

# 基于群体智能的无人机集群 作战任务规划研究

*Jiyu Qunti Zhineng de Wurenji Jiqun  
Zuozhan Renwu Guihua Yanjiu*

李浩 范翔宇 金宏斌 陶松波 著



国防工业出版社  
National Defense Industry Press

# 基于群体智能的无人机集群 作战任务规划研究

李 浩 范翔宇 著  
金宏斌 陶松波

国防工业出版社

· 北京 ·

## 内 容 简 介

任务规划是人工智能领域需要经常面临和解决的问题,在军事领域,任务规划几乎贯穿了整个作战过程,是遂行作战任务的关键核心和作战效能的倍增器。本书聚焦于无人机集群的任务规划问题,采用新一代人工智能基础理论中的群体智能方法,系统地建立了多层次任务规划框架,给出了典型问题的建模方法和求解步骤,并进行了仿真验证。本书突出前沿学科交叉和军事应用背景,注重基础理论知识阐述,力求使广大读者能快速掌握基于群体智能的无人机集群任务规划问题方法和技术。

### 图书在版编目(CIP)数据

基于群体智能的无人机集群作战任务规划研究 / 李浩等著. — 北京:国防工业出版社, 2019.9  
ISBN 978-7-118-11939-8

I. ①基… II. ①李… III. ①无人驾驶飞机—集群—作战任务—研究 IV. ①E844

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 164924 号

※

国防工业出版社 出版发行  
(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)  
三河市腾飞印务有限公司印刷  
新华书店经售

\*

开本 710×1000 1/16 印张 9 字数 150 千字  
2019 年 9 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 68.00 元

---

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777 发行邮购: (010) 88540776  
发行传真: (010) 88540755 发行业务: (010) 88540717



李浩，中国人民解放军空军预警学院教师，电子科学与技术专业博士，主要从事集群探测、情报组网和指挥自动化相关领域教学与研究工作。主持国家自然科学基金、军委科技委国防科技应用推进计划项目、军委装备发展部“十三五”领域基金、军委装备发展部与教育部联合青年人才基金、湖北省自然科学基金、全军装备科研重点项目等课题11项，参与国防973课题、军委科技委创新特区、国家自然科学基金和军队相关项目10余项，发表相关学术论文40余篇，其中SCI/EI检索20余篇，相关专利/软著9项，在集群信息处理和指挥控制领域有较为深入的研究。

# 前 言

群体智能 (Swarm Intelligence, SI) 的概念源于人们对生物群体的集群行为长期观察和研究。群体智能是指群体中个体简单, 在环境中表现出自主性、自适应性和学习性, 通常个体与个体协作、个体与环境交互, 最终在群体层面涌现出复杂的智能行为。自然界中, 生物的群体智能行为几乎随处可见: 鱼群游水底, 看似杂乱, 实则高度协作防御与觅食; 蚁群遍布大地, 相互协作觅食, 能合力搬运重于其身体百千倍的东西; 狼群分工明确各司其职, 可协作捕获大型猎物等。

随着 MEMS 微电子、通信导航、C<sup>4</sup>ISR、人工智能技术等现代前沿科技领域的迅猛发展, 从生物群体智能中受到启发的世界军事强国, 希望借鉴动物的群体智能行为, 通过多个小型、功能简单的无人机组成的集群, 更大限度地发挥整体战斗力; 并依靠无人机集群的整体战斗力, 应对未来复杂电磁环境下的高强度、高对抗性和高不确定的战争行动。目前, 无人机集群作战已成为未来无人作战的主要作战样式。

本书瞄准无人机集群作战的核心关键问题——任务规划问题, 以群体智能的基础方法和理论为依托, 尝试建立无人机集群作战中异构多飞行器、多任务、多约束的多层次任务规划模型, 并利用群体智能理论与方法设计算法进行求解, 突出前沿学科交叉和军事应用背景, 注重基础理论知识阐述, 力求使广大读者能快速掌握基于群体智能的无人机集群任务规划问题相关方法和技术。本书出版过程中, 得到了国家自然科学基金项目“生物行为启发的航空集群攻防建模及其能力涌现与诱导控制方法研究”(61502522)、军委装发预研领域基金项目“蜂群无人机雷达技术”(JZX7Y20190253036101)、军委装发与教育部联合青年人才基金项目“基于群体智能的无人机集群作战任务规划建模与构型控制”(6141A02033703)、湖北省自然科学基金面上项目“基于人机联合认知的无人机实时航迹规划技术研究”等项目的支持。

