

基于改进灰色聚类的导弹发射车供电系统健康评估

侯如非, 段杰, 孙海涛

(上海机电工程研究所, 上海 201109)

摘要: 针对导弹发射车供电系统健康状态评估方法的不足, 对一种基于动态区间改进灰色聚类的评估方法展开研究; 构建了供电系统健康状态评估指标体系; 采用灰色关联法与层次分析法相结合的综合评价方法, 建立了改进的灰色聚类理论模型; 以某型导弹发射车供电系统为对象, 结合实测数据, 通过归一化处理、综合评价与聚类分析, 实现了系统健康状态的定量评估; 应用结果表明, 该方法能够有效评估供电系统健康状态, 具有较高的准确性与通用性, 为装备保障提供了可靠依据。

关键词: 导弹发射车; 供电系统; 健康评估; 灰色聚类; 白化权函数

Health Assessment of Power Supply Systems for Missile Launch Vehicles Based on Improved Grey Clustering

HOU Rufe, DUAN Jie, SUN Haitao

(Shanghai Electro-Mechanical Engineering Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: To address the shortcomings in the health status assessment of missile launch vehicle power supply systems, research is conducted on the assessment method based on dynamic interval improved gray clustering. An health assessment index system for the power supply system is built. By using a comprehensive evaluation method combining the gray relational analysis and analytic hierarchy process, an improved gray clustering theoretical model is established. By taking the power supply system of a certain missile launch vehicle as an example and combining with the measured data, the system's health statuses are quantitatively evaluated by normalization processing, comprehensive evaluation, and cluster analysis. Application results show that the method can effectively evaluate the health statuses of power supply systems with a high accuracy and generality, providing a reliable basis for equipment support.

Keywords: missile launcher vehicle; power supply system; health assessment; grey clustering; whitening weight function

0 引言

供电系统作为导弹发射车的关键组成部分, 是完成指挥控制、发射打击等作战任务的能源保障核心, 其性能状态直接决定了武器系统的作战效能和任务可靠性。供电系统健康评估基于对供电电网的实时状态监测, 通过综合分析当前供电品质与电力特性参数, 准确量化系统偏离额定工作状态的程度, 为装备维护

和作战决策提供科学依据。建立完善的导弹发射车供电系统健康评估理论体系与先进评估方法, 能够为作战单元的状态管理、武器系统的任务规划等重要活动提供关键技术支撑。

目前, 导弹发射车供电系统普遍采用基于固定门限值的在线保护机制, 缺乏系统性的健康状态评估方法; 或仅采用基于专家经验的粗略评估方法, 通过定性描述界定系统健康程度, 存在科学性不足、通用性有限、准

收稿日期:2025-08-05; 修回日期:2025-09-19。

作者简介:侯如非(1995-),男,硕士,工程师。

引用格式:侯如非,段杰,孙海涛. 基于改进灰色聚类的导弹发射车供电系统健康评估[J]. 计算机测量与控制, 2026, 34(8): 277-283.

确性低等问题, 难以满足现代化作战对装备保障的精确化需求。

基于灰色系统理论的灰色聚类法能够有效处理小样本、贫信息的不确定性问题, 将定性分析与定量计算相结合, 在复杂系统评估领域得到了广泛应用^[1-3]。文献[4]采用等权灰色聚类法有效实现了对发控系统的风险评估, 但对于差异性指标的权重的科学设置未做进一步考虑, 评估结果存在误判可能。文献[5]与文献[6]将层次分析法与灰色聚类结合, 建立了武器装备研制、道路运输安全的评价体系, 结合专家经验对灰色聚类关键指标进行了权重分配, 并对评价方法进行了实例验证。然而专家经验存在一定主观因素, 难以全面科学地覆盖系统各类差异指标。文献[7]采用德尔菲法和层次分析法相结合的方式, 对各领域专家赋予相应权重系数, 优化了由专家个体差异带来的评估不一致性, 但主观影响仍然存在。文献[8]综合熵权法和灰色关联法对装备性能指标进行组合赋权, 以期基于历史数据进行客观评价, 从而得到较准确的聚类结果。但在应对系统指标差异程度不大的评估问题时, 熵权法等客观评价方法往往得到的权重准确度不高, 具有一定局限性。为解决这个问题, 文献[9]将熵权法与层次分析法二者得到的指标权重进行线性加权, 以平衡评价的主观性与客观性, 但二者线性结合缺乏一定科学依据; 与之类似, 文献[10]对熵权法与层次分析法得到的指标权重进行了不同程度的线性加权, 同样缺乏一定理论依据, 影响聚类后的评估结果准确度。

针对上述问题, 本文针对导弹发射车供电系统健康评估, 提出了基于综合赋权的改进灰色聚类法。该方法首先采用灰色关联分析法从客观数据中提取指标特征, 同时运用层次分析法融入领域专家经验, 建立主客观相结合的综合赋权模型; 其次, 针对供电系统运行中的不稳定性特点, 引入动态区间白化权函数模型, 通过实时调整聚类区间边界来适应系统状态变化; 最后, 基于相关性分析优化权重融合算法, 确保主客观权重的科学整合。实验验证表明, 该方法较传统评估方法准确率显著提升, 为导弹发射车供电系统健康评估提供了更加科学、可靠的技术手段。

