

高等教育质量工程信息技术系列示范教材

计算机

组成原理 教程 (第7版)

张基温 编著

非
外
借



清华大学出版社

高等教育质量工程信息技术系列示范教材

计算机组成原理教程

(第7版)

张基温 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书是一本面向应用型专业的计算机组成原理教材,全书共分7章。第1章帮助读者快速、轻松并深刻地建立计算机系统的整体概念并了解现代计算机硬件的测试技术与工具;第2章介绍计算机的存储体系,并着重介绍DRAM的内部操作对性能参数的影响;第3章介绍计算机总线系统和主板的有关知识;第4章介绍计算机的输入输出及其控制技术;第5章介绍计算机核心部件——控制器的工作原理和基本设计方法;第6章从架构层面介绍处理器中的并行技术;第7章介绍人们在非冯·诺依曼体系结构和非硅晶体元器件两个方面的探索。

本书概念清晰,深入浅出,取材新颖,从知识建构、启发思维和适合教学的角度组织学习内容,同时不过多依赖先修课程。本书经过6次修订,更贴近实际,更适合教学,可供应用型院校本科计算机科学与技术专业、软件工程专业、信息安全专业、网络工程专业、信息管理和信息系统专业和其他相关专业使用,也可以供有关工程技术人员和自学者使用。

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

计算机组成原理教程/张基温编著.—7版.—北京:清华大学出版社,2017
(高等教育质量工程信息技术系列示范教材)
ISBN 978-7-302-47629-0

I. ①计… II. ①张… 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(2017)第153990号

责任编辑:白立军 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:三河市金元印装有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:23.5 字 数:561千字

版 次:1998年1月第1版 2017年7月第7版 印 次:2017年7月第1次印刷

印 数:1~2000

定 价:49.00元

产品编号:069514-01

第7版前言

(一)

计算机技术是人类倾注了心血并还在投入更大心血的一个领域,也使它成为竞争最为激烈的领域之一,呈现出日新月异的特征。作为这个领域的一门教材,不应当胶柱鼓瑟,而必须与时俱进,这是笔者在每一版修订时都思考的一个重要方面。本书从第4版开始增加了未来计算机展望一章,在第6版的第2章中增加了 DRAM 内部操作与性能参数一节,本次修订中对第7章的内容进行了部分更新等,都是基于这一考虑的。

目前,国内已经有一些计算机组成原理的教材,但是多数是面向计算机设计的。本书则想写成一本面向应用的教材,目的是让读者能从应用的角度来了解计算机的组成及其工作原理。为此,本书从第5版起增加了对计算机性能有重要影响的总线与主板一章,在本次修订中则在第1章增加了计算机性能测试工具和天梯图的内容。

(二)

计算机作为人类历史上最伟大的工具之一,是全人类智慧的结晶,其中包含了中华民族历史上和现代的巨大贡献。让读者了解这些事实,不仅是为了还原历史的真实,还在于这些事实折射出来的逻辑思维精华有启迪思维、激励创新、增强自信之效能。这是我写这本书时一直坚持的一个原则。

本书作为一本教材,希望能做到好教又好学。为此,本次修订除在文字上进行了一些修改外,还从结构上进行了一些调整。

(三)

计算机俗称电脑,顾名思义,它就是一种模拟人脑的机器。模拟可以从两个方面进行:结构模拟和功能模拟。现在要用计算机从结构的角度模拟人脑还有许多问题没有解决,只能从功能模拟的角度进行,即由一些功能部件来模拟人脑的功能。因此,计算机组成原理作为计算机科学与技术及其相关专业的一门必修核心课程,对于它的学习应当从建立计算机的组成部件与人的大脑功能之间的联系开始,然后再对这两者的工作过程加以区别。这是我要与初学者共享的一点心得。

(四)

在本次修订中,作者参考了其他一些著作和网络作品。尽管本人尽力将它们对本书的贡献通过参考文献来表明,但由于有些内容(特别是网站内容)出处不明或作者难以查考,因而疏漏之处在所难免。在此,谨向为本书提供了帮助的各位深表谢意,并向由于上述原因未能列入参考文献的文章作者表示歉意。同时,还要感谢在本次修订中参加了部分写作工作

