



普通高等教育“十二五”规划教材

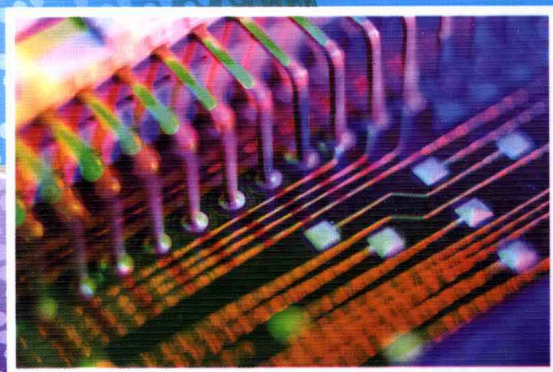
◎ 电子信息科学与工程类专业 规划教材



微处理器系统结构 与嵌入式系统设计

(第2版)

◎ 李广军 阎波 林水生 等编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

普通高等教育“十二五”规划教材
电子信息科学与工程类专业规划教材

微处理器系统结构与 嵌入式系统设计

(第2版)

李广军 阎波 林水生 编著
周亮 黄乐天

电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京·BEIJING

02

内 容 简 介

本书介绍了基于 ARM 核的嵌入式微处理器系统的体系结构、组成原理、工程设计方法和核心设计技术。全书首先讲述微处理器系统的组成、系统结构的基本概念和原理；然后从逻辑电路、IP 核设计的层次，对微处理器的体系结构、指令系统设计的核心技术进行深入研讨，揭示了微处理器系统中软件指令和硬件电路之间的接口联系、工程设计方法与流程。书中讨论了基于 ARM 微处理器 IP 核的微处理器软硬件系统的结构及组成，以提高读者编写与底层硬件交互的高效代码的工程设计能力和素质，并着重探讨了嵌入式操作系统的系统结构、操作系统移植、引导和加载等关键技术；书中还讨论了嵌入式系统的软硬件协同设计及基于 ARM 核的 SoC 设计技术。

本书可作为高校通信工程、电子信息工程、自动控制及集成电路等相关专业本科生的微机原理、嵌入式系统、计算机系统设计等课程的教材，对相关研发人员也颇有裨益。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有，侵权必究。

图书在版编目 (CIP) 数据

微处理器系统结构与嵌入式系统设计 / 李广军等编著. —2 版. —北京: 电子工业出版社, 2011.8

电子信息科学与工程类专业规划教材

ISBN 978-7-121-14389-2

I. ①微… II. ①李… III. ①微处理器—系统结构—高等学校—教材 ②微处理器—系统设计—高等学校—教材 IV. ①TP332

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 168174 号

策划编辑: 马 岚

责任编辑: 马 岚 特约编辑: 马爱文

印 刷: 北京市李史山胶印厂

装 订:

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 25.75 字数: 659 千字

印 次: 2011 年 8 月第 1 次印刷

印 数: 5000 册 定价: 45.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010)88258888。

前 言

计算机技术、网络技术、微电子技术和软件技术等信息技术的快速发展,使得嵌入式技术已深入到我们的日常生活中,从智能家电、个人通信产品、数码消费电子产品到汽车等,随处可见嵌入式技术的身影。与此同时,用户需求的多样化、复杂化和个性化趋势,导致嵌入式电子产品的功能日趋复杂、研发难度加大;而激烈的市场竞争又要求厂商能够以最快的速度将产品投放市场并尽量降低研发成本。因此,嵌入式系统设计技术与微电子、通信、计算机等信息技术互相融合并迅速发展和更新,例如仅就嵌入式系统常用的嵌入形态而言又可分为:系统级嵌入、板级嵌入、芯片级嵌入和 IP 级嵌入等。

目前,以 IC 设计与软件设计为代表的嵌入式系统设计已成为业内的核心标志性技术,基于 ARM 内核的嵌入式微处理器系统已广泛应用于各行各业及人们的日常生活中;而以应用为中心、软硬件可裁减的嵌入式系统产品的发展更是十分迅猛。嵌入式微处理器系统的产品市场已成为世界信息产业的市场增长点,其带动的相关工业产值估计每年超过数万亿元。

在 IEEE 计算机学会和 ACM 共同制定的 2004 版计算机类课程体系中,微处理器和嵌入式系统等已被列入核心课程。嵌入式计算机系统设计技术已成为通信、雷达、计算机、自动控制和微电子等研究应用领域的工程师应掌握的基本技术和必备技能。与巨大的市场潜力和产业需求相比,我国的嵌入式系统人才的工程与系统设计培养却有明显不足。为此,国家“十二五”和国家中长期科研规划均把微处理器等核心集成电路设计技术与基础软件技术设计列为国家重点关注的核心技术。

近年来,我国的 ASIC/微处理器芯片设计水平与 20 世纪相比已有本质的飞跃,IT 业的飞速发展对大学生的微处理器和嵌入式系统的设计能力提出了很高的要求。但是,国内高校大多仍以讲授 80x86 微处理器及应用系统为主,缺乏对计算机及微处理器系统的组成原理、系统结构,尤其是微处理器内部结构的深入剖析和理解,对学生的微处理器系统的硬件/软件协同设计、底层驱动设计等工程能力的培养不够重视。因此,原有的课程教学不可避免地存在教学脱离实际、课程落后技术、高校与行业脱节的情况。显然,以往的微型计算机原理等课程的教学大纲已无法满足相关产业的技术发展及人才需求。

随着 ARM、PowerPC、MIPS、8051 等 CPU 内核的广泛应用,国内 IC 与嵌入式系统产品设计技术和研发水平得到了飞速发展,微机原理、嵌入式系统等系列课程的改革已势在必行。

为弥补上述不足,电子科技大学“微型计算机系统原理及嵌入式系统”课程组编写了《微处理器系统结构与嵌入式系统设计》,并于 2009 年由电子工业出版社出版。同时,从 2009 年起在校内大规模进行了微机原理的课程改革,至今已历经 3 届本科教学。虽然课程改革存在诸多困难和缺陷,但改革后的课程教学仍得到了老师和学生们广泛的欢迎和好评。根据我们几年来的教学经验、教训和搜集到的宝贵建议,在对课程的教学大纲、教材的编写大纲及配套的实践教学大纲进行了多次讨论和修改的基础上,编写了《微处理器系统结构与嵌入式系统设计(第 2 版)》。

