



直升机

无人化

改型技术

周尧明 蒙志君 刘 鹏 编著



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS

直升机无人化改型技术

周尧明 蒙志君 刘 鹏 编著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书主要讲述直升机无人化改型技术,包括4篇共9章。

第1篇绪论包括第1章,主要描述无人直升机研制的意义、直升机无人化改型技术的内涵及现状。第2篇改型前准备,包括第2、3章,主要描述无人化改型前需要做的技术准备工作,包括直升机的飞行动力学模型辨识及关键部件特性辨识。第3篇分类研发,包括第4、5、6章,主要从分系统的角度讲述无人化改型过程中需要进行的技术开发工作,包括电气、航电、动力及飞行控制等。第4篇改型后测试,包括第7、8、9章,主要从无人化改型后的仿真测试、地面测试、飞行测试的角度逐步深入进行测试描述。

本书主要面向从事相关研究的专业技术人员,用于指导实施直升机无人化改型;亦可作为辅助教材,用于大学本科高年级学生或者研究生的直升机无人化改型、无人直升机、无人飞行器等相关课程的教学。

图书在版编目(CIP)数据

直升机无人化改型技术 / 周尧明, 蒙志君, 刘鹏编
著. -- 北京: 北京航空航天大学出版社, 2018.4
ISBN 978-7-5124-2658-0

I. ①直… II. ①周… ②蒙… ③刘… III. ①无人驾
驶飞机—直升机—系统设计 IV. ①V275

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 031954 号

版权所有,侵权必究。

直升机无人化改型技术

周尧明 蒙志君 刘 鹏 编著
责任编辑 刘晓明

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱: goodtextbook@126.com 邮购电话:(010)82316936

北京建宏印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:710×1 000 1/16 印张:12.5 字数:266 千字

2018 年 5 月第 1 版 2018 年 5 月第 1 次印刷 印数:1 000 册

ISBN 978-7-5124-2658-0 定价:58.00 元

若本书有倒页、脱页、缺页等印装质量问题,请与本社发行部联系调换。联系电话:(010)82317024

前 言

无人飞行器由于在实战中具有较高的出勤率以及多样的功能,越来越受到战地指挥官的青睐。而无人直升机由于独特的飞行性能和使用价值,成为了无人飞行器中不可或缺的组成部分,引起了人们的广泛关注。直升机无人化改型是实现无人直升机研制的一种快速手段,其不仅解决了飞行平台的研制问题,而且具有减少无人直升机研制成本、缩短研制周期和降低研制风险的优点。

本书作为无人化改型的专业性书籍,主要面向从事相关项目研究的研发人员,用于指导直升机无人化改型项目实施;亦可作为辅助教材,用于直升机无人化改型、无人直升机、无人飞行器等相关课程的教学。

本书主要讲述直升机无人化改型技术,包括4篇共9章。

第1篇为绪论,包括第1章概述,主要描述无人直升机研制的意义、直升机无人化改型的技术内涵及现状。

第2篇为改型前准备,包括第2、3章,主要描述无人化改型前需要做的技术准备工作,包括直升机的飞行动力学模型辨识及关键部件特性辨识。

第3篇为分类研发,包括第4、5、6章,主要从分系统的角度,讲述无人化改型过程中需要进行的技术开发工作,包括电气、航电、动力及飞行控制等。

第4篇为改型后测试,包括第7、8、9章,主要从无人化改型后的仿真测试、地面测试、飞行测试的角度逐步深入进行测试描述。

本书理论讲解与实例分析相结合,结合作者无人化改型的研究实例,以更好地帮助读者理解无人化改型技术。根据无人化改型的过程将本书分为4篇,更有助于读者理解无人化改型的技术研发过程,并可根据实际项目情况,查找所需学习的内容。

直升机无人化改型是一门综合性的学科,由于作者能力所限,很难对涉及的各个专业均有精深理解,书中如有错谬之处,敬请读者不吝告知,将不胜感激。

周尧明

2018年4月

符 号 表

s	秒
min	分钟
ϕ	滚转角
θ	俯仰角
ψ	偏航角
p	滚转角速度
q	俯仰角速度
r	偏航角速度
$\dot{p}$	滚转角加速度
$\dot{q}$	俯仰角加速度
$\dot{r}$	偏航角加速度
g	重力加速度
a	机体坐标系下加速度向量
F	机体坐标系下除重力以外的合力
m	质量
F_x	沿 x 轴方向的合外力
F_y	沿 y 轴方向的合外力
F_z	沿 z 轴方向的合外力
I_x	绕机体坐标系 x 轴的转动惯量
I_y	绕机体坐标系 y 轴的转动惯量
I_z	绕机体坐标系 z 轴的转动惯量
M_x	机体坐标系下绕 x 轴的合外力矩
M_y	机体坐标系下绕 y 轴的合外力矩
M_z	机体坐标系下绕 z 轴的合外力矩
u	x 轴方向的速度分量
v	y 轴方向的速度分量
w	z 轴方向的速度分量
V_a	空速
V_g	地速

