

超小型超声检测系统低功耗技术

丁国琴,徐大专,王博

(南京航空航天大学 电子信息工程学院,南京 210016)

摘要:介绍了超声检测系统低功耗的实现方案。该系统基于 FPGA 和 ARM 平台,采用了模块化层次化的设计思想,重点从硬件和软件两个方面研究了超声检测系统低功耗的实现方法:利用变压器耦合电路实现了收发电路与放大器的隔离,降低了放大器的电压;利用 AD 分时采样减少了 AD 采样工作时间,减少系统功耗;利用 Linux 电源管理功能实现了系统的休眠与唤醒,减少了设备工作时间。经过性能测试表明,提出的三种方法有效地降低了系统的功耗,延长了电池的使用时间,提升了系统的性能,满足设计需求。

关键词:超声检测;低功耗;AD 采样;系统休眠

中图分类号: TG115.28+5

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2015)06-0061-06

Low-power Technology of Subminiature Ultrasonic Testing System

DING Guo-qin, XU Da-zhuan, WANG Bo

(College of Electronics and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Implement of ultrasonic testing system of low-power consumption is presented in this paper. The system is based on FPGA and ARM platforms, using a modular hierarchical design. This paper focuses on the non-destructive testing methods to achieve low-power systems from both hardware and software: The isolation of transceiver circuit and amplifier by dormancy transformer coupling circuit, which reduces the voltage of the amplifier. Through the AD time-sampling technology, it reduces the working time of AD sampling and the power consumption of the system. The implement of sleep and wake-up of the device by the power management of Linux system shall reduce the time of the device. After the performance tests, it shows that the three methods proposed in this paper effectively reduce the power consumption of the system, prolong the use time of battery, improve the performance of the system and meet the requirements.

Keywords: Ultrasonic testing; Low-power consumption; AD sample; System sleep

超声检测是工业中应用非常广泛的无损检测技术,随着科学的发展和微电子技术的不断创新,嵌入式无损检测系统的设计越来越得到系统设计人员的关注。嵌入式系统以应用为中心,计算机为辅助,系统设计人员根据自身的需要进行裁剪,以满足其功能、成本、功耗等方面的要求^[1]。

在无损检测系统的设计中,低功耗一直是小型便携设备的系统设计人员必须考虑的问题,超小型

超声检测设备是一款体积小、重量轻、功能性强、操作简便、便于携带及现场操作的无损检测设备,由于其体积小使得其电池容量小的特点导致设备待机时间大大减少。笔者从硬件和软件两个方面出发为超小型超声检测设备给出了降低系统功耗的系统设计方案。在硬件方面,提出了一种超声波收发电路与模拟放大器的变压器耦合和 AD 分时采样的方法,在软件方面,充分利用 ARM 的时钟功率管理功能实现了系统的睡眠与唤醒。

1 系统总体设计框架

系统是一套基于嵌入式平台的无损检测系统,

收稿日期:2014-07-25

作者简介:丁国琴(1990—),女,硕士研究生,主要从事无损检测和嵌入式开发工作。

为超小型超声检测设备低功耗的实现提供了参考。系统在设计时采用了层次化、模块化的思想,分为硬件层、内核系统层、应用软件层,其基本框图如图 1 所示。

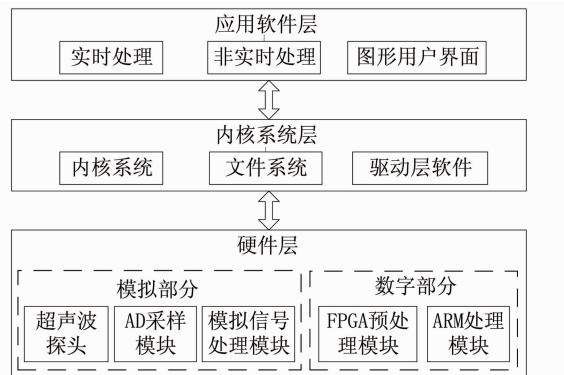


图 1 超声检测系统设计框图

基本工作模式为:系统通过收发探头发送脉冲波至被测材料中,来自被测材料的反射波信号被探头接收后送入模拟信号处理模块进行放大、滤波等处理,然后送给 AD 采样模块,AD 将采样后的高速数据流传送给 FPGA,使其转换为低速的数据流并存放在高速存储器中,最后由 ARM 模块将此回波信号的数据流读出,利用应用软件将回波信号在显示屏上显示,同时根据回波信号的情况做相关的处理。

