



装备科技译著出版基金

CRC Press  
Taylor & Francis Group

无人机系统自主控制技术丛书

# Guidance of Unmanned Aerial Vehicles

# 无人机制导

[美] 拉斐尔·雅诺舍夫斯基 (Rafael Yanushevsky) 著  
牛轶峰 朱华勇 沈林成 相晓嘉 译

CRC Press  
Taylor & Francis Group



国防工业出版社  
National Defense Industry Press



装备科技译著出版基金

无人机系统自主控制技术丛书

# 无人机制导

Guidance of Unmanned Aerial Vehicles

【美】拉斐尔·雅诺舍夫斯基(Rafael Yanushevsky) 著  
牛轶峰 朱华勇 沈林成 相晓嘉 译

国防工业出版社

·北京·

# 著作权合同登记 图字:军-2013-051号

## 图书在版编目(CIP)数据

无人机制导/(美)雅诺舍夫斯基(Yanushevsky,R.)著;牛轱峰等译.

—北京:国防工业出版社,2015.8

(无人机系统自主控制技术丛书)

书名原文:Guidance of Unmanned Aerial Vehicles

ISBN 978-7-118-10285-7

I. ①无... II. ①雅... ②牛... III. ①无人驾驶飞机—  
制导—研究 IV. ①V279

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第163508号

**Guidance of Unmanned Aerial Vehicles by Rafael Yanushevsky ISBN: 978-1-4398-5095-4**

Copyright© 2011 by CRC Press.

Authorized translation from English language edition published by CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC; All rights reserved;本书原版由Taylor & Francis出版集团旗下,CRC出版公司出版,并经其授权翻译出版,版权所有,侵权必究。

National Defense Industry Press, is authorized to publish and distribute exclusively the **Chinese (Simplified Characters)** language edition. This edition is authorized for sale throughout **Mainland of China**. No part of the publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher. 本书中文简体翻译版授权由国防工业出版社独家出版并在限在中国大陆地区销售。未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

Copies of this book sold without a Taylor & Francis sticker on the cover are unauthorized and illegal. 本书封面贴有Taylor & Francis公司防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。

※

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责任公司

新华书店经售

\*

开本710×1000 1/16 印张18 字数336千字

2015年8月第1版第1次印刷 印数1—2500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

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

## 译者序

无人机系统(Unmanned Aircraft Systems, UAS)是无人系统领域发展最快、技术水平最高和实战经验最多的一个领域。目前无人机在军事上得到大量应用,并且其自主能力不断提高,不仅要以巡航方式侦察飞行,也需要在攻击目标时自主形成攻击条件(如攻击处于助推段的弹道导弹),甚至作为攻击武器直接攻击目标(如反辐射无人机直接攻击雷达目标),这些应用对无人机的高精度制导控制能力提出了更高要求。无人机要实现精确的导航制导与自主飞行,还和它所应用的领域有关。由于无人机可能运行在高危环境中,制导系统还需要考虑感知并规避各种障碍和威胁等问题。对于简单任务(如航路点跟踪),可以采用修正的巡航导弹制导律,对于复杂任务(如空中加油、多机协同),则制导问题变得更为复杂,这类复合问题要求多无人机之间彼此保持距离固定、速度一致,对无人机制导系统提出了更高的挑战。

针对这些应用需求,本书在现代导弹制导的基础上,首次较为全面地研究和分析了无人机制导问题。作者为在该研究领域有着超过30年工作经验的知名学者,书中包含了作者对无人机制导与控制系统的最新研究成果。该书不但清晰阐述了无人机动力学和制导律等问题,而且建立了制导与控制系统模型,更针对自主无人机(不同于传统导弹在轴向加速控制能力受限),发展了广义的无人机制导律(兼容导弹制导律,导弹是一种一次性使用的特殊无人机),并针对无人机典型任务,包括侦察监视任务、空中加油任务和无人机集群运动,进行了制导律应用研究和性能测试。同时,该书还针对未来无人机发射机载拦截器的制导律进行了案例分析。该书对无人机制导律有着严格证明,不但比较了广义与常规制导律的区别和联系,也阐述了导弹和无人机制导律计算方法和软件运用,并提供了MATLAB数值算例。本书出版后,2012年的英国《航空杂志》(Aeronautical Journal)认为其非常详细地分析了无人机的制导律,十分适合研究自主无人机控制系统的技术人员参考,书中提供的翔实理论和计算方法有助于读者进一步研究未来自主无人机制导的最佳解决方案。

