

doi: 10.7690/bgzd.2023.07.014

面向装备作战效能评估的灰靶理论综合模型

钱 希¹, 王静宇², 柯宏发³

(1. 航天工程大学研究生院, 北京 101416; 2. 航天员科研训练中心管理保障处, 北京 100094;
3. 航天工程大学航天保障系, 北京 102206)

摘要: 针对武器装备作战效能评估结果对其作战运用的指导问题, 提出一种面向装备作战效能评估的灰靶理论综合模型。给出邓氏灰靶理论并分析其在装备作战效能评估中的应用缺陷; 介绍基于 TOPSIS 方法理念的装备作战效能评估的综合靶心度模型, 包括虚拟灰色靶心的构造、基于灰色关联度的综合靶心度模型等; 给出 4 部超短波地面通信对抗系统的作战效能评估实例。分析结果表明, 该综合评估方法具备合理性和有效性。

关键词: 作战效能评估; 灰靶理论; 虚拟靶心; 综合靶心度

中图分类号: TJ06 **文献标志码:** A

Comprehensive Model of Grey Target Theory for Equipment Operational Effectiveness Evaluation

Qian Xi¹, Wang Jingyu², Ke Hongfa³

(1. Graduate School, Space Engineering University, Beijing 101416, China;
2. Department of Management and Support, Astronaut Scientific Research and Training Center, Beijing 100094, China;
3. Department of Space Support, Space Engineering University, Beijing 102206, China)

Abstract: Aiming at the problem that the result of operational effectiveness evaluation of weapon equipment can guide its operational application, a grey target theory comprehensive model for operational effectiveness evaluation of weapon equipment is proposed. Deng's grey target theory is given and its application defects in equipment operational effectiveness evaluation are analyzed. Comprehensive target degree model of equipment operational effectiveness evaluation based on TOPSIS method concept is introduced, including the construction of virtual grey target, comprehensive target degree model based on grey correlation degree, etc. Operational effectiveness evaluation examples of 4 ultra-short wave ground communication countermeasure systems are given. The analysis results show that the comprehensive evaluation method is reasonable and effective.

Keywords: operational effectiveness evaluation; grey target theory; virtual target; comprehensive target degree

0 引言

装备作战效能评估是武器装备论证、研制、规划和配置的基本依据, 其在武器装备建设、管理与作战运用活动中占有极其重要的地位, 目前已成为装备建设管理与作战运用领域的研究热点与难点问题^[1-4]。装备作战效能评估方法从整体上虽然分为专家经验法、数据驱动法^[5-8]和作战模拟法^[9]3种, 但是由于专家经验的主观性、仿真数据的可信度、实战数据的录取难度等问题, 使得面向试演训数据的统计分析法在作战效能评估领域居于主导地位。

武器装备作战效能是指装备在规定作战阶段和作战环境下, 满足一组预期作战任务要求程度的功能性能及作战能力; 作战效能的评估实质就是衡量与评价作战效能指标数据序列对作战任务需求数据序列的满足程度, 通常通过多维度数据的描述、统

计、分析等来实现。由于评估数据的少量、缺失等特征, 使得灰色系统相关理论方法^[10-11]在装备作战效能评估领域占有一席之地, 特别是邓聚龙教授提出的灰靶理论更是解决了装备作战效能评估领域的众多难点问题。张壮等^[12]针对传统效能评估中指标权重相对固定的不足, 基于变权理论和灰靶理论, 以评估对象变权投影靶心距作为度量标准, 采用投影灰靶方法确定了评估对象综合效能及排序; 杜焯等^[13]用反映坦克陆上机动性能的主要指标构造比较各方案的模式, 根据理想的或较优的指标值构造一个标准模式, 通过求各模式对标准模式的靶心度并按大小排序, 最终确定各方案性能的优劣; 尹建平等^[14]针对智能雷毁伤效能评估中存在涉及影响因素多、因素之间有不明确灰色关系和数据不足的问题, 以灰色理论中的灰靶技术为基础, 用最能反

