

动态威胁下的合作型无人机自主防撞控制

朴海音¹, 王鹤¹, 魏瑞轩², 蔡为民¹

(1. 沈阳飞机设计研究所, 沈阳 110035; 2. 空军工程大学航空航天工程学院, 西安 710038)

摘要: 无人机在飞行空域中遭遇动态碰撞威胁时, 需要进行有效的规避。为改善现有方法对合作型无人机动态威胁规避的协作性考虑不足, 首次提出将合作系数引入回避策略, 采用最优化理论求解了合作型无人机规避动态威胁的最优回避策略, 从而有效实现对多种动态威胁的有效规避。仿真验证表明, 所提方法能有效实现对合作型无人机动态威胁的碰撞规避。

关键词: 无人机; 防撞; 最优回避策略; 动态威胁

中图分类号: V279 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2017)03-0028-04

Autonomous Collision Avoidance Control for Cooperated UAVs Under Dynamic Threat

PIAO Hai-yin¹, WANG He¹, WEI Rui-xuan², CAI Wei-min¹

(1. Shenyang Aircraft Design and Research Institute, Shenyang 110035, China;

2. Engineering College of Aeronautics and Astronautics, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: The UAVs need to avoid the dynamic threat effectively while encountering it in the flight airspace. For solving problem of the cooperated UAVs' autonomous avoidance of dynamic threats, a cooperative parameter is introduced into collision avoidance strategy, and the optimization theory is used for computing the optimum collision avoidance strategy. Therefore, it can realize effective avoidance to multiple types of dynamic threats. Simulation result demonstrates that the method can implement the cooperated UAVs' real-time evading from dynamic threats.

Key words: Unmanned Aerial Vehicle (UAV); collision avoidance; optimized avoidance strategy; dynamic threat

0 引言

随着无人机技术的飞速发展, 无人机全空域飞行成为其应用的必然趋势^[1]。然而, 当无人机在非隔离空域飞行时, 空中的各类动态威胁极易与无人机发生碰撞事故。碰撞事故的发生, 将严重影响无人机任务的完成, 因此, 寻找一种有效方法来规避动态威胁对无人机的应用具有重要意义。

无人机防撞技术作为无人机应用领域的一项关键技术, 受到了国内外学者的广泛关注。文献[2]通过航路规划的方法来解决无人机的防撞问题, 并对实现规避的相关航路规划算法进行了深入分析, 但该

方法仅适合于静态碰撞威胁的规避, 对于动态威胁是不适用的; 文献[3]研究了多机协同下的防撞问题, 提出基于模型预测控制的多机协同防撞决策方法; 文献[4-5]采用人工势场法解决了无人机的防撞问题, 但将该方法从二维平面扩展到三维时, 相应的计算量急剧增大; 文献[6]采用微分对策和生存能力理论提出了一种无人机防撞安全区域的动态决策方法; 文献[7-8]对非合作型无人机的碰撞威胁进行分级, 提出通过增加视线转率来规避碰撞威胁, 实现了无人机在到达目标位置的同时有效防撞。综上, 现有方法主要着力解决非合作型威胁的防撞问题, 对于能够进行协同规避的合作型动态威胁防撞问题并无深入研究。

为解决上述问题, 本文首先建立了三维空间中无人机与动态威胁的遭遇模型, 通过最优化理论求解了多项式时间复杂度最优回避策略, 并首次在回避策略

收稿日期: 2015-04-17

修回日期: 2016-04-14

基金项目: 国防预研项目

作者简介: 朴海音(1984—), 男, 朝鲜族, 辽宁辽阳人, 硕士, 工程师, 研究方向为无人作战飞机地面站总体设计。

中引入合作系数,实现了对给定合作系数动态威胁的规避。最后对所提方法进行仿真验证,仿真结果表明,该算法能够有效实现无人机对于合作型动态威胁的碰撞规避。

1 动态威胁碰撞判定方法

当无人机探测到飞行空域中的目标时,首先需要就其是否会对无人机构成碰撞威胁进行实时判定,因而构建多项式时间复杂度算法^[9]可有效解决航路规划法、人工势场法计算量过大的问题^[2,4-5],其判定结果是无人机进行实时碰撞规避决策的基础。无人机与空域威胁的遭遇模型如图1所示。

