



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



21世纪大学本科
计算机专业系列教材

张晨曦 刘真 刘依 编著

计算机组成原理

- 根据教育部“高等学校计算机科学与技术专业规范”组织编写
- 与美国 ACM 和 IEEE CS *Computing Curricula* 最新进展同步



清华大学出版社

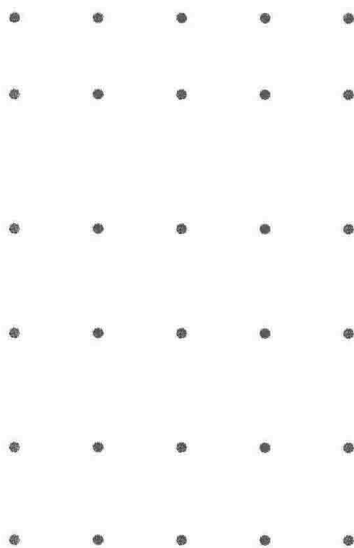


普通高等教育“十一五”国家级规划教材

21世纪大学本科计算机专业系列教材

计算机组成原理

张晨曦 刘真 刘依 编著



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书系统、深入地论述数字逻辑与计算机组成原理,全书共13章,第2~5章属数字逻辑方面的内容,系统地讲述数字逻辑电路的分析和设计方法,包括数制与编码、布尔代数基础、组合逻辑电路、时序逻辑电路;第1章、第6~13章属计算机组成原理方面的内容,包括计算机系统概论、计算机执行程序的过程、指令系统、中央处理器、微程序控制器、运算方法与运算器、存储器、总线系统、输入/输出系统。本书强调设计,以MIPS的一个简单实现为例,逐步、系统地讲述了中央处理器的设计。

本书内容全面,层次性好,语言简练,通俗易懂。本书可作为高等院校的计算机、自动化以及电子工程等相关专业本科生的教学用书,也可供相关科技人员参考。

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/张晨曦,刘真,刘依编著.--北京:清华大学出版社,2015

21世纪大学本科计算机专业系列教材

ISBN 978-7-302-41995-2

I. ①计… II. ①张… ②刘… ③刘… III. ①计算机组成原理 IV. ①TP301

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第263148号

责任编辑:魏江江 王冰飞

封面设计:傅瑞学

责任校对:时翠兰

责任印制:沈 露

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座 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

课 件 下 载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 刷 者:北京富博印刷有限公司

装 订 者:北京市密云县京文制本装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:23.5 字 数:569千字

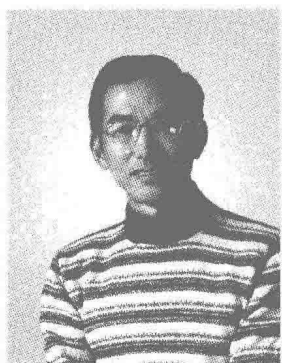
版 次:2015年12月第1版 印 次:2015年12月第1次印刷

印 数:1~2000

定 价:39.50元

产品编号:037048-01

第一作者简介



张晨曦,男,1960年9月生,汉族,福建龙岩人。现任同济大学软件学院教授,博士生导师。国家级“中青年有突出贡献专家”,国家杰出青年基金获得者,上海市高校教学名师和上海市模范教师。先后主持了一个国家973计划课题和5项国家自然科学基金项目。1988年获博士学位,后一直在国防科技大学计算机学院工作,2005年9月调入同济大学。

作为课程负责人,张晨曦承担的计算机系统结构课程和计算机组成原理课程分别于2007年和2011年被评为上海市精品课程,系统结构课程于2008年被评为国家级精品课程。他还先后获得了“教育部-微软精品课程”和“教育部-SUN精品课程”荣誉。他主讲计算机系统结构课程和计算机组成原理课程30余年,进行了一系列的教学改革和课程建设,取得了突出的成绩。1992年开发出了国内第一套系统结构与组成原理CAI课件(含30个动画),在清华、北大等全国10多所高校获得应用。2003年完成教育部的新世纪网络课程建设工程项目“计算机体系结构网络课程”。2008年开发出了国内第一套200个用于本课程的动画课件,2009年开发出了国内第一套系统结构与组成原理实验模拟器。

