



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 107516439 B

(45)授权公告日 2018.05.18

(21)申请号 201710631216.1

(22)申请日 2017.07.28

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 107516439 A

(43)申请公布日 2017.12.26

(73)专利权人 北京航空航天大学
地址 100191 北京市海淀区学院路37号

(72)发明人 曹先彬 杜文博 李宇萌

(74)专利代理机构 北京永创新实专利事务所
11121

代理人 姜荣丽

(51) Int. Cl.
G08G 5/04(2006.01)

(56)对比文件

CN 103973740 A, 2014.08.06,

CN 102572987 A, 2012.07.11,

管详民,吕人力.“基于 满意博弈论的复杂
低空飞行冲突解脱方法”.《航空学报》.2017,第
38卷(第S1期),

审查员 邓薇

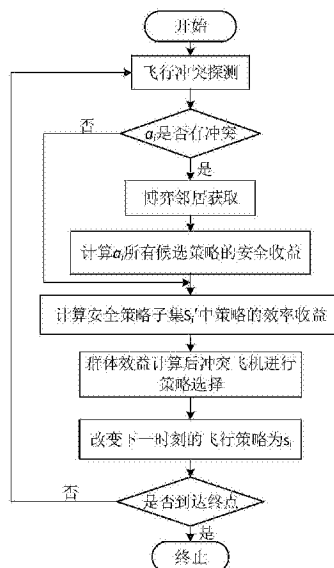
权利要求书4页 说明书6页 附图2页

(54)发明名称

一种基于满意博弈论的飞行器冲突解脱方
法及装置

(57)摘要

本发明提供一种基于满意博弈论的飞行器
冲突解脱方法及装置,所述方法包括冲突检测模
型探测冲突,然后基于满意博弈论,采用博弈邻
居确定模块建立冲突飞机间的博弈邻居,博弈收
益计算模块计算飞机的收益,包括安全收益和效
率收益,最后采用飞行策略选择模块选取飞行策
略冲突解脱。本发明能够处理空域内大量飞行
器之间的冲突解脱问题,算法复杂度低,计算精
度高,可以有效解决复杂环境下的多机冲突问
题。



1. 一种基于满意博弈论的飞行器冲突解脱方法,其特征在于:包括如下步骤,

步骤1:冲突探测模块检测飞机 a_i 是否有冲突,若有冲突执行步骤2;若无冲突转到步骤3;

步骤2:博弈邻居确定模块对飞行空域中的飞机进行优先级排序,得到博弈邻居集合;

步骤3:博弈收益计算模块计算飞机所有候选策略的安全收益,得到安全策略子集 S_i' ;计算安全策略子集 S_i' 中策略的效率收益;计算飞机的群体收益,选择使群体效益最高的策略;

步骤4:飞机 a_i 根据优先级排序顺序,对存在冲突的飞机进行策略选择,并计算飞机 a_i 的个体收益,表示为:

$$F(s_i^n) = \frac{1}{\mu P_S(s_i^n) + \omega E(s_i^n)}$$

其中, μ 和 ω 为常数;

飞机个体在进行策略选择时将 S_i 中安全收益函数 $P_S(s_i^n)$ 最小值所映射的所有单纯策略看成是安全策略,或者次安全策略,这些安全策略组成安全策略子集 S_i' 被表示为:

$$S_i' = \{s \mid s = \arg \min_{s_i^n \in S_i} P_S(s_i^n)\}, S_i' \subset S_i$$

得到安全策略子集 S_i' 后,对此集合的元素计算相应的效率收益,效率收益函数 $E(s_i^n)$ 的最小值对应的单纯策略就成为既能保证安全飞行,又能最大程度的满足飞机个体利益的最优飞行策略,也即为下一时刻飞机 a_i 将采用的飞行策略:

$$s_i = \arg \min_{s_i^n \in S_i'} E(s_i^n)$$

计算过存在冲突的飞机个体收益之后,所有冲突飞机的群体效益表示为:

$$F(s) = \sum_{i=0}^n F(s_i)$$

更新飞机 a_i 的飞行策略;

步骤5:判定飞机是否到达终点,若未到达终点,执行步骤1;若到达终点,结束。

2. 根据权利要求1所述的一种基于满意博弈论的飞行器冲突解脱方法,其特征在于:

所述的冲突包括两种冲突类型:风险接近和碰撞冲突,用 A 来表示整个飞行空域内所有飞机的集合,整个空域内飞机的数量为 M 架,任意一架飞机 a_i 都满足 $a_i \in A, i = 1, \dots, M$;每架飞机都被两个虚拟的圆形保护区环绕,即风险接近区和碰撞冲突区,风险接近区半径 R_{NM} ,碰撞冲突区半径 $R_c, R_{NM} > R_c$;

所述的冲突探测包括飞机间的冲突探测和飞机与障碍物之间的冲突探测,具体探测方法如下:

