



普通高等教育

软件工程

“十二五”规划教材

12th Five-Year Plan Textbooks  
of Software Engineering

# 计算机 组成原理

张光河 ○ 主编

刘芳华 万隆昌 ○ 编

周琪云 ○ 主审

*Principles of  
Computer Organization*

人民邮电出版社  
POSTS & TELECOM PRESS

013071241



普通高等教育  
软件工程

“十二五”规划教材

TP301  
65

12th Five-Year Plan Textbooks  
of Software Engineering

# 计算机 组成原理

张光河 ◎ 主编

刘芳华 万隆昌 ◎ 编

周琪云 ◎ 主审



*Principles of  
Computer Organization*

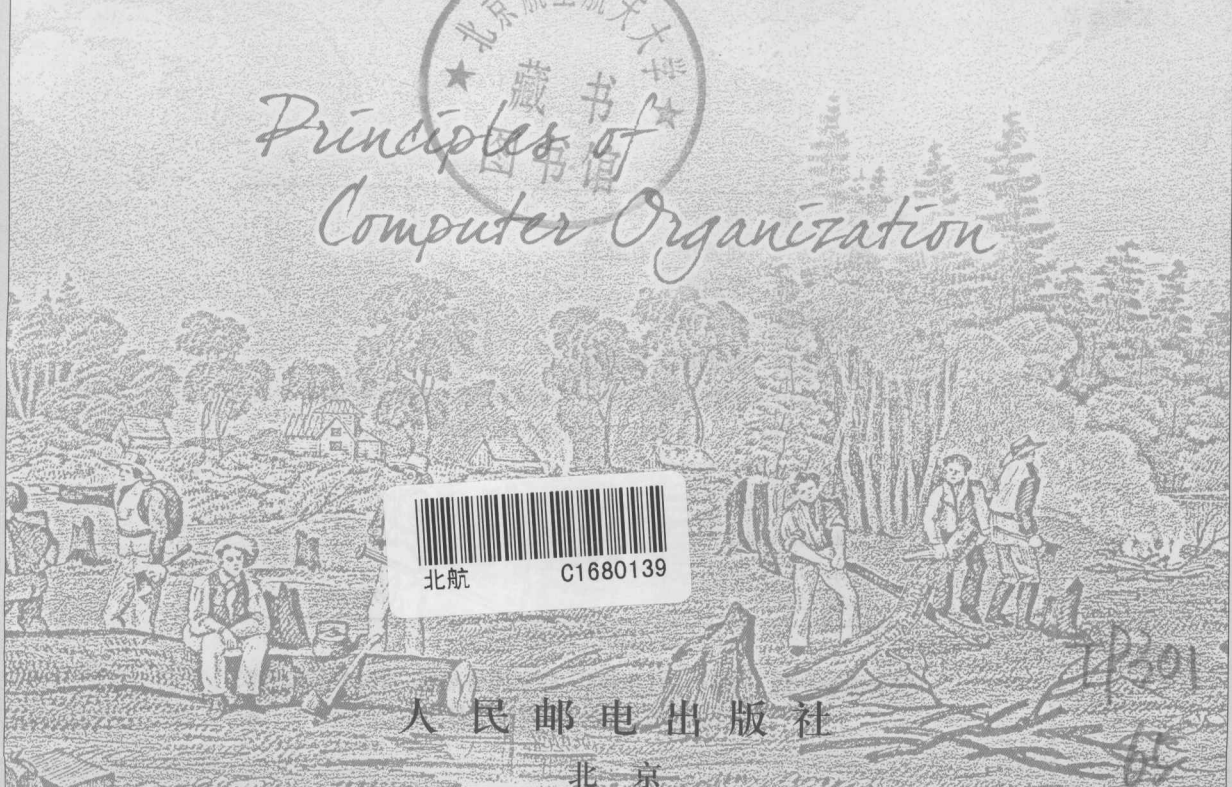


北航

C1680139

人民邮电出版社

北京





013071241

### 图书在版编目(CIP)数据

计算机组成原理 / 张光河主编 ; 刘芳华, 万隆昌编

— 北京 : 人民邮电出版社, 2013.9

普通高等教育软件工程“十二五”规划教材

ISBN 978-7-115-32142-8

I. ①计… II. ①张… ②刘… ③万… 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174633号

### 内 容 提 要

本书是“基于卓越人才培养模式的硬件课程体系建设和教学模式改革”教学改革研究课题的重要成果之一。全书按照普通高等院校计算机专业本科生的教学要求,并根据“计算机组成原理”课程教学大纲及硕士研究生入学考试的要求编写而成。共分为7章:第1章总体介绍了计算机组成原理的基本概念及应用领域;第2章介绍了计算机运算的方法,包括定点数与浮点数的算术运算;第3章介绍了存储器相关的知识,包括主存储器、高速缓冲存储器和虚拟存储器等;第4章重点介绍了计算机的核心部件中央处理器,主要包括微程序控制与设计,硬布线逻辑控制器及相关知识;第5章介绍了指令系统,包括指令的格式、方式,复杂指令集和精简指令集;第6章介绍了总线结构和分类,总线通信与控制等知识;第7章介绍了输入输出系统,包括程序中断、存储器直接存取和通道等。本书每章之后附有习题,包括基础题和提高题。基础题可用于学生日常学习或教学布置练习时使用,提高题则适用于准备考硕士研究生的同学使用。

本书可作为普通高等院校计算机组成原理课程的教材,也可供计算机及相关专业的教学人员、科研人员或其他相关人员使用。高职高专类学校也可以选用本教材,使用时可以根据学校和学生的实际情况略去某些章节。

- 
- ◆ 主 编 张光河
  - 编 刘芳华 万隆昌
  - 主 审 周琪云
  - 责任编辑 刘 博
  - 责任印制 彭志环 焦志炜
  - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街14号
  - 邮编 100061 电子邮件 315@ptpress.com.cn
  - 网址 <http://www.ptpress.com.cn>
  - 三河市海波印务有限公司印刷
  - ◆ 开本: 787×1092 1/16
  - 印张: 11.75 2013年9月第1版
  - 字数: 321千字 2013年9月河北第1次印刷
- 

