



国防科技图书出版基金

无人飞行器 任务规划技术

Mission Planning Technology for UAV

王玥 张克 孙鑫 等著



国防工业出版社
National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

无人飞行器 任务规划技术

Mission Planning
Technology for UAV

王玥 张克 孙鑫 等著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目 (CIP) 数据

无人飞行器任务规划技术/王玥, 张克, 孙鑫著. —北京: 国防工业出版社, 2015.6

ISBN 978-7-118-10094-5

I. ①无… II. ①王… ②张… ③孙… III. ①无人驾驶飞行器—航线—规划 IV. ①V47

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 100590 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)

三河市腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 880×1230 1/32 印张 6 $\frac{1}{4}$ 字数 185 千字

2015 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 89.00 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

致读者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分，又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展，加强社会主义物质文明和精神文明建设，培养优秀科技人才，确保国防科技优秀图书的出版，原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款，设立国防科技图书出版基金，成立评审委员会，扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是：

1. 在国防科学技术领域中，学术水平高，内容有创见，在学科上居领先地位的基础科学理论图书；在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖，内容具体、实用，对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著；密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值，密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作，负责掌握出版基金的使用方向，评审受理的图书选题，决定资助的图书选题和资助金额，以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书，由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就，积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形

势下，原国防科工委率先设立出版基金，扶持出版科技图书，这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物，是对出版工作的一项改革。因而，评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进，这样，才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授，以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来，为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗！

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金
第七届评审委员会组成人员

主任委员	潘银喜			
副主任委员	吴有生	傅兴男	杨崇新	
秘书长	杨崇新			
副秘书长	邢海鹰	谢晓阳		
委员	才鸿年	马伟明	王小谟	王群书
(按姓氏笔画排序)	甘茂治	甘晓华	卢秉恒	巩水利
	刘泽金	孙秀冬	芮筱亭	李言荣
	李德仁	李德毅	杨伟	肖志力
	吴宏鑫	张文栋	张信威	陆军
	陈良惠	房建成	赵万生	赵凤起
	郭云飞	唐志共	陶西平	韩祖南
	傅惠民	魏炳波		

前 言

20 世纪 80 年代, 为了使巡航导弹能够规避威胁实现突防, 美军第一代任务规划系统应运而生。而后, 随着无人机的研制和大量部署, 任务规划技术也从最初的离线规划发展到在线实时规划, 从单一平台的规划发展到多平台协同规划。任务规划技术已成为无人飞行器系统的关键技术之一, 影响着其作战效能的发挥。

结合多年教学经验和国防科研工作积累, 本书针对无人飞行器的任务规划技术展开论述, 总结了近年来应用较多的相关优化方法, 并重点对无人飞行器任务模式、任务分配模型和航迹规划模型进行讲解。

本书由王玥、张克、孙鑫、周其忠、刘义先编写第 1 章、第 2 章、第 4 章、第 5 章和第 8 章, 周玲、曹晓文、张志强、佟训靓、李磊编写第 3 章、第 6 章和第 7 章, 王玥、董世建、徐东方、李兴斌完成了对书稿的编排和整理工作。

在本书的写作过程中, 北京理工大学朵英贤院士和马宝华教授给予了大力支持, 在此由衷地表示感谢。

本书是在多年科研教学成果基础上完成的, 由于作者学识和水平有限, 书中难免存在不当和待完善之处, 敬请广大读者和同行专家学者批评指正, 不胜感激。

王玥

2015 年 3 月

于北京理工大学

目 录

第 1 章 无人飞行器与任务规划系统概述	1
1.1 无人飞行器简介	1
1.1.1 典型无人飞行器简介	1
1.1.2 无人飞行器未来发展趋势	5
1.2 无人飞行器任务规划概述	6
1.3 任务规划问题的影响因素	9
1.4 任务规划系统发展及典型应用	10
1.4.1 任务规划系统的发展过程	10
1.4.2 各国任务规划系统的典型应用	11
1.5 现阶段存在的问题与挑战	13
1.5.1 无人飞行器任务规划空域的约束——感知与 规避问题	13
1.5.2 无人飞行器实时任务规划问题	16
1.5.3 无人飞行器自主任务规划问题	19
1.5.4 无人飞行器任务规划自主化面临的伦理问题	20
第 2 章 无人飞行器任务规划方法	23
2.1 无人飞行器任务规划方法简介	23
2.1.1 智能优化算法的兴起	23
2.1.2 智能优化算法的发展	25
2.2 多目标优化问题的求解方法	26
2.2.1 多智能体系统控制架构	26
2.2.2 集中式任务分配方法	28
2.2.3 分布式任务分配方法	29
2.3 传统优化算法	33

