



Introduction
to UAV Systems
Fourth Edition

无人机系统导论

(第4版)

[美] Paul Gerin Fahlstrom Thomas James Gleason 著

郭正 王鹏 陈清阳 鲁亚飞 译

侯中喜 审校



国防工业出版社
National Defense Industry Press

WILEY



装备科技译著出版基金

无人机系统导论

(第4版)

Introduction to UAV Systems (Fourth Edition)

[美] Paul Gerin Fahlstrom Thomas James Gleason 著

郭正 王鹏 陈清阳 鲁亚飞 译

侯中喜 审校

国防工业出版社

·北京·

著作权合同登记 图字:军-2013-006 号

图书在版编目(CIP)数据

无人机系统导论:第4版/(美)法尔斯特伦
(Fahlstrom, P. G.), (美)格里森(Gleas, T. J.) 著;
郭正等译. — 北京:国防工业出版社, 2015. 4
书名原文: Introduction to UAV systems (fourth edition)
ISBN 978-7-118-09970-6

I. ①无... II. ①法... ②格... ③郭... III. ①无人驾驶
飞机—研究 IV. ①V279

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 059924 号

Translation from the English Language Edition:

Introduction to UAV Systems 4e by Paul Gerin Fahlstrom, Thomas James

ISBN 9781119978664

Copyright © 2012 John Wiley & Sons, Ltd

All right reserved. This translation published under John Wiley & Sons,
Ltd. No part of this book may be reproduced in any form without the
written permission of the original copyrights holder.

本书中文简体版由 John Wiley & Sons, Ltd. 授权国防工业出版社独家出版发行。
未经出版者书面许可, 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。

※

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 17 3/4 字数 335 千字

2015 年 4 月第 4 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

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

序

《无人机系统导论》第四版既适用于无人机系统的初学者,又适用于已经熟悉无人机系统但想对无人机系统有全局视野、或者是精通无人机系统某一专业领域但想要深入了解与无人机系统相关的其他专业领域的读者。本书基于标准工科教科书和作者所收集整理资料,面向高中文化程度以上读者编写。本书对于无人机领域的从业人员,不论读者是否有技术背景,都具有可读性。为了避免将本书写成涵盖广泛、无所不包的手册,全书多数方程省略了证明过程。读者如果对其中的设计与分析等技术细节感兴趣,可参见相关领域的专业书籍。

本书并非定位于一本介绍空气动力学、图像传感器或者数据链的教科书,但对以上几门学科以及其他与无人机相关学科会提供足够详细的解释说明,以展示这些学科如何支撑一个完整无人机系统的设计,并使读者理解系统总体设计的多学科之间折中权衡的特点。如此说来,本书也可以作为提供系统视角的任一专业领域的辅助性教材。

对于初学者,编者希望本书可以帮助他们了解至少一门无人机相关技术领域并向他们展示即便最简单的数学变换也能体现的总体设计过程中所不可避免的折中权衡。

对于无人机使用者或者操作员,编者希望本书可以帮助他们理解系统技术如何影响无人机任务完成方式以及可以保障完成无人机任务的各项技术。

对于涉及无人机系统设计任一学科的专家读者,编者希望帮助他们更好地理解他们的专业如何在保障整个系统成功运行中发挥不可替代的作用,以及有些事在他们看来无关紧要而其他专业专家却颇为关注的原因。

最后,对于技术经理这类读者,编者希望本书可以帮助他们理解各子系统如何合为一体,在系统设计之初系统集成的重要性,促使他们在选择子系统设计方案时考虑集成问题,并帮助他们理解专家意见,甚至可能在研发的关键阶段提出核心问题。

本书共有六部分,第一部分包括第1、第2章。第1章是关于无人机的历史简介与总览。第2章介绍了无人机的分类与任务。

第二部分包括第3~第7章,涵盖飞行器设计的多个专题,具体包括基础空气动力学,飞行器性能、稳定性与控制,推进与负载,结构与材料。

第三部分包括第8、第9章。其中第8章讨论了任务规划和控制函数,第9章讨论了操作控制。

第四部分包括第10~第12章,涉及飞行器载荷。第10章讨论了通用载荷、侦察与监视传感器。第11章讨论了武器载荷,武器载荷自从10年前被引入便一直备受关注。第12章讨论一些无人机可能搭载的其他类型载荷。

第五部分包括第13~第16章,涵盖数据链与通信子系统。通信子系统用于建立飞行器与地面站之间的通信连接,下传飞行器载荷所收集的数据至地面站。第13章介绍与讨论了数据链路的基本功能和属性。第14章列举了影响数据通信质量的各种因素,包括自然与人为干扰的影响。第15章展示了多种为适应有限通信带宽而减小数据通信速率的方法对无人机操作手以及系统性能所产生的影响。第16章总结了数据链路折中设计,数据链路折中设计是系统总体折中设计的重要组成部分。

