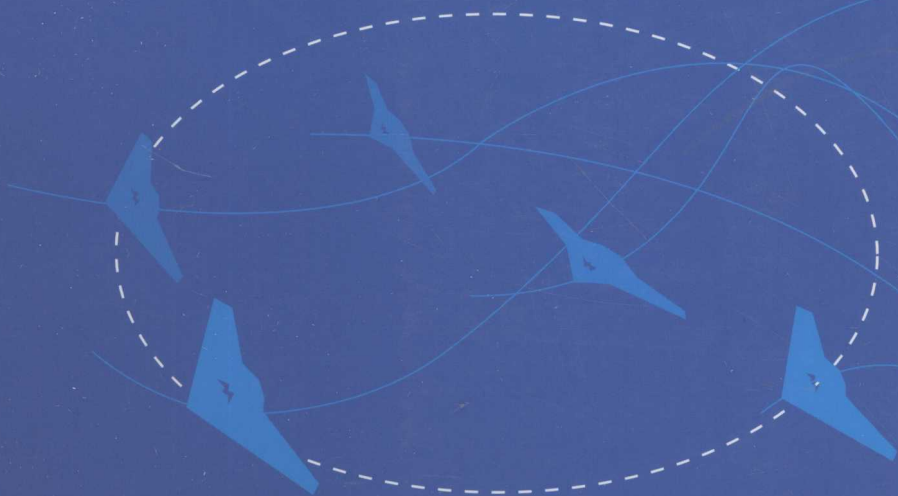


无人机系统自主控制技术丛书

Theories and Methods of  
Autonomous Cooperative Control  
for Multiple UAVs

# 多无人机自主协同 控制理论与方法

沈林成 牛轶峰 朱华勇 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

V279/1015

V279  
1015-1

无人机系统自主控制技术丛书



NJAA2013014076

# 多无人机自主协同控制 理论与方法

沈林成 牛轶峰 朱华勇 著



国防工业出版社

·北京·

2013014076

## 内 容 简 介

无人机系统是目前无人系统领域发展最快、水平最高、实战应用最多的一类空中无人系统。由于战场环境日益复杂,对抗性日益增强,任务日益多样,单机能力受限,多机协同执行作战任务已经成为无人机系统应用的重要发展趋势。通过多机协同实现无人机集群控制,不但可以减轻操作人员负担,而且将使打击变得更加集中,更加持续,更具规模。要实现这一目标必须提高无人机的自主协同控制能力。本书围绕多无人机协同执行作战任务对自主协同控制基础理论与关键技术展开了探讨,主要针对多机协同作战中的环境复杂性、无人机系统复杂性、任务复杂性、时间敏感性、计算复杂性和通信复杂性等特点,对多无人机协同任务分配、协同航迹规划、协同目标状态估计、协同编队航迹优化、协同任务自组织以及典型作战应用等方面阐述,反映了作者在该领域的最新研究工作,具有新颖性、前沿性、理论与应用密切结合的特点。

本书可作为高等学校与科研院所中从事人工智能与模式识别、机器人与智能系统、无人机系统工程等专业领域的研究和教学参考用书,也可作为自动化、计算机、运筹学、信息处理领域其他相关专业师生及科研人员的参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

多无人机自主协同控制理论与方法/沈林成,牛铁峰,朱华  
勇著. —北京:国防工业出版社,2013. 1  
ISBN 978-7-118-08422-1

I. ①多... II. ①沈...②牛...③朱... 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(2012)第 287672 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)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

\*

开本 710×960 1/16 印张 26½ 字数 501 千字

2013 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 60.00 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

