

代 号 10701

学 号 1012121123

分 类 号 TP18

密 级 公开

西安电子科技大学

硕士学位论文



题 (中、英文) 目 基于进化匈牙利算法的目标分配问题研究及应用

A Study and Application of Target Allocation based

on Evolution Hungary Algorithm

作 者 姓 名 谷 稳 指导教师姓名、职务 于 昕 副教授

学 科 门 类 工学 学科、专业 模式识别与智能系统

提交论文日期 二〇一三年一月

西安电子科技大学

学位论文独创性（或创新性）声明

秉承学校严谨的学风和优良的科学道德，本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢中所罗列的内容以外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果；也不包含为获得西安电子科技大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中做了明确的说明并表示了谢意。

申请学位论文与资料若有不实之处，本人承担一切的法律责任。

本人签名： 谷松

日期 2013.1.22

西安电子科技大学

关于论文使用授权的说明

本人完全了解西安电子科技大学有关保留和使用学位论文的规定，即：研究生在校攻读学位期间论文工作的知识产权单位属西安电子科技大学。学校有权保留送交论文的复印件，允许查阅和借阅论文；学校可以公布论文的全部或部分内容，可以允许采用影印、缩印或其它复制手段保存论文。同时本人保证，毕业后结合学位论文研究课题再撰写的文章一律署各单位为西安电子科技大学。

本人签名： 谷松

日期 2013.1.22

导师签名： 于昕

日期 2013.1.22

摘要

在现代战争中，态势的复杂化要求寻找理想的方案进行目标最优排序和资源最佳分配。合理有效的目标分配方案可以将资源安排在合适的时间和正确的位置执行适当的行动，提高任务的效能。其不紧在交通管制、生产控制及车间调度中起到了重要作用，而且对战场的态势评估甚至战争的成败起决定作用。确定一个目标分配方案需要考虑多种因素，如个体性能的差异、战场环境的复杂性、指挥者的偏好等等。本文主要针对目标分配问题进行研究并给出了解决方案，主要内容如下：

1. 目标分配问题本质上是一个指派问题，匈牙利算法和进化算法都是解决目标分配问题的常用方法，但是这两种方法都有自己的优势和不足之处。匈牙利算法速度快但是对于高维的目标分配问题得到的结果的精确性比较差，进化算法可以有效的处理高维的目标分配问题但是速度慢，为了解决这两种算法存在的不足，并充分利用其优势，本文提出了进化匈牙利算法。

2. 基于进化匈牙利算法的无人机目标分配问题研究。目标分配问题分为平衡目标分配和不平衡目标分配，不平衡目标分配问题和平衡目标分配问题相比主要包括无人机的突然加入和退出造成的无人机数量变化以及目标分配结果更多样化等动态问题。进化匈牙利算法可以有效的处理平衡目标分配问题，但是并不适用于不平衡目标分配问题，本文对进化匈牙利算法进行改进使其能够有效的解决不平衡目标分配问题。目标分配的结果采用 0-1 矩阵表示，矩阵中的 1 表示其所在列号的无人机被分配给该行号无人机攻击，结果矩阵中的每行每列只能有一个 1。本文针对以上问题，提出了有效的解决方法，并实验证明该方法是可行的。

3. 基于进化匈牙利算法的机器人目标分配问题研究.机器人足球目标分配系统是机器人足球控制系统的重要组成部分，本文对机器人足球目标分配问题进行建模，结合机器人足球自身特点对进化匈牙利算法进行修改，并成功的将改进后的进化匈牙利算法应用到机器人足球目标分配问题中。为了对目标分配算法进行验证并直观的显示目标分配的结果，本文设计了动态目标分配仿真软件，将进化匈牙利算法嵌入到目标分配仿真软件中，对机器人足球目标分配进行了仿真实验，通过实验表明该方法的可行性。

关键词：目标分配 匈牙利算法 协同进化 无人机 机器人足球

Abstract

In the modern war, the complex situation requires finding the ideal plan of action, target optimal scheduling and the optimum allocation of resources. Reasonable and effective target allocation can arrange resources at the right time and the right place to perform the appropriate action, improving task performance. The methods of target allocation plays an important role in the field of traffic control, production control, job-shop scheduling and the situation assessment. Define an target allocation needs to consider many factors, such as individual differences in performance, the complexity of the battlefield environment, the preference of the commander and so on. The paper mainly solved the problems of targets allocation. The paper has done at least the following works:

1. Target allocation problem is essentially an Assignment Problem. Hungary algorithm and evolutionary algorithm are used to solve the problem of target allocation, but the two methods have their own advantages and disadvantages. The speed of Hungarian algorithm is high, but the algorithm can't get a good performance on High-Dimensional problem. The evolutionary algorithm can resolve the High-Dimensional problem, but it costs more time. In order to solve the shortcomings of these two methods, and make full use of their advantages, this paper puts forward the evolutionary hungary algorithm.

2. Research of UAV target allocation problem based on the evolutionary hungary algorithm. Target allocation problem include balance target allocation and unbalanced target allocation, compared to the balance target allocation problem, the unbalanced target allocation problem includes the problems: the change of UAV number caused by sudden joining or leaving UAV, the result of target allocation is more diverse and so on. Evolutionary hungary algorithm can effectively deal with the the balance target allocation problem, but it does not apply to the unbalanced target allocation problem, in this paper, improved the evolutionary hungary algorithm and enabled it to effectively solve the unbalanced target allocation problem. The result of allocation is represented by a matrix which element is "0" or "1", the "1" represents that the target which number is the number of the column is allocated to the plan which number is the number of the row, the matrix of the result is restrained that every column and every row has only one "1". To solve the above problem, an effective solution was proved in this paper and the simulation demonstrated that this method is useful and reasonable.

3. Research of Robot Soccer target allocation problem based on the evolutionary hungary algorithm. The Robot Soccer target allocation is an important and necessary work in Robot Soccer System. The evolutionary hungary algorithm is applied in robot task allocation in this paper and developed to be applicable with the characteristics of robot soccer. In this paper, in order to validate the target allocation algorithm and visually display the results of the target allocation, designed a dynamic target allocation simulation software. The evolutionary hungary algorithm is utilized in the target allocating simulation software with the robot soccer, the simulation result shows that the presented software can find the optimal solution rapidly and accomplish the solution of the various target allocation problems.

Key words: Target allocation Hungary algorithm Co-evolutionary UAV
Robot soccer

目录

摘 要.....	I
Abstract	III
目录	V
第一章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.1.1 态势评估问题	1
1.1.2 态势评估研究现状	3
1.2 目标分配问题	4
1.2.1 目标分配问题概念	4
1.2.2 目标分配问题的研究现状	5
1.3 论文的主要内容和章节安排	7
1.3.1 论文的章节安排	7
1.3.2 论文的创新工作	8
第二章 目标分配问题研究	9
2.1 引言	9
2.2 威胁估计的概念及相关算法	9
2.2.1 威胁估计的概念	9
2.2.2 威胁估计相关算法	10
2.3 目标分配问题建模及相关算法	10
2.3.1 目标分配的概念	10
2.3.2 目标分配的模型	12
2.3.3 匈牙利算法	13
2.4 基于匈牙利算法和进化算法的目标分配方法	16
2.5 本章小结	17
第三章 无人机目标分配研究	19
3.1 引言	19
3.2 无人机平衡目标分配问题	19
3.2.1 无人机平衡目标分配问题	19
3.2.2 无人机平衡目标分配的仿真分析	20
3.2.3 运行时间测试	24
3.3 无人机不平衡目标分配问题	24
3.3.1 无人机不平衡目标分配问题	24

3.3.2 无人机动态目标分配问题	28
3.3.3 无人机不平衡目标分配仿真说明	30
3.3.4 无人机不平衡目标分配问题中的未分配问题	33
3.4 本章小结	36
第四章 机器人足球目标分配研究	37
4.1 引言	37
4.2 机器人足球中的目标分配问题	37
4.2.1 机器人概述	37
4.2.2 机器人足球目标分配问题建模	37
4.2.3 算法	39
4.3 机器人足球目标分配仿真实验	42
4.3.1 系统介绍	42
4.3.2 机器人足球平衡目标分配仿真结果及分析	44
4.3.3 机器人足球不平衡目标分配问题仿真结果及分析	47
4.4 本章小结	50
第五章 总结与展望	51
致谢	53
参考文献	55
研究成果	59

第一章 绪论

1.1 研究背景

1.1.1 态势评估问题

近年来，随着信息技术的迅速发展，态势估计(Situation Assessment, SA)研究取得了很大突破，尤其在理论和体系结构方面的研究取得了较大进步，但是态势评估至今没有一个统一的定义，学者们分别以他们各自的理解对态势评估进行了一些定义。其中被广泛接受的定义有美国实验室联席理事会提出的JDL模型(Joint Directorate Laboratory, JDL)^[1]和Endsley提出的态势评估的功能模型^[2]，这两种模型分别从各自特定的应用背景对态势评估进行了定义。

一、JDL 模型

JDL模型是由美国实验室联席理事会提出的态势评估模型，JDL模型^[3-6]对态势评估的定义为：态势评估是要建立一张关于战场态势的综合评价图，通过将战场中的作战活动、兵力动向、部署和武器装备等战场要素组成一张反应当前战场情况的多重视图，并将已经侦查到的战斗力量部署情况以及活动和战场实际环境有效地结合起来，确定已经发生过的事件和情况，明确敌方的兵力组成、部署情况、行军路线等，确定敌方指挥官的作战方式，推测敌军的作战意图，得出对当期作战环境的一个较为正确的解释，并对下一步的战场态势做出判断。

JDL模型主要以军事应用为背景，认为态势评估的功能就是对当前战场上“态”的评估和“势”的推测。“态”即战场当前的作战状态，包括作战活动、时间、事件、兵力部署和组成要素等，将这些战场要素有力的组织起来就能获得一张表示战场态势的“态”视图；“势”即战场下一步的发展趋势，将敌方兵力分布、活动以及作战环境有机的组织起来，结合已经得到的战场“态”视图可以有效的推断出敌方指挥官的作战意图。JDL模型对态势评估的定义可以归纳为图1.1。

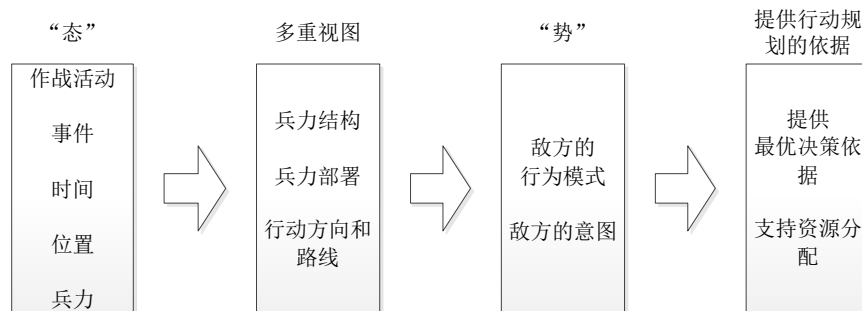


图1.1 战场态势图

态势评估是一个高层次的决策级的信息融合技术。由于态势评估涉及的要素

众多，而且各个要素之间的联系模糊、复杂，同时它又是一种模拟人脑的推理过程，所以很难对其功能有一个准确的归纳。近年来，国内外许多的科研工作者对态势评估的功能划分提出了自己的理解。其中Mark G. Alford^[7]对态势估计功能的划分是比较权威的一种，如图1.2：

- 目标聚合
- 上下文解释/融合
- 作战意图
- 多重视图

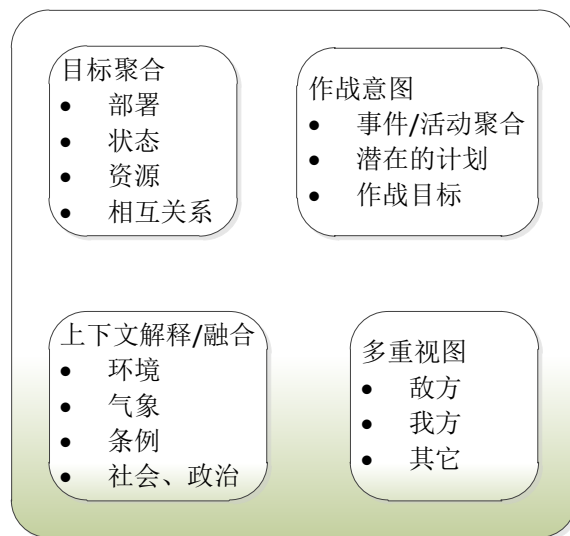


图 1.2 JDL 态势估计功能结构图

二、Endsley 态势评估模型

Endsley 模仿人脑的学习和推理过程对态势评估的功能模型给出了定义，Endsley^[8]认为态势评估是一个认知过程，态势要素是人们借助工具从外部环境获得的，只能作为对当前外部环境的一种动态性的知识存在于人脑中；而人脑中已经储存的知识如定理、规则、指令、经验等，对过去事物的认识将作为已有知识存储于知识库中，他认为态势评估就是一个不断更新知识库中已经存在的知识并不断学习外部知识的认知过程。因此，Endsley 从人脑认知的角度^[9]将态势评估技术分为三层：态势感知、态势理解和态势预测。

- 态势感知：是态势评估的第一步。该阶段的主要任务就是感知战场态势要素：敌方兵力部署、组成、武器配置等，并根据知识库中存储的信息对感知到的目标进行聚类，构建成为具有军事意义的作战群体；
- 态势理解：是态势评估的关键内容。根据态势感知阶段所获得的态势信息，并结合军事知识库中的知识对当前战场态势进行解释；根据一定的推理方法判断敌方的兵力情况和部署情况，并给出目标活动、运动路线和兵力结构等内容的态势图。战场态势作为一个动态的发展过程，在态势理

解阶段需要结合新出现的态势情况和已经发生过的态势信息，描述出战场局势的发展和演变；

- 态势预测：根据目前的态势情况来预测未来可能出现的趋势。

总的来说，在 Endsley 的功能模型中，态势评估是一个不断评估、不断补充军事知识库学习的过程。他从认知的角度给出了态势评估的定义，如图 1.3 所示。

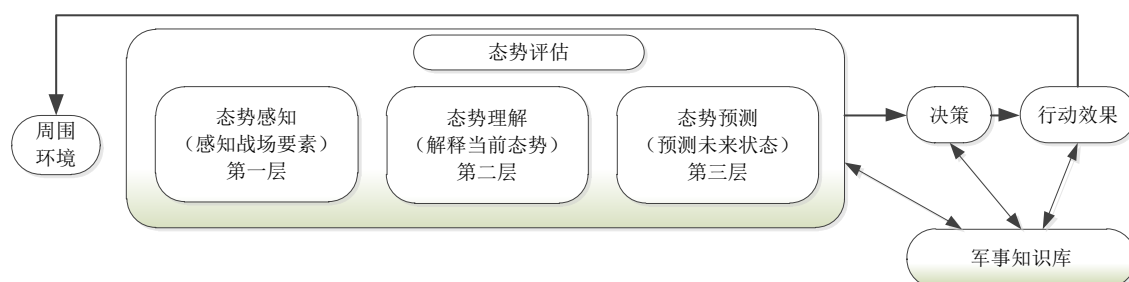


图1.3 Endsley态势估计功能模型

三、其相关它定义

态势评估是一个对战场上的兵力部署情况以及兵力动态进行评估，并以此来推测敌方指挥官的作战意图，预测敌方将来可能采取的行动，为我方指挥官提供关于兵力和资源的有效安排建议的过程。态势评估过程主要包括四个步骤：战场建模、目标聚类、威胁估计、态势推理。

- 战场建模：对战场整体环境进行建模，根据敌我双方的兵力部署和组成以及武器装备等要素，得到关于整体作战形式的模型。
- 目标聚类：战场中的不同军事单位之间有着紧密的联系，根据它们之间的这种联系对这些军事目标进行聚类，把这些军事目标分为一个个具有实际意义的群体。
- 威胁估计：根据目标聚类的情况，计算每个军事群体的威胁值，并将这些威胁值进行组合，得到敌方对我方的一个整体的威胁态势。
- 态势推理：根据一些特定的推理方法，推测战场态势下一步的发展趋势。

1.1.2 态势评估研究现状

国际方面：1982 年，M.Ben.Bassat 提出的模式类的态势识别系统和基于专家系统的态势系统模型框架^[10]；1987 年，美国国防部的 Joint directors of laboratories 提出的基于态势评估的 JDL 模型；1997 年，Smith 给出了小组决策支持原型系统^[11]；Antony^[12]、Endsley 和 Jean Roy^[13]分别在 1995 年、1995 年、2001 年提出了他们对于态势评估的认识；2002 年，Subrata Das^{[14][15]}等人设计出了用于陆战战斗的基于贝叶斯网络的模型，贝叶斯网络推理的缺点是难以给出其先验概率，并且难以实现证据间独立性，只是通过一个数值表示不确定性；2005 年，Kevin

C. Trott^[16]等设计了空中态势的分析和预测系统,该系统使用分布式结构,可以提供目标威胁等级和任务执行状况的信息;2005年, Yang Fan^[17]给出了多智能体系统的态势评估方法;2008年, Yanping Xiang^[18]设计出了用于军事行动的态势评估系统;2011年, Schubert. R 和 Wanielik. G^[19]提出了一种在贝叶斯过滤器和贝叶斯网络之间基于自适应可能性节点的直接链,用于态势评估问题的分析。

国内的态势评估领域也出现一些研究成果:2004年,王三民^[20]在战争态势分析中使用贝叶斯网络;2006年初,李志强等^[21]设计了基于人工势场军事态势评估模型;李伟民^[22]等给出了将计划识别用于态势评估;2007年,高晶^[23]等提出了将条件事件的代数理论用于战术防空的态势评估;2008年,林晓强^[24]提出了基于模糊算法的态势评估思想,李涛、白剑林^[25]将粗糙集和证据理论方法用于防空作战的态势评估。2010年,故杰等^[26]在粗糙集理论上提出将置信阈值 β 作为变精度的粗糙集的理论,通过深入分析了UCAV态势评估的过程,将该理论和态势评估理论相结合,形成了基于变精度的粗糙集UCAV的态势评估的算法。2010年,赵晓辉^[27]把动态的贝叶斯应用在战争态势估计。