第六部分包括第17~第19章,介绍了无人机发射与回收的方法,包括传统的起飞与着陆,也包括许多有人机未采用的方法。其中第17章和第18章分别介绍了无人机发射系统与回收系统,第19章总结了多种发射与回收方法之间的折中权衡。

本书第一版于1992年出版。自本书第一版面世以来,在过去的20年里无人机领域发生了巨大变化。在本书第二版(1998年出版)前言中,编者曾做出战术型无人机的发展仍面临诸多问题的结论;但在波斯尼亚维和行动中,已有无人机支持这次维和行动的迹象;甚至美国空军已经开始关注无人机,并在内部开展了无人战斗机潜在用途的讨论。在美国空军开始关注无人机之际,编者又做了以下论断:尽管无人机获得了一些关注,并在一些领域取得实质性进展,但我们仍然认为整个无人机领域还有待接受,而且无人机还没有发展成熟,尚未作为一项使用工具确立稳固的地位。

自编者做出这一论断的14年来,情势已大不相同:无人机在军事领域已得到广泛应用;无人战斗机已经部署于战场,高调亮相,频频出现在新闻报道之中;无人作战系统正成为下一代战斗机与轰炸机的有力竞争者。

然而受阻于无人机如何在通用空域中与有人机互不干扰的实际问题,无人机在民用领域的发展仍然滞后。无人机在军事领域的成功应用将有力推动这一问题的解决,促使无人机在非军事领域扮演重要角色。

本书第四版经过大量修改。编者希望这些修改会使本书更加清晰易懂。本次修改加入了无人机领域近10年来日益重要的内容,如电推进、武器载荷和赋予无人机系统不同程度的自主性。本次修改还修订了与事件更新有关的多处细节,而且保证了所有章节在介绍新术语、新概念和过去14年间出现的无人机系统的时效性。另一方面,构建无人机系统的基础子系统并未发生显著变化,而且从本书的层

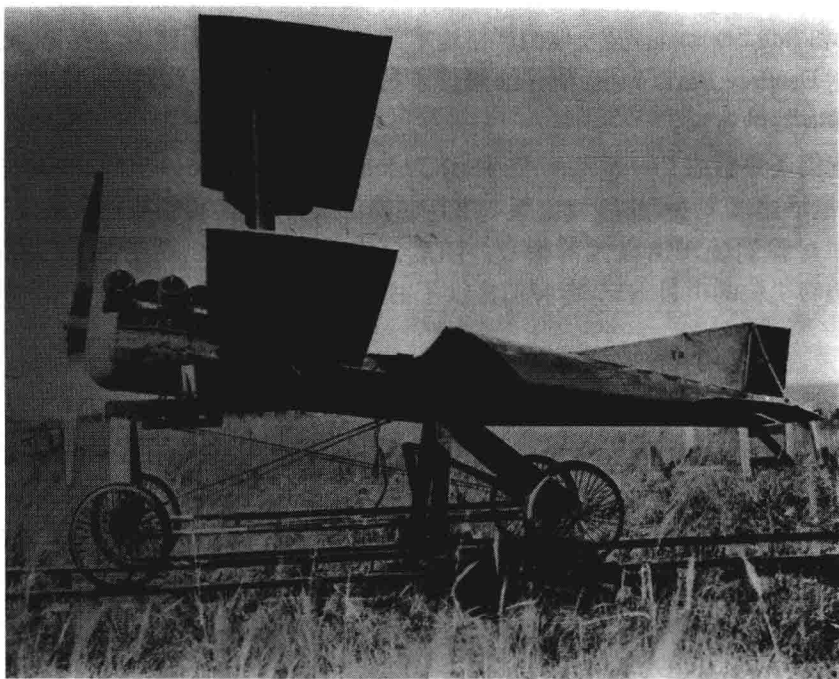
面而言,无人机系统的基础问题和主要原理自从本书第一版面世以来一直未曾改变。

本书的编者们在参加“红队”时结识。“红队”是在一个早期无人机项目中致力于诊断与解决重要问题的组织。针对出现的问题所得到的诊断往往表明:在系统设计环节,“系统工程”远未实现,很多子系统并未有效整合达到预定的系统级指标。本书的编者们有这样一个愿望,至少要记录一些亲历的“经验教训”,希望能对读者在未来设计无人机系统时有所借鉴。

