

DOI: 10. 13382/j. jemi. B1902438

基于射频识别技术的电能质量计量评估模型*

陈海宁¹ 沈洁² 马福龙¹ 于洋洋³

(1. 国网青海省电力公司电力科学研究院 西宁 810016; 2. 北京邮电大学 北京 100876;

3. 北京智芯微电子科技有限公司 北京 100192)

摘要:为了解决传统方法中未考虑多参量指标对电能质量的影响、电能质量计量结果准确度较低等问题,提出基于射频识别技术的电能质量计量评估模型。利用射频识别技术采集电能质量 EPC 码,获取电能质量计量评估数据,并以电流总谐波畸变率、三相不平衡和频率偏差等为计量评估指标进行权重计算,获取各项指标综合权重值;引入雷达图分析方法,比较电能质量的多变量,定义综合性的评估函数,反映电能质量情况,实现电能质量综合性评估。以评估稳定性和评估准确性为实验指标的实验结果显示,该模型可实现电能质量的高精度评估,实际应用的可靠性较强。

关键词: 射频识别技术;电能质量;多参量计量;评估

中图分类号: TN247; TM71 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 480. 3

Power quality measurement and evaluation model based on radio frequency identification technology

Chen Haining¹ Shen Jie² Ma Fulong¹ Yu Yangyang³

(1. State Grid QingHai Electric Power Company Research Institute, Xining 810016, China;

2. Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;

3. Beijing Smartchip Microelectronics Technology Co., Ltd., Beijing 100192, China)

Abstract: In order to solve the problems of traditional methods, which do not consider the influence of multi parameter indexes on power quality and low accuracy of power quality measurement results, a power quality measurement and evaluation model based on RFID technology is proposed. The power quality EPC code is collected by using RFID technology to obtain the power quality measurement and evaluation data, and the total harmonic distortion rate of current, three-phase imbalance and frequency deviation are taken as the measurement and evaluation indexes to calculate the weight and obtain the comprehensive weight value of each index; the radar chart analysis method is introduced to compare the multi variables of power quality, and the comprehensive evaluation function is defined to reflect the power quality to achieve comprehensive power quality assessment. The experimental results, which take the evaluation stability and accuracy as the experimental indicators, show that the model can achieve high-precision evaluation of power quality. The reliability of practical application is strong.

Keywords: RFID technology; power quality; multi-parameter measurement; assessment

0 引言

电能质量作为建立切实可行电力市场的重要前提,电能质量计量评估不仅能够对电能质量做出客观、合理的评价,还为建立公平、公正的电力市场提供可行基

础^[1-2]。电能质量评估是通过电表等仪器测量电力系统中的各个电力运行参数或利用建模仿真方法获取电力数据后,根据电能质量评估准则对电能质量进行排序,最后得到评价等级的过程^[3-4]。电能质量精准评估,获取准确的评估结果,是电力市场判断电能优良和定价的重要基础,为确保电力市场秩序的稳定,亟需对电能质量进行合

理的评估。

目前常用的质量评估方法有 Fisher 判别分类法、数据调度控制方法、厂商和批次相结合的分析方法。其中,王继东等^[4]对于电能质量评估过程中存在的复杂性、与单项目指标局限性等问题,将 Fisher 判别分类法应用至电能质量评估中,以此判断光伏并网可靠性。基于已知的国家电能质量标准,利用构建样本获取判别模型,再根据回代估计法实现模型校验,同时对真实系统进行判别分析。苏慧玲等^[5]以研究适用于智能电表电能质量检定的技术为目的,由数据交互和调度控制等方面针对离散型的检定模式进行分析。过程中,以多维角度设计并构建自动化检定数据整体应用结构,通过 WCF 与 MQ 通信方式设计数据交互结构,并给出前馈反馈控制机制;依据自动化建设控制结构,构建时空纵横调度控制方案;根据自动化检定设备类别确定异常和故障类别,同时构建故障知识库,通过故障和处理流程,构建电能质量评价和处理结构。肖坚红等^[6]利用厂商和批次相结合的方式对电能质量进行分析,不仅能够识别电能运行过程中的故障情况,还能识别出家族性不足,完成基于以往人工检验诊断转变成机器学习评估预测。过程中,首先以厂商与生产批次当作对象,利用对电能表运行状态故障率与折旧率等进行分析,把所有电能表分析所得数据进行降维,并整合成非健康度波动曲线的一维数据,通过散点图将数据展示出来。然后利用对电能表运行状态与工作环境等方面进行实时监测,根据机器学习中线性回归法,通过诊断、评估和预测的形式对电能表实际状况进行分析,预测出电能表的非健康度值变化情况。

