

基于蚁群优化的多弹协同目标分配算法*

张邦楚¹, 彭琛^{1,2}, 余新荣¹, 周晓华¹, 邹丽君³

(1 洪都航空工业集团 660 所, 南昌 330024; 2 南昌航空大学信息工程学院, 南昌 330063;
3 江西信息应用职业技术学院, 南昌 330043)

摘要: 为了提高对目标群的打击效果, 研究了多弹编队系统中存在的目标分配决策问题。首先, 利用弹间共享信息, 综合考虑导弹性能、目标特性以及弹目之间的态势关系, 建立弹目之间优势矩阵模型; 然后, 利用贪心算法及蚁群优化提出了一种简单有效的一轮拍卖及其改进算法以在规定时间内得到单弹的次优目标分配方案, 并以此得到整个弹群的分配结果。最后, 仿真结果证实了所提出方法的有效性。

关键词: 导弹; 目标分配; 协同; 拍卖; 蚁群优化

中图分类号: E94 **文献标志码:** A

Cooperative Target Assignment Algorithm of Multiple Missiles Based on Ant Colony Optimization

ZHANG Bangchu¹, PENG Chen^{1,2}, YU Xinrong¹, ZHOU Xiaohua¹, ZOU Lijun³

(1 No. 660 Research Institute, Hongdu Aviation Industry Co. Ltd, Nanchang 330024, China;

2 School of Information Engineering, Nanchang Aeronautic University, Nanchang 330063, China;

3 Jiangxi Vocational and Technical College of Information Application, Nanchang 330043, China)

Abstract: In order to better strike target group, the weapon-target assignment problem of multimissile formation system was studied. Firstly, by using the information shared between the missiles, the dominance matrix was modeled based on the performance of missiles, the character of targets and the relationship between the missiles and targets. Then, in order to obtain target assignment result of individual missile in desired time, the simple and effective auction algorithm around a circle and its improved algorithm were presented based on greedy algorithm and ant colony optimization. The final result of the missiles formation could be obtained based on the result of individual missile. Finally, the simulation results show the effectiveness of the proposed approach.

Keywords: missile; weapon-target assignment; cooperative; auction; ant colony optimization

0 引言

近年来, 国内外对多弹编队协同制导攻击技术展开了广泛的研究。进行合理可行的目标分配是多弹协同作战研究的一个重要方面。多弹编队协同制导对多目标进行攻击时, 要在规定的时间内对跟踪空域中的目标进行合理分配, 实现对目标群的杀伤概率最大并避免重复攻击与遗漏。求解目标分配问题的方法有匈牙利算法, 穷举及其改进方法^[1], 模拟退火、遗传算法^[2]和禁忌搜索^[3]等。问题规模较大时, 大的计算代价是 NP 问题的难点, 对多数问题实时性难以保证, 难以满足要求在线实时分配的要求。

文中首先建立目标分配的数学模型, 并据此提出了一种简单有效的一轮拍卖及其基于蚁群优化的改

进算法以在规定时间内得到单弹的次优目标分配方案。然后综合所有单弹的分配方案, 利用少数服从多数的原则表决得到整个弹群的目标分配结果。

1 目标分配的数学模型

目标分配的数学建模, 常采用的方法有参量法和非参量法^[4]。参量法需要知道目标的特征分布, 利用如 Bayes 等方法进行弹目优势评估; 非参量法主要根据弹目之间的战术几何关系, 包括弹目之间的角度、距离、速度等参数构造弹目综合优势函数。由于非参量法简明实用, 便于实时计算, 在实际中被广泛采用。文中利用非参量法, 根据弹目间角度、距离、速度以及导弹对目标的捕捉概率、辐射源等参数构造弹目综合优势函数。

