

1-4-2019

Improvement of Grey Target Algorithm and Its Application in Assessment of Marine Gas Turbine

Tongqing Wang

School of System Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

Mei Shan

School of System Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

Xiaobo Li

School of System Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

Jiajie Liu

School of System Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Improvement of Grey Target Algorithm and Its Application in Assessment of Marine Gas Turbine

Abstract

Abstract: In the modern shipbuilding industry, gas turbines are increasingly becoming the main power supply devices for ships with their good overall performance. The assessment of their overall performance is very important in the development and introduction of gas turbines. *By using the grey target theory, a comprehensive gas turbine performance evaluation model is constructed and the grey target method can easily deal with the evaluation problem which has the characteristics of "small amount of data, lean information, and uncertainty". By discussing the influence of distinguishing coefficient in the algorithm, a method for determining the value of the distinguishing coefficient is proposed to improve the grey target algorithm. A case study is performed to verify the feasibility and practicality of the method.*

Keywords

grey target, distinguishing coefficient, marine gas turbine, comprehensive evaluation

Recommended Citation

Wang Tongqing, Mei Shan, Li Xiaobo, Liu Jiajie. Improvement of Grey Target Algorithm and Its Application in Assessment of Marine Gas Turbine[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(11): 4477-4484.

灰靶算法的改进及在舰用燃气轮机评估中的应用

王同庆, 梅珊, 李小波, 刘佳杰

(国防科技大学 系统工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 在现代船舶工业中, 燃气轮机凭借其良好的总体性能, 越来越成为舰船的主流动力提供装置, 在燃气轮机的研发和引进过程中, 对其综合性能的评估也显得越来越重要。通过运用灰靶理论在“少数据、贫信息、不确定性”的综合评估方面有较强实用性的特点, 构造了舰用燃气轮机综合性能的评估模型, 通过讨论灰靶算法中分辨系数的影响, 提出了一种确定分辨系数取值的方法, 对灰靶算法进行了改进。通过对案例的分析, 验证了该方法的可行性和实用性。

关键词: 灰靶算法; 分辨系数; 舰用燃气轮机; 综合评估

中图分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2018) 11-4477-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201811051

Improvement of Grey Target Algorithm and Its Application in Assessment of Marine Gas Turbine

Wang Tongqing, Mei Shan, Li Xiaobo, Liu Jiajie

(School of System Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In the modern shipbuilding industry, gas turbines are increasingly becoming the main power supply devices for ships with their good overall performance. The assessment of their overall performance is very important in the development and introduction of gas turbines. By using the grey target theory, a comprehensive gas turbine performance evaluation model is constructed and the grey target method can easily deal with the evaluation problem which has the characteristics of "small amount of data, lean information, and uncertainty". By discussing the influence of distinguishing coefficient in the algorithm, a method for determining the value of the distinguishing coefficient is proposed to improve the grey target algorithm. A case study is performed to verify the feasibility and practicality of the method.

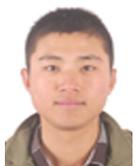
Keywords: grey target; distinguishing coefficient; marine gas turbine; comprehensive evaluation

引言

邓聚龙提出了灰色理论的概念, 之后, 灰色系统的理论一直在不断发展。灰靶理论是灰色系统理论的一个重要组成部分, 其基本思想是在没有标准模式的条件下设定一个灰靶, 通过灰靶理论

的方法在灰靶中找到靶心(标准模式), 然后将待评价的指标序列与靶心序列进行比较得到靶心度, 最后结合靶心度等级划分原则确定评估等级^[1]。灰靶理论的核心问题之一是求取靶心度, 靶心度是指每一个待评估模式与标准模式的灰关联度, 其几何意义为待评价指标序列与靶心序列的距离与相似程度, 即: 两者距离越近、相似程度越高, 靶心度就越大。

经典灰靶方法的基本思想是依据问题的实际背景, 找出理想最优方案对应的效果评价向量,



收稿日期: 2018-05-30 修回日期: 2018-06-30;
作者简介: 王同庆(1989-), 男, 山东临邑, 硕士生, 研究方向为体系工程与体系仿真; 梅珊(1981-), 女, 湖南永州, 博士, 副教授, 研究方向为体系工程与体系仿真; 李小波(1983-), 男, 湖南衡阳, 博士, 讲师, 研究方向为体系工程与体系仿真。

