

WEIXIAOXING
WUREN FEIXINGQI
XIETONG KONGZHI JISHU

微小型无人飞行器 协同控制技术

王玥 关震宇 杨东晓 等著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

微小型无人飞行器 协同控制技术

王 玥 关震宇 杨东晓 李大林 等著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书主要介绍了无人飞行器协同控制技术的发展,对协同优化方法的架构和具体算法进行了详细描述。在此基础上重点对无人飞行器协同任务分配模型和协同航迹规划模型进行论述,并对仿真方法和仿真结果进行了分析,对微小型无人飞行器集群作战方法进行了研究,最后对无人飞行器协同任务和航迹评价方法进行了讨论。本书内容建立在多年相关领域教学和科研工作基础之上,是对巡飞器等多种微小型无人飞行器关键技术攻关和样机研制过程中的经验总结,对未来其他无人系统协同控制领域的研究具有很好的借鉴作用。

本书可以作为兵器、航空航天等国防科技领域工程技术人员及科研工作者的学习参考书,也可以作为相关专业的研究生教材。

图书在版编目(CIP)数据

微小型无人飞行器协同控制技术/王玥,关震宇,杨东晓著.

—北京:国防工业出版社,2014.1

ISBN 978-7-118-09056-7

I. ①微… II. ①王… ②关… ③杨… III. ①无人驾驶飞行器—自动飞行控制—研究 IV. ①V47

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 284102 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷责任有限公司

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 9 1/4 字数 194 千字

2014 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 68.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010) 88540777

发行邮购:(010) 88540776

发行传真:(010) 88540755

发行业务:(010) 88540717

前 言

从 1917 年英国人成功研制出世界上第一架无人飞行器到现在,无人飞行器走上历史舞台已近百年。从最初的靶机,到 21 世纪初的侦察监视、电子对抗,再到今天的全方位精确打击,无人飞行器已经在不知不觉中彻底改变了战争的模式。

在无人飞行器的若干关键技术中,自主控制技术是其中最重要的一项,而协同控制则是自主控制技术中的关键,也是未来发展的重点。

结合多年国防科研工作积累和研究生教学经验,作者针对微小型无人飞行器的协同控制技术展开论述,总结了近年来应用较多的相关优化方法,并重点对协同任务分配模型、协同航迹规划模型和评价方法进行讲解。本书秉持理论与工程实践相结合的原则,理论介绍和实例研究直接相关,从而更易于读者对相关理论的理解和接受;实例仿真背景明确,但同时理论方法也具有较强的通用性,对未来其他无人系统的协同控制研究具有很好的借鉴作用。

本书由王玥、李杰、李兵、周玲编写了第 1 章、第 2 章、第 3 章、第 6 章和第 7 章,杨东晓、关震宇、李大林编写了第 4 章和第 5 章。全书由王玥统稿,曹晓文完成了对书稿的编排和整理工作。

在本书的写作过程中,北京理工大学朵英贤院士、兵器科学研究院上官垠黎研究员和兵器工业出版社严峻社长给予了大力支持,北京理工大学马宝华教授和范宁军教授对书稿提出了宝贵的意见,在此由衷地表示感谢。

本书是在总结多年科研教学成果,特别是国防基础科研项目“非瞄准线巡飞××技术”和“微小型智能××技术”的基础上完成的。由于时间和水平所限,书中难免有不当和错误之处,敬请读者批评指正,不胜感激。

作者
2013 年 10 月
于北京理工大学

目 录

第 1 章 微小型无人飞行器概述.....1	
1.1 无人飞行器的发展历史.....1	
1.1.1 从历史角度看无人 飞行器的的发展.....1	
1.1.2 近代无人飞行器的发展.....3	
1.2 无人飞行器的分类.....7	
1.2.1 按特性分类.....7	
1.2.2 按航行能力分类.....9	
1.3 无人飞行器系统的 关键技术.....11	
1.4 无人飞行器的未来 发展趋势.....14	
第 2 章 微小型无人飞行器协同 控制技术的发展.....16	
2.1 协同控制简介.....16	
2.2 协同控制技术发展.....16	
2.2.1 协同控制技术的 历史与现状.....16	
2.2.2 协同控制技术的 发展趋势.....17	
第 3 章 微小型无人飞行器协同 优化方法.....19	
3.1 多目标优化问题的求解 方法概述.....20	
3.1.1 多智能体系统控制 架构.....20	
3.1.2 集中式任务分配方法.....22	
3.1.3 分布式任务分配方法.....23	
3.1.4 微小型无人飞行器协同 控制优化方法简介.....26	
3.2 动态规划算法.....28	
3.2.1 动态规划算法简介.....28	
3.2.2 动态规划方法原理.....29	
3.3 Dijkstra 算法.....30	
3.3.1 Dijkstra 算法简介.....30	
3.3.2 Dijkstra 算法原理.....30	
3.4 蚁群算法.....31	
3.4.1 蚁群算法简介.....31	
3.4.2 蚁群算法原理.....32	
3.4.3 蚁群算法的发展与 改进.....33	
3.5 遗传算法.....33	
3.5.1 遗传算法简介.....33	
3.5.2 遗传算法原理.....35	
3.5.3 遗传算法的发展与 改进.....36	
3.6 粒子群算法.....38	
3.6.1 粒子群算法简介.....38	
3.6.2 粒子群算法原理.....38	
3.6.3 粒子群算法的发展与 改进.....40	
3.7 模拟退火算法.....40	
3.7.1 模拟退火算法简介.....40	
3.7.2 模拟退火算法原理.....41	
3.7.3 模拟退火算法的发展与 改进.....42	
3.8 A*算法.....43	
3.8.1 A*算法简介.....43	
3.8.2 A*算法原理.....43	

