

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2010.04.006

## 基于 NSGA-II 的炮兵火力优化问题研究

崔海波<sup>1,2</sup>, 姚志超<sup>2</sup>, 易先清<sup>1</sup>

(1. 国防科学技术大学 信息系统与管理学院 C<sup>4</sup>ISR 技术国防科技重点实验室, 湖南 长沙 410073;

2. 中国人民解放军 71602 部队, 山东 潍坊 261055)

**摘要:** 为解决如何分配不同杀伤能力火力单元打击不同性质的目标, 提出了一种非支配遗传算法—NSGA-II。分析了炮兵火力分配的数学模型, 从编码技术、非支配分类、虚拟适应度计算、倒位操作生成新个体和变异操作方面对 NSGA-II 算法的设计进行了阐述, 最后运用实例进行了分析。分析表明, 该算法能有效、快速地得到 Pareto 最优解, 所得结果合理且符合实际, 为指挥员提供了一种定量的决策支持依据。

**关键词:** 炮兵; 火力优化; 遗传算法; NSGA-II; 倒位算子

**中图分类号:** N945.12; N945.15 **文献标识码:** A

## Research on Artillery Firepower Optimal Distribution Based on NSGA-II

CUI Hai-bo<sup>1,2</sup>, YAO Zhi-chao<sup>2</sup>, YI Xian-qing<sup>1</sup>

(1. C<sup>4</sup>ISR Key Laboratory of Department of Information System & Management, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China; 2. No. 71602 Unit of PLA, Weifang 261055, China)

**Abstract:** A non-dominated genetic algorithm, called NSGA-II, is presented to solve the problem of allocating different firepower to shoot objects with different traits. Firstly, Mathematic model of artillery firepower allocating is analyzed. Then, details of NSGA-II are introduced, including encoding, sorting by non-domination, virtual fitness calculated, generating new individuals by backward operation, as well as the variation operation. Finally, the algorithm is analyzed by an application. The results show that NSGA-II can get optimal Pareto solutions effectively and efficiently, the outcomes are reasonable and truthful, it can provide a decision-making bases for commander.

**Keywords:** Artillery; Firepower optimization; Genetic algorithm; NSGA-II; Backward operator

### 0 引言

随着炮兵在现代战场射击区域内目标数量的明显增多, 火炮的射击精度也在不断提高, 如何分配不同杀伤能力的火力单元打击不同性质的目标, 精确地完成火力支援任务, 是战场火力指挥与控制的重要问题。传统的方法仅凭指挥员的经验来确定, 不仅非常困难, 而且往往得不到最佳的攻击效果。故利用改进的遗传算法, 将综合考虑影响火力决策的多种因素, 定量地研究战场火力分配问题, 最终确定出最优的决策方案集<sup>[1]</sup>。

### 1 炮兵火力分配的数学模型

火力分配的任务在于发挥诸火力单位的整体综合优势, 寻求在确定的约束条件下, 总的射击效果最好的分配方案。在考虑这一问题时, 有 4 个基本要素: 火力单位特性、目标单位特性、最优准则(火力打击任务要求)、射击条件。将上述各要素进行不同组合, 构成了多种多样的复杂的最优火力分配问题, 经过合理地抽象后, 可描述成一个数学模型。

#### 1.1 建立指标体系

根据炮兵射击理论和炮兵战术理论的要求, 炮兵火力分配主要基于 4 个指标: 毁伤性指标、经济性指标、时间性指标和对抗性指标<sup>[2]</sup>。毁伤性指标是火力分配中最关注的问题, 但从以往的研究结果来看, 大多数都以毁伤面积作为基本的参量, 这样虽然便于理解, 但有时会产生偏差, 如精确制导弹药对目标的毁伤效能显然会有大幅度的提高, 而其毁伤面积不是增加而是减少, 故以毁伤目标的数学期望为基础来描述该效能指标。经济性指标主要是为了节省资源, 但由于不同的弹药的价值是不同的, 也要根据弹药的价值和具体的保障难度对其进行加权处理。时间性指标是指射击的持续时间, 在以往火力分配问题中往往被忽略, 而信息化条件下作战对炮兵快打快撤的能力提出了更高的要求, 因此对射击持续时间的量化必不可少。对炮兵而言, 对抗性指标对主要是将优势火力运用于对战斗态势影响较大的目标, 在模型中以目标的价值系数进行体现。

