



# 基于变权威胁评估的无人机安全飞行区域确定方法

闫东, 陈谋\*, 吴庆宪, 袁梦顺

南京航空航天大学自动化学院, 南京 210016

\* 通信作者. E-mail: chenmou@nuaa.edu.cn

收稿日期: 2020-07-25; 修回日期: 2020-09-11; 接受日期: 2020-09-25; 网络出版日期: 2021-03-26

国家自然科学基金(批准号: 61825302, U2013201)、科技创新 2030 — “新一代人工智能”重大项目(批准号: 2018AA0100800)和江苏省“333 高层次人才培养工程”科研项目(批准号: BRA2019051)资助

**摘要** 针对复杂战场环境下确定无人机安全飞行区域的过程中面对的复杂性和不确定性问题, 本文提出了一种基于变权理论和马尔可夫模型的无人机安全飞行区域确定方法. 根据无人机相对于威胁区域距离的不同, 引入变权理论对威胁指标权值进行调整, 完成综合威胁大小计算. 然后, 利用马尔可夫模型对无人机飞行过程中受到的潜在威胁进行预测. 接着, 使用模糊评估方法评估无人机飞行区域的威胁等级, 并引入云模型构建隶属度函数, 以提高评估结果的可靠性. 最后, 根据威胁阈值确定无人机安全飞行区域. 仿真结果表明所研究的无人机安全飞行区域确定方法在复杂战场环境下是有效的.

**关键词** 无人机, 威胁评估, 安全飞行区域, 变权理论, 马尔可夫模型

## 1 引言

现代化战争中, 无人机已经成为争夺制空权不可忽视的力量. 根据战场环境信息确定有效的安全飞行区域是无人机能够高效、快速、安全地完成作战任务的首要保障. 但是随着高新武器与技术在现代战争中投入使用, 战场环境变得愈加复杂, 无人机面临的威胁也愈加复杂和多变<sup>[1]</sup>, 所以对无人机飞行区域进行综合威胁评估, 并基于评估结果确定无人机安全飞行区域是提升无人机作战效率的重要手段之一.

目前对无人机安全飞行区域的确定方法主要有仿真实验法<sup>[2]</sup>和 Graham 算法<sup>[3]</sup>等. 文献 [2] 利用电磁场仿真软件计算输电线路周围电磁场强度, 进而确定无人机与电磁场的安全距离, 从而计算出无人机安全飞行区域; 文献 [3] 利用 Graham 算法确定了无人机飞行过程中受到的气象威胁区域. 但无人机在战场环境下确定安全飞行区域时, 其实时性要求更高, 无人机所面对的威胁类型更加复杂, 且无人机的安全飞行区域与威胁之间的关系也更加复杂. 传统的方法很难满足无人机战场环境下安全飞行区域确定的需求, 因而需要更为综合全面的安全区域确定方法.

**引用格式:** 闫东, 陈谋, 吴庆宪, 等. 基于变权威胁评估的无人机安全飞行区域确定方法. 中国科学: 信息科学, 2021, 51: 663-677, doi: 10.1360/SSI-2020-0227  
Yan D, Chen M, Wu Q X, et al. Determining safe flight area of UAVs based on variable weight threat assessment (in Chinese). Sci Sin Inform, 2021, 51: 663-677, doi: 10.1360/SSI-2020-0227

本文针对战场环境下无人机受到的威胁因素, 进行威胁建模并计算无人机受到的威胁值. 为了准确地对无人机飞行过程中受到的综合威胁大小进行计算, 引入变权理论对威胁指标权值进行调整, 完成综合威胁大小计算. 传统的权值确定方法例如熵权法<sup>[4]</sup>和层次分析法<sup>[4]</sup>, 其权值由评估前的采样数据确定, 评估过程中权值保持不变, 但在实际战场环境中, 无人机的状态总是实时变化的, 固定的权值无法满足需求. 变权理论基于无人机威胁的状态向量构建权值的优势度函数<sup>[5]</sup>, 并通过变权函数对威胁的权值实时进行调整, 使权值根据无人机威胁指标的状态变化进行实时修正<sup>[6]</sup>, 从而满足了无人机战场环境下进行威胁计算的需求. 另外, 为了更有效地对无人机所受威胁进行评估, 在当前威胁基础上还需要对无人机受到的潜在威胁进行预测. 随着马尔可夫 (Markov) 模型在工程上广泛使用<sup>[7~9]</sup>, 可以将该模型用于无人机威胁预测<sup>[10]</sup>. 本文通过马尔可夫模型计算无人机的状态变化概率, 在此基础上进行威胁预测. 另外, 为了确定无人机的安全飞行区域, 还需进一步利用威胁评估方法通过融合当前威胁计算结果和预测威胁值实现对威胁的全面评估.

针对威胁评估问题, 国内外学者已做了大量研究. 文献<sup>[11]</sup>使用模糊聚类技术对威胁进行分类处理, 然后采用动态贝叶斯方法进行威胁评估; 文献<sup>[12]</sup>采用样本数据对小波神经网络进行训练得到评估模型, 然后利用得到的评估模型进行威胁评估; 文献<sup>[4]</sup>运用模糊评价语言和隶属度函数对指标进行预处理, 然后在利用层次分析法和信息熵法进行主客观组合定权的基础上采用理想解法进行威胁评估. 在上述威胁评估方法中, 被评估对象的状态总是保持不变, 而无人机实际威胁评估中, 因无人机从接收指令到执行飞行动作的过程中存在时间延迟, 且无人机的位置实时变化, 所以无人机威胁评估的有效性有待提升.

基于以上分析, 本文以在复杂战场环境下作战的无人机为研究对象, 首先对无人机受到的威胁进行分析并建立威胁指标体系, 根据威胁指标体系进行建模. 然后, 根据综合变权理论确定无人机威胁指标的权值, 并计算无人机当前威胁大小, 避免传统确定加权系数方法的局限性. 接着, 利用马尔可夫模型对无人机受到的威胁进行预测, 克服了无人机飞行过程中威胁评估时效性差和与实际不符的问题. 最后根据无人机自身参数和实际情况设定无人机安全阈值, 结合云模糊评估方法进行无人机安全飞行区域的确定. 仿真研究验证了本文所研究方法的有效性.

