http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2025.0122

基于运行时保证的DAA系统运行安全保障方法设计

董磊[1,2]，王琦[1,3]，陈曦[1,2,*]，刘嘉琛[1,3]

(1. 中国民航大学 民航航空器适航审定技术重点实验室，天津 300300；2. 中国民航大学 科技创新研究院，天津 300300；
3. 中国民航大学 安全科学与工程学院，天津 300300)

摘　　要：针对无人驾驶航空器在城市空中交通(UAM)场景下的避让问题，提出了一个基于运行时保证的探测与避让模块(RTA-DAAM)，通过探测外部环境信息源判断航空器状态，并提供控制指令和告警信息，保证航空器在UAM场景下执行任务的高效性和安全性。对RTA-DAAM中的先进避让模块和备用避让模块的控制方法进行设计，同时考虑探测、决策和告警功能协同配合的重要性，定义航空器自身的净空边界、预防边界、障碍物的安全边界，划分不同的航空器状态，完成决策与告警逻辑的设计。仿真实验结果表明，RTA-DAAM可使航空器在仅损失3.40%效率的基础上，确保其始终存在期望分离距离，以保障DAA系统运行安全。小型无人机的实飞结果表明，RTA技术的引入可提升无人机的安全时间占比至96.9%，最大限度地确保了无人机的运行安全。

关　键　词：运行时保证；探测与避让系统；无人驾驶航空器；安全运行限制；决策与告警
中图分类号：V243
文献标志码：A　　**文章编号**：1001-5965(2026)09-3023-16

“低空经济”作为近年来新兴的经济形态，涵盖了无人机物流、通用航空等诸多前沿领域，正处于发展的黄金时期，中国正计划扩大低空经济的规模，以确保在新兴低空技术赛道占据领先地位[1]。追溯其源，为了解决城市道路日益严重的拥堵问题，NASA于2018年提出了城市空中交通(urban air mobility, UAM)的概念，基于先进空中交通工具在城市中的高效运作，缓解地面交通压力，提高运输效率[2]。无人驾驶航空器作为先进交通工具的核心成员之一，具有高效、经济、环保等优点，在为城市居民提供更加便携的通勤方式的同时，也为城市规划提供了新的思路，在未来有着广阔的发展空间[3-4]。出于对航空器运行安全的考虑，防止可控飞行撞地和空中碰撞等事故的发生，良好的探测与避让(detect and avoid, DAA)能力是必不可少的，其概念定义为“无人驾驶航空器监视跟踪保持良好距离并避免与其他航空器相撞的能力”[5]。DAA系统对外部状态进行探测感知，面对障碍物时提供机动避让指令，同时提供预警警告，作为防止航空器发生碰撞的关键系统之一，在保证航空器安全方面发挥着巨大的作用[6]。

在多系统的协同作用下，无人驾驶航空器能够以一定的安全保障措施解决部分问题，然而，未来UAM场景下交通愈加复杂，DAA系统应具备更好的性能以应对突发状况[7]。伴随着近年来人工智能技术的发展与进步，打造新一代智能航空成为了发展的必然趋势。航电系统智能化的应用研究正在受到重视与青睐，工业和信息化部等部门于2023年发布的《绿色航空制造业发展纲要(2023—2035年)》指出，未来应建成具有完整性、先进性、安全性的绿色航空制造体系，以无人化、电动化、智能化为技术特征的新型通用航空设备实现商业化、规模化应用[8]。因此，DAA系统与人工智能技术的集成满足中国航空业未来发展前景，能够为实现高效的空中交通运输任务提供一条可行的道路。

收稿日期：2025-03-11；**录用日期**：2025-04-25；**网络出版时间**：2025-06-11 09:28
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20250610.1954.003
基金项目：中央高校基本科研业务费专项资金 (3122022QD07,3122022044)
* **通信作者**. E-mail：chen_x@cauc.edu.cn

引用格式：*董磊，王琦，陈曦，等. 基于运行时保证的DAA系统运行安全保障方法设计[J]. 北京航空航天大学学报，2026，52(9)：3023-3038. Dong L，Wang Q，Chen X，et al. Design of operational security guarantee method for DAA system based on runtime assurance[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2026，52(9)：3023-3038 (in Chinese).*

无人驾驶航空器DAA系统智能化水平的提升和通信导航监视技术的发展将有助于对城市低空空域更精细化的管理和使用,从而最终实现UAM的美好蓝图。然而,机器学习、自适应等智能算法的策略及工作过程被称作黑盒模型[9-10],可解释性的缺失使其集成的系统会出现不安全、不可控、难理解等问题。同样的,航电系统的智能化虽然可以推动航空领域迈向新的层次,但现有民机系统安全性设计与评估方法难以保证应用启发式算法或人工智能方法的功能满足安全需求[11]。随着未来城市低空空域环境不确定性的增加和DAA系统复杂程度的提升,现有方法难以保证DAA系统复杂组件在安全关键场景中不会发生失效或故障,无人驾驶航空器的空中碰撞风险可能会持续增加,其运行过程的安全性难以保证在较高的水平上。

因此,有必要引入安全风险减缓技术将DAA系统的剩余风险控制在人们可接受的范围内[12]。运行时保证(runtime assurance, RTA)作为一种保证系统安全运行的新兴技术,初步解决了一些复杂系统行为难预测、难解释、不安全、非预期结果的问题,在航空航天、智能汽车、机器人等领域的研究正趋于火热[13-14]。Cofer等[15]针对支持学习组件难以采用传统方法认证的问题,引入RTA技术架构对飞机滑行的地面运动进行设计,满足了飞机滑行时的安全需求;He等[16]提出了结合高级统计分析框架和R2U2监视器的运行时监控架构,能够高效地完成飞机自主中心线跟踪任务;Ghori等[17]将RTA与综合模块化航电系统进行交互,以小型四旋翼无人机进行实际测试,通过故障注入的方式测试了实际情况下RTA技术带来的影响;Abate等[18]基于航天器非确定性动力学模型的基础上设计了RTA过滤器,通过对动力学可达集的实时计算,确保系统始终处于先验安全终端集的范围内;Avram等[19]对基于RTA技术架构的四旋翼飞行器非线性自适应控制算法开展了分析研究,提出了四旋翼自适应控制架构,以完整性监测的方法增强了RTA技术架构的鲁棒性和故障敏感性;Chen等[20]提出了基于RTA的自动驾驶汽车控制框架,并在密集交通场景下验证了框架的有效性。RTA技术在各领域具备一定的研究基础,但在UAM场景下,针对无人驾驶航空器的避让问题,相关的案例研究仍然较为匮乏。

综上所述,当前无人驾驶航空器的DAA系统因引入先进技术而难以落地使用且存在一定碰撞风险。基于此,本文提出了一种基于RTA的DAA系统运行安全保障方法,保证了无人驾驶航空器在UAM场景下能够兼顾效率与安全,也为复杂功能难以应用于航空业的问题提供了一条可能的解决思路。具体地,提出了一个基于运行时保证的探测与避让模块(runtime assurance-detect and avoid module, RTA-DAAM),通过探测外部环境信息源确定系统的安全运行限制,控制航空器规避障碍物,并与地面站对接以便及时提供人工干预,为无人驾驶航空器的避让难题提供了新的安全保障思路;在DAA系统的决策处理单元融入RTA技术,设计了切换与告警逻辑,实现了从探测、决策到告警过程中信息处理与控制执行的协同性,能够为航空器在不牺牲效率的前提下提供运行安全保障。

1 基本概念

1.1 探测与避让系统

DAA系统是为了协助无人机操作员在国家空域系统中安全操作无人机的职责而开发的,用于帮助操作员保证无人机与其他障碍物之间存在一定的安全距离[21-22]。区别于传统的空域规划,无人驾驶航空器系统(unmanned aircraft system, UAS)考虑到空域划分及空管分类重叠严重等现象,DAA系统所属的UAS运行环境如图1所示。图中:AGL表示距地面高度,UTM表示无人机交通管理。DAA系统运行中,不仅需要处理静态楼宇等障碍物的避让规划,还需要考虑其他机型对本机的影响。因此,在DAA系统的决策过程中,应开展静态与动态障碍物结合的避让设计,以满足航空器在UAM场景中的安全需求。

DAA系统架构如图2所示。通过多监视设备完成航空器自身及周围环境状态的探测,同时接收空中交通管理系统及地面站获取的障碍物状态信息,由DAA模块对目前任务规划的航迹信息开展分析,完成探测阶段。根据安全需求判断障碍物是否对本机产生影响,若不满足,则执行航迹规划,直至能够完成对障碍物的避让,完成决策阶段。告警阶段与决策阶段近似同步进行,出现风险时提供相应的告警方式,警示工作人员准备应急措施以应对突发状况[23]。

1.2 运行时保证技术框架

2017年,美国材料与试验学会(American Society of Testing Materials, ASTM)组织发布了ASTM-F3269标准文件[24],提出的RTA基础框架如图3所示,该框架在航空领域的提出旨在为使用RTA技术实现复杂系统的认证提供指导[25]。典型RTA技术框架由复杂功能、备用功能、输入管理器、安全监视器和RTA开关组成。输入管理器负责接收并处理信息;复杂功能指复杂度较高,安全难以进行验证,信

