leq i, j \leq n$ , 它的实际意义表示的是要素  $i$  对要素  $j$  的相对重要程度。 $A_{ij}$  的取值可以使用表 2.9 所示的 0.1~0.9 的标度方法。

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \cdots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & \cdots & A_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{n1} & A_{n2} & \cdots & A_{nn} \end{bmatrix} \quad (2-21)$$

$$A_{ij} = \begin{cases} 0.5 & i = j \text{ 且 } 1 \leq i \leq n \\ 1 - A_{ji} & 1 \leq i, j \leq n \end{cases} \quad (2-22)$$

表2.9 0.1~0.9 标度法

标度	相对重要性	说明
0.5	同等重要	要素 <i>i</i> 和要素 <i>j</i> 同等重要
0.6	稍微重要	要素 <i>i</i> 比要素 <i>j</i> 稍微重要
0.7	明显重要	要素 <i>i</i> 比要素 <i>j</i> 明显重要
0.8	重要得多	要素 <i>i</i> 比要素 <i>j</i> 重要得多
0.9	极端重要	要素 <i>i</i> 比要素 <i>j</i> 极端重要
0.1, 0.2, 0.3, 0.4	反比较	要素 <i>j</i> 与要素 <i>i</i> 相比, 即 $f_{ji} = 1 - f_{ij}$

**Step4:**对模糊判断矩阵进行一致性调整。已知模糊判断矩阵是模糊一致矩阵的充要条件是矩阵中任意两行的对应元素之差为常数, 使用该性质可以确保模糊判断矩阵的一致性:

①计算矩阵每一行的和, 得到一个一阶向量  $R$ , 计算公式如下所示:

$$R_i = \sum_{j=1}^n A_{ij}, 1 \leq i, j \leq n \quad (2-23)$$

②通过向量  $R$  构建模糊一致矩阵  $F$ 。

$$F = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & \cdots & f_{1n} \\ f_{21} & f_{22} & \cdots & f_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{n1} & f_{n2} & \cdots & f_{nn} \end{bmatrix} \quad (2-24)$$

其中, 矩阵内元素  $f_{ij}, 1 \leq i, j \leq n$  的计算公式如式(2-25)。

$$f_{ij} = \frac{R_i - R_j}{2(n-1)} + 0.5 \quad (2-25)$$

根据模糊一致矩阵的性质以及矩阵内元素的判断公式确保得到的矩阵  $F$  为模糊一致性矩阵, 判断公式如式(2-26)所示。

$$f_{ij} = \begin{cases} 0.5 & i = j \text{ 且 } 1 \leq i \leq n \\ 1 - f_{ji} & 1 \leq i, j \leq n \\ f_{ik} - f_{jk} + 0.5 & 1 \leq i, j, k \leq n \end{cases} \quad (2-26)$$

Step5:根据模糊一致判断矩阵求解威胁评估各要素对应权重向量  $W$ ，首先计算矩阵每行的和，然后进行归一化得到权重向量。其计算公式如式(2-27),(2-28)所示。

$$Sum_i = \sum_{j=1}^n f_{ij} \quad (2-27)$$

$$W_i = \frac{Sum_i}{\sum_{i=1}^n Sum_i} \quad (2-28)$$

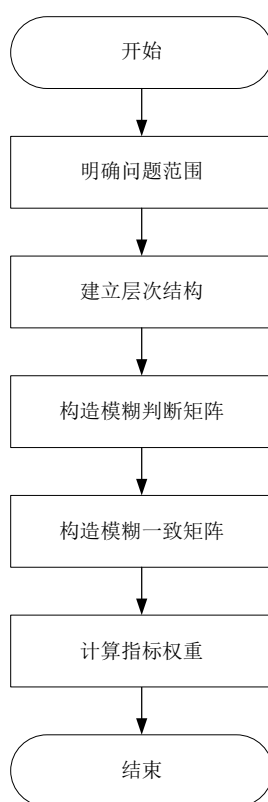


图2.7 模糊层次分析法流程图

## (2) 基于分级多专家评判法改进的模糊层次分析法

虽然模糊层次分析法避免了层次分析法一致性检验困难以及判断矩阵调整效



率低下的问题，但是仍然有以下两个缺点：

缺点一：只由单一专家判断指标相对重要程度，算法存在主观性太强的问题。

缺点二：权重计算时值采用算数平均法，计算过于简单，结果说服力不强。

针对缺点一：本文采用分级多专家评判的方法。该方法引入多层次专家参与属性重要性比较的判断，充分发挥出群体决策的优势，也使结果具有更强的说服力。本文改进的方法中，所谓分级，即是将专家级别分为Ⅰ级，Ⅱ级，Ⅲ级，根据知识水平和经验对不同级别的专家设置决策权重。三个级别的专家中，Ⅰ级专家的判断更为重要，因此需要更加重视。

针对缺点二：本文在算数平均法计算的基础上，引入几何平均法计算指标权重值，最后结合算数平均法计算的权重值求出主观综合权重值。

## 2.4.2 基于改进 CRITIC 法求解客观权重

客观权重相对于主观权重来说，其权重计算完全依赖于各要素之间的内在关系，因此求解的权重值更加客观。但是该方法仅从数据自身携带的信息出发计算指标的客观权重，不考虑专家的经验，最终的评价结果可能会出现与专家经验不同甚至相悖的情况。客观赋权法的基本原理是根据计算出的指标变异性大小来确定待评价指标在评价系统中所占权重的大小。若某个待评价指标的变异性越大，其提供的信息量相较于其它指标而言也就越多，在最终的权重确定时所起到的作用也就越大，其权重也就越大<sup>[44]</sup>。

目前使用较为广泛的客观赋权法主要有熵权法<sup>[45]</sup>，它主要通过各指标数据的离散程度，使用信息熵确定各指标的权重，但是该方法仅考虑了指标的变异性，没有考虑指标之间的冲突性，不够全面具体。而与之对比，CRITIC<sup>[46]</sup>(Criteria Importance Though Intercriteria Correlation)法在计算各个指标的客观权重时，不但将指标变异性大小对于权重计算的影响考虑了进来，而且还考虑了各指标之间存在的冲突性对计算权重产生的影响，是一种更好的客观赋权法。因此，本文采用 CRITIC 法来计算威胁评估指标的客观权重。而对于 CRITIC 法来说，指标的权重大小取决于在标准差(指标变异性)一定时，指标之间冲突性的大小，当指标冲突性越小，则指标所占权重就越小，反之，则越大。由此所求取的各指标的权重系数相较于只考虑单一变异性而言，更加的合理客观。

### (1) 传统 CRITIC 法算法步骤

CRITIC 法算法流程图如图 2.8 所示，其具体步骤如下：

Step1:数据的标准化处理。设现在有一组数据，有  $m$  个对象， $n$  个指标，构成原始数据矩阵  $X$ ，如式(2-29)所示。由于不同评价指标量纲不同，若采用原始数据进行权重的求解，势必会出现计算结果不合理的现象，因此为消除量纲对计算结果带来的

影响,使数据都可以用一个统一的标准来测量,本文采用极差法对原始数据进行归一化处理,计算公式如(2-30),(2-31)所示。

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (2-29)$$

对于正向型数据:

$$x_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_i x_{ij}}{\max_i x_{ij} - \min_i x_{ij}}, (i = 1, 2, \dots, m) \quad (2-30)$$

对于反向型数据:

$$x_{ij} = \frac{\max_i x_{ij} - x_{ij}}{\max_i x_{ij} - \min_i x_{ij}}, (i = 1, 2, \dots, m) \quad (2-31)$$

Step2:计算信息承载量。首先要计算指标的波动性,使用标准差来表示各指标的取值差异波动情况,然后使用相关系数计算指标的冲突性,最后计算指标的信息量。

①计算指标波动性:

$$S_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_j)^2}{n-1}} \quad (2-32)$$

其中,  $\bar{x}_j$ 表示每个指标(列)的数据均值,计算公式为  $\bar{x}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m x_{ij}, j = 1, 2, \dots, n$ 。

②计算指标冲突性:

计算指标冲突时需要用到相关性矩阵  $R$ , 计算公式如式(2-33)所示。

$$R = \frac{\sum_{j,k=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)(x_{ik} - \bar{x}_k)}{\sqrt{\sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2 \sum_{k=1}^n (x_{ik} - \bar{x}_k)^2}} \quad (2-33)$$

则,冲突性计算公式如式(2-34)。

$$A_j = \sum_{i=1}^n (1 - r_{ij}) \quad (2-34)$$

其中 $r_{ij}$ 表示第 $i$ 个指标与第 $j$ 个指标间的相关系数。

③计算信息量:

$$C_j = S_j \times A_j \quad (2-35)$$

Step3:客观权重计算。第 $j$ 个指标的权重计算公式如式(2-36)所示。

$$W_j = \frac{C_j}{\sum_{j=1}^n C_j} \quad (2-36)$$

其中,  $W_j$ ,  $j=1,2,\dots,n$  表示各指标的权重向量。

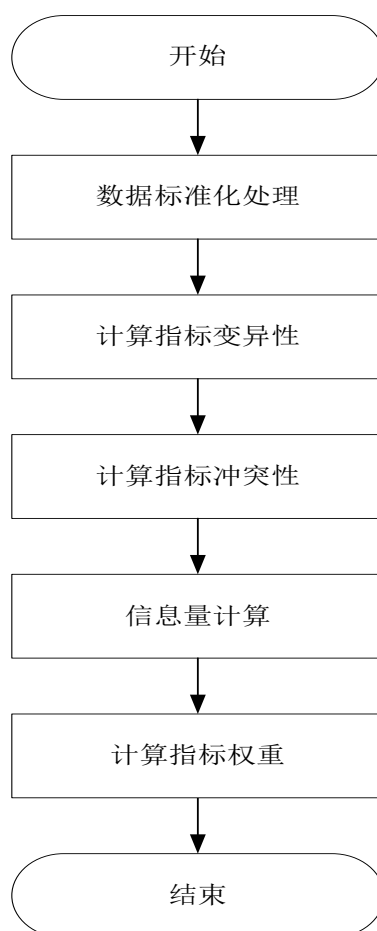


图2.8 CRITIC 算法流程图

## (2) CRITIC 法改进

传统的 CRITIC 法存在有两个问题。问题一：只用标准差来衡量指标变异性，当指标的数量级不同，各个指标间的均值可能会差距较大，若只使用标准差无法合理的衡量各指标的变异性。问题二：计算指标冲突性的时候，由于指标之间的相关系数有可能出现负数，但是考虑到绝对值一样的正相关和负相关，其反映的指标间的相关性应该是一样的，所以仅使用  $\sum_{i=1}^n (1-r_{ij})$  来反映指标间的冲突性是不合理的，

针对问题一：本文使用标准差系数来计算指标波动性，消除由于各个指标平均值相差过大带来的数据误差。由此得到指标波动性的计算公式如式(2-37)所示。

$$S'_j = \frac{1}{x_j} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_j)^2}{n-1}} \quad (2-37)$$

式中， $\bar{x}_j$  的计算方式在式(2-32)中有阐述，不再重复叙述。

针对问题二：使用公式  $\sum_{i=1}^n (1-|r_{ij}|)$  来计算指标之间的冲突性，得到指标冲突性计算公式如式(2-38)。

$$A'_j = \sum_{i=1}^n (1-|r_{ij}|) \quad (2-38)$$

得到新的的信息量计算公式(2-39)：

$$C'_j = S'_j \times A'_j \quad (2-39)$$

最终的客观权重计算公式如式(2-40)：

$$W'_j = \frac{C'_j}{\sum_{j=1}^n C'_j} \quad (2-40)$$

### 2.4.3 基于组合权重的空战单目标威胁值计算

威胁评估结果的合理性一方面取决于威胁指标的选取与量化，另一方面在于各指标的权重计算。对于威胁指标的选取和量化在 2.3 小节进行过了详细分析，不再重新阐述。现主要分析指标的权重计算方式，主观赋权法以及客观赋权法在传统的威胁评

估指标权重计算时运用最多,主观赋权法依照专家自身的主观意识(知识、经验、喜好等),对指标重要程度相互比较,给出相互之间重要程度的量化值,计算得到指标权重。但是该方法透明度差,过于依赖专家知识,可能会出现给出不合理的权重比的问题,本文采用分级多专家评判的方法,就是为了在一定程度上避免单一专家判断结果主观性过强的问题。但是主观赋权法也有自身的优势,通过专家经验的把控,可以粗略确认各个指标的重要顺序,避免出现指标权重与指标重要程度不匹配的情况;而客观赋权法只通过客观数据的差异进行计算,其数据来源于问题产生的客观环境,因此客观性极强。客观赋权法根据待评价指标在不同目标中的变异程度确定其在评估系统中的权重大小,指标承载的信息量越大,其权重也就越大。该赋权方法的优势在于评价过程透明度高,不依赖于专家的主观经验,同时数学理论成熟,便于进行数据处理。但是仅仅依靠属性间的差异性,不考虑专家的主观意见,容易导致结果片面,出现与实际情况不一致的现象。

本文针对以上两种赋权方法存在的不足之处,采用组合赋权<sup>[47]</sup>的方式,将两种方法求出的各指标权值进行综合,计算各指标最终的组合权重值。在进行组合赋权的时候,主观权重与客观权重主要有两种组合方式:乘法组合赋权法和加法组合赋权法。其中,乘法赋权法是将各指标通过各赋权方法求出的权重值对应相乘,最后再将结果归一化处理。这种方法存在着放大效应<sup>[48]</sup>,最终求得的结果会出现一定的不合理。因此该方法主要适用于各指标权重分配较为均匀的情况。而加法赋权法是直接对两种方法求解的权重值进行加权处理。虽然加法赋权法避免了乘法赋权法存在的问题,但是各种赋权方法的影响因子仍然难以确定。本文在对两种组合方式分析的基础上,使用加法赋权法求解指标的组合权重,如公式(2-41)所示。 $\alpha$ 为模糊层次分析法的影响因子, $\beta$ 为CRITIC法的影响因子。

$$W = \begin{pmatrix} \alpha w_{11} + \beta w_{21} \\ \alpha w_{12} + \beta w_{22} \\ \vdots \\ \alpha w_{1n} + \beta w_{2n} \end{pmatrix} = \alpha w_1 + \beta w_2 \quad (2-41)$$

其中 $\alpha + \beta = 1$ 且 $\alpha, \beta \geq 0$ ,  $W$ 为综合权重向量。由于加法赋权法存在影响因子难以确定的问题,而若采用专家经验的方法确定影响因子,会放大评估结果的主观性。因此为了避免主观经验对影响因子的影响,本文基于博弈论的思想来确定主客观影响因子。算法步骤如下:

**Step1:**设有  $n$  种指标需要计算权重,使用改进模糊层次分析法求得的权重向量为

$w_{1j} = \{w_{11}, w_{12}, \dots, w_{1n}\}$ ，使用改进 CRITIC 法求解的权重向量为  $w_{2j} = \{w_{21}, w_{22}, \dots, w_{2n}\}$ 。

Step2:基于博弈论的思想，构建目标函数。以指标权重  $W$  与  $w_1$  和  $w_2$  离差最小和为目标，寻求最佳的影响因子组合  $\alpha^*$  (主观影响因子)、 $\beta^*$  (客观影响因子)。此时计算出的  $W^*$  即为最优的组合权重。目标函数如式(2-42)所示。

$$\begin{aligned} \min(\|W - w_1\|_2 + \|W - w_2\|_2) = \\ \min(\|\alpha w_1 + \beta w_2 - w_1\| + \|\alpha w_1 + \beta w_2 - w_2\|) \end{aligned} \quad (2-42)$$

Step3:根据微分原理，公式(2-42)取得最小值的一阶导数条件为公式(2-43)：

$$\begin{cases} \alpha w_1 w_1^T + \beta w_1 w_2^T = w_1 w_1^T \\ \alpha w_2 w_1^T + \beta w_2 w_2^T = w_2 w_2^T \end{cases} \quad (2-43)$$

Step4:最终求得主观影响因子  $\alpha^*$  和客观影响因子  $\beta^*$ ，如式(2-44)。

$$\begin{cases} \alpha^* = \frac{|\alpha|}{|\alpha| + |\beta|} \\ \beta^* = \frac{|\beta|}{|\alpha| + |\beta|} \end{cases} \quad (2-44)$$

进而得到最佳组合权重为

$$W^* = \alpha^* w_1 + \beta^* w_2 \quad (2-45)$$

最后根据求得的组合权重结合敌方目标的威胁指标向量  $F$  得到空战目标的威胁结果，如式(2-46)所示。

$$T = \sum_{i=1}^n (W_i^* * F_i) \quad (2-46)$$

其中， $W_i$  表示第  $i$  个指标的组合权重， $F_i$  表示第  $i$  个指标的威胁量化值。

#### 2.4.4 威胁评级与优势占比度计算

##### (1) 威胁评级

为了提高作战效率，仅仅求出目标的威胁值是不够的，本文将在计算出目标威胁

值以后对敌方目标的威胁等级进行判定。敌方目标的威胁等级判定是指在综合考虑单目标空战能力、空战机会以及空战意图的基础上，计算出单目标的威胁值，然后判断空战环境下各个敌方目标对我方的威胁程度，确定其威胁等级。本文将目标威胁等级划分为五个级别，威胁分级与威胁值对应情况如表 2.10 所示。

表2.10 威胁等级对应表

威胁等级	威胁值区间
无威胁	[0,0.2]
低级威胁	(0.2,0.4]
中级威胁	(0.4,0.6]
高级威胁	(0.6,0.8]
最高威胁	(0.8,1]

## (2) 优势占比度计算

如果说威胁评级是为了提高作战效率，那么基于威胁值的优势占比度计算则是让飞行员对于此时双方空战搏斗情况有更直观的数据感受。空战是一个复杂多变的过程，仅依靠威胁值为我方飞行员提供作战决策支持过于粗糙，虽然指挥作战平台可以依据计算出的目标实时威胁等级判断此时对我方单位威胁最高的敌方目标，但是空战是一个双方对抗的过程，仅依靠敌方此时威胁值最高就作为我方需要优先打击的目标而缺乏我方此时对该目标的优势度考量，容易使飞行员做出错误决策，造成更大损失。基于此，本文引入优势占比度的考量，结合目标威胁等级，辅助飞行员做出更合理的战术决策，减少我方损失，使空战收益最大。假设我方优势度为  $A$ ，其计算流程与目标威胁评估过程一致，在此不再重复叙述；敌方威胁值为  $T$ ，则优势占比度  $P$  的计算公式如式(2-47)所示。

$$P = \frac{A}{A+T} \quad (2-47)$$

## 2.5 实验仿真分析

### 2.5.1 仿真场景设定

假设空战环境下，现有 6 个敌方目标，1 个我方作战单位，目标运动信息以及空战意图原始数据如表 2.11 所示，空战能力原始数据如表 2.12 所示，由于军事保密原

因，目标具体类型不在表格中给出。

表2.11 6 个目标运动信息以及空战意图原始数据表

目标	经度	纬度	高度(km)	速度(Ma)	作战行动
T1	119.37	23.36	9	0.8	攻击
T2	119.53	23.57	10	1.1	空中拦截
T3	118.43	22.65	13	1.5	攻击
T4	119.28	24.35	15	0.6	侦察
T5	120.28	22.46	16	2.2	攻击
T6	118.35	23.46	12	1.1	撤退
我方	119.45	23.16	13	1.6	

表2.12 目标空战能力原始数据表

指标 目标	类型威 胁值	机动能 力	火力参 数	探测能 力	操作性 能参数	生存力 系数	航程系 数	电子对 抗能力
T1	很大	14.5	1635.25	668	0.85	0.95	1.01	0.97
T2	很大	19.1	2301	169	0.8	1	0.87	1.05
T3	大	14.8	1328	41.6	0.75	1	0.98	1.05
T4	稍小	8.98	0.57	2637	0.7	0.94	1.15	1.1
T5	极大	23.2	2768	2123	0.9	1.03	1.21	1.15
T6	很大	17.1	249.75	136.4	0.8	0.87	1.01	1.1
我方	很大	19.25	1893.25	798	0.75	0.96	1.09	1.05

