

# 一种近似动态规划的无人机机动决策方法

黄长强<sup>\*①</sup> 赵克新<sup>①</sup> 韩邦杰<sup>②</sup> 魏政磊<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(空军工程大学航空航天工程学院 西安 710038)

<sup>②</sup>(空军驻石家庄地区军事代表室 石家庄 050002)

**摘要:** 针对空战机动决策时出现的“维数爆炸”问题, 该文提出一种基于近似动态规划的群智能空战机动决策方法。首先建立无人机空气动力学模型和空战态势优势指标函数。其次, 利用近似动态规划的思想, 将空战过程按时间域划分为多个规划时域, 在每个规划时域内, 提出人工势场引导下的改进蚁狮优化算法快速逼近最优控制量, 有效裁减搜索空间。通过与专家系统法进行仿真对比, 表明所提方法解决高动态、实时性强的无人机机动决策问题的有效性和可行性。

**关键词:** 近似动态规划; 无人机; 机动决策; 群智能

中图分类号: V271.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)10-2447-06

DOI: 10.11999/JEIT180068

## Maneuvering Decision-making Method of UAV Based on Approximate Dynamic Programming

HUANG Changqiang<sup>①</sup> ZHAO Kexin<sup>①</sup> HAN Bangjie<sup>②</sup> WEI Zhenglei<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(College of Aeronautics of Engineering, Air Force University, Xi'an 710038, China)

<sup>②</sup>(Military Delegate Section of China People's Liberation Army Air Force Stationed, Shijiazhuang 050002, China)

**Abstract:** To solve the problem of dimension disaster when solving air combat maneuvering decision-making by dynamic programming, a swarm intelligence maneuvering decision-making method based on the approximate dynamic programming is proposed. Firstly, the Unmanned Aerial Vehicle (UAV) dynamic model and advantage functions of situation are established. On this basis, air combat process is divided into several stages according to dynamic programming thought. In order to reduce the search space, an Artificial Potential Field (APF) Guiding Ant Lion Optimizer (ALO) approximate optimal control amount is adopted in each programming stage. Finally, by comparing expert system, the experiment result indicates that the high dynamic and real-time air combat maneuvering decision can be solved by the proposed method effectively.

**Key words:** Approximate dynamic programming; Unmanned Aerial Vehicle (UAV); Maneuvering decision-making; Swarm intelligence

## 1 引言

随着导航、控制、传感技术的发展, 无人机开始从传统的空中侦察向自主空战发展。机动决策是无人机根据不同的空战态势, 结合飞行员的先验知识<sup>[1]</sup>而做出的机动动作。机动决策常用的方法有微

分对策法<sup>[2-4]</sup>、专家系统法<sup>[5,6]</sup>、优化理论<sup>[7,8]</sup>、多级影响图<sup>[9,10]</sup>等, 专家系统法可以有效地解决特定空战态势下的决策问题, 但是空战态势是高强度、高动态的过程, 在出现未知态势时专家系统易失效; 多级影响图在出现未知态势时依然能够给出有效决策, 但是其建模过程复杂, 运算时间长, 难以适应紧张的空战环境; 微分对策法偏重于理论推导, 很难得出符合实际的有效结果。

空战环境具有相对性和动态性<sup>[11]</sup>, 因此, 决策方法需要具备准确性和快速性。虽然当前用于机动决策的方法比较多, 但是各方法都存在自身的不足<sup>[12]</sup>, 因此机动决策问题仍然属于无人机自主空战中的关键问题。本文利用最优控制的方式对机动决策问题

收稿日期: 2018-01-17; 改回日期: 2018-06-20; 网络出版: 2018-07-30

\*通信作者: 黄长强 13227894098@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61601505), 航空科学基金(20155196022)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61601505), The Aviation Science Foundation Project (20155196022)

建模,提出了一种近似动态规划的无人机机动决策方法(Maneuvering decision of Unmanned aerial vehicle based on approximate dynamic Programming, MUP),解决机动决策时出现的“维数爆炸”问题<sup>[13]</sup>,将整个空战过程按照时间域进行划分,采用动态规划的方法实现决策的快速性;在改进蚁狮优化算法中融入人工势场,搜索单个规划时域的最优控制参量,保证决策的正确性。实验结果表明MUP方法是有效的。

