

应用型本科 电子及通信工程专业“十二五”规划教材

嵌入式系统原理及应用 (基于Cortex-A8处理器)

主编 唐永峰

- 内容新颖：新知识、新技术、新工艺
- 特色鲜明：突出“应用、实践、创新”
- 定位准确：面向工程技术型人才培养
- 质量上乘：应用型本科专家全力打造



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

应用型本科 电子及通信工程专业“十二五”规划教材

嵌入式系统原理及应用 (基于 Cortex - A8 处理器)

主 编 唐永锋
参 编 白秋产 季仁东
居勇峰 杨定礼

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

全书共5章,分别对嵌入式系统的组成结构和典型应用、Cortex-A8处理器的体系结构、指令系统、嵌入式系统的开发流程、智能家居系统的设计进行了详细讲解,还提供了S5PV210驱动仿真调试、Linux及Android等嵌入式操作系统的实验例程。

本书内容丰富、案例实用、层次清晰、叙述详尽,方便教学与自学,可作为高等院校电气、电子信息类专业嵌入式系统课程的教材,也可作为工程技术人员进行嵌入式系统开发与应用的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

嵌入式系统原理及应用:基于Cortex-A8处理器/唐永锋主编. —西安:

西安电子科技大学出版社, 2016.9

应用型本科电子及通信工程专业“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5606-4221-5

I. ① 嵌… II. ① 唐… III. ① 微处理器—系统设计—高等学校—教材

IV. ① TP332

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 208709 号

策 划 马晓娟

责任编辑 马晓娟 杨 薇

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西华沐印刷科技有限责任公司

版 次 2016年9月第1版 2016年9月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 21.25

字 数 505千字

印 数 1~3000册

定 价 38.00元

ISBN 978-7-5606-4221-5/TP

XDUP 4513001-1

*** 如有印装问题可调换 ***

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

应用型本科 电子及通信工程专业系列教材

编审专家委员会名单

主 任：沈卫康（南京工程学院 通信工程学院 院长/教授）

副主任：张士兵（南通大学 电子信息学院 副院长/教授）

陈 岚（上海应用技术学院 电气与电子工程学院 副院长/教授）

宋依青（常州工学院 计算机科学与工程学院 副院长/教授）

张明新（常熟理工学院 计算机科学与工程学院 副院长/教授）

成 员：（按姓氏拼音排列）

鲍 蓉（徐州工程学院 信电工程学院 副院长/教授）

陈美君（金陵科技学院 网络与通信工程学院 副院长/副教授）

高 尚（江苏科技大学 计算机科学与工程学院 副院长/教授）

李文举（上海应用技术学院 计算机科学学院 副院长/教授）

梁 军（三江学院 电子信息工程学院 副院长/副教授）

潘启勇（常熟理工学院 物理与电子工程学院 副院长/副教授）

任建平（苏州科技学院 电子与信息工程学院 副院长/教授）

孙霓刚（常州大学 信息科学与工程学院 副院长/副教授）

谭 敏（合肥学院 电子信息与电气工程系 系主任/教授）

王杰华（南通大学 计算机科学与技术学院 副院长/副教授）

王章权（浙江树人大学 信息科技学院 副院长/副教授）

温宏愿（泰州科技学院 电子电气工程学院 讲师/副院长）

郁汉琪（南京工程学院 创新学院 院长/教授）

严云洋（淮阴工学院 计算机工程学院 院长/教授）

杨俊杰（上海电力学院 电子与信息工程学院 副院长/教授）

杨会成（安徽工程大学 电气工程学院 副院长/教授）

于继时（金陵科技学院 智能科学与控制工程学院 副院长/副教授）

前言

“嵌入式系统”一般指非 PC 系统，有计算机功能但又不称之为计算机的设备或器材。目前，嵌入式系统已经渗透到我们生活中的每个角落，如工业、服务业、消费电子业……

本书是针对应用型本科学生编写的一本教材，全书共分 5 章。

第 1 章嵌入式系统概论，主要介绍了嵌入式系统的定义、特点，并详细介绍了嵌入式系统的软硬件组成、典型应用、发展趋势，嵌入式相关开发岗位需求与岗位职责，嵌入式系统的学习方法等。

第 2 章 ARM 体系结构，介绍了常用嵌入式微处理器的类型与性能指标，着重介绍了 ARM9 典型内核 ARM920T 和 Cortex-A 典型内核，并介绍了 ARM 处理器的体系结构，包括精简指令集和流水线技术、工作状态及运行模式、寄存器组织、异常处理、数据类型及存储模式等。

第 3 章 ARM 指令系统，介绍了 ARM 指令特点、ARM 指令格式与条件码、寻址方式，详细介绍了 ARM 指令集、Thumb 指令集，并举例分析了 ARM 汇编语言和 C 语言程序设计及相互调用方法。

第 4 章嵌入式系统设计，介绍了嵌入式系统的开发流程，包括交叉编译器、开发环境的构建、调试工具、软件调试方法等，并详细介绍了智能家居模块和监控系统设计。

第 5 章嵌入式系统实验，结合 ARM Cortex-A8 嵌入式系统教学实验平台和物联网实训模块的实验例程，介绍了无操作系统的 GPIO 控制 LED、串口通信、键盘输入等 S5PV210 驱动仿真调试实验，BootLoader、Linux 内核移植、Linux 下 Qt 图形界面等 Linux 操作系统实验，Android 的编译环境和开发环境搭建、设备驱动程序和应用程序开发。

