

基于嵌入式系统的接地网测量装置

方彦军, 习 博

(武汉大学 自动化系, 湖北 武汉 430072)

摘要: 探讨了一种基于嵌入式系统新型接地网特性测量装置的开发方案, 采用变频测量方法, 能在 30~70 Hz 频段内 1 Hz 步进, 选择最佳测量频率, 避开工频环境中的干扰信号, 实现接地网特性参数的准确测量。设计的测量装置由变频电源、测量处理模块、嵌入式控制核心组成, 其中处理器采用 ARM7TDMI 内核的 32 位高速处理器。系统软件包括准同步采样、数字滤波、电参量计算等, 由固化在嵌入式 ARM 芯片中的程序实现。方案充分利用嵌入式技术特点, 通过传感器、A/D 转换器等较少硬件, 完成接地网参数的测量, 应用结果证明设计方案高效、可靠, 满足测量要求。

关键词: 交流变频测量; 接地网; ARM; uCLinux; 数字滤波器

中图分类号: TM 943

文献标识码: B

文章编号: 1006-6047(2007)10-0073-04

为了确保电力系统安全可靠运行, 各电气设备必须通过大型接地网进行良好接地。对于大型发电厂、变电站接地网而言, 一般占地面积可达 $(900 \sim 50 \times 10^4 \text{ m}^2)$, 且结构复杂(包括各种接地桩、柱、地下金属管道、铜网、组件耦合接地等), 要方便、安全、准确地实现接地网的特性测量比较困难。目前, 接地网的测试方法多采用类工频(变频)、大电流测试法, 通过对接地网注入一个类工频(变频)大电流信号, 采取不同于工频(50 Hz)的信号, 用特殊设备降低噪音信号的干扰, 计算出接地网的特性参数^[1-2]。

传统使用的接地网测试设备有很多, 包括变频电源、变频电压电流测试仪等, 整套设备存在着体积庞大、使用不便、测试精度低等问题。为了准确实现接地网的特性测量, 把嵌入式系统、数字滤波器的研究成果应用到接地网测量仪器的开发中, 将测试系统所需要的变频电源、变频电压电流测试仪整合到一起, 开发出一个可独立使用的接地网特性测量装置, 能够方便、准确地进行接地电阻的测量。

收稿日期: 2006-11-14; 修回日期: 2007-04-17

1 测试原理

将变频大电流信号的发生、电流和电压信号的检测、数据的处理显示等模块全部集中到接地网测量装置后, 改变了传统测试装置体积庞大、携带不易的缺点, 方便测试布线、数据显示, 测试时引线方法、线路布置如图 1 所示。在测量接地网接地电阻 R 时, 注入接地网的电流 I 经接地网向无穷远处自由散流, 理论上接地网上的电位 U (以无穷远处为参考零点) 与电流 I 的比值即为其接地电阻值。

在测量中, 电流极布极与放线距离应 4~5 倍于被测地网对角线, 同时电压极布线长度应约为电流极布线长度的 0.5~0.6。如果减小接地网与电流极之间的距离, 则电流极引起的电压降对地表电位的影响会显著增大, 影响测量准确度^[3]。

图 1 中的 P 是实际零电位区中的一点, 测量时, 只要找到零电位中的一点 P , 测量装置可以自动分别测出接地装置 G 与电极 P 之间的电位差 U_G 和通过

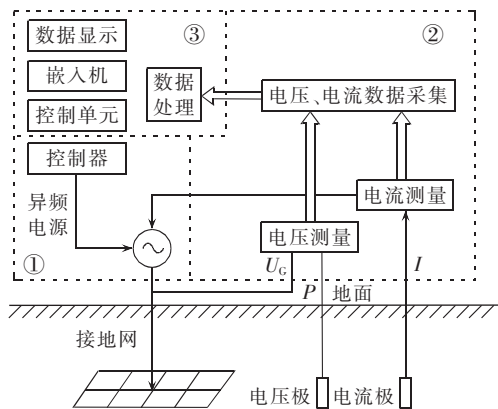


图 1 系统测试原理图

Fig.1 Principle of grounding grid parameter measurement

接地装置流入地中的测试电流 I , 可求得接地装置的工频接地电阻为 $R_G = U_G / I$ 。另外, 为了提高测量仪的抗干扰能力, 测量装置中变频电源产生的低频交流电压频率是可变的, 频率可在 30~70 Hz 频率中手动选择 1 Hz 步进, 然后画出多组测得的接地电阻阻值曲线, 舍去大于干扰测量下的失真值, 对 50 Hz 工频下实际的接地阻值进行拟合。

