



陕西出版资金精品项目




国之重器出版工程  
国防现代化建设

无人机系统研究与应用丛书

UAV Swarms

# 无人机集群

梁晓龙 张佳强 吕娜  著



中国工信出版集团 西北工业大学出版社



无人机系统研究  
与应用出版工程



国之重器出版工程  
国防现代化建设



# 无人机集群

Wu Ren Ji Ji Qun

梁晓龙 张佳强 吕娜 著



西北工业大学出版社

西安

**【内容简介】** 本书从理论与实践结合的角度,系统地介绍无人机集群系统构建、任务分配、集群控制、通信网络等方面的基本理论与方法。全书共分为5章。第1章介绍无人机集群的发展现状及应用;第2章阐述无人机集群体系结构与系统构建/重构方法;第3章介绍无人机集群任务分配数学模型、求解算法及集中式/分布式任务分配方法;第4章介绍无人机集群控制关键技术与典型控制方法;第5章介绍无人机集群信息网络及其MAC协议、路由协议等关键技术。

本书可作为高等院校无人机系统及相关专业的本科生教材,也可供从事无人机集群任务系统、集群控制及通信网络研究的科技人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

无人机集群/梁晓龙,张佳强,吕娜著. —西安:  
西北工业大学出版社,2018.5  
(无人机系统研究与应用丛书)  
国之重器出版工程  
ISBN 978-7-5612-5755-5

I.①无… II.①梁… ②张… ③吕… III.①无人  
驾驶飞机 IV.①V279

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第304161号

### WURENJI JIQUN

策划编辑:肖亚辉

责任编辑:李阿盟

出版:西北工业大学出版社  
通信地址:西安市友谊西路127号 邮编:710072  
电话:(029)88493844 88491757  
网址:www.nwpu.com  
印刷者:固安县铭成印刷有限公司  
开本:710mm×1000mm 1/16  
印张:18.25  
字数:320千字  
版次:2018年5月第1版 2018年5月第1次印刷  
定价:88.00元



# 《国之重器出版工程》

## 编辑委员会

编辑委员会主任：苗 圩

编辑委员会副主任：刘利华 辛国斌

编辑委员会委员：

冯长辉 梁志峰 高东升 姜子琨 许科敏

陈 因 郑立新 马向晖 高云虎 金 鑫

李 巍 李 东 高延敏 何 琼 刁石京

谢少锋 闻 库 韩 夏 赵志国 谢远生

赵永红 韩占武 刘 多 尹丽波 赵 波

卢 山 徐惠彬 赵长禄 周 玉 姚 郁

张 炜 聂 宏 付梦印 季仲华



专家委员会委员(按姓氏笔画排列):

- 于 全 中国工程院院士
- 王少萍 “长江学者奖励计划”特聘教授
- 王建民 清华大学软件学院院长
- 王哲荣 中国工程院院士
- 王 越 中国科学院院士、中国工程院院士
- 尤肖虎 “长江学者奖励计划”特聘教授
- 邓宗全 中国工程院院士
- 甘晓华 中国工程院院士
- 叶培建 中国科学院院士
- 朱英富 中国工程院院士
- 朵英贤 中国工程院院士
- 邬贺铨 中国工程院院士
- 刘大响 中国工程院院士
- 刘怡昕 中国工程院院士
- 刘韵洁 中国工程院院士
- 孙逢春 中国工程院院士
- 苏彦庆 “长江学者奖励计划”特聘教授



- 苏哲子 中国工程院院士
- 李伯虎 中国工程院院士
- 李应红 中国科学院院士
- 李新亚 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、中国  
机械工业联合会副会长
- 杨德森 中国工程院院士
- 张宏科 北京交通大学下一代互联网互联设备国家工  
程实验室主任
- 陆建勋 中国工程院院士
- 陆燕荪 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、原机  
械工业部副部长
- 陈一坚 中国工程院院士
- 陈懋章 中国工程院院士
- 金东寒 中国工程院院士
- 周立伟 中国工程院院士
- 郑纬民 中国计算机学会原理事长
- 郑建华 中国科学院院士



