

doi: 10.7690/bgzdh.2018.09.003

## 多型反舰导弹组合攻击最小弹药消耗优化模型

李一夫<sup>1</sup>, 宋贵宝<sup>2</sup>, 贾汝娜<sup>1</sup>, 张文鹏<sup>3</sup>

- (1. 海军航空大学研究生管理大队, 山东 烟台 264001;
2. 海军航空大学导弹总体与发动机教研室, 山东 烟台 264001;
3. 国防大学联合勤务学院研究生管理大队, 北京 100039)

**摘要:** 为优化多型导弹组合攻击弹药消耗, 提出一种基于萤火虫算法的最小弹药消耗优化模型。在萤火虫算法基础上, 引入自适应步长和自适应搜索半径, 结合体系贡献度、排队论、智能算法等相关理论, 构建最小弹药消耗优化模型, 利用萤火虫算法全局寻优的优秀性能, 对数学模型进行解算。仿真结果表明: 该算法具有良好的有效性和时效性, 可为多型反舰导弹组合攻击的作战方案制定及训练提供参考。

**关键词:** 多型反舰导弹; 火力分配; 萤火虫算法; 自适应步长

**中图分类号:** TJ410.2 **文献标志码:** A

## Optimization Model of Minimum Ammunition Consumption for Combined Anti-ship Missile Attack

Li Yifu<sup>1</sup>, Song Guibao<sup>2</sup>, Jia Runa<sup>1</sup>, Zhang Wenpeng<sup>3</sup>

- (1. *Administrant Brigade of Postgraduate, Navy Aeronautical University, Yantai 264001, China;*
2. *Staff Room of Missile General & Engine, Navy Aeronautical University, Yantai 264001, China;*
3. *Administrant Brigade of Postgraduate, National Defence University Joint Logistics College, Beijing 100039, China)*

**Abstract:** In order to optimize the consumption of ammunition for multiple missile combined attack, a minimum ammunition consumption optimization model based on firefly algorithm is proposed. On the basis of the firefly algorithm, the adaptive step length and adaptive search radius are introduced, and the optimization model of minimum ammunition consumption is constructed by combining the theory of system contribution, queuing theory and intelligent algorithm, and the mathematical model is solved by using the excellent performance of the global optimization of the firefly algorithm. The simulation results show that the algorithm has good effectiveness and timeliness, and it can provide reference for the formulation and training of the multi type anti-ship missile combined attack.

**Keywords:** multi-anti-ship missile; fire distribution; firefly algorithm; adaptive step size

### 0 引言

现代海战已演变成为打击体系与防御体系的对抗, 输赢不仅取决于对抗双方的武器装备性能, 而且取决于双方以目标分析、火力毁伤、火力需求、火力分配和弹药消耗等火力优化能力。毋庸置疑, 灵活有效的火力优化是提高作战效能的“倍增器”。使用多型反舰导弹组合攻击时, 以最小化弹药消耗为目标的火力打击方案设计具有突出的战术意义和研究价值。在确保完成既定作战任务的前提下, 通过优化各型反舰导弹火力打击的目标分配方案, 减少反舰导弹消耗量, 以降低战争成本、缓解后勤补给压力, 为战斗力的可持续生成、打赢持续战争、提高对战争消耗的承受能力提供支持<sup>[1]</sup>。

### 1 问题分析

文中的弹药消耗实质上是弹药综合价值的消

耗。综合价值由弹药消耗量、导弹的战术价值和经济造价等因素聚合得到。在满足给定毁伤的前提下, 通过优化火力配置以实现最小化弹药综合价值消耗是最优火力分配的基本问题之一。在多型导弹组合攻击的背景下, 是一个具有多约束的多目标整数优化问题。为解决该问题, 笔者的解决思路为: 首先以给定的作战任务, 即给定的总毁伤量为基本约束, 区分多型反舰导弹的毁伤能力、载弹量、综合价值, 确定满足上述约束的打击方案, 作为优化对象; 再以最小消耗为单一目标对上述满足约束的打击方案进行寻优, 利用萤火虫算法在解决组合优化问题时优秀的全局搜索性能, 最终得到一组“既经济又有效”的火力分配方案。

