

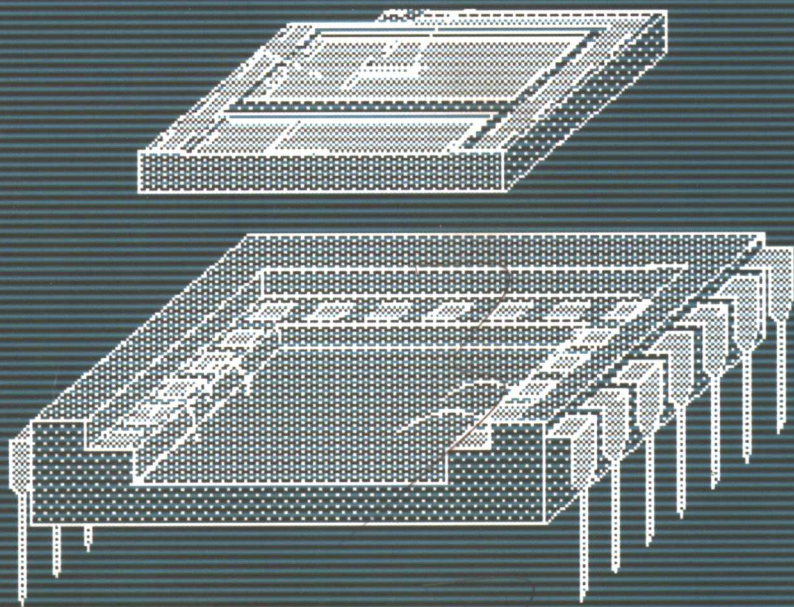
信息与通信技术



国防科工委「十五」规划教材

# 嵌入式实时操作系统 及应用开发

● 罗蕾 主编



北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社

哈尔滨工业大学出版社

西北工业大学出版社

哈尔滨工程大学出版社



TP316.2  
16D



国防科工委“十五”规划教材·信息与通信技术

RJS158/10

# 嵌入式实时操作系统及应用开发

罗 蕾 主编

北方工业大学图书馆



00570709

北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社 西北工业大学出版社

哈尔滨工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社

## 内容简介

本书以嵌入式软件的核心——嵌入式实时操作系统为重点,以应用为目的,全面介绍嵌入式系统。它使读者既能对嵌入式系统及开发有一个全景的把握,又能深入理解和使用嵌入式实时操作系统。同时,为了加强理论与实践的结合,还专为该教材配套了实验系统。实验系统包括嵌入式实时操作系统和集成开发工具,提供了丰富的实验用例。

本书共分9章。第1~3章介绍嵌入式软硬件系统,包括基本概念、组成、特点、分类和发展趋势等;第4~8章重点介绍嵌入式实时内核,包括任务管理与调度、同步互斥与通信、中断和时间管理、内存管理和I/O管理;第9章介绍嵌入式系统软件的开发,包括开发模式、任务划分方法等。

本书可以作为高等学校有关嵌入式系统方面教学的本科生或研究生的教材,也适合于从事嵌入式系统研发的人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

嵌入式实时操作系统及应用开发/罗蕾主编. —北京:北京航空航天大学出版社,2005.1

ISBN 7-81077-580-4

I. 嵌… II. 罗… III. 实时操作系统  
IV. TP316.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第105631号

## 嵌入式实时操作系统及应用开发

罗蕾 主编

责任编辑 刘晓明

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路37号(100083)

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

<http://www.buaapress.com.cn> E-mail: [bhpress@263.net](mailto:bhpress@263.net)

涿州市新华印刷有限公司印装 各地书店经销

\*

开本:787×960 1/16

印张:20.75 字数:465千字

2005年1月第1版 2005年1月第1次印刷

印数:5000册

ISBN 7-81077-580-4 定价:34.00元(含光盘)

# 国防科工委“十五”规划教材编委会

(按姓氏笔画排序)

主任：张华祝

副主任：王泽山 陈懋章 屠森林

编委：王 祁 王文生 王泽山 田 蔚 史仪凯  
乔少杰 仲顺安 张华祝 张近乐 张耀春  
杨志宏 肖锦清 苏秀华 辛玖林 陈光禔  
陈国平 陈懋章 庞思勤 武博祎 金鸿章  
贺安之 夏人伟 徐德民 聂 宏 贾宝山  
郭黎利 屠森林 崔锐捷 黄文良 葛小春



