

普通高等教育“十五”国家级规划教材

清华大学计算机系列教材

清华大学信息科学技术学院教材
学院公共基础课程系列

计算机组成与设计

(第2版)

Computer Organization
and Design

● 王 诚 刘卫东 宋佳兴 编著

Wang Cheng Liu Weidong Song Jiaying



清华大学出版社

普通高等教育“十五”国家级规划教材
清华大学计算机系列教材

TP303
63D=2

清华大学信息科学技术学院教材
学院公共基础课程系列

计算机组成与设计 (第2版)

Computer Organization and Design

● 王 诚 刘卫东 宋佳兴 编著

Wang Cheng Liu Weidong Song Jiaying

RJS/23/03

清华大学出版社

北 京

内 容 简 介

本书共分9章。第1章是综述,第2章介绍数字电路基础和计算机中常用的逻辑器件,第3~8章讲解计算机组成原理与设计的主体内容,包括计算机系统的中央处理器(CPU)、存储器系统和输入输出系统;第9章介绍并行计算机体系结构。

本书既可作为高等院校计算机或相关专业“计算机组成原理”课程的教材,也可供从事与计算机相关业务的生产、科研和工程技术人员参考。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13901104297 13801310933

本书封面贴有清华大学出版社激光防伪标签,无标签者不得销售。

图书在版编目(CIP)数据

计算机组成与设计/王诚,刘卫东,宋佳兴编著. —2版. —北京:清华大学出版社,2004.4

(清华大学信息科学技术学院教材. 学院公共基础课程系列)

ISBN 7-302-08621-4

I. 计… II. ①王… ②刘… ③宋… III. ①计算机体系结构—高等学校—教材 ②电子计算机—设计—高等学校—教材 IV. TP30

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 043610 号

出 版 者: 清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

社 总 机: 010-62770175

地 址: 北京清华大学学研大厦

邮 编: 100084

客户服务: 010-62776969

责任编辑: 马瑛珺

印 装 者: 北京鑫海金澳胶印有限公司

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 185×230 印 张: 25.25 字 数: 519 千字

版 次: 2004 年 7 月第 2 版 2004 年 7 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-08621-4/TP·6180

印 数: 1~5000

定 价: 32.00 元

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话: (010)62770175-3103 或 (010)62795704

《清华大学信息科学技术学院教材》

编 委 会

(以姓氏拼音为序)

主 任: 郑大钟

副 主 任: 蔡鸿程 邓丽曼 胡事民 任 勇 覃 征

王希勤 王 雄 余志平

编 委: 高文焕 华成英 陆文娟 王诗宓 温冬婵

萧德云 谢世钟 殷人昆 应根裕 郑君里

郑纬民 周立柱 周润德 朱雪龙

秘 书: 王 娜

责任编辑: 马瑛珺 王一玲 邹开颜

出版说明

本套教材是针对清华大学信息科学技术学院所属电子工程系、计算机科学与技术系、自动化系、微电子研究所、软件学院的现行本科培养方案和研究生培养计划的课程设置而组织编写的。这些培养方案和培养计划是基于清华大学对研究型大学的定位和对研究型教学的强调,吸纳多年来在教学改革与实践中所取得的成果和形成的共识,历经多届试用和不断修订而形成的。贯穿于其中的“本科教育的通识性、培养模式的宽口径、教学方式的研究型、专业课程的前沿性”的相关思想将成为我们组编本套教材所力求体现的基本指导原则。

本套教材以本科教材为主并适量包括研究生教材。定位上,属于信息学科大类中各个基本方向的基本理论和前沿技术的一套高等院校教材。层次上,覆盖学院公共基础课程、专业技术基础课程、专业课程、研究生课程。领域上,涉及6个系列14个领域,即学院公共基础课程系列,信息与通信工程系列(含通信、信息处理等领域),微电子光电子系列(含微电子、光电子等领域),计算机科学与技术系列(含计算机科学、计算机网络与安全、计算机应用、软件工程、网格计算等领域),自动化系列(含控制理论与控制工程、模式识别与智能控制、检测与电子技术、系统工程、现代集成制造等领域),实验实践系列。类型上,以文字教材为主并适量包括多媒体教材,以主教材为主并适量包括习题集、教师手册等辅助教材,以基本理论和工程技术教材为主并适量包括实验和实践课程教材。列入这套教材中的著作,大多是清华大学信息科学技术学院所属系所院开设的课程中经过较长教学实践而形成的,既有多年教学经验和教学改革基础上新编著的教材,也有部分已出版教材的更新和修订版本。教材总体上将突出求新与求实的风格,力求反映所属领域的基本理



