



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 112987784 A

(43) 申请公布日 2021.06.18

(21) 申请号 202110215841.4

(22) 申请日 2021.02.26

(71) 申请人 辽宁工程技术大学

地址 125105 辽宁省葫芦岛市龙湾南大街
188号

(72) 发明人 郭羽含 刘永武 丁文婧 张宇
于俊宇 姜彦吉

(74) 专利代理机构 沈阳东大知识产权代理有限公司 21109

代理人 李在川

(51) Int. Cl.

G05D 1/10 (2006.01)

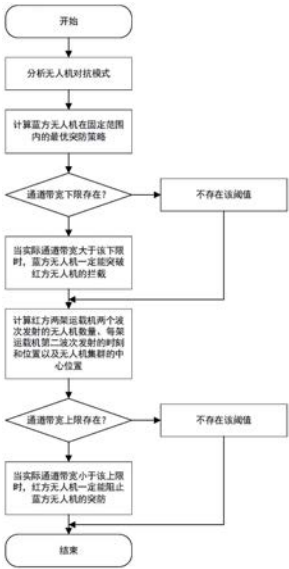
权利要求书4页 说明书14页 附图11页

(54) 发明名称

一种针对无人机集群协同对抗的决策方法

(57) 摘要

本发明提供一种针对无人机集群协同对抗的决策方法。首先通过分析无人机的对抗模式确定出固定范围内的最优突防策略,其次判断是否存在一个通道宽度的下限使得蓝方能突防成功,判断是否存在一个通道宽度的上限,在这种情况下无论蓝方无人机采用什么样的突防策略,红方无人机集群均存在相应的拦截策略,并且还确定出了红方两架运载机两个波次发射的无人机数量、每架运载机第二波次发射的时刻和位置以及第二波次发射的无人机集群的中心位置,以实现最优的拦截效果,本发明对无人机飞行中的几何问题进行清晰完整的建模,很好的解决了无人机博弈问题,保证了红方无人机的最优拦截效果。



1. 一种针对无人机集群协同对抗的决策方法,其特征在于,包括:

步骤1:分析蓝方突防无人机与红方拦截无人机的对抗模式;

步骤2:当蓝方无人机从通道宽度的中心位置Q水平方向突袭时,判断是否存在一个通道宽度M的下限 M_{\min} ,当实际通道宽度M比 M_{\min} 大时,蓝方无人机一定能突破红方无人机集群的拦截;

步骤3:为防止蓝方无人机的突防,从红方无人机的角度计算红方两架运载机两个波次发射的无人机数量、每架运载机第二波次发射的时刻和位置以及第二波次发射的无人机集群的中心位置,以实现最优的拦截效果;

步骤4:判断是否存在一个通道宽度的上限 M_{\max} ,当实际通道宽度M小于 M_{\max} 时,无论蓝方无人机采用什么样的突防策略,红方无人机集群均存在相应的拦截策略,在区域ABCD内成功阻止蓝方无人机的突防,由于红方无人机在飞行总时间内的飞行距离必定等于最佳拦截

距离,则 $d=d_2$,即 $M = 2L \tan \left(2 \arctan \frac{d}{L} \right)$;

当 $M=M_{\max}$, $d=d_2$ 时,计算出通道宽度的上限 $M_{\max} = 2L \tan \left(2 \arctan \frac{d_2}{L} \right)$,

其中,L表示攻击纵深,M表示通道宽度,d表示红方无人机集群的捕捉距离, d_2 表示红方无人机的最远飞行距离。

2. 根据权利要求1所述的一种针对无人机集群协同对抗的决策方法,其特征在于,所述步骤1包括:

步骤1.1:根据红方无人机集群中任意两架无人机FY0101、FY0102的拦截域,确定任意两架无人机的拦截半径OP,其中O表示红方无人机围成的集群圆周的圆心,P表示无人机FY0101的拦截域与无人机FY0102的拦截域的交点;

步骤1.2:以点O为圆心、OP为半径所形成的圆形区域即为红方无人机集群形成的最大拦截域 S_F ,集群中的所有无人机成圆形阵列排列;

步骤1.3:以点O为圆心、 R_v 为半径所形成的圆形区域即为红方无人机集群在当前时刻t形成的最大捕捉半径 R_v ,即最大捕捉域的圆周半径,

$$R_v = r + V_p * t$$

式中, V_p 为红方无人机的速度,r为红方无人集群的拦截域 S_F 的圆周半径;

步骤1.4:根据蓝方无人机的飞行方向确定红方无人机集群的拦截区域。

3. 根据权利要求2所述的一种针对无人机集群协同对抗的决策方法,其特征在于,所述步骤1.4包括:

步骤1.4.1:以点B为坐标原点建立集群对抗的直角坐标系,以点B为起点沿x轴正方向作线段BC,线段BC的长度根据攻击纵深L确定,以点C为起点沿Y轴正方向作线段CD,线段CD的长度根据通道宽度M确定,以点D为起点作平行于X轴的线段DA,且满足点ABCD构成矩形的攻击泳道,其中C、D点坐标分别为 $C(x_c, y_c)$ 、 $D(x_D, y_D)$,线段CD为蓝方突破线;

步骤1.4.2:如果蓝方无人机沿水平方向飞行,则拦截区域内所有点横坐标的取值范围为 $x \in [x_{pe}, x_{G1}]$,拦截区域内所有点纵坐标的取值范围为

$y \leq \frac{x_{G1} - x_{pe}}{y_{pe} - y_{G1}} \times x + y_D - \frac{x_{G1} - x_{pe}}{y_{pe} - y_{G1}} x_D$ 且 $(x_{G1} - x_{pe})^2 + (y_{G1} - y_{pe})^2 \geq R_v^2$, (x_{G1}, y_{G1}) 表示其中一个红方无人机集群所在集群圆周的圆心 $G1$, (x_{G2}, y_{G2}) 表示另一个红方无人机集群所在集群圆周的圆心 $G2$, (x_{pe}, y_{pe}) 表示蓝方无人机在水平方向上的飞行路线与红方无人机拦截域 S_F 相切时的一切点 Pe ;

步骤1.4.3: 如果蓝方无人机的飞行方向不是水平方向, 计算蓝方无人机的飞行路线与红方无人机拦截域 S_F 相切时的切线方程分别为:

$$y = \frac{x_{G1} - x_{pe}}{y_{pe} - y_{G1}} \times x + y_{pe} - \frac{x_{pe} \times x_{G1} - x_{pe}^2}{y_{pe} - y_{G1}} \text{ 或 } y = \frac{x_{G1} - x_{pe}}{y_{pe} - y_{G1}} \times x + y_D - \frac{x_{G1} - x_{pe}}{y_{pe} - y_{G1}} x_D$$

则拦截区域内所有点横坐标的取值范围为 $x \in \left[x_{G1} - V_E \times t \times \cos \tan^{-1} \frac{x_{G1} - x_{pe}}{y_{pe} - y_{G1}}, x_{G1} \right]$, 拦截

区域内所有点纵坐标的取值范围为 $y \geq \frac{x_{G1} - x_{pe}}{y_{pe} - y_{G1}} \times x + y_{pe} - \frac{x_{pe} \times x_{G1} - x_{pe}^2}{y_{pe} - y_{G1}}$ 且

$$y \leq \frac{x_{G1} - x_{pe}}{y_{pe} - y_{G1}} \times x + y_D - \frac{x_{G1} - x_{pe}}{y_{pe} - y_{G1}} x_D \text{。}$$

4. 根据权利要求1所述的一种针对无人机集群协同对抗的决策方法, 其特征在于, 所述步骤2包括:

步骤2.1: 根据蓝方无人机开始攻击的初始位置 Q , 确定两个红方无人机集群开始捕捉的初始位置 $G1, G2$, 假设红方无人机的初始位置 Q 位于泳道边界 AB 的中点, 红方无人机的拦截轨迹为垂直于线段 QD 或者垂直于线段 QC 或者垂直于线段 $QQ1$ 方向飞行, 则满足垂线段 $G1Q1 = Q2G1$ 的 $G1$ 点位置即为其中一个红方无人机集群的圆心位置, 满足线段 $G1Q1 = Q1G2$ 的 $G2$ 点位置即为另一个红方无人机集群的圆心位置, 则蓝方无人机的最优飞行策略为沿着线段 $QQ1$ 方向进行水平突破, 或者沿着线段 QD 方向向泳道右上角 D 突破, 或者沿着线段 QC 方向向泳道右下角 C 突破;

步骤2.2: 计算红方无人机集群的最短捕捉时间 $t4$,

$$t4 = \frac{L}{V_E}$$

式中, V_E 为蓝方无人机的速度;

步骤2.3: 计算红方无人机集群的捕捉距离 d ,

$$d = L \times \tan\left(\frac{\arctan \frac{M}{2L}}{2}\right)$$

步骤2.4: 由于红方无人机集群需要在 $t4$ 时刻内到达捕捉距离终点位置, 因此:

$$r + V_p \times t4 \geq d$$

步骤2.5: 确定通道宽度 M 的取值范围, 判断是否存在一个通道宽度的下限, 使得蓝方无人机一定能突破红方无人机集群的拦截,

$$M \leq 2L \times \tan \left[2 \arctan \left(\frac{rs \times \cos \frac{\theta}{2} + rs \times \sin \frac{\theta}{2} \times \tan \left(\arccos \left(\frac{rs \times \sin \frac{\theta}{2}}{l1} \right) \right)}{L} \right) + \frac{V_P}{V_E} \right]$$

式中,rs表示红方无人机集群圆周的半径, θ 表示相邻两个红方无人机与集群圆心O形成的夹角,l1表示红方无人机距点P的距离。

5.根据权利要求1所述的一种针对无人机集群协同对抗的决策方法,其特征在于,所述步骤3包括:

步骤3.1:计算红方无人机的最短拦截时间T:

$$T = \frac{L}{V_E}$$

步骤3.2:第一波次的红方无人机在对抗伊始被发射,根据第二波次无人机的发射时刻将拦截情况分为三种:

第一种情况,第二波红方无人机在对抗伊始也被发射,发射后其行驶距离 l_x 加上拦截半径r和部署距离 l_b 之和与预设的安全距离 L_y 进行比较,所述部署距离为运载机到集群圆心的距离,当满足 $(l_x + r + l_b) \geq L_y$ 时,表明红方无人机已经行驶至安全距离,拦截过程结束,对应的拦截时间段为 $[0, t1)$,t1表示红色无人机初始位置飞行至拦截点时的时间,当红方无人机运行至t1时仍未到达拦截距离,则考虑第二种情况;

第二种情况,当运载机与第一波红方无人机的距离达到预设的最大约束距离时,调节运载机的发射时间改变第二波红方无人机的发射位置,如果发射位置超过最大约束距离时,将考虑第三种情况,第二种情况对应的拦截时间段为 $[t1, t1+t2]$,t2表示运载机由初始位置飞行到最远递送距离时的时间;

