

21世纪高等学校规划教材 | 计算机科学与技术



基于FPGA的计算机 体系结构实践教程

杨 军 编著



清华大学出版社

基于FPGA的计算机 体系结构实践教程

杨 军 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书是针对计算机科学与技术专业的计算机组成与体系结构综合课程实验而设计编写的教材,以机器并行执行为主要特征来研究计算机系统的设计和实现。全书共分6章。第1章详细介绍计算机的组成、层次结构;第2章详细介绍并行计算机体系结构;第3章简单介绍 Quartus II 8.0 软件及仿真软件 ModelSim 的使用方法;第4章通过对基本运算器、多通路运算器、FIFO、Cache 控制器实例的实现,分析计算机各个关键部件的工作方式和相互关系,进而介绍基于 CISC、RISC 技术模型机的设计与实现;第5章介绍基于 FPGA 的12个并行开发实验设计,引领读者快速掌握并行的设计原理和技巧;第6章是综合实验部分,循序渐进地讲解了3个实例系统的设计。通过对本书的学习与实践,读者可以对并行计算机体系结构的基本原理有一个清晰的概念和认识,从而掌握现代计算机硬件设计的关键技术。

本书可作为普通高等学校计算机科学与技术、信息安全、电子信息工程、通信工程、自动化等专业学生的教材,也可作为从事计算机体系结构研发的科研人员的参考书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

基于 FPGA 的计算机体系结构实践教程/杨军编著. —北京:清华大学出版社,2012.1

(21 世纪高等学校规划教材·计算机科学与技术)

ISBN 978-7-302-26182-7

I. ①基… II. ①杨… III. ①计算机体系结构—高等学校—教材 ②现场可编程门阵列—系统设计—高等学校—教材 IV. ①TP303 ②TP331.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 137004 号

责任编辑:高买花 王冰飞

责任校对:时翠兰

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62795954, jsjic@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京鑫海金澳胶印有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:13 字 数:325 千字

版 次:2012 年 1 月第 1 版 印 次:2012 年 1 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:23.00 元

编审委员会成员

(按地区排序)

