电子式电流互感器暂态传变延时测试技术研究

赵 勇[1]，孔圣立[1]，罗 强[2]，石 光[1]，周 鹏[3]，杨海晶[1]，李 雷[1]

（1.国网河南省电力公司电力科学研究院，河南 郑州 450052；2.江苏凌创电气自动化股份有限公司，江苏 镇江 212009；
3.国网河南省电力公司，河南 郑州 450052）

摘要：从继电保护应用的角度关注了电子式电流互感器暂态下的传变延时问题，阐述了暂态延时与稳态延时的差异性以及在工程中测试的必要性。提出了一种基于高精度高带宽模拟采样和数字量接收精确时标标定的测试方案，采用数字相位锁定器（DPLL）消除数字量时序抖动，利用突变量检测确定初始时刻，再结合相位提取进行时差补偿修正，很好地消除了测试中的各个误差因素。通过开发的测试系统在工程中的应用，证明了所提方案的可行性。

关键词：电子式电流互感器；暂态传变延时；突变量检测；相位补偿修正；DPLL

Research on testing technology of ECT transmission delay time in transient state

ZHAO Yong[1], KONG Sheng-li[1], LUO Qiang[2], SHI Guang[1], ZHOU Peng[3], YANG Hai-jing[1], LI Lei[1]

(1. State Grid Henan Electric Power Company Research Institute, Zhengzhou 450052, China; 2. Jiangsu Lingchuang Electric Automation Co., Ltd., Zhenjiang 212009, China; 3. State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: This paper studies the electronic current transformer transient transmission delay time from the point view of relay protection, explains the difference between transient state delay time and steady state delay time, as well as the necessity test in engineering. It proposes a test scheme based on simulation sampling with high accuracy and high bandwidth, and the precise time scale digital calibration receiver. Digital phase locked loop (DPLL) is used to eliminate the digital timing jitter. Mutation detecting is applied to determine the initial time, combined with the phase extraction for time delay compensation. The various error factors are eliminated in the test system. The developed test system is applied in the practical engineering, which proves the test scheme is feasible.

Key words: electronic current transformer; transient transmission delay; mutation detection; phase compensation; DPLL

中图分类号： TM452 文献标识码：A 文章编号： 1674-3415(2014)17-0125-06

0 引言

电子式电流互感器（ECT）已经在智能电网中广泛应用，其稳态特性和暂态特性直接关系到后端间隔层设备的性能好坏，继电保护设备在故障出现时必须以尽可能快的速度准确判断并决定是否动作，此时电子式电流互感器能否快速且准确地将系统一次侧的暂态电流传变到继电保护设备，就直接影响到故障切除的总耗时时间，可见，暂态过程中电子式电流互感器的传变延时时间测试具有极为重要的意义[1-2]。

电子式互感器的绝对延时时间，是指电子式互感器一次侧工频模拟量出现某一量值的时刻，到电子式互感器合并单元（MU）输出口将该模拟量对应的数字采样值送出的时刻，这两个时刻之间的间隔时间[3]。国家电网公司在《Q-GDW441-2010 智能变电站继电保护技术规范》中规范了电子式互感器的传输延时时间不大于 2 ms[4]。

目前国内针对电子式互感器的延时时间测试只是稳态下的测试，以稳态延时指标代替暂态指标，没有一套完善的针对电子式互感器暂态传变延时的测试系统[5-6]，为工程应用带来一定的安全隐患。本文就此展开了讨论和研究，提出了一套测试 ECT 暂态传变延时的技术方案，并进行了实际测试应用。

1 暂态传变延时与稳态传变延时差异性

稳态绝对延时时间测试，是在 ECT 一次侧施加额定电流一定比率（一般不大于 1.2 倍）的稳定电

流，同步检测合并单元（MU）输出的基波相位和一次侧电流基波相位，结合当前实测频率，由相位差换算出绝对延时时间为 $\nabla t=(\Phi^{\text{智能}}-\Phi^{\text{传统}})/\omega$。

而暂态时，一次侧电流幅值远大于稳态时电流，并且除基波外往往包含了衰减直流分量（含量大小和合闸角相关）和谐波分量，ECT 在暂态下的幅值误差，相位误差，噪声和零漂抑制，抗电磁干扰等条件都和稳态不同，造成 ECT 暂态传变特性和稳态相比存在差异性，因而稳态的指标在暂态下并不完全适用[7-8]。

