

μC/OS 在龙芯处理器上的移植及性能分析

程晓宇¹, 毕笃彦¹, 蔡 晔²

(1. 空军工程大学工程学院信号与信息处理实验室, 西安 710038; 2. 中国科学院计算技术研究所微处理器中心, 北京 100080)

摘要:在以国产 CPU 龙芯 2E 为核心的 PC104 Plus 处理器模块上移植嵌入式实时操作系统 μC/OS-II, 对其实时性能进行评价。阐述处理器相关函数的编写及与 PMON 的整合等关键技术, 讨论系统实时性能评价的一般方法, 包括 Rheapstone 方法、进程分派延迟时间法和三维表示法等。在此基础上选择 Rheapstone 方法中的 2 个指标对整个系统的实时性能进行分析。实验结果表明, 系统的实时性能可满足一般实时系统的需求。

关键词:实时操作系统; μC/OS-II 系统; 龙芯

Transplantation of μC/OS on Loongson Processor and Its Performance Analysis

CHENG Xiao-yu¹, BI Du-yan¹, CAI Ye²

(1. Signal and Information Processing Lab, Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038;

2. Microprocessor Research Center, Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

【Abstract】 The real-time operation system μC/OS-II is transplanted to Loongson 2E PC104 Plus CPU module. The process is described and three methods for real-time performance evaluation are discussed. Rheapstone benchmark method is chosen to measure and analyze real-time performance of the system. Experimental results show that μC/OS-II in Loongson 2E PC104 Plus CPU module can meet the requirement of general real-time applications.

【Key words】 real-time operation system; μC/OS-II system; Loongson

1 概述

随着信息化技术的迅速发展, 嵌入式系统已广泛应用于通信、网络、工控等技术领域, 它是应用为中心, 软硬件可裁减的, 适应应用系统对功能、可靠性、成本、体积、功耗等综合性严格要求的专用计算机系统。实时性是指系统能够在限定的时间内完成任务并对外部的异步事件作出及时响应。绝大多数嵌入式应用对系统的实时性有很高的要求。

嵌入式微处理器和嵌入式操作系统是构成一个嵌入式系统的硬件和软件核心。龙芯 2E 处理器是我国自主研发的通用处理器, 它具有高性能、低功耗等特点。μC/OS 是一个开放源代码的嵌入式实时操作系统。为了将龙芯应用于嵌入式系统, 本文在龙芯 2E PC104 Plus 处理器模块的基础上, 移植 μC/OS-II 嵌入式实时操作系统, 并对其实时性能进行测试。

2 μC/OS 实时内核及其可移植性

μC/OS-II^[1]是专为嵌入式系统设计的抢占式多任务内核。它可以基于 ROM 运行, 具有内核精简、多任务管理功能相对完善、实时性能好、可裁剪、可固化、源码开放、可移植性强等特点。μC/OS-II 采用抢占式的内核, 如图 1 所示。它最多可以管理 60 个任务, 其性能和很多商业实时操作系统性能相当。目前 μC/OS-II 已经成功地移植到大多数微处理器和微控制器上。

要使 μC/OS- 能正常运行, 处理器必须满足以下要求:

- (1) 处理器的 C 编译器能产生可重入代码;
- (2) 用 C 语言就可以打开和关闭中断;
- (3) 处理器支持中断, 并且能产生定时中断;
- (4) 处理器支持能够容纳一定量数据的硬件堆栈;
- (5) 处理

器有将堆栈指针和其他 CPU 寄存器读出和存储到堆栈或内存中的指令。

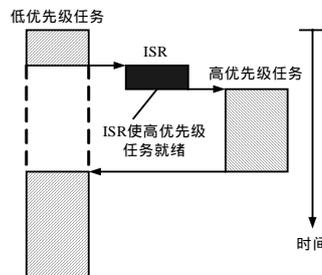


图 1 μC/OS 的可剥夺型内核

3 龙芯 2E PC104Plus 处理器模块

龙芯 2E^[2]微处理器是一款实现 64 位 MIPS III 指令集的通用 RISC 处理器。其最高工作频率为 1 GHz, 典型工作频率为 800 MHz, 实测功耗为 5 W~7 W, 综合性能已经达到高端奔腾 III 处理器以及中低端奔腾 IV 处理器的水平。