在本书翻译期间,感谢国防科学技术大学研究生潘崇煜、吴雪松、凌黎华、孔维杰、王震、张文龙、顾天豪、钟道等完成有关章节的整理工作;感谢谭双鹏等同志辛苦完成主要章节的校对工作;感谢国防工业出版社编辑辛俊颖等同志在本书出版过程中的辛勤劳动。感谢清华大学张钹院士和中国航空工业集团公司无人办王英勋教授对于本书的有力推荐。本书的出版得到了国家安全重大基础研究项目、国家自然科学基金项目(61403410,61403406)、国防科学技术大学“青年拔尖人才培养计划”和“研究生科技创新计划”等项目的支持,并获得总装备部装备科技译著出版基金资助,在此一并表示感谢。

由于译者水平有限,书中难免存在一些问题和不足,欢迎读者批评指正。

译者

2015年4月25日于长沙

# 前 言

无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)是航空航天工业中发展速度最快、最具活力的一个领域。随着无人机的快速发展及其应用领域的不断扩大,无人机设计人员面临着新的问题。尽管目前无人机大多用于军事领域,如情报、监视、侦察任务,作战行动(打击任务、压制和/或摧毁敌军及其设施)等,但未来在民用领域也具备巨大的发展潜力,例如:边防巡逻、森林火灾监测和消防、非军事安全行动(包括监视工业生产、公路/铁路基础设施、矿产勘探、沿海侦察、管道监控、喷洒化肥和杀虫剂、航拍、土地测绘、环境监测、运输、收集科学数据等)。

由于无人机一般被视为空中机器人,因此无人机设计人员密切关注成像、通信、光电传感器系统、传感器融合等技术,以期为操作员提供可靠的视觉信息,从而确保飞行员能够做出有关未来飞行路径的正确决策。这些都是众多文献广泛讨论的话题。从控制论的角度来看,有关生成飞行员动作的控制器的文献并未提出任何新的概念。

然而,相关科技文献着重探讨了航迹的生成与调整、任务分配与调度等问题。通过对这些问题的探讨,可帮助操作员在各种潜在的任务想定中选择从一个位置到另一个位置的最优路径,改进下一代无人机的设计,从而确保最大程度地降低操作员在任务中的参与程度。由于无人机的自主制导飞行在许多方面与巡航导弹类似,因此这种无人机的制导控制系统可以参照现有的巡航导弹进行设计。然而,由于无人机是在高风险环境下工作的,因此,感知和规避自然障碍物与人工障碍物、重建飞行路径的能力是无人机应当具备的一个重要特征。为此,我们必须在无人机的制导与控制系统中嵌入相应的算法。

在许多情况下,无人机被描述为单个飞行器(配备相关监视传感器)或无人机系统,通常由3~6个无人机平台、1个地面控制站以及保障设备组成。我们可以采用“领航机”操作无人机,同时通过“领航机”接收来自地面任务控制单元的指令,从而解决无人机集群飞行控制的问题。为了使无人机操作更加容易,无人机应该具备人工智能(Artificial Intelligence, AI)特征。应该指出的是,导弹作为一种无

人飞行器,具有一定的人工智能特征,因为导弹是在制导律的导引下击中目标的,并且其中一部分导弹通过模仿“捕食者”的行为来追击目标。

令人惊讶的是,目前关于下一代无人机的政策主要关注发展更加先进的传感器、通信和控制设备,提高有效载荷能力、耐力以及无人机的杀伤力。这些研究领域获得了巨额资助,这与自主无人机制导与控制领域形成了鲜明的对比。此外,根据设想,未来的自主无人机可能通过模仿飞行员动作的计算机程序来进行控制。当然,未来的无人机应当具备一些人工智能特征,以反映飞行员在特定态势下的反应。然而,我们不可能,至少近期不可能,编写出极其复杂、具备高可靠性的计算机程序,然后在机载计算机上同时使用这些程序、所需相关传感器以及其他设备,来满足有效载荷或者其他需求。此外,为了解决无人化致命性能力的问题,我们必须了解有关参数,而这些参数又与前述计算机程序中使用的参数不同,因此,无人机制导律逻辑上需要采用与导弹类似的参数来创建。需要再次强调的是,导弹也是一种无人飞行器(无人机)。有关军事专家近期强调了无人系统控制领域通用性的重要性。然而,我们目前似乎并未确定控制的通用性究竟是否以制导律为起点。

