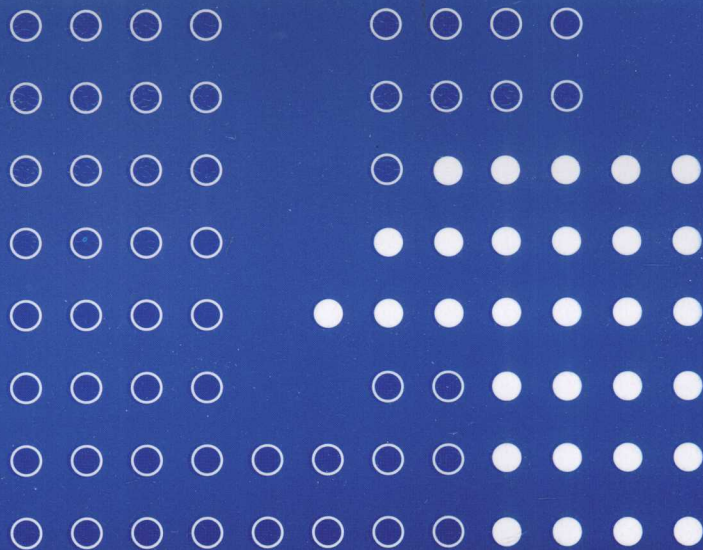
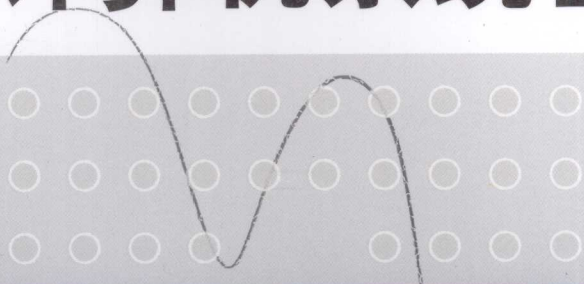


计算机系列教材

计算机系统基础



张羽 黄小平 编著

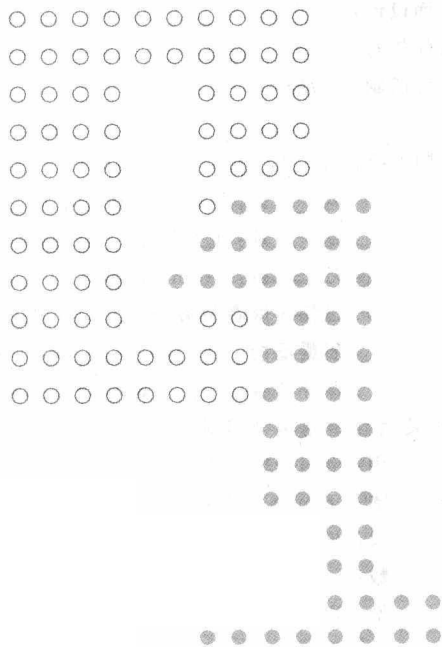
清华大学出版社



计算机系列教材

张羽 黄小平 编著

计算机系统基础



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书以“层次转换”的方法介绍与计算机系统相关的核心概念和基本原理,试图帮助初学者建立计算机系统的整体概念及“系统观”。本书共分6章,主要内容包括计算机系统发展简史、数据和程序的机器级表示、数字逻辑基础、冯·诺依曼结构与哈佛结构、计算机组成与指令集结构、编译器工作原理、虚拟内存、上下文切换、Internet原理、无线网络及移动社交网络系统等。

本书可用作高等院校计算机专业和物联网工程等相关专业学生的入门教材,也可作为计算机专业人士和技术人员的参考书。

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

计算机系统基础/张羽,黄小平编著. --北京:清华大学出版社,2016

计算机系列教材

ISBN 978-7-302-43825-0

I. ①计… II. ①张… ②黄… III. ①计算机系统—教材 IV. ①TP30

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第101705号

责任编辑:张民 战晓雷

封面设计:常雪影

责任校对:时翠兰

责任印制:王静怡

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 装 者:北京国马印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:15.5 字 数:357千字

版 次:2016年10月第1版 印 次:2016年10月第1次印刷

印 数:1~2000

定 价:33.00元

产品编号:064529-01

随着移动互联网、物联网和云计算的快速发展,全社会范围的计算机化显著增强,而如何培养担当这些技术发展重任的计算机专业人才的问題,国内外的专家学者和一批计算机界的有识之士进行了深入的研究和有益的探讨。其中一个重要的共识是:与其他专业相比,计算机专业的人才培养应该更加突出“系统思维”,应该使学生能站在计算机系统整体的高度解决今后面临的应用问題。

