

文章编号:1671-1637(2026)03-0198-17

# 非合作微分博弈下 eVTOL 航空器自主避让 决策与控制方法

赵昕颐<sup>1</sup>, 王岩韬<sup>2</sup>, 赵焱飞<sup>\*1,3</sup>

(1. 武汉大学 电子信息学院, 湖北 武汉 430072; 2. 中国民航大学 科技创新研究院,  
天津 300300; 3. 中国民航大学 空中交通管理学院, 天津 300300)

**摘要:**为保障电动垂直起降(eVTOL)航空器在城市空域安全自主运行,针对非合作航空器入侵场景,提出了非合作博弈下 eVTOL 航空器自主避让决策与控制方法。针对具有不同飞行目标及避让意图的航空器,分别构建最优控制模型,并采用连续、混合动作空间表达控制输入;建立了基于非合作微分博弈的多机决策模型,以刻画冲突场景下航空器之间的避让或抢行行为;融合事件触发机制与模型预测控制框架,采用航迹预测-冲突检测-优化计算-控制执行的滚动优化流程,为航空器实时求解单步最优控制指令;采用迭代最优响应算法,逐步逼近非合作微分博弈问题的纳什均衡解,以提高在线计算效率;基于上述模型与算法,在双机对向、同向、交叉冲突场景下,开展了 eVTOL 航空器的自主避让仿真试验。试验结果表明:当预判入侵机不具备避让意图时,避让效果更优;采用“调速+调向+调高度”的复合机动策略能够使避让安全性提升 32%,避让效率提升 53%,并且能够减少 88% 的最大偏移距离;基于迭代最优响应的博弈优化算法单步内平均计算时间小于 0.3 s,响应速度快。提出的自主避让决策与控制方法能够使 eVTOL 航空器在面对非合作目标冲突时,快速生成最优控制策略,从而实现安全、高效的自主避让。

**关键词:**城市空中交通; eVTOL 航空器; 微分博弈; 自主避让决策; 迭代最优响应; 模型预测控制; 低空交通

中图分类号:U8 文献标志码:A DOI:10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.093

## Autonomous avoidance decision-making and control method for eVTOL aircraft under non-cooperative differential games

ZHAO Xin-yi<sup>1</sup>, WANG Yan-tao<sup>2</sup>, ZHAO Yi-fei<sup>\*1,3</sup>

(1. Electronic Information School, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei, China; 2. Institute of  
Science and Technology Innovation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;  
3. College of Air Traffic Management, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

**Abstract:** To ensure the safe autonomous operation of electric vertical take-off and landing (eVTOL) aircraft in urban airspace, an autonomous avoidance decision-making and control method for eVTOL aircrafts under non-cooperative games was proposed for non-cooperative aircraft intrusion scenarios. Optimal control models were constructed respectively for aircraft

出版历程:2025-09-01 收稿,2025-11-19 修回,2025-11-27 录用

基金项目:国家重点研发计划(2022YFC3002502);国家自然科学基金项目(52572390)

作者简介:赵昕颐(1998-),女,天津人,工学博士研究生,E-mail:2024182120077@whu.edu.cn。

\*通信作者:赵焱飞(1971-),男,湖南常德人,教授,博士生导师,工学博士,E-mail:yfzhao@cauc.edu.cn。

引用格式:赵昕颐,王岩韬,赵焱飞.非合作微分博弈下 eVTOL 航空器自主避让决策与控制方法[J].交通运输工程学报,2026,26(3):198-214.

Citation:ZHAO Xin-yi, WANG Yan-tao, ZHAO Yi-fei. Autonomous avoidance decision-making and control method for eVTOL aircraft under non-cooperative differential games[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2026, 26(3): 198-214.

with different flight goals and avoidance intentions, and continuous and hybrid action spaces were adopted to express control inputs. A multi-aircraft decision-making model based on non-cooperative differential game theory was established to characterize the avoidance or priority-taking behaviors of aircraft in conflict scenarios. An event-triggered mechanism was integrated with a model predictive control framework, and a rolling optimization process of trajectory prediction, conflict detection, optimization calculation, and control execution was adopted to solve the single-step optimal control command for aircraft in real time. An iterative best response algorithm was adopted to progressively approach the Nash equilibrium solution of the non-cooperative differential game to improve online computational efficiency. Based on the proposed models and algorithms, autonomous avoidance simulation experiments of eVTOL aircraft were conducted under head-on, same-direction, and crossing conflict scenarios. Simulation results show that when the intruding aircraft is predicted to have no avoidance intention, the avoidance effect is better. The composite maneuver strategy of “speed adjustment + direction adjustment + altitude adjustment” improves avoidance safety by 32%, increases avoidance efficiency by 53%, and reduces maximum deviation distance by 88%. The average computation time per step of the game optimization algorithm based on iterative best response is less than 0.3 s, and the response speed is fast. The proposed autonomous avoidance decision-making and control method enables eVTOL aircraft to rapidly generate optimal control strategies when facing non-cooperative target conflicts, thereby achieving safe and efficient autonomous avoidance.

**Keywords:** urban air mobility; eVTOL aircraft; differential game; autonomous avoidance decision-making; iterative best response; model predictive control; low-altitude traffic

**Publication history:** Received 2025-09-01; Received in revised form 2025-11-19; Accepted 2025-11-27

**Funding:** National Key R&D Program of China (2022YFC3002502); National Natural Science Foundation of China (52572390)

\* **Corresponding author:** ZHAO Yi-fei, professor, PhD, E-mail: yfzhao@cauc.edu.cn.

## 0 引言

随着全球城市化进程的加快,地面交通拥堵与污染问题日益严峻。以电动垂直起降(Electric Vertical Take-off and Landing, eVTOL)航空器<sup>[1]</sup>为代表的城市空中交通(Urban Air Mobility, UAM)体系,被视为缓解地面交通拥堵,构建绿色、高效、立体化城市交通体系的重要方式<sup>[2-3]</sup>。为实现这一目标,各国政府与企业正在积极探索 eVTOL 的运行与管理新模式。2023年,美国联邦航空管理局(Federal Aviation Administration, FAA)与欧洲单一天空计划先后发布了 UAM 2.0、U-Space 4.0 版本运行概念,根据在城市空域中运行的航空器数量、类型及自动化程度等,将 UAM 发展过程划分为不同阶段。其中,在 UAM 成熟阶段,eVTOL 将依靠人在回路外的高度自动化无人驾驶系统,实现与小型无人机和传统通用航空器的高密度混合运行。在这一场景中,eVTOL 将独立执行路径规划、间隔保持以

及碰撞规避等全流程飞行任务,而无需飞行员或地面操作员介入。这不仅可以减轻地面控制中心的通信负担和操作压力,还可有效应对城市高楼遮挡造成的通信中断问题。从 eVTOL 运营商的角度来看,无人化运行不仅能够显著降低机组人力成本,还可减少因人为操作失误引发的事故风险<sup>[4]</sup>,从而有效推动 eVTOL 的大规模商业化应用。然而,这也对 eVTOL 的自主运行能力,尤其是在冲突场景下的自主保持安全间隔(Remain Well Clear, RWC)与避撞(Collision Avoidance, CA)能力提出了更高要求。为实现 eVTOL 在高密度 UAM 场景中的安全、自主、高效运行,亟需发展高可靠、智能化的机载探测与避让(Detect and Avoid, DAA)技术<sup>[5]</sup>,以避免飞行冲突甚至空中相撞事故。

目前,国际上尚无专门针对 eVTOL 航空器制定的 DAA 技术规范,但可借鉴现有无人驾驶航空器(以下称无人机)的相关标准,以指导自主运行模式下 eVTOL DAA 系统的设计和开发。欧洲航空

电子标准协会在 ED-271 文件中,规定了适用于遥控驾驶航空器的 DAA 最低航空系统性能标准,从系统层面定义了 DAA 系统的核心能力——RWC、CA 与交通感知。美国航空无线电技术委员会在 DO-365C 文件中,规定了无人机 DAA 系统的最低运行性能标准,从技术层面细化了 RWC 的性能要求,而将 CA 功能分离至独立的防撞系统<sup>[6]</sup>。2024 年,无人系统规则制定联合体在特定运行风险评估方法中指出,认证类或空中风险等级高于 ARC-d 的特定类无人机须配备 DAA 系统以降低空中碰撞风险,并详细规定了 DAA 应具备的探测、决策、指令、执行与反馈功能的性能要求。2025 年,中日联合发布无人机感知与避障系统国际标准 ISO 15964,分别为短程、中远程和混合 DAA 系统定义了其环境感知、情境感知和目标避让等功能的性能要求。基于现有无人机标准框架,自主运行下的 eVTOL DAA 系统至少应涵盖探测、决策、执行等功能模块<sup>[7]</sup>,以实现 RWC 和 CA 两大核心能力。其中,RWC 与 CA 的区别主要体现在预警边界设定、机动强度以及机动限制等方面<sup>[8]</sup>。具体而言,RWC 更侧重于冲突预防,在保障安全的同时兼顾机平稳性与乘客舒适度;而 CA 则侧重于应对突发碰撞风险时的紧急规避,通常不考虑其他限制条件。尽管二者在威胁判定和执行策略上存在差异,但其核心功能——探测和避让相似,在一定条件下可相互借鉴甚至转化。

eVTOL DAA 系统的探测功能旨在通过目标识别、状态估计以及航迹预测等关键技术,识别 eVTOL 之间的潜在冲突,并为后续避让决策提供数据支持。根据目标是否具备信息共享能力,探测方式可分为非合作式与合作式两类。前者主要依靠机载毫米波雷达、激光雷达、光电和红外等传感器实现目标识别与数据采集,并利用卡尔曼滤波、粒子滤波等方法<sup>[7]</sup>进行数据融合与状态估计,从而获取目标位置、速度、加速度等关键参数,以支持航迹预测与冲突判定。后者则通过 5G/6G 通信、UAT 链路广播式自动相关监视 (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast, ADS-B) 等先进技术<sup>[9]</sup>,直接获取目标的飞行状态信息。在特定的合作机制下,该探测方式还能同步双方的任务优先级、飞行意图等关键信息<sup>[10]</sup>,从而实现高效协同避让。目前,FAA 与麻省理工学院林肯实验室正在联合开发专用于 eVTOL 等旋翼机的新型空中防撞系统 ACAS Xr<sup>[11-12]</sup>。该系统以应答机主动询问和 ADS-B 为合作目标的主要探测方式,

同时预留了空对空通信链路接口,以便在未来实现与合作目标的信息共享与机动协调。尽管合作机制可显著提高 eVTOL 的态势感知与避让能力,但其适用性受以下因素限制:低空网联、UAT 链路 ADS-B 等关键技术尚未成熟<sup>[13]</sup>,短期内无法满足 eVTOL 的安全探测需求;eVTOL 机型与运行方式多样,难以建立统一的合作机制;城市空域中建筑物遮蔽或电磁干扰可能会导致通信中断。为应对上述问题,在推进合作技术发展的同时,需持续提升 eVTOL 非合作目标探测与独立避让能力,以应对 UAM 场景中可能出现的各类冲突。

