

文章编号:1001-2486(2011)06-0150-04

改进类电磁算法在武器目标分配问题中的应用*

杨晓凌,邱涤珊,彭黎,谈群

(国防科技大学 信息系统工程重点实验室,湖南长沙 410073)

摘要:通过基于级数的粒子编码变换方法,将武器目标分配问题的约束条件进行了化简。对原始类电磁算法,在种群初始化、局部搜索、合力计算以及粒子移动等各步骤对其进行改造,使之适应武器目标分配问题的整数解空间。最后通过数值实验验证了该改造后算法解决武器目标分配问题的有效性。

关键词:类电磁算法;武器目标分配;粒子编码;合力计算;粒子移动

中图分类号:TP301.6;O221.4 **文献标识码:**A

Application of Modified Electromagnetism-like Algorithm in Weapon-target Assignment Problem

YANG Xiao-ling, QIU Di-shan, PENG Li, TAN Qun

(Science and Technology on Information Systems Engineering Laboratory, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: A method of particle coding based on progression was applied to the simplification of constraints in Weapon-Target Assignment (WTA) model. The original EM algorithm was modified in all steps, including the initialization of the population, the local searching, the calculation of total force vector and movement along the total force, and the WTA problems with integer solution space was settled by the algorithm. Finally, the numerical experiments verified the effectiveness of the algorithm for solving WTA problems.

Key words: the electromagnetism-like algorithm; Weapon-Target Assignment(WTA); particle coding; calculation of total force vector; movement of particle along total force

武器目标分配(Weapon-Target Assignment, WTA)作为现代战争指挥控制流程的关键环节,其时效性和分配方案的优劣直接影响作战效果,设计快速优化的求解算法是WTA问题研究的重要组成部分。目前,对WTA问题的求解除隐枚举法、分支定界法、割平面法、动态规划法等传统算法外,近年来,又产生了许多诸如遗传算法、粒子群算法、蚁群算法、模拟退火算法、免疫算法及人工神经网络等现代优化算法,但是这些算法的效率需要进一步提高^[1]。

类电磁算法作为一种启发式的全局优化方法,最早由Birbil和Fang在2003年针对连续函数的全局优化问题提出^[2]。该算法将种群中个体看作带电粒子,通过模拟电磁场中带电粒子间的吸引排斥作用引导粒子朝最优解移动。类电磁算法具有全局搜索能力强、不使用一阶和二阶导数信息等优点,已初步应用于函数优化、项目调度等领域。但是原始的类电磁算法在结构设计上也存

在如下两点局限:

(1) 只能处理简单约束

原始类电磁算法处理的约束是针对决策向量的盒状约束^[3]:

$$\mathbf{x} \in \{\mathbf{x} \in \mathcal{R}^n \mid l_k \leq x_k \leq u_k, k = 1, 2, \dots, n\}$$

(2) 只能处理具有连续解空间的最优化问题

原始类电磁算法中,电磁力的计算方法以及粒子的移动策略都局限于连续解空间,这种局限性主要针对粒子间距离的计算。

本文针对原始类电磁算法的以上局限性,采用基于级数的粒子编码方法,将WTA问题的约束条件进行了化简。在原始类电磁算法的框架下,在种群初始化、局部搜索、合力计算以及粒子移动等各步骤对原始类电磁算法进行改造,使之适应WTA问题的整数解空间。

通过仿真计算并与遗传算法和粒子群算法等两种典型优化算法比较,验证了改进类电磁算法在WTA问题中应用的有效性。

* 收稿日期:2011-04-20

基金项目:国家部委基金资助项目

作者简介:杨晓凌(1982—),男,博士生。

1 WTA 问题描述

本文研究的 WTA 问题是静态的,即武器对目标的分配过程只有一次且所有武器与目标之间只进行一次交战。所研究的模型各要素可表示为一个五元组 $\{W, T, V, P, R\}$, 其中:

W : 武器平台集合, $W = \{w_1, w_2, \dots, w_m\}$;

T : 目标集合, $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$;

V : 目标价值集合, $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$;

P : 武器对目标的杀伤概率矩阵, $P = [p_{ij}]_{m \times n}$, 其中 p_{ij} 表示第 i 个武器平台对第 j 个目标的杀伤概率, 且 $p_{ij} \in [0, 1]$;

R : 单个武器平台可使用的武器数量限制, 可假设对武器平台 i 最多可使用 r_i 个武器;