(1) 飞机间的冲突探测:预测时长用 T_w 表示,利用飞机 a_i 和飞机 a_j 当前飞行状态矢量或意图飞行状态矢量,线性预测未来 T_w 时间内 a_i 和 a_j 的航迹,并计算两架飞机在未来 T_w 时间内的最小距离 $d_{\min}(i, j)$,其中,在飞机 a_i 预测航迹上的最小距离点称为 a_i 相对 a_j 在未来 T_w 时间内的最近接近点,飞机 a_i 的当前位置到 a_i 相对于 a_j 的最近接近点的距离用 $d_{CPA}(i, j)$ 表示;如果 $d(i, j) < R_D$ 且 $d_{\min}(i, j) < R_{NM}$,那么飞机 a_i 和 a_j 之间存在潜在的飞行冲突, a_i 和 a_j 之间的冲突表示成:

$$w_{ij} = (d_{\min}(i, j), d(i, j)) \in W^2$$

在这里, W^2 是一个二维向量空间, 称之为冲突空间; R_D 为探测范围半径, $d(i, j)$ 为飞机 a_i 和 a_j 之间的距离;

(2) 飞机与障碍物间的冲突预测: 预测时长用 T_w 表示, 利用飞机 a_i 和障碍 w_n 当前飞行状态矢量或意图飞行状态矢量, 线性预测未来时间 T_w 内飞机 a_i 的航迹, 并计算飞机在未来 T_w 时间内距离障碍 w_n 的最小距离 $d_{\min}(i, w_n)$; 其中, 在飞机 a_i 预测航迹上距离中心点 w_n 的最小距离点称为 a_i 相对 w_n 在未来 T_w 时间内的最近接近点, 其中障碍物包络半径为 r_c , 最小安全距离半径为 r_{nm} ; 飞机 a_i 的当前位置到 a_i 相对于 w_n 的最近接近点的距离用 $d_{CPA}(i, w_n)$ 表示; 如果 $d_{\min}(i, w_n) < r_{nm}$ 且 $d(i, w_n) < r_c$, 那么飞机 a_i 和障碍 w_n 之间存在潜在的飞行冲突, a_i 和 w_n 之间的冲突表示成:

$$w_{w_n} = (d_{\min}(i, w_n), d(i, w_n)) \in W^2$$

在这里, W^2 是一个二维向量空间, 称之为冲突空间; $d(i, w_n)$ 是飞机 a_i 和障碍 w_n 的距离。

3. 根据权利要求1所述的一种基于满意博弈论的飞行器冲突解脱方法, 其特征在于: 第二步中所述的优先级排序, 按照如下原则:

(1) 首先根据当前位置离目的地的距离, 将所有飞机分成两个子集: 离目的地距离在5海里以内的飞机和离目的地距离大于5海里的飞机; 前一子集拥有较高的优先级;

(2) 其次在根据原则(1)确定的每一个拥有较高的优先级子集中, 飞机根据当前的飞行延误时间进行排序, 有较大延误时间的飞机拥有较高的优先级;

(3) 再次对于根据原则(2)确定的每一个拥有较高的优先级的子集中, 在延误时间相同的情况下, 当前飞行时间越长的飞机拥有较高的优先级;

(4) 最后在具有相同延误时间和飞行时间的同一子集中, 剩余航程计划飞行时间越长的飞机优先级越高;

将最终优先级最高的子集作为飞机的博弈邻居, 组成博弈邻居集合 A_i' 。

4. 根据权利要求1所述的一种基于满意博弈论的飞行器冲突解脱方法, 其特征在于: 所述的安全收益, 通过如下方式计算:

飞机 (a_1, a_2, \dots, a_M) 的下一时刻将要采用的飞行策略 s_i^n 从候选策略集合 S_i 中选取, $S_i = (s_i^1, s_i^2, \dots, s_i^n, \dots, s_i^N)$, $n = 1, \dots, N$, $i = 1, \dots, M$, N 为候选飞行策略集合中飞行策略的总数量, 则飞机 a_i 的采用单纯飞行策略 s_i^n 的安全收益为:

$$P_S(s_i^n) = \sum_{a_j \in A_i'} G(s_i^n, s_j) + \sum W(s_i^n, w_n)$$

这里的 $P_S(s_i^n)$ 只考虑了一级映射; A_i' 表示飞机 a_i 的博弈邻居集合; $G(\cdot)$ 是飞行器冲突等级权重函数, 其定义为:

$$G(s_i^n, s_j) = \begin{cases} 2\alpha, & \text{if } d_{\min}(i, j) \leq R_C \\ \alpha, & \text{if } R_C < d_{\min}(i, j) \leq R_{NM} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