## 2 问题描述

无人机安全飞行区域的确定是保证无人机安全完成作战任务的基础, 通过确定无人机安全飞行区域可极大缩减无人机规划路径时的复杂度, 并为无人机安全飞行提供参考. 本文将无人机战场环境下受到的威胁因素分为地形威胁、气象威胁、其他飞行单元威胁、敌方探测单元威胁和敌方防空武器威胁 5 个方面进行考虑. 其中敌方防空武器威胁又分为敌方高射炮威胁和敌方防空导弹威胁. 如图 1 所示, 假设无人机战场环境下作战区域为矩形区域, 通过雷达已测出该区域的气象类型  $T$ 、风力等级  $f_{ws}$ 、地形海拔高度  $H$ 、地形起伏度  $R$ , 敌方雷达、高射炮、导弹, 以及非合作飞行单位的位置坐标等信息. 同时通过我方侦察单位已获取敌方防空雷达最大探测距离  $R_0$ 、敌方高射炮临界射高  $h_{g \max}$ 、敌方高射炮有效射角  $\alpha_g$ 、敌方高射炮最小射程  $d_{g \min}$ 、敌方高射炮最大射程  $d_{g \max}$ 、敌方导弹的最大射程  $r_{m \max}$ 、敌方导弹的最小射程  $r_{m \min}$  等信息.

基于以上获取的信息, 针对每种威胁构建相应的指标模型进行威胁指标融合计算<sup>[13]</sup>, 并利用获取的信息对无人机威胁进行预测. 然后将结果传送给评估模块利用云模糊评估方法进行威胁评估, 得到无人机飞行区域威胁评估结果. 最后根据实际情况确定无人机安全飞行阈值, 生成无人机安全飞行区域. 无人机安全飞行区域确定原理如图 2 所示.

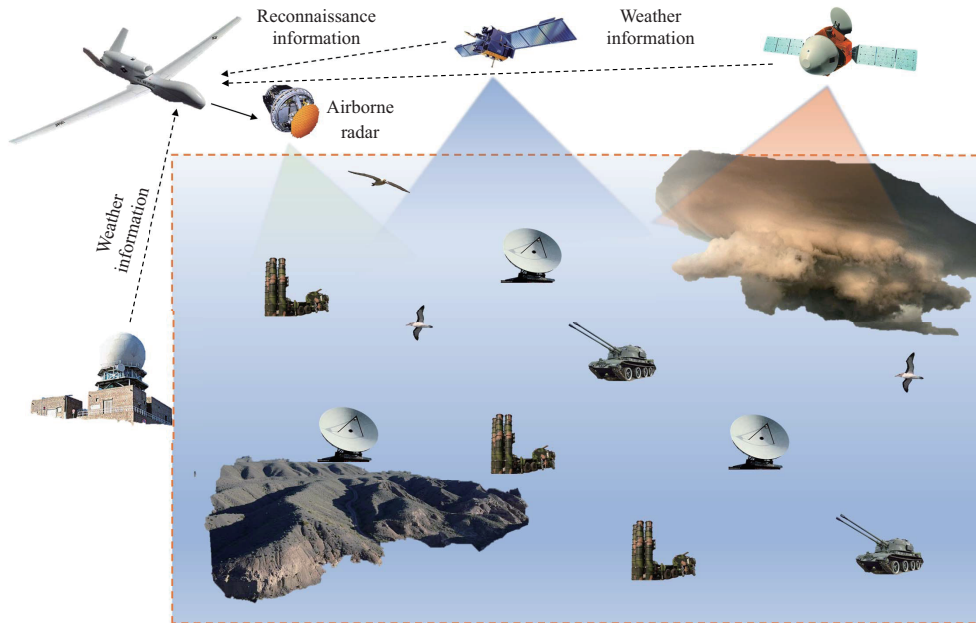


图 1 (网络版彩图) 无人机战场环境威胁示意图  
 Figure 1 (Color online) Threat of UAV battlefield environment

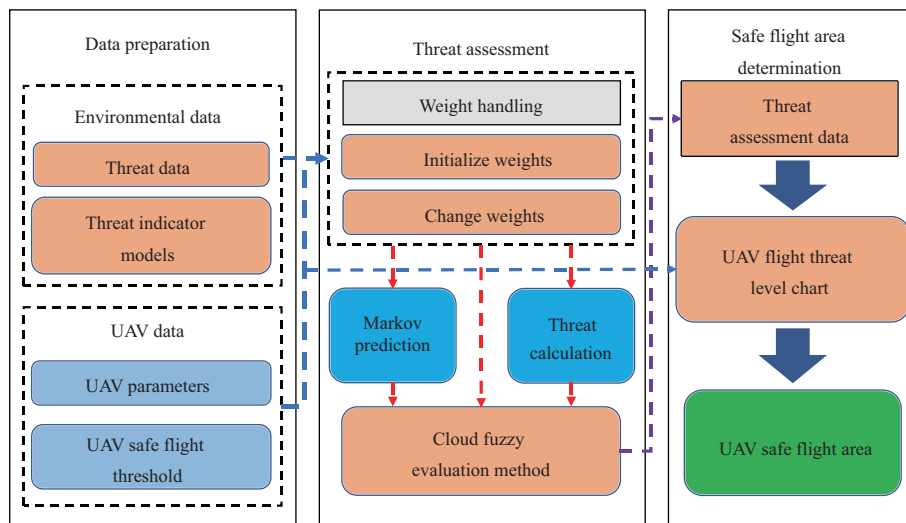


图 2 (网络版彩图) 无人机安全飞行区域确定原理图  
 Figure 2 (Color online) Determination UAV safe flight area

## 2.1 威胁指标体系建立

无人机战场环境下受到的威胁主要来自于自然环境和对抗环境, 自然环境主要包含对无人机有碰撞威胁的地形、对无人机通讯及飞行有威胁的气象等. 敌对威胁主要包含雷达的探测威胁、高射炮和导弹的打击威胁, 以及非合作飞行器的碰撞威胁等. 由此建立评估指标体系如图 3 所示.

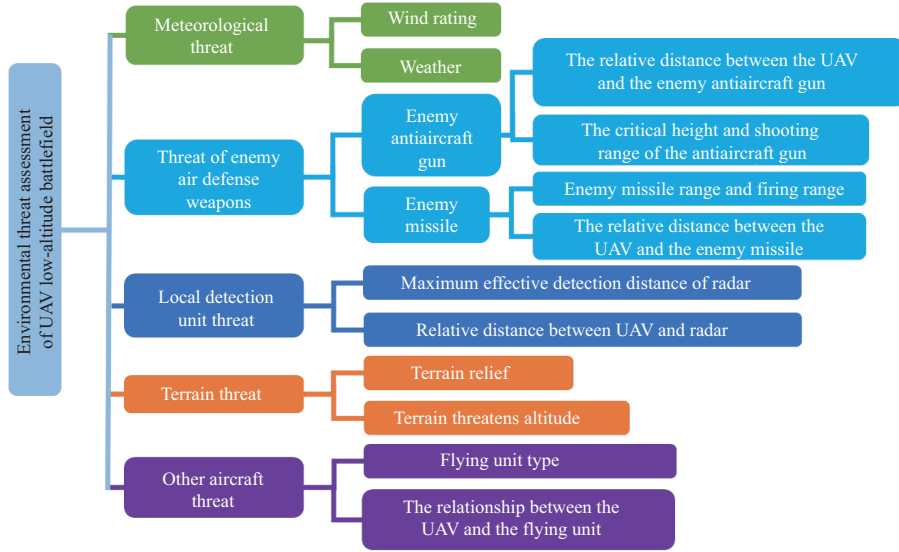


图 3 (网络版彩图) 无人机战场环境威胁评估指标体系

Figure 3 (Color online) Threat assessment indexes of UAV battlefield environment

## 2.2 威胁指标计算

根据威胁评估指标体系, 建立相应的威胁指标计算模型.

