

中文引用格式: 钟庆伟, 庾映雪, 刘苏, 等. 考虑低碳及速度调整偏差的航空器集群改进速度障碍法[J]. 中国安全科学学报, 2026, 36(4): 142–151.

英文引用格式: Zhong Qingwei, Yu Yingxue, Liu Su, et al. Aircraft swarm improved velocity obstacle methods considering low carbon and deviation[J]. China Safety Science Journal, 2026, 36(4): 142–151.

考虑低碳及速度调整偏差的航空器集群 改进速度障碍法^{*}

钟庆伟^{1,2}副教授, 庾映雪^{1,3}, 刘苏^{**1}讲师, 王睿¹讲师,
郭经纬⁴副教授, 潘卫军²教授

(1 中国民用航空飞行学院 空中交通管理学院, 四川 广汉 618307; 2 中国民用航空飞行学院
民航飞行技术与飞行安全重点实验室, 四川 广汉 618307; 3 广州城建职业学院 机电工程学院,
广东 广州 510925; 4 澳门城市大学 商学院, 中国 澳门 999078)

中图分类号: X949

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.04.0144

基金项目: 国家自然科学基金资助(U233209); 民航飞行技术与飞行安全重点实验室开放基金资助(F2024KF07C);
四川省民航飞行技术与飞行安全工程技术研究中心项目(GY2025-25D); 中央高校基本科研专项资助项目(25CAFUC09018)。

【摘要】 为满足民航运行中低碳减排与冲突解脱安全性并重的需求, 在考虑航空器碳排放及速度调整偏差的基础上, 提出基于自适应椭圆保护区的改进速度障碍法(IVO)。首先, 根据航空器速度差异构造自适应椭圆保护区; 其次, 将同一航路、矢量速度相似、距离接近的航空器划分为集群, 并刻画集群的质点、速度矢量和安全范围等特征; 再次, 针对已划分的集群, 采用集群控制算法合理调整集群内航空器的速度矢量, 确保冲突解脱期间保持安全间隔; 然后, 在集群间建立速度障碍锥, 结合单位时间最大改变量限制, 通过平面几何分析与数学优化模型求解低碳目标下偏差最小的解脱速度和航向; 最后, 通过 Python 基于数值模拟实现动态行为分析。研究结果表明: 与传统速度障碍法相比, 改进方法使航空器解脱效率提高 87.5%, 平均调整幅度优化 86.67%, 燃油节省最高达 37.36%, 为复杂空中交通环境下冲突解脱与运行优化问题提供了一种可行的技术方案。

【关键词】 低碳; 速度调整偏差; 航空器集群; 改进速度障碍法(IVO); 冲突解脱

Aircraft swarm improved velocity obstacle methods considering low carbon and deviation

Zhong Qingwei^{1,2}, Yu Yingxue^{1,3}, Liu Su¹, Wang Rui¹,
Guo Jingwei⁴, Pan Weijun²

(1 School of Air Traffic Management, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan
Sichuan 618307, China; 2 Key Laboratory of Flight Techniques and Flight Safety, Civil Aviation
Flight University of China, Guanghan Sichuan, 618307, China; 3 School of Electromechanical
Engineering, Guangzhou City Construction College, Guangzhou Guangdong 510925, China;
4 Faculty of Business, City University of Macau, Macau 999078, China)

* 文章编号: 1003-3033(2026)04-0142-10; 收稿日期: 2025-11-02; 修稿日期: 2026-01-10

** 通信作者: 刘苏(1988—), 女, 重庆人, 博士, 讲师, 主要从事交通运输系统仿真与决策智能化研究。E-mail: cdliusu@my.swjtu.edu.cn。

Abstract: In order to address the requirements of low-carbon operation and safety in aircraft conflict resolution, an IVO method based on adaptive elliptical protected zones was proposed, taking into account aircraft carbon emissions and speed adjustment deviations. First, adaptive elliptical protected zones were constructed according to the velocity differences among aircraft. Second, aircraft flying on the same route with similar velocity vectors and close spatial proximity were grouped into clusters, and key characteristics such as cluster centroids, velocity vectors, and safety regions were defined. Then, a cluster control algorithm was applied to reasonably adjust the velocity vectors of aircraft within each cluster, ensuring the maintenance of safe separation during conflict resolution. Subsequently, velocity obstacle cones were established between clusters. By incorporating constraints on the maximum allowable adjustment per unit time and combining planar geometric analysis with a mathematical optimization model, conflict-free velocities and headings with minimal deviation were determined under low-carbon objectives. Finally, dynamic behaviour analysis was conducted through numerical simulations implemented in Python. The results show that, compared with the traditional velocity obstacle method, the proposed approach improves conflict resolution efficiency by 87.5%, reduces the average adjustment magnitude by 86.67%, and achieves fuel savings of up to 37.36%, demonstrating its effectiveness for aircraft conflict resolution and operational optimization in complex air traffic environments.

Keywords: low carbon; velocity adjustment deviation; aircraft swarm; improved velocity obstacle (IVO) method; aircraft conflict resolution

0 引言

在航空科技进步与全球化发展推动下,民航业在我国现代化进程中作用突出。近年来,《2030年前碳达峰行动方案》与《“十四五”民航绿色发展专项规划》对民航低碳转型提出明确目标与量化指标^[1-2],同时,“航班再加密,往来更便利”政策背景下,航班密度与运输需求增长,进一步强化了安全保障要求^[3]。民航业因此面临飞行安全与低碳发展的双重约束,动态航线路径规划成为兼顾安全运行与低碳目标的关键技术。其中,全局路径规划侧重静态障碍下的路径最优,局部路径规划侧重动态环境中的实时感知与避碰决策。

速度障碍法(Velocity Obstacles, VO)已在航空器动态路径规划领域得到广泛应用^[4-5],实现了动态环境中的碰撞规避。其通过在速度空间中构建碰撞约束实现实时避障,并发展出交互VO法(Reciprocal VO, RVO)与广义VO法(Generalized VO, GVO),已广泛应用于多智能体系统与无人机编队等场景^[6-8],成为航空器集群避障的重要基础方法之一。Du Zhe等^[9]比较了VO法与人工势场法,验证了VO法在安全性和队形变换效率方面的优势,并引入不确定性因素优化了无人水面船艇避障性能(Unmanned Surface Vehicle, USV)。Pan Weijun等^[10]针对三维飞行冲突,提出将VO法与粒

