DOI: 10.7667/PSPC180967

电能计量装置健康度的综合评估与趋势预测方法

刘春雨[1]，刘自发[2]，罗 群[1]，葛磊蛟[3]，邓文栋[4]，王月明[1]

(1. 国网天津市电力公司电力科学研究院，天津 300384；2. 华北电力大学电气与电子工程学院，北京 102206；
3. 天津大学电气信息与自动化工程学院，天津 300072；4. 烟台东方威思顿电气有限公司，山东 烟台 264003)

摘要：为有效解决电能计量装置的计划检修任务重、重复检测、针对性不强等问题，提出了一种电力计量装置健康度的综合评估方法以及电能计量装置健康度的趋势预测方法，为电能计量装置的状态在线检修优化提供辅助决策。首先，从电能计量装置的运行状态、配置方式以及运行工况等方面，提出了一种电能计量装置的健康度综合评价指标体系。并采用序关系分析法求取电能计量装置综合评估指标的赋权值，从而实现电能计量装置健康度的综合评价。其次，基于电能计量装置的综合评估结论，提出了一种基于灰色 GM(1,1)模型的电能计量装置健康度预测方法，并通过天津市电力公司的实际运行进行案例验证。健康度评价和预测的结果可对电能计量装置的现场状态检修进行有效指导，并能及时发现电能计量装置的运行隐患，为电能计量装置状态检修策略优化提供理论依据。

关键词：电能计量装置；状态检修；序关系分析法；灰色模型

A comprehensive evaluation and trend prediction method of health degree for electric energy measuring devices

LIU Chunyu[1], LIU Zifa[2], LUO Qun[1], GE Leijiao[3], DENG Wendong[4], WANG Yueming[1]

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300384, China; 2. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;
3. School of Electrical Information and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
4. Yantai Orient Wisdom Electric Co. Ltd, Yantai 264003, China)

Abstract: In order to solve the problems of electric energy measuring devices effectively, including heavy maintenance task, duplicate detecting, and being targeted weakly, a comprehensive evaluation and trend prediction method of health degree of electric energy measuring devices is proposed, which provides an auxiliary decision for the state online maintenance optimization of electric energy measuring devices. Firstly, a comprehensive evaluation indicator system is proposed from running state, configuration mode and operation condition of electric energy measuring devices. The order relation analysis method is used to calculate the weighting of comprehensive evaluation indicator system, so as to realize the comprehensive evaluation of the health degree of electric energy measuring devices. Secondly, based on the comprehensive evaluation conclusion of electric energy measuring devices, a trend prediction method based on the grey GM(1,1) model is proposed to predict the health degree of electric energy measuring devices. Finally, it is verified by actual operation in Tianjin. The results of health degree evaluation and trend prediction can effectively guide to the field status maintenance of electric energy measuring devices and discover the hidden dangers, which can provide a theoretical basis for the strategy optimization of state maintenance of electric energy measuring devices.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900105).

Key words: electric energy measuring devices; status maintenance; sequential relation analysis; grey model

0 引言

电能计量装置是电力企业营销和市场化的重要组成部分，其准确性是维持电力市场公平有序运转的关键。于是，电能计量装置日常运维的一个重要工作是现场检测，当前主要采用固定周期人工现场检验模式[1-3]。文献[4]DL/T448-2000《电能计量装置技术管理规程》规定，I 类、II 类和 III 类电能表

基金项目：国家重点研发计划项目资助(2016YFB0900105)

的现场检验周期分别为 3 个月、6 个月和 1 年。这种固定周期检验模式未考虑不同批次不同厂家的电能计量装置运行状态随机性，因此，难以适应电能计量技术和电力公司精细化管理的要求。其主要原因有：一方面，电网规模不断扩大，电能计量装置的应用越来越多，国家电网公司范围内智能电表安装的数量已达到了数亿只，在现有的人力条件下实现全覆盖的周期性现场检验非常困难。另一方面，传统周期性现场检验工作效率低、检测严谨性和针对性不强，无法对智能电表进行实时监测和故障预警，也难以及时发现两次现场检验之间出现的运行故障及原因。

