

## 针对非合作型动态障碍的无人机自主防碰撞

韩统, 周欢, 李霞, 翁兴伟, 罗寰

(空军工程大学航空航天工程学院, 西安 710038)

**摘要:** 针对非合作型动态障碍研究了无人机自主防碰撞问题。首先对无人机自主防碰撞问题进行描述, 将动态障碍的无人机防碰撞问题分为冲突预测与规避控制两部分; 然后定义了动态障碍碰撞冲突预测规则, 在二维动态碰撞冲突预测的基础上提出一种动态三维碰撞冲突预测算法; 最后基于最优化理论设计了无人机自主防碰撞规避策略。仿真结果表明, 所提方法能有效避免无人机与非合作型动态障碍之间的碰撞。

**关键词:** 无人机; 非合作型动态障碍; 自主防撞; 冲突预测

**中图分类号:** V249 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2017)02-0006-07

## Autonomous Collision Avoidance Control of UAV Against Non-cooperative Dynamic Obstacles

HAN Tong, ZHOU Huan, LI Xia, WENG Xing-wei, LUO Huan

(Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

**Abstract:** The autonomous collision avoidance problem of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) against non-cooperative dynamic obstacles is studied, including the decision making and control. First of all, the autonomous collision avoidance problem is described, and it is divided into two parts of collision prediction and avoidance control. Then, the rules of the collision prediction are defined, and a three-dimensional algorithm is proposed for dynamic collision prediction based on the two-dimensional collision prediction. The collision avoidance strategies are designed finally by using the optimization theory. Simulation results demonstrate the validity of the proposed method.

**Key words:** Unmanned Aerial Vehicle (UAV); non-cooperative dynamic obstacle; autonomous collision avoidance; collision prediction

### 0 引言

随着各国航空工业的迅猛发展, 无人机在战争以及民用领域得到了广泛应用, 从而导致包括无人机在内的各种作战飞行器的数量急剧上升, 致使飞行密度不断增大, 飞行安全形势也日趋严峻。无人机自主防撞技术是无人机自主控制的关键技术之一, 对提高无人机在复杂环境下的生存能力具有重要意义。特别是对于非合作型动态障碍, 无人机自主防撞系统成为急需<sup>[1-3]</sup>。

无人机防撞研究已经引起国内外学者的高度关

注。在优化算法方面, 文献[4-6]研究了遗传规避算法, 采用离散航路点模型, 考虑了飞机速度不确定性导致的误差, 该方法易于拓展到三维且不增加复杂性, 但精确度有待提高。在图论方面, 文献[7-8]分析了多机飞行碰撞的复杂性, 采用建立 Voronoi 多边形的方法解决防撞问题, 但其仅限于二维平面。文献[9-12]采用人工势场法, 将无人机与障碍物分别看作是带正电和负电的粒子, 以此构建协同防撞方法, 但是该方法不能有效求解带约束条件的问题。为此, 模型预测控制方法得到了越来越多的应用<sup>[13-14]</sup>。文献[15]综合利用几何方法与模型预测控制方法, 基于相切原则, 建立了二维环境中的非线性约束下的防撞控制算法。文献[16]采用分布式模型预测控制提出非线性动态约束条件下多无人机协同防撞方法, 但该方法的前提是所有障碍物的状态均精确已知。

通过上述分析可以发现, 当前关于无人机防撞

收稿日期: 2015-12-22

修回日期: 2017-01-03

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(61601505); 中国航空科学基金(20155196022)

作者简介: 韩统(1980—), 男, 山西临汾人, 博士后, 讲师, 研究方向为无人飞行器作战系统与技术等。

的研究主要存在以下几个问题:1)防碰撞多针对合作型障碍物,该方法难以应对非合作型防碰撞的要求;2)很多方法未考虑无人机自身约束条件,这与实际情况不符;3)模型预测控制方法计算复杂,难以满足实时性要求。

为此,本文基于最优化理论研究针对非合作型动态障碍的无人机自主防碰撞控制方法。首先对动态障碍自主防碰撞问题进行合理的描述,将其分为碰撞预测与自主规避两个部分,然后提出一种三维动态碰撞冲突预测算法,在此基础上设计无人机自主防碰撞控制策略,最后通过仿真实验验证本文所提方法的正确性和有效性。

