

On Cooperation Architectures of  
Multiple Unmanned Aerial Vehicles

# 多无人机协同体系 结构研究

■ 曹文静 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

# 多无人机协同体系 结构研究

曹文静 著

国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

本书系统地研究了多无人机协同体系结构,深入探讨了目前的多无人机协同体系结构及其应用实例,针对现有多无人机协同体系结构的缺点,提出并深入研究了基于工作流的多无人机协同体系结构,分析了多无人机协同工作流的可行性,理论验证了多无人机协同体系结构的协同性能。

本书可供无人飞行器作战技术与指挥及相关专业学生和研究人员学习参考,同时也适合从事无人飞行器设计的工程技术人员以及从事无人飞行器战术战法研究的作战指挥决策者阅读。

### 图书在版编目(CIP)数据

多无人机协同体系结构研究 / 曹文静著. —北京:国防工业出版社, 2017.5

ISBN 978-7-118-11324-2

I. ①多… II. ①曹… III. ①无人驾驶飞机-自动飞行控制-研究  
IV. ①V279

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 122799 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)

三河市众誉天成印务有限公司印刷

新华书店经售

\*

开本 710×1000 1/16 印张 8 字数 138 千字

2017 年 5 月第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 49.00 元

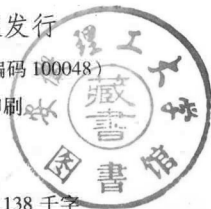
(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717



## 前 言

无人机在现代战争中的应用优势明显,已经被越来越多地应用于执行多种危险和复杂的任务。然而,在复杂多变的信息化战场环境下,单个无人机执行侦察或攻击等任务时面临侦察角度和范围、杀伤半径和摧毁能力等诸方面的限制,制约了作战效能的发挥,单个无人机圆满完成任务的难度越来越大。多无人机协同作战是指两架或两架以上无人机相互配合、相互协作地执行战斗任务。多无人机组成的编队协同执行一项任务,可以很好地实现优势互补,充分发挥各无人机的优势,提高战斗力。在这一过程中,多无人机间的有效协同是提升整体作战效能的关键,而多无人机协同体系结构直接影响了协同性能。本书系统研究了多无人机协同体系结构,探究现有协同体系结构的优缺点,寻求高效的协同体系结构。目前,关于多无人机协同体系结构系统研究方面的书籍还寥寥无几。

本书是作者早期获得的一些研究成果及近几年研究的结晶。在多无人机协同体系结构领域,我们首先对目前的多无人机协同体系结构进行归纳分类,分析了这些协同体系结构的基本原理,探究了这些协同体系结构的优缺点,以及它们的适用场合,为提出新的协同体系结构提供了良好的起始点;然后提出了作者的观点,将工作流理论引入协同体系结构,提出了基于工作流的多无人机协同体系结构,分析了多无人机协同工作流的可行性,理论验证了多无人机协同体系结构的协同效能。

撰写本书的目的就是总结作者最近已取得的多无人机协同体系结构方面的研究成果,提出不同的协同体系结构,为设计高效的协同体系结构提供新的思路。我们期望本书对相关专业的研究人员、教师、研究生和工程师有所裨益。

随着对多无人机协同执行任务的需求越来越多,对多无人机协同体系结构的研究必将是一个持续发展的过程。

感谢国家自然科学基金委的基金支持,感谢中国博士后科学基金会的基金支持,感谢山东省自然科学基金委的基金支持,感谢我的博士后合作导师张友安教授的悉心指导,感谢所有为本书编写做过贡献的人。