2.3.1	动态规划算法	33
2.3.2	Dijkstra 算法	35
2.4	智能优化算法	37
2.4.1	蚁群算法	37
2.4.2	遗传算法	40
2.4.3	粒子群优化算法	46
2.4.4	模拟退火算法	50
2.4.5	A* 算法	53
2.4.6	D* 算法	57
2.4.7	合同网协议方法	59
2.4.8	黑板模型算法	61
第 3 章	数字地图技术	65
3.1	地理信息系统	65
3.1.1	地理信息系统的发展史	65
3.1.2	地理信息系统的组成及功能	66
3.1.3	地理信息系统数据的查询方式	69
3.1.4	地理信息系统的应用与数字地图	69
3.2	数字地图概述	71
3.3	数字高程模型	74
3.4	数字地图技术在航迹规划中的应用	76
3.4.1	数字地图网格划分	77
3.4.2	数字地图的绘制与优化	78
3.4.3	数字地图中经纬度信息的使用	82
第 4 章	无人飞行器任务模式	87
4.1	无人飞行器侦察任务	87
4.1.1	无人飞行器侦察任务工作原理	87
4.1.2	无人飞行器侦察任务的关键问题	90
4.1.3	无人飞行器侦察任务规划方案	91
4.2	无人飞行器攻击任务	94
4.2.1	攻击过程与特点	94
4.2.2	无人飞行器攻击任务的关键问题	95

4.3	侦察攻击一体化任务	96
4.3.1	侦察攻击一体化任务过程	96
4.3.2	侦察/攻击一体化任务规划关键阶段	97
4.4	无人飞行器其他作战任务模式	98
4.4.1	通信中继任务	98
4.4.2	电子干扰任务	98
4.4.3	诱饵欺骗任务	99
4.4.4	空中预警任务	99
4.4.5	火力评估任务	100
第 5 章	无人飞行器任务分配模型与仿真	101
5.1	多无人飞行器集中式任务分配	101
5.1.1	矩阵全排列的基本思想	101
5.1.2	基于矩阵全排列的任务分配模型	103
5.1.3	基于矩阵全排列的协同任务分配仿真	105
5.2	多无人飞行器分布式任务分配	110
5.2.1	基于合同网的任务分配	111
5.2.2	基于合同网的任务分配模型	112
5.2.3	基于合同网的协同任务分配仿真	113
第 6 章	无人飞行器航迹规划模型与仿真	126
6.1	航迹规划概述	126
6.1.1	航迹规划技术的发展	126
6.1.2	航迹规划的求解过程	127
6.1.3	航迹规划需要解决的关键问题	128
6.1.4	无人飞行器的使用需求对算法的要求	130
6.2	基于改进 A*算法的航迹规划	131
6.2.1	A*算法的改进	132
6.2.2	双侧搜索模型	135
6.2.3	应用双侧搜索模型的航迹规划仿真	143
6.3	基于改进遗传算法的航迹规划	148
6.3.1	遗传算法动态适应度函数的引入	148
6.3.2	种群初始化模型	152

6.3.3	基于改进遗传算法的航迹规划仿真	155
第7章	无人飞行器任务规划评价方法	168
7.1	评价的必要性	168
7.2	基于毁伤效能最优的评价方法	168
7.2.1	炸点的确定	170
7.2.2	目标描述	171
7.2.3	目标坐标杀伤规律	171
7.2.4	随机数的产生	173
7.2.5	样本容量的确定	173
7.3	基于飞行性能最优的评价方法	174
7.3.1	影响航迹规划评价的因素	174
7.3.2	基于 Simulink 的飞行器六自由度弹道模型	174
7.4	评价计算	175
7.4.1	仿真初始条件	175
7.4.2	仿真结果分析	176
第8章	无人飞行器任务规划系统的工程研制	179
8.1	概述	179
8.2	任务规划系统的组成	179
8.3	任务规划系统的物理形态	183
8.4	任务规划系统部署	184
8.5	任务规划系统保障数据	185
8.6	任务规划系统的试验验证	188
8.6.1	任务规划系统验证内容	189
8.6.2	验证方法	190
参考文献		192

