

# 进攻战斗电子对抗兵力需求的三层规划模型

赵禄达<sup>1,\*</sup>, 王 斌<sup>1,2</sup>, 曾 威<sup>3</sup>

(1. 国防科技大学电子对抗学院, 安徽 合肥 230037; 2. 国防科技大学第三学科交叉中心, 安徽 合肥 230037; 3. 中国人民解放军 31680 部队, 四川 成都 610000)

**摘 要:** 为解决电子对抗兵力需求的作战预测问题, 估测合同战斗中不同作战阶段的兵力数量需求, 提升指挥作战效率与效果, 提出一种基于三层规划的电子对抗兵力需求模型。首先, 在详细分析陆上战术进攻战斗中电子对抗作战方式的基础上, 提出电子对抗规范交战模式。其次, 根据作战方式和作战阶段划分, 建立电子对抗兵力需求的三层规划模型。然后, 在使用模糊隶属度量化模型变量的基础上引入满意度函数算子, 通过遗传算法求解出各层最优满意度, 进而得到最优兵力需求。最后, 通过算例仿真, 得到 3 个不同作战阶段电子对抗的最优兵力需求, 并通过与 3 种多层规划求解算法的对比, 表明了所提算法的适用性和结果收敛的高效性。

**关键词:** 战术进攻战斗; 电子对抗; 兵力需求; 三层规划; 遗传算法

中图分类号: E 837; E 917

文献标志码: A

DOI:10.12305/j.issn.1001-506X.2021.06.14

## Three-level programming model of electronic countermeasures force requirements in offensive combat

ZHAO Luda<sup>1,\*</sup>, WANG Bin<sup>1,2</sup>, ZENG Wei<sup>3</sup>

(1. Electronics Engineering Institute, National University of Defence Technology, Hefei 230037, China;  
2. The Third Interdisciplinary Centre, National University of Defense Technology, Hefei 230037, China;  
3. Unit 31680 of the PLA, Chengdu 610000, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of operational prediction of electronic countermeasures force requirements, estimate the force quantity requirements in different operational stages of contract combat, and improve the efficiency and effect of command and operation, an electronic countermeasures force requirements model based on three-level programming is proposed. Firstly, based on the detailed analysis of the electronic countermeasures operation mode in the land tactical offensive combat, the standard engagement mode of electronic countermeasures is proposed. Secondly, according to the division of operation mode and operation stages, a three-level programming model of electronic countermeasures force requirements is established. Then, on the basis of using fuzzy membership degree to quantify the model variables, the satisfaction function operator is introduced to solve the optimal satisfaction of each level through genetic algorithm, and then the optimal force requirements is obtained. Finally, the optimal force requirements of electronic countermeasures in three different operation stages are obtained through the simulation of an example, and the applicability of the proposed algorithm and the convergence efficiency of the results are demonstrated by comparing with three kinds of multi-layer programming algorithms.

**Keywords:** tactical offensive combat; electronic countermeasures; force requirements; three-level programming; genetic algorithm

收稿日期:2020-08-21; 修回日期:2020-10-01; 网络优先出版日期:2021-02-03。

网络优先出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2422.TN.20210203.1132.040.html

基金项目:全军军事类研究生资助课题(JY2019C055);2020 年湖南省研究生科研创新项目(CX20200029)资助课题

\* 通讯作者。

引用格式:赵禄达, 王斌, 曾威. 进攻战斗电子对抗兵力需求的三层规划模型[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(6):1564-1571.

**Reference format:** ZHAO L D, WANG B, ZENG W. Three-level programming model of electronic countermeasures force requirements in offensive combat[J]. Systems Engineering and Electronics, 2021, 43(6):1564-1571.

## 0 引言

随着新时代智能化战争形态的加速演变,电子对抗已经成为战场上左右战争胜负的关键因素。电子对抗作战方式多样,在作战筹划过程中,确定各作战阶段电子对抗兵力需求对作战实施阶段具有实际运用价值,可在整个作战指挥过程中为各级指挥员提供指导性建议<sup>[1]</sup>。

针对兵力需求问题的求解,不少学者进行了深入研究并得到了较好的方法。文献[2—3]通过构建雷达对抗干扰网络模型,对作战双方交战过程进行排队建模,得到了雷达对抗网络的干扰站兵力需求算法。文献[4—5]对空中进攻作战中的电子对抗预警兵力、机载雷达对抗兵力和防辐射攻击兵力进行了交战建模,得出了以作战任务为牵引的兵力估算方法。文献[6]将 Lanchester 平方律中的交战系数引入电子对抗因子来描述防空作战过程,运用作战双方对抗模式得出防空兵力需求。文献[7]通过联合作战多兵种任务建模,运用任务规划的思路建立了联合兵力需求求解模型。文献[8]通过对重要目标对空防御过程的防空火力层进行分析,建立了拦截兵力的 Markov 链,进而概率求得其兵力需求。以上对兵力需求问题的求解,基本上是针对不同的作战任务、作战对象进行的具体建模,为特定作战行动的兵力需求求解提供了具体思路,但还存在以下几点不足:① 对电子对抗兵力需求的建模还停留在单一装备、单一任务的战术建模,与现阶段作战任务和要求严重脱节;② 以作战任务为背景的兵力需求求解没有考虑作战阶段对兵力需求的影响,对不同作战阶段作战目标、企图的变化研究不够深入;③ 对兵力需求规划模型的求解算法研究较少。

本文将以上陆上战术进攻电子对抗战斗为作战背景,深入分析合同战斗的作战阶段和不同作战阶段的电子对抗作战目标变化,在充分考虑电子对抗装备实际作战效能的基础上,建立分阶段的电子对抗兵力需求多层规划模型,并对多层规划的求解算法进行研究<sup>[9—19]</sup>,通过模糊数学理论将三层规划问题转化为单层线性规划问题,结合遗传算法求出兵力需求的最优解。

