https://doi.org/10.1051/jnwpu/20213920382

基于威胁建模的 UCAV 武器投放在线航迹规划

唐嘉钰[1,2], 李相民[1], 代进进[1]

(1. 海军航空大学, 山东 烟台　264001; 2.海军研究院, 北京　100422)

摘　要:针对无人作战飞机(UCAV)执行对地攻击任务时的武器投放航迹规划问题,提出了一种基于环境威胁建模的在线航迹规划方法。通过对 UCAV 气动力、发动机推力及油耗等特性进行分析,建立了 UCAV 质点运动学和动力学模型;考虑 UCAV 性能和战场环境威胁约束,通过计算求解机载制导炸弹的可投放区包络,将可投放区中心和投放姿态作为末端约束条件,构造了 UCAV 武器投放航迹规划模型;提出了一种基于威胁建模的在线航迹规划方法,将航迹规划问题转换为飞行过程中的威胁态势划分问题进行求解。仿真结果表明,所提方法可有效实现静态与动态场景下 UCAV 武器投放在线航迹规划。

关　键　词:无人作战飞机;在线航迹规划;机载武器投放;威胁建模

中图分类号:V279　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**1000-2758(2021)02-0382-10

攻击型无人机(unmanned combat aerial vehicle, UCAV)是快速形成对敌威胁、打赢信息化条件下非对称战争的重要手段[1]。UCAV 可携带小型或大威力的精确制导武器(包括反辐射导弹、红外制导导弹及制导炸弹等),可遂行防空压制、对地攻击等作战任务[2]。

航迹规划技术是成功实现 UCAV 自主攻击的关键技术之一[3]。目前无人机航迹规划方法主要有 Voronoi 图算法[4-6]、A* 算法[7-8]、稀疏 A*(sparse A* search, SAS)算法[9]、人工势场法[10-12]、灰狼算法[13-14]和随机搜索树(rapid-exploration random tree, RRT)算法[15-16],在线航迹规划则主要通过滚动时域控制获取实时动态飞行轨迹[17-20]。目前 UCAV 航迹规划研究主要集中于局部威胁信息已知的静态任务场景,未考虑复杂战场环境动态变化(例如突发威胁和机动目标等)。

针对这一问题,本文提出了基于任务区域威胁建模的 UCAV 在线投放航迹规划方法。首先,针对 UCAV 对地攻击任务需求,将预先求解的机载制导炸弹可投放区中心和投放姿态作为终端约束条件,同时考虑飞行器性能和战场环境等约束,建立了 UCAV 武器投放航迹规划模型;基于战场环境威胁建模,结合模型预测控制的滚动优化策略,UCAV 通过不断在线预测判断飞行态势实现自主避障飞行。仿真结果表明,本文所提算法能够实现 UCAV 在动态战场环境下在线航迹规划。

1　UCAV 武器投放航迹规划数学模型

1.1　UCAV 运动学及动力学模型

与旋翼飞机相比,固定翼无人作战飞机具有续航能力强、飞行速度快及可靠性较高等优点,更适合应对复杂动态多变的战场环境。

UCAV 在地理坐标系下的质点运动学和动力学方程组分别为

$$\begin{cases} \dot{x} = V\cos\gamma\cos\psi \\ \dot{y} = V\cos\gamma\sin\psi \\ \dot{h} = V\sin\gamma \end{cases} \tag{1}$$

收稿日期:2020-07-20

作者简介:唐嘉钰(1992—),女,海军研究院助理研究员,主要从事多无人机指挥控制建模与决策研究。

$$\begin{cases}\dot{V}=\dfrac{T\cos\alpha\cos\beta-D}{m}-g\sin\gamma\\ \dot{\gamma}=\dfrac{L\cos\mu-Y\sin\mu+T\sin\alpha\cos\mu}{mV}+\dfrac{T\cos\alpha\sin\beta\sin\mu}{mV}-\dfrac{g\cos\gamma}{V}+\dot{\psi}=\dfrac{L\sin\mu+Y\cos\mu+T\sin\alpha\sin\mu+T\cos\alpha\sin\beta\cos\mu}{mV\cos\gamma}\\ \dot{\mu}=P+\tan\gamma\cdot\left(\dfrac{L\sin\mu+Y\cos\mu+T\sin\alpha\sin\mu-T\cos\alpha\sin\beta\cos\mu}{mV}\right)\\ \dot{m}=-cT\end{cases}\tag{2}$$

式中:x,y 及 h 分别为 UCAV 经度、纬度及高度;V 和 $\dot{V}$ 为 UCAV 真空速及其变化率;ψ 为 UCAV 航向角;γ 和 μ 分别为航迹倾斜角和滚转角;$\dot{\psi}$,γ 和 μ 分别为各角对应的角度变化率;α 为 UCAV 迎角,β 为飞行器侧滑角;m 及 $\dot{m}$ 分别为 UCAV 质量及其变化率;g 为重力加速度,Y 为 UCAV 受到的侧力;P 为旋转角速度在气流坐标系中沿 x 轴分量;c 为飞行器燃料消耗系数;T,D 和 L 分别为无人机受到的推力、阻力和升力,且有

$$\begin{cases}T=\delta T_{\max}(Ma,h)\\ D=0.5\rho V^2SC_D\\ L=0.5\rho V^2SC_L\end{cases}\tag{3}$$

式中:δ 为 UCAV 油门位置;$T_{\max}$ 为 UCAV 最大可用推力;ρ 为空气密度;S 为飞行器横截面积;C_D 和 C_L 分别为阻力和升力系数。

1.2　UCAV 机载武器可投放区模型

为保证机载武器命中精度、提升攻击效果,UCAV 投放制导炸弹时存在特定的区域限制,这个区域即为可投放区。当 UCAV 在此空域内且满足投放速度姿态等约束条件时投放制导炸弹,制导炸弹将以给定精度命中目标,而在此区域外进行投放时,则无法保证有效地命中目标。因此,UCAV 在航迹规划前应依据目标类型和毁伤特性等要素,解算出制导炸弹的可投放区,以此作为航迹规划的末端约束条件,确保 UCAV 完成攻击前的占位。

1.2.1　制导炸弹运动学模型

1）制导炸弹弹道模型

计算制导炸弹可投放区的本质是生成炸弹弹道航迹,为提高计算效率,本文采用三自由度质点运动模型,同时为了便于模型的建立与求解,做以下假设:

（1）不考虑外界环境因素对炸弹弹道航迹的干扰,飞行条件设定为标准大气环境;

（2）忽略炸弹弹体的转动惯性,不研究炸弹在飞行过程中绕质点转动的情况;

