



普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
微电子与集成电路设计系列规划教材

# 嵌入式系统

## ——从SoC芯片到系统

(第2版)

© 凌明 王学香 单伟伟 编著



中国工信出版集团



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

普通高等教育“十一五”  
微电子与集成电路设计系列教材

# 嵌入式系统

## ——从 SoC 芯片到系统

### (第 2 版)

凌 明 王学香 单伟伟 编著

电子工业出版社  
Publishing House of Electronics Industry  
北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材，从 SoC 芯片设计者的视角分析和介绍嵌入式系统的基础知识，注重软硬件协同设计与软硬件适配优化。全书共 8 章，主要内容包括：嵌入式系统概况、嵌入式系统中 SoC 的硬件架构、嵌入式系统的开发和调试、SoC 中的 CPU 内核、存储子系统、外设接口、嵌入式系统软件概述、嵌入式系统功耗优化等。每章都设置专门的设计案例分析、思考题和扩展阅读，配套电子课件、习题参考答案、程序代码等。

本书可作为高等学校微电子、集成电路设计，以及其他电子和计算机相关专业高年级本科生与研究生 SoC 及嵌入式课程的教材，也可作为从事嵌入式系统研究开发的工程技术人员的参考书。

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：从 SoC 芯片到系统 / 凌明，王学香，单伟伟编著. — 2 版. — 北京：电子工业出版社，2017.6  
ISBN 978-7-121-30718-8

I. ①嵌… II. ①凌… ②王… ③单… III. ①微型计算机—系统开发—高等学校—教材 IV. ①TP360.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 314602 号

策划编辑：王羽佳

责任编辑：周宏敏

印 刷：北京京科印刷有限公司

装 订：北京京科印刷有限公司

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：787×1092 1/16 印张：26.5 字数：773 千字

版 次：2017 年 6 月第 1 版

印 次：2017 年 6 月第 1 次印刷

印 数：2000 册 定价：69.00 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)88254888，88258888。

质量投诉请发邮件至 [zltz@phei.com.cn](mailto:zltz@phei.com.cn)，盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

本书咨询联系方式：(010)88254535，[wylj@phei.com.cn](mailto:wylj@phei.com.cn)。

## 第 2 版序

《嵌入式系统——基于 SEP3203 微处理器的应用开发》第 1 版自 2006 年底出版以来得到了东南大学以及相关兄弟院校的教学应用，取得了良好的教学效果，并入选了“十一五”国家级规划教材。近几年来，嵌入式系统技术的飞速发展正推动着整个产业发生着深刻的变化：第一，移动互联网产业的兴起彻底改变了传统电信运行商、软件服务商、内容提供商、整机制造商等生态环境的商业模式，而物联网技术的迅速发展则推动着传统产业信息化和现代服务业的变革；第二，嵌入式领域虽然不存在传统桌面系统的 Wintel 联盟，但是在嵌入式 CPU 和嵌入式操作系统方面已经出现 ARM 公司系列 CPU 和 Google 公司 Android 系统一枝独秀的局面；第三，国内已经涌现出一批初具规模和实力的嵌入式微处理器设计厂商，自主 CPU 内核也逐渐成熟，并在部分市场领域得到应用，自主 SoC 芯片的生态环境已初步形成。

另一方面，嵌入式系统的本质是以应用为核心的专用计算机系统，它的核心是嵌入式微处理器（SoC 芯片），围绕应用目标开展软硬件协同设计是嵌入式技术的本质特征。作为专用计算机系统，嵌入式系统技术与通用计算机系统没有本质的区别，但往往对系统的性能、功耗、成本、可靠性与实时性有更加严格的限制，这就决定了其总线架构、CPU 内核设计、存储架构设计、媒体与图形系统设计等方面都有自己的设计哲学。传统的嵌入式系统教学往往采用国外 SoC 芯片作为主要教学内容，由于缺乏芯片的底层实现细节，往往更侧重于如何基于国外芯片厂商封装好的底层软件库进行应用开发。这使得学生缺乏对芯片底层工作机制的了解，从而无法对软硬适配部分进行充分的优化与定制，更不要说参与自主 SoC 芯片的研发与系统方案设计了。这显然无法满足技术和产业发展的需求。

基于对以上问题的认识，东南大学国家 ASIC 工程技术研究中心（以下简称工程中心）的几位老师着手编写了《嵌入式系统——从 SoC 芯片到系统（第 2 版）》。正如本书副标题所表明的，本书将从 SoC 芯片的视角来分析和介绍嵌入式系统的基础知识。得益于工程中心十多年来在自主 SoC 芯片设计方面积累的工程经验与研究成果，本书详细介绍嵌入式微处理器 SoC 芯片的架构、CPU、存储子系统、外围设备、调试方法、低功耗设计和操作系统基础，力图给读者一个 SoC 芯片设计者的视角，使其了解现代嵌入式系统的构成，并真正理解一个复杂的嵌入式系统应用在芯片层面和软件层面是如何运作的。在第 2 版中，作者将继续采用工程中心自主研发的 SEP4020 与 SEP6200 处理器作为主要案例，其中 SEP6200 处理器采用了国产 UniCore2 CPU 内核。

与第 1 版不同，为了便于教学，本书为几乎所有的章节编写了思考题、案例分析和扩展阅读。当然，这不是一本包罗万象、解决所有问题的教材，正如作者们所希望的，这是一本嵌入式系统入门教材。通过这本书的阅读和学习，作者希望为读者后续进一步的深入学习打下坚实的基础。

时龙兴  
于东南大学

# 前 言

## 关于本书以及如何使用本书

毫无疑问，在大学中讲授嵌入式系统相关的课程是一个巨大的挑战。带来这种挑战的根本原因在于：第一，嵌入式系统是一个飞速发展的动态系统，新技术、新产品、新应用、新商业模式层出不穷，这一点在这一轮的移动互联网浪潮和物联网浪潮中表现得尤为突出。第二，嵌入式系统技术是一个非常综合的学科门类，其内涵涉及电子与微电子、计算机架构、操作系统、中间件、人机交互、计算机网络、通信甚至整机设计与制造等各领域，很难在有限的课时内将所有的知识点讲深讲透——这一点对于传统的电子信息类专业的本科生而言尤其明显，因为传统的电子信息类专业课程的设置往往很少涉及操作系统等软件方面的内容。第三，嵌入式系统技术的两大基础是微电子技术（尤其是 SoC 技术）和以嵌入式操作系统为代表的嵌入式软件技术。嵌入式系统对于性能、成本、功耗、实时性与高可靠性的更高要求决定了围绕应用目标开展软硬件协同设计和软硬件适配优化是嵌入式系统技术的本质特征。这就需要对 SoC 芯片的架构和工作机制有非常深刻的理解。第四，嵌入式系统技术是一门实践性非常强的课程，如何在有限的课时内加强学生的实践能力培养也是一个非常大的挑战。

