

基于集对分析和证据理论的电能表运行状态评估^{*}

李学生 高黎航 王君瑞

(北方民族大学电气信息工程学院 银川 750000)

摘要:为及时准确地评估电能表的运行状态,提出一种基于集对分析和证据理论的电能表运行状态评估方法。首先根据电能表自身基础、在线监测及现场检测信息,建立电能表运行状态评估指标体系。然后运用模糊层次分析法和熵权法分别确定各指标的主客观权重,运用博弈论和变权理论确定各指标的组合同权重与变权重。之后运用集对分析法确定各指标与各状态等级间的联系度,采用证据理论对各指标的联系度进行合成。最后利用最大隶属度原则与信度准则共同判定电能表的运行状态等级。实例分析结果表明,该方法与电能表的实际运行情况相符,且评估结果准确直观,与模糊综合评价法和集对分析法相比,该方法在状态等级区分度上达到了0.5256,明显高于模糊综合评价法的0.3024及集对分析法的0.1483,具有较好的区分度,为电能表的状态评估提供了一种新的思路。

关键词:电能表;状态评估;变权;集对分析;证据理论

中图分类号: TM933 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4017

Operation state evaluation of electric energy meter based on set pair analysis and evidence theory

Li Xuesheng Gao Lihang Wang Junrui

(School of Electrical Information Engineering, North Minzu University, Yinchuan 750000, China)

Abstract: In order to assess the operation state of electric energy meter timely and precisely, an evaluation method of electric energy meter operation state based on set pair analysis and evidence theory is proposed. Firstly, in line with the basis of the electric energy meter itself, on-line monitoring and on-site detection information, the evaluation index system of the running state of the electric energy meter is established. Then the fuzzy analytic hierarchy process and entropy weight method are applied to confirm the subjective and objective weights of each index, and then the game theory and variable weight theory are applied to confirm the combined weight and variable weight of the index. Then, the set pair analysis method is applied to confirm the connection degree between each index and each state level, and the evidence theory is applied to synthesize the degree of connection of each index to obtain the evaluation results. Finally, the maximum membership principle and the reliability criterion are used to evaluate the running state of the electric energy meter. The analysis results of the example show that the method is consistent with the actual operation of the electric energy meter, and the evaluation results are accurate and intuitive. Compared with the fuzzy comprehensive evaluation method and the set pair analysis method, the method reaches 0.5256 in the state level discrimination, which is significantly higher than 0.3024 of the fuzzy comprehensive evaluation method and 0.1483 of the set pair analysis method. It has a good discrimination and provides a new idea for the state evaluation of the electric energy meter.

Keywords: electricity meter; state assessment; variable weight; set pair analysis; evidence theory

0 引言

作为智能电网中最关键的设备之一,电能表不仅在保

证家庭用户用电的可靠性、拓展电力市场的开放性及创新电力交易手段中扮演着重要角色,也在电能数据采集系统中发挥着重要作用^[1-2]。在我国大部分地区,对电能表的

收稿日期:2023-09-12

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(52167004)项目资助

状态检验还是以传统方法——周期性现场检定为主。这种检定模式带来的弊端是造成了大量人力物力的浪费,且不适应电力工业和智能电网的快速发展。与此同时,随着电能表在智能化方面的不断提高,其在运行过程中出现突发故障的情况也越来越多^[3]。因此,对电能表的运行状态进行评估显得尤为重要。

目前,涉及电能表状态评估领域的相关算法有云模型^[1]、贝叶斯^[4]、决策树^[5]、机器学习^[6-8]、图形处理器^[9]、神经网络^[10-12]、灰色关联度^[13]及聚类算法^[14]等。文献^[15]在威布尔分布理论和最小二乘法两者的基础上,引入贝叶斯模型和泰尔指数,构建了基于信息融合理论的低压智能电能表状态评价模型。文献^[16]通过对海量的电力大数据进行挖掘分析,构建了两种随机矩阵模型,并结合动态时间规整聚类算法对电能表的运行状态进行了评估。文献^[17]通过权重自适应调整算法对电能表运行状态模型进行了改进,该方法避免了常权问题带来的缺陷,实现了动态权重下电能表的状态评估。文献^[18]在兼顾评价指标的主观经验性和客观规律性的基础上,对传统的熵值法进行了改进,提出了一种基于双重熵值确定的电能表状态评价模型。

综上所述,目前在电能表状态评估领域已取得一定研究成果,但在某些方面仍存在不足。首先是对评估指标的选取,一些研究在选取指标时没有考虑指标的全面性、合理性、可操作性及定性定量相结合等原则,从而导致所选指标不能全面反映电能表的运行状态;其次是指标权重的确定,部分研究忽略了指标权重确定时的主客观结合性及固定权重所带来的缺陷,从而导致计算所得的权重缺乏合理性及可信性;最后是综合评估算法的选择,综合评估算法的选择对建立电能表运行状态评估模型十分重要,然而,当前电能表状态评估工作还处于初步探索阶段,尚未建立起一个系统全面的综合评估模型。

鉴于目前在电能表状态评估方面的不足,本文提出一种新的电能表运行状态评估方法。首先,根据影响电能表运行状态的因素,构建电能表运行状态评估指标体系。其次,结合层次分析法、熵权法及博弈论法获取各评估指标的常权重,兼顾了指标的主观经验性和客观规律性,在常权重的基础上,引入变权理论获取评估指标的变权重,避免了恒定权重带来的缺陷。最后,融合集对分析和证据理论的评估结果,综合评估电能表的运行状态。集对分析法可有效解决电能表运行状态评估模型中指标与状态等级之间的不确定性与模糊性问题,证据理论可对指标层中的各状态量信息进行融合,以获取电能表整体运行状态的评估结果。

