

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2010.02.006

基于杂交粒子群算法的弹炮混编防空群火力优化模型

谭乐祖¹, 任东彦², 温巧林²

(1. 海军航空工程学院 指挥系, 山东 烟台 264001; 2. 海军航空工程学院 研究生 5 队, 山东 烟台 264001)

摘要: 针对弹炮混编防空群射击指挥中的火力分配问题, 提出了弹炮混编防空群的火力分配方法, 建立了优化的火力分配数学模型。在此基础上, 借鉴遗传算法中的杂交概念, 采用改进后的粒子群优化算法对此模型求解。通过算例和仿真结果与实际经验对比表明, 改进粒子群优化算法是解决弹炮混编防空群火力优化分配问题的一种有效方法。

关键词: 弹炮混编防空群; 火力分配; 粒子群算法**中图分类号:** N945.15; TP301.6 **文献标识码:** A

Optimization Model of Mixed Antiaircraft Group Missile and Artillery Based on Hybrid Particle Swarm Algorithm

TAN Le-zu¹, REN Dong-yan², WEN Qiao-lin²

(1. Dept. of Command, Naval Aeronautical & Astronautical University, Yantai 264001, China;

2. No.5 Brigade of Postgraduate, Naval Aeronautical & Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: Aiming at the fire distribution of the fire command for mixed antiaircraft group of missile and artillery, a fire distribution method for mixed antiaircraft group of missile and artillery is presented, an optimization mathematical model is established. Based on this, draw lessons from the hybrid concept of genetic algorithm, adopt Enhanced particle swarm optimization algorithm to solve the allocation model. Through the contrast in conclusion from simulator and practice, it provides that Enhanced particle swarm optimization algorithm is valid method in solving fire allocation of hybrid antiaircraft group of missile and artillery.

Keywords: Mixed antiaircraft group of missile and artillery; Fire distribution; Particle swarm algorithm

0 引言

实施全空域、全时域、全方位、多兵种、多机种、多波次、多种手段综合运用的群体合成空袭, 是现代空袭作战的发展趋势。为了最大限度地发挥整体作战效能, 以求不同防空兵器之间的优势互补, 将执行同一任务不同型号的地空导弹分队与不同口径的高炮分队相结合, 形成弹炮混合编组的防空体系^[1]。弹炮混编是地面防空力量作战编组的重要形式, 对其进行火力分配, 最大限度地发挥其作战效能, 对夺取防空作战的胜利具有重要意义。研究表明, 及时准确地制定出可行火力分配方案, 就能实时捕捉战机, 充分发挥火力优势, 有效提高防空群的整体抗击效能^[2]。故针对弹炮混编防空群的火力分配问题, 提出弹炮混编防空群的火力分配方法, 建立优化的火力分配数学模型, 引入线性化约束条件, 引进 0-1 变量, 对弹炮混编防空群火力分配数学模型进行改进, 并通过借鉴遗传算法中的杂交概念对粒子群优化算法的改进, 将其应用于弹炮混编防空火力分配决策问题。

1 弹炮混编防空群火力分配数学模型建立

设某防空群由地空导弹和高炮 2 种武器系统组成 (不再细分)。对于多通道的防空导弹系统, 由于各通道在作战使用上完全等同, 分配到哪个具体的通道射击效果都是相同的。故可视为在同位置部署了与通道数相同数量的火力单元。在进行火力分配前, 首先要计算空中目标对被保卫目标的威胁度和每个火力单位对每个来袭目标的杀伤概率。为了便于对弹炮混编防空群的火力进行分配, 假定防空导弹各火力单位对同批目标的射击有利度相等。考虑到地空导弹和高射炮对目标的杀伤概率是不同的, 采用如下建立弹炮混编防空群火力分配数学模型:

假设在某一时刻, 某弹炮混编防空群装备包括防空导弹和高炮, 防空导弹有 n_1 个火力单位, 高炮有 n_2 个火力单位, 则此弹炮混编防空群共有 $n(n = n_1 + n_2)$ 个火力单位。空中有 $m(m \leq n)$ 批来袭目标。来袭目标特性威胁系数为 $r_k(k = 1, 2, \dots, m)$,