这里的 α 反应了潜在的飞行冲突风险, 定义如下:

$$\alpha = \begin{cases} \left(2 - \frac{d_{\min}(i, j)}{R_{NM}}\right) \left(\frac{1}{d_{CPA}(i, j)}\right)^\beta, & \text{if } d_{CPA}(i, j) \leq 3R_{NM} \\ \left(\frac{1}{d_{CPA}(i, j)}\right)^\beta, & \text{otherwise} \end{cases}$$

参数 β 是权重参数；

$W(s_i^n, w_n)$ 是判定飞机与静态障碍物的冲突等级权重函数，静态障碍的位置中心坐标为 $\overline{w_n}$ ，障碍物包络半径为 r_c ，最小安全距离半径为 r_{nm} ， $W(s_i^n, w_n)$ 定义为：

$$W(s_i^n, w_n) = \begin{cases} 2\rho, & \text{if } d_{\min}(i, w_n) < r_c \\ \rho, & \text{if } r_c < d_{\min}(i, w_n) < r_{nm} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

这里的 ρ 反应了潜在的飞行冲突风险，定义如下：

$$\rho = \begin{cases} \left(2 - \frac{d_{\min}(i, w_n)}{R_{NM}}\right) \left(\frac{1}{d_{CPA}(i, w_n)}\right)^\gamma, & \text{if } d_{CPA}(i, w_n) \leq 3r_{nm} \\ \left(\frac{1}{d_{CPA}(i, w_n)}\right)^\gamma, & \text{otherwise} \end{cases}$$

参数 γ 是权重参数；

所述的效率收益通过如下方式计算：

飞机 a_i 的当前位置坐标为 $L_i^c = (x_i^c, y_i^c)$ ，则 a_i 采用安全策略子集 S_i' 中的任一单纯策略 s_i^n 作为飞行方式，在下一时刻可能到达的位置坐标用 $L_i^c + \overline{s_i^n}$ 来表示， $\overline{s_i^n}$ 是 s_i^n 的向量形式，表示飞行的速率和方向；对于飞机 a_i ，采用单纯策略 $s_i^n (s_i^n \in S_i')$ 的效率收益函数为：

$$E(s_i^n) = P_E(s_i^n) + Q(s_i^n, s_i^{n-1})$$

其中， $P_E(s_i^n)$ 为飞行时间函数，表示为：

$$P_E(s_i^n) = |L_i^c + \overline{s_i^n} - L_i^d|$$

$L_i^p = (x_i^p, y_i^p)$ 是当 a_i 按照飞行计划飞行时，下一时刻的计划位置坐标，表示为：

$$L_i^p = \begin{cases} L_i^c + \frac{\overline{L_i^c L_i^d}}{T_i^p - T_i^c}, & \text{if } T_i^p > T_i^c \\ L_i^d, & \text{otherwise} \end{cases}$$

这里 $L_i^d = (x_i^d, y_i^d)$ 是 a_i 的目的地坐标， T_i^p 是飞机 a_i 按照飞机计划飞行的计划飞行时间， T_i^c 是 a_i 的当前飞行时长， $\overline{L_i^c L_i^d}$ 是从 a_i 的当前位置 L_i^c 到目的地 L_i^d 的距离向量；

$Q(s_i^n, s_i^{n-1})$ 为飞机策略变化消耗函数，表示为：

$$Q(s_i^n, s_i^{n-1}) = \varphi \cdot A_i + \lambda \cdot V_i$$

这里 $A_i \in [0, \theta_i]$ 是角度偏转量， $V_i \in [0, v_i]$ 是速度变化量， θ_i 和 v_i 根据飞行器性能进行异质化设定， φ 和 λ 为常数。

5. 一种基于满意博弈论的飞行器冲突解脱装置，其特征在于：根据权利要求1所述的一

种基于满意博弈论的飞行器冲突解脱方法，

冲突探测模块，用于检测飞机 a_i 是否有冲突；

博弈邻居确定模块，用于确定飞行空域中的冲突飞机的博弈邻居，并进行优先级排序；

博弈收益计算模块，计算飞机所有候选策略的安全收益，得到安全策略子集 S_i' ；计算安全策略子集 S_i' 中策略的效率收益；计算飞机的群体收益，选择使群体效益最高的策略；

飞行策略选择模块，计算使得飞机群体收益最高的冲突解脱参数；

所述的冲突解脱参数包括飞行器的飞行速度调整量和航向角度调整量。

一种基于满意博弈论的飞行器冲突解脱方法及装置

技术领域

[0001] 本发明属于飞行器技术领域,涉及一种冲突解脱方法,具体的说,是指一种基于满意博弈论的飞行器冲突解脱方法及装置。

背景技术

[0002] 在存在已知及未知障碍的场景下,飞机间的飞行冲突解脱是空中交通管理系统中的研究重点,一方面避免飞行中飞机与障碍和飞机间的冲突,飞机间的间隔距离不能小于飞行安全间隔标准(即发生飞行冲突);另一方面在确保飞行安全的前提下,适当缩小飞机间的距离,以及为解决冲突所消耗的能源来提高飞行效率,以支持高密度条件下的安全飞行。因此一套行之有效的飞行冲突解脱方法对于空管安全和效率都至关重要。演化博弈是一个很自然的分析涉及潜在的利益冲突、必须通过个体间的交互协商来进行决策、进而达到群体目标问题的理论框架。

