



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

Introduction to Unmanned Aircraft Systems

无人机系统导论

[美] Richard K. Barnhart Stephen B. Hottman 编著
Douglas M. Marshall Eric Shappee

沈林成 吴利荣 牛轶峰 吴立珍 译
刘永坚 审校



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

无人机系统导论

Introduction to Unmanned Aircraft Systems

【美】Richard K. Barnhart Stephen B. Hottman

Douglas M. Marshall Eric Shappee 编著

沈林成 吴利荣 牛轶峰 吴立珍 译

刘永坚 审校

国防工业出版社

著作权合同登记 图字:军-2013-052 号

图书在版编目(CIP)数据

无人机系统导论/(美)巴恩哈德(Barnhart, R. K.)等
编著;沈林成等译. —北京:国防工业出版社, 2014. 9
(无人机系统自主控制技术丛书)

书名原文: Introduction to unmanned aircraft systems
ISBN 978-7-118-09659-0

I. ①无... II. ①巴... ②沈... III. ①无人驾驶
飞机-研究 IV. ①V279

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 192284 号

Introduction to Unmanned Aircraft Systems, First edition, by Richard K. Barnhart
Stephen B. Hottman Douglas M. Marshall Eric Shappee

ISBN 978-1-4398-3521-0

© 2012 by Taylor & Francis Group, LLC

CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, an Informa business.

All Rights Reserved.

版权所有,侵权必究。

本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签,无标签者不得销售。



开本 710 × 1000 1/16 印张 14½ 字数 270 千字
2014 年 9 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 70.00 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

序

我们很高兴向广大读者推出《无人机系统导论》(Introduction to Unmanned Aircraft Systems)第1版。众所周知,无人机系统(UAS)产业是一个高速变化、科技不断发展的行业。本书旨在这种背景下,确认和综述无人机系统操作使用的基础性问题,从而为广大读者指明无人机系统的基本发展方向,并为进一步的深入研究打下坚实基础。本书是在总结过去探索失败经验的基础之上所取得的成果,可用作大学无人机系统专业学生的教材。各章均由全美各大高校无人机系统领域的顶级专家独立撰写。因此,读者在阅读过程中可能注意到各章的文风有所不同。我们之所以未对不同投稿人的文风进行统一,是为了完全恪守作者的真实意图,从而提高文中的信息含量。本书是站在非工程、民用、操作使用的角度来撰写的,以期提高读者对无人机系统的操作和应用水平,并能在今后各种任务中加以运用。

本书最终得以出版,离不开所有编辑和投稿人的密切合作,感谢他们为本书的撰写所付出的宝贵的时间与心血!本书编辑要感谢所有投稿人及其家人!正是因为你们付出了宝贵的时间与心血,我们最终才能取得令人满意的成果!此外,还要感谢北达科他大学(University of North Dakota)研究生 Kristen Steuver 的精心校对工作!对于你们的辛勤劳动,我们感激不尽!

最后,欢迎广大读者对书中的不足予以批评和指正,以作为与时俱进、再版改进的依据。

Richard K. Barnhart, Stephen B. Hottman
Douglas M. Marshall, Eric Shappee

前 言

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。自主能力是无人机系统的首要特征,主要解决在不确定环境下,无人机系统不依赖于人或人的最少干预下,自主实现“观察-判断-决策-行动”(Observe-Orient-Decide-Act, OODA)整个回路周期的任务能力。随着无人机系统自主能力的不断提高,无人机系统的应用不断拓展,无人机系统对于国家空域系统的访问和使用需求不断增加,不论是军用无人机进入国家空域,还是民用无人机进入国家空域,都要求相应的安全性,这其中涉及到空域集成、适航认证等基本问题,是目前无人机系统技术研究的热点问题。

