

基于博弈论及 Memetic 算法求解的空战机动决策框架

顾佼佼, 赵建军, 刘卫华
(海军航空工程学院, 山东 烟台 264001)

摘要: 针对现有机动决策模型体现空战对抗性不足的问题, 基于博弈论构建机动决策模型并提出采用改进 Memetic 算法求解。基于双矩阵博弈构造空战机动决策模型; MA 由粒子群优化算法和禁忌搜索算法组成, 并引入模拟退火算法以保持粒子多样性。仿真表明更加符合空战实际, 可对空战进行有效建模, 求解算法满足实时性要求。

关键词: 空战; 机动决策; 博弈论; Memetic 算法; 粒子群优化

中图分类号: V271.4; O225 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)01-0020-04

Air Combat Maneuvering Decision Framework Based on Game Theory and Memetic Algorithm

GU Jiao-jiao, ZHAO Jian-jun, LIU Wei-hua
(Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: The existing maneuvering decision models are deficient in reflecting the confrontation of the air combat. Therefore, we proposed an air combat maneuvering decision model based on game theory, and used Memetic Algorithm (MA) to solve the model. The air combat maneuvering decision model was established based on bi-matrix game. The MA was composed of Particle Swarm Optimization (PSO) and Tabu Search (TS) algorithm, and Simulated Annealing (SA) was introduced to maintain the diversity of particles. Simulation results show that the framework can effectively model the actual air combat, and the improved MA can meet the real-time requirements.

Key words: air combat; maneuvering decision; game theory; Memetic algorithm; Particle Swarm Optimization (PSO)

0 引言

空战机动决策具有强烈的对抗性, 双方都意图通过机动达到己方导弹发射条件, 且避免落入敌方攻击区内, 基于对策的方法进行机动更能体现空战实际。基于对策论的方法已有初步理论进展, 目前主要问题是缺乏实用的求解方法, 且解具有非唯一性^[1-2]。

本文用双矩阵博弈对空战机动决策建模, 并提出基于改进 Memetic 算法 (Memetic Algorithm, MA)^[3] 求解多纳什均衡 (Nash Equilibrium, NE)。MA 算法由粒子群优化 (Particle Swarm Optimization, PSO)^[3] 算法和禁忌搜索 (Tabu Search, TS)^[4] 算法组成, 并引入模拟退

火 (Simulated Annealing, SA)^[4] 算法以保持粒子多样性, 然后对可能的多个解进行优选, 仿真表明, 所建模型及求解方法更符合空战实际。

1 战机运动模型

1.1 飞机质心运动模型

在战机惯性坐标系 xyz 下, 将战机视为可操纵质点, 构建质心运动方程为

$$\begin{cases} \dot{x} = V \cos \gamma \cos \psi \\ \dot{y} = V \cos \gamma \sin \psi \\ \dot{z} = V \sin \gamma \\ \dot{V} = g(n_x - \sin \gamma) \\ \dot{\gamma} = \frac{g}{V}(n_z \cos \phi - \cos \gamma) \\ \dot{\psi} = \frac{gn_z \sin \phi}{V \cos \gamma} \\ n_z < n_{z\max}, n_x < n_{x\max} \end{cases} \quad (1)$$

收稿日期: 2014-06-23

修回日期: 2014-10-23

基金项目: 国家自然科学基金 (61179018, 61102165); 航空科学基金 (20135184008)

作者简介: 顾佼佼 (1986—), 男, 山东烟台人, 博士, 研究方向为海军武器装备与攻防对抗信息化。

式中： V 为战机速度； $\gamma, \psi, \phi, n_x, n_z$ 分别为航迹倾斜角、偏航角、滚转角、切向过载、法向过载； n_{zmax}, n_{xmax} 分别为法向过载极限和切向过载极限； g 为重力加速度。

1.2 敌我相对运动模型

我机 P_i 与敌机 T_j 的相对关系如图 1 所示。图中， $\varphi_{P_i}, q_{P_i}, R_i$ 分别为 P_i 机的方位角、目标进入角和距离，解算方法参见文献[5-6]，类似可计算 φ_{T_j} 和 q_{T_j} 。