无人系统(Unmanned Systems, US)是自动化技术发展的必然产物,无人系统的自主能力代表了自动化技术发展的水平。自动化(Automation)是指由机器代替人所执行的各种信息获取、处理、决策与控制活动。从某种程度上,我们已经开始享用自动化带来的各种便利,小如承担日常劳动,大到高速列车的自动运行等。自动化可以看作系统中一个与人类操作者交互的代理,它有自己的行为,与操作者的精神与行为产生互动,从而影响操作者的工作负荷、态势感知甚至信赖程度。一直以来,提高自动化水平都是系统设计者和操作者努力的对象,无人系统就是在这样的背景下应运而生。无人系统由无人平台、任务载荷和指挥控制系统组成,具有在复杂环境中代替人完成特定任务的能力。无人系统的设计者致力于减少操作者的工作负荷,提高控制精度,实现更优的系统性能,然而,自动化还不够完美,操作者不得不忍受自动化带来的系统失败或事故。究其原因,在于自动化本身只具有系统设计者所信赖的必要能力,不能“思考”,行为能力受限,在出现意外情形、任务变化、行动失败时,系统必然无法有效应对,我们可称之为“静态自动化”。在这种情况下,无人系统需要具有自主能力(Autonomy),能够在各种不确定条件下,不依赖于人,自主实现环境感知、信息处理、任务决策与行为控制,我们可称之为“自适应自动化”。无人系统的控制已经开始从最初用遥控器的完全手动控制,到由操作员通过地面控制站实现预先规划和实时调整的半自主控制,向着自主到达目标,执行特定任务的全自主控制转变。随着无人系统自主能力的提高,其应对复杂环境和执行复杂任务的能力越强,同时操作员对其信赖程度越高,工作负荷越小,系统的自动化水平将会越高。

按照使用区域,无人系统主要包括无人机系统(Unmanned Aerial System, UAS)、地面无入平台(Unmanned Ground Vehicle, UGV)、无人潜航器(Unmanned Undersea Vehicle, UUV)和无人水面艇(Unmanned Surface Vehicle, USV)等。无人机系统是发展最早、发展速度最快、技术最为成熟、技术水平最高,并不断得到实战检验的一个重要研究领域,无人机系统“平台无人”的特性使其可以代替人执行“枯燥的、恶劣的、危险的、纵深的”(Dull, Dirty, Dangerous, Deep, 4D)任务,具有机动性强、适应能力和生存能力高、无人员伤亡风险、制造和维护成本低等优点。目前,无人机系统由保障型向作战型发展,由注重单一平台向网络化智能平台发

展,由自主系统向协同任务自适应自主系统发展。在未来日益复杂的未知环境下,无人机系统的使用模式将由单平台逐步发展为更灵活的多平台(有人/无人、无人/无人)协同操作方式,具有复杂性、分布性、异构性、不一致性等特点,因此,解决多无人机协同侦察、搜索、定位、跟踪和打击等控制问题变得更加困难。

近年来,国内外针对多无人机自主协同控制研究开展了大量的研究,并取得丰硕的研究成果,研究内容涵盖了系统架构、信息融合、任务分配、航迹规划、编队控制、多智能体一致性等多个方面,而复杂环境下分布式多无人机自主协同控制问题日益成为当前无人机领域的研究热点。国内主要研究单位有国防科技大学、西北工业大学、北京航空航天大学、南京航空航天大学以及中科院沈阳自动化所、中航工业集团等科研院所。其中,国防科技大学较早地开展了这方面的研究,在多无人机协同任务分配、多无人机协同航迹规划等方面取得了较大进展,完成了相应的数字仿真、半物理仿真和飞行试验验证,研究成果发表于国内外核心期刊,并被广泛引用,表明研究工作得到国内学术界较高的认可度。同时,部分研究成果已应用于或将应用于我国现役或在研多型无人机的任务控制系统,为提高我国无人机系统作战效能奠定了坚实的基础。

在多无人机自主协同控制的教学方面,目前国内还没有相关的课程,但在自动化专业的“人工智能”、“智能系统”、“机器人控制”、“计算智能”等课程都涉及到相关的研究内容,较为分散。目前,已有院校将无人机系统作为一门课程,并陆续开设了无人机系统的相关专业。因此,如果在多无人机自主协同控制领域将这些各自独立的内容形成体系,梳理相关理论和方法,不但能够使自动化等学科课程体系更加完善,更好地为教学工作服务,而且能够为该领域的研究提供重要参考,带动该研究方向的进一步发展。为此,面向学科前沿,并结合科研实际,我们编写了本书。本书共分7章,具体内容安排如下:

第1章“绪论”概述了多无人机自主协同控制理论与方法的研究进展。将多无人机自主协同控制分为基于分层递阶和基于自组织两种研究方法,并分别从任务分配、航迹规划、编队控制等三个层次和融合估计、协同决策、编队控制和蜂拥集结等4个问题展开阐述。

