

基于实时多任务操作系统的微机线路保护装置的研究

王义刚¹, 许云峰², 张迎春¹

(1. 哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 北京市天利自动化设备研究所, 北京 100083)

摘要: 设计并实现了一种面向配电线路的全分布式的微机保护和测控装置。该装置以高可靠性的原则, 硬件上采用 DSP + MCU 的双 CPU 结构, 软件设计基于嵌入式实时操作系统 $\mu C/OS$ 。重点介绍了 $\mu C/OS$ 在 TMS320LF2407A DSP 上的移植和基于 $\mu C/OS$ 的软件编程方法; 同时针对电力系统的特点采用了改进算法, 提高了计算精度与实时性。在装置的结构和软硬件设计方面, 采用了多种抗干扰措施, 大大提高了装置的可靠性。

关键词: 微机线路保护; 数字信号处理器; 实时操作系统

中图分类号: TM774 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)08-0056-04

0 引言

微机继电保护产品在电力系统中得到了广泛的应用, 然而到目前为止, 应用于我国电力系统的微机保护产品采用的 CPU 大多为 8 位或 16 位单片机, 它存在着诸如硬件资源及功能过于简单、开发平台不完善等不足之处^[1]。本文采用 DSP 作为主要数据处理芯片, 主要性能较常规保护产品有较大提高。同时 DSP 丰富的硬件资源也可以使继电保护产品应用嵌入式实时操作系统 RTOS(Real Time Operation System), 进一步从软件方面提高装置的性能和可靠性水平。本文将介绍基于 TI 公司的 TMS320LF2407A DSP 和 RTOS $\mu C/OS$ 的新一代继电保护装置。

1 装置的总体介绍

本装置适用于 66 kV 以下电压等级的小电流接地系统或配置电流电压保护的 110 kV 线路。它不仅实现了电力系统的实时测控和三段式电流保护功能, 还集成了零序电流保护、低频减载、自动重合闸、小电流接地选线、电度采集等功能。本装置着重考虑了保护的特殊性和测控的实时性要求, 硬件上采用了 DSP + MCU 的结构。DSP 负责数据采集、滤波、计算、故障判断及通信等; MCU 负责键盘和 LCD 显示。两个 CPU 之间通过 RS232 通讯实现互联, 这样可以使两个处理器工作相互独立, 互不影响, 从而提高了装置的硬件可靠性。软件编程基于嵌入式实时操作系统 $\mu C/OS$, 大大提高了装置的软件可靠性。

2 装置的硬件设计

2.1 DSP 在继电保护中的应用

DSP 相对于单片机是一种硬件资源丰富、功能强大、开发环境及相应开发平台先进的微处理芯片, 它强大的计算能力使得保护装置应用诸如小波、神经网络等算法成为可能; 同时它丰富的硬件资源也为应用 RTOS 提供了硬件基础。因此基于 DSP 开发的装置将会使保护产品的性能有较大提高。

然而 DSP 的控制功能和抗干扰能力相对较弱, 因此可以在实际应用时结合这两种控制器的优点, 提高继电保护产品的性能和可靠性。

2.2 本装置的硬件特点

本装置采用 DSP + MCU 的结构, 综合了 DSP 与 MCU 各自的优点, 提高了装置的可靠性。DSP 采用了 TI 公司的 TMS320LF2407A 芯片, MCU 采用 89C52。主要包括以下几个功能模块: 模拟量输入、开关量输入、数据存储、CAN 总线通讯、RS232 通讯、键盘显示、时钟及控制输出等。硬件结构图参见图 1。

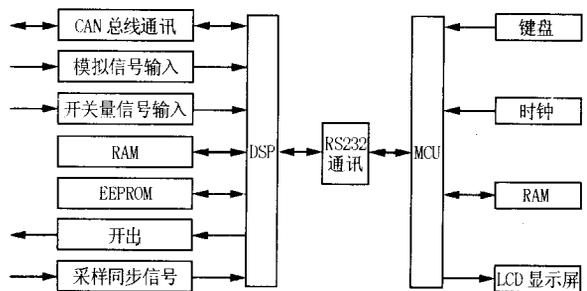


图 1 装置硬件总体结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the hardware structure

本装置主要有以下特点:

- 1) 装置的硬件部分采用 DSP + MCU 的双 CPU 结构, 克服了以往单片机计算速度慢的缺点;

2) 为了提高测量精度,采用了自适应调整采样间隔技术,即采样间隔根据测量到的频率进行自动调整,采样间隔由频率决定。因此在 A/D 转换中,采用跟踪频率变化的变步长对输入信号进行采样,以使本系统具有较好的测量精度;