作为西北工业大学计算机学院教学改革和陕西省教育厅本科高校“专业综合改革试点”项目中具体落实建设思路的关键内容,本书就计算机专业学生如何建立“系统观”提供了一条学习途径。与目前国内外出版的计算机系统基础类书籍相比,本书有两个基本特色:第一,试图结合自顶向下和自底向上两种方法,阐述计算机系统的基本概念和原理。综合程序员视角和系统构建视角的核心内容,讲授计算机系统各层次之间的转换。同时,不拘泥于单计算机系统内部,而面向更加开放的网络分布式计算环境,实现计算机系统含义的延展;第二,结合国内多年一线教学实践经验及本科计算机专业课程总学时规划的现实需求,对“系统观”和“程序与计算思维”进行统筹考虑和设计,使与之对应的“计算机系统基础”与“程序设计基础”课程相互呼应、相互配合。同时,在内容设计上做好后续计算机专业核心课程(数字逻辑、计算机组成原理、数据结构、编译原理、操作系统和计算机网络)的知识铺垫。

编写本书的主要动机是让刚进入大学校门的学生,在一开始学习计算机专业课程时就对构成计算机专业基础的“计算机系统”有一个整体的、全局的和较为深入的理解,这是一项具有挑战性的任务。我们希望本书有助于具有相关教学经验的老师交流关于如何培养学生“系统思维”能力的见解,为进一步促进计算机专业人才培养贡献一份力量。

本书共6章。第1章是计算机系统的导论,讲述为计算机系统的形成奠定重要基础的人物及事件,并介绍计算机系统中的几个关键概念。第2章阐述计算机系统中的信息表示,以自顶向下的方法揭示抽象数据和高级语言程序到物理的机器级表示之间的层次转换关系。第3章介绍计算机系统中的硬件基本组成,计算机硬件自底向上的层次关系以及计算机系统结构。第4章介绍高级语言程序转换成计算机硬件语言指令集组合的工作原理,并考察代码优化与计算机硬件之间的内在关系。第5章介绍计算机系统核心软件——操作系统,并通过一个高级语言示例程序,揭示应用程序、操作系统与计算机硬件之间的交互机制。第6章介绍计算机网络系统中的关键内容,以全球最大的网

络——Internet 和当前迅猛发展的移动互联网络系统为线索,阐述多计算机系统之间的软、硬件交互机制和工作原理。

本书是多人智慧的结晶,由张羽和黄小平编著。此外,参加本书编写的人员还有张艳、郭丽、姚朋宾、刘永吉、王时雨、李林、庞晓旭、魏明菲、张谦、覃伟等。本书也是多年讲义的实践成果与积淀,感谢各位同仁和各届学生对本书原讲义内容所提出的宝贵反馈和改进意见。

感谢清华大学出版社和西北工业大学在本书编写过程中提供的支持。特别感谢本书责任编辑清华大学出版社的张民和战晓雷老师,他们极其专业细致的审校和编辑工作为本书的出版质量提供了可靠的保证。

由于计算机系统相关技术的不断发展,加之作者水平有限,书中难免存有不足之处,恳请广大读者批评指正,我们的电子邮箱是 zhangyu@nwpu.edu.cn。

编者

2016年7月

于西安

F O R E W O R D

第 1 章 绪论 /1

- 1.1 计算机系统发展简史 /1
 - 1.1.1 计算机系统硬件发展史 /1
 - 1.1.2 计算机系统软件发展史 /9
- 1.2 计算机系统概述 /29
 - 1.2.1 计算机系统概念 /29
 - 1.2.2 本书结构 /35
- 习题 /36

第 2 章 计算机系统中信息表示 /37

- 2.1 数据的机器级表示 /37
 - 2.1.1 位和数据类型 /37
 - 2.1.2 整数数据类型 /38
 - 2.1.3 字符数据类型 /40
 - 2.1.4 浮点类型 /42
 - 2.1.5 十六进制表示法 /43
 - 2.1.6 基本运算举例 /44
- 2.2 程序的机器级表示 /47
 - 2.2.1 数据格式 /50
 - 2.2.2 数据访问 /51
 - 2.2.3 算术和逻辑操作 /55
 - 2.2.4 控制 /58
 - 2.2.5 过程 /74
 - 2.2.6 数组分配和访问 /79
 - 2.2.7 结构和联合 /84
- 习题 /88

