

全国计算机等级 考试三级教程



教育部考试中心

——嵌入式系统开发技术 (2015年版)

高等教育出版社



全国计算机等级考试三级教程

——嵌入式系统开发技术

(2015年版)

Quanguo Jisuanji Dengji Kaoshi Sanji Jiaocheng
——Qianrushu Xitong Kaifa Jishu

教育部考试中心

主编 张福炎
编者 马维华 戴志涛 符意德



高等教育出版社·北京

内容简介

本书是受教育部考试中心委托,按照教育部考试中心颁布的《全国计算机等级考试三级嵌入式系统开发技术考试大纲(2013年版)》的要求而编写的。经过近两年时间的使用并吸取了广大读者的意见,本版作了全面修订。全书共5章,分别对嵌入式系统的概念与基础知识、嵌入式处理器、嵌入式系统硬件组成、嵌入式系统软件、嵌入式系统的开发等相关知识和技能进行了详细讲解,以满足报考嵌入式系统开发工程师岗位证书的广大考生复习的要求。

本书结构合理、概念清晰、理论联系实际,既可作为全国计算机等级考试三级嵌入式系统开发技术的考试用书,也可作为高等学校嵌入式系统相关课程的教材或培训用书。

图书在版编目(CIP)数据

全国计算机等级考试三级教程:2015年版.嵌入式系统开发技术/教育部考试中心编. --北京:高等教育出版社,2014.11

ISBN 978-7-04-041386-1

I. ①全… II. ①教… III. ①电子计算机-水平考试-教材 ②微型计算机-系统开发-水平考试-教材 IV. ①TP3

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第249561号

策划编辑 何新权 责任编辑 何新权 封面设计 杨立新 版式设计 于婕
插图绘制 于博 责任校对 陈杨 责任印制 毛斯璐

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100120
印 刷 北京中科印刷有限公司
开 本 787 mm×1092 mm 1/16
印 张 21.5
字 数 530千字
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
版 次 2014年11月第1版
印 次 2014年11月第1次印刷
定 价 42.00元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物 料 号 41386-00

积极发展全国计算机等级考试 为培养计算机应用专门人才、促进信息 产业发展作出贡献

(序)

中国科协副主席 中国系统仿真学会理事长
第五届全国计算机等级考试委员会主任委员
赵沁平

当今，人类正在步入一个以智力资源的占有和配置，知识生产、分配和使用为最重要因素的知识经济时代，也就是小平同志提出的“科学技术是第一生产力”的时代。世界各国的竞争已成为以经济为基础、以科技（特别是高科技）为先导的综合国力的竞争。在高科技中，信息科学技术是知识高度密集、学科高度综合、具有科学与技术融合特征的学科。它直接渗透到经济、文化和社会的各个领域，迅速改变着人们的工作、生活和社会的结构，是当代发展知识经济的支柱之一。

在信息科学技术中，计算机硬件及通信设施是载体，计算机软件是核心。软件是人类知识的固化，是知识经济的基本表征，软件已成为信息时代的新型“物理设施”。人类抽象的经验、知识正逐步由软件予以精确地体现。在信息时代，软件是信息化的核心，国民经济和国防建设、社会发展、人民生活都离不开软件，软件无处不在。软件产业是增长快速的朝阳产业，是具有高附加值、高投入高产出、无污染、低能耗的绿色产业。软件产业的发展将推动知识经济的进程，促进从注重量的增长向注重质的提高方向发展。软件产业是关系到国家经济安全和文化安全，体现国家综合实力，决定 21 世纪国际竞争地位的战略产业。

为了适应知识经济发展的需要，大力促进信息产业的发展，需要在全民中普及计算机的基本知识，培养一批又一批能熟练运用计算机和软件技术的各行各业的应用型人才。

1994 年，国家教委（现教育部）推出了全国计算机等级考试，这是一种专门评价应试人员对计算机软硬件实际掌握能力的考试。它不限制报考人员的学历和年龄，从而为培养各行业计算机应用人才开辟了一条广阔的道路。

1994 年是推出全国计算机等级考试的第一年，当年参加考试的有 1 万余人，2012 年报考人数已达 549 万人。截至 2013 年年底，全国计算机等级考试共开考 38 次，考生人数累计达 5 422 万人，有 2 067 万人获得了各级计算机等级证书。

事实说明，鼓励社会各阶层人士通过各种途径掌握计算机应用技术，并通过等级考试对他们的能力予以科学、公正、权威性的认证，是一种比较好的、有效的计算机应用人才培养途径，符合我国的具体国情。等级考试同时也为用人单位录用和考核人员提供了一种测评手段。从有关公司对等级考试所作的社会抽样调查结果看，不论是管理人员还是应试人员，对该项考

试的内容和形式都给予了充分肯定。

计算机技术日新月异。全国计算机等级考试大纲顺应技术发展和社会需求的变化，从2010年开始对新版考试大纲进行调研和修订，在考试体系、考试内容、考试形式等方面都做了较大调整，希望等级考试更能反映当前计算机技术的应用实际，使培养计算机应用人才的工作更健康地向前发展。

全国计算机等级考试取得了良好的效果，这有赖于各有关单位专家在等级考试的大纲编写、试题设计、阅卷评分及效果分析等多项工作中付出的大量心血和辛勤劳动，他们为这项工作的开展作出了重要的贡献。我们在此向他们表示衷心的感谢！

我们相信，在21世纪知识经济和加快发展信息产业的形势下，在教育部考试中心的精心组织领导下，在全国各有关专家的大力配合下，全国计算机等级考试一定会以“激励引导成才，科学评价用才，服务社会选材”为目标，服务考生和社会，为我国培养计算机应用专门人才的事业作出更大的贡献。

