

# 基于模糊矩阵的计量装置状态评估方法

贾晋峰<sup>1</sup>, 程超贻<sup>1</sup>, 周欣<sup>2</sup>, 夏向阳<sup>2</sup>, 周为<sup>1</sup>,  
王宁<sup>1</sup>, 任发隽<sup>1</sup>, 朱真辉<sup>1</sup>

(1. 国网重庆市电力公司市区供电分公司, 重庆 400015; 2. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘要:**为了更全面准确地对电能计量装置运行状态进行评估, 提出一种基于模糊层次分析法的电能计量装置状态评估方法。首先, 通过物联网传输电能计量装置的各状态量数据, 构造模糊判断矩阵并进一步求解各层元素的权重, 再由权重和各层次指标评分通过加权求和计算出评估目标的最终得分, 由得分所在的区间段来判断电能计量装置各个部分是否正常运行; 然后, 通过定性与定量综合分析, 能够系统有效地分析最终评估目标和各层次之间的关系, 最终通过实例分析验证该方法的有效性和准确性。

**关键词:**电能计量装置; 模糊层次分析法; 状态评估; 权重系数

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.02.019 中图分类号: TM93 文章编号: 1673-9140(2022)02-0164-09

## Evaluation method of metering device condition based on fuzzy matrix

JIA Jinfeng<sup>1</sup>, CHENG Chaoyi<sup>1</sup>, ZHOU Xin<sup>2</sup>, XIA Xiangyang<sup>2</sup>, ZHOU Wei<sup>1</sup>,  
WANG Ning<sup>1</sup>, REN Fajun<sup>1</sup>, ZHU Zhenhui<sup>1</sup>

(1. Chongqing Urban Power Supply Branch, State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 400015, China;  
2. School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** In order to evaluate the operation status of electric energy metering devices (EEMD) more comprehensively and accurately, a state evaluation method of the EEMD is proposed on the basis of Fuzzy Analytic Hierarchy Process. The data of each state variable of the EEMD can be obtained by the Internet of Things, and are further used to construct a fuzzy judgment matrix for solving the weight of each layer element. The final score of the target device is calculated by the weighted summation of the weight and the index scores of each layer, and then the interval of the score is used to determine whether each part of the EEMD is normally operating. Through qualitative and quantitative analysis, the proposed method can systematically and effectively reveal the relationship between the final evaluation target and each level. Finally, the effectiveness and accuracy of the method are verified through realistic cases.

**Key words:** electric energy metering device; fuzzy analytic hierarchy process; state assessment; weights

随着经济的迅速发展, 电能计量装置 (electric energy metering device, EEMD) 的数量出现了爆炸

式的增长。在电能计量装置运行过程中, 存在人为窃电、电力系统扰动、计量装置故障等复杂原因导致

收稿日期: 2020-10-29; 修回日期: 2021-03-10

基金项目: 国家自然科学基金 (51977014); 湖南省自然科学基金衡阳联合基金 (2018JJ4025)

通信作者: 夏向阳 (1968-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事电力电子技术及其应用研究; E-mail: 307351045@qq.com

电能计量异常,不但给电力部门造成了巨大的经济损失,而且存在着严重的安全隐患问题,所以如何更高效、准确地反映电能计量装置的运行状态也就显得尤为重要<sup>[1-3]</sup>。

目前,国内外对电能计量装置运行状态评价的研究并不是很多,国内的计量装置在这方面的研究也只是起步阶段,对电能计量装置运行状态在线评估的方法主要有大数据分析<sup>[4]</sup>、序关系分析法<sup>[5]</sup>、模糊综合评估法<sup>[6]</sup>、并行化朴素贝叶斯法<sup>[7]</sup>、BP 神经网络法<sup>[8]</sup>、灰色理论法<sup>[9]</sup>以及机器学习法<sup>[10]</sup>等。

文献[11]利用用电信息采集系统,通过远程采集用电信息来分析用户电能计量装置运行情况,但是通过用电信息采集系统获得的数据之间的关联性并不强,并且采集到的计量装置异常的情况很多且复杂,并不能很好地对单个情况进行分析;文献[12]通过建立数学模型对电能计量装置进行状态评估,但是该方法的准确性与模型的准确度有关,由于计量装置易受外界环境干扰,使得模型的准确性不能得到保证;文献[13]采用层次分析法对电能计量装置的运行状态进行评估,通过定性与定量分析相结合的方法进行状态评估,能有效地分析评判目标与各体系层次之间的关系,综合各因素之间的相互关系达到准确评估的目的。但是,在层次分析法中,对判断矩阵的一致性检验既复杂又困难,并且文献[13]并没有给出一致性检验过程,同样对于权重问题也没有给出实际的计算方法,缺乏科学的理论依据。

