

基于 3DDWA-VO 的 eVTOL 动态避障规划

王娟¹, 郭盈², 李国瑞²

(1. 中国民航大学 工程技术训练中心, 天津 300300;

2. 中国民航大学 电子信息与自动化学院, 天津 300300;)

摘要: 针对电动垂直起降飞行器 (eVTOL) 在低空动态避障中的实时决策与安全飞行的难题, 提出一种基于动态窗口-三维速度障碍 (3DDWA-VO) 融合的低空路径避障算法; 该算法通过融合动态窗口法的线性速度约束空间与三维速度障碍法的避障锥体预测域, 建立运动学约束与动态规避的协同优化机制, 从而在安全速度边界内实现避障决策效率与飞行稳定性的双重提升; 仿真结果表明: 所提方法规划的路径可有效在单动态障碍物和多动态障碍物环境下完成避障规划; 在含交叉机动障碍物的典型城市场景中, 相较于传统三维速度障碍法, 3DDWA-VO 算法将避障成功率大幅度提升, 同时避障路径长度减少 3.3%, 规划时间缩短了 0.03 s; 该方法还将动态避障航迹平均曲率优化至 0.013 6 rad/m, 有效降低飞行器姿态调整频率, 并具备实时响应能力与高可靠性, 为 eVTOL 复杂动态环境下的安全自主避障提供了有效解决方案。

关键词: eVTOL; 速度障碍法; 动态窗口法; 动态避障; 评价函数

Dynamic Obstacle Avoidance Planning for eVTOL Vehicles Based on 3DDWA-VO

WANG Juan¹, GUO Ying², LI Guorui²

(1. Engineering Technology Training Center, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

2. College of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: Aiming at the difficulties of real-time decision-making and safe flight in low-altitude dynamic obstacle avoidance for electric vertical take-off and landing (eVTOL) vehicles, a low-altitude path obstacle avoidance algorithm based on three-dimensional dynamic window approach velocity obstacle (3DDWA-VO) fusion is proposed. By integrating the linear velocity constraint space of dynamic windows with the predictive domain of the obstacle avoidance cone of the 3DDWA-VO, a collaborate optimization mechanism between kinematic constraints and dynamic avoidance was established, thereby improving the efficiency of avoidance decision-making and flight stability within safe speeds. Simulation results show that the planning path of the proposed method can effectively complete the obstacle avoidance planning in single-dynamic obstacle and multi-dynamic obstacle environments. In a typical urban scenario with cross-motorised obstacles, the 3DDWA-VO algorithm has notably superior in the success rate of obstacle avoidance to the traditional 3D velocity obstacle method, while the length of the obstacle avoidance path is reduced by 3.3%, and the planning time is shortened by 0.03 s. The method also improves the mean curvature of the dynamic obstacle avoidance trajectory to 0.013 6 rad/m, which effectively adjusts the vehicle's attitude and provides real-time response capability and high reliability, providing an effective solution for safe autonomous obstacle avoidance in complex dynamic environment of eVTOL vehicles.

Keywords: eVTOL; velocity obstacle; DWA; dynamic obstacle avoidance; evaluation function

收稿日期: 2024-03-05; 修回日期: 2025-04-11。

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFB4302901); 中国民航大学研究生科研创新项目 (230125061005)。

作者简介: 王娟 (1981-), 女, 硕士, 副教授。

通讯作者: 郭盈 (1997-), 女, 在读研究生。

引用格式: 王娟, 郭盈, 李国瑞. 基于 3DDWA-VO 的 eVTOL 动态避障规划[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(9): 326-333, 341.

0 引言

随着智慧城市与立体交通体系的深度融合,电动垂直起降飞行器(eVTOL, electric vertical take-off and landing)凭借其零排放、低噪音及三维机动优势,正成为破解城市交通困局的关键载体^[1]。据摩根士丹利的预测,全球城市空中交通市场规模将于2040年突破1.5万亿美元,而实现这一愿景的核心挑战在于解决eVTOL在50~500米低空域的安全避障问题^[2]。该特殊空域不仅需规避高密度建筑群、高压电缆等静态障碍物,更需应对无人机集群、同类飞行器等动态威胁,其复杂交互场景对实时避障算法提出严峻挑战。因此,本文聚焦于低空飞行环境中动态障碍物的实时避障算法研究,特别针对移动飞行器目标构建动态避障系统。

当前航空避障技术体系在应对低空复杂场景时存在显著局限:传统空中交通警戒与防撞系统(TCAS, traffic collision avoidance system)依赖二次雷达应答机制,存在设备复杂度高、无法自主决策的固有缺陷^[3];地面迫近警告系统(GPWS, ground proximity warning system,)通过比对预存地形数据发出地形接近警告,但缺乏实时环境更新能力^[4];而新兴的广播式自动相关监视(ADS-B, automatic dependent surveillance-broadcast)虽实现飞行状态实时共享^[5],却因缺乏标准化协同协议导致避障决策碎片化^[6-7]。学术界提出的人工势场法、改进A-Star算法等解决方案,虽取得阶段性成果,但仍普遍受限于静态环境假设、计算复杂度高或运动学约束缺失等问题。