的赵忠孝、姚威、张展为、史林娟、戴璐、张友明、张秋菊、陈觉、董兆军。

本书的修订仍不会画上句号。本人诚恳地希望阅读过本书的专家、老师和学生能无保留地提出批评意见和建议，帮助本人把这本书修订得更好。

张基温

2017年4月

目 录

第 1 章 计算机系统概述	1
1.1 计算工具的进步轨迹	1
1.1.1 神奇的算盘和算筹——软件与硬件的起源	1
1.1.2 提花机的启示与巴贝奇分析机——内程序计算机的最早实践	5
1.1.3 帕斯卡加法器——内动力计算机的尝试	7
1.1.4 从八卦图到布尔代数——电子数字计算机的理论基础	11
1.1.5 诺依曼电子数字计算机体系的确立	19
1.1.6 操作系统——计算机的自我管理	22
1.1.7 现代计算机系统结构	25
1.1.8 自动计算机理论的再讨论	27
1.2 0、1 编码	27
1.2.1 数字系统中的信息单位与量级	27
1.2.2 十进制数与二进制数的转换	28
1.2.3 八进制、十六进制和 BCD 码	30
1.2.4 原码、反码、补码和移码	31
1.2.5 浮点数与定点数	34
1.2.6 声音的 0、1 编码	36
1.2.7 图形图像的 0、1 编码	37
1.2.8 文字的 0、1 编码	39
1.2.9 指令的 0、1 编码与计算机程序设计语言	43
1.2.10 数据传输中的差错检验	44
1.3 电子数字计算机的基本原理	48
1.3.1 电子数字计算机的运算器	48
1.3.2 计算机存储器	50
1.3.3 计算机控制器	54
1.3.4 总线	56
1.3.5 计算机中的时序控制	57
1.4 冯·诺依曼计算机体系的改进	59
1.4.1 冯·诺依曼瓶颈	59
1.4.2 并行与共享	60
1.4.3 哈佛结构	63
1.4.4 拟态计算机	64
1.5 计算机性能评测	64

1.5.1	计算机的主要性能指标	64
1.5.2	计算机性能测试工具	69
1.5.3	天梯图	71
习题	74
第 2 章	存储系统	77
2.1	主存储器概述	77
2.1.1	ROM 元件	77
2.1.2	RAM 元件与存储结构	79
2.1.3	DRAM 元件与基本存储结构	82
2.2	主存储体组织	85
2.2.1	内存条结构	85
2.2.2	存储体的基本扩展方式	87
2.2.3	Bank	89
2.2.4	并行存储器	90
2.2.5	并行处理机的主存储器	93
2.3	DRAM 内部操作与性能参数	94
2.3.1	SDRAM 的主要引脚	94
2.3.2	SDRAM 的读写时序	95
2.3.3	突发传输	97
2.3.4	数据掩码	98
2.3.5	DRAM 的动态刷新	99
2.3.6	芯片初始化与预充电	102
2.3.7	存储器控制器	104
2.3.8	RAM 的一般性能参数	104
2.3.9	DDR SDRAM 与 RDRAM	107
2.4	磁盘存储器	109
2.4.1	磁表面存储原理	109
2.4.2	硬磁盘存储器的存储结构	111
2.4.3	磁盘格式化	112
2.4.4	硬磁盘存储器与主机的连接	115
2.4.5	硬磁盘存储器的技术参数	118
2.4.6	磁盘阵列	120
2.5	光盘存储器	123
2.5.1	光盘的技术特点与类型	123
2.5.2	可擦写型光盘读写原理	124
2.5.3	光盘规格	124
2.6	闪速存储器	127

2.6.1	闪存原理	128
2.6.2	固态硬盘	128
2.7	存储体系	131
2.7.1	多级存储体系的建立	131
2.7.2	多级存储体系的性能参数	132
2.7.3	Cache-主存机制	133
2.7.4	虚拟存储器	138
2.8	未来记忆元件	141
2.8.1	磁随机存取存储器	141
2.8.2	铁电随机存取存储器	142
2.8.3	相变随机存取存储器	143
2.8.4	阻变随机存取存储器	144
	习题	145
第3章	总线与主板	148
3.1	总线的概念	148
3.1.1	总线及其规范	148
3.1.2	总线分类	149
3.1.3	总线的性能指标	152
3.1.4	标准总线	153
3.2	总线工作原理	154
3.2.1	总线的组成与基本传输过程	154
3.2.2	总线的争用与仲裁	155
3.2.3	总线通信中主从之间的时序控制	157
3.3	几种标准系统总线分析	161
3.3.1	ISA 总线	161
3.3.2	PCI 总线	163
3.3.3	AGP 总线	166
3.3.4	PCI-Express 总线	168
3.4	几种标准 I/O 总线分析	169
3.4.1	ATA 与 SATA 总线	169
3.4.2	SCSI 与 SAS 总线	171
3.4.3	USB 总线	174
3.4.4	光纤总线	178
3.4.5	AMR 和 CNR	178
3.5	微型计算机主板	179
3.5.1	主板的概念	179
3.5.2	主板的组成	180

