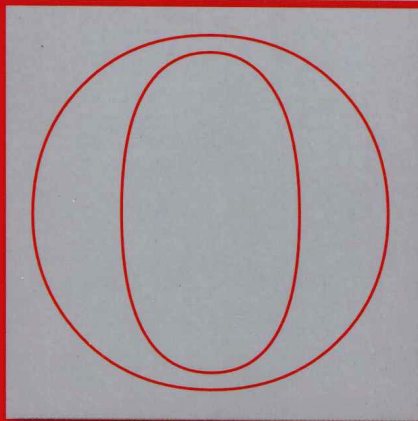


21世纪高等学校计算机**专业**实用规划教材

计算机组成原理



肖铁军 主编



清华大学出版社

21 世纪高等学校计算机**专业**实用规划教材

计算机组成原理

肖铁军 主编

邹婷婷 杨旭东 丁伟 袁晓云 马学文 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书系统地介绍了计算机的基本组成、基本原理和基本分析方法。全书共7章,内容包括计算机系统概述、运算方法与运算器、存储器与存储体系、指令系统、控制器与中央处理器、输入输出系统和系统总线,涉及计算机从部件到整机的组织结构和工作原理。

本书力求深入浅出,理论联系实际,每章均附有习题,可作为高等院校计算机专业教材,也可作为相关科技人员的参考书。

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

计算机组成原理/肖铁军主编. —北京:清华大学出版社,2010.6

(21世纪高等学校计算机专业实用规划教材)

ISBN 978-7-302-22104-3

I. ①计… II. ①肖… III. ①计算机体系结构—高等学校—教材 IV. ①TP303

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第029673号

责任编辑:魏江江 李玮琪

责任校对:李建庄

责任印制:杨 艳

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:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

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

印 装 者:北京国马印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:17.5 字 数:431千字

版 次:2010年6月第1版 印 次:2010年6月第1次印刷

印 数:1~3000

定 价:27.00元

产品编号:034228-01

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

北京交通大学

阮秋琦 教授

北京信息工程学院

赵 宏 教授

北京科技大学

孟庆昌 教授

石油大学

杨炳儒 教授

天津大学

陈 明 教授

复旦大学

艾德才 教授

吴立德 教授

吴百锋 教授

杨卫东 副教授

同济大学

苗夺谦 教授

徐 安 教授

华东理工大学

邵志清 教授

华东师范大学

杨宗源 教授

应吉康 教授

上海大学

陆 铭 副教授

东华大学

乐嘉锦 教授

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

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

孙 莉 副教授

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

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

顾 彬 教授

赵克佳 教授

刘卫国 教授

林亚平 教授

邹北骥 教授

沈钧毅 教授

齐 勇 教授

巨永峰 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 讲师

曾华桑 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。

本系列教材立足于计算机专业课程领域,以专业基础课为主、专业课为辅,横向满足高校多层次教学的需要。在规划过程中体现了如下一些基本原则和特点。

(1) 反映计算机学科的最新发展,总结近年来计算机专业教学的最新成果。内容先进,充分吸收国外先进成果和理念。

(2) 反映教学需要,促进教学发展。教材要适应多样化的教学需要,正确把握教学内容和课程体系的改革方向,融合先进的教学思想、方法和手段,体现科学性、先进性和系统性,强调对学生实践能力的培养,为学生知识、能力、素质协调发展创造条件。

(3) 实施精品战略,突出重点,保证质量。规划教材把重点放在公共基础课和专业基础课的教材建设上;特别注意选择并安排一部分原来基础比较好的优秀教材或讲义修订再版,逐步形成精品教材;提倡并鼓励编写体现教学质量和教学改革成果的教材。

(4) 主张一纲多本,合理配套。专业基础课和专业课教材配套,同一门课程有针对不同层次、面向不同应用的多本具有各自内容特点的教材。处理好教材统一性与多样化,基本教材与辅助教材、教学参考书,文字教材与软件教材的关系,实现教材系列资源配套。

