



工业和信息化部普通高等教育
“十二五”规划教材立项项目

王诚梅霆 主编
王奇 范山岗 赵建立 汪胡青 编著

ARM嵌入式系统 原理与开发

21世纪高等院校信息与通信工程规划教材
21st Century University Planned Textbooks of Information and Communication Engineering

Principle and Development
of ARM Embedded System



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



精品系列



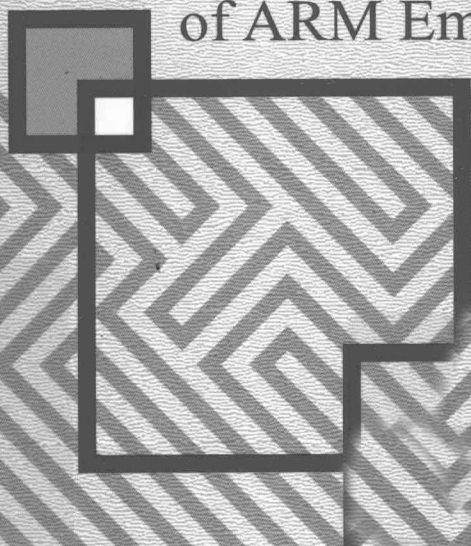
工业和信息化部普通高等教育
“十二五”规划教材立项项目

王诚梅霆 主编
王奇 范山岗 赵建立 汪胡青 编著

ARM嵌入式系统 原理与开发

21世纪高等院校信息与通信工程规划教材
21st Century University Planned Textbooks of Information and Communication Engineering

Principle and Development
of ARM Embedded System



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



精品系列

图书在版编目(CIP)数据

ARM嵌入式系统原理与开发 / 王诚, 梅霆主编. --
北京: 人民邮电出版社, 2011.6
21世纪高等院校信息与通信工程规划教材
ISBN 978-7-115-25252-4

I. ①A… II. ①王… ②梅… III. ①微处理器,
ARM—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073101号

内 容 提 要

本书从实际应用的角度出发, 全面介绍嵌入式系统相关的概念、基于 ARM 系统的嵌入式开发模式及编程、ARM 体系结构、ARM 汇编及 C 语言编程、基于 S3C2410 的硬件结构与接口编程、嵌入式 Linux 原理及编程、基于嵌入式系统的应用开发方法及应用实例, 最后结合具体实验箱给出了嵌入式系统实验指导等方面的知识。

本书重点突出, 层次分明, 注重理论与实践的联系, 紧跟最新的开发技术及平台, 不仅有详细的理论基础知识介绍, 还有相关的开发案例以供参考, 学习性和实用性较强。

本书可作为高等学校电子信息工程、通信工程、广电工程、软件工程、电气工程、自动化等相关专业的本科教材, 同时也可供从事嵌入式系统应用与开发的工程技术人员学习参考。

21 世纪高等院校信息与通信工程规划教材

ARM 嵌入式系统原理与开发

- ◆ 主 编 王 诚 梅 霆
编 著 王 奇 范山岗 赵建立 汪胡青
责任编辑 蒋 亮
- ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号
邮编 100061 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京鑫正大印刷有限公司印刷
- ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 23
字数: 566 千字

2011 年 6 月第 1 版

2011 年 6 月北京第 1 次印刷

ISBN 978-7-115-25252-4

定价: 42.00 元

读者服务热线: (010)67132692 印装质量热线: (010)67129223
反盗版热线: (010)67171154



嵌入式系统是融合了计算机软硬件技术、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。嵌入式技术自诞生之日起就被广泛应用于军事、航空航天、工业控制、仪器仪表、汽车电子、医疗仪器等众多领域。20 世纪 90 年代后，信息技术和网络技术飞速发展，消费电子、通信网络、信息家电等的巨大需求加速了嵌入式技术的发展，扩大了嵌入式技术的应用领域。

近年来，我国在嵌入式系统设计和应用开发方面取得了长足进步，嵌入式领域日益增长的需求使得我们面临人才匮乏的尴尬局面。在此背景下，嵌入式技术的学习与研究成为热点，很多高校开设了嵌入式技术的相关课程。本书可作为高等院校嵌入式系统课程的教材，也可作为从事嵌入式系统应用与开发的工程技术人员的参考书。

在众多嵌入式处理器中，ARM 处理器以其合理的结构、优良的性能、颇具市场竞争力的价格等优点，成为嵌入式处理器的主流产品。随着嵌入式应用的深入，软件设计的复杂度越来越高，操作系统成为应用软件设计的基础和开发平台，在嵌入式系统中起到承上启下的作用。在众多的嵌入式操作系统中，嵌入式 Linux 因其开源性和优良的性能，得到广泛的应用。由于嵌入式目标系统的资源限制，无法建立复杂的开发平台，在嵌入式系统的开发过程中，一般采用交叉开发方式。

本书以 ARM 处理器为例，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开发环境的建立方法等；最后通过两个实际综合应用案例，给出完整的嵌入式系统解决方案。本书在介绍嵌入式系统基本原理的同时，从应用角度出发，介绍了大量的开发实例。

本书共分 7 章。主要内容有：嵌入式系统概述，主要介绍嵌入式系统的概念、发展历史、应用领域和发展趋势；介绍 ARM 处理器的体系结构和指令系统；介绍 ARM 汇编语言程序设计和 C 语言程序设计方法；以 S3C2410 处理器为例介绍 ARM 处理器的硬件结构和接口编程方法；介绍嵌入式 Linux 操作系统的基础知识，包括进程管理、内存管理、设备管理、文件系统以及嵌入式 Linux 的引导过程；介绍嵌入式程序设计方法，结合实例介绍嵌入式系统的开发流程；结合实践教学的需要，从嵌入式系统开发的角度介绍嵌入式系统的开发工具、交叉开发环境的建立方法及相关基础知识。