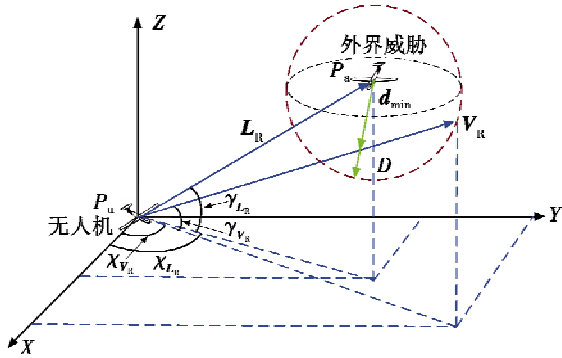


图1 无人机与空域威胁的遭遇模型

Fig.1 Model of aerial threat encountering with the UAV

通过图中的相对距离矢量 L_R 和相对速度矢量 V_R 可预测无人机与威胁之间的最小距离矢量 d_{min}

$$d_{min} = L_R - \frac{L_R \cdot V_R}{\|V_R\|^2} \times V_R \quad (1)$$

d_{min} 的水平分量为

$$d_{min}^H = \begin{cases} L_R & |\chi_{v_r} - \chi_{L_r}| \geq \frac{\pi}{2} \\ L_R \cos(\gamma_{v_r} - \gamma_{L_r}) \sin(\chi_{v_r} - \chi_{L_r}) & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

如图1所示, χ_{v_r} 为相对速度矢量的水平方位角, γ_{L_r} 为相对速度矢量的倾斜角。

d_{min} 的垂直分量为

$$d_{min}^V = \begin{cases} L_R & |\gamma_{v_r} - \gamma_{L_r}| \geq \frac{\pi}{2} \\ L_R \sin(\gamma_{v_r} - \gamma_{L_r}) & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

设 D 为威胁周围保护球体的半径,如果 $d_{min} < D$, 则判定无人机与威胁将发生碰撞,否则判定为不会发生碰撞。

2 基于最优相对规避策略的碰撞规避方法

如果判定目标将与无人机发生碰撞,则无人机需要采取一定的规避策略进行规避。如何构建多项式时

间复杂度的规避策略是进行实时规避的关键。

2.1 最优相对规避策略求解

二维条件下,文献[9]将与原相对速度矢量夹角最小改变量的极小值作为其最优规避策略。本文将该方法扩展到三维空间中,设最优规避相对速度矢量为 V_R^* , 其对应的相对航迹方位角和相对航迹倾斜角分别为 $\chi_{v_r}^*, \gamma_{v_r}^*$, 该速度矢量将与威胁周围球体保持相切的关系,如图2所示。

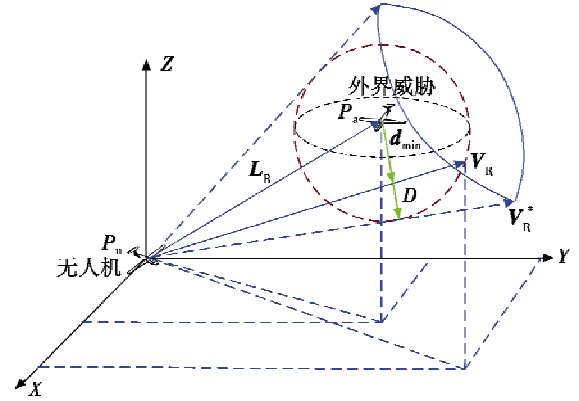


图2 最优规避策略求解示意图

Fig.2 Schematic of avoidance strategy optimization

相对速度矢量 V_R^* 将使得预期的相对距离矢量在水平面内和垂直面内分别与保护球体相切,因此将相对距离矢量在水平方向和垂直方向分解,由式(2)得无人机与威胁之间在水平方向的预测最小相对距离为

$$d_{min}^H = L_R \cos(\gamma_{v_r} - \gamma_{L_r}) \sin|\chi_{v_r} - \chi_{L_r}| = \sqrt{D^2 - d_{min}^V} \quad (4)$$

通过求解上述方程,可以得到最优的相对速度的航迹方位角为

$$\chi_{v_r}^* = \chi_{L_r} \pm \arcsin \frac{\sqrt{D^2 - d_{min}^V}}{L_R \cos(\gamma_{v_r} - \gamma_{L_r})} \quad (5)$$

由式(3)得无人机与威胁之间在垂直方向的预测最小相对距离为

$$d_{min}^V = L_R \sin|\gamma_{v_r} - \gamma_{L_r}| = \sqrt{D^2 - d_{min}^H} \quad (6)$$