无人机制导不同于导弹制导,其目标也是不同的,取决于无人机具体的应用领域。当无人机执行简单的导航任务时,如航路点跟踪,可以采用修正的导弹制导律,以达到满足速度要求等目的;而在执行复杂任务时,如空中加油、多机协同制导,制导问题将会变得更为复杂。这类会合问题要求彼此保持距离固定、速度一致。为了解决普遍存在的无人机制导问题,我们应该研发通用性更强的制导律。而在这个过程当中,不应忽视导弹制导和无人机制导之间的内部联系。

本书作者提出了一种可实现平行导引的导弹制导律。这种制导律可视为一种自然规律,“捕食者”及后来进化出的人类,自古以来就已经在应用这种规律了。作者在其另一本著作《现代导弹制导》中详细地介绍了此类制导律的研究方法。本书将对这些观点进行提炼概括。因此,本书将适用于导弹和无人机的多种制导律都纳入了考虑的范围。

第1章:介绍了无人机制导的基本问题。

第2章:分析了作为侧向运动控制手段的比例导引法(Proportional Navigation, PN)和平行导引法,其中比例导引法在本书中被划归为控制问题。

第3章:详细地介绍了基于李雅普诺夫(Lyapunov)方法的一类制导律,这种制导律可以提高比例导引法针对机动和非机动目标制导的效率,被视为比例导引法之所以能够得到广泛应用的理由之一。作者提出了有/无轴向加速度指令的导弹

的广义平面模型和三维会合模型的解析表达式,并使用李雅普诺夫-贝尔曼(Lyapunov-Bellman)方法来选择制导律参数。此外,作者还考虑了无人机的广义制导问题。

第4章:分析了比例导引制导系统,这种系统可在基于伴随法的时域中控制无人飞行器的侧向运动。

第5章:从频域的角度分析比例导引制导系统,所得到的脱靶量解析表达式可用于设计制导和控制系统,并且有助于分析制导系统的参数对系统性能的影响。为此,作者考虑了包含目标模型在内的广义制导系统模型,分析了频率响应和阶跃响应之间的关系,并提出了确定脱靶量最大振幅所需最优频率的方法。

第6章:参照经典控制论,对比例导引法进行了改进。该方法利用前馈/反馈控制信号,可使实际加速度接近制导律所生成的指令加速度。此外,本章还验证了这种制导律对于高机动目标的效率。

第7章:分析了比例导引制导系统在各种噪声影响下的性能,并提出了比例导引制导系统的解析表达式。

第8章:介绍了无人机制导在各个领域中的实际应用不断扩展的情况,设计不同的制导律解决无人机的不同应用问题。实现这些制导律的算法主要是在以下三个应用领域中进行测试:监视问题、加油问题以及无人机集群运动控制问题。

第9章:主要介绍了仿真模型。仿真模型可以有效地分析制导律的性能,并对不同的制导律进行分析比较。

第10章:讨论了制导律和控制律的一体化设计问题。之所以要讨论这个问题,是因为飞行器系统的一体化设计正受到越来越多的关注。

第11章:介绍了如何将前文讨论的制导律应用于助推段拦截系统,该类系统应装备下一代拦截弹。需要特别注意的是从无人机上发射的机载拦截弹。此外,本章还介绍了拦截弹的特殊特征和确定最优制导律的不同方法。

最后一章关注的是对任何新的理论方法通常持怀疑态度的工程师们。通过听取专为科学家和工程师开设的制导控制专业讲座,作者明白了一个道理,即任何一门理论课程都须经历一个复杂的实践过程。

列奥纳多·达·芬奇(Leonardo da Vinc)在《Notebooks》(笔记)(1508-1518年)中这样写道:“没有科学理论基础的实践犹如没有舵和罗盘的航行,无法把握前进的方向。实践应当始终建立在理论知识的基础之上。”

