

WILEY



Advanced UAV
Aerodynamics,
Flight Stability and Control
Novel Concepts, Theory and Applications

无人系统技术与应用书系


先进无人机 空气动力学、 飞行稳定性与飞行控制

[英] 帕斯夸尔·马克斯 (Pascual Marqués)
安德烈亚·达·龙什 (Andrea Da Ronch)

主编

向文豪 张博勋 李东宸 马捷

等译

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

无人系统技术与应用书系

先进无人机空气动力学、 飞行稳定性与飞行控制

[英] 帕斯夸尔·马克斯 (Pascual Marqués) 主编
安德烈亚·达·龙什 (Andrea Da Ronch) 主编
向文豪 张博勋 李东宸 马捷 等译



机械工业出版社

《先进无人机空气动力学、飞行稳定性与飞行控制》旨在揭示无人机航空学领域迅速发展的秘密。这是一个包罗万象的多学科专业领域，通过将多种工程学科和领域结合到一起，共同构成了航空航天业制造独特高科技无人机的基础。

本书介绍了当今不同构型无人机的气动模型技术进展、实际应用中的飞行稳定性，以及实验平台中的控制策略验证，对固定翼和旋翼飞行的空气动力学进行了高级论述。本书可促进读者理解与无人机相关的基本物理规律和数学处理方法，以及在飞行稳定性和控制工程方面的先进理论和创新。本书属于高级技术层次，包含大量公式和数据，同时亦采用了技术性不至于过强的描写与叙述性文字来阐述各种概念。

本书主要面向航空相关专业大学生和讲师、空气动力学研究人员、航空航天工程师以及航空器设计师与制造商。

Copyright © 2017 John Wiley & Sons, Ltd

All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled *Advanced UAV Aerodynamics, Flight Stability and Control: Novel Concepts, Theory and Applications*, ISBN: 978-1-118-92868-4, by Pascual Marqués, Andrea Da Ronch, Published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

本书中文简体字版由 Wiley 授权机械工业出版社独家出版，未经出版者书面允许，本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。

版权所有，翻印必究。

北京市版权局著作权合同登记 图字：01-2017-9166 号。

图书在版编目 (CIP) 数据

先进无人机空气动力学、飞行稳定性与飞行控制/(英)帕斯夸尔·马克斯, (英)安德烈亚·达·龙什 (Andrea Da Ronch) 主编; 向文豪等译. —北京: 机械工业出版社, 2019.3

(无人系统技术与应用书系)

书名原文: *Advanced UAV Aerodynamics, Flight Stability and Control Novel Concepts, Theory and Applications*

ISBN 978-7-111-61966-6

I. ①先… II. ①帕… ②安… ③向… III. ①无人驾驶飞机-空气动力学②无人驾驶飞机-飞行稳定性③无人驾驶飞机-飞行控制 IV. ①V279

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 025313 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 孟 阳 责任编辑: 孟 阳

责任校对: 刘志文 张晓蓉 封面设计: 马精明

责任印制: 郜 敏

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

2019 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 43 印张 · 8 插页 · 888 千字

0 001—1 500 册

标准书号: ISBN 978-7-111-61966-6

定价: 189.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线: 010-88361066

读者购书热线: 010-68326294

网络服务

机工官网: www.cmpbook.com

机工官博: weibo.com/cmp1952

金书网: www.golden-book.com

教育服务网: www.cmpedu.com

封面防伪标均为盗版

题 献

致我们的同事，伦敦皇家航空学会荣誉会员拉梅什·K·阿加瓦尔教授。这一荣誉会员称号代表了全世界航空航天领域的最高成就，于2015年授予阿加瓦尔教授，以表彰他在航空航天教育和研究方面的杰出领导作用，以及运用流体力学方法对各类航空器发展做出的贡献。阿加瓦尔还是美国圣路易斯华盛顿大学的 William Palm 工程学教授。

