

doi: 10.7690/bgzdh.2015.07.002

航空器轨迹冲突探测方法的改进与仿真

李波睿¹, 田成富¹, 彭 茜¹, 于永学¹, 慕春棣²

(1. 海军装备研究院, 北京 100036; 2. 清华大学自动化系, 北京 100084)

摘要: 针对传统轨迹冲突探测方法忽略航空器外形轮廓会造成空域浪费的问题, 对冲突探测几何近似法进行改进。考虑航空器外形尺寸对轨迹冲突探测结果的影响, 提出扩展保护区的概念, 给出相应几何近似法的计算步骤, 并通过仿真实验对所提出的几何近似法的有效性进行验证。仿真实验表明: 所提出的几何近似法的结果能反映轨迹冲突概率的变化趋势, 更接近冲突概率的真实情况。

关键词: 轨迹冲突探测; 航空安全; 扩展保护区; 奇异值分解; 几何近似法

中图分类号: TJ02 **文献标志码:** A

Improvement and Simulation of Aircraft Trajectory Conflict Detection Method

Li Borui¹, Tian Chengfu¹, Peng Qian¹, Yu Yongxue¹, Mu Chundi²

(1. Navy Academy of Armament, Beijing 100036, China;

2. Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In order to solve the airspace waste problem caused by traditional trajectory conflict detection methods which usually ignore the aircraft contour, the geometric approximation method (GAM) for conflict detection is improved. Considering the effect of aircraft contour size on the trajectory conflict detection result, the concept of extended protection zone is proposed at first, and then the steps of corresponding GAM are given. The validity of the proposed GAM is verified through simulation experiments. The simulation experiments show that the result of the proposed GAM could efficaciously reflect the variation trend of conflict probability, and is closer to the true value of conflict probability.

Keywords: trajectory conflict detection; aviation safety; extended protection zone; singular value decomposition; geometric approximation method

0 引言

根据航空器的飞行轨迹, 判断和预测航空器之间是否存在发生碰撞的危险, 或者计算发生碰撞可能性的大小, 即为轨迹冲突探测。轨迹冲突探测为航空安全提供了基础保障, 在民用航空中有着广泛的应用, 研究成果非常丰富^[1-7]。文献[1]总结和综述了 68 种轨迹冲突探测与解脱方法。轨迹冲突探测方法可以按照对目标轨迹动态变化的不同建模方式划分为确定型、最差情况型和概率型 3 类。概率型方法^[2-5]认为航空器的飞行目标轨迹是不确定的, 比其他 2 种方法更贴近真实情况, 因此笔者将探讨概率型轨迹冲突探测方法的改进和仿真。

文献[6]假定 2 架飞机的质心位置分量均服从高斯分布, 提出了一种随机化的方法, 通过随机采样取点的方式估算冲突概率值。文献[3]的算法设定与文献[6]类似, 但采用了不同的处理方法: 首先将冲突概率表示为高斯分布概率密度函数的积分, 积分区域为航空器的保护区; 然后求解该积分的近似值, 得到解析形式的计算公式。因为该方法在计算积分

时对积分区域进行了几何近似, 所以被称为几何近似法。文献[4]将文献[3]的几何近似法中长度无限的带状近似积分区域改进为面积有限的矩形区域, 得到了更精确的近似解析解, 并且在预测飞行轨迹时考虑了航空器的飞行意图。

几何近似法和文献[6]方法是比较有代表性的概率型轨迹冲突探测方法。与文献[6]方法相比, 几何近似法的优点是其得到的解析解形式简单, 可以有效地缩短运算时间, 算法实用性优于文献[6]方法, 并且在 NASA 开发的空中交通管理系统 Center/TRACON Automation System 中得到了应用。随着需求的改变和技术的进步, 几何近似法也逐渐出现一些需要改进的问题。

民航领域在进行冲突探测时, 通常采用远大于航空器外形尺寸的保护区尺寸 (即最小安全间隔)^[7], 因此文献中的方法往往将航空器视为点源目标, 即忽略外形轮廓, 只考虑其质心的运动学状态。这种做法虽然可以保证冲突探测的有效性, 但是偏保守, 对空域的浪费很大。目前, 社会对民航的需求快速增长, 亟需减小保护区尺寸以提高空域的利

收稿日期: 2015-03-01; 修回日期: 2015-04-18

基金项目: 航空科学基金(20128058006)

