

一种考虑排序稳定分析的电能质量 综合评估新方法

刘俊华, 罗隆福, 张志文, 许加柱

(湖南大学电气与信息工程学院, 湖南省 长沙市 410082)

A New Method for Power Quality Comprehensive Evaluation Considering the Analysis of Sequence Stability

LIU Junhua, LUO Longfu, ZHANG Zhiwen, XU Jiazhu

(College of Electrical & Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan Province, China)

ABSTRACT: In the comprehensive evaluation of power quality, the experts determine the weight of every indicator by using analytic hierarchy process. Considering the non-uniform weight distribution errors caused by evaluation differences among experts, the entropy method was applied to get the importance of every expert when they determine the weights of power quality indicators in this paper. Accordingly, obtained the final weight of every indicator. Then, in allusion to the uncertainty in the comprehensive evaluation of power quality, the connection degree is applied to deal with the uncertainties of the comprehensive evaluation of power quality. Compare the values of the assessment indicators and criteria value. A model for the comprehensive evaluation of power quality based on connection degree was established. The index of uncertainty grade discrepancy in connection degree is an uncertain interval value and study on it. The analysis of sequence stability was conducted for the sorted result of power quality. So a more accurate and comprehensive power quality assessment method was provided.

KEY WORDS: evaluation of power quality; entropy method; uncertainty; connection degree; analysis of sequence stability

摘要: 在电能质量综合评估时, 多位专家应用层次分析法确定其各指标权重, 考虑到多位专家意见不统一造成的权重分配错误, 运用熵值法求解出各位专家在确定电能质量指标权重时的作用大小, 从而求得各指标的最终权重; 然后, 针对电能质量综合评估指标的不确定性, 引入联系度概念, 应用联系度处理电能质量综合评估指标的不确定性, 将各评估指标值与标准值比较, 建立电能质量综合评估的联系度模型;

联系度中差异度系数是一个不确定的区间值, 对其进行研究, 可为电能质量优劣排序做进一步的稳定性分析, 因而给电能质量综合评估提供了一种更精确全面的新方法。

关键词: 电能质量评估; 熵值法; 不确定性; 联系度; 排序稳定性分析

0 引言

在电网中, 许多非线性负荷、冲击性负荷不定期的接入或退出系统, 以及系统自身存在的一些故障等, 造成了大量的电能质量问题^[1]; 现代社会微电子技术和其他高科技用电设备的大量应用, 其运行对电能质量各指标的变动相当敏感, 因此电力用户对电能质量提出了更高的要求, 很多国家也制定了有关电能质量的一系列标准, 我国现有的六项电能质量标准分别对电压偏差、频率偏差、电压三相不平衡、电压波动与闪变、公用电网谐波、暂时过电压和瞬态过电压这些指标值加以限定, 但对其综合评估还没有做出规范, 单个评估指标内涵较为单一, 不能整体评估系统的电能质量状况, 电能质量综合评估就是在分析单项指标的基础上, 把电能质量问题的多个特征量按其属性合成一个综合体, 对其整体进行考核^[2]; 因此必须建立一种能客观、全面地反映电能整体性能的综合评估方法, 得到电能质量的综合量化指标, 为系统本身和用户提供参考。对电能质量进行客观地评估是电能质量工作者研究的重要方向, 目前的电能质量综合评估方法主要有模糊综合评估法^[3-5]、人工神经网络^[6]、基于概率统计和矢量代数的电能质量评估方法^[7]等, 但其存在各自的一些缺陷, 模糊综合评估法采用的最大

基金项目: 国家自然科学基金项目(51077045, 51077044)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51077045, 51077044).

