



航空航天科技出版工程

11

无人机系统

[美] 艾拉·阿特金斯 (Ella Atkins) [西班牙] 阿尼瓦尔·奥列罗 (Anibal Ollero)

[英] 安东尼奥斯·楚拉多斯 (Antonios Tsourdos) 编

刘莉 李道春 等译

向锦武 审



**ENCYCLOPEDIA OF
AEROSPACE ENGINEERING 11
Unmanned Aircraft Systems**



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLISHING FUND PROJECT

航空航天科技出版工程

11

无人机系统

[美] 艾拉·阿特金斯 (Ella Atkins) [西班牙] 阿尼瓦尔·奥列罗 (Anibal Ollero)

[英] 安东尼奥斯·楚拉多斯 (Antonios Tsourdos) ©编

刘莉 李道春 等©译

向锦武©审

*ENCYCLOPEDIA OF
AEROSPACE ENGINEERING 11
Unmanned Aircraft Systems*



 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

WILEY

图书在版编目 (CIP) 数据

航空航天科技出版工程·11, 无人机系统 / (美) 艾拉·阿特金斯 (Ella Atkins), (西) 阿尼瓦尔·奥列罗 (Anibal Ollero), (英) 安东尼奥斯·楚拉多斯 (Antonios Tsourdos) 编; 刘莉等译. —北京: 北京理工大学出版社, 2019. 1

书名原文: UNMANNED AIRCRAFT SYSTEMS

国家出版基金项目

ISBN 978-7-5682-6719-9

I. ①航… II. ①艾… ②阿… ③安… ④刘… III. ①无人驾驶飞机-系统设计 IV. ①V

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 027568 号

北京市版权局著作权合同登记号 图字: 01-2017-3069 号

Copyright © 2016 John Wiley & Sons Ltd

All Rights Reserved. Authorised translation from the English language edition published by John Wiley & Sons Limited. Responsibility for the accuracy of the translation rests solely with Beijing Institute of Technology Press Co., LTD and is not the responsibility of John Wiley & Sons Limited. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyright holder, John Wiley & Sons Limited.

封面图片来源:



源自 NASA



源自 Getty



源自 'Aircraft Fuel Systems' (Wiley)



源自 Shutterstock

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京地大彩印有限公司

开 本 / 889 毫米×1194 毫米 1/16

印 张 / 38.75

字 数 / 1129 千字

版 次 / 2019 年 1 月第 1 版 2019 年 1 月第 1 次印刷

定 价 / 198.00 元

责任编辑 / 封 雪

多海鹏

陈莉华

文案编辑 / 封 雪

多海鹏

陈莉华

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 边心超

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

航空航天技术出版工程

译审委员会

主任 杜善义

副主任 李椿萱 余梦伦 黄瑞松 叶培建 唐长红 甘晓华

委员 (按姓氏笔画排序)

才满瑞 向锦武 刘 莉 杨 超 昂海松 周志成 唐胜景
熊 克

翻译委员会

主任 刘 莉

副主任 朱春玲 李道春 赵 宁 江 驹

委员 (按姓氏笔画排序)

万志强 马东立 王正平 王晓芳 王焕瑾 王锁柱 毛军逵
古兴瑾 龙 腾 朱程香 向彩霞 刘东旭 齐艳丽 孙康文
孙慧玉 杜 骞 杜小菁 李 书 李 响 李世鹏 杨春信
肖天航 吴小胜 吴志刚 宋 晨 宋豪鹏 张景瑞 陈永亮
武志文 林 海 昂海松 季路成 周光明 周建江 周思达
周储伟 郑祥明 贺云涛 徐 军 徐 明 郭 杰 唐胜景
黄晓鹏 龚 正 韩 潮 韩启祥 谢 侃 谢长川 雷娟棉
谭慧俊 熊 克 冀四梅

审校委员会

主任 林 杰

副主任 樊红亮 李炳泉

委员 (按姓氏笔画排序)

于 勇 王佳蕾 王玲玲 王美丽 尹 晷 白照广 多海鹏
祁载康 杜春英 李秀梅 杨 侧 张云飞 张海丽 张鑫星
陈 竑 陈莉华 周瑞红 孟雯雯 封 雪 钟 博 梁铜华