三层规划属于多层规划,而多层规划的基础是二层规划问题。由于多层规划各层的目标函数和约束条件均可能不同,使最终的解集满足每层约束条件的情况基本上是不存在的,而每层规划根据目标函数和约束条件的复杂程度不同也会组成一个 NP(Nondeterministic Polynomial) 难问题。为了解决多层规划最优解的求解问题,文献[9]在三层线性规划的模型基础上使用模糊相关性理论进行综合寻优,最终得出了比较好的折中最优解求解方法。文献[10]讨论了在所有优化层次内均存在连续变量和整数变量的情况,并通过数据并行算法对三层规划模型进行求解。文献[11—13]对传统求解双层规划的隶属度函数进行改进,利用抛物线型隶属度函数对多层规划问题得出了满意

解。在不同学科分支中,不少学者利用启发式算法求解多层规划问题,取得了很好的效果。文献[14—17]利用遗传—模拟退火算法相结合,拆分求解多层规划模型,得到了很好的解集收敛性。文献[18]使用粒子群算法求解单层目标,通过改进的理想解相似排序技术(technique for order preference similarity to ideal solution, TOPSIS)对各层满足约束的解集进行综合排序,取排序最优的解集为多层规划最优解集。文献[19—22]分别对多层规划中各层和总体解使用遗传算法,并采用遗传算法对解集进行迭代评价,得到了最优 Pareto 解集。文献[23—25]使用模糊目标规划,将目标函数和约束等效为线性模糊约束,再使用启发式算法对模型进行求解。

本文建立了电子对抗兵力需求的三层规划模型,结合文献[11—13]中求解多层规划的模糊隶属度方法,运用遗传算法对三层目标进行 Pareto 优化。

## 1 基本作战背景和作战方式

目前,战术级电子对抗力量按照作战目标类别主要分为战术通信网干扰力量、战场火控雷达及探测雷达干扰力量、机载多功能雷达干扰力量和精确制导干扰力量 4 种类型,其频率涵盖超短波、微波、毫米波、红外和激光的波段范围。通常以同步随扰、机动支援的行动方式,支援旅各战斗群联队作战行动,掩护旅重要目标对空安全。

战术电子对抗力量规模有限、使用灵活,在合同进攻战斗中一般集中运用于合成部队主要进攻方向,以同步机动、随队干扰等形式,围绕主要战斗行动和核心要害目标提供直接支援和掩护,在上级和友邻的电子对抗支援下,夺取战场电磁优势,紧密配合兵力火力行动,电火一体达到作战目的<sup>[23]</sup>。大致可分为以下 4 个阶段:① 火力准备时,战术通信网干扰力量隐蔽抵近,及时侦获对方指挥协同和火力引导通信,重点压制对方反击火力引导;② 前沿突破时,重点压制对方指挥协同和阻拦火力引导通信,战场火控雷达及探测雷达干扰力量重点监控突击方向对方战场侦察雷达活动情况,发现目标立即干扰,机载多功能雷达干扰力量和精确制导干扰力量伴随装甲攻击群发起冲击,提供随队干扰掩护;③ 防御反击时,战术通信网干扰力量和战场火控雷达及探测雷达干扰力量就近占领有利地形,重点压制对方预备队指挥协同通信和浅近纵深战场侦察雷达,机载多功能雷达干扰力量和精确制导干扰力量在抗击阵地附近占据有利地形,防御精确武器打击;④ 分区歼控时,战术通信网干扰力量应加强对战场超短波通信目标侦察,尽可能压缩干扰带宽,为分区歼控行动的指挥协同通信让出频段,战场火控雷达及探测雷达干扰力量在安全区域内尽量前出,监测对方纵深内空中雷达活动情况,为分区歼控行动加强对空预警,机载多功能雷达干扰力量和精确制导干扰力量适当收缩至炮阵地和装甲集群附近,增强安全掩护<sup>[24]</sup>。

在以上几个作战阶段中,防御反击和分区歼控阶段作战区域基本均处于对方防御纵深,我方电子对抗兵力需求会随着对方电子目标的干扰价值变化划分为 3 个不同阶段,即按照对方防御区域划分为防御前沿阶段、重点防御区域阶段和防御纵深阶段。电子对抗力量和对方电子目标在不同阶段的态势图如图 1 所示(对方电子目标数量和类型在图中只是示意表示,实际中的数量和类型一般多于图中情况)。由于对方电子目标属性(种类、抗干扰特性等)不尽相同,我方电子对抗装备对其实施干扰也会存在效果差异,这就需要我方在现有电子对抗兵力规模的基础上合理运用,确定恰当的兵力规模。

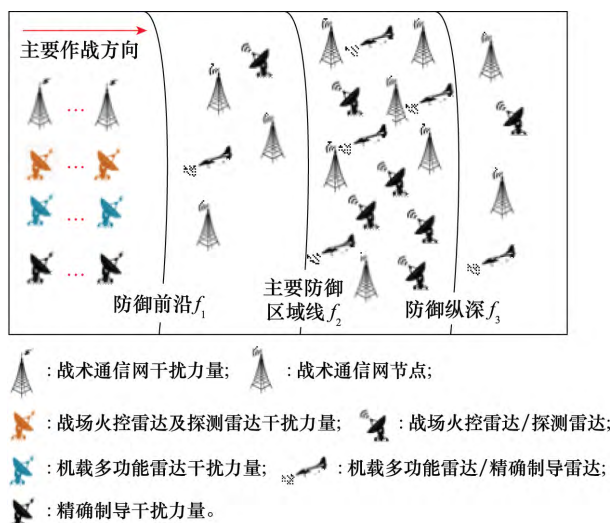


图 1 双方态势图

Fig. 1 Situation map of both side

## 2 兵力需求规划模型构建

### 2.1 模型背景与假设

经过电子对抗作战方式的分析可以得出以下结论:①随着作战阶段的变化,我方电子对抗所面临的干扰电子目标任务也会发生变化;②在建立兵力需求模型时需考虑我方电子对抗力量的损耗问题(被对方硬摧毁或装备自身出现故障)。将合同作战中对方的 3 个阶段防御线用  $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$  表示,为便于分析建模,提出以下假设条件:

(1) 我方在本次作战行动中,按照电子对抗部队装备编制投入了一定数量的电子对抗兵力,以保证指挥员的作战筹划。并且,在作战区域内电子对抗兵力对方电子目标有一定的干扰能力。经先期侦察,结合平时的情报搜集,对方电子目标信息可基本推知;

(2) 在实施电子干扰时,不同类型的电子对抗装备只能干扰压制对应类型的多个电子目标,干扰装备于电子目标为“一对多”的情况;

(3) 模型在建立时需要考虑对方电子反对抗的因素,但为了使其简洁明了,采取定性分析与定量分析相结合的方法,进行宏观的描述;

(4) 我方电子对抗兵力对方电子目标实施干扰时需严格按照干扰规则,即在每一个作战阶段完成且只完成干扰能力范围内和战前预分配的作战任务<sup>[25]</sup>。

### 2.2 根据作战阶段划分建立兵力需求模型

经先期侦察,设对方电子目标共有  $M$  类,其中在第  $k$  个作战阶段( $k=1,2,\dots,3$ ),第  $j$  ( $j=1,2,\dots,M$ ) 类目标数量及单个目标干扰价值分别为  $n_j^{(k)}$  和  $e_j^{(k)}$ ,则每个作战阶段的目标总体干扰价值为

$$E_{\text{total}}^{(k)} = \sum_{j=1}^M n_j^{(k)} e_j^{(k)} \quad (1)$$

此处的作战目标价值一般依据作战体系,考虑的因素包括目标威胁程度、目标重要程度、目标可干扰程度等,在此基础上将不同目标的相关因素进行量化,聚合成目标干扰价值。目前这一问题的解决办法有前景值理论<sup>[26]</sup>、动态贝叶斯网络法<sup>[27]</sup>、改进的 TOPSIS<sup>[28]</sup> 等综合指标评价法。由于此部分内容较多,限于篇幅,本文在讨论模型时,将  $e_j^{(k)}$  直接给出,不进行详细求解。

根据上文划分的作战区域和作战阶段,建立的电子对抗兵力三层规划模型为

第一层:

$$\begin{aligned} \min Z_1 &= \sum_{i=1}^N x_{i1} \\ \text{s. t. } g_1^{(k)}, g_2^{(k)}, \dots, g_m^{(k)} &\leq 0 \quad (k=1) \end{aligned} \quad (2)$$

第二层:

$$\begin{aligned} \min Z_2 &= \sum_{i=1}^N x_i - \sum_{i=1}^N x_{i1} \\ \text{s. t. } g_1^{(k)}, g_2^{(k)}, \dots, g_m^{(k)} &\leq 0 \quad (k=2) \end{aligned} \quad (3)$$

第三层:

$$\begin{aligned} \min Z_3 &= \sum_{i=1}^N x_i - \sum_{i=1}^N x_{i1} - \sum_{i=1}^N x_{i2} \\ \text{s. t. } g_1^{(k)}, g_2^{(k)}, \dots, g_m^{(k)} &\leq 0 \quad (k=3) \end{aligned} \quad (4)$$

式中,目标函数为  $N$  类电子对抗装备数量之和; $x_{ik}$  ( $k=1,2,3$ ) 为电子对抗兵力决策变量,表示对第  $f_k$  道防御线区域的电子目标实施干扰压制的第  $i$  种电子对抗装备数量; $x_i$  为整个作战行动中的第  $i$  种电子对抗总兵力数量。求解目标是以最少的电子对抗装备数量贯彻上级作战决心、达成作战企图。约束条件用  $g_1^{(k)}, g_2^{(k)}, \dots, g_m^{(k)} \leq 0$ , ( $k=1,2,3$ ) 表示,具体包括:

$$(1-\beta) \frac{E_{\text{total}}^{(k)}}{E_{\text{total}}} \geq \epsilon_{\text{prep}}^{(k)} \quad (5)$$

$$I_{ik} x_{ik} (1-H_{ki}) p_i (1-\beta) C_{ij} \geq N_{\text{success}}^{(k)} \quad (6)$$

$$\alpha_k \sum_{i=1}^N x_{ik} \leq N_{\text{destory}}^{(k)} \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^N x_i \leq \sum_{i=1}^N x_i^{\text{total}} \quad (8)$$

$$x_{ik} \quad (k=1,2,3) \in N^+ \quad (9)$$

其中,式(5)表示各个作战阶段中,对方电子目标产生的干扰价值不低于战前的预期比例值  $\epsilon_{\text{prep}}^{(k)}$ ;  $\beta$  表示对方采用反

电子对抗措施后使我方电子装备干扰能力降低的系数,此系数由相关人员根据实际情况以及以往的统计规律确定。

$$E^{(k)} = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N I_{ik} x_{ik} (1 - H_{ki}) C_{ij} e_j \quad (10)$$

式中,  $I_{ik}$  表示电子对抗干扰压制能力(以干扰目标数量进行表征),具体指第  $i$  种电子对抗装备有效干扰对方第  $f_k$  道防御线区域的电子目标数量,我方对其实施干扰压制的效果取决于  $I_{ik}$  与  $x_{ik}$  的乘积;  $C_{ij}$  表示一台第  $i$  种电子对抗装备的干扰能力(成功干扰对方  $j$  类电子目标数量);  $H_{ki}$  表示对方第  $f_k$  道防御线被突破前电子目标对我第  $i$  种电子对抗装备的抗干扰能力,可根据不同类型电子对抗装备的实际干扰能力与对方采取抗干扰措施后的能力比值进行确定,本文不做具体求解,  $H_{ki} \in [0, 1]$ ;  $x_{ik}$  为电子对抗兵力决策变量,表示对第  $f_k$  道防御线区域的电子目标实施干扰压制的第  $i$  种电子对抗装备数量。