1 导弹发射车供电系统健康评估指标体系

导弹发射车供电系统健康评估结果是导弹发射车完成诸多作战任务的重要依据指标。根据导弹发射车的任务特点, 按照供电系统的技术指标, 选取具有代表性的评估状态量, 构建导弹发射车供电系统健康评估指标体系, 将整个系统分为系统层、功能层和指标层等 3 个层次, 如图 1 所示。

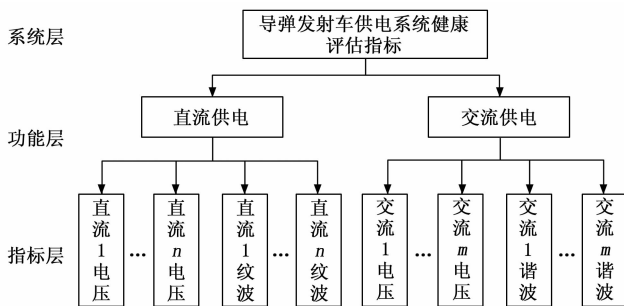


图 1 导弹发射车供电系统健康评估指标

其中, 直流电压稳定性直接关系到弹上控制设备的正常工作, 电压异常可能导致系统故障; 直流纹波超标会干扰精密电子设备, 特别是可能导致制导系统误动作, 严重影响作战效能, 因此其权重高于谐波指标; 交流电压稳定性影响辅助设备运行, 谐波含量过高则会降低系统效率。指标优先级通过专家问卷调查和历史故障案例分析确定, 其中直流电压稳定性和纹波系数被列为最高优先级指标。需要说明的是, 输出电流和输出电压稳定性等参数虽然重要, 但由于受负载影响较大, 在不同工况下表征不一致, 无法客观反映系统本身的健康状态, 因此未纳入评估指标体系。相比之下, 纹波、谐波等参数更能真实反映供电系统的本质特性。该指标体系既考虑了参数的技术特性, 又结合了作战需求的实际影响, 确保了评估的科学性和实用性。

同时, 导弹发射车供电系统的实际健康状态可划分为健康、I 降级、II 降级、故障共 4 种等级。

这种分级体系充分考虑了系统性能衰减的渐进性和作战使用的实际需求:

健康状态表征各指标检测值均处于最优工作区间(额定值的 $\pm 5\%$ 以内), 供电系统所有功能正常运行, 电能质量完全满足作战要求, 可安全可靠地执行各类作战任务。此时系统处于最佳运行状态, 无需任何维护干预。

I 级降级状态表征部分次要指标检测值出现轻微偏离(额定值的 $\pm 5\% \sim \pm 10\%$), 但关键指标仍保持在允许范围内。供电系统基本功能正常, 可满足大部分作战任务需求, 但需要加强状态监控并计划预防性维护。

II 级降级状态表征多个关键指标出现明显偏离(额定值的 $\pm 10\% \sim \pm 20\%$), 系统性能显著下降, 只能满足基本作战需求, 需要降级使用并尽快安排检修。此时系统可靠性降低, 存在故障风险。

故障状态则表征关键指标严重偏离(超过额定值的 $\pm 20\%$), 供电系统无法正常工作, 必须立即停机维修。此时系统已丧失基本功能, 继续使用可能导致设备损坏或作战任务失败。

2 基于灰色关联法与层次分析法的综合评价方法

导弹发射车供电系统复杂、庞大, 各项指标影响程度不一且存在一定耦合关系, 指标间相对重要性难以依据专家经验进行准确主观判断, 从而容易造成对重要指标的忽略, 影响最终健康评估结果。与此同时, 供电系统指标表征与负载特性密切相关, 且系统本身往往具有一定不稳定性, 通过历史数据客观推算指标的权重, 较难覆盖各类工况, 可能造成健康评估结果的失真。于是, 本文通过集成主观层次分析法与客观灰色关联法, 建立综合评价法对供电系统各指标重要度进行赋权。

2.1 灰色关联法

灰色关联法通过分析参考数据列与若干比较数据列的相似程度, 判断各因素与结果是否联系紧密, 以确定影响程度。主要步骤如下^[11-12]:

1) 对指标状态矩阵 $\mathbf{X}_g(k) = [X_{ij}(k)]$ 进行规范化处理, 并计算绝对值差 $\Delta_{ij-if}(k)$:

$$\Delta_{ij-if}(k) = |X_{ij}(k) - X_{if}(k)| \quad (1)$$

式中, $g=1, 2, \dots, s$, 代表功能数量; $k=1, 2, \dots, m$, 代表历史数据数量; $i=1, 2, \dots, n$, 对应 g 功能的隶属指标数量; j, f 均为 i 的遍历, 但有 $j \neq f$ 。

2) 计算 $X_{ij}(k)$ 对 $X_{if}(k)$ 的关联系数 $\xi_{ij-if}(k)$:

$$\xi_{ij-if}(k) = \frac{\Delta_{ij-if}(k)_{\min} + \rho \Delta_{ij-if}(k)_{\max}}{|X_{ij}(k) - X_{if}(k)| + \rho \Delta_{ij-if}(k)_{\max}} \quad (2)$$