通过求解上述方程,可以得到最优的相对航迹倾斜角为

$$\gamma_{v_r}^* = \gamma_{L_r} \pm \arcsin \frac{\sqrt{D^2 - d_{min}^H}}{L_R} \quad (7)$$

2.2 基于合作系数的规避策略求解

相对速度向量 V_R 由无人机速度和威胁速度共同组成,故针对能够协同规避的合作型威胁,其规避策略可通过双方权衡航迹方位角及航迹倾斜角共同构建。定义方位角合作系数 m_u, m_a 表示无人机与威胁对 $\Delta\chi_{v_r}$ 的贡献比例, $0 \leq m_u \leq 1, 0 \leq m_a \leq 1$, 且 $m_u + m_a = 1$; 倾斜角合作系数 n_u, n_a 表示无人机与威胁对于 $\Delta\gamma_{v_r}$ 的贡献比例, $0 \leq n_u \leq 1, 0 \leq n_a \leq 1$ 且 $n_u + n_a = 1$ 。因此,对于无人机 u 和威胁 a 的最优相对航迹方位角分别为

$$\begin{cases} \chi_{v_u}^* = \chi_{v_r} + m_u(\chi_{v_r}^* - \chi_{v_r}) \\ \chi_{v_a}^* = \chi_{v_r} + m_a(\chi_{v_r}^* - \chi_{v_r}) \end{cases} \quad (8)$$

当遭遇合作型威胁时无人机与威胁共同规避, m_u , m_a 的值分别为 $0 < m_u < 1, 0 < m_a < 1$, 且 $m_u + m_a = 1, n_u, n_a$ 的值分别为 $0 < n_u < 1, 0 < n_a < 1$, 且 $n_u + n_a = 1$ 。当无人机遭遇非合作型威胁时, 无人机单独进行规避, 此时 $m_u = 1, m_a = 0, n_u = 1, n_a = 0$ 。假设无人机与威胁能够单独地改变其速率大小、航迹方位角和航迹倾斜角, 下面将构建航迹方位角调整、航迹倾斜角调整方法, 实现威胁双方的有效规避。

2.2.1 航迹方位角调整

设无人机 u 将航迹方位角调整为 χ_u^* 时能够有效规避威胁, 此时将使得其速度矢量变为 V_u^* (其速率为 V_u^*), 在 X - Y 平面内的分量与航迹方位角的关系为

$$\frac{\sin \chi_{v_u}^*}{\cos \chi_{v_u}^*} = \frac{V_a \cos \gamma_a \sin \chi_a - V_u^* \cos \gamma_u \sin \chi_u^*}{V_a \cos \gamma_a \cos \chi_a - V_u^* \cos \gamma_u \cos \chi_u^*} \quad (9)$$

整理得

$$V_u^* \sin(\chi_u^* - \chi_{v_u}^*) = V_a \frac{\cos \gamma_a}{\cos \gamma_u} \sin(\chi_a^* - \chi_{v_u}^*) \quad (10)$$

由于速率大小不变, 因此 $V_u^* = V_a$, 由上式可得, 单独进行航迹方位角调整时的最优航迹方位角为

$$\chi_u^* = \chi_{v_u}^* + \arcsin \left\{ \frac{V_a}{V_u} \cdot \frac{\cos \gamma_a}{\cos \gamma_u} \sin(\chi_a^* - \chi_{v_u}^*) \right\} \quad (11)$$

2.2.2 航迹倾斜角调整

航迹倾斜角调整是指不改变无人机速度矢量的航迹方位角和速率的大小, 仅对航迹倾斜角进行修正。设无人机 u 将航迹倾斜角调整为 γ_u^* 时能够有效规避威胁, 此时将使得其速度矢量变为 V_u^* (其速率为 V_u^*)

$$\tan \gamma_{v_u}^* = \frac{\sin \gamma_{v_u}^*}{\cos \gamma_{v_u}^*} = \left(\frac{V_{R_z}}{\sqrt{V_{R_r}^2 + V_{R_r}^2}} \right) \quad (12)$$

