

12-12-2019

## ADS-B IN based Conflict Prediction and Conflict-free Trajectory Planning for Multi-aircraft

Siyuan Zhang

*Tianjin Key Lab for Advanced Signal and Image Processing, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;*

Xianying Li

*Tianjin Key Lab for Advanced Signal and Image Processing, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;*

Xiaoyun Shen

*Tianjin Key Lab for Advanced Signal and Image Processing, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

# ADS-B IN based Conflict Prediction and Conflict-free Trajectory Planning for Multi-aircraft

## Abstract

**Abstract:** For free flight of future, it is necessary to continuously detect conflicts and plan safe flight paths. Through in-depth analysis of detection principle of TCAS, combined with the characteristics of ADS-B data, *the target within the scope of ADS-B IN surveillance is classified and given a risk factor, and the TCAS function is implemented in the ADS-B IN simulation software.* For complex conflict scenarios with multi-aircraft, by meshing the conflict region and discretizing the flight procedure, *the genetic algorithm is then used to calculate the optimal conflict-free trajectory based on risk factors.* Two common multi-aircraft conflict scenarios are simulated, and the results show that the algorithm proposed in this article can solve the multi-aircraft conflict issues quickly and efficiently.

## Keywords

automatic dependent surveillance-broadcast (ADS-B), free flight, conflict prediction, genetic algorithm, trajectory planning

## Recommended Citation

Zhang Siyuan, Li Xianying, Shen Xiaoyun. ADS-B IN based Conflict Prediction and Conflict-free Trajectory Planning for Multi-aircraft[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(8): 1627-1635.

# 基于 ADS-B IN 的冲突预测与多机无冲突航迹规划

张思远, 李仙颖, 沈笑云

(中国民航大学天津市智能信号与图像处理重点实验室, 天津 300300)

**摘要:** 为实现未来的自由飞行, 需要进行不断的冲突探测并规划安全的飞行航迹。通过深入分析机载 TCAS 的冲突探测原理, 结合 ADS-B 数据的特点, 为 ADS-B IN 监视范围内的目标机划分等级并定义冲突危险系数, 仿真模拟实现了 TCAS 功能。针对自由飞行中复杂的多机冲突场景, 通过将冲突区域网格化, 从而将冲突区域内的飞行过程离散化, 根据冲突危险系数并结合遗传算法规划出全局最优的无冲突航迹。对两种常见的多机冲突场景进行仿真, 结果表明该航迹规划算法可以快速有效的解决多机冲突问题。

**关键词:** 广播式自动相关监视; 自由飞行; 冲突预测; 遗传算法; 航迹规划

中图分类号: TP391.9      文献标识码: A      文章编号: 1004-731X (2019) 08-1627-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.17-0266

## ADS-B IN based Conflict Prediction and Conflict-free Trajectory Planning for Multi-aircraft

Zhang Siyuan, Li Xianying, Shen Xiaoyun

(Tianjin Key Lab for Advanced Signal and Image Processing, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

**Abstract:** For free flight of future, it is necessary to continuously detect conflicts and plan safe flight paths. Through in-depth analysis of detection principle of TCAS, combined with the characteristics of ADS-B data, the target within the scope of ADS-B IN surveillance is classified and given a risk factor, and the TCAS function is implemented in the ADS-B IN simulation software. For complex conflict scenarios with multi-aircraft, by meshing the conflict region and discretizing the flight procedure, the genetic algorithm is then used to calculate the optimal conflict-free trajectory based on risk factors. Two common multi-aircraft conflict scenarios are simulated, and the results show that the algorithm proposed in this article can solve the multi-aircraft conflict issues quickly and efficiently.

**Keywords:** automatic dependent surveillance-broadcast (ADS-B); free flight; conflict prediction; genetic algorithm; trajectory planning

## 引言

现行的航空器冲突探测功能主要是通过机载的空中交通防撞系统(Traffic Collision Avoidance

System, TCAS)来实现的。TCAS 虽然可以有效的进行冲突探测和提供解脱策略, 但目前的 TCAS 也存在很多不足, 它的探测距离较近, 跟踪目标数量有限, 误警率偏高, 避撞策略相对单一, 对于飞行流量较大的终端区或飞行航迹比较灵活的通航飞机, 无法给出有效的冲突探测和避撞策略。随着广播式自动相关监视 (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast, ADS-B) 的发展, 尤其是空空监视 ADS-B IN 技术的发展, 自由飞行的实现已



收稿日期: 2017-06-06      修回日期: 2017-07-10;  
基金项目: 国家自然科学基金委员会-中国民航局民航联合研究基金(U1533115), 天津市应用基础与前沿技术研究计划(14JCYBJC16000), 中央高校基本科研业务费项目(3122013Z001);  
作者简介: 张思远(1976-), 男, 天津, 博士, 讲师, 研究方向为 ADS-B 数据分析与数据挖掘。

<http://www.china-simulation.com>

• 1627 •

不再遥不可及。自由飞行可以减少甚至去除管制员的指挥,由飞行员在飞行规则允许范围内自行选择飞行航迹、速度和高度,这对航空器的冲突解脱策略和最优航迹规划提出了更高的要求。

