

控制与决策

Control and Decision

无人飞行器航迹方案的VIKOR择优评价

殷春武

引用本文:

殷春武. 无人飞行器航迹方案的VIKOR择优评价[J]. *控制与决策*, 2020, 35(12): 2950–2958.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0415>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

凸优化与A*算法结合的路径避障算法

Convex optimization and A-star algorithm combined path planning and obstacle avoidance algorithm

控制与决策. 2020, 35(12): 2907–2914 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0351>

考虑卸载顺序约束的成品油二次配送车辆路径问题

Vehicle routing problem of refined oil secondary distribution considering unloading sequence constraints

控制与决策. 2020, 35(12): 2999–3005 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1756>

微型无人机集群低时延组网规划方法

A low delay networking planning method for micro UAV swarm

控制与决策. 2020, 35(11): 2696–2706 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1549>

考虑时间序列的动态大群体应急决策方法

Dynamic large group emergency decision-making method considering time series

控制与决策. 2020, 35(11): 2609–2618 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0088>

乡村旅游开发适宜性等级评价TOPSIS方法

TOPSIS method of suitability grade assessment for rural tourism development

控制与决策. 2020, 35(11): 2619–2625 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1565>

无人飞行器航迹方案的VIKOR择优评价

殷春武[†]

(西安建筑科技大学 信息与控制工程学院, 西安 710055)

摘要: 针对无人飞行器智能航迹规划算法导致的多航迹选择问题, 构建基于多准则妥协解排序法(VIKOR)的航迹路线择优评价体系. 为快速获得各威胁源的综合威胁信息, 采用路线分割和极限的思想, 建立综合威胁计算模型, 并给出模型参数变化范围计算方法. 以变异系数法确定指标权重, 采用可最大化群体利益且弱化个体遗憾的VIKOR算法融合威胁信息, 给出基于VIKOR算法的航迹方案择优评价方法和步骤. 该评价方法可获得具有优先级别的妥协最优航迹方案, 使评价结果更容易被决策者接受. 实际航迹路线择优问题验证了所提出方法的有效性.

关键词: 无人飞行器; 航迹规划; VIKOR; 择优评价

中图分类号: O225; C934

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2019.0415

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 殷春武. 无人飞行器航迹方案的VIKOR择优评价[J]. 控制与决策, 2020, 35(12): 2950-2958.

Unmanned aerial vehicle path scheme optimal evaluation based-VIKOR

YIN Chun-wu[†]

(School of Information and Control Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: A path scheme preferential evaluation system based on VlseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje (VIKOR) is proposed to deal with the path planning scheme selection problem in the process of unmanned aerial vehicle flight, and comprehensive threat models are established for each threat sources. To get the comprehensive threat information from each threat sources quickly, comprehensive threat computation models are constructed. Using the line segmentation and the definition of limit, the range of model parameters are also given. The index weight is determined by the coefficient of variation, and the threat information is fused using the VIKOR algorithm which can maximize the group interest and weaken the individual regret. The path plan optimal evaluation method based on VIKOR and its steps are given. The evaluation method can obtain a priority level compromise optimal path scheme, which makes the evaluation result more easily accepted by the decision maker. The effectiveness of this method is verified by the optimization of the actual path planning.

Keywords: unmanned aerial vehicle; track planning; VIKOR; optimal evaluation

0 引言

无人飞行器在执行飞行任务前, 需根据GPS和被执行区域电子地图上的已知威胁, 规划可行性较高的飞行线路, 以确保无人飞行器的飞行安全. 航迹规划是实现无人飞行器自主飞行的关键技术^[1-2]. 多种航迹规划算法相继被提出, 使得同一飞行任务基于不同算法可以产生不同的航迹路线, 特别是智能航迹规划算法的广泛使用, 出现同一算法产生不同的航迹路线, 导致最优航迹方案的选择成为无人飞行器航迹规划新问题^[3], 因此, 建立航迹方案择优评价体系, 具有

重要的实际工程应用意义.

算法是航迹规划的核心, 航迹规划算法大致可分为两类: 第1类算法是确定性算法^[4-6], 诸如动态规划法、A*算法、Voronoi算法等, 该类算法能获得唯一的飞行路径, 但该类算法更注重的是最短路径, 容易陷于局部最优解; 第2类算法是随机智能规划算法^[7-12], 诸如模拟退火法、蚁群算法及其改进算法、遗传算法或差分算法、粒子群优化算法及其改进算法等, 这类算法能获得全局最优解, 但针对不同的规划算法, 或是同一算法针对不同的初始条件, 随机智能规划算

收稿日期: 2019-04-06; 修回日期: 2019-08-01.

基金项目: 西安建筑科技大学青年基金项目(QN1727); 西安建筑科技大学人才基金项目(6040317017); 陕西省教育厅专项科研项目(17JK0294).

责任编辑: 刘民.

[†]通讯作者. E-mail: yincwxa2013@mail.nwpu.edu.cn.

法可能规划出不同的航迹路线,使得在航迹路线选择上,面临着多航迹择优的决策问题. 当前,学者的研究重点集中于航迹规划算法研究,缺乏对多航迹择优问题的研究,使得航迹方案择优评价方面的文献几乎没有,仅文献[13]探讨了航迹择优问题;文献[3]提出了一种基于区间灰度的决策方法,并将其用于航迹择优评价中. 在当前智能控制为主导的大背景下,制定一套科学、合理的多航迹择优评价体系非常必要和迫切.