但上述相关研究成果未考虑多参量指标对电能质量的影响,存在准确性较差等降低实际应用效率的问题,提出基于射频识别技术的电能质量计量评估模型。射频识别技术(radio frequency identification, RFID)是一种通过非直接接触方式进行自动识别的技术,本文创新之处在于根据识别采集卡采集得到的数据,以满足电能计量检定与电力物资质量检测为最终现实需求,进行相应评估,并利用射频识别技术下电能计量检定、电力物资质量检测 and 电能质量评估,3 种测定相辅相成,为电力系统高效运行提供依据。

1 基于射频识别技术的电能质量评估

1.1 基于射频识别技术的电能质量数据采集

电力设备因长期在大自然中暴露,其不仅会受到电力负荷等方面的作用,还会受到雷击和风力等外力的侵害^[14]。各种因素会导致设备逐渐老化与腐蚀。为此,将射频识别技术应用至电力物资质量检测中。在实施中,将具备不同编号的 RFID 标签安置在需要巡检的地点,

巡检人员手握内置 RFID 读写器与 GPRS 通信单元的便携式信号采集装备和作业点中 RFID 标签进行通信,在 PDA 上显示出相应设备信息,相关人员可对设备进行检测,同时将检测结果录入至 PDA 的数据库中,以此为电能质量评估奠定基础,实现电力管理的信息化及规范化。其中 RFID 系统通常是由电子标签、读写器、天线、数据采集器组成,如图 1 所示。

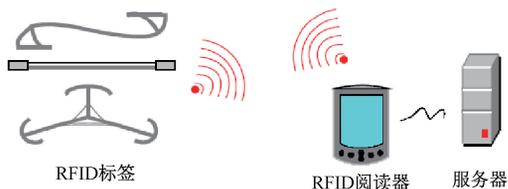
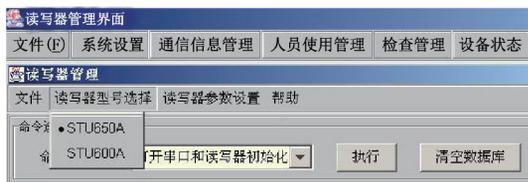


图 1 RFID 系统结构组成
Fig. 1 RFID system structure

- 1) 电子标签,典型的 RFID 系统电子标签是由芯片构成,通过内置天线与射频天线实现通信。
- 2) 读写器,用于读取 RFID 标签信息,其系统结构如图 2 所示。



(a) 读写器管理列表
(a) Reader management list



(b) 读写器管理界面
(b) Reader interface

图 2 读写器结构组成

Fig. 2 Structure of the reader

在图 2(a)中添加读写器型号,菜单就会出现读写器管理界面,如图 2(b)所示,经选择读写器型号后,可进行读写器参数配置。

- 3) 天线,用于传递射频信号。
- 4) 数据采集设备,对于产生的信号或数据进行采集与处理。

结合射频识别的基本结构,规划电能计量数据采集流程。首先设置读写器规格及参数,启动读写器,使电子标签处于读写器天线磁场区域,利用读写器采集电能质

量的EPC码,获取并记录标签时间的时戳,并生成物理节点信息,判断该节点信息是否是入口信息节点,若是入口信息节点,则生成该信息,通过EPC获得电能质量,输出判断得到的电能质量值;若不是入口信息节点,则生成出口信息节点,并进行电能质量获取,完成输出。具体流程如图3所示。