书中提出的制导律与知名科幻作家艾萨克·阿西莫夫(Isaac Asimov)在小说



《I, Robot》(我是机器人)中的描述的“机器人三大原则”完全一致:

◆ 第一条:机器人不得伤害人类。此外,不可因为疏忽危险的存在而使人类受害。

◆ 第二条:机器人必须服从人类的命令,但命令违反第一条内容时,则不在此限。

◆ 第三条:在不违反第一条和第二条的情况下,机器人必须保护自己。

民用领域必须严格遵守以上三条规定;而在军事应用领域当中,我们必须注意,第一条中的“人类”是指应用制导律来实施自我保护的人。艾萨克·阿西莫夫想必也会对此表示认同。

和因简易而应用广泛的比例导引法一样,本书讨论的制导律也十分简单。

据了解,国防和航空航天工业正面临着巨大的困难,难以吸引并留住科学家和工程师等人才。美国国防部约 13000 名科学家将在未来 10 年内退休,然而却没有足够的毕业生来接替他们的工作。本书可用作航空航天专业研究生课程的基础教材,也可用于指导研究人员和工程师的日常实践。作者希望本书能够为航空航天科学家与工程师提供新的思路,从而切实为无人机系统的性能带来显著的提升。读者可通过网站 [www.randtc.com](http://www.randtc.com) 获取更多相关信息和帮助。

最后,本书献给丹尼尔(Daniel)和卡米拉(Camilla)。

Rafael Yanushevsky (拉斐尔·雅诺舍夫斯基)

# 目 录

第 1 章 制导的基本原理	1
1.1 引言	1
1.2 制导过程	5
1.3 导弹制导	6
1.4 巡航导弹与无人机的制导	7
1.5 运动表达	8
1.6 视线(LOS)	10
1.7 纵向运动和侧向运动	12
参考文献	13
第 2 章 侧向运动的控制	14
2.1 引言	14
2.2 平行导引法	14
2.3 比例导引法:平面会合	16
2.4 比例导引法:三维会合	18
2.5 增广比例导引法	19
2.6 比例导引法的控制问题	20
2.7 增广比例导引的控制问题	22
2.8 最优比例导引法	23
参考文献	24
第 3 章 纵/侧向运动的控制	26
3.1 引言	26
3.2 制导修正控制	27
3.3 设计控制律的 Lyapunov 方法	28
3.4 Bellman - Lyapunov 方法:最优制导参数	31
3.4.1 非机动目标的最优制导	31

3.4.2 最优增广制导律 .....	34
3.5 修正线性平面交会模型 .....	35
3.6 一般的平面模型 .....	36
3.7 三维会合模型 .....	39
3.8 广义制导律 .....	41
3.9 改进的广义制导律 .....	45
3.10 实例 .....	46
参考文献 .....	50
第4章 比例导引制导系统的时域分析 .....	52
4.1 引言 .....	52
4.2 无惯性的PN制导系统 .....	53
4.3 伴随法 .....	54
参考文献 .....	59
第5章 比例导引制导系统的频域分析 .....	60
5.1 引言 .....	60
5.2 伴随法:广义模型 .....	61
5.3 频域分析 .....	64
5.4 稳态脱靶量分析 .....	72
5.5 摆动式机动分析 .....	72
5.6 实例 .....	74
5.7 频率分析与脱靶量阶跃响应 .....	75
5.8 有界输入/有界输出稳定 .....	78
5.9 广义制导模型的频率响应 .....	79
参考文献 .....	82
第6章 实现平行导引的制导律设计:频域方法 .....	83
6.1 引言 .....	83
6.2 新古典导弹制导理论 .....	84
6.3 伪古典导弹制导理论 .....	88
6.4 实例系统 .....	90
6.4.1 平面交会模型 .....	91
6.4.2 多维交会模型 .....	95

