



高等院校计算机应用技术系列教材

嵌入式计算机硬件体系设计

王平 何为 郭珂 编 著



清华大学出版社 • 北京交通大学出版社

高等院校计算机应用技术系列教材

嵌入式计算机硬件体系设计

王 平 何 为 郭 珂 编著

清华大学出版社
北京交通大学出版社
· 北京 ·

内 容 简 介

基于 ARM 内核的嵌入式计算机系统是目前 32 位微处理器的主流芯片, 被广泛应用于工业制造、过程控制、仪器仪表、航空航天、电子消费类产品等领域, 本书是根据编者多年的开发经历进行的总结与归纳, 能够让读者快速建立起嵌入式计算机系统开发的基本思想、基本流程, 并对开发过程中可能设计的问题进行详细的解答, 使读者能够在嵌入式系统开发中快速入门。

本书重点介绍了嵌入式计算机系统的基本构成、嵌入式 ARM 微处理器、基于 ARM 微处理器的硬件电路设计、ARM 硬件体系下嵌入式操作系统的移植、面向 ARM 硬件体系的 Linux 驱动程序设计、ARM 硬件体系下系统程序设计进阶、基于 ARM 的工业内窥镜设计实例、基于 ARM 的电阻抗成像采集系统的设计实例。

本书适合作为计算机及电子相关专业的教材, 也适合做嵌入式领域相关研究人员的参考书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签, 无标签者不得销售。

版权所有, 侵权必究。侵权举报电话: 010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

嵌入式计算机硬件体系设计/王平, 何为, 郭珂编著. —北京: 清华大学出版社; 北京交通大学出版社, 2011. 11

(高等院校计算机应用技术系列教材)

ISBN 978-7-81123-716-0

I. ① 嵌… II. ① 王… ② 何… ③ 郭… III. ① 硬件-设计-高等学校-教材
IV. ① TP303

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 224593 号

责任编辑: 郭东青

出版发行: 清华大学出版社 邮编: 100084 电话: 010-62776969

北京交通大学出版社 邮编: 100044 电话: 010-51686414

印刷者: 北京交大印刷厂

经 销: 全国新华书店

开 本: 185×260 印张: 17 字数: 424 千字

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

书 号: ISBN 978-7-81123-716-0/TP·671

印 数: 1~4 000 册 定价: 27.00 元

本书如有质量问题, 请向北京交通大学出版社质监组反映。对您的意见和批评, 我们表示欢迎和感谢。

投诉电话: 010-51686043, 51686008; 传真: 010-62225406; E-mail: press@bjtu.edu.cn。

前 言

基于 ARM 内核的嵌入式计算机系统具有功能强大、低功耗的特点，是 32 位微处理器的主流芯片，大量应用于工业制造、过程控制、通信、仪器仪表、汽车、船舶、航空航天、军事装备、电子消费类产品等领域，但嵌入式计算机硬件设计是一个公认的难点，国内第一手资料也较为少见。

本书参照国内外最新的资料，结合作者的实际科研工作，全面描述了基于 ARM 内核芯片的嵌入式计算机硬件设计的主要过程和关键步骤，特别是针对在实际开发过程中嵌入式计算机主板的设计、启动程序的移植和硬件驱动程序设计等方面进行了较为详细的描述，结合作者丰富的设计经验，对初学者快速进入嵌入式计算机开发领域有明显的帮助。另外，读者完成了基于 ARM 的嵌入式硬件体系基础知识的学习后，本书提供了作者实际完成的两个详细开发实例，可供读者加深理解。如果读者希望从这两个实例的硬件环境到软件编程无缝连接，还可以参考作者另外一本书《基于 ARM 的嵌入式 QT 软件开发技术》（清华大学出版社、北京交通大学出版社）。通过系统的阅读，可以帮助希望成为嵌入式计算机开发工程师的读者，轻松进入面向硬件的嵌入式系统开发工作。

本书提供的电路和程序是经过作者设计制作后，获得运行并达到设计要求的电路和程序，其中程序主要是面向应用的，因此可能在语句结构上不是最优，电路设计上也不尽完善，希望有经验的读者提出批评。

编 者
2011 年 11 月

重庆大学电工电子实验教学中心
重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室

目 录

| | |
|---------------------------------|----|
| 第 1 章 嵌入式计算机系统基本构成 | 1 |
| 1.1 嵌入式系统概述 | 1 |
| 1.1.1 嵌入式系统的组成 | 1 |
| 1.1.2 嵌入式系统的特点 | 2 |
| 1.1.3 嵌入式系统的发展 | 3 |
| 1.1.4 嵌入式系统的应用 | 6 |
| 1.2 嵌入式处理器 | 7 |
| 1.2.1 嵌入式处理器的种类 | 7 |
| 1.2.2 ARM 微处理器简介 | 8 |
| 1.3 嵌入式系统的组成 | 9 |
| 1.3.1 嵌入式系统的硬件 | 10 |
| 1.3.2 嵌入式系统的软件 | 11 |
| 1.4 嵌入式操作系统 | 12 |
| 1.4.1 Linux | 12 |
| 1.4.2 μ C/OS | 12 |
| 1.4.3 Windows CE | 13 |
| 1.4.4 VxWorks | 13 |
| 1.4.5 QNX | 13 |
| 习题 | 14 |
| 第 2 章 嵌入式 ARM 微处理器 | 15 |
| 2.1 嵌入式处理器内核 | 15 |
| 2.1.1 MIPS 核 | 15 |
| 2.1.2 ARM 核 | 15 |
| 2.1.3 PowerPC 核 | 16 |
| 2.1.4 68K/COLDFIRE 核 | 16 |
| 2.2 ARM 体系结构的发展 | 16 |
| 2.2.1 V1 版体系结构 | 16 |
| 2.2.2 V2 版体系结构 | 16 |
| 2.2.3 V3 版体系结构 | 17 |
| 2.2.4 V4 版体系结构 | 17 |
| 2.2.5 V5 版体系结构 | 17 |
| 2.2.6 V6 版体系结构 | 17 |
| 2.2.7 V7 版体系结构 | 17 |
| 2.3 ARM 体系结构的技术特征 | 18 |
| 2.3.1 单周期操作 | 18 |

