

基于冲突概率的低空自由飞行冲突检测算法

沈笑云¹, 周波^{1,2}, 曹博¹, 唐鹏¹

(1. 中国民航大学智能信号和图像处理天津市重点实验室, 天津 300300;

2. 中国民用航空中南地区空中交通管理局湖北分局, 武汉 430000)

摘要: 针对低空自由飞行的临时机动性, 基于 Paielli 算法中冲突概率的思想, 提出一种适用于低空飞行的飞机冲突探测算法。算法考虑空间精度要求, 加入时间维度, 使 Paielli 算法中的扩展冲突域在相对运动方向上的不定积分变成与冲突时间相对应的有确定上下限的定积分, 冲突的概率转化为对应于某一时刻的冲突域与联合航迹误差的交叉体积的积分。通过 Cholesky 分解和矩阵旋转等方式, 实现了冲突概率模型的量化求解, 能更准确地预测冲突发生的概率。

关键词: 低空飞行; 冲突检测; 误差; 冲突概率

中图分类号: V328.5

文献标志码: A

文章编号: 1671-637X(2014)06-0043-05

A Free Flight Conflict Detection Algorithm of Low-Altitude Airspace Based on Conflict Probability

SHEN Xiao-yun¹, ZHOU Bo^{1,2}, CAO Bo¹, TANG Peng¹

(1. Tianjin Key Lab for Advanced Signal Processing, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

2. Air Traffic Management Bureau of Middle & Southern Region, Hubei CAAC, Wuhan 430000, China)

Abstract: Considering the flexibility of the aircraft in low-altitude airspace, we put forward a flight conflict detection algorithm adaptable to the low-attitude airspace flight based on conflict probability. In the algorithm, the spatial precision and time parameters were taken into account, the indefinite integral of the extended conflict area in the direction of the relative motion of Paielli algorithm, is changed into a definite integral corresponding to the conflict time, which has determined upper and lower limits of integration. The conflict probability is transformed into the integral of the cross volume between the collision area and the joint track error corresponding to a certain moment. The quantization solution of the conflict probability model is realized by Cholesky factorization and matrix rotation, which is more accurate for the prediction of the conflict probability.

Key words: low-attitude flight; conflict detection; error; conflict probability

0 引言

在低空开放时代背景下, 有关政策陆续出台, 根据国务院和中央军委下发的文件及民航局规定, 低空空域分为管制空域、监视空域、报告空域 3 种, 其中监视空域和报告空域占大部分, 飞行员具有相对自由的飞行决策和处理能力。飞行员在仪表或目视飞行规则下, 依靠机载设备指示, 更加自主地处理各种空中交通问题。而飞行冲突检测通过机载和地面监视设备对航

空器在空域中的位置、高度和速度等信息进行计算, 利用它们的飞行计划及当前时刻的飞行状态预测未来航迹, 判断航空器间隔是否小于规定安全值, 实现冲突的预测、告警功能, 是空中交通安全的重要因素^[1-2]。冲突检测方法大体可以分为确定性检测和概率检测^[3]。概率检测是根据航迹误差的模型和冲突域共同判断冲突可能性大小的方法^[4-13]。

文献[4-8]在基于概率的冲突检测方面做了深入的研究; 文献[4, 6-8]都是针对商用航班提出的算法, 忽略了两架冲突飞机的相对机动; 文献[5]提出的基于 ADS-B 的航路改变情况下的冲突预测方法, 计算比较复杂; 文献[14]将 Paielli 建立的思路模型应用到机器人避撞领域, 实验表明时间维度缺失导致冲突的准确检测十分困难。针对以上问题, 本文在“自由飞行

收稿日期: 2013-08-02

修回日期: 2013-08-28

基金项目: 国家自然科学基金(61079009); 中央高校基本科研业务费(ZXH2009 B008, 3122013SY22)

作者简介: 沈笑云(1965—), 女, 江苏盐城人, 硕士, 研究员, 研究方向为空中交通管理、虚拟现实。

下的冲突概率估计算法”^[6-7]中提出的基于概率的冲突检测算法的思路基础上,提出了一种改进的概率冲突检测算法。该算法不仅能预测到飞机沿直线航路飞行情况下的冲突,还适合于机动性比较强的低空空域飞行器,能对机动目标的冲突概率进行更好的预测,及时准确地给出与飞行计划匹配的冲突预测概率,极大地节约了空域资源,同时提高了飞行器的安全系数。实验结果表明,本文方法解决了机动条件下目标冲突概率难以预测的问题。

