

12-13-2019

## Overview of Cooperative Target Assignment

Ou Qiao

*1. Graduate College, National Defense University, Beijing 100091, China; ;2. College of Joint Operations, National Defense University, Beijing 100091, China;*

Xiaoyuan He

*2. College of Joint Operations, National Defense University, Beijing 100091, China;*

Jiuyang Tao

*2. College of Joint Operations, National Defense University, Beijing 100091, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

## Overview of Cooperative Target Assignment

### Abstract

**Abstract:** The concept and connotation of combat coordination are briefly analyzed. The historical origin of cooperative target allocation and its orientation in command and control process are expounded. The research status of collaborative target allocation in model building and algorithm solving is analyzed comprehensively, the shortcomings of current research is pointed out. It is proposed that for the next step we should pay more attention to large-scale collaborative target allocation under dynamic and confrontational conditions, and focus on the real-time, adaptability and iterative evolution mechanism of the algorithm.

### Keywords

combat coordination, cooperative target assignment, Weapon Target Assignment, dynamic, confrontation, intelligent algorithm

### Recommended Citation

Ou Qiao, He Xiaoyuan, Tao Jiuyang. Overview of Cooperative Target Assignment[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(11): 2216-2227.

## 协同目标分配问题研究综述

欧峤<sup>1,2</sup>, 贺筱媛<sup>2</sup>, 陶九阳<sup>2</sup>

(1. 国防大学研究生院, 北京 100091; 2. 国防大学联合作战学院, 北京 100091)

**摘要:** 简要剖析了作战协同的概念和内涵, 阐述了协同目标分配问题的历史由来及其在指挥与控制流程中的定位。综合分析了协同目标分配问题在模型建立和求解算法上的研究现状, 指出了当前研究存在的不足, 提出了下一步应将研究重心转向动态、对抗条件下的大规模协同目标分配问题上去, 且应重点关注算法的实时性、适应性和迭代进化机制。

**关键词:** 作战协同; 协同目标分配; 武器目标分配; 动态; 对抗; 智能算法

中图分类号: TP391.9

文献标识码: B

文章编号: 1004-731X (2019) 11-2216-12

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.19-FZ0382

## Overview of Cooperative Target Assignment

Ou Qiao<sup>1,2</sup>, He Xiaoyuan<sup>2</sup>, Tao Jiuyang<sup>2</sup>

(1. Graduate College, National Defense University, Beijing 100091, China;

2. College of Joint Operations, National Defense University, Beijing 100091, China)

**Abstract:** The concept and connotation of combat coordination are briefly analyzed. The historical origin of cooperative target allocation and its orientation in command and control process are expounded. The research status of collaborative target allocation in model building and algorithm solving is analyzed comprehensively, the shortcomings of current research is pointed out. It is proposed that for the next step we should pay more attention to large-scale collaborative target allocation under dynamic and confrontational conditions, and focus on the real-time, adaptability and iterative evolution mechanism of the algorithm.

**Keywords:** combat coordination; cooperative target assignment; Weapon Target Assignment; dynamic; confrontation; intelligent algorithm

## 引言

在新时期的联合作战中, 基于信息系统的体系对抗已成为战争的基本形态。战争的胜负不仅取决于单装、单平台的先进程度, 更取决于体系内部各作战要素之间的协同程度<sup>[1]</sup>。作战协同涉及规划、调度等多个领域, 通过精准高效的作战协同能促进

各协同方消解时间、空间、频率、任务、效果等多个维度的矛盾和冲突, 有利于生成优质的作战行动方案或计划, 进而为获得理想的作战效费比奠定基础。协同目标分配是联合作战指挥与控制的重要组成部分, 在军事运筹领域通常被规约为武器-目标分配(Weapon Target Assignment, WTA)问题。WTA 问题起源于 20 世纪 70 年代的美军舰队防空领域<sup>[2]</sup>, 本质上是一类组合优化问题, 具有多约束、非线性、多目标等特点。作为指控决策中的关键环节之一, 协同目标分配方案的实时性、准确性、有效性将直接影响军事对抗中能否取得更好的作战



收稿日期: 2019-05-28 修回日期: 2019-07-30;  
作者简介: 欧峤(1987-), 男, 四川成都, 硕士生, 助理工程师, 研究方向为运筹分析与智能化决策; 贺筱媛(1968-), 女, 陕西西安, 博士, 教授, 研究方向为运筹分析与智能化决策; 陶九阳(1983-), 男, 山东五莲, 博士, 讲师, 研究方向为运筹分析与智能化决策。

<http://www.china-simulation.com>

• 2216 •

效能并尽量减少作战资源消耗。

## 1 协同目标分配问题模型建立研究现状

协同目标分配既是指挥与控制的重要组成部分,也是作战协同的核心模块。为了能全方位、多视角地对其进行剖析,我们有必要先对作战协同的概念与内涵、以及协同目标分配在军事领域的定位作简要论述。

### 1.1 作战协同的概念与内涵简述

20 世纪 70 年代初,德国斯图加特大学理论物理学教授赫尔曼·哈肯(Hermann Haken)等创立了“协同学”这门学科,并从复杂性理论角度对“协同”进行了定义<sup>[3]</sup>。

几乎就在同一时期,美军着手开发了协同交战能力(Cooperative Engagement Capability, CEC),之后又衍生出战役协同(Cooperative Operation)和战术协同(Cooperative Combat)等概念。进入 21 世纪,美军将与协同相关的作战概念纳入“网络中心战”、“海空一体战”等军事理论中。从某种程度上讲,美军将一体化联合作战等同为一体化协同作战,这其实也是将复杂性理论成果转化为军事理论创新的典型代表。

俄罗斯退役少将特鲁申认为<sup>[4]</sup>,作战协同从本质上可分为 2 类:(1) 战役筹划阶段的组织协同;(2) 作战实施阶段的行动协同。

我国关于协同一词的研究与应用早于西方,但正式将其吸纳到现代军事理论创新中却相对较晚。在我军军事理论体系中,作战协同被视为协调消解各种矛盾冲突,使各种行动协调一致,达成作战力量上的优势互补、战场空间上的相互照应、作战样式上的相互配合、作战时间上的相互衔接和作战效果上的相互利用,最大限度地发挥联合作战的整体威力的过程<sup>[5]</sup>。

虽然国内外对作战协同的理解和认识略有不同,但实质上却有许多相似之处:

(1) 作战协同的本质是检测与消解当前与长远、全局与局部、个体与个体之间在时间、空间、频率或利益上的各类冲突;而触发作战协同的主要原因是战场中的不确定性因素和个体的能力短板。

(2) 作战协同是一类优化活动,也是一种无私程度很高的协作形式,其目的是为了在整体上降低风险、提高收益,即为了实现更高的作战效费比。从最优化理论来看,作战协同是在战争初始状态、终止条件已明确的前提下,在对态势及威胁进行评估与预测的基础上,为了以最小的资源代价取得最大的作战效能,而对战略运筹、作战筹划、作战规划等工作进行的优化。

