

数字量输入式电能表在线校验方法及系统的研究

陈 涛¹, 王永安², 邱忠梅¹, 李 林¹, 黄俊硕²

(1.江苏省计量科学研究院, 江苏 南京 210023)

(2.南京师范大学江苏省电气装备电磁兼容工程实验室, 江苏 南京 210023)

[摘要] 通过研制高精度数字标准功率源, 搭建基于数字量网络传输的数字量输入式电能表与数字标准功率源在线校验系统, 包括对虚负荷校验的方式、虚拟负荷校验方式、实负荷校验方式, 分析了数字量输入式电能表的电能优化计算方法. 同时通过研究电磁环境对校准精度的影响, 实现数字量输入式电能表与数字标准功率源快速、准确、有效的在线校准, 大大降低综合成本.

[关键词] 数字电能表, 校验方法, 校验装置, 电能计算

[中图分类号] TM933 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2019)04-0092-07

Analysis and Research of Digital Input Type Electric Energy Meter Calibration Device and Online Verification System

Chen Tao¹, Wang Yongan², Qiu Zhongmei¹, Li Lin¹, Huang Junshuo²

(1.Jiangsu Institute of Metrology, Nanjing 210023, China)

(2.Jiangsu Engineering Laboratory of Electrical Equipment Electromagnetic Compatibility, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: In this paper, a high-precision digital standard power source is developed to build a digital input power meter and digital standard power source online verification system based on digital network transmission, including virtual load verification mode, virtual load verification mode, and real load. The paper uses the verification method to analyze the electric energy optimization calculation method of the digital input type electric energy meter, and realize the fast, accurate and effective online calibration of the digital input type electric energy meter and the digital standard power source by studying the influence of the electromagnetic environment on the calibration precision, and the comprehensive cost is greatly reduced.

Key words: digital energy meter, calibration method, calibration device, calculation of electrical energy

数字量输入式电能表作为核心计量设备, 能计量多路电能, 且输入量使数字信号通过处理算法能够得到电能、功率等参数, 在可靠性更高, 低压侧无高压危险, 也无互感器铁芯的饱和特性问题. 因此数字量输入的电能表作为新型电能计量设备得到了广泛应用^[1-5].

数字量输入式电能表的准确度很高, 其处理的信号为网络传输, 理论上无误差, 但电能表处理器的字长受限, 导致一定的截断误差^[6-7]. 造成误差的原因有很多, 不同算法对信号处理的结果不同造成偏差, 电能质量不同、频率的上下波动、谐波问题等也会影响计量设备的不确定度. 与传统电能表不同, 数字量输入式电能表接口输入的电压和电流为数字量, 所以电能表校验装置应当包括能输出相应标准的数字帧的标准功率源^[8-11]、产生电压和电流数字信号, 而传统的实验室校验系统无法开展该项校验工作^[12].

国内电能计量设备校验方法包括传统标准表法和标准源法. 标准表法校验装置采用电能主标准器, 测试标准电能值、输出检定点所需功率等, 被检测的电能设备的电能误差是根据测量的电能值来计算的. 标准源法校验装置无需主标准器, 它能够准确输出检定功率(包括准确的电压值、电流值以及相角), 通过功率设定值与计时器时间, 得到标准电能值, 从而确定被检设备的误差, 本质上是瓦秒法校验装置. 上述两种方法需要对被检电能设备进行现场校验, 不但要花费大量的时间, 而且造成现场检测的任务

收稿日期: 2019-09-10.

基金项目: 国家质量监督检验检疫总局科技计划项目(2015QK071).