简 写 表

SRUAS, Series Rotorcraft Unmanned Aerial System	无人直升机系统
MIMO, Multiple Input Multiple Output	多输入多输出
SISO, Single Input Single Output	单输入单输出
RUAS, Rotorcraft Unmanned Aerial System	无人直升机系统
CSRA, General System Requirements Analysis	通用系统需求分析法
UCAR, Unmanned Combat Armed Rotorcraft	无人武装战斗直升机
QFD, Quality Function Deployment	质量功能展开
HOQ, House Of Quality	质量屋
TOQ, Tower Of Quality	质量塔
COTS, Commerical Off-The-Shelf	商用货架产品
IPU, Integrate Processing Unit	综合处理单元
CCP, Common Core Processor	通用核心处理机
CFCU, Common Flight Control Unit	通用飞行控制单元
CHIU, Common Helicopter Interface Unit	直升机通用接口单元
TCU, Telemetry Control Unit	机载测控单元
MLU, Mission Load Unit	任务载荷
ES, End System	端系统
API, Application Programming Interface	应用程序编程接口
NOD, Normal Operation Data	节点状态信息
DPM, Digital Processing Module	数字处理模块
IPM, Image Processing Module	图像处理模块
ESM, Ethernet Switch Module	以太网交换模块
IOM, Input Output Module	输入输出接口模块
MOS, Module Operation System	模块操作系统
POS, Partition Operation System	分区操作系统
BSP, Board Support Package	板级支持包
ACR, Avionics Computer Resource	航空电子计算机资源
飞控, 飞行控制	
自控, 自动控制	
手控, 手动控制	

目 录

第 1 篇 绪 论

第 1 章 概 述.....	1
1.1 无人直升机研制的意义	1
1.2 无人化改型技术的现状	1
1.3 无人化改型技术的内涵	6
参考文献.....	7

第 2 篇 改型前准备

第 2 章 直升机飞行动力学建模.....	9
2.1 直升机建模方法概述	9
2.2 机理建模	9
2.2.1 坐标系的定义及转换	9
2.2.2 运动学方程.....	11
2.2.3 动力学方程.....	13
2.2.4 小扰动线性化模型.....	14
2.3 频域辨识.....	15
2.3.1 基本特点及流程.....	15
2.3.2 频率响应.....	18
2.3.3 单通道传递函数辨识	18
2.3.4 状态空间方程辨识.....	20
2.3.5 模型精度分析与时域验证.....	24
2.4 扫频飞行试验.....	26
2.4.1 试验准备及试验步骤.....	26
2.4.2 试验数据要求.....	28
2.4.3 扫频飞行的技术要点.....	28
2.5 实例分析.....	30



2.5.1	数据重构与分析	30
2.5.2	单通道模型辨识	38
2.5.3	状态空间模型修正	41
2.5.4	时域验证	43
2.5.5	模型动力学特性分析	44
参考文献		47
第3章 直升机关键部件特性分析		48
3.1	发动机模型辨识	48
3.1.1	数学模型	48
3.1.2	模型辨识	48
3.1.3	时域验证	52
3.2	操纵系统特性分析	53
3.2.1	操纵系统的组成	53
3.2.2	铰链力矩计算	54
3.2.3	操纵系统传力分析	56
3.3	电气系统特性分析	60
3.3.1	电气系统的组成	60
3.3.2	传感器特性	62
3.3.3	执行器特性	65
参考文献		68

第3篇 分类研发

第4章 电气系统改型		69
4.1	监测系统	69
4.1.1	传感器布置	69
4.1.2	信号调理电路	74
4.1.3	传感器智能化改型	81
4.2	操纵系统	87
4.2.1	开关量控制	87
4.2.2	电机控制	89
4.2.3	舵机	92
4.3	供电系统	93
4.3.1	电源系统	93



4.3.2 配电系统.....	95
参考文献	96
第 5 章 航电系统研制	98
5.1 需求分析.....	98
5.1.1 任务场景.....	98
5.1.2 需求分析方法	101
5.1.3 实例分析	105
5.2 系统设计方法	113
5.2.1 基本原理	114
5.2.2 主要特点	115
5.3 技术结构设计	118
5.3.1 系统构架设计	118
5.3.2 系统功能设计	126
5.3.3 软硬件结构规范设计	127
5.4 系统结构设计	128
5.4.1 应用层软件结构	128
5.4.2 构架层操作系统	129
5.4.3 实例层硬件设计	130
参考文献.....	131
第 6 章 动力及飞行控制研制.....	133
6.1 动力系统控制	133
6.1.1 发动机转速控制	133
6.1.2 离合器控制	135
6.1.3 超转控制	137
6.2 飞行控制	141
6.2.1 典型控制器	141
6.2.2 应用实例	144
参考文献.....	149
 第 4 篇 改型后测试 	
第 7 章 仿真测试.....	150
7.1 半物理仿真	150



7.1.1	最小闭环仿真	150
7.1.2	控制律内环仿真	151
7.1.3	控制律外环仿真	151
7.1.4	全系统综合仿真	151
7.2	测试实例	153
7.2.1	风扰动下三轴姿态及高度控制	153
7.2.2	航迹跟踪仿真	153
参考文献		154
第 8 章 地面测试		155
8.1	发动机测试	155
8.1.1	发动机试验准备	155
8.1.2	发动机测试科目及内容	157
8.1.3	发动机测试实例	160
8.2	系留测试	163
8.2.1	系留试验准备	163
8.2.2	系留测试科目及内容	165
8.2.3	系留测试实例	166
参考文献		171
第 9 章 飞行测试		172
9.1	飞行试验准备	172
9.2	飞行测试科目及内容	172
9.2.1	自动悬停飞行试验	172
9.2.2	低空小速度自动航线飞行试验	175
9.2.3	中高空大速度自动航线飞行试验	179
9.2.4	自动起降试验	181
9.2.5	机动飞行试验	183
9.3	飞行测试实例	183
参考文献		188

第1篇 绪论

第1章 概述

1.1 无人直升机研制的意义

无人飞行器由于在实战中具有较高的出勤率以及多样的功能,越来越受到战地指挥官的青睐。而无人直升机由于独特的飞行性能和使用价值,成为无人飞行器中不可或缺的组成部分,近年来引起了人们的广泛关注,在多个国家出现了研发热潮。

