DOI:10.11918/202006107

多 UCAV 协同打击多目标实时三维航迹规划

李银通,韩 统,聂光戍,周 欢,赵 辉

(空军工程大学 航空工程学院,西安 710038)

摘 要: 为提高无人作战飞机(Unmanned combat aerial vehicle, UCAV)协同实时航迹规划的实时性和可操作性,针对多架UCAV协同执行对地作战任务过程中的协同实时航迹规划问题,提出一种基于自学习策略和Lévy飞行的正弦余弦优化算法(Sine cosine optimization algorithm with self-learning strategy and Lévy flight,SCASL)的多UCAV协同打击多目标实时三维航迹规划方法.首先,构建三维任务空间模型并根据UCAV平台性能设计了飞行速度、飞行高度、相对距离以及威胁规避等约束条件;其次,基于UCAV的三自由度运动学和动力学质点模型设计了协同实时航迹规划的决策变量;最后,根据UCAV作战使用战术原则构建了目标函数将协同实时航迹规划问题转化为优化问题,采用所提出的自学习策略和Lévy飞行的正弦余弦优化算法对模型进行求解,并采用病毒搜索算法(Virus colony search, VCS)求解模型作为对比实验. 仿真结果表明, 同等条件下, VCS求解模型得到的仿真结果满足协同性要求但不满足实时性要求,SCASL求解模型得到的仿真结果满足实时性与协同性要求,验证了本文所提出的基于SCASL的多UCAV协同实时航迹规划方法的有效性与优越性.

关键词: 无人作战飞机;协同航迹规划;实时三维航迹规划;正弦余弦优化算法;优化问题

中图分类号: V279;TP311 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2021)06-0128-10

Real-time 3D trajectory planning of multi-UCAV for cooperative multi-target attacking

LI Yintong, HAN Tong, NIE Guangshu, ZHOU Huan, ZHAO Hui

(College of Aeronautics Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: In view of the problem of collaborative real-time trajectory planning during the execution of ground combat missions by multiple unmanned combat aerial vehicles (UCAV), a real-time 3D trajectory planning method based on the sine cosine optimization algorithm with self-learning strategy and Lévy flight (SCASL) for multi-UCAV cooperatively attacking multi-targets was proposed to improve the real-time performance and operability of UCAV collaborative real-time trajectory planning. Firstly, the model of 3D mission space was constructed, and the constraints of flight speed, flight altitude, relative distance, and threat avoidance were designed according to the performance of UCAV. Secondly, the decision variables of collaborative real-time trajectory planning were designed based on the three-degree-of-freedom kinematics and dynamic particle model of UCAV. Finally, the objective function was constructed by transforming the collaborative real-time trajectory planning problem into an optimization problem according to the tactical principle of UCAV operations. The proposed SCASL was applied to solve the model, and the virus search algorithm (VCS) was adopted for comparison. Simulation results show that under the same conditions, the results obtained by VCS met the requirement of collaboration but not real-time, while the results obtained by SCASL met the requirements of both real-time and collaboration, which verifies the validity and superiority of the SCASL-based multi-UCAV collaborative real-time 3D trajectory planning method proposed in this paper.

Keywords: UCAV; cooperative trajectory planning; real-time 3D trajectory planning; sine and cosine optimization algorithm; optimization

无人作战飞机(Unmanned combat aerial vehicles,UCAV)是目前世界各军事强国争相发展的空中无人作战系统,能实施防空压制、对地打击、对空作战以及情报侦察等多种作战任务[1].UCAV协同航迹规划作为发挥协同作战效能的关键技术,目前已经成为无人作战系统领域的热点问题.

当前,无人机/无人作战飞机离线单/协同航迹规划的研究成果丰富[2-10],但实时航迹规划研究成果匮乏.江泽强等[11]在考虑无人机的机载探测范围条件下,采用滚动规划策略,提出一种基于RRT算法的单无人机实时二维航迹规划方法,解决了突发

收稿日期: 2020-06-19
基金项目: 航空科学基金(20175196019,201951096002);陕西省自然科学基金(2020JQ-481)
作者简介: 李银通(1995—),男,博士研究生;
赵 辉(1973—),男,教授,博士生导师
通信作者: 赵 辉,kgy_zhao@163.com

威胁条件下的单无人机实时二维航迹规划问题. 范伟伦等[12]考虑无人机动力学约束，提出了一种基于 RRT 算法的单无人机实时二维航迹规划方法，使规划出的航迹满足无人机的实际性能要求. Zhang 等[13]提出一种单无人机三维实时航迹规划方法，并采用改进 RRT 算法求解，结果显示满足实时性要求与误差要求. Cai 等[14]提出一种基于三层决策规划模型(Tri-level programing，TLP)的 UAV 实时航迹规划方法，解决了单 UAV 突发威胁下的实时航迹规划问题. You 等[15]提出一种基于情境空间的 UCAV 三维路径规划方法，根据战术要求，为单架 UCAV 规划跟踪目标并避免碰撞的实时航迹.

上述有关 UAV/UCAV 实时航迹规划的成果大多以单 UAV 航迹规划为研究对象，其中二维航迹规划成果与 UCAV 作战实际应用情况不符，三维实时航迹规划考虑地形因素和战术因素较少. 在多 UCAV 协同作战成为研究热点的背景下，单机实时航迹规划已不能满足需求，实时协同航迹规划已成为研究热点问题[16]. 因此，为满足多 UCAV 协同作战任务需求，本文以多 UCAV 协同执行对地作战任务为背景，考虑战术要求，提出一种多 UCAV 协同打击多目标实时三维航迹规划模型，将多 UCAV 协同实时航迹规划问题转化为优化问题，在此基础上，采用李银通等[17]提出的自学习策略和 Lévy 飞行的正弦余弦优化算法(Sine cosine optimization algorithm with self-learning strategy and Lévy flight，SCASL)对模型进行求解. 通过仿真实验验证本文所提出方法的有效性.

1　实时协同三维航迹规划模型

用于航迹规划的战场信息通常是不完备的，部分敌方威胁只有 UCAV 抵达其附近一定范围内才可能探测到，这些威胁称为突发威胁. 因此，UCAV 在按离线航迹飞行过程中需要利用机载设备进行实时探测，一旦发现离线航迹穿过威胁区就需要进行航迹实时重规划以规避威胁. 如图 1 所示，本文研究内容为实时协同航迹规划的方法，因此仅考虑探测到新威胁源进行实时航迹规划直到抵达目标点的过程，而不考虑 UCAV 在探测到新威胁之前的飞行状态.

本文受滚动时域控制思想的启发，将规划过程进行分割，对多 UCAV 协同打击多目标实时航迹进行滚动迭代规划. 从严格意义上说，每次滚动迭代规划只是对一个时间窗口内的航迹进行寻优规划，是一种局部航迹规划，目的是安全抵达任务目标区域，通常来说实时规划的航迹在局部是最优的，但从全局角度来看整条航迹是非最优的. 由于实时航迹规划严格来说是动态的局部规划过程，并且对实时性有严格要求，航迹规划耗时必须小于 UCAV 的滚动时域的时间窗口，因此必须在求解的耗时与最优性之间进行折中，在满足实时性要求的前提下获得相对较优的安全可飞航迹.