作者简介: 李波睿(1985—), 男, 山西人, 博士, 工程师, 从事通信工程和信息融合研究。

用率。然而，当航空器外形尺寸与保护区尺寸相比无法忽略时，文献中几何近似法的设定就无法满足。航站楼附近的空域因为航班起降频繁，所以业务繁忙、空域紧张，因此也面临着类似的问题。此外，在自动空中加油等军用领域，由于航空器(或飞行编队)彼此间隔距离小、编队规模大等原因^[8]，也对现有的轨迹冲突探测方法提出了挑战。在这些情况下，如果按惯例将航空器(或飞行编队)都看作点源目标，那么显然会降低轨迹冲突探测的精度。

为了方便表述，笔者将轨迹冲突探测问题中的航空器(或飞行编队)统称为“目标”。针对上述问题，笔者对几何近似法进行了改进，并称之为 OEOP(one object as an extended object and the other as a point source object)几何近似法，文献[3-4]中的几何近似法是 OEOP 几何近似法的特例。

1 轨迹冲突探测问题描述

1.1 质心运动状态

因为多个目标的轨迹冲突探测可以分解为多组 2 个目标之间的冲突探测问题，所以考虑 2 个目标(目标 1 和目标 2)平飞时的轨迹冲突探测问题。2 个目标的质心位置分量均服从高斯分布，并假设目标 1 的外形尺寸相对较大，需要被看作扩展目标，目标 2 则可被视为点源目标。

将质心位置分量的随机性都赋予目标 2，认为目标 1 的质心位置分量是确定的^[3]。为便于区分，将目标 1 称为参考目标(简称“RO”)，目标 2 称为随机目标(简称“SO”)，与 2 个目标相关的变量分别以 R 和 S 作为下标。

根据上述设定， k 时刻参考目标和随机目标的质心相对位置分量可以记为

$$\mathbf{g}_{RS}(k) = \mathbf{g}_R(k) - \mathbf{g}_S(k) \quad (1)$$

进一步假设 2 个目标的飞行轨迹彼此独立，则有

$$p[\mathbf{g}_{RS}(k)] = \mathcal{N}(\mathbf{g}_{RS}(k); \bar{\mathbf{g}}_{RS}(k), \mathbf{P}_{RS}(k)) \quad (2)$$

式中， $\mathcal{N}(\mathbf{g}_{RS}(k); \bar{\mathbf{g}}_{RS}(k), \mathbf{P}_{RS}(k))$ 表示高斯分布的概率密度函数，期望为 $\bar{\mathbf{g}}_{RS}(k)$ ，协方差矩阵为 $\mathbf{P}_{RS}(k)$ ；并且有

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{g}}_{RS}(k) &= \bar{\mathbf{g}}_R(k) - \bar{\mathbf{g}}_S(k) \\ \mathbf{P}_{RS}(k) &= \mathbf{P}_R(k) + \mathbf{P}_S(k) \end{aligned} \quad (3)$$

1.2 扩展保护区

因为参考目标被视为扩展目标，所以首先需要确定参考目标外形轮廓的描述方法，笔者将其简化为中心点位于目标质心的椭圆体^[9-10]。这种近似处

理方法在扩展目标跟踪技术中应用较多。因为椭圆体外形轮廓可以用一个正定矩阵 $\mathbf{X}_R(k)$ 来描述，所以有利于进行推导和计算。在实际应用中，参考目标的外形轮廓特征可以事先获知，也可以采用扩展目标跟踪技术^[9-10]进行估计。

将扩展目标的保护区称为扩展保护区，记为 \mathcal{D} ，其设置方法与民航常用的保护区设置方式有所区别^[7]。 \mathcal{D} 也称为冲突域，存在轨迹冲突即等价于其他目标进入 \mathcal{D} 。笔者采用椭圆体形状的扩展保护区，将 $\mathbf{X}_R(k)$ 进行奇异值分解得到^[11]

$$\mathbf{X}_R(k) = \mathbf{R}(k) \text{diag}(\sigma_a^2, \sigma_b^2, \sigma_c^2) \mathbf{R}^T(k) \quad (4)$$

式中： $\sigma_a \geq \sigma_b \geq \sigma_c > 0$ ； $\mathbf{R}(k)$ 是一个正交矩阵。在轨迹冲突探测中，若规定目标之间最小水平安全间隔为 r_h ，最小垂直安全间隔为 r_v ，则扩展保护区 \mathcal{D} 对应的正定矩阵 $\mathbf{X}_D(k)$ 可按照下式计算：

$$\mathbf{X}_D(k) = \mathbf{R}(k) \text{diag}\left((\sigma_a + r_h)^2, (\sigma_b + r_h)^2, (\sigma_c + r_v)^2\right) \mathbf{R}^T(k) \quad (5)$$