无人直升机是指由无线电地面遥控飞行或/和自主控制飞行的可垂直起降不载人飞行器,在构造形式上属于旋翼飞行器,在功能上属于垂直起降飞行器。与有人直升机相比,无人直升机由于其具有无人员伤亡、体积小、造价低、战场生存力强等特点,在许多方面都有无法比拟的优越性。与固定翼无人机相比,无人直升机可垂直起降、空中悬停、朝任意方向飞行,其起飞着陆场地小,不必配备像固定翼无人机那样复杂、大体积的发射、回收系统,若发动机发生故障空中停车,无人直升机可以利用旋翼自转下滑安全着陆。

无人直升机的应用领域非常广阔。在军用方面,无人直升机适于在各种复杂、恶劣环境下,执行多项任务,既能执行各种非杀伤性任务,又能执行各种软硬杀伤性任务,包括侦察、监视、目标截获、诱饵、攻击、通信中继等;此外,在民用方面,无人直升机在公安巡逻、大气监测、交通监控、资源勘探、电力线路检测、森林防火等方面具有广阔的应用前景。可见无人直升机对于推动国民经济和国防建设的发展具有重要的作用。

1.2 无人化改型技术的现状

对无人直升机国内外发展现状的研究发现:对于微型/小型的无人直升机而言,飞行平台设计是其系统设计的关键部分,可采用单旋翼带尾桨、共轴双旋翼、四旋翼等构型;而对于中大型的无人直升机而言,采用成熟有人机进行无人化改型的方式是



解决飞行平台问题的有效手段。采用无人化改型的技术不仅解决了飞行平台的研制问题,且具有减少无人直升机研制成本、缩短研制周期和降低研制风险的优点。这个观点已经被工业界接受,该技术得到了广泛的应用,例如美国诺斯罗普·格鲁曼公司(Northrop Grumman Corp.)的火力侦察兵(Fire Scout)是基于 S-333 有人直升机无人化改型而成的,Fire-X 是基于 Bell 407 有人直升机无人化改型而成的,且 Fire-X 项目由于采用了 Fire Scout 的项目经验及部分无人系统,仅花费不到 1 年时间便实现了无人飞行(见图 1-1)。相比于 Fire Scout,Fire-X 具有更大的航程、航时和有效载荷。

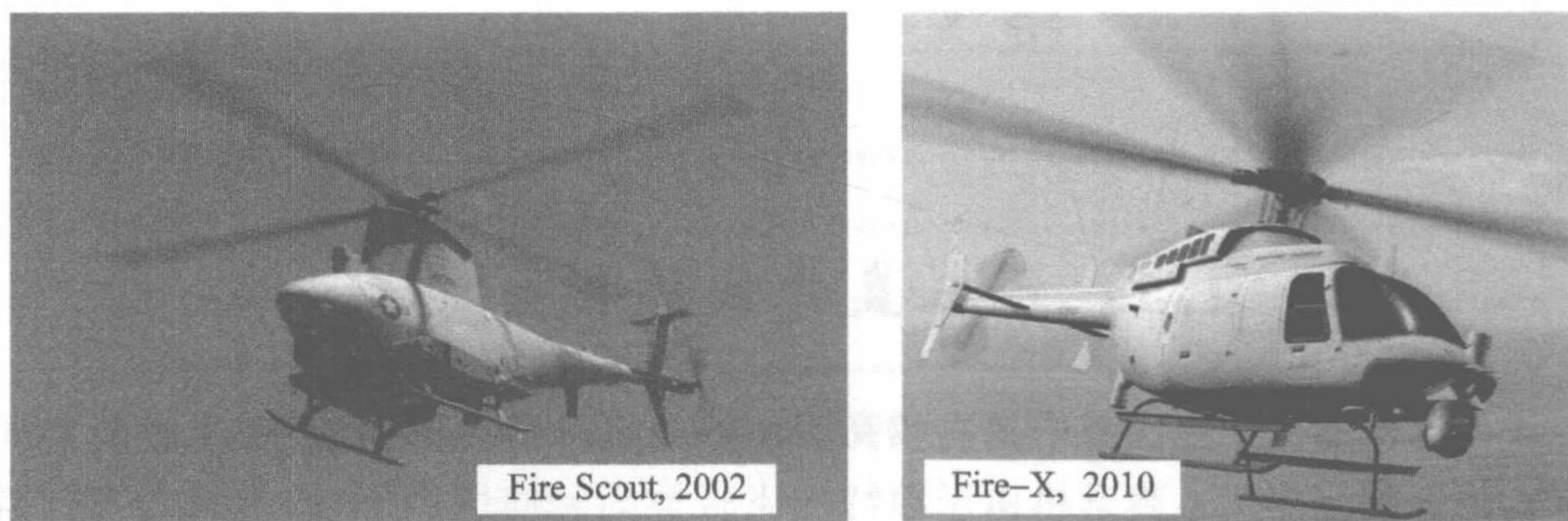


图 1-1 美国诺斯罗普·格鲁曼公司的火力侦察兵和 Fire-X

美国波音公司(Boeing Corp.)以基于麦道公司的 MD 530F 有人直升机无人化改型而成的无人小鸟(Unmanned Little Bird, ULB)作为技术试验平台,应用于新设备的飞行试验;此外,还利用无人小鸟验证的技术,采用同样的有人直升机平台实现了世界上第一种可进行有人/无人模式切换的无人直升机——A/MH-6X 的研制。韩国大韩航空公司航空航天事业部(Korean Air Aerospace Division, KAL-ASD)也引进此技术,对本国 MD 500 有人直升机进行改型,研制完全无人驾驶的 KUS-VH 无人直升机。此外,波音公司的 A-160 蜂鸟飞控系统的飞行试验也是采用基于罗宾逊公司的 R22 有人直升机无人化改型而成的 Maverick 完成的。上述 4 种无人直升机如图 1-2 所示。