当然，近年来关于电能计量装置的状态检测方法，国内外相关专家学者也进行了一些研究。国外对状态检测的研究起步相对较早，其侧重于在智能电网中的应用，将数据和信息通过远程计量装置传回数据中心进行分析[5-8]，文献[6]开发了一种在线状态检测系统，让专业技术人员随时了解计量装置状态。文献[7]提出了一种新型电能计量装置的状态远程检测方法，该方法能有效检测智能电表的数据并判断是电表故障还是存在窃电行为。文献[8]基于状态估计的负荷预测方法来检测仪表故障或篡改，当预测值和实际值相差超过阈值时，会进行故障判断和远程报修。国内对电能计量装置的状态检测侧重于状态评估和故障判断，文献[9]对关口电能计量装置的状态评估提出了一套相关理论方法，通过分析传回的检测数据可以在一定程度上进行故障分析。文献[10]从可靠性、经济性、稳定性等多方面对电能计量装置运行情况进行了综合评价。文献[11]对智能电表的运行状态提出了一套综合评估指标体系，开发了在线的评价平台，一定程度上可以实现同一批次智能电表的好坏评定。简言之，国内外关于智能电表的状态检测，大多数学者从智能电表的运行可靠性入手进行分析，但是在电能计量装置健康度评价方面涉及不多。

同时，随着用电信息采集系统和电力计量生产调度平台的建设，电能计量装置运行信息的在线监测和状态评估已经有了较好的基础数据条件。于是，基于现有系统平台所采集的电能计量装置基础数据，针对原来固定周期现场检验模式的缺陷，开展基于在线监测信息的电能计量装置动态检验非常必要。为此，本文提出了一种电能计量装置健康度的评价和预测方法，实现了对电能计量装置健康度的综合评估和趋势预测，为在电能计量装置动态检测中提前安排现场检修计划、统筹人力资源等针对性布局提供辅助决策依据，对电力计量精益化管理工作具有重要的实用价值。

1　电能计量装置健康度的综合评价

电能计量装置一般由电能表、电压互感器、电流互感器和二次回路等 4 个部分构成[12-14]，而每个组成部分的运行稳定性均受到多个不同因素影响，因此对其进行运行状态评估和故障机理分析就相当复杂。其主要原因：一方面，电能计量装置包含多个组成部分，每个组成部分均缺一不可，各个部分相对重要性程度较难衡量；另一方面，电能计量装置的运行与很多因素相关，其健康度评价指标与各个影响因素之间的关系也较难定量分析。因此，本文按照电能计量装置的不同组成部分构建电能计量装置健康度的综合评估指标体系，然后采用序关系分析法对电能计量装置综合评估指标的赋权值进行求取，从而实现对电能计量装置健康度准确评价。

1.1　电能计量装置健康度的综合评估指标

电能计量装置健康度主要受限于运行状态、配置方式以及运行工况等多种因素[15-18]，且电能计量装置不同组成部分健康度的作用机理差异较大。为此，在实际的综合评估过程中，先对电能计量装置的 4 个部分分别进行评分，然后依次进行加权综合，从而得到最终的健康度评分。

(1) 电能计量装置运行状态 M_1 评价

电能计量装置运行状态评价指标主要包括电能计量装置的设备合格率 M_{11}、入网检测成功率 M_{12}、运行安装环境标准化率 M_{13} 以及家族缺陷 M_{14} 等，下面分别对计算公式进行详述。

$$M_{11}=U/N\times100\% \tag{1}$$

式中：M_{11} 是设备合格率；U 是安装调试成功的设备总数；N 是工程中实际安装的设备总数。

$$M_{12}=B/C\times100\% \tag{2}$$

式中：M_{12} 是入网检测成功率；B 是一个批次内抽查的电能计量装置成功的总数；C 是一个批次内电能计量装置总数。

$$M_{13}=D/C\times100\% \tag{3}$$

式中：M_{13} 是电能计量装置运行安装环境标准化率；D 是一个批次内抽查的电能计量装置按照电能计量装置安装规程进行标准化安装总数；C 是一个批次内电能计量装置总数。

$$M_{14}=\begin{cases}\text{优} & 100\ge\theta\ge85\\ \text{良} & 85>\theta\ge70\\ \text{中} & 70>\theta\ge60\\ \text{差} & \theta<60\end{cases} \tag{4}$$