推荐序

航空航天是国家的战略产业，其科技水平直接决定着综合国力和国家安全。近年来，我国航空航天科技水平得到显著提升，在若干领域取得了举世瞩目的成就。在建设航空航天强国的进程中，广大科技人员需要学习和借鉴世界航空航天科技的最新成就。《航空航天科技出版工程》是综合反映当代世界范围内航空航天科技发展现状和研究前沿的一套丛书，具有系统性、学术性、前沿性等特点。该丛书的翻译和出版，为我国科技工作者提供了学习和借鉴世界航空航天科技提供了一个良好平台。

《航空航天科技出版工程》英文版由美国 WILEY 出版公司和 AIAA（美国航空航天学会）联合出版。全世界 34 位来自航空航天领域的顶级专家组成丛书顾问团，负责对丛书进行规划指导，来自美国、英国、德国、法国等国家的 800 多位著名专家参与丛书撰写。该丛书是当今世界上最为系统和权威的航空航天科技丛书，共有 11 卷、约 1170 万字，涵盖航空航天科技的 62 个领域主题，合计 529 个章节。该丛书对航空航天科技所涉及的重要概念、理论、计算、实验等进行了系统阐述，并配有大量工程实践案例，主要内容包括：流体动力学与空气热力学、推进与动力、结构技术、材料技术、动力与控制、环境影响与制造、飞行器设计、系统工程、绿色航空、无人机系统等。最难能可贵的是，该丛书对航空航天工程的战略决策、实施路径、技术应用、实践验证和评价等方面进行了系统阐释，对未来二十年面临的挑战和机遇进行了深入分析。

该丛书中有些专题研究在我国尚属起步阶段，不少内容是国内紧缺的文献资料。例如，丛书对高超声速稀薄气体动力学、扑翼空气动力学、高超声速气动热弹性、多运动体协调控制、多种飞行器融合、深空探测、航天系统设计认证、多无人机系统网络、绿色航空飞机等领域的介绍颇有参考价值。丛书内容不仅适用于国防领域，而且适用于民用领域，对我国航空航天科技发展具有指导意义。



北京理工大学是我国首批设立火箭、导弹等专业的高校，曾为我国航天事业的创立和发展做出重要贡献，近年来又在深空探测、制导武器、空间信息处理等领域取得重要进展。该丛书英文版问世不久，北京理工大学出版社敏锐地判断，该丛书对我国航空航天科技发展具有重要借鉴作用，提出翻译这套巨著的设想。北京理工大学航空航天学科的教授们积极投身于翻译丛书的策划中，他们联合我国高校、研究机构中一批长期从事航空航天科技工作的教师和工程技术人员组成团队，仅用一年多时间就将这套巨著译为中文。我帮助他们邀请到丛书英文版顾问、著名航天结构力学家杜善义院士担任译审委员会主任，邀请到我国航空航天科技领域的多位领军科学家、总设计师共同负责丛书译审，进而确保中文版的科学性、准确性、权威性。

作为长期从事航空航天科技工作的学者，看到这套丛书即将问世由衷高兴。我认为，该丛书将为我国航空航天科技工作者提供一套不可多得的工具书，有利于提升我国航空航天科技水平，有利于促进我国航空航天科技与世界航空航天科技的有效对接，有利于推动我国建设航空航天强国。因此，我郑重向航空航天科技界的同行们推荐这套丛书。

中国科学院院士
北京理工大学教授

译者序

航空航天技术的发展水平体现了一个国家的综合实力。我国高度重视航空航天技术的创新发展，将航空航天产业列入国家战略性新兴产业和优先发展的高技术产业。航空航天技术的发展日新月异并呈现出跨学科化和国际化特征，国内学者需要一套系统全面的丛书，来巩固现有知识，了解国际前沿发展动态，以便进行系统更新，并提供高质量的科学研究资源。

美国 WILEY 国际出版公司和 AIAA（美国航空航天学会）联合出版的《航空航天科技出版工程》（*Encyclopedia of Aerospace Engineering*）正是这样的一套技术研究丛书。各章均由活跃在全球航空航天各专业领域研究一线的专家执笔，集成了编写团队在航空航天科技领域的重要科学研究成果和宝贵的科学试验数据。北京理工大学出版社组织专家对第一期出版的 9 个分册各章节标题及主要内容进行翻译和评审后，决定引进、出版本套丛书的中文版，并依托北京理工大学、北京航空航天大学、南京航空航天大学、中国航天科工集团、中国航天科技集团等国内从事航空航天技术研究的高校和科研院所，组建了翻译团队和专家译审团队。历时三年，中文版于 2016 年面世，分别为《流体动力学与空气热力学》《推进与动力》《结构技术》《材料技术》《动力学与控制》《环境影响与制造》《飞行器设计》《系统工程》和《航空航天专业术语》。

