

一种基于遗传算法的防空导弹火力分配优化方法*

钟晓声, 李应歧

(第二炮兵工程学院, 西安 710025)

摘要: 结合现代防空作战特点, 分析影响目标威胁评估与排序的因素, 利用关联度对目标进行威胁评估与排序. 建立了基于遗传算法的防空导弹目标优化和火力分配模型. 仿真结果表明, 该方法有效地解决了防空导弹目标分配这一复杂的问题, 提高了防空导弹武器系统的作战效能.

关键词: 关联度; 威胁评估; 火力分配; 遗传算法

中图分类号: E917

文献标识码: A

文章编号: 1006 - 0707(2009)07 - 0020 - 04

信息化条件下的空袭与反空袭是以体系与体系对抗为特征的一体化作战. 在兵力、火力有限的情况下, 必须对空中目标的威胁程度进行正确的评估和排序, 为火力分配和射击决策提供依据.

对于空中目标的威胁评估国内外提出了很多新的理论和评估方法: 高军亮和王洪胜提出的基于部分目标权重未知的多指标决策模型的指标权重方法^[1]; 程红斌提出的模糊度理论与层次分析法相结合的威胁评估方法^[2]; 刘军和贾宏慧提出的基于不完全信息的多属性决策的评估方法^[3]等. 这些方法在指标权重的确定中主观因素影响很大, 主要靠专家的专业知识确定. 对于评估结果的可靠性有一定的影响. 本文中提出了一种基于关联度确定指标权重的评估方法, 可以在一定程度上消除主观因素的影响, 使评估结果更加客观可信.

弹、隐身飞机等)、大型目标(轰炸机、歼击轰炸机、强击机等)和武装直升机. 并假定目标类型威胁量化函数为:

$$r = \begin{cases} 0.8 & \text{小型目标} \\ 0.5 & \text{大型目标} \\ 0.3 & \text{武装直升机} \end{cases} \quad (1)$$

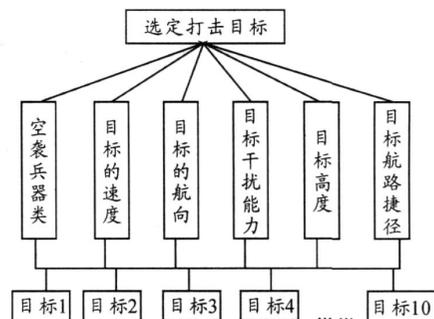


图1 目标威胁评估指标体系

1 空中目标威胁评估指标体系

空袭目标的威胁程度主要由目标进行的作战任务及目标特性决定. 根据光电干扰武器系统作战使用原则及雷达所能提供的目标信息, 影响目标威胁程度的指标体系主要由空袭兵器类型、目标的速度 v_i 、目标高度 h_i 、电子干扰、目标航路捷径 P 和航向角 θ 组成. 评估指标体系如图1所示.

2 威胁评估指标量化

2.1 目标类型量化函数的确定

不同目标类型的用途、武器装备不同, 对被保卫要地的威胁程度也就随之不同. 针对被保卫要地防空的特点, 将来袭目标分3类, 即: 小型目标(空地导弹、反辐射导弹、巡航导

2.2 目标速度

空中目标的飞行速度直接影响防空导弹的杀伤区的范围. 即使同一目标, 若飞行速度不同, 它们的威胁程度也不同. 通常飞行速度越大, 其威胁程度也越大, 反之威胁程度就小. 其量化函数可选取为:

$$r_v = \begin{cases} \frac{0.9v}{1600} & 0 < v < 1600 \\ 1 & v > 1600 \end{cases} \quad (2)$$

2.3 航向角

航向角体现了空中目标攻击意图的因素, 是判断空中目标对于被保卫目标威胁程度的一个重要评价指标. 航向角的量化准则如下: 按 $0^\circ \sim 36^\circ$ 等间隔 (4°) 依次量化为 $9 \sim 1$. 量化表如表1所示.

* 收稿日期: 2009 - 04 - 01

作者简介: 钟晓声(1986—), 男, 硕士研究生, 主要从事系统效能评估研究; 李应歧, 男, 教授, 硕士生导师, 主要从事系统效能评估研究.

表1 航向角量表

评价指标	1	2	3	4	5	6	7	8	9
量化值	0	0.125	0.25	0.375	0.5	0.625	0.75	0.875	1

2.4 电子干扰

施放电子干扰是敌空袭突击编队典型的对抗手段之一.电子干扰的主要是干扰地空导弹武器系统中的跟踪照射制导雷达,使其不能对目标进行有效的跟踪;干扰地空导弹上的电子设备,使导弹失控,降低命中概率.可见,空袭兵器的电子干扰能力也是目标威胁程度的一个重要的因素.