供稿作者

伊马伊德·A·阿卜杜勒·雷塔

Emaid A. Abdul Retha

无人机大学

美国亚利桑那州菲尼克斯

拉梅什·K·阿加瓦尔

Ramesh K. Agarwal

圣路易斯华盛顿大学

美国密苏里州圣路易斯

乌拜杜拉·阿克拉姆

Ubaidullah Akram

洛克希德·马丁商业飞行训练部

荷兰萨森海姆

乔治·N·巴拉科斯

George N. Barakos

英国利物浦大学工程学院

英国格拉斯哥大学工程学院

R·巴尔德拉·莫拉

R. Bardera Mora

INTA 低速空气动力学实验室

西班牙马德里

罗恩·巴雷特

Ron Barrett

堪萨斯大学

美国堪萨斯州劳伦斯

陈文华

拉夫堡大学航空与汽车工程系

英国拉夫堡

凯利·科恩

Kelly Cohen

辛辛那提大学航空航天工程和工程力学系

美国俄亥俄州辛辛那提

安东尼奥·J·科内萨·托雷斯

Antonio J. Conesa Torres

INTA 空气动力学实验室

西班牙马德里

马尔科·克里斯托法罗

Marco Cristofaro

李斯特内燃机及测试设备公司

奥地利格拉茨

安德烈亚·达·龙什

Andrea Da Ronch

南安普顿大学

英国南安普顿

兰詹·甘古利

Ranjan Ganguli

印度科学理工学院航空航天工程系

印度班加罗尔

胡庆雷
哈尔滨工业大学控制科学与工程系
中国哈尔滨

丹尼尔·J·英曼
Daniel J. Inman
密歇根大学航空航天工程系
美国密歇根州安阿伯

凯瑟琳·S·约翰逊
Catherine S. Johnson
英国利物浦大学工程学院
英国格拉斯哥大学工程学院

贾拉勒·卡里米
Jalal Karimi
MUT 大学空间研究中心
伊朗德黑兰

马利亚姆·基亚尼
Maryam Kiani
谢里夫理工大学空间科学与技术研发中心
伊朗德黑兰

李波
哈尔滨工业大学控制科学与工程系
中国哈尔滨

刘存佳
拉夫堡大学航空与汽车工程系
英国拉夫堡

帕斯夸尔·马克斯
Pascual Marqués
马克斯航空有限公司
英国绍斯波特

朱塞佩·佩泽拉
Giuseppe Pezzella
意大利航空航天研究中心
意大利卡普阿

赛义德·H·普尔塔克道斯特
Seid H. Pourtakdoust
谢里夫理工大学空间科学与技术研发中心
伊朗德黑兰

屈秋林
北京航空航天大学
中国北京

尼古拉斯·施瓦茨
Nicholas Schwartz
辛辛那提大学航空航天工程和工程力学系
美国俄亥俄州辛辛那提

奥克萨纳·斯塔诺夫
Oksana Stalnov
以色列理工学院航空航天工程系
以色列海法

尼古劳斯·D·坦塔罗乌达斯
Nikolaos D. Tantaroudas
European Dynamics 股份公司
希腊雅典

马克·B·蒂施勒
Mark B. Tischler
美国陆军研究发展与工程司令部
美国加利福尼亚州莫菲特联邦机场

VI | 先进无人机空气动力学、飞行稳定性与飞行控制

安东尼奥·维维亚尼

Antonio Viviani

坎帕尼亚大学路易吉·万维泰利学院

意大利阿韦尔萨

马克·伍德盖特

Mark Woodgate

英国利物浦大学工程学院

英国格拉斯哥大学工程学院

王娅（音）

纽约州立大学石溪分校机械工程系

美国纽约州斯托尼布鲁克

肖冰

哈尔滨工业大学控制科学与工程系

