

无线传感器网络的能耗检测仪的设计

Design of Energy Consumption Detector Based on Wireless Sensor Network

付蔚方健

(重庆邮电大学工业物联网与网络化控制教育部重点实验室,重庆 400065)

摘要: 针对无线传感器网络的动态性、可靠性以及自组网等特点,采用 ADE7755+ATmega64+CC2430 的系统构架,设计了无线能耗检测仪。基于 IEEE 802.15.4e 无线通信协议,建立了家庭能耗监测系统,实现了家庭电器的远程控制和实时能耗监测。实测结果表明,该检测仪具有较高的可靠性和准确性,在家庭能耗监测中发挥了重要作用。

关键词: 无线传感器网络 能耗检测仪 CC2430 智能家居 远程控制

中图分类号: TP216 **文献标志码:** A

Abstract: Aiming at the characteristics of the wireless sensor network (WSN), e.g., dynamic, reliability and Ad Hoc, by adopting ADE7755+ATmega64+CC2430 system architecture, the wireless energy consumption detector is designed. On the basis of IEEE 802.15.4e wireless communication protocols, the home energy consumption monitoring system is built, and the remote control and real time energy consumption monitoring on household appliance is implemented. The experimental results indicate that the detector possesses high reliability and accuracy, and it plays an important role in the monitoring of household energy consumption.

Keywords: Wireless sensor network Energy consumption detector CC2430 Smart Remote control

0 引言

无线传感器网络广泛应用于工业、农业、军事、环境、医疗、交通等领域。2003年,美国《技术评论》将无线网络技术列为未来改变人类生活的十大技术之首^[1]。无线传感器网络^[2]是传感器节点以自组织和多跳形式构成的自组织分布式网络系统。网络中的每个传感器都可以感知、采集、处理和传输网络覆盖地理区域内感知对象的监测信息,并通过无线通信网络将所感知信息传送到用户终端,使用户完全掌握监测区域的情况并做出反应。智能家居能耗监控技术与无线网络技术相结合,能检测单个电器的能耗,从而为用户提供更明细的电能消耗情况,实现节能减排^[3]。该技术在给人们带来经济效益的同时,也为智能家居物联网带来更广阔的发展空间。

1 无线能耗检测仪设计方案

根据无线能耗检测仪的需求分析,从低成本、低功

耗、高可靠性角度^[4]出发,设计了无线能耗检测仪方案,如图1所示。

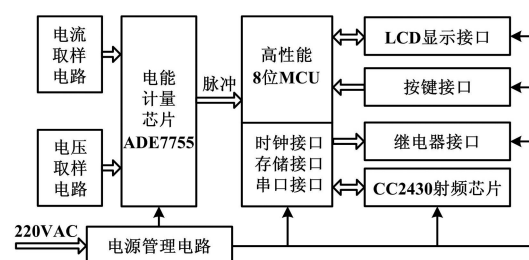


图1 无线能耗检测仪方案图

Fig. 1 Scheme of the wireless energy consumption detector

本方案选用电能计量芯片和电压电流采集电路的形式,把电能脉冲信号发送给主处理器芯片进行处理计算,同时把得到的能耗数据发送给无线射频芯片进行转发。电源管理电路直接由 220 VAC 电源供电,取得的电压经过转换后为各部分电路提供电源。

2 无线能耗检测仪硬件设计

本设计选用 ATmega64 作为处理芯片,其工作时钟频率为 16 MHz。无线收发芯片选用 CC2430,其自身集成了外围电路无线收发芯片,在简化硬件电路的同时,其高可靠性也能满足家居环境组网应用,并且支持 IEEE 802.15.4e^[5] 协议栈的移植。计量芯片的选择是无线能耗检测仪的关键,其性能的优劣直

国家科技重大专项基金资助项目(编号:2011ZX03005-002);

中韩合作基金资助项目(编号:S2012GR0092);

重庆市教委 2012 年度基金资助项目(编号:kj20534)。

修改稿收到日期:2012-08-20。

第一作者付蔚(1981-),女,2008年毕业于重庆邮电大学控制理论与控制工程专业,获硕士学位,讲师;主要研究方向为计算机网络技术、物联网技术。

接影响能耗信息的准确性。本设计选用 ADI 公司最近推出的低功耗、高性能的 ADE77XX 系列芯片 ADE7755。该芯片能把电量测量内核与微处理器、片内闪存、LCD 驱动器、实时时钟和智能电池管理电路结合在一起,允许电表保持时间、检测温度变化、读取 LCD 数据并完成其他功能。选择 ADE7755 作为计量芯片^[6]将大大简化系统的设计,提高计量的准确性。ADE7755 具有高精度、高性能、输出方式灵活、低功耗、低成本等优点,它在单相电能表中应用广泛。