1 评估指标体系的构建

1.1 建立评估指标体系

电能表的运行状态信息一方面可通过在线监测数据

与现场检测数据获取,同时也与其基本信息存在关联。随着电能表在线监测技术的成熟,在线监测系统可为电能表的运行状态评估提供大量有用信息,如 SG186、信息采集系统等工具,其涵盖了电能表运行状态的大部分指标,如此一来便为指标信息的采集工作提供了可操作性与便捷性。本文根据影响电能表运行状态的因素,遵循全面性与代表性、系统性与层次性、定性与定量、易获取性与可操作性结合等原则,同时根据文献^[19]和相关规程规范^[20-21],从运行可靠性、运行性能、辅助配置、运行环境和电气性能 4 方面建立电能表运行状态评估指标体系,如图 1 所示。

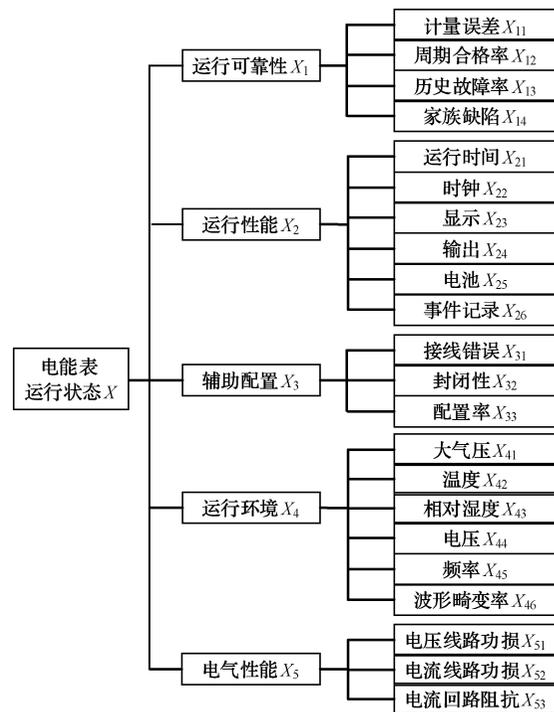


图 1 电能表运行状态评估指标体系

运行可靠性主要反映电能表自身基础情况及历史运行记录对运行状态的影响,如周期合格率、历史故障率等;性能指标在电能表运行状态中扮演着非常重要的角色,其优劣与否将直接关系到电能表测量的准确性,如时钟误差、数据显示及输出等;辅助配置指的是在非运行状态下可获取的信息,如设备封闭性、设备配置率等;运行环境主要指电能表所处的内部及外部环境对其运行状态所造成的影响,如周围温度、相对湿度等;电气性能指标涉及电能表在电路中运行时所产生的损耗,如电压线路功损、电流线路功损等。

本文建立的电能表运行状态评估指标体系(图 1),是与现有研究中的指标体系进行对比分析,在原评价指标的基础上,进行提炼和完善之后而确定的。如对文献^[1]的“运行可靠性”,增加了“计量误差”与“周期

合格率”等指标指标,对“运行环境”,增加了“大气压”与“波形畸变率”等指标。在文献[18]的“配置指标”中,增加了“接线方式”指标。之后参考文献[21],在指标体系中增加了“电压及电流线路功损”等指标,增加指标体系的完备性。

1.2 确定各指标相对劣化度

在确定了状态评估指标体系后,由于影响电能表运行状态的因素众多且复杂,且各评估指标的量纲和数量级不尽相同,从而导致各指标在相互比较时会产生较大差异。因此,引入相对劣化度对各指标数据进行归一化处理^[22]。相对劣化度可理解为设备实际运行状态相对于正常状态的偏离程度,用0~1之间的数值来表示,相对劣化度越接近1,设备劣化程度越严重。

对越大越优型指标,按式(1)进行归一化处理。

$$x_{kl} = \begin{cases} 0, & X \geq X_{\max} \\ \frac{X_{\max} - X}{X_{\max} - X_{\min}}, & X_{\min} < X < X_{\max} \\ 1, & X \leq X_{\min} \end{cases} \quad (1)$$

式中: x_{kl} 为指标劣化度值; X 为指标的实测值; X_{\min} 为电能表通用技术规范中规定的电能表各指标正常运行的下限值; X_{\max} 表示电能表各指标理想运行状态下的数值。

对于区间型指标,按式(2)进行归一化处理。

$$x_{kl} = \begin{cases} 1, & X \leq X_{\min} \\ \frac{X_1 - X}{X_1 - X_{\min}}, & X_{\min} < X < X_1 \\ 0, & X_1 \leq X \leq X_2 \\ \frac{X - X_2}{X_{\max} - X_2}, & X_2 < X < X_{\max} \\ 1, & X \geq X_{\max} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $[X_1, X_2]$ 为各指标处于优良运行状态时的上、下限值; X_{\max} 、 X_{\min} 为电能表通用技术规范中所规定的电能表各指标正常运行时的上、下限值。

对越小越优型指标,按式(3)进行归一化处理。

$$x_{kl} = \begin{cases} 0, & X \leq X_{\min} \\ \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}, & X_{\min} < X < X_{\max} \\ 1, & X \geq X_{\max} \end{cases} \quad (3)$$

式中: X_{\max} 表示电能表安全运行标准限值的上限; X_{\min} 表示电能表各指标理想运行状态下的数值。

1.3 运行状态等级划分

目前,现有的电能表状态评估模型对电能表的状态等级没有进行统一的划分,根据文献[19]及规程规范^[20-21],本文将电能表运行状态划分为优秀(z_1)、良好(z_2)、注意