第三种情况,若运载机已达到最远递送距离(根据安全距离的最大值确定最远递送距离)时将第二波红方无人机发射出去,若发射后第二波无人机在飞过第一种情况对应的时间段仍未到达拦截点时,则应继续以 V_p 速度向前移动,第三种情况对应的拦截时间段为 $[t1+t2, t3]$,t3表示红方无人机的飞行总时长;

步骤3.3:计算最远拦截距离d2与当前时间t的函数关系,确定情况下对应的时间段:

$$d2 = \begin{cases} l_b + t * V_p + r & t \in [0, t1) \\ L_y + V_y \times (t - t1) & t \in [t1, t1+t2] \\ L_y + V_y \times (t2) + V_p (t - t1 - t2) & t \in [t1+t2, t3] \end{cases}$$

式中, V_y 表示运载机的速度,r表示红方无人机的拦截半径;

$$\text{其中, } t1 = \frac{L_y - l_b - r}{V_p}, \quad t2 = \frac{\sqrt{l_b^2 - (l_{g1} + rs)^2} + \sqrt{(l_{g2} + rs)^2 - (l_{g1} + rs)^2}}{(V_y - V_p)},$$

$$t3 = \frac{L - V_y \times (t2) - l_b - L_y}{V_p}, l_{g1} \text{ 表示运载机与红方无人机之间约束距离的最小值, } l_{g2} \text{ 表示运}$$

载机与红方无人机之间约束距离的最大值;

步骤3.4:根据红方无人机集群内无人机数量与拦截半径r的关系确定每个波次需要发射的无人机数量;

$$r = rs \cos \frac{\theta}{2} + \sqrt{(PS1)^2 - \left(\frac{K}{2}\right)^2}$$

式中,PS1表示红方无人机所在位置S1与交点P之间的距离,K表示任意两个红方无人机之间的距离。

一种针对无人机集群协同对抗的决策方法

技术领域

[0001] 本发明涉及智能作战技术领域,具体涉及一种针对无人机集群协同对抗的决策方法。

背景技术

[0002] 目前,无人机集群技术已经演化为航空工业的核心技术之一,表现出巨大的应用潜力,尤其是在军事应用领域。无人机集群的灵活组织与运用,离不开科学的体系架构设计,不同的架构设计又牵引着不同的技术路线和方向,影响着无人机集群的任务规划、协同决策和实际效益。在多无人机协同对抗中,无人机集群是多无人机的高阶形式,对应的拦截任务也更为复杂。

[0003] 随着各国在无人机领域投入研究的深入,无人机的对抗问题成了一个具有重大意义的课题。与传统的博弈模型相比,无人机对抗博弈模型中涉及到较为复杂的几何问题。对无人机飞行中的几何问题进行清晰完整的建模,是解决无人机博弈问题的关键。在考虑无人机的集群协同对抗时,集群的拦截可以看作任意两架无人机在某一方向上对敌方无人机的拦截。进攻方希望突破防守方的拦截,成功抵达目的地实行军事行动,而防守方则希望在给定的区域内完成对进攻方的拦截,阻止进攻方的突防。

发明内容

[0004] 针对现有技术的不足,本发明提出一种针对无人机集群协同对抗的决策方法,包括:

[0005] 步骤1:分析蓝方突防无人机与红方拦截无人机的对抗模式;

[0006] 步骤2:当蓝方无人机从通道宽度的中心位置Q水平方向突袭时,判断是否存在一个通道宽度M的下限 M_{\min} ,当实际通道宽度M比 M_{\min} 大时,蓝方无人机一定能突破红方无人机集群的拦截;

[0007] 步骤3:为防止蓝方无人机的突防,从红方无人机的角度计算红方两架运载机两个波次发射的无人机数量、每架运载机第二波次发射的时刻和位置以及第二波次发射的无人机集群的中心位置,以实现最优的拦截效果;

[0008] 步骤4:判断是否存在一个通道宽度的上限 M_{\max} ,当实际通道宽度M小于 M_{\max} 时,无论蓝方无人机采用什么样的突防策略,红方无人机集群均存在相应的拦截策略,在区域ABCD内成功阻止蓝方无人机的突防,由于红方无人机在飞行总时间内的飞行距离必定等于最佳

拦截距离,则 $d=d_2$,即 $M = 2L \tan \left(2 \arctan \frac{d}{L} \right)$;

[0009] 当 $M=M_{\max}$, $d=d_2$ 时,计算出通道宽度的上限 $M_{\max} = 2L \tan \left(2 \arctan \frac{d_2}{L} \right)$,

[0010] 其中,L表示攻击纵深,M表示通道宽度,d表示红方无人机集群的捕捉距离, d_2 表示红方无人机的最远飞行距离。

[0011] 所述步骤1包括:

[0012] 步骤1.1:根据红方无人机集群中任意两架无人机FY0101、FY0102的拦截域,确定任意两架无人机的拦截半径 OP ,其中 O 表示红方无人机围成的集群圆周的圆心, P 表示无人机FY0101的拦截域与无人机FY0102的拦截域的交点;

[0013] 步骤1.2:以点 O 为圆心、 OP 为半径所形成的圆形区域即为红方无人机集群形成的最大拦截域 S_F ,集群中的所有无人机成圆形阵列排列;

[0014] 步骤1.3:以点 O 为圆心、 R_v 为半径所形成的圆形区域即为红方无人机集群在当前时刻 t 形成的最大捕捉半径 R_v ,即最大捕捉域的圆周半径,

[0015] $R_v = r + V_p * t$

[0016] 式中, V_p 为红方无人机的速度, r 为红方无人集群的拦截域 S_F 的圆周半径;

[0017] 步骤1.4:根据蓝方无人机的飞行方向确定红方无人机集群的拦截区域;

[0018] 所述步骤1.4包括:

[0019] 步骤1.4.1:以点 B 为坐标原点建立集群对抗的直角坐标系,以点 B 为起点沿 x 轴正方向作线段 BC ,线段 BC 的长度根据攻击纵深 L 确定,以点 C 为起点沿 Y 轴正方向作线段 CD ,线段 CD 的长度根据通道宽度 M 确定,以点 D 为起点作平行于 X 轴的线段 DA ,且满足点 $ABCD$ 构成矩形的攻击泳道,其中 C 、 D 点坐标分别为 $C(x_c, y_c)$ 、 $D(x_D, y_D)$,线段 CD 为蓝方突破线;

[0020] 步骤1.4.2:如果蓝方无人机沿水平方向飞行,则拦截区域内所有点横坐标的取值范围为 $x \in [x_{pe}, x_{G1}]$,拦截区域内所有点纵坐标的取值范围为 $y \leq \frac{x_{G1} - x_{pe}}{y_{pe} - y_{G1}} \times x + y_D - \frac{x_{G1} - x_{pe}}{y_{pe} - y_{G1}} x_D$ 且 $(x_{G1} - x_{pe})^2 + (y_{G1} - y_{pe})^2 \geq R_v^2$, (x_{G1}, y_{G1}) 表示其中一个红方无人机集群所在集群圆周的圆心 $G1$, (x_{G2}, y_{G2}) 表示另一个红方无人机集群所在集群圆周的圆心 $G2$, (x_{pe}, y_{pe}) 表示蓝方无人机在水平方向上的飞行路线与红方无人机拦截域 S_F 相切时的一切点 Pe ;

[0021] 步骤1.4.3:如果蓝方无人机的飞行方向不是水平方向,计算蓝方无人机的飞行路线与红方无人机拦截域 S_F 相切时的切线方程分别为:

$$[0022] \quad y = \frac{x_{G1} - x_{pe}}{y_{pe} - y_{G1}} \times x + y_{pe} - \frac{x_{pe} \times x_{G1} - x_{pe}^2}{y_{pe} - y_{G1}} \text{ 或 } y = \frac{x_{G1} - x_{pe}}{y_{pe} - y_{G1}} \times x + y_D - \frac{x_{G1} - x_{pe}}{y_{pe} - y_{G1}} x_D$$

[0023] 则拦截区域内所有点横坐标的取值范围为

$$x \in \left[x_{G1} - V_E \times t \times \cos \tan^{-1} \frac{x_{G1} - x_{pe}}{y_{pe} - y_{G1}}, x_{G1} \right], \text{ 拦截区域内所有点纵坐标的取值范围为}$$

$$y \geq \frac{x_{G1} - x_{pe}}{y_{pe} - y_{G1}} \times x + y_{pe} - \frac{x_{pe} \times x_{G1} - x_{pe}^2}{y_{pe} - y_{G1}} \text{ 且 } y \leq \frac{x_{G1} - x_{pe}}{y_{pe} - y_{G1}} \times x + y_D - \frac{x_{G1} - x_{pe}}{y_{pe} - y_{G1}} x_D \text{。}$$

[0024] 所述步骤2包括:

[0025] 步骤2.1:根据蓝方无人机开始攻击的初始位置 Q ,确定两个红方无人机集群开始捕捉的初始位置 $G1$ 、 $G2$,假设红方无人机的初始位置 Q 位于泳道边界 AB 的中点,红方无人机的拦截轨迹为垂直于线段 QD 或者垂直于线段 QC 或者垂直于线段 $QQ1$ 方向飞行,则满足垂线段 $G1Q1=Q2G1$ 的 $G1$ 点位置即为其中一个红方无人机集群的圆心位置,满足线段 $G1Q1=Q1G2$

的G2点位置即为另一个红方无人机集群的圆心位置,则蓝方无人机的最优飞行策略为沿着线段QQ1方向进行水平突破,或者沿着线段QD方向向泳道右上角D突破,或者沿着线段QC方向向泳道右下角C突破;

[0026] 步骤2.2:计算红方无人机集群的最短捕捉时间 t_4 ,

$$[0027] \quad t_4 = \frac{L}{V_E}$$

[0028] 式中, V_E 为蓝方无人机的速度;

[0029] 步骤2.3:计算红方无人机集群的捕捉距离 d ,

$$[0030] \quad d = L \times \tan\left(\frac{\arctan \frac{M}{2L}}{2}\right)$$

[0031] 步骤2.4:由于红方无人机集群需要在 t_4 时刻内到达捕捉距离终点位置,因此:

$$[0032] \quad r + V_P \times t_4 \geq d$$

[0033] 步骤2.5:确定通道宽度 M 的取值范围,判断是否存在一个通道宽度的下限,使得蓝方无人机一定能突破红方无人机集群的拦截,

$$[0034] \quad M \leq 2L \times \tan \left(2 \arctan \left(\frac{rs \times \cos \frac{\theta}{2} + rs \times \sin \frac{\theta}{2} \times \tan \left(\arccos \left(\frac{rs \times \sin \frac{\theta}{2}}{l1} \right) \right)}{L} + \frac{V_P}{V_E} \right) \right)$$

