

1-3-2019

Analysis of UAS Avoidance Warning Criteria Based on " τ - τ "

Zhiwei Zhang

Department of Aircraft Control, Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China;

Jianwu Tao

Department of Aircraft Control, Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China;

Shao Xiao

Department of Aircraft Control, Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Analysis of UAS Avoidance Warning Criteria Based on " τ - τ "

Abstract

Abstract: In the process of UAV avoiding obstacles, the tau warning logic based on time is introduced. *Based on the tau warning logic, the τ - τ warning logic is proposed, and the equal τ - τ warning curve is constructed. According to the range of maneuver of the own UAV, three warning areas are defined, including high-risk area, low-risk area and non-risk area. Aiming at the two planes in the case of parallel encounter and vertical encounter, in accordance with three different situations of the UAV's speed greater than, equal to and less than the intruder's speed, the method simulates the warning curve of two aircrafts at different relative speeds with MATLAB software, proposing the division method of warning area, analyzing the difference between the warning areas of different encounter situation.* The results of this experiment provide data support for the formulation of the UAV avoidance tactics.

Keywords

UAV, avoidance, equal τ - τ curve, warning area

Recommended Citation

Zhang Zhiwei, Tao Jianwu, Shao Xiao. Analysis of UAS Avoidance Warning Criteria Based on " τ - τ "[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(5): 1877-1885.

基于" τ - τ "的无人机规避告警准则分析

张志伟, 陶建武, 邵校

(空军航空大学飞行器控制系, 吉林长春 130022)

摘要: 在无人机规避障碍的过程中, 引入了基于时间 τ 告警逻辑, 并在此基础上提出了基于时间 τ - τ 告警逻辑, 构建了等 τ - τ 告警曲线。根据自身无人机所进行机动动作的幅度, 定义了三种告警区域, 即高风险区、低风险区以及无风险区。该方法分别针对两架飞机在平行相遇情形和垂直交叉相遇情形下, 按照自身无人机速度大于、等于和小于入侵无人机速度三种不同情况, 利用 MATLAB 软件仿真出两架飞机不同相对速度下的告警曲线, 提出了告警区域的划分方法, 重点分析了不同相遇情形中告警区的区别。所得实验结果为无人机规避策略的制定提供了数据支撑。

关键词: 无人机; 规避; 等 τ - τ 线; 告警区域

中图分类号: V279

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 05-1877-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201805033

Analysis of UAS Avoidance Warning Criteria Based on " τ - τ "

Zhang Zhiwei, Tao Jianwu, Shao Xiao

(Department of Aircraft Control, Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China)

Abstract: In the process of UAV avoiding obstacles, the tau warning logic based on time is introduced. Based on the tau warning logic, the τ - τ warning logic is proposed, and the equal τ - τ warning curve is constructed. According to the range of maneuver of the own UAV, three warning areas are defined, including high-risk area, low-risk area and non-risk area. Aiming at the two planes in the case of parallel encounter and vertical encounter, in accordance with three different situations of the UAV's speed greater than, equal to and less than the intruder's speed, the method simulates the warning curve of two aircrafts at different relative speeds with MATLAB software, proposing the division method of warning area, analyzing the difference between the warning areas of different encounter situation. The results of this experiment provide data support for the formulation of the UAV avoidance tactics.

Keywords: UAV; avoidance; equal τ - τ curve; warning area

引言

无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)系统^[1]具有体积小、重量轻、成本低以及操纵方便、机动灵活、噪音小、隐蔽性好等优点, 使其无论是在军



收稿日期: 2016-07-14 修回日期: 2016-10-06;
基金项目: 国家自然科学基金(61571462), 吉林省自然科学基金(20140101073JC);
作者简介: 张志伟(1993-), 男, 山东莱阳, 硕士, 研究方向为无人机自主控制; 陶建武(1959-), 男, 吉林吉林, 博士, 教授, 研究方向为阵列信号处理。

事领域还是在民用领域, 都有十分广泛的应用前景。但由于大部分无人飞行系统的飞行区域是低空, 在其飞行空域中, 可能存在未知的静止障碍物或运动飞行器。为了保证飞行安全, 不与障碍物或飞行器碰撞, 无人飞行系统碰撞规避技术的研究显得至关重要。

无人机飞行主要通过地面控制站遥控进行, 更多地依赖于外部数据链为其提供信息。然而一则数据链传输需要一定时间, 二则数据链容易受干扰。

<http://www.china-simulation.com>

• 1877 •

因此,需要无人机具有自身感知能力和自主发现并避开那些位于航迹上障碍物的能力,即感知与规避(Sense and Avoid, SAA)技术^[2-6]。在设计无人机感知与规避系统^[7-9]时,常采用被动式无源传感器来检测空中无合作飞行器。这里,无合作意味着飞行器或空中交通管制系统没有通过数据链向无人机系统传送任何关于可能发生碰撞的信息。因此,无人机系统必须依靠自身的传感器数据,在有限的时间内推导出可能发生碰撞的障碍物或飞行器的相对位置和速度信息,以判断是否要执行一定的规避动作,来避免可能发生的碰撞。