论和新进展,力求做到学科先进性和教学适用性的统一。

本套教材的主要读者对象为电子科学与技术、信息与通信工程、计算机科学与技术、控制科学与工程、系统科学、电气工程、机械工程、化学与技术工程、核能工程等相关理工专业的大学生和研究生,以及相应领域和部门的科学工作者和工程技术人员。我们希望,这套教材既能为在校大学生和研究生的学习提供内容先进、论述系统和适于教学的教材或参考书,也能为广大科学工作者与工程技术人员的知识更新与继续学习提供适合的和有价值的进修或自学读物。我们同时要感谢使用本系列教材的广大教师、学生和科技工作者的热情支持,并热忱欢迎提出批评和意见。

《清华大学信息科学技术学院教材》编委会

2003 年 10 月

前言

Preface

本书重点介绍计算机的组成与设计技术,同时简要地介绍计算机体系结构的基本概念。全书共9章。

第1章是全书内容的概述,简要介绍计算机组成与体系结构的基本概念,从实现功能的角度来说明计算机硬件系统的基本组成,从功能和层次的观点来讲解计算机组成与体系结构各自需要研究和解决的问题。此外,还简单说明了本课程的教学目标和对学习方法的建议。

第2章简明讲解数字逻辑电路基础和计算机中的逻辑部件,属于本书的预备性知识。通过本章学习,不仅可以了解一些基本知识,更重要的是为掌握学习计算机组成打下电子线路与逻辑设计的基础。本章中给出的数字逻辑电路设计与应用的例子,就直接取自于教学计算机中所用到的实际逻辑电路。

第3章的数据表示和运算、第4章的运算器部件,构成本书的第1个知识单元,主要围绕着计算机的运算器部件来进行讲解。第3章的内容更多地涉及到信息编码知识、数据表示和运算算法,是设计与实现运算器部件的理论基础。第4章主要讲解运算器部件的功能和组成,其中给出了运算器部件的物理实现的实例。第4章的最后一节介绍提高运算器处理能力的可行途径。

第5章的指令和指令系统、第6章的控制器部件,构成本书的第2个知识单元,主要围绕着计算机的控制器部件来进行讲解。第5章的内容更多地涉及指令系统设计和汇编语言程序设计的简单知识,是设计与实现控制器部件的出发点和基本依据。第6章在综述控制器的功能和基本组成的基础上,以教学计算机的控制器为例,详细地讲解微程序控制器和硬连线控制器的具体设计,其中给出了控制器部件的物理实现的

方法。第6章的最后介绍指令流水线的概念和实现思路。

第7章的多级结构的存储器系统,构成本书的第3个知识单元,包括内(主)存储器、外(辅助)存储设备、高速缓冲存储器和虚拟存储器4部分内容,主要围绕着如何在计算机的存储器系统中存储和管理数据来进行讲解。首先对多级结构的存储器系统进行简单综述,说明其具有高的性能价格比的道理、层次之间需要满足的原则等。接下来讲解主存储器的有关知识,并给出了由静态存储器芯片组成的一个主存储器的实际例子。然后讲解辅助存储设备(磁盘、光盘、磁带和磁盘阵列技术)的基本组成与运行原理。最后讨论高速缓冲存储器和虚拟存储器的基本组成和运行原理。

第8章的输入输出设备和输入输出系统,构成本书的第4个知识单元,主要围绕着计算机的输入和输出功能进行讲解。对于输入输出设备,重点介绍常用的、以点阵方式运行的显示器和打印机等设备的基本组成和运行原理;对于输入输出系统,重点介绍计算机系统中最常用的输入输出方式的操作过程和基本原理、计算机总线的构成、计算机中通用可编程接口线路的有关内容,并给出了教学计算机实际的总线构成和使用串行接口芯片的具体例子。