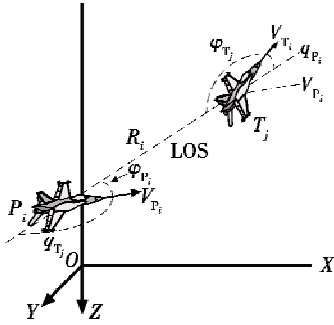


图 1 三维空间战机相对几何关系
Fig. 1 The 3-D geometry relation

2 基于双矩阵对策的机动决策建模

双矩阵对策 $\Gamma^{[7]}$ 包括 3 个基本要素，即

$$\Gamma = (N, \{S_i\}, \{P_i\}) \quad (2)$$

式中： N 为局中人集合； $\{S_i\}$ 为策略集； S_i 为局中人 i 的策略集合； $\{P_i\}$ 为局中人的支付函数集。

对于双矩阵对策 $\Gamma = (N; S_1, S_2; A)$ ，有

$$\begin{cases} S_1 = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m\} \\ S_2 = \{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n\} \\ A = (a_{ij})_{m \times n} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} S_1^* = \{x \in \mathbf{R}^m \mid x_i \geq 0 (i = 1, 2, \dots, m), \sum_{i=1}^m x_i = 1\} \\ S_2^* = \{y \in \mathbf{R}^n \mid y_j \geq 0 (j = 1, 2, \dots, n), \sum_{j=1}^n y_j = 1\} \end{cases} \quad (4)$$

式中： S_1^*, S_2^* 为局中人的混合策略集； $x \in S_1^*, y \in S_2^*$ 为混合策略。局中人的期望支付函数为

$$E(x, y) = \mathbf{x}A\mathbf{y}^T = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_{ij}x_i y_j \quad (5)$$

由此可知，我方机动决策的结果不只与我方的策略有关，也与敌方机动决策有关，称对策 $\Gamma^* = (N; S_1^*, S_2^*; E)$ 为对策 Γ 的混合扩充。

机动决策模型中，局中人指参与空战的敌我双方；策略集为战机的机动动作，将 NASA 提出的 7 种基本机动动作扩充为 11 种，如图 2 所示，使机动动作决策集本身能产生所有机动动作。取几何态势为支付函数定量评估机动后的优势值。双方机动决策集为

$$\begin{cases} \mathbf{u}_P = \{u_P^1, u_P^2, u_P^3, \dots, u_P^{11}\} \\ \mathbf{u}_T = \{u_T^1, u_T^2, u_T^3, \dots, u_T^{11}\} \end{cases} \quad (6)$$

在 t 时刻，敌我双方构造支付矩阵为

$$\begin{matrix} & \mathbf{u}_T^1 & \dots & \mathbf{u}_T^{11} \\ \begin{matrix} \mathbf{u}_P^1 \\ \vdots \\ \mathbf{u}_P^i \\ \vdots \\ \mathbf{u}_P^{11} \end{matrix} & \begin{bmatrix} s_{u_P^1 u_T^1}(t) & \dots & s_{u_P^1 u_T^{11}}(t) \\ \vdots & & \vdots \\ s_{u_P^i u_T^1}(t) & \dots & s_{u_P^i u_T^{11}}(t) \\ \vdots & & \vdots \\ s_{u_P^{11} u_T^1}(t) & \dots & s_{u_P^{11} u_T^{11}}(t) \end{bmatrix} & \end{matrix} \quad (7)$$

式中， $s_{u_i u_j}(t)$ 为 t 时刻我机采取第 i 种机动、敌方采取第 j 种机动时的优势值。

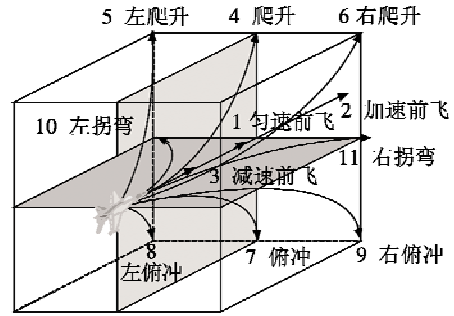


图 2 扩展基本机动动作决策集
Fig. 2 The expanded basic maneuver set

基于博弈方法的解为 NE，它具有非唯一性^[2]。在达到均衡时，博弈双方都不会因为单方改变自己的策略而增加收益。多 NE 可理解为特定条件下飞行员的偏好，以混合策略 NE $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_m)$ 为例，可以理解飞行员对各机动动作的偏好程度，不同 NE 即代表了飞行员的不同偏好。