第 3 章 计算机系统硬件 /90

- 3.1 数字逻辑基础 /91
 - 3.1.1 数字硬件 /91

3.1.2	逻辑基础	/92
3.1.3	晶体管开关	/96
3.2	冯·诺依曼结构与哈佛结构	/99
3.3	计算机系统组成	/100
3.3.1	计算机基本组成	/100
3.3.2	微处理器	/102
3.3.3	存储器	/104
3.3.4	输入输出以及总线	/107
3.4	计算机指令集体系结构	/110
3.4.1	指令集体系结构概念	/110
3.4.2	指令集分类和设计	/111
3.4.3	几种典型的指令集	/113
	习题	/116

第4章 编译系统 /118

4.1	计算机系统语言处理	/118
4.1.1	编译器	/119
4.1.2	汇编器	/120
4.2	编译器前端技术	/121
4.2.1	词法分析	/122
4.2.2	语法分析	/123
4.2.3	语法制导翻译	/127
4.2.4	符号表	/128
4.3	目标代码生成	/131
4.3.1	代码生成	/131
4.3.2	代码优化	/132
	习题	/133

第5章 操作系统 /134

5.1	计算机操作系统概述	/134
5.1.1	操作系统的定义、功能 以及基本特征	/134

- 5.1.2 操作系统的分类 /138
- 5.1.3 用户与操作系统的接口 /142
- 5.2 操作系统和应用程序的启动 /144
 - 5.2.1 操作系统启动 /144
 - 5.2.2 应用程序启动 /147
- 5.3 应用程序、操作系统、系统硬件的交互 /148
 - 5.3.1 交互概述 /148
 - 5.3.2 输入和输出 /153
 - 5.3.3 文件与目录 /156
 - 5.3.4 虚拟存储器 /160
 - 5.3.5 上下文切换 /169
- 习题 /170

第 6 章 计算机网络系统 /171

- 6.1 因特网原理 /171
 - 6.1.1 什么是因特网 /171
 - 6.1.2 网络边缘 /176
 - 6.1.3 网络核心 /179
 - 6.1.4 协议层次及其服务模型 /183
- 6.2 因特网技术基础 /188
 - 6.2.1 TCP/IP 协议 /188
 - 6.2.2 IP 地址 /189
 - 6.2.3 域名系统 /191
 - 6.2.4 客户/服务器模式 /194
- 6.3 无线网络原理 /195
 - 6.3.1 无线网络概述 /195
 - 6.3.2 无线通信 /196
 - 6.3.3 无线网络拓扑 /198
- 6.4 无线网络实例 /202
 - 6.4.1 Wi-Fi: IEEE 802.11 无线局域网 /202
 - 6.4.2 IEEE 802.11 以外的标准:
蓝牙和 WiMAX /205

6.4.3	蜂窝网络	/207
6.4.4	无线传感器网络	/211
6.4.5	无线 Mesh 网络	/217
6.5	社交网络基础	/223
6.5.1	社交网络的发展	/224
6.5.2	在线社交网络	/226
6.5.3	移动社交网络	/231
	习题	/235
	参考文献	/236

第 1 章 绪 论

1.1 计算机系统发展简史

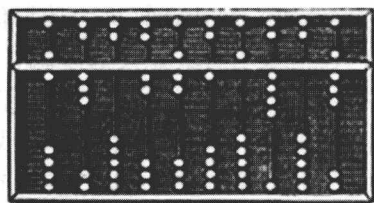
计算的历史十分悠久,它可以解释为什么计算机系统是今天这个样子。本节讲述为计算机系统的形成奠定重要基础的人物及事件,从计算机系统硬件和软件发展的两条线索来揭示计算机系统进化的脉络。