于是 WTA 问题的规划模型可表示为

$$\begin{aligned} \min E &= \sum_{j=1}^n v_j \prod_{i=1}^m (1 - p_{ij})^{x_{ij}} \\ \text{s. t. } &\begin{cases} \sum_{j=1}^n x_{ij} \leq r_i, i = 1, 2, \dots, m \\ x_{ij} \in Z, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

值得一提的是,在某些 WTA 模型中考虑了对单个目标的武器数量限制。而实际作战运用中,为保证消灭某一威胁度或价值较大的目标,使用武器往往不考虑数量限制,如进行“饱和攻击”。因此本文采用的式(1)是合理的。

2 求解 WTA 问题的改进类电磁算法

本文通过解向量变换简化了 WTA 问题的可行解空间。针对可行解空间的离散特征,对原始类电磁算法在种群初始化、局部搜索及粒子移动等各步骤进行了改造。

2.1 基于级数的粒子编码策略

原始类电磁算法中,对粒子的各种操作必须在可行解空间中进行。对式(1),由于约束条件相对复杂,若直接采用解向量对粒子进行编码,在操作上有诸多限制,可构造一种基于级数的粒子编码方法。

记 $y_{i0} = 0$, $y_{ij} = \sum_{k=1}^j x_{ik}$, 则式(1)的解向量可变换为: $\mathbf{y} = (y_{11}, y_{12}, \dots, y_{1n}; y_{21}, y_{22}, \dots, y_{2n}; \dots; y_{m1}, y_{m2}, \dots, y_{mn})$, 且有 $x_{i1} = y_{i1}, x_{ij} = y_{ij} - y_{i,j-1}$ 。种群中粒子的编码如图 1 所示。

进而,式(1)可转换为

$$\begin{aligned} \min E(\mathbf{y}) &= \sum_{j=1}^n v_j \prod_{i=1}^m (1 - p_{ij})^{(y_{ij} - y_{i,j-1})} \\ \text{s. t. } &\mathbf{y} \in \Omega \end{aligned} \quad (2)$$

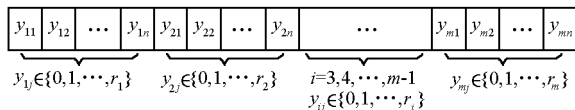


图 1 基于级数的粒子编码

Fig. 1 Particle coding based on progression

其中 $\Omega = \{y \in Z^{nm} | y_{i,j-1} \leq y_{ij}, y_{ij} \in \{0, 1, \dots, r_i\}, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n\}$ 。

2.2 类电磁机制算法的改造

为解决如式(2)的 $n \times m$ 维变量约束优化问题,本文对原始类电磁算法在各个步骤均进行了改造,使得各步骤生成的新粒子或粒子的新位置均保持在可行解空间 Ω 中(具体算法步骤可参照文献[2]进行适当修改)。

2.2.1 种群初始化

在进行迭代计算之前,需要对种群进行初始化,即从可行解空间 Ω 等概率选取 pop_size 个样本点 $\{y^{(1)}, y^{(2)}, \dots, y^{(pop_size)}\}$ 作为初始解。粒子 $y^{(k)}$ ($k = 1, 2, \dots, pop_size$) 的选取方法为:

(1) 采用旋转赌轮机制从集合 $\{0, 1, \dots, r_i\}$ 中选择任意一个整数 $n_{i1}^{(k)}$, 令 $y_{i1}^{(k)} = n_{i1}^{(k)}, i = 1, 2, \dots, m$;

(2) 采用旋转赌轮机制从集合 $\{y_{i,j-1}^{(k)}, y_{i,j-1}^{(k)} + 1, \dots, r_i\}$ 中任意选择一个整数 $n_{ij}^{(k)}$, 令 $y_{ij}^{(k)} = n_{ij}^{(k)}, i = 1, 2, \dots, m$ 。

2.2.2 局部搜索

局部搜索是指在初始化种群的基础上,对种群中每个粒子,在其周围附近寻找更优的粒子,进一步对种群进行优化,以加快寻找最优解的速度。由于约束条件 $y \in \Omega$ 的限制,搜索局限在一定范围内,对粒子 y 的每一维可定义一个正向搜索长度和一个负向搜索长度,按正向搜索长度搜索,粒子分量变大,按负向搜索长度搜索,粒子分量变小。