隶属度原则掩盖了当评估值处于2个隶属度之间时会导致判断偏差，并且不能给出具体的电能质量综合指标值；人工神经网络法需要大量的样本来训练网络，电能质量样本的数目和其本身评估结果的准确性都会影响其评估性能；基于概率统计和矢量代数评估方法，在其概率分布期望值和标准差归一量化中，存在基准值选取的误差问题。

为了更准确更全面地对电能质量进行综合评估，本文把联系度概念应用于电能质量评估中；当确定了其评估所需要的各指标后，通过多位专家应用层次分析法得到其指标权重，考虑到每位专家得到的权重结果存在差异，再运用熵值法确定各位专家在计算各电能质量评估指标权重时的作用大小，从而在很大程度上消除各专家在运用层次分析法求得的各指标权重时意见不统一造成的权重分配错误，使评估过程所使用的电能质量指标权重值更合理；然后，针对电能质量综合评估指标的不确定性，为了解决这一不确定性问题，需要一种不确定性的数学方法，本文引入联系度概念，建立各电能质量指标的联系度表达式，对每一指标做联系度分析，然后结合各指标权重，进行加权综合联系度分析，进而建立电能质量综合评估的联系度模型，考虑到综合联系度值中差异度系数是一个不确定的区间值，因此，可以对其进行研究，为电能质量优劣排序进行进一步的稳定性分析，因而给电能质量综合评估提供一种更精确全面的新方法。

1 权重确定方法简介

在求解各指标权重时，层次分析法(analytic hierarchy process, 简称 AHP)是较常用的方法，其基本原理是利用判断矩阵通过两两比较的方式确定各指标间的相对重要性，即指标的相对权重，并检验判断矩阵的一致性指标来保证数据的可信度。其详细求解指标权重的步骤可参考文献[8-9]。

另一种求解指标权重的方法：熵值法，熵是信息论中测度系统不确定性的量；熵值法是一种求解指标的客观权重求解法，其根据所选指标的实际信息形成决策矩阵，由熵值法确定指标权重值大小的原始信息直接来源于所建立的决策矩阵，在此矩阵的基础上通过客观运算形成权重，其决策结果具有较强的数学理论依据。熵值法求解指标权重的计算步骤^[10-11]为：

1) 由于各指标的量纲不一致，所以要对原始指标数据进行标准化处理，标准化方法采用线性比

例变换法，设原始指标数据矩阵和标准化后的矩阵分别为 $\mathbf{Y} = (y_{ij})_{m \times n}$ 、 $\mathbf{Y}' = (y'_{ij})_{m \times n}$ 。其中，下标 i 表示第 i 种方案；下标 j 表示第 j 项指标。当指标为正指标时，即指标值越大越好，其标准化公式为

$$y'_{ij} = y_{ij} / \max_j y_{ij} \quad (1)$$

式中， $1 \leq i \leq m$ ； $1 \leq j \leq n$ 。

当指标为逆指标时，即指标值越小越好，其标准化公式为

$$y'_{ij} = \min_j y_{ij} / y_{ij} \quad (2)$$

式中： $1 \leq i \leq m$ ； $1 \leq j \leq n$ 。

2) 计算第 j 项指标下第 i 种方案的特征比重：

$$p_{ij} = y'_{ij} / \sum_{i=1}^m y'_{ij} \quad (3)$$

式中： $1 \leq i \leq m$ ； $1 \leq j \leq n$ 。

3) 计算第 j 项指标的熵值：

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij}, \quad 1 \leq j \leq n \quad (4)$$

4) 计算第 j 项指标的差异系数。对于指标 j ，指标的差异越大，熵值越小，指标的权重系数相应就越大；反之，指标的差异越小，熵值越大，指标的权重系数相应就越小。差异系数的计算公式为

$$g_j = 1 - e_j, \quad 1 \leq j \leq n \quad (5)$$

5) 利用熵值法对指标赋权，得到指标的权重：

$$v_j = g_j / \sum_{j=1}^n g_j \quad (6)$$

式中 $1 \leq j \leq n$ 。

2 联系度

具有一定联系的两个集合 A 和 B ，设 a 、 b 、 c 分别为其两个集合共同具有、相互对立、既不共同也不对立的特性数所占比例，分别叫做两集合的同一度、差异度和对立度，由此可建立其联系度表达式^[12]：