“2013 中国无人机系统峰会”就以“民用无人机系统等待起飞”为主题重点探讨无人机系统融入国家空域系统面临的诸多挑战性问题。美国国防部先后发布的2011年版和2013年版《无人系统综合路线图》不断强化对无人(机)系统自主能力、空域集成、使用环境等能力需求和技术需求,指出无人系统更高的自主性需求是美国空军未来科技投资的“单一最大的主题”,其优势在于降低人力资源需求,减少对高带宽数据链依赖,缩短任务回路周期,提升任务能力等。空域集成主要解决无人机的适航性,飞行员/操作员的资质认证,以及无人机相关的作战规则、标准和程序等。无人机系统的使用环境主要包括全天候、从低空到高空和在拥挤竞争的空域,这对感知与规避(Sense and Avoid, SAA)能力提出了挑战。无人机系统的感知与规避能力将弥补无人机系统“机上无人”特性与有人机飞行员“看见与规避”(See and Avoid)这两者之间的缺口。

目前,针对无人机的操作使用基本原理相对匮乏的现状,本书以无人机系统自主能力发展趋势为引领,从非工程、民用以及使用者的视角,首先概述了无人机的发展简史,分析了无人机系统的各个组成单元,然后以美国航空监管系统为例,剖析了无人机的航空监管体系,介绍了无人机授权认证过程,分析了无人机系统的运行管控问题;在此基础上,阐述了无人机系统的机载传感器和感知与规避技术,分析了无人机系统的安全问题和人因工程,重点分析了自动化(Automation)和自主性(Autonomy)的区别,介绍了目前关于自主性等级划分的主要观点,包括自主等级和自主系统参考框架,最后介绍了无人机系统在地理空间中的应用,展望了无人机系统的未来市场,以及国际舆论关注的热点问题。

本书原著者分别为:第1章“无人机系统发展简史”,美国陆军预备役中校 Charles Jarnot;第2章“无人机系统的组成”,堪萨斯(Kansas)州立大学的 Joshua Brungardt;第3章“无人机航空监管体系——以美国为例”,新墨西哥州立大学的 Douglas M. Marshall(原书第三作者);第4章“无人机授权认证的过程”,新墨西哥州立大学的 Glen Witt 和 Stephen B. Hottman(原书第二作者);第5章“无人机系统的空域运行”,安柏瑞德(Embry-Riddle)航空大学的 Theodore Beneigh;第6章“机载传感器与有效载荷”,新墨西哥州立大学的 Douglas M. Marshall;第7章“无人机系统感知与规避”,南佛罗里达理工大学的 Lisa Jo Elliott,新墨西哥州立大学的 Jeremy D. Schwark 和 Matthew J. Rambert;第8章“无人机系统安全评估”,堪萨斯州立大学的 Eric J. Shappee(原书第四作者);第9章“无人机系统中人的因素”,新墨西哥州立大学的 Igor Dolgov 和 Stephen B. Hottman;第10章“无人机系统的自动化与自主性”,南佛罗里达理工大学的 Lisa Jo Elliott 和白沙导弹试验场的 Bryan Stewart(本章内容补充较大);第11章“面向地理空间数据采集的无人机系统”,新墨西哥州立大学的 Caitrina M. Steele 和南佛罗里达理工大学的 Lisa Jo Elliott;第12章“无人机系统的未来”,堪萨斯州立大学教授 Richard K. Barnhart(原书第一作者)。关于作者的详细介绍请参阅附录。本书在翻译过程中,力争保持原书风格,但为方便理解和内容完整,书中章节有所调整和补充。

在本书编译期间,感谢谭双鹏等同志不辞辛苦完成有关章节的校对工作;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;感谢空军装备研究院总体所有同志付出的劳动。感谢清华大学张钹院士和北京航空航天大学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、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,在此一并表示感谢。

本书虽然定位是入门级大学教科书,但其所涉及的自主能力、感知与规避、人因工程等,使得本书无论对于自动化、无人机系统等相关专业的初学者,还是对于该领域专家,都是一部必不可少的参考书。