前 言

近十多年来，嵌入式系统的技术和应用发展十分迅速，涉及的应用领域非常广泛，工业控制、通信设备、仪器仪表、医疗器械、消费电子、家用电器、计算机外围设备、汽车、船舶、航空、航天等均是嵌入式系统的重要应用领域。手机、数码相机、MP3/MP4 播放器、电子书（词典）、机顶盒、GPS 导航仪等，无一不是嵌入式系统的杰出成果。可以说，嵌入式系统在现代社会中无处不在。

当前，国内外许多 IT 公司投入大量经费和人员研发嵌入式系统新产品，工业界每年都需要相当数量受过良好训练的嵌入式系统开发人才。由于社会对掌握嵌入式技术人才的迫切需求，使嵌入式系统开发工程师成为这些年来热门的工作岗位之一，不少高校的计算机、电子、通信、自动控制等相关专业纷纷开设了嵌入式系统课程。为了推动国内嵌入式技术的发展和嵌入式系统人才培养，第五届全国计算机等级考试考试委员会决定设立“嵌入式系统开发技术”考核科目。

编者受教育部考试中心委托，编写了本书，以满足报考“嵌入式系统开发技术”科目的广大考生复习的需要。由于嵌入式系统涉及数字技术与集成电路、计算机组成原理、网络通信、实时操作系统、程序设计等知识，编写教材的难度较大，编者在撰写本书时严格按照《嵌入式系统开发技术考试大纲》的要求，对考生需要掌握的知识和技能进行了较为全面、系统的阐述。考虑到报考人员已经在程序设计、计算机组成原理和操作系统方面有一定基础，所以本书只对考试大纲中涉及的重点知识和技能加以讲解，一些基础知识和基本概念限于篇幅无法展开，请读者参考其他相关教材。

本教材自 2013 年出版以来，经过近两年时间的使用并吸取了广大读者的意见，这次作了全面的修订。南京大学张福炎主持了修订版的编写工作并撰写了第 1 章，第 2、3 章由南京航空航天大学马维华编写，第 4 章由北京邮电大学戴志涛编写，第 5 章由南京理工大学符意德编写。书中不少内容都是经过多次讨论修改确定的。

本书在编写过程中参考了许多相关资料和书籍，编者对这些参考资料的作者表示感谢。北京航空航天大学牛建伟对书稿进行了认真细致的审阅，提出了许多宝贵的建议，在此表示由衷的感谢。

虽然编者从事嵌入式系统的教学科研工作多年，但限于水平，书中定有错漏和不妥之处，望读者指正。

编 者

目 录

第 1 章 嵌入式系统概论	1	2.4.2 ARM 指令的寻址方式	73
1.1 嵌入式系统及其应用	1	2.4.3 ARM 指令集	75
1.1.1 嵌入式系统	1	2.4.4 Thumb 指令集	83
1.1.2 嵌入式系统的组成与分类	3	2.4.5 ARM 处理器支持的伪指令	83
1.1.3 SoC 芯片	12	2.5 ARM 汇编语言程序设计	85
1.2 嵌入式系统与数字媒体	19	2.5.1 ARM 汇编器所支持的伪指令	85
1.2.1 数字(电子)文本	19	2.5.2 ARM 汇编语言的语句格式	89
1.2.2 数字图像	23	2.5.3 汇编语言的程序设计举例	91
1.2.3 数字音频与数字视频	26	2.5.4 嵌入式 C 语言与汇编语言混合程序 设计	99
1.3 数字通信与计算机网络	29	小结	103
1.3.1 数字通信	29	自测题	105
1.3.2 计算机网络	34	第 3 章 嵌入式系统硬件组成	108
1.3.3 互联网	38	3.1 嵌入式系统硬件组成概述	108
小结	44	3.1.1 嵌入式最小硬件系统	108
自测题	45	3.1.2 基于 ARM 内核的典型嵌入式应用 系统硬件组成	111
第 2 章 嵌入式处理器	47	3.2 嵌入式处理芯片	111
2.1 嵌入式处理器概述	47	3.2.1 ARM 的 AMBA 总线体系结构及 标准	112
2.1.1 嵌入式处理器的结构类型	47	3.2.2 基于 ARM 内核的嵌入式芯片的 硬件组成	114
2.1.2 嵌入式处理器简介	49	3.2.3 常用 ARM 嵌入式处理芯片	117
2.1.3 ARM 处理器概述	50	3.2.4 嵌入式处理芯片的选型	121
2.2 典型 ARM 处理器介绍	53	3.3 嵌入式系统的存储器	123
2.2.1 ARM 处理器的分类	53	3.3.1 存储器层次结构	123
2.2.2 经典 ARM 处理器	54	3.3.2 存储器分类	124
2.2.3 ARM Cortex 嵌入式处理器	55	3.3.3 存储器主要性能指标	126
2.2.4 ARM Cortex 实时嵌入式处理器	57	3.3.4 片内存储器	128
2.2.5 ARM Cortex 应用处理器	58	3.3.5 片外存储器	129
2.3 ARM 处理器体系结构	59	3.3.6 外部辅助存储设备	134
2.3.1 ARM 处理器的工作状态及工作 模式	59	3.4 I/O 接口及常用 I/O 设备	136
2.3.2 ARM 处理器的寄存器组织	61	3.4.1 通用 I/O 接口 GPIO	136
2.3.3 ARM 处理器的异常	63	3.4.2 集成电路互连总线接口 I ² C	137
2.3.4 ARM 的存储器格式及数据类型	65	3.4.3 串行外设接口 SPI	139
2.3.5 ARM 处理器中的 MMU 和 MPU	67		
2.4 ARM 处理器指令集	68		
2.4.1 ARM 指令分类及指令格式	68		