## 1 问题描述

### 1.1 无人机自主防碰撞系统

针对非合作型动态障碍的无人机自主防碰撞系统如图1所示。

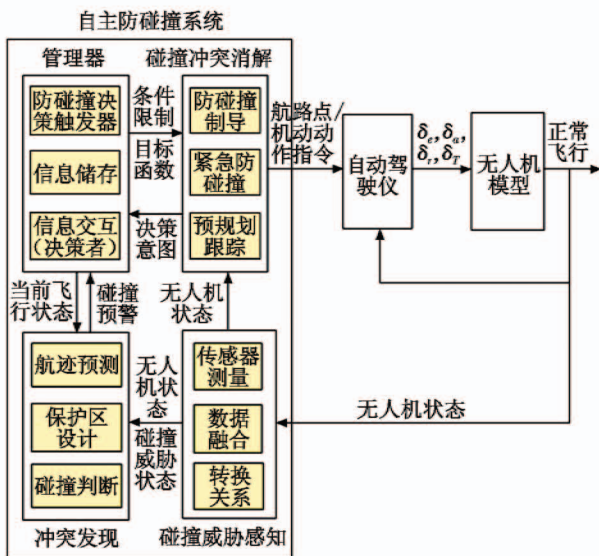


图1 无人机自主防碰撞系统

Fig.1 Autonomous collision avoidance system configuration of UAV

无人机通过机载传感器等设备探测飞行过程中可能遇到的障碍,实现对周围环境的感知。然后基于一定的规则,对碰撞冲突进行预测,如果预测到可能发生碰撞,则启动自主防碰撞策略,完成碰撞规避之后再回到预先设置的航路中,如果不发生碰撞,无人机则沿预设航路正常飞行。

### 1.2 无人机自主防碰撞问题描述

无人机状态信息用一个标示符、一个位置以及一个速度矢量来表示。标示符假设唯一且不变,即同一空域内不会有两架不同无人机具有相同的标示符。用字母 $A, B, \dots$ ,表示无人机状态,黑体字母表示矢量参数,例如, $S$ 表示位置矢量, $V$ 表示速度矢量。当一个矢

量变量表示一架无人机时,将无人机状态作为下标:比如一架无人机 $A$ 的当前位置和速度矢量分别用 $S_A$ 和 $V_A$ 来表示。通常,分角标 $x, y, z$ 表示在各方向轴上的数值,例如 $V_{Ax}, V_{Ay}$ 是速度 $V_A$ 的水平分量, $S_A = [S_{Ax} \ S_{Ay} \ S_{Az}]$ 。

假设无人机自主防碰撞系统功能中的自主感知功能已经实现,初始位置和速度信息是精确的,且能获得入侵机的半径、位置和速度矢量,同时动态障碍物在坐标系上用球体保护区表示。该保护区定义了一个两机间的最小安全间隔,即一个直径为 $D$ 的球体。

为研究无人机针对动态障碍的防碰撞方法,首先定义一组用于所有动态障碍碰撞预测与规避方法的基本概念,然后在此基础上展开本文的相关研究。

**定义1** 保护区:无人机 $A$ 的保护区定义为一个点集 $P_A$ ,满足

$$P_A = \left\{ X \mid \|S_A - X\| < \frac{1}{2} \right\} \quad (1)$$

式中: $X$ 为空间中任一点的位置; $\|\cdot\|$ 是一个向量范数;令 $Y$ 也表示空间中某一点的位置。 $X, Y$ 满足以下条件。

- 1) 非负性:  $\|X\| \geq 0$ 。
- 2) 零值:  $\|X\| = 0$  当且仅当  $X = 0$ 。
- 3) 齐次性:  $\|kX\| = |k| \|X\|$ 。
- 4) 三角不等式:  $\|X + Y\| \leq \|X\| + \|Y\|$ 。

以上是所有保护区的抽象概念。本文中,每架无人机周围假想的保护区具体是一个直径为 $D$ 的球体,即无人机 $A$ 的球体保护区定义为一个点集 $P_A$ ,满足

$$\sqrt{(x - S_{Ax})^2 + (y - S_{Ay})^2 + (z - S_{Az})^2} < \frac{D}{2} \quad (2)$$

因此其范数定义为

$$\|(x, y, z)\| = \frac{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}{D} \quad (3)$$

**命题1** 式(3)是规范的范数向量,即满足非负性、零值、齐次性和三角不等式。

**命题1** 使得无人机间距离和安全间隔丢失的定义不依赖于保护区形状的选择。

**定义2** 距离:无人机 $A$ 和 $B$ 之间的距离定义为

$$\Delta(A, B) = \|S_A - S_B\| \quad (4)$$

**定义3** 安全间隔丢失:无人机间安全间隔丢失的条件是当两架无人机的保护区发生重叠,即

$$P_A \cap P_B \neq \emptyset \quad (5)$$

**命题2** 无人机 $A$ 和 $B$ 安全间隔丢失条件是当且仅当

$$\Delta(A, B) < 1 \quad (6)$$

**定义4** 碰撞冲突:无人机 $A$ 和 $B$ 产生碰撞冲突的条件是在超越时间 $T$ 之前有一未来时间 $t$ ,且 $0 \leq t \leq T$ 时,两机间距离严格小于1。

$$\Delta(A(t), B(t)) < 1 \quad (7)$$

碰撞冲突通常通过比较两架无人机间预测的最接近间隔和由保护区定义的最小安全间隔来判定。

**定义 5** 最接近间隔时间:无人机  $A$  和  $B$  在超越时间  $T$  内的最接近间隔时间为  $\tau_T(A, B)$ , 即最小时间  $\tau(0 \leq \tau \leq T)$ , 对于任意  $0 \leq t \leq T$  的时间  $t$  有

