

单芯片以太网的开发及其在 电气自动化中应用

李 睿,黄守道,吴桂清

(湖南大学 电气与电子信息工程学院,湖南 长沙 410082)

摘要: 针对传统串行通信方式不能满足电气设备在线检测和继电保护的现实,提出了采用 TCP/IP 技术的实时信息传输方案。系统采用 MC 9S12NE 64 芯片构成嵌入式以太网解决方案。该单芯片集成有 Freescale CPU12 内核和 10/100 Base-T 以太网,只需 1 片 MC 9S 12NE 64 芯片、1 个以太网变压器、1 个 RJ45 接口就能构成最小系统。系统工作在内嵌以太网控制器的驱动的基础上,通信协议采用经改造的 TCP/IP 协议,且设计实现了一个串口(RS-232)转以太网的网关和一个内嵌 Web 服务器。详细讨论了其在备用电源自动投入装置的实时通信和发电机在线监测中的应用。

关键词: 单芯片以太网; TCP/IP; 网关; 嵌入式 Web 服务器

中图分类号: TP 368.1; TN 915.05 **文献标识码:** B **文章编号:** 1006-6047(2006)11-0094-04

0 引言

目前,在电力系统中使用了大量的开关、环网柜、无功补偿装置、抄表装置及控制器等带 RS-232/422/485 串行接口的设备。由于串行通信方式实现方便、系统费用低,所以许多监控系统大都采用串行通信技术实现。这些设备大部分都没有实现集中控制,只能做到本地显示和控制,只能少部分关键点采用电话拨号方式实现远程监控,但无法做到实时监控。怎样改造现有设备使之能适应自动化的需要,怎样构建低成本、高效率网络是热门的研究工作。

本文提出并实现了一个串口(RS-232)转以太网的网关以实现数据集中式管理传输和一个内嵌 Web 服务器以实现分布式监控。

1 系统模块介绍

1.1 硬件系统

系统采用 16 位单芯片以太网解决方案。Freescale 半导体的 MC9S12NE 64 带有集成 10/100 Base-T 以太网媒介接入控制器(MAC)/物理层器件(PHY),可以适应各种数据速率,它还具有灵活的寻址功能,支持不同大小的数据包。带有媒介独立接口(MII)可以扩展其他类型的 PHY^[1]芯片。MC 9S12NE 64 拥有比 8 位解决方案更强的处理能力和更多的存储资源(共享 8 KByte 的 RAM 数据/消息存储区),比 32 位解决方案更加小巧、灵活。

系统硬件构成简单紧凑,最小系统只需要 1 片 MC 9S 12NE 64 芯片、1 个 RJ45 接口和 1 个以太网变压器。

系统的一个重要优势就是单芯片包含了微控制器(MCU)、MAC 和 PHY,使得整个系统的稳定性和性价比更好。

1.2 驱动和协议

TCP/IP 堆栈模型是简化的 OSI 7 层协议。TCP/IP 堆栈模型定义了 TCP/IP 协议和网络接口。

1.2.1 驱动

系统的 TCP/IP 协议是工作在为 MC 9S 12NE 64 片内的以太网控制器编写的底层驱动之上。驱动工作在 OSI 模型的数据链路层,驱动工作包括为 MAC 地址赋值、初始化硬件和为上层协议提供应用编程接口(API)。通过驱动可以在初始化硬件时决定硬件的工作模式;是否启用自动协商模式,10 Mbit 或 100 Mbit LINK SPEED 选择,是否启动全双工模式,以及对收发缓存大小的配置^[1-2]。驱动提供的 API,可以在上层协议中方便调用。

1.2.2 协议

OpenTCP 是一个高鲁棒性和可移植的 TCP/IP 协议和应用层协议的实现。OpenTCP 去掉了许多全功能协议栈中不常用的功能,而保留网络通信所必要的协议机制,减少了对 RAM 和 ROM 空间的占用,需要注意的是 OpenTCP 在堆栈设计上有几处背离了 TCP/IP 的因特网标准(RFC)^[3]。包括:不支持 IEEE 802.3 类型的数据封装、不支持 IP 任选项、不支持 IP 分片;只支持请求回显的网间控制报文协议(ICMP)协议(即 ping);忽略所有 TCP 选项。