3.4.4 串行异步通信接口 UART	141	4.2.1 实时系统与实时操作系统	215
3.4.5 通用串行总线 USB	143	4.2.2 嵌入式操作系统概述	219
3.4.6 高清多媒体接口 HDMI	145	4.2.3 Linux 内核	226
3.4.7 常用简单输入设备	146	4.2.4 嵌入式 Linux 操作系统	228
3.4.8 常用简单输出设备	148	4.2.5 Android 操作系统	234
3.5 ARM 内核典型嵌入式处理 芯片	152	4.2.6 iOS 操作系统	239
3.5.1 S3C2410/S3C2440 芯片的 内部结构	152	4.3 μ C/OS 嵌入式操作系统	242
3.5.2 S3C2410 的存储器控制组件	154	4.3.1 μ C/OS 操作系统概述	242
3.5.3 S3C2410 的时钟及电源管理 组件	155	4.3.2 μ C/OS-II 的任务及其管理	244
3.5.4 S3C2410 的中断控制器及中断 控制	156	4.3.3 μ C/OS-II 的系统服务	248
3.5.5 S3C2410 的脉宽调制定时计数器 PWM Timer	159	4.3.4 μ C/OS-II 应用程序设计	254
3.5.6 S3C2410 的实时时钟 RTC	166	4.3.5 μ C/OS-III 操作系统的改进与 提高	260
3.5.7 S3C2410 的通用 I/O 接口 GPIO	169	小结	261
3.5.8 S3C2410 的串行异步通信接口 UART	176	自测题	261
3.5.9 S3C2410 的 I ² C 总线接口	179	第 5 章 嵌入式系统的开发	263
3.5.10 S3C2410 的看门狗定时器 WDT	183	5.1 开发嵌入式系统的基础知识	263
3.5.11 S3C2410 的模数转换器 ADC	185	5.1.1 嵌入式系统的开发过程	263
3.6 嵌入式系统外部通信接口	187	5.1.2 嵌入式系统的开发平台与工具	267
3.6.1 基于 UART 的 RS-232/RS-485 接口	187	5.1.3 嵌入式系统的调试	271
3.6.2 CAN 总线接口	188	5.2 系统开发工具软件	277
3.6.3 以太网通信接口	191	5.2.1 ADS 1.2 工具软件	277
3.6.4 常用无线通信接口	192	5.2.2 RVDS	288
小结	195	5.2.3 GNU	290
自测题	195	5.3 系统开发示例	295
第 4 章 嵌入式系统软件	200	5.3.1 数字式电子钟	295
4.1 嵌入式系统的软件组成	200	5.3.2 便携式心电图记录仪	305
4.1.1 嵌入式软件的特点	200	5.3.3 基于嵌入式 Web 服务器的应用 设计	316
4.1.2 嵌入式系统的软件结构	201	小结	324
4.1.3 硬件抽象层与板级支持包	205	自测题	325
4.1.4 引导加载程序	208	附录 1 全国计算机等级考试三级 嵌入式系统开发技术考试 大纲 (2013 年版)	328
4.1.5 嵌入式系统的设备驱动程序	212	附录 2 全国计算机等级考试三级 嵌入式系统开发技术样题 及参考答案	330
4.2 嵌入式操作系统	215	附录 3 自测题答案	332
		参考资料	334

第1章 嵌入式系统概论

本章首先介绍嵌入式系统的基本特点、系统组成、分类与应用，对嵌入式处理芯片及其开发流程作了简要描述。然后针对嵌入式系统对网络连接和多媒体信息处理能力日益增长的需求，介绍了数字媒体处理和网络通信方面的基本知识。

考核目标

- (1) 了解嵌入式系统的特点、分类、发展与应用，熟悉嵌入式系统的逻辑组成。
- (2) 了解嵌入式处理芯片的主要类型，熟悉 SoC 的开发流程，理解 IP 核的重要意义。
- (3) 熟悉中西文字的编码和数字文本的类型与处理，掌握数字图像的参数、文件格式及其主要应用。
- (4) 了解音频/视频信息的数字化过程，熟悉数字音频/视频文件格式及其应用。
- (5) 掌握数字通信的基本概念，熟悉有线通信和无线通信的传输与交换技术。
- (6) 理解计算机网络的分类与组成，熟悉 IP 协议的主要内容，掌握互联网的组成和常用接入技术。

1.1 嵌入式系统及其应用

当前，嵌入式系统（Embedded System）广泛应用于各个领域，它几乎无处不在。随着技术的发展，它还将得到更加广泛深入的应用。

1.1.1 嵌入式系统

1. 什么是嵌入式系统

嵌入式系统是嵌入式计算机系统的简称。顾名思义，它是一种嵌入在设备（或系统）内部，为特定应用而设计开发的专用计算机系统。英国电气工程师协会（Institution of Electrical Engineers, IEE）从应用角度定义嵌入式系统是“控制、监视或协助设备、机器、工厂运行的装置”（devices used to control, monitor, or assist the operation of equipment machinery or plants）。这里 devices 指的是计算装置，即计算机。

从技术角度来说，国内普遍认为：嵌入式系统是以应用为中心，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、功耗等多种约束的专用计算机系统。

实际上，技术不断进步，应用不断拓展，嵌入式系统的内涵还在发展和变化，人们很难给它下一个准确的定义。尽管如此，与人们日常使用的通用计算机如个人计算机（Personal Computer, PC）相比，嵌入式系统具有许多不同之处。下面是嵌入式系统的一些共同特点。

(1) 专用性 嵌入式系统与具体应用紧密结合，具有很强的专用性。它按照特定的应用需求进行设计，完成预定的任务。正因为目标明确，所以往往对系统作最优化设计和裁剪，使得系统运行效率很高。

(2) 隐蔽性 嵌入式系统通常总是非计算机设备（系统）中的一个部分，它们隐藏在其内部，不为人知。人们只关心宿主设备（系统）的能效、性能及其操作使用，很少有用户知道或愿意了解隐藏在内部的嵌入式系统。例如在使用 ATM 柜员机、数码相机等设备时，人们对其中的计算机软硬件毫无觉察，它们在设备中扮演着无名英雄的角色。

