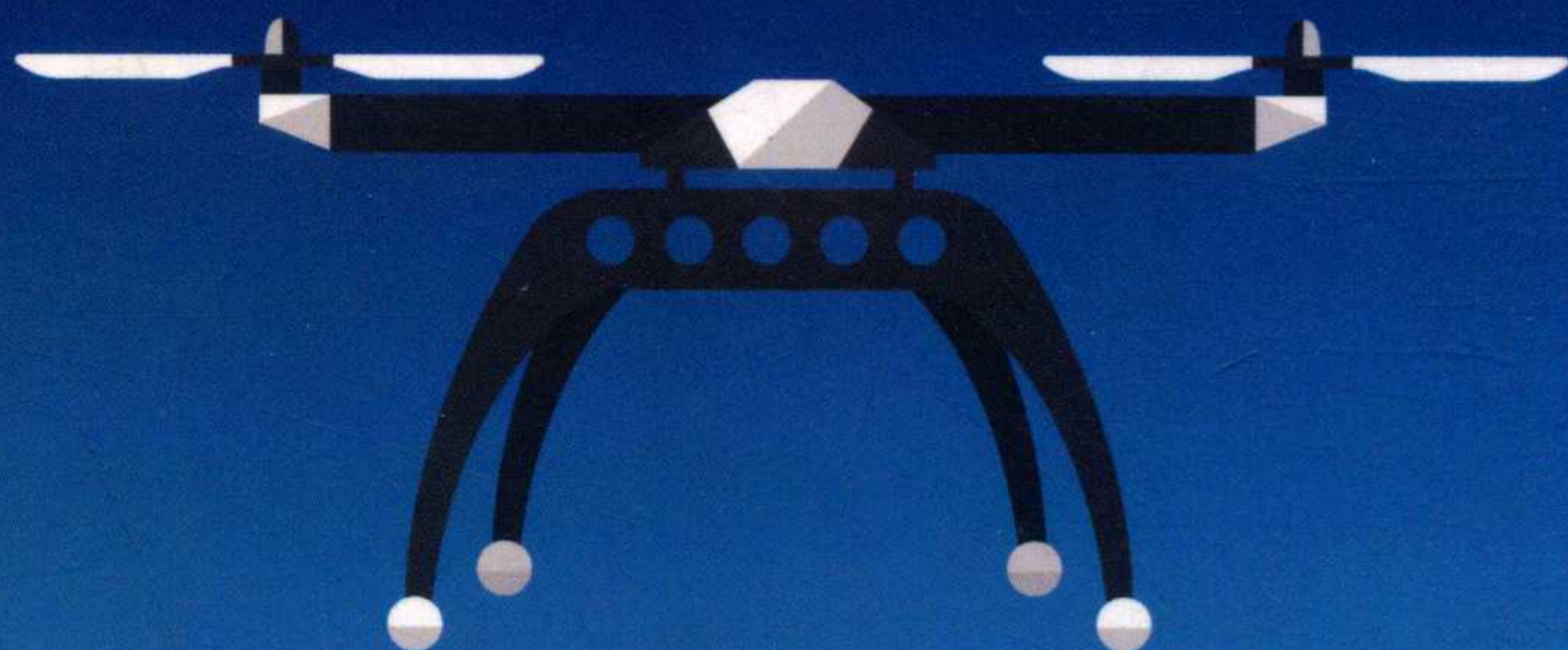


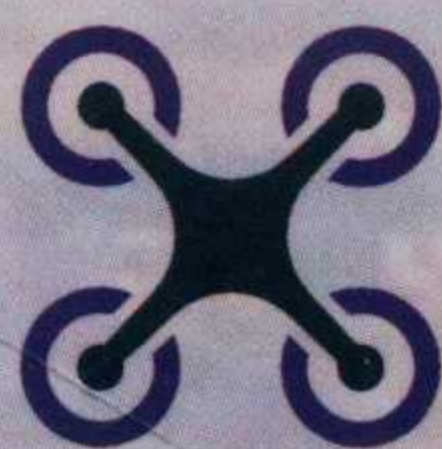
广西高校硕士专业学位建设项目资助
河池学院省力化装备与智能控制工程研究中心资助
广西高等学校千名中青年骨干教师项目资助

Design and Application
of Hollow Cup Four
Rotor Aircraft



空心杯 四旋翼飞行器 设计与应用

彭建盛◎编著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

广西高校硕士专业学位建设项目资助

河池学院省力化装备与智能控制工程研究中心资助

广西高等学校千名中青年骨干教师项目资助

空心杯四旋翼飞行器 设计与应用

彭建盛 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书主要教授航模研发初学者如何 DIY 一个微型四旋翼飞行器。内容主要分为三篇：第一篇基础篇，主要包括无人机概述和四旋翼飞行器结构和原理的介绍，让读者对四旋翼飞行器有一个初步的认识；第二篇硬件篇，主要介绍了 DIY 微型四旋翼飞行器所需的开发环境——AD 软件和 Keil 软件，并重点介绍了如何利用 AD 软件进行元件的封装、工程创建、器件选择、各个模块的原理图绘制，以及 PCB 制作、焊接器件的方法与注意事项等；第三篇飞控篇，重点介绍了 MPU-6050 传感器的数据获取、飞控算法（包含姿态解算、互补滤波算法、卡尔曼滤波算法）、PID 控制算法、PID 参数的整定方法及飞控各个功能模块的软件实现方法。