2.5.2 威胁指标计算

根据 2.3.2 小节的空战能力威胁计算方法，计算出敌我双方的空战能力指数，如表 2.13。

表2.13 敌我双方空战能力指数

目标	T1	T2	T3	T4	T5	T6	我方目标
空战能力 指数	11.80	10.41	8.41	3.50	24.16	9.24	12.75

则根据 2.3 小节目标各威胁要素的量化计算方式得到敌方 6 个目标各威胁指标的



威胁要素量化值，如表 2.14 所示。

表2.14 敌方目标各指标威胁量化值

目标	空战能力 威胁值	角度威胁 值	速度威胁 值	高度威胁 值	距离威胁 值	意图威胁 值
T1	0.9255	0.3056	0.1	0.1	0.3988	1
T2	0.8165	0.3472	0.1875	0.2	0.3023	0.8
T3	0.6596	0.3333	0.4375	0.5	0.1088	1
T4	0.2745	0.25	0.1	0.7	0.7631	0.4
T5	1.8949	0.5278	0.875	0.8	0.4773	1
T6	0.7247	0.3611	0.1875	0.4	0.1	0.2

### 2.5.3 主观权重仿真

本文计算时，为降低单一专家主观经验以及偏好对结果影响较大的问题，采用分级多专家评判的方法改进 FAHP 算法，并且在求各指标主观权重时综合算数平均法和几何平均法求出的权重结果形成主观综合权重，使计算结果更加合理准确。首先，本文将决策专家分为三级，每位专家分别给出决策意见表，进行独立计算分析。最后根据专家级别不同乘以对应的系数进行线性加权。本文给出三位专家的决策意见，分别为Ⅰ级专家一位，Ⅱ级专家一位，Ⅲ级专家一位，每位专家给出的判断矩阵以及处理结果如下所示。

#### (1) Ⅰ级专家决策意见

Ⅰ级专家的决策如表 2.15 所示，经过仿真计算，其结果如表 2.16 所示。

表2.15 Ⅰ级专家决策意见表

指标	空战能力	速度	角度	高度	距离	空战意图
空战能力	0.5	0.4	0.4	0.6	0.3	0.7
速度	0.6	0.5	0.6	0.7	0.5	0.7
角度	0.6	0.4	0.5	0.6	0.2	0.5
高度	0.4	0.3	0.4	0.5	0.2	0.4
距离	0.7	0.5	0.8	0.8	0.5	0.8
空战意图	0.3	0.3	0.6	0.6	0.2	0.5

表2.16 I级专家分析结果

指标 方法	空战能力	速度	角度	高度	距离	空战意图
几何平均 法	0.1639	0.1833	0.1611	0.1445	0.1972	0.15
算数平均 法	0.1638	0.1839	0.1609	0.1437	0.1983	0.1494
主观综合 权重	0.1638	0.1836	0.161	0.1441	0.1977	0.1497

## (2) II级专家决策意见

II级专家的决策如表 2.17 所示，经过仿真计算，其结果如表 2.18 所示。

表2.17 II级专家决策意见表

指标	空战能力	速度	角度	高度	距离	空战意图
空战能力	0.5	0.6	0.6	0.7	0.3	0.6
速度	0.4	0.5	0.5	0.6	0.4	0.5
角度	0.4	0.5	0.5	0.5	0.4	0.5
高度	0.3	0.4	0.5	0.5	0.2	0.5
距离	0.7	0.6	0.6	0.8	0.5	0.2
空战意图	0.4	0.5	0.5	0.5	0.8	0.5

表2.18 II级专家分析结果

指标 方法	空战能力	速度	角度	高度	距离	空战意图
几何平均 法	0.1750	0.1639	0.1611	0.1450	0.1778	0.1722
算数平均 法	0.1752	0.1638	0.1610	0.1496	0.1780	0.1723
主观综合 权重	0.1751	0.1639	0.1610	0.1498	0.1779	0.1723

## (3) III级专家决策意见

III 级专家的决策如表 2.19 所示，经过仿真计算，其结果如表 2.20 所示。

表2.19 III 级专家决策意见表

指标	空战能力	速度	角度	高度	距离	空战意图
空战能力	0.5	0.4	0.6	0.6	0.3	0.5
速度	0.6	0.5	0.5	0.6	0.5	0.7
角度	0.4	0.5	0.5	0.6	0.3	0.5
高度	0.4	0.4	0.4	0.5	0.3	0.5
距离	0.7	0.5	0.7	0.7	0.5	0.8
空战意图	0.5	0.3	0.5	0.5	0.2	0.5

表2.20 III 级专家分析结果

指标 方法	空战能力	速度	角度	高度	距离	空战意图
几何平均 法	0.1639	0.1778	0.1611	0.1528	0.1917	0.1528
算数平均 法	0.1638	0.1781	0.1610	0.1524	0.1924	0.1524
主观综合 权重	0.1638	0.1779	0.1610	0.1526	0.1920	0.1526

(4) 主观权重综合分析

三位不同级别的专家的权重结果对比图如图 2.9 所示。

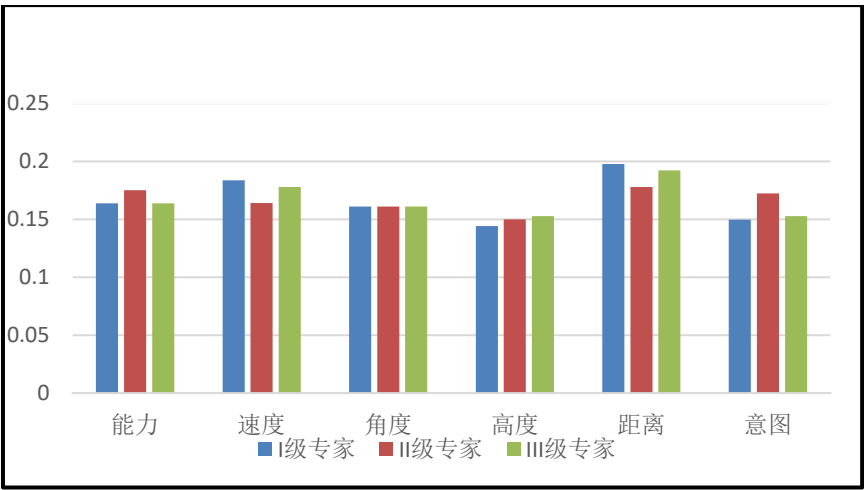


图2.9 各级专家权重结果对比图

从上述三位专家决策意见的分析结果中可以看出,不同专家由于其经验以及偏好的不同,最终的指标权重结果会出现些许的不同。因此,如果仅仅采用单一专家的方法所得到的权重结果必然片面,对于最终的威胁评估结果也会有很大影响。

根据专家级别的不同,给予不同的权重系数,本文将 I 级专家权重设为 0.5, II 级专家权重设为 0.3, III 级专家权重设为 0.2,得到最终的主观权重,其结果如表 2.21 所示。

表2.21 主观权重汇总表

指标 权重	空战能力	速度	角度	高度	距离	空战意图
I 级专家	0.1638	0.1836	0.161	0.1441	0.1977	0.1497
II 级专家	0.1751	0.1639	0.1610	0.1498	0.1779	0.1723
III 级专家	0.1638	0.1779	0.1610	0.1526	0.1920	0.1526
主观权重	0.1672	0.1766	0.1610	0.1475	0.1906	0.1571

#### 2.5.4 客观权重仿真

在 2.5.1 小节中,已经得到各个威胁要素的原始数据表,如表 2.12 所示。在进行计算前,由于各个指标的量纲不同,首先要对表 2.12 中的原始数据进行正向化的处理,正向化处理结果如表 2.22 所示。

表2.22 原始数据正向化处理表

指标 目标	空战能力 威胁值	角度威胁 值	速度威胁 值	高度威胁 值	距离威胁 值	意图威胁 值
T1	0.4018	0.2001	0.0000	0.0000	0.4506	1.0000
T2	0.3345	0.3499	0.1129	0.1429	0.3051	0.75
T3	0.2377	0.2999	0.4355	0.5714	0.0133	1.0000
T4	0.0000	0.0000	0.0000	0.8571	1.0000	0.2500
T5	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.5690	1.0000
T6	0.2778	0.3999	0.1129	0.4286	0.0000	0.0000

基于改进的 CRITIC 法求解的最终客观权重仿真结果如表 2.23 所示,其权重结果图如图 2.10 所示。

表2.23 改进 CRITIC 法求解客观权重结果表

指标	指标变异性	指标冲突性	信息量	权重
空战能力	0.335	2.445	0.820	0.1112
速度	0.337	2.555	0.862	0.1169
角度	0.389	2.185	0.849	0.1152
高度	0.391	3.396	1.329	0.1802
距离	0.377	4.894	1.843	0.2500
空战意图	0.438	3.811	1.668	0.2264

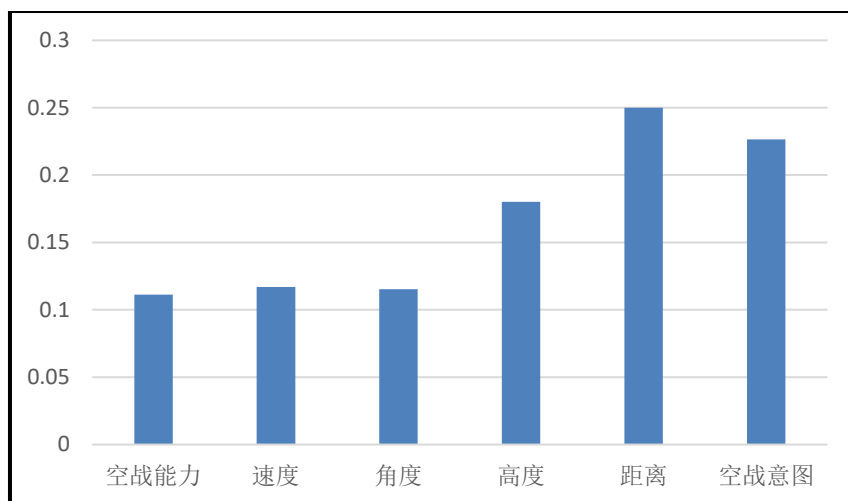


图2.10 客观权重图

### 2.5.5 单目标威胁评估计算仿真与分析

在 2.5.3 小节与 2.5.4 小节分别得到各个威胁指标的主观权重以及客观权重，其对比图如图 2.11 所示。

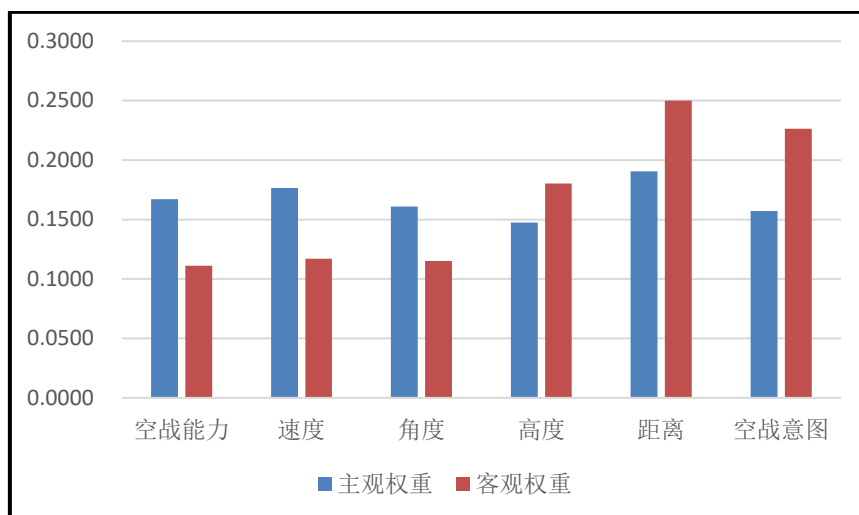


图2.11 主客观权重对比图

从图中可以看出来,主观赋权法与客观赋权法对于威胁指标的权重有不同的偏向,比如空战意图指标,在主观赋权法里其重要程度排在倒数第二,而在客观赋权法里其重要程度排在第二位。由此可见,在复杂的空战环境下,敌方多目标对我方产生威胁时,仅仅依靠主观赋权法进行权重计算而忽略数据间的客观性,其权重计算结果会出现过于片面的问题,所以需要将主观赋权法与客观赋权法求出的指标权重进行综合求出组合权重,根据 2.4.3 小节求解组合权重的步骤求出主观影响因子为 0.402,客观影响因子为 0.598,仿真计算结果如表 2.24 所示,权重对比图如图 2.12 所示。

表2.24 组合权重结果

指标 权重	空战能力	速度	角度	高度	距离	空战意图
主观权重	0.1672	0.1766	0.1610	0.1475	0.1906	0.1571
客观权重	0.1112	0.1169	0.1152	0.1802	0.2500	0.2264
组合权重	0.1337	0.1409	0.1336	0.1671	0.2261	0.1985

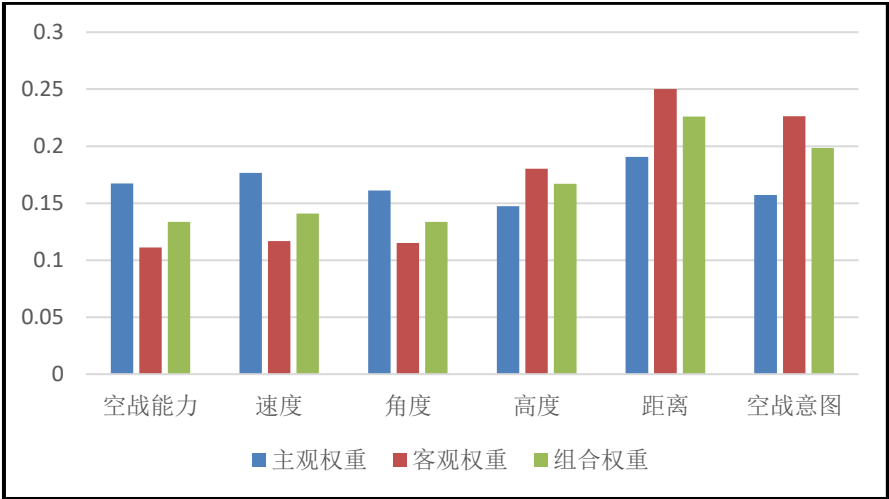


图2.12 权重对比图

由图中可以看出，基于博弈论思想求解的组合权重，对主观赋权法以及客观赋权法求解的指标权重进行了修正，使得求解的指标权重结果更加合理科学。

在求出组合权重的基础上，求解敌方 6 个目标的威胁值并判断其威胁等级，结果仿真如表 2.25 所示。

表2.25 6 个空中目标的威胁值

目标	T1	T2	T3	T4	T5	T6
威胁值	0.4840	0.4425	0.5010	0.4530	0.8872	0.3007
威胁等级	中等威胁	中等威胁	中等威胁	中等威胁	最高威胁	低威胁

而此时我方作战单位对 6 个敌方目标的优势度经计算如表 2.26 所示。

表2.26 我方优势度

目标	T1	T2	T3	T4	T5	T6
优势度	0.8109	0.8345	0.8309	0.9317	0.4557	0.8590

根据我方优势度以及敌方目标的威胁度求出优势占比度，如表 2.27 所示。

表2.27 我方优势占比度

目标	T1	T2	T3	T4	T5	T6
优势占比度	62.62%	65.35%	62.36%	67.29%	22.93%	74.07%

敌方目标威胁度折线以及我方优势占比度的折线如图 2.13 所示。从图中可以看出，当面对 T5 目标时，我方优势占比度最低，此目标对我威胁最大，我方需要采取紧急措施降低该威胁。而当面对 T6 目标时，由于其采取的作战行动是撤退，因此其对我方威胁为最低，相应我方优势占比度为最高。通过计算目标威胁值与我方优势占比度可以为我方飞行员快速决策提供更加可靠的数据支撑，大大提高我作战飞行员的战场决策能力。

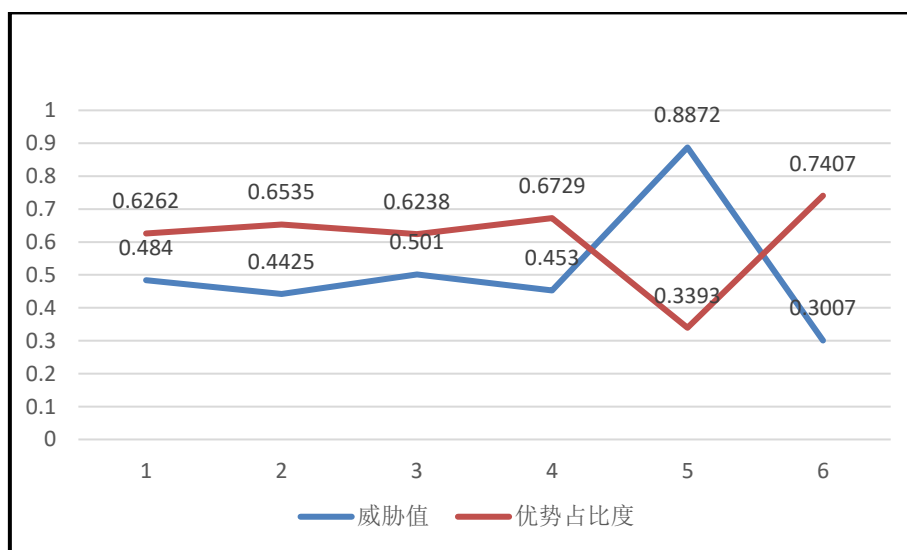


图2.13 威胁值与优势占比度分析图

## 2.6 本章小结

本章节主要对空战单目标威胁评估的相关技术进行了研究，主要内容包括目标威胁评估的相关理论研究、空战威胁评估指标的选取以及量化、指标权重的确定和目标威胁评级以及我方优势占比度计算四个部分。在评估指标选取上，引入了目标空战意图作为评估指标，使威胁评估指标体系更加全面；在算法创新上，本章在对主客观权重的计算方法进行改进后，基于博弈论的思想综合二者权重形成组合权重，使二者优势互补；并且在威胁评估模型中引入了优势占比度的想法，结合目标的威胁值以及威胁等级，使战场态势更加直观，辅助作战飞行员快速做出战术决策。





## 第三章 战场目标分群与群内主要威胁目标判断技术研究

### 3.1 引言

在现代空战体系中，敌我双方的博弈已经从简单的单目标之间的对抗，逐渐发展为体系之间、群组之间的对抗。随着战场目标的增多，需要指战员处理的战场信息愈加繁多，为了提高作战效率、满足指战员快速制定决策的需求，需要对战场目标进行合理的分群。本文针对战场上目标多、分群数目未知以及目标属性多维度的特点，以单目标个体本身的特征为基础，使用 OPTICS 算法实现空战环境下的目标分群，并在目标相似度计算和算法运行效率上进行改进，以满足空战环境对于战场目标分群准确性和实时性的要求。其群组作战组成关系如图 3.1 所示。

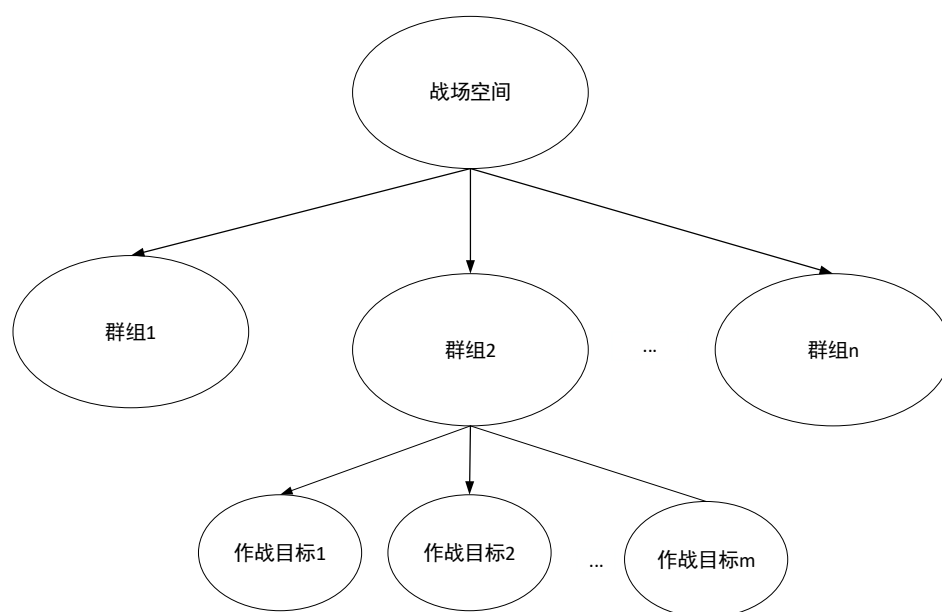


图3.1 群组作战组成关系图

从图中可以看出，群组由多个不同的作战目标组成，而每个群组中都会有至少一个的主要进攻者，它是敌方作战群对我方作战群造成威胁时发挥主要作用的目标，本文将之称为主要威胁目标。在对战场目标进行合理分群以后，结合群内各目标的威胁值，使用灰色关联算法判断此时敌方作战群内的主要威胁目标。