自然界中, 萤火虫可以通过感知有效范围内其他萤火虫发光的强度来确定其他个体的存在和吸引力, 从而为其求偶、觅食等行为进行指向。根据这

收稿日期: 2018-05-25; 修回日期: 2018-06-29

作者简介: 李一夫(1994—), 男, 山东人, 硕士, 从事武器系统作战与装备保障管理研究。

一现象，一种新兴的仿生智能算法——萤火虫算法应运而生，其核心思想是通过各萤火虫个体的发光强度及距离的演变推动群体间位置信息交互，最终实现萤火虫群体的聚类收敛。在人工萤火虫算法中，首先将具有相同荧光素、无性别差异、拥有独立搜索半径的萤火虫随机分布于目标空间之中，各萤火虫根据所处位置的适应度函数更新其发光强度，然后萤火虫在自己的搜索空间内向发光强度大的萤火虫位移某一步长，并根据新位置附近邻居的个数自适应调整搜索半径。不断重复上述过程，可以实现萤火虫向发光强度较大个体的所在位置集聚，从而确定最优的萤火虫个体<sup>[2]</sup>。

## 2 建立数学模型

笔者建立问题背景下的数学模型，提出目标函数和约束条件。

### 2.1 模型参数

1)  $x_{ij}$  为第  $i$  型反舰导弹攻击第  $j$  个目标的数量。

2)  $w_i$  和  $w_j$  分别为第  $i$  型反舰导弹和第  $j$  个目标的综合成本，笔者将综合成本分为经济造价成本和作战机会成本：经济造价成本包括采购成本、保障成本、发射成本等；作战机会成本可等价于该导弹对作战体系的贡献度，表示因发射某型导弹而放弃攻击其他目标所损失的作战能力。以计算第  $i$  型反舰导弹综合成本为例，数学表达式为

$$w_i = (a_1, a_2)(z_i', \text{csw}_i')^T \quad (1)$$

其中： $a_1$  和  $a_2$  分别为反舰导弹经济造价成本和作战机会成本所占综合成本的权重； $z_i'$  为每一枚第  $i$  型反舰导弹的经济造价成本，去量纲处理后得到  $z_i'$ ； $\text{csw}_i$  为单枚第  $i$  型反舰导弹对反舰导弹攻击群的体系贡献度，也可作为发射该枚反舰导弹后，整个反舰导弹作战体系作战能力的损失程度，即该枚导弹的作战机会成本，对其去量纲后得到  $\text{csw}_i'$ 。

3)  $c_i$  为第  $i$  型反舰导弹的载弹量； $h_i$  为第  $i$  型反舰导弹的毁伤系数； $p_{ij}$  为第  $i$  型反舰导弹对第  $j$  个目标的单枚毁伤概率， $p_{ij} = p_i^{kk} p_{ij}^{mz} (1 - p_i^y)(1 - p_i^r)$ 。其中： $p_i^{kk}$  为第  $i$  型反舰导弹的飞行可靠性； $p_{ij}^{mz}$  为第  $i$  型反舰导弹对第  $j$  个目标的命中概率； $p_i^y$  和  $p_i^r$  分别为目标对第  $i$  型反舰导弹的硬抗击拦截概率和软抗击拦截概率。

4)  $E$  为给定的既定作战目标所对应的毁伤程度， $E \in (0, 1)$ ，作战目标与毁伤程度的对应关系见表 1。

表 1 各作战目标的毁伤区间

作战目标	佯攻、袭扰	牵制、阻滞	压制、大部歼灭	重创、基本歼灭
毁伤程度 $E$	(0.1, 0.25]	(0.25, 0.45]	(0.45, 0.85]	(0.85, 1)

### 2.2 目标函数

以剩余导弹综合价值最大化作为模型的目标函数， $(a_1, a_2)(z_i', \text{csw}_i')^T$  为该型导弹单枚综合价值， $c_i - \sum_{j=1}^q x_{ij}$  为攻击各目标后该型导弹的剩余数量，函数值  $f$  越大，表示投入作战的导弹数量  $\sum_{j=1}^q x_{ij}$  越小，即实现了最小化的弹药消耗，数学表达式为

$$\max f = \sum_{i=1}^p (a_1, a_2)(z_i', \text{csw}_i')^T \left( c_i - \sum_{j=1}^q x_{ij} \right) \quad (2)$$

