

信息与电子学科百本精品教材工程

新编计算机类本科规划教材

嵌入式系统 及其开发应用

沈连丰 宋铁成 叶芝慧 等编著 王志功 主审

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



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

东南大学出版基金资助项目

新编计算机类本科规划教材

嵌入式系统及其开发应用

沈连丰 宋铁成 叶芝慧 夏玮玮 黄忠虎 编著

王志功 主审



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书系统介绍嵌入式系统的基本原理和主要技术,以 ARM 和 Linux 为重点,详细讨论其硬件结构和软件体系。全书共 15 章,内容包括:嵌入式系统概述,单片机及其开发应用,DSP 芯片及其开发应用,ARM 微处理器及其开发应用,嵌入式系统的操作系统及软件开发, Linux 操作系统, ARM 嵌入式系统开发环境,嵌入式系统的基本外设,嵌入式系统中的接口技术,嵌入式系统内核的相关技术,嵌入式系统图形界面和网络通信,嵌入式蓝牙电话网关及其终端设备,基于蓝牙技术的局域网接入点设备,嵌入式系统在信息家电中的应用,智能车辆管控系统。为了理论联系实际,全书给出了 14 个典型实验。给出的多个产品开发实例都是作者及其同事近年来承担的国家“863”和攻关计划等科研项目的成果。本书既是一本理论联系实际的教科书,又是一本可作为指导实验和开发应用的参考书。

本书有完善的实验和开发设备与之配套,可作为高等院校通信类、信息类、电子类和理工科其他学科本科生的教材,也可供研究生和有关科学研究与产品开发人员使用。

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

嵌入式系统及其开发应用/沈连丰等编著. —北京:电子工业出版社, 2005.7

新编计算机类本科规划教材

ISBN 7-121-01283-9

I. 嵌… II. 沈… III. 微型计算机—系统设计—高等学校—教材 IV. TP360.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 076801 号

责任编辑:冉 哲

印 刷:北京牛山世兴印刷厂

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

经 销:各地新华书店

开 本:787×1 092 1/16 印张:25.75 字数:659 千字

印 次:2005 年 7 月第 1 次印刷

印 数:5 000 册 定价:32.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话:(010) 68279077。质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

前 言

嵌入式系统的概念虽然很早就已提出,但它成为最热门的技术之一却是近几年的事情。现在,嵌入式系统已广泛地渗透到科学研究、工程建设、军事、各类产业,甚至商业、文化、艺术及人们日常生活的方方面面。随着国内外各种嵌入式产品的进一步开发和推广,嵌入式技术的重要性日益凸显,这方面人才的需求量与日俱增,高等学校的培养任务迫在眉睫。在这样的背景下,作者结合多年来的科研和教学体会,于2003年春季编写了“嵌入式系统及其开发应用”讲义,作为“嵌入式系统”及其相关课程的教科书或参考书在东南大学无线电工程系和其他兄弟院校试用。本书是在原讲义的基础上,根据两年来的教学实践并综合了广大师生的反馈意见修改而成的,可作为高等院校相关学科本科生的教材或教学参考书,也可供研究生和有关科学研究与产品开发人员使用。本书已有完备的多媒体课件和完善的实验开发设备与之配套,有需要的老师可直接与作者联系(电子邮件:lfshen@seu.esu.cn 或 songtc@seu.edu.cn)。建议本课程3学分,课堂教学和实验的学时数由任课教师根据实际情况灵活掌握。

本书共分15章,系统地介绍嵌入式系统的基本原理和主要技术,以ARM和Linux为重点,详细讨论其硬件结构和软件体系,内容包括:嵌入式系统概述,单片机及其开发应用,DSP芯片及其开发应用,ARM微处理器及其开发应用,嵌入式系统的操作系统及软件开发,Linux操作系统,ARM嵌入式系统开发环境,嵌入式系统的基本外设,嵌入式系统中的接口技术,嵌入式系统内核的相关技术,嵌入式系统图形界面和网络通信,嵌入式蓝牙电话网关及其终端设备,基于蓝牙技术的局域网接入点设备,嵌入式系统在信息家电中的应用,智能车辆管控系统。其中,第1~6章可以看做基础理论篇,主要给出嵌入式系统的有关概念并详细讨论其硬件和软件的共性问题,重点是ARM微处理器和Linux操作系统;第7~11章为实验应用篇,详细讨论14个典型应用的基本原理,并给出在推荐的实验设备上做的典型实验,让读者理论联系实际;第12~15章为研究开发篇,给出作者及其同事近年来在科研实践中研究开发的多个产品设计实例。