无线能耗检测仪由备电压电流采集电路、LCD 显示电路、电源转换电路、键盘扫描电路以及开关控制电路等组成,其总体硬件设计方案如图 2 所示。

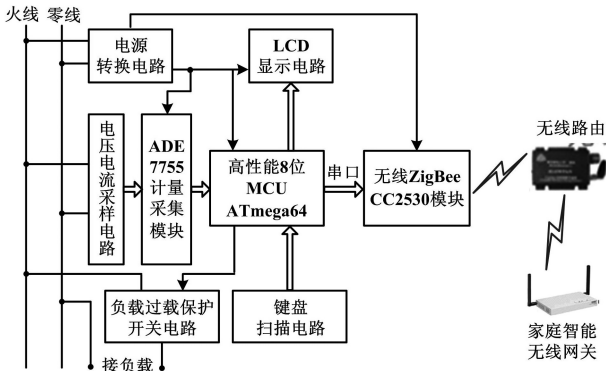


图 2 无线能耗检测仪硬件框图

Fig. 2 Block diagram of the hardware of wireless energy consumption detector

图 2 中,计量芯片 ADE7755 与不同量程的电压电流传感器直接相连,这既简化了接口设计,又提高了

功率测量的精确度和稳定性。由于电路输出为脉冲信号,所以 CPU 通过中断引脚可以方便准确地进行电量的累计。当有负载时,瞬时功率信号 CF 输出脉冲信号给微控制器 ATmega64,通过对 CF 的计数,可以得到累计的电量信息;然后 ATmega64 内部采用功率算法,通过内部定时器设定积分时间对 CF 进行计数;接着除以积分时间得到瞬时有功功率,并且根据设定的电价,得到电费数据信息;最后,ATmega64 将电器的瞬时有功功率值、累计电量、电费等数字信息通过串口发送给 CC2430,CC2430 通过无线路由将数据发送给智能家庭网关^[7-10],从而实现底层电器能耗信息的无线采集。

下面对几个重要的电路进行详细描述。

2.1 能耗检测电路

能耗监测电路是无线能耗检测仪硬件设计的关键,因为电量计量的准确与否直接影响能耗检测仪的准确性和稳定性。能耗检测电路原理图如图 3 所示。能耗检测电路主要由电压检测电路、电流检测电路和 ADE7755 外围电路组成。负载电流经过分流器再通过滤波电路后转换成合适的电压信号。转换后的电压被送入到电能计量芯片 ADE7755 的电流通道,即 V_{IP} 和 V_{IN} 端;而 220 V 相电压则通过校验衰减网络降压后,再通过滤波电路送入电能计量芯片 ADE7755 的电压通道,即 V_{2P} 和 V_{2N} 端。电流和电压经过 ADE7755 转换成瞬时功率,以高频脉冲形式从 CF 端输出,然后接入到 ATmega64 的外部中断信号输入端。主控芯片通过对 CF 脉冲信号的定时计算和计数处理,得到瞬时功率和累计电量值。