（3）弹上测量和控制系统能够准确、理想无延迟工作。

制导炸弹弹体运动学方程与(1)式相同,其动力学方程则为

$$\begin{cases}\dot{v}=\dfrac{D_{\mathrm{B}}}{m_{\mathrm{B}}}-g\sin\theta\\ \dot{\theta}=\dfrac{g(n_{\mathrm{d}}-\cos\theta)}{v}\\ \dot{\xi}=\dfrac{-gn_{\mathrm{t}}}{v\cos\theta}\end{cases}\tag{4}$$

式中:v 和 $\dot{v}$ 为制导炸弹速度及其变化率;D_{B} 为炸弹所受阻力;m_{B} 为炸弹质量;g 为重力加速度;ξ 为弹道偏角;θ 为弹道倾角;n_{d} 为法向过载;n_{t} 为侧向过载。

2）制导律模型

UCAV 机载制导炸弹采用比例导引律,不考虑滚转角及滚转角速率影响,可将制导炸弹在三维空间上的运动解耦成俯冲和转弯 2 个平面上的运动。

制导炸弹视线角速率为

$$\begin{cases}q_{\mathrm{d}}=\arctan\left(\dfrac{(s_m-s_T)}{(l_m-l_T)}\right)\\ q_{\mathrm{t}}=\arctan\left(-\dfrac{(p_m-p_T)}{d}\right)\end{cases}\tag{5}$$

式中:(l_m,p_m,s_m) 表示投放后制导炸弹位置,其中 l_m 代表纵向射程;p_m 代表侧向射程;$(l_{\mathrm{T}},p_{\mathrm{T}},s_{\mathrm{T}})$ 代表目标点位置;q_{d} 和 q_{t} 分别为视线在俯冲平面内的高低角和转弯平面内的方位角,则为制导炸弹与目标相对距离

$$d=\sqrt{(s_m-s_{\mathrm{T}})^2+(l_m-l_{\mathrm{T}})^2+(p_m-p_{\mathrm{T}})^2}\tag{6}$$

考虑制导炸弹采用传统比例导引律,则有

$$\begin{cases} n_d = \dfrac{K_d V \dot{q}_d}{g + \cos\theta} \\ n_t = \dfrac{-K_t(V\dot{q}_t \cos\theta)}{g} \end{cases} \tag{7}$$

式中，K_d 和 K_t 为比例导引律的增益。

1.2.2　制导炸弹可投放区模型

可投放区模型的求解主要包括两方面内容：通过计算极限射程弹道获得制导炸弹可达域；将可达域变换得到可投放区边界。可投放区求解流程如图 1 所示。

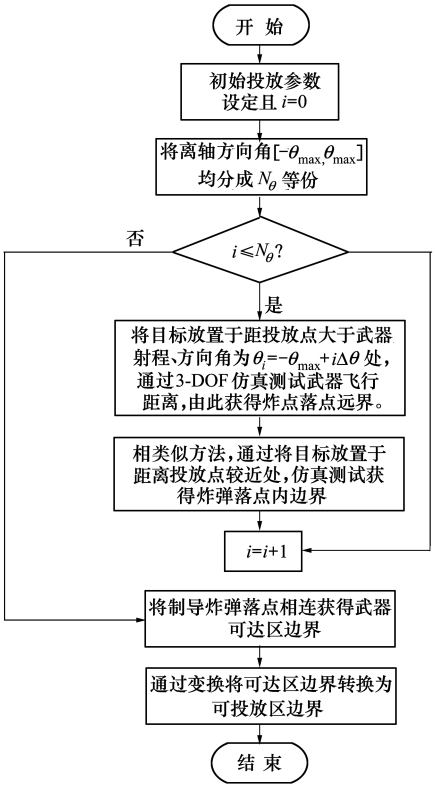

图 1　机载制导炸弹可投放区包络求解流程

1.3　UCAV 武器投放航迹规划约束条件

UCAV 武器投放航迹规划时需满足边值和过程约束两类约束条件。

1.3.1　边值约束条件

边值约束条件主要包括初值约束和终端约束。

1）初值约束

设任务起始时刻为 t_s，则初值约束为

$$\begin{cases} x(t_s) = x_s,\ y(t_s) = y_s, \\ h(t_s) = h_s,\ m(t_s) = m_s, \\ V(t_s) = V_s,\ \gamma(t_s) = \gamma_s,\ \psi(t_s) = \psi_s \end{cases} \tag{8}$$

2）终端约束

为保证高精度打击，将制导炸弹可投放区作为 UCAV 航迹规划的终端约束条件。考虑到实际投放区域离可投放区中心越近时，制导炸弹抗干扰能力越强，命中率越高[18]。因此将区域终端约束条件简化为将 UCAV 航迹末端点尽可能靠近可投放区中心位置。设可投放区中心点坐标为 $(\bar{x},\bar{y})$，则有

$$\begin{cases} \bar{x} = \dfrac{\sum_{j=1}^{N_p} x_j}{N_p} \\ \bar{y} = \dfrac{\sum_{j=1}^{N_p} y_j}{N_p} \end{cases} \tag{9}$$

式中：(x_j, y_j) 为第 j 个可投放区包络顶点；N_p 为包络顶点个数。因此 UCAV 投放航迹终端约束为

$$\bar{d} = \sqrt{(x_f - \bar{x})^2 + (y_f - \bar{y})^2} \leqslant \varepsilon \tag{10}$$

式中：ε 为地理坐标系下所允许的距离偏差；x_f，y_f 及 h_f 分别为 UCAV 航迹末端点位置。

此外，在武器投放点 UCAV 还需要满足一定的速度和姿态约束，即

$$\begin{cases} V(t_f) = V_{release} \\ \gamma(t_f) = \gamma_{release} \\ \alpha(t_f) = \alpha_{release} \\ \psi(t_f) = \psi_{release} \end{cases} \tag{11}$$

式中：t_f 为终端时刻；$V_{release}$ 为武器投放速度；$\gamma_{release}$ 为投放航迹倾角；$\alpha_{release}$ 为投放迎角；$\psi_{release}$ 为投放滚转角。