由于译者水平的限制,书中难免存在一些问题和不足,欢迎读者批评指正。

译者

2014年5月31日于长沙

目 录

第 1 章 无人机系统发展简史	1
1.1 起源	1
1.2 有效控制的需求	2
1.3 无线电和自动驾驶仪	2
1.4 航空鱼雷:首架现代无人机(1918 年 3 月 6 日)	3
1.5 无人靶机	4
1.6 第二次世界大战期间美国海军的无人攻击机	6
1.7 第二次世界大战期间德国的 V-1“蜂鸣”飞弹(Buzz Bomb)	8
1.8 第二次世界大战期间德国的“槲寄生”(Mistletoe)	9
1.9 早期无人侦察机	9
1.10 雷达诱饵:20 世纪 50 年代至 70 年代	10
1.11 远程侦察无人机系统:20 世纪 60 年代至 70 年代	10
1.12 首架无人直升机系统:20 世纪 60 年代至 70 年代	11
1.13 寻求自主操作	11
1.14 双尾桁推进式无人机的诞生	12
1.15 沙漠风暴:1991 年	13
1.16 克服飞行员的偏见	14
1.17 无人机系统会取代有人机吗?	15
思考题	15
参考文献	15
第 2 章 无人机系统的组成	16
2.1 无人机系统(UAS)的组成	16
2.2 遥控驾驶飞行器(RPA)	16
2.2.1 固定翼	17
2.2.2 垂直起降	17
2.3 指挥与控制单元	18
2.3.1 自动驾驶仪	18
2.3.2 地面控制站	19

2.4	通信数据链	21
2.4.1	视距内(LOS)	21
2.4.2	超视距(BLOS)	21
2.5	任务载荷	22
2.5.1	光电	22
2.5.2	红外	23
2.5.3	激光	24
2.6	发射与回收	24
2.7	人的因素	26
第3章	无人机航空监管体系——以美国为例	27
3.1	美国航空监管体系	27
3.1.1	引言	27
3.1.2	美国航空条例历史	27
3.1.3	美国联邦航空管理局	28
3.1.4	执法和制裁	30
3.2	国际航空条例	31
3.3	标准和条例	34
3.4	规则制定的过程	36
3.5	有关无人机的现行规定	38
3.6	FAA 对无人机系统的执法权	42
3.7	前进之路:无人机系统管理条例的未来	45
3.8	结论	46
	思考题	47
第4章	无人机授权认证的过程	48
4.1	引言	48
4.1.1	背景	48
4.1.2	常规国家空域系统	48
4.1.3	无人机系统分类	50
4.2	无人机系统空域准入历史	51
4.2.1	联邦航空管理局备忘录的指示	52
4.2.2	改变空域准入的新力量	53
4.3	授权认证(COA)或豁免的启用	54
4.4	联邦航空管理局的指南文件	55
4.5	无人机项目办公室的创建	56
4.5.1	授权认证的焦点	56

4.5.2 授权认证申请的数据和步骤	57
4.6 无人机准入国家空域系统的未来发展	59
4.7 结论	61
参考文献	62
第5章 无人机系统的空域运行	64
5.1 无人机系统空域运行障碍	64
5.2 无人机系统空域运行指南	65
5.3 空域定义	65
5.4 公共用户:授权证书	67
5.5 民间用户:专用适航性/试验性证书	67
5.6 飞行操作	68
5.7 人员资质	70
思考题	72
第6章 机载传感器与有效载荷	73
6.1 引言	73
6.2 无人机系统:“采集平台”抑或飞行器?	73
6.3 监管的挑战	74
6.4 传感器和有效载荷:有区别吗?	75
6.5 感知与规避的动力学和系统	76
6.6 目标驱动型传感器	78
6.7 技术和系统的限制	79
6.8 结论	80
思考题	81
第7章 无人机系统感知与规避	82
7.1 引言	82
7.1.1 检测、看见与规避:有人机	82
7.1.2 飞行员的看见与规避职责:有人机	82
7.1.3 检测、感知与规避:无人机系统	83
7.2 检测、看见与规避的信号检测方法	83
7.2.1 响应偏差与响应准则	84
7.2.2 可辨性	85
7.3 检测、感知与规避技术	86
7.3.1 协作式技术	86
7.3.2 非协作式技术	87
7.3.3 改造性技术	89

