

文章编号:1001-9081(2011)10-2617-04

doi:10.3724/SP.J.1087.2011.02617

# 基于 DSP 和 FPGA 的网络转换网关

陈 明, 宋 宝, 唐小琦

(华中科技大学 国家数控系统工程技术研究中心, 武汉 430074)

(diwujichenm@163.com)

**摘要:**以高性能的 DSP + FPGA 作为核心处理芯片构成硬件平台, 开发了一种实时性强的现场总线 NCUC-Bus 与以太网转换的嵌入式网络转换网关。该网关在网络的物理层和数据链路层完成协议转换, 解决了现场总线和以太网无法实现直接通信的问题。通过实验证明, 该设计的可行性和有效性达到设计要求。

**关键词:**现场总线; 以太网; 嵌入式网关; 协议转换; 数字信号处理器; 现场可编程门阵列

中图分类号: TP393.03; TN915.05 文献标志码:A

## Network conversion gateway based on DSP and FPGA

CHEN Ming, SONG Bao, TANG Xiao-qi

(National Numerical Control System Engineering Research Center, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan Hubei 430074, China)

**Abstract:** With Digital Signal Processor (DSP) and Field Programmable Gate Array (FPGA) adopted as the kernel processors, the embedded network conversion gateway of high real-time was designed to realize the conversion between fieldbus and Ethernet. The conversion was finished on the physical layer and the data link layer, and the problem of direct communications between fieldbus and Ethernet was solved. The experimental results indicate that the feasibility and effectiveness of the design satisfy the requirements.

**Key words:** fieldbus; Ethernet; embedded gateway; protocol conversion; Digital Signal Processor (DSP); Field Programmable Gate Array (FPGA)

## 0 引言

现代数控技术朝着网络化方向发展, 通过网络将数控机床与企业局域网以及更外延的 Internet 连接起来, 构成一个集网络制造、远程监控、远程诊断与维护于一体的现代制造系统是数控技术发展的重要方向<sup>[1-3]</sup>。在机床内部, 常使用现场总线将数控系统、伺服驱动器、I/O 单元等部件连接构成一个全数字控制的通信系统<sup>[4]</sup>。现场总线与标准的以太网有不同协议结构和数据帧格式, 导致两者之间无法进行直接通信, 成为远程计算机与数控机床通信的壁垒。文献[5]设计了一种实现 PROFIBUS-DP 与 MODBUS 转换的协议转换网关; 文献[6]设计了一款实现以太网与 CAN 现场总线转换的网关, 上述文献提到的网关实现的基本思想都是在网络物理层实现传输介质的转换, 在应用层完成网络协议转换。上述网关都是基于特定应用开发的设备, 对数据采样速率要求不高, 不适合应用于实时性强的数控领域。因此, 开发一种实时性强、应用于数控机床领域, 可实现数控机床与远程计算机通信的网络转换网关, 提高网络通信的实时性具有重要意义。

本文设计了一款基于数字信号处理器 (Digital Signal Processor, DSP) 和现场可编程门阵列 (Field Programmable Gate Array, FPGA) 双核架构的嵌入式网络转换网关。该网关提供 1 个标准的以太网接口和 4 个现场总线通信接口, 利用软硬件相结合的处理方式, 在网络协议的物理层和数据链路层实现协议格式的转换。这种实现方案可以显著提高数据处理速度, 具有处理灵活、可扩展性强的特点, 能够满足远程计

算机与数控机床通信的功能要求。

## 1 嵌入式网络转换网关工作原理

通常, 异构网络需要一个中间设备才能实现互联, 这个中间设备实现不同网络协议之间的转换, 也称为协议转换器<sup>[7]</sup>。不同网络协议在物理层定义了不同的传输介质, 在数据链路层定义了不同的数据转发方式, 协议转换器应忽略传输介质和数据转发方式的差异, 直接对数据进行操作。以太网中, 网关是常见的协议转换器之一, 通常工作在网络层及以上。以太网和现场总线属于两种完全不同类型的网络, 具有不同的协议结构和数据格式。以太网采用标准的 ISO/OSI 7 层参考模型, 数据按照标准的 TCP/IP 协议数据结构封装<sup>[8]</sup>; 现场总线只保留了 ISO/OSI 7 层参考模型中的物理层、数据链路层、应用层<sup>[9]</sup>。根据网关工作原理<sup>[10]</sup>可知, 传统的网关无法实现以太网和现场总线的协议转换。因此本文设计了一种嵌入式网络转换网关, 该网关工作在网络的物理层和数据链路层, 通过直接操作数据完成现场总线和以太网的转换。

