

一种无人机自主规避导弹的威胁度评估方法



郭强,何胜杰,程家林,王兴虎,孙亘,郭菲

成都飞机工业(集团)有限责任公司,四川 成都 610091

摘要:针对三维空间中无人机规避空空导弹问题,本文建立一种无人机与空空导弹的相对追逃模型。基于人工势场理论,对空空导弹相对无人机的威胁度进行分析。以导弹为中心,提出了在无人机牵连地轴系构建人工势场,提出了距离势场函数、导弹进入角势场函数以及两者结合的距离+导弹进入角的势场,对威胁进行评估,在线决策无人机轨迹。仿真结果表明,使用人工势场法能够根据态势实时做出决策,控制无人机完成自主规避导弹的任务。该方法能增加导弹的能量消耗,提高无人机规避导弹的成功率。

关键词:人工势场;无人机;空空导弹;牵连地轴系;距离+导弹进入角势场函数

中图分类号:V212.1

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2022.07.002

现代战场中越来越多地出现了无人机的身影。保证自身的安全是成功执行任务的前提^[1],而无人机面临的最大安全威胁是敌方导弹。因此无人机自主规避导弹,是提升无人机生存率和任务完成率的关键^[2]。

无人机规避导弹问题属于追逃问题,追击者为导弹,逃逸者为无人机。导弹根据自身导引律追击无人机,无人机根据方法策略规避导弹。无人机规避导弹的方法有专家系统法^[3-4]、最优控制法^[5-7]、微分对策法^[8-10]和深度强化学习方法^[11-13]。专家系统法依靠相关领域经验,根据不同情况做出不同决策。当增加新的经验时,需要对以前的策略进行增加或修改。最优控制、微分对策方法依赖于模型,需要对方程求解,但实际中模型很难准确知道。深度强化学习使用神经网络和强化学习的结合,通过大规模仿真训练,优化出适合规避导弹的模型。但基于深度强化学习的方法,需要大规模的训练,且对于状态空间的覆盖有限,对于某些点可能存在无效的情况。Khatib于1986年提出了人工势场法,并在机器人领域得到应用。相比机器人路径规划,无人机同样可以使用人工势场法对导弹的势场构建^[14-16],并通过使用此方法的决策,控制无人机飞行。

综上所述,本文将人工势场法用于无人机规避导弹问题中,构建一套无人机规避导弹系统。使用人工势场法实时构建导弹的势场,无人机沿势场梯度方向运动,规避导弹。本文提出在运动的无人机和导弹坐标系中构建导弹人工势场,并提出距离+导弹进入角势场函数对导弹威胁度评估,将人工势场的决策转化为无人机的控制指令。为了验证该方法的有效性,使用六自由度无人机模型、质点导弹模型进行仿真验证。

1 追逃模型构建

为了讨论无人机规避导弹问题,首先需要构建无人机规避导弹的追逃模型,如图1所示。其中, V_m 为导弹速度, V_u 为无人机速度。 q_m 为导弹进入角,即导弹速度矢量与视线方向的夹角, λ 为无人机进入角,即无人机速度矢量与视线的夹角。

导弹使用比例导引追踪目标,无人机使用适当的规避策略来逃脱导弹追击。本文主要进行方法层面的验证工作,未考虑传感器影响。在仿真中,无人机能够实时获取战场态势和导弹态势。

收稿日期: 2022-02-11; 退修日期: 2022-03-20; 录用日期: 2022-04-15

引用格式: Guo Qiang, He Shengjie, Cheng Jialin, et al. A threat evaluation method of autonomous UAV avoidance missile[J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33(07): 8-14. 郭强,何胜杰,程家林,等. 一种无人机自主规避导弹的威胁度评估方法[J]. 航空科学技术, 2022, 33(07): 8-14.