清华大学

周立柱 教授
覃 征 教授
王建民 教授
冯建华 教授
刘 强 副教授

北京大学

杨冬青 教授
陈 钟 教授
陈立军 副教授

北京航空航天大学

马殿富 教授
吴超英 副教授
姚淑珍 教授

中国人民大学

王 珊 教授
孟小峰 教授
陈 红 教授

北京师范大学

周明全 教授
阮秋琦 教授
赵 宏 副教授

北京交通大学

北京信息工程学院

孟庆昌 教授
杨炳儒 教授
陈 明 教授

北京科技大学

石油大学

艾德才 教授
吴立德 教授
吴百锋 教授

天津大学

杨卫东 副教授
苗夺谦 教授
徐 安 教授

复旦大学

同济大学

邵志清 教授
杨宗源 教授
应吉康 教授

华东理工大学

乐嘉锦 教授
孙 莉 副教授

华东师范大学

东华大学

浙江大学

扬州大学

南京大学

南京航空航天大学

南京理工大学

南京邮电学院

苏州大学

江苏大学

中国矿业大学

武汉大学

华中科技大学

中南财经政法大学

华中师范大学

江汉大学

国防科技大学

中南大学

湖南大学

西安交通大学

长安大学

哈尔滨工业大学

吉林大学

山东大学

中山大学

厦门大学

仰恩大学

云南大学

电子科技大学

成都理工大学

西南交通大学

吴朝晖 教授

李善平 教授

李 云 教授

骆 斌 教授

黄 强 副教授

黄志球 教授

秦小麟 教授

张功萱 教授

朱秀昌 教授

王宜怀 教授

陈建明 副教授

鲍可进 教授

张 艳 教授

何炎祥 教授

刘乐善 教授

刘腾红 教授

叶俊民 教授

郑世珏 教授

陈 利 教授

颜 彬 教授

赵克佳 教授

邹北骥 教授

刘卫国 教授

林亚平 教授

沈钧毅 教授

齐 勇 教授

巨永锋 教授

郭茂祖 教授

徐一平 教授

毕 强 教授

孟祥旭 教授

郝兴伟 教授

潘小轰 教授

冯少荣 教授

张思民 教授

刘惟一 教授

刘乃琦 教授

罗 蕾 教授

蔡 淮 教授

于 春 副教授

曾华燊 教授

出版说明

随着我国改革开放的进一步深化,高等教育也得到了快速发展,各地高校紧密结合地方经济建设发展需要,科学运用市场调节机制,加大了使用信息科学等现代科学技术提升、改造传统学科专业的投入力度,通过教育改革合理调整和配置了教育资源,优化了传统学科专业,积极为地方经济建设输送人才,为我国经济社会的快速、健康和可持续发展以及高等教育自身的改革发展做出了巨大贡献。但是,高等教育质量还需要进一步提高以适应经济社会发展的需要,不少高校的专业设置和结构不尽合理,教师队伍整体素质亟待提高,人才培养模式、教学内容和方法需要进一步转变,学生的实践能力和创新精神亟待加强。

教育部一直十分重视高等教育质量工作。2007年1月,教育部下发了《关于实施高等学校本科教学质量与教学改革工程的意见》,计划实施“高等学校本科教学质量与教学改革工程(简称‘质量工程’)”,通过专业结构调整、课程教材建设、实践教学改革、教学团队建设等多项内容,进一步深化高等学校教学改革,提高人才培养的能力和水平,更好地满足经济社会发展对高素质人才的需要。在贯彻和落实教育部“质量工程”的过程中,各地高校发挥师资力量强、办学经验丰富、教学资源充裕等优势,对其特色专业及特色课程(群)加以规划、整理和总结,更新教学内容、改革课程体系,建设了一大批内容新、体系新、方法新、手段新的特色课程。在此基础上,经教育部相关教学指导委员会专家的指导和建议,清华大学出版社在多个领域精选各高校的特色课程,分别规划出版系列教材,以配合“质量工程”的实施,满足各高校教学质量和教学改革的需要。

为了深入贯彻落实教育部《关于加强高等学校本科教学工作,提高教学质量的若干意见》精神,紧密配合教育部已经启动的“高等学校教学质量与教学改革工程精品课程建设工作”,在有关专家、教授的倡议和有关部门的大力支持下,我们组织并成立了“清华大学出版社教材编审委员会”(以下简称“编委会”),旨在配合教育部制定精品课程教材的出版规划,讨论并实施精品课程教材的编写与出版工作。“编委会”成员皆来自全国各类高等学校教学与科研第一线的骨干教师,其中许多教师为各校相关院、系主管教学的院长或系主任。

按照教育部的要求,“编委会”一致认为,精品课程的建设工作从开始就要坚持高标准、严要求,处于一个比较高的起点上;精品课程教材应该能够反映各高校教学改革与课程建设的需要,要有特色风格、有创新性(新体系、新内容、新手段、新思路,教材的内容体系有较高的科学创新、技术创新和理念创新的含量)、先进性(对原有的学科体系有实质性的改革和发展,顺应并符合21世纪教学发展的规律,代表并引领课程发展的趋势和方向)、示范性(教材所体现的课程体系具有较广泛的辐射性和示范性)和一定的前瞻性。教材由个人申报或各校推荐(通过所在高校的“编委会”成员推荐),经“编委会”认真评审,最后由清华大学出版

社审定出版。

目前,针对计算机类和电子信息类相关专业成立了两个“编委会”,即“清华大学出版社计算机教材编审委员会”和“清华大学出版社电子信息教材编审委员会”。推出的特色精品教材包括:

(1) 21 世纪高等学校规划教材·计算机应用——高等学校各类专业,特别是非计算机专业的计算机应用类教材。

(2) 21 世纪高等学校规划教材·计算机科学与技术——高等学校计算机相关专业的教材。

(3) 21 世纪高等学校规划教材·电子信息——高等学校电子信息相关专业的教材。

(4) 21 世纪高等学校规划教材·软件工程——高等学校软件工程相关专业的教材。

(5) 21 世纪高等学校规划教材·信息管理与信息系统。

(6) 21 世纪高等学校规划教材·财经管理与应用。

(7) 21 世纪高等学校规划教材·电子商务。

(8) 21 世纪高等学校规划教材·物联网。

清华大学出版社经过三十多年的努力,在教材尤其是计算机和电子信息类专业教材出版方面树立了权威品牌,为我国的高等教育事业做出了重要贡献。清华版教材形成了技术准确、内容严谨的独特风格,这种风格将延续并反映在特色精品教材的建设中。