本书适用于有一定编程基础的入门级航模爱好者，可以引导他们设计、制作出属于自己的微型四旋翼飞行器；也可供大学生课外阅读和实践使用，以培养学习兴趣和提高动手能力。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有，侵权必究。

图书在版编目（CIP）数据

空心杯四旋翼飞行器设计与应用 / 彭建盛编著. —北京：电子工业出版社，2018.5

ISBN 978-7-121-34138-0

I. ①空… II. ①彭… III. ①无人驾驶飞行器—设计 IV. ①V47

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2018）第 088472 号

策划编辑：王昭松

责任编辑：王昭松 文字编辑：张思辰

印刷：北京虎彩文化传播有限公司

装订：北京虎彩文化传播有限公司

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编：100036

开 本：720×1 000 1/16 印张：17.75 字数：338 千字

版 次：2018 年 5 月第 1 版

印 次：2018 年 5 月第 1 次印刷

定 价：68.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：（010）88254888，88258888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式：（010）88254015 wangzs@phei.com.cn QQ：83169290。

前言

近年来，无人机进入飞速发展的黄金时期，这个行业发展前景广阔，各国都非常重视无人机的开发和应用。无人机类型众多，本书只对消费级无人机的设计与应用进行详细讲解，不对其他类型的无人机做具体阐述。就消费级无人机而言，国内外的技术已经非常成熟，我国的大疆公司在无人机行业中占据主导地位，据2016年市场调查报告显示，我国的大疆公司在全球消费级无人机市场份额中占有率高达70%。由此可以看出，我国的消费级无人机技术具有明显的技术优势。在这个无人机热潮的背景下，涌现出了众多的无人机爱好者，无人机技术的迅速发展给他们带来了越来越多的激情，但是对于一些想要自己制作无人机的无人机爱好者来说，初始阶段却往往不知从何做起，市场上虽有一些开源的飞控代码，但都需要有一定的基础才能看懂并能进行修改运用。例如，采用STM32等类似的高端芯片及应用各种高端的功能等，这些内容对于初学者来说很难理解，需要在具备很好的技术的前提下才可能做出类似的无人机，学习难度非常大，所以对于一般的初学者来说并不适合。为此，我们以编程相对简单的51系列单片机作为平台来制作一款四轴飞行器。对于51系列单片机，工科生基本上都有过接触，对于从未接触过单片机的初学者，51平台也是初学者学习单片机最好的平台。51系列单片机相对于STM32等高端芯片来说入门门槛低，结合本书的详细讲解，可使广大初学者能够亲手制作出属于自己的无人机，让梦想变成现实。通过这个平台，不仅能制作出属于自己的无人机，还能提高单片机的应用水平，为学习高级芯片应用打下基础。

通过该51系列单片机四旋翼开发平台，能够实现飞行器的平稳飞行，可以进行二次开发，学会一些飞行器基本的算法及滤波算法，如互补滤波、低通滤波、姿态解算算法、PID控制算法及PID参数整定的方法等。

本书第1、2、4章由詹宜成录入和校对，第3、12章由罗力友录入和校对，第5、7、9、10章由覃剑录入和校对，第6、8、11章由钟文键录入和校对。

限于编者水平，书中难免存在疏漏之处，欢迎广大专家、同行进行批评指正。

编者

2018年2月

目 录

- 第一篇 基础篇 1
 - 第 1 章 无人机概述 2
 - 1.1 无人机的发展历史 3
 - 1.2 什么是无人机 7
 - 1.2.1 固定翼无人机 7
 - 1.2.2 旋翼无人机 8
 - 1.2.3 旋翼无人机与固定翼无人机的优缺点 9
 - 1.3 归纳总结 13
 - 1.4 科学精神的培养 13
 - 第 2 章 四旋翼飞行器结构和原理 14
 - 2.1 四旋翼飞行器的分类 14
 - 2.2 四旋翼飞行器坐标系的建立 15
 - 2.3 四旋翼飞行器的结构特性 16
 - 2.4 四旋翼飞行器的运动模式分析 16
 - 2.4.1 垂直上升与下降运动 16
 - 2.4.2 俯仰运动 18
 - 2.4.3 横滚运动 19
 - 2.4.4 偏航运动 20
 - 2.4.5 水平运动 22
 - 2.5 四旋翼飞行器的基本组成 23
 - 2.5.1 电机 24
 - 2.5.2 电调 25
 - 2.5.3 电池 28
 - 2.5.4 正反螺旋桨 31
 - 2.5.5 机架 35