第9章简单介绍并行计算机体系结构的基础内容,包括阵列处理机和向量处理机、多处理机系统和多计算机系统。此章不作为教学的重点要求。

选用本教材时,总的教学学时约为60~80。第3章到第8章是课程的主体部分,4个知识单元的学时划分可以大体参照30%、30%、20%、20%的比例安排。

通过本教材的学习,读者可以学到数字电路和逻辑设计的基本知识。可以从层次的观点,掌握计算机的组成和运行机制方面的系统知识,奠定必要的专业知识基础。可以从系统的观点,理解提高计算机整机的硬软件性能和部件性能的各种可行途径,了解计算机系统中硬件、软件的功能划分和相互配合关系,从而初步了解从计算机体系结构的角度进一步提高系统性能的主体思路,能站在更高的层次上思考与解决工作中遇到的问题。

本书的第1~6章由王诚编写,第7章由刘卫东编写,第8章和第9章由宋佳兴编写,王诚对全书进行了统编。作者有多年从事本专业教学和科研工作的经历。

由于时间和作者水平所限,书中难免存在不足或不当之处,敬请广大读者批评指正。

编 者

2004年4月于清华大学计算机科学与技术系

目 录

Contents

1 计算机组成概述	1
1.1 计算机系统的基本组成及其层次结构	1
1.2 计算机的体系结构、组成和实现	6
1.3 计算机系统发展进步与拓展应用的历程	8
1.4 课程的教学目标和学习建议	11
小结	11
习题与思考题	12
2 数字电路基础和计算机中的逻辑部件	13
2.1 数字电路基础	13
2.1.1 半导体材料和晶体二极管简介	13
2.1.2 双极型三极管的结构及其伏安特性	15
2.1.3 MOS 管的结构及其伏安特性	17
2.2 基本逻辑门和布尔代数基础	18
2.2.1 最基本的逻辑门电路	18
2.2.2 布尔代数基础	20
2.2.3 一位加法器的逻辑线路设计举例	25
2.3 组合逻辑电路及其应用	27
2.3.1 基本逻辑门	27
2.3.2 三态门	27
2.3.3 数据选择器	29
2.3.4 译码器和编码器	30

2.3.5	组合逻辑电路应用举例	32
2.4	时序逻辑电路及其应用	37
2.4.1	基本 R-S 触发器	38
2.4.2	D 型触发器与寄存器、计数器器件	39
2.4.3	时序逻辑电路应用举例	43
2.5	现场可编程器件及其应用	51
2.5.1	现场可编程器件概述	51
2.5.2	通用可编程器件 GAL20V8 的内部结构及编程使用	52
2.5.3	MACH 器件的内部结构与编程使用	55
2.5.4	FPGA 器件及其在实现 CPU 功能中的应用	60
2.6	几个专用功能器件和存储器芯片的引脚图	61
	小结	63
	习题与思考题	63
3	数据表示、运算算法和线路实现	65
3.1	数字化信息编码的概念和二进制编码知识	65
3.1.1	数字化信息编码的概念	65
3.1.2	二进制编码和码制转换	66
3.1.3	检错纠错码	73
3.2	数据表示——常用的信息编码	83
3.2.1	逻辑类型数据的表示	83
3.2.2	字符类型数据的表示	84
3.2.3	数值类型数据的表示	86
3.3	二进制数值数据的编码与运算算法	93
3.3.1	原码、反码、补码的定义	93
3.3.2	补码加、减运算规则和电路实现	98
3.3.3	原码一位乘法、除法的实现方案	100
3.3.4	实现数据算术运算和逻辑运算的原理性电路组成	107
3.3.5	补码一位乘法、除法的实现方案	107
3.3.6	加速乘除法运算的有关算法介绍	111
	小结	116
	习题与思考题	117

