

文章编号:1008-1542(2020)02-0114-08

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 基于多标度层次分析法的无人机避让策略构建

甄 然<sup>1,2</sup>, 牛辰辉<sup>1</sup>, 吴学礼<sup>1,2</sup>

(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:**针对未来同一片空域内由于多种航空器共同执行任务而可能出现的飞行安全问题,通过研究各种可能出现碰撞的情景,构建了大型无人机在混合空域中最优避让方案评价指标体系,通过分析不同标度法的优缺点,提出一种多标度层次分析法的混合空域策略。首先,以大型无人机为研究对象建立混合空域模型,将混合空域中出现与本机发生冲突可能性的各种飞鸟或航空器进行分类,并考虑碰撞风险等级及目标执行任务等级因素。其次,采用多标度层次分析法求得不同情况下各类避让目标的权值,经过一致性判定;进一步引入隶属度函数,通过分析已获得的权值,对最终结果进行进一步的权重修正。最后,对大型无人机在空域中飞行可能遇到的空域环境进行分析,以验证无人机避让决策方案是否行之有效。结果表明,确定的基于多标度层次分析法可以满足无人机在面对复杂空域环境时避让策略方案的确立,并且具有动态效果,满足无人机实时构建和调整避让策略需要。研究结果可为实现大型无人机在混合空域中的安全飞行提供新的思路。

**关键词:**决策论;混合空域;指标体系;层次分析法;标度法;避让策略

中图分类号:V279

文献标识码:A

doi:10.7535/hbkd.2020yx02002

## Construction of hybrid airspace strategy based on multi-scale analytic hierarchy process

ZHEN Ran<sup>1,2</sup>, NIU Chenhui<sup>1</sup>, WU Xueli<sup>1,2</sup>

(1.School of Electrical 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:** Considering the possible flight issues due to multiple aircrafts performing tasks in the same airspace in the future, an evaluation index system for the optimal avoidance scheme of large UAVs in mixed airspaces was constructed by studying various scenarios of possible collisions, and a hybrid airspace strategy of multi-scale analytic hierarchy process was proposed by analyzing the pros and cons

收稿日期:2019-12-25;修回日期:2020-02-28;责任编辑:陈书欣

基金项目:国家国防基础项目;河北省重点研发项目;河北省高等学校科学技术研究项目(BJ2017041)

第一作者简介:甄 然(1971—),女,河北保定人,教授,博士,主要从事非线性系统智能控制方面的研究。

通讯作者:吴学礼教授。E-mail: xueliwu0311@163.com

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.

of different scale methods. First, a large-scale unmanned aerial vehicle was used as a research object to establish a hybrid airspace model, which classified various birds or aircraft that have the possibility of conflict with the UAV in the mixed airspace, and considered the factors of collision risk level and the target execution task level. Secondly, the multi-scale analytic hierarchy process was used to obtain the weights of various avoidance targets in different situations, and the consistency was determined. The membership function was further introduced, and the final result was further weighted by analyzing the obtained weights. Finally, the airspace environment that large drones may encounter in the airspace is analyzed to verify whether the drone avoidance decision plan is effective. The verification results show that the determined multi-scale analytic hierarchy process can meet the establishment of the avoidance strategy in a complex airspace environment, and has a dynamic effect to meet the needs of UAVs to construct and adjust the avoidance strategy in real time. The research result provides new ideas for drones to complete avoidance strategies and safe flight under complex airspace conditions.

**Keywords:** decision theory; mixed airspace; index system; analytic hierarchy process; scale method; avoidance strategy

随着无人机技术的日趋成熟及空域的逐步开放,越来越多的无人机被应用于军民领域当中<sup>[1-4]</sup>,研究拥有长续航能力的高空大型无人机已成为趋势<sup>[5-6]</sup>,大型无人机与有人机在同一空域执行任务成为可能,但随之也带来空中交通流量趋于饱和等问题<sup>[7-9]</sup>。同时,随着空中无人机数量的增加,飞行冲突相继增多,安全事故也会随之增多<sup>[10]</sup>,严重影响大型无人机在混合空域中的安全飞行。

