



免费提供
电子教案

高等院校规划教材
计算机科学与技术系列

嵌入式系统基础及应用

孙 媛 邱莉榕 艾云峰 李叶青 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



高等院校规划教材·计算机科学与技术系列

嵌入式系统基础及应用

孙媛 邱莉榕 艾云峰 李叶青 编著



机械工业出版社

本书主要介绍了嵌入式系统领域研究和开发所涉及的基本知识,结合嵌入式系统理论和实践方面的最新进展,以嵌入式系统工程实践的基本理论和方法为主线,涵盖了嵌入式系统的主要方面,包括嵌入式系统概论,嵌入式处理器,ARM 处理器及简单编程,嵌入式操作系统及主流嵌入式操作系统介绍与比较,嵌入式软件开发与设计以及嵌入式网络应用等。同时,本书还安排了丰富的实验内容与课后实践,使读者能够边学边用,更快更好地掌握所学知识。

本书语言通俗易懂,内容丰富,注重理解与实例,知识覆盖面广。不仅适用于普通高校的嵌入式系统课程教学,也适用于嵌入式系统爱好者阅读研究。

图书在版编目(CIP)数据

嵌入式系统基础及应用/孙媛等编著. —北京:机械工业出版社,2009.8
(高等院校规划教材·计算机科学与技术系列)
ISBN 978-7-111-27949-5

I. 嵌… II. 孙… 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(2009)第133705号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)
责任编辑:陈皓 李亚斌
责任印制:杨曦

北京蓝海印刷有限公司印刷

2009年8月第1版·第1次印刷
184mm×260mm·18.75印张·459千字
0001—3500册
标准书号:ISBN 978-7-111-27949-5
定价:33.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
销售服务热线电话:(010)68326294 68993821
购书热线电话:(010)88379639 88379641 88379643
编辑热线电话:(010)88379753 88379739
封面无防伪标均为盗版

出版说明

计算机技术的发展极大地促进了现代科学技术的发展，明显地加快了社会发展的进程。因此，各国都非常重视计算机教育。

近年来，随着我国信息化建设的全面推进和高等教育的蓬勃发展，高等院校的计算机教育模式也在不断改革，计算机学科的课程体系和教学内容趋于更加科学和合理，计算机教材建设逐渐成熟。在“十五”期间，机械工业出版社组织出版了大量计算机教材，包括“21世纪高等院校计算机教材系列”、“21世纪重点大学规划教材”、“高等院校计算机科学与技术‘十五’规划教材”、“21世纪高等院校应用型规划教材”等，均取得了可喜成果，其中多个品种的教材被评为国家级、省部级的精品教材。

为了进一步满足计算机教育的需求，机械工业出版社策划开发了“高等院校规划教材”。这套教材是在总结我社以往计算机教材出版经验的基础上策划的，同时借鉴了其他出版社同类教材的优点，对我社已有的计算机教材资源进行整合，旨在大幅提高教材质量。我们邀请多所高校的计算机专家、教师及教务部门针对此次计算机教材建设进行了充分的研讨，达成了许多共识，并由此形成了“高等院校规划教材”的体系架构与编写原则，以保证本套教材与各高等院校的办学层次、学科设置和人才培养模式等相匹配，满足其计算机教学的需要。

本套教材包括计算机科学与技术、软件工程、网络工程、信息管理与信息系统、计算机应用技术以及计算机基础教育等系列。其中，计算机科学与技术系列、软件工程系列、网络工程系列和信息管理与信息系统系列是针对高校相应专业方向的课程设置而组织编写的，体系完整，讲解透彻；计算机应用技术系列是针对计算机应用类课程而组织编写的，着重培养学生利用计算机技术解决实际问题的能力；计算机基础教育系列是为大学公共基础课层面的计算机基础教学而设计的，采用通俗易懂的方法讲解计算机的基础理论、常用技术及应用。

本套教材的内容源自致力于教学与科研一线的骨干教师与资深专家的实践经验和研究成果，融合了先进的教学理念，涵盖了计算机领域的核心理论和最新的应用技术，真正在教材体系、内容和方法上做到了创新。另外，本套教材根据实际需要配有电子教案、实验指导或多媒体光盘等教学资源，实现了教材的“立体化”建设。本套教材将随着计算机技术的进步和计算机应用领域的扩展而及时改版，并及时吸纳新兴课程和特色课程的教材。我们将努力把这套教材打造成为国家级或省部级精品教材，为高等院校的计算机教育提供更好的服务。