#### 1.2 确定目标价值系数

评估目标威胁程度要将目标融合于复杂的战场

收稿日期: 2009-10-17; 修回日期: 2009-11-25

作者简介: 崔海波(1980-), 男, 吉林人, 国防科技大学在读硕士, 从事指挥自动化方向研究。

态势和战斗进程中,既要考虑目标固有的特征属性,又要考虑对作战的影响因素。综合分析炮兵打击目标的性质,设  $W_j$  表示第  $j$  个目标的价值(即权值),  $j=1,2,\dots,m$ 。这里的目标价值实际上是目标重要程度的一种量度,取决于目标的价值系数、威胁程度等因素。计算如下:设目标的政治价值、军事价值、经济价值及目标的威胁度,分别为  $w_{j1}$ 、 $w_{j2}$ 、 $w_{j3}$ 、 $w_{j4}$ , 可以通过模糊综合评判法、层次分析法或其他方法确定它们相对于第  $j$  个目标权重分别为  $G_1$ 、 $G_2$ 、 $G_3$ 、 $G_4$ 。因此求得目标综合价值系数  $W_j$  如下:

$$W_j = \sum_{k=1}^4 G_k W_{jk}$$

### 1.3 建立数学建模

设  $M$  个火力单位(炮兵连)要对  $N$  个目标射击(抽象为点目标),  $M \geq N$  (当目标数多于火力单位数时,即  $M < N$ ,可按目标的威胁度分批选取前  $N$  个威胁度大的目标作为火力分配的对象,逐次处理完所有目标),武器—目标分配方案如下:

$$X = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1M} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{N1} & X_{N2} & \dots & X_{NM} \end{bmatrix}$$

$$X_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{表示第 } i \text{ 个火力单元对第 } j \text{ 个目标射击} \\ 0, & \text{表示第 } i \text{ 个火力单元不对第 } j \text{ 个目标射击} \end{cases}$$

1) 对各个目标射击的效果总和最大 ( $w_j$  为目标的综合价值系数,  $P_{ij}$  为第  $i$  个火力单元对第  $j$  个目标射击的毁伤概率,  $X_{ij}$  为决策变量):

$$F_1(x) = \text{Max} \sum_{j=1}^N [1 - \prod_{i=1}^M (1 - W_j P_{ij})^{X_{ij}}]$$

2) 对各个目标射击的弹药消耗量和最小 ( $V_j$  弹药的价值权重,  $U_{ij}$  为第  $i$  个火力单元对第  $j$  个目标达到一定毁伤程度的弹药消耗量):

$$F_2(x) = \text{Min} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N V_j U_{ij} X_{ij}$$

3) 使对各个目标射击的持续时间最短 ( $T_{ij}$  为第  $i$  个火力单元对第  $j$  个目标射击的持续时间):

$$F_3(x) = \text{Min} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N T_{ij} X_{ij}$$

4) 第  $j$  个目标最多可以分配  $t[j]$  个火力单位,即:

$$\sum_{i=1}^M X_{ij} \leq t[i]$$

5) 总分配火力单位必须小于或等于  $M$ , 即:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M X_{ij} \leq M$$

6) 同一火力单位不能同时对 2 个及其以上目标

射击:

$$\sum_{j=1}^N X_{ij} \leq 1$$

7) 综合 1)、2)、3) 得多指标下火力分配模型:

$$\begin{cases} F_1(x) = \text{Max} \sum_{j=1}^N [1 - \prod_{i=1}^M (1 - W_j P_{ij})^{X_{ij}}] \\ F_2(x) = \text{Min} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N V_j U_{ij} X_{ij} \\ F_3(x) = \text{Min} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N T_{ij} X_{ij} \end{cases}$$