(3) 资源受限 嵌入式系统通常要求小型化、轻量化、低功耗及低成本，因此其软硬件资源受到严格的限制。开发嵌入式系统应用项目时，设计师通常会选择仅能满足宿主设备所需功能的软硬件，使目标产品的成本最小化。因而对系统的配置及软件开发有着苛刻的要求。

(4) 高可靠性 嵌入式系统大多面向控制应用，系统的可靠性十分重要。尤其是汽车、数控机床、运输工具中的嵌入式系统，任何误动作都可能产生致命的后果。

(5) 实时性 嵌入式系统广泛应用于过程控制、数据采集、通信传输等领域，承担着测量、报警、控制、调节等任务，所以嵌入式系统都有或多或少的实时性，即必须在一个可预测和有保证的时间范围内对外部事件作出正确的反应。

(6) 软件固化 嵌入式系统是一个软硬件高度结合的产物。嵌入式系统中的软件一般都固化在只读存储器（Read-Only Memory, ROM）中，用户通常不能随意变更其中的程序功能。

最近几年在计算机、通信等信息技术领域，“嵌入式”是一个使用很广但含义又比较模糊的用语。为避免混淆，本书对“嵌入式”一词的使用作如下说明。

(1) “嵌入式系统”、“嵌入式计算机”与“嵌入式计算机系统”同义，都泛指嵌入在设备或系统中的专用计算机系统，既包含硬件，也包含软件。

(2) 广义上讲，凡是带有微处理器的专用软硬件系统都可称为嵌入式系统。狭义上讲，嵌入式系统强调那些使用嵌入式微处理器构成的具有自己的操作系统和特定功能、用于特定场合的独立系统。本书中的嵌入式系统一般是指广义的嵌入式系统。

(3) “嵌入式设备/产品/应用系统”指的是使用了嵌入式计算机的设备/产品/应用系统，也就是嵌入式计算机的宿主设备/产品/系统，有时也笼统地称为“嵌入式应用系统”或“嵌入式应用”。

(4) “嵌入式”用作定语。例如，嵌入式处理器指的是使用在嵌入式系统中的处理器，嵌入式软件即使用在嵌入式系统中的软件，等等。

(5) 为行文简洁，“系统”一词有时候指的是嵌入式系统，有时候指的是嵌入式应用系统，有时候指某个具体的子系统，如硬件系统、软件系统等，视上下文而定。

2. 嵌入式系统的应用

嵌入式系统所涉及的应用领域非常广泛，通信设备、仪器仪表、医疗器械、消费电子、家用电器、计算机外围设备、汽车、船舶、航空、航天等均是嵌入式系统的主要应用领域。下面列出一些典型的应用产品和应用领域。

消费类应用产品：冰箱、洗衣机、空调、微波炉、电饭煲、热水器等“白色家电”；电视机、机顶盒、家庭影院、数码相机、摄像机、DVD 播放器、MP3 播放器、PDA、电子字典、游戏机、电子琴、智能玩具等数码产品。

产业类应用产品：数控机床、工业机器人、机电一体化设备、生产线控制等工业设备；汽车、飞机、铁路机车、船舶、电梯等运输工具；X光机、超声诊断仪（B超）、计算机断层成像系统（CT）、心脏起搏器、监护仪、磁共振成像、心电计、血压计等医疗电子设备。

业务类应用产品：电话机、传真机、打印机、扫描仪、复印机等办公设备；电子秤、条码阅读机、商用零售终端（POS）、银行点钞机、IC卡读卡机、取款机、自动柜员机（ATM）、自动售货机、信息亭等金融电子设备；手机、GPS导航仪、Modem、路由器、集线器（Hub）、交换机、网桥等通信设备。

军用类应用产品：火炮、导弹、智能炸弹的制导引爆等武器控制装置；坦克、舰艇、战机、无人机等军用电子装备；雷达、电子对抗、导航系统等军事通信装备。

目前，嵌入式系统的应用已经无处不在。以汽车为例，汽车中使用的嵌入式系统有两类。一类是电子控制装置，它与汽车机械系统配合使用，即所谓“机电结合”的部件，包括发动机、底盘、车身的电子控制，如电子燃油喷射系统、制动防抱死控制、防滑控制、牵引力控制、电子控制悬架、电子控制自动变速器、电子动力转向等（图1-1）。另一类是车载电子装置，它们虽与汽车本身的性能并无直接关系，但为用户提供了更多的服务，例如导航系统、汽车音响及电子娱乐系统、车载通信系统等。

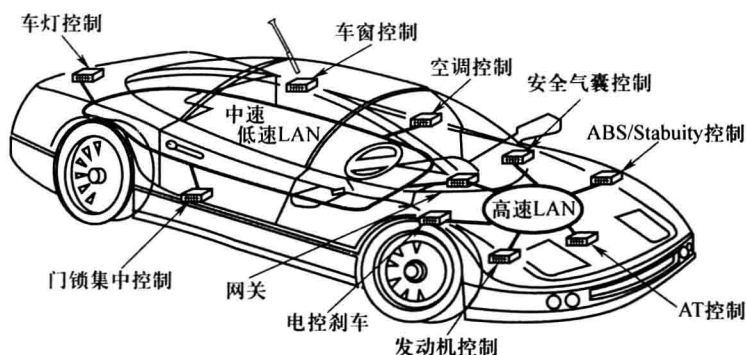


图 1-1 汽车中的嵌入式系统

今天，嵌入式系统的应用数量上远远超过了各种类型的通用计算机系统。嵌入式系统正在逐步渗透到人类社会的各个领域，无所不在的嵌入式应用构成了所谓“无所不在的计算时代”。嵌入式系统的研发能力及产业化水平已经成为衡量一个国家经济发展、科技进步和国防实力的重要标志。

