

# 基于 Hanning 窗插值 FFT 的介损测量装置设计

邓谊柏, 徐 勇, 李海波, 王维治

湖南大学电气与信息工程学院, 长沙 410082

**摘要** 介质损耗是反映高电压电气设备绝缘受潮、劣化变质或气体放电等绝缘状况的重要指标, 其准确测量对于电力系统安全、经济运行有着重要意义。针对高电压电气设备介质损耗在线监测的技术要求, 本文提出了 ADS8364+TMS320F2812 的介损测量装置构成方案, 详细介绍了六路同步采样 ADC 的数据采集单元和以 TMS320F2812 为核心的数据处理单元电路设计。传统 FFT 方法进行介损测量容易产生频谱泄漏和栅栏效应, 影响测量的精度, 而加窗插值 FFT 修正算法可以明显提高测量结果的准确性, 消除频谱泄漏和栅栏效应引起的误差。为此本装置采用基于 Hanning 窗插值 FFT 算法实现介损准确测量与分析。仿真结果表明, 基于 Hanning 窗插值 FFT 算法的介损测量装置能有效克服谐波干扰、基波频率波动、采样点数变化及噪声干扰的影响, 试验结果验证基于 Hanning 窗插值 FFT 算法的介损测量装置测试介损结果精确, 且受频率波动的影响较小。

**关键词** 介质损耗; Hanning 窗; 快速傅里叶变换; 频率波动; 误差分析

**中图分类号** TM835.4

**文献标识码** A

**文章编号** 1000-7857(2010)05-0096-05

## Dielectric Loss Measurement Device Based on Hanning Window Interpolation FFT

DENG Yibo, XU Yong, LI Haibo, WANG Weizhi

*Institute of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China*

**Abstract** Dielectric loss is a key indicator, reflecting insulation damping, deterioration or gas discharge of high-voltage electrical equipment insulation. Its accurate measurement is very important for the power system security and economy. According to the technology requirement of high-voltage electrical equipment, this paper has designed a dielectric loss measuring device, with its hardware based on ADS8364 and TMS320F2812. The hardware system is detailed, such as the sampling module and the data-processing module. The Hanning Window FFT Interpolation Algorithm is more advantageous than the traditional FFT algorithm in the dielectric loss measurement, as it can significantly improve the measurement accuracy of results, eliminating effects of spectrum leakage and fence. Therefore, it is used to accurately measure and analysis dielectric loss. Simulation and experimental results show that the device is accurate and stable, which can overcome the interference of the harmonics, frequency fluctuations and the impact of noise.

**Keywords** dielectric loss; Hanning Window; FFT; frequency fluctuation; error analysis

### 0 引言

介质损耗作为反映高电压电气设备如绝缘受潮、劣化变质或绝缘中气体产生放电等绝缘状况的重要指标, 其准确测

量对于电力系统安全、经济运行有着重要意义<sup>[1]</sup>。通常采用阻性电流的大小判断高压电气设备绝缘性的好坏, 但该方法存在一些不足<sup>[2-3]</sup>, 为更精确测量, 可采用介损法。介损的测量方

收稿日期: 2009-11-09

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60872128)

作者简介: 邓谊柏, 硕士研究生, 研究方向为高压电气设备控制与故障诊断, 电子信箱: chinadyb168@163.com; 徐勇 (通信作者), 教授, 研究方向为智能仪器、高电压测量技术, 电子信箱: xuyong501@sina.com

法可分为 2 大类:一类是以过零比较器<sup>[4]</sup>为代表的硬件实现方法;另一类是以谐波分析法<sup>[5-9]</sup>为代表的软件实现方法。后者因有较好的抗干扰性和稳定性,在国内外被广泛采用。

非整周期截断时,谐波分析法产生频谱泄漏和栅栏效应,影响谐波分析精度<sup>[6]</sup>。为减小非整周期截断给介损测量带来的误差,可采用加组合余弦窗插值的方法<sup>[3-7]</sup>。