他负责编写出版的《计算机系统结构》系列教材是“十五”和“十一五”国家级规划教材,2002年获全国普通高等学校优秀教材二等奖,2009年被评为国家级精品教材。全国至少有100所大学采用了该教材。他一共编写出版了5种“十一五”国家级规划教材(第一作者),撰写了专著两部(第二作者)。其中,专著《新一代计算机》由荷兰North-Holland出版社出版;另一部1992年获“国家教委优秀专著特等奖”,1993年获“全国优秀科技图书一等奖”。发表学术研究论文100多篇,其中,在《中国科学》、《计算机学报》等一级刊物上发表8篇,国外发表20多篇。有18篇被国际著名八大检索工具收录。

张晨曦获部委级科技进步一等奖两项(排名第二)、二等奖一项(排名第一);获部委级教学成果二、三等奖各一项。

2007年获宝钢优秀教师奖和上海市育才奖,2008年获上海高校教学名师奖。1991年被国家教委授予“做出突出贡献的中国博士”光荣称号,被评为湖南省科技青年“十佳”之一;1993年被评为“全军优秀教师”,1993年和1995年两次获“霍英东青年教师奖”;1995年获第4届“中国青年科技奖”。

从15岁起当中学教师,对教学方法和现代教育技术有深入的研究,提出了面向远程教育和CAI的动画解析教学法。

业余爱好：摄影

通信地址：上海市曹安公路 4800 号同济大学软件学院

邮编：201804

个人摄影网站：www.FotoSky.com

E-mail：xzhang2000@163.com

前 言

本书在介绍“数字逻辑”核心内容的基础上,详细论述计算机的主要功能部件及其相互连接,以及这些功能部件的功能与设计。全书共 13 章,第 1 章为计算机系统概论,简单介绍计算机系统的硬件组成、多级层次结构以及计算机的性能指标等;第 2 章介绍数制与编码;第 3 章介绍布尔代数的基本概念、公式、定律和规则,论述布尔函数的基本形式和布尔函数的化简;第 4 章介绍逻辑门电路和组合逻辑电路的分析与设计方法;第 5 章介绍触发器和时序逻辑电路的分析与设计方法;第 6 章用分步解析图详细介绍计算机中程序的执行过程;第 7 章论述指令系统,首先介绍计算机指令系统的基本知识,然后讨论指令系统设计的有关问题,最后介绍典型的 RISC 处理器 MIPS 的指令系统;第 8 章阐述中央处理器,以一个类 MIPS 的模型机为例,详细讲解数据通路的建立以及控制器的设计,并介绍流水线技术;第 9 章讨论微程序控制器;第 10 章是运算方法与运算器,论述运算方法、运算器的组成及设计;第 11 章阐述存储器系统,包括各种类型存储器的基本工作原理、并行存储器、磁表面存储器等;第 12 章阐述总线的工作原理及典型的总线实例,包括 PCI 总线、SCSI 总线、USB 总线等;第 13 章是输入/输出系统,阐述各种输入/输出方式及中断系统。

本书按层次和模块化结构组织教学内容,授课教师可以根据需要及课时的多少,对内容进行灵活的取舍。教学课时可以安排为 48~64 学时。

本书由同济大学的张晨曦、刘依及国防科技大学的刘真编写。

本书可作为本科计算机原理等课程的教材,适用于高等院校的计算机、自动化以及电子工程等相关专业本科生。

本书直接或间接地引用了许多专家和学者的文献或著作,在此向他们表示衷心的感谢。由于作者水平有限,书中难免有疏漏和不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者