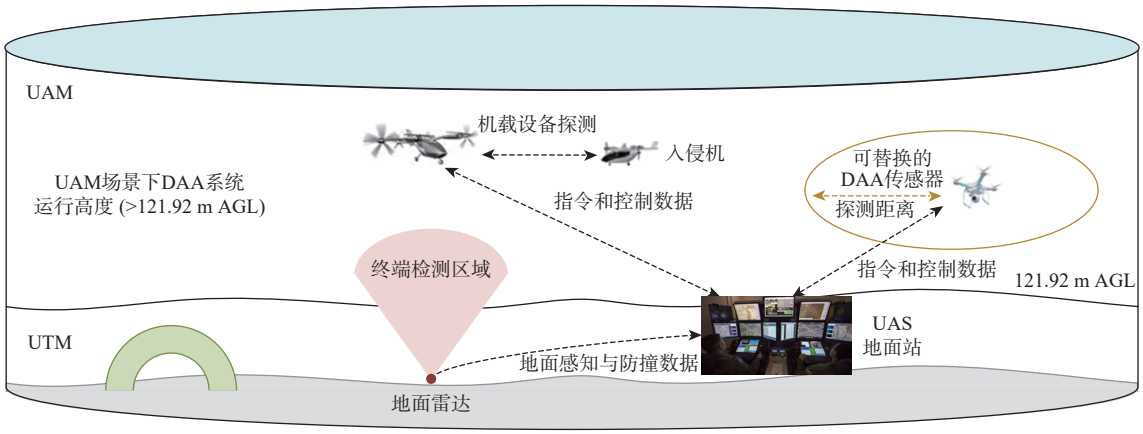


图 1　DAA 系统运行环境

Fig. 1　DAA system operating environment

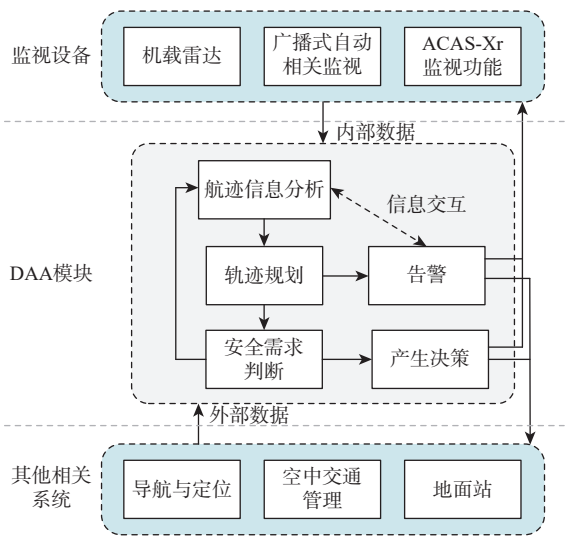


图 2　DAA 系统架构

Fig. 2　DAA system architecture

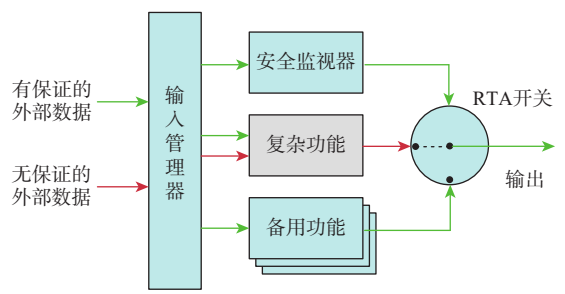


图 3　RTA 基础框架

Fig. 3　RTA foundation framework

任度较低的系统、设备、功能或算法; 备用功能指安全性和可靠性较高, 经验证的系统、设备、功能或算法; 由安全监视器监控系统状态并输出指令控制 RTA 开关, 执行复杂功能和备用功能之间的输出切换。

2　基于运行时保证的 DAA 模块

本文将 RTA 技术与 DAA 系统中的 DAA 主要模块进行结合, 提出了一个运行安全保障模块 RTA-DAAM, 如图 4 所示。RTA-DAAM 通过对航空器状态和 2 种控制指令进行监控, 以权衡任务执行过程的效率和安全。先进避让模块的设计以性能为优先进行考虑, 迎合新一代智能航空发展, 引入新兴技术, 采用在线学习的方式完善优化自身指令, 但其学习的过程难以解释, 安全性、可靠性难以进行验证。备用避让模块的设计以安全为优先进行考虑, 能够在任务场景下保证其控制指令的稳定性, 并为航空器提供安全保障。在此前提下, 备用避让模块的性能和任务效率可能会低于先进避让模块。

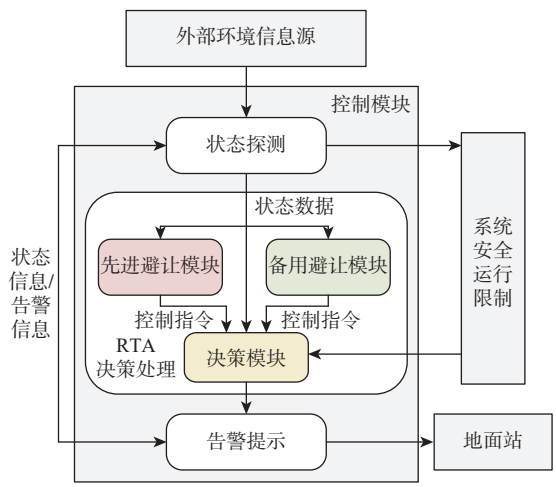


图 4　RTA-DAAM 架构

Fig. 4　RTA-DAAM architecture

由图 4 可得, RTA-DAAM 由以下部分组成:

1) 外部环境信息源。指无人驾驶航空器在执行任务过程中的环境信息, 包括可视作静态障碍物的楼宇、除本机外的可视为动态障碍物的入侵机、电子地理围栏、本机传感设备能够探测到的距离、角度、动态轨迹等数据。

2) 控制模块。该部分融合了 DAA 模块的主要

功能，用于提供控制指令和告警信息。其中，状态探测单元用于接收本机传感器从外部环境信息源取得的环境数据，结合本机的状态完成探测工作；RTA决策处理单元用于判断航空器安全水平，并执行先进避让模块或备用避让模块的控制指令输出；告警提示单元根据本机状态和控制指令输出提供相关告警信息。

3）系统安全运行限制。DAA系统保障航空器运行安全应满足相应的限制条件，完善安全限制条件并作为基础理念提供给决策模块，使无人驾驶航空器在复杂场景下时刻具备保护本机安全的能力。

4）地面站。实时接收无人驾驶航空器自身状态和告警信息，若出现突发状况，在必要时进行人工干预，为航空器任务安全提供协助及安全保障。

根据对效率和安全的不同需求确定先进避让模块和备用避让模块的控制方法，航空器在执行任务过程中，由状态探测单元获取外部环境及本机状态信息，基于不同情景分析需满足的系统安全运行限制，处理并提供给决策模块；通常情况下，先进避让模块工作并输出控制指令，以满足航空器对任务效率的需求，在实时监控的过程中，若决策模块根据已有信息判断得出本机存在一定碰撞风险，则切换到备用避让模块输出控制指令，同时将相应告警信息发送至地面站，短暂地降低效率来保证本机自身安全；在决策模块判断本机脱离风险状况后，切换回先进避让模块提供控制指令，继续执行任务。

除此之外，RTA-DAAM的设计满足以下功能：

1）备用避让模块应采用易解释、易验证的控制方法，避免备用控制指令安全性、可靠性难以确定的情况存在。

2）决策模块应在切换2种模块的指令输出中加入时间裕度，以防止系统在2种控制指令之间短时间内反复切换，导致危险情况的发生。

3）告警提示单元可基于航空器自身状态对风险程度进行分级处理，以提供更加准确的告警信息。

4）地面站实时接收无人驾驶航空器的自身状态和场景因素，可自行判断并介入航空器的控制指令切换，在必要时可直接接管航空器的控制权，成为航空器运行安全的最后一层保障。

3 基于RTA的航空器自主避让方法

对应RTA-DAAM控制模块开展无人驾驶航空器的自主避让方法研究，建立简化的无人驾驶航空器的运动学模型如下：

$$\begin{cases}\dot{x}=V\cos\alpha\cos\beta\\ \dot{y}=V\cos\alpha\sin\beta\\ \dot{z}=V\sin\alpha\\ \dot{V}=a_x-g\sin\alpha\\ \dot{\alpha}=\dfrac{a_z+g-g\cos\alpha}{V}\\ \dot{\beta}=\dfrac{a_y}{V\cos\alpha}\end{cases}\tag{1}$$

式中：V为航空器的飞行速度；α和β分别为航空器的俯仰角和偏航角；g为重力加速度；a_x、a_y、a_z分别为航空器沿x、y、z轴的加速度。

为了更直观地判断航空器的避让效果，搭建障碍物的碰撞模型，使用标准凸面体包络对楼宇、入侵机或其他风险因素进行等效处理，楼宇等静态障碍物可视作平行六面体或圆柱体，入侵机、空中障碍物视作球体。障碍物等效包络方程如下：

$$\Gamma(\boldsymbol{\eta})=\left(\frac{x-x_0}{A+R_0}\right)^{2D}+\left(\frac{y-y_0}{B+R_0}\right)^{2E}+\left(\frac{z-z_0}{C+R_0}\right)^{2F}\tag{2}$$

式中：常数A、B、C决定障碍物的大小，常数D、E、F决定障碍物的形状；R_0为航空器自身半径；$\boldsymbol{\eta}_0=[x_0,y_0,z_0]$为障碍物的中心位置。

因此，航空器碰撞判据可表示如下：

1）$\Gamma(\boldsymbol{\eta})>1$时，航空器与障碍物之间无接触，无碰撞事件发生。

2）$\Gamma(\boldsymbol{\eta})\leqslant 1$时，航空器与障碍物接触，发生碰撞事件，对航空器自身安全产生威胁。

3.1 先进避让模块设计

3.1.1 基于IFDS的航空器自主避让方法

扰动流体动态系统（interfered fluid dynamical system, IFDS）算法被提出用于解决无人机复杂地形下的三维路径规划问题[26]。该算法的原理源于自然界的水流避石现象，通过模拟水流自然流向方式，判断障碍物位置、速度等信息，从而规划出一条平滑的避障轨迹[27]。

在初始坐标系O下，航空器位置为$\boldsymbol{\eta}=(x,y,z)^{\mathrm{T}}$，目标点位置为$\boldsymbol{\eta}_{\mathrm{d}}=(x_{\mathrm{d}},y_{\mathrm{d}},z_{\mathrm{d}})^{\mathrm{T}}$，飞行速度常数为$V$的情况下，航空器初始速度矢量$\boldsymbol{u}(\boldsymbol{\eta})$和航空器到目标位置的距离$d(\boldsymbol{\eta})$表示为

$$\boldsymbol{u}(\boldsymbol{\eta})=\left[\frac{V(x-x_{\mathrm{d}})}{d(\boldsymbol{\eta})}\quad\frac{V(y-y_{\mathrm{d}})}{d(\boldsymbol{\eta})}\quad\frac{V(z-z_{\mathrm{d}})}{d(\boldsymbol{\eta})}\right]^{\mathrm{T}}\tag{3}$$

$$d(\boldsymbol{\eta})=\sqrt{(x-x_{\mathrm{d}})^2+(y-y_{\mathrm{d}})^2+(z-z_{\mathrm{d}})^2}\tag{4}$$

对于环境中存在的N个障碍物，所有障碍物对航空器的初始速度矢量的扰动影响使用总扰动矩阵$\overline{\boldsymbol{M}}(\boldsymbol{\eta})$表示为

$$\overline{\boldsymbol{M}}(\boldsymbol{\eta})=\sum_{n=1}^{N}\omega_n(\boldsymbol{\eta})\boldsymbol{M}_n(\boldsymbol{\eta})\tag{5}$$

式中: $\omega_n(\boldsymbol{\eta})$为第$n$个障碍物的扰动权重系数, 航空器与障碍物之间距离越大, 则扰动权重系数越小, 反之亦然。