(5) 依靠专家,择优选用。在制定教材规划时要依靠各课程专家在调查研究本课程教

材建设现状的基础上提出规划选题。在落实主编人选时,要引入竞争机制,通过申报、评审确定主题。书稿完成后要认真实行审稿程序,确保出书质量。

繁荣教材出版事业,提高教材质量的关键是教师。建立一支高水平教材编写梯队才能保证教材的编写质量和建设力度,希望有志于教材建设的教师能够加入到我们的编写队伍中来。

21 世纪高等学校计算机专业实用规划教材

联系人:魏江江 weijj@tup.tsinghua.edu.cn

前 言

本书适用于高等院校计算机类各专业及相关专业的本科生。“计算机组成原理”作为计算机专业的一门重要的核心专业基础课程,主要讨论计算机从部件到整机的组织结构和工作原理,在课程体系中起着承上启下的作用。

本教材讲述的是一般性原理,并不针对任何具体的商业机型,而是综合了国内外计算机类型中较为成熟的先进技术,兼顾计算机发展的新技术、新成果,力求做到深入浅出。为了避免一般性的抽象原理不便于分析理解,本教材既从面上反映不同的典型结构,也有深入的分析,点面结合;通过一个模型机的实例将相关章节联系起来,最终形成一个整机的概念,系统性较强。本教材设计的JU-C1教学微处理器已经在FPGA上设计实现,可用于配套的实践教学。

本书共分7章,授课学时为70~90学时,在教学中可根据具体情况对教材内容取舍。

第1章计算机系统概论首先透过计算机的发展历程探究计算机技术飞速发展的动力所在,然后介绍了冯·诺依曼结构计算机的基本组成,使读者建立整体概念,了解计算机各部件之间的关系,有利于后续的学习。

第2章讨论运算方法和运算器,包括数制与编码的基础知识,数据的表示方法和校验方法,定点数和浮点数的四则运算及溢出判断方法,运算器的组织结构及数据加工流程。

第3章介绍存储器和存储体系。存储器以“存储位元—存储器芯片—主存储器”为主线,讲述相关的半导体存储器原理和主存储器的构成;存储体系以“高速缓存—主存—虚拟存储”为层次,讨论如何解决速度与容量的矛盾。

第4章是指令系统,讲述指令系统的一般设计原则和寻址技术,最后以JU-C1教学模型机为例,介绍了它的指令系统。

第5章是很关键的一章,通过这一章的学习将建立起计算机主机的概念,并通过指令执行流程,理解计算机的工作原理。在讲述了控制器的基本原理之后,以JU-C1教学模型机为例,具体讲解了微程序控制器设计方法。这一章的最后还介绍了指令流水线。

第6章和第7章讲解输入输出系统和系统总线。包括常用外部设备、辅助存储器,主机与外设的数据传送方式,总线仲裁等内容。

本书由计算机组成原理课程组的六位老师合作编写,第1章和第5章由肖铁军编写,第2章由邹婷婷编写,第3章主要由杨旭东编写,第4章由丁伟编写,第6章由袁晓云编写,马学文编写了第7章以及第3章的一部分。研究生于洋参加了JU-C1教学模型机的FPGA设计验证工作。由于作者水平有限,书中难免有错误和不妥之处,敬请读者批评指正。电子邮箱: tj.xiao@126.com。

编 者

2010年3月

于江苏大学

目 录

第 1 章 计算机系统概述	1
1.1 计算机的发展历程	1
1.2 计算机硬件的基本组成	2
1.2.1 主存储器	2
1.2.2 运算器	3
1.2.3 控制器	3
1.2.4 输入输出设备	3
1.2.5 计算机的总线结构	4
1.3 程序设计语言和计算机的层次结构	4
1.4 计算机的主要性能指标	6
1.4.1 机器字长	6
1.4.2 运行速度	6
习题	7
第 2 章 运算方法与运算器	8
2.1 数制与编码	8
2.1.1 进位计数制及其相互转换	8
2.1.2 机器数的表示	10
2.1.3 十进制数的二进制编码	14
2.1.4 非数值数据的表示	16
2.1.5 数据信息的校验	19
2.2 机器数的定点表示和浮点表示	25
2.2.1 定点数的表示	25
2.2.2 浮点数的表示	26
2.3 定点数加减法运算	28
2.3.1 加法器及其进位链	28
2.3.2 原码加减运算方法	32
2.3.3 补码加减运算方法	33
2.3.4 补码加减运算的逻辑实现	36
2.4 定点数移位运算	37

