

考虑特定试验条件的架空绝缘导线质量分级评估

许侃¹, 袁志文¹, 张金丽¹, 王伟韬²

(1. 国网上海市电力公司电力科学研究院, 上海 200437;

2. 上海交通大学 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室, 上海 200240)

摘要: 利用物资抽检的方式进行电力设备质量评估是采购电力设备的重要依据。针对现阶段设备检测报告当中对于各项检测指标, 会给予合格与否的是非制评价, 导致具有一定分布范围的检测数据无法充分利用的问题, 基于灰色聚类法, 结合多项检测指标, 在设备质量合格的基础上提出一种对架空绝缘导线质量的分级评判方法, 并考虑特定试验条件下的试验结果以简化评价体系。结果表明所提出的评价方法可以对合格设备的质量给出优和良的等级分类, 同时, 对特定试验条件下检测数据的关联性分析能够简化评价指标体系, 加深了对设备检测报告中数据的利用程度, 有利于检测人员更加准确地了解设备质量, 为设备采购提供参考。

关键词: 电力设备; 质量评估; 聚类分析; 关联性分析; 架空绝缘导线

DOI: 10.15938/j.jhust.2024.02.016

中图分类号: TM73 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2024)02-0130-07

Quality Grading Evaluation of Overhead Insulated Wire Considering Specific Testing Conditions

XU Kan¹, YUAN Zhiwen¹, ZHANG Jinli¹, WANG Weitao²

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Shanghai Electric Power Co. Ltd., Shanghai 200437, China;

2. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion of Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: It is important to use material sampling to evaluate the quality of power equipment. In the equipment testing report, the simple judgement of qualified or unqualified is given to each testing index, which leads to the waste of a large number of testing data. In order to make more in-depth use of test data and understand the quality of equipment, based on adaptive grey clustering, combined with a number of testing indicators, a grading evaluation method for the overhead insulated wire is proposed. The consideration of test results under specific test conditions can simplify the evaluation system. The qualified power equipment quality can be classified into "excellent" and "good" grades. At the same time, the correlation analysis of test data under specific test conditions can simplify the evaluation index system. It deepens the utilization of the data in the equipment testing report, which is helpful for the testing personnel to understand the equipment quality more accurately and provides reference for the equipment procurement.

Keywords: power equipment; quality evaluation; clustering analysis; correlation analysis; overhead insulated wire

收稿日期: 2022-08-22

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(B3094020000C); 国家自然科学基金(51907120).

作者简介: 许侃(1989—), 女, 硕士, 工程师;

袁志文(1973—), 男, 硕士, 高级工程师.

通信作者: 王伟韬(1998—), 男, 硕士, E-mail: zntt1234@foxmail.com.

0 引言

线路类设备承担了电能传输,联结整个电力系统的重要作用,其质量水平影响到电网公司采购设备的经济性和电网运行的安全性^[1]。配电线路类设备的检测报告是了解与评判设备质量的重要依据。现阶段电力设备的检测工作由专门的机构进行,并出具检测报告。检测数据主要以纸质文档的方式储存并积累,电力公司对于检测数据的分析效率不高。

在设备质量评估领域,研究主要着眼于运行维护及测试数据等的分析。文[2]采用贝叶斯方法建立了传输线的故障预测模型。文[3]使用了动态状态向量评估方法,来实现对于变压器等装置的质量评价。文[4]系统地分析了设备的功能层次与结构特点,利用模糊综合评价方法以及功能层次分析法,给出了一个系统中量化评估设备的主要方式。文[5]探讨了基于超低频场空间电荷响应的绝缘状态评估方法。文[6]实现了对于电缆老化状况的评估,重点分析了对数正态分布和 Weibull 分布两种分布函数的应用。以上方法往往对于设备的质量评估所采取的评价指标单一,不能全面的反映设备的质量状况。