2 OEOP 几何近似法

根据第 1 节的问题描述，参考目标被视为扩展目标，其外形轮廓对应的正定矩阵记为 $\mathbf{X}_R(k)$ ；而随机目标的尺寸较小，可以忽略外形轮廓而被视为点源目标。

需要说明的是：当 OEOP 几何近似法中扩展目标的外形尺寸趋近于无穷小时，即退化为 2 个目标均视为点源目标的情况，这也就是大多数现有的冲突探测方法所考虑的情况，可以称之为 OPOP 情形。笔者介绍的 OEOP 几何近似法也适用于 OPOP 情形，只需要将描述扩展保护区的正定矩阵 $\mathbf{X}_D(k)$ 替换为描述点源目标椭圆体保护区的正定矩阵即可。

首先以二维水平面($x-y$ 平面， z 轴方向为垂直方向)上的冲突探测问题为例进行算法说明，该设定适用于参考目标和随机目标在同一高度飞行的情况；然后再推广到三维的情况。

2.1 二维平面 OEOP 几何近似法

首先将坐标系的原点平移到坐标 $\bar{\mathbf{g}}_S(k)$ ，参考目标的质心位置分量 $\mathbf{g}_R(k) = \bar{\mathbf{g}}_{RS}(k)$ 是确定的；随机目标的质心位置分量 $\mathbf{g}_S(k)$ 服从高斯分布，其概率密度函数为

$$p[\mathbf{g}_S(k)] = \mathcal{N}(\mathbf{g}_S(k); \mathbf{0}, \mathbf{P}_{RS}(k)) \quad (6)$$

在二维情况下，参考目标的外形轮廓可以用半

轴长为 $\sigma_{R,a} > \sigma_{R,b}$ 的椭圆来描述, 该椭圆对应的正定矩阵为 $X_R(k)$, 则 $X_R(k)$ 的特征值为 $\sigma_{R,a}^2 \geq \sigma_{R,b}^2$ 。参考目标的扩展保护区 \mathcal{D} 可以定义为中心点为参考目标质心、半轴长分别为 $\sigma_{R,a} + r_h$ 和 $\sigma_{R,b} + r_h$ 的椭圆。该椭圆形扩展保护区的 2 条轴分别与椭圆 $X_R(k)$ 的 2 条轴平行, 如图 1 中阴影部分所示, 其相应的正定矩阵为 $X_D(k)$ 。协方差矩阵 $P_{RS}(k)$ 在通常情况下是正定矩阵, 其对应的椭圆被称为联合误差椭圆(以原点为中心点)^[3], 如图 1 中的虚线椭圆所示。

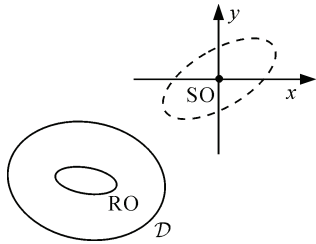


图 1 二维平面 OEOP 情形示意图

记 k 时刻随机目标进入参考目标扩展保护区 \mathcal{D} 的概率为 $\Xi(k)$, 则 $\Xi(k)$ 为随机目标与参考目标发生轨迹冲突的概率, 可以表示为

$$\Xi(k) = \int_{g(k) \in \mathcal{D}} \mathcal{N}(g(k); \theta, P_{RS}(k)) dg(k) \quad (7)$$

上式在通常情况下是没有解析解的, 而计算数值解需要耗费大量的系统资源和运算时间, 在资源受限或需要实时运算的应用场景中是不适用的。因此, 接下来对文献[3-4]中的几何近似法进行改进后求解 $\Xi(k)$ 的近似解析解。

2.1.1 坐标变换

OEOP 几何近似法首先需要进行坐标变换, 记变换后的坐标轴为 u 轴和 v 轴, $g(k) = (x, y)^T$ 变换后的坐标为 $h(k) = (u, v)^T$ 。记非奇异坐标变换矩阵为 T , 则有

$$\begin{aligned} h(k) &= Tg(k) \\ g(k) &= T^{-1}h(k) \end{aligned} \quad (8)$$

随机目标的位置分量 $g_s(k)$ 变换后为 $h_s(k)$, 并且 $h_s(k)$ 的协方差矩阵为 $TP_{RS}(k)T^T$ 。记坐标变换后的冲突域椭圆为 \mathcal{D}' , 坐标变换的目的一方面要使 $TP_{RS}(k)T^T$ 成为单位矩阵; 另一方面要使椭圆 \mathcal{D}' 的长轴平行于坐标轴 u 轴^[3-4]。相应地, 图 1 中的联合误差椭圆也就变换成了联合误差单位圆, 如图 2 所示。

