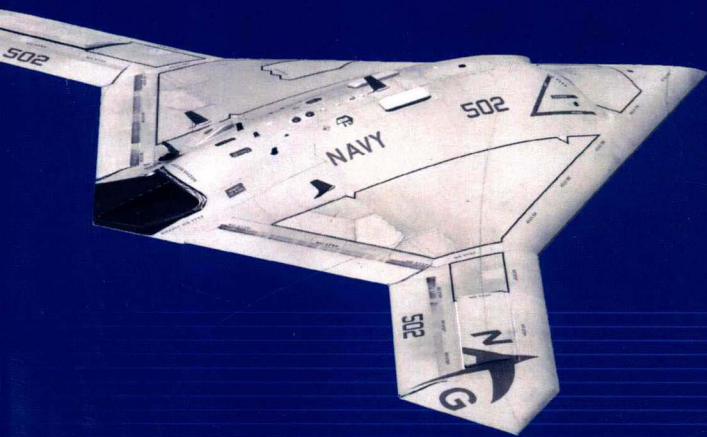




军队院校“2110”建设项目

多无人飞行器 协同航迹控制

马培蓓 纪 军 著



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS



军队院校 2110 建设项目

多无人飞行器协同航迹控制

马培蓓 纪 军 著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

现代信息化战争越来越强调体系间对抗和多系统协同作战,单无人飞行器单独执行任务的可能性越来越小。相对于单飞行器而言,多无人飞行器协同,能够执行更加多样化的任务,系统生存能力显著提升,对复杂战场环境的适应能力更强。多无人飞行器协同控制问题已成为多无人飞行器系统相关技术领域的研究热点。本书结合作者的研究工作,围绕多无人飞行器协同执行作战任务对协同控制基本理论和关键技术展开探讨,主要针对多无人飞行器协同控制系统结构、协同分配优化、协同航迹规划、具有时间约束的协同航迹控制、协同编队控制等方面展开阐述。

本书可作为高等院校或科研院所中从事无人机系统工程、无人飞行器航迹规划及仿真的科研工作者和工程技术人员的参考用书,也适合于人工智能、导航与制导、信息处理等相关专业的师生和科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

多无人飞行器协同航迹控制 / 马培蓓, 纪军著. --
北京: 北京航空航天大学出版社, 2016.12

ISBN 978-7-5124-2313-8

I. ①多… II. ①马… ②纪… III. ①无人驾驶飞行器—航迹控制 IV. ①V47

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 284300 号

版权所有,侵权必究。

多无人飞行器协同航迹控制

马培蓓 纪 军 著

责任编辑 刘晓明

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话: (010)82317024 传真: (010)82328026

读者信箱: goodtextbook@126.com 邮购电话: (010)82316936

北京建宏印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本: 710×1 000 1/16 印张: 13.5 字数: 288 千字

2017 年 4 月第 1 版 2017 年 4 月第 1 次印刷 印数: 1 000 册

ISBN 978-7-5124-2313-8 定价: 59.00 元

前 言

无人飞行器(Unmanned Aerial Vehicle,UAV)是指由动力驱动、机上无人驾驶的航空飞行器,泛指在大气层内或大气层外空间(太空)飞行的无人机、导弹、无人飞艇等飞行物。无人飞行器是新军事变革的代表性装备,具有突防能力强、制导精度高、机动性好、效费比高的优点,正迅速成为现代军事力量的重要组成部分,充分体现了未来战争信息化、网络化、无人化、非接触的特点,是最符合未来战争需求和世界装备发展潮流的航空武器装备,已逐步成为现代战争不可或缺的重要装备之一。

随着无人飞行器技术和性能的不断发展,其军事任务需求的不断提高,很多情况下,单架无人飞行器已无法满足任务要求,若能由多架无人飞行器协同工作,则它们不但能完成单架飞行器不能完成的任务,而且能使系统的作战效能大幅提高。无人飞行器协同是以无人飞行器协同系统为研究对象,在高度非结构化、具有角度和时间约束的动态不确定环境中,无需或只需最少人工干预,以集中或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。多无人飞行器系统通过协同获得比相互独立设计的单架无人飞行器更有效的工作能力。多无人飞行器协同控制并不是各飞行器控制功能的简单叠加,整个系统的能力是通过飞行器之间的紧密协作完成的,通过一体化无缝通信网络实现信息共享,并通过一定的协同策略,综合分析、处理、分发各种战场信息数据,根据系统的共同利益承担共同的目标,从而在整个协同系统内实现共同的导航与控制。