2.5	定点乘法运算	38
2.5.1	原码乘法运算	39
2.5.2	补码乘法运算	44
2.5.3	阵列乘法器	49
2.6	定点除法运算	50
2.6.1	原码除法运算	50
2.6.2	补码除法运算	55
2.6.3	阵列除法器	57
2.7	浮点数的四则运算	59
2.7.1	浮点加减运算	59
2.7.2	浮点乘除运算	61
2.8	运算器的组织	64
2.8.1	逻辑运算与算术逻辑单元 ALU	64
2.8.2	定点运算器的组成与结构	66
2.8.3	浮点运算器的组成与结构	70
	习题	71

第3章 存储器和存储体系 73

3.1	存储器概述	73
3.1.1	存储器的分类	73
3.1.2	存储器的性能指标	75
3.2	半导体随机存取存储器	75
3.2.1	静态随机存取存储位元	76
3.2.2	动态随机存取存储位元	77
3.2.3	半导体随机存取存储芯片	79
3.2.4	高级 DRAM	86
3.3	半导体只读存储器	89
3.3.1	掩模型只读存储器	89
3.3.2	一次可编程只读存储器	90
3.3.3	可擦除可编程只读存储器	90
3.3.4	电可擦除可编程只读存储器	91
3.3.5	Flash 存储器	92
3.4	主存储器的组织	93
3.4.1	主存储器容量的扩充	93
3.4.2	主存储器的编址方式	96
3.5	并行存储器	98
3.5.1	双端口存储器	98
3.5.2	多模块交叉存储器	98
3.5.3	相联存储器	100

3.6	高速缓冲存储器 cache	101
3.6.1	cache 的基本原理	101
3.6.2	地址映像	101
3.6.3	替换算法	106
3.6.4	cache 的读写策略	107
3.7	虚拟存储器	108
3.7.1	虚拟存储器的基本概念	108
3.7.2	页式虚拟存储器	109
3.7.3	段式虚拟存储器	110
3.7.4	段页式虚拟存储器	112
3.7.5	快表与慢表	112
3.8	存储体系的层次结构	113
	习题	114
第4章	指令系统	116
4.1	指令系统的基本概念	116
4.1.1	指令和指令系统	116
4.1.2	指令的格式	117
4.1.3	指令的类型	121
4.2	寻址方式	125
4.2.1	数据寻址	125
4.2.2	指令寻址	130
4.3	RISC 技术	131
4.3.1	RISC 的产生及发展	131
4.3.2	RISC 的主要特征	132
4.3.3	RISC 与 CISC 的比较	133
4.4	指令系统设计举例	135
4.4.1	JU-C1 模型机指令系统	135
4.4.2	JU-C1 模型机汇编程序设计举例	139
	习题	140
第5章	控制器和中央处理器	141
5.1	控制器概述	141
5.1.1	控制器基本组成	141
5.1.2	控制器的工作过程	142
5.1.3	控制器的实现方式	143
5.2	模型机 CPU 的数据通路	143