本文基于时间 τ - τ 告警逻辑,构建了等 τ - τ 告警曲线,并重点分析了两架飞机在平行相遇情形和垂直交叉相遇情形下,等 τ - τ 告警曲线的变化,最后比较了不同相遇情形中告警区的区别。

1 基于时间“ τ - τ ”的告警逻辑

在感知与规避系统中,为确定飞行器是否执行规避机动动作,必须制定一个标准。本节先介绍基于时间“ τ ”的告警逻辑,并在此告警逻辑的基础上介绍了基于时间“ τ - τ ”的告警逻辑。对于基于时间“ τ ”的告警逻辑,“ τ ”的定义是飞行器之间的距离除以飞行器之间的相对速率,即:

$$\tau = -\frac{r}{\dot{r}} \quad (1)$$

式中: r 表示距离; \dot{r} 表示相对速率。如果飞行器之间的运动状态处于一个给定的“ τ ”或长度门限内,在可接受风险范围内的一个触发动作将产生。但是,基于时间“ τ ”的告警准则是假设飞行器没有执行额外的机动动作,并且所有的遭遇都将导致碰撞。对于大多数两个(或多个)飞行器相遇的情况,这个假设可能是不成立的。如果两个飞行器的飞行轨迹不会导致碰撞,碰撞时间“ τ ”的估计就为无穷大。因此,无法利用时间“ τ ”来分辨两个飞行器之间的接近程度。

无论飞行器是否处于碰撞路径上,当两者接近时,都需要有一个物理量指标,以衡量两个飞行器

可能发生碰撞的程度,以确定飞行器是否执行规避机动动作。为此,文献[10]提出了基于时间“ τ - τ ”的告警逻辑。此逻辑考虑两个飞行器接近碰撞路径的程度。无论飞行器是否处于碰撞路径上,此逻辑均适用。

1.1 基于时间“ τ ”的告警逻辑

目前,基于时间“ τ ”的告警准则广泛应用于SAA领域^[11]。

对于每个飞行器,运动方程为:

$$(x, y)_{\text{final}} = (x, y)_{\text{initial}} + v(x, y)t \quad (2)$$

式中: v 表示飞行器速度, t 表示从初始位置到达最终位置的时间。应用式(2)到两个飞行器,有如下等式:

$$(x, y)_{1,\text{final}} = (x, y)_{1,\text{initial}} + v_1(x, y)t \quad (3)$$

$$(x, y)_{2,\text{final}} = (x, y)_{2,\text{initial}} + v_2(x, y)t \quad (4)$$

假设发生一个碰撞,那么:

$$(x, y)_{1,\text{final}} = (x, y)_{2,\text{final}}$$

注意,这个假设对于不发生碰撞的路径是无效的。因此:

$$(x, y)_{1,\text{initial}} + v_1(x, y)t = (x, y)_{2,\text{initial}} + v_2(x, y)t \quad (5)$$

$$t = \frac{(x, y)_{2,\text{initial}} - (x, y)_{1,\text{initial}}}{v_1(x, y) - v_2(x, y)} \quad (6)$$

式中:两个飞行器的速度均是矢量,所以为了计算方便,利用速度的幅值来替代速度矢量。利用速度矢量与另一个飞行器之间夹角的余弦乘以速度幅值来替代速度的 x, y 分量,可得:

$$v_1(x, y) = V_1 \cos(\theta_1) \quad (7)$$

$$v_2(x, y) = V_2 \cos(\theta_2) \quad (8)$$

$$t = \frac{\sqrt{(x_{2,\text{initial}} - x_{1,\text{initial}})^2 + (y_{2,\text{initial}} - y_{1,\text{initial}})^2}}{V_1 \cos(\theta_1) - V_2 \cos(\theta_2)} = \tau \quad (9)$$

1.2 基于时间“ τ - τ ”的告警准则

因为在利用“ τ ”告警逻辑时,必须要保证两架无人机的飞行最后相撞,可是一般情况而言,两架无人机在空中飞行时不会恰好相撞。所以推导不在碰撞路径上的两架无人机的碰撞时间是没有意义的。

那么对于不在碰撞路径上的两架无人机, 我们可以考虑它们接近路径最近点(Closest Point of Approach, CPA)的程度。在同一平面内, 任何两架无人机都存在路径最近点(CPA)。针对飞行轨迹直接相撞的两架无人机, 两架无人机的碰撞点就是这两架无人机的路径最近点。