中国哈尔滨

魏伟（音）

辛辛那提大学电机工程系

美国俄亥俄州辛辛那提

张友民

康考迪亚大学机械与工业工程系

加拿大魁北克省蒙特利尔

本书翻译人员

参与本书翻译工作的有向文豪、张博勋、李东宸、马捷、曹鹏钧、朱志国、张建强、张萌、包文卓、刘佳和李玉红。

序

在航空领域，早期的无人机应用无疑是小心谨慎的，但如今它们的用途已经非常广泛。无论家用、工业用途、政府/官方用途还是军用，处处都有它们的身影。当前，无人机有固定翼载具、多旋翼载具、自适应机翼载具和空间再入载具等多种构型，且具备遥控和自主操作模式，由此催生了众多无人机种类，而每一个种类中又包含了不同制造商开发的众多型号的无人机。它们都可以携带包括传感器在内的某种形式的有效载荷，并可以将传感器数据中继到地面上。不过，尽管取得了这样的成就，我们在这一领域中仍然有很多需要学习的地方。与传统有人航空器一样，无人机的应用范围还将继续扩展，对于更高性能的需求也将持续增长。

本书将介绍现有各类无人机的气动设计、稳定性和控制、自适应控制、模拟和风洞测试等方面的内容，以及相关的新概念。这些技术的价值不仅体现在载具本身的设计上，它们还是远程和自主飞行控制系统旨在实现高完整性和安全操作的控制律的设计基础。应用上述技术可以为收集证据以支持此类载具的认证提供重要的基础。

“航空航天技术丛书”面向工程专家和操作员、商务和法律专员等专业人员，以及航空航天业从业者，意在持续地提供各类实践信息、专题信息和其他相关信息。这些信息涉及航空器的方方面面，包括设计开发、制造、操作和支持等，以及基础设施操作和研究与技术发展等。

《先进无人机空气动力学、飞行稳定性与飞行控制》同样遵从这一体系。它是来自不同领域、具有丰富经验的众多作者所撰写的不同主题的纲要，每一个主题都借助详尽的插图和数学证明来进行阐述。书中对各种新概念和技术进行了介绍。对无人机设计领域的学生、学者和从业者而言，这就如同一座可靠的知识库。

彼得·贝罗巴巴、乔纳森·库珀、艾伦·西布里奇

前 言

《先进无人机空气动力学、飞行稳定性与飞行控制》是一本面向大学学生和讲师、空气动力学研究人员、航空航天工程师以及航空器设计师与制造商的书籍。本书读者需要具备空气动力学、飞行稳定性和飞行控制方面的基础知识。尽管如此，本书第1章依然简要介绍了空气动力学和飞行稳定性方面的知识，以飨不具备传统工程背景的读者。本书属于高级技术层次，包含大量公式和数据，但同时亦采用了技术性不至于过强的描写与叙述性文字来阐明各种概念。

本书分为两部分，共21章。第一部分介绍了无人机空气动力学中的新概念，包含关于固定翼航空器（飞机）、旋翼航空器（直升机）和混合航空器的章节。第二部分介绍了无人机飞行稳定性和飞行控制中的新概念，包含关于固定翼航空器（飞机）和四旋翼航空器的章节。读者可以通过本书详细了解各种无人机设计理念和气动环境分析方法，包括再入无人机空气动力学、大柔性航空器的气动伺服弹性分析、风洞试验、地效空气动力学、直升机的动力学建模和系统辨识、径向基函数神经网络、带有类BERP桨尖的旋翼桨叶的优化、直升机后缘襟翼、采用智能作动的桨叶扭转、可在悬停和高速平飞间转换的无人机空气动力学、闭环流动控制、自主阵风减缓、采用计算流体动力学进行虚拟飞行仿真、采用等离子激励修改流动结构、约束运动规划和轨迹优化、自主空间导航、航天器自适应姿态容错控制、多旋翼垂直起降无人机动力学和稳定性，以及四旋翼无人机系统辨识和飞行控制。

