



物联网 与嵌入式系统开发

刘连浩 编著

- ◎ 详细地阐述了物联网与嵌入式系统的关系
- ◎ 讲述了基于ARM和Linux的嵌入式系统开发
- ◎ 配有教学课件，方便教学使用



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

国家级特色专业（物联网工程）规划教材

物联网与嵌入式系统开发

刘连浩 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是依托中南大学国家级特色专业(物联网工程)的建设,结合国内物联网工程专业的教学情况编写的。本书主要介绍物联网应用中的嵌入式系统的开发,以 S3C2440 为硬件,以嵌入式 Linux 为软件,详细介绍了物联网与嵌入式系统的关系、ARM Cortex 的体系结构、ARM 的指令和程序设计、S3C2440 的硬件结构与编程、嵌入式 Linux 的开发和移植等内容,最后给出了在物联网应用中常用的嵌入式系统开发实例。

本书可作为普通高等学校物联网工程及其相关专业的教材,也可供从事物联网及其相关专业的人士阅读。

本书配有教学课件,读者可登录华信教育资源网(www.hxedu.com.cn)免费注册后下载。

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

物联网与嵌入式系统开发/刘连浩编著. —北京:电子工业出版社,2012.9

国家级特色专业(物联网工程)规划教材

ISBN 978-7-121-17997-6

I. ①物… II. ①刘… III. ①互联网络—应用—高等学校—教材②智能技术—应用—高等学校—教材
③微型计算机—系统开发—高等学校—教材 IV. ①TP393.4②TP18③TP360.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 194564 号

责任编辑:田宏峰 特约编辑:牛雪峰

印 刷:三河市双峰印刷装订有限公司

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:787×980 1/16 印张:23.75 字数:520 千字

印 次:2012 年 9 月第 1 次印刷

印 数:4 000 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。

出版说明

物联网是通过射频识别 (RFID)、红外感应器、全球定位系统、激光扫描器等信息传感设备,按约定的协议,把任何物品与互联网相连接,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概念。物联网是继计算机、互联网和移动通信之后的又一次信息产业的革命性发展。物联网产业具有产业链长、涉及多个产业群的特点,其应用范围几乎覆盖了各行各业。

2009年8月,物联网被正式列为国家五大新兴战略性新兴产业之一,写入“政府工作报告”,物联网在中国受到了全社会极大的关注。

2010年年初,教育部下发了高校设置物联网专业申报通知,截至目前,我国已经有100多所高校开设了物联网工程专业,其中有包括中南大学在内的9所高校的物联网工程专业于2011年被批准为国家级特色专业建设点。

从2010年起,部分学校的物联网工程专业已经开始招生,目前已经进入专业课程的学习阶段,因此物联网工程专业的专业课教材建设迫在眉睫。

由于物联网所涉及的领域非常广泛,很多专业课涉及其他专业,但是原有的专业课的教材无法满足物联网工程专业的教学需求,又由于不同院校的物联网专业的特色有较大的差异,因此很有必要出版一套适用于不同院校的物联网专业的教材。

为此,电子工业出版社依托国内高校物联网工程专业的建设情况,策划出版了“国家级特色专业(物联网工程)规划教材”,以满足国内高校物联网工程的专业课教学的需求。

本套教材紧密结合物联网专业的教学大纲,以满足教学需求为目的,以充分体现物联网工程的专业特点为原则来进行编写。今后,我们将继续和国内高校物联网专业的一线教师合作,以完善我国物联网工程专业的专业课程教材的建设。

