

虚拟导航路径的空战多目标攻击 顺序与接敌方向规划

张 誉, 阮铖巍

(空军工程大学航空航天工程学院, 西安, 710038)

摘要 通过分析空战多目标攻击的基本内涵,提出了基于虚拟导航路径的多目标攻击顺序与接敌方向规划方法。阐明了攻击顺序和接敌方向对作战过程和结果的重要影响;将攻击顺序和接敌方向规划等效为虚拟导航路径规划,建立了导航路径规划空间,给出了导航路径规划原理和可行航路评价指标,并基于粒子群优化(PSO)算法给出了具体的编码和求解方法。仿真结果表明,该虚拟导航路径方法可以有效地解决多目标攻击的攻击顺序和接敌方向规划问题,并能确保战斗机在多目标攻击战术执行过程中较高的生存性。

关键词 攻击顺序;接敌方向;虚拟导航;多目标攻击;粒子群优化

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2015.04.004

中图分类号 TP391 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2015)04-0013-06

Sequence and Direction Planning of Multi-Target Attack in Air Combat Based on Virtual Navigation Path

ZHANG Yu, RUAN Chengwei

(Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: The basic connotation of multi-target attack in air combat is analyzed, and an attack sequence and direction planning based on virtual navigation path is proposed. Firstly, the impact of the attack sequence and direction is clarified. Secondly, the planning of attack sequence and direction is equivalent to the programming of the virtual navigation path, the planning space is established, and the principle of navigation path programming and the indexes of feasible route are presented. Then, the concrete coding and the solution methods are given based on the particle swarm optimization (PSO) algorithm. Finally, the computer simulation shows that the method proposed above is effective in solving the problem of the attack sequence and direction planning of multi-target attack, and simultaneously the use of this method can ensure a higher survivability for the fighters in the process of implementing multi-target attack tactics.

Key words: attack sequence; direction; virtual navigation; multi-target attack; particle swarm optimization

收稿日期:2014-08-01

作者简介:张 誉(1989—),男,陕西咸阳市人,硕士生,主要从事火力指挥控制技术研究. E-mail:873329538@qq.com

引用格式:张誉,阮铖巍.虚拟导航路径的空战多目标攻击顺序与接敌方向规划[J].空军工程大学学报:自然科学版,2015,16(4):13-18. ZHANG Yu, RUAN Chengwei. Sequence and Direction Planning of Multi-Target Attack in Air Combat Based on Virtual Navigation Path[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2015, 16(4): 13-18.

随着网络化作战水平的不断提高及先进战斗机多目标攻击能力的不断增强,空战对抗中可能出现双机编队对敌方多架目标攻击的任务需求。常规的多目标攻击是指战斗机同时发射和制导多枚导弹的攻击方式,然而当空域态势较为复杂,无法形成同时攻击的条件时,则需要对出现的目标按一定的顺序依次攻击。如何避开敌方雷达截获区域,从威胁较小的方向接敌也是一个值得研究的问题。

合理的规划攻击顺序可以确保攻击过程的快速性和攻击的成功概率;攻击过程的转换主要体现在对各目标的接敌方向和退出方向上。合理的接敌方向可以确保攻击过程的连贯性,并能降低在攻击当前目标的同时被其他目标击毁的概率,维持较高的生存力。

现有研究主要集中在多目标攻击的目标威胁^[1-2]、目标分配^[3-4]及战术决策^[5-6]方面。本文在分析空战多目标攻击的基本内涵的基础上,对空域目标威胁进行了分析,提出了基于虚拟导航路径的多目标攻击顺序和接敌方向规划方法,并给出路径寻优的粒子群优化(PSO)算法。

1 攻击顺序和接敌方向等效规划

以双机编队执行空战任务为例,当双机分配的目标分布在较广的空域内,受限于我方导弹攻击范围和双机协同的需要,无法同时实施多目标攻击,要完成对这些目标的攻击,需要按照一定的顺序依次进行。