另外，基于相位差测试延时无法分辨延时大于整周波（360°）的极端异常情况，如图 1，频率为额定 50 Hz 时，当试品延时增加 20 ms 后，试品相位将保持不变，$\Phi(t)=\Phi(t+20)$，得到的延时时间也将保持不变。

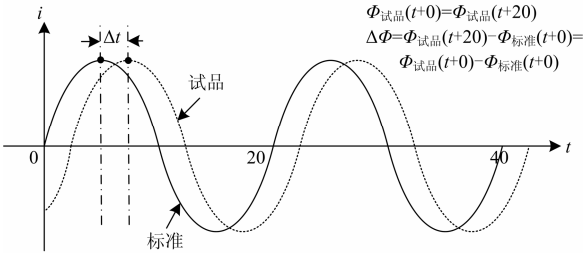

图 1 相位差不能反映大于 20 ms 的延时

Fig. 1 Phase difference does not reflect greater than 20 ms

国内某座运行的 500 kV 智能变电站中，在区外进行人工接地试验时，造成本站的 500 kV 主变差动、220 kV 母差、220 kV 部分线路纵联差动保护均误动，原因就是部分间隔的 MU 绝对延时时间大于了 20 ms，造成跨间隔保护装置的采样不同步，错误地产生了持续 1 周波的差流，而投运前调试仅对 MU 进行了稳态下的相关测试。图 2 是其中一套 220 kV 线路光差保护装置误动的录波图，可以看出由于本侧的 C 相电流采样延时过大，造成线路两侧采样不同步，出现差流后 C 相误动。在稳态下，两侧采样延时相差 20 ms 并不能在差流中得到体现。

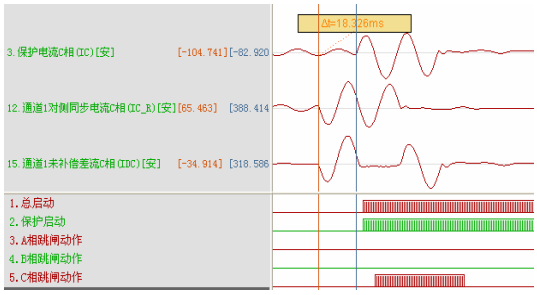

图 2 线路纵联光纤差动保护录波图

Fig. 2 Record diagram of line optical fiber differential protection

2 暂态传变延时的测试方案

2.1 系统方案

暂态传变延时测试系统借助于目前传统互感器暂态试验系统[9]，系统方案示意图如图 3 所示。

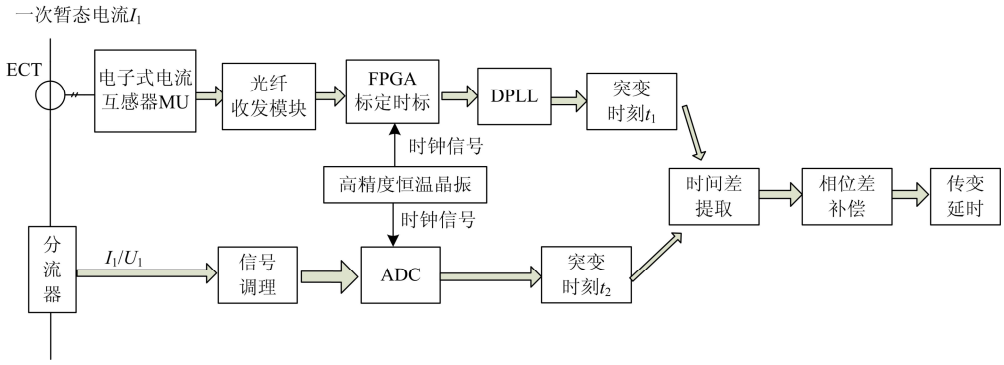

图 3 暂态传变延时测试原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of transient transmission delay test

将电子式电流互感器串接到暂态试验系统的一次电流系统中，由现有的暂态试验系统来控制暂态电流的发生和切除时刻、暂态电流幅值、衰减直流分量的含量和时间常数等指标，可以进行单次通电（*C*-*t*'-O）或双次通电（*C*-*t*'-*O*-t_{fr}-*C*-*t*''-*O*）暂态试验[10-11]。