1.2 目标分配问题

1.2.1 目标分配问题概念

近年来,科学技术发展日新月异,在人们生活的各个领域都取得了巨大的突破,信息技术的发展尤其迅速,人们的生活已不可能离开信息技术的支持。随着信息技术的发展,其在战争中的应用也越来越广泛,现在战争正朝着信息化、智能化、复杂化方向发展。由于战场态势复杂化的发展,已不可能单纯的依靠指挥官的个人经验来对战场形势作出正确的判断,借助相关的信息工具已经成为战场指挥者的必然选择。因此,军事领域就提出了目标分配问题(Target Allocating Problem, 简称 TAP),态势评估中的目标分配指的是根据战场态势变化寻找理想的方案进行资源最佳分配。合理有效的目标分配方案可以将资源安排在合适的时间和正确的位置执行适当的行动,提高目标的效能。确定一个目标分配方案需要考虑多种因素,如个体性能的差异、战场态势的复杂性、指挥者的偏好等等。目标分配就是将多个目标进行组合排序并将有用的资源合理地分配给每个目标,即将有限的资源分配给合理的目标在合理的时间执行合理的任务。随着技术的进步,目标分配技术的应用已经不再局限在军事领域,例如:交通管制、车间调度、金融管理领域都出现了相应的目标分配技术。

1.2.2 目标分配问题的研究现状

目标分配问题是运筹学的一个经典问题,广泛的应用于各个行业,如生产规划和运输调度等^[28-31]。目标分配问题还可以用来建立决策支持性系统^[32,33]。目标分配问题属于线性规划的问题范畴,是一种特殊整数规划问题,使用正规单纯形法,或者借助于解决运输问题中的某种特殊的方法,也可以来解决目标分配问题,但是不能够取得最好的结果。匈牙利算法(Hungary Algorithm, HA),目前是公认的来解决目标分配问题的一种较有效的算法,在运筹学以及最优化的一些技术专著中,标准的目标分配问题都将其作为求解算法来进行介绍。然而,大量的数据试验的过程表明,匈牙利算法在解决不同的问题时,耗时不稳定,甚至于在处理某些特殊的数据时算法会不收敛而无法找到其最优解,因此并不适用。文献^[34]实例化分析了匈牙利算法的不完全收敛性,并指出了目标分配问题的矩阵规模越大,不收敛情况就越多。目前:国内外解决目标分配问题的方法主要包括:

(1) 单纯形法:单纯形法是解决目标分配问题的常用方法,由美国数学家G. B. 丹齐克最先提出来。该方法的理论依据是: n 维的向量空间 R^n 中多面凸集是目标分配问题的可行域,若其有最优值必定在该凸集的某顶点处取得,其基本可行解就是该顶点所对应的解。单纯形法的思想是:首先找到一个基本可行解,对其进行鉴别,判断它是否是最优解;如果不是,则需要按照一定的规则进行转换,得到另一个基本可行解,再次进行鉴别;如果仍然不是最优解,则需要再次进行转换,按照此方法进行重复。因为基本可行解的数量是有限,所以经过有限次数的转换后必定能够得到目标分配问题的最优解。如果问题没有最优解也可以使用这种方法进行判断。单纯形法解题的步骤一般可以归纳为:①将目标分配问题的约束型方程组修改成典范方程组的形式,并找出问题的基本可行解将其作为初始的基本可行解。②如果问题没有基本可行解,即说明约束条件是矛盾的,则问题是无解的。③如果问题有基本可行解,以问题初始的基本可行解为起点,依据可行条件和最优条件,并且引进非基变量替代某个基变量,找到使目标函数的值更优的一个基本可行解。④按照步骤③进行迭代操作,直到对应的检验数达到最优条件为止(这时对应的目标函数值不能够再改善),即求出了问题的最优解。⑤如果在迭代操作过程中发现目标函数的值是无界的,则停止迭代操作。因为单纯形法的复杂度是指数级的,所以当目标分配问题的规模比较大的时候,该方法不能够在使用有效的时间内得到问题的最优解。

(2) 隐枚举法^[35]:隐枚举法在处理目标分配问题时通常是通过比较多个对象对多个目标的执行能力来进行分配的。当能执行时为1,不能时就为0,再经过判断是否满足问题的约束条件,如果满足就是问题的最优点,其对应的值就是问题的最优值;如果不满足问题的最优点,则选一个决策变量作为分支(这个决策变

量是一个固定值，可以取0或是1）；对新分支出现的情况，再次判断其是否满足问题的约束条件。若满足，则其为问题的一个可行解。对于新分支出现的情况继续进行判断，对新分支继续分支下去是否存在问题的最优解。如果有可能存在，则就再选一个决策变量进行分支操作，并重复的验证新分支。如果没有可能存在，则就从判断出的所有可行解中找出对应的最优值作为问题的解。单纯形法是0-1规划问题中的整数规划方法，适用于目标分配数目较少的情况。该方法的缺陷是：一是规划问题的矩阵必须是行数和列数相等的方阵。如果不是方阵就需要添加虚拟的对象或是虚拟的目标，使矩阵成为方阵。二是当目标分配的对象数或目标数较多时，算法的计算时间受到影响。三是整数规划问题的求解对初值的依赖性比较大，求出的解有可能是局部最优而并不是全局最优。

(3) 层次分析法^[36]：层次分析法对问题进行分解然后组合成各个不同的因素，并根据支配关系将这些因素组成递阶层次的结构。经过两两相比较的方式来确定层次中因素相对的重要性，然后结合指挥者的判断来确定各个方案的权重。整个的算法过程完全体现了人思维的特征----分解、判断和组合。层次分析法又是一种将定量和定性相结合的方法，把人主观的判断用数量的形式进行表达和处理。层次分析法的基本步骤是：首先要确定问题，明确目标；分析各个因素之间的相互关系，建立递阶层次的结构；对同一层各个元素相对于上一层中的某一个准则的重要性进行两两的比较，建立两两相比较的判断矩阵；通过判断矩阵来计算被比较的元素对于该准则相对的权重，即对层次进行单排序，并且进行一致性的检验。层次分析法并没有很好地呈现出系统的性能，而且其时间复杂度通常是指数级的。

(4) BP神经网络算法^[37]：BP(Back Propagation)神经网络算法也可以运用于目标分配，其不仅有输入节点和输出节点，还可以存在1个或者多个的隐含层节点。输入的信号先传播到其隐含层的节点，经过作用函数，再将隐节点输出的信号从输出节点进行输出。BP神经网络模型将一组样本I/O问题进行转化，使其成为非线性的优化问题，其使用优化算法中常用的梯度下降方法。若将神经网络作为输入向输出进行的映射，则是一个高度的非线性的映射关系。通常来说，算法的结构是通过所要研究的领域以及要完成的目标所确定的。通过所要研究的问题的各种历史经典的资料以及数据分析等，结合目前神经网络的理论发展的水平的研究经验，建立起一个恰当的模型，然后针对这个选择使用的模型来进行相应的算法求解，网络学习的过程中，不断调整网络的参数，除非输出的结果可以满足所要达到的要求。通过将影响其目标分配最优化的各个因素来作为输入的指标节点，将最终作战的效能，作为其输出的节点，并选择了多个隐层的节点，形成三层BP网络，然后再通过BP网络的模型来进行目标最优化的分配。BP网络算法的特点：计算如果达不到其预期的水平，就会无止境的一直计算下去；计算的过程中有可能发生震荡；BP网络计算需要一定时间；计算的数据对神经网络计算的结果有极大

的影响。

(5) 遗传算法^[38]：遗传算法是一种新的建立在自然选择与群体遗传基础上的寻优算法，其实质是利用优胜劣汰和适者生存的基本原理以及遗传机理进行抽象，形成的一种计算机可以且方便实现的算法。遗传算法具有比较强的全局的搜索能力，可解决其他一些优化算法无法解决的问题。其在目标分配算法中的应用，是将目标作为染色体，然后进行分配，通过数学模型的应用，利用基因遗传、变异和交叉来求解目标最优化分配。遗传算法存在着两个不足之处：一方面，遗传算法是随机搜索的一种方法，因此在求解最优解的时候通常要经过大量计算，需要耗费较长的时间，对实时性的要求较高的情况下，很难满足和适应；另一方面，它在收敛的速度较高时，容易引起早熟，算法可能收敛到局部的最优解，导致到最后所得到的解不是全局的最优解，降低了最优解的质量。

(6) 粒子群算法^[39]：目标分配最优化问题还可以使用粒子群算法，将对象所要达到的目标做为粒子群个体，通过结合其影响目标最优化分配因素，使个体之间进行协作，以达到最优的解，信息的共享机制是群内处于最优的粒子可以向其它的粒子进行信息传递。所有的粒子都拥有一个适应值，这个值是由优化函数来决定的，而且已知当前的位置和当前所寻找到的最好的位置，可以将此作为粒子飞行经验；同时每个粒子已知目前为止其整个群体所有的粒子所找到最佳的位置，可看作为同伴飞行经验。粒子可以根据其自身的当前位置和当前速度，以及当前的位置与自己的最好位置的距离，当前的位置和群体的最好位置的距离等来动态的改变自身当前的位置，以类似于梯度下降法来追随当前最优的粒子在最优解空间的搜索。

1.3 论文的主要内容和章节安排

1.3.1 论文的章节安排

本论文的主要工作是针对目标分配问题进行研究，介绍了一些经典的算法并提出了相应的改进措施，得到了不错的结果。论文主要包括五个部分：

第一章、绪论，主要介绍了目标分配问题，对其研究背景、国内外研究现状进行了详细描述，最后是本文的总体安排和创新工作的说明。

第二章、本章的主要工作就是对目标分配问题进行了详细介绍，其本质上是一个整数规划问题。威胁估计是进行目标分配问题的前提，本章首先介绍了威胁矩阵的概念。匈牙利算法和进化算法是解决目标分配问题的主要方法，本章对这两种算法进行了详细的分析，得出了匈牙利算法和进化算法的优势和不足之处，为了弥补匈牙利算法和进化算法的不足，本文将匈牙利算法和进化算法结合起来，提出了进化匈牙利算法来处理目标分配问题。

第三章、基于进化匈牙利算法的无人机目标分配问题研究。根据第二章对目标分配问题的建模，对无人机目标分配问题进行了处理。针对平衡目标分配问题可以采用进化匈牙利算法直接进行处理，对于不平衡目标分配问题就不能直接采用进化匈牙利算法，本文提出了相关的改进方法。不平衡目标分配中经常遇到的问题主要有战机加入战场、战机退出战场、目标分配不稳定等动态目标分配问题。本章针对这些问题，提出了解决方法，实验证明，这些方法都是有效的。

第四章、针对机器人足球问题进行建模，并设计了机器人足球目标分配算法，设计了动态目标分配仿真系统，对机器人足球目标分配问题进行了动态、直观的验证，结果有力的说明了算法的有效性。

第五章、总结与展望。对本论文的主要工作进行了总结，分析了目标分配问题中存在的问题，提出了下一步的研究方向。

1.3.2 论文的创新工作

1. 针对目标分配问题提出了进化匈牙利算法。进化匈牙利算法结合了匈牙利算法和进化算法的优点，在对目标分配问题进行处理时不仅运行速度快、结果稳定并且精确性高。本文通过将匈牙利算法和进化算法结合起来提出了进化匈牙利算法，实验结果表明了该算法的有效性。

2. 基于进化匈牙利算法的无人机目标分配问题研究。目标分配问题分为平衡目标分配和不平衡目标分配，在无人机目标分配问题中，不平衡目标分配问题和平衡目标分配问题相比主要指由于无人机的突然加入和退出造成的敌我双方无人机数量变化以及目标分配结果更加多样化等动态问题。针对这些情况，本文对进化匈牙利算法进行了改进，使其可以有效的处理这些问题。目标分配的结果采用0-1 矩阵表示，矩阵中的1 表示其所在列号的无人机被分配给该行号无人机攻击，结果矩阵中的每行每列只能有一个1。

3. 针对机器人足球决策系统中任务分配模块的缺陷，将进化匈牙利算法应用到机器人决策系统中，提出了机器人足球目标分配算法。针对目标分配问题，本文设计了动态目标分配系统，以机器人足球目标分配问题为背景，直观、动态的验证了算法的有效性。

第二章 目标分配问题研究

2.1 引言

目标分配作为一种整数规划问题，属于非线性规划问题的范畴。合理有效的目标分配方案可以将资源安排在合适的时间和正确的位置以执行适当的行动，提高目标的效能。确定一个目标分配方案需要考虑多种因素，如个体性能的差异、资源环境的复杂性等等，目标分配是一个NP难题。本章以无人机空战为背景，首先介绍了威胁估计，对目标分配进行建模，通过对匈牙利算法和进化算法进行说明，提出了结合匈牙利算法和进化算法的方法来处理目标分配问题，使其能够有效的处理平衡目标分配问题和不平衡目标分配问题。

2.2 威胁估计的概念及相关算法

2.2.1 威胁估计的概念

威胁估计是进行目标分配的基础，威胁估计的结果会直接影响目标分配的结果，并可能影响到整个的作战计划的最终结果，因此对威胁估计算法的研究是极其重要的，然而由于威胁估计算法涉及到战争条令以及武器装备的性能等因素，且具有很多不确定性，所以研究的难度较大，仍需投入更多的精力，是当前的态势估计领域一项研究重点。

威胁估计是根据战场上敌我双方各自的态势来推断敌方对我方造成的威胁程度，重在推断出敌方的企图和目的，量化出敌方的威胁程度，为我方的指挥决策提供信息。威胁评估依据的前提是态势评估，并属于态势评估高层次的信息融合处理。在战争中，对作战目标进行威胁估计，是作战指挥的一个重要的环节。只有对敌方的威胁性有了明确的判定，才能够正确的选择攻击兵力兵器和攻击的恰当时机。威胁估计基于很多因素，如敌我双方的武器性能、电子通信性能、作战条令、作战策略，我方的重点保护对象，敌方的杀伤力等。

威胁估计主要是确定敌方的作战能力、作战意图、作战方式等对我方造成的威胁等级。由此，我们建立威胁估计的三级模型^[40]：威胁要素的提取、威胁度的计算和威胁等级确认，如图 2.1 所示。



图 2.1 威胁估计的三级模型

(1) 威胁要素的提取。空中作战的威胁要素主要有：敌机导弹的威胁概率，敌电子战的设备的干扰效果，敌人的战斗机的威胁度，地面的威胁指标(如高炮、地空导弹)等。防空作战的威胁要素主要有：敌机空中袭击目标的类型、速度、距离、方式、航路的捷径(航向角)、遂行的任务企图、干扰的能力、平台机载的武器装备和突防能力。

(2) 威胁度的计算。威胁度的计算主要是完成对敌方各种威胁要素的威胁概率进行计算，定量的来描述敌方的空中目标对于我方所构成威胁的程度。此外，威胁度的计算还包括对敌方的作战意图要进行推理，将敌方的作战能力与作战意图加权处理，得到各个威胁源对于我方的威胁程度的一个量化指标。

(3) 威胁等级确定。威胁等级确定基于敌方的作战能力以及作战意图进行加权处理得到最终结果，按威胁源所产生的威胁可能对我方目标所引起破坏的程度来分类，并判定所属威胁级别。

2.2.2 威胁估计相关算法

目前，威胁估计的计算方法有很多，主要包括有多属性决策系统^[41]、模糊推理^[42]、贝叶斯推理^{[43][44]}、对策论^[45]、基于知识的方法^[46]、人工神经网络方法^{[47][48]}、D-S 证据理论^[49]、基于云模型推理的目标威胁排序方法^[50]等，这些方法针对不同的作战情景，各有各的优势和不足，恰当的结合使用多种方法，可以有效的避免各种不足，使得威胁估计的准确度与效率得到提高。

威胁估计最常用的加权方式按照下式进行运算：

$$T = k \cdot (w_1 \cdot E + w_2 \cdot I) \quad (2-1)$$

其中， T 为我方所收到的总的威胁程度， w_1 为敌作战能力的威胁权重， w_2 敌作战意图的威胁权重， E 为敌作战能力量化值， I 为敌意图量化值， k 为威胁的修正系数。

2.3 目标分配问题建模及相关算法

2.3.1 目标分配的概念

无人机目标分配问题，即不同类型的无人机协同作战，拦截一定数量的敌机，为其中的每一架无人机分配攻击目标，使其相互配合，协同作战的问题。无人机目标分配的基本原则^[51]是使目标分配结果在满足各种约束条件的情况下，尽可能的提高作战效率，降低作战代价。

目标分配问题可分为平衡目标分配问题和不平衡目标分配问题：

(1) 平衡目标分配

平衡目标分配问题主要指执行任务的个体和等待执行的任务数量一致的问题，无人机空空作战中的打击问题就是平衡目标分配问题的一个典型实例。如图 2.2 所示，在目标分配过程中要充分考虑各种因素：敌我机型、无人机的相对距离、敌我相对速度等，以求得到正确的目标分配结果，我方 1 号无人机攻击敌方 1 号无人机，我方 2 号无人机攻击敌方 3 号无人机，我方 3 号无人机攻击敌方 2 号无人机。