7.3.4 能见度替代方案.....	91
7.4 结论.....	92
思考题	94
参考文献	94
第8章 无人机系统安全评估	97
8.1 引言.....	97
8.2 危险分析.....	97
8.2.1 目的.....	97
8.2.2 预先危险列表.....	97
8.2.3 预先危险分析.....	98
8.2.4 操作危险评估与分析.....	99
8.2.5 变更分析	100
8.3 风险评估	100
8.3.1 目的	102
8.3.2 开发	102
8.3.3 使用	103
8.4 安全性评价	104
8.4.1 风险评估	104
8.4.2 飞行测试卡	104
8.4.3 适航性认证	104
8.5 事故调查中的考虑因素	105
8.5.1 软件和硬件	106
8.5.2 人的因素	106
8.5.3 建议	107
8.6 结论和推荐	107
思考题.....	108
参考文献.....	108
第9章 无人机系统中人的因素.....	109
9.1 引言	109
9.2 无人机系统事故和意外分析	110
9.3 无人机系统中人的因素	116
9.3.1 操作环境	117
9.3.2 人-系统集成	117
9.3.3 系统自动化	118
9.3.4 机组规模、编成和训练.....	118

9.4 结论和未来研究方向	119
思考题	121
参考文献	121
第 10 章 无人机系统的自动化与自主性	125
10.1 自动与自主	125
10.2 工作负荷	126
10.2.1 主观负荷评估	126
10.2.2 客观负荷评估	127
10.3 态势感知	128
10.4 技能下降	128
10.5 信任度	129
10.5.1 可靠性	130
10.6 自动化类型与等级	131
10.6.1 自动化类型	131
10.6.2 自动化等级/以人为中心的分类	133
10.7 以技术为中心的分类	134
10.7.1 美国空军研究实验室	134
10.7.2 美国国家航空航天局	136
10.7.3 美国国家标准与技术研究所	139
10.7.4 其他机构	141
10.8 自主等级分析(ALFUS)	143
10.8.1 自主等级 0	143
10.8.2 自主等级 1~3(低级)	144
10.8.3 自主等级 4~6(中级)	144
10.8.4 自主等级 7~9(高级)	144
10.8.5 超越 10 级	144
10.9 自主系统参考框架	145
10.9.1 自主能力面临的挑战	145
10.9.2 自主系统参考框架	146
10.9.3 自主能力关键技术	149
10.10 结论	152
思考题	153
参考文献	153
第 11 章 面向地理空间数据采集的无人机系统	159
11.1 引言	159

11.1.1	遥感无人机系统	159
11.1.2	传感器	160
11.1.3	实时数据传输	162
11.1.4	静态影像的地理校正与拼接	162
11.2	应用	164
11.2.1	环境监测与管理	164
11.2.2	交通传感	167
11.2.3	灾害响应	168
11.3	结论	173
	思考题	174
	参考文献	174
第 12 章	无人机系统的未来	178
12.1	引言	178
12.2	预期市场增长	178
12.2.1	私有部分	179
12.2.2	公共部分	179
12.3	基础设施	180
12.3.1	地基基础设施	180
12.3.2	常规空域准入	181
12.3.3	培训与认证	181
12.4	就业机会	182
12.5	飞行器演化	182
12.5.1	小型化	182
12.5.2	动力解决方案	183
12.6	未来概念	185
12.6.1	无人作战飞机(UCAV)	185
12.6.2	无人机集群	186
12.6.3	“戈尔贡”凝视	186
12.6.4	通用性和可扩展性	187
12.7	五年后及更远的未来	187
	思考题	188
	参考文献	188
附录 1	意外风险评估	189
附录 2	原书编者简介	191
附录 3	原书章节作者简介	194
附录 4	术语表	197

第1章 无人机系统发展简史

1.1 起 源

无人机的历史实际上就是所有飞机的历史。从多个世纪之前中国的风筝优雅地飞翔在空中到第一个热气球的问世,无人飞行器的出现要远早于附带风险的载人飞行器。据传说,中国蜀汉军师诸葛亮(公元180~234年)是早期无人机的运用者之一,他在纸质气球中点燃油灯以加热空气,然后在晚上将气球放飞至敌营上空,使敌人误以为有神力在起作用。到了现代,无人机主要是指能够模仿有人机机动飞行的自主/遥操作的空中飞行平台。多年来,无人机的名称也发生了多次改变。飞机制造商、民航当局和军方各自对其都有不同的命名。航空鱼雷(Aerial Torpedoes)、无线电控制飞行器(Radio Controlled Vehicle)、遥控驾驶平台(Remotely Piloted Vehicle)、遥控飞行器(Remote Control Vehicle)、自主控制平台(Autonomous Control Vehicle)、无人平台(Pilotless Vehicle)、无飞行员的遥控飞机(Drone)以及空中无人平台(即发展为无人机,Unmanned Aerial Vehicles, UAVs)等都曾被用于描述这种“机上无人”飞行机器。