在复杂空域环境下,由于无人机机动性能更好、智能等级更高,因此更需要去避让其他航空器。而避让其他不同航空器或者鸟类的优先级属于多准则决策问题,在面临复杂多准则决策问题时多选择层次分析法<sup>[11]</sup>,该方法将复杂的问题划分为多目标、多层次的相互关联因素,进而进行定性和定量分析,在求解具有复杂结构的目标因素及必要数据不足的多标准决策问题时,具有很好的效果。层次分析法与其他方法不同的是不直接评判目标问题和因素的重要性,而是构建一个判断矩阵,将因素指标进行两两比较以增强结果说服力。目前层次分析法多应用于各种复杂的决策问题<sup>[12-14]</sup>,并取得了很好的效果。在层次分析法中选取不同的标度通常有着不同的效果。骆正清等<sup>[15]</sup>详细分析了不同标度法各自的优缺点,徐泽水<sup>[16]</sup>对多种标度法进行了评估。标度法的选取在一定程度上决定层次分析结果的精确度。

本文提出一种多标度层次分析法,通过分析各类标度法的利弊,选取 3 种不同的标度法并结合求权值方法,以保证大型无人机在混合空域中构建更加有效的避让策略。根据实际设想,引入隶属度函数,使最终计算结果更加贴合实际。最后进行实例仿真验证,结果表明,该方法具有一定的动态效果,达到了预期目的。

## 1 模型构建和模拟方法

### 1.1 混合空域

混合空域具有复杂结构,可允许航空器共同在同一空域内执行任务。以大型无人机为研究对象,将大型无人机称作本机,将威胁大型无人机飞行安全的航空器及鸟类称作目标物,并通过目标物、碰撞风险等级、执行任务等级 3 个方面构建出混合空域模型。

目标物方面:混合空域内的航空器主要由军用飞机、公共用途飞机、通用飞机、鸟类、轻于空气的航空器等组成。将在混合空域中出现的飞行器进行列举,其类型包括战斗机、运输机、教练机、直升机、客机、私人飞机等。

碰撞风险等级方面<sup>[17]</sup>:对大型无人机与目标碰撞风险进行评估分类,国内外许多学者对飞行器的碰撞风险等级做了深入探讨。主要方法是通过建立航空器碰撞风险模型,考虑到航空器之间传递信号的延迟、位置误差、相对速度波动等因素,构建航空器保护区,该保护区表示在当前飞行环境下航空器与障碍物之间的最小安全范围。正常情况下,保护区内不存在任何障碍物,一旦保护区被其他障碍物入侵,则表示航空器发生了碰撞事故。无人机的风险评估最终要获得对风险的量化结果,本文中将其其他学者对无人机风险评估的研究成果当作已知条件来使用。将碰撞风险分为远期碰撞风险、中期碰撞风险、近期碰撞风险并作为指标层。

执行任务等级方面:在得知目标飞行器飞行任务的前提下,将飞行任务分为自由飞行、执行普通任务、执行重要任务、执行紧急任务。

### 1.2 评价指标

影响混合空域中大型无人机运行策略的因素是多方面的,而每个方面都可能成为一个评价指标。因此,构建一个科学、合理而又实用的评价指标体系,对大型无人机运行策略综合评价是非常重要的。评价指标体

系的建立应当坚持从本专业相关专家的角度出发,与目标物的碰撞等级及各类航空器执行任务等级认为可从外界信息可知且具有时变性,将鸟类执行任务等级默认为自由飞行。

通过对本专业专家的调查,认为影响大型无人机在混合空域最优避让方案的因素主要包括大型无人机最优避让目标物标准  $U$ 、碰撞风险等级标准  $V$ 、执行任务情况标准  $W$  为标准层,再将标准层按照上述分类细化,建立构建大型无人机在混合空域安全飞行的评价指标体系表,如表 1 所示。