发明内容

[0003] 本发明提供一种基于满意博弈论的飞行器冲突解脱方法,将飞行冲突解脱问题看作是一个多人博弈的过程,在多人博弈过程中,首先要确定博弈的对象,即每架飞机个体的博弈邻居。在每一轮博弈过程中,飞机个体的博弈邻居是通过它的潜在冲突集合以及集合中飞机个体的优先级排序确定的。优先级划分体现了飞机个体在冲突解脱过程中的“社会地位”,具有较高优先级的飞机个体更倾向于考虑自身的利益,较低优先级飞机更倾向于考虑整体的效益。

[0004] 具体的,所述的基于满意博弈论的飞行器冲突解脱方法,包括如下步骤:

[0005] 步骤1:冲突探测模块检测飞机 a_i 是否有冲突,若有冲突执行步骤2;若无冲突转到步骤3;

[0006] 步骤2:博弈邻居确定模块对飞行空域中的飞机进行优先级排序;

[0007] 步骤3:博弈收益计算模块计算飞机所有候选策略的安全收益,得到安全策略子集 S_i' ;计算安全策略子集 S_i' 中策略的效率收益;计算飞机的群体收益,选择使群体效益最高的策略;

[0008] 步骤4:更新飞机 a_i 的飞行策略;

[0009] 步骤5:判定飞机是否到达终点,若未到达终点,执行步骤1;若到达终点,结束。

[0010] 本发明还提供一种基于满意博弈论的飞行器冲突解脱装置,包括:

[0011] 冲突探测模块,用于检测飞机 a_i 是否有冲突;

[0012] 博弈邻居确定模块,用于确定飞行空域中的冲突飞机的博弈邻居,并进行优先级排序;

[0013] 博弈收益计算模块,计算飞机所有候选策略的安全收益,得到安全策略子集 S_i' ;计算安全策略子集 S_i' 中策略的效率收益;计算飞机的群体收益,选择使群体效益最高的策略;

[0014] 飞行策略选择模块,计算使得飞机群体收益最高的冲突解脱参数。

[0015] 本发明的优点在于:

[0016] (1) 本发明针对空中交通高密度、高复杂度的状况,通过挖掘飞行器协同飞行的内在机理,提取飞行特征规则,指导飞行冲突自主解脱,这对于飞行冲突的解决是一个全新的方案。

[0017] (2) 本发明围绕密集飞行条件下的自主冲突解脱,从提高空中交通系统安全性和高效性两方面出发,开展飞行冲突自主解脱方法研究。对于确保飞行安全,增加空域容量,减少航班延误,降低飞行成本,提高空中交通系统运行效率具有重要意义。

附图说明

[0018] 图1为飞机飞行的探测范围、风险接近区和碰撞冲突区示意图。

[0019] 图2为飞机间航迹预测的最近接近点示意图。

[0020] 图3为飞机与障碍物间航迹预测的最近接近点示意图。

[0021] 图4为本发明的冲突探测与解脱博弈模型实施方案流程图。

具体实施方式

[0022] 下面结合附图和实施例对本发明进行详细说明。

[0023] 本发明提供一种基于满意博弈论的飞行器冲突解脱方法,如图4所示流程,所述飞行器冲突解脱方法包括如下步骤:

[0024] 第一步,冲突探测模块进行冲突探测。

[0025] 飞行冲突探测采用确定型的线性外推法,即通过对当前飞机的状态在未来时间内的投影直接得到未来某一时刻的状态,并不考虑不确定因素的影响。

[0026] 本发明中定义了两种冲突类型:风险接近(near miss)和碰撞冲突(collision)。用A来表示整个飞行空域内所有飞机的集合,整个空域内飞机的数量为M架,任意一架飞机 a_i ($i=1, \dots, M$) 都满足 $a_i \in A$ 。每架飞机都被两个虚拟的圆形保护区环绕,即风险接近区和碰撞冲突区,风险接近区半径 R_{NM} ,碰撞冲突区半径 R_C , $R_{NM} > R_C$,如图1所示。

