



中央民族大学特色教材

嵌入式系统概论

◎ 赵悦 潘秀琴 / 编著



中央民族大学出版社

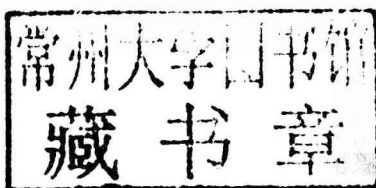


中央民族大学特色教材

嵌入式系统概论

Qianrushishi Xitong Gailun

● 赵悦 潘秀琴/编著



中央民族大学出版社
China Minzu University Press

图书在版编目 (CIP) 数据

嵌入式系统概论/赵悦、潘秀琴编著. —北京: 中央民族大学出版社, 2011. 11

ISBN 978-7-5660-0030-9

I. ①嵌… II. ①赵…②潘… ①Ⅲ. 微型计算机—系统设计 IV. ①TP360.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 118128 号

嵌入式系统概论

编 著 赵 悦、潘秀琴

责任编辑 李 飞

封面设计 布拉格

出 版 者 中央民族大学出版社

北京市海淀区中关村南大街 27 号 邮编:100081

电话:68472815(发行部) 传真:68932751(发行部)

68932218(总编室) 68932447(办公室)

发 行 者 全国各地新华书店

印 刷 者 北京华正印刷有限公司

开 本 787×1092(毫米) 1/16 印张:15.625

字 数 250 千字

版 次 2011 年 11 月第 1 版 2011 年 11 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5660-0030-9

定 价 32.00 元

版权所有 翻印必究

前 言

《嵌入式系统概论》教材是为计算机科学与技术专业、自动化专业和其他相关专业编写的嵌入式系统学习的入门教材，其主要面向初学者，从最基本的原理、概念到嵌入式系统的组成结构、设计方法，由浅入深地指导初学者如何进行嵌入式系统开发。该教材在中央民族大学特色教材项目的资助下，特别针对我校“嵌入式系统概论”课程的短学时理论教学特点而编写的。

“嵌入式系统概论”课程为嵌入式系统设计与开发的入门课程，基础性、综合性较强，涉及内容全面。由于目前国内现有嵌入式系统教材多侧重嵌入式的处理器体系、嵌入式操作系统或嵌入式的软件开发中的某一方面进行介绍，内容并不能涵盖完整的知识体系，抑或涵盖了完整知识体系，但由于内容繁多，并不适宜短学时的教学。目前该课的理论教学无固定教材，以教师讲义为主，参考书为辅，学生学起来觉得无从下手，接受较为困难。因此，为适应我校嵌入式系统课程教学改革，希望通过这本特色教材的出版，促进“嵌入式系统概论”课程更好地开展教学，使学生轻松掌握嵌入式系统技术、增强他们系统开发的工程经验。

本书共分为6个章节，分别介绍了嵌入式系统的基本概念、硬件基础、软件基础、整体设计方法、Linux系统应用开发、WinCE系统应用开发和具体开发实例。赵悦老师撰写了第1、第2、第3、第4、第5章的内容，潘秀琴老师撰写了第6章的内容，并对全书进行了审读。

本书编写过程中参考并引用了大量的国内外相关书籍和资料，不再一一列举，对作者表示感谢。同时感谢中央民族大学信息工程学院杨国胜院长及崔立群书记、曹永存副院长，对本书出版的关怀与支持。