嵌入式网络转换网关的工作原理如图 1 所示, 网关接收源协议完整的数据, 在数据链路层分析源协议的数据帧格式, 去除数据控制信息, 并提取出有效的用户数据, 再按照目标协议的数据帧格式, 在其数据链路层封装为新的数据, 最后通过目标协议对应的物理层接口把数据发送到目标设备。这种网关实现方案在网络物理层完成传输介质的转换, 在数据链路层完成数据格式的变换, 能有效地实现以太网和现场总线透明的数据传输。

收稿日期:2011-04-22;修回日期:2011-06-13。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50875099;20100192);国家重大科技专项(2010ZX0417-011)。

作者简介:陈明(1986-),男,四川广安人,硕士研究生,主要研究方向:数控;宋宝(1974-),女,湖北黄冈人,副教授,博士,主要研究方向:数控、交流伺服驱动;唐小琦(1957-),男,湖南邵东人,教授,博士生导师,博士,主要研究方向:数控、交流伺服驱动、非线性运动控制。

本设计采用的现场总线是 NCUC-Bus 现场总线,以太网为基于 TCP/IP 协议的标准以太网。

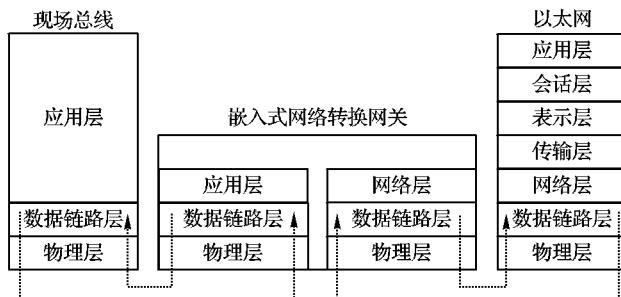


图 1 嵌入式网关结构示意图

## 2 协议结构分析

### 2.1 现场总线协议结构分析

NCUC-Bus 现场总线,是由武汉华中数控、大连光洋、广州数控、沈阳数控、浙江中控 5 家公司联合研发的具有自主知识产权的强实时现场总线协议。该协议基于快速以太网,支持双绞线和光纤通信介质;采用主-从通信方式,网络中包含一个主站设备(主站)和多个从站设备(从站);支持环形和线形网络拓扑结构。

NCUC-Bus 协议数据报文格式如图 2 所示,每帧数据包含

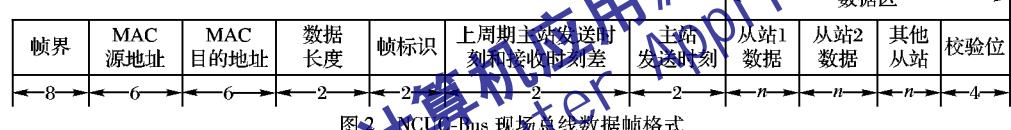


图 2 NCUC-Bus 现场总线数据帧格式

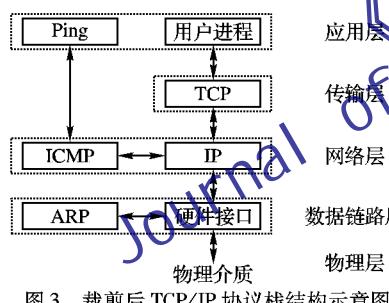


图 3 裁剪后 TCP/IP 协议栈结构示意图

## 3 网络转换网关设计与实现

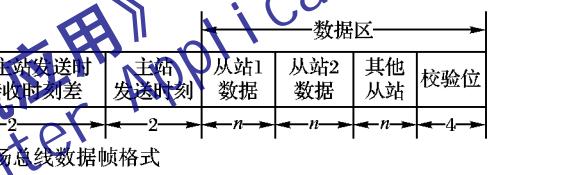
嵌入式网络转换网关的硬件平台结构主要包括 DSP、FPGA 和相关外围接口电路,软件程序主要包括 DSP 的协议