式中：M_{14} 是产品本身的设计缺陷，是各个供应商提供的基本产品性能数据，可从计量生产调度系统读取该数据；θ 是以一年为评估周期，电网企业对电子式互感器供应商的产品情况进行综合打分，以 100 分为基准，上一年度发生产品缺陷一次扣除 10 分，可从计量生产调度系统读取。

电能计量装置 4 个不同组成部分可获取不同的评价值，于是电能计量装置运行状态 g 可表示为

$$g=\omega_S g_S+\omega_C g_C+\omega_P g_P+\omega_D g_D \tag{5}$$

式中：g_S、g_C、g_P 和 g_D 分别为对电能表、电流互感器、电压互感器以及二次回路 4 个部分的运行状态评分；ω_S、ω_C、ω_P 和 ω_D 为组成电能计量装置 4 个部分的评分权重值，且有

$$\omega_S+\omega_C+\omega_P+\omega_D=1 \tag{6}$$

(2) 电能计量装置配置方式 M_2 评价

电能计量装置的配置方式重点考虑配置过程中可能产生的错误，其评价指标主要包括典型配置方式率 M_{21}、型号匹配度 M_{22} 和封闭性能 M_{23} 等，其计算公式如下。

$$M_{21}=F/D\times 100\% \tag{7}$$

式中：M_{21} 是电能计量装置典型配置方式率；F 是同一批次配置有三种以上通信方式的电能计量装置总数；D 是同一批次电能计量装置的总数。

$$M_{22}=X/T\times 100\% \tag{8}$$

式中：M_{22} 是型号匹配度；X 是一定区域范围内同一批次同一厂家同一型号数量最大的电能计量装置总数；T 是一定区域范围内的电能计量装置总数。

$$M_{23}=Y/S\times 100\% \tag{9}$$

式中：Y 是一个区域内同一批次具有封闭性能的电能计量装置总数；S 是一个区域内同一批次电能计量装置总数。于是电能计量装置的配置方式评分 k 可表示为

$$k=\omega_S k_S+\omega_C k_C+\omega_P k_P+\omega_D k_D \tag{10}$$

式中：k_S、k_C、k_P 和 k_D 分别为对电能表、电流互感器、电压互感器以及二次回路 4 个部分的配置方式评分。

(3) 电能计量装置运行工况 M_3 评价

电能计量装置的运行工况指标主要包括运行温度 M_{31}、运行湿度 M_{32}、运行的负荷率 M_{33} 和运行磁场强度 M_{34} 等，其中，M_{31}，M_{32} 和 M_{34} 从用电信息采集系统中读取相关数据，M_{33} 可表示为

$$M_{33}=V/Z\times 100\% \tag{11}$$

式中：M_{31} 是运行的负荷率；V 是一定区域范围内同一批次电能计量装置每月具有正常数据的总数；Z 是一定区域范围内同一批次电能计量装置的安装总数。于是电能计量装置运行工况 r 可表示为

$$r=\omega_S r_S+\omega_C r_C+\omega_P r_P+\omega_D r_D \tag{12}$$

式中，r_S、r_C、r_P 和 r_D 分别为对电能表、电流互感器、电压互感器以及二次回路 4 个部分的运行工况评分。

综合考虑影响电能计量装置健康度的运行状态、配置方式以及运行工况等因素，电能计量装置健康度整体评分 h 可表示为

$$h=\omega_G g+\omega_K k+\omega_R r \tag{13}$$

式中：g 为电能计量装置运行状态评分；k 为配置方式评分；r 为运行工况评分；ω_G、ω_K 和 ω_R 分别为运行状态、配置方式、运行工况三部分评分的权值，且有

