

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240039

考虑群体决策差异冲突解决机制的配电站房 健康状态评估方法

罗昆¹, 高伟^{1,2}, 洪翠¹

(1. 福州大学电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108; 2. 智能配电网装备
福建省高校工程研究中心, 福建 福州 350108)

摘要: 针对配电站房缺乏健康评估机制、运维周期设置不合理的问题, 提出了一种考虑群体决策差异冲突解决机制的配电站房健康状态综合评估方法。首先, 建立配电站房指标体系和专家评价框架, 设计了一种新型的二元冲突测量函数来量化全局冲突。然后, 使用专家评价结果的虚假度、可信度、可用度等测度指标构造专家修正因子, 以改进 D-S 证据理论, 通过聚合不同专家的评价意见来量化评价指标的权重。接着, 建立改进灰色关联度-逼近理想解法(grey relation analysis-technique for order preference by similarity to an ideal solution, GRA-TOPSIS)评估模型, 引入灰色关联接近度, 与距离接近度融合得到综合接近度, 改善 TOPSIS 评价判断片面性的缺陷。最后, 计算每个配电站房的评价值与理想解之间的综合接近度, 反映配电站房的健康状态。实验分析表明该方法能兼容专家评价之间的冲突性、差异性、不确定性, 与现有方法相比评估结果更具准确性和合理性, 对运维人员制定合理的检修决策具有一定的指导价值。

关键词: 配电站房; 专家评价框架; 改进 D-S 证据理论; 专家修正因子; 改进 GRA-TOPSIS 评估方法

Health condition assessment method of a distribution station using a group decision-making difference conflict resolution mechanism

LUO Kun¹, GAO Wei^{1,2}, HONG Cui¹

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 2. Fujian Province
University Engineering Research Center of Smart Distribution Grid Equipment, Fuzhou 350108, China)

Abstract: To tackle the absence of health assessment mechanisms and the irrational maintenance cycles at distribution stations, a comprehensive evaluation method is introduced, integrating a conflict resolution mechanism for group decision-making differences. First, the method sets up an indicator system and an expert evaluation framework, featuring a novel binary conflict measurement function to quantify overarching conflicts. Subsequently, expert correction factors are devised using metrics like falseness, credibility, and usability of expert evaluations to enhance the D-S evidence theory. This adjustment facilitates the weighting of evaluation indicators through the aggregation of various expert opinions. Also, an improved GRA-TOPSIS model is established, integrating grey relational and distance closeness to yield a comprehensive closeness, improving TOPSIS's one-sided criteria. Finally, this approach calculates the overall closeness between each station's evaluation value and the ideal solution, accurately reflecting its health status. Experimental analysis reveals that this method effectively reconciles conflicts, differences, and uncertainties in expert evaluations, offering more precise and sensible assessment outcomes, thus providing valuable guidance for maintenance decision-making.

This work is supported by the Natural Science Foundation of Fujian Province (No. 2021J01633).

Key words: distribution station; expert evaluation framework; improved D-S evidence theory; expert correction factor; improved GRA-TOPSIS evaluation method

基金项目: 福建省自然科学基金项目资助 (2021J01633)

0 引言

随着新型电力系统与现代智慧配电网等发展理念的兴起，配电网正逐步迈向信息化、智能化和开放式的未来^[1-3]。配电站房是连接用电用户与电网之间的重要枢纽，对配电站房进行科学、全面地监测不仅能保障居民用电需求，也是对于积极推动配电网早日实现智能化的重要举措。然而，大量安装的传感器并不能给运维人员带来安全感，在海量数据面前，运维人员反而变得无所适从，不仅未能减轻其工作负担，反而增加了额外的压力。究其原因，目前评估方法缺乏有效的机制整合利用专家经验知识，无法充分利用监控数据对配电站房的健康状态进行科学合理的评估。只有通过知识赋能，才能全面提升数据的经济价值，实现对配电站房的科学运维。

目前，国内外学者对电气设备健康状态的评估已做了一定的研究和探索。文献[4]针对继电保护装置健康状态，提出了一种基于麻雀搜索算法(sparrow search algorithm, SSA)优化的支持向量机(support vector machine, SVM)评估模型，此模型按正常、注意、异常和严重 4 种类别对保护装置的健康状态进行分类评估。文献[5]提出了一种基于增量容量分析(incremental capacity analysis, ICA)和深度学习模型的新型锂电池健康评估方法，旨在解决目前评估方法过于依赖电池精确建模的局限。近年来，变压器状态评估成为了研究热点^[6]，其常见方法包括逼近理想解法^[7-8]、模糊综合评价法^[9-11]。

总的来说，状态评估方法主要可分为两大类：机器学习评估方法和多属性综合评估方法。机器学习方法通常适用于具有明显特征的评估对象，其依靠大量数据的分析得到评估结果；多属性综合评估方法适用于具备多特征、多属性的评估对象，这些对象通常由复杂的系统组成。配电站房设备众多，不仅要考虑内部设备运行情况，还要考虑外部环境等因素，因其涉及面广，对其健康状态评价应采用多属性综合评估方法。目前健康状态评价研究和应用主要集中在电力设备领域，而针对复杂系统，如配电站房等的评价研究极少。文献[12]针对配电站房的环境因素指标建立了多源数据信息阵列，并对每列数据进行量化，生成了多源数据评估矩阵。最后，通过加权平均方法对评估矩阵进行综合，以得到评估结果。文献[13]采用熵权法与层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)来确定牵引变电所关键设备指标的权重，并利用灰色聚类系数来反映各设备的健康状态。

然而，针对如配电站房这类复杂系统的健康状

态评估研究，存在以下几个亟待解决的问题：1) 评价维度过于单一，仅从环境角度分析无法对配电站房健康状态进行全面评估；2) 指标赋权主观性过强，且忽略了专家评价之间的差异性、冲突性以及不确定性；3) 评价方法不够全面，仅从单个角度无法保证评价的准确性。

鉴于此，本文提出了一种考虑群体决策差异冲突解决机制的配电站房健康状态综合评估方法，对现有评估方法进行了改进。其特点如下：首先改进了传统 D-S 理论(dempster-shafer theory, DST)冲突测量方法，并结合 Joussemme 距离设计了一种新型二元冲突测量函数，以量化专家之间的冲突。其次从专家意见的虚假度、可信度以及可用度角度分析，提出了专家修正因子以改进 D-S 证据理论，进而修正并聚合了具有差异冲突性的专家意见。最后提出 GRA-TOPSIS 综合评估方法，该方法通过结合灰色关联度和距离接近度，得到综合接近度，以处理配电站房健康状态评估的问题。

1 配电站房指标体系

配电站房作为一个复杂、多参量的系统，表征其运行状态的指标繁多，因此需要选择合适的指标进行状态评估。

本文将配电站房的主要常见故障归纳为：

- (1) 开关柜故障或者性能下降；
- (2) 二次通信连接失败；
- (3) 配电站房发生火灾、水浸等事故；
- (4) 供电可靠性下降。

据此，本文基于关联规则理论^[14]来分析故障发生时指标相关性，并确定与配电站房健康状态相关的 13 种指标。

考虑到不同类型故障带来的风险，本文参考国家能源局发布的《DL/T 2106-2020 配网设备状态评价导则》^[15]，并利用关联规则的支持度和置信度来确定配电站房健康状态指标。指标体系如图 1 所示。