因此,本文提出采用模糊层次分析法对电能计量装置的运行状态进行评估,解决层次分析法中的权重问题,能够系统有效地分析最终评估目标和各层次之间的关系,通过实例分析验证该方法的有效性和准确性。

# 1 模糊层次分析法简介

模糊层次分析法(fuzzy analytic hierarchyprocess,FAHP)是对层次分析法(analytic hierarchy process,AHP)的进一步深入,将模糊理论与层次分

析法相结合,能有效解决层次分析法中某一层指标过多时(4 个以上)思维不具有一致性的问题。

FAHP 的基本步骤:

- 1)系统地建立多层次递阶结构模型;
- 2)构建模糊一致判断矩阵;
- 3)计算各层次指标的权重系数;
- 4)通过加权求和,依次递推得出对最终目标的评价结果。

FAHP 与 AHP 的思想步骤基本一致,仅有 2 点不同:①AHP 构造判断矩阵,而 FAHP 构造模糊一致判断矩阵;②矩阵中求解各元素相对重要性权重的方法不同<sup>[14]</sup>。

## 1.1 模糊一致判断矩阵的建立

采用模糊层次分析法时需要建立多层次递阶结构模型,即确定系统的层次数以及每个层次对应的元素有哪些,之后以对上一层指标重要程度为准则,构造模糊判断矩阵  $R$ ,假如令某层元素的集合为  $P=\{P_1,P_2,\cdots,P_n\}$ ,那么表示  $P_1,P_2,\cdots,P_n$  中两两元素重要程度比较的模糊判断矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nn} \end{bmatrix} \tag{1}$$

矩阵中的  $r_{ij}$  为模糊标度,其具体含义<sup>[15]</sup>如表 1 所示。

表 1 模糊标度及其说明

Table 1 Fuzzy scale and its description	
模糊标度( $r_{ij}$ )	说明
0.1	两元素相比,后者比前者极端重要
0.2	两元素相比,后者比前者重要得多
0.3	两元素相比,后者比前者明显重要
0.4	两元素相比,后者比前者稍微重要
0.5	两元素相比,两者同等重要
0.6	两元素相比,前者比后者稍微重要
0.7	两元素相比,前者比后者明显重要
0.8	两元素相比,前者比后者重要得多
0.9	两元素相比,前者比后者极端重要

构建好模糊判断矩阵后需要检验其是否满足一致性条件,其判断依据为若模糊矩阵  $\mathbf{R}=(r_{ij})_{n\times n}$  满足  $\forall i,j,k=1,2,\cdots,n$  有

$$r_{ij}=r_{ik}-r_{jk}+0.5 \tag{2}$$

则称模糊矩阵  $\mathbf{R}$  是模糊一致判断矩阵。

若所得矩阵满足式(2)条件,则可进行权重计算,若不满足,则需要将所得矩阵调整为模糊一致矩阵。文献[16]中提出了一种调整模糊判断矩阵一致性的方法:首先对不满足一致性的初始矩阵  $\mathbf{R}$  进行判断,看其是否具备顺序一致性(若  $r_{ij}>0.5, \forall k$ , 有  $r_{ik}>r_{jk}$ ;若  $r_{ij}=0.5, \forall k$ , 有  $r_{ik}=r_{jk}$ ;若  $r_{ij}<0.5, \forall k$ , 有  $r_{ik}<r_{jk}$ , 则称  $\mathbf{R}$  具有顺序一致性),若具备顺序一致性,则矩阵  $\mathbf{R}$  不需要进行调整,可以直接由公式求解权重;若不具备顺序一致性,则要求解矩阵  $\mathbf{R}$  的导出和偏差矩阵并对  $\mathbf{R}$  进行调整,使其满足一致性条件,具体求解过程参考文献[16]。

1.2 各元素权重的求解

文献[17]中给出了模糊一致判断矩阵  $\mathbf{R}$  中  $r_{ij}$  与权重关系:

$$r_{ij}=a(w_i-w_j)+0.5, a\geq \frac{n-1}{2} \tag{3}$$

式中  $w_i(w_j)$  为元素  $i(j)$  对应的权重值; $n$  为矩阵的阶数; $a$  为对所感知对象的差异程度的一种度量,与评价对象个数和差异程度有关,通常取边界值(最小值),本文中的参数  $a$  也取边界值。