(1) 地形威胁. 首先考虑地形的海拔高度对无人机飞行的影响, 可利用式 (1) 计算得到地形的高度威胁大小<sup>[14]</sup>.

$$T_h = \frac{h_m}{h_u}, \quad (1)$$

其中  $T_h$  表示地形海拔高度威胁大小,  $h_m$  表示地形的海拔高度,  $h_u$  表示无人机高度上限. 进一步考虑地形起伏因素, 利用式 (2) 可以计算某一位置的地形威胁大小<sup>[14]</sup>.

$$T_b = \frac{\max(h_m - \min(h_k), \max(h_k) - h_m)}{\max(h_j) - \min(h_j)}, \quad (2)$$

其中  $T_b$  表示地形威胁大小,  $h_k$  为坐标点周围的海拔高度值,  $h_j$  表示海拔高度值.

(2) 气象威胁. 首先考虑风力的大小对无人机飞行的影响, 根据风力大小进行划分, 其计算公式如下所示<sup>[15]</sup>:

$$T_d = \begin{cases} 0, & f_{ws} \leq f_{scy}, \\ 0.5, & f_{scy} < f_{ws} < f_{TLV}, \\ 1, & f_{ws} \geq f_{TLV}, \end{cases} \quad (3)$$

其中  $T_d$  为风力大小对飞行的影响,  $f_{ws}$  表示风力等级,  $f_{scy}$  表示无人机的抗风级数,  $f_{TLV}$  表示无人机飞行中的允许风力的最大值. 然后, 将气象对无人机的通讯和机体的毁伤威胁与风力对无人机的飞行威胁进行求和得到气象威胁大小具体如下:

$$T_w = \varphi T_c + \chi T_d, \quad (4)$$

其中  $T_c$  表示不同气象类型对无人机的通讯和机体毁伤威胁, 其数值根据气象威胁表<sup>[15]</sup> 可查得,  $\varphi$  表示气象类型威胁系数,  $\chi$  表示风力威胁系数, 根据无人机参数进行确定.

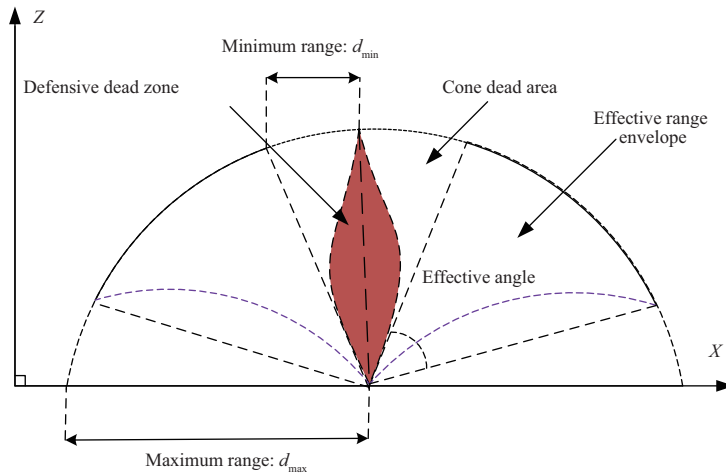


图 4 (网络版彩图) 高射炮威胁示意图  
Figure 4 (Color online) Antiaircraft gun threat

(3) 雷达威胁. 假设无人机在雷达最大探测有效距离  $R_0$  位置时, 雷达的探测概率为  $\text{Pr}_0 = 0.5$ . 当无人机与雷达的距离为  $R_r$  时, 无人机被雷达探测的概率如下所示<sup>[16]</sup>:

$$\text{Pr}(Q, r) = \exp[-0.69 \times (R_r/R_0)^4], \tag{5}$$

其中  $R_r < R_0$ ,  $\text{Pr}(Q, r)$  为无人机被雷达发现的概率. 无人机受雷达威胁的大小可表示为

$$\text{Tr}_Q = \alpha \text{Pr}(Q, r), \tag{6}$$

其中  $\alpha$  为概率增益系数, 根据无人机的型号不同进行确定.

(4) 高射炮威胁. 高射炮对无人机飞行威胁区域<sup>[17]</sup> 如图 4 所示.

假设无人机位于与高射炮  $A$  相对距离为  $d_{(Q,A)}$  的位置处, 则无人机所受威胁的大小可用式 (7) 进行计算<sup>[17]</sup>:

$$\text{Ta}_Q = \begin{cases} 0, & d_{(Q,A)} < d_{\min}, \\ \exp\left(-\frac{d_{(Q,A)}^2}{d_{\max}^2/7}\right), & d_{\min} < d_{(Q,A)} < d_{\max}, \\ 0, & d_{(Q,A)} > d_{\max}, \end{cases} \tag{7}$$

其中  $d_{\min}$  和  $d_{\max}$  表示高射炮有效距离的上下界,  $\text{Ta}_Q$  表示无人机位于  $Q$  位置时受到的高射炮威胁大小.

(5) 导弹威胁. 本文研究的防空导弹主要是电光制导类防空导弹, 导弹对无人机的威胁区域的立体图和截面图如图 5(a) 和 (b) 所示<sup>[18]</sup>.

图 5(a) 表示导弹威胁区示意图, 导弹发射点在图中原点  $O$  处. 图 5(b) 表示导弹威胁区横截面图, 其中  $d_{f\max}$  为导弹最大射程,  $d_{f\min}$  为导弹的最小射程. 防空导弹对无人机的威胁可以用式 (8) 近似表示<sup>[19]</sup>:

$$T_m = 1 - \exp\left(-\frac{R_k^2}{2\sigma^2}\right), \tag{8}$$

其中  $T_m$  为导弹的威胁大小,  $R_k$  表示第  $k$  个导弹对无人机的杀伤半径,  $\sigma$  为导弹的制导误差, 本文取  $\sigma$  为 20 m.