美国先进技术公司(Advanced Technologies Inc., ATI)的治安官(Vigilante)系列无人直升机采用 Ultrasport 496 有人直升机改型而成,具有灵巧的结构,便于运输和使用,可广泛应用于民用领域。美国洛克希德·马丁公司(Lockheed Martin Corp.)和美国卡曼航空航天公司(Kaman Aerospace Corp.)合作开发的 K-MAX 无人直升机,基于 K-MAX 有人直升机改型而成,是目前世界上具有最大有效载荷的无人直升机,可用于补给和运输。美国西科斯基飞机公司(Sikorsky Aircraft Corp.)正在将从美国陆军退役的 UH-60 黑鹰直升机改型成无人版黑鹰直升机(Optionally Piloted Black Hawk, OPBH)。上述 3 种无人直升机如图 1-3 所示。

以色列航空工业公司(Israel Aerospace Industries Inc.)的海军旋翼无人飞行器

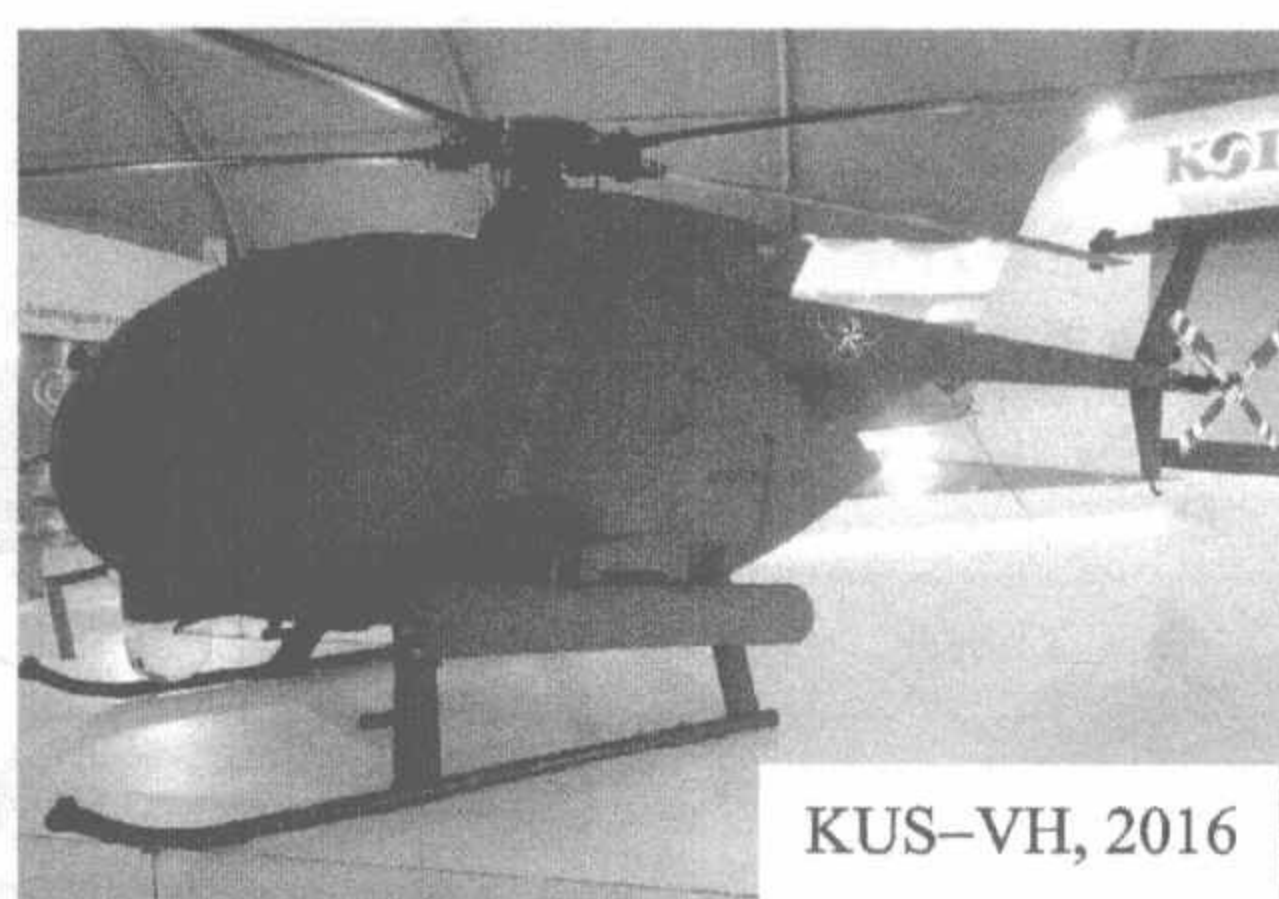


图 1-2 4 种无人直升机

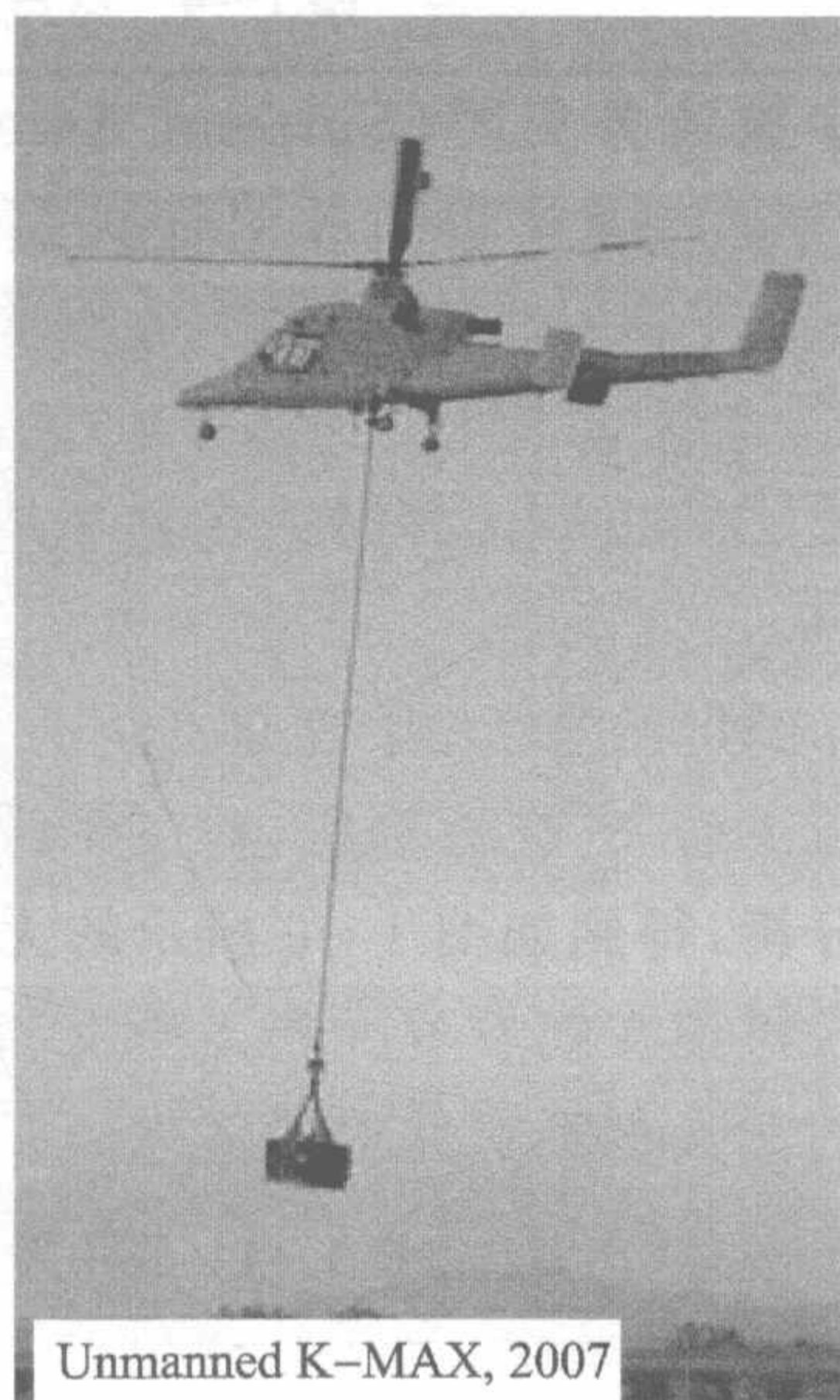


图 1-3 黑鹰、治安官和 K-MAX 无人直升机

(Naval Rotary Unmanned Air Vehicle, NRUAV), 虽然采用了较大的有人直升机平台进行改型, 但其有效载荷仅有 220 kg。以色列航空防务系统公司 (Israel Aeronautics Defense Systems Inc.) 的斗牛士 (Picador) 旋翼无人机采用 Dynali H2S kit 有人直升机改型而成, 具有多棱边的隐身外形。上述 2 种无人直升机如图 1-4 所示。

