

中远距协同空战多目标攻击决策 *

李战武^{1,2}, 常一哲¹, 孙源源³, 杨海燕⁴, 罗卫平¹

(1. 空军工程大学航空航天工程学院, 西安 710038 2. 西北工业大学电子信息学院, 西安 710072 ;

3. 解放军 94968 部队, 南京 210000 4. 空军工程大学空管领航学院, 西安 710051)

摘 要 :根据先进战斗机的技术特点和中远距协同空战发展方向,提出一种基于先敌发现、先敌发射、先敌摧毁能力的空战态势分析模型。同时,将并行遗传算法与分布估计算法相结合的并行分布遗传算法应用于上述模型,给出了求解多目标攻击决策问题的算法。最后利用具体算例进行仿真验证。结果表明空战态势分析模型能够较为准确地描述中远距多机协同空战,采用的算法具有较好的可行性和实时性,为中远距多机协同空战的多目标攻击决策提供了新的思路和方法。

关键词 :中远距空战,协同空战,多目标攻击,并行分布遗传算法

中图分类号 :V271.4

文献标识码 :A

A Decision-Making for Multiple Target Attack Based on Characteristic of Future long-range Cooperative Air Combat

LI Zhan-wu^{1,2}, CHANG Yi-zhe¹, SUN Yuan-yuan³, YANG Hai-yan⁴, LUO Wei-ping¹

(1. School of Aeronautics and Astronautics Engineering Air Force Engineering University Xi'an 710038, China ;

2. School of Electronic Communication Northwestern Polytechnical University Xi'an 710072, China ;

3. Unit 93619 of PLA Nanjing 210000, China 4. ATC Navigation College Air Force Engineering University Xi'an 710051, China)

Abstract :Considering the technical characteristics of the advanced fighters and the trend of future long-range cooperative air combat, a model of air combat situation assessment based on first view, first shot, first kill is proposed. A parallel distribution genetic algorithm consist of estimation of distribution algorithm and parallel genetic algorithm is used for decision-making for cooperative multiple target attack. The model and the algorithm is verified with simulation, and the results demonstrates the model is able to describe mode of future long-range cooperative air combat and the algorithm's feasibility and time-saving. A new method is proposed for the decision-making for multiple target attack on future long-range cooperative air combat.

Key words :long-range air combat, cooperative air combat, multiple target attack, parallel distribution geneticalgorithm

0 引言

随着现代科技的高速发展,先进战斗机已经逐渐装备各国空军部队。而先进战斗机突出的特点就是具备先敌发现、先敌发射、先敌摧毁的能力。由此

可见,以上特点也将是协同空战的发展趋势和作战模式。多目标攻击决策问题作为多机协同空战的基础,一直是国内外学者研究的重点[1-7]。

本文根据先进战斗机的特点及协同空战的发展趋势,在空战态势分析模型的建立中将动态因素

收稿日期 2015-01-18

修回日期 2015-03-16

* 基金项目 国家自然科学基金资助项目(61472441)

作者简介 李战武(1978-)男,陕西西安人,博士,副教授,硕士生导师。研究方向:火力指挥控制原理与技术。

和静态因素相结合,提出一种新的空战态势分析模型并采用基于并行遗传算法与分布估计算法的并行分布遗传算法对目标分配问题进行解算。

1 空战态势分析

根据先进战斗机的性能特点以及协同空战的发展趋势,综合敌我双方飞机静态和动态因素,对具体的空战态势模型进行构建,双方的空战态势以相对的综合空战能力作为衡量标准,如图 1 所示。