子群优化相结合并将三维问题简化为二维,从而提升计算效率。Gao Jing等^[11]通过改进互惠速度障碍RVO方法,降低了无人机转向角和路径抖动。Zhu Hongyang等^[12]通过将VO法与USV动力学相结合,提出最优碰撞避障点方法以优化多障碍环境下的决策过程。Zheng Huarong等^[13]在动态路径规划中综合考虑航海规则与不确定性因素,增强算法对不同遭遇情景的适应性。在多机协作方面,Peng Mingzhu等^[14]结合VO法与B样条曲线生成平滑路径,实现多UAV协作避障;Xue Delai等^[15]将RVO与深度强化学习结合,通过基于门控循环单元(Gated Recurrent Unit, GRU)的网络结构实现复杂动静态环境下的有效冲突探测。现有研究在提升冲突解脱精度方面取得一定进展,但在高密度航空器集群运行条件下,其实时性和低碳约束考虑仍显不足。

因此,笔者拟针对高密度、小间距航空器集群运行场景,在集群划分基础上提出一种基于自适应椭圆保护区的改进VO法(Improved VO, IVO)。该方法通过构建自适应保护区并引入碳排放与速度调整偏差约束,实现航空器集群冲突解脱过程中安全性、实时性与运行经济性的综合优化,以期未来低空及融合空域条件下的安全高效运行提供方法支撑与决策参考。

1 面向航空器集群的冲突解脱建模

1.1 航空器集群划分与自适应保护区模型

1.1.1 自适应保护区

1) 单个航空器保护区。不同机型航空器的性能和速度差异导致传统间隔标准无法有效提高空域运行效率,因此,通过基于速度矢量的自适应椭圆模型来精确表示各机型的保护区范围(图1)。保护区短半轴取自基于航迹运行(Trajectory-based Operation, TBO)的精确安全间隔^[16]。计算见下式:

$$\mathbf{v}_i = \begin{bmatrix} v_{xi} \\ v_{yi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |\mathbf{v}_i| \cos \theta_i \\ |\mathbf{v}_i| \sin \theta_i \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$a_i = \lambda |\mathbf{v}_i| \quad (2)$$

式中: $\mathbf{v}_i$ 为航空器 i 速度矢量, km/min; v_{xi} 和 v_{yi} 为速度矢量 $\mathbf{v}_i$ 的水平分量和垂直分量, km/min; θ_i 为速度矢量 $\mathbf{v}_i$ 的速度方向 $\theta_i \in (0, 2\pi)$, ($^\circ$); $|\mathbf{v}_i|$ 为速度矢量 $\mathbf{v}_i$ 的速度大小, km/min; a_i 为保护区的长半轴长度, km, a_i 与 $|\mathbf{v}_i|$ 成正比; λ 为实数参数。

航空器 i 保护区 ε 的计算见下式:

$$\varepsilon = \varepsilon_i(p_i, a_i, b_i, \theta_i) \quad (3)$$

式中: p_i 为航空器 i 的几何中心位置, $p_i = (x_i, y_i)$, km; b_i 为保护区的短半轴长度, km; ε_i 为以 p_i 为圆心构造的椭圆保护区。

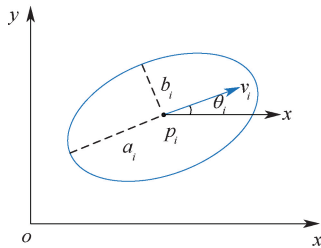


图1 单一航空器安全保护区模型

Fig.1 Single aircraft safety protection zone model

航空器保护区发生重叠视为航空器间已经产生冲突。冲突区域 C 见下式:

$$C = \left\{ (\hat{x}_j, \hat{y}_j) \in \mathbb{R}^2 : \frac{[(\hat{x}_j - x_i) \cos \theta_i + (\hat{y}_j - y_i) \sin \theta_i]^2}{a_i^2} + \frac{[(x_i - \hat{x}_j) \sin \theta_i + (\hat{y}_j - y_i) \cos \theta_i]^2}{b_i^2} \leq 1 \right\} \quad (4)$$

式中: e_j 为障碍航空器 j 保护区内任意一点的位置, $e_j = (\hat{x}_j, \hat{y}_j)$, km; $\mathbb{R}^2$ 为所有可能的有序对 $(\hat{x}_j, \hat{y}_j)$ 组成的平面(即二维实数空间)。

2) 航空器集群保护区。在高密度相似航态场景

下,逐机冲突探测计算开销高且策略易随时间失效。将相似航空器归并为集群 n , 以自适应椭圆集群保护区 ε_n 对其进行等效建模(图2), 并由集群成员的几何中心、合速度确定 ε_n 的质心 $p_n = (x_n, y_n)$ 、集群速度 $\mathbf{v}_n$ 及集群航向角 θ_n (集群保护区与 x 轴的夹角)。

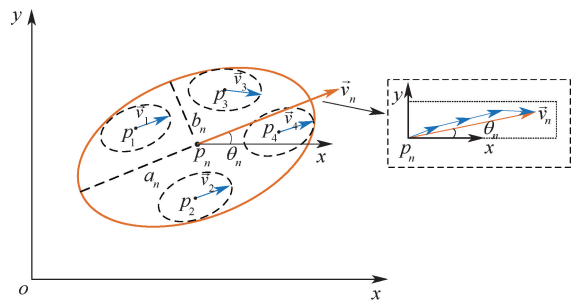


图2 航空器集群保护区模型

Fig.2 Aircraft swarm protection zone model

由于航空器之间的角度差异微小,结合集群的划分机制,定义航空器坐标均值为航空器集群的质心,见下式:

$$\begin{cases} x_n = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \\ y_n = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N} \end{cases} \quad (5)$$

式中 N 为集群内航空器个数。

为规避外障碍物,控制算法遵循对齐原则,基于集群速度矢量小幅修正航空器运动状态,以维持间隔并计算集群位姿参数,见下式:

$$|\mathbf{v}_n| = \frac{\sum_{i=1}^N |\mathbf{v}_i|}{N} \quad (6)$$

$$\theta_n = \arctan \frac{v_{ny}}{v_{nx}} = \sum_{i=1}^N \theta_i \quad (7)$$

$$\mathbf{v}_n = \begin{bmatrix} v_{nx} \\ v_{ny} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |\mathbf{v}_n| \cos \theta_n \\ |\mathbf{v}_n| \sin \theta_n \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: v_{nx} 和 v_{ny} 为集群速度矢量 $\mathbf{v}_n$ 的水平分量和垂直分量, km/min; θ_n 为集群速度矢量 $\mathbf{v}_n$ 的集群速度方向, ($^\circ$); $|\mathbf{v}_n|$ 为集群速度矢量 $\mathbf{v}_n$ 的集群速度大小, km/min。