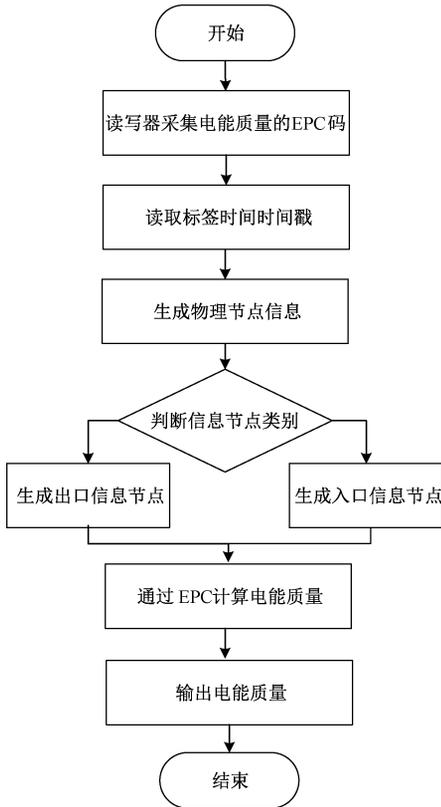


图3 电能计量数据采集流程

Fig. 3 Energy measurement data acquisition process

根据上述流程得到电能计量相关数据分别为设备中通过的实际电流值 I_h 、实际电压值 U_{re} 以及实际工作频率 f_{re} , 将该数据作为电能质量评估的基础指标。为更好地满足电能计量检测需求,需对基础指标进行深度计算,以完善供电系统。

1.2 评估指标计算

为评估采集到的电能质量的数据,需建立评价指标。要得到精准的评估结果,指标选取非常重要。根据我国电能质量评估有关标准,本文将以电压的偏差、波动、闪变、电流总谐波畸变率、三相不平衡、频率偏差为电能质量计量评估指标,为电能计量检定与电力物资质量检测提供理论基础。

1) 电压偏差,在电力系统正常运行过程中,一段时间中电压偏差 U_0 计算式为:

$$U_0 = \frac{U_{re} - U_N}{U_N} \quad (1)$$

式中: U_N 代表系统标准电压值。

在电力系统正常工作时,元件应依据其标准而运行。但在实际中,电力系统运行过程是不断变化的,这样的变化会致使电力系统电压值产生一定变动,在电压变动的过程中,真实电压就会与标准电压值产生脱离的情况,此种情况下就会有电压偏差。电压偏差产生的原因基本为无功功率整体平衡性较差。

2) 电压波动,在实际应用中,电压的波动是符合某种特定条件的持续性变动。在电力系统正常运行中,此种变动出现是随机的。幅度与频度是判断电压变动的基本变量,电压波动表达式为:

$$d = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_0} \quad (2)$$

式中: U_{\max} 和 U_{\min} 代表电压波动中相邻极大极小值。

3) 电压闪变是指人对于光线产生的照射存在主观感视,这是因为电压持续性变动而产生的。闪变觉察率的计算方式为:

$$F = \frac{C + D}{A + B + C + D} \cdot 100\% \quad (3)$$

式中: A 代表对闪变没有任何察觉的总人数; B 代表稍稍能感觉到闪变的总人数; C 代表能够显著性感觉到闪变的总人数; D 代表基本不能忍受闪变的总人数。

4) 谐波,其为一个周期性电气量正弦波分量,谐波含有率表示的是某次谐波分量含量, h 次谐波电流含有率表达式为:

$$H_R = \frac{I_h}{I_l} \cdot 100\% \quad (4)$$

式中: I_l 代表系统标准电流。总谐波畸变率 T_H 指的是波形偏离标准的正弦波形程度,电流总谐波畸变率表达式为:

$$T_H = \sqrt{\sum_{h=2}^m H_R^2} \cdot 100\% \quad (5)$$

5) 三相不平衡,通常情况下,理想三相交流系统会受到各种因素的影响,从而很难达到。在电力系统中,电量三相不平衡程度可表示为:

$$\varepsilon_U = \frac{U_2}{U_1} \cdot 100\% \quad (6)$$

$$\varepsilon_I = \frac{I_2}{I_1} \cdot 100\% \quad (7)$$

式中: ε 代表电量三相不平衡程度; U_1 和 U_2 代表电压正序分量与负序分量的均方根值; I_1 和 I_2 代表电流正序分量与负序分量均方根值。

三相不平衡会给电力系统中的供电方与用电方带来非常大的危害,会增大电网损耗,还会给电力线路增加很大的负担,对于电能计量检定与电力物资质量检测都能提供可靠依据。

6) 频率偏差,多方验证,频率为电能质量评估中的关键指标之一,频率应是维持在标准值并不产生改变的^[15-16]。标准额定频率一般情况下是 50 或者 60 Hz。频率偏差表达式为;

$$d_f = f_{re} - f_N \quad (8)$$

式中: f_N 代表额定频率。

根据确定得到的评估指标,进行指标权重计算,为电能质量评估提供可行依据。

1.3 指标权重计算

首先利用咨询专家的方式获取评价指标的判断矩阵,由此计算得到各专家个体权重向量。然后将层次分析法与熵权法进行结合,针对各专家个体权重均值获取各项指标综合权重值。由此本文根据聚类分析下的层次分析实现主观权重计算。