$$\Delta(A(\tau), B(\tau)) \leq \Delta(A(t), B(t)). \quad (8)$$

最接近间隔时间始终存在, 因为  $\Delta$  是一个连续函数且时间范围  $0 \leq t \leq T$  定义为一个闭区间。

**定义 6** 最接近间隔距离:无人机  $A$  和  $B$  在超越时间  $T$  内的最接近间隔距离是在最接近间隔时间的两机间距离, 即

$$\delta_T(A, B) = \Delta(A(\tau_T(A, B)), B(\tau_T(B, A))). \quad (9)$$

因此, 基于最接近间隔距离的碰撞冲突可重新定义如下。

**命题 3** 无人机  $A$  和  $B$  有碰撞冲突当且仅当  $\delta_T(A, B) < 1$ 。

**定义 7** 规避策略: 规避策略  $R_A$  是无人机  $A$  只修改当前速度矢量的新状态。无人机  $A$  在  $R_A$  下的新速度表示为  $V_{R_A}$ 。

规避策略可根据其满足的间隔标准来分类。令  $R_A$  和  $R_B$  分别是无人机  $A$  和  $B$  的规避策略:

1) 当  $\delta_T(R_A, B) \geq 1$ ,  $R_A$  对于无人机  $A$  是一个非合作型的规避策略(无人机  $B$  不做机动), 如果  $\delta_T(R_A, B) = 1$ ,  $R_A$  也是相切的规避策略;

2) 当  $\delta_T(R_A, R_B) \geq 1$ ,  $R_A$  和  $R_B$  是合作的规避策略, 如果  $\delta_T(R_A, R_B) = 1$ ,  $R_A$  和  $R_B$  也是最小的规避策略;

3) 当  $\delta_T(R_A, R_B) > \delta_T(A, B)$ ,  $R_A$  和  $R_B$  是互斥的规避策略。

无人机针对动态障碍的防碰撞可以明确分为 3 个阶段: 第 1 阶段是入侵机的状态估计; 第 2 阶段是冲突预测, 两机间潜在的冲突将被预测到, 并确定它们在一段时间后的未来位置是否会发生最小间隔丢失(即无人机  $O$  是否进入无人机  $I$  的保护区); 一旦预测到冲突情况就进入第 3 阶段, 即装载自主防碰撞功能的无人机及时采取相应的规避方法。其中, 状态估计可采用类似扩展卡尔曼滤波方法来获得入侵机的估计状态, 本文假设在已获取入侵机状态的情况下研究动态障碍的碰撞预测与规避方法。

## 2 动态障碍物碰撞预测规则

### 2.1 二维动态碰撞冲突预测

基于保护区基本定义, 考虑一个以入侵机为坐标系中心的保护区, 即直径为  $D$  的圆。安全间隔丢失发生在时刻  $t$  当且仅当两机间在时间  $t$  的投影距离严格小

于  $R$  (即  $D/2$ )。假设  $S_{00}, V_{00}$  和  $S_{10}, V_{10}$  分别为本机 and 入侵机在 0 时刻的位置和对地速度矢量, 则有

$$|(S_{00} - S_{10}) + t(V_{00} - V_{10})|^2 < R^2 \quad (10)$$

$t$  有解, 当且仅当

$$|(S_{00} - S_{10}) + t(V_{00} - V_{10})|^2 = R^2 \quad (11)$$

有两个解  $t_1, t_2$ , 且  $t_1 \neq t_2$ , 两个解即安全间隔丢失开始和结束的时间。通过定义可知, 如果  $t_1 = t_2$ , 将没有间隔丢失发生。此二维方法是由 Bilimoria<sup>[17]</sup> 提出并应用的, 考虑入侵机在空间中固定不动, 且本机位置  $S$  和速度  $V$  采用的是相对于入侵机状态的量, 即  $S = S_0 - S_I$  和  $V = V_0 - V_I$ 。如果本机的一个新的相对速度能够使它与入侵机保护区内部不相交, 就可以规避碰撞。在无穷多规避碰撞的新速度矢量解中, Bilimoria 选择了与其原有速度矢量具有最小角度的速度矢量作为最优解。如图 2 所示, 任何其他解都需要本机对地路径的大量改变, 因此任何最优解都是与入侵机保护区相切的。每经过  $M, N$  点就决定一条新的本机对地路径, 在一定约束下它是最优的, 例如约束条件为只能左转, 目标点  $A$  是最优的。速度矢量的长度可任选。

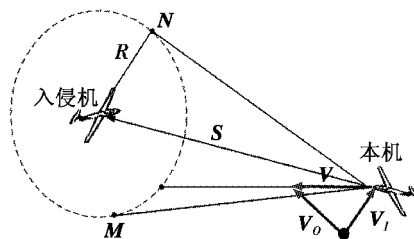


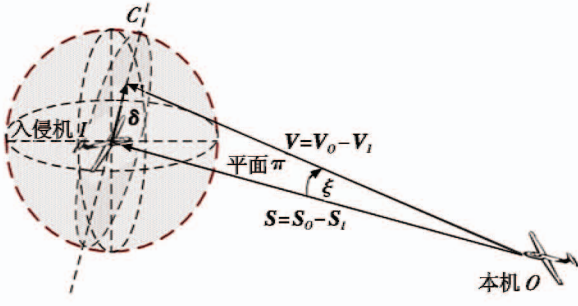
图 2 二维碰撞冲突预测与规避方法

Fig. 2 Collision prediction and avoidance control in two dimensions

Bilimoria 二维方法可以预测和规避水平面上的冲突, 但对于垂直方向的冲突没有考虑。在文献 [18] 中, 三维冲突被分解成水平和垂直方向的冲突, 从而可以独立预测和规避碰撞冲突, 然后组合各个方向的解以获得三维机动, 这种方法虽然简单但却难以证明其正确性。本文将基于 Bilimoria 的二维水平冲突预测与规避方法, 提出一种真正的用于动态障碍物的三维碰撞冲突预测和规避方法。