将上式化简得

$$\begin{aligned} & (V_u^*/V_a)^2 (\sin^2 \gamma_u^* - \sin^2 \gamma_{v_u}^*) - 2(V_u^*/V_a) \cdot \\ & [\sin \gamma_u^* \sin \gamma_a \cos^2 \gamma_{v_u}^* - \cos \gamma_u^* \cos \gamma_a \sin^2 \gamma_{v_u}^* \cdot \\ & \cos(\chi_u - \chi_a)] = \sin^2 \gamma_{v_u}^* - \sin^2 \gamma_a \quad (13) \end{aligned}$$

由于只进行航迹倾斜角的调整, 速率大小不变, 即 $V_u = V_u^*$, 通过求解式(13)可得最优规避航迹倾斜角 γ_u^* , 另由式(13)知, 最优规避策略解算均为多项式形式, 保证了解算实时性, 从而实现对动态威胁规避策略的实时求解。

3 仿真实验

本文通过 Matlab 仿真两架无人机在空域中遭遇的情况来验证算法的有效性与实时性, 仿真运行平台硬件配置为 CORE i5 3.2 GHz 主频, 8 GB 内存工作站。设 UAV1 为我方无人机, UAV2 为外界威胁机。仿真初

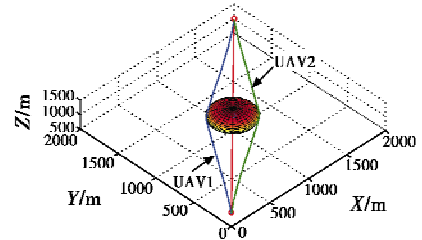
始参数设置如表 1 所示。

表 1 双机初始状态信息

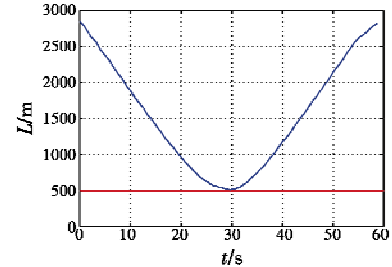
Table 1 Initial situation of UAV formation

参数	数值
起始位置/m	(0, 0, 1000)
UAV1 目标位置/m	(2000, 2000, 1000)
速度大小/(m · s ⁻¹)	50
起始位置/m	(2000, 2000, 1000)
UAV2 目标位置/m	(0, 0, 1000)
速度大小/(m · s ⁻¹)	50

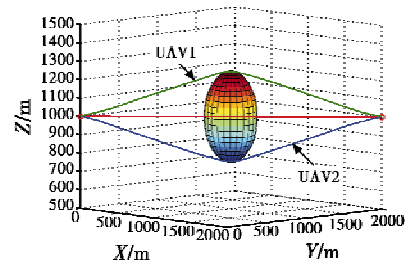
设两架无人机的最小分离距离为 500 m, 取 $m_u = 0.5, m_a = 0.5, n_u = 0.5, n_a = 0.5$, 即双方互为全合作型动态威胁。在预测的碰撞点设置半径为 250 m 的球形碰撞保护区, 红色直线表示两架无人机的原规划航路, 得到如图 3 所示的仿真曲线。



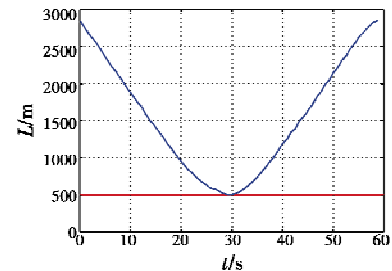
a 水平向随遇目标重构航迹曲线



b 水平向机间间距变化曲线



c 垂直向随遇目标重构航迹曲线



d 垂直向机间间距变化曲线

图 3 仿真结果

Fig. 3 Simulation results

仿真采用 20 ms 定步长解算方式,经验证能够保证解算实时性要求。图 3a 表示无人机与威胁遭遇时,通过航迹方位角调整时的调整轨迹。图 3b 表示无人机与威胁的水平距离变化曲线,从曲线中可以看出两架无人机机间距离始终大于分离距离。图 3c 表示无人机与威胁遭遇时,通过航迹倾斜角调整时的调整轨迹。图 3d 表示对应的垂直距离变化曲线,从图中可以看出无人机与威胁的距离始终大于分离距离。

4 结束语

无人机对动态威胁的碰撞规避是无人机应用领域的关键技术。本文采用最优化理论求解了对动态威胁的最优规避策略,并考虑到威胁类型的不同,提出了将合作系数引入到规避策略中,从而有效实现对多种动态威胁的有效规避。仿真验证表明,所提方法能有效实现对动态目标的碰撞规避。下一步工作将研究当无人机处于复杂空域中,同时面对多个动态碰撞威胁时的碰撞规避决策问题。

参考文献

[1] 蔡志浩,杨丽曼,王英勋,等. 无人机全空域飞行影响因素分析[J]. 北京航空航天大学学报,2011,37(2): 175-179.