1.1.2 嵌入式系统的组成与分类

1. 嵌入式系统的逻辑组成

嵌入式系统与通用计算机一样，也是由硬件和软件两部分组成的。硬件的主体是中央处理器和存储器，它们通过输入/输出（I/O）接口和输入/输出设备与外部世界联系，并借助总线相互连接，这些硬件连同嵌入式软件一起构成完整的嵌入式系统。图1-2是嵌入式计算机硬件的逻辑组成及其与外部世界关系的示意图。

1) 处理器

能按照指令的规定高速度完成二进制数据算术和逻辑运算的部件称为“处理器”，它由运算器、控制器、寄存器、高速缓冲存储器(Cache)等部件组成，结构相当复杂。大规模集成电路的出现，使得处理器的所有组成部分都可以制作在一块大小仅为几 cm^2 的半导体芯片上。当初由于采用了微米级（目前是深亚微米级至纳米级）的半导体加工工艺，人们把这样的处理器称为微处理器（Microprocessor）。目前所有的处理器都是微处理器。

有些嵌入式系统会包含多个处理器，它们各有其不同的任务，其中负责运行系统软件和应用软件的主处理器称为中央处理器（Central Processing Unit, CPU），其余的都是协处理器，如数字信号处理器（Digital Signal Processor, DSP）、图形处理器、通信处理器等。CPU 是任何计算机不可或缺的核心部件。

CPU 的字长有 4 位、8 位、16 位、32 位、64 位之分。字长指的是 CPU 中通用寄存器和定点运算器的二进位宽度。现在嵌入式系统中使用最多的还是 8 位和 16 位的 CPU，但 32 位和 64 位 CPU 是技术发展的主流。通用计算机的 CPU 则以 64 位为主。

嵌入式系统的性能在很大程度上是由 CPU 决定的。CPU 的性能主要表现为程序（指令）执行速度的快慢，而影响程序（指令）执行速度的因素很多，例如：

- 主频（CPU 时钟频率）指 CPU 中门电路的工作频率，它决定着 CPU 芯片内部数据传输与操作速度的快慢。一般而言，主频越高，执行一条指令需要的时间就越短。
- 指令系统 指令的格式、类型和指令的数目、功能等都会影响程序的执行速度。
- 高速缓冲存储器的容量与结构 程序运行过程中高速缓冲存储器（Cache）有利于减少 CPU 访问内存的次数。通常，其容量越大、级数越多，其效用就越显著。
- 逻辑结构 CPU 包含的定点运算器和浮点运算器数目、有无协处理器、流水线级数和条数、有无指令预测和数据预取功能等，都对指令执行的速度有影响。

2) 存储器

存储器的任务是存储程序和数据。按照存取特性，存储器分为易失性存储器和非易失性存储器两大类（图 1-3）。前者在掉电（或关机）后会丢失所存储的信息，后者则能永久或半永久性保存信息，即使掉电（或关机）信息也不会丢失。

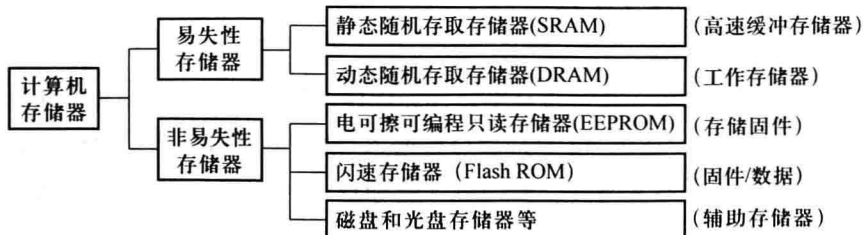


图 1-3 半导体存储器的类型及其应用

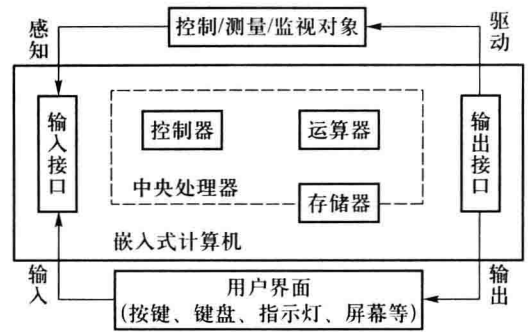


图 1-2 嵌入式计算机硬件的逻辑组成

随机存取存储器 RAM (Random Access Memory) 属于易失性存储器, 它有动态随机存取存储器 (Dynamic RAM, DRAM) 和静态随机存取存储器 (Static RAM, SRAM) 两种。DRAM 的电路简单, 集成度高, 功耗小, 成本低, 通常用作存放正在运行/处理的程序/数据的工作存储器; SRAM 的电路较复杂, 集成度低, 功耗较大, 成本高, 但工作速度非常快, 往往与 CPU 内核集成在同一芯片内, 用作程序和数据的高速缓冲存储器 (Cache)。

非易失性存储器有多种类型。以前使用较多的是掩膜只读存储器 (Mask ROM) 和电可擦可编程只读存储器 (Electrically Erasable Programmable Read Only Memory, EEPROM)。前者不可修改, 后者通过专用设备可以离线修改, 它们用来存放那些很少需要更新的程序代码 (称为“固件”)。闪速存储器 (Flash Memory, 简称闪存) 是一种新型的非易失性存储器, 其特点是它能方便地在线写入信息。Flash 存储器有两类: 或非型 (NOR Flash) 和与非型 (NAND Flash)。前者以字节为单位进行随机存取, 存储在其中的程序 (称为“固件”) 可以直接被 CPU 执行; 后者以页 (行) 为单位进行存取, 读出速度稍慢, 通常应将程序或数据预先读入到 RAM 中再使用, 但它在容量、使用寿命和成本方面有较大优势, 所以大多做成存储卡或 U 盘, 像磁盘存储器和光盘存储器一样用来扩充存储器容量或用于脱机保存程序和数据, 作为辅助存储器使用。