第2章“多无人机协同任务分配”研究了多无人机协同执行多种多个任务的分配问题。首先研究了用于任务执行阶段之前的集中式任务分配和调度方法,然后研究了面向任务执行阶段的分布式动态任务分配和协调方法。

第3章“多无人机协同航迹规划”研究了多无人机协同执行任务过程中航迹规划问题。首先研究了单机预先和实时航迹规划方法,然后研究了复杂威胁和复杂约束条件下的多机协同航迹规划和分布式避碰航迹协调方法。

第4章“多无人机协同目标状态估计”研究了多无人机协同观测中的目标状态估计问题。重点研究了多无人机对机动目标状态的融合估计、强连通动态拓扑

通信条件下分布式融合估计、复杂受限网络条件下分布式状态估计等关键问题。

第5章“多无人机协同编队轨迹优化”研究了编队控制包括编队构成/重构和编队保持两个主要环节轨迹优化的能量最优控制问题。建立了多无人机编队构成和编队保持的轨迹优化模型,设计了分布式的轨迹优化求解方法,分别开展了仿真试验和飞行试验验证。

第6章“多无人机协同任务自组织”研究了多无人机集群在执行任务过程中的自组织问题。探索了基于群集智能的多无人机任务自组织问题,研究了在全局通信条件下的多无人机区域搜索分布式控制方法和网络约束条件的多无人机任务区集结分布式控制方法。

第7章“多无人机自主协同控制的典型应用”研究了无人机典型使用模式下的自主协同控制问题。以高空长航时战略侦察型无人机、中高空战术无人机和先进无人作战飞机为研究对象,对其在应用中面临的协同侦察、协同跟踪和与有人机协同打击等协同控制问题展开研究,并分别开展了飞行试验验证和半物理仿真。

书中包含了2003年—2011年期间在国防科技大学机电工程与自动化学院十多名博士研究生的工作,他们是叶媛媛(女)、龙涛、田菁(女)、陈岩、霍霄华(女)、李远、苏菲、彭辉、王林、张庆杰等,对于他们所做出的贡献表示衷心感谢!感谢张代兵、吴立珍等在飞行试验和总体设计中所做的工作。在本书编写期间,黄丁才、张庆杰、李杰、纪晓婷(女)、贾圣德等同学不辞辛苦完成有关章节的整理和校对工作,在此一并表示感谢。

由于作者水平的限制,书中难免存在一些问题和不足,欢迎读者批评指正。

沈林成

2012年9月30日于长沙

# 目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 背景与意义	1
1.1.1 军事需求	1
1.1.1.1 无人机系统的发展	1
1.1.1.2 自主能力的发展需求	3
1.1.2 研究意义	7
1.1.2.1 问题定义	7
1.1.2.2 研究挑战	8
1.2 多无人机自主协同控制研究现状	9
1.2.1 国外项目研究概述	9
1.2.2 基于分层递阶方法的多无人机协同控制	15
1.2.2.1 多无人机协同任务分配	15
1.2.2.2 多无人机协同航迹规划	20
1.2.2.3 多无人机协同编队控制	22
1.2.3 基于自组织方法的多无人机协同控制	24
1.2.4 多无人机自主协同控制中的智能优化算法	26
1.2.4.1 智能优化算法概述	27
1.2.4.2 智能优化算法在多无人机自主协同 控制应用框架	29
1.2.4.3 智能优化算法在多无人机自主协同 控制中的应用	30
1.2.5 国内技术研究现状	32
1.2.5.1 基于分层递阶方法的多无人机协同控制	32
1.2.5.2 基于自组织方法的多无人机协同控制	34
1.2.6 多无人机自主协同控制技术展望	35
参考文献	37
第 2 章 多无人机协同任务分配	49
2.1 多无人机集中式任务分配	49