式中, ρ 为分辨系数, 用于调节关联系数对极差的敏感程度。通过敏感性测试验证: 当 ρ 在 0.3~0.7 内变化时, 权重波动 $\leq 3\%$, 证明取值具有较好的稳定性。分辨系数 ρ 的取值直接影响关联度的分布: ρ 增大时, 弱关联指标的权重占比相对提升, 关联度差异缩小; ρ 减小时, 强关联指标的权重占比更加突出, 关联度差异扩大。通过多次实验比较, 最终选取 $\rho=0.5$, 以平衡关联度的区分度与稳定性。

进而可得 $X_{ij}(k)$ 对 $X_{if}(k)$ 的关联度:

$$Z_{ij-if} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \xi_{ij-if}(k) \quad (3)$$

将第 g 个功能的 n 个指标两两之间进行关联度求解, 可最终获得关联度矩阵 $\mathbf{Z}_g$:

$$\mathbf{Z}_g = \begin{bmatrix} 1 & Z_{g1-g2} & \cdots & Z_{g1-gn} \\ Z_{g2-g1} & \cdots & \cdots & Z_{g2-gn} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{gn-g1} & Z_{gn-gn} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

3) 计算第 i 个指标关于 g 功能的权重系数 w_{gi} :

$$w_{gi} = \frac{\bar{Z}_{gi}}{\sum_{j=1}^n \bar{Z}_{gj}} \quad (5)$$

式中, $\bar{Z}_{gi}, \bar{Z}_{gj}$ 为 $\mathbf{Z}_g$ 第 i, j 列元素的平均值。则可得 g 功能的指标权重向量 $\mathbf{w}_g = [w_{g1}, w_{g2}, \dots, w_{gn}]$, n 为 g 功能的隶属指标数量。

2.2 层次分析法

层次分析法在确定系统指标权重方面的应用十分广泛^[13-15], 其主要过程可以归纳如下:

1) 基于系统各指标间的隶属关系, 对同一层级各指标的影响程度进行两两比较^[13], 构造判断矩阵 $\mathbf{R}$;

2) 对判断矩阵 $\mathbf{R}$ 进行一致性检验, 计算随机一致性比率 CR :

$$CR = CI/RI \quad (6)$$

式中, RI 为平均随机一致性指标, CI 为一致性指标:

$$CI = (\lambda_{\max} - r)/(r - 1) \quad (7)$$

式中, $\lambda_{\max}$ 为 $\mathbf{R}$ 的最大特征根, r 为 $\mathbf{R}$ 的阶数。一般地, $r \geq 3$ 时, 需满足 $0 < CR < 0.1$ ^[16], 则 $\mathbf{R}$ 通过一致性检验, 否则需要对 $\mathbf{R}$ 进行重新赋值。

3) 求出 $\lambda_{\max}$ 对应的特征向量 $\mathbf{w}'_{g0}$:

$$\mathbf{R}\mathbf{w}'_{g0} = \lambda_{\max} \mathbf{w}'_{g0} \quad (8)$$

式中, $\mathbf{w}'_{g0}$ 为 g 功能中各指标的重要性排序, 通过求解式 (8) 可得。再进行归一化处理, 可得 g 功能的指标权重向量 $\mathbf{w}'_g = [w'_{g1}, w'_{g2}, \dots, w'_{gn}]$ 。

2.3 综合评价法

为得到综合主观和客观的组合权重, 建立一种基于组合赋权的综合评价法对层次分析法与灰色关联法进行有效组合。考虑到当客观权重 $\mathbf{w}_g$ 与主观权重 $\mathbf{w}'_g$ 相关度更高时, 表明专家经验判断与数据驱动结论趋于一致, 此时应增强一致性指标的权重贡献; 反之, 则需通过动态调节机制平衡两者差异。

对于 g 功能, 首先求出去除 i 指标权重时 ($i=1, 2, \dots, n$), 权重向量 $\mathbf{w}_g$ 与 $\mathbf{w}'_g$ 的相关系数 ϵ_{gi} , 用以量化主客观判断的一致性程度:

$$\epsilon_{gi} = \frac{\sum_{j=1}^n (w_{gj} - \bar{w}_{gj}) \sum_{j=1}^n (w'_{gj} - \bar{w}'_{gj})}{\sqrt{\sum_{j=1}^n (w_{gj} - \bar{w}_{gj})^2 \sum_{j=1}^n (w'_{gj} - \bar{w}'_{gj})^2}} (i \neq j) \quad (9)$$

式中, $\bar{w}_{gj}$ 为 $\mathbf{w}_g$ 去除 w_{gi} 后各元素的平均值, $\bar{w}'_{gj}$ 类似。

进而计算优化因子 α_{gi} :

$$\alpha_{gi} = \frac{1 - |\epsilon_{gi}|}{\sum_{j=1}^n (1 - |\epsilon_{gi}|) + \alpha_0} (i \neq j) \quad (10)$$

式中, α_0 为调节因子。

之后通过优化因子得到组合权重 $\mathbf{w}''_{g0}$:

$$\mathbf{w}''_{g0} = \alpha_{gi} (\mathbf{w}_{gi} + \mathbf{w}'_{gi}) \quad (11)$$

