

doi: 10.7690/bgzdh.2014.04.003

遗传-蚁群算法在目标分配问题中的应用研究

武从猛, 王公宝

(海军工程大学理学院, 武汉 430033)

摘要: 针对传统算法很难满足大型水面舰艇编队防空武器的武器目标分配 (weapon target assignment, WTA) 问题, 提出一种将遗传算法融入蚁群算法的混合算法。分析了遗传算法和蚁群算法的优缺点、利用遗传算法快速全局随机搜索能力生成一组粗略解, 用其作为蚁群算法的初始信息素, 再利用蚁群算法的并行性、正反馈机制, 最后求得最优解, 并对遗传-蚁群算法与蚁群算法、遗传算法这 3 种方法进行仿真比较。分析结果证明: 遗传-蚁群算法用更少的时间获得最优的火力分配方案, 缩短了武器系统反应时间, 在求解质量方面有较大优势。

关键词: 武器目标分配; 遗传算法; 蚁群算法; 遗传-蚁群算法

中图分类号: TJ03 **文献标志码:** A

Application of Genetic Ant-Colony Algorithm in Target Assignment Problem

Wu Congmeng, Wang Gongbao

(College of Science, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: As the traditional algorithm can't properly solve the anti-air craft weapon target assignment problem of a grope of surface ships, a mixed algorithm which combines genetic algorithm with ant colony algorithm is presented. The advantage and disadvantage of genetic algorithm and ant colony algorithm are analyzed in detail. The optimal solution was obtained by using the parallelism and positive feedback mechanism. And the genetic-ant colony algorithm, genetic algorithm and ant colony algorithm were compared by simulating calculation. The result demonstrates that the genetic-ant colony algorithm is the most effective way to determine the optimal solution of fire assignment strategy, which reduces the weapon system response time, and has great advantage relating solution quality.

Keywords: weapon target assignment; genetic algorithm; ant colony algorithm; genetic-ant colony algorithm

0 引言

对于舰艇编队而言, 目标分配问题^[1]是指防空作战中在一定的准则条件下将防空武器与空中来袭目标合理分配, 充分发挥编队防空武器的效能, 使得防空武器对来袭目标的毁伤概率达到最大。武器目标分配 (weapon target assignment, WTA) 问题实际上是一个非线性整数规划问题^[2], 研究内容主要是如何将武器与目标合理分配^[3], 以期达到对目标的毁伤效果最好, 该问题是典型的 NP-complete 问题^[4], 一直备受各国学者专家的关注^[5-6], 是军事运筹学研究的重要内容之一。

关于 WTA 问题求解的算法, 目前主要是采用了一些启发式的优化算法, 如遗传算法^[7-8]、蚁群算法^[9]、模拟退火^[10]、粒子群^[11]及将几种算法融合在一起的混合算法^[12]。文献[7]采用遗传算法实现目标分配优化问题; 文献[9]采用了蚁群与模拟退火相结合的算法来求解 WTA 问题, 使得收敛速度得到了提高。文献[12]采用了将蚁群算法融入遗传算法方法来求解 WTA 问题, 该方法使得遗传算法的搜索性能得到了提高, 从仿真分析结果看优于传统的智能算法。由此可以看出算法混合思想已成为提高算法优性能的重要途径; 所以, 笔者提出将遗传算法融入蚁群算法的混合算法, 利用 2 种算法的互补性,

发挥各自优点, 克服各自缺点, 在 WTA 问题求解中, 加快了收敛速度, 使分配结果更加合理。

1 目标分配问题的描述及其数学模型

大型水面舰艇编队防空作战中的 WTA 问题就是合理地将舰载防空武器分配给来袭目标, 以达到最大程度地对来袭目标实施拦截, 其实质就是在一定约束条件下求目标函数的极大值问题。具体问题描述如下: 假设大型水面舰艇编队配备有 m 座防空装置, 每座防空装置的火力通道数分别为 μ_i 个 ($i=1, 2, \dots, m$), 有 n 个空中来袭目标, 目标威胁系数 w_j ($j=1, 2, \dots, n$) 表示第 j 个目标对大型水面舰艇的威胁值; p_{ij} 表示 i 防空装置对第 j 个空中目标的毁伤概率 ($i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$); x_{ij} 表示第 i 个防空装置是否对第 j 个空中目标射击 ($i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$), 用第 i 个防空装置对第 j 个空中目标射击时 $x_{ij}=1$, 否则 $x_{ij}=0$; Z 表示毁伤效能即毁伤目标的期望值。建立武器目标分配的数学模型如下:

$$\max Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n w_j P_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_{i=1}^m x_{ij} = 1 & (2) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n x_{ij} \leq \mu_i & (3) \end{cases}$$