1.3.2　过程约束条件

飞行过程中，UCAV 需满足机动性能约束和战场环境约束。

1）机动性能约束

机动性能约束条件主要包括航迹控制量、速度、加速度、航向角及最小转弯半径等约束。根据 UCAV 机动性能，具体建立如下过程约束条件

$$\begin{cases} V_{min} \leqslant V(t) \leqslant V_{max},\ h_{min} \leqslant h(t) \leqslant h_{max}, \\ a_{min} \leqslant \dot{V}(t) \leqslant a_{max},\ \gamma_{min} \leqslant \gamma(t) \leqslant \gamma_{max}, \\ \mu_{min} \leqslant \mu(t) \leqslant \mu_{max},\ \alpha_{min} \leqslant \alpha(t) \leqslant \alpha_{max}, \\ \beta_{min} \leqslant \beta(t) \leqslant \beta_{max},\ 0 \leqslant \delta(t) \leqslant 1, \\ |\dot{\alpha}(t)| \leqslant \dot{\alpha}_{max},\ |\dot{\mu}(t)| \leqslant \dot{\mu}_{max}, \\ |\dot{\alpha}(t) + \dot{\gamma}(t)\cos\mu(t) + \dot{\psi}(t)\cos\gamma(t)\sin\mu(t)| \leqslant Q_{max}, \\ |\mu(t)| \leqslant P_{max}(\alpha(t), h(t), Ma(h(t), V(t))), \\ C_L(\alpha(t), Ma(h(t), V(t))) \leqslant C_{L,max} \end{cases} \tag{12}$$

式中:$Q_{\max}$ 和 $P_{\max}$ 分别为 UCAV 在俯仰和滚转方向上的最大角度变化率;Ma 为飞行器飞行马赫数;$|\alpha(t)|$和$|\mu(t)|$分别为 UCAV 攻角和滚转角变化率数值;$\alpha_{\max}$ 和 $\mu_{\max}$ 分别为最大攻角及滚转角变化率;$C_{L,\max}$ 为最大升力系数。

2) 战场环境约束

UCAV 在对地攻击过程中会碰到地形障碍及防空阵地等安全威胁。飞行过程中 UCAV 应尽可能避开这些威胁,同时与目标保持一定距离以保证自身安全。

战场环境约束条件主要分为硬威胁和软威胁 2 类。硬威胁是指无人机无法进入的障碍区域,例如山体、建筑物及其他禁飞区;软威胁则是指与防空武器相关的安全威胁,例如地空导弹、防空火炮等。

(1) 硬威胁模型

以圆柱体作为硬威胁基本形状,设共有 M_1 个互不联通的硬威胁 $\boldsymbol{H}_m = \langle \boldsymbol{A}_m, \boldsymbol{P}_m \rangle, m = 1, \cdots, M_1$,其中 $\boldsymbol{A}_m$ 为圆柱体中心点坐标;$\boldsymbol{P}_m$ 为形状参数矩阵,特别的,$\boldsymbol{P}_m = \mathrm{diag}(a^2, b^2, c^2)$ 时圆柱体三轴分别与 x 轴、y 轴和 z 轴平行,当 $a = b = c = r$ 时 $\boldsymbol{P}_m$ 表示半径为 r 的球体,$\boldsymbol{P}_m$ 中非对角线元素不为零则表示威胁体坐标轴与航迹坐标系轴之间存在非零夹角。考虑到硬威胁三维模型中 $\boldsymbol{A}_m$ 和 $\boldsymbol{P}_m$ 难以确定,在 UCAV 定高飞行模式下,将 $\boldsymbol{A}_m$ 和 $\boldsymbol{P}_m$ 简化为二维形式更易于计算。因此在高度为 h 处,硬威胁 $\boldsymbol{H}_m$ 可由二维中心点坐标 $\boldsymbol{A}_m(h)$ 和形状参数矩阵 $\boldsymbol{P}_m(h)$ 共同确定。

综上 UCAV 硬威胁度函数可定义为

$$F_m(\boldsymbol{p}(h)) = 1 - (\boldsymbol{p}(h) - \boldsymbol{A}_m(h))^{\mathrm{T}} \boldsymbol{P}_m^{-1}(h)(\boldsymbol{p}(h) - \boldsymbol{A}_m(h)) \tag{13}$$

式中,$\boldsymbol{p}(h) = (x, y)$ 表示在飞行高度为 h 时 UCAV 在 2D 平面内位置坐标。当 $F_m(\boldsymbol{p}(h)) < 0$ 时,UCAV 可成功躲避硬威胁 H_m。

(2) 软威胁模型

与硬威胁不同,UCAV 与软威胁之间不存在碰撞问题,无人机应尽可能远离软威胁。设共有 M_2 个软威胁,飞行高度为 h 时,第 $j(j = 1, \cdots, M_2)$ 个软威胁对 UCAV 的威胁度函数可表示为

$$\Omega_j(\boldsymbol{p}(h)) = \lambda(h)\exp\left[-\frac{1}{2}(\boldsymbol{p} - \boldsymbol{B}_j(h))^{\mathrm{T}} Q_j^{-1}(h)(\boldsymbol{p} - \boldsymbol{B}_j(h))\right] \tag{14}$$

式中:$\lambda(h)$ 为与高度 h 有关的软威胁强度系数;$\boldsymbol{B}_j(h)$ 和 $Q_j(h) \geqslant 0$ 分别为第 j 个软威胁位置和威胁区域半径。当 UCAV 以恒定高度飞行或飞行高度变化不大时,$\lambda(h)$ 可设为 1。

软威胁度函数 $\Omega_j(p(h))$ 表征了 UCAV 位于(x, y, h) 时被第 j 个软威胁击中或摧毁的概率。通过将所有软威胁的威胁度叠加,可获得整体软威胁度,即

$$\Omega(\boldsymbol{p}(h)) = \sum_{j=1}^{M_2} \Omega_j(\boldsymbol{p}(h)) \tag{15}$$

$\Omega(\boldsymbol{p}(h))$ 数值越小,表明 UCAV 受到的软威胁程度越低。

1.4　UCAV 航迹规划目标函数

UCAV 投放航迹规划目标主要可分为 3 个方面:①尽可能接近机载武器投放区中心点;②避免与硬威胁发生碰撞;③尽可能远离软威胁。据此 UCAV 最优路径转化为以下最优控制问题

$$\min_{\{p_{\mathrm{UAV}i}(t), u_{\mathrm{UAV}i}(t)\}} \int_{t_s}^{t_f} \Big[C_1 \sum_{i=1}^{N} \| p_{\mathrm{UAV}i}(t) - q_{T_i}(t) \| + \kappa C_2 \sum_{i=1}^{N} \omega(p_{\mathrm{UAV}i}(t)) \Big] \mathrm{d}t \tag{16}$$