本书的显著特点是其主要内容基于作者及其所在的东南大学移动通信国家重点实验室近年来承担的国家、教育部、江苏省和南京市相关科研项目所取得的成果。这些项目是:国家“863”计划“家庭网络核心SoC平台和整体解决方案”(2003AA1Z1110),国家科技攻关计划“基于Bluetooth技术的无线接入系统”(2001BA102C),国家自然科学基金“WPAN环境下宽带高速跳频系统关键技术的研究”(60072016)和“循环平稳理论在复杂无线通信环境中的若干算法与应用研究”(60472053),教育部科学技术研究重点项目“复杂环境下跳频多媒体通信关键技术的研究”(99176)和“宽带无线个域网共享访问协议及组件开发”(02171),高等学校博士学科点专项科研基金“周期平稳理论在无线通信网络中的分析和研究”(20030286017),江苏省科技攻关重大项目“CDMA无线接入系统”(BG2000008)、“基于多网融合技术的接入设备及其终端产品”(BE2004008),江苏省高技术研究重大项目“家庭网络核心集成电路片上系统平台技术”(BG2004002)、“移动自组织网络关键技术研究与应用”(BG2003004),江苏省基础研究项目“周期平稳理论在复杂无线通信系统中的若干算法的研究”(BK2003055),南京市创新创业人才项目“无线接入系统通信模块的系列化和产业化”

(200308002)等。鉴于此,“东南大学出版基金”对本书提供了资助。因此,本书既是一本理论联系实际的教科书,又是指导实验和开发应用的参考书。作者期望它对于提高教学质量,特别是提高学生的创新能力能够发挥良好的作用。

本书由沈连丰、宋铁成、叶芝慧、夏玮玮、黄忠虎等共同编著。初稿的第1~6章、第7~11章和第12~15章分别由黄忠虎、夏玮玮和叶芝慧撰写,全书大纲的确定和修改完善由沈连丰、宋铁成和叶芝慧负责,最后由沈连丰定稿。书中的实验由南京东大移动互联技术有限公司依托东南大学无线电工程系和移动通信国家重点实验室设计与研制。该公司的张宏泽、陈培、张勇、王国峰、刘佳、殷磊、张文凤、洪云、黄慧妍、吴小安、王伟、章欣、王磊等技术人员对每一个实验都进行了精心的调试和测试,使之稳定可靠、功能多样。他们对工作一丝不苟的精神,使实验设备受到众多老师的欢迎;博士生李文峰和硕士生施荣参与了初稿的前期撰写,博士后刘云、张磊和博士生邱晓华、徐智勇、谷金山、顾燕等参与了本书大纲的讨论和部分工作;东南大学无线电工程系教学副主任孟桥教授对全部书稿进行了仔细阅读,对每一个实验进行了认真研究,提出了非常宝贵的建设性意见,他的大力支持和热情帮助激励作者把本书写好并研制出一流的实验设备,以实现提高学校教学质量、增强学生创新能力之目的;作者的同事钱进、张圣清、张念祖等老师执教本门课程,根据学生的反馈意见和他们的教学实践,对本书的修改完善做了很大贡献;东南大学出版基金委员会、科技处、教务处、研究生院和无线电工程系的领导对作者的工作给予了大力支持和指导,特别是著名集成电路设计专家、“高等学校电子信息科学与工程类基础课教学指导分委员会”主任、教育部“长江学者”特聘教授、东南大学射频与光电集成电路研究所所长、博士生导师王志功教授在百忙之中抽出时间担任本书的主审,他以渊博的学识、丰富的经验和严谨的学风,对本书的写作给予了多方面指导;南京信息工程大学、江苏科技大学、南通大学等兄弟院校率先使用了本书的讲义和实验设备,给出了许多改进和修改意见。因此,本书及其推荐的实验系统是集体智慧的结晶,在此谨向支持作者工作和对本书作出贡献的同仁致以最诚挚的感谢!

本书及其推荐的实验系统虽已在多个高等院校应用,并在提高教学质量和学生创新能力方面发挥了一定的作用,但是嵌入式技术的发展方兴未艾,限于水平,本书的编写和推荐的实验系统、给出的设计开发实例一定存在不少缺点或错误,敬请使用本书和实验系统的师生及读者不吝指正。

作 者

2005年5月

于东南大学无线电工程系
移动通信国家重点实验室

目 录

第 1 章 嵌入式系统概述	(1)
1.1 嵌入式系统的定义	(1)
1.2 嵌入式系统的基本组成	(2)
1.3 嵌入式系统的特点	(3)
1.4 嵌入式系统的主要应用领域	(5)
1.5 嵌入式系统的发展趋势	(7)
思考题	(8)
第 2 章 单片机及其开发应用	(9)
2.1 单片机分类及应用领域	(9)
2.2 Philips 系列单片机	(10)
2.2.1 Philips 12 Clock 80C51 和 6 Clock 80C51 系列单片机	(10)
2.2.2 Philips LPC700 系列 OTP 单片机	(11)
2.2.3 Philips LPC900 系列 Flash 单片机	(13)
2.3 PIC 系列单片机	(14)
2.3.1 PIC12CXXX 单片机	(15)
2.3.2 PIC16CXXX 单片机	(16)
2.3.3 PIC17CXXX 单片机	(17)
2.4 Motorola 系列单片机	(17)
2.4.1 M68HC05 系列单片机	(17)
2.4.2 56800/E 系列单片机	(19)
2.5 单片机开发应用举例	(20)
思考题	(27)
第 3 章 DSP 芯片及其开发应用	(28)
3.1 DSP 芯片概述	(28)
3.2 定点式 DSP 芯片	(29)
3.3 浮点式 DSP 芯片	(30)
3.4 多处理器 DSP 芯片 TMS320C8X	(31)
3.5 DSP 芯片开发举例	(32)
思考题	(35)
第 4 章 ARM 微处理器及其开发应用	(36)
4.1 ARM 微处理器概述	(36)
4.1.1 ARM 微处理器的特点及应用领域	(36)
4.1.2 ARM 微处理器系列	(37)
4.1.3 ARM 微处理器结构	(39)
4.1.4 ARM 微处理器的应用选型	(40)