### 3.2 空战环境下目标分群算法研究

#### 3.2.1 聚类算法介绍

聚类(Clustering)<sup>[49]</sup>是指将某些数据的集合按照某些特定的标准将具有相似属性

的数据对象划分成多个类或者簇。聚类算法所划分的处于同一个类(簇)内的数据对象其特征要高度相似,不同簇内的对象特征也要尽可能不同,这是一种无监督的学习方法。本节主要对常见的聚类算法进行简单分析:基于层次的聚类算法、基于划分的聚类算法以及基于密度的聚类算法<sup>[50]</sup>等。

### (1) 基于层次的聚类算法

层次聚类算法<sup>[51]</sup>是通过计算数据对象间的相似程度对对象进行层次划分的方法。其本质上是对数据集合使用分层的方式进行划分,形成树形的聚类结构,后面一层的簇基于前面一层簇的结果。常见聚类方式主要有两种:一种是凝聚聚类法,它采用的是自底向上寻找新簇的方法,其核心思想在于最开始先将输入的数据集内的各个对象都看作一个独立的簇,然后根据选取的准则,比如距离全连接算法、平均连接算法等将邻近的簇进行合并生成新簇,如此往复合并,最终划分完数据集内的所有对象。另一种是分裂聚类法,它寻找新簇的方法与凝聚聚类不同,采用自顶向下的思路,其核心思想在于最开始将输入的数据集看作一个整体,然后按照一定的规则将某个簇分裂成数个不同的簇,不断往复,最终划分完数据集内的所有对象。由此可见,层次聚类算法本质上是一种贪心算法,其每次形成新簇的过程都是基于一种局部最优的准则。并且在进行划分的时候不需要预先设置群体个数,限制较少,但是算法效率低且复杂度较高,这是由于在每次划分或合并之前都要遍历一次距离矩阵来搜索最小距离。如果将这种算法运用在大规模的集群空战中,其时间和空间开销巨大,不满足战场环境实时性的特点,因此在集群空战的环境中,这种算法是不可取的。

### (2) 基于划分的聚类算法

此类型聚类算法的思想在于通过事先指定的聚类中心或者聚类数目,采用某种准则通过不断的反复迭代,直至实现预期目标。常见算法有 K-Means<sup>[52]</sup>及其变体 K-Means++。其中, K-Means 算法的详细流程如下:

Step1:随机选取 C 个初始聚类中心。

Step2: 计算数据集内剩余的各个对象到各个中心的距离,对计算出的距离进行比较,找到最短的距离,将该对象划分到距离最短的中心所处的簇中。

Step3:计算各个类中所有数据对象到该中心的距离均值并将此值作为新的聚类中心。

Step4:重复二、三步,直至聚类结果不再改变,算法结束。

从上述的 K-Means 算法步骤来看,算法的实现更加简单且时间、空间复杂度不高,更适合大规模数据。但是其缺点也十分明显,主要包括:在聚类前需要预先设置 C 值;对初始值设定非常敏感,初始值设置较差可能会出现局部最优解;容易受到噪声数据的影响,不适合对未知类别样本数据的划分。

K-Means++是对 K-Means 中初始值设置敏感进行改正的优化算法。其步骤与 K-

Means 类似, 只有在聚类中心选取的时候该算法是任意选择一个对象作为初始中心, 当中心数目不够  $C$  个时, 计算非中心的对象到当前中心的距离, 对结果进行比较, 结果越大, 则该对象被选为下一个中心的机会也就越大, 从而降低陷入局部最优解的概率。

通过对以上两种算法的分析可以看出, 在能够预先知道  $C$  值的情况下, 划分式的聚类算法基本可以满足聚类要求。但是在实际的空战场景下, 我方无法提前获取敌方群体的分群数量, 因此本文不采用基于划分的聚类算法完成空战时敌方的目标分群。

### (3) 基于密度的聚类算法

此聚类算法是根据数据集内数据对象的分布情况来划分簇的方法, 其基本思想是先发现数据空间内比较密集的数据点, 然后将邻近的密度比较高的数据点划分在一起, 最终形成各种簇。常见算法主要有 DBSCAN<sup>[53]</sup>、DENCLUE 以及 OPTICS<sup>[54]</sup>等, 以下主要对 DBSCAN 算法进行详细介绍。

DBSCAN(Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise)算法, 又被称为具有噪声的基于密度的聚类方法。该算法将簇定义为密度相连的数据点的最大集合, 并且能够在空间数据具有噪声时发现任意形状的簇。假设存在集合  $S$ , 且  $P = \{P_i | S, 1 \leq i \leq n, P_1 \cup P_2 \cup \dots \cup P_n = S\}$ , 那么  $P_i$  就是算法所发现的一个簇。

DBSCAN 算法主要有两个参数:  $eps$  和  $MinPts$ 。其中,  $eps$  表示某数据点的邻域半径,  $MinPts$  描述了半径为  $eps$  的邻域中数据点个数的最少个数。下面对 DBSCAN 算法相关定义进行介绍:

邻域半径  $eps$ : 主要用于确定邻域点, 在以  $eps$  为半径的圆内的所有数据点都被称作邻域点, 其数量则反映了以  $eps$  为半径的圆内数据点的密度。

邻域密度阈值  $MinPts$ : 该值主要限制以  $eps$  为半径的邻域内包含的数据对象的最少数目。

核心点: 若任意对象的邻域内至少包含了  $MinPts$  个对象, 则称其为核心点。

边界点: 若某一个对象包含在其他核心点的邻域内, 但是自身邻域内的对象数量小于  $MinPts$ , 则称其为边界点。

噪声点(孤立点): 除去核心点与边界点的其他点, 称其为噪声点。

直接密度可达: 对于数据集而言, 如果存在两个不同的对象  $x, y$ , 其中  $x$  是核心点并且  $y$  在  $x$  的  $eps$  邻域内, 那么称  $y$  从  $x$  直接密度可达。

密度可达: 对于数据集, 若存在  $x_1, x_2, \dots, x_n$  且  $x=x_1, y=x_n$ , 假如对象  $x_{i+1}$  是对象  $x_i$  关于设置的两个参数是直接密度可达的, 那么称  $y$  由  $x$  密度可达。

密度相连: 若数据集内存在一个对象  $p$ , 而对象  $x$  和对象  $y$  关于  $p$  密度可达, 那么称  $x$  和  $y$  密度相连。

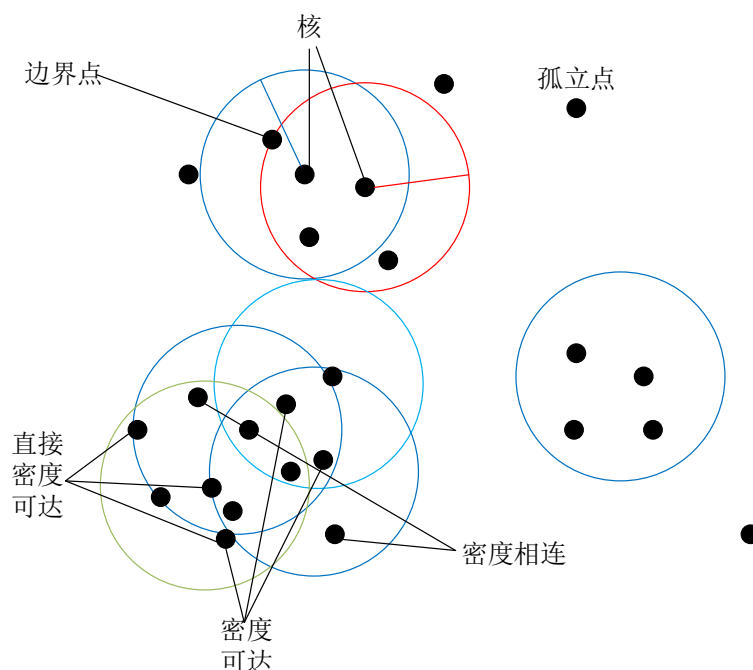


图3.2 DBSCAN 定义示意图

从以上定义可以看出 DBSCAN 的算法思想主要是从随机选择的初始点开始, 向密度可达区域不断扩展, 最后得到一个最大化区域, 该区域包含核心点与边界点并且其内任意选择两点都密度相连。将所有核心点都按此流程处理, 得到最终的聚类结果。

从算法思想可以看出相较于基于层次的聚类算法而言, 基于密度的聚类算法其算法时间复杂度更低, 能够更有效率的处理大量数据; 相较于基于划分的聚类算法而言, 基于数据密度进行聚类可以形成不同形状的簇并且在事先不用设置聚类数量。因此, 基于密度的聚类算法更适用于空战环境下的战场目标分群。

虽然 DBSCAN 算法避免了提前指定聚类数目的缺点, 但是其对于输入参数仍然敏感, 确定  $eps$  和  $MinPts$  比较困难, 若输入参数选取不当, 会使结果不合理。而在 DBSCAN 算法中  $eps$  和  $MinPts$  是全局唯一的, 这样就会导致当数据点分布不均匀时, 聚类效果不够理想<sup>[55]</sup>。该缺点在战场环境下会被放大, 因为空战环境下, 不同类型的目标所组成的战斗群体其密度是不同的, 这就会导致战场分群结果出错, 最终影响群威胁评估的结果。而相较于 DBSCAN 算法, OPTICS 算法的主要优势在于对于输入参数不敏感, 能够有效处理不同簇的密度差别较大的情况。因此本文采用 OPTICS 算法进行空战环境下的战场目标分群, 并对其进行改进。在传统战场数据属性选取的基础上引入目标的速度以及航向角, 形成多维属性(经度、纬度、高度、航向角、速度)作为分群依据, 并对属性进行权重划分, 形成基于属性权重的战场分群算法, 最后再对算法运行效率进行改进, 使其适应复杂的空战环境。

### 3.2.2 OPTICS 算法详细介绍

OPTICS(Ordering Points to identify the clustering structure)算法是针对 DBSCAN 算法对于输入参数敏感的缺点进行改进的,其大部分定义仍然与 DBSCAN 算法相同,比如核心点、边界点等概念,只是在此基础上增加了核心距离与可达距离的概念。

核心距离:样本  $x \in X$ , 对于给定的  $eps$  和  $MinPts$ , 使得  $x$  成为核心点的最小邻域半径称为  $x$  的核心距离。其表达式如(3-1):

$$cd(x) = \begin{cases} undefined & |N_{eps}(x)| < MinPts \\ d(x, N_{eps}^{MinPts}(x)) & |N_{eps}(x)| \geq MinPts \end{cases} \quad (3-1)$$

其中,  $cd(x)$  表示核心距离,  $N_{eps}^i(x)$  表示在集合  $N_{eps}(x)$  中与对象  $x$  近邻的第  $i$  个对象,  $d(x, N_{eps}^{MinPts}(x))$  表示对象  $x$  邻域中任意一个对象与对象  $x$  之间的距离。

可达距离: 设两个对象  $x, y \in X$ , 对于规定的  $eps$  和  $MinPts$ ,  $y$  关于  $x$  的可达距离定义为:

$$rd(y, x) = \begin{cases} undefined & |N_{eps}(x)| < MinPts \\ \max\{cd(x), d(x, y)\} & |N_{eps}(x)| \geq MinPts \end{cases} \quad (3-2)$$

其中,  $rd(y, x)$  表示可达距离,  $d(x, y)$  表示两个对象之间的距离(对象相似度)。当  $y$  处于  $x$  的邻域内时, 其可达距离为  $x$  的核心距离。否则, 可达距离则是  $y$  到  $x$  之间的距离。

OPTICS 算法引入可达距离的作用在于优先扩展核心点附近的数据点。一般而言, 在面积一定的情况下, 簇越稠密, 其数据点之间的距离越小, 在 OPTICS 算法中表现为可达距离越小。因此, 引入可达距离并选择最近的邻居进行聚类, 是为了首先确定选定点附近密度最高的地方, 由此避免了 DBSCAN 算法存在的不足。

OPTICS 算法的核心思想是: 随机选择一个初始点, 从该初始点出发, 不断向周围密度最大的区域扩张。而在扩张过程中, 每次都选择可达距离最小的对象, 将其存在 OPTICS 算法创建的一个有序队列中, 该队列中所有对象都是按照可达距离的大小由小到大进行排序。另外, OPTICS 算法按照对象的处理顺序, 将处理完成的对象的可达距离存储在一个结果队列中。

具体的算法步骤如下所示:

Step1: 输入多维原始数据集  $U = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ , 并将其内数据对象标记为 **unused**, 设定初始参数。

Step2: 创建有序队列  $S$  和结果队列  $R$ 。

Step3:对 U 内数据进行处理。如果 U 内仍有 unused 对象,则随机选择一个 unused 对象,将其放入 R 中,并找到该对象的邻域对象点 N,将其放入 S 中,并按可达距离排序。否则,算法结束。

Step4:若 S 为空,则转至 Step3(重新选择数据)。否则,从 S 中取出可达距离最小的对象 A 并将其标记为 used,保存至 R(若其不存在于 R 中),进行如下处理:

①判断 A 是不是核心对象,如果是,则找到该点的所有直接密度可达点。否则,跳转至 Step4。

②任取一个直接密度可达点 N 进行判断,如果 R 中已经存在该点,则不处理,否则下一步。

③如果 S 中已经存在 N,将此时新的可达距离与旧的可达距离进行比较,如果小于旧的可达距离,则将旧的可达距离替换为新可达距离, S 重新排序。

④如果 S 中不存在 N,则插入该点,并对 S 重新排序。

Step5:迭代 Step3 和 Step4。

Step6:从 R 中提取有序样本点,并将样本点进行聚类,算法结束。

OPTICS 整体流程图如图 3.3 所示。

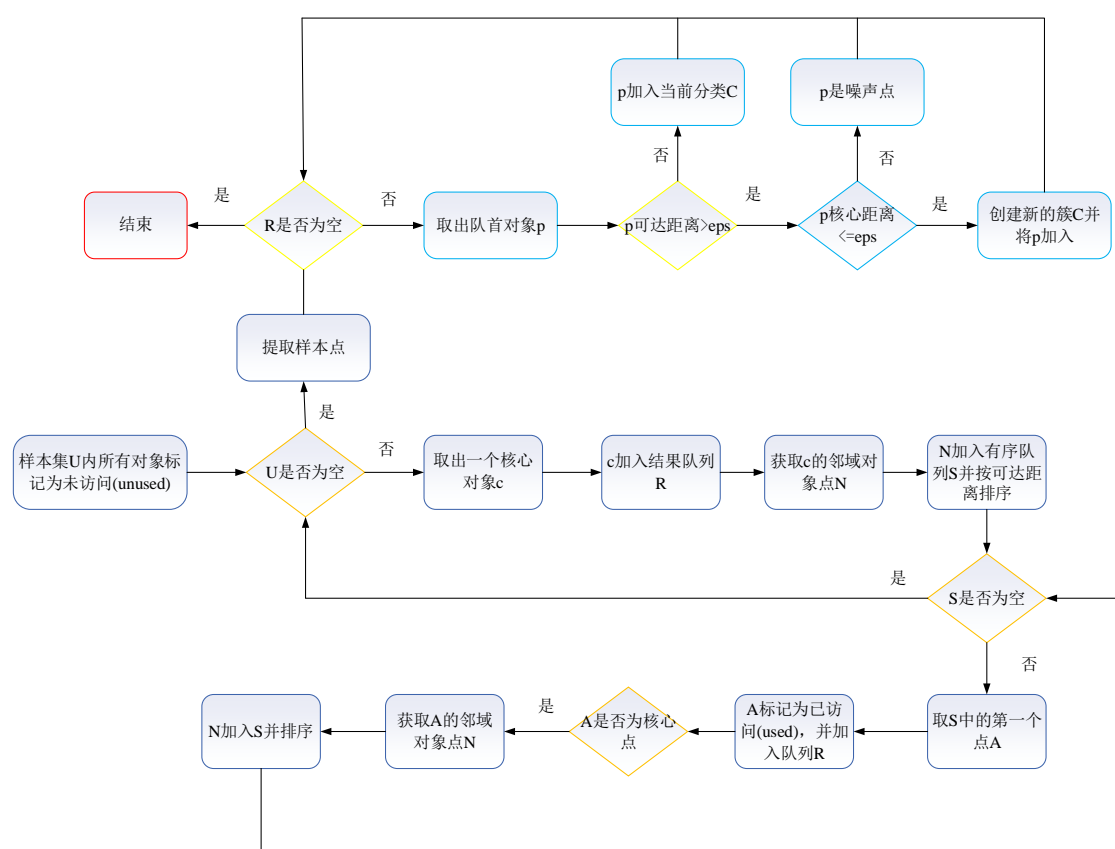


图3.3 OPTICS 算法流程图

从 OPTICS 算法步骤来看, 虽然仍然使用参数  $eps$ , 但是只是运用该参数生成可达距离的有序队列, 并没有直接参与到聚类结果的生成, 所以  $eps$  的改变对于聚类产生的可达距离结果影响较小。OPTICS 算法核心思想在于可达距离的判断, 在可达距离图中, 不同的凹陷程度代表着不同密度大小的簇, 当凹陷明显的时候, 其所代表的簇密度越大。因此, 在复杂的空战环境下, 通过设置较大的邻域半径即可识别不同的战场目标群体, 这是 DBSCAN 算法所不具有的优势。

### 3.2.3 基于改进的 OPTICS 算法的空战战场目标分群

#### (1) OPTICS 算法目标相似度计算的改进

在传统的战场目标分群中, 仅仅依靠目标的经纬高进行分群, 而忽略了敌方目标的空战意图, 这样往往会导致分群结果的不准确, 比如执行不同作战任务的目标被划分到了同一个群内。而目标的空战意图除了与目标的经纬高有关以外, 还与目标的速度以及航向角有关, 因此本文使用目标的经度  $Lon$ , 纬度  $Lat$ , 高度  $H$ , 速度  $S$  以及航向角  $C$  作为目标分群的依据, 以此产生的目标属性数据集  $D$  为:

$$D = [Lon, Lat, H, S, C] \quad (3-3)$$

由于每一维度的数据对聚类结果会产生不同的影响, 比如经纬量纲相同, 所以对结果的影响一样, 而经纬与速度量纲不同, 其对聚类结果的影响也不相同。因此, 在进行分群之间要先将原始数据进行标准化。

首先, 根据 FAHP 法计算每一维的权重, FAHP 算法的详细步骤可见 2.4.1 小节, 其权重向量表示为:

$$W = [w_1, w_2, w_3, w_4, w_5]^T \quad (3-4)$$

其中,  $w_i$  满足  $\sum_{i=1}^5 w_i = 1$ 。

然后, 本文采用极差法对战场目标各属性数据进行处理, 公式为(3-5)。

$$z(k) = \frac{x(k) - \min(x(n))}{\max(x(n)) - \min(x(n))} \quad (3-5)$$

式中,  $n$  表示原始数据的维度,  $z(k)$  表示处理后的数据,  $x(k)$  表示未经处理的原始数据,  $\max(x(n))$  表示该特征向量的最大值,  $\min(x(n))$  则表示该特征向量最小值。

最后, 通过加权欧式距离的度量方式计算各数据对象之间的相似度, 即数据对象



之间的距离，如式(3-6)。

$$\begin{aligned} dist &= \sqrt{w_1(x_{i1} - x_{j1})^2 + w_2(x_{i2} - x_{j2})^2 + \cdots + w_5(x_{i5} - x_{j5})^2} \\ &= \sqrt{\sum_{n=1}^5 w_n(x_{in} - x_{jn})^2} \end{aligned} \quad (3-6)$$

其中， $dist$  表示两个目标之间相似度的大小， $x_i$ ， $x_j$  表示战场上的两个目标， $w_n$  表示某一个属性的权重， $x_{in}$ ， $x_{jn}$  表示两个不同目标的同一个属性的大小。

