



陕西出版资金精品项目

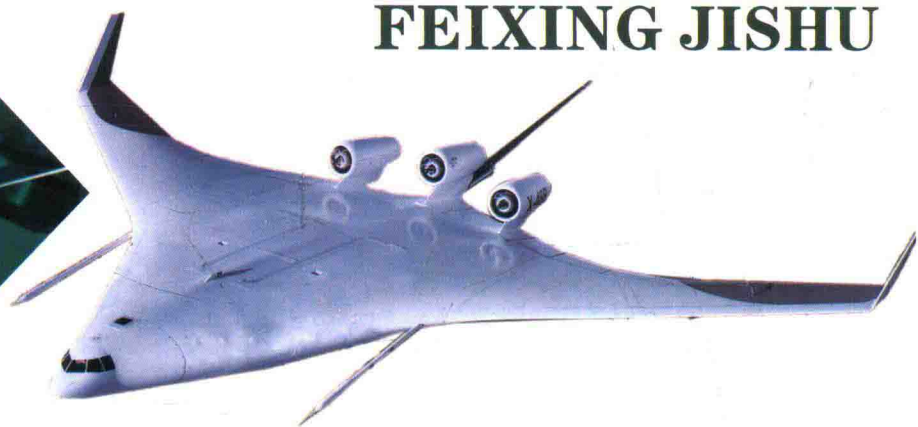
无人机系统研究与应用出版工程



# 无人机编队飞行技术

王新民 王晓燕 肖 堃◎著

WURENJI BIANDUI  
FEIXING JISHU



西北工业大学出版社



无人机系统研究与应用出版工程  
陕西出版资金精品项目

WURENJI BIANDUI FEIXING JISHU

# 无人机编队飞行技术

王新民 王晓燕 肖 堃 著

西北工业大学出版社

**【内容简介】** 本书系统而全面地介绍了无人机编队飞行中的关键技术问题,提出了一系列编队队形设计准则,建立了编队飞行数学模型,并对编队气动耦合进行了深入的分析,研究了多无人机协同航迹规划问题和三维无人机编队飞行控制系统的设计问题。

本书可供无人飞行器作战技术与指挥及相关专业高年级本科生和研究生学习参考,同时也适合从事无人飞行器设计、无人飞行器战术战法研究等方面的作战指挥决策者参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

无人机编队飞行技术/王新民,王晓燕,肖堃著. —西安:西北工业大学出版社,2015.9

ISBN 978-7-5612-4622-1

I. ①无… II. ①王… ②王… ③肖… III. ①无人驾驶飞机—编队飞行 IV. ①V279②V323.18

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 227517 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:(029)88493844 88491757

网 址:www.nwpup.com

印 刷 者:陕西宝石兰印务有限责任公司

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:16 彩插:8

字 数:289 千字

版 次:2015 年 11 月第 1 版 2015 年 11 月第 1 次印刷

定 价:45.00 元

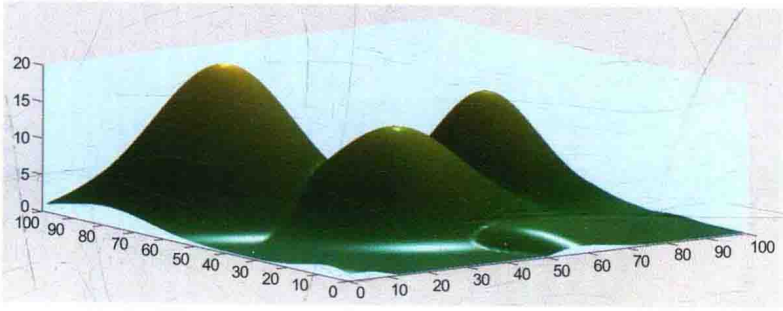


图5-11 三维自由构建C空间

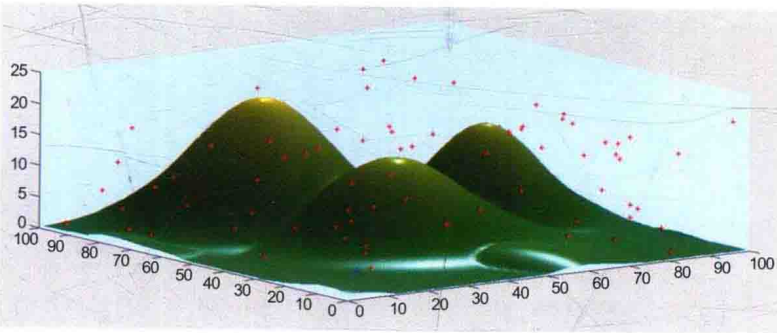


图5-12 随机采样点的分布

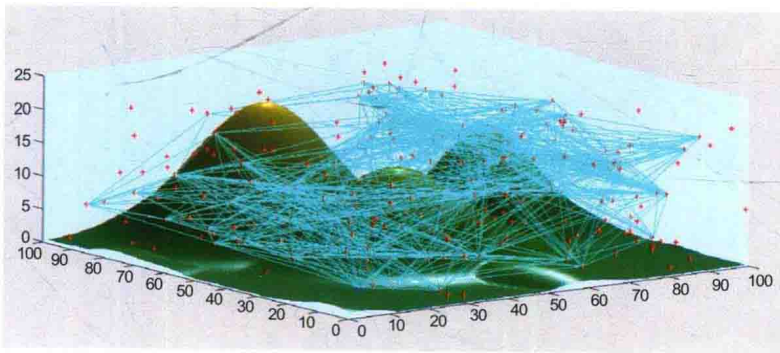
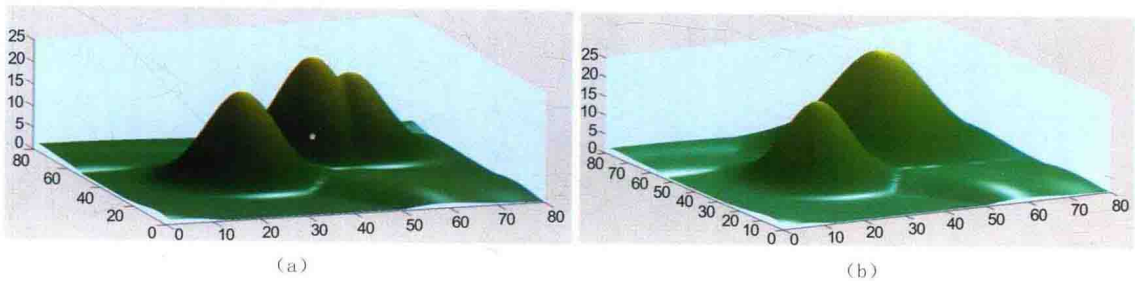