清华大学出版社教材编审委员会

联系人:魏江江

E-mail:weijj@tup.tsinghua.edu.cn

前言

“计算机组成与体系结构课程”是计算机专业很重要的一门专业基础课,其工程性、技术性和实践性都很强。为使理论教学和实践教学紧密结合、培养学生的动手能力和解决工程问题的能力,作者编写了本书。基于 FPGA 的计算机系统设计技术将是 21 世纪电子系统设计领域的发展趋势,是现在高校和社会嵌入式培训班必学的内容和热点。本书主要包括基于 FPGA 的并行开发实验设计、CISC 和 RISC 指令系统设计、先进存储器及并行运算器、以时间并行性为特征的计算机结构设计、多处理机系统设计等;采用 Quartus II 实例设计方法,方便实现。通过对本书的学习与实践,读者不仅能够深入理解并行计算机组成与体系结构,而且能够掌握现代计算机硬件设计技术。

近些年来,EDA 技术以及计算机硬件设计仿真技术的发展,使“计算机组成与体系结构课程”的实验有了新的方法和手段。本书从可编程器件+EDA 软件+硬件描述语言的现代数字系统设计的方法出发,在学生掌握了 VHDL 或 Verilog HDL 后,进一步学习本书介绍的 Altera 公司最新的系列设计软件 Quartus II 和 TD-CMA 综合实验平台,并以此来学习研究并行计算机体系结构的原理、方法。这对他们今后的设计工作有很大的帮助。

本书是作者结合近几年的实践教学经验,针对学生面临的实际问题,参考了大量设计书籍和技术文献组织编写的,在这里向这些资料的作者表示衷心的感谢。本书的实验内容充分吸纳借鉴了西安唐都公司和 Altera 公司的工程师的经验和资料,尤其感谢唐都公司的技术人员,他们在实例设计中给予了大量的技术支持,提高了本书的水平和实用价值。

本书由杨军编著,丁俊、李娜、董寅、唐佐侠、王小军、赵嘎、张凯、张伟平、舒平平等参加了本书的编写。他们在资料的收集、整理和源代码的设计、分析、仿真、硬件平台的验证等技术支持方面,以及书稿的录入、排版、绘图等方面做了大量的工作。在此一并表示衷心的感谢!

本书涉及的知识范围广,只是想为初学者提供一些帮助和指导。由于作者水平有限,加之计算机技术飞速发展,新的理念和技术层出不穷,以及编写时间仓促,书中难免有不足之处,恳请广大读者批评指正。

注:本书所有源代码请到清华大学出版社网站上自行下载。

作者

2011 年 7 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 计算机系统的组成	1
1.1.1 计算机硬件的组成	1
1.1.2 计算机软件的组成	2
1.2 计算机系统的层次结构	3
1.2.1 计算机系统的多级层次结构	3
1.2.2 软件与硬件的逻辑等价性	4
1.3 计算机的工作过程	4
第 2 章 并行计算机体系结构	6
2.1 并行的概念	6
2.2 提高并行性的技术途径	7
2.3 并行计算机系统的性能度量	8
2.3.1 计算机的速度	8
2.3.2 并行计算机的速度	10
2.3.3 并行计算机的加速比和效率	12
2.4 并行计算机的发展	12
第 3 章 常用 FPGA 开发工具	15
3.1 硬件开发工具 Quartus II 8.0	15
3.1.1 Quartus II 8.0 简介	15
3.1.2 Quartus II 8.0 设计流程	15
3.1.3 Quartus II 设计方法	19
3.1.4 Quartus II 功能详解	20
3.1.5 时序约束与分析	28
3.1.6 设计优化	35
3.1.7 SignalTap II	43
3.1.8 实例讲解	47
3.2 ModelSim 仿真工具	52
3.2.1 ModelSim 简介	52
3.2.2 基本仿真步骤	52
3.2.3 ModelSim 各界面介绍	56
3.2.4 ModelSim 调试功能	60
3.2.5 实例讲解	64

