

# 无人机自主防撞关键技术与应用分析

刘慧颖<sup>1</sup>, 白存儒<sup>1</sup>, 杨广珺<sup>2</sup>

(1. 西北工业大学 航空学院, 西安 710072)

(2. 西北工业大学 无人机特种技术国防科技重点实验室, 西安 710065)

**摘要:** 无人机与有人机在多机种和不同合作程度下共享空域飞行是未来的发展趋势, 防撞问题成为制约无人机飞出隔离空域的关键挑战。结合现有飞机防撞体系, 从无人机防撞特殊性出发分析无人机自主防撞需求, 提出无人机自主防撞系统的框架, 归纳分析两大主要关键技术——感知探测技术和防撞算法, 以及二者的不同应用范围和主要问题, 在此基础上提出无人机自主防撞管理体系架构, 总结探讨无人机自主防撞关键技术的发展趋势。

**关键词:** 无人机; 自主防撞; 感知; 避让

**中图分类号:** V279

**文献标识码:** A

## Application and Analysis and Discussion of Autonomous Collision Avoidance Techniques for Unmanned Aerial Vehicle

Liu Huiying<sup>1</sup>, Bai Cunru<sup>1</sup>, Yang Guangjun<sup>2</sup>

(1. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(2. National Key Laboratory of Science and Technology on Unmanned Aerial Vehicle, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** Sharing airspace with manned aircrafts in different degree of cooperation is the future trend of unmanned aerial vehicle(UAV) operations, and collision avoidance issues become key challenges hindering UAV from flying beyond segregated airspace. Requirements of autonomous collision avoidance for UAV are analyzed from the perspective of the particularity of the UAV collision avoidance combined with current layered aircraft collision avoidance strategies, and framework of UAV autonomous collision avoidance system is proposed. Two key techniques and their application scope and main issues of UAV autonomous collision avoidance are analyzed and discussed inductively, i. e. sensing technologies and collision avoidance algorithms, and on this basis management system of UAV autonomous avoidance is proposed. Finally, development trends of UAV autonomous collision avoidance techniques are explored.

**Key words:** unmanned aerial vehicle; autonomous collision avoidance; sense; avoid

## 0 引言

随着科学技术的快速发展, 无人机在军民用各大领域得到广泛应用<sup>[1]</sup>。无人机的飞行活动量不断增加, 给复杂空域环境内的其他飞行器以及地面

第三方带来很大的安全隐患。无人机可能引发的危害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对象。为保障飞行安全, 目前各国对无人机的运行管理普遍保持审慎的态度, 将无人机限制在特定的空域内, 与有人机分开、隔离运行<sup>[2]</sup>。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。

无人机与有人机共享空域飞行是未来的发展趋势, 防撞问题成为制约无人机飞出隔离空域的关

键挑战。欧美等航空发达国家提出了无人机空域整合计划,从技术、标准、规章、运行等方面开展广泛的研究,推进无人机与有人机共享空域运行的进程。

本文结合现有飞机防撞体系从无人机防撞特殊性出发分析无人机自主防撞的需求,在此基础上提出无人机自主防撞系统的功能框架,梳理论述无人机自主防撞的两大主要关键技术——感知探测技术和防撞算法,分别归纳分析了它们的应用范围和主要问题,结合发展前景设计无人机自主防撞管理体系的顶层框架,最后总结探讨无人机自主防撞系统与关键技术的发展趋势。

## 1 无人机自主防撞需求及系统框架

### 1.1 无人机自主防撞需求

民用航空领域目前已形成一套成熟的飞机防撞体系,如图 1 所示,通过多层防撞策略有效降低飞机空中相撞的风险<sup>[3]</sup>。其中“看见避让(See and Avoid)”是空中航行的基本原则,ATC(空中交通管制)服务、TCAS(空中交通防撞系统)给出的避让建议以及“看见避让”均由飞行员执行。