2015 年 10 月于上海

目 录

第 1 章 计算机系统概论	1
1.1 引言	1
1.2 计算机系统的硬件组成	2
1.3 计算机的软件系统	5
1.3.1 系统软件	5
1.3.2 应用软件	6
1.4 计算机的性能指标	7
1.5 计算机的发展简史	9
1.5.1 第一台计算机	9
1.5.2 计算机的四代变化	9
1.5.3 计算机发展的重大事件	10
1.5.4 微处理器的发展	11
1.6 计算机的分类与应用	12
1.6.1 计算机的分类	12
1.6.2 计算机的应用	13
习题 1	14
第 2 章 数制与编码	15
2.1 进位记数制与数制转换	15
2.1.1 进位记数制及其表示	15
2.1.2 数制转换	17
2.2 带符号数的表示方法	22
2.2.1 原码表示法	22
2.2.2 补码表示法	23
2.2.3 反码表示法	25
2.2.4 移码表示法	26
2.3 数的定点表示与浮点表示	27
2.3.1 数的定点表示	27
2.3.2 数的浮点表示	28
2.4 常用的其他编码	31
2.4.1 十进制数的二进制编码	31

2.4.2	字符代码	33
2.4.3	可靠性编码	35
习题 2	.....	43
第 3 章	布尔代数基础	45
3.1	布尔代数的基本概念	45
3.1.1	布尔变量及其基本运算	45
3.1.2	布尔函数及其表示方法	46
3.1.3	布尔函数的“相等”概念	48
3.2	布尔代数的公式、定理和规则	49
3.2.1	布尔代数的基本公式	49
3.2.2	布尔代数的主要定理	50
3.2.3	布尔代数的重要规则	51
3.3	布尔函数的基本形式	53
3.3.1	函数的“积之和”与“和之积”形式	53
3.3.2	函数的“标准积之和”与“标准和之积”形式	53
3.4	不完全确定的布尔函数	57
3.5	布尔函数的化简	58
3.5.1	代数化简法	59
3.5.2	卡诺图化简法	61
3.5.3	列表化简法	67
习题 3	.....	74
第 4 章	组合逻辑电路	78
4.1	常用逻辑门的图形符号	78
4.2	布尔函数的实现	79
4.2.1	用与非门实现布尔函数	79
4.2.2	用或非门实现布尔函数	80
4.2.3	用与或非门实现布尔函数	80
4.3	组合电路的分析	81
4.4	组合电路的设计	83
4.5	常用组合电路	85
4.5.1	加法器	85
4.5.2	十进制数字的七段显示	89
4.5.3	二进制比较器	93
4.6	二进制译码器	93
4.6.1	二进制译码器的功能和组成	93
4.6.2	用中规模集成译码器进行设计	94
4.7	多路选择器	96

4.7.1	多路选择器的逻辑功能和组成	96
4.7.2	用多路选择器进行逻辑设计	97
4.8	多路分配器	100
4.9	组合电路中的险态	101
习题 4	.....	103
第 5 章	时序逻辑电路	106
5.1	时序电路与时序机	106
5.1.1	时序电路的结构和特点	106
5.1.2	时序机的定义	107
5.1.3	时序机的状态表和状态图	108
5.1.4	完全定义机和不完全定义机	109
5.2	触发器	110
5.2.1	基本 RS 触发器	110
5.2.2	同步 RS 触发器	112
5.2.3	JK 触发器	113
5.2.4	D 触发器	114
5.2.5	T 触发器	114
5.3	同步时序电路的分析与设计	115
5.3.1	建立原始状态表	116
5.3.2	状态表的化简	118
5.3.3	状态分配	128
5.3.4	确定激励函数和输出函数	129
5.3.5	分析与设计举例	132
5.4	常用的同步时序电路	137
5.4.1	寄存器	138
5.4.2	计数器	138
5.4.3	节拍信号发生器	141
习题 5	.....	144
第 6 章	计算机执行程序的过程	149
6.1	样例程序	149
6.2	第 1 条指令的执行过程	149
6.3	第 2 条指令的执行过程	155
6.4	第 3 条指令的执行过程	157
6.5	第 4 条指令的执行过程	159
6.6	第 5 条指令的执行过程	161
6.7	第 6 条指令的执行过程	165
习题 6	.....	166