自《航空航天科技出版工程》英文版第 1 分册出版以来，随着新技术不断发展成熟，并已经出现新的技术挑战，所产生的经验和知识必须纳入专业知识体系，两个典型的例子就是绿色航空技术和无人机系统技术。英文版《航空航天科技出版工程》的补充分册《绿色航空》和《无人机系统》于 2016 年出版后，北京理工大学出版社第一时间做了版权引进，并迅速组织北京理工大学、北京航空航天大学、



南京航空航天大学的专家学者组成译审团队。

《绿色航空》和《无人机系统》由 181 位国际航空航天相关领域的科学家、工程师、设计师和学者撰写，反映了编写团队在航空航天科技领域的重要科学研究成果和宝贵的科学实践经验，从工程、科技、运营和政策的视角，对航空航天工程的战略决策、实施路径、技术应用、实践验证和主客观评价等进行了系统阐释，对未来二十年面临的挑战和机遇进行了深入分析。

《无人机系统》面向军事和民用两个方面，围绕无人机系统的设计、开发、操作和任务进行阐述分析，涉及空气动力学、结构、推进和动力系统等学科以及航空电子设备、通信、传感、控制和规划功能，包括简介、任务、机身配置、无人机系统设计与子系统、自主性、控制、人为监督、多机合作与协同、空域访问、安全整合性问题等 10 个主题、49 个章节。

《航空航天科技出版工程》中文版配有丰富的原版插图、表格以及大量的图片资料，最大程度地保留了原版书的编写风格。该丛书对于国内的科研和技术人员，以及承担着未来航空航天技术开发、管理的年轻学者和学生来说，都无疑是一套非常好的参考资料。

本分册由刘莉、李道春、龙腾、王正平、邓云山、李展宇、闭昌禹、宋严杰、孔馨婉、陈世泽、邢璐、周珂、葛佳昊、曹潇、陆天和、董欣心、刘刚、孙晓楠、刘倩、戴月领、蔡祺生、徐广通、王祝、王生印、曹严、魏钊、别大卫、李华东、邵浩原、杨宇等翻译，由向锦武审稿。特别感谢北京理工大学出版社引进本书，更感谢各位院士学者们对此书出版的大力支持。译、校者虽在译文、专业内容、名词术语等方面进行了反复斟酌，并向有关专业人员请教，但限于译、校者的水平与对新知识的理解程度，谬误和不当之处恳请读者批评、指正。

翻译委员会

2018 年 12 月

英文版序

2010年出版的《航空航天科技出版工程》(*Encyclopedia of Aerospace Engineering*)是一种全新的尝试,它汇总了航空航天领域不断扩大的知识体系,构建了一个便捷、综合和通用的参考架构。

在过去的几年里,航空航天系统与技术飞速发展——随着越来越新型的创新设计和应用,以及针对存在已久的问题的各种新思维方式不断涌现,现有的技术和系统不断朝着崭新的、令人兴奋的方向发展。这种进步在无人机系统(Unmanned Aircraft Systems, UAS)领域尤为显著。

无人机不再仅仅是军事工具,它经历了一场成本和性能的革命,执行了包括农业传感、基础设施检查、科学研究和物流等领域的重要任务,对企业研究和开发具有重大意义。人工智能等新兴技术的融入正在不断地改变着我们对无人机系统技术性能和应用方向的想法,也使我们更加期待,无人机究竟会如何改变我们的生活?

由于无需搭载飞行员和人工操作的相关系统,无人机领域出现了大量的工业性创新。然而,无人系统在向操作者提供类似的态势感知方面仍面临着巨大的挑战,小型远程驾驶飞机的广泛使用和日渐降低的成本,使其在安全、保密等领域存在着大量的潜在威胁。为了应对这些挑战,并充分利用这些相关的创新,我们需要不断获取前沿信息。因此我们推荐这部《航空航天科技出版工程》的《无人机系统》分册。本分册契合时代发展现状,且内容全面,涵盖了平台技术、自主控制、安全、故障安全系统、载人航空、监管和法律制度的整合等一系列与无人机系统相关的突出问题——包含了我们进一步推进无人机产业并发挥其最大潜力所需要了解的相关内容。

