

MISSION PLANNING FOR UNMANNED AERIAL VEHICLES

无人飞行器任务规划

叶文 范洪达 朱爱红◎ 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

无人飞行器任务规划

Mission Planning for Unmanned Aerial Vehicles

叶文 范洪达 朱爱红 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

无人飞行器任务规划是实现无人飞行器自动导航的一项关键技术,是人工智能及导航、制导与控制领域中的重要研究方向之一。本书结合作者的研究工作,系统、深入地介绍了无人飞行器任务规划的概念、理论及方法。主要内容包括任务规划建模、任务规划数字地图技术、任务规划威胁信息建模技术、单无人飞行器航路规划、单无人飞行器多航路规划、多无人飞行器协同任务分配、多无人飞行器协同航路规划等多个方面。

本书适合于人工智能及导航、制导与控制相关专业的硕士、博士研究生作专业参考书,也适合于任务规划领域的科研工作者和工程技术人员作为参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

无人飞行器任务规划/叶文,范洪达,朱爱红编著.

—北京:国防工业出版社,2011.5

ISBN 978-7-118-07383-6

I. ①无... II. ①叶... ②范... ③朱... 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(2011)第060955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 13 $\frac{3}{4}$ 字数 242千字

2011年5月第1版第1次印刷 印数 1—4000册 定价 39.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

无人飞行器(Unmanned Aerial Vehicles, UAV)是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。与有人驾驶或者遥控飞行器不同,无人飞行器具有自动起降(发射)、自动驾驶、自动导航、自动快速准确定位、自动信息采集与传送等多项功能,特别适合代替人在危险、恶劣和极限的环境下完成特定的工作和任务,因此在军事、测绘、航空航天、商业等领域有着广泛应用。

无人飞行器在完成任务过程中,需要对如何有效、安全地完成自己的任务过程进行规划,这就是所谓的任务规划(Mission Planning)。无人飞行器任务规划包括针对单无人飞行器的任务规划和针对多无人飞行器协同作战的任务规划。单无人飞行器任务规划,就是自作战目标确定到作战任务完成的整个过程中,安排无人飞行器在飞行过程中执行何种飞行任务以及如何实施这些飞行任务,使无人飞行器生存概率和作战效能达到最佳。多无人飞行器协同任务规划,除了需要考虑任务本身构成要素的要求外,还必须考虑多个无人飞行器之间协调一致共同执行任务的约束关系,并根据任务规划指标为无人飞行器设计出协同的飞行航路,使其整体作战效能最优或近似最优。因此,无人飞行器任务规划是一个约束条件众多、复杂且耦合的多目标优化与决策问题,需要综合利用运筹学、智能计算以及计算几何等理论和技术降低问题求解难度并求解。

近年来,针对无人飞行器任务规划的特点和现有规划方法存在的问题,我们开展了一系列研究工作,本书是研究工作的总结。书中绝大部分内容取材于我们在国际、国内学术期刊和会议上发表的论文,细致而全面地展示了最新的研究成果和进展。

本书系统地讨论了无人飞行器任务规划的基本要素。第1章在对国内外主要任务规划方法综述的基础上,重点讨论了已有这些方法在实际使用过程中所存在的主要问题;第2章讨论了无人飞行器任务规划系统的体系结构,分别研究了单无人飞行器任务规划系统和多无人飞行器协同任务规划系统的逻辑结构;

第3章讨论了无人飞行器任务规划的数学建模,包括单无人飞行器任务规划的数学模型和多无人飞行器协同任务规划的数学模型;第4章介绍了航空数字地图的发展过程,重点讨论了数字地图的采用与处理,以及数字地图仿真数据的产生算法、地形数据的插值算法、特殊的地形平滑算法、任务规划对地形的特殊要求及其处理方法;第5章主要探讨了威胁空间的构建,主要包括威胁空间的组成要素、基本概念、生成过程等,并针对探测威胁,分别建立了雷达波探测和电磁干扰的威胁信息模型,针对火力威胁,分别建立了地空导弹和高炮的威胁信息模型;第6章针对单无人飞行器航路规划问题,分别介绍了四种航路规划方法,包括自适应伪并行遗传算法、改进蚁群算法、元胞自动机和元胞蚂蚁算法;第7章讨论了单无人飞行器多航路规划问题,研究了基于小生境克隆选择算法的单无人飞行器多航路规划方法;第8章针对多无人飞行器协同任务分配问题,讨论了基于混合离散粒子群算法的协同任务分配方法;第9章针对多无人飞行器协同航路规划问题,讨论了基于扩展 Voronoi 图模型与协同进化算法的协同航路规划方法。