4.2	ARM 微处理器的指令系统	(41)
4.2.1	ARM 微处理器的指令分类与格式	(41)
4.2.2	指令的条件域	(42)
4.2.3	ARM 指令的寻址方式	(43)
4.2.4	ARM 指令集	(44)
4.2.5	Thumb 指令及应用	(56)
4.3	ARM 汇编程序设计基础	(57)
4.3.1	ARM 汇编器所支持的伪指令	(57)
4.3.2	汇编语言的语句格式	(65)
4.3.3	汇编语言的程序结构	(68)
4.4	ARM 微处理器的编程模型	(69)
4.4.1	ARM 微处理器的工作状态	(69)
4.4.2	ARM 体系结构的存储器格式	(69)
4.4.3	处理器模式	(70)
4.4.4	寄存器组织	(70)
4.4.5	异常	(75)
4.5	ARM 存储器设计	(80)
4.6	基于 ARM 的嵌入式系统开发	(82)
	思考题	(84)
第 5 章	嵌入式系统的操作系统及软件开发	(85)
5.1	嵌入式系统对操作系统的要求	(85)
5.2	嵌入式实时操作系统	(87)
5.2.1	嵌入式实时操作系统的概念	(88)
5.2.2	实时操作系统的发展过程	(88)
5.2.3	RTOS 的几个评价指标	(90)
5.2.4	嵌入式操作系统与通用操作系统的区别	(90)
5.3	实时操作系统的选择	(91)
5.4	嵌入式系统高级语言开发流程	(93)
5.5	开发调试方法	(93)
5.5.1	嵌入式系统开发时需要的工具	(94)
5.5.2	嵌入式系统的开发调试过程	(95)
	思考题	(96)
第 6 章	Linux 操作系统	(97)
6.1	Linux 概论	(97)
6.1.1	Linux 的起源	(97)
6.1.2	Linux 与 GNU	(98)
6.1.3	Linux 内核概况	(99)
6.1.4	Linux 内核的微型化	(100)
6.2	嵌入式 Linux	(100)
6.2.1	Linux 应用于嵌入式系统的优势和不足	(100)

6.2.2 嵌入式 Linux 的应用举例	(102)
6.3 uClinux 操作系统及其开发环境	(104)
6.3.1 uClinux 操作系统	(104)
6.3.2 uClinux 的应用开发环境	(107)
6.3.3 uClinux 操作系统的一些说明	(108)
6.4 嵌入式实时操作系统和实时 Linux	(109)
6.5 Linux 常见术语和常用命令	(110)
6.5.1 Linux 常见术语	(111)
6.5.2 Linux 常用命令	(112)
6.6 gcc 编译器和 Makefile	(118)
6.6.1 gcc 编译器	(118)
6.6.2 Makefile	(122)
思考题	(125)
第 7 章 ARM 嵌入式系统开发环境	(126)
7.1 基本原理	(126)
7.1.1 实验开发环境	(126)
7.1.2 uClinux 系统的目录结构	(130)
7.1.3 uClinux 系统的编译过程	(132)
7.1.4 uClinux 系统的烧写	(134)
7.1.5 uClinux 系统的地址空间分布	(135)
7.1.6 在开发板上开发应用程序	(137)
7.1.7 应用程序调试方法	(139)
7.2 实验及其要求	(142)
思考题	(143)
第 8 章 嵌入式系统的基本外设	(144)
8.1 嵌入式系统中的 LCD 及其实验	(144)
8.1.1 嵌入式系统中 LCD 的工作原理	(144)
8.1.2 实验及其要求	(153)
8.2 嵌入式系统中的触摸屏及其实验	(154)
8.2.1 触摸屏的工作原理	(154)
8.2.2 实验及其要求	(164)
8.3 嵌入式系统中的 LED 和键盘控制	(165)
8.3.1 基本原理	(166)
8.3.2 实验及其要求	(173)
思考题	(174)
附录 有关的寄存器、函数及源代码	(174)
A8.1 LCD 控制器的部分寄存器设置和图形界面接口函数	(174)
A8.2 触摸屏程序开发中使用的函数和 SIO 接口专用寄存器	(179)
A8.3 CPLD 程序 VHDL 源代码	(182)
第 9 章 嵌入式系统中的接口技术	(185)

