

基于融合对策-进化算法的无人机空战决策研究

姚颖¹, 吴宇¹, 邓嘉宁²

(1. 重庆大学航空航天学院, 重庆, 400044; 2. 西南电子技术研究所, 成都, 610091)

摘要 以无人机一对一近视距空战为研究背景, 提出一种融合加权矩阵对策与进化算法, 结合粗细粒度优化的空战决策方法。首先, 基于实际作战情况建立无人机机动模型和空战态势评估优势函数; 其次, 考虑到基于机动动作库的离散变量优化与满足机动能力的连续型优化2种方式各自存在精度不足和计算代价高的问题, 提出将粗细粒度优化相结合的机动动作决策框架。在粗粒度优化层面上, 引入矩阵对策法, 同时针对传统矩阵对策法机动权重参考选择保守的问题, 基于卡尔曼滤波算法进行权重调整; 在细粒度优化层面上, 基于差分进化原理, 进一步搜索更好的机动动作。仿真算例中, 通过4组对比实验, 验证了所提决策框架的有效性, 基于轨迹预测的加权矩阵对策算法能够针对敌方的动作采取有效的应对策略。

关键词 无人机空战; 矩阵对策法; 卡尔曼滤波; 差分进化

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2025.01.010

中图分类号 V219 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2025)01-0076-10

Research on UAV Air Combat Decision Making Based on Fusion Game-Evolution Algorithm

YAO Ying¹, WU Yu¹, DENG Jianing²

(1. School of Aeronautics and Astronautics, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Southwest Institute of Electronic Technology, Chengdu 610091, China)

Abstract Based on the research background of one-to-one near visual range air combat of unmanned aerial vehicles (UAVS), a new air combat decision-making method combining weighted matrix strategy and evolutionary algorithm with coarse and fine granularity optimization is proposed. Firstly, the UAV maneuver model and air combat situation assessment advantage function are established based on the actual combat situation. Secondly, considering that the discrete variable optimization based on maneuvering library and the continuous optimization based on maneuvering ability both have the problems of insufficient accuracy and high calculation cost, a maneuvering decision framework combining coarse and fine granularity optimization is proposed. At the level of coarse-grain optimization, the matrix game method is introduced, and the Kalman filter algorithm is used to adjust the weight of the traditional matrix game method to solve the problem of conservative choice of maneuvering weight reference. At the fine-grained optimization level, based on the differential evolution principle, further search for better maneuvers. The effectiveness of the

收稿日期: 2024-02-29

基金项目: 国家自然科学基金(52102453)

作者简介: 姚颖(2000—), 男, 重庆万州人, 硕士生, 研究方向为空战态势、路径规划研究。E-mail: yaoying@stu.cqu.edu.cn

通信作者: 吴宇(1987—), 男, 重庆綦江人, 副教授, 研究方向为飞行器动力学建模与轨迹优化、智能体协同控制、多智能体任务规划调度与决策、优化算法研究。E-mail: cquwuyu@cqu.edu.cn

引用格式: 姚颖, 吴宇, 邓嘉宁. 基于融合对策-进化算法的无人机空战决策研究[J]. 空军工程大学学报, 2025, 26(1): 76-85. YAO Ying, WU Yu, DENG Jianing. Research on UAV Air Combat Decision Making Based on Fusion Game-Evolution Algorithm[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2025, 26(1): 76-85.

proposed decision frame is verified by four sets of comparison experiments. The weighted matrix game algorithm based on trajectory prediction can take effective countermeasures against the enemy's actions.

Key words UAV air combat; matrix game method; Kalman filter; differential evolution

随着无人技术的不断发展,无人机已成为现代空战中的主要武器装备之一^[1-2]。无人机空战是指依靠先进的机动决策技术,在无人为操作控制下,战机能自主执行空战任务^[3]。

机动决策是实现无人机空战的核心,建立一个良好的决策模型对于空战至关重要,目前关于空战决策的研究主要分为以下 3 类:基于专家经验^[4-5]、数据驱动启发式算法^[6-11]和对策理论^[12-15]。基于专家经验的机动决策主要由空战专家的经验进行分类和规则细化确定机动决策,文献[4]提出基于进化算法和遗传算法建立的进化式专家系统树机动决策模型,基于专家经验的机动决策无法完全释放无人战机的性能且系统更新较为困难。基于数据驱动的启发式学习机动决策方法主要分为:神经网络^[6-7]、群智能算法^[8-9]和强化学习算法^[10-11]3 类。文献[16]基于已有的空战训练数据,利用神经网络对决策模型进行训练,对未来态势进行预测实现机动决策,基于启发式学习算法的机动决策对数据的依赖性较大且算法复杂度难以分析。对策理论主要分为微分对策和矩阵对策,文献[17]基于博弈论和自觉模糊,建立了基于纳什均衡的机动决策模型,微分对策求解代价高不适用于复杂环境,而矩阵对策存在精度低,对于权重的参考选择相对单一等问题。目前关于视距内空战的研究较少,现有文献中基于动作库的离散优化以及满足机动能力的连续优化都不能满足视距内空战反应迅速、高精度的作战特点,因此,本文采取两者相结合的优化方式,以矩阵对策法为基础进行研究改进。

基于矩阵对策法的离散化方法求解快、求解精度相对较低,而直接采用优化算法在解空间直接寻优求解精度较高、计算代价太高,因此本文提出粗细粒度优化结合的视距内空战决策方法。在离散优化中采用矩阵对策法得到一个次优解,同时针对传统矩阵对策法对敌机机动参考权重选择保守的问题,基于卡尔曼滤波算法通过预测敌机位置调整对各机动动作的参考权重;在连续优化中,考虑到差分进化算法的稳定性、全局收敛性和高效性,选择改进差分进化算法在次优解的基础上寻找最优解。

1 无人机机动模型建立

在无人机空战的模拟仿真中,通常将无人机的

运动当作质点的质心运动,采用三自由度的运动模型用以描述战机飞行,同时不考虑无人机的迎角与侧滑。建立的无人机动力学及运动学模型如下:

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos \theta \cos \psi \\ \dot{y} = v \sin \theta \\ \dot{z} = -v \cos \theta \sin \psi \\ \dot{v} = g(n_x - \sin \theta) \\ \dot{\theta} = g(n_y - \cos \theta)/v \\ \dot{\psi} = gn_z/v \cos \theta \end{cases} \quad (1)$$

