

基于 ADSP-BF606 的电能质量检测装置的设计

低成本和高性能成为了电能质量监测装置设计的主要矛盾，所以设计了基于亚德诺半导体公司（Analog Devices Inc, ADI）最新双核高性能 ADSP-BF606 芯片的电能质量检测系统。设计中采用了高速 AD 芯片 AD7606 并行采集八路信号，使系统能够进行实时数据采集、处理和分析，而且成本更低。谐波分析采用了加窗插值修正快速傅里叶变换算法，各次谐波计算准确度更高。采用了 S 变换的结果作为扰动检测和定位的依据，定位准确。扰动的分类识别采用了小波包分解和支持向量机相结合的方式，利用小波包分解提取各种扰动的特征量，利用聚类思想中的类距离概念设计了二叉树结构的支持向量机分类器，使得分类器更加简洁和智能。实验结果表明设计满足了自动化、智能化、高性能和低成本的要求。

潘丰厚¹ 原峰¹ 王茂军¹ 钟丹田¹ 高强^{1,2} 张云华¹/1.国网辽宁省电力有限公司电力科学研究院 2.上海交通大学



潘丰厚/工程师

关键词/Keywords

电能质量 ·
DSP ·
双核 ·
S变换 ·
小波包 ·
支持向量机 ·

0 引言

目前，电能在经济发展中具有非常重要的地位，电能已成为现代化生产的主要动力。电能质量的好坏直接影响到经济效益，它在国计民生中日益显示出其重要作用。而如今，大功率电子器件，大电容、非线性和冲击性负载等电子设备的使用，给电能带来了严重污染，影响了电能质量。用电方的设备受损或造成安全隐患，供电方则需要极力避免遭受来自用电设备产生的干扰，维护电网安全稳定^[1-3]。因此，对电能质量检测装置进行研究有着非常重要的意义。

保证电能质量的关键在于是否能够及时精确地检测电网的异常，而电能质量检测装置就是进行电能质量管理的有效方式之一^[4-5]。大多数电能质

量检测装置采用单片机+DSP 结构或单 DSP+单 ARM 结构，前者的唯一的优势就是价格低廉，后者虽功能齐全，但价格昂贵，在实际应用中或多或少存在着问题：功能单一；存储空间小；不具备网络功能；价格昂贵；不便大量安装在现场；进行多点检测等。因此，本文基于当前最新的双核高性能 DSP 芯片，设计一款实用且处理能力强的电能质量检测装置，实现在线数据采集、处理和分析，高准确度计算谐波以及准确检测、定位和分类各种暂态扰动，满足自动化、智能化、高性能和低成本的要求。

1 硬件设计

1.1 硬件系统架构

电能质量检测装置需要完成采集、计算等各项任务，目前市面上的设计方案可以归为以下几种方式：

- 1) DSP 加单片机的方案。单片机控制能力强，但计算处理能力较弱。
- 2) 单独一块 DSP 处理器的方案。计算处理能力较强，而且技术和方案均比较成熟。
- 3) 单独一块 ARM 处理器的方案。可以移植实时操作系统并进行多任务调度。
- 4) 一块 DSP 处理器加一块 ARM 处理器的方案。兼顾了 DSP 处理器与 ARM 处理器的优势，但设计较为复杂，成本偏高。

从设备的角度考虑，目前电能质量检测装置的发展趋势倾向于采用永久性的固定设备对现场数据进行在线检测。

综合考虑了以上设计方案的优缺点及发展趋势,本设计采用了ADI最新推出的双核高性能数字信号处理芯片,设计了一款新的电能质量检测装置的整体方案。其硬件架构主要由三个部分组成:电压电流信号采集模块、信号调度与处理模块以及供电电源模块。硬件框图如图1所示。