3) 与上位机的通讯是通过 CAN 总线来实现的。CAN 是一种多主方式的串行通讯总线,具有成本低、传输速率高、抗电磁干扰性高、错误可靠处理和检错机制等特点。

3 $\mu\text{C}/\text{OS-2}$ 在 TMS320LF2407A DSP 上的移植

3.1 RTOS $\mu\text{C}/\text{OS-2}$ 在继电保护产品中的应用前景

RTOS 是嵌入式应用软件的基础和开发平台。目前大多数嵌入式开发仍在单片机上直接进行,没有 RTOS,但有一个主程序负责调度各个任务。包括本装置在内的新一代微机保护产品已经采用了嵌入式的操作系统^[2]。

应用 RTOS 可以显著地提高系统软件的可靠性,从而提高了装置的可靠性;基于 RTOS 设计的软件必定是模块化的,它具有良好的可读性,因此软件的可移植性和可升级能力都能够得到很大的提高;由于 $\mu\text{C}/\text{OS-2}$ 是一种源代码公开的 RTOS,因此使用 $\mu\text{C}/\text{OS-2}$ 可以在几乎不增加成本的基础上提高产品的性能和可靠性,具有广阔的应用前景。

3.2 $\mu\text{C}/\text{OS-2}$ 简介

$\mu\text{C}/\text{OS-2}$ 是“Micro-controller Operation System”的缩写,是一种源码公开的、可移植、可固化的、占先式的多任务嵌入式实时操作系统。

$\mu\text{C}/\text{OS-2}$ 中最关键的部分是实时多任务内核,它的基本功能包括任务管理、时间管理、内存管理、事件管理、消息管理(队列管理)、信号量管理等,这些管理功能是通过内核服务函数形式交给用户调用的,这就是 $\mu\text{C}/\text{OS-2}$ 的系统调用,或者叫做 $\mu\text{C}/\text{OS-2}$ 的 API^[3]。

3.3 $\mu\text{C}/\text{OS-2}$ 在 TMS320LF2407A 上的移植

为了使 $\mu\text{C}/\text{OS-2}$ 能够在 2407A 上运行,需要用 C 和汇编语言写一些与处理器相关的代码。 $\mu\text{C}/\text{OS-2}$ 的移植工作只与以下三个文件相关:OS-CPU.H、OS-CPU-C.C、OS-CPU-A.ASM。下面将详细介绍这些文件的修改。

1) OS-CPU.H 文件的修改

OS-CPU.H 包括了用 #defines 定义的与处理器相关的数据类型,即宏和类型定义。

数据类型的移植就是将 $\mu\text{C}/\text{OS-2}$ 中的数据类型与编译器所使用的数据类型相对应,如将 $\mu\text{C}/\text{OS-2}$ 中的无符号 16 位整数 INT16U 定义为 C 语言中的 unsigned。

$\mu\text{C}/\text{OS-2}$ 中使用了开中断与关中断的宏命令,对于 2407 DSP,通过执行 SETC INTM 命令禁止中断,并用 CLRC INTM 命令来允许中断。

不同的微处理器和微控制器的堆栈生长方向是不同的。对于 2407 DSP 来说,它的堆栈是向上生长的,因此置 OS-STK-GROWTH 为 0 表示堆栈从下往上长。

OS-TASK-SW() 是一个宏,它是在 $\mu\text{C}/\text{OS-2}$ 从低优先级任务切换到最高优先级任务时被调用的,OS-TASK-SW() 总是在任务级代码中被调用的,在 2407 中可以用软中断来实现。这里采用命令 INT 31。

2) OS-CPU-C.C 文件的修改

$\mu\text{C}/\text{OS-2}$ 的移植要求用户编写 C 函数 OSTaskStkInit(), 构造一个任务堆栈,使之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。图 2 显示了作者创建的任务堆栈结构。

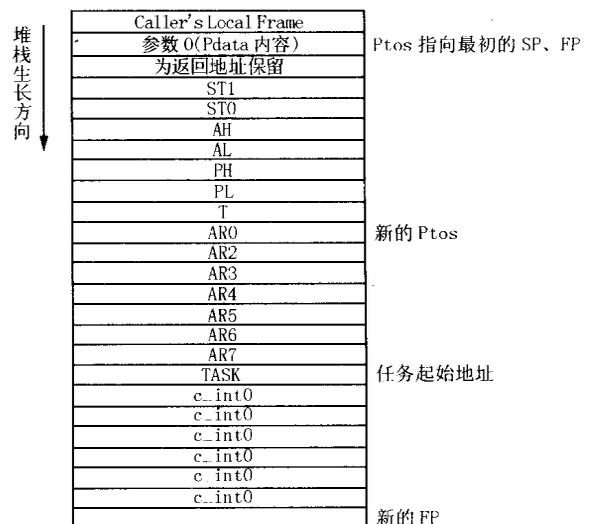


图 2 任务堆栈结构图

Fig. 2 Diagram of task stacking structure

3) OS-CPU-A.ASM 文件的修改

$\mu\text{C}/\text{OS-2}$ 的移植要求用户编写四个简单的汇编语言函数:OSStartHighRdy(), OSCtxSw(), OSIntCtxSw(), OSTickISR()。