本书由王诚、梅霆主编，王奇、范山岗、赵建立、汪胡青编著。本书在编写过程中得到了北京博创兴业科技有限公司的大力支持。该公司提供的 UP-NetARM2410-S 嵌入式系统实验教学平台，为本书的编著提供了测试环境。

由于编者的水平有限，加之时间仓促，书中难免存在错误与不妥之处，欢迎读者批评指正。

编者

2011 年 4 月

目 录

第1章 嵌入式系统概述	1	3.4.1 ATPCS 概述	66
1.1 嵌入式系统的概念	1	3.4.2 基本 ATPCS	66
1.2 嵌入式系统的历史	2	3.4.3 支持 ARM 程序和 Thumb 程序混合使用的 ATPCS	68
1.3 嵌入式系统的组成	4	3.4.4 C 语言及汇编语言混合编程	68
1.3.1 嵌入式系统的组成结构	4	思考题与习题	74
1.3.2 嵌入式处理器	8	第4章 基于 S3C2410 的硬件结构与 接口编程	75
1.3.3 典型的嵌入式操作系统	9	4.1 S3C2410 简介	75
1.4 嵌入式系统的特点	12	4.1.1 S3C2410X 集成的主要片上功能	76
1.5 嵌入式系统的应用	12	4.1.2 S3C2410X 的特点	77
1.6 嵌入式系统的发展趋势	16	4.2 S3C2410X 的存储器及其控制	81
思考题与习题	18	4.2.1 S3C2410X 的存储器控制器	81
第2章 ARM 体系结构与指令集	19	4.2.2 NAND Flash 控制器	82
2.1 ARM 处理器基础	19	4.3 时钟和电源管理	85
2.1.1 ARM 体系架构发展	19	4.4 DMA	85
2.1.2 ARM 处理器内核系列	20	4.4.1 DMA 请求源	86
2.1.3 ARM 体系架构分析	24	4.4.2 DMA 工作过程	86
2.1.4 ARM 处理器模式	27	4.4.3 基本的 DMA 时序	87
2.1.5 ARM 内部寄存器	27	4.4.4 DMA 传输尺寸	87
2.1.6 ARM 体系的异常处理	31	4.4.5 DMA 专用寄存器	88
2.1.7 ARM 体系的存储系统	33	4.4.6 DMA 编程实例	94
2.2 ARM 指令系统	34	4.5 I/O 端口	97
2.2.1 ARM 指令格式	34	4.5.1 S3C2410X I/O 端口的工作机制	97
2.2.2 ARM 指令寻址方式	35	4.5.2 S3C2410X 端口的编程实例	106
2.2.3 ARM 指令集	38	4.6 定时器	106
2.3 Thumb 指令系统	48	4.6.1 S3C2410X 定时器概述	106
2.3.1 Thumb 状态寄存器组织	49	4.6.2 S3C2410X 定时器的工作原理	107
2.3.2 Thumb 指令集	50	4.6.3 PWM 输出控制直流电动机 编程实例	116
思考题与习题	59	4.7 异步串口通信	119
第3章 ARM 汇编语言程序设计	60	4.7.1 异步串口通信概述	119
3.1 ARM 汇编的语句格式	60	4.7.2 S3C2410X 的异步串行口简介	121
3.1.1 符号命名规则	60	4.7.3 S3C2410X UART 工作原理	123
3.1.2 ARM 汇编语言伪操作	60	4.7.4 S3C2410X UART 编程实例	130
3.1.3 ARM 汇编语言伪指令	61	4.8 A/D 转换器	133
3.2 ARM 汇编的程序结构	62	4.8.1 A/D 转换器简介	133
3.3 ARM 汇编语言程序设计举例	64		
3.4 ARM C 语言基础及混合编程	65		

4.8.2 A/D 转换的重要指标	135	第 6 章 嵌入式系统应用开发及实例	283
4.8.3 ARM 自带的 10 位 A/D 转换器	136	6.1 引言	283
4.8.4 A/D 转换器在扩展版的接法	138	6.2 软件工程及嵌入式软件工程	285
4.8.5 A/D 编程实例	138	6.2.1 概述	285
4.9 ARM 中断	139	6.2.2 软件需求	287
4.10 LCD	149	6.2.3 软件设计	288
4.10.1 LCD 原理	149	6.2.4 统一建模语言	289
4.10.2 LCD 的驱动控制	150	6.2.5 嵌入式软件编程	293
4.10.3 与 ARM 自带 LCD 驱动器 有关的寄存器	152	6.3 基于 ECX 嵌入式平台的旅游 系统应用实例	294
4.10.4 LCD 编程实例	160	6.3.1 应用实例背景	294
4.11 触摸屏	164	6.3.2 设计目标	295
4.11.1 触摸屏的工作原理	164	6.3.3 系统总体设计	295
4.11.2 触摸屏的控制	165	6.4 基于 Android 操作系统平台的 点餐系统应用实例	312
4.11.3 编程要点	167	6.4.1 Android 简介	312
4.11.4 S3C2410X 中触摸屏接口的 相关寄存器	167	6.4.2 Android 架构	313
4.11.5 触摸屏编程实例	168	6.4.3 Android 未来及前景	314
4.12 键盘及 LED 控制	172	6.4.4 Android 应用程序基础	315
4.12.1 键盘及 LED 的接口原理	172	6.4.5 Android 开发环境搭建	317
4.12.2 I ² C 总线	179	6.4.6 Android 工程目录结构	318
4.12.3 键盘及 LED 控制编程实例	187	6.4.7 点餐系统实现	319
第 5 章 嵌入式 Linux 操作系统	197	思考题与习题	328
5.1 操作系统简介	197	第 7 章 嵌入式系统开发的实验基础	329
5.1.1 操作系统	197	7.1 引言	329
5.1.2 嵌入式操作系统	198	7.2 ADS 集成开发环境简介	329
5.2 嵌入式 Linux 操作系统	199	7.2.1 ADS 软件组成	329
5.2.1 Linux 介绍	200	7.2.2 使用 CodeWarrior IDE	333
5.2.2 Linux 作为嵌入式操作系统的优势	202	7.2.3 使用 AXD IDE	340
5.2.3 进程管理	203	7.3 基于嵌入式 Linux 系统的 软件开发基础	344
5.2.4 存储管理	219	7.3.1 嵌入式 Linux 系统介绍	344
5.2.5 文件系统	227	7.3.2 Linux 常用命令介绍	344
5.2.6 设备管理	245	7.3.3 Linux 系统下的 vi 编辑器	347
5.2.7 嵌入式 Linux 引导过程	261	7.4 嵌入式 Linux 下交叉开发环境的 建立与软件开发过程	348
5.3 基于嵌入式 Linux 开发应用实例	266	7.4.1 嵌入式教学实验系统简介	349
5.3.1 Linux 启动流程	266	7.4.2 嵌入式交叉开发环境的建立	352
5.3.2 从“零”到一套精简的 Linux 平台	267	7.4.3 基于 Linux 的应用程序的开发步骤	359
5.3.3 从 x86 平台到嵌入式平台	272	思考题与习题	361
5.3.4 Linux 平台上用户空间程序与 内核交互方式	273	参考文献	362
5.3.5 Linux 平台上网络工具工作框架	277		
思考题与习题	282		

