

无人飞行器作战系统与技术丛书

无人作战飞机 自主攻击技术

Autonomous Attack Technology for UCAV

黄长强 丁达理 黄汉桥 赵辉 编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

无人飞行器作战系统与技术丛书

无人作战飞机自主攻击技术

黄长强 丁达理 黄汉桥 赵 辉 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书系统地阐述了无人作战飞机自主攻击的应用背景、目标可投射区快速解算、自主攻击过程分析与建模、基于航迹规划算法的自主攻击规划、隐身无人作战飞机的低可探测攻击轨迹规划、考虑不确定因素下的自适应轨迹规划方法、多飞行器的协同攻击任务分配及协同轨迹规划、基于变结构控制的航迹跟踪控制方法,以及自杀式无人攻击机末制导段导引律和控制律设计及弹道仿真等内容。

本书可供无人飞行器设计、作战指挥及相关专业本科高年级学生和研究生学习参考,同时也适合从事无人机设计、无人作战飞机战术战法研究等方面的人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

无人作战飞机自主攻击技术/黄长强等编著. —北京:
国防工业出版社, 2014. 4
(无人飞行器作战系统与技术丛书)
ISBN 978-7-118-09403-9

I. ①无... II. ①黄... III. ①无人驾驶飞机—空军战术学 IV. ①E844

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 046189 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)
北京嘉恒彩色印刷有限公司
新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 13½ 字数 234 千字
2014 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2800 册 定价 60.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)88540777
发行传真: (010)88540755

发行邮购: (010)88540776
发行业务: (010)88540717

本书编委会

主 编 黄长强

副 主 编 丁达理 黄汉桥 赵 辉

编写组成员 曹林平 杜海文 王 勇 翁兴伟
韩 统 程 华 任 波 刘尧林
丁 未 刘鹤鸣 蚩军祥 王 铀
国海峰 唐传林 董康生 任 洋
肖 红 杨晶晶 孙超娇 刘文杰

前 言

目前装备的无人作战飞机主要由无人机作战平台系统、机载武器系统、信息收集与通信系统、操控站与回路中的操控员组成。其作战使用过程需要地面控制站完成远程指挥控制,主要体现在对目标的远程人工识别、武器的火控离线解算、地面操控员的攻击决策、地面攻击轨迹控制以构成武器的发射条件等功能。其作战任务的规划、识别、判断、控制与执行,几乎完全依赖于地面操控人员。这就不可避免地要求地面指挥控制站与无人作战飞机之间大数据量的交互,无疑增加了无人机通信的带宽、可靠性、实时性等需求,在与地面通信过程中极易受到干扰,也会因此错过或丧失攻击的时机;同时加上地面操控人员的固有生理因素限制,如估算精度、动作准确性、反应时间、攻击决策的优劣程度等,地面操控人员难以充分利用飞机和武器系统的全部能力,甚至错过或丧失攻击时机,乃至错误攻击目标等严重后果,严重影响和制约了无人作战飞机的作战效能。因此,各军事强国纷纷加强无人作战飞机的研制,并极力发展其自主攻击作战性能。未来信息化条件下无人机的作战使用,在确定、锁定并跟踪目标之后,应该根据当前的飞行条件、作战环境等诸多因素,自主进行作战决策,自动解算发射诸元,自主攻击轨迹决策与轨迹控制,实施自主攻击作战,具有显著技术优势和军事应用价值。

无人作战飞机自主攻击是无人作战的必然发展趋势,具有自主攻击能力的无人作战飞机武器系统体现了无人作战飞行器一体化、自动化、智能化发展方向,必将演变成一种高效费比、攻防兼备的新概念武器,将对未来的空中作战理念和作战模式产生重大影响。2012年7月美国海军在帕图森河海军航空站成功进行X-47B无人机试飞,自行完成起飞、打击目标、返回和降落等一系列动作,表明美国在无人作战飞机自主攻击技术上已走在世界前列。因此,展开无人作战飞机自主攻击技术研究对于提高无人作战决策与综合控制的自动化和智能化程度具有显著意义,对于夯实无人作战的理论基础具有很好的理论和技术支