[0027] (1) 飞机间的冲突探测:结合图2,预测时长用 T_w 表示,利用飞机 a_i 和飞机 a_j 当前飞行状态矢量或意图飞行状态矢量,线性预测未来 T_w 时间内 a_i 和 a_j 的航迹,并计算两架飞机在未来 T_w 时间内的最小距离 $d_{\min}(i, j)$ 。其中,在飞机 a_i (或 a_j)预测航迹上的最小距离点称为 a_i (或 a_j)相对 a_j (或 a_i)在未来 T_w 时间内的最近接近点(the closest point of approach, CPA),如图2所示。飞机 a_i (或 a_j)的当前位置到 a_i (或 a_j)相对于 a_j (或 a_i)的最近接近点的距离用 $d_{CPA}(i, j)$ (或 $d_{CPA}(j, i)$)表示。如果 $d(i, j) < R_D$ 且 $d_{\min}(i, j) < R_{NM}$,那么飞机 a_i 和 a_j 之间存在潜在的飞行冲突, a_i 和 a_j 之间的冲突表示成:

[0028] $w_{ij} = (d_{\min}(i, j), d(i, j)) \in W^2$

[0029] 在这里, W^2 是一个二维向量空间,称之为冲突空间。 R_D 为探测范围半径, $d(i, j)$ 为飞机 a_i 和 a_j 之间的距离。

[0030] (2) 飞机与障碍物间的冲突预测:预测时长用 T_w 表示,利用飞机 a_i 和障碍 w_n 当前飞行状态矢量或意图飞行状态矢量,线性预测未来时间 T_w 内飞机 a_i 的航迹,并计算飞机在未来 T_w 时间内距离障碍 w_n 的最小距离 $d_{\min}(i, w_n)$ 。其中,在飞机 a_i 预测航迹上距离中心点 w_n 的最小

距离点称为 a_i 相对 w_n 在未来 T_w 时间内的最近接近点(the closest point of approach, CPA),如图3所示,其中障碍物包络半径为 r_c ,最小安全距离半径为 r_{nm} 。

[0031] 飞机 a_i 的当前位置到 a_i 相对于 w_n 的最近接近点的距离用 $d_{CPA}(i, w_n)$ 表示。如果 $d_{min}(i, w_n) < r_{nm}$ 且 $d(i, w_n) < r_c$,那么飞机 a_i 和障碍 w_n 之间存在潜在的飞行冲突, a_i 和 w_n 之间的冲突表示成:

$$[0032] \quad w_{i w_n} = (d_{min}(i, w_n), d(i, w_n)) \in W^2$$

[0033] 在这里, W^2 是一个二维向量空间,称之为冲突空间。 $d(i, w_n)$ 是飞机 a_i 和障碍 w_n 的距离。

[0034] 如果检测到存在冲突,则执行第二步,否则执行第三步。

[0035] 第二步,博弈邻居确定模块根据探测半径范围内的静态动态障碍,进行优先级排序。

[0036] (1)首先根据当前位置离目的地的距离,将所有飞机分成两个子集:离目的地距离在5海里以内的飞机和离目的地距离大于5海里的飞机。前一子集拥有较高的优先级;

[0037] (2)其次在(1)的每一个拥有较高的优先级子集中,飞机根据当前的飞行延误时间进行排序,有较大延误时间的飞机拥有较高的优先级;

[0038] (3)再次对于(2)的每一个拥有较高的优先级的子集中,在延误时间相同的情况下,当前飞行时间越长的飞机拥有较高的优先级;

[0039] (4)最后在具有相同延误时间和飞行时间的同一子集中,剩余航程计划飞行时间越长的飞机优先级越高。

[0040] 将最终优先级最高的子集作为飞机的博弈邻居,组成博弈邻居集合 A_i' 。

[0041] 第三步,飞机确定博弈邻居后,博弈收益计算模块计算各飞机的收益,所述的收益包括安全收益和效率收益。

[0042] (1)安全收益。

[0043] 飞机 (a_1, a_2, \dots, a_M) 的下一时刻将要采用的飞行策略 s_i^n 从候选策略集合 S_i 中选取, $S_i = (s_i^1, s_i^2, \dots, s_i^N)$, $n = 1, \dots, N$, $i = 1, \dots, M$, N 为候选飞行策略集合中飞行策略的总数量,则飞机 a_i 的采用单纯飞行策略 s_i^n 的安全收益为:

$$[0044] \quad P_S(s_i^n) = \sum_{a_j \in A_i'} G(s_i^n, s_j) + \sum W(s_i^n, w_n)$$

[0045] 这里的 $P_S(s_i^n)$ 只考虑了一级映射; A_i' 表示飞机 a_i 的博弈邻居集合; $G(\cdot)$ 是飞行器冲突等级权重函数,其定义为:

$$[0046] \quad G(s_i^n, s_j) = \begin{cases} 2\alpha, & \text{if } d_{min}(i, j) \leq R_C \\ \alpha, & \text{if } R_C < d_{min}(i, j) \leq R_{NM} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