本书是作者自2004年以来从事无人飞行器协同控制研究工作的总结。一部分研究是针对无人机展开的,有些研究的假定对象是导弹,在具体章节中都予以说明。本书共分9章,具体内容安排如下:

第1章“绪论”概述无人飞行器的背景和意义,探究了以美国、以色列和俄罗斯为代表的无人机的现状与发展;研究美国无人机协同控制的应用现状,并从多无人飞行器协同分配、多无人飞行器协同航迹规划、具有时间约束的多无人飞行器协同航迹控制和多无人飞行器编队控制等方面对协同控制的研究现状展开论述。

第2章“多无人飞行器协同控制系统结构”针对多无人飞行器协同的作战样式、协同的特点、传统的控制体系结构进行了分析,提出对多无人

飞行器协同系统应采用多级分布式控制体系结构,采用分层控制的思想,将多无人飞行器协同控制问题分解为相互关联的若干重要问题。

第3章“多无人飞行器战场环境模型”论述了战场空间的相关概念,对威胁源进行分类,重点建立了雷达威胁场、高炮威胁场和防空导弹威胁场模型。

第4章“基于混合遗传算法的单无人飞行器航迹规划”研究基于混合遗传算法的单无人飞行器航迹规划,提出混合算法——混沌遗传模拟退火算法。该算法改进的地方有:混沌算法产生初始种群、交叉率和变异率的 Sigmoid 曲线非线性自适应调整及与模拟退火算法的结合。

第5章“基于混合遗传算法的多无人飞行器航迹规划”研究多无人飞行器攻击目标的航迹规划问题,引入团队预计到达目标的时间作为协同变量,针对多航迹规划问题,设计多航迹综合适应度函数;针对协同任务规划问题,综合考虑协同航迹规划及目标分配问题,设计效费比-适应度函数和混合编码结构,使用混合遗传算法得到多无人飞行器航迹。

第6章“多无人飞行器分配优化”研究目标分配优化问题,其目的是充分发挥各无人飞行器的整体优势,寻求在给定约束条件下,符合分配原则的最佳方案;分析了用于解决目标分配优化问题的改进的匈牙利算法,论述了匈牙利算法解决平衡指派问题的具体流程,并推广到非平衡指派的情形;将火力分配优化问题看作是一个动态决策过程,利用动态规划的逆序法求解此问题,结合无人飞行器对敌补给护航编队实施作战的具体实例求得最优火力分配方案。

第7章“威胁环境下多无人飞行器协同航迹规划”研究多无人飞行器协同航迹规划算法,考虑威胁体的威胁度和目标战术价值等因素,建立扩展 Voronoi 图,并对传统的 Dijkstra 算法进行了改进,综合考虑了无人飞行器的距离代价和威胁代价,得到多无人飞行器的初始航迹;通过基于视线的航迹缩短算法和航迹平滑算法,对无人飞行器初始航迹进行动态优化处理;结合协同分配算法找到综合代价最小的航迹,从而为每架飞行器分配各自攻击的目标;研究无人飞行器和目标数量一致、无人飞行器和目标数量不一致、参与作战的无人飞行器和目标数量较多的情况,能针对诸如突发威胁、威胁突然消失、目标突然出现和目标突然消失等动态环境进行航迹重规划,满足无人飞行器在互不碰撞的情况下从不同航迹终端角度到达不同目标的要求,实现了空间的协同;最后将基于扩展 Voronoi 图的算法、基于栅格的算法和基于可视图的算法进行了比较。

第8章“具有时间约束的多无人飞行器协同航迹控制”明确协同时间的相关概念,利用基于协同变量和协同函数的多级分布式控制结构,有效实现了多飞行器间的协同,并将其应用在航迹预先规划的协同时间上;研究了具有时间约束的实时航迹规划算法,以满足协同时间的要求。

第9章“多无人飞行器编队控制”是多飞行器协同控制的另一种重要形式,主要围绕三个问题展开,分别是编队结构问题、编队保持控制器设计问题和编队避障问题;研究改进的领机-僚机的编队结构问题,结合多智能体系统技术研究了领机与僚机的协同优化组织结构;针对面向编队飞行的僚机控制律和实现算法进行重点研究;针对躲避威胁的编队变形、编队变换等情况进行了研究。