针对上述这些挑战，东南大学国家专用集成电路系统工程技术研究中心依托电子科学与技术国家重点学科的优势，将多年来承担的国家、省部级科研项目的科研成果应用于教学，开展软硬件协同的嵌入式系统教学，具体举措包括：第一，建设了以自主 SoC 芯片为基础的系列嵌入式系统课程：面向本科生的“嵌入式系统概论”，面向研究生课程的“嵌入式系统”、“SoC 设计”、“嵌入式系统高级 C 语言编程”、“嵌入式操作系统”、“移动互联网应用编程”、“嵌入式系统实训”。课程内容覆盖从 SoC 芯片到软硬协同设计、适配优化再到应用方案设计的各层次。第二，采用自主 SoC 芯片设计了多款教学实验平台，并开发了相关实验。在课内有限的学时内重点培养学生基本的实践技能，通过课外实验和综合实训课程培养学生的综合应用能力，通过连续举办多届嵌入式设计竞赛培养学生的创新能力。

本书的写作目的就是配合本科课程“嵌入式系统概论”和研究生课程“嵌入式系统”的教学。因为是作为本科概论课程和研究生基础课程用书，本书的目的不是也不可能讲授嵌入式系统相关的所有内容。事实上，试图在一本书、一门课程中将嵌入式系统的所有内容讲授清楚是不可能的。因此，本书的基本定位是基础与入门。为后续课程或进一步的学习打下坚实的基础和扫清概念障碍。我们发现初学者对于现代 SoC，尤其是面向移动互联网终端的 SoC 中出现的新概念、新知识的了解非常匮乏，而这些对于开展软硬件协同设计与软硬件适配优化却是必不可少的。与以往许多教材不同，本书试图站在 SoC 设计者的角度来介绍嵌入式系统的相关基础知识。这得益于本书作者参与了东南大学国家 ASIC 工程中心几款自主 SoC 芯片设计的全过程，全书中我们也将以自主 SoC 芯片 SEP4020 和 SEP6200 作为案例进行介绍。

为了便于教学，本书几乎在所有的章节中都设置了专门的设计案例和思考题。为了适应研究生教学的需要，本书在每章都设置了提高内容（书中带\*的章节），将最新的技术发展融入教学内容。这些内容涉及到新型的片上互联架构、高性能 CPU 架构、异构计算单元、片上存储架构、多层次低功耗设计等内容，并为研究生和学有余力的本科生设置了扩展阅读单元，读者们可以通过这些扩展阅读进一步深化对相关技术的了解。

本书各章节安排如下：

## 第 1 章 嵌入式系统概况

本章概述嵌入式系统的概念、嵌入式系统的应用等。作为两个最重要也可能是最热门的应用领域，本章专门对移动互联网终端和物联网进行介绍。我们还将在本章介绍嵌入式系统的产业链构成，并对学习嵌入式系统的知识体系进行梳理。本章最后通过一个 MP3 播放器的实例分析引出问题：按下按钮后 MP3 音乐是怎么播放出来的。

## 第 2 章 嵌入式系统中 SoC 的硬件架构

本章介绍 SoC 的硬件架构，由总线互联、处理器、中断控制器、定时器、存储系统、外设接口等组成，由于本书后面的章节将详细阐述处理器、存储系统、各种接口等部分，因此本章重点介绍 SoC 芯片的总线互联，并分析 ARM 公司的片上互联标准——AMBA。本章还专门介绍 DMA 控制器的工作原理。在案例部分，本章给出了几款 SoC 芯片的架构介绍。

## 第 3 章 嵌入式系统的开发和调试

本章首先介绍嵌入式系统的一般开发过程，并对各种调试方法进行介绍，包括模拟器、在线仿真、片上在线仿真和跟踪技术，并详细介绍基于 JTAG 的调试方法。接着对 ARM 公司的 3 款集成开发环境：ADS、MD-5 和 MDK 进行介绍。

## 第 4 章 SoC 中的 CPU 内核

本章介绍 CPU 的基本概念：CPU 的流水线技术、分支预测技术、乱序执行技术、超标量处理器、VLIW 处理器、EPIC 处理器、多核处理器等。接下来重点介绍 ARM 处理器的特点、编程模型、指令系统、汇编语言程序结构、异常处理、编程技巧、ARM 系列微处理器等。作为对 ARM 架构的补充，本章还介绍 MIPS、龙芯和众志 CPU 的基本架构。GPU 和可重构计算作为新兴的计算引擎也在本章进行介绍。

## 第 5 章 存储子系统

本章首先介绍嵌入式系统存储子系统的金字塔结构，重点分析高速缓存（Cache）与虚拟存储器技术。接下来介绍常用的存储器及其时序，包括 SRAM、SDRAM、DDR SDRAM、Flash 等。SoC 中的外部存储器控制接口 EMI 及其编程模型，SoC 中的 SD/MMC 控制器及其编程模型也在本章进行讲解。最后介绍存储子系统的性能和功耗优化技术。

## 第 6 章 外设接口

本章分别介绍低速通信接口控制器（异步串行通信 UART、同步串行通信 SPI）、高速通信接口控制器（通用串行总线 USB、10/100M 以太网 MAC 网络接口）、人机界面控制器（液晶显示器控制器 LCDC、音频接口 I2S 控制器）。

## 第 7 章 嵌入式系统软件概述

本章首先介绍嵌入式系统软件的组成、bootloader 引导程序，以及为什么需要嵌入式操作系统和嵌入式操作系统的一些基本概念。在本章的第二部分，重点介绍与嵌入式操作系统相关的基本原理，包括内核中的任务管理、任务间通信和中断管理。Android 作为当前最流行的手持终端操作系统在本章的第三部分进行介绍。