* 收稿日期: 2011-11-01

作者简介: 张邦楚(1976-), 男, 湖南邵阳人, 高级工程师, 博士, 研究方向: 先进制导与控制技术。

1.1 捕捉概率

基于网络通信的多弹协同攻击依赖于友弹之间的通讯数据链,虽然每个导弹探测的范围有限,只能探测部分空域或跟踪部分目标,但是通过友弹之间信息交换和共享,可以使编队中每个导弹获得更广范围内的态势,可以假定存在一个“超级导引头”,通过它可以探测到更远更广的范围。然而,由于导弹网络通信之间存在延迟和丢包,所以在导弹自身无法探测到目标而需要友弹提供目标信息时,其捕捉目标的概率将比依靠自身传感器捕捉目标的概率更低。因此文中对这两种情况分别加以考虑,并进行适当简化,构造捕捉概率模型如下:

$$S_c = \begin{cases} p_{sc}, & \text{通过自身导引头探测到目标} \\ p_{nc}, & \text{通过网络通信获得目标信息} \end{cases} \quad (1)$$

其中, p_{nc} 依赖于编队自组织网络通信状况。

1.2 角度优势

假设平面内弹目相对运动关系如图 1 所示,其中 M 为导弹,其速度为 V ; T 为目标,其速度为 V_T ; 弹目之间距离为 r ; LOS 为弹目视线, V 与弹目视线的夹角为 η ; V_T 与弹目视线的夹角为 η_T 。

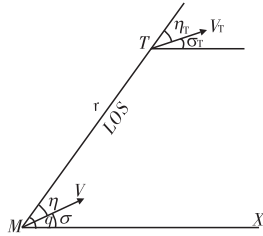


图 1 弹目相对运动关系

当导弹的速度方向越接近弹目视线方向的时候,导弹就越容易攻击目标,也就是说,当 η 等于零的时候,导弹对目标的角度优势最大。因此构造角度优势函数如下:

$$S_\varphi = \exp\left\{-\left(\frac{\eta}{a\pi}\right)^2\right\} \quad (2)$$

其中 a 为可变参数,随弹目距离 r 改变而改变。由于 r 越大, η 的影响越小,文中假设 a 与 r 成正比关系。

1.3 距离优势

假设导弹导引头探测距离的范围为 $(R_{min} \sim R_{max})$,其中 R_{min} 和 R_{max} 分别为导引头近界和远界,当弹目距离 $r \gg R_{max}$ 或者 $r \ll R_{min}$ 时,认为距离优势很小,而在 $r = (R_{min} + R_{max})/2$ 时,距离优势最大。因此构造距离优势函数如下:

$$S_r = \exp\left\{-\left(\frac{r - R_0}{\sigma_R}\right)^2\right\} \quad (3)$$

其中 $R_0 = (R_{min} + R_{max})/2$,对于不能通过探测得知弹目距离的被动导引头,可以通过自身导引头滤波算法和友弹提供的信息获得距离 r 的估计值。

1.4 速度优势

一般情况下,只有导弹的速度比目标速度大的时候,导弹才能攻击到目标,因此按下式构造弹目之间的速度优势函数:

$$S_v = 1.0 - V_T/V \quad (4)$$

1.5 导引头与目标辐射源之间的匹配优势

根据目标指示系统提供的目标有关辐射源特性,就可以在综合优势函数中考虑导引头探测类型与目标的辐射源类型之间进行匹配,这样可以大大提高导弹对目标的捕捉和跟踪精度,并可在最后攻击中为友弹提供准确的目标信息。建立如下弹目辐射特性匹配优势函数:

$$S_s = \begin{cases} n_c & \text{导引头与目标辐射源匹配} \\ n_d & \text{导引头与目标辐射源不匹配} \end{cases} \quad (5)$$

其中 n_c 与 n_d 是可变参数,根据导引头探测类型与辐射源匹配与否对综合优势的影响来定。认为当导引头探测类型与辐射源匹配时的优势要大于不匹配时的优势。

1.6 综合优势函数

根据以上所得各个优势函数,就可以构造弹目之间的综合优势函数。考虑到在具有较大距离优势或者速度优势的情况下,如果角度偏离很大,也就是角度优势很小,综合优势并不会大,故将角度优势与距离优势以及其与速度优势的关系都处理为相乘的关系。由此可以得到综合优势的表达式如下:

$$S = S_c \times (C_1 \times S_\varphi \times S_r + C_2 \times S_\varphi \times S_v + C_3 \times S_s) \quad (6)$$

其中 C_1 、 C_2 、 C_3 分别为权系数,其值由各优势对综合优势的影响的大小决定。 $0 \leq C_i \leq 1$,且 $\sum_{i=1}^3 C_i = 1$ 。