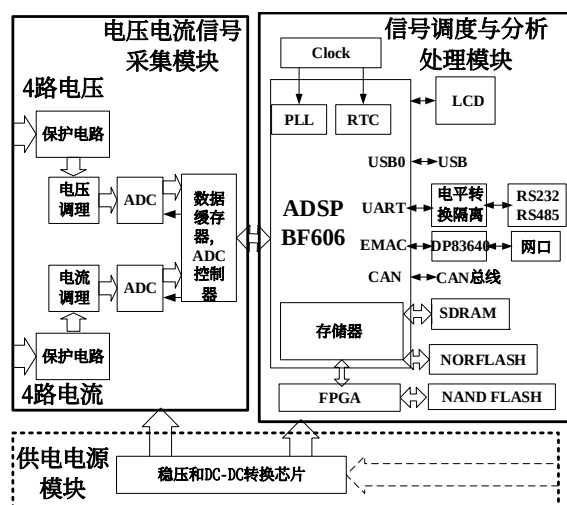


图1 电能质量检测装置硬件框图

其中电压电流信号采集模块用于采集模拟信号,将模拟信号转换成数字信号,并发送给后端信号调度与处理模块进行计算。信号调度与处理模块是整个电能质量检测装置的核心,包括各种外设和系统的核心芯片ADSP-BF606,主要针对信号进行包括谐波分析在内的各种算法运算,并将得到的运算结果数据进行存储,协议转换后上传。供电电源模块用于对前端电压电流信号采集采集模块和后端信号调度与处理模块供电。

1.2 核心芯片的选择与特点

ADSP-BF606是ADI公司推出的全球第一款基于双核高性能DSP(Core1[#]、Core2[#])结构设计,2×400 MHz主频,Core1[#]可以实现基于uCLinux Kernel 3.3嵌入式任务,处理非实时任务,同时支持完整的IEC 61850 MMS功能应用,Core2[#]可以实现各类高强度的实时处理计算。另外,ADSP-BF606还拥有两个独立的以太网MAC(两个MAC地址),非常适合IEC 61850应用。其拥有3个增强型并行外设接口,支持最高24位的数据宽度,可直接连接TFTLCD面板、并行转换器等其他通用外设。通信接口包括同步串行端口、UART、SPI、I2S、USB、EMAC和CAN

等,芯片的集成度非常高。本设计中的各个模块均可与ADSP-BF606相应接口直接相连,大大缩减了硬件设计难度。板卡体积缩小,降低了成本,同时也缩短了开发周期^[5]。

信号调度与处理模块中外部存储器是由NAND FLASH、NOR FLASH和DDR3存储器三部分构成的,其中,NOR FLASH主要用于存放启动程序、内核以及文件系统,而NAND Flash和DDR3一般用于传输和存储计算数据。各种通信接口同样全部由ADSP-BF606的片上外设引出,实现了与上位机的多种通信方式^[5],如网络接口、RS 232/485串行接口、SD卡接口和USB接口等。

1.3 电压电流信号采集模块

模块主要由两部分组成:过电压、过电流保护与信号调理电路以及模数转换电路。模块可以同时采集四路电压值和四路电流值。电能质量检测装置前端电压电流信号采集模块可以将三相电力线上的电压电流信号经互感器转换成能被模数转换芯片识别的±10 V之间的电压电流信号,再由AD芯片转换成数字量。

电压电流互感器采用SPT204A,电磁隔离,准确度高,无漂移,工作频率范围是20 Hz~50 kHz,串联电阻后输入电压1 000 V以内。电流互感器采用CKSR 6-NP,高灵敏度,低线性误差,高准确度,且应用简单,非常适合用于高准确度电流采样。

电压电流信号经过互感器转换成低压信号后,送入AD进行模数转换。AD采用ADI公司的高速八通道AD7606芯片,16位的数字量采集准确度,同步采样频率可达到200 kSPS^[5]。电路图如图2所示。

AD7606有并行输出和串行输出两种输出模式,在本设计中,采用的是其并行输出模式。针对设计需求的规定,需要满足测量八路电流电压信号,所以只需要一片AD芯片就可以实现所需功能,提高了性能,节约了成本,而且AD7606还有4通道和6通道两种,当方案设计的通道数超过八个时,扩展方便。