$\omega_n(\boldsymbol{\eta})$与障碍物$n$的关系如下:

$$\omega_n(\boldsymbol{\eta})=\begin{cases}1 & n=1\\ \prod\limits_{i=1,i\neq n}^{N}\dfrac{\Gamma_i(\boldsymbol{\eta})-1}{\left(\Gamma_i(\boldsymbol{\eta})-1\right)+\left(\Gamma_n(\boldsymbol{\eta})-1\right)} & n\neq 1\end{cases} \tag{6}$$

对每个障碍物的扰动矩阵$\boldsymbol{M}_n(\boldsymbol{\eta})$进行求解, 定义$\boldsymbol{t}_n(\boldsymbol{\eta})$为障碍物的径向法向量, 同时构建垂直于径向法向量$\boldsymbol{t}_n(\boldsymbol{\eta})$且互相垂直的 2 个向量$\boldsymbol{h}_{n,1}(\boldsymbol{\eta})$和$\boldsymbol{h}_{n,2}(\boldsymbol{\eta})$, 表示为

$$\boldsymbol{h}_{n,1}(\boldsymbol{\eta})=\begin{bmatrix}\dfrac{\partial\Gamma_n(\boldsymbol{\eta})}{\partial y} & -\dfrac{\partial\Gamma_n(\boldsymbol{\eta})}{\partial x} & 0\end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{7}$$

$$\boldsymbol{h}_{n,2}(\boldsymbol{\eta})=\begin{bmatrix}\dfrac{\partial\Gamma_n(\boldsymbol{\eta})}{\partial x}\cdot\dfrac{\partial\Gamma_n(\boldsymbol{\eta})}{\partial z}\\ \dfrac{\partial\Gamma_n(\boldsymbol{\eta})}{\partial y}\cdot\dfrac{\partial\Gamma_n(\boldsymbol{\eta})}{\partial z}\\ -\left(\dfrac{\partial\Gamma_n(\boldsymbol{\eta})}{\partial x}\right)^2-\left(\dfrac{\partial\Gamma_n(\boldsymbol{\eta})}{\partial y}\right)^2\end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{8}$$

由于$\boldsymbol{t}_n(\boldsymbol{\eta})$、$\boldsymbol{h}_{n,1}(\boldsymbol{\eta})$和$\boldsymbol{h}_{n,2}(\boldsymbol{\eta})$两两正交, $\boldsymbol{h}_{n,1}(\boldsymbol{\eta})$和$\boldsymbol{h}_{n,2}(\boldsymbol{\eta})$组成的平面为$H$,可将 3 个向量组成的空间看作一个新的坐标系$O'$, H上的所有单位向量可表示为

$$\boldsymbol{h}'_n(\boldsymbol{\eta})=\begin{bmatrix}\cos\theta_n & \sin\theta_n & 0\end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{9}$$

式中: θ_n为方向系数, 代表每一切向量与坐标系O'中x'轴的夹角, 影响切线扰动的方向。

使用坐标变换矩阵$\boldsymbol{R}$将$\boldsymbol{h}'_n(\boldsymbol{\eta})$变换回初始坐标系$O$下:

$$\boldsymbol{h}_n(\boldsymbol{\eta})=\boldsymbol{R}\boldsymbol{h}'_n(\boldsymbol{\eta}) \tag{10}$$

则单个障碍物的扰动矩阵$\boldsymbol{M}_n(\boldsymbol{\eta})$表示为

$$\boldsymbol{M}_n(\boldsymbol{\eta})=\boldsymbol{I}-\frac{\boldsymbol{t}_n(\boldsymbol{\eta})\boldsymbol{t}_n(\boldsymbol{\eta})^{\mathrm{T}}}{\left|\Gamma_n(\boldsymbol{\eta})\right|^{\frac{1}{\rho n}}\boldsymbol{t}_n(\boldsymbol{\eta})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{t}_n(\boldsymbol{\eta})}+\frac{\boldsymbol{h}_n(\boldsymbol{\eta})\boldsymbol{t}_n(\boldsymbol{\eta})^{\mathrm{T}}}{\left|\Gamma_n(\boldsymbol{\eta})\right|^{\frac{1}{\sigma n}}\left|\boldsymbol{h}_n(\boldsymbol{\eta})\right|\left|\boldsymbol{t}_n(\boldsymbol{\eta})\right|} \tag{11}$$

式中: ρ和σ分别为障碍物的排斥系数和切向系数, 2 个系数越大, 则航空器做出规避动作的时间越早, 需要合理调节以权衡任务路径长度与飞行安全的重要性。

采用总扰动矩阵$\overline{\boldsymbol{M}}(\boldsymbol{\eta})$对$\boldsymbol{u}(\boldsymbol{\eta})$进行修正获得扰动速度$\overline{\boldsymbol{u}}(\boldsymbol{\eta})$, 以执行规避动态障碍物的指令:

$$\overline{\boldsymbol{u}}(\boldsymbol{\eta})=\overline{\boldsymbol{M}}(\boldsymbol{\eta})\left(\boldsymbol{u}(\boldsymbol{\eta})-\boldsymbol{v}(\boldsymbol{\eta})\right)+\boldsymbol{v}(\boldsymbol{\eta}) \tag{12}$$

式中: $\boldsymbol{v}(\boldsymbol{\eta})$为动态障碍物对航空器的速度威胁。在第 n 个动态障碍物的速度影响下, $\boldsymbol{v}(\boldsymbol{\eta})$可表示为

$$\boldsymbol{v}(\boldsymbol{\eta})=\sum_{n=1}^{N}\omega_n(\boldsymbol{\eta})\mathrm{e}^{1-\Gamma_n(\boldsymbol{\eta})}\boldsymbol{v}_n \tag{13}$$

此时, 对位置进行积分获得从当前航路点$\boldsymbol{\eta}_t$到下一时刻航路点$\boldsymbol{\eta}_{t+1}$的位置关系:

$$\boldsymbol{\eta}_{t+1}=\boldsymbol{\eta}_t+\overline{\boldsymbol{u}}(\boldsymbol{\eta})\Delta T \tag{14}$$

式中: ΔT为时间变化量。

3.1.2　基于 TD3 算法的系数优化

由于具有与人类相似的奖励与惩罚机制, 可通过与环境的交互不断学习从而实现最优决策, 深度强化学习在近年来被广泛用于多领域研究, 其学习过程通常采用马尔可夫决策过程(Markov decision process, MDP)表示[28-29]。MDP 为五元组, 表示为$\{S,A,P,R_{\mathrm{MDP}},\gamma\}$, 其中, S为环境状态的集合即状态空间, A为 Agent 根据环境和策略做出的决策集合, 即动作空间, P为状态转移模型, $P^a_{ss'}=P[S_{t+1}=s'|S_t=s,A_t=a]$表示 Agent 从状态$s$下采取动作$a$后到达状态$s'$的概率, R_{MDP}为奖励函数, $r=R_{\mathrm{MDP}}[S_t=s,A_t=a]$表示 Agent 采取动作后环境对 Agent 的反馈, 即得到的奖励, $\gamma\in(0,1]$为折扣因子, 用以权衡当前奖励与后续奖励之间的权重关系。

综合考虑无人驾驶航空器在城市复杂场景下的交通流量大、航路交互等问题, 应快速且稳定地执行路径规划决策, 为了弥补 IFDS 算法在复杂场景下应对实时碰撞风险的局限性, 将 IFDS 相应系数作为动作选取, 开展系数优化研究。在深度强化学习的发展过程中, SAC、DDPG、TD3 等算法具有各自的特点, 在处理不同问题时有着不同程度的表现。文献 [30] 采用 DDPG 算法对系数进行优化, 适用于高维连续动作空间, 在处理路径规划、自动驾驶、机器人控制等问题方面有着广泛的应用研究, 但其仍存在估计值函数大于真实值函数的问题。

为了解决过估计问题, TD3 算法基于 AC 算法网络框架[31], 在 DDPG 的基础上进行了改良, 采用 2 套网络估算不同的 Q 值, Critic 网络Q_{θ_k}在状态s和动作a情况下计算 Q 值$Q_{\theta_k}(s,a)$, Critic 目标网络$Q_{\theta'_k}$用于计算下一状态s'和目标动作a'情况下的目标 Q 值$Q_{\theta'_k}(s',a')$。ϕ和θ_k分别为 Actor 网络和 Critic 网络的参数, ϕ'和θ'_k分别为 Actor 目标网络和 Critic 目标网络的参数。采用较小的目标 Q 值计算目标值函数f, 从而抑制过高估计的问题发生。

$$f=r+\gamma\min_{k=1,2}Q_{\theta'_k}(s',a') \tag{15}$$

通过最小化损失函数更新 2 个 Critic 网络参数, 可表示为

$$\theta_k \leftarrow \arg\min_{\theta_k} B_1^{-1}\sum\left(Q_{\theta_k}(s,a)-f\right)^2\big|_{(k=1,2)} \tag{16}$$

在得到准确的值函数估计后，对策略进行延迟更新，避免 Actor 更新时预期取得而实际未取得最优值的情况发生。为使值估计更加准确，将服从截断正态分布的噪声ε加入目标策略，则目标动作a'可表示为

$$a' = \pi_{\phi'}(s') + \varepsilon \tag{17}$$

式中：$\pi_{\phi'}$表示网络参数为ϕ'的 Actor 目标网络。

采用的网络结构中，Actor 网络由输入层、全连接层、激活函数层和输出层组成，输入维度由航向、位置、速度等状态向量组成，输出为排斥系数、切向系数等动作向量，Critic 网络中的每个 Q 网络由输入层、全连接层、激活函数层、添加层和输出层组成，输入维度由状态向量和动作向量组成，输出维度则对应 Q 值。

基于 TD3 算法的系数优化方法伪代码如下：

输入：航空器航向、位置、速度，障碍物形状、速度，航空器与障碍物之间距离。

输出：排斥系数、切向系数、方向系数。

随机化ρ、σ和θ_n。

初始化 Actor 网络、Critic 网络及网络参数、经验回放池D。

初始化 Actor 目标网络、Critic 目标网络及网络参数。

for l=1, L do

更新环境信息

for u_T=1, U_T do

获取外部环境及航空器状态信息

执行动作a，获得奖励r和状态s'

从D中抽样s'，通过 Actor 目标网络获得目标动作a'，并通过 Critic 目标网络计算并选用较小的Q值，根据式(15)得到f

利用f更新 Critic 网络参数(式(16))

使用策略梯度法将网络参数按 Q 值增大的方向进行更新：

$$\nabla_\phi J(\phi) = B_1^{-1}\sum \nabla_\phi Q_{\theta_1}(s,a)\big|_{a=\pi_\phi(s)}\nabla_\phi \pi_\phi(s)$$