4 运算器部件的组成与设计	118
4.1 运算器部件概述	118
4.1.1 运算器部件的功能和在计算机中的地位	118
4.1.2 定点运算器的功能、组成与运行控制	120
4.1.3 位片结构的运算器芯片 Am2901	121
4.2 教学计算机运算器的设计与实现	126
4.2.1 用 4 片 Am2901 芯片构建 16 位的运算器部件	126
4.2.2 在 4 片 Am2901 芯片之外的线路设计	129
4.3 脱机的和联机的运算器实验	133
4.4 浮点运算与浮点运算器	135
4.4.1 浮点数的运算规则	135
4.4.2 浮点运算器举例	142
4.5 提高运算器部件处理能力的可行途径	146
4.5.1 计算机性能的演变和并行性发展概述	146
4.5.2 提高计算机运算器处理能力的可行途径	147
小结	149
习题与思考题	149
5 指令、指令系统和汇编语言程序设计	151
5.1 指令格式和指令系统概述	151
5.1.1 操作码的组织与编码	153
5.1.2 操作数类型和指令操作类型	154
5.1.3 操作数的个数、来源、去向和地址安排	155
5.1.4 指令的分类	156
5.2 寻址方式概述与应用实例	158
5.2.1 基本寻址方式概述	158
5.2.2 寻址方式应用举例	161
5.3 指令系统举例	164
5.3.1 教学计算机的指令系统说明	164
5.3.2 Pentium II 机的指令系统	171
5.3.3 Ultra SPARC II 机的指令系统	172
5.4 汇编语言程序设计举例	174
5.4.1 汇编语言及其在教学计算机中的实现	174
5.4.2 教学计算机的汇编程序设计举例	176

小结	183
习题与思考题	183
6 控制器部件的组成与设计	185
6.1 控制器的功能、组成与指令执行步骤	186
6.1.1 控制器部件的功能、组成概述	186
6.1.2 指令的执行步骤概述	187
6.1.3 指令周期和其他有关术语	191
6.2 微程序控制器部件的组成与设计	193
6.2.1 微程序控制器的基本组成和工作原理	193
6.2.2 微程序设计中下地址形成逻辑的硬件技术	194
6.2.3 教学计算机微程序控制器的组成	198
6.2.4 设计教学计算机的微指令格式	202
6.2.5 设计教学计算机的微程序	210
6.2.6 微程序控制器教学实验	220
6.3 硬连线控制器部件的组成与设计	220
6.3.1 硬连线控制器的组成和运行原理简介	221
6.3.2 教学计算机硬连线控制器的组成	222
6.3.3 设计教学计算机的指令执行流程与节拍发生器部件	223
6.3.4 设计教学计算机的时序控制信号产生部件	235
6.3.5 硬连线控制器教学实验	250
6.4 提高指令执行速度的可行途径	250
6.4.1 指令流水的基本概念和实现思路	250
6.4.2 RISC 计算机的指令系统和指令流水线实例	252
6.4.3 RISC 计算机中的通用寄存器组织和编译程序简介	256
6.4.4 流水线的性能指标	257
6.4.5 指令级并行技术	259
小结	260
习题与思考题	260
7 多级结构的存储器系统	262
7.1 存储器系统概述	263
7.1.1 存储器分类	264
7.1.2 存储器系统的设计目标和解决思路	265

7.2	主存储器	267
7.2.1	主存储器概述	267
7.2.2	动态存储器芯片的存储原理和读写过程	269
7.2.3	静态存储器的存储原理和内部结构	272
7.2.4	主存储器实现与应用中的几项技术	274
7.2.5	TEC-2000 教学计算机内存储器的组成与设计	276
7.3	外存储设备与磁盘阵列技术	281
7.3.1	外存储设备概述	281
7.3.2	磁盘设备与磁盘阵列技术	284
7.3.3	光盘设备与技术	292
7.4	高速缓冲存储器 cache	300
7.4.1	层次存储器系统的运行原理和必须遵从的原则	300
7.4.2	高速缓冲存储器 cache 的工作原理和组织	302
7.4.3	Pentium 机的 cache 管理	312
7.5	虚拟存储器	316
7.5.1	虚拟存储器的概念	316
7.5.2	段式虚拟存储器	318
7.5.3	页式虚拟存储器	318
7.5.4	Pentium 机的存储器管理	320
7.6	提高存储器系统性能的可行途径	324
	小结	326
	习题与思考题	327
8	输入输出设备与输入输出系统	330
8.1	输入输出设备	331
8.1.1	输入输出设备概述	331
8.1.2	点阵式设备运行原理综述	332
8.2	显示器设备的组成和运行原理	334
8.2.1	显示器设备概述	334
8.2.2	阴极射线管的组成与运行原理	335
8.2.3	CRT 字符显示器的组成和运行原理	336
8.2.4	CRT 图形显示器	339
8.2.5	计算机终端	340
8.2.6	液晶显示器的组成和运行原理	340

