



周伟 李五洲
王旭东 吴超
著

多无人机 协同控制技术

深入

层层递进式分析，
囊括建模、算法研
究、仿真和证明。

创新

针对协同的技术难
点，给出了关键技
术及核心方法。

图解

全书给出了90多张
图示，帮助读者快
速理解所讲知识。

实用

可直接将本书知识
运用到无人机集群
控制的工程之中。



北京大学 出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

多无人机 协同控制技术

周伟 李五洲
王旭东 吴超
著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

多无人机协同控制技术是无人机专业领域未来一段时间内的研究热点,具有较强的理论研究价值和应用前景。本书首先简要介绍多无人机协同控制技术的背景意义、主要研究内容和国内外发展现状,然后深入到多无人机协同控制关键技术的解决方案上,研究体系结构设计方法、协同控制相关的数学模型和主要算法,最后介绍多无人机协同控制的仿真测试系统的设计和实现方法。让读者不但可以系统地学习多无人机协同控制的相关知识,还能够对多无人机协同控制相关的算法有一个深入的了解,而且还可以根据需求构建相关的仿真测试平台进行相关的实验。

本书内容理论扎实,算例丰富,实用性强,适合多无人机协同领域的学生和老师作为学习用书,也适合无人机行业的研发人员作为参考用书,还可以作为无人机专业的多无人机协同控制相关的课程的教材使用。

图书在版编目(CIP)数据

多无人机协同控制技术 / 周伟等著. — 北京: 北京大学出版社, 2019.12

ISBN 978-7-301-30898-1

I. ①多… II. ①周… III. ①无人驾驶飞机—自动飞行控制—研究 IV. ①V279

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第245763号

书 名 多无人机协同控制技术

DUO WURENJI XIETONG KONGZHI JISHU

著作责任者 周伟 李五洲 王旭东 吴超 著

责任编辑 吴晓月 孙宜

标准书号 ISBN 978-7-301-30898-1

出版发行 北京大学出版社

地 址 北京市海淀区成府路205号 100871

网 址 <http://www.pup.cn> 新浪微博: @北京大学出版社

电子信箱 pup7@pup.cn

电 话 邮购部 010-62752015 发行部 010-62750672 编辑部 010-62570390

印 刷 者 河北涿县鑫华书刊印刷厂

经 销 者 新华书店

787毫米×1092毫米 16开本 14.5印张 284千字

2019年12月第1版 2019年12月第1次印刷

印 数 1—4000册

定 价 69.00 元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话: 010-62752024 电子信箱: fd@pup.pku.edu.cn

图书如有印装质量问题,请与出版部联系,电话: 010-62756370

前言

—INTRODUCTION—

无人机技术经过几十年的发展已经相对成熟，在军事和民用领域发挥着重要的作用。为了适应未来的挑战，除了提高单机的功能和效用外，还需要考虑如何以现有的技术为基础，发展更加有效的无人机管理和组织模式。多无人机协同编队作战越来越受到国内外的重视，通过多无人机协同编队作战，可以获得更多的战场环境信息，提高作战效能。

然而，面对多无人机这样一个复杂的系统，如果缺乏有效的协同控制，不仅无法体现出多架无人机的优势，甚至还会出现无人机之间发生冲突、碰撞的危险情况。特别是随着协同飞行的无人机数量的增加，其飞行时的复杂性、变化性、时变性及耦合度也随之提高，多架无人机之间进行组织和相互协调的困难程度也会随之以指数倍增长。同时，由于无人机系统本身就是一个复杂系统，多无人机协同控制将涉及编队队形控制、协同飞行控制、航迹规划、威胁规避等方面的技术问题。因而在多无人机协同控制过程中可能会出现以下状况：系统的非线性和时变性导致协同控制算法难以实时求解；多无人机系统在进行全局优化时难以找到全局最优解；各无人机之间由于资源的分配或者使用不合理而产生冲突或出现死锁；无人机之间的相对运动关系和无人机与目标之间的相对运动关系产生冲突等。故研究多无人机协同控制技术需要解决众多较难的理论问题，能够控制多架无人机的协同控制技术是使无人机能够高效完成作战任务的核心技术和重要保证。该技术对智能体间的协同控制、机器人协同控制、无人机协同控制有重要的技术参考价值，是一个有重要理论意义的课题。