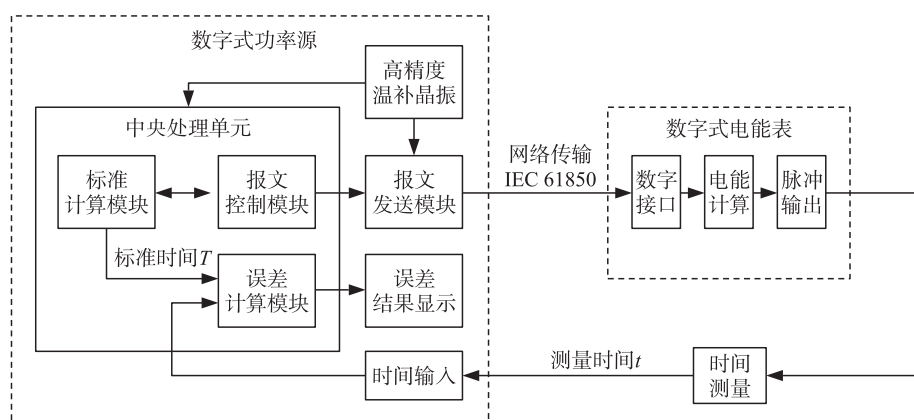
通讯联系人: 陈涛, 工程师, 研究方向: 电能表检验与电磁兼容. E-mail: 997161026@qq.com

量非常繁重,严重降低工作效率。

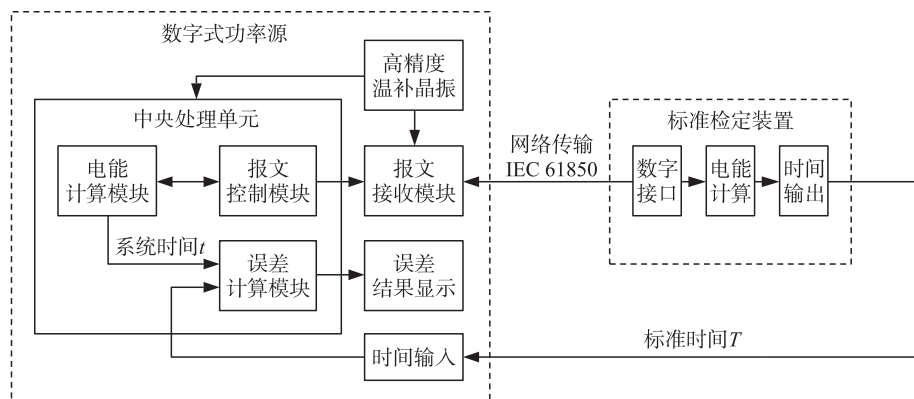
1 电能表校验装置设计方案

本文提出了数字量输入式电能表远程校验方法,包括远程数字量输入式电能表校验和远程数字标准功率源校验。图 1(a) 为远程数字量输入式电能表校验系统硬件联系图,校验系统包括两部分,即数字式功率源和数字式电能表,以实现基于 IEC 61850-9-1/2/LE 协议的网络通信。数字式功率源中中央处理单元标准计算模块和报文控制模块是双向数据传输的,标准计算模块计算标准时间 T ,报文控制模块和高精度温补晶振控制报文发送,通过网络传输,数字式电能表接收信息后对电能进行计算,然后输出脉冲,这个时间记为测量时间 t 传送给中央处理单元误差计算模块。得出被试数字化电能表的相对误差 γ ,

$$\gamma = \frac{T-t}{t} \times 100\% \quad (1)$$



(a) 远程数字量输入式电能表校验系统硬件联系图



(b) 远程数字标准功率源校验系统硬件联系图

图 1 基于标准源法和网络传输的数字量输入式电能表校验系统

Fig. 1 Digital input type electric energy meter verification system based on standard source method and network transmission

远程数字标准功率源校验系统硬件联系图如图 1(b) 所示。被校验的是数字标准功率源,校验系统包括数字式功率源和标准检定装置,标准检定装置输出标准时间 T 传送到功率源误差计算模块,功率源电能计算模块输出系统时间 t 至误差计算模块,相对误差 γ 可以按照公式(1)得出。

1.1 高准确度数字功率源设计方法

数字标准功率源应兼有模拟信号源和数字信号源功能,即数字标准功率源可以采用模拟或数字输入及模拟或数字输出。从而可以作为标准装置,又可以作为标准表,提高数字标准功率源的实用性。

数字标准功率源的工作原理如图 2 所示,它包括了七个部分,分别为电源管理模块、数字信号发生模块、系统控制模块、串口控制模块、光纤接口模块、键盘控制模块以及显示模块组成。它拥有 100 M 光纤输出口,能够输出标准格式的电流和电压,再通过 IEC61850-9-1/2 协议的光纤接口与数字式电能表相

连. DK-51F6 数字化标准功率源是面向智能变电站数字化电能表校验的仪器设备,仪器具备内置先进的双核 ARM 处理器和 FPGA 以及精密测量技术设计. 工作时,通过仪器键盘/按钮控制系统控制模块,控制数字信号发生模块输出符合标准的电流、电压、功率因数等数据,再由光纤模块输出. 电源管理模块负责供电,将市电转换成 12V 和 5V 的直流电,用以给系统控制模块和数字信号发生模块供电. 显示单元将负责显示相关的信息.