式中:$q_{T_i}(t) = (\bar{x}_{T_i}, \bar{y}_{T_i})$ 为攻击目标 T_i 所对应的投放区中心点坐标;C_1 和 C_2 分别表示目标 ① 和 ③ 的权重系数,$C_1 > C_2 \geqslant 0$ 且 $C_1 + C_2 = 1$;

由于战场环境具有动态多变、复杂不确定的特点,UCAV 对战场态势信息很难具备准确的先验知识,一般只能依靠其传感器来对局部环境信息进行探测。因此,引入了模型预测控制(model predictive control,MPC)中的滚动规划策略将航迹规划控制在一个移动区域中滚动进行,根据其时空约束条件控制每次滚动的优化范围,保证无人机航迹规划的实时性。

因此,上述航迹规划最优控制问题模型可进一步转化为

$$\min_{p_{\mathrm{UAV}i}(t)} \int_{t_k}^{t_k+\delta\cdot\Delta t} \Big[C_1 \sum_{i=1}^{N} \| p_{\mathrm{UAV}i}(t) - q_{T_i}(t) \| + \kappa C_2 \sum_{i=1}^{N} \Omega(p_{\mathrm{UAV}i}(t)) \Big] \mathrm{d}t \tag{17}$$

式中:δ 为时域长度;Δt 为单位时间步长。为保证求解精度,δ 和 Δt 取值不宜过大,但二者数值较小将导致计算负担增大。本文中设 $\delta = 1$。

2 基于威胁建模的 UCAV 在线航迹规划算法

2.1 在线航迹规划关键要素

设 UAV^i 当前状态量 $\boldsymbol{S}_{\mathrm{UAV}i}(k)$ 由二元组 $\langle \boldsymbol{p}_{\mathrm{UAV}i}(k), V_{\mathrm{UAV}i}(k)\rangle$ 表示，其中 $\boldsymbol{p}_{\mathrm{UAV}i}(k) = (x_{\mathrm{UAV}i}(k), y_{\mathrm{UAV}i}(k), h_{\mathrm{UAV}i}(k))^{\mathrm{T}}$ 为无人机位置坐标，$V_{\mathrm{UAV}i}(k)$ 为无人机速度。为便于分析，仅考虑UCAV以定高模式飞行，即 $h_{\mathrm{UAV}i}(k) \equiv h_{\mathrm{UAV}i}$。由 UCAV 质点运动学方程可知，单位时间步长后 UCAV 速度和航向角变化范围为

$$O^{\psi}_{\mathrm{UAV}i} = [\psi_{\mathrm{UAV}i}(k) + \dot{\psi}_{\min}\cdot\Delta t, \psi_{\mathrm{UAV}i}(k) + \dot{\psi}_{\max}\cdot\Delta t] \tag{18}$$

$$O^{V}_{\mathrm{UAV}i} = [\max\{V_{\mathrm{UAV}i} + a_{\min}\cdot\Delta t, V_{\min}\}, \min\{V_{\mathrm{UAV}i} + a_{\max}\cdot\Delta t, V_{\max}\}] \tag{19}$$

UAV^i 与投放区中心 q_{T_i} 之间的视线角为

$$\varphi_{\mathrm{UAV}i}(k) = \tan^{-1}\left(\frac{\bar{y}_{T_i}(k) - y_{\mathrm{UAV}i}(k)}{\bar{x}_{T_i}(k) - x_{\mathrm{UAV}i}(k)}\right) \tag{20}$$

此时 UAV^i 以最大和最小转弯率能到的极限距离分别为

$$\boldsymbol{p}^{\mathrm{TMAX}}_{\mathrm{UAV}i}(k) = [x_{\mathrm{UAV}i}(k), y_{\mathrm{UAV}i}(k), h_{\mathrm{UAV}i}]^{\mathrm{T}} + \frac{V_{\mathrm{UAV}i}(k)}{\dot{\psi}_{\max}}\cdot \begin{bmatrix} \sin\left(\psi_{\mathrm{UAV}i}(k) + \frac{\pi}{2}\right) - \sin(\psi_{\mathrm{UAV}i}(k)), \\ -\cos\left(\psi_{\mathrm{UAV}i}(k) + \frac{\pi}{2}\right) + \cos(\psi_{\mathrm{UAV}i}(k)), \\ 0 \end{bmatrix} \tag{21}$$

$$\boldsymbol{p}^{\mathrm{TMIN}}_{\mathrm{UAV}i}(k) = [x_{\mathrm{UAV}i}(k), y_{\mathrm{UAV}i}(k), h_{\mathrm{UAV}i}]^{\mathrm{T}} + \frac{V_{\mathrm{UAV}i}(k)}{\dot{\psi}_{\min}}\cdot \begin{bmatrix} \sin\left(\psi_{\mathrm{UAV}i}(k) + \frac{\pi}{2}\right) - \sin(\psi_{\mathrm{UAV}i}(k)), \\ -\cos\left(\psi_{\mathrm{UAV}i}(k) + \frac{\pi}{2}\right) + \cos(\psi_{\mathrm{UAV}i}(k)), \\ 0 \end{bmatrix} \tag{22}$$

2.2 威胁规避策略

下面分别计算 UCAV 飞行过程中遭遇硬威胁和软威胁时航向角的最优变化范围。

1）硬威胁避碰策略

设 UAV^i 飞行过程中存在硬威胁 $\boldsymbol{H}_m = \langle \boldsymbol{A}_m, \boldsymbol{P}_m\rangle (m = 1,\cdots,M_1)$ 使得 $F_m(\boldsymbol{p}^{\mathrm{TMIN}}_{\mathrm{UAV}i}(k)) \geqslant 0$ 或 $F_m(\boldsymbol{p}^{\mathrm{TMAX}}_{\mathrm{UAV}i}(k)) \geqslant 0$，其中 $\boldsymbol{A}_m = [a_x\ a_y]^{\mathrm{T}}, \boldsymbol{P}_m = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{12} & b_{22} \end{bmatrix}$。

为了保证 UCAV 飞行安全，其航向角变化范围为

$$\psi^{\mathrm{var}-H_m}_{\mathrm{UAV}i}(k) = \left[\psi^{H_m}_{\mathrm{UAV}i}(k) - \frac{\pi}{2}, \psi^{H_m}_{\mathrm{UAV}i}(k) + \frac{\pi}{2}\right] \tag{23}$$

式中，$\psi^{H_m}_{\mathrm{UAV}i}(k)$ 为与 $p_{\mathrm{UAV}i}(k)$ 和 $\boldsymbol{A}_m$ 连线与 H_m 表面交点 $P_{\mathrm{in}} = (x_{\mathrm{in}}, y_{\mathrm{in}})$ 切线垂直且与 $p_{\mathrm{UAV}i}(k) - \boldsymbol{A}_m$ 连线成锐角（如图 2 所示）。

