

文章编号:1000-582X(2008)10-1154-06

## 智能发电设备电参量测量仪的研制

刘和平<sup>1</sup>, 余银辉<sup>1</sup>, 常 猛<sup>2</sup>, 高尚勇<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400030;

2. 中煤国际工程集团 重庆设计研究院, 重庆 400016)

**摘 要:**发电设备电参量是反应发电设备状况的重要参数,为此研制了基于嵌入式系统的智能发电设备电参量测量仪。通过加 Hanning 窗的基 2 FFT 电参量计算方法、硬件频率检测跟踪方法降低泄漏效应和栅栏效应;同时设计了外部总线接口的高速同步 AD 转换、多路反馈(MFB)型滤波器,多任务调度,以及图形开发软件  $\mu\text{C}/\text{GUI}$  的应用,提高了电参量测量的实时性、抗干扰能力和人机交互能力。实验测试表明,该系统精度不大于 0.5%,稳定性好,使用操作方便。

**关键词:**嵌入式系统;发电设备;电参量;泄漏效应;

中图分类号:TM932

文献标志码:A

## Design of an electric parameter measurement instrument for power generation equipment

LIU He-ping<sup>1</sup>, YU Yin-hui<sup>1</sup>, CHANG Meng<sup>2</sup>, GAO Shang-yong<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment and System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China 2. SINO-COAL International Engineering Group, Chongqing Design and Research Institute, Chongqing 400016, P. R. China)

**Abstract:** Because electric parameters are crucial for indicating the operating condition of power generation equipment, an intelligent instrument for electric parameters measurement of power generation equipment was developed. A Hanning windowing interpolation algorithm based on FFT and a hardware frequency track were adopted to reduce the effect of leakage and fencing. In addition, a high speed AD conversion based on an external bus interface, a multiple feedback filter, an application of  $\mu\text{C}/\text{GUI}$ , and a multitask scheduler all were designed to improve timing and anti-jamming. Test results indicate the system is stable and easily operated. The measured relative error of electric parameter is less than 0.5%.

**Key words:** embedded systems; power generation equipment; electric parameter; effect of leakage

发电设备是电力系统最重要的组成部分之一,发电设备的电参量测试是发电设备出厂试验必不可少的一部分,同时发电设备在运行过程中也需要实时监测其发出的电能质量,以便采取相应的措施,避免不必要的损失。目前的发电机电参量测试仪多以

PC 机为后台,实时性不高,系统庞大,使用不便,难以保证现场需求。系统以基于 ARM9 核的 AT91RM9200 为 CPU, VxWorks 为操作系统构成一个嵌入式实时计算机系统,利用嵌入式系统丰富的外设资源和高速的处理能力使得仪表小型化、智

收稿日期:2008-06-21

基金项目:重庆市科技攻关资助项目(20521);重庆大学研究生科技创新基金资助项目(200707A1B0060243)

作者简介:刘和平(1957-),男,重庆大学教授,博士生导师,主要从事电力传动、智能测试仪器、微机在电力系统在线应用等领域的研究。(Tel)023-65102438;(E-mail) engineer@cqu.edu.cn.

欢迎访问重庆大学期刊网 <http://qks.cqu.edu.cn>

能化。

## 1 电参量计算基本原理及算法

笔者以快速傅立叶变换(FFT)为理论依据,设计了一种基于嵌入式系统的发电设备电参量测量装置,该装置通过采集三相电压、电流信号,以加窗 FFT 为运算基础计算出各次谐波的幅值、功率因数、谐波总畸变率、有功功率、无功功率,序分量等各种电力参数。

### 1.1 快速傅立叶变换基本原理

非周期连续时间信号  $x(t)$  的傅立叶变换可以表示为<sup>[1-2]</sup>

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt, \quad (1)$$

设每周周期采样得到了  $N$  点采样值  $\{x(nT), n = 0, 1, \dots, N-1\}$

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{NT}, \quad (2)$$

由此对式(1)离散化可得到式(3)

$$X(k\omega_0) = \sum_{n=0}^{N-1} x(nT)e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}, \quad (3)$$