一次暂态电流经过分流器的变换，输出可供采集的低幅值模拟电压信号，该信号经过抗混叠调理，进入模数转换环节，得到测试所需的标准源信号。相对于传统电磁式互感器的传变，分流器传变一次侧电流具有更好的带宽和线性度。ECT 的采样值由 MU 通过 FT3 或光纤以太网输出，属于被测信号量[12-14]，

采用 FPGA 来实现 MAC 子层，完成以太网采样值和 FT3 采样值的接收，并精确标定采样值时标，通过数字相位锁定器（DPLL）处理消除 MU 数字量的时序抖动，得到最终的被测信号。

高精度的恒温晶振产生测试系统的时钟信号，作为模数转换模块和 FPGA 运行的基础时序。

对接收到的标准源信号和被测量信号，均进行突变量的实时判别，突变量的计算算法为

$$\Delta i = |\,[\,i(t) - i(t-T)\,] - [\,i(t-T) - i(t-2T)\,]\,|$$

式中：i 为电流瞬时值；t 为当前时刻；T 为一个工频周波。

该算法可以有效地避免试验过程中频率的波动带来的突变量的影响，当发现突变量 Δi 大于定值并持续 1 ms 即认为突变量发生[15]。记录标准源突变时刻 t_1，经过加 Hanning 窗的傅氏滤波[16]，获取信号 t_1 时刻的基波相位 φ_1，同时计算系统当前频率 f。同样的算法检测出被测量的突变时刻 t_2，并提取此时的基波相位 φ_2，得到时间的补偿量：$\Delta t=(\varphi_2-\varphi_1)/2\pi f$，最终电子式电流互感器的暂态传输延时为 $T_d = t_2 - t_1 - \Delta t$。

2.2 误差因素分析及消除

本系统属于时间值测量，涉及到标准源和试品信号的时标信息、波形信息（包括频率、幅值和相位信息）的提取，对时钟信号、时序控制的要求很高，这需要基于一个稳定精确的基础时钟信号。ADC 采样速率偏离设计值，采样时钟信号抖动造成的孔径延时和孔径抖动，会带来标准源信号信息精度降低。对试品数字量标定时标时，基准时间不准确、MAC层时序不稳定、程序中断或任务响应时间不确定，都会造成数字量时标精度降低。为此，采用低温漂系数低相位噪声的恒温晶振作为整个系统的基础时钟信号，提高 ADC 环节和数字量接收环节在时域上的时间精度。

采用 FPGA 来完成数字量的接收，FPGA 实现 MAC 层，通过 MII 接口与 PHY 芯片通信，如果接收到以太网帧的帧定界符，并且与前一数据帧的时间间隔大于最小帧间隙，则进入数据接收状态，并标定以太网数据帧头的到达时刻。相对于以太网收发控制器，FPGA 优良的时序控制能力，能够避免数据接收环节的时间误差，并能从物理层精确确定时标，精度等级从微秒级提高到纳秒级。

MU 由于同步处理，数据打包，程序任务调度，光纤收发接口等环节的影响，数据帧输出时存在一定的随机时间抖动，即采样值报文的输出时刻 $\theta_1(t)$ 是带有随机抖动的，尤其是经过网络以后该抖动值可达到30～40 μs。为此，采用DPLL原理对时标 $\theta_1(t)$ 进行消抖，得到最终时标 $\theta_2(t)$，原理示意图如图 4 所示。