定价: 29.80 元

读者服务热线: (010)67170985 印装质量热线: (010)67129223

反盗版热线: (010)67171154

# 前 言

本书根据普通高等院校计算机专业本科生的教学要求,并按照“计算机组成原理”教学大纲的规定,同时在参考全国硕士研究生入学统考《计算机组成原理》的考试大纲的基础上编写而成,全书系统地讲解了“计算机组成原理”的基础知识、基本概念和基本方法,将计算机内部运行机制全面地展现在读者眼前。作者在总结“计算机组成原理”课程教学工作经验的基础上,结合本课程及专业的发展趋势、前导课程及后续课程的情况安排了本书的内容。

计算机组成原理是计算机专业的一门核心课程,本课程可以相对独立地分为计算机硬件和计算机软件两大部分。其特点是涉及知识面比较广泛,内容比较丰富,无论是硬件还是软件,其发展都可以用日新月异来形容。本书始终坚持突出基础知识、基本概念和基本方法,加强实践能力的人才培养目标,力求介绍基础知识时由浅入深、由易到难的原则,行文时力求言简意赅、清晰明了,把作者主持“基于卓越人才培养模式的硬件课程体系建设和教学模式改革”教学改革研究课题的成果和心得尽可能地反映和体现在本教材之中。

作者在设计和挑选教材内容时,做了以下处理:

(1) 考虑到对于大多数高校而言,尽管“数字逻辑”是本课程的先导课程,但绝大部分学生在学习本课程时都不是太记得如数制和编码、数据的表示方法这些内容,因此本书在第2章中增加了这些内容以便学生们更好地进入学习状态,对于学生基础相当扎实的学校,本节可以选讲甚至略过不讲;

(2) 在第3章存储器介绍虚拟存储器时,简单描述了页式、段式和段页式3种虚拟存储器,这可能与部分操作系统中的内容重复,教师授课时亦可根据学生的实际情况跳过;

(3) 在第4章中介绍流水线相关的内容,在计算机体系结构中亦有提及,教学过程中可酌情处理;

(4) 在第6章中介绍总线时,为了让学生更加直观地了解总线,特意引入了PC机上已经基本淘汰的ISA及EISA总线,也介绍了最新的USB总线,以此帮助学生理解总线。

全书共7章:第1章为概述,对计算机的由来、组成、发展、性能指标及应用进行了简要介绍;第2章介绍了计算机运算方法,其中数制与编码和数据的表示方法均为预备知识,而定点及浮点数的加减乘除的计算方法,则是本章的重点,掌握这些计算方法,才能更好地理解计算机运算的原理及方法;第3章主要介绍了存储器相关的知识,包括存储器的种类、技术指标、主存储器、高速缓冲存储器、虚拟存储器和外部存储器;第4章是计算机的核心部件中央处理器,主要介绍了微程序控制和设计、硬布线逻辑控制器、CPU的最新进展;第5章为指令系统,主要介绍了指令格式、寻址方式,还介绍了复杂指令集和精简指令集;第6章介绍了总线的结构和分类、通信和控制,并列出了常用的总线;第7章主要介绍了程序中断处



理, 存储器直接存取方式、通道方式, 最后简单地介绍了输入输出设备及 I/O 接口。

本书内容新颖, 重点突出, 语言精练易懂, 便于自学, 可作为高等院校计算机及相关专业的教材, 也可以作为工程技术人员的参考书。本书的前导课程为数字逻辑, 后续课程包括计算机系统结构。教学安排可以在 60~90 (推荐学时数为 64, 即每周共 4 节课, 共授课 16 周) 学时之间选择, 并可以根据学校的实际情况适当开展基于某些教学实验箱的教学实验。此外还至少应该完成课后习题中的基础题, 准备考硕的学生可以完成提高题以检验自己的水平。本书附录中 5 套试题可用于本课程期末考试时复习使用, 也可用于教师检查学生的学习情况时使用。

参加本书编写的还有刘芳华老师和万隆昌老师, 江西师范大学计算机信息工程学院周琪云教授担任主审, 本书出版还得到了人民邮电出版社编辑刘博和曹慧的大力支持和帮助, 在此深表感谢! 感谢本书在编写过程中给予过支持和帮助的郭义榕、胡韵、彭丽丽、熊慧敏、李绵、刘收银、叶藤、殷饶斌、胡涂强和熊玮等同学! 感谢在本书成书过程中其他很多不知道名字的同学所给予的支持和帮助!

作者在编写本教材的过程中, 参阅了大量的相关教材和专著, 也在网上找了很多资料, 在此向各位原著作者致敬和致谢!

由于作者水平有限, 加上时间仓促, 书中难免存在各种不妥或错误, 恳请读者批评指正!

作者邮箱: [guanghezhang@163.com](mailto:guanghezhang@163.com)

作者个人主页: [www.guanghezhang.com](http://www.guanghezhang.com)

