

1-3-2019

Collision Avoidance Performance Improvement for TCAS in Multi-Aircraft Situations Based on State Prediction

Tang Jun

College of Information Systems and Management, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

Fen Zhu

College of Information Systems and Management, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

Wan Yu

College of Information Systems and Management, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

Songyang Lao

College of Information Systems and Management, National University of Defense Technology, Changsha 410073, 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.

Collision Avoidance Performance Improvement for TCAS in Multi-Aircraft Situations Based on State Prediction

Abstract

Abstract: Currently the density of the airspace increases with the air traffic flow increasing significantly, and therefore the conflict occurrence possibility of two or multiple aircraft raises. However, the traffic collision avoidance system (TCAS) may not be able to resolve all the collision problems of multi-threat situation. There is an active demand to improve its performance in multi-threat situation. *This paper mathematically describes the traditional TCAS anti-collision mechanism, and achieves its expansion in the horizontal direction, thus proposes the improvement algorithm of collision avoidance performance for TCAS in multi-aircraft situations based on the state prediction.* Adjusting the height and vertical speed are used as the core in this algorithm, course change and multiple aircraft cooperation are combined to choose the optimization strategy to avoid collision. Simulation results demonstrate the effectiveness of our approaches.

Keywords

air traffic management, TCAS, multi-aircraft situations, state prediction, collision risk

Recommended Citation

Tang Jun, Zhu Fen, Wan Yu, Lao Songyang. Collision Avoidance Performance Improvement for TCAS in Multi-Aircraft Situations Based on State Prediction[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(12): 4703-4711.

基于状态预测的空中防撞系统多机避碰性能改进方法

汤俊, 朱峰, 万宇, 老松杨

(国防科学技术大学, 系统工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 目前随着空中交通流量的大幅提升, 空域密度不断增加, 发生双机、多机冲突的可能性增大, 但空中防撞系统 (TCAS) 不能解决所有多机态势下的防撞问题。因此迫切需要提高其在多机态势下的防撞性能。本文通过数学描述传统的 TCAS 防撞机制, 并实现其在水平方向上的拓展, 从而提出基于状态预测的垂直与水平方向综合优化的 TCAS 避碰策略选择算法。算法以高度和垂直速度调整为核心, 辅以水平变向, 多机协同, 采取最优化的策略避免碰撞。仿真实验验证了方法的有效性。

关键词: 空中交通管理; 空中防撞系统; 多机态势; 状态预测; 碰撞风险

中图分类号: V328.3 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2018) 12-4703-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201812026

Collision Avoidance Performance Improvement for TCAS in Multi-Aircraft Situations Based on State Prediction

Tang Jun, Zhu Fen, Wan Yu, Lao Songyang

(College of Information Systems and Management, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Currently the density of the airspace increases with the air traffic flow increasing significantly, and therefore the conflict occurrence possibility of two or multiple aircraft raises. However, the traffic collision avoidance system (TCAS) may not be able to resolve all the collision problems of multi-threat situation. There is an active demand to improve its performance in multi-threat situation. *This paper mathematically describes the traditional TCAS anti-collision mechanism, and achieves its expansion in the horizontal direction, thus proposes the improvement algorithm of collision avoidance performance for TCAS in multi-aircraft situations based on the state prediction.* Adjusting the height and vertical speed are used as the core in this algorithm, course change and multiple aircraft cooperation are combined to choose the optimization strategy to avoid collision. Simulation results demonstrate the effectiveness of our approaches.

Keywords: air traffic management; TCAS, multi-aircraft situations; state prediction; collision risk

引言

随着航空事业的迅速发展, 空中交通密度日益增加, 为了保证飞机安全有序地飞行, 需要在传



收稿日期: 2018-06-28 修回日期: 2018-07-29;
基金项目: 国家自然科学基金(71601181);
作者简介: 汤俊(1988-), 男, 安徽安庆, 博士, 讲师, 研究方向为航空安全管理; 朱峰(1985-), 男, 湖北咸宁, 博士, 讲师, 研究方向为复杂系统建模; 万宇(1994-), 男, 四川眉山, 硕士, 研究方向为飞机防撞。

统的空中交通管制(AirTrafficControl, ATC)系统的基础上为飞行员提供一种可靠的、机动的防碰撞措施^[1]。在有限的空域资源条件下, 飞行量激增的后果主要表现在两个方面: 一方面局部空域出现拥挤, 致使航班大量延误, 给航空公司造成巨大的经济损失和不良社会影响; 另一方面飞行冲突次数增加, 使得相关空中交通服务和安全保障系统高负荷运行, 安全形势不容乐观^[2]。

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

• 4703 •

此外,各种新型飞行器特别是高空高速长航时无人机的广泛应用,增加了空域密度和复杂度,对传统航空安全构成严重威胁^[3];空中交通管理(Air Traffic Management, ATM)领域“自由飞行”概念的提出,要求以最大限度地允许飞行员对航线进行自主导航,这无疑增加了飞行中航线不固定性,提高了飞行冲突概率^[4]。