## (2) OPTICS 算法运行效率的改进

由 OPTICS 算法步骤可知，每次有序队列发生改变时，比如增加新的样本对象到有序队列中或者修改队列中某个对象的可达距离时都需要将有序队列中的样本对象按照可达距离大小重新排序，其排序时间复杂度为  $O(n \log n)$ 。当战场目标过多的时候，其算法运行效率并不高。而对于有序队列的排序，其作用仅仅是为了保证可达距离最小的对象处于有序队列的第一位，而对于其他对象的排序并没有体现出实际作用，从而导致了算法运行时间的浪费。

针对该点不足，本文采用以下的改进方式：使用无序队列代替算法中的有序队列，不再对加入队列的对象按照可达距离进行排序，而是遍历一次队列，找出可达距离最小的对象即可，其算法运行时间为  $O(n)$ 。由于改进后避免了队列的不断排序，有效的降低了算法的运行时间，提高了算法运行效率，并且战场目标数量越大，其效果越明显。

通过以上分析，可以得到改进后的 OPTICS 算法在战场分群上的应用：

Step1:根据 FAHP 算法计算出各属性权值。

Step2:战场数据的预处理。将战场数据标准化，设置较大的邻域半径  $\varepsilon$  和最少邻域点数  $Minpts$ 。

Step3:创建结果队列和一个无序队列(替代原算法中有序队列)。

Step4:根据 OPTICS 算法步骤计算聚类结果。其中，在计算不同目标之间可达距离的时候两个对象相似度计算方式改为加权欧式距离的度量方式(各属性权值由 Step1 给出)。

Step5:提取聚类结果，给出当前战场目标分群结果。

## 3.3 群内主要威胁目标判断技术研究

### 3.3.1 相关概念介绍

在对战场目标进行分群之后，只能初步得到该作战群体的兵力配比情况，要想进一步得到该群体对我方到底具有多大的威胁则需要进一步分析。而群威胁评估并

不是群体内单目标综合威胁值的简单相加,在群组进攻时,往往会有一架或多架飞机承担更多的作战任务,其在敌方作战群体的群威胁计算中也占有重要地位。对于典型的编队作战来说,作战飞机一般分为长机和僚机,其判断方式大多依靠专家经验,在建立相应的知识库以后,通过模板匹配的方式确定群内的长机与僚机,结合长机的单目标威胁值以及僚机的单目标威胁值最终实现群目标威胁的计算<sup>[56]</sup>。然而,这种方法也存在明显的缺点,首先是过于依赖专家经验,不适合复杂多变的空战环境。其次在飞机没有明显队形时无法准确识别长机与僚机。最后,群组与群组对抗的过程是一个多目标与多目标互相对抗的过程,而专家经验法无法综合考虑敌我双方的力量对比,此时得到的结果可能并不适用于群威胁的计算。因此,本文提出了群内主要威胁目标的概念,类似于编队的长机和僚机概念,本文将敌方作战群体内的作战目标分为主要威胁目标以及次要威胁目标,其相关介绍如下所示:

**主要威胁目标:**本文所定义的主要威胁目标,在群目标威胁中处于主要地位,整个群目标的综合威胁都由它作为主要贡献者。

**次要威胁目标:**群目标内除却主要威胁目标以外的目标都可称为次要威胁目标,其主要作用在于计算敌方群目标的群威胁值时为群威胁提供合理的增益。

群内主要威胁目标的判断可以借鉴系统分析的方法,判断对于群威胁系统影响最大的敌方目标。通过对系统分析方法的研究,本文采用灰色关联分析<sup>[57]</sup>(Grey Relation Analysis, GRA)算法来判断敌方群内主要威胁目标。

### 3.3.2 灰色关联分析算法基本原理

灰色关联分析算法<sup>[58]</sup>是一种对多指标之间关联性分析的方法,它对样本量的多少以及样本有无规律都同样适用,而因素间的变化有相似与相异两种趋势,该算法通过对因素间这两种趋势的分析实现了对因素之间关联程度量化的度量。在一个系统内,分析不同因素对某个关注项目的影响程度随时间或不同对象变化的量度大小,称为关联度。

算法的核心思想是选定一个参考数列与若干个比较数列,根据参考数列形成的序列曲线与若干个比较数列形成的序列曲线进行比较,判断其变化趋势是否一致,若一致性较为明显,则说明两个数列之间的联系较为紧密,其关联程度就越高,反之则越低。假设某次评价中共有  $m$  个对象,其中每个对象有  $n$  个指标,算法详细步骤如下:

**Step1:** 确定参考数列(母序列)  $y = y(k) | k = 1, 2, \dots, m$  与比较数列(子序列)  $x_i = x_i(k) | k = 1, 2, \dots, m, i = 1, 2, \dots, n$ 。

**Step2:** 对变量进行预处理

由于不同要素之间具有不同的量纲和数据范围,为了消除量纲与数据范围不同对于最终结果的影响,需要对它们进行标准化处理,将它们统一到近似的范围内。其处理

公式如式(3-7)。

$$x_i(k) = \frac{x_i(k)}{\bar{x}_i} \quad (3-7)$$

其中,  $x_i(k)$  表示第  $i$  个序列中的第  $k$  个元素,  $\bar{x}_i$  表示第  $i$  个序列的均值。

Step3: 计算子序列与母序列对应指标之间的关联系数  $\mathcal{G}(y(k), x_i(k))$ 。

$$\mathcal{G}(y(k), x_i(k)) = \frac{\alpha + \rho\beta}{|y(k) - x_i(k)| + \rho\beta} \quad (i = 1, 2, \dots, n, k = 1, 2, \dots, m) \quad (3-8)$$

式中,  $\alpha$  表示两极最小差,  $\beta$  表示两极最大差,  $\rho$  表示分辨系数(通常取 0.5)

$$\alpha = \min_i \min_k |y(k) - x_i(k)| \quad (3-9)$$

$$\beta = \max_i \max_k |y(k) - x_i(k)| \quad (3-10)$$

Step4: 计算灰色关联度

因为  $\mathcal{G}(y(k), x_i(k))$  指的是子序列与母序列各指标之间的关联量化值, 所以有许多数值, 而过于分散的信息不利于各个子序列与母序列整体的关联大小对比。因此需要将各要素的关联系数进行整合, 形成一个量化值, 即求各要素关联系数的平均值, 作为两个序列之间关联大小的量化表示。定义  $r_i$  为第  $i$  个子序列关于母序列的灰色关联度, 则

$$r_i = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \mathcal{G}(y(k), x_i(k)) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3-11)$$

最终根据灰色关联度的大小判断哪个指标在系统内更加重要。

其算法流程图如图 3.4 所示。

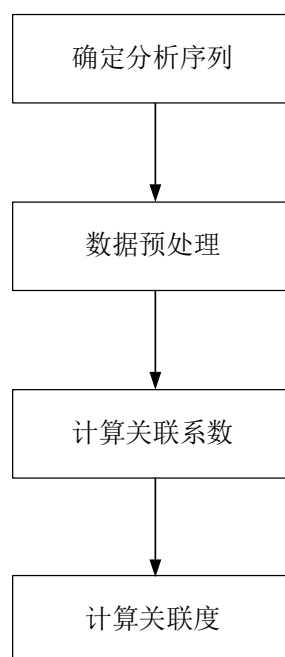


图3.4 灰色关联算法流程图

### 3.3.3 基于灰色关联分析算法的群内主要威胁目标判断技术研究

空空作战时，敌方使用的作战目标类型会不相同，常见的类型目标包括战斗机、预警机、干扰机等。不同类型的飞机往往在战场上起到不同的作用，表 3.1 给出常见类型飞机在战场上的不同功能。

表3.1 飞机功能分析表

类型	功能
战斗机	保护制空权，并摧毁敌人使用制空权能力
预警机	搜索目标，指挥并引导我方飞机作战
干扰机	干扰敌方电子设备，使其无法正常工作
加油机	为飞机补加燃料

从表中可以分析出，在空战时除却战斗机，其他类型飞机一般会远离战场，不直接参与到作战中。因此，本文主要考虑战斗机的群组威胁情况。以下给出战斗机编组时，群内主要威胁目标判断的步骤，其算法流程如图 3.5 所示。

**Step1:**构造初始矩阵。假设敌方作战群体内有  $n$  个目标，我方作战群体内有  $m$  个单位，根据单目标综合威胁评估算法计算出敌方群体内  $n$  个目标对我方  $m$  个单位的单目标威胁值，形成初始矩阵  $T$ ：

$$T = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & \cdots & t_{1n} \\ t_{21} & t_{22} & \cdots & t_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ t_{m1} & t_{m2} & \cdots & t_{mn} \end{bmatrix} \quad (3-12)$$

其中,  $t_{ij}$  表示敌方第  $j$  个目标对我方第  $i$  个作战单位的单目标威胁值。

由于在计算单目标威胁值的时候已经进行了归一化, 各个要素量纲一致, 且各个元素都大于 0, 因此不必再对数据进行预处理。

**Step2: 确定分析序列。**

判断群内主要威胁目标的目的主要是为群目标综合威胁计算做铺垫, 群体的威胁是基于群目标内各个目标的单目标威胁值所形成的的综合威胁值, 因此可以确定此时的参考数列与比较数列如下所示:

**参考数列:** 参考数列所代表的含义是敌方群组内各架飞机对我方各个作战单位的总威胁值(在此只是运算所用, 其象征含义与真实群威胁值类似, 但不代表真实群威胁值)。定义参考数列为  $x_0$ , 其计算方式如式(3-13)。

$$x_0(i) = \sum_{j=1}^n t_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (3-13)$$

其中,  $x_0(i)$  表示参考数列里第  $i$  个元素。

**比较数列:** 比较数列表示敌方作战群内第  $j$  个目标对我方  $m$  个作战单位的所有威胁值, 其表示为  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , 以  $x_1$  为例, 其表示敌方第一个目标对我方各个作战单位的威胁值, 表示式为:

$$x_1 = [t_{11}, t_{21}, \dots, t_{m1}]^T \quad (3-14)$$

**Step3: 计算关联系数。** 关联系数的计算方式如式(3-8)所示。

**Step4: 计算灰色关联度。** 其计算公式如式(3-11)。

最终通过计算出的敌方作战群内各个目标的灰色关联度, 得到此时敌方作战群内的主要威胁目标。

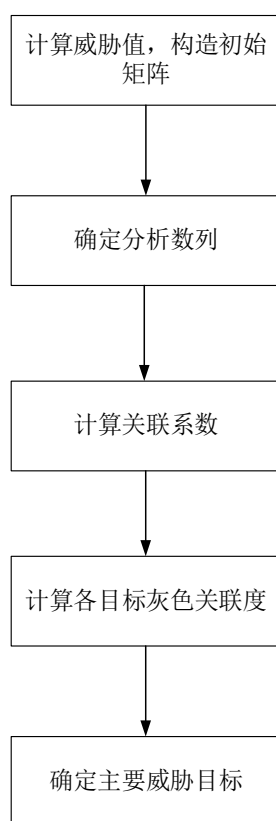


图3.5 群内主要威胁目标判断算法流程图

## 3.4 实验仿真分析

### 3.4.1 战场目标分群实验仿真

#### (1) 仿真一：两种聚类算法效果对比

通过公共数据集 Iris 对聚类算法进行对比仿真。由于本文对于 OPTICS 算法的改进在于目标相似度计算和算法效率的改进，因此在仿真一中主要先对 DBSCAN 与 OPTICS 算法进行仿真对比，阐明本文为什么在战场分群中使用 OPTICS 算法。

Iris 数据集主要包含 150 个样本数据，分为 3 个类型(1,2,3)，每个类型有 50 个数据，每个数据有 4 个属性。可以通过 4 个属性对数据进行分类，Iris 数据集标记情况如图 3.6 所示。

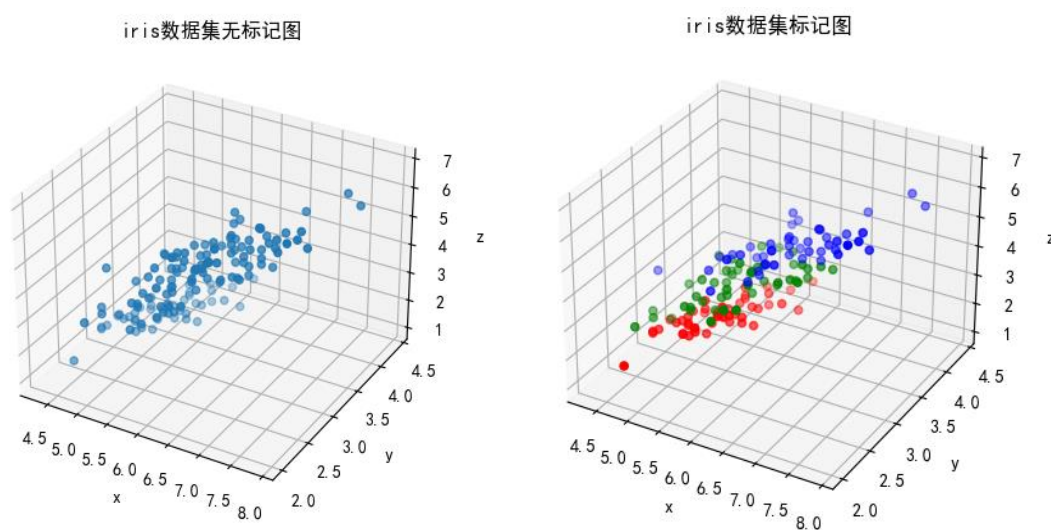


图3.6 Iris 数据集标记图

首先对不同参数取值下 DBSCAN 算法进行仿真对比与分析，仿真对比如图 3.7 所示。

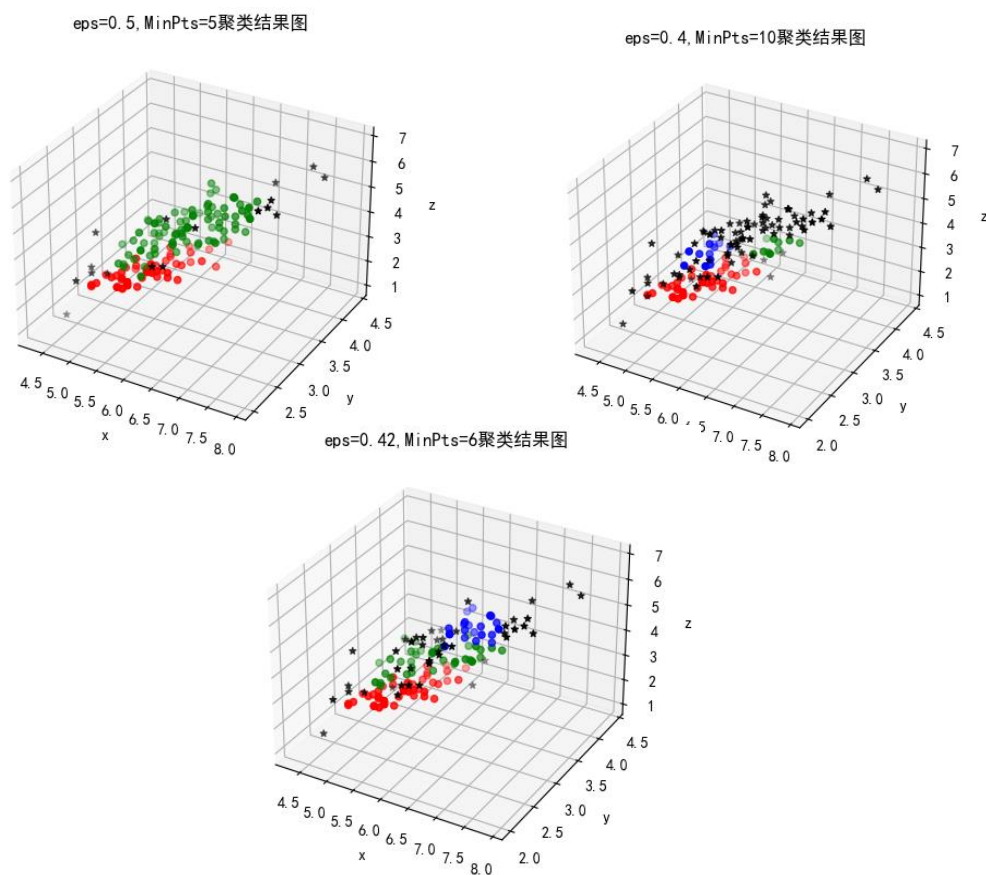


图3.7 不同参数取值下 DBSCAN 算法仿真对比图

不同参数取值下 DBSCAN 算法的聚类情况分别如表 3.2，表 3.3，表 3.4 所示。

表3.2  $\text{eps}=0.5, \text{MinPts}=10$  聚类情况表

类型 聚类情况	1	2	3	散点个数
群内个数	49	84	0	17
正确匹配个数	49	44	0	

表3.3  $\text{eps}=0.4, \text{MinPts}=10$  聚类情况表

类型 聚类情况	1	2	3	散点个数
群内个数	44	10	13	83
正确匹配个数	44	10	0	

表3.4  $\text{eps}=0.42, \text{MinPts}=6$  聚类情况表

类型 聚类情况	1	2	3	散点个数
群内个数	46	37	22	45
正确匹配个数	46	37	22	

对 DBSCAN 算法仿真结果分析发现，只有通过对 DBSCAN 算法的输入参数 ( $\text{eps}, \text{Minpts}$ ) 不断进行调整，才会使得聚类结果正确率逐步提高。在本次实验对比中，DBSCAN 算法参数设置为  $\text{eps}=0.42, \text{MinPts}=6$ 。接下来对 OPTICS 算法进行仿真分析，由于其仿真过程与 DBSCAN 类似，通过不断修改参数得到较好的聚类结果，因此本文在接下来的仿真实验中直接使用仿真结果较好的参数  $\text{MinPts}=5$ ，其仿真结果如图 3.8 所示。



OPTICS聚类结果图

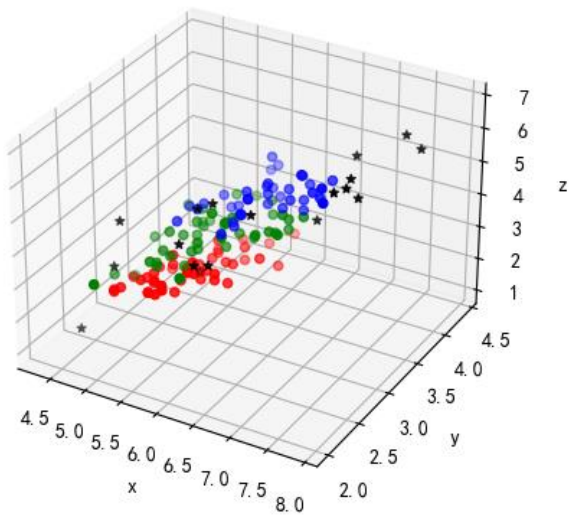


图3.8 MinPts=5 时 OPTICS 仿真结果图

其聚类结果如表 3.5 所示。

表3.5 OPTICS 聚类结果表

<div>类型</div> <div>聚类情况</div>	1	2	3	散点个数
群内个数	48	46	38	18
正确匹配个数	48	46	38	

从上述仿真结果中可以发现，对于 DBSCAN 算法来说，过于依赖初始参数的设置(邻域半径  $\epsilon$  和邻域密度 MinPts),通过不断的调整  $\epsilon$  和 MinPts 才能得到相对较好的聚类情况。而对于 OPTICS 算法而言，虽然其仍然需要输入参数，但是算法对于  $\epsilon$  并不敏感，只需调整 MinPts 就可以得到较好的聚类结果。

通过上述结果分析得到两个算法的正确率对比情况和运行 50 次后平均运行时间对比如表 3.6 所示。

表3.6 DBSCAN 算法与 OPTICS 算法对比表

<div>对比</div> <div>算法</div>	正确率	运行时间(ms)
DBSCAN	70%	37.58
OPTICS	88%	51.23

由表格可以看出,虽然 OPTICS 算法相对于 DBSCAN 算法付出了时间代价,但是聚类效果得到了大幅度的提高,并且在复杂的空战环境下,相较于 DBSCAN 算法要不断调整两个初始参数尝试获得更优的结果而言,OPTICS 算法显然更适合较复杂的战场目标分群。因此本文采用 OPTICS 算法完成空战环境下的战场目标分群,并在仿真二中验证改进后的 OPTICS 算法对于复杂空战环境的适用性。