设定有 n 个行业专家,针对 m 项指标进行评估,所有专家个体权重向量由 $X_i = \{x_{i1}, \dots, x_{im}\} (i = 1, 2, \dots, n)$ 描述。利用聚类分析的方式,获取各权重聚类,归纳每个类别样本数量 $\alpha_j (j = 1, 2, \dots, k)$ 。假设专家 i 个体权重向量是第 j 类,将专家 i 个体权重的置信子定义为:

$$\alpha_i = \frac{\alpha_j}{n} \quad (9)$$

针对类容量比较大的类别,该类别的专家个体权重向量需要赋予的权重系数比较大,否则赋予的权重系数比较小。即,第 i 个专家个体权重向量权重系数 γ_i 与 α_i 为正比例关系,该系数表达式为:

$$\gamma_i = c \cdot \frac{\alpha_i}{n} \quad (10)$$

各专家个体权重向量与相应权重值进行加权,获取主观权重向量的综合值:

$$W = \sum_{i=1}^n \gamma_i X_i \quad (11)$$

依据国家有关标准,将电能质量划分成 m 项指标记作 $I = \{I_1, \dots, I_m\}$, l 个等级定义为 $Q = \{Q_1, \dots, Q_l\}$ 。设定有 b 个样本,标记成 $S_b = \{S_1, \dots, S_b\}$, 样本 S_b 与指标 I_j 相对应的评估值定义为 v_{sj} 。以将各个指标变化范围进行统一为目的,消除量纲产生的干扰,需要对各个等级标准和样本评估值进行处理。

基于熵的定义,将第 j 个指标熵值定义为:

$$H_j = -\frac{1}{\ln b} \sum_{i=1}^b x_{ij} \ln x_{ij} \quad (12)$$

将聚类层次分析法与熵权法相结合获取第 j 个指标综合权重值:

$$v_j = \frac{H_j}{W} \quad (13)$$

其中, $0 \leq v_j < 1, \sum_{j=1}^m v_j = 1$ 。

通过电能质量评估指标权重的计算,得知该指标在整体评价中的相对重要程度。将 1.2 节的指标代入式(13),获取指标的权重值,基于此,构建电能质量计量评估模型。

1.4 电能质量评估

基于上述计算与分析,引入雷达图法实现最终的电能质量评估。以传统的雷达图评估法为依据,使用新特征量提取法,给出综合评估函数,定义各评估点电能质量综合评估结果。

雷达图分析方法作为一种多变量比较的分析技术,本文针对雷达图绘制和指标表征区域进行优化,使其适用于电能质量评估。优化之后的详细过程如下。

1) 通过 1.3 确定指标权重。

2) 将圆心当作起点,并垂直向上引一条射线,该射线的长度为 1 个单位长度值。基于第 1 条射线,利用第 1 个电能质量指标权重值转化成角度值 θ_1 绘制第 2 条射线,剩下各条射线依照同样的道理进行绘制,分别记为 OA^*, OB^*, \dots , 如图 4 所示:

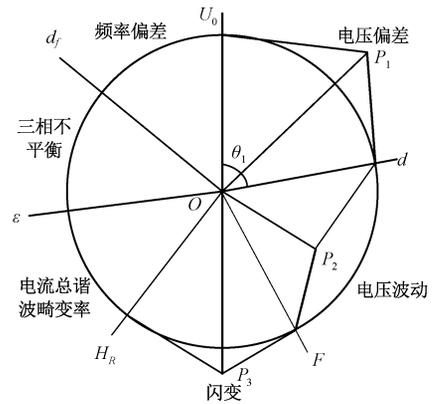


图 4 雷达图

Fig. 4 Radar chart

权重转换成角度值 θ_i 的表达式为:

$$\theta_i = 360^\circ \frac{\pi}{6} v_j \quad (14)$$

3) 将圆心当作起点,针对各扇形区域进行角平分线操作。其中,角平分线表示各指标坐标轴。在各角平分线上描绘出各个评估点指标值,并分别记为 OP_1, OP_2, \dots 。

