

文章编号:1000-6893(2006)06-1166-05

基于启发式蚁群算法的 协同多目标攻击空战决策研究

罗德林^{1,2}, 段海滨³, 吴顺详¹, 李茂青¹

(1. 厦门大学 系统与amp;控制研究中心, 福建 厦门 361005)

(2. 南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 210016)

(3. 北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100083)

Research on Air Combat Decision-making for Cooperative Multiple Target Attack Using Heuristic Ant Colony Algorithm

LUO De-lin¹, DUAN Hai-bin², WU Shun-xiang, LI Mao-qing

(1. Center for Systems and Control, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

(2. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

(3. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics,
Beijing 100083, China)

摘要: 协同多目标攻击空战决策是现代战机在超视距条件下进行协同空战的关键技术之一。它是寻求一个优化分配方案,将目标分配给各友机,力求使攻击效果最优。本文在对协同多目标攻击战术进行深入分析的基础上,提出了一种用于空战决策的启发式蚁群算法,该算法通过求解友机导弹对目标的最优分配来确定空战决策方案。仿真实验表明所提出的启发式蚁群算法对最优解的搜索效率明显优于基本蚁群算法,是一种求解协同多目标攻击空战决策问题的有效算法。

关键词: 空战决策; 协同空战; 多目标攻击; 启发式; 蚁群算法

中图分类号: V247; E837 **文献标识码:** A

Abstract: The air combat Decision-Making (DM) for Cooperative Multiple Target Attack (CMTA) is one of the key techniques for modern fighters performing cooperative air combat under the Beyond Visual Range (BVR) condition. It is to find a proper assignment of the friendly fighters to the hostile fighters to achieve the optimal attack effect. In this paper, based on the deep analysis of the CMTA tactics, a Heuristic Ant Colony Algorithm (HACA) is proposed to solve the DM problem. The HACA obtains the DM solution by searching for the optimal assignment of the missiles of the friendly fighters to the hostile fighters. Simulation results show that the search efficiency of the proposed algorithm is obviously superior to that of basic Ant Colony Algorithm (ACA). It is an effective algorithm to deal with the DM problem for CMTA in air combat.

Key words: air combat decision-making; cooperative air combat; multiple target attack; heuristics; ant colony algorithm

协同多目标攻击空战决策已成为现代战机实现超视距空战火控系统的关键技术之一,其研究具有重要的意义^[1]。文献[2]采用神经网络方法对空战决策进行了研究,但难以获得符合实际且全面的空战数据对神经网络进行训练。因此,有必要探索其他方法对空战决策问题进行研究。

近来,基于自然界中蚂蚁群体寻径行为而提出的蚁群算法已被广泛用于多种常见组合优化

问题的求解^[3],在军事领域也逐渐获得了应用,如文献[4]用基于免疫的蚁群算法对战场中的防空武器目标分配问题进行了研究,文献[5]对基本蚁群算法进行了改进,并用于实现飞机低空突防中的航路规划,为空战决策的研究提供了新思路。

本文提出了一种用于空战决策的启发式蚁群算法,此处的启发式是指根据协同多目标攻击战术特定的启发知识而设计的一种局部搜索算法,将其与蚁群算法融合以提高蚁群算法对全局最优解的搜索效率。

收稿日期:2005-07-31; 修订日期:2006-03-21

基金项目:国家自然科学基金(60604009)、厦门大学 985 二期信息
创新平台基金、福建省教委科技基金(JAO5290)

1 协同多目标攻击空战决策问题

1.1 空战态势

空战态势是空战决策的基础。这里设 M 架蓝机与 N 架红机进行空战, 蓝机采用协同多目标攻击战术对红机进行攻击。所有蓝机与红机分别具有各自相同的性能。所有蓝机组成机群 B , 所有红机组成机群 R , 分别记为 $B = \{B_i, i = 1, 2, \dots, M\}$ 和 $R = \{R_j, j = 1, 2, \dots, N\}$, 其中, B_i 表示蓝机 i , R_j 表示红机 j , B_i 与 R_j 之间的空战态势用图 1 表示。