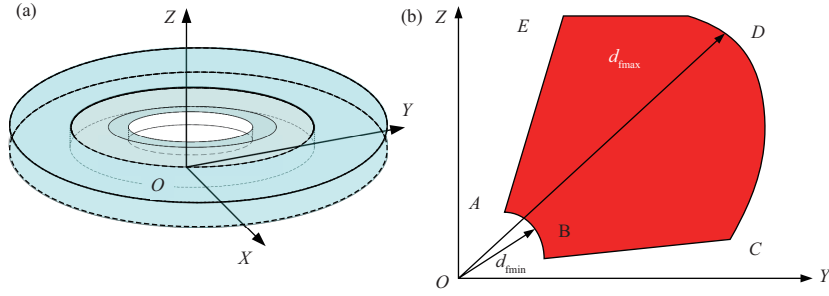


图 5 (网络版彩图) (a) 导弹威胁区示意图; (b) 导弹威胁区截面图  
 Figure 5 (Color online) (a) Missile threat area; (b) cross section of missile threat area

(6) 非合作飞行单元威胁. 非合作飞行单元对无人机的威胁  $T_{nc}$  主要来自于无人机与其他飞行单元的碰撞威胁<sup>[20]</sup>. 此外, 其他飞行单元周围会产生扰乱气流, 给无人机的飞行带来威胁. 如果其他飞行单元与我机为敌对关系,  $T_{nc}$  将会更大. 对于非合作飞行单元的威胁可根据其类型的不同<sup>[21]</sup>, 采用模糊语言表对  $T_{nc}$  的值进行确定.

根据以上分析得到无人机威胁指标体系计算公式:

$$V = w_1 T_b + w_2 T_w + w_3 Tr_Q + w_4 Ta_Q + w_5 T_m + w_6 T_{nc}, \quad (9)$$

其中  $w_j$  表示各指标的威胁权重值, 下面对威胁指标权重进行讨论.

### 3 基于综合变权理论的权值确定方法

针对无人机战场环境下威胁计算中权值的确定问题, 考虑到无人机在飞行过程中自身状态不断发生改变, 会导致不同威胁对无人机的影响权重也会发生变化. 传统计算威胁的方法常常以确定的权值作为计算的依据, 在实际无人机飞行时的威胁计算中并不适用, 故引入变权理论对无人机威胁计算中权值的确定进行改进. 先利用客观熵权法与主观层次分析法<sup>[4]</sup>进行初始权值求解, 然后利用式 (10) 将客观熵权法得到的权值与主观层次分析法得到的权值进行综合计算, 得到初始综合权值.

$$w_j^0 = a \times w_j' + b \times w_j'', \quad (10)$$

其中  $w_j^0$  表示第  $j$  个指标的变权初始权值,  $w_j'$  表示第  $j$  个指标的主观层次分析法确定的权值,  $a$  表示主观影响因子.  $w_j''$  表示第  $j$  个指标的客观熵权法确定的权值,  $b$  表示客观影响因子.

根据理想解法求解无人机威胁的优势度值<sup>[5]</sup>, 如式 (11) 所示:

$$Q_j = \frac{1}{1 - e^{2\lambda}} + \frac{e^\lambda}{e^{2\lambda} - 1} \exp\left(\lambda \frac{d_j^- - d_j^+}{d_j^\pm}\right), \quad (11)$$

其中  $Q_j$  为第  $j$  个指标的变权指标优势度,  $d_j^-$  表示第  $j$  个指标与理想下限值的差值,  $d_j^+$  表示第  $j$  个指标与理想上限值的差值,  $\lambda$  为调节因子, 对于无人机威胁计算时要注意调节因子的取值, 使优势度的变化符合实际要求,  $d_j^\pm = d_j^+ - d_j^-$ . 然后根据变权理论建立变权函数, 如下所示<sup>[12]</sup>:

$$\varphi_j(Q_j) = \begin{cases} (1/e)^{mw_j^0(Q^- - Q_j)}, & Q_j < Q^-, \\ 1, & Q^- \leq Q_j \leq Q^+, \\ e^{\delta(j)mw_j^0(Q_j - Q^+)}, & Q_j > Q^+, \end{cases} \quad (12)$$

1	2	3
4	5	6
7	8	9

图 6 地图栅格示意图

Figure 6 Map grid

其中  $Q^-$  为奖惩下限,  $Q^+$  为奖惩上限,  $m$  表示指标维数,  $w_j^0$  为初始权值,  $\delta(j)$  为变权比重因子, 这里根据高斯 (Gauss) 准则利用式 (13) 对变权比重的大小进行调节, 从而改变变权函数对无人机初始权值的影响程度.

$$\delta(j) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left( -\frac{1}{2} \left( \frac{d_j^-}{d_j^\pm} - 1 \right)^2 + 1 \right), \quad (13)$$

其中  $\delta(j)$  为第  $j$  个指标的变权比重因子, 接着利用式 (14) 对变权后的权值进行计算.

$$w(j) = \frac{w_j^0 \times \varphi_j(Q_j)}{\sum_{j=1}^n w_j^0 \times \varphi_j(Q_j)}, \quad (14)$$

其中  $w(j)$  为利用变权理论变权后的权值. 将式 (14) 与 (9) 结合, 可以得到无人机飞行过程中受到的综合威胁值.

#### 4 基于马尔可夫模型的无人机威胁预测方法

由于无人机的状态实时变化, 无人机飞行区域内受到的威胁不仅应包含当前威胁值, 还应该对无人机因状态转移受到的潜在威胁进行预测. 前文讨论了如何确定无人机当前受到的威胁, 而对于威胁的预测本文采用马尔可夫模型进行求解. 首先根据地图模型, 将无人机的飞行区域进行栅格化处理<sup>[14]</sup>, 如图 6 所示.

假设无人机所处位置位于图中的中心位置, 即无人机当前在位置 5, 并设定无人机受到的威胁预测范围为周围的 8 个位置.

由于无人机飞行过程中状态转移具有马尔可夫性质, 即当前转移概率仅与上一状态有关, 用公式可表示为<sup>[22]</sup>:

$$P_{SS'}^\theta = E(S_{n+1} = S' | S_n = S, \theta_n = \theta), \quad (15)$$

其中  $S_n$  表示无人机在时刻  $n$  的某一状态,  $P_{SS'}^\theta$  表示在时刻  $n$  从状态  $S$  到状态  $S'$  采取策略  $\pi$  执行动作  $\theta$  的概率, 执行动作  $\theta$  的概率用概率期望  $E$  表示.

下面利用马尔可夫价值函数求解无人机所受的状态威胁值, 由于无人机处于地图中某一位置时所受的当前威胁值可由威胁建模计算得到, 无人机所受的状态威胁函数的 Bellmen 方程可以表示成如下



公式 [7]:

$$V_{\pi}(S) = E_{\pi}[R_{n+1} + \gamma V_{\pi}(S_{n+1}) | S_n = S], \quad (16)$$

其中  $V_{\pi}(S)$  表示无人机在某个状态  $S_n$  时采取  $\pi$  的转移策略所受的状态威胁值,  $E_{\pi}$  表示无人机采取  $\pi$  的转移策略的期望值,  $R_{n+1}$  表示无人机在  $n+1$  时刻所受的当前威胁值,  $\gamma$  表示预测状态威胁衰减因子, 代表在预测状态威胁时的折扣系数, 该公式表示无人机处于某一状态下所受的威胁值等于当前威胁与预测威胁的和.

