

21世纪高等学校规划教材 | 计算机科学与技术



计算机组成原理

黄颖 王进 尚凤军 许可 编著
李伟生 主审

清华大学出版社



- ❧ 教学目标明确，注重理论与实践的结合
- ❧ 教学方法灵活，培养学生自主学习的能力
- ❧ 教学内容先进，反映了计算机学科的最新发展
- ❧ 教学模式完善，提供配套的教学资源解决方案
- ❧ 可下载教学资料：<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>



清华大学出版社数字出版网站

WQBook  
www.wqbook.com

ISBN 978-7-302-32107-1



9 787302 321071 >

定价：36.00元

21世纪高等学校规划教材 | 计

计算机组成原理

黄颖 王进 尚凤军 许可 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书阐述了计算机系统的组成原理和实现。全书分 10 章,第 1~3 章介绍了计算机组成的基本概念及相关基础;第 4~9 章介绍了计算机组成的各部件的原理及其实现;第 10 章介绍了计算机体系的一个重要发展方向,即并行计算机体系结构。本书结构优化,内容精练,重点突出,并配有习题、实践项目和电子教案。

本书可作为大专院校理工科学生“计算机组成原理”课程的教材,也可供从事计算机领域相关工作的工程技术人员参考。

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/黄颖等编著. --北京:清华大学出版社,2013

21 世纪高等学校规划教材. 计算机科学与技术

ISBN 978-7-302-32107-1

I. ①计… II. ①黄… III. ①计算机组成原理—高等学校—教材 IV. ①TP301

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 189818 号

责任编辑:付弘宇 薛 阳

封面设计:傅瑞学

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:三河市春园印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:22 字 数:533 千字

版 次:2013 年 9 月第 1 版 印 次:2013 年 9 月第 1 次印刷

印 数:1~2000

定 价:36.00 元

产品编号:041585-01

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、教学内容和教学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

“计算机组成原理”是计算机科学和计算机工程专业的必修课,是继续深入学习计算机其他知识的基础课程。计算机系统设计的综合性和复杂性决定了本课程内容的广泛性和复杂性。

本书主要讲述计算机系统的内部工作机制和组成原理,并介绍了各个部件之间的有机联系。旨在使读者掌握计算机中各功能部件的工作原理、逻辑实现和设计方法,了解计算机组成原理的发展方向,为今后参加计算机系统的分析、设计和开发等工作打下坚实的基础。

本书首先对计算机的体系结构做了一个整体的描述。然后对各个部件逐一介绍,让读者了解各个部件的工作原理和逻辑实现。最后阐述各个部件在 CPU 的指挥下如何协同完成各种指令,使计算机正常工作。这种合-分-合的方式可以让读者在了解各个部件的工作原理时不至于割舍与其他部件的联系,而这种联系却正体现了计算机设计的综合性和复杂性。在组成原理的实验方面目前比较重视 VHDL 的实现,在本书中对 VHDL 的基础进行了加强。

全书共分为 10 章。第 1 章介绍了计算机的发展简史、计算机的层次结构、冯·诺伊曼型计算机的体系结构和计算机的性能评价方法。第 2 章介绍了计算机组成的运算基础,包括各种运算的工作原理,如布思算法等。第 3 章介绍了逻辑基础,包括构成计算机的各种基本逻辑元件和集成设计方法,并详细介绍了 VHDL 的基础。第 4 章介绍了系统总线,介绍了总线的仲裁、总线的同步和总线的通信控制等,并以现在比较流行的几种总线(如 PCI Express 总线)来加深对这些原理的理解。第 5 章介绍了计算机的存储系统,主要介绍了主存储器、外部存储器、Cache 和虚拟存储器的工作原理,并简要介绍了 SSD 固态硬盘技术。第 6 章介绍了输入输出系统,重点介绍了中断机制。第 7~9 章介绍了计算机的最重要的部件——中央处理器,同时特别介绍了其中的控制器部分。并行处理是现代计算机体系发展的一个重要方向,在第 10 章介绍了并行处理的基本原理和一些具体实现。每章后都有习题,可以加深对每章中原理的理解和掌握。附录中附有实践项目,通过实践可以更深入地掌握计算机的各种原理。