作为超小型超声检测设备,功耗太大不仅缩短了电池寿命,不利于长时间的探伤工作,而且会降低系统的整体性能,包括散热处理、系统稳定性等。现有的超声检测系统各模块的功耗如表 1 所示。

表 1 超声检测系统各模块功耗及所占比例

模块	模拟	ARM+LCD	AD 采样	其他
功耗/W	3.340	2.254	1.296	0.250
占比/%	46.800	31.500	18.200	3.500

从表 1 可以看出,现有的超声检测系统中功耗比较大的是模拟信号处理模块和 ARM+LCD 处理模块。模拟信号处理模块主要完成超声探头的触发和回波信号的处理,即可控增益放大/衰减、宽带滤波等,模拟信号处理模块中超声波收发电路与模拟放大器之间的耦合方式影响了系统的功耗,ARM+LCD 处理模块主要完成与 FPGA 的通信,配置系统参数,处理数据及波形显示等功能,ARM+LCD 的长时间工作缩短了电池的使用时间,进而影响了系统的功耗。

半导体工艺的进步及集成电路的发展,使得数字处理芯片向着小型化、低功耗的方向发展。笔者设计的超小型超声无损检测系统,对低功耗有着严

格的要求,重点从模拟信号处理模块设计与系统睡眠技术两方面讨论了降低系统功耗的实现方法。

2 模拟信号处理模块设计

模拟信号处理模块是无损检测系统的重要组成部分,它由超声波收发电路、模拟放大器、滤波电路组成,收发电路将回波信号送入模拟放大器处理后经滤波等处理工作传送给 AD 进行采样。在传统的电路设计中收发电路与放大器常选用直接耦合的方式,采用直接耦合虽然效率高但信号不失真,而这种做法使得前后两级工作点牵连较大,调整比较复杂,同时模拟放大器也必须采用双电源供电才能保证放大器的输入电平与收发电路一致,以致影响了整个系统的功耗。变压器耦合方式虽然会损失一些信号的高频成分,但它可以在把直流方面的前一级和后一级分开的同时使交流信号顺利传递到下一级,并且由于变压器耦合同时具有隔直通交和阻抗变换的特性使得其电路的形式丰富多样,不仅能够满足电路的设计要求,还能提高系统的性能。正是基于这种思想提出了一种耦合变压器的电路设计方法来降低系统的功耗。

2.1 变压器耦合原理

变压器耦合电路如图 2 所示。耦合电路通常是完成级间信号的耦合并对信号进行一些处理,常见的耦合电路情况主要有:(1)将两级放大器之间的直流电路隔离。(2)获得两个电压相等相位相反的信号。(3)对信号电压进行提升或衰减。(4)对前级和后级放大器之间进行阻抗匹配。

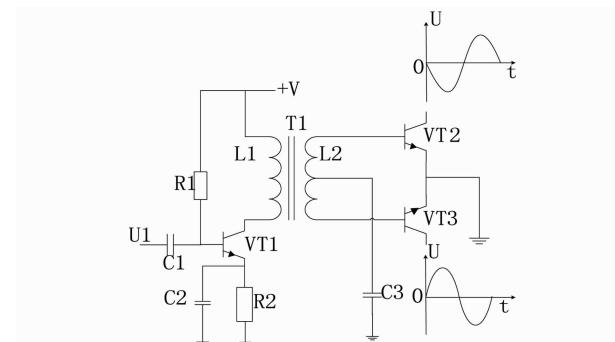


图 2 变压器耦合电路

变压器耦合是耦合电路的其中一种耦合方式,它是采用变压器作为耦合元件,由于变压器同时具有隔直通交和阻抗变换的特性,使得变压器耦合电路的形式丰富多彩,针对该设计系统,由于需要信号在经过耦合电路后能产生两路电压相等相位相反的信号,因此在电路设计中采用变压器耦合电路。