[0035] 式中, rs 表示红方无人机集群圆周的半径, θ 表示相邻两个红方无人机与集群圆心 O 形成的夹角, $l1$ 表示红方无人机距点 P 的距离;

[0036] 所述步骤3包括:

[0037] 步骤3.1:计算红方无人机的最短拦截时间 T :

$$[0038] \quad T = \frac{L}{V_E}$$

[0039] 步骤3.2:第一波次的红方无人机在对抗伊始被发射,根据第二波次无人机的发射时刻将拦截情况分为三种:

[0040] 第一种情况,第二波红方无人机在在对抗伊始也被发射,发射后其行驶距离 l_x 加上拦截半径 r 和部署距离 l_b 之和与预设的安全距离 L_y 进行比较,所述部署距离为运载机到集群圆心的距离,当满足 $(l_x + r + l_b) \geq L_y$ 时,表明红方无人机已经行驶至安全距离,拦截过程结束,对应的拦截时间段为 $[0, t_1)$, t_1 表示红色无人机初始位置飞行至拦截点时的时间,当红方无人机运行至 t_1 时仍未到达拦截距离,则考虑第二种情况;

[0041] 第二种情况,当运载机与第一波红方无人机的距离达到预设的最大约束距离时,调节运载机的发射时间改变第二波红方无人机的发射位置,如果发射位置超过最大约束距离时,将考虑第三种情况,第二种情况对应的拦截时间段为 $[t_1, t_1 + t_2]$, t_2 表示运载机由初

始位置飞行到最远递送距离时的时间；

[0042] 第三种情况，若运载机已达到最远递送距离时将第二波红方无人机发射出去，若发射后第二波无人机在飞过第一种情况对应的时间段仍未到达拦截点时，则应继续以 V_p 速度向前移动，第三种情况对应的拦截时间段为 $[t_1+t_2, t_3]$ ， t_3 表示红方无人机的飞行总时长；

[0043] 步骤3.3：计算最远拦截距离 d_2 与当前时间 t 的函数关系，确定情况下对应的时间段：

$$[0044] \quad d_2 = \begin{cases} l_b + t * V_p + r & t \in [0, t_1) \\ L_y + V_y \times (t - t_1) & t \in [t_1, t_1 + t_2] \\ L_y + V_y \times (t_2) + V_p (t - t_1 - t_2) & t \in [t_1 + t_2, t_3] \end{cases}$$

[0045] 式中， V_y 表示运载机的速度， r 表示红方无人机的拦截半径；

$$[0046] \quad \text{其中，} t_1 = \frac{L_y - l_b - r}{V_p}, \quad t_2 = \frac{\sqrt{l_b^2 - (l_{g1} + rs)^2} + \sqrt{(l_{g2} + rs)^2 - (l_{g1} + rs)^2}}{(V_y - V_p)},$$

$$t_3 = \frac{L - V_y \times (t_2) - l_b - L_y}{V_p}, l_{g1} \text{表示运载机与红方无人机之间约束距离的最小值，} l_{g2} \text{表示运}$$

载机与红方无人机之间约束距离的最大值；

[0047] 步骤3.4：根据红方无人机集群内无人机数量与拦截半径 r 的关系确定每个波次需要发射的无人机数量；

$$[0048] \quad r = rs \cos \frac{\theta}{2} + \sqrt{(PS1)^2 - \left(\frac{K}{2}\right)^2}$$

[0049] 式中， $PS1$ 表示红方无人机所在位置 $S1$ 与交点 P 之间的距离， K 表示任意两个红方无人机之间的距离。

[0050] 本发明的有益效果是：

[0051] 本发明提出了一种针对无人机集群协同对抗的决策方法，首先通过分析无人机的对抗模式确定出固定范围内的最优突防策略，其次判断是否存在一个通道宽度的下限使得蓝方能突防成功，判断是否存在一个通道宽度的上限，在这种情况下无论蓝方无人机采用什么样的突防策略，红方无人机集群均存在相应的拦截策略，并且还确定出了红方两架运载机两个波次发射的无人机数量、每架运载机第二波次发射的时刻和位置以及第二波次发射的无人机集群的中心位置，以实现最优的拦截效果，本发明对无人机飞行中的几何问题进行清晰完整的建模，很好的解决了无人机博弈问题，保证了红方无人机的最优拦截效果。

附图说明

[0052] 图1为本发明中针对无人机集群协同对抗的决策方法流程图；

[0053] 图2为本发明中分析红方无人机集群对抗蓝方无人机时建立的直角坐标系；

[0054] 图3为本发明中红方无人机集群中任意两架无人机的拦截半径示意图；

[0055] 图4为本发明中红方无人机集群的拦截域示意图；

[0056] 图5为本发明中拦截盲区的三种情况,其中(a)为蓝方无人机沿水平方向飞行时的拦截盲区图,(b)、(c)分别为蓝方无人机的飞行方向与水平方向存在一定角度时的拦截盲区图;

[0057] 图6为本发明中红方无人机集群在第30秒时刻形成的拦截区域图;

[0058] 图7为本发明中红方无人机集群在第70秒时刻形成的拦截区域图;

[0059] 图8为本发明中蓝方无人机的突防区域图;

[0060] 图9为本发明中蓝方无人机的飞行轨迹示意图;

[0061] 图10为本发明中红方无人机集群的初始最优位置示意图;

[0062] 图11为本发明中红方无人机集群拦截域半径的求解原理图;

[0063] 图12为本发明中红方无人机集群的初始最优位置求解原理示意图;

[0064] 图13为本发明中红方无人机集群分波次发出时拦截距离的求解原理图;

具体实施方式

[0065] 下面结合附图和具体实施实例对发明做进一步说明。

[0066] 如图1所示,一种针对无人机集群协同对抗的决策方法,包括:

[0067] 步骤1:分析蓝方突防无人机与红方拦截无人机的对抗模式,包括:

[0068] 步骤1.1:根据红方无人机集群中任意两架无人机FY0101、FY0102的拦截域,确定任意两架无人机的拦截半径OP,其中O表示红方无人机围成的集群圆周的圆心,P表示无人机FY0101的拦截域与无人机FY0102的拦截域的交点;

[0069] 规定当蓝方突防无人机与红方至少2架无人机的距离均满足 $R < 300\text{m}$ 时,红方将成功拦截蓝方突防无人机。如图3所示,红方无人机集群内的五架无人机分别为无人机FY0101、FY0102、FY0103、FY0104和FY0105,且为等间距圆周飞行队列,将无人机集群的拦截机制简化为任意两架无人机可以实行拦截即表示拦截成功。取其中两架无人机FY0101和FY0102分别以300m为半径画圆,如图3中,两圆相交形成两架无人机的拦截域,连接最远点P和集群圆周的圆心O,从而形成了集群的拦截半径OP,如图4所示,集群的拦截域为以O为圆心,OP为半径形成的圆周。

[0070] 步骤1.2:以点O为圆心、OP为半径所形成的圆形区域即为红方无人机集群形成的最大拦截域 S_F ,集群中的所有无人机成圆形阵列排列;

[0071] 步骤1.3:设当前时刻为t,红方无人机集群可以移动的最远距离为 $V_p * t$,此距离也是集群拦截域的圆心可以移动的最远距离,因此,对于当前时刻t,红方无人机集群可以捕捉的最大捕捉区域是圆心为集群初始圆心位置,半径为捕捉半径 R_v 的圆形区域,以点O为圆心、 R_v 为半径所形成的圆形区域即为红方无人机集群在当前时刻t形成的最大捕捉半径 R_v ,即最大捕捉域的圆周半径,

[0072] $R_v = r + V_p * t$

[0073] 式中, V_p 为红方无人机的速度,规定其值为200m/s,r为红方无人集群的拦截域 S_F 的圆周半径;

[0074] 步骤1.4:根据蓝方无人机的飞行方向确定红方无人机集群的拦截区域,包括:

[0075] 步骤1.4.1:以点B为坐标原点建立集群对抗的直角坐标系,以点B为起点沿x轴正方向作线段BC,线段BC的长度根据攻击纵深L确定,以点C为起点沿Y轴正方向作线段CD,线

段CD的长度根据通道宽度M确定,以点D为起点作平行于X轴的线段DA,且满足点ABCD构成矩形的攻击泳道,其中C、D点坐标分别为C(x_c, y_c)、D(x_D, y_D),线段CD为蓝方突破线;其中集群圆周半径为100m, DG1=20km, G1G2=30km, CG2=20km,如图2所示;

[0076] 将蓝方无人机在t时刻肯定能突破成功的区域称为捕捉盲区,在上述直角坐标系中,CD为蓝方突破线,对于水平方向飞行的蓝方无人机,其捕捉盲区如图5(a)中灰色阴影区域所示。其中水平线与拦截域相切,并且区域最左端沿飞行方向到达突破线的飞行距离是 $V_E * t'$,其中 t' 为蓝方无人机从初始位置沿飞行方向飞行到突破线CD的最短时间, V_E 为蓝方无人机的速度,规定其值为250m/s。

[0077] 如果飞行方向与水平方向存在一定的夹角,拦截区域如图5(b)中灰色阴影区域所示,其中飞行方向存在一条与拦截域相切的线,取沿飞行方向距离为 $V_E * t'$ 可得图中图形。当飞行方向与水平方向夹角增大到某一时刻时,切点位置恰好为平行四边形的顶点,此时拦截盲区如图5(c)中灰色阴影区域所示,由图5(a)区域转换到图5(c)区域,实际上就是在拦截域的圆形上从图5(c)的切点移动到图5(a)的切点的过程。

[0078] 对于任意一个切点 $P_e(x_{pe}, y_{pe})$,拦截区域的范围可用方程来表示,由线段和半径可求得夹角的正切值,则拦截区域内所有点横坐标的取值范围为

$$x \in \left[x_{G1} - V_E \times t \times \cos \tan^{-1} \frac{x_{G1} - x_{pe}}{y_{pe} - y_{G1}}, x_{G1} \right], \text{其中 } x_{G1} \text{ 和 } y_{G1} \text{ 分别为图中 } G1 \text{ 点的横坐标和纵坐标。}$$

[0079] 设过切点 $P_e(x_{pe}, y_{pe})$ 的切线 L_{pe} 的一次函数为: $y=kx+b$,由于半径过圆心切点两点,可知半径的斜率,由于切线与半径相切,可知切线斜率,同时该函数过切点,因此该一次函数为

$$[0080] \quad y = \frac{x_{G1} - x_{pe}}{y_{pe} - y_{G1}} \times x + y_{pe} - \frac{x_{pe} \times x_{G1} - x_{pe}^2}{y_{pe} - y_{G1}}$$

[0081] 则过点D且与切线 L_{pe} 斜率相同的切线 L_D 的函数为:

$$[0082] \quad y = \frac{x_{G1} - x_{pe}}{y_{pe} - y_{G1}} \times x + y_D - \frac{x_{G1} - x_{pe}}{y_{pe} - y_{G1}} x_D$$