1 本文冲突检测算法

1.1 三维飞行冲突

在三维空间中,设定通航飞机的水平安全间隔与垂直安全间隔分别为 R_c 及 H_c ,一架飞机与其他飞机的冲突关系如图1所示。图中,参考飞机 R 位于圆柱体的中心,上、下圆半径为 R_c ,高度为 $2H_c$;随机飞机为 S_a 和 S_b 。飞机 S_a 进入圆柱体冲突域内,则称 S_a 与 R 发生飞行冲突;而飞机 S_b 处于圆柱体冲突域之外,不会冲突。

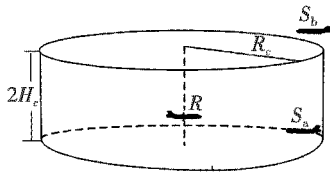


图1 三维飞行冲突域

Fig.1 3D flight collision area

1.2 联合航迹误差模型

航迹误差由多种因素造成,由Lebeg中心极限定理可知此类误差符合高斯分布。并且,NASA的Ames研究中心对4000多例飞机航行信息的研究也表明航迹误差近似符合零均值高斯分布^[6-8]。据此,文献^[6-7]指出:航迹误差可以定义为3个互相独立的部分,分别是沿航迹方向误差、垂直航迹侧面方向误差、垂直地面方向误差。

将沿航迹方向、垂直航迹侧面方向、垂直地面方向分别设为 x 轴、 y 轴、 z 轴正向,将本机当前位置为原点的正交坐标系称为航向坐标系。设 $\mathbf{q}_r = [x_r, y_r, z_r]^T$,为飞机的实际位置; $\mathbf{q}_e = [x_e, y_e, z_e]^T$,为预测位置。则在此坐标系中,飞机的误差向量为 $\mathbf{q} = \mathbf{q}_r - \mathbf{q}_e$,其中,各个分量都是均值为0、相互独立的高斯分布,因此, \mathbf{q} 的协方差矩阵 \mathbf{D} 为一对角矩阵

$$\mathbf{D} = \text{cov}(\mathbf{q}) = \text{diag}(\sigma_x^2, \sigma_y^2, \sigma_z^2) \quad (1)$$

式中, σ_x^2 、 σ_y^2 、 σ_z^2 分别为 x 、 y 、 z 方向上分量的误差。随着时间的推移,方差会增大。

为了更好地反映方差随时间增长的实际情况,本

文算法采用文献^[6-10]对3个方向上方差增大方式的研究结果。为将飞机在各自航迹坐标系下的坐标统一到惯性坐标系下,需进行坐标旋转,航向坐标系向惯性坐标系的旋转矩阵为

$$\mathbf{R}_0 = \begin{bmatrix} \cos \gamma \cos \chi & \sin \chi \cos \gamma & -\sin \gamma \\ -\sin \chi & \cos \chi & 0 \\ \sin \gamma \cos \chi & \sin \gamma \sin \chi & \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: γ 为航迹倾斜角,是航迹方向矢量与水平面的夹角; χ 为航迹方位角,是航迹方向矢量在水平面上的投影与惯性坐标系 x 轴之间的夹角。

在动力学中,将Ma数低于5的目标对应的惯性坐标系都视为大地坐标系,所以上面的惯性坐标系也是大地坐标系。将所有目标都转换到大地坐标系下考虑,则航迹误差向量 \mathbf{q} 在惯性坐标系下的向量为 $\mathbf{p} = \mathbf{R}_0 \mathbf{q}$,其对应的协方差矩阵为

$$\mathbf{Q} = \text{cov}(\mathbf{p}) = \mathbf{R}_0 \mathbf{D} \mathbf{R}_0^T \quad (3)$$