针对不在碰撞路径上的两架无人机, 其路径最近点(CPA)是两架无人机在飞行过程中距离最近的那一点。

所以说对于直接相撞的两架无人机可以采用“τ”准则, 而对于不在碰撞路径上的两架无人机则不适用“τ”准则, 则需要采用“τ-τ”准则。即如果自身无人机飞行速度相比入侵无人机飞行速度较慢, 那么要使两架无人机相撞, 需要入侵无人机向自身无人机方向旋转一个角度飞行, 这样才能够使两架无人机相撞。同理, 如果自身无人机飞行速度相比入侵无人机飞行速度较快, 那么要使两架无人机相撞, 需要自身无人机向入侵无人机方向旋转一个角度飞行, 这样才能够使两架无人机相撞。这样我们就可以确定出当前矢量在碰撞路径上的分量, 也就是说我们可以利用当前矢量乘以无人机旋转角度的余弦就会得到当前矢量在碰撞路径上的分量。这种方法在一定程度上缩小了速度矢量, 并在一定程度上缩小了告警范围, 从而减少了虚假告警。需要注意的是只有当自身无人机的速度矢量分量和入侵无人机的速度矢量分量最后相交时, 计算才有意义。

故“τ-τ”定义为飞行器之间的距离除以使飞行器之间产生最大碰撞风险的距离变化量, 即:

$$\tau - \tau = \frac{\text{飞行器之间的距离}}{\text{产生最大碰撞风险的距离变化量}} \quad (10)$$

根据定义, 较小“τ-τ”值表示具有碰撞的高风险, 较大“τ-τ”值表示不具有碰撞的紧迫性。图 1 显示了“τ-τ”逻辑的几何关系。式(10)是时间“τ-τ”的数学表达式。

图 1 中, α 和 β 表示机头当前朝向与路径最近点(CPA)的最小值之间的夹角。在 V₂ 保持不变的前提下, 当存在风险最大化时, 也就是说令当前速

度矢量的分量最后相交, 从而确定出 V₁ 旋转的角度, 该角度即为 α。同理, 在 V₁ 保持不变的前提下, 当存在风险最大化时, 也就是说令当前速度矢量的分量最后相交, 从而确定出 V₂ 旋转的角度, 该角度即为 β。对于已经在碰撞路径上的飞行器, α 和 β 等于零, 这时, “τ-τ”等式就简化为可提供精确碰撞时间估计的“τ”等式。

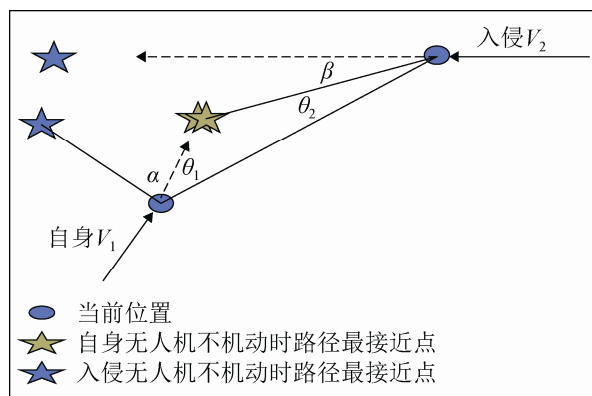


图 1 “τ-τ”逻辑几何表示
Fig. 1 Geometric representation of “τ-τ” logic

故“τ-τ”逻辑的数学表达式为:

$$\tau - \tau = \frac{\sqrt{(x_{2,initial} - x_{1,initial})^2 + (y_{2,initial} - y_{1,initial})^2}}{V_1 \cos(\theta_1) \cos(\alpha) - V_2 \cos(\theta_2) \cos(\beta)} \quad (11)$$

式中: (x_{1,initial}, y_{1,initial})表示自身无人机的当前位置坐标; (x_{2,initial}, y_{2,initial})表示入侵无人机的当前位置坐标。V₁cos(θ₁)和 V₂cos(θ₂)分别表示自身无人机和入侵无人机速度矢量在两个飞行器当前位置之间连线上的投影分量。

综上所述, “τ-τ”准则能够有效地估计碰撞时间。相对而言, 要优于“τ”准则。这是因为该准则不仅适用于在碰撞路径上的飞行器, 还适用于不在碰撞路径上的飞行器, 而且通过缩放速度矢量, 可以有效地缩小告警范围并减少虚假告警。此外, “τ-τ”准则不仅是一个针对碰撞时间的估计, 而且还是在碰撞路径和不碰撞路径之间区分规避优先顺序的工具, 所以非常具有研究意义。