教材编委会

编委会主任：施荣华 黄东军

编委会成员：（按姓氏字母拼音顺序排序）

董 健 高建良 桂劲松 贺建飏
黄东军 刘连浩 刘少强 刘伟荣
鲁鸣鸣 施荣华 张士庚

嵌入式系统是融合计算机软/硬件技术、半导体技术、电子技术和通信技术，与各行业的具体应用相结合后的产物。嵌入式 CPU 从 8 位、16 位发展到 32 位、64 位，嵌入式系统无处不在，已普遍应用于国防电子、数字家庭、工业自动化、汽车电子、医学科技、消费电子、无线通信、电力系统等国民经济的主要行业。在众多嵌入式处理器中，ARM 具有功能强、成本低、功耗少等特点。基于 ARM 技术的微处理器应用约占 32 位 RISC 微处理器 75% 以上的市场份额。

物联网是一种建立在互联网上的泛在网络，通过各种有线和无线网络与互联网融合，综合应用了海量的传感器、智能处理终端、全球定位系统等，实现物与物、物与人，所有的物品与网络的连接，方便识别、管理和控制。物联网引领了信息产业革命的第三次浪潮，将成为未来社会经济发展、社会进步和科技创新的最重要的基础设施，物联网是新一代信息技术的重要组成部分，是互联网与嵌入式系统发展到高级阶段的融合。物联网的物联源头是嵌入式应用系统的 4 个通道接口（I/O 接口）：与物理参数相连的是前向通道的传感器接口；与物理对象相连的是后向通道的控制接口；实现人-物交互的是人机交互接口；实现物-物交互的是通信接口。物联网的实现需要用到嵌入式技术，嵌入式系统作为“物联网”的核心，是当前最热门最有前景的 IT 应用领域之一。因此，普通高等院校急需一本嵌入式与物联网方面的教材。

本书以 ARM 为例，介绍嵌入式系统的基本原理和开发方法；以嵌入式 Linux 操作系统为例，介绍实时操作系统的基本功能、软件设计方法和嵌入式交叉编译环境的建立方法；以物联网中常用操作系统 TinyOS 和传感器网络编程 nesC 语言为例，介绍物联网的应用开发。

全书共分为 8 章。主要内容有：嵌入式系统概述，主要介绍嵌入式的概念、发展历史、应用领域、发展趋势、物联网与嵌入式系统；ARM 体系结构、存储结构和其他部件；ARM 指令系统、汇编语言程序设计和 C 语言程序设计方法；以 S3C2440 处理器为例介绍 ARM 处理器的硬件结构和接口编程；嵌入式 Linux 操作系统的基础知识，主要介绍进程管理、内存管理、设备管理、文件系统以及其他常用嵌入式操作系统；嵌入式操作系统应用开发，主要介绍创建虚拟机、交叉编译环境、Linux 常用命令和嵌入式 Linux 应用编程；Bootloader

和嵌入式 Linux 操作系统移植；物联网中常用的操作系统 TinyOS 和传感器网络编程 nesC 语言。

本书由刘连浩编著，王智超在本书的编写过程中做了大量的工作。在本书的编写中还得到了李刚、贺建飏、曾锋等老师的大力支持，在此特一并表示感谢！

由于作者水平有限，加之时间仓促，书中错误和不足之处在所难免，欢迎读者批评指正。

编著者

2012年8月

第 1 章 嵌入式系统概述	1
1.1 嵌入式系统简介.....	2
1.2 嵌入式系统的组成.....	3
1.3 嵌入式处理器简介.....	7
1.4 嵌入式系统应用.....	9
1.5 嵌入式系统发展趋势.....	11
1.6 物联网与嵌入式系统.....	12
1.7 嵌入式开发工具.....	14
1.7.1 软件开发工具.....	14
1.7.2 硬件开发工具.....	15
思考与习题.....	16
第 2 章 ARM 体系结构	17
2.1 ARM 处理器基础.....	18
2.1.1 ARM 简介.....	18
2.1.2 冯·诺依曼结构、哈佛结构与改进的哈佛结构.....	18
2.1.3 CISC 与 RISC.....	19
2.1.4 流水线.....	19
2.1.5 ARM 处理器的命名方式.....	23
2.2 ARM 处理器系列.....	24
2.2.1 ARM 处理器架构.....	24
2.2.2 常用 ARM 处理器系列简介.....	27
2.3 ARM 体系结构.....	31
2.3.1 ARM 的基本数据类型.....	31
2.3.2 ARM 处理器的运行模式.....	31
2.3.3 ARM 处理器的运行状态.....	32
2.3.4 存储器的大/小端.....	32