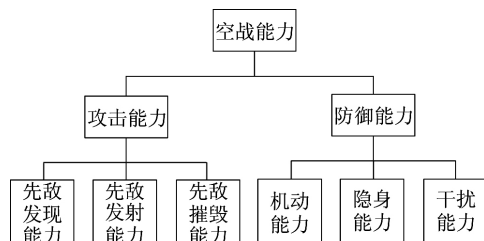


图 1 模型参数结构图

1.1 先敌发现能力

根据敌我双方的相对位置关系以及探测装备的特点,可定义先敌发现能力如下:

$$\varepsilon_1 = \begin{cases} \ln(1 + K + d_{\max} + \frac{k_R \times IR_{\max} \times \alpha_R}{r}), & r > R_{\max} \text{ 或 } \varphi > \alpha_R \\ \ln(1 + K + d_{\max} + \frac{k_R \times R_{\max} \times \alpha_R}{r}), & r > IR_{\max} \text{ 或 } \varphi > \alpha_{IR} \\ \ln(1 + K + d_{\max} + \frac{k_R \times R_{\max} \times \alpha_R + k_{IR} \times IR_{\max} \times \alpha_{IR}}{r}), & \text{else} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中 K 为预警机支援系数,若有预警机支援 $K=1$,无预警机支援 $K=0$; d_{\max} 为数据链最大作用距离; k_R, k_{IR} 分别为雷达、红外探测设备的抗干扰系数; R_{\max}, IR_{\max} 分别为雷达、红外探测设备最大作用距离; α_R, α_{IR} 分别为雷达、红外设备的最大搜索范围角; r 为敌我双方的距离; φ 为我机相对敌机的提前角; q 为敌机相对我机的进入角。角度、距离定义如图 2 所示。

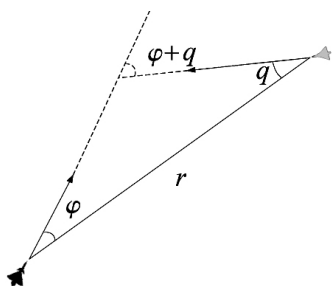


图 2 敌我双方角度和距离定义

1.2 先敌发射能力

根据敌我双方的相对位置关系以及武器装备

的特点,可定义先敌发射能力参数如下:

$$\varepsilon_2 = \begin{cases} 0, & r > D_{\max} \text{ 或 } \varphi > \alpha_R \\ \ln(1 + \frac{K_i \times D_{\max} \times R_{\max} \times \alpha_R \times P_{mr} \times k_R \times \bar{r}}{RCS^{0.25}}), & \text{else} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中 K_i 为我方第 i 架战机携带中远距雷达弹的数量; D_{\max} 为中远距雷达弹的最大发射距离; $P_{mr} = 1 - (1 - P_r)^N$ 为编队在雷达最大作用距离上发现目标的概率; P_r 为单架飞机在最大发现目标距离发现目标的概率; N 为编队的飞机数量; k_R 为雷达的抗干扰系数; \bar{r} 为进行归一化处理后的距离系数。

1.3 先敌摧毁能力

根据敌我双方武器装备的特点,可定义先敌摧毁能力如下:

$$\varepsilon_3 = \ln(1 + \frac{\varepsilon_{31} \varepsilon_{32}}{r}) \quad (3)$$

式(3)中 $\varepsilon_{31}, \varepsilon_{32}$ 分别为导弹的命中能力和毁伤能力,命中能力的具体模型参考式(4)

$$\varepsilon_{31} = P_j \times d_H \times CEP \times n_y \times k_H \times V_{m0} \quad (4)$$

式(4)中 P_j 为导引头截获概率; d_H 为导引头作用距离; CEP 为圆概率误差; n_y 为导弹最大可用过载; k_H 为导引头的抗干扰系数; V_{m0} 为导弹的发射初速度。

毁伤能力的具体模型参考式(5)

$$\varepsilon_{32} = \frac{V_c \times N_p \times m \times d_m \times k_m}{\alpha} \quad (5)$$