接着, 建立动作威胁预测函数的 Bellmen 方程, 如下所示 [7]:

$$q_{\pi}(S, \theta) = E_{\pi}[R_{n+1} + \gamma q_{\pi}(S_{n+1}, \theta_{n+1}) | S_n = S, \theta_n = \theta], \quad (17)$$

其中  $q_{\pi}(S, \theta)$  表示无人机从当前状态  $S$  采取策略  $\pi$  执行动作  $\theta$  所受的威胁值. 由于无人机所受的威胁预测值等于所有基于  $\pi$  策略的状态转移威胁值的和, 利用状态威胁 Bellmen 方程可以得到式 (18) 用来计算威胁值 [8].

$$V_{\pi}(S) = \sum \pi(\theta | S) q_{\pi}(S, \theta), \quad (18)$$

其中  $\pi(\theta | S)$  表示在状态  $S$  时采取策略  $\pi$  执行动作  $\theta$  的概率, 由于在马尔可夫模型下, 该策略的执行概率只与当前状态  $S$  有关, 所以利用动作威胁预测函数的 Bellmen 方程可以得到动作威胁预测计算公式如下 [8]:

$$q_{\pi}(S, \theta) = R_S + \gamma \sum P_{SS'}^{\theta} V_{\pi}(S'), \quad (19)$$

其中用  $S'$  表示无人机状态的变化, 由于状态威胁预测值等于所有状态转移威胁值基于  $\pi$  策略的和, 联合式 (18) 和 (19) 可得无人机在战场环境下的威胁预测值如式 (20) 所示 [23]:

$$V_{\pi}(S) = \sum \pi(\theta | S) \left[ R_S + \gamma \sum P_{SS'}^{\theta} V_{\pi}(S') \right]. \quad (20)$$

通过马尔科夫预测方法计算无人机威胁预测值, 并利用式 (20) 融合之前无人机威胁指标计算结果, 然后将计算结果输入至威胁评估方法中进行威胁评估.

## 5 无人机威胁评估及安全飞行区域确定方法

定义无人机威胁评估的输入为无人机当前威胁计算结果与无人机威胁预测结果, 输出为模糊语言集: {安全, 较小威胁, 中等威胁, 较大威胁, 极大威胁}. 根据经验值确定云发生器的期望值、熵值和超熵值并生成模糊评估云模型. 进而根据生成的云模型参考文献 [24] 对无人机威胁进行云模糊评估, 从而得到无人机飞行区域威胁等级评估结果.

无人机安全飞行区域确定流程图如图 7 所示. 首先利用无人机飞行威胁指标计算结果对无人机飞行区域内每一位置上受到的威胁进行计算, 得到无人机飞行过程中所受的当前威胁值 [4]. 然后利用马尔可夫模型进行威胁预测, 得到无人机预测威胁大小. 接着利用云模糊评估方法融合威胁计算结果与威胁预测结果, 得到无人机飞行区域威胁等级. 最后根据实际情况设定无人机安全飞行阈值, 确定无人机安全飞行区域.



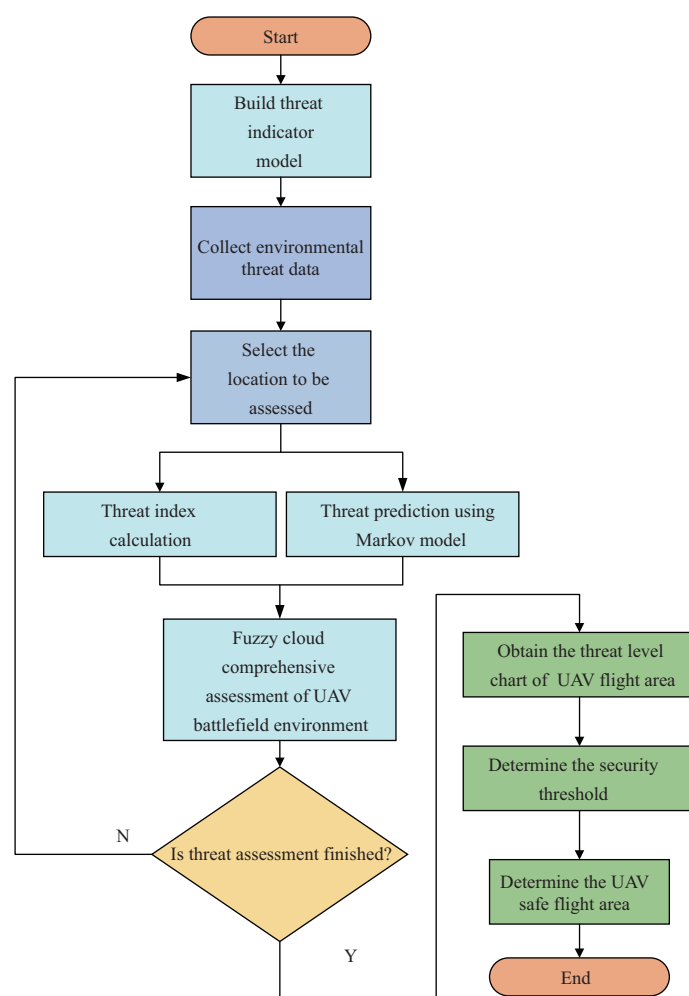


图 7 (网络版彩图) 基于威胁评估的无人机飞行安全区域确定流程图

Figure 7 (Color online) Flow chart of UAV safe flight area determination based on threat assessment

## 6 仿真实验

以某型号无人机为仿真实验对象, 飞行范围为  $1000 \text{ km} \times 1000 \text{ km}$  的方形区域. 无人机参数主要包含: 最大起飞重量  $50 \text{ kg}$ , 巡航速度  $150 \text{ km/h}$ , 最大飞行速度  $200 \text{ km/h}$ , 抗风等级 6 级, 最大允许飞行风力等级 8 级, 实用升限  $5000 \text{ m}$ , 机长  $59 \text{ m}$ , 翼展  $70 \text{ m}$ . 实验中传感器数据从作战仿真系统中获取, 并根据实验人员经验进行适当调整. 仿真实验具体步骤如下:

(1) 首先对无人机感知系统获取的威胁数据进行预处理. 假设得到一组威胁坐标及威胁半径数据, 进行处理后如表 1 所示, 表中坐标为相对地图坐标.

接着根据指标威胁计算公式, 计算无人机威胁指标的具体值. 其中根据文献 [25] 查表后进行归一化, 得到不同类型的气象对无人机通讯和机体的影响及毁伤程度, 作为气象威胁值如表 2 数据.

根据非合作飞行单位的类型对非合作飞行单位威胁大小和威胁半径进行模糊语言归一化划分. 如表 3 所示, 表中威胁大小为归一化后的数值.