目前,冲突探测算法主要针对两机冲突,可分为几何型和概率型两大类。几何型冲突探测算法是基于两架飞机最近一段时间的位置与速度矢量进行航迹外推,再根据设定的保护区模型预测未来是否发生冲突,这种方法比较简单但有一定的局限性,传统的 TCAS 就采用这种方法<sup>[1]</sup>。概率型冲突探测算法将两架飞机之间的距离看作是服从某种分布函数的随机变量,通过建立两机相遇模型并预测飞行状态和航迹,计算碰撞风险概率<sup>[2-5]</sup>。概率型冲突探测考虑飞行动力学、气象、人为因素等多种随机因素,提高了碰撞预测的可靠性和准确性,但从实际应用角度来说,如何降低并消除碰撞风险才是空中安全技术的核心和重点。

根据中国民航局最新修订的 ADS-B 规划,“十三五”期间民航局将组织开展 ADS-B IN 技术应用的试验验证工作,并在 2025 年实现 ADS-B IN 初始运行<sup>[6]</sup>。随着 ADS-B 技术的不断推广和应用,基于 ADS-B IN 技术的机载防撞系统必将取代传统的 TCAS<sup>[7]</sup>。近年来,基于 ADS-B IN 技术的冲突探测与间隔保持研究越来越多。郝帅等以 Reich 模型为基础,结合 ADS-B 技术对飞行安全间隔进行定量评估,但由于缺少足够数据,其分析还停留在估算阶段<sup>[8]</sup>。张晓燕等建立了 ADS-B 监视下的危险接近概率模型,对雷达监视和 ADS-B 监视下的危险接近概率进行比较分析,在与雷达同等安全水平下,ADS-B 监视的最小间隔可以缩小为原来的二十分之一<sup>[9]</sup>。Orefice 提出了基于 ADS-B 技术的冲突探测系统结构,包括 ADS-B 数据处理、滤波、冲突探测、优化和解脱五部分,然而文章没有阐述多机冲突的解脱方法<sup>[10]</sup>。

随着民航客机数量的不断增加以及我国低空空域的开放,通航飞机活动数量的快速增长,发生多机冲突的概率会不断增加。多机冲突是指在一定

的时间和空间内,某架飞机会与另外两架或两架以上的飞机发生冲突,传统的两机冲突探测和解脱方法往往不能有效解决连续的两机冲突或同时的多机冲突,甚至可能增加冲突的数量和碰撞的风险。目前针对多机冲突的解脱算法研究有很多,比较典型的包括蚁群算法<sup>[11]</sup>、粒子群算法<sup>[12]</sup>、蜂群算法<sup>[13]</sup>、DDTSA 算法<sup>[14]</sup>和 Swarm 算法<sup>[15]</sup>等,这些算法各有特点,并在一定范围内可以解决多机冲突问题,但缺少对连续冲突和冲突解脱完成后的航迹规划研究。

目前的多机冲突解脱算法大多都停留在解脱阶段,未对解脱后的飞行路径进行规划,少数的航迹规划研究主要针对低空无人机<sup>[16]</sup>。由于冲突解脱必然会造成飞机在一定程度上偏离既定航线,而在空域流量较大区域,贸然直接返回原航线可能又会造成新的冲突,因此真正的多机冲突解脱方案应该是包含返回原航线的完整航迹规划。本文在深入研究 TCAS 算法的基础上,结合 ADS-B IN 技术的特点,简化冲突探测算法,对周围所有目标机进行跟踪和分类,为潜在冲突目标机定义冲突危险系数,在此基础上,将冲突区域网格化,并选取合理的适应度函数,利用遗传算法快速搜寻最优无冲突航迹,最大程度地减少解脱过程的持续时间和飞机轨迹变化次数,并最终引导飞机回到既定航线,提高飞行器在高流量空域中的飞行安全性,为实现未来的自由飞行奠定基础。

## 1 冲突预测与航迹规划

### 1.1 冲突预测

通过空空 ADS-B 信息交换,机载计算机可以预测范围更远的飞机,并提前规划出与周围所有飞机都保持安全间隔的最优飞行路径,从而实现整个空域安全高效的自由飞行。根据航空无线电委员会(RTCA)制定的 DO-263<sup>[17]</sup>文件的规定,在本机周围定义 2 个以本机为质心的圆柱体区域:碰撞区域(Collision Airspace Zone, CAZ)、保护区

(Protection Airspace Zone, PAZ), 如图 1 所示。圆形并不是最优的保护区形状,但在相对运动判断中却是最全面的模型<sup>[18]</sup>。