式(5)中 V_c 为破片初速; N_p 为破片总数; m 为单枚破片质量; d_m 为引信作用距离; k_m 为引信抗干扰系数; α 为破片速度衰减系数。

1.4 机动能力

考虑到现代空战中飞机机动和武器发射的特点,定义飞机的机动能力如下^[8]:

$$\eta_1 = n_{y\max} + n_{ys} + SEP \times \frac{9}{300} \quad (6)$$

式(6)中 $n_{y\max}$ 为飞机的最大可用过载; n_{ys} 为飞机最大瞬时盘旋过载; SEP 为最大单位重力剩余功率。

1.5 隐身能力

根据雷达反射截面积和飞机表面温度随角度的变化特性^[9],可以定义飞机的隐身能力如下:

$$\eta_2 = \begin{cases} \ln(1 + \frac{r}{R_{\max'}} \times (\frac{1}{RCS(\varphi)} + 1)), \\ q > \alpha_{IR}' \text{ 或 } r > IR_{\max}' \text{ 且 } q < \alpha_R' \text{ 且 } r < R_{\max}' \\ \ln(1 + \frac{r}{IR_{\max'}} \times (\frac{1}{T(\varphi)} + 1)), \\ q > \alpha_R' \text{ 或 } r > R_{\max}' \text{ 且 } q < \alpha_{IR}' \text{ 且 } r < IR_{\max}' \\ \ln(1 + \frac{r}{R_{\max'}} \times (\frac{1}{T(\varphi)} + \frac{1}{RCS(\varphi)})), \\ q < \alpha_{IR}' \text{ 且 } r < IR_{\max}' \text{ 且 } q < \alpha_R' \text{ 且 } r < R_{\max}' \\ 0, \\ \text{else} \end{cases} \quad (7)$$

其中:

$$RCS(\varphi) = \begin{cases} \frac{e^{\frac{\pi^2}{2}} - 1}{e^{\frac{(\frac{\varphi}{180} \times \pi - \frac{\pi}{2})^2}{2}} - 1} \times RCS_H, \\ 0 \leq \varphi < 90^\circ \text{ 或 } 90^\circ < \varphi \leq 180^\circ \\ RCS_W, \\ \varphi = 90^\circ \end{cases} \quad (8)$$

$$T(\varphi) = T_h \times e^{\frac{\varphi}{180} \times \pi} \quad (9)$$

式(7)~式(9)中 RCS_H 为飞机的迎头平均雷达截面积 RCS_W 为飞机的侧面平均雷达截面积 T_h 为机头的温度 R_{\max}' 为对方飞机的雷达最大探测距离 IR_{\max}' 为对方飞机的红外探测设备最大探测距离 α_R' 为对方飞机的雷达最大搜索范围角 α_{IR}' 为对方飞机的红外最大搜索范围角。

1.6 干扰能力

电子干扰能力主要考虑电子干扰的有源干扰和箔条、红外干扰弹的无源干扰^[10-11] 其定义为:

$$\eta_3 = \ln(1 + \frac{N' \times \delta \times \alpha'}{t_s \times V} + \frac{P_d \times P_j \times P_i \times G_j \times k_{dis} \times \Omega}{r}) \quad (10)$$

式(10)中 N' 为有效箔条数 δ 为单根箔条的平均有效反射面积 α' 为箔条的衰减系数 t_s 为箔条包的散开时间 V 为箔条的平均下降速度 P_d 为干扰机在雷达方向上的干扰功率 P_j 为干扰机的截获概率; P_i 为干扰机的判断概率 G_j 为干扰机天线的增益; k_{dis} 为电子干扰机的干扰调节系数 Ω 为天线波束的最大指向范围。

1.7 通信能力

协同空战中友机间的通信能力尤为重要 根据空战中通信的特点 定义通信能力如下^[12]:

$$\eta_4 = \ln(1 + P_{C1} \times (C_1)^{0.3} + P_{C2} \times (C_2)^{0.3}) \quad (11)$$