2.5.6	飞行控制器	40
2.5.7	遥控器	43
2.6	归纳总结	44
2.7	科学精神的培养	45
第二篇 硬件篇		47
第3章 开发环境之 AD、Keil		48
3.1	开发环境的搭建和介绍	48
3.2	元件封装库的建立	50
3.2.1	元件库的建立	50
3.2.2	封装库的建立	55
3.2.3	第三方元件库和封装库的导入	58
3.3	建立工程指导	59
3.3.1	建立第一个工程	59
3.3.2	创作遥控器 PCB	61
3.4	Keil μ Vision4 集成开发环境 (IDE) 介绍和获取	67
3.5	stc-isp-15xx-v6.85 的获取	68
3.5.1	软件安装	68
3.5.2	Keil μ Vision4 软件的使用	68
3.6	归纳总结	74
3.7	科学精神的培养	74
第4章 空心杯小四轴无人机电路板制作		75
4.1	制作小四轴飞行器所需的工具与元器件	75
4.1.1	飞行控制器电路板元器件材料清单	75
4.1.2	空心杯小四轴飞行控制器电路板	76
4.1.3	制作工具	77
4.2	飞控原理图绘制	77
4.2.1	主控与指示灯	77
4.2.2	电源电路的选择	80
4.2.3	姿态角度获取电路	82
4.2.4	电机驱动部分电路	83
4.2.5	无线模块接口电路	84

4.2.6	下载接口	85
4.2.7	气压计电路	86
4.3	制作遥控器所需的元器件	87
4.3.1	制作遥控器所需的元器件清单	87
4.3.2	遥控器电路板	88
4.4	遥控器原理图绘制	89
4.4.1	主控与下载电路	89
4.4.2	摇杆电位器电路	90
4.4.3	遥控器电源电路	92
4.4.4	微调电路	92
4.4.5	体感控制电路	93
4.4.6	按键模块	94
4.4.7	无线模块接口电路	95
4.4.8	蜂鸣器电路	95
4.5	归纳总结	95
4.6	科学精神的培养	96
第 5 章	四轴 PCB 手工焊接方法	98
5.1	手工焊接所需工具	98
5.1.1	焊台和电烙铁	98
5.1.2	其他工具	99
5.2	手工焊接表面贴片流程	100
5.3	PCB 实物图	100
5.4	MPU-6050 的焊接方法	101
5.4.1	MPU-6050 的封装形式	101
5.4.2	MPU-6050 手工焊接方法	102
5.5	主控芯片手工焊接流程	103
5.5.1	主控芯片实物图	103
5.5.2	主控芯片的手工焊接方法	104
5.5.3	其他芯片手工焊接方法	106
5.6	其他器件的焊接	106
5.6.1	电阻和电容的焊接	106
5.6.2	贴片 LED 正负极的判断方法	107

5.6.3	电机的焊接问题	107
5.6.4	焊接完成效果	108
5.7	归纳总结	109
5.8	科学精神的培养	109
第三篇 飞控篇		111
第6章 MPU-6050 六轴（陀螺仪+加速度计）传感器介绍及通信		112
6.1	MPU-6050 六轴（陀螺仪+加速度计）传感器介绍	112
6.1.1	概述	112
6.1.2	特征	113
6.1.3	MPU-6050 的应用领域	114
6.1.4	引脚介绍	114
6.1.5	硬件连接	116
6.2	I ² C 总线的介绍与使用	118
6.3	I ² C 总线硬件结构和时序	119
6.3.1	I ² C 总线硬件结构图	119
6.3.2	I ² C 总线通信时序	120
6.4	I ² C 总线 4 个信号的程序分析	121
6.4.1	启动信号的程序	123
6.4.2	停止信号的程序	123
6.4.3	应答信号的程序	124
6.4.4	I ² C 设备发送一个字节数据的程序	124
6.4.5	I ² C 设备接收一个字节数据的程序	125
6.4.6	I ² C 设备写入一个字节数据的程序	126
6.4.7	I ² C 设备读取一个字节数据的程序	127
6.5	MPU-6050 内部寄存器设置	128
6.6	归纳总结	150
6.7	科学精神的培养	150
第7章 基于 STC15 系列单片机飞控核心算法研究		151
7.1	姿态解算	151
7.1.1	姿态解算对于飞行器的作用	151
7.1.2	姿态解算涉及的传感器	152