该数字标准功率源拟采用高精度晶体振荡器,锁相控制技术以及 FPGA 全数字逻辑控制技术,从而保证报文发送时具有严格的时序特性. 同时,发送报文采用硬件电路实现可以去抖报文的抖动,从而确保数字标准功率源的高准确性,高可靠性. 数字标准功率源控制报文发送时序的硬件实现方式如图 3 所示.

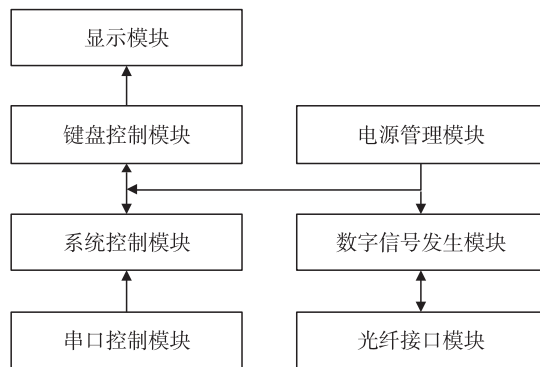


图 2 数字标准功率源的原理框图

Fig. 2 Fundamental diagram of the digital standard power source

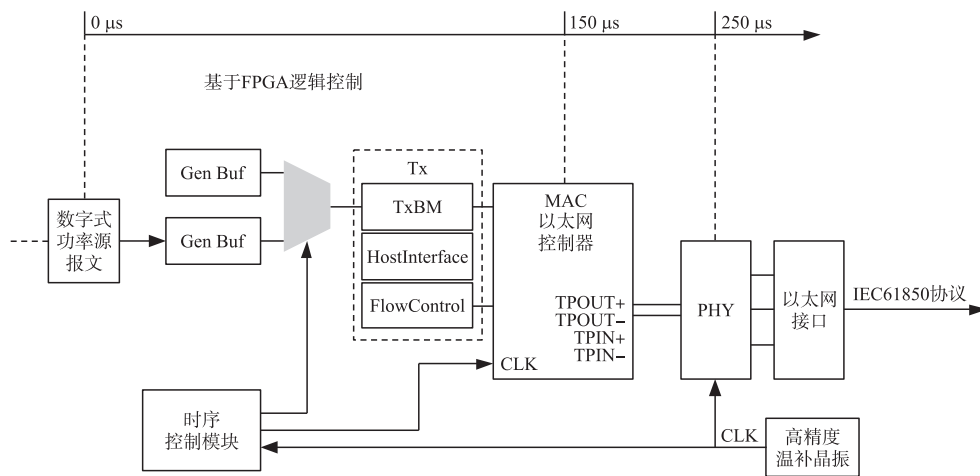


图 3 数字标准功率源报文发送的时序控制原理图

Fig. 3 Schematic diagram of timing control when digital standard power source message is sent

1.2 不同负荷状态下数字量输入式电能表的校验方法

数字化电能表有三种校验方式,分别为虚负荷校验方式、虚拟负荷校验方式、实负荷校验方式.

第一种是虚负荷校验方式,虚负荷检定方式示意图如图 4 所示,外部程控模拟功率源输出测试所需的电压、电流波形,数字化电能表校验仪内部高精度 AD 转换模块将模拟量转换为数字信号,其中标准表电能计算模块计算得到电能值,协议组包模块将电压、电流数字信号组包为 IEC61850-9-2 协议数据帧,经校验仪以太网接口输出到被测电能表,数字化电能表发出电能脉冲到校验仪误差模块进行计算,得到电能误差. 其中模拟标准表计算模块计算得到电能值 W ,被检测电能表计算得到电能值 W_0 . 则被检电能表误差 γ 为

$$\gamma = \frac{W_0 - W}{W} \times 100\% \quad (2)$$

第二种是虚拟负荷校验方式,虚拟负荷检定示意图如图 5 所示,由数字化电能表校验仪按照界面设置产生符合 IEC61850-9-2 协议标准的电压、电流数字信号,标准表电能计算模块计算得到电能值,IEC61850-9-2 协议数据帧,经校验仪以太网接口输出到被测电能表,数字化电能表发出电能脉冲到校