2.1.1	基于多目标整数规划进化算法的多无人机集中式任务分配	49
2.1.1.1	多 UAV 协同任务分配多目标整数规划模型	49
2.1.1.2	多 UAV 协同任务分配 MOIPEA 算法	52
2.1.1.3	基于 MOIPEA 的多 UAV 协同任务分配仿真实验	57
2.1.2	基于异质多种群蚁群算法的多无人机多任务分配	62
2.1.2.1	多无人机多任务分配模型	62
2.1.2.2	多无人机多任务分配异质多种群蚁群算法	65
2.1.2.3	基于 HMACA 的多无人机多任务分配仿真试验	71
2.1.3	基于离散粒子群算法的多无人机任务调度	75
2.1.3.1	多 UAV 任务调度问题建模	75
2.1.3.2	面向多无人机任务调度的 PSO 算法	78
2.1.3.3	基于 PSO 的多无人机任务调度仿真试验	80
2.2	多无人机分布式任务分配与协调	82
2.2.1	基于合同网的多无人机分布式任务分配	82
2.2.1.1	多 UAV 分布式任务分配的合同网模型	82
2.2.1.2	基于多种合同网的任务分配	85
2.2.1.3	多无人机分布式任务分配仿真实验	89
2.2.2	基于条件合同机制的多无人机分布式任务协调	92
2.2.2.1	基于条件合同机制的多 UAV 任务协调	93
2.2.2.2	基于多链接条件合同机制的多 UAV 任务协调	98
2.2.2.3	基于条件合同机制的多无人机任务协调仿真实验	102
2.3	本章小结	106
	参考文献	107
第 3 章	多无人机协同航迹规划	109
3.1	单机快速航迹规划	109
3.1.1	基于 RLACA 的航迹规划 PRM 方法	109
3.1.1.1	无人机航迹规划 PRM 模型	109
3.1.1.2	航迹规划再励学习蚁群算法	113
3.1.1.3	基于 RLACA 的无人机航迹规划仿真实验	118
3.1.2	基于异步双精度滚动窗口的 UAV 实时航迹规划方法	121
3.1.2.1	面向航迹规划的异步双精度滚动窗口优化方法	121



3.1.2.2	求解精细航迹规划问题的 AI - DDPSO 混合 算法 .....	124
3.1.2.3	基于异步双精度滚动窗口的实时航迹 规划仿真试验 .....	129
3.1.3	基于改进 RRT 的 UAV 在线航迹规划方法 .....	132
3.1.3.1	RRT 方法的基本原理 .....	133
3.1.3.2	面向在线航迹规划的 RRT 改进策略 .....	134
3.1.3.3	基于改进 RRT 的 UAV 在线航迹规划 仿真试验 .....	138
3.2	多机协同航迹规划 .....	143
3.2.1	基于 VBCEA 的多机协同航迹规划方法 .....	143
3.2.1.1	基于 V 图的环境建模 .....	143
3.2.1.2	基于 V 图的多 UAV 协同航迹规划共 同进化算法 .....	146
3.2.1.3	基于 VBCEA 的多机协同航迹规划仿真试验 .....	151
3.2.2	基于 CEMACA 的多机多约束协同航迹规划方法 .....	152
3.2.2.1	多机协同航迹规划问题描述 .....	153
3.2.2.2	面向多 UAV 协同航迹规划的共同进化多 种群蚁群算法 .....	155
3.2.2.3	多无人机多约束协同航迹规划仿真试验 .....	159
3.2.3	基于分布式滚动优化的多机避碰航迹协调方法 .....	161
3.2.3.1	多无人机避碰航迹协调问题建模 .....	162
3.2.3.2	基于分布式滚动优化的多无人机避碰 航迹协调 .....	167
3.2.3.3	基于分布式滚动优化的多机避碰协调 仿真试验 .....	169
3.3	本章小结 .....	172
	参考文献 .....	173
第 4 章	多无人机协同目标状态估计 .....	175
4.1	基于 IMM - UIF 算法的机动目标状态融合估计 .....	175
4.1.1	问题模型 .....	176
4.1.1.1	目标运动模型和传感器观测模型 .....	176
4.1.1.2	非线性系统多传感器融合估计模型 .....	179
4.1.2	交互多模型无色卡尔曼滤波 .....	180
4.1.2.1	无色卡尔曼滤波 .....	180