2 硬件设计

2.1 整体结构

在接地网变频测量仪中, 需要完成扫描各传感器模块状态、数据采集、信息处理、数据显示报警、实现人机界面等功能, 这给实际应用带来了很大的压力。因此, 在设计时采用 32 位高性能嵌入式 CPU, 使得测量仪能够实现复杂的控制, 进行多任务的处理, 极大地提高测量效率和测试精度。测量仪主要由以下 3 部分组成, 这 3 个模块协同工作完成一次接地电阻的自动测量。

a. 可变功率源, 受嵌入式 CPU 控制, 可向接地网注入连续的激励源, 提供 30~70 Hz 频率范围内 1 Hz 步进正弦交流电, 当手动设置电源信号后, 频率平滑变化调整到相应设定值。

b. 嵌入式 CPU 控制的测量处理模块, 主要功能是对待测接地网的电流、电压信号进行数据采集、程控放大、模数转换, 以达到数据处理模块可处理的信号范围, 并利用数字滤波滤除测量现场的工频干扰, 最后根据相应数据得出计算结果。

c. 嵌入式 CPU 控制的键盘、中文 LCD 显示屏、测量仪的通信接口、可变功率源的过压、过流、过热等仪器外围及保护电路。

2.2 嵌入式系统架构

考虑到测量现场的复杂性和特殊性, 用 32 位 ARM 处理器来开发硬件平台是理想的选择。测量装置的处理单元采用 Samsung 公司基于 ARM7TDMI 内核的 32 位高速处理器 S3C4510B。S3C4510B 芯片属于 ARM7 系列, 典型处理速度为 0.9 MIPS/MHz,

系统时钟可达 50 MHz。芯片中集成了丰富的外围功能模块, 包括: 2 个通用串口、2 个通用 DMA、2 个 32 位计时器、2 个高级数据链路控制 HDLC (High level Data Link Control protocol) 通道、18 个可编程通用 I/O 口、片内以太网控制器, 逻辑控制器包括可编程中断控制器、I2C 总线控制器, 存储控制器和总线仲裁器^[4-6]。根据 32 位 ARM 处理器特点和实际功能需要, 设计了测试仪的嵌入式硬件结构, 见图 2。

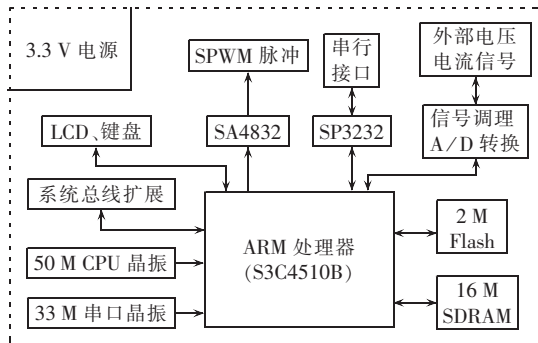


图 2 S3C4510B 结构及其部分外围电路图

Fig.2 Structure of S3C4510B and its peripherals

在具体实现中, ARM 微处理器的体系结构支持 8 位/16 位/32 位的存储器系统, 32 位的存储器系统相比较而言具有较高的性能, 而 16 位的存储器系统则在成本及功耗方面占有优势, 采用一片 HY29LV160 构建 16 位的 Flash 存储器系统, 其存储容量为 2 MB, 用来存放用户应用程序、uClinux 嵌入式操作系统和在系统掉电后需要保存的用户数据等^[7]。另外, 选用 2 片 HY57V641620 并联构建 32 位 16 MB 的 SDRAM 存储器系统, 作为系统运行时的主要区域, 用于存放嵌入式系统及用户数据、堆栈。

由于 RS-232-C 标准所定义的高、低电平信号与 S3C4510B 系统的 LVTTTL 电路所定义的高、低电平信号完全不同, 使用 SIPEX 公司 SP3232 芯片增加一个电平转换电路^[8]。