8 个字节帧界,6 字节 MAC 源地址(主站 MAC),6 字节 MAC 目的地址(从站 MAC),2 个字节数据长度,2 个字节帧类型标识(CMID),2 个字节上周期主站帧发送和接收时刻差,2 个字节主站帧发送时刻,可配置的 n(n ≥ 1) 字节从站数据,4 个字节的校验位。

### 2.2 以太网协议结构分析

通常应用于传统以太网中的 TCP/IP 协议,协议栈结构复杂,资源消耗量大。一般情况下,嵌入式网络转换网关系统资源有限,难以实现完整的 TCP/IP 协议栈,而且由于系统网络结构单一,不涉及复杂的路由选择,只需要实现最基本的通信功能就完全满足实际需求。因此,有必要对 TCP/IP 协议栈进行适当的裁剪,在满足通信功能的前提下,又不增加系统负担,满足系统功能需求。

裁剪后的 TCP/IP 协议栈结构如图 3 所示,实现的协议包括 ARP 协议、ICMP 协议、IP 协议、TCP 协议,其中 ARP 协议实现 IP 地址与 MAC 地址映射,ICMP 协议完成 ping 命令的连通性测试,IP 协议是 TCP/IP 协议族中最核心的协议,所有的 TCP、UDP、ICMP 等数据都以 IP 数据报格式传输,TCP 协议向应用层提供一种面向连接的、可靠的字节流服务。本设计中网关作为服务器端,只被动响应远程终端的连接命令,不主动发起连接。经过裁剪后的 TCP/IP 协议栈结构清晰,资源消耗少,达到了设计要求。



转换模块、数据采集模块和 FPGA 的数据接口电路模块。

### 3.1 网关硬件平台

硬件平台采用 DSP + FPGA + PHY 结构,如图 4 所示,主要部件包括主控制器 DSP、辅控制器 FPGA、光纤端口、RJ45 端口。

本设计包含 4 个光纤端口,主要用于连接 NCUC-Bus 现场总线的现场设备,例如:其中一个端口可连接 NCUC-Bus 现场总线的主站,其他端口连接从站设备如伺服驱动器等。本设计包含一个 RJ45 端口,用于实现远程计算机和本地网关的通信。主控制器采用 TI 公司的 TMS320F2812<sup>[11]</sup>,该 DSP 芯片有 4K × 8 bit 的引导 ROM、18K × 16 bit 高速 RAM、128K × 16 bit 可加密 FLASH,最高工作频率可达 150 MHz。DSP 完成

