

文章编号: 1674-8190(2022)06-050-09

无人机空中冲突探测与避撞研究

杨姝, 王一桦

(中国民用航空飞行学院 空中交通管理学院, 广汉 618307)

摘要: 近年来, 无人机运输业迅猛发展, 其飞行过程中的冲突探测与避撞问题成为亟需解决的关键问题。在无人机周围建立合理的三维空间模型, 优化包括紧急避撞区域、一般避撞区域、监视及提前避撞区域的三级避撞区域系统, 并利用ADS-B报文提供的无人机位置、速度等信息, 基于无人机一般二维平面上的冲突探测与避撞算法, 通过增加垂直方向上的冲突识别来改进冲突探测算法, 对比调速、调向两种避让方案在各避撞区域的成功率。结果表明: 改进算法能够在无人机数量大幅增加的情况下有效识别冲突无人机, 同时采用先调速后调向的避让方案, 使避撞成功率达到99.75%, 为保障无人机的飞行安全提供有效策略。

关键词: 无人机; 冲突探测; ADS-B; 三级避撞; 决策避让

中图分类号: V328; V279

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2022.06.05

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on Air Conflict Detection and Collision Avoidance of UAV

YANG Shu, WANG Yihua

(College of Air Traffic Management, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China)

Abstract: In recent years, with the rapid development of UAV transportation industry, the problem of conflict detection and collision avoidance during its flight has become a key problem to be solved. A reasonable three-dimensional spatial model is established around the UAV, a three-level collision avoidance area system including emergency collision avoidance area, general collision avoidance area, surveillance and advance collision avoidance area is optimized, and the information such as UAV position and speed provided by ADS-B (automatic dependent surveillance-broadcast) messages is used, based on the general two-dimensional plane of UAV conflict detection and collision avoidance algorithm, and the conflict detection algorithm is improved by adding conflict recognition in the vertical direction, and the success rates of the two avoidance schemes, speed and direction, are compared in each collision avoidance region. The results show that the algorithm can effectively identify conflicting UAVs when the number of UAVs increases significantly, while the success rate of collision avoidance using the speed-then-direction avoidance strategy reaches 99.75%, providing an effective strategy for ensuring the flight safety of UAVs.

Key words: UAV; conflict detection; ADS-B; three-stage collision avoidance; decision avoidance

收稿日期: 2021-10-24; 修回日期: 2022-03-17

通信作者: 王一桦, 543486747@qq.com

引用格式: 杨姝, 王一桦. 无人机空中冲突探测与避撞研究[J]. 航空工程进展, 2022, 13(6): 50-58.

YANG Shu, WANG Yihua. Research on air conflict detection and collision avoidance of UAV[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(6): 50-58. (in Chinese)

0 引言

近年来,随着中国航空运输业的快速发展,无人机已被广泛应用于包括测绘、拍摄、精准农业、监控、搜救和公共安全等各个领域^[1]。随着我国低空空域的逐步开放,无人机运输业必将迎来迅猛发展的新契机,但其遭遇飞行冲突的风险也日益上升,避撞问题成为无人机行业发展亟需解决的关键问题,对无人机飞行冲突进行提前探测和避撞的必要性愈发突出。

广播式自动相关监视(Automatic Dependent Surveillance-Broadcast,简称ADS-B)是飞行器上的一种自动监视系统,利用卫星导航技术向空中交通管制(Air Traffic Control,简称ATC)和其范围内的飞行器发送/接收信息。ADS-B在飞行器冲突探测和运行监视方面有很大优势,可以提供更为精准的监视精度和丰富的监视信息等^[2],可用于空中避撞、监视、辅助进近等方面。ADS-B具有价格相对较低,速度、位置等信息精度高,更新速度快,监视范围广等特点^[3]。吴学礼等^[4]在改进EVENT模型的基础上,提出了ADS-B监视技术下各个参数的计算方法,提高了飞行器纵向碰撞风险的检测精度。相对于有人机由管制员、飞行员及导航设施等提供多方保障,无人机适用于低空作业,保障设施完善程度远不及有人机,因此,赵建华等^[5]基于概率论和系统可靠性理论,建立无人机与运输类飞机的碰撞风险模型。针对无人机相互碰撞风险评估,V. D. Berdonosov^[6]提出通过ADS-B系统获得的两个或三个轨道点来估计无人机的轨道,计算无人机可以碰撞的临界速度范围的两个截止值;P. Pierpaoli等^[7]提出基于ADS-B和可预测的冲突避撞算法的模型,将该模型预测控制器应用于一对无人机在即将发生碰撞时的冲突避撞,并对其安全性进行评估;徐剑锋^[8]将场势理论和ADS-B技术相结合,设计了一种以ADS-B技术为基础的无人机航迹规划算法;王倩等^[9]结合静态保护区原理,基于滑动窗多项式拟合法对无人机入侵航迹进行预测与冲突告警。无人机飞行与传统运输航空相比,飞行航路不固定且随意性较大,这给无人机空中冲突探测与避撞带来了极大困难。由上述研究可以发现,目前针对无人机的ADS-B碰撞研究,主要采用碰撞模型、航迹预测等方法,基于EVENT碰撞模型评估所得到的碰