OSStartHighRdy() 中假设 OSTCBHighRdy 指向的是优先级最高任务的任务控制块。要想运行最高优先级任务,用户所要做的是将所有处理器寄存

器按顺序从任务堆栈中恢复出来,并且执行中断的返回。堆栈指针总是储存在任务控制块(即它的 OS-TCB)的开头。

如前面所述,任务级的切换是通过软中断命令来完成的。中断服务程序的向量地址指向 OSCtxSw()。OSCtxSw()除了执行中断保存外还要保存和更新任务堆栈指针,再将新任务的堆栈内容恢复到处理器寄存器中。OSIntCtxSw()是中断级的任务切换函数,它与 OSCtxSw()的区别在于:不需要保存处理器寄存器,因为在进入中断时已经完成了;需要清理堆栈,清除函数调用中压入堆栈的返回地址,具体操作是将堆栈指针减3。

$\mu\text{C}/\text{OS}$ 要求用户提供一个时钟资源来实现时间的延时和期满功能,作者使用 2407 EVA 中的定时器 1 来完成此功能。OSTickISR()就是定时中断服务程序,它主要完成以下功能:清除中断标志、保存处理器寄存器、调用 OSIntEnter()、调用 OSTimeTick()、调用 OSIntExit()、恢复处理器寄存器、执行中断返回指令。

采用嵌入式操作系统将会大大加快其软件开发速度,同时软件将会具有天然良好的模块化结构,同时会有更好的可移植性、可维护性,大大缩小软件开发的成本。

4 装置的软件设计要点

4.1 实时操作系统软件设计要点^[4]

在 RTOS 的基础上设计应用软件,设计者可以方便地利用实时操作系统的资源简化设计,但与传统的程序设计有着不同之处。这里提出几个需要注意的问题:

1) 任务划分的合理性

任务是能够完成一个或一组相关功能的程序的集合,它可能会调用若干系统的标准函数或系统资源。本装置主要包括以下几个任务:模拟输入任务、离散输入任务、信号处理任务、故障判断任务、出口任务、RS232 通讯任务、CAN 通讯任务等。任务之间主要通过信号量、消息队列及邮箱等来进行任务之间的信息传递。合理地划分任务将会大大提高程序的执行效率、减少系统调用的时间消耗,同时使程序具有良好的结构和可读性。

2) 实时时钟的设计

实时时钟是整个实时系统计时标准,它由 DSP 的定时中断调用 RTOS 系统时钟函数产生。定时长短由用户确定,它是实时时钟的基本计量单位。使用

实时时钟应注意:

如果实时时钟的基本单位选的很小,则定时中断频繁,并且每次定时中断完成后,RTOS 都要检查系统中使用的定时器,判断是否需要任务切换,这就会占用系统时间,降低了应用程序的效率;

实时多任务系统中,用系统定时时会存在定时误差。误差值小于实时时钟的基本单位。

由于 2407A DSP 的工作频率达到 40 M,在综合考虑了以上两个因素的基础上,设定定时中断频率为 5000 Hz。从运行情况看,工作正常,满足定时精度要求。

4.2 继电保护算法选择要点

算法的选择就是在精度和速度之间进行权衡,以达到满足系统要求的指标。目前在微机保护中广泛使用的算法主要包括积分算法、傅氏算法、卡尔曼滤波算法和最小二乘算法。全波傅氏算法能够滤除所有整次谐波,且稳定性好,但其数据窗要求一个周期,响应速度较慢。最小二乘法需已知故障信号的模型和干扰信号的分布特性^[5]。为了克服数据窗暂态带来的附加延时,已有半波傅氏算法和卡尔曼滤波算法^[6]。卡尔曼滤波算法在数据窗暂态条件下能够给出基波分量的最优估计,但计算过于复杂,限制了实际应用。

半波傅氏算法的优点在于数据窗短,但是其滤波能力较差,只能滤除奇次谐波分量,不能滤除偶次谐波分量和直流分量。电力系统在故障发生时,电流和电压往往会叠加衰减直流分量,这将严重地影响傅氏算法的精度。为此,作者采用了文献[7]中的改进方法,只需要半个周期加两个采样点就可以补偿衰减直流分量的影响,从而在保证实时性的基础上大大提高了计算的精度。