参考文献 .....	96
第7章 随机输入条件下制导律性能分析 .....	98
7.1 引言 .....	98
7.2 随机过程浅析 .....	99
7.3 目标随机机动 .....	102
7.4 噪声对脱靶量的影响分析 .....	104
7.5 目标随机机动对脱靶量的影响 .....	109
7.6 计算方面 .....	110
7.7 实例 .....	112
7.8 滤波 .....	121
参考文献 .....	122
第8章 无人机制导 .....	123
8.1 引言 .....	123
8.2 基本制导律和基于视觉的导航 .....	126
8.3 广义无人机制导律 .....	132
8.3.1 航路点制导问题 .....	132
8.3.2 会合问题 .....	133
8.3.3 有条件会合问题 .....	135
8.4 无人机集群制导 .....	137
8.5 避障算法 .....	140
参考文献 .....	142
第9章 制导律性能测试 .....	144
9.1 引言 .....	144
9.2 作用于无人机上的力 .....	146
9.3 参考坐标系及坐标转换 .....	149
9.4 无人机动力学模型 .....	151
9.5 自动驾驶仪和执行器模型 .....	157
9.6 导引头模型 .....	162
9.7 滤波与估计 .....	165
9.8 $\text{Kappa}$ 制导 .....	171
9.9 Lambert 制导 .....	172

<b>9.10 无人机仿真模型</b> .....	174
9.10.1 六自由度仿真模型 .....	175
9.10.2 三自由度仿真模型 .....	183
参考文献.....	187
<b>第10章 一体化设计</b> .....	189
<b>10.1 引言</b> .....	189
<b>10.2 一体化制导与控制模型</b> .....	192
<b>10.3 控制律合成</b> .....	200
10.3.1 标准泛函最小化 .....	200
10.3.2 特殊泛函最小化 .....	202
<b>10.4 合成与分解</b> .....	206
参考文献.....	210
<b>第11章 面向无人机发射的助推段拦截弹制导律</b> .....	211
<b>11.1 引言</b> .....	211
<b>11.2 面向助推段防御的杀伤拦截器</b> .....	213
<b>11.3 导弹模型开发和制导律参数选择</b> .....	216
<b>11.4 末段需求与制导律效率比较分析</b> .....	220
11.4.1 平面模型 .....	220
11.4.2 三自由度模型:标称弹道.....	225
11.4.3 三自由度模型:阶跃/摆动式目标机动 .....	230
<b>11.5 应用于助推段的先进制导律</b> .....	234
11.5.1 拦截弹模型 .....	234
11.5.2 仿真结果:非机动目标.....	237
11.5.3 仿真结果:成型项的影响.....	242
<b>11.6 有轴向控制条件下的拦截弹性能</b> .....	244
11.6.1 杀伤拦截器的轴向控制 .....	244
11.6.2 拦截弹的轴向控制 .....	248
<b>11.7 Lambert 制导的对比分析</b> .....	253
参考文献.....	256
术语表.....	257
附录 A .....	262

<b>A.1 Lyapunov 方法</b> .....	262
<b>A.2 Bellman – Lyapunov 方法</b> .....	263
参考文献 .....	265
<b>附录 B</b> .....	267
<b>B.1 Laplace 变换</b> .....	267
<b>B.2 定理的证明</b> .....	267
参考文献 .....	269
<b>附录 C</b> .....	270
<b>C.1 气动回归模型</b> .....	270
参考文献 .....	271
<b>附录 D</b> .....	272
<b>D.1 Runge – Kutta 法</b> .....	272

# 第1章 制导的基本原理

## 1.1 引言

人类的自然进化过程也包括了复杂系统的发展进步。这类系统被人们当做是一种抵御外敌(即所谓将战争视为改善其生活条件主要途径的人)的手段,也可以帮助人们实现工作简单化。韦氏(Webster)词典把“机器人”(robot)定义为“由人类设定其执行功能的一种自动化设备”。根据这种定义,无人机(也称为遥控无人驾驶飞机)可以被视为机器人。此外,自从人类开发了智能技术,导弹也可被划归为机器人的一种。它可以替代投掷的石块、掷出的长矛、射出的子弹、扔出的炸弹乃至发射的火箭,其防御性/破坏性功能取得了明显的提升,因为导弹通过特定的人工智能,能够依据移动目标的行为来改变自身的弹道。