定义 $\delta(\in (0, 1])$ 为搜索长度因子。粒子各分量的正向搜索长度 \vec{L}_{ij} 按如下方式定义:

(1) $\vec{L}_{i1} = \delta(r_i - y_{i1}), i = 1, 2, \dots, m$;

(2) $j > 1$ 时,若 $y_{ij} > y_{i,j-1}$, 则 $\vec{L}_{ij} = \delta(r_i - y_{ij})$ 。若 $y_{ij} < y_{i,j-1}$, 则 $\vec{L}_{ij} = \delta(r_i - y_{i,j-1})$ ($i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$), 且搜索只能在集合 $\{y_{i,j-1}, y_{i,j-1} + 1, \dots, r_i\}$ 中进行。

粒子各分量的负向搜索长度 \bar{L}_{ij} 按如下方式定义:

(1) $\bar{L}_{i1} = \delta y_{i1}, i = 1, 2, \dots, m$;

(2) $j > 1$ 时,若 $y_{ij} > y_{i,j-1}$, 则 $\bar{L}_{ij} = \delta(y_{ij} - y_{i,j-1})$ ($i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$)。

若 $y_{ij} < y_{i,j-1}$ 时,则搜索只能在集合 $\{y_{i,j-1}, y_{i,j-1} + 1, \dots, r_i\}$ 中进行。

2.2.3 电荷及合力计算

通过计算施加到粒子上的合力确定下一步搜索的方向。首先计算粒子的电荷量,公式如下:

$$q(\mathbf{y}) = 1 / \left(nm \frac{\Phi(\mathbf{y}) - \Phi(\mathbf{y}^{best})}{\Phi(\mathbf{y}^{worst}) - \Phi(\mathbf{y}^{best})} + 1 \right) \quad (3)$$

其中 $\Phi(\mathbf{y})$ 为粒子 \mathbf{y} 的适应度评价函数,其计算公式为

$$\Phi(\mathbf{y}) = \frac{\mathbf{y}}{\sum_{k=1}^{pop_size} E(\mathbf{y}^{(k)})} \quad (4)$$

根据式(3)和式(4),目标函数值相对较优的粒子将拥有较大的电荷量。由于原始类电磁算法针对的是连续可行解空间,而 WTA 问题的可行解空间是离散的,故对施加到粒子上的合力计算,需要关注的是两个粒子间距离的计算方法。因此本文仍采用原始类电磁算法中合力的计算方法,其合理性在于:将本文中式(2)的整数约束条件去掉,即将原有的离散的整数解空间换为连续的实数解空间,解空间为式(2)的解空间的子空间,因此在计算粒子间距离时仍采用欧式距离,得到的合力也能够为下一步粒子的位置更新提供指示。

2.2.4 粒子移动

原始类电磁算法中,种群粒子在合力作用下,其移动策略可由式(5)给出

$$\mathbf{x}^{(k)} = \mathbf{x}^{(k)} + \lambda \frac{\mathbf{F}^{(k)}}{\|\mathbf{F}^{(k)}\|} \mathbf{V}_F \quad (5)$$

其中 $\lambda \sim U(0,1)$, $\mathbf{F}^{(k)} / \|\mathbf{F}^{(k)}\|$ 为合力方向上的单位向量, \mathbf{V}_F 是粒子在各维上向边界移动的可行步长组成的向量。可以看出,原始类电磁算法移动粒子的思想是粒子沿合力方向在可行步长上进行随机移动。

记 $\mathbf{e} = \mathbf{F}^{(k)} / \|\mathbf{F}^{(k)}\| = (e_{11}, e_{12}, \dots, e_{1n}; e_{21}, e_{22}, \dots, e_{2n}; \dots; e_{m1}, e_{m2}, \dots, e_{mn})$ 。设 $\mu \geq 0$, 则 $\mathbf{y} + \mu\mathbf{e}$ 表示粒子 \mathbf{y} 沿合力方向移动长度 μ 后到达的位置。