撞风险概率过于保守,会造成过多的无用避让;航迹预测的准确性依赖于数据预处理结果的正确度,且在实时运算时运算量很大,需要高性能的计算机,很难实现大范围普及。

鉴于此,本文对无人机冲突探测和避撞问题进行研究,基于传统的两圈层保护区及二维平面避撞策略,提出从纵向、侧向及垂直方向三个方向综合评估无人机冲突情况,并建立三圈层保护区,提升筛选冲突无人机的准确性;同时改进基于ADS-B的无人机冲突避撞策略——SA区域优先调速、TA区域优先调向,降低无人机连续转向操作的复杂性,以期提高无人机运行的安全性,并为未来无人机的运行安全保障提供一种思路。

1 无人机周围空间模型建立

无人机周围保护空间建模方法有很多种,比如Reich模型、EVENT模型^[10]、圆柱体保护区模型、球体保护区模型、椭球体保护区模型^[11]、长方体保护区模型^[12]等。对无人机周围空间保护区的划分大多采用两级避撞策略,即内、外两圈层,称为保护区(Protected Airspace Zone,简称PAZ)和碰撞区(Collision Airspace Zone,简称CAZ)^[13]。这种方法的保护区范围较大,在实际飞行过程中,在如此大范围内的无人机与本无人机发生碰撞的概率是非常低的,同时也会让本无人机处于对所有入侵飞机进行避撞处理的状态。交通预警与防撞系统(Traffic Alert and Collision Avoidance System,简称TCAS)是目前在航空运输中使用量最大且成熟度非常高的系统,独立于地面的空中交通管制系统,其采用椭圆柱体建模,避撞采用RA(Resolution Advisory)区域(15~35 s)和TA(Traffic Advisory)区域(20~48 s)两级避撞^[14]。但TCAS的价格较高,并且需要每架飞机上都装有应答机才能发挥作用,而ADS-B工作范围更广,价格更低。

本文对无人机采用圆柱体建模方法,即以本无人机为中心点,考虑两架无人机对向飞行时的避撞距离,取适当半径值和高度值,建立圆柱体空间保护模型。无人机周围空间保护区(保护区大小可根据预测的会合速率而做出相应改变^[15]),以本无人机为中心,建立3个同心圆柱状的保护空间。一圈层为RA区域(紧急避撞区域),必须对进入此区域的入侵无人机立即进行紧急避撞处理;

二圈层为TA区域(一般避撞区域),进入此区域的入侵无人机需进行一般碰撞规避,避免入侵无人机进入RA区域;三圈层为SA区域(监视及提前避撞区域),由于此区域范围较大,进入的无人机较多,需利用ADS-B信息对入侵无人机进行筛选,识别存在冲突的无人机并进行提前避让。

本文以中低空多用途无人机中国翼龙无人机为研究对象,其机体尺寸为:机长 9.05 m,机高 2.77 m,翼展 14 m,平均飞行速度为 180 km/h,最大飞行速度为 280 km/h^[16]。在设置保护区数值时,引入叠加保护区的概念,即将入侵无人机的保护圆叠加到本无人机上,将两个保护圆的冲突避让问题简化为质点与叠加保护圆的冲突避让问题。根据 TCAS II 的设计标准,本文 RA 区域以本无人机为中心点,水平保护面半径为 $2 \times 280 \times 35 \div 3600 = 5.4$ km,垂直保护面高度为 2.7 km;TA 区域以本无人机为中心,水平保护面半径为 $2 \times 280 \times 48 \div 3600 = 7.5$ km,垂直保护面高度为 3.75 km;SA 区域主要进行冲突识别及提前避撞,具体参数值可根据需要自由设定,本文以本无人机为中心,水平保护面半径设为 15 km,垂直保护面高度设为 7.5 km,建立模型保护区示意图如图 1 所示。