本文提出如下的等效规划思想:

1)将目标周围区域按照距离和角度的不同划分为不同区域,以虚拟导航点代表目标周围特定的态势点;

2)将攻击顺序和接敌方向规划等效为导航路径规划,多目标间的导航路径代表一定的攻击顺序;

3)经评价指标寻优所得的虚拟导航路径只代表攻击顺序和接敌方向范围,仅作为当前航路规划的依据,并非真实的导航点。

基于上述等效思想,则攻击顺序和接敌方向的规划包含如下步骤:①对于空域中的目标,首先按照一定的规则进行分组,重新形成新的目标组^[7];②基于目标态势和能力参数生成等效的虚拟导航路径规划空间;③依据既定准则,寻找最优导航路径;确定的导航路径可等效为规划的攻击顺序和接敌方向。

下文主要对步骤②和③进行详细阐述。

2 空域目标的威胁区域分析

本文将作战目标的能力威胁分为探测威胁和杀伤威胁。一对一空战是空战的基本场景,图1为几何态势, A 为隐身作战飞机, T 为空域目标, V_a 和 V_t 分别为双方速度, q 为目标进入角, φ 为目标方位角。

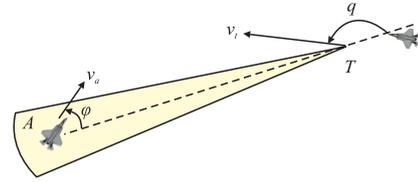


图1 一对一空战几何态势

Fig.1 Combat geometric situation of 1vs1

空战规避的目标集取决于双方雷达探测范围和导弹攻击范围。本文基于攻击区和暴露区的概念分析空战过程中我方可能遇到的空中威胁。

攻击区:本文中指以被攻击目标为中心的空空导弹攻击区,即在目标周围空间中存在一个区域,当载机在此区域发射空空导弹时,就能以不低于某一给定的概率命中杀伤目标;若在此区域之外投射,杀伤目标的概率将急剧降低甚至下降为零^[8]。该攻击区解算需要大量计算,精确的实时在线计算难以满足作战需求,因此采用拟合的方法得到近似攻击区^[9]。假设我机携带中距空空导弹,则以目标为中心的攻击区的远、近边界分别记为:

$$D_{\max} = f(H, V_0, V_T, \dot{V}_T, V_r, \dot{V}_r, \eta_y, \omega, q_T, t_0) \quad (1)$$

$$D_{\min} = f(H, V_0, V_T, \dot{V}_T, V_r, \dot{V}_r, \eta_y, \omega, q_T, t_0) \quad (2)$$

式中: D_{\max} 、 D_{\min} 分别表示以目标为中心的导弹攻击区的远、近边界; H 表示攻击高度; V_0 表示导弹发射速度; V_T 表示目标速度; \dot{V}_T 表示目标加速度; V_r 表示目标角速度; \dot{V}_r 表示目标角加速度; η_y 表示目标机动过载; ω 表示我方导弹最大离轴发射角; q_T 表示目标进入角; t_0 表示导弹工作时间。

在以目标为中心的极坐标系中,攻击区记为:

$$Z_A = \left\{ (q_T, d, h) \mid q_T \in [-\pi, \pi], h \in [H_{\min}, H_{\max}], \right. \\ \left. d(q_T, h) \in [D_{\min}(q_T, h), D_{\max}(q_T, h)] \right\} \quad (3)$$

式中: d, h 分别表示目标距离与目标高差; $[H_{\min}, H_{\max}]$ 表示导弹攻击高度之差的范围。

暴露区记为:

$$Z_E = \left\{ (q_T, d, h) \mid q_T \in [-\theta_R, \theta_R], h \in [H'_{\min}, H'_{\max}], \right. \\ \left. d(q_T, h) \in [0, R_R(q_T, h)] \right\} \quad (4)$$