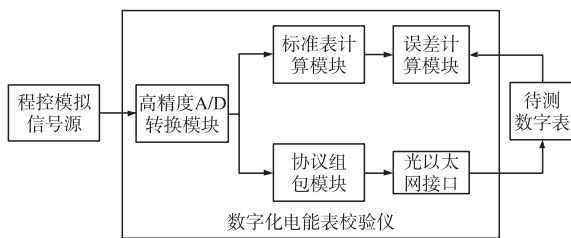


图 4 虚负荷检定方式示意图

Fig. 4 Schematic diagram of virtual load verification

验仪误差模块进行计算,得到电能误差.其中标准表计算模块计算得到电能值 W ,被试电能表计算得到电能值 W_0 ,同样由式(2)可计算被检电能表误差 γ .

第三种是实负荷校验方式,实负荷检定示意图如图6所示,这种校验方式适用于现场检测,数字化电能表校验仪通过光以及网接口1接收来自合并单元的采样值数据报文,并解析其中的电压、电流等信号,并经过标准表电能计算模块计算得到电能值,同时将接收到的报文转发到光以及网接口2,数字化电能表发出电能脉冲到校验仪误差模块进行计算,得到电能误差.其中标准表计算模块计算得到电能值 W ,被试电能表计算得到电能值 W_0 ,同样按式(2)计算被检电能表误差.

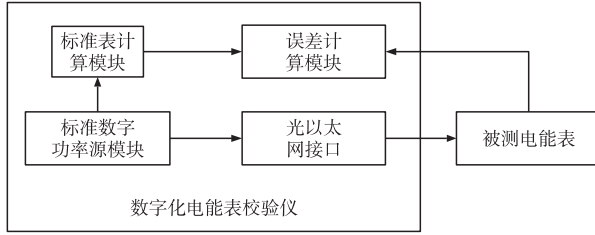


图5 虚拟负荷检定示意图

Fig. 5 Schematic diagram of virtual load verification

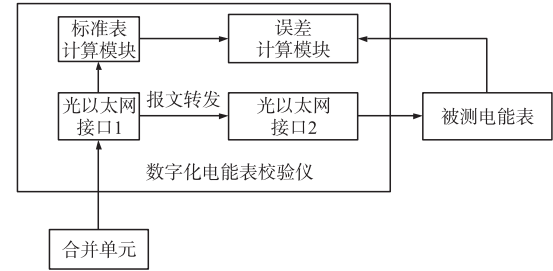


图6 实负荷检定示意图

Fig. 6 Schematic diagram of real load verification

2 数字量输入式电能表的电能优化计算方法

数字式电能表精度的核心在于其内部电能计算的方法,电能计算需要考虑的因素包括电网频率波动、幅值畸变、采样频率改变等因素,所以需要提出优化的电能计量算法,即准同步算法,电能指标参数包括幅值、平均值、有效值、谐波分量的幅值可以表示为:

$$\overline{f(x)} = \frac{1}{2\pi} \int_{x_0}^{x_0+2\pi} f(x) dx. \quad (3)$$

理想情况下,若有 N 段积分区间为 2π , M 为 $f(x)$ 最高谐波的次数,则当 $N > M$ 时,有

$$\overline{f(x)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g(x_i). \quad (4)$$

如果有积分区间是 $2\pi + \Delta$, Δ 为同步误差,式(4)将不再适用.此时需通过增加周期数和经过多次平均计算在 Δ 较小的情况下,得到 $f(x)$ 的估计.

