

无人机动态避撞区建模方法研究

许敬刚, 王宏伦, 刘畅, 梁宵

(北京航空航天大学飞行器控制一体化技术重点实验室, 北京 100191)

摘要: 针对现有方法采用定值飞行间隔确定避撞区域对空域利用不足的问题, 提出一种动态、实时建立避撞区域的方法。根据无人机的机动约束, 无人机的碰撞区域以及飞机之间的相对位置、相对速度等信息, 实时建立避撞区包络。由于动态考虑了无人机与入侵飞机对避撞区的影响因素, 提高了所建包络的针对性, 缩小了避撞区包络所占的空域面积, 不仅避免了一些不必要的规避机动, 而且还可以使繁忙的空域得到更合理的利用。仿真结果验证了所建动态避撞区的有效性。

关键词: 无人机; 感知与规避; 避撞区; 动态建模

中图分类号: V328 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2014)12-0030-06

Modeling of Dynamic Collision Avoidance Zone for UAVs

XU Jing-gang, WANG Hong-lun, LIU Chang, LIANG Xiao

(Science and Technology on Aircraft Control Laboratory, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Considering that the size of collision avoidance zone is usually constant and can not make full use of the space, we proposed a method for establishing the collision avoidance zone of UAVs dynamically in real time. The collision avoidance zone is established according to the constraints of UAV maneuverability, collision zone, the relative position and the relative velocity. The influencing factors of UAV and the intruder to collision avoidance zone are considered dynamically, thus the collision avoidance zone is established more accurately with smaller airspace, which can not only avoid the unnecessary maneuvering for collision avoidance, but also make more reasonable use to the busy airspace. The simulation results show the good performance of this dynamic modeling method.

Key words: UAV; sense and avoid; collision avoidance zone; dynamic modeling

0 引言

目前, 由于无人机仍没有成熟的自主感知与避撞系统, 为避免可能的冲突, 无人机飞行中往往采用独享空域的方法, 难以与有人机或其他无人机共享宝贵的空域, 造成了空域的极大浪费, 也严重制约了无人机的进一步发展。随着民用航空、通用航空的快速发展, 空域将日趋珍贵, 如何在确保飞行安全的前提下通过共享提高空域的利用率成为新的研究热点。威胁感知与规避技术正是基于这个需求而开展的。

在民航领域, 为了防止飞行冲突, 维护飞行秩序, 保证飞行安全, 国内外都有相关的安全飞行间隔规定。

我国现行的《飞行间隔规定》^[1]对飞行器的纵向、侧向和高度安全间隔都有明确的规定。在飞行中通过空中防撞系统(Traffic Collision Avoidance System, TCAS)或广播式自动相关监视系统(Automatic Dependent Surveillance Broadcast, ADS-B)实时监测飞机之间的相对位置, 当有飞机侵入其他飞机的避撞区域时, 根据侵入区域的不同向飞行员提供告警或警戒信息, 通过飞行员操纵飞机避免冲突^[2]。

对于无人机而言, 为了能和其他飞机共享空域, 必须具备自主威胁感知与规避能力。通过感知系统检测无人机周围可能的威胁, 通过碰撞检测算法判断冲突的可能, 通过规避机动避免碰撞。通常, 从避免飞行冲突的角度将无人机周围区域从内向外划分为碰撞区、避撞区和安全区。碰撞区指比无人机外形尺寸稍大的区域, 一旦有它机侵入必将发生碰撞, 是绝对不允许侵入的区域。避撞区指通过碰撞检测算法判断会发生碰撞但通过合适的机动可避免碰撞的区域, 又可进一步

收稿日期: 2013-11-04 修回日期: 2014-03-05

基金项目: 装备预研项目; 国家自然科学基金(61175084)