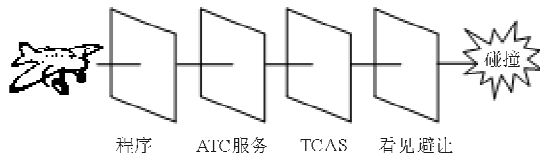


图 1 飞机多层防撞体系

Fig. 1 Layered aircraft collision avoidance strategies

目前普遍应用的无人机隔离运行方式属于程序防撞策略,对有人机防撞体系的第一层。该层策略局限性大,无法应对偏离预定飞行计划、突然闯入隔离空域的飞机。无人机防撞具有一定特殊性,主要体现在:(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 ATC 服务、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)无人机广泛应用于监视、搜救等领域,在这类任务中不是“点对点”常规飞行方式,而是特定范围内的盘旋、扫描或跟踪,并需要根据动态改变飞行路线,使得飞行任务具有动态、非常规特征;(4)目前无人机主要由操控员通过通信

链路远程遥控实施防撞,难以应对链路丢失的应急情况,严重依赖通信链路的保障。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。

美国联邦航空局要求无人机在进入国家空域系统前须达到与有人机相当的安全水平<sup>[4]</sup>,通常以每飞行小时的碰撞次数来衡量,这已成为各国普遍认同的无人机共享空域运行的可接受安全目标。为达到与有人机相当的安全水平、实现共享空域运行,无人机需要参照有人机防撞体系建立自主防撞系统,承担机上飞行员转移的防撞责任,建立与 ATC 服务、TCAS 和地面操控员的交互机制,通过自身的“感知避让(Sense and Avoid)<sup>[5]</sup>”保障与其他飞机的安全间隔和避免碰撞,将碰撞风险降低至安全目标水平;从机载设备、决策算法、空域管理等方面提升无人机自主防撞的实时性和智能化水平。

### 1.2 无人机自主防撞系统及其关键技术

基于无人机自主防撞应用需求的分析可知,无人机自主防撞的关键技术主要包括:(1)对无人机外部飞行环境态势的感知与探测;(2)对不同碰撞冲突态势的防撞避让决策。据此建立无人机自主防撞系统的框架,如图 2 所示,包括“感知”和“避让”两大功能模块,分别由感知探测技术和防撞算法具体实现。

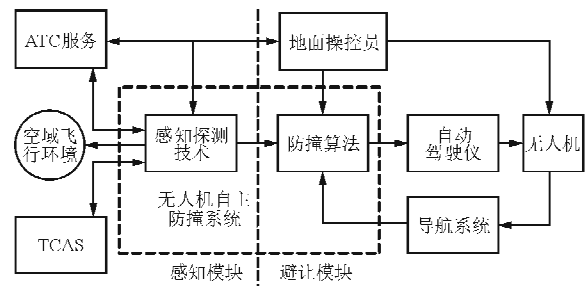


图 2 无人机自主防撞系统框架

Fig. 2 Framework of autonomous collision avoidance system of UAV

感知探测技术负责对无人机周围空域飞行环境的探测以及与 TCAS、ATC 服务和地面操控员的交互,从而实现对周围飞行环境中入侵机状态信息(包括位置、速度等)的感知,是无人机实施自主防撞的必要前提。

防撞算法根据感知探测技术提供的入侵机状态信息,结合地面操控员和导航系统提供的预定飞

行计划和本机状态信息,按照设定的安全目标(如无人机与入侵机之间的距离大于最小安全间隔)进行评估决策,制定满足无人机飞行性能约束、预定飞行航迹偏离最小化的防撞策略,以机动指令的形式输出至自动驾驶仪,从而实现入侵机的自主避让。同时还需考虑碰撞冲突解除后重回预定飞行航迹的问题。