| | | |
|--------------|---------------------------------|-----------|
| 2.3.2 | 采用加载/存储指令结构 | 18 |
| 2.3.3 | 固定的 32 位指令 | 18 |
| 2.3.4 | 三地址指令格式 | 18 |
| 2.3.5 | 多级指令流水线技术 | 18 |
| 2.4 | ARM 处理器工作状态与工作模式 | 19 |
| 2.4.1 | ARM 处理器工作状态 | 19 |
| 2.4.2 | ARM 处理器工作模式 | 19 |
| 2.5 | ARM 处理器寄存器组 | 20 |
| 2.5.1 | ARM 状态下的寄存器组 | 20 |
| 2.5.2 | Thumb 状态下的寄存器组 | 22 |
| 2.6 | ARM 处理器的异常中断 | 22 |
| 2.6.1 | ARM 异常种类及异常中断向量 | 23 |
| 2.6.2 | 异常中断的优先级 | 23 |
| 2.6.3 | ARM 异常中断的响应过程 | 24 |
| 2.6.4 | 从异常处理程序中返回 | 24 |
| 2.7 | ARM 的存储器格式及数据类型 | 26 |
| 2.7.1 | ARM 存储字数据的格式 | 26 |
| 2.7.2 | ARM 微处理器数据类型 | 27 |
| 2.8 | ARM 流水线技术 | 27 |
| 2.8.1 | 指令流水线处理 | 27 |
| 2.8.2 | ARM 的 3 级指令流水线 | 28 |
| 2.8.3 | ARM 的 5 级指令流水线 | 30 |
| 2.9 | ARM 处理器内核结构 | 30 |
| 2.9.1 | ARM 处理器内核概述 | 30 |
| 2.9.2 | ARM7TDMI 处理器内核 | 31 |
| 2.9.3 | ARM7TDMI 存储器接口 | 34 |
| 2.9.4 | ARM7TDMI 的调试接口 | 37 |
| 2.9.5 | ARM920T 处理器核 | 39 |
| 2.9.6 | ARM 的 AMBA 总线体系结构 | 40 |
| 2.9.7 | ARM 的 MMU 部件 | 41 |
| | 习题 | 47 |
| 第 3 章 | 基于 ARM 微处理器的硬件电路设计 | 48 |
| 3.1 | 硬件系统及外围接口电路设计 | 48 |
| 3.1.1 | 嵌入式主板的电源设计 | 49 |
| 3.1.2 | 内存 SDRAM 模块 | 49 |
| 3.1.3 | NorFlash 模块 | 50 |
| 3.1.4 | NandFlash 模块 | 50 |
| 3.1.5 | USB 模块 | 51 |
| 3.1.6 | CAN 总线通信模块 | 53 |
| 3.1.7 | RS-232 串行通信模块 | 54 |
| 3.1.8 | 音频输出模块 | 56 |

| | | |
|--------------|--|------------|
| 3.1.9 | 10/100 M 网卡模块 | 57 |
| 3.1.10 | LCD/VGA 接口模块 | 58 |
| 3.1.11 | 实时时钟模块 | 60 |
| 3.1.12 | SD/MMC 卡接口模块 | 60 |
| 3.1.13 | 嵌入式计算机主板实物图片 | 61 |
| 3.2 | 硬件设计中应该注意的一些问题 | 61 |
| 3.2.1 | 高频电路中的信号反射 | 62 |
| 3.2.2 | 高频电路中的信号串扰问题 | 66 |
| 3.2.3 | 高频电路设计中的电磁辐射 | 68 |
| 3.2.4 | 高频电路设计中的仿真 | 70 |
| 3.2.5 | PCB 设计的基本方法 | 72 |
| | 习题 | 75 |
| 第 4 章 | ARM 硬件体系下嵌入式操作系统的移植 | 76 |
| 4.1 | Boot loader 的介绍 | 76 |
| 4.1.1 | AT91RM9200 引导程序分析 | 76 |
| 4.1.2 | u-boot 介绍 | 81 |
| 4.1.3 | vivi 介绍 | 83 |
| 4.1.4 | u-boot 的移植 | 87 |
| 4.1.5 | ARM 程序的执行流程 | 89 |
| 4.1.6 | AT91RM9200 启动程序固化方法 | 91 |
| 4.2 | Linux 内核的移植 | 99 |
| 4.2.1 | 交叉编译 | 99 |
| 4.2.2 | Linux 内核介绍 | 102 |
| 4.2.3 | AT91RM9200 的 Linux-2.4.27 的移植 | 105 |
| 4.2.4 | Linux 内核配置选项介绍 | 106 |
| 4.2.5 | 编译 Linux 的内核基本步骤 | 113 |
| 4.3 | 文件系统介绍 | 114 |
| 4.3.1 | 嵌入式 Linux 文件系统的组成 | 114 |
| 4.3.2 | 制作 RAM Disk | 116 |
| 4.3.3 | 创建 JFFS2 文件系统 | 117 |
| 4.3.4 | 创建 NFS 文件系统 | 119 |
| | 习题 | 126 |
| 第 5 章 | 面向 ARM 硬件体系的 Linux 驱动程序设计 | 127 |
| 5.1 | 嵌入式 Linux 的设备管理 | 129 |
| 5.2 | 嵌入式 Linux 驱动程序开发的基本函数 | 132 |
| 5.2.1 | Linux 的中断 | 132 |
| 5.2.2 | Linux 的内存操作 | 133 |
| 5.2.3 | I/O 端口 | 134 |
| 5.2.4 | 定时器 | 134 |
| 5.3 | Linux 驱动程序的设备号 | 135 |
| 5.4 | 设备驱动的模块化编程 | 136 |