## (2) 仿真二:改进 OPTICS 算法对于战场目标分群的应用

本文在战场空间中随机生成 51 个敌方目标,每个目标都有五个属性:经度、纬度、高度、速度和航向角。生成的数据集总共包含 5 个目标群,其标记情况如图 3.9 所示,颜色一致的表示同一群体,并且为了避免受到属性量纲不同带来的影响,将所有目标的各个属性进行归一化。

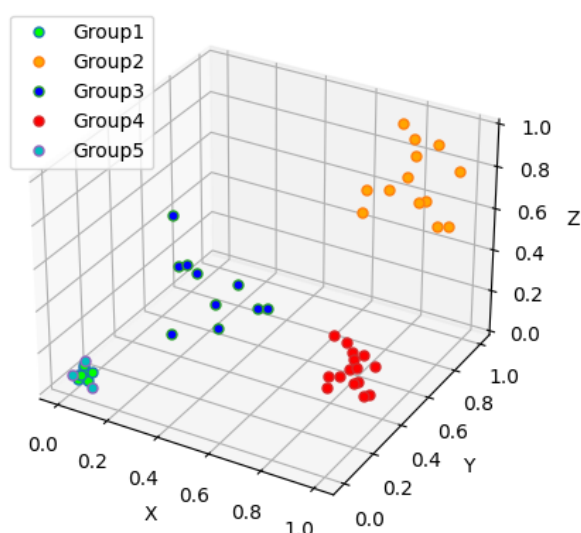


图3.9 战场数据集标记状态图

对图 3.9 分析可以看出,编号 1 和编号 5 的群体交织在一起,但是分为了两个群,这是因为 1 群和 5 群虽然空间位置特征较为相近,但是其速度和航向角的差异较大。

根据 FAHP 算法计算五个纬度的指标权重如下:

$$W = \{0.25, 0.25, 0.2, 0.15, 0.15\}$$

本文对于改进后的 OPTICS 算法设定初始参数为  $\text{eps}=\text{inf}$ ,  $\text{MinPts}=2$ (根据场景可以改变)。运行算法得到各目标的可达距离图,如图 3.10 所示。图中纵轴代表可达距离的大小,横轴代表作战群的编号。根据可达距离图中的凹槽数量即可判断当前战场目标的分群数量,图中显示此时战场空间内目标分为 5 个群体,这与实际战场敌方目标的分群数量一致。而可达距离图中不同的凹槽有着不同的平均可达距离,这代表了群体的密集程度。

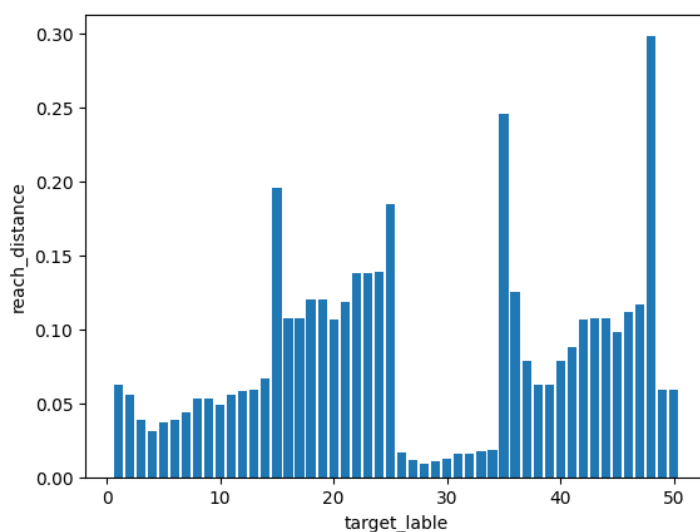


图3.10 改进 OPTICS 算法可达距离图

其三维分群结果如图 3.11 所示，图中三维坐标分别表示目标的经纬高，每一个点表示战场空间内的一个目标，颜色相同的点代表处于同一个群内，“+”表示未被分群的目标。通过三维结果图可以清晰的看出目标的分群情况，但是群内某些点可能会出现重叠问题，这主要是由于目标的经纬高一样导致的。因此，为了能够更好的展示目标的实际情况，基于三维坐标图做出 x-y, x-z, y-z 剖面图，如图 3.12 所示。在剖面图中，可以发现原先重叠的目标点可能只是在经纬高某个维度上发生了重合，而在其他维度下仍然是分离的状态。

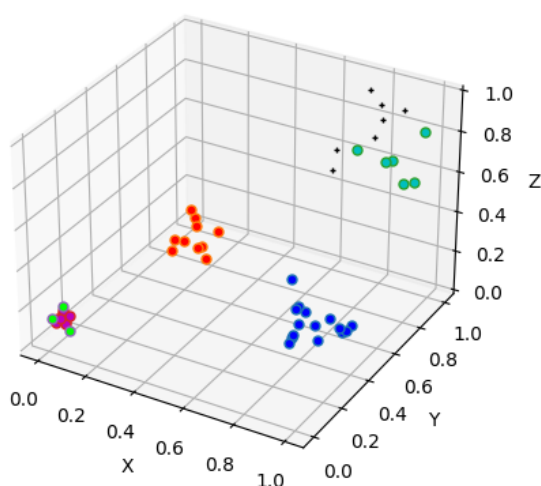


图3.11 改进 OPTICS 算法分群结果图

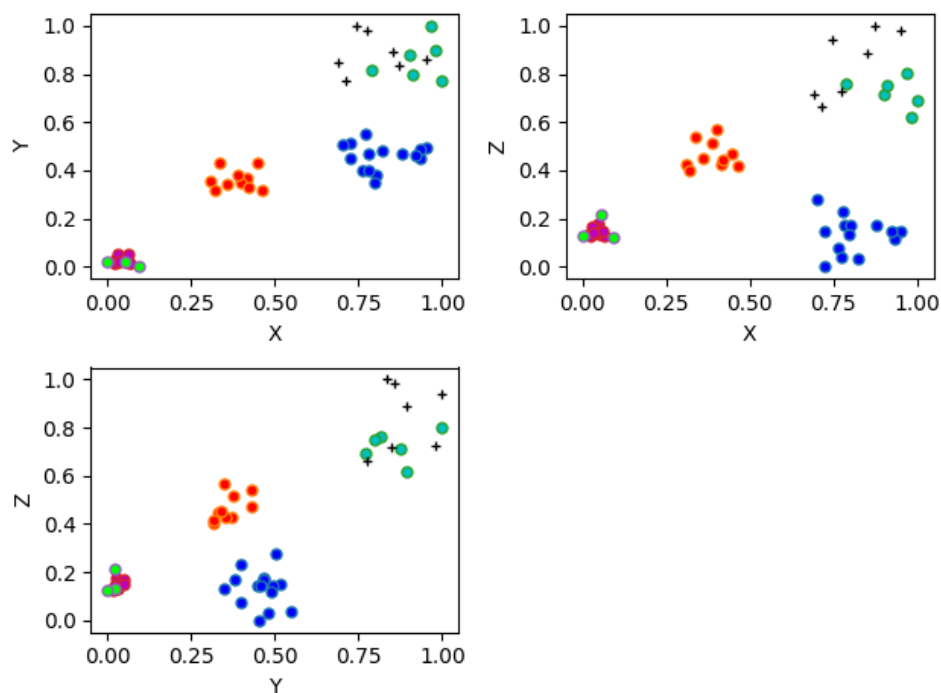


图3.12 改进 OPTICS 算法分群结果三视图

通过对改进 OPTICS 算法的分群结果与战场数据标记图对比分析可以发现，该算法识别的分群数量与战场数据一致，且可以实现 4 个群的完美识别，仅是 Group2 群只能部分识别，分群结果符合理想结果。

接下来验证改进 OPTICS 算法与 OPTICS 算法的效率情况和正确率，为了使得算法的验证结果更具有普遍性，本文随机生成 100 个密度不均的战场数据集共 100 组，设置相同的算法参数，计算并对比算法的准确率和运行时间，结果如表 3.7 所示。

表3.7 聚类结果正确率和运行时间对比表

算法 对比指标	OPTICS	改进 OPTICS
正确率	85.21%	86.27%
运行时间(ms)	43.21	33.43

由表格可知，OPTICS 算法与改进 OPTICS 算法的正确率相差不大，但是改进 OPTICS 算法运行效率得到了较大程度的提高。另外，初始邻域半径的设置也是影响算法运行效率的因素之一，如果战场空间中有大量敌方目标时，在不影响分群效果的前提下，可以适当减小邻域半径，使得算法运行时间降低。结合仿真一 DBSCAN 算法以及 OPTICS 算法结果对比情况，可以得出以下结论，改进后的 OPTICS 算法性能

更高，能够更有效地解决战场目标的分群问题，具有较高的研究意义与应用前景。

3.4.2 群内主要威胁目标判断实验仿真

(1) 仿真一：假设空战环境下，敌方作战群向我方作战群发起进攻，各作战单位运动信息如表 3.8，表 3.9 所示，其相对位置如图 3.13 所示。由于保密原因，敌我双方飞机具体类型不在表格中给出，以下仿真实验皆是。

表3.8 仿真一敌方运动信息数据表

<div>参数 敌方目标</div>	经度	纬度	高度(km)	速度(Ma)
T1	118.25	24.70	11	1.2
T2	118.22	24.95	14	1.6
T3	118.27	25.10	12	1.1

表3.9 仿真一我方运动信息数据表

<div>参数 我方单位</div>	经度	纬度	高度	速度
M1	117.56	24.64	13	1.4
M2	117.57	24.55	12	1.3

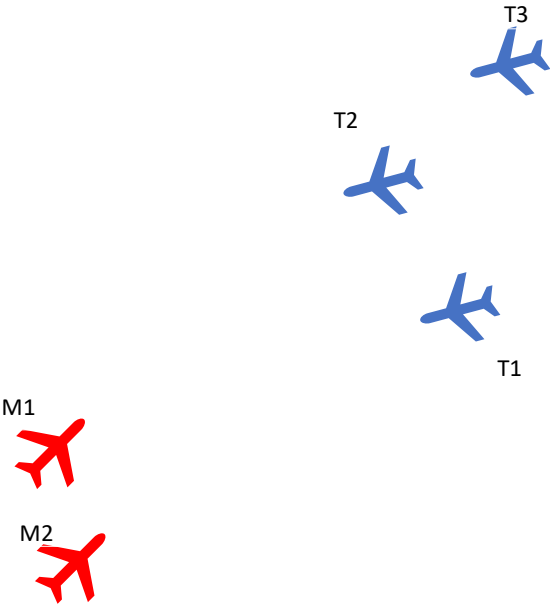


图3.13 仿真一战场相对位置图

从图中可以看出,敌方编队大致采用正三角形队形,根据专家经验判断,一般这种队形以突出战机作为群目标主要威胁来源,即 T2。

根据单目标威胁评估算法计算出各个目标的威胁值,各目标威胁值如表 3.10 所示。

表3.10 仿真一各目标威胁值

	T1	T2	T3
对 M1 威胁值	0.4426	0.5861	0.4358
对 M2 威胁值	0.467	0.6171	0.4594

根据灰色关联算法求出各目标的灰色关联度如表 3.11 所示。

表3.11 仿真一各目标灰色关联度

目标	T1	T2	T3
灰色关联度	0.8930	0.9827	0.8882

从表 3.11 可以看出,T2 的灰色关联度最高,其是敌方作战群内的主要威胁目标。与专家经验判断相同。

(2) 仿真二:仍然以三个敌方目标,两个我方作战单位分析,形成表 3.12 的敌方信息数据表。我方信息仍以表 3.9 为例。

表3.12 仿真二敌方运动信息数据表

参数 敌方目标	经度	纬度	高度(km)	速度(Ma)
T4	118.27	24.70	12	1.2
T5	118.25	24.95	11	1.2
T6	118.27	25.10	11	1.1

此时的战场相对位置如图 3.14 所示。

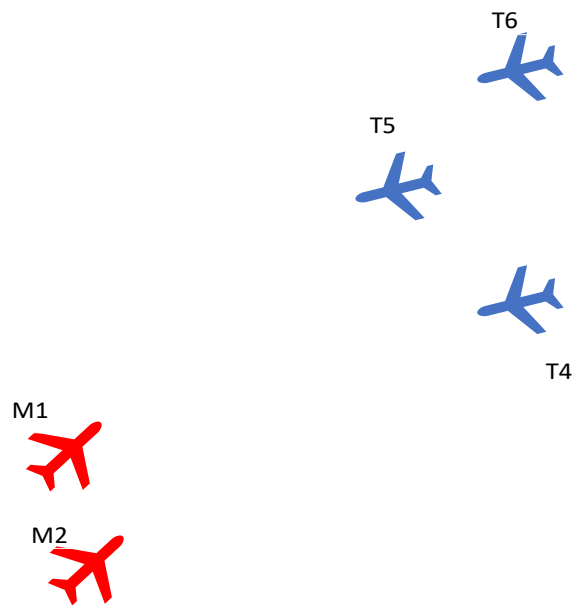


图3.14 仿真二战场相对位置图

从图中发现，此时敌方作战群仍以正三角队形飞行，若以专家经验来看，此时的主要威胁目标应该是 T5。在此对其进行分析，根据单目标威胁评估相关算法计算出各个目标的威胁值，其威胁值表如表 3.13 所示。

表3.13 仿真二各目标威胁值

	T4	T5	T6
对 M1 威胁值	0.4681	0.4278	0.4191
对 M2 威胁值	0.4963	0.4519	0.4427

根据灰色关联算法求出各目标的灰色关联度如表 3.14 所示。

表3.14 仿真二各目标灰色关联度

目标	T4	T5	T6
灰色关联度	0.9825	0.9526	0.9465

从表 3.14 可以看出，此时 T4 的灰色关联度最高，其是来袭目标群内的主要威胁目标。这与专家经验判断的结果和仿真一的结果并不相同。与专家经验判断不同是因为专家经验判断时，仅仅依靠主观方式人为规定群目标内的主要威胁目标，没有考虑空战时目标各属性随着战场过程的推进发生改变，其威胁值也要随着改变，其在作战

群内的威胁贡献度也会随之改变。而基于灰色关联算法判断群内主要威胁目标的时候,依靠的是客观的数据,即群内各个目标的威胁值,考虑到了战场的态势是瞬息万变的,群内的主要威胁目标也随着战场过程的推进在发生着改变,这也解释了为什么同样是正三角编队飞行,而仿真一与仿真二的结果并不相同,这是因为此时的战场态势发生了改变,群内各目标威胁值也发生了相应变化。若是以一成不变的结果作为依据,接下来的群威胁计算结果也必然不够准确,不利于我方作战指挥员的战术决策。

从仿真一和仿真二结果分析看出,敌方作战群内的主要威胁目标并不是一成不变的,它会随着战场态势的改变而发生改变,并不能以一成不变的结果作为群内的主要威胁目标,在此对结论进行进一步的仿真验证。

(3) 仿真三:假设此时作战群体内含有四个作战目标对我方群体(含三个作战单位)发起进攻,此时战场空间各目标的战场信息如表 3.15、3.16 所示。其战场相对位置如图 3.15 所示。

表3.15 仿真三敌方运动信息表

参数 敌方目标	经度	纬度	高度(km)	速度(Ma)
T7	118.25	24.70	11	1.2
T8	118.22	24.95	14	1.6
T9	118.27	25.10	12	1.1
T10	118.21	24.76	14	1.4

表3.16 仿真三我方运动信息表

参数 我方单位	经度	纬度	高度(km)	速度(Ma)
M1	117.56	24.64	13	1.4
M2	117.57	24.55	12	1.3
M3	117.56	24.45	11	1.3



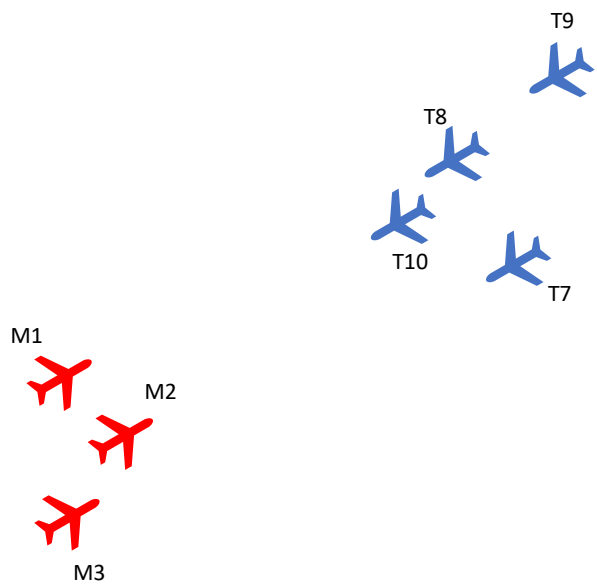


图3.15 仿真三战场相对位置图

从图中可以看出，T10 处于敌方进攻的前端，按照经验来说，会认为其是敌方作战群的主要进攻者，在此进行分析。根据单目标威胁值相关算法计算出此时敌方各个目标的单目标威胁值如表 3.17 所示。

表3.17 仿真三各目标威胁值

	T7	T8	T9	T10
对 M1 威胁值	0.4426	0.5428	0.4875	0.5345
对 M2 威胁值	0.4700	0.5710	0.5146	0.5623
对 M3 威胁值	0.4857	0.5847	0.5332	0.5711

计算出的各目标灰色关联度如表 3.18 所示。

表3.18 仿真三各目标灰色关联度

目标	T7	T8	T9	T10
灰色关联度	0.9321	0.9714	0.9496	0.9673

从表中可以看出，此时 T8 关联度最高，其是来袭敌方群内的主要威胁目标。这与经验法判断的不一致。

(4) 仿真四：此时敌方来袭目标战场相对位置不变，我方作战群内作战单位数量发生改变，新增一个作战单位 M4，此时我方作战单位运动信息如表 3.19 所示。其战场相对位置如图 3.16 所示。

表3.19 仿真四我方运动信息表

<div>参数 我方单位</div>	经度	纬度	高度(km)	速度(Ma)
M1	117.56	24.64	13	1.4
M2	117.57	24.55	12	1.3
M3	117.56	24.45	11	1.3
M4	117.58	24.65	14	1.5

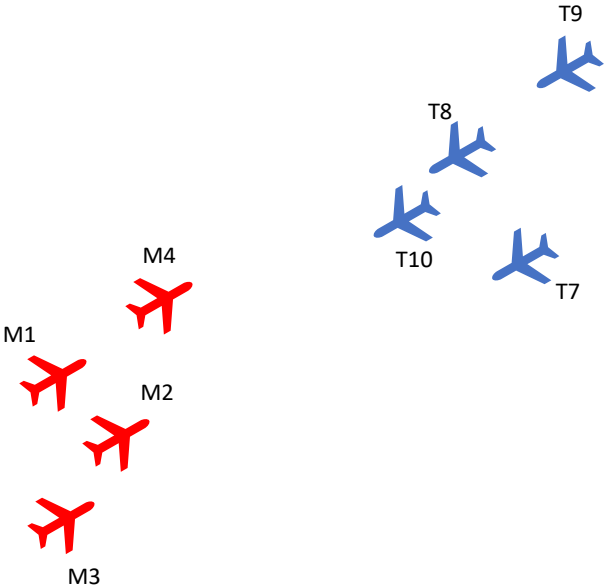


图3.16 仿真四战场相对位置图

此时根据单目标威胁值相关算法计算出敌方各个目标的单目标威胁值如表 3.20 所示。

表3.20 仿真四各目标威胁值

	T7	T8	T9	T10
对 M1 威胁值	0.4426	0.5428	0.4875	0.5345
对 M2 威胁值	0.4700	0.5710	0.5146	0.5623
对 M3 威胁值	0.4857	0.5847	0.5332	0.5711
对 M4 威胁值	0.4617	0.5624	0.8557	0.5436

计算出的各目标灰色关联度如表 3.21 所示。

表3.21 仿真四各目标灰色关联度

目标	T7	T8	T9	T10
灰色关联度	0.9095	0.9448	0.9541	0.9405

由表 3.21 可以看出，此时群内主要威胁目标为 T9，与仿真三结果不同。这是由于此时我方群体相较于仿真三时发生了改变，双方的战场态势发生了变化，导致仿真四判断的结果与仿真三不一致。而仿真三与仿真四结果的对比则进一步说明了群内主要威胁目标并不是一成不变的，它会随着战场态势的改变而发生变化。

