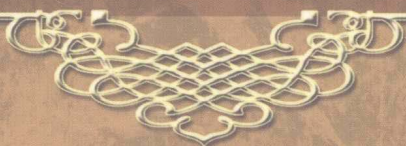


面向计算机科学与技术专业规范系列教材



计算机组成原理

张新荣 李雪威 于瑞国 编著
张 钢 主审

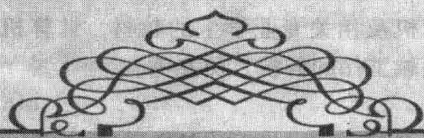


Principles of Computer Organization



机械工业出版社
China Machine Press

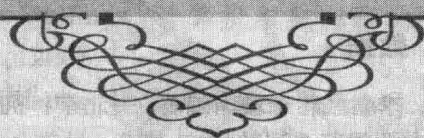
面向计算机科学与技术专业规范系列教材



计算机组成原理

张新荣 李雪威 于瑞国 编著

张 钢 主审



Principles of Computer Organization



机械工业出版社
China Machine Press

本书以计算机科学与技术本科专业规范为指导,系统地介绍计算机单机系统的基本组成和工作原理。全书共分九章,内容包括:计算机系统概述、计算机中数据的表示及运算、存储器系统、指令系统、中央处理器 CPU、总线技术及 I/O 系统。涵盖了计算机各大部件的组成、工作原理、设计方法及其互联构成计算机整机的技术。读者通过阅读本书,可对计算机系统有比较全面的了解,为进一步深入学习和研究计算机系统奠定基础。

本书可作为高等院校计算机及相关专业学生的教材,计算机专业研究生入学考试的复习用书,也可供从事计算机等领域工作的科技人员参考。

版权所有,侵权必究。

本书法律顾问 北京市展达律师事务所

图书在版编目(CIP)数据

计算机组成原理/张新荣,李雪威,于瑞国编著. —北京:机械工业出版社,2009.3
(面向计算机科学与技术专业规范系列教材)

ISBN 978-7-111-26127-8

I. 计… II. ①张… ②李… ③于… III. 计算机体系结构 IV. TP303

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 021318 号

机械工业出版社(北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:吴怡

北京瑞德印刷有限公司印刷

2009 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

185mm×260mm·20.5 印张

标准书号:ISBN 978-7-111-26127-8

定价:36.00 元

凡购本书,如有倒页、脱页、缺页,由本社发行部调换
本社购书热线(010) 68326294

序 言

近 20 年里, 计算机学科有了很大的发展, 人们普遍认为, “计算机科学”这个名字已经难以涵盖该学科的内容, 因此, 改称其为计算学科 (Computing Discipline)。在我国本科教育中, 1996 年以前曾经有计算机软件专业和计算机及应用专业, 之后被合并为计算机科学与技术专业。2004 年以来, 教育部计算机科学与技术专业教学指导分委员会根据我国计算机专业教育和计算学科的现状, 为更好地满足社会对计算机专业人才的需求, 发布了《高等学校计算机科学与技术专业发展战略研究报告暨专业规范(试行)》(以下简称《规范》), 提出在计算机科学与技术专业名称之下, 构建计算机科学、计算机工程、软件工程和信息技术四大专业方向。《规范》中四大专业方向的分类, 在于鼓励办学单位根据自己的情况设定不同的培养方案, 以培养更具针对性和特色的计算机专业人才。

为配合《规范》的实施, 落实中央“提高高等教育质量”的精神, 我们规划了“面向计算机科学与技术专业规范系列教材”。本系列教材面向全新的计算学科, 针对我国高等院校逐步向新的计算机科学与技术专业课程体系过渡的趋势编写, 在知识选择、内容组织和教学方法等方面满足《规范》的要求, 并与国际接轨。本套教材具有以下几个特点:

(1) **体现《规范》的基本思想, 满足其课程要求。**为使教材符合我国高等院校的教学实际, 编委会根据《规范》的要求规划本套教材, 广泛征集在国内知名高校中从事一线教学和科研工作、经验丰富的优秀教师承担编写任务。

(2) **围绕“提高教育质量”的宗旨开发教材。**为了确保“精品”, 本系列教材的出版不走盲目扩大的路子, 每本教材的选题都将由编委会集体论证, 并由一名编委担任责任编委, 最大程度地保证这套教材的编写水准和出版质量。