空中防撞系统(Traffic Collision Avoidance System, TCAS)^[5]于20世纪80年代发展成熟并被广泛应用,它独立于陆基的ATC系统,通过获得邻近飞机的状态信息来判断飞机之间是否会存在潜在的冲突威胁或者碰撞风险,从而实现邻近飞机的监视并根据自身情况进行机动避让,有效降低航空器相撞的可能性,确保飞行安全。因此,如果说地面航管提供了飞机安全间隔的基本保证,防撞系统就构成了防止灾难的最终安全屏障。2002-03-06,由于进入地面雷达的控制盲区,阿根廷境内两架相互靠近的飞机几乎在万米高空相撞。由于两架飞机均安装了TCAS系统,并且飞行员及时根据TCAS建议采取了避让措施,有效避免了灾难的发生。据记载两架飞机在最近距离只有70米的情况下擦肩而过^[6]。目前,美国和欧盟已经将TCAS作为法定实施项目,要求在其空域内飞行的商业飞机必须安装和强制使用该系统,同时加强了对飞行员和管制员的培训,由此可以看出TCAS对飞行安全的重要性。

空中交通拥挤问题的产生是由于空中交通系统的容量与需求不平衡,解决该问题的基本思路为积极寻求增加空域容量的手段和方法,如缩小垂直间隔、减小纵向间隔、优化空域结构、灵活使用空域等。但同时,遭遇入侵机的风险也会随之增高,出现多机冲突态势的概率增多。因此,需要对TCAS进行有效改进从而提高避免碰撞的能力。

本文提出基于状态预测的垂直与水平方向综合优化的TCAS避碰策略选择算法,根据局部空域内多架飞机当前运动状态预测未来一小段时间(<1 min)内的整体态势,避免连锁碰撞等突发情况,

以高度和垂直速度调整为核心,辅以水平变向,多机协同,从而采取最优化的策略避免碰撞。完善有效的TCAS改进方案不仅是空域交通是否可以安全正常运行的基本保障,还对高效利用有限的空域资源、节约空中飞行时间、提升飞行员操作能力、降低燃料消耗等方面有着重要影响。

1 问题描述

TCAS根据两机距离和预计相遇时间进行逻辑判断,提供两个等级的告警信息:(1)当入侵机进入威胁区域时造成了交通冲突风险,TCAS发出交通警戒信息TA(traffic advisory),使飞行员觉察并引起注意;(2)当入侵机更接近,并且进入告警区时便构成碰撞威胁,TCAS发出决策警告信息RA(resolution advisory),建议飞行员为避免碰撞需要采取爬升或下降策略^[7]。目前,TCAS分为两种类型:TCAS I和TCAS II。TCAS I只提供TA功能,TCAS II更为先进,不仅提供TA功能,还提供具有决策建议的RA功能。TCAS主要采用本机和入侵机到达它们之间最接近点(closest point of approach, CPA)的时间,而不仅仅是依靠距离来决定是否发出TA和RA建议。并根据本机和入侵机在最接近点的水平间隔(horizontal miss distance, HMD)和垂直间隔(vertical miss distance, VMD)来对入侵飞机进行威胁探测和评估,预测出两机到达CPA的时间Tau以及HMD和VMD^[8]。TCAS一般提供一个不穿越入侵机既定航线的RA建议,实现在CPA时双方的高度差值满足最小高度限制ALIM(altitude limit)。但如果RA建议在CPA时双方的高度差值不满足ALIM,则TCAS会选择穿越入侵机既定航线的RA咨询^[1]。TCAS II概念模型如图1所示。

TCAS在航空安全上的巨大作用得到了航空领域工作人员的一致好评。飞行员操作飞机在空中飞行时,不仅有ATC系统为他们提供安全可靠的间隔距离,还可使用TCAS系统去观察周围的飞机,主动避免可能出现的危险。但是安装了防撞系

统不代表就可以高枕无忧, TCAS 本身在技术方面的诸多问题显示其还不够成熟, 例如: 虚假告警率较高, 以致过多地分散了飞行员的注意力; 在提供碰撞解决信息后, 飞机响应建议采取动作时会遭遇其他飞机形成新的威胁; 以及飞机避让建议可能会与地面航管命令相矛盾, 导致飞行员无法采取正确措施, 等等^[9]。

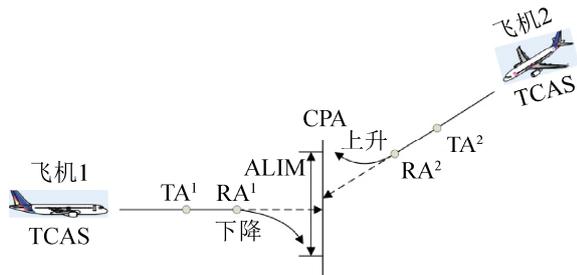


图 1 TCAS II 概念模型
Fig. 1 TCAS II conceptual model

特别是近年来, 随着空中交通量不断上升, 空域密度随之增加, 发生双机、多机飞行冲突的可能性增大。TCAS 能有效应对双机碰撞风险, 但是不一定能解决所有多机态势下的飞行冲突问题。图 2 显示均安装了 TCAS 的四架飞机诱发连锁碰撞的态势。飞机 1 与飞机 2 之间存在冲突 1, 飞机 3 与