3.9	D*算法	46
3.9.1	D*算法简介	46
3.9.2	D*算法的基本原理	46
3.10	合同网协议方法	47
3.10.1	合同网协议方法简介	47
3.10.2	合同网协议方法原理	47
3.10.3	合同网协议方法的 发展与改进	48
3.11	黑板模型	49
3.11.1	黑板模型简介	49
3.11.2	黑板模型原理	50
第4章	微小型无人飞行器协同 任务分配模型	52
4.1	协同控制基本知识简介—— 平面 Dubins 路径	52
4.1.1	基本知识	52
4.1.2	Dubins 路径的基本 概念	53
4.1.3	微分几何法计算 Dubins 路径长度	53
4.1.4	两点间 Dubins 路径 生成	56
4.1.5	平面内两点间 Dubins 路径仿真	58
4.2	协同任务分配问题描述	58
4.2.1	任务描述	58
4.2.2	对于单个目标的 任务定义	59
4.3	系统动力学建模及任务 分配的数学模型	60
4.4	协同任务分配动态决策 树模型	60
4.4.1	基本概念: 图和树	60
4.4.2	动态决策树模型	61
4.4.3	优化目标及约束条件	64
4.5	搜索算法研究	64
4.5.1	分支定界树搜索算法	64

4.5.2	算法时间复杂度分析	65
4.6	实例仿真	67
4.6.1	预定搜索方式下的 多任务分配仿真	67
4.6.2	随机条件下多任务 分配仿真	70
4.6.3	与典型 CTAP 动态 算法的比较	72
4.7	小结	74
第5章	微小型无人飞行器协同 航迹规划	75
5.1	微小型无人飞行器航迹 规划	75
5.1.1	微小型无人飞行器战场 介入阶段航迹生成	75
5.1.2	微小型无人飞行器障碍 环境下静态航迹 生成方法	84
5.1.3	微小型无人飞行器实时 避障动态航迹 生成方法	96
5.2	微小型无人飞行器协同 航迹规划	101
5.2.1	Dubins 路径及其 曲率变化	101
5.2.2	MAV 群同时到达目标 的路径规划方法	108
5.2.3	算法及仿真	111
5.3	小结	113
第6章	微小型无人飞行器集群 作战研究	115
6.1	微小型无人飞行器集群 作战原理	115
6.2	微小型无人飞行器集群 协同作战的关键技术 及方式	117

6.2.1	微小型无人飞行器集群 协同作战的关键技术	117
6.2.2	微小型无人飞行器集群 协同作战方式	118
6.3	微小型无人飞行器集群 协同作战系统模型研究	118
6.3.1	群体状态转移模型	119
6.3.2	群体系统动力学模型	121
6.4	无人飞行器集群作战 研究	122
6.4.1	基本假设与符号描述	123
6.4.2	作战场景的分析及 作战研究	123
6.5	小结	126
第 7 章	微小型无人飞行器协同 任务和航迹评价方法	127
7.1	评价的必要性	127

7.2	基于毁伤效能最优的 评价方法	127
7.2.1	炸点的确定	128
7.2.2	目标描述	129
7.2.3	目标坐标杀伤规律	129
7.2.4	随机数的产生	130
7.2.5	样本容量的确定	131
7.3	基于飞行性能最优的 评价方法	131
7.3.1	影响航迹规划评价的 因素	131
7.3.2	基于 Simulink 的飞行器 六自由度弹道模型	131
7.4	评价计算	132
7.4.1	仿真初始条件	132
7.4.2	仿真结果分析	133
7.5	小结	134
参考文献		135

