

# 基于灰色关联的体系效能评估指标筛选

陆营波<sup>1</sup>, 丁士洲<sup>2</sup>, 江宜航<sup>1</sup>, 陈顶<sup>1</sup>, 方志耕<sup>3</sup>

(1. 上海机电工程研究所, 上海 201109; 2. 上海航天技术研究院, 上海 201109;  
3. 南京航空航天大学, 江苏 南京 210016)

**摘要:** 针对体系效能样本量较少、样本数据规律不确定的特点, 提出基于灰色关联的体系效能评估指标筛选方法。筛选方法利用序列曲线的几何形状相似程度判断评估指标与作战效能之间的关联度, 通过关联度大小量化评估指标与作战效能之间的关联关系, 筛选关键体系效能评估指标。将筛选方法应用于某导弹防御案例, 验证了该方法的可行性。

**关键词:** 体系效能; 指标筛选; 灰色关联

**中图分类号:** N 945. 25 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-4641(2023)03-0025-04

## System Effectiveness Evaluation Index Screening Method Based on Grey Relation Analysis

LU Yingbo<sup>1</sup>, DING Shizhou<sup>2</sup>, JIANG Yihang<sup>1</sup>, CHEN Ding<sup>1</sup>, FANG Zhigeng<sup>3</sup>

(1. Shanghai Electro-Mechanical Engineering Institute, Shanghai 201109, China; 2. Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 201109, China; 3. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, Jiangsu, China)

**Abstract:** A system effectiveness evaluation index screening method based on grey principal component analysis was proposed to solve the limited sample size and irregular sample distribution in system effectiveness evaluation. The geometric similarity of the serial curve evaluated the correlation of the evaluation index with combat effectiveness. The association between combat effectiveness and evaluation index was quantified by the correlation degree and screening key index in system effectiveness evaluation. This method can verify the feasibility of missile defence.

**Keywords:** system effectiveness; index screening; grey relation

## 0 引言

作战效能受设备状态、敌我作战安排、武器性能等多种因素共同影响。从众多因素中识别出主要因素, 以及对作战效能提升起推动作用的因素, 对作战效能评估具有重要意义。数理统计中的回归分析、方差分析、主成分分析等都是用来进行系统分析的方法, 但是应用这些方法的前提条件较多, 如需要大量数据, 样本服从某个典型的概率分布等。在作战效能评估过程中可能数据比较缺乏, 许多数据序列起伏波

动频繁, 甚至出现大起大落, 难以找到典型的分布规律, 因此采用数理统计方法往往难以奏效。

灰色关联模型的基本思想是根据序列曲线几何形状的相似程度判断不同序列之间的联系是否紧密。对于两个系统之间的要素, 其随时间或不同现象而变化的关联性大小的度量, 称为关联度。灰色关联分析法是根据因素之间发展趋势的相似或相异程度, 即“灰色关联度”, 作为衡量因素间关联程度的一种方法。灰色关联分析法在指标体系筛选中的运用一直很广泛。赵久奋等<sup>[1]</sup>着眼于要地防空作战决

收稿日期: 2023-06-28; 修订日期: 2023-08-07

基金项目: 国家自然科学基金(72271124)

