

大规模编队空战队形优化算法

夏庆军, 张 安, 张耀中

(西北工业大学 电子信息学院, 陕西 西安 710129)

摘要: 大规模编队队形优化是空战战术研究的一个重要方面, 但是对队形优化评估标准还没有建立一种有效的方法. 在利用市场机制完成目标分配的基础上, 提出使用编队目标函数作为队形优化评估标准. 为了验证该评估标准的有效性, 提出利用自适应遗传算法完成大规模编队协同空战队形优化. 首先采用层级方法对大规模飞机编队队形进行编码和解码, 然后利用编队目标函数构造出了适应度函数. 最后通过3组例子阐明了队形优化算法的有效性.

关键词: 队形优化; 自适应遗传算法; 市场机制; 适应度函数

中图分类号: V221.91 **文献标识码:** A

Formation-optimizing algorithm for large-scale air combat

XIA Qing-jun, ZHANG An, ZHANG Yao-zhong

(School of Electronic and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an Shaanxi 710129, China)

Abstract: Formation optimization is an important tactic in large-scale air combats. However, there is no proper standard for evaluating the formation performance. A formation target function is proposed as the evaluation standard based on the market mechanism in target allocation. To verify the effectiveness of this evaluation standard, the adaptive genetic algorithm is applied to the formation optimization. Therein, the hierarchical structure method is used to encode and decode the formation in the large-scale air combat. Next, the fitness function is constructed by using the formation target function. Finally, the effectiveness of the formation optimization algorithm is illustrated by three scenarios.

Key words: formation optimization; adaptive genetic algorithms; market mechanism; fitness function

1 引言(Introduction)

随着信息技术的发展, 现代空战逐渐向网络中心战方向发展, 即战斗机编队在地面指挥所、预警指挥机和其他作战单元的配合下协同作战^[1]. 因此, 超视距(BVR)大规模编队协同作战成为可能, 空战编队战术作为空战战术研究的一个重要方面, 日益受到军方的重视. 与小编队战术相比, 大规模编队战术对飞机队形的要求更加严格, 需要各小分队之间更加密切的配合, 因此不能简单的沿用二机、四机等小规模的小编队战术. 根据编队优化得出敌我编队优势对战表, 可以给作战飞行员以参考, 使他们在作战时可以根据敌方作战编队和敌我双方飞机性能的差异迅速调整我方编队, 使之形成对我方最有利的队形, 从而在一定程度上弥补作战双方飞机的性能差异, 或更好的发挥我方飞机的性能优势, 在作战过程中占据主动地位, 给敌方以有力打击.

钱斌等人提出了利用遗传算法进行空战战术优

化的方法^[2,3]. 这些算法提出通过对抗双方损失比作为队形优化评估标准, 并作为适应度函数, 而损失比是通过运行红蓝对抗仿真模型得到的. 因此, 算法的复杂度较高, 计算量大, 实时性不够好. 本文提出利用市场机制完成目标分配. 在目标分配基础上, 利用编队目标函数作为适应度函数并利用AGA搜索最优队形.

2 编码与解码(Encode and decode)

2.1 编码(Encode)

编码是遗传算法设计中非常关键的一步, 它不仅决定了个体的染色体排列形式, 还决定了将个体的搜索空间转换到解空间的解码方法, 另外也影响到遗传算子的操作. 本文采用二进制编码方法对飞机编队队形进行编码. 大规模飞机编队常采用层级编队的方法, 根据这一特点, 在二进制编码的基础上采用层级编码方法对大规模飞机编队队形进行编码.

2.1.1 基本队形编码(Basic formation encode)

在实际空战中, 编队战术通常是以基本的双机或四机为“单元”, 按照层级的概念建立起大规模的

飞机编队^[4]. 这种层级编队方法可以将大规模空战战术的研究建立在现有空战小编队战术的基础上. 常见的双机或四机队形如图1所示.