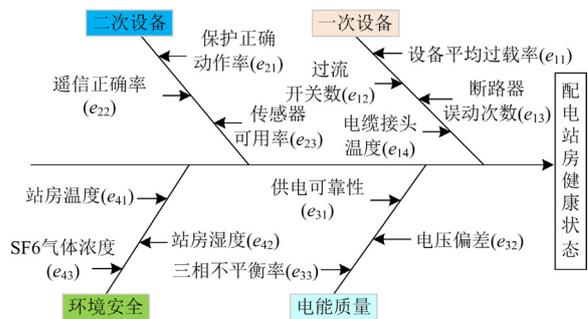


图 1 配电站房指标体系鱼骨图

Fig. 1 Fish bone diagram of distribution station index system

2 指标赋权方法

指标赋权是综合评估方法的重要一环, 确定权重对评估结果至关重要, 目前关于赋权的方法可以分为三部分^[16]: 主观赋权、客观赋权、主客观赋权法。主观赋权法通过专家知识、经验判断进行权重分配, 缺陷在于当专家之间意见不一致时, 权重的确定存在一定难度; 客观赋权法完全依赖于指标数据本身, 取决于数据的质量和标签的真伪; 主客观赋权法同时考虑了专家信息和客观数据, 但是实施难度较大, 难以平衡两者之间的关系。配电站房作为一个复杂的系统, 目前大多依赖专家主观经验进行评估, 因此如何有效整合多个专家经验知识是进行科学赋权的关键。配电站房状态评估作为一种群体决策行为, 无法由个人实施。在实际应用中, 一方面不同专家提供的评价信息可能多样化且存在显著冲突; 另一方面由于不同部门专家知识储备和背景差异, 可能无法准确表达他们的评价意见。因此本文将配电站房健康状态评估视为一个不确定的多准则决策问题(multiple-criteria decision making, MCDM)^[17-18], 并引入 D-S 证据理论聚合不同部门专家的评价意见来量化指标权重, 充分发挥专家的主观能动性。

2.1 评价信息获取

评价指标的重要性难以准确确定, 因为专家提供的评价信息往往是不确定或模糊的。因此为了更好地反映专家评价意见的不确定性和模糊性, 本文建立指标重要性评分表, 如表 1 所示。

表 1 指标重要性评分表

Table 1 Score table of index importance

评分值	含义
1	不重要, 对配电站房健康影响微乎其微
2	较不重要, 对配电站房健康影响较小
3	一般重要, 对配电站房健康影响一般
4	重要, 对配电站房健康影响较大
5	非常重要, 对配电站房健康至关重要

本文将 D-S 理论^[19-20]引入到专家评价框架, 允许专家通过灵活的语言变量形式表达其评价意见, 具体形式如下所述。

例如一个肯定的评价可被表示为[5,1], 5 代表该指标非常重要, 1 代表信任程度为 100%; 一个模糊的评价可被表示为{[3,0.8], [4,0.2]}, 这表示专家认为以 0.8 的概率给 3 分, 以 0.2 的概率给 4 分; 一个不确定的评价可以表示为{[3,4], 1}, 这意味着专家认为评为 3 分或者 4 分的概率为 1。这里的概率指 D-S 证据理论中的基本信念分配(basic belief

assignment, BBA)^[19]。

本文根据以上 3 种评价形式对配电站房评价指标进行重要性评估。利用 D-S 理论中的证据体结构定义专家评价序列, 设有 Q 名专家对第 i 个评价维度的第 j 个指标进行评分。基于此, 可以定义专家对指标重要性的评价框架和评价序列如式(1)和式(2)所示。

$$\Theta_{ij} = \{1, 2, 3, 4, 5\}, i = 1, 2, \dots, M; j = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

$$E_{(p)ij}^q = \{(\theta_t, m_{ij}^q(\theta_t)) | t = 1, 2, \dots, T\}, q = 1, 2, \dots, Q \quad (2)$$

式中: Θ_{ij} 为专家评价识别框架; M 、 N 分别为评价维度、指标; $E_{(p)ij}^q$ 为第 q 个专家给出的评价序列; θ_t 为评价框架中第 t 个焦点元素; $m_{ij}^q(\cdot)$ 为专家 q 给出评分集对应的基本信念分配函数; T 为评价序列中焦点元素的个数; Q 为专家数。

2.2 基于改进 D-S 证据理论的聚合方法

在实际应用中, 当传统 D-S 理论用于融合不同专家给出的高度冲突性意见时, 经常出现反直觉的结果^[21]。针对这一问题, 本文提出了一种基于专家修正因子的改进 D-S 理论聚合方法, 以融合不同专家之间的冲突评价意见(见图 2)。首先, 设计了一种新型二元冲突测量函数, 该函数在杰卡德相似系数的基础上对传统 D-S 证据冲突测量方式进行了改进,

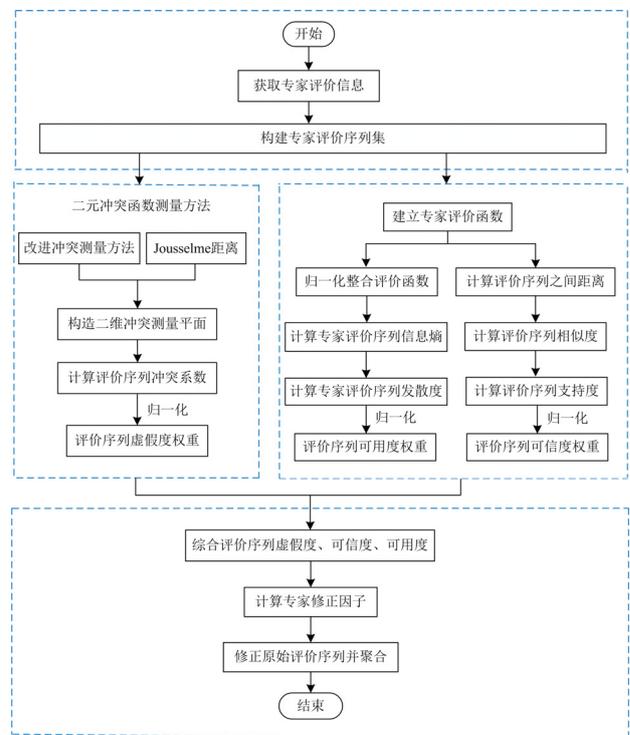


图 2 所提方法的理论流程图

Fig. 2 A theoretical flow chart of proposed method

并结合了 Jusselme 距离^[22]来建立二元冲突度量函数, 用于计算评价序列之间的虚假度。接着, 通过计算评价序列之间的距离及其信息熵, 来衡量评价序列的可信度和可用度。专家修正因子根据评价序列间的虚假度、可信度和可用度来定义, 最终, 使用专家修正因子对原始评价序列进行修正和融合, 以确定最终的指标权重。

2.2.1 基于杰卡德相似系数的改进冲突测量

传统 D-S 证据理论冲突测量方法仅考虑了空集的焦点元素, 忽略了非空集上焦点元素之间不相容的部分, 使得冲突测量不够全面和准确。因此, 本研究区分了专家评价序列间的直接冲突与间接冲突, 并开发了一种新型二元测量函数, 以计算多证据间的全面冲突, 明确每个评价序列的冲突性。

1) 直接冲突

直接冲突指当证据之间没有交集时, 不同证据体焦点元素在冲突测量中完全不相容的情况。它们的冲突值 K_{12} 可表示为

$$K_{12} = \sum_{B \cap C = \emptyset} m_1(B)m_2(C) \quad (3)$$

式中, $m_1(B)$ 、 $m_2(C)$ 分别为焦点元素 B 、 C 对应的基本信念分配(BBA)。

2) 间接冲突

间接冲突为证据之间相交不为空集时, 不同证据体焦点元素部分不相容的情况。它们的冲突值可表示为

$$K_{12} = \sum_{\substack{B \cap C \neq \emptyset \\ B, C \in \Theta_j}} \left(1 - \frac{|B \cap C|}{|B \cup C|}\right) m_1(B)m_2(C) \quad (4)$$