## 2 最优控制模型

### 2.1 无人机运动模型

敌机和UAV的运动模型采用三自由度质点运动模型。状态向量 $\mathbf{X}_r$ 、 $\mathbf{X}_b$ 分别表示敌机(红方)和UAV(蓝方)的状态。

$$\mathbf{X}_p = (x_p, y_p, z_p, \theta_p, \psi_p, \phi_p), p = r, b \quad (1)$$

式中, $x_p, y_p, z_p$ 分别表示飞机在惯性坐标系下的3维位置坐标; $\theta_p$ 表示飞机的航迹倾角, $\psi_p$ 表示飞机的航迹方位角, $\phi_p$ 表示飞机的航迹滚转角。认为飞机发动机推力和速度的方向一致,并且忽略侧滑角的影响,飞机的质点动力学模型为

$$v_x = v \cos(\theta) \cos(\psi) \quad (2)$$

$$v_y = v \cos(\theta) \sin(\psi) \quad (3)$$

$$v_z = v \sin(\theta) \quad (4)$$

$$\frac{dv}{dt} = g(n_x - \sin(\theta)) \quad (5)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{g}{v}(n_z \cos(\phi) - \cos(\theta)) \quad (6)$$

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{gn_z \sin(\phi)}{v \cos(\theta)} \quad (7)$$

式中, $v_x, v_y, v_z$ 分别表示飞机在3个方向上的分速度; $g$ 表示重力加速度, $n_x, n_z$ 分别为切向过载和法向过载。由式(5)可以得出切向过载 $n_x$ 决定飞机的加速度,由式(6)和式(7)得出法向过载 $n_z$ 和速度滚转角 $\phi$ 控制飞机航迹倾角 $\theta$ 和航迹方位角 $\psi$ 的变化(滚转角是飞机绕机体纵轴的旋转运动,指飞机对称面与通过机体轴的铅垂面间的夹角。航迹倾角指机体纵轴在地面上的纵轴与 $x$ 轴之间的夹角。航迹方位角指速度在水平面的投影与 $x$ 轴之间的夹角)。因此将切向过载 $n_x$ 、法向过载 $n_z$ 和速度滚转角 $\phi$ 作为飞机运动状态变化的控制量,给定飞机初始3维坐标 $(x_0, y_0, z_0)$ 、初始速度 $v_0$ 、初始航迹倾角 $\theta_0$ 、初始航迹方位角 $\psi_0$ ,通过不断改变控制量的值,可以得到飞机位置坐标 $(x_t, y_t, z_t)$ 随时间在空间中的运动规律,得到无人机进行机动动作时的轨迹。

### 2.2 构建优势指标函数

无人机进行机动动作的目的是在与敌机空中格斗时,通过改变与敌机的相对位置、速度和角度等,扩大态势优势或者改变不利态势。因此引入优势指标函数<sup>[13]</sup>来评价无人机做出的机动动作的优劣。其数学表达式为

$$S_t = S_o + S_r + S_e \quad (8)$$

式中, $S_o, S_r$ 和 $S_e$ 分别为角度优势指标函数、距离优势指标函数和能量优势指标函数。

**2.2.1 角度优势指标函数** 影响空战态势优劣的一个重要因素是敌机与UAV的相对几何关系<sup>[14]</sup>,如图1所示。

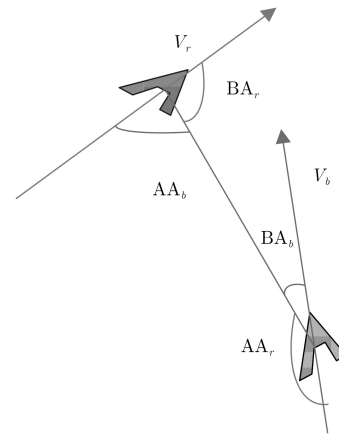


图1 敌机与UAV相对几何关系

图1中,上方代表UAV,下方代表敌机,UAV保持并扩大态势优势可用两点表示:UAV机头指向敌机;UAV位于敌机尾部。则角度优势指标函数可以表示为

$$S_o = \frac{2\pi - (BA_b + AA_b)}{2\pi} \quad (9)$$

$$AA_b + BA_r = AA_r + BA_b = \pi \quad (10)$$

式中, $BA_b$ 为敌机的目标方位角, $AA_b$ 为目标进入角,当UAV正对于敌机尾部,机头朝向敌机时,角度优势指标函数达到最大值1,相反,如果敌机位于UAV尾部,此时角度优势指标函数为最小值0。