收稿日期: 2023-03-21; 修回日期: 2023-04-20

基金项目: 军队科研计划项目(2019-JCJQ-JJ-114; 2019JHHS14; TJ20203A010047)

作者简介: 钱 希(1993—), 女, 河南人, 从事军事装备、装备建设与管理研究。E-mail: 270863286@qq.com。

映智能雷毁伤效能的性能指标构造不同智能雷比较方案的模式，通过求解智能雷各方案对标准模式的靶心度，实现智能雷武器系统攻击坦克目标的毁伤效能评估，确定各方案毁伤效能的优劣。

上述文献在应用灰靶理论时，一般选择作战任务正向需求数据序列作为参考序列，但为更好地指导武器装备的作战运用问题，除了需要评价装备对作战任务需求的满足程度，大多数情况下还需了解对作战任务需求的不满足程度，即对作战任务负向需求的满足程度。笔者借鉴 TOPSIS 方法理念并构建虚拟负向靶心^[15]，分别求取相对于作战任务正向需求和虚拟负向需求的灰色靶心度，并求取正向灰色靶心度和虚拟负向灰色靶心度的相对贴近度作为装备作战效能评估的综合靶心度。

1 灰靶理论及虚拟负向靶心构建

1.1 邓氏灰靶理论

灰靶理论的模型依据是灰色关联分析方法，基于灰靶理论的作战效能评估基本思想是针对装备作战效能或综合能力评估指标体系中某一个指标值序列，在进行指标值的无量纲化处理，构成与各装备所对应的参考数据模式，即标准模式，各模式和标准模式共同构成了一个灰靶，然后进行分析。首先设定最优值靶心(即灰色关联分析中的参考数据列，由于效能评估问题中评估指标最优值通常难以直接给出，所以常规灰靶理论一般基于所有评估对象的指标最大值构建靶心)，然后计算各评估对象指标值序列与靶心的灰色关联系数和灰色靶心度。

灰靶理论认为标准模式是灰靶的靶心，远离靶心的模式称之为靶边，向上远离者称之为上靶边，向下远离者称之为下靶边；每个灰关联差异信息空间中的模式与靶心的灰关联度称为靶心接近度，简称靶心度。最终基于靶心度就可对各评估对象进行作战效能的评估与排序。显然，代表各装备作战效能的数据模式越接近标准模式，则该模式所代表的装备作战效能就越优。所以，只要求得各模式靶心度，便能对各模式所代表的装备进行作战效能评估和排序优选。

1.1.1 建立标准模式

假设 x_i 是第 i 个武器装备的作战效能评估数据模式， $x(k)$ 是武器装备第 k 个作战效能评估指标序列，对于 $x_i=(x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(n))$ ， $\forall x_i(k) \in x_i$ ，则有 $k \in K = \{1, 2, \dots, n\}$ ， $i \in I = \{1, 2, \dots, m\}$ ；对于 $x(k)=$

$(x_1(k), x_2(k), \dots, x_n(k))$ ， $\forall x_i(k) \in x(k)$ ，则有 $i \in I = \{1, 2, \dots, m\}$ 。

在进行灰靶计算前需要对不同极性的作战效能评估指标进行选择并确定参考数据列，评估指标存在极大值极性、极小值极性和适中值极性 3 种，通常按下列方法进行选择。

1) 极大值极性选择算法。

极大值极性是指目标值越大越好的指标特性，即 $\text{POL}x(k)=\text{POL}x(\max)$ ，一般着眼于衡量指标效果偏离最大值的程度，其选择算法为：

$$x_0(k) = \max_i x_i(k), x_i(k) \in x(k)。 \quad (1)$$

2) 极小值极性选择算法。

极小值极性是指目标值越小越好的指标特性，即 $\text{POL}x(k)=\text{POL}x(\min)$ ，一般着眼于衡量指标效果偏离最小值的程度，其选择算法为：