| | | |
|--------------|----------------------------|------------|
| 5.4.1 | Linux 驱动模块编程简介 | 136 |
| 5.4.2 | 关于阻塞型 I/O | 139 |
| 5.4.3 | 并发访问与数据保护 | 140 |
| 5.4.4 | 中断处理 | 140 |
| 5.4.5 | Linux 内核源代码的目录分布 | 141 |
| 5.4.6 | 驱动程序的调试 | 148 |
| 5.5 | 嵌入式 Linux 系统驱动程序的的分析 | 149 |
| 5.5.1 | 串口驱动程序的的分析 | 149 |
| 5.5.2 | 嵌入式 Linux 主板音频驱动的实现 | 151 |
| 5.5.3 | 嵌入式 Linux 的 demo 驱动模板演示与实现 | 156 |
| | 习题 | 161 |
| 第 6 章 | ARM 硬件体系下系统程序设计进阶 | 162 |
| 6.1 | 嵌入式系统的初始化过程 | 162 |
| 6.1.1 | 中断向量表 | 162 |
| 6.1.2 | 初始化存储器系统 | 163 |
| 6.1.3 | 初始化堆栈 | 164 |
| 6.1.4 | 初始化有特殊要求的端口与设备 | 165 |
| 6.1.5 | 初始化应用程序执行环境 | 165 |
| 6.1.6 | 改变处理器模式 | 166 |
| 6.1.7 | 呼叫主应用程序 | 167 |
| 6.2 | ARM 与 Thumb | 168 |
| 6.2.1 | ARM 的结构体系 | 168 |
| 6.2.2 | 堆栈的分配 | 169 |
| 6.2.3 | 在 0 地址处是 ROM 还是 RAM | 169 |
| 6.2.4 | 存储器地址重映射 | 170 |
| 6.2.5 | 根据目标存储器系统分散加载映像 | 172 |
| 6.3 | ARM 的异常处理机制 | 173 |
| 6.3.1 | 异常响应流程 | 174 |
| 6.3.2 | 异常处理函数的设计 | 177 |
| 6.3.3 | 可重入中断设计 | 180 |
| 6.4 | ARM/Thumb 的交互工作 | 181 |
| 6.4.1 | 需要交互的原因 | 181 |
| 6.4.2 | 状态切换的实现 | 182 |
| 6.4.3 | ARM/Thumb 之间的函数调用 | 183 |
| 6.4.4 | 交互程序之间的兼容性 | 184 |
| 6.4.5 | V5 架构的扩展 | 184 |
| 6.4.6 | Thumb-2 | 185 |
| 6.5 | ARM 高效程序的开发 | 185 |
| 6.5.1 | 变量定义 | 185 |
| 6.5.2 | 参数传递 | 187 |
| 6.5.3 | 循环条件 | 188 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 6.5.4 | 条件执行 | 188 |
| 6.5.5 | 混合编程 | 189 |
| 6.5.6 | 性能分析 | 190 |
| 习题 | | 191 |
| 第7章 | 基于ARM的工业内窥镜设计实例 | 192 |
| 7.1 | 基于嵌入式系统的工业内窥镜系统的实现 | 192 |
| 7.1.1 | 系统的功能需求 | 192 |
| 7.1.2 | 方案选择 | 192 |
| 7.1.3 | 工业内窥镜系统硬件 | 196 |
| 7.1.4 | 紫外线检测设备驱动设计及其实现 | 199 |
| 7.1.5 | USB摄像头驱动移植 | 201 |
| 7.1.6 | 设备驱动程序的编译和安装 | 202 |
| 7.2 | 软件开发环境的组成及软件开发的流程 | 202 |
| 7.2.1 | 虚拟机上安装和配置Linux系统 | 204 |
| 7.2.2 | 交叉编译环境的建立 | 206 |
| 7.2.3 | Qt/Embedded的软件开发实例 | 206 |
| 7.3 | 工业内窥镜系统软件设计与实现 | 207 |
| 7.3.1 | 内窥镜图像采集软件实现 | 208 |
| 7.3.2 | 视频图像采集 | 209 |
| 7.3.3 | GPRS数据通信 | 211 |
| 7.3.4 | Linux下串口编程 | 212 |
| 7.3.5 | Qtopia文件系统的挂接与大容量数据的存储 | 213 |
| 7.4 | 嵌入式计算机系统调试 | 214 |
| 习题 | | 215 |
| 第8章 | 基于ARM的电阻抗成像采集系统的设计实例 | 216 |
| 8.1 | 电阻抗成像系统简介 | 216 |
| 8.1.1 | 电阻抗成像技术 | 216 |
| 8.1.2 | 电阻抗成像系统的组成 | 216 |
| 8.1.3 | 阻抗成像数据采集系统的组成 | 217 |
| 8.2 | 基于ARM的阻抗成像采集系统的实现 | 217 |
| 8.2.1 | ARM处理器系统的设计 | 217 |
| 8.2.2 | 阻抗成像采集系统外围电路的设计 | 226 |
| 8.2.3 | FPGA在阻抗成像采集系统中的设计 | 232 |
| 8.3 | 阻抗成像采集系统测试 | 241 |
| 习题 | | 243 |
| 附录A | 嵌入式系统开发中涉及的文件共享、基本命令及相关术语 | 244 |
| 习题参考答案 | | 255 |
| 参考文献 | | 260 |