式(6)表示各个作战阶段中对对方电子目标实施成功干扰的数量不低于战前预期值  $N_{\text{success}}^{(k)}$ ,  $p_i$  为电子对抗装备的生存概率,  $p_i = \prod_{k=1}^3 (1 - \alpha_k)$ ,  $\alpha_k$  表示电子对抗装备损失率。

式(7)表示电子对抗装备的损失率不高于战前预期值  $N_{\text{destory}}$ 。

式(8)表示整个作战行动中的电子对抗总兵力不超过投入作战的电子对抗建制单位全部种类的编制装备总数量  $\sum_{i=1}^N x_i^{\text{total}}$ , 其中  $x_i^{\text{total}}$  表示第  $i$  种电子对抗装备的编制数量。式(7)表示决策变量的正整数约束。

### 3 三层规划模型求解算法

本文建立的电子对抗兵力需求三层规划模型如式(2)~式(4)所示,结合文献[11-13]中求解多层规划的模糊隶属度方法,运用遗传算法对三层目标进行 Pareto 优化,具体算法步骤如下。

**步骤1** 分别解出每层的最优解。由于三层规划的上、中、下层均为线性规划,在小规模规划中可使用传统图解法进行求解;在大规模规划问题时使用遗传算法进行求解,解得的每层最优解记为  $(x_{1k}^*, x_{2k}^*, \dots, x_{Nk}^*)$ ,  $(x_{1k}^{z_2}, x_{2k}^{z_2}, \dots, x_{Nk}^{z_2})$ ,  $(x_{1k}^{z_3}, x_{2k}^{z_3}, \dots, x_{Nk}^{z_3})$ , 若三者相等,则得到电子对抗兵力需求的最优解,若每层的最优解不相等,转到步骤2。

**步骤2** 对每层规划中的目标函数和决策变量进行隶属度函数值确定。将每层目标函数取相反数,即为  $\max Z_k = \sum_{i=1}^N x_{ik}$ , 则第  $k$  层的目标隶属度为

$$\mu(Z_k) = \begin{cases} 0, & Z_k \leq Z_k^{\min} \\ \frac{Z_k - Z_k^{\min}}{Z_k^{\max} - Z_k^{\min}}, & Z_k^{\min} < Z_k < Z_k^{\max} \\ 1, & Z_k \geq Z_k^{\max} \end{cases} \quad (11)$$

设容忍度为  $t_k$ , 则第  $k$  层的决策变量均会在  $[x_{(k-1)k}^{z_{k-1}}, t_k, x_{(k-1)k}^{z_{k-1}} + t_k]$  范围内进行最优解搜索,其隶属度表示为

$$\mu(x_k) = \begin{cases} \frac{x_k - (x_{(k-1)k}^{z_{k-1}} - t_k)}{t_k}, & x_{(k-1)k}^{z_{k-1}} - t_k \leq x_k < x_{(k-1)k}^{z_{k-1}} \\ \frac{(x_{(k-1)k}^{z_{k-1}} + t_k) - x_k}{t_k}, & x_{(k-1)k}^{z_{k-1}} \leq x_k \leq x_{(k-1)k}^{z_{k-1}} + t_k \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

**步骤3** 定义各层的满意度变量  $\lambda^k$ , 将三层规划转化为优化满意度变量的单层线性规划。具体流程如图2所示。

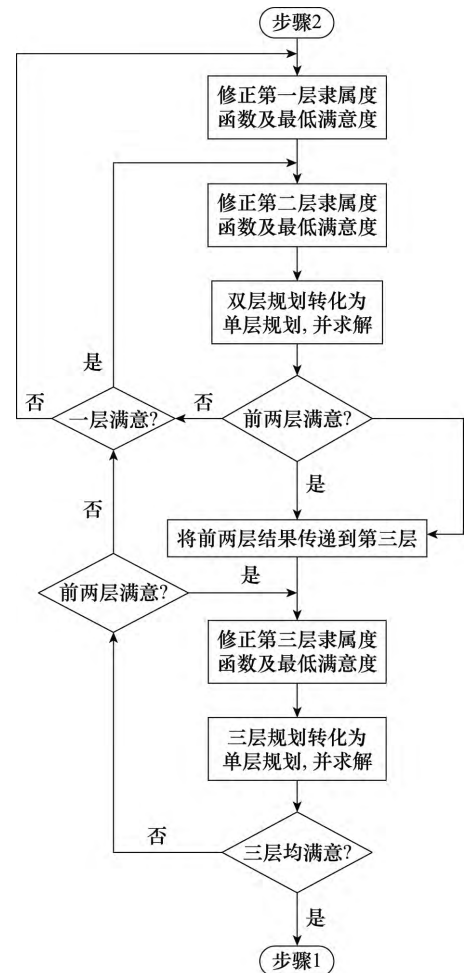


图2 步骤3流程图

Fig. 2 Step3 flow chart

如图2所示,通过各层的满意值进行解的传递,由第一层向第二层传递满意值时,  $\lambda = \min\{\mu(Z_1), \mu(Z_2), \mu(x_1)\}$ , 由第二层向第三层传递满意值时,  $\lambda = \min\{\mu(Z_1), \mu(Z_2), \mu(Z_3), \mu(x_1), \mu(x_2)\}$ 。运用最大最小化原则<sup>[29-30]</sup>,将其作为最大化目标值,替换第三层规划模型目标函数,如式(12)所示,求解即可得到最终的均衡满意度  $\lambda$ 。

$$\begin{aligned} & \max \lambda \\ \text{s. t. } & \begin{cases} \mu(Z_1), \mu(Z_2), \mu(Z_3), \mu(x_1), \mu(x_2) \geq \lambda \\ g_1^{(k)}, g_2^{(k)}, \dots, g_m^{(k)} \leq 0, k = 3 \\ \lambda \in [0, 1] \end{cases} \end{aligned} \quad (13)$$