4.1.2.2	基于交互多模型的无色卡尔曼滤波算法	182
4.1.3	基于交互多模型无色信息滤波的融合估计算法	183
4.1.3.1	信息滤波	183
4.1.3.2	无色信息滤波算法	184
4.1.3.3	基于 UIF 的融合估计结构	185
4.1.3.4	基于 IMM - UIF 融合估计算法	187
4.1.4	多机协同对机动目标状态融合估计仿真试验	188
4.2	基于自适应一致性的分布式目标状态融合估计	190
4.2.1	分布式融合估计及其一致性估计问题	191
4.2.2	自适应一致性算法	192
4.2.2.1	一致性算法	192
4.2.2.2	自适应一致性算法	195
4.2.3	基于自适应一致性的分布式融合估计算法	198
4.2.3.1	AC_DUIF 算法流程	198
4.2.3.2	AC_DUIF 算法分析	199
4.2.4	有限步长目标状态预测	201
4.2.5	基于 AC_DUIF 算法的分布式目标状态融合估计仿真试验	201
4.2.5.1	自适应一致性算法性能测试	201
4.2.5.2	基于 AC_DUIF 算法的分布式融合估计	203
4.3	受限条件下基于鲁棒一致性的分布式目标状态融合估计	207
4.3.1	问题描述	207
4.3.1.1	目标运动和雷达观测模型	207
4.3.1.2	网络化通信模型	208
4.3.2	基于鲁棒一致性的分布式估计算法	209
4.3.2.1	“双时间窗”递推迭代机制	209
4.3.2.2	时延相关鲁棒一致性算法	210
4.3.2.3	RC_DUIF 算法流程	211
4.3.2.4	RC_DUIF 算法性能分析	212
4.3.3	基于 RC_DUIF 算法的分布式目标状态融合估计仿真试验	213
4.3.3.1	理想网络条件下的目标状态估计性能比较	214
4.3.3.2	网络时延条件下的目标状态估计性能比较	217
4.3.3.3	复杂网络约束条件下的目标状态估计性能比较	219

4.4	本章小结	221
	参考文献	222
第5章	多无人机协同编队轨迹优化	223
5.1	多无人机编队轨迹优化模型	223
5.1.1	平台模型及其线性化	224
5.1.1.1	UAV 平台运动学模型	224
5.1.1.2	基于李导数的精确线性化	224
5.1.1.3	平台性能约束及其线性化	226
5.1.2	多无人机编队控制轨迹优化模型	228
5.1.2.1	多 UAV 编队构成中的轨迹优化模型	228
5.1.2.2	多 UAV 编队保持中的轨迹优化模型	229
5.1.3	网络通信拓扑模型	230
5.2	多无人机编队控制中的分布式轨迹优化方法	232
5.2.1	多无人机编队构成中的分布式轨迹优化方法	232
5.2.1.1	基于原始分解的求解框架	232
5.2.1.2	次梯度算法	235
5.2.1.3	编队构成分布式轨迹优化算法	238
5.2.1.4	多无人机编队构成轨迹优化仿真试验	239
5.2.2	多无人机编队保持中的分布式轨迹优化方法	242
5.2.2.1	基于间接分解的求解框架	242
5.2.2.2	编队保持分布式轨迹优化算法	247
5.2.2.3	多无人机编队保持轨迹优化仿真试验	249
5.3	多无人机编队轨迹优化飞行试验	260
5.3.1	多无人机编队飞行试验环境	260
5.3.1.1	MD4-200 四旋翼 UAV 系统	260
5.3.1.2	四旋翼 UAV 平台基本特性	261
5.3.1.3	飞行试验环境构建	262
5.3.2	飞行试验相关参数	263
5.3.3	飞行试验结果及分析	264
5.4	本章小结	269
	参考文献	270
第6章	多无人机协同任务自组织	271
6.1	基于群集智能的多 UAV 任务自组织	271
6.1.1	多 UAV 协同任务自组织问题	272
6.1.1.1	基本假设	273

