文章编号:1008-1542(2022)04-0374-12

基于改进灰色关联投影法的无人机避让优先运行策略

吴学礼[1,2],林东旭[1],甄　然[1,2],王东明[1],武晓晶[1]

(1.河北科技大学电气工程学院,河北石家庄　050018;2.河北省生产过程自动化工程技术研究中心,河北石家庄　050018)

摘　要:针对未来混合空域中多种航空器共同执行任务而可能出现飞行避让安全问题,提出了一种基于组合赋权改进灰色关联投影法的无人机避让优先运行策略。首先,从空域管理、航空法规、风险评估等角度分析影响避让过程的因素,构建无人机避让评价指标体系;其次,利用层次分析法和粗糙熵法进行主客观赋权,由合作博弈方法构建离差和最小目标优化函数将主客观权重融合确定最终权重,克服主观赋权随意性和客观赋权过分依赖数据的弊端;随后,利用优劣解距离法(TOPSIS)与灰色关联投影法的融合算法对无人机避让对象进行综合评价,从而获取无人机优先避让运行策略;最后,将融合算法与 TOPSIS 算法进行对比。结果表明,较于 TOPSIS 法,所提融合算法获取策略与空域运行实践相符且灵敏度提高了 17.08%。因此,新算法避免了单一算法的数据丢失现象,提高了获取策略的准确性,可为混合空域的无人机运行策略获取提供新思路。

关键词:决策论;灰色关联投影;无人机运行策略;合作博弈;层次分析法;粗糙熵;指标体系

中图分类号:TP301;V279　　**文献标识码**:A　　**DOI**:10.7535/hbkd.2022yx04005

Avoidance priority operation strategy of UAV based on improved greycorrelation projection method

WU Xueli[1,2], LIN Dongxu[1], ZHEN Ran[1,2], WANG Dongming[1], WU Xiaojing[1]

(1. School of Mechanical Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China; 2. Engineering Technology Research Center for Production Process Automation of Hebei Province, Shijiazhuang, Hebei 050018, China)

Abstract: Aiming at the safety problems of flight avoidance caused by multiple aircraft performing tasks together in the

收稿日期:2022-01-02;修回日期:2022-02-10;责任编辑:冯　民

基金项目:国家自然科学基金(62003129,61903122);河北省重点研发计划项目(19250801D);河北省研究生创新资助项目(CXZZSS2020098);国防基础计划研究项目;河北省军民融合发展研究课题(HB19JMRH009)

第一作者简介:吴学礼(1961—),男(满族),黑龙江齐齐哈尔人,教授,博士,主要从事控制科学与工程方面的研究。

通讯作者:甄　然教授。E-mail:zhenranzr@126.com

吴学礼,林东旭,甄然,等.基于改进灰色关联投影法的无人机避让优先运行策略[J].河北科技大学学报,2022,43(4):374-385.

WU Xueli,LIN Dongxu,ZHEN Ran,et al.Avoidance priority operation strategy of UAV based on improved greycorrelation projection method[J].Journal of Hebei University of Science and Technology,2022,43(4):374-385.

mixed airspace in the future, a priority operation strategy of UAV avoidance based on improved grey correlation projection method with combination weighting was proposed. Firstly, this paper analyzed the factors affecting the collision avoidance process from the perspectives of airspace management, aviation regulations and risk assessment, and constructed the evaluation index system of UAV collision avoidance. Secondly, the analytic hierarchy process (AHP) and rough entropy method were used to assign subjective and objective weights, and the deviation and minimum objective optimization function were constructed by the cooperative game method to fuse subjective and objective weights to determine the final weight, so as to overcome the disadvantages of the arbitrary subjective weight and objective weight relying too much on data. Thirdly, the fusion algorithm of TOPSIS and gray correlation projection method were used to comprehensively evaluate the UAV avoidance object, so as to obtain the UAV priority avoidance operation strategy. Finally, the fusion algorithm was compared with TOPSIS algorithm. The results show that compared with TOPSIS method, the acquisition strategy of the fusion algorithm is consistent with the airspace operation practice, and the sensitivity is improved by 17.08%. The algorithm avoids the data loss of single algorithm and improves the accuracy of acquisition strategy, which provides a new idea for the acquisition of UAV operation strategy in mixed airspace.

Keywords: decision-making theory; grey correlation projection; UAV operation strategy; cooperative game; analytic hierarchy process; rough entropy; index system

随着无人机行业的蓬勃发展，越来越多的无人机被应用到军民领域[1]，因此将它们纳入国家空域监管系统已成为发展的必然趋势[2-4]。但是无人机数量和种类的增加给传统的空域监管系统带来了严峻挑战。如何避免混合空域下无人机发生冲突，已成为全球各发达国家的研究热点[5-6]。然而，目前仍缺乏完整的运行法规和分离标准[7]。因此，基于多主体对空域模型和交通进行模拟，建立综合的避让评价模型，分析和评估混合空域中飞行器避让运行策略涉及的诸多关键因素，确定避让优先运行策略，是当前急需解决的问题。

人工势场法早期被应用于无人机的避让问题，YU 等[8]采用马尔科夫评价方法解决避让策略问题。许云红等[9]通过无人机路径确定了多种防撞控制决策，并得到相应的多目标代价函数模型和最优决策方法。ALBAKER 等[10]通过集合交集的防撞方法结合极小化风险函数得到了防撞轨迹，但没考虑避让中拥挤度问题；骆正清等[11]详细分析了不同标度法各自的优缺点；甄然等[12]通过多种标度法和隶属函数融合进行避让评估，通过标度法的选取来影响层次分析结果的精确度，提出了基于多标度层次分析法的避让决策构建方法。层次分析法是一种基于决策者经验和直觉来使用定量数据和定性数据分析复杂多准则评价问题的方法。该方法可以进行分层建模，解释性强且可以解决因数据缺少带来无法仿真的问题[13]。粗糙熵法作为一种处理各种模糊数据的有效方法，已在机器学习和数据挖掘等领域得到广泛应用[14]。吴建斌等[15]通过合作博弈的方法有效解决了主客观权重融合问题，克服了单一赋权方法的片面性和权重确立缺乏依据的问题。ZHANG 等[16]基于改进灰色关联投影法评价战时军事物资保障部署问题，获得了更科学、实用的部署策略。

在飞行器避障研究过程中，人们对无人机避让标准并没有形成共识，避让优先运行策略的获取方法基本空白。因此，本文针对混合空域中无人机避让安全问题，结合以上方法研究的优劣，提出一种基于组合赋权改进灰色关联投影法的无人机避让优先运行策略。