## 第8章 嵌入式系统功耗优化

本章首先概述低功耗设计方法。接着分别介绍 SoC 级低功耗设计方法和嵌入式系统级低功耗设计方法，并给出两个与之对应的设计案例。

### 相应的课程安排

本书可以作为电子类本科生高年级和研究生低年级的教材。按照 2 学分（本科 32 学时、研究生 36 学时，其中实验课时按一半折算）的课程设置，作者给出的参考课时安排如下（教师可根据实际情况进行调整）：

- 本科生“嵌入式系统概论”授课学时安排（24 学时）

- 第 1 章 嵌入式系统概况 2 学时

- 第 2 章 嵌入式系统中 SoC 的硬件架构 2 学时

- 第 3 章 嵌入式系统的开发和调试 2 学时

- 第 4 章 SoC 中的 CPU 内核 6 学时

- 第 5 章 存储子系统 3 学时

- 第 6 章 外设接口 3 学时

- 第 7 章 嵌入式系统软件概述 3 学时

- 第 8 章 嵌入式系统功耗优化 3 学时

- 本科生“嵌入式系统概论”实验课学时安排（16 学时，折合 8 学时）

- 实验一 UB4020EVB 实验平台及 ADS 开发环境及 ARM 汇编实验 3 学时

- 实验二 GPIO、Timer（含中断和逻辑分析仪使用）3 学时

- 实验三 UART、IIC 与 SPI 实验（逻辑分析仪）3 学时

- 实验四 DMA 与 LCDC 实验 3 学时

- 实验五 设计一个温湿度传感节点 4 学时

- 本科生“嵌入式系统概论”课外实验安排

- 1. Mini4020 或 HiveBoard 教学平台相关 Linux 系统实验

- 研究生“嵌入式系统”授课学时安排（28 学时）

- 第 1 章 嵌入式系统概况 1 学时

- 第 2 章 嵌入式系统中 SoC 的硬件架构 6 学时

- 第 3 章 嵌入式系统的开发和调试（自学）

- 第 4 章 SoC 中的 CPU 内核 6 学时

- 第 5 章 存储子系统 6 学时

- 第 6 章 外设接口（自学）

- 第 7 章 嵌入式系统软件概述 3 学时

- 第 8 章 嵌入式系统功耗优化 6 学时

- 研究生“嵌入式系统”实验课学时安排（16 学时，折合 8 学时）

- 实验一 UB4020EVB 实验平台及 ADS 开发环境及 ARM 汇编实验 3 学时

- 实验二 GPIO、Timer、UART 实验（含中断和逻辑分析仪使用）3 学时

- 实验三 不同 CPU 主频、总线主频、DDR 控制器主频对于性能的影响 3 学时

- 实验四 采用 Oprofile 分析软件瓶颈 3 学时

- 实验五 SoC 中多总线 Master 竞争对于系统性能的影响 4 学时

\*本实验课程需要采用 UB4020EVB 开发板和 HiveBoard 开发板。

● 研究生“嵌入式系统”课外实验安排

1. Mini4020 教学平台相关 Linux 系统实验
2. HiveBoard 教学平台相关 Linux 系统实验及其他高阶实验

## 支持资料

本书中的许多图表可以无偿地从互联网上得到但不得用于商业目的。使用它们的唯一限制是使用这些资料的任何课程都应将本书作为推荐教材。

作者已做了很大的努力来校验本书内容，相关的其他人员更是以加倍的努力来校验这本书。即便如此，也仍然可能会遗漏某些错误。另外，由于作者水平与知识面的限制，书中的部分观点与见解可能存在欠妥甚至错误之处，作者欢迎读者对本书的内容和形式以及发现的任何错误给予反馈意见。请将相关信息发至 E-mail: [wxx@seu.edu.cn](mailto:wxx@seu.edu.cn)和 [trio@seu.edu.cn](mailto:trio@seu.edu.cn)。

## 致谢

东南大学国家专用集成电路系统工程技术研究中心主任时龙兴教授参与了本书的策划和章节设置讨论，并给与了大量而具体的指导意见。东南大学国家专用集成电路系统工程技术研究中心的博士生张阳同学和谢震同学在本书的编写过程中也参与了讨论并给予了相应的技术支持。东南大学苏州研究院国家专用集成电路与系统实验室的硕士研究生刘烁、高滔、骆然、郑晓萌、刘克桥、李晨锋、蔡鹏翔、戴悦等参与了本书的部分图表绘制和勘误工作。在本书的写作与修改成稿期间，我正在加拿大维多利亚大学做访问学者，维大计算机系的潘建平教授和郑开明（Mantis Cheng）教授在工作和生活方面都给了我巨大的帮助。另外，本书得以最终出版，也得益于电子工业出版社的王羽佳编辑的大力支持与耐心等待。在此一并向他们表示衷心的感谢！

凌 明



# 目 录

第 1 章 嵌入式系统概况	1	思考题	47
1.1 什么是嵌入式系统	1	扩展阅读	47
1.2 嵌入式系统的应用与分类	2	第 3 章 嵌入式系统的开发和调试	48
1.2.1 基于实时性的分类	2	3.1 嵌入式系统的一般开发过程	48
1.2.2 基于应用的分类	2	3.1.1 交叉编译	49
1.2.3 移动互联网	3	3.1.2 链接	50
1.2.4 物联网	4	3.1.3 调试	50
1.3 嵌入式系统的产业链	6	3.2 调试方式介绍	51
1.4 嵌入式系统的知识体系	7	3.2.1 模拟器	53
1.5 案例: MP3 播放器	9	3.2.2 驻留监控软件	60
思考题	10	3.2.3 在线仿真调试	62
扩展阅读	11	3.2.4 片上在线仿真调试	62
第 2 章 嵌入式系统中 SoC 的硬件架构	12	3.2.5 跟踪 (Trace) 技术	63
2.1 SoC 硬件架构概述	12	3.2.6* CoreSight 调试与跟踪技术简介	65
2.2 互联结构	15	3.3 基于 JTAG 接口的片上在线仿真	70
2.2.1 常见互联结构分类	15	3.3.1 JTAG 简介	70
2.2.2 地址空间	20	3.3.2 基于 JTAG 的片上在线仿真的 系统结构	75
2.2.3 常见互联结构接口协议	23	3.3.3* ARM7TDMI 内核调试原理	76
2.3 中央处理器	32	3.4 ARM 的集成开发环境	82
2.4 中断控制器	32	3.4.1 ADS 集成开发环境	83
2.5 存储子系统	34	3.4.2 DS-5 集成开发环境	83
2.6 直接存储器访问 (DMA)	35	3.4.3 MDK 集成开发环境	89
2.6.1 scatter-gather DMA	36	3.5 嵌入式软件的执行镜像与启动过程	94
2.6.2 SEP4020 芯片中的 DMA 控制器	37	3.5.1 ARM 链接器的输出文件的加载 视图与执行视图	95
2.6.3 DMAC 驱动	40	3.5.2 基于 ROM 的程序执行	97
2.7 外设接口控制器	40	3.5.3 基于 RAM 的程序执行	97
2.7.1 高速通信接口控制器	40	3.5.4 ROM/RAM 重映射	98
2.7.2 低速通信接口控制器	41	思考题	98
2.7.3 人机界面控制器	41	扩展阅读	98
2.8 案例: SoC 架构设计	41	第 4 章 SoC 中的 CPU 内核	100
2.8.1 S3C44B0X	41	4.1 CPU 的基本概念	100
2.8.2 S3C6410	42	4.1.1 CPU 的发展	100
2.8.3 OMAP3530	43		
2.8.4 SEP4020	43		
2.8.5 SEP6200	44		