5 装置的可靠性与抗干扰性设计

由于保护装置的工作环境中电磁干扰是相当严重的。为了保证装置的正常工作,需要提高装置的抗干扰能力及可靠性。除了硬件上的屏蔽、隔离、接地、硬件滤波外,在软件方面主要采取了以下措施:

1) 软件滤波

虽然采用了一些硬件滤波方法,但是由于软件滤波具有节省硬件开销、参数可变、可靠性高等优点,对于采样数据主要还是通过软件滤波的方法来达到抗干扰的目的。

2) 系统恢复技术

为了使程序在出轨之后能尽快恢复正常运行,

除了在硬件上采用“看门狗”电路之外,还设置了软件陷阱,即在未编程的程序空间中全部写入复位指令,当程序由于未知原因走到该区域,将会使 DSP 复位。

3) 数据的冗余设计

在软件的设计过程中多处使用冗余设计。对于重要的数据采取冗余存储,读出表决;同时对于 EEPROM 中的重要定值,定时读出,再重新存入。这样可以减小由于定值错误而使装置产生误动的可能性。

4) 出口控制闭锁

跳闸出口的抗干扰性能直接影响装置的抗干扰性能。因为由一条语句控制跳闸出口的方法可靠性太差,本装置结合硬件设计,采用了发指令——延时——发指令——跳闸的方式,防止干扰所产生的误动作,提高了装置的抗干扰水平。

6 结论

在原有的微机线路保护装置的基础上,以 $\mu\text{C}/\text{OS-2}$ 和 TMS320LF2407A DSP 为软硬件平台,并结合一系列的软硬件抗干扰措施,使得本保护装置具有更强的功能和更高的可靠性,适用于各种中低压输电线路保护。目前已完成了 110 kV 线路保护的样机,主要应用于采用三相跳闸和三相重合闸的 110 kV 输电线路。

参考文献:

[1] 丁爱民(DING Ai-min). 基于 DSP 的配电线路微机保护和测控装置的研制 (Research and Development of the Distributed Power Line Protection & Monitoring Device Based on DSP, Thesis) [D]. 北京:中国农业大学(Beijing: China Agricultural University), 2001.

[2] 张利敏,丁坚勇(ZHANG Li-min, DING Jian-yong). 嵌入式技术及其在电力系统中的应用 (Embedded Technology and Its Applications in Power System) [J]. 继电器 (Relay), 2002, 30(3): 43-47.

[3] Jean J L. $\mu\text{C}/\text{OS-2}$: The Real-time Kernel [M]. CMP Books, 2002.

[4] Jean J L. Embedded Systems Building Blocks: Complete and Ready-to-use Modules in C [M]. CMP Books, 1999.

[5] Sachdev M S, Nagpal M. A Recursive Least Error Squares Algorithm for Power System Relaying and Measurement Application [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1991, 6(3): 1008-1015.

[6] Perez J, Martinez J. Kalman Filter Algorithm Digitally Record Lighting Impulse Parameter Evaluation [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(4): 1713-1719.

[7] 丁书文,张承学,等 (DING Shu-wen, ZHANG Cheng-xue, et al). 半波傅氏算法得改进——一种新的微机保护交流采样快速算法 (An Improved Half-wave Fourier Algorithm—A New Fast Algorithm for Microprocessor-based Protection AC Sampling) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 1999, 23(3): 18-20.

收稿日期: 2003-07-16; 修回日期: 2003-10-08

作者简介:

王义刚(1979-),男,硕士研究生,从事电力系统继电保护、控制系统故障诊断方面的研究;

许云峰(1962-),男,硕士,从事电力系统继电保护方面的研究工作;

张迎春(1961-),男,教授,从事控制系统故障诊断、卫星姿态控制方面的研究工作。

Microcomputer-based line protection development based on real-time operation system

WANG Yi-gang¹, XU Yur-feng², ZHANG Ying-chun¹

(1. Harbin University of Technology, Harbin 150001, China;

2. Beijing Tianli Automatic Equipment Institute, Beijing 100083, China)

Abstract: A full-distributed multifunctional protection & monitoring device orienting the distributed line is studied. For the highly reliable performance, DSP + MCU of double CPU hardware structure is employed in the instrument. The software design is based on embedded real-time operation system $\mu\text{C}/\text{OS-2}$. And how to port $\mu\text{C}/\text{OS-2}$ to TMS320LF2407A DSP and programming based on $\mu\text{C}/\text{OS-2}$ are described in detail. In addition, based on the characteristics of power system, the improved algorithms are used to enhance the calculation precision and real-time performance. Several anti-jamming measures are taken in designing the hardware and software, which can make the equipment highly reliable and practicable.

Key words: microprocessor-based line protection; digital signal processor (DSP); real-time operation system (RTOS)