作者简介: 许敬刚(1986—), 男, 河北衡水人, 硕士生, 研究方向为无人机导航、制导与控制。

由内到外划分为紧急避撞区和自动规避区。紧急避撞区,指入侵机进入该区域边界时,无人机采取紧急避撞机动(如采用最大侧向过载机动),刚好能够避免碰撞的发生;自动规避区,指入侵机进入该区域时,无人机采取自动规避策略,即可避免碰撞的发生。安全区指不会发生碰撞的区域。

近年来,国内外学者围绕无人机自主威胁感知与规避策略展开了大量卓有成效的研究。文献[3-4]以飞机间互通飞行信息为前提,提出了一种水平面内协作避撞策略;文献[5-6]利用 TCAS 的感知与决策功能,采用时间阈值对飞行器避撞区进行划分,从外层到内层依次划分为警戒区、决策区、避撞区,但对于每一层的阈值并未给出确切值,而是一个时间范围,并且飞行器最终的避撞策略仍需遵循 TCAS 给出的决策信息;文献[7-8]以自我感知获得入侵机飞行信息为前提,并依据所获得信息,判断冲突是否会发生,但对于避撞区范围的确定,采用的是相关飞行间隔规定,对避撞范围做定值处理。这种方法缺乏对飞行器的针对性,不仅造成了一定程度的空域浪费,而且会造成不必要的避撞机动。另外,在密集编队飞行状况下,以固定区域为避撞区的方法并不适用。

本文针对上述问题,提出了一种无人机动态避撞区建模方法。通过分析获得的入侵机飞行信息,提取避撞机动的关键影响因素作为建模参数,并结合无人机自身的机动能力以及位置、姿态、飞行速度等信息建立无人机避撞区包络。为系统同时提供了最小避撞距离与避撞所需时间双重参考信息,更大程度上保证了避撞成功率。仿真结果表明该方法能够提高避撞区的针对性,避免了不必要的空域浪费和避撞机动。

1 碰撞检测算法

在避撞区建模之前,首先需要判断在飞行过程中,无人机与入侵机是否有发生碰撞的可能。判断方法采用一种 CPA (Closest Point of Approach) 碰撞检测算法^[9]。该算法的思路为,通过无人机与入侵机的相关信息,实时计算当前运动航路情况下,两架飞机航路的最接近点距离,以及到达最接近点所需时间。如果两架飞机到达最接近点时,飞机之间的距离小于规定的安全距离,则可以判定两架飞机之间将会有碰撞发生。碰撞检测模型如图 1 所示。图中: V_0, V_1 分别为无人机与入侵机的飞行速度; V_r 为无人机与入侵机的相对速度,实际飞行情况可以等效为本机静止不动,入侵机以 V_r 飞行; $\theta_1, R_1, \theta_2, R_2$ 分别为间隔 t 时间内,两次测量所得到的两架飞机的相对距离与方位角。通过几何关

系推导可得,到达最接近点处时,水平相对距离为

$$D_{\min} = \frac{R_1 R_2 \sin(\theta_1 - \theta_2)}{\sqrt{R_1^2 + R_2^2 - 2R_1 R_2 \cos(\theta_1 - \theta_2)}} \quad (1)$$

所需时间为

$$\tau = \frac{R_2 (R_1 \cos(\theta_1 - \theta_2) - R_2)}{\sqrt{R_1^2 + R_2^2 - 2R_1 R_2 \cos(\theta_1 - \theta_2)}} \quad (2)$$

对于无人机而言,可以通过该算法预判碰撞是否将会发生,从而提前进行相关决策。

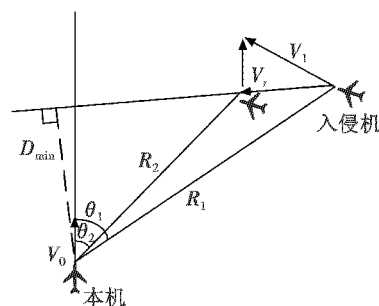


图 1 碰撞检测模型

Fig. 1 Model for collision detection

2 避撞区动态建模方法

2.1 紧急避撞区模型推导

主要假设如下:

- 1) 假设通过机载感知与识别系统,可以获得入侵机的相对位置、速度、特征尺寸、运动趋势等信息;
- 2) 仅考虑同一飞行高度下,无人机与入侵机的遭遇情况,飞机碰撞区为以飞机质心为圆心,安全距离为半径的圆形区域;
- 3) 当无人机与入侵机遭遇时,无人机在水平面内采取简单有效的最大过载紧急避撞机动(左转/右转),做保速变向飞行,主动避让入侵机,入侵机保持原飞行状态飞行。

本文主要对飞机空中遭遇的 3 种典型情况进行研究,分别为迎面遭遇,正侧向遭遇,追尾遭遇,遭遇情形分别如图 2~图 4 所示。

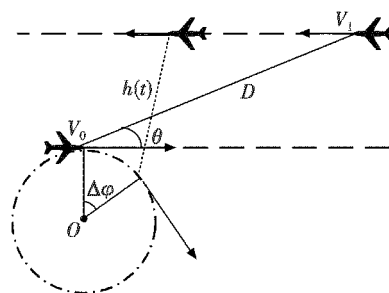


图 2 无人机与入侵机迎面遭遇情形

Fig. 2 Situation of head-on encountering

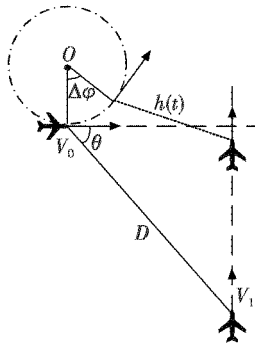


图3 无人机与入侵机正侧向遭遇情形

Fig. 3 Encountering situation with intruder coming from direct vertical direction

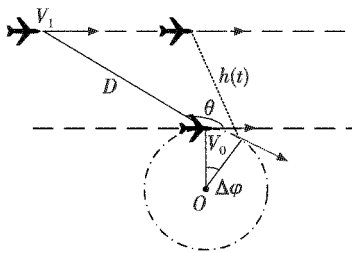


图4 无人机与入侵机追尾遭遇情形

Fig. 4 Encountering situation with intruder coming from rear

以无人机与入侵机迎面遭遇为例,即无人机与入侵机相对航向角为 180° (遭遇情形见图2),详细介绍本文的建模方法。

图2中: V_0, V_1 分别为无人机与入侵机的飞行速度; θ 为入侵机与无人机的相对方位角; D 为防撞机动开始时,无人机与入侵机的相对距离; $h(t)$ 为防撞机动开始时刻 t 时,无人机与入侵机的相对距离; $\Delta\varphi$ 为 t 时刻后,无人机的转向角度; D_{limit} 为飞机之间的最小安全距离。

假设无人机与入侵机相对距离为 D 时,无人机开始采取紧急防撞机动(以最大转弯角速率 r 机动),两架飞机到达最接近点时,距离为无人机与入侵机的最小安全距离 D_{limit} ,飞机刚好避免碰撞的发生。 D 即入侵机与无人机相对方位角为 θ 入侵时,紧急防撞区的边界值。

分析上述过程, t 时刻,飞机的状态信息可以表示为 $X(t)=[x(t), y(t), v(t), \varphi(t), r(t)]$ 。其中: $x(t), y(t)$ 为 t 时刻无人机的位置信息; $v(t), \varphi(t)$ 分别为 t 时刻无人机的速度大小与飞行方向; $r(t)$ 为无人机的转弯角速率。

由当前无人机的飞行信息,计算防撞机动转弯飞行一周所需时间为

$$T = \frac{2\pi R}{V_0} \quad (3)$$

无人机的转弯角速率为

$$r = \frac{2\pi}{T} \quad (4)$$

由式(3)、式(4)可知,无人机的转弯半径为

$$R = \frac{V_0}{r} \quad (5)$$

分析迎面遭遇情况, t 时刻,无人机与入侵机之间的距离为

$$\begin{cases} \Delta x = D \cos \theta - V_1 t - \frac{V_0}{r} \sin rt \\ \Delta y = D \sin \theta + \frac{V_0}{r} - \frac{V_0}{r} \cos rt \\ h(t) = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2} \end{cases} \quad (6)$$