根据延迟更新策略对目标网络进行更新，表示为

$$\theta_k' \leftarrow \tau\theta_k + (1-\tau)\theta_k'\big|_{(k=1,2)}$$

$$\phi' = \tau\phi + (1-\tau)\phi'$$

$$\tau \leqslant 1$$

end for

end for

3.1.3 基于 CIFDS 的航空器自主避让方法

航空器在低空域下面临的危险状况趋向复杂多变，为减少基于 IFDS 的航空器路径规划时间，提高避障效率，同时增加规划路径的平滑度，将 TD3 算法与 IFDS 算法进行结合，形成复杂扰动流体动态系统(complex interfered fluid dynamical system, CIFDS)算法，以强化学习训练的方式对 IFDS 算法中的障碍物排斥系数、切向系数和方向系数进行调节，在不同环境下做出高效且合理的避障逻辑决策。CIFDS 算法架构如图 5 所示。

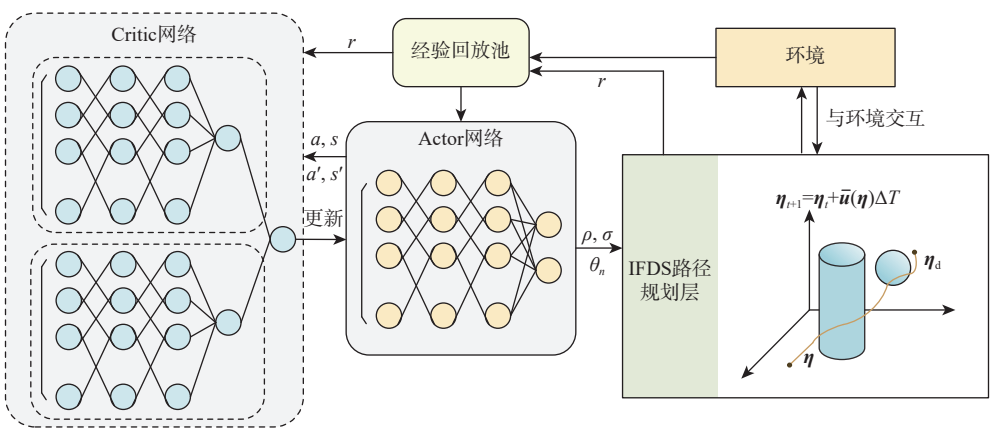


图 5 CIFDS 算法架构

Fig. 5 CIFDS algorithm architecture

航空器被视为智能体，所处的状态空间包括航空器与障碍物的位置关系、航空器与目标点的位置关系和航空器靠近障碍物的速度，为ρ、σ和θ_n赋予合适的常值范围，执行动作后存在以下情况：航空器到下一状态的路径中接触到障碍物，给予惩罚；航空器到下一状态的路径中不存在障碍物，对路径长度即任务效率进行优化；航空器到下一状态的路径中未接触障碍物，但距离障碍物过近，则给予另一类惩罚。其对应的奖励机制分别表示为

$$r_1 = \left\|\boldsymbol{\eta}_{t+1} - \boldsymbol{\eta}_{\mathrm{o}}\right\| - \lambda_1 \qquad \left\|\boldsymbol{\eta}_{t+1} - \boldsymbol{\eta}_{\mathrm{o}}\right\| \leqslant d \tag{18}$$

$$r_2 = \left\|\boldsymbol{\eta}_{t+1} - \boldsymbol{\eta}_{\mathrm{o}}\right\| + \lambda_2 \qquad \left\|\boldsymbol{\eta}_{t+1} - \boldsymbol{\eta}_{\mathrm{o}}\right\| > d \tag{19}$$

$$r_3 = \left\|\boldsymbol{\eta}_{t+1} - \boldsymbol{\eta}_{\mathrm{o}}\right\| - \lambda_1 + \lambda_3 \qquad \left\|\boldsymbol{\eta}_{t+1} - \boldsymbol{\eta}_{\mathrm{o}}\right\| < d + \lambda_3 \tag{20}$$

式中: $\boldsymbol{\eta}_{t+1}$为航空器下一状态的路径点; $\boldsymbol{\eta}_{\mathrm{o}}$为距离最近的障碍物中点; d为障碍物中点到障碍物表面的距离幅值; λ_1、λ_2、λ_3为可设定的正数权重。$\lambda_1 > d$, λ_3为设定的障碍物外的安全范围半径, 为保证第 3 种情况对航空器做出惩罚, 故使得$\lambda_3 < \lambda_1$。因此, 奖励值函数可表示为

$$r = R_{\mathrm{MDP}}[s,a] = r_1 + r_2 + r_3 \tag{21}$$

得到奖励值后, 将其与状态、动作等数据存储在经验回放池中, 将状态、动作输入到 Critic 网络计算并筛选得到 Q 值, 计算目标值函数并更新 Critic 网络参数, 使用策略梯度对 Actor 网络进行更新, 结合 IFDS 的扰动矩阵计算扰动速度, 分析得到下一时刻的航路点, 通过判断是否到达规定的目标点选择继续循环或完成任务。CIFDS 运行流程如图 6 所示。

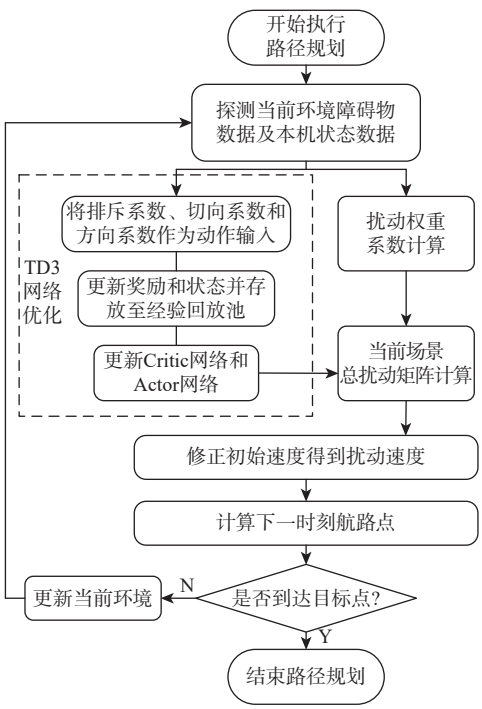


图 6　CIFDS 运行流程

Fig. 6　CIFDS operation flowchart

3.2　备用避让模块设计

备用避让模块的控制方法应具备高水平的安全保障能力, 在 RTA-DAAM 中发挥安全保险的作用, 同时考虑到备用避让方法在可解释、可靠性等方面应满足公众的信任, 因此, 参考无人机主流规划方法 EGO-Planner 作为备用避让方法以输出安全的控制指令[32]。由于不需要建立栅格距离场, 路径规划时间缩短, 能够提供更大的反应空间, 同时仅需在每次规划中迭代判断路径是否发生碰撞, 未发生则继续进行优化, 发生则施加反向推力, 能够得到符合航空器运动的平滑且安全的避让路径, 因此, 在安全可靠和解释方面符合备用避让模块的设计理念, 避免风险事件的发生。

EGO-Planner 分析本机与障碍物或入侵机的位置关系, 在此时间步长上, 将本机与障碍物的位置关系作为实时跟踪的路径参考, 对基本的可行路径进行双向的调整以实现与障碍物的分离, 找出最优指令执行并传播至下一时间步长, 规划高安全保障的避让路径。

如图 7 所示, 对于轨迹上接近障碍物的可控点寻求可行路径, 并由路径与障碍物内部接触的可控点$\boldsymbol{U}$向障碍物表面点$\boldsymbol{K}$建立单位向量$\boldsymbol{w}$, 则定义航空器与障碍物的距离D_K为

$$D_K = (\boldsymbol{U} - \boldsymbol{K})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{w} \tag{22}$$

对于需要远离障碍物的距离W施加代价项$(D_K - W)^2$推动$\boldsymbol{U}$沿$\boldsymbol{w}$运动, 进而避开障碍物。

避让路径的轨迹优化过程中, 使用平滑度、碰撞度和动力学可行度来优化轨迹, 目标函数表达式为

$$\min_{\boldsymbol{U}} J_{\mathrm{t}} = \delta_{\mathrm{S}} J_{\mathrm{S}} + \delta_{\mathrm{C}} J_{\mathrm{C}} + \delta_{\mathrm{D}} J_{\mathrm{D}} \tag{23}$$

式中: δ为惩罚项的权重; J_{S}、J_{C}和J_{D}分别为平滑度惩罚、碰撞度惩罚和动力学可行度惩罚。

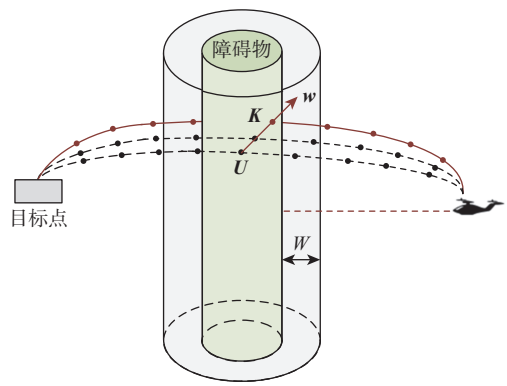


图 7　EGO-Planner 规划示意图

Fig. 7　EGO-Planner planning schematic

3.3　决策与告警逻辑设计

在 RTA-DAAM 中, 决策模块接收航空器状态信息, 并能够控制正向开关和反向开关以分别确保安全性和减少效率损失。在决策模块的作用下, 先进避让方法的设计可以追求性能和效率, 而免于受困解释方面的难题之中, 同时能够使备用避让方法的设计简单化, 减轻其在路径规划性能上的负担, 更加注重航空器的安全问题, 保证航空器满足系统安全运行限制。决策模块架构设计如图 8 所示。

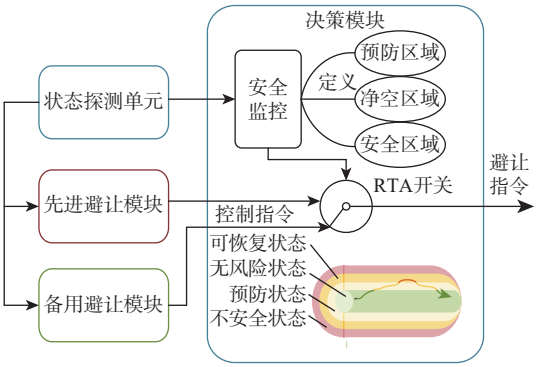


图8 决策模块运行示意图

Fig. 8 Schematic diagram of operation of decision-making module

为尽可能地维持2种避让模块之间的平滑切换，应保证2种控制方法的输出指令接口一致，任务状态同步，而使得切换后能够立刻掌握当前环境信息及航空器自身运动状态信息，并以此作为输入，避免突加指令导致航空器稳定性降低，若系统切换过程存在响应时间，航空器可短暂悬停以确保自身安全。