我们相信本书所呈现的大多数“经验教训”具有通用性,这些“经验教训”在今天与它们在若干年前被发现时同样适用。我们同时希望本书可以帮助未来的无人机系统设计者直接运用这些“经验教训”,从而避免付出不必要的代价。

Paul G. Fahlstrom
Thomas J. Gleason

2012 年 1 月



“凯特灵虫子”无人机(图片由“荷兰人”Norman C. Heilman 提供)

致 谢

我们诚挚地感谢卓达宇航的分部(Division of Zodiac Aerospace),工程拦阻系统公司(Engineering Arresting System Corporation,ESCO)(阿斯顿,宾夕法尼亚州),以及通用原子航空系统有限公司(General Atomics Aeronautical Systems, Inc.),他们提供了关于各自研制的飞行器及相关设备的图片、图表和其他信息。

联合无人机计划办公室(The Joint UAV Program Office)(帕图森河海军航空基地,马里兰州)、美国陆军航空和导弹司令部(US Army Aviation and Missile Command)(亨茨维尔,阿拉巴马州)也都在本书第一版的筹备中提供了综合素材。

我们特别感谢 Robert Veazey 先生,他在 ESCO 公司任职期间提供了发射和回收系统的素材和草稿。一并感谢 Tom Murley 先生(曾在里尔航电(Lear Astronics)效力)和 Bob Sherman 先生,他们严格地审阅了书稿并给出了建设性意见。我们还要感谢 Geoffrey Davis 先生,他仔细阅读了第四版书稿,并在文风和语法方面给出了很多有益的建议。

我们还要感谢 Eric Willner 先生,作为 John Wiley and Sons 出版机构的执行编辑,他最早建议 Wiley 出版社出版本书新的修订版,并在实现新版出版的细节工作过程中对我们表现出极大的耐心。随后,Elizabeth Wingett 女士,John Wiley and Sons 出版机构的项目编辑,为我们提供了书稿筹备方面的指导。

缩略词表

AC	alternating current	交流电
ADT	air data terminal	航空资料终端
AJ	Antijam	抗干扰
AR	aspect ratio	展弦比
ARM	antiradiation munition	反辐射弹药
AV	air vehicle	飞行器
BD	bi - directional	双向的
CARS	Common Automatic Recovery System	通用自动回收系统
CCD	charge - coupled device	电荷耦合装置
CG	center of gravity	重心
CLRS	central launch and recovery section	中央发射和回收科
CP	center of pressure	压心
COMINT	communication intelligence	通信情报
C rate	charge/discharge rate	充放电倍率
CW	continuous wave	连续波
dB	decibel	分贝
dBA	dBs relative to the lowest pressure difference that is audible to a person	相对于人耳可辨最低压差的分贝数
dBmV	dBs relative to 1 mV	相对于 1mV 的分贝数
dBsm	dB relative to 1 square meter	相对于 1m ² 的分贝数
DF	direction finding	定向
ECCM	electronic counter - countermeasures	电子反对抗
ECM	electronic countermeasure	电子对抗
ELINT	electronic intelligence	电子情报

EMI	electromagnetic interference	电磁干扰
ERP	effective radiated power	有效辐射功率
ESM	electronic support measure	电子支援措施
EW	electronic warfare	电子战
FCS	forward control section	前方控制科
FLIR	forward – looking infrared	前视红外(探测系统)
FLOT	Forward Line of Own Troops	己方部队前沿
FOV	field of view	视场
Fps	frames per second	每秒帧数(帧频)
FSED	Full Scale Engineering Development	全尺寸工程研制
GCS	ground control station	地面控制站
GDT	ground data terminal	地面数据终端
GPS	global positioning system	全球定位系统
GSE	ground support equipment	地面保障设备
Gyro	gyroscope	陀螺仪
HELLFIRE	helicopter launched fire and forget missile	直升机载发射后不管导弹(如“地狱火”导弹,“海尔法”导弹)
HERO	Hazards of Electromagnetic Radiation to Ordnance	电磁辐射对武器的危害
HMMWV	High Mobility Multipurpose Wheeled Vehicle	高机动多用途轮式车辆
I	intrinsic	固有的
IAI	Israeli Aircraft Industries	以色列飞机制造工业
IFF	identification friend or foe	敌我识别
IMC	Image Motion Compensation	图像移动补偿
IR	infrared	红外
ISO	International Organization for Standardization	国际标准化组织
JATO	Jet Assisted Take – Off	喷气助推起飞
JII	Joint Integration Interface	联合集成界面