式中: θ_R 与 R_R 为敌机载雷达扫描扇区角度与最大探测距离; $[H'_{\min}, H'_{\max}]$ 表示机载雷达探测高度之差的范围,其余参数同上。

3 基于虚拟导航路径的攻击顺序与接敌方向规划

3.1 虚拟导航路径规划空间生成

本文基于目标信息生成战术导航点,并基于战术导航点形成的规划空间进行路径规划,以路径表示攻击顺序。

欲实施对敌攻击,需进入给定目标(组)导弹攻击区的远边界,因此以目标(或目标组的几何中心)为中心,将目标导弹攻击区远边界按角度均匀采样,作为第 1 层战术导航点,记为:

$$RP_1^i = \{P_1^i, \dots, P_{N_1}^i\} \quad (5)$$

为了进入以目标为中心的攻击区远边界,必须首先经过离目标更远的最小安全距离边界。在目标周围最小安全距离边界上均匀采样,作为第 2 层战术导航点。目标 t 形成的第 2 层战术导航点记为:

$$RP_2^t = \{Q_1^t, \dots, Q_{N_2}^t\} \quad (6)$$

其余范围不再设定战术导航点,即认为我机采样时间最短的方法为:从一个目标的第 2 层战术导航点飞行至另一个目标的第 2 层战术导航点,从而实现在 2 个目标之间的转换。

若目标 i 的攻击顺序优先于目标 j ,则存在如下的偏序关系:

$$\exists Q_1^i, Q_1^j, \text{使得 } Q_1^i > Q_1^j \quad (7)$$

对于双机编队的目标组,所有的战术导航点组成导航路径的规划空间, T 个目标形成的导航点组成的规划空间记为:

$$PS = \{P_1^1, \dots, P_{N_1}^1, Q_1^1, \dots, Q_{N_2}^1, \dots, P_1^T, \dots, P_{N_1}^T, Q_1^T, \dots, Q_{N_2}^T\} \quad (8)$$

图 2 为一个目标(组)形成的 2 层战术导航点。

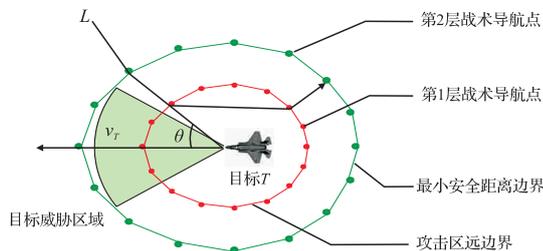


图 2 目标形成的 2 层战术导航点

Fig.2 Two layers of tactical navigation point of target

L 表示就当前态势规划好的一条导航路径,导航路径穿过了 2 层战术导航点, θ 为该导航路径与飞机速度方向的夹角,表示接敌方向。就空战协同多目标攻击情况而言,战术导航点一方面是指攻击过程的总体路径规划(对多个目标,确定导航点的选择顺序),另一方面也是接敌方向和退出方向的规划

(对同一目标,依次选择不同的导航点)。

3.2 虚拟导航路径规划原理

中远距空空导弹的攻击需要较长时间的制导过程,因而退出攻击的过程也可以简化为依次经过第 1、2 层战术导航点,规划问题描述为:

1)针对各空域目标(组),选择 4 个战术导航点,选择顺序为:

$$Q_i^t \rightarrow P_m^t \rightarrow P_n^t \rightarrow Q_o^t (m \neq n) \quad (9)$$

2)依次将各目标的 4 个战术导航点连接,形成导航路径,一条导航路径可描述为如下五元组:

$$L = \langle N, S, T_g, P_r, E \rangle \quad (10)$$

式中: N 为航路段数量,航路段指任 2 个连续导航点的连线; S 为我机初始位置结点,也是导航路径的第一个航路点; T_g 为一个目标序号的有序集合,表示目标选择顺序,记录了多目标攻击顺序; P_r 为一个航路点的有序集合,表示针对各目标所选的 4 个战术导航点及其顺序,记录各目标的接敌方向和退出方向; E 为终止导航位置,是导航路径的最后一个航路点,在不出现新目标时可不设定。