式(11)中 P_{C1} 、 P_{C2} 分别为无线电台和数据链的

可靠性 $C_1 = \sum_{i=1}^m \frac{R_{C1}}{r_i}$, $r_i \neq 0$, $C_2 = \sum_{i=1}^m \frac{d_{\max}}{r_i}$, $r_i \neq 0$ 。 r_i 为

我机与第 i 架友机的距离。 R_{C1} 为无线电台的最大作用距离。

1.8 相对综合空战能力

在多机协同空战的条件下, 设我方有 m 架飞机 敌方有 n 架飞机 则我方第 i 架飞机对敌方第 j 架飞机的空战能力为:

$$p(i, j) = \varepsilon_1(i, j) \times \varepsilon_2(i, j) \times \varepsilon_3(i, j) \times K_A + \eta_1(i) + \eta_2(i, j) + \eta_3(i, j) + \eta_4(i) \quad (12)$$

式(12)中 K_A 为先敌攻击能力的调节系数。敌机对我机的空战能力用相同的方法计算。由相对综合空战能力模型可以得到我机相对敌机的空战能力矩阵 $P = \{p(i, j)\}_{m \times n}$ 以及敌机相对我机的空战能力矩阵 $P' = \{p'(i, j)\}_{m \times n \odot}$

2 目标分配模型构建

以最小化敌机生存概率以及对我方的毁伤概率为原则 构建目标函数如下^[13-15]:

$$J_{\min} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [\bar{p}'(i, j) \cdot ((\prod_{i=1}^m (1 - \bar{p}(i, j)))^{X(i, j)})] \quad (13)$$

式(13)中 $\bar{p}'(i, j)$ 、 $\bar{p}(i, j)$ 分别为对 $p'(i, j)$ 、 $p(i, j)$ 进行归一化处理后的结果。即

$$\bar{p}'(i, j) = \frac{p'(i, j)}{\max\{\max(P'), \max(P)\}}$$

$$\bar{p}(i, j) = \frac{p(i, j)}{\max\{\max(P'), \max(P)\}}$$

$\bar{p}'(i, j)$ 表示第 j 架敌机对第 i 架我机的毁伤概率, $\prod_{i=1}^m (1 - \bar{p}(i, j))^{X(i, j)}$ 表示第 j 架敌机的生存概率。约束条件为:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^m x_{ij} \leq m_i \\ \text{st.} \sum_{j=1}^n x_{ij} \leq n_j \leq K_i \\ x_{ij} \in \{0, 1\} \end{cases}$$

x_{ij} 为布尔值 $x_{ij}=1$ 表示我方第 i 架飞机攻击敌方第 j 架飞机 $x_{ij}=0$ 表示我方第 i 架飞机不攻击敌方第 j 架飞机。第 1 个约束条件表示一架敌机最多被 m_i 架我机攻击 第 2 个约束条件表示我方一架飞机最多能攻击 n_j 架敌机 且可攻击的敌机数 n_j 必须少于我方飞机携带的导弹数量。

3 并行分布遗传算法设计

本文采用粗粒度并行遗传算法(Coarse Grained Parallel Genetic Algorithm CGPGA)以及分布估计算法(Estimation of Distribution Algorithm EDA)相结合的并行分布遗传算法^[16-17]。并行遗传算法可以有效

降低遗传算法在全局搜索能力方面的固有的缺陷,且保持较强地局部搜索能力。分布估计算法采用基于搜索空间的宏观层面的进化方法,相比遗传算法具备更强的全局搜索能力和更快的收敛速度^[18-19]。因此,将并行遗传算法与分布估计算法结合,可以同时提高搜索能力和进化速度。算法具体流程如图3所示:

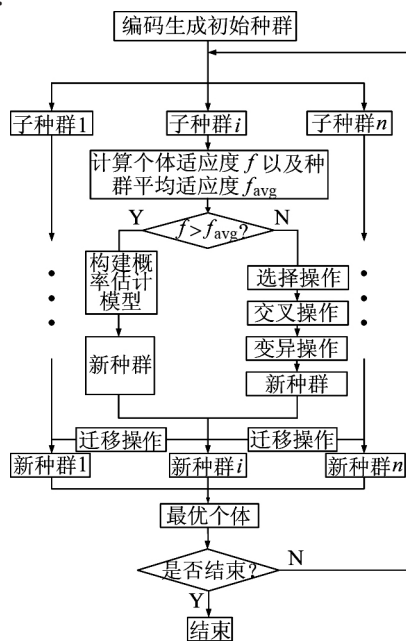


图3 改进算法的流程图

3.1 问题编码

算法中为了保证实时性,采用十进制编码。在武器-目标分配问题中,可以采用以基因位表示武器所对应的目标来编码,也可以采用分配给目标的武器编号为编码。在本文选用后一种方式,即每一个基因值代表载机的编号。

3.2 适应度函数的确定

适应度函数的选择是决定算法收敛性、实时性的关键。因此,在本文中,选取目标分配函数作为适应度函数。即适应度函数为:

$$f = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [\bar{p}'(i,j) \bullet ((\prod_{i=1}^m (1 - \bar{p}(i,j)))^{X(i,j)})] \quad (15)$$

式(15)中参数的意义与式(13)中相同。

3.3 操作算子的确定

交叉算子。文中对交叉算子进行了改进,个体的交叉率可以根据适应度值和进化代数进行调节:

$$P_c = \begin{cases} P_{c_max} - \left(\frac{P_{c_max} - P_{c_min}}{it_max} \right) * iter, & f' > f_{avg} \\ P_{c_max}, & f' \leq f_{avg} \end{cases} \quad (16)$$

P_c 为交叉概率 P_{c_max} 为最大交叉概率 P_{c_min} 为最小交叉概率 it_max 为最大代数 $iter$ 为当前代数 f' 为交叉的两个个体中较大的适应度 f_{avg} 为种群平均适应度。

变异算子。本文对变异算子进行了改进,个体变异率也根据适应度值和进化代数进行调节。变异概率的总趋势也应该是逐渐减小,从而群体能够迅速集中。

$$P_m = \begin{cases} P_{m_max} + \left(\frac{P_{m_max} - P_{m_min}}{it_max} \right) * iter, & f > f_{avg} \\ P_{m_max}, & f \leq f_{avg} \end{cases} \quad (17)$$

式(17)中 P_m 为变异概率 P_{m_max} 为最大变异概率 P_{m_min} 为最小变异概率 f 为要变异的个体适应度。

迁移算子。本文采用自适应循环迁移算子,即根据子种群的相对适应度值调整迁移概率,将子种群中适应度高的个体发给其他子种群^[20]。

$$P_q = k \left(1 - \frac{f - f_{min}}{f_{max} - f_{min}} \right) \quad (18)$$

式(18)中 f_{min} 为群体中适应度的最小值 f_{max} 为群体中适应度的最大值 k 为比例系数。

构建概率模型。概率模型是分布估计算法的核心。分布估计算法通过概率模型及其更新来描述解空间分布以及种群整体进化趋势^[21]。模型的构建过程为:

$$a. \text{形成 } N \text{ 个初始种群} \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & \cdots & q_{1n} \\ q_{21} & q_{22} & \cdots & q_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ q_{m1} & q_{m2} & \cdots & q_{mn} \end{bmatrix};$$

b. 评估初始种群中所有个体的适应度,按从高到低的顺序选出最优的 m 个个体 ($m \leq N$);

c. 从 m 个个体中估计每个变量取 1 的个体作为概率模型并对其采样,形成新种群。

4 仿真计算与结果分析

假设我方 3 机编队协同攻击敌方 4 机编队。下页表 1~ 表 3 分别给出了敌我双方的位置信息,归一化后的我机相对敌机的空战能力以及敌机相对我机的空战能力。在算法中 $P_{c_max}=0.8$ $P_{c_min}=0.1$, $P_{m_max}=0.08$ $P_{m_min}=0.01$ $k=0.5$ 。