## 2 感知探测技术应用分析

无人机感知探测技术目前存在多种不同的解决方案,根据感知探测方式可以分为合作型和非合作型两大类。

应答机、TCAS 以及 ADS-B(广播式自动相关监视系统)能够获取目标飞机(装载同类设备的飞机)的直接、精确、全面的的状态信息,属于合作型感知探测设备,必须依靠通信链路且探测目标受限。其中,ADS-B 具有信息全面、更新快、精准度高等优势,能够实现与 ATC 服务和地面操控员的交互,有助于无人机更为灵活可靠地实施感知避让。为改善小型无人机的可探测性,Robert C. Strain 等<sup>[6]</sup>研究了一套重量轻、成本低、能耗低、便携式的 ADS-B 系统;Florent Martel 等<sup>[7]</sup>利用 ADS-B 作为核心组件成功研制了一套小于 5 kg 的 4D 防撞系统,包括一个 ADS-B 发送机、一台微型飞行计算机和电池组件。

雷达、视觉、EO/IR(光电/红外)等非合作型传感器能够感知探测视场范围内的所有物体,包括装备应答机、TCAS 或 ADS-B 设备的飞机以及地势、鸟类等非合作型目标。雷达和 EO/IR 的探测视场有限,如图 3 所示<sup>[8]</sup>,探测性能受到无人机姿态影响而存在盲区,如在坡度转弯时视场将随着侧倾角在水平面上转动从而导致很多入侵机无法被探测。

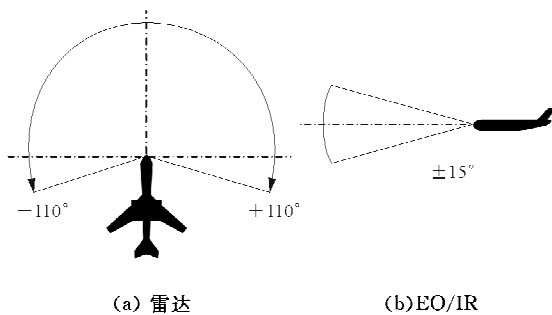


图 3 传感器有限视场示意图

Fig. 3 Limited field-of-view of sensors

为了保障对入侵机及时、稳定的航迹预测,有效应对两机高速接近的冲突情景,雷达作为一项成熟的飞机防撞技术,其探测范围、扫描角速度、更新率和信号质量等均需要进一步改进提高。Y. K. Kwag 等<sup>[9]</sup>研究了适用于低空飞行无人机防撞雷达的关键设计参数。照相机、摄像机这类视觉传感器成本、尺寸、重量和功率要求相对较低,适用于小型无人机;实时的图像处理技术是其应用面临的关键问题<sup>[10-11]</sup>。其中,单目照相机图像处理计算量小,对其“深度丧失”的问题可以采用简单几何估算、同步定位与建图等方法<sup>[12-14]</sup>来解决。

对于传感器的选用,A. D. Zeitlin<sup>[15]</sup>从技术标准的角度给出了一些建议,B. C. Karhoff 等<sup>[16]</sup>提出了一套加权评价方法,包括探测半径、视场、跟踪能力、可靠性和虚警率等五项收益指标以及尺寸、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,通过收益成本分析为特定无人机选用合适的感知探测技术。

TCAS 由于方位测量精度差,发布的解脱咨询局限于垂直方向(爬升或下降);EO/IR 可以提供高精度方位角和高度角的测量,与 TCAS 互补组合运用可以实现更为灵活的防撞避让。在满足尺寸、重量等硬性要求的前提下,组合使用不同类型传感器能够改善无人机感知探测能力、提升防撞系统的冗余度,是未来的应用趋势。多传感器的数据融合是其面临的主要问题。美国空军研究实验室和诺·格公司成功研制了基于 EO-TCAS 数据融合的无人机自主防撞系统,对 EO 与 TCAS 的每项独立传感器数据进行管理和修正,通过数据关联、数据融合和航迹管理三个处理过程最终实现对入侵机的探测跟踪,如图 4 所示<sup>[17]</sup>。