6.1.1.2	多 UAV 协同任务自组织特性分析	273
6.1.1.3	多 UAV 协同自组织问题描述	274
6.1.2	蚁群搜捕行为自组织与协同任务自组织	277
6.1.2.1	蚁群搜捕行为自组织特性分析	277
6.1.2.2	蚁群搜捕与多 UAV 协同任务自组织对比	278
6.1.3	基于分布式搜捕蚁群算法(DRPACA)的协同任务自组织	279
6.1.3.1	基于并行蚂蚁策略的结构设计	280
6.1.3.2	面向任务协调的信息素更新机制	281
6.1.3.3	DRPACA 算法流程	286
6.1.4	多无人机协同任务自组织仿真试验	286
6.1.4.1	复杂环境中的任务自组织	286
6.1.4.2	动态环境下的任务自组织	290
<b>6.2</b>	<b>多 UAV 协同搜索任务自组织</b>	<b>292</b>
6.2.1	多 UAV 协同搜索建模	292
6.2.1.1	多 UAV 协同搜索任务过程	292
6.2.1.2	传感器探测模型	293
6.2.1.3	任务区域搜索图模型	297
6.2.1.4	状态空间模型	298
6.2.1.5	协同搜索任务目标	299
6.2.1.6	滚动优化模型	300
6.2.2	基于分布式模型预测控制的求解方法	301
6.2.2.1	分布式模型预测控制(DMPC)	301
6.2.2.2	基于 Nash 最优的 DMPC 迭代求解	304
6.2.2.3	基于 PSO 的子系统优化问题求解	305
6.2.3	多无人机协同搜索任务自组织仿真试验	306
6.2.3.1	分布式方法与集中式方法的比较	306
6.2.3.2	分布式方法与其他搜索方法的比较	309
<b>6.3</b>	<b>多 UAV 任务区集结自组织</b>	<b>312</b>
6.3.1	多 UAV 集结问题描述	312
6.3.1.1	问题描述	312
6.3.1.2	任务区集结问题建模	313
6.3.2	基于合作博弈优化一致性的分布式求解方法	315
6.3.2.1	分布式求解框架	315

6.3.2.2	基于 CGOC 的自组织方法 .....	318
6.3.3	多无人机任务区域集结自组织仿真试验 .....	325
6.4	本章小结 .....	329
	参考文献 .....	329
第 7 章	多无人机自主协同控制的典型应用 .....	332
7.1	高空长航时无人机协同目标侦察 .....	332
7.1.1	多无人机协同目标侦察问题分析 .....	334
7.1.1.1	无人机侦察任务剖面 .....	334
7.1.1.2	侦察成像传感器的选择 .....	335
7.1.1.3	侦察目标需求 .....	336
7.1.1.4	无人机平台性能 .....	337
7.1.1.5	多 UAV 协同侦察问题时/空特性 .....	337
7.1.2	多无人机协同目标侦察任务分配模型及算法 .....	338
7.1.2.1	多基地多 UAV 协同侦察任务分配 .....	338
7.1.2.2	多无人机协同侦察动态任务分配 .....	344
7.1.3	多无人机协同目标侦察任务分配仿真试验 .....	345
7.1.3.1	自适应进化多目标优化方法 .....	345
7.1.3.2	多 UAV 协同目标侦察任务分配 .....	347
7.1.3.3	多 UAV 协同侦察动态任务分配 .....	354
7.2	战术无人机协同目标跟踪 .....	356
7.2.1	面向战术任务的协同目标跟踪问题 .....	358
7.2.1.1	面向战术任务的多无人机系统任务控制结构 .....	358
7.2.1.2	多 UAV 协同跟踪在线航迹优化问题建模 .....	360
7.2.2	多无人机协同目标跟踪问题求解方法 .....	361
7.2.2.1	面向 Standoff 跟踪的多 UAV 协同航迹 优化方法 .....	361
7.2.2.2	面向 Persistent 跟踪的多 UAV 协同航迹 优化方法 .....	364
7.2.3	多 UAV 协同目标跟踪轨迹优化仿真及飞行试验 .....	366
7.2.3.1	多无人机协同 Standoff 跟踪仿真试验 .....	366
7.2.3.2	多无人机协同 Persistent 跟踪仿真试验 .....	371
7.2.3.3	多 UAV 协同目标跟踪飞行试验 .....	373
7.3	多无人作战飞机/有人机协同遂行 SEAD 任务 .....	382
7.3.1	多无人作战飞机/有人机协同的概念及典型任务想定 .....	385