本课程建议授课学时为 48 学时,实验学时为 16 学时。

本书的第 1 章、第 6~10 章和附录由黄颖编写,第 2 章和第 3 章由王进编写,第 5 章由尚凤军编写,第 4 章由许可编写,最后由黄颖统一定稿。薛峙、程克非、周丽芳和王矿生等为本书提供了部分资料,李伟生为本书提出了宝贵的意见并担任主审。在此向一切为本书的出版付出劳动的老师们表示感谢,感谢重庆邮电大学校级教材建设项目(JC2011—08)、重庆市教委教育教学改革项目(1203035)、重庆邮电大学校级教育教学改革研究项目

(XJG1102、XJG1118)的资助,同时也要感谢重庆邮电大学计算机学院和教务处的领导和老师给予的大力支持和帮助。最后要感谢清华大学出版社的大力支持和责任编辑的辛勤工作。

书中存在不妥之处,欢迎读者批评指正。

编 者

2013 年春

目 录

第 1 章 计算机系统概述	1
1.1 计算机的发展简史	1
1.1.1 第一代计算机——电子管电子计算机	2
1.1.2 第二代计算机——晶体管电子计算机	3
1.1.3 第三代计算机——集成电路计算机	4
1.1.4 第四代计算机——超大规模集成电路计算机	6
1.1.5 第五代计算机——普适计算机	7
1.2 计算机的分类	7
1.3 计算机系统简介	13
1.3.1 计算机系统的层次结构	13
1.3.2 软件与硬件的等价性原理	15
1.3.3 计算机体系结构和计算机组成	16
1.4 计算机的基本组成	16
1.4.1 冯·诺伊曼体系和哈佛体系计算机	16
1.4.2 计算机的硬件框图	17
1.5 计算机性能的评价	18
1.5.1 性能评价的时间因素	18
1.5.2 性能评价程序的选择	19
1.6 计算机系统设计的准则	21
1.7 本书结构	22
习题	23
第 2 章 运算基础	24
2.1 数制和数制转换	24
2.1.1 数制	24
2.1.2 数制转换	25
2.2 数据的编码和表示	26
2.2.1 无符号数	26
2.2.2 有符号数	27
2.2.3 浮点数表示	30
2.2.4 二进制信息编码	34
2.3 定点数的运算	35
2.3.1 移位运算	35
2.3.2 加减法运算	37

2.3.3	乘法运算	39
2.3.4	除法运算	43
2.4	浮点数的运算	46
2.4.1	浮点数的加减法运算	46
2.4.2	浮点数的乘除法运算	47
2.4.3	保证位	49
2.5	检错码和纠错码	49
2.5.1	检错和纠错的理论基础	49
2.5.2	奇偶校验	50
2.5.3	CRC 校验	50
2.5.4	海明码	51
小结		54
习题		54
第3章	数字电路和逻辑电路基础	56
3.1	布尔代数	56
3.2	逻辑函数的化简	57
3.2.1	代数化简法	57
3.2.2	卡诺图化简法	57
3.3	组合逻辑电路	59
3.3.1	加法器	60
3.3.2	译码器	62
3.3.3	算术逻辑单元	63
3.3.4	数据选择器	65
3.4	时序逻辑电路	66
3.4.1	触发器	66
3.4.2	寄存器和移位寄存器	67
3.4.3	计数器	69
3.5	阵列逻辑电路	70
3.5.1	只读存储器	71
3.5.2	随机存取存储器	73
3.5.3	可编程逻辑器件	74
3.6	VHDL 硬件描述语言	77
3.6.1	VHDL 语法	77
3.6.2	数据类型、运算操作符	85
3.6.3	VHDL 实例	90
3.6.4	VHDL 工具介绍	93
小结		95
习题		95