根据以上信息,利用改进后的算法进行寻优,得到如下多目标攻击决策方案:

表 1 敌我双方位置信息

		X/km	Y/km	Z/km
我机	1	6	2	4.9
	2	8	2.5	5.1
	3	12	2	5
敌机	1	1	12	4.75
	2	5	12	4.85
	3	9.5	14	4.7
	4	14	14.2	4.75

表 2 我机相对敌机的空战能力矩阵

敌机 我机	1	2	3	4
1	0.881 9	0.881 0	0.882 8	0.884 1
2	0.680 5	0.678 9	0.680 3	0.681 5
3	1.000 0	0.998 4	0.998 4	0.998 5

表 3 敌机相对我机的空战能力矩阵

敌机 我机	1	2	3	4
1	0.312 3	0.311 3	0.521 2	0.522 6
2	0.312 8	0.311 2	0.520 5	0.521 6
3	0.315 0	0.313 1	0.521 0	0.521 1

表 4 多目标攻击决策方案

敌机	1	2	3	4
我机	2	1	3	3

通过以上分配方案可以看到,我方 2 号机对敌方 1 号机,我方 1 号机对敌方 2 号机,我方 3 号机对敌方 3 号机以及 4 号机的分配方案可以保证总的威胁评估值最小。

为了兼顾种群的多样性和算法的实时性,在本文的算法中,将初始种群分为 2 个子种群,每个子种群有 50 个染色体,每个群体进化 100 代。进化过程如图 4 所示,为了研究算法的收敛速度和收敛值,将文中提出的算法与标准的遗传算法进行比较,具体参数相同。从图 4 中可以看到,本文提出的并行分布遗传算法与标准遗传算法相比,在收敛精度上一致,但在收敛速度方面较好。文中提出的算法在进化到第 18 代已经收敛,而标准的遗传算法在进化到第 23 代时,目标函数才完全收敛。在精度一定的情况下,文中提出的并行分布遗传算法在进

化的速度上更具有优势,能够满足对目标分配问题解算的实时性要求。

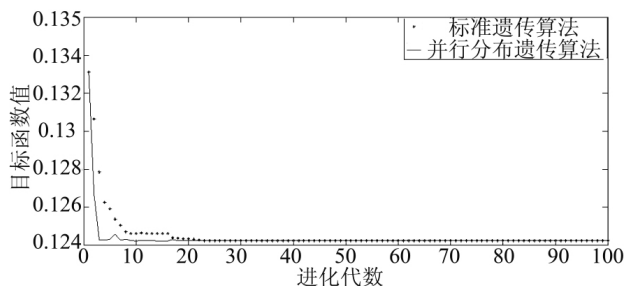


图 4 进化过程曲线

5 结论

多目标攻击决策是现代中远距协同空战的核心和基础。本文针对中远距协同空战的特点和发展方向,提出了一种基于先敌发现、先敌发射、先敌摧毁能力的空战态势分析模型,构建了考虑敌机生存概率和对我方毁伤概率最小的目标分配模型,并采用一种将分布估计算法和并行遗传算法结合的并行分布遗传算法。通过仿真验证,可以看到本文提出的空战态势分析模型能够较为准确地描述中远距协同空战的特点,文中采用的并行分布遗传算法可以快速、有效地计算得到协同多目标攻击决策问题的最优解,为中远距协同空战的多目标攻击决策提供了新思路和新方法。

参考文献:

- [1] 常勇,姜长生,陈志伟.基于模糊神经网络的多机多目标空战决策[J].电光与控制,2011,18(4):13-17.
- [2] 刘波,陈峭东,贺建良.基于概率群集的多战机协同空战决策算法[J].上海交通大学学报,2011,45(2):257-261.
- [3] 朱艳萍,姚敏,赵敏.敌对环境下多无人机协同空战决策[J].火力与指挥控制,2013,38(3):12-16.
- [4] 杨啸天,刘小军,冯金富,等.不确定环境下空地多目标攻击优先权决策[J].南京理工大学学报,2012,36(4):567-572.
- [5] 陈中起,周中良,于雷,杜永伟.基于改进信息熵的空地多目标攻击优先权决策[J].系统工程与电子技术,2011,33(2):329-333.
- [6] LUO D L, SHEN C L, WANG B, et al. Air combat decision making for cooperative multiple target attack: an approach of hybrid adaptive genetic algorithm[J]. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2006, 23(3): 382-389.
- [7] LUO D L, YANG Z, DUAN H B, et al. Heuristic particle swarm optimization algorithm for air combat decision-making on CMTA [J]. Transactions of Nanjing University of

(下转第 46 页)

参考文献:

- [1] CHAI Y ,LI H F ,LI Z F. Multifocus image fusion scheme using focused region detection and multiresolution [J]. Optics Communications 2011 ,284(19) :4376-4389.
- [2] TAO W ,ZHU C C ,QIN Z C. Multifocus image fusion based on robust principal component analysis[J]. Pattern Recognition Letters 2013 ,34(9) :1001-1008.
- [3] ZHAO H J ,SHANG Z W ,TANG Y Y ,et al. Multi-focus image fusion based on the neighbor distance[J]. Pattern Recognition 2013 ,46(3) :1002-1011.
- [4] ISHITA D ,BHABATOSH C. Multi-focus image fusion using a morphology-based focus measure in a quad-tree structure [J]. Information Fusion 2013 ,14(1) :136-146.
- [5] ZHANG Y X ,CHEN L ,ZHAO Z H ,et al. Multi-focus image fusion based on robust principal component analysis and pulse-coupled neural network [J]. Optik 2014 ,125(17) :5002-5006.
- [6] ECKHORN R. Neural mechanisms of scene segmentation : recordings from the visual cortex suggest basic circuits or linking field models [J]. IEEE Transactions on Neural Networks 1999 ,10(3) :464-479.
- [7] MIAO Q G ,SHI C ,XU P F ,et al. A novel algorithm of image fusion using shearlets[J]. Optics Communications 2011 ,284(6) :1540-1547.
- [8] GUO K H ,LABATE D. Optimally sparse multidimensional representation using shearlets [J]. SIAM Journal on Mathematical Analysis 2007 ,39(1) :298-318.
- [9] GUO K H ,LABATE D ,WANG L. Edge analysis and identification using the continuous shearlet transform [J]. Applied and Computational Harmonic Analysis 2009 ,27(1) :24-46.
- [10] LIU X ,ZHOU Y ,WANG J J. Image fusion based on shearlet transform and regional features [J]. International Journal of Electronics and Communications 2014 ,68(6) :471-477.
- [11] SHI C ,MIAO Q G ,XU P F. A novel algorithm of remote sensing image fusion based on Shearlets and PCNN[J]. Neurocomputing 2013 ,117(6) :47-53.
- [12] 廖勇 ,黄文龙 ,尚琳 ,等. Shearlet 与改进 PCNN 相结合的图像融合 [J]. 计算机工程与应用 2014 ,50(2) :142-146.
- [13] 刘勃 ,马义德. 一种基于 PCNN 赋时矩阵的图像去噪新算法[J]. 电子与信息学报 2008 ,30(8) :1869-1873.
- [14] 何刘杰 ,胡涛 ,任仙怡. 自适应 PCNN 的形态小波多聚焦图像融合方法 [J]. 计算机工程与应用 2013 ,49(12) :132-135 ,159.
- [15] 韩潇 ,彭力. 基于小波变换的多聚焦图像融合新算法 [J]. 计算机与数字工程 2014 ,42(9) :1628-1631.
- [16] 罗德林 ,王彪 ,龚华军 ,等. 基于 SAGA 的协同多目标攻击决策 [J]. 哈尔滨工业大学学报 2007 ,39(7) :1154-1158.
- [17] 张涛 ,于雷 ,魏贤智 ,等. 改进遗传算法的超视距协同多目标攻击决策 [J]. 火力与指挥控制 2013 ,38(5) :137-140.
- [18] 张毅 ,杨秀霞 ,周绍磊. 基于量子分布估计算法的火药分配问题研究[J]. 电光与控制 2013 ,20(12) :18-21.
- [19] 张毅 ,杨秀霞 ,周绍磊. 基于分布估计算法的多无人飞行器自主任务规划研究 [J]. 弹箭与制导学报 2013 ,33(6) :9-12.
- [20] 王圣尧 ,王凌 ,方晨 ,等. 分布估计算法研究进展[J]. 控制与决策 2012 ,32(7) :961-974.
- [21] 张涛 ,于雷 ,周中良 ,等. 基于变权重伪并行遗传算法的空战机动决策[J]. 飞行力学 2012 ,30(5) :470-474.
- [22] 高尚. 武器 - 目标分配问题的分布估计算法及参数设计 [J]. 东南大学学报(自然科学版) 2012 ,42(1) :178-181.
- [23] Aeronautics & Astronautics 2006 ,23(1) :20-26.
- [24] 朱宝镗 ,朱荣昌 ,熊笑非. 作战飞机效能评估[M]. 2 版. 北京 :航空工业出版社 2006.
- [25] 付昭旺 ,于雷 ,李战武 ,李飞. 战斗机隐蔽接敌轨迹优化方法[J]. 国防科技大学学报 2013 ,35(5) :52-58.
- [26] 裴云. 自卫电子对抗系统对战斗机作战效能的影响分析 [J]. 电光与控制 2006 ,13(2) :19-24.
- [27] 蓝启城 ,贾玉红. 机载电子战效能评估模型研究[J]. 航天电子对抗 2010 ,26(4) :57-60.
- [28] 周焘 ,任波 ,于雷. 基于威力场的空战分析建模[J]. 系统仿真学报 2008 ,20(3) :738-745.
- [29] ZENG X P ,ZHU Y H ,LIN N ,et al. Solving weapon target assignment problem using discrete particle swarm optimization[C]//Proc. of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation 2006.
- [30] RAVINDRA K A ,KUMAR A ,KRISHNA C ,et al. Exact and heuristic algorithms for the weapon-target assignment problem[J]. Operations Research 2007 ,55(6) :1136-1146.