# 目 录

第1章 绪论 .....	1
1.1 军事需求 .....	1
1.1.1 多无人机协同作战需求 .....	1
1.1.2 无人机自主能力发展需求 .....	2
1.2 多无人机协同作战的概念与现状 .....	4
1.2.1 多无人机协同作战的概念 .....	4
1.2.2 多无人机自主协同控制研究现状 .....	5
1.2.3 多无人机控制系统体系结构研究现状 .....	10
1.2.4 多无人机协同作战所面临的挑战 .....	12
1.3 多无人机协同作战的发展 .....	14
1.4 本书概要 .....	16
第2章 现有多无人机协同体系结构综述 .....	18
2.1 基于地面控制站的协同体系结构 .....	18
2.1.1 基本思想 .....	18
2.1.2 实例一：“全球鹰”任务控制站 .....	19
2.1.3 实例二：一站多机地面站配置及测控通信模式 .....	22
2.2 基于中心节点的协同体系结构 .....	27
2.2.1 基本思想 .....	27
2.2.2 实例一：以长机为中心节点的协同 .....	27
2.2.3 实例二：以有人机为中心节点的协同 .....	29
2.3 基于多 Agent 的协同体系结构 .....	33
2.3.1 基本思想 .....	33
2.3.2 实例一：基于 Agent 联盟的多无人机协同 .....	37
2.3.3 实例二：基于蚁群搜捕行为的多无人机协同 .....	39
2.4 集散式协同体系结构 .....	45

2.4.1	基本思想	45
2.4.2	实例一:基于团队管理的集散式协同	45
2.4.3	实例二:基于有人机有限控制的集散式协同	50
2.5	本章小结	52
<b>第3章</b>	<b>基于工作流的协同体系结构</b>	<b>53</b>
3.1	workflow理论	53
3.1.1	workflow概述	53
3.1.2	workflow建模方法	59
3.1.3	workflow模型的分析	61
3.2	基于工作流的协同体系结构	63
3.2.1	基本思想	63
3.2.2	协同工作过程	64
3.2.3	系统构架	65
3.3	本章小结	67
<b>第4章</b>	<b>基于Petri网的多无人机协同 workflow模型</b>	<b>68</b>
4.1	Petri网理论	68
4.1.1	系统模型概述	68
4.1.2	Petri网基本概念	70
4.1.3	建立 workflow的 Petri网模型方法	73
4.1.4	Petri网模型的验证	80
4.2	Petri网模型分析	84
4.2.1	畅通性分析	85
4.2.2	死锁分析	90
4.3	基于 workflow的协同体系结构的优势	93
4.4	本章小结	94
<b>第5章</b>	<b>协同性能评价</b>	<b>95</b>
5.1	多无人机协同性能指标	95
5.2	协同时间与协同数据量模型	95
5.2.1	一次协同时间基本模型	96
5.2.2	一次协同数据量基本模型	96
5.3	各种协同体系结构的协同时间与协同数据量分析	97

---

5.3.1	基于地面控制站的协同体系结构	97
5.3.2	基于中心节点的协同体系结构	98
5.3.3	基于多 Agent 的协同体系结构	100
5.3.4	基于工作流的协同体系结构	102
5.3.5	一次协同性能比较	103
5.4	多无人机自主协同体系结构系统协同性能	103
5.4.1	系统协同时间比较	105
5.4.2	系统协同数据量比较	108
5.5	本章小结	112
<b>第 6 章</b>	<b>结束语</b>	<b>113</b>
6.1	多无人机协同体系结构及其协同性能评估	113
6.2	基于工作流的多无人机协同体系结构及其可行性和性能分析	113
6.3	未解决的问题	114
	<b>参考文献</b>	<b>115</b>

# 第1章 绪论

## 1.1 军事需求

### 1.1.1 多无人机协同作战需求

未来的战场环境日益复杂,战场空间全面覆盖陆、海、空、天、电、网等多个维度,夺取信息优势成为克敌制胜的关键,新概念武器的作战性能和杀伤力也越来越大,对战争具有决定因素的“人”面临的挑战日益严峻,迫切需要无人化的装备替代“人”来完成各种作战任务。无人机在现代战争中的应用优势明显,具有反侦察能力强、工作持续时间长、不用担心人员伤亡、可操作性强、侦察能力强、可执行多种电子战任务、可担负各种空中作战任务等特点,已经被越来越多地应用于执行多种危险和复杂的任务。

在高度信息化战场上,无人机已从传统单一的侦查、评估、监听及预警等战斗支援作用,向具有攻击和杀伤能力的方向迅速发展,成为可以执行压制敌防空系统,对地攻击、拦截战术弹道导弹和巡航导弹,甚至可执行对空作战任务的作战装备,并最终成为影响作战进程的重要力量。近年来,无人机在侦察、反恐,尤其是在几次高技术局部战争中的卓越表现,引起了世界各国的高度重视,许多国家开始大力发展无人机技术。