本书共分 5 章, 各章的主要研究内容如下。

第 1 章主要介绍无人机集群作战任务规划问题的背景和意义, 同时对任务规划模型和算法、群体智能算法进展现状等进行综述。

第2章对无人机集群作战任务规划问题的多层次性进行介绍,从无人机集群作战时序入手,就任务规划问题主客体、原则、分类、控制特性和多层次性进行详细阐述;最后提出基于群体智能的无人机集群多层次任务规划求解框架。

第3章无人机集群典型静态任务规划问题研究。列举无人机集群作战中的飞行路径规划和协同反隐身构型两个典型静态任务规划问题,建立相应的规划模型,并用群体智能算法进行求解。

第4章无人机集群集中式动态任务规划问题研究。从无人机集群作战的战场环境和主体属性分析入手,构建基于数字地图的目标位置概率图和信息确定性图,建立集群作战净收益最优化模型并进行求解。

第5章无人机集群分布式动态任务规划问题研究。针对集群分布式动态任务特点,建立一种自下而上的具有多任务类型(且不同任务类型有一定执行顺序)、多状态、自适应响应阈值、多个体响应等特点的动态蚁群劳动分工模型;并按照在既定目标情况、突发威胁目标情况、新增无人机联盟情况和部分无人机被击毁这四种情况,对模型和方法进行研究。

在本书撰写过程中,得到了大量的支持和帮助,感谢对本书给予过关怀、支持和帮助的人们,以及对本书的研究有着帮助和贡献的人们,他们是柏鹏教授、梁晓龙教授、吴虎胜副教授、薛俊杰博士和肖吉阳博士。

由于作者水平有限,书中难免有遗漏或不当之处,恳请各位专家和读者批评指正。

作者  
2019年7月

# 目 录

第 1 章 无人机集群任务规划概述	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 任务规划研究现状	4
1.2.1 无人机集群作战任务规划研究现状	4
1.2.2 任务规划问题模型	5
1.2.3 任务规划算法	6
1.3 群体智能算法研究现状	9
1.3.1 群体智能算法研究进展	9
1.3.2 烟花算法研究现状分析	10
1.3.3 狼群算法研究现状分析	11
1.3.4 蚁群劳动分工模型研究现状	14
1.4 本书结构与章节安排	15
第 2 章 无人机集群多层次任务规划问题分析	17
2.1 无人机集群任务规划问题描述	17
2.1.1 相关基本概念	17
2.1.2 无人机集群作战时序	18
2.1.3 无人机集群任务规划问题特点简述	19
2.2 无人机集群任务规划的控制特性分析	21
2.2.1 集中式控制	21
2.2.2 分布式控制	22
2.2.3 多层分布式控制	23
2.3 无人机集群任务规划问题的多层次性	24
2.3.1 无人机集群任务规划主客体的多层次性	24
2.3.2 无人机集群任务规划系统的层次结构	25
2.3.3 无人机集群任务规划系统的硬、软件层次结构	27
2.4 无人机集群多层次任务规划问题的求解框架	28
2.4.1 任务规划问题的一般求解框架	28

2.4.2	无人机集群多层次任务规划的难点分析与问题描述	29
2.4.3	基于群体智能的无人机集群多层次任务规划问题的求解 框架	30
2.5	本章小结	33
<b>第3章</b>	<b>无人机集群典型静态任务规划问题研究</b>	<b>34</b>
3.1	无人机集群作战飞行路径规划问题	34
3.1.1	无人机集群作战路径规划问题建模	34
3.1.2	基于离散烟花算法的无人机集群路径规划问题求解	36
3.1.3	仿真与分析	38
3.2	无人机集群反隐身作战编队构型规划问题	43
3.2.1	无人机集群协同反隐身作战简介	43
3.2.2	隐身战斗机的雷达散射截面特性分析	43
3.2.3	集群反隐作战中的编队构型优化建模	47
3.2.4	仿真与分析	56
3.3	本章小结	63
<b>第4章</b>	<b>无人机集群集中式动态任务规划问题研究</b>	<b>65</b>
4.1	相关研究情况	65
4.2	无人机集群集中式作战任务决策模型描述	66
4.2.1	战场环境与主体描述	67
4.2.2	无人机集群协同搜索	73
4.2.3	基于组合竞标的集群协同攻击任务协调机制	77
4.2.4	无人机集群攻击任务代价与收益分析	79
4.2.5	无人机集群集中式任务建模	80
4.3	基于二进制反向狼群算法的任务规划算法	81
4.3.1	二进制反向学习	82
4.3.2	二进制反向狼群算法简介	83
4.3.3	基于二进制反向狼群算法的任务规划算法流程	84
4.4	无人机集群察打一体作战任务规划算例仿真与分析	85
4.4.1	仿真实例与模型参数设置	85
4.4.2	仿真与分析	88
4.5	本章小结	90
<b>第5章</b>	<b>无人机集群分布式动态任务规划问题研究</b>	<b>91</b>
5.1	现状概要分析	91
5.2	分布式动态任务规划与FTM相似性	94

