

文章编号:1671-1637(2019)06-0125-12

基于 SMILO-VTAC 模型的复杂 低空多机冲突解脱方法

张启钱, 王中叶, 张洪海, 江程鹏, 胡明华

(南京航空航天大学 民航学院, 江苏 南京 211106)

摘要:针对传统 SMILO-VTAC 模型的 2 种不受控情形,提出了面向不受控情形的复杂低空多机冲突解脱模型;在传统 SMILO-VTAC 模型的基础上,考虑复杂低空空域物障限制条件,提出了面向物障情景的低空多机冲突探测与解脱模型;结合通用航空活动任务优先等级,建立了基于任务优先性质的多机冲突探测与解脱规则和流程;建立了多航空器对头汇聚场景,基于提出的方法进行仿真验证。分析结果表明:相比传统 SMILO-VTAC 模型,提出的方法能够满足不受控情形的多机冲突探测与解脱实际需要,并能根据任务优先等级计算方案,解脱成本分配合理,符合复杂低空空域航空器的特点;提出的方法在航空器数量不大于 4 架次时,求解时间略长,但基本控制在 1 s 以内;当航空器数量大于 4 架次时,求解时间小于传统 SMILO-VTAC 模型;当航空器数量不小于 7 架次时,求解时间远低于传统 SMILO-VTAC 模型;在将优先级因素加入考量后,方法的平均解脱成本较传统 SMILO-VTAC 模型增加了 10%~20%,以少量增加平均解脱成本为代价,实现了解脱成本依照优先级顺序的分配,将高优先级航空器解脱成本向低优先级航空器传递。可见,在多航空器运行和多优先级情景下,改进方法具有更高的解脱效率,在相同计算时间内具有更高的解脱架次极限。

关键词:航空运输;冲突探测与解脱;建模仿真;整数线性规划;复杂低空;多机冲突

中图分类号:V355.2 **文献标志码:**A **DOI:**10.19818/j.cnki.1671-1637.2019.06.012

SMILO-VTAC model based multi-aircraft conflict resolution method in complex low-altitude airspace

ZHANG Qi-qian, WANG Zhong-ye, ZHANG Hong-hai, JIANG Cheng-peng, HU Ming-hua
(School of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, Jiangsu, China)

Abstract: Aiming at the two uncontrolled cases of traditional sequential mixed integer linear optimization-velocity change, turn change and altitude change (SMILO-VTAC) model, a new multi-aircraft conflict resolution model in complex low-altitude airspace under uncontrolled cases was proposed. Considering the constraints of terrain obstacles in complex low-altitude airspace, a low-altitude multi-aircraft conflict detection and resolution model for the obstacle-oriented scenarios was proposed based on the traditional SMILO-VTAC model. Combined with the priority of general aviation tasks, the rules and procedures of multi-aircraft conflict detection and resolution were established based on the task priority. A multi-aircraft head-to-head convergence scenario was established. Simulation and verification were performed based on the proposed method. Analysis result shows that compared with the traditional SMILO-VTAC model, the

收稿日期:2019-07-03

基金项目:国家自然科学基金项目(61573181);空中交通管理系统与技术国家重点实验室开放基金项目(SKLATM201801)

作者简介:张启钱(1979-),男,江苏南通人,南京航空航天大学副研究员,工学博士,从事空中交通管理研究。

通讯作者:张洪海(1979-),男,山东菏泽人,南京航空航天大学教授,工学博士。

proposed method can meet the actual needs of multi-aircraft conflict detection and resolution in uncontrolled cases, and resolve the schemes based on task priority. The resolution cost allocation is reasonable, and the method is more suitable for the characteristics of aircrafts in complex low-altitude airspace. The solution time of the proposed method is slightly longer when the number of aircrafts is no more than 4, but it is basically controlled within 1 s. When the number of aircrafts is more than 4, the solution time of the proposed method is generally less than that of the traditional SMILO-VTAC model. When the number of aircrafts is no less than 7, the solution time of the proposed method is much lower than that of the traditional SMILO-VTAC model. Considering the priority factors, the average resolution cost of new method is 10%-20% higher than that of the traditional SMILO-VTAC model. Along with the small increase in the average resolution cost, the resolution cost is allocated in order of priority. The resolution cost of high-priority aircraft is passed to low-priority aircraft. Obviously, the improved method has higher resolution efficiency in multi-aircraft operation and multi-priority scenario, and has a higher limit of resolution amount in the same calculation time. 4 tabs, 12 figs, 28 refs.

Key words: air transportation; conflict detection and resolution; modeling and simulation; integer linear programming; complex low-altitude airspace; multi-aircraft conflict

Author resumes: ZHANG Qi-qian(1979-), male, associate professor, PhD, zhangqq@nuaa.edu.cn; ZHANG Hong-hai(1979-), male, professor, PhD, honghaizhang@nuaa.edu.cn.

0 引 言

复杂低空飞行机型多样、性能差异大,空域飞行环境复杂,易受物障、天气等因素的影响。在飞行量较大的区域,多航空器相互影响,飞行员无法完全依靠自主行为完成安全、高效的飞行,在此类局部繁忙空域中,需依靠集中式决策来辅助进行冲突避让。为实现复杂低空环境下各类航空活动安全高效运行,国内外对多机飞行冲突解脱技术进行了深入研究并取得了一定成果。

在针对复杂低空飞行建模的研究中,基于智能体的建模与仿真研究较多,智能体思想将系统内的行为个体视为具有感知能力、效应能力、主动性和目的性的智能体,对复杂适应系统中的个体间以及个体与环境之间的交互进行建模。Wang 等提出通用航空仿真系统框架,包括数据收集模块、数据分析模块、冲突探测模块、冲突解脱模块以及数据输出模块,对冲突探测与冲突解脱模块的内部流程进行详细分析^[1];叶博嘉等应用多智能体建模技术研究了空中走廊中的飞行风险问题^[2];张翔宇等基于智能体的建模思想,建立空域环境和航空器智能体,基于 Netlogo 软件进行了复杂低空飞行态势仿真^[3-4]。复杂低空飞行建模研究的核心在于多机交互中的冲突探测与解脱。

在解脱方法方面,主流的冲突解脱方法有 3 种,

分别为基于规则的、基于力场的和基于效用函数最优的解脱。基于规则的解脱方法即使用一套提前规定好的行为进行解脱,如上升、下降、转弯。Rong 等提出了一种基于多智能体的空中交通冲突探测与解脱方法,此方法可进行多机解脱,将每架航空器视为一个智能体,将航空器冲突解脱问题转化为约束满足问题,航空器根据已知的约束生成可行的飞行方案,然后将此方案及自身的限制传送给对象航空器,航空器根据受到的限制及自身的限制判断方案是否可行,若不可行,考虑最新的限制生成新的方案,循环直到生成满足限制的方案^[5];Wollkind 等提出使用合作的、多智能体协商技术来高效地解决空中交通冲突问题,所得解脱方案为伪最优,使用了单调许可协议进行协商,计算每种策略对两航空器的效用,采用伪最优,去除不满足的策略,航空器根据效用大小接收或拒绝对方的策略,基于力场的解脱方法将航空器视为一个个粒子,粒子之间存在斥力,应用修正的静电学方程和力学方程进行冲突解脱^[6];Eby 等介绍了一种在“自由飞”运行环境中航空器可以实时且独立的无冲突航迹规划的方法,不管是针对航空器对还是多架航空器,都具有较好的鲁棒性^[7];Innocenti 等提出了一种基于概率场的冲突解脱方法,通过在概率场中引入漩涡解决了航空器的完全对称问题,方法在多机解脱中展现出很好的效果^[8]。

2000 年后的研究开始侧重于优化算法的构

建^[9-28], 缩减算法运行时间, 以实现实时的冲突探测与解脱。Bilimoria 等对集中式和分布式 2 种冲突解脱策略的运行效能进行了对比, 其中集中式策略具有提前性, 在进行解脱之前计算好可行的策略, 考虑所有限制同时满足最小化目标函数, 使用半定规划和分支定界搜索寻找最优解, 分布式策略具有实时性, 每架航空器解决自身的冲突, 每次策略刷新时, 基于当前的状态信息计算一个新的策略, 在经过多次瞬时调整之后达到稳定状态^[9]; Frazzoli 等提出了一种冲突解脱方法, 每架航空器给出其期望的航迹, 以航空器期望航迹与冲突解脱航迹偏离最小为目标, 通过一个集中式空中交通管制单元解脱所有冲突^[10]; 在基于线性规划的冲突解脱研究中, 基于混合整数线性优化 (Mixed Integer Linear Optimization, MILO), Pallottino 等提出了调速 (Velocity Change, VC) 和调节航向 (Turn Change, TC) 2 种冲突解脱模型^[11]; 在此基础上, Alonso-Ayuso 等提出了可同时选择调速或调高度 (Altitude Change, AC) 的 MILO-VAC 模型^[12], 通过将航向离散化并引入序列整数线性规划, 提出 SILO-TC 模型^[13], 进一步将以上 2 种模型结合, 基于序列混合整数线性规划提出了可同时选择调速度、调航向以及调高度的序列混合整数线性优化 (Sequential Mixed Integer Linear Optimization-Velocity Change, Turn Change and Altitude Change, SMILO-VTAC) 模型^[14]。