7.3.2	面向多无人作战飞机/有人机协同的分布式控制方法	387
7.3.2.1	有人机与多无人作战飞机协同作战的技术需求	388
7.3.2.2	多UCAV/有人机协同SEAD任务过程分析	389
7.3.2.3	面向多UCAV/有人机协同SEAD的在线协同规划过程分析	390
7.3.2.4	多UCAV/有人机协同分布式自适应模型预测控制框架	391
7.3.3	多UCAV/有人机协同控制仿真试验	398
7.3.3.1	仿真环境及系统结构	398
7.3.3.2	仿真试验结果及分析	399
7.4	本章小结	401
	参考文献	401
	缩略语	404

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 背景与意义

### 1.1.1 军事需求

#### 1.1.1.1 无人机系统的发展

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。同时,随着现代科学技术的发展,控制技术、计算机技术、电子技术、信息技术、通信技术、航空技术等一系列高新技术出现了日新月异的变化,“无人机”(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)应运而生,并逐步作为一种现代化的武器装备应用于现代高技术局部战争中。

无人机系统(UAS)是一类机上无人驾驶、能够自主控制或遥控的空中飞行器机器人系统,可执行对地、对海乃至对空作战任务,并且具有可回收、可重复使用等特点<sup>[1,2]</sup>。与有人机相比,UAV 具有零人员伤亡、持续作战能力强、全寿命周期成本低,以及在尺寸、速度和机动性等方面的特有优势<sup>[3,4]</sup>,能够替代“有人机”执行枯燥、恶劣、危险、纵深(Dull, Dirty, Dangerous and Deep, 4D)等任务<sup>[5]</sup>,其中,枯燥任务主要指重复性的任务或者持久性的任务;恶劣任务主要指环境涉及核、生物、化学武器威胁的任务;危险任务主要指对飞机和机组成员具有高风险的任务;纵深任务是指超越当前有人机作战半径的任务。

UAV 系统的发展经历了无人靶机—侦察型 UAV—一次性使用攻击型 UAV—察/打一体化 UAV 到作战型 UAV 的发展历程,其使命由早期的靶标、情报/监视/侦察(Intelligence Surveillance and Reconnaissance, ISR)、电子软/硬杀伤发展到察/打一体乃至智能化作战任务<sup>[6]</sup>。UAV 系统起源于 1917 年英国人研制的世界上第一架无人机。UAV 作为武器首次出现在 20 世纪 60 年代~70 年代越南战场上,美军使用“瑞安”-147(Ryan)系列无人侦察机和“QH”-50 系列无人直升机执行空中侦察和电子情报任务,大大减少了有人机和飞行员的损伤率。而最经典的 UAV 作战运用,是以色列人创造的。在 1973 年的第四次中东战争中,以色列沿苏伊士

运河大量使用美制“BQM”-74C 多用途 UAV 模拟作战机群,掩护战斗机超低空突防,成功地摧毁了埃及沿运河部署的地空导弹基地。在 1982 年以色列入侵黎巴嫩的军事行动中,以军派遣“猛犬”(Mastiffs) UAV,诱使叙利亚地空导弹基地的雷达开机并发射大量地空导弹,为摧毁该基地创造了条件。海湾战争中,多国部队大量使用了“先锋”(Pioneer)和“指针”(Pointer)等多种类型的 UAV,为多国部队实时了解伊拉克防空系统、军队部署与调动、战场态势与空袭效果评估等任务提供了主要依据。科索沃战争中,美国及北约首先使用“捕食者”(Predator)、“猎人”(Hunter)、“不死鸟”(Phoenix)和“先锋”(Pioneer)等 UAV,实施低空侦察和战场监视、电子对抗和目标定位,起到了有人飞机难以发挥的作用。阿富汗战争中,美军使用“捕食者”UAV 发动空袭,追杀拉登及其基地组织成员。2001 年 11 月,一架“捕食者”UAV 发射了两枚“海尔法”导弹,击毙了“基地”组织的第二号人物穆罕默德·阿提夫,开创了 UAV 作战运用的先河。伊拉克战争中,UAV 更是大显神威,美军使用了包括“全球鹰”(Global Hawk)、“影子”-200(Shadow)、“龙眼”(Dragon Eye)、“沙漠鹰”(Desert Hawk)等在内的十几种 UAV,并部分实现了 UAV 与战斗机的数据对接,在情报、监视、侦察和攻击协调方面发挥了重要作用<sup>[7]</sup>。在 2011 年 4 月的利比亚战争中,美军 UAV 的开火强度创下了新的历史纪录,在美军战机实施的 397 次打击中,“捕食者”UAV 实施攻击次数达到了创纪录的 145 次,在美军的空袭行动中 UAV 首次占到如此高的比重(36.5%),再次验证了美军“遥控战争”(Remote Control War)理论(在敌方展开防御前,在美国本土控制远在数千公里以外的 UAV 对敌方领土和纵深目标发动突然袭击)。

