

基于 RTAI 的 uClinux 硬实时性能的实现

范海涛,王树民

(清华大学 电机工程与应用电子技术系,北京 100084)

摘要: uClinux 嵌入式操作系统具有优良的稳定性和网络功能,然而其不支持硬实时任务的缺陷却极大地限制了它在高实时性监控领域中的应用。介绍了嵌入式实时操作系统在电能质量监控领域中的应用,以及uClinux 系统的特性。利用实时应用接口 RTAI(Real Time Application Interface)对 uClinux 系统的实时性进行了扩展,采用对内核进行小规模改动的双内核方法实现 Linux 系统硬实时特性。对比实验可见 RTAI/uClinux 双内核系统具有良好的实时性能。

关键词: 嵌入式系统; RTAI; 硬实时

中图分类号: TP 316.2

文献标识码: B

文章编号: 1006-6047(2006)03-0066-03

在线式电能质量监测设备大多采用嵌入式的系统结构,完成现场数据采集、运算、控制以及通信等一系列任务^[1-2]。由于这些任务必须满足严格的时序关系,并且需要有很高的响应速度,因此,对在线式电能质量监测设备的实时特性提出了很高的要求。uClinux 操作系统是 Linux 操作系统的一个变种,它作为一种优秀的嵌入式操作系统具有很好的稳定性和优异的网络性能,但是它的实时性差,尤其不支持硬实时任务的特点却极大地限制了其在电力系统实时监控领域中的应用^[3],本文介绍实时应用接口 RTAI(Real Time Application Interface)对 uClinux 的实时性扩展,并且对系统改造前后的实时性能进行了对比分析。

1 嵌入式实时操作系统在电能质量监控领域的应用

简单的控制系统由于应用比较简单,一般只包括较少的一些控制流程。但是,当控制系统所提供的功能越来越强大后,简单的流程控制将不能满足系统要求,这时就必须引入操作系统,通过操作系统对整个硬件平台进行管理,并使应用程序的开发变得简易。一个典型的基于嵌入式实时操作系统(RTOS)的在线式电能质量监测器硬件结构框图如图 1 所示。

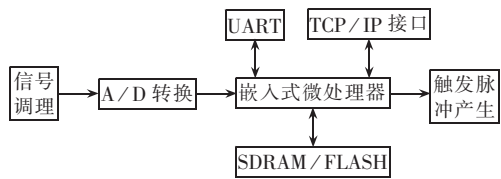


图 1 一种在线式电能质量监控系统结构图

Fig.1 Architecture of online power quality monitoring and control system

图中,嵌入式微处理器是整个在线式电能质量

监控器的核心,在其上运行有嵌入式实时操作系统。嵌入式微处理器除了具有很强的运算能力外,还具有丰富的外设接口,可以容易地扩展出功能丰富的通信接口如异步串口(UART),TCP/IP 网络接口等。另外,为了满足嵌入式操作系统的运行要求,嵌入式微处理器必须扩展外部程序、数据存储单元,如 FLASH 和 SDRAM 存储器等。

实时系统分为两类,一类是硬实时(hard real-time);另外一类则是软实时(soft real-time)。所谓硬实时是指如果系统对某个实时任务的处理未能在某个截止时间开始或者结束,最终的结果将是灾难性的,这就意味着即便处理结果合乎逻辑但是仍然毫无意义;而在软实时系统中,处理任务启动或者结束的截止时间只是一个期望值,并不必须满足;即便是处理时间超过了截止时间,结果也是有意义的。

在线式电能质量监控系统中的各个任务在嵌入式操作系统的调度下运行,依据任务的紧迫性不同可将其分为实时任务和非实时任务。在线式电能质量监控系统的任务如表 1 所示。

表 1 监控系统任务表

Tab.1 Tasks of monitoring and control system		
任务	内容	性质
采样	对 A/D 转换芯片的转换结果采样	硬实时
计算	依据实时性要求不同,选择 FFT 或小波变换等算法对采样数据运算	硬实时
控制	根据运算结果执行正确的控制策略	硬实时
通信	与数据管理中心通信,上传现场状态量,并更新控制策略	软实时

从表中可见,除了通信任务对实时性的要求比较低以外,其他任务都需要操作系统能提供较高的硬实时性响应。在电能质量监控应用中,一般的晶闸管投切电抗器型静止无功补偿装置(TCR)、晶闸管投切电容型静止无功补偿装置(TSC)等动态无功补偿设备要求系统响应时间在 10~20 ms,而有源滤波设备需要系统的相应时间小于 1 ms。