SMILO-VTAC 模型可很好地实现多机、多行为的冲突解脱, 但未考虑航空器的类型差异, 并不适用于低空多优先级航空器交互的冲突解脱, 同时也未将障碍物、恶劣天气等因素纳入考虑。鉴于此, 本文对 SMILO-VTAC 模型进行改进, 加入对障碍物、恶劣天气等因素的考虑, 同时调整对冲突情形的分类判断方式, 增加原模型未涉及的近距离航空器冲突特殊情形, 提出了改进后的复杂低空繁忙空域冲突解脱模型; 此外, 本文在改进模型的基础上提出一系列冲突探测与解脱规则, 将航空器基于相互间的冲突关系纳入到不同的局部冲突解脱组中, 并按照航空器的绝对优先级次序分组, 循环执行冲突解脱。

1 复杂低空飞行冲突几何构型

1.1 冲突探测几何构型

冲突探测的几何构型^[11]见图 1, 其中 v_i 、 v_j 分别为航空器 i 、 j 的速度, $i, j=1, 2, \dots, F, i \neq j, F$ 为航空器数量; v_{ij} 为航空器 i 相对航空器 j 的速度; 航空器对 $(i, j) \in U, U$ 为任意航空器的组合对集合;

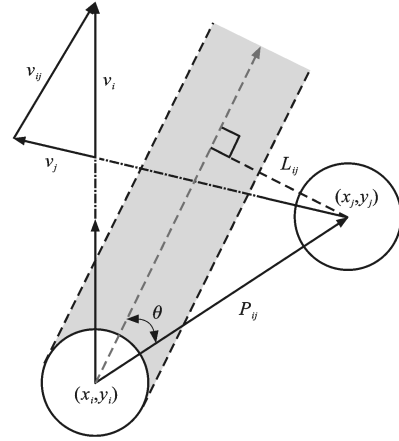


图 1 冲突探测的几何构型

Fig. 1 Geometric configuration for conflict detection

(x_i, y_i) 为航空器 i 的当前坐标; (x_j, y_j) 为航空器 j 的当前坐标; θ 为相对位移与相对速度的夹角; L_{ij} 为航空器 i 、 j 的最小相对距离; 与航空器 i 保护区相切的 2 条虚线与 v_{ij} 平行, 虚线阴影区域表示航空器 i 和 j 的运动区域。

本文采用基于最小相对距离的冲突探测方式^[7], 航空器 i 、 j 的相对位移 P_{ij} 为

$$P_{ij} = (x_j - x_i, y_j - y_i) \quad (1)$$

相对位移与相对速度的夹角 θ 的余弦为

$$\cos(\theta) = \frac{P_{ij} v_{ij}}{|P_{ij}| |v_{ij}|} \quad (2)$$

航空器 i 和 j 的最小相对距离为

$$L_{ij} = |P_{ij}| \sin(\theta) \quad (3)$$

记 r_i 为航空器 i 保护区半径, r_j 为航空器 j 保护区半径, 则冲突判定条件为

$$\begin{cases} \cos(\theta) \geq 0 \\ L_{ij} < r_i + r_j \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\cos(\theta) \geq 0$ 为两航空器相互汇聚; $L_{ij} < r_i + r_j$ 为虚线阴影区域与航空器 j 保护区相交。

1.2 冲突解脱几何构型

冲突解脱的几何构型^[11]见图 2, 若航空器 i 和 j 通过速度或航向调整满足式 (5)、(6) 中基本限制之一, 使阴影区域与冲突航空器保护区不重叠, 则可实现冲突解脱

$$\tan(l_{ij}) \leq S_{ij} / C_{ij} \quad (5)$$

$$S_{ij} / C_{ij} \leq \tan(g_{ij}) \quad (6)$$

$$S_{ij} = (v_i + v_i^+ - v_i^-) \sin(m_i + \mu_i^+ - \mu_i^-) - (v_j + v_j^+ - v_j^-) \sin(m_j + \mu_j^+ - \mu_j^-) \quad (7)$$

$$C_{ij} = (v_i + v_i^+ - v_i^-) \cos(m_i + \mu_i^+ - \mu_i^-) - (v_j + v_j^+ - v_j^-) \cos(m_j + \mu_j^+ - \mu_j^-) \quad (8)$$

$$l_{ij} = \omega_{ij} + \alpha_{ij} \quad (9)$$

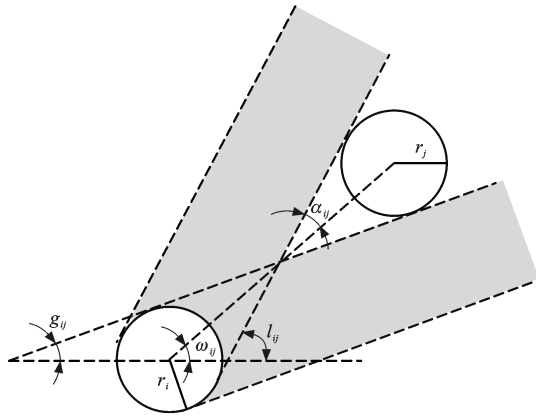


图 2 冲突解脱的几何构型

Fig. 2 Geometric configuration for conflict resolution

$$g_{ij} = \omega_{ij} - \alpha_{ij} \quad (10)$$

$$\alpha_{ij} = \arcsin[(r_i + r_j)/d_{ij}] \quad (11)$$

$$\omega_{ij} = \arctan[(y_i - y_j)/(x_i - x_j)] \quad (12)$$

式中: S_{ij} 为航空器 i, j 相对速度在垂直方向上的分量; C_{ij} 为航空器 i, j 相对速度在水平方向上的分量; m_i 为航空器 i 当前航向; m_j 为航空器 j 当前航向; v_i^+, v_i^- 分别为航空器 i 的加、减速调整量; v_j^+, v_j^- 分别为航空器 j 的加、减速调整量; μ_i^+, μ_i^- 分别为航空器 i 右、左转航向调整量; μ_j^+, μ_j^- 分别为航空器 j 右、左转航向调整量; l_{ij} 为航空器 i 和 j 相对速度与航空器 j 保护区上侧相切时的方向角; g_{ij} 为航空器 i 和 j 相对速度与航空器 j 保护区下侧相切时的方向角; ω_{ij} 为航空器 i 和 j 相对位置关系角; α_{ij} 为冲突解脱阴影区边界与航空器 i 和 j 连线的夹角; d_{ij} 为航空器 i 和 j 的水平距离。

1.3 冲突情形分类

在以上冲突解脱几何构型的基础上, Alonso-Ayuso 等提出了 SMILO-VTAC 模型^[14]。SMILO-VTAC 模型考虑了一种不受控情形, 即非近距特殊情形, 见图 3。航空器 i 和 j 的横坐标十分接近, 满足

$$|x_i - x_j| \leq r_i + r_j \quad (13)$$

此时相对速度的正切值趋向无穷大, 导致计算结果不稳定, 需在预处理中将航空器 i 和 j 的相对位置逆时针旋转 90° , 转化为普通情形求解。

这种不受控情形出现的原因在于, 当航空器 i 和 j 满足 $\tan(l_{ij}) \leq S_{ij}/C_{ij}$ 或 $S_{ij}/C_{ij} \leq \tan(g_{ij})$ 时, 要保证不出现冲突, 还需满足

$$\tan(g_{ij}) < \tan(l_{ij}) \quad (14)$$

否则限制无效, 即为上述的不受控情形。

在不受控情形中, 还存在图 4 所示的近距特殊情形, 航空器 i 和 j 的距离非常接近, 使 l_{ij} 和 g_{ij} 分别位于第 1、3 象限或第 2、4 象限, 即满足

