



装备科技译著出版基金

无人机系统自主控制技术丛书

On Integrating Unmanned Aircraft Systems into
the National Airspace System (Second Edition)

无人机融入 国家空域系统 (第2版)

[希]康斯坦丁诺斯·达拉玛凯迪斯(Konstantinos Dalamagkidis)

[希]基蒙·P·维拉范尼斯(Kimon P. Valavanis)

著

[德]雷斯·A·皮尔(Les A. Piegl)

谢海斌 尹栋 杨健 程巧 译

沈林成 审校



Springer



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

无人机融入国家空域系统 (第2版)

**On Integrating Unmanned Aircraft Systems
into the National Airspace System
(Second Edition)**

[希] 康斯坦丁诺斯·达拉玛凯迪斯(Konstantinos Dalamagkidis) 著

[希] 基蒙·P. 维拉范尼斯(Kimon P. Valavanis)

[德] 雷斯·A. 皮尔(Les A. Piegl)

谢海斌 尹栋 杨健 程巧 译

沈林成 审校

国防工业出版社

·北京·

著作权合同登记 图字:军-2015-042 号

图书在版编目(CIP)数据

无人机融入国家空域系统:第2版/(希)达拉玛凯迪斯(Dalamagkidis,K.),
(希)维拉范尼斯(Valavanis,K.P.), (德)皮尔(Piegl,L.A.)著;
谢海斌等译. —北京:国防工业出版社, 2015.10

(无人机系统自主控制技术丛书)

书名原文: On Integration Unmanned Aircraft Systems into the
National Airspace Syetem(Second Edition)

ISBN 978-7-118-10471-4

I. ①无... II. ①达...②维...③皮...④谢... 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 244006 号

Translation from English language edition:

On Integrating Unmanned Aircraft Systems into the National Airspace System
by Konstantinos Dalamagkidis, Kimon P. Valavanis and Les A. Piegl

ISBN 978-94-007-2478-5

Copyright © Springer Science + Business Media B. V. 2009, 2012

Springer Netherlands is a part of Springer Science + Business Media All Right Reserved
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 19½ 字数 357 千字

2015 年 10 月第 2 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 80.00 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

第2版 前言

本书自第1版发行至今已过了将近两个年头。在此期间,虽然我们在编写工作中引入了许多新的成果和变化,但还是有很多人质疑我们的工作不够全面。自小型无人驾驶飞机系统(UAS)规则制定委员会向美国联邦航空管理局提交建议以来已有一年时间。虽然截止期限是2009年底,但是,在写下这些文字之前,我并没有放弃延长期限,预计在2013年前仍然不会出台可用的政策。此外,预计限制类的民用无人机系统在2015年前仍然无法得到认证,这之后至少需要5年才能正常进入国家空域系统中飞行。我们在两年前明确了的许多挑战目前依然存在。与通信延迟、安全和可靠性一样,感知与避让依然是一个重要的问题。目前,无人机系统仍然不可能与载人机系统采用相似的规程/或约束,在国家空域飞行。

尽管世界各国正试图缩小UAS管理之间的差距,但这种差距依然存在。无论如何,人们还必须考虑到民用市场和大学、研究中心与公司在开发未来UAS上存在的差异。虽然文章列举的文献中有几个是关于民用的,但民用市场似乎大都忽视了将UAS投入商用所带来的好处,究其原因主要有三点:①UAS仍然被视为不成熟的技术;②开发这项技术的合作伙伴其实是从民用市场中分离出来的;③由于没有适用的条例,导致公众对无人机系统的关注度下降,进而导致规则制定的动力不足。实际上,美国联邦航空管理局预测,UAS的商业活动将从2018年开始,因此对促进更快地把UAS纳入国家空域系统(NAS)的需求不会太多。

