

继电保护装置中基于 uC/OS - II 实时操作系统的嵌入式以太网

谢玉冰, 游大海, 罗强, 金明亮, 李正天

(华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 现在越来越多的用户对继电保护装置提出了带有以太网接口的要求, IEC61850 体系提出的变电站综合自动化系统的无缝通讯也是基于以太网。保护装置对以太网通讯的实时性、可靠性的要求也随着计算机技术、网络技术的发展得到满足。该文介绍了在新研制的 DSP 继电保护装置中, 基于 uC/OS - II 实时操作系统的以太网通讯模块。分别从硬件电路、硬件驱动程序、基于 RTOS 的 / IP 协议三个层次阐述了如何具体实现以太网通讯。该文所描述的以太网通讯模块已经在 35 kV 以下的低压保护装置中得到了实际应用。

关键词: 嵌入式以太网; DSP; uC/OS - II; TCP/IP

中图分类号: TM774 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2005)18-0020-03

0 引言

变电站中的通信,最初是采用 RS - 485 将保护设备、各种电气智能化设备 (IED) 连接在一起,采用主从方式通信。后来各种总线技术 (如 Lonworks, CAN 总线等) 被采用, 并以其简单易用, 组网方便, 抗干扰力强等特点在变电站自动系统中得到广泛的应用。

以太网采用的是 CSMA/CD 协议, 运用了 1 - 坚持和二进制指数退避算法 (BEB)。CSMA/CD 协议是一种随机性的协议, 数据传输有其不确定性。但是随着传输速度的提高, 实验表明^[1], 只要以太网具有足够的带宽以及限制以太网上节点的数目和节点间的距离, 实时性能够得到保证。

随着计算机技术, 网络技术的飞速发展, 集成电路规模和速度的不断提高, 以太网由于其良好的开放性、稳定性、传输速度快等特性在电力系统获得了越来越广泛的应用。IEC (国际电工委员会) 正在制定的变电站通讯网络和系统协议 IEC61850, 提出了变电站内信息分层的概念, 从逻辑上和物理概念上将变电站的通信体系分为 3 个层, 即变电站层、间隔层和过程层并且定义了层和层之间的通信接口^[2], 体现了变电站中基于以太网技术的无缝通讯技术。

在新一代的继电保护产品中提供嵌入式以太网接口, 已成为一种必然趋势。

1 整体层次模型^[3,4]

由于 IEC61850 体系仍在制订中, 基于 TCP/IP 的 IEC60870-5-104 协议是当前实现变电站无缝通讯的实用方法, 它也是向未来 IEC61850 体系过渡的

一种有效途径。IEC60870-5-104 协议所采用的层次模型, 如图 1 所示。

| | |
|---------------|-----------------------------|
| 应用层 (第 5 层) | APCI (应用规约控制信息) 用户到 TCP 的接口 |
| 传输层 (第 4 层) | TCP/IP 协议 |
| 网络层 (第 3 层) | |
| 数据链路层 (第 2 层) | 网卡驱动 |
| 物理层 (第 1 层) | IEEE802.3 |

图 1 IEC60870 - 5 - 104 的网络参考模型

Fig 1 Network reference model for IEC60870 - 5 - 104

IEC-60870-5-104 远动规约使用的参考模型源出于开放式系统互联的 ISO - OSI 参考模型, 但它只采用其中的 5 层。第一层实际上就是硬件电路的连接; 第二层主要在网卡的底层程序中得到实现, 即以以太网帧的发送和接收; 第三层、第四层为 TCP/IP 协议, TCP/IP 协议包含的内容很多, 在嵌入式以太网中实际上只用实现其一部分内容; IEC60870 - 5 - 104 处于第五层应用层协议的位置。

2 硬件电路的设计

以太网硬件设计时必须处理好如下问题: CPU 处理速度、RAM 的容量、ROM 的容量, 10 Mb/s 和 100 Mb/s 的自适应双网的冗余设计及其切换策略。

硬件平台的 CPU 采用德州仪器生产的新一代 32 位浮点 DSP TMS320VC33, 其强大的运算能力为继电保护装置的灵敏性, 可靠性和易操作性提供了可靠的保证, 也为 RTOS 的使用, 程序的设计提供了

很大的灵活性。

以太网控制芯片的种类很多,Realtek公司生产的 RTL8019AS^[5],是一款运用非常广泛,成熟稳定的产品,而且价格十分便宜。RTL8019AS全面支持 IEEE802.3标准,收发速率可同时达到 10Mbps,其内置有 16 kB 的 SRAM,可作为接受和发送缓存区。