从图 2 可以看出,耦合变压器 T1 的二次绕组有一个中心抽头通过电容 C3 交流接地,VT2 和 VT3 为 NPN 型三极管,其交流信号的波形如图中所示,从图中可以看出,当 L2 绕组上端信号为正半周期时,L2 绕组下端信号为负半周期,当 L2 绕组上端信号为负半周期时,L2 绕组下端信号为正半周期,这样使得绕组 L2 的上下两端信号的电压相等相位相反,即 L2 的上端与抽头之间的绕组输出一个信号到 VT2 的基极,L2 的下端与抽头之间的绕

组输出一个信号到 VT3 的基极。

2.2 收发电路耦合变压器实现

针对超小型超声无损检测系统,为了满足系统的低功耗需求,首先在芯片上选用了 ADI 公司的 AD8331 放大器,它是一款单通道、低噪声、宽频带的可控增益运算放大器,工作电压为 +5V,单电源供电,其次利用耦合变压器电路的特性获得两个电压相等相位相反的信号,收发电路与放大器的电路如图 3 所示。

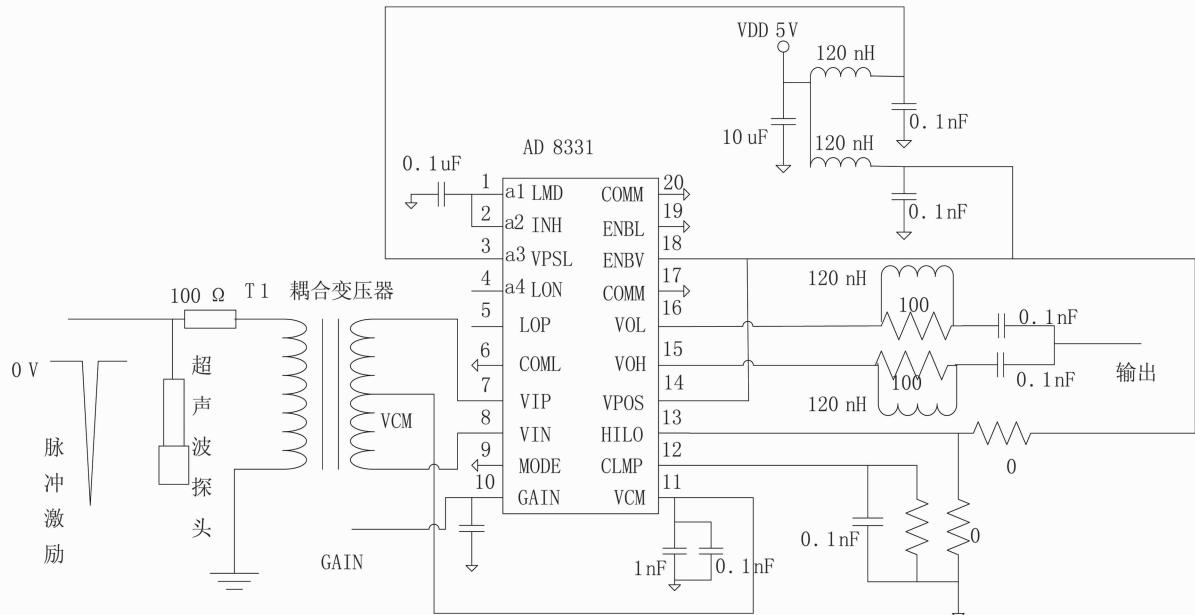


图 3 超声波收发电路与放大器电路图

从图 3 可以看出,T1 为电路中添加的变压器,AD8331 为模拟放大器。在此电路中,抽头与二次绕组的上下端产生的信号电压即差分信号直接与放大器的 VIP 和 VIN 端相连,差分信号经过放大器后继续输出两路差分信号连接到下级放大器的输入端。