步骤 4 利用遗传算法对步骤 3 中的满意度规划模型进行求解,将隶属度函数作为种群进行二进制编码,满意度值作为适应度函数值,进行选择、交叉、变异运算,得出最优满意度值和最优 Pareto 解集。若最优满意度值无法达到三层满意度值要求,返回步骤 2,修改隶属度函数;若满足要求,求解结束,得到最优兵力需求。

## 4 实例分析与仿真

### 4.1 想定背景

本次战术进攻战斗我方拥有  $N=4$  种电子对抗装备,分别干扰对方战术通信网、战场火控雷达及探测雷达、机载多功能雷达和精确制导系统,由于编制产生的数量约束分别为 30、20、20、30。对方共有 10 种类型的电子目标,①~⑩分别为炮兵指挥通信网、地空指挥协同网、空空指挥协同网、警戒分队指挥通信、前沿防御阵地指挥通信网、防御重点区域指挥通信网、纵深指挥通信网、机载多功能雷达、战场侦察雷达以及精确制导武器。对方不同作战阶段电子目标数量  $n_j^{(k)}$  如表 1 所示。

表 1 不同作战阶段对方电子目标数量

Table 1 Numbers of electronic target of opposite party in different combat stages

作战阶段	M									
阶段	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
$k=1$	5	10	6	5	6	12	8	6	3	20
$k=2$	3	8	5	0	1	11	8	5	2	16
$k=3$	1	4	4	0	0	4	6	4	2	5

各个阶段不同类型的电子目标及其干扰价值  $e_j^{(k)}$  如图 3 所示。其中,①~⑩含义同表 1。

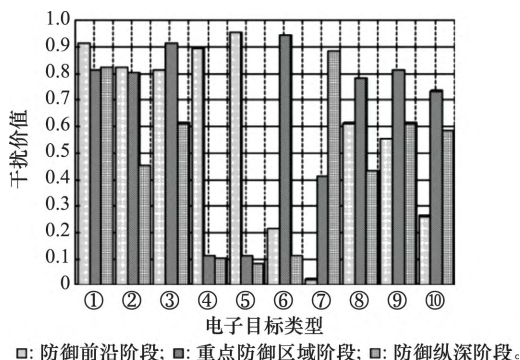


图 3 3 个作战阶段对方电子目标的干扰价值

Fig. 3 Jamming value of electronic target of opposite party in the three combat stages

干扰能力  $c_{ij}$  如表 2 所示。对方电子目标的抗干扰能力在 3 条防御线被突破时的系数  $H_{ki}$  如表 3 所示。电子对抗装备的电子对抗干扰压制系数  $I_{ik}$  如表 4 所示。

表 2 电子对抗装备的干扰能力

Table 2 Jamming ability of electronic countermeasures equipment

i	j									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	4	2	2	5	3	5	5	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0
3	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5

表 3 对方电子目标的抗干扰能力系数

Table 3 Anti-jamming ability coefficient of opposite party electronic target

j	f		
	1	2	3
1	0.25	0.14	0.08
2	0.26	0.25	0.26
3	0.12	0.11	0.12
4	0.09	0	0
5	0.10	0.01	0
6	0.18	0.10	0.05
7	0.20	0.15	0.09
8	0.12	0.11	0.12
9	0.23	0.21	0.22
10	0.15	0.15	0.16

表 4 电子对抗装备的电子对抗干扰压制系数

Table 4 Electronic countermeasures interference suppression coefficient of electronic countermeasures equipment

防御线	i			
	1	2	3	4
$f=1$	40	4	2	15
$f=2$	21	3	2	10
$f=3$	9	2	2	4

每个阶段预期成功干扰对方电子目标数量分别为 60、25、18,电子对抗装备的生存概率为 0.95,对方采用反电子对抗措施系数  $\beta=0.01$ 。

### 4.2 模型求解与分析

将想定数据带入建立好的电子对抗兵力需求模型,得到三层规划模型分为

第一层:

$$\begin{aligned} \min Z_1 &= \sum_{i=1}^3 x_{i1} \\ \text{s. t. } & \begin{cases} (1-\beta) \frac{E^{(1)}}{E_{\text{total}}^{(1)}} \geq \epsilon_{\text{prep}}^{(1)} \\ I_{i1} x_{i1} (1-H_{i1}) p_i (1-\beta) C_{ij} \geq N_{\text{success}}^{(1)} \\ \alpha_1 \sum_{i=1}^N x_{i1} \leq N_{\text{destry}}^{(1)} \\ \sum_{i=1}^N x_i \leq \sum_{i=1}^N x_i^{\text{total}} \\ x_{i1} \in N^+, i=1,2,3 \end{cases} \end{aligned} \quad (14)$$



第二层:

$$\begin{aligned} \min Z_2 &= \sum_{i=1}^N x_i - \sum_{i=1}^N x_{i1} \\ \text{s. t. } &\begin{cases} (1-\beta) \frac{E^{(2)}}{E_{\text{total}}^{(2)}} \geq \epsilon_{\text{prep}} \\ I_{i2} x_{i2} (1-H_{2i}) p_i (1-\beta) C_{ij} \geq N_{\text{success}}^{(2)} \\ \alpha_2 \sum_{i=1}^N x_{i2} \leq N_{\text{destory}}^{(2)} \\ \sum_{i=1}^N x_i \leq \sum_{i=1}^N x_i^{\text{total}} \\ x_{i2} \in N^+, i=1,2,3 \end{cases} \end{aligned} \quad (15)$$