只有当应答前一个已接收的 TCP 包之后,下一个 TCP 包才能被接收(即不支持滑动窗口)。

OpenTCP 的其他一些特性包括有基于单一全局数组的发送数据缓冲(net_buf[]),所有需要发送数据的应用都是用它。不支持内存动态分配,由应用负

责处理收发数据。基于事件驱动的应用程序接口,各并发连接采用轮循处理,仅当网络事件发生时,由 listener 函数指针唤起应用程序处理。这样,用户只需关注特定应用就可以了。

协议栈部分功能由应用程序实现(如 TCP 的重发机制,数据包分段和流量控制),由内核设置重发事件,应用程序重新生成数据提交发送,免去了大量内部缓存的占用。

在对 OpenTCP 进行必要的裁减之后,实现基本功能的协议栈编译后只有 14.388 KByte,而 MC 9S12NE64 内部 flash 有 64 KByte。内部 8 KByte RAM 也完全可以满足本文实现功能的需要。

1.2.3 OpenTCP 的接口与服务

整个 OpenTCP 协议栈与底层驱动每一层并不需要知道它的下一层是如何实现的,而仅仅需要知道该层通过层间接口所提供的服务。

底层驱动为上层提供对硬件的操作。例如,对硬件的初始化,为上层协议提供收发数据的服务^[3-4]。对于 OpenTCP,驱动需要提供的主要接口是:对以太网控制器写入 1 个字,写入 1 个字节,写入 1 个字符串;和对应的读出操作。

网络层利用底层驱动提供的服务,并且为上层提供服务。网络层的 process_ip_in() 函数用于对收到的 IP 包进行分发。收到的是用户数据协议(UDP)包则交给 UDP 处理,如果是 TCP 包则交给 TCP 处理。同理,传输层的 UDP 和 TCP 函数也有相应的 process_udp_in 和 process_tcp_in 函数。服务的对象则是应用层。这就是前面提到的服务思想^[5]。

很多协议栈的设计主要用于服务器,它们的数据发送都做得不够好,比如一 TCP/IP 协议栈 UIP 直到 0.9 版本才支持 TCP 协议的主动打开。OpenTCP 提供对 UDP 和 TCP 发送数据的支持。以发送一帧 TCP 数据为例,介绍 OpenTCP 的工作原理。

假设应用层程序有一个 TCP 数据包要发送,并且已经建立好了链路。这就需要传输层提供的服务。将要发送数据报写入全局缓存,然后调用发送函数,把 Socket、缓存地址、数据长度等参数传递给它。在发送函数中,检查给参数的有效性,加入 TCP 标志位,然后调用 process_tcp_out() 函数。process_tcp_out() 函数的作用是在缓存中创建 TCP 报头、计算校验和,然后调用 process_ip_out() 函数,数据报就被传递给了网络层。这样传输层就利用了网络层提供的服务,进一步处理数据报。process_ip_out() 用于进行发送一个 IP 包前期准备工作。这些包括,与地址解析协议(ARP)缓存进行目的 MAC 地址协商;为 send_ip_packet 结构变量赋值(其用于形成 IP 报头);进行 IP 层的校验和计算;通过接口调用底层驱动函数将发送缓存中数据写入以太网控制器;然后通过接口启动硬件发送数据报。

传输层与应用层的接口有一个很重要的设计就是系统为每个数据传输保持一个控制模块,这个模块

由一个结构体实现。它保存了许多重要的参数,比如:目的地址、目的端口号、本地端口号、链接的状态和一个用于事件驱动的函数指针。其中,这个用于事件驱动的函数指针是一个非常巧妙的设计。它相当于一个应用层与传输层的接口;不同的应用层程序可以提供用以实现自己功能的事件监听函数,然后把其函数指针赋给对应控制模块中的函数指针。数据到达时,传输层引擎能够通知相应的应用程序,实现了事件触发。这样传输层能够无差异地为每个应用程序提供统一的服务。OpenTCP 的接口与服务见图 1。