一旦某种科学名词被来自特定领域的专家提出后,其科学术语便被赋予精准的定义。尽管如此,随着科学学科及其专业化趋势的发展,应用于某一特定领域的术语通常在拥有自身术语体系的另一领域也有可能具备适用性。由于存在这种术语重叠现象,导致难以做到表述清晰、严谨。例如,无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)也称为遥操作飞行器(Remotely Piloted Vehicle, RPV)、遥控无人驾驶飞机(Drone)、机器人飞机(Robot Plane)、无人飞行器(Pilotless Aircraft)、无人机系统(Unmanned Aircraft System)等。当用英文进行表述时,我们甚至无法解释为何通常用缩略语“UAV”来替代表述更为精准的全称“无人机系统”(Unmanned Aircraft Systems)。在不同的出版物当中,缩略语 UAV 表示的意义也不尽相同,其中包括无人机(Unmanned Aerial Vehicle)、无人空中平台(Unmanned Air Vehicle)、无人驾驶空中飞行器(Uncrewed Aerial Vehicle)、无人自主平台(Unmanned Autonomous Vehicle)、无人航空平台(Unmanned Airborne Vehicle)、无人飞行器(Unmanned Aircraft Vehicle)等。尽管存在这种术语上的混乱,但是我们可以明确一点,即导弹,作为无人机的一种,被排除在外。

今后,我们将用以下术语来描述这一大类无人机。

无人机(UAV):是指机上无人,可通过遥控或自主实现飞行的空间穿越平台。

根据美国国防部的定义,无人机是指机上无操作员,利用空气动力提供升力,能够自主飞行或遥控驾驶,可一次性消耗或可回收,且可携带致命性或非致命性载荷的航空飞行器。无人机按照结构可分为固定翼无人机、垂直起降(Vertical Take-

Off and Landing, VTOL) 无人机、短距起降 (Short Take-Off and Landing, STOL) 无人机、旋翼无人机 (rotocraft) 以及无人直升机五类。

导弹 (Missile) : 是指采用飞行路径控制措施、并且携带致命性装置的空间穿越无人平台。制导导弹只考虑在地球表面上使用, 因此制导鱼雷不符合上述定义。导弹一般按照其发射的物理区域和目标所在的物理区域来进行分类。制导导弹可以分为四大类, 即地对地/面对面、地/面对空、空对地/面和空对空。

巡航导弹 (Cruise Missile) : 是指能像飞机一样飞行, 携带致命性装置, 可消耗的自导引无人飞行器。它与传统导弹相似, 也是依据发射的物理区域来进行分类的, 主要分为陆基或地射巡航导弹、海基或海射巡航导弹以及空射巡航导弹。巡航导弹与无人机的不同之处在于, 巡航导弹的武器是集成在飞行器上的, 并且飞行器本身在任务计划中是要牺牲的。巡航导弹本质上属于飞航炸弹 (Flying Bomb), 它是一种装有升翼的制导导弹, 大部分都采用喷气式推进系统, 以保障持续飞行, 并携带弹头飞行数百英里以极高精度命中目标。为了区分无人机和巡航导弹, 我们将无人机定义为“可重用的无人制导飞行器”, 而巡航导弹则是“不可重用的武器”, 尽管它也是无人飞行器, 并且在某些场合采用了遥控手段。现代的巡航导弹为了躲避雷达探测, 通常采用自导航方式, 以超声速或高亚声速在低空进行非弹道飞行。

美国在第一次世界大战期间, 首次尝试使用无人驾驶飞机。它通过制导飞向并接近目标, 然后像海军鱼雷的机载弹药一样, 以不关机俯冲的方式与目标相撞。1916—1917 年期间, 美国利用一架名为“休伊特 - 斯佩里” (Hewitt-Sperry) 的自动飞机样机开展了一系列简短的飞行测试, 以证明这个想法可行。然而, 美国在这次战争中并未将此样机投入作战。随后, 美国生产了 20 架“虫子” (Bug) 无人机, 并于 1918 年 10 月进行了一次成功的飞行测试。第一次世界大战结束后, 除“虫子”无人机项目直到 1925 年才被终止以外, 其他所有项目都被中断。首架无人机的问世推动了无线电控制“无人靶机” (Pilotless Target Aircraft) 在英国和美国于 20 世纪 30 年代的蓬勃发展。尽管在这 10 年间鲜有导弹研究项目, 然而航空学和电子学的发展成果随后也被应用于导弹。1936 年, 美国海军开展了另一项旨在为防空炮训练提供真实靶机的无人机计划, 但是这个计划直接影响了导弹的发展。1937 年, 美国测试了一款名为“柯蒂斯” N2C - 2 (Curtiss N2C - 2) 的无线电控制的无人机。美国空军在战争期间采购了数百架“卡尔维” PQ - 8 (Culver PQ - 8) 无人机, 并改进了“卡尔维” PQ - 14 靶机。“卡尔维” PQ - 14 靶机主要用于防空训练, 与同样是卡尔维飞机公司生产的轻型双座民用运动型“候补军官” (Cadet) 无人机类似, 其区别在于前者是通过无线电进行控制的。