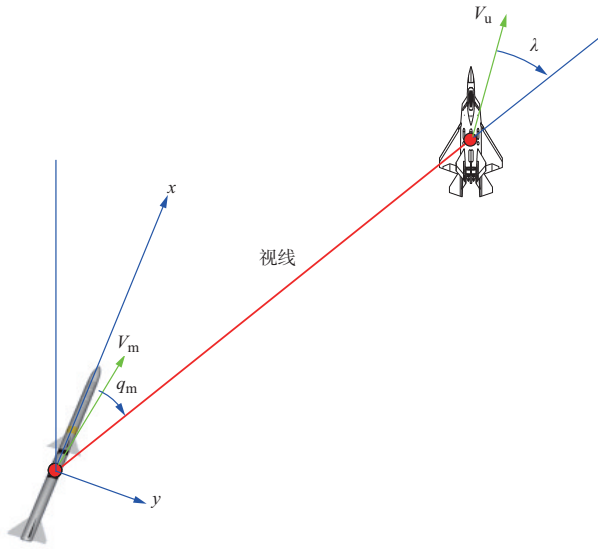


图1 无人机和导弹相对运动模型

Fig.1 Relative motion model of UAV with missile

2 人工势场

2.1 势场在无人机坐标系定义

创建势场函数时,为了构建势场的直观性,本文以导弹为中心建立势场函数,根据无人机相对导弹位置,评估导弹势场对无人机的作用。而在无人机规避导弹问题中,导弹和无人机使用的坐标系不同。无人机的坐标不能直接在导弹的坐标系中表示。因此,需要有统一的坐标系,将导弹和无人机的相对位置表示在坐标系中,以导弹为中心建立势场函数。

使用导弹和无人机的经纬度信息,在地心轴系下,计算导弹和无人机的相对坐标。由于最终需要对无人机进行控制,因此将相对坐标从地心轴系转到无人机牵连地轴系。无人机牵连地轴系原点定义在无人机体轴系原点, x 轴指向正北, y 轴指向正东, z 轴铅垂向下。如图2所示,从地心坐标系向无人机牵连地轴系旋转变换,可以通过以下三步实现:(1) 绕 Z 轴转动经度 λ ,形成坐标系 $X_1Y_1Z_1$,其中 X_1 垂直于地面方向向上, Y_1 在赤道平面内与赤道相切指向东, Z_1 垂直于赤道平面指向北;(2) 绕 Y_1 轴转动纬度 $-\phi$,形成坐标系 $X_2Y_2Z_2$,其中 X_2 垂直于地面方向向上, Y_2 在纬度平面内与纬线相切指向东, Z_2 与经线相切指向北;(3) 绕 Y_2 轴转动 -90° ,与无人机牵连地轴系重合。

由于无人机的牵连地轴系以无人机为中心,因此需将坐标系原点移动到导弹中心。假设导弹在无人机牵连地轴系的位置为 $M(x_0, y_0, z_0)$ 。由于需要以导弹为中心构建势

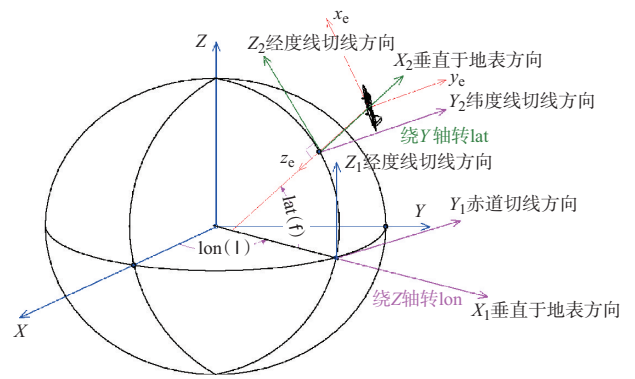


图2 地心坐标系向无人机牵连地轴系旋转过程

Fig.2 Rotation of earth center coordinate system to aircraft traction ground coordinate system

场,则无人机在人工势场中的坐标设置为 $N(-x_0, -y_0, -z_0)$ 。将此坐标代入人工势场的公式,即可求取无人机受到导弹的势场力。因此,所有在无人机牵连地轴系的矢量,通过减去 $M(x_0, y_0, z_0)$,可转为以导弹为中心的矢量。