表 1 评价指标体系表  
Tab.1 Evaluation index system

目标层	标准层	方案层	因素
大型无人机在混合空域安全飞行的规则库	目标物标准 $U$	鸟类 $U_1$	零散飞鸟 $U_{11}$
			鸟群 $U_{12}$
		军用航空器 $U_2$	军用大型无人机 $U_{21}$
			轰炸机 $U_{22}$
			侦察机 $U_{23}$
			武装直升机 $U_{24}$
			加油机 $U_{25}$
			运输机 $U_{26}$
			歼击机 $U_{27}$
		公共用途为主航空器 $U_3$	无人机 $U_{31}$
	干线运输机 $U_{32}$		
	支线运输机 $U_{33}$		
	直升机 $U_{34}$		
	客机 $U_{35}$		
	通用飞机 $U_4$	通用无人机 $U_{41}$	
		直升机 $U_{42}$	
		私人飞机 $U_{43}$	
		中小型固定翼飞机 $U_{44}$	
	轻于空气航空器 $U_5$	热气球 $U_{51}$	
		飞艇 $U_{52}$	
碰撞风险等级标准 $V$	远期碰撞风险 $V_1$		
	中期碰撞风险 $V_2$		
	近期碰撞风险 $V_3$		
	危机碰撞风险 $V_4$		
执行任务情况标准 $W$	自由飞行 $W_1$		
	普通任务 $W_2$		
	重要任务 $W_3$		
	紧急任务 $W_4$		

### 1.3 权值求解

层次分析法与其他方法不同的是不直接评判目标问题和因素的重要性,而是构建一个判断矩阵,将因素指标进行两两比较以增强结果的说服力。判断矩阵  $A = (a_{ij})_{n \times n}$  如式(1)所示:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

在判断矩阵中的各个元素  $a_{ij}$  都具有式(2)中的性质:

$$\begin{cases} a_{ij} > 0, \\ a_{ij} = 1, \\ a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}. \end{cases} \quad (2)$$

通过对判断矩阵计算得出各项指标权重值。先将判断矩阵每一列归一化,得到矩阵  $\mathbf{B}$ ,再将矩阵  $\mathbf{B}$  进行行求和,进而将结果归一化得到指标权重,其计算过程如式(3)一式(6)所示:

$$\mathbf{B} = (b_{ij})_{n \times n}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (3)$$

$$b_{ij} = a_{ij} / \sum_{k=1}^n a_{kj}, \quad i, j = 1, 2, \dots, n, \quad (4)$$

$$c_i = \sum_{j=1}^n b_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (5)$$

$$w_i = c_i / \sum_{k=1}^n c_k, \quad (6)$$

式中  $\mathbf{w}_i = (w_1, w_2, w_3, \dots, w_n)^T$  为所求权重向量。

受多种因素影响,判断矩阵通常不易满足一致条件,尤其在判断矩阵中的因素较多时,不满足一致性的情况更加明显。为了保证结果的可信度和准确度,必须对判断质量做一致性检验<sup>[18]</sup>。其计算过程如式(7)一式(9)所示:

$$\text{C.I.} = \frac{1}{n-1}(\lambda_{\max} - n), \quad (7)$$

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(A\mathbf{w}_i)_i}{w_i}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (8)$$

$$\text{C.R.} = \frac{\text{C.I.}}{\text{R.I.}}, \quad (9)$$

式中:C.I.表示一致性指标; $\lambda_{\max}$ 表示最大特征值;R.I.表示随机一致性指标(见表 2);C.R.表示一致性比率。

表 2 随机一致性指标表  
Tab.2 Random consistency index table

$n$	1	2	4	5	6	7	8	9
R.I.	0	0	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