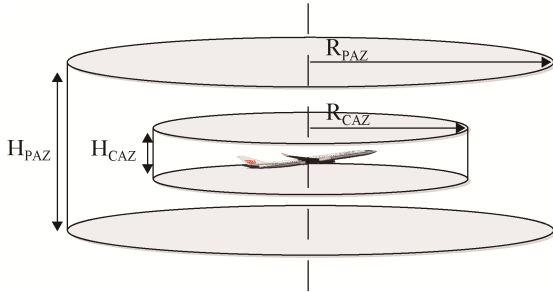


图 1 保护区示意图

Fig. 1 Diagram of protection zone

CAZ 区域定义直接的机身接触,它的大小与冲突飞机的大小有关,也就是说,当另一架飞机的质心进入本机的 CAZ 区域内,就视为发生碰撞<sup>[19]</sup>。考虑到飞机位置信息的误差,冲突飞机的大小不同,冲突飞机的数量可能大于两架等因素,本文将 CAZ 的范围定义为  $R_{CAZ}=200\text{ m}$ ,  $H_{CAZ}=100\text{ m}$ 。由于诸多不定因素的存在,预测碰撞不能仅基于 CAZ,而要基于一个范围更大的 PAZ,PAZ 定义一个发生碰撞概率较大的缓冲区或保护区,通常是一个以本机为中心的圆柱体,其大小取决于两机的接近率,如果两机的接近率不同,这个圆柱体的尺寸是不同的。在多机冲突预测中,PAZ 的不断计算会消耗大量的计算资源,因此我们在多机冲突检测时,将其设为常数用于简化计算,  $R_{PAZ}=2\ 000\text{ m}$ ,  $H_{PAZ}=1\ 000\text{ m}$ 。PAZ 用于确定所有可能与本机发生冲突的飞机,其数值设定需根据实际情况进行调整,PAZ 的范围太大,则误警率较高且航迹规划较复杂,PAZ 的范围太小,则存在漏警率较高且航迹规划方案可能需要不断变更。

在相对运动分析时,把本机(设为 A1)看为不动的质点,目标机(设为 A2)看为移动的质点,由于冲突预测算法中使用的均为相对位置和相对速度,因此采用适合相对运动目标计算的站心坐标系(又称“东-北-天坐标系”),图 2、图 3 分别为该坐标系下某一时刻的水平运动投影图和垂直运动投

影图,其中本机 A1 始终位于坐标原点。

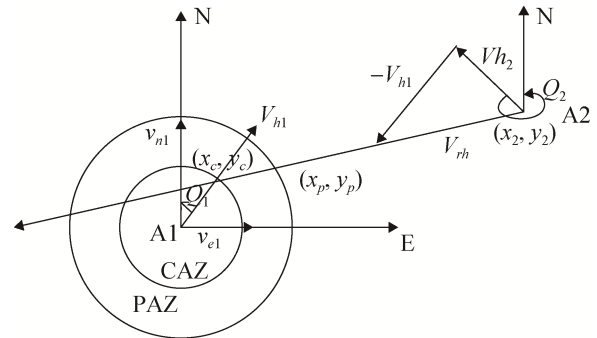


图 2 水平运动投影图

Fig. 2 Projection drawing of horizontal motion

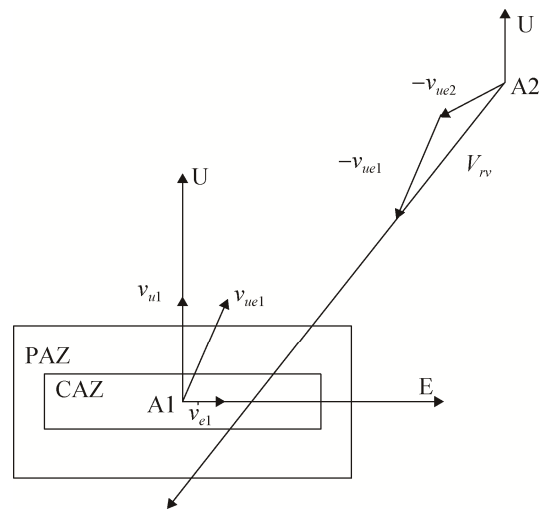


图 3 垂直运动投影图

Fig. 3 Projection drawing of vertical motion

通过 ADS-B IN 可以直接获取目标机的速度,将本机和目标机的速度分解为水平速度  $v_h$  和垂直速度  $v_u$ ,其中  $v_h$  又可按东和北两个方向继续分解为  $v_e$  和  $v_n$ 。图 2 中,将 A1 和 A2 的水平速度  $v_h$  分解为东(E)和北(N)两个方向。已知两架飞机的偏航角分别为  $Q_1$  和  $Q_2$ ,水平速度分别为  $v_{h1}$  和  $v_{h2}$ ,则两机的水平相对速度  $v_{rh}$  的计算公式如下:

$$\vec{v}_{rh} = \vec{v}_{h2} - \vec{v}_{h1} \tag{1}$$

$$|v_{rh}| = \sqrt{|v_{h1}|^2 + |v_{h2}|^2 - 2|v_{h1}||v_{h2}|\cos(Q_1 - Q_2)} \tag{2}$$

图 3 中,利用 A1 和 A2 的垂直速度  $v_u$  和水平速度在东向上的分量  $v_e$  可得到两机在东天坐标下的速度分量  $v_{ue}$ ,则两机在东天垂直方向上的相对速度  $v_{rv}$  的计算公式如下:

$$\bar{v}_{rv} = \bar{v}_{rv1} - \bar{v}_{rv2} \quad (3)$$

如果两机的水平相对速度矢量和垂直相对速度矢量均穿越 PAZ 而未穿越 CAZ 定义为潜在冲突飞机, 如果两速度矢量均穿越 CAZ, 则定义为潜在碰撞飞机。对潜在冲突飞机只计算其到达 PAZ 的时间, 对潜在碰撞飞机只计算其到达 CAZ 的时间。通过 ADS-B IN 可以获得目标机的卫星定位位置, 结合本机的位置, 可计算得到目标机 A2 相对本机的在站心坐标系中的相对位置为 $(x_2, y_2)$ , 如图 2 所示。设两机水平相对速度矢量与 PAZ 和 CAZ 的交点分别为 $(x_p, y_p)$ 和 $(x_c, y_c)$ , 那么 A2 到达 PAZ 和 CAZ 水平边界的时间分别为:

$$\begin{cases} t_{ph} = \frac{\sqrt{(x_2 - x_p)^2 + (y_2 - y_p)^2}}{|v_{rh}|} \\ t_{ch} = \frac{\sqrt{(x_2 - x_c)^2 + (y_2 - y_c)^2}}{|v_{rh}|} \end{cases} \quad (4)$$