考虑到DAA系统中告警功能作为保护无人驾驶航空器安全的重要手段，其提供的信息在UAS中需要清楚且能够获得地面站支持与反馈，因此，有必要将基于RTA的避让决策逻辑与告警逻辑进行融合，有助于提高无人驾驶航空器在复杂运行场景下的安全性。

为了保证RTA-DAAM提供的告警信息清晰直观，且便于地面站工作人员选择是否介入航空器的控制方法，定义告警等级如表1所示。

表1 告警等级

Table 1 Alarm levels

告警等级	告警名称	采取措施
0	无告警	地面站可选择性干预
Ⅰ	预防告警	地面站可选择性干预
Ⅱ	纠正告警	地面站可选择性干预
Ⅲ	危险告警	地面站干预

如图9所示，参考NASA提出的无人机探测与避让告警逻辑(detect and avoid alerting logic for unmanned systems, DAIDALUS)[5]，考虑航空器的运行环境及自身运动特性等因素，定义无人驾驶航空器自身在水平面上的预防边界和净空边界，同时定义障碍物或入侵机的安全边界，该安全边界与障碍物的距离可看作期望分离距离，并作为DAA系统运行安全限制用以判断本机与障碍物或入侵机是否存在碰撞风险，将航空器状态进行划分，无风险状态、预防状态和可恢复状态作为安全状态，存在碰撞风险时航空器处于不安全状态。

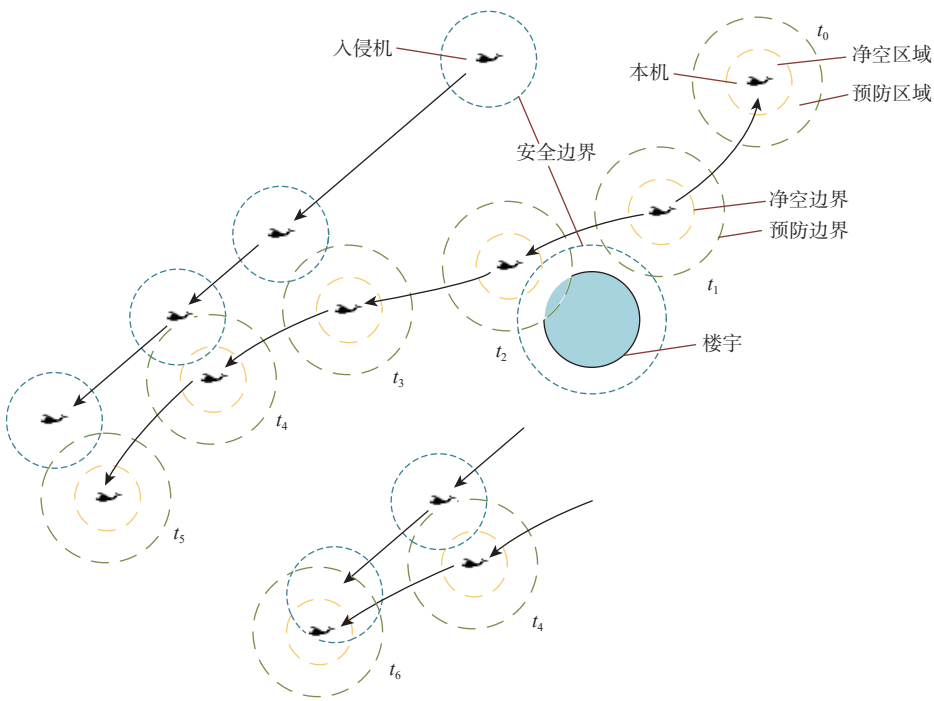


图9 基于RTA的决策与告警逻辑示意图

Fig. 9 Schematic diagram of RTA-based decision-making and alerting logic

同时，各边界的划分与设定依据航空器的机动能力及运行空域密度，运行速度较大的航空器应存在更大的期望分离距离，繁忙的空域需要按照实际情况对各个边界进行适当调整。决策与告警模块的切换时间裕度的设定应综合考虑系统特性、物理约束和安全需求，其取值应包含最大系统响应时间

和安全余量时间, 用以避免系统在短时间内反复切换而引发的不安全行为。

因此, RTA-DAAM 决策与告警逻辑如下:

1) L1: 在t_0时刻下, 本机的净空边界和预防边界都与障碍物安全边界不存在接触, 此时本机不存在碰撞风险, 处于无风险状态, 由先进避让模块输出控制指令, 告警模块不输出告警信息。

2) L2: t_1和t_3时刻下, 本机的预防边界与障碍物安全边界存在接触, 本机进入预防状态, 安全监控对障碍物状态信息进行实时跟踪, 可继续由先进避让模块输出控制指令, 告警模块输出预防告警, 目的在于将信息提供给 UAS, 并警示地面站工作人员提供一定的实时状态与路径监视。

3) L3: 在t_2和t_4时刻下, 本机的净空边界与障碍物安全边界接触, 代表航空器在当前路径规划上可能存在一定的碰撞风险, 本机进入可恢复状态, 告警模块提供纠正告警, 并由安全监控单元控制 RTA 开关进行正向切换, 采用备用避让模块输出避让指令, 短暂时间内将无人驾驶航空器的任务执行侧重点由效率变为安全。

4) L4: t_5时刻下, 本机的净空边界脱离障碍物的安全边界, 即航空器的碰撞风险降低, 本机进入预防状态, 告警模块的输出为预防告警, 此时由安全监控单元进行判断, 若在该时刻前一定的时间裕度内无控制指令的切换, 则控制 RTA 开关进行反向切换, 由先进避让模块提供控制指令, 航空器任务执行的侧重点变回效率优先; 若在该时刻前一定时间裕度内已经进行过控制指令的切换, 则经过该时间裕度再次进行航空器本机与环境的状态判断。

5) L5: 在空域密集度高或突发状况下, 2 种避让模块出现故障或难以有效降低航空器碰撞风险, 如t_6时刻所示, 航空器自身接触障碍物边界, 航空器与障碍物之间距离即将小于期望分离距离, 存在碰撞风险, 则本机进入不安全状态, 告警模块输出危险告警并发送至地面站, 由地面工作人员干预航空器的控制工作, 提供人工引导, 使航空器悬停或寻找其他安全路线, 直至航空器脱离障碍物安全边界, 以此最大程度保证航空器的安全, 防止碰撞事件的发生。同时, 若发生指令冲突等状况, 人工干预作为底层保护逻辑可直接输出系统避让指令。

4　实验验证与分析

本节通过实验的方式对 RTA-DAAM 提供的避让控制方法和决策告警逻辑进行验证, 测试避让方法的有效性和 RTA 技术对 DAA 系统的安全保障能力。

4.1　仿真实验平台设置

采用 unity3D 作为仿真平台, 基于 ML-Agents 库训练和调试先进避让方法, 降低仿真环境与现实场景的差异。模拟 UAM 低空环境下, 无人驾驶航空器执行应急消防任务, 前往目标点完成灭火协助工作。因此, 在该场景下, 航空器具有任务执行效率的较高要求, 同时要保证自身的安全运行, 高效且安全地完成路径规划, 以此为例开展仿真实验验证。

如图 10 所示, 将仿真场景建立为正方形区域, 定义该区域的边界为电子围栏, 用于限制航空器的运行范围, 其中, 障碍物包含圆柱形和平行六面体的静态楼宇, 以及可视为动态入侵机的球体, 在避免入侵机模型与楼宇模型碰撞的基础上, 将入侵机的路径进行随机化处理。同时, 在电子围栏内定义一定距离的初始区域, 使航空器的初始点与目标点在区域内随机初始化。

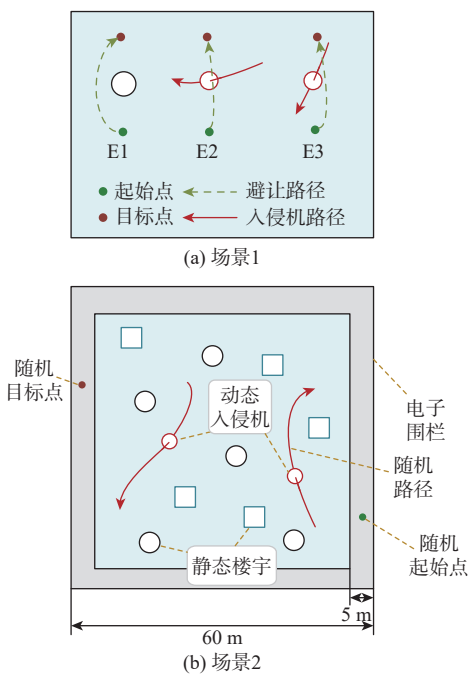


图 10　仿真场景设置

Fig. 10　Simulation scene setting

根据 RTA-DAAM 的切换逻辑规则, 规定障碍物表面到安全边界的距离为障碍物安全边界宽度, 也作为航空器的期望分离距离, 由于距离参数的设定会对结果产生一定影响, 结合航空器的运行速度及障碍物的密集程度, 合理设定本机的净空边界半径、预防边界半径和障碍物安全边界宽度。强化学习训练参数与环境边界参数定义如表 2 所示。同时, 为保证切换时间裕度的有效性, 使切换时间裕度扩展至 1.5 s。航空器通过双目相机传感器获取环境信息, 探测本机与障碍物的相对距离, 以完成 RTA-DAAM 的探测功能。

表 2 参数设置

Table 2 Parameter settings

参数	数值
本机速度/(m·s^{-1})	0.8
入侵机速度/(m·s^{-1})	0.8
障碍物安全边界宽度/m	2.5
本机净空边界半径/m	1
本机预防边界半径/m	1.5
Actor学习率	2×10^{-4}
Critic学习率	1×10^{-3}
训练轮数/回合数	5 000
批次大小/个	256
经验池容量/个	1×10^{6}
折扣因子	0.99
噪声截断值	0.5
策略噪声	0.2

4.2 先进避让方法性能测试

根据先进避让方法设计及参数设置开展 CIFDS 算法训练，训练过程的奖励函数情况如图 11 所示。CIFDS 算法训练过程早期存在大幅波动，表明智能体在随机探索环境中频繁触发碰撞惩罚，在 1 500 回合数左右基本实现了收敛，策略达到了局部最优。