第 4 章 系统总线	96
4.1 系统总线概述	96
4.1.1 总线的分类	97
4.1.2 总线的特性和性能指标	98
4.2 总线的通信方式	100
4.2.1 同步通信方式	101
4.2.2 异步通信方式	102
4.3 总线仲裁	103
4.3.1 集中式仲裁方式	103
4.3.2 分布式仲裁方式	105
4.4 总线结构	105
4.4.1 单总线结构	105
4.4.2 双独立总线	106
4.4.3 多总线结构	106
4.5 常用高速总线标准	107
4.5.1 PCI 总线	107
4.5.2 AGP 总线	113
4.5.3 PCI Express	114
小结	118
习题	119
第 5 章 存储器	120
5.1 概述	120
5.1.1 存储器分类	120
5.1.2 存储器的层次结构	122
5.2 主存储器	123
5.2.1 主存储器的基本结构	123
5.2.2 主存的技术指标	124
5.2.3 半导体存储器接口的基本技术	125
5.2.4 DRAM 的刷新	129
5.2.5 多体交叉存储技术	130
5.2.6 高级 DRAM 技术	131
5.3 辅助存储器	133
5.3.1 辅助存储器的种类与技术指标	133
5.3.2 硬盘存储器	135
5.3.3 固态硬盘	140
5.3.4 磁盘阵列存储器	141
5.3.5 光盘存储器	145
5.3.6 磁带存储器	147

5.4	Cache	147
5.4.1	Cache 的工作原理	148
5.4.2	地址映射	149
5.4.3	替换策略	153
5.4.4	Cache 写策略	154
5.4.5	Cache 的性能分析	154
5.4.6	改进 Cache 性能的措施	155
5.4.7	Cache 综合举例	156
5.5	虚拟存储器	157
5.5.1	虚拟存储器的基本原理	157
5.5.2	虚拟存储器的管理	162
5.5.3	快表 TLB	162
5.5.4	Pentium 处理机的虚拟存储器技术	163
	小结	164
	习题	164
第 6 章	输入输出系统	165
6.1	I/O 概述	165
6.1.1	I/O 接口的功能及组成	165
6.1.2	I/O 接口与 I/O 端口	167
6.1.3	I/O 端口的编址方式	167
6.2	程序查询方式	168
6.2.1	程序查询的基本思想	168
6.2.2	程序查询方式的工作流程	169
6.3	程序中断方式	170
6.3.1	中断的基本概念	170
6.3.2	中断处理流程	171
6.3.3	中断向量	172
6.3.4	中断判优逻辑	173
6.3.5	中断的嵌套	175
6.4	DMA 方式	175
6.4.1	DMA 的工作方式	175
6.4.2	DMA 接口组成	177
6.4.3	DMA 的工作过程	178
6.5	I/O 通道和 I/O 处理机	180
6.5.1	I/O 通道的种类和功能	180
6.5.2	通道型 I/O 处理机和外围处理机	183
6.6	I/O 接口标准	184
6.6.1	IDE 和 SATA	184
6.6.2	USB 和 FireWire	186

小结	190
习题	190
第 7 章 CPU 的结构与功能	191
7.1 CPU 的功能	191
7.2 CPU 的结构	192
7.2.1 CPU 的结构框图	192
7.2.2 算术逻辑单元和控制器	193
7.2.3 CPU 的寄存器	194
7.3 指令周期及其数据通路	195
7.3.1 CPU 的执行过程	195
7.3.2 指令周期的基本概念	197
7.3.3 数据通路及其基本要素	198
7.3.4 指令子周期的数据通路	199
7.4 Pentium 处理器	201
7.5 Itanium 微处理器	210
7.6 SPARC 处理器	211
小结	214
习题	214
第 8 章 指令系统	215
8.1 机器指令	215
8.1.1 指令的一般书写格式	215
8.1.2 指令字长	217
8.2 操作数的类型、大小和存储	217
8.2.1 操作数类型和大小	217
8.2.2 数据在存储器中的存放方式	218
8.3 操作类型	219
8.3.1 数据传送类	219
8.3.2 算术运算类	219
8.3.3 逻辑运算类	220
8.3.4 控制传送类	220
8.3.5 输入输出类	224
8.3.6 系统控制类	224
8.4 寻址技术	224
8.4.1 立即数寻址	225
8.4.2 寄存器寻址	225
8.4.3 存储器寻址	225
8.4.4 寄存器和存储器混合寻址	226
8.4.5 相对寻址	227