收稿日期: 2009-09-27; 修回日期: 2009-10-28

作者简介: 谭乐祖 (1965-), 男, 山东人, 副教授, 从事作战模型与软件、海军兵种作战运筹分析研究。

防空导弹对目标的杀伤概率为 $P_{ik} (i=1,2,\dots,n_1, k=1,2,\dots,m)$, 高炮对目标的杀伤概率为 $P_{jk} (j=1,2,\dots,n_2, k=1,2,\dots,m)$ 。设每个来袭目标至少有一个火力单位与之对抗, 用 x_{ik} 表示防空导弹第 i 个火力单位对第 k 个来袭目标的对抗射击情况, 当防空导弹中第 i 个火力单位被用来射击第 k 个来袭目标时, $x_{ik}=1$, 否则 $x_{ik}=0$; 用 x_{jk} 表示高炮第 j 个火力单位对第 k 个来袭目标的对抗射击情况, 当高炮中第 j 个火力单位被用来射击第 k 个来袭目标时, $x_{jk}=1$, 否则 $x_{jk}=0$, 由于受射界的限制, 防空导弹和高炮不能同时对同一目标射击, 即 x_{ik} 和 x_{jk} 不能同时为 1, 于是, 所有 n 个火力单位对目标 j 的毁伤概率为:

$$P_k = 1 - \prod_{i=1}^{n_1} (1 - p_{ik} x_{ik}) \cdot \prod_{j=1}^{n_2} (1 - p_{jk} x_{jk}) \quad (1)$$

则建立表示弹炮混编防空群火力分配情况的数学模型如下:

$$\max \sum_{k=1}^m r_k \left(1 - \prod_{i=1}^{n_1} (1 - p_{ik} x_{ik}) \cdot \prod_{j=n_1+1}^{n_2} (1 - p_{jk} x_{jk}) \right) \quad (2)$$

$$st \begin{cases} x_{ik} + x_{jk} > 0, & x_{ik}, x_{jk} \text{ 取 } 0 \text{ 或 } 1 \\ x_{ik} + x_{jk} < 2, & x_{ik}, x_{jk} \text{ 取 } 0 \text{ 或 } 1 \end{cases}$$

式中, $x_{ik} + x_{jk} < 2$ 表示防空导弹和高炮不能同时对同一目标射击; $x_{ik} + x_{jk} > 0$ 表示对于来袭的任一目标必有火力进行抗击。

以上模型的求解属于整数规划中的指派问题, 约束条件非线性化, 为了便于对模型的求解, 引入线性化约束条件, 引进 0-1 变量如下:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{第 } i \text{ 门炮射击第 } j \text{ 个来袭目标} \\ 0, & \text{第 } i \text{ 门炮不射击第 } j \text{ 个来袭目标} \end{cases}$$

$$y_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{第 } i \text{ 枚导弹攻击第 } j \text{ 个来袭目标} \\ 0, & \text{第 } i \text{ 枚导弹不攻击第 } j \text{ 个来袭目标} \end{cases}$$

$$s_j = \begin{cases} 1, & \text{第 } j \text{ 个目标被炮射击} \\ 0, & \text{第 } j \text{ 个目标未被炮射击} \end{cases}$$

$$t_j = \begin{cases} 1, & \text{第 } j \text{ 个目标被导弹攻击} \\ 0, & \text{第 } j \text{ 个目标未被导弹攻击} \end{cases}$$

j 表示空中来袭目标。

对弹炮混编防空群火力分配情况的数学模型进行如下改进:

$$\max \sum_{j=1}^m r_j \left(1 - \prod_{i=1}^{n_1} (1 - p_{ij} x_{ij}) \cdot \prod_{i=1}^{n_2} (1 - \tilde{p}_{ij} y_{ij}) \right) \quad (3)$$

$$st \begin{cases} \sum_{i=1}^{n_1} x_{ij} + \sum_{i=1}^{n_2} y_{ij} \geq 1, & j=1,2,\dots,9 \\ \sum_{j=1}^{n_1} x_{ij} \leq 1, & i=1,2,\dots,n_1 \\ \sum_{j=1}^{n_2} y_{ij} \leq 1, & i=1,2,\dots,n_2 \\ s_j \geq x_{ij}, & i=1,2,\dots,n_1; j=1,2,\dots,m \\ t_j \geq y_{ij}, & i=1,2,\dots,n_2; j=1,2,\dots,m \\ s_j + t_j = 1, & j=1,2,\dots,m \\ x_{ij}, y_{ij} = 0 \text{ 或 } 1, & i=1,2,\dots,n_1; j=1,2,\dots,m \\ s_j, t_j = 0 \text{ 或 } 1, & j=1,2,\dots,m \end{cases}$$