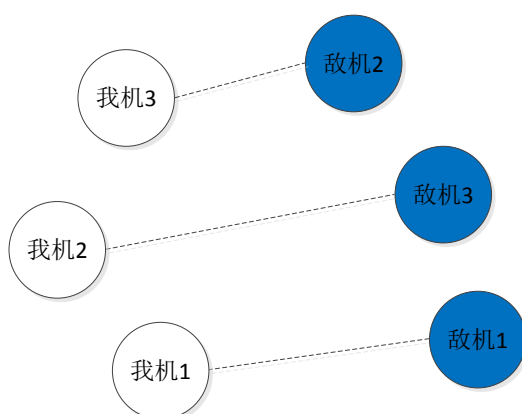


图 2.2 平衡目标分配问题

(2) 不平衡目标分配

平衡目标分配问题在现实中只是一种比较理想化的情况，在大多数情况下，执行任务的个体和任务数量是不相等的。在空战中，经常会出现一架我方无人机攻击多架敌方无人机或是多架我方无人机协同攻击敌方一架无人机的情况，这时候问题就转换为不平衡的目标分配问题。不平衡目标分配问题和平衡目标分配问题相比极其复杂，由于每个个体执行任务的能力不同，分配的结果就会更加多样化，但是通过虚拟目标可以将不平衡目标分配问题转化为平衡目标分配问题。如图 2.3 所示，我方 1 号无人机攻击敌方 1 号和 4 号无人机，我方 2 号无人机攻击敌方 3 号无人机，我方 3 号无人机攻击敌方 2 号我方。

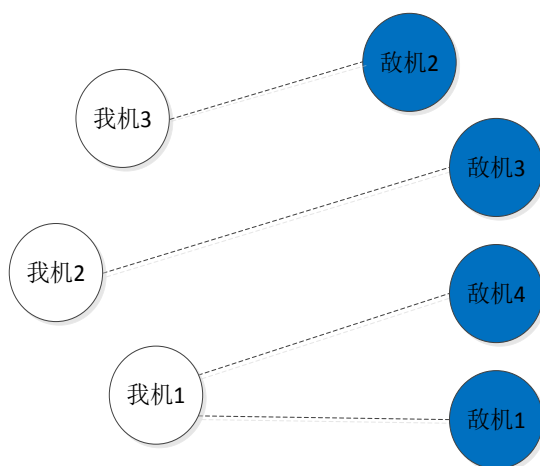


图2.3 多对多的目标分配问题

无人机目标分配流程如下^[52]：通过计算威胁估计，得到敌机对我机的一个威胁矩阵，采用合理的分配算法对我方无人机进行分配目标，该算法可以结合作战实际情况，考虑多重因素，从而充分利用我方优势，发挥我机的作战效能，提高我方生存概率，并且有效杀伤目标。

无人机的协同作战^[53]可以用来满足未来的作战系统的侦察、捕获、监视等任务需要。在现代战争形势中，一种典型的无人机作战的模式，如图2.4所示，先通过态势评估和威胁评估，得到敌我双方的态势图，采用无人机目标分配算法对攻击目标合理分配，并完成路径规划，最终对目标进行攻击。本章主要研究目标分配问题，提出了结合匈牙利算法和进化算法的进化匈牙利算法来完成合理的目标分配。

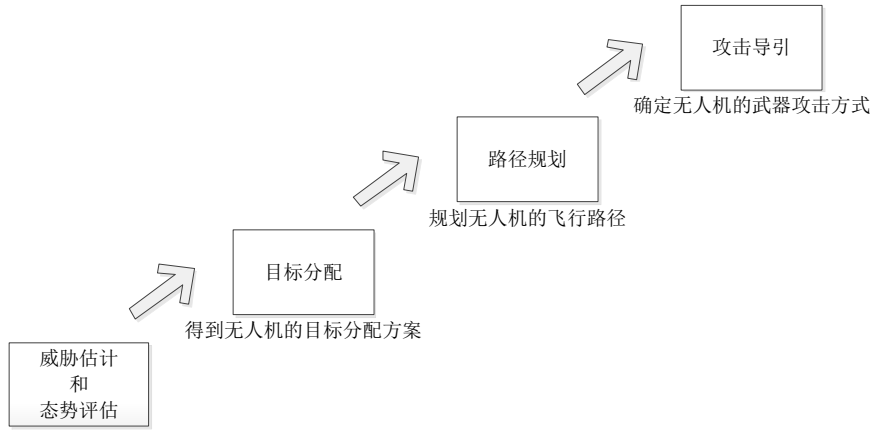


图 2.4 无人机作战模式

2.3.2 目标分配的模型

对目标分配问题进行建模。设有 n 架无人机来攻击 n 个目标^[54]，每架无人机只攻击其中的一个目标，则无人机的目标分配问题的模型可以描述为：

$$z = \min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{ij} X_{ij} \quad (2-2)$$

满足

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

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

$$X(i, j) = \begin{cases} 1, \text{第} i \text{架我机攻击第} j \text{个目标} \\ 0, \text{第} i \text{架我机不攻击第} j \text{个目标} \end{cases} \quad (2-5)$$

其中, $C=(C_{ij})_{n \times n}$ 是威胁矩阵, C_{ij} 为敌方第 j 架敌机对我方第 i 架无人机造成的威胁数值。 $X=(X_{ij})_{n \times n}$ 为无人机目标分配的解矩阵, X_{ij} 值为 1 时, 表示已经把敌人第 j 架无人机分配给我方的第 i 架无人机, X_{ij} 值为 0 时, 表示未把敌人第 j 架无人机分配给我方的第 i 架。条件 (2-2) 限定总威胁值 z 最小, 在此基础上给出分配解 X 。条件 (2-3) 限定解矩阵的每一行必须只能有一个 1, 即一架我方的无人机只能攻击一架敌机, 条件 (2-4) 限定解矩阵的每一列必须只能有一个 1, 也就是一架敌机只分配给一架我机进行攻击。

2.3.3 匈牙利算法

1955年, 库恩(w · w · Kuhn)提出了匈牙利算法, 它是一种关于指派问题的求解方法。匈牙利算法引用了匈牙利数学家康尼格(D. konig) 的一个关于矩阵中独立0元素个数的定理: 矩阵中独立0元素的个数等于能够覆盖所有0元素的最少直线数^[55]。匈牙利算法^[53]的成立依托下面两个数学定理。

定理1. 从指派问题的评价矩阵 $[C_{ij}]_{n \times n}$ 上的每一行元素中分别减去或加上一个常数 u_i (被称为该行的位势), 从每一列元素中分别减去、或加上一个常数 v_j (被称为该列的位势), 将得到一个新的评价矩阵 $[b_{ij}]_{n \times n}$, 新矩阵中的元素 $b_{ij} = C_{ij} - u_i - v_j$, 则 $[b_{ij}]_{n \times n}$ 的最优解就是 $[C_{ij}]_{n \times n}$ 的最优解。这里 C_{ij} 、 b_{ij} 均为非负值。

定理2. 若评价矩阵 $[C_{ij}]_{n \times n}$ 中的元素可划分为“0”与非“0”两中数据类型, 则评价矩阵中的独立零元素 (位于不同行不同列的“0”元素) 的最大个数等于覆盖该矩阵中所有“0”元素的最少直线数。如果最少直线数为 n , 则独立“0”元素的个数为 n , 将这些独立零元素对应的元素值改为1, 其余元素值改为0, 就得到指派问题的最优解。

多机协同攻击多目标中的目标分配问题是一种典型的组合优化问题, 匈牙利算法能够有效地解决目标函数是线性函数、分配策略是“ N 项目— N 目标”的单对单的目标分配问题。在多无人机空战目标分配问题中, 威胁矩阵对应匈牙利算法中的评价矩阵。匈牙利算法已被证明是解决目标分配问题的一种快速可靠的算法, 结合战场态势, 通过改进匈牙利算法使其能适用于无人机战场的目标分配问题, 通过对评价矩阵的处理得到最优的目标分配结果, 即我方无人机打击敌方无人机的效用值最大, 我方无人机的损失最小。

匈牙利算法的具体实施步骤如下:

第1步: 以敌方无人机的属性和具体的战场状态为主要依据进行威胁评估, 计算敌方无人机对我方无人机的威胁值, 从而构成威胁矩阵, 并将威胁矩阵转化为评价矩阵。

第2步: 对评价矩阵进行线性变换, 每行每列都减去改行该列中的最小元素, 使

其各行各列中出现0元素。

- ① 评价矩阵的每行元素减去该行的最小元素；
- ② 再从所得到的新的评价矩阵的每列元素中减去该列的最小元素。

若某行(列)中已有0元素，就不必再减了（减去该行或列的0元素得到的结果是一样的）。

例1：

$$C_{ij} = \begin{matrix} & \min \\ \begin{bmatrix} 11 & 15 & 12 \\ 12 & 12 & 14 \\ 14 & 13 & 16 \end{bmatrix} & \begin{matrix} 11 \\ 12 \\ 13 \end{matrix} \end{matrix} \rightarrow \begin{matrix} & \min \\ \begin{bmatrix} 0 & 4 & 1 \\ 0 & 0 & 2 \\ 1 & 0 & 3 \end{bmatrix} & \begin{matrix} 11 \\ 12 \\ 13 \end{matrix} \end{matrix} \rightarrow \begin{matrix} & \min \\ \begin{bmatrix} 0 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 2 \end{bmatrix} & \begin{matrix} 11 \\ 12 \\ 13 \end{matrix} \end{matrix} = b_{ij}$$

第3步：根据得到的新的评价矩阵进行试分配，寻求最优的分配结果。按以下的步骤进行变换。

经过第1步的变换后，新评价矩阵中的每行每列都出现了0元素，但是我们需要找到 N 个独立的0元素，若能找到，就得到了问题的最优解。当 N 较小时，可采用试探法、观察法找到 N 个独立的0元素。当 N 较大时，可按照下面的步骤进行计算：

①从只有一个0元素的行或列开始计算，对这个0元素进行标记，记作 \otimes 。这表示该行所代表的我方无人机，只有一架敌方无人机可被分配去进行攻击。然后划去 \otimes 所在列或行的所以其他0元素，并将这些元素记作 Φ 。表示该列所代表的敌方无人机已经被分配出去，不用再考虑进行其他分配了。

②对只有一个0元素的列或行的0元素进行标记，记作 \otimes ；然后划去其所在行或列的所有其他0元素，并将这些元素记作 Φ 。

③反复对①、②两步进行操作，直到找不到只有一个0元素的行或列为止。

④如果仍有没被标记的0元素，且同行或列的0元素至少有两个(表示该无人机可以从这两架无人机中选择其中一架进行打击)，在这种情况下分配结果可能有多个不同的解。对于这种问题，可采用不同的方案进行试探性的求解。从0元素个数最少的行或列开始计算，比较该行各个0元素所在列中0元素的个数，对0元素个数最少的那列的0元素进行标记(表示可选择性较多的要“礼让”可选择性较少的)。然后划掉和这个0元素同行同列的所有其他0元素。反复进行这一操作，直到所有的0元素都已经被标记或者划掉为止。

⑤若记作 \otimes 元素的数目 l 和矩阵的阶数 n 相等，则目标分配问题的最优解已经找到。

以例1的矩阵 (b_{ij}) 作为评价矩阵，按照上述步骤进行计算。则先给 b_{32} 作标记，然后划去 b_{22} ；对 b_{13} 作标记，划去 b_{11} ，最后对 b_{21} 标记，得到：

$$\begin{bmatrix} \Phi & 4 & \otimes \\ \otimes & \Phi & 1 \\ 1 & \otimes & 2 \end{bmatrix}$$

可见当 $l=n=3$ 时, 得到的最优解为:

无人机 1 攻击 3
无人机 2 攻击 1
无人机 3 攻击 2

若 $l < n$, 则需进行下一步。

例2:

$$C_{ij} = \begin{bmatrix} 11 & 15 & 12 \\ 13 & 12 & 12 \\ 11 & 13 & 14 \end{bmatrix} \xrightarrow{\min} \begin{bmatrix} 0 & 4 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 2 & 3 \end{bmatrix}$$

经过一次矩阵变换之后, 矩阵的每行每列都出现了0元素。按照上述步骤进行下一步得:

$$\begin{bmatrix} \otimes & 4 & 1 \\ 1 & \otimes & \Phi \\ \Phi & 2 & 3 \end{bmatrix}$$

观察可得, \otimes 的个数 $l=2$, 而 $n=3$, 所以无法进行分配, 需要进行下一步。

第4步: 若 $l < n$, 用最少的直线覆盖矩阵中所有的0元素, 从而确定该评价矩阵中可以找到的独立0元素最大数量, 具体的步骤如下:

- ① 没有 \otimes 元素的行打x号;
- ② 已打x号的行中所有含0元素的列打x号;
- ③ 对打有x号的列中所有含0元素的行打x号;
- ④ 复②和③两个步骤, 直到找不出新的打x号的行和列为止;
- ⑤ 没有打x号的行画一横线, 有打x号的列画一纵线, 这样就得到覆盖所有0元素的最少直线数。

将覆盖所有0元素的直线数记为 k , 若 $k < n$, 则说明需要再变换当前的评价矩阵才能找到 n 个独立的0元素, 为此转至第5步; 若 $k=n$, 而 $l=n$, 则应转到第2步的④, 继续试探。

第5步: 对评价矩阵进行变换的目的是为了增加矩阵中的0元素数量。在矩阵中没有被直线覆盖的元素中找出最小的元素。然后在打x行的各元素中减去这个最小元素, 在打x列的各元素中都加上这个最小元素, 以保证原来的0元素不被影响, 这样得到新评价矩阵的最优解和原问题相同。若能得到 n 个独立的0元素, 则已经

得最优解，否则需转到第3步重复进行运算。

2.4 基于匈牙利算法和进化算法的目标分配方法

多无人机目标分配是典型的组合优化问题，本章2.3节将这一问题建立为一个整数形非线性优化问题，因此使用单纯形法、动态规划法和梯度法求解比较困难，特别是对于敌我双方无人机数量比较多的情况，枚举法就更不使用了。匈牙利算法通过对评价矩阵进行一系列的线性运算，计算得出目标分配问题的最优结果。对于维数比较低的情况匈牙利算法可以很好的解决，但是对于高维的目标分配问题，匈牙利算法的结果不是最优的。为了弥补匈牙利算法在处理高维数据上的不足，本文将匈牙利算法和进化算法进行结合。

进化算法是由Holland^[56]提出的，一种模仿生物进化机制的优胜劣汰式的选择策略，它以一组解作为种子建立一个初始种群，通过初始种群进行交叉、变异及复制等操作，模仿生物界的“适者生存、优胜劣汰”的机制来选择结果，其选择机制表明进化算法可以有效的解决多无人机的目标分配问题。但是进化算法速度很慢无法满足战场实时性的要求^[57]。通过将匈牙利算法和进化算法结合起来，有效地弥补了算法的不足并且满足战场实时性的要求。

多无人机目标分配问题的最优解是一个单对单的分配结果，表现在结果矩阵上就是矩阵上的每行每列只有一个1。算法的初始种群中的个体是随机产生的0-1矩阵，“1”表示把其所在列的目标分配给该行号的我方无人机，“0”表示未分配。初始种群有两部分构成，一部分是随机产生的0-1矩阵，另一部分是使用匈牙利算法计算得到的目标分配结果矩阵，由于通过匈牙利算法计算得到的结果矩阵已经是一个比较好的分配结果，使用这个结果来初始化种群可以保证算法快速的收敛。算法使用的变异算子是随机的交换结果矩阵的两行或两列，目标分配的结果矩阵如图2.5和2.6所示：

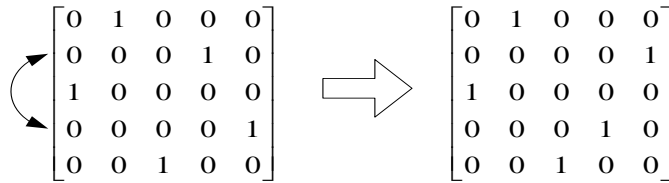


图2.5 交换矩阵的两行

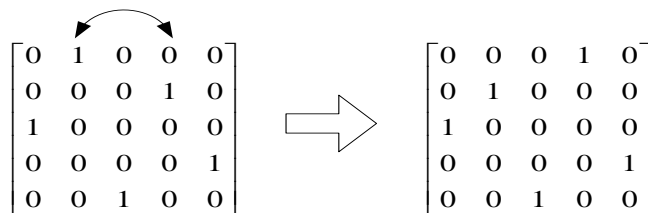


图2.6 交换矩阵的两列

算法流程为:

步骤1 判断敌我双方无人机的数量

若无人机的数量为1, 即我方无人机和敌方无人机的数量都为1, 则默认我方1号无人机攻击敌方1号无人机;

若无人机的数量为2-4, 由于无人机的数量比较少, 单纯的使用匈牙利算法进行计算即可;

若无人机的数量为5架或5架以上, 则单纯的使用匈牙利算法不能得到很好的分配结果, 需要结合进化算法进行处理。则转到步骤2继续运算。

步骤2 使用匈牙利算法来处理评价矩阵, 得到匈牙利算法的结果矩阵; 随即产生若干个结果矩阵, 将这些矩阵和匈牙利算法得出的结果作为算法的初始种群。

步骤3 计算种群中每个个体的适应度, 并进行下列操作:

复制: 从父代种群中复制优良个体将其添加到子代种群中, 并删除父代种群中适应度差的个体;

变异: 从父代种群中随机选择一个个体, 交换其中的任意两行或两列, 然后将新得到的个体添加到子代种群中;

步骤4 重复步骤3, 增加进化代数, 直到达到最大进化代数为止, 然后对得到的种群中的个体进行选择, 最优的个体即为所要求的解, 其对应的目标分配结果即是最优的分配方案。

2.5 本章小结

本章对目标分配问题进行了详细的研究, 把目标分配问题抽象成一个指派问题, 采用匈牙利算法和进化算法相结合的方法。分配结果采用 0-1 矩阵来表示, 1 表示其所在列的目标分配给对应行的我方无人机攻击, 结果矩阵中的每行每列最多只能有一个 1, 这表示目标分配的结果是一种单对单的分配模式。匈牙利算法运行速度快, 但是对维数比较高的目标分配问题计算精度不够好; 进化算法能够有效地处理高维的目标分配问题, 但是进化算法收敛慢运算时间长, 本文结合这两种算法的优势, 提出了一个既能保证算法运算速度又能解决高维目标分配问题的合理的分配方法。