嵌入式系统课程具有很强的实践与应用性，本书编写时通过若干典型的嵌入式产品举例，力图让学生了解嵌入式系统的软硬件组成结构、最新应用和发展趋势，培养学生对嵌入式系统的学习兴趣和探索欲。同时，通过介绍目前嵌入式硬件工程师、软件工程师、Linux/Android 系统开发等相关岗位职责与招聘要求，让学生意识到不仅要掌握主流嵌入式微处理器的结构与原理，还要掌握至少一种嵌入式操作系统的操作，激励学生努力学习、积极参与实践和竞赛。书中通过智能家居系统的设计，让学生掌握嵌入式系统软硬件开发流程并至少参与开发一个嵌入式软件项目。Cortex-A8 嵌入式系统教学实验平台和物联网实训模块的实验例程，则有助于读者掌握无操作系统的 S5PV210 驱动仿真调试方法及在 Linux/Android 操作系统平台下的应用程序开发。

本书参考学时 48 学时，建议理论教学 40 学时，实验教学 8 学时，或者 32+16 学时，可以根据专业和培养计划的要求适当调整，但建议保证实验环节的时间，授课时也要引用各典型案例增进教学效果。同时操作系统的操作内容，可在学生的嵌入式系统技能训练、电子应用软件实习、专业综合实训等实践环节中作为实习内容练习。

本书由唐永锋主编，白秋产、季仁东、居勇峰、杨定礼参编。淮阴工学院电子信息工程卓越班学生朱鹏、梅佳、吴召娣、顾闯等同学完成了初稿的校对工作，初稿已在11级和12级电子信息工程、电子科学与技术、自动化等专业本科和化工自动化研究领域的研究生中试用，师生普遍反映实用性强，教学效果良好。本书在编写过程中，得到了武汉创维特公司和北京博创公司提供的教学平台、实验例程和案例支持，在此一并表示感谢。同时向书中引用文献的作者和科技论坛网站表示崇高的敬意和诚挚的感谢。感谢西安电子科技大学出版社领导和编辑的大力支持，使得本书得以出版发行。

本书内容丰富、案例实用、层次清晰、叙述详尽，方便教学与自学，可作为高等院校电子信息工程、电子科学与技术、电气自动化、通信工程、计算机科学与技术、机械电子、交通管理等专业嵌入式系统教学的教材，也可作为全国大学生电子设计竞赛、全国信息技术应用水平大赛、全国计算机三级嵌入式系统开发技术、四级嵌入式系统开发工程师考试等的培训教材以及工程技术人员进行嵌入式系统开发与应用的参考书。书中提供了大量实验操作内容，在理论知识学习的同时提高学生的实践操作能力。

由于时间仓促和编者水平有限，书中难免有不足之处，敬请读者批评指正，不胜感谢。读者的建议可以发送到邮箱 tyf1982@hyit.edu.cn 与作者联系，以期进一步完善。

编者

2016年6月

目 录

第 1 章 嵌入式系统概论	1	2.1.7 Cortex-A 典型内核	94
1.1 嵌入式系统的概念	1	2.1.8 Cortex-R 典型内核	99
1.2 嵌入式系统的组成	3	2.1.9 ARM 芯片选择原则	99
1.2.1 硬件层	3	2.2 ARM 处理器体系结构	101
1.2.2 中间层	13	2.2.1 精简指令集	101
1.2.3 软件层	14	2.2.2 流水线技术	102
1.2.4 功能层	22	2.2.3 ARM 处理器的工作状态	105
1.3 嵌入式系统的应用	22	2.2.4 ARM 处理器的运行模式	106
1.3.1 农业水文环境监测	23	2.2.5 寄存器组织	107
1.3.2 智慧农业物流	25	2.2.6 异常处理	113
1.3.3 移动支付	39	2.2.7 数据类型及存储模式	116
1.3.4 智慧旅游导航	30	习题	118
1.3.5 人机交互与多点触控	31	第 3 章 ARM 指令系统	121
1.3.6 物联网	32	3.1 ARM 指令概述	121
1.3.7 信息安全	34	3.1.1 ARM 指令特点	121
1.3.8 无人驾驶汽车	35	3.1.2 ARM 指令格式与条件码	122
1.3.9 生物识别	38	3.1.3 ARM 指令的寻址方式	125
1.3.10 智能机器人	42	3.2 ARM 指令集	128
1.3.11 虚拟现实与增强现实	53	3.2.1 数据处理指令	128
1.4 嵌入式系统的职业需求	59	3.2.2 存储器访问指令	130
1.5 嵌入式系统的学习方法	63	3.2.3 分支指令	133
习题	65	3.2.4 协处理器指令	134
第 2 章 ARM 体系结构	67	3.2.5 程序状态寄存器访问指令	136
2.1 常用嵌入式处理器芯片	67	3.2.6 杂项指令	137
2.1.1 ARM 处理器内核版本	68	3.3 Thumb 及 Thumb-2 指令集	138
2.1.2 处理器性能指标	70	3.3.1 Thumb 指令集	139
2.1.3 ARM 处理器内核类型	71	3.3.2 Thumb-2 指令集	141
2.1.4 ARM9 典型内核	84	3.4 ARM 汇编语言程序设计	142
2.1.5 ARM11 典型内核	88	3.4.1 ARM 汇编伪指令	143
2.1.6 Cortex-M 典型内核	91	3.4.2 汇编语言程序举例分析	148