目前,世界各国正在大力发展各种无人飞行器技术,为任务规划带来广阔应用前景的同时,也提出了新的需求和挑战。希望本书能够吸引更多的研究人员投身这一领域,将我国任务规划的理论和应用研究提高到新的水平。

本书由叶文同志策划和统稿,参加撰写的有范洪达、朱爱红同志。本书还参阅了国内外许多专家学者的文章和书籍,在此谨向他们表示感谢。

限于水平,错误和疏漏之处在所难免,请专家和读者不吝赐教。

作者
2010年6月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 任务规划研究的背景和意义	1
1.2 无人飞行器任务规划综述	2
1.2.1 无人飞行器任务规划问题	2
1.2.2 任务规划系统的应用现状	4
1.3 常用的任务规划方法	6
1.3.1 单无人飞行器航路规划方法	6
1.3.2 多无人飞行器协同航路规划方法	9
1.3.3 多无人飞行器协同任务分配方法	11
1.4 当前任务规划研究中存在的问题	12
1.5 本书的主要内容及安排	14
第 2 章 无人飞行器任务规划的系统结构	17
2.1 无人飞行器任务规划系统的本质分析	17
2.1.1 无人飞行器任务规划系统的概述	17
2.1.2 无人飞行器任务规划系统的特点	19
2.1.3 无人飞行器任务规划系统的功能	19
2.2 多无人飞行器协同任务规划系统的体系结构	20
2.3 单无人飞行器任务规划系统的逻辑结构	22
2.4 多无人飞行器协同任务规划系统的逻辑结构	24
2.5 本章小结	26
第 3 章 无人飞行器任务规划的数学模型	27
3.1 单无人飞行器任务规划的数学模型	27
3.1.1 单无人飞行器航路规划模型	27
3.1.2 单无人飞行器多航路规划模型	29
3.2 多无人飞行器协同任务规划的数学模型	31
3.2.1 多无人飞行器协同任务分配模型	31
3.2.2 多无人飞行器协同航路规划模型	33

3.3	本章小结	35
第4章	任务规划数字地图技术	36
4.1	概述	36
4.1.1	航空数字地图	36
4.1.2	电子海图	38
4.2	数字地图的采集与处理	40
4.3	数字地图数据的模拟	42
4.3.1	地形统计特性分析	42
4.3.2	随机地形的模拟	43
4.3.3	特征地形的模拟	47
4.3.4	地形数据的插值	47
4.3.5	地形数据的平滑	50
4.4	本章小结	51
第5章	任务规划威胁信息建模技术	52
5.1	威胁空间的构建	53
5.1.1	威胁空间的组成要素	53
5.1.2	威胁空间的基本概念	56
5.1.3	威胁空间的生成过程	58
5.2	探测威胁信息建模	59
5.2.1	雷达探测威胁信息建模	59
5.2.2	电磁干扰威胁信息建模	60
5.3	火力威胁信息建模	60
5.3.1	地空导弹威胁信息建模	60
5.3.2	高炮威胁信息建模	61
5.4	本章小结	62
第6章	单无人飞行器航路规划	63
6.1	多目标优化问题的求解方法	63
6.1.1	多目标优化理论基础	63
6.1.2	多目标优化问题的求解方法	65
6.2	基于自适应伪并行遗传算法的航路规划	67
6.2.1	遗传算法分析	67
6.2.2	自适应伪并行遗传算法	71
6.2.3	基于自适应伪并行遗传算法的航路规划	74
6.2.4	仿真实验	77