针对高电压电气设备介质损耗在线监测技术的要求,本文提出了 ADS8364+TMS320F2812 的介损测量装置构成方案,详细介绍了六路同步采样 ADC 的数据采集单元和以 TMS320F2812 为核心的数据处理电路设计,设计了基于嵌入式系统实现的 Hanning 窗插值 FFT 介质损耗测量方法,针对谐波干扰、基波频率波动、采样点数变化及噪声干扰等情况仿真和实测检验,对本文算法进行了验证。

## 1 介损测量装置的构成

介损测量装置原理框图如图 1 所示。该系统采用 ADC+DSP 的结构形式,其中 ADC 采用美国 ADI 公司的高速、低功耗六通道同步采样的十六位模数转换器 ADS8364;DSP 选用 TI 公司的数字信号处理芯片 TMS320F2812,该芯片可实现双 16×16 和 32×32 乘加操作,最高可工作频率为 150MHz,且具有丰富的外围模块和通信接口。

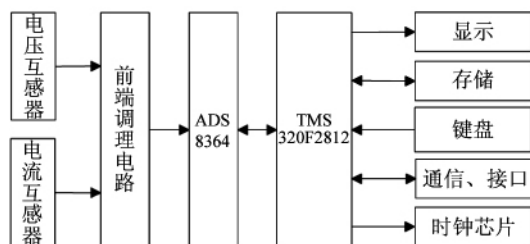


图 1 介损测量装置原理框图

Fig. 1 Block diagram of dielectric loss measuring device

耗六通道同步采样的十六位模数转换器 ADS8364;DSP 选用 TI 公司的数字信号处理芯片 TMS320F2812,该芯片可实现双 16×16 和 32×32 乘加操作,最高可工作频率为 150MHz,且具有丰富的外围模块和通信接口。

系统将被测电容器上的电压和电流通过电压互感器 (TV)和电流互感器(TA)转换成-2.5~2.5V 交流小电压信号,分别送到 ADS8364 的同步采样输入 I/O 口完成电网电压、电流的实时同步采样。A/D 转换后同步数据经八位数据总线送入后续 TMS320F2812,采用基于 Hanning 窗的插值 FFT 算法分离出基波分量的幅值、相角<sup>[10]</sup>,凭借 TMS320F2812 高速运算与数据处理性能计算出同相电压电流的初相角,据此计算介损与内置判断规则,并根据故障判断结果控制外围器件执行相应操作,同时将结果送液晶显示和存储单元。

### 1.1 数据采集单元

数据采集单元由模拟信号调理电路和 A/D 转换器件构成,主要完成三相电压、电流信号的同步采集和 A/D 转换。电网电压信号进入系统前先通过 TV 将其转换为满足 AD 输入要求范围的交流小信号。通常从电网电力互感器取回的电压额定值为  $100/\sqrt{3}$  V 左右,变换后经过系统 TV 将电压值变为-2.5V~2.5V。电容器上的电流信号通过电力互感器变换为 5A 信号,再通过系统中 TA 变换为小电流信号,再由取样电阻变换为电压信号后,经与电压调理单元相同的低通滤波后送入 ADS8364。系统中 TV 采用维博电子有限公司生产的超小型精密互感器 WBV411D TA,选用电流互感器 CT03-5/2.5,滤除信号中高于  $f/2$  的频率成分,信号调理单元接入相同的 RC 滤波电路,其截至频率为 3.3kHz。数据采集单元的硬件电路如图 2。