第 1 章 微型无人飞行器概述

无人飞行器 (Unmanned Aerial Vehicle) 是一种以无线电遥控或由自身程序控制为主的不载人飞行器。由于翻译的不同, 无人飞行器大多时候也通俗地称为无人机。微型无人飞行器 (Micro-Unmanned Aerial Vehicle) 是一种相对尺度较小的无人飞行器, 其显著特点是体积小、重量轻、相对成本低、编队集群完成任务等。当多架微型无人飞行器共同执行一项或者多项任务时, 我们认为它们此时组成了一个飞行编队, 可以通过协同控制技术对其进行智能化的控制, 以达到系统效能的最优。为了更加清晰地呈现 MAV 及其协同控制技术的发展, 下面将对无人飞行器的发展历史、典型分类、系统的关键技术及未来发展趋势进行介绍。

1.1 无人飞行器的发展历史

无人飞行器走上历史舞台已近百年。1917 年, 英国人成功研制出世界上第一架无人飞行器。但是, 直到 20 世纪 50 年代, 无人飞行器才得到广泛应用。在军事领域, 无人飞行器最初用作靶机, 类似靶弹。随着战争的需要、技术的进步, 无人飞行器在侦察、监视、电子对抗等方面大显身手。无人飞行器大致经历了无人靶机、预编程序控制无人侦察机、指令遥控无人侦察机和复合控制多用途无人机的发展历程。

与有人驾驶飞行器相比, 无人飞行器具有一些明显的优势: 不需要冒人员伤亡的风险、成本较低、不需战斗机护航即可以潜入高威胁区执行多种任务等。无人飞行器任务领域逐步拓展到侦察监视、目标搜索、火力校正、毁伤评估、数据中继、火力打击等。在 1991 年海湾战争、1999 年科索沃战争和 2003 年伊拉克战争中, 多种军用无人飞行器发挥了重要作用。

1.1.1 从历史角度看无人飞行器的发展

“自主性机械”的首次具有突破性的报道是来自于意大利南部的 Archytas, 那是一个被达芬奇称之为古代世界的时期。在公元前 425 年, 第一架无人飞行器被制造出来, 那是一只可以通过挥动自己翅膀飞行的机械鸽子, 从它的肚子中的一个机械装置获取能量, 如图 1.1 所示。据称它能在能量用尽坠到地面前飞行两百多米, 而且如果它的机械装置不重新设置, 这只鸽子就不能再次飞起来。

在同一时期, 中国则首次出现并发展了垂直飞行的概念。早期的雏形是一根尾

端包含有羽毛的棒。木棒在被释放自由飞行之前，会在双手之间旋转以产生足够的升力。



图 1.1 一个艺术家描绘的人类有记录以来的首次无人飞行

大约 17 个世纪之后，类似的“飞行鸟”出现了，这主要归功于文艺复兴时期的许多不知名的工程师，如图 1.2 所示。这一思想不知道是不是来自于 Archytas 的想法，但是至少它们是相似的。

在 1483 年，达芬奇设计了一个被称为是空中陀螺的可以在空中盘旋的飞行器，如图 1.3 所示。它的直径有 5m，达芬奇的想法是如果有一个转轴，施加足够的力就可以使他旋转或者飞翔。这一机械被当今许多专家认为是直升机的祖先。达芬奇在 1508 年也设计了一个通过双重曲柄机构煽动它的翅膀来飞行的机械鸟。

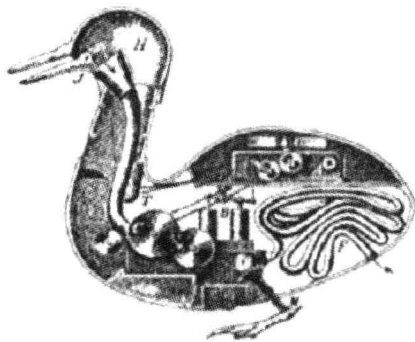


图 1.2 文艺复兴时期一个工程师制作的一个
类似的胃部有机械装置的“飞行鸟”

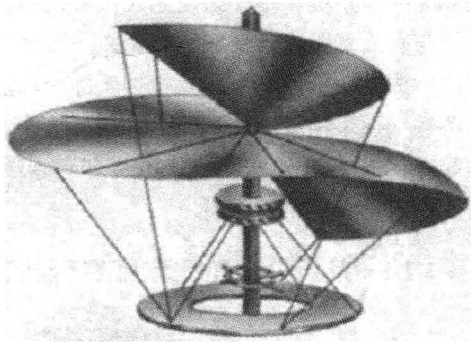


图 1.3 达芬奇的飞行装置

更多的飞行机械是在 1860 年和 1909 年被设计的，最初大家都集中关注垂直起降的飞行器是因为动力机械的限制，而这一时期蒸汽动力装置开始使用。这些机械的设计直接引领了当今的设计思路。