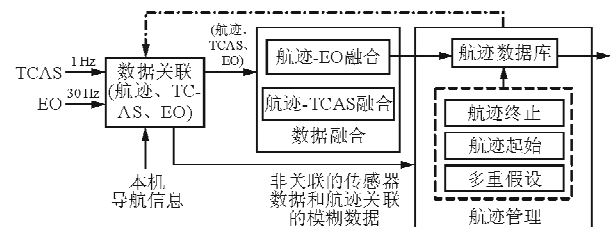


图 4 EO-TCAS 数据融合功能框架

Fig. 4 Data fusion architecture for EO-TCAS

## 3 防撞算法应用分析

防撞算法是无人机自主防撞避让决策的关键

功能模块,众多学者研究并提出了不同的无人机防撞算法,归纳起来主要分为两种:一种是采用几何算法,通过分析无人机和入侵机在几何空间的相对运动关系,按照冲突探测与解脱实施被动式防撞;另一种是转化为最小安全间隔约束条件下的航迹规划问题,采用航迹规划算法、根据感知探测的入侵机状态信息主动规划从当前位置到目标位置的无碰撞安全航迹。

### 3.1 几何算法

几何算法是解决防撞问题最直观的方法,最小接近点法(Point of Closest Approach,简称PCA)和碰撞锥方法(Collision Cone Approach,简称CCA)是其应用的典型代表。

PCA根据无人机与入侵机的当前状态信息计算到达最小接近点的时间 $\tau$ 和错开距离矢量 $r_m$ ,当 $\|r_m\| \leq R$ (最小安全间隔)且 $\tau > 0$ 时,启动冲突避让。J. W. Park等<sup>[18]</sup>提出一种矢量分担解脱方法,综合考虑飞机机动性能和避让效率,速度慢的飞机在相同时间内可以执行更多的避让机动因而分担更多的份额,但不能直接应对两机迎头飞行( $r_m = 0$ )的特殊情况。

CCA<sup>[19]</sup>最初是针对不规则外形的平面运动机器人提出的,后来扩展应用到三维动态环境中的飞机防撞上。CCA的基本原理是以入侵机为中心设置一个无人机必须避让的球体保护区,由无人机到球体的切线构成碰撞锥,当调整无人机相对速度与球相切求解最优避让机动<sup>[20-21]</sup>。目前的安全间隔标准中,水平安全间隔远大于垂直安全间隔,球体模型通常以水平安全间隔为避让半径,将增大避让机动与预定飞机计划的偏离,同时造成垂直方向空域资源浪费;圆柱体模型<sup>[22]</sup>相比球体和轴向最小包围盒<sup>[23]</sup>能更灵活独立地满足水平安全间隔和垂直安全间隔的运行要求。由于无人机垂直方向的机动性能相对水平方向更受限制且风险更高,而三维最优避让机动更倾向于垂直方向,S. C. Han等<sup>[24]</sup>根据无人机飞行高度上下限、最低安全高度、入侵机飞行高度和垂直机动性能等因素设定垂直机动加权系数,综合平衡避让机动的最优性和安全性。

几何算法直观简单、计算成本低,无论入侵机

是否协同避让都能求解三维飞行环境中的最优避让机动,但大都针对两机冲突的一对一避让。随着入侵机的增加,重复检查每架入侵机的计算量相当庞大;当遭遇密集的多机冲突时,一对一避让将不再适用。J. W. Park等<sup>[18]</sup>提出了一种多机防撞理念,合并两架入侵机的保护区计算其几何中心,从而转化为两机冲突。A. L. Smith等<sup>[25]</sup>研究了允许无人机同时探测避让多架入侵机的聚合碰撞锥方法,并首次开展多机三维几何防撞飞行试验验证了算法的有效性。

### 3.2 无碰撞航迹规划算法

目前,针对无人机防撞应用的航迹规划算法主要有势场方法<sup>[26-28]</sup>、线性规划<sup>[28-29]</sup>、离散化空域<sup>[28,30]</sup>和随机理论<sup>[31-32]</sup>等方法。