当  $\text{C.R.} < 0.1$  时,认为两两判断矩阵一致性可接受,否则必须重新构建判断矩阵。

### 1.4 确定标度法

目前,在层次分析法的标度法使用当中最常用的是 1~9 标度法,除此之外还有 0~2 标度法、 $9^{0/9} \sim 9^{8/9}$  标度法、 $e^{0/4} \sim e^{8/4}$  标度法、 $e^{0/5} \sim e^{8/5}$  标度法等,但是这些标度法各有利弊。例如:1~9 标度法标度均匀性最好,但是一致性与标度权重拟合度较差; $e^{0/4} \sim e^{8/4}$ 、 $e^{0/5} \sim e^{8/5}$  标度法标度值可记忆性与可感知性较差,但是有着较好的一致性及标度权重拟合度。综上分析,为了保证大型无人机在混合空域中构建更加有效的策略库,本文采用 1~9 标度法、 $e^{0/4} \sim e^{8/4}$  标度法和  $e^{0/5} \sim e^{8/5}$  标度法相结合的方法,在保证每一个标度法满足一致性求出权值的基础上再进行求平均权值,以中和各自标度法的优缺点,使结果权值更加合理,满足在复杂空域情况下混合空域策略库构建的需要。3 种不同标度法标度值及含义如表 3 所示。

表 3 3 种标度法标度值及含义

Tab.3 Scale values and meanings of the three scaling methods

程度	1~9 标度法	$e^{0/4} \sim e^{8/4}$ 标度法	$e^{0/5} \sim e^{8/5}$ 标度法
同样重要	1	1	1
微小重要	2	1.284	1.221
稍微重要	3	1.649	1.492
更为重要	4	2.117	1.822
明显重要	5	2.718	2.226
十分重要	6	3.490	2.718
强烈重要	7	4.482	3.320
更强烈重要	8	5.755	4.055
极端重要	9	7.390	4.953

通过研读《中国民用航空空中交通管理规则》和《中华人民共和国飞行基本规则》等相关资料,并综合考虑专家意见,构建判断矩阵<sup>[19-20]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 3种结构体系吸附过程的平衡

分别以3种标度法构建 $U$ 的判断矩阵,判断矩阵分别采用了1~9标度法、 $e^{0/4} \sim e^{8/4}$ 标度法、 $e^{0/5} \sim e^{8/5}$ 标度法,3种不同标度法下的判断矩阵依次用 $U_a, U_b, U_c$ 来表示,如式(10)~式(12)所示:

$$U_a = \begin{bmatrix} 1 & 1/8 & 1/6 & 1/5 & 1/9 \\ 8 & 1 & 4 & 5 & 1/4 \\ 6 & 1/4 & 1 & 2 & 1/6 \\ 5 & 1/5 & 1/2 & 1 & 1/7 \\ 9 & 4 & 6 & 7 & 1 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$U_b = \begin{bmatrix} 1 & 0.174 & 0.287 & 0.368 & 0.135 \\ 5.755 & 1 & 0.117 & 2.718 & 0.472 \\ 3.490 & 0.427 & 1 & 1.284 & 0.287 \\ 2.718 & 0.368 & 0.779 & 1 & 0.223 \\ 7.390 & 2.117 & 3.490 & 3.482 & 1 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$U_c = \begin{bmatrix} 1 & 0.247 & 0.368 & 0.449 & 0.202 \\ 4.055 & 1 & 1.822 & 2.226 & 0.549 \\ 2.718 & 0.549 & 1 & 1.221 & 0.368 \\ 2.227 & 0.449 & 0.819 & 1 & 0.301 \\ 4.953 & 1.822 & 2.718 & 3.320 & 1 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

并依次构建出其他判断矩阵,最终得到权值,如表4所示。

### 2.2 隶属函数

隶属函数是用于表征模糊集合的数学工具,通过对已经确定出的各类指标权重分析发现,由层次分析法求得的权重值为一个固定的常数值。若要使大型无人机在复杂多变的混合空域环境中合理化地构建飞行规则库,还应根据实际需要对所求的指标权值进行合理化调整。例如当大型无人机在混合空域面临的风险为远期碰撞风险时,在标准层应当以一个更小的权重与之计算,从而减小无人机的不必要操作。当碰撞等级较高时,例如无人机处于危机碰撞风险时,更加要求无人机可以迅速地紧急避让,此时准则层的权重系数应当更高,以增加无人机的反应灵敏性。因此,在标准层确立更加符合无人机在复杂混合空域飞行的隶属函数,并对隶属函数进行比较、调整,最终得到更令人满意的大型无人机在混合空域中安全飞行的规则库。本文中隶属函数由专家判定法得出。