书中包含了2004—2011年期间博士、硕士研究生的工作,尤其要感谢张友安教授和程春华博士对本书的贡献。

本书得到国家自然科学基金(61305136)和军队院校2110建设项目的支持。

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。

马培蓓

2016年10月18日于烟台

目 录

第1章 绪 论	1
1.1 背景和意义	1
1.2 无人机的现状与发展	5
1.2.1 美国典型无人机	5
1.2.2 以色列典型无人机	14
1.2.3 俄罗斯典型无人机	15
1.2.4 无人机的发展	17
1.3 协同控制应用与研究现状	19
1.3.1 应用现状	19
1.3.2 研究现状	21
1.4 本书内容和安排	30
第2章 多无人飞行器协同控制系统结构	32
2.1 多无人飞行器协同的作战样式	32
2.2 多无人飞行器协同的战术特点	34
2.2.1 多无人飞行器的战术特点	34
2.2.2 多无人飞行器协同的特点	35
2.3 多无人飞行器协同控制体系结构	36
2.3.1 集中式控制体系结构	36
2.3.2 分散式控制体系结构	37
2.3.3 分布式控制体系结构	38
2.3.4 多级分布式控制体系结构	39
2.3.5 基于层次分解的分层控制策略	40
2.4 本章小结	45
第3章 多无人飞行器战场环境模型	46
3.1 战场空间的相关概念	46
3.2 威胁源的分类	47
3.3 禁飞区分析	50
3.4 战场环境模型建立	51
3.4.1 雷达威胁场建模	51
3.4.2 高炮威胁场建模	53

3.4.3 防空导弹威胁场建模	55
3.5 本章小结	59
第4章 基于混合遗传算法的单无人飞行器航迹规划	60
4.1 遗传算法基础	60
4.1.1 遗传算法的基本思想	60
4.1.2 遗传算法的基本框架	61
4.2 混合遗传算法设计	63
4.2.1 初始种群的改进	64
4.2.2 遗传算子的改进	67
4.2.3 与其他优化方法的结合	69
4.2.4 性能对比	70
4.3 求解多目标多约束优化问题的遗传算法	72
4.3.1 遗传算法处理约束的方法	72
4.3.2 遗传算法处理多目标的方法	73
4.4 初始航迹	75
4.4.1 链接图法	75
4.4.2 仿真研究	76
4.5 遗传算法对初始航迹的优化	78
4.5.1 航迹编码	78
4.5.2 航迹代价选取	79
4.5.3 仿真研究	81
4.6 本章小结	84
第5章 基于混合遗传算法的多无人飞行器航迹规划	85
5.1 多航迹规划	85
5.1.1 多航迹规划问题描述	85
5.1.2 多航迹规划的关键	87
5.2 单目标航迹规划	87
5.2.1 基于遗传算法的单目标协同航迹规划	87
5.2.2 仿真研究	89
5.3 多目标协同航迹规划	92
5.3.1 基于遗传算法的多目标协同航迹规划	92
5.3.2 仿真研究	93
5.4 本章小结	95
第6章 多无人飞行器分配优化	96
6.1 引言	96

6.2 多目标优化方法	96
6.3 协同目标分配优化	97
6.3.1 目标分配原则	98
6.3.2 协同目标分配的数学模型	99
6.3.3 基于匈牙利算法的平衡指派算法	100
6.3.4 基于改进匈牙利算法的非平衡指派算法	102
6.4 协同火力分配优化	104
6.4.1 无人飞行器火力分配优化模型的建立与求解	104
6.4.2 无人飞行器火力分配优化问题实例	107
6.4.3 火力分配优化的结论	109
6.5 本章小结	109
第7章 威胁环境下多无人飞行器协同航迹规划	111
7.1 引 言	111
7.2 基于扩展 Voronoi 图的多飞行器协同航迹规划算法	112
7.2.1 多飞行器协同航迹规划的特点和航迹约束条件	112
7.2.2 Voronoi 图的性质及生成方法	115
7.2.3 威胁环境下扩展 Voronoi 图的建立	119
7.2.4 初始航迹的产生	122
7.2.5 航迹动态优化处理	129
7.2.6 航迹代价的协同分配	133
7.3 多飞行器协同航迹规划实验与分析	134
7.3.1 4 枚导弹攻击 4 个目标的实验与分析	135
7.3.2 6 枚导弹攻击 6 个目标的实验与分析	137
7.3.3 9 枚导弹攻击 9 个目标的实验与分析	138
7.3.4 不同威胁环境下仿真时间的比较与分析	140
7.3.5 导弹数量与目标数量不一致的实验与分析	142
7.3.6 威胁突然变化和目标突然变化的实验与分析	143
7.4 三种协同航迹规划算法的比较	147
7.4.1 基于栅格法的协同航迹规划	147
7.4.2 基于可视图法的协同航迹规划	149
7.4.3 三种算法的比较	150
7.5 本章小结	153
第8章 具有时间约束的多无人飞行器协同航迹控制	154
8.1 引 言	154
8.2 多飞行器协同航迹控制问题	155

