doi: 10.7690/bgzdh.2023.08.010

基于模糊多目标决策理论的拦截优化问题

车国帅[1]，戚振东[1]，袁明泉[2]，王　伟[1]，孙昊楠[1]
（1. 火箭军工程大学研究生院，西安　710025；2. 中国人民解放军 96716 部队，江西　赣州　341000）

摘要：针对未来防空作战形势的发展趋势，结合国内外效能评估模式发展现状，贴合作战实际的多个火力单元对多个目标拦截问题进行深入研究。建立科学合理的评价指标体系，采用定性分析和定量计算相结合的方法，基于模糊多目标决策理论对作战方案进行排序分析，确定最佳作战方案。实例结果表明，该方法是有效的。

关键词：未来防空作战；拦截优化问题；模糊多目标决策理论
中图分类号：TJ761　　**文献标志码**：A

Interception Optimization Based on Fuzzy Multi-objective Decision Theory

Che Guoshuai[1], *Qi Zhendong*[1], *Yuan Mingquan*[2], *Wang Wei*[1], *Sun Haonan*[1]
(1. *Graduate School*, *Rocket Force University of Engineering*, *Xi'an* 710025, *China*;
2. *No.* 96716 *Unit of PLA*, *Ganzhou* 341000, *China*)

Abstract: In view of the development trend of future air defense combat situation, combined with the development status of effectiveness evaluation mode at home and abroad, the problem of multi-target interception by multi-firepower units suitable for actual combat is studied in depth. A scientific and reasonable evaluation index system is established. Based on the fuzzy multi-objective decision theory, the operational plan is sorted and analyzed by using the method of combining qualitative analysis with quantitative calculation, and the optimal operational plan is determined. The example results show that the method is effective.

Keywords: air defense operation in the future; interception optimization problem; fuzzy multi-objective decision theory

0　引言

从海湾战争、利比亚战争和塞阿战争等几场具有信息化典型特征的战争[1]中可以发现：军事强国利用卫星、无人机等手段进行高空侦察，掌握敌兵力与部署情况，建立情报优势，通过对敌雷达和防空系统进行摧毁，迫使敌人处于致盲状态。敌人无法对来袭武器进行侦察探测，战场呈现出单向透明化，地面机械化部队在缺少防空掩护的情况下难以在战场上生存。军事强国采用超低空突击、精确打击和防区外攻击等手段，均能够达到良好的作战效果，传统防空系统已不能满足现代防空作战需求。

地面部队未来还将面临有人飞机、战术导弹、精确制导炸药和无人机等各类空中威胁，这些威胁呈现出去平台化、隐身化、无人化、智能化的特点，正颠覆人类对传统战争的认识，作战将突破人类生理和思维极限，传统防空系统面临着巨大的生存威胁和挑战。

为满足未来防空作战需求，适应新兴军事技术变革下的防空作战特点[2]，研究发现防空作战正呈现出 3 种发展趋势：

1) 部署模式由要点静态向区域动态转变。防空作战部署必须着眼全局，灵活处置各类情况，提高系统机动能力，适应机动攻防作战特点，建立有重点的梯次动态部署，对关键作战部署和重要战斗行动实施机动伴随护。

2) 抗击手段由单纯火力向火电一体转变。适应现代空袭整体规律对防空作战的客观要求，综合运用火力拦截和电子对抗手段，充分发挥电子对抗“软杀伤”和火力拦截“硬摧毁”的优点。

3) 作战理念由粗放规模向精确集约转变。防空作战必须充分发挥指挥信息系统效能，运用信息化手段全面实时地掌握战场情况，对作战行动进行精细、准确地掌控与制约，提高作战费效比。各级指挥员要精确控制部队战斗行动，保证作战效果和指挥活动的时效性、稳定性和连续性，在战斗过程中准确判断形势，灵活处置突发情况，提高连续作战能力。

1　效能评估模式发展现状

效能评估[3]是在作战资源限定的条件下，通过定量计算的方式计算得到来袭目标的拦截概率，实

收稿日期：2023-04-15；**修回日期**：2023-05-17
作者简介：车国帅(1993—)，男，四川人。

现对武器装备的进一步改进优化。关于效能评估的方法有很多，这里不再赘述，但是作战资源限定条件却相对比较固定，主要有 3 种资源限定模式：

1) 单个火力单元对单个目标实施拦截的武器系统效能评估。该模式通常采用 ADC 法，对武器系统进行层次分解，建立系统效能评价指标体系[4]进行效能评估，有利于武器装备的设计研发、试验改进和作战使用。