同理, 可计算得到 A2 到达垂直边界的时间 $t_{pv}$ 和 $t_{cv}$ 。由于只有从水平和垂直两方向都进入保护区才是真正的进入了保护区范围, 因此分别对比 $t_{ph}$ 和 $t_{pv}$ ,  $t_{ch}$ 和 $t_{cv}$ 的值, 因此目标机真正进入 PAZ 和 CAZ 的时间可表示为:

$$\begin{cases} t_p = \max(t_{ph}, t_{pv}) \\ t_c = \max(t_{ch}, t_{cv}) \end{cases} \quad (5)$$

根据冲突时间将能够进入 CAZ 的潜在碰撞飞机分为类似 TCAS 的两个告警级别。为使多机冲突解脱的路线更加安全和合理, 需要对每一架探测到的潜在冲突飞机和潜在碰撞飞机定义危险系数, 该系数决定了其在解脱算法中的优先级。TCAS 的告警级别取决于两机到达最近点(Closest Point of Approach, CPA)<sup>[20]</sup>的时间, 为了简化计算, 我们沿用到达 PAZ 和 CAZ 的时间来定义危险系数, 其数值取决于到达 PAZ 和 CAZ 的时间, 时间越短则危险系数越大, 反之则越小, 危险系数的定义公式如下:

$$f_R = \begin{cases} \frac{1}{t_p + 1} & t_p \geq 0 \text{ and } t_c = 0 \\ \frac{m}{t_c + 1} & t_c > 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $t_c=0$  表示目标机未进入 CAZ 区域, 潜在冲突飞机的危险系数取值范围为 $[0,1]$ , 潜在碰撞飞机的危险系数取值范围为 $[0,m]$ ,  $m$  是一个大于 1 的常数, 用于提高潜在碰撞飞机的危险系数。

每架飞机的危险系数都是相对于某一个本机的, 多机航迹规划作为一种整体规划, 具有协同性, 即所有飞机遵循同样的规划原则, 因此每架飞机应具有唯一的危险系数。以 ADS-B IN 监视范围内的每一架飞机为本机, 计算周围所有飞机的危险系数, 其中危险系数最大的目标机定义为本机的危险系数。无冲突航迹规划时需要根据每架飞机的危险系数调整规划优先级, 保证最危险的两架冲突飞机获得最远的安全间隔和最早的航迹改变, 危险系数是快速无冲突航迹规划过程中规划顺序、规划方向、冲突判定、快速求解和最优解等项目的重要依据。

## 1.2 无冲突航迹规划

通过机载 ADS-B IN 数据可以感知更大范围内的交通态势, 更早的预测和发现冲突, 是实时无冲突航迹规划的前提和保障。无冲突航迹规划是以消除所有潜在的冲突威胁并始终保持足够的安全间隔和最短航迹为目的, 设计最优的冲突解脱路线和回归路线, 辅助飞行员或自动驾驶系统实现安全高效的自由飞行。

传统的垂直解脱策略通常不适用于多机冲突场景, 此外改变高度对飞机燃油消耗比较大, 因此本文采用水平解脱策略。水平解脱又可分为改变航向和改变航速 2 种, 然而飞机改变速度存在一定的延时, 且速度会受气象、气流、飞行高度等影响, 无法进行精确的计算, 因此本文采用的是保速调向方式。无冲突航迹规划整体建模过程如图 4 所示。

通过对 ADS-B IN 监视范围内所有飞机的危险系数求和判断是否存在潜在冲突, 当发现飞行冲突时, 以冲突飞机为边界, 定义正方形冲突区域, 冲突点一般位于区域中心, 将冲突区域按固定的时间间隔或距离间隔网格化, 对网格中的节点进行编码, 结合遗传算法在选择和进化上的优势, 优化目



标函数, 可以快速规划出最优的无冲突飞行路径, 使冲突扇区内的所有飞机始终保持安全的飞行间隔。ADS-B IN 最远可以探测和发现 200 海里以外的飞机, 将冲突区域按航路最小间隔 5 海里可划分 40×40 个方格, 由于受天气影响以及接收机性能不同, 我们以冲突飞机相距 40 海里为例进行分析, 依旧按 5 海里最小航路间隔将冲突区域划分为 8×8 个方格, 飞机沿网格节点飞行, 使整个飞行过程离散化, 便于航迹规划。