5.2.1	基本蚁群劳动分工模型简介	94
5.2.2	任务规划与FTM的关联性	94
5.2.3	FTM的缺陷分析	95
5.2.4	经典蚁群劳动分工模型的改进思路	96
5.3	基于动态蚁群劳动分工模型的任务规划算法	97
5.3.1	模型中各变量描述	97
5.3.2	动态环境刺激	99
5.3.3	个体对动态环境刺激的响应	100
5.3.4	个体的状态转移概率	101
5.3.5	动态蚁群劳动分工模型描述	101
5.3.6	仿真规则	102
5.4	仿真验证与分析	102
5.4.1	问题描述	103
5.4.2	实例参数设置	104
5.4.3	冲突消解	106
5.4.4	仿真与分析	108
5.5	本章小结	118
	参考文献	120

# 第1章 无人机集群任务规划概述

## 1.1 研究背景及意义

自然界中，群体智能几乎随处可见（图 1.1）：鸟翔天空却不见它们碰撞；鱼游水底，看似杂乱实则高度协作防御与觅食；蚁群遍布大地相互协作觅食，能合力搬运重于其身体百倍、千倍的东西；狼群分工明确各司其职，可协作捕获大型猎物，以及蜂群、蝗虫群等。这些群体中就单个个体而言，其智能有限、行为规则简单、决策机制并不复杂，但在一定的规则下、相互协作可在整体层面涌现出惊人的群体智能，表现出复杂的群体行为和高明的智慧<sup>[1]</sup>。