以太网控制芯片和 DSP之间通过 CPLD 芯片连接,CPLD 芯片主要用来扩展 DSP 的 I/O 口,并完成一些控制功能,以减轻 DSP 的负担,以便 DSP 能够更好地完成计算和保护等功能。具体的硬件连接如图 2 所示。

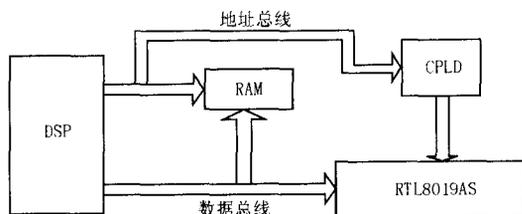


图 2 硬件接线示意图

Fig 2 Hardware connection

由于从成本、易用性、通用性等角度考虑,以太网控制芯片采用的是 RTL8019AS,没有选择其它的 32 位高档以太网控制芯片。RTL8019AS 只支持 8 位或 16 位的数据总线,而系统所用的 CPU 是 32 位的 DSP 处理器,数据在系统和 RTL8019AS 之间交换时,高 16 位将被舍弃,因此在后面的软件设计中,以太网帧中的数据类型需要被严格定义。

3 RTL8019AS 芯片驱动程序的设计

RTL8019AS 驱动程序的主要工作流程是,将要发送的数据包按指定格式写入芯片并启动发送命令,8019 会自动把数据包转换成物理帧格式在物理信道上传输。反之,8019 收到物理信号后将其还原成数据,按指定格式存放在芯片 RAM 中以便主机程序取用。简言之就是 8019 完成数据包和电信号之间的相互转换。以太网协议由芯片硬件自动完成,对程序员透明。驱动程序主要实现 3 种功能:芯片初始化、收包、发包。

一个标准的 IEEE802.3 以太网物理传输帧由七部分组成,如表 1 所示。

表 1 IEEE802.3 以太网标准物理传输帧

Tab 1 IEEE802.3 Ethernet standard transmitting frame

| PR | SD | DA | SA | TYPE | DATA | FCS |
|-----|-----|------|-----|------|---------|-------|
| 同步位 | 分隔位 | 目的地址 | 源地址 | 类型字段 | 数据段 | 帧校验序列 |
| 7 | 1 | 6 | 6 | 2 | 46~1500 | 4 |

除了数据段的长度不定外,其它部分的长度固定不变。数据段为 46~1500 字节。以太网规定整个传输包的最大长度不能超过 1514 字节(14 字节为 DA、SA、TYPE),最小不能小于 60 字节。除去 DA、SA、TYPE 14 字节,还必须传输 46 字节的数据,当数据段的数据不足 46 字节时需填充,填充字符的个数不包括在长度字段里;超过 1500 字节时,需拆成多个帧传送。事实上,发送数据时,PR、SD、FCS 及填充字段这几个数据段由以太网控制器自动产生;而接收数据时,PR、SD 被跳过,控制器一旦检测到有效的前序字段(即 PR、SD)就认为接收数据开始。

初始化 RTL8019AS,主要是初始化相关的寄存器,为网络接口的收发创造条件。这些寄存器主要包括 CR、ISR、MR、DCR、TCR、TSR、RCR、RSR、TPSR、PSTART、PSTOP、TBCR0、TBCR1、CURR、BURY 等。

发包程序主要是将待发送的数据按帧格式封装,通过远程 DMA 通道送到 RTL8019AS 中的发送缓存区,然后发出传送命令,完成帧的发送。需要设置以太网目的地址、以太网源地址、协议类型等,再按所设置的协议类型来设置数据段。之后启动远程 DMA,数据写入 RTL8019AS 芯片中的 RAM,再启动本地 DMA,将数据发送网上。

数据包的接收将采用中断方式,以保证实时性。网卡接收到一个完整的以太网数据包后,向 DSP 发送中断请求。中断请求获得响应以后进入中断服务子程序,先由本地 DMA 将数据读入到数据缓存区中,然后再由远程 DMA 将接收缓存区的数据读入内存。