持价值。

无人作战飞机自主攻击是指无人作战飞机在武器系统识别并锁定跟踪目标后,火控系统自动完成目标参数测量计算、目标状态估计和可投射区快速解算,优化设计出一条从当前点到制导武器可投射区的最优攻击参考轨迹,或根据导引律生成制导指令,通过飞行控制系统实现攻击姿态和轨迹机动,完成攻击占位过程,然后发射武器并执行发射后对武器的制导。整个自主攻击过程不仅要综合考虑飞机平台性能、燃油、地形、气象、敌方火力或探测威胁、制导武器可投射区等各种复杂约束要求,同时,在攻击之前还需要满足终端位置、速度、姿态等要求以构成武器发射条件。可见,无人作战飞机自主攻击是一个多约束、非线性、高动态、实时性要求高的科学问题,是多学科交叉、综合性很强的新兴学术领域,特别是考虑隐身特性、不确定因素、高真实度作战等复杂条件下的自主攻击技术具有较高的前瞻性和挑战性。本书系统地阐述和分析了无人作战飞机自主攻击的应用背景、目标可投射区快速解算技术、自主攻击过程分析与建模、单个和多无人作战飞机自主攻击规划方法及其航迹跟踪控制技术。最后阐述和分析了自杀式无人攻击机末制导段导引律与控制律设计,及其弹道仿真等技术。对无人作战飞机自主攻击技术进行了系统的总结、提炼和升华。

本书纵向和横向涉及的军事高技术知识比较广泛,为了使涉及的各军事高技术领域的内容完整广博,本书分门别类、深入浅出地介绍了无人作战飞机自主攻击技术涉及到的原理、方法和技术,并引入了实例进行具体剖析和仿真。为掌握本书内容,除了要学习一般基础知识外,还要了解无人机轨迹规划与控制的相关原理、最优控制理论、仿真技术等相关技术知识。

本书共 11 章,分别从无人作战飞机自主攻击综述、目标可投射区快速解算、自主攻击过程分析与建模、基于航迹规划算法的自主攻击规划、隐身无人作战飞机的低可探测攻击轨迹规划、考虑不确定因素下的自适应轨迹规划方法、多飞行器的协同攻击任务分配及协同轨迹规划、基于变结构控制的航迹跟踪控制方法,以及自杀式无人攻击机末制导段导引律和控制律设计及弹道仿真等技术等 11 个方面进行讲述。

本书由空军工程大学教授黄长强主编,丁达理、黄汉桥、赵辉任副主编,曹林平、杜海文、王勇、翁兴伟、韩统、程华、任波、刘尧林、丁未、刘鹤鸣、蚩军祥、王铀、国海峰、唐传林、董康生、任洋、肖红、刘文杰、杨晶晶、孙超娇等同志参加了全文的撰写和修改。在这里,对为本书付出辛勤劳动的同志们致以衷心的感谢。向

本书引用的参考文献的各位作者表示诚挚的谢意,感谢他们的劳动丰富了本书的内容。

尽管作者在本书的写作过程中投入了大量的时间和精力,但由于作者水平有限,错误和不妥之处在所难免,敬请同行专家和广大读者予以指正。

编著者
2014年1日

目 录

第 1 章	无人作战飞机自主攻击综述	1
1.1	无人作战飞机自主攻击的应用背景和需求性分析	1
1.2	UCAV 自主攻击轨迹规划算法综述	6
1.2.1	轨迹优化问题的一般描述	7
1.2.2	轨迹优化问题的数值解法	7
1.2.3	轨迹优化问题的解法分类	10
1.3	自主攻击轨迹跟踪控制方法综述	15
1.3.1	增益调度控制	15
1.3.2	反馈线性化方法	16
1.3.3	反推设计方法	16
1.3.4	变结构控制方法	17
1.3.5	智能控制方法	17
第 2 章	目标可投射区快速解算技术	19
2.1	多约束条件下空地导弹可投射区建模	19
2.1.1	空地导弹数学模型的建立	19
2.1.2	目标运动方程	20
2.1.3	相对运动参数方程	21
2.1.4	导引方法、过载限制、舵机延时	21
2.1.5	仿真终止条件	22
2.2	可投射区边界快速搜索算法设计	22
2.2.1	算法的快速性设计	22
2.2.2	算法流程	23
2.3	数字仿真与结果分析	24
2.4	本章小结	27
第 3 章	UCAV 自主攻击过程分析与建模	28
3.1	复杂约束条件下 UCAV 自主攻击轨迹优化建模	28
3.1.1	坐标系的选取	28

