

# 基于三支理论的无人机对地攻击认知决策方法

鲁鸿轩, 魏瑞轩

(空军工程大学航空工程学院, 西安, 710038)

**摘要** 针对无人机对地攻击过程的自主化问题,为使无人机能够有效规避突发的地面火力威胁,研究借鉴人类智能的认知决策方法。通过分析无人机的对地攻击过程,建立了对地攻击模型,将无人机对地攻击过程中的机动行为归纳为 3 种方式,运用描述人脑认知思维的三支决策理论,提出了一种基于三支决策的无人机对地攻击认知决策方法。通过与其他类自主攻击决策方法的对比分析和仿真实验表明,提出的方法能使无人机合理规避攻击过程中突然出现的防空火力单元威胁。

**关键词** 无人机;自主对地攻击;三支决策

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2018.05.001

**中图分类号** V271,E926 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2018)05-0001-06

## Research on the Cognitive Decision-Making Methods Based on Unmanned Aerial Vehicle Making an Attack on Ground

LU Hongxuan, WEI Ruixuan

(Aeronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

**Abstract:** In order to enable the UAV to effectively avoid the sudden threat of the ground fire, this paper studies and uses the cognitive decision of human intelligence. By analyzing the ground attack process of UAVs, a ground attack model is established, and the maneuver behavior of UAVs during ground attack is summarized into three ways. The three-way decision theory is to utilize the cognitive thinking of human brain for describing. A three-way decision-making method for cognitive decision-making of UAV ground attack is presented. Through comparative analysis and simulation experiments with other types of autonomous attack decision-making methods, the method enables the UAV to reasonably evade the threat of an air defense fire unit that suddenly appears during the attack process.

**Key words:** UAV; autonomous ground attack; three-way decision theories

无人机对地攻击的操控方式目前仍然是远程手控模式,即在无人机发现目标后,由地面控制站中的无人机操控员通过操控设备手控无人机完成对目标的跟踪、瞄准和锁定,然后发射导弹实施打击。为提高攻击过程的自主化,减轻操控员操作负荷,人们开

始积极研究面向无人机自主攻击的决策方法。自主决策研究是通过设计导引律或攻击轨迹来实现攻击过程的自主化。文献[1]通过设计导引律实现无人机自主对地攻击过程;文献[2]通过建立威胁约束条件和最优控制目标函数,实现了飞行器轨迹规划和

**收稿日期:** 2018-02-27

**基金项目:** 国家自然科学基金(61573373)

**作者简介:** 鲁鸿轩(1994—),男,湖南长沙人,硕士生,主要从事无人机自主对地攻击方法研究。E-mail: 654114390@qq.com

**引用格式:** 鲁鸿轩,魏瑞轩.基于三支理论的无人机对地攻击认知决策方法[J].空军工程大学学报(自然科学版),2018,19(5):1-6. LU Hongxuan, WEI Ruixuan. Research on the Cognitive Decision-Making Methods Based on Unmanned Aerial Vehicle Making an Attack on Ground[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2018, 19(5): 1-6.

飞行控制;文献[3~5]运用最优控制思想的伪谱法将无人机动力学约束整合到问题求解框架中,使得无人机轨迹规划的可飞性和实用性得到提高;文献[6]设计了基于事件触发的轨迹滚动规划方案,并运用粒子群算法进行寻优得出攻击轨迹决策。

以上方法虽然可以使无人机自主完成攻击占位,但对于突然出现的地面火力威胁难以做到及时有效规避。对于突发事件的应急处理,部分学者已在研究将人类的认知智能引入到无人机的决策方法中,文献[7]将认知发育特性引入无人机的防碰撞决策;文献[8]运用模糊认知决策方法来解决多无人机协同搜索的问题。认知决策体现了人类处理复杂问题的最高层次智能。受此启发,本文结合无人机对地攻击过程中威胁规避的特点,运用反映人脑认知思维的三支决策原理,研究一种面向无人机对地攻击的认知决策方法。