该电路设计将变压器与耦合电路相结合,利用变压器实现了收发电路与放大器的隔离,提高了系统的抗噪声性能,利用耦合电路获得两路电压相等相位相反的差分信号,同时由于变压器两端直流电压可以不相等的性质,使得放大器可以采用低功耗、低成本的单电源放大器,从而降低了系统功耗。另外,在电路设计中,将耦合变压器的中心抽头与放大器的共模信号端相连可以防止放大器无法产生共模输出时输出共模信号,使电路正常运行。

2.3 AD 分时采样实现

AD 采样速度和采样精度对无损检测设备性能有着至关重要的影响。在设计的无损检测系统中,选用了高速 AD 采样芯片 MAX1448,可以很好地实

现对缺陷回波的实时采样,保证回波峰值不漏检。MAX1448 采用单电源 3V 供电,最大采样频率为 80 MHz,采样精度为 10 位,−3 dB 输入带宽为 400 MHz,内部集成了 2.048 V 参考电压,正常工作模式时电流消耗为 40 mA,掉电模式时电流消耗仅为 5 μA,因此整体功耗为 120 mW。由于无损检测设备在检测过程中需要对采样数据进行压缩以实现对波形声程方向上的压缩和展宽,因此针对该无损检测系统,重复频率为 50 Hz,即每隔 20 ms 便有一帧探伤数据,压缩算法采用非均匀压缩算法以实现对采样数据进行小数倍的压缩以得到 620 个探伤波形数据,系统压缩比最大值设为 500,采样频率为 40 MHz,因此 AD 实际最大采样 7.75 ms 便可完成数据采集,即在 20 ms 内 AD 最多工作 7.75 ms 就可完成对有效数据的采集。基于这个原理和分时工作的思想,在该系统设计过程中,当 ADC 有效数据采样结束时,通过 FPGA 输出低电平到 MAX1448 的 PD 引脚,使 ADC 处于掉电模式,从而大幅度减

少 ADC 电路的功耗,降低了整个系统的功耗。

3 ARM 处理模块的睡眠与唤醒技术

在系统设计中,ARM 处理器芯片选用了三星公司的 2410 系列,内核选用了 Linux 操作系统,版本为 2.6.24,文件系统选用 cramfs+yaffs 结构,图形用户界面选用了 Qt/Embedded 作为系统图形库,利用键盘输入进行工作参数设置及状态查询。

S3C2410 芯片是三星公司的一款高性能,低功耗的处理器芯片,已经成功移植了很多嵌入式 Linux 系统,其本身提供四种工作模式:正常模式、空闲模式、慢速模式、掉电模式,各工作模式下的功耗如表 2 所示。

3.1 系统睡眠与唤醒工作流程

从表 2 可以看出,正常模式的功耗最大,掉电模式的功耗最小。在系统设计中,充分利用了 S3C2410 工作模式之间的相互转换和 Linux 的电源管理功能,实现了系统的睡眠与唤醒^[2-3]。

表 2 S3C2410 芯片各种工作模式下的功耗与频率

模式	正常	空闲	掉电	关机
最大功耗	297 mW	122 mW	12 mW	80 μ A
频率 /MHz	203	203	12	32.76

系统睡眠与唤醒的工作流程是:系统上电后开始进行正常探伤工作,在探伤过程中通过键盘输入进行参数设置,当每次按键后开启一个定时器,若在定时器规定的时间内一直有按键输入,系统会处于正常探伤的状态,当定时器溢出时,系统在保存 LCD 设置、关闭 AD 采样等相关设置后便会进入掉电模式,直到有中断将其唤醒,否则将一直处于掉电模式。