通过以上四个仿真实验分析可以看出，对于来袭群内的主要威胁目标判断，若只依靠专家经验进行，其结果会出现与实际战场不一致的情况。而使用灰色关联算法进行判断，此时算法判断的依据主要是群内各目标的威胁值，是客观的数据，不以专家主观意识而改变。随着战场态势的不断变化，群内各目标的威胁值也在发生着相应改变，群内的主要威胁目标也应该随着战场过程的推进而发生变化，这也是仿真一与仿真二、仿真三与仿真四判断出的群内主要威胁目标结果不同的原因。并且，从以上四个实验也可以看出，本文所采用的算法对于群目标成队形飞行或者不成队形飞行，都可以判断出此时群内的主要威胁目标，其在群内主要威胁目标判断的应用上具有通用性。

### 3.5 本章小节

本章主要完成了空战环境下战场目标的分群以及群内主要威胁目标判断技术的研究。首先，对现有的传统聚类算法进行了分析研究，通过对比各聚类算法的优缺点

并结合战场环境目标多、分群数量未知以及属性多维度的特点,使用 OPTICS 算法完成战场目标分群,并在目标相似度计算以及算法运行效率上进行改进以满足复杂战场下目标分群的实时性和准确性要求。在完成战场目标分群以后,结合群内各个单目标的威胁值,使用灰色关联算法完成群内主要威胁目标的判断,并进行了仿真验证,为下一章实现群目标综合威胁评估奠定基础。



## 第四章 群目标综合威胁评估及其在打击意图判断中的应用研究

### 4.1 引言

当前的威胁评估更多关注的是单个作战目标的威胁程度。常用的战场威胁评估手段关注的也是单个目标的各个威胁指标,计算出的结果也只是单目标威胁值。对于飞行员而言,单目标的威胁值完全够用,但是对于指挥员来说,仅仅只有单目标的威胁值会面临两个问题,一个是战场上要关注的信息量太过庞杂,另一个就是无法对整体战场态势形成良好的认知反馈。并且现代空战不再仅仅是单兵作战的方式,由于通信技术的飞速发展,战机与战机之间通信数据链的产生,使得现代空战的作战模式已经变成了的单机之间的协同作战,即群组作战模式。

多机群组作战已经成为现代空战的主要作战方式。由多架飞机组成的编队能够充分发挥各个飞机的作战优势,多机之间的协同具有单架飞机完全达不到的作战效能。多机作战,并不是单机的简单叠加,多机之间的系统安排,能够大大超越个体的作战效果。因此,将单个目标的战场威胁评估向群目标综合威胁评估转变十分有必要。

但是,威胁评估并不是空空作战的最终目标,完善的空中作战体系需要生成最终的决策方案,而决策方案的生成依赖于对敌方目标打击意图的判断。而空中大规模作战时,作战平台数量多、战场态势复杂多变的特点使得目标打击意图的判断成为亟需解决的难点。

本章在实验室项目的基础上,针对群内各个目标之间协同作用难以评估的问题,提出了基于增益系数的群目标综合威胁评估算法,综合考虑敌我双方作战群的空战能力对比以及群内各目标对于群威胁系统的增益程度,形成更为客观合理的群目标综合威胁值。然后采用粒子群优化算法,构建合适的群目标打击意图判断模型,结合计算出的群目标综合威胁值完成敌方目标的打击意图判断。

### 4.2 空战群目标综合威胁评估算法设计

#### 4.2.1 群内目标相互增益评估

空战威胁评估各个环节中,对于群目标的威胁评估是较为困难的一节。这是由于群组作战的群威胁评估过程虽然实际上是对群内单目标的威胁值进行综合的一个过程,但是目标分群后各个目标之间的相互关联度不容易进行量化。群威胁的计算并不是群内各个单目标威胁值的简单相加或相乘。若采用简单的求和相加方式,由于群内

各目标之间的功能可能会有一定的重叠性,这样就会导致计算结果与实际结果相比偏大的问题;而采用相乘,如果群内有威胁程度较小的实体,则会导致群威胁计算结果的明显缩小,与实际不符。

由于群内各个作战目标之间的协同作用难以度量,因此目前并没有很好的解决方式。本文在群威胁算法研究的基础上,受到单目标威胁指标权重计算方法的启发,提出了基于增益系数的群目标综合威胁评估计算方法,为群威胁计算提供新的思路。

基于 3.3 小节介绍,在实际作战时,群目标内的作战单位分为主要威胁目标以及次要威胁目标,而群目标的主要威胁来源在于主要威胁目标。对于其他次要威胁目标而言,则主要考虑它们对于群威胁系统的增益程度。通过这种方式,既避免了简单相加导致的结果偏大问题,又避免了相乘带来的结果偏小问题。

因此,本文在对群目标的作战意图以及目标类型进行分析以后,通过专家经验对群内各个目标之间的相互增益进行评估,然后根据熵权法计算各个目标在群威胁系统内的增益系数。表 4.1 中给出各作战目标的增益程度及其对应的区间值。

表4.1 作战目标之间的相互增益程度等级划分

增益程度	最大	较大	一般	较小	无
$\lambda$	[0.8,1]	[0.6,0.8]	[0.3,0.6]	[0,0.3]	0

## 4.2.2 基于熵权法的增益矩阵计算

### (1) 熵权法介绍

熵的概念最开始来源于热力学对于物质状态的探索,随着科学理论的发展,信息论中引入并完善了关于信息熵的相关概念。而熵权法<sup>[59]</sup>是根据系统内各个指标的信息熵来判断指标的变异程度,进而计算出各指标所占权重的方法。当指标的信息熵越大时,说明此时该指标的变异程度越小,信息量的提供就越少,指标的权重也就越小。反之,权重越大。该方法是对指标状态一种客观评价的方法,其根本上是通过指标的变异程度来计算各指标的权重系数,其结果避免了专家主观经验的干涉,具有较强的客观性。

关于信息熵的计算如下所示:

$$H = -\sum_{i=1}^n (P_i \times \ln P_i) \quad (4-1)$$

其中,  $H$  代表信息熵,  $P_i$  表示数据对象在  $n$  个状态中处于第  $i$  个状态的概率。

而当待评价对象共有  $m$  个时,则会形成  $m \times n$  的待评价矩阵  $D = (d_{ij})_{m \times n}$ ,那么对于某个指标  $j (j=1,2,\dots,n)$  的信息熵计算如式(4-2)所示。

$$H_j = -\sum_{i=1}^m (P_{ij} \times \ln P_{ij}) \quad (4-2)$$

其中,  $P_{ij}$  的计算如式(4-3)所示。

$$P_{ij} = \frac{d_{ij}}{\sum_{i=1}^m d_{ij}} \quad (j=1,2,\dots,n) \quad (4-3)$$

## (2) 基于熵权法求解增益系数

本文首先根据专家经验法得到敌方群组内各个目标的初始增益矩阵,假设敌方作战群内有  $n$  个目标。

Step1:构建  $n \times n$  矩阵。矩阵中元素  $c_{ij}$  表示第  $i$  个目标对第  $j$  个目标的增益程度。

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \cdots & c_{nn} \end{bmatrix} \quad (4-4)$$

Step2:归一化作战目标增益矩阵。

对敌方初始增益矩阵  $C$  进行归一化处理,得到  $C^* = \{\delta_1^*, \delta_2^*, \dots, \delta_n^*\}$ ,如式(4-5)所示:

$$C^* = \begin{bmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} & \cdots & \delta_{1n} \\ \delta_{21} & \delta_{22} & \cdots & \delta_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \delta_{n1} & \delta_{n2} & \cdots & \delta_{nn} \end{bmatrix} \quad (4-5)$$

其中,  $\delta_{ij} (i, j=1,2,\dots,n)$  的计算如式(4-6)所示。

$$\delta_{ij} = \frac{c_{ij}}{\sum_{i=1}^n c_{ij}} \quad (j=1,2,\dots,n) \quad (4-6)$$



Step3:计算信息熵。

$$e_i = -\frac{1}{\ln(n)} \sum_{j=1}^n (\delta_{ij} * \ln(\delta_{ij})) \quad (4-7)$$

其中,  $e_i$  表示计算的信息熵, 考虑对数函数的性质, 规定当  $\delta_{ij}=0$  时,  $\delta_{ij} * \ln(\delta_{ij}) = 0$ 。

Step4:得到增益系数。

通过计算得到的信息熵, 将初始目标间的增益转换为对群威胁的增益, 并且得到增益向量  $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$ , 其中  $w_i$  的计算公式如式(4-8)所示:

$$w_i = \frac{1 - e_i}{\sum_{i=1}^n (1 - e_i)} \quad (4-8)$$

### 4.2.3 基于增益系数的群威胁值计算

正如上文所述, 群威胁值的计算是对群内单目标威胁值进行综合的一个过程, 不能仅仅简单使用数据叠加或相乘的想法, 本文在 3.3 节对于群内主要威胁目标判断以及 4.2.2 小节群内目标增益系数求解的基础上, 采用基于增益系数的群威胁值计算方式。其算法步骤如下所示:

假设我方作战群有  $m$  个作战单位, 敌方作战群有  $n$  个作战目标, 形成初始目标威胁矩阵  $T$ , 如下所示:

$$T = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & \cdots & t_{1n} \\ t_{21} & t_{22} & \cdots & t_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ t_{m1} & t_{m2} & \cdots & t_{mn} \end{bmatrix} \quad (4-9)$$

其中,  $t_{ij}$  表示敌方第  $j$  个目标对我方第  $i$  个作战单位的单目标威胁值。

Step1:根据专家经验得到敌方作战群内各个目标之间相互增益的初始增益矩阵。

Step2:根据熵权法计算出各个敌方目标在群威胁系统内的增益系数  $w$ 。

Step3:根据灰色关联算法判断敌方作战群内主要威胁目标。

Step4:计算群目标综合威胁值。

由于敌方作战群的群威胁主要来源是群内的主要威胁目标,其余各个次要威胁目标主要考虑对群系统威胁的增益,因此构建公式(4-10)计算群目标综合威胁值  $T_{\text{群}}$ 。

$$T_{\text{群}} = \delta * \frac{1}{m} \left[ \sum_{i=1}^m T_{\text{主}i} + \sum_{i=1}^m (w_j * T_{ij}) \right] \quad (j=1,2,\dots,n) \quad (4-10)$$

式中,  $T_{\text{主}i}$  表示敌方作战群内主要威胁目标对我方第  $i$  个单位的威胁值,  $w_j$  表示敌方第  $j$  个次要威胁目标的增益系数,  $T_{ij}$  表示此目标对我方第  $i$  个目标的威胁值,  $\delta$  表示敌我双方群体的作战能力对比,其计算公式如式(4-11)所示。

$$\delta = \frac{\sum_{j=1}^n STE_j}{\sum_{i=1}^m STC_i + \sum_{j=1}^n STE_j} \quad (4-11)$$

式中,  $STE_j$  表示敌方群内第  $j$  个目标的空战能力,  $STC_i$  表示我方群体内第  $i$  个单位的空战能力。

其算法流程图如图 4.1 所示。

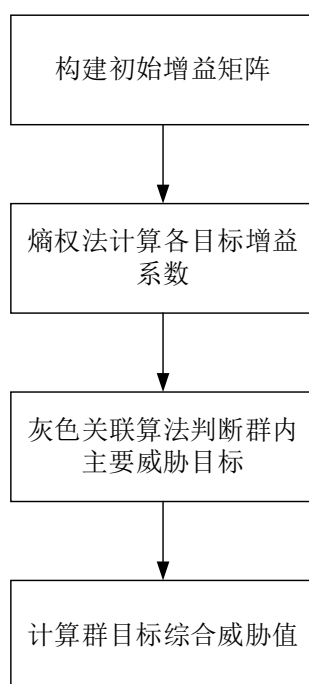


图4.1 群目标综合威胁值计算流程图

#### 4.2.4 群威胁计算仿真与分析

本小节仿真实验主要是验证本文提出的群目标综合威胁评估计算模型的合理性。

(1) 仿真一：假设在战场空间上，敌方作战群 $E_1$ (包含三个作战单位：T1,T2,T3)向我方作战群 $G_1$ (包含两个作战单位:M1,M2)发起进攻，此时双方的战场信息如表 4.2 和表 4.3 所示。

表4.2  $E_1$  群内各目标信息表

参数 敌方目标	经度	纬度	高度(km)	速度(Ma)
T1	118.25	24.70	11	1.2
T2	118.22	24.95	14	1.6
T3	118.27	25.10	12	1.1

表4.3  $G_1$  群内各单位信息表

参数 我方单位	经度	纬度	高度(km)	速度(Ma)
M1	117.56	24.64	13	1.4
M2	117.57	24.55	12	1.3

根据专家经验给出敌方作战群内各目标间的相互增益情况，如表 4.4 所示，以下仿真步骤类似，不再一一给出。

表4.4  $E_1$  群内各目标相互增益表

目标	T1	T2	T3
T1	0	0.6	0.6
T2	0.4	0	0.7
T3	0.5	0.8	0

使用熵权法求得敌群各目标的增益系数如表 4.5 所示。

表4.5  $E_1$  群内各目标增益系数表

目标	增益系数
T1	0.323
T2	0.342
T3	0.334

此时各目标的威胁值如表 4.6 所示。

表4.6  $E_1$  群内各目标威胁值

	T1	T2	T3
对 M1 威胁值	0.4426	0.5861	0.4358
对 M2 威胁值	0.4670	0.6171	0.4594

根据 3.3 小节的主要威胁目标判定技术得到此时敌群内的主要威胁目标是 T2。  
根据公式(4-10)计算得到的群目标综合威胁值为:

$$T_{群} = 0.975 * (0.6016 + 0.323 * 0.4548 + 0.334 * 0.4476) = 0.876$$

(2) 仿真二：我方作战群战场信息与仿真一一致，此时敌方作战群  $E_2$  相比于  $E_1$  增加了一个作战单位 T4，  $E_2$  群内各目标信息如表 4.7 所示.

表4.7  $E_2$  群内各目标信息表

<div>参数 目标</div>	经度	纬度	高度(km)	速度(Ma)
T1	118.25	24.70	11	1.2
T2	118.22	24.95	14	1.6
T3	118.27	25.10	12	1.1
T4	118.21	24.76	14	1.4

此时  $E_2$  群内各目标的增益系数如表 4.8 所示。

表4.8  $E_2$  群内各目标增益系数

目标	增益系数
T1	0.237
T2	0.262
T3	0.255
T4	0.246

此时各目标的威胁值如表 4.9 所示。

表4.9  $E_2$  群内各目标威胁值

	T1	T2	T3	T4
对 M1 威胁值	0.4426	0.5861	0.4358	0.566
对 M2 威胁值	0.4670	0.6171	0.4594	0.5954

此时群内的主要威胁目标是 T2，根据公式(4-10)计算得到此时的群目标综合威胁值如下：

$$T_{\text{群}} = 1.079 * (0.6016 + 0.237 * 0.4548 + 0.255 * 0.4476 + 0.246 * 0.5807) = 1.043$$

(3) 仿真三：此时敌方作战群战场信息与仿真二一致，记为  $E_3$ 。此时我方作战群  $G_2$  增加一个作战单位 M3，其战场信息表如表 4.10 所示。

表4.10  $G_2$  群内各单位信息表

参数 我方单位	经度	纬度	高度(km)	速度(Ma)
M1	117.56	24.64	13	1.4
M2	117.57	24.55	12	1.3
M3	117.56	24.45	11	1.3

$E_3$  群内各目标增益系数如表 4.8 所示，此时， $E_3$  群内各目标的威胁值如表 4.11 所示。

表4.11  $E_3$  群内各目标的威胁值

	T1	T2	T3	T4
对 M1 威胁值	0.4426	0.5861	0.4358	0.5660
对 M2 威胁值	0.4670	0.6171	0.4594	0.5954
对 M3 威胁值	0.4857	0.6356	0.4726	0.6139

根据 3.3 小节的主要威胁目标判定技术得到此时敌群内的主要威胁目标是 T2。根据公式(4-10)计算出群目标综合威胁值如下：

$$T_{\text{群}} = 0.984 * (0.6129 + 0.237 * 0.4651 + 0.255 * 0.4559 + 0.246 * 0.5918) = 0.969$$

仿真一与仿真二结果对比发现仿真二的威胁值要大于仿真一的，此时仿真二中敌方作战群内的目标数量要比仿真一多，而我方作战群内目标数不变；仿真二与仿真三结果对比发现当敌方作战群内目标数不变时，而我方作战群内作战单位数目增加，此时我方与敌方的群组空战能力对比发生了变化，所以此时仿真三的结果要小于仿真二的结果，但是仍然大于仿真一的结果。由此可见，空战群目标综合威胁值的计算既要考虑敌我双方作战群的空战能力，也要考虑群内的各个目标对于群威胁系统的增益情况，最终形成综合结果。而通过三个仿真实验的对比也验证了本文提出的空战群目标综合威胁评估算法的合理性。

### 4.3 基于粒子群优化算法的目标打击意图判断技术研究

目前，随着集群空战体系的不断完善，群威胁评估在战场上的作用也愈发重要，评估结果既可以使指挥员对于战场态势有更为直观的量化认知，也可以为后续决策的制定提供相应的数据支撑。对于空中集群作战系统而言，群威胁的评估并不是作战的最终需求，根据群威胁结果进行下一步的战术决策制定才是最终目的。在决策制定之前，需要根据群威胁的结果对战场态势进行下一步的推导，群威胁的结果一般可以用于群目标打击意图的判断、群目标分配等。本文主要针对群威胁结果在群目标打击意图判断中的应用进行分析研究。

#### 4.3.1 相关算法介绍

目标打击意图判断本质上是多目标寻优<sup>[60]</sup>的过程，现有的多目标寻优算法有很多，以下对常使用的多目标寻优算法进行介绍，主要有蚁群算法、匈牙利优化算法、

粒子群优化算法。

### (1) 蚁群算法

蚁群算法<sup>[61]</sup>是一种通过研究蚁群中蚂蚁个体觅食的过程而提出的群智能算法。蚂蚁在觅食时通常是随机选择前进方向的,但在觅食过程中,它们能够感知到其他蚂蚁在地面上遗留的信息,并倾向于往信息浓度较高的方向移动。当觅食路径较短时,在此路径上的蚂蚁往返速度相较于其他路径较快,因此相同时间内该路径上的蚂蚁数量要多于其他路径,其积累信息素速度要快于其他较长的路径,而随着时间变化,路径上的信息素会持续消散,往返蚂蚁数量较多的路径其信息素仍会高于其他路径,后续蚂蚁在觅食时会更偏向于此路径。通过这种正反馈机制使更多的蚂蚁在觅食时选择行进在最优路径上,引申到多目标寻优领域中,则是得到最优方案。

### (2) 匈牙利算法

匈牙利算法<sup>[62]</sup>主要解决二分图匹配的问题。常用来解决平衡目标寻优问题,以任务分配为例,所谓平衡目标指的是  $n$  项任务分配给  $n$  个人执行。其核心思想在于运用增广路径寻找最优匹配。初始时,最优匹配为空,然后不断寻找增广路径,并扩展增广路径,不断迭代直到没有新的增广路径出现,此时则表示算法获得了最优匹配结果。该算法应用较为广泛,而在多个领域内的运用证明了此算法能够有效的解决平衡目标的指派问题。

### (3) 粒子群优化算法

粒子群优化算法<sup>[63][64]</sup>是目前多目标寻优问题中常用的算法。该算法通过设置不同的种群规模和迭代次数,对多目标问题进行数学建模,根据模型产生的约束条件,构造合适的适应度函数,在战场上群目标打击意图判断的适应度函数主要是目标群体之间产生的群威胁评估矩阵。种群中粒子的各个维度代表不同群目标的打击策略,从粒子的随机初始化开始,对粒子下一时刻的速度和位置不断更新,使用适应度函数进行评价,记录个体最优值以及更新全局最优值,通过不断的迭代获取最优结果,即目标打击意图判断结果。

