



无人机 飞行防相撞技术

UAV Flight Collision
Avoidance Technology

陈金良 主编



国之重器出版工程
国防现代化建设

无人机系统研究与应用丛书

无人机飞行防相撞技术

UAV Flight Collision Avoidance Technology

陈金良 主编

西北工业大学出版社

西安

【内容简介】 本书从技术防角度出发,全面细致地阐述了无人机飞行防相撞技术涉及的空管动态控制技术、感知与避让技术、空管态势信息融合显示技术以及无人机防相撞飞行管理技术,以期为无人机飞行防相撞管控和无人机防相撞设备的研发提供有益的参考与指导。

本书涉及的技术内容相对专业,可作为无人机领域从事飞行管控、教学、研究和无人机防相撞设备制造、使用的各类人员的参考用书,也可作为高等院校相关专业研究生教学用书和学习参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

无人机飞行防相撞技术/陈金良主编. —西安:
西北工业大学出版社,2018.5

国之重器出版工程

ISBN 978-7-5612-5991-7

I. ①无… II. ①陈… III. ①无人驾驶飞机—
飞行管理—研究 IV. ①V279

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 094302 号

WURENJI FEIXING FANGXIANGZHUANG JISHU

策划编辑:肖亚辉

责任编辑:张 友

出 版:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:(029)88493844 88491757

网 址:www.nwpup.com

印 刷 者:固安县铭成印刷有限公司

开 本:710 mm×1 000 mm 1/16

印 张:8.25

字 数:138 千字

版 次:2018 年 5 月第 1 版

2018 年 5 月第 1 次印刷

定 价:48.00 元

《国之重器出版工程》

编辑委员会

编辑委员会主任：苗 圩

编辑委员会副主任：刘利华 辛国斌

编辑委员会委员：

冯长辉	梁志峰	高东升	姜子琨	许科敏
陈 因	郑立新	马向晖	高云虎	金 鑫
李 巍	李 东	高延敏	何 琼	刁石京
谢少锋	闻 库	韩 夏	赵志国	谢远生
赵永红	韩占武	刘 多	尹丽波	赵 波
卢 山	徐惠彬	赵长禄	周 玉	姚 郁
张 炜	聂 宏	付梦印	季仲华	



专家委员会委员(按姓氏笔画排列):

- | | |
|-----|-----------------|
| 于 全 | 中国工程院院士 |
| 王少萍 | “长江学者奖励计划”特聘教授 |
| 王建民 | 清华大学软件学院院长 |
| 王哲荣 | 中国工程院院士 |
| 王 越 | 中国科学院院士、中国工程院院士 |
| 尤肖虎 | “长江学者奖励计划”特聘教授 |
| 邓宗全 | 中国工程院院士 |
| 甘晓华 | 中国工程院院士 |
| 叶培建 | 中国科学院院士 |
| 朱英富 | 中国工程院院士 |
| 朵英贤 | 中国工程院院士 |
| 邬贺铨 | 中国工程院院士 |
| 刘大响 | 中国工程院院士 |
| 刘怡昕 | 中国工程院院士 |
| 刘韵洁 | 中国工程院院士 |
| 孙逢春 | 中国工程院院士 |
| 苏彦庆 | “长江学者奖励计划”特聘教授 |



- 苏哲子** 中国工程院院士
- 李伯虎** 中国工程院院士
- 李应红** 中国科学院院士
- 李新亚** 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、中国机械工业联合会副会长
- 杨德森** 中国工程院院士
- 张宏科** 北京交通大学下一代互联网互联设备国家工程实验室主任
- 陆建勋** 中国工程院院士
- 陆燕荪** 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、原机械工业部副部长
- 陈一坚** 中国工程院院士
- 陈懋章** 中国工程院院士
- 金东寒** 中国工程院院士
- 周立伟** 中国工程院院士
- 郑纬民** 中国计算机学会原理事长
- 郑建华** 中国科学院院士



- 屈贤明** 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、工业和信息化部智能制造专家咨询委员会副主任
- 项昌乐** “长江学者奖励计划”特聘教授，中国科协书记处书记，北京理工大学党委副书记、副校长
- 柳百成** 中国工程院院士
- 闻雪友** 中国工程院院士
- 徐德民** 中国工程院院士
- 唐长红** 中国工程院院士
- 黄卫东** “长江学者奖励计划”特聘教授
- 黄先祥** 中国工程院院士
- 黄 维** 中国科学院院士、西北工业大学常务副校长
- 董景辰** 工业和信息化部智能制造专家咨询委员会委员
- 焦宗夏** “长江学者奖励计划”特聘教授



