

基于滚动时域控制的无人机机动博弈决策

刘佳敏,吴庆宪,王玉惠,周大可

(南京航空航天大学 自动化学院,江苏 南京 211106)

摘要:针对无人机机动决策计算复杂等问题,研究基于滚动时域控制的无人机机动博弈决策算法。分割无人机空战时间域,将机动决策问题转化成滚动时域控制下的最优控制序列求解问题;确定无人机系统的状态方程,选取机动过程中的控制变量;建立空战机动决策指标函数,计算敌我双方无人机的态势优势值,获得敌我双方无人机机动态势博弈矩阵,求解双方机动博弈决策的纳什均衡解,实现无人机机动博弈决策,并通过仿真实例验证所建模型的可行性和有效性。

关键词:无人机;机动博弈决策;滚动时域控制;态势优势

中图分类号:V279+.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2023)02-0145-04

UAV Maneuvering Game Decision Based on Receding Horizon Control

LIU Jiamin, WU Qingxian, WANG Yuhui, ZHOU Dake

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: In view of the complexity of UAV maneuvering decision calculation, the game decision algorithm of UAV maneuvering is studied based on receding horizon control. The time domain of UAV air combat is segmented, the maneuver decision problem is transformed into the optimal control sequence solution problem under receding horizon control. The state equation of the UAV system is determined to select the control variables in the maneuver process. The index function of air combat maneuvering decision is constructed and the situation superiority value of UAV is calculated to obtain the game matrix of UAV maneuvering situation and solve the Nash equilibrium solution of UAV maneuvering decision, realizing the maneuvering game decision of UAV. The feasibility and effectiveness of the constructed model is verified by simulation examples.

Keywords: UAV; maneuvering game decision; receding horizon control; situational advantage

0 引言

无人机空战机动决策是典型的博弈对抗问题,敌我双方无人机根据战场态势评估结果进行决策,各自执行机动动作,直至形成有利对抗态势或空战结束,这与工业上的运动控制过程相类似。常用的机动决策方法有专家系统法^[1]、狼群算法^[2]和影响图法^[3]等,但这些方法有一定的局限性,如专家系统法不能充分适应多变的战场形势。采取以博弈论为基础的矩阵对策方法更能体现无人机空战的对抗性^[4-6],如文献[7]提出了一种矩阵对策法与遗传算法相结合的空战决策算法等。然而由于战场环境干扰等原因,空战信息的复杂度增加,单一的矩阵对策法会影响空战机动决策的快速性^[8-9]。

关于无人机空战机动博弈的研究,目前已取得了一些研究成果。文献[10]建立了无人机空战机动直觉模糊博弈模型,但模糊数属性权重的确定具有主观性。文献[11-13]基于区间数对不确定环境无人机博弈策略进行了研究,但是没有考虑机动博弈情况。学者们已开展不确定信息下无人机空战机动博弈问题的研究,但还需充分

考虑战场态势,客观地确定决策结果。无人机空战机动过程与工业中的运动控制类似,因而可以考虑将机动决策问题转化成最优控制序列的求解。文献[14]将滚动时域控制作为专家系统的补充,文献[15]从时间角度考虑机动战术优势,但都不能充分体现空战的对抗性。

综上所述,针对无人机空战面临信息不确定等挑战,参考工业中的运动控制,本文基于滚动时域控制方法提出一种无人机空战机动博弈模型。该模型分割时间域,选择机动控制变量,计算机动博弈态势支付矩阵,采用量子粒子群优化算法求解机动策略的纳什均衡解。最后通过仿真,验证该模型解决复杂空战环境下无人机机动博弈问题的有效性。

1 基于滚动时域控制的无人机机动博弈决策

1.1 无人机机动问题描述

参考工业运动控制,将无人机空战过程分割成一连串的离散时间域,在每个时间域里,无人机通过选择与调用

基金项目:科技部国家重点基础研究发展计划(973计划)(2018AA0100805)