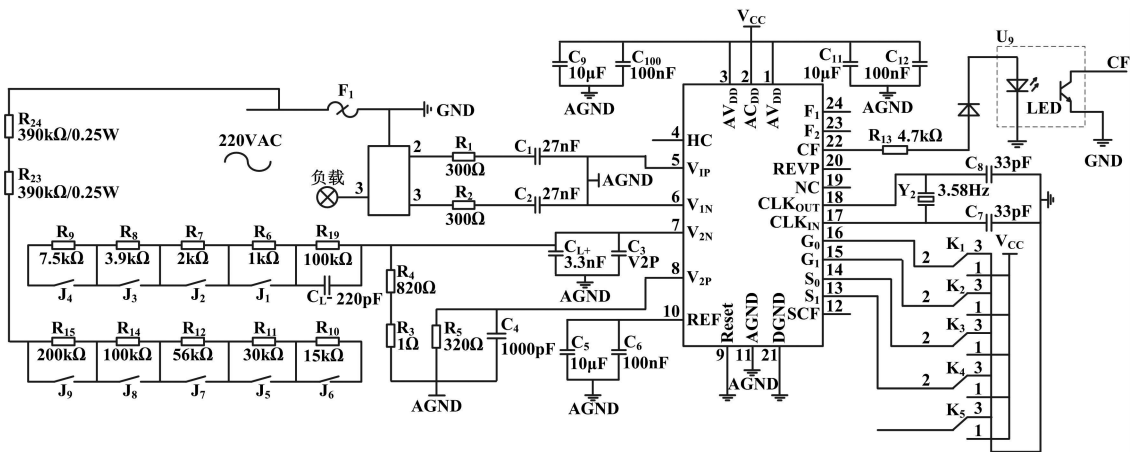


图 3 能耗检测电路原理图

Fig. 3 Schematic diagram of energy consumption detection circuit

图 3 中, F_1 为分流器; R_1 、 R_2 为采样电阻; C_1 、 C_2 为采样电容,一般选取为 27 nF 和 33 nF,它们为电流

采样通道提供采样电压信号,采样电压信号的大小由分流器的阻值和流过它的电流决定。电流采样通

道采用完全差动输入, V_{IP} 为正输入端, V_{IN} 为负输入端。根据 ADE7755 芯片技术指标可知, 电流采样通道最大差动峰值电压应小于 470 mV。电流采样通道有一个可编程增益放大器 (programmable gain amplifier, PGA), 其增益可由 ADE7755 的 G_1 和 G_0 来选择。

ADE7755 电流通道增益选择如表 1 所示, 当使用分流器采样时, G_1 、 G_0 都接高电平, 增益选择 16, 通过分流器的峰值电压为 ± 30 mV。考虑到常用家庭电器的功耗范围为 100 ~ 4 000 W, 所以在能耗检测仪硬件设计时, 按照标定电流为 5 (20) A (5 A 为负载电流, 20 A 为最大额定电流) 的规格, 分流器阻值选择为 $500 \mu\Omega$, 其分流器的类型为锰铜分流器。这样当流过分流器的电流为最大电流 20 A 时, 其采样电压为 $500 \mu\Omega \times 20 \text{ A} = 10 \text{ mV}$, 该值不超过峰值电压半满度值, 所以选用 $500 \mu\Omega$ 锰铜分流器, 令 $G_1 = 1$ 、 $G_0 = 1$ 时, 理论标定电流规格为 5 (20) A。

表 1 ADE7755 电流通道增益选择

Tab. 1 Gain selection of ADE7755 current channel

G_1	G_0	增益	最大差动信号/mV
0	0	1	± 470
0	1	2	± 235
1	0	8	± 60
1	1	16	± 30

ADE7755 电压输入通道 (V_{2N} 、 V_{2P}) 也为差分电路, V_{2N} 引脚连接到电阻分压电路的分压点, V_{2P} 接地。电压输入通道的采样信号是通过衰减线电压得到的, 其中 $R_6 \sim R_{14}$ 为校验衰减网络, 通过短接跳线 $J_1 \sim J_9$ 可将采样信号调节到需要的采样值。本文设计的能耗检测仪在基本电流为 5 A 时, 电压采样值为 174.2 mV。

为了保证分流器的容差和片内基准源的误差 $< 8\%$, 衰减校验网络的检验范围应 $\geq 30\%$ 。根据前文可知, 电压调节范围为 169.8 ~ 250 mV, 完全满足调节的需要。这个衰减网络的 -3 dB 频率是由 R_4 和 C_3 决定的, R_{19} 、 R_{23} 、 R_{24} 确保了这一频率, 即使全部跳线都接通, R_{19} 、 R_{23} 、 R_{24} 仍远远大于 R_4 , R_4 和 C_3 的选取要与电流采样通道的 R_1 、 C_1 相匹配, 这样才能保证两个通道的相位进行合适的匹配, 以消除因相位失调带来的误差影响。