其中, p_{ij} 为高炮对目标的杀伤概率, \tilde{p}_{ij} 为导弹对目标的杀伤概率。

2 模型的求解

2.1 粒子群优化算法

粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, PSO)是一种进化计算技术, 源于对鸟群捕食的行为研究。PSO 是一种基于迭代的优化工具。系统初始化为一组随机解, 通过迭代搜寻最优值。在 PSO 中, 每个优化问题的解都是搜索空间中的 1 只鸟, 称之为粒子。所有的粒子都有一个被优化的函数决定的适应值。每个粒子还有一个速度决定它们飞翔的方向和距离, 然后粒子们就追随当前的最优粒子, 在解空间中搜索。PSO 初始化为一群随机粒子随机解。然后通过迭代找到最优解。在每次迭代中, 粒子通过跟踪 2 个极值来更新自己: 一个是粒子本身所找到的最优解, 称为个体极值 $pbest$; 另一个极值是整个种群目前找到的最优解, 是全局极值 $gbest$; 另外, 也可以不用整个种群而只是用其中一部分为粒子的邻居。那么在所有邻居中的极值就是局部极值^[3]。

PSO 的优势在于简单容易实现并且没有许多参数需要调整。

在找到这 2 个最优值时, 每个粒子根据如下的公式来更新自己的速度和新的位置^[4]:

$$v_{k+1} = c_0 v_k + c_1 (pbest_k - x_k) + c_2 (gbest_k - x_k) \quad (4)$$

$$x_{k+1} = x_k + v_{k+1}$$

式中: v_k 为粒子的速度向量, x_k 为当前粒子的位置, $pbest_k$ 为粒子所找到的最优解的位置, $gbest_k$ 为整个种群目前找到的最优解的位置, c_0 、 c_1 、 c_2 为群体认知系数, c_0 取介于 (0,1) 之间的随机数, c_1 、 c_2 取 (0,2) 之间的随机数。在每维粒子的速度都

会被限制在一个最大速度 v_{\max} ($v_{\max} > 0$)，如果某一维更新后的速度超过用户设定的 v_{\max} ，那么这一维的速度就被限定为 v_{\max} ，即若 $v_k > v_{\max}$ 时， $v_k = v_{\max}$ 或 $v_k < -v_{\max}$ 时， $v_k = -v_{\max}$ 。

2.2 改进粒子群算法求解火力分配问题

分析 PSO 的进化，由式 (4) 可见，粒子 k 的新速度主要是通过 3 部分来计算的：第 1 部分是粒子 k 前一时刻速度的调整；第 2 部为“认知”部分，即粒子 k 当前位置与自己最好位置之间的距离，表示粒子的动作来源于自己经验的部分；第 3 部分为“社会”部分，即粒子 k 当前位置与群体最好位置之间的距离，表示粒子的动作来源于群体中其他粒子经验的部分，表现为知识的共享与合作^[5]。粒子就是通过自己的经验和其它粒子中最好的经验来决定下一步的运动。其中第 1 部分是用于保证算法具有一定的全局搜索性能，第 2、第 3 部分则使得粒子群算法具有局部收敛能力^[6]。

分析 PSO 和遗传算法，可发现它们有很多共同之处。两者都随机初始化种群，而且都使用适应值来评价系统，而且都根据适应值来进行一定的随机搜索。但是，PSO 没有遗传操作如交叉和变异，而是根据自己的速度来决定搜索。分析粒子群算法的进化可以看出，粒子还有一个重要的特点，就是有记忆。与遗传算法比较，PSO 的信息共享机制是很不同的。在遗传算法中，染色体互相共享信息，所以，整个种群的移动是比较均匀的向最优区域移动。在 PSO 中，只有 $gbest$ (or $pbest$)给出信息给其他的粒子，这是单向的信息流动。整个搜索更新过程是跟随当前最优解的过程。与遗传算法比较，在大多数的情况下，所有的粒子可能更快地收敛于最优解。

试验表明，粒子群优化算法会出现早熟收敛现象。粒子群中的粒子会出现“聚集”现象，要么所有粒子聚集在某一特定位置，要么聚集在某几个特定位置，这主要取决于问题本身的特性以及适应度函数的选择^[5]。针对这一问题，为提高运算的精度，借鉴遗传算法中的杂交概念，在每次迭代中，根据杂交概率选取指定数量的粒子放入杂交池内，池中的粒子随机两两杂交，产生同样数目的子代粒子 ($child$)，并用子代粒子替换亲代粒子 ($parent$)。子代位置由父代位置进行算术交叉得到：

$$child(x) = p \cdot parent_1(x) + (1-p) \cdot parent_2(x) \text{ 或}$$

$$child(x) = (1-p) \cdot parent_1(x) + p \cdot parent_2(x)$$

其中， P 是 0 到 1 之间的随机数。

子代的速度由下式计算：

$$child(v) = \frac{parent_1(v) + parent_2(v)}{|parent_1(v) + parent_2(v)|} |parent_1(v)|$$

$$\text{或 } child(v) = \frac{parent_1(v) + parent_2(v)}{|parent_1(v) + parent_2(v)|} |parent_2(v)| \quad (5)$$