2 uClinux 的特征及其实时性扩展

uClinux 是一个源码开放的操作系统,它是 Linux 的一个变种,继承了 Linux 操作系统的优良稳定性、强大的网络性能和文件系统支持。由于 uClinux 出众的性能和源代码开放的便利,其在嵌入式应用领域得到了广泛的推广^[5]。Linux 虽然也可采取基于优先级的调度策略,并且也将进程分为实时进程和非实时进程,但是 Linux 的特征决定了其本身很难完成硬实时的任务,这极大地限制了 Linux 在工业控制领域中的应用,表现为以下 3 点。

- a. Linux 的核心进程是不能被抢占的。如果 Linux 的核心态进程在运行时,其他进程不管优先级多高都需要等待,这就造成当低优先级的进程在进行系统调用时,其他任何的高优先级进程都必须等待^[6]。
- b. 在 Linux 执行系统调用时,为了保护临界区资源,保证对资源的独自占用, Linux 会长时间关掉中断。若低优先级的进程关闭了中断,即使有高优先级的中断发生,系统也无法响应。
- c. Linux 内核(2.6 版本以前)为了减小时钟中断处理的开销,采用了较大时间粒度的定时器,时钟中断周期为 10 ms,因此,任务调度的时间精度最高能达到 10 ms^[7],这就加大了任务响应的延迟,无法满足对时间精度要求苛刻的实时应用,如 A/D 转换采样等。

目前,有多种方法可以实现 Linux 系统的硬实时特性,以是否对 Linux 的内核进行大规模修改为判别手段,可以将这些实现方法大致分为两类:对内核进行大规模修改的兼容内核方法和对内核进行小规模改动的双内核方法。后者由于对内核改动小,效果明显且遵守公共许可证(GPL)得到了更加广泛的推广,它的代表就是新墨西哥州立大学的 FSM 实验室推出的 RT-Linux 和由意大利米兰理工学院航天工程系发起的 RTAI。

RTAI 实现过程中,在 Linux 上定义了一组实时硬件抽象层(RTHAL),RTHAL 将所有需要的 Linux 内部数据和函数的指针集合到一个 rthal 结构中,在双内核结构工作时,它们可以被 RTAI 重定向,以取代 Linux 中原有的函数,完成对硬件的接管,RTAI 只是用此程序界面与 Linux 进行沟通,通过这种方法就可以把对 Linux 内核源码的改动程度降到最低,便于 RTAI 在不同 Linux 版本之间的移植^[8]。

RTAI 严格而言并不是一个完整的操作系统,它只是一个具备了操作系统核心功能的实时系统内核,它接管了所有的硬件资源,并且将 Linux 操作系统作为它的一个低优先级的任务来运行,RTAI 是一个完全的占先式内核,它具备了实时操作系统的诸多特性,如实时的中断响应、任务对事件的实时响应、细粒度的原子操作等。在 RTAI/Linux 双内核结构下,实时性的任务在 RTAI 的调度下运行,非实时性和需要利用完善的操作系统功能的任务在 Linux 调

度下运行,由于 Linux 操作系统在 RTAI 下具有的优先级很低,因此只有当 RTAI 没有实时任务调度时, Linux 才能够得到运行,其双内核结构如图 2 所示^[9]。

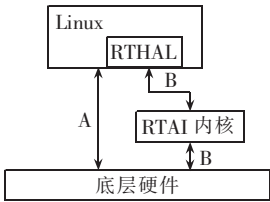


图 2 RTAI / uClinux 双内核结构图
Fig.2 Architecture of RTAI/uClinux system's dual-kernel

在 RTAI 中,中断处理机制属于其核心部分,RTAI 过滤了所有硬件中断,对属于 RTAI 的中断和时钟中断进行处理,对属于 Linux 操作系统的中断则是透明的,会不加处理传递给 Linux 内核。

由于 RTAI 在工作时接管了所有的硬件资源,因此, Linux 系统无法直接对硬件进行操作,例如: Linux 系统中原有的关中断函数

```
#define_cli_asm_volatile_(“cli”::“memory”)直接  
通过汇编语言对硬件进行操作,而在双内核结构下  
Linux 中的关中断函数被替换为  
#define_cli()(rthal_linux_cli())  
static void linux_cli(void)  
{  
    processor[hard_cpu_id()].intr_flag=0;  
}
```