6.3	基于改进蚁群算法的航路规划	78
6.3.1	蚁群算法分析	78
6.3.2	蚁群算法的改进	84
6.3.3	基于改进蚁群算法的航路规划	85
6.3.4	仿真实验	89
6.4	基于元胞自动机的航路规划	89
6.4.1	元胞自动机理论	89
6.4.2	基于元胞自动机的航路规划	94
6.4.3	仿真实验	98
6.5	基于元胞蚂蚁算法的单无人飞行器航路规划	100
6.5.1	蚁群算法与元胞自动机的混合	100
6.5.2	基于元胞蚂蚁算法的单 UAV 航路规划	105
6.5.3	仿真实验	107
6.6	本章小结	108
第7章	单无人飞行器多航路规划	109
7.1	单无人飞行器多航路规划问题求解方法	109
7.1.1	无人飞行器多航路规划的问题描述	109
7.1.2	多峰值函数优化的求解方法	111
7.2	克隆选择原理分析	113
7.2.1	克隆选择原理	113
7.2.2	克隆选择算法的描述	116
7.2.3	克隆选择算法在函数优化中的应用	118
7.2.4	克隆选择算法同进化算法的比较	120
7.3	小生境克隆选择算法	121
7.3.1	小生境技术	121
7.3.2	克隆选择算法的改进	125
7.3.3	小生境克隆选择算法	127
7.4	基于小生境克隆选择算法的单无人飞行器多航路规划	129
7.4.1	抗体的编码	129
7.4.2	初始抗体的确定	131
7.4.3	抗体—抗原亲和度的确定	131
7.4.4	基于小生境适应值共享函数的亲和力调整	132
7.4.5	克隆操作	132
7.4.6	新抗体的补充	134

7.4.7	优秀抗体的记忆	134
7.4.8	单无人飞行器多航路规划流程	134
7.5	仿真验证与分析	135
7.6	本章小结	141
第8章	多无人飞行器协同任务分配	142
8.1	多目标整数优化问题求解方法	142
8.1.1	多目标整数优化问题的搜索与决策	142
8.1.2	多目标整数优化问题的求解方法	143
8.2	粒子群优化算法分析	144
8.2.1	算法的基本原理	144
8.2.2	粒子群算法的社会行为分析	145
8.2.3	粒子群算法的应用	146
8.2.4	粒子群算法与进化算法的比较分析	148
8.3	混合离散粒子群任务分配算法	150
8.3.1	离散粒子群算法	150
8.3.2	离散粒子群任务分配算法	153
8.3.3	离散粒子群算法与禁忌搜索的混合优化任务分配策略	157
8.4	基于混合离散粒子群算法的多无人飞行器协同任务分配	163
8.4.1	粒子的编码	163
8.4.2	初始粒子群的确定	164
8.4.3	适应度函数值的计算	164
8.4.4	粒子位置和速度的更新操作	164
8.4.5	粒子的局部搜索	165
8.4.6	多机协同任务分配算法的实现流程	166
8.5	仿真实验	167
8.6	本章小结	170
第9章	多无人飞行器协同航路规划	171
9.1	多无人飞行器协同航路规划问题求解方法	171
9.1.1	多无人飞行器协同航路规划	171
9.1.2	多无人飞行器协同航路规划问题的求解	172
9.2	威胁场的扩展 Voronoi 图模型的建立	173
9.2.1	Voronoi 图的基本理论	173
9.2.2	威胁场的扩展 Voronoi 图模型	174
9.2.3	针对突发威胁的扩展 Voronoi 图模型	177

9.2.4 Voronoi 图与扩展 Voronoi 图的比较分析	177
9.3 多机航路规划的协同控制	179
9.3.1 协同进化理论	179
9.3.2 基于协同进化算法的空域协同	186
9.3.3 基于层次分解策略的时域协同	187
9.4 基于扩展 Voronoi 图模型与协同进化算法的协同航路规划	190
9.4.1 威胁场扩展 Voronoi 图的构造	190
9.4.2 无人飞行器可行航路的编码	191
9.4.3 初始化种群的建立	192
9.4.4 单条航路适应度的计算	192
9.4.5 进化操作	192
9.4.6 空域协同操作	193
9.4.7 时域协同操作	194
9.4.8 多无人飞行器协同航路规划流程	194
9.5 仿真实验	195
9.6 本章小结	200
参考文献	201

第 1 章 绪 论

1.1 任务规划研究的背景和意义

自古以来,人类一直向往能像鸟儿一样在空中自由翱翔。1903年,莱特兄弟驾驶飞机成功飞上天空,使人类的这一梦想变成了现实。飞行器发展至今,从体积庞大、载重惊人的客货运飞机,到速度高达数倍声速、性能卓越的战斗机,人类在飞行器领域的研究可谓硕果累累。随着计算机、自动化、信息技术的发展,现代飞行器技术也发生了巨大的变化,飞行器的种类越来越多,结构越来越复杂,技术越来越密集。现代飞行任务的难度、危险度以及强度正在不断增加,限于飞行员的生理和心理承受极限,单纯依靠手工操纵完成复杂的飞行任务变得越来越困难。例如,在地形跟随飞行过程中,视觉效应会使飞行员精神高度紧张,对速度的控制容易诱发长周期振荡。因此,如何最大程度地给飞行器赋予智能,实现自主导航与控制深受国内外研究人员的关注。任务规划作为飞行器自主导航的关键技术之一,已成为目前一大研究热点。