第一作者简介:刘佳敏(1997—),女,安徽合肥人,硕士研究生,研究方向为无人机火力控制、信息融合与智能决策。

机动动作,从而实现该时域内无人机机动飞行,每个时间域机动的叠加得到机动飞行轨迹。根据滚动时域控制的原理,机动决策问题可描述成式(1)一式(3)中最优控制序列 $u_i \in \Omega$ 的求解,使得性能指标 $J(X_{t_k}, u_{t_k})$ 满足要求。

$$J(X_{t_k}, u_{t_k}) = \sum_{k=0}^{n-1} F(X_{t_k}, u_{t_k}, X_{t_{k+1}}) + \Phi(X_{t_f}, t_f) \quad (1)$$

$$\dot{X} = f(X, u, t), X_{t_0} = X_0 \quad (2)$$

$$u_i \in \Omega \quad (3)$$

式中: $\Phi(X_{t_f}, t_f)$ 为终端指标; t_0, X_{t_0} 分别为初始时间和初始状态; t_f, X_{t_f} 分别为终端时间和终端状态; Ω 为控制约束; $k=0, 1, \dots, n-1$ 。

1.2 系统状态方程描述

空战中双方飞行状态分别用状态向量 T_r, T_b 来表示,下标 r, b 分别代表我方和敌方。状态向量如式(4)所示。

$$T_i = (x_i, y_i, z_i, v_i, \psi_i, \gamma_i, \phi_i) \quad (4)$$

式中: $i=r, b$; x_i, y_i 和 z_i 为坐标系下无人机 i 的位置坐标; v_i 为无人机 i 的速度; γ_i, ψ_i 和 ϕ_i 分别为无人机 i 的航迹倾斜角、方位角和滚转角。

无人机质点运动模型如式(5)所示。

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos \gamma \sin \psi \\ \dot{y} = v \cos \gamma \cos \psi \\ \dot{z} = v \sin \gamma \\ \dot{v} = g(n_x - \sin \gamma) \\ \dot{\psi} = -\frac{gn_z \sin \phi}{v \cos \gamma} \\ \dot{\gamma} = \frac{g}{v}(n_z \cos \phi - \cos \gamma) \end{cases} \quad (5)$$

根据式(5)可知,给定无人机任意时刻的初始状态和该时刻的控制量 n_x, n_z 和 ϕ ,通过求解无人机质点运动方程可得到无人机下一时刻的状态,这与工业上的运动控制相类似。

1.3 控制约束设计

为了无人机能够完成斜筋斗、战斗转弯等战术机动,将基本操作动作库中的7种典型机动动作扩充为11种机动动作。根据11种机动动作的设计,选取控制量 n_x, n_z 和 ϕ 作为控制变量,通过设计控制变量的变化规律来实现无人机机动的变化。无人机根据空战态势等,切换11种基本动作,从而完成特定的战术动作。

空战机动决策是通过机动的选择和调用来实现对飞机状态 T_i 的控制,所以式(3)的控制约束 Ω 指的是包含11种基本动作的机动动作库。具体机动动作和对应控制量如表1所示。

表1 基本机动动作及其对应控制量

序号	动作	n_x	n_z	ϕ
1	匀速前飞	0	1	0
2	加速前飞	$n_{x\max}$	1	0
3	减速前飞	$-n_{x\max}$	1	0

续表1

序号	动作	n_x	n_z	ϕ
4	左转	0	$n_{z\max}$	$\arccos\left(\frac{1}{n_{z\max}}\right)$
5	右转	0	$-n_{z\max}$	$-\arccos\left(\frac{1}{n_{z\max}}\right)$
6	爬升	0	$n_{z\max}$	0
7	俯冲	0	$n_{z\max}$	0
8	左爬升	0	$n_{z\max}$	$\pi/4$
9	右爬升	0	$n_{z\max}$	$-\pi/4$
10	左俯冲	0	$-n_{z\max}$	$\pi/4$
11	右俯冲	0	$-n_{z\max}$	$-\pi/4$

1.4 空战机动决策指标函数的建立

以任意时刻我机态势优势值与敌机态势优势值的差值作为我机进行机动决策的指标:

$$J(X_{t_k}, u_{t_k}) = F(X_{t_k}, u_{t_k}, X_{t_{k+1}}) = S_r(t_{k+1}) - S_b(t_{k+1}) \quad (6)$$

式中 $S_r(t_{k+1})$ 和 $S_b(t_{k+1})$ 分别为我机和敌机在 t_{k+1} 时刻的态势优势值。

滚动时域控制的核心在于将广义优化问题转化成在线滚动的一系列局部优化问题。不同机动动作的选择会产生不同的态势,即式(6)的值不同。在双方对抗过程中,敌我双方都会选择对自己更有利的机动动作,且我方的优势即敌方的劣势,双方的动作库相同,满足二人零和博弈的条件,通过计算敌我双方机动博弈支付矩阵 F ,求解敌我双方的机动混合策略纳什均衡,执行动作,改变态势。