1.4 电源模块

系统要求电源的最大供电能力达到3 A,根据系统结构,电源设计结构如图3所示。

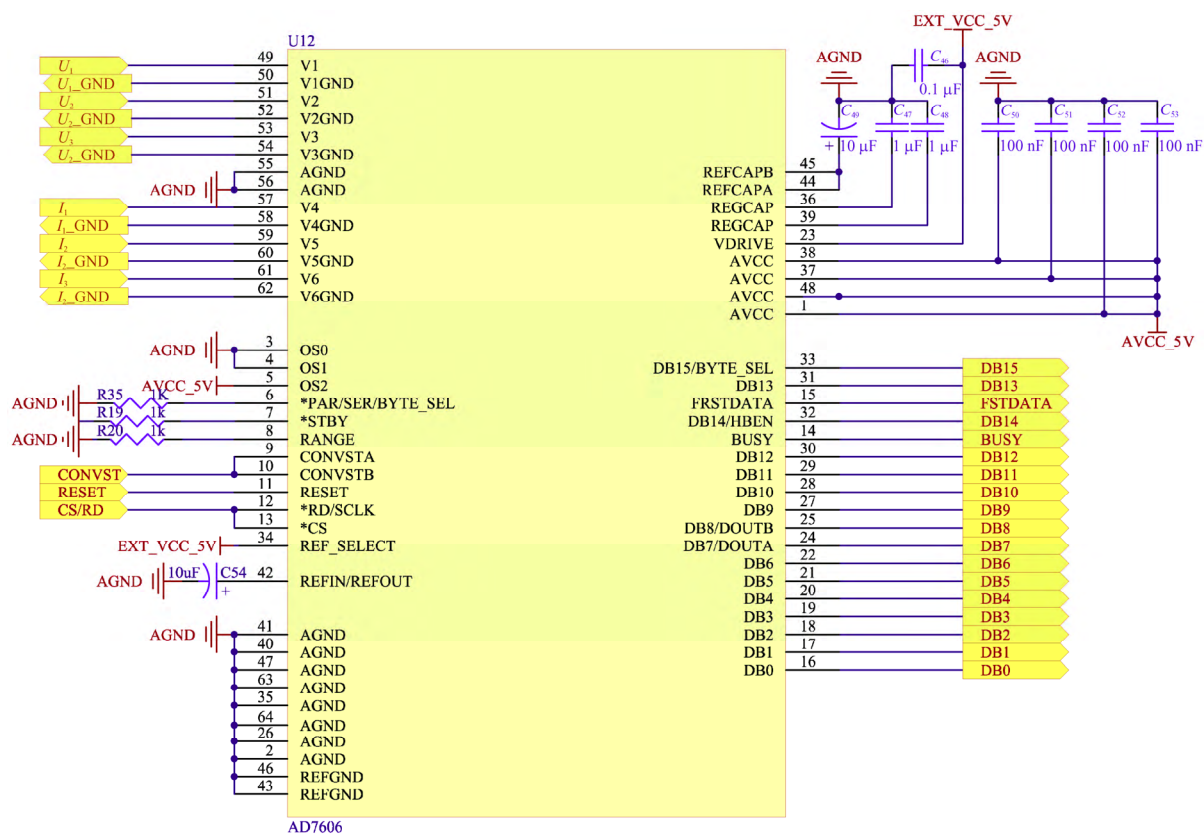


图 2 转换电路硬件图

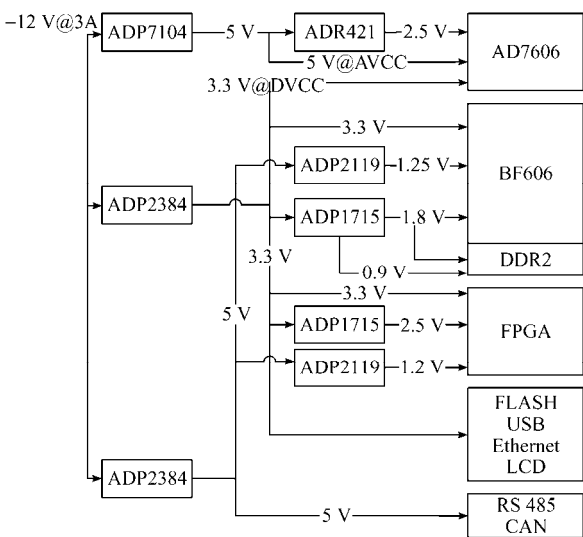


图 3 电源设计结构图

两片 ADP2384 分别产生 3.3 V、4 A 和 5 V、4 A 的供电能力，作为系统的主要电源。3.3 V 是系统 IO 电源，给 FLASH、RS 232、RS 485、CAN、以太网和 LCD 等电路供电。5 V 主要用作总线接口、CAN 和光电隔离等电路供电。