7.1.3	四元数预备知识	152
7.1.4	利用四元数计算欧拉角	153
7.2	滤波算法	167
7.2.1	算术平均滤波法	167
7.2.2	滑动平均滤波法	168
7.2.3	互补滤波算法	168
7.2.4	卡尔曼滤波算法介绍	169
7.2.5	卡尔曼滤波算法	169
7.3	PID 控制算法	170
7.3.1	比例控制	170
7.3.2	比例-积分控制	171
7.3.3	比例-微分控制	172
7.3.4	比例-积分-微分控制	172
7.4	常见定高方式和选择	173
7.4.1	常见气压计介绍	173
7.4.2	为什么选择气压计定高方式	176
7.5	归纳总结	176
7.6	科学精神的培养	177
第 8 章	PID 参数调节方法和整定	178
8.1	PID 各参数的含义及其重要性	178
8.2	PID 在实际中的使用	180
8.3	超声波程序分析与讲解	183
8.3.1	模块介绍	183
8.3.2	超声波时序图分析	184
8.3.3	超声波程序	185
8.4	使用 PID 调节定高	187
8.4.1	PID 调节定高程序	187
8.4.2	PID 程序分析	189
8.4.3	调节定高问题分析	191
8.5	PID 参数在飞行器上的整定	192
8.5.1	调试前的准备	192
8.5.2	飞行器方向的设定	192

8.5.3 调节内环	193
8.5.4 程序分析	195
8.5.5 串级 PID 的程序分析	199
8.6 归纳总结	200
8.7 科学精神的培养	201
第 9 章 油门补偿	202
9.1 A/D 转换器	202
9.2 A/D 转换测试程序详解	205
9.3 归纳总结	210
9.4 科学精神的培养	211
第 10 章 四旋翼飞行器的上位机调试	212
10.1 串行口内部结构	212
10.2 串口通信的原理	213
10.3 串行口 1 的相关寄存器	216
10.4 飞行器与上位机通信测试代码	218
10.4.1 uart.h 代码	218
10.4.2 uart.c 代码	219
10.5 上位机查看数据操作步骤	224
10.5.1 程序的下载	224
10.5.2 串口调试参数的方法	226
10.6 归纳总结	231
10.7 科学精神的培养	231
第 11 章 PWM 信号和 15 系列单片机 PWM 信号的产生	232
11.1 PWM 介绍	232
11.2 软件模拟 PWM	233
11.3 15 系列单片机内部 PWM 设置	235
11.3.1 I/O 口模式设置	236
11.3.2 寄存器设置	237
11.4 程序的编写与实现	245
11.4.1 15 系列单片机 PWM.h 程序	245
11.4.2 PWM 初始化程序	246

11.4.3 调节占空比输出程序.....	251
11.5 归纳总结	252
11.6 科学精神的培养.....	252
第 12 章 基于 STC15 系列单片机遥控器控制算法.....	253
12.1 2.4GHz 无线发送.....	254
12.2 摇杆控制飞行模式.....	259
12.3 体感控制飞行模式.....	262
12.4 OLED 显示屏.....	263
12.5 归纳总结	268
12.6 科学精神的培养.....	269
参考文献.....	271

基础篇

本篇主要讲述无人机的发展历史及四旋翼飞行器的结构和原理。



第1章

无人机概述

无人机是“无人驾驶飞行器”(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)的简称,它是利用无线遥控设备和自备程序控制装置操纵的不载人飞行器。与载人飞行器相比,它具有体积小、造价低、使用方便、对环境要求低等优点。无人机过去主要用于军事领域,由于无人机具有用途广泛、效率高、无人员伤亡风险、在战场中适应性与生存能力强、完成任务率高等优点,所以无人机在战场上有着出色的表现,在空战中也有着举足轻重的地位,是现代战场的重要作战力量。世界各主要军事国家对无人机的技术与战场应用非常看重,纷纷将国家的高新技术投入到无人机的研究和开发中,并且取得了丰硕的成果。无人机在战场中的主要应用有战场侦察和监视、定位校射、毁伤评估、电子战、充当靶机等,这些应用在战争中往往能起到决定性的作用,影响战争的结局。

过去的十年,随着无人机技术的迅猛发展,民用无人机在各个领域中的应用也逐渐开始崭露头角,如图 1-1 所示。在航拍摄影、农业植保、微型自拍、快递运输、灾难救援、观察野生动物、监控传染病、测绘、新闻报道、电子巡线、环境监控、森林保护、野外火灾探测、交通监测、桥梁检查、搜索与救援、导航、监控、侦察、边境巡逻等领域中的应用,大大地拓展了无人机本身的用途。无人机极大地改变了城乡生活,它能够让农田耕作变得更加有效率,更加节约资源和劳动力;它能够解决因为道路糟糕、交通堵塞而导致紧急物品无法按时运输的问题等。目前,各个国家都在积极扩展无人机的行业应用,并大力发展无人机技术。



图 1-1 无人机在民用领域的应用

1.1 无人机的发展历史

飞机是 20 世纪最重要的发明之一，1903 年，世界上第一架飞机在莱特兄弟的手上诞生了。自发明以来，飞机成为现代生活中不可缺少的交通工具。它深刻地改变了人们的生活，开启了人们征服天空的时代。