8.4.6 堆栈寻址	228
8.5 指令集结构的功能设计	229
8.5.1 复杂指令系统计算机	229
8.5.2 精简指令系统计算机	229
8.5.3 CISC 与 RISC 的比较	231
8.6 指令系统的举例和设计	233
8.6.1 一个简单的指令系统 Y86 的设计	233
8.6.2 SPARC 的指令系统	235
8.6.3 Pentium 微处理器的指令系统	240
小结	247
习题	247
第 9 章 控制器	249
9.1 控制器概述	249
9.1.1 控制器的功能	249
9.1.2 控制器的组成	250
9.1.3 时序控制信号形成部件	250
9.1.4 微操作命令分析	253
9.1.5 控制信号	257
9.2 硬布线控制器	259
9.2.1 硬布线控制器概述	259
9.2.2 硬布线控制器的结构	260
9.2.3 硬布线控制器的设计步骤	261
9.3 微程序控制器	262
9.3.1 微程序控制器概述	262
9.3.2 微程序控制器的结构框图	263
9.3.3 微程序控制器的工作原理	265
9.3.4 微指令的格式	266
9.3.5 微指令的编码方式	267
9.3.6 微指令序列地址的形成	269
9.3.7 微程序控制器举例	272
小结	277
习题	278
第 10 章 并行计算机系统结构	280
10.1 计算机系统结构中的并行性概念	280
10.1.1 概述	280
10.1.2 并行计算机体系结构的分类	280
10.2 流水线技术	283
10.2.1 流水线原理	283

10.2.2	流水线的性能指标	285
10.2.3	流水线的相关问题	287
10.2.4	动态调度	288
10.2.5	RISC 处理器的流水线举例	293
10.3	片内并行	294
10.3.1	超流水线技术	294
10.3.2	超标量技术	295
10.3.3	超长指令字技术	296
10.4	多核处理器技术	297
10.4.1	同构多核处理器技术	298
10.4.2	异构多核处理器技术	298
10.5	共享内存的多处理机	300
10.5.1	UMA 对称多处理器系统	300
10.5.2	NUMA 多处理器系统	303
10.6	消息传递的多处理机	305
10.6.1	互联网络	305
10.6.2	大规模并行处理器	307
10.6.3	集群计算	309
10.6.4	多计算机的通信软件	312
10.6.5	网格计算	314
小结		316
习题		317
附录A	使用硬布线方法设计 CPU	318
A.1	CPU 设计概述	318
A.2	模型机中的指令集	319
A.3	模型机中的数据通路	319
A.4	控制器	320
A.5	完整的 CPU 实现	323
附录B	常用的计算机组成原理仿真软件	325
B.1	仿真软件 SimpleScalar	325
B.2	数据通路模拟软件	328
B.3	指令集流水线模拟	330
B.4	硬件测试软件 phoronix test suite	332
B.5	VHDL 编写的 JAM CPU	334
参考文献		336

第1章

计算机系统概述

1.1 计算机的发展简史

电子计算机的诞生和发展是 20 世纪最伟大的科技成果之一。在这以前人们设计出了一些其他类型的计算工具。早在 13 世纪,我国就发明了算盘,如图 1.1 所示,这是世界公认的最早的计算工具。促进计算工具研究发展的最初动力是编制初等函数表(如正弦、余弦、对数等)。法国科学家帕斯卡(Blaise Pascal, 1623—1662)于 1642 年建造出第一台能工作的机械计算机,程序设计语言 Pascal 就是为纪念他而以他的名字命名的。帕斯卡的父亲从事税务工作。他为了帮助父亲完成大量的计算统计事务而设计出了帕斯卡机。帕斯卡机的外形是一个不大的黄铜盒子,采用齿轮啮合结构,用手工操作,可进行加法和减法运算。帕斯卡计算机在当时具有重大意义,开辟了自动计算的道路。30 年后,伟大的德国数学家莱布尼茨(G. Leibniz, 1646—1716)建造了一台还能做乘法和除法的机械计算机。在此后的 150 年里计算机没有大的发展,直到剑桥大学的数学教授查尔斯·巴贝奇(Charles Babbage, 1792—1871)设计和制造了差分机,如图 1.2 所示。差分机只能运行差分运算,所谓“差分”的含义,是把函数表的复杂算式转化为差分运算,用简单的加减法代替平方运算。虽然差分机运行得比较好,但是巴贝奇对这种只能运行一个算法的机器厌烦了,所以他开始制造差分机的替代品——分析机。在他的设计中,分析机已经具有现代计算机的雏形了。分析机由 5 个部分组成:存储部分,计算部分,控制器部分,输入部分和输出部分。但是因为当时的技术不能提供他需要的高精度齿轮,所以终其一生他未能完成一台计算机。由于他对计算机结构的贡献,人们尊称他为“现代数字计算机之父”。1991 年,为了纪念巴贝奇 200 周年诞辰,英国肯圣顿(Kensington)科学博物馆根据他的设计图纸重新建造了一台差分机,如图 1.3 所示。在复制过程中,只发现图纸存在着几处小的错误。复制者特地采用 18 世纪中期的技术设备来制作,不仅成功地造出了机器,而且可以正常运转。