JPO	joint project office	联合项目办公室
JSTARS	Joint Surveillance Target Attack Radar System	联合目标监视攻击雷达系统
LAN	local area network	局域网
Li - ion	lithium ion	锂离子
Li - poly	lithium polymer	锂聚合物
LOS	line of sight	视线
LPI	low - probability of intercept	低截获概率
MARS	mid - air recovery system	空中吊挂回收
MART	Mini Avion de Reconnaissance Telepilot	“玛尔特”无人机(法国)
MET	meteorological	气象的
MICNS	Modular Integrated Communication and Navigation System	模块化综合通信导航系统
MPCS	mission planning and control station	任务规划控制站
MRC	minimum resolvable contrast	最小可分辨对比度
MRDT	minimum resolvable delta in temperature	最小可分辨温差
MRT	minimum resolvable temperature	最低可分辨温度
MTF	modulation transfer function	调制传递函数
MTI	Moving Target Indicator	移动目标指示器
N	negative	负的
NASA	National Aeronautics and Space Administration	美国航空航天局
NDI	nondevelopmental item	不发展的项目
NiCd	nickel cadmium	镍镉
NiMH	nickel metal hydride	镍氢
OSI	Open System Interconnection	开放系统互连
OT	operational test	操作测试
P	positive	正的
PGM	precision guided munition	精确制导武器(弹药)
PIN	positive intrinsic negative	P 型 - 本征 - N 型

PLSS	Precision Location and Strike System	精确定位打击系统
RAM	radar – absorbing material	雷达波吸收材料
RAP	radar – absorbing paint	雷达波吸收涂料
RATO	rocket assisted takeoff	火箭助推起飞
RF	radio frequency	无线电频率(射频)
RGT	remote ground terminal	远程地面终端
RMS	root mean square	均方根
RPG	rocket propelled grenade	火箭推进榴弹
RPM	revolutions per minute	每分钟转数
RPV	remotely piloted vehicle	遥控飞行器
SAR	synthetic aperture radar	合成孔径雷达
SEAD	Suppression of Enemy Air Defense	压制敌方防空
shp	shaft horsepower	轴马力
SIGINT	signal intelligence	信号情报
SLAR	side – looking airborne radar	机载侧视雷达
SOTAS	Stand – Off Target Acquisition System	机载目标捕获系统
SPARS	Ship Pioneer Arresting System	“先锋”无人机舰上回收系统
TADARS	Target Acquisition/Designation and Aerial Reconnaissance System	目标捕获 / 锁定和空中侦察系统
TUAV	tactical UAV	战术无人机
UAS	unmanned aerial system	无人飞行器系统
UAV	unmanned aerial vehicle	无人机
UCAV	unmanned combat aerial vehicle	无人战斗机
UD	unidirectional	单向的
VTOL	vertical takeoff and landing	垂直起降

目 录

第一部分 导 论

第1章 历史和概述	2
1.1 概述	2
1.2 发展史	2
1.2.1 早期发展史	2
1.2.2 越南战争	4
1.2.3 战后复兴	4
1.2.4 联合开发	5
1.2.5 沙漠风暴	5
1.2.6 波斯尼亚	6
1.2.7 阿富汗和伊拉克	6
1.3 无人机系统概述	6
1.3.1 飞行器	8
1.3.2 任务规划和控制地面站	8
1.3.3 发射和回收装置	8
1.3.4 有效载荷	9
1.3.5 数据链	10
1.3.6 地面保障设备	10
1.4 “天鹰座”无人机系统	11
1.4.1 “天鹰座”任务需求	11
1.4.2 “天鹰座”飞行器	12
1.4.3 地面控制站	12
1.4.4 发射和回收	13
1.4.5 有效载荷	13
1.4.6 其它装备	13
1.4.7 小结	13

参考文献	15
第2章 无人机种类和任务	16
2.1 概述	16
2.2 无人机系统实例	16
2.2.1 微小型无人机	17
2.2.2 小型无人机	19
2.2.3 中型无人机	20
2.2.4 大型无人机	23
2.3 可损耗型无人机(一次性无人机)	25
2.4 无人机系统分类	26
2.4.1 按照航程和航时分类	26
2.4.2 基于尺寸的小型无人机非正式分类	27
2.4.3 梯级分类系统	28
2.4.4 近期分类变更	28
2.5 任务	29
参考文献	31

第二部分 飞行器

第3章 空气动力学基础	33
3.1 概述	33
3.2 空气动力学基本方程	33
3.3 飞机极曲线	37
3.4 真实机翼和飞机	37
3.5 诱导阻力	38
3.6 边界层	41
3.7 扑翼	44
3.8 飞行器总阻力	46
3.9 小结	46
参考文献	46
参考书目	46
第4章 性能	48
4.1 概述	48
4.2 爬升飞行	48
4.3 航程	50