第 1 章 嵌入式计算机系统基本构成

1.1 嵌入式系统概述

通用计算机系统是指计算机连同一些常规的外设作为独立系统而存在，并非为特定用途专门设计。如一台个人计算机就是一个完整的计算机系统，整个系统存在的目的就是为人们提供一台能够处理数据的通用机器，人们可以用它进行程序设计和科学计算，也可以用它进行企业管理和休闲娱乐。但是有些系统却不是这样，如工业中的自动控制装置也是一个系统，系统中也有计算机，但是这种计算机是作为某个专用系统中的一个部分而存在的。这种嵌入到专用系统中的计算机，被称为嵌入式计算机。将计算机嵌入到系统中，一般并不是直接把一台通用计算机原封不动地安装到目标系统中，而是为目标系统构筑起特定用途的计算机，再把它有机地植入，甚至融入目标系统中。

嵌入式系统（Embedded System）是嵌入式计算机系统的简称。简单地说，嵌入式系统就是嵌入到目标体系中的专用计算机系统。嵌入式系统与通用计算机系统的本质区别在于系统应用不同，嵌入式系统是将一个计算机系统嵌入到对象系统中。这个对象可能是庞大的机器，也可能是小巧的手持设备，用户并不关心这个计算机系统的存在。嵌入性、专用性与智能性是嵌入式系统的三个基本要素。具体地讲，嵌入式系统是指以应用为中心，以计算机技术为基础，并且软硬件可裁剪，适用于专用系统，对功能、可靠性、成本、体积、功耗有严格要求的专用计算机系统。它融合了计算机软硬件技术、通信技术和微电子技术，是集成化电子技术发展过程中的一个标志性成果。

应该注意的是，嵌入式系统与嵌入式设备不是一个概念。嵌入式设备是指内部有嵌入式系统的产品和装置，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。随着后 PC 时代的到来，嵌入式系统技术目前已经成为了一个万众瞩目的焦点，广泛应用于信息家电、数据网络、工业控制、医疗卫生、航空航天等众多领域。

硬件方面，各大电子厂商相继推出了自己的专用嵌入式芯片，比如 ARM，MIPS 等；软件方面，相配套的 Linux、Windows CE、vXworks、pSOS、Nucleus 等嵌入式操作系统也出现了空前繁荣的局面。

1.1.1 嵌入式系统的组成

一个嵌入式系统包括硬件和软件两部分。硬件主要包括嵌入式微处理器、外围硬件设备等两大部分，而软件主要包括嵌入式操作系统和应用程序。为了提高系统性能，除了需要对硬件和软件进行优化外，还会引入总线的概念。

1. 硬件

与普通计算机系统类似，嵌入式系统仍然包括微处理器、存储器、输入和输出等设

备,但是它与一般的 PC 系统还有很大的区别。一般来讲,嵌入式系统在功耗、体积、成本、可靠性、速度、处理能力、电磁兼容性等方面均受到来自嵌入式设备要求的制约。

2. 软件

嵌入式软件是数字化产品的核心,PC 的出现使桌面软件得到了飞速发展,而数字化产品的广泛普及必将为嵌入式软件产业提供发展空间。操作系统控制着应用程序和硬件之间的交互作用,应用程序控制着系统的运行。

随着嵌入式应用系统架构的开发越来越复杂,嵌入式系统软件的开发往往较硬件滞后,导致软硬件的集成被推迟,甚至还可能导致研发出有设计错误的产品,错失市场机会,造成设计反复、成本高昂等问题。因此,软件成为嵌入式设备开发的关键,软件需要在标准化平台上运行,软件发展需要工具支持,软件发展不断促进标准的建立,如 MIPI、OpenGL、JSR184、ISR184 等,相继形成了嵌入式软件编制标准。