飞机 4 之间存在冲突 2。变量 t_{TA}^i ($i=1,2,3,4$) 表示相应飞机 TA 发生的时间, 变量 t_{RA}^i ($i=1,2,3,4$) 表示相应飞机 RA 发生的时间。TCAS 建议飞机 1 下降同时飞机 2 上升用以解脱冲突 1, 飞机 3 下降同时飞机 4 上升用以解脱冲突 2。但是, 下降的飞机 1 和上升的飞机 4 诱发了一个新的冲突, 并且由于距离较近且留下的时间不足而造成飞行员无法及时响应 TCAS 建议, 连锁冲突未能解脱从而引发了碰撞事故。

2 基于状态预测的 TCAS 多机避碰性能改进

2.1 时空混合的飞机冲突区域建模

本研究对多机态势所在的局部空域进行建模, 采用的是欧几里德三维空间(无曲度)模型^[10], 如图 3(b)所示; 一般情况下, 解决空中交通管理问题, 均需要考虑地球椭球面造成的曲度, 如图 3(a)所示。本研究面向操作级的 TCAS 防碰撞研究, 时间跨度很小($<1\text{min}$), 飞机分布紧凑, 因此可简化局部空域模型, 构建经度、纬度和高度三维坐标系, 大大减小了计算量。

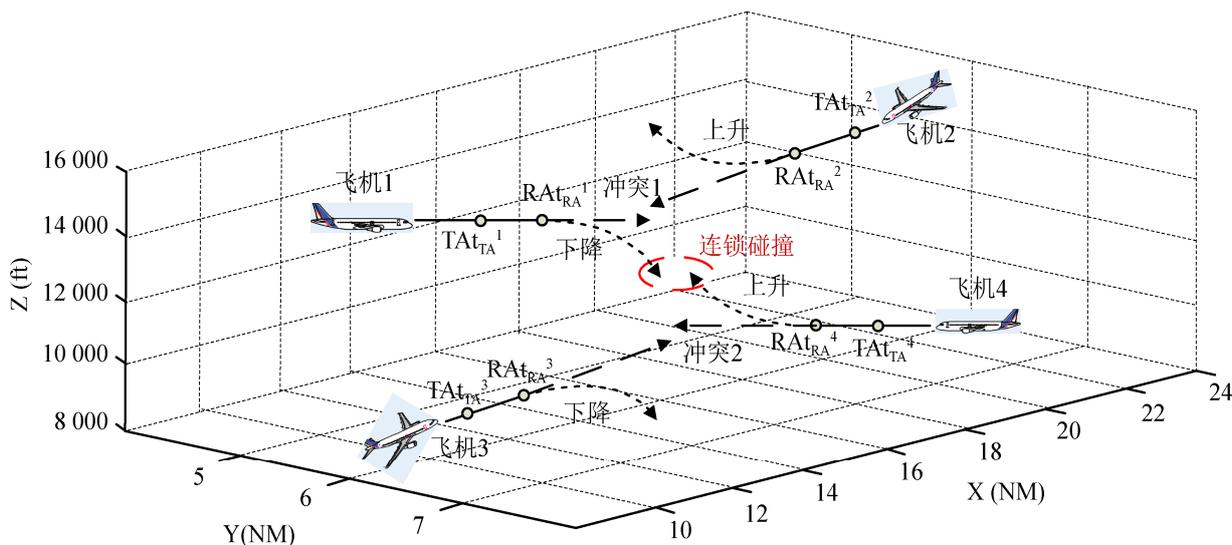
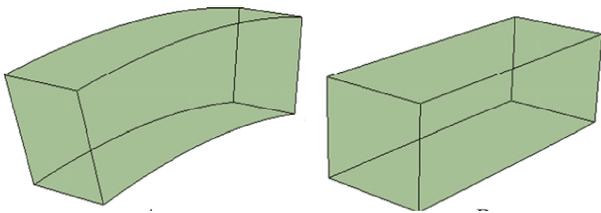


图 2 TCAS 诱发的连锁碰撞
Fig. 2 Chain collision triggered by TCAS II



(a) 考虑地球表面曲率模型 (b) 简化的欧几里德空间模型

图 3 局部空域模型

Fig. 3 Regional airspace model

TCAS 一般采用本机和入侵机到最近点 CPA, 即两机间的最小距离的时间来决定是否发出 TA 和 RA 信息, 并根据本机和入侵机在 CPA 的水平间隔 HMD 和垂直间隔 VMD 来对相遇飞机进行冲突检测, 不同高度层发出 TA 和 RA 的时间不同, 如表 1 所示^[1]; 当两架飞机航向相同且以很小的速度差慢慢靠近时, 以到达 CPA 的时间来判断是非常危险的, 因此需要考虑空间上的区域限制, 即水平和垂直方向上的距离均小于相应的数值时(对应不同的高度层)才会发出 TA 或 RA。此外, 需要强调的是, 两机发生碰撞事故不考虑时间上的标准, 只考虑水平距离差 D_{CL} 和高度差 H_{CL} 是否同时达到了相应的阈值。因此, 需要构建时空混合的飞机冲突区域模型, 其概念如图 4 所示。