近些年，无人机这个词渐渐出现在人们的视野中，人们可能会认为无人机是近几十年来随着科技的发展而衍生出的高新产物，但其实无人机的发展已有百年的历史。下面就对无人机的演化史进行简要的介绍。

很多伟大的科技都是源于战争，而无人机就是在战争中诞生的。无人机最初的发展阶段要追溯至第一次世界大战时期。

1917 年，彼得·库伯和艾尔姆·A·斯皮里发明了第一台自动陀螺稳定仪，从而诞生了无人机。美军应用斯皮里“空中鱼雷”式无人机（见图 1-2）在测试中挂载了一枚 300 磅（约合 136 千克）的炸弹，可持续飞行 50 英里（约合 80.5 公里）。

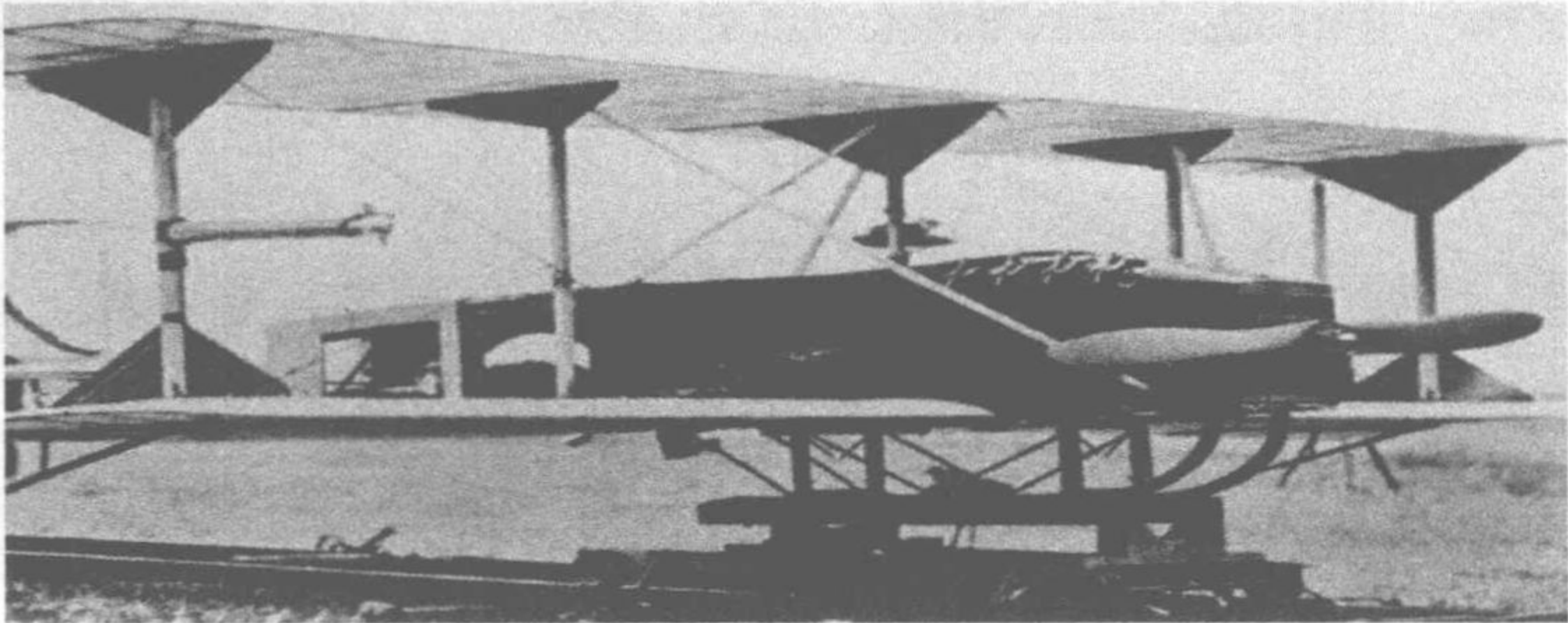


图 1-2 斯皮里“空中鱼雷”

1935 年, DH.82B “蜂王号”(见图 1-3) 问世。在这之前, 空中飞行器无法飞回起飞点, 因此也无法重复使用。而“蜂王号”的发明, 使得无人机能够回到起飞点, 从而增加了无人机的实用价值。



图 1-3 DH.82B “蜂王号”

1944 年, 第二次世界大战期间, 为攻击英伦列岛, 纳粹德国设计制造了“复仇者一号”(见图 1-4), “复仇者一号”可搭载 2000 磅(约合 908 千克)的导弹飞行, 成为当代巡航导弹的先驱。