1　混合空域中无人机避让评价指标体系

混合空域是以在一定空域范围内各属性飞行器为主体，包括空域中可能出现的动物及一些以各类任务出现在空域范围内的固定或者移动的对飞行器在空域中安全飞行可能造成威胁的障碍物所构成的空域。确立无人机在混合空域避让模型中，依据《中国民航航空空中交通管理规则》、《飞行间隔规定》等[17-18]相关法规，由学者、飞行器工程师和承接空域无人机避让项目的专家 13 人通过评估从文献、航空相关部门收集的信息，以无人机为研究对象，将影响无人机安全飞行及避让的飞行物作为目标物，并通过目标物自身性能、碰撞风险等级、执行任务类别、气象环境条件、周围飞行器拥挤度 5 个影响避让的因素构建避让评价指标体系，如图 1 所示。

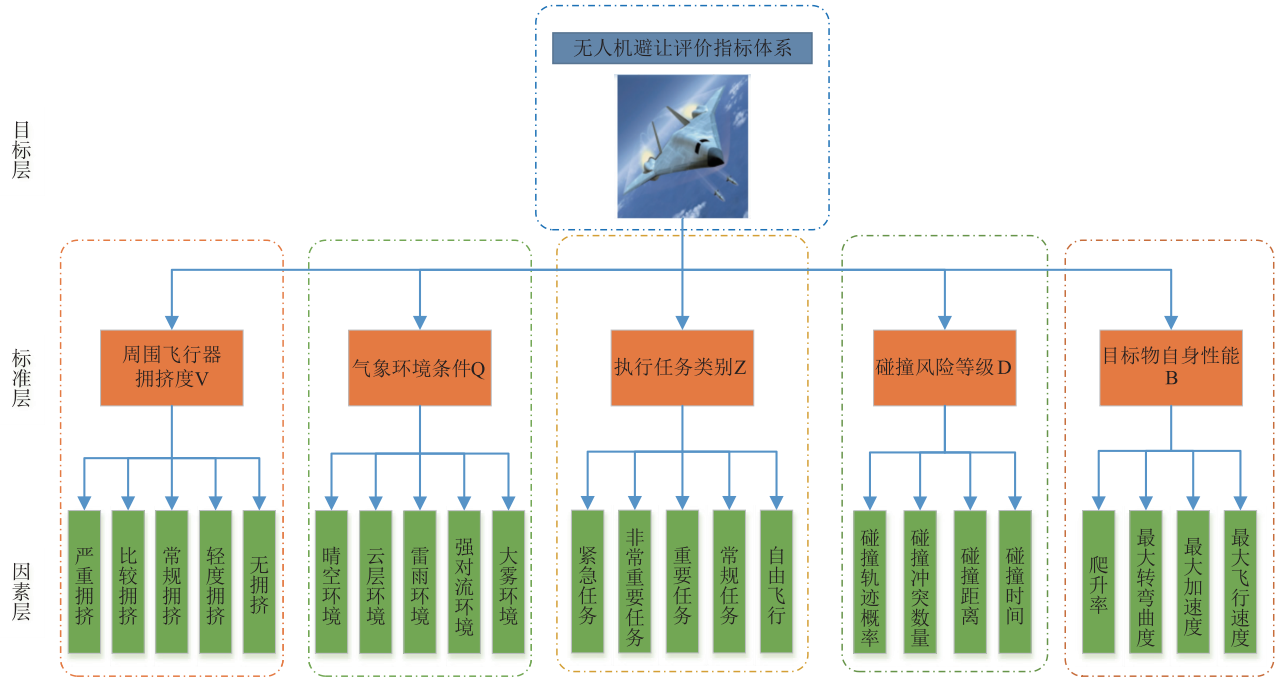

图 1 无人机避让评价指标体系图

Fig.1 UAV avoidance evaluation index system diagram

1)目标物自身性能方面 飞行器自身性能是保证飞行安全的前提,是有效防止空中冲突的必要条件。混合空域内的飞行物主要包括军用飞机、通用飞行器、客机、鸟类、轻于空气的航空器等。因为混合空域中飞行器种类繁多,对未知飞行物的有效识别率参差不齐,因此选取飞行器自身属性作为避让因素。其中目标物自身性能包括最大飞行速度、最大加速度、最大转弯曲度、爬升率。

2)碰撞风险等级方面 国内外学者对飞行器的碰撞风险等级进行了深入研究,认为碰撞风险等级的评估直接影响避让时机、避让角度等。结合无人机避让的特殊性,碰撞风险等级包括碰撞时间、碰撞距离、碰撞冲突数量、碰撞轨迹概率。

3)执行任务类别方面 为保证空域飞行安全和有序,约定在没有下达避让指令时,空域飞行器应共同遵守空域规则。如公路的“左转车辆礼让直行车辆,机动车辆礼让行人”。但是混合空域系统尚未形成。通常,任务等级低的航空器需避让任务等级高的航空器。对此,执行任务类别分为自由飞行、常规任务、重要任务、非常重要任务、紧急任务。

4)气象环境条件方面 航空器飞行受气象条件影响非常大,实际生活中航空公司的航班可能因大雾、雷暴等恶劣天气导致航班延误甚至取消。这是因为气象环境条件导致航空器飞行受限,产生了飞行安全问题。例如雷雨天气产生的雷暴、强降水、下击暴流。在雷暴中飞行的航空器会遭受颠簸、积冰,以及冰雹击、电击等风险。因此研究航空器的避让策略,气象环境条件是必须考虑的因素。气象环境条件包括大雾环境、强对流环境、雷雨环境、云层环境、晴空环境。

5)周围飞行器拥挤度方面 针对无人机避让问题,飞行器在密集容量下避让显然是非常困难的。因此需对拥挤度进行分类,包括无拥挤、轻度拥挤、常规拥挤、比较拥挤、严重拥挤。

构建一个科学、实用的评价指标体系对无人机避让优先运行策略的获取至关重要[19],该评价指标体系通过反复修正和完善,遵循评价指标的全面性、重点性、独立性、简洁性原则,且需要具备一定的动态要求。在无人机避让评价指标体系中,碰撞时间为无人机与目标物之间进入安全圈的时间。碰撞距离也是无人机与目标物之间通过相应航空器航迹预测算法得到的双方最大安全圈之间的距离。碰撞冲突数量是目标物自身在限定时间内与外界的飞行器有实际冲突的数量统计,即体现该飞行器的不稳定性。碰撞轨迹概率为无人机与目标物之间安全圈距离的统计。该设定方式便于提高无人机避让优先策略获取的动态性。

2　研究方法

2.1　基于层次分析法的主观权重求解

在建立综合避让评价模型、确定避让优先运行策略过程中，无人机避让评价指标中存在大量定性数据，因此需要解决多层次指标的权重分配，还需要对定性数据进行定量计算。层次分析法可以很好地将语言值表示的定性概念进行定量表示，目前广泛应用于综合评价领域，主要步骤如下。