FPGA 还需要 3.3 V、2.5 V 和 1.2 V 供电。ADP2119 产生 1.25 V、2 A 提供给 BF606 的核心电源。ADP7104 产生 5 V、500 mA 给 AD7606 供电。ADR421B 产生 2.5 V 参考电压给 AD7606。ADP1715 提供 1.8 V 给 DDR2，同时通过两个高精度 1 k Ω 电阻分压产生 0.9 V 给 DDR2 参考电压。

2 软件设计

2.1 软件系统架构

ADSP-BF606 的双内核需采用 CrossCore Embedded Studio 集成开发环境进行开发。Core1[#]运行 uClinux 和 IEC 61850 应用。Core2[#]运行电能质量检测算法。流程图如图 4 所示。

上电运行后，首先从 NOR Flash 中启动 uClinux 内核，并初始化 ADSP-BF606，系统稳定运行后，开始进行电压电流信号采集，进行谐波分析计算，得到各次谐波幅值、相位，然后执行扰动检测算法，判断在持续时间内是否有干扰信号存在，如果发现扰动信号则提取特征值，

执行分类算法，辨别扰动的类别，最后对数据进行协议转换，存储和上传。

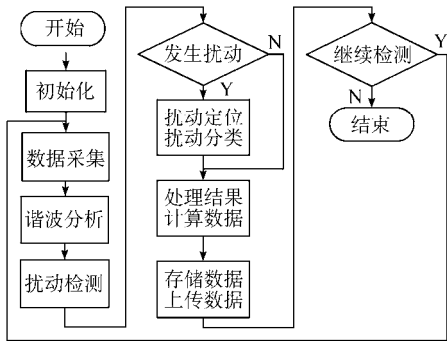


图 4 电能质量监测系统软件流程图

2.2 谐波检测

谐波检测算法采用的是快速傅里叶变换 (Fast Fourier Transform, FFT)，采用此算法的优点是可以达到较快计算速度，满足同步采样且奈奎斯特采样定律的条件下可以达到很高的准确度^[6]。缺点是，在实际应用中，做到整数个周期的同步采样很困难，由此会导致频谱混叠、栅栏效应和频谱泄漏等问题，影响测量准确性，使得幅值和相位的计算结果很不准确，尤其是相位误差很大，无法满足电能质量标准对谐波测量的要

求^[7-8]。本文采用了加窗插值 FFT 修正算法，可以很好地解决测量存在误差这一问题。

加窗算法。常用的窗函数有 20 余种，在实际测量中用得最多的窗是汉宁 (Hanning) 窗、布莱克曼窗 (Blackman) 和布莱克曼-哈里斯窗^[9]。根据各种窗函数特点和计算的复杂度，最终采用 Hanning 窗，计算公式为

$$w(n) = 0.5 - 0.5\cos(2\pi n/N), (n = 0, 1, 2, \dots, N-1) \quad (1)$$

本文选用了基于双峰谱线的插值修正算法，即在对幅值进行修正的同时，提取出与之相邻的次强谱线参与修正的方法，最后对两根谱线的幅值进行加权平均运算，以计算出最接近真实幅值。得到 Hanning 窗函数的插值修正公式，计算公式为

$$\begin{aligned} m &= 1.5q \\ \theta &= \arg[\tilde{X}(k_i\Delta f)] + \pi/2 - (m - (-1)^i \times 0.5)\pi \\ i &= 1, 2 \\ A &= N^{-1}(y_1 + y_2)(2.3561940 + 1.15543682m^2 \\ &\quad + 0.32607873m^4 + 0.07891461m^6) \end{aligned} \quad (2)$$