对于本套教材的组织出版工作，希望计算机教育界的专家和老师们能提出宝贵的意见和建议。衷心感谢计算机教育工作者和广大读者的支持与帮助！

机械工业出版社

目 录

出版说明

前言

第 1 章 嵌入式系统概述	1
1.1 嵌入式系统的定义及特点	1
1.2 嵌入式系统的发展历史	3
1.3 嵌入式系统的组成	4
1.4 嵌入式系统的设计与开发	8
1.4.1 嵌入式系统的设计方法	8
1.4.2 嵌入式系统开发的基本流程	9
1.5 嵌入式系统与 PC 的比较	15
1.6 嵌入式系统的发展趋势	16
1.7 习题与思考	19
第 2 章 嵌入式处理器	20
2.1 嵌入式处理器基础	20
2.1.1 冯·诺依曼体系结构和哈佛体系结构	20
2.1.2 CISC 和 RISC	22
2.1.3 影响 CPU 性能的因素	24
2.2 嵌入式处理器分类	26
2.3 嵌入式处理器举例	28
2.4 ARM 处理器基础	30
2.4.1 ARM 公司简介	30
2.4.2 ARM 处理器的应用领域及特点	31
2.4.3 ARM 体系结构版本及命名方法	32
2.4.4 ARM 处理器系列	35
2.4.5 ARM 芯片选型	39
2.5 习题与思考	46
第 3 章 ARM 体系结构编程	47
3.1 ARM 处理器编程基础	47
3.1.1 ARM 处理器的数据类型	47
3.1.2 ARM 处理器的工作状态	47
3.1.3 ARM 处理器的工作模式	48
3.1.4 ARM 处理器的寄存器组织	48
3.1.5 ARM 处理器的异常处理	52
3.1.6 ARM 处理器的存储器格式	55
3.2 ARM 指令	56

3.2.1	ARM 指令概要介绍	56
3.2.2	ARM 处理器的寻址方式	57
3.2.3	ARM 指令集	59
3.3	Thumb 指令及应用	76
3.4	ARM 汇编编程	77
3.4.1	常用伪操作	77
3.4.2	宏定义	79
3.4.3	ARM 汇编举例	80
3.4.4	C 语言与汇编语言的混合使用	81
3.5	习题与思考	81
第 4 章	嵌入式操作系统	83
4.1	嵌入式操作系统概述	83
4.1.1	嵌入式操作系统的定义	83
4.1.2	嵌入式操作系统的组成	84
4.1.3	嵌入式操作系统的特点	84
4.1.4	嵌入式操作系统的分类	85
4.2	嵌入式实时操作系统概述	85
4.2.1	实时系统	86
4.2.2	实时嵌入式系统	86
4.2.3	嵌入式实时操作系统	86
4.2.4	嵌入式实时操作系统举例	91
4.3	主流嵌入式操作系统	93
4.3.1	嵌入式操作系统举例	93
4.3.2	嵌入式 Linux、WinCE 和 Palm OS 的比较	100
4.4	嵌入式操作系统的发展	102
4.4.1	ASOS	102
4.4.2	Android	104
4.5	习题与思考	109
第 5 章	嵌入式软件设计与开发	110
5.1	开发环境搭建	110
5.2	Bootloader 技术	111
5.2.1	Bootloader 简介	111
5.2.2	常见的 Bootloader	113
5.2.3	PXA270 平台的 Blob 分析	114
5.2.4	Blob 移植	118
5.2.5	使用 Blob	119
5.3	Linux 内核	119
5.3.1	Linux 内核简介	120
5.3.2	Linux 内核体系结构	122

5.3.3	Linux 内核目录结构	125
5.3.4	ARM-Linux 内核启动代码分析	126
5.3.5	ARM-Linux 系统调用	127
5.3.6	Linux 内核配置	129
5.4	文件系统	145
5.4.1	文件系统的定义	145
5.4.2	Linux 文件系统的类型	146
5.4.3	嵌入式 Linux 文件系统	148
5.4.4	制作根文件系统	152
5.5	Linux 驱动程序开发	156
5.5.1	设备驱动程序简介	156
5.5.2	Linux 设备驱动程序分类	157
5.5.3	Linux 设备驱动程序原理	157
5.5.4	编译及运行	170
5.5.5	Linux 设备驱动代码的分布	174
5.5.6	Linux 常见设备文件	174
5.6	嵌入式 GUI 系统	175
5.6.1	GUI 的主要特征	175
5.6.2	新人机交互技术	176
5.6.3	嵌入式系统 GUI 的特点与要求	177
5.6.4	嵌入式 Linux GUI 的解决方案	178
5.6.5	Qt/Embedded 移植	182
5.6.6	Qt 常用工具介绍	183
5.6.7	Qt 的主要特性及应用	186
5.7	习题与思考	192
第 6 章	嵌入式网络应用	193
6.1	互联网环境	193
6.1.1	互联网的起源和发展	193
6.1.2	互联网简介	194
6.1.3	互联网协议	195
6.1.4	嵌入式互联网技术	197
6.2	开放式服务网关平台	199
6.2.1	OSGi 简介	200
6.2.2	市场前景	201
6.2.3	开放服务网关标准	202
6.2.4	嵌入式设备与 OSGi	206
6.2.5	OSGi 的应用	207
6.3	实时通信与现场总线	208
6.3.1	现场总线的背景和发展	208