引入约束条件, $h'(t) = 0$ 时刻, $h(t)$ 刚好等于无人机与入侵机的最小安全距离 D_{limit} 。从而可以建立二元方程组

$$\begin{cases} D[V_0 \sin \theta \sin rt - V_0 \cos \theta \cos rt - V_1 \cos \theta] + \\ \frac{V_0^2}{r} \sin rt + V_1^2 t + \frac{V_0}{r} V_1 \sin rt + V_0 V_1 t \cos rt = 0 \\ (\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 - D_{\text{limit}}^2 = 0 \end{cases} \quad (7)$$

通过求解该方程组,可以求得到达最小安全距离时刻 $t_{d_{\text{min}}}$ 以及入侵机与无人机相对方位角为 θ 入侵时,紧急防撞区的边界值 D 。

在上述紧急防撞过程中,为了保证无人机成功防撞后能够顺利返回初始航线飞行,限定最大转向角度为 90° 。

运用相同的建模思想,可分别得到正侧向遭遇与追尾遭遇情况下,无人机紧急防撞区的模型方程,分别为

$$\begin{cases} \Delta x = D \cos \theta - \frac{V_0}{r} \sin rt \\ \Delta y = D \sin \theta - V_1 t + \frac{V_0}{r} - \frac{V_0}{r} \cos rt \\ D(V_0 \cos \theta \cos rt - V_0 \sin \theta \sin rt + V_1 \sin \theta) - \\ \frac{V_0^2}{r} \sin rt - V_1^2 t - \frac{V_0}{r} V_1 \cos rt + V_0 V_1 t \sin rt + \frac{V_0 V_1}{r} = 0 \\ (\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 - D_{\text{limit}}^2 = 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \Delta x = D \cos \theta - V_1 t + \frac{V_0}{r} \sin rt \\ \Delta y = D \sin \theta + \frac{V_0}{r} - \frac{V_0}{r} \cos rt \\ D(V_0 \sin \theta \sin rt + V_0 \cos \theta \cos rt - V_1 \cos \theta) + \\ \frac{V_0^2}{r} \sin rt + V_1^2 t - \frac{V_0 V_1}{r} \sin rt - V_0 V_1 t \cos rt = 0 \\ (\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 - D_{\text{limit}}^2 = 0 \end{cases} \quad (9)$$

由模型方程可知,紧急防撞区边界值大小主要受无人机与入侵机之间的安全距离 D_{limit} ,无人机与入侵机的飞行速度 V_0 和 V_1 ,以及无人机转弯角速率 r 的影响。

2.2 紧急防撞区包络计算

由于方程组(7)为非线性方程组,所以本文采用

数值方法中的二分法^[10]对紧急避撞区包络进行计算。

观察方程组(7)不难发现,方程 1 为关于 D 的线性方程,将未知量 D 表示成关于时间 t 的函数 $D = f_1(t)$,并代入方程(2),则方程(2)化简为关于未知量 t 的一元非线性方程,可表示为 $y = f_2(t, D)$,运用二分法求解思想,即可得到未知量 t 和 D 的数值解。

设定时间 t 的初始值为 0 s,终值为无人机转向 180° 所需时间 π/r ,对方程组(7)进行求解。如果在该时间区间内无解,则表明 $t = 0$ 时刻,无人机与入侵机距离最近,此时令 $t_{D_{\min}} = 0, D = D_{\text{limit}}$ 。具体的求解过程如图 5 所示。