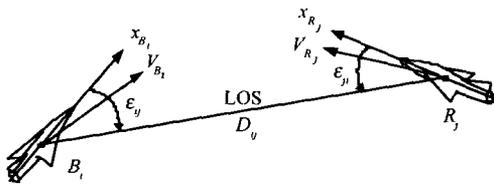


图 1 B_i 与 R_j 之间的空战态势

Fig. 1 The air combat situation between B_i and R_j

图 1 中: LOS 为视线, 即 B_i 到 R_j 的连线; D_{ij} 为 R_j 相对 B_i 的距离; x_{B_i} 与 V_{B_i} 分别为 B_i 的机体轴线和速度; ϵ_{ij} 为 R_j 相对 B_i 的离轴角; x_{R_j} , V_{R_j} 以及 ϵ_{ji} 用类似方法定义。

B_i 对 R_j 的威胁可用组合函数表示为^[6, 7]

$$th_{ij} = w_1 th_{ij}^{D_{ij}} th_{ij}^{\epsilon_{ij}} + w_2 th_{ij}^{V_{B_i}} \quad (1)$$

其中

$$th_{ij}^{D_{ij}} = \begin{cases} 1 & D_{ij} \leq Ra_B \\ 1 - \frac{D_{ij} - Ra_B}{Tr_B - Ra_B} & Ra_B < D_{ij} \leq Tr_B \\ 0 & D_{ij} > Tr_B \end{cases} \quad (2)$$

$$th_{ij}^{\epsilon_{ij}} = e^{-\lambda_1 (\pi \epsilon_{ij} / 180)^2} \quad (3)$$

$$th_{ij}^{V_{B_i}} = \begin{cases} 1 & V_{R_j} < 0.5V_{B_i} \\ 1.5 - V_{R_j} / V_{B_i} & 0.5V_{B_i} \leq V_{R_j} \leq 1.4V_{B_i} \\ 0.1 & V_{R_j} > 1.4V_{B_i} \end{cases} \quad (4)$$

式中: w_1, w_2 为非负的权重系数, 且满足

$$w_1 + w_2 = 1 \quad (5)$$

$th_{ij}^{D_{ij}}, th_{ij}^{\epsilon_{ij}}$ 与 $th_{ij}^{V_{B_i}}$ 分别为 B_i 对 R_j 的距离威胁因子、角度威胁因子与速度威胁因子; Ra_B 为蓝机导弹的有效作用距离; Tr_B 为蓝机雷达的最大跟踪距离; λ_1 与 λ_2 为正常数。

由式(2)~式(4)可见, $th_{ij}^{D_{ij}} \in [0, 1], th_{ij}^{\epsilon_{ij}} \in [0, 1]$ 及 $th_{ij}^{V_{B_i}} \in [0.1, 1]$, 故有 $th_{ij} \in [0, 1]$ 。假设机群

B 所使用的导弹性能一致, 并假设在空战中某一时刻, B_i 对 R_j 的胜率, 即 B_i 击毁 R_j 而获胜的概率, 与该时刻 B_i 对 R_j 的威胁成正比^[8], 则 B_i 对 R_j 的威胁 th_{ij} 可视为 B_i 发射 1 枚导弹攻击 R_j 的胜率。

R_j 对 B_i 的威胁 th_{ji} 用类似方法确定, 且有 $th_{ji} \in [0, 1]$ 。

1.2 空战决策模型

空战决策的过程是要寻找一个合适的 M 架蓝机对 N 架红机的分配方案, 以达到最优的攻击效果。这里用机群 R 的总期望剩余威胁来衡量攻击效果, 它被定义为: 在机群 B 对机群 R 进行一次协同攻击后, 机群 R 对机群 B 存在的威胁。对于机群 B , 机群 R 的总期望剩余威胁越小, 攻击效果以及空战决策越好。由于一架蓝机可以同时攻击多个目标, 而其一枚导弹只能攻击一个目标, 用导弹目标的分配来描述空战效果更为直接。因此, 导弹目标分配问题成为空战决策的关键问题应首先求解。在求得导弹目标最优分配方案后, 可由其确定空战决策方案。