令  $W_N = e^{-j\frac{2\pi}{N}}$ , 并省略符号  $\omega_0$  和  $T$ , 则式(3)可写成

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)W_N^{kn}, \quad (4)$$

其中:  $X(k)$  是时间序列  $x(n)$  的频谱;  $W_N$  为蝶形因子。

利用  $W_N$  的对称性  $W_N^{k+\frac{N}{2}} = -W_N^{kn}$  和周期性  $W_N^{kn} = W_N^{k(N+N)} = W_N^{(k+N)n}$  就可得到按时间抽选的基 2 FFT 的计算方法<sup>[3-4]</sup>。FFT 算法本身可滤除高次谐波和直流分量。

### 1.2 快速傅立叶变换误差分析

电压电流信号采集时,即使采样频率满足了奈奎斯特定理,但如果不是整周期采样,FFT 算法将带来栅栏效应<sup>[5-6]</sup>,使算出的频率、幅值和相位信号等不准,尤其是相位误差很大,从而无法满足准确的谐波测量要求。因而保证整周期采样可降低栅栏效应产生的误差。

在满足采样定理及整周期采样的前提下,信号的采样点数为  $N$ , 采样间隔为  $\Delta t$ , 即是所分析的信号持续时间  $T = N\Delta t$ 。

$$\text{设单一频率信号: } x_m(t) = A_m e^{j\omega_m t}, \quad (5)$$

对应的频谱为

$$X_m(\omega) = 2\pi A_m \delta\omega_m(\omega), \quad (6)$$

即在  $\omega_m$  处有单一的谱线。

快速傅立叶变换是截取信号的一个周期进行计算,相当于对原信号加了一个矩形窗。

$$\text{矩形窗为 } w_T(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq T \\ 0, & \text{其他} \end{cases}, \quad (7)$$

矩形窗对应的频谱为

$$\begin{aligned} W_T &= \frac{T \sin(\frac{\omega T}{2})}{\frac{\omega T}{2}} \exp(-j \frac{\omega T}{2}) \\ &= \frac{\sin(\frac{\omega T}{2})}{\frac{\omega}{2}} \exp(-j \frac{\omega T}{2}), \end{aligned} \quad (8)$$

截取的一个周期的信号相当于  $x_m$  和  $w_T$  的乘积,根据傅立叶变换的乘积定理,其傅立叶变换为  $X_m(\omega)$  和  $W_T(\omega)$  的卷积。

$$\begin{aligned} \bar{X}_m(\omega) &= 2\pi A_m \int W_T(\omega - \tau) \delta\omega_m d\tau = \\ &= 2\pi A_m \frac{\sin(\frac{\omega - \omega_m}{2} T)}{\frac{\omega - \omega_m}{2}} \exp(-j \frac{\omega - \omega_m}{2} T), \end{aligned} \quad (9)$$

此时  $\bar{X}_m(\omega)$  已经不是单一的谱线,而是分布在频率轴上,从而造成了频谱的泄露,在谐波分析中各次谐波的泄露相互叠加,因而构成傅立叶变换的泄露误差<sup>[7]</sup>。

采用 hanning 窗减少频谱泄露引起的误差<sup>[8]</sup>,窗函数为

$$w(n) = 0.5 - 0.5 \cos(\frac{2\pi n}{N}), \quad (10)$$

离散信号  $x_n$  的 FFT 所得结果为  $X(n)$ , 加 hanning 窗后信号的 FFT 所得结果为

$$X_n(n) = \frac{1}{2} X(n) - \frac{1}{4} X(n-1) - \frac{1}{4} X(n+1). \quad (11)$$

## 2 系统硬件设计

仪表中央处理单元采用了 ATMEL 公司的基于 ARM920T 内核的控制器 AT91RM9200<sup>[9]</sup>, 运算速度高达 200MIPS, 它是 ATMEL 公司专为工业应用提供的高性价比的微控制器解决方案。具有存储器管理单元(MMU)、外部总线接口(EBI)等丰富的外围模块。根据实际需要设计了以 AT91RM9200 为核心的硬件电路,系统硬件结构图如图 1 所示。