1.7 优势矩阵

设有 m 枚导弹, n 个目标,这两个值是根据战场态势和网络连通状态而随机动态变化的。根据上一节建立的数学模型,通过式(6)可以得到的我方第 i 枚导弹对敌方第 j 个目标的动态优势函数值 S_{ij} ,从而可以建立起如下弹目优势矩阵:

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & \cdots & S_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ & S_{ij} & \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{m1} & \cdots & S_{mn} \end{bmatrix} \quad (7)$$

则目标分配问题可描述如下:

$$J_{\max} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n S_{ij} X_{ij} \quad (8)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_{j=1}^n X_{ij} = 1, i = 1, 2, \dots, m \\ \sum_{i=1}^m X_{ij} \leq T_j, j = 1, 2, \dots, n \\ X_{ij} \in \{0, 1\} \end{cases} \quad (9)$$

式中,第一个约束条件表示一枚导弹只能攻击一个目标;第二个约束条件表示目标 j 最多只能被我方 T_j 枚导弹攻击,也就是目标 j 需弹量为 T_j ,它可由目标有关特性得到; X_{ij} 为决策变量,其在 $\{0, 1\}$ 之中取值,1 表示第 i 枚导弹被分配给第 j 个目标。

2 单物品一轮拍卖算法及基于蚁群优化的改进算法

由于假定一枚导弹只能攻击一个目标,所以可以采用单物品拍卖方法进行一轮拍卖。其原则是:遍历弹目优势矩阵所有元素找出最大元素值,在该最大元素值所对应的导弹和目标之间形成分配关系。同时根据一定的原则更新该目标的优势值,依此循环直至所有导弹都被分配完毕。这样可以保证算法的实时性,并能获得可行的次优分配结果,但是由于其实质是一种局部的贪心算法,容易导致处于分配劣势的导弹分配结果不理想,得到局部最优值。为了避免这种情况,在时间允许的情况下,可以在一轮拍卖所得结果的基础上采用现代启发式优化算法进行多轮随机拍卖以寻求更好的解来修正初始分配结果。这样就能保证最终分配结果是在允许搜索时间范围内最优的。

蚁群优化(ant colony optimization, ACO) 算法是一种模拟昆虫王国中蚂蚁群体智能行为的仿生优化算法,该算法利用信息素(Pheromone) 作为蚂蚁选择后续行为的依据,并通过正反馈机制使蚂蚁达到协同来完成寻优过程,其具有较强的鲁棒性,优良的分布式计算机制、易于与其他方法相结合等优点,是一种搜索能力很强的全局优化算法^[5],所以文中采用蚁群优化算法来修正初始分配结果。

下面针对上述目标分配问题,结合文献[6] 中相关知识介绍该算法的各主要组成部分。

1) 构建图:蚂蚁就是在构建图 $G_c = (C, L)$ 上随机游走来建立解的随机构建过程,其中集合 L 完全连接集合 C 中的成分点。这里集合 C 包含了所有的导弹和目标。一个可行解就是一个由 m 枚导弹和 n 个目标以配对 (i, j) 形式组成的一个分配,其中一枚导弹只

能分配一个目标,而一个目标可以被分配给多枚导弹。

2) 信息素:信息素 τ_{ij} 指的是分配导弹 i 到目标 j 上的期望度,它编码了有关蚂蚁完整搜索过程的一段长时间记录,并由蚂蚁对其进行更新。

3) 启发式信息 η_{ij} :用来表示在构建分配方案过程中添加新的弹目配对 (i, j) 到解中的启发值。在这里,把 S 矩阵元素 S_{ij} 映射为启发值 η_{ij} ,即 $\eta_{ij} = S_{ij}$ 。

4) 解的构建:首先按照随机方式排列导弹,然后按照排列的顺序按式(10) 所示选择规则求得的概率把下一个还未达到需弹量的目标 j 分配给导弹 i 。

$$p_{ij}^k = \frac{[\tau_{ij}]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{i \in N_i^k} [\tau_{ii}]^\alpha [\eta_{ii}]^\beta}, \text{如果 } j \in N_i^k \quad (10)$$