2016年既是英国皇家航空学会(Royal Aeronautical Society, RAeS)成立150周年,也是美国航空航天学会(American Institute of Aeronautics and Astronautics, AIAA)



成立 85 周年，两个学会拥有的航空航天专业成员总数突破 5 万。我们庆祝这些里程碑，我们的成员从未停止对知识的探索与对当前乃至未来面临问题、挑战的解决方式的探寻。我们的成员推动着无人机技术的发展，并致力于使其拥有比现今无人机系统更强大的性能和更广泛的应用。

航空航天技术使世界变得更加安全、联系更加紧密、交通更加便利、社会更加繁荣。我们希望本分册能够延续这一趋势，对其读者乃至整个行业有着和前 10 个分册一样的专业价值和影响力。

正如我们在此所写，在航空领域没有什么问题比无人机系统更契合当今时代的发展。因此，我们有幸共同向你们推荐这一航空航天工程知识体系的新贡献。

James Master

美国航空航天学会主席

普拉特惠特尼公司业务项目管理部副总裁

Chris Atkin

英国皇家航空学会主席

伦敦城市大学航空工程系教授

英文版前言

Wiley出版的《航空航天科技出版工程》(*Encyclopedia of Aerospace Engineering*)为航空航天和机器人行业提供了一系列可查阅章节,几乎涵盖了航空航天领域的所有学科。虽然《航空航天科技出版工程》会定期更新以确保准确性,但编者还是决定在重要和新兴的航空航天领域寻求新的关键分册。本分册涵盖了与小型和大型无人机系统(UAS)相关的技术、运营和政策挑战。

从业余爱好到监控和包裹递送,低空运行的小型无人机系统应用范围正在迅速扩大,并具备了前所未有的机动性:配置范围从传统的固定翼飞机到流行的多旋翼直升机或多旋翼飞行器。塑料和复合材料,低成本制造工艺以及功能强大的嵌入式传感器和处理器能够支持无人机全自动飞行。由锂聚合物电池供电的电动机以低成本大批量生产,机载能量存储和功率要求的进一步提高对于增加小型无人机航程和航时来说必不可少。本分册提供了无人机系统配置和子系统设计的基本背景,涉及空气动力学、结构、推进和动力系统等考虑因素以及航空电子设备、通信、传感、控制和规划功能。

由于传统的有人驾驶飞机一直依靠机载飞行员或机组来获取信息并做出安全关键决策,因此无人机系统必然会在控制、通信和信息管理方面带来许多新的挑战。哪些传感和控制策略对无人机系统配置和任务的覆盖范围有效,以及需要什么级别的自主决策程度?远程操作员如何保持态势感知,如何确保地-空链路的安全性和可靠性,以及哪些规程适用于链路中断情况?无人机将如何感知和规避有人驾驶飞机?应该在无人机上应用哪些功能以及在地面站中设置哪些功能?小的无人机系统可以以集群的方式进行编队,以简化国家空域系统(National Airspace System, NAS)、国家空中交通服务(National Air Traffic Services, NATS)和其他空中交通管制系统中的任务协调和处理。本分册中的章节涵盖了传感器、导引、导航和控制算法的范围,以及任务



级决策算法，使无人机能够自主执行任务计划并有效协调与其他无人机的行动。本分册就如何确保安全、保障、可靠和稳定的无人机运行所面临的其他挑战进行了相关讨论。

无人机每天的运行数量预计将迅速超过有人机。此外，这些运行通常会占据当前不常用于有人驾驶飞机的低空空域。小型机动无人机可以从几乎任何地点发射和回收，并在杂乱的地区飞行。这些因素引入了与空域访问和政策、隐私、社会、法律相关的各种新问题。基于农村到城市房产以及空域等级的无人机运行应该受到哪些限制？政策和法律如何在平衡使用新型无人机的愿望的同时，尊重人员和财产隐私问题并确保可接受的风险？本分册还包括了有关无人机空域访问要求和相关政策问题的章节。这些章节阐述了实现无人机系统安全认证和安全性的标准与流程的功能和需求。由于存在诸如配备摄像机的无人机“在我们的后院飞行”等问题，新的隐私和空域所有权以及控制问题已经出现，目前仍在讨论中。本分册中的一些章节还阐述了法律先例和新兴社群关注背景下的隐私、社会和法律问题。