[0047] 这里的 α 反应了潜在的飞行冲突风险,定义如下:

$$[0048] \quad \alpha = \begin{cases} \left(2 - \frac{d_{min}(i, j)}{R_{NM}}\right) \left(\frac{1}{d_{CPA}(i, j)}\right)^\beta, & \text{if } d_{CPA}(i, j) \leq 3R_{NM} \\ \left(\frac{1}{d_{CPA}(i, j)}\right)^\beta, & \text{otherwise} \end{cases}$$

[0049] 参数 β 是权重参数,范围在 $[0,1]$ 区间内可调。 $d_{\min}(i,j)$ 和 $d_{CPA}(i,j)$ 可以通过冲突探测的冲突空间 W^2 计算得到。

[0050] $W(s_i^n, w_n)$ 是判定飞机与静态障碍物的冲突等级权重函数,静态障碍物的位置中心坐标为 $\overline{w_n}$,障碍物包络半径为 r_c ,最小安全距离半径为 r_{nm} , $W(s_i^n, w_n)$ 可定义为:

$$[0051] \quad W(s_i^n, w_n) = \begin{cases} 2\rho, & \text{if } d_{\min}(i, w_n) < r_c \\ \rho, & \text{if } r_c < d_{\min}(i, w_n) < r_{nm} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

[0052] 这里的 ρ 反应了潜在的飞行冲突风险,定义如下:

$$[0053] \quad \rho = \begin{cases} \left(2 - \frac{d_{\min}(i, w_n)}{R_{NM}}\right) \left(\frac{1}{d_{CPA}(i, w_n)}\right)^\gamma, & \text{if } d_{CPA}(i, w_n) \leq 3r_{nm} \\ \left(\frac{1}{d_{CPA}(i, w_n)}\right)^\gamma, & \text{otherwise} \end{cases}$$

[0054] 参数 γ 是权重参数,范围在 $[0,1]$ 区间内可调。 $d_{\min}(i, w_n)$ 和 $d_{CPA}(i, w_n)$ 可以通过冲突探测的冲突空间 W^2 计算得到。

[0055] 根据以上计算,能够看出安全收益函数 $P_S(s_i^n)$ 的值越小,其映射的单纯策略飞行冲突风险越小。

[0056] (2) 效率收益。

[0057] 飞机 a_i 的当前位置坐标为 $L_i^c = (x_i^c, y_i^c)$,则 a_i 采用安全策略子集 S_i' 中的任一单纯策略 s_i^n 作为飞行方式,在下一时刻可能到达的位置坐标可以用 $L_i^c + \overline{s_i^n}$ 来表示, $\overline{s_i^n}$ 是 s_i^n 的向量形式,表示飞行的速率和方向。对于飞机 a_i ,采用单纯策略 $s_i^n (s_i^n \in S_i')$ 的效率收益函数为:

$$[0058] \quad E(s_i^n) = P_E(s_i^n) + Q(s_i^n, s_i^{n-1})$$

[0059] 其中, $P_E(s_i^n)$ 为飞行时间函数,可以表示为:

$$[0060] \quad P_E(s_i^n) = |L_i^c + \overline{s_i^n} - L_i^p|$$

[0061] $L_i^p = (x_i^p, y_i^p)$ 是当 a_i 按照飞行计划飞行时,下一时刻的计划位置坐标,可以表示为:

$$[0062] \quad L_i^p = \begin{cases} L_i^c + \frac{\overline{L_i^c L_i^d}}{T_i^p - T_i^c}, & \text{if } T_i^p > T_i^c \\ L_i^d, & \text{otherwise} \end{cases}$$

[0063] 这里 $L_i^d = (x_i^d, y_i^d)$ 是 a_i 的目的地坐标, T_i^p 是飞机 a_i 按照飞机计划飞行的计划飞行时间, T_i^c 是 a_i 的当前飞行时长, $\overline{L_i^c L_i^d}$ 是从 a_i 的当前位置 L_i^c 到目的地 L_i^d 的距离向量。

[0064] $Q(s_i^n, s_i^{n-1})$ 为飞机策略变化消耗函数,可以表示为:

$$[0065] \quad Q(s_i^n, s_i^{n-1}) = \varphi \cdot A_i + \lambda \cdot V_i$$

[0066] 这里 $A_i \in [0, \theta_i]$ 是角度偏转量, $V_i \in [0, v_i]$ 是速度变化量, θ_i 和 v_i 可以根据飞行器性能进行异质化设定, φ 和 λ 为常数,可以根据飞行器特点和管制要求进行设定。

[0067] 根据以上计算,能够看出效率收益函数 $E(s_i^n)$ 的值越小,采用其映射的单纯策略作

为飞行策略越接近飞行计划安排,以保证依照飞行计划准时到达目的地,并且消耗的能源也越小。

[0068] 第四步,飞行策略选择模块根据博弈收益计算模块的计算结果,计算使得飞行器群体收益最高的冲突解脱参数。冲突解脱参数包括飞行器的飞行速度调整量、航向角度调整量。