式中: g 表示重力加速度; x, y, z 表示无人机在地面坐标系下所处的位置; $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$ 表示无人机在 x, y, z 3 个方向上的速度; v, θ, ψ 分别表示无人机的速度、轨迹倾角和轨迹偏航角; n_x, n_y, n_z 表示无人机在机体坐标系下在 x, y, z 3 个方向上的机动过载量,同时本文选取 3 个机动过载作为控制量,并假设其取值范围如下:

$$\begin{cases} n_x \in [-5g, 5g] \\ n_y \in [-4g, 4g] \\ n_z \in [-3g, 3g] \end{cases} \quad (2)$$

同时,根据战机在实际飞行中升力的产生、推力的产生和作用方式以及无人机所受侧向力等综合影响,3 个方向上的机动过载 n_x, n_y, n_z 无法同时取得最值,本文贴合视距内作战要求对机动过载值的约束限制如下:

$$\begin{cases} n_x^2 + n_y^2 \leq 36g^2 \\ n_x^2 + n_z^2 \leq 25g^2 \\ n_y^2 + n_z^2 \leq 25g^2 \\ n_x^2 + n_y^2 + n_z^2 \leq 45g^2 \end{cases} \quad (3)$$

选取无人机质心位置坐标 x, y, z 、速度 v 、轨迹倾角 θ 和轨迹偏航角 ψ 作为状态量,即 $X = (x, y, z, v, \theta, \psi)$,无人机状态通过四阶龙格库塔法计算。

2 视距内空战态势评估优势函数建立

空战中反映无人机空战态势评估函数是无人机采取机动决策的根据。本节将建立起由敌我双方无人机的指向敏捷性、高度和近视距空对空导弹攻击性能组成的态势评估模型。

2.1 指向敏捷性评估优势函数

视距内空战中,由于敌我相对距离较小,空战态

势的变化与敌我相对速度极为密切。建立的速度评估函数如下:

$$S_V = 1/2 - (1/\pi) \arctan(V_r/100) \quad (4)$$

式(4)中,采用敌我战机的相对运动速度大小 V_r 作为评估参数,单位为 m/s,同时为了保证接近速度优势为正值,反正切函数 $\arctan$ 将对相对速度 V_r 进行缩放处理,同时加以 1/2 对优势值进行了大小限制。

空战中,敌我双方的角度关系对于打击效果至关重要。建立的角度评估优势函数如下:

$$S_A = (\varphi_T^a - \varphi_P^a)/2\pi \quad (5)$$

式中: φ_T^a 表示敌方速度与敌机位置到我机位置连线的夹角,为敌方对于我方的进攻角; φ_P^a 表示我方速度与我机位置到敌机位置连线的夹角,为我方对敌方的进攻角。进攻角范围为 $(0, \pi)$ 。

视距内空战迅速反应的特点要求无人机具有良好的指向敏捷性,因此建立接近速度和角度耦合关系的指向敏捷性函数评估优势函数如下:

$$S_{VA} = S_V S_A \quad (6)$$

2.2 高度评估优势函数

空战中,拥有一个合适的敌我双方高度差,能够使我的导弹获得更高的杀伤概率。建立的高度评估优势函数如下:

$$S_H = e^{-((h-h_m)/\sigma h_m)^2} \quad (7)$$

式中: h_m 表示我机相对于敌机的最佳空战高度差; σ 为比例系数,表示我方无人机在未达到相对于敌方的最佳空战高度差 h_m 时,我方无人机对空战高度的调节速度大小; h 表示我方相对于敌方的高度差。

2.3 对敌导弹攻击性能评估优势函数

空战中,评判当前导弹攻击效果需要考虑两个因素:敌我无人机相对距离和我方攻击角度优势。在对敌进行导弹攻击时,需要同时满足距离和角度限制,才能对敌产生较大的攻击优势。建立的导弹攻击距离评估优势函数如下:

$$S_R = e^{-((R-R_m)/2dR)^2} \quad (8)$$

式中: R 表示敌我双方无人机的相对距离; dR 表示空对空导弹的攻击范围大小,即 $dR = R_{\max} - R_{\min}$; $R_{\max}$ 、 $R_{\min}$ 分别表示无人机在视距内空战中空对空导弹对敌造成杀伤效果最佳的和最小攻击距离; R_m 表示视距内空对空导弹杀伤效果最佳的和最小攻击距离 $(R_{\max}、R_{\min})$ 的中间值,即 $R_m = (R_{\max} + R_{\min})/2$ 。同时,建立的导弹攻击角度评估优势函数如下:

$$S_{CA} = e^{-(\varphi_P^a/\varphi_m)^2} \quad (9)$$

式中: φ_P^a 表示我方攻击角,为我机速度矢量与我机

到敌机连线的夹角,表示敌机在我机视野范围内的方位角; φ_m 表示视距内空对空导弹发射时允许的最大离轴发射角。

在实际的空战中,从导弹完成对敌锁定到有效打击,需要同时满足距离和角度的要求,因此建立的攻击距离、角度因素存在耦合关系。建立的对敌导弹攻击评估优势函数如下:

$$S_{AC} = S_{CA} S_R \quad (10)$$

2.4 综合空战态势评估优势函数

在 2.1~2.3 小节中,分别针对影响无人机视距内空战的不同要素建立了相关的态势评估优势函数,在空战机动决策中,需要将上述 3 种因素进行有机综合考虑,使其能精准反映视距内空战的态势情况。建立的综合空战态势评估优势函数如下:

$$S = w_1 S_{VA} + w_2 S_H + w_3 S_{AC} \quad (11)$$

式中: w_1 、 w_2 、 w_3 表示对于 3 种因素的权重赋值,由层次分析法计算得出。

层次分析法是一种解决多目标复杂问题权重决策的方法^[18-19],本文首先针对 S_{VA} 、 S_H 、 S_{AC} 3 个指标两两进行相对重要性评估,然后建立一个 3 层级评估的层次结构,最终确定每个指标的标量权重。层次分析法评估层次矩阵如下:

$$W = \begin{matrix} & S_{VA} & S_H & S_{AC} \\ \begin{matrix} S_{VA} \\ S_H \\ S_{AC} \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0.5 & 1 & 0.5 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (12)$$