4 基于 uC/OS-II 的 TCP/IP 协议

uC/OS-II^[6]采用基于优先级的可剥夺式调度策略,能够很好地满足系统对实时性的要求,而且其源代码公开,可以免费使用。

TCP/IP 协议实质上是一系列协议的总称,包含十几个协议标准。在现有的硬件水平下,在保护装置中实现所有的协议中的所有内容是不现实的,也是没有必要的。根据实际需要,主要实现的内容有:因特网控制报文协议(ICMP)、地址解析协议(ARP)、网际层协议(IP)、传输控制协议(TCP)、用户数据报协议(UDP)等。基本上由这五个协议组成了一个小型化的 TCP/IP 协议。并且根据实际的情况,对上述的五个协议也进行了适当的简化,在满

足可以完成通讯功能的情况下,保证系统的实时性和可靠性。

TCP/IP的传输层为应用层提供 2 种类型的服务:一为面向连接的可靠传输服务 TCP协议,通信的发起节点在每次发起通信时在传输层都必须与通信接收方事先建立 3 次握手连接之后才能发送;二为无连接的通用数据报协议 UDP协议,这种传输方式由于不需要事先建立“握手”联系,所以效率很高,并且有单播、分组广播和广播 3 种方式。

继电保护装置中以太网通讯主要是采用 UDP 协议来传输数据。TCP协议能够实现可靠的数据传输,但是延时不易把握,不易于数据的实时传输。UDP协议传输数据实时性强,效率高,而且能够在同一时间向所有节点传输数据。电力系统对实时性的要求,决定了将主要采用 UDP协议来传输数据。

在实时操作系统中,整个以太网通讯部分作为系统的一个任务。该任务的优先级低于采样任务、保护任务的优先级,但是要高于键盘、显示等任务的优先级。uC/OS - II是基于任务优先级调度,采用可剥夺式内核,已经就绪的高优先级任务可以剥夺正在运行的低优先级任务的 CPU 使用权。我们通过发出信号量、释放信号量来完成以太网通讯任务与其它任务的切换。

以太网通讯任务和其它保护任务之间的切换,主要依靠两个与以太网通讯相关的信号量——发送数据包信号量 TxTSem 与接收数据包信号量 RxTSem。

图 3 描述了实时操作系统如何依靠信号量完成对中断和任务的调度。

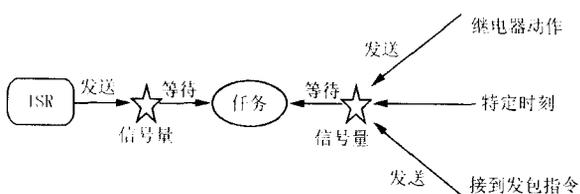


图 3 任务调度示意图

Fig 3 Sketch map of task schedule

当网卡接收到一个完整的以太网数据包后,向 DSP 发送中断请求,中断请求获得响应以后进入中断服务子程序,在中断服务子程序中数据包的接收,并发信号 RxTSem。中断服务子程序结束后,将进行任务调度,如果此时没有更高优先级的任务处于就绪状态,就将执行以太网通讯任务,在以太网通讯任务中将完成数据包的处理,数据处理完成后将信号量 RxTSem 挂起,任务进入等待状态,等待信号量

RxTSem 的再次有效。

如果要发送以太网包,就必须等待信号 TxTSem 有效。可以发出信号量 TxTSem 的地方比较多,任何需要发送以太网包的场合都能够对它进行操作,可能是继电器动作后,也可能是某一特定的时候到了,或者是收到外部指令要发送数据。当 TxTSem 有效后,如果没有其它更高优先级的任务就绪,也同样进入通讯任务。在通讯任务中完成数据的处理,发送数据包。发送完毕后将 TxTSem 挂起,任务进入等待状态。

5 结束语

在高速 DSP 硬件平台上,采用 uC/OS - II 实时操作系统进行实时任务调度,保证了以太网通讯的实时性、可靠性。实验表明,完全能够满足 35 kV 以下低压继电保护装置对以太网通讯的技术要求。嵌入式以太网在继电保护装置中的使用,是实现 IEC61850 体系提出的变电站无缝通讯的一个重要环节。

参考文献:

- [1] IEC61850-5, Communication Networks and System in Substations, Part 5: Communication Requirements for Function and Device Modes[S].
- [2] 谭文恕. 电力系统无缝通讯系统体系 [J]. 电力系统自动化, 2001, 21(11): 1-4
TAN Wen-shu. Seamless Communication Architecture in Power System [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 21(11): 1-4.
- [3] 吴在军, 胡敏强, 杜炎森. 嵌入式以太网在变电站通信系统中的应用 [J]. 电网技术, 2003, 27(1): 71-75.
WU Zai-jun, HU Min-qiang, DU Yan-sen. Application of Embedded Ethernet to Communication Networks in Substations [J]. Power System Technology, 2003, 27(1): 71-75.
- [4] 杨刚, 杨仁刚, 郭庆喜. 嵌入式以太网在变电站自动化系统智能化电气设备中的实现 [J]. 电力系统自动化, 2003, 28(3): 74-76
YANG Gang, YANG Ren-gang, GUO Qing-xi. Implementation of Embedded Ethernet in Intelligent Electric Device (IED) in the Substation Automation System [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 28(3): 74-76.
- [5] RTL8019AS Realtek Full-Duplex Ethernet Controller with Plug and Play Function (Real PNP) Specification [Z]. Realtek Semiconductor Co., Ltd

(下转第 60 页 continued on page 60)

路导频中有 3 路以上出现峰值,就可以确认该点以前的样点是捕捉到的一帧信号,然后对捕捉到的帧信号进行解调。

解调时首先对捕捉到的帧信号进行实信号的 FFT 变换,之后利用 4 路导频计算出本地采样时钟的延时,由延时值调整下一帧采样时钟是提前或滞后一个时间量值。接着进行并串转换及 16 - QAM 解调、纠错译码。最后利用幅值门限判断是否有连续帧,当 4 路导频的平均幅值小于一个定值时,说明解调结束,否则继续进行。

5 结语

馈线自动化系统采用有线中继通信方式,并应用 OFDM 传输技术和 DSP 技术设计的调制解调器,

具有造价低,信息传输率高,抗干扰能力强等优点,完全能满足馈线自动化对通信系统的要求。

参考文献:

- [1] Orthogonal Frequency Division Multiplexing [P]. U. S Patent: 3 488 445, 1970-01-06
- [2] Li Z, Mammela A. An All Digital Frequency Synchronization Scheme for OFDM [A]. Proc IEEE Int Symp PM-RC '97. Helsinki (Finland): 1997. 327-331.

收稿日期: 2005-01-10; 修回日期: 2005-04-29

作者简介:

王小平 (1959 -),男,副教授,主要从事电气工程及通信技术的教学和科研工作。E-mail: wxp - xp@sohu.com

Using OFDM technology in the feeder automation based on wire communication

WANG Xiao-ping¹, WANG Yan-fang², CHEN Dong-yang¹, FENG Tao¹

(1. Department of Electric Engineering, Shijiazhuang Institute of Railway, Shijiazhuang 050043, China;

2. Shijiazhuang Institute of Railway, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: Feeder automation requires that the communication system has the characteristic of low cost, strong anti-interference, high reliability and much more real-time ability. Therefore, wire (twister-pair) communication manner is chosen in the feeder automation system. The proposed system uses OFDM technology to transfer data, and adopts DSP to modulate and demodulate the data. OFDM signal modem is designed based on the DSP, which can meet the need of the communication system.

Key words: feeder automation; modem; OFDM; DSP

(上接第 22 页 continued from page 22)

- [6] Labrosse J J. 嵌入式实时操作系统 uC/OS - II[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2003.
- Labrosse J J. Embedded Real-time Operating System uC/OS - II[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2003.

作者简介:

谢玉冰 (1979 -),男,硕士研究生,研究方向为电力系统继电保护; E-mail: xieyubing@sina.com

游大海 (1956 -),男,教授,研究方向为电力系统继电保护和稳定控制,电力市场等;

罗强 (1980 -),男,硕士研究生,研究方向为电力系统继电保护。

收稿日期: 2005-01-05; 修回日期: 2005-02-28

Embedded Ethernet based on uC/OS - II RTOS in protection devices

XIE Yu-bing, YOU Da-hai, LUO Qiang, JIN Ming-liang, LI Zheng-tian

(College of Electric and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: More and more users demand the embedded Ethernet be provided in the protection devices. And the seamless communication of the power station automation system, which is issued by the IEC61850 system, is based on Ethernet technology. The real-time character and reliability of Ethernet communication are resolved with the development of the computer technology and network technology. The paper introduces embedded the Ethernet communication module, which bases on uC/OS-II real-time operating system. In the paper, the method to implement embedded Ethernet is expounded from hardware, hardware driver program and TCP/IP protocol. The proposed Ethernet communication module has been applied in the low-voltage protection devices.

Key words: embedded Ethernet; DSP; uC/OS - II; TCP/IP