2) 单个火力单元对多个目标实施拦截的打击排序问题[5]。该模式通常采用模糊评价法[6]，通过对拦截目标进行层次分析，建立目标威胁程度因素指标体系，通过模糊评价得到各个目标的权重，进一步求出多个目标的威胁程度大小，有利于作战火力分配。

3) 多个火力单元对单个目标实施拦截的配置优化问题[7]。该模式通常采用遗传算法、粒子群算法等智能算法，通过随机数的方式模拟多个火力单元不同的位置配置，得到最优配置下的系统综合效能，有利于解决作战部署优化问题。

在实际作战条件下，敌我双方都是在一定武器装备数量的基础上进行对抗；此时，上述 3 种评估模式局限性较大，不能满足实际作战需要。在多个火力单元对多个目标拦截问题研究方面，主要通过开发系统，模拟敌我对抗，所需参数较多，受约束限制大，难以在实际作战阶段应用。笔者基于模糊多目标决策理论研究多个火力单元对多个目标拦截问题，充分发挥指挥员的主观作用，采用定性分析与定量计算相结合的方式，通过对多个作战方案进行评价排序，得到最优作战方案，既能实现预定拦截目标，又能控制作战成本，能为实际作战提供一定的参考依据。

2 建立评价因素指标体系

传统指标体系建立时，通常将武器系统或来袭目标作为单独的指标进行层级分解，建立多个影响因素层级，确定不同因素层级之间的权重，将定性因素定量化，通过计算得到评价结果。在进行多个火力单元对多个目标实施拦截的效能评估中，不能只将火力单元或来袭目标作为单独的因素进行分层，需要将两者结合起来进行综合考虑，这样才能达到“知己知彼”的效果，才能完成预期目标。

防空作战[8]一般按照先到先打原则，充分考虑来袭目标到达防空火力杀伤区时间和在杀伤区内飞行时间。目标分配时，一是优先拦截上级指定的目标、威胁程度大的目标，二是拦截尽可能多的目标。在总目标的引领下，将敌我双方情况进行层级分解，对关键因素和因素重要性进行评价，通过计算可得到方案优劣排序，确定最佳作战方案。主要考虑以下关键因素：1) 指挥控制效能，主要包括通信能力、指挥手段、协调控制等因素，这些因素制约着指挥效能的发挥，指挥员的指挥决策能力在作战中起着决定性作用；2) 保卫目标情况，包括保卫目标重要程度、几何分布、伪装效果等因素，这些因素是指挥员进行摆兵布阵的依据，在作战中起着主要作用；3) 作战部署情况，主要包括火力单元类型与数量、部署方式、机动能力等因素，这些因素影响着系统的综合效能，在作战中起着重要作用；4) 目标毁伤能力，主要包括目标类型和数量、打击方式、目标特性等因素，这些因素是实施防空拦截的情报信息来源，在作战中起着关键作用；5) 复杂战场环境，主要包括自然环境、电磁环境、人文环境等因素，这些因素对装备性能发挥有一定的影响，也是指挥员在作战中需要考虑的因素。通过对总目标进行层次分解，可得到敌我对抗条件下各个因素的不同重要程度。据此，建立关键因素评价指标体系如图 1 所示。

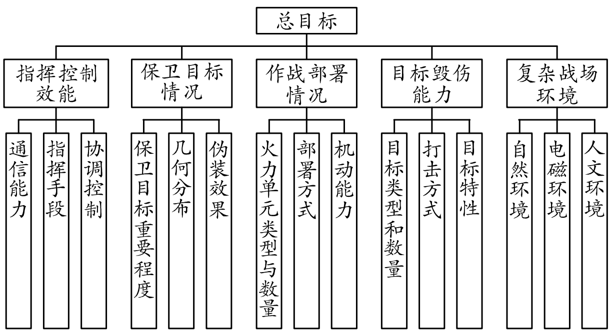

图 1 关键因素评价指标体系

根据末端防御武器系统[9]的结构组成，分析各分系统在实际作战过程中的作用及影响，将复杂问题层次化、条理化，建立科学合理、贴近实际的效能评价指标体系，实现系统工作过程的准确描述，为提高系统效能提供参考。