利用本文设计的谐波检测算法计算了 50 次谐波的幅值和相位误差，仿真结果如图 5 所示。

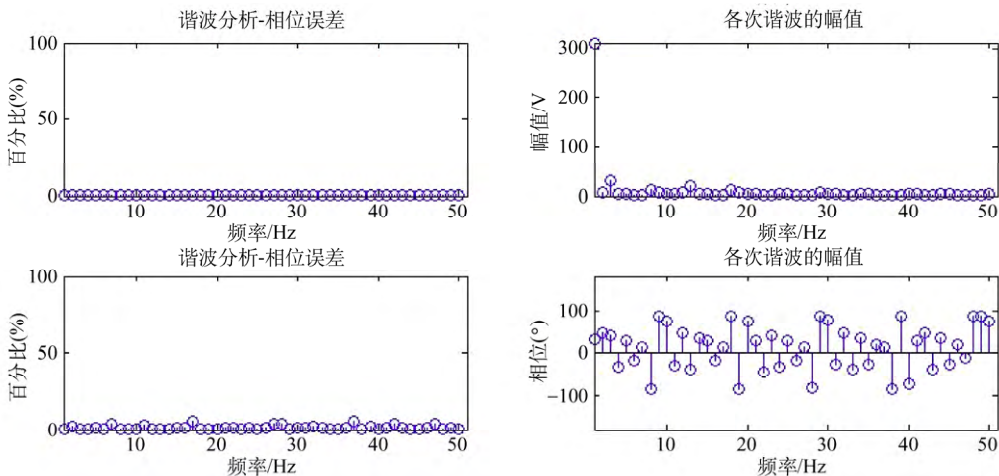


图 5 加 Blackman 窗函数插值修正算法的谐波分析结果

2.3 扰动检测

扰动可以分为稳态和暂态两类电能质量扰动。暂态电能质量扰动的研究起步较晚，影响范围小，但后果却比较严重。暂态电能质量扰动主要包括：电压骤降、电压骤升、暂态脉冲、暂态振荡和电压中断五种^[10]。本文专门设计了扰动检

测算法，利用 S 变换实现对暂态电能质量扰动的检测。

S 变换 (S-Transform, ST) 是一种可逆的时频分析方法，继承了小波变换与短时傅里叶变换的局部化思想。信号 $x(t)$ 一维连续 S 变换 $S(\tau, f)$ 定义如下

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) w(\tau - t, f) \exp(-i2\pi ft) dt \quad (3)$$

$$w(\tau - t, f) = |f| / \sqrt{2\pi} \exp(-(t - \tau)^2 f^2 / 2) \quad (4)$$

式中, $w(\tau - t, f)$ 为高斯窗; i 为虚数; f 为频率; τ 起到控制高斯窗在时间轴位置的作用。

设 $x[kT]$, ($k=0, 1, 2, \dots, N-1$) 是对时域信号 $x(t)$ 进行采样得到的离散时间序列, N 为采样点数, T 为采样时间间隔。对照连续 S 变换公式, 可得离散形式为

$$S[jT, n/NT] = \sum_{m=0}^{N-1} X[m + n/NT] \exp(-2\pi^2 m^2 / n^2) \exp(i2\pi mj / N) \quad (5)$$

式中, N 为采样点数, T 为采样时间间隔, 代表频率的 $n=1, 2, \dots, N-1$, 代表时间的 $j=0, 1, 2, \dots, N-1$ 。时域序列 $x[kT]$ 经过 S 变换后, 得到的结果是一个二维的复时频矩阵 (S 矩阵), S 矩阵中列对应的是离散频率, 行对应的是采样时间点^[11]。

本设计采用 S 模矩阵中最高次频率对应的时间点发生的突变作为扰动发生的标志, 经实验验证, 此方法在加入了各次谐波的噪声及 30 dB 高斯噪声背景下, 有很好的识别率, 如图 6 所示。