$$\omega_G+\omega_K+\omega_R=1 \tag{14}$$

从式(1)—式(6)不难发现，电能计量装置健康度评价的重点之一是确定各个权重参数，本文采用序关系分析法求取赋权值，下面进行详细阐述。

1.2 序关系分析法

假设对一个事物的评价涉及 K 个因素，在序关系分析法中，按照重要性对 K 个因素建立序关系，即

$$F_1\succ F_2\succ\cdots\succ F_K \tag{15}$$

式中：$F_k, k=1,\cdots,K$ 表示影响评价的第 k 项因素，$F_{k-1}>F_k$ 表示前者重要性高于后者。应用序关系评价法依据权重大小决定 F_k 的最终位置。令 ω_k 是 F_k 的权重，并规定相邻部分 F_{k-1} 和 F_k 的重要性比值为

$$\eta_k=\begin{cases}1 & k=1\\ \omega_{k-1}/\omega_k & k=2,\cdots,K\end{cases} \tag{16}$$

各因素相互间的重要程度比值，依据所选择咨询的相关专家意见进行判断，专家判定按照表 1 进行。

表 1 相邻部分重要程度比值判断方法

Table 1 Judgment method of ratio of importance degree to adjacent parts

描述	相邻因素重要性比值 η_k
因素 F_{k-1} 和 F_k 具有同样的比重	1.0
因素 F_{k-1} 的比重稍微高于因素 F_k 的比重	1.2
因素 F_{k-1} 的比重明显高于因素 F_k 的比重	1.4
因素 F_{k-1} 的比重强烈高于因素 F_k 的比重	1.6
因素 F_{k-1} 的比重极端高于因素 F_k 的比重	1.8

其中，重要性比值 η_k 也可以取表中所给数值之间的数，以细化不同因素间的相对重要程度。根据选择的专家，对各因素进行相对重要性判断后，各

部分评分的权值系数可以由式(17)得到，从而获取各个影响因素的排序，即指标的权重值。

$$\begin{cases}\omega_K=(1+\sum_{k=2}^{K}\prod_{i=k}^{K}\eta_i)^{-1}\\ \omega_{k-1}=\eta_k\omega_k,\ k=2,\cdots,K\end{cases}\tag{17}$$

1.3 电能计量装置综合评分

为进行有效的电能计量装置健康度的综合评估，首先，对电能计量装置的 4 个组成部分进行重要性排序，再根据表 1 进行相对重要性判断。先令电能表、电流互感器、电压互感器以及二次回路 4 部分的重要性依次降低，且令它们的重要性比值向量为 $\boldsymbol{\eta}_1$=[1.9,1.7,1.5,1]。然后将 $\boldsymbol{\eta}_1$ 代入式(17)即可得到 4 个组成部分的评分权重值 ω_S、ω_C、ω_P 和 ω_D。最后，将这 4 个权重值代入式(5)、式(10)和式(12)即可分别得到电能计量装置的运行状态、配置方式以及运行工况的评分。

最后，先令电能计量装置运行状态、配置方式以及运行工况等之间的重要性向量为 $\boldsymbol{\eta}_2$=[1.8,1.3,1]，通过式(14)得到三个因素的权重值 ω_G、ω_K 以及 ω_R；然后，将权重值代入式(13)即可得到计量装置健康度的最终整体评分。

2 电能计量装置健康度预测方法

电能计量装置健康度的综合评价为其运行状态预报和故障预警提供了一定的借鉴[19-25]，即先通过对同一批次的电能计量装置进行全覆盖的健康度评定，然后依据评定分值大小排序来制定动态检修计划，代替之前的固定周期检修模式，一定程度上提高了电能计量装置运行检修的针对性。简言之，健康度评定分值较高的电能计量装置，说明其运行稳定，可跳过下一周期的现场检验；健康度评定分值较低的电能计量装置，则需立刻或者尽快进行现场检验，及时排除风险。但是，电能计量装置健康度评定分值的境界值，一般按照管理约定或者专家经验而确定，缺乏定量分析手段；另一方面，受限于实际的人员、设备等电能计量装置运维投入，如果检测临界分值偏高导致在同一时间需要现场检修的电能计量装置过多，则会造成人力资源和检验装置方面的紧张。另外，一般对于不同批次不同类型的电能计量装置，根据其重要程度不同以及产生故障后的危害大小，也应当采取不同的健康度分值标准和检验力度。为此，针对海量电能计量装置检修针对性不够强而任务重的困境，为有效地进行精准的电能计量装置在线运维检测，提出了一种基于灰色模型理论的电能计量装置健康度趋势预测方法。

