

一种基于安装式标准电能表的智能电能表误差在线检测比对方法研究

杨芾藜¹, 侯兴哲²

(1. 国网重庆市电力公司营销服务中心, 重庆 401123; 2. 国网重庆电力公司电力科学研究院, 重庆 401123)

摘要: 文章针对不同厂家生产的单相智能电能表在线使用时计量准确性问题, 在相同实际负载条件下进行相关试验。通过一种新型的高精度单相安装式标准电能表模拟用户实际使用情况, 采用多种不同功率的负载对单相智能电能表在实际运行中的基本误差、电量走字误差进行测试。与实验室参比条件下检定装置测试的数据进行比对, 验证分析单相智能电能表在参比条件下检定装置测试数据的可靠性和一致性。通过实验数据分析表明, 该方法可以真实反映单相智能电能表在实际使用中基本误差和电量误差的情况, 可以作为单相智能电能表在线检测的一种新的方法。

关键词: 安装式标准电能表; 误差在线检测; 电量在线比对

DOI: 10.19753/j.issn1001-1390.2022.03.025

中图分类号: TM933

文献标识码: B

文章编号: 1001-1390(2022)03-0181-06

A method of online error detection and comparison of smart meter based on installation type standard electricity meter

Yang Feili¹, Hou Xingzhe²

(1. Marketing Service Center, State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 401123, China.

2. State Grid Chongqing Electric Power Research Institute, Chongqing 401123, China)

Abstract: Aiming at the measurement accuracy of single-phase smart meter produced by different manufacturers when it is used online, this paper carries out relevant tests under the same actual load conditions. Through a novel type of high precision single-phase installation type standard electricity meter, simulating the actual usage of users, a variety of different power load is used to test the basic error and electric quantity running error of single-phase smart meter in actual operation. Then, this paper compares the test data of the verification device under the reference condition in the laboratory to verify the reliability and consistency of the test data of the verification device under the reference condition. The analysis of experimental data shows that this method can truly reflect the basic error and electric quantity error of the single-phase smart meter in actual use, and it can be used as a novel method for online detection of the single-phase smart meter.

Keywords: installation type standard electricity meter, online error detection, online comparison of electric quantity

0 引言

近年来,随着经济社会的不断发展,科技的不断进步以及电力用户和供电部门对电能精确计量的需求,促使我国智能电网建设不断深入,电子式智能电能表的安装量也越来越大。由于电子计量技术越来越成熟^[1],以及大量的市场需求,使智能电能表的生产厂家也越来越多。但是目前智能电能表的生产和电力部门

挂网前的首检均是在参比条件(环境温度 $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$; 相对湿度 $60\% \pm 15\%$; 电压允许偏差 0.5% ; 频率允许偏差 0.3% , 波形失真度小于 1%) 下通过自动化检定装置检测完成的。用户使用中智能电能表在复杂的使用环境下加载实际负载,能否对电量进行连续的准确计量,不同厂家的智能电能表在参比条件下误差和现场在线使用中的误差有无差异,在使用中计量是否准

确可靠,这是一个值得研究的课题,也是电力计量部门和电力用户十分关心的问题。

目前测试同一负载条件下不同厂家智能电能表的误差、电量等数据。一般采用电能表检定装置虚负载测试。无法反映智能电能表实际负载运行情况。传统现场校验仪采用电流钳方式现场测试智能电能表误差,由于电流钳钳口污染、错位、松紧度等因素影响,也很难准确测试实际误差^[2-6]。

本文所提的方法采用一种新型的单相安装式标准电能表(以下简称安装式标准电能表)和普通单相智能电能表串联进行测试,该安装式标准电能表外形尺寸和普通智能电能表一致,计量部分采用TDM时分割乘法器原理。符合国家标准GB/T 17215.211-2006《交流电测量设备通用要求、试验和试验条件 第11部分:测量设备》和国家标准GB/T 17215.701-2011《标准电能表》。在现场复杂的电磁、温湿度等环境下均可实现高达0.05级的有功电能计量和有功误差测量,同时也可以对线路中的运行参数进行更加精确地测量^[7]。安装式标准电能表还可以通过设置线损功率参数对同一串联线路的其他智能电能表基本误差及电量走字误差进行精确测量。所提的方法采用实际负载对不同生产厂家在线挂网运行过的智能电能表基本误差及电量走字误差进行精确测试比对,分析各厂家智能电能表在线运行的可靠性及一致性^[8-12]。