3 建立决策评估模型

模糊多目标决策理论[10]应用模糊理论，将不易定量、边界不清的因素定量化，通过设置因素集、评语集、权重向量等方式，将决策者语言评价转换成定量信息，即先对单个因素模糊评价结果进行定量分析，再采用权重的方式对方案进行综合评价。该方法既考虑了单体特性，又考虑了目标多样性，

能够贴近实际地对事物作出总体评价，得到方案的优劣排序，适合解决非确定性问题。由于防空作战战场态势瞬息万变，可供指挥员决策的时间很短，若能在计算机中建立自动决策模型，由计算机自动决策，生成可供指挥员选择的决策指令方案，才能满足实际作战需求。

在实际作战过程中，作战资源是有限制的，所以制定作战方案是在武器装备种类和数量一定的情况下进行的。在某次防空作战中，假设防空导弹种类为 k 种，第 i 种导弹数量为 $l_i(0<i\leqslant k)$，则整个导弹体系可用导弹数量表示，即 $L=(l_1, l_2, \cdots, l_n)$，按照组合方式进行配置，则得到配置方案总数 n_0 为：

$$n_0 = C_{k_0}^1 + C_{k_0}^2 + \cdots + C_{k_0}^{k_0} = 2^{k_0} - 1，\ (k_0 = \sum_{i=1}^{k} l_i)。\quad (1)$$

对不能完成任务的方案进行筛选，也可通过建立模型设置约束函数对方案进行自动筛选，去除 n_b 个不可行方案，得到可行方案 $\bar{X}$ 为：

$$\bar{X} = (\bar{X}_1, \bar{X}_2, \cdots, \bar{X}_{nx})，\ (n_x = n_0 - n_b)。\quad (2)$$

再结合作战实际，从可行方案中选定几个较为合理的方案作为备选方案，即：

$$X=(X_1, X_2, \cdots, X_n)。\quad (3)$$

最后由决策者根据不同因素对备选方案进行分析，通过综合计算比较的方法，求解出方案的优劣排序，得到最优方案。

在某次防空作战行动中，需要对 m_k 个目标进行打击，目标记作$(f_1, f_2, \cdots, f_m)$，对完成这些目标的概率，即指标效能值记做 $\left(\tilde{f}_1, \tilde{f}_2, \cdots, \tilde{f}_m\right)$，其中 $0\leqslant f_i\leqslant 1(0<i\leqslant m)$。设 p 个决策者在有限备选作战方案 $X=(X_1, X_2, \cdots, X_n)$内进行评价决策排序，决策者对目标值的评价语可转换为三角形模糊数 $\tilde{f}_{ij}^k = (l, m, n)$。其中：$\tilde{f}_i^k$ 表示 n 个方案的第 i 个模糊目标值，$\tilde{f}_j^k$ 表示决策者 p 对方案 X_j 的所有 m_k 个模糊目标值，可得决策者关于目标和方案关系的决策矩阵 $\tilde{\boldsymbol{F}}^k$ 如下：

$$\tilde{\boldsymbol{F}}^k = \begin{array}{c} \\ f_1^k \\ f_2^k \\ \vdots \\ f_{m_k}^k \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} X_1 & X_2 & \cdots & X_n \end{array} \\ \begin{vmatrix} \tilde{f}_{11}^k & \tilde{f}_{12}^k & \cdots & \tilde{f}_{1n}^k \\ \tilde{f}_{21}^k & \tilde{f}_{22}^k & \cdots & \tilde{f}_{2n}^k \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \tilde{f}_{m_k 1}^k & \tilde{f}_{m_k 2}^k & \cdots & \tilde{f}_{m_k n}^k \end{vmatrix} \end{array}。\quad (4)$$

或记作 $\tilde{\boldsymbol{F}}^k = (\tilde{f}_{ij}^k)_{m\times n}$。

由于每个决策者专业水平、作战偏好、经验知识等不同，所以对同一目标作出的评价也不相同。设决策者 p 对 m_k 个目标 f_i 的模糊权重向量为：

$$\tilde{\tilde{\boldsymbol{\omega}}}^k = \left(\tilde{\tilde{\omega}}_1^k, \tilde{\tilde{\omega}}_2^k, \cdots, \tilde{\tilde{\omega}}_{m_k}^k\right)^{\mathrm{T}}。\quad (5)$$