3)按照既定原则,攻击顺序和接敌方向的规划问题成为导航点的排列组合优化问题。

3.3 虚拟导航路径的评价指标

导航路径的优劣需要建立指标函数来评价,在中远距导弹超视距攻击情况下,各导航点间距较大,因而航路可行性问题的约束较少,正常情况下规划航路均满足飞行约束。本文给定的导航路径指标主要从以下 4 个方面建立。

1)航路长度:即为当前路径中所有导航点的连线长度, l_i 为各航路段的长度:

$$D_L = \sum_{i=1}^N l_i \quad (11)$$

2)受威胁航路长度:

$$E_L = \sum_{i=1}^N e_i \quad (12)$$

式中: e_i 为各航路段的受威胁(主要指探测威胁和火力杀伤威胁)航路长度,与目标火力杀伤范围有关,可通过敌目标态势信息进行预估。

3)接敌方向限制:各目标的接敌方向应满足导弹最大离轴发射角,即:

$$\theta_i = f(P_i^j, Q_i^j, T_i) \leq \theta_{\max}, i = 1, 2, \dots, T \quad (13)$$

式中: θ_i 表示对第 i 个目标的接敌方向; θ_{\max} 表示机载导弹的最大离轴发射角。

4)转弯角限制:由于导航点并非真实的飞行航路,因而实际上此约束可以忽略,即认为编队飞机总能通过调整航向和姿态达到导航点。在相邻 2 个航路段长度较小的情况下,可增加此约束。

$$\begin{cases} \mu_{j,j+1} = \infty, & \text{if } l_j + l_{j+1} < r_{\min} \\ \mu_{j,j+1} \geq \mu_{\min}, & \text{else} \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, N-1 \quad (14)$$

式中： $\mu_{j,j+1}$ 为第 j 个航路段和第 $j+1$ 个航路段之间的夹角； l_j 为第 j 段航路的长度； r_{\min} 为最小转弯半径； μ_{\min} 为最小转弯角。

4 虚拟导航路径粒子群优化寻优

组合优化问题可通过遍历的方法求解,但在问题规模较大时,则计算量过大,计算效率太低。粒子群优化(PSO)算法^[8]进行组合优化问题的求解,计算量较小,求解速度快,并且可以保证收敛性。

4.1 解的编码方法

图 3 为一条可行的导航路径:图中现有 3 个目标(1,2,3),形成的导航路径如图 3 中实线连线,既表示了攻击顺序,同时也给出了接敌和退出方向。每条可行导航路径都由起始点、各目标周围的 4 个导航点、终止点(可不设定)组成。每条导航路径即

可表示为上述导航点的有序组合。

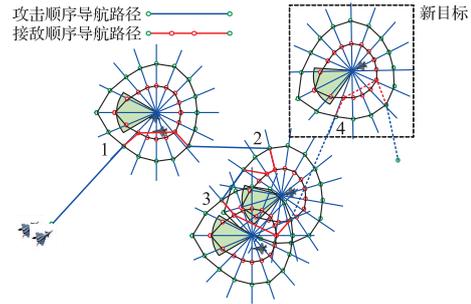


图 3 导航路径规划示意图

Fig.3 Diagram of Navigation Path

应用算法的基本步骤是对问题的解进行编码。根据当前分配的目标数 T 确定编码长度为 $5T$,其中,前 T 个基因片采用十进制编码,依次为 T 个目标的排序,即前 T 个基因片表示了攻击顺序;后面的 $4T$ 个基因片也采用十进制编码方式,每 4 个为一组,依次表示在当前排序方式下的各目标的 4 个虚拟导航点。解的编码方式见图 4。