第 7 章 指令系统	168
7.1 指令格式	168
7.1.1 指令的地址码	168
7.1.2 指令的操作码	170
7.1.3 指令长度	172
7.2 数据类型	172
7.3 寻址方式	173
7.4 指令类型与功能	176
7.5 指令系统的设计	177
7.5.1 对指令系统的基本要求	177
7.5.2 指令格式的设计	178
7.6 指令系统的发展和改进	179
7.6.1 沿 CISC 方向发展和改进指令系统	179
7.6.2 沿 RISC 方向发展和改进指令系统	181
7.7 指令系统实例：MIPS 的指令系统	183
习题 7	188
第 8 章 中央处理器	190
8.1 CPU 的功能和组成	190
8.1.1 CPU 的功能	190
8.1.2 CPU 的基本组成	190
8.1.3 指令执行的基本步骤	191
8.2 关于模型机	191
8.3 逻辑设计的约定和定时方法	192
8.3.1 逻辑设计的约定	192
8.3.2 定时方法	193
8.4 实现 MIPS 的一个基本方案	193
8.4.1 构建基本的数据通路	193
8.4.2 ALU 控制器	197
8.4.3 单周期数据路径的控制器	199
8.5 多周期实现方案	201
8.5.1 为什么要采用多周期	201
8.5.2 指令分步执行过程(按周期分步)	202
8.6 控制器的设计	207
8.6.1 控制器的组成	207
8.6.2 控制方式与时序系统	209
8.6.3 模型机控制器的设计	210
8.7 流水线技术	213

8.7.1	流水线的基本概念	213
8.7.2	流水线的性能指标	218
8.7.3	一条经典的5段流水线	218
8.8	经典微处理器	220
8.8.1	Intel 80386/80486	220
8.8.2	Pentium 微处理器	221
8.8.3	Alpha 微处理器	223
习题 8		225
第 9 章	微程序控制器	227
9.1	微程序控制的基本原理	227
9.2	微程序控制器的组成与工作过程	228
9.3	微程序设计技术	229
9.3.1	微指令的编码方法	229
9.3.2	微指令格式	231
9.3.3	微程序的顺序控制	233
9.3.4	微指令的执行方式	236
9.4	模型机的微程序控制器	237
9.4.1	模型机的微指令格式	237
9.4.2	构造微程序	240
习题 9		242
第 10 章	运算方法与运算器	244
10.1	移位运算	244
10.2	定点数的加减法运算	247
10.2.1	补码加减法运算规则	247
10.2.2	补码加减法运算的硬件实现	247
10.2.3	溢出的判断	248
10.3	定点数的乘除法运算	249
10.3.1	原码一位乘法	250
10.3.2	补码一位乘法	252
10.3.3	阵列乘法器	254
10.3.4	原码一位除法	256
10.3.5	阵列除法器	262
10.4	定点运算器的构成	263
10.4.1	算术逻辑运算单元	263
10.4.2	寄存器组	264
10.4.3	运算器的基本结构	266
10.5	浮点运算	267