4.1.2	复杂指令集 (CISC) 与精简指令集 (RISC) .....	103	5.3.2	虚实地址映射与转换 .....	224
4.1.3	CPU 的流水线技术 .....	104	5.3.3	快速地址转换技术 .....	227
4.1.4*	CPU 的分支预测技术 .....	106	5.3.4	地址保护机制 .....	228
4.1.5*	乱序超标量处理器 .....	110	5.3.5	处理缺页和 TLB 缺失 .....	230
4.1.6*	SIMD 和向量处理器 .....	114	5.3.6	ARM Cortex A 系列处理器的 虚存管理 .....	230
4.1.7*	VLIW 处理器 .....	115	5.4	片外存储器 .....	234
4.1.8*	EPIC 处理器 .....	116	5.4.1	静态随机存储器 (SRAM) .....	235
4.2	ARM 内核 .....	116	5.4.2	动态随机存储器 (DRAM) .....	237
4.2.1	ARM 介绍 .....	116	5.4.3	非易失性存储器 .....	250
4.2.2	ARM7TDMI 编程模型 .....	121	5.5	外部存储器接口 .....	258
4.2.3	ARM7TDMI 的指令集 .....	131	5.5.1	SEP4020 芯片的外部存储器 接口 EMI .....	258
4.2.4	ARM7TDMI 汇编语言 .....	143	5.5.2	SEP4020 芯片 EMI 的初始化与 配置 .....	261
4.2.5	ARM7TDMI 异常处理 .....	146	5.5.3	OMAP4460 处理器的外部 存储器接口 .....	266
4.2.6	ARM 汇编程序与 C 程序 .....	153	5.6*	存储子系统优化技术 .....	267
4.2.7*	ARM 处理器的多核技术 .....	158	5.6.1	存储子系统的技术指标 .....	267
4.2.8*	ARM 处理器的最新发展 .....	164	5.6.2	DDR 控制器的优化 .....	271
4.3*	其他 CPU 介绍 .....	169	5.6.3	片上存储器布局优化技术 .....	276
4.3.1	MIPS 体系架构 .....	170	案例: 高效高清媒体处理器的访存 QoS .....	279	
4.3.2	龙芯处理器 .....	175	思考题 .....	284	
4.3.3	UniCore-2 处理器 .....	178	扩展阅读 .....	285	
4.4*	其他类型的计算引擎 .....	181	第 6 章	外设接口 .....	288
4.4.1*	GPU .....	181	6.1	低速通信接口 .....	288
4.4.2*	可重构计算 .....	187	6.1.1	异步串行通信 UART .....	288
案例: REMUS-II 粗粒度可重构计算 架构 .....	196	6.1.2	同步串行通信 .....	294	
思考题 .....	201	6.2	高速通信接口 .....	299	
扩展阅读 .....	202	6.2.1	通用串行总线 USB .....	299	
第 5 章	存储子系统 .....	203	6.2.2*	10/100M 以太网 MAC 网络 接口 .....	304
5.1	存储子系统概述 .....	203	6.3	人机接口 .....	313
5.2	高速缓存 Cache .....	204	6.3.1	液晶显示器接口 .....	313
5.2.1	Cache 的基本组成 .....	204	6.3.2	音频接口 .....	322
5.2.2	Cache 的基本原理 .....	206	6.3.3	触摸屏接口 .....	326
5.2.3*	Cache 缺失与访问冲突 .....	212	6.4	定时器 .....	332
5.2.4*	Cache 一致性问题 .....	216	6.4.1	通用定时器 .....	332
5.2.5	Cache 和 SPM 的比较 .....	218	6.4.2	RTC .....	333
5.2.6*	ARM Cortex A8 处理器的 Cache 架构 .....	221			
5.3	虚拟存储器 .....	222			
5.3.1	虚拟内存技术的基本原理 .....	222			

思考题 .....	335	第 8 章 嵌入式系统功耗优化 .....	379
扩展阅读 .....	336	8.1 嵌入式系统功耗优化概述 .....	379
第 7 章 嵌入式系统软件概述 .....	337	8.1.1 嵌入式系统的功耗问题 .....	379
7.1 嵌入式系统的软件框架 .....	337	8.1.2 SoC 芯片级功耗优化 .....	380
7.1.1 嵌入式系统软件所面临的挑战 .....	337	8.1.3 嵌入式系统级功耗优化 .....	384
7.1.2 嵌入式软件的层次框架 .....	338	8.2 SoC 芯片级低功耗设计方法 .....	385
7.2 嵌入式操作系统的基本原理 .....	340	8.2.1 时钟门控 .....	386
7.2.1 嵌入式操作系统简介 .....	340	8.2.2 多电压域技术 .....	388
7.2.2 嵌入式操作系统的内核 .....	341	8.2.3 电源门控技术 .....	389
7.2.3 任务管理与调度 .....	342	8.2.4* 动态电压频率调节和自适应	
7.2.4 任务间通信 .....	348	调节 .....	391
7.2.5 中断管理 .....	350	案例: SoC 芯片低功耗设计 .....	396
7.3* Android 操作系统简介 .....	356	8.3 嵌入式系统级低功耗设计方法 .....	399
7.3.1 Android 操作系统的层次 .....	356	8.3.1 嵌入式系统级功耗优化技术	
7.3.2 Android 虚拟机 .....	358	介绍 .....	399
7.3.3 Android 的任务间通信机制 .....	366	8.3.2 动态电源管理 DPM .....	400
7.3.4 Android 的安全机制 .....	371	8.3.3 动态电压调节 DVS .....	402
案例: 基于 SEP4020 的 EPOS 软件		8.3.4 动态电压频率调节 DVFS .....	404
平台设计 .....	375	案例: 整机系统级低功耗设计 .....	406
思考题 .....	378	思考题 .....	411
扩展阅读 .....	378	扩展阅读 .....	411