该选择规则使用信息素值和启发式值以一定概率决定导弹如何选择目标。 α 和 β 是分别决定了信息素和启发式信息的相对影响力, N_i^k 代表了在蚂蚁 k 求解分配方案时可被分配给导弹 i 的目标的集合。

5) 信息素更新:为了避免残留信息素过多引起残留信息淹没启发信息,每只蚂蚁完成对 m 枚导弹的遍历获得完整的分配方案之后,要对残留信息进行更新,淡化旧信息,强化新信息。因此,在 $t + m$ 时刻,导弹 i 到目标 j 的配对 (i, j) 上的信息素可按如下规则进行调整:

$$\tau_{ij}(t + m) = (1 - \rho)\tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t),$$

$$\Delta\tau_{ij}(t) = \sum_{k=1}^A \Delta\tau_{ij}^k(t) \quad (11)$$

其中: $\rho \in (0, 1)$ 表示信息素 $\tau_{ij}(t)$ 随时间的推移而衰减的程度; $\Delta\tau_{ij}(t)$ 表示信息素增量; $\Delta\tau_{ij}^k(t)$ 表示蚂蚁 k 在本次循环中在导弹 i 和目标 j 的配对 (i, j) 上留下的信息素。根据类似于文献[6] 中 ant circle system 的模型设计 $\Delta\tau_{ij}^k(t)$ 的计算公式如下:

$$\begin{cases} \Delta\tau_{ij}^k(t) = \frac{J_k}{Q}, \text{若第 } k \text{ 只蚂蚁选择 } (i, j) \\ \Delta\tau_{ij}^k(t) = 0, \text{否则} \end{cases} \quad (12)$$

其中: Q 为常数,用来控制算法的收敛速度, J_k 为第 k 只蚂蚁本次循环中所得分配方案的总优势值。

6) 结束规则:如所有目标都已分配完毕,且超出允许的分配时间,或者算法迭代一定次数之后历史最优值仍没有提高,则结束分配。

综上所述可得一轮拍卖及其改进算法步骤如下:

1) 从式(7) 所示的优势矩阵 S 中选择最大的值,假定为 S_{ij} 。

2) 判断分配给目标 j 的导弹数是否小于需弹量

为 T_j , 即 $\sum_{i=1}^m X_{ij} < T_j$ 是否成立, 如是则将第 i 枚导弹分配给第 j 个目标, 将 X_{ij} 置为 1; 否则将 X_{ij} 置为 0。

3) 修正优势矩阵。如果 $X_{ij} = 1$, 则将 S 阵第 i 行元素全部置零, 即第 i 枚导弹不再参与分配; 如 $\sum_{i=1}^m X_{ij} \geq T_j$, 则将 S 阵第 j 列元素全部置零, 即第 j 个目标不再参与分配; 假如 $\sum_{i=1}^m X_{ij} < T_j$, 则将第 j 列元素全部衰减 w_1 倍。同时, 为了做到导引头之间的优化搭配, 将已分配给 j 目标的导弹导引头类型与其他未分配给 j 目标的导弹导引头类型进行比较, 如果类型相同, 则将 j 列中相应的未分配给 j 目标的导弹所在行的元素乘以衰减因子 w_2 。 w_1, w_2 为可变参数, 且 $0 < w_i < 1, i = 1, 2$ 。

4) 判断所有的导弹是否分配完毕, 即 $\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n X_{ij} = m$ 是否成立, 如成立则一轮拍卖分配结束, 得到初始分配结果, 转 5), 否则返回 1) 循环执行。

5) 如达到结束条件, 则转 9), 否则转 6)。

6) 蚁群优化算法参数初始化。设置最大循环次数 $N_{c_{max}}$, 采用随机方式排列导弹, 并根据一轮拍卖所得当前解初始化每个分配对 (i, j) 的信息素 $\tau_{ij}(0)$, 令初始时刻 $\Delta\tau_{ij}(0) = 0$ 。

7) 按照导弹序列根据选择概率公式计算的概率选择目标, 在此过程中需根据 3) 中修正原则修正优势矩阵, 并同步更新蚂蚁 k 求解分配方案过程中可分配目标的集合 N^k 。