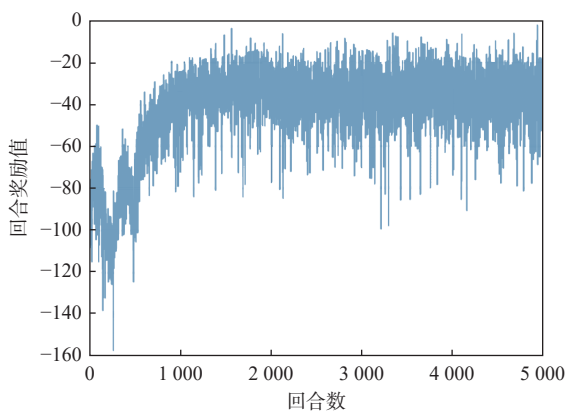


图 11 回合奖励值变化

Fig. 11 Episode reward changes

通过对 CIFDS 算法的路径规划效率进行验证，以证明该算法作为先进避让方法的合理性。在场景 1 中，对 CIFDS 与 IFDS 算法规划的路径进行对比，在面对圆柱形静态障碍物、横向运动的球形障碍物及对向运动的球形障碍物 3 种情况下，CIFDS 与 IFDS 算法的最大飞行角度变化与路径长度对比如表 3 所示。

可以看出，在规避静态楼宇时，CIFDS 和 IFDS 算法规划的避让路径中，航空器运行的最大航迹倾角和避让路径长度存在较小差异，而在规避动态入侵机的情况下，CIFDS 规划出航空器运行路线的最大航迹倾角小于 IFDS，能够保证航空器执行任务时的飞行姿态具有较高的稳定性，满足安全运行限制，同时，CIFDS 规划的避让路径长度小于 IFDS 规划的避让路径长度，使得航空器能够在更短的时间内完成对障碍物的避让，具有更高的效率，满足先进避让方法的设计理念与需求，以此验证了 CIFDS 作为先进避让方法的合理性。

表 3 CIFDS 与 IFDS 算法路径规划对比

Table 3 Comparison of path planning under CIFDS and IFDS algorithms

障碍环境	最大飞行角度变化/(°)		路径长度/m	
	CIFDS	IFDS	CIFDS	IFDS
E1	26.8	27.2	22.1	23.4
E2	28.5	32.4	23.7	26.6
E3	27.3	30.9	22.9	25.5

4.3 RTA-DAAM 效果测试与验证

本节基于场景 2 的仿真环境开展先进避让方法、备用避让方法及 RTA-DAAM 避让方法的任务路径对比实验，由于 IFDS 算法在复杂环境下难以安全地完成任务，稳定性和效率不及上述 3 种避让方法，不将其考虑进对比实验中。

航空器在 3 种避让方法执行任务下，从初始点起航空器与目标点之间的距离变化如图 12 所示。

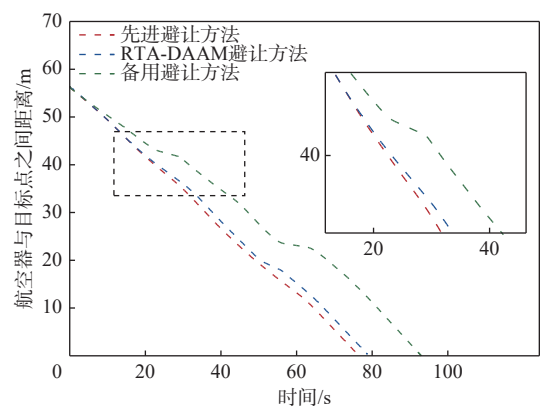


图 12 航空器与目标点之间距离变化

Fig. 12 Distance variation between aircraft and target point

如图 12 所示，在同一起始点和目标点的任务执行过程中，先进避让方法展现了更高的效率，能够更快地到达目标点。相比之下，备用避让方法在执行效率上明显落后，任务执行效率低于其他 2 种方法。RTA-DAAM 避让方法在任务过程初期与先进避让方法采取的策略相似，但随后在任务过程中进行了方法切换，导致其后续的变化曲线与先进避让方法产生了差异。由表 4 可知，备用避让方法在任务执行时间和路径长度上相较于先进避让方法损失了 21.57% 的效率，而 RTA-DAAM 避让方法则仅损失了 3.40% 的效率。

根据前述定义的航空器状态对 3 种避让方法

表 4　避让方法效率对比

Table 4　Comparison of efficiency of avoidance methods

避让方法	任务执行时间/s	路径长度/m
先进避让方法	76.5	61.2
RTA-DAAM避让方法	79.1	63.3
备用避让方法	93.0	74.4

进行安全分析, 如图 13 所示。先进避让方法在无风险状态上的占比相对较低, 且在任务执行过程中, 航空器有进入不安全状态的风险, 存在一定的碰撞可能性。相比之下, 备用避让方法在执行过程中虽然可恢复状态的占比较少, 但无风险状态和预防状态的占比较高, 且完全避免了进入不安全状态, 确保了任务的安全性。尽管 RTA-DAAM 避让方法完成任务所需的时间相对较长, 导致其在无风险状态和预防状态占总运行时间的比例上略低于先进避让方法, 但同样能够避免进入不安全状态, 从而有效规避了潜在的碰撞风险。这表明在权衡任务执行时间和安全性方面, RTA-DAAM 避让方法展现出了良好的平衡性。

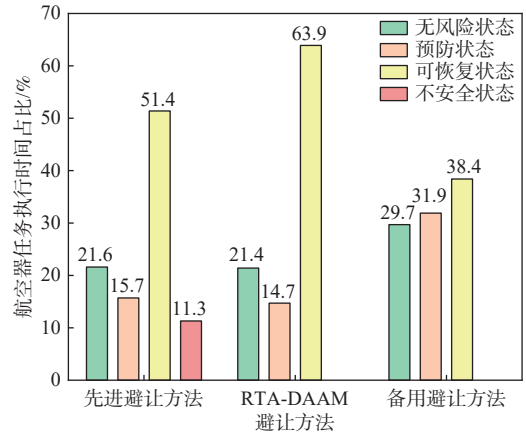


图 13　航空器任务执行时间占比

Fig. 13　Percentage of aircraft operational status time

在执行任务的过程中, 备用避让方法虽然以牺牲效率为代价确保了极高的安全性, 但对于紧急消防工作这类对时间要求极为严格的任务而言, 效率的提升显得尤为重要。为尽可能追求效率的同时保障航空器的安全, 对先进避让方法和 RTA-DAAM 避让方法的任务路径规划开展进一步分析, 如图 14 和图 15 所示。

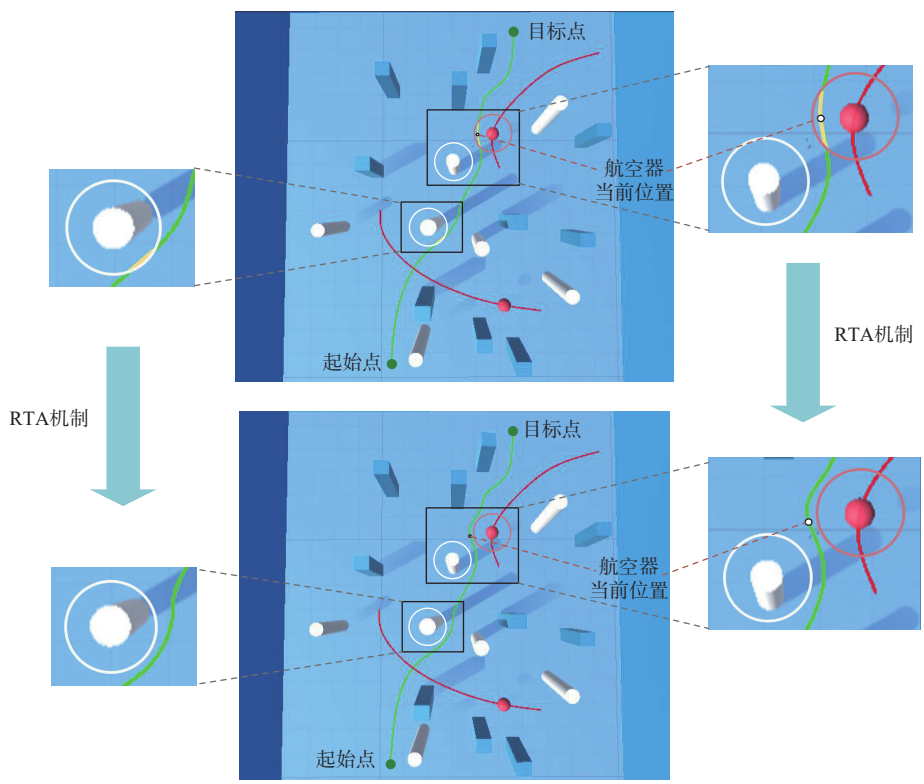


图 14　航空器任务路径规划(俯视图)

Fig. 14　Aircraft mission path planning (top view)

在先进避让方法和 RTA-DAAM 避让方法作用下, 航空器与障碍物之间的最小安全距离如图 16 所示。以 RTA-DAAM 避让方法的 3 个关键任务路径点为例开展分析, 航空器在起步阶段, 默认采用高安全性的备用避让方法开始执行任务, 由于初始位置时航空器净空边界与障碍物边界较为接近, 航空器短暂地保持与障碍物的安全距离, 随后开始逐渐远离障碍物安全边界, 决策模块切换至效率更高

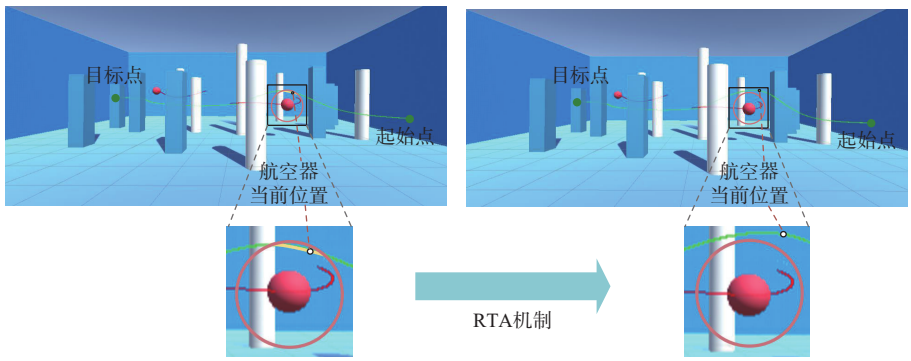


图 15 航空器任务路径规划(左视图)

Fig. 15 Aircraft mission path planning (left view)