2.2 势场函数构建

假设无人机关于导弹的相对位置为 (x_t, y_t, z_t) ,则导弹与无人机的距离为

$$D = \sqrt{x_t^2 + y_t^2 + z_t^2} \quad (1)$$

式中: (x_t, y_t, z_t) 为无人机相对于导弹的位置, D 为导弹与无人机的距离。

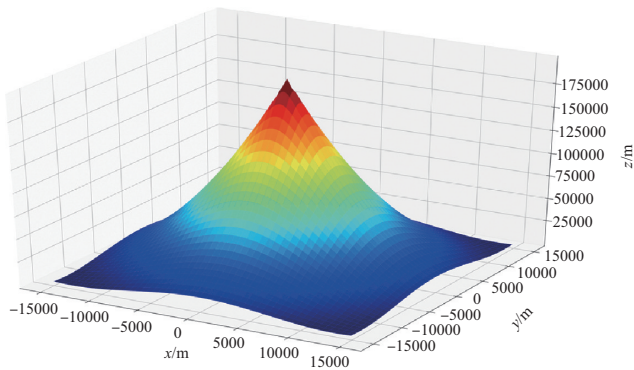
距离势场函数可以创建为如下形式

$$U_D = \begin{cases} k_D \cdot \left(\frac{1}{D+\sigma} - \frac{1}{D_{\text{bound}}} \right)^2 \cdot (D+\sigma)^2, & \text{if } D < D_{\text{bound}} \\ 0, & \text{if } D \geq D_{\text{bound}} \end{cases} \quad (2)$$

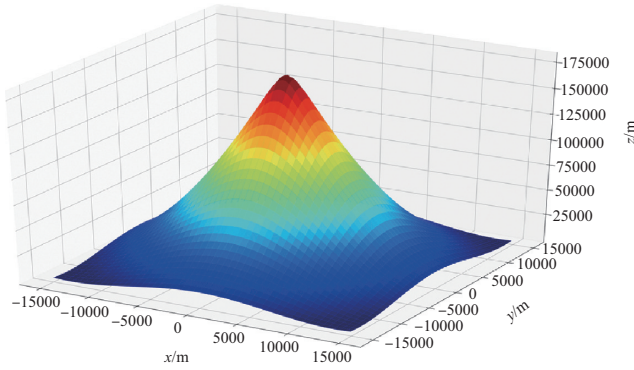
式中: k_D 为正的系数, D 为导弹与无人机的距离, σ 为小量,防止分母为0和乘数为0,造成(0,0)点突变。 D_{bound} 为距离边界,大于此值势场作用为0。 U_D 为距离势场函数。

根据上述公式,绘制不同高度时的距离人工势场如图3所示。图3中 z 方向代表势场大小,颜色映射势场的大小,红色为势场大的地方,蓝色为势场小的地方。由图3可知,势场大小以(0,0)点为中心,向四周不断下降。当无人机沿势场减小的方向运动时,将增大与导弹的距离,远离导弹的威胁。

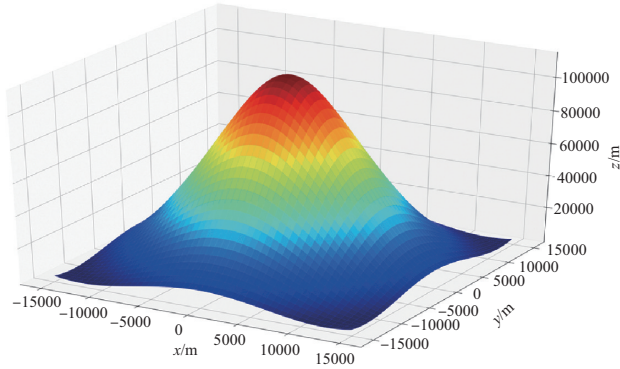
在无人机规避导弹问题中,由于距离势场函数考虑高度的影响。而无人机爬升性能并没有导弹强,导弹在发射后,急速提高速度,短期速度增加能力比无人机高。因此,使用距离势场函数时,可以去掉高度的影响,即