避让功能是 DAA 系统的核心,其目标在于通过决策、规划及控制等关键技术,引导 eVTOL 自主规避潜在冲突,并在冲突解除后快速恢复至既定航线。与探测方式类似,避让方式可划分为合作式<sup>[14]</sup>与非合作式<sup>[15]</sup>两类。合作避让依赖于 eVTOL 间高可靠的信息交互能力,采用优先级或协商机制实现协同避让<sup>[10]</sup>。非合作避让则需依靠 eVTOL 自身的感知与避让能力,独立完成避让决策与控制执行。目前,专为 eVTOL 开发的非合作避让算法较少,其中最具代表性的为基于马尔科夫决策过程 (Markov Decision Process, MDP) 的方法<sup>[14,16-18]</sup>。例如,Yang 等<sup>[16]</sup>将二维空间内的 eVTOL 自主避让问题建模为 MDP 过程,并采用蒙特卡洛树搜索算法在线求解最优避让策略。在此基础上,Bertram 等<sup>[17]</sup>开发了一种 FastMDP 算法,进一步提高了 MDP 的计算效率。Wu 等<sup>[18]</sup>开发了一种具有连续动作空间的蒙特卡洛树搜索算法,避免了动作离散化带来的轨迹不平滑和搜索性能下降问题。尽管基于 MDP 的方法能够快速生成安全的避让策略,但其机动方式通常局限于水平航向调整。原因在于,为保证计算实时性,MDP 动作空间必须高度离散化;若引入调速、调高等多维机动,将导致状态-动作空间急剧膨胀,使求解复杂度无法满足 eVTOL 的在线决策需求。已有研究表明,采用混合机动策略能够显著提升避让的安全性及效率。例如,Katz 等<sup>[19]</sup>通过蒙特卡洛仿真对比了 eVTOL 调向、调高和调速等机动策略的避让效果,试验结果证明了混合策略比单一策略更加安全、高效。以速度障碍法为代表的几何法、人工势场法以及最优控制法等传统方法,被广泛应用于小型无人机的三维避让问题<sup>[20-22]</sup>,并已逐步扩展至 eVTOL 之间的避让问题<sup>[23-27]</sup>。例如,NASA<sup>[23]</sup>开发了一种基于安全体积的 eVTOL 辅助避让算法,可为飞行员实时提供转

向、爬升/下降、减速等规避指引。Chen 等<sup>[24]</sup>提出了一种改进人工势场算法,用于解决三维空间内多 eVTOL 实时避撞问题。郝鹏<sup>[25]</sup>将人工势场与速度障碍融合,用于兼顾入侵航空器与静态障碍物的紧急避撞。Deniz 等<sup>[26]</sup>构建了适用于复杂三维环境的深度多智能体强化学习框架,通过自主调节速度和高度以应对大规模冲突。张康等<sup>[27]</sup>将 eVTOL 自主避让问题建模为带机会约束的模型预测控制问题(Model Predictive Control, MPC),并采用迭代凸优化法进行求解,解决了不确定、动态环境下的 eVTOL 的在线避让问题。尽管上述方法通过扩展动作空间改善了避让性能,但普遍缺乏对入侵航空器飞行意图的建模。当双方同时具备避让意图时,该问题可能导致同步机动并引发二次冲突。

综上所述,针对现有避让方法机动策略单一、缺乏对非合作目标避让意图的预判等问题,本文提出一种面向非合作目标入侵场景的 eVTOL 航空器自主避让决策与控制方法。首先,根据 eVTOL 航空器是否具备避让意图,分别构建带间隔约束的最优控制模型,以及单机航迹跟踪控制模型;其中,最优控制模型采用连续动作空间表达控制输入,可同时支持转向、调速、爬升等混合机动,以提升避让效率;在此基础上,建立基于非合作微分博弈的多机决策模型,用于刻画 eVTOL 间的动态交互过程;进一步地,提出了基于事件触发 MPC 机制的自主避让决策与控制方法,通过迭代最优响应机制求解纳什均衡,生成同时满足安全约束与实时性要求的避让轨迹;最后,在对向飞行、同向超越、交叉相遇三类典型场景中开展仿真试验,验证方法在避让效率、安全性及实时性方面的性能。

## 1 问题建模

### 1.1 问题描述

在城市空中交通发展初期,由于空-空通信技术尚未成熟、各运营商独立运行、尚未形成统一的信息共享与协同机制,加之可能面临的大规模通信失效情形,eVTOL 航空器之间难以实现可靠的协同避让。在此背景下,所有冲突探测与避让均需由航空器独立完成,不依赖任何合作或通信机制。本研究即基于上述背景展开:在某低空空域中同时运行有  $N$  架 eVTOL 航空器,各 eVTOL 均具有既定的、包含期望位置与预计到达时间序列的 4D 参考航迹,且各 eVTOL 之间不存在合作关系。为确保飞行安

全,eVTOL(本机)需在飞行过程中持续感知自身及邻近航空器(入侵机)的状态信息,并实时判断是否存在潜在冲突风险,即双机间距是否小于或接近最低安全间隔  $d_0$ 。一旦检测到潜在冲突,本机应及时调整控制策略以实现有效避障,以防两机间距进一步缩小导致碰撞事故。同时,完整的冲突避让过程还应考虑航迹恢复环节。因此,在面对潜在飞行冲突时,本机的主要任务包括:①通过避让机动与入侵机保持安全间隔;②沿 4D 参考航迹继续飞行至目标点。

此外,本机的避让策略会根据入侵机的行为动态调整。例如,当入侵机不避让时,应执行快速、大幅度的机动操作;而当入侵机主动避让时,则可采取相对平稳的避让策略,以减轻旅客不适并减少航迹偏差。为更清晰地描述该问题,现对冲突场景与入侵机做以下假设。

假设 1:入侵机为非合作航空器,无法实现信息共享或协同避让,本机需独立完成避让决策与控制。

假设 2:本机与入侵机为理性智能体,均希望沿各自的 4D 参考航迹飞行至目标点。在面对潜在冲突时,本机一定避让,入侵机可能避让,也可能不避让。若入侵机选择避让,则同样采用本文提出的避让算法框架执行操作。

假设 3:本机可通过自身传感设备获取入侵机的位置、速度、航向角等完美状态信息,并由飞行计算机推导入侵机的历史控制输入(如加速度、角速率等)。

基于上述假设,第 1.2 节根据 eVTOL 航空器是否实施避让,分别建立了带间隔约束的最优控制模型与单机航迹跟踪控制模型。前者在满足飞行性能约束的前提下,以保持安全间隔为主要目标,用于求解航空器的最佳避让策略;后者以航迹跟踪为主要目标,通过调整控制输入,使输出航迹尽可能贴合既定的 4D 参考航迹。规定本机在检测到冲突时,采用带间隔约束的最优控制模型进行避让决策与控制,避让结束后采用航迹跟踪模型进行航迹恢复。进一步的,为描述入侵机行为对本机避让策略的影响,第 1.3 节建立了基于非合作微分博弈的多机决策模型,用于解释决策目标冲突下多机的策略交互行为,为求解 eVTOL 航空器的最优避让策略提供理论依据。

### 1.2 单机最优控制模型

#### 1.2.1 带间隔约束的最优控制模型

冲突场景下的航空器控制模型,其输出航迹需

严格满足航空器之间的安全间隔约束,并保证控制输入符合飞行性能限制。在此基础上,综合考虑航迹跟踪误差、机动成本和碰撞风险等因素,在确保安全的前提下尽可能优化以上指标。

(1) 状态变量

$$\mathbf{x}_i(n) = (x_i(n), y_i(n), z_i(n), v_i(n), \Psi_i(n), \theta_i(n))^T$$

式中: $\mathbf{x}_i(n)$ 为eVTOL航空器*i*在第*n*步的状态变量, $n=0,1,\dots,T$ ; $x_i(n)$ 、 $y_i(n)$ 和 $z_i(n)$ 分别为航空器*i*在该时刻地面坐标系下位置 $\mathbf{P}_i$ 的横向、纵向、垂向分量; $v_i(n)$ 、 $\Psi_i(n)$ 和 $\theta_i(n)$ 分别航空器*i*在该时刻的飞行速度标量、航向角和俯仰角。

(2) 控制输入

$$\mathbf{u}_i(n) = (a_i(n), \omega_i(n), \alpha_i(n))^T$$

式中: $\mathbf{u}_i(n)$ 为eVTOL航空器*i*在第*n*步的控制输入; $a_i(n)$ 、 $\omega_i(n)$ 和 $\alpha_i(n)$ 分别为航空器*i*在第*n*步的加速度、航向角速率和俯仰角速率。

(3) 状态更新方程

考虑计算复杂度与实时性需求,本文使用离散化欧拉运动学公式对eVTOL航空器状态的连续变化过程进行建模,具体为

$$\mathbf{x}_i(n+1) = \mathbf{f}[\mathbf{x}_i(n), \mathbf{u}_i(n)] = \begin{bmatrix} x_i(n) + v_i(n) \cos[\Psi_i(n)] \cos[\theta_i(n)] \Delta t \\ y_i(n) + v_i(n) \sin[\Psi_i(n)] \cos[\theta_i(n)] \Delta t \\ z_i(n) + v_i(n) \sin[\theta_i(n)] \Delta t \\ v_i(n) + a_i(n) \Delta t \\ \Psi_i(n) + \omega_i(n) \Delta t \\ \theta_i(n) + \alpha_i(n) \Delta t \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $\Delta t$ 为时间步长。

(4) 代价函数

航空器*i*的最优控制目标是通过优化未来*T-1*步的控制序列 $U_i$ ,以最小化总代价函数 $J_i$ ,具体为

$$\begin{cases} \min J_i = \sum_{n=0}^{T-1} L_i(n) + \Phi_i \\ U_i = \{\mathbf{u}_i(0), \mathbf{u}_i(1), \dots, \mathbf{u}_i(T-1)\} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} L_i(n) = J_1(n) + J_2(n) + J_3(n) \\ J_1(n) = \omega_1 \|\mathbf{P}_i(n) - \mathbf{P}_{i,0}(n)\|^2 \\ J_2(n) = \omega_2 [a_i(n)]^2 + \omega_3 [\omega_i(n)]^2 + \omega_4 [\alpha_i(n)]^2 \\ J_3(n) = \sum_{j \neq i} \frac{\omega_5}{[d_{ij}(n) - d_0]^2 + \epsilon} \\ \Phi_i = \omega_6 \|\mathbf{p}_i(T) - \mathbf{p}_{i,0}(T)\|^2 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $L_i(n)$ 为运行代价; $\Phi_i$ 为终端代价; $\mathbf{P}_i(n)$ 和 $\mathbf{P}_{i,0}(n)$ 分别为航空器*i*在第*n*步的预测位置和参考

位置; $\omega_1 \sim \omega_6$ 为权重系数; $d_{ij}(n)$ 为航空器*i*、*j*间的欧氏距离; $d_0$ 为双机最低安全间隔; $\epsilon$ 为一个极小的正数,用于防止分母为0,本文取0.1; $J_1(n)$ 为航迹跟踪误差,用于衡量航迹的偏离程度或任务完成度; $J_2(n)$ 为机动成本,用于衡量控制能耗或飞行稳定性; $J_3(n)$ 为碰撞风险,用于提供一种软约束惩罚机制,即通过成本增加的方式鼓励保持安全间距。

具体而言,当两架航空器的欧式距离趋近于 $d_0$ 时,碰撞风险急剧上升;当距离远大于 $d_0$ 时,碰撞风险趋近于0,代表碰撞风险极低。 $\Phi_i$ 为终端代价,用于鼓励航空器*i*在最终时刻尽可能的接近其目标位置。

(5) 约束条件

为保障航空器在飞行过程中满足空域边界限制与飞行性能要求,需对其状态变量及控制输入施加物理约束,具体为

$$\begin{cases} \mathcal{X}_i = \{(v_i, z_i, \Psi_i, \theta_i) \mid v_{\min} \leq v_i \leq v_{\max}, z_{\min} \leq z_i \leq z_{\max}, \\ \Psi_{\min} \leq \Psi_i \leq \Psi_{\max}, \theta_{\min} \leq \theta_i \leq \theta_{\max}\} \\ \mathcal{U}_i = \{(a_i, \omega_i, \alpha_i) \mid a_{\min} \leq a_i \leq a_{\max}, \omega_{\min} \leq \omega_i \leq \omega_{\max}, \\ \alpha_{\min} \leq \alpha_i \leq \alpha_{\max}\} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\mathcal{X}_i$ 和 $\mathcal{U}_i$ 分别为航空器*i*状态变量和控制输入的可行域。