3.5 ARM C 语言程序设计	151	5.2 Eclipse 集成开发环境	215
3.5.1 嵌入式 C 语言程序设计规范	151	5.2.1 Eclipse 开发环境的安装	217
3.5.2 C 语言与汇编语言混合编程	155	5.2.2 Eclipse 的调试方法	220
习题	163	5.2.3 Eclipse 调试工程过程	222
第 4 章 嵌入式系统设计	165	5.3 S5PV210 驱动仿真调试实验	224
4.1 嵌入式系统开发流程	165	5.3.1 GPIO 控制 LED 实验	224
4.1.1 嵌入式系统开发	165	5.3.2 步进电机控制实验	232
4.1.2 嵌入式系统硬件设计	166	5.3.3 串口通信实验	236
4.1.3 嵌入式系统软件设计	167	5.4 嵌入式 Linux 系统实验	252
4.1.4 开发调试工具	169	5.4.1 BootLoader 实验	252
4.1.5 软件测试	173	5.4.2 Linux 内核移植实验	259
4.2 智能家居模块设计	177	5.4.3 Linux 操作系统实验	262
4.2.1 智能家居系统发展现状	178	5.4.4 Linux 下图形界面 Qt 实验	294
4.2.2 环境检测传感器模块设计	182	5.5 Android 系统实验	303
4.2.3 智能窗帘控制模块	191	5.5.1 Android 系统编译环境搭建	306
4.2.4 智能报警模块	191	5.5.2 Android 系统开发环境搭建	308
4.2.5 智能家居控制系统产品	192	5.5.3 Android 系统应用程序开发	316
习题	202	5.5.4 Android 设备驱动程序开发	320
第 5 章 嵌入式系统实验	203	习题	324
5.1 Cortex-A8 处理器硬件电路	203	习题解答	325
5.1.1 S5PV210 芯片软硬件资源	204	附录 start.s 启动程序	328
5.1.2 CVT-S5PV210 教学平台	204	参考文献	331

第1章 嵌入式系统概论

本章主要介绍嵌入式系统的定义、特点，嵌入式系统的软硬件组成、典型应用、发展趋势，嵌入式相关开发岗位需求与岗位职责，嵌入式系统学习方法等。

学习目标

- ※ 熟悉嵌入式系统的定义、特点、硬件和软件的组成结构等。
- ※ 通过若干典型的嵌入式产品举例，让学生们了解嵌入式系统的应用以及发展趋势。
- ※ 了解嵌入式硬件工程师、软件工程师、安卓系统开发等岗位职责与招聘要求。

学海聆听

真正的科学精神，是要从正确的批评和自我批评发展出来的。真正的科学成果，是要经得起事实考验的。有了这样双重的保障，我们就可以放心大胆地去做，不会自掘妄自尊大的陷阱。

—— 李四光

1.1 嵌入式系统的概念

嵌入式计算机系统的出现，是现代计算机发展史上的里程碑事件。嵌入式系统诞生于微型计算机时代，与通用计算机的发展道路完全不同，其形成了独立的单芯片的技术发展道路。由于嵌入式系统的诞生，现代计算机领域中出现了通用计算机与嵌入式计算机两大分支。不可兼顾的技术要求，形成了两大分支的独立发展道路：通用计算机按照高速、海量的技术要求发展；嵌入式计算机系统则按满足对象系统嵌入式智能化控制的要求发展。由于独立的分工发展，从20世纪90年代开始，现代计算机的两大分支都得到了迅猛的发展。

经过几十年的发展，嵌入式系统已经在很大程度改变了人们的生活、工作和娱乐方式，而且这些改变还在继续。即使不可见，嵌入式系统也无处不在。事实上，几乎所有带有一点“智能”的家电（如全自动洗衣机、数字电视机顶盒、智能电饼铛、智能电饭煲等）都是嵌入式系统的应用范例。

1. 嵌入式系统的定义

嵌入式系统(Embedded System)是嵌入式计算机系统的简称，它有以下几种定义。

1) IEEE(国际电气和电子工程师协会)的定义

嵌入式系统是“控制、监视或者辅助设备、机器和车间运行的装置”(原文为 Devices used to control, monitor or assist the operation of equipment, machinery or plants)，它通常执行特定的功能，以微处理器与周边构成核心，具有严格的时序与稳定度要求，全自动

操作循环

2) 国内普遍采用的定义

嵌入式系统是以应用为中心,以计算机技术为基础,软件硬件可裁剪,适用于应用系统的对功能、可靠性、成本、体积、功耗有严格要求的专用计算机系统。

3) 根据嵌入式系统特点给出的定义

北京航空航天大学何立民教授对嵌入式系统给出的定义是:嵌入到对象体系中的专用计算机系统。按照这一定义,嵌入式系统有三个基本特点,即“嵌入性”、“专用性”与“计算机”。

“嵌入性”由早期微型机时代的嵌入式计算机应用而来,专指计算机嵌入到对象体系中,实现对象体系的智能控制。当嵌入式系统变成一个独立应用产品时,可将嵌入性理解为内部嵌有微处理器或计算机。

“专用性”是指在满足对象控制要求及环境要求下的软硬件裁剪性。也即嵌入式系统的软、硬件配置必须依据嵌入对象的要求,满足应用系统的功能、可靠性、成本、体积等要求,设计成专用的嵌入式应用系统。