1.1.2 嵌入式系统的特点

嵌入式系统与以 PC 为代表的通用计算机系统相比,有较大的差别。不同的嵌入式系统其特点会有所差异,其主要特点概括如下。

1. 嵌入式系统是专用的计算机系统

嵌入式系统的硬、软件均是面向特定应用对象和任务设计的,具有很强的专用性和针对性。嵌入式系统提供的功能及应用都是预知的,相对固定,而不像通用计算机那样,有很大的随意性。嵌入式系统的硬、软件可裁剪性,能够满足对象要求的最小硬、软件配置。

2. 嵌入式系统须满足环境的要求

嵌入式系统的硬件和软件都必须具备高度可定制性。由于嵌入式系统要嵌入到对象系统中,因此它必须满足对象系统的环境要求,如物理环境(集成度高、体积小)、电气环境(可靠性高)、成本低(价廉)、功耗低(能耗少)等高性价比要求,另外还要求它能满足对温度、湿度、压力等自然环境的要求,民用和军用嵌入式系统对自然环境的要求差别很大。

3. 嵌入式系统必须能满足对象系统的控制要求

嵌入式系统必须配置与对象系统相适应的接口电路,如 A/D 接口、D/A 接口、PWM 接口、LCD 接口、SPI 接口、I²C 接口等。

4. 嵌入式系统是集计算机技术与各行业应用于一身的集成系统

嵌入式系统是将先进的计算机技术、半导体技术和电子技术与各个行业的具体应用相结合后的产物。这就决定了它必然是一个技术密集、资金密集、高度分散、不断创新的知识集成系统。

5. 嵌入式系统具有较长的生命周期

嵌入式系统和实际应用有机地结合在一起,它的更新、换代也是和实际产品一同进行

的，因此基于嵌入式系统的产品一旦进入市场，就具有较长的生命周期。

6. 嵌入式系统的软件固化在非易失性存储器中

为了提高执行速度和系统可靠性，嵌入式系统中的软件一般都固化在 Flash 等非易失性存储器中，而不是像通用计算机系统那样存储于磁盘等载体中。

7. 嵌入式系统的实时性要求

许多嵌入式系统都有实时性要求，需要有对外部事件迅速反应的能力。以前，嵌入式系统几乎是实时系统的代名词，近年来出现了许多不带实时要求的嵌入式系统，这两个词的区别才变得显著起来。但是，多数嵌入式系统还是有着不同程度的实时性要求。

8. 嵌入式系统需要专用开发环境和开发工具进行设计

嵌入式系统本身不具备自主开发能力，即使设计完成以后用户通常也不能对其中的程序功能进行修改，它必须有一套开发工具和相应的开发环境才能进行开发和修改。

1.1.3 嵌入式系统的发展

20 世纪 60 年代末期，随着微电子技术的发展，嵌入式计算机逐步兴起。随着计算机技术、通信技术、机电一体化进程不断加剧，嵌入式技术也在不断地更新换代，目前它已成为广大工程技术人员必须掌握的一门专业基础技术。

1. 嵌入式系统发展的 4 个阶段

1) 以单片机为核心的低级嵌入式系统

以单片机（微控制器）为核心的低级嵌入式系统是嵌入式系统发展的第一阶段。它具有与监测、伺服、指示设备相配合的功能，应用于专业性很强的工业控制系统中，通常不采用操作系统，软件采用汇编语言编程对系统进行控制。该阶段的嵌入式系统处于低级阶段，主要特点是系统结构和功能单一，处理效率不高，存储容量较小，用户接口简单或没有用户接口，但它使用简单，成本低。

2) 以嵌入式微处理器为基础的初级嵌入式系统

以嵌入式微处理器为基础，以简单操作系统为核心的初级嵌入式系统是嵌入式系统发展的第二阶段。其主要特点是处理器种类多，通用性较弱；系统效率高，成本低；操作系统具有兼容性、扩展性，但用户界面简单。

3) 以嵌入式操作系统为标志的中级嵌入式系统

以嵌入式操作系统为标志的中级嵌入式系统是嵌入式系统发展的第三阶段。其主要特点是嵌入式系统能运行于各种不同的嵌入式处理器上，兼容性好；操作系统内核小、效率高，并且可任意裁剪；具有文件和目录管理、多任务功能，支持网络、具有图形窗口及良好的用户界面；具有大量的应用程序接口，嵌入式应用软件丰富。

4) 以 Internet 为标志的高级嵌入式系统

以 Internet 为标志的高级嵌入式系统是嵌入式系统发展的第四阶段。嵌入式系统大多孤立与 Internet，随着网络应用的不断深入，随着信息家电的发展，嵌入式系统的应用必将与 Internet 有机地结合在一起，这将成为嵌入式系统发展的未来。

2. 嵌入式系统的发展现状

近几年嵌入式系统技术的发展有以下几个显著的变化。

(1) 新的处理器越来越多。一方面, 嵌入式操作系统自身结构的设计更易于移植, 以便在短时间内支持更多种的微处理器; 另一方面, 系统应能使用驱动程序开发与配置环境, 造就一个新的 BSP (板级支持包) 和驱动程序结构, 以适应微处理器不断升级变化所产生的需求。