### 2.3 约束条件

显然，各型导弹对各个目标的发射数量为正整数，即  $x_{ij} \in Z^+$ ；发射数量也应该小于等于最大载弹量，即  $0 \leq \sum_{j=1}^q x_{ij} \leq c_i$ 。此外，投入战斗的各型导弹所制造的总毁伤量应该满足作战目标所对应的毁伤约束，即  $E_{\min} \leq \sum_{j=1}^q \text{csw}_j h_j p_{ij} \leq E_{\max}$ 。其中，对每一个目标的毁伤量应以该目标的威胁值为权重，目标威胁值可以等价于其体系贡献度  $\text{csw}_j$ 。

### 2.4 优化模型

综上所述，建立给定毁伤条件下最小弹药消耗的优化模型，为

$$\begin{aligned} \max f &= \sum_{i=1}^p (a_1, a_2)(z_i', \text{csw}_i')^T \left( c_i - \sum_{j=1}^q x_{ij} \right) \\ \text{s.t.} & \begin{cases} x_{ij} \in Z^+ \\ 0 \leq \sum_{j=1}^q x_{ij} \leq c_i \\ E_{\min} \leq \sum_{j=1}^q \text{csw}_j h_j [1 - (1 - p_{ij})^{x_{ij}}] \leq E_{\max} \end{cases} \quad (3) \end{aligned}$$

### 3 基于改进萤火虫算法的模型解算

根据数学模型，利用萤火虫算法全局寻优的优秀性能，对数学模型进行解算。解算步骤如图 1。

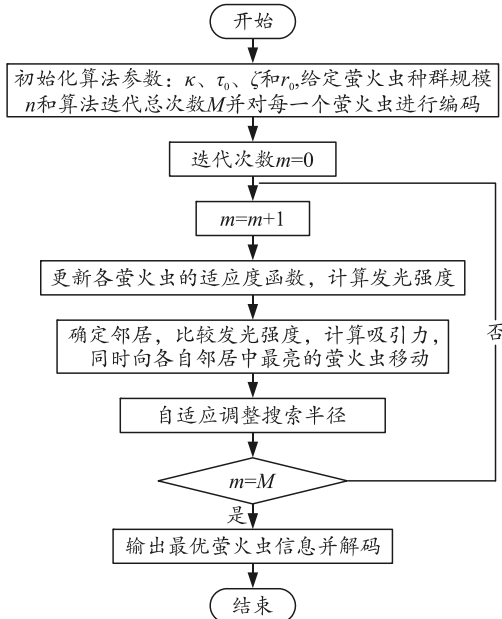


图 1 算法流程

#### 1) 编码并初始萤火虫种群。

由 FA 算法机理可知，每一个萤火虫代表该优化问题的一组解决方案，即一组火力分配策略。根据约束条件，对每一个萤火虫进行编码。以两型反舰导弹组合攻击 3 艘舰艇为例，每只萤火虫编码可以记为  $A=(a_{11}, a_{12}, a_{13}, a_{21}, a_{22}, a_{23})$ ，其中  $\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^3 p_{ij} a_{ij} \geq 0.85$ ，即以重创敌舰艇编队为前提条件，生成众多火力分配方案，组成解空间。

随机选取满足上述约束的 100 只萤火虫作为初始种群，定义每只萤火虫的搜索半径为  $r_0$ ，初始亮度为  $l_0$ 。

#### 2) 计算初始发光强度。

根据目标函数表达式计算各个萤火虫所处位置的适应度，并以此为依据按照下列公式转化为该萤火虫的发光强度。萤火虫越亮，代表该方案的弹药消耗越小，越能满足寻优目标<sup>[3-4]</sup>。

$$l_k(t+1) = (1-\rho)l_k(t) + \gamma F_k(t+1) \quad (4)$$

其中： $F_k(t+1)$  为第  $k$  个萤火虫在  $t+1$  次迭代中所在位置的目标函数值； $\rho$  为萤火虫发光强度的衰减系数； $\gamma$  为目标函数值与发光亮度的比例系数。