在航迹方案择优评价体系中,涉及到威胁信息的获取、威胁点权重的确定和信息融合 3 部分. 多航迹择优过程不同于航迹规划,航迹择优过程是基于航迹已知的前提下进行的,因此,在航迹择优过程中,计算各威胁源的综合威胁概率是首要问题. 精确的威胁概率对提升决策结果可信度具有重要的意义,文献[13]采用分段法来计算各威胁源的综合威胁概率,但存在难以分段和计算精度不够的问题. 本文根据各威胁源探测威胁概率的计算公式,通过对飞行器航行轨迹进行分割,结合极限理论,推导出各个威胁点计算综合威胁概率的公式,以获得精确的威胁概率. 确定指标权重的方法有很多,主要分为主观赋权法、客观赋权法以及对主客观赋权法加权的组合赋权法. 通常,各备选航迹在某威胁源的威胁概率变化越离散,说明该威胁源对航迹规划的影响越大,应重点关注该威胁源,对其赋予更大的权重. 基于此,本文采用变异系数法来确定每个威胁点的动态权重. 为克服传统理想解法(TOPSIS)容易出现逆序的问题,本文采用可获得妥协最优解的VIKOR算法融合各航迹方案的威胁信息,以实现对各航迹方案的威胁程度排序和方案择优. 本文的创新之处在于:采用极限原理推导出各威胁点对飞行器综合威胁概率的计算公式,可计算出各威胁点的精确威胁概率;构建了一套用于多航迹方案择优的VIKOR评价体系.

1 威胁源综合威胁概率模型的建立

无人飞行器在执行任务过程中会受到各种威胁源的威胁,计算各个威胁源对无人飞行器的威胁概率,是实现无人飞行器航迹规划和航迹方案择优的主要依据. 下面将基于各种威胁的实际情况,采用极限原理,建立各种威胁源对无人飞行器的综合威胁概率的计算模型.

1.1 雷达威胁

无人飞行器在执行任务过程中会受到雷达的威胁. 如果天线无法 360° 扫描,则天线的扫描范围为扇形,雷达对飞行器的探测概率^[14]为

$$p_r(d_r) = \begin{cases} 0, & d_r > d_{r \max} \text{ or } d_r > d_r \cos \theta_r; \\ 1/d_r^4, & \text{otherwise}; \\ 1, & d_r < d_{r \min} \text{ or } d_r < d_r \cos \theta_r. \end{cases} \quad (1)$$

其中: d_r 为无人飞行器距雷达的距离, h_r 为无人飞行器相对于雷达的距离, $d_{r \max}$ 为雷达探测区域的最大半径.

假设天线可以 360° 扫描,形成雷达的全方位探测,方位角范围为 0° ~ 360°,则探测概率^[14]为

$$p_r(d_r) = \begin{cases} 0, & d_r > d_{r \max}; \\ 1/d_r^4, & d_{r \min} < d_r < d_{r \max}; \\ 1, & d_r < d_{r \min}. \end{cases} \quad (2)$$

当无人飞行器从第 i 个位置飞向第 j 个位置时,假设威胁点位于第 K 位置,则无人飞行器与威胁点之间的关系如图 1 所示. 并记威胁点 K 的坐标为 (x_k, y_k) ,第 i 个位置的坐标为 (x_i, y_i) ,第 j 个位置的坐标为 (x_j, y_j) .

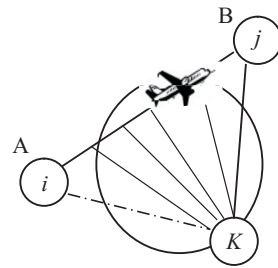


图 1 无人飞行器与威胁点的位置关系

1) 当威胁源到直线 AB 的距离 d 大于雷达探测区域的最大半径 $d_{r \max}$ 时,威胁为 0.

2) 当威胁源到直线 AB 的距离 d 小于雷达探测区域的最大半径 $d_{r \max}$ 时,一定存在威胁,下面着重探讨综合威胁的计算.

① 当 $x_i \neq x_j$ 时,从第 i 个位置到第 j 个位置的直线方程为

$$y = y_j + \frac{y_j - y_i}{x_j - x_i}(x - x_i), \quad (3)$$

考虑从第 i 个位置到第 j 个位置的线段,将该线段平均分成 n 份,当分得很细时,可以认为该小段上每点到威胁点的距离都相等. 设在第 t 小段上任取一点的坐标为 (ξ_{it}, η_{it}) ,则 $p_r(d_r)$ 到威胁点的距离为

$$p_{rt}(d_{rt}) = \frac{1}{(\sqrt{(\xi_{it} - x_k)^2 + (\eta_{it} - y_k)^2})^4}, \quad (4)$$

n 段的平均威胁为

$$\bar{p}_r = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n p_{rt}(d_{rt}) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \frac{1}{(\sqrt{(\xi_{it} - x_k)^2 + (\eta_{it} - y_k)^2})^4} =$$

$$\frac{1}{|x_j - x_i|} \sum_{t=1}^n \frac{|x_j - x_i|}{n} \frac{1}{(\sqrt{(\xi_{it} - x_k)^2 + (\eta_{it} - y_k)^2})^4}. \quad (5)$$

对线段分得越细,威胁概率计算越精确.因此,基于极限的思想,当 $n \rightarrow \infty$ 时,有

$$\begin{aligned} \bar{p}_r &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{|x_j - x_i|} \times \\ &\sum_{t=1}^n \frac{|x_j - x_i|}{n} \frac{1}{(\sqrt{(\xi_{it} - x_k)^2 + (\eta_{it} - y_k)^2})^4}. \quad (6) \end{aligned}$$

因为是对线段进行平均分割,记 $\Delta x_{it} = \frac{|x_j - x_i|}{n}$,所以平均威胁为

$$\begin{aligned} \bar{p}_r &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{|x_j - x_i|} \times \\ &\sum_{t=1}^n \Delta x_{it} \frac{1}{(\sqrt{(\xi_{it} - x_k)^2 + (\eta_{it} - y_k)^2})^4} = \\ &\frac{1}{|x_j - x_i|} \int_{x_i}^{x_j} \frac{1}{(\sqrt{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2})^4} dx. \quad (7) \end{aligned}$$