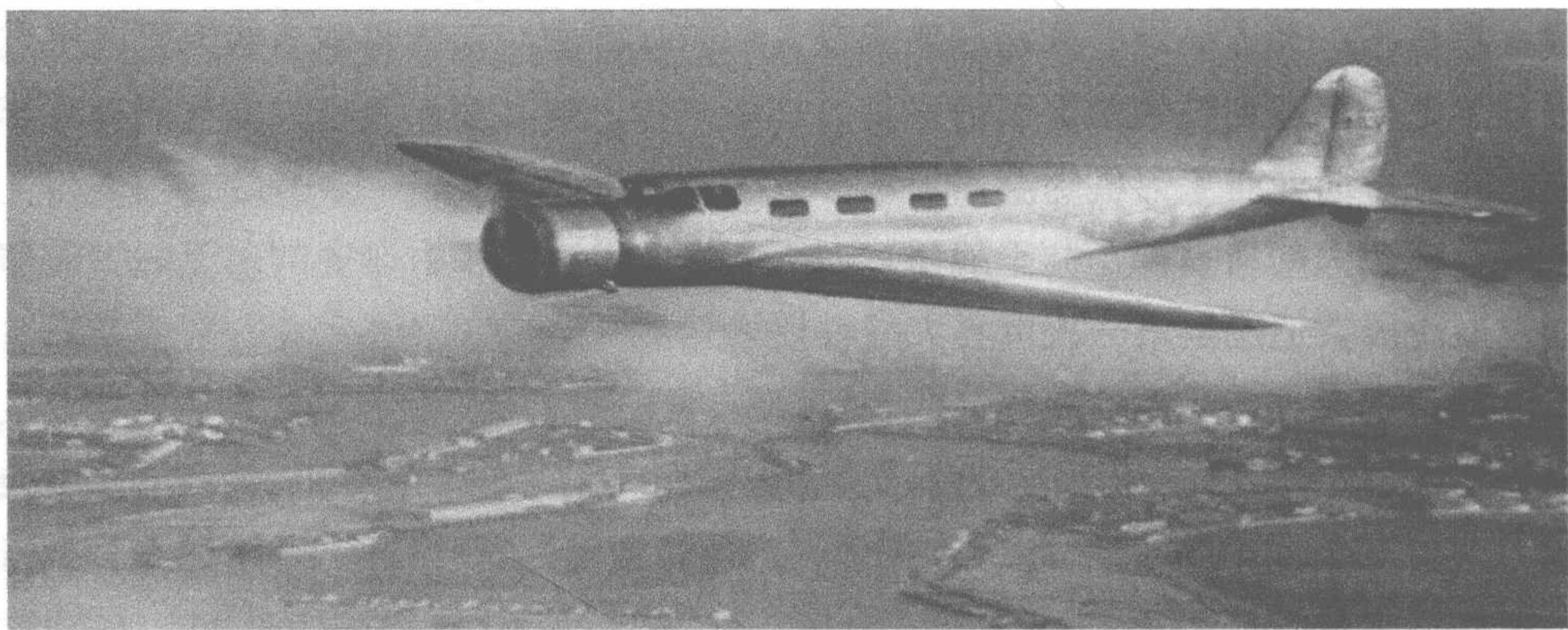


图 1-4 “复仇者一号”无人机

1955 年, 瑞安“火蜂号”(见图 1-5) 由瑞安航空制造, 是世界上首台喷气推动的无人机, 主要用于美国的情报收集和针对无线电交流的监控活动。



图 1-5 瑞安“火蜂号”

1986 年，“先锋号” RQ-2A（见图 1-6）为战术指挥官提供了特定目标及战场的实时画面，执行了美军“侦查、监视并且获取目标”等各项任务。“先锋号” RQ-2A 通过火箭助力起飞，起飞重量为 416 磅（约合 189 千克），航速为每小时 109 英里（约合 174 公里）。



图 1-6 “先锋号” RQ-2A

1994 年，通用原子公司（General Atomics）制造了 MQ“捕食者”无人机（见图 1-7）。作为捕食者的升级版，它为原本仅供侦查用途的无人机增加了携带武器并攻击目标的能力。