1 方案概述

文中所提的方法选取相同规格在网运行中的不同厂家生产的智能电能表和0.05级安装式标准电能表等比例混合串联,在室温条件下接入同一个负载进行测试。再将所有智能电能表和安装式标准电能表取下在参比条件下通过检定装置模拟实际负载点进行测试。根据两次数据进行比对分析不同厂家智能电能表的可靠性及一致性^[12-18]。对有问题智能电能表进一步进行试验验证。

2 模拟实际用户测试

实验在35℃室温条件下,选取产品规格为:220V/5(60)A,等级为2级,在网运行中的5个不同厂家生产的单相智能电能表共25只,产品规格为220V/10(100)A,等级为0.05级的同一厂家生产的单相安装式标准电能表6只,将安装式标准电能表设置为安装表模式,在此模式下,安装式标准电能表的接线和智能电能表一致。然后用相同材质的等导线,将25只智能电能表和6只安装式标准电能表按照图1的方式串联接线,最后接入白炽灯、电风扇、电油汀等负载。同时为

保证每只电表参数信息读取时效的一致性,采用一台安装有多路RS-485通信的电脑,每一路RS-485仅连接一台电能表,通过软件同步抄录每一只电能表的参数信息。由于普通智能电能表的准确等级只有2级,因此文中以安装式标准电能表抄录的运行参数为依据,通过合理的计算来对智能电能表的基本误差和电量走字误差进行分析。

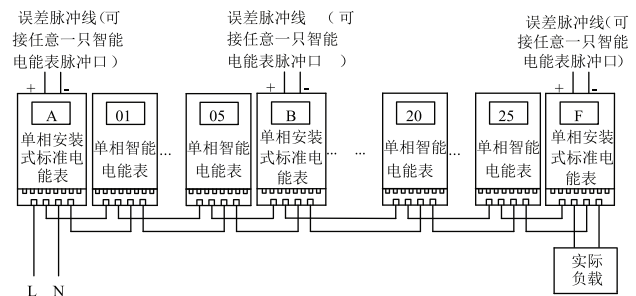


图1 接线示意图1

Fig. 1 Wiring schematic diagram 1

在连接智能电能表前分别用5只安装式标准电能表对每一块智能电能表和安装式标准电能表的自身功耗进行测试,取平均值作为该表的自身功耗数据。线路通电工作稳定后,通过首尾两只安装式标准电能表的功率,和试验前测得的每只表的自身功耗,就可以计算出每一组线材的线路损耗。进行误差测试时可以通过在安装式标准电能表内设置线损功耗和智能电能表功耗来测试智能电能表的误差。试验中采用相邻2只安装式标准电能表来分别测试它们之间5只智能电能表的误差,取平均值为该智能电能表在此负载点的基本误差。进行电量走字误差测试时,通过软件同步抄录所有智能电能表从负载开始工作到负载断电期间的电量和功率,减去每只电能表的线损电量,即为该智能电能表在此负载下的电量走字。将每只智能电能表的电量走字和安装式标准电能表尾表电量走字进行比对即可得该表的电量走字误差。

以一台工作电流约为5A的电油汀负载为例,测量图1中1号智能电能表的误差。作为头表A的安装式标准电能表测得的功率为 $P_1 = 1160.69\text{ W}$,作为尾表F的安装式标准电能表测得的功率 $P_w = 1102.57\text{ W}$,除头表外所有电能表自身功耗之和 $P_z = 46.0957\text{ W}$,那么31只表之间30组线材的平均线损功率 P_g 为 0.40081 W 。

$$P_g = (P_1 - P_w - P_z) / 30 \quad (1)$$

已知A、B号安装式标准电能表的自身功耗分别为 P_{zA} 、 P_{zB} 。电能表1号到5号的自身功耗分别为 P_{z1} 、 P_{z2} 、 P_{z3} 、 P_{z4} 、 P_{z5} 。那么用A号安装式标准电能表来测