3.1.2	UCAV 动力、运动学建模	29
3.1.3	约束条件分析	37
3.1.4	目标函数	38
3.1.5	复杂约束条件下 UCAV 自主攻击轨迹优化模型	42
3.2	基于 Radau 伪谱法的求解策略	43
3.3	数字仿真与结果分析	45
3.3.1	仿真算例 1	45
3.3.2	仿真算例 2	49
3.4	本章小结	52
第 4 章	基于航迹规划算法的攻击轨迹规划方法	54
4.1	V 图算法	54
4.1.1	基于 Voronoi 图的初始轨迹生成	55
4.1.2	UCAV 攻击轨迹建模	57
4.1.3	DPSO 算法	58
4.1.4	仿真分析	60
4.2	改进 A* 算法 (ISAS)	62
4.2.1	水平方向航迹节点的搜索策略	62
4.2.2	垂直平面航迹坐标生成和可飞性修正	64
4.2.3	代价函数设计	64
4.2.4	仿真结果及分析	65
4.3	本章小结	68
第 5 章	隐身 UCAV 的低可探测攻击轨迹规划方法	69
5.1	考虑动态 RCS 的低可探测攻击轨迹规划研究	69
5.1.1	问题描述	69
5.1.2	威胁代价模型	70
5.1.3	目标函数	72
5.2	最优轨迹求解策略	72
5.3	HP 自适应伪谱轨迹优化算法	73
5.4	仿真结果及其分析	76
5.5	本章小结	79
第 6 章	考虑不确定因素下的自适应轨迹规划方法	80
6.1	不确定条件下的攻击决策问题建模	80
6.1.1	任务想定	80
6.1.2	RHC 优化策略	81

6.1.3	采用 RHC 策略的局部模型求解框架	82
6.1.4	可切换的自适应目标函数	83
6.2	不确定条件下轨迹求解策略	83
6.2.1	基于 GPM 的攻击决策精细规划	83
6.2.2	实时迭代优化策略	86
6.2.3	攻击决策算法流程	87
6.3	仿真验证	87
6.4	本章小结	90
第 7 章	多 UCAV 的协同攻击任务分配及协同轨迹规划研究	91
7.1	协同多目标攻击的任务分配研究	92
7.1.1	协同多目标攻击的任务分配模型	92
7.1.2	模型的改进粒子群算法实现及仿真	95
7.1.3	IPSO 算法仿真及结论分析	97
7.1.4	模型的蚁群算法实现及仿真	99
7.1.5	模型的遗传算法实现及仿真	101
7.1.6	三种算法的对比分析及结论	104
7.2	多轨迹规划方法研究	105
7.2.1	基于进化算法的多轨迹规划原理	105
7.2.2	多航迹进化算法仿真结果	107
7.2.3	改进复合 A* 算法原理	109
7.2.4	改进复合 A* 算法仿真结果	110
7.3	基于进化算法的多 UCAV 协同多目标攻击的轨迹规划	111
7.3.1	算法基本原理	111
7.3.2	协同轨迹规划的进化算法流程	113
7.3.3	仿真及结论分析	113
7.4	基于时间协同的多 UCAV 协同攻击多目标的轨迹规划	116
7.4.1	基于四维/时间协同的多 UCAV 轨迹规划	117
7.4.2	协同航程及代价函数	118
7.4.3	协同算法原理及流程	119
7.4.4	仿真及结论分析	120
7.5	编队协同攻击轨迹规划研究	126
7.5.1	任务描述	126
7.5.2	UCAV 编队信息协同机制	127
7.5.3	编队攻击轨迹规划数学模型	129

7.5.4	最优轨迹求解策略	134
7.5.5	仿真结果及分析	135
7.6	本章小结	139
第8章	基于变结构控制的航迹跟踪控制方法研究	141
8.1	变结构控制理论简述	141
8.2	选择合适的滑动模态超平面	142
8.3	求取控制律	144
8.4	对航迹倾角、偏角及速度的跟踪方法研究	146
8.5	数字仿真及结论	148
8.6	姿态控制器设计	149
8.7	本章小结	152
第9章	自杀式无人机末制导段导引律设计	153
9.1	滑模变结构控制系统设计	153
9.1.1	滑动模态	154
9.1.2	变结构控制系统设计	154
9.1.3	变结构控制系统性能	155
9.2	带落角约束的自适应滑模导引律设计	156
9.2.1	末导引段相对运动关系	156
9.2.2	期望落角的描述	158
9.2.3	俯仰平面内导引律设计	158
9.2.4	转弯平面内导引律设计	160
9.3	制导律稳定性分析	160
9.3.1	滑模面存在条件、到达条件及系统稳定性	160
9.3.2	滑动运动的不变性	161
9.4	制导律的参数设置	165
9.5	末制导段进入条件分析	170
9.6	与典型导引律的比较	172
9.6.1	目标运动模型建立	172
9.6.2	与比例导引律的比较	173
9.6.3	与自适应滑模导引律的比较	175
9.7	本章小结	176
第10章	自杀式UCAV末制导段控制律设计	177
10.1	无人机飞控系统基本原理	177
10.1.1	飞控系统的硬件构成	177