$$\mu = a + bi + cj \quad (7)$$

式中， i 为差异度系数， $i \in [-1, 1]$ ； j 为对立度系数， $j = -1$ ，且 $a + b + c = 1$ 。

当集合 A 和 B 具有 n 个特性(或指标)时，可得加权综合联系度为

$$\mu = \sum_{j=1}^n \omega_j \mu_j \quad (8)$$

式中： μ_j 为第 j 项指标的联系度； ω_j 为其权重。

评估方案的指标体系包括效益型指标和成本型指标两大类。若为效益型指标,则指标值越大越好;若为成本型指标,则指标值越小越好。设指标 j 的最优方案和最劣方案构成了其比较区间 $[v_j, u_j]$ 。对于效益型指标 j , 其指标值为 p_j , 则 $p_j/(v_j+u_j)$ 、 $p_j^{-1}/(u_j^{-1}+v_j^{-1})$ 分别表示指标值 p_j 与比较区间端点值 u_j 和 v_j 的接近程度,其值越大,表明越接近。 p_j 与 v_j 越接近,则 p_j 与 u_j 的接近程度越远,因此,可以构造出该指标对 $\{p_j, u_j\}$ 的同一度和对立度:

$$a_j = \frac{p_j}{v_j + u_j} \quad (9)$$

$$c_j = \frac{p_j^{-1}}{u_j^{-1} + v_j^{-1}} \quad (10)$$

由 $a+b+c=1$, 可得差异度 b 的值:

$$b = \frac{(u_j - p_j)(p_j - v_j)}{p_j(u_j + v_j)} \quad (11)$$

因此,可得效益型指标 j 的联系度:

$$\mu_j = \frac{p_j}{v_j + u_j} + \frac{(u_j - p_j)(p_j - v_j)}{p_j(u_j + v_j)} i + \frac{p_j^{-1}}{u_j^{-1} + v_j^{-1}} j \quad (12)$$

当指标 j 为成本型指标时,可构造出该指标对 $\{p_j, u_j\}$ 的同一度和对立度:

$$a_j = \frac{p_j^{-1}}{u_j^{-1} + v_j^{-1}} \quad (13)$$

$$c_j = \frac{p_j}{v_j + u_j} \quad (14)$$

同理,可求出相应指标的联系度,然后结合各指标权重,由式(8)求得加权综合联系度表达式:

$$\mu = \sum_{j=1}^n \omega_j \mu_j = a + bi + cj \quad (15)$$

式中 a 和 c 是相对确定的,分别表示该方案接近最优方案的肯定和否定。在相对确定条件下,定义该方案与最优方案的相对贴进度为^[13]

$$\gamma = \frac{a}{a+c} \quad (16)$$

为了得到最终的联系度值,确定联系度表达式中的差异度系数 i 是关键,由于差异度系数 i 是一个不确定的区间值,其是对不确定性的进一步分析和充分考虑式(7)中 b 对 a 和 b 对 c 的影响过程;在联系度表达式中,差异度表示既不同一又不对立,本文采用文献[14]中的“顺势取值法”,将 b 分成 ab 和 bc 两部分,其中, ab 合并入 a 中, bc 合并入

c 中,得到 i 的表达式:

$$i = \frac{a-c}{a+c} \quad (17)$$

从而得到了联系度中 i 的具体数值,将 i 的值代入式(7)可得确切的联系度值。

3 电能质量综合评估指标集

电能质量综合评估是在对系统电气运行参数进行实际测量获得其数据后,再对电能质量各项特性指标做出评价以及和标准等级进行比较的过程^[15]。因此,在进行电能质量评估时,客观全面的选取其各评估指标很重要,本文取衡量电能质量的指标集为电压偏差、电压波动与闪变、三相电压不平衡、频率偏差、波形畸变指标、可靠性指标、服务性指标这7个方面的参数建立电能质量综合评估指标体系,其具体含义可参阅文献[16],各指标隶属度函数形式^[17-18]如下:

1) 电压偏差隶属度为

$$\mu(\Delta U) = \begin{cases} 0, & |\Delta U| \geq U_2 \\ \frac{1}{\sqrt{2}\delta\sigma} e^{-\Delta U^2/2\sigma^2}, & \text{其它} \\ 1, & |\Delta U| \leq U_1 \end{cases} \quad (18)$$

式中: ΔU 表示电压偏差百分比; σ 、 U_1 、 U_2 为常量,根据实际情况确定。

2) 电压偏差持续时间隶属度函数为

$$\mu(T_{\Delta U}) = \begin{cases} 1, & T_{\Delta U} \leq T_{\Delta U_0} \\ e^{-k(T_{\Delta U} - T_{\Delta U_0})}, & T_{\Delta U} > T_{\Delta U_0} \end{cases} \quad (19)$$