从本分册中的各种技术、操作和政策内容可以看出，无人机系统是真正的“多学科系统”，能够提供令人兴奋的新任务能力，但也挑战了传统航空的操作规范和人员角色。无人机系统的发展正在激励我们重新思考信息处理，同时真正让每个人低成本地接触天空。

Ella Atkins

密歇根大学航空航天工程系教授

Aníbal Ollero

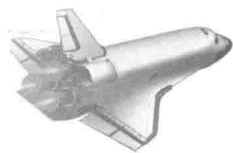
塞维利亚大学教授

先进航空航天技术中心科学顾问

Antonios Tsourdos

克兰菲尔德大学自主和网络物理系统中心负责人

目 录



Contents



第1部分 简介

■ 第1章 无人机系统的应用、能力以及重大挑战	3
1 引言	3
2 任务与应用	3
2.1 早期演化	3
2.2 代替人做枯燥、肮脏、危险工作	4
2.3 民用和商业应用的出现	4
3 新型能力与前景	5
3.1 扩大设计空间和操作范围	5
3.2 自主能力	8
4 重大挑战	9
4.1 有权使用的空域	9
4.2 追求信任	9
4.3 一体化	10
5 总结	10
参考文献	10

第2部分 任务

■ 第2章 基于无人飞行系统的遥感技术	15
1 引言	15
2 基于无人机系统的遥感技术	15
3 无人机遥感技术应用中的核心概念	17
3.1 检测与计数应用	17
3.2 识别与定位应用	18
3.3 分析应用	18
4 无人机成像设备	19

4.1 视频系统	19
4.2 数码相机	19
4.3 校准数字成像仪	20
5 结论	22
参考文献	22

■ 第3章 基于自主降落伞的精确运输系统	24
1 引言	24
2 操作及关键要求的概念	24
3 PADS 家族及其稳态表征	27
4 建模	30
4.1 管理方程式	30
4.2 表观质量和惯性	31
4.3 PADS 空气动力学	32
4.4 控制输入的影响	34
4.5 线性化模型及其稳定性	35
5 PADS GNC	35
5.1 机动指导	36
5.2 对不同风况的考虑	37
5.3 最优精准位置制导	38
6 其他进展	40
6.1 滑坡角度控制	40
6.2 低成本 PADS	40
7 结论	43
参考文献	43

■ 第4章 多功能联网无人机系统	45
1 引言	45
2 无线电通信原理	45
3 空对地通信	46
4 空对空通信	48



5	天线类型和位置	48
5.1	全向天线	48
5.2	定向天线	48
5.3	相控阵天线	49
5.4	天线位置	49
6	无人机系统网络	50
7	总结	51
	参考文献	51
■ 第5章 武器一体化 53		
1	引言	53
2	系统设计与集成的问题	53
3	武器种类	53
4	弹道炸弹	54
4.1	物理基础	54
4.2	飞机附件	54
4.3	目标瞄准	54
4.4	投放	55
5	智能炸弹	55
5.1	物理基础	55
5.2	飞机附件	55
5.3	目标瞄准	55
5.4	投放与制导	57
6	复杂的空对地武器	57
7	空对空导弹	57
7.1	飞机附件	57
7.2	目标瞄准	58
7.3	投放与制导	58
7.4	最后阶段	59
8	从武器舱释放武器	59
9	存储管理系统	59
10	武器接口标准	60
11	未来的系统	60
	参考文献	60

第3部分 机身配置

■ 第6章 无人机的分级和任务 65		
1	概述	65
2	无人机实例	65
2.1	微型无人机	66
2.2	小型无人机	66
2.3	中型无人机	67

2.4	大型无人机	69
3	损耗型无人机	70
4	无人机系统的分类	70
4.1	以航程和航时分类	70
4.2	分层系统	71
4.3	商用和消费级无人机	71
5	任务使命	71
5.1	军民任务对比	72
6	结论	73
	参考文献	73

■ 第7章 无人机的起飞 74		
1	概述	74
2	基本考虑	74
3	固定翼无人机的起飞方式	76
3.1	轨道发射器	76
3.2	气压发射器	77
3.3	液压气动发射器	77
3.4	零距离火箭助飞无人机发射	78
4	垂直起降无人机的起飞	79
5	无人机的空中起飞	80
6	结论	80
	参考文献	80