式中:评估层次矩阵中的元素如 $W(S_{VA}, S_H)$ 表示 S_{VA} 相对于 S_H 的相对重要性,其余元素同理。基于矩阵 W ,计算得到归一化权重向量 $w = [0.4, 0.2, 0.4]$,取比例得到最终的综合空战态势评估优势函数如下:

$$S = 2S_{VA} + S_H + 2S_{AC} \quad (13)$$

3 基于融合对策-进化算法的空战决策模型

在分别建立无人机的机动模型和空战态势评估优势函数的基础上,本节将建立基于改进矩阵对策法的无人机空战模型。

3.1 矩阵对策法空战模型

矩阵对策法的机动选择主要采用美国国家航天局(national aeronautics and space administration, NASA)提出 7 种无人机基本动作,后续研究文献^[20]将基本机动动作库扩展到 11 种,根据式(2)、式(3)本文对比实验无人机采取的机动动作见表 1。

表 1 基本动作库表

Tab. 1 Basic action library table

序号	动作指令	n_x/g	n_y/g	n_z/g
1	匀速前飞	$\sin \theta$	$\cos \theta$	0
2	最大加速前飞	5	$\cos \theta$	0
3	最大减速前飞	-5	$\cos \theta$	0
4	最大过载向上爬升	0	$\cos \theta$	-3
5	最大过载向下俯冲	0	$\cos \theta$	3
6	最大过载向右转弯	0	4	0
7	最大过载向左转弯	0	-4	0
8	右上爬升	0	4	-3
9	左上爬升	0	-4	-3
10	右下俯冲	4	4	3
11	左下俯冲	4	-4	3

在视距内空战模拟中,首先计算步长时间 dt 后敌我双方在各自可选机动动作下的状态,分别记为 $P_{1 \sim m}$ 、 $T_{1 \sim n}$;再计算敌我每种组合下 P_i 与 T_j ,我机对敌机的空战态势优势值 S_{ij} ;在得到完整的矩阵 S 后(如式 14),选择综合对敌所有机动动作态势优势最大的我方机动过载控制量,作为我机的决策动作,即:我机所采取的动作 A^* ,会使得该动作所处态势矩阵 S 的行取得行和最大值。

$$S = \begin{bmatrix} S_{1,1} & S_{1,2} & \cdots & S_{1,n} \\ S_{2,1} & S_{2,2} & \cdots & S_{2,n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ S_{m,1} & S_{m,2} & \cdots & S_{m,n} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$S_i = \sum_{j=1}^n s_{ij}, A^* = \{A_i \mid \max(S_i), i = 1, 2, \cdots, m\} \quad (15)$$

3.2 矩阵对策法空战模型改进

根据视距内空战的特点,本文采取矩阵对策与优化算法粗细粒度结合的寻优方式。针对传统的矩阵对策法所存在的权重单一、精度不高的问题,利用卡尔曼滤波算法和差分进化算法进行改进。同时,本文选取 3 个机动过载 n_x 、 n_y 、 n_z 作为无人机的控制量,粗粒度优化中在式(2)的空间范围内,以 1 g 作为间隔,在满足式(3)的约束下划分机动过载组合作为矩阵对策法求解次优解的基础,如表 2 所示 581 种机动过载组合。

表 2 无人机机动过载控制量组合

Tab. 2 Combination of UAV maneuvering overload control quantity

机动编号	n_x/g	n_y/g	n_z/g
1	-5	-3	0
2	-5	-2	0

续表

机动编号	n_x/g	n_y/g	n_z/g
3	-5	-1	0
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
581	5	3	0

3.3 基于卡尔曼滤波算法的矩阵对策法改进

3.1~3.2 节中,基于矩阵对策法初步选定过载机动组合时,对敌方可能采取的机动采用了相同的参考权重,缺乏对敌方未来态势的预测。本节将基于卡尔曼滤波算法,通过预测敌机位置进行权重再调整。

卡尔曼滤波算法^[21-22]是一种通过观测当前输入输出数据,对系统的下一状态进行最优估计的算法。本文通过卡尔曼滤波算法预测敌机的下一时刻位置记为 $\hat{\mathbf{X}}_t$,同时计算敌机可能采取的所有机动后的下一时刻位置,记为: $\mathbf{X}_t = [X_t^1, X_t^2, \cdots, X_t^n]$,计算每种机动后的位置与 $\hat{\mathbf{X}}_t$ 的相对距离 $\mathbf{R}_t = [R_t^1, R_t^2, \cdots, R_t^n]$,则参考权重 ω 的计算如下:

$$\omega_j = (1/R_t^j) / \sum_{j=1}^n (1/R_t^j) \quad (16)$$

式(16)基于敌方所采取的所有机动后与预测位置的相对距离,权重 ω 随着距离的增大而减小,即:对于最靠近预测点的机动动作,将给予最大的参考权重,改进的矩阵决策初步选定最优动作 A^* 公式如下:

$$S_i = \sum_{j=1}^n s_{ij}, A^* = \{A_i \mid \max \sum_{j=1}^n \omega_j s_{ij}, i = 1, 2, \cdots, m\} \quad (17)$$

3.4 基于改进差分进化的机动决策再寻优

在 3.1~3.3 节中,通过矩阵对策法计算得到机动过载初解 A^* 的控制精度较低,可能并不是最优解;若单纯降低矩阵对策法的求解间隔,则会增加算法的计算代价。因此,基于上述考虑在初步决定控制量 A^* 后,再在 A^* 所属划分区间优化算法进行再寻优得到最终的控制指令 A' ,考虑到差分进化算法良好的稳定性、全局收敛性以及简单、运行高效,本文选择改进差分进化算法进行再优化。

以式(13)的空战态势函数作为适应度函数,通过矩阵决策法初步得到的控制量 $A^* = [n_x^*; n_y^*; n_z^*]$ 后,在此基础上通过式(18)得到其再优化的空间 AP 。

$$AP = \begin{bmatrix} n_x^* - 1 \text{ g}, n_x^* + 1 \text{ g} \\ n_y^* - 1 \text{ g}, n_y^* + 1 \text{ g} \\ n_z^* - 1 \text{ g}, n_z^* + 1 \text{ g} \end{bmatrix} \quad (18)$$

基本差分进化算法中,变异算子较难确定;变异

率太大会导致算法搜索率低下,所得优化结果精度低;变异率太小,种群多样性降低,易出现“早熟”现象。本文针对此情况将自适应变异算子确定如下:

$$\lambda = e^{\frac{1-G_m}{G_m+1-G}}, F = F_0 \times 2^\lambda \quad (19)$$

式中: F_0 表示变异算子; G_m 表示最大进化代数, G 表示当前进化代数。自适应变异算子的初值为 $2F_0$, 具有较大值, 在算法初期保持个体多样性, 避免了“早熟”; 随着算法迭代, 变异算子逐步降低, 到后期变异率接近 F_0 , 保留了优良信息。