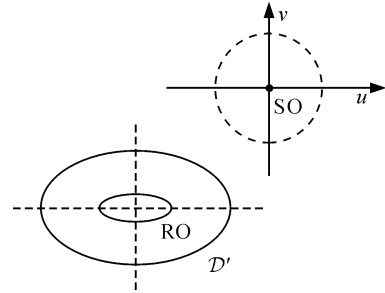


图 2 坐标变换示意图

因为协方差矩阵 $P_{RS}(k)$ 通常是正定矩阵, 所以可以对其进行 Cholesky 分解得: $P_{RS}(k) = LL^T$, L 为非奇异下三角矩阵。

取坐标变换矩阵 T ^[3] 为

$$T = RL^T \quad (9)$$

式中 R 为正交矩阵, 有 $RR^T = I$, I 为单位矩阵。显然, 式 (9) 定义的 T 即可使 $TP_{RS}(k)T^T$ 成为单位矩阵。

坐标变换前冲突域椭圆 \mathcal{D} 的方程为

$$(g(k) - g_R(k))^T X_D^{-1}(k) (g(k) - g_R(k)) = 1 \quad (10)$$

将式 (8) 和式 (9) 代入式 (10), 整理得到

$$(h(k) - h_R(k))^T (RL^{-1}X_D(k)L^{-T}R^T)^{-1} (h(k) - h_R(k)) = 1 \quad (11)$$

因为 $X_D(k)$ 是正定矩阵, 所以 $L^{-1}X_D(k)L^{-T}$ 也是正定矩阵, 将其进行奇异值分解^[16]如下:

$$\begin{aligned} L^{-1}X_D(k)L^{-T} &= R_{LD}(k) \text{diag}(\sigma_{LD,a}^2, \sigma_{LD,b}^2) R_{LD}^T(k) \triangleq \\ &R_{LD}(k) V_{LD}(k) R_{LD}^T(k) \end{aligned} \quad (12)$$

式中: $R_{LD}(k)$ 为正交矩阵; $V_{LD}(k)$ 为对角矩阵, 主对角线元素 $\sigma_{LD,a}^2 \geq \sigma_{LD,b}^2 > 0$ 。

将式 (12) 代入式 (11) 得到

$$\begin{aligned} (h(k) - h_R(k))^T (RR_{LD}(k) V_{LD}(k) R_{LD}^T(k) R^T)^{-1} \cdot \\ (h(k) - h_R(k)) = 1 \end{aligned} \quad (13)$$

取正交矩阵 $R = R_{LD}^{-1}(k)$, 则有 $R^T = R_{LD}^{-T}(k)$, 坐标变换矩阵 $T = R_{LD}^{-1}(k)L^{-1}$ 。将 R 代入式 (13) 后得到变换后的冲突域椭圆 \mathcal{D}' 的方程

$$(h(k) - h_R(k))^T V_{LD}^{-1}(k) (h(k) - h_R(k)) = 1 \quad (14)$$

因为 $V_{LD}(k)$ 为对角矩阵并且有 $\sigma_{LD,a}^2 \geq \sigma_{LD,b}^2$, 所以式 (14) 表明经过坐标变换之后, 冲突域椭圆 \mathcal{D}' 的长轴与坐标轴 u 轴平行。

2.1.2 积分区域近似

经过坐标变换后, 式 (7) 的 $\Xi(k)$ 可以改写为

$$\Xi(k) = \int_{\mathbf{h}(k) \in \mathcal{D}'} \mathcal{N}(\mathbf{h}(k); \mathbf{0}, \mathbf{I}) d\mathbf{h}(k) \quad (15)$$