4) 按照顺序连接各个扇形区外围点,即可构成新雷达图,同时能够基于雷达图面积和边长及周长等一系列特征向量,针对各个评估点电能质量进行评估。

以反映电能质量情况为目的,将雷达图总面积 S_i^* 与边长平方和 L_i^* 当作雷达图特征量。选取这两个特征量集合平均值当作评估指标,则评估模型可表示为:

$$f(S_i^*, L_i^*) = \sqrt{S_i^* L_i^*} \quad (15)$$

2 实验与仿真分析

为了验证基于射频识别技术的电能质量计量评估模型有效性,进行一次相关性实验。将本文所提基于射频识别技术的电能质量计量评估模型应用在某省电能质量监测平台。该监测平台使用 PQSYS3.0 内核,后台数据库为 Oracle、PI,整个系统包含 3 层混合框架,监测主站、子系统以及监测设备。实验平台搭建在 MATLAB 上,实验指标为评估准确性。电能质量监测平台如图 5 所示。



(a) 电能质量监测主站
(a) Power quality monitoring main station



(b) 电能质量监测子系统
(b) Power quality monitoring subsystem

图 5 电能质量监测平台

Fig. 5 Power quality monitoring platform

分别设立 4 个观测点进行电能质量评估,测量结果如表 1 所示。

表 1 观测点实测数据

Table 1 Observed data of observation points

评估指标	观测点实测指标值			
	观测点 1	观测点 2	观测点 3	观测点 4
电压偏差/%	3.110	6.582	3.421	5.461
电压波动/%	1.39	1.48	1.88	1.26
电压闪变/%	0.463	0.851	0.659	0.798
谐波畸变率/%	1.69	4.35	2.48	3.48
三相不平衡度/%	0.79	1.49	1.42	1.69
频率偏差/Hz	0.089	0.148	0.211	0.182

结合 1.3 节对表 1 实测数据进行指标权重计算,获取计算结果,如表 2 所示。

为分析本文方法电能质量计量评估模型的指标权重计算的稳定性,以计算得到的频率偏差的综合权重为指

表 2 电能质量的各指标权重

Table 2 Power index weights

指标	主观权重	客观权重	综合权重
电压偏差	0.249	0.191	0.274
电压波动	0.099	0.208	0.149
电压闪变	0.089	0.156	0.175
谐波畸变率	0.319	0.598	0.876
三相不平衡	0.181	0.264	0.344
频率偏差	0.245	0.141	0.354

标,输入到仿真软件中,进行 25 次测量实验,分析模型的稳定性。采用 MATLAB 7 进行仿真实验,将本文方法与文献[5-7]方法进行对比,对比实验结果如图 6 所示。

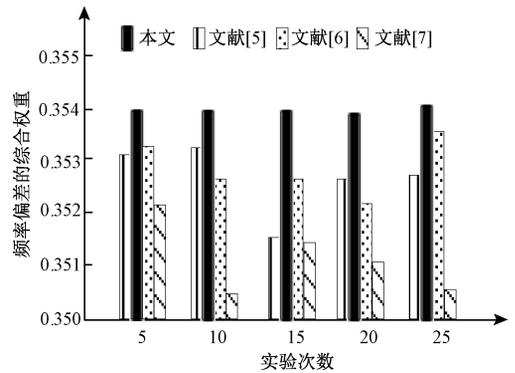


图 6 不同研究成果评估稳定性对比

Fig. 6 Comparison of evaluation stability of different research results

由图 6 可知,相比献[5-7]成果,基于射频识别技术的电能质量计量评估模型具有良好的评估性能,其综合权重基本保持在 0.354 左右,稳定性得到保证,因为该模型为了更好地评估出电能质量,以电压偏差、电压波动与闪变、谐波、三相不平衡和频率偏差等为评估指标,并通过聚类层次分析法与熵权法相结合得到了各指标综合权重值,降低了指标权重赋值存在的主观性,提升了评估准确性,增强了方法运行的整体性能。

3 结论

电能不仅仅是一种能源,还是一种特殊商品在市场竞争中有着很高的竞争地位,电能质量的高效保障与优质优价是其关键竞争力。完善及构建科学的电能质量计量评估模型式供电两方的基础保障,也是高品质电能提供的重要方式。针对当前相关成果存在的问题,提出基于射频识别技术的电能质量计量评估模型。利用射频识别技术获取电能相关数值,提出具有代表性的评估指标,并赋予指标权重,利用雷达图方法实现电能质量评估。实验结果表明,所提模型评估结果鲁棒性强,且评估稳定