3.5.3	主板架构及其进展	185
3.5.4	主板选择参数	188
3.5.5	主板整合技术	191
3.5.6	智慧型主板技术	191
习题		193
第4章	输入输出系统	195
4.1	外围设备	195
4.1.1	外部设备及其发展	195
4.1.2	键盘	198
4.1.3	鼠标	201
4.1.4	打印设备	202
4.1.5	显示器	210
4.1.6	触摸屏	220
4.1.7	虚拟现实设备	223
4.2	I/O 过程的程序直接控制	225
4.2.1	I/O 过程的程序无条件传送控制方式	225
4.2.2	I/O 过程的程序查询传送方式	225
4.3	I/O 过程的程序中断控制	227
4.3.1	程序中断控制的核心概念	227
4.3.2	中断关键技术	230
4.3.3	中断接口	234
4.3.4	多重中断	235
4.4	I/O 数据传送的 DMA 控制	236
4.4.1	DMA 的基本概念	236
4.4.2	DMA 与 CPU 共享存储器冲突的解决方案	237
4.4.3	DMA 控制器	239
4.4.4	DMA 传送过程	240
4.4.5	DMA 与中断方式比较	241
4.5	I/O 过程的通道控制	242
4.5.1	通道控制及其特点	242
4.5.2	通道控制原理	244
4.5.3	通道类型	246
4.6	I/O 接口	247
4.6.1	影响 I/O 设备与计算机连接的主要因素	248
4.6.2	I/O 接口的功能与类型	249
4.6.3	I/O 接口结构	250
4.6.4	缓冲	251

4.6.5	I/O 端口	252
4.7	I/O 设备适配器	253
4.7.1	显卡	254
4.7.2	声卡	256
4.7.3	网卡	259
4.8	I/O 管理	261
4.8.1	设备驱动程序	261
4.8.2	ROM BIOS	262
	习题	265
第 5 章	控制器逻辑	268
5.1	处理器的外特性——指令系统	268
5.1.1	指令系统与汇编语言概述	268
5.1.2	寻址方式	271
5.1.3	Intel 8086 指令简介	276
5.1.4	CISC 与 RISC	283
5.1.5	指令系统的设计内容	287
5.2	组合逻辑控制器	287
5.2.1	指令的微操作分析	288
5.2.2	指令的时序控制与时序部件	290
5.2.3	组合逻辑控制器设计举例	292
5.3	微程序控制器	295
5.3.1	概述	295
5.3.2	微程序操作控制部件的组成	295
5.3.3	微程序操作控制部件设计举例	296
	习题	299
第 6 章	处理器架构	302
6.1	流水线技术	302
6.1.1	指令流水线	302
6.1.2	运算流水线	304
6.1.3	流水线中的相关冲突	305
6.1.4	流水线中的多发射技术	307
6.1.5	Pentium CPU	309
6.1.6	流水线向量处理机	312
6.2	多处理器系统	316
6.2.1	多计算机系统与多处理器系统	316
6.2.2	SMP 架构	317

