

龙芯 1 号通用 CPU 芯片的研制^{*}

唐志敏

计算技术研究所 北京 100080)

摘要 龙芯 1 号是我国自行研制的具有自主知识产权的通用 CPU 芯片,居国内通用 CPU 芯片研制领先水平。文章概要地介绍了龙芯 1 号的研制目标和总体思路、研制过程、取得的成果及性能评测情况以及进一步应用推广的设想。

关键词 龙芯 1 号, CPU 芯片

1 研究目标和总体思路

龙芯 1 号通用 CPU 芯片是在中国科学院知识创新工程方向性项目“高性能通用 CPU 芯片研制”和“十五”863”计划重点课题“高性能通用 CPU 芯片设计”支持下,完成的阶段性成果。研制龙芯 1 号通用 CPU 芯片的主要目标是:初步掌握深亚微米 CMOS 工艺条件下通用 CPU 芯片设计的关键技术,开发可实际运行的 CPU 芯片和样机系统,走通从微体系结构设计、逻辑设计、可测性设计、综合、仿真验证、物理设计到样机开发的完整流程,锻炼和培养一支高水平的 CPU 芯片设计队伍,为进一步研制高性能通用 CPU 芯片,并在市场上大规模地推广龙芯系列 CPU 芯片奠定基础。

龙芯 1 号通用 CPU 芯片研制的总思路是:充分利用计算技术研究所系统方面积累的技术优势,走兼容的道路,稳扎稳打,逐步推进。在具体实施上,我们充分采用软硬件协同设计的方法,从体系结构设计、C 模拟器设计、RTL 设计、FPGA 硬件验证、逻辑综合,到物理设计形成最终的版图,各个阶段都进行了详细的功能验证,确保设计的成功;CPU 设计、主板设计和软件开发移植齐头并进,保证最终成果的可用性和可集成性。在计算技术研究所较少积累的领域,尤其是在高速芯片的物理设计方面,我们与优势单位——微电子中心密切合作,保证了项目的顺利进行。

2 完成的主要研究开发工作

2.1 体系结构设计

根据未来应用的需求和对已有 CPU 体系结构的分析,我们选择了与 MIPS 指令系统兼容的设计方案,在微体系结构上进行了大胆的创新。除了采用动态流水线结构以提高性能外,还在芯片内增加了抵抗缓冲区溢出这种最常见的网络攻击手段的硬件机制。体系结构设计结束的标志是完成一个用 C 语言写的模拟器,在该模拟器上可运行 Linux 操作系统和一些应用软件。

2.2 RTL 设计与 FPGA 验证

根据 C 模拟器对 CPU 体系结构的详细描述,Verilog 硬件描述语言完成寄存器传输级(RTL)的设计。完成 RTL 设计后,我们又在 Verilog 仿真平台上成功地运行了 Linux 操作系统。然后再综合并形成 FPGA 的烧制文件。利用基于 FPGA 的硬件验证环境运行速度快(工作频率可达到 12—15MHz)、支持完整的系统软件和运行环境的特点,我们对龙芯 1 号的功能和性能进行了详细的分析和验证,根据存在的性能瓶颈和功能缺陷,对微体系结构又进行了多次修改。

2.3 可测性设计

可测性设计是 CPU 设计的重要环节,对保证流片成功、提高量产成品率、降低芯片测试成本都有重要作用。龙芯 1 号的可测性设计主要包括 4 部

^{*} 收稿日期:2002 年 10 月 21 日

分内容:芯片的 JTAG 设计、扫描链插入、存储器自测试(BIST)和测试向量生成。

2.4 仿真验证

除了采用 FPGA 进行硬件验证外,还结合测试码自动生成(ATPG)方法,加强对路径覆盖率的检查。我们不仅在逻辑仿真时运行包括 Linux 操作系统和许多实用程序在内的测试代码,甚至在布局布线参数反提取后,可以继续启动 Linux 操作系统。每次修改芯片的逻辑时,都要重复这样漫长的验证过程。同时,我们也对这些验证用代码进行了覆盖率分析,在不足的地方,采用 ATPG 方法生成一些补充的测试代码。最后,结合程序性功能验证方法和 ATPG 方法,形成提交测试台使用的测试向量。

另外,在芯片物理设计过程中,我们也采用了形式化的验证方法。

2.5 物理设计

龙芯 1 号物理设计中,解决了两个主要问题:①超深亚微米集成电路的设计流程。我们借鉴了其它单位、许多集成电路设计企业和 Foundry 的参考流程,结合龙芯 1 号的实际需求及已有的 EDA 工具,实现了自己的设计流程,并成功流片。②0.18 微米高速集成电路设计中的信号完整性分析。信号完整性问题在频率提高、线宽变窄后,日益突出,如果解决不好,芯片很难稳定工作。我们具体完成了两种不同的实现方案,其中的一种更保守一些。流片结果表明,它们在信号完整性方面,表现都很好。