[0083] 其中 x_D 和 y_D 分别为图中D点的横坐标和纵坐标。

[0084] 步骤1.4.2:如果蓝方无人机沿水平方向飞行,则拦截区域内所有点横坐标的取值范围为 $x \in [x_{pe}, x_{G1}]$,拦截区域内所有点纵坐标的取值范围为

$$y \leq \frac{x_{G1} - x_{pe}}{y_{pe} - y_{G1}} \times x + y_D - \frac{x_{G1} - x_{pe}}{y_{pe} - y_{G1}} x_D \text{ 且 } (x_{G1} - x_{pe})^2 + (y_{G1} - y_{pe})^2 \geq R_v^2, (x_{G1}, y_{G1}) \text{ 表示其中一个红}$$

方无人机集群所在集群圆周的圆心 $G1, (x_{G2}, y_{G2})$ 表示另一个红方无人机集群所在集群圆周的圆心 $G2, (x_{pe}, y_{pe})$ 表示蓝方无人机在水平方向上的飞行路线与红方无人机拦截域 S_F 相切时的一切点 P_e ;

[0085] 步骤1.4.3:如果蓝方无人机的飞行方向不是水平方向,计算蓝方无人机的飞行路线与红方无人机拦截域 S_F 相切时的切线方程分别为:

$$[0086] \quad y = \frac{x_{G1} - x_{pe}}{y_{pe} - y_{G1}} \times x + y_{pe} - \frac{x_{pe} \times x_{G1} - x_{pe}^2}{y_{pe} - y_{G1}} \text{ 或 } y = \frac{x_{G1} - x_{pe}}{y_{pe} - y_{G1}} \times x + y_D - \frac{x_{G1} - x_{pe}}{y_{pe} - y_{G1}} x_D$$

[0087] 拦截区域内所有点纵坐标的取值范围为 $y \geq \frac{x_{G1} - x_{pe}}{y_{pe} - y_{G1}} \times x + y_{pe} - \frac{x_{pe} \times x_{G1} - x_{pe}^2}{y_{pe} - y_{G1}}$ 且

$$y \leq \frac{x_{G1} - x_{pe}}{y_{pe} - y_{G1}} \times x + y_D - \frac{x_{G1} - x_{pe}}{y_{pe} - y_{G1}} x_D ;$$

[0088] 从蓝方无人机的角度计算其在固定范围内的最优突防策略,对任意切点所确定的区域进行叠加,可获得t时刻的所有拦截盲区,对蓝方无人机飞行的所有时刻形成的拦截盲区进行叠加,最终得到全部的拦截盲区。如图6所示,图6中②号区域表示时间在第30秒时刻红方无人机所形成的拦截区域,①号区域为蓝方无人机的突防区域。如图7所示,图7中②号区域表示时间在第70秒时刻无人机所形成的拦截域,①号区域为蓝方无人机的突防区域。如图8中所示②号区域为红方无人机的捕捉盲区,即为蓝方无人机的最优突防区域,在此区域内突防是最优策略,肯定能够突防成功。

[0089] 步骤2:当蓝方无人机从通道宽度的中心位置Q水平方向突袭时,判断是否存在一个通道宽度M的下限 M_{\min} ,当实际通道宽度M比 M_{\min} 大时,蓝方无人机一定能突破红方无人机集群的拦截,包括:

[0090] 步骤2.1:根据蓝方无人机开始攻击的初始位置Q,确定两个红方无人机集群开始捕捉的初始位置G1、G2,假设红方无人机的初始位置Q位于泳道边界AB的中点,则蓝方无人机的最优飞行策略为沿着线段QQ1方向进行水平突破,或者沿着线段QD方向向泳道右上角D突破,或者沿着线段QC方向向泳道右下角C突破,红方无人机的最优突破轨迹为垂直于线段QD或者垂直于线段QC或者垂直于线段QQ1方向飞行,则满足垂线段G1Q1=Q2G1的G1点位置即为其中一个红方无人机集群的圆心位置,满足线段G1Q1=Q1G2的G2点位置即为另一个红方无人机集群的圆心位置;

[0091] 如图9所示,攻击泳道为矩形ABCD,蓝方无人机HT01位于边AB中心点Q,过Q点做水平线QQ1平分攻击泳道并交CD边于其中心点Q1。两个红方无人机集群捕捉蓝方无人机HT01,则其必定在水平线QQ1两侧,否则,蓝方无人机HT01可向无红方无人机集群的一侧突破。因此只需考虑上半部分区域矩形AQQ1D,下半区域与上半区域同理。对于上半部分矩形AQQ1D,蓝方无人机HT01的最优飞行策略为沿着线段QQ1方向进行水平突破,或者沿着线段QD方向向泳道右上角D突破,蓝方无人机HT01飞行轨迹如图9,红方无人机集群的初始位置可以为突破线CD上的任意一点G1_n,红方无人机集群的最短捕捉轨迹为从其初始位置G1_n垂直射向蓝方无人机HT01突破轨迹的线段,由于蓝方无人机HT01总可以选择红方无人机集群最短捕捉轨迹较远的一条突破轨迹,因此红方无人机集群的最优位置是到蓝方无人机HT01两条突破轨迹QD、QQ1的最短捕捉轨迹Q2G1、G1Q1相等的位置,即G1Q1=Q2G1的G1点位置,如图10、图12所示。

[0092] 步骤2.2:设泳道边界D点距水平线QQ1的距离为M/2,攻击纵深为L=50km,在蓝方无人机HT01沿着线段QQ1方向进行水平突破时其轨迹的长度即为L,由此计算红方无人机集群的最短捕捉时间t4,

[0093]
$$t4 = \frac{L}{V_E}$$

[0094] 式中, V_E 为蓝方无人机的速度;

[0095] 步骤2.3: 线段QD与水平线QQ1夹角 $\angle Q1QD$ 为 α , 在直角三角形Q1QD中计算红方无人机集群的捕捉距离d,

$$[0096] \quad d = L \times \tan\left(\frac{\arctan \frac{M}{2L}}{2}\right)$$

[0097] 由于红方无人机集群最佳初始位置G1到 $\angle Q1QD$ 两边射出的垂线段长度相等, 故红方无人机集群最佳初始位置必定在 $\angle Q1QD$ 的角平分线上, 则 $\angle G1QD$ 为 $\frac{\alpha}{2}$, 在直角三角形

$$G1QD \text{ 中 } \tan \frac{\alpha}{2} = \frac{d}{L}, \text{ 则 } d = L \times \tan \frac{\arctan \frac{M}{2L}}{2};$$

[0098] 步骤2.4: 由于红方无人机集群需要在 t_4 时刻内到达捕捉距离终点位置, 因此:

$$[0099] \quad r + V_p \times t_4 \geq d$$

[0100] 步骤2.5: 确定通道宽度M的取值范围, 判断是否存在一个通道宽度的下限, 使得蓝方无人机一定能突破红方无人机集群的拦截,

$$[0101] \quad M \leq 2L \times \tan \left(2 \arctan \left(\frac{rs \times \cos \frac{\theta}{2} + rs \times \sin \frac{\theta}{2} \times \tan \left(\arccos \left(\frac{rs \times \sin \frac{\theta}{2}}{l1} \right) \right)}{L} + \frac{V_p}{V_E} \right) \right)$$

[0102] 式中, rs 表示红方无人机集群圆周的半径, θ 表示相邻两个红方无人机与集群圆心O形成的夹角, $l1$ 表示红方无人机距点P的距离;

[0103] 其中 r 为红方无人机集群拦截域半径, 即 $r = OP$, 如图11所示, 设红方无人机FY0101、FY0102分别在S1和S2处, 设线段S1S2的长度为K, S1S2与拦截域半径OP交于点S。

$$[0104] \quad \text{因为在三角形 } \triangle POS1 \text{ 和 } \triangle POS2 \text{ 中 } \begin{cases} OP = OP \\ OS1 = OS2 \\ PS1 = PS2 \end{cases}, \text{ 所以 } \triangle POS1 \cong \triangle POS2,$$

$$\angle POS1 = \angle POS2 = \frac{\theta}{2} = 36^\circ \text{ (全等三角形的对应角相等)}。$$

[0105] 又因为 $\triangle S1OS2$ 为等腰三角形, 拦截域半径OP为 $\triangle S1OS2$ 的角平分线, 且为等腰三角形的顶角平分线, 底边上的中线, 底边上的高相互重合, 设高表示为OS, 所以 $\angle OSS1 = \angle OSS2 = 90^\circ$ 。

[0106] 在直角三角形 $\triangle OSS2$ 中, 设线段OS的长度为 $h1$, OS2的长度 $rs = 100m$, 则

$$\begin{cases} \sin \frac{\theta}{2} = \frac{K/2}{rs} \\ \cos \frac{\theta}{2} = \frac{h1}{rs} \end{cases}, \text{ 故 } h1 = rs \times \cos \frac{\theta}{2}, \quad rs \times \sin \frac{\theta}{2} = K/2。$$

[0107] 在直角三角形△PSS2中,设线段PS的长度为h2,PS2的长度l1=300m,∠PS2S=β,

$$\text{则} \begin{cases} \tan \beta = \frac{h2}{K/2} \\ \cos \beta = \frac{K/2}{l1} \end{cases}, \text{故 } h2 = \frac{K}{2} \tan \left(\arccos \left(\frac{K/2}{l1} \right) \right), \text{即 } h2 = rs \times \sin \frac{\theta}{2} \times \tan \left(\arccos \left(\frac{rs \times \sin \frac{\theta}{2}}{l1} \right) \right),$$

$$[0108] \quad \text{因此 } r = h1 + h2 = rs \times \cos \frac{\theta}{2} + rs \times \sin \frac{\theta}{2} \times \tan \left(\arccos \left(\frac{rs \times \sin \frac{\theta}{2}}{l1} \right) \right), \text{结合上述公式可}$$

知 $r \approx 375.0871596014444\text{m}$ 。

[0109] 红方通道宽度M的范围,求解过程如下,其中符号∴指代数学证明中的因为,符号∵指代数学证明中的所以:

$$[0110] \quad \because \tan \alpha = \frac{M/2}{L}$$

$$[0111] \quad \therefore \alpha = \arctan \frac{M}{2L}$$

$$[0112] \quad \because \tan \frac{\alpha}{2} = \frac{d}{L}$$

$$[0113] \quad \therefore \tan \frac{\arctan \frac{M}{2L}}{2} = \frac{d}{L}$$

$$[0114] \quad \because r + V_p \times t \geq d, t = \frac{L}{V_E}$$

$$[0115] \quad \therefore r + \frac{V_p \times L}{V_E} \geq L \times \tan \frac{\arctan \frac{M}{2L}}{2}$$

$$[0116] \quad \therefore \frac{r}{L} + \frac{V_p}{V_E} \geq \tan \frac{\arctan \frac{M}{2L}}{2}$$