此外,为确保航空器间距离严格满足最低安全间隔标准,施加如下安全硬约束

$$d_{ij}(n) \geq d_0 \quad j \neq i \quad (5)$$

综上所述,航空器*i*带间隔约束的最优控制模型为

$$\min_{U_i} J_i = \sum_{n=0}^{T-1} [J_1(n) + J_2(n) + J_3(n)] + \Phi_i \quad (6)$$

### 1.2.2 单机航迹跟踪控制模型

若不考虑避让约束,航空器的最优控制问题可退化为单机航迹跟踪控制问题。此时,代价函数仅包括航迹偏差和机动成本两项,且不受安全硬约束限制。该模型主要用于本机避让后的航迹快速恢复与飞行性能优化。航空器*i*的单机航迹跟踪控制模型为

$$\min_{U_i} J_i = \sum_{n=0}^{T-1} [J_1(n) + J_2(n)] + \Phi_i \quad (7)$$

### 1.3 基于非合作微分博弈的多机决策模型

微分博弈是一种研究动态系统中多方决策者通过连续策略交互达成均衡的数学框架。该框架以微分方程描述决策者的状态演化,以博弈论模拟决策者之间的竞争行为,要求各决策者在满足约束条件的前提下,共同或独立优化控制策略以实现利益最大化,且策略之间互相耦合。根据决

策者之间是否存在合作关系,微分博弈可进一步分为合作微分博弈与非合作微分博弈。前者需要决策者之间合作协商,共同优化一个统一的目标函数;后者则由各决策者独立优化自己的控制策略,以最大化自身收益,常见于多智能体竞速或追逃问题<sup>[28]</sup>。在非合作避让场景中,eVTOL 航空器之间缺乏通信与协作机制,且各自的优化目标具有一定的竞争性(如争夺优先通行权),因此采用非合作微分博弈框架进行建模。

非合作微分博弈问题本质上是单机最优控制问题在多机场景下的扩展<sup>[29-30]</sup>。在此框架系下,每架航空器  $i(i=1,2,\dots,N)$  均希望通过寻求最优策略  $U_i^*$ ,即未来一段时间的控制输入,使得自身的代价函数  $J_i$  取得极小值。代价函数和约束条件的设计决定了航空器的行为模式,如航空器  $i$  采用式(6)所示的带间隔约束最优控制模型,则表明该航空器具备避让意图;若航空器  $i$  采用(7)所示的单机航迹跟踪模型,则表明该航空器不具备避让意图,仅以跟踪参考航迹快速飞往目的地为目标。由于在冲突场景中,航空器  $i$  的状态变化不仅取决于其自身状态与控制策略,还受到其他航空器控制策略的影响——后者引起的空间位置变化会重构空域资源分布,从而带来潜在的碰撞风险,因此形成了相互耦合的非合作微分博弈。基于非合作微分博弈构建的模型,可用于解释多架 eVTOL 航空器在冲突场景中的避让或抢行决策。

求解非合作微分博弈问题的关键在于寻找所有航空器的纳什均衡策略集合  $U_i^*, i=1,\dots,N$ 。在该策略集合下,任意一架航空器均无法通过单方面调整自身策略来获得更低的代价函数值,即所有航空器在当前冲突情境中均做出了对自身最优的响应,此时系统达到稳定的博弈均衡状态。其数学表达式为

$$J_i(U_i^*, U_{-i}^*) \leq J_i(U_i, U_{-i}^*) \quad i=1,\dots,N \quad (8)$$

式中: $U_{-i}^*$ 为除航空器  $i$  以外其他所有航空器的最优控制策略集合。

由于各航空器的状态演化不仅取决于自身控制输入,还受到其他航空器控制输入的影响,因此其 Hamilton-Jacobi-Bellman (HJB) 方程彼此耦合。为求得非合作微分博弈的纳什均衡策略组合,需联立求解由所有航空器 HJB 方程构成的耦合偏微分方程组。然而,在高维系统中,该方程组的求解计算复杂度极高,难以直接应用于实际场景。对此,第 2.3 节中提出了一种基于迭代最优响应(Iterative Best Response, IBR)算法的求解方法,用以逼近该微分

博弈问题的纳什均衡解。

## 2 求解方法

为提高飞行安全裕度,应用 MPC 方法,采取“预测-优化-执行-更新”的滚动机制,在每个采样时刻,预测航空器未来一段时间的状态轨迹,并求解有限时域  $T$  内的最优控制序列  $U_i^*$ ,仅执行该序列的首项控制量。该方法有助于提前探测潜在冲突,实现前瞻性的避让决策与控制。进一步地,为减轻在线计算负担,引入基于事件触发机制的优化控制策略,仅在系统状态满足特定触发条件时启动优化控制计算。本文构建的 eVTOL 自主避让决策与控制流程包含航迹预测、冲突检测及优化控制等环节,具体步骤为:①在每一离散时刻  $t$ ,航空器  $i$  通过传感器获取自身状态变量  $x_i(t)$  与上一时刻控制输入  $u_i(t-1)$ ,并通过探测设备采集周边其他航空器的状态变量  $x_{-i}(t)$ ,根据历史观测记录计算其控制输入  $u_{-i}(t-1)$ ;②使用航迹预测算法求解所有航空器未来  $T$  步的四维航迹;③基于预测航迹检测事件  $A$ (飞行冲突)与事件  $B$ (航迹偏离)是否发生;④若  $A$  发生,则触发非合作博弈优化机制,以“避免冲突+平稳机动+快速恢复航迹”为目标优化当前控制输入;若  $A$  不发生且  $B$  发生,则触发单机航迹跟踪优化机制,以“平稳机动+快速恢复航迹”为目标优化当前控制输入;若  $A$ 、 $B$  均不发生,则不改变控制输入,即维持当前速度、航向角与俯仰角不变;⑤执行优化(或未优化)的控制输入,系统进入到下一时刻,重复上述步骤直至航空器  $i$  到达目标点。基于事件触发 MPC 的避让决策与控制流程如图 1 所示。

### 2.1 航迹预测算法

基于当前可观测到的变量状态与历史控制输入,采用式(1)运动学公式计算航空器  $i$  及周边其他航空器  $-i$  未来  $T$  步的航迹位置,计算过程中假设控制输入不变,始终等于上一时刻该航空器的控制输入,航迹预测流程如图 2 所示。

### 2.2 事件 A、B 触发逻辑

将事件  $A$ “飞行冲突”的触发逻辑定义为:在预测时间范围内,任意时刻 2 架航空器之间的相对距离小于设定的最低安全间隔,则视为发生飞行冲突事件,具体为

$$d_{ij}(n) < d_0 \quad j \neq i, n=1,\dots,T \quad (9)$$

将事件  $B$ “航迹偏离”的触发逻辑定义为:在预测时间范围的任意时刻内,若航空器预测航迹点  $P_i(n)$  与其参考航迹点  $P_{i,0}(n)$  之间的偏离距离超过

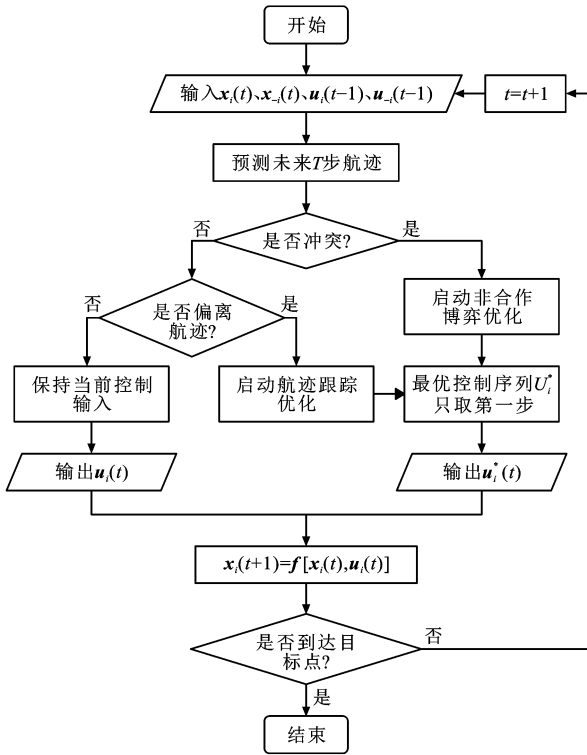


图1 基于事件触发 MPC 的避让决策与控制流程

Fig. 1 Avoidance decision and control process based on event-triggered MPC

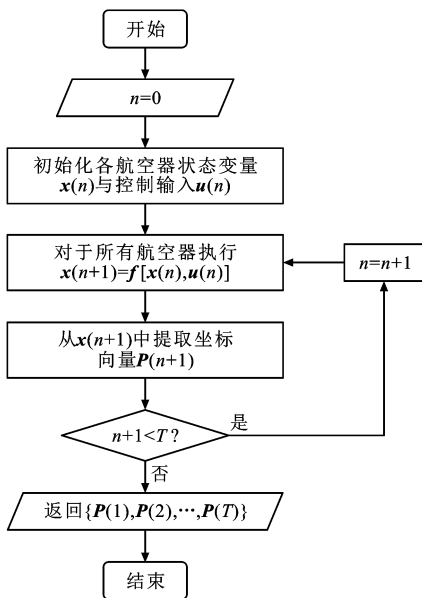


图2 航迹预测流程

Fig. 2 Trajectory prediction process

既定阈值  $\delta$ , 则视为发生航迹偏离事件, 具体为

$$\|P_i(n) - P_{i,0}(n)\|_2 \geq \delta \quad n = 1, \dots, T \quad (10)$$

### 2.3 基于 IBR 的非合作微分博弈求解算法

在第 1.3 节中, 基于非合作微分博弈理论建立了多架 eVTOL 航空器在冲突场景下的决策模型。然而, 在连续且较长时域内求解该问题通常

面临计算复杂度 high、响应速度慢等困难, 难以满足实际应用中的实时性需求。为提高算法的在线求解效率, 采用离散时间框架与 MPC 思想, 提出一种非合作滚动时域博弈求解方法<sup>[31]</sup>, 其具体计算流程如图 3 所示。该方法通过将决策时域划分为多个有限长度的滚动优化窗口, 在每个窗口内局部优化当前控制输入, 逐步推进避让过程, 从而将原本需要一次性统一规划完整避让航迹的高维非合作博弈问题, 转化为一系列可在线求解的有限维最优响应子问题。在每一滚动窗口内, 各航空器根据当前状态及对未来行为的预测, 独立优化自身控制策略, 并采用 IBR 算法搜索局部纳什均衡解。该方法在保持解的博弈合理性的同时, 可显著提升计算收敛性与在线求解效率。

IBR 是一种分布式博弈求解算法, 用于寻找多智能体系统的纳什均衡。其核心是通过交替迭代优化每个智能体的策略: 在每一轮迭代中, 固定其他智能体的策略, 仅优化当前智能体的最优响应, 直至所有智能体的策略收敛。该算法将耦合的博弈问题分解为单智能体优化问题, 显著降低计算复杂度, 且适用于分布式实时控制系统。本文采用基于 IBR 的纳什均衡逼近方法求解多机决策问题的均衡策略集合, 算法流程如下。

#### 步骤 1: 初始化

根据航迹预测与冲突探测结果, 提取航空器  $i$  周边所有航空器集合  $I$ 。将所有航空器的初始策略  $U_{m=0}^*$  设定为上一时刻控制输入在未来  $T$  个时刻的重复序列。其中,  $m$  为迭代次数;  $T$  为 IBR 博弈算法的优化步长, 决定了需要优化的控制序列长度, 本文设定其与预测步长相同。

#### 步骤 2: 开始迭代

对于每一轮迭代, 依次执行以下步骤:

步骤 2-1: 固定集合  $I$  中所有航空器策略, 根据式 (11) 所示带间隔约束的最优控制模型, 计算航空器  $i$  的最优策略, 并根据式 (1) 更新预测航迹/状态

$$U_{i,m}^* = \arg \min_{U_i} [J_i(X_{i,m-1}, U_{i,m-1}^*, U_{I,m-1}^*)] \quad (11)$$

式中:  $U_{i,m}^*$  为航空器  $i$  在第  $m$  次迭代中的最优策略;  $X_{i,m-1}$  为本机在上一次迭代后的更新状态序列;  $U_{i,m-1}^*$  和  $U_{I,m-1}^*$  分别为本机和其他航空器在上一次迭代中的优化控制序列;  $J_i(\cdot)$  为代价函数, 包括累计运行代价与终端代价两部分[式 (2)]。

$J_i(\cdot)$  中的运行代价  $L_i$  由航空器  $i$  的预测航迹、4D 参考航迹、控制输入、其他航空器的预测航迹

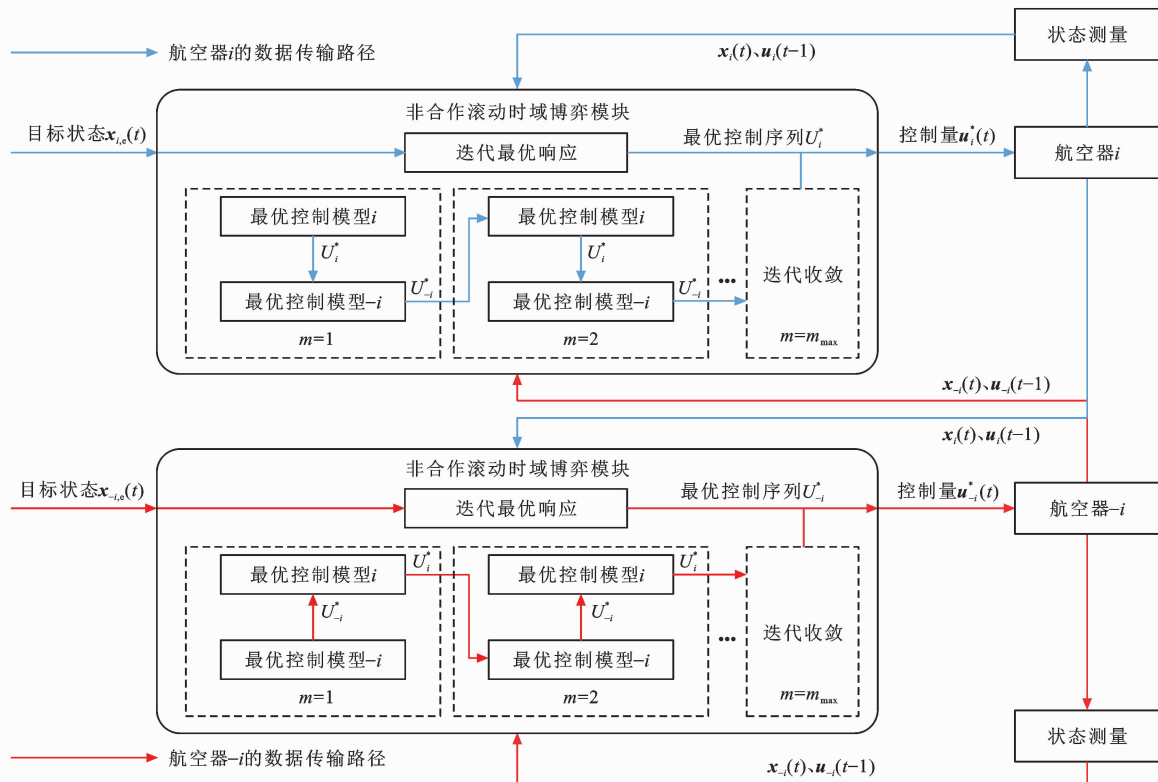


图 3 非合作滚动时域博弈流程

Fig. 3 Game process of noncooperative receding horizon

共同决定,以及终端代价  $\phi_i$  由航空器  $i$  在  $T$  时刻的预测航迹点与参考航迹点[即目标点,见图 4(a)]的偏差决定。

步骤 2-2:固定航空器  $i$  策略,依次推演集合  $I$  中所有航空器的控制输入并更新其预测航迹。需要注意的是,该过程完全由航空器  $i$  独立完成,而非由各航空器分别执行。由于航空器  $i$  无法获取其他航空器的真实目标点,将每架航空器预测航迹的末端位置视为其目标点,据此完成对其行为的推演与最优响应计算,见图 4(b)、(c)。

步骤 2-3:收敛判断。若前后 2 次迭代中航空器  $i$  的策略变化量小于给定阈值  $c$  (式(12))或迭代次

数达到最大迭代次数  $m_{max}$ ,终止迭代。具体为

$$\|U_{i,m}^* - U_{i,m-1}^*\|_2 < c \quad (12)$$

步骤 3:控制执行

输出收敛后的最优控制序列  $U_{i,m}^*$  首项  $u_i^*(0)$ ,作为当前时刻的控制输入  $u_i(t)$ ,执行  $u_i(t)$  并更新系统状态,进入下一时域。IBR 算法流程见图 5。

### 2.4 无冲突条件下单机航迹跟踪优化算法

当系统检测到未来  $T$  步不存在冲突风险,且航空器  $i$  的预测航迹偏离参考航迹时,启动单机航迹跟踪优化。基于第 1.2.2 节构建的单机航迹跟踪模型,计算离散时域  $\{0, 1, \dots, T-1\}$  内的最优控制序列  $U_i^*$ 。该算法同样遵循 MPC 的滚动时域原则,仅

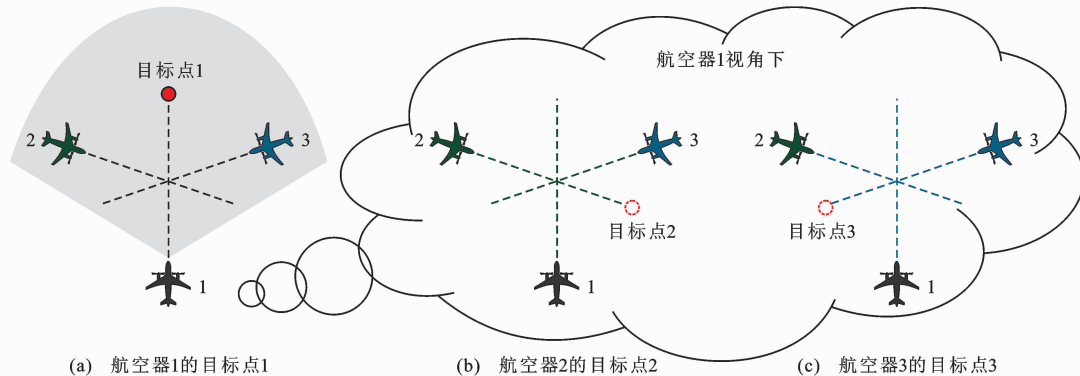


图 4 eVTOL 航空器目标点

Fig. 4 eVTOL aircraft target points

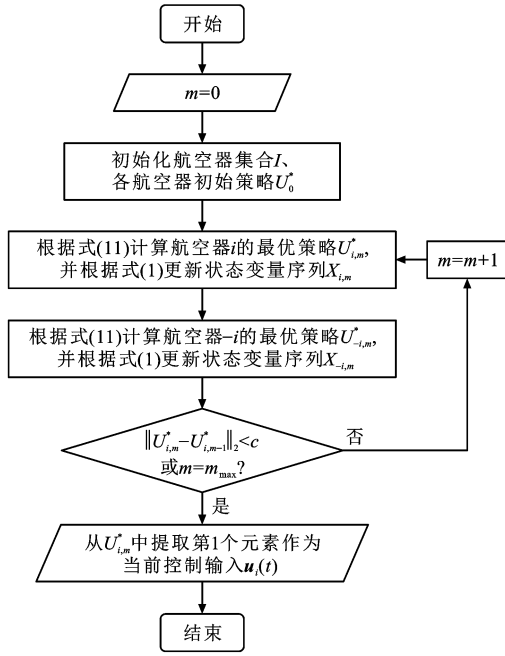


图5 IBR算法流程

Fig. 5 Algorithm process of IBR

采用序列首项  $u_i^*(0)$  作为当前时刻的控制输入  $u_i(t)$ , 执行并进入下一时域。

### 3 仿真试验

为验证前文所述模型与算法的有效性, 基于 MATLAB R2024b 平台搭建了三维空间 eVTOL 飞行仿真环境。以双机冲突问题为例, 分别测试了算法在双机对向飞行、同向超越与交叉相遇场景下的避让效果。仿真试验在配置 AMD Ryzen 9 7940H w/ Radeon 780M Graphics 处理器 (4.00 GHz) 的计算平台上进行。参考亿航 EH216-S 型号 eVTOL 设定仿真参数, 此外考虑到乘客舒适度, 对机动调整量进行限定: 设置加速度不超过  $1g$ ; 航向角速率不超过  $30^\circ \cdot s^{-1}$ ; 俯仰角速率不超过  $10^\circ \cdot s^{-1}$ , 详细参数设置详见表 1。

为定量评估 eVTOL 的航空器避让效果, 从安全性、实时性、高效性以及舒适性等方面设计评价指标, 见表 2。其中, 双机间隔是衡量避让策略是否安全的核心指标, 理论上需大于规定的最低安全间隔  $d_0$ ; 计算时间用于评价第 2.3 节与第 2.4 节中优化算法的响应速度, 分为博弈优化时间与跟踪优化时间; 避让时间用于衡量控制策略的冲突解脱效率; 最大横向偏移距离用于评价避让策略的瞬时机动强度, 偏移量越大表明避让策略越激进, 可能由于航空器突然转向、减速而导致乘客舒适度下降。最大横向偏移距离  $\Delta L$  的计算公式为

表1 仿真参数设置

Table 1 Simulation parameter settings

参数	取值
时间步长 $\Delta t / s$	1
预测与优化步数 $T$	5
最低安全间隔 $d_0 / m$	100
航迹偏离阈值 $\delta / m$	1
迭代收敛阈值 $c$	$1.0 \times 10^{-4}$
飞行高度范围 $(z_{\min}, z_{\max}) / m$	(200, 600)
水平速度范围 $(v_{\min}^{XY}, v_{\max}^{XY}) / (m \cdot s^{-1})$	(0, 36.1)
垂直速度范围 $(v_{\min}^Z, v_{\max}^Z) / (m \cdot s^{-1})$	(0, 10)
航向角范围 $(\Psi_{\min}, \Psi_{\max}) / rad$	$(-\pi, \pi)$
俯仰角范围 $(\theta_{\min}, \theta_{\max}) / rad$	$(-\pi/6, \pi/6)$
加速度范围 $(a_{\min}, a_{\max}) / (m \cdot s^{-2})$	$(-10, 10)$
航向角速率范围 $(\omega_{\min}, \omega_{\max}) / (rad \cdot s^{-1})$	$(-\pi/6, \pi/6)$
俯仰角速率范围 $(\alpha_{\min}, \alpha_{\max}) / (rad \cdot s^{-1})$	$(-\pi/18, \pi/18)$
代价项权重系数 $\omega_1 \sim \omega_5$	$1, 10^2, 10^4, 10^6, 10^8, 1$

注: 表中参数值范围可根据实际情况调整。

$$\Delta L = \max(d(n)) \quad (13)$$

式中:  $d(n)$  为第  $n$  时刻航迹点到参考航迹的垂直距离。

表2 避让效果评价指标

Table 2 Evaluation metrics of avoidance performance

指标	含义
双机间隔/m	任意两架 eVTOL 在三维空间中的欧氏距离
计算时间/s	单时间步内, 从开始求解博弈/跟踪优化问题到求解器返回最优控制输入所用的时间
避让时间/s	从系统首次检测到冲突开始, 到冲突完全解除为止所经历的时间
最大横向偏移距离/m	实际航迹相对于参考航迹的偏离程度