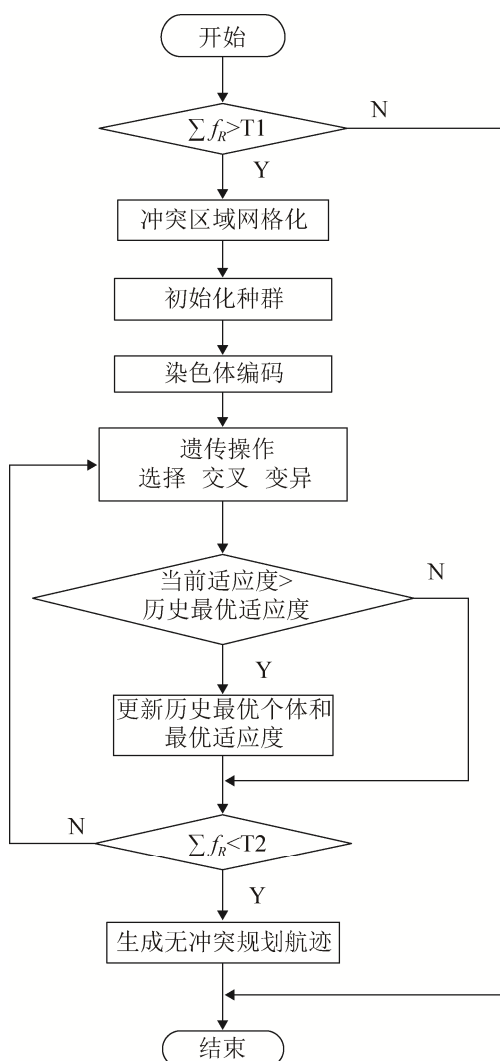


图 4 无冲突航迹规划流程图  
Fig. 4 Flow chart of conflict-free trajectory planning

用  $x$  和  $y$  表示网格节点坐标, 对飞机航迹点进行编码,  $x$  和  $y$  均为 4bit, 那么每个航迹点的基因  $(x,y)$  为 8bit, 从进入边界到离开边界直线飞行一般分为

9 步, 如果包含本机在内的冲突飞机共有 4 架, 则染色体的长度为  $8 \times 9 \times 4 = 288$  bit。4 架飞机分别经过编码得到基因后组合成为一条染色体, 即一个解。

冲突位置定义为某一个方格节点, 两架或多架飞机在某一时刻同时经过该节点, 将这种情况下的染色体适应度设为 0, 也就淘汰了这种情况。同时为获得最优航迹规划, 设置适应度函数, 优先考虑危险系数较大的目标机, 并将整体飞行航迹长度, 飞行转向次数, 实际飞离点与理论飞离点的距离作为最优评定依据。当个体的适应度很高时, 那么其被算法所选择进行遗传操作的概率就越高。适应度函数如式(7)和式(8)所示。

$$J_1 = \min(\sum_i \Delta f_r(i)) \tag{7}$$

式中:  $\Delta f_r(i)$  表示第  $i$  架冲突飞机危险系数的变化。

$$J_2 = \min(w_L \sum_i |\Delta D_L(i)| + w_T \sum_i |\Delta D_T(i)| + w_C \sum_i |\Delta D_C(i)|) \tag{8}$$

式中:  $\Delta D_L(i)$  表示第  $i$  架冲突飞机在冲突扇区内的航迹长度变化,  $w_L$  为该项权重;  $\Delta D_T(i)$  表示第  $i$  架冲突飞机在冲突扇区内的转向次数,  $w_T$  为该项权重;  $\Delta D_C(i)$  表示第  $i$  架冲突飞机实际飞离点与理论飞离点的距离,  $w_C$  为该项权重。式(7)用于快速求解, 而式(8)则用于求最优解。

针对非协同解脱情况, 即其中一架或多架飞机只具有 ADS-B OUT 功能而不具备 ADS-B IN 功能, 则需通过航迹点改变信息进行早期判断, 确认其没有航迹改变意图后, 将其标定为固定航迹再进行无冲突航迹规划。通过生成未来航迹报告可以共享本机与周围目标机的航迹改变点, 通过多机协同重新规划航迹, 保持飞机之间的安全间隔, 结合 ADS-B 报文的特点, 本算法尤其适合复杂的多机冲突场景。

## 2 仿真验证

### 2.1 冲突预测仿真验证

冲突预测算法作为一个独立的模块放入实验室开发的 ADS-B IN 应用仿真软件中进行测试, 为

了增加碰撞概率并验证冲突预测算法, 监视数据源使用的是模拟的 ADS-B 数据, 飞机初始数量为 15 到 30 架, 在以本机为中心的半径 100 海里内随机分布, 以每秒 1 次的速率通过 UDP 协议发送, 接收到的数据通过解析后模拟 TCAS 的交通显示, 如图 5 所示。距离环中心的白色三角形为本机, 蓝色三角形为探测到的目标机。