式中 $\tilde{\tilde{\omega}}_i^k(i=1, 2, \cdots, m_k)$ 为模糊数。

目标 f_i 采用 λ 均值面积度量法对方案 X 进行排序，$\tilde{f}_{ij}^k$ 的排序函数为：

$$r\left(\tilde{f}_{ij},\ \lambda\right) = \int_0^1 \{\lambda[1+(m-1)\alpha] + (1-\lambda)[u - (u-m)\alpha]\} d\alpha = [\lambda l + m + (l-\lambda)u]/2。\quad (6)$$

式中 $\lambda \in [0,\ 1]$。

在进行排序时，若 X_j 排在 t 位，令 $\varphi_{jti}=1$；其他情况令 $\varphi_{jti}=0$，得到排序矩阵 $\boldsymbol{\Gamma}^k{}_i = (\varphi_{jti}^k)_{n\times n}$。令

$$\tilde{n}_{jt}^k = \sum_{i=1}^{m_k} \varphi_{jti}^k \tilde{\omega}_i^k (j=1,2,\cdots,n; t=1,2,\cdots,n)。\quad (7)$$

式中 $\tilde{\omega}_i^k$ 表示进行规范化处理后的模糊权重，即：

$$\tilde{\omega}_1^k = \tilde{\tilde{\omega}}_1^k \Big/ \sum_{i=0}^{m_k} \tilde{\tilde{\omega}}_1^k。\quad (8)$$

记 $\tilde{\boldsymbol{N}}^k = (\tilde{n}_{jt}^k)_{n\times n}$，作为 L 的排序权重矩阵。对变量 y_{jt}^k 进行如下设置：

$$y_{jt}^k = \begin{cases} 1 & (X_j\text{在第}t\text{位}) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases}。\quad (9)$$

在对所有目标进行综合考虑下，通过求解模糊线性 0-1 指派问题得到对 X 的优劣排序，即：

$$\max\left\{\sum_{j=1}^{n}\sum_{t=1}^{n} \tilde{n}_{jt}^k y_{jt}^k\right\};$$

$$\left.\begin{array}{l} \sum_{t=1}^{n} y_{jt}^k = 1,\ (j=1,2,\cdots,n) \\ \sum_{j=1}^{n} y_{jt}^k = 1,\ (t=1,2,\cdots,n) \\ y_{jt}^k = 1\text{或}0,\ (j=1,2,\cdots,n; t=1,2,\cdots,n) \end{array}\right\}。\quad (10)$$

采用匈牙利算法对式(10)转化的 0-1 指派问题进行求解，得到最优解为 $y_{jt}^{k*}(j=1,2,\cdots,n; t=1,2,\cdots,n)$，则由 $Y^{k*} = (y_{jt}^{k*})_{n\times n}$ 确定 X 的最终排序。

在计算得到 $Y^{k*} = (y_{jt}^{k*})_{n\times n}$ 后，可计算出各个方案 X_j 的波达选择函数值，即：

$$b^k(X_j) = \sum_{t=1}^{n} (n-t) y_{jt}^{k*}。\quad (11)$$

进而求得所有决策者关于方案 X 的波达选择函数值为：

$$b(X_j)=\sum_{k=1}^{p}b^k(X_j)\text{。} \quad (12)$$

可求得波达选择函数值 $B=(b_1, b_2, \cdots, b_n)$，其中 $b_g=\max(B)$所对应的方案 X_g 为最佳方案。

4　决策评估模型举例验证

某地面部队在执行作战任务时，防空雷达系统探测到有 1 枚巡航导弹和 1 架无人机 2 个目标对我方指挥所构成威胁，且 2 个目标均在我方防空火力单元拦截杀伤区范围内，相关单位立即按照预案展开行动。针对此次防空拦截任务，上级要求在作战方案中拟定 2 个目标的拦截指标为(0.95, 0.85)，假设该防区内可使用的防空火力单元携带防空导弹种类为 A、B、C 3 类，3 类防空导弹的可使用数量分别为 $l_A=2$, $l_B=2$, $l_C=3$，防空导弹携带数量如表 1 所示，各类防空导弹拦截成功率如表 2 所示。