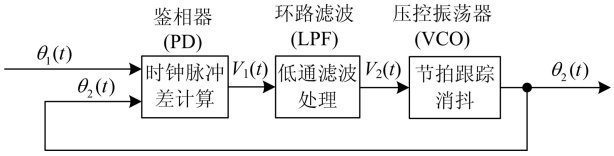

图 4 DPLL 进行时间的消抖

Fig. 4 DPLL eliminating the time jitter

原始采样值报文的到达节拍构成 DPLL 的初始输入量 $\theta_1(t)$，在 DPLL 启动初始时，$\theta_2(t)=\theta_1(t)$。不论是累计误差或是时间抖动造成的 $\theta_1(t)$与 $\theta_2(t)$的失步，均由鉴相器完成两者时间差值计算。该差值作为环路滤波器的输入量 $V_1(t)$，设计一个 IIR 型低通滤波器来保证良好的跟踪速度和稳定性，滤波输出为 $V_2(t)$。$V_2(t)$作为压控振荡器的输入量，按其幅值的大小来确定跟踪调节步长，在不超过 1 s 的时间内完成 $\theta_2(t)$的整个跟踪过程，以上环节在 DPLL 的运行中连续循环进行[17]，最终 $\theta_2(t)$的抖动幅度能降低到原有值的 1/10 以内。

突变时刻 t_1 和 t_2 的时间差并不是暂态传变延时时间，因为这中间也包含有误差因素。首先被测数字信号的采集是基于 MU 的晶振，在无同步信号联系的情况下，两者之间的采集时间必定是异步的，而寻找突变时刻是基于同一个固定定值的不等式算法，因而 t_1 时刻和 t_2 时刻必定包含了采样异步时间。其次，由于存在采样误差，标准源突变时刻的电流瞬时值和 MU 突变时刻的电流瞬时值必定有差异，这种瞬时值的差异也同时带入到了 t_1 和 t_2 的时间差上，特别是对 ECT 的暂态最大峰值瞬时误差限值要求是 10%，这种差异更是不可忽略。为了消除以上误差因素，采用相位差进行时间修正。对于交流信号而言，时域上的时间信息必定反映到相位上，即从相位信息中可以提取出相应的时间信息。一定长度时间窗内的个别点的采样误差、所有点的偏移误差和增益误差、采样中的随机噪声等等，都对基波相位的影响有限，因而通过滤波提取出基波相位 φ_1 和 φ_2，大大消除了采样误差影响，同时从 $\Delta\varphi=\varphi_2-\varphi_1$ 中得到采样异步的信息，时差补偿量即为：$\Delta t=(\varphi_2-\varphi_1)/2\pi f$。

2.3 系统的研制开发

暂态电流 I 经过分流器转换成峰值 10 V 以内的电压信号 U 供采集，如图 5 所示，采集回路经过信号调理后，采样频带范围外信号大幅衰减。考虑到暂态电流分量的主要谐波范围，ADC 的采样率采用 40 kHz，选用 24 位∑-△架构高性能模数转换器 ADS1271，以保证足够的带宽和精度获取真实的一次电流波形。ADC 的采样时序基于不低于 5 ppb 的高精度恒温晶振控制，标准源信号的每个采样值均标定时标。

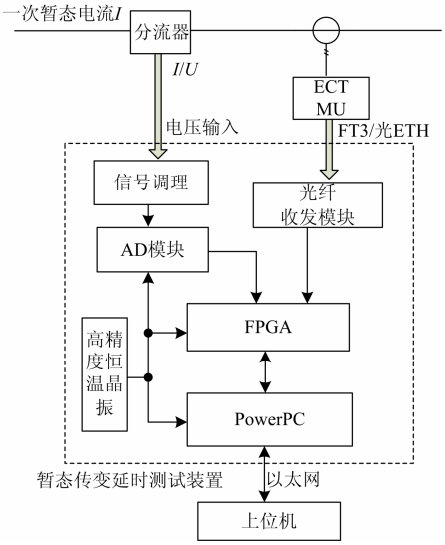

图 5 暂态传变延时测试系统结构图

Fig. 5 Structure diagram of transient transmission delay test

光纤收发器采用 AFBR5803，保证有足够的带宽和响应速度。FPGA 采用 Spartan3 系列产品 XC3S1500，来实现 MU 的以太网采样值和 FT3 采样值接收，FPGA 对每个采样值进行精确时间标定，接收环节的时间抖动控制在纳秒级别[18-19]。

采用 MPC8247 嵌入式微处理器，该处理器属于 PowerQUICC II 系列，包含一个基于 PowerPC MPC603e 的内核和一个通信处理内核 CPM，测试装置的应用软件以 vxworks 嵌入式实时操作系统为平台，C 语言编写。

