

基于 FFT 与小波变换结合的嵌入式 电能质量检测系统*

沈海滨, 郑寿森, 祁新梅

(中山大学电力电子及控制技术研究所, 广东 珠海 519082)

摘要: 该文研究应用 FFT 在频域与小波变换在时域的优势, 设计搭建了基_4 FFT 与 Daub4 小波变换结合的嵌入式电能质量检测系统。该系统利用小波变换检测电压骤升、骤降等暂态问题, 使用 FFT 分析稳态下电信号谐波。为验证系统的实际检测能力, 分别对稳态、电压骤降、电压暂态干扰三种状况进行了实时监测测试和 Matlab 软件分析, 结果表明: 该嵌入式电能质量检测系统在稳态时, 检测基波幅值的误差为 0.3%, 满足公用电网 GB/T 14549—93 对谐波测量仪器的 A 级标准; 同时, 在电压骤降、电压暂态干扰状态下也能准确检测到电信号的突变时间, 实际系统检测和软件仿真结果误差在 1.6 ms 内, 满足实时性要求。

关键词: FFT; 小波变换; 电能质量

中图分类号: TM933.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2014) 04-0040-05

The Embedded System for Power Quality Detection Based on FFT and Wavelet Theory

SHEN Haibin, ZHENG Shousen, QI Xinmei

(Institute of Power Electronics and Control Technologies, Sun Yat-sen University,
Zhuhai 519082, China)

Abstract: The advantages of FFT application in frequency domain and wavelet theory in time domain were studied, and an Embedded System for Power Quality Detection (ESPQD) based on radix-4 FFT and Wavelet Transform is developed. The ESPQD uses the wavelet theory to monitor the transient power quality including voltage dip, voltage swell and so on. FFT is applied to analysis harmonics of electrical signals in steady-state. Three different states including steady-state, voltage dip and transient interference were tested with both the ESPQD hardware system and Matlab simulation for verification. The results show that the amplitude error of fundamental wave is within 0.3%, meeting the A level standard of the utility grid standards GB/T 14549-93 about harmonic measuring instruments. The system can also precisely and quickly detect the abrupt changes of the electrical signals during voltage dip and transient interference. The time difference between ESPQD and simulation is within 1.6 ms and the system can be used in real time measurement.

Key words: FFT; wavelet transform; power quality

随着电力消耗的多样性需求、电能的高效利用要求及非线性设备的迅速增加, 电能质量的检测及治理也变得更加复杂和迫切。当前, 较为常用的电

能质量检测方法主要有: 瞬时无功功率的谐波检测法、基于傅里叶变换的谐波检测法以及基于小波变换的谐波检测法等几种方法^[1-7]。瞬时无功功率检

* 收稿日期: 2013-11-08

基金项目: 广东省自然科学基金资助项目 (8451027501001493)

作者简介: 沈海滨 (1990 年生), 男; 研究方向: 特种电源; 通讯作者: 郑寿森; E-mail: zhengsh@mail.sysu.edu.cn

测法的检测结果受滤波器影响大，较适合做三相检测，对于单相电路检测算法较为复杂，不易实现。傅里叶变换法能够精确地测量稳定信号的幅值、频率等，却难以分析暂态信号。小波变换具有良好的时频局部化特性，恰好弥补了傅里叶变换的不足^[8-12]。

本文研究 FFT 与小波变换两者在频域、时域各自的优势，将二者结合应用于电能质量的稳态和暂态检测之中，利用 STM32F4 的优良运算能力，搭建了嵌入式电能质量检测系统，实现对电力系统谐波的分析和对电能暂态扰动的实时检测，同时也进行了对应的 Matlab 软件分析，通过软件分析和系统实测结果的对比来验证系统的性能。

1 基-4FFT 傅里叶变换及谐波分析

FFT 为快速傅立叶变换算法，常用的 FFT 算法包括分裂基 FFT（例如基-2FFT、基-4FFT）、混合 FFT、局部 FFT 等，其中分裂基 FFT 算法较其他算法简单、易于实现，其基数决定着算法的效率，基数越高，运算量越小，基-4FFT 比基-2FFT 效率快 25%，故本文采用基-4FFT。

基-4FFT 算法要求测量仪器的采样点为 4^n 。另一方面，国际电工委员会 IEC 61000 4-7 文件建议谐波测量最高 50 次谐波，推荐测量时间间隔为 3 s。基于以上关于采样点及 IEC 建议的考虑，本文设计嵌入式系统采样频率为 5.12 kHz，每 0.2 s 采集 10 个工频周波，采样点 1 024 个，采样的奈奎斯特频率为 2.56 kHz，FFT 运算后得到一组固定 5 Hz 频率分辨率的频谱来评估谐波与间谐波，如此可以分析到 50 次谐波，满足 IEC 关于谐波测量的需要。