表 1　防空导弹携带枚数

A 类	B 类	C 类
2	2	3

表 2　防空导弹拦截成功率

目标	A 类	B 类	C 类
巡航导弹	0.8	0.7	0.6
无人机	0.7	0.6	0.7

按照各类防空导弹的使用数量，采用组合方式进行配置计算，得到拦截方案总数 $n_0=2^7-1=127$，拦截方案配置总数如表 3 所示。

表 3　拦截方案配置总枚数

序号	A 类使用量	B 类使用量	C 类使用量
1	0	0	0
2	0	0	1
…	…	…	…
128	2	2	3

考虑实际作战情况，过滤明显不可行方案个数 $n_b=115$，得到可行方案如表 4 所示。经过有关专家过滤论证，确定备选方案如表 5 所示。

表 4　可行方案使用枚数

方案编号	A 类使用量	B 类使用量	C 类使用量
1	1	1	1
2	1	1	2
3	1	1	3
4	1	2	1
5	1	2	2
6	1	2	3
7	2	1	1
8	2	1	2
9	2	1	3
10	2	2	1
11	2	2	2
12	2	2	3

表 5　备选方案使用枚数

方案编号	目标	A 类使用量	B 类使用量	C 类使用量
1	巡航导弹	1	0	2
	无人机	0	2	0
2	巡航导弹	1	0	2
	无人机	0	2	1
3	巡航导弹	2	0	1
	无人机	0	1	1
4	巡航导弹	2	0	1
	无人机	0	2	1
5	巡航导弹	2	0	2
	无人机	0	2	1

首先利用多枚导弹拦截同一目标成功概率公式[11] $P=1-\prod_{i=1}^{n}(1-p_i)$，计算得到备选方案决策矩阵如下：

$$\tilde{\boldsymbol{F}}=\begin{array}{c} \\ f_1 \\ f_2 \end{array}\begin{array}{ccccc} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 \\ \end{array}\begin{vmatrix} 0.978, & 0.978, & 0.984, & 0.984 & 0.994 \\ 0.840, & 0.952, & 0.880, & 0.952 & 0.952 \end{vmatrix}^{\mathrm{T}}\text{。} \quad (13)$$

由计算结果可知，对于 X_1，无人机目标指标 0.84＜0.85，不符合作战指标要求，排除使用。备选方案 X_2、X_3、X_4、X_5 均符合作战指标，其弹量消耗分别为 6、5、6、7 枚，从作战成本的角度出发，对消耗 7 枚防空导弹的方案非特殊情况下，通常不予采用，下一步将结合关键因素和因素重要性对作战方案 X_2、X_3、X_4 进行进一步评价分析。为便于区分，将备选方案按照弹药消耗数量 X_3、X_2、X_4 进行排序，作为新的决策方案 x_1，x_2，x_3。

决策者采用定性分析和定量计算相结合的方式进行决策分析，主要考虑以下 5 个关键因素：指挥控制效能(f_1)、保卫目标情况(f_2)、作战部署情况(f_3)、目标毁伤能力(f_4)和复杂战场环境(f_5)。假设由 3 个决策者对决策方案进行决策分析，决策者分别对 3 个方案进行语言评价和因素重要性评价，评价情况分别如表 6—9 所示。

表 6　决策者 p_1 对 3 个决策方案关于各个因素的语言评价

决策方案	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5
x_1	好	中等	好	好	好
x_2	中等	好	中等	中等	差
x_3	较差	较好	较好	差	较好

表 7　决策者 p_2 对 3 个决策方案关于各个因素的语言评价

决策方案	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5
x_1	好	较好	较好	差	中等
x_2	较好	中等	中等	较好	差
x_3	较差	好	差	中等	好

表 8　决策者 p_3 对 3 个决策方案关于各个因素的语言评价

决策方案	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5
x_1	差	好	中等	较差	差
x_2	较好	较差	好	好	好
x_3	中等	较好	较好	中等	较好

表 9　决策者关于各个因素重要性的语言评价

决策者	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5
p_1	不重要	重要	较重要	重要	很重要
p_2	重要	不太重要	中等	不重要	很重要
p_3	较重要	重要	很重要	较重要	重要