第4章 计算机体系结构基础实验	72
4.1 运算器	72
4.1.1 基本运算器实验	73
4.1.2 多通路的运算器与寄存器堆设计实验	76
4.2 存储系统	80
4.2.1 FIFO 先进先出存储器实验	81
4.2.2 Cache 控制器设计实验	83
4.3 指令系统	87
4.3.1 基于 CISC 技术的模型计算机设计实验	89
4.3.2 基于 RISC 技术的模型计算机设计实验	96
第5章 基于 FPGA 的并行开发实例	101
5.1 4 位二进制并行加法器设计实例	101
5.2 16 位乘法器实验	104
5.3 6 位并行优化平方器实验	107
5.4 并行优化的 3×3 矩阵乘法器	111
5.5 简单循环冗余校验并行运算	115
5.6 Rake 接收机的设计实验	118
5.7 简单并行 CORDIC 算法的设计	122
5.8 基于 FPGA 实现的多路 PWM 设计	127
5.9 基于 FPGA 的并行 DDS	131
5.10 并行结构 FIR 滤波器	134
5.11 并行 IIR 滤波器的实验设计	137
5.12 3DES 加/解密流水线模式的设计	140
第6章 并行计算机设计	146
6.1 以时间并行性为特征的计算机系统	146
6.1.1 具有指令预取功能的模型机设计实验	146
6.1.2 具有三级流水的模型机设计实验	155
6.2 以指令并行性为特征的计算机系统	162
6.2.1 超标量处理机	162
6.2.2 具有两条流水线的超标量模型机设计实验	164
附录 实验硬件平台及软件环境使用说明	173
附录 A TD-CMA 系统硬件环境	173
附录 B 软件使用说明	179
附录 C DE2 开发平台	183
附录 D 实用芯片介绍	193
参考文献	197

任何一台计算机都是由密切相关的硬件和软件组成的。硬件是计算机的物质基础,没有硬件计算机将不复存在;软件是发挥计算机功能、使得计算机能正常工作的程序,没有软件计算机无法投入使用。计算机的硬件和软件之间的关系很像电影放映机和电影胶片之间的关系。

1.1 计算机系统的组成

1.1.1 计算机硬件的组成

计算机硬件由运算器、控制器、主存储器、输入设备和输出设备等五大部分组成,如图 1-1 所示。

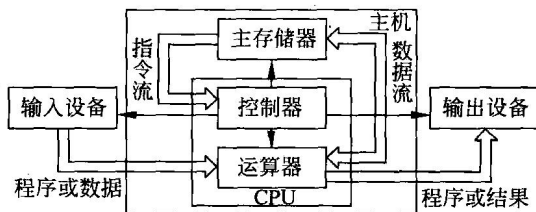


图 1-1 计算机硬件的组成

(1) 运算器是用来完成各种运算的部件。通常将运算分成算术运算和逻辑运算两大类:算术运算是指需要考虑进位的加、减、乘、除运算;逻辑运算是指位对位的运算。运算器中除了包含一个能完成算术和逻辑运算功能的算术逻辑运算单元(ALU)之外,还要有可存放参加运算的操作数和运算结果的寄存器,以及在它们之间传送数据的通路。

(2) 控制器是全机的指挥中心,由它向机内的各个部件发出各种命令,使全机构成一个有机的整体。通常将运算器和控制器合起来称为中央处理器,简称 CPU(central processing unit, CPU)。

(3) 主存储器是用来存放各类信息的部件。所有能在机内运行的程序和所需要的数据都要存放在存储器中,通常被称做主存储器或内存储器。一般来说,主存储器的容量越大,计算机的功能越强。通常将 CPU 和主存储器合起来称为计算机的主机。

(4) 输入设备是用来完成输入功能的部件。所有需要输入到机内的程序或数据,都是

经过输入设备输入的。最常用的输入设备是键盘。

(5) 输出设备是用来完成输出功能的部件。所有需要从机内输出的运算结果或在机内运行的程序、数据均可通过输出设备输出。最常用的输出设备是显示器和打印机。

由于这种硬件结构是由美籍数学家冯·诺依曼等人提出来的,因此后人将其称为冯·诺依曼结构。这种冯·诺依曼结构的计算机具有如下主要特点:

(1) 存储程序控制。要求计算机完成某种功能,需要事先编制成相应的程序并将其输入到存储器中,于是计算机就可以在程序的控制下有条不紊地工作了。

(2) 程序和数据都是用二进制来表示的,机内进行的是二进制数的运算和存储。

(3) 程序由指令序列构成,任何一条指令都包含操作码和地址码两部分。操作码用来表明本指令的功能,地址码用来指定参加运算的操作数和运算结果存放的地址。

(4) 机器以 CPU 为中心,输入的信息在 CPU 控制下才能写入主存储器,输出的信息也只有在 CPU 控制下才能从主存储器中取出送至相应的输出设备。

1.1.2 计算机软件的组成

软件是计算机系统的灵魂,可以这样认为,没有配备任何软件的“裸机”无法投入使用;没有配备足够的软件,计算机的功能将不能很好地发挥,计算机的应用范围也将受到很大的影响。