8.3	打印机设备的组成与运行原理	341
8.3.1	针式打印机的组成与打印过程	342
8.3.2	喷墨打印机的组成与打印过程	343
8.3.3	激光打印机的组成与打印过程	345
8.4	计算机的输入设备	346
8.4.1	计算机键盘的组成和运行原理	346
8.4.2	鼠标设备	348
8.5	输入输出系统概述	348
8.6	计算机总线	349
8.6.1	计算机总线概述	349
8.6.2	计算机总线的构成	351
8.6.3	总线仲裁和数据传输控制	352
8.6.4	教学计算机的总线系统实例	354
8.7	输入输出接口概述	356
8.7.1	输入输出接口的基本功能	357
8.7.2	通用可编程接口的一般组成	357
8.7.3	串行接口实例	358
8.8	常用的输入输出方式	364
8.8.1	常用的输入输出方式概述	364
8.8.2	中断的概念和中断处理过程	366
8.8.3	DMA 的概念和 DMA 处理过程	370
8.9	提高数据输入输出能力和可靠性的可行途径	372
	小结	373
	习题与思考题	373
9	并行计算机体系结构	376
9.1	阵列处理机和向量处理机	376
9.2	多处理机系统	379
9.3	多计算机系统	381
	小结	386
	习题与思考题	386
	参考文献	388

1

计算机组成概述

本章首先介绍计算机系统的基本组成及其层次结构,读者可从层次的观点,初步认识完整计算机的基本组成;接下来对计算机硬件子系统的3部分知识即计算机的体系结构、计算机组成和计算机实现进行说明,指明它们之间的联系与区别,读者可从中掌握学习本课程的主脉络。其后讲述了计算机的发展进步和推广应用的历程并对某些基本概念和常用术语做了解释。最后简单说明本课程的教学目标和学习建议,期望读者能够从系统和部件、硬件和软件、知识和能力等多种对应关系的角度提高自己的学习质量。

1.1 计算机系统的基本组成及其层次结构

计算机系统的含义是什么?可以从它所完成的功能和相应的组成这两个方面来回答。从它所完成的功能的角度看,计算机系统能够完成原始数据的输入、存储、对数据的运算和处理、将计算处理的结果输出这4项操作功能。因此,一套计算机的硬件系统至少需要由图1.1所示的几个相互连接在一起的部件和设备组成。

从组成的角度看,图1.1中的5个方框正是计算机硬件的5个基本组成部分。数据输入设备完成对原始数据的输入,数据存储部件完成对数据的存储功能,数据运算部件完成对数据的运算处理功能,结果输出设备完成对运算处理结果的输出功能,而计算机控制部件的功能则是向各个部件或设备提供它们协调运行所需要的控制信号。

如果把计算机想象为一个加工处理数据的“工厂”,那么,数据运算部件就是数据加工车间,数据存储部件就是存放原材料、半成品和最终产品的库房,输入设备相当于运入原材料的货车,输出设备相当于发出最终产品的货车,控制部件则相当于承担领导指挥功能的厂长

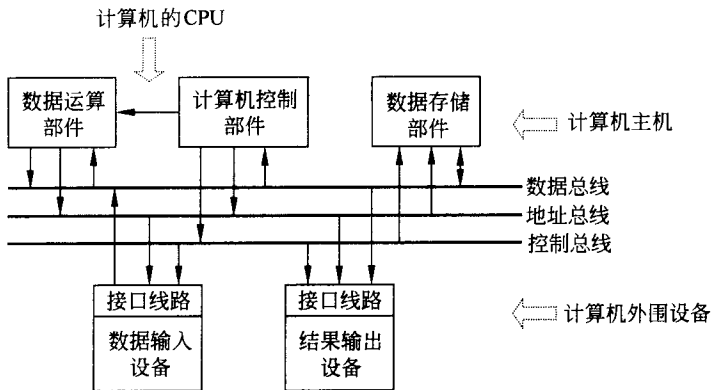


图 1.1 计算机硬件系统的组成示意图

和各个职能办公室。在领导的正确指挥下,如果能够源源不断地取得原材料,工厂内有存放的场所,车间又能够对这些原材料进行指定的加工处理,且加工后的产品又可以畅通地运出去销售,那么这个工厂(计算机)就能正常运行。

图 1.1 上部的 3 个组成部分通常是使用电子线路实现的,安装在一个金属机柜内或者印制电路板上,称为计算机的主机。数据运算部件和计算机控制部件合称为中央处理器(center processing unit,CPU),也称为计算机的处理机(processor)。