《先进无人机空气动力学、飞行稳定性与飞行控制》旨在揭示无人机航空学领域迅速发展的秘密。这是一个包罗万象的多学科专业领域，通过将多种工程学科和领域结合到一起，共同构成了航空航天业制造独特高科技无人机的基础。世界级研究人员和行业专家的丰富知识和经验通过本书可惠及航空航天领域从业人员和大学生。

航空器之所以能飞上蓝天，离不开空气动力学的支持。现代无人机的高效表现大多源自工程师利用精密的计算流体动力学对气体流动进行建模的工作。本书可促进读者理解该主题的基本物理规律和数学处理方法，以及在飞行稳定性和控制工程方面的先进理论和创新。

技术创新和日益多样化的应用是无人机技术迅速发展的两大关键驱动力。全球用于采购无人机的国防预算正在增长，而民用无人机市场更有望超越军用市场。本书介绍了当今不同构型无人机的气动模型技术进展、实际应用中的飞行稳定性，以及实验平台中的控制策略验证。对固定翼和旋翼飞行的空气动力学进行的高级论述将吸引航空器设计师、航空学本科生和研究生，以及寻找这一主题的进修教科书的

执业工程师。

主要特色

- 对空气动力学和飞行稳定性进行现代化的论述和实践研究。
- 介绍当代飞行控制系统的发展趋势。
- 详细、严谨、带有插图的阐述和案例。
- 可在配套网站上获取供讲师使用的教学 PowerPoint 演示文稿。

在此，我们要对向本书供稿的众多世界级行业专家致以诚挚的谢意，感谢他们贡献出宝贵的时间和学识使本书最终得以问世。所有供稿人如下（按章节先后顺序排列）：朱塞佩·佩泽拉博士、安东尼奥·维维亚尼教授、尼古劳斯·D·坦塔罗乌达斯、安德烈亚·达·龙什博士、R·巴尔德拉·莫拉博士、屈秋林博士、拉梅什·K·阿加瓦尔教授、陈文华教授、刘存佳博士、兰詹·甘古利教授、凯瑟琳·S·约翰逊博士、马克·伍德盖特博士、乔治·N·巴拉科斯教授、帕斯夸尔·马克斯博士、罗恩·巴雷特博士、奥克萨纳·斯塔尔诺夫博士、丹尼尔·J·英曼教授、王娅（音）博士、乌拜杜拉·阿克拉姆、马尔科·克里斯托法罗、安东尼奥·J·科内萨·托雷斯博士、赛义德·H·普尔塔克道斯特教授、贾拉勒·卡里米博士、马利亚姆·基亚尼博士、胡庆雷教授、肖冰博士、李波博士、张友民博士、伊马伊德·A·阿卜杜勒·雷塔博士、魏伟（音）、马克·B·蒂施勒博士、尼古拉斯·施瓦茨和凯利·科恩教授。

帕斯夸尔·马克斯、安德烈亚·达·龙什

配套网站

本书的配套网站包含旨在加强学习效果的材料，包括：

- 演示幻灯片
- 视频文件
- 数据集

网址：

http://www.wiley.com/go/marques/advanced_UAV_aerodynamics



目 录

供稿作者

本书翻译人员

序

前言

第 1 章 概述..... 1

帕斯夸尔·马克斯

第 2 章 无人机构型中的空气动力学 31

帕斯夸尔·马克斯

第一部分 无人机空气动力学中的新概念

固定翼航空器 (飞机)

第 3 章 三种不同的再入无人载具的气动性能分析 49

朱塞佩·佩泽拉、安东尼奥·维维亚尼

第 4 章 大柔性航空器的非线性降阶气动伺服弹性分析..... 138

尼古劳斯·D·坦塔罗乌达斯、安德烈亚·达·龙什

第 5 章 无人机风洞试验..... 172

R·巴尔德拉·莫拉

第 6 章 固定翼无人机的弦向地效空气动力学..... 190

屈秋林、拉梅什·K·阿加瓦尔

旋翼航空器 (直升机)