任务规划是一门伴随现代信息技术而发展起来的高新技术,已被广泛应用于飞行器、水面舰艇、地面车辆及机器人等的导航系统中。本书主要研究无人作战飞机、巡航导弹等无人飞行器(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)中的任务规划问题。

有人飞行器一般需要预先进行任务规划。同样,无人飞行器执行作战任务,也必须预先进行任务规划。由于无人驾驶,UAV对任务规划的要求更为严格,需要更为详细的飞行航路(如空间和时间)信息、攻击目标和武器投放信息。也正因为无人驾驶,任务规划在很大程度上决定了UAV执行任务的作战效能、作战代价以及生存概率等。

UAV任务规划包括针对单UAV的任务规划和针对多UAV协同作战的任务规划,即单UAV任务规划和多UAV协同任务规划。单UAV任务规划,就是自作战目标确定到作战任务完成的整个过程中,安排UAV在飞行过程中执行何种飞行任务,以及如何实施这些飞行任务,使UAV生存概率和作战效能达到最佳。单UAV任务规划从功能上包括单UAV航路规划和单UAV多航路规划。

单 UAV 航路规划指在特定约束条件下,寻找 UAV 从初始点到目标点并且满足某种性能指标最优的飞行航路,其目的就是要利用地形和敌情等信息,规划出生存概率最大的 UAV 突防航路。单 UAV 多航路规划是预先规划出多条航路,在任务执行时可以根据不同需要临时决定选择合适的飞行航路。这样选择的航路并不一定是最优的,但必须能够保证顺利完成飞行任务。多 UAV 协同任务规划,除了需要考虑任务本身构成要素的要求外,还必须考虑多个 UAV 之间协调一致共同执行任务的约束关系,并根据任务规划指标为 UAV 设计出协同的飞行航路,使其整体作战效能最优或近似最优。多 UAV 协同任务规划从功能上包括多 UAV 协同任务分配和多 UAV 协同航路规划。多 UAV 协同任务分配指为多 UAV 协调一致完成任务,考虑各种约束条件,为 UAV 分配攻击目标,进行编队配置等。多 UAV 协同航路规划根据 UAV 任务的约束条件、UAV 性能以及战场环境等因素同时为多个 UAV 设计完成任务的多条飞行航路,并满足 UAV 在空间和时间上的协调一致关系。因此,UAV 任务规划是一个约束条件众多、复杂且耦合的多目标优化与决策问题,需要综合利用运筹学、智能计算以及计算几何等理论和技术降低问题求解难度并求解。

美国和北约国家过去已经开发了各种用于飞行器的任务规划系统。目前,美国空军 X-45 型系列 UAV 已验证了地面任务控制站的预先任务规划功能、多 UAV 协同飞行的任务控制能力等。相对国外任务规划研究开始较早且比较充分而言,国内任务规划技术研究起步较晚,基本处于资料跟踪与消化阶段,缺乏理论和技术储备。因此,面向我国未来 UAV 系统的作战使用,必须在这方面立足国情,尽快开展 UAV 任务规划技术研究,尤其是 UAV 任务规划中核心技术任务分配和航路规划方法的研究。

为了提高和确保 UAV 的作战有效性和生存能力,减轻决策人员和操纵人员的负担,应着力于 UAV 任务规划技术的研究工作,以适应未来战争的信息化、智能化和无人化发展趋势,有必要深入研究满足战术限制条件的 UAV 任务规划,这将具有重要的理论意义、工程应用及军事价值。

1.2 无人飞行器任务规划综述

1.2.1 无人飞行器任务规划问题

UAV 任务规划的目的是在作战任务完成的整个过程中,确定如何实施飞行任务,使 UAV 生存概率和作战效能达到最佳。由于 UAV 自身动力特点以及所执行任务的多样性、协同性,这些都给解决 UAV 任务规划问题带来很大的困难。