设 B_i 用 L_i 枚导弹攻击目标, 则机群 B 用于攻击目标的导弹数量为

$$Z = \sum_{i=1}^M L_i \quad (6)$$

由于机群 B 的导弹数量及空战能力所限, 此处假设分配攻击目标的导弹数量满足

$$N \leq Z \leq 2N \quad (7)$$

设攻击目标的 Z 枚导弹构成集合 G , 并记 $G = \{r, r = 1, 2, \dots, Z\}$ 。

定义 G 的第 r 枚导弹为 B_i 所使用的 L_i 枚导弹中的第 h 枚导弹, 则 r 与 h 的对应关系为

$$r = \sum_{j=1}^{i-1} L_j + h \quad (8)$$

$(h = 1, 2, \dots, L_i; i = 1, 2, \dots, M)$

决策中, 假设一个目标分配 1 至 2 枚导弹攻击。即对威胁较大的目标允许分配 2 枚导弹同时进行攻击。用 th_{rj} 表示 B_i 发射导弹 r 攻击 R_j 的胜率。若将导弹 r 分配给 R_j , 则 R_j 的生存率为 $(1 - th_{rj})$ 。在进行一次协同攻击后, R_j 对 B_i 的期望剩余威胁为 $th_{ji} \cdot \prod_{r=1}^Z (1 - th_{rj})^{x_{rj}}$ 。为此, 空战决策问题首先要寻找合适的导弹目标分配方案 π 使如下机群 R 的总期望剩余威胁评估函数值最小,

$$E(\pi) = \min_{\pi \in \Omega} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M \{ th_{ji} \cdot [\prod_{r=1}^Z (1 - th_{rj})^{x_{rj}}] \} \quad (9)$$

s. t.

$$\sum_{j=1}^N X_{rj} = 1 \quad (r = 1, 2, \dots, Z) \quad (10)$$

$$\sum_{r=1}^Z X_{rj} = 1 \text{ 或 } 2 \quad (j = 1, 2, \dots, N) \quad (11)$$

式中： Ω 为所有可行导弹目标分配方案构成的解空间； X_{rj} 的值为 1 或 0， $X_{rj} = 1$ 表示导弹 r 攻击 R_j 。式(10)表示一枚导弹只能攻击一个目标，式(11)表示每个目标分配 1 或 2 枚导弹攻击。 π 可表示为 $\pi = (T_1, T_2, \dots, T_r, \dots, T_Z)$ ，其中， $\pi(r) = T_r$ 表示导弹 r 攻击目标 T_r ， $T_r \in R$ ， $r = 1, 2, \dots, Z$ 。由式(10)和式(11)可知，在一个方案 π 中，所有目标最少出现一次，同一目标最多出现两次。

在求得最优导弹目标分配方案 π 后，根据式(8)可惟一确定空战决策方案。

2 协同多目标攻击战术分析

在协同空战中，机群 B 的空战态势应作为一个整体考虑。在战术上，要求机群 B 依据优先攻击分配规则^[9]，也即，一方面， B_i 应在其相对于其他蓝机更有利于攻击的目标中按其攻击能力分配一定数量的目标；另一方面， B_i 在已分配的目标中，应优先选择攻击对机群 B 威胁最大的目标。协同多目标攻击战术可用图 2 所示的机群 B 对机群 R 的空战态势进行分析。

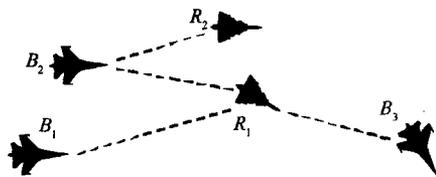


图 2 协同多目标攻击战术分析
Fig. 2 Analysis of the cooperative multiple target attack tactics

图 2 中，机群 B 包含 B_1, B_2 及 B_3 ，机群 R 包含 R_1 和 R_2 。机群 B 采用协同空战战术与机群 R 空战。不难看出 R_1, R_2 均为 B_2 相对于 B_1, B_3 更有利于攻击的目标。因而， R_1 和 R_2 应分配给 B_2 攻击。在 R_1 与 R_2 中，显然， R_1 对机群 B (尤其对其中 B_3) 的威胁较大，故 B_2 应优先攻击 R_1 。

根据优先攻击分配规则，定义 B_i 对 R_j 的分配值为

$$ASM(i, j) = th_{ij} \cdot \sum_{i=1}^M th_{ji} \quad (12)$$

式中： $\sum_{i=1}^M th_{ji}$ 为 R_j 对机群 B 的威胁。显然， B_i 应攻击相对其具有尽可能大的分配值的目标。如

果 R_j 对机群 B 的威胁较大，为减小威胁，就需要同时分配 2 枚导弹对其攻击，设分配导弹 r 与 l ，定义这样的 2 枚导弹为一个导弹对，记为 (r, l, j) 。定义导弹对 (r, l, j) 的分配差值为