两架飞机的航迹均存在误差,但是为了便于分析求解,以其中一架飞机为参考,并且将其误差转移给另一架飞机,参考飞机航迹误差为零,非参考飞机航迹误差为两架飞机的联合误差 V_p 。非参考飞机记为 S ,参考飞机记为 R 。两架飞机的联合航迹误差为

$$\Delta \mathbf{p} = \Delta \mathbf{p}_r - \Delta \mathbf{p}_e = \mathbf{p}_s - \mathbf{p}_r \quad (4)$$

也是均值为零的高斯分布,其协方差矩阵为

$$\mathbf{C} = \text{cov}(\Delta \mathbf{p}) = \mathbf{Q}_s + \mathbf{Q}_r - \mathbf{Q}_{sr} \quad (5)$$

工程上认为飞机的航迹误差是相互独立的,即 $\mathbf{Q}_{sr} = 0$ 。因此容易判定协方差矩阵 \mathbf{C} 为实对称正定阵,满足Cholesky分解条件^[4,15]。

1.3 三维飞行冲突的相遇几何

参考飞机的当前卫星测量位置为飞机间冲突区域(水平安全间隔是 R_c ,垂直安全间隔是 H_c 的圆柱体)的中心,参考飞机飞行方向为两飞机的相对速度方向。它们的相遇几何如图2所示。 R 关于 S 的相对速度 Δv 不一定与地面平行, R 的圆柱体冲突域沿 Δv 形成的三维扩展冲突域是一个复杂的空间柱体。 R 和 S 在相遇时的总冲突概率是单位误差椭球与扩展冲突域的相交体积。

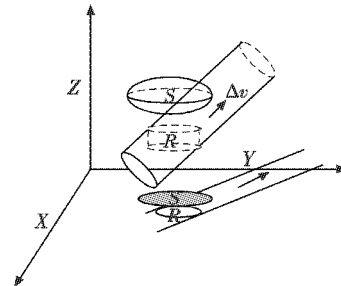


图2 相遇几何

Fig.2 Encounter geometry

1.4 概率模型的求解过程

由于图2中的体积不能从数学的角度定量地直接求解,可经过坐标系的变换,将上面坐标系中的变量经过3次坐标变换后得到近似的积分解析解,3次坐标变换包括1次非正交变换和2次正交变换。

1.4.1 非正交变换

非正交变换的目的是将联合航迹误差椭球转换为单位球,从而简化冲突概率的计算。利用Cholesky分解将联合航迹误差 C 分解为 $C=LL^T$,其中 L 是下三角矩阵。设该非正交变换矩阵为 T ,则经过其变换后的联合航迹误差为 $\Delta p_T = T\Delta p$,且转换后的联合航迹误差均值仍为0,均方差为

$$\text{cov}(\Delta p_T) = TCT^T \quad (6)$$

由此可知,当 $T=L^{-1}$ 时,式(6)可以简化为标准形式: $\text{cov}(\Delta p_T) = I$,其中 I 为单位矩阵。转换后的矩阵表明联合航迹误差在 x, y, z 方向上的分量都是均值为0、方差为1的标准高斯分布。联合航迹误差由椭圆转换为单位圆形式,柱形冲突域转换为圆柱体区域,其在 xoy 平面上的投影由圆形转换成椭圆, z 轴方向上没有发生变化。非正交变换前后两架飞机的相遇在 xoy 平面上几何投影的对比如图3所示。

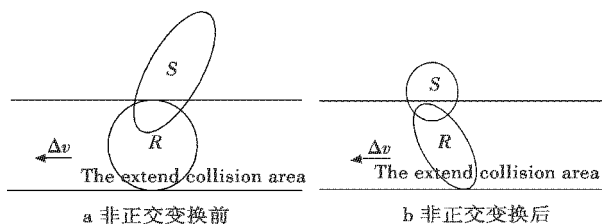


图3 非正交变换前后两架飞机的相遇在 xoy 平面上的几何投影

Fig. 3 The projection of the encounter geometry in the xoy plane before and after transformation

1.4.2 第一次正交变换

利用正交变换,旋转非正交变换后的坐标系,将相对速度方向旋转与 x 轴平行,从而扩展冲突域。由于正交变换仅对坐标系转换,所以不会改变联合误差球和圆柱体冲突域的形状。