1.1.2 近代无人飞行器的发展

第一次世界大战进入尾声时，动力飞行还完全是一个新生的事物。众所周知，那是个重大发明辈出的年代。莱特兄弟在北卡罗来纳州的基蒂霍克（KittyHawk）的沙丘间完成了原始双翼飞机试飞。

1917 年，皮特·库柏（Peter Cooper）和埃尔默·A·斯佩里（Elmer A. Sperry）发明了第一台自动陀螺稳定器，这种装置使得飞机能够保持平衡向前飞行，无人飞行器自此诞生，如图 1.4 所示。

这项技术成果将美国海军寇蒂斯 N-9 型教练机成功改造为首架无线电控制的无人飞行器。

斯佩里空中鱼雷（Sperry Aerial Torpedo）能够搭载 300 磅的炸弹飞行 50 英里，但它从未参与实战。

木质的凯特灵空中鱼雷号被称作“凯特灵小飞虫”（Kettering Bug），这架飞机能够载重 300 磅，在 1917 年的造价为 400 美金，如图 1.5 所示。

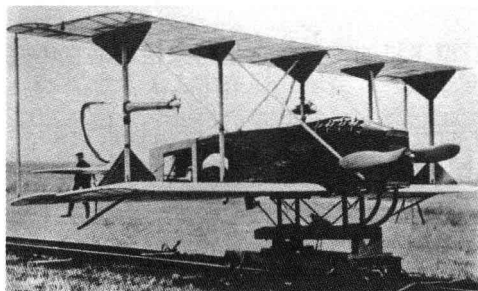


图 1.4 1917 年：斯佩里空中鱼雷号



图 1.5 1917 年：凯特灵空中鱼雷号

通用公司的查尔斯·F·凯特灵（Charles F. Kettering）设计的这架飞行器拥有可拆卸机翼，并且可以巧妙地由装有滚轮的手推车起飞。

第一次世界大战接近尾声的时候，美军下了大量的凯特灵飞虫的订单，但在它被派上战场之前战争就已经结束了。

由于受到技术的限制，1935 年之前的空中飞行器飞不回起飞点，因此也就无法重复使用。蜂王号的发明，使得无人飞行器能够回到起飞点，因此这项技术更具有实际价值，如图 1.6 所示。

蜂王号最高飞行高度 17000 英尺（约合 5182m），最高航速 100mile/h（约合 160km/h），在英国皇家空军服役到 1947 年。可以说，蜂王号在无人飞行器历史上有着重要的意义。

阿道夫·希特勒希望拥有能够攻击非军事目标的飞行炸弹，因此德国工程师弗莱舍·福鲁则浩（Fieseler Flugzeugbau）于 1944 年设计了一架速度达到 470mile/h 的无人飞行器，复仇者应运而生。

著名的复仇者一号是为攻击英伦列岛而设计，也是当代巡航导弹的先驱，如图 1.7

所示。复仇者一号载弹量比前代更大，经常搭载多达 2000 磅的导弹。英国有 900 多人死于该型无人飞行器之下，复仇者一号从弹射道发射后能按照预先设定程序飞行 150mile。



图 1.6 1935 年：DH.82B 蜂王号

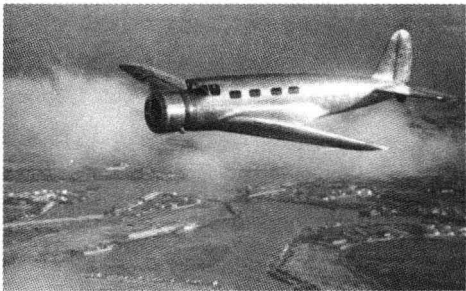


图 1.7 1944 年：复仇者 1 号

由瑞安航空 1951 年制造的火蜂原型机 XQ-2 在 4 年后进行首次试飞，如图 1.8 所示。这架世界上首台喷气推动的无人飞行器主要用于美国空军。火蜂无人飞行器适用于情报收集以及无线电交流的监控活动。

M-21 型是黑鸟系列中最早的产品 A-12 型飞机的变体，它是用来搭载洛克希德 D-21 高空无人飞行器的母机。

M-21 和 D-21 同属一个 1963 年—1968 年间进行的秘密项目，这个项目直到 40 年后才为人所知晓，如图 1.9 所示。M-21 型的改进在于新增供发射操作员乘坐的副驾驶舱。这两型飞行器于 1969 年—1971 年开展对罗布泊核试验场的 4 项侦察活动。21 机型的后续生产在 1966 年因为 D-21 在发射过程中和母舰 M-21 之间发生撞击事故而被取消。