2.2 无线数据收发电路

由于 CC2430 采用无线 SOC 设计, 其内部已集成了大量电路, 因此采用较少的外围电路即可实现信号的收发功能, CC2430 外围电路原理图如图 4

所示。

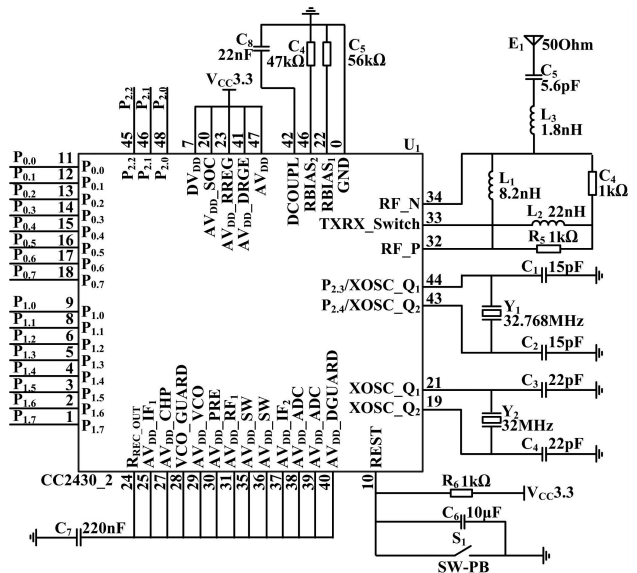


图 4 CC2430 外围电路原理图

Fig. 4 Schematic diagram of CC2430 peripheral circuit

图 4 中, Y_2 为 32 MHz 晶振, 采用 1 个 32 MHz 的石英谐振器和 2 个电容 (C_3 和 C_4) 构成一个 32 MHz 的晶振电路; Y_1 为 32.768 kHz 晶振, 采用 1 个 32.768 kHz 的石英谐振器和 2 个电容 (C_1 和 C_2) 构成一个 32.768 kHz 的晶振电路。 C_5 为 5.6 pF 的电容, 电路中的非平衡变压电路由电容 C_5 、电感 L_1 、 L_2 、 L_3 以及一个 PCB 微波传输线组成。整个结构满足 RF 输入/输出匹配电阻 (50 Ω) 的要求。

另外, 在电压脚和地脚都添加了滤波电容, 用于确保芯片工作的稳定性。

3 无线能耗检测仪软件设计

在无线能耗检测仪底层驱动程序设计中, 能耗采集模块和无线数据收发模块的设计是重点。

系统首先进行各参数的初始化, 包括中断向量的设置、ADE7755 使能端口的设置、定时器以及计数器的设置, 以保证系统对中断的响应处理和功能定时处理。

主程序采用轮询的方式, 通过检测 CF 脉冲来得到能耗数据, 并根据按键功能的标志位判断页码, 把数据送到液晶显示模块进行显示。另外, 系统通过串口数据收发模块和定时器将耗数据定时发送给 CC2430 的数据转发模块, 并且把能耗数据定时保存在 MCU 的 EEPROM, 以避免数据丢失。在中断响应中, 串口数据收发模块在接收到来自 CC2430 的转发命令数据时, 会执行响应的端口操作。

无线能耗检测仪软件流程图如图 5 所示。

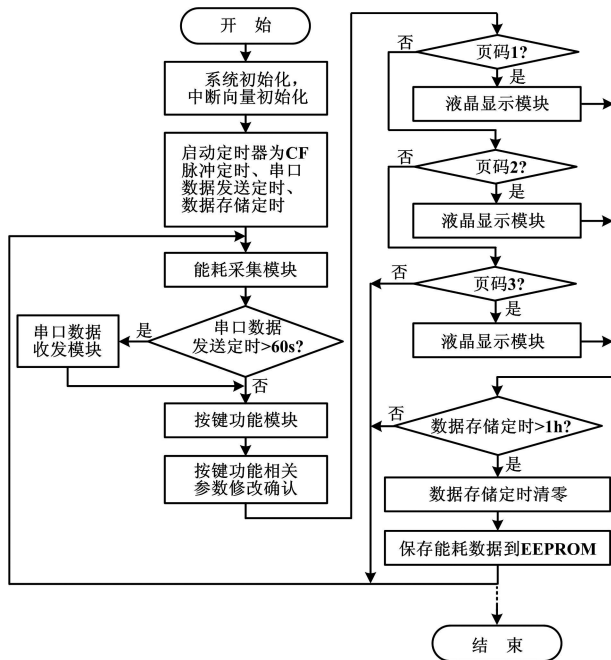


图5 主程序流程图

Fig. 5 Flowchart of the main program

4 无线能耗检测仪测试

4.1 电磁兼容测试

根据标准 GB/T 17215. 211-2006《交流电测量设备通用要求、试验和试验条件》^[9] 中第 7.5 条款提出的电磁兼容测试项目,对无线能耗检测仪进行射频电磁场抗扰度试验,以验证其可靠性,射频干扰等级 3 垂直极化测试曲线如图 6 所示。