6.2.3	多处理器操作系统·····	319
6.3	多线程处理器·····	320
6.3.1	多线程处理器架构的提出·····	320
6.3.2	同时多线程技术·····	322
6.3.3	超线程处理器·····	324
6.4	多核处理器·····	327
6.4.1	多核处理器及其特点·····	327
6.4.2	多核+多线程——CMT 技术·····	329
6.5	关于处理器并行性开发的讨论·····	329
6.5.1	并行性及其级别·····	329
6.5.2	基于并行性的处理器体系 Flynn 分类·····	331
6.5.3	处理器并行性开发的思路与途径·····	333
	习题·····	334
第 7 章	未来计算机展望·····	337
7.1	非冯·诺依曼体系计算机的探索·····	337
7.1.1	数据流计算机·····	337
7.1.2	归约机·····	339
7.1.3	智能计算机·····	341
7.1.4	神经网络计算机·····	343
7.2	未来计算机元器件展望·····	349
7.2.1	摩尔定律及其影响·····	349
7.2.2	突破传统微电子工艺的努力·····	351
7.2.3	纳米电子器件·····	353
7.2.4	量子计算机·····	356
7.2.5	光学计算机·····	358
7.2.6	超导技术·····	359
7.2.7	生物计算机·····	360
	习题·····	363
附录 A	国内外常用二进制逻辑元件图形符号对照图·····	364
参考文献 ·····		366

第1章 计算机系统概述

人类生存在资源环境中。人类社会的发展过程是一个不断提高资源开发能力的过程。这种能力表现在知识水平和工具水平两个方面。

不同的时代,囿于认识水平、科学技术水平、生产力水平和制造能力的限制,人类对于工具的需求和开发重心有所不同。从原始时代到工业时代的漫长岁月中,人们迫于生存的压力,资源开发的重心先是放在物资资源上,后来扩展到能源资源。在这一漫长的时期,工具的开发重心主要在扩展和延伸四肢的机能上面。而只有到了科学技术发展到较高水平,人类的制造能力使工具从外力驱动进步到内力驱动再进步到自动工作时,信息资源开发能力才成为社会生产力水平的重要标志,以计算机为核心的信息处理与传播工具才作为智力扩展和延伸的工具,成为人类的宠儿。

人类对工具的开发是从对于人体器官功能的模拟和放大开始的。人们将计算机俗称为电脑,就说明了计算机是从模拟和放大人脑功能的工具。简单地说,模拟有两种途径:结构模拟和功能模拟。目前人类的模拟水平还基本处于功能模拟阶段。因此,对于计算机组成原理的学习也应当从这里起步。

1.1 计算工具的进步轨迹

纵观计算工具的发展历史,人类计算工具已经经历了算筹、算盘、计算尺、手摇计算机、电动计算机、真空管计算机、晶体管计算机、大规模集成电路计算机阶段,正在向生物计算、光计算、量子计算等方向探索。从需求的角度看,其发展主要面向3个方面:提高计算能力(计算速度和精度等),提高计算的可用性与方便性,实现自动计算以减轻人的计算负担。

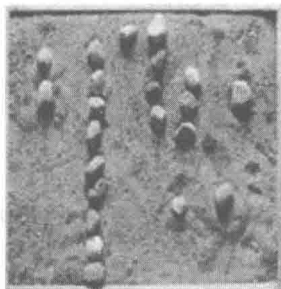
通过进一步分析还可以看出,计算机的发展是从两个方面不断向前推进的:计算机体系结构的发展和元器件技术的进步。

1.1.1 神奇的算盘和算筹——软件与硬件的起源

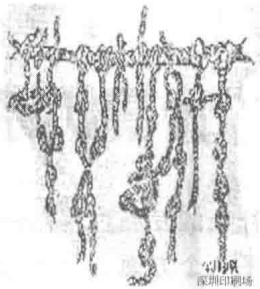
1. 从记数到计数再到计算

人类计算工具的开发是从记数开始的。在原始社会,为了扩展大脑的记忆能力,人们采用了结绳记事、石子记事、刻木记事的方法,如图1.1所示。那时,人类对于“数”的概念最初只有“一、二、多”,还不能精确地区别数量。后来随着生产力的发展,剩余物质开始增多,数的概念也开始扩充,计算工具从记数走向计数。计数就是对数进行度量,是一种简单的计算。经过漫长的岁月,数制不断完善,形成两大类型的数制:位值数制(进位记数制)和迭加数制(非进位记数制)。