2 复杂环境下基于滚动时域控制的无人机机动博弈决策

建立机动博弈模型,采用量子粒子群优化算法来求解机动博弈纳什均衡策略。

2.1 复杂环境下基于滚动时域控制的无人机机动博弈模型

定义 $w = (w_1, w_2, \dots, w_{11})$ 为我方混合策略,机动博弈模型为

$$U_1 = \max_{w \in W} \min_{1 \leq g \leq 11} \sum_{e=1}^{11} F_{e,g} w_e \quad (7)$$

令 $U_2(w) = \min_{1 \leq g \leq 11} \sum_{e=1}^{11} F_{e,g} w_e$, 则式(7)可转换为

$$U_1 = \max_{w \in W} U_2(w)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_{e=1}^{11} F_{e,g} w_e > U_2(w), & g = 1, 2, \dots, 11 \\ w_1 + w_2 + \dots + w_{11} = 1 \\ w_e \geq 0, & e = 1, 2, \dots, 11 \end{cases} \quad (8)$$

对单矩阵博弈问题的求解本质上是求解式(8),采用量子粒子群优化算法求解纳什均衡。

2.2 机动博弈决策流程

机动博弈决策的具体步骤如下。

Step1:采集空战信息,参考工业运动控制,分割无人机电空战时间域;

Step2:确定无人机系统的质点状态方程,并选取机动过程中的控制变量;

Step3:建立空战机动决策指标函数如式(6),计算敌我双方无人机的态势优势值,获得敌我双方无人机机动博弈支付矩阵。

Step4:采用量子粒子群优化算法求解敌我双方的机动混合策略纳什均衡。定义无人机策略粒子种群和适应度函数,根据式(9)~式(12)迭代更新个体最优策略粒子和全局最优策略粒子。

Step5:重复 Step4,直至达到最大迭代次数,输出全局最优策略粒子,即敌我双方无人机机动混合策略的纳什均衡解。

在 Step4 中,设定无人机策略粒子的种群大小为 M ,策略粒子的维度为 11。第 t 轮迭代时第 r 个策略粒子表示为 $w^r(t) = (w_1^r(t), w_2^r(t), \dots, w_{11}^r(t))$,迭代更新公式如式(9)~式(11)所示。

$$w_e^r(t+1) = \begin{cases} p_e^r(t+1) + \\ \lambda |B_e(t) - w_e^r(t)| \ln(1/\varepsilon), 0 < \varepsilon < 0.5 \\ p_e^r(t+1) - \\ \lambda |B_e(t) - w_e^r(t)| \ln(1/\varepsilon), 0.5 \leq \varepsilon < 1 \end{cases} \quad (9)$$

$$p_e^r(t+1) = \eta P_i^r(t) + (1-\eta) P_{g_e}(t) \quad (10)$$

$$B_e(t) = \frac{1}{M} \sum_{r=1}^M P_i^r(t) \quad (11)$$

式中: $P_i^r(t)$ 为第 t 轮迭代时第 r 个策略粒子个体最优的第 e 维参数; $P_{g_e}(t)$ 为第 t 轮迭代时全局最优策略粒子的第 e 维参数; η, ε 为 $(0, 1)$ 上的随机数, 参数 $\lambda < 1$, $B_e(t)$ 为第 t 轮迭代时所有策略粒子个体最优的第 e 维参数均值。

设定策略粒子 $w^r(t)$ 的适应度值为

$$f(w^r(t)) = \min_{1 \leq g \leq 11} \sum_{e=1}^{11} F_{e,g} w_e^r(t) \quad (12)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_{e=1}^{11} w_e^r(t) = 1 \\ w_e^r(t) \geq 0, \quad e = 1, \dots, 11 \end{cases}$$

在迭代中,设第 $t-1$ 代第 r 个策略粒子的个体最优为 $P_i^r(t-1)$, 如果 $f(w^r(t)) > f(P_i^r(t-1))$, 则 $P_i^r(t) = w^r(t)$, 否则 $P_i^r(t) = P_i^r(t-1)$ 。