表 1 不同高度层上的 TCAS 阈值
Tab. 1 TCAS thresholds for different levels

Own Altitude /ft	SL	Time		DMOD		ZTHR		ALIM
		/s		/NM		/ft		/ft
		TA	RA	TA	RA	TA	RA	RA
<1 000	2	20	N/A	0.30	N/A	850	N/A	N/A
1000~2350	3	25	15	0.33	0.20	850	600	300
2350~5000	4	30	20	0.48	0.35	850	600	300
5000~10000	5	40	25	0.75	0.55	850	600	350
10000~20000	6	45	30	1.00	0.80	850	600	400
20000~42000	7	48	35	1.30	1.10	850	700	600
>42000	7	48	35	1.30	1.10	1200	800	700

2.2 TCAS 防撞机制数学描述

TCAS 的防撞机制是通过 TA 和 RA 两级告警来实现的。机载 TCAS 通过对飞机在空域中的位置

和速度信息进行计算, 判断飞机之间是否达到 TA 告警阈值, 如果态势不断恶化, 临近的飞机不断靠近, 就需要冲突解脱, 即预测到将要发生碰撞时, 规划出避免飞行碰撞的理想决策, 使得飞行员能够按照提示的 RA 建议操纵飞机到达安全区域。

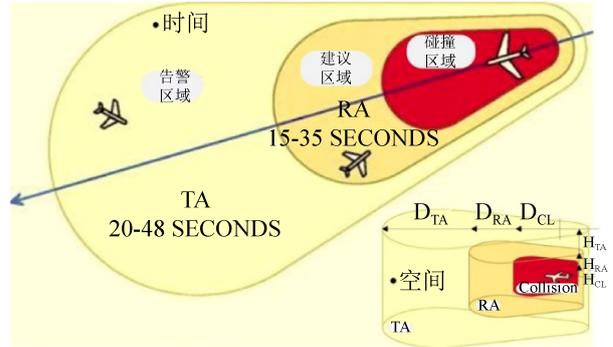


图 4 时空混合的飞机冲突区域概念模型

Fig. 4 Time-space mixed aircraft conflict area conceptual model

在时间 t , Aircraft i 相应的动态参数(位置 p_t^i 和速度 v_t^i)可表示为^[11]:

$$p_t^i = \begin{bmatrix} x_t^i \\ y_t^i \\ z_t^i \end{bmatrix}, v_t^i = \frac{dp_t^i}{dt} = \begin{bmatrix} v_t^i \cos \gamma_t^i \cos \theta_t^i \\ v_t^i \cos \gamma_t^i \sin \theta_t^i \\ v_t^i \sin \gamma_t^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{t,x}^i \\ v_{t,y}^i \\ v_{t,z}^i \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$0 < \theta_t^i < 2\pi, -\frac{\pi}{2} \leq \gamma_t^i \leq \frac{\pi}{2}$$

式中: θ_t^i 表示水平方向上的航向角; γ_t^i 表示垂直方向上的俯仰角。

$$T_{t,CPA}^{ij}, h = \frac{-\sqrt{(x_t^i - x_t^j)^2 + (y_t^i - y_t^j)^2}}{\sqrt{(v_{t,x}^i - v_{t,x}^j)^2 + (v_{t,y}^i - v_{t,y}^j)^2} \cdot \cos(\alpha_t^{ij} - \beta_t^{ij})} \quad (2)$$

$$\cos \alpha_t^{ij} = \arctan\left(\frac{v_{t,x}^i - v_{t,x}^j}{v_{t,y}^i - v_{t,y}^j}\right) \quad (3)$$

$$\cos \beta_t^{ij} = \arctan\left(\frac{x_t^i - x_t^j}{y_t^i - y_t^j}\right) \quad (4)$$

$$T_{t,CPA,z}^{ij} = -\frac{z_t^i - z_t^j}{v_{t,z}^i - v_{t,z}^j} \quad (5)$$

$$D_{t,h}^{ij} = \sqrt{(x_t^i - x_t^j)^2 + (y_t^i - y_t^j)^2} \quad (6)$$

$$D_{t,z}^{ij} = |z_t^i - z_t^j| \quad (7)$$

$$D_{t_{CPA,h}}^{ij} = \sqrt{\left[(x_t^i + v_{t,x}^i \cdot T_{t_{CPA,z}}^{ij})^2 - (x_t^j + v_{t,x}^j \cdot T_{t_{CPA,z}}^{ij})^2 \right] + \left[(y_t^i + v_{t,y}^i \cdot T_{t_{CPA,z}}^{ij})^2 - (y_t^j + v_{t,y}^j \cdot T_{t_{CPA,z}}^{ij})^2 \right]} \quad (8)$$

$$D_{t_{CPA,z}}^{ij} = \sqrt{\left[(z_t^i + v_{t,z}^i \cdot T_{t_{CPA,h}}^{ij})^2 - (z_t^j + v_{t,z}^j \cdot T_{t_{CPA,h}}^{ij})^2 \right]} \quad (9)$$