(a) 0m 时势场大小



(b) 1000m 时势场大小



(c) 5000m 时势场大小

图3 高度为0m、1000m、5000m时距离人工势场

Fig.3 Distance APF at $h=0, h=1000\text{m}, h=5000\text{m}$

$$D = \sqrt{x_t^2 + y_t^2} \quad (3)$$

导弹对无人机的威胁不仅可以从距离角度考虑,也可以从导弹进入角(导弹速度方向与视线方向的夹角)考虑。设导弹进入角为 q_m ,导弹速度为 (v_x, v_y, v_z) ,同样不考虑高度的影响,导弹进入角计算公式如下所示

$$\cos q_m = \frac{\mathbf{V}_m \cdot \mathbf{MP}}{|\mathbf{V}_m| \cdot |\mathbf{MP}|} = \frac{x_t v_x + y_t v_y}{\sqrt{x_t^2 + y_t^2} \cdot \sqrt{v_x^2 + v_y^2}} \quad (4)$$

式中: q_m 为导弹进入角, $\mathbf{V}_m$ 为导弹速度矢量, $\mathbf{MP}$ 为无人机

与导弹的视线矢量。导弹进入角的势场函数创建为如下形式

$$U_a = \begin{cases} k_a \cdot \left(\frac{1}{q_m + \sigma} - \frac{1}{180} \right)^2 \cdot (q_m + \sigma)^2, & \text{if } D < D_{\text{bound}} \\ 0, & \text{if } D \geq D_{\text{bound}} \end{cases} \quad (5)$$

式中: k_a 为正的系数, q_m 为导弹进入角, σ 为小量,防止分母为0和乘数为0。 D_{bound} 为距离边界, U_a 为导弹进入角势场函数。

假设导弹速度方向沿 x 轴方向,绘制高度为0时的导弹进入角势场函数,如图4所示。

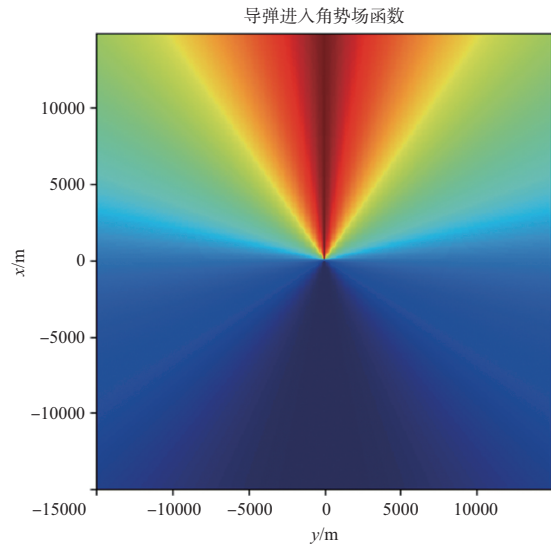


图4 高度为0时导弹进入角势场函数

Fig.4 Missile aspect angle APF at $h=0$

人工势场以 x 轴正方向(导弹速度方向),往 x 轴负方向(背离导弹速度方向),势场不断下降。沿势场减小的方向,能够使导弹的速度方向与视线方向不一致,从而耗散导弹的能量。进一步考虑距离势场函数与导弹进入角势场函数的结合,如下形式

$$U_t = \begin{cases} (1 - k_w) \cdot \left(\frac{1}{D + \sigma} - \frac{1}{D_{\text{bound}}} \right)^2 \cdot (D + \sigma)^2 + \\ k_w \cdot \left(\frac{1}{q_m + \sigma} - \frac{1}{180} \right)^2 \cdot (q_m + \sigma)^2, & \text{if } D < D_{\text{bound}} \\ 0, & \text{if } D \geq D_{\text{bound}} \end{cases} \quad (6)$$