式中, $\frac{|B \cap C|}{|B \cup C|}$ 为焦点元素 B 和焦点元素 C 的杰卡德相似系数, 代表两个集合之间的相似性。

3) 总冲突

将证据之间的直接冲突和间接冲突相加得到证据之间的总冲突为

$$K_{12} = \sum_{B \cap C = \emptyset} m_1(B)m_2(C) + \sum_{\substack{B \cap C \neq \emptyset \\ B, C \in \Theta_j}} \left(1 - \frac{|B \cap C|}{|B \cup C|}\right) m_1(B)m_2(C) \quad (5)$$

扩展到多个证据

$$K_{1, \dots, Q} = \sum_{\theta_i \in \Theta_j} \left\{ \left(1 - \frac{\left| \bigcap_{t=1}^T \theta_t \right|}{\left| \bigcup_{t=1}^T \theta_t \right|}\right) \prod_{i=1}^Q m_q(\theta_i) \right\} \quad (6)$$

式中, $K_{1, \dots, Q}$ 包括两个及以上 ($Q > 2$) 证据之间的冲突。

本文首次提出的改进冲突测量方法能测量证据之间的直接冲突和间接冲突, 兼顾空集和非空集上的焦点元素, 从而有效弥补了传统 D-S 理论冲突测量的不足。

4) 二元冲突测量方法

文献[21]认为传统 D-S 冲突测量或证据距离均无法直接反映证据间的冲突。因此, 本文在改进冲突测量的基础上引入 Jusselme 距离作为量化冲突的另一个标准。首先, 利用改进的冲突测量方法计算证据之间的冲突系数 K ; 其次计算证据之间的 Jusselme 距离 d_{BBA} ; 最后, 通过点 (K, d_{BBA}) 的空间位置来确定证据之间的冲突程度(见图 3)。

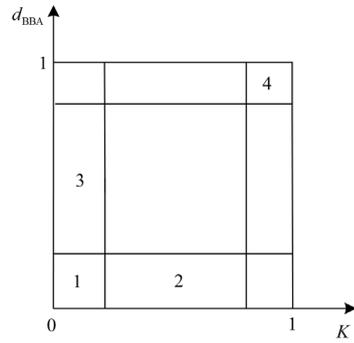


图 3 二元函数平面图

Fig. 3 Planar graph of binary function

如图 3 所示, 横坐标 K 为所有证据之间的总冲突, 纵坐标 d_{BBA} 为任意两个证据之间的距离。当点 (K, d_{BBA}) 位于 1、3 区域内, 表明证据之间的冲突程度较低; 当其位于 2 区域内, 表明证据间公共焦点元素少且 BBA 分散; 当其位于 4 区域内, 表明证据之间的冲突程度最高, 不利于进行 D-S 规则融合; 而位于其他区域时, 则为适中情况。因此当点 (K, d_{BBA}) 位于 1、2 和 3 区域时, 冲突程度较低, 融合时能产生较好的结果, 可以赋予一个较小的值作为冲突测量值。而位于 4 区域时, 需要赋予一个较大的值。

假设有 Q (Q 为正整数且 $Q \geq 2$) 位专家, 对应识别框架上的 BBA 为 m_1, m_2, \dots, m_Q , 则所有证据之间的总冲突表示如式(7)所示。

$$\begin{cases} C_{1, \dots, Q} = \frac{K_{1, \dots, Q} + d_{BBA_{1, \dots, Q}}^{\max}}{2} \exp\left(-\left|\frac{K_{1, \dots, Q} + d_{BBA_{1, \dots, Q}}^{\max}}{2} - 1\right|\right) \\ d_{BBA_{1, \dots, Q}}^{\max} = \max_{i \neq j} \{d_{BBA}(m_i, m_j)\}, i \in [1, Q], j \in [1, Q] \end{cases} \quad (7)$$

式中: $C_{1, \dots, Q}$ 为总冲突系数; $d_{BBA_{1, \dots, Q}}^{\max}$ 为所有 BBA 中任意两个证据之间的最大 Jusselme 距离, 综合了

冲突系数 $K_{1,\dots,Q}$ 对于总冲突的影响。同时添加指数项使得当点 (K, d_{BBA}) 位于 1、2 和 3 区域时, 总冲突系数 $C_{1,\dots,Q}$ 为一个较小的值。

2.2.2 评价序列多特性兼容方法

专家的不同知识背景使得评价序列表现出多样性。本文从评价序列之间的虚假度、可信度和可用度 3 个特性进行分析, 并将其视为并行关系综合得到专家修正因子, 用以衡量评价序列的可靠程度。最后通过专家修正因子对原始评价序列进行修正得到新的评价序列, 并利用 D-S 组合规则对新的评价序列进行融合得到兼容后的结果。

1) 评价序列虚假度

证据虚假度^[23]由 D-S 理论中的冲突测量方法计算得到, 反映出某证据对其他证据的影响力。而本文提出的二元冲突测量来计算评价序列间的冲突, 更为准确, 具体计算步骤见附录 A。

2) 评价序列可信度

证据间的可信度基于证据间的距离计算得到, 反映该证据被其他证据支持的程度^[24]。

3) 评价序列可用度

评价序列可用度基于信息熵^[25]计算得到, 反映该证据本身的信息量大小, 即不确定性程度。

4) 计算专家修正因子

专家修正因子 α_{ij}^q 可用虚假度、可信度和可用度来表示, 如式(8)所示。

$$\alpha_{ij}^q = \frac{C_{(\text{red})ij}^q \times F_{(\text{al})ij}^q \times e^{A_{(\text{va})i}^q}}{\max\{C_{(\text{red})ij}^q \times F_{(\text{al})ij}^q \times e^{A_{(\text{va})i}^q}\}} \quad (8)$$

式中: $C_{(\text{red})ij}^q$ 为专家 q 给出评价序列的可信度权重; $F_{(\text{al})ij}^q$ 为专家 q 给出评价序列的虚假度权重; $A_{(\text{va})i}^q$ 为专家 q 给出的评价序列可用度权重。

5) 修正原始评价序列

$$\begin{cases} \bar{m}_{ij}^q(\theta_i) = \alpha_{ij}^q \cdot m_{ij}^q(\theta_i), \forall \theta_i \in \Theta_{ij}, \theta_i \neq \Theta_{ij} \\ \bar{m}_{ij}^q(\Theta_{ij}) = \alpha_{ij}^q \cdot m_{ij}^q(\Theta_{ij}) + (1 - \alpha_{ij}^q) \\ \sum_{\theta_i \in \Theta_{ij}} \bar{m}_{ij}^q(\theta_i) = 1, q = 1, 2, \dots, Q \end{cases} \quad (9)$$

式中, $\bar{m}_{ij}^q(\theta_i)$ 和 $\bar{m}_{ij}^q(\Theta_{ij})$ 为修正后的评价序列。

6) 计算指标权重

$$\beta_{ij}^q = \sum_{i=1}^T \frac{\max(\theta_i) + \min(\theta_i)}{2} \bar{m}_{ij}^q(\theta_i) \quad (10)$$

$$\omega_{ij} = \frac{\beta_{ij}^q}{\sum_{i=1}^Q \beta_{ij}^q} \quad (11)$$

式中: β_{ij}^q 为指标重要性因子; ω_{ij} 为对 β_{ij}^q 进行归一化得到每个指标的权重。

3 改进 GRA-TOPSIS 综合评价方法

TOPSIS^[26-28]作为一种多属性决策方法, 根据有限评价对象与最优解、最劣解的距离进行排序, 广泛应用于综合评估问题, 有效地反映配电站房的健康优劣情况。然而, 该方法存在以下缺陷: 一是仅利用单一欧氏距离作为评估判据, 可能会出现待评价目标与正负理想解距离同样接近的情况, 此时无法明确方案的相对优劣情况; 二是无法反映数据样本的整体变化态势。