通过分析隶属函数的特点,选取高斯隶属函数、S型隶属函数、一般钟型隶属函数,通过文中所求的权值对隶属函数内的参数做出调整,并通过 Matlab 画出图形。

大型无人机最优避让目标物标准选取高斯隶属函数,设为 $f_1$ ,如图1所示。由图1可知,随着优先避让目标物权重值的增长。隶属度也随之增长,目标物权重较低的进一步小范围降低权重值,目标物权重值较大的更重要价值目标适当提升重要程度,以在小范围内增大区分度。

碰撞风险等级标准选取S型隶属函数,设为 $f_2$ ,如图2所示。

表 4 评价指标权值确定  
Tab.4 Determination of evaluation index weights

目标层	标准层	方案层	因素
大型无人机在混合空域安全飞行的规则库	目标物标准	鸟类 0.046	零散飞鸟 0.180
			鸟群 0.820
		军用航空器 0.258	军用大型无人机 0.038
			轰炸机 0.163
			侦察机 0.107
			武装直升机 0.052
			加油机 0.209
			运输机 0.361
			歼击机 0.070
			无人机 0.284
		公共用途为主航空器 0.131	干线运输机 0.262
			支线运输机 0.144
			直升机 0.108
			客机 0.435
		通用飞机 0.101	通用无人机 0.068
			直升机 0.168
私人飞机 0.307			
中小型固定翼飞机 0.457			
轻于空气航空器 0.465	热气球 0.788		
	飞艇 0.212		
碰撞风险等级标准	远期碰撞风险 0.068		
	中期碰撞风险 0.159		
	近期碰撞风险 0.308		
	危机碰撞风险 0.465		
执行任务情况标准	自由飞行 0.075		
	普通任务 0.139		
	重要任务 0.268		
	紧急任务 0.518		

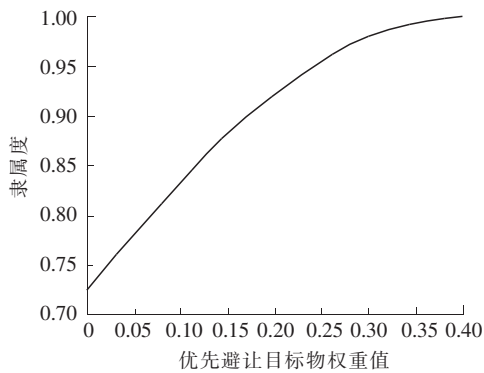


图 1 高斯隶属函数

Fig.1 Gaussian membership function selected by the target standard

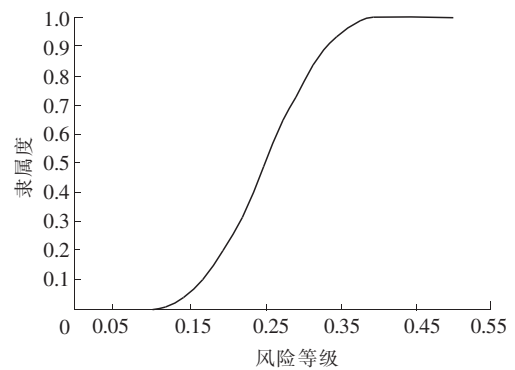


图 2 S型隶属函数

Fig.2 S-type membership function



执行任务情况标准选取一般钟型隶属函数,设为  $f_3$ ,如图 3 所示。由图 3 可知,当碰撞风险等级较低即处于远期碰撞风险等级时,暂时对大型无人机在混合空域中飞行不构成威胁,此时将远期碰撞风险的权重归零,随着碰撞风险等级的提升,隶属度迅速提升,若大型无人机与目标物碰撞风险处于危机碰撞风险时,将隶属度提升至 1,最大程度上保护无人机的飞行安全。

将鸟类的飞行活动自动定义为自由飞行,当鸟类飞行时,可缩减无人机避让鸟类的权重值,以使无人机尽可能优先避让执行任务等级较高权重的航空器。当大型无人机在混合空域中飞行,与其他执行任务较高的航空器相遇时,能够迅速提高避让优先级权值,以保证更有价值的作业优先完成。