对所有策略粒子的个体最优——比较适应度值,全局最优策略粒子更新为适应度值最大的个体最优策略粒子,从而保证最终输出的全局最优策略粒子满足式(7),即为机动混合策略的纳什均衡解。

3 无人机机动博弈决策仿真

假设双方各有一架无人机进行对峙, $n_{\max} = 4, n_{z\max} = 4$, 无人机最大速度为 400 m/s, 最小速度为 50 m/s。敌我双方机动策略详见表 1。

定义我方混合策略为 $w = (w_1, w_2, \dots, w_{11})$, 敌方混合策略为 $ww = (ww_1, ww_2, \dots, ww_{11})$ 。

1) 无人机对峙状态 1 (表 2)

表 2 无人机对峙状态 1

状态参数	我方 U_1	敌方 V_1
x/m	69 000	59 000
y/m	19 000	39 000
z/m	7 800	7 200
$v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	200	200
$\theta/(\circ)$	0	0
$\psi/(\circ)$	180	0

以我方初始状态 A 点为例, 根据式(1)~式(3), 分割时间域, 将机动决策问题转化成最优控制序列的求解; 根据式(4)确定无人机的飞行状态向量, 我方 U_1 的状态向量为 $T_r = (x_r, y_r, z_r, v_r, \psi_r, \gamma_r, \varphi_r)$ 。

接着, 根据式(5)、式(6)确定控制变量和指标函数, 计算不同动作选择可能产生的态势值, 获得 11×11 维的机动博弈支付矩阵。当我方 U_1 选择机动动作 1, 敌方 V_1 分别选择机动动作 1、2、3、4、5、6、7、8、9、10、11 时, 我方机动博弈支付值为 $(0.892\ 6, 0.749\ 9, 0.821\ 4, 0.892\ 6, 0.892\ 6, 0.892\ 8, 0.892\ 7, 0.892\ 7, 0.892\ 7, 0.892\ 6, 0.892\ 6)$ 。

我方混合策略作为策略粒子, 采用量子粒子群优化算法求解纳什均衡, 设置粒子规模为 $M = 100$, 迭代次数为 300, 粒子维度为 11, $\lambda = 0.5$ 。

我方无人机混合策略纳什均衡解为: $w_{\text{nash}}^* = (0.051\ 5, 0.380\ 5, 0.014\ 5, 0.021\ 3, 0.026\ 7, 0.038\ 2, 0.013\ 6, 0.061\ 0, 0.138\ 8, 0.168\ 5, 0.085\ 4)$ 。根据纳什均衡解, 我方 U_1 执行机动动作 2。仿真结果如图 1 所示。

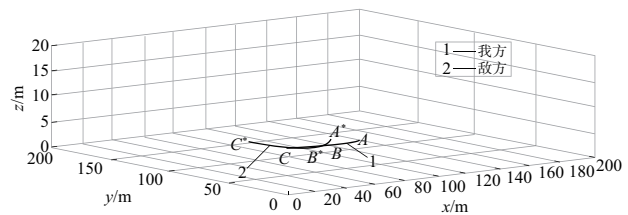


图 1 对峙状态 1 的无人机机动博弈结果

2) 无人机对峙状态 2 (表 3)

表 3 无人机对峙状态 2

状态参数	我方 U_1	敌方 V_1
x/m	10 000	10 000
y/m	10 000	0
z/m	10 000	10 000
$v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	150	150
$\theta/(\circ)$	0	0
$\psi/(\circ)$	60	0

计算过程与状态 1 相同, 仿真结果如图 2 所示。

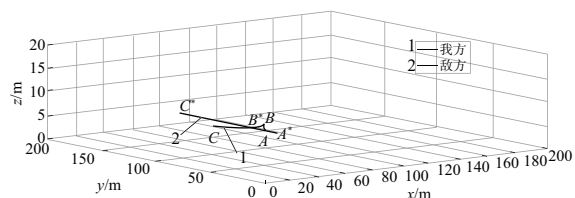


图 2 对峙状态 2 的无人机机动博弈结果

初始态势为双方均势。 A 点和 A^* 点为我方和敌方的初始位置, A^*B^* 段敌机向我机靠近, AB 段我机保证高度优势,同时改变角度,远离敌机; B 点和 B^* 点双方雷达探测到对方无人机, B^*C^* 段敌机远离我机,增加自身高度和角度优势, BC 段我机预测敌机会逃离,选择向下俯冲,同时准备导弹锁定敌机; C 点我机导弹锁定敌机,空战结束。