改进后的粒子群算法步骤如下^[7]：1) 随机初始化种群中各微粒的位置和速度；2) 评价每个微粒的适应度，将当前各微粒的位置和适应值存储在各微粒的 $pbest$ 中，将所有 $pbest$ 中适应值最优个体的位置和适应值存储于 $gbest$ 中；3) 更新每个微粒的速度和位置；4) 对每个微粒，将其适应值与其经历过的最好位置作比较，如果较好，则将其作为当前的最好位置；5) 比较当前所有 $pbest$ 和 $gbest$ 的值，更新 $gbest$ ；6) 根据杂交概率选取指定数量的粒子放入杂交池内，池中的粒子随机两两杂交产生同样数目的子代粒子，子代的位置和速度计算公式如下：

$$\begin{cases} child(x) = p \cdot parent_1(x) + (1-p) \cdot parent_2(x) \\ child(v) = \frac{parent_1(v) + parent_2(v)}{|parent_1(v) + parent_2(v)|} |parent_1(v)| \end{cases}$$

保持 $pbest$ 和 $gbest$ 不变；若满足停止条件（通常为预设的预算精度或迭代次数），搜索停止，输出结果，否则，返回步骤 3) 继续搜索。

3 实例分析

设在要地防空中，某弹炮混编防空群由高炮营和防空导弹营组成，防空导弹营装备一套有 6 个目标通道的武器系统，同时假定高炮营有 6 个基本火力单位，则在此要地防空中，弹炮混编防空群共有 12 个基本火力单位，在某一时刻，空中有 9 个来袭目标 ($M_1 \sim M_9$)，其火力分配相关数据如表 1 和表 2。

表 1 高炮火力分配相关数据表

P_{ij}	来袭目标								
火力	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.20	0.31	0.33	0.49	0.56	0.44	0.62	0.41	0.55
2	0.67	0.80	0.66	0.57	0.72	0.63	0.68	0.78	0.80
3	0.35	0.38	0.42	0.51	0.59	0.62	0.60	0.45	0.86
4	0.59	0.45	0.47	0.63	0.57	0.48	0.46	0.50	0.63
5	0.55	0.61	0.59	0.42	0.46	0.68	0.57	0.51	0.62
6	0.80	0.52	0.66	0.77	0.78	0.69	0.81	0.63	0.82
r_k	0.81	0.45	1.00	0.86	0.63	0.73	0.60	0.22	0.91

在表 1 和表 2 中， r_k 为目标威胁系数；

采用上面介绍的粒子群优化算法流程进行仿真，取粒子数为 40，学习因子都取 2，惯性权重取 0.7，杂交概率取 0.9，杂交池大小比例取 0.2，迭代步数取 5 000，求出最优解，得到弹炮混编防空群火

力分配决策如表 3。

表 2 防空导弹火力分配相关数据表

\bar{p}_j	来袭目标								
火力	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.83	0.82	0.76	0.69	0.70	0.84	0.91	0.72	0.65
2	0.83	0.82	0.76	0.69	0.70	0.84	0.91	0.72	0.65
3	0.83	0.82	0.76	0.69	0.70	0.84	0.91	0.72	0.65
4	0.83	0.82	0.76	0.69	0.70	0.84	0.91	0.72	0.65
5	0.83	0.82	0.76	0.69	0.70	0.84	0.91	0.72	0.65
6	0.83	0.82	0.76	0.69	0.70	0.84	0.91	0.72	0.65
r_k	0.81	0.45	1.00	0.86	0.63	0.73	0.60	0.22	0.91

表 3 目标分配方案

来袭目标	1	2	3	4	5	6	7	8	9
火力单元	3	5	$\tilde{2}, \tilde{6}$	4, 6	$\tilde{4}$	$\tilde{1}$	$\tilde{3}$	$\tilde{5}$	1, 2