## 1 UAV 自主对地攻击决策问题

一个完整的 UAV 对地攻击任务是从基地起飞,经过巡航阶段到达任务区以后,开始搜索探测目标。在发现地面目标后,操作员开始对目标进行跟踪、瞄准,操作 UAV 进入激光制导导弹可发射区后发射导弹。

整个任务过程中,发现目标前的起飞、巡航、搜索阶段以及导弹发射后的返航阶段已经实现了自主化。但发现目标后到进入激光导弹可发射区这一阶段的攻击过程目前完全是操作员手动操作。从发现目标到发射导弹这一阶段的攻击过程我们可以理解为 UAV 的飞行瞄准过程,本文研究的自主攻击决策方法主要针对飞行瞄准这一攻击过程。

对于上述手动操作的攻击过程,目前的自主化方法主要是依靠预先设计的导引律和已发生的场景案例设定规则实现。但是这些自主化方法无法快速有效处理突发的地面威胁这一未知不确定因素。突破口是借鉴人类的高级认知能力,让机器在自主的同时也拥有处理突发问题的能力。

## 2 UAV 对地自主攻击模型

### 2.1 UAV 运动模型的建立

为了简单直观地建立 UAV 的动力学模型,本文假设 UAV 为一个刚体,即忽略 UAV 弹性的影响,且地球是惯性参考系,忽略地球自转与公转以及地球曲率带来的影响<sup>[9]</sup>。

地面坐标系下 UAV 的运动学方程组为:

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos \theta \cos \varphi \\ \dot{y} = v \cos \theta \sin \varphi \\ \dot{z} = v \sin \theta \end{cases} \quad (1)$$

航迹坐标轴系下 UAV 的动力学方程组为:

$$\begin{cases} \dot{v} = \frac{T \cos \alpha - D}{m} - g \sin \theta \\ \dot{\varphi} = \frac{(L + T \sin \alpha) \sin \gamma}{m v \cos \theta} \\ \dot{\theta} = \frac{(L + T \sin \alpha) \cos \gamma}{m v} - \frac{g}{v} \cos \theta \end{cases} \quad (2)$$

式中:\$(x, y, z)\$为 UAV 的位置;\$v\$为 UAV 的飞行速度;\$\alpha\$为攻角;\$\gamma\$为滚转角;\$\theta\$为航迹角;\$\varphi\$为航向角;\$T\$为 UAV 的推力;\$D\$为阻力;\$L\$为升力;\$m\$为 UAV 的质量;\$g\$为重力加速度。

### 2.2 UAV 对地攻击基本行为方式

UAV 攻击过程中的典型机动可以归纳为 3 种方式,即俯冲、跃升、水平转弯,为了有效地攻击地面目标,攻击方式的选择主要考虑因素有:UAV 当前的飞行状态、与地面目标的相对位置、地面目标类型、大小、形状和要害部位等。

俯冲是用来迅速降低 UAV 飞行高度,将其高度势能转换为动能的攻击方式,见图 1。俯冲由 3 个阶段构成,即进入直线飞行和退出阶段。俯冲过程中 UAV 的高度、速度都在变化,因此俯冲是一种不稳定的飞行状态,但是它具有较好的目标视野,一定程度上可以扩大 UAV 攻击范围,有利于地面目标瞄准,同时还能增加杀伤效果。另外,俯冲还可以提高飞行速度,提升了 UAV 的突防概率。