6.3.2	现场总线的定义和特点	209
6.3.3	现场总线的类型	210
6.4	无线网络与通信协议	219
6.4.1	无线网络与有线网络	219
6.4.2	无线网络通信协议	220
6.5	分布式运行环境与应用	227
6.5.1	Jini 简介	228
6.5.2	Jini 技术的基础结构	229
6.5.3	Jini 在嵌入式系统中的应用	233
6.6	习题与思考	235
第 7 章	嵌入式基础实验	236
7.1	开发环境搭建实验	236
7.2	HelloWorld 实验	242
7.3	烧写各部分到目标板	245
7.4	编译 Bootloader	249
7.5	编译 Linux 内核	252
7.6	ARM-Linux 系统调用实验	258
7.7	制作文件系统	260
7.8	构造和运行内核模块	265
7.9	完整的驱动程序及应用程序编写	267
7.10	CPU GPIO 驱动程序	273
7.11	Qt 开发环境搭建	278
7.12	Qt 下的“Hello world!”实验	280
7.13	Qt 对象间通信机制——信号/槽	283
参考文献	286

第1章 嵌入式系统概述

现代社会已经步入一个信息化的时代，丰富多彩的数字化产品已经开始继 PC 之后成为信息处理的发展趋势，并且正在逐步形成一个充满商机的巨大产业。

各种各样的嵌入式产品蜂拥而至，已经广泛渗透到人们日常生活的各个领域（见图 1-1）。

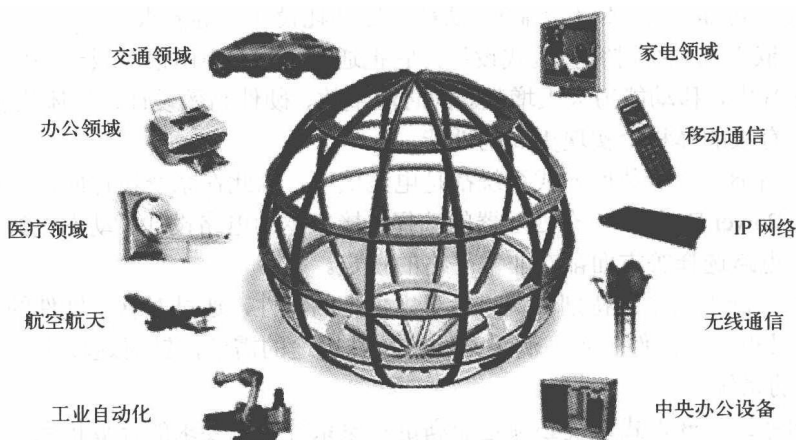


图 1-1 后 PC 时代丰富的嵌入式产品

1.1 嵌入式系统的定义及特点

如此丰富的嵌入式产品进入了我们的生活，那么，什么是嵌入式系统呢？

1. 嵌入式系统的定义

什么是嵌入式系统？电气和电子工程师协会（Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE）给出的定义如下：“嵌入式系统是用于控制、监控或者辅助操作机器和设备的装置”。它具备下列 4 项特性：

- 1) 用来执行特定功能。
- 2) 以 CPU 与周边外部设备构成核心。
- 3) 需要严格的时序与稳定度。
- 4) 全自动循环操作。

可以看出这个定义是从应用上考虑的，嵌入式系统是软件和硬件的综合体，还可以涵盖机电等附属装置。但是这个定义并没有给出嵌入式系统的一些独特的特点，因此，目前更为常用的定义是：

“嵌入式系统是以应用为中心，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”。

简单概括一下，可以给出如下更为简短的定义：

“嵌入式系统是嵌入到对象体系中的专用计算机系统”。

“嵌入性”、“专用性”与“计算机系统”是嵌入式系统的3个基本要素；对象系统则是指嵌入式系统所嵌入的宿主系统。

2. 嵌入式系统的特点

嵌入式系统是面向用户、面向产品、面向应用的计算机系统。嵌入式系统的核心部件——嵌入式微处理器的功耗、体积、成本、处理能力和电磁兼容性等方面均受到应用要求的制约，因此，开发人员不能设计出一个像PC那样通用的嵌入式系统，如不可能把洗衣机的控制系统直接应用于电视机的控制中。根据嵌入式系统的定义及其特性，嵌入式系统的特点可总结如下。