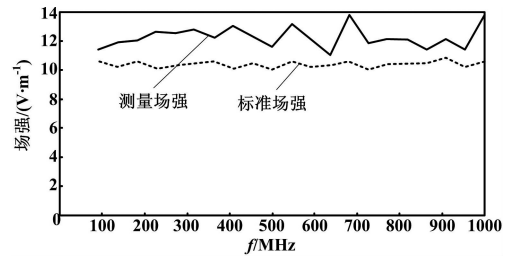


图6 射频干扰等级3垂直极化测试曲线

Fig. 6 Radio frequency interference level 3 vertical polarization test curves

从图 6 可以看出,在射频电磁场抗扰度测试中,功率放大器提供的实际场强大于设定的 10 V/m。在这种情况下,无线能耗检测仪仍能正常工作,所以其射频电磁场辐射抗扰度电磁兼容测试满足设计与应用要求。

4.2 准确性测试

本文设计的能耗检测仪选用 WF-D01A 型单相电能校验表作为标准表,其技术指标符合 GB/T 1725. 321-2008,准确精度为 1 级^[10],电流范围为 1.5 ~ 120 A、参比电压为 220 VAC/50 Hz。根据 JJG 596-1999《电子式电能表检定规程》^[11] 中第 3.5 条款,能耗检测仪应属于安装式电能表。在电路设计时,通过 ADE7755 电流通道的分流器的选定,计算出参比电流 $I_b(I_{max})$ 为 5(20) A。按照检定规程规定,安装式电能表的负载电流可为 $0.5I_b$ 、 I_b 、 I_{max} 。由于缺少供电源,所以选用负载电流为 2.3 A 电饭煲作为负载,通过标准表法计算相对误差来检定能耗检测仪的准确度, $0.5I_b$ 相对误差测试结果如表 2 所示。

表 2 $0.5I_b$ 相对误差测试结果

Tab. 2 The result of $0.5I_b$ relative error test

负载类型	功率误差(50 次)		电量误差(4 次/24 h)	
	最大误差	最小误差	最大误差	最小误差
电饭煲($I_{额} \approx 0.5I_b$)	测量值 532.0 W	测量值 531.2 W	测量值 12.1 kW·h	测量值 12.2 kW·h
	校验值 531.1 W	校验值 530.6 W	校验值 12.09 kW·h	校验值 12.18 kW·h
	相对误差 0.17%	相对误差 0.11%	相对误差 0.16%	相对误差 0.08%

从表 2 可知,在负载电流约为 $0.5I_b$ 的情况下,对能耗检测仪的相对功率误差记录 50 次,相对电量误差记录 4 次、每次测量 24 h,然后读取其最大误差和最小误差,确定无线能耗检测仪的测试功率相对误差范围为 0.11% ~ 0.17%,电量相对误差范围为 0.08% ~ 0.16%。

根据 JJG 596-1999《电子式电能表检定规程》^[11] 中第 2 条款,在功率因数为 1 的情况下,采用准确度等

级为 0.1 的标准表,对 0.5 级、1 级和 2 级被检表的误差评定范围分别为 $\pm 0.1\%$ 、 $\pm 0.2\%$ 、 $\pm 0.3\%$ 。由于在实际测试中,采用准确度为 1 级的标准表,根据误差结果,将其放大 10 倍,粗略估计被检表准确度等级为 2 级。为完善准确性测试工作,由重庆计量质量检测研究院采用准确度为 0.05 级的三相多功能电能表检定装置进行第三方测试,测试结果为电能误差国家 2 级,功率误差国家 2 级。

4.3 通信距离测试

在本样机测试中,主要针对无线能耗检测仪在有天线增益的情况下进行。无线能耗检测仪每 1 min 会定时发出无线能耗数据,在 1 h 内通过 CC2430 抓包器来获取无线能耗数据抓包率,得到无线通信距离测试结果。通信距离测试示意图如图 7 所示,通信距离丢包率测试对比如表 3 所示。