# 第1章 嵌入式系统概况

## 1.1 什么是嵌入式系统

关于嵌入式系统的定义可以说是众说纷纭，IEEE给出的定义是：“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。”而维基百科给出的定义则是：“所谓嵌入式系统是指完全嵌入受控器件内部，为特定应用而设计的专用计算机系统。”国内学术界和工业界普遍接受的定义则是：“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、功耗严格要求的专用计算机系统。”

总而言之，与巨型机、服务器、工作站和PC等通用计算平台不同，嵌入式系统是为特定应用设计的专用计算机系统。所谓通用计算平台，是指计算机的功能主要取决于所运行的软件系统，不同的软件决定了通用计算机系统的功能，比如在服务器上运行Web服务器，那么这台服务器的主要功能就是作为网页服务器，而如果运行的是打印服务，那么该服务器的主要功能就是打印服务器。嵌入式设备则通常具有一个非常特定的应用功能，比如即使在今天智能手机的功能已经非常强大，可以集成大量的应用，但是其作为电话的功能却必须是首先实现的。所以从最广义的角度上来看，只要是专用计算机系统都可以称为是嵌入式系统，甚至有种开玩笑似的定义，所谓嵌入式系统就是PC取反，所有非PC类的计算机系统都是嵌入式系统。甚至PC也是由嵌入式系统构成的，比如键盘控制器、硬盘的控制器构成的专用控制系统等等。

从嵌入式系统的定义我们可以知道嵌入式的应用其实无所不在，现代生活每天都在和嵌入式系统打交道。据ARM公司的预测，2013年全球出货的消费电子类产品将达到24亿部（其中手机14亿部），而围绕工业控制、汽车电子、网络通信等传统嵌入式设备应用，2013年全球出货的嵌入式微处理器将达到110亿颗。可以不夸张地说，嵌入式应用和相关技术支撑了全球电子信息类产业的大半壁江山。

与通用计算平台不同，嵌入式应用往往更加强调系统的高性能、低成本、低功耗以及实时性、可靠性等设计因素。尤其是对于消费电子这类面广量大，强调用户体验，并且采用电池供电的设备而言，系统的性能、成本以及功耗是必须考虑的优化目标。然而，高性能往往意味着高成本和高功耗，如何在性能、成本与功耗间找到折中是这类产品设计过程中必须面对的挑战。本书也试图重点介绍这三个设计维度的考量、优化与折中。

值得一提的是，传统上归入嵌入式系统设备的移动电话等消费电子类产品，由于采用更加强大的处理器以及相关硬件和操作系统，在这些设备上集成的功能也越来越丰富，比如智能手机和平板电脑已经可以实现上网浏览、处理邮件、办公软件、游戏、高清视频、高保真音乐等功能，使得这类产品已经越来越具备通用计算平台的特征，也就是设备的功能取决于其上所安装的软件系统。在这类产品上嵌入式专用计算平台与通用计算平台的界限正在变得模糊。作者认为这种通用化的趋势会变得越来越明晰，智能手机等传统嵌入式设备会逐渐变为通用计算平台，这个通用化的过程其实也正是移动互联网兴起和普及的过程，而与此相应的是手机专用外设和众多以手机为终端的软件商（当然，也可能是服务商和内容提供商）的兴起，这个过程将像当年PC的兴起一样充满创新、机遇和激情。

## 1.2 嵌入式系统的应用与分类

从不同的分类标准我们可以对嵌入式系统应用进行不同的分类，本节将从实时性要求和应用领域两个维度对嵌入式应用进行分类，虽然任何分类方法都很难准确地划分纷繁复杂的不同应用和产品形态。另一方面，由于移动互联网和物联网的兴起，这两大领域的应用已经深刻改变了传统嵌入式系统应用的产品形态和商业模式，因此我们将用两小节的篇幅单独介绍。

### 1.2.1 基于实时性的分类

所谓实时性是指系统运行的正确性不仅仅取决于功能的正确完成，同时还取决于在规定的时间内完成该功能。按照系统对于实时性要求的严格程度，我们可以简单地将嵌入式系统划分为非实时系统、软实时系统和硬实时系统。

**非实时系统。**在非实时系统中，系统的功能正确性仅仅取决于功能是否正确执行，而与功能执行的时间无关。简单地说，比如我们在手机或平板电脑上打开一个 Word 文档并进行编辑，这个功能的正确性仅和文档是否正确打开、是否能够正常编辑并保存有关，而与打开文档所耗费的时间无关（打开文档耗时长仅仅影响用户体验，而不影响功能）。

**软实时系统。**软实时系统的功能正确性不仅与功能执行有关，而且该功能必须在规定的时间内完成，否则将造成系统的功能不正常或故障，虽然这种不正常或故障并不会引起崩溃性和灾难性的后果。移动电话的语音编解码系统就是一个典型的软实时系统，电话的编解码系统必须在规定的时间内完成语音的采样、编码并在规定的时间内封装成为可传输的通信帧进行传输。如果系统不能在规定的时间内完成此项工作，就有可能造成通话质量的下降或停顿。另外，移动智能终端上的音乐播放软件和视频播放软件都必须在规定的时间内完成音频或视频文件的解码，否则将造成音乐或视频播放的卡顿。

**硬实时系统。**硬实时系统要求系统必须在规定的时间内完成规定的功能，否则将造成崩溃性的后果。火箭的控制系统可能是硬实时系统的最好例子，如果控制系统不能在规定的时间内完成对各路传感器传回数据的分析并做出控制响应的话，整个火箭系统将可能出现不可逆的灾难后果。硬实时系统的另外一个比较直观的例子是汽车的安全气囊。