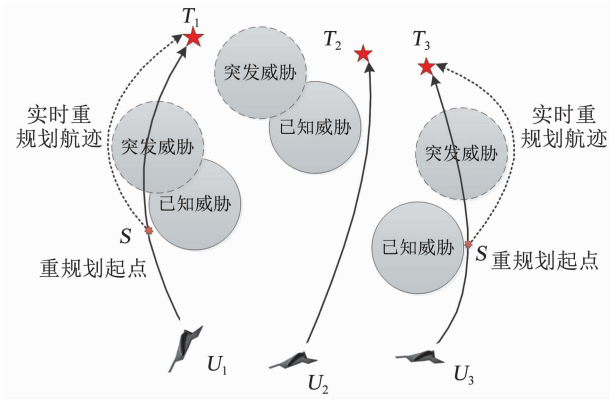


图 1　实时航迹重规划示意图

Fig. 1　Schematic diagram of real-time trajectory replanning

1.1　战场环境构建

战场环境构建主要分为地形构建和威胁构建两部分. 本文以三维山地地形为战场环境，作战任务空间 $\boldsymbol{\Phi}$ 可表示为

$$\boldsymbol{\Phi}=\{(x,y,h)\,|\,0\leqslant x\leqslant x_{\max},\ 0\leqslant y\leqslant y_{\max},\ 0\leqslant h\leqslant h_{\max}\}. \tag{1}$$

式中：x、y、h 分别为战场空间中的任意一点的横坐标、纵坐标以及高度；$x_{\max}$、$y_{\max}$、$h_{\max}$ 分别为作战任务空间的边界值. 本文采用航天飞机雷达地形测绘任务(shuttle radar topography mission，SRTM)数据来模拟实际的战场环境地形信息. SRTM 所包含的地形数据仅为节点处的高度信息，并不包含地形范围内任意位置点地形高度信息，因此，本文在规划过程中采用“二维三次卷积插值法”确定战场空间中任意位置处的地形高度[18].

作战任务空间，尤其是敌方重要目标附近通常部署有敌方的防空系统，主要包括探测雷达、导弹阵地以及防空高炮等. 在实际作战过程中，我方通常难以获得准确的敌方防空武器性能参数，只能通过各种探测方式获得部署的大概方位和类型，以此估计相应雷达的探测半径和相关武器的作战半径，所以难以精确建模. 此外，低空突防是目前有效的突防手段，在遇到敌方防空火力或雷达时，通常情况下采用转弯来规避而非爬升高度. 基于上述两点因素，为保证 UCAV 在飞行过程中的存活率以及航迹规划模型的简洁性，本文将威胁源的威胁范围和由天气原因形成的禁飞区均简化等效为具有一定高度的障碍模型.

1.2 UCAV 运动学模型

本文采用 UCAV 运动学三自由度质点模型对实时航迹规划过程中 UCAV 的动态特性进行描述(如图 2 所示),三维空间内 UCAV 在 t 时刻的运动状态可描述为

$$\boldsymbol{\Psi}(t)=[x(t),y(t),h(t),v(t),\psi(t),\vartheta(t),\gamma(t),\alpha(t)]. \tag{2}$$

式中:$x(t)$、$y(t)$、$h(t)$ 为 t 时刻 UCAV 在战场中的位置;$v(t)$、$\psi(t)$、$\vartheta(t)$、$\gamma(t)$、$\alpha(t)$ 分别为 t 时刻 UCAV 的速度、偏航角、航迹倾角、滚转角以及攻角.

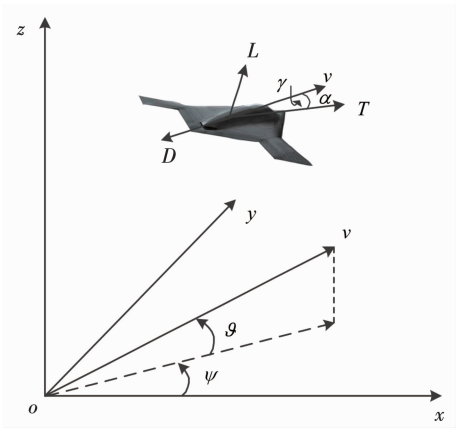


图 2 质点运动模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of particle motion model

UCAV 基于惯性坐标系的质点运动学模型可描述为

$$\begin{cases}\dot{x}(t)=v(t)\cdot\cos\vartheta(t)\cdot\cos\psi(t),\\ \dot{y}(t)=v(t)\cdot\cos\vartheta(t)\cdot\sin\psi(t),\\ \dot{h}(t)=v(t)\cdot\sin\vartheta(t).\end{cases} \tag{3}$$

UCAV 基于航迹坐标系的质点动力学模型可描述为

$$\begin{cases}\dot{v}(t)=\dfrac{T\cdot\cos\alpha(t)-D}{m}-g\cdot\sin\vartheta(t),\\ \dot{\psi}(t)=\dfrac{(L+T\cdot\sin\alpha(t))\cdot\sin\gamma(t)}{m\cdot v(t)\cdot\cos\vartheta(t)},\\ \dot{\vartheta}(t)=\dfrac{(L+T\cdot\sin\alpha(t))\cdot\cos\gamma(t)}{m\cdot v(t)}-\dfrac{g\cos\vartheta(t)}{v(t)}.\end{cases} \tag{4}$$

式中:g 为重力加速度;m 为 UCAV 质量;T 为发动机推力;D 为空气气动阻力;L 为空气气动升力.

UCAV 在飞行过程中的阻力和升力模型如下:

$$\begin{cases}D(t)=0.5\cdot\rho\cdot v(t)^2\cdot S\cdot C_D(t),\\ L(t)=0.5\cdot\rho\cdot v(t)^2\cdot S\cdot C_L(t).\end{cases} \tag{5}$$

式中:ρ 为空气密度;S 为 UCAV 等效横截面面积;$C_L(t)$ 为 t 时刻的气动升力系数;$C_D(t)$ 为 t 时刻的气动阻力系数. $C_L(t)$ 与 $C_D(t)$ 计算公式采用文献[19]拟合出的 F-4 在攻角 $\alpha<15°$ 时的气动力系数模型:

$$\begin{cases}C_D(t)=(0.043\,4-0.136\,9\cdot\alpha(t))\cdot\cos\alpha(t)+\\ \qquad(0.131+3.082\,5\cdot\alpha(t))\cdot\sin\alpha(t),\\ C_L(t)=(-0.043\,4+0.136\,9\cdot\alpha(t))\cdot\sin\alpha(t)+\\ \qquad(0.131+3.082\,5\cdot\alpha(t))\cdot\cos\alpha(t).\end{cases} \tag{6}$$

发动机推力计算模型为

$$T(t)=\zeta(t)T_{\max}(t). \tag{7}$$

式中:$T_{\max}(t)$ 为文献[19]依据 F-4 发动机数据拟合出的 t 时刻 UCAV 以 1 000 lb(4 436.26 N)为单位的最大推力,$\zeta(t)$ 为 t 时刻 UCAV 油门的位置. 本文在实时航迹规划中使用 $\boldsymbol{u}(t)=[\zeta(t),\gamma(t),\alpha(t)]$ 作为 UCAV 在 t 时刻的控制量.

1.3 约束条件

UCAV 在进行实时航迹规划时,除了考虑地形条件约束和威胁规避,还要考虑飞行性能约束,使规划出的航迹可以直接供 UCAV 飞行.

1.3.1 飞行速度约束

由于 UCAV 本身性能的限制,其在飞行过程中存在最大飞行速度 $v_{\max}$,同时由于本文以固定翼 UCAV 为研究对象,其不可能在空中悬停并且由于战术原因,存在最小飞行速度 $v_{\min}$. 因此,飞行速度约束可描述为

$$g_1=\max_{i\in K}\{v_{i\min}-v_i,v_i-v_{i\max}\}\leqslant 0. \tag{8}$$

式中:v_i 为第 i 架 UCAV 当前时刻的速度;$[v_{i\min},v_{i\max}]$ 为第 i 架 UCAV 的速度范围;$K=\{1,2,\cdots,N_U\}$,其中 N_U 为 UCAV 的架数.