经过 30 多年的发展,嵌入式系统已经广泛应用在科学研究、工程设计、军事技术、各类产业、商业文化艺术、娱乐业、人们的日常生活等方方面面。随着数字信息技术和网络技术的飞速发展,计算机、通信、消费电子的一体化趋势日益明显,这必将培育出一个庞大的嵌入式应用市场。嵌入式系统技术也成为当前关注、学习、研究的热点。

1.1 嵌入式系统的概念

嵌入式系统是硬件和软件紧密结合的单机计算机系统。“嵌入式”反映了这些系统通常是更大系统中的一个完整的一部分,称为嵌入的系统。嵌入的系统可以共存多个嵌入式系统。嵌入式系统本身是一个相对模糊的定义,不同的组织对其定义也略有不同,但大意是相同的,我们来看一下嵌入式系统的相关定义。

按照电器工程协会(IEEE)的定义,嵌入式系统是用来控制、监控或者辅助操作机器、装置、工厂等大规模系统的设备(devices used to control, monitor, or assist the operation of equipment, machinery or plants)。这个定义主要是从嵌入式系统的用途方面来进行定义的。更具一般性,也是在多数书籍资料中使用的关于嵌入式系统的定义:嵌入式系统是指以应用为中心,以计算机技术为基础,软件、硬件可剪裁,适应应用系统对功能、可靠性、成本、体积和功耗严格要求的专用计算机系统。它包括硬件和软件两部分。硬件包括处理器/微处理器、存储器及外设器件和 I/O 端口、图形控制器等。软件包括操作系统软件(OS)(要求实时和多任务操作)和应用程序编程。有时设计人员把这两种软件组合在一起。应用程序控制着系统的运作和行为,而操作系统控制着应用程序编程与硬件的交互作用。

由以上嵌入式系统的定义可知,嵌入式系统在实际数量上远远超过了各种通用计算机,一台通用计算机的外部设备中就包含了 5~10 个嵌入式微处理器,键盘、鼠标、软驱、硬盘、显示卡、显示器、Modem、网卡、声卡、打印机、扫描仪、摄像头、USB 集线器等均是由嵌入式处理器控制的。

嵌入式计算机系统同通用型计算机系统相比具有以下特点。

① 嵌入式系统通常是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,执行的是带有特定要求的预先定义的任务,如实时性、安全性、可用性等。它通常具有低功耗、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，从而有利于嵌入式系统设计趋于小型化，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。这一点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。

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高的性能，这样才能在具体应用中对处理器的选择更具有竞争力。由于嵌入式系统通常需要进行大量生产，所以单个的成本节约，能够随着产量进行成百上千的放大。

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，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本身中，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，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，必须有一套开发工具和环境才能进行开发。

通用计算机与嵌入式系统的对比如表 1-1 所示。

表 1-1 通用计算机与嵌入式系统的对比

特 征	通用计算机	嵌入式系统
形式和类型	看得见的计算机 按其体系结构、运算速度和结构规模等因素分为大、中、小型和微机	看不见的计算机 形式多样，应用领域广泛，按应用来分类
组成	通用处理器、标准总线 and 外设 软件和硬件相对独立	面向应用的嵌入式微处理器，总线和外部接口 多集成在处理器内部 软件与硬件是紧密集成在一起的
开发方式	开发平台和运行平台都是通用计算机	采用交叉开发方式，开发平台一般是通用计算机，运行平台是嵌入式系统
二次开发	应用程序可重新编制	一般不能再编程

1.2 嵌入式系统的历史

事实上，在很早以前，嵌入式这个概念就已经存在了。在通信方面，嵌入式系统在 20 世纪 60 年代就用于对电子机械电话交换的控制，当时被称为“存储式程序控制系统”(Stored Program Control)。

嵌入式计算机的真正发展是在微处理器问世之后。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，其后各厂家陆续推出了许多 8 位、16 位的微处理器，包括 Intel 8080/8085、8086，Motorola 的 6800、68000，以及 Zilog 的 Z80、Z8000 等。以这些微处理器作为核心所构成的系统，广泛地应用于仪器仪表、医疗设备、机器人、家用电器等领域。微处理器的广泛应用形成了一个广阔的嵌入式应用市场，计算机厂家开始大量的以插件方式向用户提供 OEM 产品，再由用户根据自己的需要选择一套适合的 CPU 板、存储器板以及各式 I/O 插件板，从而构成专用的嵌入式计算机系统，