对于动态障碍物避障问题,其规划是指飞行器在飞行运行过程中,基于动态障碍物信息(如位置、速度、方向等)实时规划或调整自身运动轨迹以避免碰撞的方法。目前,国内外在eVTOL动态避障技术研究方面已取得一定进展,但仍存在诸多不足。文献[8]通过构建城市三维航路网络,并引入人工势场-速度障碍融合算法进行避障规划,但其避障效果受限于预设航路结构;文献[9]在A-Star算法的基础上,引入碰撞惩罚的多项式关系,但其研究仅针对静态障碍物;文献[10]提出基于视觉感知技术的实时避障系统设计方案,但其避障执行速度较慢且实时性不足;美国NASA开发的ACAS Xu系统^[11]采用分布式传感器融合技术,能够实现多飞行器间的协同避障,但其依赖高成本传感器和高计算资源,难以大规模推广;文献[12]通过构建风险等级信息动态风险评估模型,引入风险成本对eVTOL航线进行避障规划,但其风险评估因素不够全面,对于飞行器飞行性能未纳入风险评估;文献[13]提出了一种基于马尔科夫决策和蒙特卡洛树搜索的复合制导算法,为城市空中交通自主按需飞行提供了潜在解决方

案框架,但其计算复杂度高。

针对eVTOL在城市低空复杂环境中的动态避障需求,本文提出一种高效、低成本的实时避障新方法。通过融合动态窗口法(DWA, dynamic window approach)和速度障碍法(VO, velocity obstacle),在DWA的线性速度空间约束基础上引入VO的三维锥形避障域预测,实现运动学约束与动态规避的协同优化。首先,建立球体包络动态障碍物模型,将复杂外形动态障碍物进行膨胀简化;其次,将VO的三维锥形避障域预测机制融入DWA的线性速度空间约束体系;最终,通过B样条曲线平滑处理,在保证安全裕度的同时提升航迹舒适性。该方法突破传统应答式避障机制的限制,将障碍物运动预测、飞行器动力学约束与实时路径优化相结合,为eVTOL低空密集运行提供新的解决方案。

1 障碍物检测建模

动态避障系统的有效性依赖于环境感知模块的实时性和准确性,尤其在城市低空密集障碍物场景中,eVTOL飞行器需要通过有效的感知和建模,获取障碍物运动信息,建立动态障碍物的运动学表征模型,进而为后续动态避障轨迹规划提供可靠的前置输入^[14]。

1) 几何等效建模:

在城市低空复杂环境中,eVTOL飞行器需要实时感知周围障碍物的位置和运动信息,以支持动态避障决策。本文主要针对具有动态特性的城市空中障碍物,例如无人机、热气球及无人驾驶飞行器等。为了简化几何建模并便于碰撞检测与动态分析,基于运动学包络原理,将具有机动性的障碍物等效为时变球体模型。

具体而言,首先将障碍物本体等效为质点 $c(t) \in R^3$,进而构建动态安全包络球,用以模拟动态障碍物的行为。该模型将城市低空环境下复杂外形的动态障碍物抽象为具有时变特征的几何实体,其空间占据范围可通过动态球体模型表示,如下所示:

$$O_i(t) = \{x \in R^3 \mid \|p - c_i(t)\| \leq r_i(t)\} \quad (1)$$

其中: $c_i(t)$ 为球体质心坐标 $[x_i(t), y_i(t), z_i(t)]$,用于实时描述障碍物运动轨迹。 $r_i(t)$ 为包络半径,其由飞行器物理尺寸 r_0 以及相对速度补偿项 Δr_v 与感知误差的补偿量 σ 。如下式所示:

$$r_i(t) = r_0 + \Delta r_v + \sigma \quad (2)$$

2) 多源感知融合:

为了构建精准的障碍物模型,eVTOL飞行器采用多源传感器融合技术,实时获取周围环境中动态障碍物的位置和运动信息,进而建立障碍物运动状态观测模型。该模型描述了障碍物的位置、速度与加速度的动态变化,如下式所示:

$$s_i = [c_i, \dot{c}_i, \ddot{c}_i]^T \quad (3)$$

其中: c_i 表示障碍物位置, $\bar{c}_i$ 和 $\bar{\dot{c}}_i$ 分别表示障碍物运动速度和加速度。

通过多传感器融合, eVTOL 飞行器能够实时测量障碍物的运动状态, 构建包含位置、包络半径及运动状态向量的障碍物检测模型。该模型综合了飞行器 4 个方向的传感器数据, 确保飞行器能够在城市低空复杂环境中精确感知障碍物, 实时更新障碍物的动态状态。

最后, 通过上述感知系统, eVTOL 飞行器能在复杂的城市低空环境中, 确保动态避障轨迹在任意时刻, 均满足 $\|x_{\text{eVTOL}}(t) - c_i(t)\| > r_i(t)$ 的安全边界要求, 为后续的动态避障算法提供可靠的数据支持以及约束条件。基于实时感知和有效建模的方法, 能够显著提高飞行器在复杂场景中的避障性能, 确保飞行安全。

2 速度障碍算法

2.1 传统速度障碍法

二维传统速度障碍法 (VO) 由 FIORINI 等人在 1998 年提出, 旨在为移动机器人提供一种更为灵活和实时的避障策略^[15]。与传统的静态障碍物处理方式不同, 速度障碍法通过考虑障碍物的运动状态, 能够动态地调整避障策略, 进而应对速度较快且不可忽视的动态障碍物^[16]。目前已被应用在了诸多领域, 如无人船舶、无人机、无人车的自主避障中。速度障碍法具有原理简单, 可面对多个障碍情况等优点。传统速度障碍法的原理图如图 1 所示。