本教材在保留原第 1 版的主要知识结构的基础上, 为方便教学, 增设了总线技术与总线标准、存储系统、输入/输出接口等有关章节。教材新版重点介绍了 ARM 微处理器的 IP 核及其软硬件系统的结构及组成, 从逻辑电路和 ARM 核的设计层次, 剖析了嵌入式微处理器系统的控制器、数据通路等主要功能部件的工作原理和内部结构, 使读者掌握嵌入式微处理器系统的主流工程设计方法和核心技术, 强调基本原理与先进工程设计理念结合, 提高学生的工程素质和设计能力, 其主要特点如下。

(1) 加强微处理器系统的组成原理和系统结构等基础理论

计算机系统结构与组织理论是设计实现计算机系统的基石。无论是通用计算机系统还是嵌入式计算机系统, 无论采用哪种 CPU 芯片, 其组成原理与系统结构本质上都是非常类似的。只有具备了这些基础知识才能够真正理解计算机的行为原理, 真正做到举一反三。

(2) 深入探讨了微处理器的体系结构、指令系统等关键核心技术

从逻辑电路、ARM 核和 IP 设计的层次, 对微处理器的体系结构、指令系统及其特性进行较深入的研究和讨论, 深入探讨了微处理器系统的硬件与软件两者之间的相互影响, 重点揭示了微处理器系统中软件指令和硬件电路之间的接口联系及综合设计工程方法。

(3) 选用基于 ARM 内核的嵌入式微处理器系统

对基于 ARM 微处理器 IP 核的微处理器软硬件系统的结构及组成进行了较深入的介绍, 通过对 ARM 微处理器的学习和理解, 以利读者今后更容易理解和掌握 PowerPC、MIPS、8051 等其他 CPU 内核的工作原理和设计技术, 从而理解更先进的微处理器体系结构, 了解嵌入式系统的主流工程设计技术和理念, 以便写出直接与底层硬件交互的高效代码。

(4) 强调嵌入式操作系统的系统结构、系统移植、引导和加载等核心技术

随着操作系统在嵌入式系统中的应用日益广泛, 重点讲述了嵌入式软件系统结构及工作流程、ARM 嵌入式软件系统的引导和加载、嵌入式 Linux 内核的移植等核心软件设计技术, 有助于读者建立完整的计算机系统架构, 透彻地理解嵌入式系统的工作原理, 可显著增强读者的工程设计能力和素质。

(5) 引入嵌入式系统的软硬件协同设计及基于 ARM 核的 SoC 设计技术

引入了嵌入式系统的软硬件协同设计及基于 ARM 核的 SoC 设计技术, 使读者不仅会使用现成集成电路芯片搭建应用系统, 还要了解如何使用已有 IP 内核或自行设计 IP 内核构建面向应用的片上系统, 使读者尽快掌握电子系统设计工程师必备的技术和工程设计方法。通过实验课这一平台, 为学生进一步掌握 SoC 系统设计技术提供了基本的知识体系结构。

为方便教师和读者, 本教材有配套的教学课件与教学实验装置, 感兴趣的教师[登录华信教育资源网](http://www.hxedu.com.cn)(<http://www.hxedu.com.cn>), 注册之后可[免费下载](#)本书的教学课件; 或将[咨询邮件](mailto:malan@phei.com.cn)发至 malan@phei.com.cn。

本书作者都是长期从事微机系统原理、嵌入式系统、ASIC/SoC 设计及通信系统设计的教学和科研的教师, 在教学和科研实践中积累了丰富的工程设计经验, 完成了大量国家及国际合作的嵌入式系统、ASIC/SoC 等研发项目, 取得了很好的社会和经济效益。本书中的技术专题, 都力争与实际应用有机结合, 所举的例子大多数是完整的、可操作的, 甚至有的直接来自科研实践。

全书共 12 章和 7 个附录。李广军组织拟定了编写大纲, 编写了第 1 章、第 3 章和第 12 章;

阎波编写了第2章和第5章；林水生编写了第4章、第6章及附录；黄乐天编写了第7章至第9章；周亮编写了第10章和第11章。

本书第1章简述了计算机/微处理器/嵌入式系统设计技术的最新技术现状及发展趋势；第2章介绍了计算机体系结构的演变及现代计算机系统的组织特点，基于简单模型机介绍计算机系统的基本工作原理；第3章介绍了微处理器的组成原理以及控制器、数据通路等主要核心功能部件的原理、内部结构与工程设计方法；第4章介绍了计算机系统中各部件之间的总线数据传输技术、总线分层结构、总线仲裁、总线操作、总线标准及总线接口技术；第5章介绍了常用存储器件的结构和特点、计算机系统中存储器的分层构建策略和关键技术、计算机系统中存储器模块的设计技术。第6章介绍了计算机系统输入/输出接口的概念、接口电路结构、主设备与从设备间接口电路的信息传输方式、并行接口电路原理和串行接口电路原理。第7章介绍了ARM微处理器内核的体系结构及编程模型。第8章介绍了ARM汇编指令的格式、寻址方式和功能。第9章介绍了ARM程序开发环境、汇编程序设计，以及汇编语言和C语言混合编程技术。第10章介绍了基于ARM微处理器的系统总体设计技术以及构造ARM微处理器最小硬件系统的流程与方法。第11章介绍了嵌入式软件系统结构及工作流程、ARM嵌入式软件系统的引导和加载、嵌入式Linux内核的移植等核心软件设计技术。第12章简要介绍了基于ARM核的SoC设计基础及嵌入式系统的软硬件协同设计方法。

本书可作为高校通信工程、电子信息工程、自动控制、集成电路等相关专业本科生的微机原理、嵌入式系统、计算机系统设计等课程的教材，对相关研发人员也有很好的实用参考价值。