(3) 作战协同可分层且载体不同。因不同层级的协同需求不同,作战协同发挥作用的载体也不一样,在战略层面的载体是战略运筹,在战役层面的载体是作战筹划与作战规划,在战术层面以下的载体是行动级任务规划。

(4) 科学高效的作战协同的基础是体系分析,也就是理清或设计出关于提升整体作战效费比的各种逻辑关联关系,包括作战力量之间、作战空间之间、作战阶段之间、作战行动之间的合作、支撑与制约关系。

### 1.2 协同目标分配在军事领域的定位

从军事运筹学的角度看,协同目标分配是一个较为典型的规划问题,其在指挥控制流程中的定位如图 1 所示,它与规划论、排队论、存贮论、博弈论、决策论等研究领域紧密相关。

规划问题起源于民航飞机、机器人等民用领域的行动规划,一般建模为自动规划(Automated Planning)问题。20 世纪 70 年代,美军将自动规划技术引入海军舰队防空等军事领域,由此带动了作战规划研究的发展。“作战规划的本质,是根据任务目标、依据给定的资源和约束条件,运用科学规划的方法产生一系列的作战行动序列,以实现作战目标的达成<sup>[6]</sup>。”

20 世纪 80 年代以来,在作战规划领域,国内外研究者将主要的精力放在了行动级任务规划的

模型建立、算法设计和系统开发上。当多个作战实体在同一时间或空间范围内执行一个任务或者执行多个有逻辑因果关系关联的任务时,就需要协同任务规划。

协同任务规划有离线规划和在线规划两种方式,其核心内容主要是在任务分解、态势评估、威胁评估等环节的基础上进行协同任务分配和协同动作规划。协同任务分配侧重于实施打击前的优化配置,包括策略优化与匹配优化;其中,策略优化是为了获得最大化的长期整体效益,主要完成打击

目标选择、有效毁伤下限确定,回答“打击谁”“打到什么程度”的问题;而匹配优化对应协同目标分配和作战任务调度问题,分别以最小的作战资源消耗达成最大的作战效能和实时调整作战节奏为目标,计算即将执行任务的作战实体或武器平台的类型和数量、弹药的类型和数量,以及确定各任务的起止时间,回答“谁来打”“何时打”的问题。协同动作规划对应作战单元部署优化和协同航迹规划/路径规划等问题,主要确定作战实体执行任务的起止位置及行动路径或航迹点,回答“如何打”的问题。

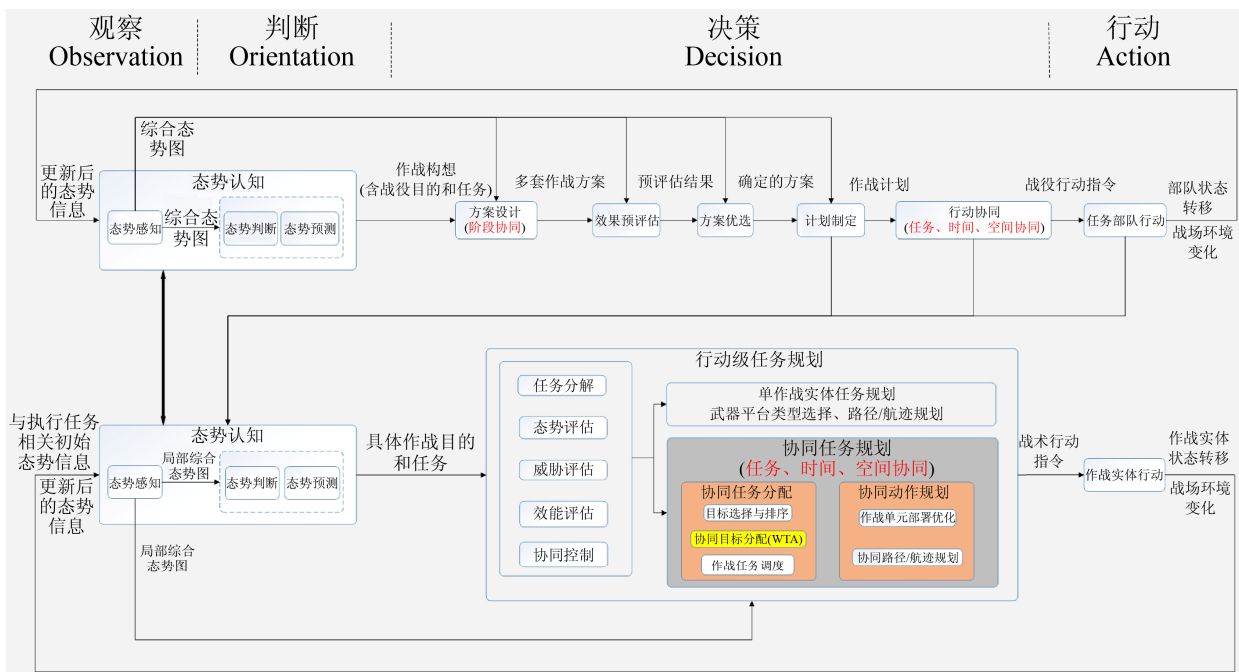


图 1 协同目标分配在指挥控制流程中的定位示意图

Fig. 1 Location diagram of cooperative target assignment in command and control process

### 1.3 协同目标分配问题模型建立研究现状

Lloyd 等<sup>[7]</sup>证明了 WTA 问题是非线性多项式完全(Non-deterministic polynomial Complete, NPC)问题。NPC 问题的特性是随着问题规模的扩大,解空间将出现“组合爆炸”,求解最优解的时间也将成指数级增长;此外, NPC 问题也可能因全局最优解不在约束后的解空间内,进而导致最终求到的解只能是局部最优解。

一般意义上的 WTA 问题建模,是由美国麻省理工学院的 Hosein 等<sup>[8]</sup>提出,他们对静态武器-目

标分配(Static Weapon-target Assignment, SWTA)与动态武器-目标分配(Dynamic Weapon-target Assignment, DWTA)的概念和数学表达式进行了较为系统全面的描述,虽然他们提出的 DWTA 模型也考虑了火力筹划与指控通信节点之间的关系,但在本质上却是多阶段的 SWTA 问题,并未完整体现动态对抗条件下协同目标分配的序贯决策特点。Khosla 指出了当时的 SWTA 模型存在不足,即未考虑在实际作战中某些武器系统会因时间窗冲突而不能进行目标分配的情况,因此他提出在计算最