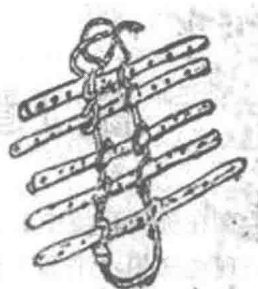
迭加数制的代表是罗马数制,它也规定了一套符号,每个符号代表不同的数值,并且与



(a) 石子记事



(b) 结绳记事



(c) 刻木记事

图 1.1 古代记事方法

位置无关。位值数制也称位权数制，它规定了一套符号，每个符号表示的数不同，并且每个符号在不同数位上所代表的值也不相同。这些计数符号是对自然现象的抽象，如十个手指，一年中月圆月缺的次数，将一件物品二分、二分、再二分得到的数量等，在此基础上产生了十进制（古代中国、古埃及以及古巴比伦记数体系）、十二进制（中国的十二地支）、十六进制（中国旧秤十六两为一斤）、六十进制（中国的十天干——甲、乙、丙、丁、戊、己、庚、辛、壬、癸与十二地支——子、丑、寅、卯、辰、巳、午、未、申、酉、戌、亥组合而成的时间记数以及古巴比伦的另一种记数体系）等应运而生。其中应用最广泛的是十进制，可以说它是基于手算的产物。

人的手指是有限的。随着数的概念的进一步扩充，人们开始扩充和延伸手指的记数功能。算盘就是一种用来扩展手指运算功能的计算工具。它通过对算珠按一定规则的排列来表示数字。根据 1976 年 3 月在陕西岐山县发掘出的西周陶丸推测，远在周代（3000 多年前）中国已经在使用算珠进行计算。迄今发现的关于珠算的最早记载则出现在东汉徐岳所著的《数术记遗》一书中，该书收集了我国汉代以前的 14 种计算形式：积算、太一、两仪、三才、五行、八卦、九宫、运筹、了知、成数、把头、龟算、珠算、计算，其中关于珠算的记载为：“珠算：控带四时，经纬三才。”北周数学家甄鸾的注释为：“刻板为三分，其上下二分以停游珠，中间一分以定算位。位各五珠，上一珠与下四珠色别。其上别色之珠当五；其下四珠，珠各当一。至下四珠所领，故云‘控带四时’。其珠游于三方之中，故云‘经纬三才’也。”图 1.2 为游珠算板的推想图。它将刻板分为 3 段，每位上都有 5 颗珠子，其中一个珠子（称上珠）与其他 4 颗（称下珠）颜色不同。它所采用的五升十进制，就是对人两只手、十个指头的模拟和放大。后来为了便于携带，人们把珠子串起来，并进一步改进，就成了图 1.3 所示的算盘。

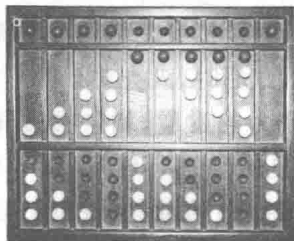


图 1.2 游珠算板

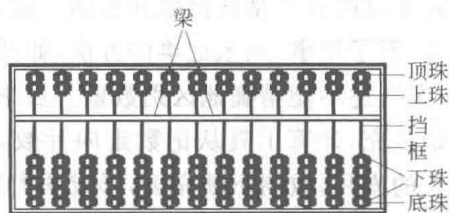


图 1.3 算盘

算盘多采用上二下五的结构,使其既可按照十进制进行计算,又可按十六进制进行计算(每位上所有珠子的总和为 15,满 16 则向左进 1),因为中国古代的重量单位中,一斤等于 16 两。北宋著名画家张择端的大作《清明上河图》左端的“赵太丞家”药铺柜台上所放置的算盘(见图 1.4)不仅能用于计算一服药的银两,还能用于每日、每月、每年的账目核算和统计。

