



国防科技著作精品译丛

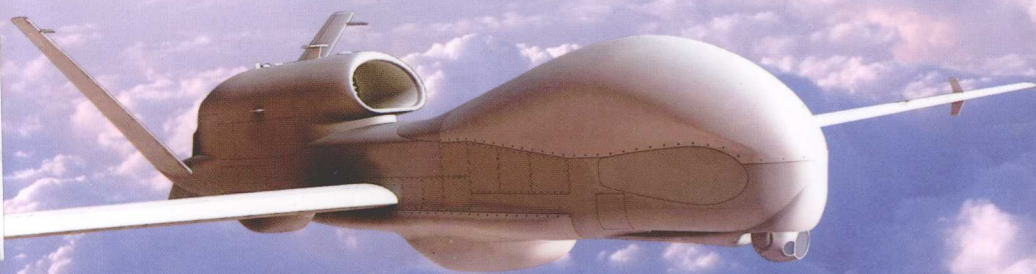
无人机系列

UAV Cooperative Decision and Control  
Challenges and Practical Approaches

# 无人机协同决策与控制

——面临的挑战与实践应用

【美】 Tal Shima    Steven Rasmussen    著  
刘忠   彭鹏菲   陈伟强   罗亚松   黄亮   译



siam



国防工业出版社  
National Defense Industry Press

013031569

V279

15



装备科技译著出版基金

# 无人机协同决策与控制

——面临的挑战与实践应用

UAV Cooperative Decision and Control  
Challenges and Practical Approaches

[美] Tal Shima Steven Rasmussen 著  
刘忠 彭鹏飞 陈伟强 罗亚松 黄亮 译



 国防工业出版社  
National Defense Industry Press



北航

C1636419

V279  
15

013031288

## 著作权合同登记 图字:军-2010-035号

### 图书在版编目(CIP)数据

无人机协同决策与控制/(美)希玛(Shima, T.),  
(美)拉斯马森(Rasmussen, S.)著;刘忠等译.  
—北京:国防工业出版社, 2012.12  
(无人机译丛)

书名原文: UAV Cooperative Decision and Control  
ISBN 978-7-118-07374-4

I. ①无… II. ①希… ②拉… ③刘… III. ①无人  
驾驶飞机—研究 IV. ①V279

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第155584号

Translation from the English language edition:

*UAV Cooperative Decision and Control: Challenges and Practical Approaches*

Copyright © 2009 Society for Industrial and Applied Mathematics.

All Rights Reserved.

本书简体中文版由 Society for Industrial and Applied Mathematics 授权国防工业出版社独家出版发行。  
版权所有,侵权必究。

### 无人机协同决策与控制

[美] Tal Shima Steven Rasmussen

著

刘忠 彭鹏菲 陈伟强 罗亚松 黄亮 译

---

出版发行 国防工业出版社

地址邮编 北京市海淀区紫竹院南路23号 100048

经 售 新华书店

印 刷 北京嘉恒彩色印刷有限公司印刷

开 本 700 × 1000 1/16

印 张 11¼

字 数 168千字

版 次 2012年12月第1版第1次印刷

印 数 1—3000册

定 价 56.00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

# 译者序

无人机编队相对于单无人机而言,能够执行更加多样化的多项任务,系统生存能力显著提升,对复杂环境的适应能力也更强。而形成无人机编队综合能力,首先要求无人机在编队中必须要有高度的自主性和很强的协同合作性。因此,无人机的协同决策与控制问题已成为多无人机系统相关技术领域研究的热点。

《无人机协同决策与控制》是美国空军研究实验室控制科学中心相关研究及合作人员的集体成果。该书首先描述了无人机协同决策与控制中的难点问题,而后分别研究了多无人机进行多目标多任务分配的方法、在同一阶段多架无人机分配多任务的求解方法和在同一时间内实现对每个目标执行协同多任务的问题。此外,本书还研究了多无人机在通信延迟情况下的协同问题,并提出了在不确定环境下无人机操作的效能度量指标。无人机协同决策与控制的相关理论与关键技术是目前多无人机系统发展与应用的薄弱环节。本书作为一本专业著作,可以为多无人机系统的使用与学习人员提供全面的基础知识和结论性规律,同时也可为长期从事无人机系统专业的设计与研究人員提供宝贵的实践性参考。希望这部译著的出版能够对我国多无人机系统的快速发展与运用起到积极的推进作用。