又因为 $y = y_j + \frac{y_j - y_i}{x_j - x_i}(x - x_j)$,所以综合威胁概率的计算公式为

$$\begin{aligned} \bar{p}_r &= \frac{1}{|x_j - x_i|} \times \\ &\int_{x_i}^{x_j} \frac{1}{\left(\sqrt{(x - x_k)^2 + \left(y_j + \frac{y_j - y_i}{x_j - x_i}(x - x_j) - y_k\right)^2}\right)^4} dx. \quad (8) \end{aligned}$$

通过图1可以看出,飞行器从第 i 个位置到达第 j 个位置时,线段 AB 只有一部分在雷达的威胁区域内,超出部分不受威胁,其威胁概率为0.在计算飞行器受威胁点威胁的概率时,应该只考虑属于威胁范围内的区域.威胁范围内的边界点是离威胁点距离为 $d_{r \max}$ 的点,因此,在威胁源覆盖线段区间的坐标 (x, y) 应满足

$$(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2 = d_{r \max}^2. \quad (9)$$

又因 $y = y_j + \frac{y_j - y_i}{x_j - x_i}(x - x_j)$,所以

$$(x - x_k)^2 + \left(y_j + \frac{y_j - y_i}{x_j - x_i}(x - x_j) - y_k\right)^2 = d_{r \max}^2. \quad (10)$$

求解式(10),即可获得 x 的取值范围,该范围即为飞行器受威胁源威胁的范围.设求解式(10)得到 x 的

解构成的范围为 $[x_{i1}, x_{i2}]$,于是,最终从第 i 个位置到第 j 个位置的飞行器实际受威胁区域为 $[x_{i1}, x_{i2}]$ 与 $[x_i, x_j]$ 的交集,即最终飞行器受威胁区间 $[a_i, b_i] = [x_{i1}, x_{i2}] \cap [x_i, x_j]$.因此,飞行器从第 i 个位置到达第 j 个位置的实际威胁为

$$\begin{aligned} \bar{p}_r &= \frac{1}{|x_j - x_i|} \times \\ &\int_{a_i}^{b_i} \frac{1}{\left(\sqrt{(x - x_k)^2 + \left(y_j + \frac{y_j - y_i}{x_j - x_i}(x - x_j) - y_k\right)^2}\right)^4} dx. \quad (11) \end{aligned}$$

② 当 $x_i = x_j$ 时,有直线方程

$$x = x_i. \quad (12)$$

同样,将线段平均分成 n 份,每份的威胁概率为

$$p_{rt}(d_{rt}) = \frac{1}{(\sqrt{(x_i - x_k)^2 + (\eta_{it} - y_k)^2})^4}, \quad (13)$$

n 段的平均威胁为

$$\begin{aligned} \bar{p}_r &= \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \frac{1}{(\sqrt{(x_i - x_k)^2 + (\eta_{it} - y_k)^2})^4} = \\ &\frac{1}{|y_j - y_i|} \sum_{t=1}^n \frac{|y_j - y_i|}{n} \frac{1}{(\sqrt{(x_i - x_k)^2 + (\eta_{it} - y_k)^2})^4}. \quad (14) \end{aligned}$$

同理,当 $n \rightarrow \infty$ 时,令 $\Delta y_{it} = \frac{|y_j - y_i|}{n}$,有

$$\begin{aligned} \bar{p}_r &= \frac{1}{|y_j - y_i|} \times \\ &\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{t=1}^n \Delta y_{it} \frac{1}{(\sqrt{(x_i - x_k)^2 + (\eta_{it} - y_k)^2})^4} = \\ &\frac{1}{|y_j - y_i|} \int_{y_i}^{y_j} \frac{1}{(\sqrt{(x_i - x_k)^2 + (y - y_k)^2})^4} dy. \quad (15) \end{aligned}$$

威胁源覆盖线段区间的坐标 (x, y) 应满足下式:

$$(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2 = d_{r \max}^2. \quad (16)$$

联合式(12)、(16),即可计算出 y 的值, y 的值构成威胁源包含飞行器范围的线段取值范围.设 y 的解构成的区间为 $[y_{i1}, y_{i2}]$,则飞行器从第 i 个位置到达第 j 个位置的过程中,实际受威胁区域为 $[y_{i1}, y_{i2}]$ 与 $[y_i, y_j]$ 的交集,即飞行器最终受威胁区间 $[c_i, d_i] = [y_{i1}, y_{i2}] \cap [y_i, y_j]$.因此,飞行器从第 i 个位置到达第 j 个位置的实际威胁为

$$\bar{p}_r = \frac{1}{|y_j - y_i|} \int_{c_i}^{d_i} \frac{1}{(\sqrt{(x_i - x_k)^2 + (y - y_k)^2})^4} dy. \quad (17)$$

3) 综合以上分析,得到飞行器从第*i*个区域飞到第*j*个区域的总体威胁为

$$\bar{p}_r = \begin{cases} 0, & d_r > d_{r \max}; \\ \frac{1}{|x_j - x_i|} \times \int_{a_i}^{b_i} \frac{1}{\left(\sqrt{(x-x_k)^2 + \left(y_j + \frac{y_j - y_i}{x_j - x_i}(x-x_j) - y_k\right)^2}\right)^4} dx, & d_r < d_{r \max}, x_j \neq x_i; \\ \frac{1}{|y_j - y_i|} \int_{c_i}^{d_i} \frac{1}{\left(\sqrt{(x_i - x_k)^2 + (y - y_k)^2}\right)^4} dy, & d_r < d_{r \max}, x_j = x_i; \\ 1, & d_r < d_{r \min}. \end{cases} \quad (18)$$

1.2 导弹威胁

无人飞行器被导弹命中的概率^[14]为

$$p_m(d_m) = \begin{cases} 0, & d_m > d_{m \max}; \\ 1/d_m, & d_{m \min} < d_m < d_{m \max}; \\ 0, & d_m < d_{m \min}. \end{cases} \quad (19)$$