S3C4510B 处理器是整个嵌入式架构的核心。变频电源的电压控制、频率反馈、停启控制信号用 S3C4510B 控制 SA4832 芯片产生 SPWM 脉冲的方式实现。外部信号的输入模块包括信号的采集、调理电路, 信号采集采用高速 AD 转换芯片 MAX197, 8 通道, 6 μ s 转换时间, 处理电压范围为 4 档 (单位为 V): 0~10、0~5、-5~5、-10~10。采集完数据后, 利用 ARM 处理器进行数字滤波、结果运算。

2.3 变频电源

变频电源受 S3C4510B 处理器控制, 提供频率异于 50 Hz 的测量信号, 是接地电阻变频测量的核心部件, 其设计直接关系到测量结果的准确度, 首先通过二极管整流电路将三相交流电转化为直流电, 然后通过 IGBT 桥式逆变电路逆变成 SPWM 波形, 经过滤波得到正弦波输出^[9], 变频电源的原理如图 3 所示。

变频电源选用 AC-DC-AC 变换电路, 其中 DC-AC 变换采用嵌入式处理器控制 SA4828 芯片的方

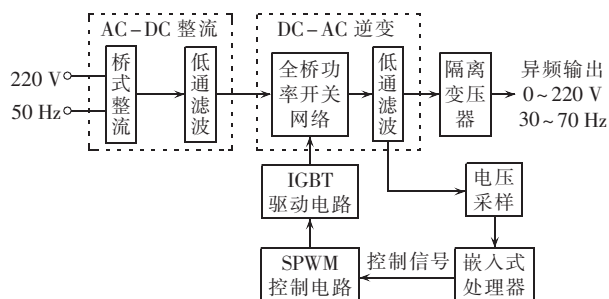


图 3 变频电源结构框图

Fig.3 Structure of variable-frequency power source

式。当需要 SPWM 脉冲输出时, S3C4510B 嵌入式处理器向 SA4828 的控制寄存器发送控制信息, 使 SA4828 从内部保存正弦型、增强型、高效型 3 种压缩波形的 ROM 中选择适当的波形按要求快速输出。SPWM 脉冲经过驱动电路控制 IGBT 的通断, 完成脉冲功率调制和脉冲极性转换, 输出经过低通滤波器后得到低失真度的正弦波。为了得到准确的电压值, 变频电源采用闭环控制。在电源输出端, 通过电压传感器, 经过整流滤波放大后, 对电压值进行采样, 通过 MAX197 模数转换器将模拟信号转换为数字信号。嵌入式处理器对这些数字信号有效处理后进行闭环控制, 同时 LCD 显示输出电压值。

3 软件设计

3.1 系统软件

测试仪的软件是在 uClinux 操作系统平台下进行开发的。uClinux 系统是近年迅速发展起来的一种专门用于微控制领域的嵌入式操作系统, 沿袭了 Linux 系统的绝大部分性能, 主要针对无内存管理单元 MMU (Memory Management Unit) 的处理器设计, 支持多任务, 具有完备的 TCP/IP 协议栈, 在低端网络设备、工业控制领域、数据采集和处理等方面有着广泛的应用^[10-12]。如图 4 所示, 测试装置软件完成的任务包括 4 点。

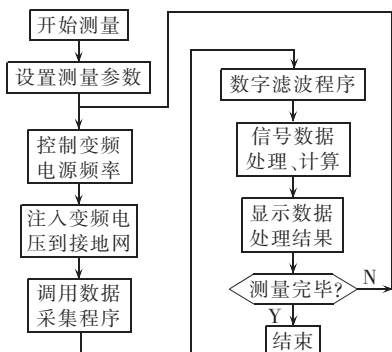


图 4 系统软件流程图

Fig.4 Flowchart of system software

a. 为提高测量精度, 对变频电源控制器发出控制信号。通过控制模块, 调节电源的频率, 使其工作在 30~70 Hz 中干扰较小的频带。同时通过调整频率, 研究不同频率对接地网的影响情况。

b. 对采集到的电流、电压信号进行数据采集

及转换的控制, 完成数据有效性的判断, 并进行数字滤波。

c. 对滤波后信号数据进行计算, 得到测试值。

d. 人机界面功能, 接收键盘输入的参数指令、显示测试仪工作状态和测试结果等。

3.2 数字滤波器

在众多软件模块任务中数字滤波的功能最为重要, 它的设计指标直接影响测试结果。为满足系统的滤波要求, 首先利用 Matlab 的信号处理工具箱设计数字滤波器。设计数字滤波器, 就是要找到一组能满足特定滤波要求的系数向量 a 、 b , 而滤波器设计完成后还需要考虑选择什么样的滤波器结构来完成滤波运算。FDA Tool 是一个功能强大的数字滤波器分析设计工具, 它涵盖了信号处理工具箱中所有的滤波器设计方法, 利用它可以方便地设计出满足各种性能的滤波器, 并可查看该滤波器的各种分析图形, 待设计满意后, 将其系数直接导出后进行软件编程^[13-14]。