式中: k_w 为权重系数,调节距离势场和导弹进入角势场之间的比例关系。 U_t 为距离+导弹进入角势场函数。其他参数与其他势场函数中意义相同。

绘制不同权重系数下的势场函数,如图5所示。图5中,权重系数越大,势场函数越偏向于导弹进入角势场;反之,越偏向于距离势场。

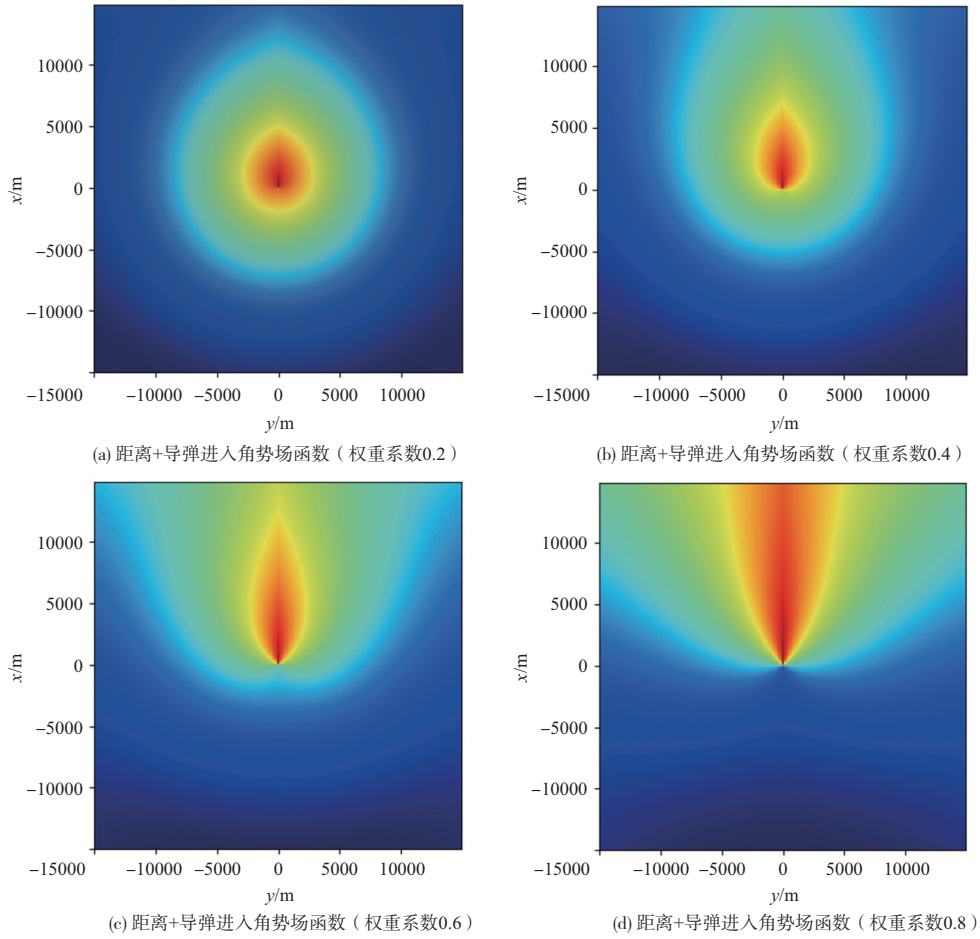


图5 高度为0时距离+导弹进入角势场函数

Fig.5 Distacne + missile aspect angle APF at $h=0$

创建势场函数后,使用梯度下降法对三维 x, y, z 方向分别求偏导,得出输出势场函数对于 x, y, z 的偏导数,即 dU_x, dU_y, dU_z 。将求导得出的势场力方向作为无人机速度使用,则无人机以此速度方向运动,可以有效规避导弹。

$$\begin{aligned} V_{apfx} &= -dU_x \\ V_{apfy} &= -dU_y \\ V_{apfz} &= -dU_z \end{aligned} \quad (7)$$

式中: dU_x, dU_y, dU_z 为 x, y, z 方向的偏导数, $V_{apfx}, V_{apfy}, V_{apfz}$ 为速度矢量在 x, y, z 方向的分量。将上述速度矢量转化为控制指令

$$\begin{aligned} V_c &= |V_{apf}| \\ \gamma_c &= \arctan \frac{V_{apfz}}{\sqrt{V_{apfx}^2 + V_{apfy}^2}} \\ \chi_c &= \arctan \frac{V_{apfy}}{V_{apfx}} \end{aligned} \quad (8)$$

式中: $|V_{apf}|$ 为速度矢量, V_c 为速度指令, γ_c 为爬升角指令, χ_c

为航向指令。势场函数控制无人机方向,飞控中,将速度/爬升角/航向指令进一步转化为过载指令控制无人机飞行。

3 仿真校验

为了验证不同势场函数规避导弹的效果,使用自主开发的仿真软件进行仿真分析。仿真中设置同样的初始条件,设置发射导弹无人机(攻击机)和规避导弹无人机(规避机)的初始高度都为5000m,初始速度为 Ma 0.9。