1）将无人机避让评价体系划分为目标层、标准层、因素层 3 个层次。

2）对不同指标同一层次的各指标进行重要性比较，从而构造出权重判断矩阵 $\boldsymbol{A}$。

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}\alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} & \cdots & \alpha_{1n}\\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} & \cdots & \alpha_{2n}\\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} & \cdots & \alpha_{3n}\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\ \alpha_{n1} & \alpha_{n2} & \alpha_{n3} & \cdots & \alpha_{nn}\end{bmatrix}, \tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{A}$ 为判断矩阵；n 为矩阵的维数；α_{ij} 表示 j 与 i 指标相比 i 的重要程度。当 $i=j$ 时，2 个指标相同，因此同等重要记为 1，这就可以解释主对角线元素为 1 的原因。$\alpha_{ij}>0$；$\alpha_{ij}\times\alpha_{ji}=1$ 时，该矩阵就为正互反矩阵。

3）利用式(2)将判断矩阵进行归一化，对判断矩阵通过式(3)、式(4)进行一致性检验。

$$c_{ij}=\frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^{n}a_{ij}}, \tag{2}$$

$$\mathrm{CI}=\frac{\lambda_{\max}-n}{n-1}, \tag{3}$$

$$\mathrm{CR}=\frac{\mathrm{CI}}{\mathrm{RandomaverageCI}}=\frac{\mathrm{CI}}{\mathrm{RI}}, \tag{4}$$

式中：CI 表示矩阵 $\boldsymbol{A}$ 不一致的特征方程式剩余解的平均值，即一致性指标；RI 为随机一致性指标，如表 1 所示；CR 表示一致性比率，如 CR<1，则判断矩阵的一致性可以接受，否则需进行矩阵的修正[20]。

表 1　随机一致性指标

Tab.1　Random consistency index

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46

4）通过特征值法计算权重，求出矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的最大特征值以及其对应的特征向量，对特征向量进行归一化处理即可得到权重。其计算过程如下：

$$f(\lambda)=|\boldsymbol{A}-\lambda\boldsymbol{I}|=\begin{bmatrix}\alpha_{11}-\lambda & \alpha_{12} & \cdots & \alpha_{1n}\\ \alpha_{21} & \alpha_{22}-\lambda & \cdots & \alpha_{2n}\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\ \alpha_{n1} & \alpha_{n2} & \cdots & \alpha_{nn}-\lambda\end{bmatrix}。 \tag{5}$$

矩阵 $\boldsymbol{A}(\lambda_i)$ 计算公式为

$$(\boldsymbol{A}-\lambda_i)w_i=0, \tag{6}$$

其中 $\boldsymbol{w}$ 是特征向量。因此对应的最大特征值（$\lambda_{\max}$）为

$$\boldsymbol{A}\boldsymbol{w}=\lambda_{\max}\boldsymbol{w}, \tag{7}$$

最大特征值（$\lambda_{\max}$）计算公式为

$$\lambda_{\max}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{(\boldsymbol{A}\boldsymbol{w})_i}{w_i}。 \tag{8}$$

其中特征向量进行归一化后即为层次分析法获取相同层的第 n 个指标的权重，记作：

$$\boldsymbol{w}_z=(w_{z1},w_{z2},\cdots,w_{zn})。 \tag{9}$$

2.2 基于粗糙熵法的客观权重求解

客观权重的获取通过粗糙熵对粗糙集的不确定性度量。设通过专家打分获取指标评价矩阵为 $\boldsymbol{S}$，U 是全域，C 是属性值的集合，f 为信息函数，因此有：

$$\begin{cases}\boldsymbol{S}=(U,\boldsymbol{A},C,f),\\ U=(x_1,x_2,\cdots,x_n),\\ C=\bigcup\limits_{a\in\boldsymbol{A}}C_a,\\ f:U\times\boldsymbol{A}\to C。\end{cases}\tag{10}$$

因此，ind(R) 在 U 上的分类表示为 $U/\mathrm{ind}(R)=\{X_1,X_2,\cdots,X_n\}$，则关于 R 的粗糙熵 $E_R(X)$ 为

$$E_R(X)=\frac{|R^-(X)-R_-(X)|}{|U|}\ln(1+|R^-(X)-R_-(X)|)+\sum_{i=1}^{n}\frac{|X_i|}{|U|}\ln|X_i|,\tag{11}$$

其中 $R^-(X)$ 和 $R_-(X)$ 分别表示 X 关于 R 的上近似和下近似。属性 $a\in\boldsymbol{A}$ 在 $\boldsymbol{A}$ 中的重要程度 $\mathrm{Sig}(a,\boldsymbol{A})$ 定义为 $\boldsymbol{A}$ 中剔除 a 后粗糙的熵变化程度，则指标 a_j 客观权重 w_{kj} 为

$$w_{kj}=\frac{\mathrm{Sig}(a_j,\boldsymbol{A})}{\sum\limits_{a\in A}\mathrm{Sig}(a,\boldsymbol{A})}=\frac{E_{A-\{a\}}(X)-E_A(X)}{\sum\limits_{j=1}^{n}E_{A-\{a\}}(X)-nE_A(X)}。\tag{12}$$

通过粗糙熵可以计算指标层第 n 个指标的客观权重，记为

$$w_k=(w_{k1},w_{k2},\cdots,w_{kn})。\tag{13}$$

2.3 基于合作博弈的组合赋权法求解

在对多种获取的权重进行组合时，合作博弈确定组合权重可以兼顾主观思想和客观事实，定性和定量结合，克服传统的平均分配的弊端。将求解组合权重问题转化为求最优化问题，构建离差和最小目标优化函数[21]，计算权重偏离因子 η，该函数约束条件见式(14)，其中在总误差 $J(M)$ 取值为 0.5 时，确保组合权重目标优化函数最小，从而确定组合权重 w_h，可得：

$$\text{s.t.}\quad\begin{cases}J(M)=\min\sum\limits_{i=1}^{n}[\eta(w_i-w_{z_i})^2+(1-\eta)(w_i-w_{k_i})^2],\\ w_h=\eta w_z+(1-\eta)w_k,\\ \sum\limits_{i=1}^{n}w_i=1,\quad w_i>0,\end{cases}\tag{14}$$

其中偏移因子 η 越大，则组合权重越接近主观权重向量。通过求解最优化问题，得到对应指标组合权重，记为 $w_h=(w_{h1},w_{h2},\cdots,w_{hn})$。

2.4 基于改进灰色关联投影法的避让优先运行策略获取过程

无人机避让优先运行策略的获取需要对影响无人机安全飞行及避让的目标物进行综合评价，以确定对目标物的避让优先顺序。由于评价指标的信息多为定性未知信息，且各指标存在不确定的灰色关系，所以应用 TOPSIS 法、灰色关联分析、矢量投影法结合算法进行综合评价。具体过程如下：

1)将无人机安全飞行及避让的 m 个带有不同指标目标物构成特性集 $U=\{U_1,U_2,\cdots,U_m\}$，该特性集中各指标都是经过正向化处理，即将成本型指标转化为效益型指标。