9.1 A/D 接口及其实验	(185)
9.1.1 基本原理	(185)
9.1.2 实验及其要求	(190)
9.2 串口通信及其实验	(191)
9.2.1 串口通信的工作原理	(191)
9.2.2 实验及其要求	(209)
思考题	(210)
第 10 章 嵌入式系统内核的相关技术	(211)
10.1 嵌入式系统进程间通信的原理与实验	(211)
10.1.1 嵌入式系统进程间通信的基本原理	(211)
10.1.2 实验及其要求	(228)
10.2 嵌入式系统中断和驱动的原理及实验	(230)
10.2.1 嵌入式系统中断和驱动的工作原理	(231)
10.2.2 实验及其要求	(242)
思考题	(244)
第 11 章 嵌入式系统图形界面和网络通信	(245)
11.1 图形用户界面的工作原理及实验	(245)
11.1.1 图形用户界面的基本原理	(245)
11.1.2 实验及其要求	(262)
11.2 TCP/IP 的基本原理及其实验	(263)
11.2.1 TCP/IP 的基本原理	(263)
11.2.2 实验及其要求	(281)
11.3 Web 服务器 CGI 的基本原理及实验	(282)
11.3.1 Web 服务器 CGI 的基本原理	(282)
11.3.2 实验及其要求	(297)
思考题	(304)
附录 有关的算法描述及实例	(305)
A11.1 时钟绘制流程图及关键算法描述	(305)
A11.2 创建子进程方式的并发 TCP 服务器实例	(307)
第 12 章 嵌入式蓝牙电话网关及其终端设备	(309)
12.1 嵌入式实时操作系统及微处理器简介	(309)
12.2 嵌入式 PSTN 网关及其终端的设计与实现	(311)
12.2.1 嵌入式 PSTN 网关及其终端的开发环境	(311)
12.2.2 嵌入式 PSTN 网关的实现	(312)
12.2.3 嵌入式语音终端的实现	(313)
12.2.4 互连互通及抗干扰测试	(316)
12.3 支持多用户的嵌入式 PSTN 网关设计	(317)
12.3.1 TCS 协议和无绳电话应用模型中的相关规定	(317)
12.3.2 支持多用户的 PSTN 网关的工作流程	(318)
12.3.3 支持多用户的 PSTN 网关设计	(318)

12.4	蓝牙“三合一”电话	(320)
12.4.1	蓝牙“三合一”电话的实现方式	(320)
12.4.2	开发平台介绍	(321)
12.4.3	蓝牙“三合一”电话的设计和实现	(323)
12.4.4	对讲机应用分析	(328)
	思考题	(330)
第 13 章	基于蓝牙技术的局域网接入点设备	(331)
13.1	蓝牙局域网接入系统的结构体系	(331)
13.1.1	应用模型	(331)
13.1.2	应用场景	(332)
13.1.3	系统结构	(332)
13.1.4	基本流程	(333)
13.1.5	LAP 的参数配置	(333)
13.2	MCF5272 硬件平台简介	(335)
13.2.1	MCF5272 微处理器的特点和性能	(335)
13.2.2	蓝牙局域网接入点硬件设计	(336)
13.2.3	软件总体结构	(337)
13.3	蓝牙 LAP 的设计实现	(337)
13.3.1	主控制模块	(337)
13.3.2	虚拟串口驱动模块	(340)
13.3.3	串口驱动模块	(341)
13.3.4	基于日志文件系统的配置管理工具	(343)
	思考题	(346)
第 14 章	嵌入式系统在信息家电中的应用	(347)
14.1	家庭网络标准及关键技术	(347)
14.1.1	家庭网络概述	(347)
14.1.2	家庭网络标准及其规范	(349)
14.1.3	基于有线传输技术的家庭网络标准	(350)
14.1.4	基于无线传输技术的家庭网络标准	(353)
14.2	蓝牙在家庭网络中的技术实现	(355)
14.2.1	基于家庭网关的家庭网络体系结构	(355)
14.2.2	模块实现	(355)
14.3	家庭信息化网络总体结构	(356)
14.4	基于蓝牙技术的嵌入式信息家电网络系统的设计	(358)
14.4.1	家庭主网	(359)
14.4.2	家庭控制子网	(360)
14.5	主网网关软件的设计与实现	(367)
14.5.1	嵌入式 Web 服务器 boa	(368)
14.5.2	Web 服务器上家电控制功能的实现	(368)
14.6	子网网关软件的设计与实现	(371)

14.6.1 子网网关数据结构和算法流程	(371)
14.6.2 子网网关主程序结构	(373)
思考题	(375)
第 15 章 智能车辆管控系统	(376)
15.1 车辆管控系统概述	(376)
15.1.1 应用领域	(376)
15.1.2 主要技术比较	(377)
15.2 车辆管控系统的设计	(378)
15.3 车辆管控系统中的蓝牙技术	(382)
15.3.1 RFCOMM 协议	(382)
15.3.2 串口仿真应用规范	(383)
15.3.3 链路监控	(384)
15.4 蓝牙智能车载卡的研制	(384)
15.4.1 SoC 嵌入式微处理器	(384)
15.4.2 CSR BlueLab 原理及应用	(385)
15.5 蓝牙智能车载卡的设计和实现	(391)
15.5.1 硬件结构	(391)
15.5.2 软件体系结构	(391)
15.5.3 关键算法处理	(392)
15.5.4 系统改进方案	(395)
15.6 蓝牙智能车载卡在邮政车辆管理系统中的应用	(395)
思考题	(397)
参考文献	(398)