本文使用的模型假设条件包括:(1)无人机使用六自由度模型,导弹使用质点模型,考虑导弹的升阻特性和推力特性;(2)导弹采用比例导引制导;(3)不考虑风的影响。

导弹模型参考AIM-120进行配置。AIM-120是第四代雷达型空空导弹,是现有空空导弹系统的重要力量,将该型导弹选为仿真试配对象具有代表性,所得结论对于无人机规避导弹具有普适指导意义。在本仿真中,配置导弹瞄准线最大角速率为32,主动段距离15km,最大过载限制

22, 发动机工作时间 5.6s, 最大速度可达 $Ma\ 4$, 制导方式为指令制导+惯性制导+主动雷达末制导, 制导率为比例导引, 杀伤半径 10m。

使用不同的势场函数进行仿真, 观测仿真结果。图 6 为迎头条件下, 无人机使用距离人工势场规避导弹的仿真结果示意图。图 6 中, 无人机发现导弹后, 距离势场函数控制无人机急速转弯, 将导弹置于尾后。之后保持与导弹方向相同, 无人机成功规避导弹。仿真过程中, 导弹的速度、升力系数、阻力系数、推力与无人机距离的变化如图 7 所示。

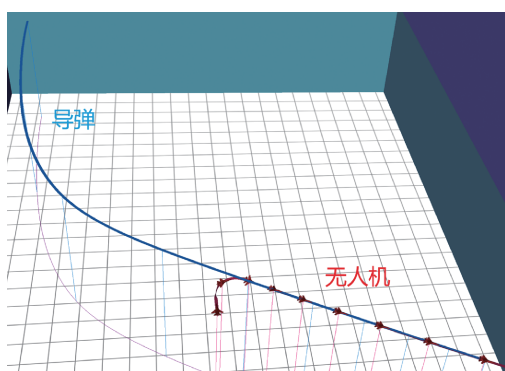


图 6 无人机使用距离人工势场规避导弹

Fig.6 Missile avoidance by distance APF

使用导弹入射角势场函数的仿真结果如图 8 所示。图 8 中, 使用导弹进入角势场函数, 人工势场法决策无人机扩大导弹进入角。无人机通过不断转弯, 增大导弹进入角。在此过程中, 导弹能量被消耗, 最终无人机使用导弹进入角人工势场成功规避导弹。

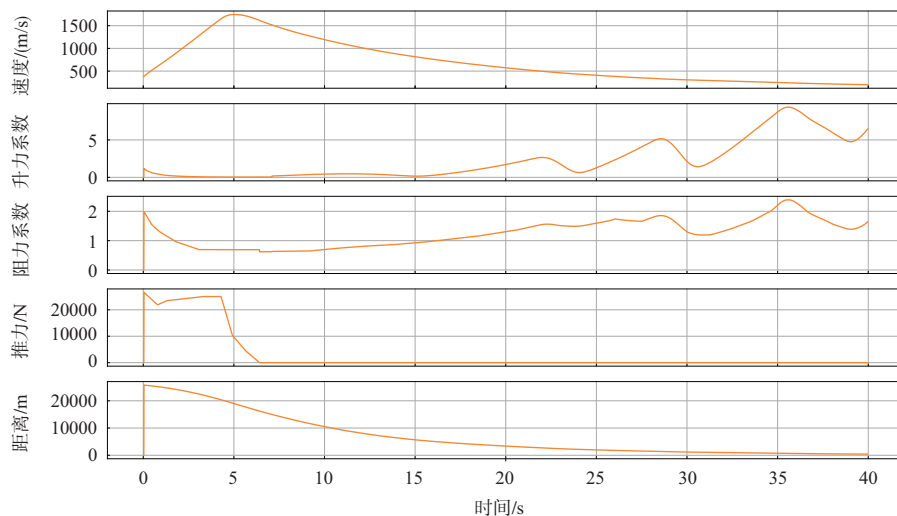


图 7 仿真过程中导弹数据变化

Fig.7 Missile data changes in simulation

使用距离+导弹进入角势场函数, 能够同时拥有距离势场和导弹进入角势场的效果, 如图 9 所示。图 9 中, 迎头态势下, 距离+导弹进入角的势场函数控制无人机进入尾追态势, 之后通过增加导弹进入角耗散导弹的能量。