其中 $d_{m \min}$ 和 $d_{m \max}$ 分别为导弹威胁的近界和远界. 当无人飞行器距导弹的距离 $d_m < d_{m \min}$ 时, 飞机进入杀伤区, 无人机已经被击落, 因此, 式(19)可以简化为

$$p_m(d_m) = \begin{cases} 0, & d_m > d_{m \max}; \\ 1/d_m, & d_{m \min} \leq d_m \leq d_{m \max}; \\ 1, & d_m < d_{m \min}. \end{cases} \quad (20)$$

与雷达威胁的分析相同, 导弹的实际威胁概率可表示为

$$\bar{p}_m = \begin{cases} 0, & d_m > d_{m \max}; \\ \frac{1}{|x_j - x_i|} \times \int_{a_i}^{b_i} \frac{1}{\sqrt{(x-x_k)^2 + \left(y_j + \frac{y_j - y_i}{x_j - x_i}(x-x_j) - y_k\right)^2}} dx, & d_m < d_{m \max}, x_j \neq x_i; \\ \frac{1}{|y_j - y_i|} \int_{c_i}^{d_i} \frac{1}{\sqrt{(x_i - x_k)^2 + (y - y_k)^2}} dy, & d_m < d_{m \max}, x_j = x_i; \\ 1, & d_m < d_{m \min}. \end{cases} \quad (21)$$

其中: $[a_i, b_i] = [x_{i1}, x_{i2}] \cap [x_i, x_j]$, $[x_{i1}, x_{i2}]$ 为方程 $(x - x_k)^2 + \left(y_j + \frac{y_j - y_i}{x_j - x_i}(x - x_j) - y_k\right)^2 = d_{m \max}^2$ 的解构成的区间; $[c_i, d_i] = [y_{i1}, y_{i2}] \cap [y_i, y_j]$, $[y_{i1}, y_{i2}]$ 为方程 $(x_i - x_k)^2 + (y - y_k)^2 = d_{m \max}^2$ 的解构成的区间.

1.3 高炮威胁

考虑到无人飞行器借助地形遮蔽的作用, 对模型进行简化处理, 无人机被高炮击中的概率^[14]为

$$p_A(d_A) = \begin{cases} 0, & d_A > d_{A \max}; \\ 1/d_A, & d_{A \min} \leq d_A \leq d_{A \max}; \\ 1, & d_A < d_{A \min}. \end{cases} \quad (22)$$

其中 $d_{A \min}$ 和 $d_{A \max}$ 分别为高炮威胁的近界和远界. 同理, 可得到高炮的实际威胁概率为

$$\bar{p}_A = \begin{cases} 0, & d_A > d_{A \max}; \\ \frac{1}{|x_j - x_i|} \times \int_{a_i}^{b_i} \frac{1}{\sqrt{(x-x_k)^2 + \left(y_j + \frac{y_j - y_i}{x_j - x_i}(x-x_j) - y_k\right)^2}} dx, & d_A < d_{A \max}, x_j \neq x_i; \\ \frac{1}{|y_j - y_i|} \int_{c_i}^{d_i} \frac{1}{\sqrt{(x_i - x_k)^2 + (y - y_k)^2}} dy, & d_A < d_{A \max}, x_j = x_i; \\ 1, & d_A < d_{A \min}. \end{cases} \quad (23)$$

其中: $[a_i, b_i] = [x_{i1}, x_{i2}] \cap [x_i, x_j]$, $[x_{i1}, x_{i2}]$ 为方程 $(x - x_k)^2 + \left(y_j + \frac{y_j - y_i}{x_j - x_i}(x - x_j) - y_k\right)^2 = d_{A \max}^2$ 的解构成的区间; $[c_i, d_i] = [y_{i1}, y_{i2}] \cap [y_i, y_j]$, $[y_{i1}, y_{i2}]$ 为方程 $(x_i - x_k)^2 + (y - y_k)^2 = d_{A \max}^2$ 的解构成的区间.

1.4 大气威胁

记飞行器与大气中心的距离为 d_C , 则大气威胁概率^[14]为

$$p_C(d_C) = \begin{cases} 0, & d_C > d_{C \max}; \\ 1/d_C, & d_{C \min} \leq d_C \leq d_{C \max}; \\ 1, & d_C < d_{C \min}. \end{cases} \quad (24)$$

其中 $d_{C \max}$ 和 $d_{C \min}$ 分别为气候威胁的最大半径和最小半径, 当飞行器进入半径为 $d_{C \min}$ 的区域时, 一定会被击毁. 大气的实际综合威胁概率为

$$\bar{p}_c = \begin{cases} 0, d_C > d_{C \max}; \\ \frac{1}{|x_j - x_i|} \times \\ \int_{a_i}^{b_i} \frac{1}{\sqrt{(x-x_k)^2 + \left(y_j + \frac{y_j - y_i}{x_j - x_i}(x-x_j) - y_k\right)^2}} dx, \\ d_C < d_{C \max}, x_j \neq x_i; \\ \frac{1}{|y_j - y_i|} \times \\ \int_{c_i}^{d_i} \frac{1}{\sqrt{(x_i - x_k)^2 + (y - y_k)^2}} dy, \\ d_C < d_{C \max}, x_j = x_i; \\ 1, d_C < d_{C \min}. \end{cases} \quad (25)$$

其中: $[a_i, b_i] = [x_{i1}, x_{i2}] \cap [x_i, x_j]$, $[x_{i1}, x_{i2}]$ 为方程 $(x - x_k)^2 + \left(y_j + \frac{y_j - y_i}{x_j - x_i}(x - x_j) - y_k\right)^2 = d_{C \max}^2$ 的解构成的区间; $[c_i, d_i] = [y_{i1}, y_{i2}] \cap [y_i, y_j]$, $[y_{i1}, y_{i2}]$ 为方程 $(x_i - x_k)^2 + (y - y_k)^2 = d_{C \max}^2$ 的解构成的区间.