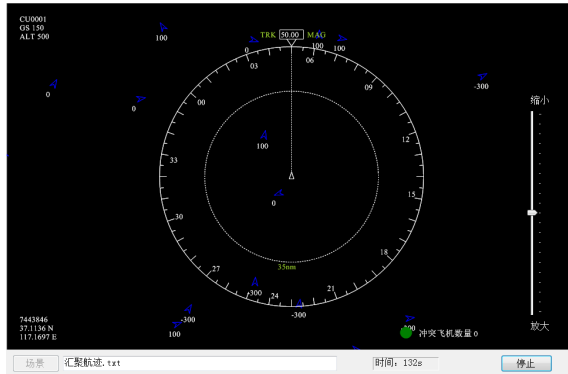


图 5 ADS-B IN 应用仿真软件界面  
Fig. 5 ADS-B IN simulation software interface

探测到冲突后, 蓝色目标机会改变颜色, 冲突距离较远或只穿越 PAZ 而未穿越 CAZ 的入侵机变为黄色, 冲突距离较近且穿越 CAZ 的入侵机会变为红色, 同时入侵机下方会显示飞机的身份和相对高度, 如图 6 所示。图 6 是 ADS-B IN 应用仿真软件的局部放大图, 左边的黄色三角为检测到的冲突目标机, 右边的红色三角为该目标机继续前进而造成更高级别的冲突。

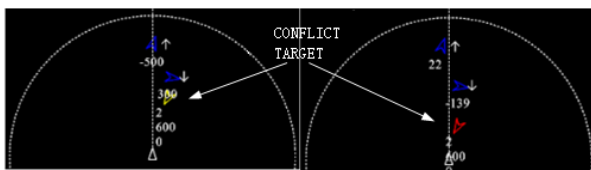


图 6 冲突探测仿真  
Fig. 6 Conflict detection simulation

## 2.2 无冲突航迹规划仿真实证

多机飞行冲突可分为连续两机冲突和多机汇聚冲突, 如图 7 和图 8 所示, 图中  $t=0$  的边缘节点是飞机飞入冲突扇区的初始位置, CP 为冲突位置。

图 7 中, 飞机 1 与飞机 2 在  $t=2$  时刻发生冲突, 飞机 1 与飞机 3 在  $t=4$  时刻发生冲突。图 8 中, 4 架飞机在  $t=4$  时刻在同一位置发生冲突。

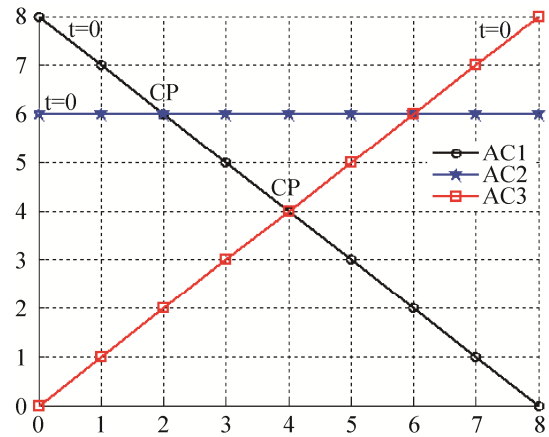


图 7 连续两机冲突  
Fig. 7 Continuous two aircrafts conflict

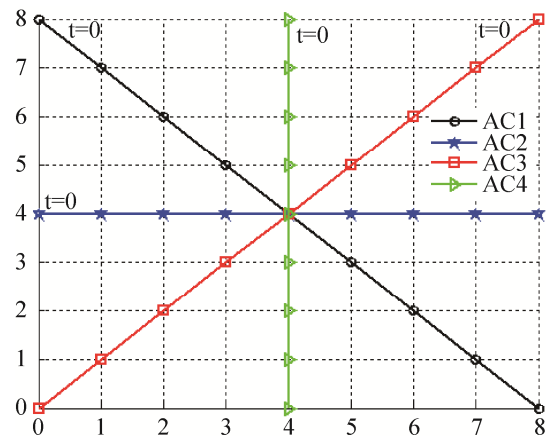


图 8 多机汇聚冲突  
Fig. 8 Multi-aircraft gather conflict

对于这两种典型的多机飞行冲突, 通过本文提出的无冲突航迹规划方法可以快速的找出一条最优的无冲突航迹, 如图 9 和图 10 所示。规划后的航迹点在时间上是完全错开, 并且相互之间的水平间隔始终满足航路最小间隔 5 海里的要求。

此外, 对于非协同情况, 通常在  $t=0$  到  $t=1$  时间内判断出是否存在非协同飞机, 如果存在则需重新规划无冲突航迹, 保证所有飞机之间的安全间隔, 如图 11 所示。4 架飞机中的某一架飞机不具有 ADS-B IN 功能, 也无法进行主动式航迹规划,