正交变换由两次旋转变换组成:第一次绕 z 轴旋转,使得相对速度落在 xoz 平面内;第二次绕 y 轴旋转,使得相对速度方向与 x 轴平行。若两飞机都平飞(飞行的过程中高度不发生变化,即不发生爬升或下降等机动),则相对速度在 z 方向上的分量为0,这时不需要第二次变换。若两飞机不是平飞,则 z 方向上的分量不为0,需要考虑第二次绕 y 轴旋转,使得合速度指向 x 轴,具体方法参考文献[4-5]。此处以 $v = (v_x, v_y, v_z)^T$ 为例,将速度视为状态量,求其旋转矩阵如下所述。

第一次正交旋转因子为

$$R_z = \frac{1}{v_m} \begin{bmatrix} v_x & v_y & 0 \\ -v_y & v_x & 0 \\ 0 & 0 & v_m \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中, $v_m = (v_x^2 + v_y^2)^{1/2}$ 。若两架飞机不是平飞,则在第一次旋转的基础之上绕 y 轴做第二次旋转,变换矩阵为

$$R_y = \frac{1}{v_l} \begin{bmatrix} v_h & 0 & v_z \\ 0 & v_l & 0 \\ -v_z & 0 & v_h \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中, $v_l = (v_h^2 + v_z^2)^{1/2}$ 。

经过两次变换后,代表冲突域的圆柱体冲突域不再与 z 轴平行,也就是说,经过正交变换不会改变形状,但是会旋转坐标系,导致几何图形在相对坐标系中坐标改变,尤其是经过变换后, z 轴方向上的分量发生改变,使代表冲突域的圆柱体不再与 z 轴平行,而向 x 轴方向有少许倾斜。柱体形状的冲突域沿 x 轴方向无限延伸,构成扩展冲突域,如果联合航迹误差球,与这个区域相交,就表明有冲突的可能性,冲突的概率就是相交体积的大小。

1.4.3 第二次正交变换

在第一次非正交变换的过程中,只考虑几何信息的变换处理,用圆柱体延伸的方向为冲突区域,第一次正交变换的过程是将这个冲突域做延伸方向的调整,使其沿 x 轴方向延伸,方便进一步计算。整个过程都是考虑联合方差球体与这个无限延伸区域相交体积,即为冲突概率,却没有考虑到每一个时刻。真正的冲突区域只是一个在原始坐标系(没有做任何变换的惯性坐标系)中半径为 R_c ,高度为 H_c 的柱体区域,一系列变换之后,无论是圆柱体区域还是圆柱体区域,都不会改变某一时刻所对应的有限区域。这一点正是Paielli算法中不能计算机动目标的原因。

图4a正是某一时刻对应冲突的真实概率示意图在 xoy 平面上的投影。设矩形与 x 轴的夹角是 θ ,为了调整矩形框的位置使得底边刚好和 x 轴平行,需要将对应的坐标系绕 z 轴旋转 θ ,如图4b所示。旋转矩阵记为

$$R_{zx} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

两架飞机间的距离在 xoy 平面的投影用 l_x 表示, l_x 与 l_y 分别为 l_x 在 x 及 y 轴上的投影, δ_x 为冲突椭圆的半短轴长, δ_y 为冲突椭圆的半长轴长。该正交变换的过程同样不会改变形状和大小,使 xoy 平面上的积分

区域变得更加精确。 x 轴方向上的积分不再是无穷区域的积分,在 x 轴、 y 轴方向上的积分限为 $(l_x - \delta_x, l_x + \delta_x)$ 和 $(l_y - \delta_y, l_y + \delta_y)$ 。