第三章 无人机目标分配研究

3.1 引言

信息技术最近二十年获得了迅速的发展，其在军事中的应用越来越广泛。近年来，随着无人机技术的不断进步，以及各国为了减少战争伤亡人数的考虑，无人机在现在战争中的使用越来越频繁。例如：在最近的几场战争中都出现了无人机的背影，阿富汗战争、利比亚战争以及伊拉克战争。通过使用无人机美国以及其盟友最大限度的降低了伤亡人员，基本上达到了“零伤亡”的目的。随着战争模式的进一步变化以及无人机技术的进步，在未来的战场上无人机的作战方式会从单架次、单型号向多架次、多型号协同作战方向发展，相比与无人机的单独作战，多架次无人机之间的协同作战会更加复杂，如何在无人机之间通过协调使其整体攻击效能最大化成为一个突出的问题。多无人机目标分配技术通过评估敌我双方无人机的性能和战场环境，为每架无人机分配自己合理的攻击目标，使我方无人机的整体作战效能最大化。

目标分配技术广泛的应用在军事斗争的各个领域，无人机目标分配是目标分配技术在战场决策领域的一个重要应用。多无人机目标分配问题是指：如何充分的协调不同类型的多架无人机进行攻击，最大限度的发挥出各个无人机的效能，使我方对敌打击最大化。本章以无人机空空战斗为背景，本章的主要内容分为两部分：首先，对无人机平衡目标分配问题进行研究，即敌我双方无人机数量相等的情况。分别使用匈牙利算法和进化匈牙利算法对问题进行实验，结果证明进化匈牙利算法在处理目标分配问题时比匈牙利算法更具有优势。其次，对无人机不平衡目标分配问题进行了详细说明，对于不平衡目标分配问题中出现的多种情况提出了自己的解决方法，实验证明了方法的有效性。

3.2 无人机平衡目标分配问题

3.2.1 无人机平衡目标分配问题

无人机的作战方式灵活多变，主要特点有：多机型、多架次、协同攻击等，战场态势错综复杂、信息真假难辨，单纯的依靠指挥者个人的经验不可能对无人机的攻击目标进行合理有效的分配，只有通过智能化的信息平台才能对现在空战进行有效的指挥。本文把无人机目标分配问题分为平衡目标分配问题和不平衡目标分配问题。平衡目标分配是指参加空战的敌我双方无人机的数量相等的情况，根据每个无人机的作战能力和实时的战场信息建立威胁矩阵，分配的结果是一对一的无人机攻击方式。

3.2.2 无人机平衡目标分配的仿真分析

无人机空空战斗中，不仅敌方无人机对我方无人机构成威胁，我方无人机同样会对敌方无人机构成威胁，通过计算敌方无人机对我方无人机的威胁得到威胁值，将威胁值组合形成威胁矩阵；通过计算我方无人机对敌方无人机的威胁得到我方无人机打击敌方无人机的打击效能，并将这些效能值组合成效能矩阵；根据威胁矩阵和效能矩阵可以组合出多种无人机攻击模式。

威胁矩阵：威胁矩阵中的元素是敌方各个无人机对我方各个无人机的威胁值，威胁矩阵的行号是我方无人机的编号，列号为敌方无人机的编号，例如：第一行第一例处的元素是敌方“0号”无人机对我方“0号”无人机的威胁值，第一行的数据就是敌方各个无人机对我方“0号”无人机的威胁值，第一列的数据就是敌方“0号”无人机对我方各个无人机的威胁值，其它数据的定义也是如此。威胁值的计算需要考虑多种因素，如：无人机的性能、相对位置等等，将这些因素进行归一化处理就得到威胁值，构成的威胁矩阵形式如（3-1）所示。

$$R = \begin{pmatrix} R_{1,1} & \dots & R_{1,n} \\ \dots & \dots & \dots \\ R_{n,1} & \dots & R_{n,n} \end{pmatrix} \quad (3-1)$$

其中， R 表示威胁矩阵， R_{ij} 表示敌方 j 号无人机对我方 i 号无人机的威胁值。

效能矩阵：效能矩阵指的是我方无人机打击敌方无人机的打击效能，其计算方法、构成方式以及表示形式和威胁矩阵相似，如（3-2）所示。

$$B = \begin{pmatrix} B_{1,1} & \dots & B_{1,n} \\ \dots & \dots & \dots \\ B_{n,1} & \dots & B_{n,n} \end{pmatrix} \quad (3-2)$$

其中， B 表示效能矩阵， B_{ij} 表示我方 i 号无人机对敌方 j 号无人机的打击效能值。

评价矩阵：评价矩阵的构成方式如下：

$$Z = \alpha_1 R + \alpha_2 B \quad (3-3)$$

其中， Z 表示评价矩阵， R 表示威胁矩阵， B 表示效能矩阵， α_1 、 α_2 是构建系数，

α_1 、 α_2 满足这样的约束条件： $0 \leq \alpha_1 \leq 1$ ， $0 \leq \alpha_2 \leq 1$ ，并且 $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ 。

根据指挥官的个人选择以及战场的实际态势，无人机的作战方式有很多种，本文把无人机的作战方式分为：攻击优先、防守优先、攻守平衡以及指挥官的个人选择四种模式。根据 α_1 、 α_2 的具体数值来划分这四种模式，当选择攻击模式时， α_1 设置为 1， α_2 设置为 0；当选择防守模式时， α_1 设置为 0， α_2 设置为 1；当选择

平衡模式时, α_1 设置为 0.5, α_2 设置为 0.5; 当指挥官根据自己决定时可以自由的设置 α_1 、 α_2 的数值, 只要满足它们的约束条件即可。本文的所有仿真实验均选择的是攻击优先的模式。

无人机进化匈牙利算法流程

根据无人机空空作战的特点, 对进化匈牙利算法进行改进并将其应用到无人机空战目标分配问题中。其具体流程如下:

步骤 1: 首先需要选择一种战斗模式, 本文设置了四种模式: 攻击模式、防守模式、平衡模式和自选择模式, 根据选择的模式设置 α_1 、 α_2 的大小。

步骤 2: 计算评价矩阵, 根据战场的实时信息计算敌方无人机对我方无人机的威胁值, 构建评价矩阵。

步骤 3: 如果是首次分配则跳过这一步直接进行步骤 4。判断评价矩阵的变化是否超过了阈值, 如果超过了阈值则需要对评价矩阵进行更新并重新进行目标分配, 相反, 则不需要再次进行目标分配保持上一次分配的结果即可。

步骤 4: 基于威胁最大化的目标分配。判断威胁值的大小是否超过了阈值, 如果超过了阈值则把结果矩阵中对应的行和列设置为 1。

步骤 5: 使用进化匈牙利算法进行目标分配。

步骤 6: 判断是否满足终止条件, 满足则结束程序, 不满足则转到步骤 2 继续运行。

4架我方无人机攻击4架敌方无人机的情况:

情景1:

威胁矩阵为:

$$\begin{bmatrix} 550 & 800 & 479 & 510 \\ 40 & 465 & 324 & 567 \\ 234 & 34 & 466 & 678 \\ 678 & 244 & 345 & 577 \end{bmatrix}$$

目标分配的结果矩阵为:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

无人机目标分配结果为:

无人机 1攻击4

无人机 2攻击1

无人机 3攻击2

无人机 4攻击3

观察上述实验结果可以看出, 结果矩阵的第二行和第三行上的 1 对应的威胁矩阵里的威胁值都是最小的, 第一行和第四行的 1 对应的威胁矩阵中的元素不是该行中最小的元素, 但是分配结果所对应的整体威胁值是最小的, 本文采用的分配方法是使得整体的分配效果最佳, 个别的分配结果可能不是最好的, 但是总的效果是最优的。分别采用匈牙利算法和进化匈牙利算法得出的结果是一样的。

情景 2:

威胁矩阵为:

$$\begin{bmatrix} 789 & 345 & 564 & 688 \\ 23 & 356 & 676 & 79 \\ 356 & 657 & 790 & 89 \\ 465 & 787 & 111 & 890 \end{bmatrix}$$

目标分配的结果矩阵为:

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

无人机目标分配结果为:

无人机 1攻击2
无人机 2攻击1
无人机 3攻击4
无人机 4攻击3

情景2的威胁矩阵中的威胁值和情景1的威胁矩阵中的威胁值不一样，分配结果也就不一样，观察之后可以发现，分配情况和情景1相似，结果矩阵中的1对应的是威胁矩阵中比较小的元素值，整体的威胁值是最优的。分别采用匈牙利算法和进化匈牙利算法得出的结果是一样的，这说明对于维数比较低的情况两种算法都能得出精确的分配。

5维~48维的目标分配仿真情况

表3.1 5维到48维的目标分配情况数据表

维数	情况1		情况2		维数	情况1		情况2	
	算法1	算法2	算法1	算法2		算法1	算法2	算法1	算法2
48	3. 548	26. 732	3. 736	22. 368	12	2. 016	4. 925	2. 137	5. 071
44	3. 365	23. 427	3. 011	16. 700	11	1. 287	1. 287	1. 614	1. 614
40	2. 968	17. 514	2. 598	16. 449	10	1. 334	3. 579	1. 11	1. 11
36	2. 663	16. 462	2. 680	16. 784	9	1. 210	2. 767	1. 381	1. 381
32	2. 3489	14. 730	2. 350	16. 124	8	1. 711	1. 711	1. 307	1. 307
28	2. 3701	15. 535	2. 114	14. 909	7	0. 869	0. 869	1. 001	1. 001
24	1. 906	10. 510	2. 378	10. 687	6	1. 104	1. 104	0. 956	0. 956
20	2. 412	10. 565	2. 415	6. 676	5	1. 026	1. 026	0. 93	0. 93
16	2. 224	7. 931	1. 548	8. 18					

表3.1中的数据是5维到48维的部分目标分配仿真数据，为了对算法进行充分的验证，情况1和情况2是指分别使用不同的威胁矩阵来进行仿真；算法1是本文提出的进化匈牙利算法，算法2是匈牙利算法，使用两种不同的算法进行对比实验；对于不同维数的情况，分别进行了10次仿真实验，表中的数据是这10次目标分配结果对应的威胁值的平均值。

由表3.1可以看出，在处理维数比较低的威胁矩阵时，进化匈牙利算法和匈牙利算法得出的结果是相同的，随着维数的不断升高结果开始产生变化，进化匈牙利算法的总威胁值明显的低于匈牙利算法，这就表明了进化匈牙利相比匈牙利算法的优势。

48维不同进化代数的仿真结果分析

参数设置：实验使用的威胁矩阵是电脑软件随即产生的，威胁矩阵中的元素值的大小在0~1之间满足约束条件。由于进化算法结果具有不稳定的缺点，实验的进化代数设置为100到1200代，每隔100代记录一次数据，使用的方法是进化匈牙利算法来处理目标分配问题。表3.2中的数据（总威胁值的均值和标准差、运行时间的均值和标准差）是每次实验的平均值，是算法运行10次得到的结果的均值和方差。

表3.2 48维威胁矩阵进化代数分析数据表

进化 代数	总威胁值		运行时间/s		进化 代数	总威胁值		运行时间/s	
	均值	标准差	均值	标准 差		均值	标准差	均值	标准 差
100	9.7564	0.9485	0.1603	0.0215	700	3.6803	0.3865	0.8126	0.0111
200	6.9005	0.6355	0.2904	0.0069	800	3.6519	0.3098	0.8904	0.0265
300	5.4568	0.4850	0.4008	0.0148	900	3.5367	0.2005	0.9598	0.0205
400	4.6654	0.4553	0.5008	0.0225	1000	3.3557	0.2412	1.0556	0.0258
500	4.4589	0.3897	0.5905	0.0219	1100	3.2793	0.3698	1.1645	0.0287
600	4.0146	0.3453	0.7289	0.0511	1200	3.2902	0.2542	1.2435	0.0259

实验结果如表3.2所示，观察表3.2中的数据可以看出，随着进化代数从100递增到1200，得到总威胁值不断减小，这说明随着进化代数的增加进化匈牙利算法的结果在一步步的趋于稳定，不断接近最优结果。但是随着进化代数的增加，算法运行所需要的时间却在不断地增加，但是在大部分的实验中算法的运行时间都在1s以内满足战场实时性的要求。只有当进化代数增加到1000代的时候算法的运行时间才超过1s，结合表中的数据可以发现当进化代数到达1000代以后总威胁值已经基本稳定，基于这两点本文将进化匈牙利算法的进化代数确定为900代。

3.2.3 运行时间测试

战场态势瞬息万变，目标分配算法必须满足战场实时性的要求才具有实际的应用意义，运行时间不达标即使得出的结果再好也是徒劳。本文对 8 维到 48 维的目标分配问题分配进行了测试，实验结果如表 3.3 所示。

表 3.3 运行时间测试数据

问题规模	48	47	46	45	44	43
运行时间/s	0.968	0.906	0.875	0.859	0.781	0.750
问题规模	42	41	40	32	16	8
运行时间/s	0.703	0.687	0.606	0.390	0.093	0.031

表3.3的数据是对8维到48维中的个别代表性的问题的仿真结果，运行环境是 Intel(R) Core(TM)2 Duo CPU, T8300 @2.40GHz, 1.17GHz, 2.00GB内存，表中的运行时间是使用进化匈牙利算法运行10次以后得出的平均值，观察表3.3中的数据可以看出，8维到48维的算法处理时间都在1s以内，随着问题规模的增大运行时间相应的增长，满足了战场实时性的要求。

3.3 无人机不平衡目标分配问题

3.3.1 无人机不平衡目标分配问题

随着战争形势的复杂化，无人机多机多目标分配协同作战会成为未来空战的主要模式。指挥官不得不频繁的面对不平衡目标分配问题，不平衡目标分配问题是指敌我双方参加空战的无人机数量不相等的情况，造成这种情况出现的原因有很多，无人机被击落、运动路线的改变以及无人机性能的差异等等。进化匈牙利算法可以有效地处理平衡目标分配问题，但对于不平衡目标分配问题确不合适，为了解决这个问题，本文对进化匈牙利算法进行了改进。

对于不平衡目标分配问题本文的做法是先将其转化为平衡目标分配问题，然后采用进化匈牙利算法进行处理。由于不平衡问题比较复杂，本文对其进行分类然后分别提出解决方法。

(1) 我方无人机数量多于敌方无人机数量

对于这类问题本文采用的方法是加边补值法。例如：我方四架无人机攻击敌方三架无人机，假设此时得到的威胁矩阵为：

$$\begin{bmatrix} 689 & 456 & 356 \\ 678 & 234 & 790 \\ 343 & 245 & 577 \\ 580 & 213 & 345 \end{bmatrix}$$

可以看出，此时的威胁矩阵是一个 4×3 的矩阵，行数表示我方的无人机数量，列数表示敌方的无人机数量，此时进化匈牙利算法不能处理这种矩阵类型。本文提出了加边补值法来解决此类问题，在威胁矩阵的最右边虚拟一列构成一个 4×4 的矩阵，加入的数据视情况而定（原则就是不能影响正常的目标分配过程）。对于本文处理的无人机目标分配问题，威胁矩阵中的元素值均为 $0 \sim 1000$ 之间的数值，由于进化匈牙利算法处理的原则是找到每行每列相对较小的数值，所以本文将新加入的威胁值的大小定为 2000（大于 2000 的数对结果不会产生影响）。修改后的矩阵为：

$$\begin{bmatrix} 689 & 456 & 356 & 2000 \\ 678 & 234 & 790 & 2000 \\ 343 & 245 & 577 & 2000 \\ 580 & 213 & 345 & 2000 \end{bmatrix}$$

（2）我方无人机数量少于敌方无人机数量

由于指挥者的指挥意图不同和战场环境的复杂，我方无人机数量少于敌方的问题比较复杂，具体的可以分为多种情况进行处理。

情况1：我方有 n 架无人机，敌方有 m 架无人机，其中 $n < m$ ，并不需要对敌方的所有无人机进行攻击，只需要有选择性的攻击敌方 n 架无人机的情况。

对于这类问题本文采用的方法和上一种情况一样，也是采用加边补值法，不同的是对于这种情况需要虚拟一行才行。例如：我方三架无人机攻击敌方四架无人机，假设此时的威胁矩阵为：

$$\begin{bmatrix} 234 & 124 & 456 & 785 \\ 267 & 345 & 435 & 578 \\ 789 & 456 & 346 & 689 \end{bmatrix}$$

此时的威胁矩阵是一个 3×4 的矩阵，加入一行后威胁矩阵变为（加入的威胁值的确定方法和第一种情况相同）：

$$\begin{bmatrix} 234 & 124 & 456 & 785 \\ 267 & 345 & 435 & 578 \\ 789 & 456 & 346 & 689 \\ 2000 & 2000 & 2000 & 2000 \end{bmatrix}$$

评价矩阵的第四行是虚拟的数据现实中不存在这架无人机，在目标分配的结果中分配给第四架无人机的目标就不会有无人机去攻击，这样敌方虽然有四架无

人机参加了战斗但是由于我方无人机的数量不足，为了保存实力只选择了敌方中的三架进行攻击。

情况2: 我方有 n 架无人机，敌方有 m 架无人机，其中 $n < m$ ，不同于情况1的是敌方某架无人机必须被攻击，其余的 $m-1$ 架无人机选择其中的 $n-1$ 架进行攻击的情况。

假设敌方有四架无人机，我方有三架无人机，由于敌方的二号无人机对我方构成很大的威胁所以必须被打掉，其余的三架无人机可以任意挑选其中的两架进行攻击。

对于这个问题，如果继续简单的采用加边补值法是不能解决问题的。因为我方无人机数量少于敌方，按照本文的方法会在评价矩阵中加入一行虚拟的数据，如果在进行目标分配时，恰好虚拟的那一架无人机被分配去攻击敌方的二号无人机，这显然没有达到指挥者的要求。进化匈牙利算法是寻找评价矩阵每行每列中最小的数据，根据这个原理，本文将敌方二号无人机对我方虚拟无人机的威胁值假定为一个很大的数（大于评价矩阵中所有的数据），这样我方虚拟的无人机就不会被分配去攻击敌方二号无人机，敌方二号无人机必然会被分配给我方其它的无人机去攻击，这就很好的解决了这个问题。