10.5.1	浮点加减法运算	267
10.5.2	浮点乘法运算	270
习题 10	.....	270
第 11 章	存储器	272
11.1	存储子系统概述	272
11.1.1	三级存储层次	272
11.1.2	存储器的分类	273
11.2	主存储器	274
11.2.1	主存储器的组成	275
11.2.2	数据在存储器中的存放	276
11.2.3	主存的主要技术指标	277
11.3	随机存储器	278
11.3.1	静态随机存储器	278
11.3.2	动态随机存储器	279
11.3.3	RAM 芯片	280
11.3.4	动态 RAM 的刷新	285
11.4	只读存储器和闪速存储器	286
11.4.1	只读存储器	286
11.4.2	闪速存储器	290
11.5	主存的设计	290
11.6	并行主存储器	293
11.6.1	单体多字存储器	293
11.6.2	多体交叉存储器	294
11.7	辅助存储器	297
11.7.1	磁表面存储器	297
11.7.2	磁盘存储器	299
11.7.3	光盘存储器	300
习题 11	.....	302
第 12 章	总线系统	304
12.1	总线概述	304
12.1.1	总线的基本概念	304
12.1.2	总线的分类	307
12.1.3	总线的连接方式	307
12.2	总线系统的工作原理	310
12.2.1	主设备/从设备	310
12.2.2	总线控制器	310
12.2.3	总线的工作过程	310

12.2.4	总线接口	311
12.3	仲裁、定时和数据传送	312
12.3.1	总线的仲裁	312
12.3.2	总线的定时	315
12.3.3	总线的数据传送方式	317
12.4	总线实例	318
12.4.1	总线的标准化	318
12.4.2	PCI 总线	319
12.4.3	ISA 总线	324
12.4.4	EISA 总线	324
12.4.5	VESA 总线(VL 总线)	324
12.4.6	SCSI 总线	325
12.4.7	USB 总线	326
12.4.8	IEEE 1394 总线	328
12.4.9	EIA RS-232-D 总线	330
习题 12		331
第 13 章	输入/输出系统	333
13.1	I/O 系统概述	333
13.1.1	主机与外设之间的连接方式	333
13.1.2	I/O 设备的编址方式	335
13.1.3	数据传送控制方式	336
13.2	I/O 接口	337
13.3	程序查询方式	339
13.4	中断系统	339
13.4.1	中断概述	340
13.4.2	中断请求信号的建立、屏蔽与传送	341
13.4.3	中断源的识别与判优	343
13.4.4	中断响应与中断处理	348
13.4.5	多重中断与中断屏蔽	350
13.5	程序中中断 I/O 控制方式	352
13.6	直接存储器访问 DMA 方式	353
13.6.1	DMA 的基本概念	353
13.6.2	DMA 的传送方式	354
13.6.3	DMA 控制器的组成	355
13.6.4	DMA 的数据传送过程	357
习题 13		358
参考文献		360

第 1 章 计算机系统概论

1.1 引言

计算机在当今世界中已经是无处不在,而且几乎无所不能。人们的日常生活和工作,都离不开计算机。当人们用手机玩微信、打电话、用 PSP 玩游戏、自驾车出游、到银行取钱、乘飞机旅行时,不知不觉地,计算机都在默默地为人们工作着。它让人们的生活充满色彩,让人们的工作多出成果。它对于人类社会发展的影响是广泛而又极其深远的。

计算机系统是由硬件和软件两大部分组成的。这两部分密切配合,计算机才能正常工作和发挥作用,两者缺一不可。硬件是计算机系统的物质基础,少了它,再好的软件也无法运行;软件则像是计算机系统的灵魂,少了它,再好的硬件也毫无用途。它们只有并驾齐驱,才能充分发挥计算机的作用和效能。

人们看到的计算机实体,如显示器、主机机箱以及机箱内主板、CPU、内存条等都是硬件。软件则是看不见摸不着的,它是指可执行的程序,而可执行的程序则是由机器所能识别和执行的指令序列构成的。软件的载体可以是光盘、U 盘或硬盘等。

从理论上讲,对于计算机的某一具体功能来说,既可以用硬件实现,也可以用软件实现,即硬件和软件在逻辑功能上是等效的。但其实现成本和速度则会有比较大的差别。在设计一个计算机系统时,必须根据设计要求、现在及预计产品上市时的条件以及成本上的考虑,确定哪些功能由硬件实现,哪些功能由软件实现,即确定硬件和软件的功能分配。而这个软件和硬件的交界面称为计算机的系统结构,如图 1.1 所示。