由于 UAV 在海湾战争、科索沃战争、阿富汗战争、伊拉克战争、利比亚战争中的广泛使用与优异表现,开始不断引起世界各国的关注,世界各军事强国都在积极研制本国的 UAV。已有西方军事家预测,未来空战将是 UAV 与 UAV 之间的对抗。同时随着 UAV 平台技术及其相应的支撑技术的不断发展,其任务能力领域不断扩展,已由早期的战场侦察监视平台,逐步转化为包括压制/摧毁敌防空系统(Suppression/Destruction of Enemy Air Defense,SEAD/DEAD)、空中电子攻击、渗透式侦察/打击能力在内的多功能多用途空中平台。由于未来的军事冲突中,夺取制空权仍将是获得战争胜利的关键。目前,美国高智能化的作战型无人机 X-47B(Unmanned Combat Air System Carrier Demonstration,UCAS-D)和“幽灵射线”(Phantom Ray)等分别于 2011 年 2 月和 4 月完成首飞,开始进入技术验证阶段,并列入其武器装备发展计划路线图。英国、法国、德国等欧洲国家联合开发的 UAV 也已经进入技术验证阶段,从现阶段的情况来看,UAV 预计将在 2020 年前后逐步进入空军主战武器的行列,将部分取代有人战斗机和轰炸机,承担大部分防空压制和部



分空中打击任务<sup>[8]</sup>。

### 1.1.1.2 自主能力的发展需求

UAV 系统之所以称为一个“系统”,在于“机上无人,系统有人”,其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。当前的 UAV 系统自主能力较低,其使用依赖于高度频繁的人机交互,以致从 2009 年年中开始,美国空军将现在在役的 UAV 称为“遥控驾驶飞行器”(Remotely Piloted Aircraft, RPA)<sup>[9]</sup>,以与未来高度自主的真正“UAV 系统”区别。为此,研究人员开始不断寻找能带来更高 UAV 自主程度的技术和政策,从而减轻人力操控负担,降低对全天时、高速通信链路的依赖,同时也减少任务决策回路时间<sup>[10]</sup>。

#### 1. 无人机系统自主控制等级

Pachter 等<sup>[11]</sup>认为自主控制(Autonomous Control, AC)是在非结构化环境下采取的“高度”自动控制,但这种定义强调无人干预,没有考虑环境感知等关键问题。Boskovic 等<sup>[12]</sup>认为自主控制包括在线感知、信息处理和重构等功能。由于没有人的直接控制,自主控制强调自我决策、自我控制<sup>[13]</sup>。所以,自主控制可看作自动控制的高级发展阶段。常规控制和自主控制的区别在于,前者是基于数据驱动的,几乎不具有智能;而后者是基于信息(如图像),甚至是知识驱动的,可以具有很高程度的智能性,并能够应对意外的情形、新的控制任务和容忍一定程度的失败。UAV 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<sup>[14,15]</sup>。这其中的系统可能是单架 UAV 系统,也可能是多架同构或异构 UAV 组成的大系统,因此,多 UAV 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。但目前的 UAV 自主控制等级划分还停留在较高层的定性描述阶段,缺乏合理有效的理论支撑,也没有具体的定量度量指标。Ziegler<sup>[16]</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。ASB<sup>[17]</sup>描述了一套从遥控到自主集结的自主水平集合。NASA<sup>[18]</sup>定义系统的自主等级随着态势感知能力的增加而增加。美国国防部在《无人机系统路线图 2005—2030》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<sup>[19]</sup>。美国国家标准与技术研究所 ALFUS(Autonomy Levels for Unmanned Systems)特别工作组主要依据任务复杂性、环境难度和人机交互程度等外部因素,对所有无人系统的自主能力进行等级划分<sup>[20]</sup>,但实际上却混淆了内部