(2) 根据 EWM-AHP (层次分析和熵权综合定权法) 进行综合定权计算, 可得初始权值为:  $w_1 =$

表 1 威胁信息  
Table 1 Threat information

Label	Type of threat	Threat coordinates (km)	Threat radius (km)
1	Antiaircraft gun 1	(150, 700)	60
2	Antiaircraft gun 2	(200, 350)	70
3	Air defense missile 1	(700, 300)	90
4	Air defense missile 2	(700, 800)	80
5	Cumulus	(350, 700)	300
6	Cumulonimbus	(550, 150)	150
7	Bird 1	(200, 150)	1
8	Bird 2	(700, 450)	1
9	Non-hostile flying unit	(200, 650)	5
10	Enemy fighter	(500, 300)	50
11	Radar 1	(480, 290)	150
12	Radar 2	(780, 650)	150
13	Radar 3	(250, 350)	200
14	Radar 4	(700, 210)	200

表 2 气象威胁类型  
Table 2 Types of meteorological threat

Meteorology	Classification	Impact of weather on communication
Cumulus	Pale cumulus	0.1
	Broken Cumulus	0.3
	Thick Cumulus	0.5
Cumulonimbus	Bald cumulonimbus	0.7
	Cumulonimbus capillatus	0.9
Stratocumulus	Translucent stratocumulus	0.1
	Obscuring stratocumulus	0.4
	Cumulus stratocumulus	0.1
	Stratocumulus castellatus	0.7
	Stratocumulus lenticularis	0.2
Stratus	Single cloud	0.4
	Fragment cloud	0.1
Rain cloud	Rain cloud	0.7
	Broken rain cloud	0.5

0.0812,  $w_2 = 0.1297$ ,  $w_3 = 0.1192$ ,  $w_4 = 0.2075$ ,  $w_5 = 0.2549$ ,  $w_6 = 0.2075$ . 取调节因子  $\beta = 0.7$ , 奖惩上限  $Q^+$  为 0.66, 奖惩下限  $Q^-$  为 0.11, 指标维度为 6, 变权比重取 0.7. 由式 (11) 可以得到优势度函数, 然后根据式 (12) 和 (13) 得到激励函数. 对无人机威胁值进行计算, 接着对无人机战场环境下受到的威胁进行预测.

(3) 建立状态转移概率计算模型. 根据式 (15) 建立无人机实时状态转移概率模型, 如图 8(a) 和

表 3 非合作飞行单位的威胁大小  
Table 3 Threat values of non-cooperative flying units

Non-cooperative flying unit	Threat size	Threat radius (km)
Bird	0.5	1
Non-hostile flying unit	0.9	5
Enemy fighter	0.9	50

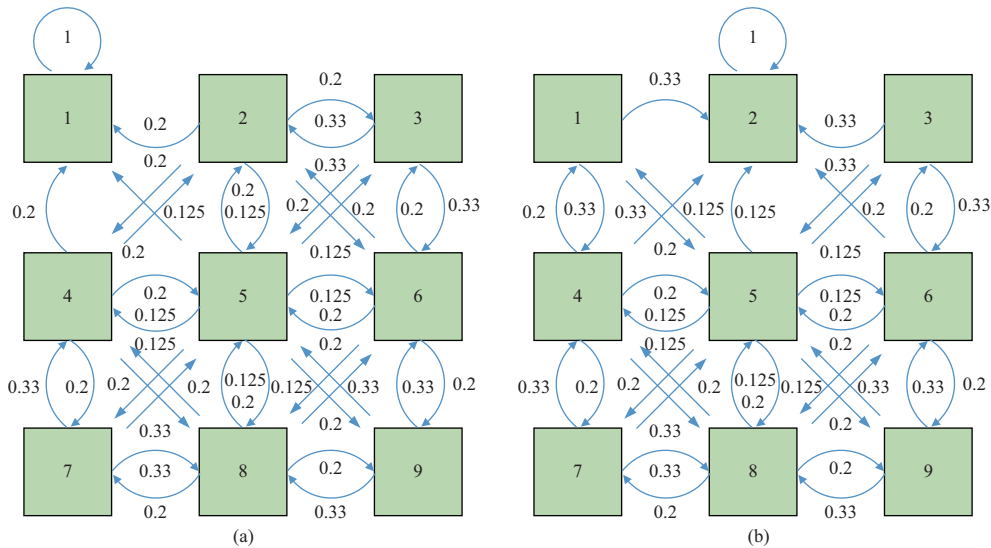


图 8 (网络版彩图) 斜角位置 (a) 和正向位置 (b) 概率转移模型

Figure 8 (Color online) Probability transfer models of (a) oblique position and (b) forward position

表 4 模糊云模型参数  
Table 4 Parameters of fuzzy cloud model

Expected value	Entropy	Superentropy
0.1	0.05	0.025
0.3	0.066	0.025
0.5	0.066	0.025
0.7	0.066	0.025
0.9	0.05	0.025

(b) 所示.

根据图 8(a) 和 (b) 的两个模型, 可以得到无人机从栅格中心向周围所有位置转移的概率模型. 然后将无人机状态转移概率模型代入马尔可夫威胁预测中, 取马尔可夫衰减因子的值为 0.9, 利用式 (19) 计算无人机战场环境威胁预测值, 从而得到无人机飞行区域威胁预测数据.

(4) 确定无人机威胁评估模糊语言集为 {安全, 较小威胁, 中等威胁, 较大威胁, 极大威胁}, 论域为 [0,1]. 根据实际情况确定模糊云模型的熵和超熵, 建立基于云滴生成的评估模型. 根据评估期望集合得到云模型分段集合为 {(0, 0.3), (0.05, 0.45), (0.3, 0.7), (0.55, 0.95), (0.7, 1)}, 如表 4 所示.

根据模糊云的期望、熵和超熵, 并利用分值激活评估云发生器, 可以得到模糊云评估模型如图 9

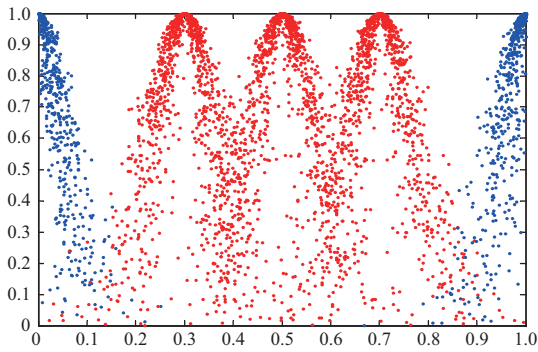


图 9 云滴模糊评估模型

Figure 9 Cloud drop fuzzy evaluation model

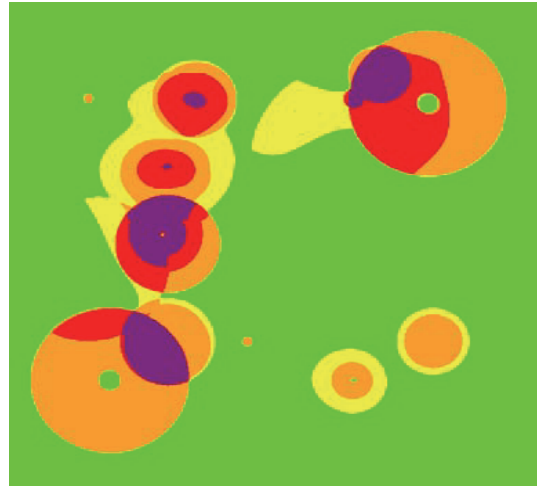


图 10 无人机飞行区域威胁等级图

Figure 10 Threat level map of UAV flight area

所示.