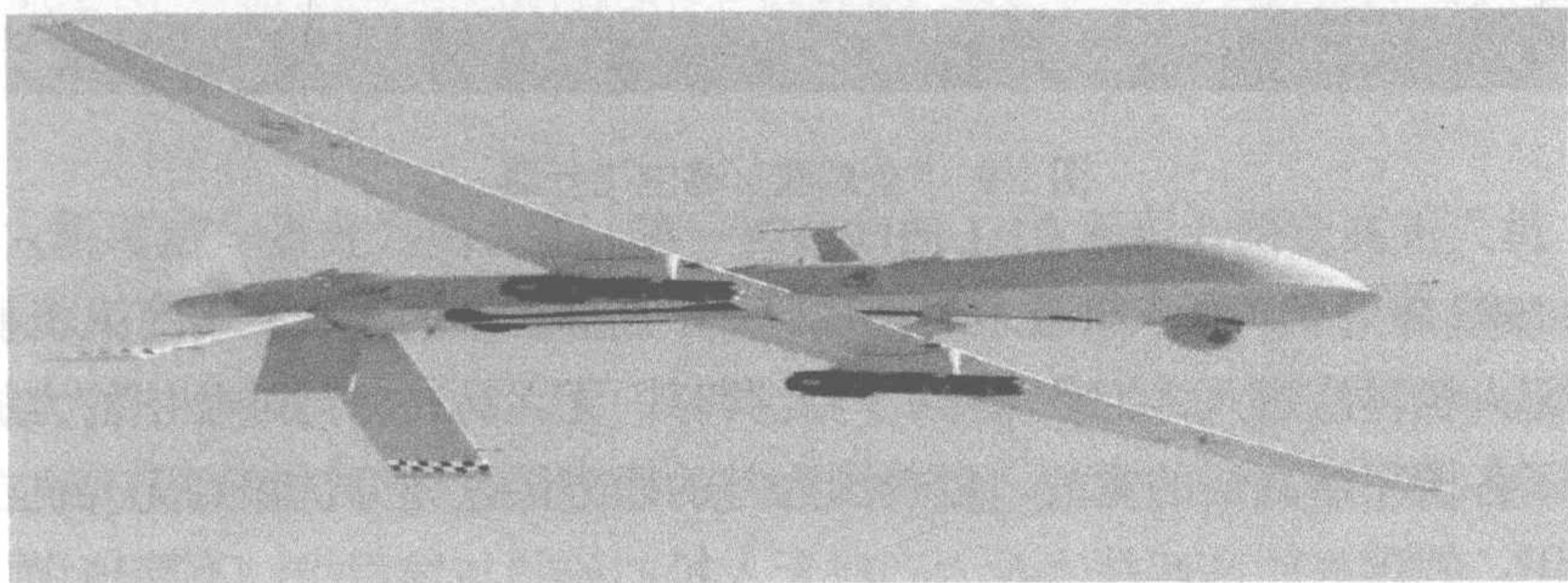


图 1-7 MQ“捕食者”

2004 年，RQ-7B “幻影 200”（见图 1-8）问世，它是无人机家族中最小的一个，被美国陆军和海军陆战队用于伊拉克和阿富汗战场。它拥有能够定位并识别战术指挥中心 125 公里之外目标的系统，这让指挥官的观察、指挥、行动都更加敏捷。