作者得到了电子科技大学教务处、飞思卡尔、ARM、TI、ST等公司和电子工业出版社马岚编辑的大力支持。本书参考了国内外著名大学的专家和教授的大量著作及文献，并得到了国内和校内著名专家和教授的建议、帮助和支持，在此表示衷心感谢。作者希望本书能对我国高校和相关行业的微型计算机系统原理、嵌入式系统设计的教学和科研尽些微薄之力。尽管是第2版，本书还有许多不尽人意之处，我们盼望着使用本书的教师和读者提出宝贵的意见，也热切地期待得到同行的建议和指教。

作者

目 录

第 1 章 概述	(1)	2.2.2 模型机系统结构	(33)
1.1 计算机发展概述	(1)	2.2.3 模型机指令集	(36)
1.1.1 电子计算机发展概述	(1)	2.2.4 模型机工作流程	(37)
1.1.2 普适计算与泛在通信	(3)	2.3 微处理器体系结构的改进	(38)
1.2 集成电路与 SoC 设计	(8)	2.3.1 冯·诺依曼结构的改进	(39)
1.2.1 集成电路技术的发展	(9)	2.3.2 并行技术的发展	(43)
1.2.2 基于 IP 的 SoC 设计	(10)	2.3.3 流水线结构	(44)
1.3 先进的处理器技术	(13)	2.3.4 超标量与超长指令字结构	(48)
1.3.1 片上多核处理器(CMP)	(13)	2.3.5 多机与多核结构	(50)
1.3.2 流处理器(Stream Processor)	(15)	2.4 计算机体系结构分类	(52)
1.3.3 PIM(Processor In Memory)	(16)	2.5 计算机性能评测	(54)
1.3.4 可重构计算处理器	(17)	2.5.1 字长	(54)
1.4 嵌入式系统	(19)	2.5.2 存储容量	(54)
1.4.1 嵌入式系统的概念	(20)	2.5.3 运算速度	(55)
1.4.2 嵌入式系统的特点	(21)	参考文献	(56)
1.4.3 嵌入式系统中的处理器	(21)	习题	(56)
1.4.4 嵌入式系统的组成	(24)	第 3 章 微处理器体系结构及关键技术	(58)
1.4.5 嵌入式系统的发展现状与趋势	(25)	3.1 微处理器体系结构及功能模块简介	(58)
1.4.6 学习嵌入式系统的意义	(27)	3.1.1 处理器的主要功能及部件	(59)
参考文献	(28)	3.1.2 处理器的基本功能结构	(60)
习题	(28)	3.1.3 一个简化的处理器模型结构示例	(62)
第 2 章 计算机系统的结构组成与工作原理	(29)	3.2 处理器设计	(64)
2.1 计算机系统的基本结构与组成	(29)	3.2.1 处理器的设计步骤	(65)
2.1.1 计算机系统的层次模型	(29)	3.2.2 控制器的操作与功能	(66)
2.1.2 计算机系统的结构、组织与实现	(31)	3.2.3 随机逻辑控制器设计	(67)
2.2 计算机系统的工作原理	(32)	3.2.4 微程序(微码)控制器结构及设计	(70)
2.2.1 冯·诺依曼计算机架构	(32)	3.2.5 寄存器组设计	(73)
		3.3 指令系统设计	(74)

3.3.1	机器指令的组成	(74)	5.3.3	现代计算机的多层次存储 体系	(161)
3.3.2	指令格式	(76)	5.4	主存储器设计技术	(164)
3.3.3	指令类型	(77)	5.4.1	存储芯片选型	(165)
3.3.4	寻址方式	(78)	5.4.2	存储芯片的组织形式	(165)
3.3.5	指令系统设计要点	(82)	5.4.3	地址译码技术	(169)
3.4	指令流水线技术	(82)	5.4.4	存储器接口设计	(174)
3.4.1	流水线技术的特点	(83)	参考文献		(176)
3.4.2	流水线操作的详细说明	(84)	习题		(176)
3.4.3	流水线的局限性	(85)	第6章	输入/输出接口	(179)
3.4.4	指令流水线设计	(87)	6.1	输入/输出接口基础	(179)
3.5	典型微处理体系结构简介	(90)	6.1.1	输入/输出接口的功能 与结构	(179)
3.5.1	ARM 体系结构简介	(90)	6.1.2	输入/输出端口编址	(182)
3.5.2	Intel x86 体系结构简介	(91)	6.2	接口地址译码	(184)
参考文献		(93)	6.3	接口信息传输方式	(185)
习题		(94)	6.3.1	程序查询传输方式	(185)
第4章	总线技术与总线标准	(95)	6.3.2	程序中断传输方式	(188)
4.1	总线技术	(95)	6.3.3	直接存储器访问(DMA) 方式	(195)
4.1.1	总线技术概述	(95)	6.3.4	通道方式	(198)
4.1.2	总线仲裁	(100)	6.4	并行接口	(198)
4.1.3	总线操作与时序	(103)	6.4.1	无握手信号的并行接口	(199)
4.2	总线标准	(107)	6.4.2	带握手信号的并行接口	(203)
4.2.1	片内 AMBA 总线	(108)	6.4.3	可编程并行接口	(205)
4.2.2	PCI 系统总线	(116)	6.5	串行接口	(209)
4.2.3	异步串行通信总线	(127)	6.5.1	同步串行接口	(209)
参考文献		(133)	6.5.2	异步串行接口	(212)
习题		(133)	参考文献		(214)
第5章	存储器系统	(135)	习题		(214)
5.1	存储器件的分类	(135)	第7章	ARM 微处理器编程模型	(216)
5.1.1	按存储介质分类	(135)	7.1	ARM 内核体系结构	(216)
5.1.2	按读写策略分类	(138)	7.1.1	ARM 体系结构版本	(216)
5.2	半导体存储芯片的基本结构 与性能指标	(139)	7.1.2	ARM 内核简介	(220)
5.2.1	随机存取存储器	(139)	7.2	ARM 编程模型	(225)
5.2.2	只读存储器	(146)	7.2.1	处理器工作状态	(225)
5.2.3	存储器芯片的性能指标	(154)	7.2.2	处理器运行模式	(226)
5.3	存储系统的层次结构	(156)	7.2.3	寄存器组织	(226)
5.3.1	存储系统的分层管理	(156)			
5.3.2	虚拟存储器与地址映射	(158)			