图5-13 概率地图的生成



(a)

(b)

图5-18 威胁源的连通过程

(a) 初始威胁源示意图；(b) 连通后的威胁源示意图

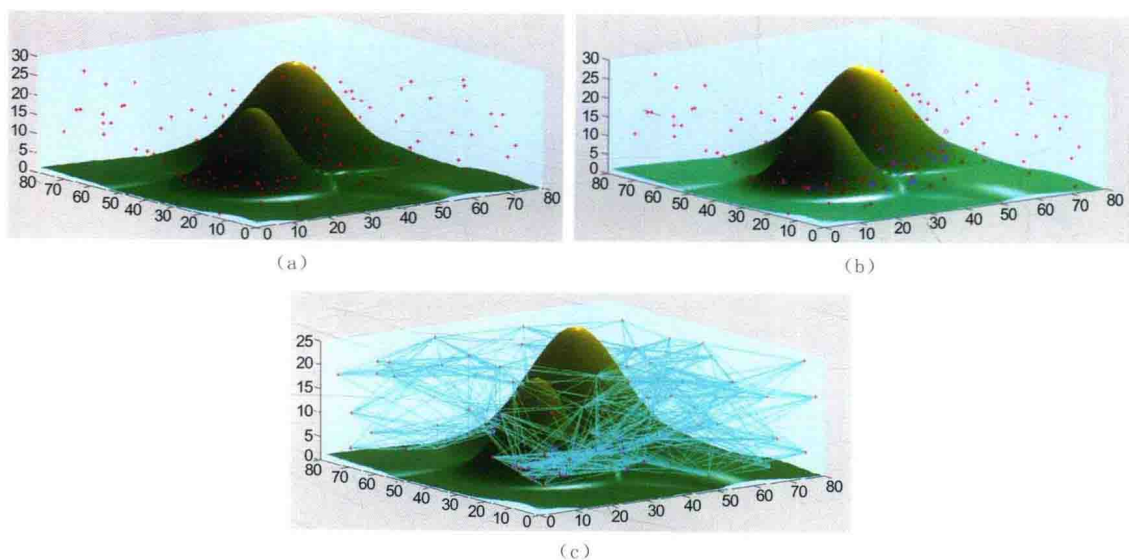


图5-19 模拟概率地图的生成过程

(a) 初始采样散点; (b) 进行地图增强; (c) 构成模拟概率地图

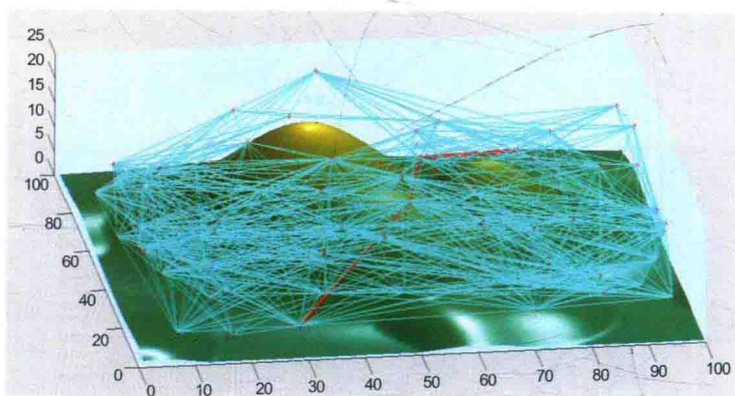


图5-20 飞行路径的搜索

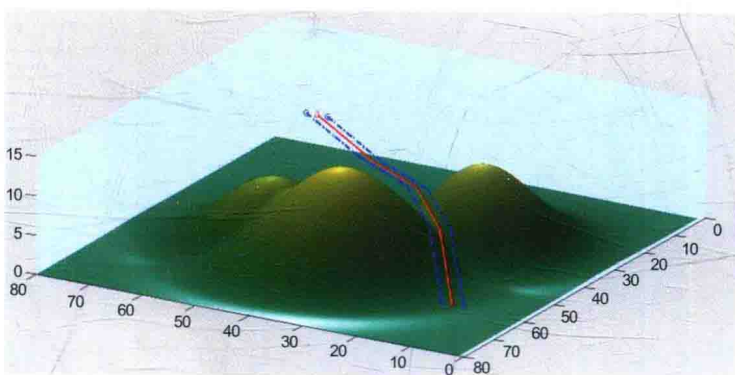


图5-21 多无人机协同编队飞行航迹

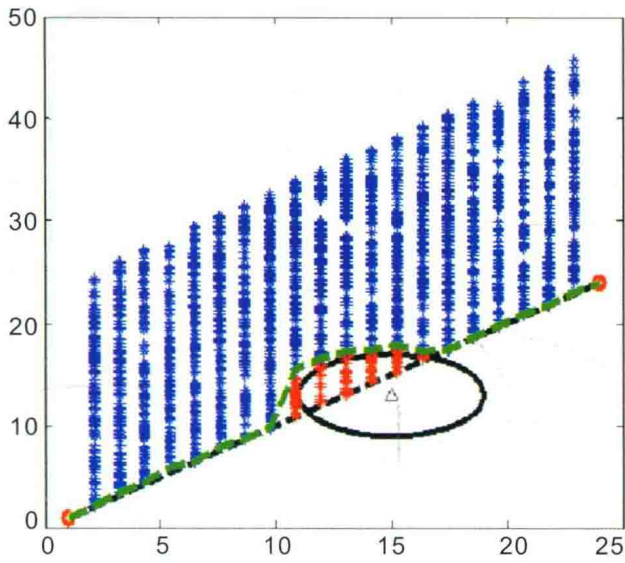


图5-24 二维平面单威胁实时重规划示意图

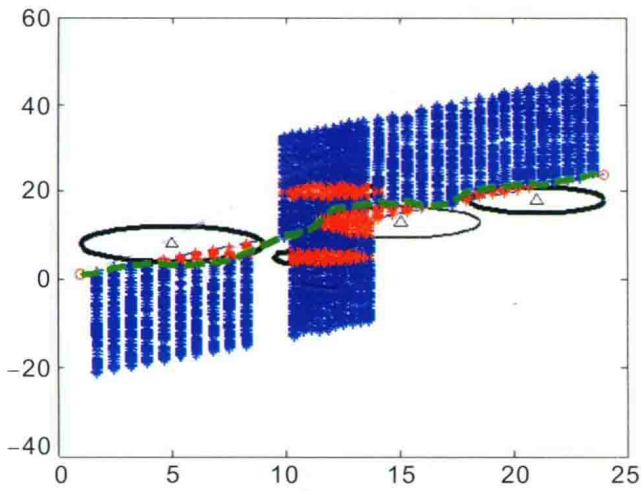
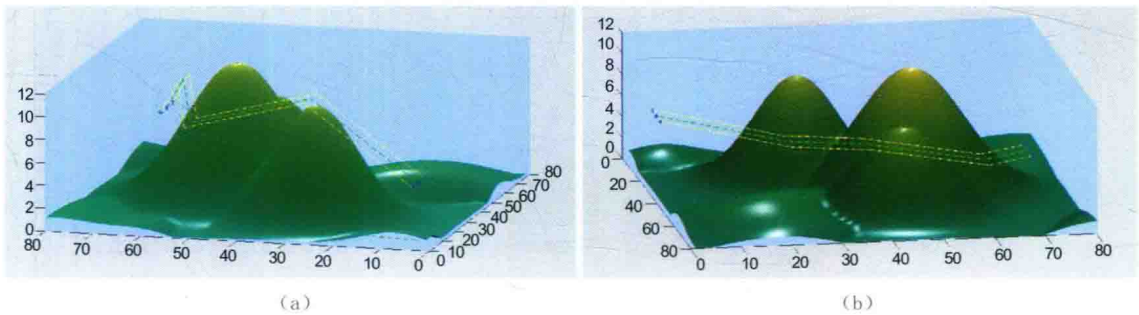


图5-25 二维平面多威胁实时重规划示意图



(a)

(b)