试1号智能电能表的误差时,可以在A号安装式标准电能表内置入减去修正功耗 $P_s = P_{z1} + P_g$ 来准确测试1号智能电能表的误差。同样的用B号安装式标准电能表来测试1号智能电能表的误差时,可以在B号安装式标准电能表内置入加上修正功耗 $P_s = P_{z2} + P_{z3} + P_{z4} + P_{z5} + P_{z6} + P_g \times 5$ 来准确测试1号智能电能表的误差。取A号、B号安装式标准电能表测得误差的平均值即为该负载点1号智能电能表的基本误差。

还以上述负载为例,现在要测量图1中1号智能电能表的8小时连续电量走字误差。先将智能电能表通电,打开RS-485通信用软件抄录所有电能表的电量,然后给负载加电。保持负载不变连续通电8小时后给负载断电,负载断电后再停止RS-485数据的抄录。定义RS-485抄录尾表F号安装式标准电能表的开始电能为 W_{fk} ,结束电能为 W_{fs} ,1号智能电能表开始电量为 W_{1k} ,结束电量为 W_{1s} ,负载累计运行时长为 T 。那么负载的实际电能走字 $\Delta W = W_{fs} - W_{fk}$,1号电能表的线路损耗电量为1号智能电能表到负载之间所有电表自身功耗之和 P_z 加上线路损耗之和 P_g 与时间 T 的乘积。所以1号智能电能表减损后的电能 ΔW_1 即为:

$$\Delta W_1 = W_{1k} - W_{1s} - (P_z + P_g) \times T \quad (2)$$

电能误差为:

$$r_1 = (W_1 - \Delta W) / \Delta W \times 100\% \quad (3)$$

基本误差为:

$$r_2 = (T_l - T_o) / T_o \times 100\% \quad (4)$$

式中: T_o 为标准电能表换算脉冲周期,单位为 s; T_l 为标准电能表换算脉冲周期,单位为 s。

通过上述方案在35℃室温条件下对25只智能电能表在不同负载条件下的基本误差(r_2)和电量误差(r_1)分别进行了测试,测试误差数据如表1所示。

从表1的数据可以看出,每个厂家的智能电能表在同一负载条件下基本误差均在合格范围内,同一厂家所有5只电能表的误差线性基本一致,同一负载的电量误差和基本误差基本一致。但也可以明显看出5个厂家的智能电能表在同一负载点的基本误差也存在较大偏差。这可能是每个生产厂家标准源之间有差异导致的,也可能是因为不同厂家硬件差异、温度影响偏差不一致,导致参比条件下误差和在线使用时误差存在较大的差异,可以通过进一步测试进行验证分析。

为了减小线损影响和进一步验证上述方法对智能电能表测试的准确性,从上述25只智能电能表中每个厂家挑出1只误差差异较大的典型。在同一测试环境下,

将2只安装式标准电能表设置为脱钩模式,在此模式下安装式标准电能表的电压和电流是隔离的,电压电流的接线方式和标准表一样。按照图2的接线方式进行连接,此时2只安装式标准电能表和智能电能表处于等电位的同一电流回路中,在负载运行中没有线损影响。