“计算机”是对象系统智能化控制的根本保证。随着单片机向 MCU、SoC 发展,片内计算机外围电路、接口电路、控制单元日益增多,“专用计算机系统”演变成为“内含微处理器”的现代电子系统。与传统的电子系统相比较,现代电子系统由于内含微处理器,能实现对象系统的计算机智能化控制。

2. 物联网视角下的嵌入式系统

如果把物联网比作人体,传感器就相当于人的眼睛、鼻子、皮肤等感官,网络就好比是用来传递信息的神经系统,嵌入式系统则是人的大脑,用于分类处理信息并控制系统的运作。这个比喻形象地描述了嵌入式系统在物联网行业应用中的位置与作用。在物联网的风潮下,嵌入式系统将具备联网的能力,网络技术的串联,使嵌入式系统不再是独立运作,而是通过通信技术串联成更大的智能系统,且拥有数据分析能力。为使传统嵌入式系统成为智能型系统,高效能微处理器、联网功能及操作系统将扮演重要角色,因此包括英特尔、微软等厂商皆有新的产品计划,以应对智能系统的发展所需。

所谓的智能型嵌入式系统应具备四个关键元素,具体如下:

(1) 高效率、高效能的运算。嵌入式处理器须内置各种输入/输出(I/O)功能,能进行智能服务程序的处理、安全防护、实时分析、服务管理及设备管理等,亦即要达到高运算的处理能力,处理器效能须进一步提升。

(2) 各种智能设备的连接。这包括整合与弹性的支持能力,涵盖广域、区域、个人及近场网络,支持移动或固定式布建、服务供应、设备资源供应、远程设备启动与管理等。例如可通过手势与语音操作的智能电视(Smart TV),其具备很强的交互功能。

(3) 传感器的数据输入。传感器的数据输入包含环境感知的低功耗技术。传感器数据包括地点、环境状况、生命特征及其他情境参数。举例来说,微软重点推广的智能型嵌入式系统则是从 Kinect 的体感技术出发,再由分析传感器与摄影机收集信息,让嵌入式系统可做出最正确的反应。微软提出的远程医疗系统,由摄影镜头与传感器捕捉人体的动作,再通过嵌入式系统处理器与 DSP 的分析,即可精准判断动作是否正确。包括正在发展的虚拟试衣间,以及可判断路人的特性、根据特性播放最适合的广告的 digital 电子广告牌与互动信

息站，都是体感技术为嵌入式系统创造的新的应用商机。

(4) 智能型嵌入式系统的软件须涵盖安全防护、管理、随插即执行的互通性、自动供应设备/应用/服务等资源。智能型嵌入式系统若无众多应用程序的配合，就无法真正落实智能化的需求，尤其是自我管理软件更为重要，其可让智能型嵌入式系统自行检测设备的温度、运作状况等，第一时间通过通信技术回传至中控中心，由后端控制人员分析状况后，决定处理的方式，这样可提升工厂自动化效能，并节省维修成本的支出。

智能型嵌入式系统发展的日益蓬勃，也吸引了智能型系统各部件从业者积极抢进市场，并全力迎接智能型嵌入式系统带来的新挑战。未来几年，在智能型嵌入式产品市场中，包括销售端点系统(POS)、交互式信息站、数字电子广告牌、医疗照顾、游戏等将有可观的发展。另外，物联网将智能型嵌入式系统连接到云端，亦将促进嵌入式系统的进一步发展。

中国工程院院士倪光南认为，嵌入式系统顺应了电子信息产业的最新发展需求。仅以目前十分热门的云计算为例，其云终端便属于嵌入式系统。物联网的终端也是如此。事实上，作为新一代信息技术的三大代表，物联网、云计算和移动互联网的核心组成部分，都包含了大量嵌入式系统。嵌入式系统涉及的范围十分广泛，不仅涉及软硬件，还包括精密机械、通信组网等。这就要求在相关人才的培养中，要注重对其综合素质的提升。

1.2 嵌入式系统的组成

一个嵌入式系统装置一般都由嵌入式计算机系统和执行装置组成，如图 1-1 所示。嵌入式计算机系统是整个嵌入式系统的核心，由硬件层、中间层、软件层和功能层组成。执行装置也称为被控对象，它可以接受嵌入式计算机系统发出的控制命令，执行所规定的操作或任务。执行装置可以很简单，如手机上的一个微小型的电机，当手机处于震动接收状态时打开；也可以很复杂，如 SONY 智能机器狗，上面集成了多个微小型控制电机和多种传感器，从而可以执行各种复杂的动作和感受各种状态信息。

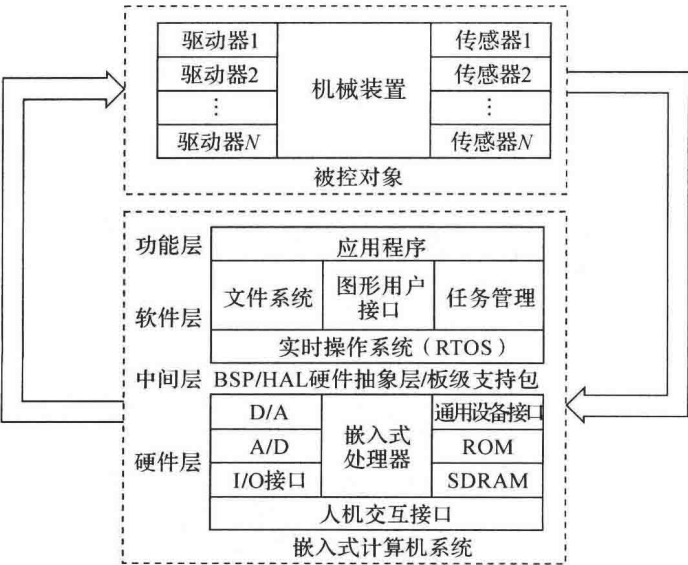


图 1-1 嵌入式系统的组成

1.2.1 硬件层

硬件层中包含嵌入式处理器、存储器(RAM、ROM、Flash 等)、通用设备接口和 I/O 接口等。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. 嵌入式处理器