势场方法利用物理学中吸引和排斥的法则,将无人机的目标航路点视为引力、入侵机视为斥力,无人机在合力作用下飞行。该方法规划速度快,根据无人机与目标航路点的距离设置优先级可进一步提高计算效率;应用关键是权衡处理吸引和排斥的关系,促使无人机在保障与入侵机必要安全间隔的同时快速到达目标位置。K. Sigurd等<sup>[26]</sup>提出一个引力常量 $\gamma$ ,表示确保无人机安全到达目标航路点的引力最小权重,无人机受到的合力表示为 $F_{\text{合}} = \gamma \times F_{\text{引}} + (1 - \gamma) \times F_{\text{斥}}$ ,研究得出 $\gamma = 0.66$ 时能够生成快速抵达目标航路点的无碰撞安全航迹。对于引力和斥力相等处局部最小点导致规划失败的问题,Liu JY等<sup>[27]</sup>提出了一种改进的人工势场算法,根据李雅普诺夫稳定性定理促使无人机尽快逃离局部最小点并到达目标航路点。

在现有的计算水平和无人机防撞应用的动态环境中,大多数航迹规划算法的计算量十分庞大、通常有必要进行实时性改进。混合整数线性规划从全局角度为多架合作型飞机规划无碰撞航迹,但随着飞机数量的增加,计算量将呈指数上升;通常采用滚动时域控制在一个有限的时间步长范围内分段求解局部次优航迹。A\*搜索建立在离散化空域的基础上,计算复杂性随着空域增大而显著增加;动态稀疏A\*搜索<sup>[28]</sup>是一种改进的实时算法,根据无人机自身性能和飞行任务缩减搜索空间并随每段时间步长动态创建带时间维度的成本网格。

马尔可夫决策过程将无人机防撞问题转化为对一个随机系统的最优控制,在给定飞机动力学模型、传感器性能和入侵机行为模型的基础上求解最小化航迹偏离的无碰撞航迹;该方法需要离散飞机相遇模型,离散状态量随状态变量成指数增加,现有的求解器还不足以求解三维问题,目前主要通过分离水平和垂直方向的动态来降低计算复杂性;对于非合作型传感器探测信息不确定且视场受限的情况,可以采用部分可观马尔可夫决策过程<sup>[32]</sup>。

J. Holt 等<sup>[28]</sup>在不同空域大小和飞机数量的仿真环境中开展了对不同规划算法的比较研究,提出了 5 项评价指标,其中冲突(两机间隔 2 s)数量、碰撞(两机间隔 1 s)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。在二维冲突情景中比较人工势场算法、混合整数线性规划和动态稀疏 A\* 搜索,得出人工势场算法综合性能表现最佳,在所有冲突情景中都能获得更高或相当的飞机存活率,并且计算效率随着飞机数量的增加有着显著改善。

对于多架无人机协同、编队飞行的防撞问题,R. K. Sharma 等<sup>[33]</sup>研究采用群智能算法,对机群中的无人机设置一系列行为规则,包括凝聚规则、跟随规则、导引规则、分散规则、队列规则和避让规则;其中分散规则保障机群中无人机之间的最小安全距离,避让规则保障无人机机群与其他机群和飞机之间的安全距离;通过设置不同的规则权重参数分别实现无人机机群整体和机群成员个体对外来入侵机的防撞避让。

#### 4 无人机自主防撞管理体系

在日益复杂的空域环境下,当前的防撞系统缺少信息化的管理手段和统一的系统平台,感知探测技术、防撞避让算法技术还存在着分散独立、完整性和规范性不足、效率低下、安全性整体评估缺乏等问题,因而无人机防撞能力相比有人机尚有差距。在感知探测和防撞算法不断发展的基础上,还需与现有飞机防撞体系建立完善的数据整合措施,从管理顶层构建无人机自主防撞的管理体系框架,实现信息融合和深入挖掘,加快无人机共享空域运行的发展进程。