图5-26 多无人机协同编队飞行航迹平滑

(a) 平滑前的编队飞行航迹；(b) 平滑后的编队飞行航迹

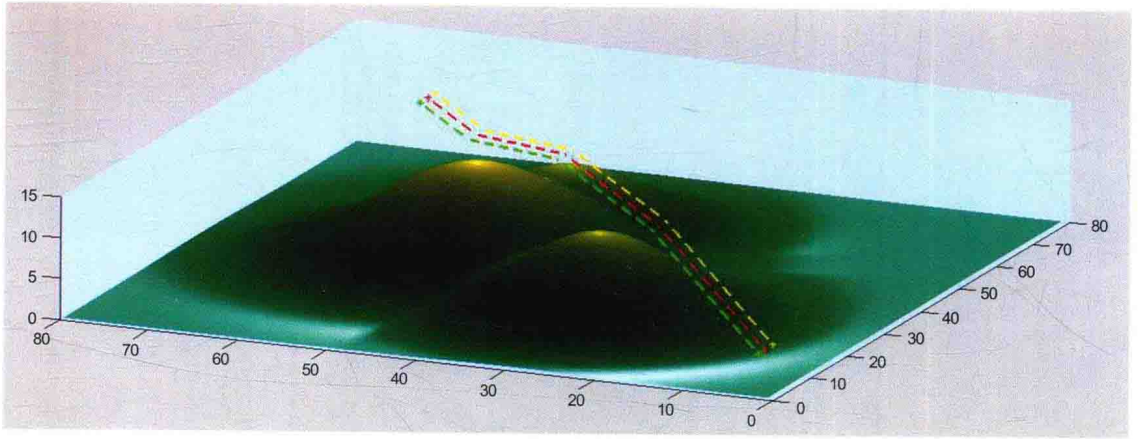


图5-27 多无人机离线协同编队飞行航迹

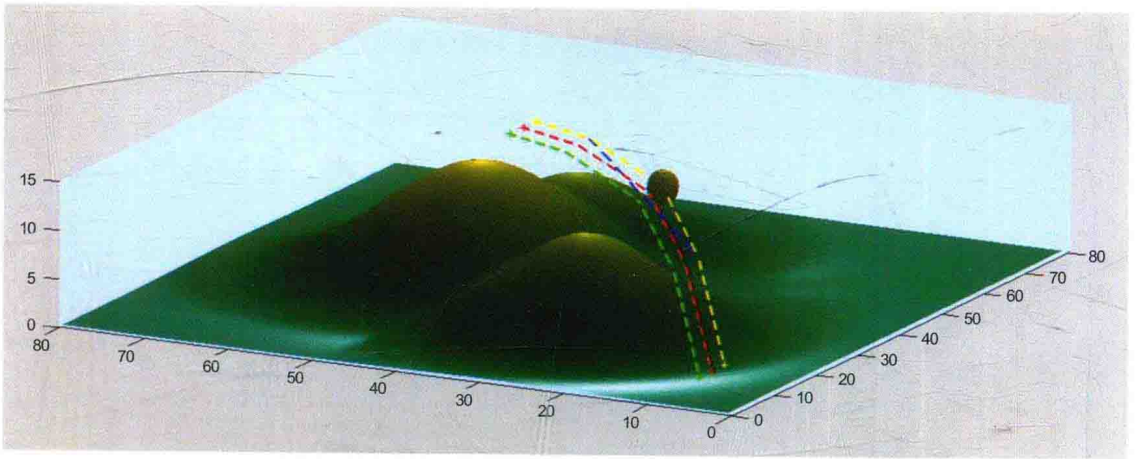


图5-28 多无人机实时协同编队飞行航迹

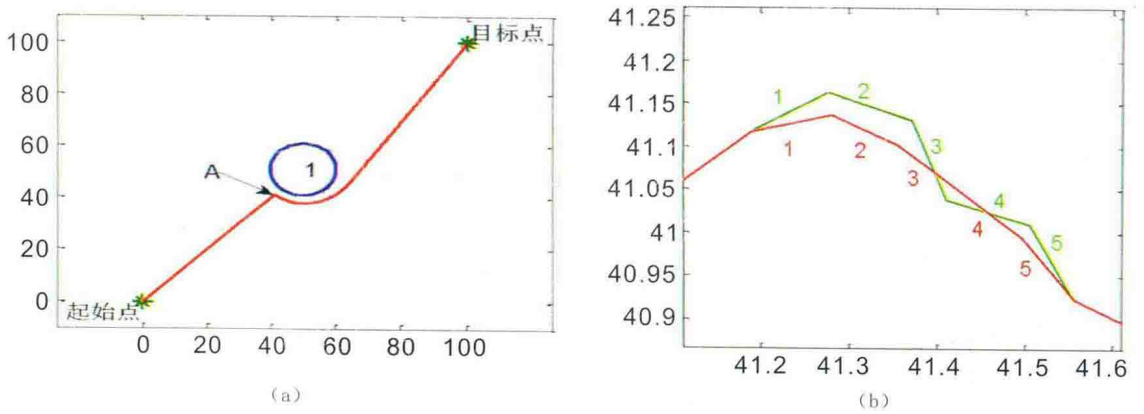


图5-38 考虑转弯角约束下的航迹规划

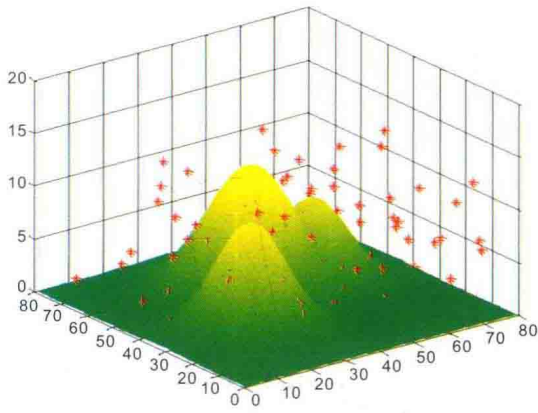


图5-42 采样点分布图