文[7]提出采用模糊综合评价的变电设施评价方式,对电网设施实施综合评价和动态控制。文[8]提出了一个采用关联规则和变权重系数的高压开关柜状态综合评价方法,通过对高压开关柜的绝缘状况、电气状态、机构状况,以及历史记录等数据分析处理,建立了上述数据和故障原因之间的关联规则,并引入变权重系数以保证状态综合评价指标的均衡性。上述方法将设备状态进行正常、故障等分类,达到对运行状态以更好的区分,未能在设备质量本身的基础上做出更细致的划分。

关联性分析能够衡量因素之间的关系密切程度。文[9]通过分析了斜拉桥各个拉索与断开拉索的关联度的大小以评估拉索的状态。文[10]利用回归分析的方法探讨了桥梁结构温度和跨中截面挠度的关系。在电器设备研究中,文[11]分析了变压器负载和顶层油温的相关性,以及变压器氢气含量与油中微水的相关性。

本文针对架空绝缘导线的质量在在设备合格的基础上使用检测数据进行精准评估,提出考虑特定试验条件下试验数据关联性的分级评估方法。首先选取参与评估的性能指标,然后利用综合赋权法对

不同指标进行赋权,并进行特定检测条件下的检测指标关联性分析,考虑权值修正,建立架空绝缘导线质量分级评估模型。结果表明所提出的评判方法能够在以往是非制的基础上对架空绝缘导线质量进行分级评估,对检测数据进行深入利用。

1 架空绝缘导线质量分级评估过程

设备的质量受诸多检测指标综合影响。本文以架空绝缘导线为例,将其质量性能指标分为导体性能、绝缘性能和热学性能,对应的检测量为导体直流电阻和导体拉断力,绝缘抗拉强度和绝缘最薄处厚度,以及热延伸性能。由此建立架空绝缘导线的评价体系如图1所示。

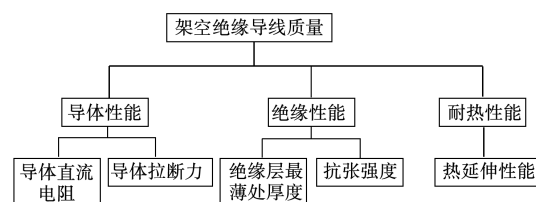


图1 架空绝缘导线质量评估体系

Fig.1 Quality evaluation system for overhead insulated conductors

现阶段电力设备的检测报告依据国家标准对检测指标以合格与否的评判,所有指标均合格的设备为合格设备,至少一项不合格的则为不合格设备,不予使用。本文对于合格的架空绝缘导线,根据选取的评价指标,使用基于综合赋权的自适应灰色聚类法进行质量的分级评估。然后进行特定试验条件下的检测结果关联性分析,考虑其对指标赋权的影响进行权值修正,建立考虑关联性的分级评估模型。由此在质量合格的基础上区分出更多的质量等级,进行质量精准评估。

2 基于综合赋权和灰色聚类的综合分级评估

设备质量需要综合多个检测指标进行评估,多项指标的综合评估体系由以下三部分组成:指标的无量纲化、多指标的综合赋权以及基于自适应灰色聚类的综合分级评价。

2.1 指标无量纲化

综合评价体系往往由多项指标组成,指标间的量纲体系常有所区别,存在着不可比较性。无量纲化的处理方法是解决不同指标间不可比较性的一种

方法^[12]。

对于不同标准的指标有不同的无量纲化计算方法:

1) 对于仅有下界的指标:

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij} - m_j}{M_j - m_j} \quad (1)$$

式中: x_{ij} 表示方案 i 在指标 j 下的原始数值; x_{ij}^* 表示方案 i 在指标 j 下的无量纲化值, 其中

$$M_j = \max_i \{x_{ij}\} \quad (2)$$

$$m_j = \min_i \{x_{ij}\} \quad (3)$$

2) 对于仅有上界的指标:

$$x_{ij}^* = \frac{m_j - x_{ij}}{M_j - m_j} \quad (4)$$

3) 对于区间型指标:

$$x_{ij}^* = \begin{cases} \frac{2(x_{ij} - m_j)}{M_j - m_j}, & x_{ij} < \frac{M_j + m_j}{2} \\ \frac{2(m_j - x_{ij})}{M_j - m_j}, & x_{ij} \geq \frac{M_j + m_j}{2} \end{cases} \quad (5)$$