- 屈贤明** 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、工业和信息化部智能制造专家咨询委员会副主任
- 项昌乐** “长江学者奖励计划”特聘教授,中国科协书记处书记,北京理工大学党委副书记、副校长
- 柳百成** 中国工程院院士
- 闻雪友** 中国工程院院士
- 徐德民** 中国工程院院士
- 唐长红** 中国工程院院士
- 黄卫东** “长江学者奖励计划”特聘教授
- 黄先祥** 中国工程院院士
- 黄 维** 中国科学院院士、西北工业大学常务副校长
- 董景辰** 工业和信息化部智能制造专家咨询委员会委员
- 焦宗夏** “长江学者奖励计划”特聘教授



在本书写作过程中参考了大量文献,在此向所有参考文献的作者表示衷心的感谢,感谢国家自然科学基金(61472443,61703427)对该研究项目的资助。同时感谢西北工业大学出版社,感谢他们的耐心指导和辛勤工作。

由于水平有限,加之本领域可提供借鉴的专著鲜见,所开展的研究尚处于起步阶段,因此,书中的不足之处在所难免,真诚希望各位专家学者提出宝贵意见,不吝赐教。

作 者

2017 年 10 月





# 目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 无人机集群概念	2
1.1.1 无人机集群定义	2
1.1.2 无人机集群产生背景	2
1.2 无人机集群发展现状	3
1.2.1 无人机集群技术优势	3
1.2.2 多无人机协同技术研究现状	4
1.3 无人机集群在民用领域的应用	12
1.3.1 市场分析	12
1.3.2 无人机集群应用领域分类	12
1.4 无人机集群在军事领域的应用	29
1.4.1 国外军用无人机集群研究项目	29
1.4.2 国内军用无人机集群研究项目	32
1.5 本章小结	32
参考文献	33
第 2 章 无人机集群体系结构	39
2.1 无人机集群系统简介	40



2.1.1	集群功能	40
2.1.2	集群属性	41
2.1.3	集群行为	43
2.1.4	任务过程	46
2.1.5	关键技术	48
2.2	无人机集群体系结构简介	50
2.2.1	概念	50
2.2.2	研究概况	57
2.2.3	功能层次	59
2.3	无人机集群系统构建方法	60
2.3.1	基本思路	60
2.3.2	研究方法	62
2.3.3	集群规则抽象与归纳	78
2.3.4	基于 Multi-Agent 的无人机集群体系结构	78
2.4	无人机集群系统重构机制	83
2.4.1	重构理论	83
2.4.2	重构方法	87
2.4.3	任务子系统重构过程	88
2.5	无人机集群体系能力评估	90
2.6	本章小结	92
	参考文献	92
<b>第 3 章</b>	<b>无人机集群任务分配</b>	<b>99</b>
3.1	无人机集群的任务	100
3.2	无人机集群任务分配问题描述	102
3.2.1	无人机集群任务分配特点及原则	103
3.2.2	无人机集群任务分配中的约束条件	104
3.2.3	解决无人机集群任务分配问题的步骤	105
3.3	无人机集群任务分配模型及控制结构	105
3.3.1	无人机集群任务分配模型分类	105
3.3.2	无人机集群任务分配控制体系结构	109
3.4	无人机集群任务分配算法	113