1.3.2 飞行高度约束

由于 UCAV 本身平台性能的限制,其在飞行过程中存在最大升限,即最高飞行高度 $h_{\max}$,通常为相对海平面的高度;为了减少与地面的碰撞概率,需要限制 UCAV 的最低飞行高度 $h_{\min}$,通常为相对地形的高度. 因此,飞行高度约束可描述为

$$g_2=\max_{i\in K}\{h_{i\min}-h_i,h_i-h_{i\max}\}\leqslant 0, \tag{9}$$

$$h_{i\min}=H_i+d_{\text{safe}}. \tag{10}$$

式中:h_i 为第 i 架 UCAV 当前时刻的高度;H_i 为候选航迹点 h_i 对应的地形高度;$[h_{i\min},h_{i\max}]$ 为第 i 架 UCAV 的高度范围.

1.3.3 UCAV 相对距离约束

由于本文研究的为实时航迹规划问题,各 UCAV 之间的距离大于安全飞行距离 d_{safe} 即可避免 UCAV 之间发生碰撞;同时,在执行作战任务期间,UCAV 之间需要进行信息共享,存在最大有效通信距离 $d_{\max}$. 该约束可描述为

$$g_3=\max_{i,j\in K}(d_{\text{safe}}-\|\boldsymbol{P}_{i,t}-\boldsymbol{P}_{j,t}\|_2)\leqslant 0, \tag{11}$$

$$g_4=\max_{i,j\in K}(\|\boldsymbol{P}_{i,t}-\boldsymbol{P}_{j,t}\|_2-d_{\max})\leqslant 0, \tag{12}$$

式中$\boldsymbol{P}_{i,t}$、$\boldsymbol{P}_{j,t}$分别为 t 时刻第 i 架和第 j 架 UCAV 的位置.

1.3.4　威胁规避约束

障碍物规避约束除了判断当前时刻 t 规划出的一个时间窗口$[t,t+\Delta t]$内的备选航迹是否经过威胁区外，还需要预测 $t+\Delta t$ 时刻的位置能否在满足 UCAV 性能约束的条件下在下一个时间窗口有效规避威胁，其中 Δt 为时间窗口. 当前备选航迹段的威胁源规避约束采用最小距离判断法：

$$g_5=\max(R_j+d_{\text{safe}}-d_{ij})\leqslant 0. \tag{13}$$

式中：d_{ij}为第 i 架 UCAV 当前备选航迹段与威胁源 j 之间的最短距离；R_j 为威胁源 j 的威胁半径. 由于障碍物为具有一定高度的圆柱区域且本文假设的威胁规避策略为转弯规避，因此威胁规避预测模型可以直接在二维平面内考虑，图 3 通过 UCAV 与障碍物在水平面的投影描述了转弯规避障碍物的过程.

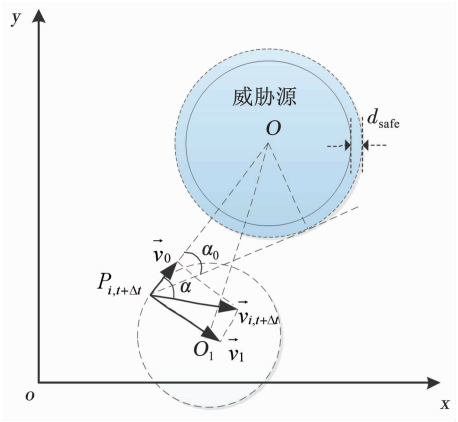


图 3　威胁规避预测模型示意

Fig. 3　Schematic diagram of threat avoidance prediction model

图中 $\boldsymbol{R}_{t+\Delta t}=\|\overrightarrow{\boldsymbol{P}_{i,t+\Delta t}\boldsymbol{O}_1}\|$ 为 $t+\Delta t$ 时刻的最小转弯半径，速度 $v_{i,t+\Delta t}$可分解为沿$\overrightarrow{\boldsymbol{P}_{i,t+\Delta t}\boldsymbol{O}}$方向的 v_0 和沿$\overrightarrow{\boldsymbol{P}_{i,t+\Delta t}\boldsymbol{O}_1}$方向的 v_1. 因此，若 $\angle\alpha\geqslant\angle\alpha_0$，UCAV 可以直飞不会经过威胁区；若 $\angle\alpha<\angle\alpha_0$，则需要判断 UCAV 与威胁中心 O 的距离 $\|\overrightarrow{\boldsymbol{P}_{i,t+\Delta t}\boldsymbol{O}}\|$，若

$$D_{t,ij}=\sqrt{(R_j+R_{t+\Delta t}+d_{\text{safe}})^2-R_{t+\Delta t}^2}-\|\overrightarrow{\boldsymbol{P}_{i,t+\Delta t}\boldsymbol{O}}\|\leqslant 0, \tag{14}$$

则可以规避威胁，否则在 UCAV 性能约束条件下必然会经过威胁区，无法规避威胁. 综上所述，$t+\Delta t$ 时刻的候选航迹点$\boldsymbol{P}_{i,t+\Delta t}$在下一时间窗口无法规避威胁应满足：

$$\begin{cases}\angle\alpha<\angle\alpha_0,\\ D_{t,ij}>0,\end{cases} \tag{15}$$

因此，约束条件可描述为：

$$g_6=\max_{i\in K,j\in O}\{D_{t,ij}\cdot\Delta\alpha_{ij}\}\leqslant 0, \tag{16}$$

$$\Delta\alpha_{ij}=\begin{cases}0,\angle\alpha\geqslant\angle\alpha_0;\\ 1,\angle\alpha<\angle\alpha_0,\end{cases} \tag{17}$$

式中：$O=\{1,2,\cdots,N_O\}$，其中 N_O 为实时探测到的威胁的总数量.

1.4　目标函数设计

本文设计的实时协同三维航迹规划的目标函数包括：航迹长度代价Cost_L、高度代价Cost_h 以及时间协同代价 Cost_t. 空间协同问题已通过式(11)～(13)、(16)进行约束，此处不再赘述.

采用候选航迹点距目标点的欧式距离作为航迹长度代价Cost_L 用以引导 UCAV 向目标飞行；采用候选航迹点高度为 UCAV 的高度代价Cost_h 用以引导 UCAV 选择地势低洼处利用地形遮蔽实现低空突防；时间协同代价Cost_t 是为引导多架 UCAV 同时到达各自目标点，对各自目标进行同时打击，做到攻其不备，实现闪电式快速多目标打击，提高整体任务成功率. 由于实时航迹规划过程中剩余航迹的总长度无法精确获得，无法精确控制同时到达，本文使用基于估计距离差的时间协同控制方法，该方法采用当前位置与目标点的欧式距离来估计剩余航迹长度，以此调节速度使各 UCAV 之间的估计航迹长度差值最小化，采用该方法时，UCAV 越接近目标点估计值越精确. 综上所述，各子目标函数可描述为：

$$\text{Cost}_L=\sum_{i=1}^{N_U}\|\boldsymbol{P}_{i,t+\Delta t}-\boldsymbol{T}_i\|, \tag{18}$$

$$\text{Cost}_h=\sum_{i=1}^{N_U}|h_i|, \tag{19}$$

$$\text{Cost}_t=\max_{i,j\in K}\{|L_{i,t+\Delta t}-L_{j,t+\Delta t}|\}. \tag{20}$$