并将其嵌入到自己的系统设备中。

从灵活兼容考虑,出现了系列化、模块化的单板机。流行的单板机有 Intel 公司的 iSBC 系列、Zilog 公司的 MCB 等。后来人们可以不必从选择芯片开始来设计一台专用的嵌入式计算机,只要选择各功能模块,就能够组建一台专用计算机系统。用户和开发者都希望从不同的厂家选购最适合的 OEM 产品,插入外购或自制的机箱中就形成新的系统,这样就希望插件是互相兼容的,也就导致了工业控制微机系统总线的诞生。1976 年 Intel 公司推出 Multibus, 1983 年扩展为带宽达 40MB/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。

20 世纪 80 年代可以说是各种总线层出不穷、群雄并起的时代。随着微电子工艺水平的提高,集成电路制造商开始把嵌入式应用中所需要的微处理器、I/O 接口、A/D 转换、D/A 转换、串行接口以及 RAM、ROM 等部件系统集成到一个 VLSI 中,从而制造出面向 I/O 设计的微控制器,即单片机,成为嵌入式计算机系统异军突起的一支新秀。其后发展的 DSP 产品则进一步提升了嵌入式计算机系统的技术水平,并迅速地渗入到消费电子、医用电子、智能控制、通信电子、仪器仪表、交通运输等各种领域。

20 世纪 90 年代,在分布控制、柔性制造、数字化通信、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。面向实时信号处理算法的 DSP 产品向着高速、高精度、低功耗发展。Texas 推出的第三代 DSP 芯片 TMS320C30,引导着微控制器向 32 位高速智能化发展。在应用方面,掌上电脑、手持 PC、机顶盒技术相对成熟,发展也较为迅速。特别是掌上电脑,1997 年在美国市场上掌上电脑不过四五个品牌,而 1998 年底,各式各样的掌上电脑如雨后春笋般纷纷涌现出来。此外,Nokia 推出了智能电话,Siemens 推出了机顶盒,Wyse 推出了智能终端,NS 推出了 WebPAD。装载在汽车上的小型电脑,不但可以控制汽车内的各种设备(如音响等),还可以与 GPS 连接,从而自动操控汽车。21 世纪无疑是一个网络的时代,使嵌入式计算机系统应用到各类网络中去也必然是嵌入式系统发展的重要方向。在发展潜力巨大的“信息家电”中,人们非常关注的网络电话设备,即 IP 电话,就是一个代表。该设备可以简单到像普通电话一样,可它却是通过互联网来实现双方通话的,花市话的钱可以打长途电话。

纵观嵌入式系统在过去发展的 40 多年中,主要经历了以下 4 个阶段。

第 1 阶段是以单芯片为核心的可编程控制器形式的系统。嵌入式系统虽然起源于微型计算机时代,然而,微型计算机的体积、价位、可靠性都无法满足广大对象系统的嵌入式应用要求,因此,嵌入式系统必须走独立发展道路。这条道路就是芯片化道路,将计算机做在一个芯片上,从而开创了嵌入式系统独立发展的单片机时代。单片机就是一个最典型的嵌入式系统,这类系统大部分应用于一些专业性强的工业控制系统中,一般没有操作系统的支持,软件通过汇编语言编写。这一阶段系统的主要特点是:系统结构和功能相对单一,处理效率较低,存储容量较小,几乎没有用户接口。由于这种嵌入式系统使用简单、价格低,以前在国内工业领域应用较为普遍,但是现在已经远不能适应高效的、需要大容量存储的现代工业控制和新兴信息家电等领域的需求。

第 2 阶段是以嵌入式 CPU 为基础、以简单操作系统为核心的嵌入式系统。其主要特点是:CPU 种类繁多,通用性比较弱;系统开销小,效率高;操作系统达到一定的兼容性和扩展性;应用软件较专业化,用户界面不够友好。

第 3 阶段是以嵌入式操作系统为标志的嵌入式系统。其主要特点是：嵌入式操作系统能运行于各种不同类型的微处理器上，兼容性好；操作系统内核小、效率高，并且具有高度的模块化和扩展性；具备文件和目录管理，支持多任务，支持网络应用，具备图形窗口和用户界面；具有大量的应用程序接口 API，开发应用程序较简单；嵌入式应用软件丰富。

第 4 阶段是以 Internet 为标志的嵌入式系统。这是一个正在迅速发展的阶段。目前，大多数嵌入式系统还孤立于 Internet 之外，但随着 Internet 的发展以及 Internet 技术与信息家电、工业控制技术结合日益密切，嵌入式设备与 Internet 的结合将代表嵌入式系统的未来。

1.3 嵌入式系统的组成

1.3.1 嵌入式系统的组成结构

嵌入式系统的核心计算系统可以抽象出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。

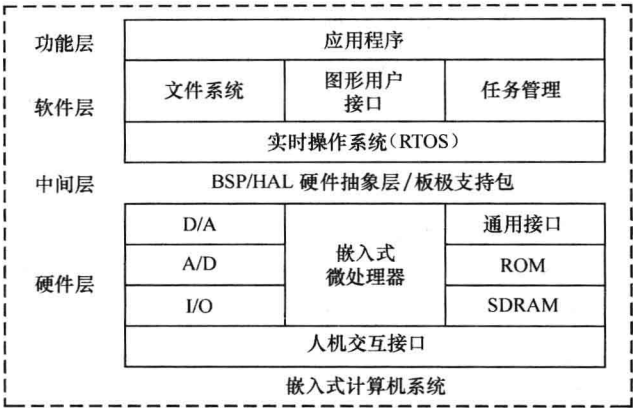


图 1-1 嵌入式系统的组成结构

1. 硬件层

硬件层中包含嵌入式微处理器、存储器（SDRAM、ROM、Flash 等）、通用设备接口和 I/O 接口（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，就构成了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。