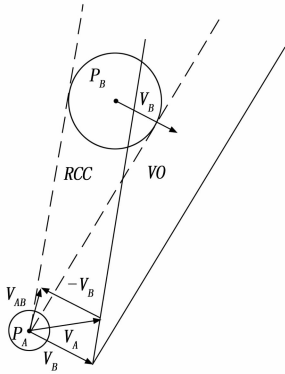


图 1 传统速度障碍法原理图

传统速度障碍法模型构建过程中, 将飞行器和移动障碍物抽象为质点模型, 通过引入安全距离阈值将双方安全域扩展为圆形区域。如图 1 所示, P_A 表示飞行器的扩展安全圆; P_B 代表动态障碍物的扩展安全圆; V_A 为飞行器的速度向量; V_B 为动态障碍物速度向量; $V_{AB} = V_A - V_B$ 表示相对运动关系。VO 区域定义为可能引发碰撞的速度集合; RCC 区域为可能引发碰撞的相对速度集合, 其数学表征如式 (4):

$$RCC = \{V_{AB} | \lambda(P_A, V_{AB}) \cap P_B \neq \emptyset\} \quad (4)$$

速度障碍域 (VO) 通过闵可夫斯基和运算将相对碰

撞区域 RCC 沿障碍物速度方向平移生成, 其定义公式如公式 (5) 所示:

$$VO(V_B) = RCC \oplus V_B \quad (5)$$

其中: $\oplus$ 表示闵可夫斯基和运算。当相对速度在相对碰撞区域时, 则飞行器与动态障碍物存在冲突。只需将飞行器的速度调整至其与障碍物的相对速度逃离速度障碍区, 即通过将飞行器速度向量修正至速度障碍域的补集区域即可实现避障。

对于多障碍物场景, 全局速度障碍域由各障碍物速度障碍域子集联合构成, 即各障碍物的 VO 集合的并集:

$$VO = \bigcup VO_i \quad (6)$$

具体而言, 如对于飞行器 A, 非 VO 集合中的速度矢量不会与障碍物发生碰撞, 即在给定的时间内将飞行器当前的速度矢量 V_A 调整到非 VO 区域飞行器即可避开障碍物。

2.2 三维空间下的速度障碍法

传统速度障碍法基于二维空间模型, 通过质点化建模与障碍物安全域扩展实现避障规划。将飞行器抽象为质点, 并通过对障碍物进行半径“膨胀”处理来构建避障区域^[17]。然而, 该模型存在空间维度限制, 难以满足三维空域复杂避障需求。

为扩展至三维空间, 将二维平面圆形危险区拓展为三维立体球状危险区域, 平面碰撞区升维构建为锥形危险空间。建立质点运动学模型并引入障碍物安全冗余机制, 在速度空间构造圆锥形危险区域, 当飞行器相对速度矢量方向脱离该锥形域时, 可确保未来时段内航迹无碰撞, 由此形成三维自主避障决策准则^[17]。

三维空间数学构建如下: 定义飞行器膨胀半径 R_A 与动态威胁障碍物的膨化半径 R_B , 假设 t 时刻二者的三维位置坐标分别为 P_A 和 P_B ; 速度矢量分别为 V_A 和 V_B ; 则飞行器和障碍物的位姿状态参量分别为 (P_A, V_A) 和 (P_B, V_B) , 具体表示如式 (7):

$$P_A = (x_a, y_a, z_a)$$

$$V_A = \begin{bmatrix} v_{ax} \\ v_{ay} \\ v_{az} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_a \cos \theta_a \sin \varphi_a \\ v_a \cos \theta_a \cos \varphi_a \\ v_a \sin \theta_a \end{bmatrix}$$

$$P_B = (x_b, y_b, z_b)$$

$$V_B = \begin{bmatrix} v_{bx} \\ v_{by} \\ v_{bz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_b \cos \theta_b \sin \varphi_b \\ v_b \cos \theta_b \cos \varphi_b \\ v_b \sin \theta_b \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中: v_a 、 v_b 分别为飞行器与障碍物的速度矢量大小; θ_a 、 φ_a 和 θ_b 、 φ_b 分别为飞行器与障碍物的速度矢量方向角 (θ 为俯仰角, φ 为偏航角)。

如图 2 所示, 构建以动态障碍物 P_B 为球心、安全半径为 R 的球体膨胀区域。在此三维几何模型下, 以

飞行器当前位置为顶点构造与障碍球体 P_B 相切的锥形约束区,球体可以较好的模拟具有机动性较强的动态障碍物。若速度矢量 V_{AB} 末端落入此三维空间速度障碍锥内,将判定存在动态障碍物对飞行器存在潜在威胁:

$$R = R_A + R_B$$

$$V_{AB} = \mathbf{V}_A - \mathbf{V}_B$$

$$d = \sqrt{(x_b - x_a)^2 + (y_b - y_a)^2 + (z_b - z_a)^2} \quad (8)$$

其中: V_{AB} 为二者相对速度;相对速度的大小为 v_{ab} ; d 为飞行器与障碍物之间的距离。

由于用相对速度作为判定存在碰撞风险,需进一步计算,因此,通常情况下,判断飞行器与障碍物是否会发生冲突,主要通过飞行器的速度矢量 V_A 来实现。将 P_A 和 P_B 沿向量 V_B 方向平移距离 $\|\mathbf{V}_B \Delta t\|$, 得到新的位置 P'_A 、 P'_B , 如式(9)所示;其中, Δt 为单位时间间隔。以 P'_B 为球心、 R 为半径构建一个球体,形成基于速度矢量的三维空间速度障碍锥模型,如图2所示。如果速度矢量末端在锥体区域内,则飞行器将受到威胁:

$$P'_A = (x_a + v_{bx} \Delta t, y_a + v_{by} \Delta t, z_a + v_{bz} \Delta t)$$

$$P'_B = (x_b + v_{bx} \Delta t, y_b + v_{by} \Delta t, z_b + v_{bz} \Delta t) \quad (9)$$