在早期航空领域,无人机的想法具有显著的优势,至少可以使那些极具实践精神的人不必冒丧失生命或者断肢断腿的风险。19世纪90年代,德国航空先驱奥托·李林赛尔(Otto Lilienthal)采用无人滑翔机作为测试平台,进行主升力机翼设计和轻型航空结构的开发。结果,尽管在试验中发生了一些事故,却没有造成人员伤亡,测试也取得了极大的进展。早期的无人机尽管尝试使用了“机上无人”的模式,但由于缺乏令人满意的控制方法,因而限制了其推广使用。航空研究很快转而使用“试飞员”来驾驶这些具有开创性的飞行器,但是这种为了突破无人滑翔机技术而做出的种种尝试也付出了惨痛的代价,甚至连航空先驱李林赛尔也在1896年的飞行试验中不幸遇难。

从现代无人机的使用来看,历史上的无人机常常遵循一致的使用模式——今天所说的3D任务,即危险的、恶劣的、枯燥的任务(Dangerous, Dirty, and Dull)。“危险”是指有人试图击落飞机或者飞行员在操作上可能面临额外的生命危险;“恶劣”是指任务环境可能被化学、生物、放射性物质甚至核污染,使人体不能暴露于其中;“枯燥”是指重复性的任务或者持久性任务,在此类任务中,飞行员易产生疲劳和紧张。目前还有1D,即纵深的(Deep),指的是超越有人机作战半径的任

务,合起来也称为4D。更广泛地,无人系统面临的来自深空、深海、深地等应用的挑战,均是指纵深性质的任务。

1.2 有效控制的需求

莱特兄弟(Wright Brothers)试飞第一架飞机的成功之处主要在于技术上解决了有人驾驶且重于空气的航空器的控制问题。政府斥巨资资助的早期飞机设计师兰利(Langley)博士在与这两个俄亥俄州技工(译者注:指莱特兄弟)的竞争中,也在全力克服如何控制飞机飞行的难题。兰利博士尝试使用了更为复杂、动力更好的飞机,结果却两次因飞行控制问题而使飞机栽进纽约海港。后来,莱特兄弟向新兴的航空界传授了控制飞行的秘诀,即采用翘曲机翼方法进行滚转控制,从而使航空技术获得了巨大进步,并在第一次世界大战期间得到了进一步推广使用。1914—1918年间的战争需求,促成了早期航空事业中一段令人难以置信的技术创新时期。创新涵盖了飞机设计的各个方面,包括动力装置、机身结构、升力机翼配置以及控制面的布局等。正是在这种以结束所有战争为目的的严峻战争考验中,航空业迎来了辉煌时代,并且随着这一轮技术进步使人们逐渐认识到实现有效飞行控制这一关键技术的必要性。

1.3 无线电和自动驾驶仪

正如其他许多改变游戏规则的技术变革一样,一些看似毫无关系的发明以新的方式相互结合起来,便可催生出新的概念。无人机便正是这种情况。在莱特兄弟1903年首次飞行之前,著名发明家尼古拉·特斯拉(Nicola Tesla)早在19世纪90年代后期就提出了利用遥控驾驶飞机作为飞行制导炸弹的想法。特斯拉是在1898年研制出世界上第一枚被称为“遥控自动化”的水下制导鱼雷的工作基础上提出这一概念的。早在1893年无线电问世之前,特斯拉就已经验证了被称为“全频谱火花隙发射机”的早期实用设备。后来,特斯拉还协助研发了频率分离技术。因此,他是许多人心目中现代无线电的真正发明者。