采用三角形模糊数的方式将决策者对方案语言评价和因素重要性语言评价进行转换，评价语与三角形模糊数之间的对应关系如表 10 所示。

表 10　评价语与三角形模糊数之间的对应关系

方案评价语	因素重要性评价语	三角形模糊数	方案评价语	因素重要性评价语	三角形模糊数
很差	很不重要	(0,0,0.1)	差	不重要	(0,0.1,0.2)
较差	不太重要	(0,0.2,0.3)	中等	中等	(0.2,0.4,0.6)
较好	较重要	(0.5,0.6,0.7)	好	重要	(0.6,0.7,0.8)
很好	很重要	(0.7,0.8,0.9)	非常好	非常重要	(0.9,0.9,1)

由表 9 和 10 可得到决策者 p_1 对 5 个因素 $f_i(i=1, 2, \cdots, 5)$的权重分别为：

$$\tilde{\omega}_1^1=(0, 0.1, 0.2)；\ \tilde{\omega}_2^1=\tilde{\omega}_4^1=(0.6, 0.7, 0.8)；$$

$$\tilde{\omega}_3^1=(0.5, 0.6, 0.7)；\ \tilde{\omega}_5^1=(0.7, 0.8, 0.9)。$$

利用式(2)进行规范化，得到模糊权重为：

$$\tilde{\omega}_1^1=(0, 0.03, 0.08)；\ \tilde{\omega}_2^1=\tilde{\omega}_4^1=(0.18, 0.24, 0.33)；$$

$$\tilde{\omega}_3^1=(0.15, 0.21, 0.29)；\ \tilde{\omega}_5^1=(0.21, 0.28, 0.38)。$$

根据表 6 得到 p_1 对各个因素的 3 个决策方案排序矩阵分别为：

$$\boldsymbol{\Gamma}_1^1=\boldsymbol{\Gamma}_4^1=\begin{array}{c} \\ x_1\\ x_2\\ x_3\end{array}\begin{array}{c}\begin{array}{ccc}1&2&3\end{array}\\ \begin{pmatrix}1&0&0\\0&1&0\\0&0&1\end{pmatrix}\end{array}；\ \boldsymbol{\Gamma}_2^1=\begin{array}{c} \\ x_1\\ x_2\\ x_3\end{array}\begin{array}{c}\begin{array}{ccc}1&2&3\end{array}\\ \begin{pmatrix}0&0&1\\1&0&0\\0&1&0\end{pmatrix}\end{array}；$$

$$\boldsymbol{\Gamma}_3^1=\boldsymbol{\Gamma}_5^1=\begin{array}{c} \\ x_1\\ x_2\\ x_3\end{array}\begin{array}{c}\begin{array}{ccc}1&2&3\end{array}\\ \begin{pmatrix}1&0&0\\0&0&1\\0&1&0\end{pmatrix}\end{array}。\tag{14}$$

利用式(1)可得到 p_1 权重矩阵排序为：

$$\tilde{\boldsymbol{N}}^1=\begin{array}{c} \\ x_1\\ x_2\\ x_3\end{array}\begin{array}{c}\begin{array}{ccc}1&2&3\end{array}\\ \begin{pmatrix}\tilde{\omega}_1^1+\tilde{\omega}_4^1+\tilde{\omega}_3^1+\tilde{\omega}_5^1 & 0 & \tilde{\omega}_2^1\\ \tilde{\omega}_2^1 & \tilde{\omega}_1^1+\tilde{\omega}_4^1 & \tilde{\omega}_3^1+\tilde{\omega}_5^1\\ 0 & \tilde{\omega}_2^1+\tilde{\omega}_3^1+\tilde{\omega}_5^1 & \tilde{\omega}_1^1+\tilde{\omega}_4^1\end{pmatrix}\end{array}=\begin{array}{c} \\ x_1\\ x_2\\ x_3\end{array}\begin{array}{c}\begin{array}{ccc}1&2&3\end{array}\\ \begin{pmatrix}(0.54, 0.76, 1.05) & 0 & (0.18, 0.24, 0.33)\\ (0.18, 0.24, 0.33) & (0.18, 0.27, 0.41) & (0.36, 0.49, 0.67)\\ 0 & (0.54, 0.73, 1.00) & (0.18, 0.27, 0.41)\end{pmatrix}\end{array}。\tag{15}$$