当  $\mathbf{R}$  为模糊一致判断矩阵时,联立式(2)、(3)可得

$$w_i=\frac{1}{a}(r_{ik}-\frac{1}{2})+w_k, k\in K \tag{4}$$

通过对  $k$  求和以及权重向量归一化条件  $\sum_{k=1}^n w_k=1$ , 得到:

$$w_i=\frac{1}{n}-\frac{1}{2a}+\frac{1}{na}\sum_{k=1}^n r_{ik}, i\in K \tag{5}$$

$$\begin{cases} a\geq \frac{n-1}{2} \\ -\frac{1}{n-1}\leq w_i-w_j\leq \frac{1}{n-1} \end{cases} \tag{6}$$

当构造的初始矩阵  $\mathbf{R}$  为模糊一致判断矩阵或矩阵满足顺序一致性时,则可通过式(5)进行权重求解,再通过加权求和得到上一层的评价结果。

2 基于 FAHP 的电能计量装置状态评估

电能计量装置主要由电能表、电压互感器(PT)、电流互感器(CT)、二次回路和负控终端 5 部分组成,如图 1 所示。任何一个部分异常都会导致电能计量装置运行状态异常,故而需要通过现场采集的数据依次对电能计量装置的各个部分进行状态评估,因此,本文采用模糊层次分析法对电能计量装置运行状态各种复杂的情况进行评估。

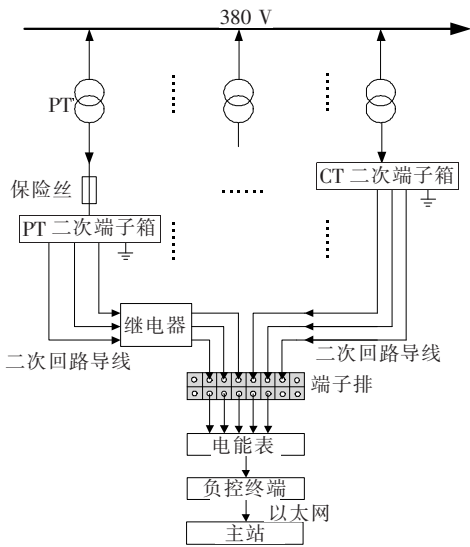


图 1 电能计量装置二次回路  
Figure 1 Diagram of secondary circuit of electric energy metering device

2.1 构建多层次递阶结构模型

采用 FAHP 对电能计量装置运行状态评估时建立 3 层递阶结构模型,如图 2 所示,目标层(最高层)是状态评估的最终目的,因此,将电能计量装置的 5 个部分作为目标层;电能计量装置各类异常情况对目标层各部分的影响程度不同,故将各类异常情况作为准则层(中间层);现场采集的状态量对各类异常情况的影响程度不同,故而将现场采集的状态量作为输入层(最底层)。

根据电能计量装置常出现的故障问题(图 2),将其各类异常情况分为 5 种:电压、电流、功率、相位异常以及异常事件。输入层的状态量分为 25 种,如表 2 所示。

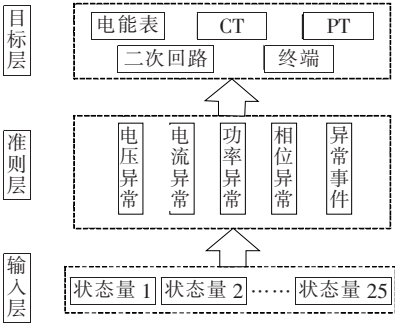


图 2 电能计量装置多层次递阶结构模型

Figure 2 Multi-level hierarchical structure model of electric energy measurement device

表 2 电能计量装置状态量

Table 2 State quantity of electric energy metering device

编号	状态量	编号	状态量
1	电压失压	15	电能表与终端有功功率差值长周期超限
2	三相电压不平	16	电能表的电压、电流处于逆相序状态
	衡度超限	17	三相负荷不平衡超限
3	A 相电压突变超限	18	A 相瞬时电压电流相位超差
4	B 相电压突变超限	19	B 相瞬时电压电流相位超差
5	C 相电压突变超限	20	C 相瞬时电压电流相位超差
6	电流失流	21	终端时钟偏差超限
7	三相电流不平	22	电能表时钟偏差超限
	衡度超限	23	装置人为开启次数
8	A 相电流突变超限	24	恒定磁场干扰
9	B 相电流突变超限	25	终端停/上电
10	C 相电流突变超限		
11	正向有功总电量超限		
12	反向无功功率超限		
13	功率因数越下限		
14	不同回路视在功率差值超限		