3 基于改进 MA 的多 NE 求解

本文基于改进 MA 求解多 NE 解，用 PSO 作为全局搜索方法，引入模拟退火 SA 增强粒子多样性；禁忌搜索 TS 作为局部搜索算法；引入拉伸-排斥变换，使算法具备多极值求解能力。基本流程如图 3 所示。

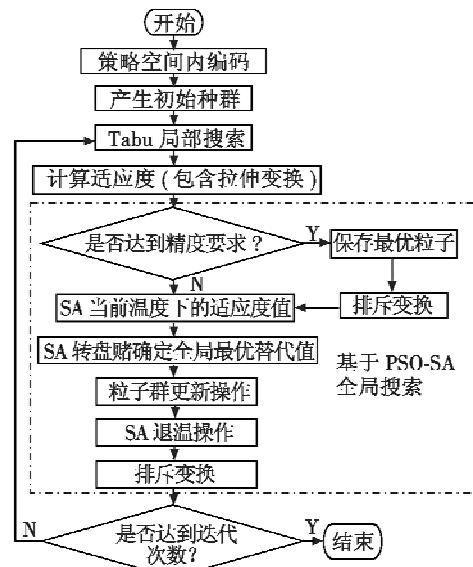


图 3 改进 MA 算法求解流程
Fig. 3 The procedure of improved MA

3.1 基于 PSO-SA 的全局搜索

粒子的位置表示一个混合策略组合,我方混合策略 $\mathbf{x} = (x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(m)})$, 敌方混合策略 $\mathbf{y} = (y^{(1)}, y^{(2)}, \dots, y^{(n)})$, 可将粒子位置定义为 $X = (\mathbf{x}; \mathbf{y})$, 粒子初始速度满足

$$\sum_{j=1}^{m_i} v_j^i = 0 \quad i = 1, 2 \quad (8)$$

式中, m_i 为局中人 i 的纯策略数, 如此便可保证粒子在局中人的混合策略空间组合内搜索^[8], 初始化粒子在策略空间内, 后续搜索则只限定粒子位置及速度在 $[0, 1]$ 区间内, 仿真表明可改善粒子多样性, 同时保证搜索效率。

3.2 基于 TS 的局部搜索

搜索策略用禁忌搜索 TS 算法, 具体算法参见文献[4]。搜索邻域用互换操作 (SWAP) 构造, 将每一个局中人混合策略的概率分布 $\mathbf{x}^{(i)} = (x_1^{(i)}, x_2^{(i)}, \dots, x_{m_i}^{(i)})$ 重新排列, 所有局中人策略概率分布交换子集 $N(\mathbf{x}^{(i)})$ 的笛卡尔乘积构成邻域空间, 始终保证粒子在策略空间内。

3.3 基于拉伸变换求解多极值

本文引入拉伸变换技术^[9]改进支付函数, 使算法具备多 NE 求解能力; $f(x)$ 为原支付函数, x^* 为已探测到的极值点集合, x^* 不再是变换后支付函数 $F(x)$ 的极值, 则算法引导收敛至别的极值点。拉伸变换表示为

$$F(x) = f(x) \prod_{i=1}^m \tanh(\lambda_i \|x - x_i^*\|)^{-1} \quad i = 1, \dots, m \quad (9)$$

式中, λ_i 为拉伸系数, 可根据实际进行设置。

为提高效率算法中还引入了排斥操作, 若检测到粒子进入已知极值 x^* 邻域, 则将粒子位置移出该邻域一定距离。

4 仿真结果分析

设计两组实验对模型及求解方法进行验证, 仿真环境为 Matlab2013a。初始态势想定如表 1 所示。

表 1 初始条件想定

Table 1 The initial parameters of air combat

仿真 编号	参战 单元	初始条件						初始 态势
		x_0/m	y_0/m	z_0/m	$\gamma_0/^\circ$	$\psi_0/^\circ$	$V_0/(m \cdot s^{-1})$	
1	P	0	0	5 000	10	0	210	我机 优势
	T	10 000	0	5 000	-10	0	220	
2	P	0	0	6 000	-45	90	200	反向复 杂均势
	T	10 000	0	5 000	0	-90	200	