基于龙芯 2E 芯片设计的 PC104 Plus 处理器模块是一个小型化但功能完整的 CPU 主板系统, 系统框架如图 2 所示。系统北桥使用 Altera 的 FPGA (Cyclone II EP2C15F484) 实现, 通过 SYSAD64 总线与龙芯 2E 连接。南桥选用了 VIA 的 VT82C686A, 可提供 IDE 接口、音频接口、USB 接口、串并

作者简介:程晓宇(1979 -), 男, 博士研究生, 主研方向: 图像侦查与传输, 实时操作系统; 毕笃彦, 教授、博士生导师; 蔡 晔, 博士研究生

收稿日期: 2008-05-12 **E-mail:** ubwom@163.com

口和鼠标键盘接口以及 ISA 总线接口。南桥和 PCI PLUS 总线接口均通过 PCI 总线和系统北桥连接, PC104 ISA 总线由南桥引出。

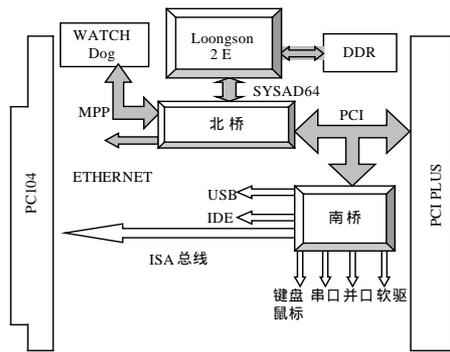


图2 龙芯 2E PC104 PLUS 处理器模块系统结构

4 移植的关键技术

4.1 处理器相关的代码移植

把 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 移植到龙芯 PC104 Plus 处理器模块的主要工作是编写体系结构相关的代码, 由于 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 良好的可移植性, 须编写的代码主要包括图 3 中与处理器相关的 3 个文件。

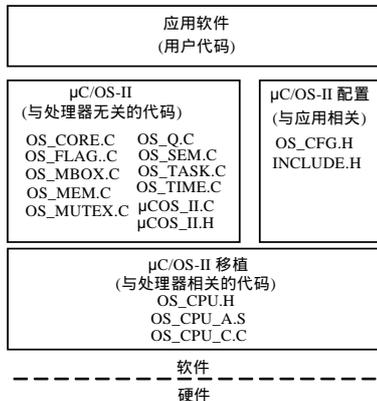


图3 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 软件结构

4.1.1 处理器和编译器的设置

`OS_CPU.H` 文件中定义了与编译器相关的数据类型, 因为不同的微处理器有不同的字长, 所以移植必须完成一系列类型定义以确保其新的编译器上可以正确编译。根据龙芯处理器的用户手册做出如下定义:

```
typedef unsigned char    BOOLEAN;
typedef unsigned char    INT8U;
typedef signed   char    INT8S;
typedef unsigned short   INT16U;
typedef signed   short   INT16S;
typedef unsigned int     INT32U;
typedef signed   int     INT32S;
```

另外, $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 定义了 3 种保护临界段代码的方式, 也在 `OS_CPU.H` 中定义, 在龙芯处理器移植中选中了第 3 种模式。通过 `OSCPUSaveSR()` 函数保存龙芯状态寄存器的值, 并将其全局中断使能位置 0, 禁止所有中断以保护临界段代码。

```
LEAF(OSCPUSaveSR)
    mfc0 v0,COP_0_STATUS_REG
    and v1,v0,0xffffffe
    mtc0 v1,COP_0_STATUS_REG
    jr ra
    nop
```

END(OSCPUSaveSR)

4.1.2 处理器相关函数的编写

(1) `OSStartHighRdy()` 函数负责在多任务启动之后, 从最高优先级任务的 TCB 控制块中获得该任务的堆栈指针 `sp`, 通过 `sp` 依次将 CPU 现场恢复, 并且执行中断的返回, 从而将系统控制权交给该任务的进程。

(2) `OSCtxSw()` 函数是任务级的任务切换函数, 在任务中调用, 通过执行一条软中断指令 `OS_TASK_SW()` 实现任务切换, 它首先保存现场, 然后获取最高优先级任务堆栈指针, 并从这个堆栈中恢复 CPU 现场, 从而实现任务切换。

(3) `OSIntCtxSw()` 函数是中断级的任务切换函数, 实现了在中断退出后可以不返回被中断的任务, 而直接使处于最高优先级的任务得到执行。在编写中设了一个全局变量 `OSIntCtxSwFlag`, 在 `Gen_EXC_Handler()` 函数中会以此变量的值来实现真正的中断级任务切换。