本文改进的差分进化算法步骤如图 1 所示。

1) 根据不同的敌我视距内空战态势, 基于卡尔曼滤波-矩阵决策论初步选定机动过载 A^* , 在其优化空间 AP 随机生成 40 个机动过载组合。

2) 对于 40 个机动过载组合, 分别计算步长时间 dt 后, 执行各个控制量的对敌空战优势, 结合约束条件限制, 得到基于空战态势优势的适应度值, 并按照值从大到小进行排序。

3) 进行变异、交叉、选择、边界条件处理等操作。

4) 重复步骤 2、步骤 3 直到达到最大迭代次数。

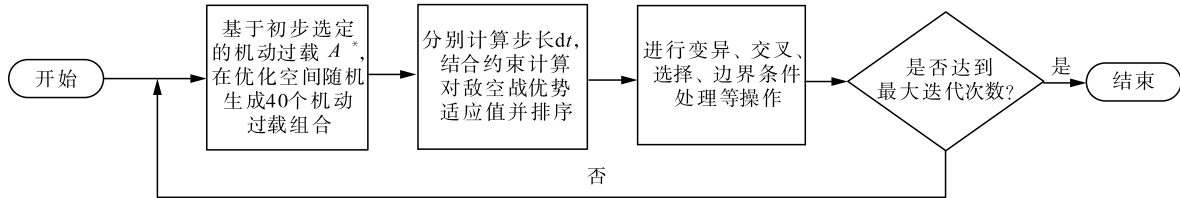


图 1 改进差分进化步骤

Fig. 1 Improved differential evolution step diagram

3.5 无人机视距内空战仿真流程

3.1 节介绍了矩阵对策法的空战模型, 3.2 节划分了机动过载组合作为矩阵对策法的求解基础, 3.3 节通过卡尔曼滤波算法改进矩阵对策法权重并在划

分的机动组合计算得到一个初解, 3.4 节在初次得到机动过载组合上利用改进差分进化算法再寻优得到当前空战最优的机动过载值, 整个空战的仿真流程如图 2 所示。

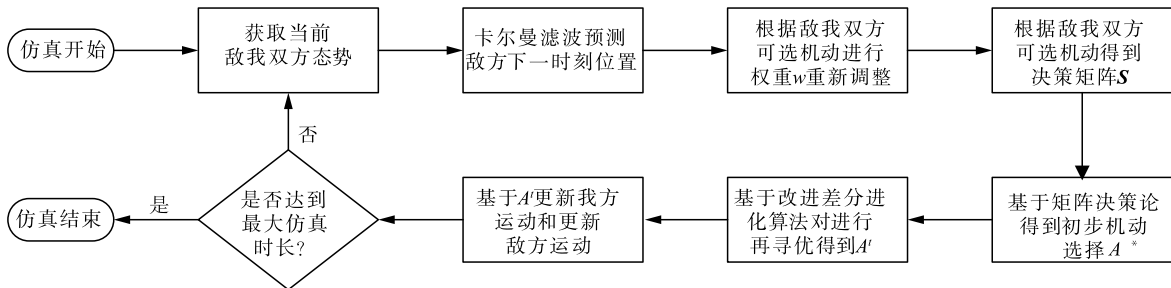


图 2 视距内空战决策流程

Fig. 2 Decision-making flow chart of in-line-of-sight air combat

4 仿真模拟实验

为了验证本文所设计的融合加权矩阵对策-进化算法的无人机视距内空战决策算法的有效性, 设计了 4 组仿真实验进行模拟对比, 实验 1 验证了在计算代价上粗细粒度算法相比于优化算法直接寻优的高效性, 实验 2 验证了在追击、跟踪情况下融合加权矩阵对策-进化算法相比于矩阵对策法的优势, 实验 3 验证了在对攻、博弈情况下融合加权矩阵对策-进化算法相比于矩阵对策法的优势, 实验 4 验证了在劣势条件下融合加权矩阵对策-进化算法的有效性。同时仿真中假设敌我双方战机的状态信息已知, 不考虑实际控制决策中信号传递和状态反应时间造成的延迟, 敌我双方采取相同的战机能参数,

即: 在高度优势函数式(7)中, 设置最佳空战高度差 $h_m = 150$ m, 比例系数 $\sigma = 1.2$; 导弹攻击优势中, 无人机近距空对空导弹对敌造成杀伤效果最佳的最大攻击距离 $R_{\max} = 4\ 000$ m、最小攻击距离 $R_{\min} = 2\ 000$ m, 近距空对空导弹允许最大离轴发射角 $\varphi_m = 30^\circ$; 步长时间 $dt = 1$ s。

表 3 中, $\lambda = e^{\frac{1-G_m}{G_m+1-G}}$, G_m 为最大进化代数, G 为当前进化代数。直接寻优时迭代次数设置为 80 次, 结合矩阵对策寻优时迭代次数为 10 次。

表 3 算法参数表

Tab. 3 Algorithm parameter table

参数	差分算法	改进差分算法
种群数量	40	40
变异算子	0.5	$0.25 \times 2^\lambda$
交叉算子	0.1	0.1

4.1 粗细粒度无人机机动动作决策框架验证

在进行验证之前,对我我双方的初始状态设定如下: $X_P = (1\ 000, 1\ 000, 1\ 000, 180, 0^\circ, 0^\circ)$ 、 $X_T = (5\ 000, 5\ 000, 1\ 500, 180, 0^\circ, 0^\circ)$ 。敌方采用表 3.1 中的机动库,采用 S 形机动飞行逃逸,我方分别采用表 4 中的 4 种决策机制进行追击。方法 1 的优化空间基于初解和式(18)计算得到,方法 2、方法 3 的优化空间根据式(2)假设的控制量范围结合式(3)的约束组成。

表 4 实验 1 敌我双方机动决策表

Tab. 4 Maneuver decision table of experiment I

博弈方	机动决策依据
敌方无人机	基于改进 NASA 机动库的 11 种机动
我方无人机 1	基于矩阵对策-进化算法
我方无人机 2	基于改进差分进化寻优算法
我方无人机 3	基于差分进化寻优算法