### 2.2 三维动态障碍碰撞冲突预测规则

在二维动态障碍碰撞冲突预测规则的基础上, 提出一种三维动态障碍碰撞冲突预测规则, 实现三维碰撞冲突预测。假设  $O, I$  分别代表无人机和入侵无人机, 入侵无人机为非合作障碍, 则本文研究的自主防碰撞问题可以看作是无人机  $O$  先预测出与入侵无人机  $I$  的碰撞冲突, 然后采取自主防碰撞策略, 完成避碰。二者飞行示意如图 3 所示。

图3 最小间隔  $\delta$ Fig. 3 Definition of the minimum distance  $\delta$ 

假设  $\delta$  是  $O$  和  $I$  可能的最小间隔,在某段时间之后,  $\delta$  的表达式为

$$\delta = \frac{S \cdot V}{\|V\|^2} V - S \quad (12)$$

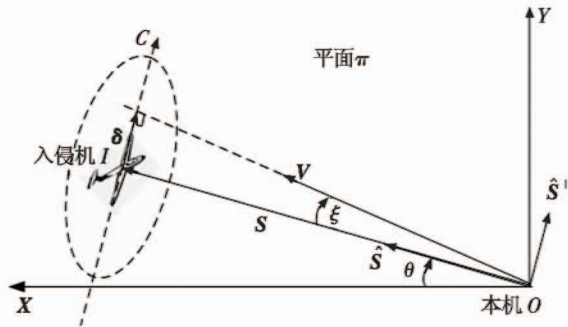
**定理 1** 无人机  $O$  和入侵无人机  $I$  (球体,半径为  $R$ ) 均进行匀速飞行,速度分别为  $V_o$  和  $V_i$ ,两架无人机发生碰撞,当且仅当

$$\| \delta \| \leq R \text{ 且 } \dot{W} < 0 \quad (13)$$

式中,  $W = \|S\|$ 。

**证明** 令  $\pi$  为矢量  $V$  和  $S$  所在平面。平面与球体  $I$  相交确定一个半径为  $R$  的圆  $C$ ,如图 3 所示。在图 4 中同样考虑这个平面,质点  $O$  和半径为  $R$  的球体  $I$  产生冲突当且仅当假设质点  $O$  以常速  $V$  在平面  $\pi$  里与假设静止的圆  $C$  发生冲突。考虑右侧单位向量  $\hat{S}$  和  $\hat{S}^\perp$ ,可得

$$V = V_s \hat{S} + V_\theta \hat{S}^\perp \quad V_s = \dot{W}, V_\theta = W\dot{\theta} \quad (14)$$

图4  $V$  和  $S$  所在平面  $\pi$ Fig. 4 The plane  $\pi$  of  $V$  and  $S$ 

在平面  $\pi$  里可应用如下定理(证明见文献[19])。

**定理 2** 如果一个点与一个圆以常速运动且初始条件满足

$$W^2 V_\theta^2 \leq R^2 (V_s^2 + V_\theta^2) \text{ 且 } V_s < 0 \quad (15)$$

那么它们即将处于冲突,以上条件对于冲突发生都是必要和充分的。

条件  $V_s = \dot{W} < 0$  表示无人机正在接近,为证明式

(13),首先证明

$$\| \delta \| \leq R \Leftrightarrow W^2 V_\theta^2 \leq R^2 (V_s^2 + V_\theta^2) \quad (16)$$

又由于  $S = W\hat{S}$ ,  $V = V_s\hat{S} + V_\theta\hat{S}^\perp \Rightarrow S \cdot V = WV_s$ ,因此

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{WV_s}{(V_s^2 + V_\theta^2)} (V_s\hat{S} + V_\theta\hat{S}^\perp) - W\hat{S} = \\ &= \frac{-WV_\theta^2}{(V_s^2 + V_\theta^2)} \hat{S} + \frac{WV_s V_\theta}{(V_s^2 + V_\theta^2)} \hat{S}^\perp \Rightarrow \| \delta \|^2 = \frac{W^2 V_\theta^2}{V_s^2 + V_\theta^2} \end{aligned} \quad (17)$$

由式(16)和式(17)可得,  $\| \delta \| \leq R \Leftrightarrow \| \delta \|^2 \leq R^2 \Leftrightarrow W^2 V_\theta^2 \leq R^2 (V_s^2 + V_\theta^2)$ 。