(z_3)、严重(z_4)4个等级,不同状态等级的关系如表1所示。

表1 相对劣化度与状态等级的关系

相对劣化度 取值范围	状态描述
[0,0.2]	优秀状态。各状态量处于规定值之内、无劣化趋势。
(0.2,0.5]	良好状态。各状态量处于规定值与扩展值之间,无明显劣化趋势。
(0.5,0.8]	注意状态。各状态量处于扩展值与极限值之间,有劣化趋势。
(0.8,1.0]	严重状态。各状态量已超过极限值,劣化趋势严重。

2 评估指标权重的确定

2.1 模糊层次分析法确定主观权重

模糊层次分析法是在层次分析法的基础上融合了模糊理论后所提出的一种主观赋权方法,该方法引入了模糊一致判断矩阵,在解决指标权重的一致性调整问题时,能有效发挥作用^[23]。其在电能表状态评估中的计算步骤如下。

1)建立模糊一致判断矩阵。模糊层次分析法在建立判断矩阵时采用0.1~0.9标度原则,如表2所示。

表2 0.1~0.9标度含义

标度	含义
0.1	指标 a_i 的重要性远远低于 a_j
0.3	指标 a_i 的重要性明显低于 a_j
0.5	指标 a_i 的重要性与 a_j 相同
0.7	指标 a_i 的重要性明显高于 a_j
0.9	指标 a_i 的重要性远远高于 a_j
0.2、0.4、0.6、0.8	上述标度的中间值

2)一致性检验与调整。对模糊判断矩阵进行一致性检验时,需检验判断矩阵的任意2行(列)对应元素之差是否为常数。若不满足条件,则应对矩阵中的元素进行调整,直到满足一致性。

3)计算权重。设有模糊判断矩阵 R ,对 R 按行求和,记为:

$$r_i = \sum_{j=1}^n r_{ij} \quad (4)$$

利用式(5)对模糊判断矩阵 R 进行处理。

$$r_{ij}^* = \frac{r_i - r_j}{2(n-1)} + 0.5 \quad (5)$$

记元素 r_{ij}^* 组成的矩阵为 R^* ,之后利用式(6)对 R^* 进行处理后可得权重向量 $W_i = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$,即模糊层次分析法计算所得的最终权重。

$$W_i = \frac{\sum_{j=1}^n r_{ij}^* + \frac{n}{2} - 1}{n(n-1)} \quad (6)$$

模糊层次分析法计算所得权重如表3所示。

2.2 熵权法确定客观权重

熵权法既是一种客观赋权法,也是一种可用于多指

表3 模糊层次分析法计算所得权重

指标	权值	子指标	权值
X_1	0.215 0	$\{X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{14}\}$	$W_1 = \{0.261 1, 0.238, 0.261 1, 0.238 9\}$
X_2	0.224 4	$\{X_{21}, X_{22}, X_{23}, X_{24}, X_{25}, X_{26}\}$	$W_2 = \{0.140 0, 0.164 0, 0.164 0, 0.172 0, 0.180 0, 0.180 0\}$
X_3	0.177 5	$\{X_{31}, X_{32}, X_{33}\}$	$W_3 = \{0.370 8, 0.333 3, 0.295 8\}$
X_4	0.205 6	$\{X_{41}, X_{42}, X_{43}, X_{44}, X_{45}, X_{46}\}$	$W_4 = \{0.137 3, 0.145 3, 0.161 3, 0.177 3, 0.193 3, 0.185 3\}$
X_5	0.177 5	$\{X_{51}, X_{52}, X_{53}\}$	$W_5 = \{0.370 8, 0.333 3, 0.295 8\}$

标,多对象的综合评价方法。它在各指标数据的基础上,根据各项评估指标值的变异程度来确定权重^[24]。其在电能表状态评估中的计算步骤如下。

1)数据标准化。对于正向指标,利用式(7)对其进行标准化处理。

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (7)$$

对于负向指标,利用式(8)对其进行标准化处理。

$$y_{ij} = \frac{\max(x_j) - x_{ij}}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (8)$$

2)计算第*i*组状态量中第*j*个因素的比重。

$$p_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sum_{i=1}^n y_{ij}} \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (9)$$

3)计算第*j*项指标的熵。

$$e_j = -k \sum_{i=1}^n (p_{ij} \times \ln p_{ij}) \quad (10)$$

式中: $k=1/\log n$ 。

4)计算各指标权重。

$$w_j = \frac{1 - e_j}{m - \sum_{j=1}^m e_j} \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (11)$$

熵权法计算所得权重如表4所示。

表4 熵权法计算所得权重

指标	权值
$\{X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{14}\}$	$W_1 = \{0.355 0, 0.297 8, 0.257 1, 0.090 1\}$
$\{X_{21}, X_{22}, X_{23}, X_{24}, X_{25}, X_{26}\}$	$W_2 = \{0.313 1, 0.218 4, 0.138 3, 0.170 4, 0.079 9, 0.079 9\}$
$\{X_{31}, X_{32}, X_{33}\}$	$W_3 = \{0.389 5, 0.281 1, 0.329 4\}$
$\{X_{41}, X_{42}, X_{43}, X_{44}, X_{45}, X_{46}\}$	$W_4 = \{0.351 2, 0.248 4, 0.151 6, 0.081 5, 0.091 3, 0.076 1\}$
$\{X_{51}, X_{52}, X_{53}\}$	$W_5 = \{0.451 2, 0.348 7, 0.200 1\}$

