

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6版)

张基温 编著



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6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7章：第1章帮助读者快速建立对计算机系统整体结构的认识，第2章介绍计算机的存储体系，第3章介绍计算机的输入输出和控制技术，第4章介绍计算机的总线系统和主板的有关知识，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章在架构层面上介绍处理器中的并行技术，第7章从体系结构和元器件进步两个方面介绍计算机的发展趋势。

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。经过5次修订，更加适合教学；可供应用型本科计算机科学与技术、软件工程、信息安全、网络工程、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. --6版. --北京：清华大学出版社，2016

高等教育质量工程信息技术系列示范教材

ISBN 978-7-302-42203-7

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(2015)第279047号

责任编辑：白立军 战晓雷

封面设计：常学影

责任校对：李建庄

责任印制：何 芊

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：北京鑫海金澳胶印有限公司

经 销：全国新华书店

开 本：185mm×260mm

印 张：22.25

字 数：554千字

版 次：1998年1月第1版 2016年5月第6版

印 次：2016年5月第1次印刷

印 数：1~2000

定 价：39.00元

产品编号：066225-01

第6版前言

计算机俗称电脑,顾名思义,就是一种模拟人的大脑的机器。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模拟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,其关键词有3个:计算机、组成和原理,即介绍计算机由哪些功能部件组成以及它们的工作原理。

目前,国内已经有一些计算机组成原理的教材,但多数是面向计算机设计的。本书则想写成本面向应用的教材,目的是让学习者能从应用的角度来了解计算机的组成及其工作原理。为了实现这个目的,本书在一开始构思时,就考虑不对运算器的内容介绍得太多;另一方面的考虑是这部分内容与数字逻辑重叠太多。

第6版是在第5版的基础上修订而成的。在修订中强调了如下4个方面:一是突出哲理,强调计算机技术发展中所折射出来的逻辑思维精华,以启迪思维,激励创新;二是增添新的技术,淘汰过时的技术;三是强化部分对于应用有价值的内容;四是对有关内容进一步重组,以便更有助于学习。

基于这些原则,本书分为7章。第1章为计算机系统概述,从内动力、内程序、自我控制 and 自我管理4个方面介绍计算机的发展过程,同时给出一个计算机组成的框架和简单原理,为全书的学习奠定基础。以后的5章作为第1章内容的展开,分别介绍存储系统、I/O机制、总线和主板、控制器逻辑和处理器架构。最后一章是对未来计算机的展望。

在这次修订中,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在参考文献中一一列出,但由于有些文献(特别是网站内容)出处不明或是佚名作者,因而疏漏之处在所难免。在此,谨向这些文献的作者深表谢意。同时,还要感谢在这次修订中参加了部分编写工作的赵忠孝、姚威、张展维、史林娟、张展赫、戴璐、张秋菊、陈觉。

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
2016年元月

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 算盘和算筹的贡献——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——内程序计算机的发展轨迹	4
1.1.3 帕斯卡加法器——第一台内动力计算机	7
1.1.4 从八卦图到布尔代数——电子数字计算机的运算基础	11
1.1.5 电子数字计算机体系的确立	19
1.2 0、1 编码	23
1.2.1 数字系统中的信息单位与量级	23
1.2.2 十进制数与二进制数的转换	24
1.2.3 八进制、十六进制和二十进制	25
1.2.4 原码、反码、补码和移码	26
1.2.5 浮点数与定点数	30
1.2.6 声音的 0、1 编码	31
1.2.7 图形图像的 0、1 编码	32
1.2.8 文字的 0、1 编码	35
1.2.9 指令的 0、1 编码与计算机程序设计语言	38
1.2.10 数据传输中的差错检验	40
1.3 电子数字计算机工作原理简述	43
1.3.1 电子数字计算机的运算器	43
1.3.2 计算机存储器	46
1.3.3 计算机控制器工作原理简述	49
1.3.4 总线	52
1.3.5 计算机工作的时序控制	52
1.4 计算机系统的主要性能指标	55
1.4.1 机器字长	55
1.4.2 存储容量	55
1.4.3 运算速度	55
1.4.4 可靠性、可用性和 RASIS 特性	58
1.4.5 效能和环保性	58
1.4.6 计算机硬件的其他性能指标	58
1.5 操作系统与计算机系统结构	59
1.5.1 用操作系统实现计算机的自我管理	59