[0117] ∴函数 $y = \arctan x$ 单调递增

$$[0118] \quad \therefore \arctan \left(\frac{r}{L} + \frac{V_p}{V_E} \right) \geq \frac{\arctan \frac{M}{2L}}{2}$$

$$[0119] \quad \therefore 2 \arctan \left(\frac{r}{L} + \frac{V_p}{V_E} \right) \geq \arctan \frac{M}{2L}$$

[0120] ∴ $r \ll L, V_E = 250\text{m/s}, V_p = 200\text{m/s}$

$$[0121] \quad \therefore \text{令 } \frac{r}{L} = \omega \ll 1, \text{则 } 0.8 < \frac{r}{L} + \frac{V_p}{V_E} = \omega + 0.8 < 0.9$$

$$[0122] \quad \therefore 38^\circ < \arctan 0.8 < \arctan \left(\frac{r}{L} + \frac{V_P}{V_E} \right) < \arctan 0.9 < 42^\circ$$

$$[0123] \quad \text{即} \arctan \left(\frac{r}{L} + \frac{V_P}{V_E} \right) \text{在} y = \tan x \text{函数的} (-90^\circ, 90^\circ) \text{内}$$

$$[0124] \quad \therefore \alpha = \arctan \frac{M}{2L} \in (-90^\circ, 90^\circ) \text{且} y = \tan x \text{函数在} (-90^\circ, 90^\circ) \text{内单调递增}$$

$$[0125] \quad \therefore \tan \left(2 \arctan \left(\frac{r}{L} + \frac{V_P}{V_E} \right) \right) \geq \frac{M}{2L}$$

$$[0126] \quad \therefore 2L \times \tan \left(2 \arctan \left(\frac{r}{L} + \frac{V_P}{V_E} \right) \right) \geq M$$

$$[0127] \quad \therefore r = rs \times \cos \frac{\theta}{2} + rs \times \sin \frac{\theta}{2} \times \tan \left(\arccos \left(\frac{rs \times \sin \frac{\theta}{2}}{l1} \right) \right)$$

$$[0128] \quad \therefore M \leq 2L \times \tan \left(2 \arctan \left(\frac{rs \times \cos \frac{\theta}{2} + rs \times \sin \frac{\theta}{2} \times \tan \left(\arccos \left(\frac{rs \times \sin \frac{\theta}{2}}{l1} \right) \right)}{L} + \frac{V_P}{V_E} \right) \right)$$

$$[0129] \quad \therefore L = 50\text{km}, V_E = 250\text{m/s}, V_P = 200\text{m/s}, rs = 100\text{m}, \frac{\theta}{2} = 36^\circ, l1 = 300\text{m}$$

$$[0130] \quad \therefore M \leq 464160.2424797644\text{m}$$

[0131] 规定突防时间为360s,则蓝方无人机最大的飞行距离为 $360V_E = 90000\text{m}$,此时 $M = 40\sqrt{14}\text{km} \approx 149666.30\text{m}$,而 $M_{\min} = 464160.2424797644\text{m} > 40\sqrt{14}\text{km}$,故没有符合条件的通道宽度下限 M_{\min} ,使得蓝方无人机一定能突破红方无人机集群的拦截。

[0132] 步骤3:为防止蓝方无人机的突防,从红方无人机的角度计算红方两架运载机两个波次发射的无人机数量、每架运载机第二波次发射的时刻和位置以及第二波次发射的无人机集群的中心位置,以实现最优的拦截效果,包括:

[0133] 步骤3.1:设QD与水平夹角 $\angle DQQ1$ 为 η ,拦截距离为d,则有如下关系:

$$[0134] \quad \tan \eta = \frac{M/2}{L}$$

[0135] 由于红方无人机初始位置到 $\angle DQQ1$ 两边射出的垂线段长度相等,故红方无人机初始位置必定在 $\angle DQQ1$ 的平分线上,因此:

$$[0136] \quad \tan \frac{\eta}{2} = \frac{d}{L}$$

[0137] 进而:

$$[0138] \quad d = L \tan \frac{\arctan \frac{M}{2L}}{2}$$

[0139] 计算红方无人机的最短拦截时间T:

$$[0140] \quad T = \frac{L}{V_E}$$

[0141] 红方无人机需在T时刻内到达拦截距离终点位置,因为运载机的速度快于红方无人机,运载机飞行时间越长,总体距离越远,规定运载机至少与一架红方无人机距离不远于最远距离10km,并与蓝方无人机(即拦截点)距离超过安全距离5km。设红方无人机集群的半径为rs,则运载机与红方无人机集群圆心最远距离为10km+rs。

[0142] 如图13所示,运载机与第一波红机(红方无人机的简称红机)一同沿水平向左方向飞行,红机的初始位置可以是以运载机初始位置为圆心、部署距离为半径的圆上任意一点,由于运载机快于第一波红机,运载机一定会超过第一波红机并最终距离第一波集群的任意红机10km,转化为距离圆心的距离为10km+rs,此时 $O_{r2}O_{p2}$ 距离最远,距离长度为圆心处运载机的安全距离,其中, O_{r2} 表示运载机的当前位置, O_{p2} 表示第一波红色无人机的当前位置, O_p 表示运载机的初始位置, O_r 表示第一波红色无人机的初始部署位置。为使该距离最大, $\angle O_p O_r O_{r2}$ 角度应尽可能小,但由于运载机与红机圆心存在最小距离,故该角度时最小梯形的高 $h_{\text{红}}$ 为最小距离,运载机与任意红机距离远于100m,转化成距离圆心的距离,则最小距离为100m+rs,图中 $h_{\text{红}}$ 表示第一波红色无人机与运载机的水平距离。

[0143] 步骤3.2:第一波次的红方无人机在对抗伊始被发射,根据第二波次无人机的发射时刻将拦截情况分为三种:

[0144] 第一种情况,第二波红方无人机在在对抗伊始也被发射,发射后其行驶距离 l_x 加上拦截半径r和部署距离 l_b 之和与预设的安全距离 L_y 进行比较,所述部署距离为运载机到集群圆心的距离,当满足 $(l_x + r + l_b) \geq L_y$ 时,表明红方无人机已经行驶至安全距离,拦截过程结束,对应的拦截时间段为 $[0, t_1]$, t_1 表示红色无人机初始位置飞行至拦截点时的时间,当红方无人机运行至 t_1 时仍未到达拦截距离,则考虑第二种情况;

[0145] 第二种情况,当运载机与第一波红方无人机的距离达到预设的最大约束距离时,调节运载机的发射时间改变第二波红方无人机的发射位置,如果发射位置超过最大约束距离时,将考虑第三种情况,第二种情况对应的拦截时间段为 $[t_1, t_1 + t_2]$, t_2 表示运载机由初始位置飞行到最远递送距离时的时间;

[0146] 第三种情况,若运载机已达到最远递送距离(根据安全距离的最大值确定最远递送距离)时将第二波红方无人机发射出去,若发射后第二波无人机在飞过第一种情况对应的时间段仍未到达拦截点时,则应继续以 V_p 速度向前移动,第三种情况对应的拦截时间段为 $[t_1 + t_2, t_3]$, t_3 表示红方无人机的飞行总时长;

[0147] 步骤3.3:计算最远拦截距离d2与当前时间t的函数关系,确定情况下对应的时间段:

$$[0148] \quad d2 = \begin{cases} l_b + t * V_p + r & t \in [0, t1) \\ L_y + V_y \times (t - t1) & t \in [t1, t1 + t2] \\ L_y + V_y \times (t2) + V_p (t - t1 - t2) & t \in [t1 + t2, t3] \end{cases}$$

[0149] 式中, V_y 表示运载机的速度, 规定其值为 300m/s, r 表示红方无人机的拦截半径;

$$[0150] \quad \text{其中, } t1 = \frac{L_y - l_b - r}{V_p}, \quad t2 = \frac{\sqrt{l_b^2 - (l_{g1} + rs)^2} + \sqrt{(l_{g2} + r)^2 - (l_{g1} + rs)^2}}{(V_y - V_p)},$$

$$t3 = \frac{L - V_y \times (t2) - l_b - L_y}{V_p}, l_{g1} \text{ 表示运载机与红方无人机之间约束距离的最小值, } l_{g2} \text{ 表示运$$

载机与红方无人机之间约束距离的最大值;

[0151] 由第一个时间段的最大时间阈值可知:

$$[0152] \quad t1 \times V_p + 2km + r = 5km, \text{ 这里 } l_b = 2km;$$

[0153] 由第二个时间段的最大时间阈值对应的梯形可知:

$$[0154] \quad t2 \times (V_y - V_p) = \sqrt{(2km)^2 - (100m + rs)^2} + \sqrt{(10km + rs)^2 - (100m + rs)^2}, \quad l_{g1} = 100m, l_{g2} = 10km;$$

[0155] 设多边形两条相邻边与圆心夹角为 θ , n 边形边长为距离 K , 则集群半径:

$$[0156] \quad rs \sin \frac{\theta}{2} = \frac{K}{2}, \quad rs = \frac{K}{2 \sin \frac{\theta}{2}}$$

[0157] 规定 $n \in [3, 7]$, 则 $\frac{\theta}{2} \in \left[\left(\frac{360}{14} \right)^\circ, 60^\circ \right]$, 从而可知集群半径 rs 与集群中无人机数量的关

系为: 无人机数量越多, 集群半径越大;

[0158] 拦截半径如图 13 所示, 由直角三角形关系, 容易得出拦截半径 r 的距离为 OS 距离与 SP 距离之和:

$$[0159] \quad r = OS + SP, \quad OS = rs \cos \frac{\theta}{2}, \quad OS = rs \cos \frac{\theta}{2}$$

$$[0160] \quad \text{则 } SP = \sqrt{(PS1)^2 - \left(\frac{K}{2} \right)^2};$$

[0161] 其中 $PS1$ 的距离为捕捉距离 300m;

$$[0162] \quad \text{由此可知: } r = rs \cos \frac{\theta}{2} + \sqrt{(PS1)^2 - \left(\frac{K}{2} \right)^2};$$

[0163] 由此可推断, 集群无人机数量越多, 拦截半径越大。

[0164] 为使运载机能尽量多递送一段距离, $t2$ 应该尽可能大, 红方无人机集群的初始圆周半径 r 应尽可能小, 由此可知第一次发射的无人机数量应尽可能小, 并且此时 $t1$ 随着 rc 的增大而减小。

[0165] 对于第一波无人机, 无人机数量为 3, 规定每个集群的无人机数量不能少于 3, $\theta =$

120°。规定K最小距离应大于30m,要求红方任意两架无人机之间的间距需大于30米,为了使总距离最短,rs最小为 $rs = \frac{15m}{\sin 60^\circ} \approx 17.3205m$;