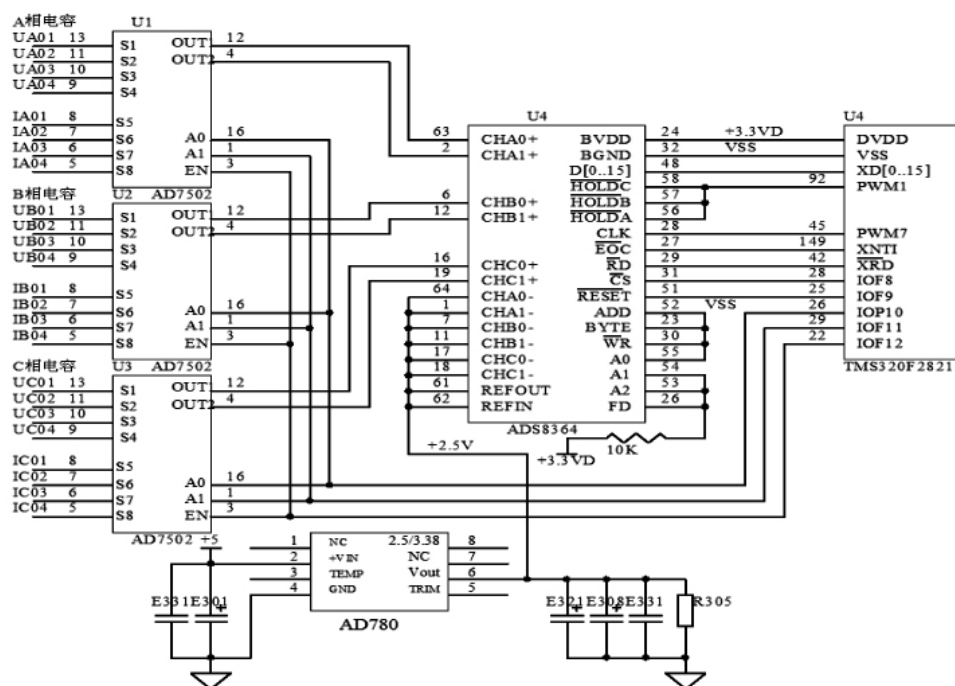


图 2 数据采集单元电路

Fig. 2 Data acquisition unit circuit

本装置采用多路模拟信号,能共用一个 ADS8364 采集,外接 3 片模拟多路开关 AD7502,同时采样 12 组数据。为实现同一电容器上电压和电流信号同步采样,设置同一个电容器上的电压和电流应为同组,并将被测电容器每 4 个分成一组,分别与 ADS8364 的 A、B、C 三组相连。当系统完成一次全部 6 通道 AD 数据采集(1024 次 AD 中断),发送到后续数据处理单元进行加 Hanning 窗插值处理。为保证采样电路有较高的精度和热稳定性,选用高精度和高热稳定性的基准电源 AD780 为 ADS8364 提供的外部参考电压。

## 1.2 数据处理单元

数据处理单元以 TMS320F2812 为数据处理核心,主要完成采集信号的预处理、基于 Hanning 插值 FFT 的运算、介损相关参数的提取与计算及显示存储等任务。其中,为完成两路至少 64 点 16bits 字长的 FFT 运算,系统采用 TMS320F2812 的硬件平台结合  $\mu\text{C}/\text{OS-II}$  多任务操作系统的软件平台,利用 TMS320F2812 的内部资源和  $\mu\text{C}/\text{OS-II}$  操作系统软件资源进行开发,在满足测量精度的基础上,提高系统扩展性。数据处理单元的电路如图 3 所示。