针对上述缺陷, 本文在 TOPSIS 原有的距离接近度上, 引入灰色关联度分析, 综合考虑评价指标的相对位置关系和整体情况变化所涉及的混合特征, 建立了一种更全面的评价判据, 克服了单一距离测度的片面性。灰色关联法^[29]通过计算指标间的关联度来体现数据样本的整体变化情况。因此本文结合灰色关联度和距离接近度构建了综合接近度, 以准确反映配电站房的健康情况, 并有效区分评估对象的优劣, 增强了评价的可靠性。具体步骤如下。

1) 对灰色关联度与距离接近度进行归一化

$$\begin{aligned} \tilde{E}_i &= \frac{E_i}{\max E_i}, i \in \{1, 2, \dots, O\}, \\ E_i &\in \{R_i^+, R_i^-, D_i^+, D_i^-\} \end{aligned} \quad (12)$$

式中: \tilde{E}_i 为对 E_i 进行归一化后的值; E_i 为灰色关联度 (R_i^+, R_i^-) 和距离接近度 (D_i^+, D_i^-) 的集合; O 为评价对象个数。

2) 构建综合接近度

若仅将距离接近度或灰色关联度作为评价判据, 由于条件简化, 评价过程可能会受到过度的主观性和非理性影响。针对此问题, 本文构建了一个受约束的非线性规划数学模型 Z , 利用距离接近度和灰色关联度计算综合接近度 $C_{(s)i}$, 并将其作为评估配电站房健康状态的依据。

$$\min Z = \sum_{i=1}^O [(C_{(s)i} - R_i)^2 + (C_{(s)i} - D_i)^2] \quad (13)$$

$$\min(R_i, D_i) \leq C_{(s)i} \leq \max(R_i, D_i)$$

式中: R_i 为归一化后的灰色关联度; D_i 为归一化后的距离接近度, 通过非线性规划模型计算综合接近度 $C_{(s)i}$, 使得评价更具有客观性和合理性。

4 DGT 评价系统流程

本文所提的混合 D-S 理论和 GRA-TOPSIS 的

DGT 评价系统流程包括评价指标体系、专家评价框架和改进 GRA-TOPSIS 综合评价模型 3 个部分,如图 4 所示。

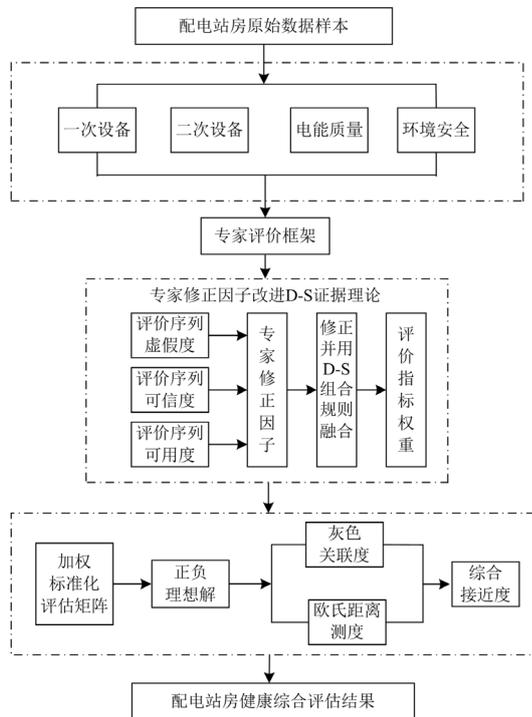


图 4 配电站房评价流程

Fig. 4 Evaluation process of distribution station

1) 利用配电站房的原始数据, 构建了覆盖一次设备、二次设备、电能质量和环境安全 4 个维度的健康评估指标体系。

2) 通过引入 D-S 证据理论构建专家框架, 并基于专家提供的评价序列虚假度、可信度、可用度计算专家修正因子, 从而修正原始序列以消除不同专家之间的差异冲突, 最后融合修正后的评价序列来保证指标赋权的可靠性。

3) 根据评价指标权重和原始评价数据建立加权标准化的评估矩阵, 并采用改进后的 GRA-TOPSIS 方法进行综合评估。通过融合灰色关联度和距离接近度得到综合接近度, 使得评价更为全面和准确。

4) 利用综合接近度揭示配电站房的健康状态相对优劣, 通过分析 4 个评价维度的指标性能, 识别影响健康状态的关键因素。

5 实例分析

为了验证文中所提综合评价方法的有效性和科学性。选取福建某地区实际运行的 3 个智能配电站房(站房 A、B、C), 对本文所提方法进行有效性和

合理性分析。

5.1 冲突量化结果

本文邀请不同部门的 4 个专家对配电站房健康状态指标进行重要性评估, 4 位专家对一次设备、二次设备、电能质量、环境安全 4 个指标维度重要性评估序列如表 2—表 6 所示。

表 2—表 6 展示了 4 位专家对各评价维度及其下指标重要性的评估序列。以表 2 中的 4 个评价维度重要性评估为例, 冲突系数的计算结果见表 7, 其中 C_{ij} 表示第 i 个和第 j 个专家的冲突系数, $C_{1,\dots,Q}$ 表示第 1 个到第 Q 个专家的总冲突系数。在一次设

表 2 各个评价维度评估序列表

Table 2 Evaluation sequence for each evaluation dimension

评价维度	专家 1	专家 2	专家 3	专家 4
一次设备	{([3,4],1)}	{(3,0.6), (4,0.4)}	{(5,1)}	{(4,1)}
二次设备	{([2,3],1)}	{(1,0.7), (2,0.3)}	{(2,1)}	{(2,0.4), (3,0.6)}
电能质量	{([2,3],1)}	{(1,0.3), (2,0.7)}	{(3,1)}	{(1,0.6), (2,0.4)}
环境安全	{([3,4],1)}	{(3,0.3), (4,0.7)}	{(4,1)}	{(4,1)}

表 3 一次设备评估序列表

Table 3 Evaluation sequence of primary equipment

一次设备	专家 1	专家 2	专家 3	专家 4
e_{11}	{([2,3],1)}	{(2,0.2), (3,0.8)}	{(3,1)}	{(4,1)}
e_{12}	{([2,3],1)}	{(2,0.6), (3,0.4)}	{(3,1)}	{(3,1)}
e_{13}	{([3,4],1)}	{(3,0.3), (2,0.7)}	{(4,1)}	{(5,1)}
e_{14}	{([3,4],1)}	{(3,0.3), (4,0.7)}	{(4,1)}	{(4,1)}

表 4 二次设备评估序列表

Table 4 Evaluation sequence of secondary equipment

二次设备	专家 1	专家 2	专家 3	专家 4
e_{21}	{([3,4],1)}	{(2,0.3), (3,0.7)}	{(3,1)}	{(4,1)}
e_{22}	{([2,3],1)}	{(3,0.6), (4,0.4)}	{(3,1)}	{(2,0.4), (3,0.6)}
e_{23}	{([1,2],1)}	{(1,0.3), (2,0.7)}	{(4,1)}	{(4,1)}

表 5 电能质量评估序列表

Table 5 Evaluation sequence of power quality

电能质量	专家 1	专家 2	专家 3	专家 4
e_{31}	{([3,4],1)}	{(3,0.4), (4,0.6)}	{(5,1)}	{(4,0.4), (5,0.6)}
e_{32}	{([1,2],1)}	{(2,0.7), (3,0.3)}	{(3,1)}	{(2,1)}
e_{33}	{([2,3],1)}	{(3,0.7), (4,0.3)}	{(2,1)}	{(3,1)}