式中：$\boldsymbol{P}_{i,t+\Delta t}$为第 i 架 UCAV 在 $t+\Delta t$ 时刻的候选位置；$\boldsymbol{T}_i$ 为第 i 架 UCAV 的任务目标位置；h_i 为第 i 架 UCAV 在 $t+\Delta t$ 时刻候选位置的飞行高度；$L_{i,t+\Delta t}$、$L_{j,t+\Delta t}$分别为 $t+\Delta t$ 时刻第 i 架和第 j 架 UCAV 距离各自目标点的估计距离. 当$\text{Cost}_t=0$ 时，即表示 $t+\Delta t$ 在各 UCAV 候选位置到目标点的估计距离相等，可同时抵达目标点. 综上所述，本文提出的实时航迹规划的代价函数可描述为：

$$\begin{aligned}\min f=&\delta_1\cdot\text{Cost}_L+\delta_2\cdot\text{Cost}_h+\\ &\delta_3\cdot\text{Cost}_t+\delta_4\cdot|\Delta h|,\end{aligned} \tag{21}$$

$$\text{s.t. }\ g_i\leqslant 0(i=1,2,3,4,5,6). \tag{22}$$

式中：$|\Delta h|=|h_{i\min}-h_i|$为高度引导代价，引导 UCAV 在地面上方安全高度飞行，减少撞地概率；δ_1、δ_2、δ_3、δ_4 分别为距离代价、高度代价、时间协同代价和高度引导代价的权重因子.

2　求解算法

正弦余弦优化算法(sine cosine algorithm，SCA)是澳大利亚学者 Mirjalili[20] 于 2016 年提出的一种基于种群的启发式优化算法. 与大多数智能优化算

法相比,SCA 具有架构简单,控制参数少,计算效率高等优点. 文献[20]已经验证 SCA 在整体优化性能上优于萤火虫算法、花朵授粉算法、粒子群算法以及遗传算法等,因此,SCA 已经被广泛应用于求解工程实际问题.

通过对 SCA 的研究,李银通等[17]发现 SCA 主要依赖正弦函数和余弦函数的震荡特性进行寻优,由于种群更新对当前最优解的依赖过强,算法迭代后期种群多样性迅速降低,导致算法易于陷入局部最优. 基于此,为提高算法的收敛精度和局部最优规避能力,李银通等[17]提出了一种自学习策略和 Lévy 飞行的正弦余弦优化算法(SCASL),并通过测试函数验证了 SCASL 的综合性能优于标准 SCA 和以及 SSA[21],VCS[22],WOA[23]和 GSA[24]. 由于 SCASL 的时间复杂度较低,因此本文采用 SCASL 求解本文提出的多 UCAV 协同实时航迹规划模型,以期满足实时性要求.

3 仿真实验与分析

采用 SCASL 求解本文所构建协同实时航迹规划问题模型以验证模型的有效性,同时采用文献[17]实验结果中综合寻优性能仅次于 SCASL 的 VCS[22]做对比实验,以对比分析 SCASL 在求解本模型时的性能.

3.1 条件设置

本文以 3 架 UCAV 协同执行 3 个任务目标条件下的实时协同航迹规划为研究对象,设定战场环境与敌方威胁源分布情况是未知的,假定我方掌握的某不完备信息的山地区域作为战场环境,UCAV 位置和待执行任务目标位置(已知)以及威胁源分布信息(UCAV 起飞前未知,需要飞行过程中利用机载探测装备进行实时探测)见表 1、2.

本文以固定翼重型 UCAV 为研究对象,UCAV 等效横截面面积 S 和质量 m 参考文献[25],分别为 $S=49.24\ \mathrm{m}^2$,质量 $m=14\ 680\ \mathrm{kg}$. UCAV 攻角变化范围为 $[-\alpha_{\max},\alpha_{\max}]$,$\alpha_{\max}=\pi\times15/180$,滚转角变化范围为 $[-\gamma_{\max},\gamma_{\max}]$,$\gamma_{\max}=\pi/3$;UCAV 之间最小安全飞行距离 $d_{\mathrm{safe}}=0.1\ \mathrm{km}$,最大有效通信距离 $d_{\max}=30\ \mathrm{km}$;UCAV 实时探测半径为 30 km,最高飞行高度 $h_{\max}=5\ \mathrm{km}$,每架 UCAV 的 $v_{\min}=0.3\ Ma$,$v_{\max}=0.8\ Ma$,重力加速度 $g=9.8\ \mathrm{m/s^2}$.

实时航迹规划模型参数如下:战场任务空间为 $x_{\max}=100\ \mathrm{km}$,$y_{\max}=100\ \mathrm{km}$,$z_{\max}=3\ \mathrm{km}$;UCAV 控制量油门 ζ 的变化范围为 $[0,1]$,空气密度 $\rho=1.225\ \mathrm{kg/m^3}$,代价函数权重因子 $\delta_1=0.7$,$\delta_2=0.1$,$\delta_3=0.1$,$\delta_4=0.1$,时间协同误差小于 20 s,滚动时域时间窗口 $\Delta t=1$ s(每次迭代规划耗时超过 1 s 则认为不满足实时性要求). 各架 UCAV 初始航迹倾角与偏航角均指向各自目标.

表 1 UCAV 及任务目标位置

Tab. 1 Locations of UCAV and mission targets

UCAV 编号	位置/km	任务目标 T	位置/km
UCAV1	(5,12)	T1	(85,90)
UCAV2	(7,9)	T2	(88,85)
UCAV3	(9,5)	T3	(90,81)

表 2 威胁源参数

Tab. 2 Threat parameters

威胁源	威胁类型	位置/km	作用半径/km	高度/km
TS_1	导弹阵地	(25,25)	8.0	1.5
TS_2	高炮阵地	(35,48)	7.0	1.5
TS_3	禁飞区域	(38,66)	8.4	1.5
TS_4	高炮阵地	(50,33)	7.5	1.5
TS_5	导弹阵地	(63,56)	7.0	1.5
TS_6	雷达阵地	(65,82)	12.0	1.5
TS_7	导弹阵地	(85,65)	9.0	1.5

采用 SCASL 和 VCS 在每个时间窗口对模型进行求解,参数设置见表 3,其中 VCS 参数设置与原文献保持一致. 寻优变量 $\boldsymbol{X}=(\zeta_1,\gamma_1,\alpha_1,\zeta_2,\gamma_2,\alpha_2,\zeta_3,\gamma_3,\alpha_3)$,问题维度 $\dim=9$,其中 $(\zeta_1,\gamma_1,\alpha_1)$ 为 UCAV1 的控制量,$(\zeta_2,\gamma_2,\alpha_2)$ 为 UCAV2 的控制量,$(\zeta_3,\gamma_3,\alpha_3)$ 为 UCAV3 的控制量. 基于对算法寻优性能的分析[17]并考虑到机载系统运算能力的限制,为实现实时性和解的质量的折中,算法最大评价次数 $FE_{\max}=3\ 000$,SCASL 中种群搜索个体数设为 20,由于 VCS 每次迭代对种群进行 3 次评价,在评价次数相同的基础上,为保证两种算法最大迭代次数相近,保证对比结果的公平性,VCS 搜索个体数设为 7.

表 3 算法参数设置

Tab. 3 Algorithm parameters setting

算法	参数设置
SCASL	$\alpha=0.05,\beta=0.5,a=2$
VCS	$\lambda=N/2,\sigma=0.3$

3.2 结果与分析

本文所提出的实时协同航迹规划的原则是在满足实时性要求和协同要求的前提下为多架 UCAV 规划出可行的协同实时航迹,图 4 为飞行过程中 SCASL 和 VCS 在各个时间窗口内求解模型,规划下一时间窗口航迹所耗费的时间(规划耗时超过时间窗口 $\Delta t=1$ s,则认为不满足实时性要求).