将 n 个周期的信号等分为 $N \times n$,每段长度为 $2\pi + \Delta$,得到 $N \times n + 1$ 个数据,分别为 $f(x_i)$ ($i = 0, 1, \dots, N \times n$).根据数值分析积分,可以求得第一组递推数据,

$$F_0^1 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=0}^N \rho_i f(x), \quad (5)$$

$$F_1^1 = \frac{1}{N+1} \cdot \sum_{i=1}^{N+1} \rho_i f(x) \cdots F_{n \times (N-1)}^1 = \frac{1}{N \times n} \cdot \sum_{i=(N-1) \times n}^{N \times n} \rho_i f(x). \quad (6)$$

从 $N \times n + 1$ 个数据组推到了 $N \times (n-1) + 1$ 的数据组,再用同样的方法可得

$$F_0^2 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=0}^N \rho_i F_i^1, \quad (7)$$

$$F_1^2 = \frac{1}{N+1} \cdot \sum_{i=1}^{N+1} \rho_i F_i^1 \cdots F_{n \times (N-2)}^2 = \frac{1}{(N-1) \times n} \cdot \sum_{i=(N-2) \times n}^{(N-1) \times n} \rho_i F_i^1. \quad (8)$$

依次类推,当递推了 n 次,最后输出的数据为

$$F_n^2 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=0}^n \rho_i F_i^{n-1}. \quad (9)$$

可以得到 $\lim_{n \rightarrow \infty} F_n = f(x)$, 递推次数 n 越大, 此算法的结果就会越精准, 趋近真实值. 可以验证, 当 $n=5$ 时, 算法精度就很高了.

3 电磁环境对校准精度的影响

在线校验系统中传输信号过程中, 线缆会受到电磁干扰, 线缆中信号在改变, 从而周围会产生电磁场, 进而将高频噪声干扰至其他的线缆之中, 这就是串扰电磁问题. 时变信号引起的射频电磁场一般为电偶极子模型.

$$\begin{aligned} H_{\phi} &= \frac{Idlk^2}{4\pi} \cdot \left[\frac{-1}{j(kr)} + \frac{1}{(kr)^2} \right] \sin\theta e^{-jkr}, \\ E_{\theta} &= \frac{Idlk^3}{4\pi\omega\epsilon_0} \left[\frac{-1}{j(kr)} + \frac{1}{(kr)^2} + \frac{1}{j(kr)^3} \right], \\ E_r &= \frac{Idlk^3}{2\pi\omega\epsilon_0} \left[\frac{-1}{(kr)^2} + \frac{1}{j(kr)^3} \right] \cos\theta e^{-jkr}, \\ H_r &= H_{\theta} = 0, E_{\phi} = 0. \end{aligned} \quad (10)$$

式中, H 为磁场强度, E 为电场强度, Idl 为电偶极子的电矩, 即电偶极矩, k 为波矢, 其模表示波数, 方向表示波的传播方向.

由式(8)可得, 线缆中的高频噪声电流引起的射频电磁场为

$$E_{\theta} = j \frac{lZ_0\beta_0 \sin\theta}{4\pi r} e^{-j\beta_0 r}. \quad (11)$$

式中, Z_0 为自由空间波阻抗, l 为控制线缆长度, I 为高频噪声电流, r 为测试距离, β_0 为 $2\pi/\lambda$, λ 为波长.

如图 7 所示, 线缆 1 引起电磁骚扰影响到线缆 2, 线缆 2 产生感应电流 I , 即为传导噪声.

因串扰引起的传导 EMI 噪声对在线校验系统中传输信号的强度和传输时间会有很大影响. 设在线校验系统受串扰影响而导致的延时为 Δt , 标准时间为 T , 被测电能设备时间为 t , 则由校验系统延时引起的误差 γ 为

$$\gamma = \frac{T - (t + \Delta t)}{t + \Delta t} \times 100\% - \frac{T - t}{t} \times 100\%. \quad (12)$$

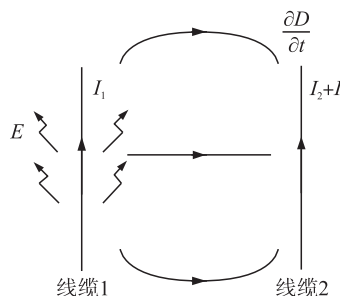
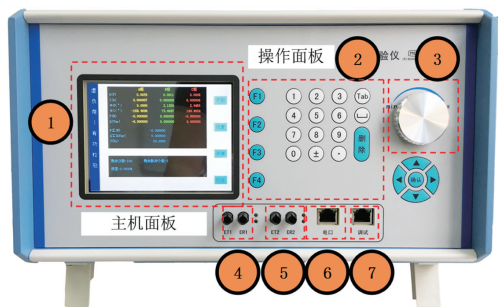


