



Unmanned Aircraft Design:
A Review of Fundamentals

无人机基本原理 与系统设计

【美】穆罕默德·萨德拉伊 (Mohammad Sadraey) 著
郎为民 周彦 等译



中国工信出版集团

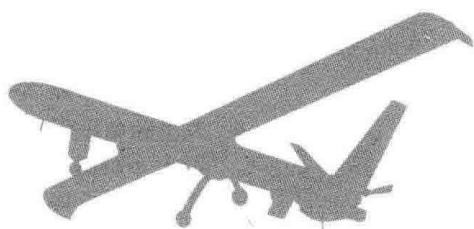


人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

Unmanned Aircraft Design:
A Review of Fundamentals

无人机基本原理 与系统设计

【美】穆罕默德·萨德拉伊 (Mohammad Sadraey) 著
郎为民 周彦等译



人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (CIP) 数据

无人机基本原理与系统设计 / (美) 穆罕默德·萨德拉伊 (Mohammad Sadraey) 著; 郎为民等译. — 北京: 人民邮电出版社, 2018.8
ISBN 978-7-115-48997-5

I. ①无… II. ①穆… ②郎… III. ①无人驾驶飞机—理论研究②无人驾驶飞机—系统设计 IV. ①V279

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第166309号

内 容 提 要

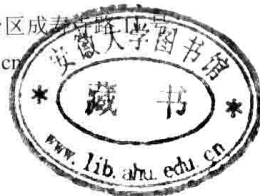
本书紧紧地围绕无人机领域发展过程中的热点问题,以无人机设计的基础知识为核心,全面和系统地介绍了无人机的基本概念、工作原理和设计实践的最新成果。本书包括3个部分,共10章。第1部分重点介绍整机设计相关知识,包括设计基础和设计学科;第2部分专门介绍自动驾驶仪设计相关知识,包括自动驾驶仪的基本原理、控制系统设计、导航系统设计、引导系统设计和微控制器;第3部分重点介绍设备设计相关知识,包括地面控制站、发射和回收系统、有效载荷选择设计。

本书体系结构完整,内容新颖翔实,知识系统全面,行文通俗易懂,兼备知识性、系统性、可读性、实用性和指导性。

本书可作为从事无人机研究、开发、设计、生产的技术人员和管理人员的技术参考书或培训教材,也可作为高等院校本科生或研究生无人机设计课程的教材。

-
- ◆ 著 [美]穆罕默德·萨德拉伊 (Mohammad Sadraey)
 - 译 郎为民 周彦等
 - 责任编辑 李强
 - 责任印制 彭志环
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路11号
 - 邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn
 - 网址 <http://www.ptpress.com.cn>
 - 三河市祥达印刷包装有限公司印刷
 - ◆ 开本: 700×1000 1/16
 - 印张: 16
 - 字数: 188千字

著作权合同登记号 图字: 01-2018-2894 号



2018年8月第1版

2018年8月河北第1次印刷

定价: 78.00 元

读者服务热线: (010) 81055488 印装质量热线: (010) 81055316

反盗版热线: (010) 81055315

作者简介

穆罕默德·萨德拉伊博士是位于新罕布什尔州曼彻斯特市的新罕布什尔南方大学 (SNHU, Southern New Hampshire University) 工程学院的副教授。萨德拉伊博士的主要研究兴趣包括飞机设计技术、飞机性能、飞行动力学以及无人驾驶飞机的设计和自动控制。1995 年, 萨德拉伊在澳大利亚墨尔本市皇家墨尔本理工大学获得航空航天工程专业硕士学位; 2006 年, 萨德拉伊在堪萨斯州堪萨斯大学获得航空航天工程专业博士学位。萨德拉伊博士是美国航空航天学会 (AIAA, American Institute of Aeronautics and Astronautics)、Sigma Gamma Tau 荣誉学会和美国工程教育学会 (ASEE, American Society for Engineering Education) 的高级成员。他还被列入美国名人录。萨德拉伊博士在学术界和工业界拥有 20 多年的专业经验。萨德拉伊博士还是另外 3 本书的作者, 其中包括 Wiley 出版社 2012 年出版的 *Aircraft Design: A Systems Engineering Approach* (《飞机设计: 系统工程方法》), 以及 CRC 出版社于 2016 年出版的 *Aircraft Performance* (《飞机性能》)。

译者序

无人机无疑是近年来快速发展的一个热点领域。无论是在军事领域还是在民用领域，无人机因其成本低廉、功能多样而深受欢迎。在未来的一段时间内，无人机的理论、制造和应用都将进一步发展。