在等式(8)和(9)中, $T_{t_{CPA,h}}^{ij}$ 和 $T_{t_{CPA,z}}^{ij}$ 被定义为 *Aircraft i* 和 *Aircraft j* 在时间 t 到达水平和垂直方向上 CPA 的时间; α_t^{ij} 和 β_t^{ij} 分别为 *Aircraft i* 和 *Aircraft j* 速度与位置向量的夹角, 且 $\alpha_t^{ij} - \beta_t^{ij} \neq \pm\pi/2$; $D_{t,h}^{ij}$ 和 $D_{t,z}^{ij}$ 分别为他们之间的水平和垂直距离; $D_{t_{CPA,h}}^{ij}$ 是他们之间在 CPA 时的水平距离而 $D_{t_{CPA,z}}^{ij}$ 则为垂直距离。

在实际飞行过程中, 由于在 CPA 时两机间的水平或垂直方向上的距离并未达到相应的阈值, 因此并不是所有相互靠近的飞机都会触发 TA 和 RA。同时 TCAS 在发出 TA 之后, 由于飞机已经转变航向等原因, RA 并不一定会出现。因此, 如果满足以下条件将会触发有效的 TA:

$$(0 < T_{t_{CPA,h}}^{ij} < Time_{TA}) \wedge (0 < T_{t_{CPA,z}}^{ij} < Time_{TA}) \wedge (D_{t_{CPA,h}}^{ij} < D_{MOD_{RA}}) \wedge (D_{t_{CPA,z}}^{ij} < ZTHR_{RA}) \quad (10)$$

当两机继续靠近且满足以下条件时, TCAS 将会发出 RA 建议:

$$[(0 < T_{t,h}^{ij} < Time_{RA}) \wedge (0 < T_{t,z}^{ij} < Time_{RA})] \vee [(D_{t,h}^{ij} < D_{MOD_{RA}}) \wedge (D_{t,z}^{ij} < ZTHR_{RA})] \quad (11)$$

式中: $Time_{TA}$ 和 $Time_{RA}$ 分别为 TA 和 RA 激发的时间阈值; $D_{MOD_{RA}}$ 和 $ZTHR_{RA}$ 分别为两机同航向上水平靠近时水平和垂直距离阈值。RA 方向(爬升/下降)选择一般是根据水平方向上 CPA 时的垂直高度差来判定:

$$z_{t_{CPA,h}}^i = z_t^i + v_{t,z}^i \cdot T_{t_{CPA,h}}^{ij} \quad (12)$$

$$z_{t_{CPA,h}}^j = z_t^j + v_{t,z}^j \cdot T_{t_{CPA,h}}^{ij} \quad (13)$$

通常, $z_{t_{CPA,h}}^i$ 和 $z_{t_{CPA,h}}^j$ 中值较大的飞机选择上升, 较小的选择下降。飞行员一般设置在 5 s 之内响应 RA, 初始加速度为 $a_v = 0.25 g$, 并在垂直 CPA 时垂直距离至少达到 ALIM。

对于 *Aircraft i* 相应的变化高度为:

$$\Delta_{t,z}^i = ALIM_{RA} + z_{t_{CPA,h}}^i - z_{t_{CPA,h}}^j \quad (14)$$

此外, *Aircraft i* 的加速时间 $t_{a_v}^i$ 为:

$$\Delta_{t,z}^i = \frac{a_v t_{a_v}^i{}^2}{2} + a_v t_{a_v}^i (T_{t_{CPA,h}}^{ij} - t_{a_v}^i) \quad (15)$$

$$t_{a_v}^i = T_{t_{CPA,h}}^{ij} - \sqrt{T_{t_{CPA,h}}^{ij}{}^2 - 2\Delta_{t,z}^i / a_v} \quad (16)$$

在相互协作的飞机冲突解脱中, 两机加速时间 $t_{a_v}^i$ 和 $t_{a_v}^j$ 设置为相等。

2.3 垂直与水平方向综合优化的 TCAS 避碰策略选择

飞行冲突探测与解脱是目前 ATM 领域的重要研究方向, 而作为空中安全最后一道防线的 TCAS 避碰性能改进, 是缓解空域飞行流量急剧增加、飞行环境逐渐复杂等问题的突破口。TCAS 可有效帮助飞行员主动搜寻和发现可能的空中交通冲突, 并以适当的机动方式躲避危险防止灾难性事故的发生, 从而显著降低了飞行器相撞风险。但随着空域密度的增加多机冲突的风险也日益增大, 甚至还会引发连锁碰撞事故。潜在的连锁碰撞即为 *Aircraft i* 和另一架入侵机 *Aircraft k* 在未来某一时刻 t_{a_i} 时的水平与垂直方向上的距离均小于碰撞区域阈值:

$$D_{t_{a_i},h}^{ik} = \sqrt{(x_{t_{a_i}}^i - x_{t_{a_i}}^k)^2 + (y_{t_{a_i}}^i - y_{t_{a_i}}^k)^2} \leq D_{CL} \quad (17)$$

$$D_{t_{a_i},z}^{ik} = |z_{t_{a_i}}^i - z_{t_{a_i}}^k| \leq H_{CL} \quad (18)$$

为了给飞行员提供避免碰撞的决策咨询, TCAS 必须在本机与入侵机到达最接近点之前, 根据两机在空中的相对位置, 预测出两机在当前时刻以及今后各个时刻的飞行轨迹点, 然后根据预测的飞行轨迹来判断是否会发生飞行冲突并遵循 TCAS 防撞逻辑予以解脱, 同时针对邻近的多机冲突判断是否存在连锁冲突, 从而确定本机应该采取何种(垂直/水平方向)避让措施。