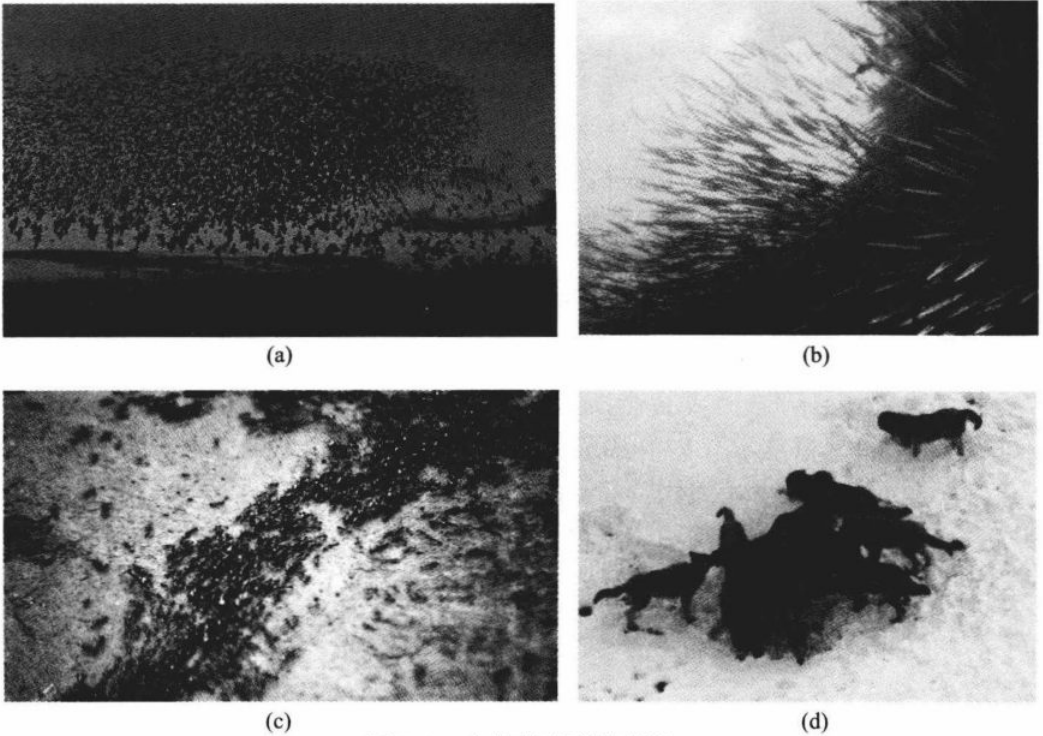


图 1.1 生物界的群体现象

启发于生物界的群体集群现象，美国空军一直致力于集群作战的相关研究，他们希望由数量庞大、成本低廉的小型无人作战系统组成的飞行集群，如图 1.2 所示。集群中各个个体通过紧密协作、自组织，涌现出惊人的群体智能，进而实现集群作战能力的跃升，以在反恐维稳、广域搜索、远程攻击等作战任务中大显身手<sup>[2]</sup>。且这种飞行集群由于其规模效应，使得作战的被动方很难防御，往往会因此遭受巨大损失。

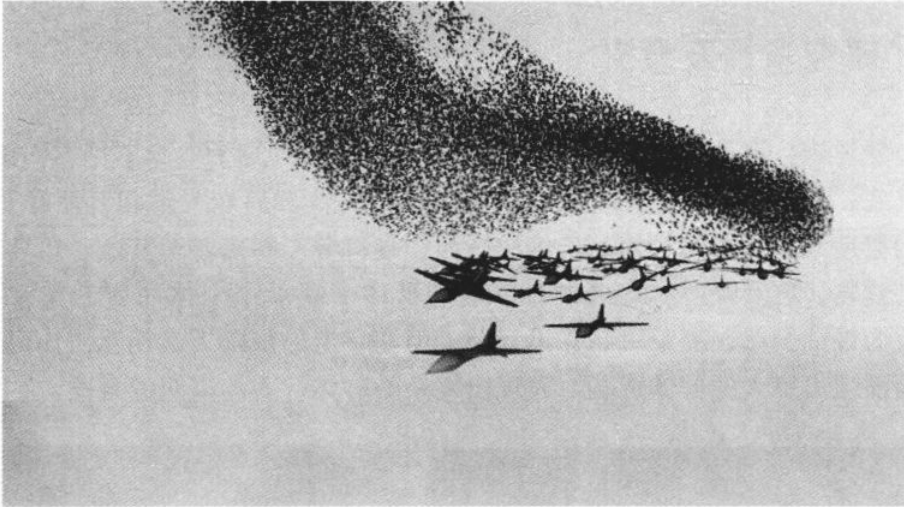


图 1.2 飞行集群示意图

因此，飞行集群特别是无人机（UAV）集群技术受到了广泛关注。在民用领域，2016 年 12 月，亚马逊获批一项专利，其主要思想就是准备用一群小无人机做一个无人机集群，组成一个巨型的运输无人机，来完善亚马逊自身的无人机物流方案。

在军用领域，2016 年 11 月，雷声公司用大概 30 架“郊狼”舰基无人机进行了无人机集群的蜂群实验，而该实验受到美国海军研究办公室（ONR）“低成本无人机蜂群技术”（LOCUST）项目的大力资助。2017 年 1 月 7 日，3 架美国海军 F/A-18F“超级大黄蜂”战斗机进行了 104 架微型集群专用无人机的抛洒和集群控制实验。美军对集群作战投入了大量的人力和物力，甚至将其视为下次空战致胜的关键<sup>[3]</sup>。

无人机技术在中国也是发展迅猛，2016 年 9 月底，中国航空工业集团有限公司在西安军民融合展上就公布了“蜂群”无人机集群作战系统的宣传视频。2016 年 11 月，珠海航展上，由中国电子科技集团有限公司、清华大学和北京泊松技术有限公司联合研制的固定翼无人机集群实验原型，共有 67 架无