3.2 系统掉电与唤醒设置

系统在进入掉电模式前需要先做些准备以保证在唤醒时系统能迅速回到正常工作状态,这些工作主要包括:设置合理的 GPIO、配置合理的唤醒源、挂起 USB、将掉电期间不希望丢失的信息保存在 GSTATUS3 和 GSTATUS4 中、关闭 LCD 控制器、设置 REFRESH 寄存器使 SDRAM 进入自刷新模式、设置 CLKCON 进入掉电模式。在唤醒时的工作主要包括:通过唤醒源产生内部复位信号唤醒系统,系统在唤醒时读取 GSTATUS2 的值以判断是否是从掉电模式唤醒,若确认为掉电模式唤醒后便会继续唤醒的恢复操作,如配置 SDRAM 控制器等,一直到 SDRAM 自刷新完成,读取 GSTATUS3 和 GSTATUS4 的值使系统恢复到睡眠前的状态。

3.3 系统掉电与唤醒实现

该设计充分利用 S3C2410 处理器工作模式的转换和 Linux 电源管理的功能,实现了系统的睡眠与唤醒。其关键设计部分主要包括:GPIO 配置、LCD 显示与唤醒配置、ADC 电池驱动和应用程序的设计。

GPIO 配置:系统在进入掉电模式时 CPU 和外设是断电的,在无损检测系统中由于很多外设是直接与 CPU 的 GPIO 相连的,当这些 GPIO 连接了上拉电阻并且具有唤醒功能时,必须将上拉电阻的供电连接到持续供电的电源上,否则会因为上拉电阻电平的跳变使系统重启无法进入掉电模式,因此必须在系统进入睡眠模式前对相应的 GPIO 进行合理的配置。针对该设计系统,外设键盘是直接与 S3C2410 的 GPF0 相连,设计时将中断 0 作为唤醒源,为了使系统能正常睡眠与唤醒,在睡眠前应重新配置 GPFCON 和 GPFUP 寄存器的值,打开中断 0 和取消相应引脚的上拉功能。Linux 内核对其已经提供了接口函数,只需利用这些接口函数便可以很方便的完成对睡眠模式时 GPIO 的配置,从而满足系统睡眠模式时需求。

LCD 显示与唤醒配置:系统在进入掉电模式前会关闭 LCD 从而降低功耗。LCD 在进入掉电模式前会切换控制台并清空 framebuffer 的数据,而系统在唤醒后则会重新初始化 LCD 控制器,因此为了使系统在唤醒后能继续显示掉电前的界面,应该在系统进入掉电模式前应该保存当前对 LCD 的设置,在唤醒后重新恢复设置,从而是系统快速恢复到掉电前的界面显示。针对该系统主要涉及的函数如下:

- ① pm_prepare_console() 切换 LCD 控制台。
- ② s3c2410fb_suspend() 挂起 LCD 控制器。
- ③ s3c2410fb_resume() 唤醒 LCD 控制器。

基于这些函数接口可以完成对 LCD 的设置,在设计的系统中,主要是通过这些函数接口实现睡眠前状态的保存,唤醒后参数的恢复等工作,使系统在唤醒后能快速显示睡眠前的界面。

ADC 电池驱动:S3C2410 芯片内部集成了一个 8 路 10 位的 A/D 转换器,具有采样保持和低能源消耗功能,利用该 A/D 转换器可以将模拟量转换为数字量,从而方便数据的分析^[4-5]。在系统设计中,主要利用 ADC 完成对电池电压值的采样并转换为百分比,实现了系统电量的实时读取,使用户可以时刻掌握设备用电量状况。当系统进入睡眠状态时,CPU 是停止工作的,此时系统无法获取设备的电

量,即掉电模式下驱动也是停止工作的,当唤醒系统后系统会立刻去读取设备的电量以保证能电量的实时显示。ADC 控制器在工作前是需要初始化的,如选择模拟输入通道,设置预分频系数,设置工作模式等,然后 ADC 才能正常工作。对于本次的 ADC 驱动,相关的初始化工作为设置预分频值 13,选择输入通道 0,主要涉及的函数如下:① `adc_register_prescaleset()` 设置预分频系数。② `adc_register_adcchannelset()` 设置模拟输入通道。③ `adc_register_adccconvstart()` 设置工作模式。这些函数 Linux 内核是没有提供的,需要设计者根据硬件电路的情况具体实现,利用这些函数接口便可完成 ADC 控制器的初始化工作^[6]。需要注意的是为了使系统在唤醒后能正常工作,必须将这些函数放在 ADC 的读函数中,以保证系统唤醒后 ADC 正常工作,从而使系统正常工作。