7.2.4	数据类型和存储格式·····	(230)	9.2.4	其他常用伪指令·····	(279)
7.2.5	异常·····	(231)	9.2.5	汇编语言中常用的符号·····	(282)
参考文献	·····	(235)	9.2.6	常用运算符和表达式·····	(283)
习题	·····	(235)	9.3	ARM 汇编语言程序设计·····	(285)
第 8 章	ARM 汇编指令 ·····	(236)	9.3.1	ARM 汇编语言程序结构·····	(285)
8.1	ARM 指令格式·····	(236)	9.3.2	ARM 汇编程序设计实例·····	(286)
8.1.1	ARM 指令的一般编码 格式·····	(236)	9.4	ARM 汇编语言与 C/C++ 的 混合编程·····	(295)
8.1.2	ARM 指令的条件域·····	(237)	9.4.1	C 语言与汇编语言之间的 函数调用·····	(295)
8.1.3	指令的第二源操作数·····	(238)	9.4.2	C/C++ 语言和汇编语言的 混合编程·····	(300)
8.2	ARM 寻址方式·····	(240)	参考文献	·····	(304)
8.2.1	立即寻址·····	(240)	习题	·····	(304)
8.2.2	寄存器直接寻址·····	(240)	第 10 章	基于 ARM 微处理器的硬件 系统设计 ·····	(307)
8.2.3	寄存器移位寻址·····	(240)	10.1	基于 ARM 微处理器的系统 设计概述·····	(307)
8.2.4	寄存器间接寻址·····	(241)	10.2	S3C2440A 微处理器·····	(307)
8.2.5	基址变址寻址·····	(241)	10.2.1	S3C2440A 微处理器 简介·····	(307)
8.2.6	多寄存器直接寻址·····	(243)	10.2.2	S3C2440A 内部结构及 主要特性·····	(308)
8.2.7	相对寻址·····	(243)	10.2.3	S3C2440A 外部引脚·····	(311)
8.2.8	堆栈寻址·····	(243)	10.3	ARM 微处理器最小硬件 系统·····	(311)
8.3	ARM 指令集·····	(244)	10.3.1	电源模块·····	(312)
8.3.1	数据处理指令·····	(244)	10.3.2	时钟模块·····	(313)
8.3.2	转移指令·····	(254)	10.3.3	复位模块·····	(313)
8.3.3	程序状态寄存器访问 指令·····	(256)	10.3.4	JTAG 调试接口模块·····	(315)
8.3.4	加载/存储指令·····	(258)	10.3.5	外部存储器模块·····	(315)
8.3.5	异常产生指令·····	(265)	10.4	人机交互接口·····	(318)
8.3.6	伪指令·····	(266)	10.4.1	键盘与 LED 接口·····	(318)
参考文献	·····	(268)	10.4.2	LCD 显示接口·····	(320)
习题	·····	(268)	10.4.3	触摸屏接口·····	(323)
第 9 章	ARM 程序设计 ·····	(269)	10.5	通信接口·····	(327)
9.1	ARM 程序开发环境·····	(269)	10.5.1	串行通信接口·····	(327)
9.1.1	常用 ARM 程序开发环境 简介·····	(269)	10.5.2	其他通信接口·····	(332)
9.1.2	RVDS 开发环境简介·····	(272)			
9.2	汇编语言伪指令·····	(273)			
9.2.1	符号定义伪指令·····	(273)			
9.2.2	数据定义伪指令·····	(274)			
9.2.3	汇编控制伪指令·····	(275)			

参考文献	(333)	12.2.2 SoC 设计中的关键技术	(358)
习题	(334)	12.3 SoC 的片上总线	(361)
第 11 章 基于 ARM 微处理器的软件		12.3.1 片上总线的特点	(361)
系统设计	(335)	12.3.2 SoC 中常用的总线标准	(362)
11.1 嵌入式软件系统结构及工作		12.4 SoC 系统的设计流程	(365)
流程	(335)	12.4.1 SoC 系统芯片的系统级	
11.1.1 嵌入式软件系统结构	(335)	设计	(366)
11.1.2 嵌入式软件系统工作		12.4.2 系统芯片的设计流程	(367)
流程	(336)	12.5 基于 ARM 内核的 SoC 系统	
11.2 嵌入式软件系统的引导		设计	(368)
和加载	(337)	12.5.1 常用 ARM CPU 内核所使	
11.2.1 Bootloader 程序的基本		用的总线接口	(368)
概念	(338)	12.5.2 基于 ARM 的 SoC 结构	(369)
11.2.2 U-Boot 的分析与移植	(339)	12.5.3 基于 ARM 内核的 SoC 系	
11.3 嵌入式 Linux 内核的移植	(341)	统应用设计举例	(376)
11.3.1 Linux 内核的结构	(344)	参考文献	(380)
11.3.2 内核的配置与裁减	(345)	习题	(380)
11.3.3 内核的编译	(347)	附录 A ASCII 码表	(381)
11.3.4 Linux 内核配置编译		附录 B ARM 实验系统简介	(382)
实例	(348)	附录 C AT91SAM9263 引脚排列及	
11.4 Linux 下驱动程序设计		信号名称表	(384)
示例	(350)	附录 D S3C2440A 引脚排列及信号	
参考文献	(354)	名称表	(386)
习题	(354)	附录 E MX21 引脚排列及信号	
第 12 章 基于 ARM 微处理器核的		名称表	(388)
SoC 设计	(355)	附录 F ARM 指令速查表及符号	
12.1 概述	(355)	含义	(389)
12.2 SoC 设计	(356)	附录 G Linux 常用命令表	(399)
12.2.1 SoC 的典型结构	(357)		