■ 第8章 无人机的回收 81		
1	概述	81
2	传统降落方式	81
3	垂直网系统	82
4	伞降回收	82
5	垂直起降无人机	83
6	空中回收	84
7	舰载回收	85
8	结论	86
	参考文献	86

■ 第9章 厘米级飞行器的发展 87		
1	概述	87
2	固定翼无人机的发展	87
2.1	固定翼无人机构型概述	87
2.2	日本固定翼无人机发展	88
3	旋翼无人机的发展	89
3.1	世界范围内厘米级旋翼无人机的发展	89
4	厘米级无人机控制器设计	91
4.1	控制理论	91



4.2 设备	92	3.2 能量最优飞行与名义巡航速度 飞行	122
4.3 MAVC 1 和 MAVC 2 的飞行 控制板	92	3.3 路线规划	123
5 低雷诺数机翼特点和固定翼 MAV 的 飞行稳定性	93	4 收集大气能量	123
参考文献	94	4.1 自主静态翱翔	125
第4部分 无人机系统设计与子系统		4.2 动态翱翔	127
第 10 章 无人机系统控制站概述		5 结论	127
1 概述	99	参考文献	127
2 术语和定义	99	第 13 章 控制系统机械化	
3 分类	99	1 无人机系统控制基础	130
4 主要设计特点	100	1.1 无人机系统和控制系统	130
4.1 结构	100	1.2 FCS 种类	130
4.2 主要功能	102	1.3 UAS 控制架构	131
4.3 人员因素	103	1.4 UAS 控制系统设计考虑	131
4.4 环境状态	104	2 无人机控制系统元素	132
4.5 取证和安全	104	2.1 传感器及其整合	132
4.6 互用性	105	2.2 作动器	133
4.7 安全	105	2.3 飞行控制计算机	134
5 未来趋势	105	3 FCS 开发过程	134
6 结论	106	3.1 控制系统设计	134
7 致谢	106	3.2 软件在环仿真	134
参考文献	106	3.3 硬件在环测试	135
第 11 章 推进系统		4 一些实际问题	136
1 综述	108	4.1 FCS 的故障安全程序	136
1.1 推进变型	109	4.2 飞行试验和与控制站的通信	136
1.2 电气化推进变型	110	5 总结	138
1.3 软基方法——智能动力管理和 节能	111	参考文献	138
2 结论	112	第5部分 自主性	
参考文献	112	第 14 章 弱 GPS 环境下的相对导航	
第 12 章 供能和能源管理		1 引言	141
1 概述	114	2 相对导航框架	142
2 机载能源和设计应用	115	2.1 相对前端概述	142
2.1 内燃机	115	2.2 全局后端概述	142
2.2 电池能源	116	2.3 突变场景	143
2.3 太阳能	117	3 相对前端	143
2.4 燃料电池	118	3.1 视觉测距	143
3 能量管理飞行计划	118	3.2 估计	143
3.1 能量优化飞行速度	119	3.3 低级路径生成及其跟踪	144
		3.4 控制	145
		4 全局后端	145