电子干扰性能指标按很强、强、中、弱、无依次量化为9、7、5、3、1其取值分别为0.85、0.65、0.20、0.10、0.05.

2.5 目标高度

降低飞行高度能使作战飞机被发现的概率明显减少,同时也是隐蔽接敌的常见攻击战术手段.近距离突然出现的低空目标,对我导弹阵地威胁较大,其威胁度明显提高.目标的高度越低(尤其是近距离目标),其威胁程度越大.因此,按照高度分为高空、中空、低空、超低空,选取高度威胁量化函数的形式为:

$$r_h = \begin{cases} 0.2 & \text{高空} \\ 0.4 & \text{中空} \\ 0.6 & \text{低空} \\ 0.8 & \text{超低空} \end{cases} \quad (3)$$

2.6 目标航路捷径

空中目标对保卫目标的航路捷径指保卫要地中心到目标航路水平投影的距离.依据射击理论,若空中目标的航路捷径越小,则攻击意图愈明显,威胁程度也就越大;航路捷径越大,威胁程度就越小.选取航路捷径的量化函数的形式为:

$$r_p = \begin{cases} 1 - \frac{0.9p}{350} & 0 < p < 350 \\ 0 & p > 350 \end{cases} \quad (4)$$

3 基于关联度的威胁程度指标权重计算

假设现有空中目标 m 个,影响各目标威胁程度综合评价值的指标有 n 个.用 x_{ij} 表示目标 i 的第 j 个评价指标值,则 m 个目标的 n 个评价指标值构成矩阵 $X = (x_{ij})_{m \times n}$.利用前面的量化函数得到消除量纲后的新矩阵 $X = (x_{ij})_{m \times n}$,从矩阵 X 各列中选出最大值,得到最优对象

$$S^+ = (x_{0+1}, x_{0+2}, \dots, x_{0+n}),$$

从各列中选出最小值,得到最劣对象

$$S^- = (x_{0-1}, x_{0-2}, \dots, x_{0-n})$$

计算各目标与最优对象、最劣对象在各指标的关联系数^[4],得

$$o^+_i(j) = \frac{\min_i o^-_{ij} + \max_j o^+_{ij}}{o^-_{ij} + \max_j o^+_{ij}} \quad (5)$$

其中

$$o^+_ij = |x_{0+}^+ - x_{ij}|, \quad o^-_{ij} = |x_{0-}^- - x_{ij}| \quad (6)$$

$(i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n)$

若指标为收益性指标或成本性指标,则有

$$\min_j o^+_ij = \min_j o^-_{ij} = 0$$

$$\max_j o^+_ij = \max_j o^-_{ij} = 1$$

故此时有,

$$o^+_i(j) = \frac{0.5}{o^+_{ij} + 0.5} = \frac{1}{2 o^+_{ij} + 1}$$

$$o^-_{i}(j) = \frac{0.5}{o^-_{ij} + 0.5} = \frac{1}{2 o^-_{ij} + 1} \quad (7)$$

$o^+_i(j)$ 越大,表示目标 i 与最优对象在指标 j 上的关联系数越大, $o^-_{i}(j)$ 则相反,其值越小,表示目标 i 与最优对象在分目标 j 上的关联系数越大.设 n 个指标的权重向量为 $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ (待定),则

$$f_i(w) = \sum_{j=1}^n w_j^2 [1 - o^+_i(j)]^2 + \sum_{j=1}^n w_j^2 o^-_{i}{}^2(j) \quad (8)$$

对应着目标 i 离最优对象与最劣对象的加权距离的平方和.在距离的意义下 $f_i(w)$ 应越小越好.由此建立下列多目标规划模型:

$$\min f(w) = (f_1(w), f_2(w), \dots, f_m(w))^T \quad (9)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \min_{i=1}^m f_i(w) \\ w_j = 1 \\ w_j = 0, j = 1, 2, \dots, n \end{cases}$$

由于 $f_i(w) \geq 0 (i = 1, 2, \dots, m)$,故上述多目标规划可归结为单目标规划,构造拉格朗日函数:

$$F(w, \lambda) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n w_j^2 \{ [1 - o^+_i(j)]^2 + o^-_{i}{}^2(j) \} - \lambda (\sum_{j=1}^n w_j - 1) \quad (10)$$