2)构建正、负理想目标物。

$$\begin{cases}\text{正理想目标物}:\boldsymbol{U}_0^+=(u_{01}^+,u_{02}^+,\cdots,u_{0n}^+),\\ \text{负理想目标物}:\boldsymbol{U}_0^-=(u_{01}^-,u_{02}^-,\cdots,u_{0n}^-),\end{cases}\tag{15}$$

其中 $u_{0j}^+=\max\limits_i(u_{ij})$，$u_{0j}^-=\min\limits_i(u_{ij})$，则称 $\boldsymbol{U}^{\pm}=(u_{ij})_{(m+1)\times n}$ 为正负理想评价矩阵。

3)为了防止评价指标之间属性和量纲不同引起的不可对比性，需要进行标准化处理。因采用标准差标准化会改变原有数据信息，故采用离差标准化进行标准化处理。则有：

$$u'_{ij}=\frac{u_{ij}-\min\limits_{1\leqslant i\leqslant m}\{u_{ij}\}}{\max\limits_{1\leqslant i\leqslant m}\{u_{ij}\}-\min\limits_{1\leqslant i\leqslant m}\{u_{ij}\}},\tag{16}$$

则标准化后的正负理想评价矩阵记为 $\boldsymbol{U}^{\pm'}=(u'_{ij})_{(m+1)\times n}$。

4)计算灰色关联系数。通过灰色关联分析方法计算第 i 个目标物与正负理想目标物 $\boldsymbol{U}_0^{\pm}$ 关于第 j 个评价指标的灰色关联系数的求解公式为

$$\begin{cases} p_{ij}^{\pm}=\dfrac{g+\rho G}{T_{ij}^{\pm}+\rho G}, \quad \rho\in(0,1), \\ T_{ij}^{\pm}=d(u_{0j}^{\pm},u_{ij}), \\ g=\min\limits_{i}\min\limits_{j}T_{ij}^{\pm}, \\ G=\max\limits_{i}\max\limits_{j}T_{ij}^{\pm}, \end{cases} \tag{17}$$

其中 ρ 为分辨系数，当 $\rho=0$ 时环境消失，$\rho=1$ 时环境保持不变。通常 ρ 取 0.5。对于正负理想评价矩阵 $\boldsymbol{U}^{\pm'}$ 的所有元素通过式(18)计算出与正负理想目标物的灰色关联系数矩阵：

$$\boldsymbol{P}^{+}=(p_{ij}^{+})_{(m+1)\times n}=\begin{bmatrix} p_{01}^{+} & p_{02}^{+} & \cdots & p_{0n}^{+} \\ p_{11}^{+} & p_{12}^{+} & \cdots & p_{1n}^{+} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{m1}^{+} & p_{m2}^{+} & \cdots & p_{mn}^{+} \end{bmatrix}, \tag{18}$$

$$\boldsymbol{P}^{-}=(p_{ij}^{-})_{(m+1)\times n}=\begin{bmatrix} p_{01}^{-} & p_{02}^{-} & \cdots & p_{0n}^{-} \\ p_{11}^{-} & p_{12}^{-} & \cdots & p_{1n}^{-} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{m1}^{-} & p_{m2}^{-} & \cdots & p_{mn}^{-} \end{bmatrix}。 \tag{19}$$

5)对正负理想目标物的灰色关联系数矩阵进行赋权，所赋权的权重为合作博弈通过式(14)获取的权重 w_h。如下：

$$\boldsymbol{P}^{+'}=\begin{bmatrix} p_{01}^{+}w_{h1} & p_{02}^{+}w_{h2} & \cdots & p_{0n}^{+}w_{hn} \\ p_{11}^{+}w_{h1} & p_{12}^{+}w_{h2} & \cdots & p_{1n}^{+}w_{hn} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{m1}^{+}w_{h1} & p_{m2}^{+}w_{h2} & \cdots & p_{mn}^{+}w_{hn} \end{bmatrix}, \tag{20}$$

$$\boldsymbol{P}^{-'}=\begin{bmatrix} p_{01}^{-}w_{h1} & p_{02}^{-}w_{h2} & \cdots & p_{0n}^{-}w_{hn} \\ p_{11}^{-}w_{h1} & p_{12}^{-}w_{h2} & \cdots & p_{1n}^{-}w_{hn} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{m1}^{-}w_{h1} & p_{m2}^{-}w_{h2} & \cdots & p_{mn}^{-}w_{hn} \end{bmatrix}。 \tag{21}$$

式中：$P^{+'}$ 表示目标物 $\boldsymbol{U}_i$ 在正理想评价矩阵中的加权关联系数矩阵；$P^{-'}$ 表示目标物 $\boldsymbol{U}_i$ 在负理想评价矩阵中的加权关联系数矩阵。

6)把每个目标物的属性集作为一个行向量，则通过矢量投影法，得到目标物 $\boldsymbol{U}_i$ 与正理想目标物 $\boldsymbol{U}_0^{+}$ 的灰色关联投影角 θ_i。

$$\cos\theta_i^{+}=\frac{\boldsymbol{U}_i\,\boldsymbol{U}_0^{+}}{|\boldsymbol{U}_i|\,|\boldsymbol{U}_0^{+}|}=\frac{\sum\limits_{j}^{n}p_{ij}^{+}w_{hj}\times w_{hj}}{\sqrt{\sum\limits_{j}^{n}(p_{ij}^{+}w_{hj})^2}\times\sqrt{\sum\limits_{j}^{n}w_{hj}^2}}。 \tag{22}$$

同时，目标物 $\boldsymbol{U}_i$ 在正理想目标物 $\boldsymbol{U}_0^{+}$ 上的投影值 M_i^{+} 为

$$M_i^{+}=|\boldsymbol{U}_i|\cos\theta_i^{+}=\frac{\boldsymbol{U}_i\,\boldsymbol{U}_0^{+}}{|\boldsymbol{U}_0^{+}|}=\frac{\sum\limits_{j}^{n}p_{ij}^{+}w_{hj}\times w_{hj}}{\sqrt{\sum\limits_{j}^{n}w_{hj}^2}}=\sum_{j=1}^{n}\frac{w_{hj}^2}{\sqrt{\sum\limits_{j}^{n}w_{hj}^2}}\times p_{ij}^{+}。 \tag{23}$$

同理，目标物 $\boldsymbol{U}_i(i=1,2,\cdots,n)$ 在负理想目标物 $\boldsymbol{U}_0^{-}$ 投影值为

$$M_i^{-}=|\boldsymbol{U}_i|\cos\theta_i^{-}=\frac{\boldsymbol{U}_i\,\boldsymbol{U}_0^{-}}{|\boldsymbol{U}_0^{-}|}=\frac{\sum\limits_{j}^{n}p_{ij}^{-}w_{hj}\times w_{hj}}{\sqrt{\sum\limits_{j}^{n}w_{hj}^2}}=\sum_{j=1}^{n}\frac{w_{hj}^2}{\sqrt{\sum\limits_{j}^{n}w_{hj}^2}}\times p_{ij}^{-}。 \tag{24}$$