### 2.1 AD 转换模块设计

对三相电压、电流信号的同步采集采用了

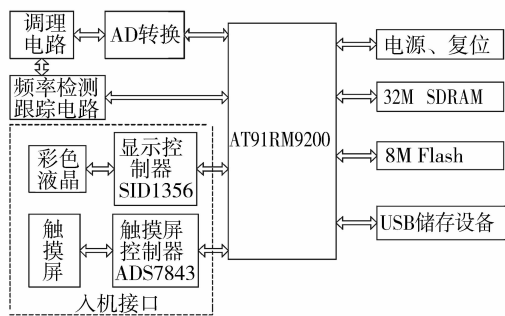


图1 系统硬件结构图

Maxim公司的8通道、14位同步AD转换芯片MAX1324,输入电压范围为 $\pm 10\text{ V}$ ,6通道同时工作时,每通道的转换速率可达250 kbps,其转换速度和精度完全符合系统需求。MAX1324与AT91RM9200接口连接图如图2所示。

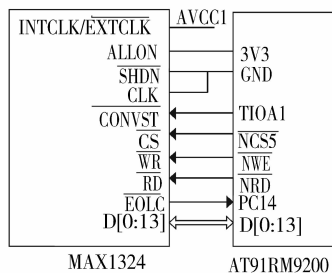


图2 MAX1324与AT91RM9200接口连接图

通过匹配AT91RM9200总线时序和MAX1324的读写时序,MAX1324与AT91RM9200的外部总线接口可以实现无缝连接。

AT91RM9200的定时器/计数器1工作于PWM模式下,引脚TIOA1输出周期和占空比可调的PWM,用于定时启动AD转换。六通道转换完成后MAX1324的EOLC引脚输出低电平,电平变化触发CPU中断,然后通过EBI总线读入AD转换数据。该接口方式编程简单,只需要通过寄存器调整总线读写信号保持时间,即可完成总线的读写,极大地降低了CPU的开销。

## 2.2 信号调理、频率检测跟踪电路

信号调理电路直接关系到信号的准确性。根据电机厂提供的发电设备输出的三相电压及三相电流信号的输出范围,电压变换器采用湖北天瑞电子有限公司的TR-YB(II)型微型精密变换器,输入电压范围为 $\pm 120\text{ V}$ ;电流变换器采用该公司的TR-LB(II)型变换器,输入电流范围为10 A;二者的输

出电压范围均为 $\pm 3.53\text{ V}$ 。AD转换芯片的采样电压范围是 $\pm 10\text{ V}$ ,为使得采样精度尽量高,调理电路采用放大倍数为2倍的MFB型二阶巴特沃思有源低通滤波电路<sup>[10]</sup>。

该电路在小于截止频率的范围内具有最平幅度的响应,而在大于截止频率的范围内,幅频响应迅速下降,网络元件少,特性稳定,输出阻抗低。系统要求对发电设备电压、电流的1~64次谐波进行分析,则信号的最高有效频率 $f$ 为3200 Hz,根据采样定理,取调理电路的截止频率 $f_s = 8f$ ,约为25 kHz。图3为利用microchip公司的filterlab软件设计的多路反馈(MFB)型二阶巴特沃思有源低通滤波电路,截止频率约为25 kHz,品质因数 $Q$ 为0.7097。

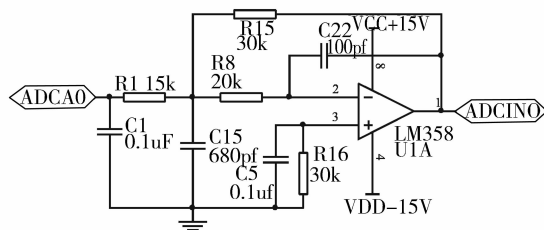


图3 MFB型二阶巴特沃思有源低通滤波电路图

由于发电设备发出的电能的频率 $f$ 容许的偏差范围为 $(50 \pm 0.2)\text{ Hz}$ ,当采样以固定频率对周波采样时<sup>[6]</sup>,若系统频率发生变化,就会出现数据多采或漏采的情况,就将带来泄漏效应以及栅栏效应。为了避免这种现象,系统将调理电路输出的ADCIN0信号经过整形电路整形为方波,CPU的定时器/计数器2工作在捕获模式下实时测得该方波信号的频率,然后改变引脚TIOA1输出的PWM的周期,从而改变采样间隔,确保整周期采样,实验表明该方法简单、实用。

## 2.3 人机接口模块设计

系统通过AT91RM9200的外部总线的NCS2接口选通LCD控制器SID1356<sup>[9]</sup>,SID1356的输出可以驱动VGA显示器或者最大为 $800 \times 600$ 点阵的LCD显示屏,使得仪器能提供优质的图形界面,界面更人性化。系统外接有 $640 \times 480$ 彩色液晶,完成电压、电流波形以及电参量的显示<sup>[11]</sup>。