第三层:

$$\begin{aligned} \min Z_3 &= \sum_{i=1}^N x_i - \sum_{i=1}^N x_{i1} - \sum_{i=1}^N x_{i2} \\ \text{s. t. } &\begin{cases} (1-\beta) \frac{E^{(3)}}{E_{\text{total}}^{(3)}} \geq \epsilon_{\text{prep}} \\ I_{i3} x_{i3} (1-H_{3i}) p_i (1-\beta) C_{ij} \geq N_{\text{success}}^{(3)} \\ \alpha_3 \sum_{i=1}^N x_{i3} \leq N_{\text{destory}}^{(3)} \\ \sum_{i=1}^N x_i \leq \sum_{i=1}^N x_i^{\text{total}} \\ x_{i3} \in N^+, i=1,2,3 \end{cases} \end{aligned} \quad (16)$$

仿真上述模型的环境为 CPU:i7-8850H,16.0 GB RAM, 操作系统: Windows10, 仿真实验工具为 Matlab R2018a。

对模型中每层进行规划求解, 将结果带入式(10), 得到每一层的目标隶属度函数分别为

$$\mu(Z_1) = \begin{cases} 0, Z_1 \leq 0 \\ \frac{Z_1(x)}{63}, 0 < Z_1 \leq 63 \end{cases} \quad (17)$$

$$\mu(Z_2) = \begin{cases} 0, Z_2 \leq 0 \\ \frac{Z_2(x)}{45}, 0 < Z_2 \leq 45 \end{cases} \quad (18)$$

$$\mu(Z_3) = \begin{cases} 0, Z_3 \leq 0 \\ \frac{Z_3(x)}{19}, 0 < Z_3 \leq 19 \end{cases} \quad (19)$$

设 3 个决策变量的容忍度范围分别为:  $t_1=12, t_2=8, t_3=4$ , 其隶属度函数分别为

$$\mu(x_1) = \frac{21-x_1}{12}, 9 < x_1 \leq 21 \quad (20)$$

$$\mu(x_2) = \frac{11-x_2}{8}, 3 < x_2 \leq 11 \quad (21)$$

$$\mu(x_3) = \frac{7-x_3}{4}, 3 < x_3 \leq 7 \quad (22)$$

最终得到此次进攻战斗中电子对抗的各阶段兵力与干扰的电子目标对应关系如图 4 所示。图 4 中, 横坐标  $j=1, 2, \dots, 10$  分成 3 段表示每个不同类型的电子目标在 3 个阶段被有效干扰的数量; 纵坐标每格表示一台不同类型的电子对抗装备, 分别以黄色、绿色、蓝色和橙色代表 4 种类型的电子对抗装备在不同作战阶段有效干扰对方电子目标数量, 黑色表示装备的损失。

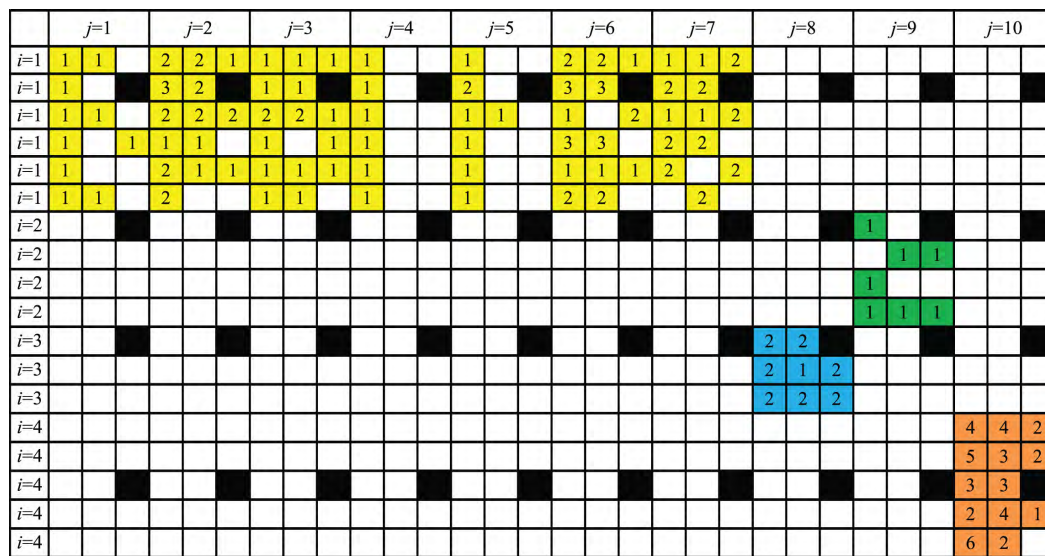


图 4 电子对抗的各阶段兵力与干扰的电子目标对应关系甘特图

Fig. 4 Gantt chart of the correspondence between the forces of each stage of the electronic countermeasures and the jamming electronic targets

求解单层线性规划的遗传算法参数设置如下: 种群规模为 100 (二进制编码), 第一层最大迭代次数为 200, 第二层最大迭代次数为 150, 第三层最大迭代次数为 150, 变异概率为 0.2, 交叉概率为 0.6。以求解迭代次数和干扰价值  $\sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N I_{ik} x_{ik} (1-H_{ki}) C_{ij} e_j$  作为影响

目标函数的因素进行迭代曲线的绘制, 结果如图 5 所示。可以看出, 在迭代到达 180 次左右时电子对抗干扰价值到达最大, 目标函数基本到达最优值。模型隶属度函数、满意度值以及目标函数值在 3 层优化中的变化如表 5 所示。