前言

随着无人机技术的发展,无人机在各个领域的应用愈加广泛,无人机的数量也在不断上升,甚至可以毫不夸张地说,无人机是未来空域的主要使用者之一。美国国防科学研究委员会、国会公共服务研究中心指出:“无人机潜在的能力和灵活性证明,更多的现有有人机执行的任务可以转向无人机平台,并且无人机和有人机可以共同飞行。”但同时,无人机的大量飞行给空域运行带来巨大的安全隐患。无人机的空域运行安全问题主要包括空中相撞和地面撞击,其中无人机与有人机之间的空中相撞是首要关注问题。目前,为保障飞行安全,各国将无人机限制在特定的空域内,与有人机分开、隔离运行,但在有限的空域资源下,隔离运行方式将难以满足无人机日益增长的应用需求。可以断言,无人机进入混合空域飞行是无人机发展的必然趋势,而无人机防相撞问题是制约无人机飞出隔离空域的主要因素。近年来,关于无人机防相撞的研究较多,欧美等航空发达国家提出了无人机空域整合计划,从标准、规章、运行等方面开展广泛的研究,以期推进无人机防相撞研究的进程。然而,无人机防相撞问题的有效解决,不能仅依靠法规标准的制定与颁布以及规章制度的运行与落实,还必须采取必要的技术手段,采用制度防与技术防相结合的综合施治措施,才能确保无人机发展中不被防相撞问题所羁绊。

本书旨在从技术防角度出发,力求全面细致地阐述无人机防相撞技术涉及的空管动态控制技术、感知与避让技术、空管态势信息融合显示技术以及无人机防相撞飞行管理技术,以为无人机防相撞设备的研发提供有益的参考与指导。本书内容的组织与编选力图体现系统性、理论性、前瞻性与指导性。全书共分为五章。第1章绪论,主要分析无人机防相撞需求,归纳无人机防相撞基础,介绍



无人机防相撞发展;第2章无人机飞行间隔保持与控制,从动态控制的角度介绍无人机防相撞中无人机飞行间隔的保持与控制,重点描述无人机飞行间隔标准,介绍无人机飞行间隔保持的方法、偏差纠正和自主保持安全间隔的关键技术以及无人机飞行间隔调整的方法等;第3章无人机感知与避让技术,主要描述空中态势感知、飞行冲突预测和飞行冲突解脱的方法;第4章空管态势信息融合显示技术,主要介绍数据融合理论、空管态势信息融合显示的实现手段、空管态势信息融合方法;第5章无人机防相撞飞行管理技术,主要从无人机法规标准、监管机制、飞行空域、人员管理和管控技术方面梳理当前无人机飞行管理环境,在借鉴国外无人机空域管理、分类监管和无人机适航标准与资格认证制度等飞行管理经验的基础上,提出基于我国当前环境的无人机飞行管理对策建议。

本书由陈金良主编,姚登凯、周志华、梁晓龙、赵顾颢、杨源、高文明、李双峰、李寰宇、张学军、黄茹参与编写,最后由陈金良统稿。其中第1章由陈金良、黄茹、李双峰编写,第2章由姚登凯、周志华编写,第3章由梁晓龙、杨源编写,第4章由赵顾颢、李寰宇编写,第5章由陈金良、张学军、高文明编写。本书的出版,得到了北航(四川)西部国际创新港科技有限公司的热切关怀和大力资助,得到了基于有人/无人机共域飞行的无人机自动避让技术研究军内科研项目参研人员的热情帮助,无人机研究专家、西北工业大学出版社肖亚辉社长参与了编写内容的策划,在此表示谢意。