不同类型和用途的存储器在嵌入式系统中分布在不同的部位。有些集成在嵌入式处理器芯片内部 (称为片内存储器), 有些安装在电路板上 (称为片外存储器), 它们都属于内置 (builtin) 存储器, 容量固定。还有些则做成可插拔的形式, 需要时才插入宿主设备使用 (称为扩充存储器)。例如, iPhone 5S 智能手机使用的 SoC 芯片 A7, 片内包含三级 Cache 存储器 (容量分别为 64 KB+64 KB、1 MB 和 4 MB), 它还以堆叠封装方式 (Package on Package, PoP) 安装了容量为 1 GB 的 DDR3 DRAM 存储器 (内存); 电路板上所安装的 NAND 型闪速存储器 (外存) 有三种容量 (16 GB、32 GB 和 64 GB) 供用户选择。iPhone 手机一般不使用扩充存储器。

3) I/O 设备与 I/O 接口

从嵌入式系统的角度来看, 外部世界都是系统的输入/输出 (I/O) 设备, 它们要么是向嵌入式系统输入信息, 要么是接收嵌入式系统的输出信息, 或者两者兼而有之。

嵌入式系统的输入/输出设备种类繁多, 按其服务对象可分为两大类:

(1) 用于人机交互的设备: 如按键、键盘、触摸板、触摸屏、鼠标器、操纵杆、手写笔、话筒 (麦克风)、发光二极管 (Light-Emitting Diodes, LED)、液晶显示器 (Liquid Crystal Display, LCD)、打印机等, 它们是用户界面的硬件部分。

(2) 用于机机交互的设备: 包括各种类型的传感器 (压力传感器、温度与湿度传感器、重量传感器、运动传感器、距离传感器、光传感器、红外传感器、电流电压传感器和生物传感器等) 和各种伺服执行机构 (继电器、微电机、步进电机、线性电机等)。

I/O 接口用于连接 (包括电器连接与物理连接) 和控制 I/O 设备的工作。它有多种类型: 从数据传输速率来看, 有低速和高速之分; 从数据传输方式来看, 有串行和并行之分; 从是否需要物理连接来看, 有有线与无线之分; 从是否能连接多个设备来看, 有总线式 (可串接多个设备) 和独占式 (只能连接一个设备) 之分。嵌入式系统常用的一些 I/O 接口有:

- 通用串行总线式接口: USB 2.0/USB 3.0、IEEE 1394、以太网接口等;
- 异步串行接口: RS-232-C、RS-485 等;

- 视频信号接口：视频图形阵列（Video Graphics Array, VGA）接口、数字视频接口（Digital Video Interface, DVI）、高清晰度多媒体接口（High Definition Multimedia Interface, HDMI）等；

- 工业总线接口：控制器局域网（Control Area Network, CAN）接口、1553B 接口、局域网（Local Interconnect Network, LIN）接口等；

- 无线接口：红外线（IrDA）接口、蓝牙（Bluetooth）接口、Zigbee 接口、WiFi 接口等。

4) 数据总线

数据总线（Data Bus）简称总线，它是嵌入式系统各组件之间进行数据传输的一个传输通路。它由传输线和控制电路组成，为连接在总线上的系统内或系统外的各个组件提供数据传输和相应的控制服务。

总线连接着嵌入式系统内部和外部的许多组件。将系统内部的组件连接在一起的总线称为内部总线，与外部组件（包括与其他嵌入式系统）进行连接所使用的总线称为外部总线。外部总线也称为系统的扩充总线，它们与通信网络接口和某些 I/O 接口有时并不严格区分。

各种不同的嵌入式系统结构与性能跨度很大，使用的总线有许多种。不同总线适用的系统和应用也不相同。

5) 软件

嵌入式系统的软件配置有多种情况。一些低端嵌入式系统的软件很简单，它们不需要操作系统，只需配置一个监控程序、若干设备驱动程序和事件处理程序即可。系统工作时，它不断地重复运行监控程序，若发现有外部事件发生，通过中断服务例程转去执行相应的事件处理程序，随后再返回继续运行监控程序。

高端嵌入式系统的软件配置则比较复杂。它通常由板级支持包（Board Support Packet, BSP）、设备驱动程序、实时操作系统、中间件以及嵌入式应用软件等组成。其中，BSP 和驱动程序属于底层软件，它们在操作系统和硬件之间构成一个硬件抽象层，负责屏蔽具体硬件的差异和细节，向操作系统提供统一的标准接口。实时操作系统是整个嵌入式系统的核心，它负责管理系统中的各种软硬件资源，完成任务调度、存储分配、文件管理、人机交互等功能，是应用软件的运行平台。中间件位于操作系统与应用软件之间，为上层的应用软件提供开发和运行环境。由于它向应用软件提供了标准化编程接口，使应用软件的开发生相对独立于硬件和操作系统，并使应用软件能在不同的系统上运行，因而降低了开发成本。应用软件则是专门用于解决具体应用问题的软件，不同应用系统需要配置不同的应用软件。

以近几年流行的智能手机广泛使用的安卓（Android）软件架构为例，Android 软件主要由 4 层组成。最底层是各种驱动程序和 Linux 内核。第 2 层是系统库和 Android 的运行环境。第 3 层是应用软件框架，它包含了许多可重用和可替换的软件组件，它们是 Android 应用程序开发和运行的重要基础。第 4 层是应用程序。Android 本身提供了若干应用程序，第三方软件开发者和自由软件设计者也开发了大量的应用程序。

2. 嵌入式处理芯片

嵌入式系统与通用计算机一样，其硬件的核心是 CPU。嵌入式系统中的 CPU 一般具有 4 个特点：① 支持实时处理；② 低功耗；③ 结构可扩展；④ 集成了测试电路。