3.4.1	静态任务分配算法 .....	113
3.4.2	动态环境中多任务重分配算法 .....	119
3.4.3	其他任务分配算法 .....	124
3.4.4	算法研究存在的不足 .....	126
3.5	集中式无人机集群任务分配 .....	127
3.5.1	静态环境下无人机集群任务分配 .....	128
3.5.2	动态环境下无人机集群任务分配 .....	136
3.6	分布式无人机集群任务分配 .....	143
3.6.1	基于 Agent 协商的无人机集群任务分配 .....	144
3.6.2	多异构无人机覆盖搜索任务区域分配 .....	150
3.7	本章小结 .....	156
	参考文献 .....	156
<b>第 4 章</b>	<b>无人机集群控制系统及方法 .....</b>	<b>159</b>
4.1	无人机集群控制的关键技术 .....	160
4.1.1	无人机控制技术的发展和现状 .....	160
4.1.2	自主飞行控制 .....	162
4.1.3	仿生控制技术 .....	166
4.1.4	集群控制技术 .....	167
4.2	无人机集群队形 .....	172
4.2.1	集群动力学建模 .....	172
4.2.2	无人机集群队形设计 .....	179
4.2.3	集群队形的动态调整 .....	181
4.3	无人机集群飞行控制系统 .....	185
4.3.1	无人机飞行控制系统 .....	185
4.3.2	无人机集群飞行控制系统 .....	189
4.4	无人机集群飞行控制方法 .....	193
4.4.1	基于“长机-僚机”方式的集群控制 .....	193
4.4.2	基于虚拟方式的集群控制 .....	197
4.4.3	基于行为方式的集群控制 .....	199
4.4.4	基于自组织方法的集群控制 .....	202
4.4.5	其他集群控制方法 .....	203



4.5 本章小结 .....	203
参考文献 .....	204
<b>第 5 章 无人机集群信息网络 .....</b>	<b>214</b>
5.1 无人机集群网络 .....	215
5.1.1 无人机集群网络化趋势 .....	215
5.1.2 无人机集群的组网 .....	217
5.2 移动 Ad Hoc 网络 .....	223
5.2.1 移动 Ad Hoc 网络 .....	225
5.2.2 网络的特点 .....	227
5.2.3 网络的拓扑结构 .....	228
5.2.4 网络的体系结构 .....	231
5.2.5 与现有无线网络的对比 .....	233
5.2.6 网络的关键技术 .....	235
5.2.7 无人机集群网络 Ad Hoc 网络特点 .....	238
5.3 移动 Ad Hoc 网络的 MAC 协议 .....	240
5.3.1 关键研究问题 .....	240
5.3.2 MAC 协议类型 .....	244
5.3.3 随机接入类 MAC 协议 .....	246
5.3.4 预约接入类 MAC 协议 .....	252
5.3.5 多信道 MAC 协议 .....	262
5.4 移动 Ad Hoc 网络的路由协议 .....	267
5.4.1 路由协议设计需求 .....	267
5.4.2 路由协议类型 .....	268
5.5 本章小结 .....	272
参考文献 .....	272



第1章  
绪论





## | 1.1 无人机集群概念 |

### 1.1.1 无人机集群定义

无人机集群由一定数量的单功能和多功能无人航空飞行器共同组成,在交感网络的支撑下,节点之间进行信息交互与反馈、激励与响应等交感行为。集群整体具有能力涌现的特点,可实现单个平台行为自主决策、平台间行为协同,最终产生能力涌现的自主式空中移动系统。

无人机集群不是多航空器平台的简单编队,其集群能力也不是诸多平台单一能力的简单叠加,而是由多航空器平台通过科学的方法聚集后,经过集群自组织机制与行为调控机制的有机耦合,产生了新的能力或原有能力发生了质的变化。

### 1.1.2 无人机集群产生背景

面对日益复杂的应用环境和多样化的需求,无人机受其自身软、硬件条件的限制,仍有某些局限性<sup>[1]</sup>。例如对单架无人机而言,其自身的燃料、质量和尺寸起着重要的限制作用,无法形成持续有力的打击力度;受机载传感器以及通信设