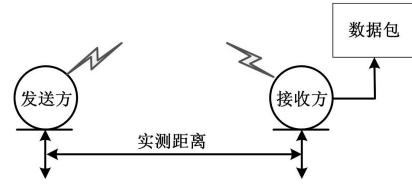


图 7 通信距离测试示意图

Fig. 7 Sketch map of communication distance test

表 3 通信距离丢包率测试对比

Tab. 3 The comparison of packet loss rates of communication distance

天线增益	25 m 丢包/ (个·h ⁻¹)	25 m 丢包率/%	50 m 丢包/ (个·h ⁻¹)	50 m 丢包率/%	75 m 丢包/ (个·h ⁻¹)	75 m 丢包率/%	100 m 丢包/ (个·h ⁻¹)	100 m 丢包率/%
有天线(3 dB)	5/60	8.3	10/60	16.7	19/60	31.7	31/60	51.7

4.4 射频穿透性测试

射频穿透性测试示意图如图 8 所示,通过定时 1 h,分别测量无线能耗检测仪与无线路由之间隔 0 道墙、1 道墙、2 道墙(墙厚 20 cm)时的抓包率,通过结果分析得到设备的射频穿透性,穿透性测试丢包率对比如表 4 所示。

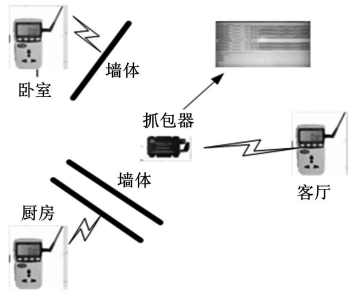


图 8 射频穿透性测试示意图

Fig. 8 Sketch map of the RF penetrability test

表 4 穿透性测试丢包率对比

Tab. 4 The comparison of packet loss rates of penetrability tests

障碍	丢包/(个·h ⁻¹)	丢包率/%
0 道墙	2/60	3.3
1 道墙	6/60	10.0
2 道墙	11/60	18.3

5 结束语

本文在已有的智能家居平台下,通过对家用电器功耗采集理论以及相关软硬件进行的研究,同时结合 IEEE 802.15.4e 网络协议,按照产品设计原则,研究设计了无线能耗检测仪。该检测仪用以实现家居电器功耗信息的采集和远程传送,可通过多种终端设备对家用电器功耗信息进行监控。在实际的系统长时间运行过程中,各种功能和性能都处于正常的水平,但对于能

耗数据的准确性、无线传输和数据应用,从物联网长远的发展角度来说,还需要在能耗数据对设备和系统不断完善和优化^[11-14]。采集精度、外壳工艺、数据信息种类、准确误差测量等方面需要进一步改进。

参考文献

- [1] 任丰原,黄海宁,林闯.无线传感器网络[J].软件学报,2003,14(7):1281-1291.
- [2] 李战明,李泉,殷培峰.基于 ZigBee 的环境监测无线传感器网络节点设计[J].电子测量技术,2010(6):118-122.
- [3] William S. 无线通信与网络[M].2 版.何军,译.北京:清华大学出版社,2010:397-403.
- [4] Tompros S, Mouratidis N, Draaijer M, et al. Enabling application of energy saving appliances of the home environment [J]. IEEE Network, 2009, 23(6):8-16.
- [5] 时志娜,董爱华,孙士栋,等.基于 ADE7755 单相电能计量电路的设计[J].微计算机信息(嵌入式与 SOC),2009(9):203-204.
- [6] Inoue M, Higuma T, Ito Y, et al. Network architecture for home energy management system [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2003, 49(3):606-613.
- [7] Li C H, Bai Y W, Lin M B, et al. Remote-controllable power outlet system for home power management [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2007, 53(4):1634-1641.
- [8] 国家质量监督检验检疫总局. GB/T 17215. 211-2006 交流电测量设备通用要求、试验和试验条件[S].北京:中国标准出版社,2006
- [9] 国家质量监督检验检疫总局. GB/T 1725. 321-2008 交流电测量设备特殊要求[S].北京:中国标准出版社,2008.
- [10] 国家质量技术监督局. JJG 596-1999 电子式电能表检定规程[S].北京:中国计量出版社,2004.
- [11] 周莉,刘开培.电能计量误差分析与电能计费问题的讨论[J].电工技术学报,2005,20(2):63-68.
- [12] 高云鹏,滕召胜,杨步明,等.谐波电能计量的比差与角差校正方法[J].仪器仪表学报,2008,29(7):1376-1381.
- [13] 温和,滕召胜,胡晓光,等.谐波存在时的改进电能计量方法及应用[J].仪器仪表学报,2011,32(1):157-162.
- [14] 戎君,张贵新,朱小梅,等.基于相位差校正法的虚拟谐波功率与电能计算[J].电测与仪表,2008,45(11):1-5,21.