作者

2013年5月

# 目 录

## 第 1 章 计算机组成概述 ..... 1

1.1 计算机的由来 ..... 1

1.2 计算机的组成 ..... 2

1.2.1 计算机硬件 ..... 2

1.2.2 计算机软件 ..... 4

1.3 计算机发展历程 ..... 5

1.4 计算机的性能指标 ..... 9

1.5 计算机的应用 ..... 11

1.6 小结 ..... 12

习题 1 ..... 13

## 第 2 章 计算机运算方法 ..... 15

2.1 数制与编码 ..... 15

2.1.1 数制及其转换 ..... 15

2.1.2 BCD 码 ..... 17

2.1.3 校验码 ..... 18

2.2 数据的表示方法 ..... 21

2.2.1 真值和机器数 ..... 22

2.2.2 字符与字符串 ..... 22

2.2.3 定点数表示法 ..... 25

2.2.4 浮点数表示法 ..... 29

2.3 定点数加减法运算 ..... 32

2.3.1 运算规则 ..... 32

2.3.2 运算实例 ..... 33

2.3.3 溢出判断 ..... 34

2.4 定点数乘法运算 ..... 35

2.4.1 原码一位乘法 ..... 35

2.4.2 原码二位乘法 ..... 37

2.4.3 补码一位乘法 ..... 38

2.4.4 补码二位乘法 ..... 40

2.5 定点数除法运算 ..... 41

2.5.1 原码一位除法 ..... 41

2.5.2 补码一位除法 ..... 42

2.6 浮点数算术运算 ..... 44

2.6.1 浮点数加减运算 ..... 44

2.6.2 浮点数乘除运算 ..... 46

2.6.3 浮点运算器 ..... 47

2.7 算术逻辑单元 ..... 50

2.7.1 算术逻辑单元简介 ..... 50

2.7.2 多功能算术逻辑单元 ..... 51

2.7.3 运算器 ..... 55

2.8 小结 ..... 56

习题 2 ..... 57

## 第 3 章 存储器 ..... 59

3.1 存储器概述 ..... 59

3.1.1 存储器分类 ..... 59

3.1.2 存储器主要技术指标 ..... 61

3.1.3 存储器层次结构 ..... 61

3.2 主存储器 ..... 64

3.2.1 半导体只读存储器 ..... 64

3.2.2 半导体随机存储器 ..... 66

3.2.3 静态 MOS 存储器 ..... 66

3.2.4 动态 MOS 存储器 ..... 70

3.3 主存与 CPU 的连接 ..... 71

3.3.1 连接的意义 ..... 71

3.3.2 主存容量的扩展 ..... 72

3.3.3 存储芯片的分配与片选 ..... 74

3.3.4 存储器与 CPU 的连接 ..... 74

3.4 双口 RAM 和多模块存储器 ..... 75

3.4.1 双端口 RAM ..... 75

3.4.2 多模块存储器 ..... 76

3.5 高速缓冲存储器 ..... 77

3.5.1 高速缓冲存储器的组织与管理 ..... 78

3.5.2 地址映像与转换 ..... 78

3.5.3 替换策略 ..... 81

3.5.4 Cache 的一致性 ..... 83

3.5.5 Cache 性能分析 ..... 83

3.5.6 相联存储器 ..... 84

3.6 虚拟存储器 ..... 85

3.6.1 虚拟存储器的基本概念 ..... 85



3.6.2 页式虚拟存储器	86	5.1.2 指令系统的特点	119
3.6.3 段式虚拟存储器	87	5.1.3 指令系统的性能指标	119
3.6.4 段页式虚拟存储器	87	5.2 指令格式	120
3.6.5 快表	87	5.2.1 指令格式简介	120
3.7 外部存储器	88	5.2.2 操作码	120
3.7.1 外部存储器简介	88	5.2.3 地址码	120
3.7.2 磁盘存储器	88	5.2.4 指令字长度与扩展方法	122
3.7.3 光盘存储器	93	5.2.5 典型指令格式实例	124
3.7.4 磁带	94	5.3 寻址方式	126
3.7.5 其他存储器	95	5.3.1 指令寻址	127
3.8 小结	96	5.3.2 数据寻址	128
习题 3	96	5.3.3 寻址实例	132
<b>第 4 章 中央处理器</b>	<b>99</b>	5.4 复杂指令集和精简指令集	135
4.1 中央处理器的结构	100	5.4.1 复杂指令集简介	136
4.2 指令周期与时序产生器	100	5.4.2 精简指令集简介	136
4.2.1 指令周期	100	5.4.3 CISC 和 RISC 的比较	137
4.2.2 时序产生器	101	5.5 小结	137
4.3 微程序控制与设计	101	习题 5	138
4.3.1 微程序控制简介	101	<b>第 6 章 总线</b>	<b>141</b>
4.3.2 微指令简介	102	6.1 总线的概述	141
4.3.3 微程序控制器	102	6.2 总线的结构和分类	141
4.3.4 微程序设计	103	6.2.1 总线的结构	141
4.4 硬布线逻辑控制器	104	6.2.2 总线的分类	143
4.4.1 硬布线逻辑控制器	104	6.2.3 总线的性能指标	144
4.4.2 硬布线逻辑设计	104	6.3 总线通信与控制	144
4.5 多核处理器	105	6.3.1 信息的传送方式	144
4.6 指令执行过程与数据通路	106	6.3.2 总线的通信	145
4.7 指令流水线与冲突处理	107	6.3.3 总线的控制	146
4.8 中央处理器的新进展	110	6.4 典型的总线	148
4.8.1 流水线处理器简介	110	6.4.1 ISA 和 EISA 总线	148
4.8.2 超标量处理器简介	110	6.4.2 PCI 和 AGP 总线	150
4.8.3 奔腾处理器简介	110	6.4.3 USB 总线	152
4.8.4 其他发展	114	6.4.4 其他类型的总线	152
4.9 小结	114	6.5 小结	153
习题 4	114	习题 6	153
<b>第 5 章 指令系统</b>	<b>118</b>	<b>第 7 章 输入与输出系统</b>	<b>155</b>
5.1 指令系统简介	118	7.1 输入与输出系统简介	155
5.1.1 指令系统的发展历程	118	7.2 程序查询及中断	156

7.2.1 程序查询方式	156	7.5.1 输入设备简介	164
7.2.2 程序中断简介	157	7.5.2 输出设备简介	166
7.2.3 程序中断处理	158	7.6 I/O 接口	167
7.3 存储器直接存取方式	159	7.7 小结	168
7.3.1 存储器直接存取的基本概念	159	习题 7	169
7.3.2 存储器直接存取的特点	160	<b>附录</b>	172
7.3.3 存储器直接存取的工作过程	160	期末复习题(一)	172
7.4 通道方式	161	期末复习题(二)	173
7.4.1 通道的作用和功能	161	期末复习题(三)	175
7.4.2 通道的类型	162	期末复习题(四)	176
7.4.3 通道的工作过程	162	期末复习题(五)	178
7.4.4 通道方式的发展	163	期末复习题(六)	179
7.5 输入与输出设备简介	163		



# 第 1 章

## 计算机组成概述

计算机组成 (computer composition) 指的是系统结构的逻辑实现, 包括计算机内的数据流和控制流的组成及逻辑设计等。计算机组成的任务是在指令集系统结构确定分配给硬件系统的功能和概念结构之后, 研究各组成部分的内部构造和相互联系, 以实现机器指令集的各种功能和特性。这种联系包括各功能部件的内部和相互作用。计算机组成要解决的问题是在所希望达到的性能和价格下, 怎样最佳、最合理地把各个设备和部件组成计算机。计算机组成设计要确定的方面应包括:

- (1) 数据通路宽度: 数据总线上一次并行传送的信息位数。
  - (2) 专用部件的设置: 是否设置乘除法、浮点数运算、字符处理、地址运算等专用部件, 设置的数量与计算机要达到的速度、价格及专用部件的使用频度等有关。
  - (3) 各种操作对部件的共享程度: 分时共享使用程度高, 虽限制了速度, 但价格便宜。设置部件多会降低共享程度, 但因操作并行度提高, 可提高速度, 不过价格也会提高。
  - (4) 功能部件的并行度: 是用顺序串行, 还是用重叠、流水或分布式控制和处理。
  - (5) 控制机构的组成方式: 用硬联还是微程序控制, 是单机处理还是多机或功能分布处理。
  - (6) 缓冲和排队技术: 部件间如何设置及设置多大容量的缓冲器来协调它们的速度差。用随机、先进先出、先进后出、优先级, 还是循环方式来安排事件处理的顺序。
  - (7) 预估、预判技术: 为优化性能用什么原则预测未来行为。
  - (8) 可靠性技术: 用什么冗余和容错技术来提高可靠性。
- 本章主要从整体上介绍计算机的产生、组成、发展历程及性能指标, 最后给出计算机的主要应用领域。我们首先来看下第一部分: 计算机是如何产生的。