此外,障碍物是否对飞行器造成威胁,还可通过比较速度矢量与空间障碍锥的夹角来进行判定。设定 α_o 为空间速度障碍锥的半顶角,且 α 为相对速度 V_{AB} 与空间障碍锥线之间的夹角。若夹角 α 小于半顶角 α_o , 则障碍物不构成威胁;反之,则表示障碍物对飞行器有威胁。

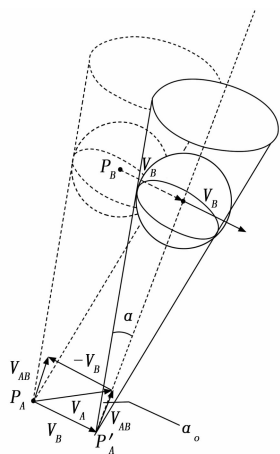


图2 三维速度障碍法原理图

2.3 三维速度障碍法的改进

1) 安全裕度:

飞行器的局部路径避障规划依赖于传感器获取的障碍物尺寸、位置和速度等信息。然而,由于传感器精度的限制、通信延迟和硬件性能限制等,障碍物的相关信息可能存在一定的偏差,这可能会导致碰撞风险的增加。为了解决这一问题,引入安全距离 R_{safe} 来提高飞行

器的安全性,从而扩展了膨胀半径,此时膨胀半径可根据实际情况优化为 R_s , 如式(10)所示:

$$R_s = R_a + R_b + R_{safe} \quad (10)$$

2) 障碍物机动性动态处理:

飞行器执行任务时,需要考虑障碍物感知模块的测量误差,特别是感知到的动态威胁障碍物往往具有一定机动性。考虑到动态障碍物机动性的影响,以三维速度障碍锥体顶点的位置向量 $\mathbf{A}_{VO}$ 为球心,确定一个半径为 r_m 的机动球 M_{VO} 。在初始三维空间速度障碍锥 VO 的基础上,反向移动 VO , 直到机动球 M_{VO} 内切于新的速度障碍锥 VO' , 从而建立考虑障碍物机动性的三维空间速度障碍锥 VO' , 此时,半径 r_m 如下式所示:

$$r_m = \|\mathbf{V}_B\| \sqrt{2(1 - \cos \omega)} \quad (11)$$

其中: ω 为该障碍物存在的最大动态不确定度。

三维空间速度障碍锥 VO' 如图3所示。

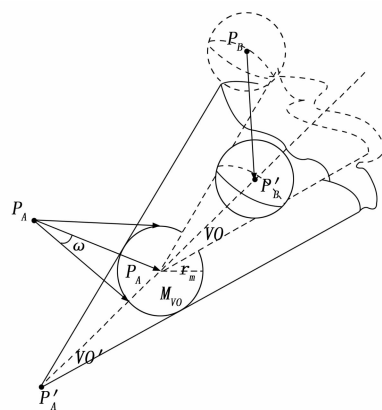


图3 三维空间速度障碍锥 VO' 图

3 基于动态窗口和速度障碍法(3DDWA-VO)的融合

动态窗口法(DWA)作为一种经典的局部路径规划算法,在移动机器人和无人系统的实时避障任务中得到了广泛应用,其核心理念在于利用速度空间进行局部路径规划,通过约束当前可达的速度与角速度范围,从而在动态环境中实现高效的实时避障与轨迹优化^[18]。该算法首先结合飞行器运动学特性、环境障碍物分布及加减速限制,在速度空间内离散化采样候选速度对 (v, ω) , 随后对每一速度对进行短时轨迹预测,并基于多目标评价函数量化轨迹性能,最终选取评价最优的速度对作为控制指令输出,符合eVTOL飞行器在城市低空复杂环境中的避障需求。

在与三维速度障碍法融合时,考虑eVTOL飞行器性能的约束,通过引入三维空间障碍物速度障碍锥以及动态窗口的实时更新机制,提升避障算法的实用性和效率。

具体而言,通过速度障碍法计算出速度障碍锥 VO

集合, 排除 VO 集合范围中的集合都是飞行器可选择的避障速度矢量, 然而, 其范围较大且未考虑飞行器本身飞行性能的约束, 导致其中存在大量不可达的速度矢量^[19]。此外, 对于具体的避障路径规划也未给出最优避障航线, 因此, 引入采样空间约束和路径评价函数, 进一步优化避障路径规划。

根据 eVTOL 飞行器性能, 基于动态窗口算法, 计算飞行器在给定时间 Δt 内能达到的移动速度。

1) 速度窗口:

$$v_m = \{v | v \in [v_{\min}, v_{\max}]\} \quad (12)$$

2) 加速度窗口:

$$v_d = \{v | v \in [v_c - \bar{v}_b \Delta t, v_c + \bar{v}_b \Delta t]\} \quad (13)$$

3) 角加速度窗口:

$$\omega_d = \{\omega | \omega \in [\omega_c - \bar{\omega}_b \Delta t, \omega_c + \bar{\omega}_b \Delta t]\} \quad (14)$$

其中: v_c 为飞行器当前的移动速度, $\bar{v}_b$ 为飞行器的加速度, ω_c 为飞行器当前的角速度, $\bar{\omega}_b$ 为飞行器角加速度。

通过对角速度窗口的进一步计算, 可求解出飞行器在给定 Δt 内可以转到的角度范围:

$$\theta_d = \left\{ \theta \left| \theta \in \left[\theta_0 + \omega_c \Delta t - \frac{1}{2} \bar{\omega}_b \Delta t^2, \theta_0 + \omega_c \Delta t + \frac{1}{2} \bar{\omega}_b \Delta t^2 \right] \right. \right\} \quad (15)$$