本书系统地阐述了多无人机协同控制系统的设计方法和相关控制算法，特别是针对多无人机协同控制系统设计过程中的一系列重难点问题进行了详细的论述。例如，如何区分多架无人机在协同控制中的作用差异，如何建立合适的运动模型，如何处理具体运动模型中的非线性关系，如何提高控制系统的实时性，针对这些问题都提出了相应的解决方法。但是由于无人机协同控制是一项前沿的技术，发展速度非常快，各人研究的思路和方法差异很大，因此本书只是给出读者一种解决问题的方向和思路，读者可以继续深入研究。



本书内容及体系结构

第1章 多无人机协同控制技术概述

本章主要阐述了多无人机协同控制技术的背景及意义,分析了多无人机协同控制所涉及的关键技术,以及国内外在本领域的研究发展现状。

第2章 多无人机协同控制体系结构

本章主要讨论了无人机协同控制结构的设计方法,并将其分为单机控制结构设计和多机协同控制结构设计。根据无人机个体控制结构的设计目标,采用基于 Agent 的方法设计出无人机个体控制结构,在此基础上提出基于分层结构的无人机参考点选取方法;基于领航跟随方法设计了两机协同的控制结构;基于图论提出了由无人机通信图向无人机控制树转换的方法,实现了从两机协同到多机协同的扩展,并对扩展方法的协调一致性进行了分析。本章内容为后面章节中的各种具体运动模型的建立、控制策略的研究提供了必要的基础。

第3章 面向协同控制的无人机单机控制

本章分析了无人机飞行控制系统的主要功能需求,确定了设计方案,对无人机的纵向、横侧向回路进行了控制律设计,并实现了自主导航功能。通过仿真实验,验证了控制律设计的合理性及所采用方法的有效性。

第4章 基于PID的无人机编队运动控制策略

本章首先对无人机编队运动建模的关键点进行了阐述,然后在基本假设的基础上,以僚机航迹坐标系为参考坐标系,建立了长机与僚机的相对运动方程,为编队飞行的控制研究建立了基础。重点讨论了基于PID的无人机编队控制策略,为编队无人机设计了一种自动驾驶仪,并在编队相对运动模型的基础上,以僚机的推力、迎角和滚转角为控制量,设计了基于PID的控制器,并通过仿真实验验证了设计的合理性和有效性。

第5章 基于滑模控制的无人机编队运动控制策略

本章主要研究的是无人飞行器编队控制方法,重点对其中的两种控制方法进行了研究,最终确定高阶滑模控制的跟随领航者法为本章适用方法,并通过仿真实验验证了算法的可靠性和稳定性。

第6章 基于预测控制的无人机编队运动控制策略

本章阐述了无人机编队队形控制的概念,分析了无人机编队飞行的相对运动,以领航无人机航迹坐标系为参考坐标系计算相对位置误差,纵向控制通道采用高度保持控制通道,横侧向控制通道采用模型预测控制设计编队队形控制器,通过控制跟随无人机达到队形控制的目的,仿真结果达到了预期的目标。

第7章 基于多模型预测控制的无人机编队运动控制策略

本章主要阐述了当环境中没有障碍物等危险因素的时候,采用领航跟随法,以领航无人机航迹坐标系为参考坐标系建立离散化的相对运动方程,然后获得系统的状态特征点。接着通过将状态点

线性化建立多模型集,再借鉴 T-S 模糊控制器的思想提出模型集加权方法。最后基于多模型的方法进行预测控制,实现巡航编队控制器的设计,通过控制跟随无人机实现编队队形控制。

第 8 章 危险状态下的无人机编队运动控制策略

本章针对无人机编队在飞行中遇到山峰等障碍物或即将发生碰撞等危险的情形,通过多无人机协同航迹规划,研究危险状态下无人机编队的避障问题。在危险状态下,利用层次分解策略,将无人机编队的整体最优航迹的求解分为三个层次,即构建 Voronoi 图;利用 K 路径算法为各无人机找到 K 条备选航路;然后建立协同函数和协同变量,为各无人机规划出既能满足时间协同要求,又能满足整体代价最优(次优)的障碍物躲避航迹。此外,又针对有可能出现的几种特殊情况,提出了无人机编队飞行通行规则,用以解决无人机在避障飞行过程中有可能产生的碰撞冲突问题。

第 9 章 单无人机目标跟踪飞行控制策略

本章首先介绍了无人机运动建模、姿态控制器设计和自动导航系统设计的相关方法。然后重点进行了无人机目标跟踪控制器的设计,先建立无人机目标跟踪运动模型,由于无人机目标跟踪的控制模型是一个非线性多输入、单输出系统,为了解决预测实时性问题,又在阶梯式预测控制的基础上提出了模糊阶梯式预测控制方法,采用模糊控制器来获得阶梯因子,提高了控制精度和效率。最后通过对直线运动目标和机动目标进行仿真实验,验证了控制策略的有效性。