图 7 因串扰引起的传导 EMI 噪声

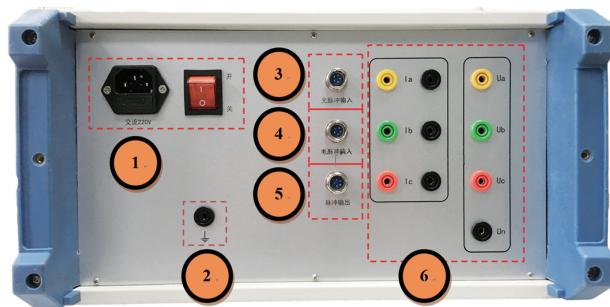
Fig. 7 Conducted EMI noise due to crosstalk

4 实验结果与分析

数字量输入式电能表校验装置的实物图如图 8 所示. 主机前面板如图 8(a) 所示, 主要由如下 7 个部分构成: 区域 1 为液晶显示部分; 区域 2 为数字按键及功能按键区; 区域 3 为旋钮调节区; 区域 4 和区域 5 分别为光口 1、光口 2; 区域 6 为电网口; 区域 7 为调试网口. 主机后面板如图 8(b) 所示, 主要由如下 6 个部分构成: 区域 1 为 AC220V 仪器工作电源接口及开关; 区域 2 为接地端子; 区域 3 为光脉冲输入端口; 区



(a) 主机前面板



(b) 主机后面板

图 8 数字量输入式电能表校验装置

Fig. 8 Digital input type electric energy meter calibration device

域4为电脉冲输入端口;区域5为电脉冲输出端口;区域6为电压电流输入端子。

数字量输入式电能表校验装置检定原理如图9所示。将数字量输入式电能表输出9-2协议的数据给准确度校验装置中的数字表,然后通过计算电能功率与数字量输入式电能表校验装置设定的值进行对比,从而得到误差。

基本误差试验的检定结果如表1所示。频率影响试验的检定结果如表2所示。



图9 数字量输入式电能表校验装置检定原理图

Fig.9 Schematic diagram of the verification of the digital inputtype electric energy meter calibration device

表1 基本误差试验结果

Table 1 Basic error test results

| 电压/kV | 电流/A | 功率因数 | 相对误差 | 电压/kV | 电流/A | 功率因数 | 相对误差 |
|-------|------|------|------|-------|-------|------|------|
| 220 | 10 | 1 | 0 | 220 | 1 000 | 1 | 0 |
| 220 | 10 | 0.5L | 0 | 220 | 1 000 | 0.5L | 0 |
| 220 | 10 | 0.5C | 0 | 220 | 1 000 | 0.5C | 0 |
| 220 | 500 | 1 | 0 | 220 | 2 000 | 1 | 0 |
| 220 | 500 | 0.5L | 0 | 220 | 2 000 | 0.5L | 0 |
| 220 | 500 | 0.5C | 0 | 220 | 2 000 | 0.5C | 0 |

表2 频率试验结果

Table 2 Frequency test results

| 电压/kV | 电流/A | 功率因数 | 频率/Hz | 相对误差 |
|-------|------|------|-------|-------|
| 220 | 1 | 1 | 49 | 0 |
| 220 | 1 | 0.5L | 50 | 0.001 |
| 220 | 1 | 0.5C | 51 | 0.001 |

经过检定,基本误差实验和频率影响试验的相对误差较低,本文所设计的校验装置及方法是可行的,整体精度达0.02级,且不确定度为0.01%。

5 结语

文中介绍的此数字量输入式电能表校验方法及系统,符合IEC相关标准,且数字标准功率源能输出标准的数据帧,用于产生标准电压、电流数字信号,该装置的精确度较高,功能较为齐全。文中介绍了不同负荷状态下数字量输入式电能表的校验方法,可以对电能表进行功能测试,满足实验要求。分析了数字量输入式电能表的电能优化计算方法和电磁环境对校准精度的影响,通过实验验证了数字量输入式电能表校验装置及方法的可行性。