2.2 综合权重法指标赋权

使用多个指标共同参与设备质量的评估, 则不同指标在评价体系内的权重需要确定。

在策略论中, 目前确定指标权重的方法有很多种, 主要分为主观权重法和客观权重法两类^[13-14]。主观权重法有层次分析法、排队计分法、G1 法等; 客观权重法有主成分分析法、因子分析法和熵权法等。

主观权重法基于使用者的知识与经验, 在评价时的主观随意性较强。客观权重法基于数据本身的特点进行信息挖掘以确定权重, 不是评价者的主观判断, 而主观经验往往对于决策问题具有重要意义。两种方法各有优劣。综合权重法的基本思想或本意就是从逻辑上将这两大类赋权法有机地结合起来, 使所确定的权重系数同时体现主观信息和客观信息。“乘法”集成法是一种常用方法^[13]。

本文中主观权重法采用 G1 法, 客观权重法采用熵权法, 再以“乘法”集成法完成最后的组合赋权。

G1 法的步骤如下:

1) 对评价指标进行排序:

假设在一个指标评价体系中有 m 个评价指标, 若 x_i 相对于评级准则的重要性程度不小于 x_j , 则记为 $x_i \geq x_j$ 。这样一一排序得出 m 个评价指标的序关系为

$$x_i^* \geq x_j^* \geq \cdots \geq x_m^* \quad (6)$$

其中 x_i^* 表示指标评价体系按序关系“ $\geq$ ”排序后的第 i 个评价指标, $i = 1, 2, \cdots, m$ 。

2) 人为给定评价指标 x_{k-1}^* 与 x_k^* 的相对重要性程度的比值 λ_{k-1}/λ_k 如下

$$\frac{\lambda_{k-1}}{\lambda_k} = r_k, k = m, \cdots, 3, 2 \quad (7)$$

式中 r_k 的赋值如表 1 所示。

表 1 r_k 的赋值参考表

Tab. 1 The values of r_k

r_k	说明
1.0	指标 $x_{k-1}^* x_{k-1}^*$ 与指标 x_k^* 有相同的重要性
1.2	指标 $x_{k-1}^* x_{k-1}^*$ 比指标 x_k^* 稍微重要
1.4	指标 $x_{k-1}^* x_{k-1}^*$ 比指标 x_k^* 明显重要
1.6	指标 $x_{k-1}^* x_{k-1}^*$ 比指标 x_k^* 强烈重要
1.8	指标 $x_{k-1}^* x_{k-1}^*$ 比指标 x_k^* 极其重要

3) 计算权重系数:

根据 r_k 的赋值参考表以及 r_k 的定义可以看出, r_{k-1} 与 r_k 显然满足以下关系:

$$r_{k-1} > \frac{1}{r_k}, k = m, m-1, \cdots, 3, 2 \quad (8)$$

G1 法主观权重计算公式为

$$w_m^s = (1 + \sum_{k=2}^m \prod_{i=k}^m r_i)^{-1} \quad (9)$$

其余指标的权重 $w_{k-1}^s = r_k w_k^s, k = m, m-1, \cdots, 3, 2$

熵权法的步骤如下:

在一个评价指标体系中, 假设有 n 个评价对象, m 项评价指标, $\alpha_{ij}, i = 1, 2, \cdots, n, j = 1, 2, \cdots, m$ 为第 i 个评价对象的第 j 项指标经无量纲化处理后的数值。

1) 计算第 j 项指标下, 第 i 个评价对象的特征比重:

$$p_{ij} = \frac{\alpha_{ij}}{\sum_{i=1}^n \alpha_{ij}} \quad (10)$$

2) 计算第 j 项指标的熵值:

$$e_j = -k \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij} \quad (11)$$

$$k = \frac{1}{\ln n} \quad (12)$$

3) 确定第 j 项指标的熵权法客观权重为

$$w_j^o = \frac{1 - e_j}{m - \sum_{j=1}^m e_j}, j = 1, 2, \cdots, m \quad (13)$$

熵权法具有以下基本性质:

1) 熵权法以评价对象某一指标的值的差异性为基础进行分析。当各个对象对于某一指标的量值

越接近,熵权越小,同时意味着该指标向评价者所揭露的信息越少。熵权为零时说明各个对象在某一指标上的值全部相同,则这项指标在评价体系当中可被考虑删去。

2) 当各个对象在某一指标上的值相差较大时,说明该指标对于评价者可利用的程度越高,对应熵权越大^[15]。

获得某指标主观赋权法得到的权值 w_j^s 和客观赋权法得到的权值 w_j^o 后利用“乘法”集成法得到组合权重。

$$w_j = \frac{w_j^s w_j^o}{\sum_{j=1}^n w_j^s w_j^o} \quad (14)$$

2.3 自适应灰色聚类法

灰色聚类法以白化权函数为基础,将不同的对象按不同的灰类进行归纳,是一种适用于多项指标的分类方法^[16-17]。相较于传统的 K-Means 聚类法,灰色聚类法对于多维数据进行聚类时可考虑不同维度指标间的主次关系,给予不同维度指标以不同权重,对于数据不同评价维度的评价更为客观。而对聚类的评价以类内样本越紧密,类间样本越分离为宜,轮廓系数是衡量聚类效果的指标,其计算方法见文^[18],其值在 $-1, 1$ 内。轮廓系数 SC 越大,说明类内的样本间更为密集时不同类间的样本间更为分散,分类的效果愈佳^[19]。

本文建立使用轮廓系数(SC)来衡量聚类效果的自适应灰色聚类法,以获得最优的聚类数量。该方法步骤如下:

1) 将样本分为 n 个聚类,所有样本的每个指标在其最大和最小值之间均分为 n 个范围。

2) 指标 j 的每个范围区间 $[a_k, a_{k+1}]$ 的中点被计算为转折点。

$$\lambda_j^k = \frac{a_k + a_{k+1}}{2}, k = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

3) 对于每个类,计算可能性函数以衡量指标的隶属度。特别地,第一类和第 n 类由式(16)和(17)计算,其他类由式(18)计算。

$$f_j^1(x) = \begin{cases} 0, x \notin [a_1, \lambda_j^2] \\ \frac{\lambda_j^2 - x}{\lambda_j^2 - \lambda_j^1}, x \in [\lambda_j^1, \lambda_j^2] \\ 1, x \in [a_1, \lambda_j^1] \end{cases} \quad (16)$$

$$f_j^n(x) = \begin{cases} 0, x \notin [\lambda_j^{n-1}, a_{n+1}] \\ \frac{\lambda_j^n - x}{\lambda_j^n - \lambda_j^{n-1}}, x \in [\lambda_j^{n-1}, \lambda_j^n] \\ 1, x \in [\lambda_j^n, a_{n+1}] \end{cases} \quad (17)$$

$$f_j^k(x) = \begin{cases} 0, x \notin [\lambda_j^{k-1}, \lambda_j^{k+1}] \\ \frac{x - \lambda_j^{k-1}}{\lambda_j^k - \lambda_j^{k-1}}, x \in [\lambda_j^{k-1}, \lambda_j^k] \\ \frac{\lambda_j^{k+1} - x}{\lambda_j^{k+1} - \lambda_j^k}, x \in [\lambda_j^k, \lambda_j^{k+1}] \end{cases} \quad (18)$$

4) 计算每个灰色聚类的评估样本的综合聚类系数。

$$\sigma_i^k = \sum_{j=1}^m f_j^k(x_{ij}) w_j \quad (19)$$

其中: $f_j^k(x_{ij})$ 为 j 指标对第 k 个聚类的测度可能性函数; w_j 为指标 j 的组合权重。

5) 假设 $\sigma_i^{k*} = \max_{1 \leq k \leq n} \{\sigma_i^k\}$, 将评估样本分为聚类 k^* 。

6) 计算此次聚类的轮廓系数,并将聚类数更改为 n' ($1 < n' < n$) 并重复步骤 1) ~ 5)。选择轮廓系数最高的聚类结果作为最终结果,并得到综合评估结果。