1.5.2	操作系统的功能	60
1.5.3	计算机从裸机走向虚拟机	61
1.5.4	现代计算机系统的模块结构	62
1.5.5	现代计算机系统的层次结构	62
1.6	计算机系统进展	63
1.6.1	Nathan 软件第一定律	64
1.6.2	摩尔定律	64
1.6.3	冯·诺依曼体系结构的局限	64
1.6.4	基于冯·诺依曼体系的改进	65
1.6.5	另辟蹊径——非冯·诺依曼体系结构	70
习题		72
第2章	存储系统	75
2.1	主存储器基本原理	75
2.1.1	ROM 基本原理	75
2.1.2	SRAM 基本原理	77
2.1.3	DRAM 基本原理	80
2.2	主存储器结构	83
2.2.1	存储体的扩展方式	83
2.2.2	Bank	84
2.2.3	内存条及其基本组成	86
2.2.4	并行存储器	88
2.2.5	并行处理机的主存储器	91
2.3	DRAM 内部操作与性能参数	92
2.3.1	SDRAM 的主要引脚	92
2.3.2	SDRAM 的读写时序	93
2.3.3	突发传输	95
2.3.4	数据掩码	96
2.3.5	DRAM 的动态刷新	97
2.3.6	芯片初始化与预充电	100
2.3.7	存储器控制器	102
2.3.8	RAM 的一般性能参数	102
2.3.9	DDR SDRAM 与 RDRAM	105
2.4	磁盘存储器	106
2.4.1	磁表面存储原理	107
2.4.2	硬磁盘存储器的存储结构	109
2.4.3	磁盘格式化	110
2.4.4	硬磁盘存储器与主机的连接	113

2.4.5	硬盘存储器的技术参数	115
2.4.6	磁盘阵列 RAID	117
2.5	光盘存储器	120
2.5.1	光盘的技术特点与类型	120
2.5.2	可擦写型光盘读写原理	121
2.5.3	光盘规格	122
2.6	闪速存储器	125
2.6.1	闪存原理	125
2.6.2	固态硬盘	126
2.7	存储体系	128
2.7.1	多级存储体系的建立	128
2.7.2	多级存储体系的性能参数	130
2.7.3	cache—主存机制	131
2.7.4	虚拟存储器	136
2.8	未来存储元件	139
2.8.1	磁随机存取存储器	139
2.8.2	铁电随机存取存储器	140
2.8.3	相变随机存取存储器	141
2.8.4	阻变随机存取存储器	141
	习题	142
第3章	输入输出系统	146
3.1	I/O 设备	146
3.1.1	I/O 设备及其发展	146
3.1.2	键盘	149
3.1.3	打印设备	152
3.1.4	鼠标	157
3.1.5	显示器	158
3.1.6	触摸屏	164
3.1.7	虚拟现实设备	165
3.2	I/O 接口	167
3.2.1	影响 I/O 设备与计算机连接的主要因素	168
3.2.2	缓冲	169
3.2.3	I/O 接口及其逻辑	171
3.2.4	I/O 端口	172
3.2.5	可编程并行接口 8255A	173
3.2.6	可编程串行接口 8251	175
3.3	I/O 过程的程序直接控制	176

3.3.1	I/O 过程的程序无条件传送控制方式	176
3.3.2	I/O 过程的程序查询控制方式	177
3.4	I/O 过程的程序中断控制	178
3.4.1	程序中断控制的核心概念	178
3.4.2	中断关键技术	181
3.4.3	中断接口	185
3.4.4	多重中断	187
3.5	I/O 数据传送的 DMA 控制	187
3.5.1	DMA 的基本概念	187
3.5.2	DMA 与 CPU 共享存储器冲突的解决方案	188
3.5.3	DMA 控制器	190
3.5.4	DMA 传送过程	191
3.5.5	DMA 与中断方式比较	193
3.6	I/O 过程的通道控制	193
3.6.1	通道控制及其特点	193
3.6.2	通道控制原理	195
3.6.3	通道类型	198
3.7	I/O 管理	199
3.7.1	设备驱动程序	199
3.7.2	ROM BIOS	200
3.7.3	I/O 设备分配	202
	习题	204
第 4 章	总线与主板	207
4.1	总线的概念	207
4.1.1	总线及其规范	207
4.1.2	总线分类	208
4.1.3	总线的性能指标	210
4.1.4	标准总线	212
4.2	总线工作原理	212
4.2.1	总线的组成与基本传输过程	212
4.2.2	总线的争用与仲裁	213
4.2.3	总线通信中主从之间的时序控制	216
4.3	几种标准系统总线分析	220
4.3.1	ISA 总线	220
4.3.2	PCI 总线	222
4.3.3	AGP 总线	225
4.3.4	PCI-Express 总线	226