备的限制,单架无人机也无法实现对任务区域的多维度、大范围覆盖;当执行高风险任务时,单架无人机可能因为受到攻击或自身故障而失效,从而导致任务系统容错性不足等。

为弥补单架无人机的局限性,美国空军科学顾问委员会指出,无人机应当以集群的方式协同工作,而不是单独行动。在未来很多应用背景中,无人机将体现出多机协同工作的特点。即由多架相同或不同型号的无人机组成无人机集群,协同作业,共同完成任务。这样,既能最大地发挥无人机的优势,又能避免由于单架无人机执行任务效果不佳或失败造成的不良后果,提高任务执行效率,拓展新的任务执行方式,从而达到提高系统可靠性、改善任务执行效果的目的。

## | 1.2 无人机集群发展现状 |

### 1.2.1 无人机集群技术优势

无人机集群的初级阶段即多无人机协同。多无人机协同工作的优势主要来源于信息融合和资源互补两个方面<sup>[2]</sup>。在多机并行执行任务过程中,每架无人机收集到的信息都是其各自位置上的局部信息,无人机集群中所有成员的信息融合成全局态势信息,提供给决策系统进行多机系统内的任务分工与调度,以提高任务的执行效率;且当某个成员失效时,能及时更新系统信息,动态调整系统成员间的执行状况,从而提高系统的可靠性和容错性,满足任务的时间、空间与指标优化等要求,达到资源和功能互补的效果,如对同一个目标依序执行确认、攻击和毁伤评估任务,对同一个目标执行同时性的多角度跟踪任务等。

要指派多架无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)协同执行一项任务,提高任务的效能,就离不开合理高效的协同控制手段,必须对多机系统进行合理的协同任务规划。它是对多 UAV 协同执行任务进行研究的核心理论,涉及控制理论、运筹学、决策理论、图论、信息论、系统论、计算机科学、人工智能、通信理论等多个学科领域。

在实际任务的执行中,受 UAV、任务要求和环境因素等的影响与制约,对多 UAV 进行协同控制是一个极其复杂、极具挑战性的过程。其复杂性主要体现在以下几方面:

(1)任务环境的复杂性。复杂的对抗性的动态环境,可能包含多种既有的和突发的威胁、障碍、极端天气等,而且 UAV 与系统可能无法获知或无法及时获

知环境的全局信息及其变化。

(2) 无人机集群成员间的差异。UAV 数量有差异, 以及不同 UAV 间存在运动学与动力学特性、功能、信息收集与处理和通信能力等的差异, 而且无人机可能在任务执行过程中失效等。

(3) 任务需求的复杂性。不同的任务具有不同的要求, 其在作战目标、时序约束、时间敏感性约束、任务间耦合约束、任务指标等各个方面均可能存在差异, 而且作战目标还可能存在着不确定性, 如移动目标、目标参数不确定等问题。

(4) 计算复杂性。在进行协同任务规划问题研究时, 不可避免地会碰到一个 NP 难题, 即随着问题规模的线性增长, 如无人机数量、目标数量等, 问题的解空间呈指数级的爆炸式扩张。当问题规模增大时, 从这个庞大的解空间中找到最优解需要大量的计算, 非常困难。当任务的实时性要求较高时, 这个矛盾会更突出, 甚至会直接影响协同任务的执行效果。

(5) 通信约束的复杂化。任务环境的复杂多变必然会对 UAV 集群的通信网络造成影响, 如通信拓扑结构变化、带宽受限、通信干扰、通信延时等, 甚至可能会出现虚假通信等问题, 再考虑到 UAV 本身的通信设备性能限制, 如通信距离和带宽等, 以及某些任务可能会要求通信尽可能地少。这些极大地增加了多机协同问题的复杂程度。

作为无人机技术发展的一个重要趋势, 多 UAV 协同控制方面的研究成为学术界的研究热点之一。美国军方对此极为重视<sup>[3-4]</sup>, 已经被美国空军科学研究所列为六大基础研究课题之一。