4 结语

针对复杂空战环境,本文提出一种无人机机动博弈模型。该模型中分割空战时间域,确定机动控制变量,计算敌我双方无人机的态势值,获得机动博弈支付矩阵,采用量子粒子群优化算法求解敌我双方机动博弈的混合策略纳什均衡,获得机动决策结果。该模型还可以应用于其他信息技术类的博弈、自动化控制、机械制造等领域,具有较好的适用性。

参考文献:

- [1] 傅莉,谢福怀,孟光磊,等. 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.
- [2] 吴虎胜,张凤鸣,吴庐山. 一种新的群体智能算法——狼群算法[J]. 系统工程与电子技术,2013,35(11):2430-2438.
- [3] 刘正敏,昂亮,姜长生,等. 多级影响图在无人机群协同空战机动决策中的应用[J]. 电光与控制,2010,17(10):10-13,78.
- [4] 陈志伟. 无人机空战攻防一体化自主攻击决策研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2011.
- [5] ZHA W Z, CHEN J, PENG Z H. Dynamic multi-team

antagonistic games model with incomplete information and its application to multi-UAV[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica,2015,2(1):74-84.

- [6] ZENGIN U, DOGAN A. Cooperative target pursuit by multiple UAVs in an adversarial environment[J]. Robotics and Autonomous Systems,2011,59(12):1049-1059.
- [7] 邓可,彭宣淇,周德云. 基于矩阵对策与遗传算法的无人机空战决策[J]. 火力与指挥控制,2019,44(12):61-66,71.
- [8] XU G Y, LI P, ZHOU B. Solving the problem of UAV air combat game based on differential variational inequality and D-gap function[J]. Advanced Materials Research,2014,1042:172-177.
- [9] SUN C H, DUAN H B. Markov decision evolutionary game theoretic learning for cooperative sensing of unmanned aerial vehicles[J]. Science China Technological Sciences, 2015, 58(8):1392-1400.
- [10] 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.
- [11] 陈侠,刘敏,胡永新. 基于不确定信息的无人机攻防博弈策略研究[J]. 兵工学报,2012,33(12):1510-1515.
- [12] 赵明明,李彬,王敏立. 多无人机超视距空战博弈策略研究[J]. 电光与控制,2015,22(4):41-45.
- [13] 孙楚,赵辉,王骁飞,等. 区间数决策在无人机攻防博弈中的应用[J]. 计算机工程与应用,2017,53(15):170-175,180.
- [14] 傅莉,谢福怀,孟光磊,等. 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.
- [15] 付昭旺,李战武,强晓明,等. 基于滚动时域控制的战斗机空战机动决策[J]. 电光与控制,2013,20(3):20-24,29.

收稿日期:2021-11-02

(上接第144页)

参考文献:

- [1] 张晓木,王克选,陈刚,等. 某型无人机腹鳍连接结构设计与分析[J]. 机械制造与自动化,2021,50(4):204-207.
- [2] WU H, WANG Z P, ZHOU Z, et al. Establishment and simulation of twelve-degree-of-freedom model for UAV parachute recovery system[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2020,38(1):68-74.
- [3] 孙晓娟. 无人机伞降回收技术[C]//中国无人机大会论文集. 北京:中国航空学会,2006.
- [4] WANG R, WANG Z P, JIA J Y, et al. Research on dynamics behaviours of small UAV parachute recovery system[J]. International Journal of Mechatronics and Automation, 2020, 7(3):156.

- [5] 张栋. 某型无人机伞降系统的设计与优化[D]. 南昌:南昌航空大学,2015.
- [6] 华晓波. 无人机发射和回收系统结构的力学分析和试验[D]. 杭州:浙江大学,2010.
- [7] LU K, LEONARD J W, ACCORSI M L, et al. Pseudo-flexural elements for parachute simulation[J]. Computers & Structures, 2000,78(1/2/3):257-269.
- [8] 刘旭红,黄西成,陈裕泽,等. 强动载荷下金属材料塑性变形本构模型评述[J]. 力学进展,2007,37(3):361-374.
- [9] 大连工学院数理力学系光测组. 关于通过销(铆)钉传递拉力的单孔耳片的应力集中系数和孔周应力分布的近似计算公式[J]. 大连工学院学报,1977,17(4):85-90.

收稿日期:2021-10-26