(3) **教材内容的组织科学、合理, 体系得当。**本套教材的编写注重研究学科的新发展和新成果, 能够根据不同类型人才培养需求, 合理地进行内容取舍、组织和叙述, 还精心设计了配套的实验体系和练习体系。

(4) **教材风格鲜明。**本套教材按 4 个专业方向统一规划, 分批组织, 陆续出版。教材的编写体现了现代教育理念, 探讨先进的教学方法。

(5) **开展教材立体化建设。**根据需要配合主教材的建设适时开发实验教材、教师参考书、学生参考书、电子参考资料等教辅资源, 为教学实现多方位服务。

我们衷心希望本系列教材能够为我国高等院校计算机科学与技术等专业的教学作出贡献, 欢迎广大读者广为选用。

“面向计算机科学与技术专业规范系列教材”编委会



面向计算机科学与技术专业规范系列教材

编委会

主任委员： 蒋宗礼

副主任委员： 王志英 钱乐秋

委员：（以姓氏拼音为序）

陈道蓄	陈 明
傅育熙	何炎祥
黄刘生	贾云得
姜守旭	李仁发
李晓明	刘 辰
马殿富	齐 勇
孙吉贵	孙茂松
吴功宜	吴 跃
谢长生	于 戈
张 钢	周兴社

秘书组： 温莉芳 刘立卿 姚 蕾

本书责任编委： 张 钢

前言

本教材为“面向计算机科学与技术本科专业规范系列教材”，以 CCC2002（中国计算机科学与技术学科教程 2002）和高等学校计算机科学与技术发展战略研究报告暨专业规范（试行）为指导，在查阅了大量国内外教科书和文献的基础上，结合作者多年的教学经验编写而成。

计算机组成原理是计算机科学与技术专业学生的一门核心主干课程，该课程在先导课和后继课之间起着承上启下的作用。由于计算机的工作原理比较复杂，各个功能部件之间又相互关联，课程的难度相对比较大。本教材在编写时，充分考虑到该课程的特点，力求做到选材新颖、组织严密，富于系统性、逻辑性、先进性、科学性和实践性。在本教材编写期间，恰逢 2009 年全国硕士研究生入学统一考试计算机科学与技术学科联考计算机学科专业基础综合考试大纲出版之际，教材以考试大纲中计算机组成原理的考察目标为依据，内容涵盖大纲中的所有内容。对于大纲中综合应用要求的知识，教材中给出了大量例题，以帮助学生掌握相关内容。本教材具有如下特色：

- 教材内容进行了合理的组织安排，既注重讲述基础知识，又兼具系统性和先进性。
- 文字叙述简洁明了、通俗易懂，既便于教师课堂讲授，又便于自学者阅读。
- 理论密切联系实际，对重点、难点的知识，都给出了相应的例题以帮助理解。
- 习题选择严格按章节内容的知识点组织，真正起到学以致用作用。
- 涵盖全国硕士研究生入学统一考试计算机科学与技术学科联考大纲的所有内容。

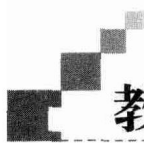
本教材第 1、6 章由张新荣、张钢编写，第 2 章由罗子超编写，第 3、5 章由李雪威编写，第 4、7、8、9 章由于瑞国编写。

编者虽然从事“计算机组成原理”课程教学工作多年，但由于编写时间紧迫及水平有限，书中难免有疏漏和欠缺之处，敬请广大读者和同行专家批评指正。

为了便于教学，我们将为选用本教材的教师免费提供电子教案，需要者请登录华章网站（www.hzbook.com）下载。

作者

2008 年 12 月



教学建议

第1章 概论 (2 学时)

了解计算机的发展历史。掌握计算机硬件系统的基本组成及一条指令的简单执行过程,初步建立计算机的整机概念,为学习后续章节打基础。理解计算机系统的层次结构及本课程在层次结构中所处的地位。掌握计算机的性能指标,包括吞吐量、响应时间、CPU 时钟周期、CPI、CPU 执行时间、MIPS、MFLOPS。

第2章 数据在计算机中的表示 (6 学时)