第 7 章 小型无人直升机的动力学建模和系统辨识..... 243

刘存佳、陈文华

第 8 章 使用径向基函数神经网络计算气动导数 268
 兰詹·甘古利

第 9 章 直升机 BERP 桨尖: 直升机桨叶外形优化方法文献综述 292
 凯瑟琳·S·约翰逊、马克·伍德盖特、乔治·N·巴拉科斯

第 10 章 带有类 BERP 桨尖的直升机旋翼桨叶的优化框架: 数值方法和应用 326
 凯瑟琳·S·约翰逊、马克·伍德盖特、乔治·N·巴拉科斯

第 11 章 采用智能作动的旋翼无人机的主动桨叶扭转 376
 帕斯夸尔·马克斯

混合航空器

第 12 章 可在悬停和高速平飞间转换的混合航空器的空气动力学和
 气动设计思路 396
 罗恩·巴雷特

第二部分 无人机飞行稳定性和飞行控制中的新概念

固定翼航空器 (飞机)

第 13 章 无人机的闭环主动流动控制 421
 奥克萨纳·斯塔尔诺夫

第 14 章 无人机的自主阵风减缓 436
 王娅 (音)、丹尼尔·J·英曼

第 15 章 通过计算流体动力学进行虚拟飞行仿真 463
 乌拜杜拉·阿克拉姆、马尔科·克里斯托法罗、安德烈亚·达·龙什

第 16 章 采用等离子体激励修改流动结构以增强无人机飞行控制 507
 安东尼奥·J·科内萨·托雷斯

第 17 章 无人机的约束运动规划和轨迹优化 536
 赛义德·H·普尔塔克道斯特、贾拉勒·卡里米

第 18 章 借助采用微机电技术的非线性滤波器实现自主空间导航 568
赛义德·H·普尔塔克道斯特、马利亚姆·基亚尼

第 19 章 执行器失效时的航天器自适应容错姿态控制 598
胡庆雷、肖冰、李波、张友民

四旋翼航空器

第 20 章 多旋翼垂直起降无人机动力学和稳定性中的新概念 618
伊马伊德·A·阿卜杜勒·雷塔

第 21 章 四旋翼无人机的系统辨识和飞行控制 643
魏伟（音）、马克·B·蒂施勒、尼古拉斯·施瓦茨、凯利·科恩

第 1 章 概 述

帕斯夸尔·马克斯

马克斯航空有限公司 (Marques Aviation Ltd), 英国绍斯波特

“过去几年,我一直为了人类可能飞翔的信念而煎熬着。”

——威尔伯·莱特 (Wilbur Wright), 1900 年 5 月 13 日

本章分为两节:第 1.1 节介绍有关无人机空气动力学的内容,第 1.2 节介绍有关飞行稳定性和飞行控制的内容。本章主要介绍了空气动力学、飞行稳定性和飞行控制的基本原理,航空航天工程专业的学生可借此预先储备基础知识,然后再阅读后续进阶章节。此外,本章还安排了一些课堂问题。

1.1 无人机空气动力学

1.1.1 无人机的类别和构型

无人机 (UAV) 的尺寸范畴非常之广,最小的纳米无人机 (NAV) 翼展只有 4cm,而最大的高空长航时 (HALE) 无人机翼展则达到甚至超过 35m。在这两者之间,还有微型 (MAV)、小型、近程、中程/战术和中空长航时等类型无人机 (图 1-1)。NAV 是在高黏度流体介质中工作的,而大型 (通常是有人驾驶的) 航空器周围的流体流动则由惯性效应主导。因此,对于不同尺寸的无人机而言,它们的空气动力学特性存在显著区别。

无人机的航空构型与其工作任务的需求密切相关,并受空速、续航时间和工作距离的限制。其采用固定翼还是旋翼设计则取决于对速度的需求。例如,HALE 侦察机为满足高空飞行的需求,需要配备展弦比 (AR) 较大的机翼。相比之下,无人作战飞机 (UCAV) 需要在较高的空速下工作,且需要在这样的条件下具备高速机动性,因此就需要配备展弦比较小的机翼。而对于需要从船上起飞的民用或军用无人机而言,垂直起飞和着陆的能力将是一大优势。固定翼无人机构型包括水平安定面后置 (传统)、水平安定面前置 (鸭式) 和无尾等类型。

