

# 嵌入式通用千兆以太网接口的设计与实现

张伟华<sup>1,2</sup>, 魏仲慧<sup>1</sup>, 何昕<sup>1</sup>

(1 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林长春 130033 2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:**以现场可编程门阵列 FPGA 和千兆以太网网络控制器 AX88180 为硬件平台, 针对嵌入式设备资源有限的特点, 提出了一种通用的嵌入式设备千兆以太网接口设计与实现方案。详细阐述了系统的组成结构、工作原理; 讨论了以太网 TCP/IP 网络协议的基本体系结构; 总结提出了适合嵌入式设备的 TCP/IP 网络协议实现方法; 给出了网络驱动和数据处理的设计流程以及仿真结果; 并实际测试了系统的通信性能, 给出了实验结果。实际应用证明该设计通用、灵活, 可以根据实际需求实现各种嵌入式设备的千兆以太网接入, 而千兆以太网更高的传输带宽优势, 可以满足大数据量传输的要求。  
**关键词:** 嵌入式; 千兆以太网; 现场可编程门阵列; 千兆网络控制器; TCP/IP

中图分类号: TP393 文献标识码: A 文章编号: 1002-1841(2011)06-0041-03

## Design and Implementation of Embedded Universal Gigabit Ethernet Interface

ZHANG Weihua<sup>1,2</sup>, WEI Zhonghui<sup>1</sup>, HE Xin<sup>1</sup>

(1 Changchun Institute of Optics Fine Mechanics and Physics Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China  
2 Graduate School Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

**Abstract** The hardware platform was built on FPGA (field programmable gate array) and Gigabit Ethernet network controller AX88180 for the characteristics of embedded devices with limited resources, this paper proposed a universal design and implementation program for embedded devices Gigabit Ethernet interface. It presented the organization structure and operate principle of the system in detail; discussed the basic architecture of Ethernet TCP/IP network protocol. It summarized and proposed an appropriate TCP/IP network protocol implement method for embedded devices, gave the network drive and data processing flow chart and simulation results. The communication performance of the system was tested and the experimental results was shown. Practical application shows that the design is general-purpose and flexible, can achieve the actual Gigabit Ethernet communication needs of a variety of embedded devices, and the higher bandwidth advantages of Gigabit Ethernet meet the requirements of large data transmission.  
**Key words** embedded; Gigabit Ethernet; FPGA; Gigabit Ethernet controller; TCP/IP

### 0 引言

通常利用控制局域网络总线 (Control Area Network CAN), 基金会现场总线 (Foundation Fieldbus FF) 等现场总线技术组建现场总线控制系统, 实现多个嵌入式设备之间的信息交换、协同运作。各种总线技术相关通信协议不开放, 互不兼容, 系统布线复杂, 成本上升, 其通信速率较低、覆盖范围有限、灵活性不足的弱点也暴露出来<sup>[1-2]</sup>。

作为目前发展最为成熟、应用最为广泛的 TCP/IP 协议以及以太网 (Ethernet) 技术, 已经成为计算机网络通信的标准。网络通信的优点在于可以利用成熟开放的网络协议, 实现各设备之间的信息交互, 其通信速率高 (千兆以太网带宽可以达到 1 000 Mbps), 传输距离远, 方便灵活, 而且, 屏蔽双绞线和光纤通信的应用更是提高了网络通信的抗干扰性, 保证了通信质量。表 1 为以太网与几种现场总线传输方式的比较。将千兆以太网引入到嵌入式设备当中, 利用以太网络传输的优势, 既可以拓展以太网的应用领域, 又可以促进工业控制系统的发展, 具有很高的实用价值。