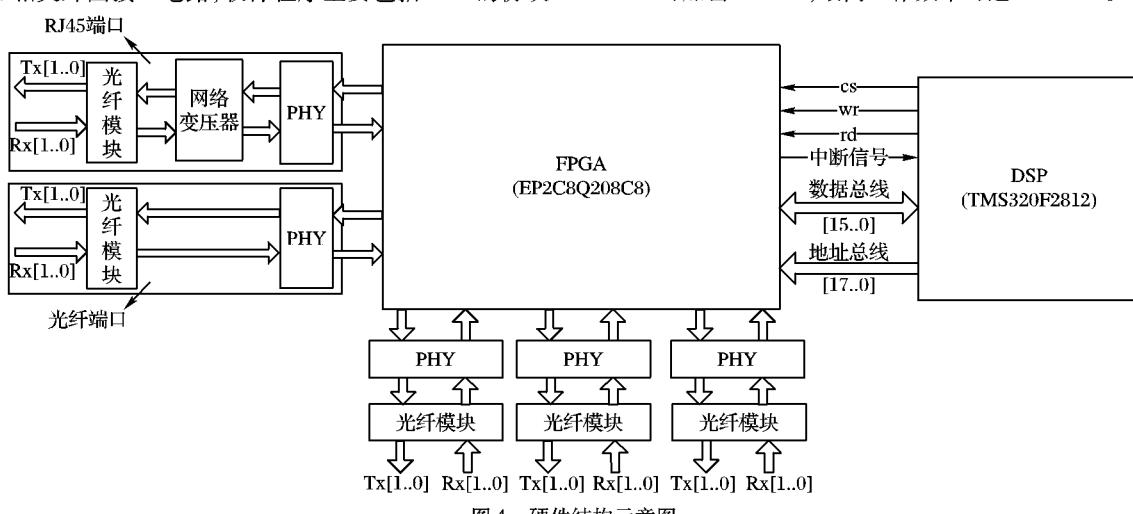


图 4 硬件结构示意图

的主要功能有实现嵌入式 TCP/IP 协议栈;以及 NCUC-Bus 现场总线协议与 TCP/IP 协议的转换。辅控制器 FPGA 选用 Altera 的 Cyclone II EP2C8Q208C8,该芯片是具有 8 256 个逻辑单元,36 个 M4K RAM 块,最高工作频率可达 260 MHz。辅控制器 FPGA 作为现场总线和以太网通信链路接口的控制核心,主要实现 NCUC-Bus 现场总线和以太网链路层功能,完成数据链路的建立、维持、拆除,实现数据的检错和纠错功能。

### 3.2 网关软件设计

嵌入式网络转换网关软件设计的关键是正确实现不同协议之间的数据帧打包和解包功能,保证每一帧数据实时、可靠地传输到目标设备。协议转换处理涉及的数据缓冲区,主要

包括数据的接收缓冲区、发送缓冲区及对应的寄存器缓冲区。数据缓冲区用于暂存以太网和总线发送和接收的数据。寄存器缓冲区用于存储协议转换的控制信息,如源协议数据长度、发送数据长度、发送使能信息、接收使能信息等。

本设计中 FPGA 负责 NCUC-Bus 现场总线和以太网数据接口处理,具体有为端口通信构建一条畅通的通信链路,实现不同端口之间的数据正确发送或接收,同时产生对应的状态标识位供 DSP 查询。DSP 完成协议转换,实现不同协议数据的打包和解包功能,例如根据远程计算机的数据采集命令,读取从站的位置、电流、速度等信息。DSP 主要程序流程如图 5 所示。

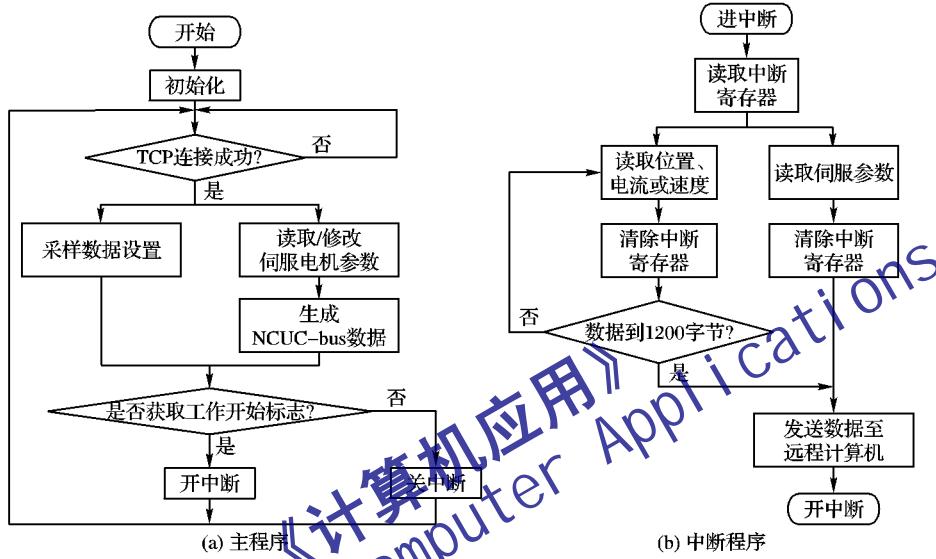


图 5 DSP 程序流程

## 4 实验结果

将本设计运用到数控系统中,构成如图 6 所示的数据采集系统。本文主要介绍伺服电机参数读取和伺服电机数据采集功能。

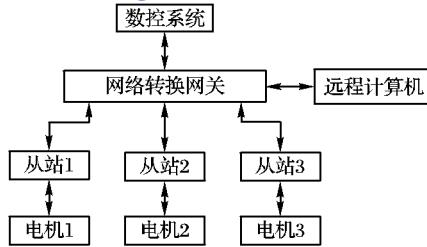


图 6 数据采集系统示意图

伺服电机参数读取需要根据远程计算机命令读取指定电机的某个伺服参数。图 7 为通过 wireshark 数据抓包工具获取的以太网数据,图 8 为通过 quartus ii 内置的 signaltap 工具采集的对应伺服参数。根据 wireshark 软件的计时功能可知,从远程计算机发出命令到读取到伺服参数值的时间约为  $178 \mu\text{s}$  ( $2.242.018\ 242\ \text{s} - 2.242.018\ 064\ \text{s} = 0.000\ 178\ \text{s}$ )。