2.3.5	ARM 的寄存器组织	33
2.3.6	异常处理	36
2.4	ARM 存储器结构	38
2.4.1	ARM 存储器接口	39
2.4.2	ARM Cache 结构	40
2.4.3	ARM 存储器管理单元 MMU	45
2.4.4	地址变换后备缓冲器	45
2.4.5	ARM 的 MMU 结构	46
2.5	ARM 的其他部件	54
2.5.1	存储器映像 I/O	55
2.5.2	直接存储器存取	55
2.5.3	中断 IRQ 和快速中断 FIQ	55
2.5.4	ARM 协处理器接口	56
2.5.5	ARM AMBA 接口	57
	思考与习题	58
第 3 章	ARM 指令集与程序设计	59
3.1	ARM 指令系统特点	60
3.1.1	数据类型	60
3.1.2	ARM 指令特点	60
3.2	ARM 指令系统	61
3.2.1	ARM 指令的寻址方式	62
3.2.2	ARM 指令的条件执行	64
3.2.3	Load/Store 类指令	65
3.2.4	ARM 数据处理类指令	68
3.2.5	ARM 转移类指令	73
3.3	Thumb 指令	74
3.3.1	Thumb 指令概述	74
3.3.2	Thumb 存储器访问指令	75
3.3.3	Thumb 数据处理指令	78
3.3.4	分支指令	83
3.3.5	中断和断点指令	85
3.4	ARM 伪操作与伪指令	85
3.4.1	符号定义与变量赋值伪操作	85
3.4.2	数据定义伪操作	86

3.4.3	汇编控制伪操作	87
3.4.4	信息报告伪操作	89
3.4.5	指令集选择伪操作	89
3.4.6	杂项伪操作	89
3.4.7	ADR、ADRL、LDR 伪指令	89
3.4.8	NOP 伪指令	91
3.5	ARM 汇编程序设计	92
3.5.1	汇编语言的基本格式	92
3.5.2	汇编语言的子程序调用	93
3.6	ARM C 语言基础及混合编程	93
3.6.1	ATPCS 概述	94
3.6.2	C 语言与汇编语言混合编程	96
3.7	超级终端的使用	99
3.8	ADS 集成开发环境的使用	100
3.8.1	安装与卸载 ADS	100
3.8.2	使用 ADS 创建工程	101
3.8.3	使用 AXD 进行仿真	108
	思考与习题	110
第 4 章	基于 S3C2440 的硬件结构与接口编程	111
4.1	S3C2440 简介	112
4.1.1	S3C2440A 片上主要功能	112
4.1.2	S3C2440A 特点	114
4.2	S3C2440A 的存储器接口	118
4.2.1	S3C2440A 存储器控制器	118
4.2.2	NAND Flash 控制器	119
4.2.3	SDRAM 原理	123
4.3	时钟和电源管理	125
4.4	DMA	125
4.4.1	DMA 请求源	126
4.4.2	DMA 工作过程	126
4.4.3	基本 DMA 时序	127
4.4.4	DMA 传输大小	127
4.4.5	DMA 专用寄存器	127
4.5	I/O 端口	132