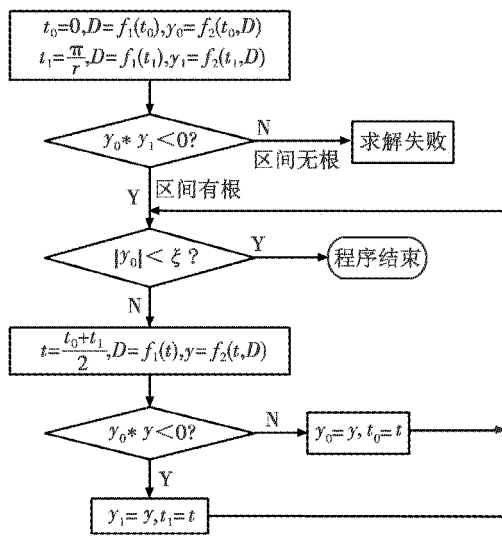


图 5 求解过程流程图

Fig. 5 Flow chart for equation solving

将入侵机的入侵方位角 θ 依次从 $0 \sim 2\pi$ 范围内取值,即可得到迎面遭遇情况下,无人机紧急避撞区包络。

3 自动避撞区模型推导

紧急避撞机动是自动避撞失败情况下所采取的一种紧急避撞策略。通过冲突检测算法,如果无人机与入侵机存在飞行冲突,则入侵机已进入自动避撞区内,无人机应采取适当的自动避撞策略避免飞行冲突。

如果无人机不采取任何避撞机动,保持原航线飞行,无人机与入侵机将会发生冲突的区域即为自动避撞区。因此,在 2.1 节的紧急避撞区模型方程中,将无人机转弯角速率 r 设为零,即可求得自动避撞区包络。

对于迎面遭遇情况,将 $r = 0$ 代入式(6)、式(7),利用洛必达法则可得

$$\begin{cases} h^2(t) = (D \cos \theta - V_0 t - V_1 t)^2 + (D \sin \theta)^2 \\ (h^2(t))' = -2(V_0 + V_1)[D \cos \theta - (V_0 + V_1)t] \end{cases} \quad (10)$$

如果 $\cos \theta < 0$,则 $t > 0$ 时, $(h^2(t))'$ 恒大于零,表明 $t = 0$ 时刻,无人机与入侵机距离最近,此时令 $D =$

D_{limit} 。如果 $\cos \theta > 0$,由式(7)可得 $D = \frac{D_{\text{limit}}}{|\sin \theta|}$ 。所以迎面遭遇情况,自动避撞区模型方程为

$$D = \begin{cases} D_{\text{limit}} & \cos \theta < 0 \\ \frac{D_{\text{limit}}}{|\sin \theta|} & \cos \theta \geq 0 \end{cases} \quad (11)$$

仿真结果如图 6 所示。其中,箭头所指方向为无人机初始航向(下同)。

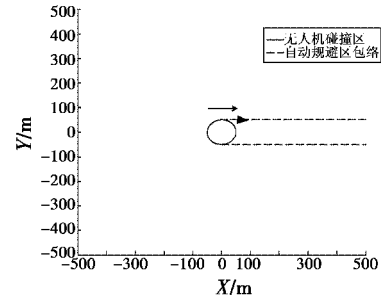


图 6 迎面遭遇情况自动避撞区包络

Fig. 6 Automatic avoidance envelope for head-on case

当入侵机处于自动避撞区内时,无人机必须采取适当的自动避撞策略避免飞行冲突。

追尾遭遇情况与迎面遭遇情况类似。

对于正侧向遭遇情况,将 $r = 0$ 代入式(8),同样运用上述思想可得

$$D = \begin{cases} D_{\text{limit}} & V_0 \cos \theta + V_1 \sin \theta < 0 \\ \frac{D_{\text{limit}}}{\sqrt{\left(\frac{V_1^2 \cos \theta - V_0 V_1 \sin \theta}{V_0^2 + V_1^2}\right)^2 + \left(\frac{V_0 \sin \theta - V_0 V_1 \cos \theta}{V_0^2 + V_1^2}\right)^2}} & V_0 \cos \theta + V_1 \sin \theta \geq 0 \end{cases} \quad (12)$$