优化模型确定集群保护区 ε_n , 目标是最小化面积并得到半轴长度, 见下式:

目标函数:

$$\min A_n = \pi a_n \cdot b_n \quad (9)$$

约束条件:

$$\frac{[(\tilde{x}_i - x_n) \cos \theta_i + (\tilde{y}_i - y_n) \sin \theta_i]^2}{a_n^2} + \frac{[(x_n - \tilde{x}_i) \sin \theta_i + (\tilde{y}_i - y_n) \cos \theta_i]^2}{b_n^2} \leq 1 \quad (10)$$

式中: $\tilde{p}_i$ 为航空器 i 的边界点, $\tilde{p}_i = (\tilde{x}_i, \tilde{y}_i)$, km; a_n 和 b_n 为航空器集群 n 的长半轴及短半轴, km; A_n 为航空器集群 n 的面积, km²。

1.2 面向航空器集群的 IVO 法

1.2.1 自适应 IVO 法

传统 VO 方法通过构建航空器间的锥形碰撞区域 (Collision Cone, CC) 预测潜在冲突, 其保护区几何形状对锥体构建及边界求解具有决定性影响。圆形保护区虽计算简便, 但在多机型、高动态飞行场景下难以准确描述航空器间的安全间隔。

为此, 提出一种自适应 IVO, 引入椭圆形保护区以替代传统圆形保护区。设 t_1 时刻, 航空器 i 和障碍航空器 j 保护区的正方辐射距离分别为 a_i 和 a_j , 侧向辐射距离分别为 b_i 和 b_j , 几何位置分别为 $p_i = (x_i, y_i)$ 和 $p_j = (x_j, y_j)$, 速度矢量分别为 $\mathbf{v}_i = [\mathbf{v}_{ix}, \mathbf{v}_{iy}]$ 和 $\mathbf{v}_j = [\mathbf{v}_{jx}, \mathbf{v}_{jy}]$, 速度大小分别为 $|\mathbf{v}_i|$ 和 $|\mathbf{v}_j|$, 速度方向分别为 θ_i 和 θ_j 。

以 p_j 为圆心, 分别叠加各轴长度作膨胀椭圆保护区的长半轴和短半轴。以 p_i 为顶点作锥形与膨胀椭圆保护区相切, 形成切线 l_1 和 l_2 , 切点 $\sigma_{ij} = (\tilde{x}_{ij}, \tilde{y}_{ij})$ 。 $\mathbf{v}_{ij} = [\mathbf{v}_{ijx}, \mathbf{v}_{ijy}]$ 为 $\mathbf{v}_i$ 和 $\mathbf{v}_j$ 相对速度矢量, l_{ij} 为 $\mathbf{v}_{ij}$ 方向上的射线, 传统 VO 模型如图 3 所示。相关计算见下式:

$$a_{ij} = a_i + a_j \quad (11)$$

$$b_{ij} = b_i + b_j \quad (12)$$

$$\mathbf{v}_{ij} = \mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j \quad (13)$$

$$d = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2} \quad (14)$$

$$\gamma = \arctan \frac{y_j - y_i}{x_j - x_i} \quad (15)$$

$$\phi = \arctan \frac{\mathbf{v}_{ijy}}{\mathbf{v}_{ijx}} \quad (16)$$

$$\varphi = \arctan \frac{\sqrt{(x_j - \tilde{x}_{ij})^2 + (y_j - \tilde{y}_{ij})^2}}{\sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2}} \quad (17)$$

式中: a_{ij} 和 b_{ij} 分别为“膨胀”椭圆保护区的长半轴和短半轴, km; $\mathbf{v}_{ij}$ 为相对速度矢量, km/min; d 为航空器间的距离, km; γ 为 d 与 $\mathbf{v}_j$ 的夹角, ($^\circ$); ϕ 为 $\mathbf{v}_{ij}$ 与 $\mathbf{v}_j$ 的夹角, ($^\circ$); ψ 为 d 与 l_1 或 l_2 的夹角, ($^\circ$)。

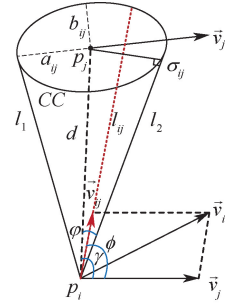


图3 传统 VO 模型

Fig. 3 Traditional VO model

因此, 膨胀椭圆保护区见下式:

$$\varepsilon_j^+(p_j, a_{ij}, b_{ij}, \theta_j) \quad (18)$$

式中: ε_j^+ 为以 p_j 为圆心构造的膨胀椭圆保护区; j 为任意航空器编号, 表示相应的膨胀椭圆区域。

ψ 的解析解可通过求导膨胀椭圆 ε_j^+ 的标准方程并利用切点斜率关系得出, 见下式:

$$\frac{[(x - x_j) \cos \theta_j + (y - y_j) \sin \theta_j]^2}{a_{ij}^2} + \frac{[(x_j - x) \sin \theta_j + (y - y_j) \cos \theta_j]^2}{b_{ij}^2} = 1 \quad (19)$$

$$\frac{\partial y}{\partial x} \Big|_{(\tilde{x}_{ij}, \tilde{y}_{ij})} =$$

$$\frac{2 \cos \theta_j [(\tilde{x}_{ij} - x_j) \cos \theta_j + (\tilde{y}_{ij} - y_j) \sin \theta_j]}{a_{ij}^2} - \frac{2 \sin \theta_j [(x_j - \tilde{x}_{ij}) \sin \theta_j + (\tilde{y}_{ij} - y_j) \cos \theta_j]}{b_{ij}^2} =$$

$$\frac{2 \sin \theta_j [(\tilde{x}_{ij} - x_j) \cos \theta_j + (\tilde{y}_{ij} - y_j) \sin \theta_j]}{a_{ij}^2} + \frac{2 \cos \theta_j [(x_j - \tilde{x}_{ij}) \sin \theta_j + (\tilde{y}_{ij} - y_j) \cos \theta_j]}{b_{ij}^2} \quad (20)$$

$$k_{l_2} = \frac{(y_i - \tilde{y}_{ij})}{(x_i - \tilde{x}_{ij})} \quad (21)$$

式中: k_{l_2} 为切线 l_2 的斜率; σ_{ij} 为 l_2 与 ε_j^+ 的切点, $\sigma_{ij} = (\tilde{x}_{ij}, \tilde{y}_{ij})$, km。