正当电子电力技术天才特斯拉忙于在纽约市建立第一个电力体系之时,另一位发明家埃尔默·斯佩里(Elmer Sperry)——如今以他的名字来命名的著名飞行控制公司的创始人——研制出了第一个实用陀螺控制系统。像特斯拉一样,斯佩里的工作重心最初也是海军的水下鱼雷。他研制出一种三轴机械陀螺仪系统,可以从陀螺仪获取参数,并将其转化为简单的磁信号,进而作用于执行器。对于水中航行器而言,航行速度慢和重量并不是重要问题。正由于此,斯佩里才能在此基础上完善世界上首架实用机械自动驾驶仪的设计。后来,斯佩里又把注意力转向了

正在兴起的航空产业,认为航空业是他的海上发明的潜在市场。其目的并不是操作无人机,而是作为安全装置辅助驾驳早期不稳定的有人机,协助飞行员在恶劣天气条件下保持飞机航向。在机身设计师格伦·柯蒂斯(Glenn Curtis)的帮助下,斯佩里开始将其发明的控制系统应用到早期飞机上。他俩共同组成了一个由飞行器设计师和自动化发明家构成的完美团队。随着战前这一概念取得了巨大进展,在一战期间为对付德国战舰而需要开发新武器的背景下,加之无线电、飞机和机械自动驾驶仪逐一问世,终于促生了世界上第一种实用型无人机——“航空鱼雷”(Aerial Torpedo)。

1.4 航空鱼雷:首架现代无人机(1918年3月6日)

1916年末,随着战争在欧洲肆虐扩张,当时仍处于中立国地位的美国开始通过海军资助斯佩里开发无人航空鱼雷。埃尔默·斯佩里将整个团队全部投入到了当时最艰巨的航空事业中。按照海军的合同指示,斯佩里要建造一种体积小、重量轻的飞机,这种飞机能够在没有飞行员操纵的情况下自行发射,在无人驾驶的条件下通过制导飞行到1000码(914.4m,1码=0.9144m)以外的目标,然后在距离军舰足够近的地方引爆弹头,对军舰形成有效的打击(见图1.1)。由于当时飞机自问世起只有短短13年的历史,即使要造出一架能够携带大型弹头的机身,或者一部带电池的体积较大的无线电设备,沉重的电力致动器和大型机械三轴陀螺稳定装置本身就是令人难以置信的,况且要将这些原始的技术融合起来形成一个有效的飞行剖面,更是令人无法想象。



图1.1 早期无人机(照片由美国航空博物馆提供)

斯佩里指定他的儿子劳伦斯·斯佩里(Lawrence Sperry)来领导在纽约长岛的试飞工作。当美国于1917年中加入第一次世界大战时,这些技术已经实现融合并开始测试。正是由于美国海军提供了大量资金,才使该项目能够经受一系列的挫

折,包括“柯蒂斯”(Curtis)N-9 航空鱼雷曾多次坠毁、各类组件曾完全失效。一切可能出现的差错都出现了,如弹射器故障、引擎停车、多个机身先后因失速、翻转和侧风等原因而坠毁等。然而,斯佩里的团队坚持了下来,最终于1918年3月6日成功地实现了“柯蒂斯”原型机的无人发射,使其平稳地飞行了1000码,并在预定时间和地点俯冲飞向目标,随后成功回收和降落,使其成为世界上第一架真正的“无人机”。无人机系统就这样诞生了。

为了不落后于海军,美国陆军投资提出了一种类似于航空鱼雷的航空炸弹(Aerial Bomb)概念。陆军的努力进一步改进了斯佩里的机械陀螺稳定技术,达到了几乎与海军项目接近的水平。查尔斯·凯特林(Charles Kettering)设计了一架轻型双翼飞机,结合了有人机项目中并不重视的航空稳定性特征(如主翼上反角过大),从而提高了飞机的横滚稳定性,但同时也牺牲了精密性和部分机动性。福特汽车公司曾受命设计了一种新的轻型V-4引擎,动力为41马力(1马力=745.7W),重151磅(68.5kg,1磅=0.4536kg)。降落架采用宽型轮距,以减少着陆时的地面滚转。为了进一步降低成本和强调飞行器的可消耗性,机身除了使用传统的布蒙皮外,还采用纸板和纸质蒙皮。此外,该飞行器还配备了带不可调全油门设置的弹射器系统。