收稿日期: 2013-11-12; 修回日期: 2013-12-08

基金项目: 全军军事学研究生课题“水面舰艇编队防空防御与目标分配优化研究”(2011JY002-421)

作者简介: 武从猛(1979—), 男, 河北人, 在读硕士, 从事军事系统建模与优化决策研究。

其中,约束条件(2)表示每个空袭目标只分配一座防空装置,约束条件(3)表示对第 j 个目标射击时,火力通道数不能超过 μ_i 个。

2 遗传-蚁群算法求解目标分配问题

2.1 遗传算法简介

遗传算法^[13](genetic algorithm, GA)是由美国的 J.Holland 教授于 1975 年首先提出的一类随机化搜索方法,是通过借鉴生物界的进化规律演化而来的。它首先确定实际问题的编码方案,随机产生一个初始种群,然后模拟繁殖机制生成新的种群,再通过预先设定的适应度评价函数评价新种群个体的优劣,依据适者生存,优胜劣汰遗传机制以决定个体的是否遗传到下一代,引导进化过程向着最优逼近。该算法具有内在的隐并行性和较好的全局快速寻优能力,在诸多领域得到应用,但也存在着收敛速度慢的缺陷。

2.2 蚁群算法简介

蚁群算法^[14](ant colony algorithm, ACA)是在 20 世纪 90 年代初由意大利学者 M.Dorigo 等人提出来的,其思想依据是:模拟蚁群在搜索食物源过程中,群体间通过一种称为“信息素”的物质进行信息传递从而快速搜索到食物源。蚁群算法的基本原理是:蚁群中的个体在搜索食物源的过程中会在经过的路上留下一一种称为“信息素”的物质,随后的蚂蚁又根据信息素的浓度来选择前进的方向。随着在同一路径上经过的蚂蚁数量的增加,则留下的信息素的浓度也在增加,后来的蚂蚁选择该路径的概率也就越大,这种信息正反馈机制使得蚁群能够快速地搜索到食物源。该算法具有并行性和正反馈的优点,但也存在着因搜索初始信息素时间过长而导致求解速度慢的缺陷。

2.3 遗传-蚁群算法

遗传-蚁群算法充分利用 2 种算法各自的优点,克服各自的缺点,形成优势互补,提高了算法的收敛速度和求解精度。

2.3.1 遗传-蚁群算法中遗传算法的相关设计

2.3.1.1 编码方式及种群初始化

对武器目标分配问题而言,编码就是将 WAT 问题结构变换为位串形式编码表示的过程,常用的编码方式有二进制编码、十进制编码等。为了使目标分配问题的表示更加直观,笔者采用十进制编码方式。每个染色体按照防空装置编号顺序排列的目

标号组成,每个基因表示一个防空装置拦截某个目标的结果,则染色体可表示为 $(G_1G_2\cdots G_j\cdots G_n)$ ($1\leq G_j\leq m$, G_j 为自然数),例如一个染色体为(3 1 2 2 4 3 4 1),则表示用 3 号防空装置拦截第 1 批次和第 6 批次目标,用 1 号防空装置拦截第 2 批次和第 8 批次目标 $\cdots\cdots$ 。 $v_{ij}=1, v_{ij}=v_{2j}=\cdots v_{i-1j}=v_{i+1j}=\cdots v_{mj}=0$, 对应毁伤概率 p_{ij} 。

2.3.1.2 适应度函数

适应度函数是用来评价染色体优劣的函数,染色体的适应度值越大,说明该染色体对应的解越接近最优解。笔者采用目标函数作为适应度函数,则适应度函数表示为

$$f = \max \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n w_j p_{ij} x_{ij} \quad (4)$$