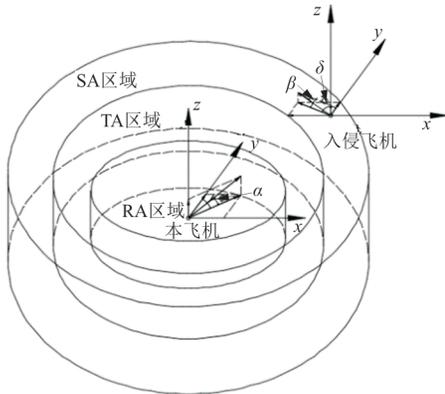


图 1 无人机保护区
Fig. 1 UAV protection area

2 冲突探测及避让措施

2.1 冲突检测过程

三级避撞圈层冲突检测及处理过程优先级为:RA区域为第一优先处理级,TA区域为第二优先处理级,SA区域为第三优先处理级,处理流程如图 2 所示。

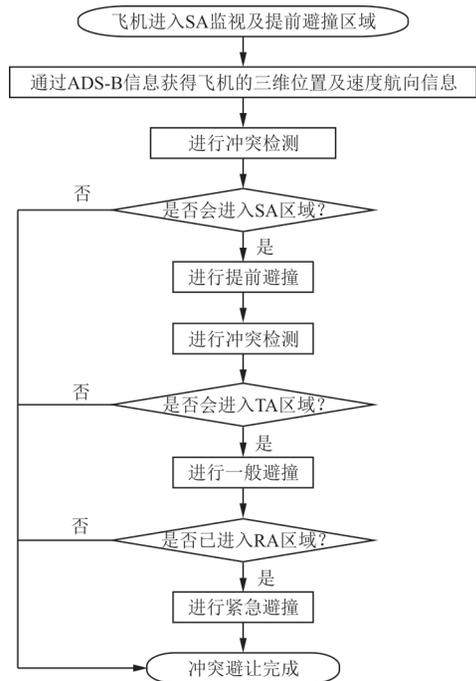


图 2 冲突检测及处理流程图

Fig. 2 Conflict detection and processing flow chart

Step 1: 接收进入 SA 区域的无人机 ADS-B 信号,其所包含的三维位置信息来源于全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System,简称 GNSS),航向、速度信息来源于无人机本身,能够真实反映无人机的飞行状态和飞行冲突^[17]。因此以本无人机为原点 O,构建 ENU 坐标系如图 1 所示。只有当本无人机与入侵无人机在水平方向和垂直方向上同时存在冲突时,才可以判定冲突存在^[18]。

入侵无人机水平相对方位如图 3 所示,1号无人机为本无人机,2号无人机为入侵无人机,通过 ADS-B 获得 1、2 号无人机的经纬度信息,得到两架无人机的相对方位角 $\angle EAC$ 。

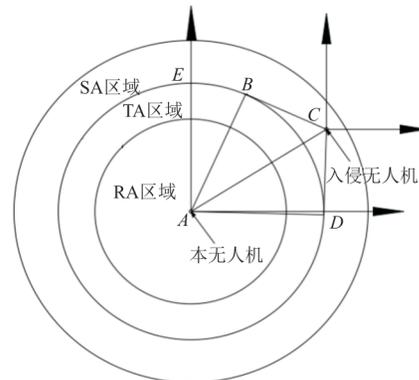


图 3 入侵无人机水平相对方位

Fig. 3 Horizontal relative position of invading drones

利用三角函数,可得 $\angle BCA$:

$$\angle BCA = \arcsin \frac{L_{AB}}{L_{AC}} \quad (1)$$

根据相对方位角 $\angle EAC$ 及式(1),可以得到 CB 、 CD 段航向为

$$H_{CB} = 180^\circ + \angle EAC + \angle BCA \quad (2)$$

$$H_{CD} = 180^\circ - \angle BAC + \angle EAC \quad (3)$$

Step 2: 基于 ADS-B 报文中包含的无人机三维速度信息,设1号无人机速度 $V_1 = (V_1 \cos \alpha \sin \gamma, V_1 \cos \alpha \cos \gamma, V_1 \sin \alpha)$,2号无人机速度 $V_2 = (V_2 \cos \beta \sin \delta, V_2 \cos \beta \cos \delta, V_2 \sin \beta)$,两架无人机的相对速度 $V_r = (V_{rx}, V_{ry}, V_{rz})$,其中 α 和 β 分别为1号无人机和2号无人机的速度方向与 xOy 面的夹角, γ 和 δ 分别为1号无人机和2号无人机的速度方向在 xOy 面上的投影与 y 轴的夹角。

$$V_r = (V_2 \cos \beta \sin \delta - V_1 \cos \alpha \sin \gamma, V_2 \cos \beta \cos \delta - V_1 \cos \alpha \cos \gamma, V_2 \sin \beta - V_1 \sin \alpha) \quad (4)$$

式中: V_r 为2号无人机相对于1号无人机的相对速度矢量,即将本无人机看作静止,入侵无人机的速度大小和方向; V_{rx}, V_{ry}, V_{rz} 为相对速度矢量在三维坐标轴上的速度分量。

该相对速度矢量方向与 x 轴夹角 θ :

$$\theta = \arctan \frac{V_2 \cos \beta \cos \delta - V_1 \cos \alpha \cos \gamma}{V_2 \cos \beta \sin \delta - V_1 \cos \alpha \sin \gamma} \quad (5)$$

则在相对运动速度下入侵飞机的航向 H_r :

$$\begin{cases} H_r = 90^\circ - \theta & (V_{rx} \geq 0, V_{ry} \geq 0) \\ H_r = 90^\circ + \theta & (V_{rx} \geq 0, V_{ry} < 0) \\ H_r = 270^\circ - \theta & (V_{rx} < 0, V_{ry} < 0) \\ H_r = 270^\circ + \theta & (V_{rx} < 0, V_{ry} \geq 0) \end{cases} \quad (6)$$

若相对速度的方向 H_r 不在 $H_{CB} \sim H_{CD}$ 以内,则该入侵无人机与本无人机不存在冲突风险;若在 $H_{CB} \sim H_{CD}$ 以内,则该入侵无人机与本无人机存在潜在冲突风险,对其进行潜在TA区域入侵标记并进行持续监视。

Step 3: ADS-B 报文信息中能显示基于 WGS-84 坐标系下的几何位置坐标,故设两架无人机的位置分别为 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) ,高度分别为 h_1 和 h_2 。2号无人机水平相对运动轨迹的斜率 K :

$$K = \tan \theta = \frac{V_2 \cos \beta \cos \delta - V_1 \cos \alpha \cos \gamma}{V_2 \cos \beta \sin \delta - V_1 \cos \alpha \sin \gamma} \quad (7)$$