人机组成，而之前美国海军是 50 架。而 2017 年 6 月 10 日中国电子科技集团有限公司成功完成了 119 架固定翼无人机集群飞行试验，刷新了 2016 年的试验记录，这标志着群集智能领域的又一突破，因为固定翼无人机集群在集群协同控制、个体避让、通信组网等各方面较之于旋翼无人机集群更为复杂。同时，中美以及其他世界各国在此方面的科技较量也充分显示无人机集群及集群作战的研究方兴未艾。

美国空军科学顾问委员会明确指出：多飞行器的集群作战将成为未来空中作战的主要作战样式<sup>[4]</sup>。研究发现：无论是对于无人机群还是有人机群，机群进行编队飞行、侦察、攻击、防御等都与自然界生物的集群行为有着大量相似之处。多机协同已成为世界各大军事科研机构广泛研究的重要课题<sup>[5-7]</sup>。进而基于两者的相似性，提出无人机集群的概念。

无人机集群即是由一定数量具有不同功能的有人或无人航空飞行器共同组成，能够相互协作，整体具有能力涌现特点的飞行系统<sup>[8]</sup>。无人机集群并非单个作战平台的简单叠加，集群作战也拥有一些单个平台作战所无法比拟的优势：

(1) 相对更高的胜算。据兰彻斯特平方率理论，参战平台数量比单个平台作战能力在战争胜负的决定上更为重要<sup>[9]</sup>。集群作战充分利用集群的数量优势来提升局部战争的胜算。

(2) 作战的相对低成本。无人机集群作战的一大特点就是将复杂的作战任务通过简单、低成本的集群个体相互间的协作完成，完成以前需要超级武器才能完成的任务；而敌方在应对集群攻击时往往需要耗费多倍的成本来进行防御，使得集群作战的综合作战成本较低。

(3) 集群生存力强。无人机集群具有“无中心”性或“多中心”性，集群个体还具有一定的“自主协同”特性，在集群作战的高度对抗中，少数的集群个体的损伤并不会对无人机集群整体造成毁灭性的伤害。且通过一定技术手段能使得集群具备自愈合功能，集群仍然可以继续执行作战任务，集群生存能力强。

(4) 功能的涌现性。无人机集群并非一定数量的单个平台的简单叠加，异构平台具有侦察、攻击、电磁干扰等功能，但单个平台的效能毕竟有限，无人机集群通过集群个体之间的高度协同和自组织，使得集群涌现出远超个体功能之和的集群功能，作战能力指数级提升。

正是由于集群作战的上述优势，使得各国都争相发展这一技术。无人机集群协作地执行某项复杂任务，离不开集群个体间的高效协同和对任务的较好分配，提升无人机集群未来战场作战效能和生存能力的重要环节之一就是高效的

任务规划方法。这一研究核心不仅涉及运筹学、智能决策理论，还涉及图论、系统理论等多学科知识。

在实际中，无人机集群作战环境复杂多变、作战主体异构且对抗性强，使得无人机集群任务规划成为一个极具挑战性的问题。其主要体现在以下四个方面<sup>[10]</sup>：

(1) 作战任务环境复杂。无人机集群作战高度复杂和充满对抗性，既有突发的威胁，也有自然环境障碍、敌方火力防御区，且有时候单个集群个体很难获知全局信息。

(2) 集群个体异构。无人机集群不同规模不仅涉及集群个体数量的不同，更涉及集群个体的功能、空气动力学差异、通信距离、飞行速度、武器载荷等方面的差异<sup>[11]</sup>。

(3) 任务的复杂性。按照任务的功能性分，有侦察、分类、攻击、毁伤评估等不同类型的任务；按照任务的时态特性分，有静态任务和动态任务；按照复杂任务之间的耦合关系分，有紧耦合任务集和松耦合任务集等。

(4) 计算和通信的复杂性。一方面，无人机集群任务规划问题不可避免地会遇到目标任务指派、集群侦察/攻击资源优化、编队构型优化等问题，很多属于 NP-Hard 问题，随问题的维数其计算复杂度呈指数级上升；另一方面，分布式、多层分布式控制方式下的集群个体要进行频繁的通信和信息传输，且复杂的任务环境对通信也造成很多影响，如通信延时、虚假通信等。

针对无人机集群作战任务规划这一难点问题，本书作者开展对群体智能优化方法（狼群算法）、无人机集群多层次任务规划框架、基于蚁群劳动分工的无人机集群动态任务规划算法等的研究，其研究成果不但能拓展群体智能研究理论，还可为军方提升集群作战能力给予一定启示，具有一定的理论和实际价值。