2 等 τ - τ 线分析

基于时间“ τ - τ ”告警逻辑对无人机安全飞行至关重要,为了研究方便,我们先讨论无人机在二维空间飞行的情况。无人机在空中飞行时可以实时感知到入侵飞机的坐标信息以及速度信息,从而利用“ τ - τ ”公式可以求出“ τ - τ ”值。对于不在碰撞路径上的飞行器,当它们非常接近时,如果任何一个飞行器突然执行一个机动动作,两个飞行器就可能发生碰撞。所以通常无人机为了有充足的时间进行规避,都会预先设置一个告警门限,一般而言,该告警时间的设置与该无人机的本身性能有关系。如果规避系统计算出来的“ τ - τ ”值小于无人机预设的告警门限,说明无人机处于紧急规避状态,系统进行告警,无人机采取规避措施,以避免碰撞。如果规避系统计算出来的“ τ - τ ”值大于无人机预设的告警门限,说明无人机处于安全飞行状态,故不需要采取规避措施。

2.1 告警区定义

利用公式(11),并令“ τ - τ ”值恒等于无人机预设的告警门限,这样可以画出恒定“ τ - τ ”值的等 τ - τ 线。当入侵无人机进入到告警门限区域内,假设它执行一个标准的转弯机动动作,在不同的等 τ - τ 线区域可能会引起不同的碰撞情况,从而使自身无人机产生不同的规避情形,例如,需要自身无人机做出大角度规避机动、或做出小角度机动甚至存在不需要采取规避措施的情况。根据自身无人机所进行机动动作的幅度,本文定义了三种情况,即高风险区、低风险区以及无风险区。

当入侵无人机进入到告警区,需要自身无人机提前做出大于 90° 的大角度规避机动,则此区域定义为高风险区。当入侵无人机进入到告警区,需要自身无人机提前做出小于 90° 的规避机动动作即可,则此区域定义为低风险区。当入侵无人机进入到告警区,假如入侵无人机无论做什么机动动作均不能引起两架无人机相撞,即自身无人机不需要采

取规避措施,则该区域定义为无风险区。本文主要分析了两架无人机两种相遇情况,分别是平行相遇情况和交叉相遇情况。

2.2 平行相遇情况

假设两架无人机在同一高度平行相向飞行,因为两架无人机相对飞行速度的不同,这会影响到告警区的构建。所以,我们将两架无人机的速度分成了3种情况,即两架无人机速度相等, $V_1=V_2$; 自身无人机速度大于入侵无人机速度, $V_1>V_2$; 自身无人机速度小于入侵无人机速度, $V_1<V_2$ 。从而可以根据不同的情况,构建出不同的告警区。

2.2.1 两架无人机速度相等

在自身无人机和入侵无人机速度相等(分别取 $V_1=V_2=100$ km/h)的情况下,并假设告警时间为30 s,利用 MATLAB 进行了仿真,将等 τ - τ 线画出,如图2所示。等 τ - τ 线关于 y 轴对称,为了方便,在这里仅截取了 x 正半轴进行研究。

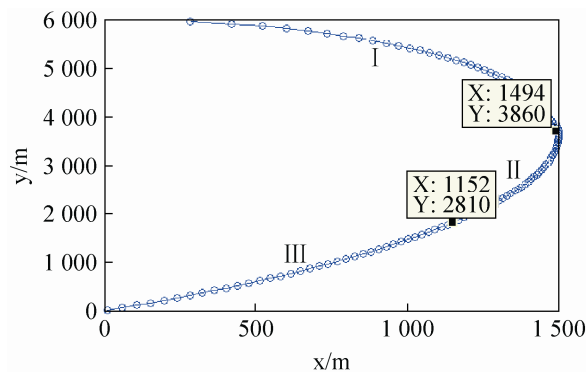


图2 $V_1=V_2$, 平行情况 30 s 等 τ - τ 线
Fig. 2 $V_1=V_2$, 30s equal τ - τ line of parallel situation

图2中,自身无人机位于图形底部的原点上,机头向上。入侵无人机可以位于 τ - $\tau=30$ s 的等 τ - τ 线上的任意位置,机头向下。针对平行相遇,无论预设的告警门限为多少,其等 τ - τ 线的外形都是相同的。如果入侵无人机处于等 τ - τ 线的顶点处,即自身无人机的正前方,那么两架无人机将处于径直碰撞的轨迹上,也就是说该点对于自身飞行器来说是最危险的情况,自身无人机为了能够躲

避入侵无人机的碰撞, 至少要做大于 90° 的转弯机动, 所以该位置处于高风险区。如果入侵无人机处于等 τ - τ 线上的其它位置, 两架无人机将平行相遇, 但是不会发生碰撞, 除非无人机执行其它动作, 比如进行转弯机动。因此, 虽然该等 τ - τ 线上的任何位置都有相同的 τ - τ 值, 但是却存在不同的碰撞情况。