(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。

嵌入式微处理器的体系结构可以采用冯·诺依曼体系或哈佛体系结构；指令系统可以选用精简指令系统（Reduced Instruction Set Computer, RISC）和复杂指令系统（Complex

Instruction Set Computer, CISC)。RISC 计算机在通道中只包含最有用的指令, 确保数据通道快速执行每一条指令, 从而提高了执行效率并使 CPU 硬件结构设计变得更为简单。

嵌入式微处理器有各种不同的体系, 即使在同一体系中也具有不同的时钟频率和数据总线宽度, 或集成了不同的外设和接口。据不完全统计, 目前全世界嵌入式微处理器已经超过 1 000 多种, 体系结构有 30 多个系列, 其中主流的体系有 ARM、MIPS、PowerPC、X86、SH 等。但与全球 PC 市场不同的是, 没有一种嵌入式微处理器可以主导市场, 仅以 32 位的产品而言, 就有 100 种以上的嵌入式微处理器。嵌入式微处理器的选择是根据具体的应用而决定的。

(2) 存储器

嵌入式系统需要存储器来存放和执行代码。嵌入式系统的存储器包含 Cache、主存和辅助存储器。

① Cache: Cache 是一种容量小、速度快的存储器阵列, 它位于主存和嵌入式微处理器内核之间, 存放的是最近一段时间微处理器使用最多的程序代码和数据。在需要进行数据读取操作时, 微处理器尽可能的从 Cache 中读取数据, 而不是从主存中读取, 这样就大大改善了系统的性能, 提高了微处理器和主存之间的数据传输速率。Cache 的主要目标就是: 减小存储器 (如主存和辅助存储器) 给微处理器内核造成的存储器访问瓶颈, 使处理速度更快, 实时性更强。

在嵌入式系统中, Cache 全部集成在嵌入式微处理器内, 可分为数据 Cache、指令 Cache 或混合 Cache, Cache 的大小依不同处理器而定。一般中高档的嵌入式微处理器才会把 Cache 集成进去。

② 主存: 主存是嵌入式微处理器能直接访问的寄存器, 用来存放系统和用户的程序及数据。它可以位于微处理器的内部或外部, 其容量为 256KB~1GB, 根据具体的应用而定, 一般片内存储器容量小、速度快, 片外存储器容量大。

常用作主存的存储器有以下几种:

ROM 类 NOR Flash、EPROM、PROM 等;

RAM 类 SRAM、DRAM、SDRAM 等。

其中, NOR Flash 凭借其可擦写次数多、存储速度快、存储容量大、价格便宜等优点, 在嵌入式领域内得到了广泛应用。

③ 辅助存储器: 辅助存储器用来存放大数据量的程序代码或信息, 它的容量大, 但读取速度与主存相比就慢很多, 用来长期保存用户的信息。

嵌入式系统中常用的外存有硬盘、NAND Flash、CF 卡、MMC、SD 卡等。

(3) 通用设备接口和 I/O 接口

嵌入式系统和外界交互需要一定形式的通用设备接口, 如 A/D、D/A、I/O 等, 外设通过和片外其他设备的或传感器的连接来实现微处理器的输入/输出功能。每个外设通常都只有单一的功能, 它可以在芯片外也可以内置芯片中。外设的种类很多, 可从一个简单的串行通信设备到非常复杂的 802.11 无线设备。

目前, 嵌入式系统中常用的通用设备接口有 A/D (模/数转换接口)、D/A (数/模转换接口), I/O 接口有 RS-232 接口 (串行通信接口)、Ethernet (以太网接口)、USB (通用串行总线接口)、音频接口、VGA 视频输出接口、I2C (现场总线)、SPI (串行外围设备接口)、IrDA

(红外线接口)等。

2. 中间层

硬件层与软件层之间为中间层,也称为硬件抽象层(Hardware Abstract Layer, HAL)或板级支持包(Board Support Package, BSP),它将系统上层软件与底层硬件分离开来,使系统的底层驱动程序与硬件无关,上层软件开发人员无须关心底层硬件的具体情况,根据BSP层提供的接口即可进行开发。该层一般包含相关底层硬件的初始化、数据的输入/输出操作和硬件设备的配置功能。BSP具有以下两个特点。

① 硬件相关性:因为嵌入式实时系统的硬件环境具有应用相关性,而作为上层软件与硬件平台之间的接口,BSP需要为操作系统提供操作和控制具体硬件的方法。

② 操作系统相关性:不同的操作系统具有各自的软件层次结构,因此,不同的操作系统具有特定的硬件接口形式。

实际上,BSP是一个介于操作系统和底层硬件之间的软件层次,包括了系统中大部分与硬件联系紧密的软件模块。设计一个完整的BSP需要完成两部分工作:嵌入式系统的硬件初始化以及BSP功能,设计硬件相关的设备驱动。

(1) 嵌入式系统硬件初始化

系统初始化过程可以分为3个主要环节,按照自底向上、从硬件到软件的次序依次为:片级初始化、板级初始化和系统级初始化。

① 片级初始化:完成嵌入式微处理器的初始化,包括设置嵌入式微处理器的核心寄存器和控制寄存器、嵌入式微处理器核心工作模式和嵌入式微处理器的局部总线模式等。片级初始化把嵌入式微处理器从上电时的默认状态逐步设置成系统所要求的工作状态。这是一个纯硬件的初始化过程。

② 板级初始化:完成嵌入式微处理器以外的其他硬件设备的初始化。另外,还需设置某些软件的数据结构和参数,为随后的系统级初始化和应用程序的运行建立硬件和软件环境。这是一个同时包含软硬件两部分在内的初始化过程。

③ 系统初始化:该初始化过程以软件初始化为主,主要进行操作系统的初始化。BSP将对嵌入式微处理器的控制权转交给嵌入式操作系统,由操作系统完成余下的初始化操作,包含加载和初始化与硬件无关的设备驱动程序,建立系统内存区,加载并初始化其他系统软件模块,如网络系统、文件系统等。最后,操作系统创建应用程序环境,并将控制权交给应用程序的入口。