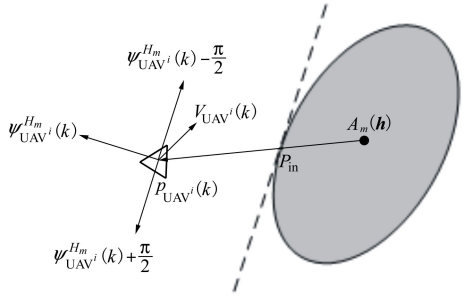

图 2 UCAV 躲避硬威胁航向角变化

由图 2 可得，与 P_{in} 处切线垂直的 2 个方向为

$$\Psi^{H_m,\pm}_{\mathrm{UAV}i}(k) = \tan^{-1}\left(\frac{\pm[b_{11}(y_{in} - a_y) - b_{12}(x_{in} - a_x)]}{\pm[b_{22}(y_{in} - a_x) - b_{12}(x_{in} - a_y)]}\right) \tag{24}$$

式中

（1）当 $y_{\mathrm{UAV}i}(k) = a_y$ 时，有

$$y_{\mathrm{in}} = a_y$$

$$x_{\mathrm{in}} = \begin{cases} a_x + \sqrt{\dfrac{b_{11}b_{22} - b_{12}^2}{b_{22}}}, & \text{if} \quad x_{\mathrm{UAV}i}(k) \geqslant a_x \\ a_x - \sqrt{\dfrac{b_{11}b_{22} - b_{12}^2}{b_{22}}}, & \text{otherwise} \end{cases}$$

（2）当 $y_{\mathrm{UAV}i}(k) \neq a_y$ 时，有

$$y_{\mathrm{in}} = a_y + \frac{(y_{\mathrm{UAV}i}(k) - a_y)\sqrt{b_{11}b_{22} - b_{12}^2}}{\sqrt{\Gamma}}$$

$$x_{\mathrm{in}} = a_x + \frac{(x_{\mathrm{UAV}i}(k) - a_x)(y_{\mathrm{in}} - a_y)}{(y_{\mathrm{UAV}i}(k) - a_y)}$$

式中

$$\Gamma = b_{22}(x_{\mathrm{UAV}i}(k) - a_x)^2 + b_{11}(y_{\mathrm{UAV}i}(k) - a_y)^2 - 2b_{12}(x_{\mathrm{UAV}i}(k) - a_x)(y_{\mathrm{UAV}i}(k) - a_y)$$

无硬威胁情况下，则有 $O^{\psi-H}_{\mathrm{UAV}i}(k) = [0, 2\pi)$。

2）软威胁躲避策略

根据任务参数 $\tilde{\omega}$ 设定威胁度阈值 $\xi(\tilde{\omega})$。为避免 UCAV 毁伤,UCAV 飞行过程中应禁止进入威胁度大于 $\xi(\tilde{\omega})$ 的区域。当 $\Omega(\boldsymbol{p}_{\mathrm{UAV}^i}^{\mathrm{TMIN}}(k)) \geqslant \xi(\tilde{\omega})$ 或 $\Omega(\boldsymbol{p}_{\mathrm{UAV}^i}^{\mathrm{TMAX}}(k)) \geqslant \xi(\tilde{\omega})$ 时,UCAV 航向角变化范围则为

$$O_{\mathrm{UAV}^i}^{\psi-S}(k) = \left[\psi_{\mathrm{UAV}^i}^{S}(k) - \frac{\pi}{2}, \psi_{\mathrm{UAV}^i}^{S}(k) + \frac{\pi}{2}\right] \tag{25}$$

式中

$$\psi_{\mathrm{UAV}^i}^{S}(k) = \tan^{-1}\left(\left.\frac{-\dfrac{\partial\Omega(p)}{\partial y}}{-\dfrac{\partial\Omega(p)}{\partial x}}\right|_{p=p_{\mathrm{UAV}^i}(k)}\right)$$

否则, $O_{\mathrm{UAV}^i}^{\psi-S}(k) = [0, 2\pi)$。

2.3　基于威胁建模的在线航迹规划流程

依据建立的硬、软威胁模型,UCAV 飞行态势可分为以下 4 种情况:

Case 1　若 UCAV 保持当前速度飞行,大概率会与硬威胁 H_m 发生碰撞,UAV^i 需最大程度降低速度,以尽快转弯实现避障;

Case 2　若 UCAV 继续保持当前速度飞行,飞行器很可能进入高危区域,此时 UAV^i 同样需尽快降低速度,远离高危区域;

Case 3　UCAV 可安全飞行但距离投放区较远,此时 UAV^i 应保持当前航向,尽快飞往可投放区。

Case 4　UCAV 距离投放区中心的距离已经满足任务要求,此时 UAV^i 应调整姿态,准备完成机载武器投放。

根据上述 UCAV 飞行态势分析,在线航迹规划过程中,定义如下 2 个态势判别变量

$$O_{\mathrm{UAV}^i}^{\mathrm{CA}}(k) = O_{\mathrm{UAV}^i}^{\psi-H_m}(k) \cap O_{\mathrm{UAV}^i}^{\psi}(k) \tag{26}$$

$$O_{\mathrm{UAV}^i}^{\mathrm{RH}}(k) = O_{\mathrm{UAV}^i}^{\mathrm{CA}}(k) \cap O_{\mathrm{UAV}^i}^{\psi-S}(k) \tag{27}$$

态势判别变量与 UCAV 飞行态势之间对应关系如表 1 所示。表 1 中, $\varepsilon_{\mathrm{UAV}^i}^{q_{T_i}}$ 为 UAV^i 与 q_{T_i} 之间相对距离,$\varepsilon_{\mathrm{RH}}$ 为给定的允许距离误差。为了快速实现 UCAV 安全抵达可投放区,基于硬、软威胁模型的在线航迹规划流程如图 3 所示。