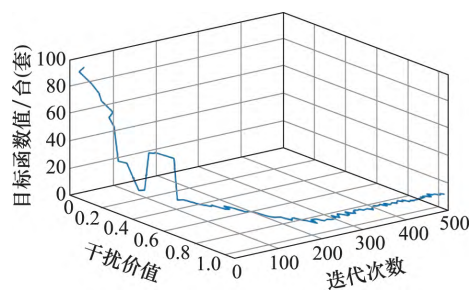


图 5 模型求解的迭代曲线

Fig. 5 Iterative curve of model solution

表 5 模型优化参数变化结果

Table 5 Change result of model optimization parameters

优化层	$\mu(Z_1)$	$\mu(Z_2)$	$\mu(Z_3)$	$\lambda$	$\sum_{i=1}^3 x_{ik}$ 台(套)
$k=1$	0.834 7	0.610 5	0.612 1	0.903 5	25
$k=2$	0.932 3	0.596 5	0.596 5	0.601 2	21
$k=3$	0.942 0	0.624 3	0.617 6	0.213 8	18

可以看出,3层优化的过程中满意度值在变小,这是各层最优值在约束条件下博弈的结果。但隶属度函数呈现先降后升的态势,显示出满意度保持在合理水平范围内,且电子对抗兵力得到了合理优化,表明了模型算法的可行性。

将本文求解三层规划算法与文献[7]的全局最优搜索法、文献[10]的模拟退火算法和文献[12]的粒子群算法进行算法性能比较,给出目标函数每次迭代结果的平均值、方差、标准差以及 CPU 平均运行时间,最优值使用加粗字体,如表 6 所示。

表 6 算法性能比较结果

Table 6 Algorithm performance comparison results

算法	目标函数 平均值/台(套)	方差	标准差	平均运行 时间/s
文献[7]	39.12	0.015	0.01	215
文献[10]	28.75	0.005	0	102
文献[12]	20.96	0.004	0	91
本文算法	19.88	0.004	0	92

本文算法在目标函数平均值、方差、标准差 3 个结果上均为最优,在 CPU 平均运行时间上与文献[12]算法相差 1 s。总体来说,本文算法性能较好,对本文模型求解具有很好的收敛结果和收敛速度。

## 5 结 论

本文以合同作战为背景,从电子对抗在合同作战中的运用方式入手,建立不同作战阶段下的电子对抗兵力需求三层规划求解模型,此模型着重突出电子对抗作战在目标选择上的特点。在模型求解上,引入满意度函数作为各层的传递参数,结合遗传算法求解出电子对抗兵力需求的最优值。经过实例仿真与结果对比分析,表明了本文模型求

解方法的可行性和优越性,为战术行动中电子对抗兵力需求预测提供了科学的理论依据,可实际指导合成指挥员和电子对抗指挥员的指挥决策,有较大的理论意义和实际价值。

## 参考文献

- [1] 全军军事委员会. 中国人民解放军军语[M]. 北京: 军事科学出版社, 2011.  
Military Committee of the Army. Military language of the Chinese People's Liberation Army[M]. Beijing: Military Science Press, 2011.
- [2] 周敬博, 胡波, 魏元, 等. 网络雷达对抗系统综合兵力需求优化研究[J]. 现代雷达, 2015, 37(5): 11-16.  
ZHOU J B, HU B, WEI Y, et al. Research on the optimization of comprehensive force requirements of network radar countermeasure system[J]. Modern Radar, 2015, 37(5): 11-16.
- [3] 周敬博, 胡波, 徐鸿羽. 网络雷达对抗系统雷达探测兵力需求优化研究[J]. 火力与指挥控制, 2015, 40(10): 60-64, 68.  
ZHOU J B, HU B, XU H Y. Research on optimization of radar detection force requirements of network radar countermeasure system[J]. Fire Power and Command Control, 2015, 40(10): 60-64, 68.
- [4] 章桂永, 胡波, 卢业华. 空中进攻作战电子对抗兵力需求分析[J]. 舰船电子对抗, 2011(1): 46-48.  
ZHANG G Y, HU B, LU Y H. Analysis of electronic warfare force requirements for air offensive operations[J]. Ship Electronic Warfare, 2011(1): 46-48.
- [5] 苗李达, 王宗杰, 孙守福. 武装直升机编队对地攻击兵力需求计算模型研究[J]. 指挥控制与仿真, 2017, 39(3): 16-18, 26.  
MIAO L D, WANG Z J, SUN S F. Research on calculation model of ground attack force requirement for armed helicopter formation[J]. Command Control and Simulation, 2017, 39(3): 16-18, 26.
- [6] 马新星, 滕克难, 侯学隆. 海军要地防空兵力需求分析[J]. 兵工自动化, 2019, 38(1): 64-68.  
MA X X, TENG K N, HOU X L. Analysis of the demand for air defense forces in important naval areas[J]. Ordnance Industry Automation, 2019, 38(1): 64-68.
- [7] 潘俊杰, 许瑞明, 刘双双. 基于决策偏好的联合火力打击兵力需求优化方法[J]. 指挥控制与仿真, 2018, 40(5): 24-26.  
PAN J J, XU R M, LIU S S. Joint fire strike force demand optimization method based on decision preference[J]. Command Control and Simulation, 2018, 40(5): 24-26.
- [8] 马新星, 滕克难, 侯学隆. 岛礁防空兵力需求分析[J]. 指挥控制与仿真, 2017, 39(2): 1-4.  
MA X X, TENG K N, HOU X L. Analysis of the demand for air defense forces on islands and reefs[J]. Command Control and Simulation, 2017, 39(2): 1-4.
- [9] 张艳芬. 多层线性规划过程折中最优解计算方法研究[J]. 兰州文理学院学报(自然科学版), 2020, 34(4): 23-27.  
ZHANG Y F. Study on the computational method of the compromise optimal solution in the multi-level linear programming process[J]. Journal of Lanzhou University of Arts and Science