由图 4 可知,在整个飞行过程中,SCASL 航迹规划耗时均小于时间窗口 Δt,证明采用改进后的

SCASL 求解该模型时满足实时性要求；而 VCS 在第 147 ~ 331 s 的时间段内的规划耗时均超过时间窗口 Δt，即不满足实时性要求. 因此，SCASL 更具有实际应用价值和意义.

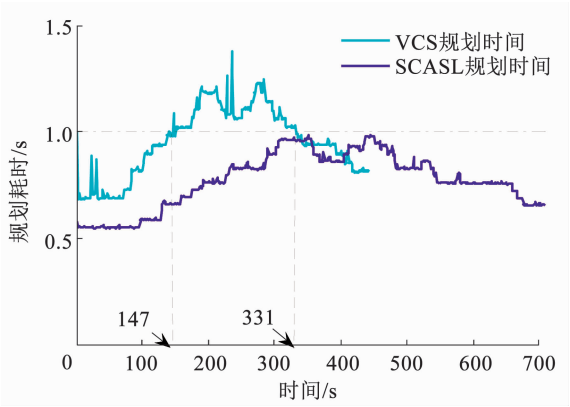


图 4　航迹规划耗时

Fig. 4　Time consumption of real-time trajectory planning

SCASL 和 VCS 求解实时协同航迹规划结果见表 4，两种算法所得 3 架 UCAV 的航迹总长度近似相等，就航程代价来讲无明显差别；SCASL 所得结果中 3 架 UCAV 到达各自任务目标的时刻分别为 707，706，708 s，到达时间仅仅相差 2 s，完全满足时间协同的要求；VCS 所得结果中 3 架 UCAV 到达各自任务目标的时刻分别为 432，437，443 s，到达时间差最大为 11 s，同样满足时间协同的要求，但时间协同效果相比 SCASL 的结果较差. 验证了本文所提出的基于估计距离差控制的时间协同航迹规划方法的有效性.

表 4　航迹规划结果

Tab. 4　Trajectory planning results

算法	UCAV 编号	航迹总长度/km	到达时刻/s
SCASL	UCAV1	115.226 6	707
	UCAV2	115.926 2	706
	UCAV3	118.082 5	708
VCS	UCAV1	115.057 0	432
	UCAV2	115.054 7	437
	UCAV3	116.985 4	443

图 5、6 分别为 3 架 UCAV 在 $t = 200$ s 和 $t = 400$ s 时的实时等高线航迹图，图中展示了 3 架 UCAV 在 200、400 s 时处于的位置和已探测到的威胁分布，图中虚线圆覆盖区域为 3 架 UCAV 实时探测范围.

图 7、8 分别为两种算法所得结果中 3 架 UCAV 均到达目标位置时的协同实时等高线航迹和协同实时三维航迹. 由图 7、8 可知，两种算法所得到的结果中，3 架 UCAV 均能安全抵达各自任务目标区域附近，在飞行过程中未出现穿过威胁区的情况，有效规避了威胁. 此外，可直观的发现，在规避实时探测到的障碍过程中，航迹比较平滑，能做到提前规避，验证本文提出的多 UCAV 实时协同航迹规划模型的有效性以及威胁预测规避方法的可靠性.

图 9、10 分别为两种算法所得结果中各架 UCAV 在飞行过程中的航迹倾角和偏航角的变化情况. 由图 9 可知，VCS 所得结果中航迹倾角变化范围在 $[-\pi/9.49, \pi/10.94]$，SCASL 所得结果中航迹倾