Contents

Chapter 1 Overview of UAV and Mission Planning System	1
1.1 Introduction of UAV	1
1.1.1 Introduction of Typical UAV	1
1.1.2 Future Trends for UAV	5
1.2 Overview of UAV Mission Planning	6
1.3 Influence Factors in Mission Planning Issues	9
1.4 Development and Typical Applications of Mission Planning System	10
1.4.1 Development of Mission Planning System	10
1.4.2 Typical Applications of Mission Planning System Abroad	11
1.5 Problems and Challenges at Current Stage	13
1.5.1 Restriction of UAV Mission Planning Airspace—— Sense and Avoid	13
1.5.2 Real-time Planning Issues of UAV	16
1.5.3 Autonomous planning Issues of UAV	19
1.5.4 Ethical Problems faced by Autonomous Mission Planning for UAV	20
Chapter 2 UAV Mission Planning Method	23
2.1 Introduction of UAV Mission Planning Method	23
2.1.1 Rise of Intelligent Optimization Algorithms	23
2.1.2 Development of Intelligent Optimization Algorithms	25
2.2 Solving Method of Multi-objective Optimization Problem	26
2.2.1 Multi-agent System Control Architecture	26

2.2.2	Centralized Task Assignment Method	28
2.2.3	Distributed Task Assignment Method	29
2.3	Traditional Optimization Algorithms	33
2.3.1	Dynamic Planning Algorithm	33
2.3.2	Dijkstra Algorithm	35
2.4	Intelligent Optimization Algorithms	37
2.4.1	Ant Colony Algorithm	37
2.4.2	Genetic Algorithm	40
2.4.3	Particle Swarm Algorithm	46
2.4.4	Simulated Annealing Algorithm	50
2.4.5	A* Algorithm	53
2.4.6	D* Algorithm	57
2.4.7	Contract Net Protocol Method	59
2.4.8	Blackboard Model Algorithm	61
Chapter 3	Digital Map Technology	65
3.1	Geographic Information System (GIS)	65
3.1.1	History of GIS	65
3.1.2	Components and Functions of GIS	66
3.1.3	Query Methods of GIS Data	69
3.1.4	GIS Applications and Digital Map	69
3.2	Digital Map Overview	71
3.3	Digital Elevation Model (DEM)	74
3.4	Digital Map Technology Applications in Route Planning	76
3.4.1	The Gridding of Digital Map	77
3.4.2	Drawing and Optimization of Digital Map	78
3.4.3	Use of Latitude and Longitude Information in Digital Map	82
Chapter 4	UAV Mission Mode	87
4.1	UAV Reconnaissance Mission	87
4.1.1	Operational Principles of UAV Reconnaissance Mission	87

4.1.2	Key Problems in UAV Reconnaissance Mission	90
4.1.3	Reconnaissance Mission Planning Program for UAV	91
4.2	UAV Attack Mission	94
4.2.1	Attack Process and Characteristics	94
4.2.2	Key Problems in UAV Attack Mission	95
4.3	The Integration Mission of Reconnaissance and Attack	96
4.3.1	Process of Reconnaissance and Attack Mission Planning	96
4.3.2	Critical Stage of Reconnaissance and Attack Mission Planning	97
4.4	Other UAV Combat Mission Mode	98
4.4.1	Communication Relay Task	98
4.4.2	Electronic Interference Task	98
4.4.3	Decoy and Deception Task	99
4.4.4	Airborne Early Warning (AEW) Mission	99
4.4.5	Firepower Evaluation Mission	100
Chapter 5	UAV Task Assignment Model and Simulation	101
5.1	Multi-UAV Centralized Task Allocation	101
5.1.1	The Basic Idea of the Full-permutation Matrix	101
5.1.2	Task Allocation Model based on the Full-permutation Matrix	103
5.1.3	Collaborative Task Allocation Simulation based on the Full-permutati on Matrix	105
5.2	Multi-UAV Distributed Task Allocation	110
5.2.1	Task Allocation Based on Contract Net	111
5.2.2	Task Allocation Model Based on Contract Net	112
5.2.3	Collaborative Task Allocation Simulation based on Contract Net	113
Chapter 6	UAV Route Planning Model and Simulation	126
6.1	Route Planning Overview	126
6.1.1	Development of Route Planning Technology	126