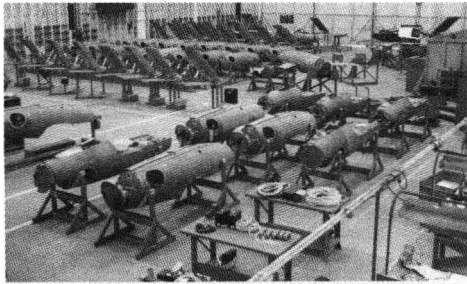


图 1.8 1955 年：瑞安火蜂号



图 1.9 1963 年：洛克希德 M-21 和 D-21

据美国海军介绍，于 1986 年 12 月首飞的先锋系列无人飞行器为战术指挥官提供了特定目标以及战场的实时画面，执行了美国海军“侦察、监视并获取目标”等各种任务。

这套无人定位系统的花销很小，满足了 20 世纪 80 年代美国在黎巴嫩，格林纳达以及利比亚以低代价开展无人获取目标的要求，并首次投入实战。

先锋号现在仍在服役，通过火箭助力起飞，起飞重量 416 磅，航速 109mile/h，如

图 1.10 所示。该无人驾驶飞行器能够漂浮在水面，并且通过海面降落进行回收。

通用原子公司（GeneralAtomics）在 1994 年制造了 MQ 捕食者无人机。

捕食者的升级版能够将完全侦查用途的飞机改造成用于携带武器的无人飞行器并攻击目标。

在美国空军服役的捕食者已超过 125 架，同时在意大利空军服役 6 架，如图 1.11 所示。

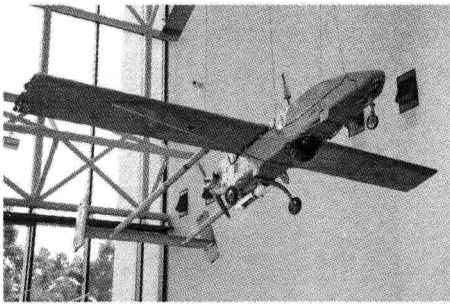


图 1.10 1986 年：先锋 RQ-2A

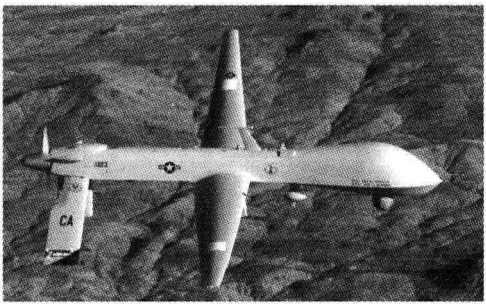


图 1.11 MQ 捕食者

捕食者无人机在联合国及北约于 1995 年对波斯尼亚的战役中首次使用，同时也出现美军阿富汗和伊拉克战场上，不过正逐步被淘汰。

RQ-7B 幻影是当时已装备的无人飞行器家族中最小的一个，被美国陆军和海军陆战队用于伊拉克和阿富汗战场，如图 1.12 所示。

这个系统能够定位并识别战术指挥中心 125km 之外的目标，让指挥官的观察、指挥、行动都更加敏捷。幻影 200 广泛使用于中东地区，截至 2010 年 5 月的累积飞行时间已经达到 500000h。

“火力侦察兵”（Fire Scout）是一种无人直升机，它能够在任何可供飞行器起降的舰船上自行起飞并且在非预定地点降落，由美国军方于 21 世纪初开发。

图 1.13 中，火力侦察直升机正在亚利桑那尤马试验场试射 2.75 英寸非制导火箭。

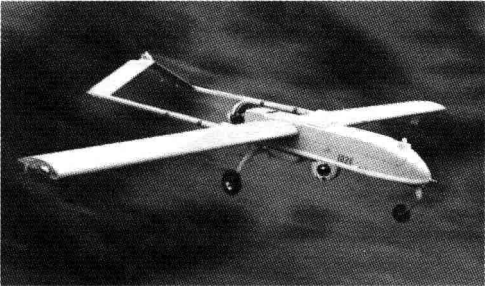


图 1.12 2004 年：RQ-7B 幻影 200



图 1.13 2005 年：火力侦察兵无人直升机

由洛克希德·马丁公司附属臭鼬工厂（SkunkWorks）设计并生产的 RQ-170 “哨兵”服役于美国空军。

它在阿富汗的“持久自由行动”初次部署，飞行高度经常达到 50000 英尺（约合

15000m) 的 RQ-170 成为了“坎大哈之兽”。

2011 年 5 月 RQ-170 参与了巴基斯坦的阿伯塔巴德 (Abbottabad) 突袭, 美军在这里找到并剿杀了奥萨马·本·拉登。2011 年 12 月一架 RQ-170 被伊朗俘获, 并且在伊朗电视台中展出。图 1.14 中展示了 RQ-170 的基本特征: 翼型设计以及 15240m 的最大飞行高度。