8.3 多级分布式协同控制在协同时间中的应用	157
8.3.1 协同时间与协同控制结构	157
8.3.2 协同变量与协同函数	159
8.3.3 在协同时间问题中的应用	161
8.4 威胁环境下具有时间约束的动态航迹规划算法	165
8.4.1 航迹切换段	165
8.4.2 动态航迹控制段	166
8.4.3 基于扩展 Voronoi 图的动态航迹规划	170
8.4.4 仿真结果与分析	170
8.5 本章小结	174
第9章 多无人飞行器编队控制	175
9.1 编队结构问题研究	175
9.1.1 编队控制对无人机的性能要求	175
9.1.2 改进的领机-僚机编队模式	176
9.1.3 无人机编队协同优化组织结构	179
9.2 编队保持控制器设计	180
9.2.1 基本编队飞行控制模型的建立	181
9.2.2 基于相对误差的三维编队控制器设计	182
9.2.3 仿真结果与分析	188
9.3 编队避障问题研究	190
9.3.1 编队变形避障	190
9.3.2 编队变换避障	191
9.4 本章小结	192
参考文献	193

第1章 绪论

1.1 背景和意义

无人飞行器(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)是由动力驱动、机上无人驾驶的航空飞行器^[1],泛指在大气层内或大气层外空间(太空)飞行的无人机、无人飞艇、导弹等飞行物。无人飞行器或为旋转翼飞行器,或为固定翼飞行器,或为轻于空气的飞行器,具备飞行能力而无需组员。无人飞行器包括飞行器和飞行所需的一体化设备(推进动力、航空电子设备、燃料、导航设备和数据链)。

无人飞行器是新军事变革的代表性装备,是信息化装备与机械化装备的有机结合,具有突防能力强、制导精度高、机动性好、效费比高的优点,正迅速成为现代军事力量的重要组成部分,充分体现了未来战争信息化、网络化、无人化、非接触的特点,是最符合未来战争需求和世界装备发展潮流的航空武器装备,已逐步成为现代战争中不可或缺的重要装备之一。面对未来战争样式和技术发展趋势,发展无人作战飞机(Unmanned Combat Aerial Vehicle,UCAV)是快速形成对敌威胁、打赢未来信息化条件下非对称战争的捷径。UCAV 主要用于攻击、拦截地面目标,携带有小型和大威力的精确制导武器(通常携带主动或半主动寻的导弹、反辐射导弹、红外制导导弹等)或在机体自身装有战斗部,当飞机发现并锁定目标后,由地面人员发出攻击指令,导弹脱离发射装置飞向目标并将其摧毁;或由 UCAV 直接撞向目标,对敌雷达、通信指挥设备以及部分可移动军事目标实施攻击。UCAV 已被认为是第五代作战飞机,是集探测、识别、决断和作战功能于一体的无人机系统。UCAV 的出现使无人机的发展发生了质的变化,即从辅助、支援性军用装备跃变为主战性装备,它的使用将使空中作战真正成为信息和武器融合的对抗,其必将成为未来的主力战斗机。UCAV 作为一种高效费比、攻防兼备的全新概念武器,已经出现在新世纪的武器装备行列,正在引起各国军事界对未来战争思想、作战模式和组织编制的一系列变革性的新探索,并将对未来的作战理念和作战模式产生重大影响。

随着无人飞行器技术和性能的不断发展和军事任务需求的不断提高,很多情况下,单架无人飞行器已无法满足任务要求,若能由多架无人飞行器协同工作,则它们不但能完成单架飞行器不能完成的任务,而且能使系统的作战效能大幅提高。美国国防部《2011—2036 财年无人系统综合路线图》明确把无人飞行器自主控制、协同编队飞行、无人机-有人机编队飞行等新技术列入未来重点发展技术路线图中,以满足高技术信息化战争中联合作战的基本需求。研究如何通过有效的协同策略支持多无

人飞行器协同航迹控制并提高动态不确定环境下无人飞行器的突防能力、电子对抗能力、对运动目标的搜捕能力并减少发射数量,从而实现整体作战效能最佳,是一个极具理论价值和现实意义的问题。

目前多无人飞行器的协同控制问题已经得到越来越多的关注,协同控制研究的范围也比较广,其研究内容具体包括协同编队飞行^[2-4]、协同航迹规划和协同目标分配^[5-6]、协同碰撞和障碍回避^[7]、协同信息一致^[8-9]、协同区域搜索、协同侦察监视、协同目标跟踪^[10-11]、协同会合^[12]、协同拦截^[13]和协同攻击^[14]等。