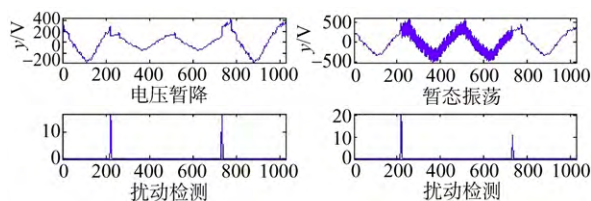


图 6 复杂噪声背景的 S 变换检测结果

若某种暂态扰动发生时, 在扰动开始时间点上会发生幅值突变, 扰动结束后, 会出现第二个突变点, 计算两点之间时间差, 即获得扰动发生的持续时间。

2.4 扰动分类

电能质量扰动种类各式各样, 需要对其进行准确、快速的分类识别, 目前主要的方法有专家系统、模糊逻辑、人工神经网络和支持向量机等。在这些方法中, 支持向量机拥有其独特的优势, 其可以避免过学习、维数灾难和局部极小点等问题, 具有良好的可扩展性和分类准确度, 在解决非线性、小样本问题中表现出泛化能力强、结构简单等许多优势^[12]。鉴于小波变换具有良好的时

-频局部化特性, 本文电能质量扰动分类方法采用小波包 (Wavelet Packet, WP) 和支持向量机 (Support Vector Machine, SVM) 相结合的方式。

小波包变换是小波变换的发展和完善, 它提供了一种更加精细的小波分解方法^[13], 通过进一步分解小波变换中没有被细化分解的高频部分, 从而增加时频分辨率, 依此便可提取出更加全面的各种扰动特征, 因此小波包在特征提取上更具有应用价值。

可按式 (6) 对时域信号 $u(t)$ 进行小波包分解, $H_1(k)$ 为高通滤波系数, $H_0(k)$ 为低通滤波系数。

$$\begin{cases} u_{2n}(t) = \sqrt{2} \sum_k H_1(k) u_n(2t - k) \\ u_{2n-1}(t) = \sqrt{2} \sum_k H_0(k) u_n(2t - k) \end{cases} \quad (6)$$

小波包分解的过程可以表示为一个二进制树形结构, 如图 7 所示。

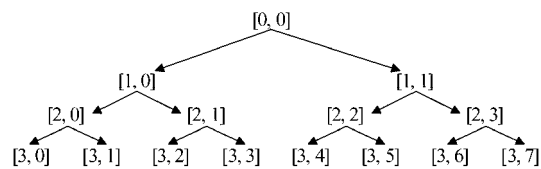


图 7 三层小波包分解

图 7 中各处节点的数值为 (j, p) 。在小波包分解中, 小波系数在节点 $(j+1, p)$ 处的计算公式为

$$\begin{aligned} d_{j+1}^{2p}(k) &= d_j^p(k) \bar{h}_0(2k) \\ &= \sum_{m=-\infty}^{m=\infty} d_j^p(m) h_0(m - 2k) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} d_{j+1}^{2p+1}(k) &= d_j^p(k) \bar{h}_1(2k) \\ &= \sum_{m=-\infty}^{m=\infty} d_j^p(m) h_1(m - 2k) \end{aligned} \quad (8)$$

小波包分解是对信号的低频部分和高频部分都进行二次分解^[13], 如果提取出所有分解层数上的相对能量值, 会使特征提取的数据量过大。所以本文利用小波包进行 3 层分解, 并获得节点 $[1, 1]$ 、 $[2, 1]$ 、 $[3, 1]$ 、 $[3, 2]$ 、 $[3, 3]$ 、 $[3, 4]$ 、 $[3, 5]$ 、 $[3, 6]$ 和 $[3, 7]$ 处分解的相对能量值作为各种扰动的特征量。各节点上的相对能量值可由式 (9) 得出, 式中 $d_i(k)$ 为第 i 个节点上第 k 个小波系数。

$$e(i) = \sum_{k=1}^N d_i^2(k) \quad (9)$$

按照式(10)可求出各节点相对能量值 $\bar{E}(i)$ 。

$$\bar{E}(i) = e(i) / E_{\max}, \quad E_{\max} = \sum_{i=1}^N e(i) \quad (10)$$

由式(10)可得扰动的特征向量 $\bar{E} = [\bar{E}(1), \bar{E}(2), \bar{E}(3), \bar{E}(4), \bar{E}(5), \bar{E}(6), \bar{E}(7), \bar{E}(8), \bar{E}(9)]$ 。