经过仿真实验, 发现若使用 FIR 型滤波器, 为满足滤波要求而生成滤波器的阶数很高, 大约要 400 阶, 不方便计算。使用 IIR 型滤波器, 在 Matlab 的可视化滤波器设计环境中输入相应的指标如下: 类型为带通, 采用 IIR 的切比雪夫 II 型, 采样频率为 4 kHz, 阻带衰减为 30 dB, 指定阶数为 8 阶。仿真设计完后, 从 Matlab 中导出设计的数字滤波器参数, 其中:

```
double b[9]={0.030 930 323 253 37,
-0.246 836 282 511 49, 0.862 414 824 036 05,
-1.723 017 918 264 02, 2.153 018 106 976 71,
-1.723 017 918 264 02, 0.862 414 824 036 05,
-0.246 836 282 511 49, 0.030 930 323 253 37}
double a[9]={1.000 000 000 000 00,
-7.939 034 942 032 85, 27.588 748 502 142 09,
-54.812 100 876 638 18, 68.095 583 280 354 40,
-54.170 069 161 232 26, 26.946 223 003 738 90,
-7.663 313 678 121 46, 0.953 963 871 932 30}
```

根据 IIR 滤波器的差分方程:

$$Y[n] = \sum_{i=0}^8 b_i X[n-i] - \sum_{k=1}^8 a_k Y[n-k]$$

a_n 、 b_n 为导出的参数, 最终在 uClinux 中用 Linux 系统 C 语言实现数字滤波算法^[15]。图 5 为实际数字滤波后的效果, 其中 1 为滤波前采集到的数字信号, 2 为滤波后信号, 可以看出滤波后曲线为平缓正弦曲线, 满足数字滤波要求。

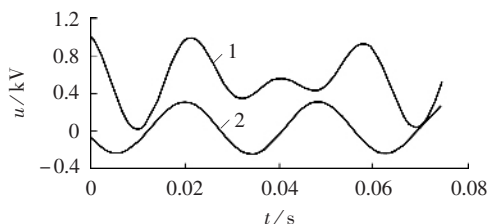


图 5 数字滤波处理

Fig.5 Effect of digital filtering

4 结语

这种嵌入式测量装置克服了原先测量设备体积庞大、使用不便、测试不准等缺点,主要性能指标:输出电源波形及频率为 30~70 Hz 步进 1 Hz,正弦波,输出电压可调,其电源指标应符合电能质量标准相关内容;测量系统电源谐波 THD<3%,奇次 2.4%,偶次 1.2%;测量系统电源各档基频 30~70 Hz,每档 1 Hz 步进,且误差小于 ± 0.1 Hz;接地电阻测量范围为 $(0.02 \sim 3) \times (1 \pm 0.002) \text{ k}\Omega$ 。现场使用表明,该测量仪在线测量速度快、测量精度高、抗干扰能力强、可靠性高、智能化程度、人机界面友好,提高了工作人员的测试效率和测试精度,在现场应用中具有明显的优势。

参考文献:

- [1] 刘宝成. 低电压大电流法检测接地网技术研究[J]. 华北电力技术,1999(2):7-8.
LIU Bao-cheng. Research on using low voltage and large current for testing ground grid[J]. North China Electric Power,1999(2):7-8.
- [2] 周文俊,文习山,汪广武,等. 有效消除地网干扰的接地电阻变频测量法[J]. 高电压技术,1998,24(3):51-53.
ZHOU Wen-jun,WEN Xi-shan,WANG Guang-wu,et al. An effective method of removing grounding grid interference grounding resistance measurement[J]. High Voltage Engineering,1998,24(3):51-53.
- [3] 张晓东,丁峰. 一种实用的接地电阻测量方法[J]. 电力自动化设备,2002,22(8):60-62.
ZHANG Xiao-dong,DING Feng. A practical grounding resistance measurement method[J]. Electric Power Automation Equipment,2002,22(8):60-62.
- [4] 李驹光,聂雪媛,江泽明,等. ARM 应用系统开发详解——基于 S3C4510B 的系统设计[M]. 北京:清华大学出版社,2003.
- [5] Samsung Electronics. S3C4510B User Manual[EB/OL]. [2006-11-10]. <http://www.lumit.org/download/document/>.
- [6] ARM Limited. ARM7TDMI Technical Reference Manual[EB/OL]. [2006-11-10]. <http://www.lumit.org/download/document/>.
- [7] FANG Yan-jun,XI Bo. Implementation of industrial Ethernet communication based on embedded systems [C]//Proceedings of 1st IEEE Conference on Industrial Electronic and Application. Singapore:IEEE,2006:1608-1611.
- [8] 方彦军,习博. 基于嵌入式 uClinux 系统工业以太网接口的设计与实现[J]. 电测与仪表,2005,42(4):59-61,29.
FANG Yan-jun,XI Bo. Design of industrial Ethernet interface on uClinux embedded system[J]. Electrical Measurement and Instrumentation,2005,42(4):59-61,29.
- [9] 李玉玲,于长胜,魏华雄. 基于 SPWM 的变压变频电源设计[J]. 哈尔滨理工大学学报,2005,10(1):63-65.
LI Yu-ling,YU Chang-sheng,WEI Hua-xiong. The design of variable voltage and variable frequency power supply based on SPWM[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology,2005,10(1):63-65.
- [10] 郭玉东,王非非. Linux 操作系统结构分析[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2002.
- [11] SCOTT M. Linux core kernel commentary[M]. [S.l.]:Coriolis group,1999.
- [12] 习博,方彦军. 基于 ARM 的嵌入式电能在线监测装置的设计[J]. 仪表技术与传感器,2007(2):47-49.
XI Bo,FANG Yan-jun. Design of embedded electric power on-line monitoring instrument based on ARM[J]. Instrument Technique and Sensor,2007(2):47-49.
- [13] BOASHASH B. Time-frequency signal analysis:method and analysis[M]. [S.l.]:Wiley Halsted Press,1992.
- [14] 飞思科技产品研发中心. Matlab 7 辅助信号处理技术与应用[M]. 北京:电子工业出版社,2005.
- [15] 陈怀琛. 数字信号处理教程[M]. 北京:电子工业出版社,2004.
- [16] 查申森,郑建勇,苏麟,等. IGBT 串联运行的动态均压研究[J]. 电力自动化设备,2005,25(5):20-23.
ZHA Shen-sen,ZHENG Jian-yong,SU Lin,et al. Research on dynamic voltage balancing of serial IGBTs[J]. Electric Power Automation Equipment,2005,25(5):20-23.
- [17] 查申森,郑建勇,苏麟,等. 大功率 IGBT 并联运行均流问题研究[J]. 电力自动化设备,2005,25(7):32-34.
ZHA Shen-sen,ZHENG Jian-yong,SU Lin,et al. Research on current balancing of parallel IGBTs[J]. Electric Power Automation Equipment,2005,25(7):32-34.

(责任编辑:汪仪珍)

作者简介:

方彦军(1957-),男,福建福州人,教授,博士研究生导师,从事过程检测与控制方面的教学与研究工作;

习博(1980-),男,湖北宜昌人,博士研究生,从事嵌入式系统、计算机控制的学习与研究(E-mail:whuxb@qq.com)。

Measurement instrument based on embedded system for grounding grid

FANG Yan-jun,XI Bo

(Department of Automation,Wuhan University,Wuhan 430072,China)

Abstract: The development scheme of an instrument based on embedded system for measuring the characteristic parameters of grounding grid is discussed. To avoid the power frequency interference and realize exact measurement,it adopts AC variable-frequency method and searches the optimal measuring frequency from 30 to 70 Hz with 1 Hz step. It is composed of AC variable frequency power source,measurement processing module and 32-bit processor with embedded ARM7TDMI control core. The system software includes quasi-synchronous sampling,digital filtering and electric parameter calculation,burnt in the embedded ARM chip. The scheme makes full use of embedding technique,implementing the parameter measurement with less hardware of sensors and A/D converter. Applications prove that the scheme is efficient and reliable,meeting the measurement requirements.

Key words: AC variable-frequency measurement; grounding grid; ARM; uClinux; digital filter