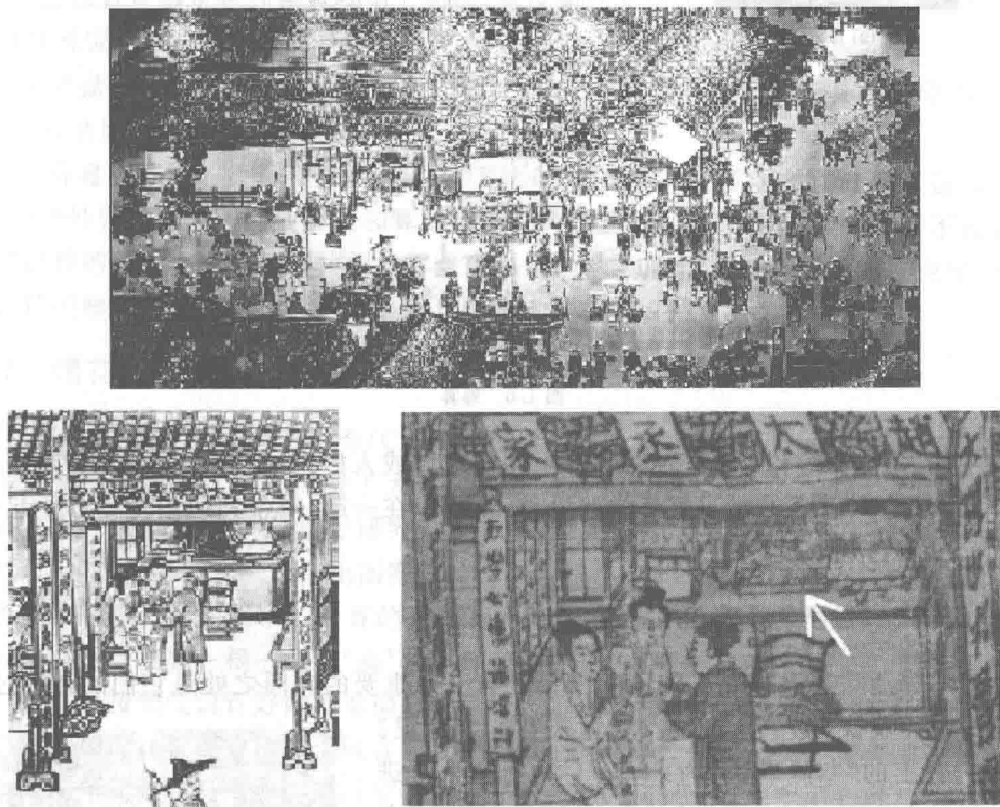
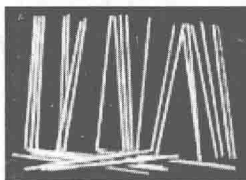


图 1.4 《清明上河图》的“赵太丞家”药铺

中国古代长期使用的另一种用来模拟和放大手指运算的工具称为算筹。中国古代数学家祖冲之(429—500 年,字文远,南北朝时期著名数学家、天文学家,见图 1.5)就是使用这种计算工具将圆周率计算到了小数点后 7 位。早期的算筹是用树枝或竹节等制成的,后来经过细致加工成为专用的计算工具(见图 1.6(a))。算筹也采用五升十进制,用 5 根算筹就可以表示 0~9 中任何一个数,大于 9 的数向左进一位。如图 1.6(b)所示,数字有纵式和横式两种表示方式。《夏侯阳算经》中说:“一纵十横,百立千僵,千十相望,万百相当。满位以上,五在上方,六不积算,五不单张。”意思是,纵式表示个、百、万位,横式表示十、千、十万位,空位表示零。这样,就可以用算筹表示出任意大的自然数了。图 1.6(c)为 3 个记数实例。这种记数工具被称为算筹或算子,因为它不仅可以表示任何自然数,还能够进行加、减、乘、除、乘方、开方等复杂的计算。图 1.6(d)为用算筹进行计算的实例。在漫长的历史中,中国无数人使用这种计算工具进行了各种计算。



图 1.5 祖冲之



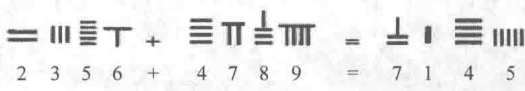
(a) 算筹

形式 \ 数字	1	2	3	4	5	6	7	8	9
纵式						┐	┑	┒	┓
横式	—	=	≡	≡≡	≡≡≡	┘	┙	┚	┛

(b) 算筹表示数字的两种方式



(c) 算筹记数实例



(d) 算筹计算实例

图 1.6 筹算

在中国古代,算筹和算盘长期共存在不同的地域或人群中。它们互相影响,互相借鉴。早期算筹流行较广。后来游珠算盘被改进,算珠被串在一起,携带和使用变得方便起来,到了明代已成为主流计算工具。