无人飞行器协同控制是以无人飞行器协同系统为研究对象,在高度非结构化、具有角度和时间约束的动态不确定环境中,无需或只需最少人工干预,以集中或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,使无人飞行器协同系统通过协同获得比相互独立设计的单架无人飞行器的控制算法更有效的工作能力^[15-18]。多无人飞行器协同控制并不是各飞行器控制功能的简单叠加,整个系统的能力是通过飞行器之间的紧密协作完成的,通过一体化无缝通信网络实现信息共享,并通过一定的协同策略,综合分析、处理、分发各种战场信息数据,根据系统的共同利益承担共同的目标,从而在整个协同系统内实现共同的导航与控制。

多无人飞行器协同控制研究主要有以下作用。

(1) 通过任务的并行执行缩短任务完成的时间,提高综合作战效能

随着空战环境的复杂化,独立空战的无人飞行器很难胜任所承担的作战任务,而多无人飞行器具备时间、空间和功能上的分布性。例如:多无人飞行器在任务执行过程中可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,并且通过无人飞行器间的协同完成单架无人飞行器难以完成的工作,甚至完成更为复杂的任务,有效提高飞行器的综合作战效能,更适合当前无人飞行器集群化、智能化、网络化等方面的要求,进而全面提高作战的自动化程度,并获得理想的作战效果。

(2) 通过协同控制可实现战术隐身

无人飞行器可以通过隐身提高其生存和突防能力,要获得无人飞行器的隐身效果,除了使用传统的隐身技术以外,还可以利用协同控制技术实现“战术攻击隐身”,有效地提高部分无人飞行器的隐身效果,从而达到提高整体突防能力的目的。

(3) 通过协同控制可实现协同电子干扰

无人飞行器受到电子干扰后,其发现目标概率、捕捉目标概率和自导命中概率等都会降低,而敌方实施有源或无源干扰都需要一定的时间。因此,为了有效地突破敌方软杀伤武器的防御层,在一次进攻中,可以采用不同频率、不同类型的无人飞行器在不同方向上进行攻击,一架无人飞行器只能干扰敌方雷达辐射面的一部分,而多无人飞行器则可通过调整飞行航迹和干扰信号来干扰敌方雷达的整个辐射面;同时,由于突防过程中目标信息共享,大大减少了攻击假目标的可能性。另外,部分无人飞行器的雷达可以始终处于关机状态,这样不易被敌方有源干扰设备所干扰,大大提高了电子对抗能力和突防能力。但在电子对抗过程中,一次发射中同一方向和同一类型

的无人飞行器数量不宜多,以防止被敌方全部干扰。

(4) 通过编队成员的相互配合可以增强突防能力,实现协同攻击

利用协同控制的思想,可以将不同功能的无人飞行器进行编队和分工,编队中的不同无人飞行器执行不同的作战任务,在飞行中相互协调,在作战中互相配合。在压制敌方火力时,攻击时间对敌方的突袭性、飞行器的命中概率和致命性非常重要,为了做到出其不意,攻击时间的选择往往是非常严格的,其目的是使无人飞行器的生存概率和打击的有效性最大化,这不仅增强了突防能力,还大幅提升了攻击效果,提高了总体作战效能。为了达到同时到达目标的目的,还要求无人飞行器具有实时重规划的能力。

(5) 通过协同控制可以减小作战消耗

利用协同控制的思想,可以针对防御系统的特点、防御武器的数量、目标特性和飞行器自身的性能,在一定的战术意图下,通过不同价值无人飞行器的合理搭配,在整体作战效能不变的条件下,实现最小的作战消耗。当多无人飞行器中某架飞行器发生故障时,飞行器之间通过其内在的自组织能力及协同机制重新确立协同关系,仍然可以完成战斗任务。

(6) 通过协同控制减小无人飞行器的发射数量

无人飞行器利用战场信息的有效共享,通过数据链将飞行器是否命中目标以及先期攻击无人飞行器对目标毁伤效果的信息传给指挥中心和后续无人飞行器,指挥中心和后续无人飞行器根据前面飞行器传来的信息来决定是否还要对目标继续实施攻击。对于目标群,已经发射的无人飞行器可以根据指挥中心或先期攻击飞行器传来的对目标的毁伤效果,来判断是否对预先要求攻击的目标进行攻击。若不需要,则无人飞行器可重新规划航迹,转而攻向其他目标,这样既可以保证完成战斗任务,又可以避免不必要的无人飞行器的浪费,从而提高武器系统的效费比。