表 1 态势状态变量与 UCAV 飞行态势对应关系

态势判别变量	态势情况序号
$O_{\mathrm{UAV}^i}^{\mathrm{CA}}(k) = \varnothing$	1
$\begin{cases} O_{\mathrm{UAV}^i}^{\mathrm{CA}}(k) \neq \varnothing, \\ O_{\mathrm{UAV}^i}^{\mathrm{RH}}(k) = \varnothing \end{cases}$	2
$\begin{cases} O_{\mathrm{UAV}^i}^{\mathrm{CA}}(k) \neq v, \\ O_{\mathrm{UAV}^i}^{\mathrm{RH}}(k) \neq \varnothing, \\ \varepsilon_{\mathrm{UAV}^i}^{q_{T_i}}(k) > \varepsilon_{\mathrm{RH}} \end{cases}$	3
$\begin{cases} O_{\mathrm{UAV}^i}^{\mathrm{CA}}(k) \neq \varnothing, \\ O_{\mathrm{UAV}^i}^{\mathrm{RH}}(k) \neq \varnothing, \\ \varepsilon_{\mathrm{UAV}^i}^{q_{T_i}}(k) \leqslant \varepsilon_{\mathrm{RH}} \end{cases}$	4

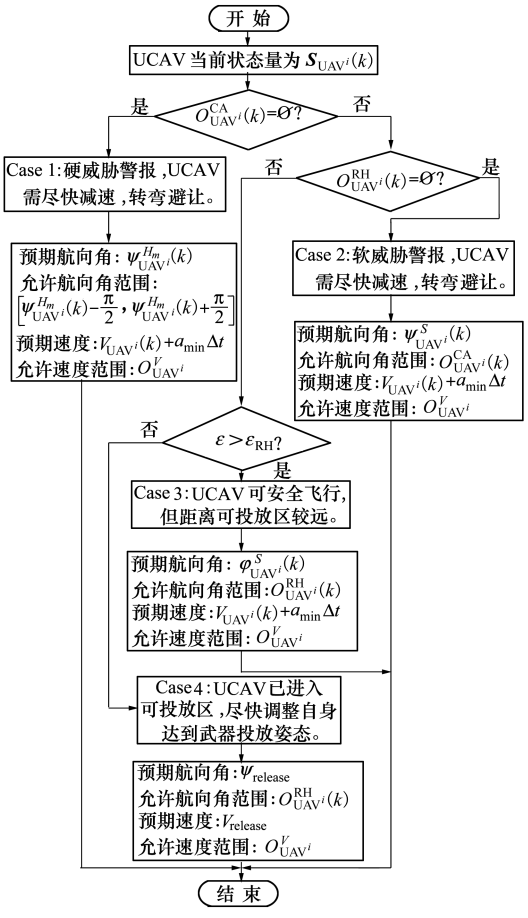

图 3　基于威胁建模的武器投放在线航迹规划流程

3　仿真结果及分析

以攻击型无人机执行对地攻击任务为例,对文中提出的武器投放航迹在线规划算法进行仿真验证。

设定多无人机之间为全连通通信网络。仿真实验环境硬件为 Intel(R) Core(TM) i7-2630QM CPU 2.00 GHz, Win 7 操作系统,应用基于 MATLAB R2019a 的 GPOPS 工具包获得控制参数。

3.1　任务环境想定

UCAV 性能参数如表 2 所示。任务仿真想定如下:UCAV 初始位置为(2,3,1.5) km,地面静态目标位置为(14,14,0) km,初始速度为 $V_0 = 200$ m/s,初始航向角 $\psi_0 = 135°$, $\gamma_0 = 0$,初始载油量为 $m_{\text{full}} = 3\ 000$ kg。

硬威胁为建筑物,软威胁分别是雷达和防空导弹阵地。机载制导武器投放速度 $V_{\text{release}} = 250$ m/s, $\gamma_{\text{release}} = 0°$, $\psi_{\text{release}} \in [-10°, 10°]$, $\alpha_{\text{release}} = 0°$。$C_1 = C_2 = 0.5$,软威胁度阈值 $\xi = 0.6$, $\varepsilon_{\text{RH}} = 1$ km。起始时刻为 $t_0 = 0$, $\Delta t = 1$ s。

表 2　UCAV 性能参数

飞行器质量/kg	气动特征面积/m^2	燃料消耗系数 $c/10^{-6}$	最大飞行高度/km	$[V_{\min}, V_{\max}]$/(km·s^{-1})	$[\psi_{\min}, \psi_{\max}]$/(°)	$[\gamma_{\min}, \gamma_{\max}]$/(°)
13 760	49.24	6.377	12	[0.082,0.59]	[-180,180]	[-89,89]
$[\alpha_{\min}, \alpha_{\max}]$/(°)	$[\beta_{\min}, \beta_{\max}]$/(°)	$[\mu_{\min}, \mu_{\max}]$/(°)	过载/g	$[\dot{\alpha}_{\min}, \dot{\alpha}_{\max}]$/(°·$s^{-1}$)	$[\dot{\beta}_{\min}, \dot{\beta}_{\max}]$/(°·$s^{-1}$)	$[\dot{\mu}_{\min}, \dot{\mu}_{\max}]$/(°·$s^{-1}$)
[-10,30]	[-20,20]	[-75,75]	≤6.8	[-30,30]	[-10,10]	[-50,50]

3.2　场景 1:静态场景航迹规划仿真分析

场景 1 中 UCAV 起始位置为(2, 3,1.5) km,地面固定目标位于(14,14,0) km 处。战场环境如 3.1 节所示。规划航迹结果如图 4 所示(图中红色线条代表 UCAV 飞行航迹,蓝色线条表示制导炸弹弹道)。算法运行时间为 8.42 s,总飞行时长为 90 s。

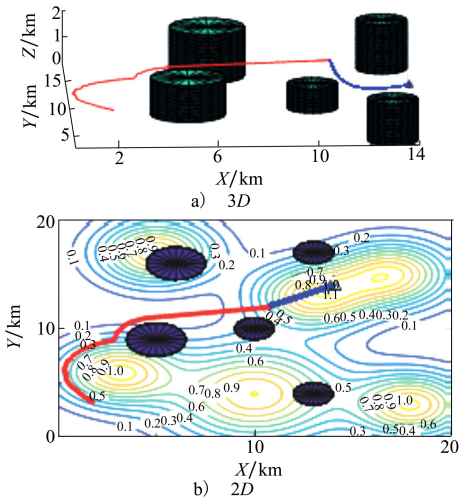

图 4　UCAV 武器投放航迹

由图 4 可以看出,本文所提出的在线规划策略生成航迹较为光滑,UCAV 能够灵活避开软、硬威胁,成功达到可投放区中心点附近。武器投放点距离可投放区中心点 0.258 0 km。

3.3　场景 2:动态场景航迹规划仿真分析

为了验证 UCAV 武器投放在线航迹规划方法的可行性与有效性,场景 2 中对突发机动威胁和机动目标的情况进行仿真实验。机动威胁为敌方 UCAV,威胁半径为 0.5 km,其预测速度为 200 m/s,预测航向角为 135°。地面机动目标以 30 m/s 的速度朝西北方向移动。