图 9 中每个云滴表示一次无人机模糊威胁评估的结果, 横坐标代表无人机威胁值, 纵坐标代表当前无人机威胁程度的隶属度值, 利用云滴集合构建模糊评估模型.

(5) 划分无人机威胁等级. 利用 (3) 得到的无人机飞行区域威胁预测值和通过威胁模型计算得到的无人机当前威胁值, 通过云模糊评估方法对无人机威胁进行模糊评估, 从而得到无人机飞行区域威胁等级图, 如图 10 所示.

图 10 中绿色区域为安全飞行区, 黄色区域为较小威胁区, 橙色区域为中等威胁, 红色区域为较大威胁区, 紫色区域为极大威胁区. 可以看出叠加多种威胁因素的区域威胁较大, 没有威胁的区域或者只是受预测威胁影响的区域威胁较小. 该方法对威胁区的范围和程度进行了预测, 并避免了因权重分散导致的威胁评估结果与实际不符的情况, 实验结果与实际飞行过程中威胁程度情况接近.

(6) 确定无人机安全飞行区域. 分别假设无人机威胁阈值为 0.27, 0.45, 0.66, 0.83, 建立无人机安全飞行区域如图 11 所示.

图 11 中白色区域代表无人机安全飞行区域, 可以看出当无人机的威胁阈值较大时无人机可飞行区域较大. 当无人机威胁阈值降低, 可飞行区域随之减小. 当确定无人机安全阈值后, 无人机只能在白色区域进行路径规划, 以保障无人机在满足威胁代价的情况下执行任务. 通过实验结果验证, 本论文的方法贴合实际, 证明了该方法的有效性.

## 7 结束语

本文以无人机在战场环境下执行任务为背景, 进行无人机安全飞行区域威胁评估研究. 由于无人机在区域内飞行时威胁的权重随无人机状态的变化发生改变, 所以引入变权理论进行变权. 针对无人机在飞行时自身状态不断变化的问题, 通过引入马尔可夫模型, 对威胁变化进行预测, 并根据预测结果利用云模糊评估方法确立无人机安全飞行区域. 该方法充分考虑了无人机战场环境下的复杂性和不确定性, 并通过仿真实验证明了该方法确定的无人机安全飞行区域的有效性. 未来工作可开展无人机

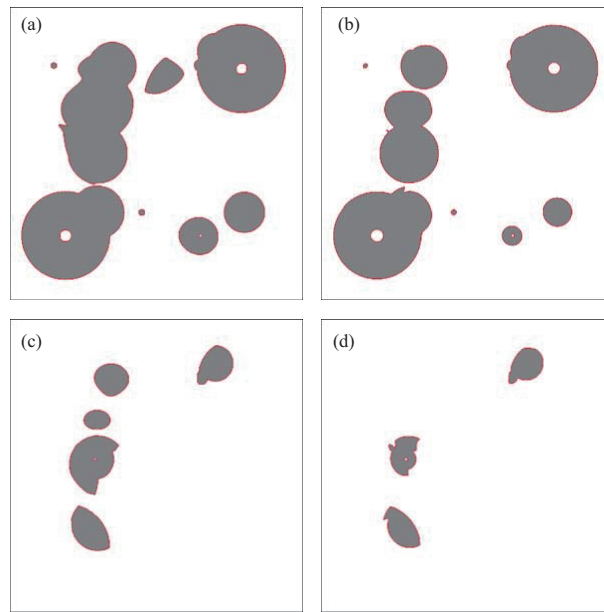


图 11 (网络版彩图) 无人机安全飞行区域

Figure 11 (Color online) UAV safe flight area. The threat thresholds are (a) 0.27, (b) 0.45, (c) 0.66, and (d) 0.83.

协同合作情况下安全飞行区域确定方法的研究, 解决合作型无人机相互影响的问题.

## 参考文献

- 1 Lyu Y, Kang T N, Pan Q, et al. UAV sense and avoidance: concepts, technologies, and systems. *Sci Sin Inform*, 2019, 49: 520–537 [吕洋, 康童娜, 潘泉, 等. 无人机感知与规避: 概念、技术与系统. *中国科学: 信息科学*, 2019, 49: 520–537]
- 2 Zheng T R, Sun L M, Lou T T, et al. Determination method of safe flight area for UAV inspection for transmission lines based on electromagnetic field calculation. *Shandong Electr Power Technol*, 2018, 45: 27–30 [郑天茹, 孙立民, 娄婷婷, 等. 基于电磁场计算的输电线路无人机巡检安全飞行区域确定方法. *山东电力技术*, 2018, 45: 27–30]
- 3 Xie C S, Li X. Division and evaluation of flight forbidden area in severe weather. *Chinese J Safety Sci*, 2010, 20: 47–52 [谢春生, 李雄. 危险天气影响航路飞行区域的划设及评估. *中国安全科学学报*, 2010, 20: 47–52]
- 4 Chang T Q, Zhao L Y, Guo L B, et al. Multi target threat assessment method for tank battlefield environment. *Acta Ordnance Equipment Eng*, 2019, 40: 88–93 [常天庆, 赵立阳, 郭理彬, 等. 坦克战场环境多目标威胁评估方法研究. *兵器装备工程学报*, 2019, 40: 88–93]
- 5 Zhang Q L, Zhao Y F, Rong S, et al. Optimization of mining method for gently inclined thin vein based on variable weight theory and TOPSIS. *Gold Sci Technol*, 2019, 27: 844–850
- 6 Zheng G, Ma J C, Zhang E G. Research on fuzzy comprehensive evaluation of milling performance based on variable weight method. *Manuf Technol Mach Tool*, 2020, 6: 112–117 [郑刚, 马旌超, 张而耕. 基于变权重方法的铣削性能模糊综合评价研究. *制造技术与机床*, 2020, 6: 112–117]
- 7 Xiong X X, Chen L, Liang J. Vehicle driving risk prediction based on Markov chain model. *Discrete Dyn Nat Soc*, 2018, 2018: 1–12
- 8 Li L, Sun L J, Ning G B. Deterioration prediction of urban bridges on network level using Markov-chain model. *Math Probl Eng*, 2014, 2014: 1–10
- 9 Zhou T L, Chen M, Yang C G, et al. Data fusion using Bayesian theory and reinforcement learning method. *Sci China Inf Sci*, 2020, 63: 170209
- 10 Zhou T L, Chen M, Wang Y H, et al. Information entropy-based intention prediction of aerial targets under uncertain and incomplete information. *Entropy*, 2020, 22: 279