假定我方三架无人机，敌方四架无人机，当前的评价矩阵为：

$$\begin{bmatrix} 234 & 124 & 456 & 785 \\ 267 & 345 & 435 & 578 \\ 789 & 456 & 346 & 689 \end{bmatrix}$$

根据本文提出的方法，我方虚拟一架无人机，则修改后的评价矩阵为：

$$\begin{bmatrix} 234 & 124 & 456 & 785 \\ 267 & 345 & 435 & 578 \\ 789 & 456 & 346 & 689 \\ 2000 & M & 2000 & 2000 \end{bmatrix}$$

依据本文的方法， M 值必须大于评价矩阵中的所有数据，具体大小可以依据具体情况而定。

情况3: 我方有 n 架无人机，敌方有 m 架无人机(其中 $m=kn+l, 0 < l < n$)，所有的敌方无人机必须被攻击。

方法1:

这种情况和前面两种情况不同，我方无人机的数量虽然少于敌方，但是敌方的无人机必须被全部攻击。对于这种情况本文采用的方法是：我方每架无人机至少需要攻击 k 架敌方无人机，这样就需要在评价矩阵中将 n 架我方无人机复制 $(k-1)*n$ 行。另外虚拟的 l 行所有的数据都设置为完成任务的最少时间，这样这个问题就转化为平衡目标分配问题。

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & \cdots & a_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & \cdots & a_{mn} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{11} & a_{12} & \cdots & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & \cdots & a_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & \cdots & a_{mn} \\ a_{i1}^{\min} & a_{i2}^{\min} & \cdots & \cdots & a_{in}^{\min} \\ a_{i1}^{\min} & a_{i2}^{\min} & \cdots & \cdots & a_{in}^{\min} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{i1}^{\min} & a_{i2}^{\min} & \cdots & \cdots & a_{in}^{\min} \end{bmatrix}$$

例如：假设我方有三架无人机，敌方有五架无人机，评价矩阵为：

$$\begin{bmatrix} 23 & 743 & 562 & 253 & 231 \\ 356 & 241 & 354 & 674 & 863 \\ 776 & 453 & 673 & 242 & 468 \end{bmatrix}$$

根据本文的方法修改后的评价矩阵为：

$$\begin{bmatrix} 23 & 743 & 562 & 253 & 231 \\ 356 & 241 & 354 & 674 & 863 \\ 776 & 453 & 673 & 242 & 468 \\ 23 & 241 & 354 & 242 & 231 \\ 23 & 241 & 354 & 242 & 231 \end{bmatrix}$$

使用进化匈牙利算法处理修改后的评价矩阵就能很好的处理这种情况。

方法2:

要求每架无人机至少完成对敌方 k 架无人机的打击，至多打击 $k+1$ 架无人机。

这就要求将我方每架无人机虚拟 k 架，然后再虚拟出 $n-1$ 架敌方无人机。

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} & M & \cdots & M \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} & M & \cdots & M \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} & M & \cdots & M \\ a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} & M & \cdots & M \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} & M & \cdots & M \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} & M & \cdots & M \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} & M & \cdots & M \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} & M & \cdots & M \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} & M & \cdots & M \end{bmatrix}$$

例如：假设我方有三架无人机，敌方有五架无人机，评价矩阵为：

$$\begin{bmatrix} 23 & 743 & 562 & 253 & 231 \\ 356 & 241 & 354 & 674 & 863 \\ 776 & 453 & 673 & 242 & 468 \end{bmatrix}$$

根据本文的方法修改后的评价矩阵为：

$$\begin{bmatrix} 23 & 743 & 562 & 253 & 231 & 2000 \\ 356 & 241 & 354 & 674 & 863 & 2000 \\ 776 & 453 & 673 & 242 & 468 & 2000 \\ 23 & 743 & 562 & 253 & 231 & 2000 \\ 356 & 241 & 354 & 674 & 863 & 2000 \\ 776 & 453 & 673 & 242 & 468 & 2000 \end{bmatrix}$$

使用进化匈牙利算法处理修改后的评价矩阵就能很好的处理这种情况。

3.3.2 无人机动态目标分配问题

结合现实的无人机空战，本文对不平衡目标分配中的几种情况进行仿真实验：

(1) 无人机被击落或是无人机新加入战场

敌我双方无人机空战的态势信息是通过评价矩阵体现出来的，目标分配的依据也是评价矩阵，评价矩阵是整个目标分配过程的基础和关键，当无人机被击落或是新的无人机加入战场时会造成无人机数量的变化，此时，通过修改评价矩阵可以很好的反应这种战场形势的变化。

当无人机被击落或是退出战场时，评价矩阵中这架无人机的信息应该被删除，但是如果简单的进行删除评价矩阵的维数会产生变化从而使得进化匈牙利算法无法处理，根据本文提出的方法，可以把相应行或是列的威胁值设置为 2000（无人机的威胁值大小在 0~1000，进化匈牙利算法是求总体威胁值最小，所以威胁值设置为 2000 不会对分配结果产生影响）。具体的实现方法如图 3.1 所示：

当前的评价矩阵为	我方三号无人机退出	敌方五号无人机退出
$\begin{bmatrix} 12 & 45 & 433 & 133 & 566 \\ 355 & 234 & 567 & 24 & 321 \\ 244 & 544 & 233 & 537 & 342 \\ 435 & 123 & 567 & 234 & 567 \\ 154 & 524 & 799 & 245 & 23 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 12 & 45 & 433 & 133 & 5 \\ 355 & 234 & 567 & 24 & 2 \\ 2000 & 2000 & 2000 & 2000 & 2 \\ 435 & 123 & 567 & 234 & 2 \\ 154 & 524 & 799 & 245 & 2 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 12 & 45 & 433 & 133 & 2 \\ 355 & 234 & 567 & 24 & 2 \\ 244 & 544 & 233 & 537 & 2 \\ 435 & 123 & 567 & 234 & 2 \\ 154 & 524 & 799 & 245 & 2 \end{bmatrix}$

图 3.1 无人机被击落或是退出战场

当新的无人机加入战场时，通过在评价矩阵上新加入第 $n+1$ 行或列的方式来反应信息的变化，并且需要再加入第 $n+1$ 列或是行（元素值设置为 2000）。具体的实现方法如图 3.2 所示。

当前的评价矩阵为	我方五号无人机加入	敌方五号无人机加入
$\begin{bmatrix} 34 & 466 & 566 & 342 \\ 124 & 687 & 463 & 875 \\ 457 & 342 & 547 & 687 \\ 578 & 245 & 237 & 975 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 34 & 466 & 566 & 342 \\ 124 & 687 & 463 & 875 \\ 457 & 342 & 547 & 687 \\ 578 & 245 & 237 & 975 \\ 346 & 545 & 660 & 321 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 34 & 466 & 566 & 342 & 356 \\ 124 & 687 & 463 & 875 & 125 \\ 457 & 342 & 547 & 687 & 739 \\ 578 & 245 & 237 & 975 & 345 \\ 2000 & 2000 & 2000 & 2000 & 2000 \end{bmatrix}$

图 3.2 无人机加入战场实现模式图

(2) 评价矩阵的稳定性保持

评价矩阵有效的反映出了战场信息，战场态势的变化都会在评价矩阵上得到体现。现在战场形势瞬息万变，评价矩阵需要根据战场态势进行变化，但是评价矩阵是目标分配的基础和关键，如果评价矩阵处于不停的变换之中目标分配的结果也会跟着不断地变换，这就会影响无人机的攻击效能，为了解决这个问题，使评价矩阵具有一定的稳定性，本文设置了一个数值作为评价矩阵是否变化的判断阈值。

$$T = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |z_{ij} - z'_{ij}| \quad (3-4)$$

其中， z_{ij} 是当前敌方 i 号无人机对我方 j 号无人机的威胁值， z'_{ij} 为这一时刻之前敌方 i 号无人机对我方 j 号无人机的威胁值， T 表示当前评价矩阵的所有元素之和这一时刻之前评价矩阵的变化差值，我们设置一个判断阈值，当 T 值的大小大于这个阈值时评价矩阵发生改变，否则保持不变，通过这个方法可以有效的保持评价矩阵的稳定性，防止评价矩阵处于一种不停的变换当中。

(3) 基于最大威胁的分配机制

进化匈牙利算法的分配原则是找出敌方无人机对我方无人机威胁最小的无人机，根据这样的原则，得到的分配结果的总威胁值是最小的，是一种总体最优的分配原则。但是在实际的无人机空战中情况远比我们想象的复杂，在敌方无人机对我方无人机威胁非常大的情况下继续采用这种总体最优的分配原则就不太合乎常理，为了解决这种问题，本文提出了基于最大威胁的分配机制。

基于最大威胁的分配机制是当敌方某架无人机对我方的威胁足够大时我方无人机会优先攻击此架无人机，从而消除威胁。本文会对威胁值设置一个阈值，当敌方某架无人机对我方无人机的威胁超过这个阈值时就会优先攻击，具体的体现方式是：在结果矩阵的相应位置处设置为 1，这样我方对应的无人机就会跟踪这架无人机进行攻击直至威胁消除。

3.3.3 无人机不平衡目标分配仿真说明

(1) 无人机数量增加

实验假设敌我双方都有四架无人机，评价矩阵为：

$$\begin{bmatrix} 910 & 250 & 642 & 485 \\ 255 & 410 & 150 & 832 \\ 23 & 365 & 598 & 935 \\ 336 & 258 & 385 & 959 \end{bmatrix}$$

使用进化匈牙利算法进行处理，得到的目标分配结果如下：

目标分配的结果矩阵为

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

无人机目标分配结果为

无人机 1攻击4

无人机 2攻击3

无人机 3攻击1

无人机 4攻击2

如果敌方突然增加无人机的数量，则根据本文提出的加边补值法对评价矩阵进行修改。若敌方增加一架无人机，则需要在评价矩阵上加入相应的行和列，列中的数据是新增加的无人机对我方无人机的威胁值，新增加的行中的数据设置为2000。修改后的评价矩阵为：

$$\begin{bmatrix} 910 & 250 & 642 & 485 & 980 \\ 255 & 410 & 150 & 832 & 145 \\ 23 & 365 & 598 & 935 & 598 \\ 336 & 258 & 385 & 959 & 886 \\ 2000 & 2000 & 2000 & 2000 & 2000 \end{bmatrix}$$

使用进化匈牙利算法进行处理得到的目标分配结果为：

目标分配的结果矩阵为

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

无人机目标分配结果为

无人机 1攻击2

无人机 2攻击5

无人机 3攻击1

无人机 4攻击3

无人机 5攻击4

直观显示如下：

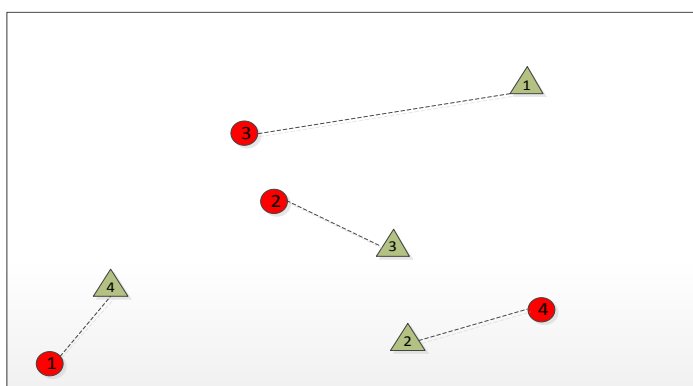


图3.3 敌机加入前的分配情况

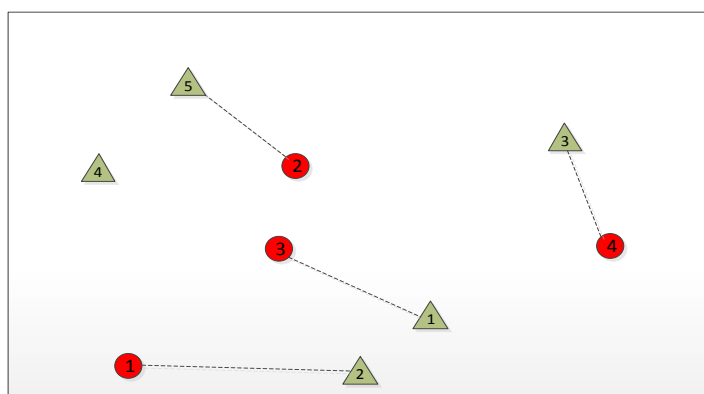


图3.4 敌机加入后的分配情况

图中，圆形表示我方无人机，三角形表示敌方无人机，连线表示使用进化匈牙利算法处理以后的目标分配情况，从图中可以看出，敌方增加无人机后，目标分配的结果会相应的发生改变。

(2) 无人机被击落或是退出战场

实验假设敌我双方的无人机数量是四，敌方无人机对我方无人机的评价矩阵为：

$$\begin{bmatrix} 887 & 250 & 648 & 435 \\ 276 & 425 & 145 & 821 \\ 31 & 358 & 665 & 923 \\ 345 & 235 & 389 & 965 \end{bmatrix}$$

使用进化匈牙利算法进行处理以后的目标分配结果为：

目标分配的结果矩阵为

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

无人机目标分配结果为

无人机 1攻击4

无人机 2攻击3

无人机 3攻击1

无人机 4攻击2

若敌方3号无人机被击落或是突然退出战场，则评价矩阵中对应的第三列的数

值应被置为2000，修改后的评价矩阵为：

$$\begin{bmatrix} 887 & 250 & 2000 & 435 \\ 276 & 425 & 2000 & 821 \\ 31 & 358 & 2000 & 923 \\ 345 & 235 & 2000 & 965 \end{bmatrix},$$

使用进化匈牙利算法进行处理后得：

目标分配的结果矩阵为

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

无人机目标分配结果为

- 无人机 1攻击4
- 无人机 3攻击1
- 无人机 4攻击2

直观显示如下所示：

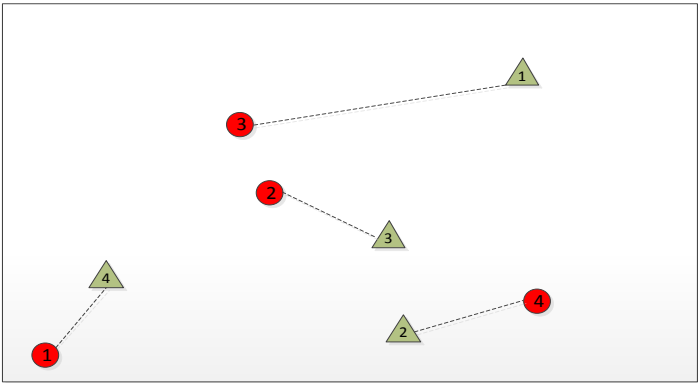


图3.5 敌方3号无人机退出前的分配情况

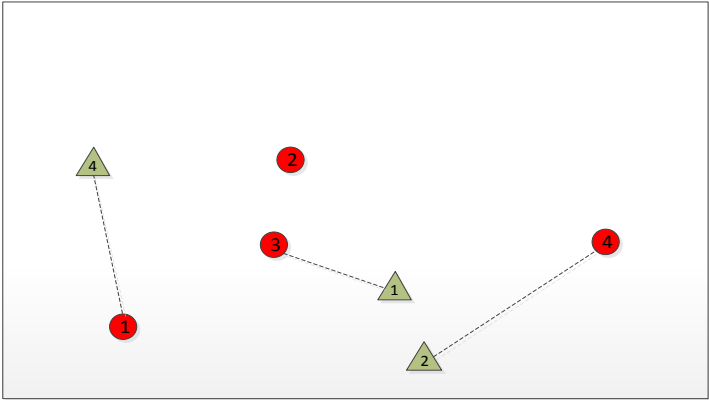


图3.6 敌方3号无人退出的分配情况

图中，圆形表示我方无人机，三角形表示敌方无人机，连线表示使用进化匈牙利算法处理以后的目标分配情况，从图中可以看出，敌方无人机退出后，目标分配的结果会相应的发生改变。

3.3.4 无人机不平衡目标分配问题中的未分配问题

不平衡目标分配问题指的是敌我双方的无人机数量不相等的问题，出现这种问题的原因有很多，除了初始化时不相等的原因外还可能是战场中出现了无人机的退出或加入等突发情况。进化匈牙利算法进行的是单对单的无人机目标分配，不能处理多对一或是一对多的问题。为了解决这个问题，本文提出了对于不平衡目标分配问题中未分配的目标进行再分配的方法。对于目标分配过程中没有被分配的无人机，本文采用的方法是：对于未分配的我机或敌机，寻找对我方无人机威胁最小的无人机进行攻击。针对目标分配过程中出现的我方无人机加入、敌方无人机退出和双方都有无人机退出的情况进行分析。

(1) 我方无人机加入

实验假设敌我双方各有四架无人机，则敌方无人机对我方无人机的评价矩阵为：

$$\begin{bmatrix} 890 & 254 & 648 & 426 \\ 276 & 423 & 145 & 843 \\ 32 & 364 & 677 & 916 \\ 330 & 247 & 389 & 965 \end{bmatrix}$$

使用进化匈牙利算法进行目标分配得到的结果为：

目标分配的结果矩阵为

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

无人机目标分配结果为

无人机 1攻击4

无人机 2攻击3

无人机 3攻击1

无人机 4攻击2

如果我方突然有一个无人机加入战场，则根据本文的方法需要在评价矩阵中加入相应的行和列，修正后的评价矩阵为：

$$\begin{bmatrix} 890 & 254 & 648 & 426 & 2000 \\ 276 & 423 & 145 & 843 & 2000 \\ 32 & 364 & 677 & 916 & 2000 \\ 330 & 247 & 389 & 965 & 2000 \\ 869 & 535 & 360 & 644 & 2000 \end{bmatrix}$$