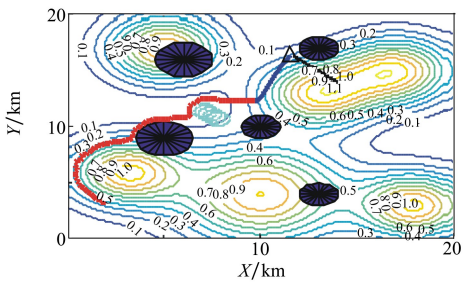

图 5　突发机动威胁和机动目标下 UCAV 航迹

为了直观展示动态场景下 UCAV 在线规划航迹,图 5 给出了 UCAV 航迹的三维投影图。图中红色线条代表 UCAV 航迹,浅蓝色圆形代表突发机动威胁,深蓝色线段为制导炸弹航迹,黑色线段为机动目标轨迹。算法运行时间为 9.35 s,总飞行时长为 94 s。武器投放点距离可投放区中心点 0.032 7 km。

由图 5 可知,本文所提算法可实现动态威胁场景下 UCAV 在线航迹规划。当飞行时间为 71 s 时,UCAV 探测到突发机动威胁,通过改变控制参量实

现降速并调整航向,成功避开突发威胁,并最终飞抵可投放区中心附近。当 $t=71$ s 时,UCAV 侦察到突发机动威胁,依据威胁规避策略 UCAV。本节仿真结果展示了本文所提在线轨迹规划算法对存在突发机动威胁和机动目标的动态场景的适用性。

3.4　算法性能比较

为进一步验证算法性能,将本文所提航迹规划算法与稀疏 A* 算法进行对比,2 种算法静态航迹对比如图 6 所示,仿真参数设定同场景 1。

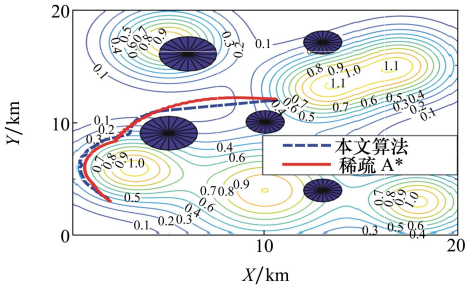

图 6　算法静态场景航迹对比图

表 3 给出了 2 种算法在静态场景下的平均威胁代价(所有航迹点威胁代价的平均值)和航迹长度。

表 3　算法静态场景性能比较

算法号	平均威胁代价	航迹长度/km
1	0.005 4	16.735 5
2	0.007 3	18.153 6

表 4 中,算法 1 为本文所提在线航迹规划算法,算法 2 为稀疏 A* 搜索算法。

由表 4 可以看出,基于本文所提算法在静态场景下规划的航迹长度最短且总威胁代价最小。

在实现静态航迹规划基础上随机产生动态威胁,移动威胁参数设定同场景 2,动态场景下航迹规划仿真结果如图 7 所示。

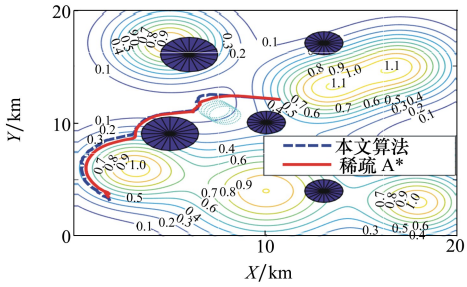

图 7　算法动态场景航迹对比图

表 4 给出了 2 种算法在动态场景下的平均威胁代价和航迹长度。

表 4　算法动态场景性能比较

算法号	平均威胁代价	航迹长度/km
1	0.005 3	18.649 7
2	0.006 8	18.420 3

由表 5 可以看出,2 种算法规划的航迹都较好躲避了突发动态威胁,基于本文所提算法在动态场景下规划的航迹平均威胁代价最小但飞行航迹长度稍长于 SAS 算法。

4　结　论

基于战场环境威胁建模,本文提出了一种考虑机载武器投放约束的固定翼 UCAV 确定性在线轨迹规划方法。仿真结果表明,本文设计的在线航迹规划策略可使得 UCAV 在成功进入制导炸弹可投放区的同时有效避开战场威胁。基于本文算法所得飞行轨迹质量随着时间步长取值缩小而增加,但与此同时算法计算量急剧增大。因此,如何将在线轨迹规划与基于智能优化算法的预先航路规划进行有效结合,并依据战场环境特性实现在线规划步长的自适应调整是后续研究的重点。

参考文献:

[1]　粟建波, 钟海, 尹文强. 基于 Radau 伪谱法的 UCAV 攻击突防航迹规划研究[J]. 计算机仿真, 2019, 36(10): 54-58
SU Jianbo, ZHONG Hai, YIN Wenqiang. Research on trajectory planning of UCAV attack based on Radau pseudospectral method[J]. Computer Simulation, 2019, 36(10): 54-58 (in Chinese)

[2]　董文洪, 马培蓓, 纪军. 攻击型无人机作战过程研究[J]. 战术导弹技术, 2018, 1: 9-15
DONG Wenhong, MA Peibei, JI Jun. Research on combat processing of UCAV[J]. Tactical Missile Technology, 2018, 1: 9-15 (in Chinese)

[3] 王渊, 魏政磊, 黄长强, 等. 不确定条件下无人机编队在线协同航迹规划研究[J]. 西北工业大学学报, 2018, 36(6): 1145-1155
WANG Yuan, WEI Zhenglei, HUANG Changqiang, et al. Online cooperative trajectory planning for UCAV formation in uncertain environment[J]. Journal of Northwest Polytechnical University, 2018, 36(6): 1145-1155 (in Chinese)

[4] PEHLIVANOGLU Y V. A new vibrational genetic algorithm enhanced with a Voronoi diagram for path planning of autonomous UAV[J]. Aerospace Science & Technology, 2012, 16(1): 47-55

[5] 潘广贞, 李亚女. 基于改进型 Voronoi 图的无人机航迹规划研究[J]. 电光与控制, 2014(4): 15-19
PAN Guangzhen, LI Yanü. Route planning for UAVs based on improved Voronoi diagram[J]. Electronics Optics & Control, 2014(4): 15-19 (in Chinese)

[6] 张淘沙, 鲁艺, 张亮, 等. 改进型 Voronoi 图和动态权值 A* 算法的无人机航迹规划[J]. 火力与指挥控制, 2015(2): 156-160
ZHANG Taosha, LU Yi, ZHANG Liang, et al. UAV path planning based on improved Voronoi diagram and dynamic weights A* algorithm[J]. Fire Control & Command Control, 2015(2): 156-160 (in Chinese)