式中, θ_0 为当前的角度。

通过对于上述采样空间的计算, 可确定飞行器在给定 Δt 内可达到的速度和角度大小范围的集合 S , 该集合与速度障碍锥 VO' 重合部分, 则是速度矢量会与障碍物发生碰撞的范围, 排除该部分可得到飞行器在给定 Δt 内可行的安全的速度矢量集合, 为 $S - VO'$ 。如图 4 所示。

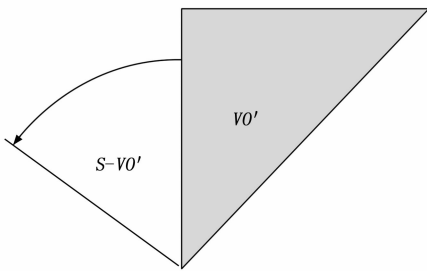


图 4 $S - VO'$ 与 VO' 速度示意图

求解出 $S - VO'$ 集合后, 需在其集合范围内选择出最优的速度矢量进行避障, 即在可行速度空间中选择最优的速度控制指令定义评估函数^[20]。评估函数如下:

$$F(v, \omega) = \sigma[\alpha \cdot f_{\text{heading}}(v, \omega)] + \sigma[\beta \cdot f_{\text{distance}}(v, \omega)] + \sigma[\gamma \cdot f_{\text{speed}}(v, \omega)] \quad (16)$$

其中: $f_{\text{heading}}(v, \omega)$ 是航向评价函数, 用作衡量当前采样速度下生成的轨迹终点位置方向与目标点连线之间

的夹角误差 $\Delta\theta$; $f_{\text{distance}}(v, \omega)$ 是距离评价函数, 表示在当前速度下, 轨迹与障碍物之间的距离; $f_{\text{speed}}(v, \omega)$ 是速度评价函数, 表示当前的速度大小; α, β, γ 均为评价函数的系数; σ 表示归一化。

4 基于 3DDWA-VO 的动态避障轨迹规划

3DDWA-VO 算法融合三维速度障碍法和动态窗口算法, 实现 eVTOL 飞行器在低空动态环境中的实时避障。其核心优化如下。

1) 三维威胁建模: 引入障碍物机动性预测的扩展速度障碍锥, 增强对动态障碍物运动的适应性;

2) 运动约束融合: 通过动态窗口约束采样空间, 规避传统速度障碍算法因忽略飞行器动力学特性导致不可行的解;

3) 多目标优化: 构建兼顾航向趋近、安全距离与运动效率的评价函数, 降低轨迹震荡。

动态避障具体流程如下。

4.1 环境感知与碰撞预警

根据上述障碍物检测模型的构建, 基于 eVTOL 机载多传感器获取前、后、左、右四向障碍物信息。

之后, 对收集到的数据进行避障预警判断, 基于传感器采集数据与 eVTOL 飞行动力学特性, 依据低空空域安全规章设定动态报警阈值 W_r (其值随飞行速度自适应调整), 并通过标识符 $\lambda_j \in \{0, 1\}$ 管理各检测模块的数据有效性 (默认 $\lambda_j = 1$, 表示启用该模块数据)。当任一检测模块的障碍物测距值 d_{ob} 满足 $d_{ob} \leq W_r$ 且 $\lambda_j = 1$ 时, 触发避障预警并将 λ_j 置零, 标记该方向为高风险区域, 同时启动冲突威胁解算; 若 $d_{ob} > W_r$ 或 $\lambda_j = 0$, 则忽略当前数据以抑制误触发。

4.2 安全速度空间构建

根据所述障碍物检测模块的测量数据以及预警信息, 基于安全性裕度考虑, 增大膨胀半径, 引入安全距离 R_{safe} , 考虑动态障碍物机动性的影响, 构建考虑安全裕度 R_{safe} 的机动性三维空间速度障碍锥 VO' 。基于障碍物机动性的三维速度障碍锥如图 5 所示。

最后, 根据 eVTOL 飞行器运动学约束, 通过对速度和角速度窗口联合约束, 生成可行速度集合 S , 排除解算出三维速度障碍锥 VO' 集合, 从而求解出安全速度空间 $S - VO'$ 。

4.3 最优速度决策与轨迹生成

1) 临界速度求解:

根据当前 eVTOL 飞行器以及障碍物的位置和速度信息, 利用三维速度障碍算法计算出临界速度矢量集合。

首先, 以 eVTOL 飞行器位置矢量 P_A 为球心、速度大小 V_A 为半径构建速度球体, 并基于此建立速度模

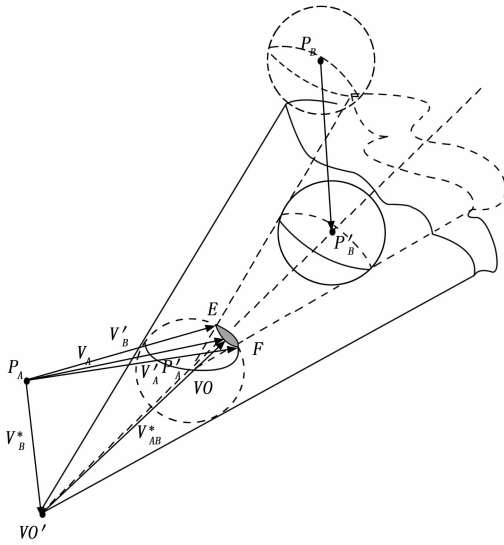


图5 障碍物机动性的三维速度障碍锥图

型。此时,速度球与空间障碍锥的交集部分形成阴影球,而要使飞行器脱离威胁区域,只需将 V_A 的末端偏转出阴影球冠区域即可。基于三维空间速度障碍锥模型 VO' ,求解 eVTOL 飞行器速度矢量 V'_A 以及速度矢量的最小方向角 φ'_A 和 θ'_A ,求解过程如下:

首先,确定圆锥顶点到零界点 E 、 F 的 L_{DE} 、 L_{DF} 的单位向量 $m = [x_1, y_1, z_1]$ 和向量 $n = [x_2, y_2, z_2]$:

$$\cos\alpha = \frac{x_i(x_{P'_A} - x_D) + y_i(y_{P'_A} - y_D) + z_i(z_{P'_A} - z_D)}{\sqrt{(x_{P'_A} - x_D)^2 + (y_{P'_A} - y_D)^2 + (z_{P'_A} - z_D)^2}}$$

$$\cos(\alpha - \alpha_o) = \frac{x_i v_{ABx} + y_i v_{AB y} + z_i v_{AB z}}{\|v_{AB}\|} \quad (17)$$

其中: $i = 1, 2$; $D = (x_D, y_D, z_D)$ 为圆锥顶点; $P'_A = (x_{P'_A}, y_{P'_A}, z_{P'_A})$ 为飞行器 A 在沿向量 V_B 的方向平移距离 $\|V_B \Delta t\|$ 的位置矢量; $V_{AB}^* = (v_{ABx}^*, v_{AB y}^*, v_{AB z}^*)$ 为飞行器 A 与障碍物之间的相对速度。

其次,再根据 $\|V'_{AB}\|$ 的求解式,获得临界相对速度的大小:

$$\|V'_{AB}\| = \sqrt{\|V_B^*\|^2 \cos^2\{\angle[V_B^*, L_{DE(F)}]\} - \|V_B^*\|^2 + \|V_A\|^2 + \|V_B^*\| \cos\{\angle[V_B^*, L_{DE(F)}]\}} \quad (18)$$

其中: V_B^* 为外来障碍物的动态不确定速度矢量。

最后,求解两个临界点 E 、 F 的矢量速度 V'_A ,进而得到 eVTOL 飞行器 A 在临界点速度矢量的方向角 φ'_A 和 θ'_A :

$$\begin{cases} V'_A = V_B^* + V'_{AB} \\ \cos\varphi'_A = \frac{v'_{Ay}}{\sqrt{(v'_{Ax})^2 + (v'_{Ay})^2}} \\ \cos\theta'_A = \frac{v'_{Az}}{\sqrt{(v'_{Ax})^2 + (v'_{Ay})^2 + (v'_{Az})^2}} \end{cases} \quad (19)$$

2) 多目标评价函数优化:

对于安全速度空间 $S-VO'$ 内每一候选速度,根据第3小节的评价函数从航向评价、安全距离评价以及速度效率评价三方面进行综合评价,选取综合评价最优的速度,作为控制指令,生成兼顾安全性、效率性与目标趋近性的避障轨迹。该多目标优化机制可有效避免局部最优陷阱,在动态复杂场景中实现平滑鲁棒的路径跟踪。

3) 避障完成判断:

在避障过程中,eVTOL 飞行器需要实时判断是否已完成避障操作。通过比较相对速度 V_{AB} 与空间障碍锥线 VO 轴线之间的夹角 α_o ,以及与空间速度障碍锥的半顶角 α 的大小关系,可以判断 eVTOL 飞行器是否已完成避障。判断条件如下:

$$\begin{cases} V_A \notin VO \Leftarrow (\cos\alpha_o < \cos\alpha), \alpha < \frac{\pi}{2} \\ \cos\alpha_o = \frac{(V_A - A_{VO}) \cdot D_{VO}}{\|V_A - A_{VO}\| \|D_{VO}\|} \end{cases} \quad (20)$$

其中: α 为空间速度障碍锥的半顶角, α_o 是相对速度 V_{AB} 与空间障碍锥线 VO 轴线所夹的角度, A_{VO} 为锥顶点位置向量, D_{VO} 为飞行器到基准平面的矢量距离。

若满足上述条件,则表明 eVTOL 飞行器已成功避开障碍物;否则,需继续调整速度组合以完成避障。

eVTOL 自主避障整体流程示意图如图6所示。

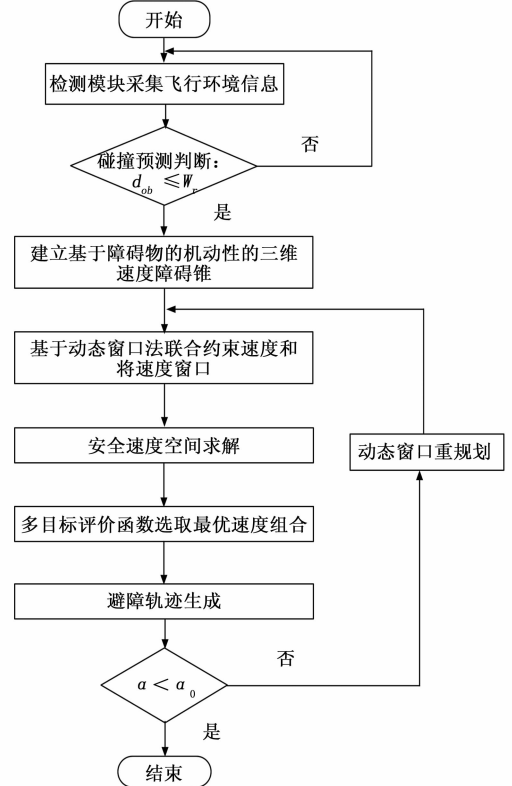


图6 eVTOL 自主避障整体流程示意图

5 仿真结果与分析

为了验证基于动态窗口与三维速度障碍融合算法(3DDWA-VO)在电动垂直起降机(eVTOL)动态避障中的性能和有效性,本研究在MATLAB环境下构建了三维动态空域仿真环境。基于Joby S4 eVTOL飞行器模型参数,设置eVTOL飞行器初始速度为0 m/s,巡航速度为18 m/s。动态障碍物被建模为具有机动性的球体,速度范围为5~15 m/s,其运动轨迹覆盖俯冲、侧向切入以及垂直爬升等典型相遇情况,以模拟eVTOL飞行器在飞行中与无人机、飞鸟和其他飞行器等常见空中动态障碍物相遇场景。