第 10 章 多无人机协同目标跟踪飞行控制策略

本章建立了协同目标跟踪飞行控制模型,提出了基于粒子群预测控制的无人机协同目标跟踪飞行控制方法。采用领航跟随法,领航无人机采用单机目标跟踪飞行控制的方法进行控制;对于跟随无人机,先在地面坐标系建立了无人机协同目标跟踪相对运动模型,然后确定性能指标,将其预测控制问题转化为多目标约束非线性规划问题。利用改进的分层序列法将该问题转化成两个非线性单目标优化问题,采用粒子群算法进行非线性优化,并针对约束和局部收敛问题,用改进的区分可行解和不可行解的方法进行约束处理。采用基因变异的思想解决局部收敛问题,提出了无人机协同目标跟踪预测控制的滚动优化基本步骤。最后通过仿真实验验证了控制策略的有效性。

第 11 章 多无人机协同航迹规划方法

本章对无人机编队飞行中的航迹规划方法进行了归纳、分析和总结,简单介绍了几种经典的航迹规划方法,然后分别对两种不同的算法进行了改进和仿真,并选用了适合三维编队飞行的一种算法,从而获得了无人机的可飞航迹。

第 12 章 基于 Muti-Agent 的无人机协同控制仿真平台的设计与实现

本章基于 HLA 标准设计并实现了针对协同控制飞行过程的三维仿真测试平台,用户只需要了解算法的实验终端工作站的接口,就可以设计自己的算法并在该仿真平台上进行实验。该仿真平台为用户进行多无人机协同控制算法的理论验证、算法实验、三维实时仿真提供了支持。最后采用该仿真平台对编队控制算法、多机目标跟踪飞行控制算法进行了三维仿真实验,可以看出该仿真平台能够实时地进行仿真实验。



本书的读者对象

本书适合任何对无人机技术感兴趣的人员，或相关领域的研究人员、高校师生、从业人员。书中列举了无人机协同控制的主要研究方法，具有一定的深度和前沿性，算法具有一定的创新性，对相关人员进行核心算法研究具有启发作用。

尤其推荐以下人群阅读本书。

- ◆ 无人机相关领域的研究人员。
- ◆ 从事无人机协同技术研究的高校老师和学生。
- ◆ 无人机行业的研发人员。

在本书的写作过程中，魏瑞轩、董志兴和刘月等老师和专家给予了很多帮助和指导，在此表示感谢。因受作者水平和成书时间所限，本书难免存有疏漏和不当之处，敬请指正。



多无人机协同控制技术概述

1.1	多无人机协同控制的背景与意义	2
1.2	多无人机协同控制的关键技术	4
1.2.1	多无人机协同控制体系结构	4
1.2.2	单无人机控制方法	4
1.2.3	多无人机巡航编队飞行控制方法	4
1.2.4	多无人机目标跟踪编队协同控制方法	5
1.2.5	航迹规划	5
1.2.6	多无人机协同控制仿真测试平台的设计	6
1.3	国内外现状研究	6
1.3.1	多无人机协同控制结构发展现状	6
1.3.2	多无人机固定距离编队飞行控制发展现状	8
1.3.3	多无人机目标跟踪编队协同控制发展现状	10
1.3.4	多无人机航迹规划技术发展现状	11
1.3.5	多无人机协同控制仿真测试技术发展现状	11
1.3.6	现状分析	14
1.4	本章小结	14

多无人机协同控制体系结构

2.1	多无人机控制结构现状分析	16
2.2	多无人机协同控制结构设计思路	16
2.3	面向协同控制的无人机个体控制结构	19
2.3.1	面向协同控制的无人机个体控制目标	19
2.3.2	基于 Agent 的无人机个体控制结构设计	21
2.4	多机协同控制结构	24
2.4.1	多机协同控制结构设计目标	24
2.4.2	参考点的选取方法	26
2.4.3	两机协同控制结构设计	27
2.4.4	基于图论的两机协同控制到多机协同控制方法	28
2.5	本章小结	32