全球鹰高空飞行器拥有长时间飞行能力。服役于美国空军的该类无人机装备了能够开展情报收集、侦察以及监视等功能的综合传感器。2001 年开始研发的全球鹰项目成为航空历史的重大标杆。

这是已知的第一架能够不经停而直接飞越太平洋的无人机, 在 2006 年 7 月获准在美国领空飞行。图 1.15 展示的是美军全球鹰无人机。

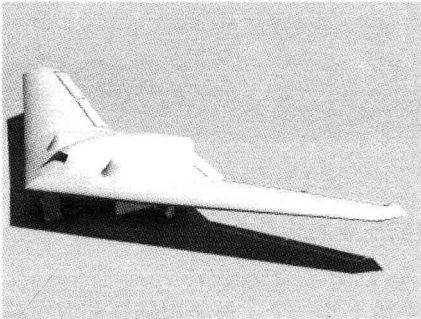


图 1.14 2009 年: RQ-170 哨兵

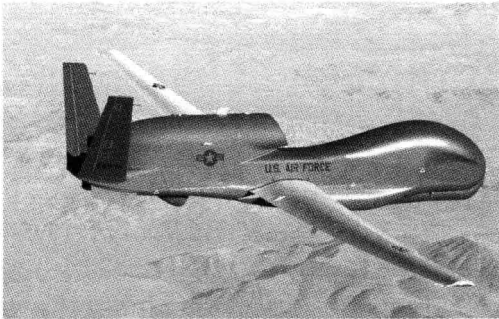


图 1.15 2010 年: 全球鹰

美国海军的无人机最为先进, 尤其是将无人机和航空母舰结合起来, 能有效减少人力的使用。美国海军计划大规模使用其 X-47B 型无人机。X-47B 目前已实现了空中加油, 使海上长时间飞行成为可能。X-47B 型无人机如图 1.16 所示。

随着无人飞行器的发展和其任务需求的扩展, 一类新型的无人飞行器——巡飞弹药开始出现。这其中的典型代表就是“弹簧刀”, 如图 1.17 所示。

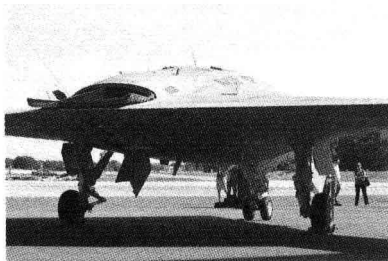


图 1.16 X-47B 型无人机

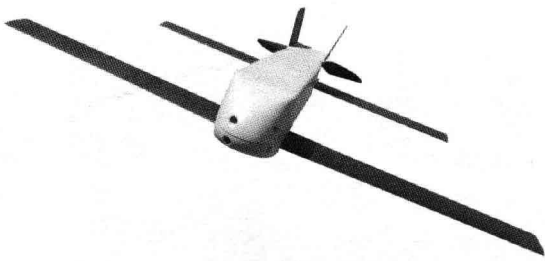


图 1.17 微小型无人飞行器——弹簧刀

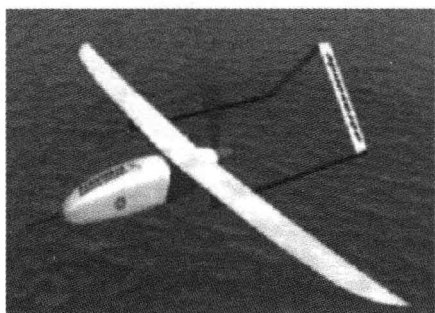
“弹簧刀”是美国航空环境公司开发的一款单兵携带的微小型巡飞弹药系统, 由发射器、巡飞弹及地面控制站等部分组成, 以电池驱动电动马达及螺旋桨为动力, 最大重量约 1.36kg, 长度为 360mm, 射程最大可达 39km, 翼展最大为 610mm。“弹簧刀”的出现, 进一步拉开了微小型无人飞行器参与战争的序幕。

1.2 无人飞行器的分类

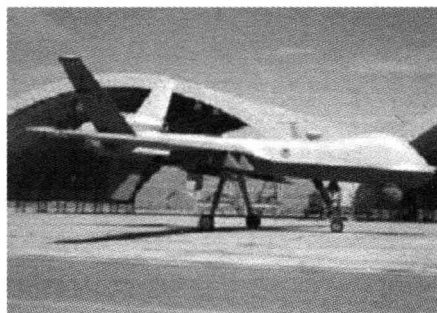
1.2.1 按特性分类

最近几十年, 各国的很多努力都被投放到发展无人飞行器的飞行航时和载荷上, 结果导致了拥有不同尺寸大小、飞行航时水平和能力的无人飞行器结构的产生。这些努力也促使了许多新的尝试, 包括非传统的结构设计。这里列举了一种根据无人飞行器特性(航空动态结构、外形等)的分类方式。不考虑无人飞行器的多样性, 典型的平台可以分为以下 5 类。