## 1.2 任务规划研究现状

### 1.2.1 无人机集群作战任务规划研究现状

无人机集群是立足于未来空战致胜关键，由于该研究点与未来作战高度相关，综述与介绍性的文献较多，而涉及底层技术与工程应用的文章保密等原因，目前可查到的无人机集群在任务规划中的应用公开文献相对较少，但从这些文献中也可看出这一方向的研究意义和前景。

文献 [12] 从作战任务层面，对集群系统重构的定义以及类型、触发机

制和基本原则等问题进行了分析, 基于博弈理论构建了基于 Multi-Agent 的系统重构模型, 同时给出了重构的流程与算法; 文献 [13] 针对多航空器独立反隐身的作战任务需求, 提出使用集群个体成员机载雷达作为发射阵元, 群内其他成员的为接收阵元, 基于构建的多部双机雷达研究了“单发多收”情况下无人机集群反隐身构型和机动策略; 文献 [14] 研究了集群定位编队构型问题, 得到了最优三机无源定位编队构型; 文献 [8] 针对集群作战规划任务规划问题, 在综合考虑多机协同、攻击/反攻击、隐身/反隐身等因素的基础上, 分析了无人机执行侦察、攻击、评估三项任务的收益和代价, 进而构建了目标函数, 最后利用一种基于新的整数编码狼群算法用于求解多目标、多任务、多约束、异构多飞行器的无人机集群作战任务规划模型, 取得较好的任务规划效果。

此外, 还可以从多 UAV 任务规划的相关研究中窥探一些规律, 得到借鉴和启示, 任务规划问题实际涉及两个方面的关键问题: 一是建立合适的模型对作战任务环境和主体进行抽象; 二是选取或提出合理高效的算法进行求解。

### 1.2.2 任务规划问题模型

目前, 众多学者已尝试采用各种规划建模方法用于多飞行器任务规划问题的建模, 但各模型都各有适用领域。例如, 多旅行商问题 (MTSP) 模型<sup>[15]</sup>和车辆路径规划问题 (VRP) 模型<sup>[16]</sup>一般用于处理可考虑时间窗约束的侦察、搜索、攻击等单一任务的多机协同任务规划问题; 但 MTSP 模型和 VRP 模型在描述多机多类型任务时, 在搜索、侦察、打击、评估一体化作战任务规划中略显乏力。

因此, 研究人员进一步地提出了混合整数线性规划<sup>[17]</sup> (MILP) 模型和网络流<sup>[18]</sup> (NFO) 模型。NFO 模型则将 UAV 作为网络中的供货商, 将待执行任务 (如侦察、攻击、评估等) 为物流, 采用 UAV 执行任务代价和收益作为网络流动成本, 最终基于图论来建立网络流模型。利用 MILP 模型既可以描述不同任务之间的约束和要求, 也可以对异构多无人机任务规划问题进行建模<sup>[19]</sup>。

随着察打一体化无人机的战术应用及各类型任务在分配时的一体化考虑, 任务的时序和时间约束等时间特性被重视, 同时多类型异构的任务处置模式也具有更高的复杂度, 需要进行进一步研究。针对无人机任务执行时序约束, 文献 [20] 提出了一种的协同任务规划问题 (CMTAP) 模型, 这种模型充分考虑了任务的一体性, 对于静态的任务规划建模效果较好, 对其做进一步改进可能会有更广泛的应用前景<sup>[21]</sup>。

对于集群作战任务规划问题所体现出的战场环境复杂、异构多飞行器、动

态时序等特点，也有很多学者依据不同的战场背景和任务假设建立了任务规划的 Multi-Agent 模型。文献 [22] 以合同网协议 (CNP) 和多智能体系统 (MAS) 理论为基础，建立了有人机/无人机编队 MAS 结构和基于投标过程的任务规划模型，取得较好效果。文献 [23] 则将集群中的个体视为一个简单智能体，在一定的行动规则下会受任务的刺激进行响应的行动反应，从而建立任务决策的应激响应模型。