<http://www.china-simulation.com>

• 4477 •

由决策问题中各个方案的效果评价向量与理想最优方案的效果评价向量之间关联度的大小来确定问题的最优方案及方案的优劣排序, 灰靶分析模型的基本思想是根据序列曲线几何形状来判断不同序列之间的联系是否紧密^[1]。早期的灰靶分析模型, 无论是基于点关联的灰靶模型, 还是基于整体或全局视角的广义分析模型, 都是以接近性为出发点测度相似性^[2]。在经典灰靶算法思想的基础上, 很多国内外学者进行了扩展和充实。

在总结前人研究的基础上, 针对灰靶算法中靶心系数计算公式里分辨系数 ρ 的取值问题进行了研究, 提出了一种改进的计算方法, 以合理地选取分辨系数的值, 使灰靶算法在评估问题中取得更好的应用效果。最后将改进的算法应用于舰用燃气轮机综合性能评估, 得到了实例验证。

1 灰靶算法

灰靶理论基于灰色关联分析来处理模式序列。灰色关联分析的目的是对“信息不完全与少数据、不确定的系统”作因子间的量化、序化。其实质是对这些系统或信息序列做有测度、有参考系的“整体比较”^[3]。其经典流程如图 1 所示。

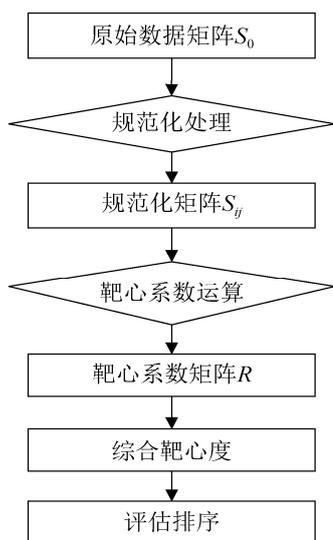


图 1 灰靶算法流程图
Fig. 1 Grey target model

1.1 评估数据规范化

假设有 n 个待评估方案, 每个方案有 m 个评价指标, 记第 i 个方案在第 j 个评价指标下的原始值为 s_{ij}^0 , 评估模式的原始数据矩阵为:

$$S^0 = \begin{bmatrix} s_{11}^0, s_{12}^0, \dots, s_{1m}^0 \\ s_{21}^0, s_{22}^0, \dots, s_{2m}^0 \\ \dots \\ s_{n1}^0, s_{n2}^0, \dots, s_{nm}^0 \end{bmatrix}$$

各指标序列下的数据代表不同的特征量, 其单位和量纲的不同会导致各指标之间的数据值差异过大, 因而对评估结果产生不良影响。为了减小原始数据中单位和量纲差异对评估结果的影响, 我们参考文献[4]的规范化公式, 对原始数据进行一些规范化处理:

$$s_{ij} = \frac{s_{ij}^0}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (s_{ij}^0)^2}}, j \in S^+ \quad (1)$$

$$s_{ij} = \frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\frac{1}{s_{ij}^0})^2}}, j \in S^-$$

其中 S^+ 为效益型的指标的集合, 即取值越大效果越好的指标集; S^- 为成本型指标, 即取值越小效果越好的指标集。通过规范化运算的处理, 可以得到数据矩阵:

$$S = \begin{bmatrix} s_{11}, s_{12}, \dots, s_{1m} \\ s_{21}, s_{22}, \dots, s_{2m} \\ \dots \\ s_{n1}, s_{n2}, \dots, s_{nm} \end{bmatrix}$$

若评估初始给出了系统所要求的目标值序列, 则将每个指标的目标值做相应的规范化处理, 得到靶心序列; 若评估初始没有目标值, 则一般选取指标最优值作为目标值, 即可以在规范化矩阵 S 中每列取其最大值得到靶心序列, 记为 $S_0 = [s_{01}, s_{02}, \dots, s_{0m}]$ 。

1.2 靶心系数的计算

灰靶算法引入了靶心系数, 以综合衡量计算实际数据值与目标值的“距离”。灰色系统理论已经提供了成熟的公式来计算靶心系数^[2]:

$$\gamma_{ij} = \frac{\min_{1 \leq i < n} \min_{1 \leq j < m} \Delta_{0ij} + \rho \max_{1 \leq i < n} \max_{1 \leq j < m} \Delta_{0ij}}{\Delta_{0ij} + \rho \max_{1 \leq i < n} \max_{1 \leq j < m} \Delta_{0ij}} \quad (2)$$