证毕。

### 3 基于最优化的自主防碰撞策略

图 5 显示了在三维惯性参考坐标系中描述两非合作无人机间避撞情况的几何图,假设装有有机载自主防碰撞系统的无人机模型用一个质点  $O$  表示,具有速度  $V_o$ ,而另一架入侵机  $I$  是一个保护区半径为  $R$  的球体,速度为  $V_i$ 。则针对非合作型动态障碍的无人机自主防碰撞策略可描述为如下最优化问题:求出使无人机  $O$  能自主规避入侵无人机  $I$  且偏离预设航路最小的解。

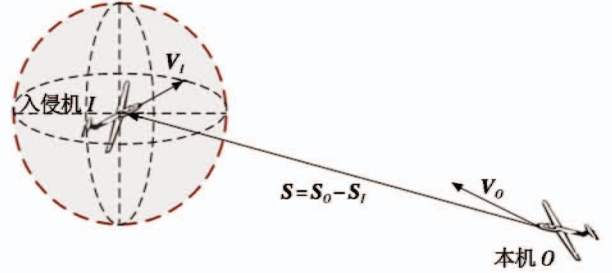


图5 非合作型防碰撞方法示意图

Fig. 5 Non-cooperative collision avoidance method

无人机  $O$  位置矢量表示为  $S_o(t) = [x_o(t), y_o(t), z_o(t)]^T$ ,入侵无人机  $I$  位置矢量表示为  $S_i(t) = [x_i(t), y_i(t), z_i(t)]^T$ 。  $S_o(t)$  可以根据  $V_o(t)$  求出,即

$$S_o(t) = S_o(t_0) + \int_{t_0}^t V_o(\tau) d\tau \quad (18)$$

假设  $S_o^d(t)$  为根据期望速度  $V_o^d(t)$  而求出的位置矢量,则偏离值

$$S_o^d(t) - S_o(t) = \int_{t_0}^t [V_o^d(\tau) - V_o(\tau)] d\tau \quad (19)$$

目标是在无人机本身约束条件下使得偏离值最小化,问题表述为

$$\min_{V_o^d, \phi_o^d} \left\| \int_{t_0}^t \Delta V_o(\tau) d\tau \right\| \quad (20)$$

s. t.  $\|S_o^d(t) - S_i(t)\| \geq R, \forall t \geq t_0, V_o^d(t) \in$

$$[V_{Omin}, V_{Omax}], \phi_o^d(t) \in [\phi_{Omin}, \phi_{Omax}], \exists t_a^O > 0$$

式中:  $\|S_o^d(t) - S_i(t)\| = \|S(t) + \int_{t_0}^t \Delta V_o(\tau) d\tau\| \geq R$  表示防止无人机  $O$  与入侵无人机  $I$  碰撞;第 2 个和第 3

个条件均为动力学约束;  $t_a^0$  表示速度延迟常数。

为了使用解析法求解式(20)问题,可将上述问题简化为

$$\|\Delta S_o(t)\| = \left\| \int_{t_0}^t \Delta V_o(\tau) d\tau \right\| = \|\Delta V_o(t_0)\| (t - t_0) \quad (21)$$

第1个约束条件化为

$$\|S(t) + \Delta V_o(t_0)(t - t_0)\| \geq R \quad \forall t \geq t_0 \quad (22)$$

同时,  $\Delta V_o = V_o^d - V_o = (V_o^d - V_I) - (V_o - V_I) = V^d - V$  且  $S(t) = S(t_0) + V(t - t_0)$ 。

则式(22)继续化为

$$\|S(t) + V^d(t - t_0)\| \geq R \quad \forall t \geq t_0 \quad (23)$$

可证  $t = t^* \equiv \frac{S(t_0) \cdot V^d}{\|V^d\|^2}$ ,  $\|S(t_0) + V^d(t - t_0)\|$  最小,

且结果是  $\|\delta^d\|$ 。由于  $\|\delta^d\| = R$  (与保护区相切), 则满足式(22)。至此,式(20)问题为

$$\min_{V_o, \phi_o} \|\Delta V_o\| \quad \text{s. t.} \quad \|\delta^d\| = R \quad (24)$$

这个新问题可以得到一个解析解,其以几何形式描述的证明如下。

需要找到最小  $\Delta V_o$  应用于速度矢量  $V_o$ , 从而使得新的速度矢量  $V_o^d = V_o + \Delta V_o$  与保护区相切。将  $V^d$  的单位矢量表示为  $\hat{V}^d$ 。在单位矢量  $\hat{V}$ ,  $\hat{V}^d$  构建的平面中 (见图6), 使  $\Delta V_o$  最小化可应用  $\hat{V}$  在  $\hat{V}^d$  上的正交投影: 任何矢量  $\Delta V_o'$  的模大于  $\Delta V_o$ , 则  $\|\Delta V_o'\| = \|V\| \sin \Omega$ ,  $\Omega \in [0, \frac{\pi}{2}]$ 。