计算机软件可分成系统软件和应用软件两大类,所有软件都是用某种语言编写的、可完成各种功能的程序。由系统程序员编写的程序称做系统程序;由应用程序员编写的程序称做应用程序。

计算机语言有机器语言、汇编语言和高级语言之分。机器语言是计算机硬件可直接识别的最低级的语言,它要求程序员不仅要了解机器的硬件结构,而且要掌握各条机器指令的二进制编码格式,这是很难做到的。因此利用机器语言编写程序是非常困难的。汇编语言是只能由汇编程序识别的语言,用汇编语言编写的源程序必须由汇编程序将其翻译成机器语言程序才能被机器执行。汇编语言与机器的硬件结构有一定的关系,能较好地发挥机器硬件的功能,因此要求程序员对机器硬件有一定的了解,在系统结构相同的序列机内部可实现汇编语言级的软件兼容。高级语言是完全脱离机器硬件结构、根据应用领域的不同要求设计出的通用的程序设计语言,其品种繁多,目前世界上使用的高级语言有上百种,大体上可分成两大类:①会话型的高级语言,它必须由解释程序将其翻译成机器语言程序才能被执行,而且是一边解释一边执行,即每解释一个语句就执行一个语句,以达到人机会话的要求,例如,BASIC 语言就属于会话型的高级语言;②编译型的高级语言,它必须由各自的编译程序将其翻译成机器语言程序,而且必须是整个程序编译完以后才能被机器执行,例如,FORTRAN 语言、COBOL 语言、PASCAL 语言和 C 语言等均属于编译型高级语言。由于高级语言与硬件结构无关,所以它具有很好的通用性和可移植性。任何一种高级语言可在各种不同类型的机器上运行,这显然是高级语言的最大优点和可取之处。换句话说,完全不了解计算机硬件的人,同样可使用高级语言来编写可执行的源程序。

系统软件通常包括用来管理机器的操作系统、各种高级语言的编译或解释程序、汇编程序、数据库管理程序,还有系统调试程序、故障诊断程序和错误检测程序等,它们是由系统程序员编写的,一般不允许修改,可固定存放在机内的只读存储器中,或者存放在外部存储器中,需要时调入机器的内存存储器中去执行。

操作系统(operating system, OS)用来管理和控制计算机系统的软硬件资源、提高这些资源的利用率,并为用户使用计算机提供方便,属于核心的系统程序。一个操作系统的研制,常常需要上百个“人年”甚至更长。目前比较流行的操作系统有 MS-DOS、UNIX、Windows、Linux 等。汇编、编译或解释程序属于语言处理程序,是各种语言的源程序能在内存中正常运行的关键软件。

数据库管理程序是管理数据库的工具。计算机在工作过程中常常需要处理大量的数据信息,它们可集中存放在各种类型的数据库中。为建立、使用和维护数据库,各种类型的数据库管理程序应运而生。从早期的数据库管理系统 DBASE 到目前流行的面向对象的数据库管理系统 ORACLE、SYBACE 等,它们都能在操作系统的管理下,实现对数据库的管理和控制功能。

除此之外,系统调试程序、故障诊断程序和错误检测程序也是系统软件中不可缺少的部分。应用软件是由应用程序员根据自己的要求使用特定语言编写的程序,用以实现计算机所要完成的各种功能。如上所述,计算机软件的组成可用图 1-2 来简明地描述。

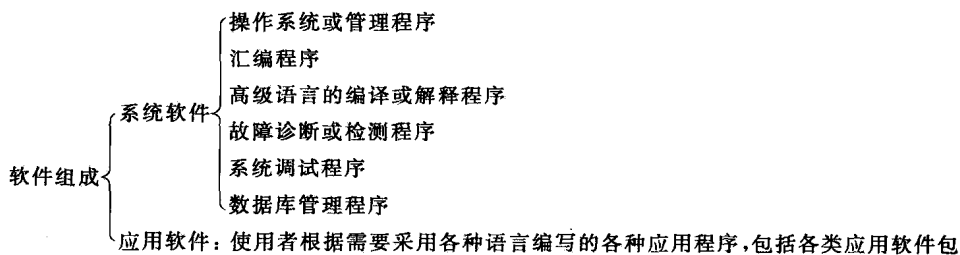


图 1-2 计算机软件的组成

1.2 计算机系统的层次结构

1.2.1 计算机系统的多级层次结构

计算机系统以硬件为基础,通过配置软件扩充功能,形成一个可能相当复杂的有机组合的系统。它通常由 6 个或 6 个以上不同的级组成,每一级都能进行程序设计,如图 1-3 所示。