(上接第 40 页)

Aeronautics & Astronautics 2006 ,23(1) :20-26.

[8] 朱宝镗 ,朱荣昌 ,熊笑非. 作战飞机效能评估[M]. 2 版. 北京 :航空工业出版社 2006.

[9] 付昭旺 ,于雷 ,李战武 ,李飞. 战斗机隐蔽接敌轨迹优化方法[J]. 国防科技大学学报 2013 ,35(5) :52-58.

[10] 裴云. 自卫电子对抗系统对战斗机作战效能的影响分析 [J]. 电光与控制 2006 ,13(2) :19-24.

[11] 蓝启城 ,贾玉红. 机载电子战效能评估模型研究[J]. 航天电子对抗 2010 ,26(4) :57-60.

[12] 周焘 ,任波 ,于雷. 基于威力场的空战分析建模[J]. 系统仿真学报 2008 ,20(3) :738-745.

[13] ZENG X P ,ZHU Y H ,LIN N ,et al. Solving weapon target assignment problem using discrete particle swarm optimization[C]//Proc. of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation 2006.

[14] RAVINDRA K A ,KUMAR A ,KRISHNA C ,et al. Exact and heuristic algorithms for the weapon-target assignment problem[J]. Operations Research 2007 ,55(6) :1136-1146.