2.3 基于博弈论的组合赋权法

博弈论起源于现代数学,是一种可以用来平衡各决策主体之间行为的理论。博弈论通常用来求取两个问题之间的最优解,以期期望效益达到最大、最优化^[25]。将博弈论运用在电能表的状态评估中,可优化主客观权重的组合结果,使常权结果更具合理性。其在电能表状态评估中的计算步骤如下。

1)设有一个权重向量集合,记为 $W = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\}$,*n*个基本权向量通过任意线性组合,结果为:

$$w = \sum_{k=1}^n \alpha_k w_k^T (\alpha_k > 0, \sum_{k=1}^n \alpha_k = 1) \quad (12)$$

式中: w 为基本权重向量; α_k 为线性组合系数。

2)对式(12)中的线性组合系数进行优化处理,使得最优组合权重和所有基本权重的偏差达到最小,即:

$$\min \left\| \sum_{k=1}^n \alpha_k \cdot w_k^T - w_i^T \right\|_2 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

3)确定组合权重。

$$w^* = \sum_{k=1}^n \alpha_k^* \cdot w_k^T \quad (14)$$

式中: w^* 为组合权重; α_k^* 为归一化后的线性组合系数。

博弈论计算所得组合权重如表5所示。

表5 组合权重

指标	权值
$\{X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{14}\}$	$W_1 = \{0.353 4, 0.296 8, 0.251 7, 0.092 6\}$
$\{X_{21}, X_{22}, X_{23}, X_{24}, X_{25}, X_{26}\}$	$W_2 = \{0.284 7, 0.209 5, 0.142 5, 0.170 7, 0.096 3, 0.096 3\}$
$\{X_{31}, X_{32}, X_{33}\}$	$W_3 = \{0.387 1, 0.287 7, 0.325 2\}$
$\{X_{41}, X_{42}, X_{43}, X_{44}, X_{45}, X_{46}\}$	$W_4 = \{0.307 2, 0.227 2, 0.153 6, 0.101 2, 0.112 3, 0.098 6\}$
$\{X_{51}, X_{52}, X_{53}\}$	$W_5 = \{0.431 7, 0.345 0, 0.223 3\}$

2.4 变权理论的应用

当电能表状态评估指标体系中某个指标严重偏离正

常值时,电能表在运行过程中可能会出现故障,此时若继续按照常权重来进行计算,由于该常权系数过小,电能表的运行状态可能还是没有发生改变,依然处于正常状态。由此一来,电能表状态评估结果的准确性可能会出现偏差。因此,本文引入变权理论^[26],实现了动态权重下电能表的状态评估。变权公式为:

$$w^{**} = \frac{w^* (1 - x_{kl})^{a-1}}{\sum_{l=1}^n w^* (1 - x_{kl})^{a-1}} \quad (15)$$

式中: w^{**} 为变权重; w^* 为组合常权重; x_{kl} 为指标值; a 为变权系数。一般情况下,当某指标权重的变化量对电能表的整体运行状态影响甚微时,取 $a > 0.5$;当某指标权重的变化量对电能表的整体运行状态影响较大时,取 $a < 0.5$;当 $a = 1$ 时,即为常权模式。本文对于运行性能、运行环境及电气性能3类指标,考虑到其状态的优劣将会对电能表的运行状态产生较大影响,故取 $a = 0.2$;对于运行可靠性和辅助配置两类指标,其状态的优劣对电能表运行状态产生的影响较小,故取 $a = 0.4$ 。

由式(15)可知,变权重结果与组合常权重、指标的相对劣化度值及变权系数有关。当变权系数确定后,若某指标的相对劣化度值越大,则其最终的变权重值计算结果也会越大,即对于相对劣化度较为严重的指标,变权公式能增大该指标权重在整体指标权重中所占的比例,从而提高评估结果的准确性及合理性,实现动态权重下电能表的运行状态评估。

3 评估模型的建立

3.1 基于集对分析的指标层评估模型

集对分析法是一种通过使用定量分析法来解决不确定性的方法。近年来,该算法在变压器绝缘状态评估、风电机组状态评估、电能质量综合评估及架空输电线路状态评估方面得到了一定应用。

设给定的两个集合 A 和 B ,将这两个集合组成集对 $H = (A, B)$,在某个具体问题中,利用集对分析理论中的联系度来描述集对 $H = (A, B)$ 在该具体问题中的相互联系情况^[27]。联系度表达式为:

$$\mu_{(A,B)} = a + bi + cj \quad (16)$$

式中: i 为差异不确定系数,可根据实际情况在 $[-1, 1]$ 区间内取值; j 为对立系数,规定其值为 -1 ; a, b, c 为联系度分量,满足 $a, b, c \in [0, 1]$,且 $a + b + c = 1$ 。式(16)是联系度的一般表达式,即三元联系度表达式。对 b 进行扩展,可得到多元联系度的表达式为:

$$\mu_H = a + \sum_{l=1}^{K-2} b_l i_l + cj \quad (17)$$

式中: b_l 为不同等级下的差异度; i_l 为差异度系数; a, b_l, c 三者依然满足归一化条件。

针对本文建立的电能表状态评估指标体系,各评估指标 x_{kl} 与各状态等级 z 构成集对 $H = (x_{kl}, z)$,则各指标与

各状态等级之间的联系度可通过模糊属性规则计算,即:

$$\mu_{kl} = \begin{cases} 1 + 0 \times i_1 + 0 \times i_2 + \dots + 0 \times i_{k-2} + 0 \times j, \\ \quad x_{kl} \leq r_1 \\ \frac{r_1 + r_2 - 2x_{kl}}{r_2 - r_1} + \frac{2x_{kl} - 2r_1}{r_2 - r_1} i_1 + 0 \times i_2 + \dots + \\ \quad 0 \times i_{k-2} + 0 \times j, r_1 < x_{kl} \leq \frac{r_1 + r_2}{2} \\ 0 + \frac{r_2 + r_3 - 2x_{kl}}{r_3 - r_1} i_1 + \frac{2x_{kl} - r_1 - r_2}{r_3 - r_1} i_2 + \dots + \\ \quad 0 \times i_{k-2} + 0 \times j, \frac{r_1 + r_2}{2} < x_{kl} \leq \frac{r_2 + r_3}{2} \\ \vdots \\ 0 + 0 \times i_1 + 0 \times i_2 + \dots + \frac{2r_{k-1} - 2x_{kl}}{r_{k-1} - r_{k-2}} i_{k-2} + \\ \quad \frac{2x_{kl} - r_{k-2} - r_{k-1}}{r_{k-1} - r_{k-2}} j, \frac{r_{k-2} + r_{k-1}}{2} < x_{kl} \leq r_{k-1} \\ 0 + 0 \times i_1 + 0 \times i_2 + \dots + 0 \times i_{k-2} + 1 \times j, \\ \quad x_{kl} > r_{k-1} \end{cases} \quad (18)$$

式中: r_1, r_2, \dots, r_{k-1} 为各状态等级之间的分界值,两者之间的关系如表6所示。

表6 状态等级与区间阈值的关系

状态等级	阈值区间
z_1	$[0, r_1)$
z_2	$[r_1, r_2)$
\vdots	\vdots
z_{k-1}	$[r_{k-2}, r_{k-1})$
z_k	$[r_{k-1}, 1]$

当 $K=4$ 时, μ_{kl} 示意图如图2所示。

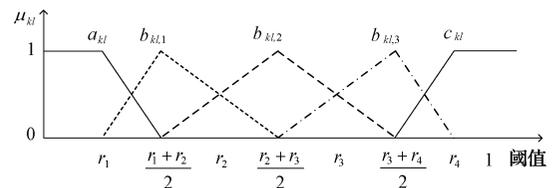


图2 联系度 μ_{kl} 的示意图

3.2 基于证据理论的信息融合模型

证据理论又称 D-S 理论,可以解决由于随机性或模糊性引起的不确定问题^[28]。因此,是一种常见而有效的决策方法计算步骤如下。

1)确定辨识框架。在某个具体问题中,将所有可能的结果所组成的集合视为识别框架 Θ 。本文将电能表的4种状态等级及不确定度视为识别框架,即 $\Theta = \{z_1, z_2, z_3, z_4, \theta\}$ 。

2)确定证据及基本信度分配(basic possibility assignment, BPA)。本文证据为电能表的各状态量信息, BPA

为集对分析计算所得的各指标的联系数。BPA 的计算函数称为 mass 函数,其表达式为:

$$\begin{cases} m(\emptyset) = 0 \\ 0 \leq m(A) \leq 1 \\ \sum_{A \subseteq \Theta} m(A) = 1 \end{cases} \quad (19)$$

式中:空集 \emptyset 的可信度为 0; A 表示具体的证据。

为避免各证据之间因可信度的不同而引发冲突,本文引入可信度系数 λ_k 来区别不同证据的可信程度, λ_k 越小,则表明该证据越不可信。因此,利用可信度系数对合成前的 BPA 进行修正,即:

$$\begin{cases} m_k(Z) = \lambda_k \mu_k \\ m_k(\theta) = 1 - \lambda_k \end{cases} \quad (20)$$

式中: $m_k(Z)$ 、 $m_k(\theta)$ 分别为修订后的基本分配概率和不确定度; λ_k 为可信度系数。

$$\begin{cases} \lambda_k = \lambda \gamma_k \\ \gamma_k = \tau w_k / \tau w_{\max} \end{cases} \quad (21)$$

式中: λ 为可信度系数,本文取 $\lambda = 0.9$; τw_{\max} 为各指标权重中的最大值。

3) 证据融合。对多个证据进行合成,可采用以下合成规则进行合成:

$$\begin{cases} m(\psi) = \sum_{A \cap B = \psi} \frac{m_1(A)m_2(B)}{1-K} \\ m(\emptyset) = 0 \\ K = \sum_{A \cap B = \emptyset} m_1(A)m_2(B) \end{cases} \quad (22)$$

式中: A 、 B 为识别框架 Θ 的子集,即两个不同的证据; K 为归一化因子; $m(\psi)$ 为融合结果。

4) 评估决策。利用证据理论计算得到最终的结果后,运用最大隶属度原则和信度准则对电能表的运行状态进行综合评判。

准确度原则:

$$m(\theta) < \epsilon_1 \quad (23)$$

若计算出的不确定度 $m(\theta)$ 的值小于所设定的阈值,则该原则得到满足,本文取 $\epsilon_1 = 0.05$ 。若无法满足式(23),则应重新划分评估等级的级数,同时调整识别框架的构成。

最大隶属度原则:

$$\begin{cases} m(z_0) - m(\bar{z}_0) > \epsilon_2 \\ m(z_0) = \max\{m(Z_i) \mid Z_i \subseteq \Theta\} \\ m(\bar{z}_0) = \max\{m(Z_i) \mid Z_i \subseteq \Theta, Z_i \neq z_0\} \end{cases} \quad (24)$$

式中: $m(z_0)$ 、 $m(\bar{z}_0)$ 分别为评估等级的最大值与次大值; ϵ_2 为本文所设阈值,其取值为 0.15。若两者的差值超过 0.15,则最终的评估结果为 z_0 级。

置信度准则:

$$z_0 = \min\{z_0 \mid \sum_{i=1}^{z_0} m(z_i) \geq \epsilon_3, 1 \leq z_0 \leq 5\} \quad (25)$$