$$x_0(k) = \min_i x_i(k), x_i(k) \in x(k)。 \quad (2)$$

3) 适中值极性选择算法。

适中值极性是指目标值要求适中的指标特性，即 $\text{POL}x(k)=\text{POL}x(\text{mem})$ ，一般着眼于衡量指标效果偏离适中值或指定值的程度，其选择算法为：

$$x_0(k) = \begin{cases} \text{avg} x_i(k) & x_i(k) \in x(k) \\ u_0 & \text{指定} \end{cases}。 \quad (3)$$

序列 $x_0=(x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(n))$ 称为武器装备作战效能评估的标准模式或靶心。

1.1.2 靶心度计算

计算第 $i(i=1, 2, \dots, m)$ 个装备第 k 个指标元素与对应靶心差值的绝对值为：

$$\Delta_{0i}(k) = |x_0(k) - x_i(k)|。 \quad (4)$$

将极大距离环境参数 Δ_{\max} 和极小距离环境参数 Δ_{\min} 记为：

$$\left. \begin{aligned} \Delta_{\max} &= \max_i \max_k \Delta_{0i}(k) \\ \Delta_{\min} &= \min_i \min_k \Delta_{0i}(k) \end{aligned} \right\}。 \quad (5)$$

从而记靶心系数为：

$$r(x_0(k), x_i(k)) = \frac{\Delta_{\min} + \xi \Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(k) + \xi \Delta_{\max}}。 \quad (6)$$

式中 $\xi \in (0, 1)$ 为分辨系数，通常取 $\xi = 0.5$ 。称 $r(x_0, x_i)$ 为 x_i 的靶心度，满足

$$r(x_0, x_i) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n r(x_0(k), x_i(k))。 \quad (7)$$

式中 $r(x_0, x_i)$ 代表第 i 个武器装备作战效能模式接近

靶心(标准模式)的程度,即靶心接近度。

1.1.3 模式选优

基于靶心度对不同武器装备作战效能进行评估和排序优选。按照 $r(x_0, x_i)$ 的大小进行作战效能的排序, $r(x_0, x_i)$ 越大,则该模式所代表的装备作战效能越高;反之就越小。

1.2 面向作战运用的灰靶理论改进

上述作战效能灰靶评估算法在面向武器装备作战运用时会出现下述问题:

1) 靶心度具有不确定性。靶心度的本质内涵是武器装备各种功能性能及作战能力对靶心度的平均影响程度。从靶心系数和靶心度的计算公式来看,如果将武器装备作战效能评估数据模式顺序变化,虽然最终的靶心度未变,但是反映各种功能性能及作战能力影响的靶心系数变了,难以直接运用于指导武器装备作战运用。

2) 选取的武器装备作战效能评估的标准模式或靶心,并不能直接反映各种功能性能及作战能力对作战效能的真实贡献程度。因为实际的武器装备作战运用环境中,各种功能性能及作战能力并不是越接近标准模式或靶心,装备就能取得越好的作战效果。随着战场环境的变化,为取得较好的作战运用效果,还希望武器装备各种功能性能及作战能力远离那些不利的因素。

基于上述原因和 TOPSIS 方法理念,如果能确定最优、最劣的标准模式或靶心,针对 2 个靶心分别求取最优、最劣靶心度,对 2 个靶心度进行聚合得到基于灰靶理论的综合靶心度,从而基于综合靶心度对不同武器装备作战效能进行评估和排序优选,则可为武器装备作战运用提供更多的参考信息。

由于 TOPSIS 方法的核心缺陷,即当被评估对象位于正负理想解连线的中垂线上时, TOPSIS 方法依据评估结果无法对被评估对象作战效能进行优劣区分,基于 TOPSIS 方法的灰靶理论运用也会存在这个问题,如图 1 所示。特别是当被评估对象位于正负理想解连线的某一个垂线上时,还会带来对被评估对象作战效能优劣的错误区分。笔者在构建最劣标准模式或靶心时借鉴文献[15]相关方法,通过构造虚拟最劣标准模式或靶心,求取常规的灰靶靶心度和虚拟最劣灰靶靶心度,从而聚合得到最终的灰靶综合靶心度。