3 特定试验条件下不同试验结果间关联性分析及其对质量分级评估的影响

电力设备的检测试验往往具有严格的试验条件限制,并且会严格控制各种变量的取值,以准确获得某些物理量的值。在严格控制变量的检测条件下,消除了诸多影响因素时,电力设备的某些检测指标之间则可能存在可分析的定量关系,甚至简洁的函数关系,这种特定条件下的定量关系可以对于设备检测试验提供更多的观察角度,丰富对于设备检测试验数据的理解。

3.1 导体直流电阻与导体拉断力的关联性分析

国家标准 GB/T 3048.4 - 2007^[20] 和 GB/T 4909.3 - 2009^[21] 分别规定了导体直流电阻和导体拉断力的测试要求。导体直流电阻由导体样本经平衡电桥测量。试验时需测得导体温度 t , 导体长度 L , 导体截面积 S 和电阻测量值 R_x , 并折算至 20°C 时的每公里长导体电阻 R 。

$$R = R_{20} = R_x \frac{1}{1 + 0.004(t - 20)} \frac{1000}{L} \quad (20)$$

同时 20°C 时的导体相当电阻率为

$$\rho_{20} = \frac{R_x S}{1 + 0.004(-20)L} \quad (21)$$

导体拉断力,由导体样本经试验机加载至断裂时测得的最大负载得到,试验时可测得导体的抗拉强度,由导体拉断力除以导体的原始横截面积得到:

$$F_b = \sigma S \quad (22)$$

式中: F_b 为导体拉断力; S 为导体原始横截面积; σ 为导体的抗拉强度。则由式(20)、(21)、(22)得到:

$$R=\frac{1}{F_b}\rho_{20}\sigma\cdot 1\,000$$

(23)

其中导体的抗拉强度 σ 和电阻率 ρ_{20} 均由导体的材料决定。故根据上述分析,在材料和型号相同的情况下,可以认为,试验测得的导体拉断力 F_b 与导体单位导体直流电阻 R 成反比:

$$F_b\propto\frac{1}{R}$$

(24)

这种关系仅和被试导体的材料有关。

3.2 关联性对质量分级评估的影响

具有单调函数关系的检测量之间,在一方发生变化时另一方会以确定的关系相应做出可定量预期的改变,以近似固定的关系同步变化,这种数据上的同步性变化使得在确定不同试验指标的权重时,可以将具有近似函数关系的检测量的权值进行合并。

4 算例分析

4.1 架空绝缘导线质量综合分级评估

选取 21 例相同规格的 10 kV 架空绝缘导线检测报告作为样本集。首先,对评估体系进行权重赋权。架空绝缘导线最重要的是其电性能,其次在高载荷下的耐热性能因为与电性能有着密切的联系,必须优先考虑。绝缘的抗张强度和导体的拉断力反映了在极端受力环境下的耐受能力,而绝缘层厚度因为缺少厚度与绝缘屏蔽的准确物理联系,无法直观反映绝缘屏蔽性能,因此放在最后考虑。因此“导体直流电阻”被设置为最重要的指标,其次是“热延伸性能”,“抗张强度”,“导体拉断力”,“绝缘最薄处厚度”,它们的相对重要性矢量表示为 $r=[1.4,1.2,1.0,1.2]$ 。结合熵权法,可以计算综合权重,结果见表 2。

表 2 权重结果表
Tab. 2 weight result table

权重	导体直 流电阻	绝缘热 延伸率	绝缘抗 张强度	导体 拉断力	绝缘最 薄处 厚度
主观权重	0.294 0	0.210 0	0.175 0	0.175 0	0.150 2
客观权重	0.321 4	0.116 4	0.149 2	0.129 7	0.283 0
综合权重	0.452 1	0.117 0	0.124 9	0.108 6	0.197 4