飞机优先采取垂直方向上的避碰策略, 若垂直方向上可能引发连锁冲突风险甚至是碰撞态势, 则采取水平方向上的避碰策略。通常, 飞机选择远离水平 CPA 的方向进行航向偏转(向左/向右)。飞行员一般设置在 5 s 之内响应 RA, 初始加速度为 $a_h = 0.25 g$, 并在 CPA 时水平距离至少达到

HRES (HorizontalRestrict)。

对于 Aircraft i 相应的变化水平距离为:

$$\Delta_{t,h}^i = HRES_{RA} - D_{t_{CPA},h}^j / 2 \quad (19)$$

此外, Aircraft i 的加速时间 $t_{a_h}^i$ 为:

$$\Delta_{t,h}^i = \frac{a_h t_{a_h}^i{}^2}{2} + a_h t_{a_h}^i (T_{t_{CPA},z}^{ij} - t_{a_h}^i) \quad (20)$$

$$t_{a_h}^i = T_{t_{CPA},z}^{ij} - \sqrt{T_{t_{CPA},z}^{ij}{}^2 - 2\Delta_{t,h}^i / a_h} \quad (21)$$

在相互协作的飞机冲突解脱中,两机加速时间 $t_{a_h}^i$ 和 $t_{a_h}^j$ 设置为相等。

空中交通冲突一般会在较短的时间内发生,飞行员必须立即采取措施,否则就会引发碰撞事故。基于状态预测的 TCAS 连锁碰撞避免流程如图 5 所示,其输入为局部空域中相关联飞机的初始运动状态,根据当前运动状态预测未来一小段时间 (<1min) 内的整体态势,并检测是否存在冲突风险,若存在且是多机复杂态势则判断是否有连锁冲突风险,若有则随机选择飞机对(两架存在冲突的飞机)进行水平解脱冲突,并再次检测连锁冲突风险,生成状态空间,选择垂直与水平方向综合优化的 TCAS 避碰策略,并输出局部空域内整体态势的防撞方法,向飞行员发出 RA 建议。

3 实验仿真与分析

为了测试本文算法的有效性,我们将采集到的飞行轨迹数据进行叠加整合,在局部空域内形成多机态势,并从中选取飞机相互靠近的片段作为测试数据,进行状态预测,生成垂直与水平方向综合优化的 TCAS 避碰策略,有效避免连锁碰撞风险。表 2 列举了测试实验中用到的主要参数^[12]。

本研究采用课题组开发的图形化编程语言 G-MAS (Graphical model and analysis software)对

上述避碰逻辑进行编码实现,并生成多机案例态势的状态空间,选取优化防撞策略。G-MAS 从根本上改变了传统的编程环境,用“图标”代替了“文本指令”。在可视化的程序设计中,编程者只需调用“图标(对象)”,随后通过连线规定数据的流向,且在连线上可添加函数定义生成所需的数据。在程序运行过程中,可随时中止并显示当前运行状态;程序运行结束,生成结果并自动记录不同时刻的运行状态形成状态空间,保存在 txt 文档中,便于后期深度分析。G-MAS (早期版本称之为 RADIUS^[13-14]) 在复杂系统建模方面已有大量成功应用案例,该仿真工具的开发完善为用于生成多机态势下系统可达的所有状态研究奠定了基础。

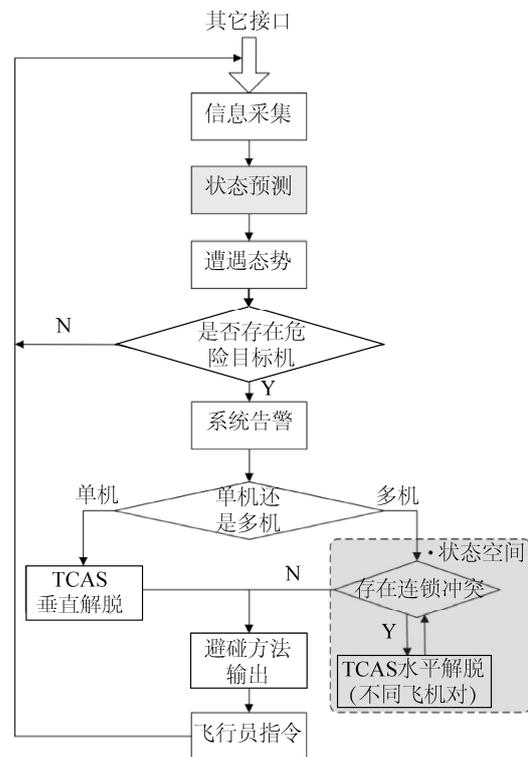


图 5 基于状态预测的 TCAS 连锁碰撞避免流程图
Fig. 5 Flow chart of TCAS chain collision avoidance based on state prediction

表 2 案例参数值
Tab. 2 Case parameter values

装备	探测距离/NM	RA 加速度/g	D _{cl} /NM	H _{cl} /ft	高度层 SL	飞行员首次/后续反应时间/s
TCAS II	40	0.25/-0.25	0.044	78.44	6	5/3