利用小波包对各种扰动信号进行分解,并求出各种扰动信号的特征值,如图8所示。

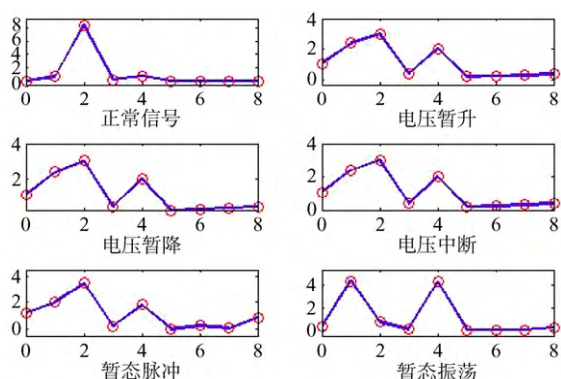


图8 不同暂态电能质量扰动的相对能量值曲线图

SVM 是针对二元问题提出的,在应用于电能质量扰动分类的多值问题时,需要多个 SVM 分类器,将多元问题转变成多级二元问题来进行处理。目前 SVM 多类分类方法应用得较为广泛的有:“一对一”、“一对多”和“有向无环图”^[14]。这些方法都是通过将一系列的 SVM 二分类器组合起来实现的多类分类,都存在一些不足之处,前两种方法存在线性不可分区域,第三种方法虽然解决了不可分区域问题,但各子类分类器在有向无环图中的位置会影响整个分类器的性能^[15]。本文选用具有分层二叉树结构的支持向量机(Binary Tree Support Vector Machine, BT-SVM)进行扰动识别,应用此方法,对于一个 K 类分类问题,只需要构造 $K-1$ 个分类器即可,这样与“一对一”、“一对多”及“有向无环图”方法比较,所需的分类器都要少。

选择一个合适的树结构是设计二叉树 SVM 的关键,需要合理安排树的结点和分支,在树结点必须以近似最优的方法将多类样本分为两组,并要求两组数据样本的中心距离最大以及尽可能强的可分性,以构造合理的层次结构。本文利用聚类分析中的类距离概念,计算各类别在特征空间中的最短距离,以最短距离作为类间的距离,这样每一个类都可以得到一组与其他类间的

距离,样本之间距离 d 公式可表示为

$$d(x_1, x_2) = \|\varphi(x_1) - \varphi(x_2)\|_2 = \sqrt{K(x_1, x_1) - 2K(x_1, x_2) + K(x_2, x_2)} \quad (11)$$

式中, $\varphi(x)$ 为将原空间中的向量 x 映射到特征向量空间后所对应的向量; $K(x_1, x_2) = \varphi(x_1) \varphi(x_2)$ 为核函数。

最终得到的二叉树分类结构图如图9所示。

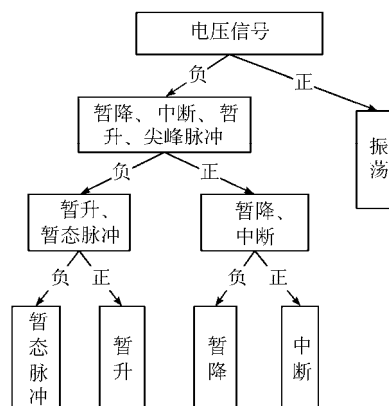


图9 二叉树分类结构图

3 结束语

本文介绍了电能质量检测装置的最新发展,在此基础上设计了一款基于 ADI 最新双核架构高性能 DSP 芯片的电能质量检测系统。以提高性能和降低成本为前提,设计了系统的硬件架构及其各个子模块。在软件方面,设计了系统的软件执行流程以及谐波、扰动的检测方法。谐波检测采用了加窗插值 FFT 算法,各次谐波的计算均能达到很高准确度。利用 S 变换可以迅速准确地检测扰动的发生。扰动分类采用小波包分解和支持向量机相结合的方式,利用小波包提取各种扰动的特征量,利用聚类思想设计二叉树结构的支持向量机,使得分类计算快速准确。根据本文介绍构建的电能质量检测系统,数据处理能力强,可实时完成多项电能质量指标的特点。该方案易于改进和升级,适合安装到现场长期执行检测任务或作为便携式的电能质量检测装置,适应电能质量检测设备发展新趋势的要求。

参考文献

- [1] 肖湘宁. 电能质量分析与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.