在对电能计量装置运行状态进行评估时,由于各状态量的量纲和数量级不一致,在评估的过程中容易出现数据丢失的问题。因此,为了保证数据的完整性,需要对各状态量进行归一化的状态评分计算,对于越大越优型、越小越优型指标,其归一化公式分别为

$$x_i = \frac{C_i - C_p}{C_{\max} - C_p}$$

(7)

$$x_i = \frac{C_{\max} - C_i}{C_{\max} - C_p}$$

(8)

其中  $x_i$ 、 $C_i$ 、 $C_p$ 、 $C_{\max}$  分别为状态量  $i$  的评分值、实测值、初始值、阈值。当  $x_i < 0$  时,令  $x_i = 0$ ;当  $x_i > 0$  时,令  $x_i = 1$ 。

2.2 准则层状态评分计算

将输入层的状态量记为  $P_n (n = 1, 2, \dots, 25)$ , 将准则层的各类异常情况记为  $Q_n (n = 1, 2, \dots, 5)$ , 目标层的待评估对象记为  $Z_n (n = 1, 2, \dots, 5)$ 。当出现异常情况时,对应的状态量也会发生改变,记某种异常情况  $Q_n$  发生时 有  $K$  种状态量发生改变,那么可认为这  $K$  种状态量与该异常情况  $Q_n$  是相关的,因此,在对异常情况  $Q_n$  进行状态评分计算时,可由相关状态量构建模糊判断矩阵:

$$\mathbf{R}_{P_n} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1K} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2K} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{K1} & r_{K2} & \cdots & r_{KK} \end{bmatrix}$$

(9)

采用 FAHP 构建的模糊判断矩阵中的元素  $r_{ij}$  是表示两两元素重要程度的模糊标度,通常由专家评价给出,但是本文为了提高状态评估的客观性程度,故而通过结合历史数据库所测数据来构造  $r_{ij}$ , 具体表达式为

$$r_{ij} = \frac{k_i}{k_i + k_j}$$

(10)

其中  $k_i (k_j)$  表示当异常情况  $Q_n$  发生时,状态量  $P_i (P_j)$  同时异常的次数。经证明,由式(10)确定的  $r_{ij}$  并构造的矩阵  $\mathbf{R}_{P_n}$  始终满足顺序一致性条件,因此,在代入数据求出矩阵  $\mathbf{R}_{P_n}$  后,即可通过式(5)计算出异常情况  $Q_n$  发生时各状态量  $P_i$  对应的权重  $w_i$ 。故而对准则层中异常情况  $Q_n$  的状态评分为

$$X_n = \sum_{i=1}^K w_i x_i$$

(11)

2.3 目标层状态评分计算

为了使评估的结果更加精确,通过专家评价主观地构造优先关系矩阵,对不同的待评估对象  $Z_n$  构造不同的优先关系矩阵,进而通过优先关系矩阵构造模糊一致判断矩阵  $\mathbf{R}_{Z_n}$ 。优先关系矩阵  $\mathbf{A} = (a_{ij})_{n \times n}$  是有限论域  $U = \{U_1, U_2, \dots, U_n\}$  上的一个三值(0, 0.5, 1)矩阵,矩阵元素  $a_{ij}$  满足:

[ 1,     表示元素  $U_i$  比  $U_j$  重要

$a_{ij} = \{0.5, \text{表示元素 } U_i \text{ 与 } U_j \text{ 同样重要} \} \quad (12)$

[ 0,     表示元素  $U_j$  比  $U_i$  重要

对准则层的各类异常情况  $Q_n (n=1,2,\cdots,5)$  进行两两比较构造优先关系矩阵,然后对优先关系矩阵  $\mathbf{A}=(a_{ij})_{n\times n}$  按行求和,记为

$$r_i = \sum_{k=1}^n a_{ik}, i=1,2,\cdots,n \quad (13)$$

并构造模糊判断矩阵中的模糊标度:

$$r'_{ij} = \frac{r_i - r_j}{2n} + 0.5 \quad (14)$$

由于式(14)构造的模糊判断矩阵是模糊一致的<sup>[18]</sup>,故在对目标层的待评估对象  $Z_n$  进行状态评分计算时,可由各类异常情况构建模糊一致判断矩阵:

$$\mathbf{R}_{Qn} = \begin{bmatrix} r'_{11} & r'_{12} & \cdots & r'_{15} \\ r'_{21} & r'_{22} & \cdots & r'_{25} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r'_{51} & r'_{52} & \cdots & r'_{55} \end{bmatrix} \quad (15)$$