8) 重复上一步直到所有蚂蚁都得到分配方案后, 根据修正后的优势矩阵求各蚂蚁所得解的总优势值, 并按式 (12) 更新每个分配对 (i, j) 上的信息素。如达到结束条件, 转 9), 否则转 7) 进行下一次迭代。

9) 算法停止, 输出最优分配方案。

得到单弹分配结果后, 立刻通过网络共享所得结果。同时本弹获得其它友弹的分配结果后, 综合统计所有分配结果, 利用少数服从多数的原则进行表决得到协同目标分配结果。并且每隔一定的时间间隔再次进行分配, 以适应战场态势的动态变化。

3 仿真验证

对 5 枚导弹攻击 3 个目标的情况进行分配算法的仿真和验证。这种情况下时间约束规定为算法最大迭代次数为 50 次。假设某时刻导弹和目标的东向和北向位置如图 2 所示, 其中所有导弹的高度为 2000m, 速

度大小为 200m/s, 弹道偏角为 0° 。所有目标的高度为 0m, 速度大小为 20m/s。图中用“□”表示红外型导引头和红外热辐射源, 用“○”表示雷达导引头和电磁辐射源。仿真中导引头视界参数如表 1 所示。其中 η_u 和 η_l 分别代表导引头高低角的上下界, q_l 和 q_r 分别代表导引头水平角的左右界, R_{max} 和 R_{min} 分别代表导引头视距的远近界。以上所用到的坐标系均为国内坐标系。目标 1 需弹量为 1, 目标 2 和目标 3 需弹量都为 2。假设 $p_{nc} = 0.7, p_{sc} = 0.95, a = 0.0001r, \sigma_R = (R_{min} + R_{max})/25, n_c = 1.0, n_d = 0.25, C_1 = C_2 = 0.35, C_3 = 0.3, w_1 = 0.6, w_2 = 0.3$, 根据数学模型可以得到弹目优势矩阵为:

$$S = \begin{bmatrix} 0.3215 & 0.9187 & 0.7260 \\ 0.7951 & 0.6831 & 0.7071 \\ 0.3590 & 0.7215 & 0.6799 \\ 0.9526 & 0.2808 & 0.5692 \\ 0.6957 & 0.4141 & 0.6940 \end{bmatrix}$$

仿真中, 蚂蚁数量为 30, $\alpha = 1, \beta = 5, \rho = 0.9$ 。

表 1 仿真中导引头视界参数

编号	$\eta_u /$ ($^\circ$)	$\eta_l /$ ($^\circ$)	$q_l /$ ($^\circ$)	$q_r /$ ($^\circ$)	$R_{max} /$ km	$R_{min} /$ km
1	5	-25	-30	30	40	1
2	10	-30	-45	45	50	1.5
3	10	-20	-25	25	35	1
4	5	-20	-40	40	60	1
5	5	-20	-20	20	60	1

若一轮拍卖所得结果中, 导弹 i 和目标 j 形成配对 (i, j) , 则 $\tau_{ij}(0) = 1$, 否则 $\tau_{ij}(0) = 0.2, Q = 100$, 为了避免陷入局部最优结果, 设定 $0 \leq \tau_{ij}(t) \leq 20$ 。

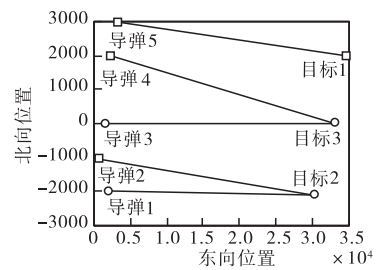


图 2 5 vs 3 分配示意图

在主频为 Pentium 双核 2.8GHz 的计算机上利用文中分配算法并基于少数服从多数的原则综合其它友弹分配结果后所得的协同分配结果如图 2 所示, 图 3 所示为分配算法的搜索过程。由仿真结果可以看出, 分配结果非常合理。弹 1 和 2 导引头类型互补, 这有利于提高随后的协同打击精度, 另外它们在几何关系上也非常适合攻击目标 2。同样, 从其它弹与所分配目标的几何关系及导引头搭配及辐射源匹配关系可以看出所得结果的合理性。