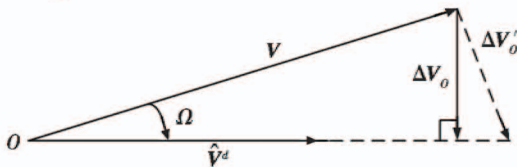


图6 单位矢量  $\hat{V}$  和  $\hat{V}^d$  形成的平面

Fig. 6 Unit vector of  $\hat{V}$  and  $\hat{V}^d$

为求出  $\Delta V_o$  的最小值,先求解  $\hat{V}^d$ , 与保护区相切且以最小角度  $\Omega$  表示。因此,圆  $I'$  是与  $S$  轴具有角度  $\eta = \arcsin \frac{R}{\|S\|}$  的锥体与保护区的交线,如图7所示。圆  $I'$  的定义如图8所示。

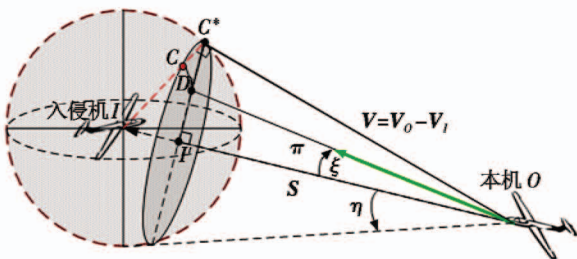


图7 锥体与保护区交面

Fig. 7 Intersecting plane between pyramid and protection zone

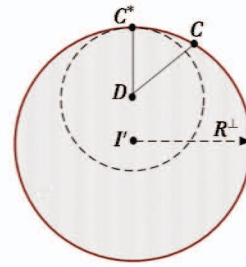


图8 圆  $I'$  的定义

Fig. 8 Definition of circle  $I'$

对于圆  $I'$  上任意一点  $C$ ,  $\overline{DC}$  确定一个与保护区相切的  $\hat{V}^d$ 。然而,  $C^*$  在  $\pi$  上,它是确保  $\Omega$  最小 (即  $\Delta V_o$  最小) 的唯一一点,因为  $|\overline{DC^*}| \leq |\overline{DC}|$ , 故  $V^d$  的解析表达必须在平面  $\pi$  中寻找。矢量  $V^d$  的计算如图9所示。

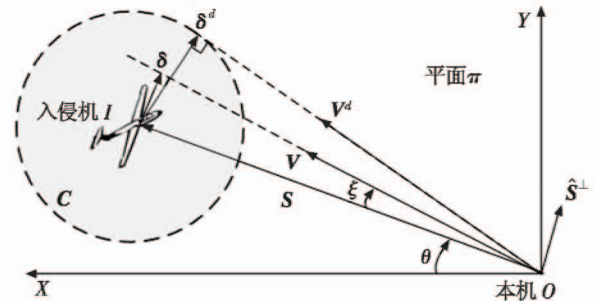


图9 矢量  $V^d$  的计算

Fig. 9 Computation of  $V^d$  in plane  $\pi$

若角度  $\eta$  和  $\xi$  同号,则  $\Omega = \eta - \xi$  最小。将其分为  $\xi \neq 0$  和  $\xi = 0$  两种情况。

1)  $\xi \neq 0$  (一般)。

由图9可得  $\Delta V_o$  的最小化形式为

$$V^d = V_o^d - V_I = V^d \sin \eta \cdot \hat{S}^\perp + V^d \cos \eta \cdot \hat{S} = \frac{V \cos(\eta - \xi)}{\sin \xi} [\sin \eta \cdot \hat{V} - \sin(\eta - \xi) \cdot \hat{S}] \quad (25)$$

表达式(25)在假设条件下是式(20)一般问题的全局最优解。

2)  $\xi = 0$  (特殊)。

此单一性取决于  $V$  和  $S$  之间的关系。此时,平面  $\pi$  不是单一定义的,而是必须从与  $S$  同方向的一组平面束中选择出来。

### 3.1 保护区设计原则

为考虑动力学约束,保护区半径  $R$  可以扩大范围,本文选择扩大保护区为  $R' = R + \Delta R$ , 其中  $R = 500 \text{ ft} \approx 152.4 \text{ m}$  (根据美国 FAA 事故标准)。  $\Delta R$  可设计为一个对于入侵机在时间  $t_a^0$ :  $\Delta R = t_a^0 \cdot V_{I_{\max}}$  内可执行的所有可能机动的保守估计值。如果  $I$  与  $O$  有相同性能,例如  $t_a^0 \approx 10 \text{ s}$  且  $V_{I_{\max}} \approx 45 \text{ m/s}$ , 即使  $I$  是追击者,那么  $R' = R + \Delta R \approx 4R = 2000 \text{ ft}$ , 半径为  $R' \approx 4R$  的保护区也足够保证防碰撞 (两机间相对距离总大于  $R = 500 \text{ ft}$ )。

由于保护区半径  $R' = R + \Delta R$  合适地设计了  $\Delta R$ , 在假使  $I$  与  $O$  有相同性能情况下能保证两机间最小距离总是大于  $R$ , 并且即使  $I$  是追击者, 初始相对距离也大于某一临界距离。但某些情况下仍有  $O$  进入半径为  $R'$  的保护区的可能性。这种情况下, 不能采用切线解式(25), 因为没有穿过球体内一点并与半径为  $R'$  的球体相切的切线。