由于矩阵  $\mathbf{R}_{Qn}$  是模糊一致判断矩阵,所以可采用公式求解各类异常情况  $Q_i$  对应的权重  $w'_i$ 。因此,对目标层的待评估对象  $Z_n$  的评分为

$$S_{Zn} = \sum_{i=1}^5 w'_i X_i \quad (16)$$

参照国家颁布的最新行业标准 DL/T 448—2016《电能计量装置技术管理规程》,将最终状态评分  $S_{Zn}$  与电能计量装置的健康状态区间相对应,如表 3 所示,对于非正常状态的评估对象,可以通过各类异常情况评分确定异常原因。

综上分析,基于 FAHP 的电能计量装置状态评估的流程如图 3 所示。

表 3 电能计量装置状态评分与健康状态关系

Table 3 The relationship between status score and health status of electric energy metering device

状态评分	健康状态	状态评分	健康状态
0~0.2	严重	0.6~0.8	注意
0.2~0.6	异常	0.8~1.0	正常

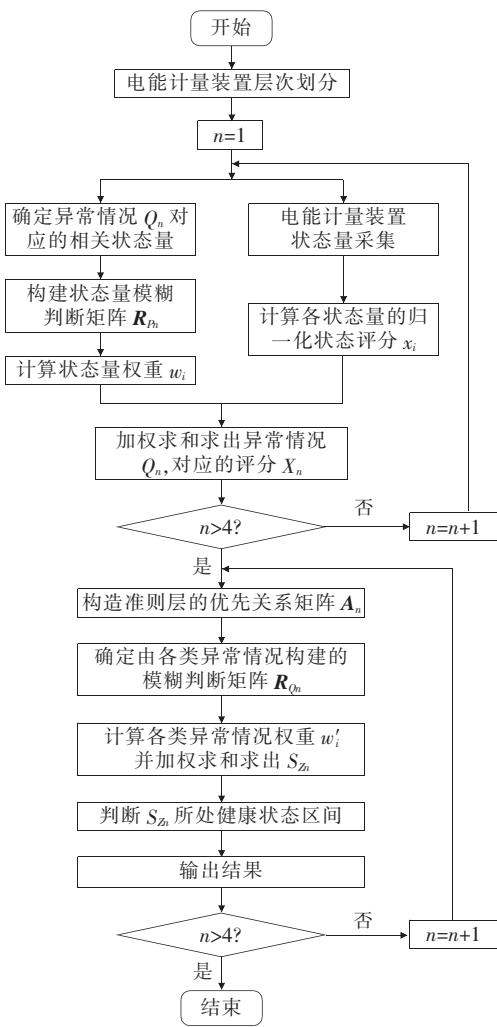


图 3 基于 FAHP 的电能计量装置状态评估流程

Figure 3 Flow chart of state evaluation of electric energy metering device based on FAHP

3 实例分析

为了验证本文提出方法的可靠性和实用性,选取某供电局计量自动化系统中某疑似用电异常企业作为分析,该用户采用三相三线电能计量装置,每 15 min 采集一次数据,一天共采集 96 次,选定状态评价的时间段为 2019 年 10 月 2 日 00:00—23:59。电能计量装置的 25 个状态量相关数据如表 4 所示,由式(7)、(8)计算的相关状态量评分如表 5 所示,根据 2 个表中的数据可以计算各类异常情况的状态评分值。

以电压异常情况为例,在表 4 中,与本次电压异常情况相关的状态量共 5 个,故按照式(10)确定  $r_{ij}$



后可得模糊判断矩阵为

$$\mathbf{R}_{P1} =$$
$$\begin{bmatrix} 0.500\ 0 & 0.574\ 5 & 0.519\ 2 & 0.794\ 1 & 0.750\ 0 \\ 0.425\ 5 & 0.500\ 0 & 0.444\ 4 & 0.740\ 7 & 0.689\ 7 \\ 0.480\ 8 & 0.555\ 6 & 0.500\ 0 & 0.781\ 3 & 0.735\ 3 \\ 0.205\ 9 & 0.259\ 3 & 0.218\ 8 & 0.500\ 0 & 0.437\ 5 \\ 0.250\ 0 & 0.310\ 3 & 0.264\ 7 & 0.562\ 5 & 0.500\ 0 \end{bmatrix}$$

表 4 各类异常情况与状态量异常同时发生的次数

Table 4 The number of simultaneous occurrences of various abnormal conditions and state quantity abnormalities