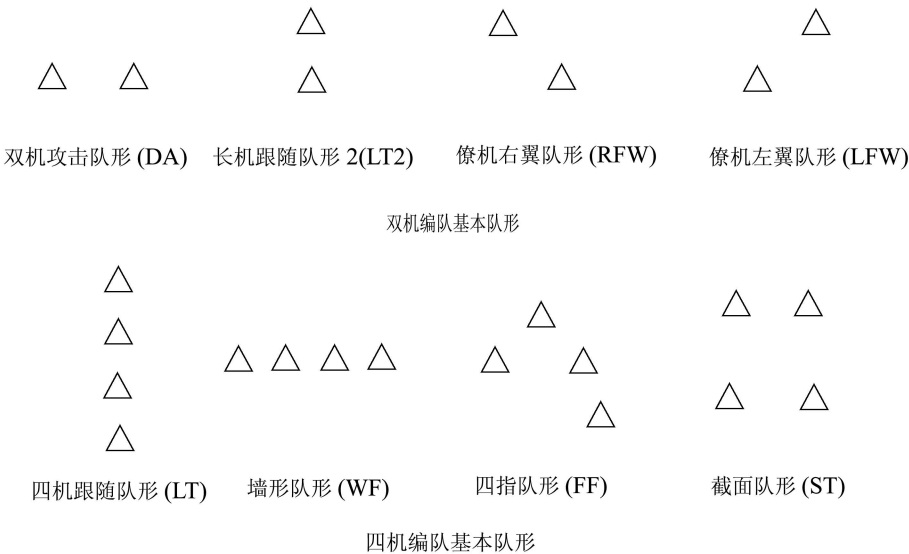


图 1 编队基本队形
Fig. 1 Basic Formation

双机和四机编队的队形共有8种, 因此用3位二进制对基本队形进行编码, 如表1所示.

表 1 基本队形编码

Table 1 Code of basic formation								
队形	DA	LT2	RFW	LFW	LT	WF	FF	ST
编码	000	001	010	011	100	101	110	111

2.1.2 大规模编队队形编码(Large scale formation encode)

采用层级编码方法对大规模飞机编队队形进行编码. 其编码方法是对大规模飞机编队进行自上而下的层级划分, 直到划分到基本编队单元, 再自下而上进行编队单元的编码组合, 直到组合出整个大规模飞机编队的编码. 编队的划分过程与一棵树相对应, 根节点对应层级划分后组合队形, 叶节点对应基本队形, 非叶子节点对应组合队形. 在编码过程中, 用0表示该节点为基本队形, 用1表示组合队形. 图2说明了编码过程.

2.2 大规模编队队形解码(Large scale formation decode)

解码是编码的逆过程, 它将编码过程所形成的编码翻译成可用于求解目标函数值的变量值. 解码是为了使得遗传算法可以对个体的适应度进行

评价, 是遗传算法运行的一个必然环节. 对层级编码进行解码就是解出各架战斗机的空间坐标. 由于编队基本队形其空间相对距离和方向是已知的, 因此可以将大规模编队队形编码还原为其对应的队形, 然后根据给定的长机坐标就可以计算每架战斗机的空间坐标. 其中关键一步是将大规模编队队形编码还原为其对应的队形, 通过一例子进行说明.

假设某队形编码为: 1011 0101 1001 0011 0011 0100 0100. 首先, 将编码按4位一组进行分组, 首位为1表示组合队形, 首位为0表示基本队形. 然后, 将编码还原为编码树. 最后根据编码树还原编队队形. 以上过程是编码的逆过程. 如图2所示.

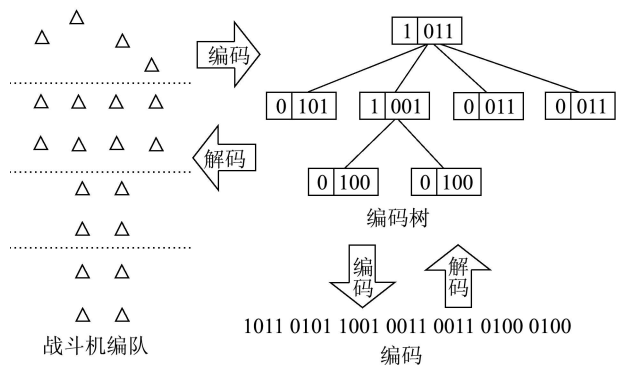


图 2 队形编码和解码示意图
Fig. 2 Formation encode and decode

3 构造适应度函数(Construct fitness function)

适应度函数代表了个体的优劣,并且决定个体能否被选择到下一代参与遗传计算.考虑编队协同作战的特点,我方战斗机编队在进行攻击前,需要根据战场态势完成目标分配.目标分配的结果会影响编队的作战效能,遗传算法的目的就是从初始种群开始进行随机搜索直到查找到能够使编队获得最大作战效能的编队队形.因此,可以选择影响目标分配结果的函数作为适应度函数.