实际上影响电能计量装置健康度的机理复杂多变，一般通过影响因素直接分析进行健康度预测难度较大，为此，本文基于同一批次电能计量装置健康度评定分值作为输入样品数据，通过灰色 GM(1,1)模型对电能计量装置健康度进行趋势预测。

假设通过前期同一批次电能计量装置的健康度评价得到了 N 个健康度评分值，记为 $h^{(0)}(n)$, n=1,⋯, N，其一次累加数列为

$$h^{(1)}(n)=\sum_{i=1}^{n}h^{(0)}(i),n=1,2,\cdots,N\tag{18}$$

GM(1,1)的差分方程模型为

$$x^{(0)}(n)+az^{(1)}(n)=b\tag{19}$$

式中：a 称为发展系数；b 称为灰作用量；序列 $z^{(1)}(n)$ 为 $h^{(1)}(n)$的邻值生成序列，且有

$$z^{(1)}(n)=0.5h^{(1)}(n)+0.5h^{(1)}(n-1)\tag{20}$$

根据已有的 N 个健康度评分值，用最小二乘法求出 GM(1,1)中参数 a 和 b 的估计值。令 $\boldsymbol{y}$=[$h^{(0)}$(2), $h^{(0)}$(3), ⋯ , $h^{(0)}$(N)] 以及 $\boldsymbol{B}$=[(–$z^{(1)}$(2), ⋯ , –$z^{(1)}$(N))$^{\mathrm{T}}$ $\boldsymbol{1}_N$]，其中 T 表示转置，$\boldsymbol{1}_N$ 表示长度为 N 的全 1 列向量。参数 a 和 b 的估计值可以由式(21)给出。

$$\begin{bmatrix}\hat{a}\\ \hat{b}\end{bmatrix}=(\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B})^{-1}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y}\tag{21}$$

GM(1, 1)差分方程模型对应的白化模型微分方程为

$$\frac{\mathrm{d}h^{(1)}(t)}{\mathrm{d}t}+ah^{(1)}(t)=b\tag{22}$$

该方程的解为

$$h^{(1)}(t)=(h^{(0)}(1)-\frac{b}{a})\mathrm{e}^{-a(t-1)}+\frac{b}{a}\tag{23}$$

从而得到一次累加数列的预测值为

$$\hat{h}^{(1)}(n+1)=(h^{(0)}(1)-\frac{b}{a})\mathrm{e}^{-an}+\frac{b}{a},\ n\geq1\tag{24}$$

式中：$h^{(0)}$(1)为参与预测的已知评分值中的第一个数；a 和 b 为式(22)计算得到的模型参数估计值。得到一次累加数列的预测值后，可根据式(25)计算获得电能计量装置健康度评分值的预测值，从而可根据趋势预测值进行动态检测参考。

$$\hat{h}^{(0)}(n+1)=\hat{h}^{(1)}(n+1)-\hat{h}^{(1)}(n),n\geq1\tag{25}$$

当然，在实际电能计量装置的现场检测过程中，当电能计量装置出现了影响运行的偶发故障，根据用户报修信息，一般立刻安排人员进行现场检修。同时，通过电能计量装置健康度趋势预测，获知电能计量装置在未来某个时间段的健康度评价，可预先发现可能存在的运行隐患，从而事先进行人员和

装置的安排，可实现合理调整装置检修的时间，推动整个电能计量装置检验工作有序平稳进行。

3　工程案例分析

为验证本文所提方法的有效性，以天津市电力公司津南区、武清区和城西区的 22 771 只电能计量装置的基础数据为例进行案例分析。其中，津南区电能计量装置 I 类、II 类、III 类分别为 100 只、823 只、5 390 只；武清区电能计量装置 I 类、II 类、III 类分别为 125 只、917 只、6 759 只；城西区电能计量装置 I 类、II 类、III 类分别为 100 只、843 只、7 714 只。