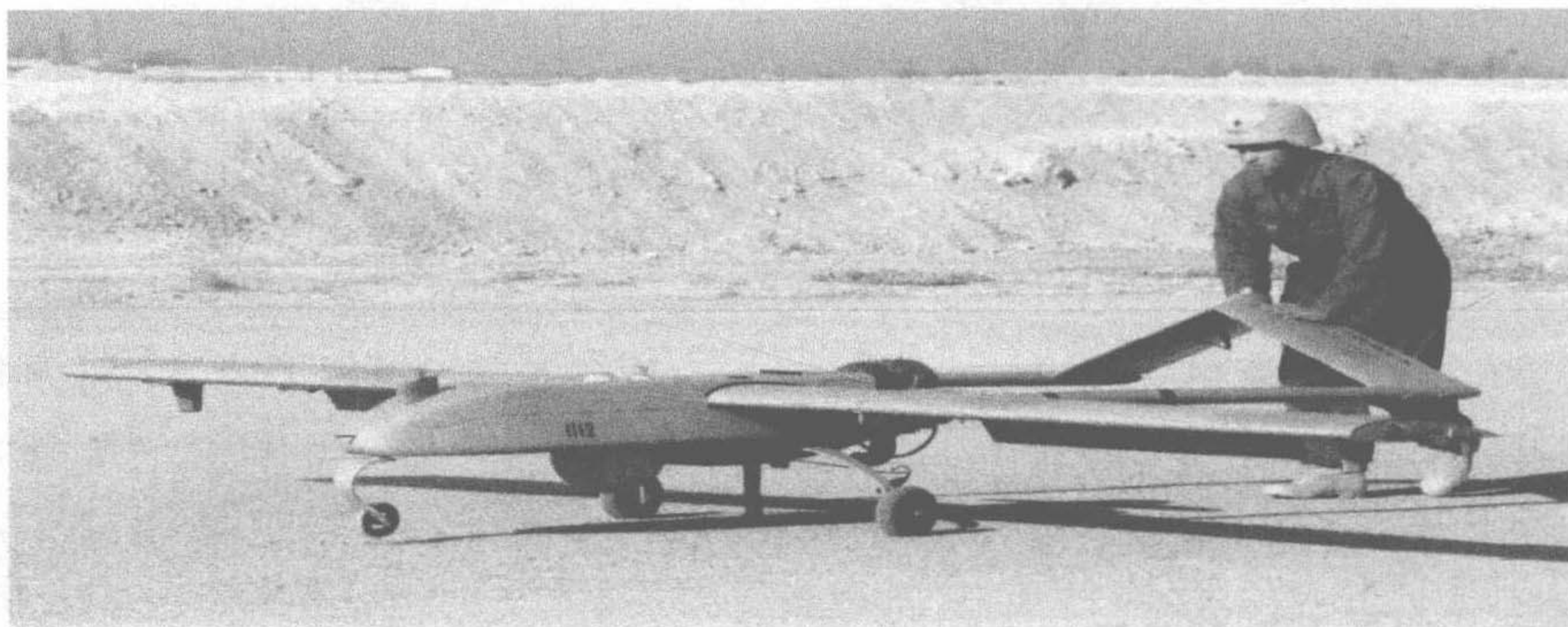


图 1-8 RQ-7B “幻影 200”

2010 年，“全球鹰”高空飞行器（见图 1-9）问世，它拥有长时间的飞行能力，还装备了能够开展情报收集、侦察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直接飞越太平洋的无人机。

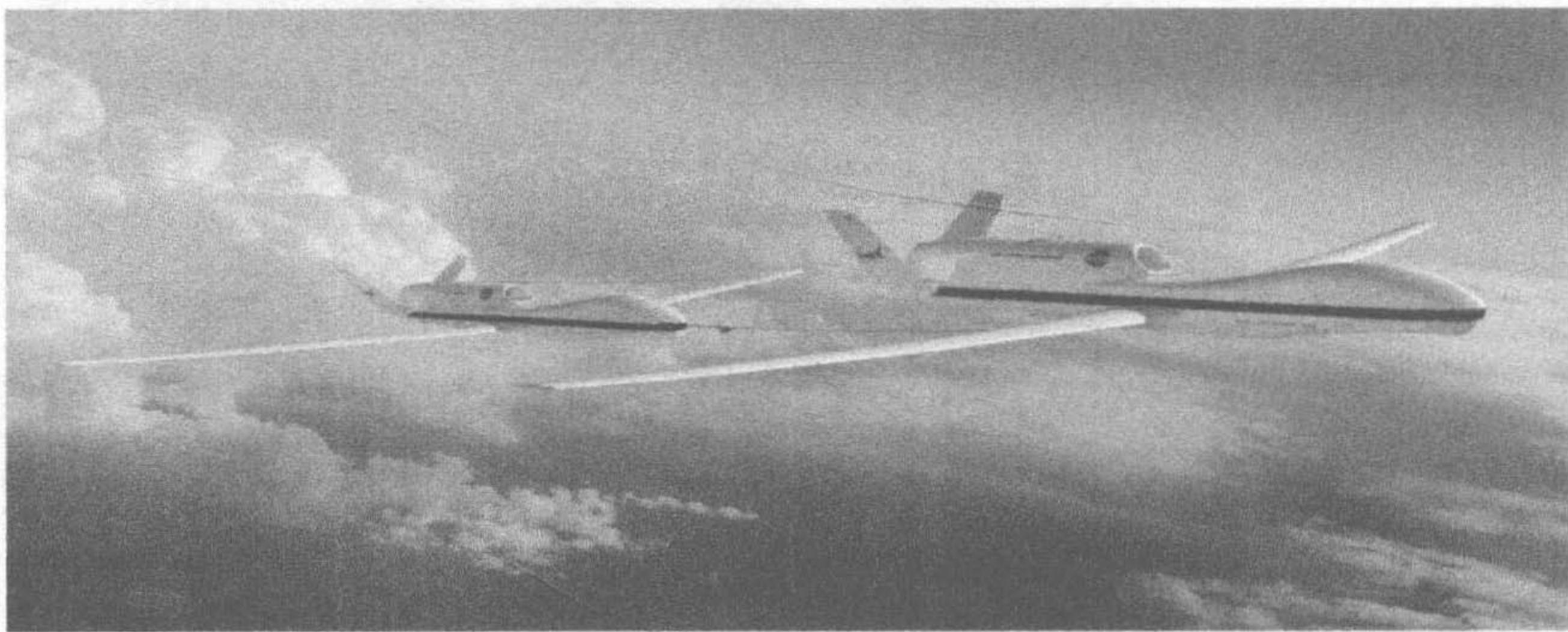


图 1-9 “全球鹰”高空飞行器

自 1982 年开始，无人机技术逐渐成熟，以色列首创的无人机与有人机协同作战，使无人机再次进入人们的眼帘。与此同时，无人机在海湾战争中的大放异彩也引起了各国军事高层的重视，以美国为首的西方国家充分认识到无人机在战争中的作用，把国家的高新技术投入到对无人机的研制与发展中，不断地增加无人机的续航时间，提高图像传递速度和数字化传输速度，还使用先进的自动驾驶仪