微程序机器级不是在任何一个计算机系统都必须存在的。采用微程序控制方式的计算机用微程序来解释机器指令,每一条机器指令都对应一个微程序。于是,任何一条机器指令的执行过程就成为一个微程序的执行过程。具体地说,它是事先编制好解释各条机器指令的微程序,并将其写入由只读存储器构成的控制存储器中。因此一旦设计完毕,微程序是固定不变的,区别于硬件(hardware)和软件(software),可称为固件(firmware)。采用微程序控制方式,可使得计算机的控制部件更规

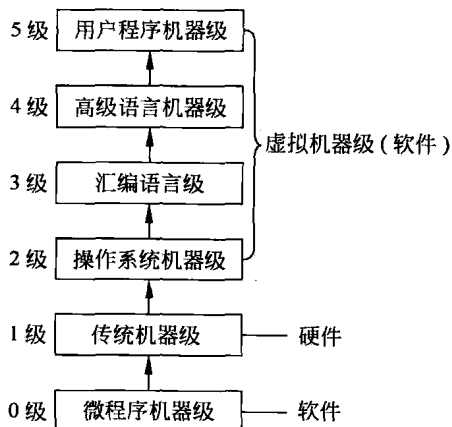


图 1-3 计算机系统的层次结构

整、更便于设计和修改,可有效地缩短计算机的设计周期,故其受到计算机设计者们的青睐。

计算机最终所能执行的只能是二进制机器指令。传统机器级是一个硬件级,从这一级可以看到一台实际的机器。它也是计算机软、硬件的分界面。

操作系统机器级由管理机器各种资源的系统软件构成,在较小的计算机系统,如一些单机版计算机中,它比较简单,通常被称作管理程序或监视程序。随着计算机软、硬件技术的飞速发展,操作系统的功能越来越强,成为系统软件的核心。早期的操作系统用汇编语言编写,设计工作量很大;现代许多机器的操作系统用高级语言编写,提高了设计效率、缩短了设计周期,增强了操作系统的功能。传统机器只有在操作系统管理下才能真正投入运行。操作系统的不断完善,使得操作者对计算机的操作愈来愈方便,给操作者提供了更加友好的界面。

操作系统机器级的上层是汇编语言级。汇编语言和机器语言最接近,它是用规定的一些助记符来编程的,助记符和指令系统一一对应。计算机只能识别机器语言,所以运行时需将汇编语言翻译成机器码程序,再在计算机上执行。汇编语言便于记忆,比直接用机器语言编程方便得多。

高级语言机器级是运行比汇编语言更高级的、接近于人类自然语言的语言所编写的程序的机器级。高级语言程序员在这一级上不需要了解计算机的硬件、编译及操作系统等内容。

用户程序机器级是运行具体应用软件的机器级,应用程序员不必详细了解计算机的硬件即可方便地使用机器。

多数机器是将程序设计语言编写的程序直接翻译成机器语言在硬机器级上运行,有的是先翻译成层次较低一些的中间语言,然后再转换成机器语言在硬机器级上运行。

1.2.2 软件与硬件的逻辑等价性

随着大规模集成电路技术的发展和软件硬化的趋势,要明确划分硬件与软件已经显得比较困难了。有许多功能既可以直接由硬件来实现,也可以在硬件的支持下靠软件来实现,对用户来说它们在功能上是等效的。随着FPGA/CPLD等技术的飞速发展,设计硬件完全可以像设计软件一样方便,可以对所设计的硬件功能随时加以修改,具有在线测试、仿真等功能,这使软、硬件之间的区别更加模糊了。例如,本书在后面的章节中要设计的一个乘法器实验,既可以在由基本单元提供的加法器和移位器功能部件的支持下编写微程序,进行多次移位相加的方法来实现乘法,也可以由CPLD直接设计一个具有乘法功能的运算部件。