### 1 网络协议体系结构及实现方法

#### 1.1 网络协议基本体系结构

TCP/IP 协议的体系结构如图 1 所示, 与开放系统互连基本参考模型 (OSI) 的七层体系结构不同, TCP/IP 采用四层体系结构, 分别是应用层、运输层、网际层以及网络接口层<sup>[3]</sup>。应用层向应用进程提供应用服务, 运输层向应用层提供面向连接的可靠的 (使用 TCP) 或不可靠的 (使用 UDP) 运输服务, 而网际层使用 IP 向运输层提供无连接分组交付服务。网络接口层支持多种协议, 文中采用的是 IEEE802.3 标准的协议。网络数据传输过程中, 在发送端数据流在网络协议中自上而下依据协议逐层封装打包; 在接收端是一个相反的过程, 网络数据包从底层依据协议逐层解包并向上层递交, 到达应用进程<sup>[4-5]</sup>。

#### 1.2 网络协议实现方法

目前, 实现嵌入式以太网网络接口的方法主要有软件方式和硬件方式 2 种。硬件方式是直接使用专用的网络处理芯片, 这种芯片已经嵌入了完整的 TCP/IP 网络协议, 能够实现数据在通用数据格式和基于 TCP/IP 网络协议的网络数据帧格式之间的转换, 这样的芯片有 Seko 公司的 S7600A 芯片, 武汉力源公司的 WebChip 芯片, WZnet 公司的 W3100A 芯片等。这类芯

表 1 以太网与几种现场总线传输方式对比

	以太网	FF	CAN
传输带宽	10/100/1 000 Mbps	最高 2.5 Mbps	最高 1 Mbps
拓扑结构	多种网络拓扑结构	总线型, 树型, 环型, 星型,	总线型, 树型, 环型, 星型,
传输模式	支持全双工	支持全双工	支持全双工
电缆接口	RJ45	专用接口	专用接口
传输介质	支持双绞线、光缆、无线传输	支持双绞线、光缆、无线传输	双绞线
传输距离	直接传输 100 m (无限中继延长)	直接传输 500 m (中继最远 1.9 km)	直接传输 40 m (中继最远 10 km)

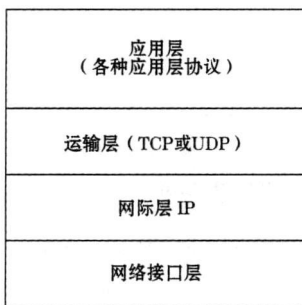


图 1 TCP/IP 协议基本体系结构

片能够实现多种网络协议, 功能强大, 操作简单, 使用方便, 但芯片价格偏高, 且用户需要重新设计接口; 软件方式是采用高档的嵌入式处理器, 如 ARM, 这类处理器能够嵌入多种嵌入式操作系统, 可以通过嵌入式操作系统中的以太网网络协议来实现网络通讯, 这种方法的优点是简化了繁琐的硬件设计, 而且操作系统中丰富的编程资源也使得软件实现更加灵活, 但是高档处理器昂贵的价格造成这种方法目前还不能广泛适用<sup>[6]</sup>。综合考虑设计功能要求、实现的方便性、使用的普遍性以及设备的成本问题, 文中采用软硬件相结合的方式, 使用 FPGA 和网络控制芯片组成硬件平台, 通过编程在 FPGA 中实现 TCP/IP 网络协议和网络控制芯片的驱动。这种方法虽然编程工作量比较大, 但是设计成本低, 而且可以根据实际需要进行功能扩展, 宜于推广使用。

## 2 系统结构设计及功能实现

### 2.1 硬件结构

如图 2 所示是系统硬件组成结构框图。系统主要由 FPGA、千兆网络控制芯片 AX88180、物理层收发芯片 M88E1111、数据存储 SRAM、RJ45 网络接口以及外围电路组成。FPGA 是系统的控制处理核心, 负责整个系统的控制驱动, 与 AX88180 通过总线方式连接, 是通信控制的主体。FPGA 内部编程实现网络协议, 并通过网络驱动程序实现对 AX88180 内部寄存器的驱动配置, 实现对以太网数据的发送和接收处理, 从而实现系统与网络之间的数据通讯。AX88180 与 M88E1111 之间采用简化的千兆以太网媒体无关接口 (RGMII) 方式连接, 实现 TCP/IP 协议体系结构中网络接口层的功能, 分别实现数据