表1 不同负载测试数据

Tab. 1 Different load test data

负载类型		白炽灯		电油汀		电油汀\白炽灯\风扇	
负载电流/A		0.968		5.125		53.525	
厂家	编号	$r_2/\%$	$r_1/\%$	$r_2/\%$	$r_1/\%$	$r_2/\%$	$r_1/\%$
I	1	-0.2	-0.4	-0.0	-0.0	-0.2	-0.2
	2	-1.2	-1.2	-1.0	-1.2	-1.2	-1.0
	3	-0.2	-0.0	-0.0	-0.2	-0.2	-0.2
	4	-0.2	-0.2	-0.2	-0.0	-0.2	-0.2
	5	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2
II	6	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
	7	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
	8	0.2	0.6	0.2	0.2	0.2	0.2
	9	0.2	0.6	0.2	0.2	0.2	0.2
	10	0.2	0.6	0.2	0.2	0.2	0.4
III	11	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2
	12	-0.0	-0.2	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0
	13	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2
	14	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2
	15	-0.0	0.2	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0
IV	16	0.0	0.2	0.0	0.2	0.0	0.2
	17	0.2	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2
	18	0.2	0.2	0.0	0.2	0.2	0.2
	19	0.0	-0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	20	0.2	0.2	0.0	0.2	0.0	0.2
V	21	0.0	0.2	0.0	0.2	0.0	0.0
	22	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	23	0.0	-0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	24	0.0	0.4	0.0	0.0	-0.0	-0.0
	25	0.0	0.4	0.0	0.2	0.0	0.2

可以通过2只安装式标准电能表同时对1只智能电能表在不同负载条件下的误差进行测试,同时可以通过安装式标准电能表的电量比对功能,在同一负载条件下设定时长自动进行智能电能表电量走字误差测试。使用这2只安装式标准电能表按照这个方法,分别对5只智能电能表在模拟用户测试中相同的负载条

件下的基本误差(r_2^1)和电量误差(r_1^1)进行检测。通过 RS-485 通信软件抄录所有被测电能表的基本误差和电量误差,数据如表 2 所示。

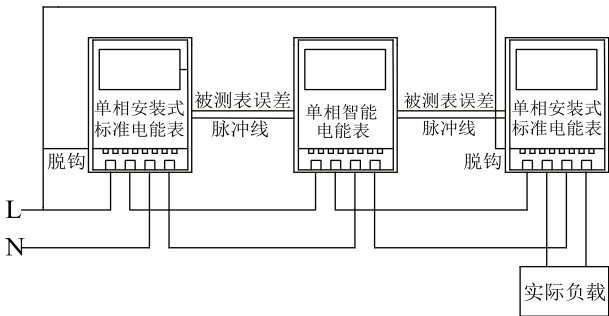


图 2 接线示意图 2
Fig. 2 Wiring schematic diagram 2

表 2 模拟用户测试数据
Tab. 2 Simulated user test data

负载类型		白炽灯		电油汀		电油汀\白炽灯\风扇	
负载电流/A		0.968		5.125		53.525	
厂家	编号	$r_2^1/\%$	$r_1^1/\%$	$r_2^1/\%$	$r_1^1/\%$	$r_2^1/\%$	$r_1^1/\%$
I	2	-1.2	-1.2	-1.0	-1.2	-1.2	-1.0
II	9	0.2	0.6	0.2	0.2	0.2	0.2
III	11	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2
IV	16	0.0	0.2	0.0	0.2	0.0	0.2
V	24	0.0	0.4	0.0	0.0	-0.0	-0.0

将表 2 和表 1 的同一块电能表的相同负载下的基本误差和电量误差数据进行对比。

电量误差对比误差为:

$$r_3 = r_1^1 - r_1 \tag{5}$$

基本误差对比误差为:

$$r_4 = r_2^1 - r_2 \tag{6}$$

具体数据如表 3 所示。

表 3 对比数据 1
Tab. 3 Comparative data 1

负载类型		白炽灯		电油汀		电油汀\白炽灯\风扇	
负载电流/A		0.968		5.125		53.525	
厂家	编号	$r_4/\%$	$r_3/\%$	$r_4/\%$	$r_3/\%$	$r_4/\%$	$r_3/\%$
I	2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
II	9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
III	11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
IV	16	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
V	24	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

从表 2 和表 3 的数据中可以看出同一只表在两种

测试方法中的基本误差和电量误差基本一致,再次验证了模拟用户测试试验数据的可靠性。

3 检定装置参比条件测试

上述两种方法测试结束后将所有智能电能表带回实验室,在参比条件下用 0.02 级 ST9001 型三相电能表检定装置调整输出上述测试中用户实际负载点的电压电流,对各个负载点参比条件下的基本误差(r_2^2)和电量误差(r_1^2)进行测试,测试结果如表 4 所示。