对航空器进行短时动态冲突预测, 根据 VO 基本原理, 航空器与障碍航空器存在冲突的判断条件 φ 是满足下式范围。 φ 的计算见下式:

$$\gamma - \varphi \leq \phi \leq \gamma + \varphi \quad (22)$$

同时,若 $\mathbf{v}_{ij}$ 末端在 VO 内,航空器与障碍航空器存在冲突。速度空间中的 CC 见下式:

$$CC = \{\mathbf{v}_{ij} \mid l_{ij} \cap \odot p_j \neq \emptyset\} \quad (23)$$

通常情况下,直接由航空器速度矢量来判断飞行冲突更为直观。当时间间隔为 Δt 时,将 p_i 和 ε_j^+ 沿 $\mathbf{v}_j$ 的方向平移距离 $\|\mathbf{v}_j \Delta t\|$, 其计算见下式:

$$\begin{cases} q_i = p_i + \mathbf{v}_j \Delta t \\ q_j = p_j + \mathbf{v}_j \Delta t \end{cases} \quad (24)$$

式中 q_i, q_j 分别为平移后坐标点, $q_i = (x'_i, y'_i)$ 、 $q_j = (x'_j, y'_j)$, km。

将 CC 平移 $\mathbf{v}_j$ 后计算新碰撞区域(New Collision Cone, NCC), 见下式:

$$NCC = CC \oplus \mathbf{v}_j \quad (25)$$

式中 $\oplus$ 为闵可夫斯基矢量加法操作。

1.2.2 面向航空器集群的 IVO 法

1) IVO 模型。集群划分“高密度”区域内航空器后,采用 IVO 法对每一组航空器集群构建 IVO 模型。设 t_1 时刻,航空器集群 n 和障碍航空器集群 m 的集群保护区正方辐射距离分别为 a_n 和 a_m ,侧向辐射距离分别为 b_n 和 b_m ,航空器集群膨胀保护区 ε_m^+ 长半轴和短半轴分别为 a_{nm} 和 b_{nm} 。质心位置分别为 p_n 和 p_m ,速度矢量分别为 $\mathbf{v}_n$ 和 $\mathbf{v}_m$,大小分别为 $|\mathbf{v}_n|$ 和 $|\mathbf{v}_m|$,速度方向分别为 θ_n 和 θ_m 。将 p_n 和 $\odot p_m$ 沿 $\mathbf{v}_m$ 的方向平移距离 $\|\mathbf{v}_m \Delta t\|$, 得到 $q_n = (x'_n, y'_n)$ 、 $q_m = (x'_m, y'_m)$, 集群与集群间的 IVO 模型如图 4 所示。

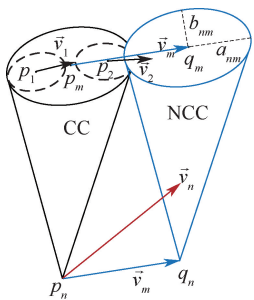


图 4 集群与集群间的 IVO 模型

Fig. 4 Swarm-to-swarm IVO model

2) 解脱空间。航空器集群的解脱包括速度解脱和航向解脱。结合航空器受自身性能约束,在单位时间 Δt 内允许调整的范围见下式:

$$\min |\mathbf{v}_n| \leq |\mathbf{v}'_n| \leq \max |\mathbf{v}_n| \quad (26)$$

$$0 \leq |\theta'_n - \theta_n| \leq \max \Delta \theta_n \quad (27)$$

式中: $|\mathbf{v}'_n|$ 为集群解脱速度, km/min; θ'_n 为集群解脱航向, ($^\circ$)。

基于解脱空间,以燃油消耗最低和速度调整偏

差最小为优化目标,分别制定切线策略和油耗策略:

1) 切线策略。切线策略的目标是使得航空器尽可能沿原航线飞行。对 NCC 区域边界关键参数的求解可转化为集群椭圆 ε_m^+ 的切线问题,其几何求解过程与下式中个体椭圆 ε_j^+ 的切线推导完全一致,故不再赘述。由此得到切线 l_3 的斜率 k_{l_3} 及其对应直线方程。

$$k_{l_3} = \frac{(y'_n - \tilde{y}_{nm})}{(x'_n - \tilde{x}_{nm})} \quad (28)$$

$$y_{l_3} = k_{l_3}(x - x'_n) + y'_n \quad (29)$$

式中: k_{l_3} 为切线 l_3 的斜率; σ_{nm} 为 l_3 与 ε_m^+ 的切点, km。

t_1 时刻障碍航空器集群解脱模型如图 5a 所示,求解解脱速度 $|\mathbf{v}'_n|$ 时,保持航向 θ_n 恒定,将 $\mathbf{v}'_n$ 所在的直线 $y_{v'_n}$ 与切线方程 y_{l_3} 联立,解得交点 $G = (x_g, y_g)$ 。

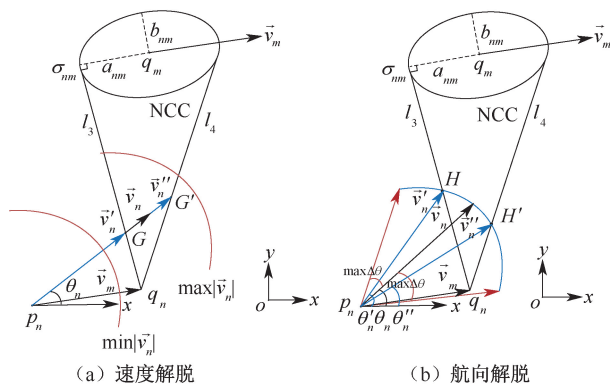


图 5 t_1 时刻障碍航空器集群解脱模型

Fig. 5 Modeling of obstacle aircraft swarm relief at moment t_1

通过分析点 G 相对于 p_n 的位置,获得解脱速度,见下式:

$$|\mathbf{v}'_{nx}| = x_g - x_n / |\mathbf{v}'_{ny}| = y_g - y_n \quad (30)$$

$$k_{v'_n} = \frac{|\mathbf{v}'_{ny}|}{|\mathbf{v}'_{nx}|} \quad (31)$$

$$y_{v'_n} = k_{v'_n}(x - x_n) + y_n \quad (32)$$

$$|\mathbf{v}'_n| = \frac{|\mathbf{v}'_{ny}|}{\sin \theta_n} \quad (33)$$

式中 $|\mathbf{v}'_{nx}|$ 和 $|\mathbf{v}'_{ny}|$ 为集群解脱速度 $|\mathbf{v}'_n|$ 的水平分量和垂直分量, km/min。