结合2号无人机的坐标 (x_2, y_2) ,可得水平相对运动轨迹方程:

$$y - y_2 + Kx_2 - Kx = 0 \quad (8)$$

设TA区域水平圆半径为 r_T ,则水平圆方程:

$$r_T^2 - x^2 - y^2 = 0 \quad (9)$$

通过式(8)~式(9),2号无人机水平相对运动轨迹与TA区域水平圆交点为 $(x_a, y_a), (x_b, y_b)$,则2号无人机与两点距离分别为

$$S_a = \sqrt{(x_2 - x_a)^2 + (y_2 - y_a)^2} \quad (10)$$

$$S_b = \sqrt{(x_2 - x_b)^2 + (y_2 - y_b)^2} \quad (11)$$

2号无人机水平方向到达两点的时间分别为:

$$T_a = \frac{S_a}{\sqrt{V_{rx}^2 + V_{ry}^2}} \quad (12)$$

$$T_b = \frac{S_b}{\sqrt{V_{rx}^2 + V_{ry}^2}} \quad (13)$$

在这两个时间段内,2号无人机分别在垂直方向上升或下降到的高度为

$$h_a = h_2 \pm T_a \times (V_2 \sin \beta - V_1 \sin \alpha) \quad (14)$$

$$h_b = h_2 \pm T_b \times (V_2 \sin \beta - V_1 \sin \alpha) \quad (15)$$

设TA区域上下高度为 h_t ,若 $|h_a - h_1| < h_t$ 或 $|h_b - h_1| < h_t$,则两无人机存在冲突,需进行冲突避让,反之,则不需要。

Step 4: 经过SA区域的提前避撞,入侵无人机一般不会进入TA区域,但在以下两种情况下,入侵无人机可能进入本无人机TA区域:一是部分存在冲突的入侵无人机SA区域避撞处理失败;二是部分入侵无人机突然改变航向。因此,对这两类无人机再进行**Step 2**及**Step 3**中的处理过程,判断其是否存在对RA区域的冲突,并对冲突进行及时避让。

Step 5: 经过TA区域的一般避撞,入侵无人机仅有极小可能进入RA区域,若入侵无人机由于突然转向或其他特殊情况进入RA区域,则本无人机需立即调整航向、速度和高度,使入侵无人机远离本无人机RA区域。

2.2 冲突避让措施

本文采用的冲突避让措施之一为调整本无人机速度的方法来进行冲突避让,使两架无人机的相对速度的方向 $H_r \geq H_{CD}$ 或 $H_r \leq H_{CB}$, H_r 与 H_{CD} 、

H_{CB} 的夹角分别为 μ 和 ρ ,则 H_r 的最小取值为

$$\begin{cases} H_r = H_{CD} & (\mu \leq \rho) \\ H_r = H_{CB} & (\mu > \rho) \end{cases} \quad (16)$$

当 $V_{rx} \geq 0, V_{ry} \geq 0$ 时,则 θ 至少为

$$\theta = H_{CD} - 90^\circ \quad (17)$$

或

$$\theta = H_{CB} - 90^\circ \quad (18)$$

设 V'_1 为1号无人机调整后速度,由于:

$$\tan(90^\circ - H_{CD}) = \frac{V_2 \cos \beta \cos \delta - V'_1 \cos \alpha \cos \gamma}{V_2 \cos \beta \sin \delta - V'_1 \cos \alpha \sin \gamma} \quad (19)$$

$$\tan(90^\circ - H_{CB}) = \frac{V_2 \cos \beta \cos \delta - V'_1 \cos \alpha \cos \gamma}{V_2 \cos \beta \sin \delta - V'_1 \cos \alpha \sin \gamma} \quad (20)$$

则

$$V'_1 = \frac{\tan(90^\circ - H_{CD}) V_2 \cos \beta \sin \delta - V_2 \cos \beta \cos \delta}{\cos \alpha \tan(90^\circ - H_{CD}) \sin \gamma - \cos \alpha \cos \gamma} \quad (21)$$

或

$$V'_1 = \frac{\tan(90^\circ - H_{CB}) V_2 \cos \beta \sin \delta - V_2 \cos \beta \cos \delta}{\cos \alpha \tan(90^\circ - H_{CB}) \sin \gamma - \cos \alpha \cos \gamma} \quad (22)$$

同理,

$$\begin{cases} V'_1 = \frac{\tan(H_{CD} - 90^\circ) V_2 \cos \beta \sin \delta - V_2 \cos \beta \cos \delta}{\cos \alpha \tan(H_{CD} - 90^\circ) \sin \gamma - \cos \alpha \cos \gamma} & (V_{rx} \geq 0, V_{ry} < 0) \\ V'_1 = \frac{\tan(270^\circ - H_{CD}) V_2 \cos \beta \sin \delta - V_2 \cos \beta \cos \delta}{\cos \alpha \tan(270^\circ - H_{CD}) \sin \gamma - \cos \alpha \cos \gamma} & (V_{rx} < 0, V_{ry} < 0) \\ V'_1 = \frac{\tan(H_{CD} - 270^\circ) V_2 \cos \beta \sin \delta - V_2 \cos \beta \cos \delta}{\cos \alpha \tan(H_{CD} - 270^\circ) \sin \gamma - \cos \alpha \cos \gamma} & (V_{rx} < 0, V_{ry} \geq 0) \end{cases} \quad (23)$$