式中: $\Delta_{0ij} = |s_{0j} - s_{ij}|$, 代表每个方案在不同指标下的取值与靶心目标值的差; ρ 为分辨系数, 代表系统整体对单个“距离”的影响程度, 一般取 0.5。

1.3 靶心度和综合排序

为便于分析, 将不同方案序列与靶心序列在各指标下的靶心系数值聚合为一个可比较的值。通常把靶心系数算术平均值 r_i , 作为该方案的靶心度。

$$r_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \gamma_{ij} \quad (3)$$

将靶心度按照大小排序, 可以得到相应方案的优劣顺序, 即若 $r_1 > r_2$, 表明方案 1 优于方案 2。

2 改进的灰靶模型

在灰靶算法靶心系数的计算公式(2)中, 分辨系数 ρ 对计算结果会产生一定的影响。从公式可以看出, ρ 的取值影响到 $\max_{1 \leq i < n} \max_{1 \leq j < m} \Delta_{0ij}$ 在靶心系数的贡献程度, 最终影响方案的靶心度排序结果。

2.1 分辨系数分析

在传统的方法中, 分辨系数 ρ 通常取值为 0.5, 但也有一些文献讨论了 ρ 的取值问题, 文献[5-6]都指出 $\rho=0.5$ 的不合理性。

文献[7]探讨了分辨系数 ρ 的意义, 分辨系数取值的大小, 在主观上体现了对差值最大值 $\max_{1 \leq i < n} \max_{1 \leq j < m} \Delta_{0ij}$ 的重视程度, 同时在客观上也体现了系统各个因子对靶心度的间接影响程度。此外文章给出了数据取值序列在受到不同程度干扰时分分辨系数 ρ 的不同取值范围, 以避免系统观测序列的异常值支配整个系统靶心度(集合)取值, 也能使靶

心度更好地体现系统的整体性。文献[8]将上述取值方法应用到烤烟品种综合评价的灰色理论中, 得到了较好的效果。

文献[9]指出分辨系数 ρ 的取值从固定值拓展到一个数列, 针对不同指标内 $\frac{\Delta_{0ij}}{\max_{1 \leq i < n} \max_{1 \leq j < m} \Delta_{0ij}}$ 的差异程度, 来选取不同的分辨系数, 得到一个分辨系数序列: $\rho = [\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_m]$, 对应系统的 m 个指标。文献[10]参考这种思想, 对分辨系数进行动态取值, 对医疗工作质量进行综合评价和分析, 并与静态取值 $\rho=0.5$ 的情况进行比较。

在文献[11]中, 作者矩阵型数据给出了分辨系数 ρ 的一个选取准则, 即分辨系数的选取应使该指标内不同方案的靶心系数差异取得最大化的值, 并采用灰熵来度量靶心系数的“差异显著性”, 借助粒子群优化算法, 以靶心系数序列的灰熵最小为目标, 求解最优分辨系数值。文献[12]对该方法做了进一步讨论, 引入灰熵均衡度概念, 使灰熵函数值域恒为 0 到 1, 从而保证在较小寻优范围和确定的误差要求下, 快速得到合适的粒子。

2.2 灰靶算法的改进

综合评估体系中, 根据实际情况下不同指标重要性程度的不同, 各个指标必须赋予相应的权重, 才能准确进行评估。而且, 指标权重取值对评估的结果会有很大的影响。本文将权重因素重新考虑, 并将其引入到分辨系数 ρ 的计算中, 使评估模型更加准确的体现指标重要性差异的客观实际。

2.2.1 权重计算方法

经典的灰靶算法中, 将各指标的影响程度被看作相同, 但后续跟多文献均提出了将权重作为计算靶心度的重要系数。传统的计算方法中指标权重以主观赋权法为主, 即指决策者或者决策团队成员以及专家以原始数据和主观经验为依据, 对属性重要程度进行确定的赋权方法, 经常见到的是 Delphi 法、层次分析法(AHP)、环比评分

法, 但是通过主观赋权法获得的结果具有很强的主观随意性^[13]。本文利用主客观组合赋权法, 将给定的主观权重与熵权法^[14]计算出的信息熵权重相结合, 既考虑到决策者的个人意向和专家的经验, 又可以深入挖掘数据本身所包含的信息, 在一定程度上避免了单独使用一种方法而存在的固有偏差, 使评估结果更加科学合理。