4.6	定时器	137
4.7	ARM 中断	139
4.8	LCD	148
4.8.1	LCD 原理	148
4.8.2	ARM LCD 驱动控制	149
4.8.3	LCD 控制器特殊寄存器	150
4.9	A/D 转换器和触摸屏	160
4.9.1	A/D 转换器简介	160
4.9.2	触摸屏的工作原理及种类	161
4.9.3	A/D 转换器和触摸屏接口	162
4.10	异步串行口通信	166
4.10.1	串行通信概述	166
4.10.2	S3C2440A 异步串行口简介	171
4.11	SPI、IIC、IIS、SD 卡总线接口	181
4.11.1	SPI 总线接口	181
4.11.2	IIC 总线接口	182
4.11.3	IIS 总线接口	190
4.11.4	SD 卡	197
4.12	USB Host/Device 控制器	203
	思考与习题	205
第 5 章	嵌入式操作系统	206
5.1	操作系统简介	207
5.1.1	操作系统	207
5.1.2	嵌入式操作系统	209
5.2	μ C/OS-II 简介	211
5.3	VxWorks 简介	212
5.4	WinCE 简介	214
5.5	Linux 简介	217
5.5.1	Linux 简介	217
5.5.2	Linux 特点	217
5.5.3	嵌入式 Linux	218
5.5.4	Linux 内核版本与发行版本	218
5.5.5	Linux 进程管理	219
5.5.6	存储管理	224

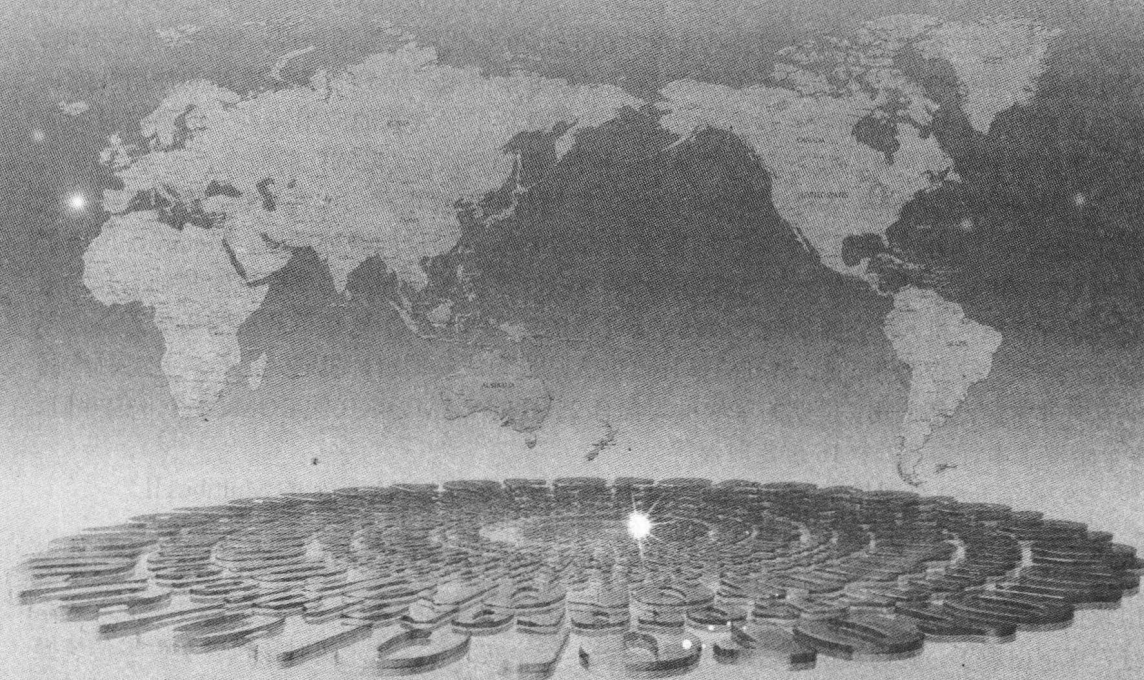
5.5.7	文件系统	227
5.5.8	设备管理	229
5.5.9	Linux 内核模块	231
5.5.10	Linux 配置文件	232
5.5.11	Linux 启动流程简介	233
5.6	其他嵌入式操作系统	236
5.6.1	其他国外常用嵌入式操作系统	236
5.6.2	其他国内常用嵌入式操作系统	237
	思考与习题	238
第 6 章	嵌入式 Linux 应用开发	239
6.1	Linux 安装	240
6.1.1	安装 vmware	240
6.1.2	创建虚拟机	240
6.1.3	安装 fedora14	244
6.1.4	安装 VMware Tools	250
6.2	交叉编译环境的建立	251
6.2.1	交叉编译	251
6.2.2	交叉编译器的安装	251
6.3	Linux 常用命令	253
6.3.1	系统管理命令	253
6.3.2	文件管理命令	255
6.3.3	文件查看命令	257
6.3.4	进程管理命令	258
6.3.5	网络管理命令	259
6.3.6	用户管理命令	259
6.4	minicom 的使用	260
6.4.1	minicom 的安装	260
6.4.2	minicom 的设置	260
6.4.3	minicom 的使用	261
6.5	vi 程序的使用	261
6.5.1	启动 vi	262
6.5.2	常用 vi 命令	262
6.6	gcc 程序的使用	263
6.6.1	gcc 简介	263