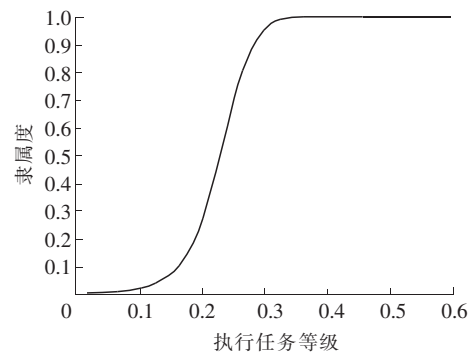


图 3 一般钟型隶属函数

Fig.3 General bell-shaped membership function

### 2.3 最终评价价值的确定

将上述所求得的数据进行对应计算得出最终评价价值,评价价值越高,大型无人机采取优先避让策略。随着评价价值的降低,避让优先级随之降低,从而形成大型无人机在混合空域中飞行的策略库,其中,碰撞风险等级与航空器执行任务情况是可变的,故所构建的策略库也具备一定的动态效果。随着碰撞风险等级以及航空器执行任务情况的变化,大型无人机能够自主地重新构建策略库。

最终评价价值由函数  $f$ 、权重值  $U, V, W$  线性组合来表示,模型为

$$y = f_1 \times U_i \times U_{ij} + f_2 \times V_k + f_3 \times W_l, \tag{13}$$

式中: $U$  代表目标物的种类; $V$  代表当前状态下与该目标物的碰撞风险等级; $W$  为当前状态下该目标物的执行任务情况。

### 2.4 结果验证

大型无人机对具有较大评价价值的目标进行优先避让,避让优先级按最终评价价值的大小进行排序。以混合空域中可能出现的情况为例,假设在混合空域中大型无人机面临 5 个目标物的飞行情况,利用多标度层次分析法构建策略库,对该方法进行仿真验证,如表 5 所示。由此数据构建大型无人机在混合空域安全飞行规则库的优先避让方案,如表 6 所示。

表 5 混合空域中目标物的状态

Tab.5 State of target in mixed airspace

混合空域情况	目标物类型	碰撞风险等级	执行任务情况	最终评价价值
目标物 1	通用直升机	近期碰撞风险	普通任务	0.273 5
目标物 2	鸟群	远期碰撞风险	自由飞行	0.031 7
目标物 3	支线运输机	远期碰撞风险	重要任务	0.233 9
目标物 4	歼击机	近期碰撞风险	重要任务	0.483 3
目标物 5	飞艇	中期碰撞风险	普通任务	0.102 7

假设此时飞艇接收到命令需要对执行任务等级进行变更,将执行普通任务变更为执行重要任务,那么根据多标度层次分析法所求得飞艇的最终评价价值更改为 0.314 3,此时大型无人机在混合空域安全飞行的规则库的优先避让方案如表 7 所示。

由表 7 可以看出,更改飞艇的执行任务等级后,大型无人机对飞艇的优先避让等级大大提高。当然随着碰撞风险等级的改变也会有同样的效果,证明了该方法具有一定的动态效果,达到了预期目的。

表 6 规则库的优先避让方案

Tab.6 Rule base priority avoidance scheme

优先避让等级	一	二	三	四	五
目标物	歼击机	通用直升机	支线运输机	飞艇	鸟群

表 7 更改后规则库的优先避让方案

Tab.7 Priority avoidance scheme for rule base after change

优先避让等级	一	二	三	四	五
目标物	歼击机	飞艇	通用直升机	支线运输机	鸟群

### 3 结 语

本文针对未来空域开放的发展趋势,提出混合空域的概念,运用多标度的层次分析法建立了混合空域模型,并引入了隶属函数以更合理的构建大型无人机在混合空域中优先避让选择的规则库,另外此方法增大各类指标之间的区别度,最后完成了具有一定动态效果的混合空域规则库,使大型无人机在面临复杂的混合空域条件下可以更加智能的自主构建规则库确定优先避让等级。仿真结果符合预期值,证明了该方法在处理大型无人机在混合空域在构建具有动态效果的规则库时具有实用性和有效性。