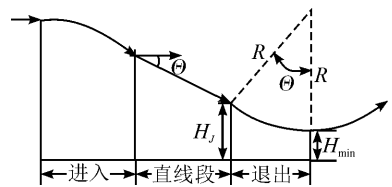


图 1 俯冲攻击示意图

Fig. 1 Diagram of dive attack

进行俯冲攻击时必须保证拉起的高度大于最小安全高度 \$H\_{min}\$,为了保证这一点可以得出相应的预警高度为:

$$H_j = H_{min} + R(1 - \cos \theta) \quad (3)$$

式中:\$R\$为拉起半径;\$\theta\$为俯冲角度。

跃升是 UAV 用来迅速爬升,将其动能转化为高度势能的攻击方式,见图 2。跃升同俯冲一样,也由 3 个阶段构成。跃升攻击有利于对地面目标进行较大的垂直分量攻击,增强对地面目标的毁伤效能,同时较高的攻击高度可以有效躲避防空导弹武器系统的覆盖。该方法通常用于低空隐蔽突防攻击和攻击完成后的脱离过程。实施跃升攻击需要满足的条

件是进入时的目标观测角  $\theta_{JR}$  和发射武器时的目标观测角  $\theta_{FS}$  要小于探测系统的视场角。

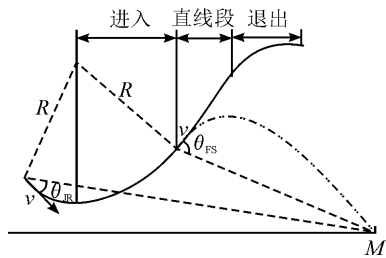


图 2 跃升攻击示意图

Fig. 2 Diagram of jump attack

水平转弯攻击是一种改变 UAV 飞行航向的攻击方式,实施该攻击方式时 UAV 的飞行高度基本保持不变。地面目标观测角有较大的偏航角度,此时需要通过水平转弯的攻击方式从而实现对地面目标的方向瞄准。水平转弯机动分为进入转弯、稳定转弯和退出转弯 3 个阶段,见图 3。图中  $L$  为升力,  $G$  为重力,  $\gamma$  为滚转角。

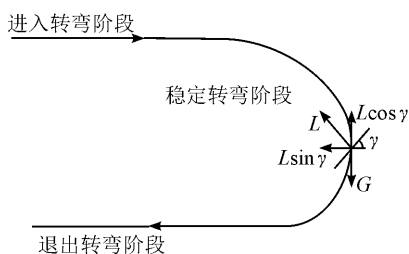


图 3 水平转弯示意图

Fig. 3 Diagram of level turn

### 2.3 UAV 激光制导导弹可发射区

在 UAV 使用激光制导导弹对地攻击过程中,为了充分发挥导弹的攻击效果,需要选择合适的攻击行为方式和发射时机。通常来说发射时机是根据激光制导导弹可发射区来确定的,也就是说 UAV 在激光制导导弹可发射区内发射可以保证激光制导导弹以一定杀伤概率攻击地面目标。

一般的激光制导导弹的可发射区受到两方面的约束:①最小和最大允许发射距离:这一因素决定了可发射区的内外边界;②导弹的最大观测角和最大离轴角:这一因素决定了可发射区的侧边界。

根据约束条件简化后的可发射区数学模型为:

距离瞄准约束:

$$\begin{cases} R_{0 \min}(H, v, \theta, \varphi, R_{d \max}, R_{d \min}, \phi_{\max}) \leq R_0 \\ R_0 \leq R_{0 \max}(H, v, \theta, \varphi, R_{d \max}, R_{d \min}, \phi_{\max}) \end{cases} \quad (4)$$

方向瞄准约束:

$$\begin{cases} \phi_0 \min(H, v, \theta, \varphi, R_{d \max}, R_{d \min}, \phi_{\max}) \leq \phi_0 \\ \phi_0 \leq \phi_0 \max(H, v, \theta, \varphi, R_{d \max}, R_{d \min}, \phi_{\max}) \end{cases} \quad (5)$$