凯特林发明的航空炸弹被命名为“臭虫”(Bug),它具有极高的远距离/高空性能,在多次试飞中飞行了100英里(即160.9km,1英里=1609m)的距离和10000英尺(即3050m,1英尺=0.305m)的高度。为了证明其机身部件的有效性,凯特林建造了一个带有飞行员座舱的模型,以便试飞员能够驾驶飞机。与海军的航空鱼雷不同的是,航空鱼雷后来从未服役和投产,而航空炸弹则是第一种大规模投产的无人机。虽然生产出来为时已晚,未能在第一次世界大战中投入使用,但在战后12~18个月期间仍然在测试中发挥了积极的作用。航空炸弹当时得到了亨利·哈普·阿诺德(Henry “Hap” Arnold)陆军上校的极力支持,他后来在第二次世界大战期间成为负责整个美国陆军航空队的五星上将。1918年10月,当陆军部长牛顿·贝克(Newton Baker)观摩了一次试飞后,该项目得到了极大重视。战争结束后,12架“臭虫”连同数枚航空鱼雷继续在佛罗里达州卡尔斯特罗姆(Calstrom)试验场进行飞行测试。

1.5 无人靶机

令人奇怪的是,战后世界上大多数无人机研究工作并不是以武器平台为方向(如航空鱼雷和航空炸弹等),而是主要集中在无人靶机(Target Drone)的技术应用上。在两次世界大战中间的和平期(1919—1939),飞机的作战能力对地/海面作战效果的影响开始得到了认可,世界各国军队加大了对防空武器的投入,这反过来

又促进了对似实物目标的需求。正是在这种背景下,无人靶机应运而生。无人靶机在检验空战理论方面也发挥了关键作用。英国皇家空军与皇家海军就飞机击沉舰艇的能力展开了激烈的辩论。20 世纪 20 年代初,陆军航空队的比利·米切尔(Billy Mitchell)将军击沉了一艘作为战利品的德国军舰和一些老旧军舰靶标,这令美国海军极为沮丧。对这些行动持相反观点的人认为,一艘全员配备并装备有防空高射炮的战舰可轻易击落来袭飞机。英国就曾用无人靶机飞越配备同种装备的战舰来检验这种观点是否正确。令所有人惊奇的是,1933 年无人靶机在装备了最新式高射炮的皇家海军军舰上空飞行了 40 多次,却从未被击落。因此,无人机技术不仅在确定空中力量作战理论方面发挥了关键作用,而且为美、英、日等国家投入巨资发展航空母舰提供了重要数据,航空母舰在随后的第二次世界大战中所起到的至关重要的作用,也证明了这笔投资的正确性。

美国的无人靶机项目主要是受“斯佩里信使”(Sperry Messenger)轻型双翼飞机研制成功的影响。这种飞机有两个型号,分别是有人驾驶型和无人驾驶型,在军事上既可作为邮机又可作为鱼雷载机使用。美国陆军共订购了 20 架,并于 1920 年将其命名为“信使航空鱼雷”(Messenger Aerial Torpedo, MAT)。然而,在 20 世纪 20 年代初,美国在这方面的努力遭受了重大挫折,因为斯佩里的儿子劳伦斯·斯佩里在一次飞机事故中不幸遇难,斯佩里飞机公司退出了现有人无人机的设计。

由于美国陆军失去了对 MAT 项目的兴趣,因此将注意力转向了无人靶机。1933 年,雷金纳德·丹尼(Reginald Denny)完善了一种无线电遥控飞机,它只有 10 英尺长,采用单缸 8 马力的发动机。陆军将这种飞行器命名为 OQ-19,后又改称为 MQM-33。这种灵活轻便的无人机共生产了约 48000 架,在整个第二次世界大战中成为世界上最受欢迎的无人靶机。

20 世纪 30 年代末,美国海军重返无人机领域,海军研究实验室研制出了“柯蒂斯”N2C-2 无人靶机(图 1.2)。这种靶机重 2500 磅(1134kg),采用径向引擎和



图 1.2 “柯蒂斯”N2C-2 无人靶机(照片由美国海军提供)