令

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial w_j} = 2w_j \sum_{i=1}^m \{ [1 - o^+_i(j)]^2 + o^-_{i}{}^2(j) \} - \lambda = 0 \\ \frac{\partial F}{\partial \lambda} = \sum_{j=1}^n w_j - 1 = 0 \end{cases}$$

此线性方程组的系数行列式为

$$d = \begin{vmatrix} 2u_1 & 0 & \dots & 0 & -1 \\ 0 & 2u_2 & \dots & 0 & -1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 2u_n & -1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \end{vmatrix} = \sum_{j=1}^n u_j \sum_{j=1}^n \frac{1}{u_j}$$

其中, $u_j = \sum_{i=1}^m \{ [1 - o^+_i(j)]^2 + o^-_{i}{}^2(j) \}$, $d > 0$ 故原方程组

一定有解.

求解此方程组得

$$w_j = \frac{1}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{u_j}} \quad (11)$$

由此即得到各指标的权重.

4 防空导弹作战目标优化与火力分配

空中目标威胁评价值为 $E = XW^T$, 由威胁评价价值 E 可以得到空中各目标的威胁程度排序. 假设有 k 个地空导弹火力单元对 n 批空袭目标进行目标分配. 第 j 个目标的威胁程度评估值为 e_j , 第 i 个火力单元对第 j 个目标射击有利程度估计值为 p_{ij} , 令各火力单元对各个目标进行拦截的效益值为 $c_{ij} = e_j \cdot p_{ij}$, 其中 c_{ij} 表示对某个目标进行拦截我方获益大小程度. 目标分配的目的是满足目标分配的基本原则, 追求总体效益最佳, 即求 $\max(\sum_{j=1}^n c_{ij})$, 其数学模型为:

$$\begin{cases} \max Z = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \\ x_{ij} = 1 \quad i = 1, 2, \dots, k \\ x_{ij} = 1 \quad j = 1, 2, \dots, n \\ x_{ij} = 1 \text{ 或 } 0 \end{cases}$$

其中: c_{ij} 为第 i 个火力单元对第 j 个目标的拦截效益值; x_{ij} 为第 i 个火力单元是否射击第 j 个目标; Z 为防空作战杀伤目标的总体效益.

对于这一组合优化问题, 可用传统搜索算法来求解, 但当目标数和火力单元数比较多时, 一方面计算量大, 另一方面容易陷入局部最优. 遗传算法 (Genetic algorithm) 其基本思想是模拟由一些称为染色体的串组成的群体进行进化, 通过有组织而又随机的信息交换来重新结合那些适应性好的串, 生成新的具有比上一代适应性好的群体. 其主要特点是简单、通用、鲁棒性强, 具有较好的全局搜索能力, 适用于传

统搜索算法难以解决的复杂组合优化问题. 因此本文中采取遗传算法来实现防空导弹目标分配问题.

5 遗传算法及实现

1) 编码方式本文中采用十进制, 每个染色体的长度等于空中目标个数, 染色体的基因位为空中火力单元的编号, 基因值表示可分配火力单元的编号, 每一个染色体为一种分配方案.

2) 适度值对目标分配的目的是总的作战效益最大, 故将作战效益作为适度值, 即

$$eval(V_n) = \sum_{j=1}^n c_{ij}, j = 1, 2, \dots, n$$

3) 遗传操作

复制算子. 许多学者通常采用轮盘赌选择法, 本文中采用随机遍历抽样, 这种选择法可以增加种群的多样性. 交叉算子. 本文中采用两点交叉算子, 其是指在个体编码串中随机设置了两个交叉点, 然后再进行部分基因交换. 两点交叉的具体操作过程是: 一、在互相配对的两个个体编码串中随机设置两个交叉点; 二、交叉两个个体在设定的两个交叉点间的部分染色体. 变异算子. 变异是指对随机选取的某基因位实施变异, 使其成为另一个合法值. 本文中采取均匀变异即分别用符合某一范围内均匀分布的随机数以某一较小的概率来替换个体编码串中各个基因座上的原有基因值. 这种变异算子使得搜索点可以在整个搜索空间内自由地移动, 从而可以增加群体的多样性.

4) 终止条件. 根据防空作战的实时性要求, 采取了遗传的最大代数和超过某一时间相结合的方法作为算法的终止条件, 如果满足了其中之一的条件, 算法即结束.

6 事例分析

现在以 10 个空中目标, 有 5 个防空导弹火力单元进行拦截为例进行分析, 设来袭目标的各个性能指标如表 2 所示^[5-7].