链路层协议和物理层协议。M88E1111 与 RJ45 网络接口连接, 实现网线上比特流的发送和接收, 并具有网络连接速度和工作模式配置和自动协商的功能。存储器 SRAM 主要是存储接收和发送的数据, 也便于接口和功能的进一步扩展。EEPROM 是网络控制芯片 AX88180 的配置芯片, 片内存储了网络控制器的物理地址, AX88180 上电工作时, 将物理地址读取到片内的物理地址寄存器中。

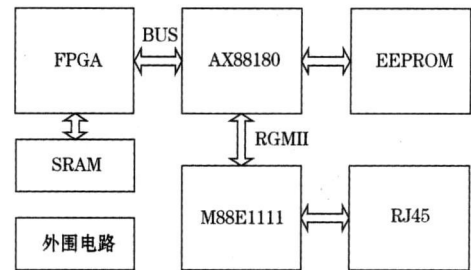


图 2 系统硬件组成结构框图

### 2.2 FPGA 和网络控制器

采用 FPGA 作为系统的控制处理核心, 增强了该设计的通用性和灵活性。FPGA 丰富的 I/O 资源, 灵活的编程处理, 极强的接口扩展性, 可以将该设计应用到其他各种接口的嵌入式设备当中, 实现网络通讯<sup>[8]</sup>。该设计中, FPGA 芯片选用 Cyclone 系列 EP1C6Q240C8 芯片。芯片最大可用 I/O 达到 185 个; 可使用的逻辑单元数 5 980 个; 拥有 2 个锁相环; RAM 位数达到 92 160 个。在同类型器件中, 性价比较高, 应用广泛, 满足设计要求。

以太网控制器是设计中的重要器件。目前, 大多数千兆以太网控制器都是采用 PCI (Peripheral Component Interconnect) 或者 PCI-E (Peripheral Component Interconnect Express) 总线接口, 这对资源有限的嵌入式设备引入千兆以太网造成了很大的困难, 设计中选取非 PCI (Non-PCI) 总线接口千兆以太网控制芯片 AX88180, 其内置 10/100/1 000 Mbps 以太网媒体存取控制器 (MAC); 有 40 KBytes 片上 SRAM 网络数据包缓存器, 其中 32 KB 用于从物理层收发芯片接收数据包, 8 KB 用于主机发送数据包到物理层收发芯片, 可以高效地进行数据包的存储、检索与修改; 内置 256 字节的配置寄存器, 用于主处理器控制和参数设置; 硬件支持 IP/TCP/UDP 校验和添加和检查; 支持简化的千兆以太网媒体无关接口 (RGMII); 符合 IEEE 802.3/IEEE 802.3u/IEEE 802.3ab 协议标准, 适用于多种高速网络通讯应用领域。采用的是类似 SRAM 的 16/32 位主接口, 可方便地实现与通用的 16/32 位本地总线接口微处理器的连接, 可以

表 2 网络控制器核心寄存器设置

寄存器	偏移地址	功能	建议值
CMD	0xFC00	命令寄存器	0x0000_0201
MR	0xFC04	中断寄存器	0x0000_0000
TX_CFG	0xFC10	发送配置寄存器	0x0000_0040
TX_CMD	0xFC14	发送命令寄存器	0x0000_0000
RX_CFG	0xFC30	接收配置寄存器	0x0000_0101
MAC_CFG0	0xFC40	MAC 配置寄存器 0	0x0000_8157
MAC_CFG1	0xFC44	MAC 配置寄存器 1	0x0000_6000
RXFILTER	0xFC80	接收数据包过滤寄存器	0x0000_0004