(2) 硬件相关的设备驱动程序

BSP的另一个主要功能是硬件相关的设备驱动。硬件相关的设备驱动程序的初始化通常是一个从高到低的过程。尽管BSP中包含硬件相关的设备驱动程序,但是这些设备驱动程序通常不直接由BSP使用,而是在系统初始化过程中由BSP将它们与操作系统中通用的设备驱动程序关联起来,并在随后的应用中由通用的设备驱动程序调用,实现对硬件设备的操作。与硬件相关的驱动程序是BSP设计与开发中另一个非常关键的环节。

3. 软件层

软件层由实时多任务操作系统(Real-time Operation System, RTOS)、文件系统、图形用

户接口 (Graphic User Interface, GUI)、网络系统及通用组件模块组成。RTOS 是嵌入式应用软件的基础和开发平台。

(1) 嵌入式操作系统

不同功能的嵌入式系统的复杂程度有很大不同。简单的嵌入式系统仅仅具有单一的功能, 存储器中的程序就是为了这一功能设计的, 其系统处理核心也是单一任务处理器。复杂的嵌入式系统不仅功能强大, 往往还配有嵌入式操作系统, 如功能强大的智能手机等, 几乎具有与微型计算机一样的功能, 嵌入式系统采用紧凑的存储器来存储代码和数据。

嵌入式操作系统 (Embedded Operation System, EOS) 是一种用途广泛的系统软件, 过去它主要应用与工业控制和国防系统领域。EOS 负责嵌入系统的全部软、硬件资源的分配、任务调度, 控制、协调并发活动。它必须体现其所在系统的特征, 能够通过装卸某些模块来达到系统所要求的功能。目前, 已推出一些应用比较成功的 EOS 产品系列。随着 Internet 技术的发展、信息家电的普及应用及 EOS 的微型化和专业化, EOS 开始从单一的弱功能向高专业化的强功能方向发展。嵌入式操作系统在系统实时高效性、硬件的相关依赖性、软件固化、应用的专用性等方面具有较为突出的特点。

(2) 嵌入式文件系统

嵌入式文件系统比较简单, 主要提供文件存储、检索、更新等功能, 一般不提供保护、加密等安全机制。它以系统调用和命令方式提供文件的各种操作, 主要有设置、修改对文件和目录的存取权限。提供建立、修改、改变和删除目录等服务。提供创建、打开、读写、关闭和撤销文件等服务。

嵌入式文件系统的特点如下。

- ① 兼容性。嵌入式文件系统通常支持几种标准的文件系统, 如 FAT32、JFFS2、YAFFS 等。
- ② 实时文件系统。除支持标准的文件系统外, 为提高实时性, 有些嵌入式文件系统还支持自定义的实时文件系统, 这些文件系统一般采用连续的方式存储文件。
- ③ 可裁剪、可配置。根据嵌入式系统的要求选择所需的文件系统, 选择所需的存储介质, 配置可同时打开的最大文件数等。
- ④ 支持多种存储设备。嵌入式系统的外存形式多样了, 嵌入式文件系统需方便地挂接不同存储设备的驱动程序, 具有灵活的设备管理能力。同时, 根据不同外部存储器的特点, 嵌入式文件系统还需要考虑其性能、寿命等因素, 发挥不同外存的优势, 提高存储设备的可靠性和使用寿命。

(3) 图形用户接口

图形用户接口 (GUI) 的广泛应用是当今计算机发展的重大成就之一, 它极大地方便了非专业用户的使用, 人们从此不再需要死记硬背大量的命令, 取而代之的是可用通过窗口、菜单、按键等方式来方便地进行操作。而嵌入式 GUI 具有下面几个方面的基本要求: 轻型、占用资源少、高性能、高可靠性、便于移植、可配置等特点。

嵌入式系统中的图形界面, 一般采用下面的几种方法实现。

- ① 针对特定的图形设备输出接口, 自行开发相关的功能函数。
- ② 购买针对特定嵌入式系统的图形中间软件包。
- ③ 采用源码开放的嵌入式 GUI 系统。
- ④ 使用独立软件开发商提供的嵌入式 GUI 产品。

4. 功能层

功能层也称为应用软件层，应用软件是由基于实时系统开发的应用程序组成，运行在嵌入式操作系统之上，一般情况下与操作系统是分开的。应用软件用来实现对被控对象的控制功能。功能层是要面对被控对象和用户，为方便用户操作，往往需要提供一个友好的人机界面。

1.3.2 嵌入式处理器

嵌入式处理器是嵌入式系统的核心，是控制、辅助系统运行的硬件单元。其产品范围极其广阔，从最初的 4 位处理器、目前仍在大规模应用的 8 位单片机，到最新的受到广泛青睐的 32 位、64 位嵌入式 CPU。

目前，世界上具有嵌入式功能特点的处理器已经超过 1000 种，流行体系结构包括 MCU、MPU 等 30 多个系列。鉴于嵌入式系统广阔的发展前景，很多半导体制造商都大规模生产嵌入式处理器，并且公司自主设计处理器已经成为了未来嵌入式领域的一大趋势。其中，从单片机、DSP 到 FPGA 有着各式各样的品种，速度越来越快，性能越来越强，价格也越来越低。目前，嵌入式处理器的寻址空间可以从 64KB 到 16MB，处理速度最快可以达到 2000 MIPS，封装从 8 个引脚到 144 个引脚不等。