第二次世界大战是电子计算机产生的催化剂。20 世纪 40 年代,无线电技术和无线电工业的发展为电子计算机的研制提供了物质基础。1943—1946 年,美国宾夕法尼亚大学研制的电子数字积分与计算机(ENIAC)是世界上第一台电子计算机。ENIAC 于 1945 年年底完成,1946 年 2 月正式交付使用。六十多年来,电子计算机已得到了飞速的发展,根据电子计算机所采用的物理器件和计算模式,可以把电子计算机的发展分为 5 个阶段,相邻两个阶段之间存在时间重叠。

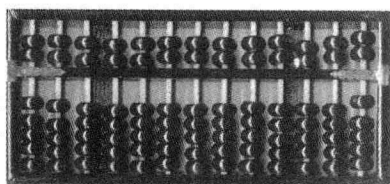


图 1.1 最早的计算工具——算盘

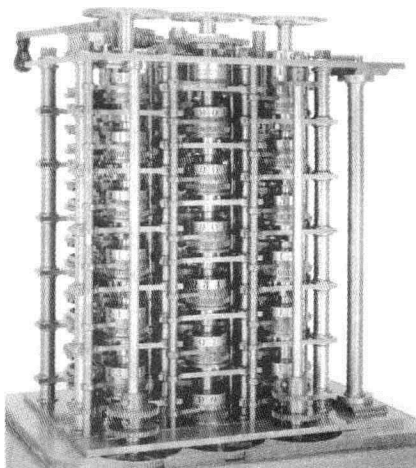


图 1.2 巴贝奇的差分机

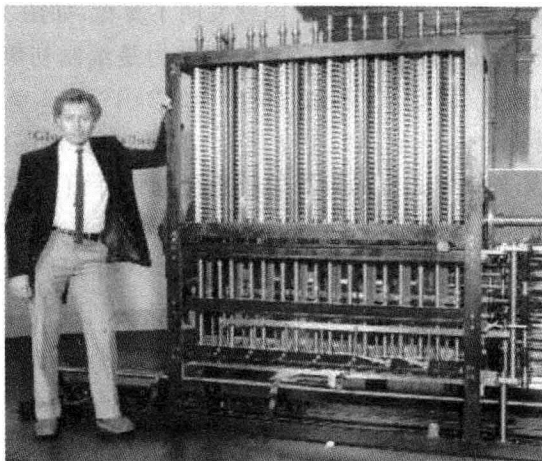


图 1.3 根据巴贝奇图纸制造的分析机

1.1.1 第一代计算机——电子管电子计算机

电子管计算机时代的主要特点是采用电子管作为基本器件。在这一时期,主要为军事与国防尖端技术的需要而研制计算机,并进行有关的研究工作,为计算机技术的发展奠定了基础,其研究成果扩展到民用,又转为工业产品,形成了计算机产业。第一代计算机 ENIAC (Electronic Numerical Integrator And Computer) (如图 1.4 所示)由 18 000 个电子管和 1500 个继电器组成,重 30t,耗电 140kW,占地 170m²,每秒钟能计算 5000 次加法。在体系结构上,它有 20 个寄存器,每个能存放一个 10 位的十进制数。ENIAC 通过设置分布在各地的 6000 个开关并连接大量的插头和插座来进行编程,所以编程的准备时间大大超过实际的计算时间。

在 ENIAC 研制的同时,冯·诺伊曼与莫尔小组合作研制了 EDVAC (Electronic Discrete Variable Automatic Computer,电子离散变量自动计算机),采用了存储程序方案。到目前