## 1.2.2 多无人机协同技术研究现状

(1) 国外研究现状。为探索多无人机协同工作的理论与实现机理, 国外已经开展了大量相关的研究项目。其中具有代表性的是美国国防部高级研究计划局 (DARPA) 牵头的自治编队混合主动控制项目 (Mixed Initiative Control of Automata - teams, MICA)<sup>[5-7]</sup>、广域搜索弹药项目 (Wide Area Search Munitions, WASM)<sup>[8]</sup> 和欧洲信息社会技术计划 (Information Society Technologies, IST) 资助的异构无人机群实时协同与控制项目 (Real-time Coordination and Control of Multiple Heterogeneous UAVs, COMETS)<sup>[9]</sup> 等。

MICA 项目对多 UAV 协同作战的多项关键技术进行研究, 目标是探索新的监视和控制手段 (即自主协同控制方法), 以使人能更好地参与到战场管理过程中, 实现相对较少的操作人员对大规模无人作战平台编队的控制。其研究课题包括协同任务分配、无人机路径规划、多机协同跟踪、编队控制等多个方面, 参





与团队主要来自麻省理工学院、加州伯克利大学等。WASM项目则以多 UAV 广域搜索与打击任务为背景,采用分层控制与优化的手段对多机协同控制进行研究,并在研究过程中建立了一个 Multi UAV 协同控制仿真平台<sup>[10]</sup>。

欧洲 COMETS 项目是一个多国合作的民用研究项目,其研究对象是一个由包括无人直升机和无人飞艇在内的多平台异构无人机群组成的协同探测与监视系统,研究目标是为该异构多 UAV 设计和实现分布式实时控制系统,集成分布式感知与实时图像处理等技术,并在森林火灾监视任务中对系统的关键技术进行演示验证。该项目的相关结果已经陈列在其官方网站上,最终成果也已经集中出版<sup>[11]</sup>。

从这些研究项目可以看出,多无人机协同控制涉及软硬件及其整合等多个方面,其中一个核心课题就是多无人机协同任务规划问题,它直接决定如何在各个 UAV 个体间进行工作任务的分配和各 UAV 如何执行,以在多种复杂因素影响下最大化系统效率。目前国内外已经有大量以 UAV 协同任务规划问题为主题的学术论文,接下来将主要按照该问题的发展脉络进行综述和分析。

在任何对多无人机协同任务规划的研究中,首先必须明确其研究的任务背景是什么,再根据该任务背景要求进行进一步的分解与细化,形成无人机可以完成的工作,进而根据任务指标并考虑某些因素进行问题建模与求解。协同任务规划问题以多 UAV 系统总体性能最大化或代价最小化为指标,其一般形式为将若干工作指派给多个 UAV 执行。因为现实中存在着极其多样化的任务背景以及复杂的影响因素,目前存在的任务规划方法无不是针对特定的任务背景进行研究的。

由于多无人机协同任务规划问题的复杂性,一般采用分层控制(hierarchical control)的方式将其分解成决策层、协调层、执行层等若干个子问题,再对这些子问题进行求解,从而降低解决这个复杂问题的难度。如 J. D. Boskovic 等人<sup>[12-13]</sup>提出将任务规划问题分解成决策层(decision making layer)、路径规划层(path planning layer)、轨迹生成层(trajjectory generation layer)和内环控制层(inner-loop control layer)等四个层次。其中,决策层负责多 UAV 系统顶层的任务决策、避障、冲突消解、任务重分配和指标评估等;路径层负责任务执行中的运动规划,生成航路点,以引导 UAV 规避威胁、障碍等;轨迹层负责根据 UAV 的状态、输入和初始条件等,为 UAV 生成通过航路点的可飞路径;控制层则保证 UAV 准确地沿着生成的轨迹飞行,并进行一定的冗余管理以降低干扰等因素的影响。A. Tsourdos 等人<sup>[14]</sup>则从多 UAV 协同路径规划的角度将任务规划的层次结构分为机群协同任务规划与分配层、机群协同路径规划层和单机控制层等三个层次。这些研究表明,这类分层控制的思路可以很好地梳理和降低多