10.1.2	飞控系统的基本设计思想	178
10.2	无人机纵向系统控制律设计	178
10.2.1	俯仰角控制系统控制律的设计	178
10.2.2	高度控制系统控制律设计	179
10.3	无人机横侧向系统控制律设计	180
10.3.1	滚转角控制系统控制律的设计	181
10.3.2	航向控制系统控制律设计	181
10.4	本章小结	182
第 11 章	自杀式 UCAV 末制导段弹道仿真及分析	184
11.1	仿真模型的建立	184
11.1.1	无人机大回路仿真模型	184
11.1.2	蒙特卡罗实验法	185
11.1.3	仿真中的随机变量	187
11.1.4	仿真计算的数学基础	188
11.2	理想状态下的仿真结果及分析	189
11.3	干扰状态下的仿真结果及分析	191
11.3.1	地面目标变速运动时的仿真及分析	191
11.3.2	有风干扰时的仿真及分析	192
11.4	本章小结	193
参考文献	194

第1章 无人作战飞机自主攻击综述

1.1 无人作战飞机自主攻击的应用背景和需求性分析

无人作战飞机(Unmanned Combat Aerial Vehicles, UCAV)是代表未来重点发展方向的航空武器装备,具有隐身性能好、维护保障费用低、无人员伤亡的风险等优势,且经受了实战的考验,受到各国军方的重视^[1-3]。随着各类无人作战飞机的迅速发展和广泛应用,无人作战飞机不仅会在未来战场上与有人机并肩作战,在某些条件下甚至有可能替代有人战斗机执行作战任务,从而成为未来战机的主力装备^[2],必将对未来作战模式产生深刻影响。

20世纪90年代,即海湾战争之后,在军事需求推动和技术进步的支持下,无人机技术获得飞跃式发展,自动化和智能化程度大大提高,航时大于24小时的洲际全天候无人机陆续服役并参加了实战。此时,出现了另一种新的武器概念,即无人作战飞机,并很快成为发展热点。

无人作战飞机是集探测、识别、决断和作战功能为一体的无人机系统,主要由飞行作战平台系统、信息收集与通信系统、操控站与回路中的操控员组成,它的出现使无人机(UAV)的发展发生了质的变化,即从辅助、支援性军用装备跃变为主战性装备,随着无人作战飞机的使用,未来空中作战将真正成为信息和武器融合的对抗^[3]。

无人作战飞机不仅可低速(0.1~0.3马赫)飞行,而且可高速(10~15马赫)飞行,大大超过有人作战飞机的速度(0.6~2.5马赫)。其航程可从几十千米到数千千米(经空中加油甚至可达上万千米),飞行高度接近2万米或更高,作战区域遍及高、中、低空,甚至兼顾高空和低空作战的双重要求。因此,它可充分满足任务需求,完成近程、中程和远程作战甚至洲际战略任务。

目前已经成功应用于实战的无人作战飞机对地攻击武器系统有美国MQ-1B“捕食者”无人机^[4](图1.1)。

“捕食者”系统由飞机、一个地面发射站(GCS)以及一支发射与回收分队组成。飞机由无人机平台、“天球”光电/红外传感器、AN/ZPQ-1TESAR战术合成孔径雷达、APX-100敌我识别器、LN100GGPS/INS卫星/惯导系统和“海尔法”激光制导导弹武器系统等组成。地面发射站装备有飞行控制设备、传感器控制