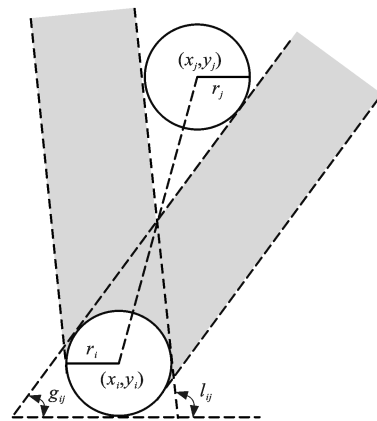


图 3 非近距特殊情形

Fig. 3 Non-proximity pathological case

$$\tan(g_{ij})\tan(l_{ij}) > 0 \quad (15)$$

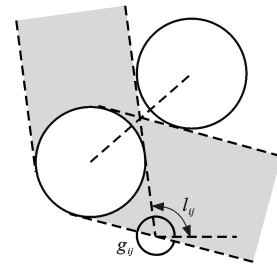


图 4 近距特殊情形

Fig. 4 Proximity pathological case

此时无法转化为普通情形求解, 为将这一特殊情形纳入考虑, 本文通过判断 $\tan(g_{ij})$ 和 $\tan(l_{ij})$ 的数值关系对冲突情形分类, 见表 1。

表 1 冲突情形分类

Tab. 1 Conflict situation classification

冲突情形	判断条件	基本限制
普通情形	$\tan(g_{ij}) < \tan(l_{ij})$	$\tan(l_{ij}) \leq S_{ij}/C_{ij}$ 或 $S_{ij}/C_{ij} \leq \tan(g_{ij})$
不受控情形 (非近距特殊情形)	$\tan(g_{ij}) > \tan(l_{ij})$ 且 $\tan(g_{ij})\tan(l_{ij}) < 0$	$\tan(l_{ij}) \leq S_{ij}/C_{ij} \leq 0$ 或 $0 \leq S_{ij}/C_{ij} \leq \tan(g_{ij})$
不受控情形 (近距特殊情形)	$\tan(g_{ij}) > \tan(l_{ij})$ 且 $\tan(g_{ij})\tan(l_{ij}) > 0$	$\tan(l_{ij}) \leq S_{ij}/C_{ij} \leq \tan(g_{ij})$

2 复杂低空多机冲突解脱模型

2.1 面向普通情形的航空器冲突解脱模型

表 1 中的基本限制均为非线性的, 要进行线性优化求解, 还需将其中的非线性因素线性化。参考 SMILO-VTAC 模型, 普通情形基本限制 $\tan(l_{ij}) \leq S_{ij}/C_{ij}$ 可转化为

$$\tan(l_{ij})C_{ij} \leq S_{ij} \quad C_{ij} > 0 \quad (16)$$

或

$$\tan(l_{ij})C_{ij} \geq S_{ij} \quad C_{ij} < 0 \quad (17)$$

$S_{ij}/C_{ij} \leq \tan(g_{ij})$ 可转化为

$$\tan(g_{ij})C_{ij} \geq S_{ij} \quad C_{ij} > 0 \quad (18)$$

或

$$\tan(g_{ij})C_{ij} \leq S_{ij} \quad C_{ij} < 0 \quad (19)$$

引入不等式选择 0-1 变量 $\delta_{ij,1}, \delta_{ij,2}, \delta_{ij,3}, \delta_{ij,4}$, 非线性约束 $\tan(l_{ij}) \leq S_{ij}/C_{ij}$ 或 $S_{ij}/C_{ij} \leq \tan(g_{ij})$ 可进一步转化为

$$-C_{ij} \leq M_1(1 - \delta_{ij,1}) \quad (20)$$

$$-S_{ij} + \tan(g_{ij})C_{ij} \leq M_2(1 - \delta_{ij,1}) \quad (21)$$

$$C_{ij} \leq M_3(1 - \delta_{ij,2}) \quad (22)$$

$$S_{ij} - \tan(g_{ij})C_{ij} \leq M_4(1 - \delta_{ij,2}) \quad (23)$$

$$C_{ij} \leq M_5(1 - \delta_{ij,3}) \quad (24)$$

$$S_{ij} - \tan(l_{ij})C_{ij} \leq M_6(1 - \delta_{ij,3}) \quad (25)$$

$$-C_{ij} \leq M_7(1 - \delta_{ij,4}) \quad (26)$$

$$-S_{ij} + \tan(l_{ij})C_{ij} \leq M_8(1 - \delta_{ij,4}) \quad (27)$$

$$\delta_{ij,1} + \delta_{ij,2} + \delta_{ij,3} + \delta_{ij,4} = 1 \quad (28)$$

式中: $M_1 \sim M_8$ 为足够大的正数。

当 $\delta_{ij,1} = 1$, 式(20)、(21)有约束作用, 式(22)~(28)皆是无效约束, 则对应情形即为 $\tan(l_{ij}) \leq S_{ij}/C_{ij}$ 。

同时, S_{ij}, C_{ij} 包含了航空器 i 的右转航向变量 μ_i^+ 、左转航向变量 μ_i^- 以及航空器 j 的右转航向变量 μ_j^+ 、左转航向变量 μ_j^- , 这些航向调整变量为非线性的, 因此, 将航向调整区间离散化。对任意航空器 i , 定义可选航向集合 $H_i = \{m_{i1}, m_{i2}, \dots, m_{iK}\}$, K 为可选航向个数。引入航向选择 0-1 参量 $\beta_k, k = 1, 2, \dots, K$; 航空器 i 调整后的航向为 m_{ik} 则 $\beta_{ik} = 1$; 航空器 j 调整后的航向为 m_{jk} 则 $\beta_{jk} = 1$ 。

S_{ij} 的非线性子项 $(v_i + v_i^+ - v_i^-) \sin(m_i + \mu_i^+ - \mu_i^-)$ 可替换为 $(v_i + v_i^+ - v_i^-) \left[\sum_{k=1}^K \sin(m_{ik}) \beta_{ik} \right]$, $(v_j + v_j^+ - v_j^-) \sin(m_j + \mu_j^+ - \mu_j^-)$ 可替换为 $(v_j + v_j^+ - v_j^-) \left[\sum_{k=1}^K \sin(m_{jk}) \beta_{jk} \right]$ 。此时子项中仍然存在非线性的变量的乘积, 是非线性的。进一步定义运算符 $\phi_{ik}^+ \equiv v_i^+ \beta_{ik}$ 和以下限制等价

$$\phi_{ik}^+ \leq v_i^+ \quad (29)$$

$$\phi_{ik}^+ \leq M\beta_{ik} \quad (30)$$

$$v_i^+ - \phi_{ik}^+ \leq M(1 - \beta_{ik}) \quad (31)$$

定义运算符 $\phi_{ik}^- \equiv v_i^- \beta_{ik}$ 和以下限制等价

$$\phi_{ik}^- \leq v_i^- \quad (32)$$

$$\phi_{ik}^- \leq M\beta_{ik} \quad (33)$$

$$v_i^- - \phi_{ik}^- \leq M(1 - \beta_{ik}) \quad (34)$$

定义运算符 $\phi_{jk}^+ \equiv v_j^+ \beta_{jk}$ 和以下限制等价

$$\phi_{jk}^+ \leq v_j^+ \quad (35)$$

$$\phi_{jk}^+ \leq M\beta_{jk} \quad (36)$$

$$v_j^+ - \phi_{jk}^+ \leq M(1 - \beta_{jk}) \quad (37)$$

定义运算符 $\phi_{jk}^- \equiv v_j^- \beta_{jk}$ 和以下限制等价

$$\phi_{jk}^- \leq v_j^- \quad (38)$$

$$\phi_{jk}^- \leq M\beta_{jk} \quad (39)$$

$$v_j^- - \phi_{jk}^- \leq M(1 - \beta_{jk}) \quad (40)$$

式中: M 为足够大的正数。

于是 $(v_i + v_i^+ - v_i^-) \left[\sum_{k=1}^K \sin(m_{ik}) \beta_{ik} \right]$ 可替换为

线性表达式 $\sum_{k=1}^K \sin(m_{ik}) (v_i \beta_{ik} + \phi_{ik}^+ - \phi_{ik}^-)$, $(v_j + v_j^+ - v_j^-) \left[\sum_{k=1}^K \sin(m_{jk}) \beta_{jk} \right]$ 可替换为线性表达式