(2) 开放源码之风已波及嵌入式操作系统厂家。数量相当多的嵌入式操作系统厂家出售产品时, 就附加了源程序代码并含生产版税。

(3) 后 PC 时代更多的产品使用嵌入式操作系统, 它们对实时性要求并不高, 如手持设备等, 微软公司的 Windows CE、Palm OS、Java OS 等产品就是顺应这些应用而开发出来的。值得注意的是, 随着 Internet 及芯片技术的快速发展, 对消费电子产品的需求日益扩大, 原来只关注实时操作系统市场的厂家纷纷进军消费电子产品市场, 并推出了各自的解决方案, 使嵌入式操作系统市场呈现出相互融合的趋势。

(4) 电信设备、控制系统要求的高可靠性, 对嵌入式操作系统提出了新的要求。

(5) 各类通用机上使用的新技术、新观念正逐步移植到嵌入式系统中, 如动态数据库、移动代理等, 嵌入式操作系统也出现了基于面向对象的分布式技术, 如实时 CORBA、嵌入式 CORBA, 嵌入式软件平台正逐步形成。

(6) 各种嵌入式 Linux 操作系统正迅速发展, 已经形成了能与 Windows CE 等嵌入式操作系统进行有力竞争的局面。嵌入式 Linux 操作系统的迅速崛起, 主要是由于人们对自由软件的渴望与嵌入式系统应用的定制性, 要求提供系统源码层次上的支持, 而嵌入式 Linux 适应了这一需求, 它具有开放源代码, 系统内核小、效率高、内核结构完整等特点, 裁剪后的系统很适合信息家电等嵌入式系统的开发。

(7) 面向定制趋势。在系统级整合改造并支持应用定制的特性, 即在定制商品化的软硬件上提供高性能和高可靠性系统服务, 将操作系统的功能和内存需求定制成每个应用所需的系统, 这同时也对嵌入式系统的设计提出了挑战。

(8) 嵌入式系统的多媒体化和网络化方向趋势, 特别是 Internet 和无线网络的结合。

(9) 基于智能化和物联网的嵌入式系统也已开始出现。

上述变化孕育着嵌入式系统将进入一个快速发展时期, 在不久的将来, 嵌入式系统应用将越来越多样化, 为用户提供更多的选择方案。它不仅仅局限于传统的控制领域, 还将广泛应用于信息家电、工业、农业、商业、服务业等各行业, 而且将渗透到社会和家庭的各个角落。

3. 嵌入式系统的发展趋势

随着嵌入式系统运行速度的不断提高, 嵌入式计算机已经逐步接近传统 PC 的数据处理能力, 其主要发展集中在嵌入式应用软件的开发上。

嵌入式应用软件的开发需要强大的开发工具和操作系统的支持。随着因特网技术的成熟、带宽的提高, 网上提供的信息内容日趋丰富、应用项目多种多样。电话手机、电话座机及电冰箱、微波炉等嵌入式电子设备的功能不再单一, 电气结构也更为复杂。为了满足应用功能的升级, 设计师们一方面采用更强大的嵌入式处理器如 32 位、64 位

RISC 芯片或数字信号处理器 DSP 增强处理能力；同时还采用实时多任务编程技术和交叉开发工具技术来控制功能复杂性，简化应用程序设计、保障软件质量和缩短开发周期。

联网成为嵌入式系统的必然趋势。为适应嵌入式分布处理结构和应用的网络需求，面向 21 世纪的嵌入式系统要求配备标准的一种或多种网络通信接口。针对外部联网要求，嵌入式设备必需配有通信接口，相应地需要 TCP/IP 协议簇软件的支持。由于家用电器相互关联（如防盗报警、灯光能源控制、影视设备和信息终端交换信息）及实验现场仪器的协调工作等要求，新一代嵌入式设备还需要具备 IEEE1394、USB、CAN、Bluetooth 或 IrDA 通信接口，同时也需要提供相应的通信组网协议软件和物理层驱动软件。为了支持应用软件的特定编程模式，如 Web 或无线 Web 编程模式，还需要相应的浏览器。

嵌入式系统需实现小尺寸、低功耗和低成本。为满足这种特性，要求嵌入式产品设计者相应降低处理器的性能，限制内存容量和复用接口芯片。这就相应地提高了对嵌入式软件设计技术的要求。如选用最佳的编程模型和不断改进算法，采用 Java 编程模式，优化编译器性能。嵌入式开发者对软件开发工具使用更加广泛，包括 Java，Web 和 WAP 等。

4. 技术的融合

作为嵌入式系统的主流技术，微控制器 MCU、微处理器 MPU、数字信号处理器 DSP 和 CPLD/FPGA 不仅都有 SoC 的趋势，而且彼此之间也有相互融合的趋势。取长补短，通过发挥各自的优点，提高系统性能。

1) 微控制器 MCU 与 SoC 的结合

8 位嵌入式微处理器发展的一个重要特点是片上系统 SoC (System on Chip) 化。SoC 化的技术含义就是在一个芯片上广泛使用知识产权 IP (Intellectual Property)，从而加速嵌入式系统的研制和开发过程。从设计角度来说，SoC 就是一个通过设计复用达到高生产率的硬软件协同设计的过程；从方法学的角度来说，SoC 在开发工具和程序设计方面做了许多突出的改进，例如，IP 核可重用设计、规范化的接口及测试方法、内置嵌入式操作系统等，这些改进为 8 位嵌入式微处理器的深入应用开辟了更为广泛的前景。