关于嵌入式系统的实时性设计与分析是学术界和工业界研究的一个热门领域，随着系统复杂性的不断增加，如何保证任何情况下都能在规定的时间内做出正确的响应是一个巨大的挑战。

### 1.2.2 基于应用的分类

正如上一节所述，嵌入式系统的应用领域几乎涵盖了所有非 PC 的计算机系统，因此从应用领域对嵌入式系统进行分类是一件困难的事。通常情况下，我们将嵌入式应用领域划分为以下几大类。

**消费电子类产品：**毫无疑问，消费电子类产品是嵌入式应用领域最为面大量广、产品形态各异、竞争异常激烈的应用领域。我们可以将这个应用领域进一步细分为个人信息终端产品、办公自动化产品和家用电器类产品。个人信息终端应用包括手机、平板电脑、数码相机、数码摄像机、移动媒体播放器、个人游戏终端等。办公自动化类产品包括打印机、复印机、传真机等。家用电器包括电视机（含互联网电视）、家庭影院系统、机顶盒、冰箱、洗衣机等。

**网络通信类产品：**网络通信类产品构建了整个信息网络的基础，主要包括交换机、接入设备、路由器、防火墙、VPN 设备等等。

**汽车电子类产品：**汽车电子领域是嵌入式系统的传统应用领域，主要包括汽车的引擎控制系统、安全系统（防抱死系统、安全气囊）、车载导航系统和娱乐系统等等。由于车载环境比较恶劣（温度、

震动、灰尘等), 车载系统往往对设备的高可靠性、稳定性有着严格的要求。

**工业控制类产品:** 工控类应用领域也是一个非常宽泛的应用领域, 主要包括工控 PC、程控机床、智能仪表、生产线控制等等。另外, 我们有时也将交互式终端类产品归入工业控制类产品, 这类产品包括各种类型的非 PC 类的网络终端, 比如税控收款机、POS 机具、各种信息查询终端等等。

**医疗电子类产品:** 医疗电子类产品包括传统的医疗设备和医疗信息化所需要的各类设备。前者包括大型的 CT 机、核磁共振扫描, 也包括小型的生命体征监护仪、呼吸机、血压计等等。医疗信息化类产品涉及的面也非常广泛, 包括药品物流所需要的各种查询终端、病人住院信息查询终端、医生的电子病历等等。

**军工及航天类产品:** 军工和航天类产品通常情况下是作为武器系统或航天器系统的相关控制系统、导航系统等等, 涉及的面也非常广泛, 通常情况下这类产品都是硬实时系统, 而且对于系统的稳定性、健壮性有着非常高的要求。

### 1.2.3 移动互联网

移动互联网是一个庞大的系统, 包括移动智能终端(又可以分为智能手机、平板电脑等设备)、互联网络、网络服务(社交网络、游戏、及时通讯)等内容。传统上, 移动智能终端被划入嵌入式设备领域, 因为早期的手机采用嵌入式微处理器, 运行嵌入式操作系统, 其应用也比较单纯。但是现代的智能手机已经配备了功能强大的多核微处理器和外设, 并运行开放的手机操作系统, 用户可以根据自己的喜好选择安装不同的手机应用软件, 从这个角度上来说, 智能手机已经越来越像一个通用计算平台, 越来越多的公司和个人可以为流行的智能手机平台编写应用软件, 与此同时越来越多的能够和智能手机协同工作的硬件设备也层出不穷。因此, 部分研究者认为移动互联网终端, 尤其是运行开放操作系统的智能终端已不能被划分为嵌入式系统产品, 而是应该作为一类独立的计算机类型。我们认为, 移动互联网终端依然保持了很多嵌入式系统的特征, 比如相比于桌面系统和服务器系统而言, 移动互联网终端的硬件系统依然需要尽可能采用低成本和低功耗的设计, 这使得虽然目前的移动互联网终端的硬件系统的功能已经越来越强大, 但总体上依然较同时代的桌面系统要低一个层次。也正因为如此, 对于移动互联网终端的底层软件与硬件的适配与优化就显得更为重要。另一方面, 虽然移动互联网终端已经出现向通用计算平台过渡的趋势, 但最基本的专用功能(比如智能手机的电话功能)依然是至关重要的。基于这两点考虑, 本书依然将移动互联网终端在广义上归为嵌入式系统。

随着互联网技术以及移动智能终端技术的发展, 互联网已经渗透到现代社会的方方面面。据统计, 2009 年全球互联网的渗透率达到了全球人口的 23.8%, 而到 2015 年这个数字将达到 50%。作为互联网的终端设备, 2009 年共有 14 亿台电脑和 47 亿部移动电话, 并且越来越多的用户通过移动智能终端来访问互联网服务。而按照 ARM 公司的统计, 仅 2013 年一年, 全球出货的消费类移动设备的总出货量将达到 24 亿部, 其中仅移动电话一项就占 14 亿部。对于新一代移动互联网终端的产品特征, ARM 公司 CEO Tudor Brown 在 2012 曾预测至少应该包含以下内容(大部分功能在今天已经成为现实): 强大的无线互联网接入能力, 4~7 英寸的 LCD 显示屏, 支持随时在线, 支持常用的办公软件(比如邮件、字处理、电子表格、PPT 和 PDF 等), 支持高清视频、3D 游戏和 Hifi 音乐, 具有 8 小时以上的电池续航时间。

总的来说, 为了支撑这些产品的设计需求, 作为核心的移动终端嵌入式微处理器需要具备高集成、高性能、低能耗的特征。移动设备往往对产品的体积有着严格的限制, 因此为了在有限的空间内支持如此丰富的功能, 移动终端处理器必须将尽可能多的功能模块集成在一颗芯片中。比如, 除了主 CPU 外, 其还必须集成 GPU(图形处理器)、VPU(视频处理单元)、各类存储器接口(DDR, Nand Flash, SD 卡等)、各类通信模块与接口(3G/4G 移动通信, Wifi, USB OTG, 蓝牙, GPS 等)、高清显示控