根据自适应灰色聚类方法,设置聚类数量为 2~7,经过计算得到各个聚类数目下的轮廓系数值,见表 3。读表可知,聚类数为 2 时,评估效果最佳。

表 3 不同聚类数轮廓系数表
Tab. 3 Table of profile coefficients of different cluster numbers

聚类数	轮廓系数
2	0.027 6
3	-0.117 6
4	-0.221 9
5	-0.336 1
6	-0.399 5
7	-0.507 9

故对于合格的导线可再细分出两个质量等级,由此将导线的质量分为 3 个等级,即合格分为优、良两个等级,不合格为差等级。

选取综合权重系数最大的 3 个指标“导体直流电阻”、“绝缘平均厚度”、“抗张强度”的数据作为三维指标做三维坐标图,将“优”和“良”的聚类等级结果进行展示,如图 2 所示。

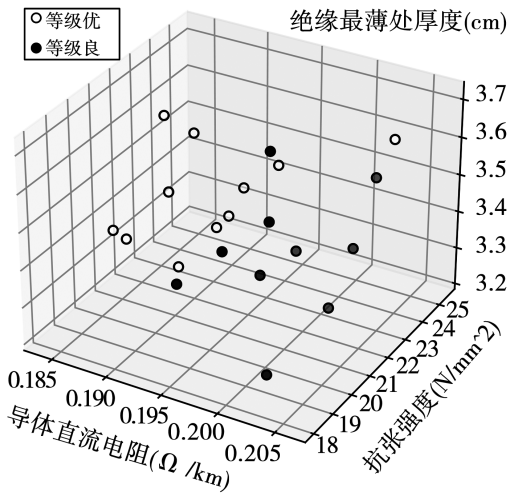


图 2 聚类三维效果图
Fig. 2 3d effect of the clustering result

图中每一个点代表 1 个架空绝缘导线样本,白色点代表等级“优”,黑色点代表等级“良”。由于导体直流电阻值越小越好,且其权值较大,抗张强度和绝缘最薄处厚度越大越好,权值相对较小,绿色样本点多分布在图的靠左侧,由图 2 可知分类结果符合分析。

4.2 考虑关联性的导线质量分级评估

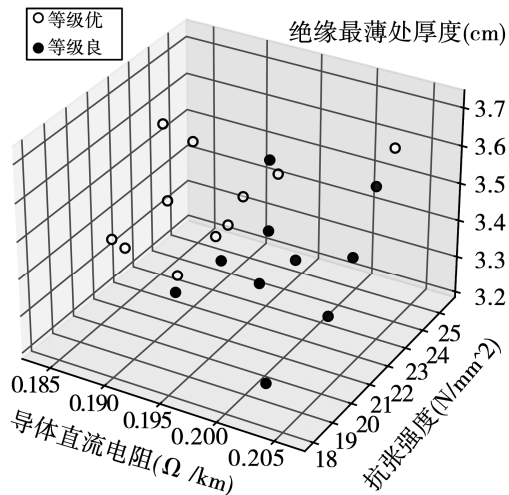
上文分析了导体拉断力和导体直流电阻间的关联性,二者具有近似的单调函数关系。故可将导体直流电阻和导体拉断力的权值进行合并。在评价体系中,导体直流电阻的权值相对较大,为 0.452 1,而导体拉断力的权值相对小很多,为 0.108 6,故选择将导体拉断力的权值附加给导体直流电阻,以减小

对原有评价体系的改变幅度。由此得到考虑关联性的综合权值如表 4 所示。利用新的综合权值对 21 例架空绝缘导线质量检测报告进行综合质量评估,同样将结果分为两类,以“导体直流电阻”、“绝缘平均厚度”、“绝缘热延伸率”的无量纲化数据作为三维指标做三维坐标图如图 3 所示,并与未考虑试验结果关联性的评价结果进行对比。