另一方面,在任何给定的时刻都有30多架无人机飞越伊拉克和阿富汗领空,其中有许多是通过地球另一端的卫星进行操作。仅仅在2009年这一年,无人机系统完成了在这两个国家之间飞行135000小时的任务,并且已经达到了累计一百万小时飞行的目标。一些无人机在很多场合还装备并部署有武器,但此举受到了国际社会的谴责。由于购置成本更低,能耗更低,并且对海外人员的需求也相对较少,在军事领域使用无人机系统大大节省了军事成本。由于无人机在军事领域中累计飞行时间和已公布的采办项目数量如此之大,美国正在快速实现军用无人机系统接管载人机对应的角色。

就民用空域而言,无人机系统已得到了美国海关和边境保护局(CBP)的广

泛使用。从2005年9月到2008年3月,无人机系统总共参与了4000余次非法毒品的截获行动,扣押了大约20000磅非法毒品。美国和其他欧洲政府机构已启用无人机系统,无人机已经成功应用于重要事件安保领域。在技术方面,无人机一再打破续航纪录。由航空环境公司制造的便携式“美洲狮”(Aerovironment Puma)无人机可持续飞行9小时以上;A160T无人直升机的持续飞行时间接近19小时;“离子虎”(Ion Tiger)无人机在2009年11月只使用一个燃料电池就完成了26小时的飞行;太阳能供电的“微风”(Zephyr)无人机在2009年10月的一次飞行过程中,持续飞行超过82小时,继而在2010年7月,将纪录刷新至两个星期。与此同时,美国国防部高级研究计划局(DARPA)正致力于研究可在空中停留5年的系统。此外,系统的进步不仅局限于续航时间的提高。随着能力和自主性的提高,无人机系统的性能将不断提升。

同样持有乐观态度的还有蒂尔(Teal)集团,该机构预计,从2009年到2018年,全球无人机市场总值将达到620亿美元,年复合增长率约为8%。在过去三年里,通过无人机系统开发机构之间的并购和合作,能力也得到了显著提高。我们希望这种趋势最终能够逆转,即使军事上的应用已经成为这种变化背后的驱动力,民用领域的应用也将开始涌现。全球大约50个国家正在生产近1000种不同的无人机机型,其中一些机型是针对于非军事应用,例如地面监测或执法。即使限制条件和有关问题依然存在,但是无人机终将在蓝天上(民用空域中)翱翔!

本书的第2版做了一些修订,几乎所有的章节都有重要的更新和更正,主要修订以下三个章节,另外还新增了一个附录。

第2章:对历史概述进行修改,以编入早期无人机设计以及这些设计最终如何变成我们今天所知道的无人机的有关信息。除此之外,我们还尽可能使用高质量照片。

第4章:对无人机法规这一章进行更新,以反映该主题的最新信息。轻/小型无人机系统的信息单独列为一个部分,以突出该系统的差异性及其短期内发展的重要性。

第5章:本章在之前的基础上进行重组、重写,并增加了新的内容。现在的篇幅是原来的2倍。我们认为这样更清晰、更全面。为了优化呈文,包含案例研究的部分被单独列为一个章节。

附录A:作为第5章的补充,该部分内容介绍了有关人类脆弱性的信息,并对给定的不同创伤机制预期的损伤程度的评估进行了概述。本部分含有6张图

和 3 个表格,以帮助读者理解和比较不同的人类脆弱性模型。

作者也很感激读者对第 1 版书提供的所有意见和修改建议。如果没有他们的努力和帮助,本书的内容将会略显贫乏。

最后,但并非最不重要,作者衷心感谢施普林格集团一直以来给予的大力支持,特别是我们的编辑 Nathalie Jacobs 女士的支持。

Munich, Germany

德国慕尼黑

Denver, Colorado

美国科罗拉多州丹佛市

and Tampa, Florida

美国佛罗里达州坦帕市

Konstantinos Dalamagkidis

Kimon P. Valavanis

Les A. Piegl

2010 年 7 月

前言

当 Kimon 首次邀请我为这本书写前言时,我倍感荣幸,并开始审阅手稿,主要着眼于它对无人机行业的潜在贡献,该行业目前正试图获得进入国家空域系统的权限。鉴于该稿件的性质,我很快发现自己恰好矛盾于这个贡献最终会是什么。因此,从机身/发动机的变化性以及任务复杂性的视角来总结行业状态是出版此书的目的之一。本书同时批判地介绍了与美国和国际监管状况有关的重要信息,并针对如何克服剩余障碍的问题提出了建议。作者将这些内容组织得非常精确,并将文档置于审查监管过程中进行定期审阅。这是当前航空规则委员会对小型无人机适航认证和运行方面认真考虑的结果(sUAS ARC),因而很容易被纳入增编或修订稿。