制与接口（高清 LCDC，HDMI 接口）。如何将如此多的功能模块集成在一颗芯片，并保证每个功能模块的正常工作，已经成为现代 SoC 设计领域的一个重大挑战。另一方面，在保证处理器高集成度：高性能的同时，设计者还必须保证整个系统的低能耗。移动设备往往采用电池供电，降低系统能耗不仅能够延长电池在充电间隔的使用时间，同时也可以降低由于发热而带来的散热问题（毕竟，谁都不愿自己的智能电话需要配备散热风扇）。遗憾的是，系统对于高集成度与高性能的要求与低能耗的要求往往是一个矛盾，如何解决“既要马儿跑，又要马儿不吃草”的问题，成为移动智能终端处理器设计的另一个设计挑战。

## 1.2.4 物联网

物联网（The Internet of Things）是“万物沟通”的、具有全面感知、可靠传送、智能处理特征的连接物理世界的网络，实现了任何时间、任何地点及任何物体的连结。Kevin Ashton 最早在 1999 年提出了这个术语，虽然当时这个术语更多地用于供应链管理这个领域。今天，物联网可以帮助实现人类社会与物理世界的有机结合，使人类可以以更加精细和动态的方式管理生产和生活，从而提高整个社会的信息化能力。如果说传统的互联网是将全世界的计算机连接在一起的网络，而移动互联网则进一步将人们获取信息、处理信息、发布信息的终端从桌面计算机延伸到移动设备（包括智能手机、平板电脑、可穿戴设备等）的话，物联网则是将信息的获取和处理进一步延伸到几乎所有的物理设备（被称为智能对象，Smart Objects）。物联网的诞生将人类信息网络的神经末梢延伸到了几乎所有领域，包括农业、工业、交通、环境监测与保护、远程医疗、智能家居等。

物联网并不是独立于传统互联网的一个新兴网络，从某种意义上来说它实际构建在传统互联网之上。一般来说我们将物联网分为 3 层：第一层是物理感知层；第二层是网络传输层；第三层是应用层（见图 1-1）。物理感知层是物联网的最底层，负责采集物理世界的相关信息，并对来自上层应用的命令进行响应。采集物理世界的相关信息需要各种传感器来完成，比如温度传感器、光照传感器、摄像头、RFID 等等；为了响应上层应用发出的命令，有时还必须在该层配备相应的执行器（Actuators）。因此，物理感知层通常需要通过无线传感器网络（WSN，Wireless Sensor Network）或者传感器/执行器网络（SANET，Sensor/Actor Networks）来实现。可以说，物理感知层实际上是物联网的最本质特征之一，因为在此之前互联网的终端以桌面计算机和移动智能终端为主，而物联网的物理感知层将各种智能对象连接到互联网。所谓智能对象，可以将其定义为：

- 具有物理特性（大小、形状等）的实体；
- 具备最基本的通信功能，比如可以被其他通信实体发现，并可接受输入的信息和发出相应的回应；
- 拥有唯一的 ID 标识；
- 拥有至少一个名字和一个地址，名字用于人类识别，而地址用于机器间的通信；
- 具备一定的信息处理能力；
- 可以感知物理世界的相关信息（Sensor），或者可以对物理世界施加影响（Actuator）。

一个无线传感器网络通常由大量随机部署的传感器节点设备和一个或少数几个作为连接互联网的网关的汇总节点（Sink）构成。传感器节点只具有非常受限的计算能力、通信能力和电池容量。在网络拓扑结构上，由于受限于传感器节点的电池容量、处理能力以及部署方式，无线传感器网络通常采用 ad hoc<sup>①</sup>网络的形式，也就是不需要预先布设的交换节点和路由节点，所有的通信节点在网络中地位相等，每个节点既要发送自己的信息也要承担转发来自其他节点信息的功能（Sink 节点除外，因为该类节点担负着将来自整个传感器网络的信息汇总传输到互联网的功能，因此该节点具有网关的作用）。

<sup>①</sup> “ad hoc”这个词来自拉丁语，意为“for this”。

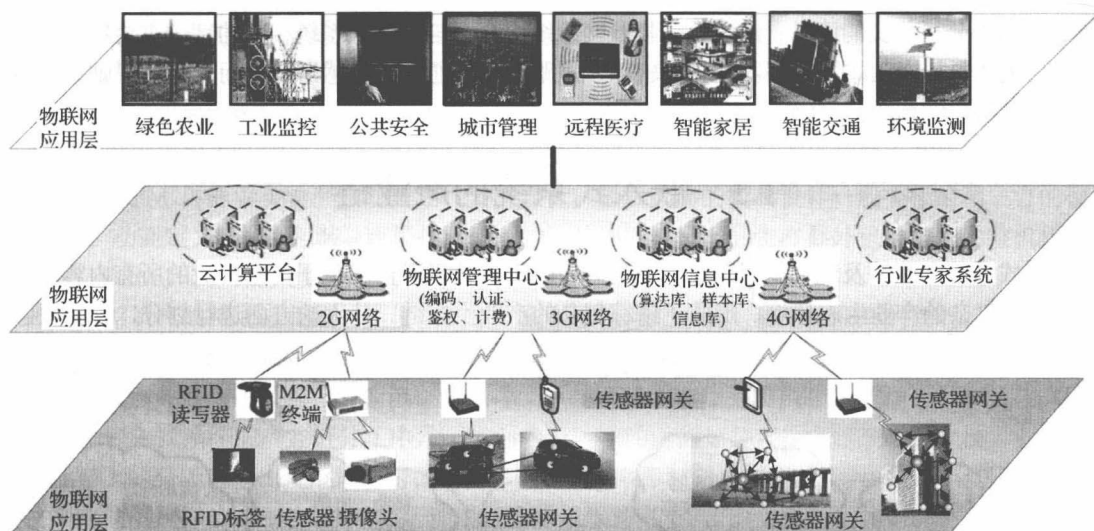


图 1-1 物联网

物联网的第二层是网络传输层。事实上，这里的网络层就是指传统的互联网，借助感知层的网关节点，物联网将底层采集的物理世界信息汇入互联网（也就是运行 TCP/IP 协议的全球网络）。互联网为这些信息提供传输通道和安全控制的同时，也为物联网应用提供了云存储平台和云计算平台。