5.3	指令执行流程	145
5.3.1	取指令阶段	145
5.3.2	取操作数阶段	146
5.3.3	执行阶段	147
5.3.4	指令执行的微操作序列举例	147
5.4	组合逻辑控制器	150
5.4.1	同步控制和异步控制	150
5.4.2	多级时序系统	151
5.4.3	组合逻辑控制器的设计	154
5.5	微程序控制器	157
5.5.1	微程序控制基本原理	157
5.5.2	微指令编码方式	159
5.5.3	微程序的顺序控制	162
5.5.4	微程序控制的时序	163
5.6	模型机的微程序控制器设计	165
5.6.1	微指令编码设计	165
5.6.2	微地址形成逻辑	166
5.6.3	微程序设计举例	169
5.7	流水线技术	172
5.7.1	流水线的基本原理	172
5.7.2	流水线的性能指标	173
5.7.3	流水线的分类	173
5.7.4	指令流水线的相关与冲突	174
5.7.5	超标量与超流水线	176
	习题	177
第6章	输入输出系统	181
6.1	常用输入设备和输出设备	181
6.1.1	输入设备	181
6.1.2	输出设备	184
6.2	辅助存储器	190
6.2.1	磁记录原理及记录方式	190
6.2.2	磁盘存储器	193
6.2.3	磁带存储器	201
6.2.4	光盘存储器	202
6.3	输入输出接口	205
6.3.1	接口概述	206

6.3.2	接口功能和组成	206
6.3.3	I/O 端口的编址方式	208
6.3.4	接口的类型	209
6.3.5	I/O 接口与主机之间信息传送的控制方式	209
6.4	程序查询控制方式	210
6.4.1	基本概念	210
6.4.2	程序查询方式的工作流程	210
6.4.3	程序查询方式的接口组成	211
6.5	程序中断方式	213
6.5.1	中断的基本概念	213
6.5.2	中断的基本过程和相关概念	215
6.5.3	中断优先级	216
6.5.4	中断响应	218
6.5.5	中断服务程序入口地址的获取	219
6.5.6	中断嵌套和中断屏蔽	221
6.6	直接存储器存取(DMA)方式	225
6.6.1	DMA 方式的基本概念	225
6.6.2	DMA 方式的传送过程	226
6.6.3	DMA 的传送方式	227
6.6.4	DMA 的接口组成	229
6.7	I/O 通道控制方式	230
6.7.1	通道的基本概念	230
6.7.2	通道的功能	230
6.7.3	通道的类型	231
6.7.4	通道的工作过程	233
6.7.5	通道结构的发展	234
	习题	234
第 7 章	系统总线	237
7.1	总线概述	237
7.1.1	总线的特性及性能指标	238
7.1.2	总线的分类	239
7.1.3	系统总线标准化	240
7.1.4	系统总线的结构形式	242
7.2	系统总线仲裁方式	244
7.2.1	总线争用和仲裁的定义	244
7.2.2	集中式总线仲裁	245

7.2.3 分布式总线仲裁.....	247
7.3 系统总线操作时序和操作方式	248
7.3.1 操作时序的类型.....	249
7.3.2 系统总线操作方式.....	253
7.4 典型微机系统总线结构举例	254
7.4.1 ISA 总线结构.....	254
7.4.2 PCI 总线结构	254
7.4.3 PCI Express 总线结构	258
习题.....	261

计算机是一种具有快速运算能力、逻辑判断功能、存储功能的电子设备,是不需要人工干预的信息处理自动机。

早期,计算机主要用于科学计算。现在,计算机已广泛应用于各行各业和社会生活,已不是单纯的科学计算,而是信息处理。所以,计算机也被称为“电脑”,它解放了人的脑力劳动,是人脑的延伸和增强。