优分配过程中应对每个武器平台建立时间约束<sup>[9]</sup>。2005 年, Adnan 等提出了广义 WTA 问题模型, 指出应考虑一个武器平台可分配给多个目标的现实情况, 将 WTA 问题建模为一个线性整数规划模型, 约束条件是各武器平台的作战效能和可用的火力资源数<sup>[10]</sup>。Shima 等提出了协同多任务分配问题(Cooperative Multi-Tasks Assignment Problem, CMTAP)模型, 该模型能够描述不同行动间的时序关系、支撑关系和逻辑约束, 较好地解决了复杂任务分配及协同规划的建模问题<sup>[11]</sup>。

我国对 WTA 问题的研究相对较晚, 但也出现了许多有价值的研究成果。1999 年, 王士同等在 SWTA 模型的基础上提出了分 2 个阶段发射的 DWTA 模型<sup>[12]</sup>。2001 年, 韩松臣提出了基于马尔可夫决策过程(Markov Decision Processes, MDP)最优化的 DWTA 模型<sup>[13]</sup>。2006 年, 蔡怀平等证明了 DWTA 问题的马尔可夫性, 并给出了 MDP 的状态转移概率矩阵<sup>[14]</sup>。2009 年, 黄卓等从基本模型、数学性能、求解算法等多个层面对 WTA 问题作了全面的综述, 指出下一步研究 WTA 问题应从动态静态相结合、大规模、考虑不确定性因素等 3 个方面着手<sup>[15]</sup>。2010 年, 刘传波等指出了现有的 DWTA 问题研究的不足, 指出应在充分考虑时空约束的基础上寻求一种具有任意时间特性且能灵活处理随机事件的 DWTA 问题智能求解算法<sup>[16]</sup>。2015 年, 为了便于聚合与解聚多任务编队之间的协同目标分配问题, 叶青松等提出了多无人机编队协同目标分配的两阶段求解方法, 第一阶段通过聚类分析求得若干目标簇, 第二阶段将不同的目标簇分配给不同的无人机编队, 进而建立编队级协同目标分配<sup>[17]</sup>。多年以来, 其他人员虽也提出过许多 WTA 模型, 但绝大多数都是上述模型在特定场景下的应用版, 暂未发现更通用的新模型。

## 2 协同目标分配问题求解方法研究现状

目前, 解决 WTA 问题较为成熟的方法主要有

3 类: (1) 适用于集中式求解的传统数学规划方法; (2) 适用于分布式求解的市场机制法; (3) 既适用于集中式求解也适用分布式求解的智能优化算法。

### 2.1 数学规划法

在 20 世纪 90 年代以前, 用于求解 WTA 问题的算法主要是匈牙利法、分支界定法、隐枚举法、混合整数线性规划法、动态规划法等较为传统的数学规划方法。虽然这些方法具有“精确度高”“原则上能求得全局最优解”“算法较为简单”等优势, 但是劣势也很突出: (1) 编程实现较为繁琐; (2) 除动态规划法外, 其他方法难以处理变量维数较大的问题, 在求解大规模问题时收敛速度很慢; (3) 只适用于集中式规划。

### 2.2 市场机制法

为了解决分布式系统中的 WTA 问题, 研究者们将合同网协议、拍卖法等市场机制法引入了该领域的研究中。

#### 2.2.1 合同网协议

1980 年, Smith 等提出了合同网协议(Contract Net Protocol, CNP)。由于 CNP 具有较强的适应性, 因而被广泛运用于分布式系统领域, 展现出良好的动态性、扩展性和鲁棒性。但是经过一段时间的实践, 研究者们也发现其存在一些缺陷, 如协商通信量大、缺乏有效的多方协调机制、任务资格评价策略不完善等。2008 年, 毛昭军等<sup>[18]</sup>第一次将 CNP 引入防空作战中的目标分配问题研究中来。2011 年, 唐苏妍等<sup>[19]</sup>对网络化防空体系中的动态武器目标分配问题进行了建模, 提出了基于扩展 CNP 的 DWTA 算法, 该算法相比传统 CNP 方法有更好的性能。2015 年, 肖玉杰等<sup>[20]</sup>针对合同网的固有缺陷, 提出了基于联盟、公告板、优先级的合同网改进算法, 并将其运用于多智能体协同任务分配问题中, 在满足实时性要求和提高协商效率 2 个方面取得了不错的效果。

### 2.2.2 拍卖法

拍卖法也是一种常用于解决分布式协同目标分配问题的市场机制法。2013 年,黎子芬等<sup>[21]</sup>将编队对地动态联合火力分配所对应的 DWTA 问题作为问题模型,在明确资源、时间、空间等约束条件下,以分布式协同拍卖算法的思想为基础,设计了一种的 anytime 算法。当参与分配过程的实体数小于 70 h,该算法仍然具有良好的收敛性。

综上所述,市场机制法具有“原理简单”“易于实现”“执行效率较高”等优势,但仍然有较为明显的不足:一是算法设计过程中需要人工定义大量的协同规则,对设计人员的专业领域知识的丰富程度要求较高;二是在求解大规模问题时收敛速度较慢,难以在规定时间内搜索到质量很高的解;三是处理协同和约束的能力较差,在追求全局最优的过程中,通常会与个体利益产生冲突;四是因协同方之间的信息交互量过大,在现实应用中,该方法有较大概率因通信速率的限制或敌方电磁干扰的影响而失效。

## 2.3 智能优化算法

智能优化算法因具有易于实现、计算复杂度低、性能优越等优点,被大量运用于 WTA 问题研究中,这些算法主要包括神经网络、模拟退火算法、遗传算法、差分进化算法、和声搜索算法、蚁群算法、粒子群优化算法等,还包括上述若干算法组合而成的混合优化算法。直至今日,学术界解决组合优化问题的算法研究也主要集中在该领域。

### 2.3.1 神经网络

神经网络起源于 1943 年,当时 McCulloch 和 Pitts 受动物神经系统网状结构的启发,开发了人工神经元模型。1958 年, Rosenblatt 在计算机上模拟实现了能够完成简单的视觉处理任务的“感知机”,该模型也成为了后来的人工神经网络(Artificial Neural Network, ANN)的雏形和支持向量机(SVM)的基础。1969 年,明斯基(Minsky)等论证了“感知机”在解决异或等基本逻辑问题上能力