记变换后的参考目标的质心位置分量为

$$\mathbf{h}_R(k) = \mathbf{T}\mathbf{g}_R(k) = (u_R(k), v_R(k))^T \quad (16)$$

文献[4]采用 2 条边分别与 2 条坐标轴平行的椭圆 \mathcal{D}' 外切矩形作为近似积分区域^[3]，如图 3 所示，则有

$$\begin{aligned} \Xi(k) &\approx \int_{v_R(k) - \sigma_{LD,b}}^{v_R(k) + \sigma_{LD,b}} \int_{u_R(k) - \sigma_{LD,a}}^{u_R(k) + \sigma_{LD,a}} \mathcal{N}((u, v)^T; \mathbf{0}, \mathbf{I}) dudv = \\ &\left[\int_{u_R(k) - \sigma_{LD,a}}^{u_R(k) + \sigma_{LD,a}} \mathcal{N}(u; 0, 1) du \right] \left[\int_{v_R(k) - \sigma_{LD,b}}^{v_R(k) + \sigma_{LD,b}} \mathcal{N}(v; 0, 1) dv \right] \end{aligned} \quad (17)$$

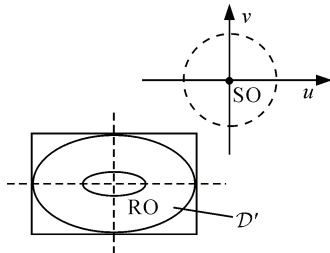


图 3 矩形的近似积分区域

记 $\Phi_1(\zeta) = \int_{-\infty}^{\zeta} \mathcal{N}(x; 0, 1) dx$ 为一维标准高斯分布的累积分布函数，则式(17)可以改写为^[3-4]：

$$\begin{aligned} \Xi(k) &\approx [\Phi_1(u_R(k) + \sigma_{LD,a}) - \Phi_1(u_R(k) - \sigma_{LD,a})] \cdot \\ &[\Phi_1(v_R(k) + \sigma_{LD,b}) - \Phi_1(v_R(k) - \sigma_{LD,b})] \end{aligned} \quad (18)$$

2.2 三维空间 OEOP 几何近似法

2.1 节的二维平面几何近似法经过简单修改后即可适用于三维空间，适用于 2 个目标的飞行高度相差较大的情况。

三维情况下 $\Xi(k)$ 的表达式与式 (7) 类似。不妨设经过坐标变换后，冲突域椭圆体 \mathcal{D}' 平行于 u 、 v 、 w 三条坐标轴的半轴长分别为 $\sigma_{LD,a} \geq \sigma_{LD,b} \geq \sigma_{LD,c} > 0$ 。记变换后参考目标的质心位置分量为 $\mathbf{h}_R(k) = (u_R(k), v_R(k), w_R(k))^T$ 。若采用椭圆体 \mathcal{D}' 的外切长方体作为近似的积分区域，该长方体的 3 组棱分别与 3 条坐标轴平行，则最后计算得到的

式 (18) 给出了解析形式的 $\Xi(k)$ 近似解，式中 $\Phi_1(\zeta)$ 的取值可以预先存储在表格中，在计算时通过查表得到，这样可以减少运算时间、加快运算速度。

接下来对图 3 所示的矩形近似积分区域进行改进。从式 (18) 中减去图 4 所示的 4 个小内接矩形上的积分值，即将积分区域减少为图 4 中的阴影部分，这样可以更接近冲突域椭圆 \mathcal{D}' 。

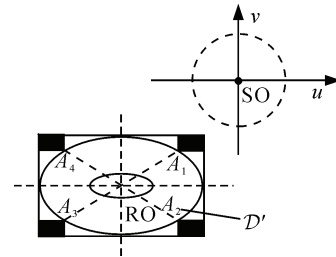


图 4 改进的近似积分区域

计算出图 4 中外切矩形的 2 条对角线与冲突域椭圆 \mathcal{D}' 的 4 个交点的坐标分别为

$$\begin{aligned} A_1 &(u_R(k) + \sigma_{LD,a} \sqrt{2}/2, v_R(k) + \sigma_{LD,b} \sqrt{2}/2)^T \\ A_2 &(u_R(k) + \sigma_{LD,a} \sqrt{2}/2, v_R(k) - \sigma_{LD,b} \sqrt{2}/2)^T \\ A_3 &(u_R(k) - \sigma_{LD,a} \sqrt{2}/2, v_R(k) - \sigma_{LD,b} \sqrt{2}/2)^T \\ A_4 &(u_R(k) - \sigma_{LD,a} \sqrt{2}/2, v_R(k) + \sigma_{LD,b} \sqrt{2}/2)^T \end{aligned} \quad (19)$$