#### 3.1 双机对向飞行

在双机对向飞行场景中, 通过设置 4 组对照试验, 讨论本机 (eVTOL1) 在对入侵机 (eVTOL2) 的避让意图存在不同判断时, 其避让策略的差异。通过调整代价函数中的冲突权重系数  $\omega_5$ , 模拟本机对入侵机意图的不同预判: 当设置  $\omega_5 = 0$  时, 表示本机认为入侵机不具备主动避让意图。令本机起点为 (1 000, 2 000, 400) m, 以  $27.8 m \cdot s^{-1}$  的水平速度匀速向 OX 轴正方向飞行; 入侵机起点为 (3 000, 2 000, 400) m, 以同样的水平速度匀速向 OX 轴负方向飞行; 二者将在 (2 000, 2 000, 400) m 处发生对向相遇。4 组试验设置如下。

试验 1: 本机认为入侵机具备避让意图, 入侵机

实际执行避让。

试验 2:本机认为入侵机具备避让意图,入侵机实际未执行避让。

试验 3:本机认为入侵机不具备避让意图,入侵机实际执行避让。

试验 4:本机认为入侵机不具备避让意图,入侵机实际未执行避让。

图 6 为试验 1 中双机轨迹与控制输入变化曲线,可以看出:2 架航空器从各自起点正对飞行,检测到潜在冲突后,二者均通过减速与右转实现主动避让,并在脱离碰撞风险后加速回归各自的参考航迹。图 6(a)为双机轨迹的平面俯视曲线,其中每隔 5 s 绘制一个航迹点,航迹点越密集表示该时段飞行

速度越小。图 6(b)、(c)分别为双机的加速度和航向角速率变化曲线,可以看出:双机在飞行约 20 s 后开始减速,并于约 113 s 时开始加速与转向,执行明显的右转机动,随后逐渐左转回归原始航迹。图 6(d)为双机的俯仰角速率变化曲线,可以看出:俯仰角速率变化幅度较小,飞行高度基本保持稳定,因此图 6(a)仅绘制了平面俯视轨迹,以突出平面内的避让行为。需要指出的是,调向与调高度的避障策略可以通过调整控制输入中相关权重系数实现。在对向冲突场景中,为避免大幅度的俯仰操作对乘客乘坐体验造成影响,避障控制策略优先采用调向方式。后文将进一步对比分析调速、调向与调高度等不同避障策略对避让效果的影响。

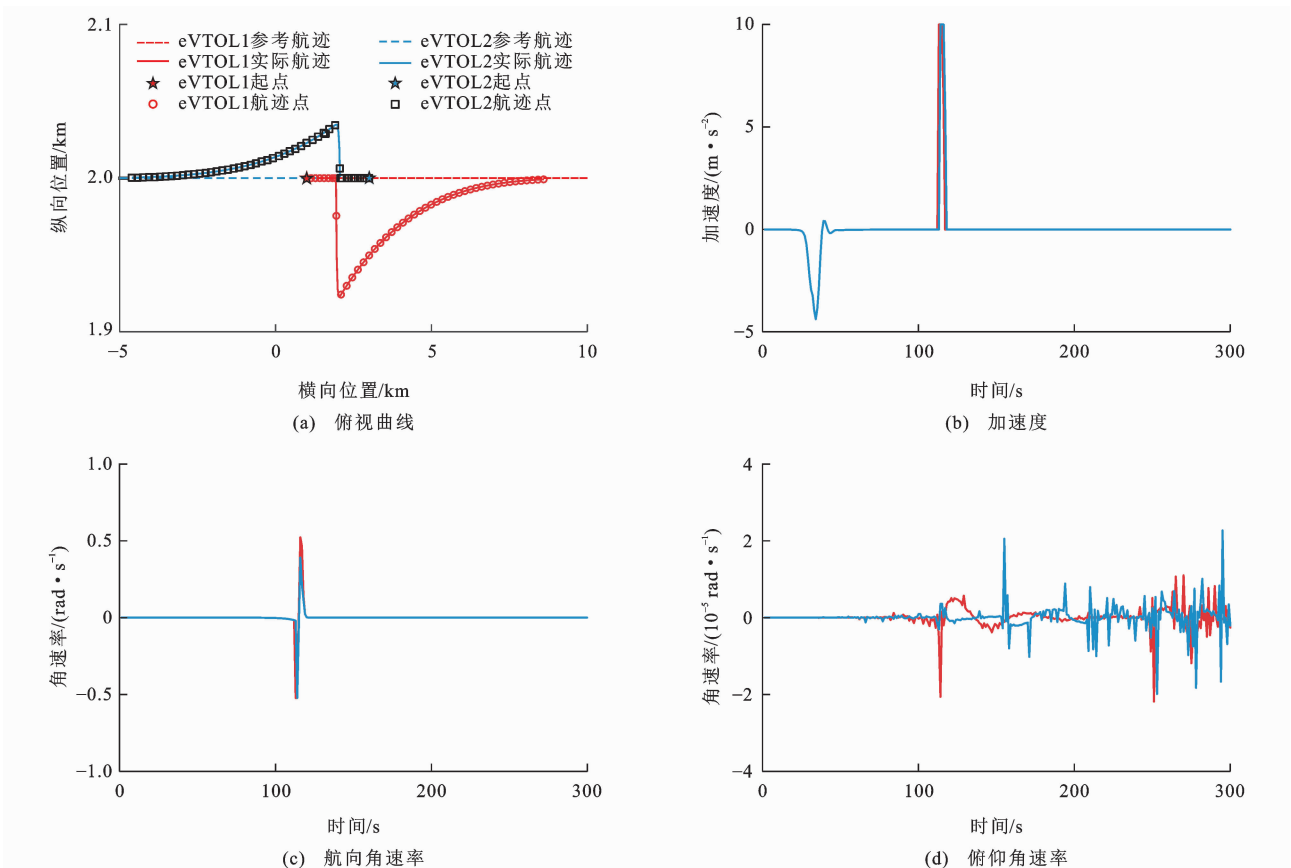


图 6 试验 1 中双机轨迹与控制输入变化曲线(对向相遇)

Fig. 6 Variation curves of trajectories and control inputs of two aircrafts in experiment 1 (head-on encounter)

图 7 和表 3 对比了 4 组试验最终的避让效果,可以看出:在试验 1 和 3 中,由于双方均具备避让意图,在探测到前方存在碰撞风险后,两机几乎同时采取了减速、观测与转向的避让策略,因此整体避让过程较为平稳且缓慢,且最大横向偏移距离小于安全间隔 100 m(见表 3);在试验 2、4 中,本机面对未采取避让措施的入侵机,需要执行更剧烈的转向机动以避免碰撞,因此避让动作更为急迫和明显,对应的

最大偏移量也相对更大。对比试验 1、3 可以看出:在试验 1 中,由于本机预期入侵机会主动避让,避让机动时间反而更晚,避让持续时间更长,这是因为双方在初始减速后出现了短暂的“观望期”——即双方均在等待对方优先转向,认为自己可以保持航向不动,这种僵持状况导致最终实际避让动作的启动时间推迟,直到航迹偏差代价积累到一定程度后才被打破;在试验 3 中,由于本机认为对方不具备避让意

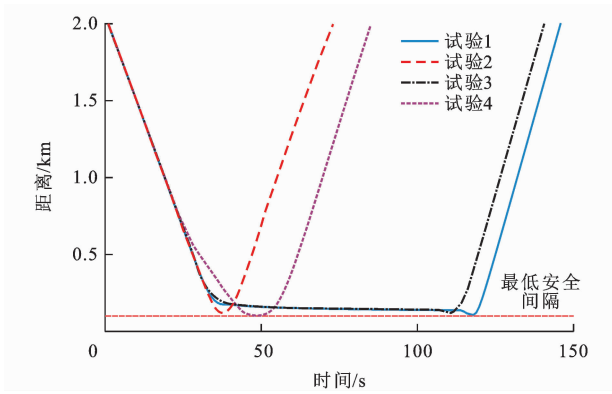


图7 双机间隔曲线(对向相遇)

Fig. 7 Curves of separation distance between two aircrafts (head-on encounter)

表3 试验1~4避让效果对比(对向相遇)

Table 3 Comparison of avoidance performances in experiments 1-4 (head-on encounter)

试验	避让时间/s	最大横向偏移距离/m	平均博弈优化时间/s	平均跟踪优化时间/s
1	113	77.04	0.28	0.03
2	35	134.27	0.24	0.03
3	107	63.46	0.29	0.03
4	50	112.76	0.13	0.03

图,因此提前做出避让决策,转向动作更早,避让过程也更为主动和平滑。对比试验2、3可以看出:在试验2中,由于本机误判入侵机具备避让意图,而对方实际上未做任何避让动作,导致本机在躲避过程中必须迅速大角度转向,形成最激烈的避让轨迹;相比之下,试验4虽然入侵机同样没有主动避让,但由于本机在策略上已有准备,避让动作启动及时,因此转向幅度相对较小,避让过程更具预期性。

图8为本机在每一时间步的控制策略计算时间曲线,可以看出:以试验1为例,本机自第20个时间步开始检测到潜在冲突并触发博弈优化,直到第134个时间步完成避让后停止计算,转而进行航迹跟踪优化;避让期间的计算时间保持在较低水平,博弈优化的平均计算时间小于0.3s(见表3),最大计算时间不超过0.8s;非避让阶段的航迹跟踪优化平均时间仅为0.03s,体现了算法良好的实时性。

### 3.2 双机同向超越

在双机同向超越场景中,令本机起点为(1 000, 2 000, 400) m,以 $27.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的水平速度匀速飞行;入侵机起点为(2 000, 2 000, 400) m,即位于本机前方1 000 m处,以 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的水平速度沿相同方向匀速飞行;本机处于追赶入侵机的飞行状态,随着距离逐渐缩短,双机存在碰撞风险。

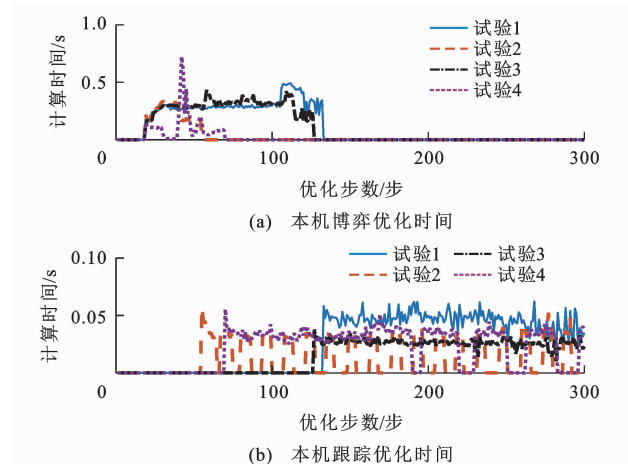


图8 控制策略计算时间(对向相遇)

Fig. 8 Computational time for control strategy (head-on encounter)

图9为两架eVTOL航空器均采用避让策略时的航迹与控制输入变化曲线,从本机(后机)的视角可以看出:在探测到前方的慢速eVTOL2后,eVTOL1首先减速以拉开纵向距离,此阶段航向保持不变;约在50s时,两机间距缩小至100m左右,并在该间距下保持匀速跟飞一段时间;随后,本机开始加速并向右侧偏航实施超越;约在90s时完成超越操作,随后向左调整航向,逐步回归原参考航迹。从入侵机(前机)的视角可以看出:eVTOL2在发现后方的eVTOL1以更高速度接近后,最初通过加速尝试拉开间距;当两机间距缩小至100m左右后,进入同速、同向飞行阶段;此后,后机开始向右超越机动,eVTOL2主动减速并向左侧规避,为后机提供超越空间;在确认后机完成超越后,再次加速并向右调整航向,回到原始航迹。