上位机的程序基于 Labview 平台开发，该平台在虚拟仪器、测量控制和仿真领域具有独到的优势，延时测试的上位机程序充分利用其数据和图形处理能力，以及方便的图形化 G 语言开发能力，完成标准源和试品的数据接收，误差分析，波形绘制，数据存储和事后分析功能[20-21]。

3　测试系统应用

该系统在实验室对国内某厂家的一只 110 kV、额定 1 000 A、5TPE 的 IEC61850-9-2LE 输出的单相电子式电流互感器进行了实测，一次侧施加 4 倍额定的暂态电流。测试结果见图 6，t_1 和 t_2 时刻相差 1.102 ms，经过补偿修正后暂态的延时时间为 1.121 ms。试验进行 5 次的结果如表 1，测试结果具有较好的稳定性与一致性。

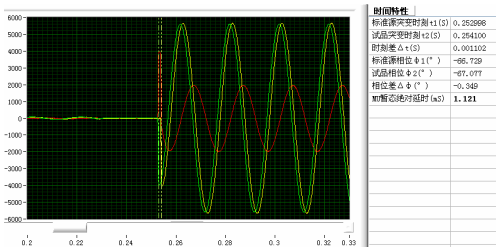

图 6 IEC61850-9-2LE 输出式 ECT 延时测试

Fig. 6 IEC61850-9-2LE type ECT delay time test

表 1 IEC61850-9-2LE 输出式 ECT 测试数据

Table 1 IEC61850-9-2LE type ECT test data

次 数	1	2	3	4	5
延时时间/ms	1.121	1.126	1.117	1.127	1.117

将互感器换成另一厂家的 110 kV、额定电流 600 A、5TPE 的 IEC60044-8 FT3 输出的 ECT 进行实测，一次侧施加 5 倍额定的暂态电流，测试结果见图 7，t_1 和 t_2 时刻相差 1.902 ms，经过补偿修正后暂态的延时时间为 1.765 ms。试验进行 5 次的结果如表 2，同样具有较好的稳定性。

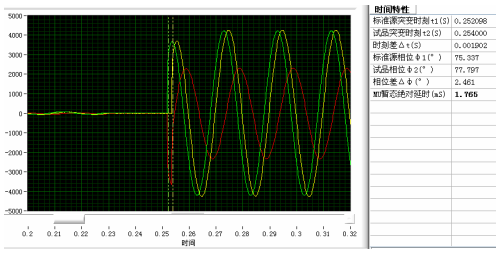

图 7　IEC60044-8 FT3 输出式 ECT 延时测试

Fig. 7 IEC60044-8 FT3 type ECT delay time test

表 2 IEC60044-8 FT3 输出式 ECT 测试数据

Table 2 IEC60044-8 FT3 type ECT test data

次 数	1	2	3	4	5
延时时间/ms	1.765	1.766	1.766	1.774	1.773

4 结论

电子式电流互感器的暂态传变延时关系到继电保护的动作快速性，关系到跨间隔设备采样的同步性，该时间不能用稳态下的绝对延时时间指标来代替，在工程应用中不能忽略对暂态延时时间的测试，以免留下安全隐患。通过现有的暂态试验系统，在 ECT 一次施加暂态电流，对一次电流进行高精度实时采集，FPGA 同步进行 MU 数据的接收和精确标定时标，由 DPLL 环节消除 MU 采样值的时间抖动，在高精度恒温晶振的统一时钟信号控制下，在同一个时间轴上得到标准源波形和试品波形。通过突变量检测算法来确定标准源和试品的突变时刻差，再由滤波算法提取基波相位，由相位差来弥补突变时刻中所包含的误差，得到最终的暂态传变延时时间。通过已经研制出的测试系统在实验室的测试验证，证明本方案切实可行。

参考文献

[1] 冯军. 智能变电站原理及测试技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.

[2] 黄益庄. 智能变电站自动化系统原理与应用技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.

[3] Q/GDW 690-2011 电子式互感器现场校验规范[S]. 2010.

[4] Q/GDW 441-2010 智能变电站继电保护技术规范[S]. 2010.

[5] 童悦, 李红斌, 张明明, 等. 一种全数字化高压电流互感器在线校验系统[J]. 电工技术学报, 2010, 24(8): 59-64.
TONG Yue, LI Hong-bin, ZHANG Ming-ming, et al. A full digital high voltage current transformer online calibration system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 24(8): 59-64.