但是,随着无人机的崛起,各国对无人机开发的针对性措施也越来越多,战场环境越来越复杂。在复杂多变的信息化战场环境下,单个无人机执行侦察或攻击等任务时面临侦察角度和范围、杀伤半径和摧毁能力等诸方面的限制,制约了作战效能的发挥,单个无人机圆满完成任务的难度越来越大。多无人机协同作战技术正是顺应这一历史潮流诞生和发展的,并表现出了一种全新的作战模式和技术。多无人机协同作战是指两架或两架以上无人机相互配合、相互协作地执行战斗任务,这是多无人机作战在现代高技术战争中的主要发展方向之一。

总的来说,多无人机协同作战的优势主要体现在以下几方面:

(1) 通过成员的相互配合提高任务完成的质量。多无人机在作战过程中相互配合,可以提高任务完成的质量并降低风险。



(2) 通过系统内的动态分配与调度增加任务成功的概率。多无人机协同执行任务,当一架无人机被击毁或者出现故障时,导致该无人机无法继续执行原有任务时,该无人机的任务可以动态分配给其他无人机,其他无人机仍可以完成既定任务。

(3) 通过成员间的资源共享扩展执行任务的能力。单架无人机的能力有限,但多架不同能力的无人机通过合作可以具备完成复杂作战任务的能力。

(4) 通过任务的并行执行缩短任务完成的时间。多架无人机在任务执行过程中通过分工协作并行执行任务,可以缩短任务完成的时间,提高任务完成的效率,例如,多架无人机对某一作战区域进行协同搜索,其效率远大于单架无人机独立进行搜索。

随着通信和智能软件等技术的发展,有关无人机协同作战的研究越来越受到关注。多无人机组成的编队协同执行一项任务,可以很好地实现优势互补,充分发挥各无人机的优势,提高战斗力。在这一过程中,多无人机间的有效协同是提升整体作战效能的关键,而协同体系结构和系统则是协同的基础。

### 1.1.2 无人机自主能力发展需求

当前的无人机系统自主能力较低,其使用依赖于高度频繁的人机交互,执行任务时必须由人通过数据链路进行操作和控制,以确保完成任务和使用安全,以致从2009年开始,美国空军将现在在役的无人机称为“遥控驾驶机”,以与未来高度自主的真正的“无人机系统”区别。

无人机系统的自主控制是指在不确定的环境中,在不需要人的干预条件下,系统通过在线环境感知和信息处理,自主生成优化的控制策略,完成各种战役和战术任务,并且具有快速而有效的任务自适应能力。这其中的系统可能是单架无人机系统,也可能是多架同构或异构无人机组成的大系统,因此,多无人机协同是无人机系统自主能力的一个重要体现,是更高层次的自主。

为了衡量无人机系统的自主水平,需要对自主能力进行合理的等级划分。Ziegler<sup>[1]</sup>将自主分为3级,分别是:①实现所描述目标的能力;②适应主要环境变化的能力;③发展自我目标的能力。美国国防部在《无人机系统路线图2005—2030》<sup>[2]</sup>中提出了自主等级划分方法,较多地考虑单平台自主到多平台协同的自主水平的时序发展方向。美国空军研究实验室按照OODA(Observe - Orient - Decide - Act,观察—判断—决策—执行)模型确立了无人机系统自主控制等级(Autonomous Control Level, ACL)<sup>[3-5]</sup>,分为遥控驾驶平台(0级)、执行预先规划任务(1级)、可变任务(2级)、实时故障/事件的鲁棒响应(3级)、故障/事件自适应平台(4级)、实时多平台协调(5级)、实时多平台协

同(6级)、战场认识(7级)、战场认知(8级)、战场集群认知(9级)、完全自主(10级)11个等级,各个等级对无人机系统的OODA基本要素提出了不同的需求。ACL在美国空军得到较广泛应用,现有无人机包括“全球鹰”“捕食者”在内的大多数较先进的无人机系统仍处于其中的第2~3级,即无人机的控制主要以程序控制和人在回路的控制为主,其职能自主程度还比较低,尚不具备多无人机协同能力。