UAV 在飞行过程中受多种因素影响,各因素之间往往相互耦合,同时还必须满足各种约束条件,因此在任务规划过程中需要协调多种因素之间的关系。具体来说,UAV 任务规划需要考虑如下因素。

1. 航路的隐蔽性

航路的隐蔽性是任务规划问题需要考虑的首要因素。在现代战争环境中,隐蔽意味着安全。在现代 UAV 设计过程中,一般会使雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)尽可能小,以降低被敌方预警雷达和截获雷达探测到的概率,延迟或消除被地空导弹系统或机载拦截导弹的火控雷达对它们的跟踪,从而提高 UAV 的生存能力。

然而,尽管 UAV 在设计时已采用了多种隐身技术,但在高空仍然会有部分雷达信号被反射回去,于是设计一条具有良好隐蔽性的飞行航路就十分关键。通常,人们所采用的隐蔽方式有两种:一是使规划航路远离威胁源;二是降低飞行高度,利用地形遮挡作用和反射的地面杂波来降低被雷达探测到的概率。

2. UAV 的物理限制

任务规划时,必须考虑 UAV 的物理限制,否则 UAV 将不可能按生成的航路进行飞行。UAV 的物理限制对航迹有如下约束。

(1)最大拐弯角。它限制了生成的航路只能在小于或等于预先确定的最大角度范围内转弯。该约束条件取决于具体 UAV 的性能和飞行任务。例如,在密集编队飞行中的 UAV 剧烈转弯将大大增加它们之间的碰撞概率。

(2)最大爬升/俯冲角。由 UAV 自身的机动性能决定,它限制了航路在垂直平面内上升和下滑的最大角度。

(3)最小航路段长度。它限制了 UAV 在开始改变飞行姿态之前必须直飞的最短距离。为减少导航误差,UAV 在远距离飞行时,一般不希望迂回行进和频繁地转弯。

(4)最低飞行高度。在通过敌方防御区时,需要在尽可能低的高度上飞行,以减少被敌防御系统探测到并摧毁的概率。但是,飞得过低往往会使得与地面相撞的坠毁概率增加。一般在保证离地高度大于或等于某一给定高度的前提下,使飞行高度尽量降低。

3. 飞行任务要求

UAV 的每一次飞行都是为了完成特定的飞行任务。在战场环境下,具体给定的飞行任务一般包括 UAV 的到达时间和进入目标方向等。这就要求任务规划满足如下要求。

(1)航路距离约束。即限制航路的长度必须小于或等于一个预先设置的最大距离。它对应于燃料的供应量,或在某一固定时间内必须到达目标。

(2)固定的目标进入方向。确保 UAV 从特定的角度接近目标,从而对目标的最薄弱部位进行有效攻击。

4. 协作性要求

UAV 的协作性能也是任务规划必须考虑的因素之一。例如,某一特定的任务要求多个 UAV 从不同的方向对同一目标实施攻击。为了使摧毁目标的概率达到最大,要求所有 UAV 同时到达。在此任务执行过程中,如果某一 UAV 遇到威胁需要改变其到达时间的话,其他 UAV 必须做相应调整。因此,整个飞行编队的预计到达时间(Estimated Time of Arrival,ETA)并不一定是完全按照原定的时间,而是在规划过程中相互协调的动态结果。在这种情形下,如何为每一 UAV 生成有效的航路,并协调 UAV 的到达时间是完成攻击任务的关键。

5. 实时性要求

当预先具备完整精确的环境信息时,人们可一次性规划出一条自起点到终点的最优航路。其中,一方面由于战场环境的瞬息万变,难以保证获得的环境信息不发生变化。另一方面,由于任务的不确定性,UAV 常常需要临时改变所担负的飞行任务。例如,UAV 需要执行紧急救援任务,或者需要迅速逃离威胁区域等。在这些情况下,不可能预先在地面规划出满足要求的航路。对于上述第一种情形,在环境的变化区域不是很大的情况下,可以通过局部更新的方法进行航路在线再规划。对于第二种情形,或者环境的变化区域较大时,则必须具备实时在线规划功能。