从表 3 可见, 威胁度大的目标 3、4、9 分配到的火力单位相对多, 计算结果与实际经验判断吻合。

4 结论

经计算仿真验证, 该方法计算结果与实际经验

(上接第 15 页)

综合云重心向量进行归一化, 得到一组向量 $T^G = (-0.268, -0.215, -0.314, 1, -0.347, -0.4)$ 。经归一化之后, 表征系统状态的综合云重心向量均为有大小、有方向、无量纲的值(理想状态为特殊情况, 其向量为(0,0,0,0,0))。

7) 计算加权偏离度

把各指标归一化后的向量值乘以其权重值, 再相加, 取平均值后得到加权偏离度 $\theta (-1 < \theta < 0)$ 的

值。 $\theta = \sum_{j=1}^p (W_j^\theta T_j^G)$ 式中, W_j^θ 为第 j 个单项指标的

权重值。经计算得加权偏离度 $\theta = -0.365$, 即距离理想状态下的加权偏离度为 0.365。

8) 用云模型实现评测的评语集

将加权偏离度输入评测云发生器(如图 2)后, 将激活“好”和“较好”2 个对象, 激活“好”云对象的程度大于“较好”云对象, 表述为“介于好和较好间, 倾向于好”来说明, 即系统作战能力的最终评判值大约在 0.635, 作为下一步的评定依据。

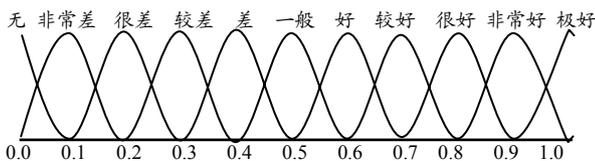


图 2 云发生器模型

为验证其可行性和可靠性, 分别采用 WSEIAC 模型和模糊综合评判法, 对上述对象进行计算, 计

判断吻合, 可为现代防空兵指挥员组织作战时提供防空火力分配辅助决策, 并为解决作战运筹领域的类似问题提供了一种新思路。

参考文献:

[1] 赖永强. 基于匈牙利法的弹炮混编防空兵群火力分配优化问题研究[J]. 指挥控制与仿真, 2008, 30(2): 48-50.

[2] 马海涛. 基于遗传算法的弹炮混编防空群火力分配[J]. 火力指挥与控制, 2006, 31(4): 36-38.

[3] 杨懿. 改进粒子群算法在导弹火力分配中的应用[J]. 火力指挥与控制, 2007, 32(1): 60-63.

[4] 邢立新. 基于粒子群算法的火力最优分配[J]. 兵工自动化, 2007, 26(12): 22-23.

[5] 曾建潮, 介倩, 崔志华. 微粒群算法[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 190-206.

[6] 周明, 孙树栋. 遗传算法原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.

[7] 龚纯, 王正林. 精通 MATLAB 最优化设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.

算结果如表 4, 并将所得的评估结果进行比较, 结果基本一致, 则证明采用云重心理论对装甲兵作战体系综合效能进行评估可行, 评估结果可靠。

表 4 运用 WSEIAC 模型和模糊综合评判法计算结果

	WSEIAC 模型		模糊综合评判法		云重心理论	
	评价值	评语	评价值	等级	评价值	等级
作战体系的综合能力	0.623	好	0.645	好	0.635	好
作战体系的可信度	0.818	很好	0.776	很好	0.796	很好
作战体系的可用度	0.724	较好	0.778	很好	0.738	较好
作战体系的综合效能	0.689	较好	0.701	较好	0.692	较好

4 结束语

以火力打击能力为例, 采用云重心理论对火力打击能力的 6 个指标进行评估。得出作战体系的综合能力最终评定值, 同理, 可确定装甲兵作战体系的可用度和系统的可信度的评定值。最终可计算出装甲兵作战体系综合效能 $E=0.692$ 。可为同类作战体系综合效能评估提供参考。

参考文献:

[1] 顾吉堂, 等. 应用神经网络评估舰载武器系统作战效能[J]. 指挥控制与仿真, 2007, 29(2): 66-70.

[2] 陈利, 尤峰. 基于 AHP 和云重心方法的装甲兵指挥信息系统效能评估[J]. 指挥控制与仿真, 2008, 30(4): 59-60.

[3] 李洪峰, 等. 基于云理论的弹炮结合防空武器系统效能评估[J]. 弹箭与制导学报, 2008, 28(2): 239-241.

[4] 董树军, 等. 作战效能评估理论与方法[M]. 北京: 解放军出版出版社, 2005: 125-164.