式中: $T_{\Delta U}$ 为电压偏差的持续时间; k 和 $T_{\Delta U_0}$ 均为常量,由实际情况决定。

3) 电压波动与闪变、波形畸变及三相电压不平衡指标等有着相同的形式,隶属度函数的选择也和上面式(18)相似,在此只给出电压波动与闪变的隶属度函数表达式:

$$\mu(\ddot{a}U) = \begin{cases} 1, & \ddot{a}U \in [0, U_3] \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin\left[\frac{\delta}{U_4 - U_3} \left(\ddot{a}U - \frac{U_3 + U_4}{2}\right)\right], & U_3 < \ddot{a}U < U_4 \\ 0, & \ddot{a}U \in [U_4, +\infty] \end{cases} \quad (20)$$

式中: $\ddot{a}U$ 为电压波动与闪变的百分比; U_3 、 U_4 为常数,由实际情况确定。

电压波动与闪变持续时间的隶属度函数与电压偏差持续时间的隶属度函数类似。

4) 供电可靠性的隶属度函数为

$$\mu(I_R) = (I_R)^p, \quad I_R \in [0,1] \tag{21}$$

式中： I_R 为供电可靠性指标； p 为常数，由实际情况确定。

5) 服务性指标可以通过专家对用户进行调查打分来确定，分值越高说明服务性指标越良好，反之则越差。

4 电能质量等级评估

4.1 电能质量等级分级标准的确定

在评估电能质量等级时，各指标的等级界限如表 1^[18]所示，表中， $c_1 \sim c_7$ 分别表示衡量电能质量的七个指标：电压偏差、电压波动与闪变、三相电压不平衡、频率偏差、波形畸变指标、可靠性指标、服务性指标； s_1 、 s_2 、 s_3 、 s_4 分别为电能质量等级 I、II、III、IV 相应指标的门槛值；共划分为四个等级，这是为了避免等级数分级太少导致计算过程中偏差过大，会影响计算结果的准确性，等级数分级太多会因分级过多而造成计算量过大^[19]。

表 1 电能质量各指标等级界限
Tab. 1 Power quality index's grade limit

C	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄
C ₁	0.99	0.90	0.80	0.65
C ₂	0.98	0.88	0.80	0.60
C ₃	0.95	0.85	0.75	0.55
C ₄	0.99	0.92	0.82	0.70
C ₅	0.94	0.85	0.75	0.50
C ₆	0.98	0.90	0.82	0.70
C ₇	0.85	0.70	0.60	0.45

4.2 电能质量各评估指标权重

由 4 位专家组成专家组通过层次分析法分别求解上述 7 个电能质量指标在评估电能质量时的权重，每位专家得到其各自的指标权重分配，如表 2 所示。由于篇幅所限，用层次分析法求解各电能质量指标权重的过程本文不再给出。

多位专家应用层次分析法确定各电能质量指标权重时，其计算所得权重会存在一些差异，因此考虑到多位专家意见不统一造成的权重分配错误，

表 2 指标权重

Tab. 2 Weighs of indexes

Z	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇
1	0.20	0.08	0.10	0.15	0.11	0.10	0.26
2	0.22	0.10	0.14	0.08	0.12	0.12	0.22
3	0.18	0.08	0.12	0.15	0.10	0.16	0.21
4	0.26	0.08	0.10	0.16	0.12	0.08	0.20

本文将引入熵值法，可在一定程度上消除指标权重分配不均的问题，使权重分配更合理。对表 2 中的数据应用熵值法求解权重的计算步骤 1) —6) 进行处理，得到由特征比重 p_{ij} 构成的矩阵 P ：

$$P = \begin{bmatrix} 0.200 & 0.220 & 0.180 & 0.260 \\ 0.080 & 0.100 & 0.080 & 0.080 \\ 0.100 & 0.140 & 0.120 & 0.100 \\ 0.150 & 0.080 & 0.150 & 0.160 \\ 0.110 & 0.120 & 0.100 & 0.120 \\ 0.100 & 0.120 & 0.160 & 0.080 \\ 0.260 & 0.220 & 0.210 & 0.200 \end{bmatrix}$$