1.2.2 任务规划系统的应用现状

任务规划系统最初起源于空间探索。20 世纪 80 年代,外军开始研究军事领域飞行器任务规划系统。任务规划技术在军事发达国家,尤其美国、英国以及法国研究深入,应用较广泛。任务规划系统在海湾战争期间首次被使用,为多国部队的成功作战做出了很大贡献;美军打击阿富汗塔利班作战和最近的伊拉克战争中,更是广泛地使用了任务规划系统,为快速行动奠定了基础。在美军各个军兵种,各指挥层面都先后发展了多种类型的任务规划系统,并在近年来的历次局部战争中得到了实际的、较为成功的应用,并不断加以改进。目前,美国在该方面暂时处于世界领先地位。

1. 美军任务规划系统的应用现状

美国的陆海空三军都装备有不同类型的任务规划系统,如空军的上层任务规划系统有战术专家任务规划装置 TEMPLAR、军级任务规划系统 FLAPS 和先进任务规划系统 APS;空军的战术级任务规划系统有任务支援系统 MSS II 系列,以及后继的空军任务支援系统 AFMSS。其中,MSS II 系列曾在海湾战争中

广泛使用,提高了精确制导武器在首战中的命中率,并在战争中不断完善。

1) 美国空军的上层任务规划系统

美国空军在海湾战争前开始研制上层任务规划系统。自 1988 年开始起,美国空军斥资 1400 万美元先后研制了战术专家任务规划装置、军级任务规划系统和先进任务规划系统。这 3 种系统属于联合军级使用的任务规划系统,装备于美国战术空军的战斗规划部,故被称为上层任务规划系统。

2) 美国空军的战术级任务规划系统

战术级任务规划系统是在上层任务规划系统进行规划的基础上,利用自己的计算机终端制作具体任务规划的系统。海湾战争中,美国所有参战部队和一些多国部队广泛使用了战术任务规划系统。其中,最典型的是美国的任务支援系统 MSS II。

3) 美国海军及海军陆战队的任务规划系统

美国海军用于航空兵作战的任务规划系统有战术飞机任务规划系统(TAMPS)和战术 EA-6B 任务规划系统(TEAMS),其功能与 MSS II 相似。美国海军陆战队的任务规划系统称为地图、操作、维修站(MOMS)系统,该系统用于支援 AV-8B 攻击机并已经获得战果。

4) 美国海军“战斧”巡航导弹的海上规划系统

美国海军的海上规划系统,又称战区任务规划中心,专用于战斧巡航导弹的作战规划。战术规划系统的主要功能是辅助任务规划人员进行“战斧”巡航导弹的攻击航线规划工作。

5) 美国陆军的任务规划系统

美国陆军的任务规划系统称为基于地形的任务规划系统(TMPW)。TMPW 用于营(大队)级陆军部队。它可用于实现战区可视化、分析和判读地形数据、作战状况、气象数据、干扰信息等。

2. 其他国家任务规划系统的应用现状

英国空军装备 Pathfinder 2000 任务规划系统和先进任务装置(AMPA),能在夜间和恶劣天气条件下支持“鹞”式 Gr.7、“狂风”战斗机及欧洲战斗机(EFA)等进行隐蔽攻击。

法国空军装备有 MIPSY、CINNA 和 CIRCE2000 三个系列的飞机任务规划系统,用于制作任务规划和攻击规划。在 1991 年海湾战争中用于为科威特作战飞机制作攻击任务规划。

意大利马可尼公司根据军方要求,开发具有任务规划能力的任务支持系统,既可用于地面对空指挥,也可在稍加改装后,加装在作战飞机平台上,成为战术飞行管理系统的组成部分。

1.3 常用的任务规划方法

1.3.1 单无人飞行器航路规划方法

目前,关于单 UAV 航路规划方法的研究比较充分,取得了大量的成果。航路规划是机器人学研究中最重要领域之一,这方面的研究已有很长的历史。Canny 在 1988 年已经证明航路规划是一个 NP 问题,对其直接求解往往导致组合爆炸。为了加速规划进程,近年来国内外学者已提出了许多不同的规划方法。下面对已有的规划方法加以概述。

1. 最速下降法

S. J. Asseo 于 1982 年提出了应用最速下降法求解地形跟随/地形回避/威胁回避(TF/TA²)问题。这种方法是建立在目标函数梯度法基础上的,先考虑飞行器的横向约束条件,计算生产水平面的二维航路,然后用抛物线拟合法计算沿水平面航路的垂直面航路。该方法将优化过程限制在二维平面内,改善了寻优的收敛性,加快了收敛速度,但不能保证全局最优解。由于此算法建立在目标函数梯度基础上,因此需要进行大量的迭代计算,而且目标函数必须导函数连续,否则无法应用此方法。此外,此类方法中关于威胁的考虑过于简单,仅以飞行方向同可能威胁方向的夹角作为威胁大小的计算依据。同时,将威胁场迭加于地形之上,相当于通过增加地形的高度来实现对威胁场的处理,从而不能反映地形对威胁的遮蔽作用。