将 $\mathbf{w}''_{g0}$ 进行归一化处理得到 $\mathbf{w}''_{gi}$:

$$\mathbf{w}''_{gi} = \frac{\mathbf{w}''_{g0}}{\sum_{j=1}^n \mathbf{w}''_{gj0}} \quad (12)$$

最终得到综合赋权后的 g 功能权重向量 $w''_g = [\omega''_{g1}, \omega''_{g2}, \dots, \omega''_{gn}]$ 。

3 基于动态区间的改进灰色聚类分

基于综合赋权后的权重向量, 可以通过灰色聚类法对指标检测值进行聚类分析, 从而得出系统健康状态评估结果。

3.1 传统灰色聚类法

设有 p 个聚类对象, n 个评估指标, s 个不同的灰类, 关于对象 g ($g=1, 2, \dots, p$) 的指标 i ($i=1, 2, \dots, n$) 观察值为 x_{gi} , 评估结果属于 k ($k=1, 2, \dots, s$) 灰类。简要步骤如下^[17-20]:

- 1) 计算系统中各指标权重 ω''_{gi} ;
- 2) 划分评估灰类, 并确定 i 指标关于第 k 灰类的取值范围 $[\alpha_{i1}^k, \alpha_{i2}^k]$;
- 3) 建立白化权函数, 记 i 指标第 k 子灰类的白化权函数 $f_i^k(\cdot)$, 经典函数有典型白化权函数、适中测度白化权函数、下限测度白化权函数等;
- 4) 计算对象 g 关于灰类 k 的综合聚类系数 δ_g^k :

$$\delta_g^k = \sum_{i=1}^n f_i^k(x_{gi}) \times \omega''_{gi} \quad (13)$$

- 5) 按最大隶属法确定对象 g 所述灰类。若 $\max\{\delta_g^k\} = \delta_g^{k^*}$ ($1 \leq k \leq s$), 则对象 g 属于灰类 k^* 。

3.2 动态灰色聚类法

考虑到供电系统本身的不稳定性, 指标检测值存在一定波动。利用传统灰色聚类进行分析时, 存在两个明显局限: 1) 无法反映指标数据的动态变化特征, 2) 忽略了数据波动性对评估结果可信度的影响。这种静态评估方法在面对具有时变特性和不确定性的供电系统时, 评估结果的可靠性和实用性受到较大限制。

本文建立动态灰色聚类法, 引入动态区间白化权函数模型, 结合当前评估指标数据和历史数据指标, 利用样本指标的标准差作为动态调节系数, 通过量化数据的离散程度来自适应调整灰类区间边界, 使聚类区间能够根据系统实际波动情况智能调整, 以优化传统灰色聚类过程。

设 $x_i(t)$ 为 i 指标 t 时刻的评估值, m 为指标的样本数量, 则指标 i 的 m 个样本序列可表示为 $X_i(t)$:

$$X_i(t) = x_i(t-m-1), x_i(t-m-2), \dots, x_i(t) \quad (14)$$

记指标第 k 子灰类的白化权函数为 $f_i^k(\cdot)$, 以适中测度白化权函数为例, 构建动态区间为 $[x_i^{k-1} + \lambda_i \sigma_i(t), x_i^k + \lambda_i \sigma_i(t), x_i^{k+1} + \lambda_i \sigma_i(t)]$, 其中 $\sigma_i(t)$ 为 $X_i(t)$ 的标准差, λ_i 为比例常数。

进而, 构建混合白化权函数, 如图 2 所示, 可以在

不引起过灰度现象的同时充分利用指标数据的灰度。其中, 灰类 1 和灰类 s 分别采用下限测度白化权函数和上限测度白化权函数, 其他灰类采用适中测度白化权函数。

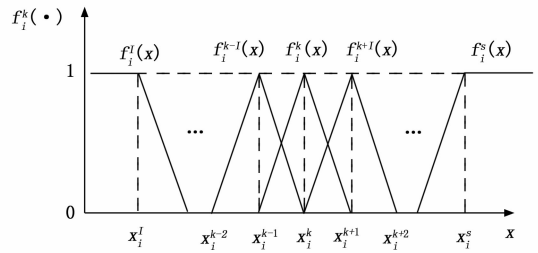


图 2 混合白化权函数

同样地, 依据公式 (13) 计算综合聚类系数 δ_g^k , 最终通过最大隶属法确定所属灰类。

4 实例应用

本文以某型导弹发射车供电系统为例, 结合实测数据, 运用灰色聚类的方法对导弹发控系统进行分析并给出健康评估效果。某型导弹发射车供电系统的评价指标以及实测数据见表 1。数据采集自 5 台同型号车辆在典型作战工况下的测试结果。采样周期为 1 s, 每组数据包含连续 1 200 个采样点 (对应 20 分钟任务周期), 共计 6 000 个数据样本。数据覆盖了启动、待发射、发射及撤收等典型工况, 包括额定负载、峰值负载 (发射瞬间) 及空载等多种状态。表 1 中所示的实测值为各评价指标在相应测试工况下的特征值。由于原始数据量庞大, 表中展示的数值是经过特征提取后的代表性数据: 对于电压类指标, 取整个采样周期内的稳定运行均值 (剔除瞬态过程); 对于纹波与谐波指标, 取 95% 概率下的最大波动值 (即 95% 分位数), 这样既能反映系统稳态特性, 又能捕捉极端工况下的最大偏差。