熵最初产生于热力学, 后来在信息论中用来表示事物出现的不确定性, 熵权法是一种依据各指标所包含的信息量的多少确定指标权重的客观赋权法, 某个指标下各个方案取值的差异程度越大, 则说明该指标提供的信息量也就越多, 在综合评价中起的作用越大, 则该指标的权重也应越大^[15]。

对建立的规范化数据矩阵 S_{ij} , 对其进行归一化处理, 形成归一化的评估指标矩阵 $X_{ij} = [x_{ij}]_{n \times m}$, 其中

$$x_{ij} = \frac{s_{ij}}{\sum_{i=1}^n s_{ij}} \quad (4)$$

对于方案中的指标 j , 其信息熵为:

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n (x_{ij} \ln x_{ij}) \quad (5)$$

则第 j 个指标的熵权为:

$$w_{e_j} = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^m (1 - e_j)} \quad (6)$$

我们可以看出, 决策指标的信息熵越大, 说明该指标可以提供的有用信息越少, 其最终熵权也越小; 反之, 其熵权越大。

假设该评估体系通过主观赋权法得到的权重值为 $W_0 = [w_{0_1}, w_{0_2}, \dots, w_{0_m}]$, 通过熵权法计算得出的客观指标权重值为 $W_e = [w_{e_1}, w_{e_2}, \dots, w_{e_m}]$, 则组合权重 $W = [w_1, w_2, \dots, w_m]$ 可以由线性平均的方式计算得出:

$$w_j = \alpha w_{0_j} + (1 - \alpha) w_{e_j} \quad (7)$$

其中系数 α 的选取有一定的重要性: (1) 当 $\alpha=0$ 时, 组合权重的大小即熵权法权重的大小, 这样消除了

主观因素的影响; (2) 当 $\alpha=1$ 时, 组合权重的大小为主观赋权法权重的大小, 以专家经验和历史数据为参考, 消除了客观因素的影响; (3) 对于主观权重和客观权重都有一定的重要性的评估问题, 一般我们选取 $\alpha=0.5$, 以表示二者相同的重要程度。

2.2.2 靶心度的计算

靶心度即为靶心系数在多指标情况下的聚合, 在考虑指标权重的条件下, 我们将公式(3)的算术平均数的计算方法做以改进:

$$r_i = \sum_{j=1}^m w_j \gamma_{ij} \quad (8)$$

r_i 即为我们最终所要计算的靶心度, 通过靶心度的对比排序, 最终得到方案的优劣顺序。

2.2.3 分辨系数的改进

灰熵均衡度^[12]概念的提出, 建立了 $\rho \sim \gamma_{0ij}$ 的函数模型:

$$F(\rho)_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n (\overline{\gamma_{0ij}} \ln \overline{\gamma_{0ij}}) \quad (9)$$

其中, $\overline{\gamma_{0ij}} = \frac{\gamma_{0ij}}{\sum_{i=1}^n \gamma_{0ij}}$, 为同一指标下靶心系数的归一化值。

借助 ρ 和 γ_{0ij} 之间的这种明确的函数关系, 来探究最佳分辨系数的取值。 $F(\rho)_j$ 反映了靶心系数的差异显著程度的大小。当 $F(\rho)_j$ 达到极小值时, 靶心系数的差异显著性极大, 对应的 ρ 就是最优分辨系数。

当我们求取整个系统的分辨系数时, 不能简单地考虑不同指标下 $F(\rho)_j$ 的累加和最小。因为不同指标权重不同, 指标下不同方案的靶心系数的差异程度对系统整体评估的贡献程度也就不同。因此在衡量分辨系数取值时, 权重的作用不能忽视。

要衡量整个系统的靶心系数, 使其差异显著性最大化, 则要使加权后靶心系数的差异化最大, 即靶心度的灰熵均衡度最小, 即:

$$F(\rho) = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n (\overline{r_i} \ln \overline{r_i}) \quad (10)$$