首先，依托计量生产调度平台、用电信息采集系统以及营销业务应用系统所采集的信息，依据第 1 节的电能计量装置健康度综合评价方法，选定 2017 年 5 月 1 日为例，以一天为单位对津南、武清和城西区域 I 类 225 个电能计量装置进行一次健康度评价，评分值分布区间情况如图 1 所示。

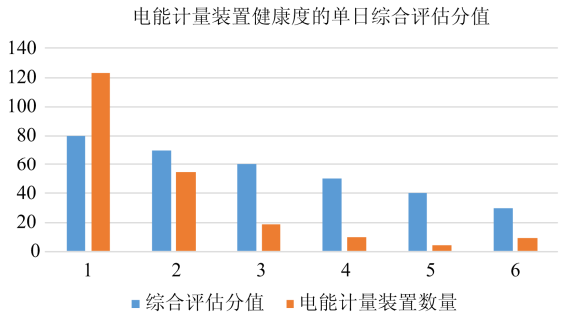


图 1　电能计量装置健康度的单日综合评估分值

Fig. 1 One-day comprehensive evaluation score of health degree of electric energy measuring devices

其次，选取根据 2017 年 5 月至 6 月的前 60 天电能计量装置的数据，对津南、武清和城西共计 22 771 只电能计量装置进行全覆盖的健康度综合评价，从而形成 GM(1,1)预测值的基本输入数据样品。预测 2017 年 6 月份后 30 天的健康度，其预测分值低于 30 分的电能计量装置情况如表 2 所示。其中，I 类、II 类、III 类电能计量装置预测分值低于 30 分的数量分别为 18 只、120 只、1 164 只。

表 2　电能计量装置的预测结果

Table 2 Prediction of energy metering devices

电能计量装置投运总数/只	实际出现故障的电能计量装置总数/只	预测值低于 30 分的电能计量装置总数/只
22 771	1 253	1 302

最后，为进一步有效验证所提方法的科学性，从 2017 年 7 月至 2018 年 3 月将电能计量装置检验模式中的检验周期设为 30 天，根据电能计量装置预测分值低于 30 分为标准，在每月 1 号对需要检验的电能计量装置进行统一检验，然后进行统计核实分析。

经过一段时间试运行后发现，在电能计量装置的现场检验过程中，由于不同类型、不同批次电能表负担的电力交换计量不同，其对于电力计量工作的重要程度也不同，完全用一个绝对的分值(评估分值或者预测分值低于 30 分)仍然难以满足运行需求。例如 III 类电能计量装置数量庞大，且用户的影响较小，完全按照 30 分警戒值标准，会导致班组工作量过大。经过多次的内部专家会议和结合实际的检测任务，结合国网的《电能计量装置技术管理规程》，对不同类型的电能计量装置，规定了不同的健康度警戒值，如表 3 所示。

表 3　电能表健康度警戒值

Table 3 Health vigilance value of electric energy meter

电能表类型	警戒值
I	40
II	30
III	20

综上所述，不难发现：

1) 电能计量装置综合评价和趋势预测后，将电能计量装置健康度警戒值确定为 30 分。在 22 771 只电能计量装置中实际健康度预测值低于 30 分的电能计量装置总数是 1 302 只，而实际出现故障的电能计量装置总数为 1 253 只，且出现故障的电能计量装置健康度预测值均低于 30 分，从而验证了警戒分值的合理性。

2) 在实际的电能计量装置现场检测过程中，I、II、III 类电能计量装置精度不同、作用大小不同等，完全按照统一的警戒值，任务量仍然较大，经过管理手段确定了差异化的健康度警戒值，进一步提升了动态检测的针对性。

3) 通过对电能计量装置进行健康度评价和预测，如果下一个月健康度预测值的平均值低于设定警戒值的电能计量装置，将在下月初安排现场检验。由于每个检验周期中健康度低于警戒值的电能计量装置只占所有表计中的很小一部分，从而可以有效地降低对检验人员的需求，大大节省人力资源。

4) 新的检验模式中分值低于警戒线的电能计量装置，将被重点关注，从而可以及时发现有安全隐患的装置，尤其可以杜绝重要的大电量关口电能表出现运行故障，保证了电力计量装置的安全。