**2.2.2 距离优势指标函数** 在UAV与敌机保持安全距离的前提下,相对距离尽量处于UAV的武器射程范围内。因此可以构建距离优势指标函数:

$$S_r = 1 - \left( \frac{a_1 - a_0}{R_e + a_1} \right)^2 e^{-(R_e - a_d)^2 / a_3^2} \quad (11)$$

$$R_e = |R| - R_s \quad (12)$$

式中, $R_e$ 为距离差值, $R$ 为敌机与UAV的实际相对距离, $R_s$ 为UAV需要与敌机保持的安全距离;

$a_d$ 为理想中的 $R_e$ 值,  $a_0$ 是距离优势指标函数在 $x$ 轴的截距,  $a_1$ 表示函数 $S_r$ 的垂直渐近线,  $a_3$ 控制函数在 $R_e > a_d$ 时进行衰减, 以保持最优相对位置。

**2.2.3 能量优势指标函数** 无人机的能量优势指标包括飞行速度优势和飞行高度优势两部分<sup>[15]</sup>。当无人机爬升时, 此时速度能量转化为高度能量, 占据有利位置; 当无人机从高处俯冲时, 此时高度能量转化为速度能量, 所以能量优势指标函数由速度优势和高度优势两部分组成:

$$E_f = H + \frac{v^2}{2g}, f=r, b \quad (13)$$

式中,  $H$ 为飞机高度,  $v$ 为无人机当前速度,  $g$ 为重力加速度,  $r$ 表示红方敌机,  $b$ 表示蓝方UAV, UAV能量优势指标函数为

$$S_e = \left| \frac{E_b - E_r}{E_b} \right| \quad (14)$$

空战过程总的优势指标函数为

$$S_t = k_1 S_o + k_2 S_r + k_3 S_e \quad (15)$$

式中,  $k_1, k_2$ 和 $k_3$ 表示权重系数, 并且有 $k_1 + k_2 + k_3 = 1 (0 < k_1, k_2, k_3 < 1)$ 。根据以上构建的优势指标函数, 无人机在某一时刻以敌我优势指标函数差值作为决策依据, 通过不断累积优势指标函数的差值, 扩大态势优势。

### 3 MUP描述

#### 3.1 近似动态规划描述

动态规划是贝尔曼在上个世纪50年代首次提出来的, 其思想渊源是贝尔曼最优化原理, 主要解决最优化问题, 对于一些比较理想的系统, 比如解决目标值为0的2次效用函数, 通过哈密尔顿-雅可比-贝尔曼(HJB)方程可以获得精确的控制率<sup>[16]</sup>。

#### 3.2 MUP机动决策方法

**3.2.1 人工势场模型** 人工势场通过虚拟的引力场和斥力场。空战中假设UAV的位置为 $(x_b, y_b, z_b)$ , 其引力场对应的范围由武器可发射角度 $\alpha$ 和武器攻击距离 $l_b$ 决定, 表示为

$$f_b = \frac{1}{2} \alpha l_b \quad (16)$$

斥力场由敌机位置 $(x_r, y_r, z_r)$ , 敌机的武器可发射角度 $\beta$ 和攻击距离 $l_r$ 决定, 表示为

$$f_r = \frac{1}{2} \alpha l_r \quad (17)$$

合势场为

$$f_t = -\lambda f_b + (1 - \lambda) f_r, 0 < \lambda < 1 \quad (18)$$

式中,  $\lambda$ 为调节系数, 根据作战目的的不同调节 $\lambda$ 的大小。

**3.2.2 基本蚁狮优化算法** 蚁狮优化算法<sup>[17]</sup>是一种新的仿生智能优化算法。通过模拟自然界中蚁狮捕捉蚂蚁的行为, 实现对规划空间的搜索。在数学实现方面, 算法中目标函数的大小表示陷阱位置的优劣。蚂蚁的随机游走的数学表示为

$$\mathbf{X}(t) = [0, \text{cumsum}(2r(t_1) - 1), \text{cumsum}(2r(t_2) - 1), \dots, \text{cumsum}(2r(t_n) - 1)] \quad (19)$$

$\text{cumsum}$ 为计算数组累,  $n$ 表示蚂蚁的数量。  $t$ 表示当前的迭代次数;  $r(t)$ 是一个随机函数。

$$r(t) = \begin{cases} 1, & \text{rand} > 0.5 \\ 0, & \text{rand} \leq 0.5 \end{cases} \quad (20)$$