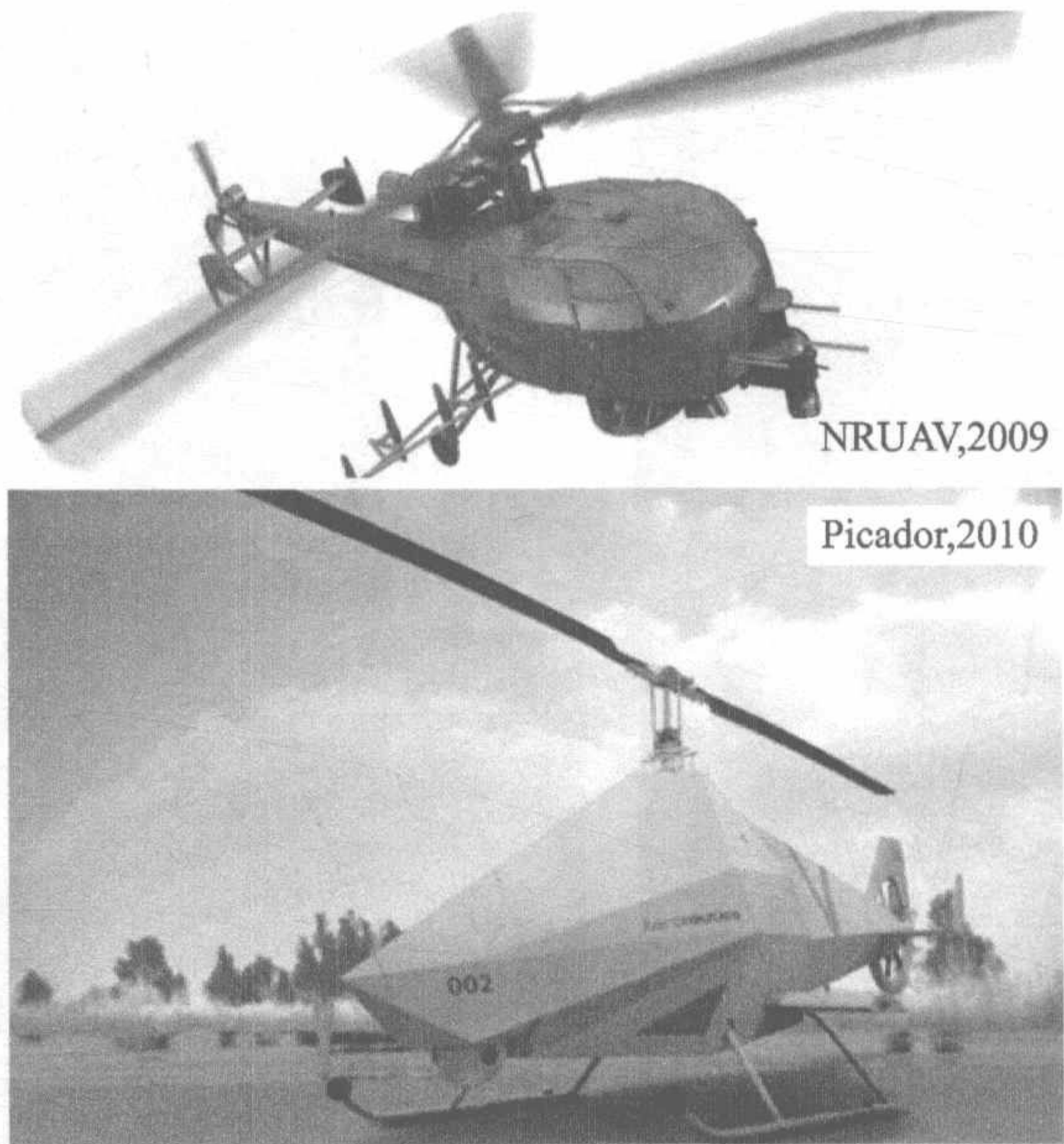


图 1-4 以色列的 2 种无人直升机

欧洲宇航防务集团(Eurpean Aeronautic Defence and Space Co., EADS)基于 Guimbal Cabri 有人直升机改型研制了 Orka-1200 无人直升机;意大利莱昂纳多公司(Leonardo S. p. a.)基于 SW-4 有人直升机改型研制了旋翼无人飞行器 SW-4 Solo;中国天翔航空工业公司基于 Brantly B2B 改型研制了 V-750 无人直升机;中国一飞智控(天津)科技有限公司基于 XE285 有人直升机改型研制了 MQ-300,如图 1-5 所示。

上述 15 种通过无人化改型研制的无人直升机基本情况如表 1-1 所列,包括了无人直升机的研制方、原型机、首飞年份和有效载荷/起飞总质量信息。对表 1-1 的信息进行分析,得到如图 1-6 所示的无人直升机参数关于时间的分布情况。可以看出无人直升机正在朝着更大起飞质量和更大有效载荷的方向发展,这正是市场对大载荷能力的无人直升机需求的体现。