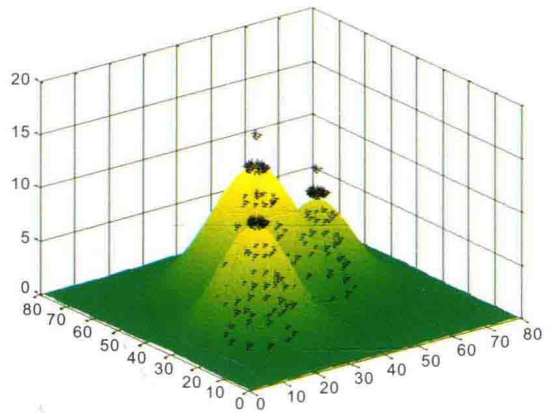


图5-43 概率地图增强

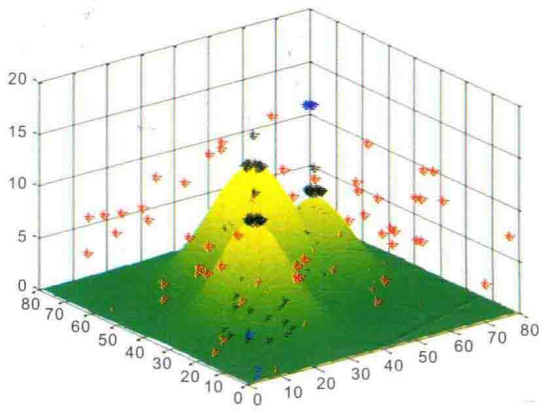


图5-44 概率地图

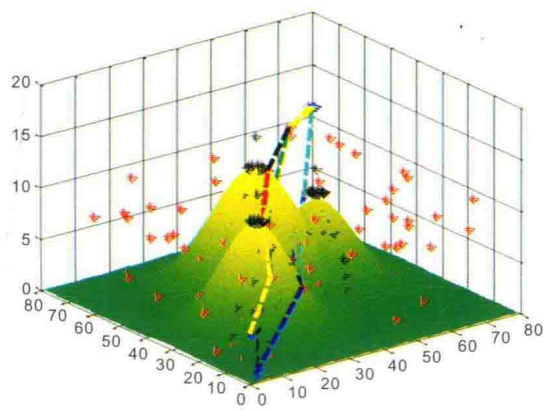


图5-47 前K条最短路径规划图

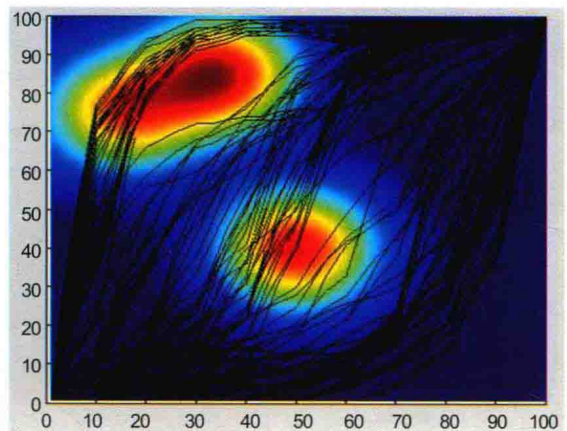
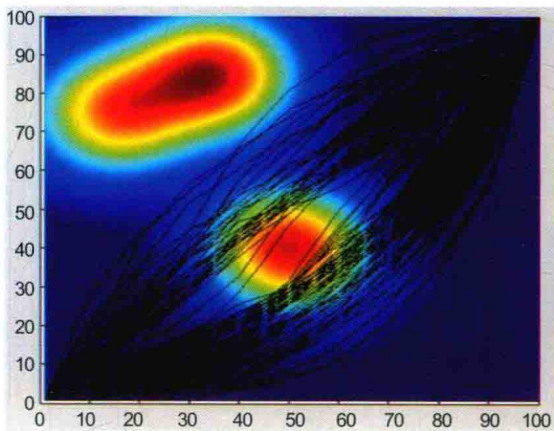
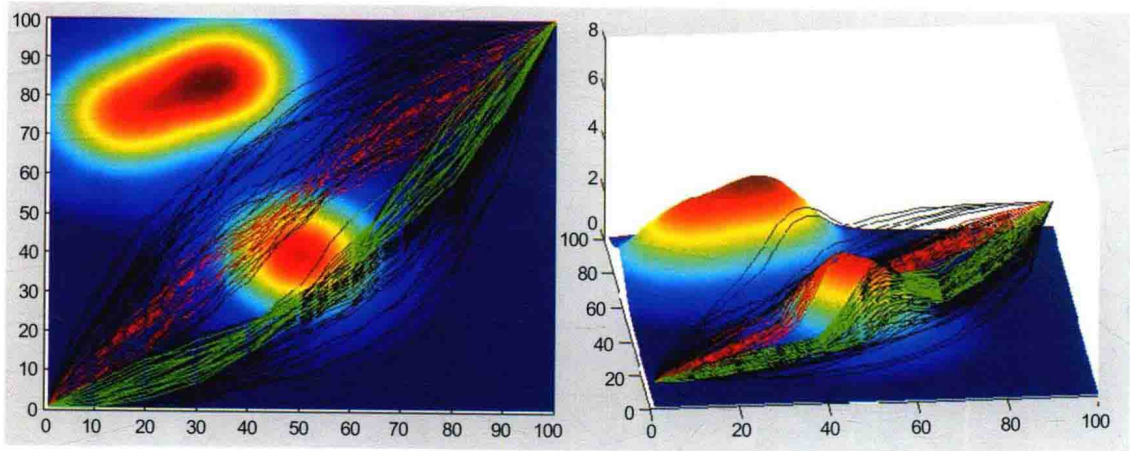