当前，从国家顶层设计到地方战略规划，自上而下都为无人机行业的发展创造了有利的环境。围绕实现制造强国的战略目标，大力推动重点领域突破发展，聚焦新一代信息技术产业、高档数控机床和机器人、航空航天装备、海洋工程装备及高技术船舶、先进轨道交通装备、节能与新能源汽车、电力装备、农机装备、新材料、生物医药及高性能医疗器械十大重点领域。为推动通航产业发展，我国持续扩大低空空域开放，并在华东、西北、新疆地区开展无人机研发试飞基地建设试点工作，为我国无人机行业的发展提供了条件和机遇。

本书从整机设计、自动驾驶仪设计和地面系统设计 3 个方面来介绍无人机的基本原理、设计流程和设计工具。载人飞机设计和无人机设计存在着诸多相似之处和不同之处，包括设计过程、约束条件（如过荷、加压）和无人机主要部件（自动驾驶仪、地面站、通信设备、传感器和有效载荷）。无人机设计人员必须熟悉无人机的最新发展动态和当前的技术，能够从过往失败中吸取经验教训，且应当深入了解多种无人机设计方案。

无人驾驶飞机（UAV，Unmanned Aerial Vehicle）的应用领域和范围每天都在不断拓展，超过 20 个国家正在开发和使用无人机，并将其应用于军事和科研领域。无人机系统远不止是一种可重复使用的飞行器或运载工具。无人机是飞行器，它们能像飞机一样飞行，并能在飞机飞行的环境中完成各种操作。人们可以像设计飞行器一样来设计它们，且它们必须满

足飞行器的一些关键参数要求。设计人员需要知道如何对复杂的多学科系统进行集成,并了解环境、需求和设计挑战。从工程角度来看,本书对基础知识进行了全面的概述。

本书由郎为民、周彦等译,武汉市委党校的王谦,国防科技大学信息通信学院的余亮琴、陈放、赵毅丰、姚晋芳、廖非凡、朱义勇、陈红、王大鹏、吴文辉、陈金明、梁红莲、邹顺、魏声云、邹力、赖荣煊、许可乐、毛炳文、张锋军、任殿龙、瞿连政、林志强、姜斌、和湘、陈虎、陈凯参与了本书部分章节的翻译工作,高泳洪、张国峰、蔡理金、王会涛、李官敏、陈林、陈于平对本书的全部图表进行了加工,王昊、张丽红、孙少兰、马同兵对本书的初稿进行了审校,并更正了不少错误,在此一并向他们表示衷心的感谢。同时,本书是译者在忠实于原书的基础上翻译而成的,书中的意见和观点并不代表译者本人及所在单位的意见和观点。

人民邮电出版社对本书的出版给予了大力支持,人民邮电出版社的李强老师作为本书的责任编辑,为本书的出版付出了辛勤的劳动,在此一并表示感谢。

谨以此书献给我聪明漂亮、温柔贤惠的老婆焦巧,以及活泼可爱、美丽幽默的宝贝郎子程!

郎为民

2018年5月

前 言

无人驾驶飞机（简称无人机）是一种可以携带相机、传感器、通信设备或其他有效载荷的遥控飞行器或自动驾驶飞机。所有飞行操作（包括起飞和着陆）都是在没有机载飞行员的情况下执行的。在美国国防部（DoD, Department of Defense）的一些报道中，无人机系统（UAS, Unmanned Aircraft System）是首选。在媒体报道中，无人驾驶飞机是首选。其使命是执行关键任务时不会给人身安全带来威胁，且与同等载人系统相比，成本效益更高。

无人机在出动架次、航时和发挥作用方面的贡献仍在持续增加。过去它们只具有侦察功能，而目前已经实现与精准打击、部队防护和信号采集的共享。这些不同系统的成本从几百美元（亚马逊销售品种）到数千万美元不等。性能变化范围从远低于 1lb（约 0.45kg）的微型飞行器（MAV, Micro Air Vehicle）到重量超过 40000lb（约合 18144kg）的飞机。

无人机系统包括四大构成要素：（1）飞行器；（2）地面控制站；（3）有效载荷；（4）维护 / 保障系统。载人飞机设计和无人机设计存在着诸多相似之处和不同之处：设计过程、约束条件（如 g 载荷、加压）、无人机主要部件（自动驾驶仪、地面站、通信设备、传感器和有效载荷）。无人机设计人员必须熟悉无人机最新发展动态和当前的技术，能够从过往失败中吸取经验教训，且应当了解多种无人机设计方案。