一般来说,功能采用硬件实现的,其速度会比较快一些,功能的变更周期也可能会长一些,但是需要增加硬件成本;采用软件实现的,虽然其速度会慢一些,但不需要增加硬件成本,功能也比较容易改变。总之,能否选择恰当的软、硬件功能分配,取决于所选定的设计目标、系统性能、价格、速度、可靠性、存储容量、变更周期等因素及当时的硬件技术水平等。

1.3 计算机的工作过程

简单地说,计算机的工作过程就是执行程序的过程。程序由一系列机器指令构成,它是事先由程序员根据需要编制的。将编制好的程序经过输入设备顺序存放到主存储器中,并

将其程序存放的首地址告诉控制器。于是控制器将从首地址开始从主存储器中取出一条指令、执行这条指令,再取出下条指令、执行下条指令、如此周而复始地工作,直到程序执行完毕,计算机便完成了该程序要求它完成的全部功能。图 1-4 示出一个简单程序的执行过程。

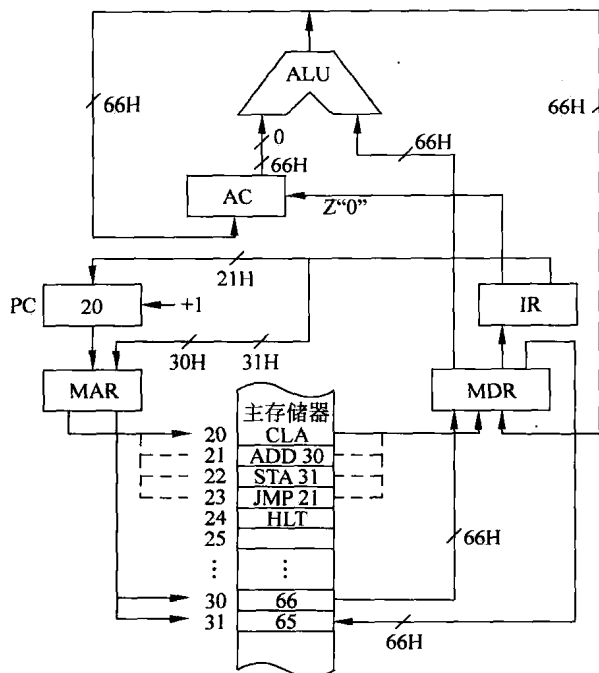


图 1-4 指令的执行过程

从图 1-4 中可以看出,5 条机器指令用助记符表示,已经存放在主存储器的从 20H 地址开始的一片存储区中,本程序需要操作的原始数据是 01100110(66H),它已存放在主存储器的 30H 地址中。程序的首地址 20H 已装入程序计数器 PC 中,于是控制器根据 PC 的内容从主存储器的 20H 地址中取出第一条机器指令 CLA,这条机器指令的功能是清除累加器 AC 中的内容,一旦这条机器指令从 20H 地址中取出,PC 中的内容已被修改为下一条机器指令的地址(21H),这时,执行 CLA 指令的结果将累加寄存器(AC)的内容清 0;接着执行的第二条指令是加法指令(ADD),执行这条指令的结果是将累加寄存器(AC)的内容(0)与 30H 地址中的操作数(66H)相加后将其结果保留在 AC 中;继续执行的第三条指令是存数指令(STA),这条指令的功能是要将累加寄存器(AC)中的数据(66H)写入到主存储器的 31H 地址中;继续执行的第四条指令是无条件转移指令(JMP),其转移目标地址是 21H,所以,执行 JMP 指令的结果是将转移目标地址(21H)置入程序计数器 PC 中;于是继续执行的下条命令不是暂停指令(HLT),而是 21H 地址中的 ADD 指令。从而可以看出,一般情况下程序是顺序执行的,只有遇到转移类指令,才能改变程序的执行顺序。不难看出,这是一个死循环程序,任何时候不可能去执行 HLT 指令。

第2章

并行计算机体系结构

2.1 并行的概念

器件技术尤其是微电子技术的迅速发展是促进计算机和系统性能迅速改进的关键和基础。据恩斯洛(P. H. Enslow)的统计,1965—1975年间,器件延迟大约缩短到原来的10%,而平均指令时间却缩短为原来的1%。就是说,同一时间,计算机系统的性能比器件的性能提高了约10倍。这表明系统结构和并行处理技术的发展是至关重要的。

在特定时期里,器件的发展变化会因物理工艺、价格等条件的限制而有一定限度。在同一种器件技术水平上,进一步提高计算机系统性能的有效途径就是开发并发性、挖掘潜在的并行能力、提高并行处理和操作的程度。