该算法比较简单,收敛速度较快,需要地形一阶偏导连续,相对最优控制对地形要求不高;梯度法由于受自身固有条件的限制,确定了梯度法的求解结果在很大程度上不是最优解。

2. 最优控制方法

最优控制方法是以速度方向与地形的切平面坐标轴的夹角作为控制量,飞行器的位置作为状态变量,将路线规划问题化为一起点固定、终端自由、时间自由的最优控制问题,通过不断地改变初始航向的方法,使路线的终点接近目标点。这种方法的优点在于将两端固定的问题简化为一端固定、一端自由的问题,大大简化了伴随向量的求解。

最优控制方法模型相对复杂,模型参数调整复杂,容易发散,对地形要求二阶偏导连续,终点位置的初始航向与地形的复杂关系很难确定。

3. 模拟退火法

模拟退火法是模拟了热力学中的退火过程。在航路规划问题中,退火法将

“加热”在起始点附近一定范围内的所有点,然后不断进行迭代计算,使所有的点的温度都逐渐冷却。冷却的速度根据一个随机产生的冷却时间表决定。禁飞区域被赋予更高的能量状态。因而,冷却的过程将回避这些区域,在迭代一定时间后,通过寻找规划区域的最低温度,可以得到最优航迹。模拟退火可获得全局最优解。

模拟退火法有全局最优、方法简单的优点,但运算速度仍很慢。

4. 动态规划法

动态规划是一类多阶段决策过程的最优化方法。动态规划法是针对存在多个空中封锁和地面障碍等多约束的情况下,采用航路图分类法进行航路规划。飞行器根据约束,在有限的探测和处理范围内,根据不同的滚转角度,得到下一时刻飞行器可能到达的位置,并在新的飞行点上,计算再下一时刻的位置。以此类推,得到一棵航路数,比较树枝终点的性能指标并找到代价最小的节点,反向搜索其父节点,得到最优航路,如图 1-1 所示。因为动态规划具有维数爆炸特性,如果在大范围内进行动态搜索,计算机无法处理大量的信息,因此在一定范围内搜索。但这种结果会得不到全局最优航路,这就必须两者权衡考虑。但动态规划法模型简单,对地形要求不高,算法不依赖于威胁场的连续性,容易实现。

动态规划法模型简单,对地形要求不高,算法不依赖于威胁场的连续性,容易实现;适于小范围内路线规划,对于范围较大的区域会出现组合爆炸。

5. 电势理论法

在航路优化过程中,将整个突防区域看成一个电场,飞行器是在电场中带正电的自由运动物体,各种威胁看作为带正电的带电体,根据同性相斥的原理,可以保证飞行器在飞行中有效的回避威胁。同时,为了使飞行器飞向目标点,将目标点看成带很大负电荷的带电体,根据异性相吸的原理保证飞行器飞向目标点(图 1-2)。该算法在计算过程中,只用当前位置临近诸点的信息,计算速度快,

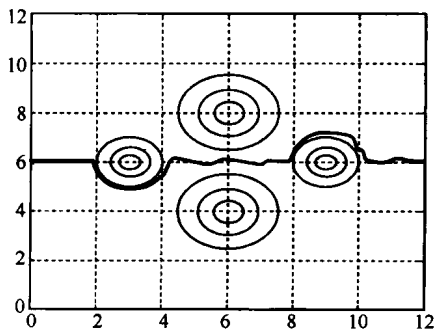


图 1-1 动态规划法航路图

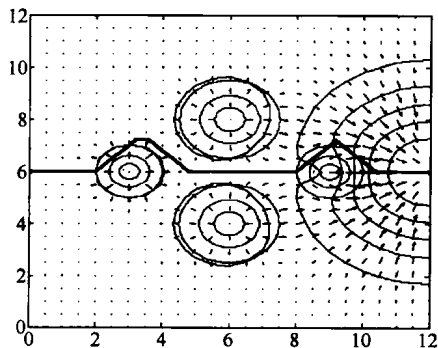


图 1-2 电势理论法航路图