约束条件为 4)、5)、6)。

## 2 NSGA-II 的算法设计

NSGA2-II 是以 NSGA 为基础进行改进的非支配排序遗传算法,采用快速非支配排序过程、精英保留策略和无参数小生境操作算子<sup>[3]</sup>。

### 2.1 编码技术

编码是实现由问题空间向遗传空间的映射。在武器、目标数量较大的情况下,使用二进制编码的基因串会很长,影响遗传效率,故采用十进制编码。每个生物个体由  $n$  个不同基因段随机组成,基因段每位表示从  $m$  个目标中分别仅选 1 个目标,所以全部基因段共有  $m^n$  种。基因段的编码是  $n$  位十进制数的生成,按此方法生成基因段后,由  $n$  个不同基因段随机组成完整的基因,这样便于遗传操作,例如:目标数  $m=5$ ,火力单元数  $n=6$ ,分配方案如图 1。

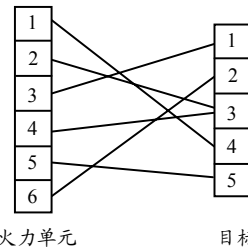


图 1 火力目标分配示例图

按十进制进行编码,基因串的表现型如下:

4	3	1	3	5	2
---	---	---	---	---	---

在计算目标函数时,这样的基因串并不能直接应用,必须转换成模型所需的操作型基因串(决策矩阵),转换工作可以通过程序设计来实现。上式转换后的决策矩阵如下:

$$X_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

### 2.2 非支配分类

非支配分类是 NSGA-II 算法的核心部分, 该步骤取代了简单遗传算法的适应度计算, 主要目的是使种群中的  $N$  个染色体 (每个染色体表示一种火力分配方案) 按照支配关系进行排序<sup>[4]</sup>。先对于每个染色体设置 2 个参数: 1)  $n_i$  为支配解  $i$  的解的个数; 2)  $S_i$  为被个体  $i$  支配的一组解。随后, 将所有  $n_i=0$  的解放入解集  $F_1$  中。对于当前解集  $F_1$  中的解  $i$ , 观察它的  $S_i$  集, 将  $S_i$  集中每个解  $j$  的  $n_j$  数减 1, 完成上述步骤后, 如果支配了的解个数  $n_i=0$ , 也就意味着  $j$  是仅次于第 1 等级中解的个体, 此时把  $j$  放入  $F_2$  中, 重复上述过程, 最终将所有的解按非劣关系分为多个等级。其中,  $F_1$  中的解最好, 即前述的精英解, 它只支配解而不被其他任何解支配,  $F_2$  中的解只被  $F_1$  中的解支配, 不被其它解支配, 依次类推。

### 2.3 虚拟适应度计算

为了保持个体的多样性、防止个体在局部堆积, NSGA-II 算法首次提出了虚拟适应度 (dummy fitness) 的概念。图 1 中目标空间第  $i$  点的拥挤距离等于它在同等级相邻的点  $i-1$  和  $i+1$  组成的矩形 2 个边长之和。可自动调整小生境(niche), 使计算结果在目标空间比较均匀地散布, 具有较好的鲁棒性。

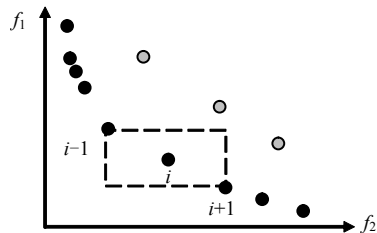


图 2 二维多目标优化中个体拥挤度示例图

具体实现时, 在非支配分类的基础上, 先解码染色体, 按上述的数学模型计算每个个体的目标函数数值, 而后计算每层个体的虚拟适应度。个体的选择依非支配分层和虚拟适应度 2 项指标综合实现。

### 2.4 倒位操作生成新个体

倒位操作 (Inverse Operation) 指颠倒个体编码串中随机指定的 2 个基因座间的基因排列顺序, 从而形成新的染色体<sup>[5]</sup>。采用倒位操作主要基于 2 点考虑: 一是合理性, 文中的十进制编码结构, 同一个基因在不同位置所代表的实际意义不同, 因此, 通过改变基因位置可以生成新的染色体; 二是必要性, 如对编码一般使用交叉策略, 必然会引入新的基因, 这样就要遍历每个染色体的每个基因来判断是否满足约束条件, 影响遗传速度, 倒位操作恰好能弥补交叉操作的这点不足。具体实现方法如图 3。