有限,这一论述使 ANN 的发展停滞了十年。1974 年, Werbos 证明了反向传播算法(BP 算法)可有效解决异或问题<sup>[22]</sup>。1982 年和 1985 年,物理学家 John Hopfield 发表了 2 篇关于 ANN 的论文<sup>[23]</sup>,提出了一种新的人工神经网络——离散霍普菲尔德网络,并证明该方法可用于求解组合优化和 NPC 问题的近似解。Hopfield 的理论促进了 ANN 进入组合优化问题求解领域。1989 年, Wacholder 提出了一种基于 ANN 求解 WTA 问题的算法,但该算法时常得不到稳定的解<sup>[24]</sup>。后来, Yann LeCun 等于 1995 年提出了卷积神经网络(Convolution Neural Network, CNN),多伦多大学的 Hinton 等于 2002 年提出了受限玻尔兹曼机(Restricted Boltzmann Machine, RBM),并于 2006 年在 RBM 的基础上提出了深度信念网络(Deep Belief Nets, DBN)。之后的 10 年,以 CNN, DBN, GAN(Generative Adversarial Networks, 生成对抗网络)等神经网络为核心的深度学习(Deep Learning)技术被成功运用于计算机视觉、语音识别、机器翻译等领域。2016 年,深度学习携手强化学习(Reinforcement Learning, RL)创造出能打败顶尖围棋选手的 AI 程序 AlphaGo。这一事件让全世界的目光聚焦到深度学习,并由此掀起了人工智能的新浪潮。深度学习是机器学习研究中的新领域,具有人工设置参数少、自适应、自学习等强大优势,但作为一种“黑箱”模型,它有不容忽视的致命缺陷——不可解释性。应用于军事领域的人工智能技术需要基本透明且具有足够的可解释性,否则人类指挥员和参谋团队将难以信任该技术。虽然有研究者将 ANN 与模糊逻辑结合起来,生成了兼具一定学习能力和解释能力的模糊神经网络(Fuzzy Artificial Neural Network, FAZZ)<sup>[25]</sup>,但其微弱的解释能力仍是进入军事决策和作战规划领域最大的障碍。

### 2.3.2 模拟退火算法

模拟退火算法(Simulated Annealing, SA)的思想由 Metropolis 于 1953 年提出,后又由 Kirkpatrick



等于 1983 年成功引入组合优化领域。SA 是一种概率搜索方法,它通过模拟固体退火降温的过程进行跳跃式搜索。搜索的初期,在温度很高时,SA 除了允许以较大概率在搜索空间内进行活跃的线性跳跃之外,还允许以一定概率进行违反直觉的正向或反向跳跃,此时算法的探索能力较强;搜索的中期,在逐步冷却的过程中,随着温度的降低,允许探索新的解空间的概率不断下降;搜索的后期,当温度接近最低值时,优先考虑在已找到的优质解附近检查是否还有更优解,直至循环结束。SA 搜索速度快,具备较强的局部寻优能力,但全局搜索能力较弱,可用于求解中小规模组合优化问题。目前,国内的研究者一般不单独使用 SA 来解决大规模协同目标分配问题,而是着力发挥其较强的局部搜索能力,将其与遗传算法<sup>[26]</sup>、粒子群算法<sup>[27]</sup>等组合起来使用,也取得了良好的效果。

### 2.3.3 禁忌搜索算法

禁忌搜索算法是由 Glover 等在 1986 年提出的一种全局逐步寻优算法。该算法通过引入一个灵活的禁忌表和相应的禁忌准则来避免迂回搜索,并通过特赦准则来赦免一些被禁忌的优良状态,进而保证多样化的有效搜索以最终实现全局优化。禁忌搜索算法的优势在于通过局部邻域搜索确保局部最优,其缺陷在于其对初始解具有较强的依赖性,全局寻优能力偏弱,且搜索过程是单进程操作<sup>[28]</sup>。为了能将禁忌搜索算法用于解决大规模动态火力分配问题,不少研究人员对该方法做了改进尝试。2006 年,蔡怀平提出了随机变领域禁忌搜索算法<sup>[29]</sup>,并将其运用于较大规模 DWTA 问题,实验证明该算法求解结果稳定,运算速度较快。2011 年,徐加强等在研究常规导弹火力分配问题时,将遗传算法的全局寻优能力和禁忌搜索算法的局部寻优能力结合起来,在较短时间内寻得了最优解<sup>[30]</sup>。

### 2.3.4 遗传算法

遗传算法(Genetic Algorithm, GA)由 John

Holland 于 20 世纪 60 年代后期提出的,并于 1975 年通过其专著《自然系统和人工系统中的适应》得到普及<sup>[31]</sup>。GA 是一种受达尔文的生物进化理论启发而来的随机优化搜索方法,它具有良好的全局搜索寻优能力、不依赖确定规则、自动获取并优化搜索空间、自适应调整搜索方向等优点,但容易过早收敛,且在遗传进化的后期因搜索效率较低导致种群进化缓解。1995 年, Ravindra 提出了一种基于 GA 的 WTA 问题求解方法,但效果不佳。2010 年,陈成等在利用 GA 求解全局问题的基础上,引入了模拟退火算法进行局部寻优,组合后的算法整体寻优性能大幅提升<sup>[32]</sup>。2012 年,杨山亮等采用精英选择和动态遗传算子来改进遗传算法,该方法也能避免求解过程过早收敛,在解决编队空战协同火力分配问题上取得了较为理想的效果<sup>[33]</sup>。2016 年,杨任农等结合最佳适应度和遗传代数调整策略,提出了自适应量子遗传算法,提高了求解 WTA 问题的收敛速度和稳定性<sup>[34]</sup>。

### 2.3.5 差分进化算法

差分进化(differential evolution, DE)算法是由 Store 和 Price 于 1997 年提出的一种基于群体差异的启发式并行搜索方法,与遗传算法同属于进化算法。该算法具有结构简单、易于执行、优化效率高、鲁棒性好等优势,但存在早熟收敛和搜索停滞等缺陷;此外,传统的 DE 算法求解各类静态优化问题的能力较强,但求解动态优化问题能力偏弱。为了让 DE 算法具备更强的解决动态优化问题的能力,研究者必须对其变异和交叉算子做出改进。2013 年,王少蕾等为了解决较大规模的水面舰艇编队防空反导作战中的 WTA 问题,以混沌初始化种群和加入混沌扰动的方式来改进 DE 算法,改进后的算法能跳出局部最优,相比粒子群算法和多智能体规划方法,该算法稳定性较强,有较强的局部搜索能力,且能获得质量较高的全局最优解<sup>[35]</sup>。2016 年,为了找到解决多无人机协同目标分配问题的通用算法,赵明提出了基于混合策略的动态多群体差分进化算法(DMDE 算法),相比其他改进型 DE 算法,



该算法寻优性能更加,能针对单对单、多对单和群巡航等多种场景下的目标分配问题进行一致性求解<sup>[36]</sup>。

### 2.3.6 和声搜索算法

和声搜索算法(Harmony Search, HS)<sup>[37]</sup>是由 Geem 和 Kim 等于 2001 年正式提出的一种启发式的全局搜索算法。作为智能优化算法家族中的新成员,HS 通过反复调整记忆库中的解变量,使得最优解的取值随着迭代次数的增加而不断收敛。与遗传算法类似,它也有随机产生初始解、适者生存、具有交配与突变机制等特点。2011 年,雍龙泉对 HS 作了综述<sup>[38]</sup>,认为其具有以下特点:(1) 算法通用,不依赖于问题信息;(2) 原理简单,可调参数少,容易实现;(3) 群体搜索,具有记忆个体最优解的能力;(4) 协同搜索,具有利用个体局部信息和群体全局信息指导算法进行更深一步搜索的能力;(5) 易于与其他智能优化算法组合,能构造出性能更优的算法。目前,国内的研究人员主要将 HS 用于解决民用领域的组合优化问题和多目标优化问题,尚未发现有研究者将其引入 WTA 问题的研究中来。