图 1.1 下部的 2 个设备通常是使用精密机械装置和电子线路共同制作的,合称为输入输出设备,又称为计算机的外围设备。

图 1.1 中部画出的是计算机的 3 种类型的总线。其中数据总线用于在这些部件或设备之间传送属于数据信息(指令和数据)的电气信号;地址总线用于在这些部件或设备之间传送属于地址信息的电气信号,以选择数据存储部件中的一个存储单元,或者外围设备中的一个设备;控制总线用于向存储部件和外围设备传送起控制作用的电气信号,也就是指定在 CPU 和这些部件或设备之间数据传送的方向以及操作的性质(读操作还是写操作)等。计算机的 5 个组成部分正是通过这 3 种类型的总线被有机地连接在一起,从而构成一台完整的、可以协调运行(执行程序)的计算机硬件系统。

在早期的计算机中,普遍的体系结构是由冯·诺依曼先生提出来的,称之为存储程序的计算机,计算机的几个部件是围绕着运算器部件来组织的,如图 1.2(a)所示,其特点是存储器和输入输出设备之间传送数据都是经过运算器完成的。在当前流行的计算机中,更常用的方案则是围绕着存储器部件来组织,如图 1.2(b)所示,输入输出设备在更多的情况下直接与存储器部件交换数据,与图 1.2(a)相比,并无实质性的区别,它仍然是冯·诺依曼结构的计算机系统,后者是对图 1.2(a)的一种改进。

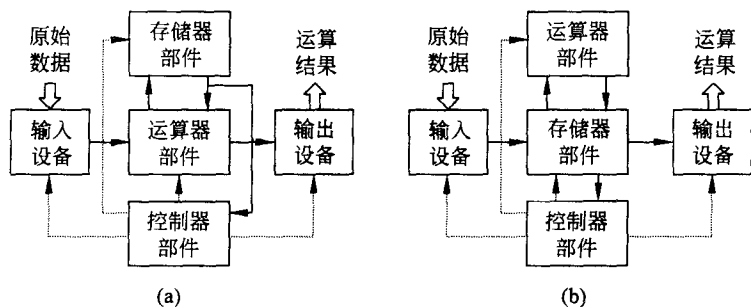


图 1.2 计算机的组成结构

仅有人员和设备即“工厂的硬件”，工厂还是很难运行的。要成功运行，还需要配有一系列的规章制度、管理策略和办法等“软件”部分。计算机系统也一样，在硬件组成的基础之上，还必须有它的软件部分。软件要具有如下主要功能：

(1) 计算机软件要包含语言支持程序。计算机是由人指挥控制，又供人来使用的。使用计算机的人员要有办法把自己的意图告知计算机，这就需要使用某种语言。遗憾的是，计算机还不能（目前尚不能低成本的实现）听懂人类的自然语言，更无法执行人类自然语言的命令。最简单的解决办法是设计一种能让计算机通过它的硬件可以直接识别、理解的语言，即用电子线路容易处理的一种语言，这就是计算机的机器语言，又称为二进制代码语言。这也就是计算机的指令，一台计算机的全部指令构成该计算机的指令系统。由此可见，实质上计算机的基础硬件是在机器语言的层次上设计与实现的，并且可以直接执行由机器语言构成的程序。这样做的结果，计算机一方的矛盾是解决了，但是使用计算机的人员却很难接受并使用这种语言。为此，必须找出一种折衷语言，做到人员使用和计算机处理都更容易一点，这就是汇编语言和高级程序设计语言、各种专用目的的语言。

(2) 计算机软件要为计算机系统本身提供性能良好的资源管理功能，为使用人员提供尽可能多的帮助。一套计算机系统，包含了大量的、高价的、管理和使用相当复杂的硬件资源和软件资源，即使是水平很高的专业人员都难以直接控制和操作，事实上把资源管理和调度功能留给计算机系统本身来完成更可靠，完成这一功能的软件就是计算机的操作系统。操作系统的存在，又为使用计算机的用户提供了许多支持，比如与程序设计语言相结合使得程序设计更简化，建立用户的应用程序和操作计算机更方便。

(3) 在操作系统软件之上，还要选用适当的软件来实现众多用户通常遇到的许多操作处理功能，文字处理软件、数据库软件、网络软件、多媒体信息处理软件、办公自动化软件等。

综上所述，计算机系统是由硬件和软件两大部分组成的。