#### 3) 初始化并自适应搜索半径从而确定邻居。

初始化人工萤火虫的搜索半径  $r_0$ ，确定邻居集  $N_i(t)$ 。为了使移动过后的萤火虫发生聚集，可以根据邻居个数自适应调整下一次迭代的搜索半径，从而既可以使萤火虫种群迅速聚类分群，又可以避免在最优解附近震荡<sup>[5]</sup>。定义一个统计量  $H(t, N)$ <sup>[6]</sup>，表示第  $t$  次迭代后，邻居集的离散程度，其公式为

$$H(t) = \frac{1}{1 + \frac{\sqrt{D(AB)}}{\text{ave}(AB)}} \quad (5)$$

式中： $AB = \{\|x_j(t)\| | j \in N_i(t)\}$  为萤火虫  $i$  到其邻居的距离集； $D(AB)$  为距离集内各元素的方差； $\text{ave}(AB)$  为各元素的算术平均值，显然， $H(t) \in (0, 1)$ 。如果  $H(t, N)$  数值越接近 1 时，表示各萤火虫聚集程度高，应适当缩短步长提高收敛的精度，因此自适应搜索半径的数学表达式为

$$r(t+1) = r(t) \frac{1}{1 + H(t, N)} + \text{rand} \quad (6)$$

#### 4) 确定移动方向。

首先确定移动对象。根据邻居集  $N_i(t)$  及各个邻居的亮度，通过轮盘赌的方法计算各个萤火虫的移动概率  $g$ ，原则是越亮的萤火虫被其他萤火虫选择为移动目标的概率越大<sup>[7-8]</sup>。

$$g_{ij} = \frac{l_j(t) - l_i(t)}{\sum_{k \in N_i(t)} l_k(t) - l_i(t)} \quad (7)$$

#### 5) 移动萤火虫。

萤火虫的移动距离是由吸引力和自适应步长 2 部分构成。吸引力可以扩大搜索范围，自适应步长可以提高迭代收敛的速度，提高算法的时效性。

萤火虫之间相互吸引驱使萤火虫  $A_i(t)$  向其搜索范围内更亮的萤火虫移动，移动至新位置后记为  $A_i(t+1)$ ，萤火虫的吸引力定义为

$$T = \tau_0 \exp(-\kappa r_{ij}^2) \quad (8)$$

其中： $\tau_0$  为萤火虫之间距离为零时相互吸引力，通常情况下取 1； $\kappa$  为光照吸收率，其取值方法见文献<sup>[7-9]</sup>。

$$\alpha' = \left| 1 - \frac{d'_{\min}}{d_{\min}} \right| \alpha \quad (9)$$

其坐标变换公式为

$$x_k(t+1) = x_k(t) + \tau_0 \exp(-\kappa r_{ij}^2)(x_{j,k}^t - x_{i,k}^t) + \zeta(\text{rand} - 0.5) \quad (10)$$

其中  $r_{ij}$  为萤火虫  $i$  与萤火虫  $j$  的笛卡尔坐标距离，计算公式为：

$$r_{ij} = \|x_i - x_j\| = \sqrt{\sum_{k=1}^d (x_{i,k} - x_{j,k})^2} \quad (11)$$

式中： $d$  为萤火虫的维数； $x_{i,k}$  和  $x_{j,k}$  分别为萤火虫  $i$  和萤火虫  $j$  在第  $k$  维的分量； $\zeta(\text{rand} - 0.5)$  为扰动项，当  $i$  为最亮萤火虫未收到吸引而位移时，为了避免过早陷入局部最优，经人为制造的位置变化； $\zeta$  为待定系数，表示步长。为了提高收敛的精度，步长  $\zeta$  也可按照上述方法进行自适应处理，公式为

$$\zeta(t+1) = \zeta(t) \frac{1}{1 + H(t, N)} + \text{rand} \quad (12)$$

#### 4 算例分析

我舰艇编队与某海域遭遇敌舰艇编队，我方指战员接到上级“重创敌舰艇编队”的作战命令后，结合敌我力量情况拟定作战计划。我方共有两型反舰导弹，其毁伤系数、对敌舰艇编队的突防概率、载弹量、单枚导弹体系贡献度如表 2—4 所示；敌舰艇编队由 3 个水面目标组成，各目标的威胁值(体系贡献度)如表 5<sup>[10-12]</sup>所示。