通过适应度函数来评价蚂蚁位置的优劣, 蚂蚁的适应度值保存在如式(21)所示矩阵函数矩阵:

$$\mathbf{M}_O = \begin{bmatrix} f([A_{1,1} & A_{1,2} & \dots & A_{1,d}]) \\ f([A_{2,1} & A_{2,2} & \dots & A_{2,d}]) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f([A_{n,1} & A_{n,2} & \dots & A_{n,d}]) \end{bmatrix} \quad (21)$$

蚁狮的数量与蚂蚁一致, 其位置和适应度函数用式(22)和式(23)矩阵来表示:

$$\mathbf{M}_A = \begin{bmatrix} AL_{1,1} & AL_{1,2} & \dots & AL_{1,d} \\ AL_{2,1} & AL_{2,2} & \dots & AL_{2,d} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ AL_{n,1} & AL_{n,2} & \dots & AL_{n,d} \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\mathbf{M}_L = \begin{bmatrix} f([AL_{1,1} & AL_{1,2} & \dots & AL_{1,d}]) \\ f([AL_{2,1} & AL_{2,2} & \dots & AL_{2,d}]) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f([AL_{n,1} & AL_{n,2} & \dots & AL_{n,d}]) \end{bmatrix} \quad (23)$$

$d$ 表示变量的维度,  $AL_{i,j}$ 代表第 $i$ 只蚁狮在第 $j$ 维上的位置。通过适应度函数 $\mathbf{M}_O$ 评价蚁狮位置。

**3.2.3 算法改进** 基本的蚁狮算法具有较强的寻优特性, 算法的结构也比较合理, 空战机动决策涉及参数多, 计算复杂, 为进一步提高算法的能力, 对算法进行了以下改进:

(1) 蚂蚁游走方式改进: 相比于随机搜索, 混沌搜索具有更强的遍历特性, 在对3维空间进行搜索时避免重复计算, 可以提高计算效率。在蚂蚁的游走步长中引入混沌调节因子:

$$x_{n+1} = 4x_n(1 - x_n) \quad (24)$$

$x_n$ 是0到1之间的一个随机数。式(20)替换为

$$\mathbf{X}_i^t = x_{n+1} \frac{(\mathbf{X}_i^t - a_i) \cdot (b_i - c_i^t)}{d_i^t - a_i} + c_i \quad (25)$$

(2) 蚁狮开发方式改进: 蚁狮的作用是在较优解的附近寻找更优解, 因此在算法的前期步长要大

一些，在算法的后期步长要小一些，在基本算法中蚁狮的游走步长中引入反调节因子  $\frac{mc}{100e^{lg(t)}}$ ，公式为

$$R_E^t = R_E^t + (2rand - 1) \frac{mc}{100e^{lg(t)}} \quad (26)$$

式中，mc为最大循环次数。随着迭代次数的增加，反调节因子由  $\frac{mc}{100}$  递减至0.01，实现了步长的自我调节。

将整个空战的过程采用近似动态规划的方法分解，每个分规划阶段采用人工势场引导下的蚁狮优化算法寻找最优机动决策，满足空战机动决策实时性的要求。

### 4 仿真验证

仿真软件采用MATLAB2012和Visual C++ 6.0开发。为了验证本文提出的空战机动决策方法的有效性，在不同的战场场景下进行仿真，并通过与专家系统得到的决策轨迹结果进行对比分析。仿真条件如表1所示，设置蚁狮算法中的种群数量为10，维度为10，最大迭代次数为80。在两种初始条件下进行实验对比，得到的空战机动决策轨迹和UAV姿态变化如图2和图3所示，其中UAV1为专家系统法生成的机动决策轨迹，UAV2为MUP生成的机动决策轨迹。

#### 4.1 仿真1

图2(a)是UAV在空战初始时，占据有利态势的

表1 仿真实验初始参数

	类型	x(m)	y(m)	z(m)	v(m/s)	$\theta(^{\circ})$	$\psi(^{\circ})$
优势态势	无人机	5000	15000	5000	300	15	6
	敌机	8000	10000	5000	270	10	20
劣势态势	无人机	6000	1000	6000	300	22	-15
	敌机	2000	10000	6000	300	-9	12