1.1.1 计算机系统硬件发展史

辅助人们进行各种计算的设备自古就有,直到今天它们还在不断进化。让我们先来了解一下计算机系统硬件发展的历史。

1. 早期历史

计算机的英文 computer 原意是从事数据计算的人。而他们往往都需要借助于某些机械计算设备或模拟计算机。这些早期计算设备包括算盘(图 1-1)以及可以追溯到公元前 87 年被古希腊人用于计算行星移动的安提凯希拉仪器。随着中世纪末期欧洲数学与工程学的再次繁荣,1623 年德国科学家威尔汉姆·施卡德(Wilhelm Schickard)率先研制出了欧洲第一部计算设备,这部机械装置改良自时钟的齿轮技术,能进行六位以内数的加减,并由钟声输出答案,因此又称为“算数钟”,可惜后来毁于火灾,威尔汉姆·施卡德也因战祸而逝。到 1633 年,英国数学家威廉·奥特雷德(William Oughtred)利用对数原理发明了一种圆形计算工具——比例环(Circles of Proportion),后来逐渐演变成近代的计算尺(图 1-2)。直到口袋型计算器发明之前,工程师以及与数学相关的专业人士都使用过计算尺。美国阿波罗计划的工程师甚至利用计算尺将宇航员送上了月球,其计算精度达到 3 或 4 位的有效数字。1642 年法国数学家帕斯卡(图 1-3)为疲于税务计算的税务员父亲发明了滚轮式加法器(图 1-4),可通过转盘进行加法运算。1673 年德国数学家莱布尼茨(图 1-5)将阶梯式圆柱齿轮加以改良,制作出了可以进行四则运算的步进计算器(图 1-6),可惜其成本高昂,不受当时人们的重视。



6 3 0 2 7 1 5 4 0 8

图 1-1 算盘

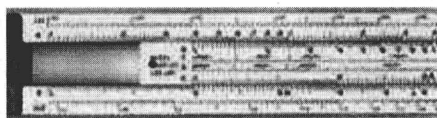


图 1-2 可计算乘除的计算尺



图 1-3 法国数学家帕斯卡

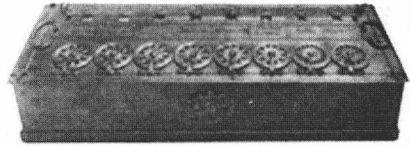


图 1-4 滚轮式加法器



图 1-5 德国数学家莱布尼茨

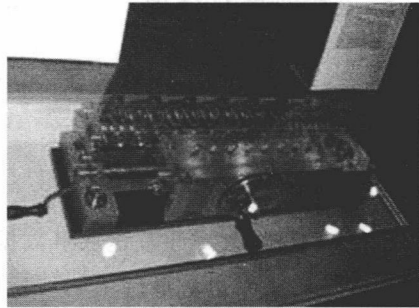


图 1-6 步进计算器

1725年,法国纺织工人鲁修为便于转织图样,在织布机套上穿孔纸带,他的合作伙伴则在1726年着手改良设计,将纸带换成相互串连的穿孔卡片,实现了仅需手工进料的半自动化生产。1801年,法国人约瑟夫·玛丽·雅卡尔(Joseph-Marie Jacquard)发明了提花织布机,利用打孔卡控制织花图样,与前者不同的是,这种织布机变更串连的卡片时无须更改机械设计,此举被视为可编程机器发展史上的里程碑。

1820年,英国数学家查尔斯·巴贝奇(Charles Babbage)(图 1-7)构想和设计了第一部完全可编程计算机,他称之为分析机。巴贝奇在1835年提到,分析机是一台通用的可编程化计算机,以蒸汽引擎驱动,吸收了提花织布机的优点,使用打孔卡输入数据,其中的重要创新是用齿轮模拟算盘的算珠。巴贝奇设计分析机的基本想法是利用“机器”将计算到印刷的过程全部自动化,全面去除人为疏忽导致的错误(如计算错误、抄写错误、校对错误、印制错误等)。尽管巴贝奇的设计方向正确(仅需部分修正),制造计算机的计划仍因各种问题而连连受挫。究其原因,一是巴贝奇难以共事,任何人不合其意便起争端;二是他的机器全是手工打造,上千个零件只要一个零件有一点差错,就会引起重大错误,因此需要远超寻常的制造公差。最后英国政府不愿继续提供资助,在资金告罄后,这项计划夭折了。虽然巴贝奇的构想没有实现,但是,在他的设计中却包含了许多现代计算机的重要硬件部件。他的设计中第一次出现了内存,这使中间值不必再重新输入。此外,他的设计还包括数字输入法和机械输入法。后人按照巴贝奇的设计制造的分析机如图 1-8 所示。