如图 3 所示,黑色轨迹表示敌机的 S 型逃逸路线,红色轨迹、绿色轨迹和蓝色轨迹表示我方无人机采取表 4 中 3 种算法的持续跟踪路线,从轨迹图可看出 3 种方法都能精确完成对敌跟踪的任务;如图 4 所示,距离图和角度图中的红线、绿线和蓝线表示 3 种算法对敌距离和角度的变化,3 种方法都能快速完成对敌角度锁定,故在满足攻击距离要求时即达到了导弹发射条件;从表 5 可见,矩阵对策-进化算法比改进差分进化算法快 3 s 锁定敌机且前者在平均空战优势上只落后于后者 0.000 5,同时在计算时长上比后者快了约 16 s,两者寻优结果相当但矩阵对策-差分算法计算代价更小,而相比于普通的差分进化算法快 5 s 锁定敌机,在平均空战态势上领先 0.000 3,在计算时长上快了约 16 s;改进差分进化算法比普通的差分进化算法快 2 s 锁定敌机,领先平均空战态势 0.000 8,同时如图 5 所示随机选取了中间 4 个时刻的迭代曲线,改进差分算法能一定程度上避免算法早熟,但两者最终相差不大,这是由于寻优空间本身不大造成的结果。

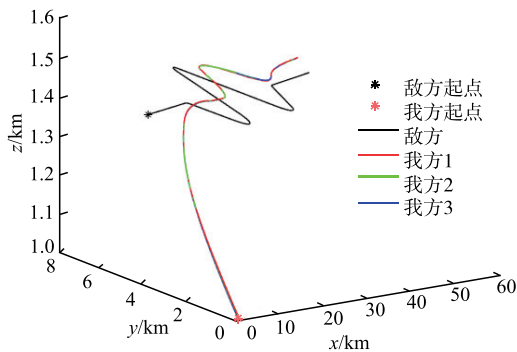
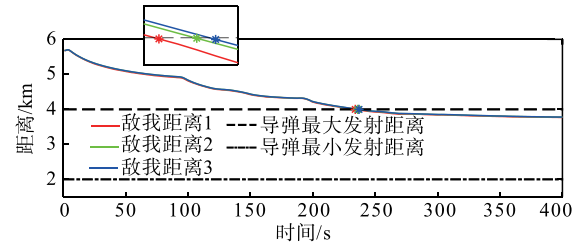
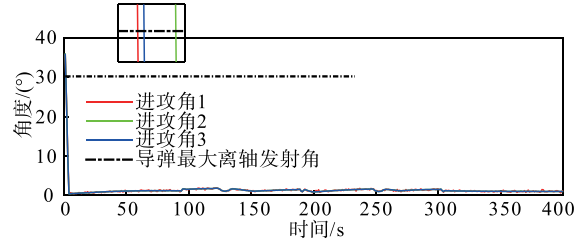


图 3 仿真实验 1 轨迹

Fig. 3 Trajectory diagram of simulation experiment I



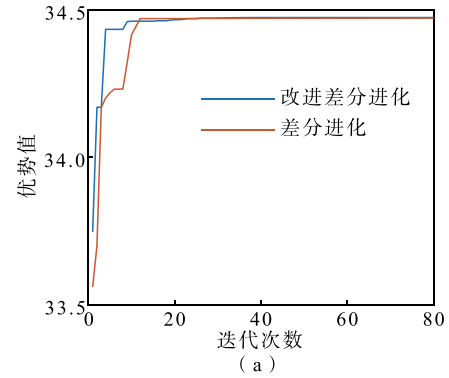
(a) 距离变化



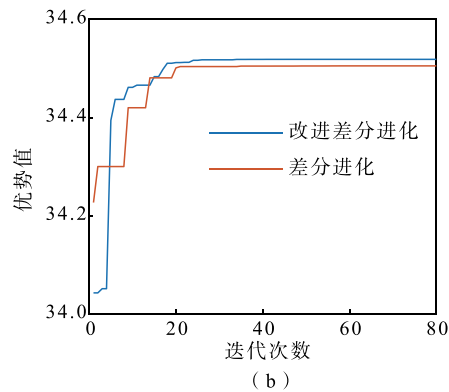
(b) 角度变化

图 4 仿真实验 1 角度、距离变化

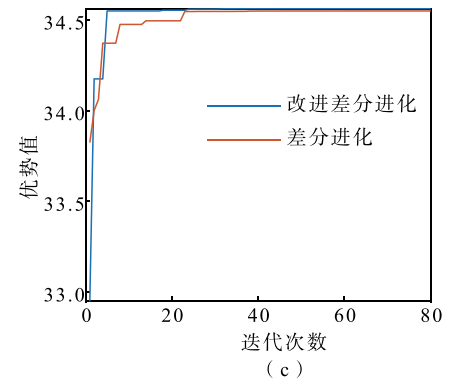
Fig. 4 Variation of angle and distance in simulation experiment I



(a)



(b)



(c)

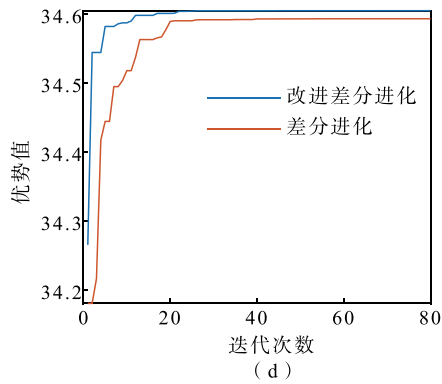


图 5 4 个随机时刻算法迭代曲线

Fig. 5 Random 4 time algorithm iteration curve

表 5 实验 1 结果

Tab. 5 Results of experiment I

博弈方	计算时长/s	满足攻击 距离时间/s	平均空战 优势
我方无人机 1	57.75	232	2.866 1
我方无人机 2	73.79	235	2.866 6
我方无人机 3	73.65	237	2.865 8

4.2 追击、跟踪下融合加权对策-进化算法的机动决策验证

在进行验证之前,对敌我双方的初始状态设定如下: $X_P = (1\ 000, 1\ 000, 1\ 000, 180, 0^\circ, 0^\circ)$ 、 $X_T = (5\ 000, 5\ 000, 1\ 500, 180, 0^\circ, 0^\circ)$ 。敌方采用表 1 中的基本动作库,S 形机动飞行逃逸,我方分别采用表 6 中的 2 种决策机制进行追击。

如图 6 所示,黑色轨迹表示敌机的 S 型逃逸路线,红色轨迹和绿色轨迹表示我方无人机采取表 6 中 2 种算法的持续跟踪路线,紫色轨迹代表我方无人机 1 在跟踪过程中对于敌机的预测轨迹,从轨迹图看出我方无人机所采用的 2 种方法都能精确完成对敌跟踪的任务。

表 6 实验 2 敌我双方机动决策

Tab. 6 Maneuver decision table of experiment II

博弈方	机动决策依据
敌方无人机	基于改进 NASA 机动库的 11 种机动
我方无人机 1	基于融合加权矩阵对策-进化算法
我方无人机 2	基于矩阵对策-进化算法