(4) `Gen_EXC_Handler()` 函数是 `OSTickISR()` 函数的替代。它不仅完成原有 `OSTickISR()` 函数对时钟中断的处理, 还为以后其他中断的处理留出了接口, 因此, 它是一个用来处理例外的通用函数。在这个例外处理函数中判断是发生了中断还是异常。

(5) 若发生了中断, 则调用 `C_INTHandler()` 函数, 进一步判断是否为时钟中断, 若发生时钟中断, 先调用 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 中时钟节拍服务函数 `OSTimeTick`, 并对龙芯中的 `count` 清零, 重置 `compare` 寄存器, 令 `compare` 为 `OS_TICKS_PER_SEC`, 这里定义为龙芯流水线频率的一半。

以上函数均由 MIPS 汇编语言实现。另外, 用来初始化任务堆栈的 `OSTaskStkInit()` 函数通过 C 语言实现, 它使堆栈看起来就像刚发生过中断并将所有的寄存器保存到堆栈中的情形一样。

4.2 与 PMON 的整合

PMON 是一个兼有 BIOS 和 bootloader 部分功能的开放源码软件, 它支持多种文件系统, 支持多种引导方式及处理器架构, 具备强大的调试功能, 多用于嵌入式系统。基于龙芯的系统采用 PMON 作为类 BIOS 兼 bootloader。为了便于调试移植后的 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$, 将 PMON 和 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 整合在一起, 借用 PMON 的调试功能进行代码的调试和性能分析。PMON 担任系统的初始化任务。 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 被整合在 PMON 的 `main()` 函数中, 在系统初始化完成后接管控制权, `OSStart()` 函数执行后, 开始进入 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 的多任务实时调度阶段。这样的结构避免了为 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 再次编写繁琐的系统初始化代码, 并且可有效利用 PMON 的调试功能。

5 性能评价

5.1 嵌入式实时系统性能评价

实时性是指系统能够在限定的时间内完成任务并对外部的异步事件作出及时响应的能力。对嵌入式实时系统的性能评价的方法很多, 目前应用最多的主要有以下 3 种:

(1) Rheelstone^[3] 为工业界的实时计算机提供了一个比较标准。它对嵌入式实时系统中 6 个关键操作的时间量进行测量, 并将它的加权和称为 Rheelstone 数。这 6 个时间量分别是: 任务切换时间, 抢占时间, 中断响应时间, 信号量交换时间, 死锁解除时间, 数据包吞吐率。

(2) 进程分派延迟时间 (Process Dispatch Latency Time, PDLT) 是另一个常用的测量嵌入式实时系统性能的方法。在

实时系统中,实时任务总是等待外部事件引发的中断来激活它。当一个中断产生后,系统必须迅速停止当前运行的低优先级任务,将控制权交给被激活的实时任务。PDLT 定义为从中断的产生到由中断激活的实时任务开始执行之间的时间间隔。这段间隔由中断延迟、ISR 延迟、内核延迟、调度延迟几部分组成。

(3)三维表示法^[4]。将实时系统定义为能够从外部进程获取输入,处理所获得的数据,并能在足够快的时间内将正确的响应返回给外部进程的系统。由这个定义,可以将实时系统的工作分为获取数据、处理数据和输出数据 3 个阶段。可以用 CPU 的计算能力、中断处理能力和 I/O 吞吐率 3 个指标来衡量,将上述 3 个特性的依赖关系用一个三维的图形表示,可以直观地表现嵌入式系统的实时性能。

5.2 测量指标的选择

本文选择了 Rhealstone 测试基准中的 2 个成分,任务切换时间和中断响应时间来对龙芯 2E PC104 Plus 处理器模块上 $\mu\text{C}/\text{OS}$ 系统的实时性能进行测量和评价。

任务切换时间也称上下文切换时间,它包括 3 个部分^[5],即保存当前任务上下文的时间、调度程序选中新任务的时间和恢复新任务上下文的时间。切换所需的时间主要取决于保存任务上下文所用的数据结构以及操作系统采用的调度算法的效率。

中断响应时间指从中断到第 1 条中断处理指令所持续的时间间隔。它由 4 部分组成,即硬件延迟、操作系统关中断时间、处理器完成当前指令的时间以及中断响应周期的时间。中断响应时间是衡量嵌入式实时系统实时性能最主要、最具有代表性的性能指标之一。