当然,由于涉及的内容非常广泛,所以书中给出的往往是简化的内容和简明的结论,有兴趣的读者可以沿着书中的主线查看专门的书籍。此外,在翻译过程中大部分词汇习惯上是通用或同义的,而有些则不尽然。这里在忠实原文的前提下,尽可能对用词进行了统一,并对含糊叙述和错误之

处进行了校正,希望能够减少阅读时的混淆。尽管译者尽了很大努力,但限于水平和时间仓促,难免出现错误和不明确之处,希望读者能给予指正。

译者十分感谢任雄伟教授和许江湖博士后在翻译修订过程中给予的帮助与指导,感谢薛峰、罗浩、肖金石、全文彬所做的大量修订与校对工作,同时也感谢国防工业出版社的大力支持。

译者

2012年6月

# 序

构成本书基础的研究工作是在空军研究实验室 (AFRL) 的控制科学中心 (CSCOE) 完成的。作为控制科学中心的主管领导,我非常高兴地向大家介绍我们所开展的主要研究工作。控制科学中心的一项重要任务是开展多无人机的控制研究,我们从 20 世纪 90 年代末就开始了这方面的研究工作,当时研究的重点是多无人机的协同集结问题。之后,又开展了广域协同搜索与攻击、协同智能监视与侦查、协同电子战、城区内的协同作业等内容的研究。通过这些研究工作,我们致力于提炼、总结出每种控制问题的本质属性,以使之可以应用于未来的无人机系统之中。经过多年的积累,我们在多无人机控制领域取得了较大的成绩,研究的成果将在本书中予以展现。

自莱特兄弟在俄亥俄州代顿市开办的自行车行附近研制了第一架飞机,并在赫夫曼大草原进行试验以来,莱特-帕特森空军基地一直是航空航天科技的研发中心。空军研究实验室作为莱特-帕特森空军基地的总部,一直是世界上致力于航空航天科技的最大的研究机构之一。控制科学中心作为空军研究实验室飞行器董事会的一部分,是控制科学技术发展的领军力量,对维持美国空军卓越的航空航天实力具有重要作用。控制科学中心具有非常专业、合理的人才结构,既有卓越的文职型科学家,也有空军军官,他们组成了中心的科技核心力量。此外,很多到访的科学家也会从其他角度对中心的研究工作给出建设性意见,使得中心的力量不断得到扩展,这种运作模式保证了中心的科技领先性。中心的研究工作涉及到了航空航天科学应用的各个方面,从飞机到宇宙飞船,从有人飞行器到无人飞行器。控制科学中心将担负起发展和改进先进控制科学技术、并为 21 世纪空中、

太空力量服务的重要任务。

未来无人机将组群、自主、协同地完成复杂作战任务,例如摧毁敌方威胁和实时目标等。为了实现这一目标,无人机需要相应的算法来做出决策以满足团队目标和使命任务的需要。无人机群的协同控制是一项极其复杂的问题,这种复杂性主要体现在任务耦合、信息有限以及高度的不确定性等方面。我们研究了在复杂任务约束条件下,实现实时多任务分配的相关算法,并研究了非中心式决策与控制算法,以保证足够的鲁棒性和灵活性。由于无人机要在不确定或恶劣的环境中工作,无人机间的通信非常重要。通信延迟会造成不稳定性,也可能带来团队聚合性的丢失。为此,我们提出了相应的度量与控制策略,使得即使存在通信延迟或者高度动态事件,也能够保持或适度降低协同团队的性能。另外,信息论和博弈论也用来解决环境中的不确定性以及战场中操作异类飞行器所面临的困难。与操作员进行交互并组成一个战场网络是当前研究中的一种重要领域。在城区环境中执行任务时,一个崭新的研究领域是实现小型或微型无人机编队的协同控制,这对在有限传感、处理和通信能力条件下,实现高度不确定性的融合提出了重大的挑战。尽管我们在这些方面取得了一些成绩,但也只是对智能协同控制及其未来的发展潜力开展了初步的研究。