## 4.3.2 粒子群优化算法详细介绍

通过对上述算法的研究,本文采用粒子群优化算法对群目标的打击意图进行判断。

### (1) 粒子群优化算法基本原理

粒子群优化算法<sup>[65]</sup>的根本思想是通过种群内部个体间的信息互通使无序的种群运动在求解空间中逐渐变成有序的过程,从而得到问题的最优结果。

假设某个目标搜索空间是  $S$  维,其内一个种群包含  $N$  个搜索粒子,用位置与速度两个  $S$  维向量描述每个粒子的信息。其中,第  $i$  个粒子的位置表示如式(4-12):

$$X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iS}) \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (4-12)$$

第  $i$  个粒子的速度表示如式(4-13):

$$V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iS}) \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (4-13)$$

第  $i$  个粒子在当前时刻获得的最优位置称为个体极值, 记为:

$$p_{besti} = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iS}) \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (4-14)$$

种群在搜索空间中目前所搜寻到的最佳位置, 称作全局极值, 记为:

$$g_{best} = (g_1, g_2, \dots, g_S) \quad (4-15)$$

对于算法而言, 下一代粒子的速度计算由三部分组成。第一部分为自身记忆部分, 反映了粒子在搜索空间中自身的运动趋向。在父辈粒子速度的基础上, 引入权重因子计算, 表示粒子整体特征不变的特性。第二部分为自我认知部分, 将粒子的自身历史最佳位置与此时位置进行差值计算, 再与随机因子进行相乘, 表示粒子有向目前自身最佳个体极值靠近的趋向。而社会部分, 与自我认知部分类似, 将种群的历史最佳位置与自身此时的位置进行差值计算, 再与随机因子进行相乘, 代表了粒子有向种群最优位置靠近的趋向。

因此在找到粒子个体最优值和种群最优值以后, 搜索粒子可以根据式(4-16)和(4-17)来计算下一代的速度和位置:

$$v(t+1) = wv(t) + k_1 d_1 [p_{best}(t) - x(t)] + k_2 d_2 [g_{best}(t) - x(t)] \quad (4-16)$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1) \quad (4-17)$$

其中,  $v(t)$  和  $x(t)$  分别表示粒子在第  $t$  次迭代的时候的速度和位置;  $w$  表示惯性权重系数, 其作用是保持算法全局或局部寻优能力的平衡;  $k_1$  和  $k_2$  称为学习因子;  $d_1$  和  $d_2$  表示均匀随机数, 其取值范围在 0~1 之间, 主要作用是提高粒子在搜索空间内更新下一代速度时候的随机性;  $p_{best}(t)$  和  $g_{best}(t)$  分别表示粒子在第  $t$  次迭代的时候自身的个体最优值和整个种群的全局最优值。在具体的计算时, 为了将粒子的搜索范围限制在寻优空间之内, 一般都会将粒子速度限制在一定范围内, 即  $v \in [-v_{\max}, v_{\max}]$ 。



## (2) 粒子群优化算法流程

粒子群优化算法是解决多目标寻优问题的常用方法, 每一个粒子都代表着一个方案, 通过在搜索空间内模拟种群搜索的行为来寻找最优结果, 具体的算法步骤如下所示:

**Step1:**初始化算法参数。包括算法迭代次数  $iter$ 、粒子种群规模  $N$ 、每个粒子的初始速度和位置以及惯性权重因子和学习因子等,

**Step2:**计算每个粒子的适应度值。根据粒子群优化算法的不同应用, 构建合适的适应度函数, 通过对适应度值的分析来评估当前粒子的优劣。

**Step3:**更新各个粒子的个体最优值  $p_{best}$  以及此时的全局最优值  $g_{best}$ 。用此时粒子的适应度值  $fitvalue$  与它的  $p_{best}$  进行比较, 如果  $fitvalue > p_{best}$ , 则用  $fitvalue$  替换掉  $p_{best}$ 。同理, 更新全局最优值  $g_{best}$ 。

**Step4:**计算下一代粒子的速度和位置。通过公式(4-16), (4-17)计算出此时粒子的下一代的速度及位置。

**Step5:**判断终止条件。如果此时已经满足初始设置的迭代次数或者说适应度值达到了计算精度, 则转 **Step6**, 否则更新粒子的位置及速度, 对相关变量进行更新, 转 **Step2**。

**Step6:**输出最优结果, 结束循环。

算法流程图如图 4.2 所示。

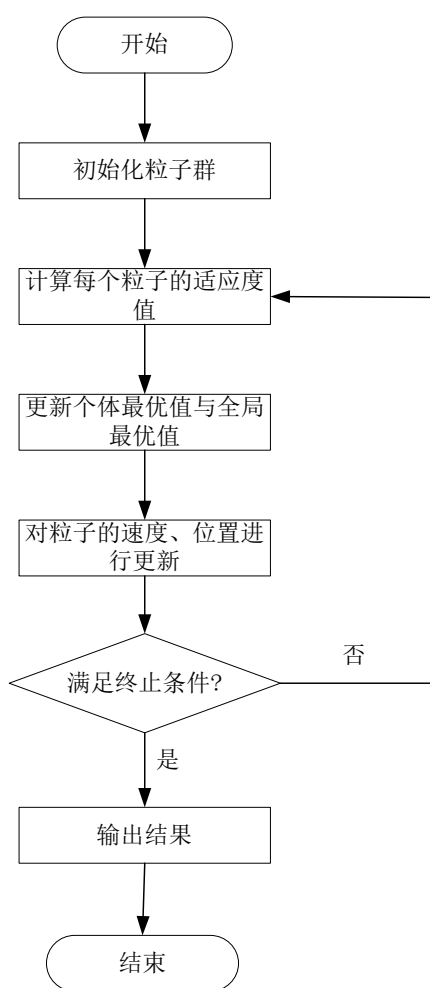


图4.2 粒子群优化算法流程图

### 4.3.3 群目标打击意图判断模型的建立

#### (1) 问题描述

现代空战体系是群组与群组之间的对抗,要想判断群目标的打击意图,首先要考虑战场分群,按照 3.2 小节中的聚类方法,将战场空间内具有相似特征的目标聚类成为群目标;其次计算出群目标的综合威胁值,在此基础上对战场上各个群目标的打击意图进行合理的判断,根据判断结果制定相应的战术决策。

由于本文主要探讨的空战群目标的相关研究,对于群内单目标的打击意图判断不做过多考虑,因此,仅研究多对多情况下,群目标的打击意图判断。针对战场上作战目标数量多,其分群数量会出现不对等的情况,参考文献<sup>[66]</sup>,建立目标打击意图判断模型。

#### (2) 群目标打击意图判断模型

实际空战中,敌方共有  $N$  个群目标  $E_i (i=1,2,\dots,N)$  来对我方  $M$  个群目标  $G_i (i=1,2,\dots,M)$  进行打击,其中,敌方各个群目标对我方群目标的威胁值为

$T_{ij}, i=1,2,\dots,M, j=1,2,\dots,N$ ，则对于群目标打击意图判断模型如式(4-18):

$$F_{\max} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N T_{ij} \chi_{ij} \quad (4-18)$$

其中， $\chi_{ij}$  表示敌方第  $j$  个群目标对我方第  $i$  个作战群的打击状态:

$$\chi_{ij} = \begin{cases} 1 & t_j \rightarrow m_i \\ 0 & t_j \mapsto m_i \end{cases} \quad (4-19)$$

式中， $t_j \rightarrow m_i$  表示敌方第  $j$  个群目标对我方第  $i$  个作战群实施打击， $t_j \mapsto m_i$  表示敌方第  $j$  个群目标不对我方第  $i$  个作战群实施打击。则当前的空战环境下，敌方群目标对我方作战群的打击情况可表示为:

$$X = \begin{bmatrix} \chi_{11} & \chi_{12} & \cdots & \chi_{1n} \\ \chi_{21} & \chi_{22} & \cdots & \chi_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \chi_{m1} & \chi_{m2} & \cdots & \chi_{mn} \end{bmatrix} \quad (4-20)$$

考虑到在实际空战中，目标数目不匹配的情况，会出现敌方多个群的打击意图是我方的一个群，又或者敌方一个群判断出打击我方多个群的情况，因此式(4-9)满足以下约束条件:

①在战场环境下，站在敌方角度考虑，对我方作战群应该保证至少有一个敌方群对其进行打击，并且为了保证打击效益的最高化，打击我方作战群的群目标至多有  $L$  个，其约束条件如式(4-21)所示。

$$L \geq \sum_{j=1}^N \chi_{ij} > 1 \quad (i=1,2,\dots,M) \quad (4-21)$$

②为了保证对于战场敌方目标群打击意图判断的准确性，要保证敌方每个群目标都能对我方作战群实施打击，其约束条件如式(4-22)所示。

$$\sum_{i=1}^M \chi_{ij} \geq 1 \quad (j=1,2,\dots,N) \quad (4-22)$$

### 4.3.4 基于粒子群优化算法的打击意图判断技术研究

本文通过建立合适的打击意图判断模型,将粒子群优化算法应用到判断空战群目标的打击意图问题中,而为了在计算时,保证算法迭代前期有足够的全局搜索能力,后期能够专注于局部最优解的搜索能力,对于惯性权重因子采用动态调整的策略,其计算公式如式(4-23)所示:

$$w = w_{\min} + (w_{\max} - w_{\min}) * \frac{MT - CT}{MT} \quad (4-23)$$

式中,  $w_{\max}$ ,  $w_{\min}$  分别表示初始设置的惯性权重的最大值和最小值,  $MT$  表示算法设置的迭代次数,  $CT$  表示算法当前运行到的迭代次数。

具体的群目标打击意图判断步骤如下所示:

**Step1:**确定敌我双方的作战群体数量,对来袭各敌群进行编码。并根据 4.2 小节的群组综合威胁值计算模型计算来袭各个敌群目标的群综合威胁值,建立打击意图判断数学模型。

**Step2:**初始化算法的各项参数,并将各个粒子的初始位置赋值给粒子个体最优值以及全局最优值。

**Step3:**根据本文构建的打击意图判断函数计算粒子的适应度值。

**Step4:**对个体最优值以及全局最优值进行更新。在计算出粒子适应度值以后需要将此适应度值与个体与全局最优值分别进行比较,通过比较后的结果更新个体最优值与全局最优值。

**Step5:**判断终止条件。如果此时算法运行已经满足初始设置的迭代次数或者适应度值的计算已经达到精度要求,则转 Step8,否则转 Step6。

**Step6:**对惯性权重系数进行更新。

**Step7:**更新粒子的速度和位置。转 Step3。

**Step8:**循环结束,输出最优结果,即敌群的打击意图判断结果。

算法实现流程图如图 4.3 所示:

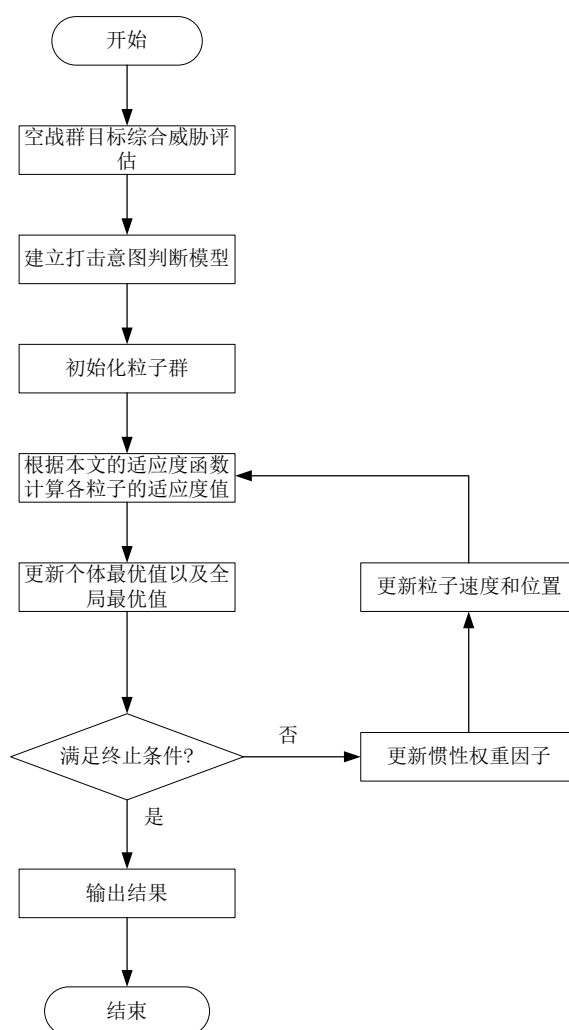


图4.3 基于粒子群优化算法的群目标打击意图判断流程图

#### 4.3.5 群目标打击意图判断仿真分析

在空战环境下，敌我双方群目标的数量对比主要分为两种，一种是平衡目标，一种是不平衡目标。所谓平衡目标，指的是敌我双方群目标数量一致，根据战场态势与资源利用最大化原则，能够对敌方目标打击意图实现“一对一”的判断，如图 4.4 所示。而随着战争过程的推进，敌我双方会出现作战群的增加或者减少，形成不平衡作战态势，如图 4.5 所示，此时对于敌方的打击意图判断可能会出现“多对一”或者“一对多”的情况。以下将对粒子群优化算法在平衡目标与不平衡目标时对于敌方作战群体打击意图判断的应用进行实验验证。

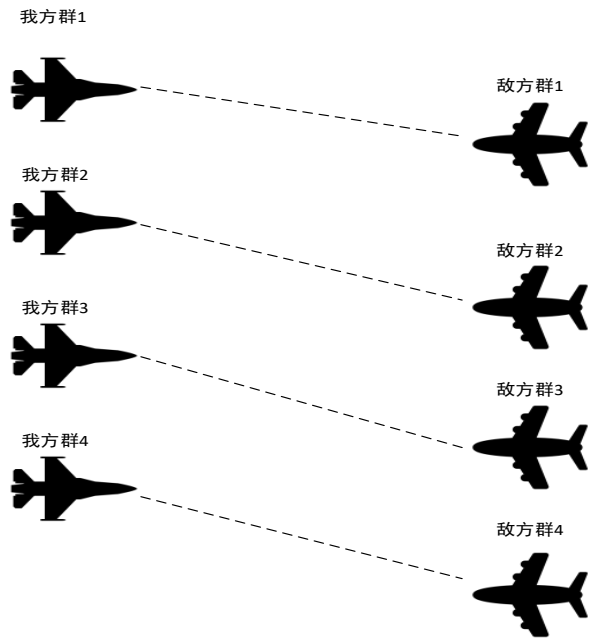


图4.4 平衡目标打击意图判断示意图

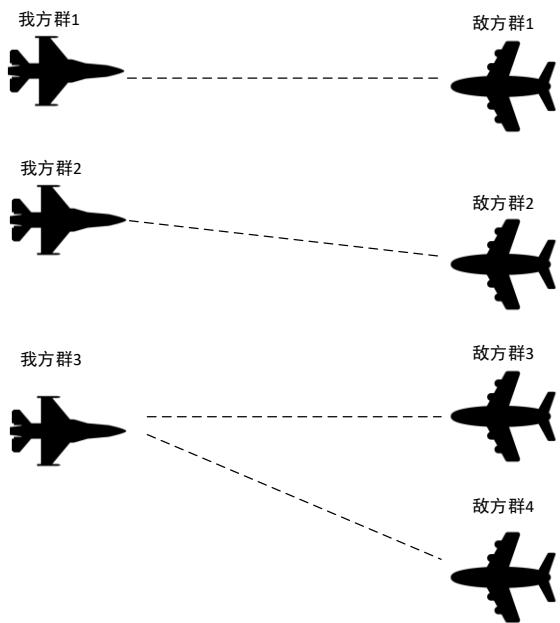


图4.5 不平衡目标打击意图判断示意图

(1) 实验一：平衡目标打击意图判断实验仿真

为了验证粒子群优化算法在平衡群目标打击意图判断中的应用，本文假设在某次空战中，敌方共有 10 个作战群  $E_j, j = 1, 2, \dots, 10$  对我方 10 个作战群  $I_i, i = 1, 2, \dots, 10$  发起进攻。通过 4.2 小节的群目标综合威胁评估计算方法得到敌方各群对我方不同群体的群综合威胁值，如表 4.12 所示。

表4.12 实验一敌方群目标综合威胁值表

目标	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>4</sub>	E <sub>5</sub>	E <sub>6</sub>	E <sub>7</sub>	E <sub>8</sub>	E <sub>9</sub>	E <sub>10</sub>
I <sub>1</sub>	0.78	0.84	0.83	0.55	0.68	0.52	1.25	0.67	0.68	0.85
I <sub>2</sub>	0.65	0.78	0.76	0.74	0.72	0.54	0.76	0.83	0.73	0.84
I <sub>3</sub>	0.73	0.79	0.65	0.67	0.71	0.55	0.85	0.77	0.65	0.83
I <sub>4</sub>	0.88	0.83	0.57	0.73	0.63	0.53	0.85	0.81	0.72	0.84
I <sub>5</sub>	0.72	0.72	0.86	0.59	0.72	0.49	0.78	0.68	0.72	0.74
I <sub>6</sub>	0.83	0.75	0.66	0.66	0.74	0.48	0.87	0.76	0.73	0.85
I <sub>7</sub>	0.68	0.87	0.57	0.73	0.66	0.49	0.68	0.75	0.71	0.74
I <sub>8</sub>	0.72	0.78	0.68	0.76	0.73	0.53	0.67	0.79	0.70	0.68
I <sub>9</sub>	0.69	0.76	0.57	0.71	0.57	0.54	0.85	0.82	0.74	0.54
I <sub>10</sub>	0.67	0.83	0.53	0.49	0.56	0.51	0.66	0.56	0.54	0.87

对于粒子群优化算法, 本文此次实验设置参数如下: 迭代次数设置为 500, 初始种群设置为 100, 由于粒子群优化算法的结果往往与初始种群的选取有关, 稳定性较差, 每次仿真时最优结果可能会出现稍许差异, 因此本文选取在连续运行 50 次的算法的最优结果, 其中, 适应度函数最优值, 即全局最优值为 8.35, 出现最优结果对应的迭代次数 100 次, 算法收敛结果如图 4.6 所示, 敌方作战群的打击意图判断如表 4.13 所示。

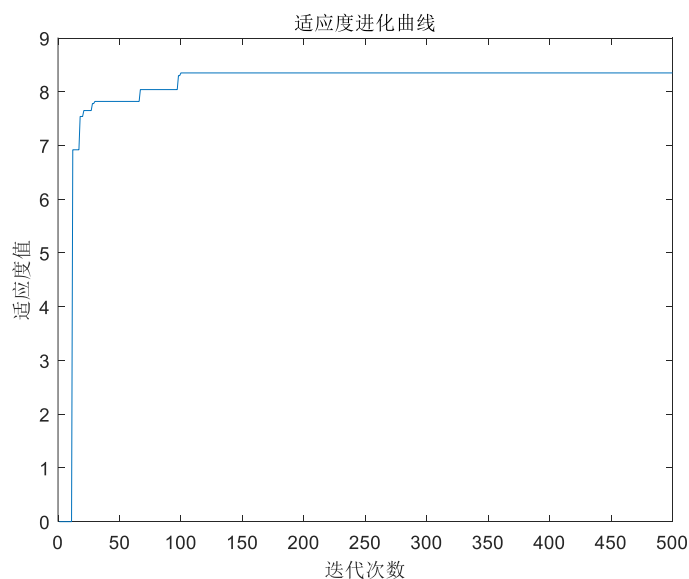


图4.6 实验一仿真结果收敛图

表4.13 实验一敌方作战群打击意图判断结果

敌群目标	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>4</sub>	E <sub>5</sub>	E <sub>6</sub>	E <sub>7</sub>	E <sub>8</sub>	E <sub>9</sub>	E <sub>10</sub>
打击判断	I <sub>4</sub>	I <sub>7</sub>	I <sub>5</sub>	I <sub>8</sub>	I <sub>6</sub>	I <sub>3</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>2</sub>	I <sub>9</sub>	I <sub>10</sub>

(2) 实验二：不平衡目标打击意图判断实验仿真

为了验证粒子群优化算法在不平衡群目标打击意图判断中的应用，本文假设在某次空战中，敌方共有 10 个作战群  $E_j, j=1,2,...,10$  对我方 8 个作战群  $I_i, i=1,2,...,8$  发起进攻。通过 4.2 小节的群目标综合威胁评估计算方法得到敌方各群对我方不同群体的群综合威胁值，如表 4.14 所示。