由式(12)可知,正侧向遭遇情况自动避撞区包络与无人机、入侵机的飞行速度有关。仿真结果见图 7。

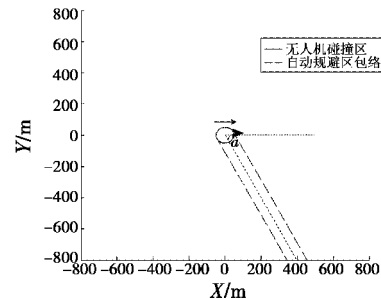


图 7 正侧向遭遇情况自动避撞区包络

Fig. 7 Automatic avoidance envelope for vertical case

图中,无人机飞行方向与自动避撞区包络中线的夹角与无人机、入侵机飞行速度之间的关系为

$$a = \arctan \frac{V_1}{V_0} \quad (13)$$

当入侵机处于上边界以外时,入侵机从无人机碰撞

区前方飞过;当入侵机处于下边界以外时,入侵机从无人机碰撞区后方飞过;当入侵机处于自动规避区内时,无人机必须采取适当的自动规避策略避免飞行冲突。

总结以上内容,可得无人机避撞过程如图8所示。

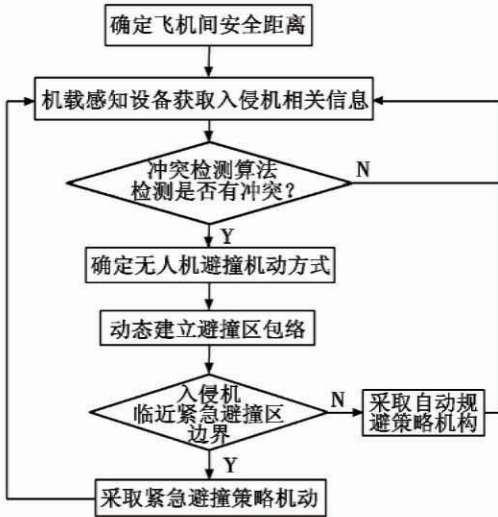


图8 无人机避撞过程

Fig. 8 Collision avoidance process for UAV

4 仿真分析

设定安全距离 $D_{limit} = 50\text{ m}$, 无人机飞行速度 $V_0 = 60\text{ m/s}$, 入侵机飞行速度 $V_1 = 120\text{ m/s}$, 无人机转弯角速率 $r = 15\text{ (}^\circ\text{)/s}$, 对3种典型遭遇情况进行避撞区包络仿真计算, 仿真结果见图9。其中: 实线为迎面遭遇情况下避撞区包络; 虚线为追尾遭遇情况下避撞区包络; 点划线为正侧向遭遇情况下避撞区包络。

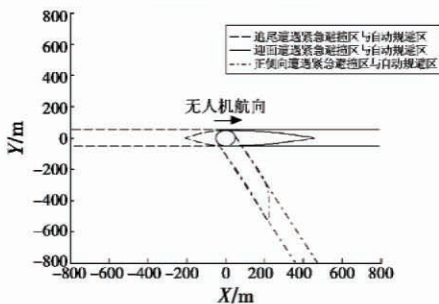


图9 3种典型遭遇情况下避撞区包络

Fig. 9 Collision avoidance envelopes for three typical cases

通过冲突检测算法, 如果飞机间存在冲突, 则入侵机已进入自动规避区, 此时采取自动规避策略进行避撞机动(如人工势场法); 如果自动规避失败, 入侵机已飞临紧急避撞区边界, 此时采取紧急避撞策略进行避撞机动(最大过载转弯机动)。

针对不同的遭遇方式以及入侵方位角, 对最小避撞距离、避撞机动所需时间以及避撞区包络计算时长进行仿真计算, 仿真结果如表1所示。

表1 最小避撞距离及避撞机动所需时间

Table 1 The minimum collision avoidance distance and the time needed for maneuvering