6.6.2	gcc 编译程序的流程	264
6.6.3	gcc 选项	264
6.7	gdb 程序的使用	265
6.7.1	gdb 简介	265
6.7.2	gdb 的调试程序流程	265
6.7.3	gdb 命令	265
6.8	makefile 简介	266
6.8.1	makefile 简介	266
6.8.2	makefile 的规则	266
6.8.3	makefile 文件的命名	266
6.8.4	makefile 的组成	267
6.8.5	简单的 makefile 示例	267
6.8.6	使用变量	268
6.8.7	使用隐式规则	268
6.8.8	伪目标	269
6.9	Linux 应用程序编程	269
6.9.1	文件编程	269
6.9.2	进程创建	273
6.9.3	进程间通信之管道	278
6.9.4	进程间通信之有名管道	280
6.9.5	进程间通信之信号	283
6.9.6	进程间通信之信号量	290
6.9.7	进程间通信之消息队列	294
6.9.8	进程间通信之共享内存	298
6.9.9	原子操作	300
6.9.10	线程	300
6.9.11	网络编程基础	306
6.9.12	Linux 中断	318
	思考与习题	320
第 7 章	嵌入式 Linux 操作系统的移植	321
7.1	Bootloader	322
7.1.1	Bootloader 简介	322
7.1.2	常见 Bootloader	323
7.2	Linux 的移植	324

7.2.1	安装前的准备工作	324
7.2.2	Linux 的移植步骤	326
7.3	根文件系统的制作	334
	思考与习题	338
第 8 章	物联网中的常用嵌入式系统	339
8.1	TinyOS 简介	341
8.1.1	TinyOS 概述	341
8.1.2	TinyOS 的特点	343
8.1.3	TinyOS 开发平台	343
8.1.4	TinyOS 开发案例	344
8.1.5	TinyOS 的基本概念	344
8.2	安装 TinyOS	345
8.3	nesC 简介	349
8.3.1	nesC 概述	349
8.3.2	nesC 基本概念	350
8.3.3	一个简单的 nesC 编程示例	356
8.3.4	TOSSIM 仿真	357
8.4	TinyOS 内部机制简介	358
8.4.1	TinyOS 程序运行机制分析	358
8.4.2	TinyOS 的调度机制	359
8.4.3	TinyOS 的通信模型	360
8.4.4	TinyOS 的能量管理	362
	思考与习题	362
	参考文献	363

第 1 章

嵌入式系统概述



1.1 嵌入式系统简介

1. 嵌入式系统的概念

根据电气和电子工程师协会 (IEEE) 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”(devices used to control, monitor or assist the operation of equipment, machinery or plants)。从中可以看出嵌入式系统是软件和硬件的综合体, 还可以涵盖机械等附属装置。目前国内一个普遍被认同的定义是: 以应用为中心、以计算机技术为基础、软硬件可裁剪、适应应用系统对功能、可靠性、成本、体积、功耗严格要求的专用计算机系统。