状态量	发生次数					状态量	发生次数				
	电压 异常	电流 异常	功率 异常	相位 异常	异常 事件		电压 异常	电流 异常	功率 异常	相位 异常	异常 事件
电压失压	27	0	0	0	0	电能表与终端有功功率 差值长周期超限	0	0	11	0	0
三相电压不平衡度超限	20	0	0	0	0	电能表的电压、电流 处于逆相序状态	7	0	0	7	0
A 相电压突变超限	0	0	0	0	0	三相负荷不平衡超限	0	0	0	0	0
B 相电压突变超限	0	0	0	0	0	A 相瞬时电压电流 相位超差	0	0	0	0	0
C 相电压突变超限	25	0	0	0	0	B 相瞬时电压电流 相位超差	0	0	0	0	0
电流失流	0	0	0	0	0	C 相瞬时电压电流 相位超差	9	0	0	9	0
三相电流不平衡度超限	0	0	0	0	0	终端时钟偏差超限	0	0	0	0	0
A 相电流突变超限	0	0	0	0	0	电能表时钟偏差超限	0	0	0	0	0
B 相电流突变超限	0	0	0	0	0	装置人为开启次数	0	0	0	0	0
C 相电流突变超限	0	0	0	0	0	恒定磁场干扰	0	0	0	0	0
正向有功总电量超限	0	0	27	0	0	终端停/上电	0	0	0	0	0
反向无功功率超限	0	0	23	0	0						
功率因数越下限	0	0	14	0	0						
不同回路视在功率 差值超限	0	0	0	0	0						

表 5 相关状态量及其状态评分

Table 5 Related status variables and the corresponding status scores

相关状态量	初始值	阈值	实测值	状态评分
电压失压	42	70	50	0.286
三相电压不平衡度超限	0.02	0.1	0.08	0.250
C 相电压突变超限	42	80	50	0.211
正向有功总电量超限	8 000	12 000	10 144.8	0.464
反向无功功率超限	−51.6	0	−96.4	0.000
功率因数越下限	0.71	0.85	0.77	0.750
电能表与终端有功功率 差值长周期超限	800	1 200	1 056.3	0.359
电能表的电压、电流处于 逆相序状态(次数)	0	3	7	0.000
C 相瞬时电压电流 相位超差	22.4	30	26.9	0.408

表 6 各类异常情况状态评分

Table 6 Scoring of various abnormal conditions

异常情况	状态评分	异常情况	状态评分
电压异常	0.243 4	相位异常	0.229 5
电流异常	1.000 0	异常事件	1.000 0
功率异常	0.370 6		

由式(5)求解模糊判断矩阵  $\mathbf{R}_{P1}$  的各状态量的权重为  $w_1=0.263\ 8$ 、 $w_2=0.230\ 0$ 、 $w_3=0.255\ 3$ 、 $w_4=0.112\ 1$ 、 $w_5=0.138\ 8$ 。根据式(11)可由状态量评分和权重值求得电压异常情况的状态评分  $X_1=0.243\ 4$ 。用同样的方法计算其他异常情况的状态评分,如表 6 所示,对于没有与状态量对应相关的异常情况(电流异常、事件异常)的状态评分记为 1。

对不同的待评估对象  $Z_n$  构造不同的优先关系矩阵,以及用式(14)构造相应的模糊一致判断矩阵,如表 7 所示(包含对应的权重)。最后,由式(14)所求待评估对象的状态评分如表 8 所示。

参照表 3 并从表 8 中可以看出,电能表、电压互感器和二次回路处于异常状态,经查明,发现目标用

户的 C 相户外高压跌落保险丝熔断,造成电压失压,导致电能表计量异常,更换 C 相户外高压保险丝后电压恢复正常,同时还需要对用户进行电量追补。从排查结果可知,由于保险丝熔断,会导致电