[参考文献](References)

- [1] 陆锋杰,申屠洁群,张佳学,等. 基于IEC 61850协议的数字电能表校验装置的研发与设计[J]. 电测与仪表,2015,52(6):49-54.
LU F J, SHEN T J Q, ZHANG J X, et al. R&D and design of digital energy meter verification device based on IEC 61850 protocol[J]. Electrical measurement & instrumentation, 2015, 52(6): 49-54. (in Chinese)
- [2] 郑磊,曾妍,杨剑,等. 数字化电能表校验方法及校验装置研究[J]. 电测与仪表,2017,54(17):100-105.
ZHENG L, ZENG Y, YANG J, et al. Research on digital energy meter calibration method and calibration device[J]. Electrical measurement & instrumentation, 2017, 54(17): 100-105. (in Chinese)
- [3] 申莉,甘依依,孙国学,等. 数字化电能表校准技术研究及应用[J]. 电测与仪表,2014,51(24):89-95.
SHEN L, GAN Y Y, SUN G X, et al. Research and application of digital energy meter calibration technology[J]. Electrical measurement & instrumentation, 2014, 51(24): 89-95. (in Chinese)
- [4] 肖勇,江波,赵伟,等. 基于IEC61850标准的数字电能表检定技术研究进展[J]. 电测与仪表,2014,51(1):1-6.
XIAO Y, JIANG B, ZHAO W, et al. Research progress of digital energy meter verification technology based on IEC61850 standard[J]. Electrical measurement & instrumentation, 2014, 51(1): 1-6. (in Chinese)

- [5] 蔺占芳. 智能型电子电能表校验系统的研究与设计[D]. 北京:华北电力大学,2016.
LIN Z F. Research and design of intelligent electronic energy meter calibration system[D]. Beijing:North China Electric Power University,2016.(in Chinese)
- [6] 姚力,李少腾,陆春光. 数字化电能表检测装置设计[J]. 电测与仪表,2010,47(Suppl. 1):28-32.
YAO L,LI S T,LU C G. Design of digital energy meter detection device[J]. Electrical measurement & instrumentation,2010,47(Suppl. 1):28-32.(in Chinese)
- [7] 谢东,吴涛,吴伯华,等. 数字量输入电能表误差等级问题的探讨[J]. 电测与仪表,2011,48(8):87-91.
XIE D,WU T,WU B H,et al. Discussion on the error level of digital input energy meter[J]. Electrical measurement & instrumentation,2011,48(8):87-91.(in Chinese)
- [8] 杨华云,艾兵,江波,等. 数字电能表现场校验仪的研制[J]. 电测与仪表,2013,50(6):53-57.
YANG H Y,AI B,JIANG B,et al. Development of digital energy meter field calibrator[J]. Electrical measurement & instrumentation,2013,50(6):53-57.(in Chinese)
- [9] 何山. 单相电能表现场校验仪的研制[D]. 四川:电子科技大学,2009.
HE S. Development of single-phase electric energy meter field calibrator[D]. Sichuan:University of Electronic Science and Technology of China,2009.(in Chinese)
- [10] 刘惠颖,殷鑫,崔旭. 数字化电能表校准技术研究及应用[J]. 科技与企业,2015,12(21):111.
LIU H Y,YIN X,CUI X. Research and application of digital energy meter calibration technology[J]. Science & technology and enterprises,2015,12(21):111.(in Chinese)
- [11] 寇英刚,范洁,杨世海,等. 一种基于实际工况的数字化电能表校验方法及其误差分析[J]. 电力工程技术,2017,36(6):53-57.
KOU Y G,FAN J,YANG S H,et al. A digital electric energy meter calibration method based on actual working conditions and its error analysis[J]. Electric engineering technology,2017,36(6):53-57.(in Chinese)
- [12] 张英,秦涛,程昱舒. 一种新的数字电能表校验仪设计[J]. 现代电子技术,2014,37(13):99-101.
ZHANG Y,QIN T,CHENG Y S. A new design of digital electric energy meter calibrator[J]. Modern electronic technique,2014,37(13):99-101.(in Chinese)

[责任编辑:陈 庆]