在研究期间,其他董事会也为我们的研究工作提供了大力的帮助,尤其是供应董事会和人力资源董事会。许多长期的合作伙伴、教授、承包商以及合作机构为我们做出了很多贡献,许多教师、学生以及访问学者也为我们提供了广阔的专业知识和见解。当然,我还要感谢飞行器董事会和空军科学研究办公室,正是由于他们的支持,才使我们如今的工作成为可能。

Siva Banda, 主管

控制科学中心

空军研究实验室

俄亥俄州莱特-帕特森空军基地

# 前言

近十年来无人机在多种军事任务上的使用已经越来越受到关注。除了不必将己方人员置于危险之中这一显著优势外,无人驾驶就意味着可以使飞机减轻重量并降低费用。无人机同时也提供了一个创新操作规范的机会。但要将这些优势变成现实,则无人机在编队中必须要有高度的自主性和很强的协同合作能力。编队中的信息交互可以显著提高编队的实际工作能力。

在这种背景下,近几年对此领域集中进行了许多研究,并发展了新的协同决策与控制算法。这些算法是要解决多无人机协同执行多任务的问题,其目的是对每架无人机分配不同的任务和飞行航线以使编队效能最大化。这个问题极具挑战性,因为分配任务包含二元决策变量,而航路优化则包含连续变量,并且两者是结合在一起的。同时,为了能够实际执行任务,这些算法必须能够实时解算,而且可能是在环境不确定性和通信受限的情况下进行,同时还应具有鲁棒性。

本书提供了一种美国空军关于无人机协同决策与控制问题及可能解决方案的权威参考。本书的目的在于帮助专业人员、学者及学生更好地了解什么是协同决策与控制及其运用,以及使无人机协同控制算法成为可能的实现方法。本书采用从具体问题中抽取出具有挑战性问题的方式来提出无人机协同决策与控制问题,使得其解决方法在更广范围内能够得到运用。为了对新的研究人员或已经从事该领域研究的人员有所帮助,本书对这个问题提供了一个全面的描述并陈述其中一些难点。一些采用多种方法解决的方案将呈现给读者,为后续进一步的研究打下基础。

为进一步明确主旨,MultiUAV2 —— 一种多无人机仿真试验平台贯



穿全文,从而帮助研究人员能够开发出新的协同控制策略。MultiUAV2 是一种基于 Simulink-MATLAB-C++ 的仿真平台,它能够模拟多架无人机协同完成预先定义的任务。

本文的主要框架如下:

第1章首先介绍了协同决策与控制问题。叙述了无人机自主控制的方式并定义了协同的分类。同时描述了有代表性的想定,对该问题及其难点进行了定义。

第2章对多无人机协同控制相关的难点进行了深入的研究。提出了编队分类方法,并分析了协同操作的复杂性。对用于无人机编队协同控制的算法进行了回顾和评述。

第3章描述了多无人机在多目标中执行多任务的基本想定。提出了一个可以看作能够转载分配问题的线性规划方程。这种方法可以用于在每个阶段对单机分配单任务,随后用这种方法进行迭代后,可进行多目标多任务的分配。

第4章提出了在同一阶段多架无人机分配多任务问题的3种解决方法。这些方法包括:混合整数线性规划、树搜索和遗传算法。文中分别描述了每种方法各自不同的优缺点,并进行了仿真试验。

第5章研究了协同问题更深层次的复杂性,即同时实现每个目标执行多任务。必须指出的是,这个结果对每个任务都有严格的时间约束。文中运用混合整数线性规划和遗传算法对此问题进行了研究和对比分析。