根据其现状，嵌入式处理器可以分成下面几类。

1. 嵌入式微处理器

嵌入式微处理器（Micro Processor Unit, MPU）是由通用计算机中的 CPU 演变而来的。它的特征是具有 32 位以上的处理器，具有较高的性能，其价格也相应较高。但与计算机处理器不同的是，在实际嵌入式应用中，只保留和嵌入式应用紧密相关的功能硬件，去除其他的冗余功能部分，这样就以最低的功耗和资源实现嵌入式应用的特殊要求。和工业控制计算机相比，嵌入式微处理器具有体积小、重量轻、成本低、可靠性高的优点。目前，主要的嵌入式处理器类型有 Am186/88、386EX、SC-400、Power PC、68000、MIPS、ARM/StrongARM 系列等，其中 Arm/StrongArm 是专为手持设备开发的嵌入式微处理器，属于中档的价位。

2. 嵌入式微控制器

嵌入式微控制器（Microcontroller Unit, MCU）的典型代表是单片机，从 20 世纪 70 年代末单片机出现到今天，虽然已经经过了 20 多年的历史，但这种 8 位的电子器件目前在嵌入式设备中仍然有着极其广泛的应用。单片机芯片内部集成 ROM/EPROM、RAM、总线、总线逻辑、定时/计数器、看门狗、I/O、串行口、脉宽调制输出、A/D、D/A、Flash RAM、EEPROM 等各种必要功能和外设，与嵌入式微处理器相比，微控制器的最大特点是单片化，体积大大减小，从而使功耗和成本下降、可靠性提高。微控制器是目前嵌入式系统工业的主流。微控制器的片上外设资源一般比较丰富，适合于控制，因此称为微控制器。

由于 MCU 低廉的价格，优良的功能，所以拥有的品种和数量最多，比较有代表性的包括 8051、MCS-251、MCS-96/196/296、P51XA、C166/167、68K 系列以及 MCU 8XC930/931、C540、C541，并且有支持 I2C、CAN-Bus、LCD 及众多专用 MCU 和兼容系列。目前，MCU

占嵌入式系统约 70% 的市场份额。近来 Atmel 出产的 Avr 单片机由于其集成了 FPGA 等器件, 所以具有很高的性价比, 势必将推动单片机获得更高的发展。

3. 嵌入式 DSP 处理器

嵌入式 DSP 处理器 (Embedded Digital Signal Processor, EDSP) 是专门用于信号处理方面的处理器, 其在系统结构和指令算法方面进行了特殊设计, 具有很高的编译效率和指令的执行速度。在数字滤波、FFT、谱分析等各种仪器上 DSP 获得了大规模的应用。

DSP 的理论算法在 20 世纪 70 年代就已经出现, 但是由于专门的 DSP 处理器还未出现, 所以这种理论算法只能通过 MPU 等由分立元件实现。MPU 较低的处理速度无法满足 DSP 的算法要求, 其应用领域仅仅局限于一些尖端的高科技领域。随着大规模集成电路技术发展, 1982 年世界上诞生了首枚 DSP 芯片。其运算速度比 MPU 快了几十倍, 在语音合成和编码解码器中得到了广泛应用。至 80 年代中期, 随着 CMOS 技术的进步与发展, 第二代基于 CMOS 工艺的 DSP 芯片应运而生, 其存储容量和运算速度都得到成倍提高, 成为语音处理、图像硬件处理技术的基础。到 80 年代后期, DSP 的运算速度进一步提高, 应用领域也从上述范围扩大到了通信和计算机方面。90 年代后, DSP 发展到了第五代产品, 集成度更高, 使用范围也更加广阔。

目前, 最为广泛应用的是 TI 的 TMS320C2000/C5000 系列, 另外如 Intel 的 MCS-296 和 Siemens 的 TriCore 也有各自的应用范围。

4. SoC (System on Chip) 片上系统

SoC 追求产品系统最大包容的集成器件, 是目前嵌入式应用领域的热门话题之一。SoC 最大的特点是成功实现了软硬件无缝结合, 直接在处理器片内嵌入操作系统的代码模块。而且 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, 实现一个复杂的系统。用户不需要再像传统的系统设计一样, 绘制庞大复杂的电路板, 一点点地连接焊制, 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, 然后通过仿真之后就可以直接交付芯片厂商进行生产。由于绝大部分系统构件都是在系统内部, 整个系统就特别简洁, 不仅减小了系统的体积和功耗, 而且提高了系统的可靠性, 提高了设计生产效率。

由于 SoC 是专用的, 所以大部分产品都不为用户所知, 比较典型的 SoC 产品是 Philips 的 Smart XA, 少数通用系列如 Siemens 的 TriCore, Motorola 的 M-Core, 某些 ARM 系列器件, Echelon 和 Motorola 联合研制的 Neuron 芯片等。

1.3.3 典型的嵌入式操作系统

嵌入式操作系统 (Embedded Operating System, EOS) 是一种用途广泛的系统软件, 过去它主要应用于工业控制和国防系统领域。EOS 负责嵌入系统的全部软、硬件资源的分配、调度工作, 控制协调并发活动; 它必须体现其所在系统的特征, 能够通过装卸某些模块来达到系统所要求的功能。目前, 已推出一些应用比较成功的 EOS 产品系列。随着 Internet 技术的发展、信息家电的普、应用及 EOS 的微型化和专业化, EOS 开始从单一的弱功能向高专业化的强功能方向发展。嵌入式操作系统在系统实时高效性、硬件的相关依赖性、软件固态化以及应用的专用性等方面具有较为突出的特点。EOS 是相对于一般操作系统而言的, 它除具备了一般操作系统最基本的功能, 如任务调度、同步机制、中断处理、文件功能等外, 还具

有以下特点。

① 可装卸性、开放性、可伸缩性的体系结构。

② 强实时性，可用于各种设备控制当中。

③ 统一的接口，提供各种设备驱动接入。

④ 操作方便、简单，提供友好的图形用户界面。

⑤ 提供强大的网络功能，支持 TCP/IP 及其他协议，提供 TCP/UDP/IP/PPP 支持及统一的 MAC 访问层接口，为各种移动计算设备预留接口。

⑥ 强稳定性，弱交互性。嵌入式系统一旦开始运行就不需要用户过多地干预，这就要负责系统管理的 EOS 具有较强的稳定性。嵌入式操作系统的用户接口一般不提供操作命令，它通过系统调用命令向用户程序提供服务。