为了能够使告警区划分为高风险区, 低风险区和无风险区, 需要求出一些临界点。针对入侵无人机需要做 90° 转弯机动才能与自身无人机相撞的点, 可以建立如下公式。

$$t_1 = \frac{y_{2,\text{initial}} - x_{2,\text{initial}}}{V_1} \quad (12)$$

$$t_2 = \frac{\pi x_{2,\text{initial}}}{2V_2} \quad (13)$$

令式(12)和式(13)相等, 可以得出:

$$y_{2,\text{initial}} = \left(1 + \frac{\pi V_1}{2V_2}\right) x_{2,\text{initial}} \quad (14)$$

根据上式, 在图 2 中确定了点(1 494, 3 860), 该点入侵无人机做一个 90° 转弯机动时, 它会与自身无人机相撞。

针对入侵无人机需要做 180° 的转弯机动才能与自身无人机相撞的点, 可以建立如下公式。

$$y_{2,\text{initial}} = \frac{\pi V_1}{2V_2} x_{2,\text{initial}} \quad (15)$$

根据上式, 在图 2 中确定了点(1 152, 1 810), 该点能够近似使入侵无人机做一个 180° 的转弯机动并与自身无人机相撞, 即入侵无人机做一个标准的半圆形, 其方向恰好改变 180° , 并与自身无人机相撞。

综上所述, 根据计算出的这两个临界点将图 2 中的等 τ - τ 线分成三个区域, 即 I 区($3\ 860 < y \leq 6\ 000$), II 区($1\ 810 < y \leq 3\ 860$), III 区($0 \leq y \leq 1\ 810$)。如果入侵无人机位于等 τ - τ 线的 I 区, 自身无人机需要提前做一个大于 90° 的转弯机动来规避入侵无人机, 所以等 τ - τ 线的 I 区相对于其他区是一个高风险区。如果入侵无人机位于等 τ - τ 线的 II 区,

这时自身无人机仅需提前做一个小于 90° 的转弯机动来规避入侵无人机, 所以该等 τ - τ 线的 II 区相对于其它区域来说是一个低风险区。如果入侵无人机位于等 τ - τ 线的 III 区, 入侵无人机在做标准转弯机动时无法与自身无人机相撞, 这时自身无人机不需要采取规避措施, 所以等 τ - τ 线的 III 区相对于其他区是一个无风险区。

2.2.2 自身无人机速度大于入侵无人机速度

在自身无人机速度大于入侵无人机速度(分别取 $V_1=100$ km/h, $V_2=30$ km/h)的情况下, 并假设告警时间为 30 s, 利用 MATLAB 进行了仿真, 将等 τ - τ 线画出, 如图 3 所示。

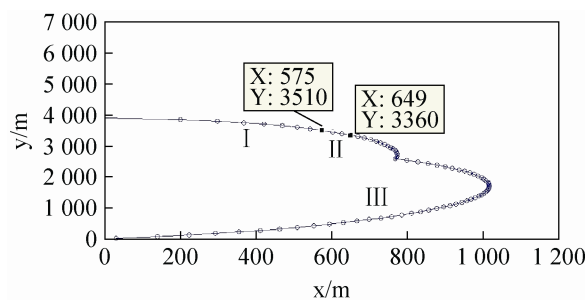


图 3 $V_1 > V_2$, 30 s 等 τ - τ 线
Fig. 3 $V_1 > V_2$, 30s equal τ - τ line

同理, 根据公式(14)和(15), 计算出两个临界点的坐标为(575, 3 510)和(649, 3 360), 它将图 3 中的等 τ - τ 线分成三个区域, 即 I 区($3\ 510 < y \leq 3\ 910$), II 区($3\ 360 < y \leq 3\ 510$), III 区($0 \leq y \leq 3\ 360$)。与两无人机速度相等的情况相同, I 区是一个高风险区, II 区是一个低风险区, III 区是一个无风险区。

2.2.3 自身无人机速度小于入侵无人机速度

在自身无人机速度小于入侵无人机速度(分别取 $V_1=50$ km/h, $V_2=100$ km/h)的情况下, 并假设告警时间为 30 s, 利用 MATLAB 进行了仿真, 将等 τ - τ 线画出, 如图 4 所示。

同理, 等 τ - τ 线的三个区域为: 即 I 区($1\ 660 < y \leq 4\ 510$)是一个高风险区, II 区($390 < y \leq 1\ 660$)是一个低风险区, III 区($0 \leq y \leq 390$)是一个无风险区。