或

$$\begin{cases} V'_1 = \frac{\tan(H_{CB} - 90^\circ) V_2 \cos \beta \sin \delta - V_2 \cos \beta \cos \delta}{\cos \alpha \tan(H_{CB} - 90^\circ) \sin \gamma - \cos \alpha \cos \gamma} & (V_{rx} \geq 0, V_{ry} < 0) \\ V'_1 = \frac{\tan(270^\circ - H_{CB}) V_2 \cos \beta \sin \delta - V_2 \cos \beta \cos \delta}{\cos \alpha \tan(270^\circ - H_{CB}) \sin \gamma - \cos \alpha \cos \gamma} & (V_{rx} < 0, V_{ry} < 0) \\ V'_1 = \frac{\tan(H_{CB} - 270^\circ) V_2 \cos \beta \sin \delta - V_2 \cos \beta \cos \delta}{\cos \alpha \tan(H_{CB} - 270^\circ) \sin \gamma - \cos \alpha \cos \gamma} & (V_{rx} < 0, V_{ry} \geq 0) \end{cases} \quad (24)$$

由于无人机自身性能限制, V'_1 应在无人机有效速度范围内进行加、减速调整,因此 $\max V_1 \geq V'_1 \geq \min V_1$ 。

其次可以通过采用调整航向的方法,实现对入侵无人机的避让。设 γ' 为1号无人机调整航向后,在 xOy 面速度投影与 x 轴的夹角,由于:

$$\tan(90^\circ - H_{CD}) = \frac{V_2 \cos \beta \cos \delta - V_1 \cos \alpha \cos \gamma'}{V_2 \cos \beta \sin \delta - V_1 \cos \alpha \sin \gamma'} \quad (25)$$

$$\tan(90^\circ - H_{CB}) = \frac{V_2 \cos \beta \cos \delta - V_1 \cos \alpha \cos \gamma'}{V_2 \cos \beta \sin \delta - V_1 \cos \alpha \sin \gamma'} \quad (26)$$

则

$$\gamma' = \arcsin \left\{ \frac{V_2 \cos \beta [\tan(90^\circ - H_{CD}) \sin \delta - \cos \delta]}{V_1 \cos \alpha \sqrt{\tan(90^\circ - H_{CD})^2 + 1}} - \arctan \frac{-1}{\tan(90^\circ - H_{CD})} \right\} \quad (27)$$

或

$$\gamma' = \arcsin \left\{ \frac{V_2 \cos \beta [\tan(90^\circ - H_{CB}) \sin \delta - \cos \delta]}{V_1 \cos \alpha \sqrt{\tan(90^\circ - H_{CB})^2 + 1}} - \arctan \frac{-1}{\tan(90^\circ - H_{CB})} \right\} \quad (28)$$

同理可得到在其余象限的 γ' 取值。在实际飞行过程中,为尽量减少额外飞行成本,无人机航向的调整范围最好在 90° 范围内,如有特殊要求,也可以按自身需求设置航向调整范围。

3 仿真实验

通过上述冲突探测及避撞措施,1号无人机可以通过 ADS-B 报文,获得 2号无人机的航向、高度、速度等信息,确定其是否对本无人机存在威胁,并通过速度及航向调整进行冲突避撞。现通过 Matlab R2018a 软件进行仿真实验,验证本文提出的冲突探测方法及避撞措施的有效性。由于获取无人机真正的 ADS-B 报文具有难度,本文主要通过仿真模拟随机生成速度、航向、高度不定的无人机,来与本无人机进行冲突探测和避撞。本文研究范围为本无人机叠加保护区范围,本无人机坐标为 $(0,0)$,以中低空多用途无人机中国翼龙无人机数据为基础,飞行速度、俯仰角等上下界限如表 1 所示。

表 1 性能参数限定值

Table 1 Limit values of performance parameters

参数	限定值
飞行速度 / $(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	130~280
俯仰角 / $(^\circ)$	4~7
航向角范围 / $(^\circ)$	0~360
水平航向改变范围 / $(^\circ)$	0~90

仿真过程可分为三个阶段:SA 区域阶段、TA 区域阶段、RA 区域阶段。具体仿真流程如图 4 所示。

在 SA 区域边缘随机产生航向、速度不同的无人机,区域边缘上的黑色短线表示无人机水平方向上存在冲突的航向范围,对两架无人机的速度矢量进行合成,得到入侵无人机对本无人机的相对运动速度及航向。相对速度方向不在冲突航向范围内的入侵无人机用小三角作标记;相对速度方向存在冲突航向的风险,但垂直方向不存在冲突的入侵无人机用五边形作为标记;对水平及垂直方向均存在冲突的无人机用五角星作标记,并进行碰撞避撞。冲突识别结果如图 5 所示。