### 2.3.7 蚁群算法

蚁群算法(Ant Colony Optimization, ACO)是由意大利学者 Dorigo M 等于 1991 年在首届欧洲人工生命会议上提出的一种基于群体智能的随机搜索算法。与其他进化算法类似,ACO 算法通过候选解组成的群体的进化过程来寻优,它具有是分布式、正反馈、不需任何先验知识、鲁棒性好、可信度高、易于同其他优化算法结合等优点,但也有收敛速度较慢、实时性较差的缺陷。2012 年,张媛等为了提高多机协同空战对抗仿真中 CGF 实体的智能性和多目标分配的实时性,引入了一种遗传算法的变异算子来提高基本 ACO 算法搜索最优解的效率<sup>[39]</sup>。2014 年,张新从基本理论和方法层面综合论述了量子蚁群算法(Quantum Ant Colony Optimization, QACO)的改进及应用方向,并指出,

与基本蚁群算法相比,量子蚁群算法具有更快的收敛速度、更好的种群多样性和全局寻优能力,除了可有效解决简单组合优化问题外,也可被用于多目标优化、约束优化、不确定性优化问题等领域<sup>[40]</sup>。2017 年,肖中晖等为解决多目标火力分配问题,提出了一种基于指标的蚁群优化算法(Indicator-Based Ant Colony Optimization, IBACO),利用二元性能指标来引导搜索,使算法具备了更好的收敛性和最优解质量<sup>[41]</sup>。

### 2.3.8 粒子群优化算法

粒子群算法,也称粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)算法,是由 Kennedy 和 Eberhart 于 1995 年共同提出的一种基于群智能的随机优化算法,该算法的基本思想是受生物学家 Frank Heppner 的鸟类群体行为模型的启发而来。PSO 算法采用 3 条简单规则来控制所有粒子:(1) 飞离最近的粒子,避免碰撞;(2) 飞向目标;(3) 飞向粒子群的中心。基本 PSO 算法有逻辑清晰、结构简单、收敛速度较快的优点,但也存在可信度偏低、容易陷入局部最优且实时性较弱的问题。2009 年,薛洪波论述了基本 PSO 算法经改进后可适用于解决多目标优化问题<sup>[42]</sup>。2011 年,杨飞等提出了适用于整数规划的改进 PSO 算法<sup>[43]</sup>。2012 年,王强等在解决多机协同对地攻击目标分配问题时,通过建立问题解与矩阵粒子之间的映射,对二进制 PSO 算法进行了改进<sup>[44]</sup>。2015 年,范成礼等在解决一体化防空反导中的协同目标分配问题时,提出了带怀疑因子和斥力因子的改进型离散粒子群算法<sup>[45]</sup>。2016 年,夏维等在解决异构常规导弹对地火力突击中的多目标优化问题时,采用变量随机分解策略和合作协同进化框架建立了改进型多目标 PSO 算法<sup>[46]</sup>。2018 年,刘志超等<sup>[47]</sup>采用粒子群禁忌混合搜索算法来求解火力分配问题,相比基本 PSO 算法,该算法求解质量更高,相同迭代次数下得出的最优解的性能更加稳定。

上述 8 种算法是学界使用较为频繁的智能优

化算法。进入 21 世纪, 随着仿生思维的拓展, 研究人员又提出了许多新颖的群智能优化算法, 如人工萤火虫群优化算法、蝙蝠算法、果蝇优化算法、引力搜索算法、布谷鸟搜索算法等等, 这些算法都十分巧妙, 研究者在设计过程中均综合考虑了“寻优空间与编码方式”“群体结构与通信机制”“搜索记忆与评价机制”“学习进化行为”“群体策略”等问题。此外, 在智能优化算法的使用过程中, 研究者们从不同角度、不同环节对各种算法进行了改进和组合, 产生了许多混合优化算法, 在解决不同场景的 WTA 问题上取得了较好的效果, 但是在应对动态条件下的大规模协同目标分配问题时, 目前的算法仍然难以满足实际需求。

## 2.4 动态对抗条件下的求解方法

上述 3 类方法的研究前提是将阶段性态势视为相对静止, 但在现实条件中, 因作战进程的快变、瞬变特点, 这些方法就极有可能面临失效的困境。

更进一步来讲, 作战筹划往往需涉及可变时长的序贯决策理论、零和博弈甚至负和博弈、不确定性规划等较为复杂的领域, 再加上信息不完全、不完美且效果非对称等因素的影响, 求解实时动态对抗条件下的协同目标分配问题将变得异常困难, 我们目前仅发现了以下几种较为成熟的求解方法:

(1) 基于模糊理论的改进型智能优化算法, 如遗传模糊树(Genetic Fuzzy Trees, GFT)、模糊神经网络(Fuzzy Artificial Neural Network, FAZZ)等, 其中, 遗传模糊树是美国辛辛那提大学与美空军研究实验室合作研发人工智能飞行员 Alpha AI 时首次提出并使用的核心算法, 该算法能有效压缩搜索计算空间; 模糊神经网络是求解 WTA 问题的有效算法, 但求解结果不够稳定。

(2) 基于分布式局部可观察马尔科夫决策过程(DEC-POMDP)的规划算法, DEC-POMDP 是一种目前学界较为流行的多智能体建模决策模型, 其建模的是一组彼此需要进行合作的智能体在随机和局部可观察的环境中进行分布式决策的过程, 吴

锋等提出了一系列行之有效的求解 DEC-POMDP 问题的离线规划算法, 如基于信念点的策略生成算法(PBPG<sup>[48]</sup>)、基于测试反馈的近似动态规划算法(TBDP<sup>[49]</sup>)、应用展开式采样的策略迭代算法(DecRSPI<sup>[50]</sup>), 上述算法是迭代改进而来的; 其中, PBPG 算法根据每个信念点来直接生成最优策略, 迭代求解的结果等价于得到一个纳什均衡点; TBDP 算法是 PBPG 算法的改进版, 它采用自底向上的动态规划, 通过在概率上分析最可能的状态来避免不必要的计算并依据概率对策略进行近似评价, 经实验证明, TBDP 可求解状态空间十分巨大的问题; DecRSPI 算法是 TBDP 算法的升级版, 采用蒙特卡罗采样的思想进行问题求解, 可有效解决现实运用中模型的状态转移函数和观察函数往往不易描述的问题, 其求解过程中无需完整的模型, 而只需问题的一个仿真环境, 经实验证明, 该算法能求解超过 20 个智能体的 DEC-POMDP 规划问题。