# 总 序

国防科技工业是国家战略性产业,是国防现代化的重要工业和技术基础,也是国民经济发展和科学技术现代化的重要推动力量。半个多世纪以来,在党中央、国务院的正确领导和亲切关怀下,国防科技工业广大干部职工在知识的传承、科技的攀登与时代的洗礼中,取得了举世瞩目的辉煌成就;研制、生产了大量武器装备,满足了我军由单一陆军,发展成为包括空军、海军、第二炮兵和其他技术兵种在内的合成军队的需要,特别是在尖端技术方面,成功地掌握了原子弹、氢弹、洲际导弹、人造卫星和核潜艇技术,使我军拥有了一批克敌制胜的高技术武器装备,使我国成为世界上少数几个独立掌握核技术和外层空间技术的国家之一。国防科技工业沿着独立自主、自力更生的发展道路,建立了专业门类基本齐全,科研、试验、生产手段基本配套的国防科技工业体系,奠定了进行国防现代化建设最重要的物质基础;掌握了大量新技术、新工艺,研制了许多新设备、新材料,以“两弹一星”、“神舟”号载人航天为代表的国防尖端技术,大大提高了国家的科技水平和竞争力,使中国在世界高科技领域占有了一席之地。十一届三中全会以来,伴随着改革开放的伟大实践,国防科技工业适时地实行战略转移,大量军工技术转向民用,为发展国民经济作出了重要贡献。

国防科技工业是知识密集型产业,国防科技工业发展中的一切问题归根到底都是人才问题。50多年来,国防科技工业培养和造就了一支以“两弹一星”元勋为代表的优秀的科技人才队伍,他们具有强烈的爱国主义思想和艰苦奋斗、无私奉献的精神,勇挑重担,敢于攻关,为攀登国防科技高峰进行了创造性劳动,成为推动我国科技进步的重要力量。面向新世纪的机遇与挑战,高等院校在培养国防科技人才,传播国防科技新知识、新思想,攻克国防基础科研和高技术研究难题当中,具有不可替代的作用。国防科工委高度重视,积极探



索,锐意改革,大力推进国防科技教育特别是高等教育事业的发展。

高等院校国防特色专业教材及专著是国防科技人才培养当中重要的知识载体和教学工具,但受种种客观因素的影响,现有的教材与专著整体上已落后于当今国防科技的发展水平,不适应国防现代化的形势要求,对国防科技高层次人才的培养造成了相当不利的影响。为尽快改变这种状况,建立起质量上乘、品种齐全、特点突出、适应当代国防科技发展的国防特色专业教材体系,国防科工委全额资助编写、出版200种国防特色专业重点教材和专著。为保证教材及专著的质量,在广泛动员全国相关专业领域的专家、学者竞投编著工作的基础上,以陈懋章、王泽山、陈一坚院士为代表的100多位专家、学者,对经各单位精选的近550种教材和专著进行了严格的评审,评选出近200种教材和学术专著,覆盖航空宇航科学与技术、控制科学与工程、仪器科学与技术、信息与通信技术、电子科学与技术、力学、材料科学与工程、机械工程、电气工程、兵器科学与技术、船舶与海洋工程、动力机械及工程热物理、光学工程、化学工程与技术、核科学与技术等学科领域。一批长期从事国防特色学科教学和科研工作的两院院士、资深专家和一线教师成为编著者,他们分别来自清华大学、北京航空航天大学、北京理工大学、华北工学院、沈阳航空工业学院、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、南京航空航天大学、南京理工大学、苏州大学、华东船舶工业学院、东华理工学院、电子科技大学、西南交通大学、西北工业大学、西安交通大学等,具有较为广泛的代表性。在全面振兴国防科技工业的伟大事业中,国防特色专业重点教材和专著的出版,将为国防科技创新人才的培养起到积极的促进作用。

党的十六大提出,进入21世纪,我国进入了全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的新的发展阶段。全面建设小康社会的宏伟目标,对国防科技工业发展提出了新的更高的要求。推动经济与社会发展,提升国防实力,需要造就宏大的人才队伍,而教育是奠基的柱石。全面振兴国防科技工业必须始终把发展作为第一要务,落实科教兴国和人才强国战略,推动国防科技工业



走新型工业化道路,加快国防科技工业科技创新步伐。国防科技工业为有志青年展示才华,实现志向,提供了缤纷的舞台,希望广大青年学子刻苦学习科学文化知识,树立正确的世界观、人生观、价值观,努力担当起振兴国防科技工业、振兴中华的历史重任,创造出无愧于祖国和人民的业绩。祖国的未来无限美好,国防科技工业的明天将再创辉煌。