2 Daub4 小波变换和瞬态电能质量检测

1988 年法国科学家 Mallat 提出多分辨分析，并将之前的正交小波构造统一起来，提出了类似傅里叶分析中 FFT 算法的小波变换的快速算法——Mallat 算法，该算法使用滤波器执行离散小波变换^[1]，原始信号 S 经过如图 1 所示的三层分解后为 $(a_3 + d_3 + d_2 + d_1)$ ，其中 0 ~ 320 Hz (a_3)，320 ~ 640 Hz (d_3)，640 ~ 1280 Hz (d_2)，1280 ~ 2560 Hz (d_1)。

工程上常用的小波包括 Daubechies、BiorNr. Nd 及 CoifN 小波系，在对电能质量暂态扰动信号的分析中，Daubechies 小波的分析结果有幅值更大的模板大值^[2]。文献 [3] 指出 Daub4 和

Daub6 最适宜应用在电能质量中分析短时和快速的瞬态骚扰，而相对于 Daub6，Daub4 滤波器长度较小，计算处理所消耗的时间也更少，故本文选择 Daub4 小波进行暂态电能质量扰动检测。

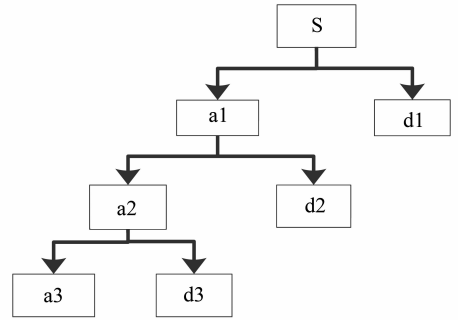


图 1 小波三层分解树

Fig. 1 Three Stage decomposition tree of wavelet

3 基于 Cortex-M4(STM32F4)的嵌入式稳态及瞬态电能质量分析及检测系统

由于系统需要执行 Daub4 小波分解算法和基-4FFT 算法，系统的运算量大，所以选择主频 168 MHz，且带有浮点运算单元的 STM32F407 处理器，它完成一次单精度浮点乘法或加法的时间为 5.95 ns，具有良好的运算能力。

根据上文所述，本文搭建了嵌入式稳态及瞬态电能质量分析及检测系统，系统框图如图 2 所示，由 STM32F4 处理器及电源模块、电压电流传感器、信号调理电路，触摸屏、SD 卡等外围电路组成。数据的存储使用 RL-FlashFS 文件系统，触摸屏采用 ewin 图形用户界面开发，整个嵌入式操作系统采用内核为 RTX 的实时操作系统 (RTOS)，通过循环执行多个任务解决任务的调度、维护、定时等问题。

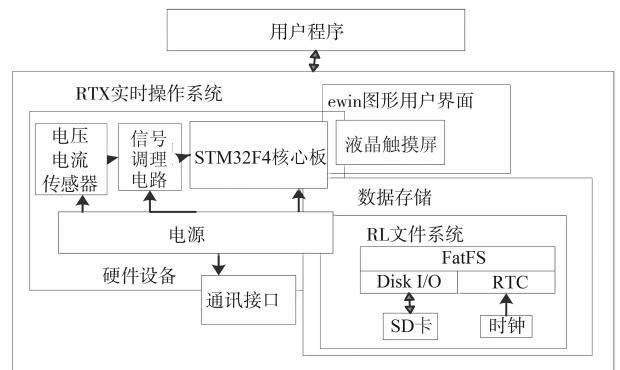


图 2 系统结构框图

Fig. 2 Block diagram of system structure

系统的主要算法流程如图 3 所示。上部为 AD 采样及小波分解任务流程，下部左边为具体的 Mallat 分解算法流程，下部右边为 FFT 分解任务流程。系统首先定时启动 AD，对输入信号进行采样，采样完成后使用 Mallat 算法对数据进行小波分解，分解完成后对高频 d1 数据进行分析，设计数据阈值为 15（阈值的选取根据模极大值与模平均值的比值，本文根据实际测量数据发现：选取 10~15 为阈值既可以减少因分析误差导致误判，又能比较敏感地检测突变点）。根据 d1 的数据最大模值与平均值之比判断突变点发生时间，发送显示任务。若未检测到突变点，则直接进行 FFT 分析，分解出稳态下谐波各频率的分量，并加以显示保存。