[0069] 飞机 a_i 根据优先级排序顺序,对存在冲突的飞机进行策略选择,并计算飞机 a_i 的个体收益,可表示为:

$$[0070] \quad F(s_i^n) = \frac{1}{\mu P_S(s_i^n) + \omega E(s_i^n)}$$

[0071] 其中, μ 和 ω 为常数,可以根据飞行器特点和管制要求进行设定,通常情况下设定 $\mu \geq \omega$ 。

[0072] 飞机个体在进行策略选择时将 S_i 中安全收益函数 $P_S(s_i^n)$ 最小值所映射的所有单纯策略看成是安全策略,或者次安全策略(在 $P_S(s_i^n)=1(n=1, \dots, N)$ 不存在的情况下),这些安全策略组成安全策略子集 S_i' 被表示为:

$$[0073] \quad S_i' = \{s \mid s = \arg \min_{s_i^n \in S_i} P_S(s_i^n)\}, S_i' \subset S_i$$

[0074] 得到安全策略子集 S_i' 后,对此集合的元素计算相应的效率收益,效率收益函数 $E(s_i^n)$ 的最小值对应的单纯策略就成为既能保证安全飞行,又能最大程度的满足飞机个体利益的最优飞行策略,也即为下一时刻飞机 a_i 将采用的飞行策略:

$$[0075] \quad s_i = \arg \min_{s_i^n \in S_i'} E(s_i^n)$$

[0076] 计算过存在冲突的飞机个体收益之后,所有冲突飞机的群体效益可以表示为:

$$[0077] \quad F(s) = \sum_{i=0}^n F(s_i)$$

[0078] 假设整个空域中集合A中的所有飞机个体优先级排序为 $a_1 > a_2 > \dots > a_m$, a_1 有最高优先级,所以 a_1 的博弈邻居集合 $A_1' = \emptyset$,这样它的所有单纯策略所映射的安全收益 $P_S(s_1^n) = 0, \forall s_1^n \in S_1 (n=1, \dots, N)$,那么 a_1 的安全策略子集 $S_1' = S_1$,这样就可以通过计算 a_1 的个体收益 $F(s_1)$,得到下一时刻将采取的最优飞行策略 s_1 并在最优策略基础上选择满意策略集 $\{s_1'\}$;

若当前策略为改变飞行角度,则选择当前飞行方向改变最小偏移角度 $Ang_i = \pm \frac{\theta_i}{m}$ 为

满意策略;若当前策略为改变飞行速度,则选择在当前速度改变最小速度 $V_i = \pm \frac{v_i}{n}$ 为满意

策略。计算满意策略 s_1' 下的个体收益 $F(s_1')$,下一时刻 a_1 的满意策略集为 $\{s_1'\}$,可以得到 a_1 的个体满意收益集合 $\{F(s_1)'\}$ 。 m, n 为常数,可以根据飞机特性设定。按照优先级顺序, a_2 的优先级仅低于 a_1 ,而高于其它所有飞机,如果 a_1 和 a_2 无冲突风险,那么 $A_2' = \emptyset$,与 a_1 的计算方式相同,得到 a_2 的个体收益集合 $F(s_2)$;若 a_1 和 a_2 存在冲突风险, a_2 的博弈邻居集合 $A_2' = \{a_1\}$,优先计算 a_1 选择最优飞行策略 s_1 下 a_2 的个体收益 $F(s_2)$ 。其次根据 a_1 的满意策略集 $\{s_1'\}$ 计算得到 a_2 下一时刻的对应飞行策略的个体收益 $\{F(s_2)'\}$ 。冲突范围内所有飞机都完成满意策略集确认后,从优先级最高的飞机开始选择策略,通过比较不同选择下的群体收益 $F(s)$,根