其中, $\bar{r}_i = \frac{r_i}{\sum_{i=1}^n r_i}$, 为靶心度的归一化值。

加权灰熵均衡度 $F(\rho)$ 综合反映了整个系统靶心系数的差异性, 其极小值时 ρ 的取值即为所探究最佳分辨系数的取值。

2.3 算法框架

通过将权重因素引入分辨系数的求取和靶心度聚合计算中, 最终灰靶算法模型如图 2 所示。

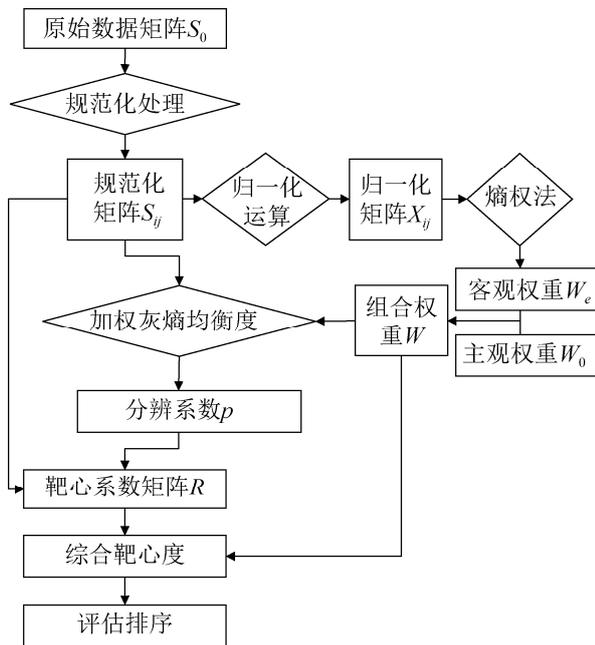


图 2 改进的灰靶算法模型
Fig. 2 Improved grey target model

3 案例研究

本节结合舰用燃气轮机综合性能评估的案例, 对所提出的改进的灰靶算法进行实例运用和验证。

3.1 案例背景

燃气轮机由于具有紧凑的结构布局、良好的燃油经济指标、较高的热效率以及良好的可靠度与长久的使用寿命等优势, 被广泛应用于航空、航海、陆航等军用国防领域, 成为新一代的核心动力代表^[16]。舰用燃气轮机相对传统的内燃机与蒸汽机, 由于其具有控制反应灵敏度高、单机

输出功率高、结构布局紧凑、重量轻等优势, 在船舶领域尤其是军用舰艇方面得到广泛认可与发展^[17]。尤其是作为军用舰艇的核心动力, 燃气轮机总体性能的好坏, 运行状况是否安全稳定, 将直接影响到舰船的生存能力与战斗能力。

近年以来, 我国舰用燃气轮机技术发展比较快, 其性能也有了很大地提升, 但是与西方发达国家相比较, 还存在一定程度的差距。为了能够更好地研制出达到世界先进水平的燃气轮机, 以满足国内对舰用燃气轮机使用的需求, 对燃气轮机综合性能进行科学合理地评估就显得十分必要。

参考文献[18]的评估指标体系, 并在此基础上利用专家咨询法取得指标相应的主客观权重值, 同时对两个备选方案 A 和 B 基于所提出指标进行测试, 并将数据进行规范化处理。具体汇总数值见表 1。

3.2 改进灰靶算法应用与结果分析

根据表 1 所提供的某舰用燃气轮机性能评估指标体系和规范后的方案数据值, 按照图 2 所示的模型流程进行运算, 其计算步骤如下:

(1) 利用公式(1)对评估数据标准化, 并得到靶心序列:

$$S_0 = [0.88 \ 0.85 \ 0.89 \ 0.87 \ 0.88 \ 0.90 \ 0.91 \ 0.90 \ 0.88 \ 0.86 \ 0.80 \ 0.76 \ 0.85 \ 0.90 \ 0.88]$$

(2) 利用熵权法计算出客观权重:

$$W_e = [0.0108 \ 0 \ 0.033 \ 0.00090.0054 \ 0.0523 \ 0.3125 \ 0.0219 \ 0.0079 \ 0.0002 \ 0.3684 \ 0.045 \ 0.0002 \ 0.1361 \ 0.0054]$$

(3) 通过公式(7)计算出综合权重:

$$W = [0.0579 \ 0.0525 \ 0.039 \ 0.0229 \ 0.0527 \ 0.0761 \ 0.2062 \ 0.0409 \ 0.0239 \ 0.0401 \ 0.2142 \ 0.0525 \ 0.0151 \ 0.083 \ 0.0227]$$