针对这一需求,构建的管理体系框架概念如图

5 所示,为管理平台搭建、空管数据标准化和信息化管理形成完善的多维数据体系提供参考,推动集成化数据资产体系的建立。

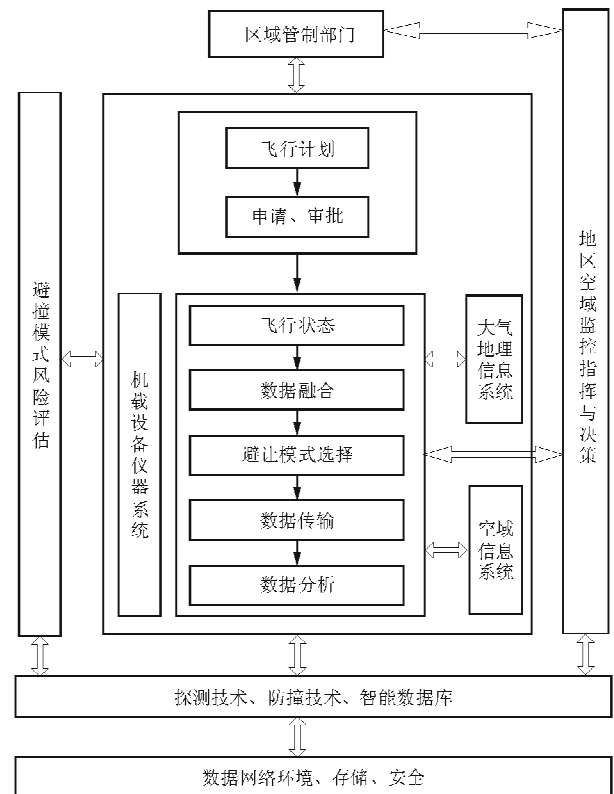


图 5 无人机自主防撞管理体系

Fig. 5 Manage system of UAV autonomous collision avoidance

感知探测技术、避让算法技术和基于这两项技术建立的数据库是管理体系的最基本组成部分,其他系统包括:飞行计划建立、申请和审批;机载飞行数据、入侵探测数据、避让模式选择的数据收集和分析;大气地理信息、空域实时信息、机载设备健康监控、风险评估和数据存储。上述四个系统的整合求解性能、可靠性、时效性和连续工作时间将直接关系到无人机与有人机共享空域的质量和效率。为此,应选取上述系统为管理对象,采取基于自身和入侵机飞行状态的管理体系结构形式,按照安全间距标准、飞行性能、探测设备和数据传输完好性等分类进行自主式无人机防撞风险评估的层次结构设计。通过将系统分解成具有不同功能的多个层次,定义不同层次之间的数据接口和通讯协议,保证系统内部不同层次模块的互操作性、互传递性和安全性,在区域飞行管理的统一决策下制定最佳

防撞方案并组织实施,完成共享空域安全飞行。

无人机周边飞行环境内的目标存在合作不确定性,因此无人机自主防撞的综合管理是一个庞大的数据体系,在链路资源有限的前提下获取环境态势信息对感知探测技术提出了促进需求。随着大规模数据处理能力的增强,防撞体系能够基于大量的多目标状态监测数据、实时当地空域气象数据和地表数据而搭建。随着历史处理经验的累积,用数据来决策、用数据来管理、用数据来创新的思想将逐步应用于无人机自主防撞的综合管理过程中。记录和收集的数据将是支持无人机航迹规划技术创新和空域管理方法改进的珍贵资产。

## 5 结束语

无人机自主防撞系统作为补偿“看见避让”、TCAS和ATC服务层级缺失的防撞策略,是促进无人机与有人机共享空域运行、推动无人机空域整合计划的必要系统,有利于缓解空域资源紧张的局面。感知探测技术和防撞算法是支撑无人机实施自主防撞的两大关键技术。