据 $F(s)$ 的最大值确定所有冲突飞机的飞行策略,并将结果输出。

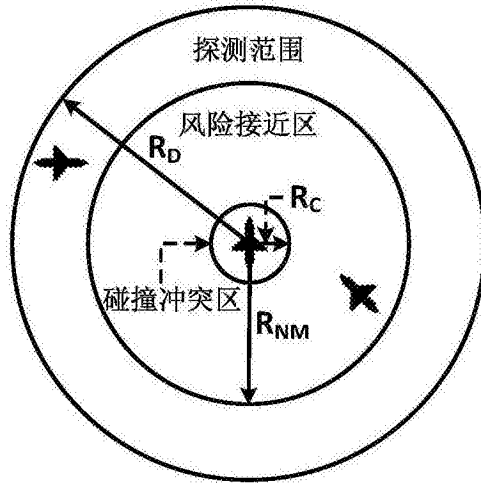


图1

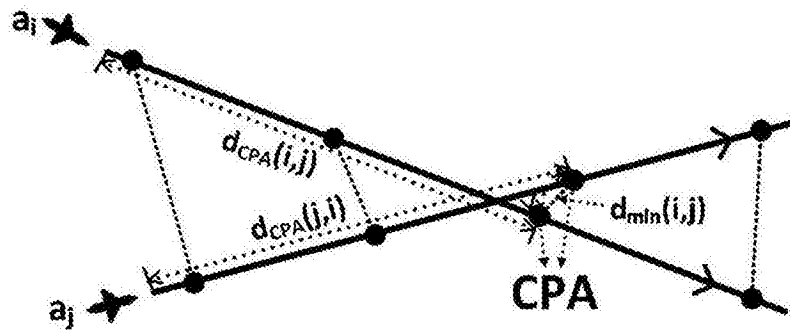


图2

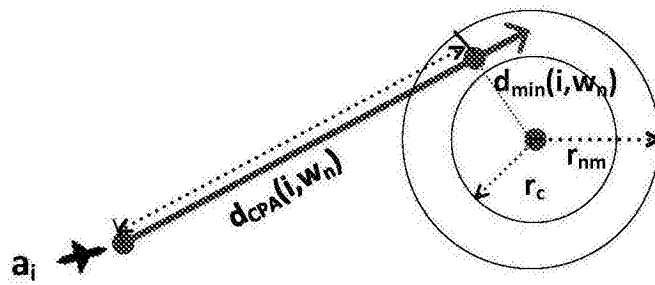


图3

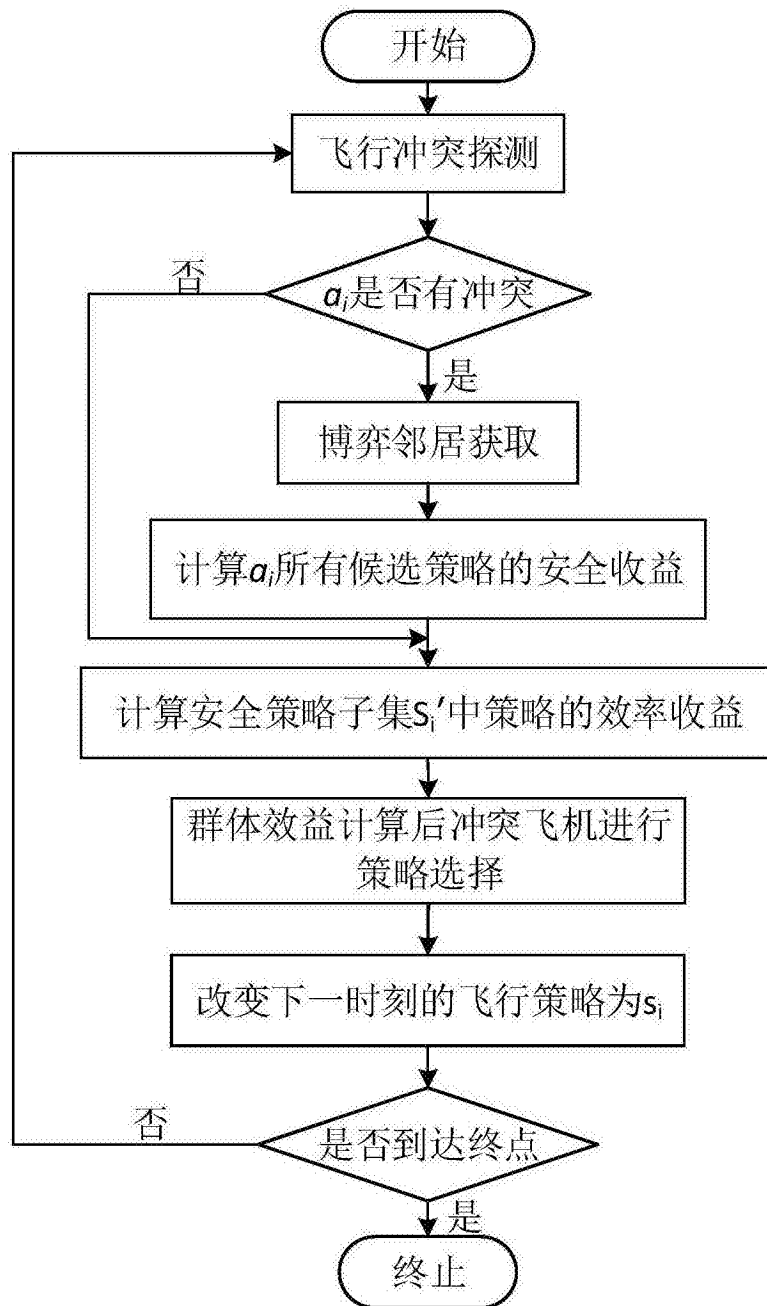


图4