能表、电压互感器和二次回路都出现异常,与电能计量装置状态评估的结果相符,并且状态评分最低的部分往往是最容易出故障的部分,可以选择优先排查。

表 7 优先关系矩阵及其对应的模糊一致矩阵

Table 7 Priority relation matrix and the corresponding fuzzy consensus matrix

待评估对象 $Z_n$	优先关系矩阵 $A_n$	模糊一致判断矩阵 $R_{Qn}$	权重 $w'_i$
电能表 $Z_1$	$\begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0.5 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0.5 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0.5 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & 0.25 & 0.35 & 0.15 \\ 0.5 & 0.5 & 0.25 & 0.35 & 0.15 \\ 0.75 & 0.75 & 0.5 & 0.6 & 0.4 \\ 0.65 & 0.65 & 0.4 & 0.5 & 0.3 \\ 0.85 & 0.85 & 0.6 & 0.7 & 0.5 \end{bmatrix}$	$w'_1 = 0.125, w'_2 = 0.125$ $w'_3 = 0.25, w'_4 = 0.2$ $w'_5 = 0.3$
	$\begin{bmatrix} 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0.5 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0.5 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0.5 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0.5 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.5 & 0.1 & 0.3 & 0.2 & 0.4 \\ 0.9 & 0.5 & 0.7 & 0.6 & 0.8 \\ 0.7 & 0.3 & 0.5 & 0.4 & 0.6 \\ 0.8 & 0.4 & 0.6 & 0.5 & 0.7 \\ 0.6 & 0.2 & 0.4 & 0.3 & 0.5 \end{bmatrix}$	$w'_1 = 0.1, w'_2 = 0.3$ $w'_3 = 0.2, w'_4 = 0.25$ $w'_5 = 0.15$
	$\begin{bmatrix} 0.5 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0.5 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0.5 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.5 & 0.9 & 0.8 & 0.6 & 0.7 \\ 0.1 & 0.5 & 0.4 & 0.2 & 0.3 \\ 0.2 & 0.6 & 0.5 & 0.3 & 0.4 \\ 0.4 & 0.8 & 0.7 & 0.5 & 0.6 \\ 0.3 & 0.7 & 0.6 & 0.4 & 0.5 \end{bmatrix}$	$w'_1 = 0.3, w'_2 = 0.1$ $w'_3 = 0.15, w'_4 = 0.25$ $w'_5 = 0.2$
	$\begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0.5 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0.5 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0.5 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & 0.15 & 0.35 & 0.25 \\ 0.5 & 0.5 & 0.15 & 0.35 & 0.25 \\ 0.85 & 0.85 & 0.5 & 0.7 & 0.6 \\ 0.65 & 0.65 & 0.3 & 0.5 & 0.4 \\ 0.75 & 0.75 & 0.4 & 0.6 & 0.5 \end{bmatrix}$	$w'_1 = 0.125, w'_2 = 0.125$ $w'_3 = 0.3, w'_4 = 0.2$ $w'_5 = 0.25$
	$\begin{bmatrix} 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0.5 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0.5 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0.5 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.5 & 0.4 & 0.2 & 0.3 & 0.1 \\ 0.6 & 0.5 & 0.3 & 0.4 & 0.2 \\ 0.8 & 0.7 & 0.5 & 0.6 & 0.4 \\ 0.7 & 0.6 & 0.4 & 0.5 & 0.3 \\ 0.9 & 0.8 & 0.6 & 0.7 & 0.5 \end{bmatrix}$	$w'_1 = 0.1, w'_2 = 0.15$ $w'_3 = 0.25, w'_4 = 0.2$ $w'_5 = 0.3$

表 8 待评估对象与最终状态评分

Table 8 Objects to be evaluated and final status score			
待评估对象	最终状态评分	待评估对象	最终状态评分
电能表	0.594 0	二次回路	0.562 5
电流互感器	0.605 8	负控终端	0.612 9
电压互感器	0.486 0		

4 结语

本文采用模糊层次分析法对电能计量装置的运行状态进行评估,得出以下结论:

1)采用 FAHP 一方面能系统地分析待评估对

象与各层次指标元素之间的关系,另一方面通过定性分析与定量分析相结合的方法,使电能计量装置状态评估的结果更加准确;

2)在对各层次指标元素权重求解时,通过物联网存储的历史数据与专家评判相结合,改进了现有权重计算的方法,克服了状态量权重主观性太强的缺点;