在评估结果不满足式(24)的情况下,则利用式(25)进行判断。其中, ϵ_3 为置信水平,取值为 0.5。若各 BPA 满足式(25),则评估结果为 z_0 级。

3.3 评估步骤

综上所述,基于集对分析和证据理论的电能表状态评估流程如图 3 所示。

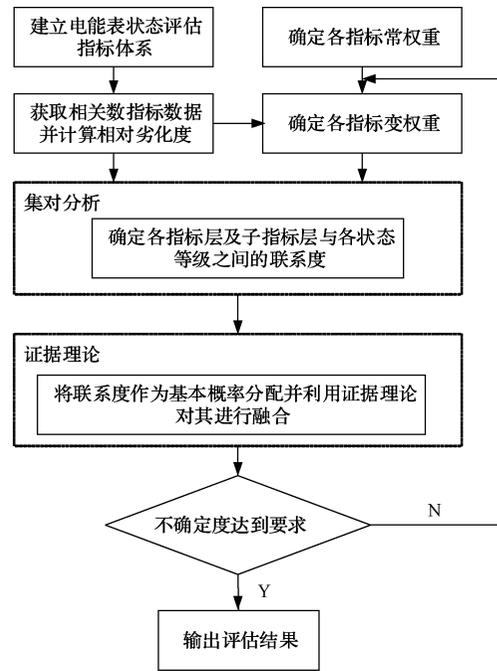


图 3 评估流程

4 实例分析

4.1 评估实例

为验证本文方法的准确性和有效性,以某 I 类准确度等级为 0.2 级的单相智能电能表为例,选取 3 组数据进行计算并分析结果,电能表数据如表 7 所示。

表 7 电能表数据

评估指标	数据 1	数据 2	数据 3
$X_{11} / \%$	0.05	0.1	0.01
$X_{12} / \%$	99.6	99.2	98.9
$X_{13} / \%$	0.25	0.15	0.45
X_{14}	0.3	0.2	0.4
$X_{21} / \text{年}$	10	6	5
$X_{22} / (\text{s} / 24 \text{ h})$	0.25	0.50	0.08
X_{23}	0.3	0.2	0.4
X_{24}	0.2	0.3	0.5
X_{25}	0.5	0.1	0.3
X_{26}	0.4	0.1	0.2
X_{31}	0.2	0.3	0.4
X_{32}	0.3	0.5	0.4
$X_{33} / \%$	80	90	70

续表

评估指标	数据 1	数据 2	数据 3
X_{41}/kPa	102	90	100
$X_{42}/^\circ\text{C}$	23.5	13	30
$X_{43}/\%$	68	50	60
X_{44}/V	219	220	222
X_{45}/Hz	50.5	49.6	51.4
$X_{46}/\%$	0.5	0.9	0.1
X_{51}/W	0.5	1.0	0.7
X_{52}/VA	0.26	0.57	0.78
$X_{53}/\text{m}\Omega$	0.6	1.0	1.4

根据 3.3 节基于集对分析和证据理论的电能表运行状态评估方法流程,分析表 7 中数据 1。首先计算各评估指标的相对劣化度,根据式(1)~(3)计算可得各指标的相对劣化度为:

$$x_1 = \{x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{14}\} = \{0.250\ 0, 0.200\ 0, 0.384\ 6, 0.476\ 0\}$$

$$x_2 = \{x_{21}, x_{22}, x_{23}, x_{24}, x_{25}, x_{26}\} = \{0.625\ 0, 0.250\ 0, 0.385\ 6, 0.256\ 1, 0.523\ 3, 0.433\ 6\}$$

$$x_3 = \{x_{31}, x_{32}, x_{33}\} = \{0.245\ 6, 0.345\ 2, 0.200\ 0\}$$

$$x_4 = \{x_{41}, x_{42}, x_{43}, x_{44}, x_{45}, x_{46}\} = \{0.200\ 0, 0.000\ 0, 0.066\ 7, 0.000\ 0, 0.000\ 0, 0.025\ 0\}$$

$$x_5 = \{x_{51}, x_{52}, x_{53}\} = \{0.333\ 3, 0.260\ 0, 0.300\ 0\}$$

根据 2.4 节的变权理论,依据式(15)对各指标的常权值进行处理得到变权值为:

$$W_1 = \{0.335\ 5, 0.267\ 6, 0.279\ 9, 0.117\ 1\}$$

$$W_2 = \{0.380\ 4, 0.160\ 8, 0.128\ 3, 0.131\ 9, 0.106\ 2, 0.092\ 5\}$$

$$W_3 = \{0.379\ 7, 0.316\ 0, 0.304\ 3\}$$

$$W_4 = \{0.342\ 9, 0.212\ 2, 0.151\ 6, 0.094\ 5, 0.104\ 9, 0.094\ 0\}$$

$$W_5 = \{0.447\ 9, 0.329\ 3, 0.222\ 8\}$$

采用集对分析方法对各指标进行处理,依据式(18)计算得到各指标量与各状态等级间的联系度,如表 8 所示。由表 8 并结合各指标的变权值计算得到修订前的初始 BPA,如表 9 所示。

由表 3 可知, $W_{\max} = 0.224\ 4$, 由式(21)可得 $\gamma_k = \{0.958\ 1, 1.000\ 0, 0.791\ 0, 0.916\ 2, 0.791\ 0\}$, $\lambda_k = \{0.862\ 3, 0.900\ 0, 0.71\ 19, 0.824\ 6, 0.711\ 9\}$, 由式(20)可得 $m(\theta) = \{0.137\ 7, 0.100\ 0, 0.288\ 1, 0.175\ 4, 0.288\ 1\}$, 之后根据式(20)计算所得的基本概率分配如表 10 所示。