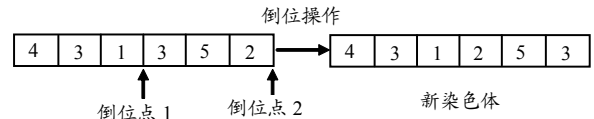


图 3 倒位操作示例图

以倒位概率  $P_m$  决定染色体是否进行倒位操作, 2 个倒位点在基因中随机选取, 设倒位点为  $L_i, L_j$ :

$$\Delta L = |L_i - L_j|$$

$$\Delta L = \begin{cases} \leq 1, & \text{不进行倒位操作} \\ > 1, & \text{将倒位点内的基因串做水平镜像} \end{cases}$$

### 2.5 变异操作

变异的目的是充分挖掘群体的多样性, 克服可能陷于局部解的弊病。采用随机变异策略, 对每个变异点, 以变异概率  $P_n$  随机从对应的取值范围内取一随机数来替代原有基因值。

假设有一个个体为  $X=x_1, x_2, x_3, \dots, x_k, \dots, x_l$ , 若  $x_k$  为变异点, 其取值范围为  $[U_{\min}^k, U_{\max}^k]$ , 在该点对个体  $X$  进行均匀变异后, 可得到一个新的个体  $X'=x_1, x_2, x_3, \dots, x'_k, \dots, x_l$ , 其中变异点的新基因值为:

$$x'_k = U_{\min}^k + r * (U_{\max}^k - U_{\min}^k)$$

$r$  的取值为  $[0, 1]$  范围内的一个随机数, 由于倒位操作, 染色体不能引入新的基因, 因此在变异操作中  $r$  的取值应适当放大, 取值在  $[0.7, 1.0]$  范围内选择。另外对新引入的基因要通过编程进行检查和修正, 确保其满足约束条件。

### 2.6 终止

终止的方法是规定最大迭代次数  $T$ , 一旦遗传算法的迭代次数达到  $T$  则停止操作, 输出结果。通常  $T$  取 100 次~500 次。

## 3 实例分析

假设红方有 6 个火力单位, P1~152 加榴炮兵连、P2~152 加榴炮兵连 (配有制导炮弹), P3、P3~122 榴弹炮兵连, P5、P6~122 火箭炮兵连, 现在这 6 个单位混合部署, 在上级编成内对防御之敌进行火力准备, 共分配 5 个目标, 分别为 M1—蓝方营指挥所, M2—蓝方迫击炮阵地, M3—蓝方排支撑点, M4—蓝方通信 4 枢纽, M5—蓝方永备工事。具体分配情况如表 1、表 2、表 3。

运用遗传算法进行仿真, 其中, 交叉概率  $P_m=0.8$ ; 变异概率  $P_n=0.08$ ; 群体规模  $N=40$ ; 最大迭代次数为 100。用 Matlab 7.0 编程, 经单机运行得出 40 组 Pareto 最优解 (表 4 中仅举 4 组)。

(下转第 22 页)

然下滑，其下滑量只是由平衡阀泄漏量而产生的下滑。由于弹体在水中有长时间停留的过程，在此过程中，弹体下滑对工艺有一定影响，因此，在平衡阀后端串联单向阀，确保弹体无下滑。实践证明，在最大负载下保压 10 h，平台下滑量小于 0.5 mm。

#### 4.2 气动系统工作原理

保温罩居于弹体上方，故选择清洁无电火花的气动作为升降保温罩的动力，将气缸倒立在保温罩上方。为确保保温罩不对弹体工艺盖产生冲击，气动回路设计为保温罩靠自重平衡气缸小腔压力下降，上升则靠气体压力将其提起。为保证安全，在气缸活塞头部安装机械式气动锁，该锁是常闭式，靠气体压力打开。原理如图 5。