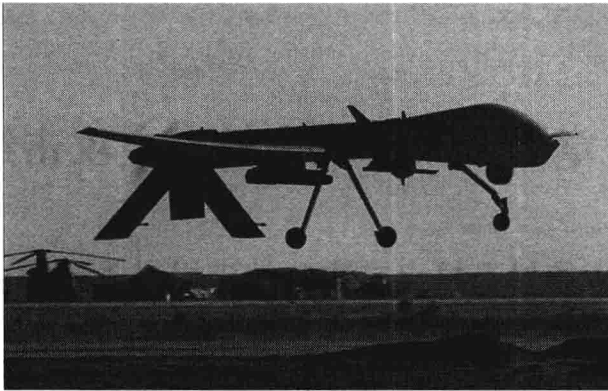


图 1.1 能发射激光制导导弹的 MQ-1B“捕食者”无人机

设备、视距数据链以及高频/超高频无线电与 Ku 波段卫星通信数据链。而发射与回收分队则备有满足发射与回收最小需求的地面发射站附属设备。“捕食者”飞行员使用视距数据链对飞机飞行进行实时控制,完成起飞降落任务。一旦无人机在空中飞行,飞行员将自动驾驶仪与导航系统耦合,飞机将自动地沿航路点飞行。地面控制站的飞行员通过 Ku 波段卫星通信系统对“捕食者”实施远程控制,并接收传感器图像信息。一旦发现、锁定和跟踪住目标,就可以用“海尔法”激光制导导弹武器系统对目标实施精确打击^[6]。其作战示意图如图 1.2 所示。

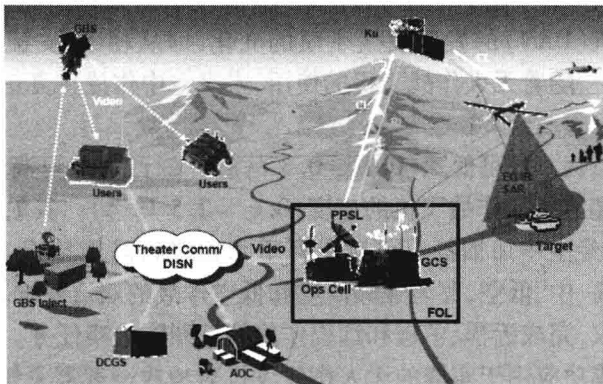


图 1.2 “捕食者”在部署模式下的作战示意图

可见,对于 MQ-1B“捕食者”无人机武器系统,尽管驾驶员不在飞机上,但驾驶员仍然保留在无人作战飞机的系统回路中,可暂称之为“人在回路地面操控模式”无人作战飞机。而且,其作战使用需要地面控制站完成远程目标人工

识别、激光制导弹武器系统的火控离线解算、攻击地面决策等功能,并通过地面控制站任务规划系统指挥控制无人作战飞机进入可发射区,以构成激光制导弹武器的发射条件。可见,人在回路地面操控模式无人作战飞机武器系统具有以下局限性:

(1) 不可避免地要求地面指挥控制站与无人作战飞机之间大数据量的交互,无疑增加了无人机通信的带宽、可靠性、实时性等需求;

(2) 无人机在与地面通信过程中极易受到干扰,存在作战指挥控制和信息交互的链路隐患;

(3) 地面操控人员的固有生理因素限制,如估算精度、动作准确性、反应时间、攻击决策的优劣程度等,地面操控人员并不能充分利用飞机和武器系统的全部能力,甚至产生错过或丧失攻击时机,乃至错误攻击目标等严重后果。

上述局限性严重影响和制约了无人作战飞机的作战效能。

为此,以美国为首的西方国家提出了无人作战飞机自主攻击技术。《美国无人机发展路线图 2005—2030》将 UAV 自主程度划分为 10 个等级,其中人/机控制权限的最终发展趋势是完全计算机自主控制。

《美国空军 2010—2030 年科学技术展望》指出,接下来 10 年,美国空军有两个关键领域需要优先发展和重点投入,其中之一关键领域就是要强化使用自主化和自动化系统,并强调:“大量使用适用性和灵活性强大的自主系统和程序,与敌方运用人力进行计划和决策的速度相比,可掌控时间主动权。扩大自主系统的应用,加快作战节奏,这本身就是一个重要的能力优势。”

《美国空军无人航空器飞行计划 2009—2047》指出,自主化运行模式有利于提高无人飞行器系统的总体效能。未来的无人飞行器系统将能够独立地观察态势并采取行动,仅需要有限或很少的人力参与,这将极大缩短决策和攻击时间。