在编写本书的过程中,曾参考了大量相关文献,在此谨向其作者表示由衷的感谢。

鉴于水平,书中错误和不当之处在所难免,敬请专家、同行和读者批评指正。

编者

2018年3月



目 录

第 1 章 绪论	001
1.1 无人机飞行防相撞需求	002
1.2 无人机飞行防相撞基础	008
1.3 无人机飞行防相撞发展	014
第 2 章 无人机飞行间隔保持与控制	018
2.1 无人机飞行间隔标准	019
2.2 无人机飞行间隔保持	022
2.3 无人机飞行间隔调整	024
第 3 章 无人机飞行感知与避让技术	027
3.1 无人机空中态势感知	028
3.2 无人机飞行冲突预测	040
3.3 无人机飞行冲突解脱	052
第 4 章 空管态势信息融合显示技术	066
4.1 数据融合理论	067
4.2 空管态势信息融合显示实现	070
4.3 空管态势信息融合	086



第5章 无人机防相撞飞行管理技术	103
5.1 当前无人机飞行管理环境梳理	104
5.2 国外无人机飞行管理经验借鉴	107
5.3 我国无人机飞行管理对策建议	110
参考文献	115



第1章 绪论

“力无人机的操控员”人机协同、减少飞行员执行“看门”任务，提升飞行安全。该机采用(A/C)配置，空空武器系统(A/A)的改进。

第1章 绪论

ATC 服务和 TEAS 提供的故障策略:



第一章 无人机飞行防相撞技术	1
第一节 无人机飞行管理环境概述	304
第二节 无人机飞行管理流程概述	107
第三节 无人机飞行管理对策建议	119
参考文献	115

| 1.1 无人机飞行防相撞需求 |

无人机的问世,无疑是现代航空领域的一次巨大变革。近年来美国在海外战争中多次成功地使用无人机执行侦察和空中打击任务,让世界各国意识到在未来战争中无人机将会扮演越来越重要的角色。众所周知,现代无人机的发展已经向多用途、多平台的方向发展,这就意味着无人机不但要充当任务执行的角色,而且未来会成为众多作战平台之间的纽带。随着对无人机作战能力要求越来越高,无人机的任务越来越繁重复杂,无人机逐步向数字化、信息化、智能化方向发展。因此,要求无人机具备各种规划和避让能力,其中无人机防相撞作为重要方面还需进一步深入研究。无人机与有人机共空域执行任务已成为无人机发展的重要趋势,伴随着无人机的广泛应用,其频频出现撞损坠毁等安全事故,特别是在飞行器密度较高和不确定环境中,无人机与无人机,无人机与有人机共空域飞行所面临的碰撞冲突已成为影响无人机发展的突出问题。因此,迫切需要研究改善无人机飞行防相撞技术。

1.1.1 当前无人机飞行防相撞特点

目前普遍应用的无人机隔离运行方式属于程序防撞策略,该策略局限性大,无法应对偏离预定飞行计划、突然闯入隔离空域的飞机。因此,无人机飞行防相撞具有一定特点,主要体现在下述几方面:



1) 无人机与操控员“人机分离”,缺少飞行员执行“看见避让”以及来自航空交通管制(ATC)服务、空中防撞系统(TCAS)的避让建议。

2) 大多数能够与民用航线飞机同高度飞行的无人机的爬升/下降性能难以达到 TCAS 运行要求,无法执行 TCAS 预定型垂直避让建议。

3) 目前无人机主要由操控员通过链路远程遥控实施防撞,严重依赖通信链路的保障,难以应对链路丢失的应急情况。由此可见,无人机缺失“看见避让”、ATC 服务和 TCAS 层级的防撞策略。

综上所述,无人机飞行防相撞目前主要是以感知避让技术来实现的,但是限于当前感知避让技术的水平,无人机无法做到像有人机那样大范围、大规模地飞行。而为满足无人机防相撞的需求,就必须根据无人机防相撞的特点,研制出合理科学的感知避让技术。

1.1.2 无人机飞行防相撞应用需求

无人机技术的快速发展,使得无人机与有人机共域飞行势在必行,但鉴于无人机的飞行特点,在研究无人机防相撞时,要考虑到它在实际应用中的需求,尤其是在起降、航路和空域三个不同阶段的应用需求。

1. 起降阶段的应用需求

无人机根据其性能和执行的任务不同,其放飞和回收的方法也不同。放飞的方法主要有地面滑行起飞、车载弹射、母机投放和手抛发射,回收的方法主要有自主降落、伞降回收、撞网回收和一次性飞行。对于起降阶段的防相撞,主要是依据不同的起降方式、无人机机载设备性能和起降机场天气情况,合理安排起降时间间隔、起降航向。