将 $\tilde{\boldsymbol{N}}^1$ 代入式(9)，采用匈牙利算法可得到 p_1 对 3 个方案的排序矩阵为：

$$\boldsymbol{Y}^1=\begin{array}{c} \\ x_1\\ x_2\\ x_3\end{array}\begin{array}{c}\begin{array}{ccc}1&2&3\end{array}\\ \begin{pmatrix}1&0&0\\0&0&1\\0&1&0\end{pmatrix}\end{array}。\tag{16}$$

同理，可求得 p_2 和 p_3 的规范化权重分别为：

$$\tilde{\omega}_1^2=(0.21, 0.32, 0.53)；\ \tilde{\omega}_2^2=(0, 0.09, 0.20)；$$

$$\tilde{\omega}_3^2=(0.07, 0.18, 0.40)；\ \tilde{\omega}_4^2=(0, 0.05, 0.13)；$$

$$\tilde{\omega}_5^2=(0.25, 0.36, 0.60)；\ \tilde{\omega}_1^3=\tilde{\omega}_4^3=(0.13, 0.18, 0.24)；$$

$$\tilde{\omega}_2^3=\tilde{\omega}_5^3=(0.15, 0.21, 0.28)；\ \tilde{\omega}_3^3=(0.18, 0.24, 0.30)。$$

由表 7 和表 8 可得到 p_2 和 p_3 关于决策方案的排序矩阵分别为：

$$\boldsymbol{\Gamma}_1^2=\boldsymbol{\Gamma}_3^2=\begin{array}{c} \\ x_1\\ x_2\\ x_3\end{array}\begin{array}{c}\begin{array}{ccc}1&2&3\end{array}\\ \begin{pmatrix}1&0&0\\0&1&0\\0&0&1\end{pmatrix}\end{array}；\ \boldsymbol{\Gamma}_4^2=\begin{array}{c} \\ x_1\\ x_2\\ x_3\end{array}\begin{array}{c}\begin{array}{ccc}1&2&3\end{array}\\ \begin{pmatrix}0&0&1\\1&0&0\\0&1&0\end{pmatrix}\end{array}；$$

$$\boldsymbol{\Gamma}_2^2=\boldsymbol{\Gamma}_5^2=\begin{array}{c} \\ x_1\\ x_2\\ x_3\end{array}\begin{array}{c}\begin{array}{ccc}1&2&3\end{array}\\ \begin{pmatrix}0&1&0\\0&0&1\\1&0&0\end{pmatrix}\end{array}；\ \boldsymbol{\Gamma}_2^3=\begin{array}{c} \\ x_1\\ x_2\\ x_3\end{array}\begin{array}{c}\begin{array}{ccc}1&2&3\end{array}\\ \begin{pmatrix}1&0&0\\0&0&1\\0&1&0\end{pmatrix}\end{array}；$$

$$\boldsymbol{\Gamma}_1^3=\boldsymbol{\Gamma}_3^3=\boldsymbol{\Gamma}_4^3=\boldsymbol{\Gamma}_5^3=\begin{array}{c} \\ x_1\\ x_2\\ x_3\end{array}\begin{array}{c}\begin{array}{ccc}1&2&3\end{array}\\ \begin{pmatrix}0&0&1\\1&0&0\\0&1&0\end{pmatrix}\end{array}。\tag{17}$$

通过计算，可得到 p_2 和 p_3 权重矩阵排序为：

$$\tilde{\boldsymbol{N}}^2=\begin{array}{c} \\ x_1\\ x_2\\ x_3\end{array}\begin{array}{c}\begin{array}{ccc}1&2&3\end{array}\\ \begin{pmatrix}(0.28, 0.50, 0.93) & (0.25, 0.45, 0.80) & (0, 0.05, 0.13)\\ (0, 0.05, 0.13) & (0.28, 0.50, 0.93) & (0.25, 0.45, 0.80)\\ (0.25, 0.45, 0.80) & (0, 0.05, 0.13) & (0.28, 0.50, 0.93)\end{pmatrix}\end{array}；$$

$$\tilde{\boldsymbol{N}}^3=\begin{array}{c} \\ x_1\\ x_2\\ x_3\end{array}\begin{array}{c}\begin{array}{ccc}1 & 2 & 3\end{array}\\ \begin{pmatrix}(0.15,0.18,0.28) & 0 & (0.59,0.81,1.07)\\ (0.59,0.81,1.07) & 0 & (0.15,0.18,0.28)\\ 0 & (0.74,1.02,1.35) & 0\end{pmatrix}\end{array}。 \tag{18}$$