1.5 地形威胁

地形最大高度为 H , 最大延伸半径为 R_T , 地形的坡度(仰角)为 θ , 无人机距山峰对称轴的距离为 d_T . 若无人机飞行高度为 h , 则地形对无人机的威胁概率随高度变化而变化. $d_{T \min}$ 表示地形所允许的最近距离, 当地形距离小于 $d_{T \min}$ 时, 毁伤概率为 1; $d_{T \max}$ 表示地形作用的最远距离, 当地形距离大于 $d_{T \max}$ 时, 毁伤概率为 0. 无人机撞地概率^[14] 为

$$\theta = \arcsin(H/\sqrt{R_m^2 + H^2}),$$

$$R_T(h) = (H - h)/\tan \theta; \quad (26)$$

$$p_T(d_T, h) = \begin{cases} 0, d_T > R_T + d_{T \max} \text{ or } h > H; \\ \frac{d_{T \max} + R_T(h) - d_T}{d_{T \max} - d_{T \min}}, \\ h \leq H, R_T + d_{T \min} < d_T < R_T + d_{T \max}; \\ 1, h \leq H, d_T < R_T + d_{T \min}. \end{cases} \quad (27)$$

与雷达威胁分析相似, 地形的实际综合威胁概率为

$$\bar{p}_T = \begin{cases} 0, d_T > R_T + d_{T \max}; \\ \int_{a_i}^{b_i} \left(\frac{d_{T \max} + R_T(h)}{|x_j - x_i|(d_{T \max} - d_{T \min})} - \right. \\ \left. \frac{\sqrt{(x-x_k)^2 + \left(y_j + \frac{y_j - y_i}{x_j - x_i}(x-x_j) - y_k\right)^2}}{|x_j - x_i|(d_{T \max} - d_{T \min})} \right) dx, \\ d_T < R_T + d_{T \max}, x_j \neq x_i; \\ \int_{c_i}^{d_i} \frac{d_{T \max} + R_T(h) - \sqrt{(x_i - x_k)^2 + (y - y_k)^2}}{|y_j - y_i|(d_{T \max} - d_{T \min})} dy, \\ d_T < R_T + d_{T \max}, x_j = x_i; \\ 1, d_T < R_T + d_{T \min}. \end{cases} \quad (28)$$

其中: $[a_i, b_i] = [x_{i1}, x_{i2}] \cap [x_i, x_j]$, $[x_{i1}, x_{i2}]$ 为方程 $(x - x_k)^2 + \left(y_j + \frac{y_j - y_i}{x_j - x_i}(x - x_j) - y_k\right)^2 = (R_T + d_{T \max})^2$ 的解构成的区间; $[c_i, d_i] = [y_{i1}, y_{i2}] \cap [y_i, y_j]$, $[y_{i1}, y_{i2}]$ 为方程 $(x_i - x_k)^2 + (y - y_k)^2 = (R_T + d_{T \max})^2$ 的解构成的区间.

1.6 油耗威胁

从起始点到目标点, 无人飞行器因其携带燃料的限制, 其飞行距离是有一定的限制的. 通常, 所飞行的距离越远, 燃料完全消耗的可能性越大, 所以, 油耗威胁可以通过飞行器航迹路程来反映, 即

$$\bar{p}_o = \sum_i^s l_i. \quad (29)$$

其中: l_i 表示第 i 个小段的路程, 航迹一共经历了 s 个航迹小段.

2 威胁类型的威胁程度确定

每个威胁因素对飞行器的威胁程度不一样, 为了对各威胁因素的重要性进行区分, 需要确定各威胁因素的权重. 纵观现有指标权重确定方法, 大体分为根据评价专家经验的定性赋权法、根据客观数据的客观赋权法和综合主客观赋权法的组合赋权法. 考虑到飞行器航迹路线的选择为在线选择, 不同环境下的威胁因素权重应该做动态调整, 因此, 基于客观数据的指标赋权法应该作为首选. 变异法是利用统计学知识获取权重的客观赋权法, 通过对各指标下数据之间的差异性确定指标权值, 其主要计算过程如下.

设采用不同算法获得 m 条备选航迹方案, 威胁点个数为 n , 通过计算得到各航迹方案的威胁矩阵为 $P = (p_{ij})_{m \times n}$. 计算每个威胁因素下的威胁均值

$\bar{p}_i = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m p_{ki}$ 和标准差

$$S_i = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{k=1}^m (p_{ki} - \bar{p}_i)^2},$$

得到各威胁因素的变异系数为 $V_i = S_i/\bar{y}_i$ ($i = 1, 2, \dots, n$). 于是, 得到第 i ($i = 1, 2, \dots, n$) 个威胁的权重为

$$w_i = \frac{V_i}{\sum_{k=1}^m V_k}, \quad (30)$$

由此得到 n 个威胁点的权重向量

$$w = (w_1, w_2, \dots, w_n). \quad (31)$$

3 基于 VIKOR 的无人飞行器航迹方案选择方法

在对飞行器航迹方案选择过程中, 一般要求最优航迹方案与理想方案尽可能地接近, 因此, 很多决策问题均选择理想解法 (TOPSIS)^[15] 作为主要的决策方法, 但理想解法要求最优方案与正理想解最近, 远离负理想解, 从而导致最优方案并不一定是贴近理想解的方案, 且容易出现逆序问题. 为此, Opricovic^[16-17] 提出一种获得距理想解最近的折中可行解的多属性决策方法 VIKOR, 该方法可以给出带有优先级的折中方案, 使得决策结果更为可靠. 为使所选择的航机路线更为可靠, 本文基于 VIKOR 决策理论, 提出如下的无人飞行器航迹方案 VIKOR 择优算法, 其具体评价步骤如下.