合作型和非合作型感知探测设备具有一定的优势互补特性,在目前复杂的空域环境中,基于数据融合的多传感器组合使用可以实现对入侵机更为精确、全面的探测跟踪,是无人机防撞应用的发展趋势。

几何算法和无碰撞航迹规划算法为无人机防撞问题提供了两种不同的解决思路,几何算法的优势主要体现在最优解求解速度;受目前计算水平限制,碰撞航迹规划算法通常需要牺牲最优解来确保实时性。在未来的应用中算法有待改进在多机、非协作、三维环境下的实时防撞性能。

目前无人机防撞能力相比有人机尚有差距,今后的研究将向智能化、实时性、与现有飞机防撞体系的整合性发展,重视数值、半物理仿真和飞行试验等验证评估方法,开发满足给定安全标准要求的无人机自主防撞系统,加快无人机共享空域运行的发展进程。对空管数据资源整合利用、将有效数据资源转化为知识体系是促进无人机自主防撞系统发展和共享空域运行的重要机遇,应以我国空管信息化建设为契机,构建完善的管理系统框架和管理平台,形成完善的多维数据体系,为无人机运行管

理提供坚实的基础资源。

## 参考文献

- [1] Konstantinos Dalamagkidis, Kimon P Valavanis, Les A Piegl. On integrating unmanned aircraft systems into the national airspace system[M]. 2nd ed. Berlin: The Springer Shop, 2012:11-42.
- [2] International Civil Aviation Organization. Unmanned aircraft systems(UAS)[S]. ICAO, Circular 328 AN/190, 2011.
- [3] Korn B, Edinger C. UAS in civil airspace: demonstrating “sense and avoid” capabilities in flight trials[C]. Digital Avionics Systems Conference, 2008.
- [4] Federal Aviation Administration. Special military operations[S]. FAA Order JO 7610.4, 2004.
- [5] FAA Sponsored SAA Workshop. Sense and avoid(SAA) for unmanned aircraft systems(UAS)[S]. Federal Aviation Administration, 2009.
- [6] Robert C Strain, Matthew T DeGarmo, J Chris Moody. A lightweight, low-cost ADS-B system for UAS applications[J]. AIAA-2007-2750, 2007.
- [7] Florent Martel, Michael Mullins, Naima Kaabouch, et al. Flight testing of an ADS-B-based miniature 4D sense and avoid system for small UAS[J]. AIAA-2011-1419, 2011.
- [8] Standard specification for design and performance of an airborne sense-and-avoid system[S]. F2411-07, ASTM International, 2004.
- [9] Kwag Y K, Chung C H. UAV based collision avoidance radar sensor[C]. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2007; 639-642.
- [10] Mejias L, McNamara S, Lai J, et al. Vision-based detection and tracking of aerial targets for UAV collision avoidance[C]// Intelligent Robots and Systems(IROS), 2010 IEEE/RSJ International Conference on, 2010; 87-92.
- [11] Carnie R, Walker R, Corke P. Image processing algorithms for UAV “sense and avoid”[C]. Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006. Proceedings 2006 IEEE International Conference on, 2006; 2848-2853.
- [12] Changhong Fu, Miguel A Olivares-Mendez, Ramon Suarez-Fernandez, et al. Monocular visual-inertial SLAM-based collision avoidance strategy for fail-safe UAV using fuzzy logic controllers[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2014, 73(1-4): 513-533.
- [13] Watanabe Y, Calise A J, Johnson E N. Vision-based obstacle avoidance for UAVs[C]// AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit. 2007.
- [14] Choi H, Kim Y, Hwang I. Reactive collision avoidance of unmanned aerial vehicles using a single vision sensor[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2013, 36(4): 1-7.
- [15] Zeitlin A D. Issues and tradeoffs in sense & avoid for un-