此时我方无人机数量多于敌方，我方有剩余的无人机没有被分配，根据本文的方法对于未分配的无人机进行再分配，得出的目标分配结果为：

目标分配的结果矩阵为

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

无人机目标分配结果为

无人机 1攻击4

无人机 2攻击3

无人机 3攻击1

无人机 4攻击2

无人机 5攻击3

直观显示如下所示:

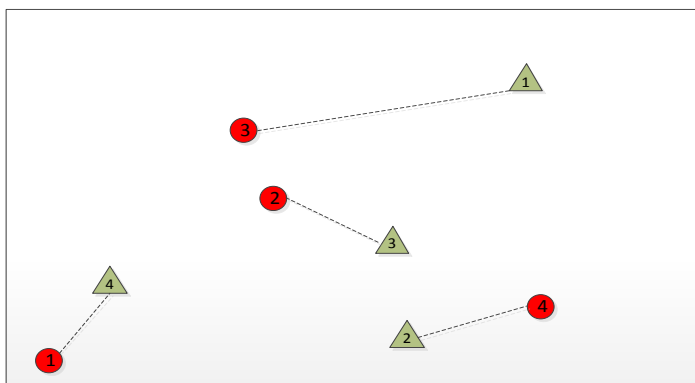


图3.7 我方无人机加入前的分配情况

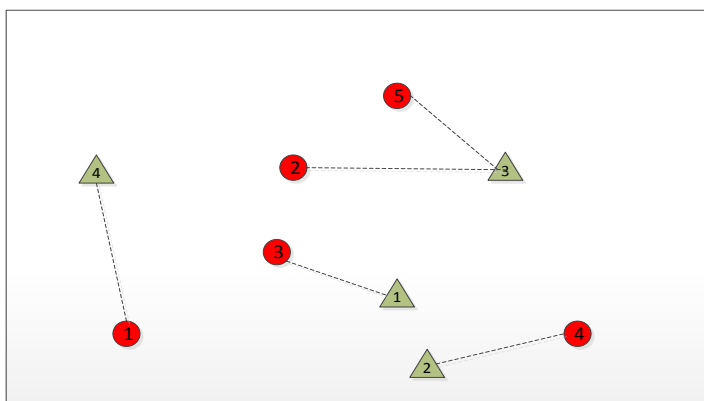


图3.8 我方无人机加入后的分配情况

图中, 圆形表示我方无人机, 三角形表示敌方无人机, 连线表示使用进化匈牙利算法处理以后的目标分配情况, 从图中可以看出, 当我方出现新加入战场的无人机后, 目标分配情况会出现改变, 并且不存在未分配的情况。

(2) 敌方无人机退出

实验假设敌我双方的无人机数量都为四架, 则敌方无人机对我方无人机的评价矩阵为:

$$\begin{bmatrix} 880 & 245 & 656 & 425 \\ 276 & 412 & 155 & 823 \\ 32 & 358 & 657 & 899 \\ 335 & 234 & 387 & 956 \end{bmatrix}$$

使用进化匈牙利算法处理以后，得到的目标分配结果为：

目标分配的结果矩阵为

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

无人机目标分配结果为

无人机 1攻击4

无人机 2攻击3

无人机 3攻击1

无人机 4攻击2

如果敌方的3号无人机突然退出战场，则需要在评价矩阵上加入相应的行和列，修改后的评价矩阵为：

$$\begin{bmatrix} 880 & 245 & 2000 & 425 \\ 276 & 412 & 2000 & 823 \\ 32 & 358 & 2000 & 899 \\ 335 & 234 & 2000 & 956 \end{bmatrix}$$

此时我方无人机数量多于敌方，我方有剩余的无人机没有被分配，根据本文的方法对于未分配的无人机进行再分配，得出的目标分配结果为：

目标分配的结果矩阵为

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

无人机目标分配结果为

无人机 1攻击4

无人机 2攻击1

无人机 3攻击1

无人机 4攻击2

直观显示图如下所示：

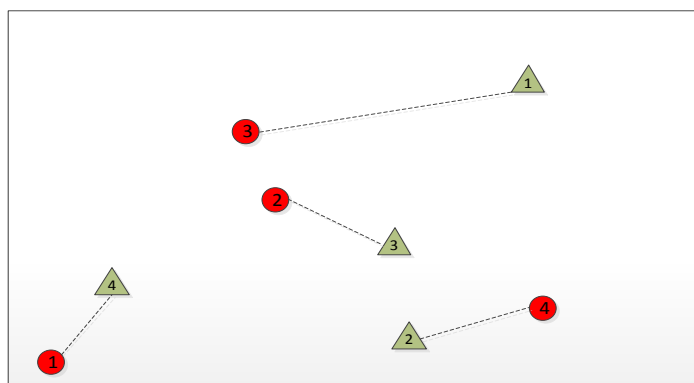


图3.9 敌机3退出战场前的目标分配情况

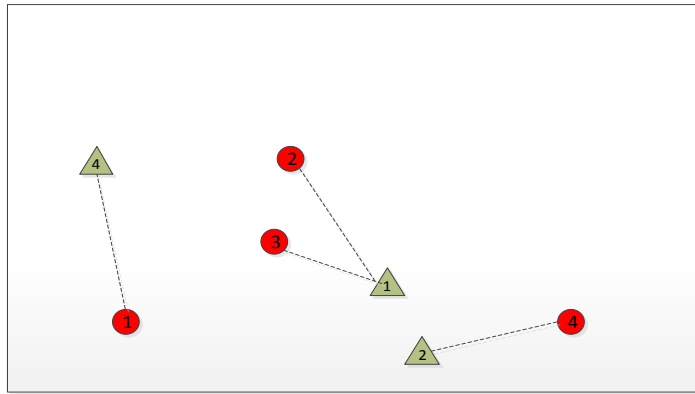


图3.10 敌机3退出战场后的目标分配情况

图中，红圆形表示我方无人机，三角形表示敌方无人机，连线表示使用进化匈牙利算法处理以后的目标分配情况，从图中可以看出，当敌方有无人机退出后，目标分配情况会出现改变，并且不存在未分配的情况。

3.4 本章小结

基于进化匈牙利算法的目标分配研究。目标分配问题本质上是一个指派问题，根据对指派问题的建模本文采用进化匈牙利算法进行处理。目标分配的结果通过0-1矩阵进行表示，1表示其所在列号无人机被分配给相对应的行号无人机机攻击，结果矩阵上的每一行每一列只能有一个1。无人机目标分配问题分为平衡目标分配问题和不平衡的目标分配问题，进化匈牙利算法可以很好的处理平衡目标分配问题，但是并不适用于不平衡目标分配问题。本文对进化匈牙利算法进行改进，实验表明改进后的算法可以有效的处理不平衡目标分配问题，此外，本文还对无人机目标分配过程中的一些突发情况进行了处理并得出了不错的结果。

第四章 机器人足球目标分配研究

4.1 引言

目标分配技术不仅仅应用在无人机空战领域，在物流运输、车间调度、金融投资、机器人足球大赛等领域也有重要作用。本章对机器人足球问题进行建模，对进化匈牙利算法进行改进并将其应用到机器人足球目标分配问题中。为了对目标分配算法进行有效的验证和直观地观察目标分配的结果，本章建立了动态目标分配系统，将目标分配算法嵌入系统中，对机器人足球目标分配问题进行了仿真实验，结果表明了目标分配算法的有效性。

4.2 机器人足球中的目标分配问题

4.2.1 机器人概述

机器人作为人类行为和大脑的功能的延伸，可以减轻人类的劳动强度，提高生产效率，代替人类从事一些具有危险性或者强度很大的工作^[58]。随着计算机水平和人工智能技术的飞速发展，机器人的性能在技术层面上有了显著提高。机器人逐渐成为了集机械、电子、控制、计算机、传感器、人工智能等多种先进技术于一体的自动化装备，具有感觉、思考、决策和动作能力等多种能力的智能机器人也相继问世^[59]。然而，随着社会的不断发展，各行各业的分工越来越明细，人们对机器人的期望也越来越高，现有机器人能力仍难满足各种新的需求应用。同时，随着赋予任务的复杂性逐渐增大，对机器人的研究与设计需要更多的投入。

机器人被广泛的应用于工业、医疗、军事等各领域，由于目标要求日益提高和运行环境的日益复杂，通常需要采用多个机器人分别到指定的地点协作完成任务，即涉及目标分配的问题。机器人足球大赛为人工智能、自动控制、机器人学以及游戏软件的开发等领域提供了良好的研究平台，逐步成为热门的研究课题^[60]。机器人足球大赛系统是一个典型的多智能体系统^[61-62]，本章将对机器人足球系统中的目标分配问题进行研究。

4.2.2 机器人足球目标分配问题建模

机器人足球大赛球员拦截目标分配，风险矩阵是我方球员防守对方某个球员造成丢球的风险值组成的矩阵，其风险值由防守球员所处区域的重要性和防守球员所处区域内的对方进攻球员数目决定；效益矩阵是我方球员防守对方某个球员的成功概率组成的矩阵，其效益值由我方球员的抢断能力、对方球员的控球能力

及该球员对球门的威胁程度决定。

比赛双方各有 9 名球员，球场区域划分为九宫格如下：

1	2	3
4	5	6
7	8	9

其中，1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 分别为球场上各个网格区域的编号，每一个格内有我方一名防守队员，其编号和网格编号相同， $STT_i, i=1,2,\dots,9$ 为我方球员 i 的抢断能力，取值范围 1、2、3，1 代表抢断能力强，2 表示抢断能力一般，3 表示抢断能力弱，按公式 $ST_i = STT_i / \sum_{i=1}^9 STT_i$ 归一化处理得到球员 i 的抢断能力因素值 ST_i ；对方进攻球员分布在球场上，按 1-9 进行编号， $CTT_i, i=1,2,\dots,9$ 为对方进攻球员 j 的控球能力，取值范围 1、2、3，1 代表控球能力强，2 表示控球能力一般，3 表示控球能力弱，按公式 $CT_i = CTT_i / \sum_{i=1}^9 CTT_i$ 归一化处理得到球员 j 的控球能力因素值 CT_i ； $NT_i, i=1,2,\dots,9$ 为第 i 个格内对方球员的数目，按公式 $N_i = NT_i / \sum_{i=1}^9 NT_i$ 归一化处理得到第 i 个格内对方球员的数目因素值 N_i 。

$IT_i, i=1,2,\dots,9$ 表示第 i 个格区域的重要性，其取值分布如下：

2	2	2
4	6	4
6	10	6

其中，每个格内的数字表示第 i 个球员在第 i 个格内的重要性。按公式 $I_i = IT_i / \sum_{i=1}^9 IT_i$ 归一化处理得到第 i 个格区域的重要性因素值 I_i 。

$THT_{ij}, i=1,2,\dots,9, j=1,2,\dots,9$ 表示第 j 个对方进攻球员处在第 i 个网格内对球门的威胁值，其取值分布如下：

1	1	1
2	4	2
3	5	3

其中，每个格内的数字表示相应格内如果有对方进攻球员时，对方进攻球员的威胁值。按公式 $TH_i = THT_i / \sum_{i=1}^9 THT_i$ 归一化得到第 j 个对方进攻球员处在第 i 个网格上对球门的威胁因素值 TH_j 。

$R_{i,j}, i=1,2,\dots,9, j=1,2,\dots,9$ 表示我方球员 i 拦截对方进攻球员 j 造成丢球的风险值，按下式 (4-1) 得到

$$R_{i,j} = I_i + N_i \quad (4-1)$$

其中， $I_i, i=1,2,\dots,9$ 表示第 i 个格区域的重要性因素值， $N_i, i=1,2,\dots,9$ 为第

i 个格内对方球员的数目因素值。

$B_{i,j}, i=1,2,\dots,9, j=1,2,\dots,9$ 表示我方球员 i 拦截对方球员 j 时的拦截成功率，按下式 (4-2) 得到

$$B_{i,j} = ST_i - CT_j + TH_j \quad (4-2)$$

其中， $ST_i, i=1,2,\dots,9$ 为我方球员 i 的抢断能力因素值， $CT_j, j=1,2,\dots,9$ 为对方进攻球员 j 的控球能力因素值， $TH_{ij}, i=1,2,\dots,9, j=1,2,\dots,9$ 表示第 j 个对方进攻球员处在第 i 个网格内对球门的威胁因素值。

4.2.3 算法流程

通过对机器人足球问题建模可以发现，机器人足球目标分配问题和无人机目标分配问题有很大的相似之处，提取目标的各种属性并进行归一化处理，然后形成目标分配的评价矩阵，通过进化匈牙利算法对评价矩阵进行运算得到目标分配的最优结果。两种问题的不同之处是，无人机的数量变化范围比较大，可以是一架也可以是十架或是更多，机器人足球的数量就比较固定；无人机空战中目标分配主要依据的是无人机在空战中的态势信息，而机器人足球目标分配主要依据的是机器人在比赛中的角色定位。针对机器人足球目标分配问题的这些特点，本文对进化匈牙利算法进行了相关的改进，具体的算法流程如下：

步骤 1，判断我方机器人数量 n 和对方机器人数量 m 是否相同

步骤 2，构建风险矩阵和效益矩阵

2a) 将影响风险值的各因素值进行归一化处理后，求和得到风险值；

2b) 用风险值构建风险矩阵如下：

$$R = \begin{pmatrix} R_{1,1} & \dots & R_{1,m} \\ \dots & \dots & \dots \\ R_{n,1} & \dots & R_{n,m} \end{pmatrix}$$

其中， R 为风险矩阵， $R_{1,1}$ 是我方 1 号机器人分配给对方 1 号机器人时所承担的风险值， $R_{1,m}$ 是我方 1 号机器人分配给对方 m 号机器人时所承担的风险值， $R_{n,1}$ 是我方 n 号机器人分配给对方 1 号机器人时所承担的风险值， $R_{n,m}$ 是我方 n 号机器人分配给对方 m 号机器人时所承担的风险值；

2c) 将影响效益值的各因素值进行归一化处理后，求和得到效益值；

2d) 用效益值构建效益矩阵如下：

$$B = \begin{pmatrix} B_{1,1} & \dots & B_{1,m} \\ \dots & \dots & \dots \\ B_{n,1} & \dots & B_{n,m} \end{pmatrix}$$

其中， B 为效益矩阵， $B_{1,1}$ 是我方 1 号机器人分配给对方 1 号机器人时所

能获得的效益, $B_{1,m}$ 是我方 1 号机器人分配给对方 m 号机器人时所能获得的效益, $B_{n,1}$ 是我方 n 号机器人分配给对方 1 号机器人时所能获得的效益, $B_{m,n}$ 是我方 n 号机器人分配给对方 m 号机器人时所能获得的效益。

若 n 和 m 相同, 则不对风险矩阵 R 和效能矩阵 B 做修改; 若 n 和 m 不相同, 则需用加边补 M 法对风险矩阵 R 和效能矩阵 B 做修改。

匈牙利算法处理的评价矩阵为行数和列数相同的方阵; 如果评价矩阵为行数和列数不同的矩阵, 利用匈牙利算法得到的结果的准确性就会大大降低, 所以在构建风险矩阵 R 和效能矩阵 B 之前我们必须先判断我方机器人数量 n 和对方机器人数量 m 是否相同。当 n 和 m 相同时我们建立的风险矩阵 R 和效能矩阵 B 就是一个方阵, 满足匈牙利算法的要求; n 和 m 不相同我们建立的风险矩阵 R 和效能矩阵 B 就不满足匈牙利算法的要求, 这时我们就需要利用加边补 M 法对矩阵进行修正。具体的情况分为两种:

1) n 少于 m , 我们采用加边补 M 法对风险矩阵 R 和效能矩阵 B 增加 $m-n$ 行, 相应的风险值和效能值以 M 代替, M 具体的大小根据实际需要进行确定。 M 的大小的确定原则就是不影响匈牙利算法的运行, 可以把 M 设置为比风险值大得多或是小得多的值。

2) n 大于 m , 我们采用加边补 M 法对风险矩阵 R 和效能矩阵 B 增加 $n-m$ 列, 相应的风险值和效能值以 M 代替, M 具体的大小根据实际需要进行确定。 M 的大小的确定原则就是不影响匈牙利算法的运行, 可以把 M 设置为比风险值大得多或是小得多的值。

步骤 3, 用户输入风险矩阵和效益矩阵。

步骤 4, 选择模式

4a) 用户根据对风险和效益的偏重程度在风险模式、效益模式、均衡模式和自定义模式中选择一种计算模式, 当用户偏重低风险时, 选择风险模式; 当用户偏重高效益时, 选择效益模式; 当用户要兼顾低风险和高效益时, 选择均衡模式; 当用户要自定义风险和效益的偏重程度时, 选择自定义模式;

4b) 根据用户选择的计算模式确定构建系数 α_1 , α_2 的值, 当用户选择风险模式时, α_1 设为 1, α_2 设为 0; 当用户选择效益模式时, α_1 设为 0, α_2 设为 1; 当用户选择均衡模式时, α_1 设为 0.5, α_2 设为 0.5; 当用户选择自定义模式时, 由用户输入 α_1 和 α_2 的值;

4c) 按下式构建评价矩阵:

$$Z = \alpha_1 R + \alpha_2 B \quad (4-3)$$

其中, Z 为评价矩阵, R 为风险矩阵, B 为效益矩阵, α_1 、 α_2 为构建系数, 满足 $0 \leq \alpha_1 \leq 1$, $0 \leq \alpha_2 \leq 1$, 并且 $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ 。

步骤 5, 初始化:

5a) 用户根据运行速度的要求设置种群规模和进化的最大代数, 其中, 种群规模的个体数量为 20-50, 进化的最大代数不低于 100 代。机器人足球大赛中确定我方球员的拦截目标时, 由于球场形势变化快, 要求在短时间内对我方球员和对方球员进行配对, 实时性要求高, 种群规模的个体数量设置为 10, 进化的最大代数设为 100。