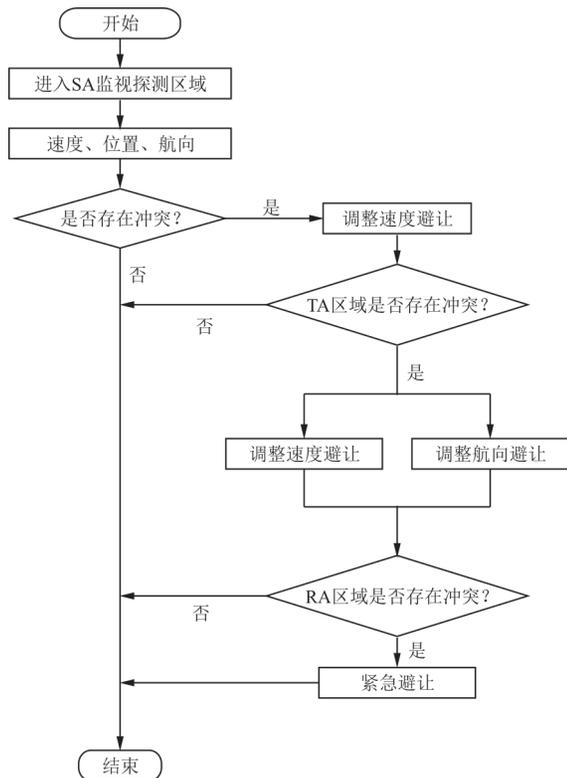


图 4 冲突避撞仿真流程图

Fig. 4 Conflict avoidance simulation flow chart

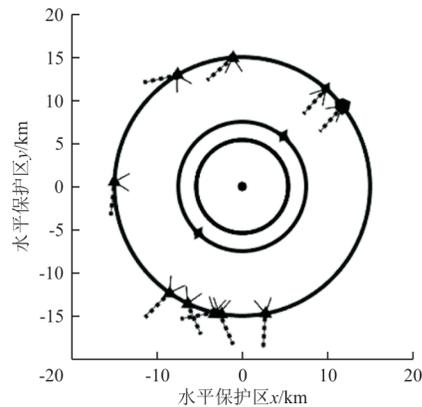


图 5 入侵无人机冲突识别

Fig. 5 Intruder drone conflict identification

计算 SA 区域避撞失败的无人机到达 TA 区域边缘的位置,对水平及垂直方向均可能入侵 RA 区域的无人机进行二次入侵标记,并采取避撞措施。若仍有无人机进入 RA 区域,则立即调整速度、航向及高度,使入侵无人机远离本飞机 RA 区域。

仿真过程分为两种情况:在 SA 区域边缘每次随机产生 1 架或 5 架随机航向及速度的无人机,随着无人机数量的增多,产生飞行冲突的概率上升,通过调整无人机速度、先调整无人机速度后调整航向两种不同方案,分别累计重复模拟 10 000 次,

得到冲突压力提升下复杂飞行环境的冲突无人机筛选及避让情况。

两种避让方案的筛选结果对比如图 6 所示,可以看出:两种方案在 10 000 次的仿真过程中,对于随机生成 1 架无人机及随机生成 5 架无人机的不同情况分别成功筛选出 1 024 架、957 架和 3 927 架、3 947 架冲突无人机,对比箱线图的范围和和中位线位置,各个阶段筛选的冲突无人机架次差别不大,表明本文筛选排除算法能在无人机数量增加、飞行冲突概率上升的情况下有效筛选出与本无人机存在潜在冲突的无人机。

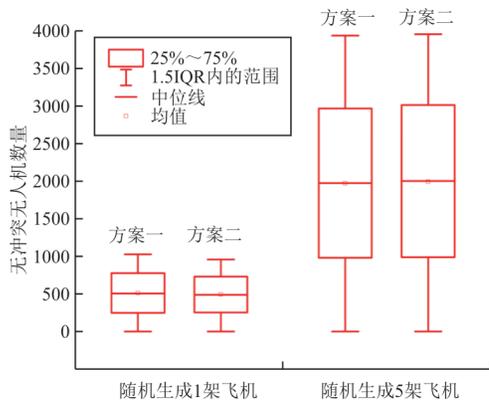


图 6 冲突无人机机筛选对比

Fig. 6 Conflict drone aircraft screening comparison

SA 区域避让无人机成功比例如图 7 所示,可以看出:两种方案在 SA 区域均采用调整速度的方法进行冲突避让,面对周围无人机数量的增加,两种不同情况的成功比例均达到 0.96 以上,表明本文提出的调速策略能有效避让绝大部分的飞行冲突。