表 4 实验室测试数据
Tab. 4 Laboratory test data

装置模拟负载		负载 1		负载 2		负载 3	
负载电流/A		0.97		5.2		53.5	
厂家	编号	$r_2^2/\%$	$r_1^2/\%$	$r_2^2/\%$	$r_1^2/\%$	$r_2^2/\%$	$r_1^2/\%$
I	1	0.2	0.4	0.0	0.0	0.2	0.2
	2	0.6	0.6	0.4	0.6	0.6	0.6
	3	0.2	0.0	0.0	0.2	0.2	0.2
	4	0.2	0.2	0.2	0.0	0.2	0.2
	5	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
II	11	0.2	0.2	0.0	0.2	0.2	0.2
	12	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
	13	0.2	0.6	0.2	0.2	0.2	0.2
	14	0.2	0.6	0.2	0.2	0.2	0.2
	15	0.2	0.6	0.2	0.2	0.2	0.2
III	1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
	2	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0
	3	0.0	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
	4	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
	5	0.0	-0.2	0.0	0.0	0.0	0.0
IV	16	0.0	0.2	0.0	0.2	0.0	0.2
	17	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2
	18	0.2	0.2	0.0	0.2	0.2	0.2
	19	0.0	-0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	20	0.2	0.2	0.0	0.2	0.0	0.2
V	21	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0
	22	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	23	0.0	-0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	24	0.0	0.4	0.0	0.0	-0.0	-0.0
	25	0.0	0.2	0.0	0.2	0.0	0.0

将表 4 的测试数据和表 1 的测试数据进行对比对实负载和装置测试电量误差对比误差为:

$$r_5 = r_1^2 - r_1 \tag{7}$$

实负载和装置测试基本误差对比误差为:

$$r_6 = r_2^2 - r_2 \tag{8}$$

其具体数据如表 5 所示。

表 5 对比数据 2
Tab. 5 Comparative data 2

装置模拟负载		负载 1		负载 2		负载 3	
负载电流/A		0.97		5.2		53.5	
厂家	编号	$r_6/\%$	$r_5/\%$	$r_6/\%$	$r_5/\%$	$r_6/\%$	$r_5/\%$
I	1	0.4	0.8	0.0	0.0	0.4	0.4
	2	1.8	1.8	1.4	1.8	1.8	1.6
	3	0.4	0.0	0.0	0.4	0.4	0.4
	4	0.4	0.4	0.4	0.0	0.4	0.4
	5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
II	6	0.0	0.0	-0.2	0.0	0.0	0.0
	7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.2
III	11	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
	12	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0
	13	0.2	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
	14	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
	15	0.0	-0.4	0.0	0.0	0.0	0.0
IV	16	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	17	-0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	18	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	19	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
V	21	0.0	0.0	0.0	-0.2	0.0	0.0
	22	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	23	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	24	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	25	0.0	-0.2	0.0	0.0	0.0	-0.2

从表 4 的测试结果可以看出 25 只智能电能表在所有模拟负载点的基本误差和电量走字误差均在合格范围内。同一负载点的电量走字误差和基本误差保持一致,并且不同厂家的智能电能表之间在同一负载点之间差异相对较小。从表 5 的数据对比可以看出 I、III 两个厂家的智能电能表在所有负载点参比条件测试误差和实际负载测试误差之间差异比较大。特别是 I 号厂家的 2 号智能电能表在参比条件下和实际负载测

试的基本误差、电量走字误差均在合格范围内。按照国家标准 GB/T 17215. 311-2008 中关于 2 级智能电能表环境温度影响量的参考标准,环境温度变化 1℃ 基本误差改变量不应超过 0.1%。按照这个标准参比条件和模拟用户测试条件环境温度变差大约 15℃,其对误差的影响最大不应超过 1.5%。I 号厂家的 2 号智能电能表参比条件和模拟用户测试的基本误差改变量已经超出了国标的允许范围,属于不合格品。