$\sum_{k=1}^K \sin(m_{jk}) (v_j \beta_{jk} + \phi_{jk}^+ - \phi_{jk}^-)$ 。

为将非线性参数 S_{ij}, C_{ij} 线性化, 中间变量 $A_i^S, A_j^S, A_i^C, A_j^C, B_{ij}, D_{ij}, B_{ji}, D_{ji}$ 分别定义为

$$A_i^S = \sum_{k=1}^K \sin(m_{ik}) (v_i \beta_{ik} + \phi_{ik}^+ - \phi_{ik}^-) \quad (41)$$

$$A_j^S = \sum_{k=1}^K \sin(m_{jk}) (v_j \beta_{jk} + \phi_{jk}^+ - \phi_{jk}^-) \quad (42)$$

$$A_i^C = \sum_{k=1}^K \cos(m_{ik}) (v_i \beta_{ik} + \phi_{ik}^+ - \phi_{ik}^-) \quad (43)$$

$$A_j^C = \sum_{k=1}^K \cos(m_{jk}) (v_j \beta_{jk} + \phi_{jk}^+ - \phi_{jk}^-) \quad (44)$$

$$B_{ij} = \sum_{k=1}^K [\tan(l_{ij}) \cos(m_{ik}) - \sin(m_{ik})] \cdot (v_i \beta_{ik} + \phi_{ik}^+ - \phi_{ik}^-) \quad (45)$$

$$D_{ij} = \sum_{k=1}^K [\tan(g_{ij}) \cos(m_{ik}) - \sin(m_{ik})] \cdot (v_i \beta_{ik} + \phi_{ik}^+ - \phi_{ik}^-) \quad (46)$$

$$B_{ji} = \sum_{k=1}^K [\tan(l_{ji}) \cos(m_{jk}) - \sin(m_{jk})] \cdot (v_j \beta_{jk} + \phi_{jk}^+ - \phi_{jk}^-) \quad (47)$$

$$D_{ji} = \sum_{k=1}^K [\tan(g_{ji}) \cos(m_{jk}) - \sin(m_{jk})] \cdot (v_j \beta_{jk} + \phi_{jk}^+ - \phi_{jk}^-) \quad (48)$$

有

$$-C_{ij} = A_i^C - A_j^C \quad (49)$$

$$-S_{ij} + \tan(g_{ij})C_{ij} = B_{ji} - B_{ij} \quad (50)$$

$$S_{ij} - \tan(l_{ij})C_{ij} = D_{ij} - D_{ji} \quad (51)$$

非线性限制式(20)~(28)可转化为以下线性限制

$$A_i^C - A_j^C \leq M_1(1 - \delta_{ij,1}) \quad (52)$$

$$B_{ji} - B_{ij} \leq M_2(1 - \delta_{ij,1}) \quad (53)$$

$$A_j^c - A_i^c \leq M_3(1 - \delta_{ij,2}) \quad (54)$$

$$B_{ij} - B_{ji} \leq M_4(1 - \delta_{ij,2}) \quad (55)$$

$$A_i^c - A_j^c \leq M_5(1 - \delta_{ij,3}) \quad (56)$$

$$D_{ij} - D_{ji} \leq M_6(1 - \delta_{ij,3}) \quad (57)$$

$$A_j^c - A_i^c \leq M_7(1 - \delta_{ij,4}) \quad (58)$$

$$D_{ji} - D_{ij} \leq M_8(1 - \delta_{ij,4}) \quad (59)$$

进一步考虑调高度问题,定义可选高度层集合 Z ,引入航空器 i 的高度层选择 0-1 变量 φ_{iz} , $z \in Z$, $\varphi_{iz} = 1$ 表示航空器 i 所在高度层为 z ;引入航空器 j 的高度层选择 0-1 变量 φ_{jz} , $\varphi_{jz} = 1$ 表示航空器 j 所在高度层为 z ;将 0-1 变量 $\delta_{ij,1}$ 、 $\delta_{ij,2}$ 、 $\delta_{ij,3}$ 、 $\delta_{ij,4}$ 扩充为 $\delta_{ijz,1}$ 、 $\delta_{ijz,2}$ 、 $\delta_{ijz,3}$ 、 $\delta_{ijz,4}$,并引入高度层选择 0-1 变量 $\delta_{ijz,5}$ 及高度层改变量 ρ 。添加调高度限制,最终可得到普通情形下的冲突解脱模型限制,对任意航空器对 $(i, j) \in U$,高度层 $z \in Z$

$$A_i^c - A_j^c \leq M_1(1 - \delta_{ijz,1}) \quad (60)$$

$$B_{ji} - B_{ij} \leq M_2(1 - \delta_{ijz,1}) \quad (61)$$

$$A_j^c - A_i^c \leq M_3(1 - \delta_{ijz,2}) \quad (62)$$

$$B_{ij} - B_{ji} \leq M_4(1 - \delta_{ijz,2}) \quad (63)$$

$$A_i^c - A_j^c \leq M_5(1 - \delta_{ijz,3}) \quad (64)$$

$$D_{ij} - D_{ji} \leq M_6(1 - \delta_{ijz,3}) \quad (65)$$

$$A_j^c - A_i^c \leq M_7(1 - \delta_{ijz,4}) \quad (66)$$

$$D_{ji} - D_{ij} \leq M_8(1 - \delta_{ijz,4}) \quad (67)$$

$$\delta_{ijz,1} + \delta_{ijz,2} + \delta_{ijz,3} + \delta_{ijz,4} + \delta_{ijz,5} = 1 \quad (68)$$

$$\varphi_{iz} + \varphi_{jz} + \delta_{ijz,5} \leq 2 \quad (69)$$

$$\sum_{k=1}^K \beta_{jk} = 1 \quad (70)$$

$$\sum_{z \in Z} \varphi_{iz} = 1 \quad (71)$$

$$\rho_i \geq \sum_{z \in Z} z\varphi_{iz} - z_i \quad (72)$$

$$\rho_i \geq z_i - \sum_{z \in Z} z\varphi_{iz} \quad (73)$$

$$\sum_{k=1}^K \beta_{jk} = 1 \quad (74)$$

$$\sum_{z \in Z} \varphi_{jz} = 1 \quad (75)$$

$$\rho_j \geq \sum_{z \in Z} z\varphi_{jz} - z_j \quad (76)$$

$$\rho_j \geq z_j - \sum_{z \in Z} z\varphi_{jz} \quad (77)$$

式中: ρ_i 为航空器 i 的高度层改变量; ρ_j 为航空器 j 的高度层改变量; z_i 为航空器 i 的初始高度层; z_j 为航空器 j 的初始高度层;式(69)表示若航空器 i 和 j 的高度层选择 0-1 参量 $\delta_{ijz,5}$ 数值为 1,则两者不能

同时存在于高度层 z ;式(70)表示任意航空器 i 的可选航向唯一;式(71)表示任意航空器 i 的可选高度唯一;式(72)、(73)为 $\rho_i = \left| \sum_{z \in Z} z\varphi_{iz} - z_i \right|$ 的线性表达,用于计算航空器 i 高度层改变量的数值;式(74)表示任意航空器 j 的可选航向唯一;式(75)表示任意航空器 j 的可选高度唯一;式(76)、(77)为 $\rho_j = \left| \sum_{z \in Z} z\varphi_{jz} - z_j \right|$ 的线性表达,用于计算航空器 j 高度层改变量的数值。