综上所述,自身无人机与入侵无人机的相对速度决定了自身无人机的告警区域,同时也决定自身无人机的不同规避情形。针对两无人机平行相遇的情况,无论两无人机的相对速度怎样,其告警区均分为高风险区、低风险区以及无风险区。当自身无人机的速度大于入侵无人机的速度时,其告警区域较其他两种情况是最小的,并且在其告警范围内,无风险区的范围是最大的。当自身无人机的速度等于入侵无人机的速度时,其告警范围比较规则,近似于椭圆的形状,较其它两种情况而言告警范围是最大的。当自身无人机的速度小于入侵无人机的速度时,其整个告警区域几乎都是风险区,仅有一小段是安全的。故自身无人机的速度大于入侵无人机的速度的情况安全性最高,两无人机速度相等的情况次之,自身无人机速度小于入侵无人机的情况危险性最高。

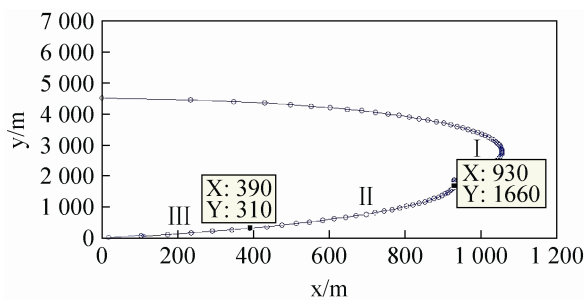


图4 $V_1 < V_2$, 30s 等 τ - τ 线
Fig. 4 $V_1 < V_2$, 30s equal τ - τ line

2.3 交叉相遇情况

相似的分析可以应用到交叉飞行的情况。假设无人机在同一高度垂直交叉飞行,根据两无人机相对速度的不同,与平行相遇情况一样,分成了两无人机速度相等、自身无人机速度大于入侵无人机速度以及自身无人机速度小于入侵无人机速度三种情况,从而构建出不同的等 τ - τ 线。

2.3.1 两架无人机速度相等

在两架无人机速度相等的情况下(分别取 $V_1=V_2=100$ km/h),并假设告警时间为 30 s,利用

MATLAB 进行了仿真,将等 τ - τ 线画出,如图 5 所示。

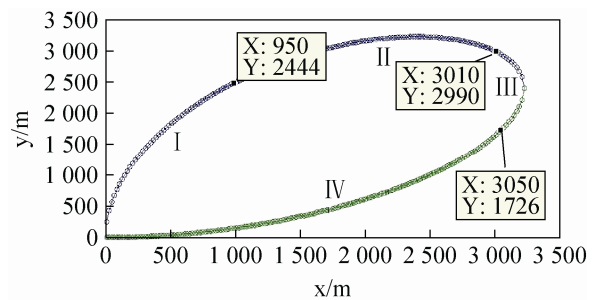


图5 $V_1=V_2$, 交叉情况 30s 等 τ - τ 线
Fig. 5 $V_1=V_2$, 30s equal τ - τ line of crossing situation

图 5 中,自身无人机位于图形底部的原点上,机头向上。入侵无人机位于 $\tau=30$ s 的等 τ - τ 线上的任意位置,机头向左。针对垂直交叉相遇的情况,当两架无人机的速度相等时,无论预设的告警时间为多少,其等 τ - τ 线的外形都是相同的。如果入侵无人机处于等 τ - τ 线的角平分线处,那么两架无人机将处于碰撞的轨迹上,也就是说该点对于自身飞行器来说是最危险的情况,自身无人机为了能够躲避入侵无人机的碰撞,至少要做一个大于 90° 的转弯机动,所以该位置处于高风险区。如果入侵无人机处于等 τ - τ 线上的其它位置,两架无人机将垂直相遇,但是不会发生碰撞,除非无人机执行其它动作,比如进行转弯机动。因此,虽然该等 τ - τ 线上的任何位置都有相同的 τ - τ 值,但是却存在不同的碰撞情况。

为了能够使告警区划分为高风险区,低风险区和无风险区,需要求出一些临界点,根据公式(14),在图 5 中确定点(950, 2444),该点能够近似使入侵无人机做一个与自身无人机方向相反的 90° 转弯机动并与自身无人机相撞,该点是一个临界点,将等 τ - τ 线分成了 I 和 II 区。

而在图 5 中等 τ - τ 线的 I 区,当入侵无人机做完标准的 90° 转弯机动后将会与自身无人机相距一段距离迎面飞行,具有紧急的碰撞风险,所以自身无人机需要提前做一个大于 90° 的转弯机动来规避入侵无人机。

点(3 010, 2 990)是等 τ - τ 线上位于角平分线上一点, 该点是一个临界点, 将等 τ - τ 线分成了 II 和 III 区, 在 II 区, 入侵无人机需要沿着自身无人机方向的反方向进行转弯机动才可能与入侵无人机相撞, 而在 III 区, 入侵无人机需要沿着自身无人机的方向进行转弯机动才可能与入侵无人机相撞。故可以建立如下公式:

$$y_{2,\text{initial}} = \left(\frac{\pi V_1}{2V_2} - 1 \right) x_{2,\text{initial}} \quad (16)$$