伺服电机数据采集需要根据远程计算机命令采集某个电机的指令位置、实际位置、反馈速度等参数信息。指令位置和实际位置显示如图 9 所示。

实验结果表明嵌入式网络转换网关正确地实现了 NCUC-Bus 现场总线和以太网的协议互相转换,

远程计算机可以成功地采集到所需电机数据,并根据需要实时读取伺服电机的参数,具有极高的实时性。该网关已成功应用于华中数控的 HNC-8 数控系统。

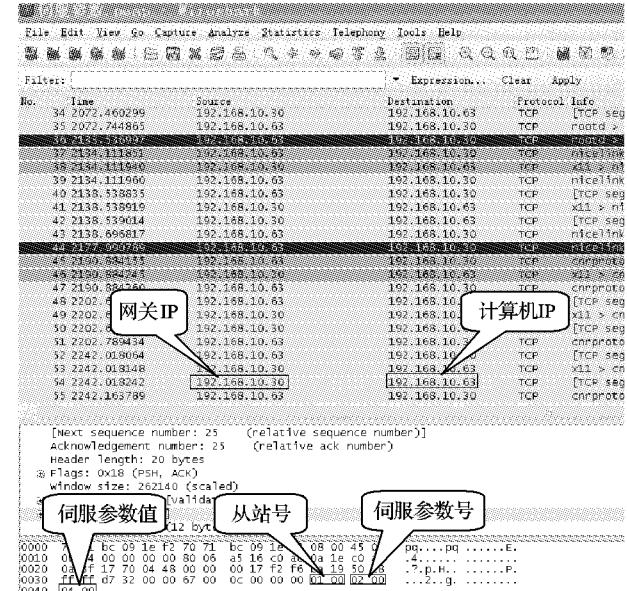


图 7 伺服参数读取的以太网数据

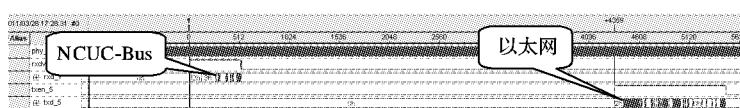


图 8 伺服参数读取时序

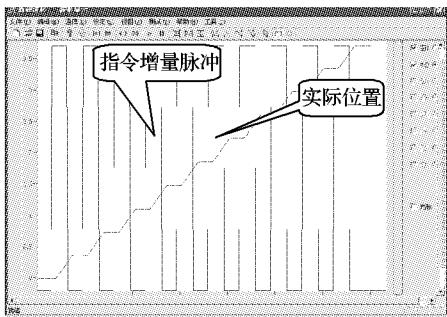


图 9 电机指令位置和实际位置显示图

## 5 结语

本文设计的嵌入式网络转换网关实现了 NCUC-Bus 现场总线和以太网的互联,具有较强的便携性和灵活的网络结构配置功能。在基于 NCUC-Bus 现场总线的数控系统中,可通过此嵌入式网络转换网关,直接在远程计算机与数控系统总线链路上搭建一条透明的传输链路,为远程计算机实时的监控车间机床工作状态,或根据其加工状态做出适当的调整,提供了一种通信策略。同时,也为开发其他现场总线协议转换网关提供了参考。

## 参考文献:

[1] 崔贵波,吴伏家.现代数控技术的发展动态[J].机械管理开发,

(上接第 2611 页)