表 2 各型反舰导弹基本信息

指标名称	反舰导弹 a	反舰导弹 b
载弹量	9	12
经济价值/千万元	1.3	0.8
单枚导弹对反舰作战体系的体系贡献度	0.013	0.022

表 3 反舰导弹 a 的战术指标

指标名称	目标 1	目标 2	目标 3
毁伤系数	0.55	0.6	0.65
突防概率	0.42	0.28	0.33

表 4 反舰导弹 b 的战术指标

指标名称	目标 1	目标 2	目标 3
毁伤系数	0.65	0.5	0.6
突防概率	0.5	0.31	0.47

表 5 目标威胁值

指标名称	目标 1	目标 2	目标 3
威胁值(体系贡献度)	0.32	0.28	0.4

算法参数的选取依赖于多次调试，文中各参数的取值如表 6 所示。

表 6 算法参数

参数	取值	参数	取值
$\rho$	0.5	$M$	100
$\gamma$	0.5	$r_0$	2.5
$a_1$	0.4	$a_2$	0.6
$\tau_0$	1	$\kappa$	0.5

将每一个符合约束的火力分配方案编码得到一只萤火虫。参照笔者提出的方法，得到仿真结果如图 2 所示。由于萤火虫的聚类行为是受到高亮度萤火虫的吸引而发生的，而高亮度的萤火虫如果超过搜索范围，三类萤火虫无法相互吸引，就会产生萤火虫种群的分类。由图 2 可知，最优的萤火虫的适应度函数取值 0.233 023，对其解码得到  $A = (2, 3, 3, 3, 2, 3)$ 。综上所述，在重创敌舰队前提下，反舰导弹最小化弹药消耗火力分配方案为：反舰导弹 a 向目标 1 发射 2 枚，向目标 2 发射 3 枚，向目标 3 发射 3 枚，反舰导弹 b 向目标 1 发射 3 枚，向目标 2 发射 2 枚，向目标 3 发射 3 枚，最终能对敌舰艇编队造成 86.351% 的毁伤。

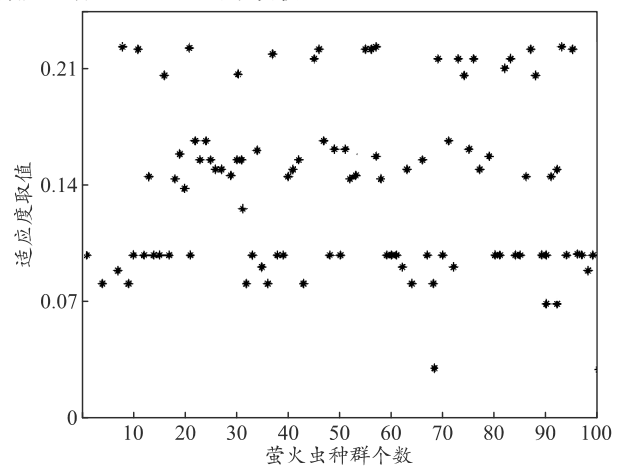


图 2 萤火虫算法收敛

#### 5 结论

笔者提出给定毁伤条件下最小弹药消耗优化模型，利用萤火虫算法出色的全局寻优性能进行模型解算。仿真实验结果证明：该算法收敛速度快，可以得出理想的火力优化配置方案，具有一定的时效性和可行性，可以为多型反舰导弹组合攻击海上目标的方案制定、演习训练提供参考，同时也可作为装备研制需求分析、技术指标确定提供技术支撑。

#### 参考文献：

[1] HASSANZADEH T, KANAN H R. FUZZY FA: A MODIFIED FIREFLY ALGORITHM[M]. Taylor & Francis, Inc. 2014:13-16.