2. 口诀——最早的计算程序语言

算筹与算盘除了都采用五升十进制外,还有一个重要的共同之处是它们的计算过程都要依据口诀(歌诀)进行。例如,朱世杰《算学启蒙》(1299年)卷上的“归除歌诀”为:“一归如一进,见一进成十。二一添作五,逢二进成十。三一三十一,三二六十二,逢三进成十。四一二十二,四二添作五,四三七十二,逢四进成十。五归添一倍,逢五进成十。六一下加四,六二三十二……九归随身下,逢九进成十。”这些口诀是布筹或拨珠的依据,它们可以简化计算过程,便于传播,是人类计算工具史上最早的用于计算的专门语言——计算程序设计语言。图 1.7 为一本民国时期的珠算口诀书。用这种计算程序设计语言可以编制计算问题的歌诀,即程序。例如,用算盘计算 $42 + 39$ 的口诀为:

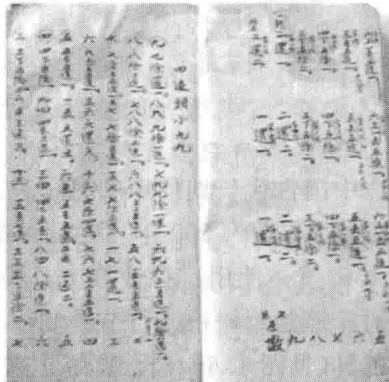


图 1.7 一本民国时期的珠算口诀书

- 三下五去二(十位上要加 3,应在上挡下来一个珠,即 5,再去掉 2)。
- 九去一进一(个位上要加 9,应先去掉一个 1,再向左进 1)。

这是世界上最早的、成系统的、意识明确的程序设计工作。这种思想实际上是把一个计算过程分成两部分:设计程序和执行程序,形成计算工具的两大要素——软件和硬件,并用软件——程序来控制硬件的工作过程。这样,就可以在相对简单的硬件上通过软件实现更多的复杂计算。这实际上也是现代计算机的基本结构。2013年12月4日,联合国教科文

组织将具有 1800 年历史的珠算正式列入人类非物质文化遗产名录。

3. 讨论：算盘和算筹如何才能实现自动计算

现代计算机可以自动执行程序，而算盘和算筹不能自动执行程序，布筹、拨珠都必须人工进行，计算者被绑定在计算过程中。那么，算盘和算筹如何才能不要人全程干预而自动实现计算过程呢？

(1) 算盘和算筹要由人——外动力进行拨珠、布筹。若算盘和算筹具有内动力，自己会动，就为自动计算提供了一个先决条件。

(2) 算盘和算筹的计算程序是由人脑下达的，是存储在人脑中的，对于算盘和算筹来说，是一种外程序方式。即使算盘和算筹可以有内动力，还要外部控制，这是其不能自动完成计算过程的另一个重要原因。假如算盘和算筹能有内程序——自己能记住程序，并由自己所记住的程序控制拨珠、布筹，那么就可以自动计算了。

1.1.2 提花机的启示与巴贝奇分析机——内程序计算机的最早实践

1812 年，英国年轻学者巴贝奇(Charles Babbage, 1792—1871, 见图 1.8)正在踌躇满志地思考如何用机器计算代替耗费了大量人力财力还错误百出的《数学用表》时，从法国的 Jacquard 提花机中得到启发，开始研究自动计算机，从此奠定了自动计算机的基本理论。

所谓提花，就是在织物上织出图案花纹。在我国出土的战国时代墓葬物品中，就有许多用彩色丝线编织的漂亮花布。所有的绸布都是用经线(纵向线)和纬线(横向线)编织而成的。只要在适当位置一根一根地“提”起一部分经线，让滑梭牵引着纬线通过，就可以织出花纹来。但是要按预先设计好的图案确定在哪个位置提起哪条经线，是一件极为费心、极为烦琐的工作。如何让机器自己知道该在何处提线，而不需要人去死记呢？最先解决了这个难题的是西汉年间钜鹿县纺织工匠陈宝光的妻子。据史书记载，她发明了一种称为“花本”的装置，用来控制提花机经线起落。图 1.9 为明代宋应星所著的《天工开物》中的一幅提花机的示意图。图中高耸于织机上部的部分称为“花楼”，其主要由丝线结成的花本组成。织造时，由两人配合操作，一人坐在花楼之上(古时称挽花工)，口唱手拉，按提花纹样逐一提综开口，另一人(古时称织花工)脚踏地综，投梭打纬。