性得到保证,表示所建模型是一种可应用至实际的电力系统中。在上述电能质量评估过程中,对电压质量方面分析较多,电流方面考量的比较少,在实际应用中,电压质量涉及到的更多一些,但下一步研究应该将电流更好地结合在电能质量评估中,以拓展评估性能,完善评估模型,进一步提高评估精度。

参考文献

- [1] 甄昊涵,沈华. 电能表现场检验数据挖掘研究[J]. 电子技术应用, 2017, 43(4):76-78.
ZHEN H H, SHEN H. Research on data mining of on-site inspection of electric energy meter [J]. Electronic Technology Application, 2017, 43 (4): 76-78.
- [2] 韩柳,李蕊,羨慧竹,等. 基于失效机理的电能表可靠性提升方法应用[J]. 科技通报, 2017, 33(7):193-196.
HAN L, LI R, XIAN H ZH, et al. Application of energy meter reliability improvement method based on failure mechanism [J]. Science and Technology Bulletin, 2017, 33 (7): 193-196.
- [3] 薛阳,杜新纲,张蓬鹤,等. 电能表故障与地域气候、行业负荷关系研究[J]. 中国电力, 2017, 50(8):98-105.
XUE Y, DU X G, ZHANG P H, et al. Study on the relationship between energy meter failure and regional climate and industry load [J]. China Electric Power, 2017, 50 (8): 98-105.
- [4] 王继东,庞文杰. Fisher 判别分类法在光伏并网系统稳态电能质量评估中的应用[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(3):50-54.
WANG J D, PANG W J. The application of Fisher discriminant classification method in the assessment of steady-state power quality of photovoltaic grid-connected systems [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37 (3): 50-54.
- [5] 苏慧玲,王忠东,蔡奇新,等. 大规模智能电能表自动化检定的关键技术[J]. 中国电力, 2016, 49(6):126-131.
SU H L, WANG ZH D, CAI Q X, et al. Key technologies for automatic verification of large-scale smart energy meters [J]. China Electric Power, 2016, 49 (6): 126-131.
- [6] 肖坚红,赵永红,薛晓茹,等. 电能表健康度分析及整体运行状态预测方法[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(7):77-80,86.
XIAO J H, ZHAO Y H, XUE X R, et al. Energy meter health analysis and overall operating state prediction method [J]. Power Grid and Clean Energy, 2016, 32 (7): 77-80,86.
- [7] 陈景霞,王学伟,朱孟. 智能电能表有功能动态测量的 SDPA 算法[J]. 工程科学学报, 2018, 40(12):114-120.
CHEN J X, WANG X W, ZHU M. SDPA algorithm for active energy dynamic measurement of smart energy meters [J]. Journal of Engineering Sciences, 2018, 40 (12): 114-120.
- [8] 李国昌,李蕊,李秀芳,等. 高精度三相电能表的自动化并行校检方法[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(20):265-270.
LI G CH, LI R, LI X F, et al. Automated parallel calibration method for high-precision three-phase energy meters [J]. Science and Technology and Engineering, 2018, 18 (20): 265-270.
- [9] 周芝梅,赵东艳,张海峰,等. 基于 IR46 标准的双芯电能表主控关键技术研究[J]. 电子技术应用, 2017, 43(10):7-11.
ZHOU ZH M, ZHAO D Y, ZHANG H F, et al. Research on the key technology of dual-core electric energy meter based on IR46 standard [J]. Electronic Technology Application, 2017, 43 (10): 7-11.
- [10] 张科,龚仁喜,王伟. 关于电网供电电能质量优化检测研究[J]. 计算机仿真, 2017, 34(6):116-120.
ZHANG K, GONG R X, WANG W. Research on the optimization detection of power quality of power grid [J]. Computer Simulation, 2017, 34 (6): 116-120.
- [11] 杨智勇,刘瑞敏,李波,等. 基于 RFID 的电能计量设备电子封印管理系统的设计与实现[J]. 软件, 2017, 38(7):83-88.
YANG ZH Y, LIU R M, LI B, et al. Design and implementation of electronic seal management system for electric energy measurement equipment based on RFID [J]. Software, 2017, 38(7):83-88.
- [12] 邓春红,左开中,潘涛. 一种 RFID 标签所有权完全转移协议[J]. 信息与控制, 2016,45(6):677-683.
DENG CH H, ZUO K ZH, PAN T. An RFID tag ownership transfer agreement [J]. Information and Control, 2016,45(6):677-683.
- [13] 孔令荣. 一种适用于低频 RFID 标签的 ASK 解调电路[J]. 计算机与数字工程, 2016,44(6):1171-1175.
KONG L R. An ASK demodulation circuit suitable for low-frequency RFID tags [J]. Computer and Digital Engineering, 2016,44(6):1171-1175.
- [14] 蒋政君,田海博,张方国. 基于 PUF 的 RFID 防伪技术研究综述[J]. 信息安全. 2016(4):38-43.
JIANG ZH J, TIAN H B, ZHANG F G. Overview of research on RFID anti-counterfeiting technology based on