(1) 固定翼无人飞行器, 是指带有机翼的无人飞行器, 起飞和着陆需要跑道或者是弹射发射和拦阻着陆, 如图 1.18 所示。一般情况下, 这类飞行器不仅拥有很长的航行时间, 并且可以高速巡航飞行。



(a) 英希图公司航空探测机器人飞机



(b) 美国通用原子航空系统公司 MQ-9 捕食者号



(c) 美国 AAI 公司 RQ-7A 影子 200



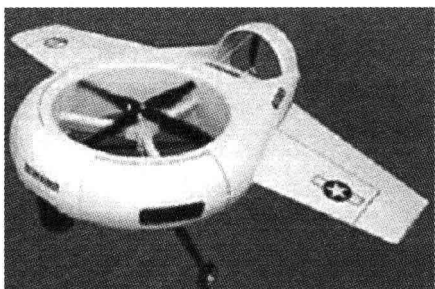
(d) 埃尔比特系统公司“海鸥”微型无人机

图 1.18 几种固定翼无人飞行器

(2) 旋转翼无人飞行器, 也被称作垂直起降无人飞行器, 具有盘旋能力强, 机动性能好的优势, 如图 1.19 所示。这些能力在面临多任务的环境中显得尤为突出, 特别是民用领域的应用。这些旋翼无人飞行器有许多不同的结构形式, 有配有主旋翼和尾旋翼的(传统的直升机)、共轴式旋翼的、串列式旋翼的和多转子旋翼的等多种形式。