在国内,国防科技大学有课题组建立了协同OODA模型(Co-OODA)<sup>[6]</sup>。无人机系统在完成自身OODA决策循环的同时,还考虑到与操作员之间的交互过程以及与其他作战单元之间的协同过程,即增加了OODA模型对协同和交互性能的描述,将人机交互、协同观测、协同分析、协同决策以及协同行动能力纳入自主性能度量之中,以更完备地描述无人机系统自主能力。该模型通过任务情况、环境情况以及人机交互情况3方面要素对该模型的各个度量要素进行映射,明确任务能力对系统各个方面的能力需求,以感知与认知、分析与判断、规划与决策、协同与交互以及执行性能5个度量依据细化无人机自主控制等级划分,如表1-1所列。

表1-1 基于Co-OODA的无人机系统自主控制等级

等级	任务能力	感知与认知	分析与判断	规划与决策	协同与交互	执行性能
7	完全自主	认知所有战场元素;识别战略意图	按需协调	独立决策	自组织	群组在没有监督协助下完成战略目标
6	战场认知	作战单元间数据融合;协同跟踪;自动目标识别;战术意图推理	战略群组目标分配;从经验中学习	分布式战术群组规划	分布式协同;系统级交互	群组在最小的监督协助下完成战略目标
5	多机协同	平台间相似数据融合;有限范围跟踪;目标状态感知	战术群组目标分配	多平台协同航迹规划	实时多平台协同;单体级交互	群组在最小的监督协助下完成战术目标
4	多机协调	局部数据融合;结合世界模型数据库局部感知	战术群组计划指派;故障诊断与预测;群组资源管理	机载航迹重规划;交战规则选定	实时多平台协调/避碰;监督控制	群组完成外部指派的战术计划(小空域间隔)
3	实时自适应	健康/状态感知;基本战场感知	战术计划指派;状态与任务能力评估;资源管理与冲突消解	机载航迹重规划;交战规则选定	监督控制	独立完成外部指派的战术计划(中等空域间隔)

(续)

等级	任务能力	感知与认知	分析与判断	规划与决策	协同与交互	执行性能
2	离线重规划	健康/状态感知;基本战场感知	实时健康诊断	依据状态离线重规划	程序控制	独自完成外部指派战术计划
1	预先规划	飞控和导航感知	飞行自检	中止规划	程序控制	大空域间隔飞行
0	远程遥控	飞控感知	遥测数据	无	手动控制	远程遥控

## 1.2 多无人机协同作战的概念与现状

### 1.2.1 多无人机协同作战的概念

“协同作战”这个概念属于现代军事学的范畴,也是现代战争中必须贯彻的原则之一。在古代,虽然还没有产生现代意义上的“协同动作”这一概念,也没有这一专业术语,但是早已经有了相互合作作战的行动和相关论述。例如,《孙子兵法·九地》篇云:“故善用兵者,譬如率然;率然者,常山之蛇也。击其首则尾至,击其尾则首至,击其中则首尾俱至。”强调了作战中各部队通过协调一致的行动,形成对敌方的有利态势,进而击败敌军。《中国人民解放军军语》对“协同动作”的定义是:“各军兵种、专业兵和专业部队之间,为执行共同的作战任务,按照战斗的目标、时间和地点,协调一致地行动。”<sup>[7]</sup>

协同在多机器人系统中已经不是一个新概念。Cao 在 1997 年对协同行为作了如下定义:给定预先定义的任务,如果由于某些内在的机制(即“协同机制”),整个多机器人系统的效能能够提升,则称该系统呈现协同行为。在此定义中,协同概念的本质在于能够实现系统的性能提升<sup>[8]</sup>。2000 年 12 月,由美国空军研究实验室(AFRL)和佛罗里达大学联合举行了第一届协同控制和优化研讨会<sup>[9]</sup>,该会议定义协同系统是由多个动态实体组成的系统,这些实体通过共享信息或者任务来实现一个共同的(可能不是一个)目标。通常认为:协同系统的效能大于单个个体的效能。协同系统主要有以下几方面的特点:

(1) 信息的高度共享。信息共享是为了最大限度地发挥协同系统中实体本身的价值,并利用信息创造新的价值。信息共享是协同系统提高整体效能的基础。

(2) 任务的高度整合。尽管每项任务从属于协同系统中的不同实体,但本

质上来说它们都是紧密关联的,系统需要对各个任务进行充分的整合以使所有的任务能够协调和平滑运作,任务上的耦合性使这些实体构成了一个协同系统。

(3) 资源的高度优化。当协同系统实现了信息共享和任务整合后,才能使系统中的各项资源突破各种壁垒和障碍,在统一管理和协调下为实现系统共同的目标而服务。

在人的最少干预下,共同执行作战任务的多架无人机就是一个典型的协同系统——多无人机协同系统。概括起来,现代战争中的多无人机协同作战,就是把单个战机作为独立单元,各个作战无人机相互之间运用系统功能组成进行信息融合、协同搜索、目标分配等,进行协调一致的行动,利用各种机载武器,实现对敌目标的打击,完成作战任务。多无人机协同的作战应用方式一般包括协同感应、协同干扰、定时攻击和协同攻击,其作战优势可以从以下几方面来说明:

(1) 协同感应。单架无人机的雷达只能提供目标的方位角信息,若是3架或更多架无人机组成的编队则可通过合作对目标进行多方向多角度测量,获得更多信息。

(2) 协同干扰。单架无人机只能干扰敌方雷达辐射面的一部分,而无人机编队则可通过调整飞行路线和干扰信号,干扰敌方雷达的整个辐射面。

(3) 定时攻击。在压制敌方火力时,攻击时间对敌方的突袭性、无人机的生存概率和攻击的致命性非常重要。定时攻击可能需要某几架无人机在某预定时刻到达某处。由于目标和威胁的一些不确定性,使得无人机编队进行协同飞行时,满足同时到达目标这个要求变得很困难,这就要求航线规划要具有很好的实时性和协同性。

(4) 协同攻击。这种任务的目的是搜寻并击毁运动目标。无人机编队在敌方区域内大范围搜寻,一旦发现目标,其中几架无人机对目标进行协同测量,确定目标的位置,余下的几架无人机协同攻击目标。

(5) 任务重新分配。多无人机协同执行任务时,若一架无人机被摧毁,则规划系统可以重新分配任务,增加任务成功的概率。

(6) 提高生存概率。多无人机可以通过成员之间的配合来提高作战任务完成的质量并降低风险,例如,实施战术欺骗诱使敌方雷达开机时,不同的无人机在不同时间、位置进行欺骗可以更高效地完成战术欺骗目标以及降低每架无人机的风险,从而提高了生存概率。

### 1.2.2 多无人机自主协同控制研究现状

多无人机自主协同控制就是以多无人机协同系统为研究对象,在高度非结

构化、不确定性的环境中,无需或最少人工干预,以集中/分布的方式选择和协调多个混合平台之间的行为来完成一个共同的目标,使多无人机协同系统通过协同获得比相互独立设计单架无人机的控制算法更有效的工作能力<sup>[10]</sup>。

多无人机自主协同控制问题可详细描述为<sup>[11]</sup>:一组位于单个基地或者多个基地的无人机,每架无人机都有其固有的动态特性、机载计算机、传感器、发射机以及执行器等硬件。在无人机执行任务之前,假设已经获得一定层次的信息,如成员数目、环境、空域等信息。给定预先定义的一个整体目标列表,这些目标需要以一定的顺序,在一定的约束条件下(包括时间、位置、燃料消耗约束等)执行,另外,目标信息还需包含每架无人机上机载设备内嵌的关于环境和其他无人机的有限知识。为了保证成功完成系统任务,自主协同控制问题研究对多架无人机进行合适的任务分配以及航线和动作规划(如路径规划、轨迹生成、底层指令),该分配和规划在某种意义上是最优的(如对静态和动态障碍的规避),并且能够应对各种扰动和不确定性(如每架无人机能够获取有限的信息)。