第 1 章 嵌入式系统概述

1.1 嵌入式系统的定义

在信息技术和网络技术高速发展的后 PC(Post-PC)时代,嵌入式系统(ES, Embed System)已经广泛地渗透到科学研究、工程设计、军事技术等众多领域。随着各种嵌入式产品的开发和推广,嵌入式技术和人们的生活将会越来越密切。在 PC 时代,可能有人从来没有接触过计算机。但是在后 PC 时代,他就不可能不接触嵌入式系统,因为嵌入式系统存在于生活的方方面面,从洗衣机、电冰箱等家用电器,到自行车、汽车等交通工具,以及办公室里的几乎每一个电气设备,其中可能都有嵌入式系统,或者都属于嵌入式技术开发和改造的对象。

嵌入式系统以应用为中心,以计算机技术为基础,并且软、硬件可裁剪,适用于应用系统对功能、可靠性、成本、体积、功耗有严格要求的专用计算机系统。它一般由嵌入式微处理器、外围硬件设备、嵌入式操作系统及用户的应用程序 4 个部分组成,用于实现对其他设备的控制、监视或管理等功能。

嵌入式系统一般指非 PC 系统,它包括硬件和软件两部分。硬件包括处理器(或微处理器)、存储器、外设器件、I/O 端口和图形控制器等。软件部分包括操作系统(OS, Operation System)和应用程序编程。操作系统控制应用程序编程与硬件的交互作用,完成实时和多任务操作;应用程序控制系统的运作和行为,完成各种设计功能。有时,设计人员会把这两种软件组合在一起。

实际上,嵌入式系统这个概念很早就已经存在了。在通信方面,它在 1960 年就被用于对电话交换的控制,当时称之为存储式程序控制系统(SPCS, Stored Program Control System)。那时,计算机一词却还不是很普遍,而存储式程序主要是指用于存储程序及日常信息的内存部分,用它来存储逻辑数据,而不是将其写入硬盘。那时也还没有出现操作系统的概念,对每一个应用都需要提供整个计算机的完整设计。后来微处理器出现了,利用它组成一个由总线连接起来的计算机硬件体系结构,并且提供一个通用功能的编程模型,从而简化了编程。

嵌入式系统的概念是在 1970 年左右出现的。当时,大部分软件都是由汇编语言完成的,而且还只能用于某一种固定的微处理器。一旦该微处理器过时,这种嵌入式系统就没有用了,对新的微处理器必须使用新的汇编语言。

当时的嵌入式系统大部分还没有使用操作系统,它们通常只是为了实现某个控制功能,仅使用一个简单的循环控制来处理外界的控制请求。这对一些简单的系统而言是足够的,但是当系统越来越复杂、使用范围越来越广泛的时候,没有操作系统就成为一个不能容忍的缺点,因为人们不可能为了添加一项新功能而将设计再从头开始。

C 语言的出现使得操作系统的开发变得更为简单,人们可以利用它很快写出一个小型的、稳定的操作系统。众所周知,C 语言的作者 Dennis M. Ritchie 和 Brian W. Kernighan 利用它写出了著名的 UNIX 操作系统,直接影响了近几十年计算机业的发展,同时对开发嵌入式系统来说,在效率和速度上都提高了很多。

从 20 世纪 80 年代开始,出现了各种各样的商用嵌入式操作系统。这些操作系统大部分

都是为专用系统而开发的，从而形成了现在商用嵌入式操作系统百家争鸣的局面，如 VxWorks、pSOS、Neculeus 和 Windows CE 等。

随着网络的广泛应用，嵌入式系统能够使用网络特别是 Internet（因特网）已成为基本要求，因此把网络的协议栈（PS，Protocol Stack）移植到嵌入式系统具有重大意义。利用嵌入式系统中的网络功能，可以实现所谓信息电器这一可能取代 PC 而在后 PC 时代占据市场主体的商品。简单比较可知，如果在前面所说的那种采用循环控制的嵌入式系统中加入网络协议栈，其复杂度将会呈指数级增长；而如果在嵌入式操作系统中增加网络协议栈则要方便得多，它使各种网络应用程序在不同平台间移植变得容易。