(3) DeepMind 公司于 2017 年提出的多智能体强化学习算法<sup>[51]</sup>, 在与深度学习等技术结合后, 该算法被成功运用于该公司 2018 年创造的星级争霸 AI 程序 AlphaStar 中, 取得了匹敌全球顶尖星际玩家的效果。

虽然动态对抗条件下的协同目标分配问题是学界下一步将重点突破的研究方向, 但该领域的研究仍处于起步阶段, 且目前还没有十分完善的理论和方法来论证并解决这一难题, 因此本节只作概述。

## 3 结论

综上所述, 截止目前, 关于 WTA 问题的研究成果很多, 但也存在一定的局限性: (1) 在 WTA 模型建立上, 大多数研究者基于特定的假设或过度简化了问题, 仍存在考虑发现概率、命中概率、毁伤概率等不确定性因素的影响不够, 限定时间、地形、气候、武器性能等约束条件偏少等问题; (2) 在 WTA 问题求解上, 虽然研究者们已经提出了数学规划法、市场机制法、智能优化算法等诸多算法,

但目前的算法普遍存在因收敛速度偏慢而无法满足当前作战筹划的高实时要求,且主要针对小规模分配问题求解,要解决动态条件下的大规模作战问题必须对现有算法进行组合与改进。此外,目前还未发现普适型的 WTA 问题模型及十分有效的求解大规模、动态、对抗条件下的 WTA 问题的算法。在今后的研究中,我们应继续在模型建立与求解方法上下功夫。

(1) 在模型建立上应兼顾共性规律与个性特点。因 WTA 问题的 NPC 特性,为了降低模型建立与求解难度,目前学界有 2 种思路: 1) 将先其转化为多旅行商、多车辆多停车场路径规划、柔性车间作业调度等经典组合优化问题模型,再利用相关的理论与方法进行求解; 2) 针对特定应用场景进行深入的军事需求分析,通过规则来有效压缩搜索计算的状态空间,而后在此基础上再进行问题建模。此外,我们还应关注几个趋势: 1) 运筹优化作为科学决策的重要基础,军事运筹人员应力求提高优化方案的可行性,在设计多目标优化问题的目标函数时,因最大毁伤效果、最小作战损耗、最短作战进程等优化目标存在关联约束,具体如何取舍需充分征求决策者的意见,考虑其决策偏好与核心关注点; 2) 随着算力与技术的不断提升,可考虑将协同目标分配问题的研究从行动级逐步提高至战役级; 3) 随着作战力量类型和作战样式的不断增加,协同目标分配的研究不能仅仅局限于协同火力分配,还应将侦察预警、电子战、网络战等作战行动纳入其中; 4) 随着复杂性理论研究的深入,可考虑从整体、动态、对抗的角度对体系对抗过程进行建模,并从中分析协同目标分配对体系作战效能的影响究竟体现在哪些重要因子或关键节点上,进而可为具体的任务场景下聚合与解聚作战力量编组提供操作性更强的牵引性指标。

(2) 在求解方法上应重点关注算法的实时性、适应性和通用性。具体来说应着力解决 3 个问题: 1) 如何满足作战决策的实时性需求。在求解大规模作战条件下的 WTA 问题时,其固有的 NPC 特

性极易导致解空间出现“组合爆炸”,求解时间将呈现指数级增长,而现代战争的快节奏又对算法的实时性提出了更高的要求,如何在算法的收敛速度与作战决策的实时性需求之间寻求平衡点,是研究者们需要关注的核心问题之一; 2) 如何处理可能面临的各种不确定性因素。战争是不确定性的王国, Hosein 等在最初建立一般意义上的 WTA 问题模型时,是在假设发现概率、杀伤概率、作战要素的威胁度、重要程度均已知的前提下进行的,一旦将 WTA 问题置于“动态”“对抗”的条件下进行求解,各种不确定性因素必将接踵而至,选择合适的方法去完成不确定性条件下的协同目标分配问题也是研究者们需要重点突破的方向之一; 3) 如何取舍全局最优和局部最优。作战决策中,求得全局最优的方案是全体指战员最期望看到的结果,但在加入时间、空间、实体关系等变量后, WTA 问题的复杂度将继续攀升。据估算,围棋的解空间是  $10^{172}$ ,而包含 100 个作战实体的中等规模战役对抗,其解空间是  $10^{14399}$ ,以目前的算力和算法是很难求得全局最优解。鉴于此,决策者可考虑依据满意决策理论(Satisficing Decision Theory, SDT)不寻找全局最优解,而去寻找满足最低决策需求的全局满意解或局部最优解即可。与 SDT 的思想一致,为了提升算法的实时性或适用规模,我们需要在计算速度和求解精度之间寻找平衡折中,如何取舍全局最优和局部最优也将是问题求解时需重点关注的核心问题之一。

## 参考文献:

- [1] 张明星,程光权,刘忠,等. 多武器协同作战发射时序规划方法[J]. 指挥与控制学报, 2017, 3(1): 10-18.  
Zhang Mingxing, Cheng Guangquan, Liu Zhong, et al. Schedule of Launch Sequential Timing in Multiple Weapons Cooperative Engagement[J]. Journal of Command and Control, 2017, 3(1): 10-18.
- [2] 蔡怀平,陈英武. 武器-目标分配问题研究进展[J]. 火力与指挥控制, 2006, 32(12): 11-15.  
Cai Huaiping, Chen Yingwu. The Development of the Research on Weapon-Target Assignment Problem[J]. Fire Control & Command Control, 2006, 32(12): 11-15.