图10和表4对比了4组试验在同向超越场景下的避让效果,可以看出:4组试验的避让完成时间均稳定在111s左右,表明不同避让策略对整体超越时长影响较小(见表4);试验1、3在100s附近出现双机间隔突变,这是由于入侵机在主机加速超越阶段采取了减速与反向避让策略,导致两机间距迅速增加(70~100s),避让后入侵机加速返回参考航迹,两机间隔增速变缓(100s后);与第3.1节中对向冲突场景的结论相似,试验1、3中主机的最大横向偏移距离显著大于试验2、4,表明当入侵机不主动避让时,主机需执行更大角度的转向机动以确保安全。进一步对比发现:试验1的偏移距离略大于试验3,说明主机在预判入侵机无避让意图时,会提前采取主动避让机动,转向动作更早、幅度相对较小;试验2的偏移距离小于试验4,这是因为试验2中主机默认入侵机会协同避让,因此仅需小幅调整航迹;而

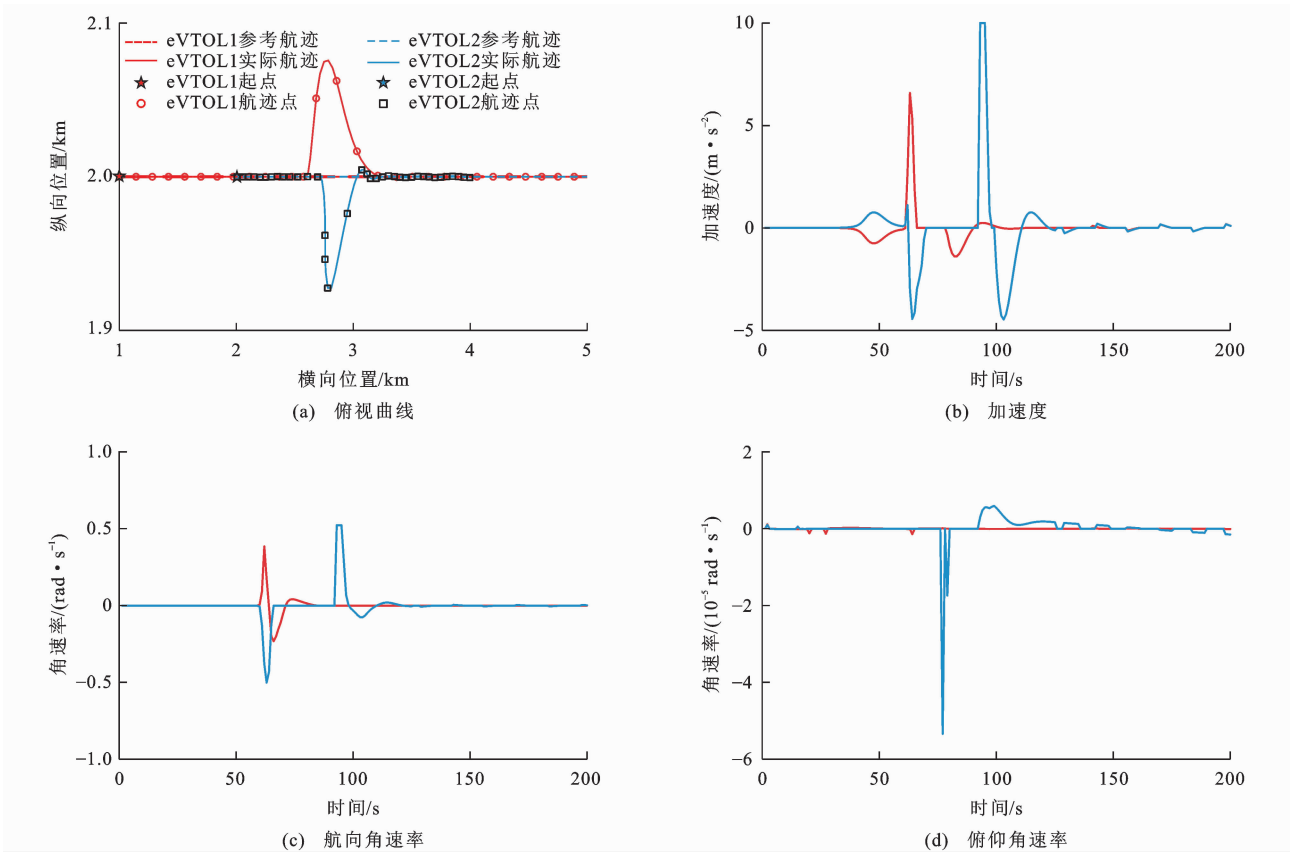


图 9 试验 1 中双机轨迹与控制输入变化曲线(同向相遇)

Fig. 9 Variation curves of trajectories and control inputs of two aircraft in experiment 1 (overtaking encounter)

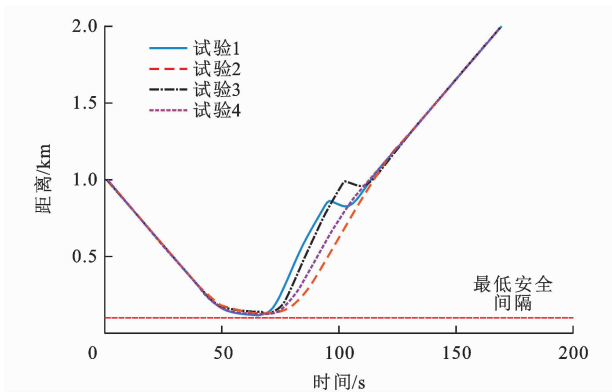


图 10 双机间隔曲线(同向相遇)

Fig. 10 Curves of separation distance between two aircraft (overtaking encounter)

表 4 试验 1~4 避让效果对比(同向相遇)

Table 4 Comparison of avoidance performances in experiments 1-4 (overtaking encounter)

试验	避让时间/s	最大横向偏移距离/m	平均博弈优化时间/s	平均跟踪优化时间/s
1	111	75.72	0.19	0.03
2	111	121.81	0.18	0.03
3	112	72.11	0.17	0.03
4	111	132.71	0.08	0.03

试验 4 中主机因判定入侵机无避让意图,采取了更保守的避让策略,主动增加横向偏移量。图 11 为同向超越场景下各 eVTOL 的控制策略计算时间,可以看出:平均博弈优化时间低于 0.2 s,且跟踪优化时间仍维持在较低水平,验证了算法的实时性。

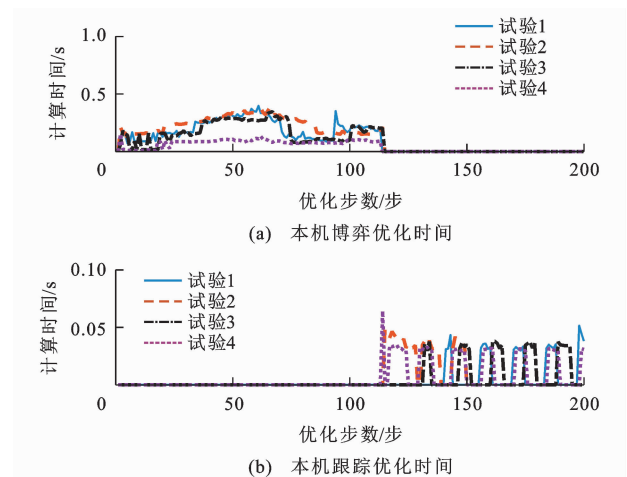


图 11 控制策略计算时间(同向相遇)

Fig. 11 Computational time of control strategy (overtaking encounter)

### 3.3 双机交叉相遇

根据第 3.1 节与第 3.2 节试验结果,在双机均进行避让的情况下,试验 3 与试验 1 相比具备避让

时间快、偏移距离小等优势,因此采用该决策方式进行双机交叉相遇场景下的避让试验,即本机认为入侵机不具备避让意图。在该场景中,通过设计调速、调向、调高度等 7 组对比试验,分析不同控制策略下的避让结果差异。令本机起点为(1 000,2 000,400) m,以  $27.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的水平速度沿  $OX$  轴正方向匀速飞行;入侵机起点为(2 000,1 000,400)m,以相同速度沿  $OY$  轴正方向匀速飞行;二者预计将在(2 000,2 000,400)m 的中心位置交叉相遇。

不同控制策略下的避让效果对比见表 5。

表 5 不同控制策略下的避让效果对比

Table 5 Comparison of avoidance performances under different control strategies

控制策略	双机最小间隔/m	避让时间/s	最大横向偏移距离/m	平均博弈优化时间/s
调速	82.52	15	0.00	0.08
调向	76.34	45	788.47	0.14
调高度	77.60	6	99.06	0.14
调速+调向	95.58	13	182.02	0.17
调速+调高度	104.71	10	66.22	0.19
调向+调高度	107.20	14	192.80	0.23
调速+调向+调高度	119.78	8	27.12	0.22

图 12(a)、13(a)、14(a)为单一控制策略下的双机避让轨迹与控制输入变化曲线,结合表 5 可以看出:在单一调速策略下[见图 12(a)],双机首先减速观察,然后 eVTOL2 加速通过,eVTOL1 等待其通过后再加速同行,该策略避让效率相对较高,仅用时 15 s,且未发生航迹偏移,然而避让过程中双机的最小间隔超过了预设的最低安全间隔限制;在单一调向策略下[见图 13(a)],双机分别向左、右方向进行避让,飞行轨迹呈现持续向前的振荡曲线,随后,eVTOL1 执行大角度左转机动,为 eVTOL2 让行使其得以返回参考航迹,eVTOL1 自身则完成一周转向后返回其参考航迹,此策略下的避让时间长达 45 s,航迹最大偏移量高达 788.47 m,显著高于其他策略;在单一调高度策略下[见图 14(a)],基于“对方不会避让”的假设,双机初始阶段均采用爬升动作进行避让,之后其中一方主动下降,通过形成高度差成功规避碰撞,该策略的避让时间为所有策略中最短,仅需 6 s。综上:无论采用何种单一控制策略,均无法满足保持最低安全间隔的要求,但在紧急情况下可实现快速避撞;另外,调高度的避让效率最高,调向的避让效率最低,调速的安全性最高,且操作简单不产生航迹偏移。