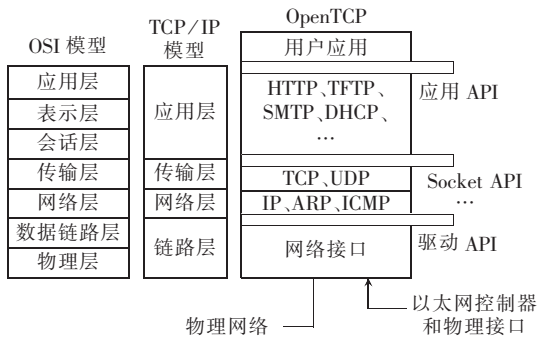


图 1 OpenTCP 的接口与服务
Fig.1 Interface and service of OpenTCP

由上述过程可以看出,服务的概念简化了系统设计,使程序更加模块化,并且调试更加容易。

1.3 2 种应用层功能的实现

在应用层实现了一个串口(RS-232)转以太网的网关和一个内嵌 Web 服务器。

1.3.1 串口转以太网网关的实现

MC 9S12NE64 内嵌有 2 个串行通信接口(SCI)、1 个串行外围接口(SPI),以及 1 个 I2C 总线接口。从原理上可以把上述 3 种串口都转为以太网。而 SCI 转以太网的实现最具有代表性,其他串行接口都可以参照。系统的传输层采用 TCP 协议或者 UDP 协议。发送帧长度、默认定时时间、本地监听端口号都可根据实际情况修改,并且系统支持双向数据传输。

模块由 8 个函数组成,下面分别介绍。

eth_sci_init(void),用于对模块初始化,包括申请 Socket、申请定时器等。

eth_sci_connect(),用于主动连接目的主机。

eth_sci_run(),模块的主程序,需要在 main 函数中周期性调用,用于处理状态跃迁和查询有无新数据需要发送等。

eth_sci_eventlistener(),监听程序,由 TCP 引擎调用。用于处理状态跃迁、接收上位机发送来的数据等。

eth_sci_send(),数据发送程序,供其他函数调用。实现串口到以太网数据发送。

eth_sci_changestate(),状态跃迁函数,供其他函数调用。实现状态机的跃迁。

eth_sci_error(),错误处理函数,供其他函数调用。另外,模块还需要 1 个串口中断处理函数,实现串

口到以太网数据接收和以太网到串口数据发送。

模块设计的一个难点就是状态机的设计^[6]。因为 TCP 协议是一个面向链接的协议,它在收发数据前需要 3 次握手以建立链接,数据发送完成后需要释放链接。所以,要成功地收发数据,模块的状态机需要与 TCP 链路的状态配合起来。模块有 7 个状态,介绍如下:

- ETH_SCI_STATE_ENABLED 模块使能;
- ETH_SCI_STATE_CLOSE 模块关闭;
- ETH_SCI_OPEN_REQUESTED 请求建立链路;
- ETH_SCI_CONNECTIONOPEN_SENT 请求已发送;
- ETH_SCI_STATE_CONNECTED 链路建立;
- ETH_SCI_DONERQ 数据收发完成请求;
- ETH_SCI_DONE 数据收发完成。

状态机模型示意图如图 2 所示。

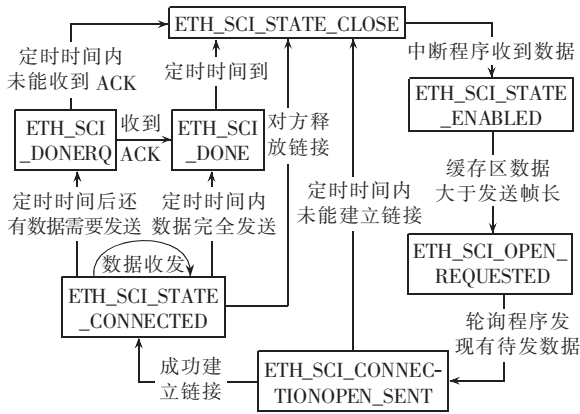


图 2 状态机模型示意图
Fig.2 Model of state machine

试验证明:系统可以稳定高效地完成双向的数据收发,对于现有的环网柜、无功补偿装置、抄表装置等大量带有 RS-232 通信接口的设备,通过此网关装置就可以使用标准网络进行数据交换。

1.3.2 嵌入式 Web 模块的实现

嵌入式 Web 服务器首先打开 80 端口的监听,一旦有客户机要求连上,模块会给它分配一个连接项,接着等收到客户机浏览器发出的“GET HTTP...”请求后,将数据填入网页模板,生成一幅新的网页发给客户机。因为这幅网页的大小已经超过 OpenTCP 的最大段长(MSS),因此,在堆栈第 1 次实际只发出了 MSS 个字节,在等到下一次轮循到该连接并且收到上次数据包的命令正确应答(ACK)时,发送剩下的网页数据。在连接处于空闲时,应用程序可以生成新的数据,经格式处理后再存到数据队列中。而在这个队列中保存着当前 1 min 数据,以便下次更新网页时使用。在网页中添加了更新按钮,一旦浏览器用户点击了按钮,浏览器会自动发出公共网关接口(CGI)请求,模块收到后,立即发送包含最新数据的网页。如果接收 ACK 超时,它会自动设置重发标志,应用程序中可以测这个标志,重新生成网页并发送。一旦用户关闭了浏览器,模块也会自动检测到这一事件,