表 6 环境安全评估序列表

Table 6 Evaluation sequence of environmental safety

环境安全	专家 1	专家 2	专家 3	专家 4
e_{41}	{([2,3],1)}	{(2,1)}	{(4,1)}	{(3,1)}
e_{42}	{([2,3],1)}	{(2,0.5), (3,0.5)}	{(4,1)}	{(2,0.4), (3,0.6)}
e_{43}	{([4,5],1)}	{(4,0.6), (5,0.4)}	{(5,1)}	{([4,5],1)}

表 7 冲突系数

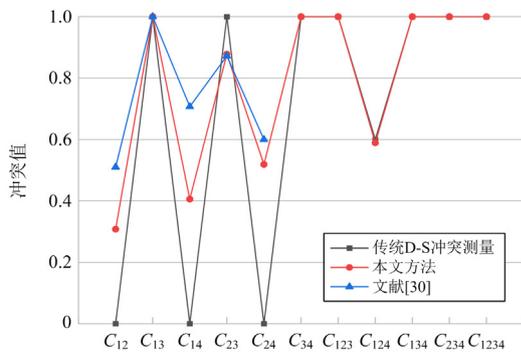
Table 7 Conflict coefficient

评价维度	C_{1234}	C_{234}	C_{134}	C_{124}	C_{123}
一次设备	1	1	1	0.589	1
二次设备	0.764	0.64	0.589	0.764	0.693
电能质量	0.894	0.894	0.878	0.661	0.894
环境安全	0.492	0.149	0.406	0.492	0.492

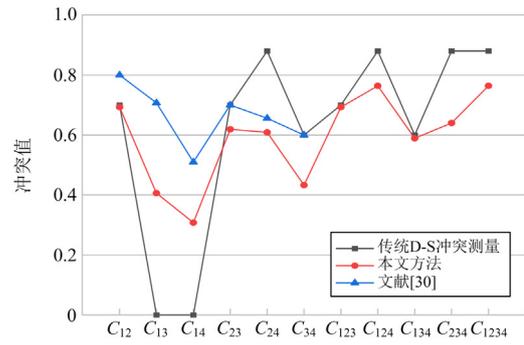
备指标的重要性评估中, 专家 1、2 和专家 4 之间的评价冲突系数为 0.589, 其余冲突系数均为 1。这表明评价过程中的主要冲突由专家 3 引起, 因此对于专家 3 给出的评价序列, 应分配较低的虚假度权重。根据本文设计的新型二元冲突方法计算可知, 4 位专家的评价序列的虚假度 $C_{(onf)1} = [0.273, 0.273, 0.181, 0.273]$, 可以看出在评价过程中, 专家 3 对于全局冲突的贡献最大, 符合人的直观逻辑结果。同理, 对于其他评价维度, 计算其虚假度权重为: $C_{(onf)2} = [0.239, 0.224, 0.281, 0.256]$, $C_{(onf)3} = [0.266, 0.263, 0.205, 0.266]$, $C_{(onf)4} = [0.149, 0.251, 0.3, 0.3]$ 。

传统 D-S 证据理论通过计算相交为空集的焦点元素来衡量专家评价序列之间的冲突。文献[30]基于传统 D-S 冲突测量方法与 Jusselme 距离, 建立二维冲突测度来衡量专家之间的冲突, 是目前主流的方法。而本文在文献[30]的基础上改进了传统 D-S 冲突测量方式, 设计了一种新型二元冲突测量函数来权衡任意专家之间的冲突。使用传统 D-S 理论、文献[30]、本文方法分别计算所有专家之间的冲突系数, 结果如图 5 所示, 纵坐标为归一化后的冲突值。

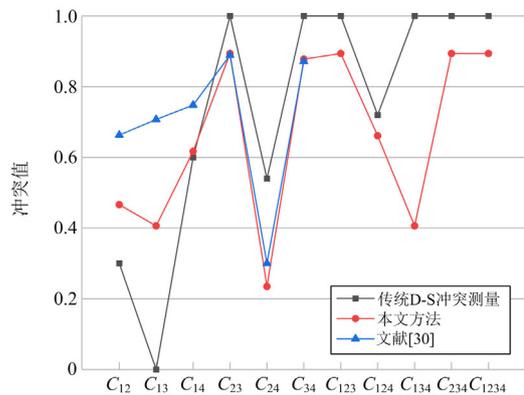
从图 5(a)可看出, 传统 D-S 认为专家 1 和专家 2 (C_{12})、专家 1 和专家 4 (C_{14})、专家 2 和专家 4 (C_{24}) 之间认为没有冲突, 即冲突系数为 0, 显然不符合人的直观逻辑结果, 不够精确。如图 5(a)所示, 以专家 1 给出的评价序列 $\{(3,4), 1\}$ 和专家 2 给出的评价序列 $\{(3,0.6), (4,0.4)\}$ 为例(见表 2), 文献[30]和本文方法测得冲突系数分别为 0.51 和 0.308, 相比



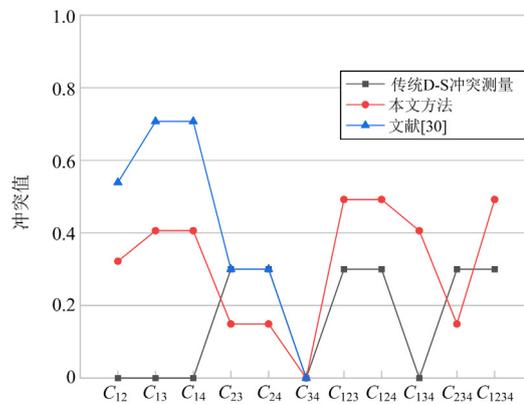
(a) 一次设备维度的专家评价冲突



(b) 二次设备维度的专家评价冲突



(c) 电能质量维度的专家评价冲突



(d) 环境安全维度的专家评价冲突

图 5 各个冲突测量方法的计算结果

Fig. 5 Calculation results of various conflict measurement methods

于传统 D-S 理论, 本文和文献[30]均能准确量化专家之间冲突。此外文献[30]只能测量两个证据之间的冲突而无法测量两个证据以上的全局冲突, 具有一定的局限性。同理, 对于图 5(b)——图 5(d)而言, 传统 D-S 理论测得不同专家之间的冲突明显不符合人的直观逻辑, 相比本文方法不够精确, 原因在于本文设计的二元冲突测量方法从证据距离和改进冲

突系数两个方面分析所有专家之间的冲突，既能测得不同专家之间的直接冲突，也能测得间接冲突，更具合理性。

综上，相比于传统 D-S 理论，文献[30]和所提方法的计算结果均符合人的直观逻辑，能快速分析专家之间的冲突程度。但文献[30]缺陷在于无法同时量化多个专家之间的冲突，且没有考虑专家之间的局部冲突。因此，本文方法具有以下优点：1) 能够同时测量多个专家之间的冲突；2) 能测量到包括空集和非空集上的焦点元素引起的局部冲突。

5.2 专家意见聚合结果

接着构建了专家评价函数，利用专家评价距离计算每个评价序列的可信度。同时，依据熵权法理论计算每个专家的信息熵，从而确定评价序列的可信度。利用式(8)计算专家修正因子，结果如表 8 所示。应用专家修正因子修正每个评估序列后，最终的聚合结果如表 9 所示。由于篇幅限制，仅展示 4 个评价维度的聚合结果。

表 8 专家修正因子

Table 8 Expert adjustment factor

评价维度	专家 1	专家 2	专家 3	专家 4
一次设备	0.75	1.00	0.27	0.86
二次设备	0.77	0.58	0.98	1.00
电能质量	0.82	1.00	0.64	0.97
环境安全	0.34	0.88	0.92	1.00

表 9 评价维度聚合结果

Table 9 Aggregation results of evaluation dimension

评价维度	聚合结果
一次设备	{(3, 0.17), (4, 0.83)}
二次设备	{(2, 0.98), (3, 0.02)}
电能质量	{(1, 0.1), (2, 0.9)}
环境安全	{(4, 1)}