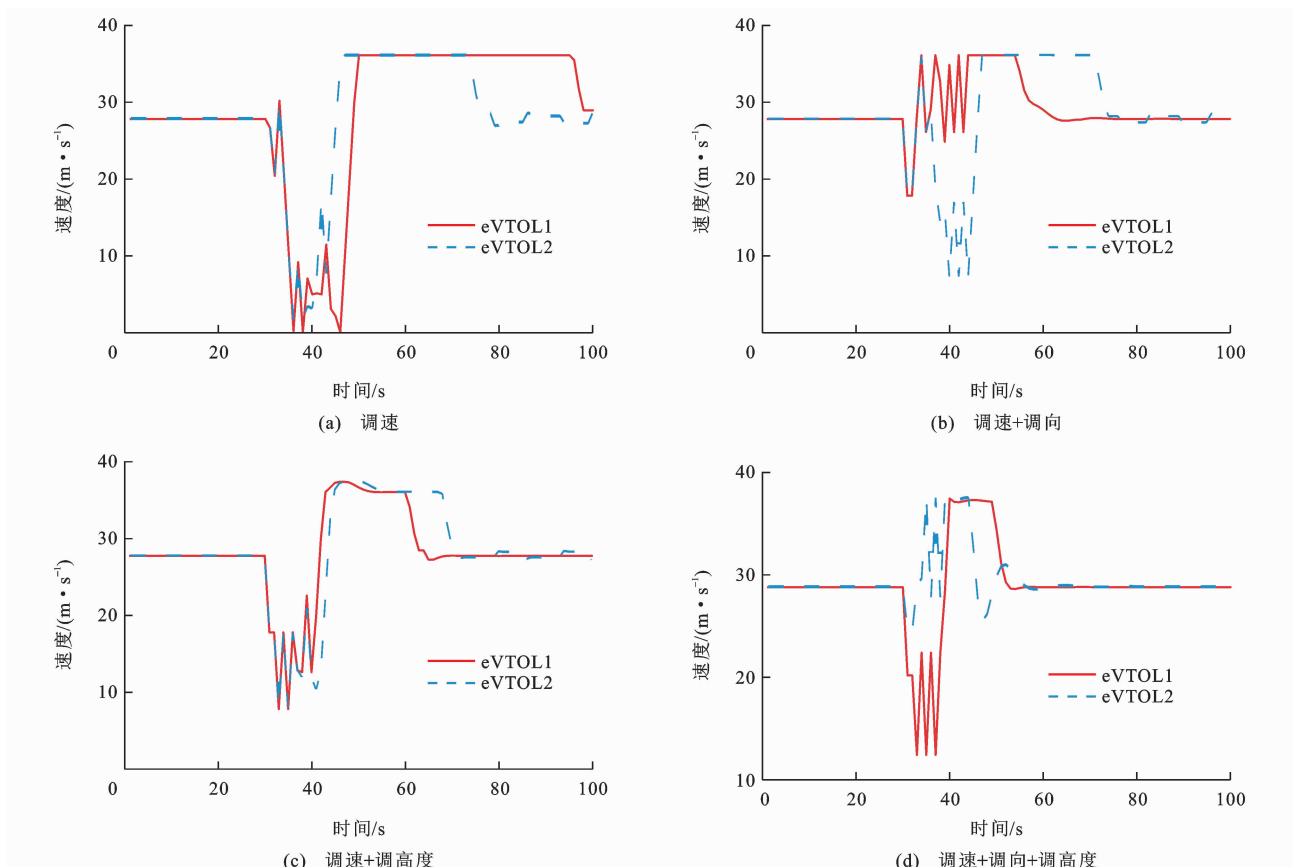


图 12 速度-时间变化曲线

Fig. 12 Variation curves of speed-time

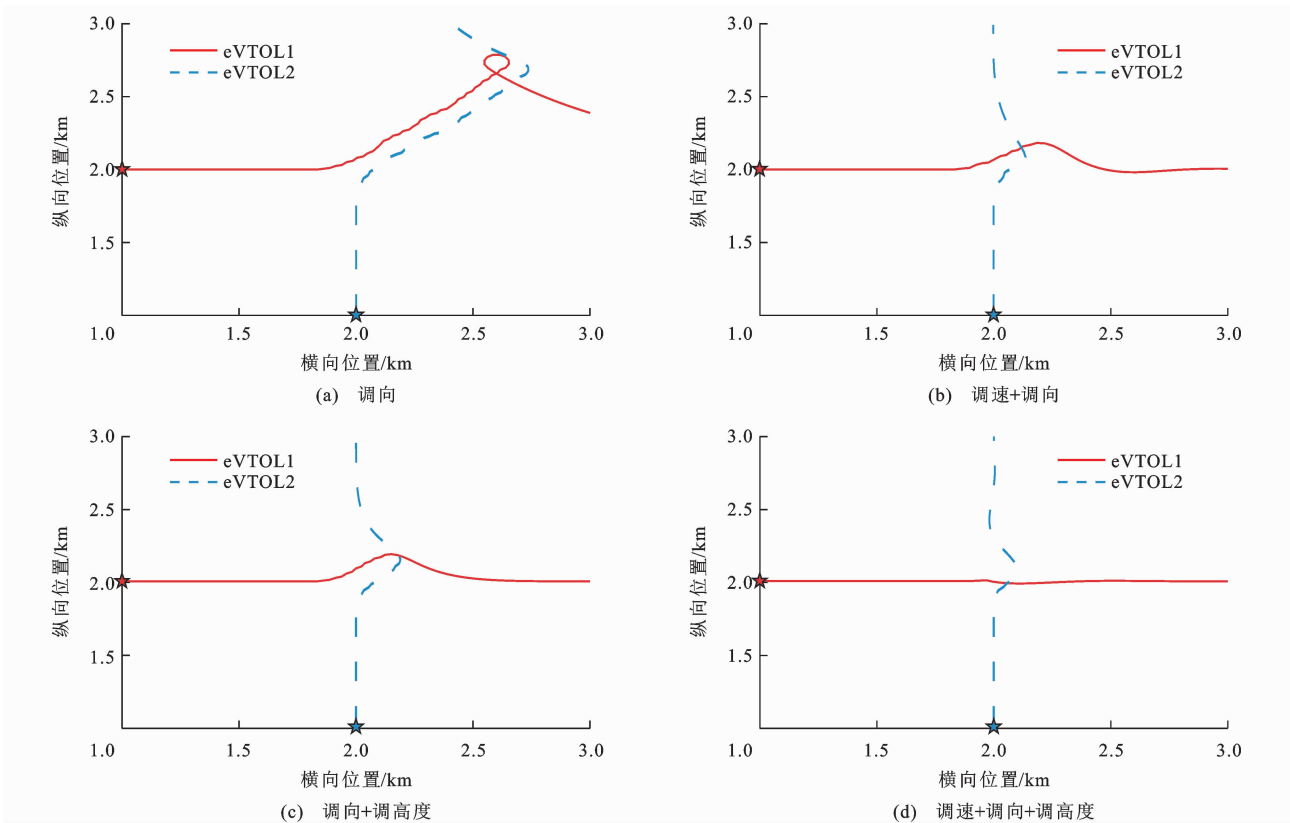


图 13 水平航迹变化曲线

Fig. 13 Variation curves of horizontal trajectory

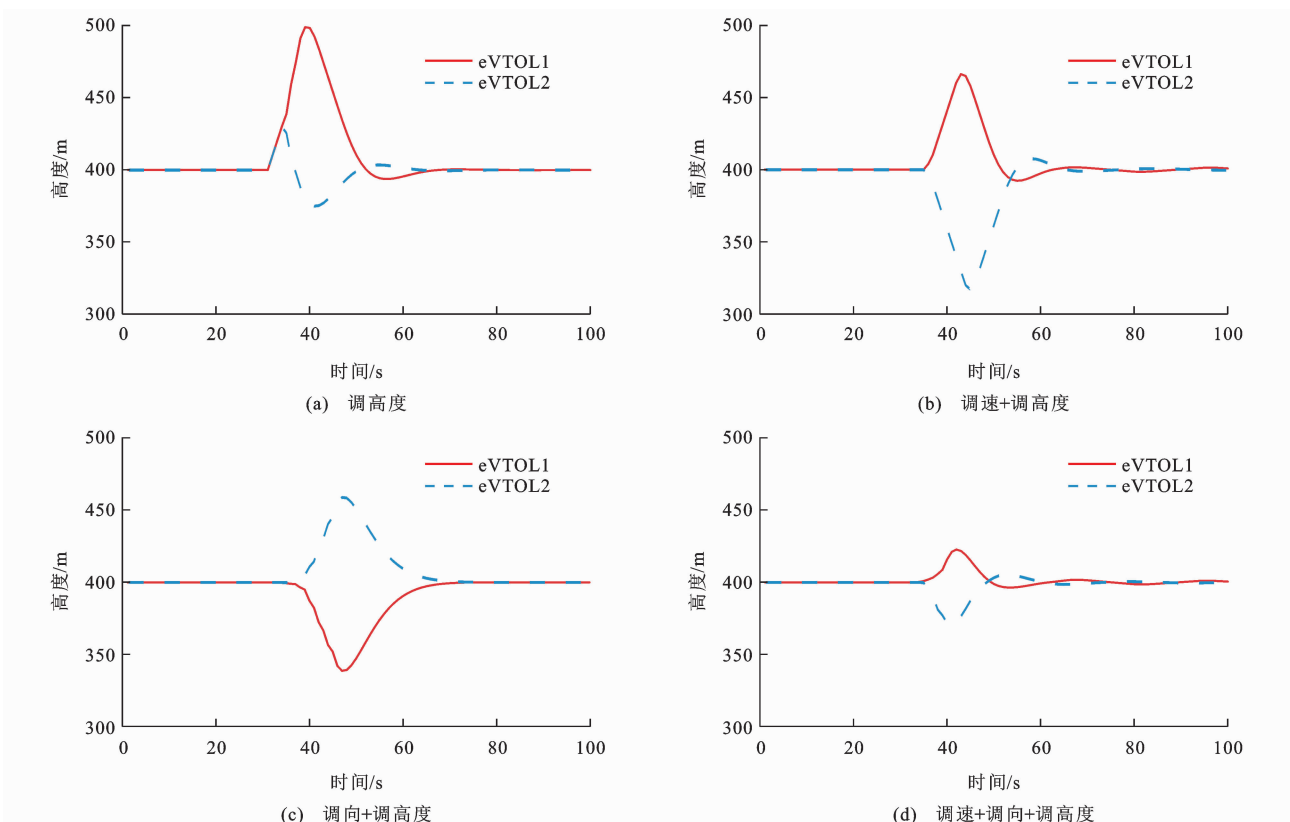


图 14 高度-时间变化曲线

Fig. 14 Variation curves of altitude-time

图 12(b)、12(c)、13(b)、13(c)、14(b)、14(c) 为双控制策略下的双机避让轨迹与控制输入变化曲线,结合表 5 可以看出:在“调速+调向”策略下,双机首先在交汇路口减速观察,随后 eVTOL1 加速向左机动,eVTOL2 减速向右机动,最终由 eVTOL1 抢先通过路口,与单一调速或调向策略相比,该组合策略显著提升了避让效果,双机最小间隔仅低于设定的最低安全间隔 4.42 m,避让效率与安全性均优于单一策略(见表 5);在“调速+调高度”策略下,与仅调高度相比双机在避让初期增加了减速过程,为双方提供了更长的观察与决策时间,有效避免了同时爬升情况,显著提升了安全性,然而减速环节也导致其避让时间略高于不减速直接进行高度调整[见图 14(a)]的用时;在“调向+调高度”策略下,eVTOL1 向左下方机动避让,eVTOL2 则向右上方机动避让,斜向避让轨迹有效扩大了避让空间,使得最小间隔显著提高,此外其避让时间和最大偏移量远优于单一调向策略,但略逊于单一调高度策略。综上:双控制策略的整体表现显著优于单一控制策略;在安全性方面,“调向+调高度”策略表现最优(间隔最大),但其代价是航迹偏移量显著增加;在避让效率与偏移距离方面,“调速+调高度”策略优于其余 2 个策略组合。

图 12(d)、13(d)、14(d)为“调速+调向+调高度”控制策略组合下的双机避让轨迹与控制输入变化曲线,结合表 5 可以看出:在避让初始阶段,双机同步减速进入观察状态;随后,eVTOL2 率先实施加速机动,向右下方运动,优先从 eVTOL1 右前方穿越;与此同时,eVTOL1 执行减速并协同向左上方机动,为 eVTOL2 预留出足够的通行空间;待 eVTOL2 通过后,eVTOL1 随即加速返回参考航迹。在安全性方面,该策略的最小间隔达 119.78 m,较最优单策略提升 45%,较最优双策略提升 12%,安全裕度最高;在避让效率方面,该策略避让耗时 8 s,较单一调高度策略仅增加 2 s,原因是调向操作耗时显著高于调高度;在航迹偏移方面,该策略显著缩短了航迹的水平与垂直调整量,具体表现为图 13(d)中的水平轨迹较图 13(a)~(c)更平缓,图 14(d)中的高度变化幅度较图 14(a)~(c)更低,最大偏移距离仅 27.12 m,较“调向+调高度”降低 86%;在计算效率方面,该策略的计算复杂度最高,单次计算平均耗时 0.22 s,但仍在实时性允许范围内。综上,“调速+调向+调高度”组合控制策略在安全性、高效性与舒适性方面的性能,较其他 6 种策略的平均性能分