无论是数值计算、数据处理、信息处理、知识处理,还是智能处理,都隐含有同时进行运算或操作的成分。解题中具有可以同时进行运算或操作的特性称为并行性(parallelism)。开发并行性的目的是能并行处理,以提高计算机解题的效率。

并行性包含同时性和并发性二重含义。同时性(simultaneity)指两个或多个事件在同一时刻发生。并发性(concurrency)指两个或多个事件在同一时间间隔内发生。

并行性可以有不同的等级,而且从不同的角度来说,等级的分法也不同。

(1) 从计算机系统中执行程序的角度来看,并行性等级从低到高可以分为4级。它们分别如下:

- ① 指令内部——单条指令内部各个微操作之间的并行。
- ② 指令之间——多条指令的并行执行。
- ③ 任务或进程之间——多个任务或程序段的并行执行。
- ④ 作业或程序之间——多个作业或多道程序的并行。

(2) 从计算机系统中处理数据的并行性来看,并行性等级从低到高可以分为如下几级:

① 位串字串——同时只对一个字的一位进行处理,这通常是指传统的串行单处理机,没有并行性。

② 位并字串——同时对一个字的全部位进行处理,这通常是指传统的并行单处理机,开始出现并行性。

③ 位片串字并——同时对许多字的同一位(称位片)进行处理,开始进入并行处理领域。

④ 全并行——同时对许多字的全部或部分位组进行处理。

(3) 并行性是贯穿于计算机信息加工的各个步骤和阶段的,从这个角度来看,并行性等级又可分为如下几级:

① 存储器操作并行——可以采用单体多字、多体单字或多体多字方式在一个存储周期内访问多个字,进而采用按内容访问方式在一个存储周期内用位片串字并或全并行方式实现对存储器中大量字的高速并行比较、检索、更新、变换等操作。典型的例子就是并行存储器和以相联存储器为核心构成的相联处理机。

② 处理器操作步骤并行——处理器操作步骤可以指一条指令的取指、分析、执行等操作步骤,也可指如浮点加法的求阶差、对阶、尾加、舍入、规格化等具体操作的执行步骤。处理器操作步骤并行是将操作步骤或具体操作的执行步骤在时间上重叠流水地进行。典型的例子就是流水线处理机。

③ 处理器操作并行——为支持向量、数组运算,可以通过重复设置大量处理单元,让它们在单一控制器的控制下,按照同一条指令的要求对多个数据组同时操作。典型的例子就是阵列处理机。

④ 指令、任务、作业并行——这是较高级的并行,虽然它也可包含如操作、操作步骤等较低等级的并行,但原则上与操作级并行是不同的。指令级以上的并行是多个处理机同时对多条指令及有关的多数据组进行处理,而操作级并行是对同一条指令及其有关的多数据组进行处理。因此,前者构成的是多指令流多数据流计算机,后者构成的则是单指令流多数据流计算机。典型的例子是多处理机。

2.2 提高并行性的技术途径

计算机系统中提高并行性的措施多种多样,就其基本思想而言,有时间重叠、资源重复和资源共享等。

(1) 时间重叠(time interleaving)是在并行性概念中引入时间因素,让多个处理过程在时间上相互错开,轮流重叠地使用同一套硬件设备的各个部分,加快硬件周转来赢得速度。图 2-1 所示的指令内各操作步骤采用重叠流水就是最典型的例子。每条指令的“取指”、“分析”、“执行”轮流在相应硬件上完成,只需 5 个 Δt 就可解释完 3 条指令,加快了程序的执行速度。时间重叠基本上不必重复增加硬件设备就可提高计算机系统的性能价格比。

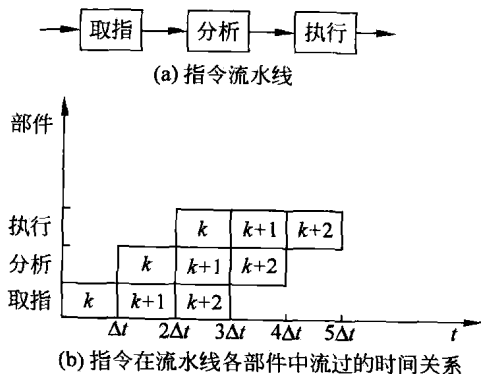


图 2-1 时间重叠的例子