因此, 当  $O$  位于半径为  $R'$  的保护区内时, 可选择另一种策略: 分配给无人机  $O$  自驾仪所需的速度矢量  $V_o^{d,e}$ , 定义见图 10。所采用的策略提供了一种强有力的控制机动以使无人机快速移出半径为  $R'$  的保护区, 然后继续应用切线解式(25)。

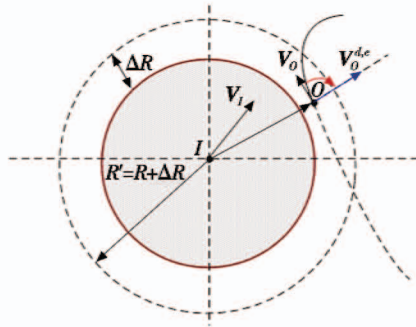


图 10 半径为  $R'$  的保护区的逃离路径

Fig. 10 Escape path with radius of protection zone being  $R'$

### 3.2 无人机动力学约束条件下的防碰撞控制指令

假设无人机当前的速度方向是  $V$  的方向, 修改的防碰撞速度方向是  $V^d$  的方向。令  $\phi$  为无人机的滚转角,  $\theta$  为无人机的俯仰角, 则在无人机边界限制条件下生成的防碰撞规避制导控制指令为

$$\dot{\phi} = \frac{1}{N}(\phi_{com} - \phi) \quad (26)$$

$$\dot{\theta} = \frac{1}{M}(\theta_{com} - \theta) \quad (27)$$

式中,  $N, M$  均为无人机机动时间延迟常数。仿真过程中, 令  $N = M = 1 \text{ s}$ 。

#### 1) 水平机动。

在水平面内, 无人机的视线倾斜角为

$$\lambda = \text{signum}((V_H \times V_H^d)_z) \arccos\left(\frac{V_H \times V_H^d}{|V_H|}\right) \quad (28)$$

式中,  $V_H$  为速度的水平分量。为此, 将无人机的滚转角看作是输入。令最大滚转角为  $\phi_{max}$ , 由此在 1 s 内最大纵向倾角改变为

$$\gamma_{max} = \frac{g}{|V_H|} \quad \text{对于 } 1 \text{ s 和 } \phi_{max} \quad (29)$$

式中,  $g$  是引力加速度常数。水平机动选择如表 1 所示。

#### 2) 垂直机动。

期望俯仰角可表示为

$$\theta_{req} = \arctan\left(\frac{V_H^d}{|V_H|}\right) \quad (30)$$

垂直机动选择如表 1 所示。

表 1 机动选择

Table 1 Maneuvering selection

水平机动选择		垂直机动选择	
视线倾斜角范围	滚转指令	俯仰角范围	时间常数 $M/s$
$\lambda < -\gamma_{max}$	$\phi_{com} = -\phi_{max}$	$0^\circ \leq  \theta_{req}  < 15^\circ$	1
$-\gamma_{max} \leq \lambda \leq \gamma_{max}$	$\phi_{com} = (\lambda/\gamma_{max}) \times \phi_{max}$	$15^\circ \leq  \theta_{req}  < 30^\circ$	2
$\lambda > \gamma_{max}$	$\phi_{com} = \phi_{max}$	$30^\circ \leq  \theta_{req}  < 45^\circ$	3
		$ \theta_{req}  \geq 45^\circ$	4

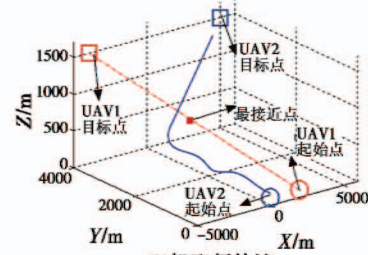
## 4 仿真分析

假设两架无人机 UAV1 和 UAV2 的初始位置、速度与目标位置的信息如表 2 所示, 其中, UAV2 为我方无人机, UAV1 为非合作型障碍。在飞行过程中预测到两机会出现碰撞现象, UAV2 采取相应规避机动, UAV1 直线飞行, 得到仿真曲线如图 11 所示。

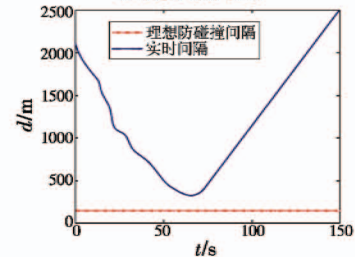
表 2 双机初始信息

Table 2 Initial states of UAV1 and UAV2

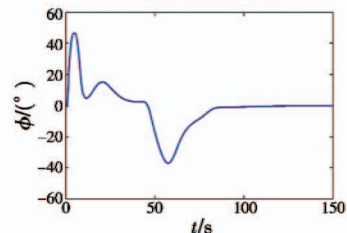
	参数	数值
UAV1	初始位置/m	(2000, 10, 100)
	目标位置/m	(-4000, 4000, 1500)
	初始速度/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	(-35, 25, 12)
UAV2	初始位置/m	(0, 10, 100)
	目标位置/m	(5000, 4000, 1500)
	初始速度/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	(30, 27, 12)