因此通过充分利用多无人飞行器协同的性能特点,实现协同控制下飞行器相互间的战术与技术配合,可以满足射击安全的需求、从不同方向对目标实施协同攻击的需求、提高飞行安全和突防能力的需求,从而有效提高其突防能力、电子对抗能力、对运动目标的搜捕能力等。

多无人飞行器航迹控制技术研究如何协调、有效地组织系统中的每架无人飞行器,以便在动态不确定作战环境中成功地完成共同使命,提供比单无人飞行器更大的作战效能。例如,若同时使用多无人飞行器从不同方向对具有防空设施的同一目标区域进行攻击,则往往能造成目标区防空指挥陷入混乱,提高无人飞行器的突防概率。尽管单无人飞行器一般也能够独立地执行一定的任务,但通过多无人飞行器在时间和空间上的协调,任务的整体效率可以得到极大的提高。虽然多无人飞行器比单无人飞行器具有明显优势,但多无人飞行器协同也产生了许多问题,具体体现在以下方面:

① 战场环境的复杂性。无人飞行器执行飞行任务时,面临的战场环境具有很大

的未知性和不确定性。目标、威胁及飞行器本身都处于动态变化之中,面对的是充满对抗的作战环境。如遇到防空导弹、高炮、天气、地形、预警机雷达等预先未知的威胁突然出现或消失,以及编队成员掉队、任务突然改变等突发情况,有些信息可能是已知的,然而其他信息只能通过事先给定的概率分布来进行估计,面临的挑战是如何对某个决策或行动所获得的期望值进行计算。传统的通过预先航迹规划进行避碰和避障的方法已经不适应未来作战的需要,而要求根据实时态势感知和协同信息实时进行协同避碰和避障。

② 无人飞行器系统的复杂性。无人飞行器数量多、类型多、用途多,在不同的作战过程中承担相应的任务,而不同的无人飞行器的气动布局、飞行性能、隐身性能及系统结构对无人飞行器的决策和控制提出了更高的要求。同时,无人飞行器配置的传感器载荷不同,不同传感器的成像条件和工作模式也不尽相同,由于传感器获取信息的不确定性,使得无人飞行器对当前态势的感知也是不确定的^[15]。

③ 控制体系结构问题。多无人飞行器协同呈现“体系对抗”的特点,子任务之间是并行的,上下级之间、同级之间子系统相互协作与配合,各种作战行动彼此交织,表现出综合化作战态势,需要以多无人飞行器总体目标为目的的协同行动。因此采用何种控制体系结构就成为整个系统设计要考虑的关键问题。采用完全集中的方式虽然可能找到全局最优的控制策略,但针对大规模复杂的全局寻优问题则难以解决,且通信带宽不足;完全分布式的结构虽具有很好的容错性和鲁棒性,但是各无人飞行器之间难以建立协调合作的关系,无法充分发挥群体上的优势。

④ 通信的复杂性。协同控制的前提是各无人飞行器之间能够在需要的任何时候相互通信,各无人飞行器之间的通信链接也将受到通信干扰、时滞和带宽受限等因素的影响,控制系统在反馈回路上的延迟会导致系统的不稳定,因此,多无人飞行器协同决策需考虑采用同步还是异步方式,并将影响降至最低。为了尽可能地满足协同的需要,各成员之间应该共享一些信息,问题是,各无人飞行器之间应该如何交换信息? 交换哪些信息? 信息如何在各无人飞行器之间传递? 通信的信息量太大容易被敌方发现,信息量太小不足以实现协同,多无人飞行器协同控制方法需要充分考虑到这些因素。

⑤ 时间的约束性。对具有时间约束的多无人飞行器协同航迹规划研究还不充分,应能使各无人飞行器在避免相互碰撞的前提下同时从不同方向攻击目标,从而最大限度地提高作战效能。需要深入研究具有飞行时间约束的多无人飞行器协同航迹控制问题。采用何种控制体系结构建立相应的协调策略,以有效实现多无人飞行器间的时间协同,以及如何根据时间误差信号的大小,实时控制无人飞行器进行侧向机动或者提前转弯以延长或缩短导弹的航迹长度,从而实现多无人飞行器同时到达目标的目的,都是需要进一步研究的问题。

本书从多无人飞行器航迹控制迫切需要解决的实际问题出发,采用多级分布式控制体系结构;为降低问题的复杂性,根据分层控制的思想,将大规模、复杂的多无人

飞行器协同控制问题进行分层与解耦,重点对无人飞行器航迹控制问题展开研究,具有重要的军事意义和军事应用价值,可以进一步应用在基于战术数据链的多无人飞行器火力控制、电子战一体化及多无人飞行器协同作战效能评估方面。