## 3 实验结果及性能分析

使用 Xilinx 平台工作室(Xilinx Platform Studio, XPS)的基础系统构建向导新建一个基于 XUP Virtex-II Pro 开发系统的测试工程;再使用 Create and Import Peripheral Wizard 向导把视频预处理 IP 核导入到 XPS 的 IP Catalog 目录;然后在工程中添加该 IP 核,连接总线、端口,配置地址,并在工程约束文件中添加管脚约束等。综合、实现之后生成硬件比特流,与编译、链接生成的软件比特流合并,生成配置比特流文件,最后下载到 FPGA 中运行。图 4 显示了实际运行边缘检测的效果。查看工程的资源报告,得到 IP 核的资源占用情况如表 1 所示。

表 1 IP 核资源占用情况

资源名称	数量
Slice	540
Slice Flip Flop	665
4 input LUT	774
BRAM	10
MULT18X18	5
GCLK	5

通过测量得到像素时钟信号的频率瞬态值为 27.03 MHz,根据 ITU-R BT.656 标准,一行视频流包括 1728 个字,一帧图像包含两场,共 625 行,则 IP 核对一帧图像进行边缘检测所需时间为 40 ms。本设计所用的模拟摄像头为 PAL 制式,也是每帧 40 ms 图像,因此证明 IP 核实现了实时预处理视频。另外,视频信号的测量必须注意终端匹配的问题<sup>[4]</sup>。

## 4 结语

本设计采用新的 FPGA 开发技术,利用 System Generator 工具在 FPGA 上实现边缘检测算法,并且封装成 IP 核。实验

- 2008, 23(4): 3–4.
- [2] 路勇, 姚英学, 董申. 基于客户/服务器模式的数控加工单元远程监控系统研究[J]. 计算机集成制造系统, 2000, 6(3): 67–70.
  - [3] 周义刚, 何岭松. 在嵌入式 PC 上实现数控机床的网络监控和远程诊断[J]. 机床与液压, 2004(10): 270–273.
  - [4] 张向利. 基于以太网的数控系统现场总线技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
  - [5] 胥军, 方彦军. 嵌入式现场总线协议转换网关开发[J]. 计算机工程, 2006, 6(12): 255–257.
  - [6] 邓卫, 裴玮, 齐智平. 基于 ARM 技术的以太网与 CAN 现场总线协议转换网关的设计与实现[J]. 机电一体化, 2007, 13(8): 28–33.
  - [7] GREEN P E. Protocol conversion [J]. IEEE Transactions on Communications, 1986, 34(3): 257–268.
  - [8] STEVENS W R. TCP/IP 详解卷 1: 协议[M]. 范建华, 胥光辉, 译. 北京: 机械工业出版社, 2000.
  - [9] 阳宪惠. 现场总线技术及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
  - [10] 安淑芝. 网络互连设备实用技术教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
  - [11] 苏奎峰, 吕强, 常天庆, 等. TMS320X281X DSP 原理及 C 程序开发[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008.

结果表明,IP 核对一帧分辨率为  $720 \times 576$  的工件灰度图像进行边缘检测所需时间仅为 40 ms,能够实时预处理视频。本设计的创新之处在于相对于别的以硬件逻辑的形式实现图像处理算法<sup>[5–6]</sup>,本文提出以 IP 核的形式实现,以达到 IP 复用的目的。这样可以提高设计能力、节省研发人员、缩短产品开发时间,更好地利用现有的技术,降低成本。



图 4 边缘检测效果

## 参考文献:

- [1] 李群, 唐景林. 利用 CCD 测量工件表面应变的研究[J]. 传感技术学报, 2005, 18(4): 756–758.
- [2] 郭春辉. 基于多 DSP 的 H.264 高清视频实时编码系统[J]. 现代电子技术, 2010, 33(5): 135–139.
- [3] APPIAH K, HUNTER A. A single-chip FPGA implementation of real-time adaptive background model[C]// IEEE 2005 Conference on Field Programmable Technology. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2005: 95–102.
- [4] LIN HUI, WU LIMING, LIU JUNXIU. Overshoot and undershoot control for signal generator[C]// 2010 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2010, 2: 864–867.
- [5] 何振琦, 李光明, 张慧琳, 等. 高速图像采集系统的研究及 FPGA 实现[J]. 计算机应用, 2010, 30(11): 3094–3096.
- [6] 熊志辉, 陈立栋, 张茂军, 等. 用逆向波形分析实现 DSP 与 FPGA 间双核 DMA 通信[J]. 计算机应用, 2008, 28(10): 2693–2695.