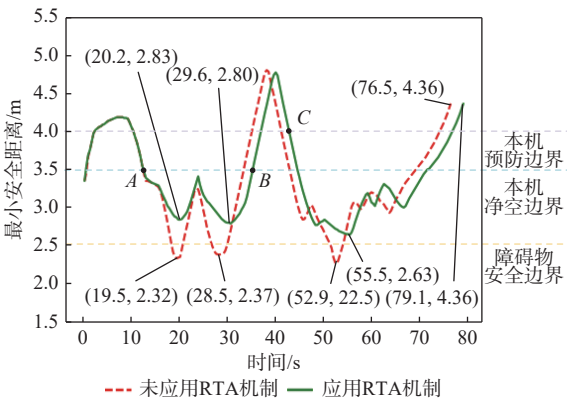


图 16 航空器与障碍物之间的最小安全距离

Fig. 16 Minimum safe distance between aircraft and obstacles

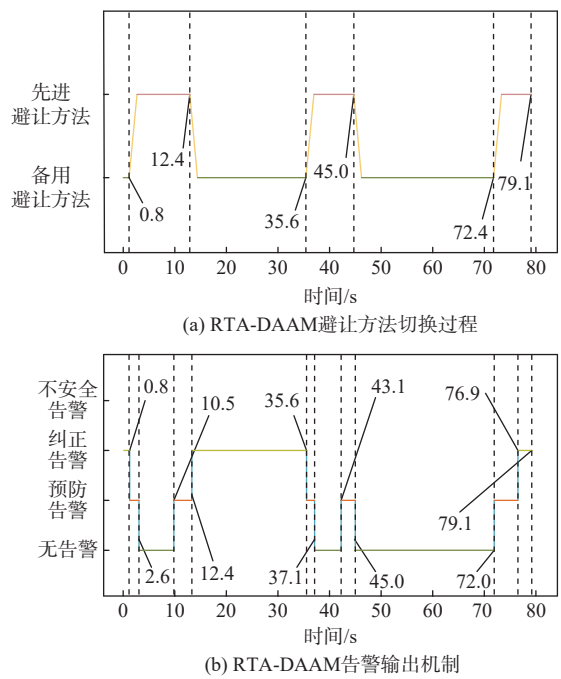


图 17 RTA-DAAM 决策与告警过程

Fig. 17 RTA-DAAM decision-making and alerting processes

的先进避让方法规划路径,因此,在点 A 前 2 种避让方法形成的曲线十分接近;航空器抵达点 A 时,面对横向运动的入侵机,根据探测的距离数据判断出航空器净空边界与入侵机的安全边界接触,触发逻辑 L3,由决策模块立即切换至备用避让方法以确保安全,同时发出纠正告警;航空器在点 A 与点 B 之间的任务过程中,RTA-DAAM 避让方法能够保证航空器自身不进入障碍物安全边界,从而保持期望分离距离的存在;抵达点 B 时,航空器净空边界远离障碍物安全边界,触发逻辑 L4,决策模块再次切换回先进避让方法输出控制指令,并调整告警级别为预防告警;航空器运动至点 C 时,预防边界与障碍物安全边界接触,触发逻辑 L2,虽然此时并未立即构成直接威胁,但系统仍然从无告警状态转变为提供预防告警,以警示地面站工作人员密切关注航空器的运行状态,确保任务的安全执行。

同时,RTA-DAAM 的避让方法切换过程及提供的告警输出机制如图 17 所示。为确保 DAA 系统控制执行稳定性,在 2 种避让方法切换节点设置了时间裕度,有效避免在场景下短时间内反复切换导致的振荡问题。

根据 RTA-DAAM 的切换逻辑、任务效率及与障碍物间的最小安全距离效果分析可以得出,RTA-DAAM 可以全程保证航空器不侵入到障碍物安全边界,维持期望分离距离,即满足系统安全运行限制条件,该方法能够保障航空器的运行安全。

为验证 RTA-DAAM 的环境适应能力,采用不同场景类型开展测试。如表 5 所示,在密集度低的场景下,航空器与障碍物之间存在较少的冲突,2 种

表 5 不同密度场景下的航空器路径规划对比

Table 5 Comparison of aircraft path planning in different density scenarios

场景类型	安全时间占比/%		路径长度/m	
	先进避让方法	RTA-DAAM避让方法	先进避让方法	RTA-DAAM避让方法
低密集度	100.0	100.0	60.8	61.4
中密集度	91.9	98.5	62.1	65.8
高密集度	77.2	93.8	65.6	74.7

方法的作用下均可以保证航空器的安全; 在密集度适中的场景下, 为航空器的起始点和目标点间设置一定的冲突, RTA-DAAM 避让方法规划的任务过程中, 安全时间占比要高于先进避让方法; 密集度高的场景下, 存在大量的冲突现象, RTA-DAAM 避让方法能够保证大部分时间内航空器处于安全状态, 而位于不安全状态时, 以人工干预的方式进行了路线规划, 因此牺牲了部分效率用以保证航空器的安全。

4.4　小型无人机实飞验证

为进一步验证 RTA 对无人驾驶航空器 DAA 系统的运行安全保障效果, 采用 FS-310 小型无人机在室内开展实验, 考虑到室内场景下无人机运行场地有限, 且需保证实验人员及设备的安全, 用纸板箱堆叠作为静态障碍物, 采用气球作为动态障碍物缓慢地移动, 并在实验场地四周添置防护网。

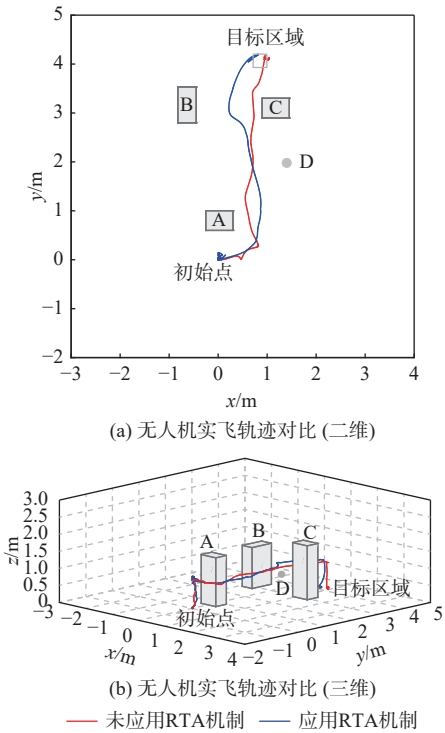
出于场地限制, 仅考虑无人机的净空边界与障碍物的安全边界, 净空边界为无人机为圆心周围的 0.15 m, 而障碍物安全边界定义为相机采集到的障碍物周围 0.3 m 的距离, 通过通信接口地址调试将飞控与机载电脑连接, 并将 RTA 提供的控制指令切换逻辑部署在硬件平台上, 在图 18 所示的场景下进行实验。



图 18　无人机运行场景

Fig. 18　Scenarios of drone operations

设定同一起始点和目标区域, 在定点模式下通过遥控器使无人机起飞至 1 m 高度, 切至 offboard 模式使无人机进行自主路径规划, 在抵达目标区域时切换回定点模式, 保证无人机安全降落在预定降落区域内。将飞控记录的飞行数据通过 QGroundControl 导出, 形成的路径如图 19 所示。



(a) 无人机实飞轨迹对比 (二维)

(b) 无人机实飞轨迹对比 (三维)

未应用RTA机制　应用RTA机制

图 19　无人机飞行轨迹对比

Fig. 19　Comparison of drone flight trajectories

在 RTA 的作用下, 无人机与障碍物之间存在更大的安全距离。无人机通过相机捕获场景信息, 面对长方体障碍物时, 需要计算障碍物可能影响无人机安全的最远距离, 因此, 路径规划的部分位置时有较大的偏航角。由于无人机飞行过程受指令的控制执行的影响, 同时在按照规划路径运动中, 与动态障碍物对向接近, 为避开动态障碍物调整了实飞路径, 实飞路径存在一定的波动, 同时无人机到达目标区域后的下降过程也存在些许误差, 该误差处于可接受的范围内。

无人机与障碍物之间的距离如图 20 所示。无人机位于点 D 时触发了逻辑 L4, 随即取消纠正告警并执行了切换动作; 而抵达点 E 后, 无人机根据逻辑 L3 切换至备用避让方法继续执行任务, 即便在短暂时间后无人机净空边界离开了障碍物安全边界, 由于时间裕度的合理设置, 系统避免了频繁的方法切换, 持续采用安全的备用避让方法, 直至时间裕度结束后, 再根据距离判断并进行避让方法的切换; 无人机到达点 F 后, 因其自身进入障碍物安全边界而存在碰撞风险, 逻辑 L5 触发, 无人机发出危险告警, 由实验人员通过控制器介入并辅助无人机离开了障碍物安全边界。对无人机的运行状态时间占比进行分析, RTA 技术的引入显著提升了无人机的安全性, 使其在障碍物安全距离外运行的

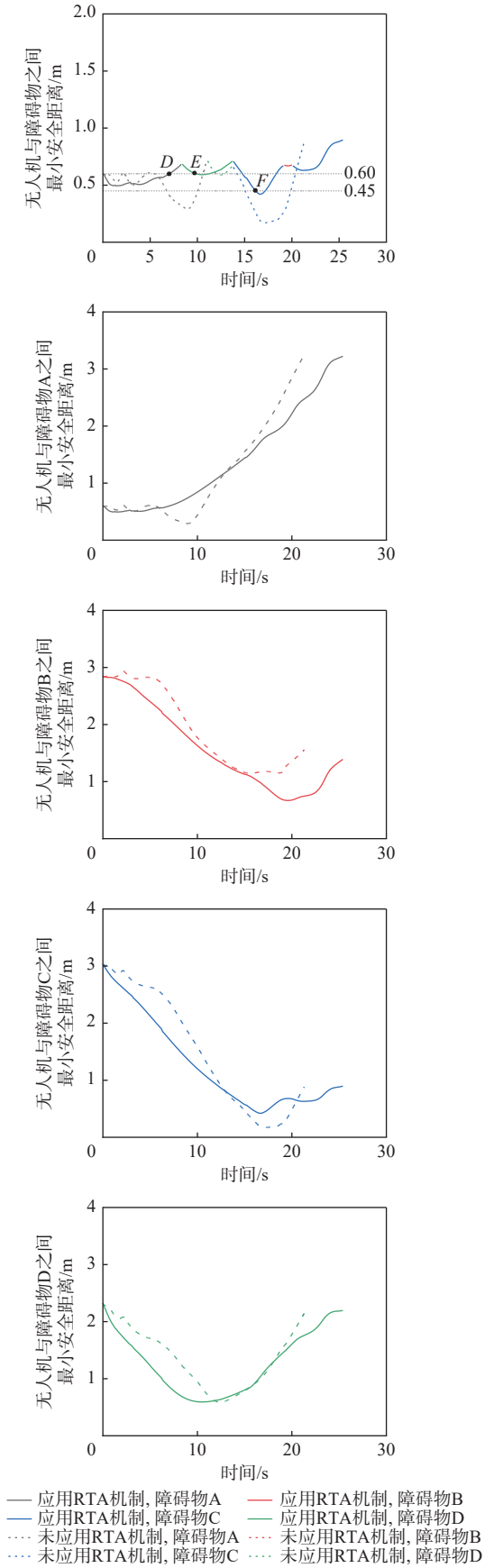


图 20 无人机与障碍物之间的最小安全距离

Fig. 20 Minimum safe distance between a drone and an obstacle

时间即安全时间占比高达 96.9%。而在这一比例之外的时间段，也有实验人员提供必要的辅助控制，从而最大限度地确保了无人机的运行安全。

通过对比航空器仿真实验和无人机实机实验中的最小安全距离数据，可以看到，在 RTA 技术的作用下，能够使航空器在任务执行过程中兼顾效率与安全，在几乎不牺牲效率的同时为 DAA 系统提供了运行安全保障。

5 结 论

本文针对无人驾驶航空器 DAA 系统的控制决策存在效率与安全的权衡难题，提出了一个运行安全保障模块 RTA-DAAM，旨在确保无人驾驶航空器在飞行环境中能够同时实现高效与安全运行。

1）为提高 IFDS 算法避让过程的效率和平滑度，引入 TD3 算法构成 CIFDS 算法；同时为 RTA-DAAM 设计决策与告警逻辑，实现 DAA 系统探测、决策到告警的一体化协同配合，有助于增强航空器的安全性和飞行稳定性。

2）仿真实验结果表明，RTA-DAAM 能够使航空器在仅损失 3.40% 效率的基础上，确保航空器始终存在期望分离距离，以保障 DAA 系统运行安全。

3）通过在小型无人机上进行实验，证明了 RTA 技术的引入能够提升无人机安全时间占比至 96.9%，引导地面站工作人员的介入也可以进一步防止危险事件的发生，提高无人驾驶航空器的运行安全性。

参考文献（References）

[1] Huang X. The small-drone revolution is coming: scientists need to ensure it will be safe[J]. Nature, 2025, 637(8044): 29-30.