6.1.2	Solving Process of Route Planning	127
6.1.3	The Key Problems Needed to Besolved During Route Planning	128
6.1.4	Algorithm Requirements for UAVU Sage Demand	130
6.2	Route Planning Based on Improved A* Algorithm	131
6.2.1	The Improvement of A* Algorithm	132
6.2.2	Bilateral Searching Model	135
6.2.3	Route Planning Simulation Based on Bilateral Searching Model	143
6.3	Route Planning Based on Improved Genetic Algorithm	148
6.3.1	Introducing Dynamic Fitness Function to Genetic Algorithm	148
6.3.2	Population Initialization Model	152
6.3.3	Route Planning Simulation Based on Improved Genetic Algorithm	155
Chapter 7	Evaluation Methods for UAV Mission Planning	168
7.1	Necessity of Evaluation	168
7.2	Evaluation Methods Based on Optimal Damage Effectiveness	168
7.2.1	Determination of Fried Points	170
7.2.2	Target Description	171
7.2.3	The Regular Pattern of CoordinateDamage of the Target	171
7.2.4	Random Number Generation	173
7.2.5	Determination of Sample Size	173
7.3	Optimal Evaluation Method Based on Flight Performance	174
7.3.1	Factors During Route Planning Evaluation	174
7.3.2	Six Degrees of Freedom Trajectory Model Based on Simulink	174
7.4	Evaluation and Calculation	175
7.4.1	Initial Conditions of Simulation	175

7.4.2	Analysis of Simulation Results	176
Chapter 8	Engineering Development of UAV Mission Planning	
System		179
8.1	Outline	179
8.2	Components of Mission Planning System	179
8.3	Physical Form of Mission Planning System	183
8.4	Deployment of Mission Planning System	184
8.5	Data Protection of Mission Planning System	185
8.6	Experimental Verification of Mission Planning System	188
8.6.1	Content verified in Mission Planning System	189
8.6.2	Verification Methods	190
Reference		192

第1章 无人飞行器与任务规划系统概述

1.1 无人飞行器简介

无人飞行器 (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) 是一种以自身程序或人在回路控制的不载人飞行器。在我国, 由于翻译的不同, 无人飞行器也通俗地称为无人机。与有人驾驶飞行器相比, 无人飞行器具有一些明显的优势: 不需要冒人员伤亡的风险、成本较低、不需战斗机护航即可潜入高威胁区执行多种任务等, 因此, 其任务领域已经从最初的靶机逐步拓展到侦察监视、目标搜索、毁伤评估、数据中继、火力打击等。

1.1.1 典型无人飞行器简介

在 1991 年海湾战争、1999 年科索沃战争、2003 年伊拉克战争以及最近的多次局部战争中, 各型军用无人飞行器均发挥了重要作用。下面针对近年来已经装备和在研的多款典型的无人飞行器进行介绍。

据美国海军介绍, 于 1986 年 12 月首飞的先锋系列无人飞行器为战术指挥人员提供了特定目标以及战场的实时画面, 执行了美国海军“侦察、监视并获取目标”等各种任务。先锋 RQ-2A 无人飞行器如图 1.1 所示。

这套无人飞行器的成本低, 满足了 20 世纪 80 年代美国在黎巴嫩、格林纳达以及利比亚以较小代价开展无人获取目标任务的要求。先锋号现在仍在服役, 通过火箭助推起飞, 起飞质量 416 磅, 航速 109 英里/小时 (1 英里=1.609km)。该款无人飞行器能够漂浮在水面, 通过海面降落进行回收。

通用原子 (General Atomics) 公司在 1994 年制造了 MQ 捕食者无人飞行器, 如图 1.2 所示。据不完全统计, 捕食者系列无人飞行器在