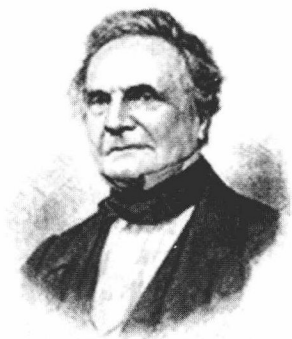


图 1-7 英国数学家巴贝奇

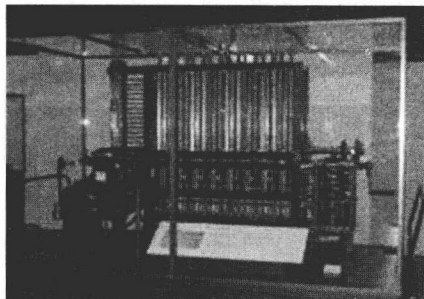


图 1-8 后人制造的分析机

洛夫雷斯(Lovelace)伯爵夫人艾达·奥古斯塔(Ada Augusta)是计算机历史上的传奇人物。艾达是英国诗人拜伦(Lord Byron)的女儿,也是一位杰出的数学家。她对巴贝奇的分析机非常感兴趣,在 1842 年与 1843 年期间,艾达花了 9 个月的时间翻译意大利数学家费德里科·路易吉讲述查尔斯·巴贝奇分析机的论文。在译文后面,她增加了许多注记,详细说明用该机器计算伯努利数的方法,被认为是世界上第一个计算机程序,艾达也因此被认为是世界上第一位程序员。循环——一系列重复执行的指令——的概念也归功于她。美国国防部广泛使用的 Ada 程序设计语言就是以她的名字命名的。

2. 电子计算机的孕育与诞生

1936 年,英国数学家、逻辑学家艾伦·图灵(Alan M. Turing,图 1-9)发表的《论数字计算在决断难题中的应用》,他在这篇论文中提出了图灵机的抽象数学模型(图 1-10),为现代计算机的逻辑工作方式奠定了基础,因此艾伦·图灵被视为“计算机科学之父”。计算机科学这一领域的荣誉最高奖项——图灵奖也以他的名字命名(相当于数学领域的菲尔兹奖章或自然科学领域的诺贝尔奖)。



图 1-9 计算机科学之父——图灵

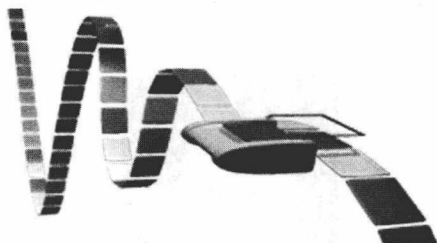


图 1-10 图灵机的艺术表示

到第二次世界大战爆发时,已经有几台计算机处于设计和建造中。马克一号(Harvard Mark I)和 ENIAC 是当时最著名的两台机器。1939 年,马克一号(图 1-11)在 IBM 公司安迪卡特(Endicott)实验室产生,其正式名称为自动化顺序控制计算机

(Automatic Sequence Controlled Calculator, ASCC), 是一般用途的电动机械计算机, 由哈佛大学数学家霍华德·艾肯(图 1-12)任总指挥。马克一号参考了巴贝奇分析机, 使用十进制、转轮式储存器、旋转式开关以及电磁继电器, 由数个计算单元平行控制, 经由打孔纸带进行计算(改良后由纸带读取器控制, 并可依条件切换读取器)。

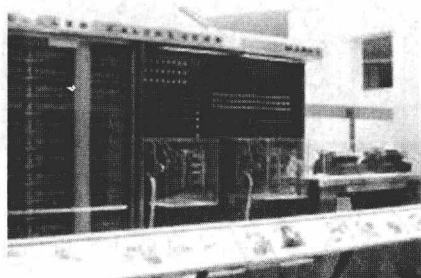


图 1-11 马克一号

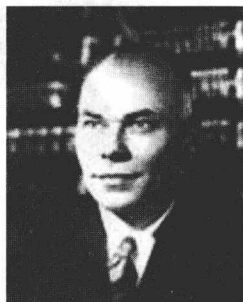


图 1-12 霍华德·艾肯

虽然马克一号被认为是第一部通用计算机, 但其实并没达到图灵完全条件。马克一号后来移至哈佛大学, 于 1944 年 5 月开机启用。由美国宾夕法尼亚大学的物理学家约翰·莫奇莱(John Mauchly)和该校莫尔电气工程学院的学生约翰·埃克特(J. Presper Eckert)(图 1-13)指导建造的 ENIAC (Electronic Numerical Integrator And Computer)被认为是世界上第一部通用的电子计算机。它是满足图灵完全条件的电子计算机, 能够重新编程, 解决各种计算问题, 为美国陆军的弹道研究实验室(BRL)所使用, 用于计算火炮的火力表。ENIAC(图 1-17)被公认为现代计算机发展史上重要的里程碑。