本章内容是全书的基础知识,后续章节要经常用到。重点为数值数据的表示。进位计数制及其相互转换的内容在数字逻辑等前导课程已经讲过,这里只需简单复习一下。重点放在有符号数和无符号数的表示方法、定点数和浮点数的表示及表示范围(其中浮点数的表示范围是本章难点,应给予关注),并能熟练对有符号数进行原码、补码、反码和移码与真值之间的转换。正确理解十进制数的表示及非数值数据的表示。

第3章 计算机的算术运算 (14 学时)

正确理解串行加法器和并行加法器的概念,掌握并行加法器的进位结构。理解并掌握定点数加减乘除的运算规则和相应硬件结构。掌握浮点数的运算方法和步骤,尤其是浮点加减运算。正确理解浮点运算所需要的硬件组成。

第4章 存储系统 (14 学时)

正确理解存储系统的基本概念、存储器的技术指标与各种分类方法,以及存储系统的层次结构和存储体系;掌握以半导体随机存储器为基础的主存储器的基本结构与相关操作,并通过给出的具体 RAM 芯片实例了解 RAM 的构造与组成;掌握 RAM 的组织方式,各种校验码的校验原理,并能熟练计算各种校验码;掌握 Cache 的工作原理、Cache - 主存地址映像和地址变换方法,能使用多种替换算法实现块的替换;正确理解虚拟存储器的基本概念,以及页式、段式、段页式虚拟存储器的基本工作原理等。

第5章 指令系统 (6 学时)

正确理解机器指令的一般格式、扩展操作码的概念、操作数类型和存储方式以及指令的操作类型。掌握指令和操作数的寻址方式,能够熟练给出各种寻址方式的有效地址。掌握 RISC 技术的基本思想,并理解 RISC 和 CISC 技术的区别。

第6章 中央处理器 (16 学时)

本章内容是全书的重点和难点,对建立计算机的整机概念至关重要。正确理解中央处理器

的功能和组成、时序控制方式，掌握时序系统组成及组合逻辑中的三级时序概念。当给定模型机的数据通路、指令系统、时序系统时，能够写出执行指令的微操作序列。理解并掌握模型机控制器的两种设计方法。正确掌握微程序控制的基本原理、微程序设计技术。正确理解 CPU 的流水线技术。

第7章 总线（6学时）

正确理解总线的基本组成、性能指标和相关标准，以及当前的几种多总线结构；掌握多种总线仲裁方法和多种通信控制方式；并对主要几种实用总线标准（PCI 总线和 PCI Express 总线）有一定的了解。

第8章 外部设备（12学时）

正确理解打印机、显示设备、键盘、鼠标、触摸屏等输入输出设备的基本组成以及工作原理，辅助存储器的种类和技术指标，磁记录原理，磁记录方式（编码方式）和磁带、光盘的结构和工作原理。掌握磁盘存储器的结构和工作原理，磁盘存储器的容量、数据传输率、寻址时间等参数的计算方法。了解各级 RAID（冗余磁盘阵列）的具体实现方式。

第9章 输入输出系统（12学时）

正确理解输入输出系统的组成、I/O 与主机的连接方式、编址方式、信息交换方式以及 I/O 接口的功能、分类及基本组成；基本掌握程序直接控制和 I/O 通道两种信息交换方式，重点掌握程序中断和 DMA 两种信息交换方式。



目 录

序言
前言
教学建议

第1章 概论	1
1.1 计算机的发展史	1
1.1.1 第一代到第四代电子数字 计算机的简单回顾	1
1.1.2 第一台通用电子数字计算机 诞生的基础和历史背景	3
1.1.3 推动计算机体系结构发展的 重要事件	4
1.2 计算机系统的基本组成	6
1.2.1 计算机系统的软硬件 概念	6
1.2.2 计算机系统的硬件组成	7
1.2.3 计算机的软件系统	12
1.2.4 计算机系统的层次结构	14
1.3 计算机的性能指标	14
思考题与习题	16
第2章 数据在计算机中的表示	18
2.1 数值数据的表示	18
2.1.1 进位计数制及相互转换	18
2.1.2 数的符号表示	20
2.1.3 数的小数点表示	24
2.1.4 十进制数据表示	34
2.2 非数值数据的表示	35
2.2.1 逻辑数据	35
2.2.2 字符及字符串的表示	35
思考题与习题	39