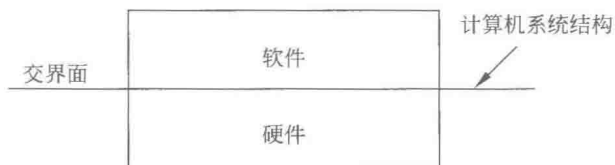


图 1.1 硬件和软件的功能分配

自第一台通用电子计算机诞生以来的六十多年中,计算机技术得到了飞速的发展,其速度之快,实在是令人赞叹。今天,用不到 5000 元人民币购买的个人计算机,其性能、主存和硬盘容量都已经超过二十多年前用 100 万美元购买的大机器。对于许多应用来说,现在的高性能微处理器的性能已经超过了 10 年前的超级计算机。在过去的二十多年中,计算机的性能差不多每 18 个月就翻一番(尽管近几年有所放缓)。这种惊人的发展一方面是得益于计算机硬件制造技术的发展,另一方面则是因为计算机系统结构的创新。本书首先论述数字逻辑的相关知识,然后系统地介绍计算机系统的硬件组成技术。

1.2 计算机系统的硬件组成

现代计算机系统的硬件结构如图 1.2(a)所示,它由 5 个部件构成: 运算器、存储器、控制器、输入设备、输出设备。运算器用于实现对数据的加工,包括算术运算和逻辑运算; 存储器用于存储数据和程序; 控制器是计算机的指挥控制中心,控制计算机各部件有序协调地工作; 输入设备和输出设备实现外部世界与计算机之间的数据交换。

由于运算器和控制器在逻辑关系上联系紧密,而且往往又制作在同一块芯片上,构成了众所周知的 CPU(Central Processing Unit,即中央处理器),因此计算机系统一般是由 3 个部件构成的,即 CPU、存储器、输入/输出设备(也称为 I/O 设备),如图 1.2(b)所示。

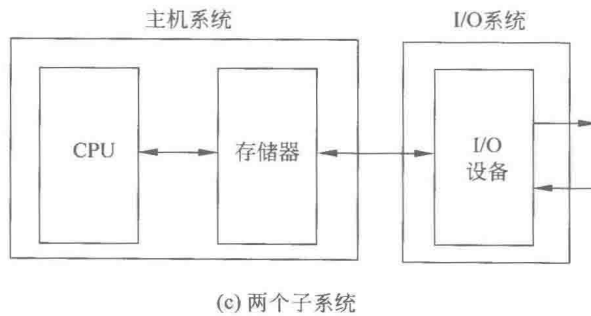
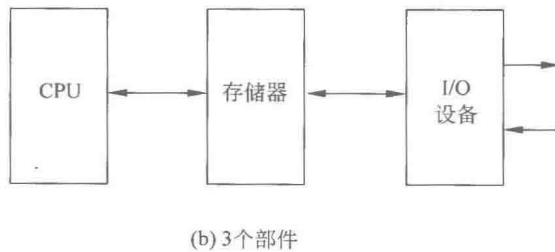
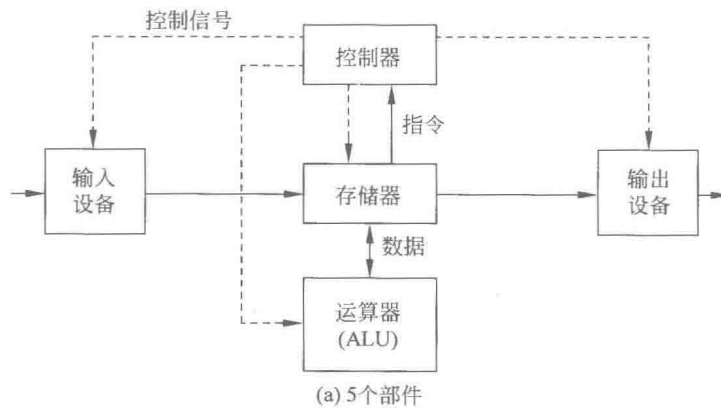