[2] Thipphavong D P, Apaza R, Barmore B, et al. Urban air mobility airspace integration concepts and considerations[C]//Proceedings of the Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. Reston: AIAA, 2018: 3676.

[3] Michelmann J, Straubinger A, Al Haddad C, et al. Urban air mobility 2030+: pathways for UAM–a scenario-based analysis[EB/OL]. [2025-03-01].https://www.semanticscholar.org/paper/URBAN-AIR-MOBILITY-2030%2B%3A-PATHWAYS-FOR-UAM-%E2%80%93-A-Michelmann-Straubinger/dde5cd91a5cd19fd5cec68241fb59bc954e2eed0.

[4] Cheng A W, Witzberger K E, Phojanamongkolkij N, et al. Urban air mobility (UAM) airspace research roadmap-systems engineering approach to managing airspace evolution towards UML-4[C]//AIAA Aviation 2022 Forum. Reston: AIAA, 2022.

[5] Muñoz C, Narkawicz A, Hagen G, et al. DAIDALUS: detect and avoid alerting logic for unmanned systems[C]//Proceedings of the IEEE/AIAA 34th Digital Avionics Systems Conference. Piscataway: IEEE Press, 2015.

[6] Davies J, Wu M H. Comparative analysis of ACAS-Xu and DAIDALUS detect-and-avoid systems: NASA/TM-2018-219773 [R]. Washington, D. C. : NASA, 2018.

[7] Ryu J Y, Lee H, Lee H T. Detect and avoid AI system model using a deep neural network[C]//Proceedings of the IEEE/AIAA 41st Digital Avionics Systems Conference. Piscataway: IEEE Press, 2022: 1-8.

[8] 工业和信息化部, 科学技术部, 财政部, 中国民用航空局. 绿色航空制造业发展纲要 (2023—2035 年)[R]. 北京: 工业和信息化部, 科学技术部, 财政部, 中国民用航空局, 2023.
Ministry of Industry and Information Technology, Ministry of Science and Technology, Ministry of Finance, Civil Aviation Administration of China. Guideline for green aviation manufacturing development (2023—2035)[R]. Beijing: Ministry of Industry and Information Technology, Ministry of Science and Technology, Ministry of Finance, Civil Aviation Administration of China, 2023(in Chinese).

[9] 曹宏业, 刘潇, 董绍康, 等. 面向强化学习的可解释性研究综述[J]. 计算机学报, 2024, 47(8): 1853-1882.
Cao H Y, Liu X, Dong S K, et al. A survey of interpretability research methods for reinforcement learning[J]. Chinese Journal of Computers, 2024, 47(8): 1853-1882(in Chinese).

[10] Castelvecchi D. Can we open the black box of AI?[J]. Nature, 2016, 538(7623): 20-23.

[11] Perez-Cerrolaza J, Abella J, Borg M, et al. Artificial intelligence for safety-critical systems in industrial and transportation domains: a survey[J]. ACM Computing Surveys, 2024, 56(7): 1-40.

[12] 董磊, 刘嘉琛, 陈曦, 等. 面向适航符合性的智能航电系统认证研究进展[J]. 航空工程进展, 2023, 14(3): 26-40.
Dong L, Liu J C, Chen X, et al. Research progress of AI-based avionics system certification for airworthiness compliance[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2023, 14(3): 26-40 (in Chinese).

[13] Fuller J G. Run-time assurance: a rising technology[C]//Proceedings of the AIAA/IEEE 39th Digital Avionics Systems Conference. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-9.

[14] 董磊, 王琦, 陈曦, 等. 运行时保证技术的研究现状与发展综述[J]. 计算机应用, 2025, 45(3): 1003-1015.
Dong L, Wang Q, Chen X, et al. Survey of research status and development of runtime assurance technology[J]. Journal of Computer Applications, 2025, 45(3): 1003-1015(in Chinese).

[15] Cofer D, Amundson I, Sattigeri R, et al. Run-time assurance for learning-based aircraft taxiing[C]//Proceedings of the AIAA/IEEE 39th Digital Avionics Systems Conference. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-9.

[16] He Y N, Schumann J, Yu H F. Toward runtime assurance of complex systems with AI components[J]. PHM Society European Conference, 2022, 7(1): 166-174.

[17] Ghori S, Khamvilai T, Feron E, et al. Runtime assurance for distributed avionics architecture[C]//Proceedings of the IEEE/AIAA 41st Digital Avionics Systems Conference. Piscataway: IEEE Press, 2022: 1-6.

[18] Abate M, Mote M, Dor M, et al. Run time assurance for spacecraft attitude control under nondeterministic assumptions[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2024, 32(3): 862-873.

[19] Avram R, Zhang X D, Muse J A, et al. Nonlinear adaptive control of quadrotor UAVs with run-time safety assurance[C]//Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Reston: AIAA, 2017: 1896.

[20] Chen S D, Sun Y W, Li D C, et al. Runtime safety assurance for learning-enabled control of autonomous driving vehicles[C]//Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation. Piscataway: IEEE Press, 2022: 8978-8984.

[21] 高雅琪. 无人机系统中 DAA 模块的研究和设计实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2022.
Gao Y Q. Research design and implementation on DAA module of UAV system[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022(in Chinese).

[22] Owen M P, Panken A, Moss R, et al. ACAS Xu: integrated collision avoidance and detect and avoid capability for UAS[C]//Proceedings of the IEEE/AIAA 38th Digital Avionics Systems Conference. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-10.

[23] Borshchova I, Ellis K. DAAMSIM: a simulation framework for establishing detect and avoid SYSTEM requirements[J]. Drone Systems and Applications, 2022, 10(1): 266-286.

[24] ASTM International. Standard practice for methods to safely bound behavior of aircraft systems containing complex functions using run-time assurance: ASTM F3269-21[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2021.

[25] Torens C, Nagarajan P, Schirmer S, et al. Certification aspects of runtime assurance for urban air mobility: AIAA 2024-1464[R]. Reston: AIAA, 2024.

[26] Wang H L, Lyu W T, Yao P, et al. Three-dimensional path planning for unmanned aerial vehicle based on interfered fluid dynamical system[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2015, 28(1): 229-239.

[27] Yao P, Wang H L, Liu C. 3-D dynamic path planning for UAV based on interfered fluid flow[C]//Proceedings of the IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference. Piscataway: IEEE Press, 2015: 997-1002.

[28] Li Y X. Deep reinforcement learning: an overview[EB/OL]. (2018-11-26)[2025-03-01]. https://arxiv.org/abs/1701.07274.

[29] Szepesvári C. Algorithms for reinforcement learning[M]. Berlin: Springer, 2022.

[30] 吴健发, 王宏伦, 王延祥, 等. 无人机反应式扰动流体路径规划[J]. 自动化学报, 2023, 49(2): 272-287.
Wu J F, Wang H L, Wang Y X, et al. UAV reactive interfered fluid path planning[J]. Acta Automatica Sinica, 2023, 49(2): 272-287 (in Chinese).

[31] 顾雪平, 刘彤, 李少岩, 等. 基于改进双延迟深度确定性策略梯度算法的电网有功安全校正控制[J]. 电工技术学报, 2023, 38(8): 2162-2177.
Gu X P, Liu T, Li S Y, et al. Active power correction control of power grid based on improved twin delayed deep deterministic policy gradient algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(8): 2162-2177(in Chinese).

[32] Zhou X, Wang Z P, Ye H K, et al. EGO-Planner: an ESDF-free gradient-based local planner for quadrotors[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2021, 6(2): 478-485.

Design of operational security guarantee method for DAA system based on runtime assurance

DONG Lei[1, 2], WANG Qi[1, 3], CHEN Xi[1, 2, *], LIU Jiachen[1, 3]

(1. Key Laboratory of Civil Aircraft Airworthiness Technology, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;
2. Science and Technology Innovation Research Institute, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;
3. College of Safety Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: A runtime assurance-detect and avoid module (RTA-DAAM) is proposed to address the avoidance issue of unmanned aerial vehicles in the urban air mobility (UAM) scenario. It does this by identifying external environmental information sources and providing control commands and alarm information to guarantee the effectiveness and safety of aircraft in the UAM scenario. The control methods of advanced and standby collision avoidance modules in RTA-DAAM are designed. Considering the importance of coordination of detection, decision-making and warning functions, defining the aircraft's own clearance boundaries, prevention boundaries, and obstacle safety boundaries, and dividing the different aircraft states so as to complete the design of the decision-making and warning logics. The simulation results show that RTA-DAAM can ensure the desired separation distance of the aircraft at a loss of only 3.40% of efficiency, so as to ensure the safety of the DAA system. The implementation of RTA technology can increase UAV safety time to 96.9%, providing UAV safety to the greatest extent possible, according to the real flight results of tiny UAVs.

Keywords: runtime assurance; detect and avoid system; unmanned aerial vehicles; safe operating limits; decision and alarm

Received: 2025-03-11; **Accepted**: 2025-04-25; **Published Online**: 2025-06-11 09:28

URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20250610.1954.003

Foundation items: The Fundamental Research Funds for the Central University (3122022QD07,3122022044)

* **Corresponding author**. E-mail: chen_x@cauc.edu.cn