5b) 用匈牙利方法处理评价矩阵, 得到一种目标分配方案, 目标分配方案按以下方式编码:

$$r = \begin{pmatrix} r_{1,1} & \cdots & r_{1,k} \\ \cdots & r_{i,j} & \cdots \\ r_{k,1} & \cdots & r_{k,k} \end{pmatrix}$$

其中, r 为目标分配方案矩阵, $r_{1,1}$ 、 $r_{1,k}$ 、 $r_{i,j}$ 、 $r_{k,1}$ 、 $r_{k,k}$ 的取值为 0 或 1, $r_{i,j}$ 取值为 1 时, 表示将我方 i 号机器人分配给对方 j 号机器人, $r_{i,j}$ 取值为 0 时, 表示没有将我方 i 号机器人分配给对方 j 号机器人, k 为 n 和 m 中的最大值;

5c) 对得到的目标分配方案进行均匀变异方式的操作, 得到种群中的其他个体。

步骤 6, 交叉操作: 对种群中的个体, 每隔两代进行局部交叉操作, 其他各代进行均匀交叉操作;

局部交叉操作按如下方式进行:

选择种群中的个体 Parent1 和个体 Parent2, 其编码分别如下:

$$\text{Parent1:} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{Parent2:} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

交换个体 Parent1 的第二行和个体 Parent2 的第二行后, 变成两个新个体 Child1、Child2:

$$\text{Child1:} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{Child2:} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

均匀交叉操作按如下方式进行: 随机产生一个和目标分配方案矩阵大小相同的 0、1 矩阵, 对应 0、1 矩阵中数值为 1 的位置交换两个个体的元素。

步骤 7, 变异操作: 对种群中的个体采用均匀变异方式的操作;

均匀交叉操作按如下方式进行: 随机产生一个和目标分配方案矩阵大小相同的 0、1 矩阵, 在选定的个体中, 将对应 0、1 矩阵中 1 的位置上的元素值由 0 变成 1, 1 变成 0。

步骤 8，选择操作：在步骤（6）交叉操作、步骤（7）变异操作得到的结果中选择评价值大的解作为当前种群的解，评价值按下式得到：

$$f = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k r_{i,j} \times Z_{i,j} \quad (4-4)$$

其中， f 为评价值， i 为我方机器人的编号， j 为对方机器人的编号， k 为 n 和目标总数 m 中的最大值， $r_{i,j}$ 为目标分配方案矩阵 r 中的元素， $Z_{i,j}$ 为评价矩阵 Z 中的元素。

步骤 9，判断是否满足终止条件，如果满足则进行下一步，否则转到步骤（6）。其中，终止条件为当前循环的代数达到最大代数。

步骤 10，如果 n 和 m 不相同则需对结果矩阵进行修正。 n 和 m 不同时我们在构建风险矩阵 R 和效能矩阵 B 时虚拟了相应的行和列，这些数据只是为了使风险矩阵 R 和效能矩阵 B 满足匈牙利算法的要求，并没有什么实际意义；因此这些虚拟的行或列中出现 1 是不对的，这时我们就需要对结果进行修正。原则为：对于结果中未分配的目标，采用“寻找威胁最大、攻击效能最大即攻击效率最高”的策略来进行分配。

步骤 11，输出目标分配结果

通过对进化匈牙利算法进行改进可以有效的解决机器人足球中的目标分配问题，从而完善机器人足球系统。

4.3 机器人足球目标分配仿真实验

4.3.1 系统介绍

目标分配问题是运筹学中的经典问题，其应用范围非常广泛。为了对目标分配问题进行动态的直观显示，本文建立了动态目标分配系统，将目标分配算法嵌入其中，通过 windows 窗口画面实时的显示目标分配的结果，使操作人员能够直观的观察目标分配的结果，并可以根据操作人员的个人偏好对分配结果进行干预。本文以机器人足球动态目标分配问题为应用背景，对动态目标分配系统进行介绍。

本系统在仿真多机器人目标分配的环境下，能完成威胁估计和目标分配功能。系统不仅包括威胁计算模块和目标分配模块，还包括机器人的演示模块，以及同整个网络系统的交互作用。根据系统的整体要求和软件的维护需要，本系统具有实时性、高度模块化、通用性强、计算精度高等特点。

动态目标分配系统的总体结构如图 4.1 所示：

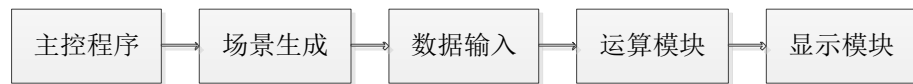


图 4.1 总体结构

主控程序

主控程序是威胁计算和目标分配软件的主体控制程序，它通过主控窗口实现人机交互。主控程序决定程序的开始和结束，并控制程序的主流程。

场景生成

此模块主要负责双方机器人的生成，具体的参数由操作人员手动输入，根据这些信息在屏幕上生成无人机空战仿真场景。

数据输入

软件实时提取球场仿真中双方机器人的各种属性（例如：速度、坐标和角度等），随着仿真场景的不断变化，这些数据也会不断地发生变化。此外，操作人员可以手动的改变机器人的各种属性（速度、角度），这些信息会实时的反应在仿真场景中并传入到运算模块。

运算模块

此模块主要负责对接收到的球场信息进行计算，是整个软件的核心部分，主要的算法也是包含在这个模块。运算模块包括主要包括两大部分：威胁计算模块和目标分配模块。

威胁计算模块又包括两部分：数据输入和威胁计算。数据输入主要负责对软件中机器人的运行数据进行实时的提取，威胁计算主要负责对接受到的数据进行加工，已得到我们需要的威胁数据。威胁计算负责计算对方机器人对我方机器人的威胁值，通过加权求和的方法将机器人的各个属性（速度、坐标和角度等）进行归一化处理，构成威胁矩阵作为目标分配的评价矩阵。

目标分配计算：目标分配模块负责对评价矩阵进行运算，采用改进的进化匈牙利算法进行目标分配，并且对于机器人的退出、加入、运动状态的改变等情况提供了解决方案。

运算模块的结构如图 4.2 所示。

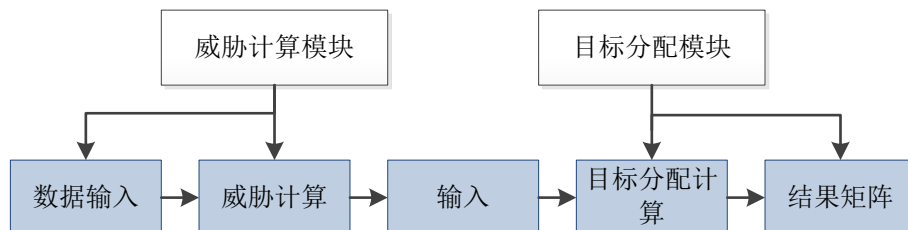


图 4.2 运算模块总体结构

演示模块

本软件的运行结果为 windows 的窗口画面，演示模块主要负责直观的显示机器人足球场景，包括双方机器人的运动状态和目标分配的结果。

4.3.2 机器人足球平衡目标分配仿真结果及分析

仿真实验中假设双方的机器人是同一种类型，我方机器人统一为红色、对方为蓝色，双方机器人的抢断能力和控球能力定为 2，计算模式默认为风险模式，圆内编号为双方机器人的编号，连线即为分配结果，通过计算机器人的状态信息来构建评价矩阵并进行目标分配。本文选取了机器人足球大赛中几个比较特殊的场景进行仿真实验。

三对三的机器人足球动态仿真，双方机器人编号和初始化信息如表所示：

表 4.1 双方机器人初始信息

我方编号 坐标轴	1	2	3
X	40	50	30
Y	40	50	40
速度	60	60	60
角度	90	90	80
敌方编号 坐标轴	1	2	3
X	40	60	30
Y	60	60	70
速度	60	60	60
角度	270	290	250

仿真开始后，根据机器人实时的运动状态使用进化匈牙利算法进行处理，目标分配过程进行时对应的威胁矩阵为：

$$\begin{bmatrix} 453 & 512 & 495 \\ 634 & 582 & 775 \\ 831 & 474 & 465 \end{bmatrix}$$

使用进化匈牙利算法进行处理，得到的目标分配结果如下：

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

从结果矩阵可以看出我方 1 号机器人拦截对方 1 号机器人，我方 2 号机器人拦截对方 2 号机器人，我方 3 号机器人拦截对方 3 号机器人。观察威胁矩阵中的数据，可以看出分配结果对应的总威胁值最小，表明了算法的有效性。

仿真图为：

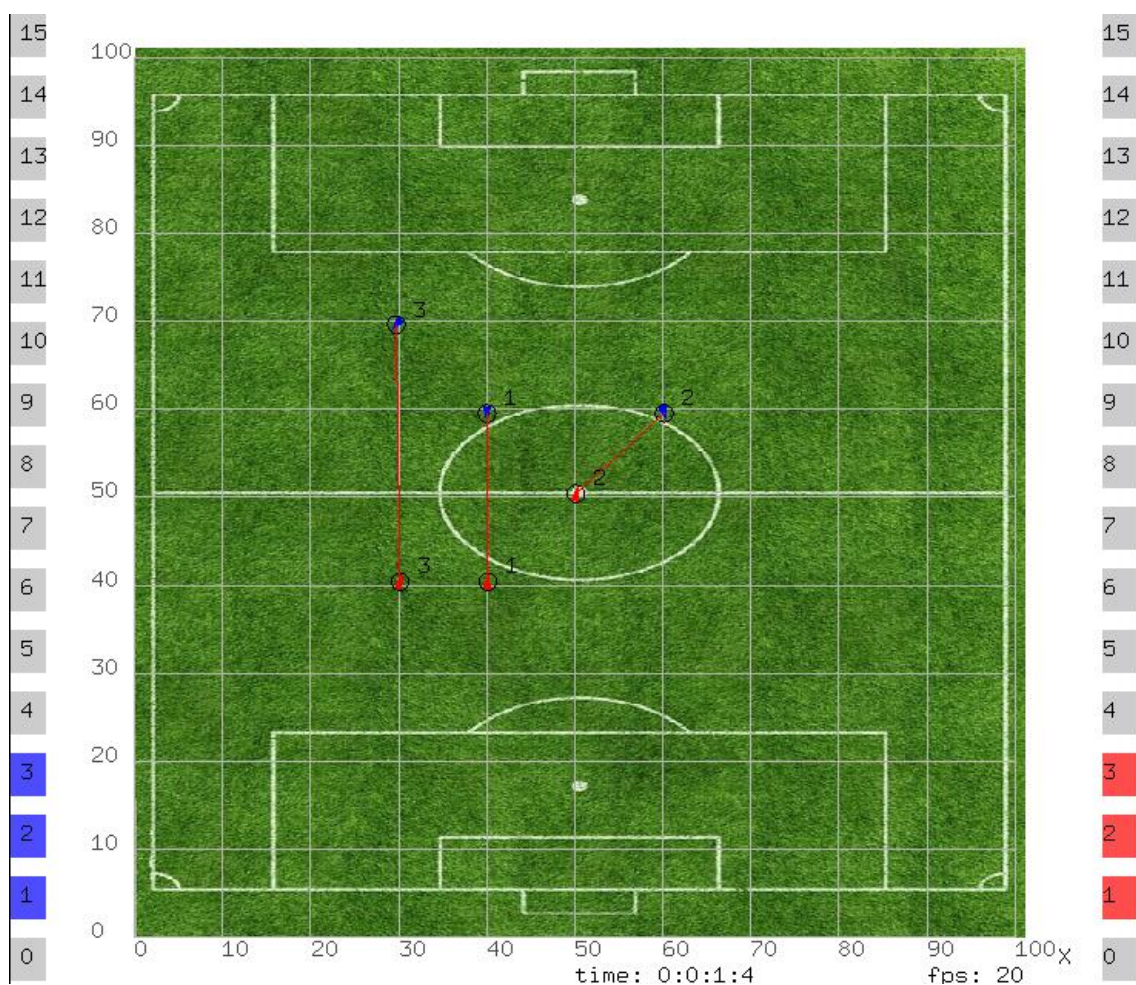


图 4.3 三对三机器人目标分配

五对五的机器人动态仿真，双方机器人编号和初始化信息如表所示：

表 4.2 双方机器人初始信息

我方编号 坐标轴	1	2	3	4	5
X	50	30	70	90	50
Y	30	20	25	20	50
速度	60	60	60	60	60
角度	90	90	120	90	90
敌方编号 坐标轴	1	2	3	4	5
X	50	10	20	70	80
Y	60	80	60	50	70
速度	60	60	60	60	60
角度	290	270	290	250	270

仿真开始后，根据机器人实时的运动状态使用进化匈牙利算法进行处理，目

标分配过程进行时对应的威胁矩阵为：

325	787	345	532	443
705	553	462	521	685
496	637	865	453	505
794	481	537	437	254
730	680	685	783	950

使用进化匈牙利算法进行处理，得到的目标分配结果如下：

1	0	0	0	0
0	0	1	0	0
0	0	0	1	0
0	0	0	0	1
0	1	0	0	0

从结果矩阵可以看出我方 1 号机器人拦截对方 1 号机器人，我方 2 号机器人拦截对方 3 号机器人，我方 3 号机器人拦截对方 4 号机器人，我方 4 号机器人拦截对方 5 号机器人，我方 5 号机器人拦截对方 2 号机器人。观察威胁矩阵中的数据，可以看出分配结果对应的总威胁值最小，表明了算法的有效性。

仿真图为：



图 4.4 五对五机器人目标分配

4.3.3 机器人足球不平衡目标分配问题仿真结果及分析

球场态势复杂多变，双方机器人数量相同的平衡目标分配问题在多数情况下是一种比较理想的情况，而双方机器人数量不同的不平衡目标分配问题是一种常见的情况。机器人足球不平衡目标分配问题和平衡目标分配问题相比有很大的不同，平衡目标分配问题的结果是一种单对单的目标分配问题，不平衡目标分配问题的结果就更加多样化，不仅存在单对单的分配问题，同时还存在一对多、多对一的分配情况。基于进化匈牙利算法的机器人足球目标分配仿真平台不仅可以对平衡目标分配问题进行仿真演示，而且同样适用于不平衡的目标分配问题。从实验中可以很直观的看出不平衡问题和平衡问题的区别。

三对五的机器人动态仿真，双方机器人编号和初始化信息如表所示：

表 4.3 双方机器人初始信息

我方编号 坐标轴	1	2	3		
X	50	70	40		
Y	30	25	25		
速度	60	60	60		
角度	90	60	150		
敌方编号 坐标轴	1	2	3	4	5
X	50	70	80	40	35
Y	50	60	50	40	35
速度	60	60	60	60	60
角度	270	270	290	250	270

仿真开始后，根据机器人实时的运动状态使用进化匈牙利算法进行处理，目标分配过程进行时对应的威胁矩阵为：

$$\begin{bmatrix} 531 & 540 & 846 & 712 & 905 \\ 456 & 352 & 406 & 753 & 625 \\ 885 & 486 & 537 & 241 & 462 \end{bmatrix}$$

使用进化匈牙利算法进行处理，得到的目标分配结果如下：

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

从结果矩阵可以看出我方 1 号机器人拦截对方 1 号机器人，我方 2 号机器人拦截对方 2 号和 3 号机器人，我方 3 号机器人拦截对方 4 号和 5 号机器人。观察威胁矩阵中的数据，可以看出分配结果对应的总威胁值最小，表明了算法的有效

性。

仿真图为：

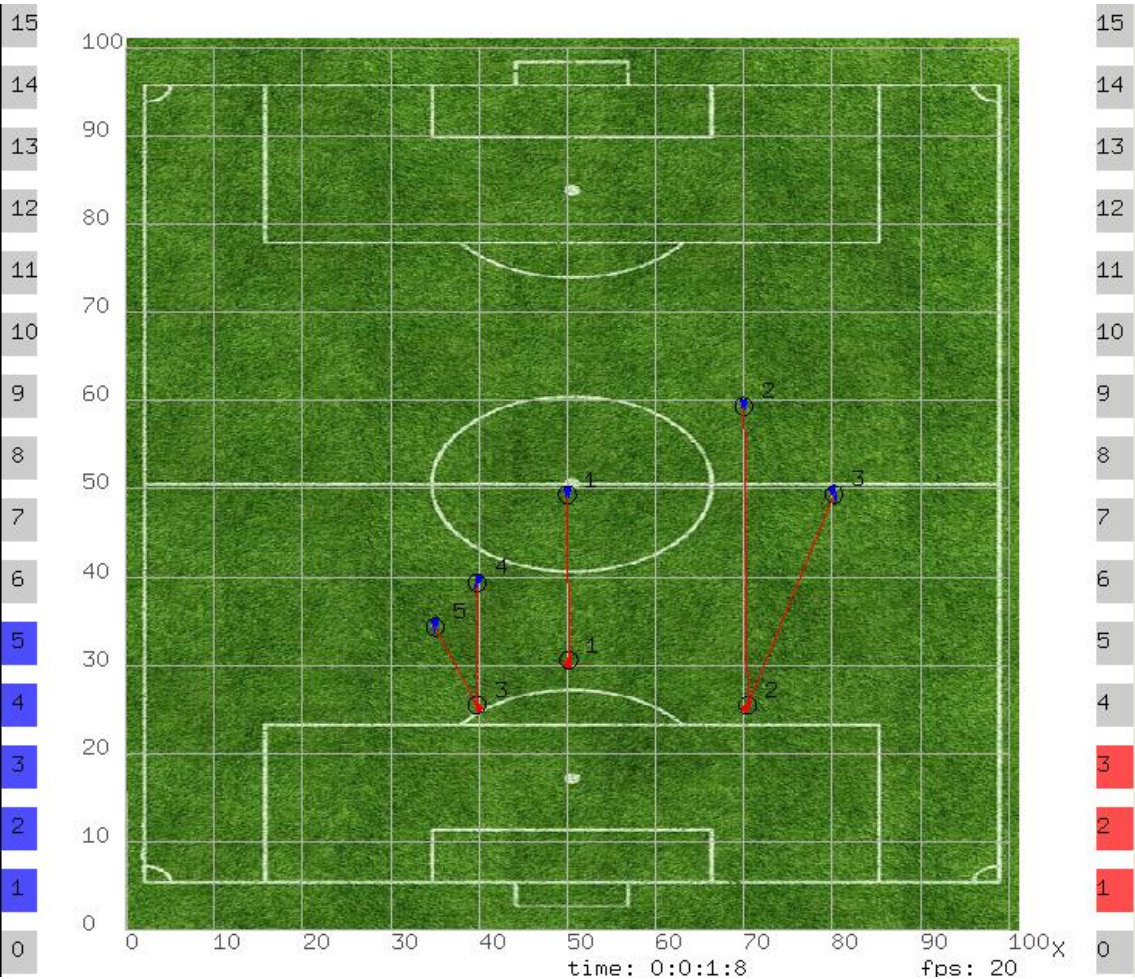


图 4.5 三对五机器人目标分配

五对三的机器人动态仿真，双方机器人编号和初始化信息如表所示：

表4.4 双方机器人初始信息

我方编号	1	2	3	4	5
坐标轴					
X	30	50	70	70	40
Y	30	40	40	50	50
速度	60	60	60	60	60
角度	90	80	90	80	120
敌方编号	1	2	3		
坐标轴					
X	60	40	80		
Y	70	70	60		
速度	60	60	60		
角度	270	290	290		