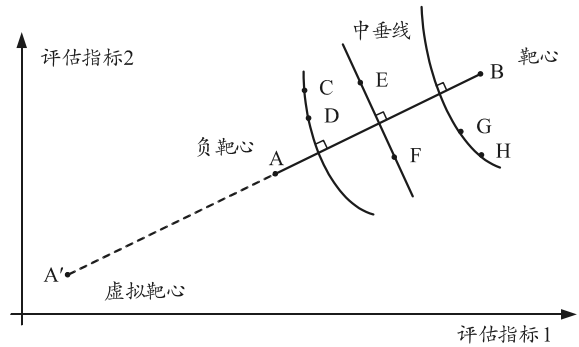


图 1 基于 TOPSIS 方法的灰靶理论改进

1.3 虚拟负向靶心构建

对于常规的标准模式或靶心,在构建负向标准模式或靶心的基础上构建虚拟负向标准模式或靶心。类似常规标准模式或靶心的构建方法,针对评估指标的极大值、极小值和适中值等 3 种极性特征,通常按下列方法选择负向靶心。

对于极大值极性指标,其选择算法为:

$$x'_0(k) = \min_i x_i(k), x_i(k) \in x(k) \quad (8)$$

对于极小值极性指标,其选择算法为:

$$x'_0(k) = \max_i x_i(k), x_i(k) \in x(k) \quad (9)$$

对于适中值极性指标,假设适中值为 $x_{mem} = u_0$ 或 $x_{mem} = \text{avg}_i x_i(k)$, 则其选择算法为:

$$x'_0(k) = \max \left\{ \max_i x_i(k) - x_{mem}, \min_i x_i(k) - x_{mem} \right\} \quad (10)$$

则称序列 $x'_0 = (x'_0(1), x'_0(2), \dots, x'_0(n))$ 为武器装备作战效能评估的负向标准模式或靶心。

借鉴参考文献[15]提出的方法构建虚拟负向标准模式或靶心:

$$x_0^* = (x_0^{*}(1), x_0^{*}(2), \dots, x_0^{*}(n)) = (2x'_0(1) - x_0(1), 2x'_0(2) - x_0(2), \dots, 2x'_0(n) - x_0(n)) \quad (11)$$

2 基于综合靶心度的装备作战效能评估模型

2.1 基本思路

笔者提出基于综合靶心度的装备作战效能评估与排序方法,其基本思路是除了考虑常规的灰色靶心度计算外,还同时借鉴 TOPSIS 理念考虑作战运用需求的不满足程度,克服 TOPSIS 方法存在的核心缺陷而构造虚拟负向靶心,并计算相应的负向灰色靶心度,对常规灰色靶心度和负向灰色靶心度进行综合而得到综合靶心度,从而基于综合靶心度对各评估对象进行作战效能的评估与排序。上述基本思路如图 2 所示。

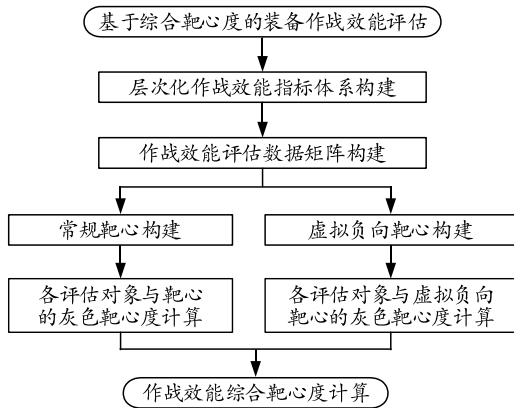


图 2 基于 TOPSIS 理念的灰靶理论综合模型思路

2.2 权重模型

面向武器装备的作战运用问题，在计算其基于灰靶的作战效能综合靶心度时，因为不同功能性能及作战能力对装备作战运用的重要性是不相同的，故考察各种功能性能及作战能力对作战效能贡献的相对重要性是极其重要的。