情况下，分别由本文方法和专家系统法得到的机动决策轨迹。空战初始阶段，UAV位于敌机尾部，属于尾追状态，有利于UAV发射武器，当敌机在4s后进行机动规避，此时专家系统失效。由图2(b)分析得出，在敌机做防御性机动动作之后，UAV1态势优势值下降。UAV2的态势优势高于UAV1的态势优势。图2(c)、图2(d)是两种方法的航迹倾角和航迹方位角变化曲线对比，采用近似动态规划的方法UAV的机动变化幅度更平缓。

#### 4.2 仿真2

图3(a)中，敌机机头正对UAV侧身，处于不利态势。专家系统法能够在开始劣势态势下选择合适的机动动作进行规避，其态势优势值不能够保持增加。UAV1的态势优势值只能稳定在0.5左右。

采用MUP方法，UAV2在向右转弯后，敌机左转弯进攻，3s时UAV2向左机动，通过变向机动改变相对位置，提升态势优势。图3(b)UAV2的态势优势不断增加，验证了在不利态势下机动决策该方

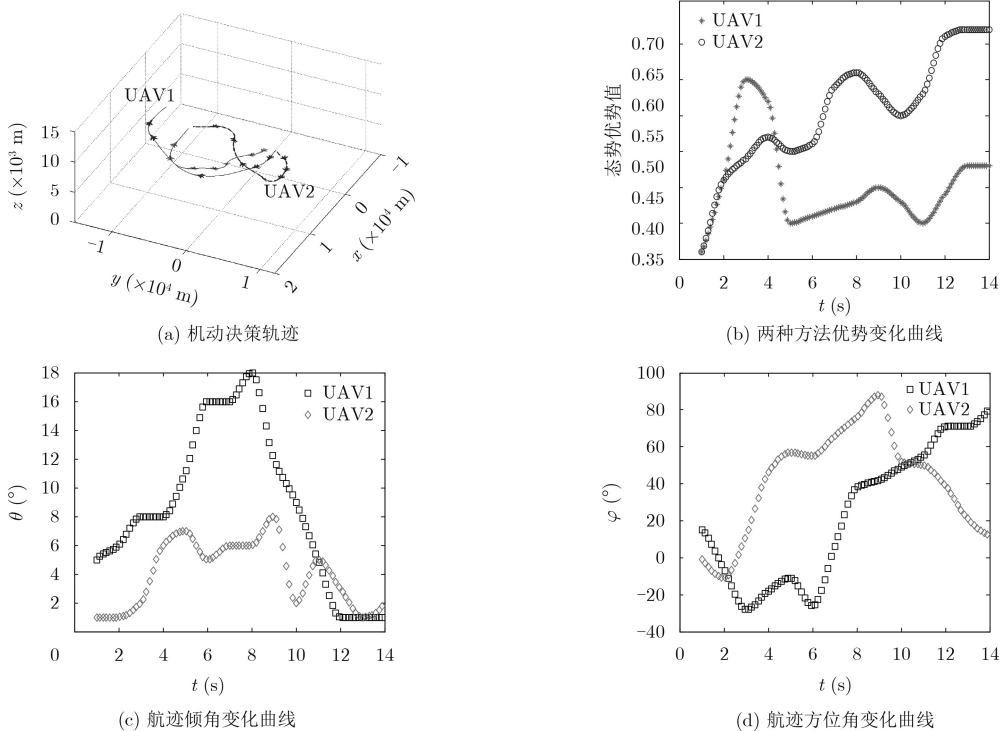


图2 初始优势态势下机动决策结果

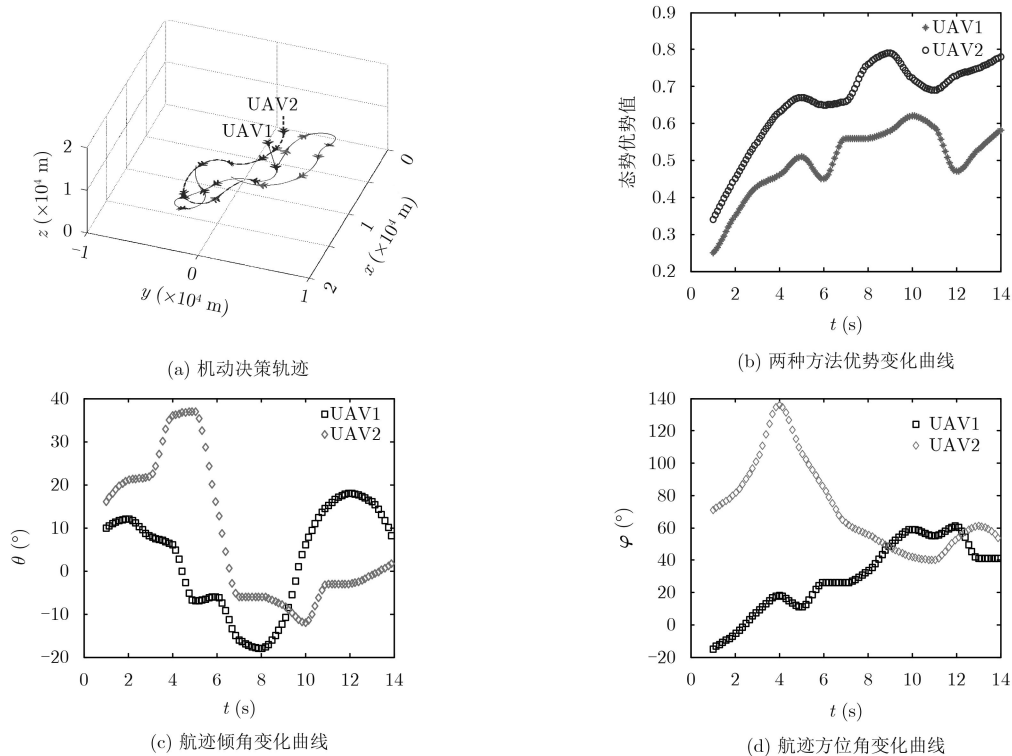


图3 初始劣势态势下机动决策结果

法的有效性。分析图3(c)，图3(d)，在躲避敌机进攻时，UAV2在5 s时进行大机动，在不利态势下对敌机实现了摆脱。

空战过程本身就存在高度复杂性和动态性，决策过程依赖双方的状态参数，参数越多越接近实际空战模型，但是算法复杂度将会呈现指数型增加，采用近似动态规划的方法，结合改进后蚁狮优化算法，通过在不同场景中对空战进行模拟，验证了所提方法相对于专家系统法的优越性。

## 5 结束语

本文提出了一种近似动态规划的空战机动决策方法，解决了机动决策多参数、非线性优化问题。主要创新有以下几点：(1)将复杂度高，耦合性强的空战决策问题转换为近似动态规划问题；(2)通过构建人工势场对搜索空间进行了有效的裁剪，避免了无用搜索；(3)对蚁狮优化算法的寻优策略进行了改进，通过混沌因子提高了最优机动控制量的搜索效率。在同一空战场景下，通过与专家系统法进行对比，仿真结果表明，MUP决策的机动轨迹优于专家系统法决策的机动轨迹，满足UAV空战机动决策的要求。本文研究的对象为一对一空战情形，在未来的工作中，多无人机空战时协同机动决策将作为研究的重点。

## 参考文献

- [1] VIRTANEN K and RAIIVIO T. Modeling pilot's sequential maneuvering decisions by a multistage influence diagram[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2012, 27(4): 665–677. doi: [10.2514/1.11167](https://doi.org/10.2514/1.11167).