作者简介: 陆营波(1994—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为体系建模与评估。

策需求,分析了影响空袭目标主攻方向的9个重要指标,考虑到火力单元最小部署间距,运用灰色关联聚类方法,对空袭目标子方向进行合理划分。沈珍瑶等<sup>[2]</sup>通过对黄河流域水资源可再生性评价指标体系的筛选,给出了灰关联分析方法的具体应用情况。黄鲁成等<sup>[3]</sup>运用灰色关联的方法通过建立适当的技术创新能力评价指标体系,专门对北京制造业的技术创新能力与竞争力之间的关系进行了研究。薛山<sup>[4]</sup>从技术创新的过程出发,建立了评价企业技术创新能力的指标体系。王章豹等<sup>[5]</sup>采用灰色关联分析法和信息熵法,分析了各种技术创新能力对其竞争力的影响程度。李雪梅等<sup>[6]</sup>构建了面板数据下新的灰色指标关联聚类(AGRA)模型,综合偏离、差离和分离的三重差异信息,构建指标关联分析模型,提出面板数据下Mean-AGRA灰色指标关联聚类算法,并应用于我国区域生态环境评价指标的降维问题。部分学者将灰色关联与其他方法进行结合以解决传统灰色关联方法不确定性较高、单一方法对导弹状态排序不够细致等问题。李琼等<sup>[7]</sup>基于聚类—灰色关联分析的指标筛选方法,建立了由18个指标组成的核电站数字化主控室报警系统评价指标体系。顾在滨等<sup>[8]</sup>利用R聚类—灰色关联度分析相结合的方法定量筛选指标,构建了绿色产业评价指标体系。朱纪忠等<sup>[9]</sup>提出一种基于改进灰色关联度的评价指标体系构建方法,采用德尔菲法对专家打分进行处理。李海君<sup>[10]</sup>运用扩展优劣解距离法(Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution, TOPSIS)和灰色关联组合的方法评估导弹状态排序,运用模糊层次分析法(Fuzzy analytic hierarchy process, FAHP)和熵权法的组合确定指标权重,给出了导弹状态评估决策流程。陈家辉<sup>[11]</sup>将灰色关联和集对分析相结合,运用灰色关联分析法确定差异度系数在其自由度中的取值,对防空导弹系统作战效能进行评估。侯崑<sup>[12]</sup>建立基于灰色混合赋权的反电子侦察效能评估模型,对阵地反电子侦察效果的指标体系进行综合评估。范纪松<sup>[13]</sup>运用多层次灰色关联分析理论和层次分析法(Analytic hierarchy process, AHP)赋权相结合的方法,对合成部队电子对抗能力进行分析评估。李海君<sup>[14]</sup>运用模糊层次分析法和熵权法组合的权重确定方案,基于改进灰色关联分析方法,对导弹状态进行评估并给出决策。Gu<sup>[15]</sup>结合灰色关联分析和

TOPSIS方法对武器系统效能进行评估。Yeh<sup>[16]</sup>基于层次分析法和灰色关联分析法,提出一种武器系统效能评估方法。Yang<sup>[17]</sup>基于灰色关联分析法以及熵权法,提出一种多属性决策方法,对多属性武器系统进行效能评估。郑益凯<sup>[18]</sup>使用改进灰色关联法,对地空导弹系统效能进行分析。

灰色关联模型对样本量的多少和样本有无明显规律都同样适用,而体系效能评估指标具有样本量贫乏、样本规律不明确的特征。本文基于灰色关联开展体系效能评估指标筛选方法研究,利用序列曲线的几何形状相似程度判断评估指标与作战效能之间的关联度,筛选出与作战效能关系最密切的评估指标,以期为体系作战效能评估提供参考指标。

## 1 数据处理算子

考虑到作战效能评估的作战效能及各个相关因素的意义、量纲常常不同,需对各个相关因素进行适当的处理。利用数据处理算子对指标数据进行处理,使之转化为数量级大体相近的无量纲数据,并将负相关因素转化为正相关因素。下面定义在灰色关联中使用的5种数据处理算子<sup>[19-20]</sup>。

**定义1** 设 $X_i=(x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(n))$ 为因素 $X_i$ 的行为序列, $D_1$ 为序列算子,且满足 $X_i D_1=(x_i(1)d_1, x_i(2)d_1, \dots, x_i(n)d_1)$ 。其中, $x_i(k)d_1=\frac{x_i(k)}{x_i(1)}$ , $k=1, 2, \dots, n$ 。则称 $D_1$ 为初值化算子, $X_i D_1$ 为 $X_i$ 在初值化算子 $D_1$ 下的象,简称初值象。

**定义2** 设 $X_i=(x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(n))$ 为因素 $X_i$ 的行为序列, $D_2$ 为序列算子,且 $X_i D_2=(x_i(1)d_2, x_i(2)d_2, \dots, x_i(n)d_2)$ 。其中, $x_i(k)d_2=\frac{x_i(k)}{\bar{X}}$ , $\bar{X}=\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_i(k)$ , $k=1, 2, \dots, n$ 。则称 $D_2$ 为均值化算子, $X_i D_2$ 为 $X_i$ 在均值化算子 $D_2$ 下的象,简称均值象。