第6章讨论了多无人机在通信延迟情况下的协同问题。这些延迟可能会在编队里不同的无人机中产生不同的信息集,从而导致非协同分配。为加强在此情况下的协同,文中提出了一种决策评估框架,并基于评估过程提出了能够通信和计算的有效算法。

第7章提出了在不确定环境下无人机操作的效能度量指标。这些指标对于合理评估协同既定规则及空中武器、多机战术、传感器布置的有效性提供了依据。

附录A描述了MultiUAV2仿真平台和操作。

附录B描述了无人机航路规划问题和“杜宾”最优航迹。

本书所有的材料和经验均来自于美国空军研究实验室控制科学中心的研究成果,该中心位于赖特—帕特森空军基地的空中飞行器董事会中。这本书是内部参谋机构责任人、来自于赖特—帕特森空军基地的空军科技学院的作者、内部工作人员、相关人员和访问科学家等几乎10年的研究成果。

作为这本书的编辑,我们衷心感谢所有为本书付出时间和努力的作者们。特别感谢控制科学中心的主任 Dr.Siva Banda 对这本书的研究给予了很多设想和支持。我们也衷心感谢评论家们对本书给出的评价和意见,特别是密歇根州大学的 Anouck Girard 教授对早期的手稿作了大量的评论。最后,我们衷心感谢工业和应用数学学会的采编 Elizabeth Greenspan 女士在整个出版过程中给予的大力支持和耐心指导。

Tal Shima  
Steven Rasmussen  
2008 年 1 月

# 目录

<b>第 1 章 概述</b> . . . . .	<b>1</b>
1.1 协同控制之路 . . . . .	1
1.1.1 无人系统的历史 . . . . .	1
1.1.2 自控系统 . . . . .	4
1.2 团队协同 . . . . .	6
1.2.1 动力 . . . . .	6
1.2.2 协同控制器分类 . . . . .	7
1.3 协同问题 . . . . .	9
1.3.1 任务场景实例 . . . . .	9
1.3.2 属性 . . . . .	12
1.4 小结 . . . . .	13
参考文献 . . . . .	14
<b>第 2 章 面临的挑战</b> . . . . .	<b>16</b>
2.1 简介 . . . . .	16
2.2 团队分类方法 . . . . .	17
2.2.1 团队协作 . . . . .	17
2.2.2 团队协同 . . . . .	18
2.2.3 团队合作 . . . . .	18
2.2.4 目标搜索团队行动 . . . . .	19

2.2.5	非协同行为	19
2.3	利益冲突	19
2.4	分布式决策与控制系统	21
2.5	团队协同中的复杂性	23
2.5.1	任务耦合	24
2.5.2	不确定性	24
2.5.3	通信	25
2.5.4	局部信息	26
2.5.5	操作员	27
2.5.6	对手行为	27
2.6	协同控制算法	28
2.7	评论	31
2.8	小结	33
	参考文献	33
<b>第 3 章</b>	<b>单任务规划</b>	<b>39</b>
3.1	广域搜索攻击情景	39
3.1.1	情景描述	39
3.1.2	任务需求	40
3.2	有容量限制的转运分配问题表达式	42
3.2.1	权重计算	44
3.2.2	仿真结果	46
3.2.3	CTAP 的能力与局限	48
3.3	迭代 CATP	49
3.3.1	仿真实例	50
3.3.2	记忆权重	51
3.3.3	路径延长	53
3.4	小结	53
	参考文献	53
<b>第 4 章</b>	<b>多任务指派问题</b>	<b>55</b>
4.1	混合整数线性规划	55
4.1.1	代价函数	58