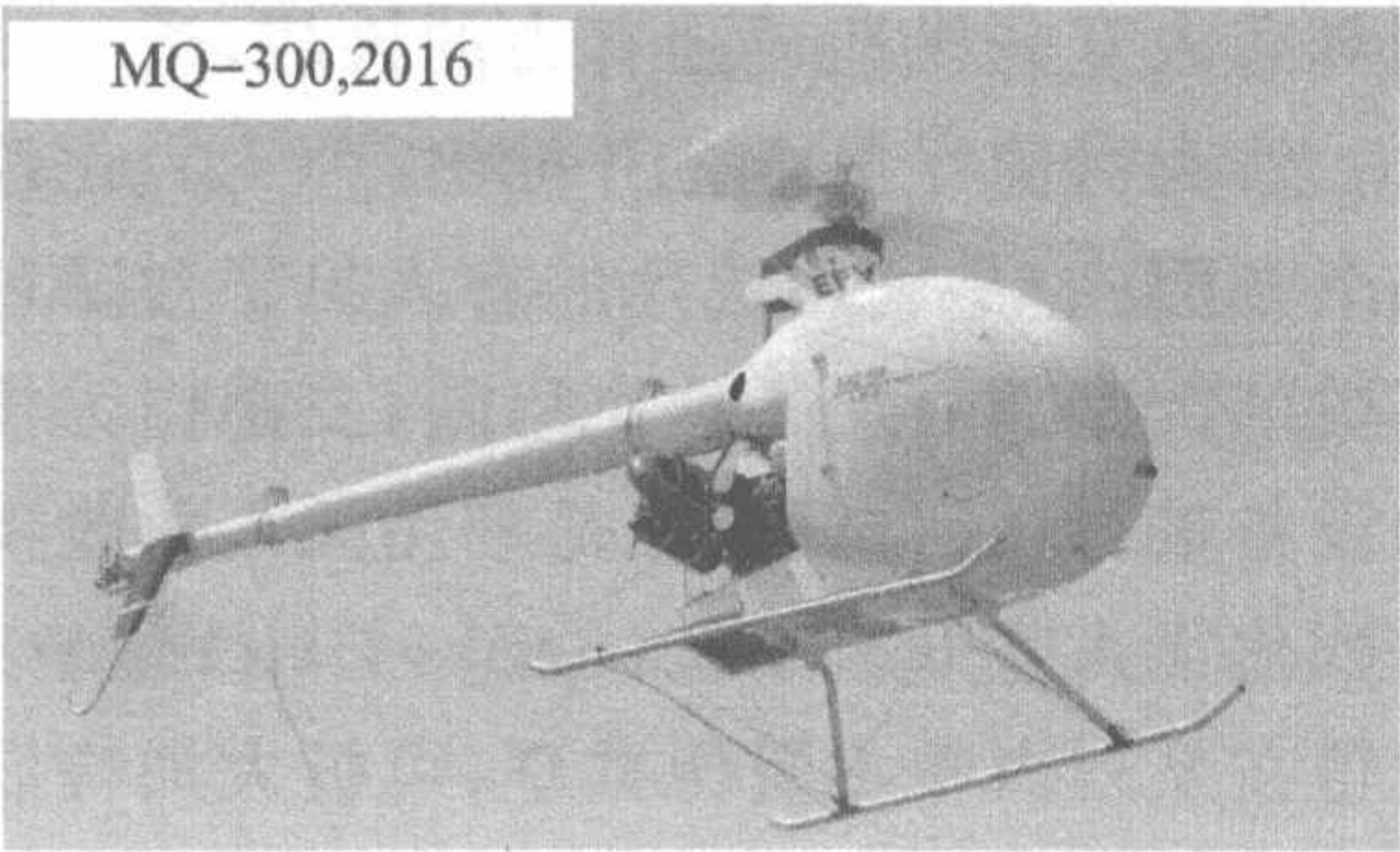
表 1-1 采用无人化改型的无人直升机

无人直升机 名称	研制方	原型机	首飞年份/年	有效载荷/kg/ 起飞总质量/kg
Maverick	Boeing	Robinson R22	1999	150/621
Vigilante 502	ATI	Ultraspport 496	2000	70/500
Fire Scout	Northrop Grumman	S-333	2002	272/1 430
ULB	Boeing	MD 530F	2004	340/1360



续表 1-1

无人直升机 名称	研制方	原型机	首飞年份/年	有效载荷/kg/ 起飞总质量/kg
Orka-1200	EADS	Guimbal Cabri	2005	180/680
A/MH-6X	Boeing	MD 530F	2006	685/1 406
Unmanned K-MAX	Lockheed Martin & Kaman Aerospace	K-MAX	2007	1 225/2 449
NRUAV	Israel Aerospace Industries	Alouette III / Chetak	2009	220/2 200
Picador	Israel Aeronautics Defense Systems	Dynali H2S kit	2010	180/720
Fire-X	Northrop Grumman	Bell407	2010	1 200/2 722
V-750	天翔航空	Brantly B2B	2011	80/757
OPBH	Sikorsky Aircraft	UH-60	2014	—
MQ-300	一飞智控	XE285	2016	80/300
KUS-VH	KAL-ASD	MD 500	2016	—
SW-4 Solo	Leonardo S. p. a.	SW-4	2018	470/1800