3)本文的相关计算过程清晰明确,可以通过简单的程序实现各层指标元素权重以及待评估对象最终状态评分的计算。

本文提出的电能计量装置状态评估方法能快速地对电能计量装置各部分运行状态做出评价,有利于解决多目标决策问题,同时也为其他电力设备的状态评估提供参考价值。

#### 参考文献:

- [1] MA C, MA S M, QU Y Q, et al. Electric energy meter state management system based on index analysis system[C]//IEEE 4th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC), Chengdu, China, 2019.
- [2] QIAO J F, ZHU B R, WANG X G, et al. Research on error analysis method of electric energy meter based on independent and same distribution[C]//IEEE 4th International Conference on Cloud Computing and Big Data Analysis (ICCCBDA), Chengdu, China, 2019.
- [3] PORCARELLI D, BALSAMO D, BRUNELLI D, et al. Perpetual and low-cost power meter for monitoring residential and industrial appliances[C]//Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE), Grenoble, France, 2013.
- [4] 王艳芹,王松,李大兴,等.一种关口电能计量装置智能故障诊断及预警技术[J].电力科学与技术学报,2019,34(3):101-107.  
WANG Yanqin, WANG Song, LI Daxing, et al. Research on intelligent fault diagnosis and early warning technology of gateway electrical energy metering device[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(3): 101-107.
- [5] 刘纯,周启涛,汪宏,等.谐波影响下变电站电能分项计量误差测试方法[J].电网与清洁能源,2022,38(2):76-81.  
LIU Chun, ZHOU Qitao, WANG Hong, et al. A study on substation electric energy subitem error control under the influence of harmonics[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(2): 76-81.
- [6] 于海波,王春雨,袁晓蕾,等.基于PCA-SVR的电能计量装置误差评估算法[J].电测与仪表,2020,57(19):140-145.  
YU Haibo, WANG Chunyu, YUAN Xiaolei, et al. Error assessment algorithms for electric energy metering devices based on PCA-SVR[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(19): 140-145.
- [7] 任辉,栗会峰,赵辉,等.电能计量用通信规约安全改造技术[J].中国电力,2021,54(1):167-174.  
REN Hui, LI Huifeng, ZHAO Hui, et al. Security transformation technology for electricity metering communication protocol[J]. Electric Power, 2021, 54(1): 167-174.
- [8] 彭鑫霞,袁瑞铭,丁恒春.谐波条件下电能计量装置运行误差自动检测方法[J].自动化与仪器仪表,2019(6):127-130.  
PENG Xinxia, YUAN Ruiming, DING Hengchuan. Automatic detection method for operation error of electric energy metering device under harmonic condition[J]. Automation & Instrumentation, 2019(6): 127-130.
- [9] 温盛科,杨悦辉,蔡妙妆,等.基于纵横交叉优化灰色模型的电能计量装置状态评估方法[J].电力科学与技术学报,2018,33(3):44-49.  
WEN Shengke, YANG Yuehui, CAI Miaozhuang, et al. Research on state assessment method of electric energy metering device based on crisscross optimization grey model[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(3): 44-49.
- [10] 刘岩,巨汉基,丁恒春,等.基于机器学习决策树的计量设备异常分析[J].自动化与仪器仪表,2018(5):171-174.  
LIU Yan, JU Hanji, DING Hengchun, et al. Abnormality analysis of measurement equipment based on decision tree[J]. Automation & Instrumentation, 2018(5):



- 171-174.
- [11] 范洁,陈霄,周玉. 基于用电信息采集系统的电能计量装置异常智能分析方法研究[J]. 电测与仪表,2013,50(11):4-9.
- FAN Jie, CHEN Xiao, ZHOU Yu. An Intelligent analytical method of abnormal metering device based on power consumption information collection system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2013, 50(11):4-9.
- [12] 栗遇春,葛翔,李发亮,等. 基于熵权法的电能计量装置改造后评价模型[J]. 国外电子测量技术,2018,37(2):25-29.
- LI Yuchun, GE Xiang, LI Faliang, et al. Evaluation model of electric energy metering device based on entropy weight method[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2018, 37(2):25-29.
- [13] 季玉琦,潘超,肖晗,等. 分布式电源电压支撑能力层次分析评价[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(11):163-171.
- JI Yuqi, PAN Chao, XIAO Han, et al. Hierarchical analysis and evaluation of the voltage support capability of distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(11):163-171.
- [14] 张吉军. 模糊层次分析法(FAHP)[J]. 模糊系统与数学,2000(2):80-88.
- ZHANG Jijun. Fuzzy analytic hierarchy process (FAHP)[J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 2000(2):80-88.
- [15] 陶余会. 如何构造模糊层次分析法中模糊一致判断矩阵[J]. 四川师范学院学报(自然科学版),2002,23(3):282-285.
- TAO Yuhui. How to construct fuzzy consistent judgment matrix in fuzzy analytic hierarchy process[J]. Journal of Sichuan Teachers College(Natural Science), 2002, 23(3):282-285.
- [16] 刘会家,江泓,吴田,等. 基于FAHP的 $\pm 800$  kV输电线路带电作业的等电位方式研究[J]. 智慧电力,2021,49(3):80-87.
- LIU Huijia, JIANG Hong, WU Tian, et al. Research on equal potential mode of live working on  $\pm 800$  kV transmission lines based on fuzzy analytic hierarchy process[J]. Smart Power, 2021, 49(3):80-87.
- [17] 王海亮,邓玲,何奇,等. 直觉模糊层次分析法下变压器状态的灰色模糊综合评判模型[J]. 高压电器,2020,56(9):216-222.
- WANG Hailiang, DENG Ling, HE Qi, et al. Grey fuzzy comprehensive evaluation model of transformer state based on intuitionistic fuzzy analytic hierarchy process[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(9):216-222.
- [18] YING C Y, JIE D, FENG Z, et al. Application of variable weight fuzzy analytic hierarchy process in evaluation of electric energy meter[C]//IEEE 2nd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference(IAEAC), Chongqing, China, 2017.