图 1.2 现代计算机系统的硬件结构

存储器主要由两部分构成：内存储器(简称内存)和外存储器(简称外存或辅存)。内存有时也称为主存(主存储器)。

有时把“CPU+内存”称为主机系统,而把输入输出设备及其相关的接口称为 I/O 系统,如图 1.2(c)所示。

早期的计算机采用的是如图 1.3 所示的结构。与图 1.2(a)相比,主要的区别是该结构以运算器为中心。这种结构是匈牙利数学家冯·诺依曼于 1946 年提出的,所以称为冯·诺依曼结构。虽然现代计算机在结构上已经有了很大的变化,但都可以看成是冯·诺依曼结构的改进,而且仍然是采用冯·诺依曼当时提出的存储程序原理。存储程序原理是指在计算机解题之前,要事先编制好程序,并与所需要的数据一起预先存入主存当中。当程序开始执行后,由控制器按照该程序自动地、连续地从存储器中取出指令并执行,直到获得所要求的结果。

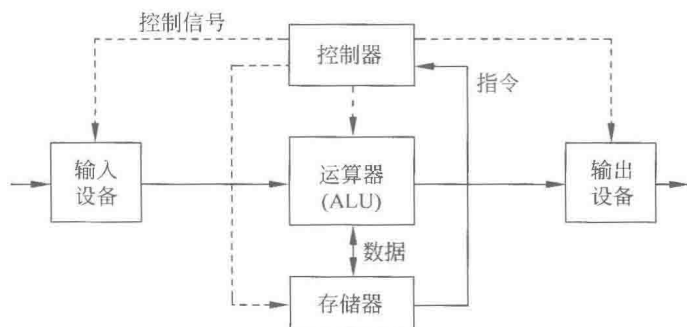


图 1.3 冯·诺依曼结构

图 1.4 是一个模型机硬件组织的示意图,模型机是指为了讲解方便而假想的一台简化了的计算机。下面分别介绍其各个部件。

1. 运算部件

运算部件是计算机的执行部件,用于对数据进行加工处理。该部件由两部分构成:运算器和通用寄存器组。运算器即算术逻辑单元,简称 ALU(Arithmetic and Logical Unit)。用于完成算术运算和逻辑运算。算术运算包括加、减、乘、除以及它们的复合运算。逻辑运算包括与、或、非、异或、比较、移位等。图 1.4 中共有 32 个寄存器: R0、R1、…、R31,用于暂存运算数据和中间结果。通用寄存器组简称 GPR(General Purpose Register),它由若干个或几十个寄存器构成。

2. 内存

存储器是计算机的存储部件,用于存储程序和数据。

存储器有内部存储器和外部存储器之分。现在的内存一般用半导体技术实现,外存往往采用磁记录方式实现,如硬盘。

内存由大量的存储单元组成,构成一个按地址访问的一维线性空间。每个存储单元有一个唯一的编号(图 1.4 中存储体左边的编号),就像街道门牌号那样。这个编号称为该存储单元的地址,用这个地址可以唯一地访问到该单元。