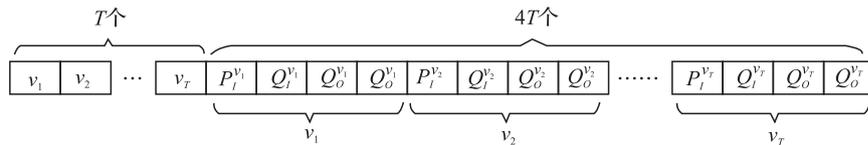


图 4 解的编码方式

Fig.4 Coding of solution

4.2 适应度函数的定义

适应度函数表示解的优劣程度。基于上述导航路径的评价指标构建如下适应度函数:

$$F(L) = \omega_1 \frac{D_L}{D_M} + \omega_2 \frac{E_L}{E_M} + g_1(L) + g_2(L) \quad (15)$$

式中： $F(L)$ 表示适应度函数， $F(L)$ 取值越小，表示适应度越高，记作 $\min F(L)$ ，反之适应度越低，当 $F(L)$ 取值趋近于无穷大时，则此解无效； D_L 为航路长度； E_L 为受威胁航路长度； D_M 和 E_M 分别为归一化系数； ω_1 和 ω_2 为加权系数； $g_1(L)$ 和 $g_2(L)$ 为 2 个修正项，分别表示接敌方向不满足导弹最大离轴发射角以及战斗机转弯角度过小的情况下对解的修正，修正方式为：

$$g_1(L) = \begin{cases} \infty, & \theta > \theta_{\max} \\ \theta, & \theta \leq \theta_{\max} \end{cases} \quad (16)$$

式中： θ_{\max} 为导弹的最大离轴发射角， θ 为导弹的离轴发射角。当 $\theta > \theta_{\max}$ ，修正项 $g_1(L)$ 为无穷大，则此解无效，该条件下导弹无法发射，则退回对解重新编码；当 $\theta \leq \theta_{\max}$ 时，导弹可以发射。

$$g_2(L) = \begin{cases} \infty, & \mu < \mu_{\min} \\ \mu, & \mu \geq \mu_{\min} \end{cases} \quad (17)$$

式中： μ 表示转弯角，当 $\mu < \mu_{\min}$ 时，修正项 $g_2(L)$

为无穷大时，则此解无效，该条件下战斗机不允许转弯，则退回对解重新编码；当 $\mu \geq \mu_{\min}$ 时，战斗机可以转弯。

4.3 初始种群生成方法

由于个体编码分为 2 部分，各自独立初始化。第 1 部分为随机选择目标，每个基因位依次取值为 $1 \sim T$ ，且不重复选择；第 2 部分 4 个基因位为一组选择，每个基因位的取值为 $1 \sim N_p$ ，为保证导航路径的简洁性，此处规定 4 个基因位中，中间 2 个基因位取值不相等。

4.4 不可行解的处理方法

在进化过程中，部分粒子可能会成为不可行解，此时直接清除，并重新初始化一个粒子，保持种群数量恒定。

4.5 虚拟导航路径的修正

由于对空域每个目标(组)都生成了 2 层战术导航点，且在路径编码过程中强制使路径必须经过每个目标的内外 2 层各 2 个导航点，这可能会出现某些航路段的交叉或者重复的情况。此时，应根据航路段不交叉原则将多余部分去掉，即航路的修正。虚拟导航路径修正后应重新进行评价，若评价结果不如修正前，则保留原虚拟导航路径。

5 仿真分析

给定如下作战想定:我方双机编队(看作一个整体)攻击空域 4 个目标(组),我方战斗机携带的导弹最大攻击距离为 80 km,敌方雷达探测范围计算见第 2 节。假定我机当前位置坐标为(0,0),4 个目标(组)相对于我机的空间态势分布见表 1。