遭遇方式	避撞区包络计算时长/s	入侵机方位角/($^\circ$)	最小避撞距离/m	避撞机动所需时间/s
迎面遭遇	0.078	0	457	2.54
		30	96.7	0.45
		90	50	0
正侧向遭遇	0.079	180	50	0
		270	107	0.74
		300	442.7	4.70
追尾遭遇	0.082	90	50	0
		150	86.1	1.08
		180	207.6	2.99

紧急避撞区包络的影响因素主要有无人机与入侵机的飞行速度, 无人机与入侵机之间的安全距离, 以及无人机的转弯角速率。分别改变上述因素的大小, 进行包络计算, 并具体分析各因素对避撞区包络的影响。

图10所示为迎面遭遇情况下, 分别改变3种影响因素对紧急避撞区包络的影响。初始飞行信息为: $D_{limit} = 50\text{ m}$, $V_0 = 60\text{ m/s}$, $V_1 = 120\text{ m/s}$, $r = 15\text{ (}^\circ\text{)/s}$ 。

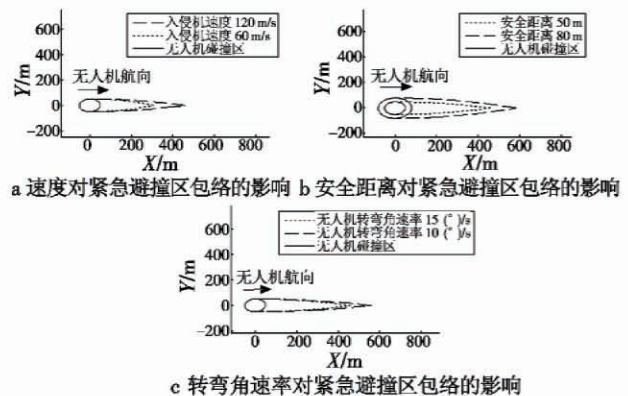


图10 迎面遭遇情况下包络比较

Fig. 10 Comparison of envelopes for head-on case

图11所示为正侧向遭遇情况下, 分别改变3种影响因素对紧急避撞区包络的影响, 初始飞行信息为: $D_{limit} = 50\text{ m}$, $V_0 = 60\text{ m/s}$, $V_1 = 120\text{ m/s}$, $r = 15\text{ (}^\circ\text{)/s}$ 。

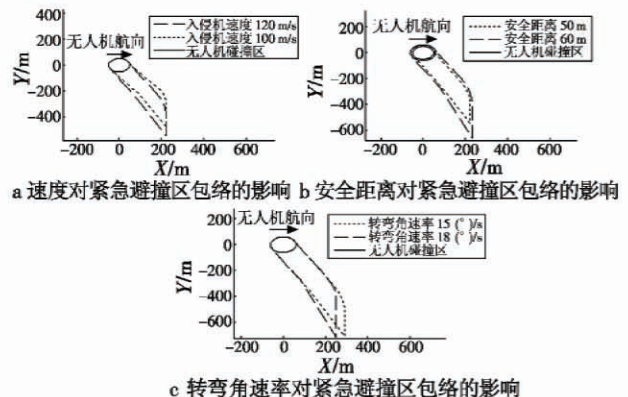


图11 正侧向遭遇情况下包络比较

Fig. 11 Comparison of envelopes for vertical case

图 12 所示为追尾遭遇情况下,分别改变 3 种影响因素对紧急避撞区包络的影响,初始飞行信息为: $D_{limit} = 50\text{ m}$, $V_0 = 60\text{ m/s}$, $V_1 = 120\text{ m/s}$, $r = 20\text{ (}^\circ\text{)/s}$ 。