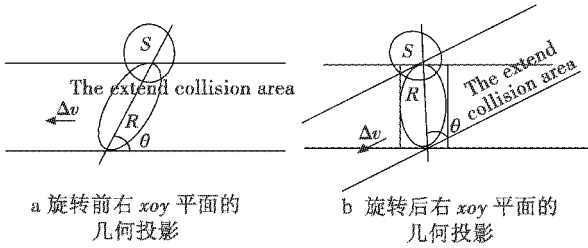


图4 两次旋转变换

Fig. 4 Two rotation transformations

同理,图5表示两架飞机冲突情况在 yoz 面上的投影。

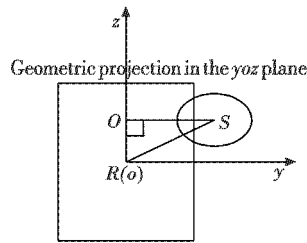


图5 某一时刻对应的冲突在 yoz 平面的几何投影

Fig. 5 Geometric projection in the yoz plane at a time

两架飞机在 z 轴方向上的距离投影记为 l_z ,即 (OR) ,则在 z 方向上的积分区域为 $(l_z - H_c/2, l_z + H_c/2)$ 。

这里的 l_x, l_y, l_z, H_c 通过

$$[l_x \ l_y \ l_z]^T = \mathbf{R}_{zx} \mathbf{R}_y \mathbf{R}_z \mathbf{T} [\Delta x \ \Delta y \ \Delta z]^T \quad (10)$$

求解,其中, $[\Delta x \ \Delta y \ \Delta z]^T$ 表示最初两架飞机距离在大地坐标系各个方向上的投影,解得

$$H_c = 2 * \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}^T \mathbf{h}_{RR} = 2 * \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}^T \mathbf{R}_{zx} \mathbf{R}_y \mathbf{R}_z \mathbf{T} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ h \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中, h 为保护区域高度值。

1.5 概率的计算

由于联合航迹误差在 x, y, z 方向上相互独立,所以计算联合航迹误差随机变量在扩展冲突域内的概率,可以转化为求各个分量概率的乘积。综上所述,冲突概率 P_c 表示为

$$P_c = \int_{l_x - \delta_x}^{l_x + \delta_x} \int_{l_y - \delta_y}^{l_y + \delta_y} \int_{l_z - H_c/2}^{l_z + H_c/2} P(x, y, z) dx dy dz = [\psi(l_x + \delta_x; \cdot) - \psi(l_x - \delta_x; \cdot)] \times [\psi(l_y + \delta_y; \cdot) - \psi(l_y - \delta_y; \cdot)] \times [\psi(l_z + H_c/2; \cdot) - \psi(l_z - H_c/2; \cdot)] \quad (12)$$

式中, $\psi(\cdot)$ 表示标准正态分布的概率分布函数。

2 仿真结果及分析

为了验证算法的有效性,本文实验考虑二维水平

探测的情况,垂直面上的情况暂不考虑。图6是两架飞机相对运动,冲突概率的预测示意图。

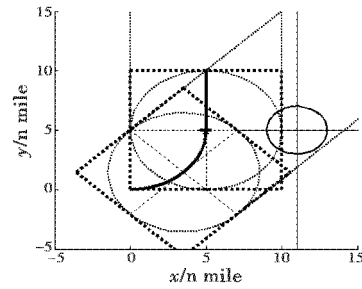


图6 两飞机相对机动示意图

Fig. 6 The schematic diagram of two planes

图6中,比较粗的曲线表示两架飞机的相对运动轨迹,相对发生了 90° 机动,沿飞机航向两侧的直线表示文献[6-8]中提到的扩展冲突域,最右边的小圆表示联合航迹误差的近似。飞机每一时刻对应的冲突区域是其周围5 n mile的范围,在图中是虚线圆显示的部分,大圆(冲突域)和小圆(联合误差)的交集是积分的区域,决定了冲突概率大小。对文献[6-8]方法的改进表现为粗虚线表示的正方形区域,这是因为,既要准确地求取积分,又要方便计算,所以采用正方形区域。

依据上面的算法得到两飞机冲突的概率,如图7所示。

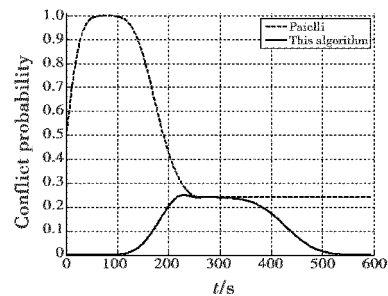


图7 冲突概率

Fig. 7 Conflict probability

图7中:横轴表示向前预测的时间是600 s;纵轴表示预测发生冲突的概率;虚线表示文献[6-8]算法预测的飞机在0~600 s发生冲突的概率;实线表示本文改进算法预测两飞机未来600 s发生冲突的概率。从Paielli算法结果可以看出,在60~110 s之间,两架飞机发生冲突的概率基本为1,也就是必然发生冲突,接着概率又连续下降达到一个稳定的水平。从本文改进算法的结果可以看出,在60~110 s之间两架飞机发生冲突的概率几乎为零,紧接着概率会上升到和文献[6-8]算法相一致的稳定数值。从图7可以看出,改进后的算法得出的概率是正常的、比较准确的,而原始的算法得出的概率在60~100 s时等于1,也就是说,