4 结论

本文使用人工势场法研究无人机规避导弹问题。将人工势场建立在无人机牵连地轴系, 使用相对坐标, 将坐标原点建立在导弹中心。根据无人机在导弹威胁势场中的梯度方向, 在线决策无人机的运动方向。通过仿真手段, 本文验证了人工势场方法能够控制无人机规避导弹, 并提出距离+导弹进入角势场函数评估导弹的威胁度, 利用距离势场和导弹进入角的特点规避导弹。

人工势场能够实时根据无人机和导弹的相对态势, 在线作出决策。本文使用的人工势场规避方法可通过构建不同的势场函数, 采取不同的威胁度评估方法, 即不同策略规避导弹。

AST

参考文献

- [1] 杨秀霞, 张毅. 动态人工势场法在无人飞行器避碰飞行中的应用研究[J]. 战术导弹控制技术, 2014, 31(1): 1-5.
Yang Xiuxia, Zhang Yi. Dynamic artificial potential field application on UAV obstacle avoidance flight[J]. Tactical Missile Technology, 2014, 31(1): 1-5.(in Chinese)
- [2] 刘杰, 张健. 基于三维空间的无人机规避攻击导引设计[J]. 电光与控制, 2014, 21(4): 34-37.

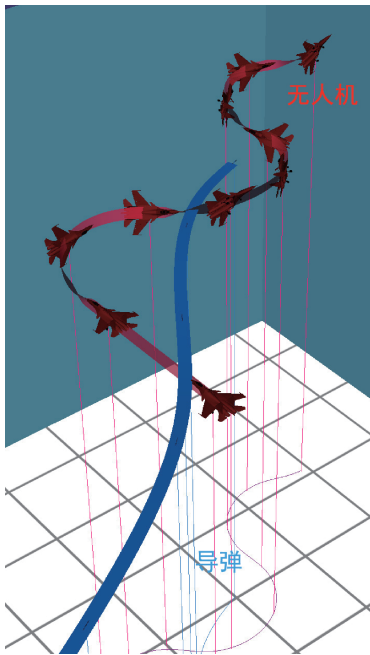


图8 无人机使用导弹进入角人工势场规避导弹

Fig.8 Missile avoidance by aspect angle APF

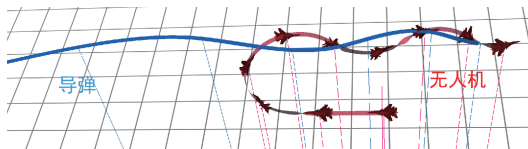


图9 无人机使用距离+导弹进入角人工势场规避导弹

Fig.9 Missile avoidance by distance + aspect angle APF

Liu Jie, Zhang Jian. Design of a UAV escape guidance law based on three dimensional space[J]. Electronics Optics & Control, 2014, 21(4): 34-37.(in Chinese)

- [3] 邵彦昊, 朱荣刚, 贺建良, 等. 中远程空空雷达导弹的新机动规避方式的探索[J]. 弹箭与制导学报, 2020, 40(4): 75-78,84.
- Shao Yanhao, Zhu Ronggang, He Jianliang, et al. Exploration of a new evasive maneuver mode for medium and long range air-to-air radar missile[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2020, 40(4): 75-78,84.(in Chinese)
- [4] 王斯财, 南英, 刘经纬. 导弹迎击时无人机的最佳逃逸策略研究[J]. 航空兵器, 2009(4): 28-32.
- Wang Sicai, Nan Ying, Liu Jingwei. Optimal escape strategy of fighter against oncoming missiles[J]. Aero Weaponry, 2009(4): 28-32.(in Chinese)
- [5] Imado F. Some practical approaches to pursuit evasion dynamic games[J]. Cybernetics and Systems Analysis, 2002, 38(2): 276-291.