本书的另一个关键贡献是从风险角度(已有相关定义)来审视无人机安全问题,并且分析了地面冲击力的破坏等级、事件发生的可能性(发生概率)以及在不同人口密度区域上空飞行的结果。自从麻省理工学院的 Roland Weibel 和 Jim Hansman 博士做出开创性研究后,这是第一次全面的风险分析。然而,这个行业尚未形成机制,不太成熟,没有标准期刊专用的同行评审过程。在作者提出的这些意见当中,究竟有哪些是我们能够在数据和解释/分析中实际应用的呢?

如有必要,我会竭尽所能去恳请业界同仁审阅这份手稿以及 Kimon 和 Konstantinos 在会议上提交的科学论文,它们将作为数据提供的依据,并提供反馈以便验证假设、模型、数据样式和后处理的有效性——其本质上是一次“欠佳的同行评审”。

几个部门权衡了相关意见与建议。我很高兴地通知大家,审查员指出,本书中没有使用有明显问题的数据模型和实验范式。这一点是很重要的,因为报告的数据表明早期由麻省理工学院研究小组提出的数据和分析“过于保守”,而按不同重量等级分类的无人机可降低风险,早期的研究报告已经指出了这一点。(我本来打算秉着完全公开的精神写出审查员的名字,然而遗憾的是,考虑出版的最后期限,我未能获得公布挂名和引用的许可。)

此外,本文包含的数据已经被提交给几名小型无人机适航性认证(sUAS

ARC)的领导成员,希望这将作为适航认证(ARC)报告给予适当考虑,报告中包含美国联邦航空管理局的指导建议,因为该局制定的 UAS 安全法规以小型无人机为起点。

总而言之,我很高兴 Kimon 和他的同事将这份总结性文件一起交给无人机团体,我期待着每半年或每年更新一次,这可能会成为无人飞行系统这一产业的一个持续的、有生命力的编辑产物。

纽约牡蛎湾,2008 年 9 月

无人机商务市场有限公司总裁

ASTM F38 无人机执行委员会成员秘书

James E. Jewell

序

无人机系统(UAS)的研发和采购,以及全球范围内与无人机系统相关的各种活动正在与日俱增。在过去十年里,无人机系统在各方面都得到了空前的发展,但是,好戏还在后头呢!

有一个惊人的事实就是,虽然无人机(UAV)在1997年的全球市场总收入约为22.7亿美元^①,但据相关分析,美国无人机市场的总收入到2015年将达到160亿美元,作为全球第二大市场,欧洲市场的无人机支出总额投资仅20亿欧元^②,远远落后于美国这位竞争对手。由蒂尔集团^③进行的一项研究称,无人机将继续成为世界航空航天工业中最具活力的增长领域,预计无人机的支出在未来10年将超出3倍,总额接近550亿美元。蒂尔集团分析得到了一个结论,即民用无人机市场在未来10年将慢慢崛起,首当其冲的便是需要类似于军用无人机的监控系统的政府机构,例如海岸警卫队、边境巡逻机构和类似于国家安全机构的系统。

正是这个结论以及奋力争取民用和公用无人机系统自由飞行的主要倡议,促使作者撰写本书。当人们认为民用无人机系统的应用要求是它们能在民用、受限制的空间飞行,即需把无人机系统融入它们飞过的国家或大陆的国家空域系统(NAS)时,作者撰写本书的动机和理由再明显不过了。

我们面临巨大的挑战,因为现在所有可用的信息都是反映全球载人航空的信息。为了使无人机系统进入国家空域,国家和国际组织努力加快了规则、规定、程序和标准的制定步伐。但是,详细而完整的路线图还远远没有完成。