对于 NCC 区域边界 l_4 , 同理计算解脱航速 $|\mathbf{v}''_n|$ 。

航向解脱如图 5b 所示,求解解脱航向 θ'_n 时,保持速度大小 $|\mathbf{v}_n|$ 恒定, $\mathbf{v}'_n$ 与切线 y_{l_3} 在 H 点相

交。计算 $\mathbf{v}'_n$ 相对于 $p_n = (x_n, y_n)$ 的水平分量 $|\mathbf{v}'_{nx}|$ 和垂直分量 $|\mathbf{v}'_{ny}|$ 。将点 $H = (x_n + |\mathbf{v}'_{nx}|, y_n + |\mathbf{v}'_{ny}|)$ 代入 y_{l_3} 方程,并通过联立 2 个分量之间的关系方程,求解出 θ'_n , 分别见下式:

$$\sin\theta'_n = \frac{|\mathbf{v}'_{ny}|}{|\mathbf{v}_n|} / \cos\theta'_n = \frac{|\mathbf{v}'_{nx}|}{|\mathbf{v}_n|} \tag{34}$$

$$(y_n + |\mathbf{v}'_{ny}|) = k_{l_3} [(x_n + |\mathbf{v}'_{nx}|) - x'_n] + y'_n \tag{35}$$

$$\theta'_n = \arctan\left(\frac{|\mathbf{v}'_{ny}|}{|\mathbf{v}'_{nx}|}\right) \tag{36}$$

对于 NCC 区域边界 l_4 , 同理, 计算解脱航向 θ''_n 。

2) 油耗策略。在切线策略的解脱空间中, 基于航空器基础数据 (Base of Aircraft Data, BADA), 优化目标为同时最小化燃油消耗和速度调整偏差^[17]。见下式:

$$\min C_i(t) = c_1 \left[1 + \frac{|\mathbf{v}'_n|(t)}{c_2} \right]$$

$$\left[\alpha |\mathbf{v}_n|(t)^2 + \frac{\beta}{|\mathbf{v}'_n|(t)^2} + m \frac{d|\mathbf{v}_n|(t)}{dt} \right] \tag{37}$$

$$\min |\mathbf{v}_n| \leq |\mathbf{v}'_n| \leq \max |\mathbf{v}_n| \tag{38}$$

式中: m 为航空器的质量, kg; c_1 为第一推力比油耗系数; c_2 为第一推力比油耗系数; α 为第一燃料流量系数; β 为第二燃料流量系数; $|\mathbf{v}_n|(t)$ 为 t 时刻速度大小, km/min; $|\mathbf{v}'_n|(t)$ 为 t 时刻决策速度大小, km/min; $C_i(t)$ 为决策速度下单位时间油耗, kg/km; 其中, c_1 、 c_2 、 α 、 β 取决于航空器的类型。

1.3 基于 IVO 法的航空器集群冲突解脱方法

在面向航空器集群的冲突解脱过程中, 考虑到实际飞行环境的复杂性和优化目标的多样性, 提出一种基于 IVO 的方法来有效解决航空器集群中的冲突问题, 具体流程如图 6 所示^[18]。

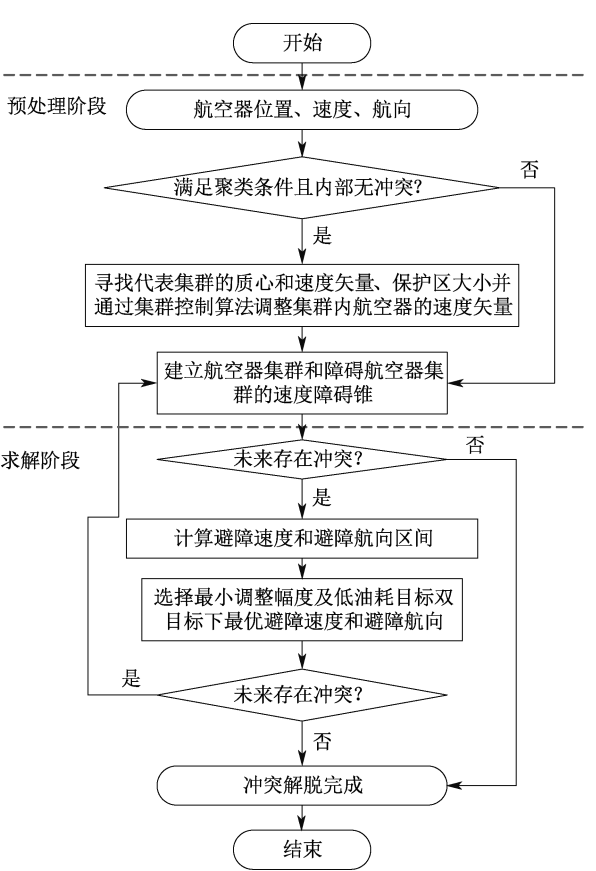


图 6 基于 IVO 的航空器集群冲突解脱流程
Fig. 6 Flowchart of aircraft swarm obstacle avoidance based on IVO method

2 集群冲突解脱模型的验证与分析

2.1 自适应保护区验证与分析

为对比传统间隔与椭圆自适应保护区间隔的差异, 选取不同机型航空器进行低空空域测试。同时, 为更好地模拟真实空域场景, 参照文献[16], 取 $\lambda = 0.3$ 。其中, 传统间隔参照中国民用航空空中交通管理规则, 见表 1。