第 1 章 概 述

信息的生成、获取、存储、传输、处理及其应用是现代信息科学的六大组成部分，其中信息的获取和处理是信息技术产业链上重要的环节之一，没有它就没有信息的传输、处理和应用。

我们知道，IT 行业的四大定律是：

摩尔定律 (Gordon Moore's Law)：处理器内晶体管集成度每 18 个月翻一番；

贝尔定律 (Bell's Law)：如果保持计算能力不变，微处理器的价格每 18 个月减少一半；

吉尔德定律 (George Gilder's Law)：未来 25 年里，主干网的带宽将每 6 个月增加一倍；

梅特卡夫定律 (Bob Metcalfe's Law)：网络价值与网络用户数的平方成正比，或者说网络的利用价值等于用户数的平方。

在这四大定律中，两条涉及微处理器，两条与通信网络有关，表明了微处理器和通信网络在 IT 中的重要地位，其中：

- 摩尔定律和贝尔定律描述了芯片的计算能力、价格与规模之间的关系，指出了 IT 产品变得更快、更小、更便宜的发展趋势，为“计算的普及运用”提供了物质基础。
- 吉尔德定律给出了通信系统带宽的发展趋势。
- 梅特卡夫定律定量描述了单机与连网之间的巨大差别和网络的重要价值，反映了数据/计算机通信网相对于其他通信网络的效率差别。

由上可知，与微处理器密切相关的集成电路、通信网络和计算机技术是 IT 业的三大支柱，已形成业界的共识。

1.1 计算机发展概述

根据摩尔定律，集成电路芯片上所集成的晶体管和电阻器等的数目，每隔 18 个月就翻一番。如何更合理地利用新器件，最大限度地发挥其潜力，设计并构成综合性能指标最佳的计算机系统，除了半导体器件与设备、通信与网络技术变革之外，还要靠计算机系统结构方面的不断改进。计算机体系结构的发展不断改变人们对计算机的整体认识，促进了计算机技术与系统的飞速发展与广泛应用。

1.1.1 电子计算机发展概述

人类文明发展早期就遇到了计算问题，古人类生活过的岩洞里的刻痕，表明他们在计数和计算。最早在中国两河流域出现的古代算筹，以及在中国真正得到发展和广泛使用的算盘，都是古代人类寻求计算工具的辉煌成就。

工业革命使计算问题日益复杂，于是 1642 年法国物理学家帕斯卡发明了机械性的齿轮式加减法器；1673 年德国数学家莱布尼兹发明了乘除器；1820 年出现了商品机械计算器；19 世纪 30 年代至 40 年代英国发明家查里斯·巴贝齐设计了差分机和分析机。

算法理论基础研究在 20 世纪 30 年代至 40 年代取得了突破性进展,出现了几个有普遍意义的计算模型。

英国数学家艾兰·图灵在 20 世纪 40 年代提出一种自动计算机器模型——“图灵机”,并提出图灵原理:一切可能的机械式计算过程都能由图灵机实现。他还提出了“通用图灵机”的概念,它能实现所有图灵机的功能,不必造加法机、乘法机或者最大公约数机,只要造出与“通用图灵机”功能等价的机器,就能解决所有计算问题。

图灵机被公认为现代计算机的原型,图灵机奠定了现代数字计算机的基础。

1946 年,美国数学家冯·诺依曼根据图灵的设想,提出了计算机的基本原理:存储程序原理,据此造出的计算机 EDSAC (Electronic Delay Storage Automatic Calculator, 爱达赛克) 和 EDVAC (Electronic Discrete Variable Automatic Computer, 爱达瓦克) 分别于 1949 年和 1952 年在英国剑桥大学和美国宾州大学运行。

EDSAC 是第一台存储程序计算机,又被称为冯·诺依曼计算机(见图 1-1),是所有现代计算机的原型和范本。EDVAC 是最先开始研究的存储程序计算机,它用了 18 000 个电子管,于 1952 年完成。

在 1955 年至 1965 年间造出了晶体管计算机,用于算术逻辑运算的真空管被晶体三极管所取代。尺寸极小的磁芯用在随机存储器中,磁鼓则用于辅助存储。这些元件将计算机的速度提高了 100~1000 倍。

晶体管计算机采用晶体管作为开关元件,使计算机的可靠性得到提高,体积大大缩小,运算速度加快,其外部设备和软件也越来越多,并且高级程序设计语言应运而生,开发出了如 FORTRAN 和 Algol 这样的高级语言。

在 1957 年,德州仪器(Texas Instruments, TI)公司发明了平面晶体管,该公司的工程师基尔比在此基础上制造出第一块 IC(Integrated Circuit),集成了 1 个晶体管、1 个电容和 1 个电阻。之后,基尔比在美国无线电工程师学会(IRE)的一次会议上宣布了“固体电路”(Solid Circuit)的出现,这就是以后的“集成电路”的代名词。1959 年开始了集成电路时代,1971 年 Intel 公司推出的微处理器芯片上只有 2300 个晶体管,到了 1982 年,Intel 80286 微处理器上有 13.4 万个晶体管。

中、小规模集成电路计算机时代是以集成电路作为基础元件的,这是微电子与计算机技术相结合的一大突破,并且有了操作系统。

半导体技术发展的现实正如摩尔定律的预言,科学家和工程师解决了一个又一个技术障碍,使 MOS 工艺每隔几年线宽就缩小二分之一。计算机进入大规模集成电路(Large Scale Integration)和超大规模集成电路(VLSI)时代,软件方面发展了数据库系统、分布式操作系统和网络软件等。

超大规模集成(Very Large Scale Integration, VLSI)技术的发展于 1978 年推动了计算机的发展,于是单片含有 29 000 个晶体管的 Intel 8086 微处理器成为技术现实。它是第一个单片的 16 位微处理器,并有一个较慢但较便宜的后继型号,即 Intel 8088。Intel 8088 在 1981 年被 IBM 选为原始的 IBM PC(个人计算机)的 CPU。1980 年 IBM PC 的诞生标志着开始进入个