由于我们水平有限，书中错误在所难免，敬请读者批评指正。我们的联系方式为 E-mail: zhaoyueso@sina.com。

编 者

2011年3月28日

目 录

第1章 嵌入式系统概况	1
1.1 嵌入式系统定义	1
1.1.1 概述	1
1.1.2 嵌入式系统的发展历程	2
1.1.3 嵌入式系统的 IEEE 定义	5
1.1.4 嵌入式系统的一般定义	5
1.1.5 嵌入式系统的特点	5
1.1.6 嵌入式计算机与通用计算机的差别	6
1.2 嵌入式系统的分类	10
1.2.1 基于硬件的分类	10
1.2.2 基于软件的分类	12
1.3 嵌入式技术的应用领域及发展趋势	13
1.3.1 嵌入式技术的现状	13
1.3.2 嵌入式技术的应用领域	14
1.3.3 嵌入式技术的发展趋势	17
1.4 嵌入式系统组成简介	20
1.5 嵌入式系统设计过程	21
思考题	23
第2章 嵌入式系统硬件基础	24
2.1 嵌入式硬件系统基本组成	25
2.2 嵌入式微处理器	26
2.2.1 ARM 微处理器简介	26
2.2.2 ARM 微处理器的体系结构	33

2.2.3	ARM 微处理器的编程模型	41
2.2.4	嵌入式微处理器处理的异常	45
2.2.5	ARM 微处理器的存储格式	47
2.2.6	ARM 微处理器的 I/O 端口地址映射方式	47
2.3	嵌入式系统总线	48
2.3.1	总线概述	48
2.3.2	AMBA 总线	50
2.4	嵌入式存储系统	53
2.4.1	存储系统简介	53
2.4.2	存储系统组成	53
2.5	嵌入式系统输入输出接口和设备	56
2.5.1	典型嵌入式系统 I/O 设备	56
2.5.2	典型嵌入式系统 I/O 接口	62
	思考题	68
第3章	嵌入式系统软件基础	69
3.1	嵌入式软件系统概述	69
3.1.1	嵌入式系统软件系统层次	69
3.1.2	集成开发环境 (IDE)	71
3.2	嵌入式系统引导程序	72
3.2.1	Bootloader 概述	72
3.2.2	Bootloader 的主要任务与典型架构	77
3.2.3	Blob 系统引导程序	86
3.3	嵌入式实时操作系统	96
3.3.1	嵌入式实时操作系统概述	96
3.3.2	嵌入式实时操作系统体系结构	100
3.3.3	嵌入式实时操作系统的组成	104
3.3.4	基本概念介绍	107
3.4	常用嵌入式操作系统简介	114
3.4.1	uC/OS-II 操作系统简介	114
3.4.2	嵌入式 Linux 操作系统简介	115

3.4.3 WinCE 操作系统简介	116
3.4.4 VxWorks 操作系统简介	118
3.4.5 Palm 操作系统简介	119
3.4.6 IOS 操作系统简介	119
3.4.7 Google Android 操作系统简介	120
思考题	120
第4章 嵌入式 Linux 操作系统的应用开发	121
4.1 嵌入式 Linux 选择	121
4.2 搭建嵌入式 Linux 开发环境	124
4.3 makefile 文件的编写	127
4.4 Linux 内核裁减与移植	132
4.4.1 Linux 内核简介	133
4.4.2 嵌入式 Linux 的裁剪	135
4.5 嵌入式 Linux 文件系统实现	139
4.5.1 文件系统类型	139
4.5.2 文件系统内容	141
4.5.3 根文件系统的制作	143
4.6 设备驱动程序开发	144
4.6.1 设备驱动原理	144
4.6.2 设备类型	145
4.6.3 设备号	146
4.6.4 设备驱动程序开发调试机制	146
4.6.5 设备文件接口	148
4.6.6 设备驱动程序编写	156
思考题	167
第5章 嵌入式 Windows CE 操作系统的应用开发	168
5.1 WINCE 概述	168
5.1.1 Windows Embedded 产品区别	168
5.2 Windows CE 体系结构	170
5.2.1 WINCE 体系框架	170