在第二次世界大战期间的小规模作战行动中, 美国也将无线电控制飞机用作航空鱼雷, 其中包括改进型的 B - 17 和 B - 24 轰炸机。尽管没有取得引人注目的



成就,这仍然是一次值得赞许的尝试。1941年1月,美国开始将TG-2鱼雷机和BG-1俯冲轰炸机改装成导弹。许多导弹研发项目是在第二次世界大战期间启动的。当时最先进的导弹是德国的地对地导弹V-1(德国FZG-76)和V-2(德国A-4)。字母“V”代表“复仇武器”(Vergeltungswaffe)。第二次世界大战结束后,随着喷气式飞机的迅速发展,人类彻底改写了空对空作战的特征。喷气式飞机的高速和机动性标志着空中混战的结束和超视距空战需求的产生。解决这个问题的办法就是空对空或地对空导弹。在战后高空大气研究的基础上,人们又研发了高空火箭。如何提高导弹制导及其精准性是研发过程中最重要的问题。论及战后的无人机计划,美国开发了不同系列的靶机;直到越南战争爆发,“火蜂”(Firebee)等无人机才开始被用于执行侦察任务。

在过去几年里,以色列在无人机领域做出了杰出的贡献。一系列不同尺寸、配置和特征的无人机逐渐问世,其中包括遥控无人机,甚至有一部分还利用复杂制导和控制系统,在预编程飞行计划的基础上能够实行自主飞行。美国目前拥有五类重要的无人机:空军的“捕食者”(Predator)和“全球鹰”(Global Hawk)、海军和海军陆战队的“先锋”(Pioneer)以及陆军的“猎人”(Hunter)和“影子”(Shadow)。美军广泛使用的“猎人”和“影子”无人机是直接从以色列的无人机系统衍生出来的。海湾战争期间,“先锋”无人机得到了成功应用。海湾战争结束之后,无人系统的重要性日益彰显。首项先进技术验证计划——“捕食者”无人机在巴尔干半岛上空成功地验证了自身的重要价值,其部分现有版本甚至还装备了用于打击目标的“地狱火”(Hellfire,又译为“海尔法”)导弹。“全球鹰”喷气式无人机,在阿富汗战争期间得到了成功的应用。目前已经投入使用或正在开发的无人机都是远程长航时平台,并且大量无人机都向着多任务角色发展,可执行从持久监视到搜索并摧毁目标的一系列任务。

**制导无人机系统:**是指由无人机及其发射、制导、测试和操控设备等组合而成的系统。

**无人机制导系统:**是指一组测量装置的组合,可测量制导飞行器相对于目标的位置,并根据制导律修改飞行路径,以确保完成飞行任务目标。而导弹制导系统通常由感知、计算和控制组件构成,其飞行目的是摧毁目标。无人机制导系统包含任务控制单元的操作员,目标可能是由操作员生成的虚拟目标,用以控制无人机飞行。

**制导律:**是指决定无人机加速度的指令生成算法。

制导导弹系统与传统武器(枪、火箭、炸弹等)的战术责任相似。但是,对于传统武器而言,目标的有关信息是通过观测获取的。评估完成之后,武器便进行瞄准并发射。从子弹、火箭瞄准或炸弹空投时刻起,弹道完全取决于重力、风向以及弹体的弹道学原理。从发射弹体到击中目标的这段时间称为飞行时间。相比于子