1.2 嵌入式系统的基本组成

与普通的计算机系统一样，嵌入式系统也是由硬件和软件两大部分组成的。前者是整个系统的物理基础，它提供软件运行平台和通信接口；后者实际控制系统的运行。

嵌入式系统的硬件可分成 3 部分：核心处理器、外围电路和外部设备，如图 1.1 所示。

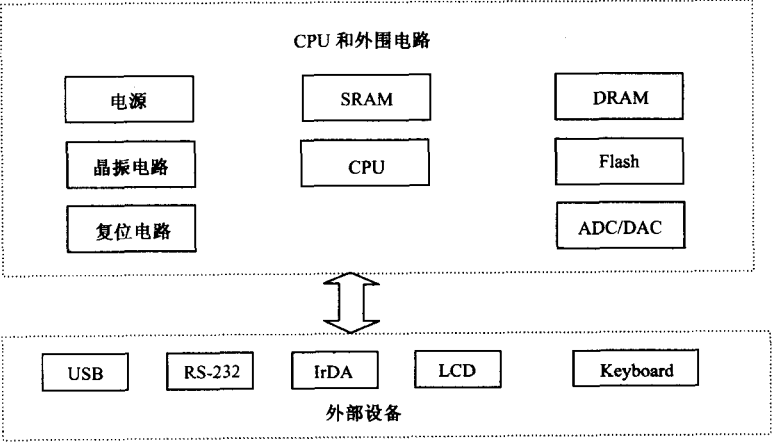


图 1.1 嵌入式系统的硬件组成

图 1.1 中，CPU 是嵌入式系统的核心处理器，又称为嵌入式微处理器，负责控制整个嵌入式系统的执行；外围电路包括嵌入式系统的内存、I/O 端口、复位电路、模数转换器/数模转换器（ADC/DAC）和电源等，与核心处理器一起构成一个完整的嵌入式目标系统，其中 SRAM（Static Random Access Memory）为静态随机存储器，DRAM（Dynamic Random Access Memory）为动态随机存储器，Flash 为闪存；外部设备指嵌入式系统与真实环境交互的各种设备，包括通用串行总线（USB，Universal Serial Bus）、存储设备、鼠标、键盘（keyboard）、液晶显示（LCD，Liquid Crystal Display）、红外线数据传输（IrDA，Infrared Data Association）和打印设备等。

微处理器是嵌入式系统硬件的核心，它一般具备以下 4 个特点。

① 对实时多任务有很强的支持能力，能完成多任务并且有较短的中断响应时间，从而使内部的代码和实时内核的执行时间减少到最低限度。

② 具有很强的存储区保护功能。这是由于嵌入式系统的软件结构已模块化，为了避免在软件模块之间出现错误的交叉作用，需要设计强大的存储区保护功能，同时也有利于软件

诊断。

③ 可扩展的结构。

④ 功耗很低，尤其是用于便携式无线及移动设备中靠电池供电的嵌入式系统更是如此，很多只允许 mW 甚至 μ W 量级。

嵌入式系统的软件可分成设备驱动接口 (DDI, Device Driver Interface)、实时操作系统 (RTOS, Real Time Operation System)、可编程应用接口 (API, Application Programmable Interface) 和应用软件 4 个层次。其中，DDI 负责嵌入式系统与外部设备的信息交互；RTOS 分成基本和扩展两部分，前者是操作系统的核心，负责整个系统的任务调度、存储分配、时钟管理和中断管理，提供文件、图形用户界面 (GUI, Graphics User Interface) 等基本服务，后者为用户提供操作系统的扩展功能，包括网络、数据库等；API 也称为编程中间件、应用中间软件，是为编制应用程序提供的各种编程接口库，它针对不同应用领域、不同的安全要求分别构建，从而减轻应用开发者的负担；应用软件是针对不同应用而由开发者自己编写的软件。

1.3 嵌入式系统的特点

从前面简单的介绍可以看出，嵌入式系统与通用型计算机系统相比具有以下特点。

① 嵌入式系统通常含有面向特定应用的嵌入式 CPU。与通用型的最大不同就是，嵌入式 CPU 大多工作在为特定用户群设计的系统中，通常具有低功耗、体积小、集成度高等特点，能够把通用 CPU 中许多由板卡完成的任务集成在芯片内部，从而有利于系统设计的小型化，移动能力大大增强，跟网络的耦合也越来越紧密。

② 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的产物。

③ 嵌入式系统的硬件和软件都必须高效率地设计，量体裁衣，去除冗余，力争在同样的硅片面积上实现更多的功能和更高的性能。

④ 嵌入式系统和具体应用有机地结合在一起，它的升级换代也是和具体产品同步进行的，因此嵌入式系统产品一旦进入市场，具有较长的生命周期。

⑤ 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存储器芯片或单片机中，而不是存储于磁盘等载体中。

⑥ 嵌入式系统本身不具备自举开发能力，设计完成以后，用户通常不能对其中的程序功能进行修改，必须有一套开发工具和环境才能进行开发。

下面再从嵌入式系统的运行环境 and 应用场合等方面来看它的特点。

1. 嵌入式处理器

嵌入式处理器可以分为 3 类：微处理器 (MPU, Micro Processing Unit)、微控制器 (MCU, Micro Control Unit) 和数字信号处理器 (DSP, Digital Signal Processor)。