每个存储单元可以存放多个二进制位,其位数一般与计算机的字长相同,一般是字节的整数倍。对存储器可以进行访问操作,简称访存。访存操作有两种:“读”和“写”。“读”操

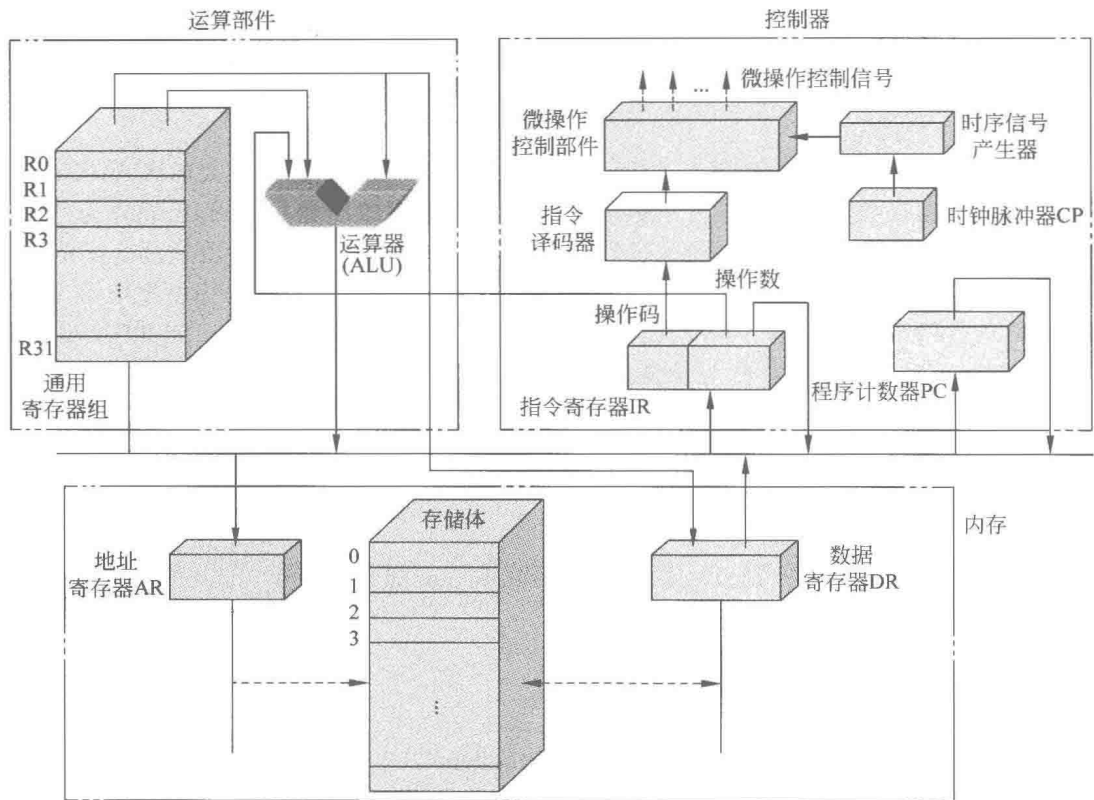


图 1.4 模型机硬件组织示意图

作把 AR 中的地址所对应的存储单元的内容读出来,放入 DR。“写”操作把 DR 中的数据写入 AR 中的地址所指定的存储单元。内存有两个重要的寄存器:地址寄存器 AR 和数据寄存器 DR。AR 存放访存地址,DR 存放从内存读出的数据或写入内存的数据。

3. 控制器

控制器是计算机的管理机构和指挥中心,它协调计算机的各个部件自动地工作。具体来说,就是按照程序中事先设计好的解题步骤,控制计算机各个部件有条不紊地工作。

它由以下 6 部分构成。

- (1) 指令寄存器 IR(Instruction Register): 用于存放当前正在执行的指令。
- (2) 程序计数器 PC(Program Counter): 用于存放当前正在执行的指令的地址。
- (3) 指令译码器: 对指令进行译码,即区分当前指令是什么指令,以便形成相应的控制信号。
- (4) 时钟脉冲 CP(Clock Pulse): CP 是协调计算机各部件操作的同步主时钟。其工作频率称为计算机的主频。

(5) 时序信号发生器: 时序信号发生器的功能是按时间顺序周而复始地发出节拍信号。

(6) 微操作控制部件: 微操作是指硬件电路中不可再细分的简单操作。例如,把一个寄存器中的数放到公共数据通路上,寄存器接收其数据入口端的数据,计数器加 1 等。微操作在一个节拍内完成。任意一条指令的执行往往都要分解成许多微操作,这些微操作需按先后次序分配到各个节拍中完成。微操作控制部件根据指令的译码结果,结合 CP 以及时