为了验证上述算法的可行性,输入图 2 中多机的初始状态,在时刻 15:19:25,该局部空域中四架飞机的状态信息 (Aircraft, x, y, z, v_x, v_y, v_z) 为: (1, -2.113, -22.827, 16000.00, 0.035, -0.090, 0)+(2, -0.142, -34.309, 17554.00, -0.015, 0.125, -30)+(3, -1.883, -22.068, 13781.00, 0.034, -0.103, 20)+(4, 1.047, -33.351, 15300, -0.037, 0.102, 0)。应用本文提出的综合优化策略,生成如图 6 所示的案例碰撞解脱状态空间。

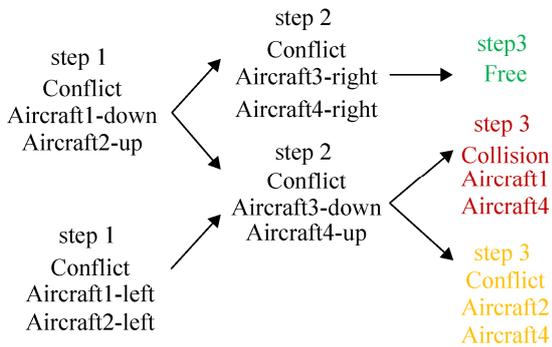


图 6 案例碰撞解脱状态空间图
Fig. 6 State space diagram of collision avoidance case

飞机 1 下降且飞机 2 爬升用以解脱冲突 1, 飞机 3 右转且飞机 4 右转用以解脱冲突 2, 则有效避免碰撞且不引发连锁冲突; 飞机 1 下降且飞机 2 爬升用以解脱冲突 1, 飞机 3 下降且飞机 4 爬山用以解脱冲突 2, 则飞机 1 与飞机 4 之间会引发连锁冲突且不能解脱; 飞机 1 左转且飞机 2 左转用以解

脱冲突 1, 飞机 3 下降且飞机 4 爬山用以解脱冲突 2, 则飞机 1 与飞机 4 之间会引发连锁冲突但能解脱。因此,选择状态预测的优化结果,即方案 1,确保多机飞行安全。

表 3 显示了一般 TCAS 逻辑下的关联飞机部分轨迹点,即飞机 1 下降且飞机 2 爬升用以解脱冲突 1,飞机 3 下降且飞机 4 爬山用以解脱冲突 2,但在时刻 15:20:23,飞机 1 与飞机 4 之间的水平距离为: $\sqrt{(0.501-0.482)^2+(27.903-27.934)^2}=0.036 < 0.044 \text{ Nm}$; 垂直间隔为: $|15623.00-15581.00|=42.00 < 78.44 \text{ ft}$ 则会引发碰撞事故。

将在 15:19:25 时的四架飞机状态输入 EuroControl 开发的互动防撞模拟器 (Interactive Collision Avoidance Simulator, InCAS),用以验证模型输出数据的准确性。InCAS 完全以 TCAS 防撞逻辑为基础的软件工具,专门用以重现真实的或合成的飞行冲突事件。实验结果表明,本文提出的方法所生成的状态数据完全符合实际态势演变流程,具有很高的精确度。

文献[14]基于 TCAS 避碰逻辑因果模型可用以检测多机态势下的连锁碰撞态势,利用本文提出的基于状态预测的 TCAS 多机防撞性能改进方法对^[14]中检测出的三架飞机的连锁碰撞态势,进行垂直与水平方向避碰策略的综合优化选择,结果表明防撞逻辑改进效果明显,如表 4 所示。

表 3 一般 TCAS 逻辑下的关联飞机部分轨迹图
Tab. 3 Part of associated aircraft track map under general TCAS logic

Time	Aircraft	X/NM	Y/NM	Z/ft	Time	Aircraft	X/NM	Y/NM	Z/ft
15:20:13	Aircraft 1	-0.887	-26.986	15 747.00	15:20:19	Aircraft 1	-0.664	-27.526	15 615.00
15:20:13	Aircraft 2	-1.230	-29.902	16 458.00	15:20:19	Aircraft 2	-1.279	-29.278	16 470.00
15:20:13	Aircraft 3	-0.513	-26.812	14 746.00	15:20:19	Aircraft 3	-0.322	-27.420	14 728.00
15:20:13	Aircraft 4	-0.131	-28.875	15 493.00	15:20:19	Aircraft 4	-0.354	-28.323	15 593.00
15:20:15	Aircraft 1	-0.820	-27.160	15 687.00	15:20:21	Aircraft 1	-0.575	-27.724	15 619.00
15:20:15	Aircraft 2	-1.260	-29.697	16 462.00	15:20:21	Aircraft 2	-1.267	-29.064	16 474.00
15:20:15	Aircraft 3	-0.449	-27.017	14 740.00	15:20:21	Aircraft 3	-0.260	-27.616	14 722.00
15:20:15	Aircraft 4	-0.205	-28.758	15 553.00	15:20:21	Aircraft 4	-0.428	-28.110	15 587.00
15:20:17	Aircraft 1	-0.746	-27.339	15 635.00	15:20:23	Aircraft 1	-0.482	-27.934	15 623.00
15:20:17	Aircraft 2	-1.277	-29.489	16 466.00	15:20:23	Aircraft 2	-1.240	-28.848	16 478.00
15:20:17	Aircraft 3	-0.385	-27.220	14 734.00	15:20:23	Aircraft 3	-0.200	-27.809	14 716.00
15:20:17	Aircraft 4	-0.280	-28.540	15 589.00	15:20:23	Aircraft 4	-0.501	-27.903	15 581.00