将 $\tilde{\boldsymbol{N}}^2$ 和 $\tilde{\boldsymbol{N}}^3$ 代入式(9)，采用匈牙利算法可得到 p_2 和 p_3 对 3 个方案的排序矩阵为：

$$\boldsymbol{Y}^2=\begin{array}{c} \\ x_1\\ x_2\\ x_3\end{array}\begin{array}{c}\begin{array}{ccc}1 & 2 & 3\end{array}\\ \begin{pmatrix}1 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 1\end{pmatrix}\end{array}；\boldsymbol{Y}^3=\begin{array}{c} \\ x_1\\ x_2\\ x_3\end{array}\begin{array}{c}\begin{array}{ccc}1 & 2 & 3\end{array}\\ \begin{pmatrix}0 & 0 & 1\\ 1 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0\end{pmatrix}\end{array}。 \tag{19}$$

通过式(4)和(5)，可计算得到决策者赋予 3 个方案的波达选择函数值分别为：

$$b(x_1)=4，b(x_2)=3，b(x_2)=2。 \tag{20}$$

即 B=(4, 3, 2)，故得到 3 个决策者对 3 个决策方案的综合排序为 $x_1 > x_2 > x_3$，方案 x_3 为最佳方案，即使用 2 枚 A 类导弹对巡航导弹进行打击，使用一枚 B 类导弹对无人机进行打击；使用 2 枚 C 类导弹，一枚打击巡航导弹，另一枚打击无人机。计算结果表明：1) 在符合作战指标的前提下，优先采用低成本方案；在成本相差不大的情况下，需结合实际情况选择方案。2) 利用火力拦截概率计算得到的作战方案为指挥决策提供了数据支撑，指挥决策根据考虑的关键因素得到的决策排序结果与拦截概率计算得到的方案排序结果不一定相同，进一步突显出指挥员的主导作用，同时也验证了确定因素和本方法的合理性。

5 结束语

笔者通过分析典型现代防空作战特点，研究未来防空作战发展趋势，综合分析当前效能评估模式，建立科学的评估指标体系，采用模糊多目标决策理论对多个火力单元对多个目标拦截问题进行研究，更加贴近作战实际情况，研究结果能够为指挥员指挥决策提供指导，具有较强的实践性。

参考文献：

[1] 陈薇，王军. 弹炮结合防空武器系统新趋势[J]. 火力与指挥控制, 2016, 41(3): 1-3, 7.

[2] 王克强. 防空概论[M]. 北京：国防工业出版社, 2012: 12-14.

[3] 谢春燕，高俊峰，朱齐阳. 末端防御弹炮结合武器系统综合效能评估模型研究[J]. 上海航天，2010，27(4): 49-55.

[4] 季军亮，汪民乐，韩慧华，等. AHP 法在末段高层反导阵地防空方案选择中的应用[J]. 火力与指挥控制, 2019, 44(4): 126-130.

[5] 何宙阳，王风华. 电火一体抗击无人机的拦截打击排序模型研究[J]. 信息工程大学学报，2021，22(1): 119-122.

[6] 刘军，贾宏慧. 模糊层次分析法在防空导弹武器系统效能分析中的应用[J]. 计算机工程与设计，2007, 28(16): 4049-4051.

[7] 殷志宏，杨宝奎，崔乃刚，等. 导弹武器系统配置优化算法研究[J]. 战术导弹技术, 2007, 6(6): 12-14, 19.

[8] 王凤山，李孝军，马拴柱. 现代防空学[M]. 北京：航空工业出版社, 2008: 82-87.

[9] 张方宇，杨帆，张筱波. 末端防御武器火控系统面临的挑战与发展建议[J]. 兵工自动化, 2012, 31(12): 25-27.

[10] 李登锋. 模糊多目标决策与对策[M]. 北京：国防工业出版社, 2003: 42-44.

[11] 陈杰，陈晨，张娟，等. 基于 Memetic 算法的要地防空优化部署方法[J]. 自动化学报, 2010, 36(2): 242-248.