- [3] 赫尔曼·哈肯. 高等协同学[M]. 郭治安译. 北京: 科学出版社, 1989.  
Hermann Haken. Higher Synergetics[M]. Guo Zhian's Translation. Beijing: Science Press, 1989.
- [4] 特鲁申. 关于协同的本质问题[Z]. 总参谋部军训部, 译外军军事期刊译编, 2015.  
Trushen. On the Essence of Synergy[Z]. Military Training Department of the General Staff, Translation. Translated Editor of Foreign Military Journals, 2015.
- [5] 中国人民解放军国防大学. 联合作战基本理论[Z]. 北京: 国防大学出版社, 2017.  
National Defense University of the People's Liberation Army. Basic Theory of Joint Operations[Z]. Beijing: National Defense University Press, 2017.
- [6] 胡晓峰, 荣明. 关于联合作战规划系统的几个问题[J]. 指挥与控制学报, 2017, 3(4): 273-280.  
Hu Xiaofeng, Rong Ming. Several Questions about Joint Operations Planning System[J]. Journal of Command and Control, 2017, 3(4): 273-280.
- [7] Lloyd S P, Witsenhausen H S. Weapons Allocation is NP-Complete[C]. IEEE Summer Conference on Simulation. Reno, Nevada, 1986.
- [8] Hosein P A, Walton J T, Athans M. Dynamic weapon-target assignment problems with vulnerable C2 nodes[J]. Proceedings of the Command & Control Symposium (S2577-1604), 1988: 1786-1795.
- [9] Khosla D. Hybrid genetic approach for the dynamic weapon-target allocation problem[J]. Proceedings of SPIE the International Society for Optical Engineering (S0277-786X), 2001: 244-259.
- [10] Adnan Y, Ron L W, Hee S H, et al. The Generalized Weapon Target Assignment Problem[C]. 10<sup>th</sup> International Command and Control Research and Technology Symposium, the Future of C2, June 13-16. McLean, VA: Lockheed Martin Corporation. 2005.
- [11] Shima T, Rasmussen S J, Sparks A G, et al. Multiple task assignments for cooperating uninhabited aerial vehicles using genetic algorithms[J]. Computers & Operations Research(S0305-0548), 2006, 33(11): 3252-3269.
- [12] 王士同, 刘征. 动态武器目标分配问题的 DWTA-GA 算法[J]. 华东船舶工业学院学报, 1999, 13(5): 17-22.  
Wang Shitong, Liu Zheng. DWTA-GA Algorithm for Dynamic Weapon Target Allocation[J]. Journal of East China Institute of Shipbuilding Industry, 1999, 13(5): 17-22.
- [13] 韩松臣. 导弹武器系统效能分析的随机理论方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.  
Han Songchen. Random Theory Method for Effectiveness Analysis of Missile Weapon Systems[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001.
- [14] 蔡怀平, 刘靖旭, 陈英武. 动态武器目标分配问题的马尔可夫性[J]. 国防科学技术大学学报, 2006, 28(3): 124-127.  
Cai Huaiping, Liu Jingxu, Chen Yingwu. Markov Property of Dynamic Weapon Target Allocation[J]. Journal of National University of Defense Science and Technology, 2006, 28(3): 124-127.
- [15] 李勇君, 黄卓, 郭波, 等. 武器-目标分配问题综述[J]. 兵工自动化, 2009, 28(11): 1-9.  
Li Yongjun, Huang Zhuo, Guo Bo, et al. Summary of Weapon-Target Assignment[J]. Military Automation, 2009, 28(11): 1-9.
- [16] 刘传波, 邱志明, 吴玲, 等. 动态武器目标分配问题的研究现状与展望[J]. 电光与控制, 2010, 17(11): 43-49.  
Liu Chuanbo, Qiu Zhiming, Wu Ling, et al. Research Status and Prospect of Dynamic Weapon Target Allocation[J]. Electro-optic and control, 2010, 17(11): 43-49.
- [17] 叶青松, 胡笑旋, 马华伟. 多无人机编队协同目标分配的两阶段求解方法[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2015(10): 1431-1436.  
Ye Qingsong, Hu Xiaoxuan, Ma Huawei. Two-stage Solution Method for Multi-UAV Formation Cooperative Target Allocation[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science Edition), 2015(10): 1431-1436.
- [18] 毛昭军, 李云芝, 蔡业泉. 防空作战中合同网协议分布式目标分配算法[J]. 火力与指挥控制, 2008, 33(1): 90-93.  
Mao Zhaojun, Li Yunzhi, Cai Yequan. Distributed Target Assignment Algorithms for Contract Network Protocol in Air Defense Operations[J]. Firepower and Command Control, 2008, 33(1): 90-93.
- [19] 唐苏妍, 梅珊, 朱一凡, 等. 基于扩展合同网协议的分布式武器目标分配方法[J]. 火力与指挥控制, 2011, 33(3): 568-574.  
Tang Suyan, Messan, Zhu Yifan, et al. Distributed Weapon Target Allocation Method based on Extended Contract Network Protocol[J]. Firepower and Command Control, 2011, 33(3): 568-574.
- [20] 肖玉杰, 李杰, 刘方. 基于合同网的分布式动态任务分配算法[J]. 舰船科学技术, 2015, 37(3): 113-118.  
Xiao Yujie, Li Jie, Liu Fang. Distributed Dynamic Task

- Allocation Algorithm based on Contract Network[J]. Ship Science and Technology, 2015, 37(3): 113-118.
- [21] 黎子芬, 李相民, 代进进, 等. 编队对地动态联合火力分配建模与仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(12): 2900-2905.  
Li Zifen, Li Xiangmin, Dai Jinjin, et al. Research of Modeling and Simulation on Formation Attack to Ground Dynamic Joint Fire Distribution[J]. Journal of System Simulation, 2013, 25(12): 2900-2905.
- [22] 腾讯 AI 研究院. 人工智能[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2017: 94-98.  
Tencent AI Research Institute. Artificial Intelligence[M]. Beijing: Renmin University Press, 2017: 94-98.
- [23] Hopfield J, Tank D W. Neural Computation of Decisions in Optimization Problems[J]. Biological Cybernetics (S1432-0770), 1985, 52(14): 141-152.
- [24] Wacholder E. A Neural Network-based Optimization Algorithm for the Weapon-Target Assignment[R]. DE89-007879, 1989.
- [25] Stephen Lucci, Danny Kopec. 人工智能[M]. 林赐译. 北京: 人民邮电出版社, 2018: 291-331.  
Stephen Lucci, Danny Kopec. Artificial Intelligence[M]. Lin Zhi, Translation. Beijing: People's Posts and Telecommunications Press, 2018: 291-331.
- [26] 吴坤鸿, 詹世贤. 分布式遗传模拟退火算法的火力打击目标分配优化[J]. 智能系统学报, 2017, 12(4): 89-92.  
Wu Kunhong, Zhan Shixian. Distributed Genetic Simulated Annealing Algorithm for Fire Target Allocation Optimization[J]. Journal of Intelligent Systems, 2017, 12 (4): 89-92.
- [27] 陈曼, 周凤星. 改进粒子群算法的舰载武器目标分配[J]. 火力与指挥控制, 2018, 43(11): 72-76.  
Chen Man, Zhou Fengxing. Shipborne Weapon Target Assignment based on Improved Particle Swarm Optimization[J]. Firepower and command control, 2018, 43(11): 72-76.
- [28] 王连山. 关于遗传、蚁群、禁忌搜索算法的比较[J]. 电脑编程技巧与维护, 2009(24): 18-21.  
Wang Lianshan. Comparisons of Genetic, Ant Colony and Tabu Search Algorithms[J]. Computer programming skills and maintenance, 2009(24): 18-21.
- [29] 蔡怀平, 陈英武, 邢立宁. SVNTS 算法的动态武器目标分配问题研究[J]. 计算机工程与应用, 2006(31): 7-10.  
Cai Huaiping, Chen Yingwu, Xing Lining. Research on Dynamic Weapon Target Assignment Based on SVNTS Algorithms[J]. Computer Engineering and Applications, 2006 (31): 7-10.
- [30] 徐加强, 毕义明, 汪民乐, 等. 基于时空约束的常规导弹火力分配建模与实现[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(9): 2025-2029.  
Xu Qiang, Bi Yiming, Wang Minle, et al. Modeling and Implementation of Conventional Missile Fire Distribution based on Space-time Constraints[J]. Systems Engineering and Electronic Technology, 2011, 33(9): 2025-2029.
- [31] Holland J. Adaptation in Natural and Artificial Systems[M]. Ann Arbor, MI: University of Michigan, 1975.
- [32] 陈成, 邢立宁, 谭跃进. 求解多机协同任务规划的改进遗传算法[J]. 兵工自动化, 2010, 29(9): 28-31.  
Chen Cheng, Xing Lining, Tan Yuejin. Improved Genetic Algorithm for Solving Multi-machine Cooperative Task Planning[J]. Military Automation, 2010, 29(9): 28-31.
- [33] 杨山亮, 黄健, 刘洋, 等. 基于遗传算法的联合火力 WTA 问题研究[J]. 计算机仿真, 2012, 29(3): 61-64.  
Yang Shanliang, Huang Jian, Liu Yang, et al. Research on Joint Firepower Weapon Target Assignment Problem Based on Genetic Algorithms[J]. Computer Simulation, 2012, 29 (3): 61-64.
- [34] 费凯, 杨任农, 黄震宇, 等. 考虑时间约束的空战编队协同火力分配研究[J]. 计算机工程与应用, 2016, 52(13): 259-264.  
Fei Kai, Yang Rennong, Huang Zhenyu, et al. Study on Cooperative Fire Distribution of Air Combat Formation Considering Time Constraints[J]. Computer Engineering and Application, 2016, 52 (13): 259-264.
- [35] 王少蕾, 陈维义, 顾雪峰. 自适应差分进化算法求解多平台多武器-目标分配问题[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(10): 2115-2120.  
Wang Shaolai, Chen Weiyi, Gu Xuefeng. Adaptive Differential Evolution Algorithms for Multi-Platform Weapon-Target Assignment[J]. Systems Engineering and Electronic Technology, 2013, 35(10): 2115-2120.
- [36] 赵明. 多无人机系统的协同目标分配和航迹规划方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.  
Zhao Ming. Research on Cooperative Target Assignment and Path Planning for Multi-UAV System[D]. Harbin: Harbin University of Technology, 2016.
- [37] Storn R, Price K. Differential evolution: a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces[J]. Journal Global Optimization (S0925-5001), 1997, 11(4): 341-359.