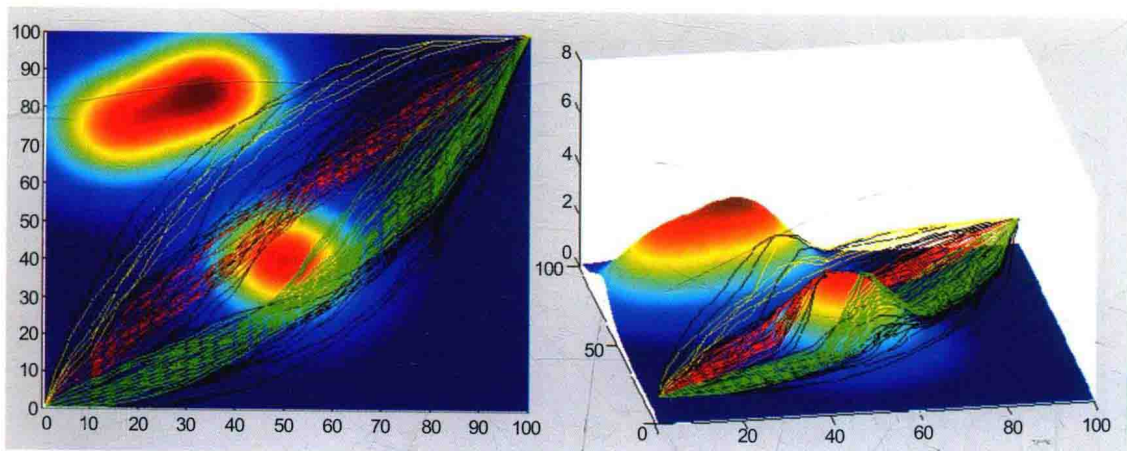
图5-52 航迹初始化示意图

(a)  $\varphi = 15^\circ$  ; (b)  $\varphi = 30^\circ$

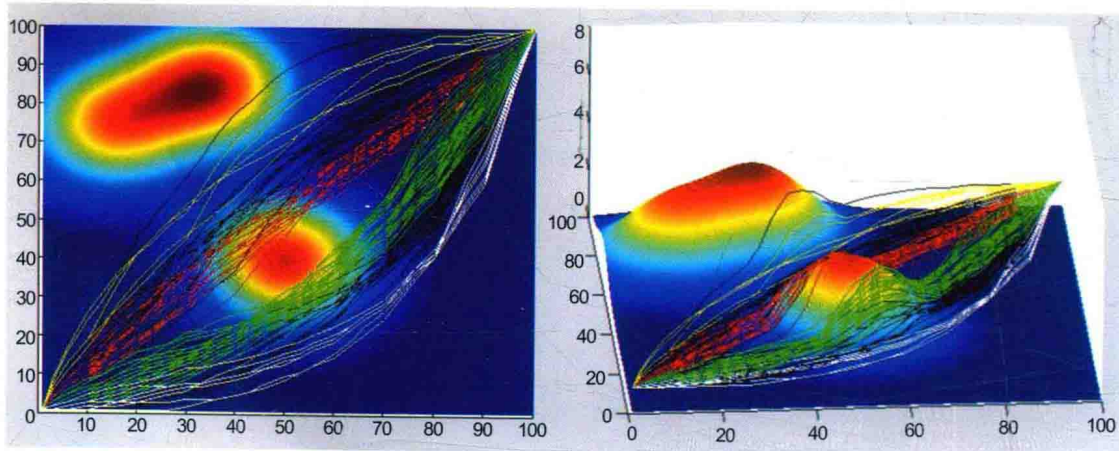




(a)



(b)



(c)