其航迹保持不变, 其余 3 架飞机重新规划无冲突航迹, 确保飞行安全。

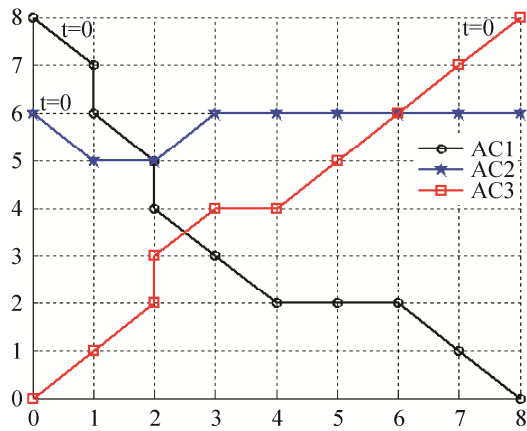


图 9 连续两机冲突消除航迹规划

Fig. 9 Conflict-free trajectory planning for continuous two aircrafts conflict

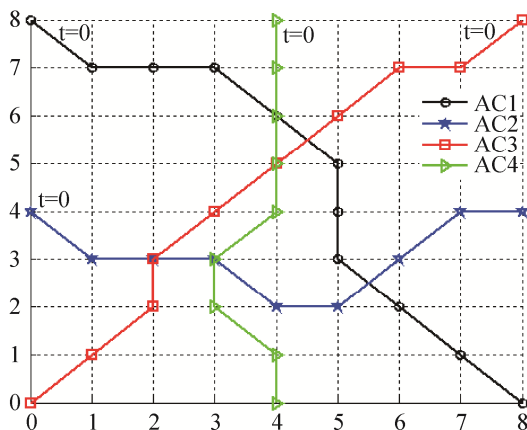


图 10 多机汇聚冲突消除航迹规划

Fig. 10 Conflict-free trajectory planning for multi-aircraft conflict

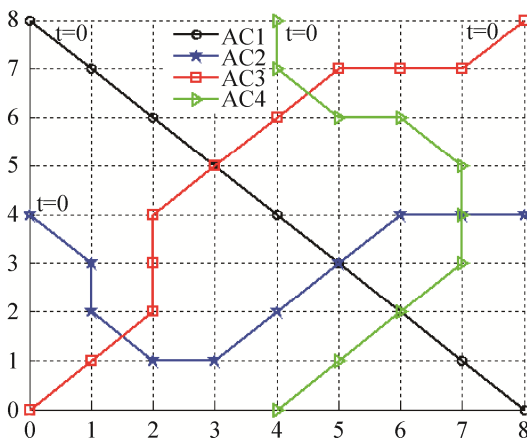


图 11 非协同无冲突航迹规划

Fig. 11 Non-collaborative Conflict-free trajectory planning

遗传算法对于 5 架以内的多机冲突, 通常在迭代 30 次左右时就可以找到相对稳定的目标函数值, 并且平均适应度随着进化过程逐渐增加。在普通配置的 PC 机上运行该算法仿真程序, 预测冲突并进行多机无冲突航迹规划耗时约 2 s, 因此飞行员有足够的时间按规划后的航迹进行安全的飞行。

### 3 与 TCAS 对比分析

通过 ADS-B IN 信息共享和多机协同避撞飞行, 保证了整个飞行过程中飞机之间均保持安全的间隔, 从而实现自由飞行的理念。与传统的 TCAS 技术<sup>[20]</sup>相比, 基于 ADS-B IN 的冲突预测与无冲突航迹规划, 具有以下优点:

(1) 冲突预测范围大大增加。TCAS 由于模拟二次雷达通过询问获取周围飞机的位置, 其询问信号功率较小, 预测距离最远可以到达 40 海里, 而 ADS-B IN 技术无需询问, 预测距离取决于接收机的性能, 最远可以预测到 200 海里。

(2) 跟踪飞机数量大大增加。TCAS 最多可以同时跟踪 30 架飞机, ADS-B IN 技术可以同时监视的飞机数量理论上没有上限, 但根据 ADS-B 每条报文的时长约 200  $\mu$ s, 数据的更新频率小于 1 s, 普通接收机处理每条报文的时间约 300  $\mu$ s, 丢包率为 50% 等条件, 计算可知 ADS-B 能够同时监视的飞机数量理论上限为 1 000 架。

(3) 紧急避撞策略改为无冲突航迹规划。TCAS 仅在冲突发生半分钟前的 RA 告警时提供垂直方向的紧急避撞指示, 而 ADS-B IN 技术可以更早发现冲突, 即使是两架飞机完全相向飞行, 按民航客机的每小时 1 000 km 左右的巡航速度, 两机相遇也需要 10 min, 足够完成无冲突航迹规划的计算, 并引导飞行电脑或飞行员按新的无冲突航迹去飞行。

### 4 结论

本文结合 ADS-B IN 技术特点, 通过简化冲突预测算法, 快速发现并跟踪所有冲突飞机和潜在冲

突飞机,将短时间的冲突探测升级为长时间的冲突预测,充足的预测时间满足航迹规划的计算和实施要求。在此基础上,通过网格化冲突扇区,并结合每个目标机的冲突危险系数,仿真实现了基于遗传算法的多机无冲突航迹规划算法,保证了飞机之间的安全间隔,同时实现了解脱后的回归航迹。

通过改变冲突扇区范围和网格间隔,本文所提方法对冲突飞机数量较多或速度较快等情况仍可适用,只是运算时间会有所增加。本文对于飞机速度相差较大和飞机速度或航向不断变化等复杂动态情况没有分析,将在今后的研究中予以解决。此外,本文的航迹规划算法主要用于巡航阶段,对于起飞爬升和下降着陆阶段,由于飞行高度不断变化,单一的水平保速调向策略并不适用,根据飞机的飞行阶段研究更有效航迹规划算法是下一步重点研究内容。