图 1.8 巴贝奇

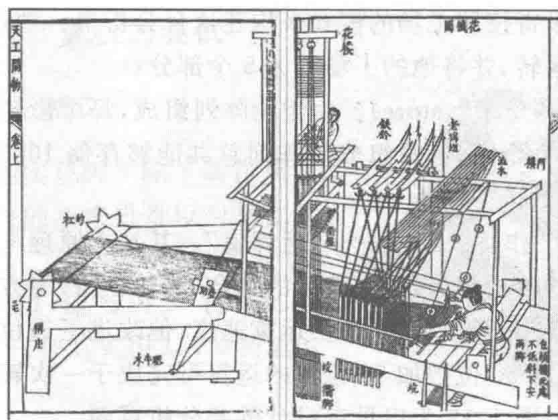


图 1.9 《天工开物》中记载的明代提花机

采用花楼可以大幅提高提花机的工作效率。据史书记载,西汉年间的纺织工匠已能熟练掌握提花机技术,在配置了 120 根经线的情况下,平均 60 天即可织成一匹花布。

提花机是中国人的伟大发明,约在 11~12 世纪沿着丝绸之路传到欧洲。1725 年法国纺织机械师布乔(B. Bouchon)想出用打孔纸带代替花本的主意,设计了一种新式提花机(见图 1.10)。他设想根据图案在纸带上打出一排排小孔,并把它压在编织针上。启动机器后,正对着小孔的编织针能穿过去钩起一根经线,于是编织针就能自动按照预先设计的图案去挑选经线,织出花纹。这一思想在 80 年后(大约在 1801 年)由另一位法国机械师杰卡德(J. Jacquard,1752—1834)实现,完成了“自动提花编织机”的设计制作。这种提花机也被称作杰卡德提花机。杰卡德提花机实际上就是把编织图案的程序存储在了穿孔金属卡片上(见图 1.11),然后用穿孔金属卡片控制经线,织出图案。杰卡德的一大杰作就是用黑白丝线织成的自画像,为此使用了大约 1 万张卡片。

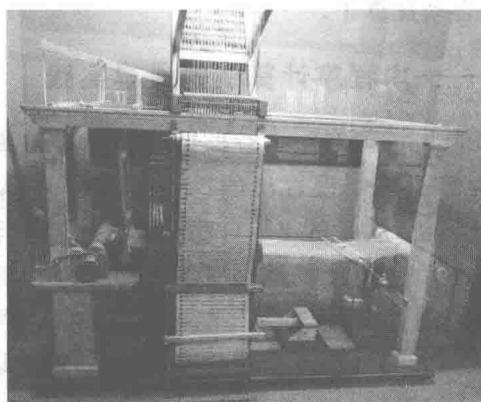


图 1.10 Bouchon 打孔纸带提花机的原理



图 1.11 杰卡德提花机的局部

巴贝奇从杰卡德提花机中得到了灵感,开始制作一台“差分机”。所谓“差分”,是把函数表的复杂算式转化为差分运算,用简单的加法代替平方运算。他耗费了整整十年光阴,于 1822 年完成了第一台差分机。差分机已经闪烁出了程序控制的灵光——它能够按照设计者的意图,自动处理不同函数的计算过程。此后,巴贝奇接着投入了一台更大的差分机的制作中。1834 年巴贝奇又构想了一种新型的分析机(analytical engine,见图 1.12)。

巴贝奇按照工场的模式来构建这台分析机。他打算用蒸汽机为内动力,驱动大量的齿轮机构运转,并将他的工场分为 5 个部分:

(1)“仓库”(store)。由齿轮阵列组成,每个齿轮可存储 10 个数,齿轮组成的阵列总共能够存储 1000 个 50 位数。

(2)“作坊”(mill)——“运算室”。其基本原理与帕斯卡的转轮相似,用齿轮间的啮合、旋转、平移等方式进行数字运算。为了加快运算速度,他改进了进位装置,使得 50 位数加 50 位数的运算可完成于一次转轮之中。图 1.13 为巴贝奇设计的差分机草图。

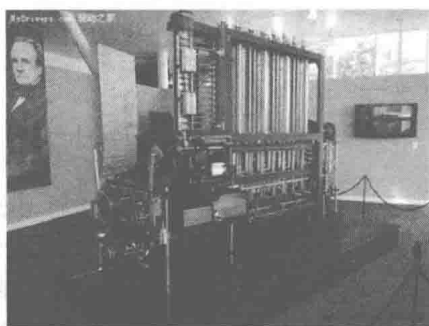


图 1.12 巴贝奇分析机复制品