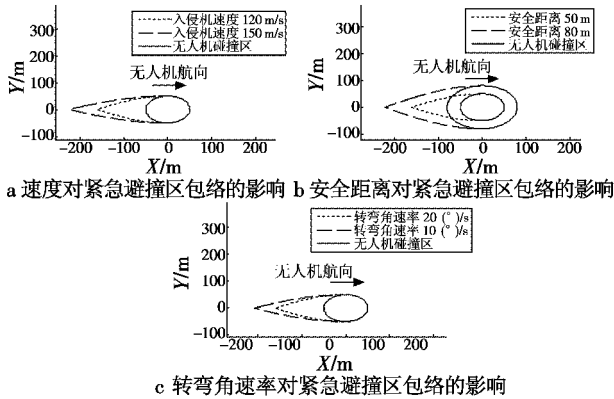


图 12 追尾遭遇情况下包络比较

Fig. 12 Comparison of envelopes for rear case

分析避撞机动过程不难得出,当安全距离 D_{limit} 增大时,紧急避撞区包络边界值也会相应增大;当入侵机速度 V_1 增大时,入侵机接近无人机的速度加快,为了避免碰撞,紧急避撞区包络边界值也会相应增大;当无人机转弯角速率 r 增大时,无人机的机动性增强,缩短了避撞时间,紧急避撞区包络边界值也会相应减小。

从图 10 ~ 图 12 中可以看出,紧急避撞区包络边界值随着安全距离 D_{limit} 、入侵机速度 V_1 的增大而增大,随着无人机转弯角速率 r 的增大而减小,仿真结果与上述分析结果一致。

5 结束语

本文提出了一种无人机避撞区动态建模方法,通过机载感知系统实时检测的入侵机飞行状态信息,动态建立避撞区包络,使所建包络具有针对性。该方法为系统同时提供最小避撞距离与避撞所需时间双重参考信息,更大程度上保证了避撞成功率。仿真结果表明,该方法缩小了避撞区包络面积,并且具有较好的实时性。

如何进一步完善该建模方法使其适合任意角度的遭遇情况,以及完成自动规避策略将是本文后续研究工作。

参考文献

[1] 国务院中央军委空中交通管制委员会. 飞行间隔规定

[S]. 北京:中国民航出版社,2003.

The State Council, The Air Traffic Control Commission of Central Military Commission. Flight separation rules [S]. Beijing: China Civil Aviation Publishing House, 2003.

[2] 张军. 空域监视技术的新进展及应用[J]. 航空学报, 2011, 32(1): 1-14.

ZHANG J. New development and application of airspace surveillance technology [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(1): 1-14.

[3] KOSECKA J, TOMLIN C, PAPPAS G, et al. Generation of conflict resolution maneuvers for air traffic management [C]//Proceedings of the 1997 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System, 1997, 3: 1598-1603.

[4] TOMLIN C, PAPPAS G J, SASTRY S. Conflict resolution for air traffic management: A study in multi-agent hybrid systems [J]. Automatic Control, 1998, 43(4): 509-521.

[5] MEYER J, ALTENKIRCH D, Dr KNORR R, et al. Sense & avoid for UAVs [DB/OL]. [2014-03-04]. <http://www.bris.ac.uk/uavs/archive>.

[6] SWIHART D E, BRANNSTROM B, GRIFFIN E, et al. Autonomous collision avoidance system for air-to-air operations [C]//International Air and Space Symposium and Exposition, Dayton, Ohio, 2003. doi:10.2514/6.2003-2775.

[7] RAHMANI A, KOSUGE K, TSUKAMAKI T, et al. Multiple UAV deconfliction via navigation functions [C]//AIAA Guidance, Navigation and Control and Exhibit, Honolulu, Hawaii, 2008, doi:10.2514/6.2008-6626.

[8] 赵源, 高正红. 飞行冲突的判定模型及其在冲突避免中的应用[J]. 计算机仿真, 2006, 23(4): 23-26.

ZHAO Y, GAO Z H. Judge model of flight conflict and its application in conflict avoidance [J]. Computer Simulation, 2006, 23(4): 23-26.

[9] ARUMUGAM S, JERMAINE C. Closest-point-of-approach join for moving object histories [C]//The 22nd International Conference on Data Engineering, 2006: 86.

[10] 颜庆津. 数值分析 [M]. 4 版. 北京:北京航空航天大学出版社, 2006.

YAN Q J. Numerical analysis [M]. 4th ed. Beijing: Beihang University Press, 2006.