嵌入式系统硬件层的核心是嵌入式处理器,嵌入式处理器与通用 CPU 最大的不同在于嵌入式处理器大多工作在为特定用户群所专门设计的系统中,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。嵌入式处理器按照实现功能,可分为以下五类。

1) 嵌入式微控制器(Micro Controller Unit, MCU)

嵌入式微控制器一般以某一种微处理器内核为核心,芯片内部集成 ROM/EPROM、RAM、总线、定时/计数器、WatchDog、I/O、串行口、脉宽调制输出、A/D、D/A、Flash RAM、E²PROM 等各种必要功能和外设。为适应不同的应用需求,一个系列的单片机具有多种衍生品种,每种衍生产品的处理器内核都是一样的,不同的是存储器和外设的配置及封装,这样可以使单片机最大限度地匹配应用需求,从而减少功耗和成本。

嵌入式微控制器是目前嵌入式系统工业的主流,品种和数量最多,其中比较有代表性的通用系列包括 8051、STC80C/S51、P51XA、MCS-251、MCS-96/196/296、MC68HC05/11/12/16、68300 等。特别值得注意的是,近年来提供 x86 微处理器的著名厂商 AMD 公司,将 Am186CC/CH/CU 等嵌入式处理器称之为 Micro Controller, Motorola 公司把以 PowerPC 为基础的 PPC505 和 PPC555 亦列入单片机行列, TI 公司将其 TMS320C2XXX 系列 DSP 作为 MCU 进行推广, ARM Cortex-M 系列近年来也已被归为 MCU 系列。

图 1-2 所示为 Arduino 单片机开发套件。Arduino 的硬件平台包括基于 AVR 单片机的主控制电路板,以及大量的各式输入/输出电子模块。输入/输出电子模块包括:开关输入模块、温度压力传感器输入模块、超声测距传感器输入模块、各类显示输出模块、电机控制模块等,甚至还有以太网接入模块。由于 Arduino 具有丰富易用的模块,目前已经在各类机电创新设计比赛中广泛应用。



图 1-2 Arduino 单片机开发套件

2) 嵌入式微处理器(Micro Processor Unit, MPU)

嵌入式微处理器的基础是通用计算机中的 CPU。在应用中,将微处理器装配在专门设计的电路板上,只保留和嵌入式应用有关的母板功能,去除其他冗余功能部分,这样可以大幅度减小系统体积和功耗。为了满足嵌入式应用的特殊要求,嵌入式微处理器虽然在功能上和标准微处理器基本是一样的,但在工作温度、抗电磁干扰、可靠性等方面一般都做了各种增强。

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,但是在电路板上必须要有 ROM、RAM、总线接口、各种外设等器件,从而降低了系统的可靠性,技术保密性也较差。嵌入式处理器目前主要有 Am186/88、PowerPC、68000、MIPS、ARM 系列等。

图 1-3 所示为三星公司工业级微处理器 S3C2440 的最小系统,其主频 400 MHz,标准存储器配置采用 64M×8bit NAND Flash(K9F1208)。

图 1-4 所示为三星公司出产的基于 Cortex-A8 的 S5PV210 处理器。

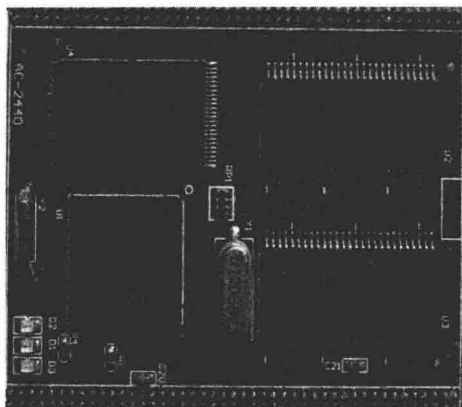


图 1-3 三星公司 S3C2440 的最小系统

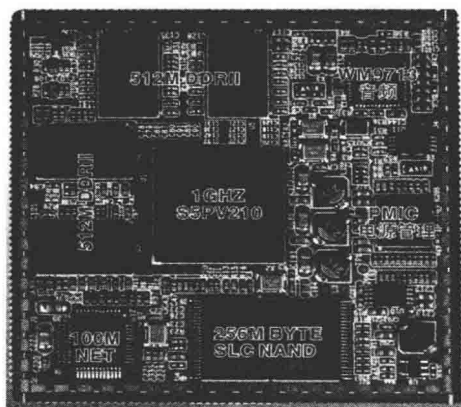


图 1-4 三星公司 S5PV210 处理器

3) 嵌入式数字信号处理器(Digital Signal Processor, DSP)

DSP 对系统结构和指令进行了特殊设计,使其适合于执行 DSP 算法,编译效率较高,指令执行速度也较高。在数字滤波、FFT、谱分析等方面,DSP 算法正在大量进入嵌入式领域,DSP 应用正从在通用单片机中以普通指令实现 DSP 功能,过渡到采用嵌入式 DSP。