安全退出高度约束:

$$H_{\min} \leq H \quad (6)$$

式中:  $R_{d \max}$ ,  $R_{d \min}$  分别表示最大和最小允许发射距

离;  $\phi_{\max}$  表示导弹最大离轴角。

## 3 UAV 自主对地攻击认知决策方法

### 3.1 三支决策理论

对于较为简单情形下的认知决策活动,三支决策理论<sup>[10]</sup>给予了较好的描述。

人与机器的决策最大的区别是机器决策结果是 0 或 1、正或负、对或错,机器决策的二支性决定了机器很难处理或者描述复杂问题中的不确定性。人类基于认知过程的决策则不像机器一样死板,对于复杂问题或进行直觉判断或进行经验推理,甚至会因为信息不足延迟决策或不决策,这样的人类认知决策的结果是具有三支性的,可以较好地处理不确定问题。加拿大里加纳大学的姚一豫教授基于粗糙集和决策粗糙集建立了三支决策理论<sup>[11-12]</sup>,提供了人类三支性决策的语意解释。这种拟人思维的三支决策理论可以更好地处理复杂问题中的不确定性,合理降低决策风险。

文献[13]通过三支决策理论中延迟决策行为转化从而实现了代价与风险的控制。文献[14]通过三支决策构建了 1 个数据分类器,实现了多个数据集上更高精度的分类且控制了误分类的代价。综合三支决策理论的优点及目前的应用,把该决策理论用于无人机对地攻击中能更加合理地对态势信息判断分类,同时可以对风险和代价进行控制,有利于无人机对环境态势的认知,从而做出更好的决策。

### 3.2 基于三支决策的无人机攻击决策方法

考虑有 2 类状态的状态集  $\Omega = \{s_1, s_2\}$  分别表示 UAV 的状态为有威胁  $s_1$  和无威胁  $s_2$ 。给定决策集  $A = \{a_P, a_B, a_N\}$ , 分别表示无人机  $x$  做出 POS, BND 和 NEG 3 种决策方式。通过前文对 UAV 3 种基本攻击行为方式优势和风险的分析,令俯冲、水平转弯和跃升这 3 种基本攻击行为方式作为三支决策中 POS, BNG 和 NEG 3 种决策方式。

由于实施不同的决策会产生不同的损失,记  $\lambda_{P1}, \lambda_{B1}, \lambda_{N1}$  分别表示当无人机有威胁  $x \in S_1$  时,实施  $a_P, a_B, a_N$  3 种决策时的损失函数值;  $\lambda_{P2}, \lambda_{B2}, \lambda_{N2}$  分别表示当无人机无威胁  $x \in S_2$  时,实施  $a_P, a_B, a_N$  3 种决策时的损失函数值。根据不同的决策损失函数值和最小风险 Bayes 决策方法可分别求出实施 3 种决策  $a_P, a_B, a_N$  相应的期望代价。

$$C(a_P | X) = \lambda_{P1} P(s_1 | X) + \lambda_{P2} P(s_2 | X) \quad (7)$$

$$C(a_B | X) = \lambda_{B1} P(s_1 | X) + \lambda_{B2} P(s_2 | X) \quad (8)$$

$$C(a_N | X) = \lambda_{N1} P(s_1 | N) + \lambda_{N2} P(s_2 | X) \quad (9)$$

采取最小风险 Bayes 决策规则,采取期望代价值最小的基本攻击行为方式作为决策方案,可以得出以下 3 条规则:

(P):若  $C(a_P | X) \leq C(a_B | X)$  且  $C(a_P | X) \leq C(a_N | X)$ , 则  $a_P = \text{POS}$ (俯冲);

(B):若  $C(a_B | X) \leq C(a_P | X)$  且  $C(a_B | X) \leq C(a_N | X)$ , 则  $a_B = \text{BND}$ (水平转弯);

(N):若  $C(a_N | X) \leq C(a_P | X)$  且  $C(a_N | X) \leq C(a_B | X)$ , 则  $a_N = \text{NEG}$ (跃升)

对于威胁状态的信息可以通过 UAV 机载雷达探测威胁源的概率  $p_i$  来表示,当雷达发现威胁的概率为  $p_i$  时,则可等价于有威胁的先验状态概率  $p(s_2 | X) = p_i$ ,无威胁时的先验状态概率  $p(s_1 | X) = 1 - p_i$ 。