## 参考文献:

- [1] Rose C E, Panken A D, Harman W H, et al. TCAS surveillance performance analysis[C]. Digital Avionics Systems Conference IEEE. Salt Lake City, UT, USA: IEEE, 2010: 3.B.4-1-3.B.4-13.
- [2] 李丹, 崔德光. 基于布朗运动的空中交通短期冲突探测[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2008, 48(4): 477-481.  
Li Dan, Cui Deguang. Air traffic control conflict detection algorithm based on Brownian motion[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2008, 48(4): 477-481.
- [3] Kochenderfer M J, Edwards M W M, Espindle L P, et al. Airspace encounter models for estimating collision risk[J]. Journal of Guidance Control & Dynamics (S0731-5090), 2012, 33(2): 487-499.
- [4] 翟文鹏, 李亚飞. 飞行目标航迹生成及冲突探测算法研究[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(10): 110-113.  
Zhai Wenpeng, Li Yafei. Flying target track generation and conflict detection algorithm[J]. China Safety Science Journal, 2013, 23(10): 110-113.
- [5] 张兆宁, 佐江丽. 基于布朗运动的自由飞行下碰撞风险研究[J]. 中国安全科学学报, 2012, 22(8): 43-47.  
Zhang Zhaoning, Zuo Jiangli. Study on free flight collision risk based on Brownian motion[J]. China Safety Science Journal, 2012, 22(8): 43-47.
- [6] 中国民用航空局. 中国民用航空 ADS-B 实施规划[S]. 北京: 中国民用航空局, 2015.  
Civil Aviation Administration of China. China's civil aviation ADS-B implementation plan[S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2015.
- [7] Baek K, Bang H. ADS-B based trajectory prediction and conflict detection for air traffic management[J]. International Journal of Aeronautical & Space Sciences (S2093-274X), 2012, 13(3): 377-385.
- [8] 郝帅, 朱代武, 陈肯. 基于 ADS-B 的飞行安全间隔方法研究[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(33): 8333-8336.  
Hao Shuai, Zhu Daiwu, Chen Ken. Study of Flight Separation Criteria in Air Traffic Control Based on ADS-B[J]. Science Technology and Engineering, 2010, 10(33): 8333-8336.
- [9] 张晓燕, 陈亚青, 刘国毅, 等. ADS-B 监视下飞行间隔评估方法研究[J]. 航空计算技术, 2011, 41(2): 13-15.  
Zhang Xiaoyan, Chen Yaqing, Liu Guoyi, et al. Research on method of flight separation assessment based on ADS-B[J]. Aeronautical Computing Technique, 2011, 41(2): 13-15.
- [10] Orefice M, Vito V D, Corrado F, et al. Aircraft conflict detection based on ADS-B surveillance data[C]. IEEE Metrology for Aerospace (MetroAeroSpace). Benevento, Italy: IEEE, 2014: 277-282.
- [11] 倪壮, 肖刚, 敬忠良, 等. 改进蚁群算法的飞机冲突解脱路径规划方法[J]. 传感器与微系统, 2016, 35(4): 130-133.  
Ni Zhuang, Xiao Gang, Jing Zhongliang, et al. Path planning method for aircrafts conflict resolution based on improved ant colony algorithm[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2016, 35(4): 130-133.
- [12] 王洁宁, 袁志娟. 基于粒子群算法的飞行冲突解脱问题[J]. 中国民航大学学报, 2010, 28(4): 1-4.  
Wang Jiening, Yuan Zhijuan. Study on resolution of flight conflicts based on particle swarm optimization[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2010, 28(4): 1-4.
- [13] 王渊, 孙秀霞, 刘树光, 等. 基于改进人工蜂群算法的多机飞行冲突解脱策略[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2014, 15(3): 10-14.  
Wang Yuan, Sun Xiuxia, Liu Shuguang, et al. Research on multi-aircraft conflict resolution based on a modified artificial bee colony algorithm[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2014, 15(3): 10-14.
- [14] 陈伟锋, 邵之江. 基于析取关系直接变换的冲突解脱方法[J]. 航空学报, 2014, 35(4): 1122-1133.

- Chen Weifeng, Shao Zhijiang. Direct disjunction transcription based conflict resolution approach[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, 35(4): 1122-1133.
- [15] 孙禾, 蔡月茹, 周沅. 飞机多机飞行冲突状态预测研究[J]. *计算机仿真*, 2016, 33(6): 59-63,409.
- Sun He, Cai Yueru, Zhou Yuan. A Study on multi-conflict flight mode forecast[J]. *Computer Simulation*, 2016, 33(6): 59-63,409.
- [16] 刘永兰, 李为民, 吴虎胜, 等. 基于狼群算法的无人机航迹规划[J]. *系统仿真学报*, 2015, 27(8): 1838-1843.
- Liu Yonglan, Li Weimin, Wu Husheng, et al. Track Planning for Unmanned Aerial Vehicles Based on Wolf Pack Algorithm[J]. *Journal of System Simulation*, 2015, 27(8): 1838-1843.
- [17] RTCA. DO-263 Application of Airborne Conflict Management: Detection, Prevention & Resolution[S]. Washington: DC, 2000.
- [18] Kuchar J K, Yang L C. A review of conflict detection and resolution modeling methods[J]. *IEEE Transactions on intelligent transportation systems (S1524-9050)*, 2000, 1(4): 179-189.
- [19] Gariel M, Hansman R J, Frazzoli E. Impact of GPS and ADS-B Reported Accuracy on Conflict Detection Performance in Dense Traffic[C]. *AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations*. Virginia Beach, VA, USA: AIAA, 2011.
- [20] FAA. Introduction to TCAS II, version 7.1[S]. USA: FAA, 28 February 2011.