效值为 219.32 V，误差在 1% 以内，测量结果准确。



图 4 嵌入式系统测试图

Fig. 4 Test picture of the embedded system

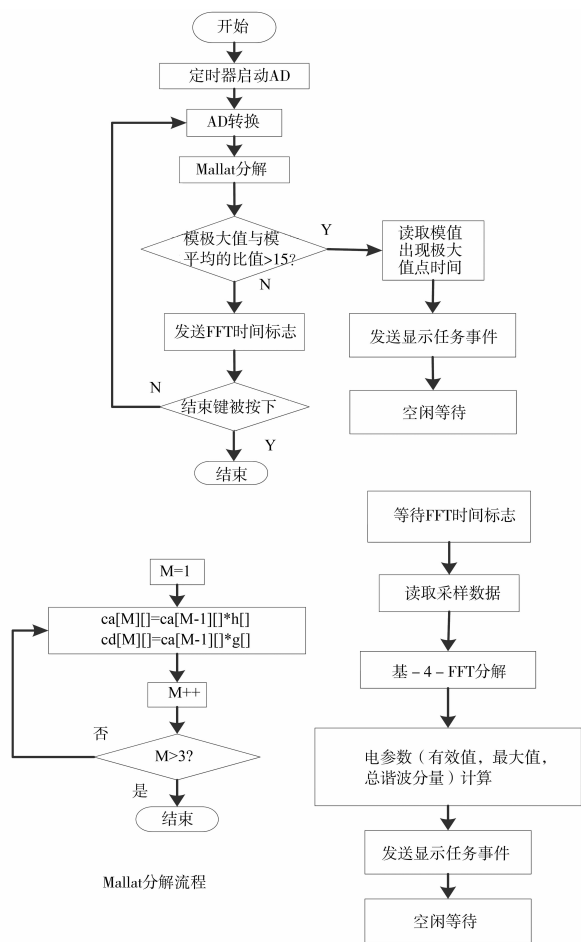


图 3 系统流程图

Fig. 3 Flowchart of the embedded system

图 4 为本文设计的嵌入式实时系统实验样机，右端部分是输入电压、电流采样及信号调理，右边部分包含 STM32F4 核心、文件系统及液晶显示界面等。液晶屏幕上端显示电压有效值 221.3 V，电压峰值 332.1 V，基波幅值 313.0 V，总谐波畸变率 3.1%。使用 FLUKE187（测量工具型号）测量有

4 系统检测结果与 Matlab 处理结果的对比分析

实际测试分为稳态测试和暂态测试两大部分，而暂态测试又分为电压骤降和负载突变两种状况。

4.1 稳态测试

嵌入式系统采样数据，并进行 FFT 处理，以 txt 格式保存采样数据以及处理结果（此处命名为 FFT_result_1）于 SD 卡，同时也用 Matlab 对 SD 卡的采样数据进行 FFT 处理得出结果 FFT_result_2。图 5 为测试中得到的采样波形图，图 6 上部分为嵌入式测试结果 FFT_result_1 的频谱图，下部分为 Matlab 处理结果 FFT_result_2 频谱图，表 1 列出了 Matlab 软件处理和系统实测结果基波幅值、3 次谐波幅值、7 次谐波幅值的对比。

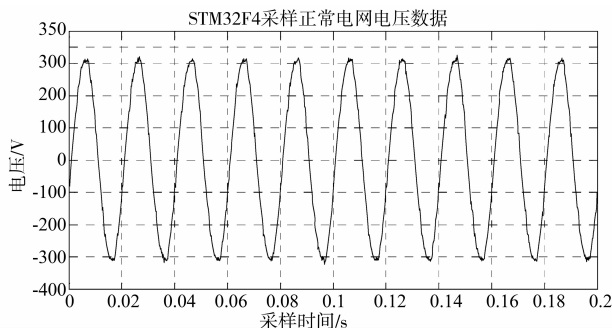


图 5 STM32F4 采样波形

Fig. 5 Sampled waveform of STM32F4

表 1 FFT 测量结果

Table 1 FFT tested result

项目	基波幅值/V	3 次谐波幅值/V	7 次谐波幅值/V
MATLAB 分析	314.0	6.683	2.785
STM32F4 分析	313	6	3

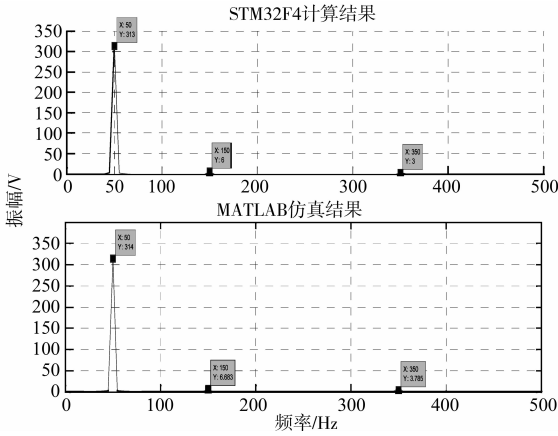


图 6 STM32F4 计算结果与 Matlab 仿真结果频谱
Fig. 6 FFT spectrum chart of STM32F4 tested result and Matlab simulation result