2.2 面向特殊情形的航空器冲突解脱模型

本文对于特殊情形,在基本限制中增加

$$S_{ij}/C_{ij} \leq 0 \quad (78)$$

$$0 \leq S_{ij}/C_{ij} \quad (79)$$

其线性化表述如下

$$A_j^s - A_i^s \leq M_9(1 - \delta_{ijz,1}) \quad (80)$$

$$A_i^s - A_j^s \leq M_{10}(1 - \delta_{ijz,2}) \quad (81)$$

$$A_i^s - A_j^s \leq M_{11}(1 - \delta_{ijz,3}) \quad (82)$$

$$A_j^s - A_i^s \leq M_{12}(1 - \delta_{ijz,4}) \quad (83)$$

式中: $M_9 \sim M_{12}$ 为足够大的正数。

在普通情形限制的基础上添加以上限制即得到特殊情形限制。对于近距特殊情形,同时要满足

$$\tan(l_{ij}) \leq S_{ij}/C_{ij} \quad (84)$$

$$S_{ij}/C_{ij} \leq \tan(g_{ij}) \quad (85)$$

即要将原来约束中的“或”关系转变为“且”关系,因此,将普通情形中的不等式选择 0-1 变量 $\delta_{ijz,3}$ 和 $\delta_{ijz,4}$ 替换为 $\delta_{ijz,1}$ 和 $\delta_{ijz,2}$,即将式(60)~(67)替换为

$$A_j^c - A_i^c \leq M_1(1 - \delta_{ijz,1}) \quad (86)$$

$$B_{ij} - B_{ji} \leq M_2(1 - \delta_{ijz,1}) \quad (87)$$

$$D_{ji} - D_{ij} \leq M_3(1 - \delta_{ijz,1}) \quad (88)$$

$$A_i^c - A_j^c \leq M_4(1 - \delta_{ijz,2}) \quad (89)$$

$$B_{ji} - B_{ij} \leq M_5(1 - \delta_{ijz,2}) \quad (90)$$

$$D_{ij} - D_{ji} \leq M_6(1 - \delta_{ijz,2}) \quad (91)$$

2.3 面向物障的航空器冲突解脱模型

本文在模型中增加考虑了航空器与移动障碍物(如雷暴云)和固定障碍物(如高山)的冲突解脱,定义障碍物为 o , $o \in O_1$ 为移动障碍物, $o \in O_2$ 为空域内固定障碍物。

2.3.1 移动障碍物

移动障碍物冲突解脱与航空器冲突解脱的几何构型相同,区别在于移动障碍物的速度和航向为固定数值。以普通情形为例,若航空器 i 和障碍物 $o \in O_1$ 满足以下基本限制之一,则可实现冲突解脱

$$\tan(l_{io}) \leq S_{io}/C_{io} \quad (92)$$

$$S_{io}/C_{io} \leq \tan(g_{io}) \quad (93)$$

移动障碍物的速度无法改变,即

$$S_{io} = (v_i + v_i^+ - v_i^-) \sin(m_i + \mu_i^+ - \mu_i^-) - v_o \sin(m_o) \quad (94)$$

$$C_{io} = (v_i + v_i^+ - v_i^-) \cos(m_i + \mu_i^+ - \mu_i^-) - v_o \cos(m_o) \quad (95)$$

式中: S_{io} 为航空器 i 与障碍物 o 相对速度在垂直方向上的分量; C_{io} 为航空器 i 与障碍物 o 相对速度在水平方向上的分量; m_o 为障碍物 o 当前航向; v_o 为障碍物 o 速度; l_{io} 为航空器 i 和障碍物 o 相对速度与障碍物 o 保护区上侧相切时的方向角; g_{io} 为航空器 i 和障碍物 o 相对速度与障碍物 o 保护区下侧相切时的方向角。

障碍物可能占据多个高度层,定义障碍物高度 0-1 参量 ϑ_{oz} ,在预处理中,若障碍物 o 占据高度层 z ,则 $\vartheta_{oz}=1$ 。对式(92)、(93)进行线性化处理,替换障碍物高度 0-1 参量 ϑ_{oz} ,将变量 $\delta_{ijz,1}$ 、 $\delta_{ijz,2}$ 、 $\delta_{ijz,3}$ 、 $\delta_{ijz,4}$ 更改为 $\delta_{ioz,1}$ 、 $\delta_{ioz,2}$ 、 $\delta_{ioz,3}$ 、 $\delta_{ioz,4}$,同样引入高度层选择 0-1 变量 $\delta_{ioz,5}$,可得到普通情形下移动障碍物冲突解脱模型限制如下,对于任意航空器 i ,障碍物 $o \in O_1$,高度层 $z \in Z$

$$-A_i^C + v_o \sin(m_o) \leq M_{13}(1 - \delta_{ioz,1}) \quad (96)$$

$$\tan(l_{io}) [A_i^C - v_o \cos(m_o)] - A_i^S + v_o \sin(m_o) \leq M_{14}(1 - \delta_{ioz,1}) \quad (97)$$

$$A_i^C - v_o \sin(m_o) \leq M_{15}(1 - \delta_{ioz,2}) \quad (98)$$

$$-\tan(l_{io}) [A_i^C - v_o \cos(m_o)] + A_i^S + v_o \sin(m_o) \leq M_{16}(1 - \delta_{ioz,2}) \quad (99)$$

$$-A_i^C + v_o \sin(m_o) \leq M_{17}(1 - \delta_{ioz,3}) \quad (100)$$

$$-\tan(g_{io}) [A_i^C - v_o \cos(m_o)] + A_i^S + v_o \sin(m_o) \leq M_{18}(1 - \delta_{ioz,3}) \quad (101)$$

$$A_i^C - v_o \sin(m_o) \leq M_{19}(1 - \delta_{ioz,4}) \quad (102)$$

$$\tan(g_{io}) [A_i^C - v_o \cos(m_o)] - A_i^S + v_o \sin(m_o) \leq M_{20}(1 - \delta_{ioz,4}) \quad (103)$$

$$\delta_{ioz,1} + \delta_{ioz,2} + \delta_{ioz,3} + \delta_{ioz,4} + \delta_{ioz,5} = 1 \quad (104)$$

$$\varphi_{iz} + \vartheta_{oz} + \delta_{ioz,5} \leq 2 \quad (105)$$

式中: $M_{13} \sim M_{20}$ 为足够大的正数。

在此基础添加限制式(70)~(77)即得到普通情形下移动障碍物冲突解脱模型限制。特殊情形下移动障碍物冲突解脱模型限制按 2.2 节进行改进。

2.3.2 固定障碍物

固定障碍物不存在速度参量,则基本限制中

$$S_{io} = (v_i + v_i^+ - v_i^-) \sin(m_i + \mu_i^+ - \mu_i^-) \quad (106)$$

$$C_{io} = (v_i + v_i^+ - v_i^-) \cos(m_i + \mu_i^+ - \mu_i^-) \quad (107)$$

以普通情形为例,固定障碍物冲突解脱模型限制如下,对任意航空器 i ,障碍物 $o \in O_2$,高度层 $z \in Z$

$$-A_i^C \leq M_{21}(1 - \delta_{ioz,1}) \quad (108)$$

$$\tan(l_{io}) A_i^C - A_i^S \leq M_{22}(1 - \delta_{ioz,1}) \quad (109)$$

$$A_i^C \leq M_{23}(1 - \delta_{ioz,2}) \quad (110)$$

$$-\tan(l_{io}) A_i^C + A_i^S \leq M_{24}(1 - \delta_{ioz,2}) \quad (111)$$

$$A_i^C \leq M_{25}(1 - \delta_{ioz,3}) \quad (112)$$

$$-\tan(l_{io}) A_i^C + A_i^S \leq M_{26}(1 - \delta_{ioz,3}) \quad (113)$$

$$-A_i^C \leq M_{27}(1 - \delta_{ioz,4}) \quad (114)$$

$$\tan(l_{io}) A_i^C - A_i^S \leq M_{28}(1 - \delta_{ioz,4}) \quad (115)$$

$$\delta_{ioz,1} + \delta_{ioz,2} + \delta_{ioz,3} + \delta_{ioz,4} + \delta_{ioz,5} = 1 \quad (116)$$

$$\varphi_{iz} + \vartheta_{oz} + \delta_{ioz,5} \leq 2 \quad (117)$$

式中: $M_{21} \sim M_{28}$ 为足够大的正数。

在此基础添加限制式(70)~(77)即得到普通情形下固定障碍物冲突解脱模型限制。特殊情形下固定障碍物冲突解脱模型限制按 2.2 节进行改进。

本文将目标函数 f 设置为调速、调航向、调高度权重加成之和最小

$$f = \min \sum_{i=1}^F \left\{ (c_{iv}^+ v_i^+ + c_{iv}^- v_i^-) + \left[\sum_{m_{ik} \in H_2} c_{ip}^+ \beta_{ik} (m_{ik} - m_i) + \sum_{m_{ik} \in H_1} c_{ip}^- \beta_{ik} (m_i - m_{ik}) \right] + c_{ip} \rho_i \right\} \quad (118)$$

式中: c_{iv}^+ 、 c_{iv}^- 分别为航空器 i 的加、减速权重; c_{ip}^+ 、 c_{ip}^- 分别为航空器 i 的右、左转权重; c_{ip} 为高度层改变量 ρ 的权重; H_1 为左转航向集合; H_2 为右转航向集合。