CPU 是由大规模集成电路芯片做成的，本书把使用于嵌入式系统的 CPU 芯片或者包含有

CPU 内核的微控制器芯片和系统级芯片 (System on Chip, SoC 或 SOC, 也称片上系统) 等统称为“嵌入式处理芯片”(而不称为“嵌入式处理器”或“嵌入式处理器芯片”)。目前, 嵌入式处理芯片有以下 4 种产品类型。

1) 微处理器

微处理器已经有 40 年左右的历史了。它是一种可编程的多用途器件, 可以使用在 PC 之类的通用计算机之中, 但更多的是应用于嵌入式系统。据 2008 年的统计数字, 微处理器的年产量已达数百亿之多, 其中用于通用计算机的仅 2% 左右, 其余 98% 均用于嵌入式系统。

根据 CPU 的字长, 微处理器产品也有 4 位、8 位、16 位、32 位和 64 位之分。虽然 32 位和 64 位处理器是当前技术发展的主流 (高端), 但销售数量仅占全部微处理器的 10% 左右。其中仅有少数应用于通用计算机, 多数还是应用于嵌入式系统。当用于嵌入式系统时, 这些通用微处理器可能删除一些与嵌入式应用无关的功能部件, 而增加一些为嵌入式应用专门设计的功能, 因此在功耗、工作温度、抗电磁干扰、可靠性等方面有所增强。

将微处理器应用于嵌入式产品 (系统) 时, 除处理器芯片之外, 还需要外接 RAM、ROM、总线、I/O 接口、小键盘、发光二极管等多种器件, 它们都安装在一块电路板上, 习惯上称为单板计算机 (单板机)。单板机体积较大, 在工业控制领域使用较多。

典型的微处理器产品主要有 PowerPC、MC68000、MIPS、AMD、x86 等系列。

2) 数字信号处理器

数字信号处理器 (DSP) 是一种专用于数字信号处理的微处理器, 它对通用处理器的逻辑结构和指令系统进行了优化设计, 使之能更好地满足高速数字信号处理的要求。例如使用分开的存储器分别存放程序和数据 (即所谓的“哈佛结构”), 指令系统中增加单指令多数据 (Single Instruction Multiple Data, SIMD) 并行处理的特殊指令等, 使之特别适合于数字滤波、快速傅里叶变换 (FFT)、谱分析等常用数字信号处理算法, 显著提高了音频、视频等数字信号的数据处理效率 (图 1-4), 促进了嵌入式系统在多媒体信息处理中的应用。

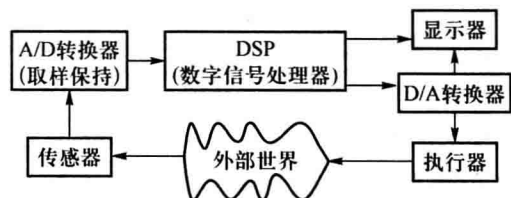


图 1-4 DSP 的典型应用方式

手机、数码相机等以声音和图像信号处理为主要任务的嵌入式应用中, DSP 有两种解决方案。一种是 DSP 经过单片化和电磁兼容 (Electromagnetic Compatibility, EMC) 改造, 在同一芯片中集成了包括数字基带、SRAM、射频、电源管理等功能部件, 成为专门的嵌入式 DSP; 另一种是在通用微处理器中扩展 DSP 功能, 或者在单片机 (或 SoC) 中增加 DSP 协处理器内核。

3) 微控制器 (单片机)

微控制器将整个计算机硬件的大部分甚至全部电路集成在一块芯片中。除 CPU 外, 芯片内还集成了 ROM/EEPROM、RAM、总线、定时/计数器、看门狗定时器 (WatchDog Timer, WDT)、I/O 接口、A/D 转换器、D/A 转换器、网络通信接口等各种必要的功能部件和外设接口 (图 1-5)。与微处理器不同, 它只需要很少一些外接电路 (如一个时钟发生器和必要的 RAM 和 ROM) 就可以独立工作, 因此体积减小, 功耗和成本降低, 可靠性也相应提高。

微控制器实际上是一种集成在单个芯片中的小型计算机。它们的工作频率不高，存储容量较小（通常只有几百 KB），功耗很低（有些是毫瓦甚至微瓦级），由于它们在各种嵌入式应用中主要作为控制单元使用，所以习惯上人们都把它们称为微控制器（Microcontroller Unit, MCU）。

MCU 的品种和数量很多，在过程控制、机电一体化产品、智能仪器仪表、家用电器、计算机网络及通信等方面得到了广泛应用。目前它大约占有嵌入式系统 70% 的市场。

MCU 按其使用的处理器内核的位数，也经历了 1 位、4 位、8 位、16 位及 32 位的发展阶段。与通用计算机情况不同的是，低端 MCU 不因高端产品的出现而衰落甚至淘汰。例如 1980 年 Intel 公司开发的 8 位 MCU 8051 中包含了 8 位的 CPU、128 字节的 RAM（存储数据）、4 KB 的 ROM（存储程序代码）、输入输出、中断控制以及计数/定时电路等，特别适合传感器信号的获取及马达等机电装置的程序控制，使用极为广泛。除了 Intel 公司之外，其他许多集成电路制造商如 Atmel、飞利浦、华邦等公司也相继开发了功能更多、更强大的 8051 的兼容产品。至今，此类 8 位微控制器每年还有几亿片的出货量。

世界上一些著名的半导体器件厂家都开发了 MCU 系列产品，有代表性的产品系列包括：微芯公司（Microchip）的 PIC 微控制器系列，Intel 公司的 MCS51（8051）、MCS-96/296、i960，飞思卡尔公司的 CPU12、CPU16、CPU32，Atmel 公司的 51 系列及 AVR 单片机系列，TI 公司的 MSP430 系列，等等。

近年来由于嵌入式应用系统对联网和多媒体信息处理的需求日益增多，对 MCU 处理功能的要求越来越高，32 位 MCU 得到了迅速的发展。在 32 位 MCU 产品中，使用 ARM7、9、11 和 ARM Cortex-M 系列处理器内核的占 90% 以上。第 3 章所介绍的三星公司的 S3C2410/S3C2440 就是其中具有代表性的产品之一。