另外,根据状态集的互补关系可知:

$$p(s_1 | X) + p(s_2 | X) = 1 \quad (10)$$

根据上述关系式,将式(10)代入式(7)~(9),可得出含有阈值形式的三条决策规则,即:

(P):若  $p(s_1 | X) \leq \gamma$  且  $p(s_1 | X) \leq \alpha$ , 则  $a_P = \text{POS}$ (俯冲);

(B):若  $p(s_1 | X) \leq \beta$  且  $p(s_1 | X) \geq \alpha$ , 则  $a_B = \text{BND}$ (水平转弯);

(N):若  $p(s_1 | X) \geq \beta$  且  $p(s_1 | X) \geq \gamma$ , 则  $a_N = \text{NEG}$ (跃升)。

其中,阈值  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$  分别可由以下等式计算求得:

$$\alpha = \frac{\lambda_{P2} - \lambda_{B2}}{(\lambda_{P2} - \lambda_{B2}) + (\lambda_{B1} - \lambda_{P1})} \quad (11)$$

$$\beta = \frac{\lambda_{B2} - \lambda_{N2}}{(\lambda_{B2} - \lambda_{N2}) + (\lambda_{N1} - \lambda_{B1})} \quad (12)$$

$$\gamma = \frac{\lambda_{P2} - \lambda_{N2}}{(\lambda_{P2} - \lambda_{N2}) + (\lambda_{N1} - \lambda_{P1})} \quad (13)$$

综合上述分析,基于三支决策的无人机对地攻击认知决策方法实现流程见图 4。

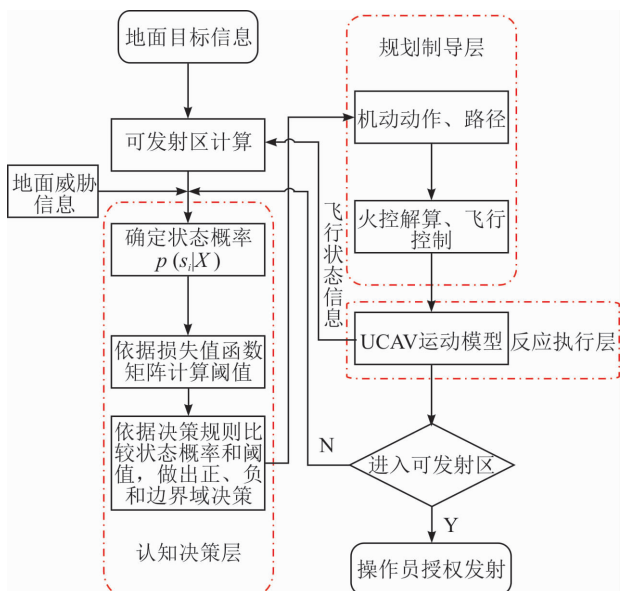


图 4 自主对地攻击流程

Fig. 4 Process of autonomous ground attack

三支决策中,决策行为不仅分为正域和负域,而

且还分为边界域,这样就产生了一种中间决策行为,或称之为延迟决策行为。这种中间决策行为可在决策信息未知不确定的情况下比错误决策行为的代价少,这就是人类认知过程中处理未知不确定问题时常用的决策思维方式,正是人类具有的这种高级决策功能使得人类在信息不全或是风险过大的情况下不至于做出正或负这样绝对的决策,良好的处理了不确定因素。因此运用这种拟人的思维方式的无人机认知决策方法可以较好地处理 UAV 对地攻击时的突发地面威胁这类未知不确定因数。

## 4 对地攻击仿真分析

### 4.1 仿真场景及规则设计

为了突出自主飞行瞄准这一攻击过程,仿真从 UAV 发现目标时刻开始,到 UAV 进入可攻击区发射激光导弹时刻终止。仿真实验用于检验本文方法对于自主攻击决策的有效性。假设 UAV 要攻击的地面目标在北偏东  $75^\circ$  方向 15 km 处,UAV 的速度为  $v=60$  m/s,高度  $H=1.2$  km,航向为正北。某个时刻,在 UAV 北偏东  $25^\circ$  方向 4.5 km 处突然出现一个野战防空火力单元,威胁半径 1 km。