像 SRAM 一样被访问, 控制简便, 为嵌入式设备的千兆以太网接口应用提供了很好的解决方案<sup>[7]</sup>。表 2 为网络控制器核心寄存器设置。

### 2.3 网络控制器驱动和数据处理

在 FPGA 中实现 TCP/IP 协议, 就是要依旧网络协议和以太网 MAC 帧格式, 发送数据时对数据进行封装发包, 接收到网络帧时对网络帧解包。如图 3 所示是以太网 V2 标准 MAC 帧格式, 也是目前最常用的帧格式。它由目的地址、源地址、类型字段、数据报部分和帧检验序列 (FCS) 组成。数据报部分长度一般在 46~1 500 字节之间 (支持巨帧模式的除外)。当通讯中需要 IP/TCP/UDP 协议时, 需要分别占用 20 字节的 IP 数据报协议首部以及 20 字节的 TCP 协议首部 (或者 8 字节的 UDP 协议首部)。通讯过程中, 实现程序要根据各协议的首部格式对数据进行封装或者解包。

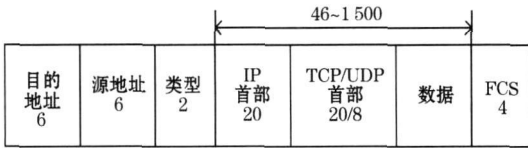


图 3 以太网 MAC 帧格式

网络控制器的驱动主要有网络初始化、数据接收和数据发送 3 个部分。主要通过配置芯片的寄存器来完成上述功能。如表 2 所示为网络控制器主要寄存器及设置。如图 4 所示为 FPGA 主程序流程图。系统上电后, 首先进行系统初始化操作, 在此过程中要完成对网络控制芯片 AX88180 和物理层收发芯片 M88E1111 相应寄存器的配置。通过寄存器的设置, 检测网络链路, 协商传输带宽和工作模式, 建立网络连接, 这是进行网络通讯的基础。网络连接建立完成后, 主程序进入空闲状态, 等待数据发送或者接收响应。当需要发送数据时, 从 SRAM 中读取要发送的数据, 根据协议将数据打包封装成以太网数据帧, 配置网络控制芯片寄存器将封装好的数据帧写入到发送缓存当中, 网络控制芯片会自动根据协议将校验和添加到数据帧相应协议的首部和尾部。然后配置发送, 物理层收发芯片就将网络帧转换成比特流发送到网络中。当有网络帧到达网络控制芯片时, 芯片产生接收中断, FPGA 配置网络控制芯片为读取状态, 从接收缓存中读取接收到的网络帧, 并存入 SRAM 中。根据网络帧的长度和协议类型对网络帧解包, 得到最终的数据部分做相应处理。如图 5 所示为 FPGA 程序时序仿真波形。

### 3 试验验证

为了验证是否满足设计要求, 测量系统的性能指标, 将该系统与计算机网卡相连, 建立 UDP/IP 网络通信链路, 在计算机上采用 Iriis 网络通信分析软件对通信过程进行测试分析。计算机端配置为 Intel Pentium 4 CPU 3.00 GHz 内存 1.00 GB 网卡为 TP-LINK TG-3269 千兆以太网卡。测试过程中, 采用固定长度的以太网数据帧作为通信数据, 分别测试了不同工作模式下发送和接收时的数据吞吐量。如图 6 所示为 Iriis 网络通信分析软件监测到的实时通信带宽数据。从图中可以看出, 网络中每秒传输的数据包数量基本不变, 通信过程连续、稳定, 没有严