假设双方均挂载四代近距空空导弹, 具备离轴、全向发射能力, 取离轴角 $\lambda_{\max} = 30^\circ$, 机动动作集见图 2 中编号, 基本机动动作执行时间 $\Delta t = 1$ s。双方战机最大飞行速度 $V_{\max} = 600$ m/s, 最小飞行速度 $V_{\min} = 100$ m/s, 敌我战机性能相同。

为保证时效性, 算法迭代次数设置为 200 次, 若一次未找到 NE 则重新迭代。对寻到的多个 NE 优先选取纯策略 NE, 若无纯策略 NE 则选取各方概率值较大的 NE 执行机动。

仿真 1 如图 4 所示。图中粗线表示战机已进入攻击区, 可发射导弹, 粗线后为导弹飞行轨迹, 采用比例导引并击中敌机。我方可先敌达成良好攻击条件并发射导弹, 敌方则俯冲逃逸。敌我相对态势变化如图 5 所示, 机动动作序列如表 2 所示。

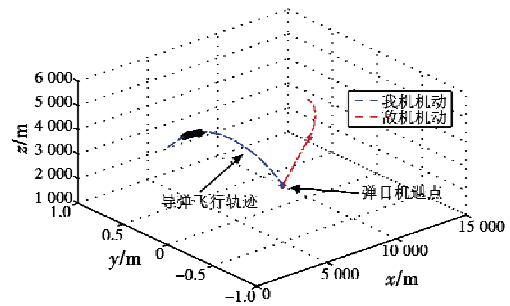


图 4 仿真 1 空战机动及导弹发射轨迹

Fig. 4 The air combat and missile trajectories

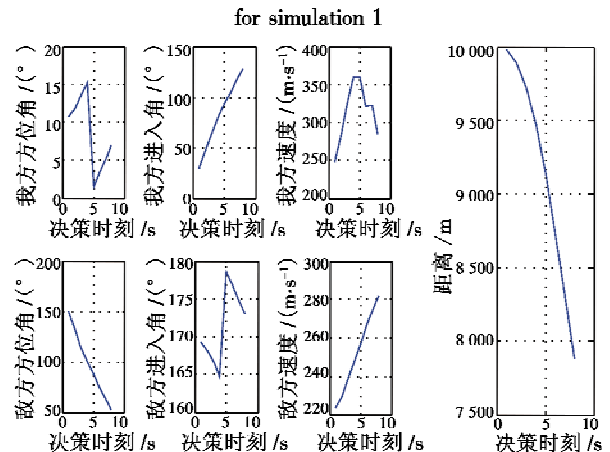


图 5 仿真 1 中双方相对态势变化过程

Fig. 5 The relative situation changing process of simulation 1

表 2 仿真 1 中求解的机动动作序列

Table 2 The maneuver sequence

机动决 策时刻	P	T	纯策略	迭代 次数	机动决 策时刻	P	T	纯策略	迭代 次数
1	2	7	1	1	5	7	7	1	1
2	2	7	1	1	6	3	7	1	1
3	2	7	1	1	7	1	7	1	1
4	2	7	1	2					

表 2 中, 纯策略表示所求解机动动作是否是纯策略 NE, 迭代次数表示求解消耗的迭代次数。可见在明确态势下多数时刻通过一次迭代求得纯策略 NE, 算法的效率较高。

仿真 2 如图 6 所示。由于敌我双方均是理性个体且同时机动, 双方均转向对方, 基本同时达到攻击条件。仿真中假设敌我双方性能相同, 这是基于当前几何态势

采取的最优机动决策,若我方战机性能不占优应考虑进行战术机动。基于改进 MA 算法求解过程如表 3 所示。可见在明确态势下,算法能取到单个纯策略 NE 解;在接近平局态势下,算法能取到多个 NE,即多个机动决策均能达到 NE,包括混合策略 NE。仿真中在决策时刻 9 s 时寻到 3 个 NE,如表 4 所示。这表示敌我双方采取机动动作 1 与动作 3 时均可达到 NE。不同的 NE 可视为飞行员对不同机动动作的偏好,此处优先选取纯策略 NE。