表 1 不同安全间隔下的航空器位姿信息

Table 1 Aircraft position information at different safety intervals

编号	机型	$(x_i, y_i)/$ km	$a_i/$ km	$b_i/$ km	$\theta_i/$ ($^\circ$)	$v_i/$ (km/min)	机型	$(x_j, y_j)/$ km	$a_j/$ km	$b_j/$ km	$\theta_j/$ ($^\circ$)	$v_j/$ (km/min)
1	A320	(60, 60)	1.65	1.47	50	5.5	DA40	(50, 90)	1.35	1.03	5	4.5
	A320	(60, 60)	10.00	10.00	50	5.5	DA40	(50, 90)	10.00	10.00	5	4.5
2	CY-09	(200, 330)	0.65	0.03	120	2.17	C-172	(215, 350)	1.14	0.73	200	3.8
	CY-09	(200, 330)	7.00	7.00	120	2.17	C-172	(215, 350)	7.00	7.00	200	3.8
3	CY-12	(60, 70)	0.80	0.24	20	2.67	HC-540	(80, 100)	0.72	0.13	280	2.4
	CY-12	(60, 70)	7.00	7.00	20	2.67	HC-540	(80, 100)	7.00	7.00	280	2.4

传统间隔与自适应椭圆保护区解脱策略见表 2, 试验组 1 的速度和航向调整分别减少 97.09% 和 96.07%, 试验组 2 和 3 也显示显著优化, 整体速

度调整偏差优化 86.67%, 有效减少了调整需求并满足间隔管理。

表 2 传统间隔与自适应椭圆保护区解脱策略

Table 2 Traditional interval and adaptive elliptical protected zone relief strategies								
编号	$ \mathbf{v}'_i /$ (km/min)	$ \mathbf{v}''_i /$ (km/min)	$\theta'_i/$ ($^{\circ}$)	$\theta''_i/$ ($^{\circ}$)	min $ \mathbf{v}'_i $ 调整量	max $ \mathbf{v}''_i $ 调整量	min θ''_i 调整量	max θ''_i 调整量
1	4.75	5.58	48.89	63.03	0.08	0.75	1.11	13.03
	2.75	12.32	21.76	117.92	2.75	6.82	28.24	67.92
2	2.06	2.48	113.47	167.64	0.11	0.31	6.53	47.64
	—	6.46	—	17.45	—	4.29	—	102.55
3	2.61	3.02	14.70	21.00	0.06	0.35	1.00	5.30
	2.03	6.56	-13.32	32.05	0.64	3.89	12.05	33.32

2.2 航空器集群分析与划分

为验证集群划分模型的适用性与有效性, 选取 5 种机型共 10 架航空器的位姿数据(表 3)。采用集群优化模型, 在航空器间隔 ≤ 10 km、航向差 $\leq 5^{\circ}$ 、航速差 ≤ 0.5 km/min 的约束下完成分类。参数设置以响应时间为依据并兼顾运行紧密性与安全性。

表 3 5 种不同机型航空器位姿信息

Table 3 Positioning information for five different types of aircraft					
编号	$(x_i, y_i)/\text{km}$	a_i/km	b_i/km	$\theta_i/(^{\circ})$	$v_i/(\text{km}/\text{min})$
1	(60, 73)	1.65	1.47	2	5.4
2	(20, 78)	1.65	1.47	0	5.2
3	(80, 58)	1.35	1.03	80	4.5
4	(82, 55)	1.35	1.03	83	4.4
5	(50, 80)	1.14	0.73	5	3.8
6	(45, 73)	1.14	0.73	6	3.7
7	(20, 70)	0.72	0.13	10	2.4
8	(85, 75)	0.72	0.13	10	2.4
9	(40, 50)	0.8	0.24	60	2.6
10	(65, 73)	1.65	1.47	4	4.9

分类结果如图 7 所示, 10 架航空器共分为 7 个内部无冲突的集群 $M = \{m_1, m_2, \dots, m_7\}$, 其中 $m_1 = \{p_2\}$, $m_2 = \{p_7\}$, $m_3 = \{p_9\}$, $m_4 = \{p_5, p_6\}$, $m_5 = \{p_1, p_{10}\}$, $m_6 = \{p_3, p_4\}$, $m_7 = \{p_8\}$ 。

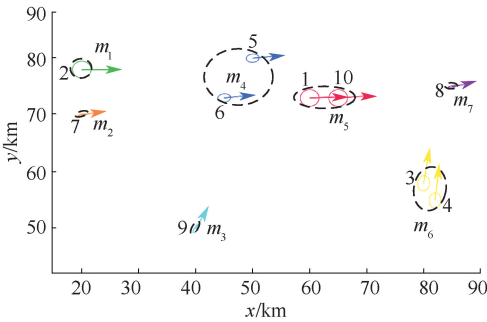


图 7 航空器聚类模型

Fig. 7 Aircraft swarming model

以集群 m_5 、 m_6 为例, 分析集群质点、速度矢量及集群保护区大小, 结果如图 8 所示。集群 m_5 和 m_6 保护区面积分别在 29.38、28.06 km² 时满足优化条件。表 4 记录了航空器与所属集群之间的速度差

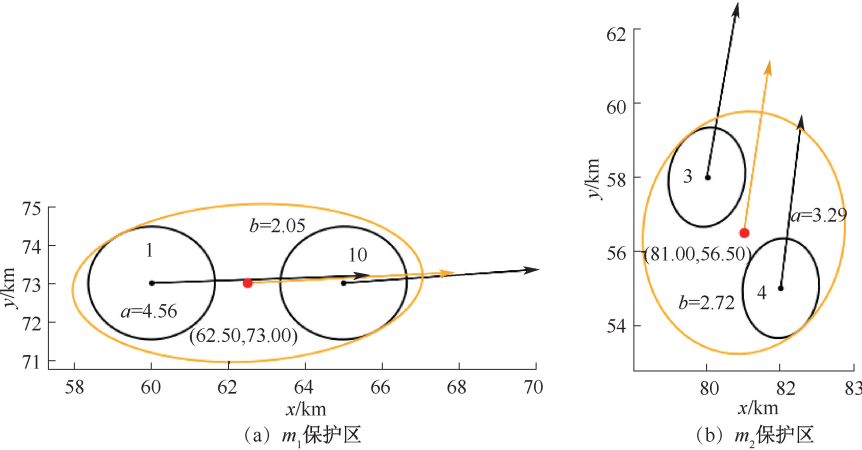


图 8 集群信息

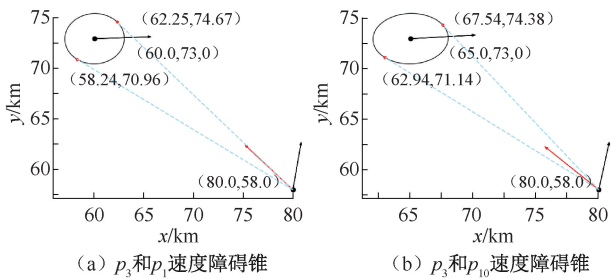
Fig. 8 Swarm information

$[0,0.3]$ 和角度差 $[0,2]$, 数据均在导航精度误差可接受范围内。

表 4 航空器与航空器集群的速度矢量差

Table 4 Velocity vector difference between aircraft and aircraft swarm			
集群	航空器	角度差/(°)	速度差/(km/min)
m_5	p_1	0.95	0.25
m_5	p_{10}	1.05	0.25
m_6	p_3	1.48	0.05
m_6	p_4	1.52	0.05