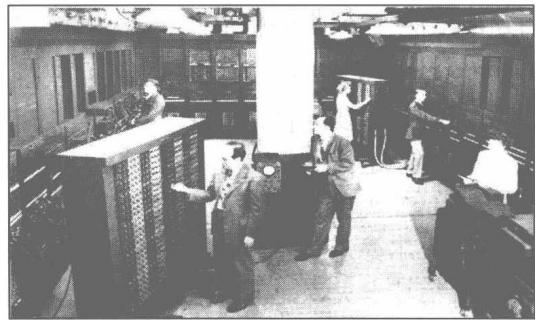


图 1-1 EDSAC 是第一台存储程序计算机

人计算机时代。作为一种新的设计思想，人们提出了精简指令集计算机(RISC)的发展方向，与复杂指令集计算机(CISC)相对立。MIPS是在1985年推出的第一台RISC机。SPARC是在1987年推出的第一台RISC工作站。微型计算机的广泛使用将计算机系统的发展从集中式主机(Centralized Mainframe)推向了由大量微型计算机通过网络相连的分布式系统。超级巨型计算机也从集中式多处理机移向分布式工作站集群(Distributed Clusters Of Workstations, DCOW)。因特网(Internet)已发展为全球最大的分布计算机系统，“网络即计算机”(the network is a computer)的理想终将实现。

甚大规模集成电路(Ultra Large Scale Integration, ULSI)已成为现实，单片微处理器包含了数亿个晶体管。个人计算机和操作系统不断成长，在标准操作系统控制的标准硬件系统平台上，数以千计的开发人员为这些系统编写程序。就软件而论，占支配地位的语言变为ADA, C++, Java, HTML和XML。此外，基于通用建模语言(UML)的图形设计语言开始出现。

计算机正迈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。计算的发展过程如图1-2所示。

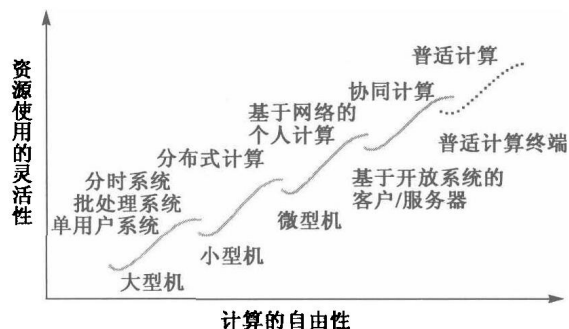


图 1-2 计算的发展过程示意图

1.1.2 普适计算与泛在通信

普适计算与泛在通信的核心思想是，小型、便宜、网络化的计算和通信设备广泛分布在日常生活的各个场所，计算和通信设备将不只依赖命令行、图形界面进行人机交互，而更依赖“自然”的交互方式，计算/通信设备的尺寸将缩小到毫米级甚至纳米级。

普适计算和泛在通信技术是IT领域的研究热点，其含义十分广泛，涉及的技术包括移动通信技术、无线传感器网络/物联网技术、小型计算设备/软件技术及操作系统技术等。

1. 普适计算

普适计算(Pervasive Computing)也称为泛在计算(Ubiquitous Computing)。

施乐研究中心的PARC首席科学家Mark Weiser，在1991年发表在《科学美国人》杂志上的一篇文章，缔造了一个交叉学科的庞大研究领域。他预言了一种“后桌面电脑时代”的全新人机交互方式，并称之为“泛在计算”。

Mark Weiser在1991年说过：“最深刻和强大的技术是看不见的技术，是那些融入日常生活并消失在日常生活中的技术。只有当计算进入人们的生活环境，而不是强迫人们进入计算的世界时，机器的使用才能像林中漫步一样新鲜有趣。”

如今，有上万名来自美国、欧洲、日本、韩国和世界其他地方的计算机、认知科学和电子工程学者，汇聚于泛在计算领域，为最终实现Mark Weiser的预言而努力着。

简单地讲，泛在计算强调的是将“计算力”嵌入到人们的日常生活中，做到无处不在(ubiquitous)而又不被人注意。实现泛在计算的动机(motivation)，主要来自以下两个直觉。其一，任何真正为人类社会带来巨大变革的技术，往往是那些融入生活而消失于无形的东西，比如当年的造纸术与印刷术。今天的互联网，也正在朝这个方向迅速靠拢。其二，未来人类最稀

缺的,并非计算资源,而是注意力资源。当今社会,各种信息、服务和电子设备都在争夺用户的注意力,泛在计算特别关注所谓的 invisibleness 和环境感知(Context Awareness)。

环境感知,是泛在计算技术的核心。过去数年间全球蓬勃发展的基于位置的服务(Location-based Service),其实是环境感知服务的一个小分支。它的目的就是节省用户的注意力资源,在传感器与智能算法的帮助下,自动探测用户需求,并做出应对。我们耳熟能详的智能家庭(Smart Home),就是环境感知服务的一个具体实现。

大概是因为诞生于一种预言式研究动机的缘故,不少人对泛在计算,尤其是环境感知服务存在一个疑问,那就是它能否真正被用户接受。从目前学术界研究成果面临的技术转化(Technology Transfer)难度来看,这个担心是有道理的。事实上,有很多因素,比如用户隐私问题、基础设施缺乏、启动成本高等,都在阻碍着大部分泛在计算技术进入主流市场。在创新扩散理论中,技术采用生命周期中的鸿沟(chasm)模型,又一次在泛在计算领域体现了它的解释力。

普适计算的意图是:希望嵌入到环境或日常工具中的计算能够使人更自然地和计算机交互。而普适计算的显著目标之一则是使计算机设备可以感知周围环境的变化,从而根据环境变化自动做出基于用户需要或设定的行为。比如,手机感知现在用户正在开会这个环境而自动切换为静音模式,并且自动答复来电者“主人正在开会”。普适计算意味着不用为了使用计算机而去寻找一台计算机,无论走到哪里,无论什么时间,都可以根据需要获得计算能力。