4.1.2	约束条件	58
4.2	树搜索	62
4.2.1	决策树相关背景	62
4.2.2	WASW 场景的树表示	63
4.2.3	搜索算法	65
4.3	遗传算法	66
4.3.1	简单回顾	67
4.3.2	GA 综合	67
4.4	性能分析	69
4.4.1	各种算法的优缺点	73
4.5	小结	74
	参考文献	74
<b>第 5 章</b>	<b>同时多任务指派问题</b>	<b>76</b>
5.1	协同运动目标作战	76
5.1.1	CMTE 场景	77
5.1.2	同时任务	79
5.2	组合优化问题	80
5.2.1	时间可用度窗	80
5.2.2	路径规划	81
5.3	基于 MILP 的最优化问题	81
5.3.1	术语	82
5.3.2	约束条件	82
5.3.3	MILP 应用	84
5.4	遗传算法 (GA)	87
5.5	CMTE 仿真实例	89
5.6	小结	91
	参考文献	91
<b>第 6 章</b>	<b>不确定条件下的改进协同估计算法</b>	<b>92</b>
6.1	冗余集中运行	92
6.2	通信延迟的影响	93
6.3	通信和估计模型	95

6.4	高效的协同估计	96
6.4.1	计算高效的信息滤波器	97
6.4.2	通信高效的信息滤波器	99
6.4.3	算法实现	100
6.5	仿真研究	100
6.6	小结	104
	参考文献	104
<b>第 7 章</b>	<b>不确定环境下的作战效能度量</b>	<b>106</b>
7.1	场景	107
7.2	传感器性能建模	108
7.3	效能度量	110
7.4	最优控制方程	120
7.4.1	示例方程	121
7.5	应用	123
7.5.1	数值求解方法	124
7.5.2	场景 1 算例	125
7.6	小结	129
	参考文献	130
<b>附录 A</b>	<b>多无人机仿真</b>	<b>131</b>
A.1	MultiUAV2 的背景	131
A.2	仿真的任务	132
A.3	MultiUAV2 的组织	133
A.3.1	目标和威胁	137
A.3.2	无人机动力学模型	137
A.3.3	任务传感器	139
A.3.4	无人机之间/仿真真实通信	141
A.3.5	协同指派算法	142
A.4	仿真事件流实例	144
A.5	小结	145
	参考文献	145

<b>附录 B 无人机路径规划</b> . . . . .	<b>147</b>
B.1 路径规划 . . . . .	148
B.2 路径导航 . . . . .	149
B.2.1 航路点跟随 . . . . .	149
B.2.2 轨迹交叉跟随 . . . . .	150
B.2.3 路径跟随 . . . . .	151
B.3 无人机模型 . . . . .	153
B.3.1 不完全运动学约束 . . . . .	153
B.3.2 可飞路径 . . . . .	153
B.4 最优航路 . . . . .	154
B.4.1 最短航路 . . . . .	154
B.4.2 Dubins 算法实现 . . . . .	156
B.5 有风情况下的航路点路径规划 . . . . .	158
B.5.1 航路点路径规划 . . . . .	158
B.5.2 有风情况下的航路规划 . . . . .	161
B.6 小结 . . . . .	163
参考文献 . . . . .	163

# 第 1 章

---

## 概述

Steven Rasmussen, Tal Shima, Phillip Chandler

伟大的发现与进步总是多种想法融合的结果。

—— 亚历山大·格雷厄姆·贝尔

过去 10 年里,无人航行器开始在各种空中、海上、太空及地面军事与民用任务中进行使用,受到了人们的高度重视。除了可以避免将己方人员置于危险环境的显著优点外,无需机载人员进行操作也延长了无人航行器的使用持久性,而且,多个无人航行器所组成的联合编队使得某些新颖的操作样式成为了可能。本书将对无人机(UAV)编队对抗地面多目标战斗背景下的协同决策与控制问题进行重点讨论。由于本书给出的大量思想具有通用性,因此相关成果可以推广到包括无人协同系统在内的其他研究领域之中。

## 1.1 协同控制之路

### 1.1.1 无人系统的历史

在构建无人系统的过程中,需要突破一个个的技术瓶颈,其中一项就是要在执行任务过程中的不确定环境下,实现对飞行器的控制,而这些控制措施就包括导航以及武器使用等方面。关于无人系统控制的最早想法是由奥地利人在 1849 年侵略威尼斯时提出并应用的,他们使用无人操作的气球飞到敌方上空并投下炸弹,起到了很好的轰炸效果<sup>[1]</sup>。但是,这种方法所存在的一个显著缺陷在于难以控制气球的飞行轨迹,同时,由于炸弹的