应用程序设计: 系统的应用程序是基于 Qt/Embedded 开发的,其提供的键盘事件可以很方便的进行探伤工作的参数设置及状态查询的,因此通过对按键信息的捕捉和 Qt 定时器功能可以很容易的判断系统进入掉电模式的时间^[7-8]。针对该系统,应用程序的设计如下:首先设定一个按键状态的标志 `ev_press`,通过 `QKeyEvent` 事件来获取按键的状态,每次按键后将 `ev_press` 的值赋为 1,同时开启定时器开始计时,时间为 30 min,如果在 30 min 内没有任何按键操作系统就会默认设备没有进行探伤操作。当定时器的时间到达后,会再次开启一个 10 s 的定时器以提醒用户系统即将进入掉电模式,若用户此时不想让设备进入掉电模式可以按返回键取消,否则 10 s 后系统便会关闭 AD 采样进入掉电状态。当系统进入掉电模式后,如果想恢复到正常的工作状态,只需要按键盘上的任意一个键即可唤醒系统和继续 AD 的采样工作。在该应用程序设计中主要是利用 QT 的事件系统键盘事件和定时器事件的相互合作来完成系统进入掉电模式的判定,通过键盘事件捕捉键盘信息确定是否有探伤操作,通过定时器事件确定系统进入睡眠模式的时间,同时利用系统控制函数接口发送关闭 AD 采样的命令,从而使系统睡眠模式时的功耗能最低。

4 系统测试

如图 4 所示是本次测试时所使用的超声检测设备,其尺寸为 210 mm×153 mm×30 mm,整机的重

量不超过 0.6 kg,基本实现了无损检测的基本功能。利用变压器耦合电路、AD 分时采样技术和 ARM 的休眠技术,可大幅度降低系统功耗,提高设备的续航能力,延长连续工作时间。下面以该设备为例给出测试结果。



图 4 低功耗超声波检测设备

4.1 模拟信号处理模块测试

在设计的超声检测系统中,模拟放大器采用的是 ADI 公司的可变增益放大器 AD8331,单电源供电,为了满足探伤标准,超声波探伤仪的模拟前端用了 3 级 AD8331 级联,测试结果如表 3 所示。超声波收发电路若采用间接耦合方式即变压器耦合电路,在供电电压为 +5 V,供电电流为 0.05 A 的情况下,总功耗为 0.75 W,若采用直接耦合电路,放大器需采用双电源供电的 AD603 芯片,并且供电电压为 ±5 V,此时的总功耗为 1.5 W,可以看出功耗降低了一半。

表 3 收发电路功耗对比表

耦合方式	直接耦合	间接耦合	W
模拟功耗	3.34	1.872	
AD 功耗	1.296	0.72	

4.2 ARM 睡眠与唤醒测试

为了能快速验证系统睡眠与唤醒的功耗,在测试时将定时器的时间设为 30 s,中断 0 设为系统唤醒源,利用 minicom 工具追踪系统工作和睡眠时的状态,通过直流稳压电源可以查看到系统的供电电压是常量,电压为 14.4 V,系统正常运行时的电流为 0.3 A,当设备掉电模式时流过系统的电流是 0.15 A,可以得到在掉电期间电流下降了 0.15 A,即在掉电模式的时候系统的总功耗降低了 2.16 W。

5 结论

笔者介绍了一款超小型超声检测系统低功耗的

2015 年美国无损检测学会(ASNT) III 级考试通知

根据中国无损检测学会(对外 ChSNDT)与美国无损检测学会(ASNT)于 2007 年 11 月美国秋季会议上的商定,每年至少联合举办一届 ASNT III 级考试班。现经协商确定 2015 年的 ASNT 3 级考试班安排如下:

考试时间:2015 年 9 月 1 日~9 月 4 日

考试地点:中国无损检测学会考试中心

上海市辉河路 100 号 3 号楼 6 楼,邮编:200437

本次考试,主考官仍由 ASNT 总部直接派遣。考官助理 1 名,由 ASNT 指定的中国无损检测学会代表 1 名。

根据中国无损检测学会和美国无损检测学会商定,凡参加 ASNT III 级考试的中国籍学员必须成为 ASNT 会员。

考试费用:1 由中国无损检测学会代收考试费,人民币 3000 元/每卷。2 补考生 US\$185/每卷,另加外国考生 40 美元,会费 65 美元/人(汇率按 6.5 计算含手续费),外加通讯费和场地分摊费:补考一卷学会收取 500 元人民币,每增加一卷增加 200 元人民币。

费用组成:

(1) ASNT 会员每张考卷 260 美元,外国考生加 40 美元邮寄费,1 年会员会费 75 美元。

(2) 主考官飞机票(商务往返),伙食费补贴(6 天),住宿(4 天),海外出差劳务费(6 天),上海市旅游。

(3) 学会本着非赢利的原则,适量收取考场费用,通讯费以及考生餐费等。

申请表索取:向学会发邮件索取

由于只要递交申请表,无论最终考试与否,美方都要收取考试费用,故请考生在递交申请表之前慎重考虑,确定参加本期考试的考生再递交申请表。考生必须于 6 月 8 日之前(逾期不再接纳)将填写完毕的申请表和背景材料,邮寄至学会,补考学员同样需要重新递交申请资料邮寄至学会,朱亚青收。由学会初审后统一递交 ASNT 总部复审,ASNT 收到考试费后开始审核考生申请表。特殊情况者可提前邮寄至学会。

费用支付:考生必须在 6 月 8 日之前支付全部考试费用,否则本学会不予受理。

人民币支付户名:中国机械工程学会无损检测分会

人民币支付帐号:437759229563

开户行:中国银行上海市大柏树支行

美金支付帐号请向学会索取

有关考试事宜,可 email 或电话直接与学会秘书处联系。

联系人:朱亚青,王莹赟

电话/传真:021-65550277/021-55057699

E-mail: chsndt2008@163.com

如 ASNT 有更新通知,以最新通知为准。

中国机械工程学会无损检测分会

实现方案,着重从硬件和软件两个层面讨论了其中关键技术的实现方法。在硬件方面讨论了超声波收发电路的设计和 AD 分时采样的实现,在软件方面讨论了 ARM 工作模式的转换,实现了系统的睡眠与唤醒。该方案充分利用了耦合电路和变压器相结合的方法实现了收发电路与放大器的隔离,利用分时工作的思想实现了 AD 采样的间断工作,利用 Linux 操作系统电源管理和 ARM 时钟功率管理的功能,减少设备工作时间从而降低系统的功耗,提高系统的效率,延长设备的使用时间,为超小型超声检测系统超长待机提供了可能。

参考文献:

[1] 胡建培,张谦琳. 超声检测原理和方法[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,1993:20-29.

- [2] MEL G. Understanding the linux virtual memory manager [M]. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 2004:87-90.
- [3] JASMIN B, MARK S. C++ GUI Programming with Qt3 [M]. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 2004:86-94.
- [4] 许药林,沈祥华,徐大专.超声相控阵成像系统软件设计[J].无损检测,2013,35(4):5-9.
- [5] 常青龙. 基于 ARM 平台的超声波自动探伤硬件系统的研制[D]. 南京:南京航空航天大学,2008.
- [6] ROBERT L. Linux 内核设计与实现[M]. 北京:机械工业出版社,2011:91-106.
- [7] 马忠梅,李善平,康慨,等. ARM&Linux 系统教程 [M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2004: 13-17.
- [8] 丁松林,黄丽琴. Qt4 图形设计与嵌入式开发[M]. 北京:人民邮电出版社,2009:327-340.