7)经过对 $M_i^{\pm}$ 进行归一化得到灰色关联投影最优值 C_i^{+} 和最劣值 C_i^{-} 。

8)计算目标物的综合评价得分 S_i 和灵敏度 ζ 。

$$S_i=\frac{(C_i^{+})^2}{(C_i^{+})^2+(C_i^{-})^2}\ , \tag{25}$$

$$\zeta=\frac{S_{\max}-S_{\min}}{S_{\max}}\times 100\%\ 。 \tag{26}$$

在综合评价中,目标物评价得分之间差距越大说明灵敏度 ζ 越大,即综合评价指标体系对目标物之间的区分度越大。

9)根据目标物距离正理想目标物的距离来确定避让优先等级。即 S_i 的值越大,避让等级越高。根据 S_i 从大到小的顺序,确定无人机避让优先运行策略。

3 算例分析

3.1 主观权重计算结果

在无人机避让优先运行策略研究中,通过层次分析法先确定无人机避让评价体系中的标准层主观权重。在研究的指标范围内,通过32位专家对标准层指标两两成对比较,得出避让评价标准层的判断矩阵。则式(1)为

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}1 & 0.352 & 0.469 & 3.018 & 3.359\\ 2.871 & 1 & 2.031 & 3.826 & 5.008\\ 2.119 & 0.494 & 1 & 3.320 & 4.021\\ 0.331 & 0.261 & 0.301 & 1 & 1.992\\ 0.297 & 0.199 & 0.249 & 0.501 & 1\end{bmatrix}。$$

根据式(2)归一化的成对比较矩阵为

$$\boldsymbol{C}=\begin{bmatrix}0.151 & 0.153 & 0.116 & 0.259 & 0.218\\ 0.434 & 0.434 & 0.501 & 0.328 & 0.326\\ 0.320 & 0.214 & 0.247 & 0.285 & 0.261\\ 0.050 & 0.113 & 0.074 & 0.086 & 0.130\\ 0.045 & 0.086 & 0.061 & 0.043 & 0.065\end{bmatrix}。$$

通过取归一化矩阵 $\boldsymbol{C}$ 的行向量元素的平均值,计算出算数平均法主观权重,根据式(5)、式(6)算出特征值法主观权重。为保证权重的稳健性,将2组主观权重取平均数,作为最终主观权重。避让标准层的主观权重为目标物自身性能(0.178)、碰撞风险等级(0.406)、执行任务类别(0.267)、气象环境条件(0.089)、周围飞行器拥挤度(0.060)。

最大特征值($\lambda_{\max}=5.135$,根据式(8)计算得出)代入式(3),并计算出一致性指标值(CI=0.034)。表1中为 $n=5$ 对应的随机一致性指标(RI=1.12)。将CI和RI代入式(11),计算出一致性比率(CR=0.030)。由于CR值小于上限值0.1,因此可以确定专家的比较是一致合理的。

为了确定因素层对标准层的影响,采用和上述类似的步骤,对每一个标准层指标中的因素进行两两比较,得到避让因素层的主观权重如下:

在目标物自身性能避让标准中具有最高权重的因素被确定为爬升率(0.315)和最大加速度(0.288),而最大飞行速度(0.201)、最大转弯曲度(0.196)确定为较低权重。

在碰撞风险避让标准中,具有最高权重的因素被确定为碰撞时间(0.361),其次是碰撞距离(0.262)、碰撞冲突数量(0.189)和碰撞轨迹概率(0.187)。

执行任务避让标准中,确定具有较高权重的紧急任务(0.375)、非常重要任务(0.288)和重要任务(0.194);较低权重确定为自由任务(0.046)和常规任务(0.097)。

拥挤度避让标准中,权重确定为无拥挤(0.049)、轻度拥挤(0.100)、常规拥挤(0.198)、比较拥挤(0.283)和严重拥挤(0.371)。

在空域环境避让标准中权重较高的因素确定为强对流环境(0.389)和雷雨环境(0.285);较低权重确定为晴空环境(0.062)、云层环境(0.128)和大雾环境(0.136)。

3.2　客观权重计算结果

采用粗糙熵法计算客观权重，通过 32 名专家对标准层指标进行打分的方式，获取 32 组数据（已经标准化），作为计算客观权重的数据集，如表 2 所示。

表 2　标准层指标数据集

Tab.2　Standard layer index data set

U	A				
	目标物自身性能(B)	碰撞风险等级(D)	执行任务类别(Z)	气象环境条件(Q)	周围飞行器拥挤度(V)
1	0.314	0.694	0.538	0.187	0.091
2	0.287	0.713	0.475	0.244	0.114
3	0.252	0.547	0.614	0.192	0.078
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
32	0.241	0.704	0.515	0.194	0.097

根据式(12)、式(13)计算各标准层指标在 $\boldsymbol{A}$ 中的重要程度 Sig(a，A) 如下：

Sig(B，$\boldsymbol{A}$)＝0.144；Sig(D，$\boldsymbol{A}$)＝0.307；Sig(Z，$\boldsymbol{A}$)＝0.206；Sig($\boldsymbol{Q}$，$\boldsymbol{A}$)＝0.067；Sig(V，$\boldsymbol{A}$)＝0.049。计算结果中没有 0 存在，说明各指标的选取不能约简。因此标准层各指标的客观权重如下：目标物自身性能(0.186)，碰撞风险等级(0.397)，执行任务类别(0.266)，气象环境条件(0.087)，周围飞行器拥挤度(0.064)。同理计算出其他因素层客观权重如下。

在目标物自身性能避让标准中具有最高权重的因素被确定为最大加速度(0.307)和爬升率(0.294)，而最大飞行速度(0.218)、最大转弯曲度(0.181)确定为较低权重。

在碰撞风险避让标准中，具有最高权重的因素被确定为碰撞时间(0.321)，其次是碰撞距离(0.298)、碰撞冲突数量(0.197)和碰撞轨迹概率(0.184)。

执行任务避让标准中，确定具有较高权重的紧急任务(0.418)、非常重要任务(0.267)和重要任务(0.204)；较低权重确定为常规任务(0.067)和自由任务(0.044)。

拥挤度避让标准中，权重确定为无拥挤(0.011)、轻度拥挤(0.124)、常规拥挤(0.157)、比较拥挤(0.297)和严重拥挤(0.411)。

在空域环境避让标准中权重较高的因素确定为强对流环境(0.316)和雷雨环境(0.311)；较低权重确定为晴空环境(0.083)、云层环境(0.116)和大雾环境(0.174)。

3.3　组合权重计算结果

通过合作博弈的思想计算组合赋权。根据式(14)对“3.1”项和“3.2”项获取的主客观权重进行合作博弈分析。通过数值分析仿真软件求解优化问题，偏离因子 η 确定为 0.61，计算出标准层各指标的组合权重，见图 2。