### 1.2.3 任务规划算法

多 UAV 系统的任务规划是一个具有复杂约束的多目标优化问题，主要研究在满足各项战术技术指标的前提下，如何为各 UAV 指定所需执行的任务及具体的执行时间，在满足各类约束的同时，使得多 UAV 协同系统实现尽可能高的作战效能。传统意义上的任务规划与协调技术通常是各 UAV 指派具体的目标，而随着 UAV 任务复杂性的不断增强和协同性的不断提高，任务规划技术不仅包括对 UAV 任务目标的指派，还要根据具体的任务协同性需求，确定各 UAV 执行任务的时序和时间关系。该领域的研究内容主要包括任务规划问题建模和求解方法两方面。

在任务规划与协调建模方面，通常采用的方法是对问题进行适当简化后通过经典优化问题进行建模，如旅行商问题 (TSP) 模型<sup>[24]</sup>、车辆路径问题 (VRP) 模型<sup>[25]</sup>、网络流优化 (NFO) 模型<sup>[26]</sup>、混合整数线性规划 (MILP) 模型<sup>[27]</sup>、背包问题 (KP) 模型<sup>[28]</sup> 等。

随着研究工作的深入，在上述经典问题模型的基础上结合各种特定约束和要求的扩展模型不断出现。美国空军研究实验室以多 UAV 执行侦察任务为背景，基于 MTSP 和 VRP 模型研究多 UAV 的任务指派和路由问题，通过引入 UAV 任务的时间窗约束，建立了带时间窗的不同能力车辆路径问题 (CVRPTW) 模型<sup>[29-31]</sup>，并将其应用于“全球鹰”无人机和“捕食者”无人机侦察任务规划问题的建模；文献 [26] 针对一类低成本 UAV 的对地攻击问题，在网络流优化模型的基础上进行扩展，建立了多 UAV 任务规划的动态网络流优化 (DNFO) 模型，该模型将多 UAV 任务规划看做一个商业供需网络物流优化问题，以 UAV 为供应商，任务为供需网络上的物流，任务规划计划则作为需求，UAV 执行任务的代价或收益即为任务在网络中的流量代价，由此建立相应的供需网络模型，通过对网络流量的最小化实现多 UAV 的任务规划；针对多架 UAV 协同执行对地打击任务的问题，文献 [32] 综合考虑不同任务之间的执行时序关系，建立了多 UAV 任务规划的混合整数线性规划模型；而文献 [33] 则在此基础上，进一步考虑任务执行过程中的动态变化因素，

提出了多平台任务规划的动态规划 (DP) 模型; 美国麻省理工学院针对 UAV 机群的任务规划问题, 将 UAV 能力、障碍以及任务时间信息等离散和连续决策变量集成到统一的 MILP 问题模型中, 并通过商业软件 CPLEX 对模型进行求解<sup>[34,35]</sup>; 在多 UAV 分布式任务规划建模中, 文献 [28] 以背包问题模型为基础, 结合多 UAV 任务规划问题的特点进行扩展, 将其描述为多维多选择背包问题 (MMKP) 进行求解。

随着 UAV 平台能力的不断增强, UAV 所执行任务的复杂程度也越来越大, 如多 UAV 协同执行 SEAD 任务时, 对同一目标需要依次执行侦察确认、攻击和毁伤评估 (BDA) 等不同类型的任务, 这些任务对平台的性能需求各不相同, 且相互之间存在一定的时序约束, 对此, 目前大部分任务规划模型无法对其进行有效的描述, 文献 [36] 针对这一问题提出了协同多任务规划问题 (CMTAP) 模型, 该模型采用树状结构对多 UAV 任务规划问题的解空间进行描述, 能够对复杂任务之间的时序约束关系进行有效建模。文献 [37] 中提出的目标参照贝叶斯网络 (OOBN) 在近年来被一些学者用于描述 UAV 执行任务过程中决策因素和决策目标之间因果关系, 可实现对多任务间协同关系的描述, 逐渐成为对 UAV 复杂系统建模的一种可行方法。