在双内核结构下, Linux 关中断的执行只是改变了 RTAI 中的中断标志位,而没有直接对硬件进行操作。

3 监控系统的实时性测试与分析

在试验过程中,选用 Freescale 的 MCF5249 嵌入式微处理器完成一套图 1 所示的在线式电能质量监控系统,微处理器内部工作频率为 120 MHz,性能达 125 Dhrystone 2.1 MIPS,外配 4 M FLASH 和 8 M SDRAM 存储器^[5]。软件方面,成功移植 RTAI/uClinux 双内核系至此硬件平台,并且针对实际应用对系统的实时性进行了测试和分析。

3.1 系统的时间分辨率测试

由于电能质量监控系统需要周期性地对 A/D 转换芯片进行采样,并且某些实时性较强的控制算法要求核心任务被重新调度的周期很短,因此系统对周期性实时任务的支持非常重要,进行试验如下:分别在 uClinux 和 RTAI / uClinux 下利用定时函数设计周期性的高优先级任务,每个周期切换 1 次 I/O 口电平,找出各自可分辨的稳定的最小任务周期。在处理器中等负荷条件下,试验结果如表 2 所示。

从试验结果可以看出, uClinux 操作系统难以完成周期小于 20 ms 的周期性任务,因此对于周期性的 A/D 采样及高实时控制很难实现,经过改造后的

表 2 时间分辨率试验结果分析表
Tab.2 Analysis of the time resolution experiment

操作系统	方波最小周期	任务的最小周期
uClinux	40.002 ms	20 ms
RTAI/uClinux 双内核	110.19 μ s	55 μ s

RTAI/uClinux 双内核结构时间分辨率低于 100 μ s, 完全可以满足电能质量控制器在 A/D 采样等方面的实时性周期任务。值得一提的是: 在 uClinux 下, 虽然定时函数提供了毫秒级的定时功能, 但是在达到 Linux 系统极限情况下, 采用更小的定时周期不会对结果产生任何影响。另外, 在 RTAI/uClinux 双内核结构下过小的定时周期(<50 μ s)会使系统运行变得不稳定, 如图 3 所示。

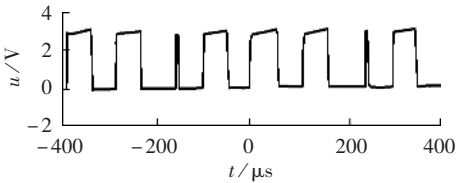


图 3 定时周期小于 50 μ s 时的试验波形图
Fig.3 Oscillogram of system output when cycle < 50 μ s

3.2 进程的响应速度测试

进程的响应速度是实时控制系统的重要指标, 例如在 A/D 采样和计算完成后, 系统需要控制进程尽快地被调度, 以执行正确的控制策略。对于一个支持硬实时任务的系统, 除了测试系统的平均响应速度外, 还必须测试系统在最差情况下的响应速度以及处理器的负荷状况对系统响应速度的影响。

设计试验如图 4 所示。

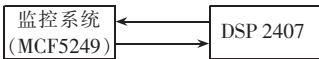


图 4 响应速度试验系统结构图
Fig.4 Architecture of experimental system for response speed

DSP 2407 启动内部定时器后, 改变 MCF 5249 的一个 I/O 引脚状态, MCF 5249 内部的高优先级进程在引脚状态改变并且被重新调度后, 立即将 DSP 2407 的指定 I/O 引脚置高, DSP 2407 在其指定的 I/O 引脚被置高后停止定时器。利用 DSP 2407 的定时器可以精确计算出从 MCF5249 引脚状态改变至 MCF 5249 内部进程响应之间的时间间隔, 从而确定 MCF 5249 内部进程的响应速度。改变 MCF 5249 处理器的负荷, 重复试验, 在每种情况下重复试验过程 1000 次, 找出不同情况下系统响应的平均速度及最慢响应速度, 如表 3 所示。

从试验可以看出, 在处理器负荷较轻时, uClinux 系统有着良好的平均响应速度, 但是在最差情况下, 系统响应速度较慢, 达到了 12 ms, 随着处理器负荷的进一步加重, uClinux 系统的响应速度急剧下降,

表 3 响应速度试验结果分析表
Tab.3 Analysis of response speed experiment

操作系统	处理器负荷轻		处理器负荷较重	
	t_1	t_2	t_1	t_2
uClinux	120 μ s	12 ms	221 ms	795 ms
RTAI/uClinux	25 μ s	27 μ s	27 μ s	30 μ s