1.1 计算机的发展历程

数字电子计算机的研制始于 20 世纪 30 年代末、40 年代初,关于 ABC(Atanasoff-Berry Computer) 和 ENIAC(Electrical Numerical Integrator And Calculator)谁是第一台数字电子计算机一直存在争议。影响较大、功能最强的是 ENIAC。ENIAC 于 1946 年 2 月在美国的宾夕法尼亚大学宣布研制成功,它使用了 17 468 个真空电子管,占地 167 平方米,重 30 吨,耗电 160 千瓦;运算速度是每秒 5000 次加法,357 次乘法或 38 次除法。这样一个笨重的庞然大物其性能不抵今天的一个掌上电脑,但在当时已经显示了它的巨大威力,运算速度是当时其他计算装置的 1000 倍,是手工计算的 20 万倍。ENIAC 的问世是一个里程碑。著名数学家约翰·冯·诺依曼(John von Neumann)在一个偶然的机得知正在研制 ENIAC,并参加了中后期的研制工作。他分析了 ENIAC 有一个很大的弱点,即没有真正的存储器,暂存器只能存储 20 个 10 位的十进制数,它的“程序”是用线路连接的方式实现的,更改计算程序极为不便;但是在 ENIAC 上完成改进已经不可能。1945 年 6 月,冯·诺依曼提出了关于 EDVAC(The Electronic Discrete Variable Automatic Computer)离散变量自动电子计算机的报告草案,后来又提出了更为完善的报告《电子计算装置逻辑结构初探》,报告中提出的设计思想对后来的计算机研制产生了巨大的影响,概括下来主要是以下三点。

第一,采用二进制。相对于十进制,二进制对电子元件的要求更低,只要有两个可以相互转换的稳定状态就可以,抗干扰能力更强,运算规律简单,有利于简化逻辑线路。

第二,程序存储。把运算程序存放在存储器中,根据程序指令执行运算,这一思想标志着自动运算的开始。

第三,计算机系统由运算器、存储器、控制器、输入设备、输出设备五大部件组成。

上述设计思想被称为“冯·诺依曼结构”,并沿用至今。在冯·诺依曼提出 EDVAC 设计的随后几年中,英国和美国分别研制出商业数字电子计算机 EDSAC 和 UNIVAC。至此,数字电子计算机发展的萌芽时期遂告结束,开始了依据程序存储器和程序控制思想的现代计算机发展之路。

第一代电子计算机称为电子管计算机。逻辑元件采用真空电子管,主存储器采用延迟线和磁芯,运算速度在几万次/秒。软件编程采用机器语言和汇编语言,应用以科学计算为主。

第二代电子计算机称为晶体管计算机。逻辑元件采用晶体管,主存储器采用磁芯,运算速度在几十万次/秒,软件编程采用高级语言,开始出现操作系统,应用领域除科学计算外,已扩展到数据处理。

第三代电子计算机称为集成电路计算机。逻辑元件和主存储器均采用集成电路,运算速度在几百万次/秒,机型多样化、系列化,软件中的操作系统开始普及,软件工程兴起,应用领域迅速发展,包括商业、科技、工程等领域。

第四代电子计算机称为大规模集成电路计算机。逻辑元件和主存储器均采用大规模和超大规模集成电路,多处理机系统已经显现优势,计算机系统已向网络化发展,应用领域更加广泛并逐渐改变着人类的生活方式。

从上面的发展历程可以看出,计算机的发展与电子技术、微电子技术的发展息息相关。计算机技术的发展速度远远超过了历史上任何一项技术的发展速度。如今超大规模集成电路仍然在不停地向前发展,计算机技术也在迅速发展,只是不再按照规模去命名第几代。

1.2 计算机硬件的基本组成

按照冯·诺依曼结构,计算机硬件系统由五大部件组成,这五大部件之间的关系如图 1.1 所示。

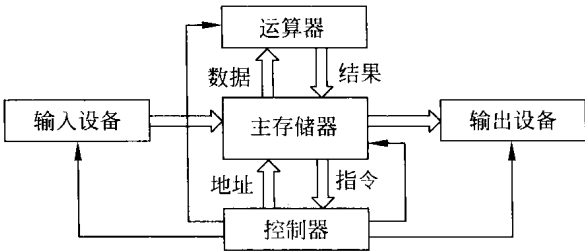


图 1.1 计算机系统的基本组成

1.2.1 主存储器

主存储器(Main Memory)是信息中心,它存储程序和数据两类信息。程序是控制信息处理过程的依据,数据则是信息处理的对象。

逻辑上存储器由若干个存储单元组成,给每个单元赋予一个唯一的编号,称为地址,如图 1.2 所示。一个单元存放若干位二进制信息,称为一个字(Word);每个单元所能存放的二进制信息的位数称为存储器的字长。所有单元所能存放的二进制信息的位数称为存储器的存储容量。