1) 嵌入性。由于是嵌入到对象系统中，必须满足对象系统的环境要求，如物理环境（小型）、电气环境（可靠）、成本（价廉）、功耗（低功耗设计）等要求。

- 体积：嵌入式系统讲究便携式设计，它把通用CPU中由很多板卡完成的任务集成在一块芯片中，移动能力大大增强。同时注重软、硬件高效设计，量体裁衣，去除冗余，力争在有限的体积上实现更高的性能。

- 功耗：目前，大多数嵌入式系统都是电池供电，因此在系统设计时，注重低功耗设计（Low Power Design）。在处理器的选择、接口驱动电路设计、动态电源管理，以及电源供给电路选择等方面都有非常严格的规定。

2) 专用性。嵌入式系统特别强调“量身定做”的特性，通过对软、硬件的裁剪，使其满足对象要求的最小软、硬件配置，满足某一种特殊用途的需求，针对这项用途开发出与其他产品截然不同的系统。

3) 计算机系统。嵌入式系统必须是能满足对象系统控制要求的计算机系统。与以上两个特点相呼应，这样的计算机必须配置与对象系统相适应的接口电路。

嵌入式系统的上述特点决定了嵌入式系统不管是硬件方面，还是软件方面都不同于通用计算机系统，它需要根据特定应用的特点，在软、硬件上进行定制。

(1) 硬件特点

嵌入式系统力争在同样的硅片面积上实现更高的性能，只有这样，才能在具体应用时对处理器的选择更具有竞争力。另外，嵌入式处理器要针对用户的具体需求，对芯片配置进行裁剪和添加才能达到理想的性能。

(2) 软件特点

嵌入式系统软件特点主要体现在以下几个方面：

1) 软件固态化存储。

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嵌入式微控制器中，而不是存储于磁盘等载体中。

2) 软件代码高质量、高可靠性。

尽管半导体技术的发展使处理器速度不断提高、片上存储器容量不断增加，但在大多数应用中，存储空间仍然是宝贵的，还存在实时性的要求。为此，要求高质量的程序代码和编译工具，以减小程序二进制代码长度，并提高执行速度。

3) 系统软件的高实时性。

在多任务嵌入式系统中，对重要性各不相同的任务进行统筹兼顾的合理调度是保证每个任务及时执行的关键，单纯通过提高处理器速度是无法完成的，而且也没有效率，这种任务调度只能由优化编写的系统软件来完成，因此系统软件的高实时性是基本要求。

4) 嵌入式系统开发需要交叉开发环境。

嵌入式系统本身不具备开发能力，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，这些工具和环境一般是基于通用计算机上的软、硬件设备（如交叉编译器）以及各种逻辑分析仪、混合信号示波器等。

5) 在嵌入式系统的软件开发过程中，一般采用 C/C++ 语言作为编程语言。

由于汇编语言是一种非结构化的语言，对于大型的结构化程序设计已经不能完全胜任，这就要求采用更高级的 C/C++ 语言去完成这一工作。目前，系统软件主要采用 C 语言，而在应用开发中，C++ 的应用则比较广泛。

1.2 嵌入式系统的发展历史

嵌入式系统出现至今，计算机、通信、消费电子的一体化趋势日益明显，嵌入式技术已成为一个研究热点。本节介绍嵌入式系统的发展历史。

1. 现代计算机技术的发展

(1) 始于微型机时代的嵌入式应用

电子数字计算机诞生于 1946 年，在其后漫长的历史进程中，计算机始终放置在特殊的机房中，作为实现数值计算的大型昂贵设备。直到 20 世纪 70 年代，微处理器的出现，计算机才出现了历史性的变化。以微处理器为核心的微型计算机以其小型、价廉、高可靠性特点，迅速走出机房。基于高速数值解算能力的微型机，表现出的智能化水平引起了控制专业人士的兴趣，要求将微型机嵌入到一个对象体系中，实现对象体系的智能化控制。例如，将微型计算机经电气加固、机械加固，并配置各种外围接口电路，安装到大型舰船中构成自动驾驶仪或轮机状态监测系统。于是，计算机便失去了原来的形态与通用的计算机功能。为了区别于原有的通用计算机系统，把嵌入到对象体系中，实现对象体系智能化控制的计算机，称作嵌入式计算机系统。因此，嵌入式系统诞生于微型机时代，嵌入式系统的“嵌入性”特性，本质上是将一个计算机嵌入到一个对象体系中去，这是理解嵌入式系统的基本出发点。

(2) 现代计算机技术的两大分支

由于嵌入式计算机系统要嵌入到对象体系中，实现对象的智能化控制，因此，它有着与通用计算机系统完全不同的技术要求与技术发展方向。

通用计算机系统的技术要求是高速、海量的数值计算；技术发展方向是总线速度的无限提升，存储容量的无限扩大。而嵌入式计算机系统的技术要求则是对象的智能化控制能力；技术发展方向是与对象系统密切相关的嵌入性能、控制能力与控制的可靠性。