性补偿函数的宽间隔跳频方法产生跳频图案。2 种跳频图案的跳频间隔分布和跳频频点分布分别如图 2 和图 3 所示。

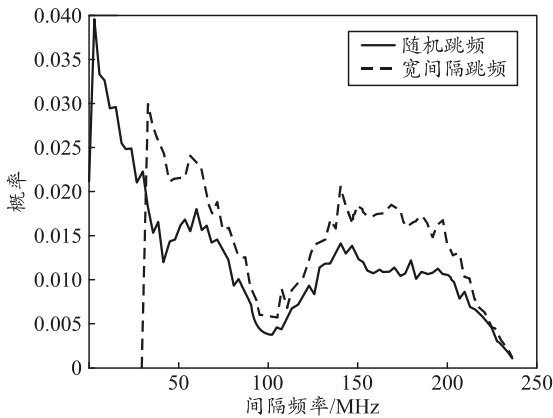


图 2 基于仿真的跳频间隔分布估计

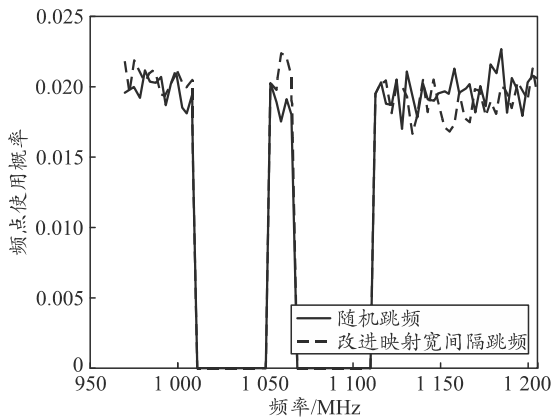


图 3 基于仿真的跳频选频分布估计

从仿真结果可见，笔者提出的方法可以得到频带约束条件下的宽间隔和均匀分布跳频图案。以 JTIDS 可用频段和跳频间隔约束为实验条件，相对无跳频间隔约束的随机跳频图案，其跳频间隔满足大于 30 MHz 的要求，并且频率能够达到较好的均匀特性。

### 3 结束语

笔者针对现有跳频图案生成方法存在的局限性，提出了一种跳频图案生成方法。该方法根据可用频带、跳频间隔和均匀性跳频图案的约束条件，计算获得均匀性补偿频点分布函数，然后根据当前频点和分布函数产生下一频点。文中方法生成的跳频图案在扩频通信系统中具有较强的实用价值。

### 参考文献:

[1] 邹磊. 跳频序列生成及其特性分析[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012.

[2] 杨光宣, 吴潜. 基于 m 序列宽间隔跳频图案设计[J]. 信息技术, 2010, 9(2): 1-3.

[3] 那丹彤, 赵维康. 跳频通信干扰与抗干扰技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 35-36.

[4] 张鸿儒. 构造宽间隔调频序列方法的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.

[5] 何维苗, 冯冈. 构造宽间隔跳频码序列的两种算法之比较[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2004, 5(4): 29-33.

\*\*\*\*\*

(上接第 11 页)

[2] YANG X S. Firefly Algorithm[M]. Engineering Optimization. John Wiley & Sons, Inc. 2010: 221-230.

[3] 王鹤淇, 王伟国, 郭立红, 等. 离散萤火虫算法的复杂装备测试点优化选择[J]. 光学精密工程, 2017, 25(5): 1357-1367.

[4] 刘畅, 刘利强, 张丽娜, 等. 改进萤火虫算法及其在全局优化问题中的应用[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2017, 38(4): 569-577.

[5] 潘晓英, 陈雪静, 李昂儒, 等. 基于自适应步长的萤火虫划分聚类算法[J]. 计算机应用研究, 2017(12): 3576-3579.

[6] 冯艳红, 刘建芹, 贺毅朝. 基于混沌理论的动态种群萤火虫算法[J]. 计算机应用, 2013, 33(3): 796-799.

[7] 刘长平, 叶春明. 具有混沌搜索策略的萤火虫优化算法[J]. 系统管理学报, 2013, 22(4): 538-543.

[8] 宋谢恩, 宋卫东, 赵成旺, 等. 混合目标火力分配及弹药消耗量求解方法[J]. 弹道学报, 2014(3): 37-41.

[9] 李元左, 杨晓段. 炮兵火力分配建模及优化方法[J]. 指挥控制与仿真, 2015(2): 48-52.

[10] 梁国强, 康宇航, 邢志川. 基于离散粒子群优化的无人机协同多任务分配[J]. 计算机仿真, 2018(2): 22-24.

[11] 姜青山, 郑保华, 郭利民. 遗传算法在舰艇编队防空火力分配中的应用[J]. 火力与指挥控制, 2005(S1): 180-182.

[12] 蔡怀平, 陈英武. 武器-目标分配(WTA)问题研究进展[J]. 火力与指挥控制, 2006, 31(12): 11-15.