图5-53 小生境子种群划分结果

(a)  $n=2$ ; (b)  $n=3$ ; (c)  $n=4$

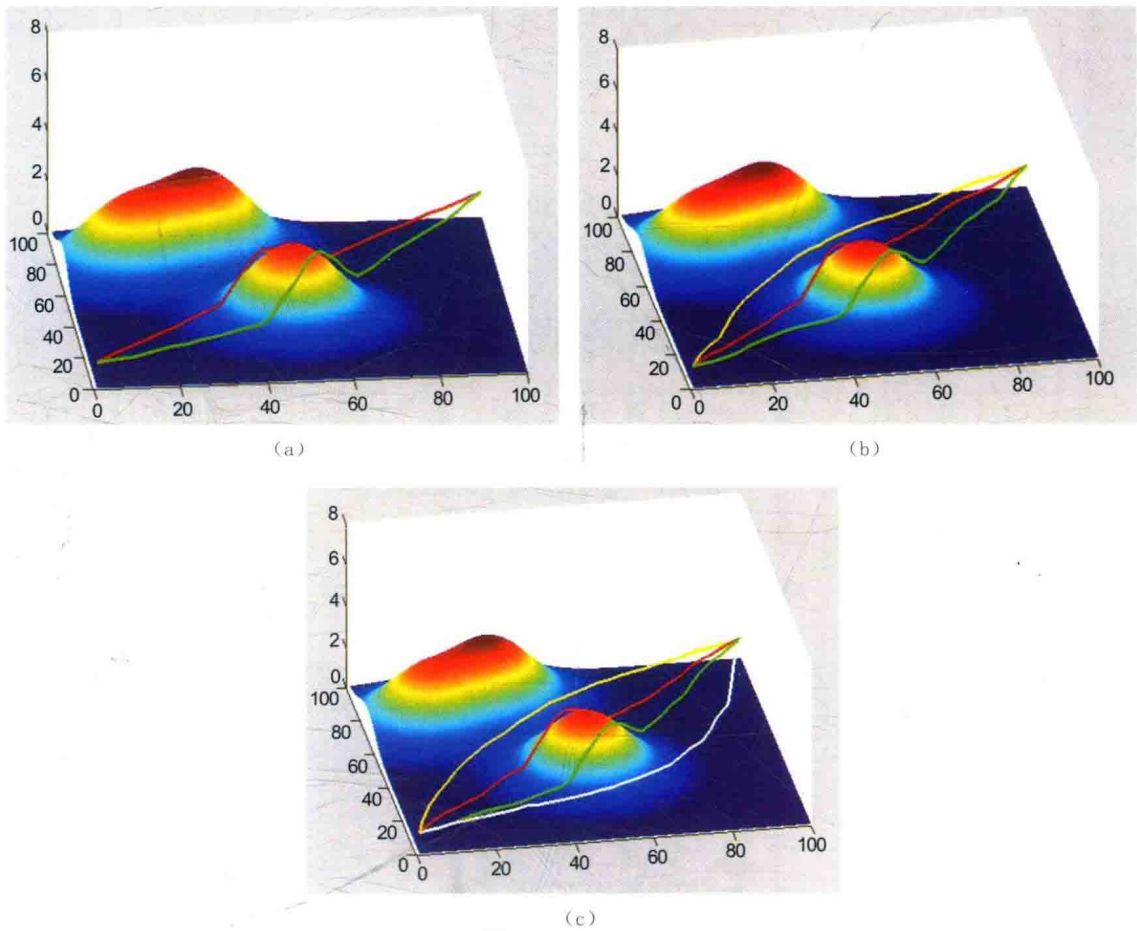


图5-54 基于小生境粒子群算法无人机编队航迹规划图

(a)  $n=2$ ; (b)  $n=3$ ; (c)  $n=4$

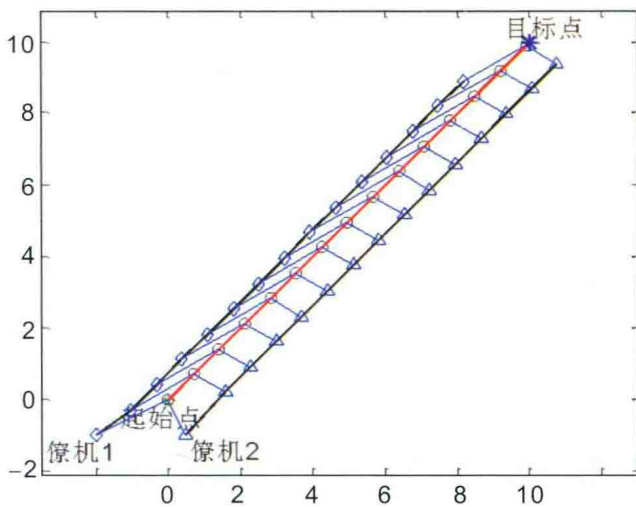


图6-89 基于人工势场的僚机跟随轨迹

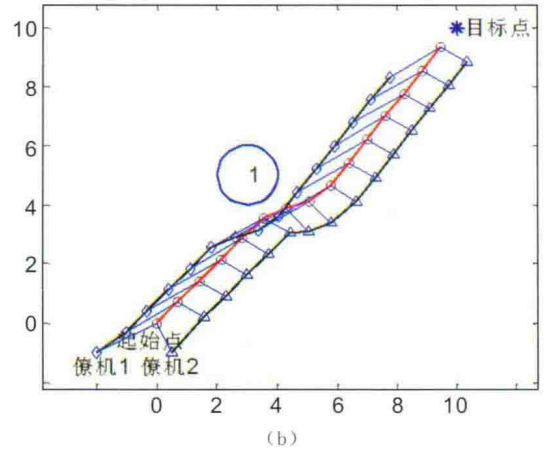
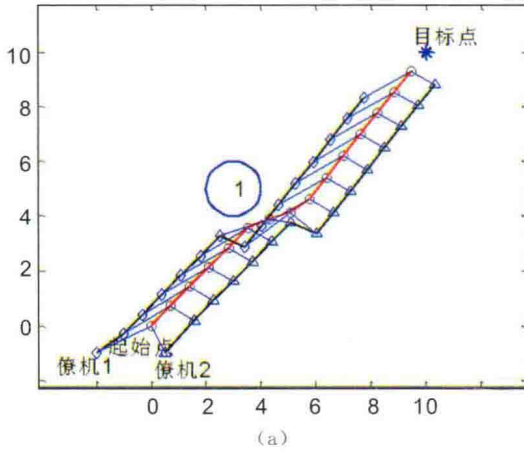


图6-90 障碍物环境下的编队轨迹

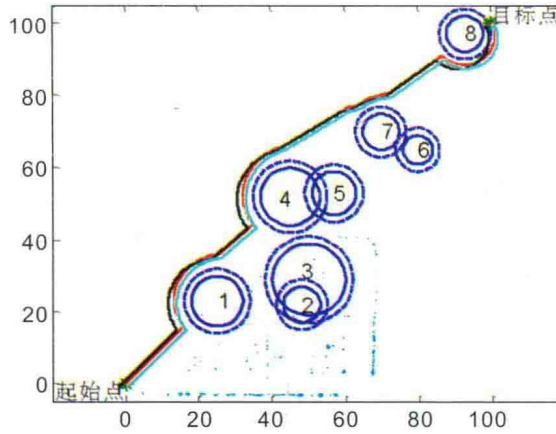


图6-91 长机-僚机编队控制跟随下的仿真航迹

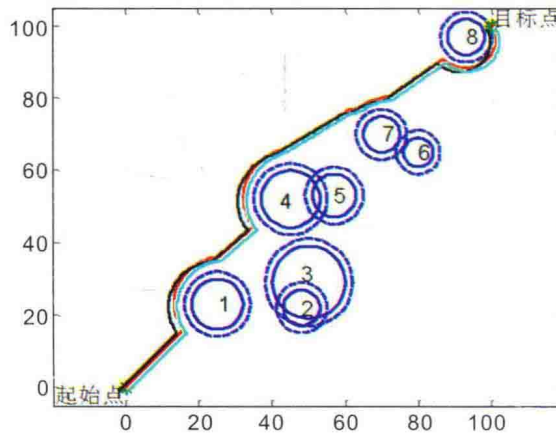


图6-93 多机编队航迹规划

# 前 言

无人机编队飞行的协同侦察、作战模式可以在一定程度上提高单机单次作战任务的成功概率,因而引起各国对无人机编队飞行的研究热潮。目前国外虽已取得了显著的研究成果,但离工程应用还有很大的差距,而国内研究才刚刚起步,还属于理论跟踪性研究。因此系统而全面地研究无人机编队飞行的关键技术,逐步实现其工程应用迫在眉睫。本书以无人机编队飞行为背景,全面探讨编队飞行的各项关键技术,并着重分析研究无人机编队队形设计、编队建模与气动耦合、航迹规划和编队控制等方面的内容。