嵌入式系统是把计算机直接嵌入到应用系统之中, 它融合了计算机软/硬件技术、通信技术和半导体微电子技术, 是信息技术 (Information Technology, IT) 的最终产品。

嵌入式系统是面向用户、面向产品、面向应用的, 它必须与具体应用相结合才会具有生命力、才更具有优势。即嵌入式系统是与应用紧密结合的, 它具有很强的专用性, 必须结合实际系统需求进行合理的裁减利用。

2. 嵌入式系统发展史

20 世纪 70 年代出现单片机, 今天各式各样的嵌入式微处理器、微控制器已得到的大规模应用。嵌入式系统的出现最初是基于单片机的。70 年代单片机的出现, 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。

1971 年 11 月, Intel 公司成功地把算术运算器和控制器电路集成在一起, 推出了第一款微处理器 Intel 4004, 其后各厂商陆续推出了许多 8 位、16 位的微处理器。Motorola 推出了 68HC05, Zilog 公司推出了 Z80 系列单板机。在 80 年代初, Intel 在单板机的基础上开发出了 MCS-48 单片机, 在它的基础上成功研制了 MCS-51 单片机, 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之一, 在各种产品中有着非常广泛的应用。早期的单片机均含有 256B 的 RAM、4KB 的 ROM、4 个 8 位并口、1 个全双工串行口、2 个 16 位定时器等。

1976 年 Intel 公司推出 Multibus, 1983 年扩展为带宽达 40Mbit/s 的 Multibus II。

1978 年由 Prolog 设计的简单 STD 总线广泛应用于小型嵌入式系统。

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、更低的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, 这时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、任务间通信、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) 公司的 PSOS、IMG 公司的 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。这些嵌入式实时多任务操作系统的出现，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。

20 世纪 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。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。

21 世纪无疑是一个网络的时代，未来的嵌入式设备为了适应网络发展的要求，必然要求硬件上提供各种网络通信接口。新一代的嵌入式处理器已经开始内嵌网络接口，除了支持 TCP/IP 协议，还有的支持 IEEE1394、USB、CAN、Bluetooth 或 IrDA 等通信接口中的一种或者几种，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。在软件方面，系统内核支持网络模块，甚至可以在设备上嵌入 Web 浏览器，真正实现随时随地使用各种设备上网。

嵌入式系统早期主要应用于军事及航空、航天等领域，以后逐步广泛地应用于工业控制、仪器仪表、汽车电子、通信和家用消费类等领域。随着 Internet 的发展，新型的嵌入式系统正朝着信息家电（Information Appliance, IA）和 3C（Computer, Communication & Consumer）产品方向发展。

1.2 嵌入式系统的组成

嵌入式计算机系统可以抽象成一个典型的组成模型：硬件层、中间层、软件层和功能层，如图 1-1 所示。

1. 硬件层

硬件层中包含嵌入式微处理器、存储器（如 SDRAM、ROM、Flash 等）、通用设备接口和 I/O 接口（如 A/D、D/A、I/O 等）。在一片嵌入式处理器基础上添加电源电路、时钟电路和存储器电路，就可构成一个嵌入式核心控制模块。其中操作系统和应用程序都可以固化在 ROM 中。嵌入式系统硬件如图 1-2 所示。

1) 嵌入式微处理器

嵌入式系统硬件层的核心是嵌入式微处理器，嵌入式微处理器与通用 CPU 最大的不同在于嵌入式微处理器大多工作在为特定用户群所专用设计的系统中，它将通用 CPU 许多由板卡完成的任务集成在芯片内部，从而有利于嵌入式系统在设计时趋于小型化，同时还具有很高的效率和可靠性。