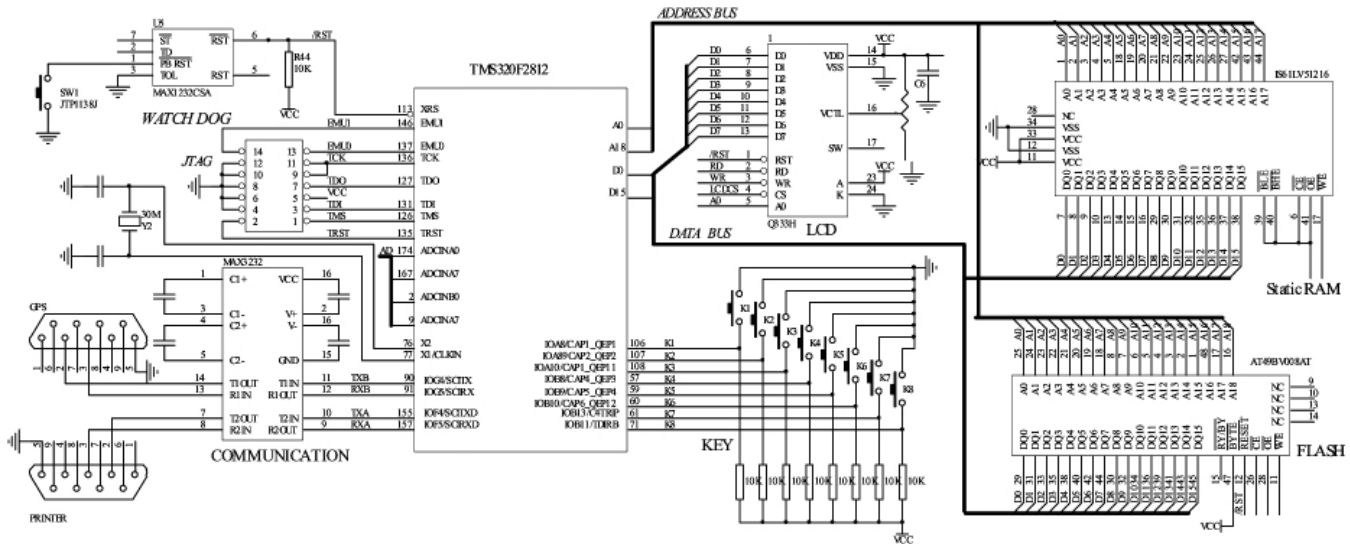


图 3 数据处理单元电路

Fig. 3 Data processing unit circuit

TMS320F2812 收到 ADC 传来的同步数据后,数据处理单元通过基于 Hanning 窗插值 FFT 算法分离出基波分量的幅值、相角,求取高压电气设备的介损相关参量并发送到存储任务实现实时数据的保存;启动故障判断任务,对高压电气设备的状态进行判断,若在线的高压电气设备有故障,则启动报警功能,并显示警报。由于 TMS320F2812 内仅有 128Kb $\times$ 16 的 FLASH、18Kb $\times$ 16 的 SARAM,不能满足设计存储要求,需对存储器进行扩展。系统选用 Atmel 公司的 AT49BV008AT 外扩 512Kb $\times$ 16 的 FLASH 存放固定数据,采用 ETC 公司的 IS61LV51216 外扩 512Kb $\times$ 16 的 Static RAM 进行数据记录和现场查询,选用 ATMEL 公司的 AT28BV64 外扩 8Kb $\times$ 8 的 EEROM 保存通信参数、高压电气设备判断的定值和故障记录等。装置选用带有 SPI 接口的 DS1302 作为时间基准,TMS320F2812 通过 GPIO 模拟 SPI 总线读取 DS1302 片内的时间值和设置时间初值。LCD 液晶显示选用台北晶光电公司的 320 $\times$ 240 显示器,通过并行总线与 TMS320F2812 连接。同时,增加 MAX706TEST 硬件看门狗提高系统的抗干扰性能。

## 2 基于 Hanning 窗插值谐波介损测量

传统 FFT 方法进行介损测量产生频谱泄漏和栅栏效应,影响测量的精度<sup>[6]</sup>。加窗插值 FFT 修正算法可以明显提高测

量结果的准确性,消除频谱泄漏和栅栏效应引起的误差。为此本文采用基于 Hanning 窗插值 FFT 算法实现介损准确测量与分析。

具有良好旁瓣性能的 Hanning 窗是一种余弦窗,其离散时间定义式为

$$\omega(n) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos\left(\frac{2n}{N} \pi\right) \quad (1)$$

其中,  $n=0, 1, 2, \dots, N-1$ ;  $N$  为采样点数。

根据 FFT 理论, Hanning 窗的频谱函数为

$$W(\omega) = 0.5D(\omega) - 0.25 \left[ D\left(\omega - \frac{2\pi}{N}\right) + D\left(\omega + \frac{2\pi}{N}\right) \right] \quad (2)$$

其中,

$$D(\omega) = e^{-j\omega \frac{N-1}{N}} \frac{\sin(\pi\omega)}{N \sin(\pi\omega/N)} \quad (3)$$

设  $\omega = \frac{2\pi}{N} k$ ,  $k=0, 1, 2, \dots, N-1$ , 当采样点数为  $N$  较大时,忽略频谱函数 3 个分量之间的相位差,有

$$W_0(k) = \frac{\sin(\pi k)}{\pi k} \frac{1}{2(1-k^2)} e^{j\frac{\pi}{N}k} \quad (4)$$