4.1 姿态图	145	1 引言	175
4.2 地点识别	146	2 静态障碍避障	175
4.3 间断的 GPS 整合	146	2.1 维诺图法	176
4.4 地图优化	146	2.2 胞体分解法	176
4.5 高级路径规划	147	2.3 可视图法	176
5 结论	147	2.4 势场和基于采样的方法	176
参考文献	148	3 避障研究	176
■ 第 15 章 基于鸽子启发优化的目标检测与任务规划	150	4 静态障碍物避障	177
1 引言	150	5 反应规划	178
2 鸽子优化算法	150	6 总结	178
2.1 鸽子的自然行为	151	参考文献	178
2.2 数学模型	151	■ 第 18 章 制导武器、无人机导航和路径规划	181
2.3 基本 PIO 算法的步骤	152	1 导弹与无人机用 GPS 和 INS 的问题	181
3 用于目标检测的 PIO 算法	153	1.1 全球定位系统 (GPS) 导航	181
3.1 问题描述	153	1.2 惯性导航系统 (INS)	182
3.2 基于 SAPIO 优化的 EPF 实施过程	154	1.3 惯性导航算法	184
3.3 实验结果	154	1.4 GPS/INS 集成	184
4 用于无人机航迹规划的 PIO 算法	156	2 TERPROM 和 TERCOM 的原理与实践	185
4.1 使用 PIO 算法进行路径优化	156	2.1 飞机和无人机的路径规划	186
4.2 基于 PP-PIO 算法的三维路径规划	157	3 战术导弹制导策略	186
5 基于 PIO 算法的任务分配方法	160	3.1 CLOS 制导与变型	187
5.1 任务分配问题描述	160	3.2 比例导引 (PN) 制导	188
5.2 实验结果	161	3.3 脱靶量 (MD)	189
6 总结	162	4 结论	190
参考文献	163	参考文献	191
■ 第 16 章 自主架构	164	■ 第 19 章 嵌入式无人机自动驾驶仪与传感器系统	193
1 无人机自主架构介绍	164	1 引言	193
1.1 无人机的自动水平	164	2 自动驾驶仪架构	194
1.2 自主系统架构概述	164	3 自内环控制结构	194
2 无人机自主架构	165	3.1 横向自动驾驶仪	195
2.1 底层架构	166	3.2 纵向自动驾驶仪	197
2.2 顶层架构	167	4 机上传感器及传感器处理	199
3 自主架构示例: ARCAS 项目	169	4.1 角速度、空速及高度	200
3.1 底层 ARCAS 架构	169	4.2 滚转角和俯仰角	200
3.2 顶层 ARCAS 架构	169	4.3 惯性位置及航向	202
3.3 ARCAS 复杂任务示例: 装配操作	171	5 GPS 导航	202
4 结论	171	5.1 直线路径追踪	203
参考文献	172	5.2 轨道跟踪	204
■ 第 17 章 避障: 静态障碍物	175	6 总结	205



参考文献 205

第6部分 控制**第 20 章 小型无平衡杆无人直升机**

建模和频域参数识别 209

- 1 引言 209
 - 2 系统识别概述 210
 - 3 时间历史数据采集 210
 - 3.1 标准和指南 211
 - 3.2 计算机扫描 212
 - 3.3 数据采集 213
 - 4 频响分析 214
 - 5 模型线性化 222
 - 5.1 配平 223
 - 5.2 综合线性状态空间模型 223
 - 6 稳定性与控制导数 224
 - 7 频率响应 224
 - 8 三维陀螺仪 226
 - 9 状态空间模型识别 226
 - 10 识别模型的频率响应 227
 - 11 时域验证 229
 - 12 结论 230
- 参考文献 230

第 21 章 轨迹规划与制导 232

- 1 引言 232
- 2 轨迹规划 233
 - 2.1 曲率约束下平面运动的基本运动学模型 233
 - 2.2 基本模型的变化 233
 - 2.3 增量更复杂的模型 235
 - 2.4 进一步模型变化 236
 - 2.5 三维扩展 237
 - 2.6 内点约束的轨迹规划 237
- 3 路径引导 239
 - 3.1 引言 239
 - 3.2 航点引导 239
 - 3.3 虚拟目标引导 241
 - 3.4 交叉引导 242
- 4 结论 243

参考文献 243

第 22 章 传感器融合 246

- 1 引言 246
 - 2 无人机传感器融合 246
 - 3 架构 248
 - 4 算法 249
 - 4.1 线性卡尔曼滤波 250
 - 4.2 扩展卡尔曼滤波 251
 - 4.3 无迹卡尔曼滤波 252
 - 4.4 粒子滤波 252
 - 4.5 传感器融合算法总结 253
 - 5 执行分配 253
 - 6 传感器融合实例 254
 - 6.1 基于多传感器的感知与规避 254
 - 6.2 多传感器组合导航 256
 - 7 未来发展 261
- 参考文献 262

第7部分 人为监督**第 23 章 人与自动化之间以及空与地之间的功能分配** 267

- 1 综述 267
 - 1.1 要求 1: 必须为每个单元分配能够执行的功能 267
 - 1.2 要求 2: 每个单元必须能够执行它的集合功能 268
 - 1.3 要求 3: 通过合理的团队协作, 实现功能配置 269
 - 1.4 要求 4: 功能分配必须满足工作的动态变化 270
 - 1.5 要求 5: 功能分配应该是经过仔细考量的设计决策结果 271
 - 2 结论 271
- 参考文献 272

第 24 章 与有人驾驶飞机和空中交通管制管的协调 274

- 1 概述 274
 - 1.1 空域系统 274
 - 1.2 无人机系统 275