记 $e_{i0} = 0, y_{i0} = 0, e_{i,n+1} = 0, y_{i,n+1} = r_i, i = 1, 2, \dots, m$ 。由 $\mathbf{y} + \mu\mathbf{e} \in \Omega$, 可知

$$y_{ij} + \mu e_{ij} \leq y_{i,j+1} + \mu e_{i,j+1} \quad (6)$$

记 $\Delta e_{ij} = e_{i,j+1} - e_{ij}, \Delta y_{ij} = y_{i,j+1} - y_{ij}$, 则由不等式(6)可得:若 $\Delta e_{ij} > 0$, 则 $\mu \geq -\Delta y_{ij} / \Delta e_{ij}$; 若 $\Delta e_{ij} < 0$, 则 $\mu \leq -\Delta y_{ij} / \Delta e_{ij}$ 。

于是可确定出 μ 的下界为

$$\alpha = \max \{ -\Delta y_{ij} / \Delta e_{ij} \mid \Delta e_{ij} > 0, i = 1, 2, \dots, m; j = 0, 1, \dots, n - 1 \}$$

μ 的上界为

$$\beta = \min \{ -\Delta y_{ij} / \Delta e_{ij} \mid \Delta e_{ij} < 0, i = 1, 2, \dots, m; j = 0, 1, \dots, n - 1 \}$$

即 α 和 β 规定了粒子在合力方向上可移动的范围。

针对 WTA 问题的粒子移动策略如式(7)所示:

$$y_{ij} = \begin{cases} y_{ij} + \lceil \lambda \gamma e_{ij} \rceil, & \text{若 } \lceil \lambda \gamma e_{ij} \rceil - \lambda \gamma e_{ij} \leq 0.5 \\ y_{ij} + \lfloor \lambda \gamma e_{ij} \rfloor, & \text{若 } \lfloor \lambda \gamma e_{ij} \rfloor - \lambda \gamma e_{ij} > 0.5 \end{cases} \quad (7)$$

其中 $\lambda \in U(0,1), \gamma \in U(\alpha, \beta), i \in \{1, 2, \dots, m\}, j \in \{1, 2, \dots, n\}$ 。

3 仿真及结果分析

本文算法在 Pentium 4 CPU 2.40GHz 计算机及 Windows XP 平台上用 Visual C++ 6.0 编程实现。针对如下算例进行了仿真分析。

某导弹艇编队艇数 $M = 5$, 目标数量 $N = 6$ 。各导弹艇装载的导弹武器数量 $\mathbf{R} = [r_i]_{1 \times m} = [5 \ 4 \ 4 \ 6 \ 5]$, 目标价值系 $\mathbf{V} = [v_j]_{1 \times n} = [0.4 \ 0.65 \ 0.15 \ 0.05 \ 0.3 \ 0.6]$; 导弹艇武器对目标的单发毁伤概率为

$$\mathbf{P} = [p_{ij}]_{m \times n} = \begin{bmatrix} 0.6 & 0.6 & 0.3 & 0.4 & 0.1 & 0.3 \\ 0.3 & 0.5 & 0.7 & 0.3 & 0.1 & 0.2 \\ 0.2 & 0.6 & 0.4 & 0.9 & 0.7 & 0.1 \\ 0.1 & 0.9 & 0.0 & 0.3 & 0.2 & 0.1 \\ 0.5 & 0.4 & 0.5 & 0.2 & 0.7 & 0.3 \end{bmatrix}$$

在仿真实验中,改进类电磁算法采用的种群规模 $pop_size = 20$, 算法最大迭代数 $MAXITER = 200$, 局部搜索迭代次数 $LSITER = 10$, 局部搜索因子 $\delta = 1$ 。计算得到的最优粒子编码为:

$$\mathbf{y} = (222225 \mid 113334 \mid 133444 \mid 333336 \mid 222245)$$

相应的目标分配方案为

$$\mathbf{x} = (200003 \mid 102001 \mid 120100 \mid 120003 \mid 200021)$$

此外,还利用粒子群算法和文献[4]给出的遗传算法对算例进行了仿真求解,其中粒子群算法采用的种群规模和最大迭代数与改进类电磁算法相同,惯性系数 $w = 0.9$, 加速系数 $c_1 = c_2 = 1.8$; 标准遗传算法采用的种群规模和最大迭代次数与改进类电磁算法相同,交叉概率 $p_c = 0.8$, 变异概率 $p_m = 0.8$, 算术交叉因子 $\beta = 0.2$ 。分别利用 3 种算法求解上述算例,收敛曲线如图 2 所示。

由图 2 可看出,改进类电磁算法与遗传算法相比,收敛速度优势比较明显,基本上从开始迭代,收敛曲线即位于遗传算法收敛曲线下方。与粒子群算法相比,虽然在迭代初期得到的最优解以及收敛速度不及粒子群算法,但是逐渐收敛速