设信号采样时间为  $\Delta t$ , 频率分辨率  $\Delta f = \frac{1}{N\Delta t}$ , 对于被测信号的基波频率,有

$$f=(k+\Delta k)\Delta f \quad (5)$$

式中  $k$  为整数,校正系数  $\Delta k$  为

$$\Delta k=\begin{cases} \frac{2|X_{\omega}(k+1)|-|X_{\omega}(k)|}{|X_{\omega}(k+1)|+|X_{\omega}(k)|} & |X_{\omega}(k+1)|\geq|X_{\omega}(k-1)| \\ \frac{|X_{\omega}(k)|-2|X_{\omega}(k-1)|}{|X_{\omega}(k)|+|X_{\omega}(k-1)|} & |X_{\omega}(k+1)|<|X_{\omega}(k-1)| \end{cases} \quad (6)$$

基波的幅值校正公式为

$$A_1=\frac{2\pi\Delta k(1-\Delta k^2)|X_{\omega}(1)|}{\sin(\Delta k\pi)} \quad (7)$$

基波的相位校正公式为

$$\varphi_1=\text{phase}(X_{\omega}(1))-\Delta k\pi \quad (8)$$

介损角的计算公式为

$$\delta=\frac{\pi}{2}-\text{phase}\left(\frac{X_{i\omega}(1)e^{-j\Delta k_i\pi}}{X_{u\omega}(1)e^{-j\Delta k_u\pi}}\right) \quad (9)$$

### 3 实验与分析

为验证本文方法的可行性,仿真分析取一个具有各次谐波的周期信号如下:

$$x(t)=\sum_{i=0}^m A_i \sin(2\pi f_i t+\theta_i) \quad (10)$$

式中  $f_i$ 、 $A_i$ 、 $\theta_i$  分别为第  $i$  次谐波的频率、幅值、相角;其中,由于高压电气设备的介损角通常为  $0.001\sim 0.02\text{rad}$ ,所以取被测信号的真实介损角为  $0.01\text{rad}$ ;3 次谐波和 5 次谐波分别为基波分量的 5% 和 0.01%,相角分别为  $\pi/3$  和  $\pi/6$ ,采样频率为  $1600\text{Hz}$ ,采样点数为 256,计算介损角时基波信号的初始相角在  $0\sim 2\pi$  内均匀取 100 个点。对采用本文加 Hanning 窗插值 FFT 算法在不同情况下介损角计算误差的变化情况进行了仿真分析。

#### 3.1 频率波动影响

在谐波存在的情况下,信号基波频率在  $49.7\sim 50.3\text{Hz}$  范围内变化时,仿真计算所得介损角的最大误差均小于  $65\mu\text{rad}$ ,误差的标准差不超过  $40\mu\text{rad}$ ,测量结果变化较为平缓,满足介损角测量精度的要求。系统频率波动对介损测量的影响如图 4 所示。

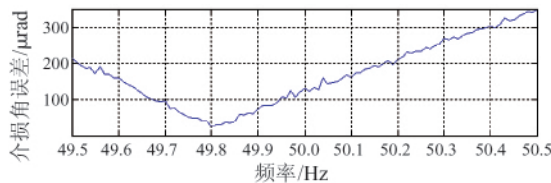


图 4 系统频率波动对算法误差的影响

Fig. 4 Impact of system frequency fluctuations on the algorithm errors

#### 3.2 谐波影响

当电网频率为  $49.5\text{Hz}$ ,3 次谐波的含量由基波分量的 0 增加至 40% 时,仿真计算所得的介损角误差的变化情况如图

5 所示。

由图 5 可知,当 3 次谐波的含量由 0 增加至 40% 时,介损角的计算误差随之增大,但与 3 次谐波含量为 10% 时的误差相比变化不大,可见,Hanning 窗抑制频谱泄露效果好,谐波变化因素对介损角测量影响较小。

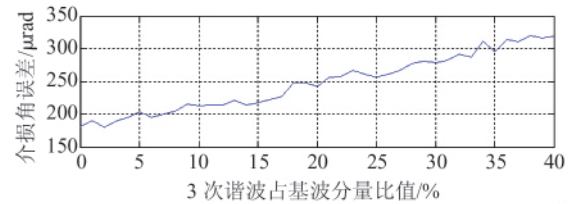


图 5 谐波对算法误差的影响

Fig. 5 Impact of harmonics on the algorithm errors

#### 3.3 采样点数影响

采样频率为  $1600\text{Hz}$ ,电网频率为  $49.5\text{Hz}$ ,采样周期从 2~14 额定周期( $N$  为 64~448 点)时,计算所得的介损角误差如表 1 所示。