表 1 导弹发射车供电系统参数数据表

评价对象	评价指标	实测值 1	实测值 2	实测值 3	实测值 4	实测值 5
直流供电能力	直流 1 电压/V	26.6	27.1	27.9	30.2	29.4
	直流 2 电压/V	26.5	26.2	28.1	29.5	29.2
	直流 3 电压/V	34.7	33.2	35.9	38.3	37.5
	直流 1 纹波/mV	17.1	27.8	15.4	25.5	25.3
	直流 2 纹波/mV	21.3	23.3	15.6	21.2	25.2
	直流 3 纹波/mV	15.5	19.5	15.2	22.1	19.7
交流供电能力	交流 1 电压/V	215.3	213.5	221.1	231.3	227.7
	交流 2 电压/V	215.3	213.0	221.1	231.5	227.3
	交流 3 电压/V	215.7	210.0	221.1	232.5	227.2
	交流 1 谐波/%	1.1	1.2	0.9	0.9	1.2
	交流 2 谐波/%	1.6	0.9	0.6	0.7	1.8
	交流 3 谐波/%	1.6	0.5	0.5	0.7	1.6

其中，经人工判断，5 个供电系统实际状态为Ⅱ降级、Ⅰ降级、健康、Ⅱ降级、Ⅱ降级。

4.1 数据预处理

由于供电系统各指标标度类型和量纲不同，对检测数据进行归一化处理，以转化为 $[0, 1]$ 区间内的无量纲数：

$$x_{gi} = 1 - \frac{|u_{gis} - u_{gi}|}{u_{gi\max} - u_{gi\min}} \tag{15}$$

式中， x_{gi} 为评价对象 j 指标检测值的规范化值， u_{gi} 为指标检测值的实测数据， u_{gis} 为指标检测值的标准值， $u_{gi\max}$ ， $u_{gi\min}$ 分别为指标的上、下限值。

原始数据进行规范化后的数据见表 2。

表 2 导弹发射车供电系统参数数据表

评价对象	评价指标	规范值 1	规范值 2	规范值 3	规范值 4	规范值 5
直流供电能力	直流 1 电压	0.825 0	0.887 5	0.987 5	0.725 0	0.825 0
	直流 2 电压	0.812 5	0.775 0	0.987 5	0.812 5	0.850 0
	直流 3 电压	0.837 5	0.650 0	0.987 5	0.712 5	0.812 5
	直流 1 纹波	0.829 0	0.772 0	0.846 0	0.745 0	0.747 0
	直流 2 纹波	0.787 0	0.767 0	0.844 0	0.788 0	0.748 0
	直流 3 纹波	0.845 0	0.805 0	0.848 0	0.779 0	0.803 0
交流供电能力	交流 1 电压	0.839 2	0.852 3	0.975 0	0.743 2	0.825 0
	交流 2 电压	0.839 2	0.840 9	0.975 0	0.738 6	0.834 1
	交流 3 电压	0.902 3	0.772 7	0.975 0	0.715 9	0.836 4
	交流 1 谐波	0.780 0	0.760 0	0.820 0	0.820 0	0.760 0
	交流 2 谐波	0.680 0	0.820 0	0.880 0	0.860 0	0.640 0
	交流 3 谐波	0.680 0	0.900 0	0.900 0	0.860 0	0.680 0

4.2 权重确定

4.2.1 灰色关联法确定指标权重

以能力层之一的直流供电为例，由式（1）得直流供电能力各指标绝对差值数列如表 3 所示。利用式（2）得直流供电指标关联度系数如表 4 所示。利用式（3）直流供电指标关联度如表 5 所示。按上述步骤，计算直流供电各指标两两间的关联度，得到关联矩阵 Z_1 如下：

$$Z_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0.7889 & 0.8673 & 0.6526 & 0.4808 & 0.5988 \\ 0.7667 & 1 & 0.6905 & 0.5642 & 0.6867 & 0.6139 \\ 0.8590 & 0.6858 & 1 & 0.6552 & 0.4552 & 0.6458 \\ 0.6734 & 0.5908 & 0.6989 & 1 & 0.7990 & 0.7111 \\ 0.5098 & 0.7041 & 0.5051 & 0.8194 & 1 & 0.7550 \\ 0.6698 & 0.6721 & 0.7146 & 0.7456 & 0.7571 & 1 \end{bmatrix}$$

进而，利用式（5）可得直流供电的指标权重向量为 $w_1 = [0.1666, 0.1641, 0.1633, 0.1699, 0.1629, 0.1731]$ 。同理，按上述步骤，可以求得交流供电的指标权重向量为 $w_2 = [0.1820, 0.1835, 0.1700,$