2.6 系统开发

龙芯 1 号 CPU 芯片可以运行在 P6032 开发板上。但该板工作频率不到 100MHz,且价格很贵(约 5 000 美元),不利于推广应用。因此,我们针对龙芯 1 号的实际需求,开发了配套的主板,并根据支持 Linux 和其它操作系统内核的要求,开发了主板上的 BIOS。

因为龙芯 1 号兼容 MIPS 指令系统,在软件开发与移植原理上没有困难,但工作量比较大,需要大量人力和资源。目前龙芯 1 号的主导操作系统是 RedHat Linux 7.1 版,增加了中文支持。同时移植了 X 窗口系统和包括浏览器、文字处理器等在内的一批实用程序。MPEG 视频播放、IPV6 防火墙、视频服务器、灵巧网关等应用软件也移植成功。

另一个值得一提的是 VXWORKS 操作系统的移植成功。龙芯 1 号能够支持这个用量最大的实时操作系统,为该款芯片在实时过程控制领域的推广应用建立了基础。

2.7 芯片研发技术支撑体系的建立

这部分工作贯穿龙芯 1 号的整个设计过程,对芯片的顺利完成起了重要的保障作用。主要工作包括:①逐步建立较完整的超深亚微米集成电路 EDA 设计环境;②选择代工厂和单元库提供商,并得到代工厂的认可,成为其 0.18 微米 CMOS 工艺的正式客户,从而得到完整的技术支持;③MPW Shuttle 的预订和联系;芯片测试工作的外包和联系等。

3 取得的主要成果

龙芯 1 号 CPU 芯片运行稳定,最高主频可达 266MHz,设计功耗小于 1W,在 200MHz 主频下启动 Linux 的功耗约为 0.4W。

龙芯 1 号 CPU 芯片的主要技术指标如下:①芯片面积约 4mm×4mm;芯片规模小于 100 万门(约 400 万晶体管);②定点寄存器和浮点寄存器各 32 个;指令 cache 和数据 cache 各 8KB,两路组相联;TLB 48 项,每项两页;③超流水线结构,实现了动态调度和乱序执行;④多功能部件:1 个访存部件、2 个定点部件、2 个浮点部件;⑤内嵌硬件安全功能,可有效抵御大多数黑客和病毒攻击。

龙芯 1 号 CPU 芯片配套主板的有关参数和特性如下:①主板外频为 50—117MHz,用户可调;②256MB 内存,支持与 PC100 兼容的 SDRAM 内存条;③1MB FLASH 存储器,用于 BIOS;④4 个标准的 PCI 扩展槽,2 个 IDE 接口;⑤2 个串行口,1 个并行口,键盘、鼠标接口;⑥支持常见的 PCI 显卡(如 S3、RIVA TNT2 等)以及 10/100M 自适应网卡。

龙芯 1 号研制过程中,我们自主完成了微体系结构及其 C 模拟器的设计,自主完成了 RTL 代码和可测试性设计,自主完成版图设计(微电子中心参加),拥有版图的全部知识产权。围绕龙芯 1 号的研制,已申请 10 项发明专利,其中,动态流水线结构 5 项,高速缓存结构 2 项,浮点部件设计 2 项,高速电路设计方法 1 项。

在龙芯样机上,我们对龙芯 1 号进行了详细的

功能和性能测试。功能测试的内容包括:Linux 操作系统、X 窗口系统、Apache WEB 服务器、WEB 浏览器、ABIword 字处理器、plaympeg 媒体播放器、IEEE 754 浮点标准兼容测试程序。结果表明,龙芯 1 号对上述系统软件、应用软件均能很好地支持。龙芯 1 号也通过了完整的 SPEC95 和 SPEC2000 基准程序包。

用于龙芯 1 号性能测试的程序主要是标准的 CPU 性能测试包 SPEC CPU2000 及少量其它标准或手写的测试程序。对外频 100MHz、内频 200MHz 的龙芯 1 号样机进行的 SPEC CPU2000 测试结果为:SPECint_base2000=18.5;SPECfp_base2000=24.8。

为了得到一个相对的性能参考,我们将 200MHz 主频的龙芯 1 号样机与安装了 180MHz 主频 MIPS R5000 CPU 芯片的 SGI O2 工作站进行了性能比较。MIPS R5000 为双发射结构,片内一级指令 cache 和数据 cache 各 32KB,这是它比龙芯 1 号有优势的地方。O2 工作站安装了 SGI 的 IRIX 操作系统,内存容量为 128MB。测试结果表明:龙芯样机的总体性能与这款 O2 工作站基本相当。