早期，人们勉为其难地将通用计算机系统进行了改装，在大型设备中实现嵌入式应用。然而，对于众多的对象系统（如家用电器、仪器仪表、工控单元），无法嵌入通用计算机系统，况且嵌入式系统与通用计算机系统的技术发展方向完全不同，因此，必须相互独立地发展通用计算机系统与嵌入式计算机系统，这就形成了现代计算机技术发展的两大分支。

如果说微型机的出现，使计算机进入到现代计算机发展阶段，那么嵌入式计算机系统的诞生，则标志了计算机进入了通用计算机系统与嵌入式计算机系统两大分支并行发展的时代，从而导致了 20 世纪末计算机的高速发展。

(3) 两大分支发展的里程碑事件

通用计算机系统与嵌入式计算机系统的专业化分工发展，导致 20 世纪末、21 世纪初，

计算机技术的飞速发展。计算机专业领域集中精力发展通用计算机系统的软、硬件技术，不必兼顾嵌入式应用要求，通用微处理器迅速从 286、386、486 到奔腾系列；操作系统则迅速扩张计算机基于高速海量的数据文件处理能力，使通用计算机系统进入到尽善尽美阶段。

嵌入式计算机系统则走上了一条完全不同的道路，这条独立发展的道路就是单芯片化道路。它动员了原有的传统电子系统领域的厂家与专业人士，继承了起源于计算机领域的嵌入式系统，承担起发展与普及嵌入式系统的历史任务，迅速地将传统的电子系统发展到智能化的现代电子系统时代。

因此，现代计算机技术发展的两大分支的里程碑意义在于：它不仅形成了计算机发展的专业化分工，而且将发展计算机技术的任务扩展到传统的电子系统领域，使计算机成为进入人类社会全面智能化时代的有力工具。

2. 嵌入式系统的发展

纵观嵌入式技术的发展过程，大致经历了 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。它具有与监测、伺服、指示设备相配合的功能。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，通过汇编语言编程对系统进行直接控制。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，因此在国内工业领域应用较为普遍，但是这类系统远不能适应高效的、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。这一阶段的主要特点是：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。这一阶段的主要特点是：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、多任务、网络支持、图形窗口，以及用户界面等功能；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。

嵌入式系统技术日益完善，32 位微处理器在该系统中占主导地位，嵌入式操作系统已经从简单走向成熟，它与网络、Internet 结合日益密切，因而，嵌入式系统应用将日益广泛。

1.3 嵌入式系统的组成

嵌入式系统是专用计算机系统，它具有一般计算机组成的共性，也是由硬件和软件组成。

1. 嵌入式系统的硬件组成

嵌入式系统硬件是以嵌入式处理器为中心，由存储器、I/O 设备、通信模块以及电源等必要的外围接口组成，如图 1-2 所示。嵌入式系统是量身定做的专用计算机系统，它的组成不同于通用计算机系统。通常，嵌入式系统硬件配置非常精简，除了微处理器和基本的外围电路以外，其余的电路都可根据需要和成本进行裁剪、定制，非常经济、可靠。

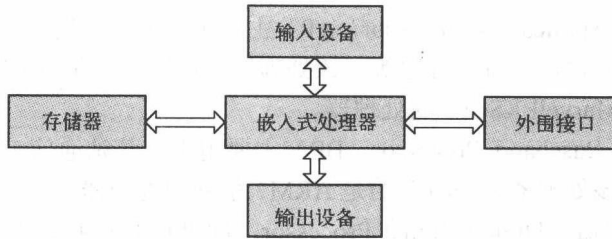


图 1-2 嵌入式系统的基本硬件组成

(1) 嵌入式处理器

嵌入式处理器同计算机的 CPU 一样，在嵌入式系统硬件中处于核心的位置。据不完全统计，目前全世界嵌入式处理器的品种总量已经超过 1000 多种，流行体系结构有 30 多个系列。现在几乎每个半导体制造商都生产嵌入式处理器，越来越多的公司有自己的嵌入式处理器设计部门。但与全球 PC 市场不同的是，没有一种微处理器和微处理器公司可以主导嵌入式系统，仅以 32 位 CPU 而言，就有 100 种以上嵌入式处理器。由于嵌入式系统设计的差异性极大，因此选择是多样的。有些公司如 Intel、AMD、Freescale 生产的嵌入式处理器很有名气，而有一些小的公司，如 QED 虽然名气很小，但也生产出了很优秀的微处理器。另外，有一些公司，如 ARM、MIPS 等，只设计但并不生产 CPU，他们把生产权授予世界各地的半导体制造商。

随着嵌入式的高端应用越来越多，为了提高系统的信息处理能力，许多嵌入式系统里不仅仅只有一个嵌入式处理器，而是几个处理器共同实现对系统的控制。下面以手机这类典型的嵌入式系统为例，了解一下手机里的嵌入式处理器，图 1-3 为一个实际的手机硬件图。目前，手机里主要有 3 大嵌入式处理器。