通过AT91RM9200的SPI接口的NPCS2片选端外扩一片触摸屏控制器ADS7843,由触摸屏完成指令的接收,根据外界指令控制系统的运行。ADS7843是一个内置12位模数转换、低导通电阻模拟开关的串行接口芯片。由于触摸屏为一慢速设

备,当有触摸行为时,PC16 输出低电平,CPU 定时查询 PC16 输入的电平状态,得到触摸点的坐标。触摸屏控制器接口电路图如图 4 所示。

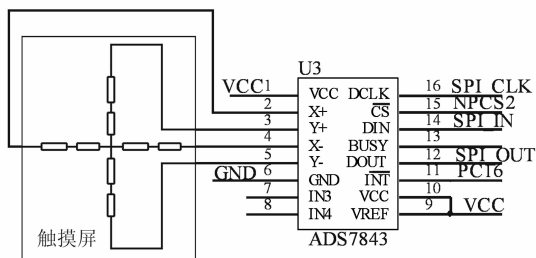


图 4 触摸屏控制器接口电路图

## 2.4 USB 存储模块设计

AT91RM9200 集成有 USB 主机控制器,与 USB2.0 全速及低速规范兼容,主机控制器可外接 U 盘进行数据的存储。硬件上只需要外接 USB 接头,配以相应的滤波电容和匹配电阻<sup>[13]</sup>。

## 3 嵌入式软件设计

系统的软件设计基于 VxWorks 操作系统。VxWorks 操作系统提供对多种处理器的广泛支持,具有完善的开发环境,开放的软件接口、具有抢占式调度、中断延迟小及良好的可裁减性,适用于各种对稳定性和实时性要求高的应用开发。VxWorks 为应用程序人员提供了高效的实时任务调度、中断管理、实时的系统资源以及任务间通信<sup>[12-13]</sup>。

### 3.1 程序整体设计

系统的软件设计采用了多任务的思想,把整个系统划分为数据采集任务,数据分析处理任务,人机交互任务,数据存储任务,任务的优先级依次从高到低,数据采集任务直接关系到数据的准确性,所以它的优先级最高。系统软件对任务切换的策略既具有优先级调度算法,又具有时间片轮巡调度算法。任务之间相对独立而又通过消息队列和信号量相互联系。系统软件框图如图 5 所示<sup>[14]</sup>。

### 3.2 数据采集任务

数据采集需要对三相电压,三相电流进行同步采集,每周期采样 256 点,数据量较大。实时采集任务开辟了双缓冲<sup>[15]</sup>,用 VxWorks 的互斥信号量来保护输入缓冲区,读取数据,从而避免竞争,并用二进制信号量通知数据分析模块、人机交互模块和数据存储模块进行相应的操作<sup>[16]</sup>。

### 3.3 数据分析处理任务

数据分析处理任务主要是根据接收的数据进行

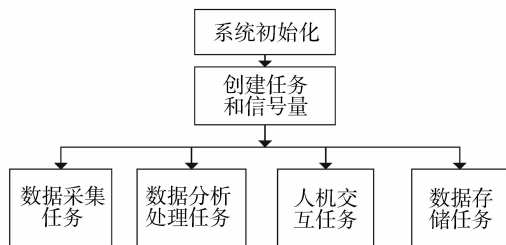


图 5 系统软件框图

数字方式的滤波处理,滤除高频干扰信号。然后对信号进行加窗 FFT 计算,最后得到各次谐波的幅值、功率因数、谐波总畸变率、有功功率、无功功率、序分量等电参量的值<sup>[3]</sup>,这些电参量对判断发电设备的运行状况有很好的价值。

### 3.4 人机交互任务

人机交互任务主要包括数据显示和通过触摸屏接收用户指令。VxWorks 具有稳定性好,实时性强等特点,但图形界面较欠缺,系统移植了图形界面开发工具  $\mu C/GUI$ ,它具有完善的图形函数库和窗口管理功能、可移植性好、占用 RAM 和 ROM 的空间小等诸多优点。数据显示模块主要负责实时显示三相电压、电流信号波形和各电参量的数值显示。在  $\mu C/GUI$  中可直接调用现成的 API 函数进行各种 2D 图形的绘制,系统以辅助时钟为时基,每 200 ms 刷新显示一次波形或数据。