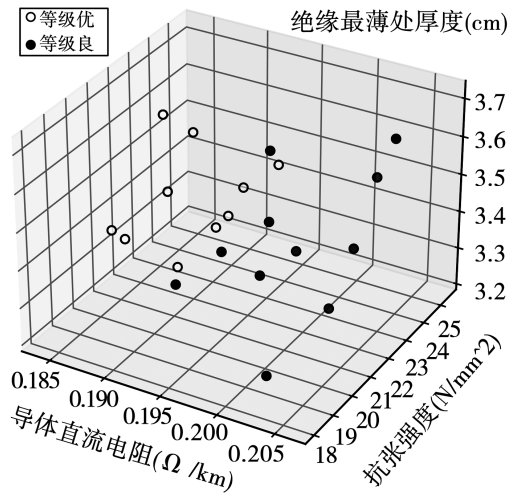
表 4 考虑关联性的权重结果表

Tab. 4 Table of weighted results considering relevance

	导体直流 电阻	绝缘热延 伸率	绝缘抗拉 强度	绝缘最薄 处厚度
综合权重	0.560 7	0.117 0	0.124 9	0.197 4



(a) 未考虑关联性的综合评估结果



(b) 考虑关联性后的综合评估结果

图 3 评估结果对比图

Fig. 3 Comparison of evaluation results

两次评估结果当中仅有一例的等级分类结果不同。此例中,导体直流电阻、绝缘抗张强度、绝缘最薄处厚度的检测结果分别为:0.206 Ω/km, 23.1 N/mm², 3.7 cm,在图 3 中为最右上方的红圈标记出点。由于此份报告中导体直流电阻的数值在所有样本中为最大,也即指标结果相对最差,而绝缘抗张强

度和绝缘最薄处厚度的数值在所有样本中为最小,指标结果相对最好。在未考虑关联性的评估中,直流电阻的权值较小,导致此点被分为优等级,即质量偏好;而在考虑关联性的评估中,直流电阻的权值增大,该点被分为良等级,质量偏差。在整体的评估结果中,两次分析仅有一份报告的结果有不同,结果偏差率为 1/21 = 4.76%。

上述结果表明考虑了关联性后,对于综合评价体系可达到精简的效果,提升了工作的效率。

5 结 论

本文基于自适应灰色聚类法建立了考虑试验数据关联性的架空绝缘导线质量分级评估模型。结果表明:①自适应灰色聚类算法可以有效利用于导线类设备质量的综合分级评估,区别于传统的是非制,在设备质量合格的基础上实现了更加精准细化的评价;②在特定的试验条件下,检测报告中部分检测指标数据间存在较强的关联性,将这种关系引入质量评估体系中可以简化分析的流程,提升效率,为技术人员阅读分析检测报告提供了更丰富的视角。

参 考 文 献:

[1] 邵森安, 马颢, 丰如男, 等. 电力电缆国内外研究综述[J]. 电线电缆, 2021(3):1.
SHAO Senan, MA Xie, FENG Runan, et al. Review of Researches on Power Cables at Home and Abroad[J]. Wire & Cable, 2021(3):1.
[2] 郭雅丽, 赵宝柱, 罗畅. 数据挖掘技术在输电线路状态检修中的应用分析[J]. 内蒙古电力技术, 2014, 32(4):28.
GUO Yali, ZHAO Baozhu, LUO Chang. Application Research of Data Mining in The Condition-Based Maintenance of Transmission Line[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2014, 32(4):28.
[3] LIU Y, QI W, WU J, et al. Dynamic Condition Vector Assessment Method for Electric Power Equipment of Overall Process Novel and Necessary Technical Approach of Condition-Based-Assessment[M]. 3rd International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems, 2017.
[4] 宾光富, 李学军, DHILLON Balbir-S, 等. 基于模糊层次分析法的设备状态系统量化评价新方法[J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(4):744.
BIN Guangfu, LI Xuejun, DHILLON Balbir-S, et al. Quantitative System Evaluation Method for Equipment State Using Fuzzy and Analytic Hierarchy Process[J].