- [38] 雍龙泉. 和声搜索算法研究进展[J]. 计算机系统应用, 2011, 20(7): 244-248.  
Yonglongquan. Progress in Harmony Search Algorithms[J]. Computer System Applications, 2011, 20(7): 244-248.
- [39] 张媛, 张立民, 刘文彪, 等. 逆转变异蚁群算法在 CGF 多目标分配[J]. 光电与控制, 2012, 19(3): 21-24.  
Zhang Yuan, Zhang Limin, Liu Wenbiao, et al. Reverse Mutation Ant Colony Algorithm in CGF Multi-objective Allocation[J]. Electro-optic and control, 2012, 19(3): 21-24.
- [40] 张新. 量子蚁群算法现状综述[J]. 机电一体化, 2014(1): 13-17.  
Zhang Xin. A Review of the Status Quo of Quantum Ant Colony Algorithm[J]. Mechatronics, 2014(1): 13-17.
- [41] 肖中晖, 寇英信, 李战武, 等. 火力分配多目标优化的 IBACO 算法[J]. 火力与指挥控制, 2017, 42(7): 165-169.  
Xiao Zhonghui, Kou Yingxin, Li Zhanwu, et al. IBACO Algorithm for Multi-objective Optimization of Firepower Allocation[J]. Firepower and command control, 2017, 42(7): 165-169.
- [42] 薛洪波, 伦淑娴. 粒子群算法在多目标优化中的应用综述[J]. 渤海大学学报(自然科学版), 2009, 30(3): 265-269.  
Xue Hongbo, Lun Shuxian. Summary of the Application of Particle Swarm Optimization in Multi-objective Optimization[J]. Journal of Bohai University (Natural Science Edition), 2009, 30(3): 265-269.
- [43] 杨飞, 王青, 候砚泽. 基于整数域改进粒子群优化算法的多平台武器目标分配[J]. 兵工学报, 2011, 32(7): 906-912.  
Yang Fei, Wang Qing, Hou Yanze. Multi-platform Weapon Target Allocation based on Improved Particle Swarm Optimization Algorithm in Integer Domain[J]. Journal of Military Engineering, 2011, 32 (7): 906-912.
- [44] 王强, 丁全心, 张安等. 多机协同对地攻击目标分配算法[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(7): 1400-1405.  
Wang Qiang, Ding Quanxin, Zhang An, et al. Target Allocation Algorithm for Multi-machine Cooperative Ground Attack[J]. Systems Engineering and Electronic Technology, 2012, 34 (7): 1400-1405.
- [45] 范成礼, 刑清华, 郑明发, 等. 基于 IDPSO 的武器目标分配优化算法[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(2): 336-342.  
Fan Chengli, Peng Tsinghua, Zheng Mingfa, et al. An IDPSO-based Optimization Algorithm for Weapon Target Allocation[J]. Systems Engineering and Electronic Technology, 2015, 37(2): 336-342.
- [46] 夏维, 刘新学, 郑明发, 等. 基于改进型多目标粒子群优化算法的武器-目标分配[J]. 兵工学报, 2016, 37(11): 2085-2093.  
Xiawi, Liu Xinxue, Zheng Mingfa, et al. Weapon-Target Assignment based on Improved Multi-objective Particle Swarm Optimization[J]. Journal of Military Engineering, 2016, 37 (11): 2085-2093.
- [47] 刘志超, 石章松, 姜涛, 等. 基于最小资源损耗的火力分配研究[J]. 火力与指挥控制, 2018, 43(6): 167-170.  
Liu Zhichao, Shi Zhangsong, Jiang Tao, et al. Research on Fire Distribution Based on Minimum Resource Loss[J]. Fire and Command Control, 2018, 43(6): 167-170.
- [48] Wu F, Zilberstein S, Chen X. Point-based policy generation for decentralized POMDPs[C]. In: Proceeding of AAMAS-10. Toronto, Canada: the 9th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, 2010: 1307-1314.
- [49] Wu F, Zilberstein S, Chen X. Trial-based dynamic programming for multi-agent planning[C]. Proceeding of AAMAS-10. Atlanta, USA: the 9th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, 2010: 908-914.
- [50] Wu F, Zilberstein S, Chen X. Rollout sampling policy iteration for decentralized POMDPs[C]. Proceeding of UAI-10. Catalina Island, USA: the 9th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, 2010: 666-673.
- [51] A Unified Game-Theoretic Approach to Multiagent Reinforcement Learning[J/OL]. [2019-05-28]. <https://arxiv.org/abs/1711.00832>.