传统的水平安定面后置设计通常将水平安定面放置在机身后部或通过尾撑连接到机翼上。此类航空器的重心 (CG) 通常位于气动中心 (AC) 的前方,因此会产生低头俯仰力矩,必须加上负力矩来抵消弧形机翼的低头力矩特征。净低头力矩可由水平安定面上的向下载荷抵消。

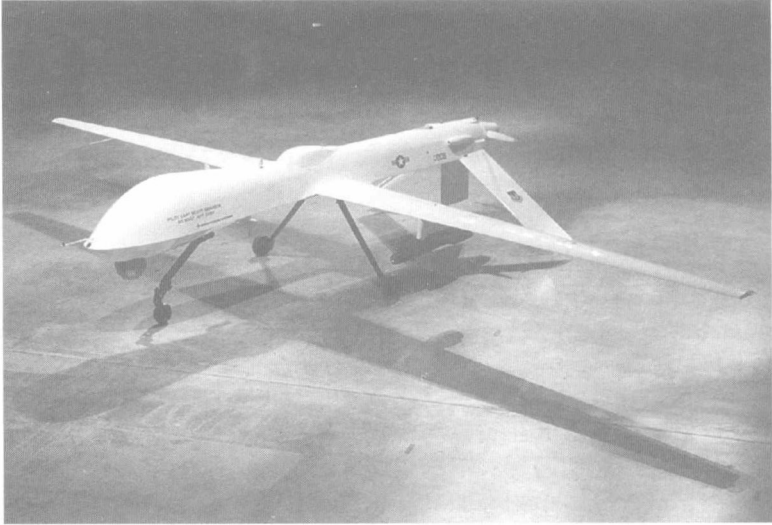


图 1-1 通用原子公司 (General Atomics) 设计制造的 RQ-1A “捕食者” (Predator)

在鸭式构型中，水平安定面和重心均位于机翼前方。这种设计通过前置水平安定面产生的正向升力实现俯仰平衡。鸭式设计在空气动力学方面比传统设计更高效，因为水平安定面和机翼都会产生正向升力。

无尾式无人机包括飞翼和三角翼两种构型，它们均配备后掠翼和高效的机尾，且翼尖处的安装角小于内翼的安装角，呈现出外洗（负扭转）的形式，从而实现俯仰稳定性。由于不配备水平安定面，可以减小翼型阻力。但是，在飞翼构型中，机翼后掠会导致升力分布不良、诱导阻力增大以及空速较高状态下产生负升力等问题。对于三角翼构型而言，由于其展弦比较小，会产生较高的翼展载荷，从而导致升力分布不良、诱导阻力增大等问题。

大多数无人机的动力装置安装在机身后部，以便在其前部安装有效载荷，并避免遮挡前方视野。此外，使用后置推进器在空气动力学上同样具有优势，因为后置推进器前方的滑流所产生的摩擦阻力小于前置推进器产生的摩擦阻力。旋翼式无人机最常见的构型是单主旋翼和四旋翼（图 1-2），此外还存在共轴双旋翼设计以及倾转旋翼、倾转机翼等混合构型。

1.1.2 理论空气动力学

对无人机设计中的新概念进行空气动力学分析可通过多种方法实现，这些方法的理论基础涵盖了从传统空气动力学原理到现代化的计算流体力学 (CFD) 的各个方面。薄翼理论是一种通过建立升力和迎角之间的函数关系来预测升力大小的分析方法，它假设机体位于理想化的不可压缩无黏性气流中。该理论可在低迎角（小于失速临界迎角）状态下应用于厚度不超过弦长 (c) 的 12% 的翼型。薄翼理论