并且释放掉这个连接项^[7]。

Web 服务器需要根据客户机的不同请求确定返回的页面。这涉及到 2 个问题:第 1,网页在 Flash 中怎样存储;第 2,系统怎样找到所需要的网页。对于第 1 个问题,可以将整个网页转化为相应的二进制码。OpenTCP 提供的工具 CEncoderBeta 就是实现这种功能。把一个文件以二进制的形式存储在一个 *.C 文件的数组里,并且另外生成一个包含这个数组声明的 *.H 的文件。这样就可以把这 2 个文件与系统文件一起编译。第 2 个问题实际上就是怎样实现一个文件系统。这里,可以为每个网页文件构造一个结构体,用于存储这个文件的 hash 值(用来搜索此文件)、文件的起始地址和文件的长度。然后,再用一个结构体数组存储这个结构体^[8]。这样就实现了一个简单的文件系统。

2 在电气自动化中应用

本文举例介绍系统在电气自动化中的 2 种应用,其一是用于备用电源自动投入装置(简称备自投装置)之间的监控报警信号传输。另一个是用于发电机射频监测仪监测信息作为 Web 形式发布,实现对发电机工作状态的远程监测。

2.1 基于 TCP/IP 的备自投保护装置

由于高炉风机备自投装置的动作时间在时段配合上要求较低,时段差一般均需数秒,以太网之间的信息传递时延不会影响备自投装置之间的时段配合,因此没有必要采用信息延时非常短的专用高频或光纤通信通道,可以借用串口转以太网网关实现备自投装置之间的信息传输。

与常规的同类型备自投装置相比,本装置的主要特点是应用了基于 TCP/IP 的实时通信技术。主供电源和备自投装置都有各自的 IP 地址,装置之间的数据采用无链接的 UDP 协议,这样可以避免建立链接的延时,实现实时数据传输^[9]。

备自投装置程序流程图如图 3 所示。

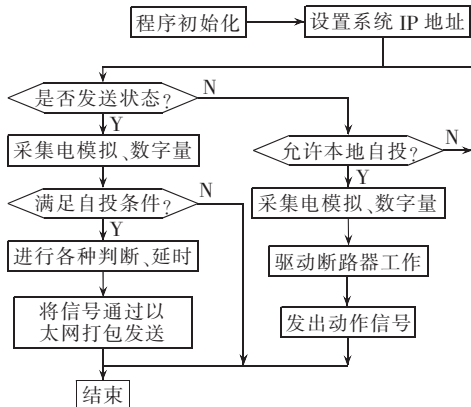


图 3 备自投装置程序流程图
Fig.3 Flowchart of automatic bus transfer equipment program

由于备自投采用数字技术,检测判断过程迅速,

并通过 UDP 传输数据,选择快速动作的断路器,所以完成整个备自投过程的时间在 180 ms 内。经试验,本装置自投成功率达 100%。通过多次模拟测试结果,得出从启动备自投装置到出口跳开原电源进线开关、合上备用电源的母联开关共计时不超过 145 ms,加上检测启动装置的时间,全过程不超过 180 ms,完全满足要求。

2.2 基于 Web 服务器的发电机在线监测

SJY 型射频监测仪根据发电机内任意部位放电所产生的高频放电电流都经过定子星形绕组的中性点流入大地的原理,用接入中性点引线回路专门设计的高频变流器接收信号。系统通过串口接收发电机射频监测仪的数据,然后利用此实时数据构造网页^[10],以实现发电机工作状态的远程监测。

3 测试结果

对于串口转以太网模块,在试验中,地址解析协议(ARP)收发速率可达到 87.3 Mbit/s(100 Mbit/s,全双工,只含驱动器和无其他软件和节点)。一般而言,估计 UDP 传输为 15 Mbit/s, TCP 传输为 5 Mbit/s。这样的速率足以满足大多数串口设备互联的需要,甚至可以同时传输 2 个 SCI 的数据流。