表4.14 实验二敌方群目标综合威胁值表

目标	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>4</sub>	E <sub>5</sub>	E <sub>6</sub>	E <sub>7</sub>	E <sub>8</sub>	E <sub>9</sub>	E <sub>10</sub>
I <sub>1</sub>	0.78	0.74	0.83	0.55	0.68	0.92	0.87	1.17	0.68	0.85
I <sub>2</sub>	0.95	0.78	0.76	0.74	0.72	0.74	0.76	0.83	0.78	0.89
I <sub>3</sub>	0.73	0.79	0.65	0.67	0.74	0.55	0.85	0.61	0.94	0.87
I <sub>4</sub>	0.54	0.55	0.55	0.48	0.53	0.53	0.55	0.52	0.49	0.51
I <sub>5</sub>	0.72	0.72	0.75	0.59	0.73	0.69	0.74	0.68	0.71	0.74
I <sub>6</sub>	0.89	0.75	0.66	0.66	0.74	0.99	1.25	0.76	0.85	0.96
I <sub>7</sub>	0.68	0.77	0.57	0.73	0.66	1.03	0.68	0.75	0.76	0.74
I <sub>8</sub>	0.83	0.73	0.68	0.76	0.69	0.78	0.93	0.79	0.77	0.68

对于粒子群优化算法，本文第二次实验设置参数如下：迭代次数设置为 500，初始种群设置为 100，由于粒子群优化算法的结果往往与初始种群的选取有关，稳定性较差，每次仿真时最优结果可能会出现稍许差异，因此本文选取在连续运行 50 次的算法的最优结果，其中，适应度函数最优值，即全局最优值为 9.10，出现最优结果对应的迭代次数 57 次，算法收敛结果如图 4.7 所示，敌方作战群的打击意图判断如表 4.15 所示。



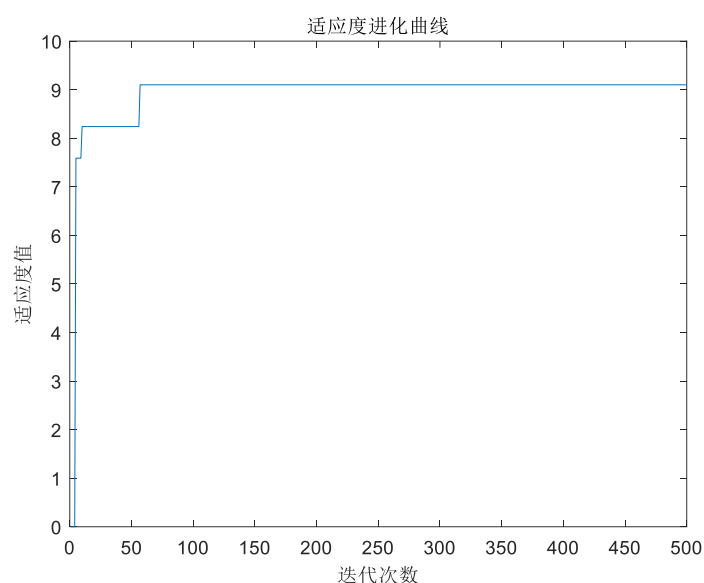


图4.7 实验二仿真结果收敛图

表4.15 实验二敌方作战群打击意图判断结果

敌群目标	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>4</sub>	E <sub>5</sub>	E <sub>6</sub>	E <sub>7</sub>	E <sub>8</sub>	E <sub>9</sub>	E <sub>10</sub>
打击判断	I <sub>2</sub>	I <sub>4</sub>	I <sub>5</sub>	I <sub>8</sub>	I <sub>3</sub>	I <sub>7</sub>	I <sub>6</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>3</sub>	I <sub>6</sub>

分析实验一与实验二的仿真结果发现,当目标群数量与我方群数量相同或者不同时,粒子群优化算法都可以实现对于敌方群目标打击意图的判断。而通过打击判断表可以清晰的知道敌方群目标的打击意图,而我方可以根据此时敌群的打击意图采取相应的战术应对,降低敌来袭目标带来的威胁程度,提高我方的获胜机会。

通过仿真分析发现粒子群优化算法结合来袭群组的群综合威胁值能够很好的对复杂空战中敌方来袭群目标的打击意图进行判断,具有较高的研究意义以及应用前景。

## 4.4 本章小节

本章主要对空战中群目标的综合威胁评估及其在群目标的打击意图判断中的应用进行了研究。针对空战中群目标的综合威胁值计算,本文提出了目标增益的想法,首先通过专家经验给出群内各个目标间的相互增益程度,然后使用熵权法计算出各个目标对于群威胁系统的增益系数,结合双方作战群的空战能力,构建了群目标综合威胁评估计算模型。对于群目标的打击意图判断,采用粒子群优化算法,构建合适的群目标打击意图判断模型,结合计算出的群目标综合威胁值完成敌方目标的打击意图判断最后通过实验仿真验证了群目标综合威胁评估计算模型的合理性以及粒子群优化算法结合群目标威胁值在空战环境下,对于群目标打击意图判断的可行性。

## 第五章 总结与展望

### 5.1 研究工作总结

本文主要是对空空作战环境下目标的威胁评估技术进行研究,为后续指战员进行战术决策奠定基础。从战场数据的提取与处理开始,对单目标威胁评估技术以及战场分群和群内主要威胁目标判断技术,以及群目标综合威胁评估技术及其在群目标打击意图判断中的应用进行了详细论述,并通过实验仿真验证了各算法的合理性。论文主要完成以下工作内容:

(1) 改进了空战单目标威胁评估算法。在威胁评估相关理论研究的基础上,建立了更为合理的空战单目标威胁评估体系,使其更加贴近空战环境,并且对各个威胁指标进行了合理的量化,为单目标威胁评估奠定基础。然后本文从威胁权重计算方面对威胁评估算法进行了改进。首先,对于主观权重的计算,本文针对层次分析法的缺点,采用模糊层次分析法进行计算,针对单一专家主观性过强和单一方式计算权重说服力不强的问题,一方面采用分级多专家评判的方法法进行改进,通过设置多级专家的方式,使赋权结果更加合理,另一方面在权重计算时,综合算数平均法与几何平均法的计算结果,使得最终的主观权重结果更具有说服力。然后对于客观权重的计算,本文采用改进的 CRITIC 算法进行,使用标准差系数计算指标变异性,消除各个指标平均值相差过大带来的数据误差。最后,基于博弈论的思想求出主观权重的主观因子以及客观权重的客观因子,综合形成各威胁指标的组合权重。根据组合权重计算出的单目标威胁值考虑更为全面,既避免了主观赋权法主观性太强的问题,又避免了客观赋权法结果片面的问题,其结果更有说服力,也为后续算法的准确性奠定了基础。

(2) 研究了战场目标分群与群内主要威胁目标判断技术。首先,对战场目标进行分群。针对空战环境下目标数量多、分群数量未知和属性多维度的特点,本文在对各个聚类算法研究的基础上,采用了 OPTICS 算法对战场目标进行分群,并在目标相似度计算以及算法运行效率方面对其进行改进,使其适应复杂的空战环境。然后,提出了群内主要威胁目标的想法,在战场分群以及群内单目标威胁值计算的基础上,使用灰色关联算法对群内主要威胁目标进行判断,为后续群目标综合威胁评估技术奠定基础。

(3) 对群目标综合威胁评估技术及其在打击意图判断中的应用进行了研究。本文对群目标综合威胁评估技术进行了初步探索。对于空战环境而言,群组之间的对抗已经成为常态,现有对群威胁评估的研究并不常见,因此本文提出了基于增益系数的群目标综合威胁值计算的方法。综合考虑了双方作战群的空战能力对比,将判断出的群

内主要威胁目标作为群威胁系统的主要参与者,其余次要威胁目标则为其提供相应增益,计算出群目标的综合威胁评估值,由于考虑了双方群组的空战能力以及群内各个目标的威胁值,因此其结果具有较高的可信度。在完成群目标的综合威胁值计算以后,通过构建合适的打击意图判断模型对来袭敌群的打击意图进行判断。使用粒子群优化算法将群威胁值应用到群目标打击意图判断之中,通过仿真验证了合理性。

## 5.2 未来工作展望

由于现代战争技术日新月异,空中战场所面临的情况更加的多样化、复杂化。对于空战综合威胁评估技术的要求也越来越高。虽然本文对空战中的威胁评估体系进行了一定的研究,但受限于学识,未来仍然可以对以下不足之处进行深入研究:

(1) 本文对于威胁值的计算是完全信任原始输入值的,也并未考虑战场数据缺失情况的威胁值计算。所以如果存在误差数据或者模糊数据,那么威胁值的计算会出现误差。后续可以对存在数据误差或者数据缺失情况下的威胁评估算法进行研究。

(2) 未能引入智能算法用于威胁评估的计算。受限于仿真条件,以及战场数据采集的难度,本文依然是在传统算法的改进上对单目标威胁值进行计算。而各种智能算法的发展对于威胁评估的计算提供了新的思路,通过对大量数据的自我学习,智能算法能够提高评估值的准确性。今后的研究可以着眼于人工智能领域的算法在威胁评估中的应用,通过搜集大量高质量的数据对各种智能算法进行仿真,进一步完善威胁评估模块。

(3) 对于群综合威胁评估算法的完善。对于空战威胁评估体系而言,群目标综合威胁值的计算无疑是最为困难的环节。对于群目标威胁值计算而言,并不能将群内的各个目标分割开来,因为目标之间存在有协同关系,各类型的飞机所拥有的功能并不一致,其参与群威胁系统的程度也不一致。本文虽然使用了增益系数的想法,但是该算法仍然使用了专家经验,因此具有一定的局限性。后续的研究中,在数值计算的基础上,可以引入战术知识库的想法,通过飞机之间的协同关系以及所执行的战术,形成更为全面客观的群目标综合威胁值。

## 参考文献

- [1] D.L.Hall and J.Llinas. An Introduction to Multisensor Data Fusion[J]. Proceedings of the IEEE, 1997, 85(1): 6-23.
- [2] 何友, 王国宏, 关欣等. 信息融合理论及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.
- [3] Looney C G, Liang L R. Cognitive situation and threat assessments of ground battlespaces[J]. Information Fusion, 2003, 4(4): 297-308.
- [4] Polychronopoulos A, Amditis A, Scheunert U, et al. Revisiting JDL model for automotive safety applications: the PF2 functional model[C]//2006 9th International Conference on Information Fusion. IEEE, 2006: 1-7.
- [5] R. T. Antony. Principles of data fusion automation [J]. Artech House Publish, 1995.
- [6] A. N. Steinberg, C. L. Bowman and F. E. White. Revisions to the JDL Data Fusion Model[J]. Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering, 1999:430-441.
- [7] Lambert D A. Advisers with attitude for situation awareness[C].Proceeding of the 1999 Workshop on Defense Applications of Signal Processing. 1999:113-118
- [8] P. Gonsalves, R. Cunningham and N. Ton, et al. Intelligent Threat Assessment Process (ITAP) using Genetic Algorithms and Fuzzy Logic. In Proceedings of the 3td International Conference on Information Fusion, Paris, France, July 2000, 18~24.
- [9] Wright E, Mahoney S, Laskey K, et al. Multi-entity Bayesian networks for situation assessment[C]//Proceedings of the Fifth International Conference on Information Fusion. FUSION 2002.(IEEE Cat. No. 02EX5997). IEEE, 2002, 2: 804-811.
- [10] Hinman M L. Some computational approaches for situation assessment and impact assessment[C]//Proceedings of the Fifth International Conference on Information Fusion. FUSION 2002.(IEEE Cat. No. 02EX5997). IEEE, 2002, 1: 687-693.
- [11] Benavoli A, Ristic B, Farina A, et al. An approach to threat assessment based on evidential networks[C]//2007 10th International Conference on Information Fusion. IEEE, 2007: 1-8.
- [12] Azimirad E, Haddadnia J. Target threat assessment using fuzzy sets theory[J]. International Journal of Advances in Intelligent Informatics, 2015, 1(2): 57-74.
- [13] Lee H, Choi BJ, Kim CO, et al. Threat evaluation of enemy air fighters via neural network-based Markov chain modeling[J]. Knowledge-Based Systems, 2017, 116: 49-57.
- [14] 韩城, 杨海燕, 涂从良. 空中对来袭目标威胁评估仿真研究[J]. 计算机仿真, 2017(8): 54-58.
- [15] 史志富. 无人作战飞机对地攻击态势威胁评估方法和算法研究[D]. 西北工业大学, 2010.
- [16] 曲长文, 何友, 马强. 应用多属性决策的威胁评估方法[J]. 系统工程与电子技术, 2000, 22(5):

- 26-29.
- [17] 屠丽妍. 基于区间层次分析法的大学生思政教育实效性综合评价[J]. 实验室研究与探索, 2019, 38(11): 187-190.
- [18] 昌飞, 张欣毅, 林莹. 防空作战多目标威胁度排序决策研究[J]. 兵器装备工程学报, 2016, (2): 159-161.
- [19] 惠轶. 空中目标威胁估计与排序技术研究[D]. 南京理工大学, 2013.
- [20] 王永杰, 张喜斌, 张恒喜, 续斌. 基于 TOPSIS 方法的空战威胁评估研究[J]. 电光与控制, 2008(05): 32-34.
- [21] 张堃, 周德云. 熵权与群组 AHP 相结合的 TOPSIS 法多目标威胁评估[J]. 系统仿真学报, 2008(07): 1661-1664.
- [22] 黄大荣, 姜辉. 基于信息熵的集群目标威胁度评估模型[J]. 计算机工程与设计, 2010, 31(04): 829-831+846.
- [23] 朱胜伟, 周德云, 李兆强. 基于改进的主成分分析法的目标威胁评估[J]. 计算机仿真, 2010, 27(03): 1-4.
- [24] 闵绍荣, 陈卫伟, 朱忍胜, 谢红胜. 基于变权 TOPSIS 法的舰艇对空防御威胁评估模型[J]. 中国舰船研究, 2015, 10(04): 100-105.
- [25] 晏师励, 李德华. 基于动态贝叶斯网络的空战目标威胁等级评估[J]. 计算机与数字工程, 2015, 43(12): 2150-2154+2198.
- [26] 张浩为, 谢军伟, 盛川, 张昭建. 基于改进灰色关联算法的目标威胁评估[J]. 计算机工程与科学, 2017, 39(10): 1908-1914.
- [27] 方诚喆, 寇英信, 徐安, 邓世杰, 彭明毓. 基于 AHP-CRITIC 组合赋权的 VIKOR 空战威胁评估[J]. 电光与控制, 2021, 28(02): 24-28.
- [28] 奚之飞, 徐安, 寇英信, 等. 基于灰主成分的空战目标威胁评估[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(1): 9.
- [29] 李威, 卢盈齐. 基于聚类组合赋权的空袭目标威胁评估方法[J]. 现代防御技术, 2022, 50(03): 17-24.
- [30] 毋嘉伟, 周林, 金勇, 李军伟, 刘恒宇. 基于主客观相结合的空中目标威胁评估[J]. 指挥信息系统与技术, 2022, 13(01): 22-29.
- [31] 张堃, 张振冲, 刘泽坤, 李珂, 刘培培. 基于 FD-TODIM 的混杂空战多目标动态威胁评估[J]. 系统工程与电子技术, 2023, 45(01): 148-154.
- [32] 于博文, 于琳, 吕明, 张捷. 基于 M-ANFIS-PNN 的目标威胁评估模型[J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44(10): 3155-3163.
- [33] 宁云晖, 黄昱申. 基于深度学习的威胁判断方法[J]. 指挥信息系统与技术, 2022, 13(02): 63-66+72.
- [34] 汤志荔, 张安. 战场威胁估计理论与方法研究[J]. 火力与指挥控制, 2011, 36(09): 1-4.
- [35] 朱宝鏊, 朱荣昌, 熊笑非. 作战飞机效能评估[M]. 航空工业出版社, 2006.

- [36] 骆正清, 杨善林. 层次分析法中几种标度的比较[J]. 系统工程理论与实践, 2004, 24(9):51-60.
- [37] 李学平. 用层次分析法求指标权重的标度方法的探讨 [J]. 北京邮电大学学报(社会科学版), 2001, 3(1): 25-27.
- [38] 陈国际, 姜长生, 吴庆宪. 战斗机对空作战效能评估[J]. 电光与控制, 2014,21(9)
- [39] 王鹏飞. 多机协同作战效能评估及其不确定问题研究[D]. 郑州大学, 2014
- [40] 高璇, 王光磊. 基于模糊层次分析法评估作战飞机的对地攻击效能[J]. 信息化研究, 2014(4):61-64.
- [41] 夏鹏程. 多机协同任务规划与非完备信息下攻击决策技术 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
- [42] Saaty T L. Decision making—the analytic hierarchy and network processes (AHP/ANP)[J]. Journal of systems science and systems engineering, 2004, 13(1): 1-35.
- [43] 张吉军.模糊层次分析法(FAHP)[J].模糊系统与数学,2000(02):80-88.
- [44] Huang J. Combining entropy weight and TOPSIS method for information system selection[C] 2008 IEEE conference on cybernetics and intelligent systems. IEEE, 2008: 1281-1284.
- [45] 张悻颀,杨刚,孟海波,王瑞琪,齐宝力.基于熵-AHP 融合的空袭目标威胁度量与排序[J].遥测遥控,2020,41(05):57-64.DOI:10.13435/j.cnki.ttc.003096.
- [46] Žižović M, Miljković B, Marinković D. Objective methods for determining criteria weight coefficients: A modification of the CRITIC method[J]. Decision Making: Applications in Management and Engineering, 2020, 3(2): 149-161.
- [47] 李威,卢盈齐,范成礼,朱晓雯.基于战场态势变权的空中集群威胁评估[J].空军工程大学学报(自然科学版),2022,23(03):89-96.
- [48] 王昌金,张永辉,黄彬.灰色模糊物元分析的要地防空威胁评估 [J]. 火力与指挥控制,2013,38(08):47-50+54.
- [49] 邓敏,刘启亮,李光强等.空间聚类分析与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [50] 章永来,周耀鉴.聚类算法综述[J].计算机应用,2019,39(07):1869-1882
- [51] 段明秀. 层次聚类算法的研究及应用[D]. 长沙: 中南大学, 2009.
- [52] Hartigan J A, Wong M A. Algorithm AS 136: A k-means clustering algorithm[J]. Journal of the royal statistical society. series c (applied statistics), 1979, 28(1): 100-108.
- [53] Khan K, Rehman S U, Aziz K, et al. DBSCAN: Past, present and future[C]//The fifth international conference on the applications of digital information and web technologies (ICADIWT 2014). IEEE, 2014: 232-238.
- [54] Ankerst M, Breunig M M, Kriegel H P, et al. OPTICS: Ordering points to identify the clustering structure[J]. ACM Sigmod record, 1999, 28(2): 49-60.

- [55] Dai B R, Lin I C. Efficient map/reduce-based dbscan algorithm with optimized data partition[C]//2012 IEEE Fifth international conference on cloud computing. IEEE, 2012: 59-66.
- [56] 朱宽宽. 空战威胁评估关键技术研究[D].西安电子科技大学,2021.
- [57] Ng D K W. Grey system and grey relational model[J]. ACM SIGICE Bulletin, 1994, 20(2): 2-9.
- [58] 张莎. 灰色关联分析新算法研究及其意义[D].东北师范大学,2012.
- [59] Zhu Y, Tian D, Yan F. Effectiveness of entropy weight method in decision-making[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020, 2020: 1-5.
- [60] 张红, 丁全心, 刘启明. 多目标攻击的目标分配[J]. 电光与控制, 2001, (z1): 66-69.
- [61] Dorigo M, Birattari M, Stutzle T. Ant colony optimization[J]. IEEE computational intelligence magazine, 2006, 1(4): 28-39.
- [62] 傅家良. 运筹学方法与模型[M]. 复旦大学出版社, 2014
- [63] 陈永刚, 牛丹梅, 范庆辉. 粒子群算法在组合优化问题上的研究与发展[J]. 电脑与电信, 2008, (12): 41-43.
- [64] Kennedy Jeberhart R. Particle Swarm Optimization[C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks, 1995 (4): 1942-1948.
- [65] 刘建华. 粒子群算法的基本理论及其改进研究[D]. 中南大学, 2009.
- [66] 郑都民. 集群空战中的群威胁评估及目标分配关键技术研究[D].西安电子科技大学,2020.