进一步可求得 4 位专家在确定电能质量各指标权重时的作用大小(即各专家权重)分别为 0.296、0.223、0.158、0.323。结合各专家权重和表 2，最终求得电能质量评估指标集 $C(C_1 \sim C_7)$ 的权重分别为 0.221、0.084、0.112、0.138、0.114、0.107、0.224。

4.3 电能质量标准等级联系度值

由电能质量等级表 1 可知，各电能质量指标在文中所给隶属度函数定义的基础上，其值越大，电能质量越优，可见其均为效益型指标。根据式(12)，得等级 I 其各电能质量指标的联系度 $\mu_j(j=1,2,\dots,7)$ 分别为 0.604+0.396j, 0.620+0.380j, 0.633+0.367j, 0.586+0.414j, 0.653+0.347j, 0.583+0.417j, 0.654+0.346j。结合各指标权重，得标准等级 I 的加权综合联系度：

$$\mu^1 = \sum_{j=1}^7 \omega_j \mu_j = 0.621 + 0.379j$$

同理，求得等级 II、III、IV 的加权综合联系度：

$$\mu^2 = 0.552 + 0.022i + 0.426j$$

$$\mu^3 = 0.488 + 0.031i + 0.481j$$

$$\mu^4 = 0.379 + 0.621j$$

由式(17)将 i 的值求出，代入上面的 4 个标准等级所对应的加权综合联系度中，得到电能质量等级 I、II、III、IV 的综合联系度值：0.242, 0.129, 0.007, -0.242。这表明综合联系度值处于区间[0.129, 0.242]的电能质量等级为 I 级，综合联系度值处于区间[0.007, 0.129]的电能质量等级为 II 级，综合联系度值处于区间[-0.242, 0.007]的电能质量等级为 III 级，综合联系度值处于区间[-1, -0.242]的电能质量等级为 IV 级；可以看出，综合联系度值越大，则电能质量越好，为接下来的电能质量样本的等级评估提供了依据。

4.4 电能质量等级评估实例

对文献[18]中的待评估电能质量样本 Q 进行评估。其各指标数据(按 C_1 — C_7 顺序, 下同)组成 $Q=[0.90, 0.87, 0.88, 0.92, 0.76, 0.95, 0.7]$, 按照上述 4.3 节中的方法先求解各电能质量指标的联系数, 再结合各指标权重最终求得该电能质量样本的加权综合联系数:

$$\mu_Q = \sum_{j=1}^7 \omega_j \mu_j = 0.550 + 0.023i + 0.427j$$

现监测到另外 3 条母线在某一时刻的电能质量各指标的测试数据为 $P=[0.82, 0.84, 0.65, 0.80, 0.75, 0.85, 0.52]$, $A=[0.85, 0.92, 0.93, 0.80, 0.87, 0.88, 0.75]$, $B=[0.75, 0.82, 0.62, 0.88, 0.75, 0.80, 0.62]$, 通过同样的方法求得这 3 个电能质量样本的加权综合联系数:

$$\mu_P = \sum_{j=1}^7 \omega_j \mu_j = 0.472 + 0.026i + 0.502j$$

$$\mu_A = \sum_{j=1}^7 \omega_j \mu_j = 0.552 + 0.019i + 0.429j$$

$$\mu_B = \sum_{j=1}^7 \omega_j \mu_j = 0.480 + 0.029i + 0.492j$$

运用公式(17)进一步求得待评估电能质量样本 Q 、 P 、 A 、 B 的综合联系数分别为 0.1259, -0.0308, 0.1254, -0.0124。根据上述 4.3 节中各等级的综合联系数区间值, 可以判断出待检电能质量样本 Q 、 P 、 A 、 B 的电能质量等级分别为 II 级、III 级、II 级、III 级; 在对电能质量样本进行等级评估的同时, 而且能精确地给出电能质量样本在等级区间的质量具体值(即文中的综合联系数值), 当多个电能质量样本同属同一等级区间时, 能分辨它们在同一电能质量等级区间内的质量优劣情况, 如电能质量样本 P 、 B 均属等级 III 级, 但样本 B 的综合联系数比样本 P 的综合联系数大, 所以两样本质量相比, 样本 B 的电能质量较好。