$$DIF(r, l, j) = |ASM(r, j) - ASM(l, j)| \quad (13)$$

对于一个导弹对，希望这 2 枚导弹对目标的分配值都应尽量大，同时，分配差值尽量小。由图 2 可看出 R_1 比 R_2 对机群 B 的威胁大，故决定分配 2 枚导弹对 R_1 进行攻击。显然，应优先选择分配 B_2 上的 2 枚导弹。但若 B_2 上仅有 1 枚导弹可供分配，此时则需从 B_1 或 B_3 上分配另 1 枚导弹攻击 R_1 。由于 R_1 处于 B_3 的侧后翼， B_3 态势上处于明显劣势，且不构成对 R_1 的攻击条件，即 R_1 相对 B_3 的分配值很低，而 B_1 相对 R_1 处于攻击的有利态势，且 B_1 对 R_1 的分配值接近于 B_2 ，因此，确定分配 B_1 的 1 枚导弹攻击 R_1 。

3 空战决策的启发式蚁群算法实现

针对导弹目标分配问题，设蚁群中的蚂蚁数为 m ，蚂蚁 $k(k=1, 2, \dots, m)$ 构建各自的导弹目标分配方案 π_k 。在构建过程中，蚂蚁 k 从第 1 枚导弹开始在所有目标中选择一个目标分配给该枚导弹；接着，对第 2 枚导弹，蚂蚁 k 在当前允许分配的目标集合中选择一个目标分配给该枚导弹；依此顺序进行分配，直到完成对第 Z 枚导弹的目标分配。在此过程中蚂蚁 k 依据如下伪随机规则选择目标 j 分配给导弹 r

$$j = \begin{cases} \arg \max_{u \in \text{allowed}_k} \{ \tau(r, u) \cdot \eta^\beta(r, u) \} & (\text{若 } q \leq q_0) \\ J & (\text{否则}) \end{cases} \quad (14)$$

式中： $\tau(r, u)$ 为信息素轨迹； $\eta(r, u)$ 为与问题相关的启发信息； β 为 $\eta(r, u)$ 的相对重要性； allowed_k 为蚂蚁 k 当前可分配的目标集； q 为一个在 $[0, 1]$ 间均匀分布的随机数； $q_0 (0 \leq q_0 \leq 1)$ 为一个指定参数； J 为依据如下随机比例规则从 allowed_k 中选择一个目标

$$p_k(r, j) = \begin{cases} \frac{\tau(r, j) \cdot \eta^\beta(r, j)}{\sum_{u \in \text{allowed}_k} \tau(r, u) \cdot \eta^\beta(r, u)} & (\text{若 } j \in \text{allowed}_k) \\ 0 & (\text{否则}) \end{cases} \quad (15)$$

由于导弹 r 对目标 j 的分配值越大，蚂蚁将导弹 r 分配给目标 j 的可能性就越大。因此，定

义将目标 j 分配给导弹 r 的启发信息 $\eta(r, j)$ 为 $ASM(r, j)$ 。在蚂蚁 k 将目标 j 分配给导弹 r 后, 构建 π_k 中的第 r 个元素 $\pi_k(r) = R_j$ 。禁忌表 $tabu_k$ 则用于记录蚂蚁 k 当前不能再分配的目标, 它依据当前 π_k 中已记录的目标和约束条件式 (10) 和式 (11) 进行调整, 则下一枚导弹可分配的目标集为 $allowed_k = \{R - tabu_k\}$ 。

蚂蚁 k 在构建可行解 π_k 的过程中, 按如下局部更新规则对其信息素轨迹进行调整

$$\tau(r, j) \leftarrow (1 - \xi) \cdot \tau(r, j) + \xi \cdot \tau_0 \quad (16)$$

式中: $\xi(0 \leq \xi \leq 1)$ 为常数; $\tau_0 = 1/(m \cdot E_m)$ 为初始信息素轨迹; E_m 为在不考虑信息素轨迹分量的情况下, 运行以上蚁群算法一次构建的解的评估值或根据最临近启发规则产生的解的评估值^[10]。

在 m 只蚂蚁均完成本次搜索后, 启发式算法用于对 $\pi_k (k=1, 2, \dots, m)$ 的邻域进行局部搜索以寻求更好的解。启发式算法是根据对协同多目标攻击战术的分析而获得的特定知识设计的, 其具体步骤如下:

第 1 步: 找出 π_k 中仅分配了 1 枚导弹的目标, 组成目标集 C , 其个数为 n ;

第 2 步: 在 π_k 的所有导弹对中找出具有最大分配差值的导弹对 (r, l, j) 。比较该导弹对中导弹 r 与 l 对目标 j 的分配值, 设其中导弹 l 的分配值较小;

第 3 步: 导弹 l 随机地选择 C 中的一个目标 s , 若导弹 l 对目标 s 的分配值大于对当前目标 j 的分配值, 则导弹 l 改为攻击目标 s 。否则, 保持不变;

第 4 步: 将目标 s 从目标集 C 中去除;

第 5 步: 重复第 3、第 4 步 n_1 次, $n_1 (n_1 < n)$ 为随机产生的一个正整数。

找出搜索过程中的当前最优解 $\pi_{elitist}$, 按如下全局更新规则对其信息素轨迹进行调整

$$\tau(r, j) \leftarrow (1 - \rho) \cdot \tau(r, j) + \rho \cdot [E(\pi_{elitist})]^{-1} \quad (17)$$

式中: $\rho(0 \leq \rho \leq 1)$ 为常数。

上述整个搜索过程不断重复, 当满足规定的迭代次数或某个收敛准则时, 算法停止。

启发式蚁群算法流程如下:

```
{
初始化;
t ← 1;
while(不满足终止条件)do
    设置 m 只蚂蚁置于第 1 枚导弹上;
    for k = 1 : m
```

```
        for r = 1 : Z
            从 allowedk 中按式 (14) 选择目标 j 分配给导弹 r, 构建  $\pi_k(r) = R_j$ ;
            更新 tabuk 与 allowedk;
            按式 (16) 更新信息素轨迹;
        end
    end
    for k = 1 : m
        对  $\pi_k$  进行启发式搜索;
    end
    找出并输出当前最优解  $\pi_{elitist}$ ;
    按式 (17) 更新  $\pi_{elitist}$  的信息素轨迹;
    清空 tabuk;
    t ← t + 1;
end
}
```

4 仿真实验

设机群 B 与机群 R 在超视距条件下进行空战, 机群 B 采用协同空战战术。对机群 B , 参数设置为: $M=4, L_i=4, V_{B_i}=350 \text{ m/s}, i=1, 2, \dots, M, Ra_B=70 \text{ km}, Tr_B=120 \text{ km}, \lambda_1=3, \lambda_2=2, \omega_1=0.8, \omega_2=0.2$ 。因此, 机群 B 用于攻击机群 R 的导弹数量为 $Z=16$ 。对机群 $R, N=14, V_{R_j}=300 \text{ m/s}, j=1, 2, \dots, N$ 。蓝机的 Ra_B 与 Tr_B 值均设置为红机对应参数值的 1.5 倍。与蓝机的 λ_1 和 λ_2 对应的红机参数分别设置为 6 和 2。与蓝机的 ω_1 和 ω_2 对应的红机参数取相同值。设在某一时刻, 机群 B 与机群 R 在同一高度以不同的编队队形迎头飞行, 且所有目标均在机群 B 的联合攻击区内, 机群 B 与机群 R 的空战态势如图 3 所示。这时, 机群 B 利用性能优势抢先对机群 R 发动协同攻击。

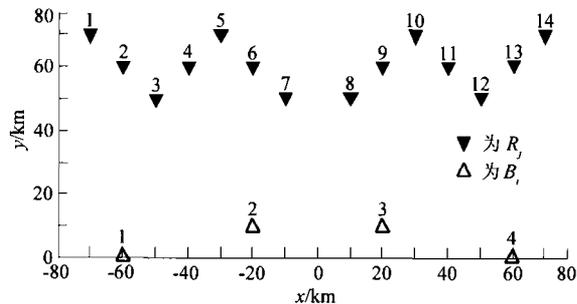


图 3 机群 B 与机群 R 空战态势

Fig. 3 The air combat situation between team B and team R

算法参数设置: $m=3, q_0=0.8, \beta=2, \xi=0.1, \rho=0.08$ 。分别采用启发式蚁群算法和基本蚁群

算法对该实例各进行10次仿真实验,每次迭代运算均为200代终止。

在实验中,启发式蚁群算法均能在循环20代以内获得最优解,而采用基本蚁群算法最好情况需循环100代左右才能获得最优解。两种算法的最好结果比较如图4所示,其中HACA表示启发式蚁群算法,ACA表示基本蚁群算法。