在多集群冲突管理中,传统 VO 法需对跨集群航空器进行两两判定;若集群分别包含 μ_1 、 μ_2 架航空器,则冲突判断次数为 $\mu_1 \times \mu_2$ 。以 $\mu_1 = 4$ 、 $\mu_2 = 2$ 为



例,传统方法需执行 8 次判断;采用聚类优化后仅需 1 次集群间判定,计算效率提升至 87.5%。因此,IVO 法的效率优势主要来自“集群级”判定机制,使计算开销由航空器总数驱动转为由集群规模驱动,显著降低大规模场景下的资源消耗。

2.3 集群冲突解脱模型验证与分析

1) 传统 VO 法冲突验证。针对集群 m_5 和 m_6 的冲突场景,采用传统 VO 法判定集群内航空器。结果表明:各航空器对的相对速度均落入速度锥碰撞区域(图 9),预示未来将发生冲突。通过数值仿真可知:5 min 内出现多次冲突,最早冲突发生于 3.15 min。

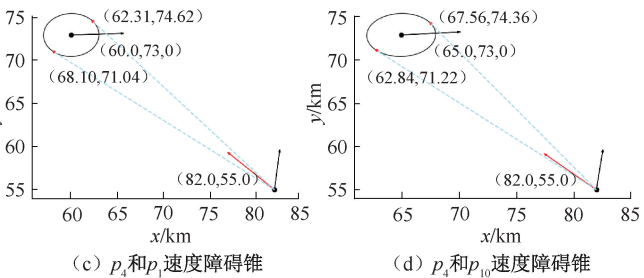


图 9 传统 VO 模型

Fig.9 Traditional VO model

2) IVO 法冲突验证。结合在单位时间内的最大调整能力,设冲突解脱的边界参数:最大调整航向为 120° ,最小调整航速为 1 km/min,最大调整航速为 13 km/min。通过 IVO 法对集群 m_5 和 m_6 进行冲突探测,由切线策略求解解脱空间(表 5)。预测得到的集群冲突时间为 3.05 min,接近于单架航空器执行冲突探测的最短冲突时间 3.15 min,表明基于航空器集群划分的 IVO 法能够准确预测航空器冲突时间。

从考虑航空器性能的解脱空间中,计算集群最优解脱策略。设 DA40 相关的参数取值为:质量

表 5 航空器解脱策略

Table 5 Aircraft relief strategy					
集群	T/min	$ \mathbf{v}'_n /(\text{km/min})$	$ \mathbf{v}''_n /(\text{km/min})$	$\theta'_n/(\text{°})$	$\theta''_n/(\text{°})$
$m_1 \& m_2$	3.05	2.84	7.1	31.2	114.83

$m = 806 \text{ kg}$,速度 $|\mathbf{v}_n| = 4.45 \text{ km/min}$,单位时间加速度 $d|\mathbf{v}_n|/dt = 0.35 \text{ km/min}^2$, $c_1 = 2.02 \times 10^{-7}$, $c_2 = 0.1$, $\alpha = 3\,500$, $\beta = 4\,279\,854.4$ 。图 10a 揭示航空器飞行速度和燃油消耗(等效碳排放)之间的关系。在兼顾解脱调整幅度与低碳运行目标下,选取接近最低碳排放且满足改变量最小目标下的速度值为最

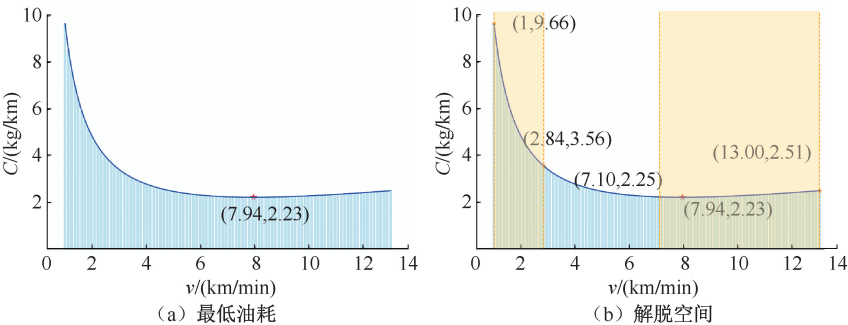


图 10 单位时间内可达范围的航空器速度与燃油消耗关系

Fig.10 Aircraft speed versus fuel consumption per unit of time in the reach range

优值。图 10b 的曲线显示,速度 $|v_n|$ 分别为 1、2.84、7.1 和 13 km/min 时,燃油消耗量分别为 9.66、3.56、2.25 和 2.51 kg/km。特别地,图中以星号标记的数据显示,最低燃油消耗为 2.23 kg/km,对应速度为 7.94 km/min,处于解脱空间 2 中。综合以上数据分析得出速度 $|v'_n| = 7.1$ km/min 时满

足设定的“双目标”要求。此时,最大节油比例可达 37.36%,而最小节油比例为 0.89%。

集群 m_5 和 m_6 的 IVO 分析如图 11a 所示,其相对速度 v_n 落入碰撞区域,判定存在潜在冲突。采用解脱解 $|v'_n| = 7.1$ km/min, $\theta'_n = 115^\circ$ 后(图 11b、图 11c),冲突解除。