[6] 马永跃, 黄梅. 数字量输出型电子式互感器校验系统的研制[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(1): 83-86.
MA Yong-yue, HUANG Mei. The development of digital output of electronic transformer calibration system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(1): 83-86.

[7] 陈辉, 陈卫, 李伟. 基于 Rogowski 线圈的数字积分器仿真及研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(2): 43-47.
CHEN Hui, CHEN Wei, LI Wei. Digital integrator simulation and research based on Rogowski coil[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(2): 43-47.

[8] 张冈, 王程远, 陈幼平. PCB 空心线圈电流传感器的暂态特性[J]. 电工技术学报, 2010, 24(11): 85-89.
ZHANG Gang, WANG Cheng-yuan, CHEN You-ping. Transient characteristics of PCB air core coil current sensor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 24(11): 85-89.

[9] 李长云, 李庆民, 李贞, 等. 直流偏磁和剩磁同时作用下保护用电流互感器的暂态特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(23): 107-111.
LI Chang-yun, LI Qing-min, LI Zhen, et al. DC magnetic bias and remanence while under the effect of protection of transient characteristic of current transformer[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(23): 107-111.

[10] GB16847-1997 保护用电流互感器暂态特性技术要求[S]. 1997.

[11] GB/T 20840.8 互感器第八部分: 电子式电流互感器[S]. 2008.

[12] IEC 60044-8: 2002(E) instrument transformers-part 8: electronic current transformers[S].

[13] DL/T860.91 变电站通信网络和系统 第 9-1 部分: 特定通信服务映射-通过单向多路点对点串行通信链路的模拟量采样值[S].

[14] DL/T860.92 变电站通信网络和系统 第 9-2 部分：特定通信服务映射-通过 ISO8802-3 的模拟量采样值[S].

[15] 尹项根, 曾克娥. 电力系统继电保护原理与应用(上册)[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2001.

[16] 温和, 滕召胜, 王永, 等. 改进加窗插值 FFT 动态谐波分析算法及应用[J]. 电工技术学报, 2012, 26(12): 270-277.
WEN He, TENG Zhao-sheng, WANG Yong, et al. The improved algorithm and application analysis of the interpolating windowed FFT dynamic harmonic[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 26(12): 270-277.

[17] 李澄, 袁宇波, 罗强. 基于电子式互感器的数字保护接口技术研究[J]. 电网技术, 2007, 31(9): 84-87.

LI Cheng, YUAN Yu-bo, LUO Qiang. Research on Interfacing technology for digital protection based on ECT/EVT[J]. Power System Technology, 2007, 31(9): 84-87.

[18] 龚坚, 彭晖, 乔庐峰, 等. 标准 802.3 以太网 MAC 控制器的 FPGA 设计与实现[J]. 军事通信技术, 2005(4): 21-24.
GONG Jian, PENG Hui, QIAO Lu-feng, et al. FPGA design and implementation of standard 802.3 Ethernet MAC controller[J]. Journal of Military Communications Technology, 2005(4): 21-24.

[19] 徐科, 窦小波, 胡敏强, 等. 基于 ARM 和 VxWorks 的新型发电机微机励磁调节装置[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(3): 73-76.
XU Ke, DOU Xiao-bo, HU Min-qiang, et al. Microprocessor excitation regulator based on ARM and VxWorks[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(3): 73-76.

[20] 周福超, 汪志勇, 居滋培. 基于 LabVIEW 的虚拟频谱分析仪[J]. 仪器仪表学报, 2002(增刊 2): 741-743.
ZHOU Fu-chao, WANG Zhi-yong, JU Zi-pei. The virtual spectrum analysis instrument based on LabVIEW[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2002(S2): 741-743.

[21] 杨乐平, 李海涛, 赵勇, 等. Labview 高级程序设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.

收稿日期：2013-12-04；

作者简介：

赵 勇(1967-)，男，硕士，高级工程师，主要从事电力系统继电保护及智能变电站研究工作； E-mail：13803819110@126.com

孔圣立(1978-)，女，硕士，高级工程师，主要从事电力系统及自动化研究工作；

罗 强(1980-)，男，硕士，工程师，从事继电保护及电子式互感器校验技术研究。