根据表 10 结果,按式(22)融合后 $X = \{0.751\ 8, 0.226\ 2, 0.019\ 2, 0.000\ 0\}$, 其中, $0.751\ 8, 0.226\ 2, 0.019\ 2, 0.000\ 0$ 分别表示该电能表整体状态属于 z_1, z_2, z_3, z_4 4 个状态等级的隶属度, $0.002\ 7$ 为不确定度。按照 3.2 节中最大隶属度原则和信度准可判断该电能表状态

表 8 二级指标与状态等级的联系度

指标层	子指标	联系度			
		z_1	z_2	z_3	z_4
X_1	x_{11}	0.666 7	0.333 3	0.000 0	0.000 0
	x_{12}	1.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
	x_{13}	0.000 0	0.844 7	0.155 3	0.000 0
	x_{14}	0.000 0	0.580 0	0.420 0	0.000 0
X_2	x_{21}	0.000 0	0.083 3	0.916 7	0.000 0
	x_{22}	0.666 7	0.333 3	0.000 0	0.000 0
	x_{23}	0.000 0	0.881 3	0.118 7	0.000 0
	x_{24}	0.626 0	0.374 0	0.000 0	0.000 0
	x_{25}	0.000 0	0.422 3	0.577 7	0.000 0
	x_{26}	0.000 0	0.721 3	0.278 7	0.000 0
X_3	x_{31}	0.696 0	0.304 0	0.000 0	0.000 0
	x_{32}	0.032 0	0.968 0	0.000 0	0.000 0
	x_{33}	1.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
X_4	x_{41}	1.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
	x_{42}	1.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
	x_{43}	1.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
	x_{44}	1.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
	x_{45}	1.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
	x_{46}	1.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
	x_{51}	0.111 3	0.888 7	0.000 0	0.000 0
	x_{52}	0.600 0	0.400 0	0.000 0	0.000 0
x_{53}	0.333 3	0.666 7	0.000 0	0.000 0	

表 9 一级指标与状态等级的联系度

指标层	联系度			
	z_1	z_2	z_3	z_4
X_1	0.491 3	0.416 2	0.092 7	0.000 0
X_2	0.189 8	0.359 3	0.451 1	0.000 0
X_3	0.578 7	0.421 3	0.000 0	0.000 0
X_4	1.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
X_5	0.321 7	0.678 3	0.000 0	0.000 0

表 10 基本概率分配计算结果

证据	$m_k(Z_i)$				$m_k(\theta)$
	z_1	z_2	z_3	z_4	
X_1	0.423 6	0.358 9	0.079 9	0.000 0	0.137 7
X_2	0.170 8	0.323 4	0.406 0	0.000 0	0.100 0
X_3	0.412 0	0.299 9	0.000 0	0.000 0	0.288 1
X_4	0.826 4	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.175 4
X_5	0.229 0	0.482 0	0.000 0	0.000 0	0.288 1

属于 z_1 级,即优秀状态。

经实际检测,该电能表各项指标数据都在正常范围内。从表 9 和 10 可以看出,运行性能与各状态等级的联系度 $\mu_{21} = 0.189\ 8, \mu_{22} = 0.359\ 3, \mu_{23} = 0.451\ 1$, 说明该类指标的状态可能会从良好转变为注意,应加强监测,必要

时应针对其进行进一步的检修。

4.2 不同评估方法结果对比

为进一步说明本文所提方法对电能表运行状态的有效识别性,将模糊综合评价法及集对分析法所得结果与本文评估方法所得结果进行对比,如表 11 所示。

表 11 不同评估方法结果对比

方法	计算结果	评估结果
模糊综合评价法	[0.602 6, 0.300 2, 0.086 6, 0.010 7]	优秀
集对分析法	[0.513 6, 0.365 3, 0.121 2, 0.000 0]	优秀
本文方法	[0.751 8, 0.226 2, 0.019 2, 0.000 0]	优秀

由表 11 可知,模糊综合评价法所计算出的该电能表与各个状态等级之间的最终隶属度为[0.602 6, 0.300 2, 0.086 6, 0.010 7],优秀状态与良好状态隶属度之间的差值为 0.302 4,即状态等级区分度为 0.302 4。同理,集对分析法所计算出的状态等级区分度为 0.148 3,本文方法所计算出的状态等级区分度为 0.525 6。由此可见,本文方法所计算出的状态等级区分度 0.525 6 明显高于模糊综合评价方法的 0.302 4 及集对分析法的 0.148 3。同时,对于 3 种方法所计算出的该电能表与优秀状态等级之间的隶属度,模糊综合评价法为 0.602 6,集对分析法为 0.513 6,本文方法为 0.751 8,由此可见,本文方法所计算出的隶属度在三者中为最大。因此,集对分析结合证据理论的方法不仅增强了评估结果中各状态等级之间的区分度,同时也提高了评估结果的准确性,从而能有效评估电能表的运行状态。

5 结 论

电能表运行状态评估是电能表运维检修的基础,对电能表的运行状态进行行之有效地评估,能够帮助电能表运行管理单位及时发现电能表在运行过程中出现的异常情况,从而提高电能表的运行管理水平。本文提出了基于集对分析与证据理论的电能表状态评估模型,集对分析法在处理电能表状态信息的模糊性与不确定性问题上具有一定优势,证据理论可以综合电能表各方面状态信息并对其进行逐一融合,不仅为状态评估过程提供了正确的分析和决策,同时也提升了状态评估结果的准确度。