对于嵌入 Web 模块,可以同时支持 4 个并发连接,1 个监听端口。ARP 表项,定时器个数都可以自行配置。测试结果表明,服务器可以很好地支持浏览器的访问和数据交互。

参考文献:

- [1] Freescale Semiconductor. MC9S12NE64V1 datasheet, Rev1.0[EB/OL]. [2005-05-15]. http://www.freescale.com/files/microcontrollers/doc/fact_sheet/MC9S12NE64FS.pdf.
- [2] TORRES S. AN27001: basic web server development with MC9S12NE64 and CMX-MicroNet TCP/IP stack[EB/OL]. [2005-04-28]. <http://www.cmx.com/freescale/AN27001.pdf>.
- [3] STEVENS W R. TCP/IP 详解卷 1: 协议[M]. 范建华, 胥光辉, 张

涛,等,译. 北京:机械工业出版社,2003.

- [4] 李胜后,钟蕾. TCP/IP 协议及其安全性分析[J]. 信息技术, 2005,29(4):99-101.
LI Sheng-hou,ZHONG Lei. TCP/IP protocol and its safety analysis[J]. Information Technology, 2005,29(4):99-101.
- [5] 李农. 因特网技术在嵌入式系统中的应用[J]. 测控技术, 2000, 19(4):15-16.
LI Nong. Application of Internet technology for embedded system[J]. Measurement & Control Technology, 2000,19(4):15-16.
- [6] 陈学泉,关宇东. 嵌入式 TCP/IP 协议单片机技术在网络通信中的应用[J]. 电子技术应用, 2002,28(8):48-49.
CHEN Xue-quan,GUAN Yu-dong. The application of embedded TCP/IP protocol in network communication[J]. Application of Electronic Technique, 2002,28(8):48-49.
- [7] BENTHAM J. 嵌入式系统 Web 服务器——TCP/IP 编程[M]. 陈向群,译. 北京:机械工业出版社,2003.
- [8] 汪江,陆颂元. 发电设备远程监测诊断系统的 Web 技术实现[J]. 动力工程, 2004,24(5):684-689.
WANG Jiang,LU Song-yuan. Research on Web-based remote monitoring and fault diagnosis system for power plant equipments[J]. Power Engineering, 2004,24(5):684-689.
- [9] 胡定辉,吴畏. 嵌入式以太网在微机继电保护装置中的应用[J]. 低压电器, 2004(4):32-34,46.
HU Ding-hui,WU Wei. Application of embedded Ethernet in relay protection device[J]. Low Voltage Apparatus, 2004(4):32-34,46.
- [10] 刘立芳,齐小刚. 远程设备实时监控管理系统的设计与实现[J]. 计算机工程, 2000,26(4):91-92.
LIU Li-fang,QI Xiao-gang. The design and implementation of an equipment's real-time remote monitoring and controlling system[J]. Computer Engineering, 2000,26(4):91-92.

(责任编辑:汪仪珍)

作者简介:

李 睿(1983-),男,江西进贤人,硕士研究生,研究方向为工控网络、故障诊断(E-mail:mulang@gmail.com);

黄守道(1962-),男,湖南资兴人,副教授,博士研究生,主要研究方向为电机智能控制、工业过程控制及自动化;

吴桂清(1966-),男,湖南临澧人,副教授,博士研究生,主要研究方向为嵌入式系统、数字信号处理。

Development of singlechip Ethernet and its application in electrical automation

LI Rui,HUANG Shou-dao,WU Gui-qing
(Hunan University,Changsha 410082,China)

Abstract: As the traditional serial communication could not meet requirements of on-line detection and relay protection of electrical devices,a scheme based on TCP/IP technique is presented for real-time data transmission. MC9S12NE64 chip is used to construct embedded Ethernet system,which integrates a Freescale CPU12 core and a 10/100 Base-T Ethernet interface. The smallest system only needs one MC9S12NE64 chip,one Ethernet transformer and one RJ45 connector. Based on the hardware driver of integrated Ethernet MAC,the modified TCP/IP stack protocol is adopted. A gateway of RS-232 to Ethernet and an embedded Web server are designed. These applications to the real-time communication of automatic bus transfer equipment and the on-line monitoring of generator are discussed in detail.

Key words: singlechip Ethernet; TCP/IP; gateway; embedded Web server