(4) 求出数据的 Δ_{0ij} , 并找出其最大与最小值。

(5) 利用 $\rho \sim r_i$ 的关系函数, 采用粒子群优化算法, 寻求加权灰熵均衡度 $F(\rho)$ 取得极小值时的分辨系数值。运用 MATLAB 中的 PSO 工具箱, 运

行得到最优的分辨系数 $\rho=0.1925$ 。

(6) 利用公式(13)靶心度, $r_1=0.7573$, $r_2=0.9131$, 得到方案B优于方案A。

同时, 我们也计算了在 $\rho=0.5$ 条件下的靶心度, 此时 $r_1=0.6743$, $r_2=0.8610$ 。通过表2可以

看出, 在通过改进计算方法得出分辨系数的条件下计算综合靶心度比在 $\rho=0.5$ 的通常条件下计算出的综合靶心度的辨别程度更高, 更容易区分方案的优劣, 达到了改进分辨系数的目的。

表1 舰用燃气轮机方案数据值
Tab. 1 Marine gas turbine program data values

一级指标		二级指标			方案	
因素	指标权重	子因素	相对权重	主观权重	方案A	方案B
技术指标 U_1	0.3	性能指标 U_{11}	0.35	0.105	0.88	0.81
		主要参数 U_{12}	0.35	0.105	0.85	0.85
		瞬时运行特性 U_{13}	0.15	0.045	0.89	0.77
		持续运行特性 U_{14}	0.15	0.045	0.87	0.85
功能指标 U_2	0.2	调节功能 U_{21}	0.5	0.1	0.88	0.83
		保护功能 U_{22}	0.5	0.1	0.90	0.75
可靠性指标 U_3	0.2	可靠性指标 U_{31}	0.5	0.10	0.58	0.91
		使用可靠性 U_{32}	0.3	0.06	0.90	0.80
		冗余设计 U_{33}	0.2	0.04	0.88	0.82
维修性指标 U_4	0.2	可达性 U_{41}	0.4	0.08	0.86	0.85
		视情维修 U_{42}	0.3	0.06	0.49	0.80
		互换性 U_{43}	0.3	0.06	0.90	0.76
装舰适应指标 U_5	0.1	振动水平 U_{51}	0.3	0.03	0.85	0.84
		噪声水平 U_{52}	0.3	0.03	0.67	0.90
		红外特性 U_{53}	0.4	0.04	0.88	0.83

表2 评估结果数据表
Tab. 2 Evaluation result data

评估指标	指标值		主观权重	客观权重	组合权重	改进后的靶心系数		组合靶心度
	A	B				A	B	
U_{11}	0.88	0.81	0.105	0.010 8	0.057 9	1	0.822 9	A的综合靶心度为0.7573; B的综合靶心度为0.9131。
U_{12}	0.85	0.85	0.105	0.000 0	0.052 5	1	1	
U_{13}	0.89	0.77	0.045	0.033 0	0.039 0	1	0.730 6	
U_{14}	0.87	0.85	0.045	0.000 9	0.022 9	1	0.942 1	
U_{21}	0.88	0.83	0.1	0.005 4	0.052 7	1	0.866 8	
U_{22}	0.90	0.75	0.1	0.052 3	0.076 1	1	0.684 4	
U_{31}	0.58	0.91	0.10	0.312 5	0.206 2	0.496 5	1	
U_{32}	0.90	0.8	0.06	0.021 9	0.040 9	1	0.764 9	
U_{33}	0.88	0.82	0.04	0.007 9	0.023 9	1	0.844 3	
U_{41}	0.86	0.85	0.08	0.000 2	0.040 1	1	0.970 1	
U_{42}	0.49	0.80	0.06	0.368 4	0.214 2	0.512 1	1	
U_{43}	0.90	0.76	0.06	0.045 0	0.052 5	1	0.699 2	
U_{51}	0.85	0.84	0.03	0.000 2	0.015 1	1	0.970 1	
U_{52}	0.67	0.90	0.03	0.136 1	0.083 0	0.585 9	1	
U_{53}	0.88	0.83	0.04	0.005 4	0.022 7	1	0.866 8	