从表 9 可以看出，聚合结果保留了群体评价的一致性，并降低了个体评价的主观影响，这是因为聚合过程中对原始评价序列的 BBA 进行了调整。本文首次提出专家修正因子，从评价序列之间的虚假度、可信度及可用度三个方面来衡量每个评价序列对整个评价的影响。专家修正因子增强了可靠评价序列的影响，同时削弱了不可靠评价序列的影响。如表 2 所示，其中 4 个专家关于评价维度给出的评价序列存在一定的差异性。以一次设备评价维度为例，根据表 8 给出的计算结果，其专家修正因子依次为 0.75、1.00、0.27、0.86，表明专家 2 给出的评价序列影响最大，修正后的 BBA 相对增大，而专家 3 给出的评价序列影响最小，其 BBA 相对减小。

因此，在聚合过程中专家 2 给出的评价序列 {(3,0.6), (4,0.4)} 影响较强，而专家 5 给出的评价序列 {(5,1)} 影响较弱。通过专家修正因子修正原始评价序列后，得到一次设备评价维度聚合结果如表 9 所示，4 个专家的聚合结果为 {(3, 0.17), (4,0.83)}。

所提方法从评价序列的虚假度、可信度、可用度三个角度建立专家修正因子来分析评价序列的合理性，从而保证聚合结果的可靠性，使得评价更为合理准确。将本文聚合方法与其他方法进行比较，对比结果如表 10 所示。

表 10 不同方法对比结果

Table 10 Comparison results of different methods

方法	一次设备	二次设备	电能质量	环境安全
D-S 理论	—	{(2,1)}	—	{(4, 1)}
Murphy	{(3, 0.139), (4, 0.811), (5, 0.025), [3,4], 0.025}	{(1, 0.004), (2, 0.884), (3, 0.095), [2,3],0.017}	{(1, 0.019), (2, 0.525), (3, 0.427), [2,3],0.029}	{(3,0.048), (4, 0.882), [3,4],0.07}
文献[9]	{(3, 0.139), (4, 0.811), (5, 0.025), [3,4], 0.024}	{(2, 1)}	{(1, 0.019), (2, 0.525), (3, 0.427), [2,3],0.029}	{(4, 1)}
文献[31]	{(3, 0.141), (4, 0.821), (5, 0.014), [3, 4], 0.02}	{(2, 0.9), (3, 0.09), [1, 2], 0.01}	{(1, 0.03), (2, 0.64), (3, 0.31), [2, 3], 0.02}	{(4, 1)}
本文方法	{(3,0.17), (4,0.83)}	{(2,0.98), (3,0.02)}	{(1, 0.1), (2, 0.9)}	{(4, 1)}

从最终聚合结果来看，在处理诸如一次设备和电能质量维度的高冲突专家评价意见时，传统 D-S 证据理论无法进行融合。尽管 Murphy 的证据平均方法可以处理高冲突评价意见，但它仅对多个证据体进行简单平均，忽略了证据间的关联性。文献[9]和文献[31]在 Murphy 方法基础上进行了改进。文献[9]利用皮尔逊系数计算证据体间的两两关联性，以此关联性为基础分配权重，修正原始证据。文献[31]引入 Hellinger 距离作为证据可信度权重，对原始证据体进行修正。从表 10 对比结果可以看出，本文方法与其他方法结果基本一致，证明了其可行性和适用性。在精度方面，以一次设备维度评价为例，4 个评价序列呈现负相关性，因此，文献[9]基于皮尔逊相关系数为 4 个专家分配相同的权重，而文献[31]为 4 个专家分配权重分别为 $w=[0.26,0.26,0.22,0.26]$ 。本文方法将专家 3 视为造成差异冲突的主要原因，赋予专家 3 较低的权重，从而减弱其评价的影响，符合人的直观结果。因此相对于本文方法，其他方法对于专家 3 区分度不够明显。本文提出的

基于专家修正因子的 D-S 理论聚合方法, 从评价序列之间的虚假度、可信度以及可用度来分析评价序列之间的关联, 并根据专家修正因子对原始评价序列进行合理修正, 确保了评价指标赋权的可靠性和精确性。因此本文方法能够反映人的直观结果, 且有效兼容了群体决策下的虚假度、可信度、可用度, 在保留有效评价信息的同时, 消除了不同专家之间的差异冲突, 具有较高的准确性、适用性和鲁棒性。

最后将聚合结果根据式(11)得到指标权重如表 11 所示, 4 个评价维度的权重 $w = (0.33, 0.17, 0.16, 0.34)$ 。从表 11 可看出, 专家对于一次设备和环境安全维度更为重视。

表 11 评价指标权重

Table 11 Evaluation index weights

评价维度	评价指标	指标权重
$E_1(0.33)$	e_{11}	0.215
	e_{12}	0.215
	e_{13}	0.282
	e_{14}	0.288
$E_2(0.17)$	e_{21}	0.476
	e_{22}	0.347
	e_{23}	0.177
$E_3(0.16)$	e_{31}	0.525
	e_{32}	0.219
	e_{33}	0.256
$E_4(0.34)$	e_{41}	0.225
	e_{42}	0.221
	e_{43}	0.574

5.3 综合评价

根据原始数据样本(具体见附录表 A1)和专家评价聚合方法建立加权标准化后的矩阵 Z , 并计算其正负理想解, 其次根据数据样本序列正负理想解的距离和相似性两个方面分别计算 3 个配电站房 A、B、C 各项基本数据序列与正负理想解的距离测度 D_i 和灰色关联系数 R_i 。为了避免单独使用 TOPSIS 或 GRA 评价方法, 从而导致评价过于主观性和片面性, 本文综合数据样本的距离和变化情况, 根据式(12)、式(13)建立非线性规划模型来计算 3 个配电站房的综合接近度, 如表 12 所示。

表 12 综合评价结果

Table 12 Comprehensive evaluation results

评价对象	D_i	R_i	$C_{(S_i)}$
配电站房 A	0.679	0.562	0.620
配电站房 B	0.223	0.434	0.328
配电站房 C	0.356	0.475	0.415

配电站房健康状态评价结果根据综合贴近度来排序, 综合贴近度值越大, 反映该配电站房的健康状态越接近最优理想解, 健康状态相对较好。因此, 根据表 12 的结果, 3 个配电站房的健康状态相对优劣性排序为: 配电站房 A > 配电站房 C > 配电站房 B。

所提基于改进 D-S 理论和 GRA-TOPSIS 综合评价方法即 DGT 评价框架, 考虑了群体决策之间的差异冲突性以及指标数据样本之间的距离和整体变化态势, 具有现实意义。将所提方法与传统综合评价方法进行比较分析, 评价结果如表 13 所示。

表 13 评估方法对比

Table 13 Comparison of evaluation methods

评价对象	本文方法		AHP-TOPSIS ^[26]		AHP-GRA	
	$C_{(S_i)}$	排名	D_i	排名	R_i	排名
配电站房 A	0.620	1	0.679	1	0.562	1
配电站房 B	0.328	3	0.223	3	0.434	3
配电站房 C	0.415	2	0.356	2	0.475	2

由表 13 可知, 本文方法与其他评估方法结果基本一致说明所提出的 DGT 评估方法具有合理性和适应性。

与传统的主观赋权方法 AHP 相比, 本文提出的基于专家修正因子的聚合方法有效应对了由不同专家意见的差异、冲突和不确定性带来的问题, 并避免了专家意见不一致导致无法通过一致性检验的情况。