式中 f 为适应度值。

2.3.1.3 遗传操作

遗传操作主要包括以下 3 个遗传算子:选择(selection)、交叉(crossover)、变异(mutation)。

1) 选择算子。为了满足舰艇编队在防空作战中的时间要求,并在保证运算精度的条件下减少运算时间,笔者根据个体适应度值的大小进行排序,然后把前 15%的个体复制 2 份,中间 70%的个体复制一份,剩余的 15%直接淘汰。

2) 交叉算子。交叉算子就是将被选中的 2 个个体的基因链按一定概率 p_c 进行交叉,从而生成 2 个新的个体。笔者采用单点交叉的方法进行交叉运算。

3) 变异算子。把禁忌搜索作为遗传算法中的变异算子,克服遗传算法的一些缺点,使个体向更优的方向进化。

2.3.1.4 循环操作

当达到最大循环次数,迭代结束将结果带入目标函数求得 ψ 个最大值点,最后形成 ψ 个分配方案。

2.3.2 遗传-蚁群算法中蚁群算法的相关设计

蚁群算法解决武器目标分配问题,其分配过程就是蚂蚁爬行过程。具体描述如下:首先把 m 座防空装置设置成 m 个武器节点,把 n 个目标设置成 n 个目标节点,每座防空装置最多可分配 μ_i 个目标,每批目标只能分配给一座防空装置。然后将 k 只蚂蚁均匀地随机至于 n 个目标节点上,则蚂蚁 k 从一个目标节点出发,按照一定的规则选择不同的武器节点,然后从没有分配的目标节点中随机选取下一个目标节点,直到所有蚂蚁都选择好各自武器节点,就建立了 k 个解,再利用目标函数计算出最优解。

2.3.2.1 信息素的初始设置

对于蚁群信息素初始化,传统的方法是随机生成^[15]。笔者首先用遗传算法得到一组初始解,然后将这组初始解转化为蚁群的初始信息素,信息素的初始值 τ_s 设置为

$$\tau_y = \tau_c + \tau_g \quad (5)$$

式 (5) 中 τ_c 是一个常数, τ_g 是由遗传算法得到的解所转换成的信息素值

$$\tau_g = \sum_{k=1}^{\psi} \Delta \tau_{ij}^k \quad (6)$$

$\Delta \tau_{ij}^k$ 表示第 k 条路径中弧 (i, j) 的信息素, ψ 为采用遗传算法得到的优化解的个数。

$$\Delta \tau_{ij}^k = \begin{cases} Qp_{ij}, & \text{武器 } i \text{ 与目标 } j \text{ 之间有边} \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (7)$$

式 (7) 中 Q 为调整系数。

2.3.2.2 蚂蚁选择节点规则

目标分配中蚂蚁选择节点的规则包括目标节点到防空装置节点的选择准则和目标节点到目标节点的选择准则,目标节点到目标节点的选择采用随机选择策略。在 t 时刻,蚂蚁 k 依据式 (8) 选择防空装置节点

$$s = \begin{cases} \arg \max ([\tau_{is}(t)]^\alpha [\eta_{is}(t)]^\beta), & q \leq q_0 \\ S, & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

式 (8) 中: $\tau_{is}(t)$ 表示在 t 时刻第 i 个空中目标和第座 j 防空装置之间路径的信息素浓度; $\eta_{is}(t)$ 为蚂蚁搜索时的启发信息(能见度)值,在文中令 $\eta_{ij} = p_{ij} w_j x_{ij}$, α 表示信息素重要程度的因子, β 表示启发信息(能见度)重要程度的因子,一般取值为 $\alpha=1$, $\beta=5$, q_0 是预先设置参数, $q \in [0,1]$ 为均匀分布的随机数。 S 的取值由以下概率决定:

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{j \in \text{alloed}_k(t)} [\tau_{is}(t)]^\alpha [\eta_{is}(t)]^\beta}, & j \in \text{alloed}_k(t) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

式 (9) 中 $\text{alloed}_k(t)$ 表示蚂蚁 k 下一步允许选择的武器节点的集合。

2.3.2.3 信息素更新规则

局部更新规则是每只蚂蚁在完成一次转移后对经过路径上的信息素进行更新

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho)\tau_{ij}(t) + \rho\Delta\tau_{ij} \quad (10)$$

$$\Delta\tau_{ij} = \begin{cases} Qp_{ij}, & \text{当路径 } (i, j) \text{ 在求出的最优路径上} \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (11)$$