4 温度影响测试

为了进一步验证上述实验中 I 号厂家的 2 号智能电能表温度影响不合格的问题,将该智能电能表和合格的 I 号厂家的 3 号智能电能表同时放入高低温试验箱,分别在 10℃、20℃、40℃ 对两只表的上述实验的三个负载点基本误差(r_2^3)进行测试,不同温度基本误差和 20℃ 误差差值用 r_7 表示。

$$r_7 = r_{2(n^{\circ}\text{C})}^3 - r_{2(20^{\circ}\text{C})}^3 \tag{9}$$

测试结果如表 6 所示。

表 6 温度影响测试数据
Tab. 6 Temperature effect test data

负载电流/A		试验 箱温 度	0.97		5.2		53.5	
厂家	编号		r_2^3 /%	r_7 /%	r_2^3 /%	r_7 /%	r_2^3 /%	r_7 /%
I	2	20℃	0.6		0.4		0.6	
	3		0.0		0.0		0.0	
I	2	10℃	0.8	0.4	0.8	0.4	1.0	
	3		0.2	0.0	0.2	0.0	0.2	
I	2	40℃	-1.4	-2.0	-1.6	-2.0	-1.8	
	3		-0.2	-0.2	-0.4	-0.4	-0.1	

以上高低温测试结果再次验证了 I 号厂家的 2 号智能电能表按照国家标准 GB/T17215. 311-2008 的要求是不合格的。

5 结论分析

通过上述测试可以看出,无论是模拟用户测试还是参比条件测试智能电能表的基本误差值和电量走字误差均保持一致,充分说明智能电能表的基本误差是可以反映走字误差情况的。但有部分智能电能表存在用户实际使用中的误差和参比条件下测得的误差差异较大的情况。并且出现有智能电能表基本误差合格,但温度影响变差超过国标允许范围的情况。由于采用的智能电能表样本数量及品牌类型有限,虽然最终的测试基本误差均在合格范围内,但不能保证大批量用

户使用的情况下不会出现出厂误差合格的表在实际负载中误差超差的问题。所以电力部门和生产厂家有必要进行更多的现场使用中的抽样测试和数据分析,减小实际负载条件下电能表出现不合格的可能。

6 结束语

通过上述试验方法的数据分析,表明采用单相安装式标准电能表对实际使用中的智能电能表进行检测的方法可以通过多只串联批量测试,也可以方便地挂在用户现场,作为现场负载条件下智能电能表基本误差和长期电量走字误差测试的一种方法。对不同厂家智能电能表现场运行情况长期监测,弥补现场校验仪钳表受环境因素影响大、不能长期挂网的不足。目前已利用该方法在重庆市部分居民区对用电异常和有争议的用户进行挂网监测,均取得良好的监测效果。