$\Xi(k)$ 更精确的近似值如下式所示。

$$\begin{aligned} \Xi(k) &\approx [\Phi_1(u_R(k) + \sigma_{LD,a}) - \Phi_1(u_R(k) - \sigma_{LD,a})][\Phi_1(v_R(k) + \sigma_{LD,b}) - \Phi_1(v_R(k) - \sigma_{LD,b})] - \\ &[\Phi_1(u_R(k) + \sigma_{LD,a}) - \Phi_1(u_R(k) + \sigma_{LD,a} \sqrt{2}/2)][\Phi_1(v_R(k) + \sigma_{LD,b}) - \Phi_1(v_R(k) + \sigma_{LD,b} \sqrt{2}/2)] - \\ &[\Phi_1(u_R(k) + \sigma_{LD,a}) - \Phi_1(u_R(k) + \sigma_{LD,a} \sqrt{2}/2)][\Phi_1(v_R(k) - \sigma_{LD,b} \sqrt{2}/2) - \Phi_1(v_R(k) - \sigma_{LD,b})] - \\ &[\Phi_1(u_R(k) - \sigma_{LD,a} \sqrt{2}/2) - \Phi_1(u_R(k) - \sigma_{LD,a})][\Phi_1(v_R(k) - \sigma_{LD,b} \sqrt{2}/2) - \Phi_1(v_R(k) - \sigma_{LD,b})] - \\ &[\Phi_1(u_R(k) - \sigma_{LD,a} \sqrt{2}/2) - \Phi_1(u_R(k) - \sigma_{LD,a})][\Phi_1(v_R(k) + \sigma_{LD,b}) - \Phi_1(v_R(k) + \sigma_{LD,b} \sqrt{2}/2)] \end{aligned} \quad (20)$$

$\Xi(k)$ 近似解析解为

$$\begin{aligned} \Xi(k) &\approx [\Phi_1(u_R(k) + \sigma_{LD,a}) - \Phi_1(u_R(k) - \sigma_{LD,a})] \cdot \\ &[\Phi_1(v_R(k) + \sigma_{LD,b}) - \Phi_1(v_R(k) - \sigma_{LD,b})] \cdot \\ &[\Phi_1(w_R(k) + \sigma_{LD,c}) - \Phi_1(w_R(k) - \sigma_{LD,c})] \end{aligned} \quad (21)$$

三维情况下也可以对积分区域进行改进，其原理与二维情况完全相同，得到的 $\Xi(k)$ 近似解的形式也与式 (20) 类似，但更加复杂。

3 Monte Carlo 方法

计算精确的冲突概率 $\Xi(k)$ 真实值是比较困难的，因此笔者采用 Monte Carlo 方法的计算结果作

为真实值的参考。

判断点源目标是否进入扩展目标的扩展保护区的 Monte Carlo 方法, 可以等价于判断描述点源目标的点是否位于冲突域椭圆(体)上或内部, 判断方法比较简单, 在此不再赘述。在 k 时刻, N_M 次 Monte Carlo 仿真存在轨迹冲突的次数为 N_C , 则冲突概率 $\Xi_M(k)$ 的 Monte Carlo 近似值为 N_C/N_M 。

4 仿真结果

在本节中, “目标 S 和 R 的轨迹冲突概率” 表示目标 S 进入 R 的保护区(或扩展保护区)的概率。

4.1 仿真场景 1

在仿真场景 1 中, 3 个目标质心位置分量的数学期望形成的轨迹如图 5 所示, “*” 表示起始位置的期望。3 个目标均沿着箭头方向进行速度大小为 83.34 m/s 的匀速直线运动, 其中, 目标 1 从图 5 的上方向 $(0,0)^T$ 运动, 目标 2 和 3 则分别从右下方和左下方方向 $(0,0)^T$ 运动。目标运动的时间范围为 0~20 s, 采样周期为 1 s。

目标 1 被视为扩展目标, 其扩展保护区为半轴长分别为 400 m 和 500 m 的椭圆。目标 2 和目标 3 被视为点源目标, 其保护区均为半径 300 m 的圆。在 x 轴和 y 轴方向上, 3 个目标质心位置分量的标准差均为 100 m。

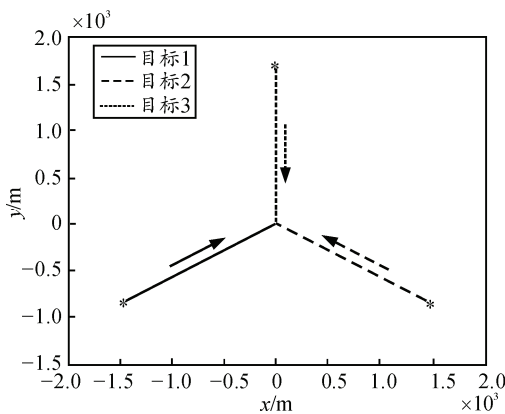


图 5 仿真场景 1 目标运动轨迹的期望

对图 5 中的 3 个目标, 逐对应用以下 3 种方法计算轨迹冲突的概率:

- 1) OEOP 几何近似法 1, 2.1 节的方法, 采用图 3 所示文献[4]的矩形近似积分区域;
- 2) OEOP 几何近似法 2, 2.1 节的方法, 采用图 4 所示改进的近似积分区域;
- 3) Monte Carlo 方法, 统计 $N_M=50\ 000$ 次 Monte

Carlo 仿真的结果计算轨迹冲突概率。

3 种方法得到的轨迹冲突概率曲线如图 6 所示。从图中可以看出: 目标 1 和目标 2、目标 1 和目标 3、目标 2 和目标 3 均存在轨迹冲突的可能; 2 种 OEOP 几何近似法得到的冲突概率值均大于 Monte Carlo 方法的结果, 说明都是偏保守的估计, 这样有利于降低漏报率、提高安全性; OEOP 几何近似法 2 采用了比几何近似法 1 更为准确的近似积分区域, 所以得到的结果也更接近 Monte Carlo 方法的结果。

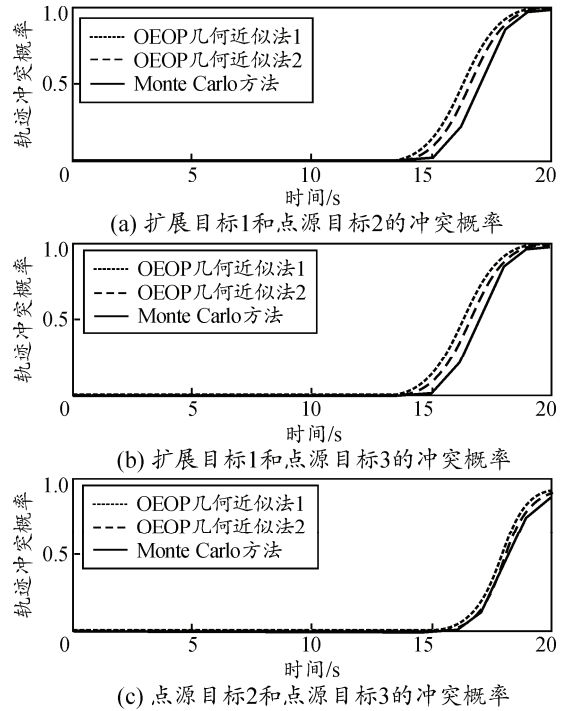


图 6 仿真场景 1 轨迹冲突概率

4.2 仿真场景 2

在仿真场景 2 中, 3 个目标质心位置分量的数学期望形成的轨迹如图 7 所示, 目标 3、目标 1 和目标 2 在图 7 中自上而下依次排列。目标 1 和 2 沿着箭头方向进行速度大小分别为 97.23 m/s 和 194.46 m/s 的匀速直线运动; 目标 3 在 0~60 s 进行的运动为角速度为 1.5 (°)/s、线速度为 194.46 m/s 的匀速圆周运动和水平向右 97.23 m/s 匀速直线运动的叠加, 60~80 s 进行的运动为垂直向上 194.46 m/s 匀速直线运动和水平向右 97.23 m/s 匀速直线运动的叠加。目标运动的时间范围为 0~80 s, 采样周期为 1 s。

其他仿真参数和所比较的 3 种轨迹冲突概率计算方法均与 4.1 节相同。

3 种方法得到的轨迹冲突概率曲线如图 8 所示。从曲线可以看出: 目标 1 和目标 2、目标 1 和目标 3

均存在轨迹冲突的可能，而目标2和目标3的轨迹冲突概率则非常小；OEOP几何近似法得到的冲突概率值是偏保守的估计，均大于Monte Carlo方法的结果；OEOP几何近似法2比几何近似法1的结果更接近Monte Carlo方法的结果。