为提高评估决策的可靠性和客观性，采用基于灰色自关联矩阵的指标权重确定方法，直接利用武器装备的作战效能评估数据信息。根据评估数据 $x_i = (x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(n))$ ，通过计算灰关联度 $\gamma(x_i, x_j)$ 后构造灰色自关联矩阵 $R_{n \times n}$ 为：

$$R_{n \times n} = \begin{pmatrix} \gamma(x_1, x_1) & \gamma(x_1, x_2) & \dots & \gamma(x_1, x_n) \\ \gamma(x_2, x_1) & \gamma(x_2, x_2) & \dots & \gamma(x_2, x_n) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \gamma(x_n, x_1) & \gamma(x_n, x_2) & \dots & \gamma(x_n, x_n) \end{pmatrix} \quad (12)$$

然后通过下式计算矩阵 $R_{n \times n}$ 的特征值：

$$R_{n \times n} \cdot X = \lambda \cdot X \quad (13)$$

式中： λ 为特征值； X 为对应于 λ 的特征向量。

接着按下式计算最大特征值对应的特征向量：

$$R_{n \times n} \cdot (\bar{\omega}_1, \bar{\omega}_2, \dots, \bar{\omega}_n) = \lambda_{\max} \cdot (\bar{\omega}_1, \bar{\omega}_2, \dots, \bar{\omega}_n) \quad (14)$$

最后计算指标权重。对 $\bar{\omega}_1, \bar{\omega}_2, \dots, \bar{\omega}_n$ 进行归一化处理，即获得标准权重值：

$$\omega_i = \bar{\omega}_i / \sum_{k=1}^n \bar{\omega}_k, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

2.3 基于灰靶的综合靶心度模型

对于常规靶心 $x_0 = (x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(n))$ 和虚拟负向靶心 $(x_0^*(1), x_0^*(2), \dots, x_0^*(n))$ ，根据式(7)和(15)计算得到正向灰色靶心度 $r(x_0, x_i)$ 和虚拟负向灰色靶心度 $r(x_0^*, x_i)$ 分别为：

$$r(x_0, x_i) = \sum_{k=1}^n \omega_k \cdot r(x_0(k), x_i(k)) \quad (16)$$

$$r(x_0^*, x_i) = \sum_{k=1}^n \omega_k \cdot r(x_0^*(k), x_i(k)) \quad (17)$$

则可计算第 i 个武器装备基于灰靶的作战效能综合靶心度为：

$$r(x_0 x_0^*, x_i) = r(x_0, x_i) / (r(x_0, x_i) + r(x_0^*, x_i)) \quad (18)$$

由于综合靶心度 $r(x_0 x_0^*, x_i)$ 的参考靶心既考虑了最优靶心值，也考虑了最劣靶心值；因此，基于综合靶心度的武器装备作战效能评估和排序为装备作战运用提供了更全面的决策信息。同样，按照 $r(x_0 x_0^*, x_i)$ 的大小进行作战效能的排序， $r(x_0 x_0^*, x_i)$ 越大，则该模式所代表的装备作战效能越高；反之就越小。

3 基于综合靶心度的作战效能评估算例

此处建立 4 个同类型超短波地面通信对抗系统（假设为系统 I、系统 II、系统 III、系统 IV）的作战效能评估指标体系如图 3 所示，利用基于灰靶的综合靶心度模型对 4 部装备作战效能进行评估与排序，以验证本文中方法的合理性和有效性。