本文不足之处是,无人机在面对评价指标体系表之外的目标物时,可能无法做出有效的避让策略,所以下一步的研究是如何使无人机在面对未加考虑的目标物时做出合理的避让策略。此外,本文中建立的隶属函数在理论上是可行的,但还需要在实际环境中通过实践来逐步对其完善。

### 参考文献/References:

- [1] 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.
- [2] 邢书元. 坚持走军民融合的空管发展之路[J]. 国防, 2013(3):14-16.
- [3] 杨晓春. 河北省无人机产业发展研究[J]. 合作经济与科技, 2019(18):32-33.
- [4] RAO B, GOPI A G, MAIONE R. The societal impact of commercial drones[J]. *Technology in Society*, 2016, 45:83-90.
- [5] 李小林, 戚丽程, 曹柱. 新时代无人机技术现状及发展趋势[J]. 科技创新导报, 2019(22):108-109.
- [6] 毛秋红, 贺明, 曾兰英. 大型民用无人机产业竞争情报分析[J]. 图书情报导刊, 2019, 4(9):54-60.  
MAO Qihong, HE Ming, ZENG Lanying. Competitive intelligence analysis of large civilian unmanned aerial vehicle(UAV) industry[J]. *Journal of Library and Information Science*, 2019, 4(9):54-60.
- [7] 徐连栋, 王校媛. 协同式空中交通流量管理关键技术分析[J]. 通讯世界, 2017(8):225.
- [8] 赵斌波. 协同式空中交通流量管理关键技术及若干问题分析[J]. 电子世界, 2019(20):201-202.
- [9] 邓力. 无人机与民航客机碰撞概率研究[J]. 南京理工大学学报, 2019, 43(1):122-128.  
DENG Li. Research of collision probability of unmanned aerial vehicles and civil airplane[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2019, 43(1):122-128.
- [10] VALDES R M A, COMENDADOR V F G, SANZ L, et al. Prediction of aircraft safety incidents using Bayesian inference and hierarchical structures[J]. *Safety Science*, 2018, 104:216-230.
- [11] AHMED F, KILIC K. Fuzzy analytic hierarchy process: A performance analysis of various algorithms[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2019, 362:110-128.
- [12] ACHARYA V, SHARMA S K, GUPTA S K. Analyzing the factors in industrial automation using analytic hierarchy process[J]. *Computers & Electrical Engineering*, 2017, 71:877-886.
- [13] SUBRAMANIAN N, RAMANATHAN R. A review of applications of Analytic Hierarchy Process in operations management[J]. *International Journal of Production Economics*, 2012, 138(2): 215-241.
- [14] SAHIN T, OCAK S, TOP M. Analytic hierarchy process for hospital site selection[J]. *Health Policy and Technology*, 2019, 8(1): 42-50.
- [15] 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(9):51-60.  
LUO Zhengqing, YANG Shanlin. Comparative study on several scales in AHP[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2004(9): 51-60.
- [16] 徐泽水. 关于层次分析中几种标度的模拟评估[J]. 系统工程理论与实践, 2000(7): 58-62.  
XU Zeshui. A simulation-based evaluation of several scales in the analytic hierarchy process[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2000(7):58-62.
- [17] 高俊杰. 无人机安全飞行风险评估研究[D]. 广汉:中国民用航空飞行学院, 2018.  
GAO Junjie. Safety Flight Risk Assessment Study of Unmanned Aircraft[D]. Guanghan: Civil Aviation Flight University of China, 2018.
- [18] FRANEK J, KRESTA A. Judgment scales and consistency measure in AHP[J]. *Procedia Economics and Finance*, 2014, 12:164-173.
- [19] PATIAS P. Introduction to unmanned aircraft systems[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2016, 82(2):89-92.
- [20] 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 for Civilian UAVs[D]. Guanghan: Civil Aviation Flight University of China, 2018.