表4 综合优化改进策略解决检测出的 TCAS 连锁碰撞态势

Tab. 4 Comprehensive optimization and improvement strategies to solve detected TCAS chain collision situation

态势	初始位置(Aircraft, NM, NM, ft)	TCAS 连锁碰撞	综合优化策略
1	(1,6.782,6.237,15570)+(2,8.956,6.548,15340)+(3,22.183,6.641,14800)	758	0
2	(1,7.556,6.548,15500)+(2,8.956,6.548,15340)+(3,21.376,6.548,14850)	964	0
3	(1,7.725,6.567,15500)+(2,8.956,6.548,15340)+(3,20.782,6.621,14900)	1216	0

4 结论

本文提出了一种基于状态预测的 TCAS 多机避碰性能改进算法。该算法建立在所定义的简化欧几里德空间模型和时空混合的飞机冲突区域模型的基础之上,首先,利用到达最近点的时间 Tau、HMD 和 VMD 等描述飞机相遇物理过程的主要参数,来完整描述 TCAS 的防撞机制,从而构建 TCAS 防撞数学模型;然后,通过定义在 CPA 时最小水平距离 HRES,实现 TCAS 防撞机制在水平方向上的拓展;最后,规范基于状态预测的 TCAS 连锁碰撞避免流程,根据局部空域内多架飞机当前运动状态预测未来一小段时间(<1min)内的整体态势,从而确定优化的避让措施,飞机优先采取垂直方向上的避碰策略,若垂直方向上可能引发连锁冲突风险甚至是碰撞态势,则采取水平方向上的避碰策略。仿真实验表明,垂直与水平方向综合优化的 TCAS 避碰策略可有效避免多机态势下的连锁碰撞风险,且对于应用传统 TCAS 防撞机制不能有效应对的潜在连锁碰撞态势,将相关联的多机运动状态进行保存,并输入 InCAS 进行验证。

在今后的工作中,我们仍然有很多问题亟待解决,特别是多机态势下的 TCAS 综合分析研究。影响 TCAS 避碰结果的因素有很多,其中最典型的:一是邻近飞机不稳定的运动状态,虽然 TCAS 通过应答机能够感知入侵机当前位置和速度等信息,但由于受天气、机械故障等因素影响,入侵机的运动状态可能会突然发生变化;二是飞行员作为 TCAS 告警对象与操作主体,对 TCAS 建议可能的应对行为(如采纳、无视与反操作)和反应时间均可能影响防撞结果。因此需要面向不同分析目标,构建相应

的 TCAS 操作模型,实现影响因素的定量分析,同时改变模型输入数据还可进一步分析飞机距离与连锁碰撞风险之间的关系,入侵机数量与模型计算时间的关系,以及引发连锁碰撞的入侵机位置特征等。

参考文献:

- [1] DoT. Introduction to TCAS II version 7.1 [R]. USA: Department of Transportation, Federal Aviation Administration, 2011. 技术报告: HQ-111358.
- [2] 温乃峰, 苏小红, 马培军, 等. 低空复杂环境下基于采样空间约减的无人机在线航迹规划算法[J]. 自动化学报, 2014, 40(7): 1376-1390.
Naifeng Wen, Xiaohong Su, Peijun Ma, et al. Sampling space reduction-based uav online path planning algorithm in complex low altitude environments[J]. Acta Automatica Sinica, 2014, 40(7): 1376-1390.
- [3] Niethammer U, James M R, Rothmund S, et al. UAV-based remote sensing of the Super-Sauze landslide: Evaluation and results[J]. Engineering Geology (S0013-7952), 2012, 128: 2-11.
- [4] May A. Free-flight determinations of the drag coefficients of spheres[J]. Journal of the Aeronautical Sciences (S0020-3483), 2012, 20(9): 635-638.
- [5] Gotlieb A. TCAS software verification using constraint programming[J]. The Knowledge Engineering Review (S0269-8889), 2012, 27(3): 343-360.
- [6] 韩艳茹, 敬忠良, 龚嘉琦. 空中交通预警与防撞系统(TCAS)风险及对策研究[J]. 计算机测量与控制, 2012, 20(3): 737-740.
Han Yanru, Jing Zhongliang, Gong Jiaqi. Research of Traffic Alert and Collision Avoidance System(TCAS) Risk and Countermeasure[J]. Computer Measurement Control, 2012, 20(3): 737-740.
- [7] Thomas LC, Wickens CD. Display dimensionality and conflict geometry effects on maneuver preferences for resolving in-flight conflicts[J]. Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society (S0018-7208), 2008, 50(4): 576-588.

(下转第 4717 页)

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

• 4710 •