面向协同控制的无人机单机控制

3.1	无人机运动建模	34
3.1.1	参考坐标系	34
3.1.2	运动参数	36
3.1.3	无人机运动方程	37
3.2	无人机飞行控制系统设计	41
3.2.1	飞行控制系统的基本设计思路	43
3.2.2	飞行控制系统功能组成	45
3.3	纵向回路控制律设计	46
3.3.1	PID 控制算法	46
3.3.2	俯仰角控制律设计	49

3.3.3 高度保持 / 控制模态控制律设计	50
3.3.4 速度保持 / 控制模态设计	51
3.4 横侧向回路控制律设计	52
3.4.1 姿态稳定与控制	52
3.4.2 航向保持 / 控制模态控制律设计	53
3.5 仿真结果	53
3.6 本章小结	55

基于 PID 的无人机编队运动控制策略

4.1 无人机编队条件假设	57
4.2 无人机编队运动建模	58
4.2.1 参考长机的选择	58
4.2.2 参考坐标系的定义	59
4.2.3 无人机质心运动方程	60
4.2.4 相对运动模型	61
4.3 模型分析	64
4.4 基于 PID 的无人机编队控制策略	65
4.4.1 编队运动分析	65
4.4.2 自动驾驶仪	67
4.4.3 编队控制器	68
4.5 仿真实验	74
4.6 本章小结	76

基于滑模控制的无人机编队运动控制策略

5.1	编队数学模型	78
5.2	控制策略与设计	80
5.2.1	路径跟踪	81
5.2.2	编队控制	83
5.2.3	编队跟踪	83
5.2.4	编队策略的扩展与改进	85
5.3	仿真验证	85
5.4	本章小结	90

基于预测控制的无人机编队运动控制策略

6.1	编队队形调节机制	92
6.2	模型预测控制	93
6.2.1	模型预测控制的发展	93
6.2.2	模型预测控制的基本原理	94
6.3	无人机编队队形控制	97
6.3.1	编队相对运动分析	98
6.3.2	编队队形控制器设计	99
6.4	仿真结果	102
6.5	本章小结	104

基于多模型预测控制的无人机编队运动控制策略

7.1	多无人机巡航编队控制系统设计思路.....	106
7.2	基于多模型预测控制的无人机编队控制方法	107
7.2.1	参考坐标系的选择	107
7.2.2	无人机巡航编队飞行控制运动学模型.....	107
7.2.3	无人机巡航编队的运动离散模型及预测控制分析	110
7.2.4	基于多模型控制方法的无人机巡航编队预测控制	111
7.3	仿真实验	119
7.3.1	领航无人机直线平飞下的编队仿真	119
7.3.2	领航无人机转弯飞行下的编队仿真	121
7.4	本章小结	124

危险状态下的无人机编队运动控制策略

8.1	危险状态下的航迹规划问题.....	126
8.2	基于层次分解策略的无人机编队避障.....	127
8.2.1	编队避障行为控制层设计	128
8.2.2	编队避障任务管理层设计	131
8.2.3	编队避障航路控制器设计	133
8.3	特殊情况下的无人机通行规则	134
8.4	仿真实验	135
8.5	本章小结	137

单无人机目标跟踪飞行控制策略

9.1	单无人机目标跟踪控制系统设计思路.....	139
9.2	无人机飞行姿态控制	140
9.2.1	无人机运动模型.....	140
9.2.2	非线性模型线性化	142
9.2.3	姿态控制器的设计	143
9.3	无人机自主导航控制	144
9.3.1	航线跟踪	144
9.3.2	航线切换	145
9.4	基于模糊阶梯式的单无人机目标跟踪预测控制	146
9.4.1	单无人机目标跟踪的运动模型	146
9.4.2	单无人机目标跟踪运动的离散模型及预测控制分析	147
9.4.3	单无人机目标跟踪的指标优化	149
9.4.4	单无人机目标跟踪的滚动优化求解	150
9.5	仿真实验	155
9.5.1	目标为直线运动时的仿真实验	155
9.5.2	目标为机动运动时的仿真实验	157
9.6	本章小结	159

多无人机协同目标跟踪飞行控制策略

10.1	多无人机协同目标跟踪飞行控制系统设计思路	161
10.2	协同目标跟踪飞行运动建模	162

10.3	基于粒子群优化的协同目标跟踪飞行预测控制	164
10.3.1	多无人机目标跟踪离散模型及预测控制分析.....	164
10.3.2	确定预测性能指标.....	166
10.3.3	多目标优化的单目标优化转化	167
10.3.4	基于粒子群算法的非线性滚动优化问题求解.....	170
10.4	仿真实验	175
10.4.1	目标为直线运动时的仿真实验	175
10.4.2	目标为机动运动时的仿真实验	178
10.5	本章小结	182