这一段时间探测的结果是两架飞机必定碰撞。由图6也可以看出,在这个时间段内,两机还远远处在告警范围之外,说明文献[6-8]算法所预测的告警是虚警。因此,改进的算法避免了图7中60~100s时出现的虚警情况,有效地预测了未来600s内冲突发生的概率。

对于预测的概率,依据最大值与阈值比较的结果做告警处理。如果依据文献[6-8]提出的算法,将毫无疑问地发出冲突警告。而依据本文的算法,预测的概率最大值为0.3,这低于告警的阈值,不做报警。

实验是在假设沿航迹方向和垂直航迹方向误差相同,联合误差区域为在圆形区域条件下展开的,该假设在简化运算和处理过程方面是合理的,但是随着预测时间的增加,联合误差区域也应该增加,这表现为圆误差区域的半径在增大,因此,对不同航迹误差的方差情况下的计算是必要的。

图8所示为不同联合航迹误差均方误差下的概率预测结果。

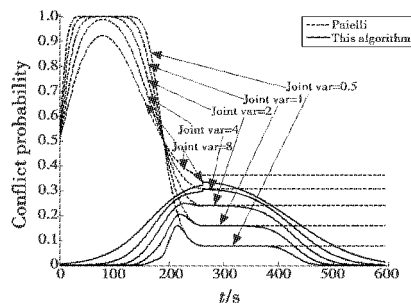


图8 不同联合航迹误差均方误差情况下的概率

Fig. 8 The probability of different joint variance

横轴表示预测的时间,纵轴表示冲突的概率。随着方差逐渐增大,预测冲突概率为1的情况有所下降,但这并不能否定文献[6-8]方法一贯的不足之处,针对这种不足,本文提出的算法预测的概率此时几乎为0,说明文献[6-8]算法对目标相对机动情况下的冲突概率是无法正确预测的,而本文的算法预测的结果与实际分析一致,能有效弥补原始算法不足之处。但是在预测时间很短的情况下,方差会很小,从图8可以看到,随着联合方差从8~0.5依次减小,在200~240s处,有概率过分上扬的表现,这是由积分区域的误差引起的,方差越小,积分区域误差所占比重会越大,因此出现突出上扬,所以对于预测短期冲突的情况,概率有一定误差。

3 结论

考虑到低空航空器临时机动的频繁性,提出了飞机机动情况下同样适用的概率型冲突探测算法。该方法从空间和时间两个维度来考虑冲突概率的求解,将

文献[6-8]提出的方法中扩展冲突域在相对运动方向上的不定积分改为与冲突时间相对应有确定积分上、下限的定积分,不仅考虑到冲突的几何空间要素,而且考虑到冲突发生对应的时间要素,最终更好地反映了冲突概率发生的时间和大小。从结果很容易看出冲突发生的时间,使得算法在控制虚警率方面有明显的改善。