4 结论

本文提出了一种电能计量装置健康度评价和预测方法。该方法综合考虑电能计量装置的各个组成部分以及影响电能计量装置运行的各项因素，基于序关系分析法衡量各因素的相对重要程度，对电能计量装置的总体健康程度进行量化评价。并在此基础上，提出一种基于灰色模型的电能计量装置健康度预测方法，实现了对未来一段时间内电能计量装置运行状态的预测。本文所提的健康度综合评估与趋势预测方法可以有效降低电能计量装置的检验次数，提高人员工作效率，并及时排除重要计量装置的安全隐患，有力保障了电力计量工作的平稳安全进行。

参考文献

[1] 李静, 杨以涵, 于文斌, 等. 电能计量系统发展综述[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(11): 130-134.
LI Jing, YANG Yihan, YU Wenbin, et al. A summary of the development of electric energy metering system[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(11): 130-134.

[2] 林伟斌, 陈垒, 肖勇, 等. 电能表现场校验技术研发应用现状及其发展趋势(上)[J]. 电测与仪表, 2016(12): 1-6, 41.
LIN Weibin, CHEN Lei, XIAO Yong, et al. Application status and development trend of field calibration technology for electric energy meters[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016(12): 1-6, 41.

[3] 贾晋峰, 易浩民, 夏向阳, 等. 分布式能源接入电力系统的新型计量系统[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(3): 118-124.
JIA Jinfeng, YI Haomin, XIA Xiangyang, et al. A new metering system for distributed energy access to power systems[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(3): 118-124.

[4] 国家电力公司发输电运营部组.《智能电能表技术管理规程》学习读本: DL/T448—2000[S]. 北京: 中国电力出版社, 2001.

[5] MARWALI M, SHAHIDEHPOUR S. Integrated generation and transmission maintenance scheduling with network constraints[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1998, 13(3): 1063-1068.

[6] NEGNEVITSKY M, KELAREVA G. Application of genetic algorithms for maintenance scheduling in power systems[C] // 6th International Conference on Neural Information Processing, November 16-20, 1999, Perth, WA, Australia: 477-452.

[7] BAT-ERDENE B, LEE B, KIM M Y, et al. Extended smart meters-based remote detection method for illegal electricity usage[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2013, 7(11): 1332-1343.

[8] LU C N, HUANG S C, LO Y L. Non-technical loss detection using state estimation and analysis of variance[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2959-2966.

[9] 杜卫华, 曹祎, 厉达. 状态评估技术在关口智能电能表管理上的应用[J]. 华东电力, 2013, 41(10): 112-116.
DU Weihua, CAO Wei, LI Da. Application of state evaluation technology in gateway energy metering device management[J]. East China Electric Power, 2013, 41(10): 112-116.

[10] 黄俐萍, 王卉, 杜卫华. 智能电能表运行评价方法研究[J]. 华东电力, 2014, 41(11): 2322-2326.
HUANG Liping, WANG Hui, DU Weihua. Study on operation evaluation method of electric energy metering device[J]. East China Electric Power, 2014, 41(11): 2322-2326.

[11] 陈陌, 郭亚军, 于振明. 改进型序关系分析法及其应用[J]. 系统管理学报, 2011, 20(3): 352-355.
CHEN Mo, GUO Yajun, YU Zhenming. Improved order relation analysis and its application[J]. Journal of System Management, 2011, 20(3): 352-355.

[12] 杨华龙, 刘金霞, 郑斌. 灰色预测 GM(1,1)模型的改进及应用[J]. 数学的实践与认识, 2011(23): 39-46.
YANG Hualong, LIU Jinxia, ZHENG Bin. Improvement and application of grey prediction GM(1,1) model[J]. The Practice and Understanding of Mathematics, 2011(23): 39-46.

[13] 房国志, 李昂, 张晓冰. 基于 Wiener 级数的交流充电桩电能计量方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(9): 155-162.
FANG Guozhi, LI Ang, ZHANG Xiaobing. Research on electric energy measurement method of AC charging pile based on Wiener series[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(9): 155-162.