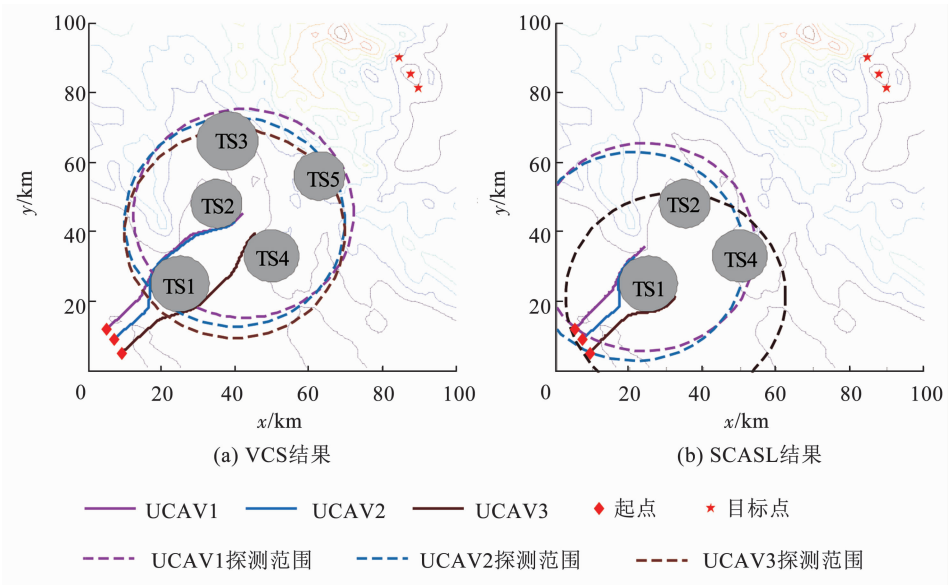


图 5　$t = 200$ s 时协同实时等高线航迹

Fig. 5　Collaborative real-time trajectory contour when $t = 200$ s

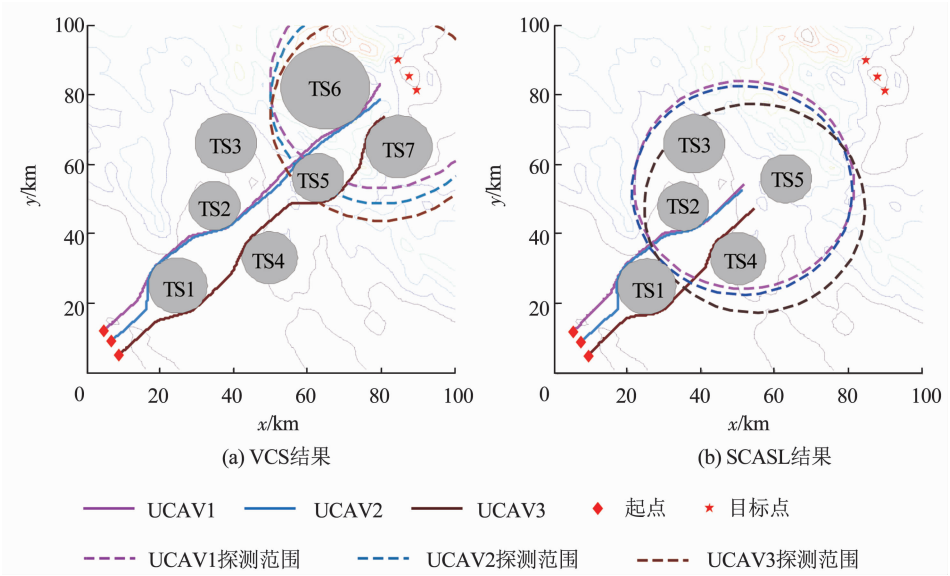


图 6 $t=400$ s 时 协同实时等高线航迹

Fig. 6 Collaborative real-time trajectory contour when $t=400$ s

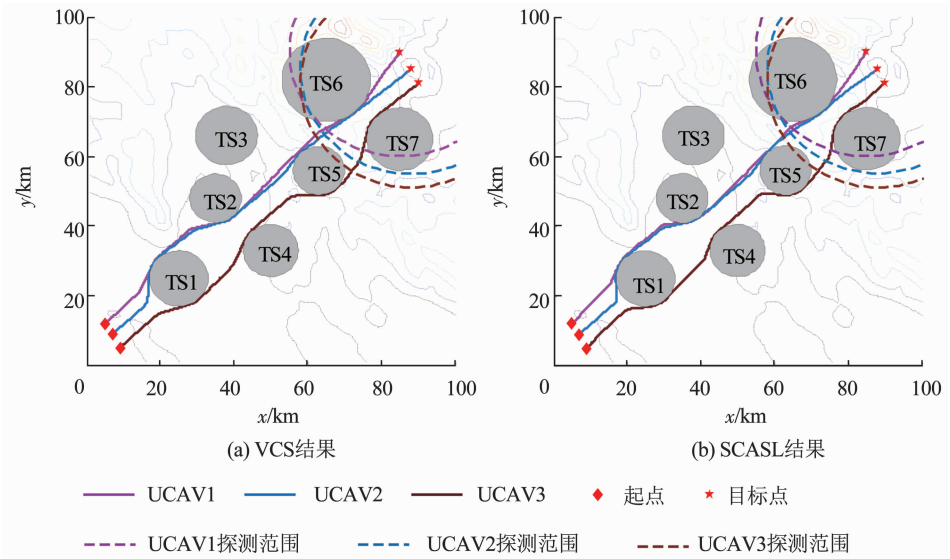


图 7 整体协同实时等高线航迹

Fig. 7 Overall collaborative real-time trajectory contour

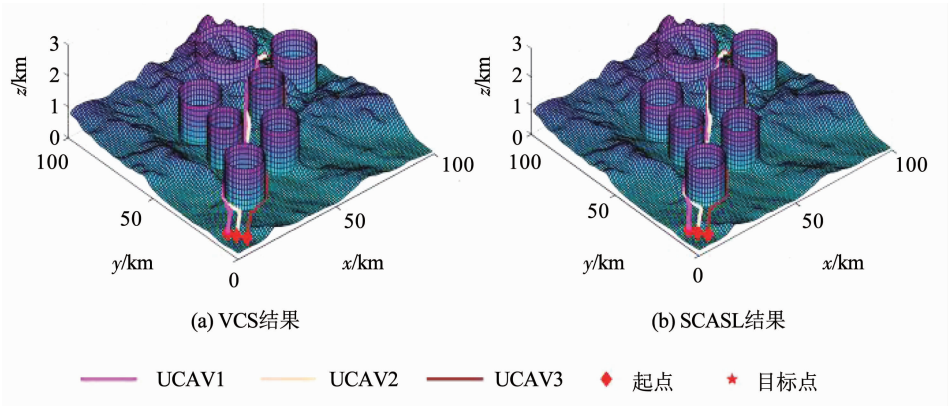


图 8 整体协同实时三维航迹

Fig. 8 Overall collaborative real-time 3D trajectory

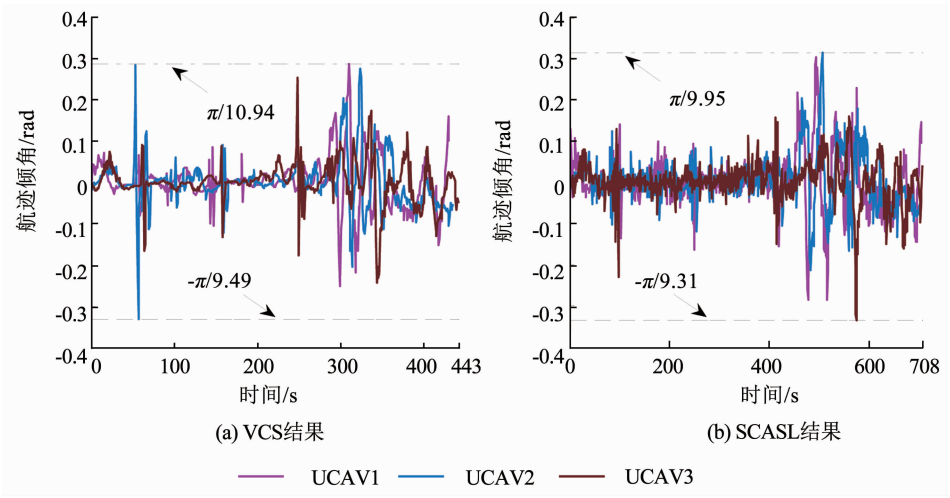


图 9　协同实时航迹倾角

Fig. 9　Collaborative real-time trajectory inclination

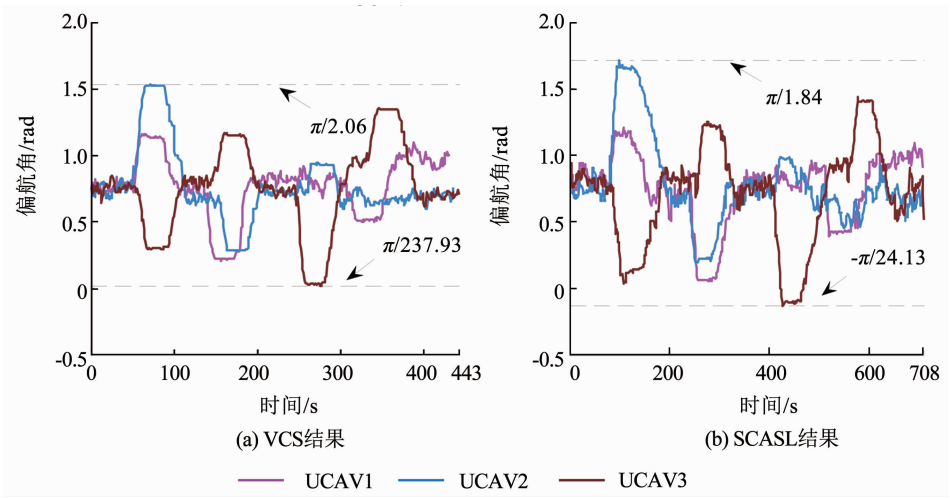


图 10　协同实时航迹偏航角

Fig. 10　Collaborative real-time trajectory yaw angle

角变化范围在[-π/9.31,π/9.95],整体上航迹倾角变化范围相对较小. 由于地形微小起伏较为频繁,为进行地形跟随实现低空突防,所以航迹倾角出现较为频繁的微调. 由图 10 可知,VCS 所得结果中偏航角的变化范围为[π/237.93,π/2.06],SCASL 所得结果中偏航角的变化范围为[-π/24.13,π/1.84],由于任务目标位置固定,在代价函数的引导作用下,未探测到威胁源时 UCAV 始终指向目标飞行,因此偏航角在飞行过程中整体上相对稳定,由于本文提出的实时航迹规划模型对于威胁源的规避只能提前预测一个时间窗口,因此在探测到需要规避威胁源时,UCAV 往往已经距离威胁源较近,此时规避威胁时偏航角会出现相对较大变化. 由于本模型中 UCAV 的机动性能是由控制量的变化范围决定的,所以规划出的航迹均满足 UCAV 机动性能约束.