4.4	几种标准 I/O 总线分析	228
4.4.1	ATA 与 SATA 总线	228
4.4.2	SCSI 与 SAS 总线	230
4.4.3	USB 总线	232
4.4.4	光纤通道总线	236
4.5	微型计算机主板	236
4.5.1	主板的概念	236
4.5.2	主板的组成	237
4.5.3	主板分类	242
4.5.4	智慧型主板	243
	习题	245
第 5 章	控制器逻辑	247
5.1	处理器的外特性——指令系统	247
5.1.1	指令与指令系统	247
5.1.2	寻址方式	250
5.1.3	Intel 8086 指令简介	255
5.1.4	RISC 与 CISC	262
5.1.5	指令系统的设计内容	266
5.2	组合逻辑控制器	267
5.2.1	指令的微操作分析	267
5.2.2	指令的时序控制与时序部件	269
5.2.3	组合逻辑控制器设计举例	271
5.3	微程序控制器	274
5.3.1	概述	274
5.3.2	微程序操作控制部件的组成	274
5.3.3	微程序操作控制部件设计举例	275
	习题	278
第 6 章	处理器架构	281
6.1	流水线技术	281
6.1.1	指令流水线	281
6.1.2	运算流水线	283
6.1.3	流水线中的相关冲突	284
6.1.4	流水线中的多发射技术	286
6.1.5	Pentium CPU	288
6.1.6	流水线向量处理机	291
6.2	多处理器系统	295

6.2.1	多计算机系统与多处理器系统	295
6.2.2	SMP 架构	296
6.2.3	多处理器操作系统	299
6.3	多线程处理器	300
6.3.1	多线程处理器架构的提出	300
6.3.2	同时多线程技术	302
6.3.3	超线程处理器	303
6.4	多核处理器	307
6.4.1	多核处理器及其特点	307
6.4.2	多核+多线程——CMT 技术	308
6.5	关于处理器并行性开发的讨论	309
6.5.1	并行性及其级别	309
6.5.2	基于并行性的处理器体系 Flynn 分类	310
6.5.3	处理器并行性开发的思路和途径	312
	习题	314
第 7 章	未来计算机展望	316
7.1	数据流计算机	316
7.1.1	从控制流驱动到数据流驱动	316
7.1.2	数据流程图及其操作规则	317
7.1.3	数据流计算机指令的组成与执行过程	318
7.1.4	静态数据流计算机与动态数据流计算机	318
7.2	归约机	320
7.2.1	需求驱动	320
7.2.2	FFP 归约机结构	321
7.2.3	FFP 工作过程	321
7.3	智能计算机	322
7.3.1	智能计算机及其性能特点	322
7.3.2	智能计算机的一般结构	323
7.3.3	智能计算机的解题过程	325
7.4	神经网络计算机	325
7.4.1	神经元与神经网络	325
7.4.2	人工神经网络	327
7.4.3	神经网络计算机的实现技术	329
7.5	基于非电子器件的计算机展望	330
7.5.1	关于摩尔定律寿命的讨论	330
7.5.2	纳米电子器件	331
7.5.3	量子计算机	333

7.5.4 光学计算机.....	335
7.5.5 超导技术.....	337
7.5.6 生物计算机.....	338
7.5 习题	340
附录 A 国内外常用二进制逻辑元件图形符号对照图	341
参考文献.....	343

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、争夺的需要,资源开发的重心先是选择了物资资源,后来扩展到能源资源。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成为人类工具的宠儿。

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。

进一步分析计算机还可以看出,它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 算盘和算筹的贡献——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。图1.1为一种石子记事的想象图。那时,人类对于“数”的概念只有“一、二、多”,还不能精确地区别数量。后来随着生产力的发展,剩余物资开始增多,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,记数体系不断完善,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)。