式 (10) 中 ρ 为局部更新挥发系数, $\Delta\tau_{ij}$ 为信息素的初始值。局部更新的作用是降低蚂蚁经过路径上的信息素的强度,以免蚂蚁在搜索时过度地选择该路径。全局更新是在所有蚂蚁都遍历完武器节点后进行的,其更新公式为

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\varphi)\tau_{ij}(t) + \varphi\tau_{ij}(t) \quad (12)$$

式 (12) 中 $\tau_{ij}(t)$ 表示在 t 时刻第座 i 防空装置和第 j 个空中目标之间路径的信息素浓度; φ 为全局更新挥发系数。

2.3.3 遗传-蚁群算法工作流程

遗传算法的优点是快速、全局搜索,缺点是收敛速度慢、求解效率低,而蚁群算法的优点是并行性和全局搜索能力强,缺点是由于初始信息素匮乏导致前期搜索初始路径的时间过长,求解速度慢。笔者设计的遗传-蚁群算法是首先利用遗传算法所具有的快速、全局搜索能力寻找出问题的一组粗略解,然后将这组粗略解转化成蚁群算法的初始路径,再利用蚁群算法所具有的分佈、并行、正反馈的特性获得最优解。其工作流程如图 1 所示。

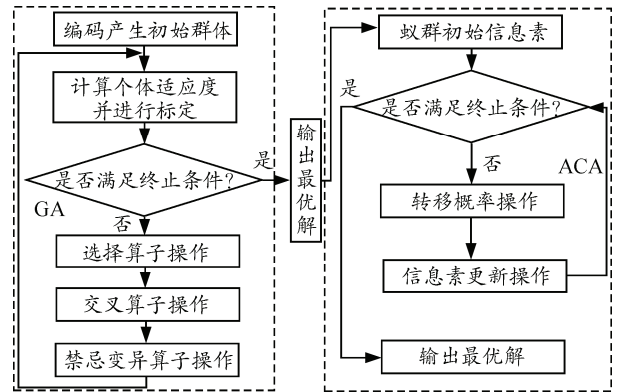


图 1 遗传-蚁群算法工作流程

3 仿真分析

假设我水面舰艇编队共装备有 5 座防空装置,火力通道数量分别为 7、3、4、3、5,航渡中发现 15 个空中来袭目标。为验证遗传-蚁群算法在求解武器目标分配问题中的性能,笔者采用配置为: Intel(R) Core(TM)i3-2120CPU3.3.40 GHz, 3.410GB 内存,操作系统为 Windows XP,软件为 Matlab Version 7.1.0.246(R14) Service Pack 3 的计算机进行模拟仿真实验。对于该算例分别用简单的遗传算法(参数设置交叉概率 0.8,变异概率 0.07)、蚁群算法、遗传-蚁群算法(参数设置:蚂蚁数 $m=50$,信息素重要程度的因子 $\alpha=1$,启发信息重要程度的因子 $\beta=5$,局部更新信息素挥发系数 $\rho=0.1$,全局更新

信息挥发系数 $\varphi=0.7$, 调整系数 $Q=100$) 分别进行 1 000 次求解。目标的威胁值 $w_j(j=1,2,\dots,15)$ 见表 1,

我舰艇编队防空装置对目标的毁伤概率 p_{ij} ($i=1,2,\dots,5; j=1,2,\dots,15$) 见表 2。

表 1 目标的威胁值 w_{ij}

目标序号	威胁值	目标序号	威胁值	目标序号	威胁值	目标序号	威胁值	目标序号	威胁值
1	0.57	4	0.69	7	0.29	10	0.24	13	0.66
2	0.41	5	0.56	8	0.54	11	0.83	14	0.74
3	0.87	6	0.36	9	0.47	12	0.86	15	0.58