1) 航迹规划和威胁信息计算. 设某地区的雷达、导弹、高炮、大气、地形、油耗等威胁共有 n 个, 根据不同的航迹规划算法, 规划出 m 条路线作为无人飞行器的可选飞行路径. 根据飞行路径, 基于本文所给出的威胁概率计算方法, 分别计算 m 条路线在 n 个威胁点的发生概率. 由于油耗威胁为关于距离的函数, 为获得量纲的统一, 将各条路线的油耗威胁除以最大油耗威胁数, 使所有油耗威胁数值处于 $[0, 1]$ 之间. 设经过处理后的威胁信息矩阵为

$$\begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix},$$

其中 x_{ij} 表示第 i 条路线在第 j 个威胁点的威胁概率.

2) 正、负理想解的确定. 在航迹择优过程中, 威胁概率越小, 无人飞行器在对应轨迹上的风险越小. 威胁信息的正理想解为 $f^* = (f_1^*, \dots, f_n^*)$, 其中

$f_j^* = \min_{i=1,2,\dots,m} \{x_{ij}\}$; 负理想解为 $f^- = (f_1^-, \dots, f_n^-)$, 其中 $f_j^- = \max_{i=1,2,\dots,m} \{x_{ij}\}$.

3) 群体效益值和个别遗憾值的计算. 分别采用如下的公式计算代表备选航迹的群体效益 S_j 和代表个别航迹方案遗憾的个体遗憾值 R_j :

$$S_j = \sum_{i=1}^n w_i (f_i^* - x_{ij}) / (f_i^* - f_i^-), \quad (32)$$

$$R_j = \max \{w_i (f_i^* - x_{ij}) / (f_i^* - f_i^-)\}, \quad (33)$$

其中 w_i 为第 i 个威胁点的权重. 对群体效益值而言, S_j 越小, 代表其对应的航迹方案的群体效益越大; 个别遗憾 R_j 越小, 则代表对应航迹方案的遗憾越小.

4) 计算各航迹方案的利益比率 Q . 有

$$Q_j = \lambda \frac{S_j - S^*}{S^- - S^*} + (1 - \lambda) \frac{R_j - R^*}{R^- - R^*}, \quad (34)$$

其中参数 $\lambda \in [0, 1]$ 为风险偏好系数. $\lambda = 0.5$ 时代表群体效益和个体威胁均衡折中选择航迹方案; 如果 $\lambda > 0.5$, 则在最优航迹方案选择中更偏重于最大化群体效益; 如果 $\lambda < 0.5$, 则代表在选择最优航迹方案时, 更偏重于最小化个体遗憾.

5) 分别根据 Q_j 、 S_j 、 R_j 的数值对备选航迹方案进行排序. 在 VIKOR 排序原则中, 最优方案的选择需要遵循以下两个条件:

条件 1 可接受的利益门槛条件为

$$Q'' - Q' \geq \frac{1}{m-1}.$$

对 Q_j 按降序排列, 将位于第 1 位的 Q_j 值记为 Q' , 位于第 2 位的 Q_j 值记为 Q'' . m 为航迹方案的个数. 该利益门槛条件表示: 排序结果相差一位的第 1 位和第 2 位航迹方案, 只有两者之间的利益比率之差超过门槛值 $\frac{1}{m-1}$, 才能认为排序第 1 位的航迹方案显著优于排序第 2 位的航迹方案. 当对多个备选航迹方案进行择优时, 对 Q_j 按降序排列, 记位于第 $k-1$ 位的 Q_j 值为 Q^{k-1} , 位于第 k 位的 Q_j 值为 Q^k , 如果有 $Q^{k-1} - Q' < \frac{1}{m-1}$, 而 $Q^k - Q' \geq \frac{1}{m-1}$, 则认为排序在前 $k-1$ 位所对应的航迹方案均为折中最优方案.

条件 2 可接受的决策可靠度.

判别航迹方案选择结果可靠度的方式是指, 在基于 Q 值排序后, 排序第 1 位航迹方案的 S 值必须比排序第 2 位航迹方案的 S 值表现好, 或是排序第 1 位航迹方案的 R 值要优于排序第 2 位航迹方案的 R 值.

6) 排序规则分别按照 Q_j 、 S_j 、 R_j 的数值进行降序排列.

如果排序第 1 位航迹方案和排序第 2 位航迹方案同时满足条件 1 和条件 2, 则认为排序第 1 位的航迹

为最优航迹路线.

如果排序第1位和排序第2位的航迹方案之间只满足条件2,则认为排序第1和排序第2的两条航迹路线均为最优路线,可任意选择一条路线作为最终的飞行路线. 如果排序第1的航迹路线与多条航迹路线之间均不满足条件1,只满足条件2,则通过计算得到满足不等式 $Q^k - Q' \leq \frac{1}{m-1}$ 的最大的 k 值,于是, Q', Q'', \dots, Q^k 均为最优飞行路线.

4 仿真验证

某无人机执行飞行任务中,已经探测到各类威胁点、无人机起点和目标点坐标如图2所示.

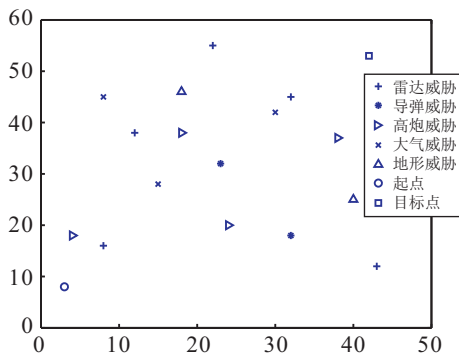


图2 威胁布局示意

各类威胁点和无人机起点与目标点的具体坐标如表1所示(单位: km).