$0.1448, 0.1631, 0.1566]$ 。

表 3 直流供电指标绝对差值数列

绝对差值	数据组 1	数据组 2	数据组 3	数据组 4	数据组 5
Δ_{11-12}	0.012 5	0.112 5	0.000 0	0.087 5	0.025 0
Δ_{11-13}	0.012 5	0.237 5	0.000 0	0.012 5	0.012 5
Δ_{11-14}	0.004 0	0.165 5	0.141 5	0.020 0	0.078 0
Δ_{11-15}	0.038 0	0.120 5	0.143 5	0.063 0	0.077 0
Δ_{11-16}	0.020 0	0.082 5	0.139 5	0.054 0	0.022 0

表 4 直流供电指标关联度数列

关联度系数	数据组 1	数据组 2	数据组 3	数据组 4	数据组 5
ζ_{11-12}	0.730 2	0.870 3	1.000 0	0.428 6	0.804 7
ζ_{11-13}	0.730 2	0.564 9	1.000 0	1.000 0	1.000 0
ζ_{11-14}	1.000 0	0.708 0	0.336 5	0.882 4	0.440 2
ζ_{11-15}	0.403 5	0.841 2	0.333 3	0.526 9	0.444 0
ζ_{11-16}	0.589 7	1.000 0	0.339 6	0.575 4	0.844 3

表 5 直流供电指标关联度系数

关联度系数	Z_{11-12}	Z_{11-13}	Z_{11-14}	Z_{11-15}	Z_{11-16}
数值	0.766 7	0.859 0	0.673 4	0.509 8	0.669 8

4.2.2 层次分析法确定指标权重

以能力层之一的直流供电为例，依据专家经验，采用 T. L. Sataty1-9 标度法^[14]对指标的影响程度进行两两比较，构成判断矩阵：

$$R_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 2 & 3 & 3 & 5 \\ 1 & 1 & 2 & 3 & 3 & 4 \\ 1/2 & 1/2 & 1 & 3 & 3 & 3 \\ 1/3 & 1/3 & 1/3 & 1 & 1 & 2 \\ 1/3 & 1/3 & 1/3 & 1 & 1 & 2 \\ 1/5 & 1/4 & 1/3 & 1/2 & 1/2 & 1 \end{bmatrix} \tag{16}$$

该矩阵体现了直流电压相较于纹波具有更高的重要性，这一赋值基于以下考量：直流电压稳定性直接决定弹上设备的正常工作，而纹波主要影响精密电子设备的性能。通过特征值法计算可得 R_1 的最大特征值 $\lambda_{\max} = 6.099 0$ 。计算一致性指标 $CI = 0.019 8$ ，得随机一致性比率 $CR = 0.015 97 < 0.1$ ，满足一致化校验，表明专家判断具有良好的一致性。求出 $\lambda_{\max}$ 对应的特征向量并归一化后，可得：

$$w'_1 = [0.3421, 0.2124, 0.2124, 0.1017, 0.0671, 0.0643]$$

同理，按上述步骤可求得交流供电的指标权重向量为：

$$w'_2 = [0.3338, 0.2142, 0.2142, 0.1026, 0.0675, 0.0675]$$

4.2.3 综合评价法确定指标权重

基于层次分析法与灰色关联法得到的权重向量，以直流供电能力为例，由式（9）计算权重向量 w_1 与 w'_1

的相关系数向量。

在综合评价法中,调节因子 α_0 的取值直接影响主客观权重的组合效果。通过对比 $\alpha_0 = 0.1, 0.2, 0.3$ 三种取值下的权重组合效果发现:当 $\alpha_0 = 0.2$ 时,主客观权重的相关系数达到 0.89,高于 $\alpha_0 = 0.1$ 时的 0.75 和 $\alpha_0 = 0.3$ 时的 0.82,表明此取值下主客观权重的一致性最佳。进一步分析显示, $\alpha_0 = 0.2$ 时组合权重的信息熵值为 0.942,权重分布最为均衡。调节因子取值过大会导致主观权重占比过高,如 $\alpha_0 = 0.3$ 时主观权重占比达 78%,使评估结果受专家经验影响过大,经测试评估精度相对下降 2%;而取值过小 ($\alpha_0 = 0.1$) 则会使客观权重主导,弱化领域知识的作用。

因此选择 $\alpha_0 = 0.2$ 作为最优调节因子,得优化因子向量 $\alpha_1 = [0.1879, 0.1574, 0.1562, 0.1562, 0.2034, 0.1183]$ 。由式(11)可得组合权重 $w''_{g_{i0}}$,进行归一化处理后,得到综合赋权后的直流供电能力权重向量:

$$w''_1 = [0.2898, 0.1796, 0.1779, 0.1257, 0.1418, 0.0852]$$

与之类似,按上述步骤可得交流供电能力权重向量:

$$w''_2 = [0.3330, 0.1666, 0.1960, 0.0807, 0.0957, 0.1280]$$

4.3 确定灰类及白化权函数

根据专家经验划分供配电系统健康、I 降级、II 降级、故障 4 个不同灰类,取值区间分别为 $(0.8, 1]$ 、 $(0.7, 0.8]$ 、 $(0.6, 0.7]$ 、 $[0, 0.6]$ 。以各指标历史数据,计算标准差构建动态区间,建立白化权函数:

$$f_i^1(x) = \begin{cases} 0 & x \notin [0, 0.7 + \sigma_i(T)] \\ 1 & x \in [0, 0.6 + \sigma_i(T)] \\ \frac{0.7 + \sigma_i(T) - x}{0.7 - 0.6} & x \in (0.6 + \sigma_i(T), 0.7 + \sigma_i(T)] \end{cases} \quad (17)$$

$$f_i^2(x) = \begin{cases} 0 & x \notin [0.6 + \sigma_i(T), 0.8 + \sigma_i(T)] \\ 1 - \frac{|0.7 + \sigma_i(T) - x|}{0.8 - 0.7} & x \in [0.6 + \sigma_i(T), 0.8 + \sigma_i(T)] \end{cases} \quad (18)$$

$$f_i^3(x) = \begin{cases} 0 & x \notin [0.7 + \sigma_i(T), 0.9 + \sigma_i(T)] \\ 1 - \frac{|0.8 + \sigma_i(T) - x|}{0.9 - 0.8} & x \in [0.7 + \sigma_i(T), 0.9 + \sigma_i(T)] \end{cases} \quad (19)$$

$$f_i^4(x) = \begin{cases} 0 & x \notin [0.8 + \sigma_i(T), 1] \\ 1 & x \in [0.9 + \sigma_i(T), 1] \\ \frac{x - 0.8 - \sigma_i(T)}{0.9 - 0.8} & x \in (0.8 + \sigma_i(T), 0.9 + \sigma_i(T)] \end{cases} \quad (20)$$

4.4 综合聚类评估

依据表 1 中各个指标的实测数据,结合综合聚类系数计算公式(13),分别利用灰色关联法、层次分析法以及基于动态区间的改进灰色聚类分析法,对供电系统健康状态进行评估。“实测数据 1”“实测数据 4”及“实测数据 5”在 3 种方法下,供电系统评估结果均为 II 降级,呈现较高一致性,与人工判断结果一致。“实测数据 2”、“实测数据 3”的评估结果如表 6 所示。

表 6 实测数据 2 评估结果

评价方法	评价对象	δ_g^1	δ_g^2	δ_g^3	δ_g^4
层次分析法	直流供电能力	0.219 8	0.385 0	0.395 2	0
	交流供电能力	0.054 9	0.464 1	0.481 0	0
灰色关联法	直流供电能力	0.233 1	0.434 1	0.332 8	0
	交流供电能力	0.050 6	0.533 2	0.416 2	0
改进灰色聚类分析法	直流供电能力	0.233 9	0.393 9	0.372 2	0
	交流供电能力	0.058 4	0.484 7	0.456 9	0

通过表 6,经改进灰色聚类分析法评估, $\max\{\delta_1^k\} = \delta_1^2 = 0.393 9$, $\max\{\delta_2^k\} = \delta_2^2 = 0.484 7$,供电系统评估结果为灰类 2,即供电系统为 II 降级,灰色关联法评估结果与之相同。而在层次分析法评估下, $\max\{\delta_1^k\} = \delta_1^1 = 0.395 2$, $\max\{\delta_2^k\} = \delta_2^1 = 0.481 0$,供电系统为 I 降级。深入分析表明,当系统各指标在参考区间内呈现不一致的波动特征时,层次分析法由于难以准确表征指标间复杂的隶属关系及其对参考区间的偏离程度,评估结果可能出现偏差。通过对比历史运行数据与参考区间范围,表 6 所示的系统实际状态更趋向于 I 降级,该结论与领域专家的人工判断结果一致,验证了改进灰色聚类分析法的准确性。

由表 7 可知,经改进灰色聚类分析法评估, $\max\{\delta_1^k\} = \delta_1^1 = 0.574 1$, $\max\{\delta_2^k\} = \delta_2^1 = 0.587 3$,供电系统评估结果为灰类 4,即供电系统为健康,层次分析法评估结果与之相同。而在灰色关联法评估下, $\max\{\delta_1^k\} = \delta_1^3 = 0.395 2$, $\max\{\delta_2^k\} = \delta_2^3 = 0.481 0$,供电系统为 I 降级。灰度分析法根据数据偏离参考区间的程度对供电系统做了综合评估,但缺少了对指标间关联关

表 7 实测数据 3 评估结果

评价方法	评价对象	δ_g^1	δ_g^2	δ_g^3	δ_g^4
层次分析法	直流供电能力	0	0.011 5	0.438 0	0.550 5
	交流供电能力	0	0.059 9	0.388 3	0.551 9
灰色关联法	直流供电能力	0	0.016 5	0.527 7	0.455 8
	交流供电能力	0	0.084 8	0.467 0	0.448 2
改进灰色聚类分析法	直流供电能力	0	0.012 2	0.413 7	0.574 1
	交流供电能力	0	0.054 5	0.358 2	0.587 3

系的考虑, 此外由于系统本身状态具有一定的波动性, 当前实测值难以确定系统真正的健康状态, 本文提出的动态区间白化权函数模型引入的动态系数表征了供电系统的稳定程度, 评估表 7 的结果趋向于健康, 与人工判断结果一致, 评估结果更加合理可信。