从本质上讲,除了其他事项外,无人机系统进入国家空域系统至少取决于无人机是否能够实现与载人航空同等的安全水平。此安全级别主要由无人机操作对人的生命造成的风险来定义,即使其他潜在的附带损害也可能被考虑在内。

作者希望这个远未完成的项目将作为一个参考文本,也许作为一个有用的工具,为所需做的工作奠定基础,以便获得期望的成果:载人机和无人机在相同

① “军用、民用和商用无人机的世界市场:无人机侦察和空中目标” Frost & Sullivan 公司,1998 年。

② Dickerson L. “无人机崛起”,航空周刊与空间技术,航空航天资料集 2007 年,第 166 卷,第 3 册,2007 年。

③ <http://www.robotictrends.com/displayarticle880.html>, 09/06, Robotics Trends.

的领空中飞行。

因此,本书将对目前的载人航空法规进行审查,然后介绍全球范围内可用的无人航空法规,以及促使无人航空保持载人航空的同等安全性水平的无人机系统的功能需求与安全评估,并对路线图提出有针对性的建议,以确保无人机系统进入国家空域系统。

最后,但并非最不重要,预计随着该领域的成熟和路线图的进一步具体化,我们会不断更新本书,以使其作为“参考手册”或“手册”。

佛罗里达州坦帕市

Konstantinos Dalamagkidis

Kimon P. Valavanis

Les A. Piegl

2008 年 9 月

致 谢

写这本书就像我们迄今已经处理过的“一个不同于其他任何项目的项目”，这是一种奇怪的感觉，因为这本书的“结局未知”，至少在最开始时是这样的情况。我们觉得自己是在试图创造一些没有起点和终点的“某种东西”。后来，我们又觉得是在快速赛跑，试图追上事情的原委。希望这能让读者了解到，在无人机系统(UAS)舞台上，事物变化得多么快；本书除了介绍需要解决的主要障碍，还会提供指示，告知我们创建一份可靠的路线图所需的联合活动次数和工作量。这份可靠的路线图最终会促使无人机系统(UAS)进入民用空域。为了使这一观点更加坚定，就算在本书出版时还需要进行修订，我们也不应对此感到惊讶。

尽管面对挑战，仍然有许多人鼓励作者完成这项工作，并对此提出了中肯的建议和意见，以及本书应添加的资料。

我们衷心感谢 R. Wallace 博士、V. Wallace 女士和 D. Schultz 先生通过其所在的机构为我们筹募了研究经费，并为本书的内容和叙述方式提出了宝贵的见解。

我们感谢赞助商 ARL、ARO 和 SPAWAR，以及 S. Wilkerson 博士、R. Zachery 博士和 J. Besser 博士对我们研究项目的信任，并让我们有机会探索新的研究手段。

G. Vachtsevanos 博士在整个项目中发挥了重要作用，但同时也是一名想要一探究竟的“读者”。此外，ASTM 国际无人机系统委员会 F38 的前副主席、XUAS LLC 公司现任首席执行官 J. Jewell 先生提供了与无人机系统的最新发展动向、法规、政策、安全有关的重要信息，同时担任该项目的发起人。

如果没有国际无人机系统协会(UVS International)会长 Peter van Blyenburgh 的倾力相助，本书将无法付梓出版。Peter 从他的数据库发给我们很多信息，包括 2007 年和 2008 年他在法国巴黎组织的会议上所提出的与无人机全球视角有关的细节。此外，他还允许我们在书中和附录 B 中引用全球现有/正在开发的无人机列表。