采用无人机轨迹规划算法,共获得6条可供选择的适飞路线,为尽可能地降低无人机执行任务的风险,需要从6条备选路线中选择一条威胁最小的路线作为无人机的最终飞行路线. 依据本文的威胁概率

表1 威胁点、无人机起点及目标点坐标

威胁点	编号	坐标 (x, y)
雷达	1	(22, 55)
	2	(32, 45)
	3	(8, 16)
	4	(12, 38)
	5	(43, 12)
导弹	1	(32, 18)
	2	(23, 32)
高炮	1	(18, 38)
	2	(24, 20)
	3	(38, 37)
	4	(4, 18)
大气	1	(8, 45)
	2	(30, 42)
	3	(15, 28)
地形	1	(40, 25)
	2	(18, 46)
起点		(3, 8)
目标点		(42, 53)

计算公式,依次计算6条备选航迹路线的综合威胁概率. 考虑到油耗威胁是关于路程的函数,与其他以概率为测度的量纲不一致,因此,将所有油耗威胁值除以6种备选方案中最大油耗威胁值,并将该油耗威胁比作为方案择优的油耗威胁数据. 通过计算,得到6种备选轨迹的各种威胁值如表2所示.

表2 各威胁点的威胁率

航迹	雷达威胁					高炮威胁			
	1	2	3	4	5	1	2	3	4
1	0.5147	0.6575	0.4218	0.3787	0.0769	0.6597	0.5909	0.5143	0.3517
2	0.6058	0.6649	0.6157	0.4577	0.0462	0.3404	0.6593	0.2435	0.5308
3	0.1270	0.1576	0.4922	0.4431	0.0971	0.5853	0.5472	0.6293	0.5853
4	0.5134	0.6706	0.6595	0.0922	0.5235	0.2238	0.1386	0.3500	0.5497
5	0.3324	0.6572	0.3557	0.3555	0.0948	0.4513	0.1493	0.1966	0.6172
6	0.0975	0.4854	0.0357	0.1712	0.0171	0.2551	0.2575	0.2511	0.2858

航迹	导弹威胁		大气威胁			地形威胁		油耗威胁
	1	2	1	2	3	1	2	1
1	0.4387	0.4094	0.3804	0.5688	0.1656	0.2290	0.1067	0.2599
2	0.3816	0.4547	0.5678	0.4694	0.3020	0.6133	0.6619	0.5001
3	0.4655	0.2760	0.0759	0.0119	0.2630	0.1524	0.0046	0.4314
4	0.4952	0.3797	0.0540	0.3371	0.3541	0.5258	0.4749	1.0000
5	0.1869	0.3551	0.5308	0.1622	0.3892	0.5383	0.5173	0.1818
6	0.4898	0.1626	0.4792	0.4943	0.4482	0.6961	0.5687	0.2638

采用变异法计算出各个威胁点的权重为
 $W =$
 (0.064 8, 0.040 9, 0.057 4, 0.052 2, 0.145 7,
 0.046 6, 0.066 2, 0.052 0, 0.030 5, 0.031 3, 0.030 4,
 0.072 1, 0.069 5, 0.034 2, 0.052 2, 0.075 6, 0.074 8).

确定6条备选航迹的正理想解向量为
 $f^* =$
 (0.097 5, 0.157 6, 0.035 7, 0.092 2, 0.017 1,
 0.223 8, 0.138 6, 0.196 6, 0.285 8, 0.186 9, 0.162 6,
 0.054 0, 0.011 9, 0.165 6, 0.152 4, 0.004 6, 0.181 8).

6条备选航迹的负理想解向量为
 $f^- =$
 (0.605 8, 0.670 6, 0.659 5, 0.457 7, 0.523 5,
 0.659 7, 0.659 3, 0.629 3, 0.617 2, 0.495 2, 0.454 7,
 0.567 8, 0.568 8, 0.448 2, 0.696 1, 0.661 9, 1.000 0).

选择偏好系数 $\lambda = 0.4$. 根据VIKOR算法, 计算6条备选航迹方案的 S 、 R 、 Q 值如表3所示.

表3 各备选航迹的 S 、 R 、 Q 值

	航迹					
	1	2	3	4	5	6
S	0.5213	0.5730	0.3822	0.9521	0.6036	0.1622
R	0.0644	0.0743	0.0543	0.1858	0.0747	0.0598
Q	0.2282	0.2994	0.1114	1.0000	0.3165	0.0253

根据 S 、 R 、 Q 值, 对6条备选航迹进行排序, 其排序结果见表4.

表4 各备选航迹的VIKOR排序

	航迹					
	1	2	3	4	5	6
S	3	4	2	6	5	1
R	3	4	1	6	5	2
Q	3	4	2	6	5	1

根据 S 、 R 、 Q 值的排序结果可以得到3个指标下的排序结果为

- S : 航迹6 > 航迹3 > 航迹1 > 航迹2 > 航迹5 > 航迹4,
- R : 航迹3 > 航迹6 > 航迹1 > 航迹2 > 航迹5 > 航迹4,
- Q : 航迹6 > 航迹3 > 航迹1 > 航迹2 > 航迹5 > 航迹4.

可见: 根据 S 、 Q 值排序, 两者的排序结果完全一致; 根据 R 值排序时, 仅有航迹3和航迹6的位置出现交换, 其他航迹排序结果与 S 、 Q 值排序结果一致. 说明采

用 S 、 R 、 Q 值排序, 得到的排序结果几乎相同. 计算得到最优方案的可接受条件为

$$Q'' - Q' \geq \frac{1}{6-1} = 0.2.$$

由计算结果可知, 根据 Q 值排序第1的航迹6和排序第2的航迹3满足条件2, 但不满足条件1, 排序第1的航迹6和排序第3的航迹1满足条件1和条件2, 因此, 可以认为航迹6和航迹3均为妥协最优航迹路线. 但是, 在实际选择过程中, 应优先选择航迹6作为飞行路线, 而航迹3可作为备选路线.