5 排序稳定性分析

从两集合的联系数表达式(15)中可以发现, 差异系数 i 的不确定性会对最终的联系数值产生影响。当 $i > 0$ 时, i 的取值将对 a 做正向修正, i 的值越靠近 1, 这种修正作用越强; 反之, 当 $i < 0$ 时, i 的取值将对 c 做正向修正, i 的值越靠近 -1, 这种修正作用越强。因此, 当 i 的值在区间 $[-1, 1]$ 之间变化时, 可以进行电能质量优劣排序的稳定性分析^[20]。

记 i 为 i' , 则 $i' \in [-1, 1]$, 在整个样本集 S 中, i' 相同, 将整个样本集原来排序作为基序, 第 k 个样本 S_k 在基序中的排序名次为 l 。记原 γ_k 为 γ_k^l , 当 $i' \neq 0$ 时, 其值会发生变化, 变化后的值记为 $\bar{\gamma}_k^l$, 设在基序中有 $\gamma_p^h < \gamma_k^l$, 由式(16)有

$$c_p a_k > c_k a_p \quad (22)$$

1) 当 $i' \in [0, 1]$ 时, 式(16)变为

$$\bar{\gamma}_k^l = \frac{a_k + b_k i'}{a_k + c_k + b_k i'} \quad (23)$$

为维持原来排序中样本的顺序, 即 $\bar{\gamma}_p^h < \bar{\gamma}_k^l$, 要满足条件:

$$c_p a_k - c_k a_p > (c_k b_p - c_p b_k) i' \quad (24)$$

结合式(22)可得:

①当 $c_k b_p - c_p b_k \leq 0$ 时, $i' \in [0, 1]$;

②当 $c_k b_p - c_p b_k > 0$ 时,

$$0 \leq i' \leq \min\left\{\frac{c_p a_k - c_k a_p}{c_k b_p - c_p b_k}, 1\right\} \quad (25)$$

2) 当 $i' \in [-1, 0]$ 时, 式(16)变为

$$\bar{\gamma}_k^l = \frac{a_k}{a_k + c_k - b_k i'} \quad (26)$$

同理, 可得维持原排序 $\bar{\gamma}_p^h < \bar{\gamma}_k^l$ 需要满足的条件:

①当 $a_k b_p - a_p b_k \geq 0$ 时, $i' \in [-1, 0]$;

②当 $a_k b_p - a_p b_k < 0$ 时,

$$\max\left\{\frac{c_p a_k - c_k a_p}{a_k b_p - a_p b_k}, -1\right\} \leq i' < 0 \quad (27)$$

求得上述两种情况下 i' 的区间的并集, 就可得排序 $\gamma_p^h < \gamma_k^l$ 的稳定排序区间。上述分析过程只针对两相邻排序样本 p 和 k 稳定性的局部分析, 其他相邻两样本排序的稳定性分析过程与上述分析方法相同。为保证这个样本集排序结果的整体稳定性, 取所有 i' 取值区间的交集, 即为这个样本集的稳定排序区间。若此交集的取值与 i' 本身定义的区域 $[-1, 1]$ 相一致, 则说明各样本排序结果是稳定的。若此交集的取值为 i' 本身定义的区域 $[-1, 1]$ 的一部分, 则当 i' 的取值在剩余部分区间时, 各样本排序结果是不稳定的, 在 i' 的此区间内, 根据 i' 的取值可得到整个样本集可能的其它排序结果, 除基序以外的其它所有可能排序, 统称为扩展序。

根据相对贴近度公式(16), 可以得到相对确定条件下 4 个电能质量样本的质量优劣排序: $\gamma_Q >$

$\gamma_A > \gamma_B > \gamma_P$ ，此排序为基序。以基序为基础进行排序稳定性分析，其结果见表 3。

表 3 排序稳定性分析
Tab. 3 Ordering stability analysis

排序	$c_p a_k - c_k a_p$	$a_k b_p - a_p b_k$	$c_k b_p - c_p b_k$	i' 的区间
$\gamma_Q > \gamma_A$	0.000 246	-0.002 246	-0.001 754	$[-0.109\ 5, 1]$
$\gamma_A > \gamma_B$	0.065 664	0.006 336	0.002 664	$[-1, 1]$
$\gamma_B > \gamma_P$	0.008 736	-0.000 736	-0.001 264	$[-1, 1]$