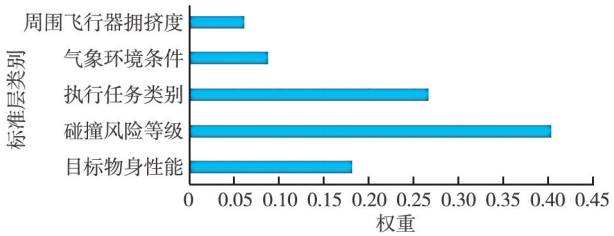

图 2　避让标准层的组合权重

Fig.2　Combination weight of avoiding standard layer

如图 2 所示，避让标准层组合权重如下：目标物自身性能(0.181)，碰撞风险等级(0.403)，执行任务类别(0.266)，气象环境条件(0.088)，周围飞行器拥挤度(0.061)。由此研究发现，在混合空域中，影响无人机避让优先顺序的主要因素是碰撞风险等级。

通过合作博弈确定组合赋权的局部权重(DW)，全局权重(HW)通过将每个子标准的 DW 乘以相关主要标准层的权重得出。各标准层和属性层的组合权重见表 3。无人机避让综合评价的所有指标均已进行赋权处理。由表 3 可以看出，全局权重值最高的属性层指标为碰撞时间、碰撞距离、紧急任务。

表3 标准层和属性层的组合权重

Tab.3 Combined weight of standard layer and attribute layer

主要避让标准	标准层权重(DW)	指标属性	属性层权重(DW)	全局权重(HW)
目标物自身性能(B)	0.181	爬升率(b_1)	0.304	0.055
		最大转弯曲度(b_2)	0.188	0.034
		最大加速度(b_3)	0.298	0.054
		最大飞行速度(b_4)	0.210	0.038
碰撞风险等级(D)	0.403	碰撞时间(d_1)	0.346	0.139
		碰撞距离(d_2)	0.276	0.111
		碰撞冲突数量(d_3)	0.192	0.077
		碰撞轨迹概率(d_4)	0.186	0.075
执行任务类别(R)	0.266	自由飞行(r_1)	0.045	0.012
		常规任务(r_2)	0.079	0.021
		重要任务(r_3)	0.200	0.053
		非常重要任务(r_4)	0.275	0.073
		紧急任务(r_5)	0.393	0.105
飞行器拥挤度(V)	0.088	无拥挤(v_1)	0.033	0.003
		轻度拥挤(v_2)	0.110	0.010
		常规拥挤(v_3)	0.181	0.016
		比较拥挤(v_4)	0.289	0.025
		严重拥挤(v_5)	0.388	0.034
气象环境条件(Q)	0.061	大雾环境(q_1)	0.156	0.010
		强对流环境(q_2)	0.350	0.021
		雷雨环境(q_3)	0.299	0.018
		云层环境(q_4)	0.122	0.007
		晴空环境(q_5)	0.073	0.004

3.4 综合评价过程

在空域中,拟定无人机需要从出发地A到达目标地B。无人机需要在每个时刻感知路径上的5架具有不同飞行特性的飞行器,以便确定不同飞行器的避让优先级,通过合理的运行策略保持安全飞行间距。同时规避指令下达的越早、规避机动越轻微,安全性、效益性越高。

为保证仿真结果的真实性、直观性,参照国家民航总局发布的《中国民航航空空中交通管理规则》及科技发展现状,最终确立各飞行器飞行特性指标数据设置如表4所示。

表4 各飞行器飞行特性指标数据

Tab.4 Index data of flight characteristics of each aircraft

参数	通用直升机	歼击机	普通运输机	客机	军用无人机
R	自由飞行	紧急任务	常规任务	常规任务	非常重要任务
V	常规拥挤	无拥挤	无拥挤	轻度拥挤	无拥挤
Q	晴空环境	云层环境	雷雨环境	晴空环境	大雾天气
b_1/(m·s^{-1})	7	280	170	26	210
b_2/(°)	12	35	18	25	35
b_3/(m·s^{-2})	3	12	5	4	10
b_4/(km·h^{-1})	270	2 000	670	750	370
d_1/min	20	30	19	20	16
d_2/km	140	900	200	220	135
d_3	2	1	0	1	3
d_4/%	45	27	40	32	27

对应综合评价确定避让优先运行策略的目的,判定目标物自身性能B、碰撞时间d_1和碰撞距离d_2属于极小型指标(成本型指标)需要转化为极大型指标。因此将指标数据进行正向化处理后,确定正负理想目标物。为了保留数据的原有信息,采用离差标准化对正负理想目标物评价矩阵进行标准化,结果如下:

$$\boldsymbol{U}^{+'}=\begin{bmatrix}1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000\\ 0.000 & 1.000 & 0.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 0.714 & 0.994 & 0.667 & 1.000\\ 1.000 & 0.000 & 0.296 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.333 & 0.000\\ 0.155 & 0.000 & 1.000 & 0.403 & 0.739 & 0.778 & 0.769 & 0.786 & 0.915 & 0.000 & 0.722\\ 0.155 & 0.342 & 0.000 & 0.930 & 0.435 & 0.889 & 0.723 & 0.714 & 0.889 & 0.333 & 0.278\\ 0.736 & 0.000 & 0.332 & 0.256 & 0.000 & 0.222 & 0.942 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 0.000\end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{U}^{-'}=\begin{bmatrix}0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000\\ 0.000 & 1.000 & 0.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 0.714 & 0.994 & 0.667 & 1.000\\ 1.000 & 0.000 & 0.296 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.333 & 0.000\\ 0.155 & 0.000 & 1.000 & 0.403 & 0.739 & 0.778 & 0.769 & 0.786 & 0.915 & 0.000 & 0.722\\ 0.155 & 0.342 & 0.000 & 0.930 & 0.435 & 0.889 & 0.723 & 0.714 & 0.889 & 0.333 & 0.278\\ 0.736 & 0.000 & 0.332 & 0.256 & 0.000 & 0.222 & 0.942 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 0.000\end{bmatrix}.$$