国外针对多无人机协同侦察、协同搜索、目标跟踪、目标定位、目标攻击以及编队控制等特定的作战任务背景,已经开展了大量多无人机自主协同控制方面的研究项目。

美国国防部高级研究计划局(DARPA)主导的自治编队混合主动控制项目(Mix Initiative Control of Automata—teams, MICA)<sup>[12,13]</sup>,对无人机自主协同作战中的多项关键技术进行了研究,包括分层控制结构、自主编队控制理论与算法,以及建模与仿真技术,其研究目标是提高无人机的自主与协同控制能力,实现较少的操作员对大规模无人机编队的控制。DARPA主导的广域搜索弹药项目中(Wide Area Search Munitions, WASM)<sup>[14-16]</sup>,美国空军研究室和空军技术学院(Air Force Institute of Technology, AFIT)以多无人机广域搜索/打击一体化任务为研究背景,提出了多无人机协同控制的分层分布式体系结构,将问题分解为编队间任务分配、编队内任务协调、多机航迹规划和轨迹优化4个层次的内容,这种问题分解方式使得无人机能够针对复杂任务实现层次化协调,极大减小了在线计算负载。该项目还建立了Multi UAV2协同控制仿真环境,并针对多无人机广域目标搜索、协同任务分配、协同目标攻击、航迹规划等问题开展深入研究,取得了一系列成果。

由麻省理工学院、科内尔大学、加利福尼亚州理工大学和加利福尼亚州大学洛杉矶分校4所大学联合研究的MURI项目中提出<sup>[17,18]</sup>,在未来大规模网络化环境下,自主无人机的分布式协同控制将面临的挑战包括:无中心信息处理、无中心决策、受限通信、大规模平台、不确定性环境和突发敌对威胁,其目标是研究

分布式协同控制和决策方法克服上述挑战,实现多无人机系统复杂、自适应和灵活的行为。为此,各大学分别对分布式多无人机系统控制中的底层路径规划、中层编队决策、高层资源管理以及网络通信方面开展合作研究。

由美国陆军航空并应用技术管理局(Aviation Applied Technology Directorate, AATD)发起的无人机自主协同作战项目(Unmanned Autonomous Collaborative Operations, UACO)<sup>[19,20]</sup>,旨在对执行指定任务的联网无人机编队的协同作战性能进行研究和论证,其最终目标是应用先进的协同作战技术,以最少的人工干预使无人机群协作完成任务。AATD 为该项目确定了4项性能,包括协同侦察/警戒、确立多个最佳观测点、通信网络适配性以及部件发生故障时无人机群内部的相应调整。

欧盟委员会 IST 计划资助的多异构无人机实时协同和控制项目(Real Time Coordination and control of Multiple heterogeneous unmanned aerial vehicles, COMETS)<sup>[21,22]</sup>,是欧洲民用领域第一个试验验证多异构无人机协同的项目。该项目针对包括无人直升机和无人飞艇等多类异构平台组成的协同探测和监视系统,研究了多个异构平台的实时协调与控制问题,包括分布式控制体系结构设计、无人直升机/无人飞艇的自主控制技术,分布式信息感知和实时图像处理等技术,已经在森林火灾等任务中完成了关键技术的演示验证。从2011年开始,欧盟委员会 ICT 计划启动 EC - SAFEMOBIL 项目<sup>[3]</sup>,针对高动态固定翼和旋翼无人机平台的复杂行为,开发新的估计/预测和协同控制技术,实现跟踪多个地面目标时的分布式安全可靠的协同与协调,并研究多机自动感知与规避技术,以及两类无人机在固定和移动平台上的精确着陆问题。另一个资助项目 AR-CAS<sup>[4,5]</sup>主要针对空中机器人的运送和装备过程,研究协同感知、规则、运动控制和体系结构等问题。

澳大利亚的自主导航和环境感知研究项目(Autonomous Navigation and Sensing Experimental Research, ANSER)<sup>[23,24]</sup>,针对多无人机协同控制中的分布式信息融合、协作目标跟踪、同步定位与地图构建等问题开展了较深入的研究,并在小型无人机平台上进行了试验验证。

2010年6月,波音公司承担了 AFRL 的多架小型无人机协同控制验证 Fox-hunt 项目<sup>[25]</sup>,研究空中任务控制站指挥下多架小型无人机如何协调作战,安全有效地完成任务,验证控制多达8架无人机执行协同感知和协同作战的能力,研究重点包括控制站体系结构、多任务规划及指挥控制技术。

从多无人机自主协同控制相关项目的研究情况来看,近年来该领域得到了蓬勃的发展并取得了丰硕的研究成果,研究内容涵盖了系统架构、分布式信息融合、多平台优化和决策以及图像处理等多个方面。