本书共分6章。首先简要介绍无人机的发展历史以及单架无人机执行任务时面临的问题,引出无人机编队飞行的概念。参照国内外相关文献对无人机编队飞行的不同定义,提出较完备的无人机编队飞行的定义,概括了无人机编队的特点及编队飞行的优势。第2章结合近年来国内外无人机编队飞行的发展状况和一些主要的研究成果,系统而全面地介绍无人机编队飞行中的关键技术问题,主要包括队形设计、航迹规划、气动耦合、队形重构、编队方式、信息交互和传递、防撞控制、编队飞行控制以及硬件测试平台等方面。第3章提出无人机编队队形设计的定义,从编队几何形状设计、无人机数量、气动耦合等因素出发,详细分析、讨论无人机编队飞行的队形设计问题,提出一系列编队队形设计准则,并概括无人机编队的分类。第4章给出根据编队几何关系推导编队飞行相对运动学方程的方法,并对编队气动耦合进行深入的分析。第5章主要研究多无人机协同航迹规划,阐述一种多无人机协同覆盖航迹规划算法。对无人机执行覆盖任务的能力进行评价,得到无人机的任务性能指数。根据该性能指数及子区域的宽度,对待覆盖区域进行划分,并分配给相应的无人机。该算法具有动态重规划能力,当单架无人机出现故障退出任务时,能够利用剩余的无人机完成整个区域的覆盖。第6章阐述三维无人机编队飞行控制系统的设计问题。