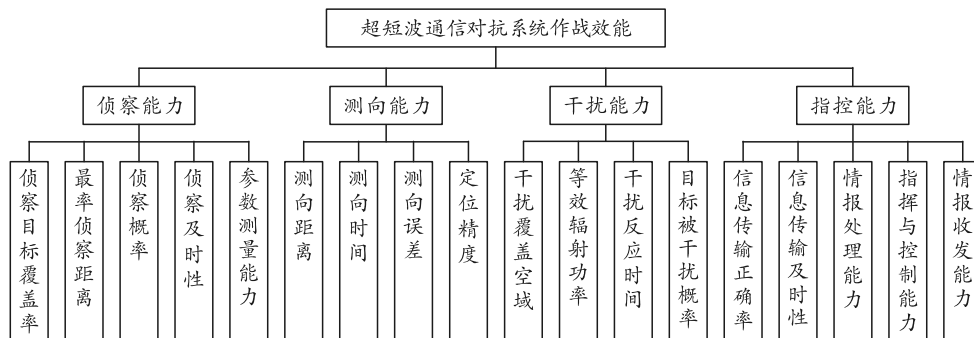


图 3 超短波通信对抗系统作战效能指标体系

上图中 18 个底层指标的原始数据一般通过定性语言或定量数值进行表述，在进行本文中算法验

证前首先进行定性定量转化和极性转换处理，得到 4 个系统的评估数据矩阵：

$$A = \begin{bmatrix} 0.66 & 0.87 & 0.89 & 0.82 & 0.86 & 0.90 & 0.66 & 0.94 & 0.58 & 0.79 & 0.89 & 0.78 & 0.70 & 0.84 & 1.00 & 0.86 & 0.77 & 0.92 \\ 0.69 & 1.00 & 0.76 & 0.86 & 0.80 & 0.92 & 0.80 & 0.82 & 0.72 & 0.72 & 0.90 & 0.88 & 0.80 & 0.92 & 0.72 & 0.93 & 1.00 & 0.80 \\ 0.78 & 0.91 & 0.82 & 0.76 & 0.90 & 0.80 & 1.00 & 0.90 & 0.82 & 0.88 & 0.82 & 0.82 & 0.72 & 0.78 & 0.66 & 0.96 & 0.82 & 0.88 \\ 0.62 & 0.82 & 1.00 & 0.84 & 0.92 & 0.72 & 0.90 & 0.92 & 0.88 & 1.00 & 0.74 & 0.90 & 0.86 & 0.90 & 0.94 & 0.88 & 0.86 & 1.00 \end{bmatrix}。$$

3.1 计算过程

首先根据评估数据矩阵 A 构造侦察能力、测向能力、干扰能力和指控能力评估数据矩阵 A_1 、 A_2 、 A_3 和 A_4 。其中侦察能力评估数据矩阵 A_1 为：

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0.66 & 0.87 & 0.89 & 0.82 & 0.86 \\ 0.69 & 1.00 & 0.76 & 0.86 & 0.80 \\ 0.78 & 0.91 & 0.82 & 0.76 & 0.90 \\ 0.62 & 0.82 & 1.00 & 0.84 & 0.92 \end{bmatrix}。$$

其常规靶心为 $C_1^+ = (0.78, 1.00, 1.00, 0.86, 0.92)$ ，负向靶心为 $C_1^- = (0.62, 0.82, 0.76, 0.76, 0.80)$ ，则可构造虚拟负向靶心为 $C_1^{*-} = (0.46, 0.64, 0.52, 0.66, 0.68)$ 。

根据矩阵 A_1 构造其灰色自关联矩阵 $R_{5 \times 5}^1$ 为：

$$R_{5 \times 5}^1 = \begin{bmatrix} 1 & 0.756 & 0.538 & 0.730 & 0.630 \\ 0.772 & 1 & 0.581 & 0.698 & 0.734 \\ 0.561 & 0.581 & 1 & 0.748 & 0.733 \\ 0.727 & 0.671 & 0.729 & 1 & 0.693 \\ 0.598 & 0.698 & 0.682 & 0.666 & 1 \end{bmatrix}。$$