1.2 无人机的现状与发展

1.2.1 美国典型无人机

将无人平台用于军事行动的历史长达 60 多年,鱼雷、巡航导弹、卫星和靶机都是早期的无人平台。它们在民用领域的应用范围十分广泛,如爆炸物处置、放射性环境下的工作与测量、各种近海工业水下设施的建立和维护、大气调查和水下调查、自动化和机械化制造业中的应用等。近年来,无人机的发展突飞猛进,以美军为例,无人机技术已成为其最“不可或缺”的一项技术。随着无人机军事用途的不断扩大,无人机在现代战争中显示出越来越重要的作用,已成为一种新型的空中力量。纵观诸多全球联合军事行动,无人机以其持久力、高效性、任务灵活性,以及信息搜集和打击能力强等特点,成为部队战斗力的倍增器。无人机不仅能够作为作战决策高层提供信息,还能够为在野外或拥挤的城市环境中作战的联合部队提供信息;不仅可以起到协助作战的作用,还能够完成预编程和对高价值目标的打击任务,在特别注重风险和损失时降低造成不必要损失的风险。大多数美国空军无人机均实行超视距操作,可以在高效保持战斗力的同时有效减少前线人员。随着对无人机的需求得到公认和无人技术的不断进步,人们对无人机军用价值的认识发生了明显的变化,这些需求和进步包括:

- 持续或持久侦察的需求;
- 将机组人员的伤亡率和被俘率降到最低的强烈需求;
- 计算机处理能力及相关软件功能的重大进步;
- 传感器技术的进步(在保持高分辨率的同时,大大减小传感器尺寸并减轻其质量);
- 通信技术、图像处理技术和图像开发能力的进步;
- 认识上的进步(工业界和政府部门对无人机的认识加深,认为无人机的发展需要专门研究,因为在业余的模型飞机式的发展方式下不可能产生可靠的具有军用价值的无人机);
- 推进系统的进步(效率提高,尺寸减小,质量减轻);
- 高性能长航时无人机平台的出现。

以伊拉克战争为例,美军共部署了 50 多架、几十种无人机,其中有 4 架“全球鹰”、20 余架“捕食者”A,2 架“捕食者”B 以及各种小型续航时间短的无人机,部署的无人机数量是阿富汗战争时部署数量的 3 倍多。在阿富汗战争中美国仅使用了“全球鹰”、“指针”和“捕食者”3 种无人机。在 1991 年的海湾战争中,只用了“先锋”一种

无人机。而在伊拉克战争中,美军使用了陆军的“猎人”、“指针”和“影子 200”,以及海军陆战队的“龙眼”和“火蜂”,还部署了几种小型无人机系统,用于支援特种作战需求。“龙眼”和“影子 200”是首次投入实战使用的。在这次伊拉克战争中,美军的无人机成为攻击力量之一,承担侦察、干扰、欺骗、战场评估、信息中继、对地支援和对地攻击等任务,凸显了无人机在空地协同作战中的作用。

自 2001 年“9·11”事件以来,美军对无人机系统的兴趣大增。由图 1-1 可以看出从 1987 年到 2012 年美国国防部对无人机系统的投资趋势。2001 年美国国防部的投资为 3.63 亿美元,两年后这一数字几乎达到了 14 亿美元,每年增加了约 5 亿美元。2005 年,美国国防部对无人机的投资达到 20 亿美元,而整个 20 世纪 90 年代只有 30 亿美元。2011 年增加到 31 亿美元。目前,世界上有 30 多个国家正在研制 250 余种无人飞行器,有 40 多个国家正在使用着 80 多种不同型号的无人机。