嵌入式 MPU 就是与通用计算机的 CPU 相对应的微处理器。在应用中，一般将微处理器装配在专门设计的电路板上，在母板上只保留和嵌入式相关的功能，这样可以满足嵌入式系统体积小和功耗低的要求。目前的嵌入式微处理器主要包括：PowerPC、Motorola 68000、ARM 系列等。

嵌入式 MCU 又称为单片机。它将 CPU、存储器（少量的 RAM、ROM 或两者都有）和其他外设封装在同一集成电路里，如最常见的 8051 系列。

嵌入式 DSP 专门用来对离散时间信号进行极快的处理计算，提高编译效率和执行速度。在数字滤波、快速傅里叶变换（FFT, Fast Fourier Transfer）、谱分析、图像处理和分析等领域，DSP 正在大量进入嵌入式市场。

2. 微内核结构

大多数操作系统至少被划分为内核层和应用层两个层次。内核只提供基本的功能，如建立和管理进程、提供文件系统、管理设备等，这些功能以系统调用方式提供给用户。一些桌面操作系统，如 Windows、Linux 等，将许多功能引入内核，操作系统的内核变得越来越大。内核变大使得占用的资源增多，剪裁起来很麻烦。大多数嵌入式操作系统采用了微内核结构，内核只提供基本的功能，例如，任务的调度，任务之间的通信与同步，内存管理，时钟管理等。其他的应用组件，如网络功能、文件系统、GUI 系统等均工作在用户态，以系统进程或函数调用的方式工作。因而系统都是可剪裁的，用户可以根据自己的需要选用相应的组件。

3. 任务调度

在嵌入式系统中，任务即进程或线程。大多数的嵌入式操作系统支持多任务。多任务运行实际是靠 CPU 在多个任务之间进行切换和调度实现的。每个任务都有其优先级，不同任务的优先级可能相同也可能不同。任务的调度有 3 种方式：可抢占式、不可抢占式和时间片轮转。不可抢占式调度是指一个任务一旦获得 CPU 就独占其运行，除非由于某种原因使它决定放弃 CPU 的使用权；可抢占式调度是基于任务优先级的，当前正在运行的任务可以随时让位给优先级更高的处于就绪态的其他任务；当两个或两个以上任务有同样的优先级时，不同任务轮转地使用 CPU，直到系统分配的 CPU 时间片用完，这就是时间片轮转调度。目前，大多数嵌入式操作系统对不同优先级的任务采用基于优先级的抢占式调度法，对相同优先级的任务则采用时间片轮转调度法。

4. 硬实时系统和软实时系统

有些嵌入式系统对时间的要求较高，称之为实时系统。实时系统有两种类型：硬实时系统和软实时系统。软实时系统并不要求限定某一任务必须在一定的时间内完成，只要求各任务运行得越快越好；硬实时系统对响应时间有严格的要求，一旦系统响应时间不能满足，就可能引起系统崩溃或致命的错误，一般在工业控制中应用较多。

5. 内存管理

针对有内存管理单元（MMU, Memory Management Unit）的处理器而设计的一些桌面操作系统，如 Windows、Linux，使用了虚拟存储器的概念。虚拟内存地址被送到 MMU。在这里，虚拟地址被映射为物理地址，实际存储器被分割为相同大小的页面，采用分页的方式载入进程。一个程序在运行之前，没有必要全部装入内存，而是仅将那些当前要运行的部分页面装入内存运行。

大多数嵌入式系统针对没有 MMU 的处理器设计，不能使用处理器的虚拟内存管理技术，而是采用实存储器管理策略，因而它对于内存的访问是直接的，即对地址的访问不需要经过

MMU，而是直接送到地址线上输出，所有程序中访问的地址都是实际的物理地址；而且，大多数嵌入式操作系统对内存空间没有保护，各个进程实际上共享一个运行空间。一个进程在执行前，系统必须为它分配足够的连续地址空间，然后全部载入主存储器的连续空间。

由此可见，对于没有 MMU 的嵌入式系统，开发人员不得不参与系统的内存管理。从编译内核开始，开发人员必须告诉系统这块开发板到底拥有多少内存；在开发应用程序时，必须考虑内存的分配情况并关注应用程序需要运行空间的大小。另外，由于采用实存储器管理策略，用户程序与内核及其他用户程序在一个地址空间内，程序开发时要保证不侵犯其他程序的地址空间，以使程序不至于破坏系统的正常工作，或导致其他程序的运行异常。因而，嵌入式系统的开发人员对软件中的一些内存操作要格外小心。

6. 内核加载方式

嵌入式操作系统内核可以在 Flash 上直接运行，也可以加载到内存中运行。Flash 的运行方式是，把内核的可执行文件烧写到 Flash 上，系统启动时从 Flash 的某个地址开始执行。这是很多嵌入式系统所采用的方法。内核加载方式是把内核的压缩文件存放在 Flash 上，系统启动时读取压缩文件并在内存（RAM）里解压，然后开始执行。这种方式相对复杂一些，但是运行速度快，因为 RAM 的存取速率比 Flash 高。