嵌入式 DSP 有两个发展来源,一是 DSP 经过单片化、EMC 改造、增加片上外设成为嵌入式 DSP, TI 的 TMS320C2000/C5000 等属于此范畴;二是在通用单片机、ARM 或 SoC 中增加 DSP 协处理器,例如 Intel 的 MCS-296、Infineon (Siemens) 的 TriCore 和 TI OMAP4、OMAP5。推动嵌入式 DSP 发展的另一个因素是嵌入式系统的智能化,例如各种带有智能逻辑的消费类产品、生物信息识别终端、带有加解密算法的键盘、ADSL 接入、实时语音压解系统、虚拟现实显示等。这类智能化算法一般运算量都较大,特别是向量运算、指针线性寻址等较多,而这些正是 DSP 的长处所在。

嵌入式 DSP 比较有代表性的产品是 TI 公司的 TMS320 系列和 Motorola 的 DSP56000 系列。TMS320 系列处理器包括用于控制的 C2000 系列、移动通信的 C5000 系列以及性能更高的 C6000 和 C8000 系列。图 1-5 所示为一 DSP5509 开发板,是市面上性价比较高的 TMS320VC5509A 开发板,适用于数字图像、语音、网络、测控等领域。

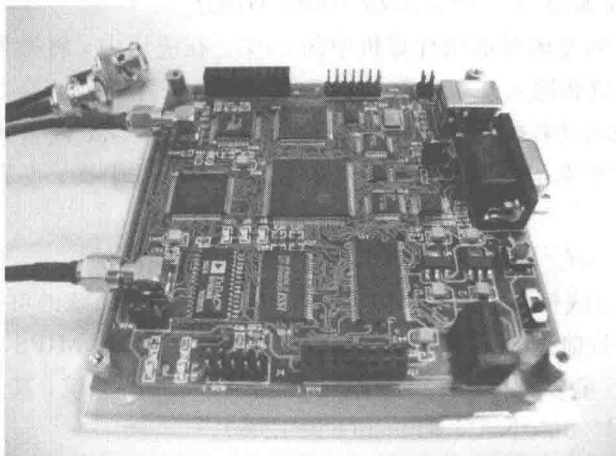


图 1-5 DSP5509 开发板

4) 嵌入式片上系统(System on Chip, SoC)

SoC 设计技术始于 20 世纪 90 年代中期, Dataquest 定义 SoC 为包含处理器(DSP 数字信号处理器)、存储器(DRAM 动态随机存储器)和片上逻辑(Logic 逻辑、MPEG 视频图像编码标准)的集成电路。随着 RF 电路模块和数模混合信号模块集成在单一芯片中, SoC 的定义在不断地完善, 现在的 SoC 中包含一个或多个处理器、存储器、模拟电路模块、数模混合信号模块以及片上可编程逻辑。从应用开发的角度来看, SoC 主要是指在单芯片上集成了微电子应用产品所需的所有功能的系统, 如图 1-6 所示。

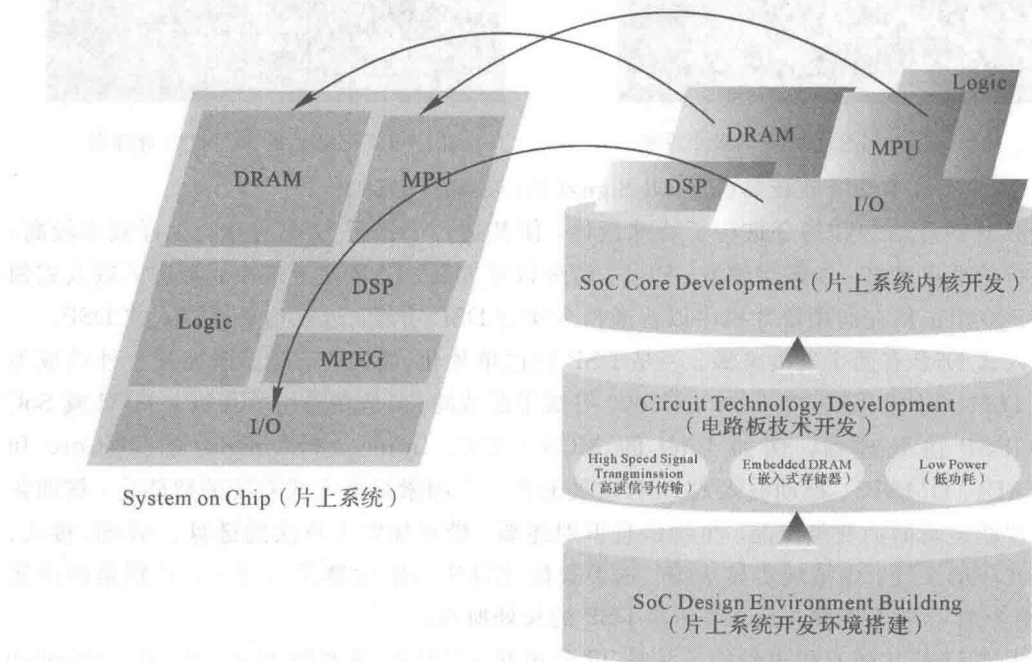


图 1-6 SoC 示意图

各种通用处理器内核将作为 SoC 设计公司的标准库, 和许多其他嵌入式系统外设一样, 成为 VLSI 设计中一种标准的器件, 用标准的 VHDL 等语言描述, 存储在器件库中。