- [6] Imado F, Kuroda T. Engagement tactics for two missiles against an optimally maneuvering aircraft[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2011, 34(2): 574-582.
- [7] Ong S Y, Pierson B L. Optimal evasive aircraft maneuvers against a surface-to-air missile[C]//The First IEEE Regional Conference on Aerospace Control Systems, IEEE, 1993: 475-482.
- [8] Imado F. Some aspects of a realistic three-dimensional pursuit evasion game[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1993, 16(2): 289-293.
- [9] Raivio T. Capture set computation of an optimally guided missile[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2001, 24(6): 1167-1175.
- [10] Imado F, Kuroda T. Family of local solutions in a missile aircraft differential game[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2011, 34(2): 583-591.
- [11] 宋宏川, 詹浩, 夏露, 等. 基于深度确定性策略梯度算法的战机规避中距空空导弹研究[J]. 航空工程进展, 2021, 12(3): 85-94.
- Song Hongchuan, Zhan Hao, Xia Lu, et al. The study on a fighter against a medium range air-to-air missile based on deep deterministic policy gradient algorithm[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2021, 12(3): 85-94. (in Chinese)
- [12] 宋欣屿, 王英勋, 蔡志浩, 等. 基于深度强化学习的无人机着陆轨迹跟踪控制[J]. 航空科学技术, 2020, 31(1): 68-75.
- Song Xinyu, Wang Yingxun, Cai Zhihao, et al. Landing trajectory tracking control of unmanned aerial vehicle by deep reinforcement learning[J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(1): 68-75.(in Chinese)
- [13] 邓伟伟, 段朝阳. 人工智能在导弹控制系统中的应用[J]. 航空科学技术, 2020, 31(10): 30-35.
- Deng Weiwei, Duan Chaoyang. The application of artificial intelligence in missile control system[J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(10): 30-35.(in Chinese)
- [14] 范世鹏, 祁琪, 路坤锋, 等. 基于改进人工势场法的巡航导弹自主规避技术[J]. 北京理工大学学报, 2018, 38(8): 828-834.
- Fan Shipeng, Qi Qi, Lu Kunfeng, et al. Autonomous collision avoidance technique of cruise missiles based on modified artificial potential method[J]. Transactions of Beijing Institute

- of Technology, 2018, 38(8): 828-834.(in Chinese)
- [15] 李志强, 胡晓峰, 司光亚, 等. 一个基于人工势场的战场态势分析模型[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(12): 3603-3607.
- Li Zhiqiang, Hu Xiaofeng, Si Guangya, et al. New battlefield situation analysis model based on artificial potential field[J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(12): 3603-3607. (in Chinese)
- [16] 彭建亮, 孙秀霞, 蔡满意, 等. 基于人工势场的防空威胁建模与仿真[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(2): 338-341, 409.
- Peng Jianliang, Sun Xiuxia, Cai Manyi, et al. Modeling and simulation of air defense threat based on artificial potential field[J]. Systems Engineering and Electronics, 2010, 32(2): 338-341, 409.(in Chinese)

A Threat Evaluation Method of Autonomous UAV Avoidance Missile

Guo Qiang, He Shengjie, Cheng Jialin, Wang Xinghu, Sun Gen, Guo Fei

AVIC Cheng' du Aircraft Industrial(GROUP)CO.LTD., Chengdu 610091, China

Abstract: Focusing on the problem of UAV avoiding missile in three-dimensional space, in this paper, a relative pursuit model of UAV and AAM is established. Based on artificial potential field theory, the threat degree of air-to-air missile to UAV is analyzed. This paper constructs a potential field function in the missile-centered coordinate system in UAV traction ground coordinate system. The text uses the distance APF function, the missile aspect angle APF function, and the APF function combined with the two to evaluate the threat and determine the UAV trajectory online. The simulation results show that the artificial potential field method can be used to make decisions in real time according to the situation, and control the UAV to complete the autonomous evasion task. This method can increase the energy consumption of the missile and improve the success rate of UAV to evade the missile.

Key Words: APF; UAV; air-to-air missile; aircraft traction ground coordinate system; distance + aspect angle APF