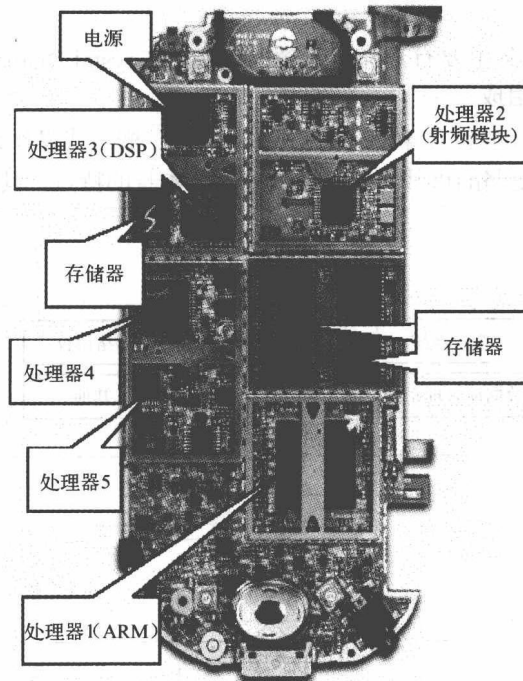


图 1-3 手机硬件设备

1) 应用处理器 (Application Processor, AP) 主要用于处理应用程序, 如办公软件、界面的服务程序、音乐播放软件、蓝牙程序等。该处理器采用较多的是 ARM10 系列或者更高性能的处理器的, 例如, Marvell XScale 的处理器。

2) 基带处理器 (Baseband Processor, BP) 主要用于与基站通信, 并负责打电话、短信的收发。在手机里, 该处理器采用较多的是 ARM7 系列的处理器。

3) 数字信号处理器 (Digital Signal Processor, DSP) 主要用于图像处理、音频/视频处理, 例如, 手机里的图片处理、音频/视频解码等相关服务, 通常是由 DSP 来处理的。

(2) 嵌入式存储器

Memory 按存储信息的功能可分为只读存储器 ROM 和随机存储器 RAM。在嵌入式系统中, 使用的存储设备主要是同步动态随机存储器 SDRAM (Synchronous DRAM) 和闪存 Flash。

其中, 闪存 Flash ROM 已经成为目前最成功、流行的一种固态内存, 与 EEPROM 相比具有读写速度快, 而与 SRAM 相比具有非易失、价格低廉等优势。在嵌入式系统中, 闪存就相当于 PC 中的硬盘, 只是存储容量要比硬盘小很多, 通常是 16MB、32MB、64MB 规格的。

另外, 在嵌入式系统中, Nand Flash、CF 卡、SD 卡和 MMC 卡等辅助存储器也被大量应用。这些存储器通常用来存放大数据量的程序代码或信息, 它容量大, 但读取速度相对主存慢很多, 通常用于长期保存用户的数据信息。

(3) 外围接口

嵌入式系统和外界交互需要一定形式的外部 I/O。目前, 绝大多数外部 I/O 接口都可以直接在嵌入式系统中应用, 主要有通用输入/输出接口 GPIO、串口、I2C、USB 和 IEEE 1394 等。

(4) 输入设备

嵌入式系统的输入设备主要有小键盘、触摸屏、声音输入等。

(5) 输出设备

嵌入式系统的输出设备主要有液晶显示器 (Liquid Crystal Display, LCD)、语音输出等。

2. 嵌入式系统软件组成

嵌入式系统软件结构一般包含 4 个层面: 硬件抽象层、嵌入式操作系统、中间件和应用软件, 如图 1-4 所示。由于硬件电路的可裁剪性和嵌入式系统本身的特点, 其软件部分也是可裁剪的。

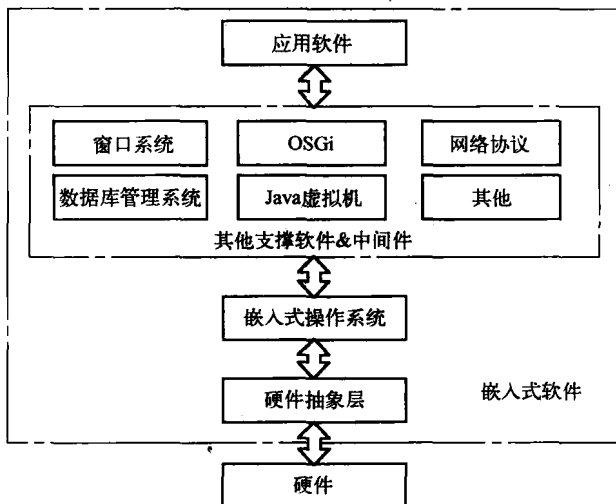


图 1-4 嵌入式系统的基本软件组成

(1) 硬件抽象层

硬件抽象层 (Hardware Abstraction Layer, HAL), 也叫做板级支持包 (Board Support Package, BSP), 它是位于操作系统内核与硬件电路之间的接口层。HAL 的主要功能在于将硬件抽象化, 也就是说, 可通过程序来控制所有的硬件电路如 CPU、I/O、存储器等的操作。这样就使得系统的设备驱动程序与硬件设备无关, 从而大大地提高了系统的可移植性。