5.2.2	Windows CE 存储管理	172
5.2.3	Wince 源代码结构	173
5.3	开发环境	177
5.3.1	开发一个 Windows CE 设备过程	177
5.3.2	Platform Builder 开发工具	179
5.3.3	Windows CE 内核基本配置结构	180
5.3.4	Windows CE 应用程序开发工具	188
5.4	驱动程序编写	195
5.4.1	Windows CE 驱动简介	195
5.4.2	驱动程序分类	196
5.4.3	流驱动开发	199
	思考题	212
第 6 章	嵌入式系统开发实例	213
6.1	基于嵌入式 LINUX 的智能报警系统	213
6.1.1	系统功能	213
6.1.2	系统设计	213
6.1.3	系统实现	215
6.2	基于 WINCE 的嵌入式无线可视门铃系统的设计	225
6.2.1	系统功能	225
6.2.2	系统设计	225
6.2.3	系统主要模块实现	227
	参考文献	232
	附录	234

第 1 章 嵌入式系统概况

随着电子数字计算机的发展，嵌入式系统已广泛应用到社会生活的各个领域，从工业控制、国防武器到汽车电子、医疗卫生设备再到智能家居、日常消费电子设备处处可以见到它们的身影。那么，什么是嵌入式系统？其具有什么特点？本章将讨论嵌入式系统的一些基本概念，具体讲解嵌入式系统的定义、分类、应用领域、系统组成和设计流程。

本章主要内容：

- (1) 嵌入式系统定义
- (2) 嵌入式系统的分类
- (3) 嵌入式技术的应用领域及发展趋势
- (4) 嵌入式系统组成简介
- (5) 嵌入式系统设计流程

1.1 嵌入式系统定义

1.1.1 概述

20 世纪 70 年代，伴随着世界上第一款商用微处理器 Intel4004 的诞生，计算机发生了历史性的变化。以微处理器为核心的微型计算机以其小型、价廉、高可靠性特点，迅速走出机房。鉴于其高速数值解算能力和表现出的智能化水平，控制专业人士将微型机嵌入到了一个对象体系中，以实现对象体系的智能化控制。例如，将微型计算机经电气加固、机械加固，并配置各种外围接口电路，安装到大型舰船中构成自动驾驶仪或轮机状态监测系统。这样一来，计算机便失去了原来的形态与通用的计算机功能。为了区别于原有的通用计算机系统，把嵌入到对象体系中，实现对象体系智能化控制的计算机，称作嵌入式计算机系统。

嵌入式计算机系统是根据具体应用对象，软、硬件采用量体裁衣方式定制的，不是以一般计算机形态出现的专用计算机系统。嵌入式系统的软件固化在硬件系统中，与硬件形成一个不可分割的整体，它所执行的功能也是面向特定的应用，很难通用。其外形、尺寸、功能、功耗等都受限于应用对象的设计需求，因而不可能有一个标准化的设计。

在当今社会中，人们使用嵌入式计算机系统的情况越来越多，例如手机、数码相机、智能空调、数字电视机等等，并且在未来社会，人们可以不接触计算机，但是不能不接触嵌入式系统的情况是不存在的。嵌入式系统可能存在于生活的各个角落，个人家庭可能就是通过一个嵌入式系统的控制中心，管理家电来控制家庭和外界网络的连接，让人们的生活更为方便；出门旅行的时候，在旅店的门把手里面安装有电子识别控制系统，利用嵌入式系统根据旅客手上的特征，判断是否应该开门；在坐车的时候，汽车电脑可以通过 GPS 来判断自己的具体位置，利用嵌入式智能系统判断应该走哪条路比较方便。因此有这样一种说法，如果以公元 2000 年作为科技史的一个分水岭，那么公元 2000 年之前可以称之为“PC”（Personal Computer）时代；而公元 2000 年之后则被称为“后 PC”（Post—Personal Computer）时代。嵌入式系统正式因为提供了一种灵活、高效和高性价比的解决方案，并伴随信息技术与网络技术的高速发展，被广泛地应用于科学研究、工程设计、军事技术以及文艺商业等方方面面，成为后 PC 时代 IT 领域发展的主力军。