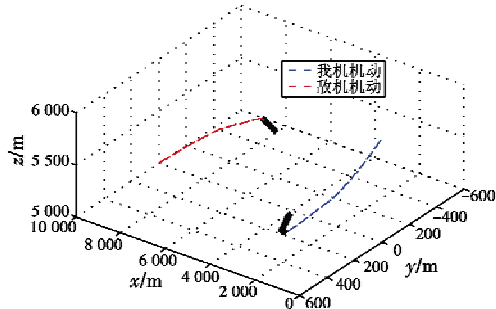


图 6 仿真 2 中双方空战机动轨迹

Fig. 6 The air combat trajectories for simulation 2

表 3 仿真 2 中求解过程

Table 3 The procedure of simulation 2

机动决策时刻	纯策略	NE 总数	迭代次数	机动决策时刻	纯策略	NE 总数	迭代次数
1	1	1	1	6	1	1	3
2	1	1	1	7	1	1	2
3	1	1	2	8	1	1	1
4	1	1	3	9	2	3	1
5	1	1	1	10	1	1	1

表 4 仿真 2 中 9 s 时刻寻到的 3 个 NE

Table 4 The 3 NEs found at 9 s

迭代步数	我方机动		敌方机动	
	1	3	1	3
33	1	0	0	1
181	0.12	0.88	0.18	0.82
182	0	1	1	0

5 结束语

大量空战模拟表明,战机初始相对位置对空战胜负起关键作用,有利的攻击方位仍意味着更好的攻击效果。文中基于双矩阵博弈对空战对抗性建模,并用改进 MA 实时求解,将 NE 的非唯一性视为特定条件下飞行员偏好,所建模型及求解方法具备通用性,可对不同态势建模方法^[10-11]进行验证。所建框架更加符合空战实际,可对空战进行有效建模,求解算法满足实时性要求。

参考文献

[1] AUSTIN F, CARBONE G, MICHAEL F, et al. Game theory for automated maneuvering during air-to-air combat [J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1990, 13 (6):1143-1149.

[2] GRIMM W, WELL K H. Modeling air combat as differential game, recent approaches and future requirements [M]. Berlin:Springer, 1991.

[3] 段海滨,张祥银,徐春芳. 仿生智能计算[M]. 北京:科学出版社,2011. (DUAN H B, ZHANG X Y, XU C F. Bio-inspired computing[M]. Beijing:Science Press, 2011.)

[4] 王凌. 智能优化算法及其应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004. (WANG L. Intelligent optimization algorithms with applications[M]. Beijing:Tsinghua University Press, 2004.)

[5] 张立鹏,魏瑞轩,李霞. 无人作战飞机空战自主战术决策方法研究[J]. 电光与控制, 2012, 19(2):92-96. (ZHANG L P, WEI R X, LI X. Autonomous tactical decision-making of UCAVs in air combat[J]. Electronics Optics & Control, 2012, 19(2):92-96.)

[6] 顾佼佼,赵建军,徐海峰,等. 基于 SPA 及 PSO 的超视距空战态势评估[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(4):691-696. (GU J J, ZHAO J J, XU H F, et al. Situation assessment for beyond-visual-range air combat based on interval SPA and PSO[J]. Systems Engineering and Electronics, 2014, 36(4):691-696.)

[7] 谢政. 对策论导论[M]. 北京:科学出版社,2010. (XIE Z. Game theory: An introduction [M]. Beijing: Science Press, 2010.)

[8] 余谦,王先甲. 基于粒子群优化求解纳什均衡的演化算法[J]. 武汉大学学报:理学版, 2006, 52(1):25-29. (YU Q, WANG X J. Evolutionary algorithm for solving Nash equilibrium based on particle swarm optimization [J]. Journal of Wuhan University: Natural Science Edition, 2006, 52(1):25-29.)

[9] PARSOPOULOS K E, VRAHATIS M N. On the computation of all global minimizers through particle swarm optimization[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2004, 8(3):211-224.

[10] 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. (LIU Z M, ANG L, JIANG C S, et al. Application of multistage influence diagram in maneuver decision-making of UCAV cooperative combat[J]. Electronics Optics & Control, 2010, 17(10):10-13.)

[11] 段海滨,马冠军,赵振宇. 基于模糊规则和动态蚁群-贝叶斯网络的无人作战飞机态势评估[J]. 智能系统学报, 2013, 8(2):119-127. (DUAN H B, MA G J, ZHAO Z Y. UCAV situation assessment based on fuzzy rules and dynamic ant colony-Bayesian network[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2013, 8(2):119-127.)