图 1-13 约翰·莫奇莱(左)和约翰·埃克特(右)

1945 年 6 月, 冯·诺依曼(图 1-14)与戈德斯坦、勃克斯等人联名发表了一篇长达 101 页纸的报告, 即计算机史上著名的“101 页报告”(图 1-15)。该报告总结和详细说明了



图 1-14 约翰·冯·诺依曼

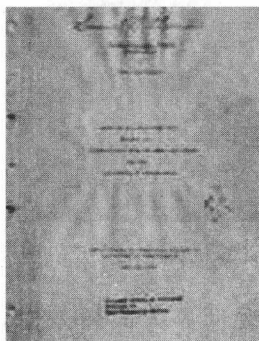


图 1-15 “101 页报告”封面

EDVAC 的逻辑设计,是现代计算机发展里程碑式的文献。报告还明确规定用二进制替代十进制运算,首次提出存储程序的概念,并将计算机分成五大组件(图 1-16),这一卓越的思想为电子计算机的逻辑结构设计奠定了基础,已成为计算机设计的基本原则。由于冯·诺依曼在计算机逻辑结构设计上的伟大贡献,被誉为“计算机之父”。

负责开发 ENIAC 的约翰·莫奇莱和约翰·埃克特认识到 ENIAC 的局限后,便又着手进行改良,最终 EDVAC 诞生,并于 1949 年 8 月交付给弹道研究实验室(图 1-17),但在发现和解决许多实际问题之后,直到 1951 年 EDVAC 才开始运行。除军用计算机之外,约翰·莫奇莱和约翰·埃克特成立的埃克特·莫奇莱公司研发了 UNIVAC I(图 1-18),但由于资金困难,1950 年被雷明顿兰德公司收购。1951 年,美国人口普查局购得了第一台 UNIVAC I。为了提高销售量,雷明顿兰德公司与美国哥伦比亚广播公司(CBS)合作预测 1952 年的美国总统选举。由于 UNIVAC I 成功预测艾森豪威尔将击败当时的竞选热门人物阿德莱·史蒂文森,使得计算机技术在大众中获得了极大的认知,UNIVAC I 也被视为第一台商用计算机。

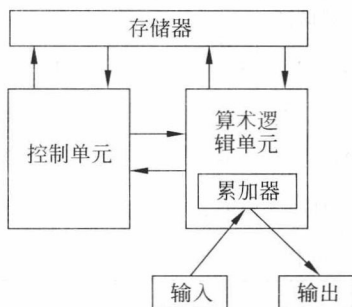


图 1-16 冯·诺依曼结构

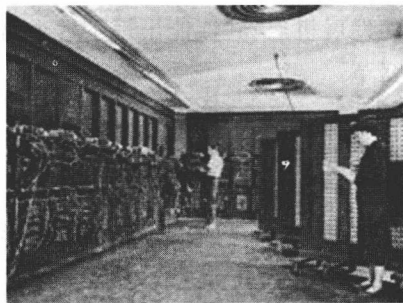


图 1-17 正以 160kW 电力作弹道运算的 ENIAC

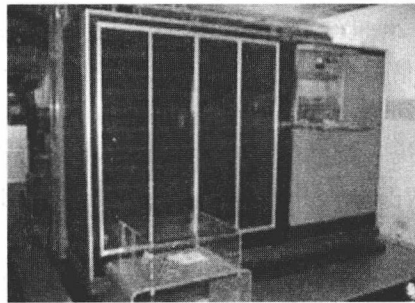


图 1-18 陈列在维也纳科技博物馆的 UNIVAC

1951 年后,计算机被越来越广泛地用来解决各个领域中的问题。从那时起,探索的重点不仅在于建造更快更大的计算设备,而且在于开发能让人们更有效地使用这些设备的工具。

3. 计算机的五个发展阶段

由于早期的计算机硬件发展受电子元器件的影响很大,因此人们通常用元器件来系统划分计算机的发展历程,如表 1-1 所示。

1) 第一代: 电子管计算机

第一代计算机采用电子管存储信息。电子管(图 1-19)会大量发热,而且非常不可靠。因此,使用电子管的计算机需要大型空气调节装置,并且需要不断维修。此外,它们

表 1-1 按元器件划分的计算机发展阶段

发展阶段	时间	硬件技术	速度(次/秒)	代表机器
第一代	1946—1957年	电子管	40 000	IBM 701
第二代	1958—1964年	晶体管	200 000	IBM 7094
第三代	1965—1971年	中、小规模集成电路	1 000 000	IBM System/360、DEC PDP-8
第四代	1972—1977年	大规模集成电路	10 000 000	Altair 8800
第五代	1978年至今	超大规模集成电路	100 000 000	IBM Blue Gene/L、天河二号