4) 片上系统

随着电子设计自动化（Electronic Design Automation, EDA）水平的提高和 VLSI 制造技术的飞速发展，半导体加工工艺已经从微米、亚微米进入到 45 nm、32 nm 和 22 nm 的深亚微米时代，单个芯片上可以集成几亿个甚至几十亿个晶体管，因而能够把计算机或其他一些电子系统的全部电路都集成在单个芯片上，这种芯片就是所谓的片上系统（图 1-6）。

SoC（片上系统）将计算机或其他电子系统集成在单个芯片中，所以也称为系统级芯片。它可以处理数字信号、模拟信号、数/模混合信号，其集成规模很大，一般达到几百万到几千万个门电路。

尽管微控制器也是一种单芯片的计算机，但通常它只是一种简化的、功能弱化的单片系统。而 SoC 则常常被用来指功能更加强大的嵌入式处理芯片，它们可以运行 Windows 和 Linux 之类的台式机操作系统，能连接外存储器（例如闪存芯片）和附加的各种外部设备。为执行更为复杂的任务，一些 SoC 还采用了多个处理器核心。

由于 SoC 将嵌入式系统的几乎全部功能都集成在一块芯片中，单个芯片就能实现数据的采

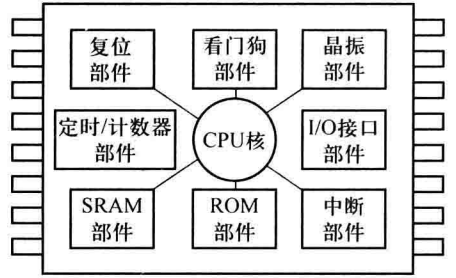


图 1-5 典型微控制器（单片机）的组成

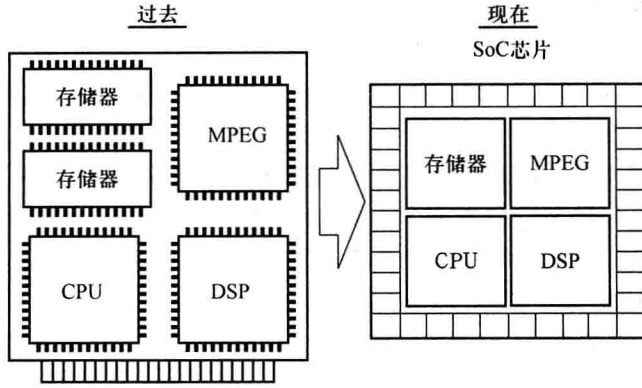


图 1-6 片上系统 (SoC)

集、转换、存储、处理和输入/输出等多种功能。集成度的增加、器件尺寸的缩小、时钟频率的提高和驱动电压的降低使整机成本和体积都大为降低，顺应了现代通信、电脑、消费电子产品向高性能、低功耗和低成本方向发展的趋势。

目前，大多数高端嵌入式系统均采用 SoC。以苹果公司的 iPhone 4 手机为例（图 1-7），其核心是 2 块 SoC 芯片，一块是基带处理器（Base Band Processor），它负责基带信号的控制、转换与处理（包括 A/D 和 D/A 转换、编码/解码、调制/解调等），主要组件是数字信号处理器（DSP）及相关的调制解调器、编码解码器和接口电路等。另一块 SoC 芯片是以 ARM Cortex-A8 作为 CPU 的 SoC 芯片（Apple A4），它运行 iOS 操作系统和应用程序，负责对整个手机进行控制和管理，A4 芯片中还包括图形处理器 GPU、定时控制、LCD 控制、射频控制、电源管理和 I/O 接口电路等。

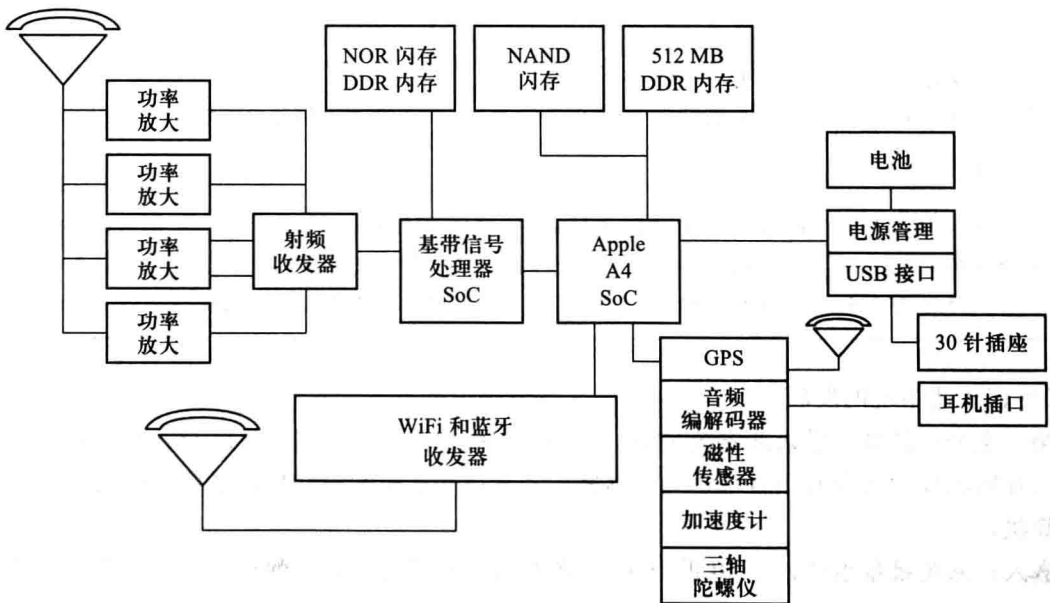


图 1-7 iPhone 4 智能手机框图