- 11 Di R H, Gao X G, Guo Z G, et al. A threat assessment method for unmanned aerial vehicle based on Bayesian networks under the condition of small data sets. *Math Probl Eng*, 2018, 2018: 1–17
- 12 Wang G G, Guo L H, Duan H. Wavelet neural network using multiple wavelet functions in target threat assessment. *Sci World J*, 2013, 2013: 1–7
- 13 Guo Y, Zhu J H, Wang Z X, et al. A multi-characteristics-based method for evaluating the security situation of inter-domain routing nodes. *Sci Sin Inform*, 2014, 44: 527–536 [郭毅, 朱俊虎, 王振兴, 等. 基于多特征的域间路由节点安全状态评估方法. *中国科学: 信息科学*, 2014, 44: 527–536]
- 14 Li R. UAV route and flight control law evaluation technology. Dissertation for Master's Degree. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013 [李荣. 无人机航路与飞行控制律评估技术. 硕士学位论文. 南京: 南京航空航天大学, 2013]
- 15 Wang J, Zhou S D, Ye S, et al. A method of weather level modeling and assessmnet for UAVs mountainous region. *Electro Optic Control*, 2012, 19: 108–112 [王俊, 周树道, 叶松, 等. 山地条件下的无人机气象威胁度建模与评估方法. *电光与控制*, 2012, 19: 108–112]
- 16 Ao Q, Fang B, Huang C. Radar detection probability model based on real-time RCS. *Comput Simul*, 2016, 33: 1–5 [敖齐, 方斌, 黄晨. 基于实时 RCS 的雷达探测概率模型. *计算机仿真*, 2016, 33: 1–5]
- 17 Wei C Y, Zang W L, Jiang J L. The utmost shooting boundary analysis of cannon fire against any velocity target. *Acta Ordnance Eng*, 2008, 29: 1296–1302 [魏朝阳, 臧文利, 江金龙. 高炮对任意速度目标极限射击死界的研究. *兵工学报*, 2008, 29: 1296–1302]
- 18 Wang D Z, Teng K N, Xiao Y J, et al. Networked cooperative air-defense target assignment of ground-to-air missile. *Command Control Simul*, 2019, 41: 13–16 [王道重, 滕克难, 肖玉杰, 等. 地空导弹网络化协同防空目标分配. *指挥控制与仿真*, 2019, 41: 13–16]
- 19 Zhao J Y, Liu X W, Jiang L. Hit probability calculation of photoelectric guided missile under smoke jamming condition. *J Detect Control*, 2019, 41: 102–105 [赵俊阳, 刘湘伟, 姜林. 烟幕干扰条件下光电制导导弹命中概率计算方法. *探测与控制学报*, 2019, 41: 102–105]
- 20 Pu H Y, Wang H, Wei R X, et al. Autonomous collision avoidance control for cooperative UAV under dynamic threat. *Electro Opt Control*, 2017, 24: 28–31 [朴海音, 王鹤, 魏瑞轩, 等. 动态威胁下的合作型无人机自主防撞控制. *电光与控制*, 2017, 24: 28–31]
- 21 Skowron M, Chmielowiec W, Glowacka K, et al. Sense and avoid for small unmanned aircraft systems: research on methods and best practices. *Proc Inst Mech Eng Part G-J Aerospace Eng*, 2019, 233: 6044–6062
- 22 Dang F, Yang X L, Long K P. Jet forwarding algorithm: a DTN routing algorithm based on Markov location prediction model. *Sci Sin Inform*, 2010, 40: 1312–1320 [党斐, 阳小龙, 隆克平. 喷射转发算法: 一种基于 Markov 位置预测模型的 DTN 路由算法. *中国科学: 信息科学*, 2010, 40: 1312–1320]
- 23 Mo L P, Pan T T. Mean-square consensus of heterogeneous multi-agent systems under Markov switching topologies. *Sci Sin Inform*, 2016, 46: 1621–1632 [莫立坡, 潘婷婷. Markov 切换拓扑下异构多智能体系统的均方一致性. *中国科学: 信息科学*, 2016, 46: 1621–1632]
- 24 Zhang Y Y. Air target threat assessment method based on cloud model theory. Dissertation for Master's Degree. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2013 [张银燕. 基于云模型理论的空中目标威胁评估方法. 硕士学位论文. 郑州: 中国人民解放军信息工程大学, 2013]
- 25 Wu J J. *Aviation Meteorology*. Dalian: Dalian Maritime University Press, 2017 [吴俊杰. 航空气象. 大连: 大连海事大学出版社, 2017]

# Determining safe flight area of UAVs based on variable weight threat assessment

Dong YAN, Mou CHEN\*, Qingxian WU & Mengshun YUAN

*College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China*

\* Corresponding author. E-mail: chenmou@nuaa.edu.cn

**Abstract** To manage the complexity and uncertainty faced by an unmanned aerial vehicle (UAV) and identify a safe flight area in a battlefield environment, we propose a method for determining the safe flight area of the UAV based on the variable weight theory and a Markov model. In the threat calculation, the variable weight theory is introduced, so that the weight can be adjusted according to the position of the UAV relative to the threat area. Then, the Markov model is used to predict the environmental threat the UAV may encounter during its flight. Then, a fuzzy evaluation method is used to determine the threat level in the UAV flight area, and a cloud model is introduced to construct a membership function that improves the reliability of the result. Finally, the safe flight area of the drone is determined based on the threat threshold. The simulation results show that the proposed method for determining the safe flight area of the UAV is effective in a complex battlefield environment.

**Keywords** UAV, threat assessment, flight safety envelope, variable weight theory, Markov model



**Dong YAN** was born in 1995. He is currently pursuing his Master's degree at NUAU, Nanjing, China. His main research interests include intelligent prediction decision making and planning.



**Mou CHEN** was born in 1975. He obtained his B.E. and Ph.D. degrees from NUAU, Nanjing, China, in 1998 and 2004. Currently, he is a professor and Ph.D. supervisor at NUAU. His research directions are nonlinear control, intelligent control, and flight control.



**Qingxian WU** was born in 1955. He obtained his Master's degree in control theory and application from SEU, Nanjing, China, in 1985. Currently, he is a professor and Ph.D. supervisor at NUAU. He has been engaged in automatic control research for a long time. His main research fields are industrial automation, robust control, and intelligent control.



**Mengshun YUAN** was born in 1996. He is currently pursuing his Master's degree at NUAU, Nanjing, China. His main research interests include fire control and path planning.