3 复杂低空多机冲突探测与解脱规则

3.1 基于优先级的多机冲突解脱总体思路

基于以上冲突解脱模型,将相关参数代入模型计算,即可得到解脱方案,但从仿真和运行的角度出发,需考虑以下几点因素。

(1)航空器间无冲突或已完成解脱状态更新时,无需进行解脱计算。

(2)对相距过远的航空器冲突不予考虑。

(3)冲突解脱后航空器应恢复至冲突前的状态,需判定何时进行状态恢复。

(4)应根据航空器作业类型和运行状态考虑冲突解脱的优先级问题。由此得到多机冲突探测与解脱的总体思路是:首先,进行多机冲突探测,考虑航空器当前状态探测任意航空器对间的冲突,根据探测结果改变其冲突关系;其次,建立冲突解脱组,基于任意航空器对间的冲突关系,建立多个独立的冲

突解脱组;最后,根据优先级进行冲突解脱,依次处理各独立冲突解脱组,按优先级次序将组内航空器代入模型解脱。

3.2 多机冲突探测规则

将航空器 i 状态分为避让状态(正在进行调速/转向/调高)和普通状态(以最优的速度、航向、高度运行)。对于普通状态航空器,只需判断与其他航空器是否存在潜在冲突,而对于避让状态航空器,除了判断是否存在二次冲突,还需判断是否能进行状态恢复。

对于航空器组合对 (i, j) , 定义航空器 i 的潜在冲突集合 E_{i1} , 表示与航空器 i 预计出现保护区重叠的个体集合;定义汇聚冲突集合 E_{i2} , 表示与航空器 i 相互汇聚接近的个体集合。其中汇聚冲突集合是否为空可用于判断避让状态航空器是否能进行状态恢复。冲突探测流程见图 5, 具体步骤如下。

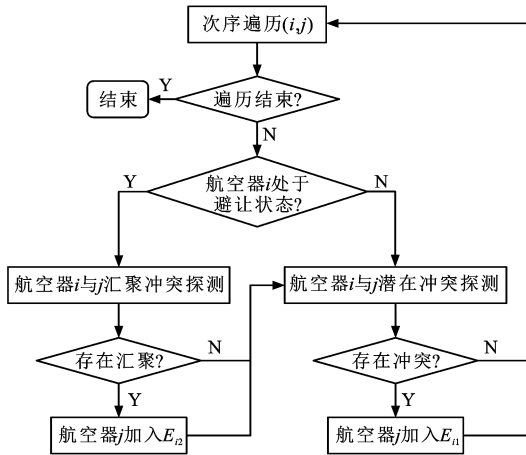


图 5 冲突探测流程

Fig. 5 Conflict detection flow

Step 1: 次序遍历组合对 (i, j) , 若遍历结束, 则冲突探测流程结束。

Step 2: 判断航空器 i 是否处在避让状态, 若否, 则转向 Step 4。

Step 3: 航空器 i 和 j 进行汇聚冲突探测, 若存在航向汇聚冲突, 则将 j 加入 i 的汇聚冲突集合 E_{i2} 。

Step 4: 航空器 i 和 j 进行潜在冲突探测^[15], 若存在潜在冲突, 则将 j 加入 i 的潜在冲突集合 E_{i1} , 返回 Step 1。

3.3 冲突解脱组建立规则

完成冲突探测后, 利用各航空器的潜在冲突集合关系, 将相互间存在潜在冲突的航空器加入同一冲突解脱组, 进而建立多个独立的冲突解脱组。

定义 q_i 为航空器 i 所属冲突解脱组, $q_i \in Q$, Q 为冲突解脱组集合。冲突解脱组建立流程见图 6, 具体步骤如下。

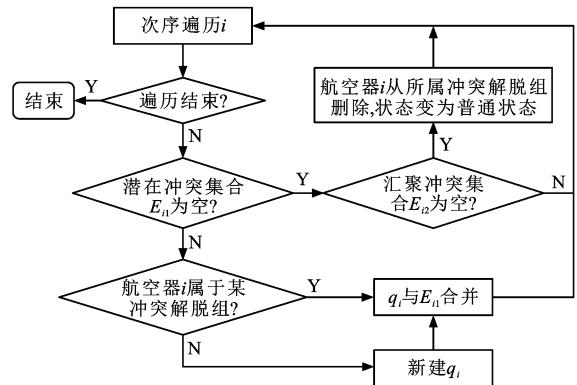


图 6 冲突解脱组建立流程

Fig. 6 Conflict resolution group formation flow

Step 1: 次序遍历航空器 i , 若遍历结束, 则冲突解脱组建立流程结束。

Step 2: 若航空器 i 潜在冲突集合 E_{i1} 为空, 则转到 Step 5。

Step 3: 若航空器 i 尚未从属于任何冲突解脱组, 则新建冲突解脱组 q_i 。

Step 4: 将潜在冲突集合 E_{i1} 中的所有个体, 以及这些航空器可能所属的冲突解脱组中的个体加入冲突解脱组 q_i 中, 返回 Step 1。

Step 5: 若汇聚冲突集合 E_{i2} 为空, 则将航空器 i 从所属冲突解脱组中删除, 状态恢复至普通状态(假如航空器 i 本身状态即为普通状态, 则无需调整), 返回 Step 1。

3.4 优先级冲突解脱规则

本文通过将冲突解脱组内航空器依据优先级次序分组依次进行解脱计算, 将已完成解脱计算的航空器视为移动障碍物代入更低优先级别的冲突解脱计算中。本文中优先级为绝对优先级, 航空器只避让同等优先级或更高优先级的航空器。

定义障碍物集合 O , 记空域内航空器以及各类障碍物对象的冲突解脱优先级为 s , 障碍物 o 的优先级 $s_o = 0$; 航空器 i 优先级为 s_i , $s_i = 1, \dots, s_{\max}$, 数值越小优先级越高。优先级冲突解脱流程见图 7, 具体步骤如下。

Step 1: 次序遍历 $q_i \in Q$, 若遍历结束, 则优先级冲突解脱流程结束。

Step 2: 设定参考优先级 s^* 为 0, 生成障碍物集合 O 。

Step 3: 参考优先级 s^* 加 1, 若 $s^* > s_{\max}$, 即已遍

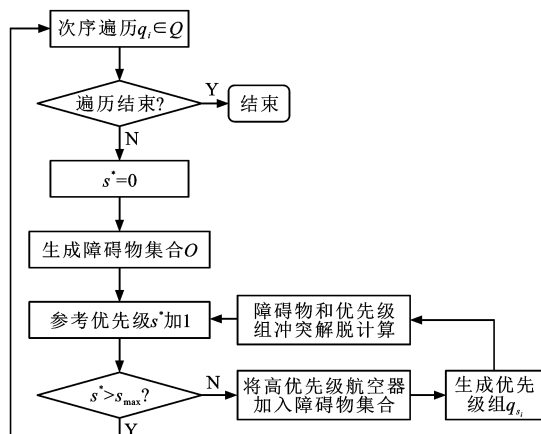


图7 优先级冲突解脱流程

Fig. 7 Priority based conflict resolution flow

历所有优先级数,则返回 Step 1。

Step 4: 将 $s_i < s^*$ 的航空器 i 视为移动障碍物加入障碍物集合 O , 生成优先级组 q_i , 将 O 和 q_i 同时代入多机冲突解脱模型求解, 返回 Step 3。

4 复杂低空多机冲突与解脱仿真验证

采用多航空器对头汇聚场景, 通过多次仿真模拟, 随机设置不同的航空器架次数 n 和航空器类别数 p (不同类别航空器的优先级不同), 对本文提出的方法和 SMILO-VTAC 解脱方案进行对比分析。基础参数设置见表 2。

表2 仿真试验基础参数

Tab. 2 Basic parameters of simulation experiment

参数	数值
航空器保护区半径/km	3
航空器飞行速度/(km · h ⁻¹)	200
航空器最大调速量/(km · h ⁻¹)	40
航空器最大转向角/(°)	30
高度层垂直间隔/m	300
调速成本权重	1
转向成本权重	40
调高成本权重	1 200

在多机三维冲突解脱中, 考虑到操纵复杂度、飞行安全性和经济性, 国内外大多数学者将解脱行为的优先顺序设置为调速、转向、调高^[3-4, 15]。以此为参考, 本文以典型通用航空器“小鹰 500”(性能数据见表 3)作为研究对象, 为保证乘坐舒适性以及飞行安全性, 设定其航空器最大调速量为 40 km · h⁻¹, 最大转向角为 30°。为保证 3 种解脱行为的优先顺序, 即最大的调速成本不超过最小的转向成本, 最大的转向成本不超过最小的调高成本, 同时结合其飞行过程中实际能耗水平, 将调速、转向和调高权重分别