仿真中, 单弹分配算法耗时 0.019s, 综合网络信

息得到最终分配结果总耗时为 0.231s。考虑每次迭代中优势矩阵元素更新后,算法所得最优解的目标函数值为 3.086,与利用穷举法所得理想目标函数数值相同,但穷举法

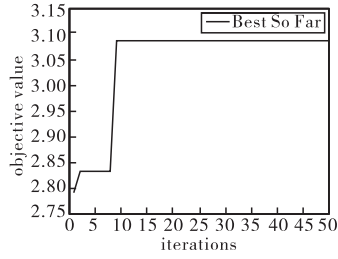


图 3 进化曲线

中,仅单弹获得分配结果就耗时 0.5s。从图 3 可以看到第 9 次迭代就能得到最优解。并且仿真 1000 次的结果表明,取得最优解的平均迭代次数为 8 次,如果不利用一轮拍卖结果初始化配对 (i, j) 的信息素 $\tau_{ij}(0)$,取得最优解的平均迭代次数为 21 次。算法所得最优解的目标函数值与理想目标函数值的比值即优化比大于 95% 的概率为 98.72%。由此可见,文中算法的分配速度非常快,能满足战场实时性要求,并具有良好的寻优性能。

当导弹 5 的导引头换成雷达导引头时,分配示意图如图 4 所示。从图中可以看出由于弹 5 的导引头类型不再与目标 1 的辐射源匹配,而弹 4 导引头类型与目标 1 辐射源匹配,故分

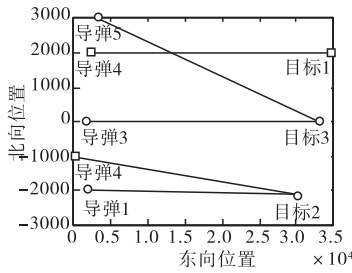


图 4 弹 5 导引头为雷达导引头时分配图

配方案改由弹 4 攻击目标 1,而目标 3 由弹 3 和 5 进行攻击。可见文中数学模型充分考虑了传感器类型匹配问题,利用该算法可以实现传感器的优化配置。

图 5 所示为 10 枚导弹攻击 8 个目标的情况。时间约束规定为算法最大迭代次数为 40 次。其中目标 3 和 7 的需弹量为 2,其它目标需弹量都为 1。由图可见,无论从几何关系还是从传感器的搭配及匹配关系看,分配结果都是非常合理的。1000 次仿真结果表明,取得最优解的平均迭代次数为 31 次。优化比大

于 95% 的概率为 94.36%。可见算法对较大规模分配问题同样也是有效的。

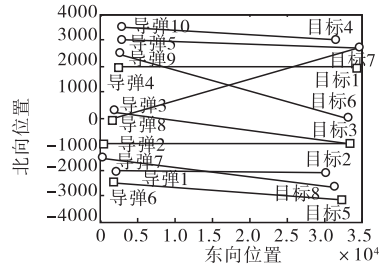


图 5 10 vs 8 分配示意图

4 结论

建立了目标分配的数学模型,得到了弹目之间的优势矩阵,在此基础上利用简单实用的优化算法求解分配策略,仿真结果表明,由此得到的分配结果合理实用,实时性也得到满足。在实际应用中,如何获得目标信息,包括其精确的位置、有关辐射源特性及需弹量等,是需进一步研究的问题。

参考文献:

- [1] Bead R W, Timothy W M, Goodrich M A, et al. Coordinated target assignment and intercept for unmanned air vehicles [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2002, 18(6): 911 - 922.
- [2] 余家祥,王绍华,程文鑫. 基于改进局部搜索遗传算法的目标分配决策[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(6): 1114 - 1117.
- [3] Peng Chen, Liu Xing, Mu Xiaomin, et al. Cooperative dynamic weapon-target assignment algorithm of multiple missiles based on networks [C]//2009 Chinese Control and Decision Conference, 2009: 126 - 130.
- [4] 高永,向锦武. 一种新的超视距空战威胁估计非参量法模型[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(9): 2570 - 2572.
- [5] 马冠军. 基于仿生智能的多UCAV协同控制技术研究[D]. 北京:北京航空航天大学, 2009.
- [6] Marco dorigo, Thomas Stutzle. Ant colony optimization[M]. MIT Press, 2004.