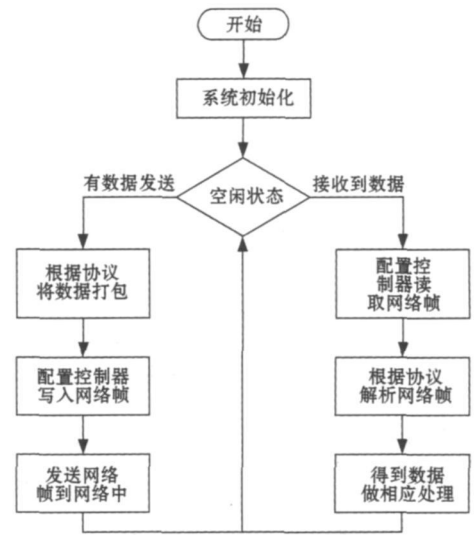


图 4 主程序流程图

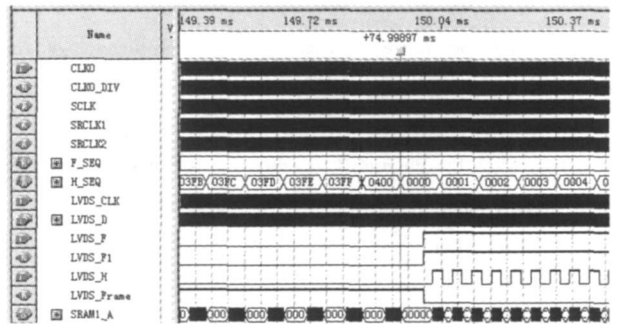


图 5 时序仿真波形

重的丢帧、错帧现象出现。表 3 所示为计算得到的不同模式下的网络接口的实际数据吞吐量。可以看出在 10/100 Mbps 模式下, 数据吞吐量基本可以达到满负荷传输。在 1 000 Mbps 模式下, 数据的传输受限于核心控制单元 FPGA 的运行时钟频率, 系统中 FPGA 运行在 50 MHz 时钟频率下, 如果采用频率更高的时钟将能够达到更高的传输速率, 这已经可以满足大多数嵌入式设备的数据传输要求。

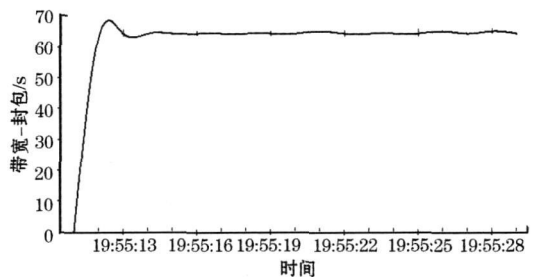


图 6 监测到的实时通信带宽数据

表 3 网络接口数据吞吐量

工作模式	发送吞吐量 M bps	接收吞吐量 M bps
1 000 Mbps 全双工	265.6	238.73
1 000 Mbps 全双工	98.54	98.54
100 Mbps 半双工	98.54	98.54
10 Mbps 全双工	9.85	9.85
10 Mbps 半双工	9.85	9.85

(下转第 47 页)

表 1 温度检测的实验结果

恒温温度	检测温度	误差
30	30.32	-0.32
40	39.55	0.45
50	49.73	0.26
70	70.56	-0.56
90	89.22	0.78

### 3.2 无线传输距离测试

将温度监测前端置于空旷地表,手持巡检装置由近及远地向温度监测前端发送数据接收命令,测试表明在距离 100 m 左右时,信号接收出现问题,有时不能有效地唤醒温度监测前端。当温度监测前端和巡检装置之间隔着一堵墙(非屏蔽)时,有效的信号传输距离缩短,只有约 30 m 左右,不过这个距离已经能够满足系统功能的需要。

### 3.3 温度监测前端功耗测试

对电缆温度监测前端进行的功耗测试结果表明:在待机模式下电流可以达到 10 A 以下,采集存储数据时的电流不大于 0.7 mA,与巡检装置进行通信时,接收数据时电流不大于 13 mA,发送数据时电流不大于 30 mA。根据粗略计算,使用 3 节碱性电池供电可以保证系统正常运行 2 年以上。

由系统测试和实验的结果,各项性能指标基本达成,该系统的设计是基本成功的,基本可以实现电力电缆接头温度无线监测的需要。

## 4 结束语

基于超低功耗微控制器 MSP430 的电力电缆温度监测前端装置的设计研究工作表明:

(1)通过论证,采用数字温度传感器、短距离无线通信技术和超低功耗微控制器组成的电力电缆接头温度无线监测系统的总体方案具有可行性。

(2)系统软件程序设计,侧重低功耗设计,使系统大部分时间处于休眠状态,已被试验证实是有效的。

(上接第 43 页)