张华祝



# 前 言

计算机是 20 世纪人类社会最伟大的发明之一。从 1946 年第一台计算机 ENIAC 在美国宾夕法尼亚大学的诞生到现在,计算机经历了两个发展阶段:大型计算机和个人计算机阶段。伴随着 21 世纪的曙光,计算机技术正进入下一个充满机遇的阶段——“后 PC 时代”或“无处不在的计算机”阶段。无处不在的计算机是指计算机彼此互联,而且计算机与使用者的比率达到 100:1 以上。无处不在的计算机包括通用计算机和嵌入式计算机,在 100:1 的比例中,95% 以上都是嵌入式计算机。

嵌入式计算和控制技术的发展可追溯到 20 世纪 60 年代初,航天工业从那时起已开始使用实时控制计算机进行航天飞行器的测控和导航。随着半导体和微处理器技术的发展,到了 20 世纪 80 年代,大量 4 位、8 位和 16 位微处理器开始应用于各种设备中,如飞行器、舰船、汽车、电话、电视机、微波炉、照相机甚至玩具,嵌入式实时操作系统开始应用。进入后 PC 时代,4 位、8 位和 16 位微处理器逐步让位于 32 位嵌入式芯片,嵌入式计算机的应用更加广泛。它将广泛应用于消费电子、有线和移动通信、汽车、医疗、工业控制、航空航天及国防等领域的民用和军用电子设备。形式多样的嵌入式计算机正努力把 Internet 连接到人们生活的各个角落,其消费量将以亿计,逐步形成一個充满商机的巨大产业。

随着嵌入式应用复杂度的提高,嵌入式软件的规模也发生了指数型增长。软件的实现从某种意义上说决定了产品的功能,已成为新产品成功与否的关键因素,是未来市场竞争力的重要体现。由于嵌入式系统具备硬件平台多样性和应用个性化的特点,因此嵌入式软件呈现出一种高度细分的市场格局,国外产品进入也很难垄断整个市场,这为我国的软件产业提供了一个难得的发展机遇。

目前市场急需专业化的嵌入式软件人才,为适应这种需求,国内高校大多已开设嵌入式软件的各种课程。电子科技大学自 1990 年以来就开始从事嵌入式软件的研究、开发和教学工作,承担并完成了国家 863、国防预研和电子发展基金等多项与嵌入式软件相关的重点课题,开发出具有自主知识产权的嵌入式实时操作系统 CRTOS 及开发工具,其成果获得了多项部级科技进步奖。从 1999 年开始进





行产业化工作以来,已走出了一条学、研、产相结合的道路,并于2000年推出了中国第一套完整的嵌入式实时软件开发平台“道系统(DeltaSystem)”。

本教材就是在此基础上,以嵌入式软件的核心——嵌入式实时操作系统为重点,以应用为目的,全面介绍嵌入式系统。它使读者既能对嵌入式系统及开发有一个全景的把握,又能深入理解和使用嵌入式实时操作系统。同时,为了加强理论与实践的结合,还专为该教材配套了实验系统。实验系统包括嵌入式实时操作系统和集成开发工具,提供了丰富的实验和手册。读者利用PC机就可以自己动手搭建嵌入式系统的开发平台,熟悉应用开发,更好地学习和理解嵌入式系统的基础知识:从纯软件到硬/软件结合、从“纸”上谈兵(编程序)到“板”上谈兵、从“懂”怎么做到“会”做以及从讲/听到讲/听/做。

## 教材的内容

教材共分9章,参与教材编写的主要人员有李允(负责第5,7,8章)、陈丽蓉(负责第4,6,9章)、雷航(负责第1,9章部分工作)、罗蕾(负责第1,2,3章),全书由罗蕾统稿。

教材包括嵌入式系统基础、嵌入式实时操作系统及应用开发三方面的内容。具体内容如下:

- 第1章 嵌入式系统导论。讲述什么是嵌入式系统、嵌入式系统的发展历史、嵌入式系统的特点、嵌入式系统的分类和应用领域、嵌入式实时系统的实时性和可靠性及嵌入式系统的发展趋势。
- 第2章 嵌入式硬件系统。讲述嵌入式硬件系统的组成、嵌入式微处理器的特点、主流的嵌入式微处理器ARM系列和MIPS系列、AMBA和PCI总线、嵌入式系统存储器结构。
- 第3章 嵌入式软件系统。讲述嵌入式软件的特点和分类、嵌入式软件的体系结构、运行流程,嵌入式操作系统结构、组成、功能、特点和发展趋势,嵌入式软件开发工具的分类、交叉开发环境,嵌入式软件实现阶段的开发过程及开发工具的发展趋势。
- 第4章 嵌入式实时内核基础。讲述嵌入式实时内核的基础知识,主要包括嵌入式实时内核的关键设计问题、主要功能和主要性能指标,为读者深入学习实时内核打下良好的基础。
- 第5章 任务管理与调度。讲述什么是任务和任务的分类、主要特性及内



容,任务管理机制,嵌入式实时系统常见的几种调度算法,优先级反转及解决方法,多处理器调度。

- 第 6 章 同步、互斥与通信。讲述任务间、任务与中断处理程序间常见的同步、互斥与通信机制(信号量、邮箱、消息队列、事件和异步信号)。
- 第 7 章 中断和时间管理。讲述中断分类、中断处理过程及中断管理机制等,硬件时钟设备。(实时时钟 RTC 和定时器/计数器)及与操作系统的关系,时间管理机制。
- 第 8 章 存储管理和 I/O 管理。讲述嵌入式实时系统对存储管理的需求以及存储管理的三种机制:固定大小存储区管理、可变大小存储区管理及保护机制、嵌入式系统 I/O 管理的特点及机制。
- 第 9 章 嵌入式系统软件的开发。讲述嵌入式系统的开发模式、任务划分的方法、嵌入式系统的设计工具以及调度算法时限可满足性分析等。

## 配套实验系统的内容

配套了嵌入式实时软件开发平台“道系统”:

- 嵌入式实时操作系统 DeltaOS 嵌入式实时内核 DeltaCORE、嵌入式 TCP/IP DeltaNET、嵌入式文件系统 DeltaFILE。
- 嵌入式集成交叉开发环境 LambdaTOOL 集成开发环境 LambdaIDE、交叉编译器 LambdaGCC、交叉调试器 LambdaGDB、目标监控器 LambdaTRA 等。

共配套 19 个实验:

- 嵌入式交叉开发环境建立实验 1 个;
- 嵌入式实时内核实验 10 个;
- 嵌入式 TCP/IP 实验 5 个;
- 嵌入式文件系统实验 3 个。

嵌入式实时软件开发平台、实验和手册放在本教材所附的 CD 中。

## 致 谢

本书除得到国防科工委重点教材建设的支持外,还得到电子科技大学研究生院课程建设及电子科技大学教务处优秀教材建设的支持。编者对此深表感谢。

感谢电子科技大学嵌入式实时系统研究室的各位老师和研究生的支持。感



谢北京科银京成公司的帮助和支持。感谢北航出版社编辑和出版人员的辛勤工作。

感谢家人和朋友们的支持。

由于作者知识所限,书中不足之处,恳请各位专家和读者赐正。您可通过 E-mail:lluo@uestc.edu.cn 或 lrchen@uestc.edu.cn 与我们联系。

编者

2004年1月

于电子科技大学

# 目 录

## 第 1 章 嵌入式系统导论

1.1 嵌入式系统概述 .....	1
1.1.1 嵌入式系统的发展历程 .....	3
1.1.2 嵌入式系统的特点 .....	7
1.1.3 嵌入式系统的分类 .....	9
1.2 嵌入式系统的应用领域 .....	14
1.3 嵌入式系统的实时性与可靠性 .....	16
1.3.1 嵌入式系统的可靠性 .....	16
1.3.2 嵌入式系统的实时性 .....	20
1.4 嵌入式系统的发展趋势 .....	24
思考题 .....	26

## 第 2 章 嵌入式硬件系统

2.1 基本组成 .....	27
2.2 嵌入式微处理器 .....	29
2.2.1 嵌入式微处理器的特点 .....	29
2.2.2 主流的嵌入式微处理器 .....	34
2.3 总线 .....	45
2.3.1 AMBA 总线 .....	45
2.3.2 PCI 总线 .....	49
2.4 存储器 .....	52
2.4.1 存储器结构 .....	52
2.4.2 电子盘 .....	53
2.5 输入/输出接口和设备 .....	56
思考题 .....	56