4 结论

舰用燃气轮机的综合评估, 是一个多指标多目标的系统问题。引入灰靶理论, 可以很好地解决评估过程中信息量少、原始数据不足的问题; 同时将客观权重与主观权重相结合, 避免了先验信息的导向作用, 也可以更有效的避免个别效果较差的指标值影响系统整体的评估。对于灰靶算法中分辨系数计算的改进, 提高了靶心度的差异性, 提高了评估分辨率。上述方法的有机结合, 为舰用燃气轮机的综合评估提供了较为实际的思路, 对整体上提高燃气轮机综合评估的可信性、有效性和科学性有着重要的意义。

参考文献:

- [1] 邓聚龙. 灰理论基础[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002: 422-454.
Deng Julong. Basis of Grey Theory [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2002: 422-454.
- [2] Liu S, Yang Y, Cao Y, et al. A summary on the research of GRA models[J]. Grey Systems (S0957-3720), 2013, 3(1): 7-15.
- [3] 邓聚龙. 灰预测与灰决策[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.
Deng Julong. Grey Prediction and Grey Decision [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2002.
- [4] 肖丁, 赵金超, 曲豪彦, 等. 舰用燃气轮机总体设计方案评估研究[J]. 船舶工程, 2011, 33(2): 37-40.
Xiao Ding, Zhao Jinchao, Qu Haoyan, et al. Research on Overall Design Scheme Evaluation of Marine Gas Turbine[J]. Ship Engineering, 2011, 33(2): 37-40.
- [5] 申卯兴, 薛西锋, 张小水. 灰色关联分析中分辨系数的选取[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2003, 4(1): 68-70.
Shen Maoxing, Xue Xifeng, Zhang Xiaoshui. Determination of Discrimination Coefficient in Grey Incidence Analysis[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2003, 4(1): 68-70.
- [6] 刘震宇. 灰色系统分析中存在的两个基本问题[J]. 系统工程理论与实践, 2000, 20(9): 123-124.
Liu Zhenyu. Two Problems Existing in Gray Systems Analysis[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2000, 20(9): 123-124.
- [7] 吕锋. 灰色系统关联度之分辨系数的研究[J]. 系统工程理论与实践, 1997, 17(6): 49-54.
Lü Feng. Research on the Identification Coefficient of Relational Grade for Grey System[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 1997, 17(6): 49-54.
- [8] 李伟, 王超, 周绍松, 等. 最优分辨系数和主成分分析在烤烟品种综合评价中的应用[J]. 中国烟草科学, 2017, 38(2): 45-50.
Li Wei, Wang Chao, Zhou Shaosong, et al. Application of Optimal Resolution Coefficient and Principal Component Analysis in Comprehensive Evaluation of Flue-cured Tobacco Varieties[J]. Chinese Tobacco Science, 2017, 38(2): 45-50.
- [9] 范凯, 吴皓莹. 灰色系统关联度中一种新的分辨系数确定方法[J]. 武汉理工大学学报, 2002, 24(7): 86-88.
Fan Kai, Wu Haiying. A new method on identification coefficient of relational grade for gray system[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2002, 24(7): 86-88.
- [10] 刘雁灵, 曹文君. CRITIC-灰色综合评判法在医疗工作质量评价中的应用[J]. 中国卫生统计, 2016, 33(6): 991-993.
Liu Yanling, Cao Wenjun. Application of CRITIC-Gray Comprehensive Evaluation Method in Quality Evaluation of Medical Work[J]. Chinese Health Statistics, 2016, 33(6): 991-993.
- [11] 张可. 矩阵型灰色关联分析建模技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
Zhang Ke. Research on Matrix Grey Relational Analysis Modeling Technology[D]. Nanjing: Nanjing Aerospace University, 2010.
- [12] 董彦非, 吴欣蓬, 屈高敏. 战斗机综合作战效能评估的改进灰色关联模型[J]. 飞行力学, 2017, 35(2): 92-96.
Dong Yanfei, Wu Xinpeng, Qu Gaoming. The Improved Grey Relation Model for Combined Operational Effectiveness Evaluation of Fighters[J]. Flight Dynamics. 2017, 35(2): 92-96.
- [13] 尤晨. 主客观组合赋权的灰色决策模型及其在消费者决策中的运用[J]. 数学的实践与认识, 2014, 44(20): 57-63.
You Chen. Grey Decision-making Model Based on the Combinational Evaluation of Subjective and Objective Weighting Method and Its Application in Consumer Decision-making[J]. Mathematics in Practice & Theory, 2014, 44(20): 57-63.