## 4 结束语

系统以 FPGA 作为控制处理核心,采用全新的非 PCI 接口的千兆以太网网络控制器,搭建适合嵌入式设备的以太网接口硬件平台,提出软硬件相结合的协议实现方法,使得该设计通用灵活,能满足多种嵌入式设备千兆以太网接入的需求。通过这种方法,已经为多种类型的嵌入式设备成功实现了千兆以太网通讯。实际应用表明,该设计传输距离远,通信速率高。通过引入该设备既提高了通信质量,又简化了系统布线,为嵌入式设备的高速以太网网络通信提供了一种很好的解决方案,有着广泛的应用前景。

### 参考文献:

- [1] 陈国顺,宋新民,马峻,等. 网络化测控技术. 北京: 电子工业出版社, 2006
- [2] 胡晓娅. 基于交换式以太网网络控制系统研究: [学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2006

还需进一步研究和完善的工作是:

(1)通过在电缆沟的实际试验确定系统设计的具体参数和装置设计改进方向。

(2)系统的供电电源从干电池改为通过电磁感应从高压电缆上获取电能的电源。这种方法可以很好地解决地下电缆监测设备所需的长期供电问题。

### 参考文献:

- [1] 王, 刘向军. 城市电力电缆接头温度无线监测系统的设计实现. 四川电力技术, 2007, 30(3): 54-56
  - [2] ZHU Hongli, BAI Liyuan. Temperature monitoring system based on AT89C51 microcontroller. In: Medicine & Education, 2009. ITME 09 IEEE International Symposium on 14-16 Aug., 2009: 316-320
  - [3] 王新超, 潘贞存. 电力电缆接头故障的预警监测系统. 电力自动化设备, 2001(5): 25-28
  - [4] 成永红, 谢恒, 衣立东. 基于热效应的电力电缆及其终端在线监测技术. 高电压技术, 1999, 25(3): 4-6
  - [5] 中华人民共和国建设部. GB50217-94 电力工程电缆设计规范. 北京: 中国计划出版社, 2003, 9
  - [6] WANG Youyuan, CHEN Rengang, LN Shuangqing, et al. Calculation and analysis of the current carrying capability of electric cable based on finite element method. Electrical Insulation and Dielectric Phenomena 2009. CEIDP 09 IEEE Conference on, 18-21 Oct., 2009: 307-310
  - [7] 周晓虎, 周秧, 唐雷, 等. 直埋电力电缆温度场计算模型. 电线电缆, 2007(5): 33-36
  - [8] JONES S, BUCEA G, MCALPINE A. Condition monitoring system for transrid 330 kV power cable. 2004 International Conference on Power System Technology. POWERCON 2004. Singapore 2004. 1282-1287
  - [9] 马国栋. 电线电缆载流量. 北京: 中国电力出版社, 2003
- 作者简介: 杨平(1954), 教授, 主要研究领域为电站自动化和计算机测控技术. E-mail: yangping1201@126.com

- [3] 谢希仁. 计算机网络, 第 4 版. 北京: 电子工业出版社, 2005
- [4] RICHARD STEVENS. TCP/IP 详解(卷 1 协议). 范建华译. 北京: 机械工业出版社, 2004
- [5] GARY R WRIGHT, RICHARD STEVENS. TCP/IP 详解(卷 2 实现). 范建华, 译. 北京: 机械工业出版社, 2000
- [6] 苑玮琦, 林峻楠. 嵌入式以太网接口的研究与实现. 仪表技术与传感器, 2008(11): 59-61
- [7] ASK Electronics Corporation. AX88180 Non-PCI 16/32-bit 10/100/1000 Ggabit Ethernet Controller. [EB/OL]. [2007-5-18]. [2005-05-20]. <http://www.asik.tw>
- [8] KOTOV I V, DEGROAT J E, HERMAN D, et al. Data Acquisition Board With Optical Ggabit Interface. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2006

作者简介: 张伟华(1983), 工学博士研究生, 主要从事网络通讯、网络化测控系统方面的研究。

E-mail: zhangweihuapuma@126.com