表 2 来袭目标性能指标值

序号	目标类型	目标速度/(m/s)	目标航向角	目标干扰能力	目标高度	目标航路捷/km
1	大型目标	400	5	强	中空	100
2	大型目标	720	8	强	中空	150
3	小型目标	1600	3	无	低空	300
4	小型目标	1200	5	无	低空	260
5	大型目标	280	10	弱	超低空	140
6	武装直升机	100	15	无	超低空	120
7	大型目标	500	18	中	中空	260
8	大型目标	370	20	强	低空	290
9	小型目标	400	12	中	低空	300
10	大型目标	230	22	无	中空	350

由量化公式(1)~(4)可以得到性能指标矩阵 X ,由权重计算公式(5)~(11)得到性能指标权重 $W = (0.1879, 0.1369, 0.2120, 0.1298, 0.1547, 0.1786)$,由公式 $E = XW^T$ 可以得到10个来袭目标的威胁评价价值 $E = (0.5887 \quad 0.5644 \quad 0.6258 \quad 0.5867 \quad 0.5257 \quad 0.4502 \quad 0.4163 \quad 0.4245 \quad 0.4998 \quad 0.2500)$.

假设第 i 个火力单元对第 j 个目标射击有利程度估计值为 p_{ij} 得到 $P = (p_{ij})_{5 \times 10}$.

$$P = \begin{pmatrix} 0.8169 & 0.5712 & 0.5283 & 0.4918 & 0.7580 & 0.4985 & 0.4348 & 0.9267 & 0.5743 & 0.4388 \\ 0.1216 & 0.6448 & 0.3774 & 0.6569 & 0.3567 & 0.0069 & 0.5240 & 0.8401 & 0.2441 & 0.7384 \\ 0.3637 & 0.1345 & 0.9895 & 0.2458 & 0.7168 & 0.8997 & 0.0233 & 0.7176 & 0.2300 & 0.5221 \\ 0.5567 & 0.4370 & 0.0105 & 0.1239 & 0.8367 & 0.8592 & 0.3181 & 0.8427 & 0.7895 & 0.8168 \\ 0.2439 & 0.5477 & 0.8498 & 0.6526 & 0.2523 & 0.5840 & 0.5658 & 0.1772 & 0.7196 & 0.9853 \end{pmatrix}$$

遗传算法的参数设置为采用十进制编码方式,适应度函数为目标函数,复制概率为0.2,交叉概率为0.7,变异概率为0.1.应用 MATLAB 中遗传算法工具箱对该问题进行仿真.经过400次遗传迭代后,目标分配方案见表3.

表3 目标分配方案

目标编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
分配结果	1	2	3	2	4	3	5	1	4	5

与此方案对应得总收益值为3.9642.图2为经过400次迭代后的优化解的目标函数值及性能跟踪.该算法历时0.86秒,搜索效率比较高,可以基本满足实际应用.

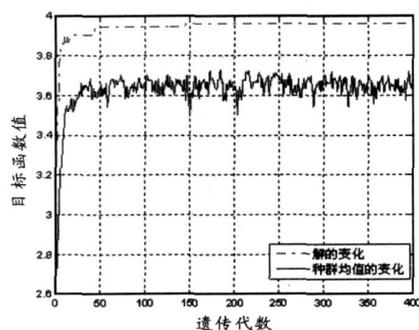


图2 优化解目标函数值及性能跟踪

7 结束语

在分析了防空作战中来袭目标威胁程度的各种因素,应用关联度获得目标威胁评估序列,并将评估结果融合到目标规划模型中,应用遗传算法获得了目标规划的最优

解,较好地解决了防空导弹目标分配问题,对提高防空导弹作战能力具有重要意义.

参考文献:

- [1] 高军亮,王洪胜.基于模糊MODM的空袭目标威胁评估[J].指挥控制与仿真,2006,28(3):44-46.
- [2] 程红斌,张晓丰.基于模糊层次分析法的威胁评估[J].现代雷达,2006,(28):22-23.
- [3] 刘军,贾宏慧.部分指标值未知的空中目标威胁评估模型[J].计算机工程与设计,2006,27(21):4115-4116.
- [4] 闫书丽,杨万才.属性权重未知的混合型多属性决策方法[J].统计与决策,2008(1):16-18.
- [5] 罗艳春,郭立红.基于神经网络的光电系统空中目标威胁评估[J].计算机测量与控制,2008,16(2):212-214.
- [6] 李健,王昆.基于最优指标法的防空信息战系统评估[J].兵工自动化,2009(4):39-42.
- [7] 刘刚,马多胜,张东升.战场目标价值评判的神经网络方法[J].兵工自动化,2007(11):11-12.