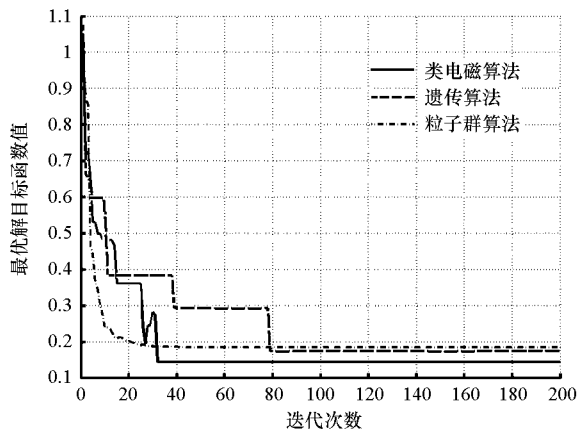


图2 求解WTA问题时类电磁算法与其他算法收敛曲线比较

Fig. 2 Comparison of convergence curves between EM algorithm and other algorithm for solving WTA

度赶超了粒子群算法,迭代到30代左右时,即得到了更优的目标函数值。

4 结论

武器目标分配是现代条件作战指挥控制机制中的关键环节,同时解决该问题也具有重要的理论研究引导作用,因此对其的研究一直非常活跃。解决武器目标分配问题的核心是提高求解的速度。类电磁算法作为21世纪初才提出的一种新型全局优化算法,其强大的搜索能力已得到了验证。但是其初衷是解决一般的连续优化问题。本文通过对原始类电磁算法进行改造,同时对武器目标分配模型进行了一定的变形,从而实现了对该问题的快速求解,仿真实验结果对此进行了验证。

与遗传算法、粒子群算法等成熟的现代优化算法相比,类电磁算法在应用于离散优化问题时往往需要针对具体问题进行特殊改造,可移植性不强。对此,需要进一步做深入的研究。

参考文献:

- [1] 蔡怀平,陈英武. 武器-目标分配(WTA)问题研究现状[J]. 火力与指挥控制, 2006, 31(12): 11-15.
- [2] Birbil S I, Fang S C. An Electromagnetism-like Mechanism for Global Optimization [J]. Journal of Global Optimization, 2003, 23(3): 263-282.
- [3] Birbil S I, Fang S C, Sheu R L. On the Convergence of a Population-based Global Optimization Algorithm[J]. Journal of Global Optimization, 2004, 30(2): 301-318.
- [4] 王玮,程树昌,张玉芝. 基于遗传算法的一类武器目标分配方法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(9): 1708-1711.
- [5] 高尚,杨静宇. 武器-目标分配问题的粒子群优化算法[J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(7): 1250-1252.
- [6] 吴平,梁青. 武器-目标分配问题的模拟退火算法[J]. 计算机工程与应用, 2006, 4: 87-90.
- [7] 范洁,刘玉树,龚元明,等. 基于混合蚁群算法的WTA问题求解[J]. Computer Engineering and Applications, 2005, 10: 59-61.
- [8] Cai H P, Liu J X, Chen Y W, et al. Survey of the Research on Dynamic Weapon Target Assignment Problem[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2006, 17(3): 559-565.
- [9] 印峰,王耀南,杨易旻,等. 结合变尺度法的改进类电磁算法[J]. 智能系统学报, 2010, 5(3): 254-259.
- [10] 韩丽霞,王宇平. 求解无约束优化问题的类电磁机制算法[J]. 电子学报, 2009, 37(3): 664-668.
- [11] Mirabi M, Fatemi G S M T, Jolai F. A Hybrid Electromagnetism-like Algorithm for Supplier Selection in Make-to-order Planning [J]. Transaction E: Industrial Engineering, 2010, 17(1): 1-11.
- [12] Rocha A M A C, Fernandes E M G P. A New Electromagnetism-like Algorithm with a Population Shrinking Strategy[C]//Proc. 6th. WSEAS International Conference on System Science and Simulation in Engineering, Venice, 2007, 11: 307-312.
- [13] Tsou C S, Hsu C H, Yu F J. Using Multi-objective Electromagnetism-like Optimization to Analyze Inventory Tradeoffs Under Probabilistic Demand[J]. Journal of Scientific & Industrial Research, 2008, 67: 569-573.