STM32F4 浮点分析 1 024 个采样点时间为 5 ms，为了提高嵌入式系统的速度，FFT 分析后各频率幅值做整数处理，得出的谐波幅值为整数，根据表 1，基波幅值绝对误差为

$$\delta = \frac{|314 - 313|}{314} \times 100\% = 0.3\% \quad (1)$$

由此可得，误差小于 1%，满足公用电网谐波 GB/T 14549—93 对谐波测量仪器的 A 级标准——基波电压允许误差小于等于 0.5%，证明嵌入式检测系统稳态电能质量分析性能良好。

4.2 暂态测试

1) 使用德力西（变压器品牌）变压器模拟电压骤降，小波分析电压骤降时刻。

图 7 最上部分波形为嵌入式采样得到的电压波形信号 S，横坐标为采样点，对应时间信息，纵轴是信号幅度。最底层为分解信号的高频区 d1（1 280 ~ 2 560 Hz），其时域信号在 612 点处出现模极大值 23.9。612 点对应的时间为

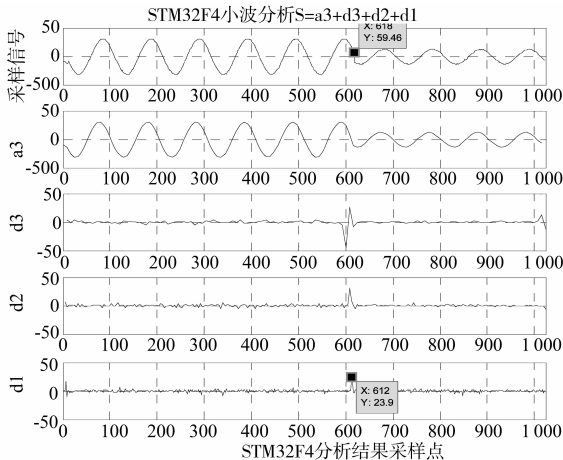


图 7 STM32F4 测量电压骤降结果
Fig. 7 STM32F4 tested result in voltage dip state

$$t = \frac{612}{1\ 024} \times 200\ \text{ms} = 119.53\ \text{ms} \quad (2)$$

图 8 为相同采样数据采用 Matlab 软件处理得出的分解结果，其底层高频区出现模极大值在 620 点，对应时间为 121.09 ms。检测时间误差 1.56 ms。

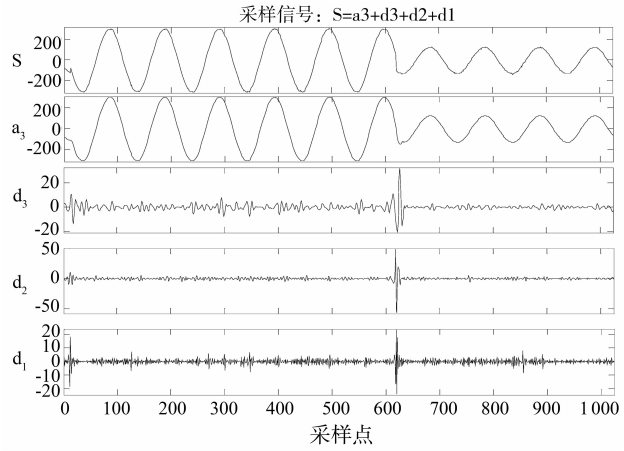


图 8 Matlab 测量电压骤降结果
Fig. 8 Matlab measured result

2) 瞬间增加负载，模拟暂态干扰，利用小波分析得到负载增加瞬间。

实验采用突然加入风扇和电阻的方式模拟增加负载，图 9、10 最顶层为采样信号，最底层为高频区 d1。图 9 所示扰动对应时间 35.17 ms，图 10 中 Matlab 分析突变点对应时间为 36.72 ms，误差时间 1.55 ms（表 2）。