如图 7 和图 8 所示,2 种方法都能对敌进行快速锁定,融合加权矩阵对策-进化算法快约 1 s 进入攻击角度且平均空战优势稍高于后者;结合表 7,前者相较于后者落后 2 s 进入攻击距离但平均空战优势上领先了 0.016 7,如轨迹图 6 所示这是由于前

者在中途某一时刻决策时选择增强高度优势进而增加总体态势导致了距离的增加,从而影响了进入攻击距离的时间,但两者总体差距不大,2 种方法在追击敌方时结果相当。

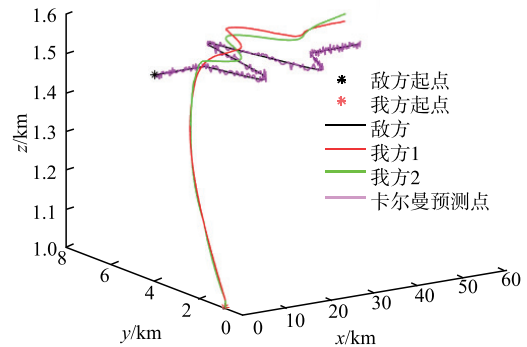
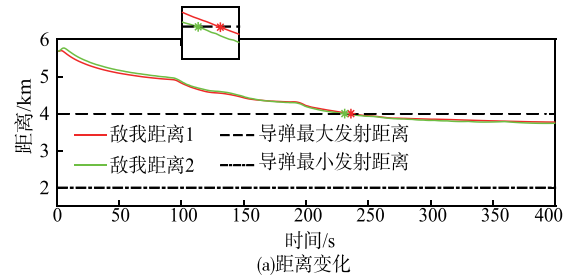
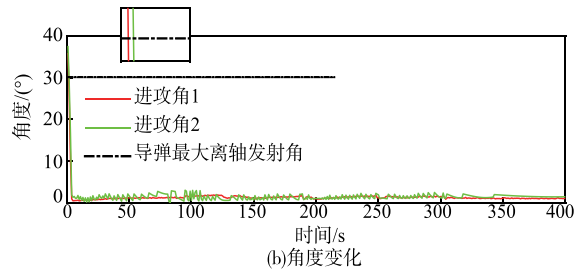


图 6 仿真实验 2 轨迹

Fig. 6 Trajectory diagram of simulation experiment II



(a)距离变化



(b)角度变化

图 7 仿真实验 2 角度、距离变化

Fig. 7 Variation of angle and distance in simulation experiment II

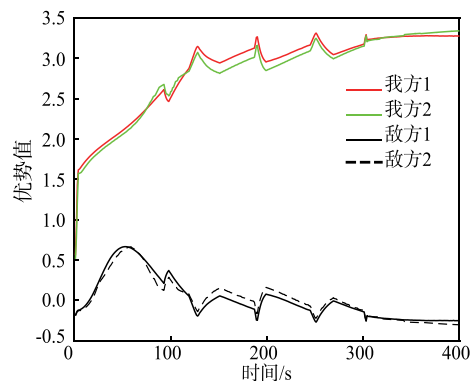


图 8 仿真实验 2 各机总态势变化

Fig. 8 Simulation experiment II General situation change diagram of each machine

表 7 实验 2 结果表

Tab. 7 Results of experiment II

博弈方	满足攻击距离时间/s	平均空战优势
我方无人机 1	234	2.864 7
我方无人机 2	232	2.848 0

4.3 对攻、博弈下融合加权对策-进化算法的机动决策验证

在进行验证之前,对敌我双方的初始状态设定如下: $X_P=(1\ 000,1\ 000,1\ 000,180,45^\circ,0^\circ)$ 、 $X_T=(7\ 000,7\ 000,1\ 000,180,-135^\circ,0^\circ)$,各自采用表 8 的机动策略。敌我双方无人机初始时刻处于相向而飞、处于攻击角度内的状态,敌我双方无人机处于均势地位。

表 8 实验 3 敌我双方机动决策

Tab. 8 Maneuver decision table of experiment III

博弈方	机动决策依据
敌方无人机	基于矩阵对策-进化算法
我方无人机	基于融合加权矩阵对策-进化算法

如图 9 所示,黑色轨迹表示敌机的博弈轨迹路线,红色轨迹表示我方无人机的博弈轨迹路线,紫色轨迹表示我方无人机在空战过程中对于敌机的预测轨迹;如图 10 和图 11 所示,初始时刻两者相向而飞都处于对方的攻击角度内且优势相当,随着空战进行,我方无人机始终处于空战的优势地位;如表 9 所示,在整个空战过程中我方无人机领先对方平均空战优势约 0.395,这主要是由于通过卡尔曼滤波算法预测敌机下一时刻位置进而调整对敌决策选择权重,在整个空战过程中我方能够始终处于对敌压制状态,融合加权矩阵对策-进化算法在敌我进攻博弈时优于矩阵对策-进化算法,同时也说明了卡尔曼滤波算法对于矩阵对策法的权重调整的有效性。

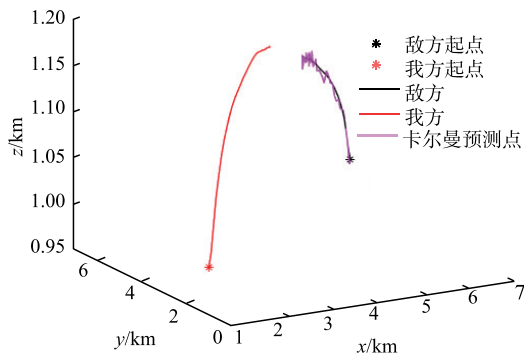
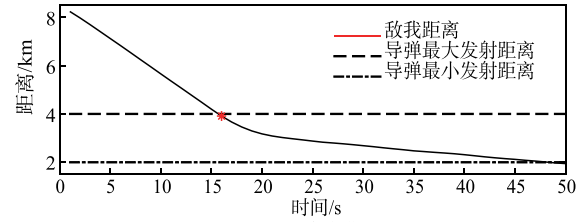
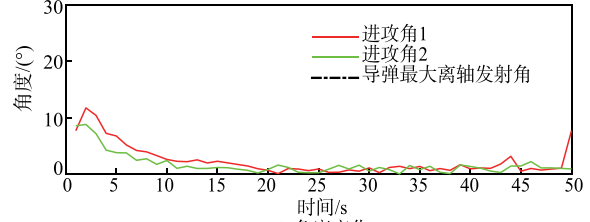