综上, 本文提出的基于动态区间的改进灰色聚类分析法具有以下优势: 1) 通过融合主客观赋权方法, 兼顾了指标统计特性和专家经验; 2) 创新的动态区间白化权函数有效解决了系统波动性带来的评估难题; 3) 综合考量了指标关联关系和历史数据影响, 使评估结果更加全面准确。实验结果表明, 该方法与单一评估方法相比, 准确率明显提升, 特别是在系统处于临界状态时表现出更好的判别能力, 为复杂装备系统的健康状态评估提供了新的技术途径。

5 结束语

针对导弹发射车供电系统健康状态评估的需求, 提出了一种基于动态区间的改进灰色聚类评估方法。该方法通过集成客观的灰色关联分析法与主观的层次分析法, 构建了主客观相结合的综合赋权模型, 既充分利用了实测数据的统计特性, 又融合了领域专家的经验知识。特别地, 针对供电系统在复杂作战环境下参数波动大的特点, 创新性地引入了动态区间白化权函数, 通过自适应调整聚类区间边界, 有效解决了传统灰色聚类方法在面对不确定性和时变特性时的局限性, 显著提升了评估模型的环境适应性和鲁棒性。通过某型导弹发射车供电系统的实测数据验证表明, 该方法能够准确识别系统的健康状态等级, 并对潜在故障提供早期预警, 具有重要的理论价值和工程应用前景。未来研究将进一步探索多源信息融合技术在评估模型中的应用, 以持续提升评估结果的准确性和实用性。

参考文献:

- [1] 崔海青, 魏士皓, 王彦翔. 基于改进灰色模型的飞机飞行仿真数据预测 [J]. 计算机测量与控制, 2024, 32 (5): 290-295.
- [2] 朱东济, 蔡红维, 欧阳霄, 等. 基于 AHP、灰色关联法和 TOPSIS 的航天测控装备评估模型研究 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (11): 240-244.
- [3] 陆营波, 丁士洲, 江宜航, 等. 基于灰色关联的体系效能评估指标筛选 [J]. 空天防御, 2023, 6 (3): 25-28.
- [4] 孙海涛, 黄磊, 蔡曼, 等. 基于灰色聚类的发控系统风险评估 [J]. 电子测试, 2020, 1 (9): 58-59.
- [5] 闫宝会, 刘晓东, 吴诗辉, 等. AHP 和三角白化权函数的武器装备研制技术风险评估 [J], 火力与指挥控制, 2016, 41 (1): 178-181.
- [6] 张宇, 吕淑然, 王婉青. 基于 AHP 和灰色聚类的危化品道路运输安全评价 [J]. 安全, 2020, 41 (3): 54-60.
- [7] 姚忠, 康总宽. 基于灰色聚类的某舰炮技术风险评估 [J]. 火炮发射与控制学报, 2019, 40 (4): 37-41.
- [8] 魏东涛, 刘晓东, 单志峰. 基于熵权与灰色关联度的武器装备体系模糊聚类分析 [J]. 信息工程大学学报, 2020, 21 (5): 626-630.
- [9] 汤飞, 赵方, 宁雪, 等. 铁路领域科技创新平台评价研究 [J]. 信息工程大学学报, 2022, 21 (3): 124-136.
- [10] 徐立超, 杨景崙, 熊泽昊. 基于改进灰色聚类法的配电网供电分区方法 [J]. 电工技术, 2021, 1 (13): 124-136.
- [11] 苏泓嘉, 罗宇成, 刘飞. 装备体系效能评估及支撑技术综述 [J]. 空天防御, 2023, 6 (3): 29-38.
- [12] 吴君. 基于改进的灰色模型的煤矿电力短期负荷预测 [J]. 测控技术, 2018, 37 (9): 26-28.
- [13] PURBA J H. A fuzzy-based reliability approach to evaluate basic events of fault tree analysis for nuclear power plant probabilistic safety assessment [J]. Annals of Nuclear Energy, 2014 (70): 21-29.
- [14] 王玘, 何正友, 程宏波, 等. 基于多层免疫原理与模糊统计的地铁牵引供电系统健康评估方法 [J]. 铁道学报, 2015, 37 (12): 31-39.
- [15] 王冠球, 郑国杰, 冯辅周, 等. 基于模糊层次分析的装甲车辆 PHM 系统性能评估 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (6): 239-244.
- [16] 郭璐, 刘晓东, 王玉峰, 等. 基于大数据推理的装备健康状态控制决策 [J]. 空天防御, 2023, 6 (3): 85-94.
- [17] NICOLA L, CARLO M, SASR S. Modeling ADC non-linearity in Monte Carlo procedures for uncertainty estimation [C] //IEEE IMTC, Como, Italy: 2004: 522-527.
- [18] HERADOR M, ASUERO A G, GONZALEZ A G. Estimation of the uncertainty of indirect measurements from the propagation of distributions by using the Monte-Carlo method: an overview [J]. Chemometrics & Intelligent Laboratory Systems, 2005, 79 (1/2): 155-122.
- [19] 万峻, 肖凡. 基于灰色模型的艇载导弹测试电源系统故障预测 [J]. 兵工自动化, 2015, 34 (11): 1-3.
- [20] 张晨. 改进灰色残差模型在航迹预测中的应用 [J]. 兵工自动化, 2018, 37 (5): 43-48.