还需要占用很大的空间,耗电量也很大。其存储设备比较落后,最初使用延迟线和静电存储器,容量很小,后来采用磁鼓(磁鼓在读/写臂下旋转,当被访问的存储器单元旋转到读/写臂下时,数据被写入这个单元或从这个单元中读出),有了很大改进。输入设备是读卡机,可以读取穿孔卡片上的孔,输出设备是穿孔卡片机和行式打印机,速度很慢。自从ENIAC问世后,人类为提高电子计算机性能一直不懈努力,20世纪50年代初,除美国外,英、法、苏联、意大利等国都相继研制出本国的第一台电子计算机,我国也于1958年研制成功第一台电子计算机。可是在这十多年的时间里,计算机的性能并未出现明显提高,它的运算速度每秒仅在数千次至上万次左右,其体积虽然不像ENIAC那样庞大,但也占了相当大的空间,耗电量也很大。在整个20世纪50年代,电子管计算机居于统治地位。直到20世纪50年代末,计算机技术迎来了一次大的发展机遇,其性能出现了数十倍以至几百倍的提高,这就是用晶体管代替电子管的重大变革。

2) 第二代: 晶体管计算机

第一个晶体管(图1-20)是在1947年由美国贝尔实验室的三位物理学家威廉·肖克利(William Shockley)、约翰·巴丁(John Bardeen)和沃尔特·布拉顿(Walter Brattain)(图1-21)利用半导体硅作为基片制成的。它的小体积、低功耗以及载流子高速运行的特点使电子管望尘莫及。进入20世纪50年代后,全球出现了一场以晶体管代替电子管的革命,计算机的性能有了很大的提高。以IBM 700/7000系列为例,晶体管机7094(1964年)与电子管机701(1952年)相比,其主存容量从2K增加到32K字,存储周期从 $30\mu\text{s}$ 下降到 $1.4\mu\text{s}$;指令操作码数从24增加到185,运算速度从每秒上万次提高到每秒50万次。



图 1-19 电子管

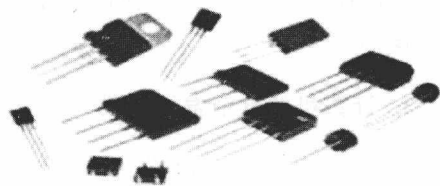


图 1-20 晶体管

尽管用晶体管代替电子管已经使电子计算机的面貌焕然一新,但是随着人们对计算机性能越来越高的追求,新的计算机所包含的晶体管个数已从一万个左右骤增到数十万

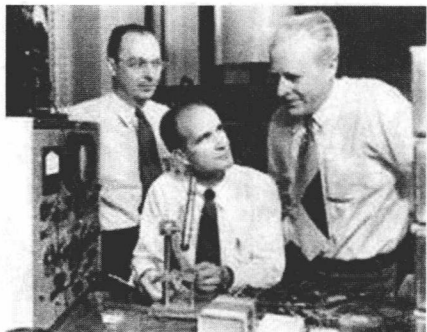


图 1-21 约翰·巴丁(左),威廉·肖克利(中)和沃尔特·布拉顿(右)

个,人们需要把晶体管、电阻、电容等一个个元件都焊接到一块电路板上,再由一块块电路板通过导线连接成一台计算机。其复杂的工艺不仅严重影响制造计算机的生产效率,更严重的是很难避免由几十万个元件的几百万上千万个焊点所造成的不可靠性。

随着 1958 年微电子学的深入研究,特别是新的光刻技术和设备的成熟,为计算机的发展又开辟了一个崭新的时代——集成电路时代。

3) 第三代:中、小规模集成电路计算机

第二代计算机中,晶体管和其他计算机元件都被手工集成在印刷电路板上。第三代计算机的特征是集成电路(IC),它使计算机的逻辑元件与存储器均可由集成电路来实现。1958 年,德州仪器公司的电气工程师、2000 年诺贝尔物理学奖得主杰克·基尔比(Jack Kilby,图 1-22)和仙童半导体公司及 Intel 公司的主要创始人、“硅谷之父”罗伯特·诺伊斯(Robert Noyce,图 1-23)同时独立发明了集成电路。它比印刷电路小,更便宜、更快并且更可靠,该项技术又一次大大缩小了计算机的体积,大幅度降低了耗电量,极大地提高了机器的可靠性。人们将由小规模集成电路(SSI)和中等规模集成电路(MSI)构建的计算机称为第三代计算机。其典型的代表为 IBM 公司的通用计算机 IBM 360 和 DEC 公司的 PDP 系列机。Intel 公司另一位创始人戈登·摩尔(Gordon Moore,图 1-24)注意到,一个集成电路上可容纳的晶体管数目约每隔 24 个月便会增加一倍,这就是著名的摩尔定律。