- PUF [J]. Information Network security, 2016 (4): 38-43.
- [15] 冯双. 铅封技术在防窃电中的应用[J]. 机电信息, 2016(9): 78-79.
FENG SH. Application of lead seal technology in preventing electricity theft [J]. Electromechanical Information, 2016 (9): 78-79.
- [16] 周振柳,李丰鹏,郑安刚. 轻量级安全的RFID电能计量封印的设计与实现[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(2):304-310.
ZHOU ZH L, LI F P, ZHENG AN G. Design and implementation of lightweight and secure RFID energy metering seal [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(2):304-310.
- [17] 张亦弛,郭晓涛,聂梅宁,等. 一种射频功放“谐波+互调”复杂非线性测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(5):1158-1163.
ZHANG Y CH, GUO X T, NIE M N, et al. A complex nonlinear measurement method for "harmonic + intermodulation" of RF power amplifier [J]. Journal of Chinese Instrumentation, 2016, 37 (5): 1158-1163.
- [18] 苟元潇,傅佳辉,林茂六,等. 基于矢量测量的射频微波器件非线性参数化行为建模技术评述[J]. 仪器仪表学报, 2013,34(6):120-130.
GOU Y X, FU J H, LIN M L, et al. Review of nonlinear parametric behavior modeling technology of RF microwave devices based on vector measurements [J]. Journal of Chinese Instrumentation, 2013, 34 (6): 120-130.
- [19] 孙金龙,林茂六,吴芝路. 射频器件时域非线性行为建模综述[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(11): 1565-1573.
SUN J L, LIN M L, WU ZH L. Overview of modeling of nonlinear behavior of RF devices in time domain [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29 (11): 1565-1573.
- [20] 刘旭明,唐求,邱伟,等. 基于ZINB层次贝叶斯智能电能表的可靠性预估[J]. 电子测量与仪器学报, 2019,33(7):28-36.
LIU X M, TANG Q, QIU W, et al. Reliability prediction of Bayesian smart electric energy meter based on ZINB hierarchy [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33 (7): 28-36.

作者简介



陈海宁, 2010年于重庆大学获得学士学位,现为国网青海省电力公司营销服务中心电力工程专业工程师,主要研究方向为电能计量领域。

E-mail:chengfang088125003@163.com

Chen Haining received his B. Sc. degree from Chongqing University in 2010. Now he is an engineer of electric power engineering in Marketing Service Center of State Grid Qinghai Electric Power Company. His main research interest includes electric energy metering.



沈洁,分别在1997年于上海交通大学获得学士学位,2000年和2010年于北京邮电大学的获得硕士学位和博士学位,2014年获得电子学教授级高级工程师的职称,主要研究方向为无线和光通信、数据通信、量子信息和微电子学。

Shen Jie received B. Sc. from Shanghai Jiaotong University in 1997 and a M. Sc. and Ph. D. from Beijing University of Posts and Telecommunications in 2000 and 2010, respectively, obtained the title of professor-level senior engineer in electronics in 2014. His main research interests include wireless and optical communication, data communication, quantum information and microelectronics.



马福龙,2016年于南京理工大学获得学士学位,现为国网青海省电力公司营销服务中心助理工程师,主要研究方向为电能计量领域。

Ma Fulong received his B. Sc. degree from Nanjing University of Science & Technology in 2016. Now he is an assistant engineer in Marketing Service Center of State Grid Qinghai Electric Power Company. His main research interest includes electric energy measurement field.



于洋洋,2009年于内蒙古大学获得学士学位,现为北京智芯微电子科技有限公司销售工程师,主要研究方向为用电信息采集系统。

Yu Yangyang received his B. Sc. degree from Inner Mongolia University in 2009. Now he is a sales engineer in Beijing Smartchip Microelectronics Technology Company Limited. His main research interest includes electricity information collection system.