4.3.1	螺旋桨推进飞机的航程	51
4.3.2	喷气推进飞机的航程	52
4.4	航时	53
4.4.1	螺旋桨推进飞机的航时	53
4.4.2	喷气推进飞机的航时	55
4.5	滑翔飞行	55
4.6	小结	56
第5章	稳定性和控制	57
5.1	概述	57
5.2	稳定性	57
5.2.1	纵向稳定性	58
5.2.2	横向稳定性	60
5.2.3	动稳定性	61
5.2.4	小结	61
5.3	控制	62
5.3.1	气动控制	62
5.3.2	俯仰控制	62
5.3.3	横向控制	63
5.4	自动驾驶	63
5.4.1	传感器	64
5.4.2	控制器	64
5.4.3	作动器	64
5.4.4	机体控制	64
5.4.5	内回路和外回路	65
5.4.6	飞行控制分类	65
5.4.7	整体操控模式	66
5.4.8	支持自动驾驶的传感器	66
第6章	动力推进	68
6.1	概述	68
6.2	推力的产生	68
6.3	动力升力	69
6.4	动力来源	73
6.4.1	二冲程发动机	73
6.4.2	转子发动机	76
6.4.3	燃气涡轮机	77

6.4.4	电动机	78
6.4.5	动力电能来源	79
第7章	结构和承载	85
7.1	概述	85
7.2	载荷	85
7.3	动载荷	88
7.4	材料	90
7.4.1	三明治结构	90
7.4.2	面层纤维增强材料	91
7.4.3	树脂基体材料	91
7.4.4	夹芯材料	91
7.5	成型技术	92

第三部分 任务规划和控制

第8章	任务规划和控制站	94
8.1	概述	94
8.2	MPCS 体系结构	98
8.2.1	局域网络	100
8.2.2	局域网络要素	100
8.2.3	通信级别	101
8.2.4	网桥和网关	103
8.3	物理配置	104
8.4	规划和导航	106
8.4.1	规划	106
8.4.2	导航和目标定位	108
8.5	MPCS 接口	110
第9章	飞行器和有效载荷控制	112
9.1	概述	112
9.2	控制模式	113
9.3	飞行器的驾驶	113
9.3.1	遥控驾驶	114
9.3.2	自主—辅助驾驶	114
9.3.3	完全自动驾驶	115
9.3.4	小结	116

9.4 有效载荷控制	117
9.4.1 信号中继有效载荷	117
9.4.2 大气、辐射及环境监测有效载荷	118
9.4.3 成像和伪成像有效载荷	118
9.5 任务控制	119
9.6 系统自治	121

第四部分 有效载荷

第10章 侦察/监视载荷	125
10.1 概述	125
10.2 成像传感器	126
10.2.1 目标探测,识别和确认	126
10.3 搜索过程	139
10.4 其它考虑	145
10.4.1 视线稳定	145
参考文献	148
参考书目	149
第11章 武器载荷	150
11.1 概述	150
11.2 杀伤攻击型无人机历史	151
11.3 武装型无人机的任务需求	154
11.4 与武器携带和投送相关的设计问题	154
11.4.1 载荷能力	154
11.4.2 结构问题	155
11.4.3 电器接口	157
11.4.4 电磁干扰	158
11.4.5 对现有机载武器的发射限制	159
11.4.6 安全分离	159
11.4.7 数据链	160
11.5 与战斗行动相关的其它问题	160
11.5.1 特征消减	160
11.5.2 自主性	170
参考文献	173

第 12 章 其它载荷	174
12.1 概述	174
12.2 雷达	174
12.2.1 常规雷达	174
12.2.2 合成孔径雷达	176
12.3 电子战载荷	177
12.4 化学探测	177
12.5 核辐射传感器	178
12.6 气象传感器	179
12.7 伪卫星	179

第五部分 数据链

第 13 章 数据链功能和特性	183
13.1 概述	183
13.2 背景知识	183
13.3 数据链功能	185
13.4 理想数据链特性	186
13.4.1 全球可用性	187
13.4.2 抗无意干扰能力	188
13.4.3 低截获概率	188
13.4.4 安全性	189
13.4.5 抗欺骗性	189
13.4.6 防反辐射武器能力	189
13.4.7 抗干扰能力	190
13.4.8 数字式数据链	191
13.5 系统接口问题	191
13.5.1 机电接口	192
13.5.2 数据率限制	192
13.5.3 控制回路延迟	193
13.5.4 互操作性, 互换性和通用性	195
参考文献	197
第 14 章 数据链余量	198
14.1 概述	198