- [2] CASBEER D W, GARCIA E, and PACTER M. The target differential game with two defenders[J]. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2017, 89: 87–106. doi: [10.1007/s10846-017-0563-0](https://doi.org/10.1007/s10846-017-0563-0).
- [3] SEO J and KIM Y. Differential geometry based collision avoidance guidance for multiple UAVs[J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 2013, 46(19): 113–118. doi: [10.3182/20130902-5-DE-2040.00061](https://doi.org/10.3182/20130902-5-DE-2040.00061).
- [4] 傅莉, 王晓光. 无人战机近距离空战微分对策建模研究[J]. *兵工学报*, 2012, 10(10): 1210–1216.  
FU Li and WANG Xiaoguang. Research on close air combat modeling of differential games for unmanned combat air vehicles[J]. *Acta Armamentarii*, 2012, 10(10): 1210–1216.
- [5] 傅莉, 谢怀福. 基于滚动时域的无人机空战决策专家系统[J]. *北京航空航天大学学报*, 2015, 41(11): 1994–1999. doi: [10.13700/j.bn.1001-5965.2014.0756](https://doi.org/10.13700/j.bn.1001-5965.2014.0756).  
FU Li and XIE Huaifu. An UAV air-combat decision expert system based on receding horizon control[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2015, 41(11): 1994–1999. doi: [10.13700/j.bn.1001-5965.2014.0756](https://doi.org/10.13700/j.bn.1001-5965.2014.0756).
- [6] XIAO Lizhi, SUN Dexiang, and LIU Yuwei. A combined method based on expert system and BP neural network for UAV systems fault diagnosis[C]. 2010 International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence, Piscataway, USA, 2010: 3–6. doi: [10.1109/](https://doi.org/10.1109/)