由于嵌入式系统应用广，领域特色突出，其未来发展前景十分广阔。因此，学习和掌握嵌入式系统技术，是开拓先进的现代计算机技术、创造未来的出发点。

1.1.2 嵌入式系统的发展历程

嵌入式系统已有近 40 年的历史，纵观其发展历程，大致经历了以下四个阶段：

1. 无操作系统阶段

1971 年 Intel 公司推出了第一款微处理器 Intel4004，这一划时代的产品，成功地把算术运算器和控制器电路集成在一起，使以微处理器为核心的微型计算机具有小型、价廉、高可靠性等特点。其后各厂家陆续推出了许多 8 位的微处理器，1974 年，推出了 8080 第二代微处理器。由于微处理器是一个归一化的智力内核，除了能实现高速数据处理，还具有智能化控

制能力。于是借助微电子工艺水平的提高,把智能化控制中所需要的微处理器、I/O接口、A/D、D/A转换、串行接口以及RAM、ROM等部件全部集成到一个VLSI中,从而制造出面向I/O设计的微控制器,即俗称的单片机。1976年Intel推出了全新体系结构、用于智能化控制的MCS-48单片机, Motorola同时推出了68HC05, Zilog公司推出了Z80系列,这些早期的单片机均含有256字节的RAM、4K的ROM、4个8位并口、1个全双工串行口、两个16位定时器。之后在80年代初, Intel又进一步完善了8048,在它的基础上研制成功了8051,这在单片机的历史上是值得纪念的一页,迄今为止,51系列的单片机仍然是最为成功的单片机芯片。单片机的出现,使得汽车、家电、工业机器、通信装置以及成千上万种产品可以通过内嵌电子装置来获得更佳的使用性能:更容易使用、更快、更便宜。这些装置已经初步具备了嵌入式的应用特点,但是这时的应用只是使用8位的芯片,执行一些单线程的程序,还谈不上“系统”的概念。

因此,这一阶段是以单芯片为核心的可编程控制器形式的系统。这类系统大部分应用于一些专业性强的工业控制系统中,一般没有操作系统的支持,软件通过汇编语言编写。这一阶段系统的主要特点是:系统结构和功能相对单一,处理效率较低,存储容量较小,几乎没有用户接口。由于这种嵌入式系统使用简单、价格低,因此以前在国内工业领域应用较为普遍,但是现在已经远不能适应高效的、需要大容量存储的现代工业控制和新兴信息家电等领域的需求。

2. 简单实时系统阶段

从80年代早期开始,嵌入式系统的程序员开始用商业级的“操作系统”编写嵌入式应用软件,这使得可以获取更短的开发周期,更低开发资金和更高的开发效率,“嵌入式系统”真正出现了。确切地说,这个时候的操作系统是一个实时核,这个实时核包含了许多传统操作系统的特征,包括任务管理、任务间通讯、同步与相互排斥、中断支持、内存管理等功能。其中比较著名的有Ready System公司的VRTX、Integrated System Incorporation (ISI)的PSOS和IMG的VxWorks、QNX公司的QNX等。这些嵌入式操作系统都具有嵌入式的典型特点:它们均采用占先式的调度,响应的时间很短,任务执行的时间可以确定;系统内核很小,具有可裁剪、可扩充和可移植性,可以移植到各种处理器上;较强的实时和可靠性,适合嵌入式应用。这些嵌入式实时操作系统的出现,使得应用开发人员得以从小范围的开发解放出来,同时也促使嵌入式有了更为广阔的应

用空间。

因此，这一阶段是以嵌入式 CPU 为基础、以简单操作系统为核心的嵌入式系统。其主要特点是：CPU 种类繁多，通用性比较弱；系统开销小，效率高；操作系统达到一定的兼容性和扩展性；应用软件较专业化，用户界面不够友好。