应用 PID 控制理论结合线性混合器进行三维编队飞行控制器的仿真设计,提供一种机动时能保持队形,并能通过控制间隔距离变换队形的控制系统的设计方法。针对无人机编队飞行的非线性模型,阐述非线性动态逆控制器、神经网络自适应逆控制器和鲁棒动态逆控制器的设计原理,提高编队控制的精度与鲁棒性。

本书内容是在笔者多年从事科研项目研究基础上撰写的。笔者指导的博士研究生、硕士研究生参与了本书部分内容的相关研究工作,在此对参与过研究工作的研究生们表示衷心的感谢。

本书可供无人飞行器作战技术与指挥及相关专业高年级本科生和研究生学习参考,同时也适合从事无人飞行器设计、无人飞行器战术战法研究等方面的作战指挥决策者参考。

著 者

2015 年 7 月

# 目 录

第 1 章 绪论 .....	1
1.1 无人机编队飞行概述 .....	1
1.2 国内外研究现状 .....	4
第 2 章 无人机编队飞行关键技术 .....	9
2.1 编队队形设计 .....	9
2.2 编队航迹规划 .....	11
2.3 编队气动影响 .....	12
2.4 编队队形重构 .....	15
2.5 编队的基本方式 .....	18
2.6 编队信息交互和传递 .....	21
2.7 编队防撞控制 .....	23
2.8 编队飞行控制 .....	24
2.9 编队飞行硬件测试平台 .....	25
第 3 章 无人机编队队形设计 .....	27
3.1 编队队形设计定义 .....	27
3.2 编队几何形状设计 .....	27
3.3 编队无人机数量选择 .....	29
3.4 编队气动耦合影响 .....	29
3.5 编队队形设计准则 .....	44
3.6 编队飞行分类 .....	46
第 4 章 无人机编队飞行模型的建立 .....	48
4.1 飞机/自动驾驶仪模型 .....	48
4.2 编队坐标系 .....	50
4.3 运动学方程 .....	51
4.4 编队飞行系统数学模型 .....	56
4.5 编队的气动耦合模型 .....	67





<b>第 5 章 无人机编队协同航迹规划</b> .....	70
5.1 航迹规划的定义 .....	70
5.2 航迹规划约束 .....	72
5.3 威胁模型 .....	77
5.4 协同航迹规划指标 .....	80
5.5 多无人机编队协同航迹规划算法 .....	83
<b>第 6 章 编队飞行控制方法</b> .....	149
6.1 鲁棒 $H_{\infty}$ 控制器设计 .....	149
6.2 非线性动态逆编队飞行控制方法研究 .....	172
6.3 鲁棒动态逆编队飞行控制方法研究 .....	188
6.4 神经网络自适应逆编队飞行控制方法研究 .....	213
6.5 航迹规划下的编队飞行控制 .....	232
<b>参考文献</b> .....	238

# 第1章 绪 论

## 1.1 无人机编队飞行概述

### 1.1.1 无人机编队飞行的定义

目前,国内外对无人机编队飞行的定义,主要有以下几种:

(1)无人机编队飞行,就是将多架无人机按照一定的队形进行排列,并使其在整个飞行过程中保持队形不变<sup>[1-6]</sup>。

(2)无人机编队飞行,是指将多架无人机按照一定的队形进行排列,并使其在整个飞行过程中保持队形不变或者相对位置在一定范围内变动<sup>[7]</sup>。

(3)无人机编队飞行,就是将多架具有自主功能的无人机按照一定的结构形式进行三维空间排列,使其在飞行过程中保持稳定的队形,并能根据外部情况和任务需求进行动态调整,以体现整个机群的协同一致性<sup>[8]</sup>。

(4)无人机编队飞行,是指多架无人机为适应任务要求而进行的某种队形排列和任务分配的组织模式,它既包括编队飞行的队形产生、保持和变化,也包括飞行任务的规划和组织<sup>[9]</sup>。

四种定义中都提出,无人机编队飞行是将多架无人机按照一定的队形进行排列,并要求在整个飞行过程中保持队形不变。定义(2)指出无人机编队飞行的队形可以保持不变或在一定范围内变动。定义(3)要求参与编队的无人机要具有自主功能,保持飞行中队形稳定并能进行动态调整,强调了整个机群的协同、一致。而定义(4)具体化了编队飞行的内容,提出了明确的目标要求,指出编队飞行主要包括队形设计、保持和调整,同时还有对飞行任务的规划和组织。

无人机编队的主要目的就是保持各无人机之间给定的相对姿态和相对位置不变,或根据任务、机动要求在一定范围内变化。同时,机群中所有飞机都要在执行任务时根据面临的具体情况来分担任务<sup>[10-11]</sup>。编队飞行的无人机能通过信息共享在飞行中改变原有队形,自主地对突发事件做出反应。当某架无人机因敌人通信干扰或受到攻击而掉队失踪时,其余的无人机应该能立







即填补它留下的空缺。在上述基础上提出笔者理解的无人机编队飞行定义。

**定义 1(无人机编队飞行):**无人机的编队飞行,是指两架或两架以上具有自主功能的无人机为适应任务要求而进行的一定结构的某种队形排列和任务分配的组织模式。它既包括编队飞行的队形设计、飞行过程中的队形保持和根据外部情况及任务需求进行队形的动态调整变化,也包括飞行任务的规划和组织,以体现整个无人机群的协同一致性。其中,带队的那架无人机称为长机(lead aircraft /leader),而其余的无人机称为僚机(wing aircraft/follower)。飞机编队飞行示例如图 1-1 所示。



图 1-1 飞机编队飞行示例

根据上述无人机编队飞行的定义,可以概括无人机编队的特点:由两架或