作者还要感谢来自美国联邦航空管理局(FFA)的 Xiaogong Lee 博士和 Bruce Tarbert 博士对写作本书的鼓励和支持。

此外，作者感谢由 Archytas 无人驾驶系统有限责任公司提供的行政支持。

作者感谢南佛罗里达大学同僚的支持和对完成这本书的鼓励,他们是 A. Kandel 博士、E. Stefanakos 博士、W. Moreno 博士、C. Ferekides 博士 和 A. Yalcin 博士。就个人而言,第二作者还希望感谢丹佛大学工程和计算机科学学院院长 Rahmat Shoureshi 教授,不仅因为他热衷于本书,而且为了让作者完成本书,在他成为电气与计算机工程系讲座教授之前,为第二作者安排了额外的时间。第一作者还要感谢 Stelios Ioannou 的宝贵帮助。当事情变得艰难或者令人沮丧时,她总是一位很好的倾听者。

Valavanis 博士和 Piegl 博士这两位作者认为有必要指出,第一作者 Kostas Dalamagkidis 为这个项目提供了强大动力,除此之外还完成了他的博士论文研究。能与这样才华横溢、兢兢业业的学生、以及同期的同事一起工作很有趣也很荣幸,他们让我们的生活变得更轻松。

最后,当然并不是最不重要的,作者想要感谢施普林格出版商、Nathalie Jacobs 女士和她的团队。Nathalie 一直是我们项目的强大支持者,她竭尽全力使一切成为可能。Nathalie,我们感谢你,只要您有时间,我们将向您展示人们如何在希腊岛屿生活——这是一个承诺。

目 录

第1章 引言	1
1.1 UAV 或 UAS 意味着什么?	1
1.2 动机与理由	2
1.3 安全监管	6
1.4 本书目标和大纲	7
参考文献	8
第2章 航空史与无人飞行	10
2.1 无人机及飞行的前身	10
2.2 1916—1944 年	13
2.3 冷战时期的无人机	14
2.4 现代系统	19
2.5 评价	39
参考文献	39
第3章 现行载人航空条例	40
3.1 引言	40
3.2 适航认证	42
3.2.1 型号证书	42
3.2.2 标准证书	43
3.2.3 特殊认证	44
3.3 特殊飞行器分类	45
3.3.1 平台	45
3.3.2 遥控模型	45
3.4 飞行员认证	46
3.5 FAR 操作规则	47
3.5.1 飞行规则	47
3.5.2 应急规则	48
3.5.3 维护要求	49
3.6 空域类别	49

3.7 监管发展模式	50
参考文献	51
第4章 无人机系统监管条例	52
4.1 引言	52
4.2 国际民用航空组织	53
4.3 美国	54
4.3.1 航空无线电委员会(RTCA)	57
4.3.2 美国材料与试验协会(ASTM)	57
4.3.3 美国汽车工程师学会(SAE)	58
4.3.4 当前的认证路径和操作指南	58
4.4 欧洲	60
4.4.1 欧洲航空安全局(EASA)	60
4.4.2 欧洲航空安全组织(EUROCONTROL)	61
4.4.3 欧洲全民航空电子学组织(EUROCAE)	62
4.4.4 欧盟的其他活动	63
4.4.5 国家活动	64
4.5 澳大利亚	65
4.6 加拿大	66
4.7 日本	67
4.8 国际无人机系统协会	68
4.9 轻小型无人机系统	68
4.9.1 美国	68
4.9.2 欧洲	69
4.10 军事规范	70
4.10.1 美国	70
4.10.2 欧洲	73
4.10.3 北约(NATO)	73
参考文献	74
第5章 无人机系统的安全评估和功能需求	81
5.1 同等安全水平	82
5.1.1 载人航空要求	82
5.1.2 无人机 ELOS 需求的推导	83
5.2 无人机事故类型	86
5.3 地面撞击死亡风险建模	87
5.3.1 地面撞击 ELOS	88