SoC 嵌入式系统从真正意义上实现了所谓“片上系统”，即芯片级的系统应用。一个嵌入式微处理器芯片可以包含若干个知识产权 IP 模块，用户可以根据需求选用某种型号的芯片或向制造厂商定制。长期以来，嵌入式系统的软件开发一直落后于硬件技术的发展，这是阻碍嵌入式系统快速发展的一个“瓶颈”。解决这一问题的的重要途径就是使用“可重用”的 IP 模块程序 IPP (Intellectual Property Program)，它可以极大地加速软件的开发过程。这一方法可以使得嵌入式系统应用程序的开发变得简单、方便和快捷。

2) 微控制器 MCU 与 DSP 的结合

目前，在嵌入式系统发展中，已经推出 MCU 和 DSP 器件两者功能的混合处理器。这种混合处理器采用多内核体系结构和统一内核体系结构支配着两种根本不同的芯片设计方法。从本质上说，多内核体系结构的设计人员主要通过将一个控制处理器和一个 DSP 安排在一

块芯片上来实现，而统一内核体系结构的方式则是通过扩展控制处理器的指令集来容纳 DSP 指令（反之亦然）。

Microchip Technology 公司的 PIC 是 8/16 位微控制器，如 dsPIC30 系列内具有 DSP 能力。例如，该系列内的 30F5011 和 30F5013 两种器件，均具有 30 MIPS 的性能。这两种器件都是基于闪存的芯片，具有 66KB 内存，可以在工业温度范围和扩展的温度范围内工作。Microchip 公司的方法是将其 16 位改进型 Harvard RISC 内核与可提供紧耦合指令流的 DSP 指令相结合。

3) ARM 与 DSP 的结合

通常在嵌入式系统设计中，微处理器实现整个系统的控制，而 DSP 负责执行计算密集型操作，然后通过一定的手段实现微处理器与 DSP 之间的通信和数据交换。因此，如何高效地设计微处理器 ARM 与 DSP 之间的接口以满足嵌入式系统的实时性要求，在嵌入式系统设计中显得尤为重要。

ARM 公司与 LSI Logic 公司和 ParthusCeva 公司合作，共同建立数字信号处理（DSP）集成标准。该标准旨在解决片上系统（SoC）设计中的 ARM 或其他微处理器核与 DSP 内核集成的技术问题。目前最典型的例子就是 TI 公司推出的 OMAP 系列芯片。

4) 微控制器 MCU 与 CPLD/FPGA 的结合

FPGA（现场可编程门阵列）是一种具有丰富可编程资源的逻辑器件，具有在线可编程、使用方便灵活的特点，不但可实现常规的逻辑器件功能，还可实现复杂的时序逻辑功能。将 FPGA 应用于嵌入式应用系统，与微控制器 MCU 结合起来，更能体现其在线可编程、使用方便灵活的特点。FPGA 与微控制器 MCU 接口，可以作为微控制器 MCU 的一个外设，实现系统所要求的功能。例如，实现常用的地址译码、锁存器、8255 等功能，也可实现加密、解密及扩展串口等特殊功能。该方案实现了嵌入式应用系统的灵活性，同时也提高了嵌入式应用系统的性能。

1.1.4 嵌入式系统的应用

嵌入式系统具有非常广阔的应用领域，是现代计算机技术改造传统产业、提升多领域技术水平的有力工具。其主要应用领域包括智能产品（智能仪表、智能信息家电）、工业自动化（测控装置、数控机床、数据采集与处理）、办公自动化、电网安全、电网设备检测、石油化工、商业应用（电子秤、POS 机、条码识别机）、安全防范（防火、防盗、防泄漏等报警系统）、网络通信（路由器、网关、手机、PDA、无线传感器网络）、汽车电子与航空航天（汽车防盗报警器、汽车和飞行器黑匣子）及军事等各个领域。

1. 消费类电子产品

消费类电子产品是指这样一些电子设备，它们能提供信息服务或通过网络系统交互信息的同时，简单易用、价格低廉、维护简便。

电视机、冰箱、微波炉、电话等都将通过嵌入计算机控制中心与 Internet 连接，转变为智能网络家电，还可以实现远程医疗、远程教育等。目前，智能小区的发展为机顶盒打开了市场，机顶盒将成为网络终端，它不仅可以使模拟电视接收数字电视节目，而且可以上网、炒股、点播电影，实现交互式电视，依靠网络服务器提供各种服务。嵌入式

系统为信息家电（网络冰箱、机顶盒、家庭网关、数字机顶盒等）的实现提供了可能和广阔的技术前景。

2. 移动计算设备

移动设备包括各种手机、PDA 掌上电脑等。中国拥有最大数量的手机用户，而掌上电脑和 PDA 等因为易于使用、携带方便、价格便宜而得到了快速发展，PDA 与手机已呈现融合趋势。用掌上电脑或 PDA 上网，人们可以随时随地获取信息。

新的手持设备将使无线互联访问成为更加普遍的现象。与互联网连接，结合音频应用，如 MP3 功能，将会促使移动计算设备市场创造新的销售纪录。整合手机模块，为移动计算设备提供语音功能，也将是大势所趋。