**定义3** 设 $X_i=(x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(n))$ 为因素 $X_i$ 的行为序列, $D_3$ 为序列算子,且 $X_i D_3=(x_i(1)d_3, x_i(2)d_3, \dots, x_i(n)d_3)$ 。其中, $x_i(k)d_3=\frac{x_i(k)-\min_k x_i(k)}{\max_k x_i(k)-\min_k x_i(k)}$ , $k=1, 2, \dots, n$ 。则称 $D_3$ 为区间值化算子, $X_i D_3$ 为 $X_i$ 在区间值化算子 $D_3$ 下的象,简称区间值象。

**定义4** 设 $X_i=(x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(n))$ 为因素

$X_i$  的行为序列,  $D_4$  为序列算子, 且  $X_i D_4 = (x_i(1)d_4, x_i(2)d_4, \dots, x_i(n)d_4)$ 。其中,  $x_i(k)d_4 = 1 - x_i(k), k = 1, 2, \dots, n$ 。则称  $D_4$  为逆化算子,  $X_i D_4$  为  $X_i$  在逆化算子  $D_4$  下的象, 简称逆化象。

**定义5** 设  $X_i = (x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(n))$  为因素  $X_i$  的行为序列,  $D_5$  为序列算子, 且  $X_i D_5 = (x_i(1)d_5, x_i(2)d_5, \dots, x_i(n)d_5)$ 。其中,  $x_i(k)d_5 = \frac{1}{x_i(k)}, x_i(k) \neq 0, k = 1, 2, \dots, n$ 。则称  $D_5$  为倒数化算子,  $X_i D_5$  为  $X_i$  在倒数化算子  $D_5$  下的象, 简称倒数化象。

## 2 基于灰色关联的指标筛选模型

### 2.1 关键指标筛选模型

基于灰色关联的关键指标筛选模型, 度量指标与评估效能之间的关联程度, 筛选出对影响作战效能的关键指标。

令作战效能数据序列  $X_0 = (x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(n))$ ; 指标数据序列  $X_i = (x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(n))$ 。其中, 评估指标序号  $i = 1, 2, \dots, m$ 。则  $X_0$  与  $X_i$  的灰色关联为

$$\gamma(X_0, X_i) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \gamma(x_0(k), x_i(k)) \quad (1)$$

其中,

$$\gamma(x_0(k), x_i(k)) = \frac{\min_j \min_k \Delta x(k) + \xi \max_j \max_k \Delta x(k)}{\Delta x(k) + \xi \max_j \max_k \Delta x(k)},$$

$$(\Delta x(k) = |x_0(k) - x_i(k)|, \xi \in [0, 1])。$$

计算得到多个指标相对于作战效能的灰色关联度, 关联度越大, 其对作战效能的影响就越大, 从而可以筛选出影响作战效能的关键指标。

### 2.2 同类指标筛选模型

基于灰色关联的同类指标筛选模型, 度量指标之间的关联程度, 对指标进行聚类分析, 筛选同类指标。

对于  $n$  个作战仿真系统, 每个系统都有  $m$  个不同的评估作战性能的指标, 得到序列如下:

$$\begin{cases} X_1 = (x_1(1), x_1(2), \dots, x_1(n)) \\ X_2 = (x_2(1), x_2(2), \dots, x_2(n)) \\ \dots\dots\dots \\ X_m = (x_m(1), x_m(2), \dots, x_m(n)) \end{cases} \quad (2)$$

由式(1)计算出  $X_i$  与  $X_j$  的灰色绝对关联度  $\epsilon_{ij}$ 。

不同指标之间两两计算灰色关联度, 组成上三角矩阵:

$$A = \begin{pmatrix} \epsilon_{11} & \epsilon_{12} & \dots & \epsilon_{1m} \\ & \epsilon_{22} & \dots & \epsilon_{2m} \\ & & \ddots & \vdots \\ & & & \epsilon_{mm} \end{pmatrix} \quad (3)$$

取定临界值  $r \in [0, 1]$ , 一般要求  $r > 0.5$ 。当  $\epsilon_{ij} \geq r (i \neq j)$  时, 则视  $X_i$  与  $X_j$  为同类特征。在评估时则可以减少指标量, 降低指标维度。