用户只需定义出其整个应用系统,仿真通过后就可以将设计图交给半导体工厂制作样品。这样除个别无法集成的器件以外,整个嵌入式系统大部分均可集成到一块或几块芯片中去,应用系统电路板将变得很简洁,对于减小体积和功耗,提高可靠性非常有利。

从使用角度来看,SoC有三种类型:专用集成电路 ASIC(Application Specific IC)、可编程 SoC(System on Programmable Chip)和 OEM(Original Equipment Manufacturer)型 SoC。随着 SoC 应用的不断普及,市场需要更加广泛的 SoC 设计。SoC 提供商不仅必须拓展系统内部设计能力,而且要直接开发和交付 SoC 设计套件和方法给客户。因此,SoC 设计逐渐向可编程 SoC 方向发展。目前已有几家 IC 提供商提供可编程 SoC,其中比较著名的三个公司是:Atmel、Xilinx 和 Altera。SoC 有通用 x86 系列(如日本矽统科技的 SiS550)、英飞凌科技的 TriCore、ARM 系列(如 TI OMAP4、OMAP5)、Echelon 和 Motorola 联合研制的 Neuron 芯片、MIPS 系列(如 Au1500)和类指令系列(如 Motorola M3 Core)等。国内研制开发的 SoC 主要基于后两者,如中科院计算所中科 SoC(基于龙芯核,兼容 MIPSⅢ 指令集)、北大众志(定义少许特殊指令)、方舟 2 号(自定义指令集)、国芯 C3 Core(继承 M3 Core)等。

从全球角度来讲,国内 SoC 应用水平还处于成长阶段,但就国内企业具体需求而言,SoC 市场却也在高速增长着。赛迪顾问在《2012—2013 年中国信息安全产品市场研究年度报告》中也印证了这一点,2012 年国内 SoC 市场规模达到了 4.76 亿元,比 2011 年增长了 22.7%。开发拥有自主知识产权的处理器核、核心 IP 和总线架构,同时又保证兼容性(集成第三方 IP),将使我国 SoC 发展得具有更强的竞争力,从而带动国内 IC 产业在深度、广度方向共同发展。

5) 多核处理器

多核处理器将两个或多个 CPU 核封装在一个芯片内部,可节省大量的晶体管和封装成本,同时还能显著提高处理器的性能。移动处理器从单核到双核再从四核到八核,再到今天的十核,仅仅花了不过五六年的时间。

由于手机结构空间的局限性,限制了散热技术的应用,导致手机没有办法像 PC 一样尽可能地提高处理器单核的主频和性能,因为 PC 上基本上不存在结构空间限制,散热问题也有多种处理办法和方式。正是这种差异化导致手机厂商和芯片厂商在设计手机处理器芯片的时候必须要尝试各种架构、技术与工艺,以达到最好的平衡效果,因此,手机和芯片厂商开始考虑往多核心方向发展。

如 2015 年联发科发布的 Helio X20 十核处理器可以满足高性能和低功耗的需求。Helio X20 的十个处理器核心可以随意调用和搭配,从而达到性能和功耗的最合理利用。

2. 存储器

嵌入式系统需要存储器来存放和执行代码。内置存储器分为片内存储器(在处理器芯片内部)和片外存储器(安装在电路板上)。扩充存储器通常做成可插拔的形式,需要时才插入宿主设备使用。嵌入式系统的存储器包含 Cache、主存和辅助存储器。

1) 存储器主要技术指标

(1) 容量:存储 1 位二进制数的最小单位为位(bit),存储器的容量通常用字节(Byte 或 B, 1 Byte=8 bit)表示。更大的容量单位有 1B、1KB、1MB、1GB、1TB、1PB、1EB、1ZB、1YB 等。对于内存来说,相邻两级容量单位之间的进率为 $2^{10}=1024$;对于外存(磁盘、U

盘、Flash 存储卡)来说,这些相邻两级容量单位之间的进率为 1000。

存储容量可用如下公式表示:内存容量=单元总数×数据位数/单元。

例如一个存储芯片容量为 $4096 \times 8 = 32$ KB,说明它有 8 条数据线,地址线的条数为 $m = \lg 4096 = 12$ 。再如 NAND Flash 存储器容量为 $256\text{M} \times 8 \text{ 位} / 128\text{M} \times 16 \text{ 位} = 2$ GB。

(2) 存取时间:指的是从启动一次存储器操作到完成该操作所用时间。现在存储器芯片的工作速度很快,一般以 ns 为单位。

(3) 内存宽度:亦称存储总线宽度,即 CPU 或 I/O 一次访存可存取的数据位数或字节数。存取宽度由编址方式决定。内存带宽的确定方式为: B 表示带宽、 F 表示存储器时钟频率、 D 表示存储器数据总线位数,则带宽 $B = F \times D / 8$ 。

例如,常见 133 MHz 的 SDRAM 内存的带宽: $133 \text{ MHz} \times 64 \text{ bit} / 8 = 1064 \text{ MB/s}$ 。

2) 存储器层次结构

如图 1-7 所示,存储器层次结构中心思想是位于上层的更快更小的存储设备作为位于下层更大更慢的存储设备的缓存。从上至下,设备读取速度变得更慢,容量更大,价格更低。寄存器在这个层次模型的最顶端,其运行速率和 CPU 是一个数量级的。