[0166] 步骤3.4:根据红方无人机集群内无人机数量与拦截半径r的关系确定每个波次需要发射的无人机数量;

[0167] 当第一波为3架无人机,第二波为7架无人机时, $\theta = (\frac{360}{7})^\circ$,规定K的最大约束距离为200m,此时拦截半径r为:

$$[0168] \quad r = rs \cos \frac{\theta}{2} + \sqrt{(PS1)^2 - \left(\frac{K}{2}\right)^2} = \frac{K}{2} \cot \frac{\theta}{2} + \sqrt{(PS1)^2 - \left(\frac{K}{2}\right)^2}$$

[0169] 式中,PS1表示红方无人机所在位置S1与交点P之间的距离,K表示任意两个红方无人机之间的距离;

[0170] 因此 $r \approx 490.4949m$, $t1 = \frac{5km - 2km - r}{V_p} \approx 12.5475s$,对应的拦截半径的最大值为5km;

$$[0171] \quad t2 = \frac{\sqrt{(2km)^2 - (100m + rs)^2} + \sqrt{(10km + rs)^2 - (100m + rs)^2}}{(V_{\text{红}} - V_p)} \approx 120.1319s;$$

[0172] 因此,当第一个时间段和第二个时间段都完成时,在(t1+t2)时间最远可达边界为41039.5684m。

[0173] 当M固定为70km时,可知最短拦截路径 $d \approx 15761.1115m$,T为200s。红机在飞行总时间内飞行的最远距离 $d2 \approx 54503.69m$,故必定可拦截。由于d小于t1和t2时刻所达的最远距离,并且大于在t1时刻的位置,因此仅用第二种情况的拦截方案即可拦截蓝机,只需由运载机先向蓝机垂线递送,随后红机飞行第一个时间段的距离,总时间约为48.4179s,递送时间为48.4179-t1 $\approx 35.8704s$ 。

[0174] 最后得出的最优结果方案,对于G1位置的运载机,运载机初始位置为 $\angle DQQ1$ 的角平分线与CD的交点位置,根据蓝机的选择的方向向QD或者QQ1垂线方向飞行(若蓝机向上则运载机向上方垂线飞行,反之则向下方垂线),并在飞行约35.8704s时,距离初始位置约10761.12m的位置发射第二波无人机,第一波发射无人机数量为3,第二波无人机数量为7,无人机发射方向亦垂直指向DQ或者QQ1,发射中心位置为距G1点约12761.12m处。

[0175] 步骤4:判断是否存在一个通道宽度的上限 M_{\max} ,当实际通道宽度M小于 M_{\max} 时,无论蓝方无人机采用什么样的突防策略,红方无人机集群均存在相应的拦截策略,在区域ABCD内成功阻止蓝方无人机的突防,由于红方无人机在飞行总时间内的飞行距离必定等于最佳

拦截距离,则 $d=d2$,即 $M = 2L \tan \left(2 \arctan \frac{d}{L} \right)$;

[0176] 当 $M=M_{\max}$, $d=d2$ 时,计算出通道宽度的上限 $M_{\max} = 2L \tan \left(2 \arctan \frac{d2}{L} \right)$ 。

[0177] 根据最远飞行时间和攻击通道宽度,蓝方无人机向上的最大角度约为56.25°,而

通过极限情况得出的角度约为 94.90° ,不仅超过了蓝方无人机极限飞行角度,甚至超过了 90° ,不再向右飞行,因此该阈值不存在。

[0178] 综上,本发明通过求解蓝方无人机的突防区域和其相应的最优突防策略,以及分析蓝方突防的通道阈值,红方拦截的通道阈值,红方运载机发射的无人机数量,发射的时刻和位置以及发射的无人机集群的中心位置,很好的解决了无人机博弈问题,保证了红方无人机的最优拦截效果,总结了蓝方无人机的最佳突防策略。

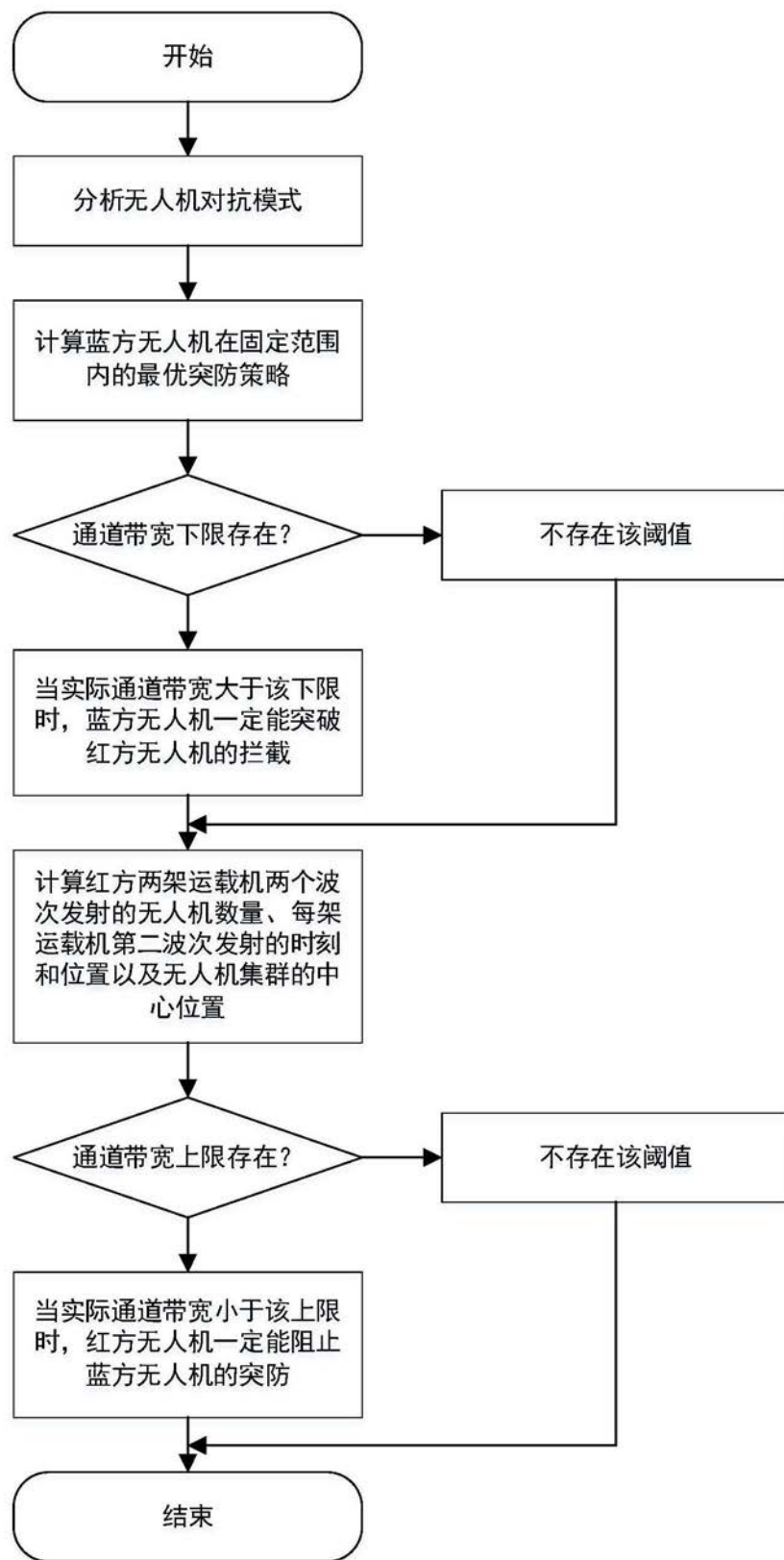


图1

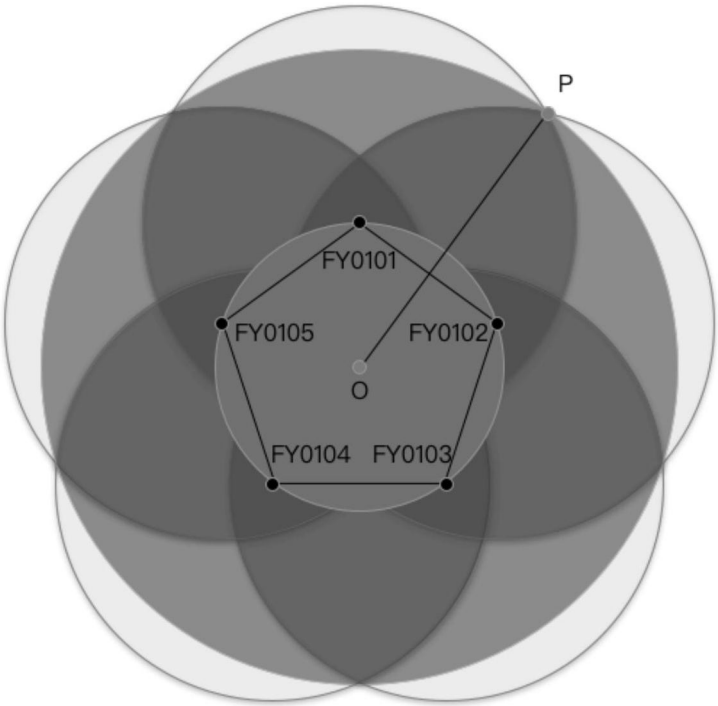
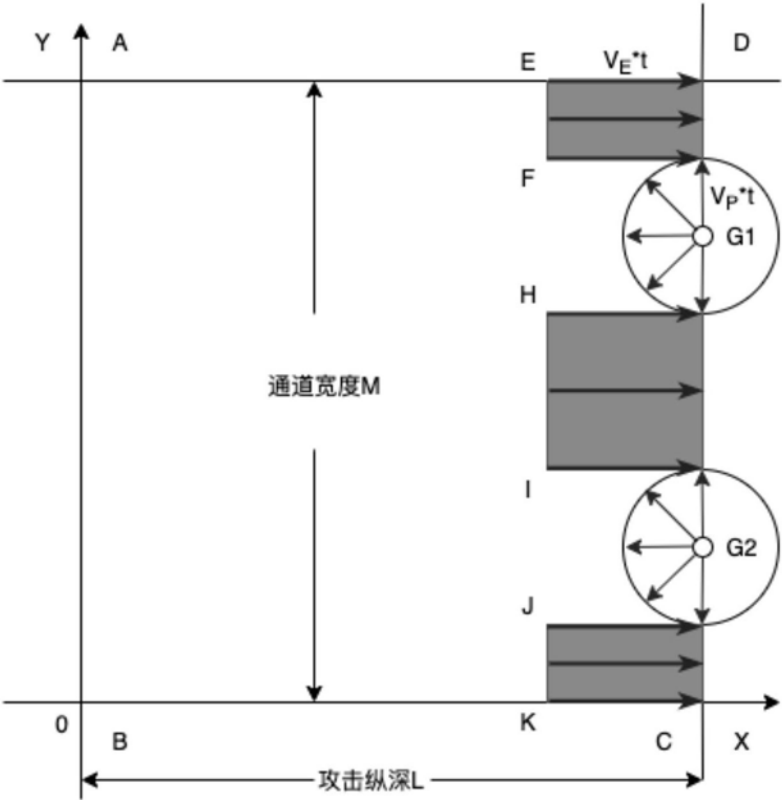