3. 实时多任务操作系统阶段

90 年代以后，在分布控制、柔性制造、数字化通信和信息家电等巨大需求的牵引下，嵌入式系统进一步加速发展。随着对实时性要求的提高，软件规模不断上升，实时核逐渐发展为实时多任务操作系统（RTOS），并作为一种软件平台逐步成为目前国际嵌入式系统的主流。这时候更多的公司看到了嵌入式系统的广阔发展前景，开始大力发展自己的嵌入式操作系统。除了上面的几家老牌公司以外，还出现了 Palm OS、WinCE、嵌入式 Linux、Lynx、Nucleux、以及国内的 Hopen、Delta Os 等嵌入式操作系统。这个阶段的嵌入式系统正从 8 位、16 位微处理器芯片逐步让位于 32 位嵌入式微处理器芯片。

因此，这一阶段是以嵌入式操作系统为标志的嵌入式系统。其主要特点是：嵌入式操作系统能运行于各种不同类型的微处理器上，兼容性好；操作系统内核小、效率高，并且具有高度的模块化和扩展性；具备文件和目录管理、支持多任务、支持网络应用、具备图形窗口和用户界面；具有大量的应用程序接口 API，开发应用程序较简单；嵌入式应用软件丰富。

4. 面向 Internet 阶段

进入 21 世纪，网络技术迅速发展，嵌入式技术与 Internet 技术的结合正推动着嵌入式技术的飞速发展，嵌入式设备和应用将真正让互联网无处不在。人们不论是在工作、娱乐、学习甚至休息的时候，都能 7 * 24 小时的与互联网保持连接。用户在任意位置，使用各种移动终端获取应用服务，计算机的计算能力将不受本地硬件的限制，一台更小尺寸、更轻的上网本或者智能手机一样可以通过网络来完成我们需要的服务。英特尔相信嵌入式互联网的快速崛起将到 2011 年时孕育出价值 100 亿美元，并预测到 2015 年将新增 150 亿个嵌入式计算设备与互联网的连接。

因此，这一阶段是以 Internet 为标志的嵌入式系统。这是一个正在迅速发展的阶段。随着 Internet 的发展以及 Internet 技术与信息家电、工业控制技术结合日益密切，嵌入式设备与 Internet 的结合将代表嵌入式系统的未来。

1.1.3 嵌入式系统的 IEEE 定义

根据 IEEE（国际电机工程师协会）的定义，嵌入式系统是“控制、监视或者辅助装置、机器和设备运行的装置”。（原文为 devices used to control, monitor, or assist the operation of equipment, machinery or plants）。从这个定义，可以看出它更像是在定义嵌入式设备，而不是嵌入式系统。

再来看看 Raj Karmal 在他的“Embedded Systems Architecture Programming and Design”一书中所给的一个定义：“An Embedded System can be defined as one that has computer hardware with software embedded in it as one of its most important components. 译为：“嵌入式系统是一种以植入了软件的计算机硬件为重要组成部分的系统。”

虽然表述不一样，无非都是为了说明它是一种具有计算机的功能特征但用于一些特定场合的系统，它的存在是为了让计算机的处理能力运用到更广泛更特殊的场合，吸取通用计算机系统高强处理能力的优势，但降低其对环境的要求，选择一个折中的方案，让计算机来代替人们或者完成人类无法胜任的工作。

1.1.4 嵌入式系统的一般定义

不过上述定义并不能充分体现出嵌入式系统的精髓，按照历史性、本质性、普遍性要求，嵌入式系统应定义为：“嵌入到对象体系中的专用计算机系统”。“嵌入性”、“专用性”与“计算机系统”是嵌入式系统的三个基本要素。对象系统则是指嵌入式系统所嵌入的宿主系统。