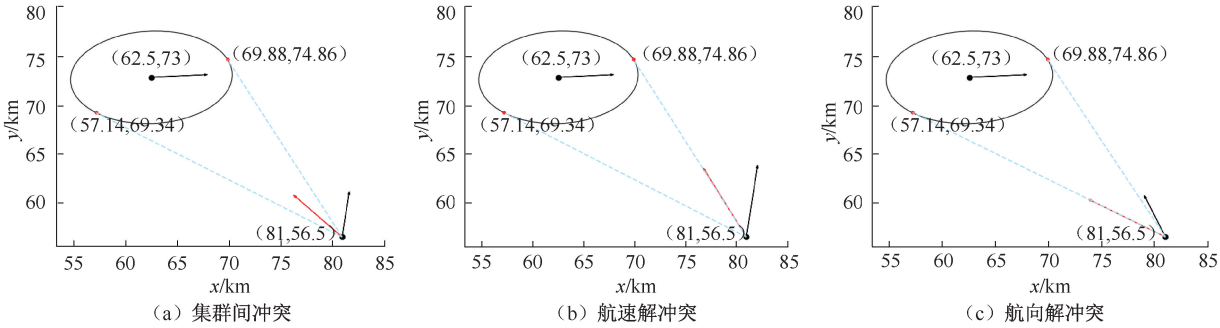


图 11 IVO 模型
Fig. 11 IVO model

3 结 论

1) 文中所构建的集群控制机制,可有效降低多机碰撞风险并维持集群结构稳定。该方法使航空器平均速度调整偏差与航向调整量减少 32.78%,并在多集群复杂场景中显著提升计算效率达 87.5%。

2) 集成速度优化策略可进一步降低航空器燃油消耗,最高节能效果达到 72.47%,显著提升飞行的经济性与环保性。

3) 文中方法基于二维数值仿真,未考虑风场等环境扰动。后续将引入环境不确定性并扩展三维保护区模型以提升精度与适用性。

参 考 文 献

[1] 王颖. “双碳”背景下数据中心绿色低碳发展对策[J]. 上海节能, 2024(5):780-783.
Wang Ying. Countermeasures for green and low carbon development of data centers under the background of "Double Carbon"[J]. Shanghai Energy Conservation, 2024(5):780-783.

[2] 耿鹏, 杨豪杰, 薛芳琳, 等. 基于多无人机协同的林火安全探测及人员疏散[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(4):43-50.
Geng Peng, Yang Haojie, Xue Fanglin, et al. Forest fire safety detection and personnel evacuation based on collaborative MUAVs[J]. China Safety Science Journal, 2025,35(4):43-50.

[3] 周元伟, 兰翔. 2026 年我国民航旅客运输量预测:基于运力约束与客源重构下的研判[J]. 空运商务, 2025(12): 8-12.
Zhou Yuanwei, Lan Xiang. Forecast of China's civil aviation passenger transport volume in 2026:an analysis based on capacity constraints and passenger source restructuring [J]. Air Transport Business, 2025(12): 8-12.

[4] Fiorini P, Shiller Z. Motion planning in dynamic environments using the relative velocity paradigm[C]. Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 1993: 560-565.

[5] Fiorini P, Shiller Z. Motion planning in dynamic environments using velocity obstacles[J]. The International Journal of Robotics Research, 1998,17(7):760-772.

[6] Wilkie D, Van D B J, Manocha D. Generalized velocity obstacles[C]. 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2009:5 573-5 578.

[7] Van D B J, Lin Ming, Manocha D. Reciprocal velocity obstacles for real-time multi-agent navigation[C]. 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2008:1 928-1 935.

[8] Yu Yingxue, Ai Yi, Zhong Qingwei, et al. A refined protected zone model and conflict-aware algorithm for manned and unmanned fusion airspace[J]. International Journal of Aeronautical and Space Sciences, 2025, 26:1 427–1 451.

[9] Du Zhe, Li Weifeng, Shi Guoyou. Multi-USV collaborative obstacle avoidance based on improved velocity obstacle method[J]. ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering, 2024, 10(1): DOI: 10.1061/AJRUA6.RUENG-1174.

[10] Pan Weijun, Qin Liru, He Qinyue, et al. Three-dimensional flight conflict detection and resolution based on particle swarm optimization[J]. Aerospace, 2023,10(9): DOI: 10.3390/aerospace10090740.

[11] Gao Jing, Zhang Hongtao, Tan Li, et al. UAV dynamic obstacle avoidance based on improved reciprocal velocity obstacle[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022,2216(1): DOI: 10.1088/1742-6596/2216/1/012014.

[12] Zhu Hongyang, Ding Yi. Optimized dynamic collision avoidance algorithm for USV path planning[J]. Sensors, 2023, 23(9): DOI: 10.3390/s23094567.

[13] Zheng Huarong, Zhu Jiangbo, Liu Chenguang, et al. Regulation aware dynamic path planning for intelligent ships with uncertain velocity obstacles[J]. Ocean Engineering, 2023,278: DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.114401.

[14] Peng Mingzhu, Meng Wei. Cooperative obstacle avoidance for multiple UAVs using spline_VO method[J]. Sensors, 2022,22 (5): DOI: 10.3390/s22051947.

[15] Xue Delai, Wu Defeng, Yamashita A S, et al. Proximal policy optimization with reciprocal velocity obstacle based collision avoidance path planning for multi-unmanned surface vehicles [J]. Ocean Engineering, 2023, 273: DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.114005.

[16] 彭娅婷, 温祥西, 吴明功, 等. TBO 模式下基于复杂网络的空中交通复杂性分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2025,51(4):1 234–1 244.

Peng Yating, Wen Xiangxi, Wu Minggong, et al. Complex network-based air traffic complexity analysis in TBO[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2025,51(4):1 234–1 244.

[17] 王红勇, 邓涛涛, 徐文强. 基于调速的飞行冲突探测与解脱方法[J]. 科学技术与工程, 2021,21(13): 5 584–5 591.

Wang Hongyong, Deng Taotao, Xu Wenqiang. Conflict detection and resolved method based on speed regulation[J]. Science, Technology and Engineering, 2021,21(13):5 584–5 591.

[18] 刘钊, 罗辰汉, 张明阳. 多碍航物水域救援船路径规划方法[J]. 中国安全科学学报, 2023,33(7): 90–97.

Liu Zhao, Luo Chenhan, Zhang Mingyang. Path planning method of rescue ships in waters with multiple obstacles[J]. China Safety Science Journal, 2023,33(7): 90–97.

作者简介： 钟庆伟 （1991—）,男,四川什邡人,博士,副教授,主要从事交通运输组织优化方面的研究。E-mail:qingweizhong@cafuc.edu.cn。