### 1.1 计算机的由来

市场很多书籍和教材上对计算机可以追溯的历史都描述得十分清楚, 我甚至见过不只一本书还提及了中国的算盘是计算机的鼻祖。事实上, 从目前已经公开的资料来看, 计算机的由来该从 1940 年 1 月 Bell 实验室的 Samuel Williams 和 Stibitz 制造成功了一个能进行复杂运算的计算机开始讲起, 这个计算机大量使用了继电器, 并借鉴了一些电话技术, 采用了先进的编码技术。

Atanasoff 和学生 Berry 在 1941 年夏季完成了能解线性代数方程的计算机, 取名叫“ABC”(Atanasoff-Berry Computer), 用电容作存储器, 用穿孔卡片作辅助存储器, 那些孔实际上是“烧”上的。时钟频率是 60Hz, 完成一次加法运算用时一秒。

1941 年 12 月, 德国人 Zuse 制作完成了 Z3 计算机的研制。这是第一台可编程的电子计算机。可处理 7 位指数、14 位小数。使用了大量的真空管。每秒种能做 3~4 次加法运算。一次乘法需要 3~5 秒。

1943 年到 1959 年的计算机通常被称作第一代计算机。这代计算机的特点是使用真空管, 所

有的程序都是用机器码编写，使用穿孔卡片。

在 1943 年 1 月，自动顺序控制计算机 Mark I 在美国研制成功。整个机器有 51 英尺长，重 5 吨，75 万个零部件，使用了 3 304 个继电器，60 个开关作为机械只读存储器。程序存储在纸带上，数据来自纸带或卡片阅读器。被用来为美国海军计算弹道火力表。

Max Newman、Wynn-Williams 和他们的研究小组在 1943 年 4 月研制成功“Heath Robinson”，这是一台密码破译机，严格说不是一台计算机。但是其使用了一些逻辑部件和真空管，其光学装置每秒钟能读入 2 000 个字符。同样具有划时代的意义。

1943 年 9 月，Williams 和 Stibitz 完成了“Relay Interpolator”，后来命名为“Model II Relay Calculator”。这是一台可编程计算机，同样使用纸带输入程序和数据。其运行更可靠，每个数用 7 个继电器表示，可进行浮点运算。

在英国于 1943 年 12 月推出了最早的可编程计算机，包括 2 400 个真空管，目的是为了破译德国的密码，每秒能翻译大约 5 000 个字符，但使用完后不久就遭到了毁坏。据说是因为在翻译俄语的时候出现了错误。

ENIAC (Electronic Numerical Integrator and Computer) 是第一台真正意义上的数字电子计算机。开始研制于 1943 年，完成于 1946 年。负责人是 John W. Mauchly 和 J. Presper Eckert。重 30 吨，18 000 个电子管，功率 25 千瓦。主要用于计算弹道和氢弹的研制。

## 1.2 计算机的组成

一台完整的计算机应该包括硬件和软件两部分，硬件与软件协同工作，才能使计算机正常运行并发挥出作用。因此，对计算机的认识不能只关注硬件部件，如 CPU、硬盘、内存和主板等，而还应该考虑到计算机软件部分，包括操作系统和上层应用软件。将整个计算机看做是一个系统，其层次结构如图 1-1 所示。

第 0 层为高级语言，如面向对象语言 Java、C#，面向过程的语言 C；第 1 层为汇编语言，如 8086 系列汇编；第 2 层为操作系统，如 Windows、Linux；第三层为机器语言；第四层为微程序设计；第 5 层为底层硬件，包括 CPU、内存、硬盘等。接下来开始分别介绍计算机硬件和软件。

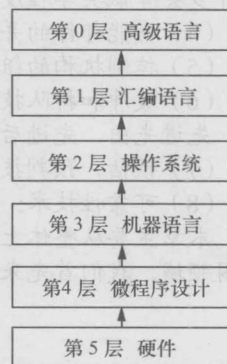


图 1-1 计算机组成层次结构

### 1.2.1 计算机硬件

计算机硬件 (Computer Hardware) 是指计算机系统中由电子、机械和光电元器件等组成的各种物理装置的总称。这些物理装置按系统结构的要求构成一个有机整体为计算机软件运行提供物质基础。简言之，计算机硬件的功能是输入并存储程序和数据，以及执行程序把数据加工成可以利用的形式。

从计算机之父冯·诺依曼提出的计算机运行原理和体系架构来看，计算机的硬件分成 5 大组成部件：运算器、控制器、存储器、输入设备和输出设备。其中，运算器和控制器是计算机的核心，合称中央处理单元 (Central Processing Unit, CPU) 或处理器。CPU 的内部还有一些高速存储单元，被称为寄存器。其中运算器执行所有的算术和逻辑运算；控制器负责把指令逐条从存储器中取出，经译码后向计算机发出各种控制命令；而寄存器为处理单元提供操作所需要的数据。

存储器是计算机的记忆部分，用来存放程序以及程序中涉及的数据。它分为内部存储器和外



部存储器。内部存储器用于存放正在执行的程序和使用的数据，其成本高、容量小，但速度快。外部存储器可用于长期保存大量程序和数据，其成本低、容量大，但速度较慢。

输入设备和输出设备统称为外部设备，简称外设或 I/O 设备，用来实现人机交互和机间通信。微型机中常用的输入设备有键盘、鼠标等，输出设备有显示器、打印机等。

计算机硬件的典型结构主要包括单总线结构、双总线结构和采用通道的大型系统结构。

(1) 单总线结构：图 1-2 就是单总线的计算机系统结构，即用一组系统总线将计算机的各部件连接起来，各部件之间可以通过总线交换信息。这种结构的优点是易于扩充新的 I/O 设备，并且各种 I/O 设备的寄存器和主存储器可以统一编址，使 CPU 访问 I/O 设备更方便灵活；其缺点是同一时刻只能允许挂在总线上的一对设备之间相互传送信息，即只能分时使用总线，这限制了信息传送的吞吐量。这种结构一般用在小型和微型计算机中。