求取表 3 中各 i' 的交集，得该排序结果的稳定区域为 $i' \in [-0.109\ 5, 1]$ 。当 $i' \in [-1, -0.109\ 5]$ 时，上述 4 个电能质量样本的质量优劣排序结果为 $\bar{\gamma}_A > \bar{\gamma}_Q > \bar{\gamma}_B > \bar{\gamma}_P$ ，此排序为扩展序。

6 结论

在电能质量综合评估问题中，本文引如一种不确定性的数学方法，其应用联系度处理电能质量综合评估指标的不确定性，并建立了一种电能质量综合评估的新方法；在确定各电能质量评估指标权重时，各专家通过层次分析法确定指标权重时会造成各电能质量指标权重的不统一，本文应用熵值法对其进行调整，使评估过程更加科学合理；相比贴近期评估电能质量优劣的计算过程简单清晰，并且给出了具体的电能质量样本评估值，当多个电能质量样本的质量值处于同一等级区间时，也能对它们的质量优劣情况做出比较；由于联系度中差异度系数 i 的不确定性，利用其提供的不确定信息可以对电能质量优劣排序结果进行稳定性分析，求出 i 的稳定性区域，在其非稳定性区域，可重新进行电能质量优劣排序分析，因而能更全面地进行电能质量综合评估。

参考文献

[1] 杨洪耕, 肖先勇, 刘俊勇. 电能质量问题的研究和技术进展(一): 电能质量一般概念[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(10): 1-4.
Yang Honggeng, Xiao Xianyong, Liu Junyong. Issue and technology assessment on power quality, part1:general concepts on power quality[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(10): 1-4(in Chinese).

[2] 乔鹏程, 吴正国, 李辉. 基于改进雷达图法的电能质量综合评估方法[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(6): 88-92.
Qiao Pengcheng, Wu Zhengguo, Li Hui. Power quality synthetic evaluation based on improved radar chart[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(6): 88-92 (in Chinese).

[3] Farghal S A, Kandil M S, Elmitwally A. Quantifying

electric power quality via fuzzy modeling and analytic hierarchy proceedings[J]. IEE Proceedings-Generation Transmission and Distribution, 2002, 149(1): 44-49.

[4] 赵霞, 赵成勇, 贾秀芳, 等. 基于可变权重的电能质量模糊综合评估[J]. 电网技术, 2005, 29(6): 11-15.
Zhao Xia, Zhao Chengyong, Jia Xiufang, et al. Fuzzy synthetic evaluation of power quality based on changeable weight[J]. Power System Technology, 2005, 29(6): 11-15(in Chinese).

[5] 李连结, 姚建刚, 龙立波, 等. 组合赋权法在电能质量模糊综合评估中的应用[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(4): 56-60.
Li Lianjie, Yao Jiangang, Long Libo, et al. Application of combination weighing method in fuzzy synthetic evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(4): 56-60(in Chinese).

[6] 周林, 栗秋华, 张凤, 等. 用模糊神经网络模型评估电能质量[J]. 高电压技术, 2007, 33(9): 66-69.
Zhou Lin, Li Qiuhua, Zhang Feng, et al. Evaluation of power quality by fuzzy artificial neural network[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(9): 66 -69(in Chinese).

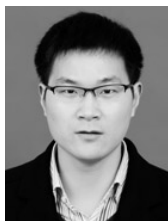
[7] 江辉, 彭建春, 欧亚平, 等. 基于概率统计和矢量代数的电能质量归一量化与评价[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2003, 30(1): 66-70.
Jiang Hui, Peng Jianchun, Ou Yaping, et al. Power quality unitary quantification and evaluation based on probability and vector algebra[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2003, 30(1): 66-70(in Chinese).

[8] 曹国庆, 邢金城, 涂光备. 基于灰色层次分析理论的烟气脱硫技术评价方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(4): 51-55.
Cao Guoqing, Xing Jincheng, Tu Guangbei. Grey method with use of an analytic hierarchy process for performance evaluation of flue gas desulfurization technology [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(4): 51-55(in Chinese).

[9] 彭静, 卢继平, 汪洋, 等. 广域测量系统通信主干网的风险评估[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(4): 84-90.
Peng Jing, Lu Jiping, Wang Yang, et al. Risk assessment of backbone communication network in WAMS [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30 (4): 84-90(in Chinese).