设计过程需要集成和迭代：（1）综合，将已知事物组合成更有用的新型组合的创造性过程；（2）分析，预测设计候选方案的性能或行为的过程；（3）评估，进行性能计算并对比每种可行设计候选方案的预测性能以确定缺陷的过程。设计人员需要知道如何对复杂的多学科系统进行集成，并理

解环境、需求和设计挑战。

本书旨在介绍无人机设计的基础知识，包括 3 个部分，共 10 章。第 1 部分是关于“整机设计”的，涵盖了设计基础和设计学科。这部分包括无人机分类、设计项目规划、决策、可行性分析、系统工程方法、设计小组、设计阶段、设计评审、评估、反馈、空气动力学设计、结构设计、推进系统设计、起落架设计、机械系统设计和控制面设计。

第 2 部分专门介绍自动驾驶仪设计方面的知识。它将涵盖动态建模、控制系统设计、导航系统设计、引导系统设计和微控制器。这部分将讨论的问题包括飞机气动力和力矩、稳定性和控制微分方程、传递函数模型、状态空间模型、飞机动力学、线性化、控制系统基本原理、控制律、常规设计技术、最优控制、强健性控制、数字控制、稳定性增强、坐标系统、惯性导航、航点导航、传感器、航空电子设备、陀螺仪、GPS、导航律、引导律、比例导航引导、视线引导、超前角、跟踪指令、飞行路径稳定、转弯协调、指挥系统、模块 / 部件、飞行软件、集成和完全自主。这部分还将介绍一些诸如侦察（探测）与回避、自动恢复、故障监视、智能飞行规划和有人与无人平台编组等高级主题。

在第 3 部分中，我们对设备设计进行了介绍，其中包括地面控制站通信系统、有效载荷以及启动和恢复系统。这部分讨论的主题包括地面单元类型、便携式地面站、任务控制元件、遥控人员、保障设备、运输、协调、硬件和软件、无线电频率、通信系统元件、通信技术、发射机、接收机、遥测、测量设备、天线、雷达、民用有效载荷、军用有效载荷、可处置性有效载荷、成像设备、有效载荷处理、有效载荷管理、有效载荷结构集成、常规发射、轨道发射器、手抛发射、空中发射和回收系统。由于本书篇幅有限，因而对很多主题都是简要介绍。

本书的完成得益于很多人的支持。感谢 Morgan & Claypool 出版社的

工作人员，感谢《工程》(*Engineering*)杂志的执行编辑保罗·佩特里亚(Paul Petralia)以及排版部门的德伯·加布里埃尔(Deb Gabriel)。特别要感谢杰出的文字编辑和校对人员，他们在图书的校对工作方面至关重要。还要感谢我的学生和本书的审稿者，他们提出的问题、建议和批评让我思路更加清晰，并对本书的成稿有着深远的影响。

穆罕默德·萨德拉伊

2017年7月

版权声明

Mohammad Sadraey.

Unmanned Aircraft Design: A Review of Fundamentals.

Copyright © 2017 by Morgan & Claypool

All rights reserved.

The simplified Chinese translation rights arranged through Rightol Media. (本书中文简体版权经由锐拓传媒取得 Email:copyright@rightol.com) This translation published under license.

Authorized translation from the English language edition published by Morgan & Claypool Publishers.

本书原版由 Morgan & Claypool 出版社出版，并经其授权人民邮电出版社翻译出版。版权所有，侵权必究。

目 录

第1部分

第1章 设计基础 //2

- 1.1 引言 //2
- 1.2 无人机分类 //4
- 1.3 设计项目规划 //10
- 1.4 决策 //11
- 1.5 设计标准、目标和优先项 //11
- 1.6 可行性分析 //14
- 1.7 设计小组 //15
- 1.8 设计过程 //16
- 1.9 系统工程方法 //17
- 1.10 概念设计 //21
- 1.11 初步设计 //26
- 1.12 详细设计 //28
- 1.13 设计评审、评估和反馈 //30
- 简答题 //31

第2章 设计学科 //33

- 2.1 引言 //33
- 2.2 空气动力学设计 //35
- 2.3 结构设计 //37
- 2.4 推进系统设计 //39

- 2.5 起落架设计 //41
- 2.6 机械 / 动力传递系统设计 //43
- 2.7 控制面设计 //46
- 简答题 //54

第 2 部分

第 3 章 自动驾驶仪的基本原理 //58

- 3.1 引言 //58
- 3.2 自动驾驶仪的主要子系统 //59
- 3.3 动态建模 //59
- 3.4 无人机动态特征 //63
- 3.5 气动力和力矩 //65
- 3.6 稳定性和控制微分方程 //66
- 3.7 传递函数 //68
- 3.8 状态空间模型 //69
- 3.9 线性化 //69
- 3.10 自动驾驶仪设计过程 //72
- 简答题 //73