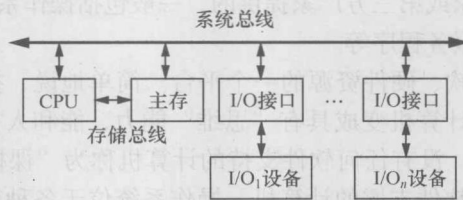


图 1-2 单总线结构

(2) 双总线结构：为了消除信息传送的瓶颈，常设置多组总线，最常见的是在内存和 CPU 之间设置一组专用的高速存储总线。以 CPU 为中心的双总线结构如图 1-3 所示，将连接 CPU 和外围设备的系统总线称为输入输出 (I/O) 总线。这种结构的优点是控制线路简单，对 I/O 总线的传送速率要求很低，缺点是 CPU 的工作效率很低，因为 I/O 设备与主存之间的信息交换要经过 CPU 进行。

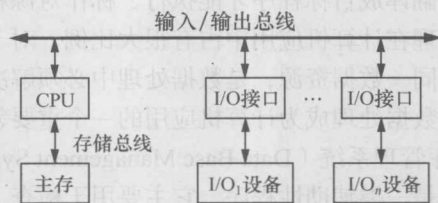


图 1-3 以 CPU 为中心的双总线结构

以存储器为中心的双总线结构如图 1-4 所示，主存储器可通过存储总线与 CPU 交换信息，同时还可以通过系统总线与 I/O 设备交换信息。这种结构的优点是信息传送速率高，缺点是需要增加新的硬件投资。



图 1-4 以存储器为中心的双总线结构

(3) 采用通道的大型系统结构：为了扩大系统的功能和提高系统的效率，在大、中型计算机系统中采用通道结构。在这种结构中，一台主机可以连接多个通道，一个通道可以连接一台或多

台 I/O 设备, 所以它具有较大的扩展余地。另外, 由通道来管理和控制 I/O 设备, 减轻了 CPU 的负担, 提高了整个系统的效率。

## 1.2.2 计算机软件

计算机软件 (Computer Software) 是指计算机系统上的程序及其文档。程序是计算任务的处理对象和处理规则的描述, 文档是为了便于了解程序所需的阐明性资料。程序必须装入机器内部才能工作, 文档一般是给人看的, 不一定装入机器。软件是用户与硬件之间的接口界面。软件是计算机系统设计的重要依据, 用户主要是通过软件与计算机进行交流。一般来说, 计算机软件可分为系统软件和应用软件两大类。

### 1) 系统软件

系统软件是由计算机厂家或第三方厂家提供的, 一般包括操作系统、语言处理程序、计算机语言和数据库系统以及其他服务程序等。

操作系统是管理计算机软、硬件资源的一个平台。简单地说, 操作系统就是一些程序, 这些程序能够被硬件读懂, 使计算机变成具有“思维”能力、能和人类沟通的机器。操作系统是应用程序和硬件沟通的桥梁。没有任何软件支持的计算机称为“裸机”(Bare-Computer)。现在的计算机系统是经过若干层软件支撑的计算机, 操作系统位于各种软件的最底层, 是与计算机硬件关系最为密切的系统软件。目前计算机配置的常见的操作系统为 Windows、UNIX、Linux、OS/2 等。

语言处理程序: 对于不同的系统, 机器语言并不一致, 所以任何语言编制的程序, 最后都需要转换成机器语言, 才能被计算机执行。语言处理程序的任务, 就是将各种高级语言的源程序翻译成机器语言表示的目标程序。语言处理程序按处理方式不同, 可分为解释型程序与编译型程序两大类。前者对源程序的处理采用边解释边执行的方法, 并不形成目标程序, 称作对源程序的解释执行; 后者必须先 will 源程序翻译成目标程序才能执行, 称作对源程序的编译执行。

数据库管理系统: 数据处理在计算机应用中占有很大比例, 对于大量的数据如何存储、利用和管理, 如何使多个用户共享同一数据资源, 是数据处理中必须解决的问题, 为此 20 世纪 60 年代末开发出了数据库系统, 使数据处理成为计算机应用的一个重要领域。数据库系统主要由数据库 (Data Base, DB) 和数据库管理系统 (Data Base Management System, DBMS) 组成。

服务性程序: 服务性程序是一类辅助性程序, 它主要用于检查、诊断计算机的各种故障。

计算机语言: 计算机语言是面向计算机的人工语言, 它是进行程序设计的工具, 又被称为程序设计语言。现在的程序设计语言一般可以分为: 机器语言、汇编语言、高级语言。

机器语言: 机器语言是最初级且依赖于硬件的计算机语言, 是用二进制代码表示的。机器语言是计算机唯一可以直接识别和执行的语言。

汇编语言: 为了克服机器语言难读、难编、难记和易出错的缺点, 人们就用与二进制代码指令含义相近的英文缩写词、字母和数字等符号来取代指令代码 (如用 ADD 表示运算符 “+” 的机器代码), 于是就产生了汇编语言。

高级语言: 高级语言是人工设计的语言, 因为是对具体的算法进行描述, 所以又称算法语言。它是面向问题的程序设计语言, 且独立于计算机的硬件, 其表达方式接近于被描述的问题, 易被人们理解和掌握。用高级语言编写程序, 可简化程序编制和测试, 其通用性和可移植性好。在计算机上, 高级语言程序不能被直接执行, 必须将它们翻译成具体的机器语言程序才能执行。

### 2) 应用软件

为解决计算机各类问题而编写的程序称为应用软件, 它用于计算机的各个领域, 各种科学计算的软件和软件包、各种管理软件、各种辅助软件和过程控制软件等。由于计算机的应用日益普

及, 应用软件的种类和数量在不断增加, 功能不断齐全, 使用更加方便, 通用性越来越强, 人们只要简单掌握一些基本操作方法就可以利用这些软件进行日常工作的处理。常见的应用软件可以分为以下几种。

**文字处理软件:** 文字处理软件主要用于编辑各类文件, 对文字进行排版、存储、传送及打印等。文字处理软件可以方便地起草文件、通知、信函等, 在办公自动化方面有着重要的作用。

**表处理软件:** 表处理软件主要用于对文字和数据的表格进行编辑、计算、存储、打印等, 并具有数据分析统计、绘图等功能。

**数据处理软件:** 数据处理软件是对数据进行存储、分析、综合、排序、归并、检索、传递等操作, 用户可以根据自己对数据的分析、处理的特殊要求编制程序。数据处理软件提供与多种高级语言接口, 用户在高级语言编制的程序中, 可调用数据库中的数据。常用的数据处理软件有 Oracle、MySQL、MSSQL 等。