图 11 为 3 架 UCAV 在飞行过程中的飞行速度变化情况. VCS 所得结果中,3 架 UCAV 在飞行过程中速度大部分时间均接近于速度上限 0.8 *Ma*,因此其到达任务目标区域的飞行时间相对较短,SCASL 所得结果中 3 架 UCAV 速度变化范围在[0.3 *Ma*, 0.8 *Ma*],符合 UCAV 的飞行速度约束,速度的变化是为了满足编队在飞行过程中的时间协同,以期同时达到各自任务目标点执行相应任务,3 架 UCAV 到达时间偏差仅为 2 s,相比 VCS 结果中到达时间偏差为 11 s,时间协同效果较好,但增加了飞行时间.

图 12 为在飞行过程中 3 架 UCAV 之间的相互距离. 由图 12 可知,两种算法所得结果中 3 架 UCAV 整个飞行过程中的距离均大于最小安全距离 d_{safe},小于最大通信距离 d_{max},确保各 UCAV 之间不会发生碰撞并能保持实时通信.

图 13 为在飞行过程中 UCAV 的飞行高度以及相应位置的地形高度,两种算法所得结果中,3 架 UCAV 在飞行过程中 UCAV 实现了相对较好的地形跟随,满足低空突防的要求,再次验证了本文提出的实时协同航迹规划模型的有效性.

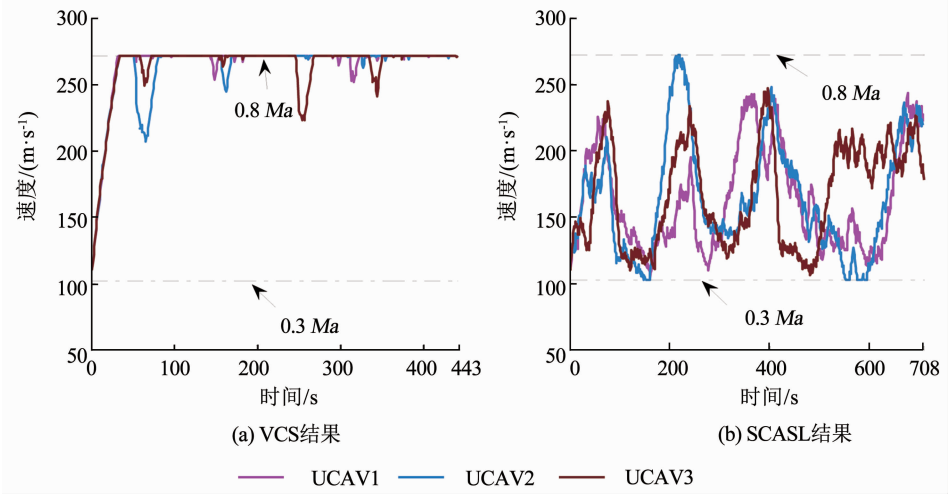


图 11 UCAV 速度变化

Fig. 11 UCAV speed change

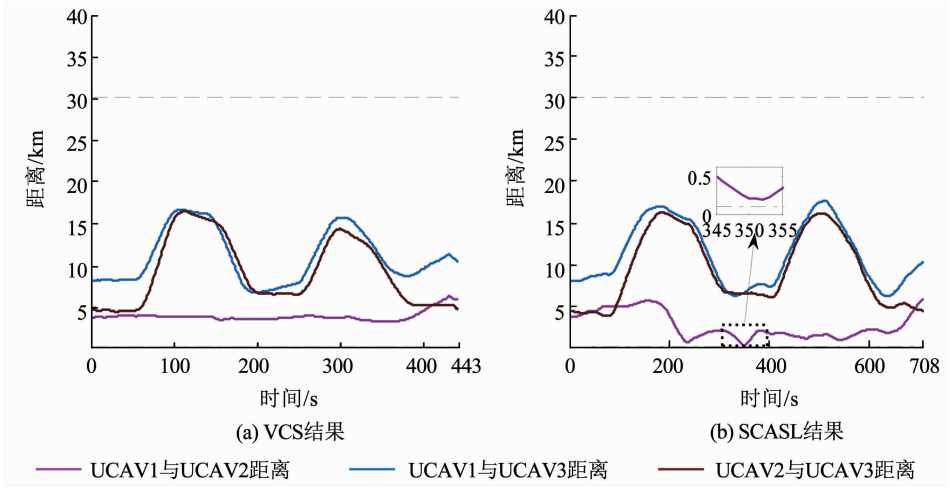


图 12 UCAV 之间距离

Fig. 12 Distance between UCAVs

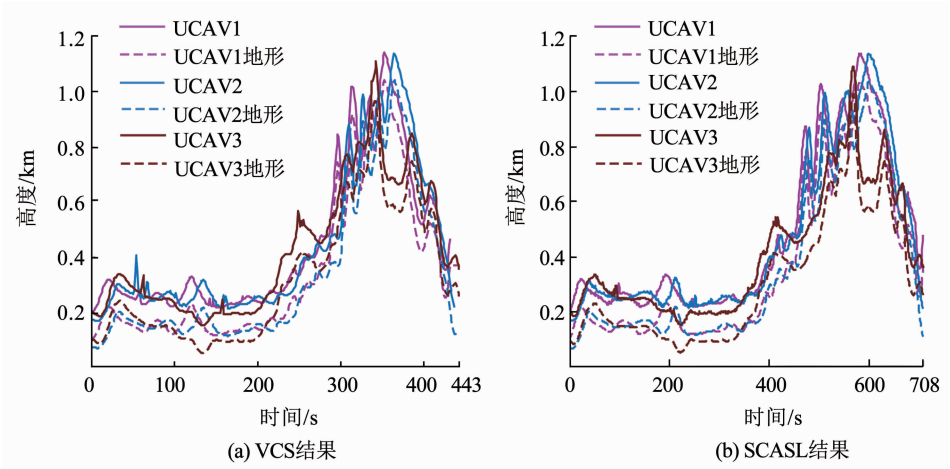


图 13 UCAV 地形跟随效果

Fig. 13 Terrain-following effect of UCAV

4 结 论

1)以 3 架 UCAV 协同执行对地打击任务为背景,根据 UCAV 平台性能设计了飞行速度、飞行高度、相对距离以及威胁规避等约束条件,基于 UCAV 的三自由度运动学和动力学质点模型建立了多

UCAV 协同实时航迹规划模型. VCS 求解模型所得结果满足协同性要求，但不满足实时性要求，航迹规划结果整体上劣于 SCASL 所得结果，证明本文提出的基于 SCASL 的协同实时航迹规划方法的有效性与优越性.

2）借鉴滚动时域控制思想，以 1 s 为时间窗口，采用 SCASL 反复滚动迭代优化为 3 架 UCAV 规划出了满足实时性要求和协同要求的安全可飞的实时航迹，有效提高了 UCAV 协同实时航迹规划的实时性和可操作性.

3）本文提出的航迹规划方法在每次滚动迭代优化过程中只考虑下一时间窗口内的一段航迹，得到的是局部最优航迹，如何优化改进模型得到近似全局最优的实时协同航迹是下一步的研究重点.