对于攻击决策方法的对比分析,考虑到当前关于无人机自主攻击决策的研究主要是基于导引律或攻击轨迹设计的方法。其中,通过在线规划设计攻击轨迹的方法需要提前一定的时间预知前方飞行航路上的所有信息,包括存在防空威胁的区域。对于即时出现的机动式野战防空火力单元来说,这种需要时间提前量的预知要求是较为苛刻的。因此,本节仅考虑与文献[1]中基于导引律设计的攻击轨迹决策方法进行对比分析。

仿真实验中,为了体现公平性,攻击过程各基本行为方式的损失值按照文献[1]中所给出的值进行设定,见表 1。

表 1 三支决策损失矩阵

Tab. 1 Three-way decision loss matrix

决策	状态	损失值
POS	$s_1$	$\lambda_{P1} = 0.1$
	$s_2$	$\lambda_{P2} = 0.9$
BND	$s_1$	$\lambda_{B1} = 0.3$
	$s_2$	$\lambda_{B2} = 0.8$
NEG	$s_1$	$\lambda_{N1} = 0.4$
	$s_2$	$\lambda_{N2} = 0.2$

从表 1 可以看出,在无威胁下,俯冲和水平转弯的损失值低,实行这些攻击决策生存率高,在有威胁情况下这些攻击决策的损失值高,而跃升攻击在此情况下损失值则很低。该数据与前文中 3 种攻击行

为方式的优势和风险分析一致。

根据上文算法设计原理,可以根据损失矩阵确定如下的决策规则:

- (P):若  $p_i \leq 0.14$  则  $a_p = \text{POS}$ ;
- (B):若  $0.14 \leq p_i \leq 0.67$  则  $a_p = \text{BND}$ ;
- (N):若  $p_i \geq 0.67$  则  $a_p = \text{NEG}$ 。

上述决策规则实际上描述了无人机在目标打击阶段的攻击策略,即:当威胁源存在概率小于阈值下限  $\alpha=0.14$  时,无人机可以实施俯冲攻击以最大化打击效果;当威胁源存在概率高于阈值上限  $\beta=0.67$  时,无人机应首先实施跃升以规避可能的威胁攻击,然后再选择合适时机对目标进行攻击;而当威胁源存在概率处于中间水平时,此时不能确定是否存在威胁,无人机应首先实施水平转弯,改变位置以获得更多信息来判断是否有潜在威胁,然后进一步确定后续行动。这样的攻击策略,可以保证无人机在攻击过程中能够及时规避突然出现的地面威胁,从而取得最好作战效果。

#### 4.2 仿真结果分析

根据前文所述的 UAV 运动模型、攻击行为方式、激光制导武器可发射区模型,在相同的场景下对 2 种方法进行比较,仿真结果见图 5~10。

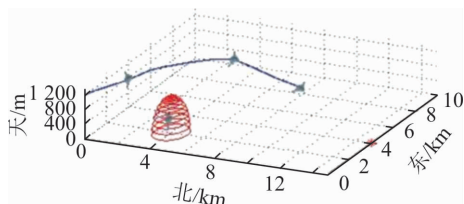


图 5 基于认知决策的对地攻击三维轨迹

Fig. 5 Three-dimensional trajectory of ground attack based on cognitive decision-making

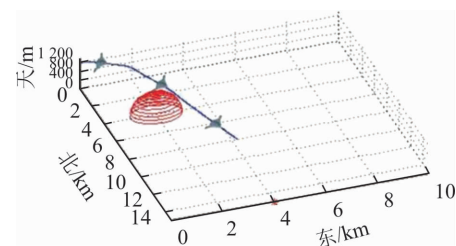


图 6 基于引导率决策的对地攻击三维轨迹

Fig. 6 Three-dimensional trajectory of ground attack based on guidance law decision-making