目前,较常用的研究思路主要包括自顶向下和自底向上两种<sup>[26]</sup>。在自顶向下的研究方面,主要基于分层递阶求解的思路,已成为主流方法,有效地降低问题求解难度。它将多无人机自主协同控制问题划分为任务分配、航迹规划和编队控制等多个层次,然后针对每个层次的问题,结合无人机的系统特性和任务要求,建立子问题的数学模型,并研究合适的求解方法和子问题间的协调问题。在自底向上的研究方面,目前主要有基于多 Agent 方法的自主协同控制策略,强调个体对环境的感知、判断、决策和动态反应,以及多个 Agent 个体之间基于规则的行为协调。

### 1. 基于分层递阶方法的多无人机协同控制

研究发现,采用分层递阶结构的思想来分解问题,是解决多无人机自主协同控制和决策中的复杂性的有效手段。美国 AFRL 的 Philip R. Chandler 等提出了多无人机协同控制的分层递阶结构,包括 3 个决策层和 1 个控制层。第 3 层基于市场机制进行编队间任务分配,第 2 层对编队内成员间的协同任务进行协调,包括协同搜索、协同攻击、协同毁伤评估等,第 1 层负责任务的执行和航迹规划,第 0 层为平台的控制层<sup>[23]</sup>。

从具体功能上来看,多无人机自主协同控制技术可分为多无人机任务分配、多无人机航迹规划、多无人机编队控制等,其分层递阶结构如图 1-1 所示。

国内外针对多无人机协同侦察、协同搜索、目标跟踪、目标定位、目标攻击以及编队控制等特定的作战任务背景,已经开展了大量多无人机协同控制方面的研究项目<sup>[24-46]</sup>。

### 2. 基于群集智能的多无人机协同控制

不同于分层递阶结构的这种自顶向下解决方案,基于群集智能的体系结构采用自底向上的解决方案,更加强调个体对环境的动态反应,以及多个个体之间基于规则的行为协调。显然,这类协调方法是一种分布式协调方法。

基于群集智能的协同体系结构最初起源于对昆虫群落的行为研究,并逐渐发展形成了群集智能理论。这类体系结构通过模拟蜂群、蚁群、鸟群、鱼群等生物群体的行为,实现多无人机分布式自组织控制,采用自底向上的数据驱动和建模策略,将简单对象构成大集合,通过简单智能主体的聚集协同,来实现全局的智能行为,具有计算简单、鲁棒性好等优点。在群集智能理论基础之上,分布式计算和人工智能等交叉领域促进并形成了一个崭新研究领域——多智能体系统一致性理论,主要研究在没有组织者和协调者情况下,如何通过个体对环境的动态反应以及多个个体之间简单协调,而涌现出整体行为的一致。在很多文献中,智能体通常用于表示生物群体系统中的个体,因而多智能体一致性理论也可称为群体系统一致性理论。在具体应用中,智能体可以是无人机、地面移动机器人

或无线传感器节点等运动单元。分布式一致性理论具有无中心控制节点、局部信息交换和简单行为协调的特点,实际上已在多无人机融合估计、多无人机协同决策、多无人机编队控制,以及多无人机蜂拥和聚集等多个领域得到了广泛应用<sup>[47-57]</sup>。