根据公式(16), 可以确定点(3 050, 1 726), 该点能够近似使入侵无人机做一个与自身无人机方向相同的 90° 转弯机动并与自身无人机相撞。

所以, 根据计算出的这三个临界点将图 5 中的等“ τ - τ ”值轮廓线分成四个区域, 即 I 区、II 区、III 区和 IV 区。如果入侵无人机位于等 τ - τ 线的 I 区、II 区, 这时自身无人机需要提前做一个大于 90° 的转弯机动来规避入侵无人机, 所以等 τ - τ 线的 I 区和 II 区相对于其他区是一个高风险区。如果入侵无人机位于等 τ - τ 线的 III 区, 这时自身无人机需要提前做一个小于 90° 的转弯机动来规避入侵无人机, 所以该等 τ - τ 线的 III 区相对于其它区域来说是一个低风险区。如果入侵无人机位于等 τ - τ 线的 IV 区, 入侵无人机在做标准转弯机动时无法与自身无人机相撞, 这时自身无人机不需要采取规避措施, 所以等 τ - τ 线的 IV 区相对于其他区是一个无风险区。

2.3.2 自身无人机速度大于入侵无人机速度

在自身无人机速度大于入侵无人机速度(分别取 $V_1=100$ km/h, $V_2=30$ km/h)的情况下, 并假设告警时间为 30 s, 利用 MATLAB 进行了仿真, 将等 τ - τ 线画出, 如图 6 所示。

与上一种情况不同的是, 整个区域均为无风险区, 因为当自身无人机保持飞行姿态飞行时, 入侵无人机在自身速度不变的情况下, 无论是保持原姿态飞行还是进行标准的转弯机动飞行, 均不能与自身无人机相撞, 所以自身无人机不需要采取规避措施, 故整个区域均为无风险区。可见当自身无人机

速度大于入侵无人机的速度时, 入侵无人机的机动动作对自身无人机影响较小。

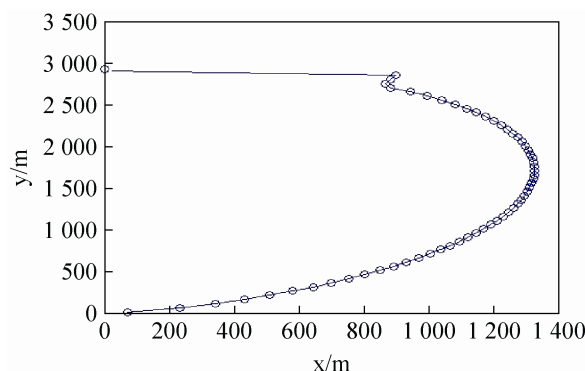


图 6 $V_1 > V_2$, 30 s 等 τ - τ 线
Fig.6 $V_1 > V_2$, 30s equal τ - τ line

2.3.3 自身无人机速度小于入侵无人机速度

在自身无人机速度小于入侵无人机速度(分别取 $V_1=30$ km/h, $V_2=100$ km/h)的情况下, 并假设告警时间为 30 s, 利用 MATLAB 进行了仿真, 将等 τ - τ 线画出, 如图 7 所示。

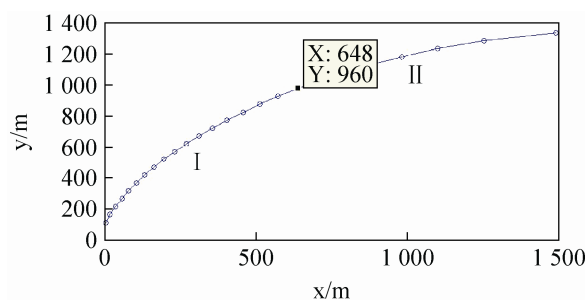


图 7 $V_1 < V_2$, 30 s 等 τ - τ 线
Fig.7 $V_1 < V_2$, 30s equal τ - τ line

为了能够使告警区划分为高风险区, 低风险区和无风险区, 需要求出一些临界点, 根据公式(14), 点(648, 960)能够近似使入侵无人机做一个与自身无人机方向相反的 90° 转弯机动并与自身无人机相撞。

所以, 根据计算出的这个临界点将图 7 中的等 τ - τ 线分成两个区域, 即 I 区和 II 区。如果入侵无人机位于等 τ - τ 线的 I 区, 入侵无人机做一个 90° 的转弯机动将会与自身无人机迎面飞行。这时自身无人机需要提前做一个大于 90° 的转弯机动来

规避入侵无人机, 所以等 τ - τ 线的 I 区相对于其他区是一个高风险区。如果入侵无人机位于等 τ - τ 线的 II 区, 入侵无人机做一个小于 90° 与自身无人机反向的转弯机动可能与飞行器 1 相撞, 这时自身无人机需要提前做一个大于 90° 的转弯机动来规避入侵无人机, 所以该等 τ - τ 线的 II 区与 I 区一样是一个高风险区。