第3章 计算机的算术运算	42
3.1 算术逻辑单元	42
3.1.1 加法器及其进位结构	42
3.1.2 多功能算术逻辑单元	51
3.2 定点运算	55
3.2.1 定点加减运算	55
3.2.2 定点乘法运算	60
3.2.3 定点除法运算	71
3.3 运算器组织	76
3.3.1 运算器组织	76
3.3.2 位片式运算器 AM2901	77
3.4 浮点运算	80
3.4.1 浮点加减运算	80
3.4.2 浮点乘除运算	84
3.4.3 浮点运算所需要的硬件	85
思考题与习题	85
第4章 存储系统	87
4.1 概述	87
4.1.1 存储器的主要技术指标	88
4.1.2 存储器的分类	89
4.1.3 存储系统的层次结构	91
4.1.4 存储体系	93
4.2 主存储器	94
4.2.1 主存储器基本结构与操作	94
4.2.2 半导体随机存储器	98
4.2.3 只读存储器 (ROM)	109
4.2.4 多体交叉存储器	112
4.2.5 校验码	113
4.2.6 相联存储器和双口 存储器	120

4.3 高速缓冲存储器	121	6.2.2 时序系统	165
4.3.1 Cache 的工作原理	122	6.3 模型机指令的执行过程	167
4.3.2 主存 - Cache 地址映象和 地址变换	123	6.3.1 模型机的数据通路	167
4.3.3 替换算法	126	6.3.2 模型机的指令系统	169
4.3.4 高速缓存的写策略	128	6.3.3 模型机的时序系统	170
4.4 虚拟存储器	129	6.3.4 模型机指令的执行过程	170
4.4.1 虚拟存储器概论	129	6.4 模型机控制器的硬布线设计	178
4.4.2 页式虚拟存储器	130	6.4.1 设计方法	178
4.4.3 段式及段页式虚拟 存储器	132	6.4.2 模型机组合逻辑控制器 框图	181
思考题与习题	135	6.5 模型机控制器的微程序设计	182
第5章 指令系统	137	6.5.1 微程序控制的基本原理	182
5.1 机器指令	137	6.5.2 微程序设计技术	185
5.1.1 机器指令格式	137	6.5.3 模型机的微程序设计	195
5.1.2 操作数类型和存储方式	141	6.5.4 微程序技术的应用	203
5.1.3 指令的操作类型	143	6.6 CPU 的流水线技术	205
5.2 寻址方式	146	6.6.1 流水线的基本概念	205
5.2.1 指令的寻址方式	147	6.6.2 流水线的分类	206
5.2.2 操作数的寻址方式	147	6.6.3 流水线中的主要问题	207
5.2.3 寻址方式举例	151	6.6.4 线性流水线的性能	207
5.3 指令格式举例	154	6.6.5 高级流水线	208
5.3.1 Pentium 指令格式	154	思考题与习题	208
5.3.2 Power PC 指令格式	155	第7章 总线	213
5.4 RISC 技术	156	7.1 总线概述	213
5.4.1 RISC 技术的提出	156	7.1.1 总线的组成	213
5.4.2 RISC 和 CISC 技术的 比较	157	7.1.2 总线性能指标	214
5.4.3 RISC 和 CISC 执行程序 所需的时间比较	158	7.1.3 总线标准	215
思考题与习题	159	7.2 总线结构	216
第6章 中央处理器	161	7.2.1 总线结构的物理实现	216
6.1 CPU 的功能和组成	161	7.2.2 多总线结构	216
6.1.1 CPU 的功能	161	7.3 总线控制	218
6.1.2 CPU 的组成	161	7.3.1 总线仲裁	218
6.2 时序控制方式与时序系统	163	7.3.2 总线通信控制	221
6.2.1 时序控制方式	163	7.4 实用总线标准	224
		7.4.1 PCI 总线	224
		7.4.2 PCI Express 总线	228
		思考题与习题	230

第8章 外部设备	232	第9章 输入输出系统	281
8.1 输出设备	232	9.1 概述	281
8.1.1 打印机	232	9.1.1 输入输出系统的组成	281
8.1.2 显示设备	240	9.1.2 I/O 设备与主机的连接 方式	281
8.2 输入设备	250	9.1.3 I/O 设备与主机的信息 交换方式	283
8.2.1 键盘	251	9.2 I/O 接口	284
8.2.2 鼠标器	253	9.2.1 I/O 接口的功能	284
8.2.3 触摸屏	254	9.2.2 I/O 接口的分类	285
8.3 辅助存储器	255	9.2.3 I/O 接口的基本组成	286
8.3.1 辅助存储器的种类与技术 指标	255	9.2.4 I/O 接口举例	287
8.3.2 磁记录原理	257	9.3 程序直接控制方式	292
8.3.3 编码方式	260	9.4 程序中断控制方式	293
8.3.4 磁盘存储器	262	9.5 DMA (直接存储器访问) 方式	307
8.3.5 RAID (冗余磁盘阵列)	268	9.6 I/O 通道方式	311
8.3.6 磁带存储器	273	思考题与习题	314
8.3.7 光盘存储器	273	参考文献	317
思考题与习题	278		