## 3 案例分析

基于某导弹防御仿真系统进行案例分析, 开展基于灰色关联的体系效能评估指标筛选方法验证。对警戒区域半径( $X_1$ )、飞机拦截区域半径( $X_2$ )、区域防空半径( $X_3$ )、掩护幕防空区域半径( $X_4$ )、目标发射导弹数( $X_5$ )、发射时间间隔( $X_6$ )、系统反应时间( $X_7$ )、典型目标 RCS( $X_8$ )、典型目标探测概率( $X_9$ ) 9 个指标进行分析, 筛选得到效能关键指标和同类指标。

对上述 9 个指标进行同类指标筛选。计算 9 个指标之间的灰色关联度, 对所有的  $i \leq j (i, j = 1, 2, \dots, 9)$  计算出  $X_i$  与  $X_j$  的绝对关联度, 得到上三角关联矩阵, 如表 1 所示。利用表 1 对指标进行聚类。其临界值可根据不同要求取值, 本文取  $r = 0.59$ , 然后从第一行开始依次进行检查, 挑选大于或等于 0.59 的  $\epsilon_{ij}$ , 取标号最小的指标作为各类的代表; 对于满足条件的  $\epsilon_{ij}$ , 将指标  $j$  归入指标  $i$  所在的类, 依次进行, 最终得到 9 个指标的一个粗聚类:  $C = \{C_1, C_4\}$ , 其中  $C_1 = \{X_1, X_2, X_3\}$ ,  $C_4 = \{X_4, X_5, X_6, X_7, X_8, X_9\}$ 。

对上述 9 个指标进行关键指标筛选, 计算 9 个指标和拦截某导弹数量、拦截率 2 个效能数据的关联度。通过计算, 得到的关联度计算结果如表 2 所示。以拦截数量为目标, 基于灰关联度计算结果对指标进行排序, 按重要度的排序结果为:  $\{X_7, X_5, X_1, X_4, X_9, X_8, X_6, X_3, X_2\}$ 。其中, 系统反应时间( $X_7$ )、目标发射导弹数( $X_5$ )、警戒区域半径( $X_1$ )为对拦截数量影响度较高的关键指标。以拦截率为目标, 基于灰关联度计算结果对指标进行排序, 按重要度排序结果为:  $\{X_9, X_1, X_3, X_7, X_2, X_4, X_5, X_8, X_6\}$ 。根据设置的临界值  $r = 0.59$ , 则确定目标探测概率( $X_9$ )、警戒区域半径( $X_1$ )、区域防空半径( $X_3$ )、系统反应时间( $X_7$ )为拦截率的关键指标。

表 1 防御装备体系性能指标灰色关联矩阵

Tab. 1 Grey incidence matrix of the defense equipment system performance index

$\epsilon_{ij}$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$	$X_9$
$X_1$	1	0.875 6	0.762 2	0.513 4	0.504 2	0.511 1	0.503 9	0.511 7	0.500 8
$X_2$		1	0.697 0	0.510 1	0.503 1	0.508 4	0.502 9	0.508 8	0.500 6
$X_3$			1	0.525 5	0.508 0	0.521 2	0.507 5	0.522 4	0.501 6
$X_4$				1	0.656 0	0.916 4	0.646 5	0.938 8	0.530 7
$X_5$					1	0.687 3	0.969 6	0.677 8	0.598 3
$X_6$						1	0.675 9	0.974 4	0.536 8
$X_7$							1	0.667 0	0.604 7
$X_8$								1	0.535 0
$X_9$									1

表 2 拦截效能指标灰关联分析表

Tab. 2 Grey incidence analysis of the interceptive effectiveness index

性能指标	与拦截某导弹数量的联度	与拦截率的联度
警戒区域半径( $X_1$ )	0.701 0	0.698 4
飞机拦截区域半径( $X_2$ )	0.598 2	0.596 2
区域防空半径( $X_3$ )	0.615 2	0.610 2
掩护幕防空区域半径( $X_4$ )	0.668 7	0.573 2
目标发射导弹数( $X_5$ )	0.718 3	0.546 3
发射时间间隔( $X_6$ )	0.632 1	0.517 4
系统反应时间( $X_7$ )	0.763 9	0.604 8
典型目标 RCS( $X_8$ )	0.653 5	0.544 6
典型目标探测概率( $X_9$ )	0.660 0	0.722 4