- AICI.2010.242.
- [7] 张涛, 于雷. 基于混合算法的空战机动决策[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(7): 1445–1450.  
ZHANG Tao and YU Lei. Decision-making for air combat maneuvering based on hybrid algorithm[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2013, 35(7): 1445–1450.
- [8] NICHOLAS E, DAVID C, COREY S, *et al.* Genetic fuzzy based artificial intelligence for unmanned combat aerial vehicle control in simulated air combat missions[J]. *Journal of Defense Management*, 2016, 6(1): 1–7. doi: [10.4172/2167-0374.1000144](https://doi.org/10.4172/2167-0374.1000144).
- [9] 周思羽, 吴文海, 孔繁峨, 等. 基于随机决策准则的改进多级影响图机动决策方法[J]. 北京理工大学学报, 2013, 33(3): 296–301. doi: [10.3969/j.issn.1001-0645.2013.03.017](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-0645.2013.03.017).  
ZHOU Siyu, WU Wenhai, and KONG Fane, *et al.* Improved multistage influence diagram maneuvering decision method based on stochastic decision criterions[J]. *Transaction of Beijing Institute of Technology*, 2013, 33(3): 296–301. doi: [10.3969/j.issn.1001-0645.2013.03.017](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-0645.2013.03.017).
- [10] KAI V and RAIVIO T. An influence diagram approach to one on one air combat[J]. *International Symposium on Differential Games and Applications*, 2002, 14(26): 8–11. doi: [10.3182/2002-0902-5-2300.00061](https://doi.org/10.3182/2002-0902-5-2300.00061).
- [11] MCGREW J S and HOW J P. Air-combat strategy using approximate dynamic programming[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2010, 33(5): 1641–1654. doi: [10.2514/1.46815](https://doi.org/10.2514/1.46815).
- [12] MESMER B L and BLOEBAUM C L. Modeling decision and game theory based pedestrian velocity vector decisions with interacting individuals[J]. *Safety Science*, 2016, 87: 116–130. doi: [10.1016/j.ssci.2016.03.018](https://doi.org/10.1016/j.ssci.2016.03.018).
- [13] BREITNER M H, PESCH H J, and GRIMM W. Complex differential games of pursuit- evasion type with stateconstraints, part2: Numerical computation of optimal open-loop strategies[J]. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 1993, 78(3): 419–441. doi: [10.1007/BF00939876](https://doi.org/10.1007/BF00939876).
- [14] DIETTERICH T G. Hierarchical reinforcement learning with the MAXQ value function decomposition[J]. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 1999, 13(1): 227–303. doi: [10.3685/CS1999-03](https://doi.org/10.3685/CS1999-03).
- [15] ANDREY P and TAL S. Cooperative differential games strategies for active aircraft protection from a homing missile[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2015, 34(3): 761–773. doi: [10.2514/1.51611](https://doi.org/10.2514/1.51611).
- [16] 张煜, 王楠, 陈璟. 空地多目标攻击中制导炸弹可投放区计算研究[J]. 兵工学报, 2011, 32(12): 1474–1480.  
ZHANG Yu, WANG Nan, and CHEN Jing. Research on launch acceptable region for guided bombs in air to ground multi target attack[J]. *Acta Armamentarii*, 2011, 32(12): 1474–1480.
- [17] MIRJALILI S. The ant lion optimizer[J]. *Advance Engineering Software*, 2015, 83(C): 80–98. doi: [10.1016/j.advengsoft.2015.01.010](https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2015.01.010).
- 黄长强: 男, 1961年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为无人机总体设计与技术.  
赵克新: 男, 1992年生, 硕士生, 研究方向为无人机武器系统设计.  
韩邦杰: 男, 1982年生, 军代表, 研究方向为机载武器系统设计.  
魏政磊: 男, 1991年生, 博士生, 研究方向为无人机武器系统设计.