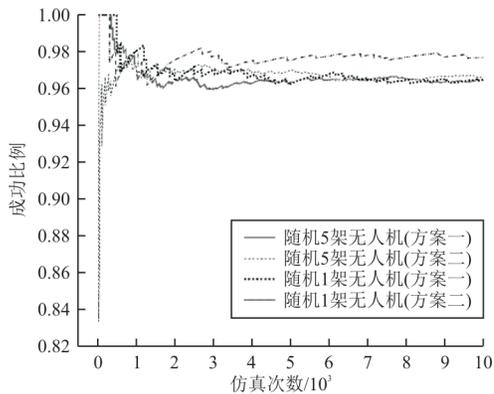


图 7 SA 区域冲突避让成功比例对比

Fig. 7 SA regional conflict avoidance success ratio comparison

TA 区域避让无人机成功比例如图 8 所示,可以看出:两种方案在 TA 区域分别采用调整速度和调整航向的方法进行冲突避让,采用调整速度的方法在面对随机生成 1 架无人机的情况成功比例可以达到 0.5,但随着无人机数量增加到 5 架,成功比例也随之下降到 0.31,表明经过 SA 区域调速避撞后,无人机在 TA 区域可调速度范围有限,调速法的效果受到无人机自身速度上下界限的影响较大。TA 区域选择调整速度策略效果较差,而采用调整航向的方法,成功比例均可达到 0.9,表明在 TA 区域的航向调整范围较大,选择调整航向来进行冲突避让更为有效。

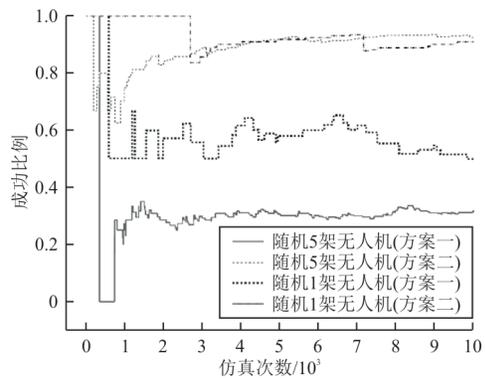


图 8 TA 区域冲突避让成功比例对比

Fig. 8 TA regional conflict avoidance success ratio comparison

两种不同情况对应两种不同方案的冲突避让总成功比例对比如图 9 所示,可以看出:由于受到 TA 区域调速法效率较低的影响,在整个冲突避撞过程中,单一调整速度的方案冲突避让效果较差,面对随机生成 1 架无人机的情况成功比例为 0.98,随着无人机数量增加到 5 架,成功比例也随之下降到 0.97。

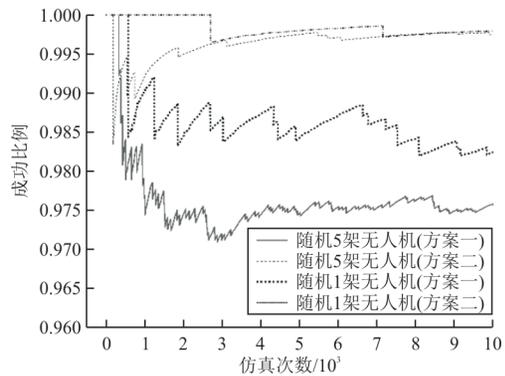


图 9 冲突避让总成功比例对比

Fig. 9 Comparison of total conflict avoidance success rates

该策略应对冲突压力提升的复杂飞行环境的效果会随着复杂程度的增加而降低,而先调整速度后调整航向的方法在两种情况下避让成功比例可以稳定在0.997以上,面对复杂飞行环境的避让效果更为明显。

仿真实验的结果如表2所示,可以看出:由于

无人机速度和航向均有上下限的限制,不同无人机性能存在差异,转向过程受风向、风速影响较大,对速度和航向调整产生较大影响。同时实际飞行中,冲突避让应尽量在不改变原有的飞行路径的原则上,减少额外的飞行成本,因此无人机在发生冲突时,应优先选择先调速后调向的方法。

表2 冲突避让仿真结果
Table 2 Conflict avoidance simulation results

实验	筛选冲突无人机数量	SA区域冲突避让成功率/%	TA区域冲突避让成功率/%	总避让成功率/%
随机出现1架无人机(调速)	1 024	96.48	50.00	98.24
随机出现1架无人机(先调速后调向)	957	97.70	90.91	99.79
随机出现5架无人机(调速)	3 927	96.43	31.43	97.55
随机出现5架无人机(先调速后调向)	3 947	96.61	92.54	99.75

4 结 论

(1) 构建三圈层三维无人机保护模型,改进有效冲突探测算法,在保证合理安全裕度的前提下,通过提前对无人机水平及垂直方向入侵可能性的判断,稳定高效的筛选出存在冲突的无人机,减少本无人机的无效冲突避让。

(2) 综合实际运行情况,提出有效冲突避让措施,选择先调整速度后调整航向的方案避免绝大部分的飞行冲突,并且能有效应对复杂飞行环境,避让效果不会随着复杂程度的增加而降低,可对无人机的飞行提供有力的安全保障。