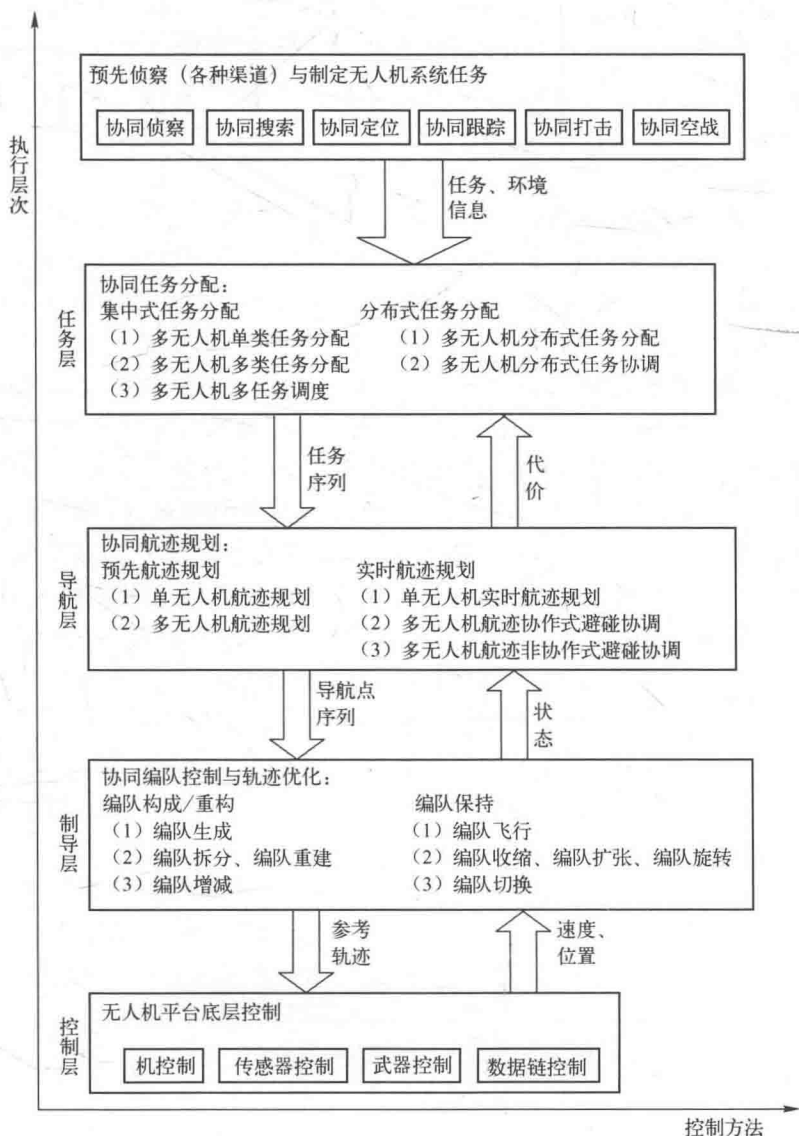


图 1-1 多无人机自主协同控制的分层递阶结构



相对国外而言,国内在多无人机自主协同控制领域的研究起步较晚,通过近几年的努力,国内相关研究机构如国防科技大学、西北工业大学、北京航空航天大学、南京航空航天大学、华中科技大学等单位在基于分层递阶方法的多无人机自主协同控制技术和基于群集智能体系结构的多无人机协同控制研究都取得了广泛的成果。但受到现有技术条件的限制,整体研究基本处于起步阶段,相比国外的研究,我国在多无人机自主协同控制的概念研究、系统设计、理论方法、实际应用等方面都存在一定差距。

### 1.2.3 多无人机控制系统体系结构研究现状

多无人机控制系统体系结构旨在刻画各无人机之间的连接,揭示多无人机系统中的信息和控制关系,反映系统中信息的存储和共享方式、问题求解能力的分布模式等。其基本的体系结构有集中式结构、分布式结构和集散式结构3种模式。

#### 1.2.3.1 集中式结构

集中式结构如图1-2所示,其特点是有唯一的中央控制节点,图中描述了完全集中式的体系结构。在这种组织模式下,中央控制节点具有极强的决策能力和权威,控制着全局数据的一致性和所有的决策权,与其他无人机之间存在着一种主从关系。集中式结构下的多无人机的协同主要表现为控制站对无人机的任务控制,即控制站在无人机任务执行过程中对其飞行、通信、载荷和任务等多个层面进行有效监管、指挥和控制。这种结构的优点是,可以降低系统的复杂性,减少各无人机间由于协商产生的通信开销。缺点是,对中央控制节点的要求很高,如果系统中无人机的行为比较复杂,或者无人机的数目比较多,那么得出一个全局一致的行为规划,并指挥各无人机执行任务是极为困难的。集中式结构下多无人机协同任务控制系统需要满足如下条件:



图1-2 集中式结构

(1) 控制站和无人机之间良好的互联、互通、互操作。控制站能够传输作战指令、控制命令给无人机,必要时还可以控制无人机的飞行。无人机能够将情报数据、态势信息和任务状态信息及时反馈给控制站。