从而得到侦察能力下属 5 个指标的权重向量为 $W_1 = (0.212, 0.270, 0.133, 0.298, 0.087)$ ，继而计算得到 4 个系统的正向灰色靶心度向量和虚拟负向灰色靶心度向量分别为：

$$r_1(x_0, x_i) = (0.730, 0.680, 0.687, 0.577)；$$

$$r_1(x_0^*, x_i) = (0.686, 0.738, 0.608, 0.768)。$$

从而计算得到 4 个系统基于灰靶的侦察能力综合靶心度向量为：

$$r_1(x_0 x_0^*, x_i) = (0.515 5, 0.479 5, 0.530 5, 0.429 0)。$$

同理可针对测向能力评估数据矩阵

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0.90 & 0.66 & 0.94 & 0.58 \\ 0.92 & 0.80 & 0.82 & 0.72 \\ 0.80 & 1.00 & 0.90 & 0.82 \\ 0.72 & 0.90 & 0.92 & 0.88 \end{bmatrix} \text{、干扰能力评估数据矩阵}$$

$$\text{阵 } A_3 = \begin{bmatrix} 0.79 & 0.89 & 0.78 & 0.70 \\ 0.72 & 0.90 & 0.88 & 0.80 \\ 0.88 & 0.82 & 0.82 & 0.72 \\ 1.00 & 0.74 & 0.90 & 0.86 \end{bmatrix} \text{和指控能力评估数}$$

$$\text{据矩阵 } A_4 = \begin{bmatrix} 0.84 & 1.00 & 0.86 & 0.77 & 0.92 \\ 0.92 & 0.72 & 0.93 & 1.00 & 0.80 \\ 0.78 & 0.66 & 0.96 & 0.82 & 0.88 \\ 0.90 & 0.94 & 0.88 & 0.86 & 1.00 \end{bmatrix} \text{进行相关}$$

靶心构建及权重、靶心度等计算，得到 4 个系统基于灰靶的测向能力、干扰能力和指控能力综合靶心度向量分别为：

$$r_2(x_0 x_0^*, x_i) = (0.459 1, 0.494 1, 0.547 7, 0.480 6)；$$

$$r_3(x_0 x_0^*, x_i) = (0.548 3, 0.406 8, 0.613 6, 0.623 9)；$$

$$r_4(x_0 x_0^*, x_i) = (0.525 3, 0.495 5, 0.481 1, 0.530 8)。$$

假设侦察能力、测向能力、干扰能力和指控能力之间的权重向量为 $W = (0.3, 0.2, 0.3, 0.2)$ ，则有 4 个系统基于灰靶的作战效能综合靶心度向量为：

$$r_0(x_0 x_0^*, x_i) = (0.516 0, 0.463 8, 0.549 6, 0.518 2)。$$

3.2 结果分析

根据上述计算结果可得出下述结论：

1) 根据综合靶心度向量 $r_0(x_0 x_0^*, x_i)$ ，其第 3 个分量最大，表明系统 III 的作战效能最高。

2) 根据综合靶心度向量 $r_1(x_0 x_0^*, x_i)$ ，其第 3 个分量最大，表明侦察能力最强的是系统 III。类似可分析测向能力、干扰能力和指控能力最强的是哪个系统。

3) 根据 3.1 节的计算可以构造系统 I 侦察能力、测向能力、干扰能力和指控能力的综合靶心度向量为：

$$r_1(x_0 x_0^*, x_i) = (0.515 5, 0.459 1, 0.548 3, 0.525 3)。$$

根据其分量大小，对系统 I 作战效能的贡献程度顺序分别为干扰能力、指控能力、侦察能力和测向能力，这是系统 I 在作战运用过程中必须引起重视的，必须注意其不利因素。同理，可对系统 II、系统 III 和系统 IV 进行同样分析。