- System Engineering Theory & Practice, 2010, 30(4):744.
- [5] 苏淮北, 曹俊, 沈鑫, 等. 基于超低频场空间电荷响应的电缆状态评估[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(4):1235.
- SU Huaibei, CAO Jun, SHEN Xin, et al. Cable State Assessment Technology Based on Space Charge Behavior under Very Low Frequency Field[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(4):1235.
- [6] 洪伟祺, 魏丹萍, 袁伟刚, 等. 基于对数正态分布的电缆状态评估方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(2):79.
- HONG Weiqi, WEI Danping, YUAN Weigang, et al. Research on Cable State Evaluation Method Based on Logarithmic Normal Distribution[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(2):79.
- [7] 周松霖, 段佳奇, 齐伟强. 基于模糊评判的变电设备评估[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(3):174.
- ZHOU Songlin, DUAN Jiaqi, QI Weiqiang. Substation Equipment State Evaluation Method Based on Fuzzy Comprehensive Evaluation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(3):174.
- [8] 吴小钊, 冯英, 兰剑, 等. 基于关联规则与变权重系数的高压开关柜状态综合评估[J]. 电工电气, 2021(7):12.
- WU Xiaozhao, FENG Ying, LAN Jan, et al. A Comprehensive Evaluation of High-Voltage Switchgear Based on Association Rule and Variable Weight Coefficient[J]. Electrotechnics Electric, 2021(7):12.
- [9] 钟桔. 斜拉桥拉索损伤状态的有限元模拟与模型试验研究[D]. 湘潭:湖南科技大学, 2014.
- [10] 刘兴旺. 大跨桥梁健康监测数据自诊断与状态评估方法研究[D]. 南京:东南大学, 2017.
- [11] 白洋. 面向大数据的电力设备状态监测信息聚合研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2014.
- [12] 李兴奇, 高晓红. 无量纲化方法的有效性评价[J]. 统计与决策, 2021, 37(15):24.
- LI Xingqi, GAO Xiaohong. Validity Evaluation of Dimensionless Method[J]. Statistics and Decision, 2021, 37(15):24.
- [13] WANG L, BINET D. TRUST: A Trigger-based Automatic Subjective Weighting Method for Network Selection[M]. Geraci P, Logothetis M, 2009:362.
- [14] 龚艳冰, 巢妍. 基于模糊组合赋权的水资源配置方案综合评价方法[J]. 统计与决策, 2021, 37(13):179.
- LONG Yanbing, CHAO yan. Comprehensive Evaluation Method of Water Resource Allocation Scheme Based on Fuzzy Combination Weighting[J]. Statistics and Decision, 2021, 37(13):179.
- [15] 宋军英, 何聪, 李欣然, 等. 基于特征指标降维及熵权法的日负荷曲线聚类方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(20):65.
- SONG Junying, HE Cong, LI Xinran, et al. Daily Load Curve Clustering Method Based on Feature Index Dimension Reduction and Entropy Weight Method[J]. Automation of Electric Power System, 2019, 43(20):65.
- [16] 董慧芬, 金晨阳, 史志波. 组合赋权的灰聚类飞机电能质量评估[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(7):49.
- DONG Huifen, JIN Chenyang, SHI Zhibo. Aircraft Electrical Power Quality Evaluation of Grey Clustering with If-Anp Combination Weight[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(7):49.
- [17] 朱文君, 陈金涛, 赵舫, 等. 基于改进灰色聚类法的配电台区电能表质量评价方法[J]. 电测与仪表, 2022, 59(12):189.
- ZHU Wenjun, CHEN Jintao, ZHAO Fang, et al. Quality Evaluation Method of Electricity Meter of Distribution Station Area based on Improved Grey Clustering Method[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(12):189.
- [18] 徐先峰, 赵依, 刘状壮, 等. 用于短期电力负荷预测的日负荷特性分类及特征集重构策略[J]. 电网技术, 2022, 46(4):1548.
- XU Xianfeng, ZHAO Yi, LIU Zhuangzhuang, et al. Daily Load Characteristic Classification And Feature Set Reconstruction Strategy for Short-Term Power Load Forecasting[J]. Power System Technology, 2022, 46(4):1548.
- [19] 万伟, 刘红旗, 孙洪昌, 等. 用电异常行为预警方法[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2022, 27(4):53.
- WAN Wei, LIU Hongqi, SUN Hongchang, et al. Early Warning Method of Abnormal Electricity Consumption Behavior Based on Data Driven[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2022, 27(4):53.
- [20] GB/T 3048.4-2007. 电线电缆电性能试验方法 第4部分:导体直流电阻试验[S].
- [21] GB/T 4909.3-2009. 裸电线试验方法 第3部分:拉力试验[S].

(编辑:温泽宇)