2. 泛在通信网络、传感器网络与物联网

(1) 泛在通信与网络

实质上,普适计算技术运用了无线电网络的科技,让人们在不受时空限制的环境下享用资讯;而与一般的行动计算(Mobile Computing)的不同之处在于具有环境感知的特性。普适运算技术可以通过感知个人所在的位置、所处的环境资讯、个人的情形及任务,来提供最有效能的使用环境。

这样,泛在通信通过提供人与人之间的通信,广泛涉及人与物、物与物的通信,深深地影响了我们的生活、学习、工作和娱乐。

泛在网络将最广泛地实现终端技术融合、接入技术的多样化和网络技术的融合,如手机和 RFID 技术的结合、无线网络和宽带网络等多种接入技术的结合等。

泛在网络在人们的日常生活中已得到了广泛的应用,比如智能家居、智能手机和物联网等。泛在通信广泛用于各种家电和电子产品的设备中,如电饭锅、微波炉和冰箱等家电,以及 DVD 机、数字电视等影音产品。泛在通信网络为消费者提供的是一种全新的无所不在的数字生活方式。利用最新的短距离无线通信技术(RFID)、智慧设备管理技术和多媒体处理技术,即可将传统的家电、PC 和手机等家用产品升级为网络家电产品,并构成一个连接家庭内部全部设备的家庭网络。随时随地利用智能家居的“家庭成员”(手机、PC 和电视等),就能够对家里的一切实施监控,并实现资讯公用与沟通,一切将尽在主人掌握之中。同时,也为家电服务带来了革命性的变化。所有的零件都进入了数据库,透过家电内部的芯片模组和软件控制,当某一个零件出现故障或者需要更换时,不用拨打服务电话,零件可以自动发出指令给控制中心,如果只是一些简单的升级程式,控制中心一端的工作人员轻点鼠标就可以维修完毕。

(2) 无线传感器网络

无线传感器网络 (Wireless Sensor Network, WSN) 也可称为泛在传感器网络 (Biquitous Sensor Network) 或智能传感器网络 (Intelligent Sensor Network)。

无线传感器网络技术被认为是 21 世纪里能够对信息技术、经济和社会进步发挥重要作用的技术, 该技术有巨大的发展潜力, 其成果的应用将会对人类未来的生活产生重要的影响。无线传感器网络技术的应用领域十分广泛, 可以应用于建筑环境中对部分物理量进行监测控制、环境监测、军事国防领域、交通安全管理、矿山安全监测等领域。

无线传感器网络是由多个节点组成的面向任务的无线自组织网络。它综合了传感器技术、嵌入式计算技术、现代网络及无线通信技术、分布式信息处理技术等, 通过各类微型传感器对目标信息进行实时监测, 由嵌入式计算模块对信息进行处理, 并通过无线通信网络或其他形式的传输网络将信息传送至远端监控中心。

无线传感器网络由无线传感器监测节点、网关节点 (Sink 节点)、传输网络和远程监控中心这 4 个基本部分组成, 其组成结构如图 1-3 所示。

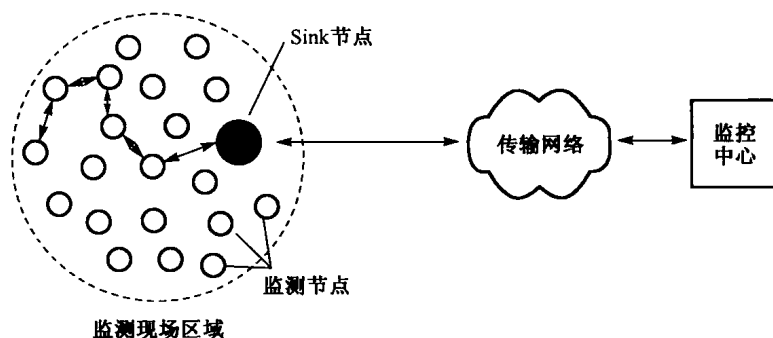


图 1-3 无线传感器网络的基本组成部分

无线传感器网络的微型传感器具有感知、计算和通信能力, 它主要是由感知单元、传输单元、存储单元和电源组成, 在完成对感知对象的信息采集、存储和简单的计算后, 通过传输网络传送给远端的监控中心。无线传感器网络由一组微型传感器通过 Ad Hoc 方式组成, 网络中的传感器可以协作地感知、采集和处理被监控区域的感知对象的信息及数据, 发布给使用一定形式终端设备的用户。无线传感器网络属于 Ad Hoc 网络, “Ad Hoc” 在拉丁语中意思是“专用的、特定的”, 因此 Ad Hoc 网络通常又称为无固定设施的网络或自组织网络, 它能够快速、灵活和方便地自动组网。

无线传感器监测节点分布在需要监测的区域, 监测特定的信息和物理参量等; 网关节点将监测现场中的许多传感器节点获得的被监测数据收集汇聚后, 通过传输网络传送到远端的监控中心。

传输网络为传感器之间、传感器与监控中心之间提供通畅的通信, 可以在传感器与监控终端之间建立通信路径。

无线传感器网络中的部分节点或者全部节点可以移动, 但网络节点发生较大范围内的移动, 势必会使网络拓扑结构发生动态变化。节点间以 Ad Hoc 的自组织网方式进行通信, 网络中每个节点既能够对现场环境进行特定物理量的监测, 又能够接收从其他方向传感器送来的监测信息数据, 并通过一定的路由选择算法和规则将信息数据转发给下一个接力节点。网络中每个节点还具备动态搜索、定位和恢复连接的能力。