- (Natural Science Edition), 2020, 34(4): 23—27.
- [10] SEYED P P, REZA T M, REZA B, et al. Designing a model for service facility protection with a time horizon based on tri-level programming[J]. *Engineering Optimization*, 2020, 52(1): 90—105.
- [11] AVRAAMIDOU S, PISTIKOPOULOS E N. Multi-parametric global optimization approach for tri-level mixed-integer linear optimization problems[J]. *Journal of Global Optimization*, 2019, 74(3): 443—465.
- [12] CHEN Y Z, CHENG X, LI J, et al. A multi-level programming for shale gas-water supply chains accounting for tradeoffs between economic and environmental concerns[J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2020, 135(6): 89—100.
- [13] SUVASIS N, AKSHAY O. On multi-level multi-objective linear fractional programming problem with interval parameters[J]. *Rairo-Operations Research*, 2019, 53(5): 1601—1616.
- [14] ZHOU J, WAN F Y, WEN L. Derivation of tri-level programming model for multi-reservoir optimal operation in inter-basin transfer-diversion-supply project[J]. *Water Resources Management*, 2017, 31(1): 479—494.
- [15] 汤莲花, 徐行方. 基于双层规划的市郊轨道交通多交路快慢车开行方案优化研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2018, 18(3): 152—159.
- TANG L H, XU X F. Study on the optimization of the fast and slow train operation plan of suburban rail transit based on two-level planning[J]. *Transportation System Engineering and Information*, 2018, 18(3): 152—159.
- [16] ALBERTO B, ANDREA D L, ERIC M, et al. Multi-level diversity promotion strategies for grammar-guided genetic programming[J]. *Applied Soft Computing Journal*, 2019, 83: 105599.
- [17] 邓堃尧, 郑洁云, 陈旷, 等. 考虑可靠性及电压稳定性的主动配电网多目标分层规划[J]. *电力科学与技术学报*, 2018, 33(4): 3—12.
- DENG Y P, ZHENG J Y, CHEN K, et al. Multi-objective hierarchical planning of active distribution network considering reliability and voltage stability[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2018, 33(4): 3—12.
- [18] LIU X, ZHENG J, FU J, et al. Multi-level optimization of maintenance plan for natural gas pipeline systems subject to external corrosion[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2018, 50: 64—73.
- [19] BUDHI G S, CHIONG R, DHAKAL S. Multi-level particle swarm optimisation and its parallel version for parameter optimisation of ensemble models: a case of sentiment polarity prediction[J]. *Cluster Computing*, 2020, 23(4): 3371—3386.
- [20] KASSA S M, HAILA Y T. An iterative method for tri-level quadratic fractional programming problems using fuzzy goal programming approach[J]. *Journal of Industrial Engineering International*, 2018, 14(2): 255—264.
- [21] 林君灿, 贾高伟, 侯中喜. 异构 UAV 编队反雷达作战中任务分配方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2018, 40(9): 1986—1992.
- LIN J C, JIA G W, HOU Z X. Task assignment method in heterogeneous UAV formation anti-radar operations[J]. *System Engineering and Electronic Technology*, 2018, 40(9): 1986—1992.
- [22] INDRANI M, TARNI M, SURAPATI P. Neutrosophic goal programming strategy for multi-level multi-objective linear programming problem[J]. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 2019, 11: 3175—3186.
- [23] 樊松, 沈楠, 张成刚. 陆军合成旅山地进攻作战电子对抗战术计算要素探析[J]. *飞航导弹*, 2017(2): 48—51.
- FAN S, SHEN N, ZHANG C G. Analysis on the calculation elements of electronic countermeasures tactics of the army's synthetic brigade mountain offensive operations[J]. *Flying Missile*, 2017(2): 48—51.
- [24] 韩春久. 电子对抗兵作战指挥学[M]. 北京: 军事科学出版社, 2010.
- HAN C J. *Electronic warfare forces combat command*[M]. Beijing: Military Science Press, 2010.
- [25] 于森, 杜正军, 孙晓明, 等. 基于改进规范交战模式的作战态势评估方法[J]. *装备学院学报*, 2013(5): 124—128.
- YU M, DU Z J, SUN X M, et al. Combat situation assessment method based on improved standard engagement mode[J]. *Journal of the Academy of Equipment*, 2013(5): 124—128.
- [26] 奚之飞, 徐安, 寇英信, 等. 基于前景理论的空战目标威胁评估[J]. *兵工学报*, 2020, 41(6): 198—210.
- XI Z F, XU A, KOU Y X, et al. Target threat assessment in air combat based on prospect theory[J]. *Acta Armamentarii*, 2020, 41(6): 198—210.
- [27] 孙海文, 谢晓方, 孙涛, 等. 基于 DDBN-Cloud 的舰艇编队航空目标威胁评估方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2018, 40(11): 2466—2475.
- SUN H W, XIE X F, SUN T, et al. DDBN-Cloud-based threat assessment method for aircraft fleet aviation targets[J]. *System Engineering and Electronic Technology*, 2018, 40(11): 2466—2475.
- [28] 徐宇恒, 程嗣怡, 周一鹏, 等. 基于 Shapely-Topsis 的辐射源威胁评估[J]. *空军工程大学学报(自然科学版)*, 2020, 21(2): 91—96.
- XU Y H, CHENG S Y, ZHOU Y P, et al. Radiation source threat assessment based on Shapely-Topsis[J]. *Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition)*, 2020, 21(2): 91—96.
- [29] AVRAAMIDOU S, PISTIKOPOULOS E N. A multi-parametric optimization approach for bilevel mixed-integer linear and quadratic programming problems[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2019, 125(9): 98—113.
- [30] HAWAF A O E, EMAM A A, ABD E M. Architecting a fully fuzzy information model for multi-level quadratically constrained quadratic programming problem[J]. *Opsearch*, 2019, 56(2): 367—389.

## 作者简介

赵禄达(1992—),男,硕士研究生,主要研究方向为军事运筹、进化优化、电子对抗建模仿真、电子对抗效能评估等。

王 斌(1977—),男,副教授,硕士研究生导师,博士,主要研究方向为作战运筹、效能评估、建模与仿真等。

曾 威(1993—),男,工程师,本科,主要研究方向为电子对抗作战指挥、合同进攻战斗战术等。