物联网的最上层是应用层。如果说感知层和网络层提供机制保障的话，应用层才是真正的策略层。比如，微型传感器节点布置在农田当中，动态自组织成网络，采集农田作物的实时信息，如温度、光照度、土壤酸碱度等，并将采集的数据通过无线传感器网络返回到监控中心，监控中心将参照农作物种植的最优化环境数据，采取相应举措，如启动灌溉设备等。再如，如今的工业厂房规模日益增大，厂房车间等的实时环境成为影响安全生产和产品质量的重要因素。单靠人力去监测厂房设备及环境信息会耗费大量的资源。如果在广大的厂房空间中布置好一定数量的传感器节点，这些节点就能组成网络实时采集设备及环境信息，如温度、压力、烟雾浓度、有害气体含量等，并将信息实时反馈到监控中心。

从系统的层面来看，物联网应该具备以下特征：

- 支持异构设备。物联网中包含了大量的异构智能对象，这些对象在计算能力和通信能力上都具有很大的不同。为了管理这些异构设备物联网，应该在体系结构和协议两个层面都提供支持；
- 通过近距离无线通信技术实现无所不在的数据交换；
- 低功耗解决方案。由于大量的传感器接点是通过电池或者其他非传统电源方式（比如被动 RFID 采用感应的方式获取能量）供电的，所以低功耗技术和能量获取技术对于物联网具有举足轻重的作用；
- 位置与跟踪能力。通过短距离无线通信技术，物联网中的通信节点可以被定位（甚至跟踪移动轨迹），这个特性对于物流和产品生命周期管理等应用（这类应用已广泛采用 RFID 技术）具有非常重要的作用；
- 自组织能力。一方面由于传感器节点布置的随机性，另一方面由于这些节点在计算能力、通信能力和电池容量上的限制，传感器网络通常采用 ad hoc 网络的形式进行组织，这就要求系统中的各个节点能够自组织起网络的通信方式，比如动态的路由选择；
- 内建的安全与隐私保护机制。因为物联网与物理世界的紧密关联，因此必须从系统的最底层保证安全性和隐私。



通过以上分析，我们可以看出在整个物联网系统中真正与嵌入式系统相关的部分主要集中在物理感知层，主要包括嵌入式微控制器及相关软件、短距离无线通信、传感器等，而其他两层则更多地与传统的计算机科学相关。

### 1.3 嵌入式系统的产业链

嵌入式系统产业涉及现代电子信息产业的方方面面，几乎涵盖了电子信息产业的所有内容，构成了一个纷繁复杂的产业生态环境，形成了错综复杂的产业生态链。从大的方面进行划分，这个生态环境可以分为芯片设计与制造、方案设计与软件、整机设计与生产以及运营与服务这几个方面（如图 1-2 所示）。

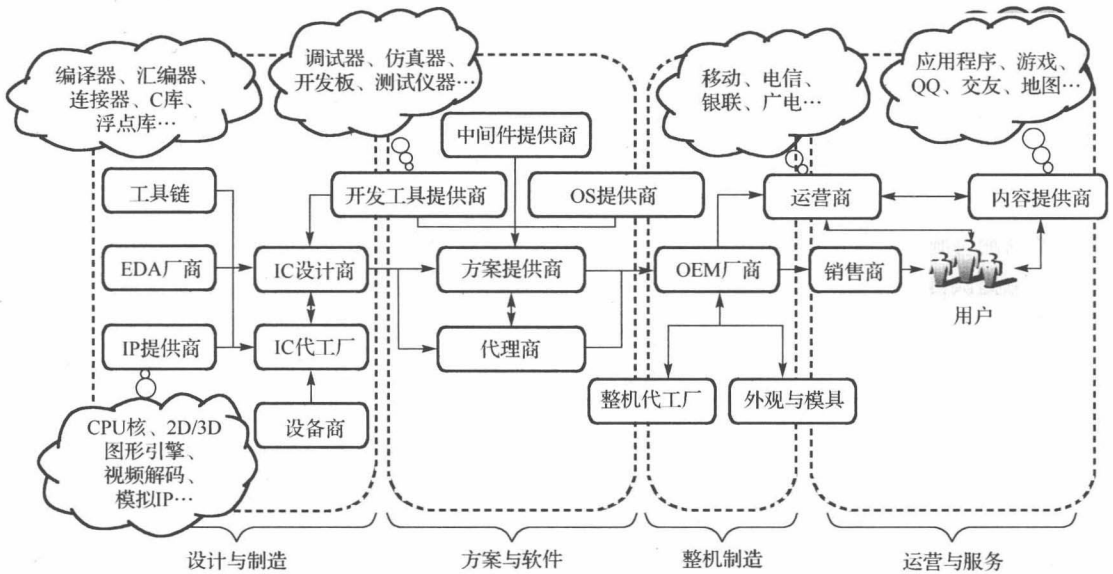


图 1-2 嵌入式系统的产业链

芯片设计与制造又可以分为 IC 设计商 (Fabless)、IC 代工厂 (包括 Foundry、封测厂等)、IP 提供商 (IP Vendor) 等。当然国际半导体巨头厂商中有仅负责 IC 设计的纯 Fabless 厂商，比如 Mavell、Broadcom 等；也有整合设计与生产封测于一体的 IDM (集成设备制造商, Integrated Device Manufacture) 厂商，比如 Intel、Samsung、ST、NXP、FreeScale 等；还包括仅负责生产或封测的厂商，比如 TSMC (台积电)、SMIC (中芯国际)、日月光等。IP 提供商中有只提供知识产权 IP 核的公司 (如 ARM)，也有除提供 IP 外同时推出自己芯片的厂商 (如高通等公司)。当然，除了前述的几类厂商外，IC 代工厂还需要向相应的设备商购买用于生产、测试、封装的专用设备。IC 设计商也需要在采购所需 IP 外向相应的 EDA (电子设计自动化, Electronic Design Automation) 厂商购买用于设计的 EDA 工具，比如 EDA 产业的两大巨头 Synopsis 和 Cadence，当然这些 EDA 公司有时不仅销售 EDA 设计工具，同时也销售自己的 IP 和提供设计服务 (Design Service)。

芯片设计和制造出来以后还必须由相应的方案提供商 (Design House) 基于这些芯片开发相应的方案设计。当然，随着竞争的日益激烈，越来越多的芯片提供商在推出新芯片的同时也会给出相应的非常完善的参考设计 (这部分工作有时由芯片提供商自己提供，有时也会委托第三方的方案商进行设计)。另外，通常情况下，芯片提供商会委托芯片代理商进行芯片的推广工作，由芯片代理商直接面对