1.1.5 嵌入式系统的特点

嵌入式系统的特点与定义不同，它是由定义中的三个基本要素衍生出来的。不同的嵌入式系统其特点会有所差异。

1. 与“嵌入性”的相关特点：由于是嵌入到对象系统中，必须满足对象系统的环境要求，如物理环境（小型）、电气/气氛环境（可靠）、成本（价廉）、系统响应（实时）等要求。

首先必须在物理尺寸和外观体积上得到满足，尤其是在手持设备或者航空航天控制设备等对于外形和体积有着非常严格要求的场合；其次必须有一定的环境承受能力，比如对温度、湿度、电气、磁场等都要有一定的

适应能力，不至于外部因素的变化而对系统的稳定性的可靠性产生太大的影响；另外，还要具有实时性，不仅要在规定的时间内完成既定的任务，还要保证一定的动作顺序（并不专指时间顺序）控制。像有些嵌入式系统，就具有实时操作系统的某些功用，应用在嵌入式领域的实时操作系统就叫做 Real Time Embedded Operation System。

2. 与“专用性”的相关特点：软、硬件的裁剪性；满足对象要求的最小软、硬件配置等。

嵌入式系统是一种专门为某些场合设计的计算机系统，所以很强调应用的专用性，当然在嵌入式系统设计的时候，为了尽量避免重复设计，可以设计一个具有微内核能够裁剪的系统，针对不同的应用，像组装产品一样进行定制，比如 Windows CE 嵌入式操作系统。当然，定制不仅体现在软件上，而且在硬件上也有体现。比如在微控制器的设计中，某系列的微控制器会使用同一种内核，但对于不同的应用配以不同容量的存储器和不同规格的外设。

3. 与“计算机系统”的相关特点：嵌入式系统必须是能满足对象系统控制要求的计算机系统。与上两个特点相呼应，这样的计算机必须配置有与对象系统相适应的接口电路。

嵌入式系统必须组成一个有机结合的整体。首先在嵌入式系统内部，硬件和软件必须要有一定的整体架构和层次，在各自独立的嵌入式软件和被嵌入硬件之间，也要有一定的交互方式，定义符合工业标准的“接口”。这样，可以让设备和嵌入式系统软件能够进行工业化的分工协作生产，也有利于大规模多台设备之间的交互。另外，在嵌入式系统之间，也需要一定的交互方式，定义好嵌入式系统之间的通信也是非常重要的一方面。比如，现在的嵌入式系统已经开始支持 TCP/IP 协议，这对于嵌入式系统的网络化和对设备的远程网络控制都有很大的帮助。

另外，在理解嵌入式系统定义时，不要与嵌入式设备相混淆。嵌入式设备是指内部有嵌入式系统的产品、设备，例如，内含单片机的家用电器、仪器仪表、工控单元、机器人、手机、PDA 等。

1.1.6 嵌入式计算机与通用计算机的差别

早期人们认为：由于嵌入式计算机系统要嵌入到对象体系中，实现的是对象的智能化控制，因此，它有着与通用计算机系统完全不同的技术要求与技术发展方向。但随着网络技术、通信技术和电子制造技术的发展，

两者的技术要求与技术发展方向已变得越来越模糊了。

通常说,通用计算机的技术要求是高速、海量的数值计算;技术发展方向是总线速度的无限提升,存储容量的无限扩大。而嵌入式计算机的技术要求则是对象的智能化控制能力;技术发展方向是与对象系统密切相关的嵌入性能、控制能力与控制的可靠性。但是进入 21 世纪的第一个十年间,嵌入式计算机与通用计算机的未来发展趋势基本趋于一致,那就是:

1. 微处理器性能的提升

英特尔公司计划在未来几年内制造出每个芯片上有 10 亿个晶体管的中央处理器,个人电脑将具有原来的高性能服务器所具有的处理能力。2010 年最新款的 iMac 个人电脑采用主频为 3.6GHz 的英特尔酷睿 i5 处理器,iPad 和 iPhone 4 采用的是具有 1GHz 主频的苹果 A4 处理器。纵观手机处理器的发展历程,从早期的主频 528MHz 到 600MHz,从 600MHz 发展到 800MHz,发展到现在 1GHz 主频的处理器俨然成了主流水准,更有甚者采用 1.5GHz 和 2GHz 主频的处理器。