多无人机协同航迹规划方法

11.1	航迹规划常用算法	184
11.2	改进动态规划算法的航迹规划	185
11.2.1	路径节点生成.....	185
11.2.2	最短路径生成.....	190
11.2.3	仿真验证.....	191
11.3	改进遗传算法的多约束航迹规划	191
11.3.1	航迹编码方式改进.....	192
11.3.2	满足约束的航迹染色体解码实现	195
11.3.3	建立地形与威胁模型	199
11.3.4	建立航迹适应度函数	201
11.3.5	设计遗传操作算子.....	203
11.3.6	仿真验证	203
11.4	本章小结	205

基于 Muti-Agent 的多无人机协同控制仿真平台的设计 与实现

12.1	多无人机协同控制视景仿真系统设计.....	207
12.1.1	多无人机协同控制视景仿真系统功能描述.....	207
12.1.2	多无人机协同控制仿真系统结构.....	209
12.1.3	软件运行流程.....	210
12.2	实现多无人机协同控制仿真系统的关键技术	211
12.2.1	无人机运动学仿真实现方法.....	212
12.2.2	无限大地形生成方法.....	214
12.2.3	细节场景的管理和实现方法.....	215
12.3	视景仿真实验.....	215
12.4	本章小结	218

第 1 章

多无人机协同控制技术概述

多无人机协同控制技术研究多架无人机协同飞行执行特定任务的飞行控制思路和策略的技术，该技术对智能体间的协同控制、机器人协同控制等技术有重要的参考价值，是一个有重要意义的课题。

贵州师范学院内部使用

1.1

多无人机协同控制的背景与意义

无人飞行器简称无人机 (Unmanned Aerial Vehicle, UAV), 是一种由动力驱动、机上无人驾驶、可控制、可执行特定任务, 并可重复使用的航空飞行器。无人机在国防和国民经济建设、科学技术发展中具有广泛的应用。在以信息为主的现代电子战中, 无人机可以用来执行侦察、监视、设置假目标、电子干扰等任务; 在国民经济建设方面, 无人机可用于大地测量、气象观测、城市环境监测、地球资源勘探、森林防火和人工降雨等; 在科学研究方面, 无人机可用于大气取样, 对核、生、化污染区进行取样与监测, 新技术实验研究等。

目前国外正掀起一股无人机的研制热潮, 美国仅 2006 年用于无人机研究的经费就达到 20 亿美元。高新技术特别是信息技术的迅猛发展, 给无人机的发展带来了良好的契机。无人机的发展呈现出以下趋势。

(1) 高空化、长航时化。在未来战争中, 高空、长航时无人机将成为侦察卫星和有人驾驶战略侦察机的重要补充和增强手段。

(2) 小型化、智能化、通用化、模块化。随着微电子技术和纳米技术的飞速发展, 未来的无人机将向微型化和小型化发展, 各种型号的无人机的机载设备将实现通用化。

(3) 低造价、低损耗。未来的无人机在造价和损耗以及维护方面的费用将大大降低。

对于单架无人机, 虽然具有机动性强、隐蔽性强、适应性强, 以及不会给人带来生命危险等许多有人机无法比拟的优点, 但仍然存在一些问题, 主要有以下几个方面。

(1) 在执行任务的过程中, 由于各种意外而造成无人机中途出现故障, 必须中断任务返回维修。这对民用可能影响不大, 但在战争中有可能会因贻误战机而破坏整个作战计划。

(2) 在侦察范围和目标跟踪方面, 单架无人机的侦察范围有限, 有可能遗漏目标。同时由于搭载的设备有限, 要完成一件比较复杂的任务时, 有时必须出动多次。

(3) 在作战范围、杀伤半径、摧毁能力、攻击精度等方面存在不足。

无人机技术经过几十年的发展已经相对成熟, 在军事和民用领域发挥了重要的作用。为了适应未来的挑战, 除了提高无人机的性能外, 还需要考虑如何以现有的技术为基础, 发展更加有效的无人机管理和组织模式。考虑到单架无人机作战的不足, 专家们提出了多无人机协同编队作战的概念。所谓多无人机协同编队作战, 就是将多架无人机按照一定的形状进行排列, 并使其在整个飞行过程中保持稳定队形, 避免相互碰撞, 从而执行作战任务。

多无人机协同编队作战具有以下优点。