a 双机飞行轨迹



b 双机相对距离



c UAV2 滚转角指令

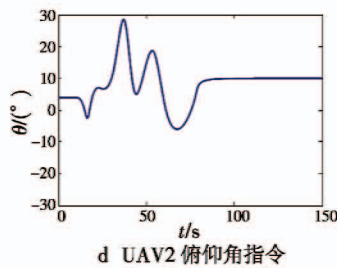


图 11 UAV1 和 UAV2 之间的防碰撞响应

Fig. 11 Collision avoidance response between UAV1 and UAV2

由图 11a 可知, UAV1 和 UAV2 的飞行航路没有相交; 由图 11b 可知, UAV2 完成了与 UAV1 的自主防碰撞; 由图 11c 和图 11d 可知, 指令均在限制范围之内。

从仿真结果可以看出, 本文所提方法可以确保无人机实现同非合作型障碍之间的自主防碰撞。

## 5 结论

本文提出一种新的针对非合作型障碍的无人机自主防碰撞控制方法。主要结论有:

- 1) 对动态障碍的无人机自主防碰撞问题进行描述, 将其分为预测和规避两个阶段;
- 2) 在二维动态碰撞冲突预测的基础上提出一种三维碰撞冲突预测方法, 可以有效对机间冲突进行预测;
- 3) 基于最优化理论的无人机自主防碰撞控制策略能够在考虑各种约束条件的前提下实现无人机与非合作型动态障碍物的避撞。

后续可以考虑设计多无人机的协同防碰撞控制方法; 同时, 对比分析合作型和非合作型防碰撞方法也是下一步的研究重点。

## 参 考 文 献

[1] RICHARDS A, HOW J. Decentralized model predictive control of cooperating UAVs[C]//The 43rd IEEE Conference on Decision and Control, Atlantis, Paradise Island, Bahamas, 2004:4286-4291.

[2] IZADI H A, GORDON B W, ZHANG Y M. Rule-based cooperative collision avoidance using decentralized model predictive control[C]//AIAA Infotech@Aerospace, 2011: 1-14.

[3] 周欢, 魏瑞轩, 茹常剑, 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] DURAND N, ALLIOT J M, NOAILLES J. Automatic aircraft conflict resolution using genetic algorithms[C]//Symposium on Applied Computing, 1996:289-298.

[5] DURAND N, ALLIOT J M, CHANSOU O. Optimal resolution of en-route conflicts[J]. Air Traffic Control Quarterly, 1995, 3(3):139-161.

[6] 张智, 林圣琳, 朱齐丹, 等. 考虑运动学约束的不规则目

标遗传避碰规划算法[J]. 航空学报, 2015, 36(4):1348-1358.

[7] FULTON N L. Airspace design: towards a rigorous specification of conflict complexity based on computational geometry[J]. The Aeronautical Journal, 1999, 103:75-84.

[8] DOWEK G, MUNOZ C A. Conflict detection and resolution for 1, 2, ..., N aircraft[C]//Proceedings of the 7th AIAA Aviation Technology, Integration and Operations Conference, AIAA-7737, Belfast, Northern Ireland, 2007:1-13.

[9] LEE L F. Decentralized motion planning within an Artificial Potential Framework (APF) for cooperative payload transport by multi-robot collectives[D]. Buffalo: State University of New York, 2004.

[10] 王奎民, 赵玉飞, 侯恕萍, 等. 一种改进人工势场的UUV动障碍航物规避方法[J]. 智能系统学报, 2014, 9(1):1-6.

[11] HELBLE H, CAMERON S. 3-D path planning and target trajectory prediction for the Oxford aerial tracking system[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Roma, 2007:1042-1048.

[12] MASSOUD A A. Managing the dynamics of a harmonic potential field-guided robotic in a cluttered environment[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(2):488-496.

[13] 李国勇. 智能预测控制及其 MATLAB 实现[M]. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2010.

[14] 吴青坡, 周绍磊, 刘伟, 等. 基于集散式模型预测控制的多无人机协同分区搜索[J]. 控制理论与应用, 2015, 32(10):1414-1421.

[15] GAGNON E, RABBATH C, LAUZON M. Receding horizons with heading constraints for collision avoidance[C]//AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, San Francisco, California. doi: 10. 2514/6. 2005-6369.

[16] BOIVIN E, DESBIENS A, GAGNON E. UAV collision avoidance using cooperative prediction control[C]//The 16th Mediterranean Conference on Control and Automation Congress Center, Ajaccio, France, 2008:682-688.

[17] BILIMORIA K D. A geometric optimization approach to aircraft conflict resolutions[C]//AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, Denver, 2000:1-11.

[18] HOEKSTRA J M, RUIGROK R, VAN GENT R, et al. Overview of NLR free flight project 1997-1999[R]. Amsterdam: National Aerospace Laboratory NLR, 2000.

[19] CHAKRAVARTHY A, GHOSE D. Obstacle avoidance in a dynamic environment: a collision cone approach[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics — part A: Systems and Humans, 1998, 28(5):562-574.