[10] 侯勇, 张荣乾, 谭忠富, 等. 基于模糊聚类和灰色理论的各行业与全社会用电量关联分析[J]. 电网技术, 2006, 30(2): 46-50.
Hou Yong , Zhang Rongqian , Tan Zhongfu , et al. Correlative analysis of power consumption for various industries to whole society based on fuzzy clustering and grey theory[J]. Power System Technology, 2006, 30(2): 46 -50(in Chinese).

- [11] 周源, 任海军, 李健, 等. 层次结构下的中长期电力负荷变权组合预测方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(16): 47-52.
Zhou Quan, Ren Haijun, Li Jian, et al. Variable weight combination method for mid-long term power load forecasting based on hierarchical structure[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(16): 47-52 (in Chinese).
- [12] 汪明武, 陈光怡, 金菊良. 基于多元联系数——三角模糊数随机模拟的围岩稳定性风险评价[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(4): 643-647.
Wang Mingwu, Chen Guangyi, Jin Juliang. Risk evaluation of surrounding rock stability based on stochastic simulation of multi-element connection number and triangular fuzzy numbers[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(4): 643-647(in Chinese).
- [13] 李勇. 输电网规划中不确定信息处理及动态评判的研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2009.
Li Yong. Research on uncertain information processing and dynamic judgement in transmission network planning[D]. Baoding: Journal of North China Electric Power University, 2009(in Chinese).
- [14] 余国祥. 对联系数中的不确定数 i 的研究[J]. 辽宁师范大学学报(自然科学版), 2002, 25(4): 349-352.
Yu Guoxiang. On Indeterminate coefficient i in number of connexion[J]. Journal of Liaoning Normal University (Natural Science Edition), 2002, 25(4): 349-352(in Chinese).
- [15] 陶顺, 肖湘宁. 电力系统电能质量评估体系架构[J]. 电工技术学报, 2010, 25(4): 171-175.
Tao Shun, Xiao Xiangning. Infrastructure of the power quality assessment system of power systems [J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2010, 25(4): 171-175(in Chinese).
- [16] 肖湘宁. 电能质量分析与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 55-200.
Xiao Xiangning. Analysis and control of power quality [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004: 55-200(in Chinese).
- [17] 贾清泉, 宋家骅, 兰华, 等. 电能质量及其模糊方法评价[J]. 电网技术, 2000, 24(6): 46-49.
Jia Qingquan, Song Jiahua, Lan Hua, et al. Power quality and fuzzy method evaluation[J]. Power System Technology, 2000, 24(6): 46-49(in Chinese).
- [18] 唐会智, 彭建春. 基于模糊理论的电能质量综合量化指标研究[J]. 电网技术, 2003, 27(12): 85-88.
Tang Huizhi, Peng Jianchun. Research on synthetic and quantificated appraisal index of power quality based on fuzzy theory[J]. Power System Technology, 2003, 27(12): 85-88(in Chinese).
- [19] 张蔓, 林涛, 曹健, 等. 理想区间法在电能质量综合评估中的应用[J]. 电网技术, 2009, 33(3): 33-38.
Zhang Man, Lin Tao, Cao Jian, et al. Application of ideal interval method in power quality synthetic evaluation [J]. Power System Technology, 2009, 33(3): 33-38(in Chinese).
- [20] 蒋茹, 曾光明, 李晓东, 等. 基于集对分析的污水处理工艺设计优化[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2007, 34(11): 70-75.
Jiang Ru, Zeng Guangming, Li Xiaodong, et al. Wastewater treatment process design optimization based on set pair analysis[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2007, 34(11): 70-75(in Chinese).



刘俊华

收稿日期: 2012-04-25。

作者简介:

刘俊华(1984), 男, 博士研究生, 主要从事电网故障诊断、电能质量检测控制评估、电力系统可靠性、新型换流变压器的研制及对应的高压直流输电新理论研究;

罗隆福(1962), 男, 教授, 博士生导师, 中国电机工程学会高级会员, 从事现代电器设备的设计、优化, 新型换流变压器的研制及对应的高压直流输电新理论研究工作, llf@hnu.cn。

(责任编辑 张玉荣)