[7] 陈志旺, 夏顺, 李建雄, 等. 基于定向 A* 算法的多无人机同时集结分步策略[J]. 控制与决策, 2019, 34(6): 1169-1177
CHEN Zhiwang, XIA Shun, LI Jianxiong, et al. Serial strategy for rendezvous of multiple UAVs based on directional A* algorithm[J]. Control & Decision, 2019, 34(6): 1169-1177 (in Chinese)

[8] 占伟伟, 王伟, 陈能成, 等. 一种利用改进 A* 算法的无人机航迹规划[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40(3): 315-320
ZHAN Weiwei, WANG Wei, CHEN Nengcheng, et al. Path planning strategies for UAV based on improved A* algorithm[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2015, 40(3): 315-320 (in Chinese)

[9] 李军华, 刘群芳. 基于稀疏 A* 算法与文化算法的无人机动态航迹规划[J]. 应用科学学报, 2017, 35(1): 128-138
LI Junhua, LIU Qunfang. Dynamic path planning of unmanned aerial vehicle based on sparse A* algorithm and cultural algorithm[J]. Journal of Applied Science, 2017, 35(1): 128-138 (in Chinese)

[10] CHEN Y B, LUO G C, MEI Y S, et al. UAV path planning using artificial potential field method updated by optimal control theory[J]. International Journal of Systems Science, 2016, 47(6): 1407-1420

[11] 罗冠辰, 于剑桥, 张思宇, 等. 穿越恶劣天气区域的无人机航迹规划[J]. 北京理工大学学报, 2014, 34(10): 1054-1059
LUO Guanchen, YU Jianqiao, ZHANG Siyu, et al. UAV path planning across weather threat[J]. Trans of Beijing Institute of Technology, 2014, 34(10): 1054-1059 (in Chinese)

[12] 甄然, 甄士博, 吴学礼. 一种基于人工势场的无人机航迹规划算法[J]. 河北科技大学学报, 2017, 38(3): 278-284
ZHEN Ran, ZHEN Shibo, WU Xueli. An improved route planning algorithm for unmanned aerial vehicle based on artificial potential field[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2017, 38(3): 278-284 (in Chinese)

[13] YAO P, WANG H L. Three-dimensional path planning for UAV based on improved interfered fluid dynamical system and grey wolf optimizer[J]. Journal of the Optical Society of America B Optical Physics, 2016, 30(3):615-623

[14] 刘永兰, 李为民, 吴虎胜, 等. 基于狼群算法的无人机航迹规划[J]. 系统仿真学报, 2015, 27(8): 1838-1843
LIU Yonglan, LI Weimin, WU Husheng, et al. Track planning for unmanned aerial vehicles based on wolf pack algorithm[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(8): 1838-1843 (in Chinese)

[15] LIN N. An adaptive RRT based on dynamic step for UAV path planning[J]. Journal of Information & Computational Science, 2015, 12(5): 1975-1983

[16] 尹高扬, 周绍磊, 吴青坡. 无人机快速三维航迹规划算法[J]. 西北工业大学学报, 2016, 34(4): 564-570
YIN Gaoyang, ZHOU Shaolei, WU Qingpo. Efficient path planning algorithm in three dimensions for UAV[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2016, 34(4): 564-570 (in Chinese)

[17] 段海滨, 杨之元. 基于柯西变异鸽群优化的大型民用飞机滚动时域控制[J]. 中国科学: 技术科学, 2018, 48: 277-288
DUAN Haibin, YANG Zhiyuan. Large civil aircraft receding horizon control based on Cauthy mutation pigeon inspired optimization[J]. Sci Sin Tech, 2018, 48: 277-288 (in Chinese)

[18] 王文彬, 秦小林, 张力戈, 等. 基于滚动时域的无人机动态航迹规划[J]. 智能系统学报, 2018, 13(4):524-533
WANG Wenbin, QIN Xiaolin, ZHANG Lige, et al. Dynamic UAV trajectory planning based on receding horizon[J]. CAAI Trans on Intelligent Systems, 2018, 13(4): 524-533 (in Chinese)

[19] 刘畅, 谢文俊, 张鹏, 等. 多重威胁下的无人机自主避障航迹规划. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(4): 119-126
LIU Chang, XIE Wenjun, ZHANG Peng, et al. UAV autonomous obstacle avoidance[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(4): 119-126 (in Chinese)
[20] 刘博, 王小平, 周成, 等. 基于 RHC-QPSO 算法的无人机. 电光与控制, 2020, 27(10):1-7
LIU Bo, WANG Xiaoping, ZHOU Cheng, et al. Dynamic path planning of UAVs based on RHC-QPSO[J]. Electronics Optics & Control, 2020, 27(10):1-7

Online trajectory planning for UCAV performing ground attacks based on threat modeling

TANG Jiayu[1,2], LI Xiangmin[1], DAI Jinjin[1]
(1.Naval Aviation University, Yantai 264001, China;
2.Naval Research Academy, Beijing 100422, China)

Abstract: The paper studies how to plan the trajectories of an unmanned combat aerial vehicle (UCAV) that releases its airborne weapons and presents an online trajectory planning method based on threat modeling. Firstly, it analyzes the aerodynamic characteristics, engine thrust and fuel characteristics of the UCAV and builds its dynamic and kinematic models. Secondly, the trajectory planning model of the UCAV is formulated with flight performance constraints and battlefield threat constraints considered. To improve the accuracy of ground attacks, the envelope of a guided bomb's acceptable region of weapon release is studied, and the release center and posture of the guided bomb work as terminal planning conditions. Thirdly, an online trajectory planning method is proposed. With the help of threat modeling, the complicated trajectory planning problem is transformed into a simplified situation classification. Finally, the simulation results demonstrate that the online planning method proposed in the paper can provide feasible trajectories for a UCAV to succeed in releasing its airborne weapons.

Keywords: unmanned combat aerial vehicle; online trajectory planning; airborne weapon release; threat modeling

引用格式: *唐嘉钰, 李相民, 代进进. 基于威胁建模的 UCAV 武器投放在线航迹规划[J]. 西北工业大学学报, 2021, 39(2): 382-391*
TANG Jiayu, LI Xiangmin, DAI Jinjin. Online trajectory planning for UCAV performing ground attacks based on threat modeling[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2021, 39(2): 382-391 (in Chinese)

© 2021 Journal of Northwestern Polytechnical University.

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.