市场机制算法采取逐个分配目标的方式,因此战斗机在计算当前分配目标时可以很好地考虑以前分配方案的影响,因此总体分配方案的质量较高.编队长机只根据标值进行目标分配,因此其功能相对简单,而且能有效控制战斗机数量.分配方案执行过程中出现扰动,如某个战斗机受到干扰,性能严重下降,该战斗机可以上报编队长机,由后者将目标重新招标,因而避免了全局分配方案的重新计算,系统鲁棒性较强^[5].

市场机制通过模仿经济行为中“招标一投标一中标”机制实现任务的委派和迁移并将标值作为任务分配的控制变量.因此,可以使用标值构造适应度函数.

3.1 目标分配算法(Target allocation algorithm)

目标分配问题可以描述为将已探测到 M 个目标分配给我方 N 架战斗机.在空战的初始阶段,由编队长机完成目标分配.编队长机收集所有目标的相关参数,并确定招标顺序.各战斗机接收到招标信息后,根据自身态势计算针对于该目标的标值,并反馈给编队长机.编队长机从各战斗机反馈的标值中选择最大的,同时将目标分配给该战斗机.重复以上过程,直到所有目标完成分配为止.算法步骤如下:

- 1) 读入待攻击目标及相关参数;
- 2) 随机产生目标的招标顺序;
- 3) 随机产生 N 架战斗机投标顺序;
- 4) 按招标顺序选择一个未被分配的目标进行招标;
- 5) 按投标顺序计算战斗机的标值.如果战斗机已分配目标数等于弹载量,则不参与投标;
- 6) 将目标分配给投标标值最大的战斗机;
- 7) 判断所有目标是否完成招标.如果完成招标,算法结束,否则转4).

3.2 标值与适应度函数(Bid value and fitness function)

战斗机 i 的标值定义为收益与代价之差,即

$$J^i = R^i - C^i. \quad (1)$$

战斗机 i 的收益 R^i 可以用战斗机 i 相对于目标的综合优势函数表示,而代价 C^i 可用目标相对战斗机 i 的综合优势函数表示^[6].

综合优势函数可分解为距离优势、角度优势和能量优势^[7].距离优势 S^r 、角度优势 S^a 、能量优势 S^e 和综合优势 S 分别由公式(2)~(5)计算:

$$S_r(R) = e^{-[(R-R_0)/\delta]^2}, \quad (2)$$

$$S_a = (|\varphi_t| - |\varphi_a|)/180, \quad (3)$$

$$S_e = (|E_{ga}| - |E_{gt}|)/E_{ga}, \quad (4)$$

$$S = \omega_r S_r + \omega_a S_a + \omega_e S_e. \quad (5)$$

其中

$$R_0 = (R_{\min} + R_{\max})/2.$$

若令

$$S_r(R_{\max}) = S_r(R_{\min}) = 0.05,$$

可求得

$$\delta = 0.6(R_{\max} - R_{\min}).$$

R 为战斗机与目标之间的距离; $R_{\max}$ 和 $R_{\min}$ 分别是导弹攻击区的近边界和远边界; φ_t 和 φ_a 分别为目标进入角和目标方位角; E_{ga} 和 E_{gt} 分别是攻击机和目标机的单位能量; ω_r , ω_a , ω_e 为权重系数.根据专家经验权重系数 ω_r , ω_a , ω_e 的取值分别为0.5, 0.3, 0.2.

定义编队目标函数 J 为

$$J = \sum_{i=1}^N (R^i - C^i), \quad (6)$$

其中: $\sum_{i=1}^N R^i$ 为完成所有目标的总收益; $\sum_{i=1}^N C^i$ 为完成所有目标的总代价; 队形优化的目的就是使我方战斗机编队目标函数 J 取得最大值.因此,可以利用编队目标函数作为适应度函数进行遗传操作.