概 论

1.1 计算机的发展史

1.1.1 第一代到第四代电子数字计算机的简单回顾

第一代电子数字计算机的典型特征是使用电子管，所以也被称为电子管计算机时代。1946 年第一台 ENIAC (Electrical Numerical Integrator And Computer, 电子数字积分器和计算机, 见图 1-1) 计算机研制成功, 标志着电子管计算机时代的开始。

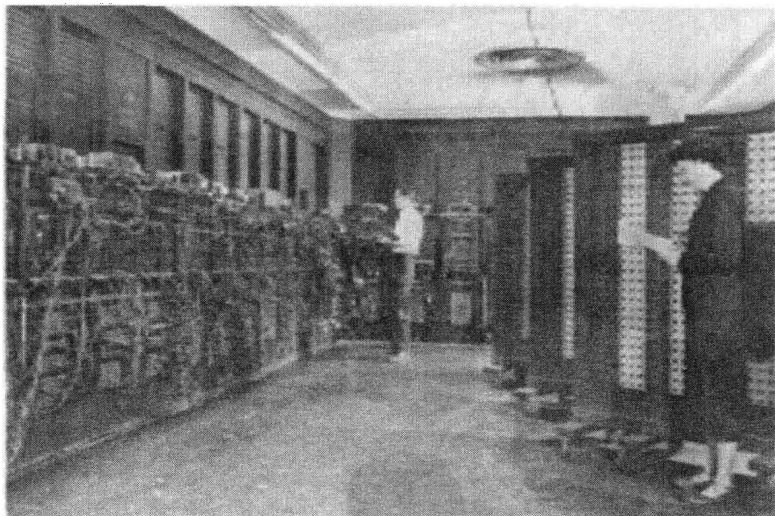


图 1-1 1946 年建成的包含 18000 个电子管的 ENIAC 计算机

第二代电子数字计算机的典型特征是使用晶体管，所以也被称为晶体管计算机时代。晶体管计算机时代开始于 20 世纪 50 年代中期。1955 年贝尔实验室建造的第一台全晶体管计算机 TRADIC (TRANsistor DIgital Computer) 标志着晶体管计算机时代的到来 (见图 1-2)。

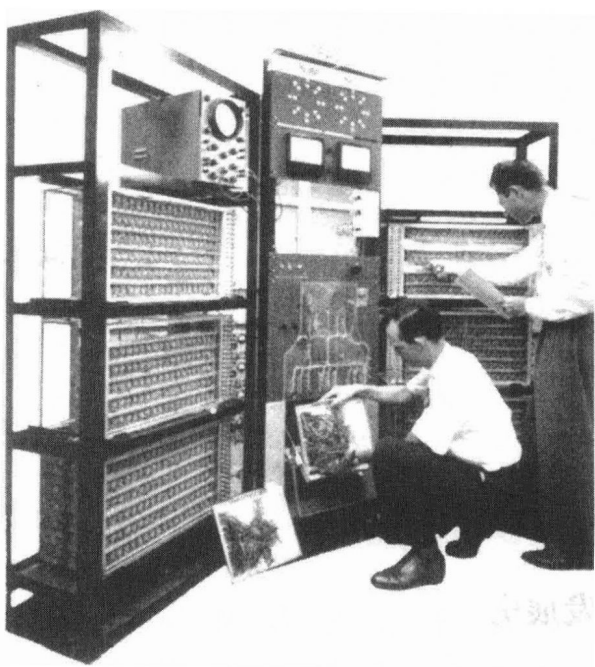


图 1-2 1955 年建成的 TRADIC 全晶体管计算机

第三代电子数字计算机的典型特征是使用集成电路，所以也被称为集成电路计算机时代。集成电路计算机时代开始于 20 世纪 60 年代中期，所采用的集成电路是小规模或中等规模集成电路。IBM 公司于 1964 年推出的 IBM 360 系统（见图 1-3）标志着集成电路计算机时代的开始。