在起降阶段,无人机的性能和机载设备是无人机防相撞的主要影响因素。和有人机相比,无人机对于周围环境的感知完全依靠传感器,操作人员通过无人机上反馈的信息来完成对无人机的控制,这本身就存在一定的风险,一旦信息有误或传输过程出现问题,无人机就有可能出现错误的飞行,发生相撞或影响其他航空器飞行。为防止此类问题的出现,无人机必须具有防相撞技术,能够及时感知周围情况,自主避让和调整飞行状态。

起降机场一般都是飞行任务和流量特别大的区域,尤其在那些有人机和无人机共用一个机场的地区,或是东南沿海发达地区,飞行环境复杂,空域资源紧张,加上天气恶劣多变,大大增加了无人机的相撞风险。例如,2015年3月22日,美国一架可搭载50人的客机在佛罗里达州机场附近差点与一架无人机相



撞,当时距离机场只有 8 km,高度约 700 m,幸无酿灾;2015 年 8 月 3 日,中新网报道,美国纽约肯尼迪国际机场两架客机降落时,险与无人机相撞。以上的例子无不在说明起降阶段,无人机防相撞的重要性,而且据美国五角大楼数据统计,美国 2001 到 2011 年中发生的无人机相撞事件中有 75% 是由人为原因造成的。因此,无人机飞行防相撞的关键在于提高无人机防相撞的技术,克服由于人为操作失误所带来的危险。

2. 航路阶段的应用需求

在航路飞行阶段,无人机与有人机相比,有人机时刻强调人的作用,飞行控制系统的作用是保证如何发挥人的主观能动性,其控制是有权限的,因此其作用范畴为保证驾驶人员方便、灵活、有效地操纵飞机。现代无人机的整个飞行过程都要靠飞行控制系统来进行有效管理与控制,飞行控制系统的作用范畴覆盖了有人机飞行控制系统的所有功能,在无人机的整个工作过程中,其执行控制系统都参与无人机的控制,因此其作用范畴远远大于有人机控制系统。为此,无人机防相撞技术是保证无人机安全飞行的关键所在。

目前无人机的飞行控制技术主要包括预编程序控制技术、指令遥测遥控技术和复合控制技术三大类。其中复合控制技术是将前两种技术融合在一起的控制技术,并随着信息技术的发展,逐渐发展为更加先进的智能自动控制技术。但是,由于航路环境复杂,天气多变,以及空中流量巨大,在各个航路的交叉点附近,无人机与有人机,无人机与无人机的飞行冲突十分突出,而无人机操作员无法直接观察无人机航路周围的飞行情况,在操作平台上又无法直接显示其他航空器的飞行情况,尤其是在一些临时飞行计划或者是个别无人机黑飞(擅自飞行)等特殊情况下,无人机的防相撞主要依靠无人机的自主防相撞技术。就算一般情况下,也需要无人机以及无人机上的各种设备和操纵人员高度协调一致,相互配合来达到防相撞的目的。从这个层面上来说,其技术复杂程度要高于有人驾驶飞机,容易出现可靠性问题。在技术上,因为没有飞行员,机载系统复杂,给无人机的飞行带来不便。当飞行中出现故障时,无人机本身不能排除和做出瞬间调整,通常要带着故障返回基地,易发生摔机、相撞等事故。此外,飞机与操纵人员之间的交互作用、协调和变化的程序要比有人驾驶飞机复杂得多。一方面要求机载设备的智能化程度高,要有安全可靠的数据链,另一方面对操纵人员的素质要求也很高,操纵人员不仅要监控飞机的飞行状态,适时改变航向,更重要的是,必须在关键时刻从控制中心发送动作指令,使无人机能够实时快速地反应。总之,如果没有成熟的无人机飞行防相撞技术,无人机是无法实现航路飞行的。



3. 空域阶段的应用需求

无人机在固定空域内飞行,由于无人机多变的飞行轨迹,因而其飞行剖面的变化也呈现多样性,这必然对其他航空器的飞行和安全产生很大影响;同时也必须按照无人机空域最高高度,调整与有人机飞行的垂直间隔(此间隔应该大于现行规定的高度间隔),并确定进出空域的方法、高度和水平范围,以防止无人机在固定空域内与其他航空器或障碍物相撞。