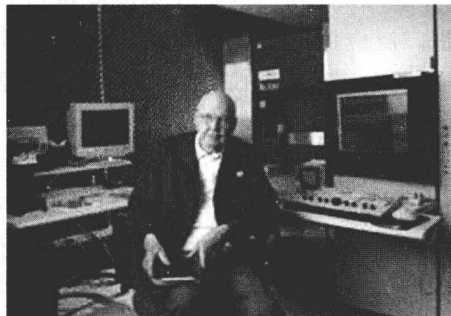


图 1-22 杰克·基尔比



图 1-23 罗伯特·诺伊斯

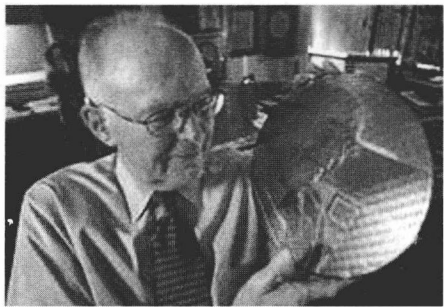


图 1-24 戈登·摩尔

从 1946 年的 ENIAC 到 1964 年的 IBM 360, 历时不到 20 年, 计算机的发展经历了电子管—晶体管—集成电路三个阶段。显然, 早期计算机的更新换代主要集中在组成计算机基本电路的元器件(电子管、晶体管、集成电路)上。

4) 第四代: 大规模集成电路计算机

大规模集成化是第四代计算机的特征。20 世纪 70 年代早期, 一个硅片上可以集成几千个晶体管, 而 80 年代中期, 一个硅片则可以容纳整个微型计算机。在过去的 40 年中, 每一代计算机硬件的功能都变得越来越强大, 体积越来越小, 价格也越来越低。摩尔定律被改为芯片的集成度每 18 个月增长一倍。

进入 20 世纪 70 年代后, 把计算机当做高级工具的狭隘观念已被人们逐渐摒弃, 计算机成为一门独立的学科而迅速发展, 并影响、改变着人类的生活方式。20 世纪 70 年代末, 词汇表中出现了个人计算机(Personal Computer, PC)这个术语。

5) 第五代: 超大规模集成电路计算机

超大规模集成电路的晶体管数量可以达到 10 000 个(现在已经高达 1 000 000 个)。截至 2012 年, 数十亿级别的晶体管处理器已经得到商用。随着半导体制造工艺从 32nm 水平跃升到 22nm, 这种集成电路会更加普遍, 尽管会遇到诸如工艺角偏差之类的挑战。值得注意的例子是 NVIDIA 公司的 GeForce 700 系列的首款显示核心——代号 GK110 的图形处理器, 它采用了 71 亿个晶体管来处理数字逻辑。而 Itanium 的大多数晶体管是用来构成其 3200 万字节的三级缓存。Intel Core i7 处理器的芯片集成度达到了 14 亿个晶体管。目前所采用的设计与早期不同的是广泛应用电子设计自动化工具, 设计人员可以把大部分精力放在电路逻辑功能的硬件描述语言表达形式上, 而功能验证、逻辑仿真、逻辑综合、布局、布线、版图等可以由计算机辅助完成。

20 世纪 80 年代, 出现了更大型、功能更强大的电子计算机, 称作工作站(workstation)。它是一种高档的微型计算机, 通常配有高分辨率的大屏幕显示器及容量很大的内存储器 and 外存储器, 并且具有较强的信息处理功能和高性能的图形图像处理功能。它是为了单用户使用并提供比个人计算机更强大的性能, 尤其是在图形处理、任务并行方面的能力。在 20 世纪 80 年代初期, 这个领域的先锋是阿波罗计算机和 Sun 计算机系统公司基于 Motorola 68000 处理器和 UNIX 系统的工作站。工作站通常比较昂贵, 价格一般是标准 PC 的数倍。一般来讲, 工作站主要应用在以下领域: 计算机辅助设计及制