[2] MUJUMDAR A, PADHI R. Evolving philosophies on autonomous obstacle/collision avoidance of unmanned aerial vehicles[J]. *Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication*, 2011(8):17-41.

[3] 周欢,魏瑞轩,崔军辉,等. 面向不确定性环境的多无人机协同防碰撞[J]. *电光与控制*,2014,21(1):91-96.

[4] GHOSH R, TOMLIN C. Maneuver design for multiple aircraft conflict resolution[C]//*Proceedings of the American Control Conference*, Chicago, 2000:123-127.

[5] SAHAWNEH L R, BEARD R W. Chain-based collision avoidance for UAS sense-and-avoid systems[C]//*AIAA Guidance, Navigation, and Control (GNC) Conference*, Boston, 2013:1-15.

[6] 崔军辉,魏瑞轩,张小倩. 无人机感知-规避系统安全区域动态决策方法[J]. *控制与决策*,2014,29(12): 2195-2200.

[7] 许云红,周锐,夏洁,等. 无人机自动防撞冲突检测与优化控制方法[J]. *电光与控制*,2014,21(1):1-6.

[8] MANATHARA J G, GHOSE D. Reactive collision avoidance of multiple realistic UAVs[J]. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 2011, 83(6):388-396.

[9] BILIMORIA K D. A geometric optimization approach to aircraft conflict resolution[C]//*AIAA Guidance, Navigation and Control Conference*, Denver, AIAA-2000-4265.

(上接第 10 页)

的影响。另外,由于检测概率的变化源于雷达视角的变化,还可以考虑在弹道固定的情况下,通过调整弹头的姿态角,改变雷达视角,从而达到合理控制弹头的被发现概率,实现导弹突防的目的。

参考文献

[1] 金圣彪. 美国弹道导弹防御系统的发展现状及趋势[J]. *导弹与航天运载技术*,2009(5):57-61.

[2] 王荣,张红军,王贵东,等. 吸气式空空导弹外形多学科一体化优化设计[J]. *航空学报*,2016,37(1):207-215.

[3] 罗志勇,郝璐. 超声速飞行器隐身技术发展趋势分析[J]. *战术导弹技术*,2016(2):16-22.

[4] 黄春华,刘凌云,梁彦刚. 高超声速滑翔飞行器再入拉起段弹道优化设计[J]. *战术导弹技术*,2016(1):24-27.

[5] 雍恩米,钱炜祺,何开锋. 基于雷达跟踪仿真的滑翔式再入弹道突防性能分析[J]. *宇航学报*,2012,33(10): 1370-1376.

[6] 杨正,曹志耀. 防空警戒雷达以一种频率对空中目标的检测概率计算[J]. *电光与控制*,2007,14(4):41-43.

[7] 吕栋雷,胡浩. 雷达检测概率额计算[J]. *火力指挥与控制*,2008,33(12):144-145.

[8] MERRILL I S. Radar handbook[M]. 3rd ed. New York: The McGraw-Hill Companies, 2008.

[9] MERRILL I S. Introduction to radar systems[M]. 3rd ed. New York: The McGraw-Hill Companies, 2001.

[10] BARICA A, MESZAROS T. Bounds for the symmetric difference of generalized marcum Q-functions[C]//*IEEE Jubilee International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics*, IEEE, 2015:529-540.

[11] PARL S. A new method of calculating the generalized function[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1980, 26(1):121-124.

[12] 周超,张小宽,张晨新. 再入段等离子体对弹头 RCS 的影响研究[J]. *现代雷达*,2014,36(3):83-86.

[13] SONG J M, CHEW W C. Multilevel fast multipole algorithm for solving combined field integral equations of electromagnetic scattering[J]. *Microwave Optoelectronet*, 1995, 10(1):14-19.

[14] GOMEZ-SOUSA H, RUBINOS-LOPEZ O, MARTINEZ-LORENZO J A. Multilevel fast multipole algorithm with multipole octrees for the solution of large-scale plasmonic problems with junctions[C]//*European Conference on Antennas and Propagation*, IEEE, 2015:125-132.