参考文献

- [1] 江宇红. 单相费控智能电能表的原理及应用[J]. 计量与测试技术, 2011, 38(5): 6-8.
Jiang Yuhong. Principle and application of single-phase charge-control smart energy meter [J]. Measurement and Test Technology, 2011, 38(5): 6-8.
- [2] 张宇明. 单相智能电能表的现场检测误差分析及纠正[J]. 机电技术, 2015, (3): 119-120.
Zhang Yuming. Analysis and correction of field detection error of single-phase smart energy meter [J]. Electromechanical Technology, 2015, (3): 119-120.
- [3] 樊强. 一种低压智能表现场检查的快速方法[J]. 城市建设理论研究: 电子版, 2018, (16): 78.
Fan Qiang. A fast method for on-site inspection of low-voltage smart meters [J]. Theoretical Research on Urban Construction: electronic edition, 2018, (16): 78.
- [4] 袁静, 刘进. 关于对电能表现场检测的几点思考[J]. 计量与测试技术, 2014, 41(9): 19, 22.
Yuan Jing, Liu Jin. Some thoughts on field test of electric energy meter [J]. Measurement and Test Technology, 2014, 41(9): 19, 22.
- [5] 沈明炎. 单相智能电能表实际负载下的误差试验与分析[J]. 工业计量, 2014, 24(2): 14-18.
Shen Mingyan. Error test and analysis of single-phase smart energy meter under actual load [J]. Industrial Measurement, 2014, 24(2): 14-18.
- [6] 雷久明. 说说电能表的现场校验[J]. 品牌与标准化, 2012, (13): 4.
Lei Jiuming. Talk about the on-site verification of the energy meter [J]. Branding and Standardization, 2012, (13): 4.
- [7] 李野, 朱逸群, 于学均, 等. 基于0.02级安装式标准电能表的设计与应用[J]. 电子技术与软件工程, 2016, (2): 240.
Li Ye, Zhu Yiqun, Yu Xuejun, et al. Design and Application of Standard Energy Meter Based on 0.02 Level Installation [J]. Electronic Technology and Software Engineering, 2016, (2): 240.
- [8] 夏震, 张家安. 智能电能表状态在线综合评价方法[J]. 电器与能效管理技术, 2018, (21): 23-26, 52.
Xia Zhen, Zhang Jiaan. Online Comprehensive Evaluation Method of State of Smart Energy Meters [J]. Low Voltage Apparatus, 2018, (21): 23-26, 52.
- [9] 朱自伟, 冯兴乐, 徐锦涛, 等. 智能电能表可靠性研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2019, (4): 99-102.
- [10] 刘光界, 李翔, 陈叶, 等. 基于属性一致性理论的智能电表软件可靠性测试结果处理及评估研究[J]. 电测与仪表, 2021, 58(11): 170-178.
- [11] 张乐平, 周尚礼, 谢文旺, 等. 基于GO法与贝叶斯网络的智能电表可靠性预计方法研究[J]. 电测与仪表, 2021, 58(10): 177-184.
- [12] 张乐平, 胡珊珊, 梅能, 等. 智能电能表可靠性研究综述[J]. 电测与仪表, 2020, 57(16): 134-140.
Zhang Leping, Hu Shanshan, Mei Neng, et al. Overview of research on reliability of smart meter [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(16): 134-140.
- [13] 薛阳, 张蓬鹤, 王雅涛, 等. 智能电表可靠性评价方法研究与探讨[J]. 电测仪表, 2016, 53(13): 90-94.
- [14] 严晶晶, 王海巍, 张卫欣, 等. 智能电能表软件可靠性测试研究[J]. 电测与仪表, 2017, 54(7): 97-102.
Yan Jingjing, Wang Haiwei, Zhang Weixin, et al. Research on the software reliability testing of smart meters [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(7): 97-102.
- [15] 张卫欣, 解岩, 严晶晶, 等. 智能电表及其可靠性技术研究综述[J]. 电子产品可靠性与环境实验, 2013, 31(4): 50-54.
Zhang Weixin, Xie Yan, Yan Jingjing. Reliability technology development of smart electricity meter [J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2013, 31(4): 50-54.
- [16] 巨汉基, 郭丽娟, 刘延泉. 基于元器件应力法的智能电表可靠性研究与应用[J]. 电测与仪表, 2013, 50(S1): 7-11, 15.
- [17] 张俊玮. 电子式电能表可靠性预测方法的研究[J]. 电力大数据, 2018, 21(8): 71-74.
Zhang Junwei. Research on reliability prediction method of electronic energy meter [J]. Power Systems and Big Data, 2018, 21(8): 71-74.
- [18] 袁金灿, 马进, 王思彤, 等. 智能电能表可靠性预计技术[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(7): 161-166.

作者简介:



杨芾蓁(1987—),男,高级工程师,硕士,主要研究方向为传感与量测相关技术及计量设备新技术。
Email: 18680887087@163.com

侯兴哲(1965—),男,高级工程师,硕士,主要研究方向为量测、传感、电能表可靠性及计量设备新技术等。Email: hhhxz@sohu.com

收稿日期:2020-06-16;修回日期:2021-10-16

(王克祥 编发)