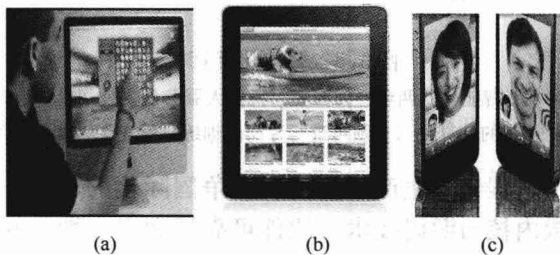


图 1.1 无线可触摸交互式计算机

(a) iMac; (b) iPad; (c) iPhone

高性能计算机采用分布式共享存储结构,将拥有 1GHz 以上的时钟频率;每个芯片有 4 个 8 路并行的以及更为复杂的 GISC 接口;计算机将采用更先进的数据存储技术(如光学、永久性半导体、磁性存储等);外设将走向高性能、网络化和集成化并且更易于携带。

输出输入技术将更加智能化、人性化,随着笔输入、计算机视觉、语音识别、生物测定、光学识别等技术的不断发展和完善,人与计算机的交流将更加便捷。

2. 软件技术的发展将呈现平台网络化、技术对象化、系统构件化、产

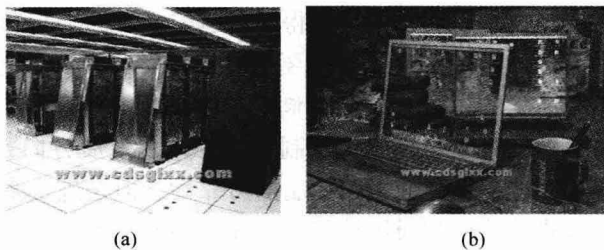


图 1.2 超级计算机与个性化计算机

(a) 超级计算机 (万亿次计算机); (b) 个性化、轻薄化概念计算机

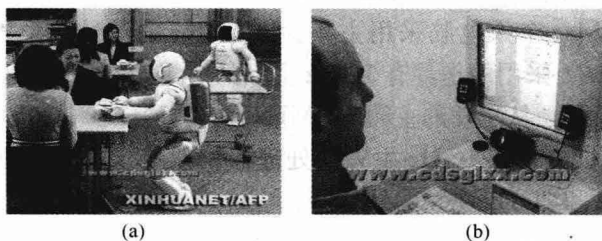


图 1.3 智能化计算机

(a) 人工智能化 (两台“阿西莫”机器人服务员为公司员工送茶)

(b) 视觉控制的计算机 (无须再进行专门的训练, 就连老人都能运用自如)

品领域化、开发过程化、生产规模化、竞争国际化的趋势。高端计算机软件、操作系统微内核与源码技术、软件可靠性和安全性、软件开发和集成工具面向人们个性化需求的应用软件, 在相当时期内仍将是软件领域的主要研究内容。

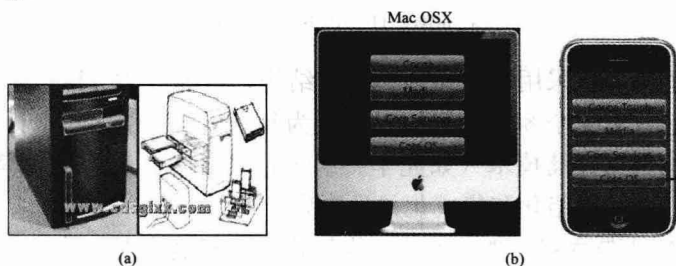


图 1.4 模块化概念计算机和模块化的操作系统

(a) 模块化概念计算机; (b) 模块化的操作系统