(3) 飞艇类无人飞行器, 比空气要轻, 同时有很长的航行时间, 飞行速度低并且外形很大, 如图 1.20 所示。

(4) 扑翼无人飞行器, 受启发于鸟类或者会飞行的昆虫, 有着带有弹性的或者可变形的小翅膀, 如图 1.21 所示。



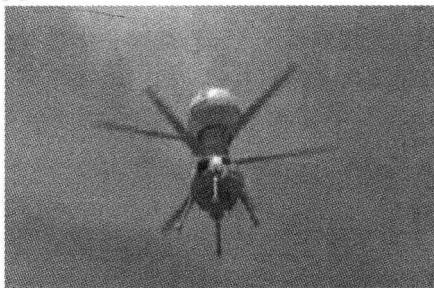
(a) 西科斯基飞机公司“零”式II



(b) 诺斯罗普·格鲁门公司“火力侦察兵”RQ-8A/B

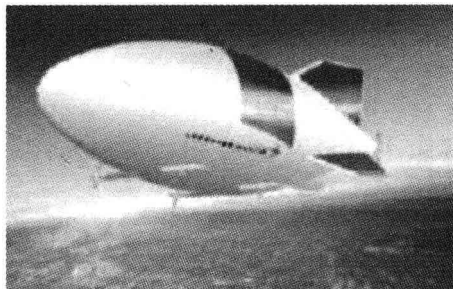


(c) 日本雅马哈公司“R-max”无人直升机

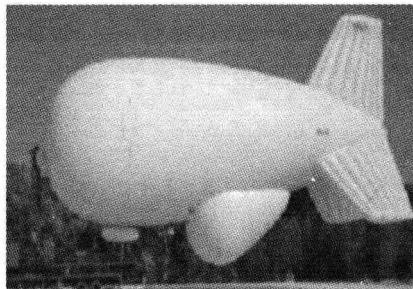


(d) 加拿大庞巴迪宇航公司“卫士”CL-327
多用途垂直起降监视无人机

图 1.19 旋翼无人飞行器

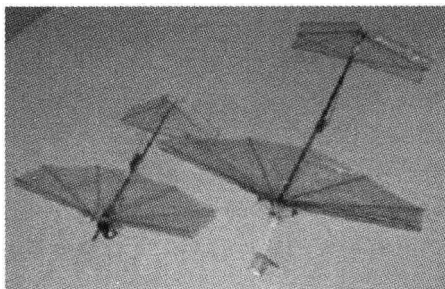


(a) 高空飞艇

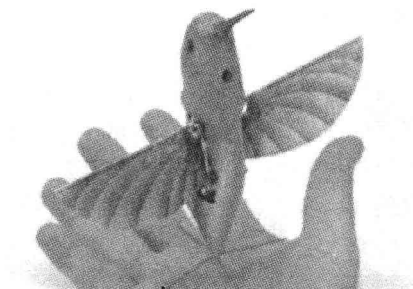


(b) 洛克希德·马丁公司海洋航空中转系统

图 1.20 基于飞艇设计的无人飞行器



(a) 荷兰代尔夫特理工大学小型扑翼飞行器 Delfly I, II



(b) 美国航空环境公司纳米蜂鸟

图 1.21 微型扑翼无人飞行器

(5) 混合类型的无人飞行器，可以垂直起飞，倾斜旋翼或机身来飞行，典型的有贝尔鹰眼无人机，如图 1.22 所示。

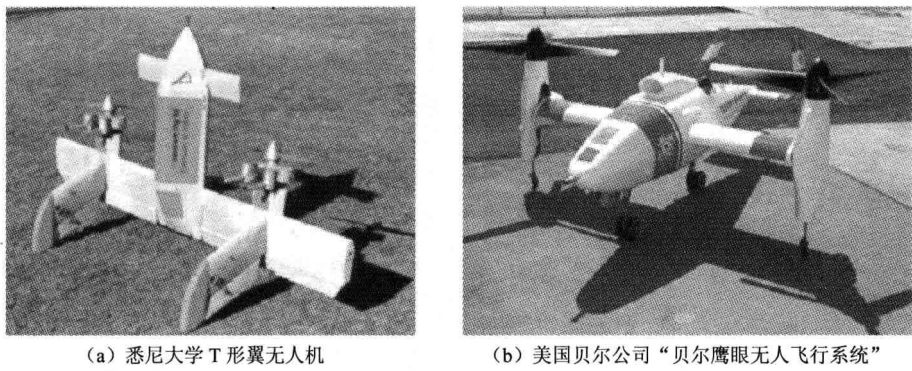


图 1.22 混合类型无人飞行器

1.2.2 按航行能力分类

除了上述的分类方式以外，另一种用于给无人飞行器分类的标准是航行能力。下面是其分类结果以及典型实例。

(1) 高空长航时无人飞行器 (HALE)，例如全球鹰 (65000 英尺飞行高度，飞行时间 35h，1900 磅载荷)，如图 1.23 所示。



图 1.23 全球鹰 (Northrop Grumman)

(2) 中高长航时无人飞行器 (MALE)，例如通用原子的捕食者无人机 (27000 英尺的飞行高度，30~40h 的飞行时间，450 磅的装载能力)，如图 1.24 所示。

(3) 战术无人飞行器，例如猎人 (Hunter)、阴影 200 (Shadow) 和先锋 (Pioneer) (15000 英尺的飞行高度，5~6h 的飞行时间，25kg 的有效载荷)，如图 1.25 所示。

(4) 微小型无人飞行器 (MAV)，这些无人飞行器在最近几年已获得越来越多的关注，其直径往往在几十厘米甚至更小，翼展较小，可以单人携带。例如 Pointer/Raven、Javelin、Black Pack Mini；航空环境公司开发的“弹簧刀”；Aerovironment 公司制造的黑寡妇，来自 BAE 的 Microstar；还包括来自许多大学的概念性设计，如佐治亚理工大学的 Entomopter，加州理工学院的 MicroBat 和加州大学伯克利分校的 MFI，同时还有许多欧洲研究机构的设计如 MuFly、Coax 等，如图 1.26 所示。



(a) MQ-1 捕食者



(b) 以色列飞机工业公司马拉特无人机公部“苍鹭”

图 1.24 中高空长航时无人飞行器

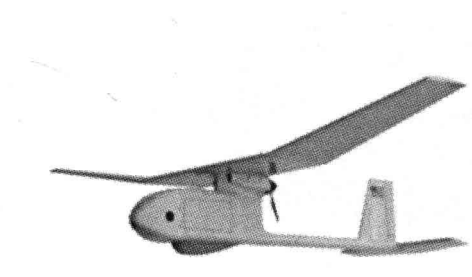


(a) 美国应用分析公司“RQ-7 阴影”

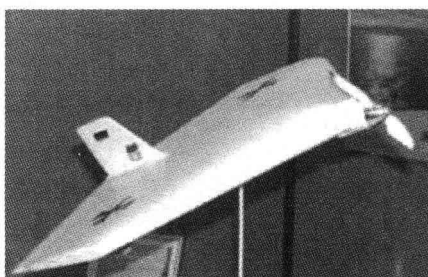


(b) 美国应用分析公司“RQ-2B 先锋”

图 1.25 战术无人飞行器



(a) 美国航空环境公司“乌鸦 RQ-11”



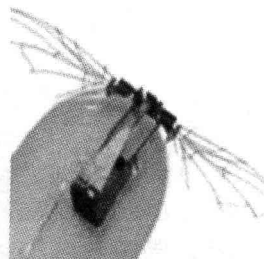
(b) 天皇号无人机



(c) 美国航空环境公司“黄蜂”



(d) Skybotix 出品的同轴无人机



(e) 哈佛微型机器苍蝇

图 1.26 微小型无人飞行器