另外,龙芯 1 号目前已能稳定地运行最重要的实时操作系统 VxWorks,并通过了高低温试验,达到了工业级应用的要求。

4 应用推广前景

龙芯 1 号的应用推广工作势头良好。目前已研制完成龙芯 1 号样机 20 余台,提供给近十个整机厂商和用户进行测试、应用开发和试用。龙芯 1 号 CPU 芯片用于网络终端机(NC)的主板已经研制完成,基于龙芯 1 号的 NC 样机已能运行网络教育应用。正在开发中的其它应用还包括:安全服务器、指纹识别、内外网安全隔离闸、智能网络安全隔离卡等。

从技术上看,龙芯 1 号 CPU 芯片的兼容和低功耗优势,使它在嵌入式应用系统方面大有用武之地。今后,我们将进一步完善龙芯 1 号 CPU 芯片对 Linux 和其它国产嵌入式操作系统、VXWORKS 和 Windows CE 等操作系统的支持,在工业控制、终端和外设产品等领域大面积地推广应用。龙芯 CPU 的产业化工作,将依托已经成立的神州龙芯集成电路设计有限公司进行。

Godson-1 General-Purposed CPU Chip

Tang Zhimin

(Institute of Computing Technology, CAS, 100080 Beijing)

Godson-1 is a general-purposed microprocessor designed in the Institute of Computing Technology, and its performance and functionality is in the leading position in China. This article briefly introduces the aim and strategy of designing Godson-1 CPU chip, describes the design procedure, presents the testing and performance evaluation results, and outlines the potential application areas of the chip.

唐志敏 男,计算技术研究所研究员,博士生导师,系统结构研究室主任。1966 年出生。1985 年毕业于南京大学计算机科学系,1990 年获计算技术研究所工学博士学位。兼任“十五”863”计算机软硬件技术主题专家组成员,国家自然科学基金委员会计算机学科评审组成员,中国计算机学会名词审定工作委员会副主任,信息存储专业委员会副主任,中国科学院研究生院信息科学与工程学院副院长,中国科学技术大学兼职博士生导师,《计算机学报》执行副主编,《Journal of Computer Science and Technology》编委,《计算机研究与发展》编委。主要研究领域包括高性能计算机体系结构、并行计算、VLSI 设计等。在国内外主要刊物或会议上发表论文 60 余篇。目前担任中国科学院知识创新工程重大项目“高性能通用 CPU 芯片研制”首席科学家。曾获中国科学院科学技术进步奖二等奖、中国科学院青年科学家奖及中国科学院优秀青年、中国科学院优秀研究生导师称号。

(相关图片请见彩插二)

龙芯 1 号通用 CPU 芯片的研制



▲ 研制组部分成员



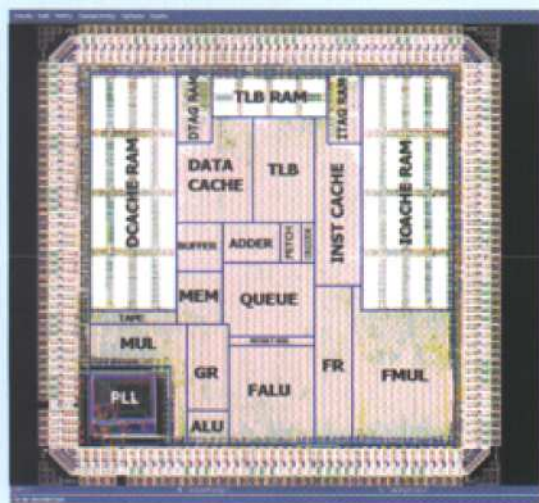
▲ 鉴定委员会专家观看演示



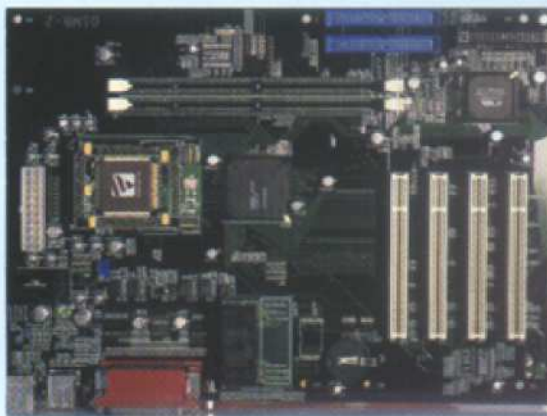
▲ 龙芯 1 号成果鉴定会



▲ 龙芯样机用于 EDA 终端



▲ 龙芯 1 号版图



▲ 龙芯 1 号主板



▲ 龙芯 1 号 CPU 卡