综上所述, 对于自身无人机与入侵无人机垂直交叉相遇情况, 告警区情况比较复杂。两无人机的不同相对速度对规避情形影响很大, 当自身无人机的速度大于入侵无人机的速度时, 整个告警区域均为无风险区, 说明入侵无人机机动动作对自身无人机的飞行影响很小; 当两无人机速度相等时, 告警区分为高风险区、低风险区和无风险区。当自身无人机的速度小于入侵无人机的速度时, 整个告警区域均为高风险区, 说明入侵无人机机动动作对自身无人机的影响很大。

2.4 以上情况在三维空间中的推广

由于无人机均是在三维空间进行飞行, 故加入了垂直速率告警逻辑。在二维空间告警逻辑的基础上, 故提出如下等式:

$$\tau - \tau = \sqrt{(x_{2,\text{initial}} - x_{1,\text{initial}})^2 + (y_{2,\text{initial}} - y_{1,\text{initial}})^2} / [V_{1,z} + V_1 \cos(\theta_1) \cos(\alpha) - V_{2,z} - V_2 \cos(\theta_2) \cos(\beta)] \quad (17)$$

式中: V_1 和 V_2 表示水平面内直线速度的幅值; $V_{1,z}$ 和 $V_{2,z}$ 表示垂直速度。

为了得到引入垂直分量的等 τ - τ 线, 并便于研究方便, 假设 α 和 β 都等于 0 , 即两个飞机平行迎头相遇, 但在垂直面上, 存在高度差。在自身无人机和入侵无人机速度相等(分别取 $V_1=V_2=100$ km/h)的情况下, 并假设告警时间为 30 s, 利用 MATLAB 进行了仿真, 将等 τ - τ 线画出, 如图 8 所示。

在飞行包络线上, 垂直距离随着水平距离的减少而不断增加, 最终在包络线上形成一个最大值, 并且与二维空间相比, 其告警范围大大缩小。

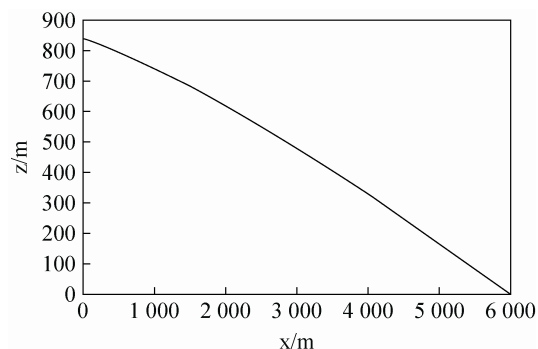


图 8 三维空间 30 s 等 τ - τ 线
Fig.8 30 s equal τ - τ line of three dimensional space

3 结论

本文针对基于时间 τ - τ 告警逻辑, 构建了等 τ - τ 告警曲线。根据自身无人机所进行机动动作的幅度, 定义了 3 种告警区域, 即高风险区、低风险区以及无风险区。在两架飞机在平行相遇情形和垂直交叉相遇情形下, 提出了告警区域的划分方法, 并重点分析了不同相遇情形中告警区的区别, 最后将该逻辑推广到三维空间中。

参考文献:

- [1] Fahlstrom P G, Gleason T J. 无人机系统导论[M]. 吴汉平, 译. 北京: 电子工业出版社, 2013.
Fahlstrom P G, Gleason T J. Introduction to UAV Systems [M]. 2012.
- [2] Utt J, McCalmont J, Deschenes M. Test and Integration of a Detect and Avoid System[C]// Proceedings of the AIAA 3rd "Unmanned Unlimited" Technical Conference, Workshop and Exhibit, Chicago, Illinois, USA, September 2004, AIAA 2004-6424.
- [3] McCalmont J, Utt J, Deschenes M, et al. Sense and Avoid Phase 1 (Man-in-the-Loop) Advanced Technology Demonstration[C]// Proceedings of the AIAA Infotech@Aerospace Conference, Arlington, Virginia, USA, September 2005, AIAA 2005-7176.
- [4] Suwal K, Chen W, Molnar T, SeFAR Integration Test Bed for Sense and Avoid Technologies[C]// Proceedings of the AIAA Infotech@Aerospace Conference, Arlington, Virginia, USA, September 2005, AIAA 2005-7178.
- [5] Shakernia O, Chen W, Graham S. Sense And Avoid (SAA) Flight Test and Lessons Learned[C]// Proceedings of the AIAA Infotech@Aerospace Conference, Rohnert Park, California, USA, May 2007, AIAA 2007-3003.

(下转第 1892 页)