对正负理想目标物评价矩阵进行加权处理，然后通过式(21)计算出正负加权灰色理想系数矩阵：

$$\boldsymbol{P}^{+'}=\begin{bmatrix}0.261 & 0.086 & 0.060 & 0.054 & 0.033 & 0.053 & 0.037 & 0.136 & 0.109 & 0.075 & 0.074\\ 0.083 & 0.073 & 0.019 & 0.046 & 0.028 & 0.045 & 0.032 & 0.078 & 0.092 & 0.041 & 0.063\\ 0.222 & 0.028 & 0.023 & 0.017 & 0.011 & 0.017 & 0.012 & 0.043 & 0.035 & 0.030 & 0.023\\ 0.092 & 0.028 & 0.051 & 0.023 & 0.020 & 0.033 & 0.023 & 0.085 & 0.081 & 0.024 & 0.043\\ 0.092 & 0.035 & 0.019 & 0.041 & 0.015 & 0.038 & 0.022 & 0.078 & 0.078 & 0.030 & 0.028\\ 0.154 & 0.028 & 0.024 & 0.020 & 0.011 & 0.020 & 0.029 & 0.116 & 0.093 & 0.064 & 0.023\end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{P}^{-'}=\begin{bmatrix}0.261 & 0.086 & 0.060 & 0.054 & 0.033 & 0.053 & 0.037 & 0.136 & 0.109 & 0.075 & 0.074\\ 0.222 & 0.028 & 0.051 & 0.017 & 0.011 & 0.017 & 0.012 & 0.053 & 0.035 & 0.030 & 0.023\\ 0.083 & 0.073 & 0.034 & 0.046 & 0.028 & 0.045 & 0.032 & 0.116 & 0.093 & 0.041 & 0.063\\ 0.176 & 0.073 & 0.019 & 0.027 & 0.013 & 0.020 & 0.014 & 0.050 & 0.037 & 0.064 & 0.028\\ 0.176 & 0.047 & 0.051 & 0.018 & 0.016 & 0.018 & 0.014 & 0.053 & 0.037 & 0.041 & 0.043\\ 0.100 & 0.073 & 0.033 & 0.032 & 0.028 & 0.033 & 0.012 & 0.043 & 0.035 & 0.024 & 0.063\end{bmatrix}.$$

根据“2.4”项中的步骤 6)和步骤 7)计算得到灰色关联投影最优值 C_i^+ 和最劣值 C_i^-，在此基础上通过式(24)、式(25)计算目标物的综合评价得分 S_i 和灵敏度 ζ，详细数值如表 5 所示。

表 5　各飞行器飞行特性主客观数据算例分析

Tab.5　Analysis of subjective and objective data of flight characteristics of each aircraft

飞行器类别	C_i^+	C_i^-	S_i	ζ/%
通用直升机	0.190 3	0.227 9	0.410 8	
歼击机	0.229 9	0.198 9	0.571 9	
普通运输机	0.175 0	0.210 3	0.409 2	42.69
客机	0.168 9	0.207 3	0.399 2	
军用无人机	0.235 9	0.155 7	0.696 6	

依据最终目标物的综合评价得分，无人机避让优先运行策略为优先避让军用无人机＞歼击机＞通用直升机＞普通运输机＞客机。该方法获取的优先运行策略加入了专家意见和实际场景经验，使该综合评价结果的可解释性强。

3.5　与 TOPSIS 算法的比较

为了验证融合算法与 TOPSIS 算法在获取运行策略方面的优越性，将 2 种算法对表 4 数据进行仿真比较。同时为了保证 2 种算法的可比性，避让评价指标所赋权重均为式(14)得到的组合权重。最终 2 种算法获取的综合评价得分、灵敏度和避让优先运行策略如表 6 和表 7 所示。

表 6 TOPSIS 法与改进方法的结果对比

Tab.6 Comparison of results between TOPSIS method and the improved method

飞行器类别	改进算法		TOPSIS 法	
	S_i	灵敏度/%	S_i^T	灵敏度/%
通用直升机	0.410 8		0.529 4	
歼击机	0.571 9		0.452 1	
普通运输机	0.409 2	42.69	0.442 0	25.61
客机	0.399 2		0.428 7	
军用无人机	0.696 6		0.576 3	

表 7 2 种算法获取的无人机避让优先运行策略对比

Tab.7 Comparison of UAV avoidance priority operation strategies obtained by two algorithms

避让优先级	一	二	三	四	五
TOPSIS 法	军用无人机	通用直升机	歼击机	普通运输机	客机
TOPSIS-灰色关联投影法	军用无人机	歼击机	通用直升机	普通运输机	客机

由表 6 可以看出，融合算法的灵敏度为 42.69%，TOPSIS 法的灵敏度为 25.61%。融合算法的灵敏度提高了 17.08%，即融合算法对目标物之间的区分度更大，可以更加准确地获取策略。在表 7 中，可以看出 2 种算法获取的无人机避让优先运行策略基本一致，这表明通过构建无人机避让评价体系获取的无人机避让优先运行策略具有良好的稳定性；TOPSIS 法获取避让优先等级二为通用直升机，而融合算法获取避让优先等级二为歼击机，为了更好探究此差异原因，对 2 种方法获取策略前数据矩阵进行分析，见图 8、图 9。

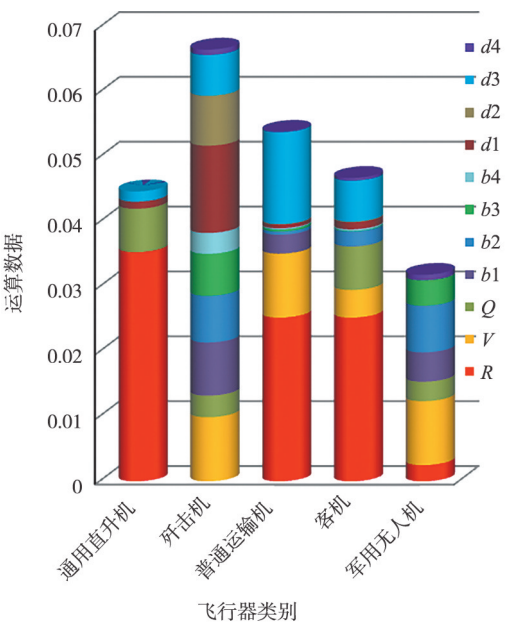

图 8 TOPSIS 法获取策略前数据

Fig.8 TOPSIS method for obtaining data before strategy

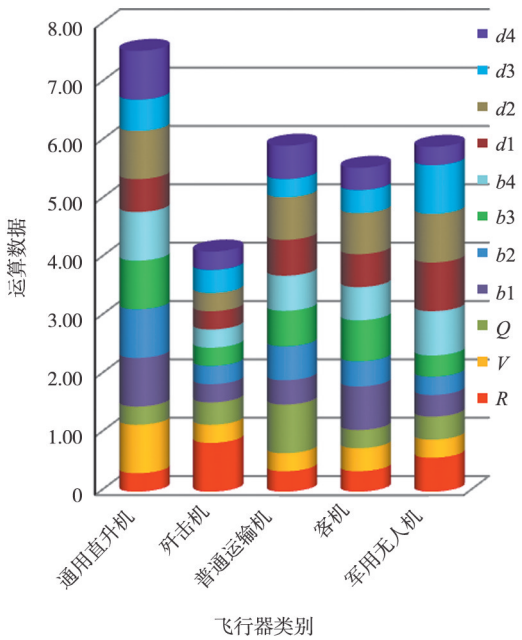

图 9 融合算法获取策略前数据

Fig.9 Fusion algorithm for obtaining data before strategy

由图 8 和图 9 对比不难发现，虽然两柱形图的指标数据值不同，但是 TOPSIS 法在评价通用直升机避让紧迫度时，只对 4 个指标类别进行评价。说明单一的 TOPSIS 方法在获取避让优先运行策略时存在数据缺失现象，而融合算法的策略获取过程指标类别无缺失现象，验证了融合算法的科学性与优越性。