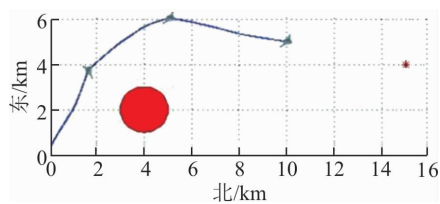


图 7 基于认知决策的对地攻击平面轨迹

Fig. 7 Attack plane trajectory of ground attack based on cognitive decision-making

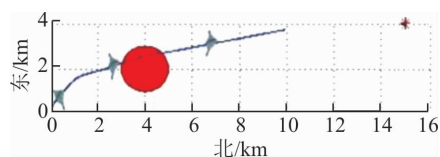


图 8 基于引导率决策的对地攻击平面轨迹

Fig. 8 Attack plane trajectory of ground attack based on guidance law decision-making

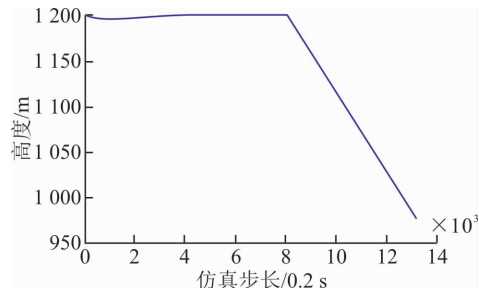


图 9 基于认知决策的攻击过程高度变化

Fig. 9 Altitude variation of ground attack based on cognitive decision-making

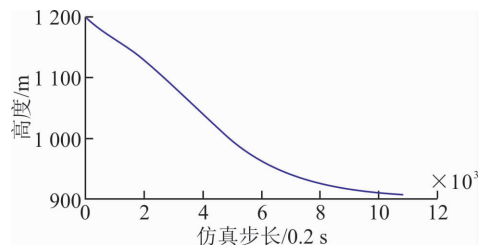


图 10 基于引导率决策的攻击过程高度变化

Fig. 10 Altitude variation of ground attack based on guidance law decision-making

从图 5 和图 7 中可以看出 UAV 先在传统的自主攻击轨迹上行进,行进过程中发现了地面威胁。当威胁概率变大时,认知决策改变了攻击行为方式,实施了机动转弯,合理避开地面威胁。反观图 6 和图 8 基于引导律决策方法的 UAV 却不能实时规避威胁,只是按照预定的导引律进入导弹可攻击区。

从图 9 和图 10 可以看出,认知决策在威胁概率减小后又改变了攻击行为方式,远离威胁后实施了俯冲攻击,快速自主地进入了导弹可发射区。而导引律决策仍是按照预先设计的导引律机械地从一开始就俯冲降低高度。

仿真实验分析表明,基于导引律设计的攻击决策是一类基于攻击初始状态设计的攻击策略,无法有效考虑在攻击过程中出现的突发威胁。而本文方法运用三支决策理论,借鉴人类的认知原理进行无人机的攻击决策,对于规避突然出现的突发威胁,确保无人机完成有效攻击具有较好的适应性。

## 5 结语

通过分析 UAV 对地攻击过程中 3 种行为方式

的优势和风险,运用拟人思维的三支决策理论提出了 UAV 对地攻击认知决策方法,并与基于引导律的自主攻击决策方法进行实验比较,验证了认知决策方法在处理无人机对地攻击过程中突发地面威胁这类未知不确定因素的情况下能准确躲避威胁。该方法提高了 UAV 自主对地攻击过程中处理突发地面威胁能力。下一步研究方向是扩展三支决策损失矩阵,从而得到处理多类不确定因素能力。