实例分析表明,基于集对分析和证据理论的电能表状态评估方法可以准确有效地评估电能表的运行状态,在状态等级评估结果相差不大时可对其进行有效区分,该方法可以为电能表的日常运行、维护管理、状态评估以及准确的更换策略提供有效的技术支持,大大提高了智能电表运行管理部门的管理水平和工作效率。

参 考 文 献

- [1] 高书垚,安泰,宋剑. 基于熵权-正态云模型的智能电能表状态评估研究[J]. 电测与仪表,2022,59(1):190-194.
- [2] 马云龙,陈霄,周玉. 一种小电量台区的电能表运行误差监测改进方法[J]. 国外电子测量技术,2021,40(4):27-31.
- [3] 商曦文,吉莹,张建寰. 智能电能表运行状态评估技术研究综述[J]. 电测与仪表,2020,57(3):134-141.
- [4] 马红明,李倩,陶鹏,等. 基于贝叶斯与数据驱动的智能电能表状态感知技术研究[J]. 电测与仪表,2022,59(2):176-182,188.
- [5] 吴宇,赵莉,冉光宇,等. 基于分层网络的电能表运行状态评价[J/OL]. 电测与仪表:1-8[2023-11-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20210924.2049.004.html>.
- [6] 许丹,李游,李贺龙. 基于联合分布适配的智能电表运行状态评价[J]. 北京航空航天大学学报,2022,48(4):674-681.
- [7] 王永超,唐求,马俊. 基于复合核 SVM 的智能电表基本误差预测方法[J]. 电子测量与仪器学报,2021,35(10):209-216.
- [8] ZHAO Q, MU J, HAN X, et al. Evaluation model of operation state based on deep learning for smart meter[J]. Energies,2021;14(15):4674.
- [9] 陆春艳,陶晓峰,周赣,等. 基于 GPU 的电能表健康状态评估与预测[J]. 电测与仪表,2020,57(11):135-140,152.
- [10] 马健,滕召胜,邱伟. 基于 IGA-BP 神经网络的智能电能计量设备退化趋势研究[J]. 仪器仪表学报,2021,42(11):123-131.
- [11] ZHAO Z, CHEN Y, LIU J, et al. Evaluation of operating state for smart electricity meters based on transformer-encoder-BiLSTM[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics,2023,19(3):2409-2420.
- [12] 刘文宇,刘璐,刘馨然,等. 基于改进 BP 神经网络的低压配台区智能电能表误差状态评估模型[J]. 电测与仪表,2022,59(11):176-181.
- [13] 刘小平,刘谋海,黄瑞,等. 基于灰色关联度的智能电能表性能评价方法研究[J]. 电测与仪表,2020,57(4):136-141.
- [14] 舒珏淋,张力,胡建. 基于高斯混合模型的智能电表误差数据挖掘与分析方法[J]. 电子测量技术,2021,44(15):56-61.
- [15] 蔡慧,乔适苏,袁健,等. 基于信息融合的低压智能电能表动态评价模型[J]. 电力系统自动化,2020,44(11):206-214.
- [16] 程瑛颖,杜杰,周全,等. 基于随机矩阵理论和聚类算法的电能表运行状态评估方法[J]. 中国电力,2020,53(11):116-125.
- [17] 王兆军,矫真,刘丽君,等. 基于自适应权重 FAHP 的

- 电能表运行状态评价[J]. 电测与仪表, 2023, 60(4): 186-192.
- [18] 黄天富, 李建新, 吴志武, 等. 基于双重熵值修正指标权重的电能表状态评价研究[J/OL]. 电测与仪表: 1-9[2023-11-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20230215.1059.004.html>.
- [19] 罗群, 刘春雨, 张家安, 等. 智能电能表状态检验评价指标体系及在线平台开发[J]. 电测与仪表, 2017, 54(17): 94-99, 111.
- [20] 国家能源局. DL/T 448-2016, 电能计量装置技术管理规程[S]. 北京: 中国电力出版社, 2016-12-05.
- [21] 国家电网有限公司. Q/GDW 10364-2020, 单相智能电能表技术规范[S]. 北京: 中国电力出版社, 2021-01-29.
- [22] 贾亚楠, 刘东明, 随慧斌. 基于正态云模型和 D-S 证据理论的开关柜运行状态综合评估[J]. 高压电器, 2017, 53(9): 247-252.
- [23] 丁伟, 乐文静, 罗拥军, 等. 基于模糊层次法的配电变压器抽检实验室能效评估研究[J]. 高压电器, 2023, 59(5): 216-220.
- [24] WANG J, PANG W, WANG L, et al. Synthetic evaluation of steady-state power quality based on combination weighting and principal component projection method[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2017, 3(2): 160-166.
- [25] 贺春光, 檀晓林, 周兴华, 等. 基于博弈论组合赋权的智能配电网项目投资效益评价[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(1): 161-167.
- [26] LEE L, XIE L, ZHAN D, et al. Condition assessment of power transformers using a synthetic analysis method based on association rule and variable weight coefficients[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(6): 2052-2060.
- [27] 程志友, 刘荡荡, 吴吉, 等. 基于集对分析与可变模糊集的电能质量综合评估[J]. 电网技术, 2020, 44(5): 1950-1956.
- [28] WANG H, LIN D, QIU J, et al. Research on multiobjective group decision-making in condition-based maintenance for transmission and transformation equipment based on D-S evidence theory [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(2): 1035-1045.

作者简介

李学生, 硕士, 副教授, 主要研究方向为电气设备智能检测与状态评估。

E-mail: lixueshengyl@163.com

高黎航, 硕士研究生, 主要研究方向为电气设备状态评估。