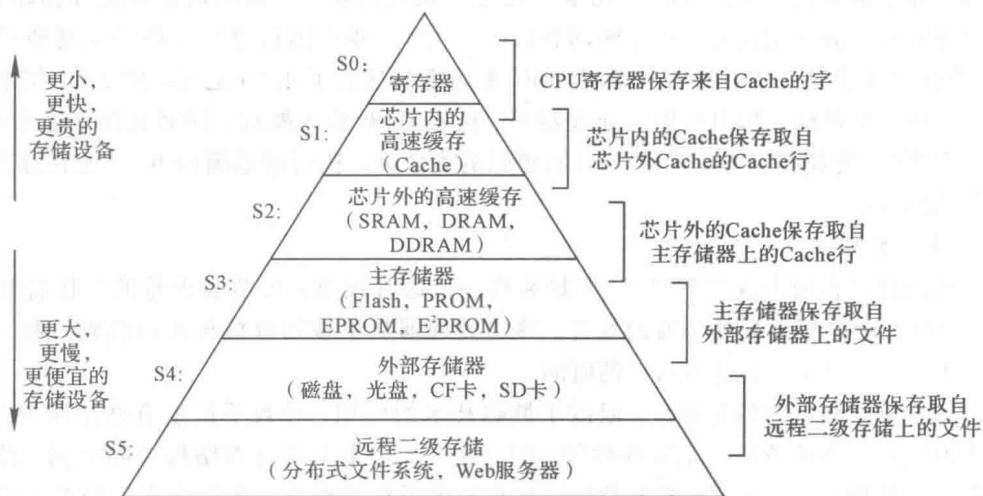


图 1-7 存储器层次结构

(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,微处理器尽可能地从 Cache 中读取数据,这样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 和混合 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两类:

- ROM 类: NOR Flash(闪存)、E²PROM(电可擦除可编程只读存储器)等。
- RAM 类: SRAM(静态随机存储器, 速度快, 体积大, 成本高, 无需刷新, 片上用)、DRAM(动态随机存储器, 速度慢, 体积小, 成本低, 需刷新, 片外用)和 SDRAM(同步动态随机存储器)等。

E²PROM(Electrically Erasable Programmable ROM)是一种可以电擦除可编程的只读存储器, 可以在线改写和擦除信息, 无需紫外线照射, 而且可以多次擦除和编程。

SDRAM 不具有掉电保持数据的特点, 但其存取速度高于 Flash 存储器, 且具有读写的属性, 因此 SDRAM 在系统中主要用作程序的运行空间、数据及堆栈区。当系统启动时, CPU 首先从复位地址 0x00 处读取代码, 在完成系统初始化后, 程序代码一般调入 SDRAM 中运行, 以提高系统的运行速度, 同时系统及用户堆栈、运行数据也都放在 SDRAM 中。

Flash 已经成为了目前最成功、最流行的一种固态内存, 与 E²PROM 相比读写速度快, 与 SRAM 相比具有非易失以及价廉等优势。基于 NOR 和 NAND 结构的闪存是目前市场上两种主要的非易失闪存技术。Intel 于 1988 年首先开发出 NOR Flash 技术, 彻底改变了原先由 EPROM 和 E²PROM 一统天下的局面。紧接着, 1989 年东芝公司发表了 NAND Flash 技术(后将该技术无偿转让给韩国三星公司), 强调降低每比特的成本, 使其具有更高的性能, 并且像磁盘一样可以通过接口轻松升级。

NOR 型与 NAND 型闪存的区别很大, NOR 型闪存更像内存, 有独立的地址线 and 数据线, 但价格比较贵, 容量比较小, 常见的 NOR Flash ROM 为 128 KB~16 MB, 适合频繁随机读写的场合, 通常用于存储程序代码并直接在芯片内运行, 程序代码不需要复制到 RAM 中再执行的场合, 用作嵌入式系统的启动代码芯片, 如手机、掌上电脑中。而 NAND 型更像硬盘, 地址线和数据线是共用的 I/O 线, 类似硬盘的所有信息都通过一条硬盘线传送, 与 NOR 型闪存相比成本要低一些, 而容量在 8 MB~4 GB 或更高。因此, NAND 型闪存主要用来存储资料, 常用的闪存产品如 U 盘、闪存盘、数码存储卡都是用 NAND 型闪存。

图 1-8 所示为三星 K9K2G08U0M-YCB0, 256 MB×8 位/128 MB×16 位=2 GB 容量的 NAND Flash。

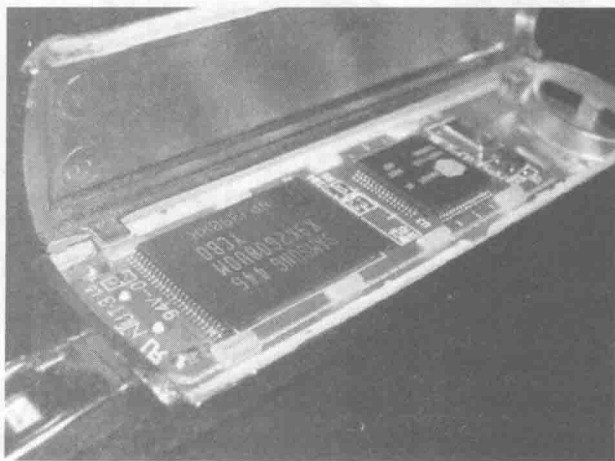


图 1-8 Flash 存储器