无线传感器网络的感知对象具体地表现为被监控对象的物理量信息,如温度、湿度、速度和有害气体的含量等。

无线传感器网络是一门融合多种新科技并具有鲜明跨学科特点的新技术,其特点如下。

- 自组织方式的组网。组网不依赖任何固定的网络设施,传感器节点通过分布式网络协议形成自组织网络,能够自动调整来适应节点的移动、加入和退出,网络中多个激活节点可以快速、自动地组成一个独立的网络。
- 无中心结构。网络中所有节点地位对等,并构成一个对等式网络。节点可以随时加入或离开网络,网络中的部分节点发生故障不影响整个网络的运行。
- 网络有动态拓扑。无线传感器网络中的节点可能由于电池能量耗尽或故障从网络中退出,也可能按照设定的程序从网络运行中退出;网络外的无线传感器节点可以随时加入网络中;传感器节点具有移动属性。
- 采用多跳路由进行路由接力传递。无线传感器网络中的节点通信距离较短,节点只能与相邻节点直接通信。要实现在网络覆盖范围内的较远节点通信,需要通过中间节点进行路由接力传递数据。无线传感器网络中的多跳路由是由普通网络节点完成的,每个节点既能发送信息,又能转发信息,节点采用多跳接力来完成各个传感器节点向 Sink 节点的数据发送。
- WSN 的空间位置寻址。WSN 中的传感器节点一般不要求拥有全球唯一的标识,数据采集发生在某一节点,用户关注的是数据所属的空间位置,可采取空间位置寻址。
- 高冗余。由于大型的无线传感器网络节点数量众多,因此要使无线传感器网络具有较高的节点、网络链路及采集数据的冗余特性,来保证整个系统的工作高可靠性和容错能力。
- 硬件资源及功能有限。无线传感器节点由于受价格、体积和携带能源的限制,其计算、数据处理能力、存储空间有限等因素,限制了在节点操作系统设计中,协议层次及内容不能过于复杂。
- 电源容量限制。传感器节点通常由电池供电,电池的容量一般不会很大。由于长期工作在无人值守的环境中,通常无法给传感器节点充电或者更换电池,一旦电池用完,节点也就失去了作用。这就要求在无线传感器网络运行的过程中,每个节点都要最小化自身的能量消耗,获得最长的工作时间;因而无线传感器网络中的各项技术和协议的使用一般都以节能为前提。

(3) 物联网

1995年,比尔·盖茨在《未来之路》(The Road Ahead)书中首次提出了“物—物”相连的雏形,1999年EPCglobal联合100多家企业成立IOT联盟并正式提出物联网概念。

从技术角度上理解,物联网是指物体通过智能感应装置,经过传输网络,到达指定的信息处理中心,最终实现物与物、人与物之间的自动化信息交互与处理的智能网络。

从应用角度上理解,物联网是指把世界上所有的物体都连接到一个网络中,形成“物联网”,然后“物联网”又与现有的互联网结合,实现人类社会与物理系统的整合,达到以更加精细和动态的方式来管理生产和生活。

物联网的定义是:物联网是通过射频识别(RFID)、红外感应器、全球定位系统、激光扫描器等设备,按约定的协议,把任何物品与互联网连接起来进行信息交换和通信,以实现智能化识别、定位、跟踪、监控和管理的一种网络。

因此，物联网是指物体通过智能感应装置，经过传输网络，到达指定的信息处理中心，最终实现物与物、人与物之间的自动化信息交互与处理的智能网络。

物联网的三个重要特征如下。

- ① **全面感知**。利用 RFID、传感器和二维码等感知设备随时、随地获取物体的信息。
- ② **可靠传递**。通过各种电信网络与互联网的融合，将物体的信息实时准确地传递出去。
- ③ **智能处理**。利用云计算和模糊识别等各种智能计算技术，对海量的数据和信息进行分析和处理，对物体实施智能化的控制。

在物联网的世界里，所有“物”都有一个电子识别标志，通过无所不在的传感器和网络可以传递到互联网上，实现任何物体在任何时间、任何地点尽在掌握中。例如图书馆里的书摆在什么位置，物流公司运送的货物已经到了哪一站，通过远程控制机械手术系统来完成手术，回家之前可以先开空调把室温调节到合适的温度等。在物联网时代，对于购买的每种食品都可以通过手机轻易地了解它的生产日期和生产厂家，从而杜绝假货；今后，若想了解路边一棵树的名称和概况，就把手机对准它的电子标签，这样即可获得相关信息。物联网能够使物品的供应链具备智能化，直至使智能遍及整个生态系统。这不仅可以提高管理的效率，更重要的是大大提高了物品和各种自然资源使用的效率。

1999年，美国麻省理工学院建立了“自动识别中心”，前瞻性地提出了“万物均可通过网络互连”的论点，“物联网”（The Internet of Things）概念由此产生。目前人们普遍认为，在未来10年左右的时间里，物联网将得到大规模应用，并将根本性地改变世界的面貌。

物联网将自然而深刻地融入到人们的日常生活及工作之中，实现人人、时时、处处、事事的信息通信服务。

物联网的体系结构可分为：感知延伸层、网络层、业务和应用层，每一层又涉及诸多关键技术，如图1-4所示。物联网的关键技术包括三方面：第一，终端的数据采集、处理、传输、终端网络的部署和协同等，以无线传感器网络和 RFID 技术为代表；第二，异构的接入网络和基础的核心网络，包括基础的 NGN 核心网和 3G、Wi-Fi 和蓝牙等接入技术；第三，由中间件、信息开放平台和服务支撑平台构成的应用支撑子层，以及物联网应用领域示范系统等。

可以说，物联网实现了网络的融合、资源的共享、应用的互通及终端的互连，并把所有信息服务综合在一起。这样来看，物联网应该是一个“梦幻世界”，但物联网实际距离我们并不遥远。我国运营商已经推出了射频支付、远程抄表、家庭安全监控等应用，这些都是物联网的初级表现。

当然，构建无所不在的传感系统有非常多的困难，物品基础信息的整理与录入很难，实现智能化的应用更难。物联网面临如下五个主要技术问题。

- **技术标准问题**。世界各国存在不同的标准。2009年9月，中国传感器网络标准工作组正式成立了 PG1（国际标准化）等8个专项组，开展具体的国家标准的制定工作。
- **安全问题**。信息采集频繁，其数据安全也必须重点考虑。
- **协议问题**。物联网是互联网的延伸，在物联网核心层面是基于 TCP/IP 的，但在接入层面，协议类别五花八门，有 GPRS/CDMA、短信、传感器、有线等多种通道，物联网需要一个统一的协议栈。
- **IP 地址问题**。每个物品都需要在物联网中被寻址，就需要一个地址。物联网需要更