⑦ 固化代码。在嵌入系统中，嵌入式操作系统和应用软件被固化在嵌入式系统计算机的 ROM 中。辅助存储器在嵌入式系统中很少使用，因此，嵌入式操作系统的文件管理功能应该能够很容易地拆卸，而用各种内存文件系统。

⑧ 更好的硬件适应性，也就是良好的移植性。

从 20 世纪 80 年代开始，市场上出现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有系统开发的，从而逐步演化成了现在多种形式的商用嵌入式操作系统百家争鸣的局面。这些操作系统有 Linux、 μ C/OS、Windows CE、VxWorks、Palm OS、QNX 等。

1. Linux

在所有的操作系统中，Linux 是发展最快、应用最广泛的系统之一。Linux 本身的种种特性使其成为嵌入式开发的首选。在进入市场的前两年中，嵌入式 Linux 的设计通过广泛应用而获得巨大的成功。随着嵌入式 Linux 技术的成熟，以其按应用要求可定制系统、支持多数硬件平台等特性，已由早期的试用阶段迈进到逐渐成为嵌入式市场的主流。根据 IDC 的报告，Linux 已经成为全球第二大操作系统。Linux 发展如此之快的另一个主要原因是产品的成本。在激烈的市场竞争中，只拥有先进的技术是远远不够的，如何减少产品的投入也是需要重点考虑的问题。免费的 Linux 为厂商节约了一大笔开支，特别是对于经济实力不强的公司来说。目前 Linux 内核的最新版本已经达到 2.6.xx。

2. μ C/OS

μ C/OS 是一个典型的实时操作系统。该系统从 1992 年开始发展，目前流行的是第二个版本，即 μ C/OS II。其特点可以概括为以下几个方面：公开源代码，代码结构清晰、明了，注释详细，组织有条理，可移植性好，可裁剪，可固化，内核属于抢占式，最多可以管理 64 个任务。自从清华大学邵贝贝教授将 Jean J.Labrosse 的《 μ C/OS: the Real Time Kernel》一书翻译后，在国内掀起 μ C/OS II 的学习热潮，特别是在教育研究领域（ μ C/OS 系统在教育研究领域是免费的）。该系统短小精悍，是研究和学习实时操作系统的首选。

3. Windows CE

Windows CE 是 Microsoft 公司的产品，是从整体上为有限资源的平台设计的多线程、完整优先权、多任务的操作系统。Windows CE 采用模块化设计，并对于从掌上电脑到专用的

工控电子设备进行定制。此操作系统的基本内核需要至少 200KB ROM 存储器。从游戏机到现在大部分的掌上电脑都采用了 Windows CE 作为操作系统，其缺点是系统软件价格过高，影响整个产品的成本控制。

4. VxWorks

VxWorks 是 WindRiver（风河）公司专门为实时嵌入式系统设计开发的操作系统软件，为程序员开发提供了高效的实时任务调度、中断管理、实时的系统资源以及实时的任务间通信。应用程序员可以将尽可能多的精力放在应用程序本身，而不必再去关心系统资源的管理。该系统主要应用在单板机、数据网络（以太网交换机、路由器）、通信等多方面。该公司据已为 Intel 所收购。

5. Palm OS

Palm OS 是一种 32 位的嵌入式操作系统，用于掌上电脑。此系统是 3Com 公司的 PalmComputing 部开发的（Palm Computing 目前已经独立成为一家公司），它运行在一个抢占式的多任务内核之上，同一时刻用户界面仅仅允许一个应用程序被打开，与同步软件 Hotsync 结合可以使掌上电脑与 PC 上的信息实现同步，把台式机的功能扩展到了手掌上。同其他嵌入式操作系统相比，Palm OS 具有更大的灵活性和移动性，是一款非常流行的掌上电脑操作系统。

6. QNX

QNX 是一款实时操作系统，由加拿大 QNX 软件系统有限公司开发，广泛应用于自动化、控制、机器人科学、电信、数据通信、航空航天、计算机网络系统、医疗仪器设备、交通运输、安全防卫系统、POS 机、零售机等任务关键型应用领域。20 世纪 90 年代后期，QNX 系统在高速增长 Internet 终端设备、信息家电、掌上电脑等领域也得到了广泛应用。

7. 苹果 iOS

iOS 是由苹果公司为 iPhone 开发的操作系统。它主要是给 iPhone、iPod Touch 以及 iPad 使用。就像其基于的 Mac OS X 操作系统一样，它也是以 Darwin 为基础的。原本这个系统名为 iPhone OS，直到 2010 年 6 月 7 日 WWDC 大会上宣布改名为 iOS。iOS 的系统架构分为 4 个层次：核心操作系统层（the Core OS layer），核心服务层（the Core Services layer），媒体层（the Media layer）、可轻触层（the Cocoa Touch layer）。系统操作占用大概 240MB 的存储器空间。iPhone 和 iPod Touch 使用基于 ARM 架构的中央处理器，而不是苹果的麦金塔计算机使用的 x86 处理器（就像以前的 PowerPC），它使用由 PowerVR 视屏卡渲染的 OpenGL ES 1.1.。因此，Mac OS X 上的应用程序不能直接复制到 iOS 上运行，它们需要针对 iOS 的 ARM 重新编写。iOS 的最新版本是 4.2，该版本支持 iPad 用户可以同时运行多项应用，并可以迅速切换。通过文件夹功能，用户进行简单地拖放操作即可组织各项应用。而统一收件箱允许用户在同个收件箱内浏览所有账户的邮件。

8. Android

Android 是 Google 开发的基于 Linux 平台的开源手机操作系统。它包括操作系统、用户