参 考 文 献

- [1] 杨元元. 中国发展新一代民用航空运输系统的愿景[J]. 中国民用航空, 2007(8): 16-18.
YANG Yuanyuan. Visions of the new generation air transportation system in China [J]. China Civil Aviation, 2007 (8): 16-18. (in Chinese)
- [2] NIJSURE Y A, KADDOUM G, GAGNON G, et al. Adaptive air-to-ground secure communication system based on ADS-B and wide-area multilateration [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(5): 3150-3165.
- [3] 罗文田, 赵泽荣, 张德银. 基于ADS-B的飞机预警避撞算法研究[J]. 控制工程, 2011, 18(4): 559-563.
LUO Wentian, ZHAO Zerong, ZHANG Deyin. Investigation of aircraft collision avoidance and early warning algorithm based on ADS-B [J]. Control Engineering of China, 2011, 18(4): 559-563. (in Chinese)
- [4] 吴学礼, 霍佳楠, 张建华. 基于ADS-B监视技术的飞行器纵向最小间隔研究[J]. 河北科技大学学报, 2017, 38(1): 52-58.
WU Xueli, HUO Jianan, ZHANG Jianhua. Longitudinal minimum interval of aircrafts based on ADS-B monitoring technique [J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2017, 38(1): 52-58. (in Chinese)
- [5] 赵建华, 王华伟, 严晓婧, 等. 无人机与运输类飞机碰撞风险研究[J]. 舰船电子工程, 2021, 41(1): 26-29, 76.
ZHAO Jianhua, WANG Huawei, YAN Xiaojing, et al. Research on collision risk between drones and transport aircraft [J]. Ship Electronic Engineering, 2021, 41(1): 26-29, 76. (in Chinese)
- [6] BERDONOSOV V D. Speed approach for UAV collision avoidance [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2018, 1015(5): 052002.
- [7] PIERPAOLI P, RAHMANI A. UAV collision avoidance exploitation for noncooperative trajectory modification [J]. Aerospace Science and Technology, 2017, 73: 173-183.
- [8] 徐剑锋. 基于ADS-B的航迹规划算法在无人机飞行管理中的应用[J]. 现代雷达, 2021, 43(1): 34-41.
XU Jianfeng. Application of the track planning algorithm based on ADS-B in the flight management of aerial drone [J]. Modern Radar, 2021, 43(1): 34-41. (in Chinese)
- [9] 王倩, 张宝华, 周志靖, 等. 无人机防相撞空中威胁态势的探测与告警研究[J]. 航空工程进展, 2019, 10(6): 794-801.
WANG Qian, ZHANG Baohua, ZHOU Zhijing, et al. Research on detection and alarm of air threat situation for UAV collision avoidance [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2019, 10(6): 794-801. (in Chinese)

- [10] 于清媛, 潘卫军. 无人机共享空域管制间隔研究[J]. 科技和产业, 2018, 18(6): 102-107.
YU Qingyuan, PAN Weijun. Reserch on unmanned aerial vehicle sharing space in controlling airspace [J]. Science Technology and Industry, 2018, 18(6): 102-107. (in Chinese)
- [11] 倪壮. 民机机载防撞系统算法研究与仿真[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
NI Zhuang. Study on the algorithm of civil aircraft TCAS and simulation[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015. (in Chinese)
- [12] 袁文铎, 宋东. 飞机防撞系统的建模与仿真[J]. 计算机仿真, 2010, 27(4): 260-263, 288.
YUAN Wenduo, SONG Dong. Modeling and simulation of traffic alert and collision avoidance system [J]. Computer Simulation, 2010, 27(4): 260-263, 288. (in Chinese)
- [13] 李洪伟, 章学锋, 易东, 等. ADS-B被动监视防撞告警系统设计[J]. 中国民航大学学报, 2019, 37(6): 6-11.
LI Hongwei, ZHANG Xuefeng, YI Dong, et al. Design of ADS-B passive surveillance collision aviodance and alarm system [J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2019, 37(6): 6-11. (in Chinese)
- [14] 徐亚军, 何桂萍. 基于当前统计模型的TCAS/ADS-B组合监视系统数据融合算法[J]. 电讯技术, 2013(9): 1154-1158.
XU Yajun, HE Guiping. Data fusion algorithm for TCAS/ADS-B itegrated surveillance system based on current statistical model[J]. Telecommunication Engineering, 2013(9): 1154-1158. (in Chinese)
- [15] 李波, 翟书颖, 李茹, 等. 一种采用ADS-B技术的通用航空防撞系统[J]. 电讯技术, 2019, 59(1): 19-26.
LI Bo, ZHAI Shuying, LI Ru, et al. A collision avoidance system for general aviation based on ADS-B[J]. Telecommunication Engineering, 2019, 59(1): 19-26. (in Chinese)
- [16] 杨硕. 大型无人机碰撞模型建模方法研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2019.
YANG Shuo. Research on modeling method of large UAV collision model[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science & Technology, 2019. (in Chinese)
- [17] 程擎, 黄俊贤, 郭文豪. 基于ADS-B信息的通航飞行冲突避让算法研究[J]. 航空工程进展, 2017, 8(4): 394-400.
CHENG Qing, HUANG Junxian, GUO Wenhao. Research on flight conflict avoidance algorithm based on ADS-B information for general aviation[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2017, 8(4): 394-400. (in Chinese)
- [18] 倪育德, 马宇申, 刘萍. 基于ADS-B的飞机冲突探测[J]. 中国民航大学学报, 2014, 32(5): 31-35, 44.
NI Yude, MA Yushen, LIU Ping. Aircraft conflict detection based on ADS-B[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2014, 32(5): 31-35, 44. (in Chinese)

作者简介:

杨 姝(1983-),女,硕士,副教授。主要研究方向:飞行程序设计、卫星导航。

王一桦(1994-),男,硕士研究生。主要研究方向:飞行程序设计、卫星导航。

(编辑:马文静)