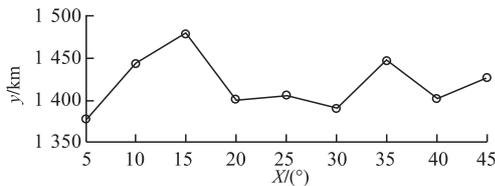
表 1 双方初始态势

Tab.1 Initial state of both sides

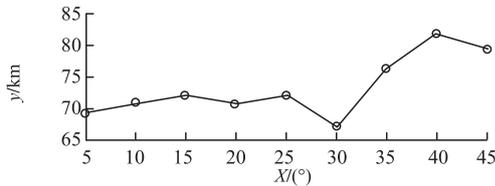
目标序号	位置坐标/km	航向角/(°)	目标序号	位置坐标/km	航向角/(°)
T ₁	(270,350)	195	T ₃	(350,50)	195
T ₂	(200,300)	150	T ₄	(500,150)	150

5.1 确定最优采样角度

由于目标导弹攻击区远边界、最小安全距离边界是按照角度均匀采样计算出来的,不同的采样角度可能会影响规划航路的总长度以及受威胁航路长度,设 9 组采样角度进行 Matlab 仿真(5°,10°,15°,20°,25°,30°,35°,40°,45°),仿真结果见图 5。



(a)采样角度和航路总长度关系图



(b)采样角度和威胁长度关系图

图 5 采样角度与总航路以及受威胁航路关系

Fig.5 The relation of angle and total route and threatened route

由图 5 可以看出,不同的采样角度对航路有影响,导航路径总长度和受威胁航路长度在某一值上下波动。不同的采样角度下规划的总航路长度 S 和受威胁航路长度 S₁ 见表 2。定义 $\alpha = S_1/S$, 表示该航路中,受威胁段航路长度占总航路长度的百分比。由表 2 可以看出,当采样角为 30°时, α 的值最小,虽然总航路长度不是最小,但是受威胁航路长度最小,综合考虑,30°为该想定下的最佳采样角。

表 2 确定采样角度

Tab.2 Determine the angle

序号	采样角度/(°)	总航路长度 S/km	受威胁航路长度 S ₁ /km	α
1	5	1 376.81	69.28	0.050 3
2	10	1 442.76	70.84	0.049 0
3	15	1 480.03	72.10	0.049 1
4	20	1 401.01	70.69	0.050 5
5	25	1 405.60	72.10	0.051 3
6	30	1 389.75	67.06	0.048 2
7	35	1 447.39	76.34	0.052 7
8	40	1 401.72	81.72	0.058 3
9	45	1 426.23	79.40	0.055 7

5.2 攻击顺序与接敌方向仿真

PSO 算法中,种群数量设定为 30,最大迭代次数为 200,采样角为 30°,经过 MATLAB 仿真计算,种群适应度能很快收敛。最终规划的虚拟导航路径见图 6,各航路段的长度以及所受威胁情况见图 7。