注: t_1 为平均响应时间; t_2 为最慢响应时间。

对于控制系统, 尤其是硬实时系统是不可接受的, 因为进程的响应速度直接影响到控制系统的反应速度。RTAI/uClinux 双内核系统在处理器负荷变化时, 系统的响应速度变化不明显, 而且进程响应速度始终稳定在微秒级, 适合作为硬实时系统的控制系统。

4 结语

本文介绍 RTAI 对 uClinux 系统的实时性扩展, 通过对比试验可以看出 RTAI/uClinux 双内核的系统具有良好的实时性能, 这极大地扩展了 uClinux 系统在高实时性监测控制领域中的应用范围。

参考文献:

[1] 黄攀, 姚建刚, 鲁栗, 等. 电能质量在线监测装置设计[J]. 中国仪器仪表, 2005(2): 86-88.
HUANG Pan, YAO Jian-gang, LU Li, et al. The design of power quality online monitoring equipment[J]. **China Instrumentation**, 2005(2): 86-88.

[2] 习博, 方彦军. 嵌入式监测系统中网络通信的研究与实现[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(7): 68-71.
XI Bo, FANG Yan-jun. Research and implementation of network communication in embedded monitoring system[J]. **Electric Power Automation Equipment**, 2004, 24(7): 68-71.

[3] 周卫玉, 孙新亚. 基于 ARM 和 uClinux 的嵌入式远程数据采集终端[J]. 计算机工程, 2004, 30(23): 156-158.
ZHOU Wei-yu, SUN Xin-ya. Remote data terminal based on embedded system of ARM and uClinux[J]. **Computer Engineering**, 2004, 30(23): 156-158.

[4] 余丹, 王庆, 李晓明. 基于 DSP 和 MCU 的新型电能质量监测装置的设计[J]. 仪表技术, 2004(6): 31-33.
YU Dan, WANG Qing, LI Xiao-ming. Development of surveillance equipment on power quality based on DSP and MCU[J]. **Instrument Technique**, 2004(6): 31-33.

[5] 沈沙, 苏佳宁, 田骏骅, 等. uClinux 操作系统在嵌入式 SOC 平台上的移植[J]. 计算机工程与应用, 2004, 40(26): 104-105, 108.
SHEN Sha, SU Jia-ning, TIAN Jun-hua, et al. uClinux OS porting on a new embedded SOC platform[J]. **Computer Engineering and Applications**, 2004, 40(26): 104-105, 108.

[6] 解觉, 赵慧斌, 叶以民. 一种基于改进时钟系统的 Linux 实时化方案[J]. 计算机工程与应用, 2003, 39(34): 133-136.
XIE Jue, ZHAO Hui-bin, YE Yi-min. A method based on timer management improvement for real-time scheduling in Linux[J]. **Computer Engineering and Applications**, 2003, 39(34): 133-136.

[7] 齐俊生,崔杜武,黑新宏. 嵌入式 Linux 硬实时性的研究与实现[J]. 计算机应用,2003,23(6):34-36.

QI Jun-sheng,CUI Du-wu,HEI Xin-hong. Research and implementation of hard read-time performance of embeded Linux[J]. **Computer Applications**,2003,23(6):34-36.

[8] 须文波,张星烨,欧爱辉. 基于 RTAI-Linux 的实时操作系统的分析与研究[J]. 现代计算机,2003(5):19-21.

XU Wen-bo,ZHANG Xing-ye,OU Ai-hui. Analyse and study of the real time operation system based on RTAI-Linux[J]. **Modern Computer**,2003(5):19-21.

[9] 李善平,刘文峰,王焕龙. Linux 与嵌入式系统[M]. 北京:清华大学出版社,2003.

(责任编辑:李 玲)

作者简介:

范海涛(1981-),男,河北衡水人,硕士研究生,主要研究方向为电能质量控制、谐波治理及无功补偿(E-mail:fantao99@mails.tsinghua.edu.cn);

王树民(1946-),男,天津人,教授,主要研究方向为电能质量控制、谐波治理及无功补偿。

Implementation of hard real-time performance of uClinux based on RTAI

FAN Hai-tao,WANG Shu-min

(Tsinghua University,Beijing 100084,China)

Abstract: uClinux embedded operating system has great advantages in reliability and network functions,but its limitation in supporting hard real-time tasks seriously restricts its popularization. The application of embedded real-time operating system in energy quality monitoring and control system is introduced ,as well as the features of uClinux system . RTAI(Real Time Application Interface) improves the real-time performance of uClinux operating system and enables Linux to realize hard real-time functions by dual-kernel mode with few modifications. Tests show that the RTAI/uClinux system has good real-time performance.

Key words: embedded system; RTAI; hard real-time