图 1-3 1964 年推出的 IBM 360 集成电路计算机

第四代电子数字计算机的典型特征是使用大规模和超大规模集成电路，所以也被称为大

规模集成电路计算机时代。大规模集成电路计算机时代开始于20世纪70年代初期。IBM公司于1970年生产的IBM 370系列机（见图1-4）以及1971年Intel公司发布的4004微处理器（见图1-5）标志着大规模集成电路计算机时代的开始。



图 1-4 1970 年推出的 IBM 370 系列机

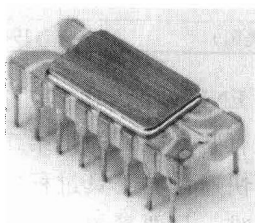


图 1-5 1971 年发布的 Intel 4004 微处理器

了解了电子数字计算机的发展历史，很多人都不免会问：电子数字计算机这么复杂的电子设备在60多年前是如何设计和制造出来的？设计第一台电子数字计算机的人是谁？为什么要设计这样的计算机？

1.1.2 第一台通用电子数字计算机诞生的基础和历史背景

从古至今，人们一直在不断地探求能够更快地进行计算的工具，可以说这种探求从来就没有停止过。客观地说，ENIAC之所以被称为第一台通用电子数字计算机，是因为ENIAC正好符合了后人对通用电子数字计算机特征的定义。

通用电子数字计算机必须具有如下四方面的特征：

- 用离散符号表示数据，即计算机内部的数据表示使用离散符号，这是区分数字计算机与模拟计算机的重要标志。
- 完全使用电子运算装置，即计算机内部的所有运算装置完全使用电子的形式，这是区分电子计算机、机电计算机和机械计算机的重要标志。
- 可以编写程序，即计算机的功能可以通过运行不同的程序而改变，这是区分通用计算机和专用计算机的重要标志。
- 图灵完备（Turing-complete），即如果一个计算系统能够计算任何图灵可计算问题（Turing-computable function），就称之为图灵完备。

表1-1简要列出了20世纪40年代初期出现的一些数字计算机的特征，从中可以看出无论计算机采用的数值是二进制还是十进制，都是使用离散符号表示数据，因此都是数字计算机；德国的Z3计算机和美国的Mark I计算机，由于运算机制是机电结合的方式，因此都不能称为电子计算机；美国的Atanasoff-Berry计算机明显是专用计算机，不能称为通用计算机；英国的Colossus计算机不具备图灵完备性；只有美国的ENIAC计算机完全具备了通用电子数字计算机的所有特征。

表 1-1 20 世纪 40 年代初期出现的一些数字计算机的特征

名 称	首次运行时间	数制	运算机制	程 序	图灵完备
Zuse Z3 (德国)	1941	二进制	机电	用穿孔软片 (punched film stock) 控制程序	是
Atanasoff-Berry Computer(美国)	1941	二进制	电子	不可编程——专用	否
Colossus (英国)	1944	二进制	电子	通过调整电缆和开关实现程序控制	否
Harvard Mark I-IBM ASCC (美国)	1944	十进制	机电	通过 24 路穿孔纸带实现程序控制 (但是没有条件分支)	是
ENIAC (美国)	1946	十进制	电子	通过调整电缆和开关实现程序控制	是

由于 ENIAC 诞生在第二次世界大战期间, 当时研制 ENIAC 的目的又是计算火炮弹道参数, 因此有些人就认为是第二次世界大战造就了 ENIAC。实际上 ENIAC 的诞生是人类在不断探索更快速计算工具过程中的必然产物, 第二次世界大战只是催生了 ENIAC。要证明这一点并不难, 只要简单回顾一下 ENIAC 诞生前的一系列重要事件, 就会得出这样的结论。

1834 年 Charles Babbage 在他所设计的十进制分析机 (decimal analytical engine) 中就使用了程序, 并把程序存储在穿孔卡片 (punch card) 上。

1848 年英国数学家 George Boole 提出二进制代数 (布尔代数 Boolean algebra), 为一个世纪之后研究二进制计算机提供了方法。

1906 年 Lee De Forest 在美国发明了电子管, 为研究数字电子计算机提供了可能。

1919 年 William Henry Eccles 和 F. W. Jordan 发表了第一个可以作为一位存储器的触发器电路 (flip-flop circuit)。