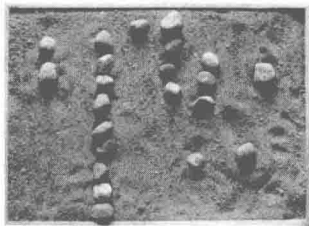


图 1.1 石子记事

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、再二分出来

的数量等,在此基础上产生了十进制(古代中国、古埃及以及巴比伦记数体系)、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。

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计数功能。算盘就是一种用来扩展手指运算功能的计算工具。它通过将算珠按一定规则排列来表示数字。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(三千多年前)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,书中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、针算,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为其推想图,也被称为游珠算板。它将刻板分为3段,每位上都有5颗珠子,其中位于上面的一颗珠子(称上珠)与下面的4颗珠子(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,人们把珠子穿起来,并进一步改进,就成了图1.3所示的算盘。

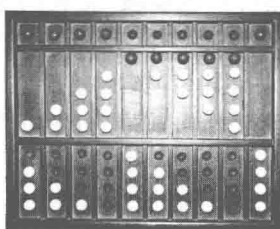


图 1.2 游珠算板

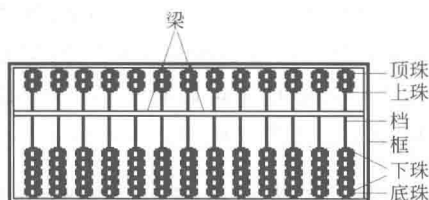


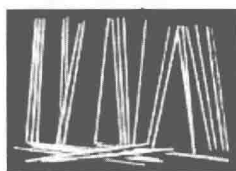
图 1.3 算盘

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),不仅能用于一服药的银两计算,还能用于每日、每月以及一年的账目核算与统计。



图 1.4 《清明上河图》左端的“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功能的工具称为算筹。早期的算筹是用树枝或竹节等制成的,后来经过精细加工成为专用的计算工具(见图 1.5(a))。算筹也采用五升十进制,用 5 根算筹就可以表示 0~9 中的任何一个数,大于 9 的数向左面进一位。如图 1.5(b)所示,表示数据分为纵式和横式两种方式。《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的自然数了。图 1.5(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、开方等复杂的计算问题。图 1.5(d)为用算筹进行计算的实例。



(a) 算筹

形式 \ 数字	1	2	3	4	5	6	7	8	9
纵式	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	┐	┑	┒	┓
横式	—	=	≡	≡	≡	⊥	⊥	⊥	⊥

(b) 算筹表示数据的两种方式

$$\begin{array}{ccc}
 \equiv \equiv \equiv = \equiv & \equiv = \equiv \equiv \equiv \equiv & \perp \equiv \equiv \perp \equiv \equiv \equiv \equiv \\
 5428 & 32591 & 60837924
 \end{array}$$

(c) 算筹记数实例

$$\begin{array}{ccccccc}
 = \equiv \equiv \equiv \equiv & + & \equiv \equiv \equiv \equiv \equiv \equiv & - & \perp \equiv \equiv \equiv \equiv \\
 2356 & + & 4789 & = & 7145
 \end{array}$$

(d) 算筹计算实例

图 1.5 算筹及其使用

在漫长的历史中,中国不少人使用这种计算工具进行了各种计算。中国古代数学家祖冲之(429—500,字文远,南北朝时期著名数学家、天文学家,见图 1.6)就是使用这种计算工具将圆周率计算到了小数点后面的 7 位。

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,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——计算程序语言。图 1.7 为一本民国时期的珠算口诀书。



图 1.6 祖冲之

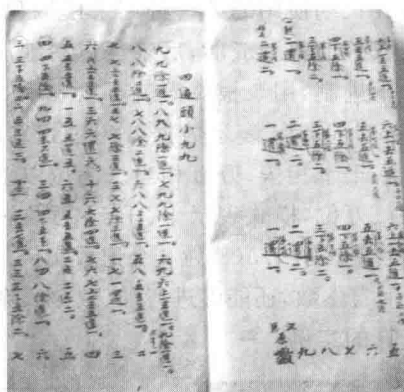


图 1.7 一本民国时期的珠算口诀书

用这种计算程序语言可以编制计算问题的歌诀,即程序。例如,用算盘计算 $42+39$ 的口令如下:

三下五去二(十位上:要加 3,应在上档下来一个珠——5,再去掉 2),

九去一进一(个位上:要加 9,应先去掉一个 1,再向前位进 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。

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——内程序计算机的发展轨迹

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却是一件极为费心、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》中所印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

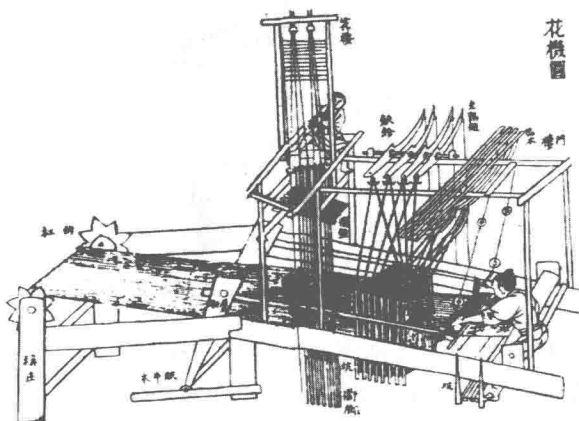


图 1.9 《天工开物》中记载的明代提花机

采用花楼可以大大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。他设想根据图案在纸带上打出一排排小孔(图 1.10 中的①所示),并把它压在编织针上(图 1.10 中的②所示)。启动机器后,正对着小孔的编织针能穿过去钩起一根线,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。这种提花机也被称做杰卡德提花机。杰卡德提花机实际上就是把织图案的程序存储在穿孔金属卡片上(见图 1.11),然后用这张纸带控制经线,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。

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旨意,自动处理不同函数的计算过程。此后,巴贝奇接着投入一台更大差分机的制作工

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)。

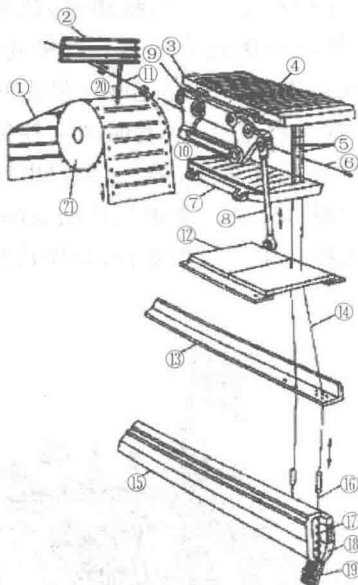


图 1.10 布乔打孔纸带提花机

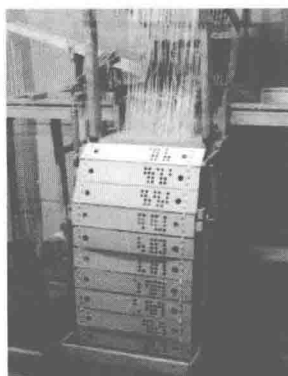


图 1.11 杰卡德提花机的局部

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,每个齿轮可储存 10 个数,齿轮组成的阵列总共能够储存 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。

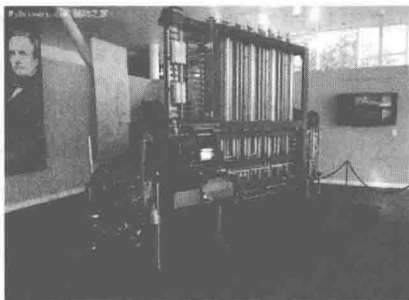


图 1.12 巴贝奇分析机复制器

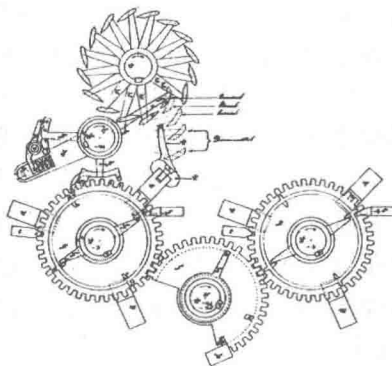


图 1.13 巴贝奇设计的差分机草图

(3) 第 3 部分,巴贝奇没有为它具体命名,其功能是以杰卡德穿孔卡片中的有孔和无孔来控制运算操作的顺序。他甚至还考虑把某一步运算的结果也用有孔或无孔表示,以便决