4 自适应遗传算法参数选择(Parameter selection)

在算法的起始阶段,因为种群的多样性会影响算法能否收敛到最优解,因此需要较大的交叉和变异概率.随着算法的进行,为了使种群稳定地收敛到最优解,需要较小交叉和变异概率^[8].采用公式(7)可以满足参数自适应改变的要求:

$$\begin{cases} P_c = 0.5[1 - \frac{f_t^i - f_{t,\min}}{f_{t,\max} - f_{t,\min}} \cdot \frac{1}{1 + e^{-k_c \Omega}}], \\ P_m = 0.1[1 - \frac{f_t^i - f_{t,\min}}{f_{t,\max} - f_{t,\min}} \cdot \frac{1}{1 + e^{-k_m \Omega}}]. \end{cases} \quad (7)$$

此处, P_c 和 P_m 分别为交叉和变异概率,

$$\begin{aligned} \Omega &= D_t/D_{\max}, \\ D_t &= 1/N \sum_{i=1}^N (f_t^i - f_{t,\text{avg}})^2, \\ D_{\max} &= \max(D_j: j = 1, 2, \cdots, t). \end{aligned}$$

参数 Ω 表示了种群的多样性. 当 Ω 变小时, 种群的多样性下降, 需要较大的交叉和变异概率以提高多样性. 反之, 当 Ω 变大时, 种群的多样性上升, 需要较小的交叉和变异概率以提高稳定性. P_c 和 P_m 的变化曲线如图3所示.

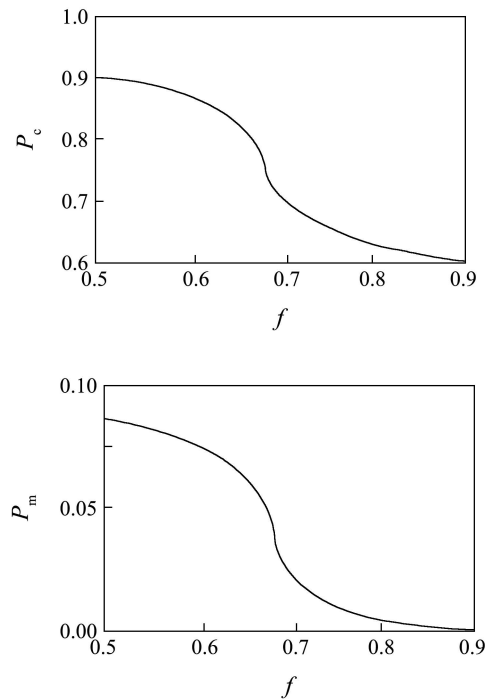


图 3 遗传参数变化曲线

Fig. 3 Change rule of Genetic parameter

图3显示: 当适应度值小于0.6或者大于0.7, 算法的 P_c 和 P_m 曲线比较平滑. 这样就能够使 P_c 和 P_m 保持相对较高值以避免算法起始阶段的早熟收敛, 而在算法的最后阶段使 P_c 和 P_m 保持相对较低值以保护优秀个体从而提高收敛速度.

5 算例分析(Example analysis)

为了验证遗传算法的性能, 考虑3种作战场景:

场景 1 16vs16; 指定红方和蓝方队形.

场景 2 16vs16; 采用与场景1相同的红方队形, 蓝方编队队形使用遗传算法进行优化.

场景 3 12vs16; 红方编队由16架战斗机组成, 检验蓝方编队在数量处于劣势时, 由遗传算法所选择队形的性能.

给定仿真的初始条件如下: 飞机之间的距离为 2 km; 红方和蓝方战斗机类型一致; 红蓝双方编队长机的初始参数设置如表2所示.

表 2 编队长机初始参数

Table 2 Lead aircraft initial parameters

	x/m	y/m	z/m	$v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	θ/rad	ϕ/rad
红方长机	6500	5000	8000	280	0	3.1
蓝方长机	1000	4500	3000	260	0	0.3

图4显示了这3种场景下蓝方编队采用的队形, 对这3种场景进行效能评估得到红蓝编队的损失比如表3所示.

图4中, 上方16架战斗机为红方编队, 下方为蓝方编队采取的队形.