5 结论

无人飞行器的航迹规划算法众多, 不同航迹算法得到不同的航迹路线, 使得在实际航迹选择中面临航迹方案选择难题. 本文针对无人飞行器多备选航迹方案的择优评价问题, 构建了航迹方案择优评价体系. 本文的主要成果如下:

1) 推导并建立了各个威胁源的综合威胁概率计算模型. 基于该模型, 可快速计算出每条备选航迹路线上, 各个威胁源对无人飞行器的综合威胁概率, 便于威胁信息的计算和采集.

2) 采用变异系数法确定各个威胁源的指标权重. 该指标权重确定方法可根据不同威胁信息, 从统计学的角度对指标权重做动态调整, 便于不同飞行环境下获得各威胁源的影响程度.

3) 采用VIKOR算法对威胁信息进行融合, 实现多备选方案的择优评价. 采用VIKOR算法对威胁信息进行融合, 最大化多备选方案的群体利益, 并最小化单个备选方案的个体负面影响, 获得距理想解最近的折中可行航迹方案, 给出带有优先级的妥协最优航迹方案, 使评价结果更具有说服力.

参考文献(References)

[1] 方旭, 刘金琨. 四旋翼无人机三维航迹规划及跟踪控制[J]. 控制理论与应用, 2015, 32(8): 1120-1128.
 (Fang X, Liu J K. Three-dimension path planning and trajectory tracking control for quadrotor unmanned aerial vehicle[J]. Control Theory & Applications, 2015, 32(8): 1120-1128.)

[2] Cai Y W, Zhao H, Li M D, et al. 3D real-time path planning based on cognitive behavior optimization algorithm for UAV with TLP model[J]. Cluster Computing, 2019, 22(2): 5089-5098.

[3] 殷春武, 侯明善, 李明翔. 基于区间灰度的无人机航迹择优评价方法研究[J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36(4): 1025-1032.
 (Yin C W, Hou M S, Li M X. UAV path planning

- optimal selection method based on interval gray scale[J]. *Systems Engineering — Theory & Practice*, 2016, 36(4): 1025-1032.)
- [4] Volkan Pehlivanoglu Y V. A new vibrational genetic algorithm enhanced with a Voronoi diagram for path planning of autonomous UAV[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2012, 16(1): 47-55.
- [5] Feng Q, Gao J, Deng X. Path planner for UAVs navigation based on A* algorithm incorporating intersection[C]. *Guidance, Navigation and Control Conference*. Nanjing: IEEE, 2017: 2275-2279.
- [6] 曾国奇, 赵民强, 刘方圆, 等. 基于网格PRM的无人机多约束航路规划[J]. *系统工程与电子技术*, 2016, 38(10): 2310-2316.
(Zeng G Q, Zhao M Q, Liu F Y, et al. Multi-constraints UAV path planning based on grid PRM[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2016, 38(10): 2310-2316.)
- [7] Radmanesh M, Kumar M. Grey wolf optimization based sense and avoid algorithm for UAV path planning in uncertain environment using a Bayesian framework[C]. *International Conference on Unmanned Aircraft Systems*. Arlington: IEEE, 2016: 68-76.
- [8] Chen D, Li S Q, Wang J F, et al. A multi-objective trajectory planning method based on the improved immune clonal selection algorithm[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2019(59): 431-442.
- [9] Zhao Y J, Zheng Z, Liu Y. Survey on computational-intelligence-based UAV path planning[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2018, 158: 54-64.
- [10] 柳长安, 王晓鹏, 刘春阳, 等. 基于改进灰狼优化算法的无人机三维航迹规划[J]. *华中科技大学学报: 自然科学版*, 2017, 45(10): 38-42.
(Liu C A, Wang X P, Liu C Y, et al. Three dimensional route planning for unmanned aerial vehicle based on improved grey wolf optimizer algorithm[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2017, 45(10): 38-42.)
- [11] Yang P, Tang K, Lozano J A, et al. Path planning for single unmanned aerial vehicle by separately evolving waypoints[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2015, 31(5): 1130-1146.
- [12] 刘炜伦, 张衡阳, 郑博, 等. 蜂群无人机自组网多优先级自适应退避算法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2019, 45(2): 325-332.
(Liu W L, Zhang H Y, Zheng B, et al. Multi-priority adaptive backoff algorithm for UAV ad hoc networks[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2019, 45(2): 325-332.)
- [13] Hu Z H, Zhao M, Yao M, et al. Multi-objective and multi-constrained UAV path plan optimum selection based on GRA[J]. *The Journal of Grey System*, 2011, 23(1): 35-46.
- [14] 胡中华. 基于智能优化算法的无人机航迹规划若干关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学自动化学院, 2011.
(Hu Z H. Research on key technologies of UAV route planning based on intelligent optimization algorithms[D]. Nanjing: College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.)
- [15] 王先甲, 汪磊. 基于马氏距离的改进型TOPSIS在供应商选择中的应用[J]. *控制与决策*, 2012, 27(10): 1566-1570.
(Wang X J, Wang L. Application of improved TOPSIS based on Mahalanobis distance in supplier selection[J]. *Control and Decision*, 2012, 27(10): 1566-1570.)
- [16] Opricovic S. Multi-criteria optimization of civil engineering systems[M]. Belgrade: Faculty of Civil Engineering, 1998: 36-38.
- [17] Opricovic S, Tzeng G H. Extended VIKOR method in comparison with outranking methods[J]. *European Journal of Operational Research*, 2007, 178(2): 514-529.

作者简介

殷春武(1982—), 男, 副教授, 博士, 从事非线性控制、决策理论、航迹规划算法等研究, E-mail: yincwxa2013@mail.nwpu.edu.cn.

(责任编辑: 李君玲)