$\mu C/GUI$  对触摸屏的支持由一个通用层和一个驱动程序层组成。首先对触摸屏进行去抖动和校准处理,然后通过 GUI\_TOUCH\_Exec() 连续监视和刷新触摸屏,该函数在它辨认出一个动作已经执行或者情况有所变化时,调用适当的通用触摸屏 API 函数,包括更改刻度实现触摸屏的刻度和 LCD 的刻度一致;最后激活 X 轴和 Y 轴的测量。

### 3.5 数据存储任务

为了实现对所采集的波形数据离线进行更详细的分析处理,必须让系统对所采波形数据进行存储,系统中将波形数据以文件的方式保存到 U 盘中。VxWorks 带有 Mass storage device 的协议栈,为驱动程序的编写提供了方便,在应用程序中只需要打开该设备,然后调用 write() 函数,即可以文件的形式将数据写入到 U 盘中。需要注意的是 VxWorks 提供的 write() 函数只能写入字符串,而各电参量都是十进制数,所以需要编写一个转换程序将十进制数转换为字符串然后写入<sup>[11-15]</sup>。

## 4 实验结果

在实验中,采用三相调压器将电网电压降为0~110 V,然后和传感器相连。通过触摸屏控制系统在彩色 LCD 上显示实时波形及各电参量、存储电参量。图 6 为 LCD 显示的三相电压、电流波形界面,通过不同的颜色来区分不同的波形。点击“详细”按钮可切换界面进行详细电参量的显示包括各次谐波的幅值、功率因数、谐波总畸变率、有功功率、无功功率,序分量等;“保存”按钮可将当前电参量保存到 U 盘;“返回”按钮可返回到主界面。

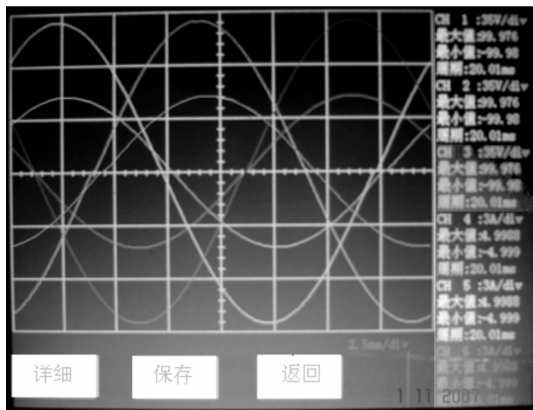


图 6 三相电压、电流波形显示界面

经测试,各个任务能够很好地协调调度,实测的各电参量的误差小于 0.5%,完全达到实际要求。

## 5 结论

系统利用基于 ARM9 的 AT91RM9200 为硬件平台和 WindRiver 公司的 VxWorks 为操作系统,构建了基于嵌入式系统的发电设备电参量测试仪。该设备可完成发电设备的电压、电流信号的高速同步采集,计算及数据、波形显示,并可实时向 U 盘存储数据。具有实时性强、可靠性高、成本低、体积小等优点。系统能取代传统的以 PC 机为后台的测试设备,用于发电设备电参量测量及电能质量监测等领域。

### 参考文献:

- [1] YU S L, GU J C. Removal of decaying DC in current and voltage signals using a modified Fourier filter algorithm[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2001, 16(3): 372-379.
- [2] JIANG XIAO HUA, JI KING, ALI EMADI. A power harmonics detection approach based on the least squares energy minimization principle[C]// Busan Korea, The

30th Annual Conference of the IEEE, 2004.