V-750,2011



图 1-5 Orka-1200、V-750、SW-4 Solo 和 MQ300 无人直升机

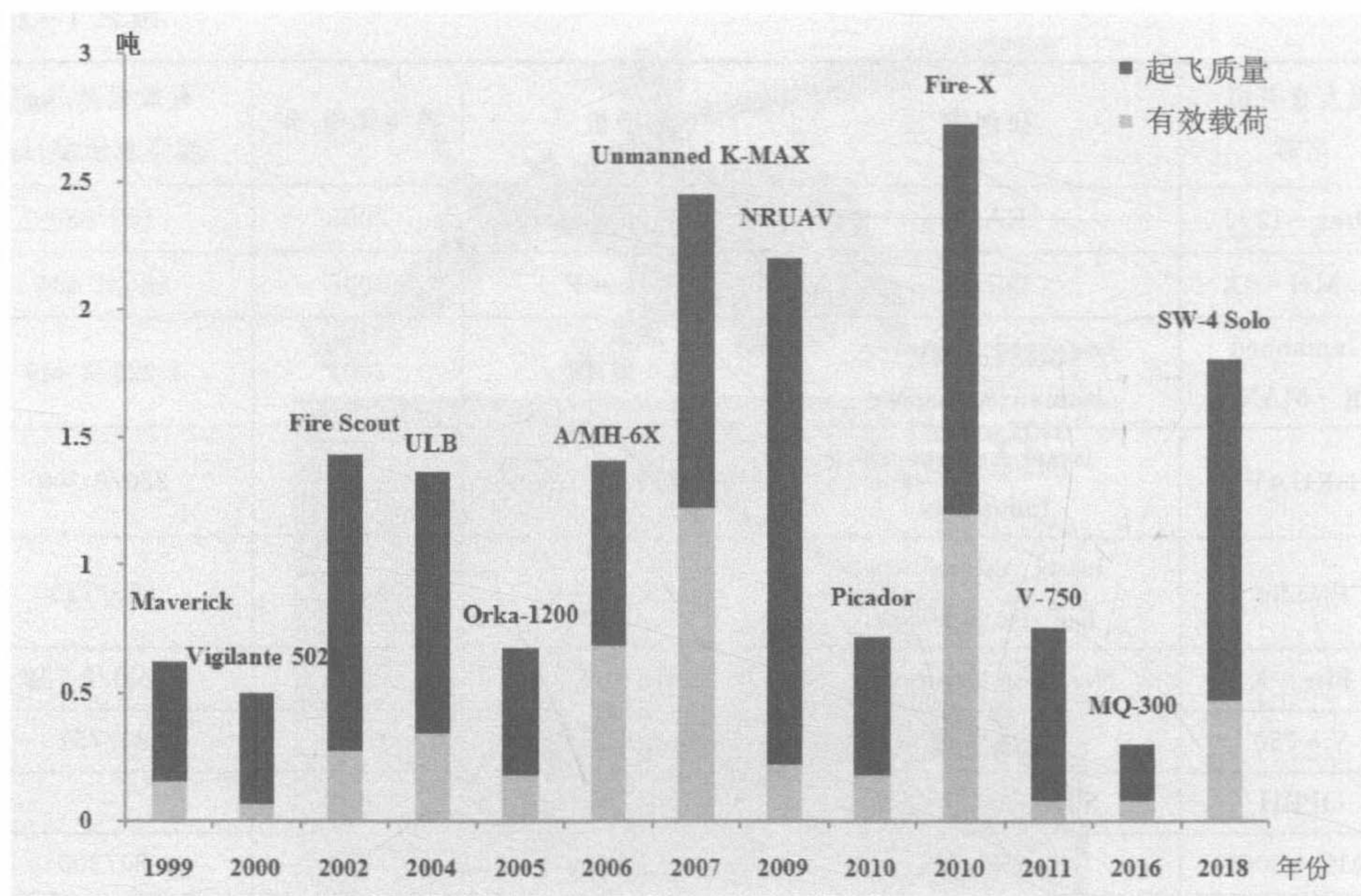


图 1-6 各型 RUAV 的有效载荷和起飞质量

因此,可以预见,未来的无人直升机将在载荷能力、飞行性能、任务效能等各个方面对有人直升机造成强有力的挑战,进一步推进无人机取代有人机的进程。

作为目前世界上公开的 15 种无人化改型的无人直升机,其研制的思路可总结为三个方面:一是利用成熟的有人机平台通过无人化改型直接形成无人直升机装备,大多数的改型型号均是这个思路;二是作为快速原型平台,对新型无人机的技术或新研的设备进行飞行试验;三是利用无人化改型技术通过对各梯次有人机进行改型,实现系列化无人直升机系统(Series Rotorcraft Unmanned Aerial System,SRUAS)装备,使得在系列内技术资源共享,可极大加快后续型号的研制进度,同时提高系列化系统的通用性、可靠性和维护性。前两个方面是目前大多数无人直升机研制的主要目的,而第三个方面是在前两个方面应用的基础上更进一步体现了 SRUAS 大系统的概念,更具有战略意义,是未来无人直升机发展的重要思路。

1.3 无人化改型技术的内涵

所谓无人化改型是指实现有人机到无人机的转型,即完成三件事:拆、改、加。拆,即对有人机平台的有人机专用结构、设备进行拆除;改,即对部分可用于无人机的原机设备进行改进;加,即对无人机需要的专用设备进行加装。无人化改型技术即对上述三项任务进行细化和分类,研究各个组成部分的任务、功能和相互之间的关系,指导具体工程实施。



无人化改型过程可进一步分解为三步:改型前准备、分类研发、改型后测试。本书后续即按此分为3篇分别进行阐述,并结合施瓦泽 269C 有人直升机(下文统称“样例机”)无人化改型实例进行实例化分析。

参考文献

- [1] James R C. FY2009-2034 unmanned systems integrated roadmap[R]. Department of Defense, 2009.
- [2] Sherri X P. MQ-8B fire scout vertical unmanned aircraft system[EB/OL]. (2008-07-01) [2011-03-25]. http://www.as.northropgrumman.com/products/mq8bfirescout_navy/assets/fs-fact-sheet.pdf.
- [3] Greg W. Northrop Grumman continues Fire-X testing[EB/OL]. (2011-01-04) [2011-03-25]. <http://www.flightglobal.com/articles/2011/06/22/358582/paris-northrop-grumman-continues-fire-x-testing.html>.
- [4] Louis S T. Boeing unmanned little bird demonstrator helicopter flies unmanned for first time[EB/OL]. (2006-06-15)[2011-03-25]. http://www.boeing.com/news/releases/2006/q3/060712c_nr.html.
- [5] Boeing. A/MH-6X Boeing manned/unmanned light helicopter makes first flight[EB/OL]. (2006-03-06)[2011-08-04]. http://www.boeing.com/news/releases/2006/q4/061009b_nr.html.
- [6] Sweetman B. UAVs find niche with VTOL capability[EB/OL]. (2011-02-01) [2011-04-07]. <http://www.aviationweek.com/aw/jsp/includes/articlePrint.jsp?storyID=news/dtiUAVS.xml&headLine=UAVs%20Find%20Niche%20With%20VTOL%20Capability>.
- [7] Kevin M. Vigilante VTOL UAV system overview[R]. Advanced Technologies Incorporated, 2004.
- [8] Lockheed Martin. K-MAX unmanned helicopter[EB/OL]. (2011-03-02)[2011-04-07]. <http://www.lockheedmartin.com/products/K-MAX/>.
- [9] Unmanned Editor. NRUAV (Navy Rotary UAV) Specifications & Data Sheet [EB/OL]. (2010-07-28) [2011-04-07]. <http://www.unmanned.co.uk/unmanned-vehicle-specifications/unmanned-aerial-vehicles-uav-specifications/nruav-navy-rotary-uav-specifications/>.
- [10] Arie Egozi. Picador unmanned helicopter[EB/OL]. (2010-05-30)[2011-04-07]. <http://www.flightglobal.com/articles/2009/06/03/327290/picture-aeronautics-reveals-picador-unmanned-helicopter.html>.
- [11] Flightglobal. EADS -Orka-1200[EB/OL]. (2010-06-30)[2011-04-07]. <http://www.flightglobal.com/directory/detail.aspx?aircraftCategory=UAV&manufacturer>