图4



(a)

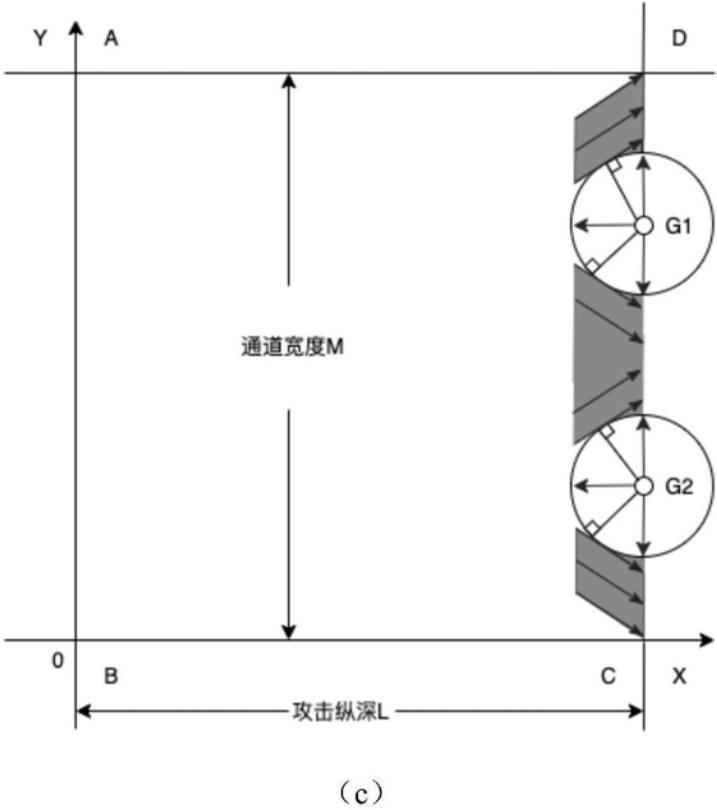
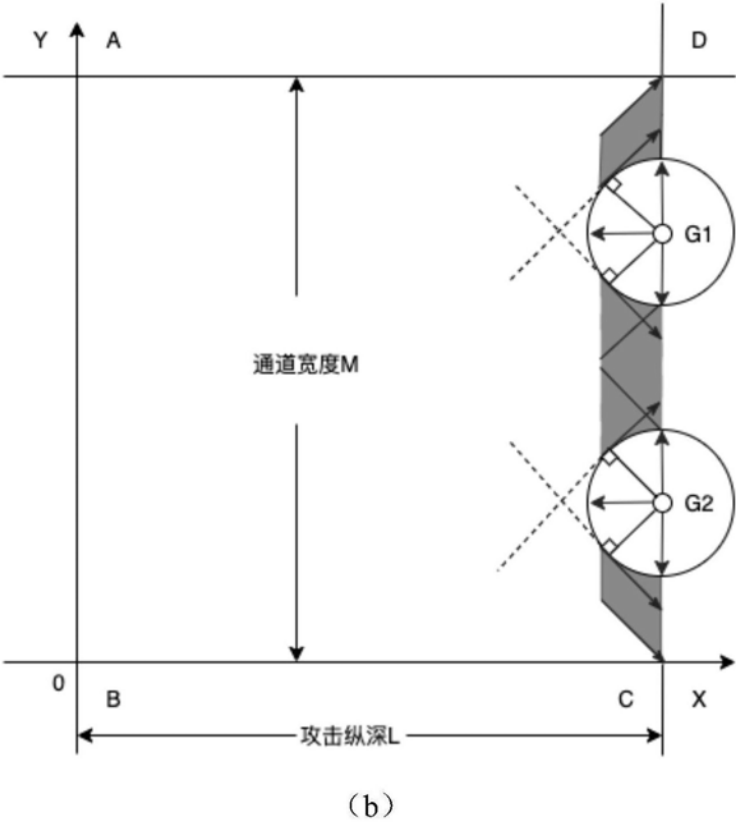