## 第 3 章 嵌入式软件系统

3.1 嵌入式软件系统概述 .....	58
3.1.1 嵌入式软件分类 .....	60
3.1.2 嵌入式软件体系结构 .....	60
3.1.3 嵌入式软件运行流程 .....	61
3.2 嵌入式操作系统 .....	63
3.2.1 体系结构 .....	64



3.2.2	功能及特点	68
3.2.3	发展趋势	71
3.3	嵌入式软件开发工具	72
3.3.1	嵌入式软件开发工具的分类	72
3.3.2	嵌入式软件的交叉开发环境	74
3.3.3	嵌入式软件实现阶段的开发过程	75
3.3.4	嵌入式软件开发工具的发展趋势	87
	思考题	88
<b>第4章 嵌入式实时内核基础</b>		
4.1	嵌入式实时内核的关键设计问题	89
4.1.1	实时性	89
4.1.2	可移植性	100
4.1.3	可剪裁、可配置性	102
4.1.4	可靠性	103
4.1.5	应用编程接口	103
4.2	嵌入式实时内核的主要功能	106
4.2.1	任务管理	106
4.2.2	中断管理	107
4.2.3	时间管理	108
4.2.4	对共享资源的互斥管理	108
4.2.5	同步与通信管理	111
4.2.6	内存管理	114
4.2.7	I/O管理	115
4.2.8	出错处理	115
4.2.9	用户扩展管理	116
4.2.10	电源管理	116
4.3	嵌入式实时内核的重要性能指标	119
4.3.1	概述	119
4.3.2	中断时序图	120
4.3.3	中断延迟时间	125
4.3.4	内核最大关中断时间	126
4.3.5	中断响应时间	127
4.3.6	中断恢复时间	128
4.3.7	非屏蔽中断	128
4.3.8	中断处理时间	129
4.3.9	任务上下文切换时间	129
4.3.10	任务响应时间	131



4.3.11 系统调用的执行时间 .....	133
4.3.12 有关时间确定性的测试 .....	137
4.3.13 嵌入式实时内核的存储开销 .....	137
思考题 .....	138
<b>第 5 章 任务管理与调度</b>	
5.1 概 述 .....	139
5.2 任 务 .....	141
5.2.1 任务的定义及其主要特性 .....	141
5.2.2 任务的内容 .....	141
5.2.3 任务分类 .....	142
5.2.4 任务参数 .....	144
5.3 任务管理 .....	144
5.3.1 任务状态与变迁 .....	144
5.3.2 任务控制块 .....	146
5.3.3 任务切换 .....	147
5.3.4 任务队列 .....	148
5.3.5 任务管理机制 .....	153
5.4 任务调度 .....	158
5.4.1 概 述 .....	158
5.4.2 基于优先级的可抢占调度 .....	161
5.4.3 时间片轮转调度 .....	162
5.4.4 静态调度 .....	163
5.4.5 动态调度 .....	167
5.4.6 静态调度与动态调度之间的比较 .....	168
5.5 优先级反转 .....	168
5.5.1 概 述 .....	168
5.5.2 优先级继承协议 .....	169
5.5.3 优先级天花板协议 .....	171
5.6 多处理器调度 .....	179
5.6.1 概 述 .....	179
5.6.2 使用率平衡算法 .....	179
5.6.3 基于 RMS 的任务分配算法 .....	180
5.6.4 基于 EDF 的首次匹配算法 .....	181
思考题 .....	182
<b>第 6 章 同步、互斥与通信</b>	
6.1 概 述 .....	184
6.2 信号量 .....	186



6.2.1	信号量的种类及用途	186
6.2.2	互斥信号量	187
6.2.3	二值信号量	188
6.2.4	计数信号量	189
6.2.5	信号量机制的主要数据结构	190
6.2.6	信号量机制的主要功能	191
6.2.7	与信号量有关的资源配置问题	193
6.3	邮箱和消息队列	193
6.3.1	任务间的通信方式	193
6.3.2	消息、邮箱和消息队列概述	194
6.3.3	消息队列机制的主要数据结构	195
6.3.4	消息队列机制的主要功能	197
6.3.5	与消息队列有关的资源配置问题	199
6.4	事件	199
6.4.1	事件机制概述	199
6.4.2	事件机制的主要数据结构	201
6.4.3	事件机制的主要功能	203
6.4.4	与事件机制有关的资源配置问题	205
6.5	异步信号	205
6.5.1	异步信号机制概述	205
6.5.2	异步信号机制与中断机制的比较	206
6.5.3	异步信号机制与事件机制的比较	207
6.5.4	异步信号机制的主要数据结构	207
6.5.5	异步信号机制的主要功能	209
	思考题	210
<b>第7章 中断和时间管理</b>		
7.1	中断管理	211
7.1.1	概述	211
7.1.2	中断的分类	212
7.1.3	中断处理的过程	214
7.1.4	实时内核的中断管理	216
7.1.5	用户中断服务程序	219
7.2	时间管理	221
7.2.1	硬件时钟设备	221
7.2.2	时间管理	223
	思考题	227