5.3.2	地面撞击事故的影响	89
5.3.3	暴露人员的死亡概率	90
5.3.4	地面撞击事故频率	94
5.4	空中碰撞死亡风险建模	95
5.4.1	空中碰撞 ELOS	95
5.4.2	暴露和死亡风险	97
5.4.3	预期的冲突轨迹	98
5.4.4	碰撞概率	98
5.5	模式选择	99
5.6	将一个事故的目标安全水平(TLS)转换为系统的可靠性要求	102
5.7	风险缓解	107
	参考文献	107
第6章	案例研究	110
	参考文献	145
第7章	关于无人机系统集成路线图的思考和建议	146
7.1	制定监管条例	147
7.1.1	应用	148
7.1.2	飞行特点	148
7.1.3	代价性	148
7.1.4	飞行员不在驾驶舱内	148
7.1.5	将无人机视作系统	149
7.1.6	最大起飞重量	150
7.1.7	乘客与货物	150
7.1.8	有效载荷	150
7.1.9	操作安全	150
7.2	操作风险参考系统	151
7.3	无人机系统分类	153
7.3.1	基于地面撞击风险的分类	155
7.3.2	基于空中碰撞风险的分类	157
7.3.3	基于自主能力的分类	159
7.3.4	其他分类	160
7.4	认证路径	161
7.5	设备认证	163
7.6	操作员训练与认证	163
7.7	技术问题	164

7.7.1	避撞	165
7.7.2	传感器	167
7.7.3	通信	167
7.7.4	动力与推进系统	168
7.7.5	起飞、回收和飞行终止系统	168
7.8	技术测试和评估	169
	参考文献	169
第8章	后记	173
8.1	为什么要无人机?	173
8.2	无人机系统的军事应用和相关挑战	174
8.3	民用无人机:挑战与问题	175
8.4	挑战和使能技术	180
8.5	前景	181
	参考文献	181
	术语表	183
	参考文献	186
附录A	人类的脆弱性	187
A.1	损伤类型和严重程度	187
A.2	脆弱性建模的注意事项	189
A.3	脆弱性模型	190
A.3.1	脆弱性阈值	191
A.3.2	对数正态分布脆弱性模型	191
A.3.3	粘性准则(VC)与钝性准则(BC)	194
A.3.4	穿透性损伤	196
	参考文献	197
附录B	地面死亡概率模型的敏感度分析	198
B.1	背景	198
B.2	分析	199
B.2.1	撞击动能的影响	200
B.2.2	参数 α 的影响	200
B.2.3	掩护因素的影响	203
B.3	讨论	207
	参考文献	207
附录C		208
	索引	284

第1章 引言

预测是非常困难的,特别是对未来的预测。

Niels Bohr

我们总是高估未来两年内将发生的变化,却低估未来10年内将发生的变化。

Bill Gates

本章涉及两方面的内容:概述本书的写作动机和理由,以及再版动机和理由。由于许多无人机已命名,本章将先概述这些术语,并阐明本书其他部分将使用的术语。本章后面是更新的部分,是关于无人机的一般性和非技术性讨论。这些内容支持和证明了本书的必要性,即使无人机进入国家空域系统的道路仍然很漫长,且充满不确定性因素。2009 年对军用无人机系统采购估价的观察数据以及对全球无人机市场 2010—2018 年的预测提供了更充分的证据来证明无人机的指数增长和使用。目前无人机非军事应用的实例证明并展示了民用操作的必要性。1.3 节介绍了安全监管背后的主要概念,也指出了监管难题。此外,本章还总结了本书其余章节的内容,以及材料是如何组织和提出的。在第一版中,给出了与一般航空特别是与无人机相关的一些基本定义,而第二版则在附录前有一个专门的词汇介绍部分来给出这些定义。

1.1 UAV 或 UAS 意味着什么?

无人机现有多种不同的命名。从 UAV 演变而来的 UAS 成为联邦航空管理局 (FAA) 的首选术语。另外一种命名是遥控飞行器 (RPV), 这是在越南战争中使用的术语, 美国军方也称之为遥控飞机 (RPA), 这是用以包括飞行器和飞行员^[9]的一个术语, 而英国已将它们命名为无人驾驶空中系统 (RPAS), 以证明存在“人在回路上”, 以对系统实施控制^[7]。

无人驾驶飞机(也称“无人机”)是指没有驾驶员的飞机, 飞行机器上不载有驾驶员或乘客。因此, “无人驾驶”意味着完全没有导引和主动驾驶飞机的人。无人机的控制功能可以是机载的或者非机载的(遥控)。