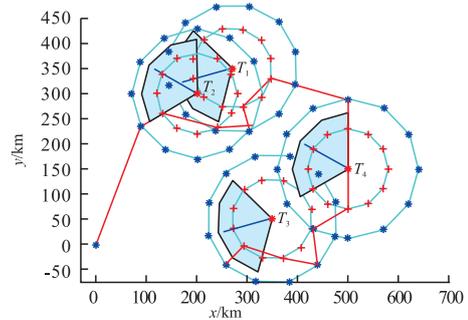


图 6 规划的虚拟导航路径

Fig.6 Planned the virtual navigation path

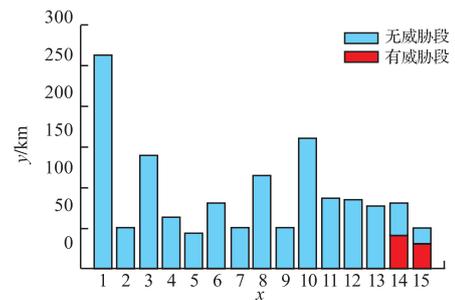


图 7 各航路段的长度以及威胁情况

Fig.7 The length and threaten of every path

从图 6 中的虚拟导航路径可以看出,对 4 个目标(组)的攻击顺序依次为 T₂、T₁、T₄、T₃,接敌方向分别为 60°,90°,60°,150°(以所选目标正迎头为 0°基准)。由图 7 可知,规划出的虚拟导航路径避开了主要的威胁区,只有在攻击 T₃ 时,经历了部分有威胁的航路段。

本文所得结果只是对攻击顺序和接敌方向的一种等效的表示方法,并非实际导航点。实际的导航点应在上述规划顺序、接敌方向确定的基础上,按照

截击算法^[9]进行确定,然后形成导引律^[10]。

6 结语

本文在分析了空战多目标攻击的基础上,提出了一种基于虚拟导航路径的多目标攻击顺序和接敌方向规划方法。在将攻击顺序和接敌方向规划等效为虚拟导航路径规划的基础上,详细阐述了虚拟导航路径空间生成方法、规划原理以及评价指标,然后基于粒子群优化算法进行求解,仿真结果表明,本文提出的方法可以有效解决多目标攻击的攻击顺序和接敌方向规划问题。

本文方法是一种静态规划方式,实际使用中需要根据目标动态实时进行调整。下一步工作重点可根据历史态势数据对目标态势发展进行预测,基于预测值进行规划,则规划结果将会更合理。

参考文献(References):

- [1] E Dror-Rein, H B Mitchell. A Soft Assignment Algorithm for Multiple Target Tracking[J]. Signal Processing, 2001, 81: 1757-1764.
- [2] Shemin Kalam, Mahbub Gani, Lakmal Seneviratne. A Game - Theoretic Approach to Non - Cooperative Target Assignment[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2010, 58: 955-962.
- [3] J. Karimi, Seid H. Pourtakdoust. Optimal Maneuver-Based Motion Planning Over Terrain and Threats Using a Dynamic Hybrid PSO algorithm[J]. Aerospace Science and Technology, 2013 (26) : 60-71.
- [4] Liang Xiao, Jun Huang. Study on Calculation for Air-to-Air Missile Attack Area Based on Improved RBF Neural Network [C]//International Conference on Computer Science and Intelligence, 2012(7): 631-637.
- [5] Lazarus, Eari. Application of Value-Driven Decision-Making in Air Combat Simulation[C]//Proceeding of the IEEE International Conference of System, Man and Cybernetics, 1997(3): 2302-2307.
- [6] Li Bo, Gao Xiao-guang. Integrate Decision-Making of Aerial Weapon System Based on BNs [J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(4): 886-889.
- [7] 付新华,王健. 多机协同多目标攻击的目标分配和攻击排序[J]. 火力与指挥控制, 2006, 31(3): 75-78.
FU Xinhua, WANG Jian. Target Assignment and Squencing Attack Algorithm for Multi-target Attack in Multi-fighters Cooperative Combat[J]. Fire Control & Command Control, 2006, 31(3): 75-78. (in Chinese)
- [8] 周志刚. 航空综合火力控制原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
ZHOU Zhigang. General Aviation Fire Control Theory [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008. (in Chinese)
- [9] Liang Xiao, Jun Huang. Study on Calculation for Air-to-Air Missile Attack Area Based on Improved RBF Neural Network [C]//International Conference on Computer Science and Artificial Intelligence Advances in Artificial Intelligence, 2012(7): 631-637.
- [10] Peng Teng, Huigang Lv. Improved Particle Swarm Optimization Algorithm and Its Application in Coordinated Air Combat Missile - Target Assignment [C]//Proc of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation. Chongqing, 2008: 25-27.

(编辑:徐敏)