#### 参考文献(References):

- [1] 黄长强,曹林平,翁兴伟,等. 无人作战飞机精确打击技术[M]. 北京:国防工业出版社,2011:162-199.  
HUANG C Q, CAO L P, WENG X W, et al. Precision Strike Technology for UCAV[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011:162-199. (in Chinese)
- [2] KAMYAR R, TAHERI E. Aircraft Optimal Terrain/Threat-Based Trajectory Planning and Control[J]. Journal of Guidance Control and Dynamics, 2014, 37(2): 466-483.
- [3] MOHAN K, PATTERSON M A, RAO A V. Optimal Trajectory and Control Generation for Landing of Multiple Aircraft in the Presence of Obstacles[C]// Proc of the Guidance, Navigation, and Control Conference. 2012: 1-16.
- [4] PATTERSON M A, RAO A V. A Matlab Software for Solving Multiple-Phase Optimal Control Problems Using HP-Adaptive Gaussian Quadrature Collocation Methods and Sparse Nonlinear Programming[J]. ACM Transactions on Mathematical Software, 2013, 39(3): 1-41.
- [5] ROSS I M, KARPENKO M. A Review of Pseudospectral Optimal Control: From Theory to Flight[J]. Annual Reviews in Control, 2012, 36(2): 182-197.
- [6] 董康生,黄长强,黄汉桥,等. 基于混合策略的UCAV攻击轨迹在线规划方法[J]. 西北工业大学学报, 2016, 34(1): 159-165.  
DONG K S, HUANG C Q, HUANG H Q, et al. Online Planning Method for UCAV Attack Trajectory Using Multi-Strategies[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2016, 34(1): 159-165. (in Chinese)
- [7] 魏瑞轩,何仁珂,张启瑞,等. 基于 Skinner 理论的无人
- 机应急威胁规避方法[J]. 北京理工大学学报,2016, 36(6): 620-624.
- WEI R X, HE R K, ZHANG Q R, et al. Skinner-Based Emergency Collision Avoidance Mechanism for UAV[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2016, 36(6): 620-624. (in Chinese)
- [8] 魏瑞轩,周凯,茹常剑,等. 多无人机协同搜索的模糊认知决策方法研究[J]. 中国科学(技术科学),2015, 45(6): 595-601.  
WEI R X, ZHOU K, RU C J, et al. Study on Fuzzy Cognitive Decision-Making Method for Multiple UAVs Cooperative Search[J]. Chinese Science (Technologica), 2015, 45(6): 595-601. (in Chinese)
- [9] 吴森堂,费玉华. 飞行控制系统[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2005:46-62.  
WU S T, FEI Y H. Flight Control System[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2005:46-62. (in Chinese)
- [10] 贾修一,商琳,周献中,等. 三支决策理论与应用[M]. 南京:南京大学出版社,2012: 1-16.  
JIA X Y, SHANG L, ZHOU X Z, et al. Three-Way Decision Theory and Applications[M]. Nanjing: Nanjing University Press, 2012: 1-16. (in Chinese)
- [11] YAO Y Y. Three-Way Decisions and Cognitive Computing[J]. Cognitive Computation, 2016, 8(4): 543-554.
- [12] YAO Y Y. The Superiority of Three-Way Decisions in Probabilistic Rough Set Models[J]. Information Sciences, 2011, 181(6): 1080-1096.
- [13] 李丽红,李言,刘保相. 三支决策中不承诺决策的转化代价与风险控制[J]. 计算机科学, 2016, 43(1): 77-80.  
LI L H, LI Y, LIU B X. Cost and Risk Control of Conversion of Three-Way Decisions' Boundary Domain[J]. Computer Science, 2016, 43(1): 77-80. (in Chinese)
- [14] 汪璐,贾修一. 三支决策贝叶斯网络分类器[J]. 南京大学学报(自然科学),2016, 52(5): 833-842.  
WANG L, JIA X Y. Three-Way Decisions based Bayesian Network Classifier[J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 2016, 52(5): 833-842. (in Chinese)

(编辑:姚树峰)