5.1 单动态障碍物场景测试

针对eVTOL在垂直起降与巡航阶段的避障需求,实验设计了两种典型冲突场景:一是障碍物以12 m/s速度从俯冲方向快速接近,二是障碍物以8 m/s速度侧向切入飞行走廊。如图7和图8所示,其中箭头为障碍物运动方向。

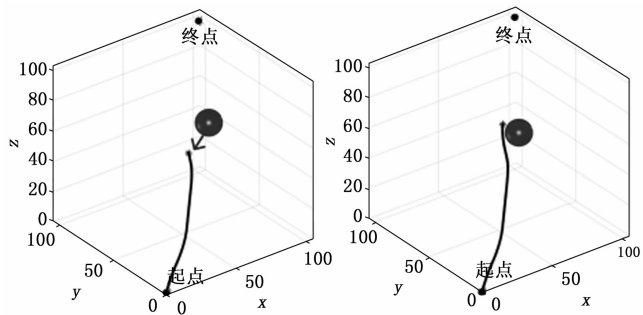


图7 俯冲方向冲突场景避障过程示意图

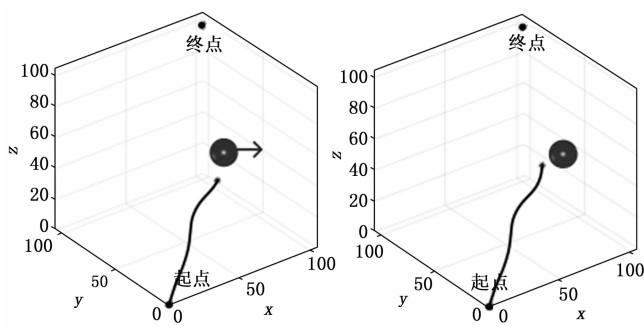


图8 侧切方向冲突场景避障过程示意图

仿真结果表明,3DDWA-VO算法通过动态调整速度矢量的俯仰角与偏航角分量,在三维空间内生成平滑避障轨迹。算法在两种场景下可有效完成避障,同时将单次规划周期缩短,满足eVTOL实时避障的时效性要求。

5.2 多动态障碍物场景测试

为验证算法在高密度空域环境中的鲁棒性,仿真构

建了包含3个动态障碍物的复杂场景,分别模拟侧向切入、垂直爬升和斜向机动3种威胁模式。避障仿真图如图9所示。

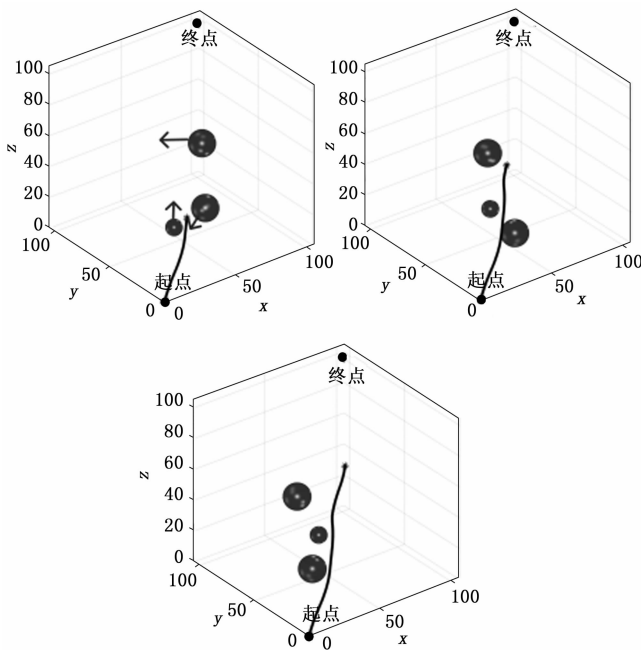


图9 多动态冲突场景避障过程示意图

仿真结果表明,3DDWA-VO算法有效解决了eVTOL三维避障中的速度耦合与空域约束难题,通过融合动态窗口的局部优化能力与三维速度障碍的全局碰撞预测特性,算法在面对不同方向的障碍物运动场景中展现出高鲁棒性与适应性,为未来城市空中交通系统的安全运行提供了理论支持与技术保障。

5.3 基于3DDWA-VO算法仿真实验分析

为验证3DDWA-VO算法的综合性能,本研究面向城市低空动态避障核心需求,构建 $100 \times 100 \times 100 \text{ m}^3$ 三维仿真环境(起点 $[0, 0, 0]$,终点 $[80, 80, 80]$),仿真实验聚焦动态障碍物场景,未引入静态障碍物主要基于两方面考量:其一,静态障碍物规避可通过全局路径规划模块预先解决;其二,动态障碍物因运动不确定性对实时避障算法提出更高要求,需独立验证算法动态响应能力。因此,仿真实验设置多个运动模式各异的动态障碍物(黑色球体),涵盖侧向切入、垂直俯冲、垂直爬升等典型冲突场景,仿真结果图如图10~11所示。