仿真开始后，根据机器人实时的运动状态使用进化匈牙利算法进行处理，目

标分配过程进行时的威胁矩阵为：

$$\begin{bmatrix} 423 & 362 & 484 \\ 783 & 468 & 570 \\ 634 & 843 & 556 \\ 352 & 435 & 771 \\ 664 & 650 & 834 \end{bmatrix}$$

使用进化匈牙利算法进行处理，得到的目标分配结果如下：

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

从结果矩阵可以看出我方 1 号、2 号和 5 号机器人拦截对方 2 号机器人，我方 3 号机器人拦截对方 3 号机器人，我方 4 号机器人拦截对方 1 号机器人。观察威胁矩阵中的数据，可以看出分配结果对应的总威胁值最小，表明了算法的有效性。

仿真图为：



图 4.6 五对三机器人目标分配

4.4 本章小结

本章针对机器人足球问题进行建模，并对进化匈牙利算法进行改进，改进后的算法能够有效的处理机器人足球中的目标分配问题。为了对目标分配算法进行验证并直观的显示目标分配的结果，设计了动态目标分配仿真系统，以机器人足球目标分配问题为背景，进行了动态、直观的验证，结果有力的说明了算法的有效性。

第五章 总结与展望

进入二十一世纪以来,科学技术发展迅速,在人们生活的各个领域都取得了巨大的突破,信息技术的发展尤其迅速。信息技术与人们的生活息息相关,当今人们的生活已不可能离开它们。随着信息技术的发展,其在战争中的应用也越来越广泛,现在战争正朝着信息化、智能化、复杂化方向发展。指挥官是战场形势的决策者,由于战场信息复杂化的发展,已不可能单纯的依靠指挥官的个人经验来对战场形势作出正确的判断。因此,目标分配问题就被各国军事部门所提出,目标分配指的是寻找理想的方案进行目标最优排序和资源最佳分配。合理有效的目标分配方案可以将资源安排在合适的时间和正确的位置执行适当的行动,提高任务的效能。确定一个目标分配方案需要考虑多种因素,如个体性能的差异、战场环境的复杂性、指挥者的偏好等等。本文以无人机空空作战和机器人足球为背景,对目标分配问题进行了研究,主要工作如下:

1、详细介绍了目标分配问题,对目标分配问题进行建模,将其归纳为指派问题。介绍了威胁矩阵的概念,给出了无人机目标威胁矩阵的计算方法。对无人机目标分配问题的相关算法进行了详细介绍,尤其对匈牙利算法和进化算法进行了详细分析,并得出了匈牙利算法和进化算法的优势和不足之处,为了弥补匈牙利算法和进化算法的不足,本文将匈牙利算法和进化算法结合起来,提出了进化匈牙利算法来处理目标分配问题。

2、基于进化匈牙利算法的无人机目标分配问题研究。本文以无人机空空作战为背景,采用进化匈牙利算法进行处理。分配结果采用0-1矩阵表示,1表示该标号所在列的目标被分配给该行号所在行的目标,结果矩阵上的每一行每一列只能有一个1。针对平衡目标分配问题可以采用进化匈牙利算法直接进行处理,对于不平衡目标分配问题就不能直接采用进化匈牙利算法,本文提出了相关的改进方法。不平衡目标分配中经常遇到的问题包括战机加入战场、战机退出战场、目标分配不稳定等动态目标分配问题。本文针对这些问题,提出了解决方法,实验证明,这些方法都是有效的。

3、针对机器人足球问题进行建模,并设计了机器人足球目标分配算法,实验结果表明了算法的有效性。设计了动态目标分配系统,以机器人足球为背景对目标分配过程中可能出现的各种问题进行了系统仿真。

本文的创新性表现如下:

1、针对多目标分配问题,通过分析将其归纳为指派问题模型,匈牙利算法和进化算法都是目标分配问题的常用方法,但是他们都有各自的优点和不足,本文结合匈牙利算法和进化算法,提出了进化匈牙利算法,通过实验表明进化匈牙利

算法能有效的解决目标分配问题。

2、目标分配问题分为平衡目标分配问题和不平衡目标分配问题，针对空战中敌我双方无人机数目不等的目标分配问题，本文进行了深入研究并提出了一整套的解决方案；对于空战中出现的突发情况，如无人机加入战场或无人机退出战场、目标分配稳定性问题等动态目标分配问题本文提出了解决方法并进行了验证。

3、通过对机器人足球问题的分析建立了机器人足球目标分配模型，并运用进化匈牙利算法进行了验证，通过实验表明该算法有效的解决了机器人足球中的目标分配问题。设计了动态目标分配仿真软件，以机器人足球为背景，对目标分配过程中可能出现的各种问题进行了系统仿真，形成了一个完整目标分配算法仿真平台，结果表明进化匈牙利算法满足实际情况的需求。

下一步工作展望：

1、由于受无人机发展程度的限制，无人机空空作战研究目前还只存在于理论阶段，对目标分配结果的合理性还有待进一步的验证。

2、战场环境瞬息万变，为了满足战场实时性的要求，算法的复杂度还有待进一步的降低，可以考虑并行计算的方法来处理。

3、目前关于目标分配问题的模型建立比较单一，可以考虑把多目标优化方面的一些研究方法应用到目标分配问题中。

致谢

时光如梭，转眼间，两年多的硕士研究生学习生活即将结束。回顾这段难忘的时光，我每一份成绩的取得，都离不开家人、老师和朋友的帮助和支持。在论文即将完成之际，向他们致以由衷的谢意。

首先，我要感谢我的导师于昕老师，正是在于老师的谆谆教诲和悉心指导下，我才得以顺利的完成毕业论文。于老师渊博的学术知识，严谨的治学态度、和蔼可亲的为师风范深深地影响了我，她将是我终身学习的榜样。感谢于老师把我引入了智能信息处理的广阔领域，使我认识到了这一课题的前沿性和挑战性。我所取得的成绩和于老师是密不可分的，于老师给了我巨大的帮助。于老师在科研上有敏锐的目光，对复杂问题有独特的见解，使我在研究生期间学到了很多研究的方法，这对我以后的工作将大有裨益。

其次，感谢智能所的老师焦李成、吴建设、白静、张向荣、韩红、尚荣华、李阳阳、周伟达、侯水平、侯彪、刘若辰、公茂果、钟桦、王爽、刘静、杨淑媛、王桂婷、马文萍、张小华、朱虎明、吴家骥、戚玉涛、郑喆坤等，感谢他们在科研过程中给予我的帮助，感谢他们牺牲自己宝贵的休息时间，认真地对待我们的每一次月报，并且提出了很多非常有价值的建议与批评。感谢实验室的各位同学，通过与他们的讨论与交流使我获益颇多，祝福他们在今后的工作中取得更大的成就。感谢我的室友陈奎、叶涛成，在生活上给了我无微不至的关心，在科研上给了我莫大的鼓励，感谢他们对我的支持和帮助，与他们一起度过了难忘的美好时光，祝福他们今后的工作和生活一切顺利。

最后，由衷地感谢我的父母，我所取得的每一个进步都离不开他们对我的关心和帮助，在此谨向他们致以崇高的谢意。

感谢所有关心我、支持我、帮助我的人！谢谢你们！

参考文献

- [1] White F E. Joint directors of laboratories-technical panel for C3I, data fusion sub-panel[R]. San Diego: Naval Ocean Systems Center, 1987.
- [2] 孔祥忠. 战场态势估计和威胁估计[J]. 火力与指挥控制. 2003, 12, 28(6): 91~98.
- [3] Hall D L, Llinas J. An Introduction to Multisensor Data Fusion. Proceedings of the IEEE. 1991, 85(1): 6-23.
- [4] Steinberg A, Bowman C, White F. Revisions to the JDL Data Fusion Model. SPIE. 1999, 37(19): 430-441.
- [5] Hall D L, Llinas J. Handbook of Multisensor Data Fusion [M]. Washington DC, NY: CRC Press, 2001.
- [6] 康耀红. 数据融合理论与应用[M]. 西安电子科技大学出版社, 1997.
- [7] Mark G, Pramod K. A Layered Architecture for Multisensor Data Fusion Systems [J]. Signals, Systems, and Computers, 1999.
- [8] Mica R. Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems. Human Factors Journal. 1995, 37(1): 32-64.
- [9] 王士同, 陈慧萍, 赵跃华等. 人工智能教程(第二版). 电子工业出版社, 2006
- [10] Ben-Bassat M. Knowledge Requirement and Management in Expert Decision Support Systems for Situation Assessment. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics, Part A. 1982, 12(4): 479-490.
- [11] Smith P J, McCoy C E, Layton C. Brittleness in the Design of Cooperative Problem-solving Systems: the Effects on User Performance. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics, Part A. 1997, 27(3): 360 - 371.
- [12] Antony R T. Principles of Data Fusion Automation [Z]. Norwood: Artech House, 1995.
- [13] Roy J. From data fusion to situation Analysis [Z]. Conference on Information Fusion, 2001.
- [14] Das S, Lawless D. Trustworthy Situation Assessment via Belief Networks. Proceedings of the 5th International Conference on Information Fusion. 2002, 1(12): 543-549.
- [15] Das S, Grey R, Gonsalves P. Situation Assessment via Bayesian Belief Networks. Proceedings of the 5th International Conference on Information Fusion. 2002, 1(6): 664-671.
- [16] Kevin C. Simulation Development for Dynamic Situation Awareness and

- Prediction. Repor: OMB No. 074-0188. 2005, 9: 21-26.
- [17] Yang Fan, Chang Guocen, Duan Tao. A practical method of situation assessment based on MAS. International Conference on. 2005, 2(17): 1626 - 1629.
- [18] Yanping Xiang, Yifeng Zeng, William Zhu Kim-Leng Poh. An intelligent design system for military situation assessment. Intelligent System and Knowledge Engineering International Conference on. 2008, 1: 158-163.
- [19] Schubert R, Wanielik G. A Unified Bayesian Approach for Object and Situation Assessment. Intelligent Transportation Systems Magazine, IEEE. 2011, 3(2): 6 -19.
- [20] 王三民, 王宝树. 贝叶斯网络在战术态势评估中的应用. 系统工程与电子技术. 2004, 26(11): 1620-1623.
- [21] 李志强, 胡晓峰, 司光亚等. 基于人工势场的军事态势分析模型. 火力与指挥控制. 2007, 32(4): 5-8.
- [22] 李伟生, 王三民, 王宝树. 基于计划识别的态势估计方法研究. 电子与信息学报. 2006, 28(3): 532-536.
- [23] 高晶. 基于条件事件代数理论的战术防空态势评估. 火力与指挥控制. 2007, 32(6): 110-112.
- [24] 林晓强, 常国岑, 杨凡等. 模糊算法在态势评估中的应用. 电光与控制. 2008, 2, 15(2): 36-38.
- [25] 李涛, 白剑林, 栾前进. 基于粗糙集与证据理论的防空作战态势评估方法. 航空计算技术. 2008, 5, 38(3): 46-48.
- [26] 胡杰, 黄长强, 赵辉等. 基于变精度粗糙集理论的UCAV态势评估方法研究. 电光与控制. 2010, 17(3): 279-281.
- [27] 赵晓辉, 姚佩阳, 张鹏. 动态贝叶斯网络在战场态势估计中的应用. 电光与控制. 2010, 17(1): 271-274.
- [28] 肖智, 钟波. 指派问题在供应商选优决策中的应用. 运筹与管理. 2002, 11(3): 63-68.
- [29] 石毛涛. 一个实际指派问题的研究. 运筹与管理. 2006, 15(4): 114-117.
- [30] 刘家学, 陈世国. 广义指派问题及其在军事装备运输中的推广应用. 数学的实践与认识. 2006, 36(1): 199-203.
- [31] 张芳玉, 高崎等. 战时装备维修任务指派模型及算法研究. 运筹与管理. 2006, 15(1): 62-65.
- [32] 宋光兴, 邹平. 多属性决策的群排序方法研究. 运筹与管理. 2002, 11(3): 27-31.
- [33] 刘家学. 基于最优线性分派的多指标群体决策. 系统工程. 2001, 19(4): 32-36.
- [34] 顾大权, 左莉. “匈牙利法”存在的问题及改进方法. 微机发展. 2003, 13(4): 76-78.

- [35]黄剑平. 地空导弹部队在反空袭作战中的目标威胁评估研究. 硕士论文. 厦门大学. 2009.
- [36]张莹. 运筹学基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.
- [37]谭跃进等. 定量分析方法[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2002.
- [38]杨波, 周晓英. 基于峰值识别理论的BP神经网络模型及应用. 人民长江. 2006, 37(12): 35-37.
- [39]周林, 姜寿春. 基于遗传算法的目标优化分配模型. 系统仿真学报. 2005, 13(3): 331-334.
- [40]曾海潮, 介婧, 崔志华. 微粒群算法[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [41]Jiaquan Si, Qiang Zhang, Dapeng Man. Network threat assessment based on attribute recognition. Advanced Communication Technology. 2009: 1482-1486.
- [42]夏博龄, 贺正洪, 雷英杰. 基于直觉模糊推理的威胁评估改进算法. 计算机工程. 2009, 35(16): 182-391.
- [43]Hou Yongyan, Guo Wenqiang, Zhu Zoe. Threat assessment based on variable parameter dynamic Bayesian network. Control Conference (CCC). 2010, 29: 1230-1235.
- [44]Yan Ge, Wei Shui. Study on Algorithm of UAV Threat Strength Assessment Based on Bayesian Network. Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. 2008, 4: 1-4.
- [45]Benavoli A. An approach to threat assessment based on evidential networks. Proceedings of the 10th International Conference on Information Fusion, 2007.
- [46]Zhili Tang, An Zhang. A Method of Knowledge Reasoning for Threat Assessment in the Battlefield. Information Technology and Computer Science. 2009, 11: 32-35.
- [47]Changqing Kan, Lihong Guo. A Model of Threat Assessment based on Discrete Hopfield Neural Network. Intelligent Control and Automation. 2006, 6: 2783-2786.
- [48]Yihong Fang, Weimin Li, Xiaoguang Zhou, Xin Xie. Threat Assessment Based on Adaptive Intuitionistic Fuzzy Neural Network. Computational Intelligence and Design (ISCID). 2011, 4: 262-265.
- [49]王琳, 寇英信. Dempster-Shafer证据理论在空战态势评估方面的应用. 电光与控制. 2007, 14(6): 155-157.
- [50]王华. 态势评估中一类目标威胁排序方法的研究. 硕士论文. 西安电子科技大学. 2009.
- [51]王健. 多架无人机攻击多目标的协同航迹规划算法研究. 硕士论文. 西北工业大学. 2004.
- [52]张红, 丁全心, 刘启明. 多目标攻击的目标分配. 电光与控制. 2001, 1: 12-15.

- [53]柳长安. 无人机航路规划方法研究. 博士论文. 西北工业大学. 2003.
- [54]王小兵, 王宝树. 空对空多机协同攻击多目标的决策研究. 电光与控制. 2003, 01: 23-26.
- [55]柳毅, 伶明安. 匈牙利算法在多目标分配中的应用. 火力与指挥控制. 2002, 10: 34-37.
- [56]任亚峰, 郑金华. 多目标进化算法搜索鲁棒最优解效率研究. 计算机工程与应用. 2011, 23: 3-4.
- [57]王勇. 基于进化算法求解复杂连续优化问题的研究. 博士论文. 中南大学. 2011.
- [58]张海英, 刘祚时, 林桂娟. 群体机器人研究的现状和发展. 电子技术应用. 2004, 02: 21-23.
- [59]谭民, 范永, 徐国华. 机器人群体协作与控制的研究. 机器人. 2001, 02: 8-9.
- [60]薛颂, 曾建. 群机器人研究综述. 模式识别与人工智能. 2008, 02: 17-20.
- [61]刘钊. 基于粒子群优化算法的足球机器人动作选择研究. 2004中国机器人足球比赛暨学术研讨会论文集, 2004.
- [62]左宏涛, 卢锦波, 冯新桓. 基于改进遗传算法的足球机器人角色分配. 全国第20届计算机技术与应用学术会议, 2009.

研究成果

- [1] Xin Yu, Wen Gu, Xiaoli Hou. The target allocation Strategy for Robot Soccer.
- [2] 基于进化匈牙利算法的目标分配软件 V1.0. 软件著作权.
- [3] 参与“无人机目标分配”项目一项.



西安电子科技大学

地址：西安市太白南路2号

邮编：710071

网址：www.xidian.edu.cn