2004 年 4 月,一架 X-45A 无人作战飞机(图 1.3)自主投掷了一枚 GPS 制导炸弹,并成功击中目标。2005 年 7 月,两架 X-45A 无人机协同对多个目标实施打击,包括仿真武器投放和战场毁伤评估。2011 年 2 月 4 日,美国格鲁曼公司为美海军研制的世界上首架陆基和航空母舰都能使用的无人驾驶侦察攻击机 X-47B(图 1.4)在加利福尼亚州沙漠地带的爱德华兹空军基地首飞成功。2012 年 7 月 29 日,美国海军为验证 X-47B 无人机与航空母舰飞行程序和起飞/回收设备之间的兼容性,在帕图森河海军航空站成功进行试飞。X-47B 一改过去无人机需要地面人员遥控的历史,是第一架完全由计算机控制的飞机,工作人员只需要预先输入程序,X-47B 就可以自行完成起飞、打击目标、返回和降落等一系列动作。这说明美国在无人作战飞机自主攻击技术上已经走在世界前列。



图 1.3 美军 X-45A 无人作战飞机



图 1.4 美军 X-47B 无人驾驶侦察攻击机

目前,美国已有多个型号的无人作战飞机投入到其在世界各地的作战使用当中,取得了一定的作战效果。此外,法国、英国、以色列、德国、澳大利亚、瑞典等国家也对研发UCAV表现极大关注,都在本国未来空中力量发展规划中列入UCAV项目,有些国家已经进行了初步的方案研究以及验证性试验,并在关键技术领域取得了一定的突破与经验积累。

我国研制无人机起步较晚,从20世纪60年代后期才开始,主要用途集中在靶机和战术侦察方面^[11],但也积极开展了无人作战飞机项目。沈飞集团公司设计的“暗剑”攻击型无人机采用红外/激光雷达装置,可以对小型运动目标进行自主搜索、定位和分析,能够依靠全球定位装置和激光/红外制导的制导弹药进行精确打击,依靠其低信号特征优势还能够携带反辐射武器对敌方纵深进行攻势防空压制^[12]。其模型如图1.5所示。

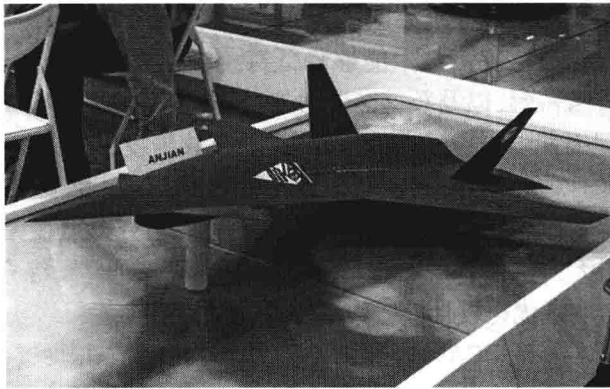


图 1.5 “暗剑”无人作战飞机模型

由中航工业集团成都飞机设计研究所设计研制的“翼龙”无人机(图 1.6)是一架中低空军民两用、长航时多用途无人机,装备一台 100 马力活塞发动机,具备全自主平轮式起降和飞行能力。可携带各种侦察、激光照射/测距、电子对抗设备及小型空地打击武器,可执行监视、侦查及对地攻击等任务,也可用于维稳、反恐、边界巡逻等^[12]。

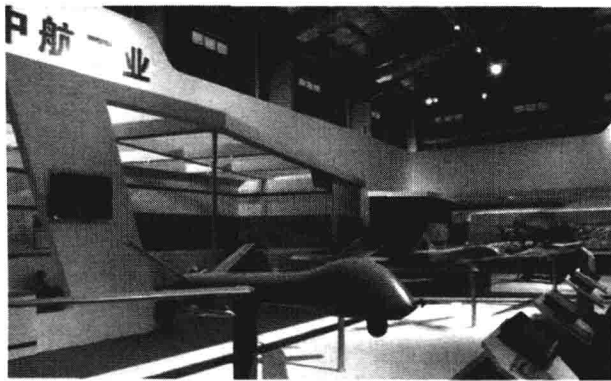


图 1.6 “翼龙”无人机

目前我军的无人机装备建设虽已取得了长足的进步,但与世界军事发达国家相比仍有一定差距,特别是在代表未来作战飞机发展方向的无人作战飞机武器系统研究领域还处于起步阶段,不能完全适应未来信息化条件下高技术战争的要求。

在各军事强国纷纷加强无人作战飞机的研制,并极力发展其自主攻击作战性能的形势下,为适应未来信息化作战的迫切需求,使我军在无人作战飞机领域与国际先进水平保持同步并适度超前,我军的无人机建设工作必须从无人作战