在任务规划与协调求解算法方面, 研究成果主要包括最优化方法和启发式方法两类。其中, 宽度/深度优先搜索、线性规划、分支定界等最优化方法以寻求问题最优解为目标, 已得到了较为充分的研究, 具有相对完备的理论支持 (如可纳性、最优性理论分析等)。如文献 [38] 采用过程代数方法对多 UAV 任务执行过程进行建模和描述, 并基于分支定界技术构建了问题空间树搜索算法。虽然最优化方法具有上述诸多优点, 但该类方法的时间和空间复杂度通常较高, 随着问题规模的增大, 计算代价急剧增加。此外, 该类方法通常要求问题模型具有特定的结构特征才能有效求解, 而实际问题往往过于复杂, 难以直接建立具有相应特征的问题模型, 这就决定了该类方法对问题描述能力的不足, 其应用必须建立在对问题较大程度的简化之上, 不能充分反映任务和战场环境的复杂性和动态性。

启发式方法, 如禁忌搜索 (TS) 算法<sup>[39]</sup> 等, 在任务规划与协调问题中也得到了广泛应用。同时, 启发式方法中的进化算法 (EA)、粒子群算法 (PSO)、入侵性杂草算法 (IWO) 等随机智能优化算法因为具有复杂度低、能快速获得问题可行解或较优解等特点, 近年来更是引起了研究人员的极大关注<sup>[40]</sup>。这类方法对问题模型没有特殊的要求, 具有良好的问题适应能力, 在非线性、非结构化的复杂优化问题求解中优势更为突出。文献 [41, 42] 研究了基于进化算法的多 UAV 协同任务规划, 并将其与最优化方法进行了比较,

验证了算法的有效性；文献 [43] 在进化算法的基础上，提出了面向 UAV 集群规划的多目标进化算法，并将其应用于 UAV 集群的任务协调与控制中；文献 [36] 在 CMTAP 模型基础上，应用遗传算法（GA）进行求解，并通过仿真实验证明了当问题空间较大的情况下，采用 GA 具有比传统最优化方法更高的效率；文献 [44] 以多 UAV 搜索打击任务为背景，综合考虑 UAV 平台能力、目标打击需求等约束，应用 PSO 算法进行求解，取得了较好的效果；文献 [45] 则结合多 UAV 协同任务规划的离散化特性，设计了离散 IWO 算法进行求解，通过模拟杂草的生长繁殖、空间扩散、竞争排斥等过程，实现多 UAV 协同任务规划问题的全局优化搜索。除上述随机智能优化方法外，基于机器学习的方法也被应用到多 UAV/UAV 的任务协调中，文献 [46] 以所构建的环境认知图为基础，提出了一种基于协同学习策略的任务协调方法，并针对多 UAV 协同搜索任务进行了仿真验证。

近年来，UAV 任务需求与所处环境日趋复杂化，一次任务中的使用规模也不断增大，传统的任务规划技术面临着严重的解空间组合爆炸问题，由此促使分布式任务控制的研究迅猛发展，分布式任务规划方法越来越受到人们的重视。文献 [47] 根据自动平台-目标分配的需求，建立了基于多人博弈的问题模型，该模型中，各平台被设计成一种“自利”的决策者，通过对自身效能函数的优化和相互之间的协商机制，实现对复杂问题的求解，体现了分布式条件下对问题的分解求解思想；文献 [48] 提出了基于合同网的分布式任务规划方法，其基本思想是将任务规划描述为多 UAV 编队之间的交易过程，目标和 UAV 是在各个编队之间交换的资源，通过构建 UAV 编队执行任务的评估值，以该评估值的增减量作为资源在网内进行拍卖和竞拍的价格，实现目标和 UAV 在不同编队之间的合理交换。一系列的研究表明，该方法的基本思想是通过 UAV 及其编队之间的互相协商和竞争，以各 UAV 编队的局部最优解来逼近全局最优解，从而使系统能够以最优配置和代价完成预定任务。在分布式条件下，多 UAV 实现任务协同的一个重要基础是平台之间的通信，而实际战场环境中，全程可靠的通信通常难以实现，针对于此，文献 [49] 就不连续通信条件下的多 UAV 任务规划问题，基于令牌机制提出了一种分布式动态约束优化方法，在降低 UAV 执行任务代价的同时，还考虑了多 UAV 在任务执行过程中对所需通信条件的满足程度。进一步的，文献 [50] 在多智能体系统结构的基础上，提出了一种基于行为的协同算法，该算法根据 UAV 出现的不同类型通信中断，分别调整通信状态完好的 UAV 和通信中断 UAV 的行为，使得通信状态完好的 UAV 能够适应通信中断的 UAV，从而达到二者的任务行为协调一致。