投放是通过向连接其上的铜线进行充电来控制的,因此,武器的作战范围也受到了很大的限制。

第一次世界大战初期,凯特林(“昆虫”)航空鱼雷(图 1.1)研制成功,它从铁轨上进行发射,飞越敌方领土,并冲入敌人的防线。这种鱼雷携带 180 磅(1 磅  $\approx 0.45\text{kg}$ ) 烈性炸药,在撞击地面时被引爆。凯特林航空鱼雷的飞行轨迹是开环控制的,由发射方向决定,并且受航路上气流的影响。在航空鱼雷的飞行过程中,通过对螺旋桨的转数进行计数来估计其飞行距离,在预先计算好的位置停止发动机并丢弃机翼,从而实现武器的自动投放。

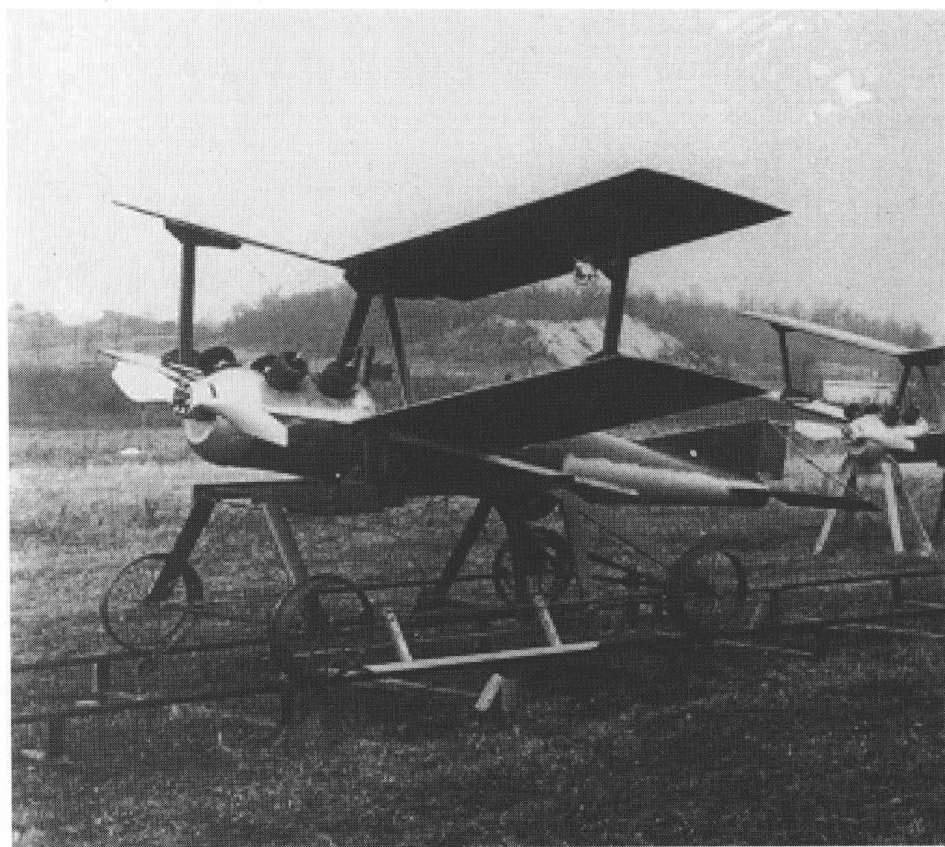


图 1.1 凯特林航空鱼雷(由航空系统中心历史局提供)

在第二次世界大战期间,UAV 被用于攻击海上和陆地目标,同时也被用于空中侦察,并作为靶机使用。一些无人武器由有人驾驶飞机通过无线电方式进行控制,例如德国就使用了无线制导亨舍尔 Hs-293 空舰炸弹这