**专家系统:** 专家系统是利用某个领域的专家知识来解决某些问题的计算机系统。专家系统由知识库、推理求解以及人机接口 3 大部分组成。用户通过人机接口进行咨询, 求解系统利用知识库中的推理求解后做出答复。目前, 在教学、医疗、气象、石油、地质等多种教学系统投入了使用。计算机之所以能发挥其强大的功能, 除了与硬件系统相关外, 还与软件系统有着密切的关系。计算机软件是指计算机自动运行的程序系统、相关的数据及文档。软件是管理和使用计算机的技术, 起着充分发挥硬件功能的作用。

## 1.3 计算机发展历程

整个计算机发展的历程大致可分为以下几个阶段: 第一代计算机的标志是电子管; 第二代计算机的标志是晶体管; 第三代计算机的标志是中小规模集成电路; 第四代计算机则是以大规模和超大规模集成电路为基础。很多书籍和文献都有提到第五代计算机甚至是第六代计算机, 但学术界对此提法并没有达成一致。

### 1) 第一代计算机

20 世纪 40 年代中期, 美国宾夕法尼亚大学电工系由莫利奇和艾克特领导, 为美国陆军军械部阿伯丁弹道研究实验室研制了一台用于炮弹弹道轨迹计算的“电子数值积分和计算机”(Electronic Numerical Integrator and Calculator, ENIAC)。这台叫做“埃尼阿克”的计算机占地面积 170 平方米, 总重量 30 吨, 使用了 18 000 只电子管, 6 000 个开关, 7 000 只电阻, 10 000 只电容, 50 万条线, 耗电量 140 千瓦, 可进行 5 000 次加法/秒运算。这个庞然大物于 1946 年 2 月 15 日在美国举行了揭幕典礼。这台计算机的问世, 标志着电脑时代的开始。

20 世纪 50 年代是计算机研制的第一个高潮时期, 那时的计算机中的主要元器件都是用电子管制成的, 后人将用电子管制作的计算机称为第一代计算机。这个时期的计算机发展有 3 个特点: 即由军用扩展至民用, 由实验室开发转入工业化生产, 同时由科学计算扩展到数据和事务处理。以“埃尼阿克”为代表, 一批计算机迅速推向市场, 形成了第一代计算机族。在这一时期, 美籍匈牙利科学家冯·诺伊曼提出了“程序存储”的概念, 其基本思想是把一些常用的基本操作都制成电路, 每一个这样的操作都用一个数代表, 于是这个数就可以只令计算机执行某项操作。程序员根据解题的要求, 用这些数来编制程序, 并把程序同数据一起放在计算机的内存储器里。当计算机运行时, 它可以依次以很高的速度从存储器中取出程序里的一条条指令, 逐一予以执行, 以完成全部计算的各项操作, 它自动从一个程序指令进到下一个程序指令, 作业顺序通过“条件转移”指令自动完成。“程序存储”使全部计算成为真正的自动过程, 它的出现被誉为电子计算机史



上的里程碑，而这种类型的计算机被人们称为“冯·诺伊曼机”。

第一代计算机是以电子管为主要电路元件的电子计算机。从 1946 年至 1957 年生产的“电子管计算机”都是第一代计算机。第一代计算机的主要特点是体积较大，运算速度较低，存储容量不大，而且价格昂贵。使用也不方便，为了解决一个问题，所编制的程序的复杂程度难以表述。这一代计算机主要用于科学计算，只在重要部门或科学研究部门使用。

### 2) 第二代计算机

第二代电子计算机是用晶体管制造的计算机。1954 年，美国贝尔实验室研制成功第一台使用晶体管线路的计算机，取名“催迪克”(TRADIC)，装有 800 个晶体管。1955 年，美国在阿塔拉斯洲际导弹上装备了以晶体管为主要元器件的小型计算机。10 年以后，在美国生产的同一型号的导弹中，由于改用集成电路元器件，重量只有原来的 1/100，体积与功耗减少到原来的 1/300。

1958 年，美国的 IBM 公司制成了第一台全部使用晶体管的计算机 RCA501 型。由于第二代计算机采用晶体管逻辑元器件，及快速磁芯存储器，计算速度从每秒几千次提高到几十万次，主存储器的存储量，从几千提高到 10 万以上。

1959 年，IBM 公司又生产出全部晶体管化的电子计算机 IBM7090。

1958~1964 年，晶体管电子计算机经历了大范围的发展过程。从印刷电路板到单元电路和随机存储器，从运算理论到程序设计语言，不断的革新使晶体管电子计算机日臻完善。

1961 年，世界上最大的晶体管电子计算机 ATLAS 安装完毕。

1964 年，中国制成了第一台全晶体管电子计算机 441-B 型。

第二代计算机的主要特点是采用晶体管作为电子器件，生产时间大约从 1958 年到 1964 年，其运算速度比第一代计算机的速度提高了近百倍，体积为原来的几十分之一。在软件方面开始使用计算机算法语言。这一代计算机不仅用于科学计算，还用于数据处理和事务处理及工业控制。

### 3) 第三代计算机

1958 年德州仪器的工程师 Jack Kilby 发明了集成电路 (Integrated Circuit, IC)，将 3 种电子元器件结合到一片小小的硅片上。这一事件揭开了第三代计算机的序幕，之后更多的元器件集成到单一的半导体芯片上，计算机变得更小，功耗更低，速度更快。第三代计算机的基本电子元件是每个基片上集成几个到十几个电子元件 (逻辑门) 的小规模集成电路和每片上几十个元件的中规模集成电路。以小规模集成电路 (每片上集成几百到几千个逻辑门)、大规模集成电路 (Large-Scale Integration, LSI) 来构成计算机的主要功能部件，集成电路是把多个电子元件集中在几平方毫米的基片上形成的逻辑电路。