1924 年 Walther Bothe 搭建了第一个“与”逻辑门电路。

1936 年图灵 (Alan Turing) 为证明“可计算性”问题, 提出了图灵机 (Turing machine) 的概念, 从理论上证明了制造出通用计算机的可能性。

1941 年美国的 Atanasoff-Berry Computer (简称 ABC) 计算机使用电子管进行运算, 成为世界上第一台使用电子管进行运算的计算机。

1944 年英国的 Colossus 计算机不仅使用电子管进行运算, 而且所使用的电子管数量已经达到 2400 个。

1946 年由 John W. Mauchly 和 J. Presper Eckert 研制的使用了 18000 个电子管的计算机 ENIAC 在美国诞生。

1.1.3 推动计算机体系结构发展的重要事件

众所周知, 电子器件从电子管、晶体管、集成电路、大规模集成电路到超大规模集成电路的不断变化, 推动了电子数字计算机的不断发展, 使得计算机体积越来越小, 运算速度越来越快, 而且价格越来越低。在现代计算机发展过程中, 除了电子器件这个推动计算机不断发展变化的因素外, 还有一些重要因素促进了计算机体系结构的发展。

1. 冯·诺伊曼体系结构

1945 年冯·诺伊曼 (Von Neumann) 在“First Draft of a Report on the EDVAC”中提出存储程序的概念。EDVAC 是在 ENIAC 基础上提出的改进机型。1946 年 Von Neumann, Burks 和 Goldstine 在他们的论文“Preliminary Discussion of the Logical Design of an Electronic

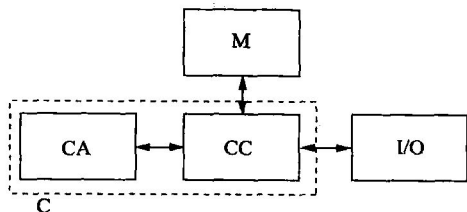
Computing Instrument”中提出：一台计算机有五个部分，即一个算术逻辑单元，一个控制单元，一个存储器，一些输入/输出设备和在这些部分之间提供数据通路的总线。这样的计算机按照如下步骤执行：

- 1) 以程序计数器的内容为地址，从存储器中取出下一条指令；
- 2) 给程序计数器的内容加上这条指令的长度（即这条指令占用几个字，也称为字长）；

3) 控制单元对这条指令译码，控制单元根据译码结果命令计算机的其他部分执行一些操作；指令可以改变程序计数器的内容，以便执行循环操作或分支操作；

- 4) 返回第1步。

冯·诺伊曼等人提出的构成计算机的五个基本部分和计算机执行的四个基本步骤，最终形成了“冯·诺伊曼体系结构”，如图1-6所示。



其中：M是存储器（memory）

CA是中央算术单元（central arithmetical unit）

CC是中央控制单元（central control unit）

I/O是输入和输出设备（input/output devices）

图1-6 冯·诺伊曼体系结构

2. 中断

纯粹冯·诺伊曼体系结构的计算机是一种完全串行的工作模式，而且程序的执行过程也完全按照事先安排好的顺序执行。

1951年 Presper Eckert 和 John Mauchly 在设计 UNIVAC I 计算机时，为了能够使计算机自动处理运算溢出问题，第一次设计并实现了自动处理异常情况的方法。具体的处理方法是：

- 在主存的0地址单元存放两条指令。
- 当计算机系统出现程序员设定的异常情况时（如：运算溢出等），计算机就自动地执行存放在主存0地址单元的指令。
- 如果在主存的0地址单元放入停机指令，一旦在程序运行过程中出现运算溢出等异常情况，计算机就可以停止运行。如果在主存0地址单元放入转移到异常处理程序入口的指令，一旦在程序运行过程中出现运算溢出等异常情况，计算机就可以转去执行预先设置好的异常处理程序。

这种处理异常情况的方法，就相当于在出现运算溢出等异常情况时，在正常的程序执行顺序中插入另一段处理程序。由于事先根本无法预知何时会出现运算溢出等异常情况，因此也就无法预知插入程序的位置。在无法预知程序插入位置的情况下实现一段程序的插入，正是 UNIVAC I 计算机的一项重要贡献。