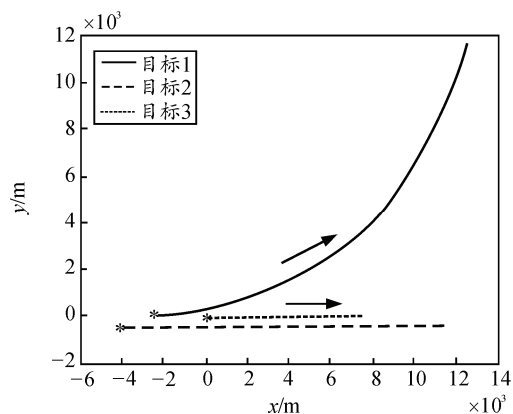
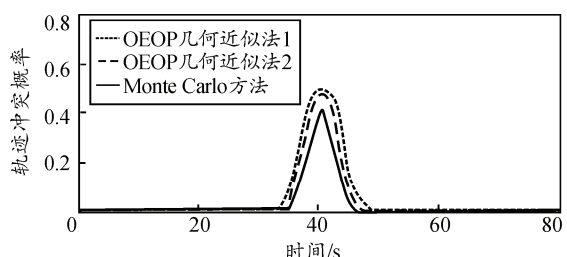
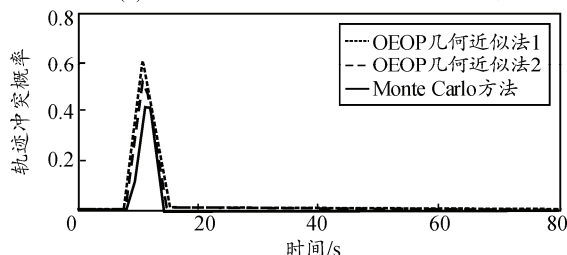


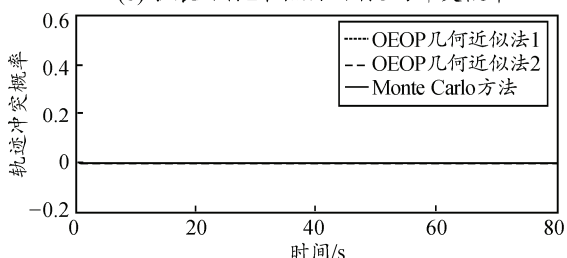
图7 仿真场景2目标运动轨迹的期望



(a) 扩展目标1和点源目标3的冲突概率



(b) 扩展目标2和点源目标3的冲突概率



(c) 点源目标2和点源目标3的冲突概率

图8 仿真场景2轨迹冲突概率

5 结论

笔者对概率型轨迹冲突探测算法的典型代表——几何近似法进行了改进，提出了OEOP几何近似法，并通过仿真验证了OEOP几何近似法的有效

性，其主要优点有：

1) OEOP几何近似法可以将参考目标视为扩展目标，考虑其外形轮廓特征对轨迹冲突概率的影响，并给出了相应的解算方法，从而可以适用目标外形尺寸与目标间隔距离、保护区尺寸相比无法忽略的情况。

2) 文献中的几何近似法是OEOP几何近似法的特例，并且后者的结果形式仍为简洁的解析解，有助于提高算法的运算速度和实用性。

3) OEOP几何近似法进一步改进了文献[4]中的矩形近似积分区域，仿真结果表明OEOP几何近似法计算得到的轨迹冲突概率值更接近真实情况。

参考文献：

- [1] 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.
- [2] Liu W, Hwang I. Probabilistic Trajectory Prediction and Conflict Detection for Air Traffic Control[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2011, 34(6): 1779-1789.
- [3] Paielli R A, Erzberger H. Conflict probability estimation for free flight[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1997, 3(20): 588-596.
- [4] Hwang I, Seah C E. Intent-Based Probabilistic Conflict Detection for the Next Generation Air Transportation System[J]. Proceedings of the IEEE, 2008, 96(12): 2040-2059.
- [5] Lauderdale T. Probabilistic Conflict Detection for Robust Detection and Resolution[C]//Proceedings of 12th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference and 14th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference. Indianapolis, Indiana: AIAA, 2012: 1-12.
- [6] Prandini M, Hu J, Lygeros J, et al. A probabilistic approach to aircraft conflict detection[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2000, 1(4): 199-220.
- [7] 胡光华. 航路飞行冲突探测与解脱方法研究[D]. 武汉：武汉理工大学, 2009: 23-26.
- [8] 董新民, 徐跃鉴, 陈博. 自动空中加油技术研究进展与关键问题[J]. 空军工程大学学报：自然科学版, 2008, 9(6): 1-5.
- [9] Koch J W. Bayesian approach to extended object and cluster tracking using random matrices[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2008, 44(3): 1042-1059.
- [10] 李波睿, 慕春棣, 白天明, 等. 一种混合的扩展目标跟踪方法[J]. 航空学报, 2014, 35(5): 1336-1346.
- [11] 张贤达. 矩阵分析与应用[M]. 北京：清华大学出版社, 2004: 214-218.