5.3 软硬件准备

5.3.1 外部中断的模拟

为测量中断响应时间,用软件的方法实现外部中断的模拟。利用并口的特征,当并口引脚 10(ACK 位)上的电平出现 1 个上升沿时,并口就会触发 1 个中断,这个触发电平可以通过并口的数据引脚获得,这里选择引脚 9(数据字节最高位),因此,将并口的引脚 9 和引脚 10 连接,并向并口写数据 0x80,就可以触发并口对应的 7 号中断。

5.3.2 精确计时

为准确测量各种时间指标,必须有 1 个精度足够高的计时机制。龙芯处理器中协处理器 0(CP0)的 Count 寄存器可以用来实现精确计时。Count 寄存器一般用来和 Compare 寄存器一起实现 R4000 时钟,Count 寄存器精确地以 CPU 流水线频率的一半向上递加,即每 2 个时钟周期加 1,当它达到 32 位最大值时,直接溢出回零。可以通过读取这个寄存器来获取微秒级的时间精度。读取 Count 寄存器的代码用汇编语言编写如下:

```
LEAF(CPU_GetCOUNT)
    mfc0    v0, COP_0_COUNT
    nop
    j      ra
    nop
END(CPU_GetCOUNT)
```

为便于其他 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 上应用程序的移植,利用这种精确计时方式实现通用的计时功能函数 `PC_ElapsedInit()`, `PC_ElapsedStart()`和 `PC_ElapsedStop()`,便于在测试程序中的时间测量。

6 实验结果及分析

测量指标选定后,需要确定测量的方法,对于任务切换时间的测量,程序中创建 2 个实时任务,先让高优先级任务挂起在某个消息邮箱上,低优先级任务向邮箱发送一则消息,从而使高优先级任务进入就绪态,从发出消息到高优先级开始得到 CPU 运行第 1 条指令之间的时间间隔就是将要被测量的任务切换时间。反复 20 次实验,取最大结果,得到 0.98 μs 。

在中断响应时间的测量程序中,在中断处理函数的开始加入停止计时的代码。实时任务初始化计时器,然后向并口写 0x80,并口会产生 1 个中断, $\mu\text{C}/\text{OS}$ 保存 CPU 的全部寄存器,然后调用中断处理程序,中断处理程序第 1 条指令会停止计时,得到从中断产生到中断处理开始的时间间隔,即中断响应时间。反复 20 次实验,取最大结果,得到 0.32 μs 。

不同平台上的实验结果对比如表 1 所示。

	龙芯 2E PC104	龙芯 2E 开发板	ARM 2410 开发板
任务切换时间	0.98	0.92	5.36
中断响应时间	0.32	0.30	0.24

实验结果对比显示,在任务切换时间上,龙芯 2E PC104 平台上的性能明显优于 ARM2410 开发板,这是由于龙芯 2E 处理器的流水线频率要高于 ARM 开发板上所选用的 S3C2410X 处理器,从而指令执行的速度会加快。中断响应时间的测量结果与 ARM2410 开发板相当,这个结果可以满足计算机模块一般的应用要求。没有明显缩短中断响应时间的原因可能是由于在龙芯处理器模块上保存处理器状态的工作量要较 ARM 处理器上更大,从而使中断处理时保存寄存器状态的时间有所增加,可以通过优化保存上下文部分的代码来进一步改善。

7 结束语

在龙芯 2E PC104 Plus 处理器模块硬件平台上移植 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$,有助于将国产龙芯处理器应用于对实时性要求较高的嵌入式领域。其实时性能的评价工作也为用龙芯和 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 的嵌入式实时应用提供了依据,为进一步用龙芯处理器和 $\mu\text{C}/\text{OS}$ 内核构建嵌入式计算机奠定了基础。

参考文献

- [1] Labrosse J J. 嵌入式实时操作系统 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ [M]. 邵贝贝,译. 北京:北京航空航天大学出版社,2003.
- [2] 中国科学院计算技术研究所. 龙芯 2 号用户手册[Z]. 2006.
- [3] Kar R P. Implementing the Rhealstone Real-time Benchmark[J]. Dr.Dobb's Journal, 1990, 15(4): 46-55.
- [4] Halang W A. Measuring the Performance of Real-time Systems[J]. International Journal of Time-critical Computing Systems, 2000, 18(1): 59-68.
- [5] 刘 森. 基于 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 的嵌入式数控系统实时性分析[J]. 计算机工程, 2006, 32(22): 222-226.