

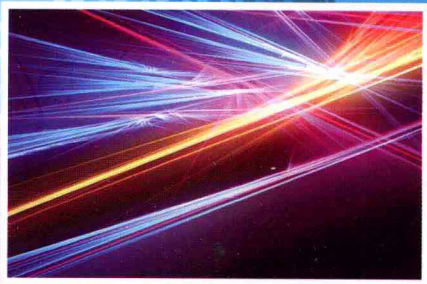


普通高等教育“十二五”规划教材

◎ 电子信息科学与工程类专业 规划教材

嵌入式系统原理 与接口技术

◎ 张学武 江 冰 张 卓 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

嵌入式系统原理与接口技术

张学武 江 冰 张 卓 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书以工程实践和应用设计作为主线,以工业领域常用的 32 位 ARM Cortex-M3 处理器 STM32F103 系列为核心,重点阐述了嵌入式系统设计过程中的共性方法和共性关键技术。在讲解嵌入式系统设计方法和原理的过程中,本书融入了作者在嵌入式系统设计方面的科研成果和开发经验,具有理论与实践、软件与硬件、科研与教学的有机结合并协同交互之特色,便于读者通过具体的工程实践案例,轻松掌握枯燥的理论知识、复杂的设计方法,在实践中全面掌握嵌入式系统的基本原理、设计方法和接口技术,以建立和提高对复杂嵌入式系统的抽象能力。

本书理论联系实际,内容新颖,可供高等院校通信工程、电子科学与技术、计算机科学与技术、控制科学与工程领域的本科生(硕士生)作为嵌入式系统课程教学教材,也可供嵌入式领域技术人员参考。

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

嵌入式系统原理与接口技术 / 张学武, 江冰, 张卓编著. —北京: 电子工业出版社, 2013.8
ISBN 978-7-121-20757-0

I. ①嵌… II. ①张… ②江… ③张… III. ①微型计算机—系统设计—高等学校—教材 ②微型计算机—接口技术—高等学校—教材 IV. ①TP36

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 135557 号

责任编辑: 董亚峰

文字编辑: 薄 宇

印 刷: 北京市李史山胶印厂

装 订: 北京市李史山胶印厂

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: 787×1 092 1/16 印张: 21.25 字数: 510 千字

印 次: 2013 年 8 月第 1 次印刷

定 价: 48.00 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。

质量投诉请发邮件至 zltts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

前言

嵌入式系统是一种专用的计算机系统，具有体积小、功耗低、计算资源丰富、网络通信功能强、软硬件资源可裁剪等特点，涉及人类生活的方方面面。嵌入式系统可独立运行与应用，也可作为智能装置或设备的一部分，在汽车电子、消费电子、航空航天、现代电力行业、医疗仪器、工业仪器仪表及其智能装备等领域应用极为广泛。

近年来，嵌入式系统得到了广泛的应用和飞速的发展，涉及人类生活、工作和学习的各个方面。据不完全统计，一个人一天当中会接触到 50 多个嵌入式系统设备。由于嵌入式系统涉及的应用领域非常广泛，彼此之间的特点也相当明显。例如，智能手机、PDA、车载导航、工控、军工、多媒体通信终端、网关、数字电视等。针对不同的应用领域，微处理器的选型、接口技术、集成开发环境、操作系统及应用软件等方面有很大的差异。组织和编写一部能够反映嵌入式系统共性技术的教材，以满足学生和工程技术人员在短期内掌握嵌入式系统的原理和设计方法的学习需求就显得尤为重要。作者经过广泛调研和论证，结合近十年在嵌入式技术领域的教学实践经验、嵌入式系统设计方面的科研经历和长期指导各项电子设计类竞赛经验，将理论与实践、软件与硬件、科研成果与教学经验有机融合，编写此教材。本书的章节设置和内容安排便于读者通过具体的工程案例轻松掌握枯燥的理论知识、复杂的设计方法，在实践中全面掌握嵌入式系统的基本原理、设计方法和接口技术，以建立和提高对复杂嵌入式系统的抽象能力。