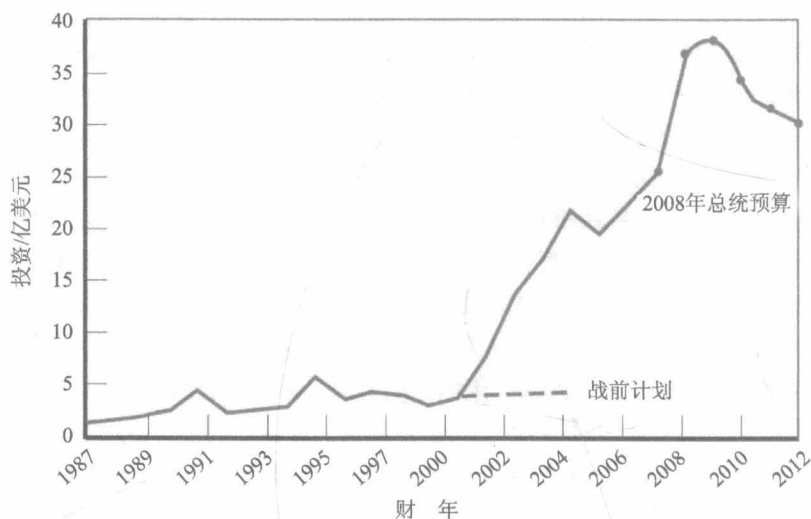


图 1-1 美国国防部无人机投资趋势图

为适应技术和作战要求的发展变化,更好地发挥指导作用,2005 年 8 月 4 日,美国国防部签署了《2005—2030 年美国无人机系统发展路线图》,对无人机系统发展中所涉及的关键领域进行了深入解析,明确提出要从系统工程的角度发展无人机系统,强调将通过采用先进技术,使无人机系统的军事应用能力产生质的飞跃。这份路线图为未来 25 年内美军无人机系统及其技术的发展指出了前进方向。2007 年 12 月,美国国防部又公布了《2007—2032 年无人机路线图》,进一步确立了无人系统在未来一体化作战中的重要地位。2009 年 5 月 18 日,美国空军出台了《美国空军 2009—2047 无人机系统飞行计划》。该计划重点介绍了未来美国空军无人机系统的发展思路和构想,同时也折射出美国空军未来加强空中力量建设的重要思想和发展方向,以及其着力发展无人机系统和夺取无人机系统发展优势的战略意图。

作为最早研制无人机的国家之一,美国凭借雄厚的经济实力和先进的技术支持,已经形成一个远、中、近、高、中、低、大、中、小,战略、战役、战术等各层面梯次搭配的庞大的无人机家族;按用途不同,可分为(靶标、靶弹)无人机、侦察监视无人机、电子对抗无人机、攻击无人机、通信中继无人机、校射无人机及侦察打击一体化综合类无人机等;按外形特征不同,可分为固定翼、旋转翼、倾斜翼和微型无人机等;根据航程、活动半径、续航时间和飞行高度不同,还分为战术无人机和战略无人机等。下面重点介绍美国海军几种有代表性的无人机系统。

1. 长航时情报监视侦察无人机

(1) RQ-4“全球鹰”无人机

1) 背景

诺斯罗普·格鲁曼公司的 RQ-4A“全球鹰”是美国空军乃至全世界最先进的无人机。该机长度为 13.5 m,翼展为 35.4 m,高度为 4.6 m;空载时为 3850 kg,载重为 10400 kg;发动装置为 1 台 AE3007H 涡轮扇叶发动机;最大飞行速度为 650 km/h,实用升限为 20000 m;白天监视区域超过 100000 km²。2001 年 4 月 22 日,“全球鹰”完成了从美国到澳大利亚的越洋飞行创举,这是无人机首次完成这样的壮举。飞行距离远也使得“全球鹰”可以逗留在某个目标的上空长达 42 h,以便持续不断地进行监视。“全球鹰”的地面站和支援舱可使用一架 C-5 或两架 C-17 运送,“全球鹰”本身则不需要空运,因为其转场航程达 25002 km,续航时间为 38 h,能飞到任何需要的目的地。

RQ-4B“全球鹰”是在 1998 年完成首飞的较小的、在 RQ-4A 基础上发展而来的高空长航时无人机系统,如图 1-2 所示。这种无人机的飞行高度在 16764~18288 m (55000~60000 ft) 之间,续航能力为 28 h,有效载荷为 1359 kg,巡航速度为 310 节,目前已被美国空军用作多传感器情报、监视和侦察平台。目前机上装有光电红外线

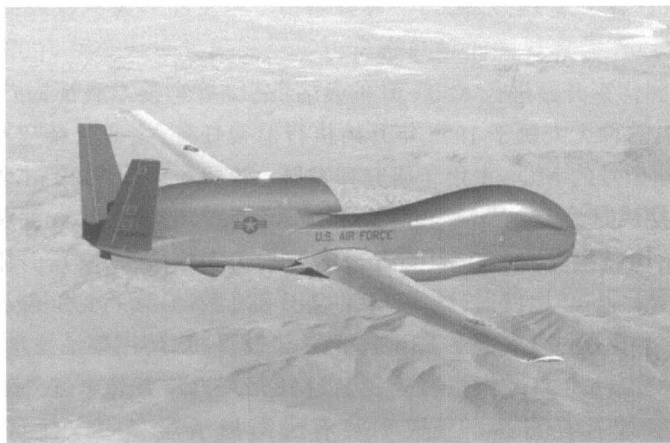


图 1-2 “全球鹰”无人机