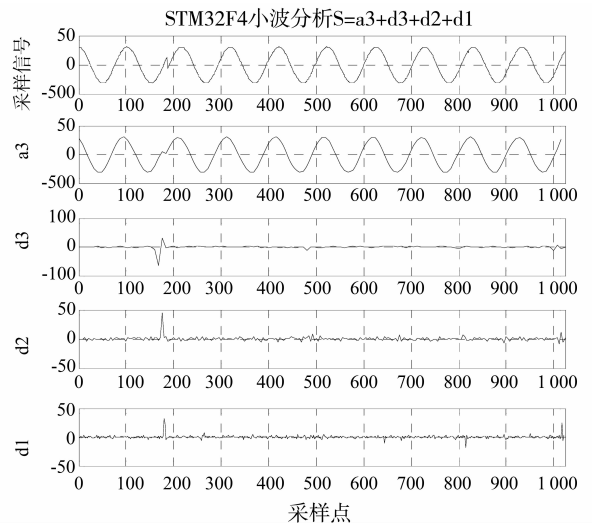


图 9 STM32F4 测量暂态干扰结果
Fig. 9 STM32F4 tested result in transient interference

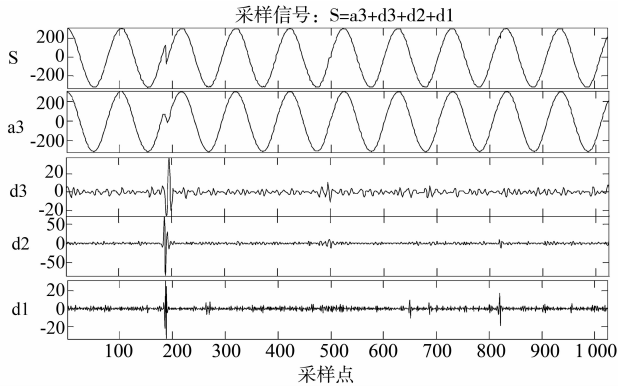


图 10 Matlab 处理暂态干扰结果

Fig. 10 Matlab measure dresult

表 2 小波分解测量结果

Table 2 Wavelet decomposition tested result ms

突变点	Matlab 处理结果	STM32F4 计算结果
电压骤降	121.09	119.53
暂态干扰	36.72	35.17

从系统实测与 Matlab 处理结果可以看出两者结果相差在 1.6 ms 以内, 证明嵌入式系统具有良好的灵敏度。

5 结 论

本文将 Daub4 小波变换及基 -4FFT 算法相结合, 应用于电能质量的稳态和暂态检测, 设计搭建了基于 STM32F4 的嵌入式电能质量检测系统, 针对单相电压稳态、电压骤降、电压暂态干扰三种情况对系统进行了测试, 同时使用 Matlab 软件进行验证。测试结果表明, 基于 STM32F4 的嵌入式电能质量检测系统稳态分析效果良好, 基波幅值检测的误差小于 0.5%, 满足公用电网谐波测量仪器的 A 级标准; 系统也能准确检测出电压骤降和负载突变的时间, 误差在 1.6 ms 以内, 灵敏度良好。本

系统实现了 Daub4 小波变换与基 -4FFT 变换相结合的电能质量瞬态及稳态检测, 满足实时性、准确性的要求。

参考文献:

- [1] 张德丰. Matlab 小波分析与工程应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008:13-14.
- [2] 谭国贞. 基于小波变换的电能质量分析方法的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006:26-27.
- [3] 林海雪. 电力系统谐波[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008:40-43.
- [4] 黄振威. 基于 db4 小波变换和双 ARM Cortex-M 的电能质量分析系统[J]. 电测与仪表, 2013, 1(25):83-88.
- [5] 柳薇, 陈冬丽. 基于多小波变换的图像编码算法研究[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2011, 50(5):50-53.
- [6] 李松华. 一类高阶奇异积分方程分方程的快速小波解法[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2010, 49(4):144-146.
- [7] 郭昌. 小波变换与 HMT 模型的图像插值算法[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2012, 51(3):55-59.
- [8] LOBOS T, REZMER J, KOGLIN H J. Analysis of power system transients using wavelets and prony Method[J]. IEEE Porto Power Tech Conference, 2001, 4:899-903.
- [9] ANGRISANIL, DAPONTE P. A measurement method base on the wavelet transform for power quality analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(4):990-998.
- [10] SUDIPTA N, Arindam D, Abhijit C. Detection of power quality disturbances using wavelet transform[J]. World Academy of Science, Engineering and Technology, 2009, 49:869-873.
- [11] 琚香雪. 基于傅里叶-小波检测的并联型有源电力滤波器[J]. 电气技术, 2011(5):25-29.
- [12] 居滋培. 在暂态电能质量检测中的小波性能比较[J]. 上海理工大学学报, 2008(6):608-612.