4 结 语

本文将改进的灰色关联投影法应用到无人机避让策略获取方面，相比于传统的根据目标飞行器碰撞危险度大小确定避让策略的方法，在构建避让评价指标体系中，不仅考虑了碰撞风险程度影响，还考虑了目标物自身性能、执行任务类别、周围飞行器拥挤度、气象环境条件对避让难易程度的影响，使评价结果符合航空实际情况；通过层次分析法和粗糙熵法进行主客观赋权，利用合作博弈构建离差和最小目标函数得到组合权重，使得此赋权方法有效解决了赋权主观随意性和数据缺少的问题；通过 TOPSIS 法、灰色关联分析、矢量

投影法融合算法，避免了单一算法的数据丢失现象，提高了获取策略的准确性。所提出的基于组合赋权改进灰色关联投影法有助于未来无人机在限定时间内有序完成避让，实现无人机在混合空域中的安全、高效飞行。

本文仅给出了无人机避让优先运行策略的获取方法，但具体的避让机动策略需要进一步深入研究，此外，无人机避让评价体系还需不断实践和完善。

参考文献/References：

[1] GUAN Xiangmin，LYU Renli，SHI Hongxia，et al.A survey of safety separation management and collision avoidance approaches of civil UAS operating in integration national airspace system[J].Chinese Journal of Aeronautics，2020，33(11)：2851-2863.

[2] 李竺袁.民用无人机自主飞行避让算法研究[D].广汉：中国民用航空飞行学院，2018.
LI Zhuyuan.Study for Autonomous Obstacle-Avoiding Algorithm of Civilian UAVs[D].Guanghan：Civil Aviation Flight University of China，2018.

[3] WANG Yajing，WANG Xiangke，ZHAO Shulong，et al.A hierarchical collision avoidance architecture for multiple fixed-wing UAVs in an integrated airspace[J].IFAC-Papers OnLine，2020，53(2)：2477-2482.

[4] ZHANG Zhaoyue，ZHANG Jing，WANG Peng，et al.Research on operation of UAVs in non-isolated airspace[J].Computers，Materials & Continua，2018，57(1)：151-166.

[5] ZHANG Xuejun，LIU Yang，ZHANG Yu，et al.Safety assessment and risk estimation for unmanned aerial vehicles operating in national airspace system[J].Journal of Advanced Transportation，2018：1-11.

[6] 吴学礼，贾云聪，张建华，等.一种改进蚁群算法的无人机避险方法仿真研究[J].河北科技大学学报，2018，39(2)：166-175.
WU Xueli，JIA Yuncong，ZHANG Jianhua，et al.Simulation study of UAV conflict resolution based on an improved ant colony algorithm [J].Journal of Hebei University of Science and Technology，2018，39(2)：166-175.

[7] 李谦.无人机技术在军民领域中的应用及发展趋势[J].科学技术创新，2019(14)：18-20.

[8] YU Fu，XIANG Yu，ZHANG Youmin.Sense and collision avoidance of unmanned aerial vehicles using Markov decision process and flatness approach[C]//2015 IEEE International Conference on Information and Automation.Lijiang：IEEE，2015：714-719.

[9] 许云红，周锐，夏洁，等.无人机自动防撞冲突检测与优化控制方法[J].电光与控制，2014，21(1)：1-6.
XU Yunhong，ZHOU Rui，XIA Jie，et al.Conflict detection and optimal control for UAVs in automatic avoiding of dynamic obstacles[J].Electronics Optics & Control，2014，21(1)：1-6.

[10] ALBAKER B，RAHIM N A.Autonomous unmanned aircraft collision avoidance system based on geometric intersection[J].International Journal of Physical Sciences，2011，6(3)：391-401.

[11] 骆正清，杨善林.层次分析法中几种标度的比较[J].系统工程理论与实践，2004，24(9)：51-60.
LUO Zhengqing，YANG Shanlin.Comparative study on several scales in AHP[J].Systems Engineering-Theory & Practice，2004，24(9)：51-60.

[12] 甄然，牛辰辉，吴学礼.基于多标度层次分析法的无人机避让策略构建[J].河北科技大学学报，2020，41(2)：114-121.
ZHEN Ran，NIU Chenhui，WU Xueli.Construction of hybrid airspace strategy based on multi-scale analytic hierarchy process[J].Journal of Hebei University of Science and Technology，2020，41(2)：114-121.

[13] UNVER S，ERGENC I.Safety risk identification and prioritize of forest logging activities using analytic hierarchy process (AHP)[J].Alexandria Engineering Journal，2021，60(1)：1591-1599.

[14] 吕跃进，杨燕华.区间粗糙数层次分析法[J].系统工程理论与实践，2018，38(3)：786-793.
LYU Yuejin，YANG Yanhua.Analytic hierarchy process based on interval rough number[J].Systems Engineering-Theory & Practice，2018，38(3)：786-793.

[15] 吴建斌，谷志红，王正，等.基于博弈变权-云模型的配电网设备精益运维多属性评价[J].科学技术与工程，2021，21(27)：11615-11623.
WU Jianbin，GU Zhihong，WANG Zheng，et al.Multi-attribute evaluation on lean operation and maintenance of distribution network equipment based on game variable weight cloud model[J].Science Technology and Engineering，2021，21(27)：11615-11623.

[16] ZHANG Zhicai，CHEN Li.Analysis on decision-making model of plan evaluation based on grey relation projection and combination weight algorithm[J].Journal of Systems Engineering and Electronics，2018，29(4)：789-796.

[17] 肖瞳瞳.中国民航空中交通管理发展演化的研究[D].天津：中国民航大学，2020.
XIAO Tongtong.Research on the Evolution of Civil Aviation Air Traffic Management in China[D].Tianjin：Civil Aviation University of China，2020.

[18] 吕小平.中国民航新一代空中交通管理系统发展总体框架[J].中国民用航空，2007(8)：24-26.
LYU Xiaoping.General framework of China's new-generation civil aviation ATM system[J].China Civil Aviation，2007(8)：24-26.

[19] 单东方.资源型地区创新能力评价指标体系构建[J].统计与决策，2020，36(2)：38-42.
SHAN Dongfang.Construction of evaluation index system of innovation ability in resource-based areas[J].Statistics & Decision，2020，36(2)：38-42.

[20] FRANEK J，KRESTA A.Judgment scales and consistency measure in AHP[J].Procedia Economics and Finance，2014，12：164-173.

[21] 伍文，孟相如，马志强，等.基于组合赋权的网络可生存性模糊综合评估[J].系统工程与电子技术，2013，35(4)：786-790.
WU Wen，MENG Xiangru，MA Zhiqiang，et al.Fuzzy comprehensive evaluation of network survivability based on combinational weight[J].Systems Engineering and Electronics，2013，35(4)：786-790.