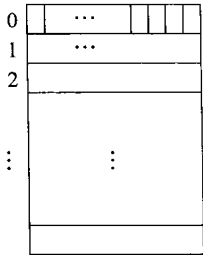


图 1.2 存储器的存储单元示意图

向存储器中存入一个数据称为写入,取出一个数据称为读出。

读或写统称为访问(Access)。对存储器的访问是按地址进行的,也就是说必须给出要访问单元的地址,然后才能写入或读出,一次访问一个地址单元。

和日常生活中“存取”的概念有所不同的是,取出之后,该单元的信息并不会丢失,只是取出了一份副本;写入之后,该单元的内容被覆盖,原来存放的信息就不存在了。

1.2.2 运算器

运算器是计算机的信息加工处理部件,它的基本功能是完成算术运算和逻辑运算以及移位操作,运算器的核心是算术逻辑单元(Arithmetic Logic Unit, ALU),此外还包括一些数据寄存器和通用寄存器组(General Register Set, GRS),用来暂存操作数以及运算结果,如图 1.3 所示。由于运算器内部寄存器的访问速度比主存储器快很多,用寄存器暂存运算的中间结果能极大提高运算速度。

ALU 的基本算术运算是整数加法运算,一次整数加法运算所能处理的二进制数据的位数就称为运算器的字长,运算器数据通路的宽度以及寄存器的字长通常与 ALU 的字长是一致的。在某些场合,也常用 ALU 代表运算器。

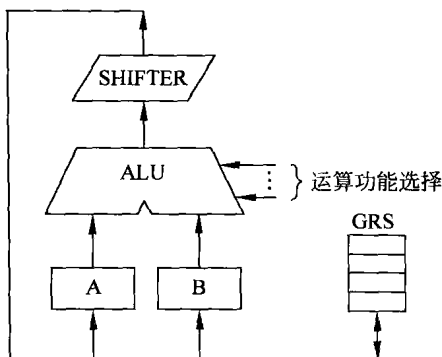


图 1.3 运算器的基本结构

1.2.3 控制器

控制器(Control Unit)的作用是控制计算机各个部件协调地工作。它按照存储器中的指令,逐步执行指令所指定的操作。

控制器的主要元件如图 1.4 所示。控制器中的指令寄存器存放从主存储器中取到的指令,它将指令代码送给指令译码器让它对指令的功能进行分析,并据此产生完成该指令所需的控制信号。这些控制信号的发出,需要一定的先后顺序,时序发生器为操作控制提供定时依据。

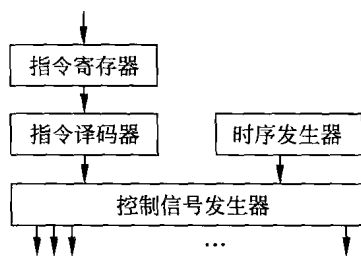


图 1.4 控制器的基本结构

当大规模集成电路发展起来以后,通常将运算器和控制器集成在一块芯片上,称为中央处理器(Central Processing Unit, CPU)。运算器、存储器、控制器三个部件构成计算机主机。

1.2.4 输入输出设备

输入设备(Input Device)的作用是把程序以及用户需要处理的数据、文字、图形、声音等信息转换为计算机所能接受的编码形式存入到计算机的主存储器内,典型的输入设备如键盘、鼠标、扫描仪等。

输出设备(Output Device)的作用是把处理的结果以用户需要的形式(如屏幕显示、打印、声音等)输出。典型的输出设备如显示器、打印机等。

输入输出设备也称为外部设备或外围设备,简称外设。外设在工作速度和数据格式等