图5

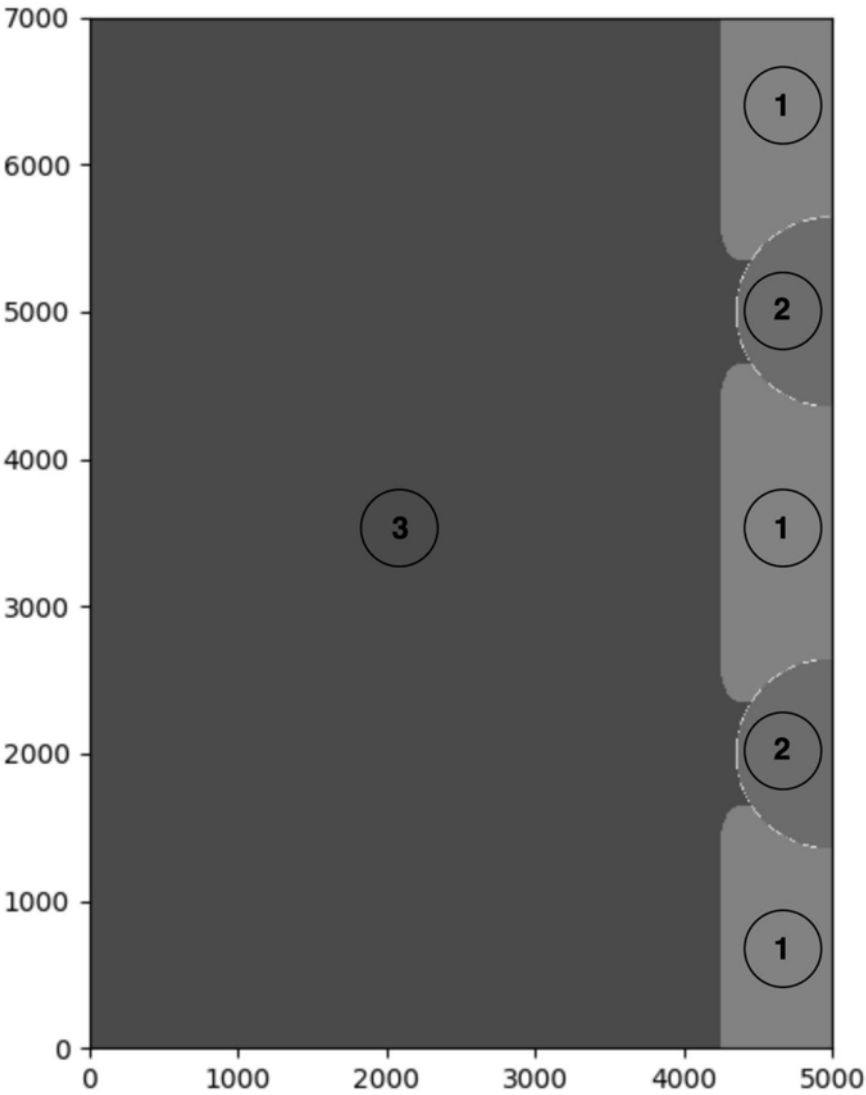


图6

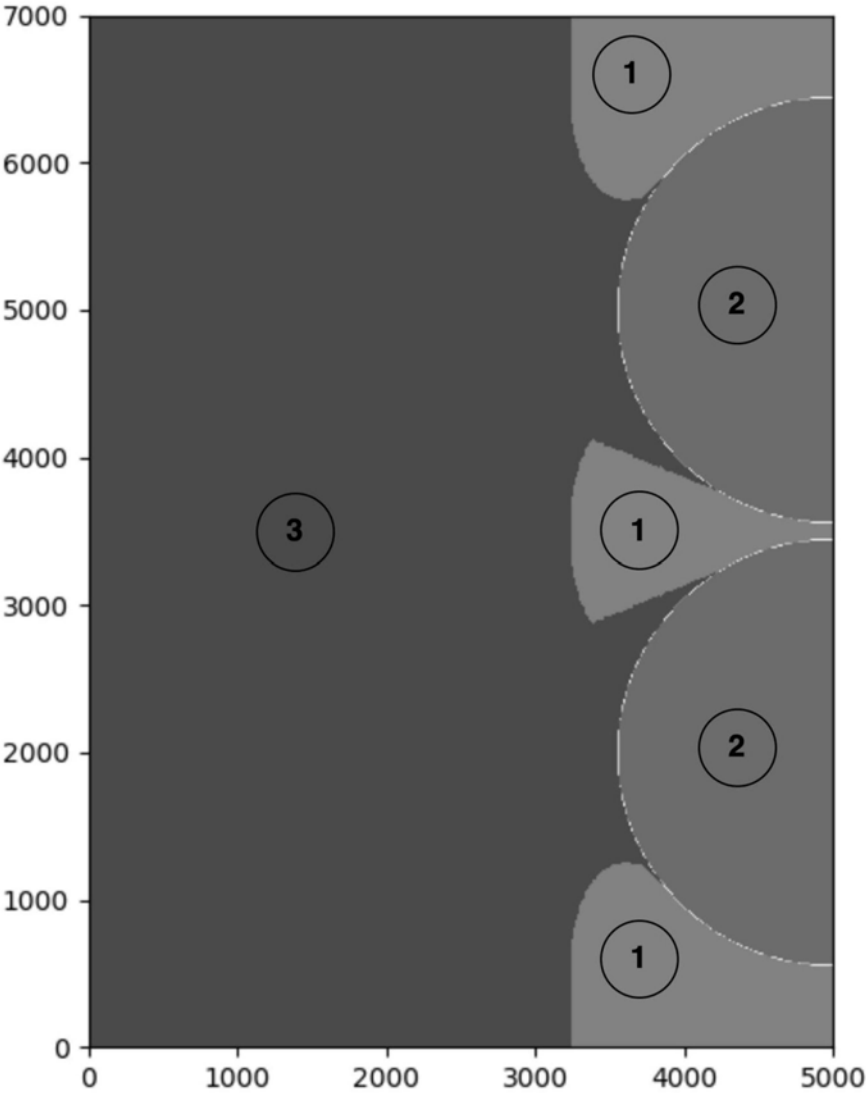


图7

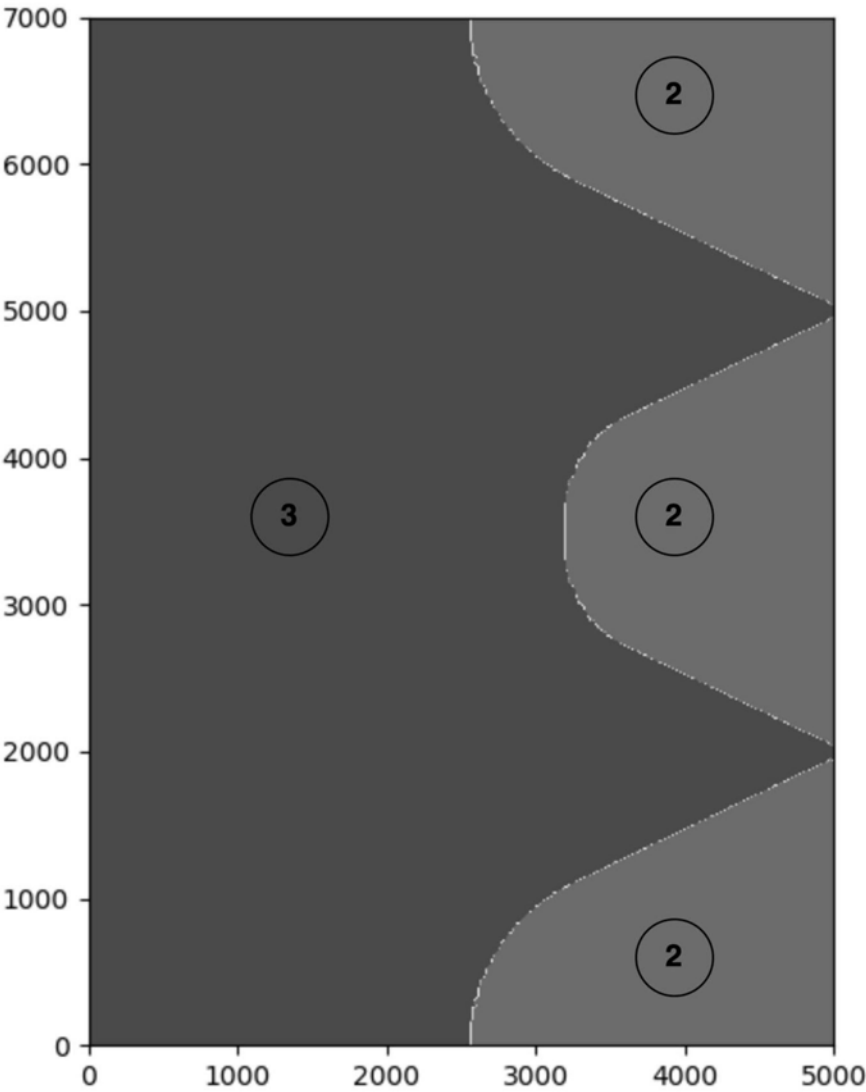


图8

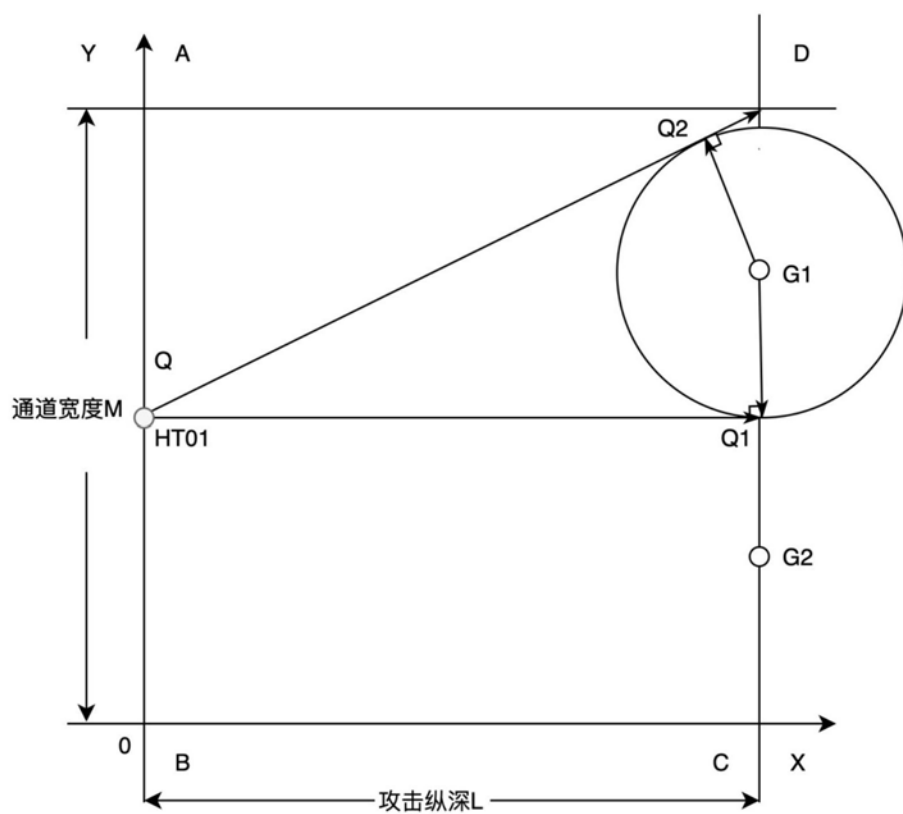


图10

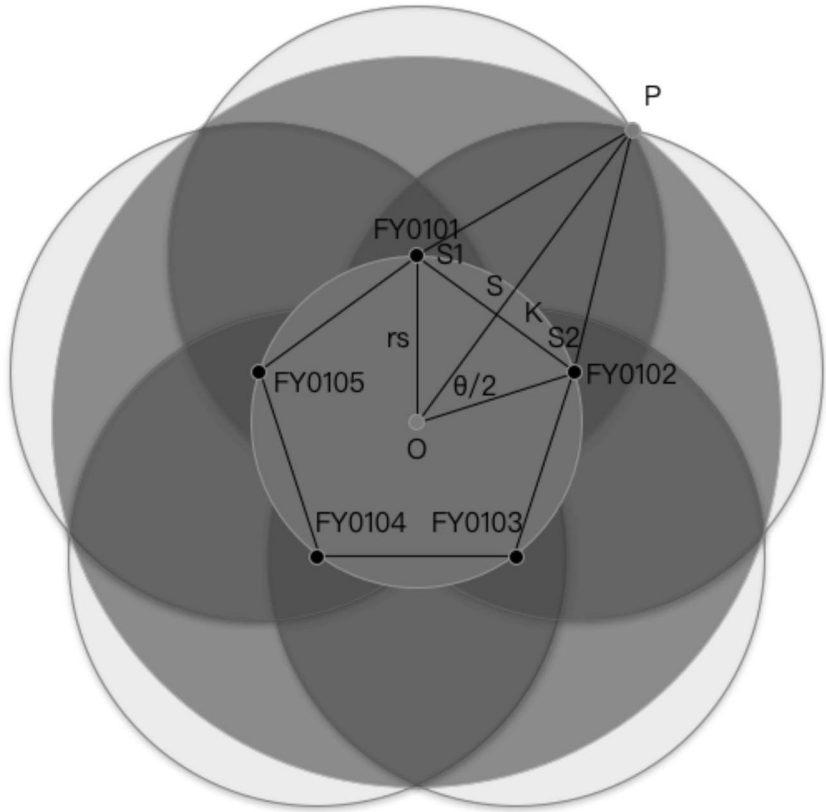


图11

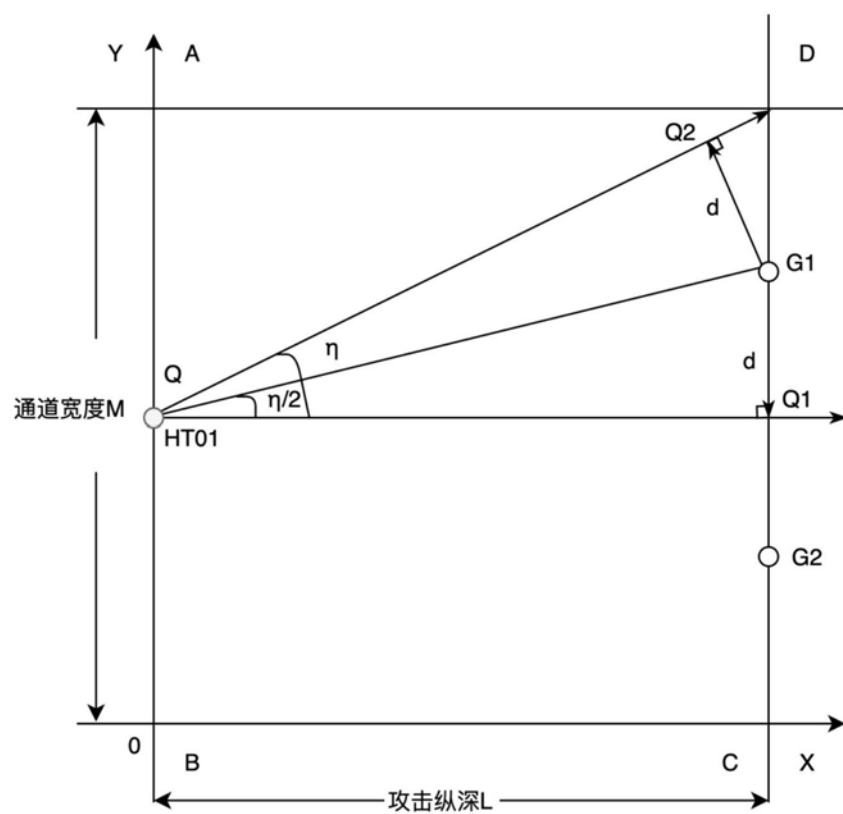


图12

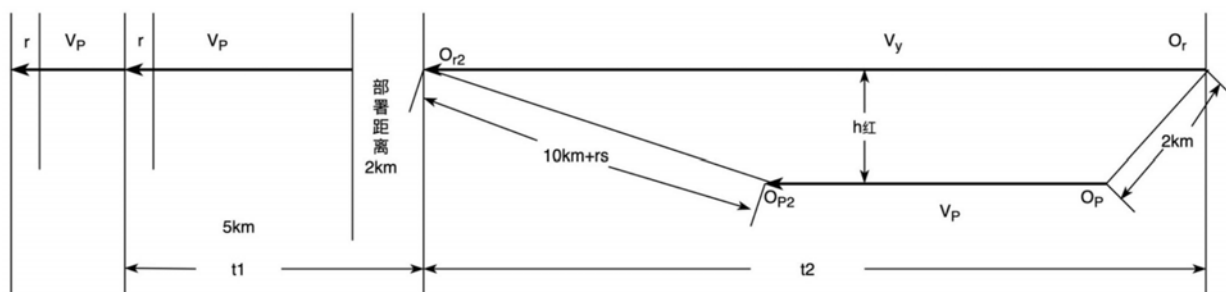


图13