## 第 8 章 内存管理和 I/O 管理

8.1 内存管理 .....	228
8.1.1 概 述 .....	228
8.1.2 内存管理机制 .....	229
8.2 I/O 管理 .....	238
8.2.1 I/O 管理的功能 .....	239
8.2.2 I/O 系统的实现考虑 .....	240
思考题 .....	244

## 第 9 章 嵌入式系统软件的开发

9.1 嵌入式系统开发模式 .....	245
9.1.1 嵌入式系统开发模式概述 .....	245
9.1.2 处理器及硬件开发平台的选定 .....	249
9.1.3 操作系统选定 .....	251
9.1.4 开发环境选定 .....	257
9.2 实时软件分析设计方法 .....	258
9.2.1 实时软件的分析设计要求 .....	258
9.2.2 DARTS 分析设计方法 .....	262
9.2.3 基于 UML 的分析设计方法 .....	273
9.3 影响系统性能主要因素的分析 .....	289
9.3.1 静态优先级调度性能分析 .....	292
9.3.2 动态优先级调度性能分析 .....	297
9.3.3 任务计算时间的确定 .....	302
9.3.4 系统开销 .....	303
思考题 .....	306

## 附 录 CD-ROM 内容

### 参考文献



# 第 1 章 嵌入式系统导论

## 1.1 嵌入式系统概述

计算机是 20 世纪人类社会最伟大的发明之一,也是 20 世纪科学技术发展的三大主题之一。从 1946 年第一台计算机 ENIAC(Electronic Numerical Integrator And Computer)在美国宾夕法尼亚大学的诞生到现在,计算机的发展经历了三大阶段:

- 第一阶段 大型机阶段,始于 20 世纪 50 年代,IBM, Burroughs 和 Honeywell 等公司率先研制出大型机。
- 第二阶段 个人计算机阶段,始于 20 世纪 70 年代。
- 第三阶段 进入 21 世纪,计算机技术正进入充满机遇的阶段,即“后 PC 时代”或“无处不在的计算机”阶段。

施乐公司 Palo Alto 研究中心主任 Mark Weiser 认为:“从长远来看,PC 机和计算机工作站将衰落,因为计算机变得无处不在,例如在墙里,在手腕上,在手写电脑中(像手写纸一样)等,随用随取,伸手可及。”

目前全世界的计算机科学家正在形成一种共识:计算机不会成为科幻电影中的那种贪婪的怪物,而是将变得小巧玲珑、无处不在。它们藏身在任何地方,又消失在所有地方,功能强大,却又无影无踪。人们将这种思想命名为“无处不在的计算机”。

无处不在的计算机是指计算机彼此互联(如图 1-1 所示),而且计算机与使用者的比率达到和超过 100 : 1 的阶段。无处不在的计算机包括通用计算机和嵌入式计算机系统,在 100 : 1 的比例中,95 % 以上都是嵌入式计算机系统,并非通用计算机。

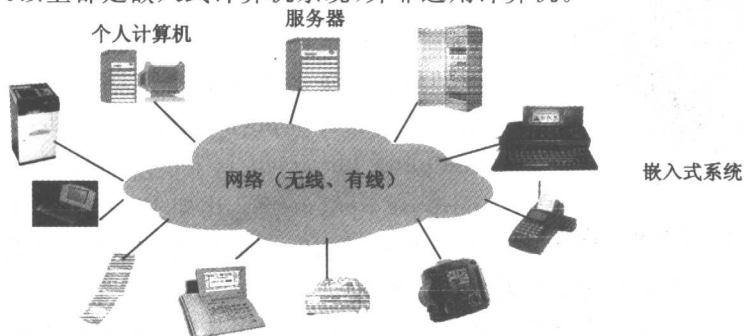


图 1-1 无处不在的计算机彼此互联