AHP-TOPSIS 评估仅考虑配电站房数据样本间的距离关系, 以单一的欧式距离为评价依据, 忽略了数据样本整体变化, 未能准确反映不同配电站房健康状态的相对优劣情况, 导致评估结果不够全面和准确。AHP-GRA 方法基于数据样本间相似度构建灰色关联系数, 以数据变化为评价依据。结果显示配电站房 B、C 的灰色关联系数过于相近, 难以判定其优劣。本文提出的 DGT 评价方法, 综合考虑了数据样本间的距离位置关系与变化特征, 作为综合评价判据, 克服了单独使用 AHP-TOPSIS 和 AHP-GRA 的片面性, 从而使评估结果更加客观合理。

6 结论

本文提出了一种考虑群体决策差异冲突解决机制的配电站房健康状态评估方法, 能够对多个配电站房的实际健康状态进行科学评估, 对于配电站房的健康运行具有实际意义。所提配电站房健康状态评价体系涵盖了一次设备、二次设备、电能质量、环境安全等 4 个维度, 可得到以下结论。

1) 所提基于专家修正因子的改进 D-S 理论聚合方法, 能兼容专家给出评价序列的虚假度、可信性、可用度多个特性, 从根本上解决了传统 D-S 理论无法融合高度冲突证据的问题。

2) 所提出的改进 GRA-TOPSIS 综合评价方法, 引入了灰色关联度改善传统 TOPSIS 单一距离测度的局限性, 实现对配电站房健康状态全面准确的评估。

3) 所提出的改进 D-S 证据理论和 GRA-TOPSIS 混合 DGT 评估框架, 能在保留有效信息的同时, 消除不同专家之间的差异冲突。与其他方法相比, 评估结果更具可靠性。此外, 本文提出的 DGT 评估框架也适用于其他领域。

本文以虚假度、可信度、可用度三个测量角度构造专家修正因子, 具有一定的合理性, 但并未考虑三者之间的最优协调关系, 具有一定的局限性。在未来研究中, 可以利用博弈论构建三个测量角度的优化模型, 从而确定最理想的修正因子, 使评价结果更为合理和可靠。

附录 A

1) 评价序列虚假度

$$F(E_{(p)ij}^q) = \frac{k_0 - k_j}{k_0} \quad (A1)$$

$$k_0 = C_{1,\dots,Q}, k_j = C_{1,\dots,j-1,j+1,\dots,Q} \quad (A2)$$

式中: $F(E_{(p)ij}^q)$ 为虚假度; k_0 为全局冲突系数, 在本文中代表几位专家之间的全局冲突; k_j 代表从所有评价序列中除去专家 j 给出的评价序列后剩余评价序列之间的局部冲突。显然当 $0 < k_j < k_0 < 1$ 、 $F(E_{(p)ij}^q) = 0$ 、 $k_0 = k_j$ 时, 代表 $E_{(p)ij}^q$ 对全局冲突没有影响。当 $F(E_{(p)ij}^q) = 1$ 、 $k_0 = 1$ 、 $k_j = 0$ 时代表 $E_{(p)ij}^q$ 是造成冲突的主要原因。当 $0 < F(E_{(p)ij}^q) < 1$, 代表 $E_{(p)ij}^q$ 对全局冲突具有一定的影响, 且虚假度越大, 该专家给出的评价冲突越大。

当修正专家评价序列时, 若该评价序列虚假度较大, 应该降低其权重, 同时为了避免对评价序列赋予零权重的情况, 对其进行归一化得到虚假度权重 $F_{(al)ij}^q$ 如式(A3)所示。

$$F_{(al)ij}^q = \frac{\exp(-F(E_{(p)ij}^q))}{\sum_{q=1}^Q \exp(-F(E_{(p)ij}^q))}, 0 \leq F_{(al)ij}^q \leq 1 \quad (A3)$$

表 A1 配电站房指标数据样本

Table A1 Sample data of distribution station indicators

评价指标	配电站房 A	配电站房 B	配电站房 C
设备平均过载率 $e_{11}/\%$	22.4	27.75	28.24
过流开关数 e_{12}	2	2	1
断路器误动次数 e_{13}	1	2	1
电缆接头温度 $e_{14}/^\circ\text{C}$	69	73	75
保护正确动作率 $e_{21}/\%$	85	90	90
遥信正确率 $e_{22}/\%$	90	90	85
传感器可用率 $e_{23}/\%$	85	80	82
供电可靠率 $e_{31}/\%$	85	82	85
电压偏差 $e_{32}/\%$	1.8	2.2	2.0
三相不平衡率 $e_{33}/\%$	0.75	0.65	1.25
站房温度 $e_{41}/^\circ\text{C}$	32	39	34
站房湿度 $e_{42}/\%$	71.6	75.8	72.8
SF ₆ 气体浓度 e_{43}/ppm	607	721	801

参考文献

[1] 高骞, 杨俊义, 洪宇, 等. 新型电力系统背景下电网发展业务数字化转型架构及路径研究[J]. 发电技术, 2022, 43(6): 851-859.
GAO Qian, YANG Junyi, HONG Yu, et al. Research on digital transformation architecture and path of power grid development planning business under new power system blueprint[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(6): 851-859.

[2] 王金丽, 李丰胜, 解芳, 等. “双碳”战略背景下新型配电系统技术标准体系[J]. 中国电力, 2023, 56(5): 22-31.
WANG Jinli, LI Fengsheng, XIE Fang, et al. Research on technical standard system of new distribution system under double-carbon strategy[J]. Electric Power, 2023, 56(5): 22-31.

[3] 陈维江, 赵国亮. 以新能源为主体的新型电力系统关键技术和装备[J]. 全球能源互联网, 2022, 5(1): 1.
CHEN Weijiang, ZHAO Guoliang. Key technology and equipment of new power system based on renewable energy[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2022, 5(1): 1.

[4] 叶远波, 李端超, 谢民, 等. 基于 SSA-SVM 的继电保护装置状态评估方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(8): 171-178.
YE Yuanbo, LI Duanchao, XIE Min, et al. A state evaluation method for a relay protection device based on SSA-SVM[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(8): 171-178.

[5] ZHANG H, SUN H, KANG L, et al. Prediction of health level of multiform lithium sulfur batteries based on