表3 “小鹰 500”性能数据

Tab. 3 Performance data of “Kitty Hawk 500”

乘员	驾驶员 1 名, 最大乘客人数 4 名
尺寸	翼展 9.879 m, 机长 7.743 m, 机高 3.044 m
重量	有效载荷 560 kg, 最大起飞质量 1 400 kg
性能	最大巡航速度 300 km · h ⁻¹ , 航程 1 640 km

设置为 1、40 和 1 200^[16]。在实际应用中, 可视具体需求对权重进行调整。

4.1 解脱方案

将本文方法在不同架次数下各优先级航空器的平均速度调整量、航向调整量和高度调整量与 SMILO-VTAC 模型解脱方案进行了对比, 解脱方案对比结果分别见图 8~10。

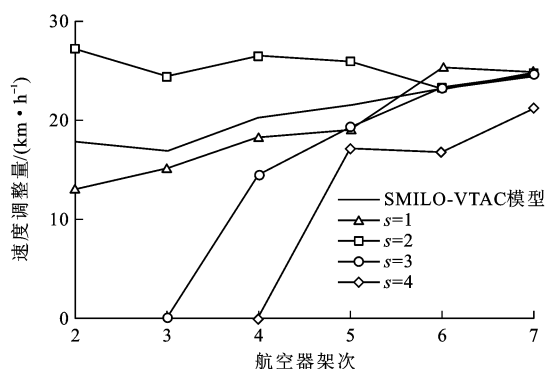


图8 各解脱方案平均速度调整量对比

Fig. 8 Comparison of average velocity changes of resolution schemes

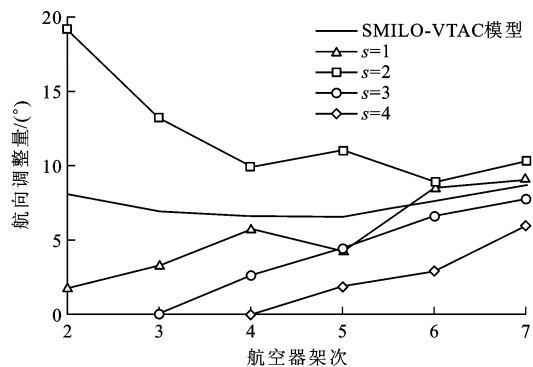


图9 各解脱方案平均航向调整量对比

Fig. 9 Comparison of average turn changes of resolution schemes

由图 8 可见: 优先级为 2 的航空器速度调整量大于优先级为 1 的航空器, 其速度调整量始终较大, 随着航空器架次数增大, 优先级为 3 和 4 的航空器开始出现之后, 优先级为 2 的航空器的速度调整量略微减少。由图 9 可见: 优先级为 2 的航空器航向调整量大于优先级为 1 的航空器, 其航向调整量也较大, 但随着航空器架次数增大, 优先级为 3 和 4 的航空器开始出现之后, 优先级为 2 航空器的航向调整量开始减少。分析图 10 可以发现: 优先级为 1 航

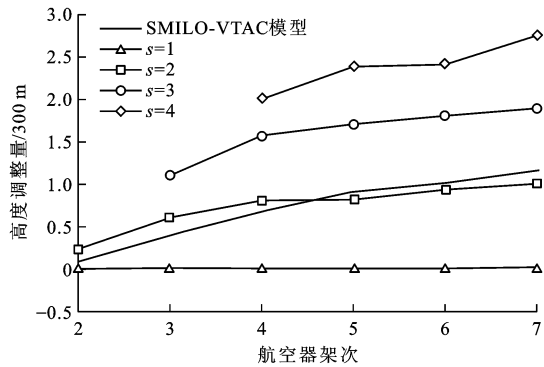


图 10 各解脱方案平均高度调整量对比

Fig. 10 Comparison of average altitude changes of resolution scheme

空器无调高行为,优先级为 3 和 4 航空器的高度调整量较大,优先级为 4 航空器的高度调整量又大于

表 4 不同场景参数的求解时间

Tab. 4 Solution times under different scene parameters

n	求解时间/s				
	$p=1$	$p=2$	$p=3$	$p=4$	$p=5$
2	0.24	0.22~0.24(0.23)			
3	0.47	0.61~0.64(0.63)	0.61~0.64(0.62)		
4	0.66	0.60~1.01(0.74)	0.83~1.03(0.83)	1.03~1.06(1.03)	
5	1.78	0.64~1.02(0.81)	0.63~1.04(0.92)	1.04~1.08(1.08)	1.21~1.24(1.22)
6	2.95	1.03~1.90(1.47)	0.84~1.44(1.04)	0.83~1.64(1.18)	1.05~1.54(1.27)
7	7.99	1.27~2.90(2.07)	1.13~2.18(1.66)	1.04~1.46(1.32)	1.42~1.82(1.60)
8	>50	1.25~8.64(4.13)	1.22~3.86(2.17)	1.23~2.18(1.59)	1.46~1.95(1.70)
9	>50	>50	1.25~8.37(2.65)	1.22~2.41(1.78)	1.63~2.05(1.93)
10	>50	>50	>50	1.45~42.33(5.97)	1.87~8.42(3.58)

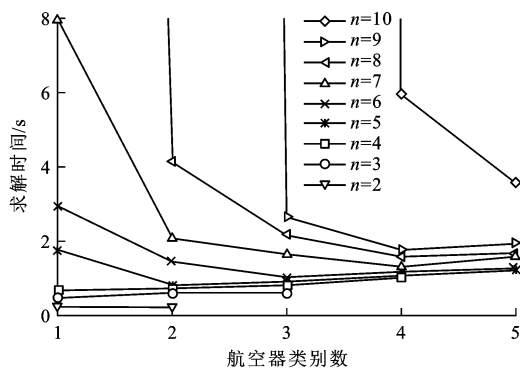


图 11 平均冲突解脱求解时间

Fig. 11 Average solution times of conflict resolutions

由表 4 中可见:本文方法相较于 SMILO-VTAC 模型,在 $n \leq 4$ 时,求解时间略多于 SMILO-VTAC 模型,但基本控制在 1 s 以内;当 $n \geq 5$ 时,求解时间已全面少于 SMILO-VTAC 模型;当 $n \geq 7$ 时,求解时间远低于 SMILO-VTAC 模型。本文方法通过将多机场景按优先级次序拆分处理,使多机交

优先级为 3 的航空器,且随航空器架次数增大,优先级为 3 和 4 航空器的高度调整量一直处在较高水平。综合来说,优先级高的航空器更倾向于使用调航向以及调速度来进行解脱,优先级低的航空器更多使用代价较高的调高度进行解脱。可以看出,本文方法通过航空器优先级和解脱成本来同时控制解脱方案,能对各优先级航空器差异分配解脱行为,解脱方案更为灵活。

4.2 解脱效率

不同场景参数下的方法求解时间结果见表 4 与图 11。在同一类别数 p 下,各类别航空器所占比例会影响求解时间,表 4 中给出了求解时间的范围(括号内为求解时间平均值)。图 11 与表 4 中 $p=1$ 的求解时间为 SMILO-VTAC 模型的求解时间。

互的冲突问题得到简化,提升了求解效率。同时在相同的求解时间维度内,能达到更高的求解架次极限。

4.3 解脱成本

以 SMILO-VTAC 解脱方案成本为基准值,计算本文方法在不同架次下各优先级航空器解脱成本及总平均解脱成本与基准值的比值,见图 12,可见:

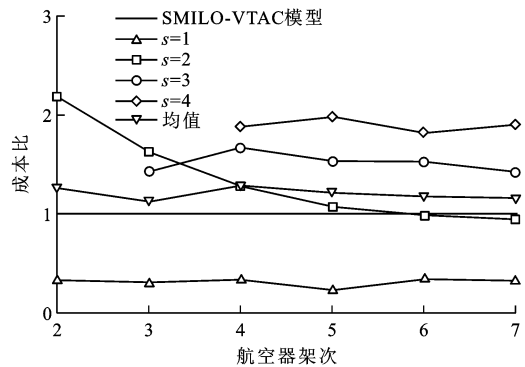


图 12 求解成本比

Fig. 12 Solution cost ratios

$s=1$ 航空器解脱成本比远低于基准值, $s=2,3,4$ 航空器解脱成本比则高于基准值,且随优先级降低而增加; $s=2$ 航空器解脱成本比随 n 增大而减小的原因在于 $n \geq 3$ 之后 $s=3,4$ 的航空器开始出现,解脱成本向 $s=3,4$ 的航空器传递;本文方法的平均求解成本比略高于基准值 $10\% \sim 20\%$,通过优先级的设定,以牺牲少量总解脱成本为代价,将解脱成本依照优先级顺序进行分配,将高优先级航空器解脱成本向低优先级航空器传递。