- [3] 刘芳亮,蒋大林,许鹏翔. 智能电力参数综合测量仪表的研究与实现[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(6): 206-208.
- LIU FANG-LIANG, JIANG DA-LIN, XU PENG-XIANG. Study and implement in integrated metrical nstr-ument of intelligent electric powerParameter[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(6): 206-208.
- [4] 牟龙华,金敏. 微机保护傅立叶算法分析[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(6): 91-93.
- MU LONG-HUA, JIN MIN. Analysis of fourier algorithm in microcomputer based protection [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(6): 91-93.
- [5] 赵文春,马伟明,胡安. 电机测试中谐波分析的高精度 FFT 算法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(12): 83-87.
- ZHAO WEN-CHUN, MA WEI-MING, HU AN. Fit algorithm with high accuracy for harmonic analysis in the electric machine[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(12): 83-87
- [6] 黄方能,黄成军,陈陈,等. 高精度插值 FFT 谐波分析[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(9): 40-42.
- HUANG FANG-NENG, HUANG CHENG-JUN, CHEN CHEN et al. Improved high precision interpolating FFT for harmonic analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(9): 40-42.
- [7] 徐志钮,律方成,赵丽娟. 基于加汉宁窗插值的谐波分析方法用于介损角测量的分析[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(2): 81-85.
- XU ZHI-NIU, LU FANG-CHENG, ZHAO LI-JUAN. Analysis of dielectric loss anagle measurement by hanning windowing interpolation algorithm based on FFT[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(2): 81-85.
- [8] 刘敏,王克英. 基于快速傅里叶变换与误差最小原理的谐波分析方法[J]. 电网技术, 2006, 30(19): 76-79.
- LIU MIN, WANG KE-YING. A harmonic analysis method based on fast fourier transform and minimal error principle[J]. Power System Technology, 2006, 30(19): 76-79.
- [9] 刘和平,常猛. S1D1356 显示控制器与 AT91RM9200 处理器的接口设计和应用[J]. 电子技术应用, 2006(4): 89-91.
- LIU HE-PING, CHANG MENG. Design and application of S1D1356 display controller and AT91RM9200 [J]. Application of Electronic Technique, 2006(4): 89-91.
- [10] TI INSTRUMENTS. Design methodology for MFB filters in ADC interface applications [EB/OL]. TI

- Application Report. [2006-2]http://focus.ti.com/cn/cn/docs/toolsw/folders/print/mfbfilter-calc.html.
- [11] 王德意,罗兴琦,闫为伟,等. TMS320LF 2812 在电力系统测频测相装置中的应用[J]. 计算机工程, 2007, 33(2):208-210.
- WANG DE-YI, LUO XING-QI, YAN WEI-WEI, et al. Application of TMS320LF2812 in frequency and phase angle measurement [J]. Computer Engineering, 2007, 33(2):208-210.
- [12] 徐科,窦小波,胡敏强. 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. Microprocessor excitation regulator based on ARM and VxWorks[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(3):73-76.
- [13] 林宝如, 张帆, 陈怡. 基于 VxWorks 操作系统的 USB 驱动分析[J]. 重庆建筑大学学报, 2005, 27(3):98-100.
- LIN BAO-RU, ZHANG FAN, CHEN YI. Analysis on USB driver based on VxWorks operation system[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2005, 27(3):98-100.
- [14] 陈智育,温彦军,陈琪. VxWorks 程序开发实践[M]. 北京:人民邮电出版社, 2004.
- [15] 陆永忠,刘峰,陆永祥. 便携式高速数据采集测控系统的研究[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(8):956-960.
- LU YONG-ZHONG, LIU FENG, LU YONG-XIANG. Research on portable high speed data acquisition measure and control system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(8):956-960.
- [16] 张皓,伍云,周志杰. 基于 VxWorks 的多任务间通信模型设计[J]. 计算机工程, 2007, 33(3):131-137.
- ZHANG HAO, WU YUN, ZHOU ZHI-JIE. Design of model for communication between multi-task based on VxWorks[J]. Computer Engineering, 2007, 33(3):131-137.

(编辑 陈移峰)

~~~~~

(上接第 1142 页)

- [11] SANDERS R S, LEE M T. Implantable pacemakers [J]. Proceedings of IEEE, 1996, 84(3):480-486.
- [12] 阎昭文. ANSYS 10.0 工程电磁分析技术与实例详解 [M]. 北京:中国水利水电出版社, 2006.
- [13] BOONE K G, HOLDER D S. Effect of skin impedance on image quality and variability in electrical impedance tomography; a model study[J]. Medical & Biological Engineering & Computing September, 1996, 34(5):351-354.
- [14] PANESCU D, COHEN K P, WEBSTER J G, et al. The mosaic electrical characteristics of the skin [J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 1993, 40(5):434-439.
- [15] 谢翔,张春,王志华. 生物医学中的植入式电子系统的现状与发展[J]. 电子学报, 2004, 32(3):462-467.
- XIE XIANG, ZHANG CHUN, WANG ZHI-HUA. A review of the implantable electronic devices in biology and medicine [J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(3):462-467.

(编辑 赵静)