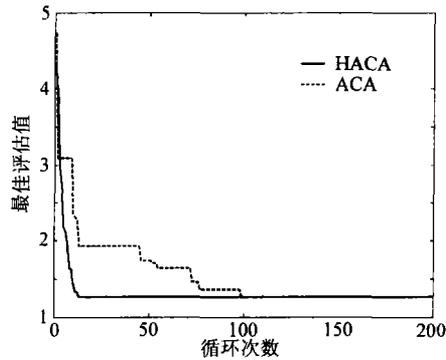


图4 两种算法最佳实验结果比较

Fig. 4 Comparison of the best experimental results of the two algorithms

图4中,启发式蚁群算法在迭代14次后获得了机群B对机群R的最优攻击分配方案,分配结果见表1。由表1可见,第1枚导弹攻击 R_2 ,第2枚导弹攻击 R_3 ,直到第16枚导弹攻击 R_{14} 。并可得到最终空战决策为: B_1 攻击 R_1, R_2, R_3 和 R_4 ; B_2 攻击 R_5, R_6 和 R_7 ,并对 R_7 分配2枚导弹攻击; B_3 攻击 R_8, R_9 和 R_{10} ,并对 R_8 分配2枚导弹攻击; B_4 攻击 R_{11}, R_{12}, R_{13} 和 R_{14} 。

表1 最优攻击分配

Table 1 The optimal attack assignment

蓝机	导弹				红机			
B_1	1	2	3	4	R_2	R_3	R_4	R_1
B_2	5	6	7	8	R_7	R_6	R_5	R_7
B_3	9	10	11	12	R_9	R_{10}	R_8	R_8
B_4	13	14	15	16	R_{13}	R_{11}	R_{12}	R_{14}

参考文献

- [1] 罗德林,吴文海,沈春林.空战多目标攻击决策综述[J]. 光电与控制,2005,12(4):4-8.
Luo D L, Wu W H, Shen C L. A survey on decision-making for multi-target attacking in air combat [J]. Electronics Optics and Control, 2005, 12(4): 4-8. (in Chinese)
- [2] 李林森,佟明安.协同多目标攻击空战决策及其神经网络实现[J]. 航空学报,1999,20(4):309-312.
Li L S, Tong M A. Air combat decision of cooperative

multi-target attack and its neural net realization[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1999, 20(4): 309-312. (in Chinese)

- [3] Dorigo M, Caro G D. Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1997, 1(1): 53-66.
- [4] Lee Z J, Lee C Y, Su S F. An immunity-based ant colony optimization algorithm for solving weapon-target assignment problem[J]. Applied Soft Computing, 2002, 2(1): 39-47.
- [5] Ye W, Ma D W, Fan H D. Algorithm for low altitude penetration aircraft path planning with improved ant colony algorithm[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2005, 18(4): 304-309.
- [6] Austin F. Game theory for automated maneuvering during air-to-air combat[J]. Guidance, 1990, 13(6): 1143-1147.
- [7] 谢希权,李伟仁.单机多目标攻击逻辑的对策型决策[J]. 系统工程与电子技术,2000,22(7):28-31.
Xie X Q, Li W R. Game form decision for air combat logic of multi-target attack system[J]. System Engineering and Electronics, 2000, 22(7): 28-31. (in Chinese)
- [8] Huynh H T, Costes P, Aumasson C. Numerical optimization of air combat maneuvers [C]//Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation and Control Conference. New York: AIAA Press, CA, AIAA-87-2392, 1987.
- [9] Lazarus E. The application of value-driven decision-making in air combat simulation [C]//Proceedings of 1997 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics and Computational Cybernetics and Simulation. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1997, 3: 2302-2307.
- [10] Rosenkrantz R E, Stearns P M, Lewis P M. An analysis of several heuristics for the traveling salesman problem[J]. SIAM Journal on Computing, 1977, 6(3): 563-581.

作者简介:



罗德林(1968—)男,博士,副教授。主要研究方向:飞行器制导与控制、精确打击与计算智能等。E-mail: luodelin204@xmu.edu.cn, 联系电话:0592-2580057。



殷海滨(1976—)男,硕士生导师,博士。主要研究方向:智能控制、无人机控制与决策等。E-mail: hbduan@buaa.edu.cn, 联系电话:010-82317318。

(责任编辑:鲍亚平)