第三代计算机中软件技术的进一步发展，尤其是操作系统的逐步成熟是其显著特点。多处理机、虚拟存储器系统以及面向用户的应用软件的发展，大大地丰富了计算机软件资源。计算机语言发展到第三代时，就进入了“面向人类”的语言阶段。第三代语言也被人们称为“高级语言”。高级语言是一种接近于人们使用习惯的程序设计语言。它允许用英文写解题的计算程序，程序中所使用的运算符号和运算式子都和我们日常用的数学式子差不多。高级语言容易学习，通用性强，书写出的程序比较短，便于推广和交流，是很理想的一种程序设计语言。高级语言发展于 20 世纪 50 年代中叶到 70 年代，有些流行的高级语言已经被大多数计算机厂家采用，固化在计算机的内存里，如 BASIC 语言 (已有不少于 128 种不同的 BASIC 语言在流行，当然其基本特征是相同的)。除了 BASIC 语言外，还有 FORTRAN (公式翻译) 语言、COBOL (通用商业语言)、C 语言、DL/I 语言、PASCAL 语言、ADA 语言等 250 多种高级语言。这一时期的发展还包括使用了操作系统，使得计算机在中心程序的控制协调下可以同时运行许多不同的程序。为了充分利用已有的软件，解决软件兼容问题，出现了系列化的计算机。最有影响的是 IBM 公司研制的 IBM-360 计算机系列。

这个时期的另一个特点是小型计算机的应用。DEC 公司研制的 PDP-8 机、PDP-11 系列机以及后来的 VAX-11 系列机等,都曾对计算机的推广起了极大的作用。其特征是用晶体管代替了电子管;大量采用磁芯做内存储器,采用磁盘、磁带等做外存储器;体积缩小、功耗降低、运算速度提高到每秒几十万次基本运算,内存容量扩大到几十万字。

总的来说,第三代计算机的主要特征是以中、小规模集成电路为电子元器件,并且出现操作系统,使计算机的功能越来越强,应用范围越来越广,时间大概从 1965 年到 1971 年。它们不仅用于科学计算,还用于文字处理、企业管理、自动控制等领域,出现了计算机技术与通信技术相结合的信息管理系统,可用于生产管理、交通管理、情报检索等领域。

#### 4) 第四代计算机

第四代计算机是指从 1971 年以后采用大规模集成电路 (LSI) 和超大规模集成电路 (Very Large-Scale Integration, VLSI) 为主要电子元器件制成的计算机。通过将 CPU 浓缩在一块芯片上的微型机的出现与发展,掀起了计算机大普及的浪潮,例如,80386 微处理器,在面积约为  $10\text{mm} \times 10\text{mm}$  的单个芯片上,可以集成大约 32 万个晶体管。

1969 年,英特尔 (Intel) 公司受托设计一种计算器所用的整套电路,公司的一名年轻工程师费金 (Federico Fagin) 成功地在  $4.2 \times 3.2$  的硅片上,集成了 2 250 个晶体管。这就是第一个微处理器——Intel 4004。它是 4 位的。在它之后,1972 年初又诞生了 8 位微处理器 Intel 8008。1973 年出现了第二代微处理器 (8 位),如 Intel 8080 (1973)、M6800 (1975, M 代表摩托罗拉公司)、Z80 (1976, Z 代表齐洛格公司) 等。1978 年出现了第三代微处理器 (16 位),如 Intel 8086、Z8000、M68000 等。1981 年出现了第四代微处理器 (32 位),如 iAPX432、i80386、MAC-32、NS-16032、Z80000、HP-32 等。它们的性能都与 20 世纪 70 年代大中型计算机大致相匹敌。微处理器的两三年就换一代的速度,是任何技术也不能比拟的。

第四代计算机的一个重要分支是以大规模、超大规模集成电路 (VLSI) 为基础发展起来的微处理器和微型计算机,这一阶段,软件行业一日千里,出现了数据库管理系统、网络管理系统和面向对象语言,这些产品使 IT 行业成为全球经济的亮点之一。

上述四代计算机的特点可以总结如表 1-1 所示。

表 1-1

四代计算机的特点

分类	特点	起止时间
第一代计算机	电子管	1946~1957 年
第二代计算机	晶体管	1958~1964 年
第三代计算机	中小规模集成电路	1965~1971 年
第四代计算机	大规模和超大规模集成电路	1972 年至今

需要指出的是,作者查了很多关于四代计算机的起止时间的书籍和资料,结果发现每一代计算机的起止时间并不一致,如第一代计算机有的资料就认为终止时间是 1958 年,即以美国的 IBM 公司制成了第一台全部使用晶体管的计算机 RCA501 为标志。又如第三代计算机的结束时间,有些资料认为是 1971 年,但有些资料认为是 1970 年,笔者认为其标志该是 1969 年英特尔 (Intel) 公司设计了一个集成电路。

#### 5) 最新发展情况

计算机网络是计算机技术和通信技术紧密结合的产物,它涉及通信与计算机两个领域。它的诞生使计算机体系结构发生了巨大变化,在当今社会经济中起着非常重要的作用,它对人类社会的进步作出了巨大贡献。从某种意义上讲,计算机网络的发展水平不仅反映了一个国家的计算机

科学和通信技术水平，而且已经成为衡量其国力及现代化程度的重要标志之一。

从 20 世纪 50 年代开始，人们及各种组织机构使用计算机来管理他们信息的速度迅速增长。早期限于技术条件使得当时的计算机都非常庞大和非常昂贵，任何机构都不可能为雇员个人提供使用整个计算机，主机一定是共享的，它被用来存储和组织数据、集中控制和管理整个系统。所有用户都有连接系统的终端设备，将数据库录入到主机中处理，或者是将主机中的处理结果通过集中控制的输出设备取出来。它最典型的特征是：通过主机系统形成大部分的通信流程，构成系统的所有通信协议都是系统专有的，大型主机在系统中占据着绝对的支配作用，所有控制和管理功能都是由主机来完成的。

专家们认为，在 21 世纪超级计算机将是决定谁能在经济和科学技术上居于领先地位的关键因素。美国国防部曾声称“超级计算机是计算技术的顶峰。如果超级计算机的研究与开发落后于外国，国家安全将受到威胁”。美、日以及西欧各国围绕超级计算机，即万亿次量级的超级巨型计算机，已开展激烈的争夺战，都想捷足先登，先发制人。为此，他们各施高招组织人力、物力、财力，制订了发展超级计算机的 5 年或 10 年计划。

#### a) 超级计算机

美国政府制订了“超级计算机与通信”(HPC&C)的发展计划。美国国防部也把超级计算列为“21 世纪科研关键技术”之一，仅此一项，投资就达 17 亿美元。为了保证在 1995~2000 年分别研制成功万亿次和百万亿次量级的高性能超级巨型计算机，美国国防部还准备拨款 21 亿美元以支持此项研究任务的按期完成。如果此项计划得以圆满完成，将使美国今后十年的国民经济总产值增加 2 000~3 000 亿美元。