别提高了 31.63%、53.40%和 87.77%,计算耗时略有增加但满足实时要求,综合表现最佳。

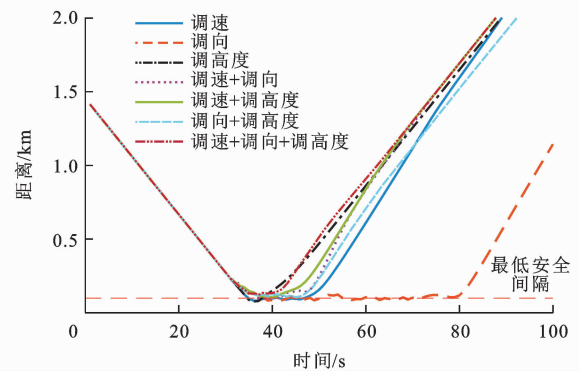


图 15 双机间隔曲线(交叉相遇)

Fig. 15 Curves of separation distance between two aircrafts (crossing encounter)

## 4 结 语

(1)为精确刻画多架 eVTOL 在冲突情境中的交互行为,构建了基于非合作微分博弈的多机决策模型。该模型充分考虑了各航空器的个体飞行任务目标及其避让意图,通过动态调整单机最优控制目标,并联合求解多机最优控制问题以获得纳什均衡策略集。该模型的优势在于能够有效预判入侵航空器在非合作情境下的潜在飞行意图,为本机制定合理的避让策略提供理论基础。

(2)提出了一种面向非合作目标的 eVTOL 航空器自主避让决策与控制方法。该方法融合事件触发机制与模型预测控制框架,采用“航迹预测-冲突检测-优化计算-控制执行”的闭环滚动优化流程,为航空器实时生成每一步的最优控制指令。为提高在线计算效率,采用 IBR 算法求解非合作微分博弈问题。试验结果表明:在双机冲突场景下,单机平均博弈优化时间可控制在 0.3 s 以内,符合飞行控制体系中的中层控制响应要求。

(3)通过双机对向飞行与同向超越场景的仿真试验,系统分析了本机对入侵机避让意图不同预判所导致的避让策略及效果差异。试验结果表明:当本机预判入侵机不会避让时,所做出的避让响应更快、机动过程更平稳,更适用于面对非合作目标的航空器自主避让场景。因此,在非网联、信息不完备的低空场景中,推荐采用入侵机不避让的保守假设,以提升飞行安全性与实用性。

(4)以双机交叉相遇场景为例,探讨了本机采取不同控制策略组合下的避让效果。试验结果表明:引入调速策略可有效提升避让安全性;调整高度策略在

避让效率上显著优于调航向策略;“调速+调向+调高度”协同控制策略的综合性能最佳,较其他策略安全性提高 31.63%、避让效率提高 53.40%、最大横向偏移距离减少 87.77%,能够实现 eVTOL 航空器安全、高效和精准的避让机动。这一结论同样反映出传统民航中相对固定、单一的避让规则,难以完全适应低空高动态环境下 eVTOL 的运行需求,未来亟需发展一种面向多维机动的灵活、自适应飞行规则体系。

(5)本文所提出的算法属于战术层冲突解脱方法,是战略层冲突预防的重要补充手段之一。然而,算法在场景适应性拓展与性能优化方面仍有提升空间。因此,下一步研究可从以下两方面展开:在冲突解脱机制方面,构建“多机协同避让—双机非合作避让”混合框架,该框架可根据信息完备度与空域复杂度自主切换避让模式,在提升系统运行效率的同时,为通信失效、环境扰动等因素引发的临时冲突提供安全补偿,从而增强系统对复杂运行环境的适应能力;在算法优化方面,通过构建不确定性模型、简化算法结构,引入并行计算或硬件加速技术,建立实时性监控与安全退化机制,确保算法在各类扰动条件下仍能稳定输出可靠的最优避让策略。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 邓景辉. 电动垂直起降飞行器的技术现状与发展[J]. 航空学报, 2024, 45(5): 47-69.  
DENG Jing-hui. Technical status and development of electric vertical take-off and landing aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(5): 47-69.
- [2] 张洪海, 邹依原, 张启钱, 等. 未来城市空中交通管理研究综述[J]. 航空学报, 2021, 42(7): 75-99.  
ZHANG Hong-hai, ZOU Yi-yuan, ZHANG Qi-qian, et al. Future urban air mobility management: Review[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(7): 75-99.
- [3] 李诚龙, 屈文秋, 李彦冬, 等. 面向 eVTOL 航空器的城市空中运输交通管理综述 [J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(4): 35-54.  
LI Cheng-long, QU Wen-qiu, LI Yan-dong, et al. Overview of traffic management of urban air mobility (UAM) with eVTOL aircraft[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(4): 35-54.
- [4] 黄 炜, 黄起鹏. 人机共驾控制架构与驾驶权决策研究综述[J]. 交通运输工程学报, 2025, 25(1): 48-65.  
HUANG Wei, HUANG Qi-peng. Research review of control architecture and driving authority decision-making of driver-automation cooperative driving[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2025, 25(1): 48-65.
- [5] 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/OL]. 北京航空航天大学学报, <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2025.0122>.  
DONG Lei, WANG Qi, CHEN Xi, et al. Design of operational security guarantee method for DAA system based on runtime assurance[J/OL]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2025.0122>.
- [6] RIEDEL M. A review of detect and avoid standards for unmanned aircraft systems[J]. Aerospace, 2025, 12(4): 344.
- [7] MCFADYEN A, MEJIAS L. A survey of autonomous vision-based see and avoid for unmanned aircraft systems [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2016, 80: 1-17.
- [8] MANFREDI G, JESTIN Y. Are you clear about “ Well Clear”? [C]//IEEE. 2018 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). New York: IEEE, 2018: 599-605.
- [9] 汤新民, 顾俊伟, 刘 冰, 等. 低空监视技术及其发展趋势综述[J]. 南京航空航天大学学报, 2024, 56(6): 973-993.  
TANG Xin-min, GU Jun-wei, LIU Bing, et al. Review on low-altitude surveillance technology and its development trends[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2024, 56(6): 973-993.
- [10] JOVER J, BERMÚDEZ A, CASADO R. Priority-aware conflict resolution for U-space[J]. Electronics, 2022, 11(8): 1225.
- [11] RORIE R C, SMITH C L, MITCHELL M, et al. Assessing helicopter pilots' detect and avoid and collision avoidance performance with ACAS Xr[C]//IEEE. 2023 IEEE/AIAA 42nd Digital Avionics Systems Conference (DASC). New York: IEEE, 2023: 1-10.
- [12] GUENDEL R E, WU S. Collision avoidance for rotorcraft in urban airspace with ACAS Xr[C]//AIAA. Aviation Forum and Ascend 2025. Reston: AIAA, 2025: 3668.
- [13] 张学军, 刘法旺, 张祖耀, 等. 低空智能网联体系[J]. 北京航空航天大学学报, 2025, 51(6): 1793-1815.  
ZHANG Xue-jun, LIU Fa-wang, ZHANG Zu-yao, et al. Overview of low-altitude intelligent networked system [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2025, 51(6): 1793-1815.
- [14] YANG X X, WEI P. Autonomous free flight operations in urban air mobility with computational guidance and collision avoidance[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 22(9): 5962-5975.
- [15] YANG X X, DENG L S, LIU J, et al. Multi-agent autonomous operations in urban air mobility with communication constraints[C]//AIAA. Scitech 2020 Forum. Reston: AIAA, 2020: 1893.
- [16] YANG X X, WEI P. Scalable multi-agent computational guidance with separation assurance for autonomous urban air mobility[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2020, 43(8): 1473-1486.
- [17] BERTRAM J, WEI P, ZAMBRENO J. A fast Markov decision process-based algorithm for collision avoidance in urban air

- mobility[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(9): 15420-15433.
- [18] WU P C, YANG X X, WEI P, et al. Safety assured online guidance with airborne separation for urban air mobility operations in uncertain environments[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(10): 19413-19427.
- [19] KATZ S M, ALVAREZ L E, OWEN M, et al. Collision risk and operational impact of speed change advisories as aircraft collision avoidance maneuvers[C]//AIAA. *Aviation 2022 Forum*. Reston: AIAA, 2022: 3824.
- [20] ZHANG N, ZHANG M C, LOW K H. 3D path planning and real-time collision resolution of multirotor drone operations in complex urban low-altitude airspace[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2021, 129: 103123.
- [21] QUAN Q, FU R, CAI K Y. Practical control for multicopters to avoid non-cooperative moving obstacles[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(8): 10839-10857.
- [22] LI S M, CHENG X C, HUANG X D, et al. Cooperative conflict detection and resolution and safety assessment for 6G enabled unmanned aerial vehicles[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2023, 24(2): 2183-2198.
- [23] CHAMBERLAIN J, CONSIGLIO M, MUÑOZ C, et al. Assistive detect and avoid technology in urban air mobility environments[C]//IEEE. 2024 AIAA DATC/IEEE 43rd Digital Avionics Systems Conference (DASC). New York: IEEE, 2024: 1-7.
- [24] CHEN J D, LIU Y G, ZHANG Y, et al. Conflict detection and resolution strategy for eVTOLs in low-altitude urban environments based on the geodetic coordinate system[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2024, 60(6): 8823-8838.
- [25] 郝 鹏. 面向 UAM 系统的 eVTOL 飞行器避障路径规划算法研究[D]. 成都: 西华大学, 2022.
- HAO Peng. Obstacle avoidance path planning of eVTOL aircraft for UAM system algorithm research [D]. Chengdu: Xihua University, 2022.
- [26] DENIZ S, WANG Z B. Autonomous conflict resolution in urban air mobility: a deep multi-agent reinforcement learning approach[C]//AIAA. *Aviation Forum and Ascend 2024*. Reston: AIAA, 2024: 4005.
- [27] 张 康, 汤新民, 顾俊伟. 基于风险意识的 eVTOL 自主避让[J/OL]. *航空学报*, 2025, <https://link.cnki.net/urlid/11.1929.V.20250720.0733.006>.  
ZHANG Kang, TANG Xin-min, GU Jun-wei. Risk-aware autonomous avoidance for eVTOL[J/OL]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2025, <https://link.cnki.net/urlid/11.1929.V.20250720.0733.006>.
- [28] CAO X Y, NING X, LIU S Y, et al. Spacecraft intelligent orbital game technology: A review[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2025, 38(6): 103480.
- [29] 秦家虎, 马麒超, 李 曼, 等. 多智能体协同研究进展综述: 博弈和控制交叉视角[J]. *自动化学报*, 2025, 51(3): 489-509.  
QIN Jia-hu, MA Qi-chao, LI Man, et al. Recent advances on multi-agent collaboration: A cross-perspective of game and control theory[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2025, 51(3): 489-509.
- [30] 曲大义, 李奥迪, 张 智, 等. 多车响应的网联自动驾驶纵横向协同控制方法[J]. *交通运输工程学报*, 2025, 25(4): 281-295.  
QU Da-yi, LI Ao-di, ZHANG Zhi, et al. Multi-vehicle responsive longitudinal and lateral cooperative control method for networked autonomous driving[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2025, 25(4): 281-295.
- [31] 衣 鹏, 潘 越, 王文远, 等. 基于博弈论的多车智能驾驶交互决策综述[J]. *控制与决策*, 2023, 38(5): 1159-1175.  
YI Peng, PAN Yue, WANG Wen-yuan, et al. A review on interactive decision-making of multi-vehicle autonomous driving with a game theoretical perspective [J]. *Control and Decision*, 2023, 38(5): 1159-1175.