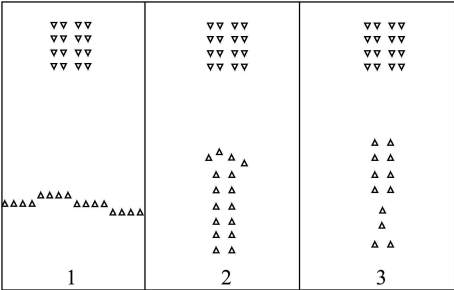


图 4 蓝方编队采用的队形

Fig. 4 Formation adopted by blue side

表 3 双方损失比

Table 3 Loss ratio of two sides

	场景1	场景2	场景3
红编队的损失	8	16	16
蓝编队的损失	10	0	4

通过仿真结果图4与表3可以看出: 在场景1下, 蓝方编队队形未进行优化, 红蓝编队损失比为8:10, 蓝方编队处于劣势; 在场景2下, 蓝方编队采用自适应遗传算法选择了最优LT4队形对抗红方ST队形, 此时蓝方编队取得最优作战效果; 在场景3下, 蓝方编队战斗机数量处于劣势, 但由于使用遗传算法选择了最优队形, 从而使蓝方编队以较少的损失全歼红方编队战斗机.

6 结束语(Conclusion)

大规模编队队形优化对提高作战效能具有重要意义. 提出通过自适应遗传算法完成队形优化并对自适应遗传算法进行了设计. 首先, 采用层级方法对编队队形进行编码和解码. 然后, 在市场机制完成目标分配的基础上, 利用编队目标函数构造出了适应度函数. 最后, 对自适应遗传算法的交叉概率和变异概率进行了优化. 算例分析表明: 当双方战斗机编队性能类似时, 通过自适应遗传算法对队形进行优化, 能够提高编队作战效能.

参考文献(References):

- [1] ZOU Y F, PRABHAKAR R. Distributed formation flight control using constraint forces[J]. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 2009, 32(1): 112 – 120.
- [2] 钱斌, 姜长生. 遗传算法在直升机空战编队优化中的应用[J]. *电光与控制*, 2008, 15(1): 6 – 9.
(QIAN Bin, JIANG Changsheng. On air combat formation of helicopters based on genetic algorithm[J]. *Electronics Optics & Control*, 2008, 15(1): 6 – 9.)
- [3] 张科施, 王正平. 基于遗传模拟退火算法的空战编队优化研究[J]. *西北工业大学学报*, 2003, 21(4): 477 – 480.
(ZHANG Keshi, WANG Zhengping. On optimizing large-scale air-combat formation with simulated-annealing GA[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2003, 21(4): 477 – 480.)
- [4] MULGUND S, HARPER K. Air combat tactics optimization using stochastic genetic algorithms[C] // *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*. San Diego: IEEE, 1998, 4: 3136 – 3141.
- [5] GENG Y L, JANG C S, LI W H. Multi-fighter coordinated multi-target attack system[J]. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2004, 21(1): 18 – 23.
- [6] LIU L, WANG L, ZHENG Z Q, et al. A learning market based layered multi-robot architecture[C] // *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics & Automation*. New Orleans: IEEE, 2004, 4: 3417 – 3422.
- [7] 浦鹏, 张金春, 孙玺蓓. 多机协同多目标分配战术决策研究[J]. *战术导弹技术*, 2007, 27(2): 57 – 61.
(PU Peng, ZHANG Jinchun, SUN Xiqing. The study of tactical decision of multi-target distribution in cooperative air combat[J]. *Tactical Missile Technology*, 2007, 27(2): 57 – 61.)
- [8] LI Q, HE W H. A study on image segmentation by an improved adaptive algorithm[C] // *Proceedings of the 6th International Conference on Machine Learning and Cybernetics*. Hong Kong: IEEE, 2007, 3: 1570 – 1573.

作者简介:

夏庆军 (1976—), 男, 博士研究生, 目前研究方向为复杂系统建模、仿真与效能评估等, E-mail: xiajun12@yahoo.com.cn;

张安 (1962—), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为航空武器火力控制原理复杂系统建模、仿真与效能评估、智能化指挥与控制工程等, E-mail: zhangnan@nwpu.edu.cn;

张耀中 (1974—), 男, 副教授, 硕士生导师, 目前研究方向为航空武器火力控制原理、复杂系统建模、仿真与效能评估、智能化指挥与控制工程等, E-mail: zhangnan@nwpu.edu.cn.