根据嵌入式系统的内存管理机制，嵌入式操作系统对用户程序一般采用静态链接的形式。在嵌入式系统中，应用程序和操作系统内核代码编译、链接生成一个二进制文件来运行。

1.4 嵌入式系统的主要应用领域

后 PC 时代的到来，使得人们越来越多地接触到嵌入式产品。例如，手机、商务通（PDA，Personal Digital Assistant，又称为个人数字助理）等均属于手持的嵌入式产品，VCD 机、机顶盒等也属于嵌入式产品，而全球定位系统（GPS，Global Position System）、数控机床、网络冰箱等同样也都采用嵌入式系统。形式多样的数字化设备正努力把 Internet 连接到人们生活的各个角落，仅就我国内需来说，数字化设备的潜在消费数量将是以亿为单位的。嵌入式软件是数字化产品的核心。如果说 PC 的发展带动了整个桌面软件的发展，那么数字化产品的广泛普及必将为嵌入式软件产业的蓬勃发展提供无穷的推动力。

在未来社会使用嵌入式系统的情形会越来越多。人可以不接触计算机，但不可能不接触嵌入式设备。嵌入式系统可能存在于人们生活的各个角落：在温馨的家中可以用一个嵌入式控制器来管理家里的所有家电，控制家庭和外界网络的连接；出门旅行的时候，嵌入式智能系统利用 GPS 判断具体位置，告知走哪条路比较方便；如果生病住了院，医院的仪器设备大多数都装有嵌入式系统，它们使得诊断更准确，让人们康复更迅速。

中国有世界上最大的家用电子产品消费市场，彩电、VCD 等拥有量都居世界第一位。随着消费结构的改变，人们对家电的灵活性和可控性提出了更高的要求。这些只能通过家电的数字化和网络化来实现；随着电话通信费用和通信类电子产品的价格不断降低，PDA 结合数字手机将成为今后个人数据通信和事务处理的最佳选择之一；同时，现代化的医疗、测控仪器和机电产品也需要专用嵌入式系统的支持。这些需求都极大地刺激了嵌入式系统的发展和产业化的进程。

嵌入式系统将会在如下领域迅速得到应用。

1. 家庭信息化网络

家庭信息化网络在很大程度上是指信息家电, 包括所有能提供信息服务或通过网络系统交互信息的消费类电子产品, 能够提供诸如网络浏览、视频点播、文字处理、电子邮件、个人事务管理等信息服务功能, 同时简单易用、价格低廉、维护简便。

家用电器向数字化和网络化发展的趋势越来越明显。电视机、冰箱、微波炉、电话等都将装备上嵌入式系统, 并通过家庭控制中心与 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, 它不仅可以使现有的模拟电视机接收数字电视节目, 而且可以上网、炒股、点播电影、实现交互式电视等, 依靠网络服务器提供各种服务。据估计, 信息家电(包括网络冰箱、网络空调、家庭网关、数字机顶盒等)未来 10 年间总量可达到数亿台, 成为国民经济新的增长点。信息家电市场的成倍增长将带动嵌入式操作系统和设备的发展, 其市场十分巨大。

2. 移动计算设备

手机、PDA、掌上电脑等各种移动设备具有移动计算功能已成为一种趋势。中国的手机用户数已达全球第一, 而掌上电脑或 PDA 由于易于使用、携带方便、价格便宜, 预计未来几年将得到快速发展。PDA 与手机相融合的趋势已经越来越明显, 人们将越来越习惯于用掌上电脑或 PDA 上网, 从而“将网络随身携带”。

新的手持设备将使无线互联访问成为更加普遍的现象。互联网结合音频应用(如 MP3), 将会促使移动计算设备的市场创立新的销售记录。掌上电脑正成为最受欢迎的移动计算产品之一, 其销售增长速率很快。将手机、掌上电脑和 PDA 相整合, 为移动计算设备提供语音、数据、图像等多媒体传输功能, 市场潜力巨大, 技术上将是大势所趋。

3. 网络设备

网络设备包括路由器(Router)、交换机(Switching)、网络服务器(Web Server)、网络接入点(AP, Access Point)等。基于嵌入式 Linux 操作系统的网络设备价格低廉, 将为企业提供更为廉价的网络方案。美国贝尔实验室预测, 在这一阶段“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”。这里所说的瘦服务器实际上就是嵌入式设备。因此, 设计和制造嵌入式瘦服务器、嵌入式网关和嵌入式 Internet 路由器等已成为嵌入式 Internet 时代的关键和核心技术。

4. 工业控制、仿真、医疗仪器等

工业、医疗卫生、国防等各部门对智能控制的需求不断增长, 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。为了适应各方面的需要, 嵌入式 MPU 通常具有精简指令集计算机(RISC, Reduced Instruction Set Computer)的体系结构, 数据位数从最初的 4 位、8 位到现在广泛使用的 16 位、32 位和 64 位, 寻址空间从 64KB 到 16MB 甚至更大, 处理速度从 0.1 MIPS (Million Instructions Per Second, 百万条指令每秒)到 2000 MIPS, 常用封装从 8 个引脚到 144 个引脚, 功耗也有了明显降低, 集成度得到进一步提高。