第 4 章 控制系统设计 //75

- 4.1 引言 //75
- 4.2 控制系统基础 //76
- 4.3 无人机控制架构 //80
 - 4.3.1 控制类型 //80
 - 4.3.2 巡航控制 //82

- 4.4 飞行控制要求 //84
 - 4.4.1 纵向控制要求 //84
 - 4.4.2 横向控制要求 //86
 - 4.4.3 定向控制要求 //86
- 4.5 PID 控制器 //87
- 4.6 最优控制：线性二次调节器 //88
- 4.7 顽健性控制 //89
- 4.8 数字控制 //90
- 4.9 稳定性增强 //92
- 4.10 自主性 //95
 - 4.10.1 分类 //95
 - 4.10.2 侦察（探测）与回避 //97
 - 4.10.3 自动回收 //98
 - 4.10.4 故障监视 //98
 - 4.10.5 智能飞行规划 //99
 - 4.10.6 有人与无人平台编组 //99
- 4.11 控制系统设计过程 //100
- 简答题 //103
- 思考题 //104

第 5 章 导航系统设计 //107

- 5.1 引言 //107
- 5.2 坐标系统 //109
- 5.3 惯性导航系统 //109
- 5.4 全球定位系统 //112

- 5.5 位置固定导航 //114
 - 5.5.1 地图读取 //114
 - 5.5.2 天文导航 //115
- 5.6 惯性导航传感器 //115
 - 5.6.1 加速度计 //116
 - 5.6.2 陀螺仪 //117
 - 5.6.3 空速传感器 //120
 - 5.6.4 高度传感器 //121
- 5.7 设计考虑 //122
- 简答题 //124

第6章 引导系统设计 //126

- 6.1 引言 //126
- 6.2 引导系统的构成要素 //129
- 6.3 引导律 //130
- 6.4 视线引导律 //132
- 6.5 编队飞行 //134
- 6.6 比例导航引导律 //137
- 6.7 追踪引导律 //138
- 6.8 航点引导律 //139
- 6.9 寻的器 //139
- 简答题 //142

第7章 微控制器 //144

- 7.1 引言 //144

- 7.2 基本功能 //146
- 7.3 模块 / 元件 //150
- 7.4 飞行软件 //153
 - 7.4.1 软件开发 //153
 - 7.4.2 操作系统 //153
 - 7.4.3 管理软件 //154
 - 7.4.4 微控制器编程 //155
 - 7.4.5 软件集成 //156
 - 7.4.6 C 语言 //157
 - 7.4.7 编译器 //158
 - 7.4.8 ArduPilot //159
 - 7.4.9 调试 //159
 - 7.4.10 设计流程 //159
- 简答题 //160

第 8 章 地面控制站 //164

- 8.1 引言 //164
- 8.2 GCS 子系统 //166
- 8.3 地面站的人工操作员 //167
- 8.4 地面站类型 //169
 - 8.4.1 手持式控制器 //170
 - 8.4.2 便携式 GCS //170
 - 8.4.3 移动卡车 //171
 - 8.4.4 中央指挥站 //174
- 8.5 通信系统 //176

8.6 设计考虑 //180

简答题 //182

第9章 发射和回收系统 //183

9.1 引言 //183

9.2 发射基础理论 //184

9.3 发射器设备 //187

9.4 回收技术 //188

9.5 回收基本原理 //190

9.5.1 伞降回收 //190

9.5.2 碰撞回收 //192

9.6 空中发射 //193

9.7 手抛发射 //194

9.8 发射和回收系统设计 //195

简答题 //197

思考题 //197

第10章 有效载荷选择设计 //199

10.1 引言 //199

10.2 有效载荷定义 //201

10.3 货物或包裹有效载荷 //202

10.4 侦察 / 监视有效载荷 //203

10.4.1 相机 //204

10.4.2 雷达 //207

10.5 科学有效载荷 //209

- 10.6 军用有效载荷（武器） //210
- 10.7 有效载荷安装 //211
 - 10.7.1 有效载荷的位置 //212
 - 10.7.2 有效载荷空气动力学 //213
 - 10.7.3 有效载荷结构集成 //213
 - 10.7.4 有效载荷稳定化 //214
- 10.8 有效载荷的控制和管理 //215
- 10.9 有效载荷选择 / 设计考虑 //216
- 简答题 //218
- 思考题 //219

注释 //221

参考文献 //223

关键词 //229