5 结 语

(1)分析了传统SMILO-VTAC模型在处理复杂低空繁忙空域多机冲突探测与解脱问题时存在的问题。建立了基于SMILO-VTAC模型的复杂低空多机冲突解脱方法,方法考虑复杂低空空域飞行特点,能够实现多机冲突按优先级顺序进行解脱。

(2)调整了传统SMILO-VTAC模型对冲突情形的分类判断方式,增加传统模型未涉及的航空器冲突近距离特殊情形。针对低空空域环境复杂,固定、移动障碍物多的特点,在模型中增加考虑了航空器与移动障碍物和固定障碍物的冲突解脱。

(3)在改进SMILO-VTAC模型的基础上提出冲突探测与解脱规则,将航空器基于相互间的冲突关系纳入到不同的局部冲突解脱组中,并按照航空器的绝对优先级次序分组,循环执行冲突解脱。

(4)对本文改进方法与传统模型进行了对比。仿真结果表明,改进方法能以较小的总成本增加为代价,依照航空器优先级顺序对解脱方案和成本进行合理的分配,符合低空运行对于不同类型航空器优先级的需求;计算结果显示,相较于SMILO-VTAC,改进方法在多优先级场景下具有更高的解脱效率和解脱架次极限。

(5)复杂低空空域飞行相较于高空航班飞行,飞行员具有更多的自主选择权,因此,冲突避让不仅要考虑飞行活动的优先级,还需要将飞行员意图考虑在内,将飞行员意图因素增加到改进方法中是下一步需要研究的重点。

参 考 文 献 :

References :

[1] WANG Lei, ZHANG Xue-jun, HAN Dong. System simulation of general aviation airborne conflict detection and resolution[J]. Advanced Materials Research, 2013, 816/817: 402-406.

[2] 叶博嘉,胡明华,田 勇. 基于多 Agent 技术的飞机协同飞行建模与仿真[J]. 交通运输工程学报, 2013, 13(6): 90-98.

YE Bo-jia, HU Ming-hua, TIAN Yong. Modeling and simulation of collaborative flight based on multi-agent technique[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2013, 13(6): 90-98. (in Chinese)

[3] 张翔宇,张洪海,邱启伦. 基于 Agent 复杂低空飞行行为建模与仿真[J]. 航空计算技术, 2016, 46(1): 40-43, 47.

ZHANG Xiang-yu, ZHANG Hong-hai, QIU Qi-lun. Modeling and simulation of complex low altitude airspace flight behaviors based on agent[J]. Aeronautical Computing Technique, 2016, 46(1): 40-43, 47. (in Chinese)

[4] 张洪海,邱启伦,王中叶,等. 复杂低空混合飞行态势安全特性研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2016, 16(5): 212-218, 226.

ZHANG Hong-hai, QIU Qi-lun, WANG Zhong-ye, et al. Safety characteristics of mixed flight situation in complex low-altitude airspace[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2016, 16(5): 212-218, 226. (in Chinese)

[5] RONG Jie, GENG Shi-jian, VALASEK J, et al. Air traffic conflict negotiation and resolution using an onboard multiagent system[C]//IEEE. Digital Avionics Systems Conference. New York: IEEE, 2002: 1-12.

[6] WOLLKIND S, VALASEK J, IOERGER T R. Automated conflict resolution for air traffic management using cooperative multi agent negotiation[C]//AIAA. 2004 AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit. Reston: AIAA, 2004: 1-11.

[7] EBY M S, KELLY W E. Free flight separation assurance using distributed algorithms[C]//IEEE. Aerospace Conference. New York: IEEE, 1999: 429-441.

[8] INNOCENTI M, GELOSI P, POLLINI L. Air traffic management using probability function fields[C]//AIAA. 2000 AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit. Reston: AIAA, 2000: 1088-1097.

[9] BILIMORIA K D, LEE H Q, MAO Zhi-hong, et al. Comparison of centralized and decentralized conflict resolution strategies for multiple-aircraft problems[C]//AIAA. 18th Applied Aerodynamics Conference. Reston: AIAA, 2013: 1-10.

[10] FRAZZOLI E, MAO Z H, OH J H, et al. Resolution of conflicts involving many aircraft via semidefinite programming[J]. Journal of Guidance Control and Dynamics, 2001, 24(1): 79-86.

[11] PALLOTTINO L, FERON E M, BICCHI A. Conflict resolution problems for air traffic management systems solved with mixed integer programming[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2002, 3(1): 3-11.

[12] ALONSO-AYUSO A, ESCUDERO L F, MARTÍN-CAMPO F J. Collision avoidance in air traffic management: a mixed-integer linear optimization approach[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2011, 12(1): 47-57.

[13] ALONSO-AYUSO A, ESCUDERO L F, MARTÍN-CAMPO F J. Exact and approximate solving of the aircraft collision resolution problem via turn changes[J]. Transportation Science, 2014, 50(1): 1-12.

- [14] ALONSO-AYUSO A, ESCUDERO L F, MARTÍN-CAMPO F J. Multiobjective optimization for aircraft conflict resolution. A metaheuristic approach[J]. *European Journal of Operational Research*, 2016, 248(2): 691-702.
- [15] LIN C E, LEE C J. Conflict detection and resolution model for low altitude flights[C]// IEEE. *International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics*. New York: IEEE, 2015: 406-411.
- [16] 黄 洋, 汤 俊, 老松杨. 基于复杂网络的无人机飞行冲突解脱算法[J]. *航空学报*, 2018, 39(12): 261-273.
HUANG Yang, TANG Jun, LAO Song-yang. UAV flight conflict resolution algorithm based on complex network[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2018, 39(12): 261-273. (in Chinese)
- [17] 周 建, RAHMANI A, 刘 昕, 等. 分布式 MAS 在飞行冲突解脱中的应用研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2015, 15(5): 231-238.
ZHOU Jian, RAHMANI A, LIU Xin, et al. Application of distributed MAS in flight conflict avoidance[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2015, 15(5): 231-238. (in Chinese)
- [18] KUCHAR J K, YANG L C. A review of conflict detection and resolution modeling methods[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2000, 1(4): 179-189.
- [19] MIGLIACCIO G, MENGALI G, GALATOLO R. Conflict detection and resolution algorithms for UAVs collision avoidance[J]. *The Aeronautical Journal*, 2014, 118(1205): 828-842.
- [20] SHANDY S, VALASEK J. Intelligent agent for aircraft collision avoidance[C]// AIAA. 2001 AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit. Reston: AIAA, 2001: 1-11.
- [21] BONGIORNO C, MICCICHÈ S, MANTEGNA R N. An empirically grounded agent based model for modeling directs, conflict detection and resolution operations in air traffic management[J]. *Plos One*, 2017, 12(4): 1-23.
- [22] ALONSO-AYUSO A, ESCUDERO L F, MARTÍN-CAMPO F J. Collision avoidance in air traffic management: a mixed-integer linear optimization approach[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2011, 12(1): 47-57.
- [23] BILLINGSLEY T B, KOCHENDERFER M J, CHRYSSANT-HACOPOULOS J P. Collision avoidance for general aviation[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2012, 27(7): 4-12.
- [24] FRAZZOLI E, MAO Z H, OH J H, et al. Resolution of conflicts involving many aircraft via semidefinite programming[J]. *Journal of Guidance Control and Dynamics*, 2001, 24(1): 79-86.
- [25] 江程鹏. 复杂低空飞行态势随机影响规律研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
JIANG Cheng-peng. Research on pattern of random factor Influence to flight situation in complex low-altitude airspace[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018. (in Chinese)
- [26] ZHANG Hong-hai, JIANG Cheng-peng, YANG Lei. Forecasting traffic congestion status in terminal areas based on support vector machine[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2016, 8(9): 1-11.
- [27] MACAL C M, NORTH M J. Tutorial on agent-based modelling and simulation[J]. *Journal of Simulation*, 2010, 4(3): 151-162.
- [28] WIGGINS M W. Vigilance decrement during a simulated general aviation flight[J]. *Applied Cognitive Psychology*, 2011, 25(2): 229-235.