各种性能的无人机在固定空域内飞行任务多样、战术运用灵活,飞行监控和管理具有全时域、全高度层的特点。无人机在航时设计上,可以长达几十小时、几百小时,甚至上千小时;飞行高度的设计可以从低空、中空甚至到三万米以上的高度。因此,飞行监控和管理必须是全时域、全高度层。这无疑增加了无人机空管人员的负担,而且长时间的人为监控难免出现一些纰漏,所以当出现人为纰漏时,为保证无人机在固定空域内安全飞行,必须具有成熟的自主防相撞技术,无论在何时都能使无人机自主脱离危险状态。

美国已经发生了一些低空无人机与直升机相撞的事故,而在高空,无人机也发生了与C-130飞机相撞的事故。在美国这样空管水平很高的航空大国,已经发生了这样严重的飞行事故,出现这种情况主要原因就是无人机飞行的技术水平尤其是无人机飞行防相撞技术水平跟不上无人机数量增多的步伐。这不得不引起我们对无人机飞行防相撞技术的重视。未来,空域资源越来越紧缺,无人机和有人机共域飞行已经势在必行,在有人机空域中执行任务的无人机,都必须适应我国空中交通管理系统的要求,满足无人机与有人机之间共享一个空域飞行的必要条件,不能由于无人机的进入而给原来的空域有人机用户带来影响和不安全因素。因此,我们需要无人机加强自主防相撞能力,确保空域中无人机的飞行安全。

1.1.3 无人机飞行防相撞功能需求

无人机飞行防相撞技术是实现无人机蓬勃发展的关键所在,为实现无人机防相撞技术,无人机必须具备以下三点技术功能需求。

1. 感知探测的功能需求

无人机感知探测设备是实现无人机防相撞的前提,越是先进的无人机,就必须装备越先进的感知探测设备,以便无人机在飞行过程中对周边环境进行感知探测。感知探测设备的核心功能就是主动获取视场或一定范围内所有物体直



接、精确、全面的状态信息。无人机防相撞的实现就是依靠感知探测设备的信息收集,先进的感知探测设备必须具备探测半径大、视场广、跟踪能力强、可靠性高和虚警率低等特点,同时还可从尺寸、成本、技术成熟度、带宽要求、功率要求和重量等六项成本指标上对其加以评判。因此,为满足无人机飞行防相撞的需求,就必须先满足感知探测功能的需求。

2. 评估决策的功能需求

无人机评估决策技术是在无人机成功感知探测周围环境的情况下,根据感知探测反馈信息,利用设定好的程序算法对无人机周边环境进行安全评估,并利用计算机算出最优飞行轨迹,是进行避让控制的关键。评估决策的核心是评估决策算法,评估决策算法必须具有速度快、复杂度低、容错性好等特点,而对评估决策算法可用冲突数量、碰撞数量、飞机存活率、飞机平均寿命和生成航路点数量 5 项评价指标评判,其中冲突数量、碰撞数量、飞机存活率和飞机平均寿命为有效性指标,生成航路点数量为效率指标。无人机飞行防相撞技术的核心就在于评估决策功能的实现,它类似于无人机自主防相撞的大脑,所以要实现无人机飞行防相撞必须拥有评估决策功能。

3. 避让控制的功能需求

无人机避让控制是无人机飞行防相撞的最后一步,也是完成防相撞的重要环节。在这一步主要是把前面两步所形成的指令付诸机械行为,达到操纵无人机避开障碍物的目的,因此,避让控制必须具有可靠性和快速性。虽然这一步在技术层面来讲是最简单的,但是在实际过程中却是最容易出现故障的地方,如果对正确的指令没有及时响应或者不响应,那么无人机就失去了防相撞的能力。避让控制主要以响应延迟与冗余度指标来评价。为了实现无人机飞行防相撞的目的,避让控制是无人机必须具备的功能,也是无人机飞行防相撞的最低需求。

1.1.4 无人机飞行防相撞主要问题

2010 年世界无人驾驶飞行器市场的总价值超过 55 亿美元。2020 年世界无人驾驶飞行器市场的总价值将达到 710 亿美元。无人机销量增长最快的将是小型无人机、战术无人机、高空无人机以及作战无人机等,民用无人机的销量也将有一定增长。目前全球共拥有军用和民用无人机约 12 万架。据有关专家分析,到 2030 年,无人机的全球飞行量将达到全球飞行时间的 60% 以上。可以断言,未来 20~50 年无人机在我国将迅猛发展。目前,我陆海空、火箭、战略支援和武