由于气动执行元件主要应用于快速动作场合，而保温罩升降要求平稳缓慢。为达到慢速的要求，在气缸排气端安装精确的调速阀，可根据需要调节不同速度。由于停止供气后，气缸内原有背压会随时间缓慢下降，因此，在下次动作时会出现保温罩突然快速下降的现象，这是很危险的动作。所以，

设计时间的延迟，对气动换向阀动作和气动锁的关闭，在每次升降动作前先对气缸补压，再开气动锁，使保温罩平稳运动。

### 5 总结

水冷却后处理方式设计为单缸悬臂结构，既避免了双缸同步的要求，又节约了成本；热芯棒后处理方式设计导向柱为热芯棒升降导向。调试结果证明，该结构平稳性好，无冲击、爬行现象，无噪音。通过比例阀和调速阀的调节，很好地满足了工艺对速度的要求。通过对气动换向阀和气动锁动作时序延迟，使保温罩运动达到了平稳运动的效果。在整个结构设计中还充分考虑材料属性，避免运动副之间产生火花。目前，后处理设备已经安装调试完毕，并通过使用，满足工艺要求。

#### 参考文献：

[1] 成大先. 机械设计手册(4版)[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002: 1.  
 [2] 章宏甲, 黄谊, 王积伟. 液压与气压传动[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000: 5.

\*\*\*\*\*

(上接第 19 页)

表 1 武器—目标毁伤概率

编号	M1	M2	M3	M4	M5
价值系数	0.30	0.16	0.15	0.17	0.24
P1	0.21	0.32	0.26	0.28	0.15
P2	0.29	0.36	0.29	0.33	0.32
P3	0.18	0.27	0.23	0.25	0.11
P4	0.18	0.27	0.23	0.25	0.11
P5	0.15	0.13	0.20	0.23	0.08
P6	0.15	0.13	0.20	0.23	0.08

表 2 基于一定毁伤概率的弹药消耗量

编号	M1	M2	M3	M4	M5	价值
P1	6	10	12	13	18	0.15
P2	3	4	8	9	4	0.39
P3	8	12	15	16	24	0.09
P4	8	12	15	16	24	0.09
P5	10	13	15	17	30	0.14
P6	10	13	15	17	30	0.14

表 3 火力反应时间

编号	M1	M2	M3	M4	M5
P1	3.9	3.6	2.6	2.9	2.5
P2	4.5	3.9	2.8	2.9	2.6
P3	3.6	3.0	2.5	2.7	2.4
P4	3.6	3.0	2.5	2.7	2.4
P5	3.1	2.5	1.8	1.9	1.7
P6	3.1	2.5	1.8	1.9	1.7

多次计算结果较为稳定，解分布均匀，没有出现陷于局部最优的情况，而且收敛速度较快，所得结果符合客观实际。

### 4 结论

采用非支配遗传算法—NSGA-II，并在新个体生成中使用倒位操作，优化了对约束条件的检验，减少了计算过程中的冗余循环。仿真结果符合实际要求，能够在一定的时间内得到最优的分配方案集，为炮兵实施定量火力优化和炮兵指挥员定下决心提供了一种可行的方法和决策支持。

表 4 Pareto 最优解

最优解	基因串	F1	F2	F3
解 1	1 5 1 4 2 3	0.2837	8.54	17.1
解 2	5 1 5 3 2 4	0.2459	11.58	16.3
解 3	1 5 1 2 3 4	0.3027	8.74	17.1
解 4	1 4 5 5 3 2	0.2220	12.65	15.9

#### 参考文献：

[1] 娄纯泗, 邓波. 创新战术作业手段提高精确指挥能力[J]. 指挥学报, 2006, 25(11): 48-49.  
 [2] 吴大梁. 射击效果评定及最优化方法[M]. 南京: 南京炮兵学院, 1986.  
 [3] 王小平, 曹立明. 遗传算法[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.  
 [4] 冯士刚, 艾芊. 带精英策略的快速非支配排序遗传算法在多目标无功优化中的应用[J]. 电工技术学报, 2007, 22(12): 146-151.  
 [5] 周明, 等. 遗传算法及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.  
 [6] 张信启, 黄锐, 范阳涛. 常规导弹火力运用的优化[J]. 四川兵工学报: 2009(8): 57-59.