- [2] 张桂芳, 马晓春, 雷欣月. 基于 TMS320C6713 的电能质量监测装置的设计[J]. 电子测量技术, 2010, 33 (2): 83-86.
- [3] 宋鑫. 基于 TMS320F2812 的电能质量监测装置的设计[D]. 太原: 太原理工大学, 2010.
- [4] 刘欣. 基于 DSP 的便携式电能质量监测仪的研究与设计[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2010.
- [5] 潘丰厚. 电网电能质量智能检测及扰动类型识别方法研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2012.
- [6] 李加升. 电力系统谐波间谐波的在线检测[D]. 长沙: 湖南大学, 2009.
- [7] Cataliotti V, Cosentino A. New measurement method for the detection of harmonic sources in power systems based on the approach of the IEEE Std. 1459-2000[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25 (1): 332-340.
- [8] Daniele Gallo, Roberto Langella, Alfredo Testa. Desynchronized processing technique for harmonic and interharmonic analysis[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004.
- [9] 许珉, 张鸿博. 基于 Blackman-harris 窗的加窗 FFT 插值修正算法[J]. 郑州大学学报, 2005, 26 (4): 99-101.
- [10] 朱晓栋, 束洪春. 基于 S 变换的电能质量扰动分析[J]. 云南电力技术, 2009, 37 (4): 15-17.
- [11] Zhao Fengzhan. Power-quality disturbance recognition using S-transform[J]. IEEE Transaction on power delivery, 2007, 22 (2): 944-950.
- [12] Gang Zhang, Xiao Meiyan, Hao Wenli, et al. Classification of sag based on wavelet transform and wavelet neutral network[C]. Proceedings of the Third International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Shanghai, 2004: 26-29.
- [13] 陈详训. 采用小波技术的几种电能质量扰动的测量、分类方法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22 (10): 1-6.
- [14] 李天云, 陈昌雷, 周博, 等. 奇异值分解和最小二乘支持向量机在电能质量扰动识别中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (34): 124-128.
- [15] 孔英会, 蔡维, 何伟. 基于特征组合的 SVM 电能质量扰动信号分类[J]. 华北电力大学学报, 2010, 37 (4): 72-77.
-
- 作者简介
潘丰厚 (1987-), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要从事工作领域: 电能质量分析。
(收稿日期: 2015-12-10) EA
(编辑: 史海疆)

(上接第 40 页)

- 力自动化设备, 2013, (8): 47-52.
- [3] 鲍谚, 姜久春, 张维戈, 等. 电动汽车移动储能系统模型及控制策略[J]. 电力系统自动化, 2012, (11): 36-38.
- [4] 杨玉青, 苏粟, 姜久春, 等. 改善电网负荷特性的充电站有序充电优化策略[J]. 电力系统保护与控制, 2014, (4): 60-65.
- [5] 田文奇, 和敬涵, 姜久春, 等. 基于自适应变异粒子群算法的电动汽车换电站充电调度多目标优化[J]. 电网技术, 2012, (11): 25-29.
- [6] 葛少云, 黄穆, 刘洪. 电动汽车有序充电的峰谷电价时段优化[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40 (10): 1-6.
- [7] Greening, L. A. Demand response resources: Who is responsible for implementation in a deregulated market? Energy, 2010, 35 (4): 1518-1525.
- [8] Hadi Goudarzi, Safar Hatami, Massoud Pedram. Demand-side load scheduling incentivized by dynamic energy prices. University of Southern California, Los Angeles, CA 90089, 2011: 351-357.
- [9] Shaolei Ren, Student Member, Mihaela van der Schaar. Pricing and distributed power control in wireless relay networks[J]. IEEE Transaction on Signal Processing, 2011, 59 (6): 2913-2917.
-
- 作者简介
高超 (1982-), 男, 大学本科, 工程师, 主要从事工作领域: 变电运维。
(收稿日期: 2015-12-10) EA
(编辑: 史海疆)