- manned aircraft[C]//Systems Conference, 2010 4th Annual IEEE. IEEE, 2010; 61-65.
- [16] Karhoff B C, Limb J I, Oravsky S W, et al. Eyes in the domestic sky; an assessment of sense and avoid technology for the army's[C]//Systems and Information Engineering Design Symposium, IEEE, 2006; 36-42.
- [17] Portilla E, Fung A, Chen W Z, et al. Sense and avoid (SAA) & traffic alert and collision avoidance system (TCAS) integration for unmanned aerial systems (UAS) [C]//2007 Conference and Exhibit, Rohnert Park, California, 2007.
- [18] Park J W, Oh H D, Tahk M J. UAV collision avoidance based on geometric approach[C]//SICE Annual Conference, IEEE, 2008; 2122-2126.
- [19] Chakravarthy A, Ghose D. Obstacle avoidance in a dynamic environment; A collision cone approach[J]. Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, IEEE Transactions on, 1998, 28(5): 562-574.
- [20] Goss J, Rajvanshi R, Subbarao K. Aircraft conflict detection and resolution using mixed geometric and collision cone approaches[C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, 2004; 1-20.
- [21] Carbone C, Ciniglio U, Corrado F, et al. A novel 3d geometric algorithm for aircraft autonomous collision avoidance [C]//Decision and Control, 2006 45th IEEE Conference on, IEEE, 2006; 1580-1585.
- [22] Luongo S, Corrado F, Ciniglio U, et al. A novel 3D analytical algorithm for autonomous collision avoidance considering cylindrical safety bubble[C]//Aerospace Conference, IEEE, 2010; 1-13.
- [23] Conde R, Alejo D, Cobano J A, et al. Conflict detection and resolution method for cooperating unmanned aerial vehicles[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2012, 65(1-4): 495-505.
- [24] Han S C, Bang H. Proportional navigation-based optimal collision avoidance for UAVs[C]//2nd International Conference on Autonomous Robots and Agents, 2004; 13-15.
- [25] Smith A L, Harmon F G. UAS collision avoidance algorithm based on an aggregate collision cone approach[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2010, 24(4): 463-477.
- [26] Sigurd K, How J. UAV trajectory design using total field collision avoidance[C]//Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, 2003.
- [27] Liu J Y, Guo Z Q, Liu S Y. The simulation of the UAV collision avoidance based on the artificial potential field method[J]. Advanced Materials Research, 2012, 591: 1400-1404.
- [28] Holt J, Biaz S, Aji C A. Comparison of unmanned aerial system collision avoidance algorithms in a simulated environment[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2013, 36(3): 881-883.
- [29] Richards A, How J P. Aircraft trajectory planning with collision avoidance using mixed integer linear programming[C]//American Control Conference, Proceedings of the 2002, IEEE, 2002; 1936-1941.
- [30] Alejo D, Conde R, Cobano J A, et al. Multi-UAV collision avoidance with separation assurance under uncertainties[C]//Mechatronics, 2009, ICM 2009, IEEE International Conference on, IEEE, 2009; 1-6.
- [31] Temizer S, Kochenderfer M J, Kaelbling L P, et al. Collision avoidance for unmanned aircraft using Markov decision processes[C]//Proc. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, 2010.
- [32] S Temizer, M J Kochenderfer, L P Kaelbling, et al. Unmanned aircraft collision avoidance using partially observable Markov decision processes[R]. ATC-356, Lincoln Laboratory, 2009.
- [33] Sharma R K, Ghose D. Collision avoidance between UAV clusters using swarm intelligence techniques[J]. International Journal of Systems Science, 2009, 40(5): 521-538.

### 作者简介:

刘慧颖(1991—),女,硕士研究生。主要研究方向:空中交通管理。

白存儒(1952—),男,教授。主要研究方向:实验流体力学、空中交通管理。

杨广瑞(1976—),男,博士,工程师。主要研究方向:实验流体力学、无人机气动布局。

(编辑:马文静)