### 4 结束语

本文采用灰色关联分析法,考虑指标与效能评估之间、指标内部之间的关联程度,在此基础上进行指标筛选,给出了作战体系指标筛选的另一种实施路径。此方法计算量少,对样本数据要求较低。利用该方法对某导弹防御仿真系统的案例进行指标筛选,实现了同类指标和关键指标的有效识别,因此可为后续仿真实验设计和效能评估工作提供参考。

下一步工作将优化指标量化方法,尝试综合几种方法并适当改进,以提高指标筛选结果的准确性和可靠性。

#### 参 考 文 献

[ 1 ] 赵久奋,唐勤洪,王伟,等. 基于主成分分析的空袭目标主攻方向判断[J]. 光电与控制, 2018, 25(7): 29-33.  
 [ 2 ] 沈珍瑶,杨志峰. 灰关联分析方法用于指标体系的筛选[J]. 数学的实践与认识, 2002, 32(5): 728-732.  
 [ 3 ] 黄鲁成,张红彩. 北京制造业竞争力与技术创新能力的关联分析[J]. 科技进步与对策, 2005, 22(10): 48-49.  
 [ 4 ] 薛山. 我国食品制造企业技术创新能力评价: 基于灰色关联分析法[J]. 科技资讯, 2007, 5(24): 202-203.

[ 5 ] 王章豹,李垒. 我国制造业技术创新能力与产业竞争力的灰色关联分析[J]. 科学学与科学技术管理, 2007, 28(7): 38-42.  
 [ 6 ] 李雪梅,党耀国,王俊杰. 面板数据下的灰色指标关联聚类模型与应用[J]. 控制与决策, 2015, 30(8): 1447-1452.  
 [ 7 ] 李琼,张力,方小勇. 基于聚类—灰色关联分析的数字化报警系统评价指标体系构建[J]. 南华大学学报(自然科学版), 2014, 28(2): 11-16.  
 [ 8 ] 顾在滨,石宝峰,迟国泰. 基于聚类—灰色关联分析的绿色产业评价指标体系构建[J]. 资源开发与市场, 2013, 29(4): 350-354.  
 [ 9 ] 朱纪忠,王萍,杨晓斌. 基于改进灰色关联度的指标体系构建方法[J]. 价值工程, 2013, 32(7): 4-7.  
 [ 10 ] 李海君,徐廷学,应新永. 基于测试数据与扩展 TOPSIS-灰色关联的导弹状态评估决策[J]. 航空兵器, 2021, 28(6): 88-94.  
 [ 11 ] 陈家辉,柯宏发. 一种灰色关联和集对分析相结合的装备作战效能评估新方法[J]. 兵工自动化, 2022, 41(6): 85-90.  
 [ 12 ] 侯崑,毕大平,赵禄达. 基于灰色混合赋权的导弹阵地反电子侦察效能评估[J]. 火力与指挥控制, 2022, 47(6): 151-157.  
 [ 13 ] 范纪松,任辉,董惠勤. 合成部队电子对抗能力灰色关联评估方法[J]. 探测与控制学报, 2021, 43(3): 103-107.  
 [ 14 ] 李海君,徐廷学. 基于组合赋权-改进灰色关联的导弹状态评估决策[J]. 现代防御技术, 2021, 49(4): 91-98.  
 [ 15 ] GU H, SONG B F. Study on effectiveness evaluation of weapon systems based on grey relational analysis and TOPSIS[J]. 系统科学与电子技术(英文版), 2009, 20(1): 106-111.  
 [ 16 ] YE H M F, LU H C. Evaluating weapon systems based on grey relational analysis and fuzzy arithmetic operations[J]. Journal of the Chinese Institute of Engineers, 2000, 23(2): 211-221.  
 [ 17 ] YANG W G, WU Y J, WANG S. Multi-attribute grey relational similarity measure evaluation method for weapon system performance based on entropy-weight [J]. Journal of Grey System, 2021, 33(2): 1-13.  
 [ 18 ] 郑益凯,范云峰,张思需,等. 基于改进灰色评估模型的地空导弹系统效能分析[J]. 空天防御, 2021, 4(2): 20-26.  
 [ 19 ] 孙留倩. 基于本体的多源数据融合方法研究与应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.  
 [ 20 ] 林瑀,陈日成,金涛. 面向复杂信息系统的多源异构数据融合技术[J]. 中国测试, 2020, 46(7): 1-7.