从软、硬件测试的角度来看, 软、硬件的测试工作都可分别基于硬件抽象层来完成, 使得软、硬件测试工作的并行进行成为可能。在定义抽象层时, 需要规定统一的软、硬件接口标准, 其设计工作需要基于系统需求来做, 代码工作可由对硬件比较熟悉的人员来完成。硬件抽象层一般应包含相关硬件的初始化、数据的输入/输出操作、硬件设备的配置操作等功能。硬件抽象层接口的定义和代码设计应具有以下特点:

- 1) 硬件抽象层具有与硬件的密切相关性。
- 2) 硬件抽象层具有与操作系统的无关性。
- 3) 接口定义的功能应包含硬件与系统所需硬件支持的所有功能。
- 4) 接口定义简单明了, 太多接口函数会增加软件模拟的复杂性。
- 5) 具有可测性的接口设计有利于系统的软、硬件测试和集成。

(2) 嵌入式操作系统

对于功能简单、仅包括应用程序的嵌入式系统来说, 一般不使用操作系统, 仅有应用程序和设备驱动程序。随着高性能嵌入式系统的广泛应用, 操作系统的使用成为必然发展趋势。在设计较复杂的程序时, 可能就需要一个操作系统来管理和控制内存、多任务、周边资源等; 同时, 依据系统所提供的程序界面来编写应用程序, 可大大减少程序员的负担。

支持嵌入式系统应用的操作系统软件, 它是嵌入式系统极为重要的组成部分, 通常包括与硬件相关的底层驱动程序、系统内核、设备驱动接口、通信协议、文件系统等。

目前, 常用的嵌入式操作系统有 Linux、 μ C/OS、WinCE、VxWorks、Palm OS、QNX、Symbian 等。

(3) 中间件

中间件 (Middleware) 位于操作系统和应用软件之间。它屏蔽了各种操作系统提供不同应用程序接口的差异, 向应用程序提供统一的接口, 从而便于用户开发应用程序, 同时也使应用程序具有跨平台的特性。该层主要包括窗口系统、OSGi 服务接口、网络协议、数据库管理系统、Java 虚拟机等。

(4) 应用软件

嵌入式应用程序运行于操作系统上, 利用操作系统提供的机制完成特定功能的嵌入式应用, 不同的系统需要设计不同的嵌入式应用程序。它是整个系统功能的体现, 系统的能力总是通过应用程序表现出来。一个嵌入式系统可以简单到没有支撑软件, 甚至没有操作系统, 但却不能没有应用软件, 否则它就不能成为一个系统。另外, 嵌入式应用软件是针对特定应用领域, 基于某一固定的硬件平台, 用来达到用户预期目标的计算机软件。嵌入式应用软件与普通应用软件有一定的区别, 它不仅要求准确性、安全性和稳定性等方面能够满足实际应用的需要, 而且还要尽可能地进行优化, 以减少对系统资源的消耗, 降低硬件成本。

1.4 嵌入式系统的设计与开发

嵌入式系统的设计与开发有别于通用 PC 系统，本节重点分析嵌入式系统的设计方法和开发流程。

1.4.1 嵌入式系统的设计方法

1. 由上而下与由下而上

由上而下 (Top-Down Approach) 是一个正统的设计方案。也就是说，所有的设计皆是遵循系统工程的流程来进行的，确定需求、制定系统规格、设计、实现、测试都是一步一步、按部就班地进行。

相对应的是由下而上 (Bottom-Up Approach)。由下而上的意思是：一个系统是以已经有的基础 (或组件) 为起点，开始往上延伸，最后将系统完成。

其实大部分的项目都是这两种方式的混合体，很少有整个项目都是从上而下的，同样也很少有整个项目都是由下而上的。

2. UML 系统建模

设计复杂的嵌入式系统时，在得到系统规范后，决定将系统分解成硬件和软件组件之前，形式语言的建模是非常必要的。通过对形式化模型的有效化、校验，可以发现许多潜在的设计问题。统一建模语言 (Unified Modeling Language, UML) 采用一种简单而直观的图形化方式描述系统设计中的各个问题和细节，不仅可以使系统分析设计实现标准化，而且完全可以实现系统分析、设计、制作、测试分别由不同的项目成员在统一、一贯的方式下完成，也使得系统分析和设计模型在相似系统中重用成为可能。目前，UML 已经广泛应用于嵌入式系统建模中，它采用规范化的验证、综合系统以及自动生成系统为嵌入式系统提供了有保障的可靠性和安全性的设计方法。