1954年，美国国家标准局 NBC(National Bureall Standards) 与美国国防部合作开发的计算机 DYSEAC 第一次使用了 I/O 中断。在 NBS DYSEAC 中设计了两个程序计数器，一个用于保存主程序的地址，另一个用于保存 I/O 程序的地址，I/O 信号能够使程序在两个程序计数器之间切换，从而实现了在主程序和 I/O 程序之间的切换。I/O 中断的重要意义在于实现了 CPU 与 I/O 的并行执行。

1955年 UNIVAC 1103A 计算机中设计了新的中断处理方式。在 UNIVAC 1103A 中只有一个程序计数器，当发生中断时，程序计数器的值被存储到一个固定的存储单元，然后用一个固定的地址更新程序计数器，从而实现了从当前程序到中断处理程序的切换。

1957年 IBM Stretch 计算机把中断、中断向量和条件转移结合在一起，具备了中断源查找和自动执行相应的中断处理程序的能力。

3. 虚拟存储器

1958年由英国曼彻斯特大学研制的Atlas计算机,第一次使用了虚拟存储器技术,1962年Atlas计算机投入运行。在Atlas计算机中16K字的主存储器由磁心存储器(core store)构成,96K字的辅助存储器由磁鼓存储器(drum store)构成。Atlas计算机的设计者通过虚拟存储器技术把主存储器和辅助存储器集成在一起。虚拟存储器的核心思想就是把当前使用的部分程序放在主存储器中,而把暂时不使用的部分程序放在辅助存储器中,但是给程序员的感觉是计算机有很大的主存储器。Atlas计算机的虚拟存储器技术开创了层次结构存储系统的先河,特别是后来出现的高速缓冲存储器(cache memory)基本上使用的就是虚拟存储器的思想。

磁鼓存储器是一种在20世纪50~60年代广泛使用的计算机存储器形式,磁鼓存储器属于顺序访问存储器,速度相对比较慢。磁心存储器属于随机访问存储器,速度比磁鼓存储器快而且没有运动部件。在计算机的发展过程中,磁心存储器逐步取代了磁鼓存储器。

4. 指令流水线

1956年IBM公司启动了一个名为Stretch的项目,计划开发出比当时最新的IBM 704计算机快100倍的高性能超级计算机系统。指令流水线的概念就是在Stretch项目中提出的,并在IBM 7030(Stretch)计算机上实现了指令流水线。第一台IBM 7030(Stretch)计算机于1960年提交给美国洛斯阿拉莫斯科学实验室(Los Alamos Scientific Laboratory)。

指令流水线的基本思想是把指令的执行过程划分成几个不同的阶段,并设法使几条指令分别处于不同的执行阶段,从而提高了处理器的指令吞吐量。一个五段指令流水线的指令执行过程示意如图1-7所示。指令流水线第一次使计算机可以同时处理多条指令,第一次实现了在CPU内部指令的并行执行。

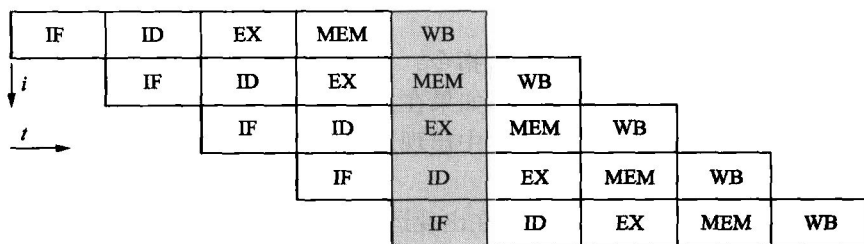


图 1-7 指令流水线指令执行过程示意图

(其中 IF 表示取指, ID 表示译码, EX 表示执行, MEM 表示存储器访问, WB 表示寄存器写回)

1.2 计算机系统的基本组成

1.2.1 计算机系统的软硬件概念

一个完整的计算机系统应该包括硬件和软件两大部分。硬件是指构成计算机的所有物理部件的集合,这些部件是由电子元器件,各类光、机电设备,电子线路等构成的有形物体。软件是指运行、维护、管理及应用计算机所编制的所有程序的总和。计算机依靠硬件和软件的协同工作完成一个具体任务,两者缺一不可。硬件是计算机系统的物质基础,软件必须在硬件的支持下才能运行。但是仅有硬件的计算机称为“裸机”,裸机是不能工作的。计算机