3. 网络设备

设计和制造嵌入式瘦服务器、嵌入式网关和嵌入式因特网路由器已成为嵌入式 Internet 的关键和核心技术。其中包括路由器、交换机等各种网络设备。基于 Linux 的网络设备价格低廉，将为企业提供更廉价的网络方案。美国贝尔实验室预测：在这阶段“将会产生比 PC 时代多成百上千倍的瘦服务器和超级嵌入式瘦服务器，这些瘦服务器将与我们这个世界任何物理信息、生物信息相连接，通过 Internet 自动、实时、方便、简单地提供给需要这些信息的对象”。

4. 工控、仿真、医疗仪器等部门

工业、医疗卫生、国防等各部门对智能控制需求不断增长的同时，也对嵌入式微处理器的运算速度、可扩充能力、系统可靠性、功耗和集成度等方面提出了更高的要求。

我国工业生产需要完成智能化、数字化和自动控制等改造工作，这都为嵌入式系统提供了很大的市场，而工控、仿真、数据采集、军用领域一般都要求操作系统支持实时工作。嵌入式系统在很多产业中得到了广泛应用，并逐步改变着这些产业。神州飞船和长征系列火箭系统中就有很多嵌入式系统，导弹制导系统也离不开嵌入式系统，现代高档汽车中也有多达几十个嵌入式系统。

1.2 嵌入式处理器

1.2.1 嵌入式处理器的种类

嵌入式处理器主要有 4 类：嵌入式微处理器（Embedded Microcomputer Unit, EMPU）、嵌入式微控制器（Embedded Microcontroller Unit, EMCU）、嵌入式数字信号处理器（Embedded Digital Signal Processor, EDSP）及片上系统（System on Chip, SoC）。

1. 嵌入式微处理器

嵌入式微处理器是由 PC 中的 CPU 演变而来的，与通用 PC 微处理器不同的是，它只保留了与嵌入式应用紧密相关的功能硬件。典型的嵌入式处理器有 Power PC、MIPS、MC68000、i386EX、AMD K62E 及 ARM 等，其中目前应用最广、最具代表性的是基于 ARM 内核的嵌入式微处理器，本书主要介绍的是基于 ARM 的嵌入式计算机系统硬件体系及其

设计。

2. 嵌入式微控制器

嵌入式微控制器的典型代表是单片机，其内部集成了 ROM/EPROM/Flash、RAM、总线、总线逻辑、定时器、看门狗、I/O 接口等各种必要的功能部件。典型的嵌入式控制器有 51 系列、MC68 系列、PIC 系列、MSP430 系列等。

3. 嵌入式数字信号处理器

嵌入式数字信号处理器是专门用于数字信号处理的微处理器，在系统结构和指令算法方面经过特殊设计，因而具有很高的编译效率和指令执行速度。DSP 芯片内部采用程序和数据分开的哈佛结构，具有专门的硬件乘法器，广泛采用流水线操作，提供特殊的 DSP 指令，可以用来快速地实现各种数字信号处理算法。典型的嵌入式数字信号处理器有 TMS32010 系列、TMS32020 系列、TMS32C30/C31/C32 系列、TMS32C40/C44 系列、TMS32C50/C51/C52/C53 系列及集多个 DSP 核于一身的高性能 DSP 芯片 TMS32C80/C82 等。

4. 嵌入式片上系统

嵌入式片上系统 (SoC) 是追求产品系统最大包容的集成器件，是当前嵌入式应用领域的技术热点。SoC 最大的特点是成功实现了软硬件无缝结合，直接在处理器的片内嵌入了操作系统。SoC 具有极高的综合性，在一个硅片内部运用 VHDL 等硬件描述语言即可实现一个复杂的系统。与传统的系统设计不同，用户不需要绘制庞大复杂的电路板，只需要使用精确的语言，综合时序设计，直接在器件库中调用各种通用处理器的标准，经过仿真之后就可以直接交付芯片厂商进行生产。

由于片上系统绝大部分系统构件都在系统内部，整个系统特别简洁。它不仅减小了系统的体积和功耗，而且提高了系统的可靠性和设计生产效率。由于 SoC 大多数是专用的，所以绝大部分都不为用户所知。

1.2.2 ARM 微处理器简介

英国 ARM (Advanced RISC Machines) 公司成立于 1990 年。在 1985 年 4 月 26 日，第一个 ARM 原型在英国剑桥的 Acorn 计算机有限公司诞生 (在美国 VLSI 公司制造)。目前，ARM 架构处理器已在高性能、低功耗、低成本应用领域中占据领先地位。

ARM 公司是嵌入式 RISC 处理器的知识产权 IP 供应商，它为 ARM 架构处理器提供了 ARM 处理器内核 (如 ARM7TDMI、ARM9TDMI、ARM10TDMI 等) 和 ARM 处理器宏核 (如 ARM720T、ARM920T/922T/940T、ARM1020E/1022E 等)，由各半导体公司 (ARM 公司合作伙伴) 在上述处理器内核或处理器宏核基础上进行再设计，嵌入各种外围处理部件，形成各种嵌入式微处理器或嵌入式微控制器。

ARM 处理器目前包括下面几个系列的处理器产品：ARM7、ARM9、ARM9E、ARM10E、ARM11、SecurCore、OptimoDE、StrongARM、XScale 及 Cortex - A8 等系列。

ARM7、ARM9、ARM9E 及 ARM10E 为 4 个通用的嵌入式微处理器系列，每个系列提供一套相对独特的性能来满足不同应用领域的要求，由多个厂家生产；SecurCore 系列则