虽然 UML 的初始目的在于描述软件系统，尤其是对象导向项目的设计与规划。但由于 UML 本身包括了许多前人的智慧，因此 UML 也就更具有变形性和应用性，可以应用于不同的问题领域，也可以在嵌入式系统设计过程中应用。UML 具有以下几大特点：

1) 面向对象。UML 支持面向对象技术的主要概念，提供了一批基本的模型元素的表示图形和方法，能简洁地表达面向对象的各种概念。

2) 可视化，表示能力强。通过 UML 的模型图能清晰地表示系统的逻辑模型和实现模型。UML 还可用于各种复杂系统的建模。

3) 独立于过程。UML 是系统建模语言，独立于开发过程。

4) 独立于程序设计语言。用 UML 建立的软件系统模型可以用 Java、Visual C++、Smalltalk 等任何一种面向对象的程序设计来实现。

5) 易于掌握使用。UML 图形结构清晰，建模简洁，容易掌握使用。

常用的 UML 图包括用例图、类图、序列图、状态图、活动图、组件图和部署图。

在嵌入式系统设计中，使用 UML 进行系统分析和设计，可以加速开发进程，提高代码质量，支持动态的业务需求。UML 适用于各种规模的系统开发，能促进软件复用，方便地集成已有的系统，并能有效处理开发中的各种风险。

另外，在嵌入式系统项目中，许多情况都需要预想到。嵌入式系统本质上就是一种强壮性设计，加上许多系统用封闭型设计，无法像开放系统一样能轻易地进行维护。在设计阶段使用 UML 来描述系统的模型，可以及早确定系统的方向、规划系统的功能，并提早发现问题，更能记忆团队的项目历程（或智慧），提供给下一次项目使用。

3. 面向对象设计

随着系统的需求日益增加，系统的功能及复杂程度不断增大，为了使系统开发变得容易，要逐步改进对系统的思考方式以及开发系统的方式，这项新技术称为面向对象的开发。

对象是客观世界中具有独立属性以及能力的实体，有着某种特征（状态）和行为。在面向对象的开发中常常遇到面向对象的分析（Object-Oriented Analysis）、面向对象的设计（Object-Oriented Design）和面向对象的编程（Object-Oriented Programming）等。

面向对象的分析是所有软件分析活动的第一步，仔细地划分系统的各个部分，然后将各个部分作为一个对象进行功能或行为的分析和定义。

面向对象的设计是将面向对象分析所建立的分析模型转变为软件构造蓝图的设计模型，即在预定义的基本类框架上构建一个系统。在这个阶段中，只要进一步确定各个对象的功能以及各个对象之间的关系即可。

面向对象的编程是指使用面向对象的设计语言（如 Java、C++、Ada 等）把面向对象设计的系统模型程序化，也就是完成具体实现。编码是软件开发过程中最基本、最底层的需求，它强调的是一种分析及解决问题的思路，而不在乎所使用的语言工具。

在传统的结构化方法看来，它是将系统分解为很多基本函数的集合，数据被孤立分离，并且不考虑并发。而面向对象方法则不同，它的基本分解单位为对象。在面对较复杂的系统设计时，可将它作为一个对象来进行分析。一个系统作为一个对象，它可以由多个部分组成。同样，这个对象也可以分解为多个对象；若从代码实现的视角分析，面向对象代码侧重于对象之间的交互，多个对象各司其职、相互协作以完成目标。

在嵌入式系统设计中，面向对象设计的方法是经常采用的方法。

1.4.2 嵌入式系统开发的基本流程

嵌入式系统的设计可以看做是一个项目的实施，按照常规的工程设计方法，可以分为 3 个阶段：需求分析、设计和开发实现。

1. 需求分析

需求分析阶段是整个项目设计的第一步，需要确定系统功能部分和非功能部分。其中，功能部分主要包括系统的总体功能、系统输入、系统输出、性能需求等要求；非功能部分主要包括名称、成本要求、物理尺寸大小等。同时需要进行需求细化，将模糊的描述转换成有意义的量化数据。对一两个新系统的开发而言，需求细化、规格的制定需要花许多的时间进行沟通，主要从以下几个方面着手。

(1) 系统功能部分分析

就系统功能而言，主要包括如下几个方面。

1) 这个系统可能会有哪些输入；输入量是什么；以什么方式进行输入；是否需要前期处理；物理量的范围是否确定；有没有特别的需求，如采样频率、信号放大等。

2) 系统需要哪些输出；是否需要进行类比数字转换；可能需要驱动哪些外部设备；输出