[14] 罗群, 刘春雨, 张家安, 等. 智能电能表状态检测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.
LUO Qun, LIU Chunyu, ZHANG Jiaan, et al. Online platform development and evaluation indexes of state inspection for electric energy measuring devices[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(17): 94-99, 111.

[15] 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 Jianhong, ZHAO Yonghong, XUE Xiaoru, et al. Analysis of the health degree of electric energy meters and the prediction method of the overall running status[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(7): 77-80, 86.

[16] 祝恩国, 董莉君, 葛磊蛟, 等. 用户用电装置评估的区间熵权法[J]. 电测与仪表, 2014, 51(24): 106-112.
ZHU Enguo, DONG Lijun, GE Leijiao, et al. Interval entropy method for user's electric equipment evaluation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(24): 106-112.

[17] VIEGAS J L, VIEIRA S M, MELICIO R, et al. Classification of new electricity customers based on surveys and smart metering data[J]. Energy, 2016(107): 804-817.

[18] 朱彩虹, 黄清秀, 黄纯. 间谐波存在时的电能计量方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 15-20.
ZHU Caihong, HUANG Qingxiu, HUANG Chun. Study of electric energy metering method while inter-harmonic exists[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 15-20.

[19] 程瑛颖, 杨华潇, 肖冀, 等. 智能电能表运行误差分析及状态评价方法研究[J]. 电工电能新技术, 2014, 33(5): 76-80.
CHENG Yingying, YANG Huaxiao, XIAO Ji, et al. Operation errors analysis of electric energy metering device and state evaluation method research[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2014, 33(5): 76-80.

[20] 朱江淼, 张月倩, 黄艳, 等. 智能电能表故障风险预估算法的研究[J]. 电测与仪表, 2018, 55(8): 97-100.
ZHU Jiangmiao, ZHANG Yueqian, HUANG Yan, et al. Research on the algorithm of fault risk prediction for the smart meter[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(8): 97-100.

[21] 姜洪浪, 赵婷, 段晓萌, 等. 智能电能表综合性能评级方法研究[J]. 电测与仪表, 2018, 55(6): 105-109, 115.
JIANG Honglang, ZHAO Ting, DUAN Xiaomeng, et al. Research on comprehensive performance rating method for electric energy measuring devices[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(6): 105-109, 115.

[22] 刘涛, 庄双勇, 陈晓伟, 等. 基于 Hanning 自乘-卷积窗 FFT 三峰插值修正的电能计量新算法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(22): 9-15.
LIU Tao, ZHUANG Shuangyong, CHEN Xiaowei, et al. A new energy measurement algorithm based on Hanning self-pulsing-convolution window FFT trimodal interpolation correction[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(22): 9-15.

[23] 张慧源, 顾宏杰, 许力, 等. 基于最小二乘支持向量机的载流故障趋势预测[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(10): 19-23, 29.
ZHANG Huiyuan, GU Hongjie, XU Li, et al. Current-carrying fault prediction of electric equipment based on least squares support vector machine[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(10): 19-23, 29.

[24] 陈奎, 陈博博. 基于改进暂态相关分析和支持向量机的电弧故障选线研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(24): 66-73.
CHEN Kui, CHEN Bobo. Research on arc fault line selection based on improved transient correlation analysis and support vector machine[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(24): 66-73.

[25] 高强, 张保航, 谷海青. 用户端电能管理系统的研究现状与发展趋势[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(7): 148-155.
GAO Qiang, ZHANG Baohang, GU Haiqing. Current situation and development of client electric management system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(7): 148-155.

收稿日期：2018-07-31；　修回日期：2018-08-25

作者简介：

刘春雨(1980—)，男，硕士，高级工程师，主要从事电能计量装置校验检测技术研究；Email: chunyu.liu@tj.sgcc.com.cn

刘自发(1973—)，男，通信作者，博士，教授，主要从电网规划和优化运行、分布式电源接入电网分析的研究；Email:tjubluesky@163.com

罗　群(1983—)，男，硕士，工程师，主要从事电能计量装置校验检测技术研究。Email: luoqungood@ qq.com

(编辑　许　威)