- incremental capacity analysis and an improved LSTM[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2024, 9(2): 21-31.
- [6] 张朋, 张健, 杨航, 等. 基于改进 NSGA 多目标值优化的油纸绝缘状态评估方法[J]. *中国电力*, 2023, 56(10): 124-132.
ZHANG Peng, ZHANG Jian, YANG Hang, et al. Improved NSGA multi-objective optimization based oil-paper insulation status assessment method[J]. *Electric Power*, 2023, 56(10): 124-132.
- [7] 张宁, 蔡金锭. 基于模糊物元-逼近理想点法的油纸绝缘状态评估[J]. *电工技术学报*, 2018, 33(22): 5381-5389.
ZHANG Ning, CAI Jinding. Evaluation of oil-paper insulation condition based on fuzzy matter element-technique for order preference by similarity to ideal solution method[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2018, 33(22): 5381-5389.
- [8] 蔡金锭, 叶荣, 刘庆珍. 基于改进 TOPSIS 和时域特征量的油纸绝缘状态分类分级评估[J]. *电机与控制学报*, 2020, 24(1): 86-94.
CAI Jinding, YE Rong, LIU Qingzhen. Oil-paper insulation classification and grading assessment based on improved TOPSIS and time domain characteristic parameters[J]. *Electric Machines and Control*, 2020, 24(1): 86-94.
- [9] 石宜金, 谭贵生, 赵波, 等. 基于模糊综合评估模型与信息融合的电力变压器状态评估方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(21): 167-176.
SHI Yijin, TAN Guisheng, ZHAO Bo, et al. Power transformer condition assessment method based on fuzzy comprehensive assessment model and information fusion[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(21): 167-176.
- [10] TIAN F, JING Z, ZHAO H, et al. A synthetic condition assessment model for power transformers using the fuzzy evidence fusion method[J]. *Energies*, 2019, 12(5): 857.
- [11] 邹阳, 俞豪奕, 金涛. 融合模糊 K 近邻及证据理论的变压器油纸绝缘状态评估方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(14): 55-63.
ZOU Yang, YU Haoyi, JIN Tao. Evaluation method of the oil-paper insulation condition of a transformer based on fuzzy K nearest neighbor and evidence theory[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(14): 55-63.
- [12] 龙秋风, 肖小兵, 文屹, 等. 基于数据挖掘的智能配电站房运行状态评估方法[J]. *电力大数据*, 2018, 21(12): 6-11.
LONG Qiufeng, XIAO Xiaobing, WEN Yi, et al. Evaluation method of intelligent distribution station operation state based on data mining[J]. *Power System and Big Data*, 2018, 21(12): 6-11.
- [13] 赵峰, 陈子文, 陈小强, 等. 高速铁路牵引变电所健康状态评估[J]. *铁道科学与工程学报*, 2019, 16(9): 2162-2167.
ZHAO Feng, CHEN Ziwen, CHEN Xiaoqiang, et al. Assessment of health status of high speed railway traction substation[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2019, 16(9): 2162-2167.
- [14] 南东亮, 王维庆, 张陵, 等. 基于关联规则挖掘与组合赋权-云模型的电网二次设备运行状态风险评估[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(10): 67-76.
NAN Dongliang, WANG Weiqing, ZHANG Ling, et al. Risk assessment of the operation state of power grid secondary equipment based on association rule mining and combination weighting-cloud model[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(10): 67-76.
- [15] 配网设备状态评价导则: DL/T 2106—2020[S]. 国家能源局, 2020.
- [16] 李建林, 郭兆东, 马速良, 等. 新型电力系统下“源网荷储”架构与评估体系综述[J]. *高电压技术*, 2022, 48(11): 4330-4342.
LI Jianlin, GUO Zhaodong, MA Suliang, et al. Overview of the “source-grid-load-storage” architecture and evaluation system under the new power system[J]. *High Voltage Engineering*, 2022, 48(11): 4330-4342.
- [17] 侯健敏, 徐志豪, 余威杰, 等. 基于灰色-前景改进优劣解距离法的多气候区建筑三联供系统多准则评估[J]. *电网技术*, 2023, 47(7): 2659-2673.
HOU Jianmin, XU Zhihao, YU Weijie, et al. Multi-criterion evaluation framework of building triple supply system in multi-climate regions based on grey-prospect TOPSIS[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(7): 2659-2673.
- [18] 王敏, 邹婕, 王惠琳, 等. 基于改进的 AHP-CRITIC-MARCOS 配电网设备风险评估方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(3): 164-172.
WANG Min, ZOU Jie, WANG Huilin, et al. Improved AHP-CRITIC-MARCOS-based risk assessment method for distribution network equipment[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(3): 164-172.
- [19] CHEN A, TANG X, CHENG B C, et al. Multi-source monitoring information fusion method for DAM health diagnosis based on Wasserstein distance[J]. *Information Sciences*, 2023, 632: 378-389.
- [20] 王磊, 张磊, 牛荣泽, 等. 基于 CNN+D-S 证据理论的多维信息源局部放电故障识别[J]. *电力工程技术*, 2022, 41(5): 172-179.
WANG Lei, ZHANG Lei, NIU Rongze, et al. Partial discharge fault identification of multi-dimensional information sources based on CNN+D-S evidence theory[J].

- Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(5): 172-179.
- [21] 韩德强, 杨艺, 韩崇昭. DS 证据理论研究进展及相关问题探讨[J]. 控制与决策, 2014, 29(1): 1-11.
HAN Deqiang, YANG Yi, HAN Chongzhao. Research progress and discussion on related problems of DS evidence theory[J]. Control and Decision, 2014, 29(1): 1-11.
- [22] 刘康, 何明浩, 韩俊, 等. 基于本征向量和 Jusselme 距离的高冲突证据融合方法[J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44(7): 2175-2180.
LIU Kang, HE Minghao, HAN Jun, et al. A high conflict evidence fusion method based on eigenvector and Jusselme distance[J]. Systems Engineering and Electronics, 2022, 44(7): 2175-2180.
- [23] 宋亚飞, 王晓丹, 雷蕾, 等. 基于信任度和虚假度的证据组合方法[J]. 通信学报, 2015, 36(5): 102-107.
SONG Yafei, WANG Xiaodan, LEI Lei, et al. Evidence combination method based on the degree of credibility and falsity[J]. Journal of Communications, 2015, 36(5): 102-107.
- [24] 江友华, 谭杰, 赵乐, 等. 基于三角散度和信念熵的冲突证据融合算法[J]. 计算机工程与应用, 2023, 59(12): 132-140.
JIANG Youhua, TAN Jie, ZHAO Le, et al. Conflict evidence fusion algorithm based on triangular divergence and belief entropy[J]. Computer Engineering and Applications, 2023, 59(12): 132-140.
- [25] 董煜, 张友鹏. 基于聚类赋权的冲突证据组合方法[J]. 通信学报, 2023, 44(3): 157-163.
DONG Yu, ZHANG Youpeng. Conflict evidence combination method based on clustering weighting[J]. Journal on Communications, 2023, 44(3): 157-163.
- [26] 付志扬, 王涛, 孔令号, 等. 基于 AHP-TOPSIS 算法的重要电力客户用电状态评估[J]. 电网技术, 2022, 46(10): 4095-4101.
FU Zhiyang, WANG Tao, KONG Linghao, et al. Power consumption status evaluation of important power customers based on AHP-TOPSIS algorithm[J]. Power System Technology, 2022, 46(10): 4095-4101.
- [27] 蒋毅, 傅俊诚, 李泽文, 等. 基于改进 TOPSIS 的楼宇多指标综合评价[J]. 上海交通大学学报, 2023, 57(7): 868-877.
JIANG Yi, FU Juncheng, LI Zewen, et al. A comprehensive evaluation model of buildings based on improved TOPSIS[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2023, 57(7): 868-877.
- [28] 陈仁朋, 王志腾, 吴怀娜, 等. 基于 FAHP 法和区间数改进 TOPSIS 法的盾构隧道下穿建筑物风险评估[J]. 上海交通大学学报, 2022, 56(12): 1710-1719.
CHEN Renpeng, WANG Zhiteng, WU Huaina, et al. Risk Assessment for shield tunneling beneath buildings based on interval improved TOPSIS method and FAHP method[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2022, 56(12): 1710-1719.
- [29] 姚忠胜, 钱虹, 吴文军, 等. 基于多因素综合评价和改进灰色关联的供电可靠性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(11): 28-34.
YAO Zhongsheng, QIAN Hong, WU Wenjun, et al. Research on power supply reliability based on multi-factor comprehensive evaluation and improved grey relation[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(11): 28-34.
- [30] XIAHOU T F, ZENG Z G, LIU Y, et al. Measuring conflicts of multisource imprecise information in multistate system reliability assessment[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2021, 71(4): 1417-1434.
- [31] ZHU C, XIAO F. A belief Hellinger distance for D-S evidence theory and its application in pattern recognition[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2021, 106: 104452.

收稿日期: 2024-01-07; 修回日期: 2024-04-10

作者简介:

罗 昆(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统状态评价的研究工作; E-mail: 2660144468@qq.com

高 伟(1983—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事电力系统及设备故障诊断、电力系统状态评价的研究工作; E-mail: gaowei0203@fzu.edu.cn

洪 翠(1972—), 女, 副教授, 硕士生导师, 主要从事直流配电网故障诊断的研究工作。E-mail: hongcui@fzu.edu.cn

(编辑 张颖)