通过与传统三维速度障碍法(VO)的对比实验表明,两种算法虽均能完成基础避障任务,但在避障效率与安全性方面存在显著差异。

经100次重复实验统计,传统速度障碍法成功率50%,基于3DDWA-VO算法成功率可达90%,改进算法在避障成功率上显著优于传统方法,其规划时间

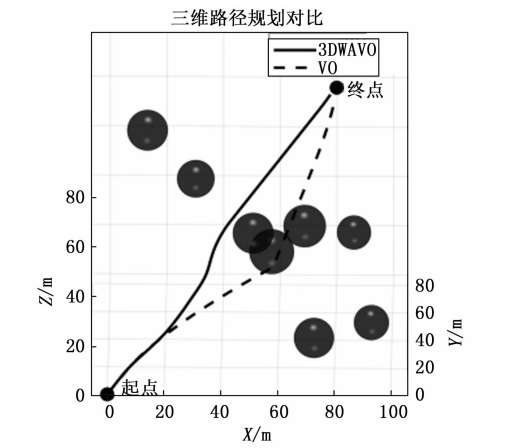


图 10 基于 3DDWA-VO 算法避障过程示意图

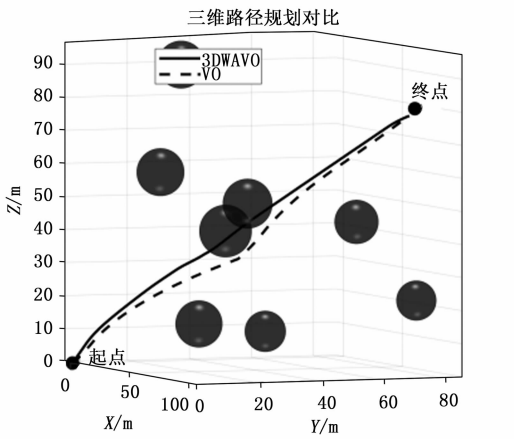


图 11 传统三维速度障碍法算法避障过程示意图

缩短 0.03 s, 满足动态环境下的实时决策需求; 据表 1 分析可知, 本文算法规划的避障路径较传统三维速度障碍算法缩短了 3.3%, 且 3DDWA-VO 算法通过引入速度窗口约束, 有效避免了传统速度障碍法因局部震荡导致的冗余航迹, 更具有经济性。最后对于轨迹平滑性, 3DDWA-VO 算法使动态避障航迹平均曲率降至 0.013 6 rad/m, 大幅降低飞行器姿态调整频次, 更符合飞控系统的运动学约束。

表 1 不同算法仿真结果对比

算法	路径长度/m	搜索时间/s	平均曲率/(rad/s)	成功率/%
3DDWA-VO	137.91	0.012 6	0.013 6	90
VO	142.62	0.035 5	28.921 8	50

6 结束语

本研究针对城市低空复杂动态环境下电动垂直起降飞行器 (eVTOL) 的动态避障这一关键问题, 创新性地提出了一种基于动态窗口法与三维速度障碍法融

合 (3DDWA-VO) 的协同避障策略。该方法充分考虑了 eVTOL 飞行器的动力学特性, 将动态窗口法的线性速度空间约束与速度障碍法的三维速度障碍锥体预测相结合, 实现了运动学约束与动态规避的协同优化, 有效提升了飞行器在复杂环境下的避障能力。3DDWA-VO 算法通过速度窗口的动态约束与障碍物运动预测的深度融合, 仿真实验表明, 该避障算法能够有效应对单一动态障碍物和多个动态障碍物环境下的避障规划。并且在交叉机动障碍物的典型城市场景中, 所提算法在轨迹长度、搜索时间、平滑度与避障成功率等核心指标上, 相较于传统速度障碍算法表现出显著的提升, 为城市低空密集动态环境下的实时避障提供了可靠解决方案。然而, 本研究仍存在局限性: 对于强电磁干扰以及噪音干扰等复杂环境条件下的动态避障问题尚未进行深入探讨。

参考文献:

[1] QU W, XU C, TAN X, et al. Preliminary concept of urban air mobility traffic rules [J]. Drones, 2023, 7 (1): 54.

[2] 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): 55-77.

[3] 张阿里布米, 张 浩. 空中交通警戒和防撞系统 (TCAS II) 简析 [J]. 民航学报, 2024, 8 (6): 78-82.

[4] 刘辛果. 飞行中交通冲突避免系统 (TCAS) 的触发与操作分析 [J]. 中国科技信息, 2023 (22): 59-61.

[5] NZAMIO (朱安) M J A M. 基于 ADS-B 数据的飞机 TCAS 冲突检测和决议 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2023.

[6] 孙保明, 陈 娟, 谷志鸣. ADS-B 系统面临的风险及应对措施 [J]. 通信学报, 2024, 45 (s1): 114-118.

[7] 王莉莉, 闵幸兴. 融合空域下基于 ADS-B IN 的无人机防撞研究 [J]. 安全与环境学报, 2024, 24 (7): 2508-2516.

[8] 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.

[9] 王 彪. eVTOL 飞行器视觉自主避障技术仿真研究 [D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2022.

[10] 魏 麟, 王 彪, 陈 玉, 等. 基于视觉感知的 eVTOL 避障系统设计 [J]. 中国科技信息, 2021 (14): 87-88.

[11] OWEN M P, PANKEN A, et al. ACAS Xu: integrated collision avoidance and detect and avoid capability for UAS [C] //2019 IEEE/AIAA 38th Digital Avionics Systems Conference (DASC), San Diego, CA, USA, 2019, 1-10.

(下转第 341 页)