参考文献

- [1] 何桂萍,徐亚军. 基于 TCAS II 和 ADS-B 的组合监视防撞系统研究[J]. 电光与控制, 2011, 18(4): 61-64.
HE G P, XU Y J. Hybrid surveillance and collision avoidance system based on TCAS II and ADS-B[J]. Electronics Optics & Control, 2011, 18(4): 61-64.
- [2] BARHYDT R, WARREN A W. Development of intent information changes to revised minimum aviation system performance standards for automatic dependent surveillance broadcast (RTCA/DO-242A) [M]. Hampton: NASA Langley Research Center, 2002: 2-36.
- [3] KUCCHAR 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.
- [4] 查牧言,冯子亮,罗世谦. 适用于多航路的概率型中期冲突探测方法[J]. 计算机应用, 2010, 30(5): 1406-1409.
ZHA M Y, FENG Z L, LUO S Q. Mid-term conflict detection algorithm of multi-route conflict probability[J]. Journal of Computer Applications, 2010, 30(5): 1406-1409.
- [5] 邓炜,张军,吴限,等. 一种适用于航路改变情况的冲突概率预测算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2005, 31(12): 1327-1331.
DENG W, ZHANG J, WU X, et al. Algorithm of conflict probability prediction for the case of trajectory change [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005, 31(12): 1327-1331.
- [6] PAIELLI A R, ERZBERGER H. Conflict probability estimation generalized to non-level flight [J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1999, 7(3): 195-222.
- [7] PAIELLI A R, ERZBERGER H. Conflict probability estimation for free flight [J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1997, 20(3): 588-596.
- [8] ERZBERGER H, PAIELLI R A, ISAACSON D R, et al. Conflict detection and resolution in the presence of prediction error [C]//The 1st USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar, Saclay, France, 1997: 17-20.

为简洁, 仅与俯仰角和倾斜角在初始时刻的导数 $\dot{\theta}(0)$ 、 $\dot{\gamma}(0)$ 和载体俯仰角 θ_0 有关, 与当地纬度和地球自转角速度无关, 从而取消了对当地纬度的测量需求; 同时, 与文献[2-3]提出的3位置和4位置寻北方法相比较, 本文提出的双位置寻北方法在寻北时间上将大为缩短, 效率更高。

参考文献

- [1] 缪玲娟, 陈家斌. 单激光陀螺捷联寻北系统[J]. 北京理工大学学报, 1997, 17(2): 215-219.
MIAO L J, CHEN J B. On a RLG strapdown north seeking system[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 1997, 17(2): 215-219.
- [2] 李嵘, 白洁雁. 基于 DSP 的全姿态挠性陀螺定北仪的原理与实现[J]. 自动驾驶仪与红外技术, 2002(1): 29-33.
- [3] 党建军, 师为建. 激光捷联惯测装置多位置寻北方案[J]. 弹箭与制导学报, 2006, 26(3): 35-37.
DANG J J, SHI W J. North-seeker based on laser gyroscope strap-down IMU[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2006, 26(3): 35-37.
- [4] TITTERTON D H, WESTON J L. 捷联惯性导航技术[M]. 张天光, 王秀萍, 王丽霞, 等译. 北京: 国防工业出版社, 2007.
TITTERTON D H, WESTON J L. Strapdown inertial navigation technology[M]. Translated by ZHANG T G, WANG X P, WANG L X, et al. Beijing: National Defense Industry Press, 2007.
- (上接第47页)
- [9] PRANDINI M, WATKINS O J. Probabilistic aircraft conflict detection[R]. IST-2001-32460 of European Commission, 2005SC-186, 2005.
- [10] PRANDINI M, HU J H, LYGEROS J, et al. A probabilistic approach to aircraft conflict detection[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems; Special Issue on Air Traffic Control, 2000, 1(4): 199-200.
- [11] 崔德光, 程朋, 耿睿. 空中交通管制自动化中的冲突概率分析[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2000, 40(11): 119-122.
CUI D G, CHENG P, GENG R. Conflict probability analysis of automatic air traffic control[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2000, 40(11): 119-122.
- [12] 陈晨, 崔德光, 程朋. 空中交通管制中改进型冲突探测算法研究与应用[J]. 计算机工程与应用, 2002, 38(19): 250-253.
CHEN C, CUI D G, CHENG P. Research and application of an improved conflict detection algorithm for air traffic control[J]. Computer Engineering and Applications, 2002, 38(19): 250-253.
- [13] BLOM H A P, BAKKER G J. Conflict probability and incrossing probability in air traffic management[J]. Proceeding of the 41st IEEE Conference on Decision and Control, 2002, 3(3): 2421-2462.
- [14] WANG F, YANG M, YANG R. Conflict-probability-estimation-based overtaking for intelligent vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2009, 10(2): 366-370.

声 明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、北京万方数据股份有限公司、重庆维普资讯有限公司等在其网络平台和系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文, 著作权使用费与本刊稿酬一并支付。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意我部上述声明。