参考文献

[1]王群. 无人作战飞机的特点和未来发展[J]. 国防科技，2011，32(1)：23
WANG Qun. Characteristic and future development of UCAV[J]. National Defense Science and Technology，2011，32(1)：23. DOI：10.3969/j. issn. 1671 - 4547. 2011. 01. 006

[2] DEWANGAN R K，SHUKLA A，GODFREY W W. Three dimensional path planning using Grey wolf optimizer for UAVs[J]. Applied Intelligence，2019，49(6)：2201. DOI：10.1007/s10489 - 018 - 1384 - y

[3]赵明，赵玲玲，苏小红，等. 一种三维多 UAV 协同航迹规划的空间模糊文化算法[J]. 哈尔滨工业大学学报，2015，47(10)：29
ZHAO Ming，ZHAO Lingling，SU Xiaohong，et al. A cultural algorithm with spatial fuzzy set to solve multi-UAVs cooperative path planning in a three dimensional environment[J]. Journal of Harbin Institute of Technology，2015，47(10)：29. DOI：10.11918/j. issn. 0367 - 6234. 2015. 10. 007

[4]PAN J S，LIU N X，CHU S C，et al. A hybrid differential evolution algorithm and its application in unmanned combat aerial vehicle path planning[J]. IEEE Access，2020，8：17691. DOI：10.1109/access. 2020. 2968119

[5]钱洲元，雷明. 面向无人机航迹规划的自适应乌贼算法[J]. 哈尔滨工业大学学报，2019，51(10)：37
QIAN Zhouyuan，LEI Ming. Adaptive cuttlefish algorithm for UAV path planning[J]. Journal of Harbin Institute of Technology，2019，51(10)：37. DOI：10.11918/j. issn. 0367 - 6234. 201805004

[6]QU Chengzhi，GAI Wendong，ZHANG Jing，et al. A novel hybrid grey wolf optimizer algorithm for unmanned aerial vehicle (UAV) path planning[J]. Knowledge-Based Systems，2020，194：105530. DOI：10.1016/j. knosys. 2020. 105530

[7]单文昭，崔乃刚，黄蓓，等. 基于 PSO-HJ 算法的多无人机协同航迹规划方法[J]. 中国惯性技术学报，2020，28(1)：122
SHAN Wenzhao，CUI Naigang，HUANG Bei，et al. Multiple UAV cooperative path planning based on PSO-HJ method[J]. Journal of Chinese Inertial Technology，2020，28(1)：122. DOI：10.13695/j. cnki. 12 - 1222/o3. 2020. 01. 019

[8]XU Chunfang，DUAN Haibin，LIU Fang，et al. Chaotic artificial bee colony approach to Uninhabited Combat Air Vehicle (UCAV) path planning[J]. Aerospace Science and Technology，2010，14(8)：535. DOI：10.1016/j. ast. 2010. 04. 008

[9]THARWAT A，ELHOSENY M，HASSANIEN A E，et al. Intelligent Bézier curve-based path planning model using Chaotic Particle Swarm Optimization algorithm[J]. Cluster Computing，2019，22：4745. DOI：10.1007/s10586 - 018 - 2360 - 3

[10]孙小雷，齐乃明，董程，等. 无人机任务分配与航迹规划协同控制方法[J]. 系统工程与电子技术，2015，37(12)：2772
SUN Xiaolei，QI Naiming，DONG Cheng，et al. Cooperative control algorithm of task assignment and path planning for multiple UAVs[J]. Systems Engineering and Electronics，2015，37(12)：2772. DOI：10.3969/j. issn. 1001 - 506X. 2015. 12. 17

[11]江泽强，朱旋，李琪. 突发威胁下的无人机实时航迹规划[J]. 指挥与控制学报，2017，3(3)：240
JIANG Zeqiang，ZHU Xuan，LI Qi. Real time path planning of UAV for pop-up threat[J]. Journal of Command and Control，2017，3(3)：240. DOI：10.3969/j. issn. 2096 - 0204. 2017. 03. 0240

[12]范伟伦，李薇，冯杭. 基于改进 RRT 算法的无人机实时航迹规划[J]. 舰船电子工程，2019，39(2)：56
FAN Weilun，LI Wei，FENG Hang. UAV trajectory planning based on an improved RRT algorithm[J]. Ship Electronic Engineering，2019，39(2)：56. DOI：10.3969/j. issn. 1672 - 9730. 2019. 02. 015

[13]ZHANG Shaoqing，LV Mingwei，YANG Chen. Real-time 3D route planning based on modified rapidly exploring random-tree algorithm[C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Electronic Information and Communication Technology (ICEICT). Harbin：IEEE，2019：147. DOI：10.1109/ICEICT. 2019. 8846357

[14]CAI Yawei，ZHAO Hui，LI Mudong，et al. 3D real-time path planning based on cognitive behavior optimization algorithm for UAV with TLP model[J]. Cluster Computing，2019，22(2)：5089. DOI：10.1007/s10586 - 017 - 1432 - 0

[15]YOU Shixun，GAO Lipeng，DIAO Ming，et al. Real-time path planning based on the situation space of UCAVs in a dynamic environment[J]. Microgravity Science and Technology，2018，30(6)：899. DOI：10.1007/s12217 - 018 - 9650 - 5

[16]宗群，王丹丹，邵士凯，等. 多无人机协同编队飞行控制研究现状及发展[J]. 哈尔滨工业大学学报，2017，49(3)：1
ZONG Qun，WANG Dandan，SHAO Shikai，et al. Research status and development of multi UAV coordinated formation flight control[J]. Journal of Harbin Institute of Technology，2017，49(3)：1. DOI：10.11918/j. issn. 0367 - 6234. 2017. 03. 001

[17]李银通，韩统，赵辉，等. 自学习策略和 Lévy 飞行的正弦余弦优化算法[J]. 重庆大学学报，2019，42(9)：55
LI Yintong，HAN Tong，ZHAO Hui，et al. An improved sine cosine optimization algorithm with self-learning strategy and Lévy flight[J]. Journal of Chongqing University，2019，42(9)：55. DOI：10.11835/j. issn. 1000 - 582X. 2019. 09. 007

[18]李清，侯永军，沈春林. 数字地形数据的二维三次卷积插值[J]. 南京航空航天大学学报，1997，29(4)：378
LI Qing，HOU Yongjun，SHEN Chunlin. Two-dimensional cubic convolution interpolation for digital map data[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics，1997，29(4)：378

[19]WILLIAMS P. Three-dimensional aircraft terrain-following via real-time optimal control[J]. Journal of Guidance Control and Dynamics，2007，30(4)：1201. DOI：10.2514/1.29145

[20] MIRJALILI S. SCA：A Sine Cosine Algorithm for solving optimization problems[J]. Knowledge-Based Systems，2016，96：120. DOI：10.1016/j. knosys. 2015. 12. 022

[21] MIRJALILI S，GANDOMI A H，MIRJALILI S Z，et al. Salp Swarm Slgorithm：A bio-inspired optimizer for engineering design problems[J]. Advances in Engineering Software，2017，114：163. DOI：10.1016/j. advengsoft. 2017. 07. 002

[22]LI Mudong，ZHAO Hui，WENG Xingwei，et al. A novel nature-inspired algorithm for optimization：Virus colony search[J]. Advances in Engineering Software，2016，92：65. DOI：10.1016/j. advengsoft. 2015. 11. 004

[23]MIRJALILI S，LEWIS A. The Whale Optimization Algorithm[J]. Advances in Engineering Software，2016，95：51. DOI：10.1016/j. advengsoft. 2016. 01. 008

[24]RASHEDI E，NEZAMABADIPOUR H，SARYAZDI S. GSA：A gravitational search algorithm[J]. Information Sciences，2009，179(13)：2232. DOI：10.1016/j. ins. 2009. 03. 004

[25]黄长强，丁达理，黄汉桥，等. 无人作战飞机自主攻击技术[M]. 北京：国防工业出版社，2014
HUANG Changqiang，DING Dali，HUANG Hanqiao，et al. Autonomous attack technology for UCAV[M]. Beijing：National Defense Industry Press，2014

（编辑　张　红）