图 9 仿真实验 3 飞行轨迹

Fig. 9 Trajectory diagram of simulation experiment III



(a)距离变化



(b)角度变化

图 10 仿真实验 3 角度、距离变化

Fig. 10 Variation of angle and distance in simulation experiment III

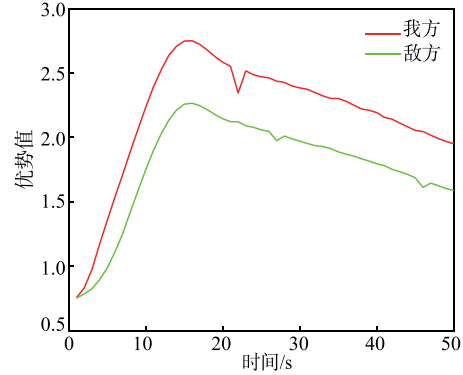


图 11 仿真实验 3 各机总态势变化

Fig. 11 Simulation experiment III General situation change diagram of each machine

表 9 实验 3 结果表

Tab. 9 Results of experiment III

博弈方	满足攻击距离时间/s	平均空战优势
我方无人机	16	2.173 8
敌方无人机	16	1.778 8

4.4 劣势条件下融合加权对策-进化算法的机动决策验证

在进行验证之前,对敌我双方的初始状态设定如下: $X_P=(1\ 000,1\ 000,1\ 000,180,180^\circ,0^\circ)$ 、 $X_T=(7\ 000,7\ 000,1\ 000,180,-60^\circ,0^\circ)$,各自采用表 10 的机动策略。初始时刻,我方处于态势较弱的一方。

表 10 实验 4 敌我双方机动决策

Tab. 10 Maneuver decision table of experiment IV

博弈方	机动决策依据
敌方无人机	基于矩阵对策-进化算法
我方无人机	基于融合加权矩阵对策-进化算法

如图 12 所示,黑色轨迹表示敌机的博弈轨迹路线,红色轨迹表示我方无人机的博弈轨迹路线,紫色

轨迹表示我方无人机在空战过程中对于敌机的预测轨迹;如图 13 所示,尽管敌方先于我方大约 2 s 进入攻击角度但是此时并未进入攻击距离,我方在进入攻击距离前也同样锁定了对方;如图 14 和表 11 所示,初始时刻我方无人机处于劣势状态,大约在 7 s 后我方开始逆转劣势情况,随后一直保持对敌优势状态,在整个过程中领先敌方平均态势优势约 0.64 左右,同时也说明了在较小的劣势情况下,融合加权对算法改进的有效性。

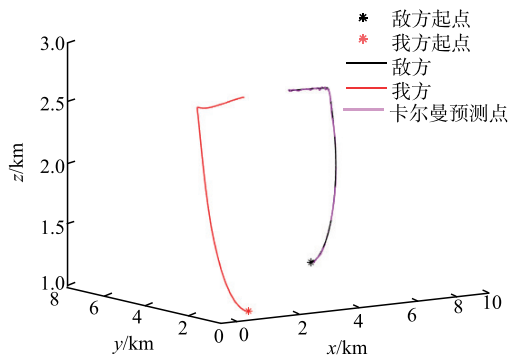


图 12 仿真实验 4 轨迹图

Fig. 12 Trajectory diagram of simulation experiment IV

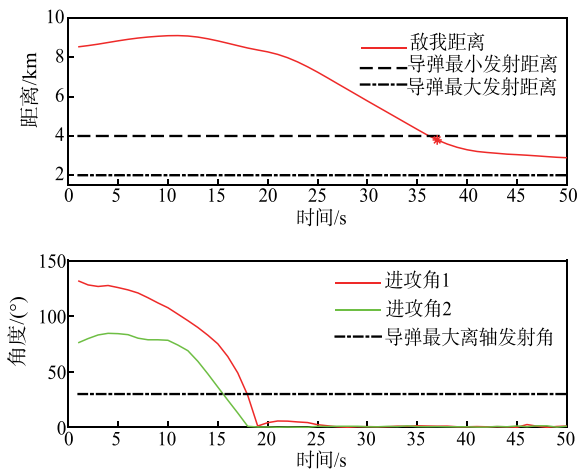


图 13 仿真实验 4 角度、距离变化

Fig. 13 Variation of angle and distance in simulation experiment IV

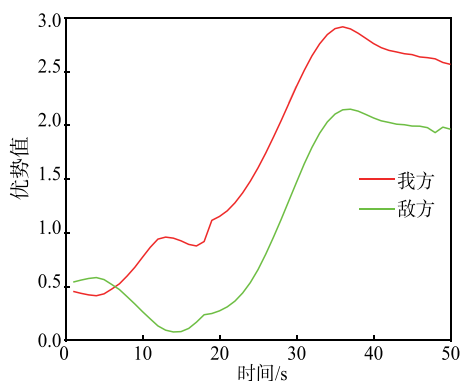


图 14 仿真实验 4 各机总态势变化

Fig. 14 Simulation experiment IV general situation change diagram of each machine

表 11 实验 4 结果

Tab. 11 Results of experiment IV

博弈方	满足攻击 距离时间/s	初始时刻 优势	平均空战 优势
我方无人机	37	0.460 8	1.728 1
敌方无人机	37	0.538 3	1.089 9

综上,本文所提的融合加权矩阵-进化算法在我方处于优势时能够持续追击,跟踪敌方;在双方初始处于均势时,我方能领先对方态势,压制敌方;在我方处于较小的劣势时,能逆转颓势。三类场景的仿真实验验证了所提算法的有效性。

5 结语

本文以无人机空战为背景,提出一种融合加权矩阵对策与进化算法的无人机空战决策算法。首先建立了无人机机动模型、态势评估数学模型和矩阵对策空战模型,针对传统矩阵对策法中存在的权重选择保守、精度较低的问题,利用卡尔曼滤波算法和差分进化算法改进,并进行了模拟仿真实验对比。仿真结果表明,本文所提的算法具有良好的适应性,克服了传统矩阵对策法参考权重单一化、选择较少以及单纯差分进化算法寻优计算量大、易陷入局部最优的问题,对今后无人机空战自主决策研究具有一定的参考意义。