表 2 我方防空装置对目标的毁伤概率 P_{ij}

防空装置编号	目标序号														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0.51	0.49	0.85	0.90	0.35	0.76	0.84	0.59	0.61	0.46	0.81	0.58	0.64	0.77	0.89
2	0.87	0.30	0.58	0.78	0.59	0.60	0.81	0.39	0.78	0.79	0.51	0.67	0.29	0.64	0.68
3	0.59	0.89	0.49	0.69	0.78	0.51	0.44	0.96	0.88	0.59	0.75	0.49	0.58	0.44	0.79
4	0.84	0.69	0.78	0.92	0.54	0.81	0.59	0.67	0.32	0.66	0.58	0.92	0.43	0.76	0.55
5	0.69	0.57	0.91	0.58	0.72	0.40	0.71	0.82	0.67	0.75	0.56	0.85	0.90	0.58	0.81

分配结果为:

0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1
1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0

其解的变化情况见图 2, 图中反映出简单遗传算法、蚁群算法、遗传-蚁群算法获得最优解的情况。

由图 2 可见, 用简单的遗传算法求解得到最大函数值为 7.760 2, 耗时 179.513 835 s; 由图 3 可见, 用蚁群算法求解得到最大函数值为 7.524 4, 耗时 122.012 411 s; 由图 4 可见, 用遗传-蚁群算法求解得到最大函数值为 7.978 0, 耗时 58.999 146 s。对比 3 种算法的求解结果可以看出: 用遗传-蚁群算法求解得到最大函数值比其他 2 种算法求得的目标函数值大, 表明用遗传-蚁群算法获得的分配方案使得防空装置对目标的毁伤概率高于单独的遗传算法和蚁群算法; 并且从图 2、图 3、图 4 中可以看出: 简单遗传算法求得的解的波动性较大, 蚁群算法求

得的解的波动性优于简单遗传算法, 但目标函数值低于简单的遗传算法, 而遗传-蚁群算法的解的波动性较小, 且目标函数值明显高于前 2 种算法; 在运行时间上, 遗传-蚁群算法比简单遗传算法提高了 67%, 比蚁群算法提高了 52%, 这对于编队海上防空作战而言, 用更少的时间获得最优的火力分配方案, 缩短了武器系统反应时间, 对于提高编队防空武器的整体作战效能具有重要的意义。

通过表 3 数据统计情况可见, 在本例中, 遗传-蚁群算法获得最优解的概率约为 99.8%, 而蚁群算法和简单遗传算法均未求得最优解, 可见遗传-蚁群算法比蚁群算法在求解质量方面具有很大优势。

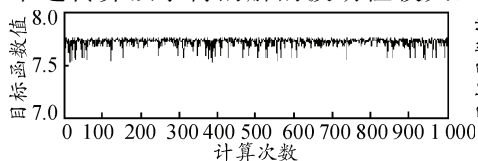


图 2 简单遗传算法求解情况

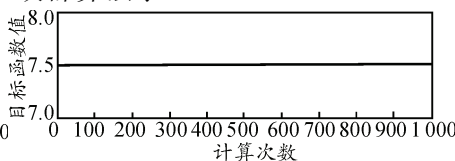


图 3 蚁群算法求解情况

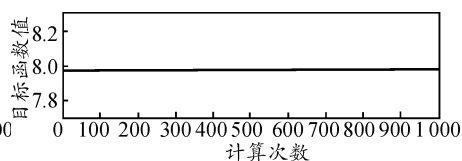


图 4 遗传-蚁群算法求解情况

表 3 数据统计情况

算法种类	解的分布					
	<7.524 4	7.524 4	[7.524 5, 7.760 1]	7.760 2	7.957 5	7.978 0
简单遗传算法	7	0	908	85	0	0
蚁群算法	1	999	0	0	0	0
遗传-蚁群算法	1	0	0	0	1	998

4 结束语

笔者针对大型水面舰艇编队防空作战中的多武器-多目标对抗问题, 基于每个空中来袭目标只分配一座防空装置的原则, 建立了大型水面舰艇编队防空作战中的目标分配模型, 采用遗传-蚁群算法对模型进行求解计算。通过仿真分析, 将该算法与蚁群

算法、遗传算法的求解结果进行比较, 仿真分析结果表明, 遗传-蚁群算法无论是在求解质量还是在时间性能上都优于单独的蚁群算法和遗传算法。

参考文献:

[1] 李勇君, 黄卓, 郭波. 武器-目标分配问题综述[J]. 兵工自动化, 2009, 28(11): 1-5.