日本也不甘落后，他们对美国发展万亿次量级的巨型机极为关注，计算机业界反应十分强烈，积极主张动用三倍于美国的巨额投资，集中人力、物力、财力，开展高技术基础设施的建设（包括 10 个巨型机中心）。日本政府依据知识阶层与计算机业界的强烈呼声，于 1992 年制订了国家直接领导、统一指挥，组织政府相关部门、计算机界厂商、高等学府联合研究、成果共享、全面开发的国策，并把大规模并行计算机列为国家 20 世纪 90 年代的重点发展项目。日本政府依据此国策制订了为期 10 年的“真实世界计算机计划”(RWC 计划)，其中有两项是发展万亿次量级超级巨型计算机的计划。日本计算机业界则雄心勃勃，企图从美国人的手中抢占巨型机霸主的世界领导权。

西欧对于并行处理技术的研究以及并行机产品的研制也已有良好的基础，特别是德、英、法对发展并行机系统十分重视，并于 1991 年制订了“Tera-Flop 计划”（即研制万亿次量级的大规模并行计算机），旨在 5 年内推出万亿次量级的超级巨型计算机。

近五年来的实践表明，要实现万亿次量级超级巨型机非并行机型莫属，即唯有大规模并行处理机才能胜任。传统向量多处理系统是不行的，这是因为单个 CPU 的速度总会受到物理极限的制约，其性能总是有限的，即使采用多处理机结构形式，因其紧耦合势必制约了微处理器的数量，最终导致系统性能有限而无法攻克万亿、百万亿次量级的难关。因此，只有并行机才能担负攀登万亿次量级的大关，挑起计算机界的历史使命。

#### b) 量子计算机

量子计算机，早先由理查德·费曼提出，一开始是从物理现象的模拟而来的。可他发现当模拟量子现象时，因为庞大的希尔伯特空间使资料量也变得庞大，一个完好的模拟所需的运算时间变得相当可观，甚至是不切实际的天文数字。理查德·费曼当时就想到，如果用量子系统构成的计算机来模拟量子现象，则运算时间可大幅度减少。量子计算机的概念从此诞生。量子计算机在 20 世纪 80 年代多处于理论推导等纸上谈兵状态。一直到 1994 年彼得·秀尔 (Peter Shor) 提出量子质因子分解算法后，因其对于通行于银行及网络等处的 RSA 加密算法可以破解而构成威胁之后，量子计算机变成了热门的话题。除了理论之外，也有不少学者着力于利用各种量子系统来实



现量子计算机。

2007年2月,加拿大D-Wave系统公司宣布研制成功16位量子比特的超导量子计算机(尚未经科学检验),如果他们是诚信的,这个工作的意义就非常重大,或许可实际应用的量子计算机会在几年内出现,量子计算机的时代真的要开始了!

2010年3月31日,德国于利希研究中心发表公报:德国超级计算机成功模拟42位量子计算机,该中心的超级计算机JUGENE成功模拟了42位的量子计算机,在此基础上研究人员首次能够仔细地研究高位数量子计算机系统的特性。

2009年11月15日,世界首台可编程的通用量子计算机正式在美国诞生,据美国《新科学家》网站报道,世界上首台可编程的通用量子计算机近日在美国面世。不过根据初步的测试程序显示,该计算机还存在部分难题需要进一步解决和改善。科学家们认为,可编程量子计算机距离实际应用已为期不远。

早在一年前,美国国家标准技术研究院的科学家们已经研制出一台可处理2量子比特数据的量子计算机。由于量子比特比传统计算机中的“0”和“1”比特可以存储更多的信息,因此量子计算机的运行效率和功能也将大大突破传统计算机。据科学家介绍,这种量子计算机可用作各种大信息量数据的处理,如密码分析和密码破译等。

在传统计算机中,采用的是二进制“0”和“1”比特物理逻辑门技术来处理信息,而在量子计算机中,采用的则是量子逻辑门技术来处理数据。对于这种技术,美国国家标准技术研究院科学家大卫·汉内克解释说,“例如,一个简单的单一量子比特门,可以从‘0’转换成‘1’,也可以从‘1’转换成为‘0’”。这种转换就使得计算机存储能力不仅仅是以倍数级增加。与传统计算机的物理逻辑门不同的是,美国国家标准技术研究院所研制的这台可编程量子计算机中的量子逻辑门均已编码成为一个激光脉冲。这台实验量子计算机使用铍离子来存储量子比特。当激光脉冲量子逻辑门对量子比特进行简单逻辑操作时,铍离子就开始旋转运行。制造一个量子逻辑门的方法首先要设计一系列激光脉冲来操纵铍离子进行数据处理,然后再利用另一个激光脉冲来读取计算结果。

这台可编程量子计算机的核心部件是一个标有金黄图案的铝晶片,其中包含了一个直径大约200微米的微型电磁圈。在这个电磁圈中,科学家放置了四个离子,其中两个是镁离子,两个是铍离子。镁离子的作用是“稳定剂”,它可以消除离子链的意外振动,以保持计算机的稳定性。由于量子比特可能产生多种操作可能,因此科学家们在实验中随机选取了160次可能操作,进行演示来验证处理器的通用性。每次操作都用31个不同的量子逻辑门去将2个量子比特编码至一个激光脉冲中。

科学家们将这160种程序每一种都运行了900次。通过对测试数据对比和理论预测,科学家们发现,这个芯片基本可以按既定程序工作。不过,科学家们也承认,它的准确率目前只有79%。汉内克表示,“每个量子逻辑门的准确率均为90%以上,但是当所有量子逻辑门都综合起来使用,整体准确率却下降到79%”。对此,科学家认为,造成这种误差主要是因为每次激光脉冲的强度不同。汉内克解释说,“由于这些脉冲不是直线的,它们是波动的,因此就会引起这种误差。此外,光线的散射和反射等原因,也会造成这种误差的产生”。

科学家们相信,随着更多的测试和改进,这种误差将会越来越小。通过改进激光的稳定性和减少光学硬件设备的误差,可以提高芯片运行的准确率,直到芯片的准确率提升到99.99%,它才可以作为量子计算机的主要部件使用,这台可编程量子计算机才可真正地投入实际应用。

## 1.4 计算机的性能指标

计算机的性能指标主要由机器字长、存储容量和运算速度三方面来决定,实际衡量时可用性