参考文献

- [1] 陈浩,黄健,刘权,等. 自主空战机动决策技术研究进展与展望[J]. 控制理论与应用, 2023, 40(12): 2104-2129.
CHEN H, HUANG J, LIU Q, et al. Review and Prospects of Autonomous Air Combat Maneuver Decisions[J]. Control Theory & Applications, 2023, 40(12): 2104-2129. (in Chinese)
- [2] 杨佳会,朱超磊,许佳. 俄乌冲突中的无人机运用[J]. 战术导弹技术, 2022(3): 116-123.
YANG J H, ZHU C L, XU J. Analysis of UAV Deployment in Russia-Ukraine Conflict[J]. Tactical Missile Technology, 2022(3): 116-123. (in Chinese)
- [3] 周新民,吴佳晖,贾圣德,等. 无人机空战决策技术研究进展[J]. 国防科技, 2021, 42(3): 33-41.
ZHOU X M, WU J H, JIA S D, et al. Progress in Research on Combat Decision-Making Technology in UAVs[J]. National Defense Technology, 2021, 42(3): 33-41. (in Chinese)
- [4] 王炫,王维嘉,宋科璞,等. 基于进化式专家系统树的无人机空战决策技术[J]. 兵工自动化, 2019, 38(1): 42-47.

- WANG X, WANG W J, SONG K P, et al. UAV Air Combat Decision Based on Evolutionary Expert System Tree[J]. Ordnance Industry Automation, 2019, 38(1): 42-47. (in Chinese)
- [5] LI B, BAI S X, LIANG S Y, et al. Manoeuvre Decision-Making of Unmanned Aerial Vehicles in Air Combat Based on an Expert Actor-Based Soft Actor Critic Algorithm[J]. CAAI Transactions on Intelligence Technology, 2023, 8(4): 1608-1619.
- [6] KHAN A, HAYAT S, ZHONG Y B, et al. Computational and Topological Properties of Neural Networks by Means of Graph-Theoretic Parameters[J]. Alexandria Engineering Journal, 2023, 66: 957-977.
- [7] DE LIMA FILHO G M, MEDEIROS F L L, PASSARO A. Decision Support System for Unmanned Combat Air Vehicle in Beyond Visual Range Air Combat Based on Artificial Neural Networks[J]. Journal of Aerospace Technology and Management, 2021, 13: 3721.
- [8] 付跃文, 王元诚, 陈珍, 等. 基于多智能体粒子群的协同空战目标决策研究[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(11): 4151-4157.
- FU Y W, WANG Y C, CHEN Z, et al. Target Decision in Collaborative Air Combats Using Multi-Agent Particle Swarm Optimization[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(11): 4151-4157. (in Chinese)
- [9] PENG G, FANG Y W, CHEN S H, et al. A Hybrid Multiobjective Discrete Particle Swarm Optimization Algorithm for Cooperative Air Combat DWTA[J]. Journal of Optimization, 2017(1): 8063767.
- [10] YANG Q M, ZHANG J D, SHI G Q, et al. Maneuver Decision of UAV in Short-Range Air Combat Based on Deep Reinforcement Learning[J]. IEEE Access, 2019, 8: 363-378.
- [11] HU J W, WANG L H, HU T M, et al. Autonomous Maneuver Decision Making of Dual-UAV Cooperative Air Combat Based on Deep Reinforcement Learning[J]. Electronics, 2022, 11(3): 467.
- [12] 殷书慧. 基于博弈模型的无人机机动决策方法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2023.
- YIN S H. Research on UAV Maneuver Decision Method Based on Game Model[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2023. (in Chinese)
- [13] LI S Y, CHEN M, WANG Y H, et al. Air Combat Decision-Making of Multiple UCAVs Based on Constraint Strategy Games[J]. Defence Technology, 2022, 18(3): 368-383.
- [14] REN Z, ZHANG D, TANG S, et al. Cooperative Maneuver Decision Making for Multi-UAV Air Combat Based on Incomplete Information Dynamic Game[J]. Defence Technology, 2023, 27: 308-317.
- [15] MA Y Y, WANG G Q, HU X X, et al. Cooperative Occupancy Decision Making of Multi-UAV in Beyond-Visual-Range Air Combat: A Game Theory Approach[J]. IEEE Access, 2020, 8: 11624-11634.
- [16] 张宏鹏, 黄长强, 轩永波, 等. 基于深度神经网络的无人作战飞机自主空战机动决策[J]. 兵工学报, 2020, 41(8): 1613-1622.
- ZHANG H P, HUANG C Q, XUAN Y B, et al. Maneuver Decision of Autonomous Air Combat of Unmanned Combat Aerial Vehicle Based on Deep Neural Network [J]. Acta Armamentarii, 2020, 41(8): 1613-1622. (in Chinese)
- [17] 李世豪, 丁勇, 高振龙. 基于直觉模糊博弈的无人机空战机动决策[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41(5): 1063-1070.
- LI S H, DING Y, GAO Z L. UAV Air Combat Maneuvering Decision Based on Intuitionistic Fuzzy Game Theory [J]. Systems Engineering and Electronics, 2019, 41(5): 1063-1070. (in Chinese)
- [18] 陈李田, 张云, 李宏博, 等. 基于随机有限集的视频 SAR 多目标跟踪方法[J]. 空军工程大学学报, 2023, 24(2): 77-82.
- CHEN L T, ZHANG Y, LI H B, et al. Research on Video SAR Multi-Objective Tracking Method Based on Random Finite Set[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2023, 24(2): 77-82. (in Chinese)
- [19] TAVANA M, SOLTANIFAR M, SANTOS-ARTEAGA F J. Analytical Hierarchy Process: Revolution and Evolution[J]. Annals of Operations Research, 2023, 326(2): 879-907.
- [20] 董肖杰, 余敏建, 宋帅. 空战机动动作库及控制算法设计研究[C]//第五届中国指挥控制大会论文集. 北京: 电子工业出版社, 2017: 188-193.
- DONG X J, YU M J, SONG S. Research on Air Combat Maneuver Action Library and Control Algorithm Design[C]// The Proceedings of the 5th China Command and Control Conference. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2017: 188-193. (in Chinese)
- [21] BORRERO J D, MARISCAL J. Predicting Time Series Using an Automatic New Algorithm of the Kalman Filter[J]. Mathematics, 2022, 10(16): 2915.
- [22] 王娜, 罗亮, 彭锐, 等. 基于组稀疏卡尔曼滤波的多步轨迹预测方法[J]. 空军工程大学学报, 2023, 24(6): 70-77.
- WANG N, LUO L, PENG K, et al. A Multi-Step Trajectory Prediction Method Based on Group Sparse Kalman Filtering[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2023, 24(6): 70-77. (in Chinese)

(编辑: 刘勇)