表 1 采样点数对算法误差的影响

Table 1 Impact of sampling points on the algorithm errors

| 采样周期 | 最大值<br>/ $\mu\text{rad}$ | 最小值<br>/ $\mu\text{rad}$ | 均值/ $\mu\text{rad}$ | 标准差<br>/ $\mu\text{rad}$ |
|------|--------------------------|--------------------------|---------------------|--------------------------|
| 2    | 2568.5                   | -2111.6                  | -0.14395            | 1355.6                   |
| 4    | 348.96                   | -326.83                  | 0.57989             | 210.01                   |
| 8    | 212.92                   | -186.56                  | -0.73398            | 122.29                   |
| 12   | 103.74                   | -100.28                  | 1.0062              | 60.954                   |
| 14   | 79.857                   | -72.216                  | 1.1021              | 46.324                   |

由表 1 可知,当采样点数增加时,介损测量的误差稳步下降,采样点数较少时,测量误差较大;当采样点数超过 200 后,采样点数对介损的测量误差影响很小。

#### 3.4 白噪声影响

抗干扰能力是算法性能的一项重要指标。为验证算法的抗干扰性能,本文在仿真信号中加入高斯白噪声,介损角的测量误差如图 6。

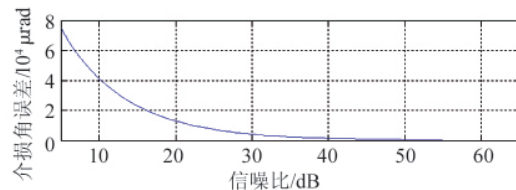


图 6 白噪声对算法误差的影响

Fig. 6 Impact of white noise on the algorithm errors

由图 6 可知,随着信噪比的增加,介损角误差逐渐下降。

当信噪比为 5dB 时,计算最大误差为 70661 $\mu$ rad,当信噪比为 25dB 时,计算最大误差为 7298.6 $\mu$ rad,当信噪比高于 35dB 时,算法的测量精度也可满足要求。

#### 4 检验结果

为验证设计的测量系统的准确性,在实验室条件下进行实验测试。测量系统实际计算介损时,为有效抑制高频电磁干扰信号对数据采样的影响,电压、电流调理通道的后级接入参数相同的 RC 低通滤波器,保持采样前后电压、电流间的相位差一致。基于 Hanning 窗双谱线插值 FFT 算法通常取采样点数为  $2^N$ ,根据 AD8364 的转换速度及 TMS320F2812 的数据处理速度,设计取  $N=9$ ,即采样点数为  $2^9=512$ 。在实验中,电源选取 220V 进行实验,电容性试品泄露电流经电流互感器与电阻网络送入测量单元,夹在试品上电压串联一个电阻后,经 TV 与调理电路送入测量单元。用 Fluke1550 测得电容性试品的介质损耗因数为 0.005906,测量系统实验结果如表 2 所示。

表 2 介损角的测量误差

Table 2 Measurement errors of dielectric loss

| 频率/Hz | 介损误差/%    |
|-------|-----------|
| 49.5  | 1.471233  |
| 49.7  | 0.7703784 |
| 50.0  | 0.9262818 |
| 50.3  | 0.0476255 |
| 50.5  | 2.373208  |

由表 2 实验结果可知,当基波频率在 49.5~50.5Hz 间变化,介损测量相对误差小于 2.37%,表明基于本文方法实现的测量系统测试介损结果精确,且受频率波动的影响较小。

#### 5 结论

本文设计实现了一套介损在线监测装置,并采用基波频率波动、谐波变化、采样点数变化、白噪声变化的仿真与实验测试验证本文的方法,仿真与实验结果表明,Hanning 窗插值 FFT 的算法抗干扰能力强,受电压频率波动、采样频率与采样时间长度的影响很小,在电压频率波动时实时测量结果稳定;可有效克服白噪声存在时信号谐波分量间的泄漏量对测量结果的影响。在非整周期截断的条件下,本文提出的基于 Hanning 窗双谱线插值 FFT 的介损测量装置能有效克服绝缘介质损耗测量参数变化的影响,且设计实现灵活,测量结果精确、稳定,可用于介损的离线测量与在线监测。同时文章具有一定的创新性,主要表现如下。

1) 本文提出了 ADS8364+TMS320F2812 的介损测量装置新型构成方案,并给出六路同步采样 ADC 的数据采集单元和以 TMS320F2812 为核心的数据处理单元电路;

2) 深入研究了 Hanning 窗插值 FFT 的算法,并实践应用

于介损在线监测系统,仿真和实际测量验证了系统的可行性与稳定性。

#### 参考文献 (References)

- [1] Wang P, Raghuveer M R, McDermid W, *et al.* A digital technique for the on-line measurement of dissipation factor and capacitance [J]. *IEEE Transactions on Dielectric Electrical Insulation*, 2001, 8(2): 228-232.
- [2] 张军, 张家安. 氧化锌避雷器阻性电流误差分析 [J]. 湖北电力, 2009, 33(1): 34-36.  
Zhang Jun, Zhang Jia'an. *Hubei Electric Power*, 2009, 33(1): 34-36.
- [3] 周文俊, 喻剑辉, 陈荣, 等. 雷电流全参数及避雷器状态在线监测研究 [J]. 高电压技术, 2008, 34(10): 2054-2057.  
Zhou Wenjun, Yu Jianhui, Chen Rong, *et al.* *High Voltage Engineering*, 2008, 34(10): 2054-2057.
- [4] 金之俭, 肖登明, 王耀德. 绝缘介质损耗角的数字化测量研究 [J]. 高电压技术, 1999, 25(1): 49-50.  
Jin Zhijian, Xiao Dengming, Wang Yaode. *High Voltage Engineering*, 1999, 25(1): 49-50.
- [5] 尚勇, 杨敏中, 王晓蓉, 等. 谐波分析法介质损耗因数测量的误差分析 [J]. 电工技术学报, 2002, 17(3): 67-71.  
Shang Yong, Yang Minzhong, Wang Xiaorong, *et al.* *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2002, 17(3): 67-71.
- [6] Gregorio A, Mario S, Amerigo T. Windows and interpolation algorithms to improve electrical measurement accuracy [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1989, 38(4): 856-863.
- [7] 柴旭峥, 关根志, 文习山, 等.  $\tan\delta$  高精度测量的加权插值 FFT 算法 [J]. 高电压技术, 2003, 29(2): 32-33.  
Cai Xuzheng, Guan Genzhi, Wen Xishan, *et al.* *High Voltage Engineering*, 2003, 29(2): 32-33.
- [8] 邱海锋, 周浩. 应用改进的布莱克曼插值算法精确估算介损角 [J]. 高压电器, 2008, 44(3): 236-238, 269.  
Qiu Haifeng, Zhou Hao. *High Voltage Apparatus*, 2008, 44(3): 236-238, 269.
- [9] 王楠, 律方成, 梁英, 等. 基于高精度 DFT 的介损数字测量方法 [J]. 高电压技术, 2003, 29(4): 3-8.  
Wang Nan, Lv Fangcheng, Liang Ying, *et al.* *High Voltage Engineering*, 2003, 29(4): 3-8.
- [10] 段大鹏, 江秀臣, 孙才新, 等. 基于正交分解的介质损耗因数数字测量算法 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(7): 127-133.  
Duan Dapeng, Jiang Xiuchen, Sun Caixin, *et al.* *Proceedings of the CSEE*, 2008, 28(7): 127-133.

(责任编辑 杨书卷)

#### 《科技导报》“科技纵横捭阖”栏目征稿

“科技纵横捭阖”栏目由上海交通大学人文学院关增建教授主持,为评论体文章。欢迎读者就国内外重大科技事件、科技人物、科技话题进行评论,发表自己独立的见解和观点。每篇文章约 2200 字,要求行文深入浅出、言简意赅、逻辑清晰、有理有据、观点鲜明、切中要害,可读性强,并附必要的参考文献(不多于 3 条)。栏目责任编辑:王芷;投稿邮箱:wangzhi@cast.org.cn。