本书分为 9 章，第 1~4 章介绍嵌入式系统设计和开发的基础知识、基本方法及相关开发工具。第 5~9 章以 STM32 系列微处理器为核心，结合嵌入式系统设计和开发中的共性关键技术，通过工程案例学习和掌握嵌入式系统的基本原理及在工程应用中涉及的通用技术、设计思想和方法。作者力图通过本书的学习和实践，引导读者既能快速入门，全面掌握嵌入式系统的基本原理和应用开发方法，又达到举一反三的目的，拓展嵌入式系统的设计理念和方法，为今后从事更先进的嵌入式系统设计和开发打下坚实的基础。

本书理论联系实际、内容新颖，可供普通高等院校通信工程、电子科学与技术、计算机科学与技术、控制科学与工程领域的本科生或硕士生作为嵌入式系统课程教学教材，也可供嵌入式领域技术人员学习参考。

由于作者水平有限，书中错误和不当之处在所难免，敬请读者批评指正。

本书涉及的工程案例来源于作者的科研项目，相关项目得到国家自然科学基金“基于仿生视觉感知机理的金属板带表面缺陷在线检测方法研究”（61273170）、教育部博士点基金“水下目标检测识别与跟踪若干问题研究”（20120094120023）和常州市机器人与智能装备科技专项“基于机器视觉的铜带表面缺陷在线检测系统”（CE20120101）的资助，在此表示感谢！

作 者

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 嵌入式系统概述	1
1.1.1 嵌入式系统的概述	1
1.1.2 嵌入式系统的特征	2
1.1.3 嵌入式系统的组成	5
1.1.4 嵌入式系统的现状及发展趋势	6
1.2 嵌入式处理器	8
1.2.1 哈佛结构和冯·诺依曼结构	8
1.2.2 CISC 指令集与 RISC 指令集	9
1.2.3 x86 指令集和 ARM 指令集	11
1.2.4 通用处理器 (x86) 与嵌入式处理器 (ARM) 小结	12
1.2.5 嵌入式处理器的分类	13
1.3 嵌入式操作系统	16
1.3.1 嵌入式操作系统的概述	16
1.3.2 常见的嵌入式操作系统	16
第 2 章 嵌入式系统设计概述	20
2.1 嵌入式系统设计的基本流程	20
2.1.1 需求分析	20
2.1.2 详细说明	21
2.1.3 结构设计	21
2.1.4 组件设计	24
2.1.5 系统集成	25
2.2 嵌入式系统设计的流程模型	26
2.2.1 瀑布模型	26
2.2.2 逐步求精模型	27
2.2.3 螺旋模型	27
2.3 嵌入式系统的开发模式	28
2.3.1 面向硬件的开发模式	29
2.3.2 面向软件的开发模式	29
2.3.3 两种开发模式的区别与联系	29

第 3 章 ARM 嵌入式处理器	31
3.1 ARM 嵌入式处理器简介	31
3.1.1 ARM 处理器的特点	32
3.1.2 ARM 体系结构的版本及系列	32
3.1.3 ARM 处理器核系列	34
3.1.4 综述	40
3.2 ARM Cortex-M3 处理器简介	41
3.2.1 概述	41
3.2.2 寄存器组	42
3.2.3 操作模式和特权级别	44
3.2.4 向量中断控制器	45
3.2.5 存储器映射	46
3.2.6 总线接口	46
3.2.7 存储器保护单元	47
3.2.8 指令集	47
3.2.9 中断和异常	48
3.2.10 调试支持	49
3.3 Cortex-M3 指令系统与汇编语言基础	49
3.3.1 汇编语言基础	49
3.3.2 指令集	52
3.3.3 汇编语言初步应用	56
第 4 章 嵌入式系统的开发环境	66
4.1 嵌入式集成开发环境	67
4.1.1 嵌入式集成开发环境概述	67
4.1.2 嵌入式系统集成开发环境的组成	69
4.2 常见的嵌入式开发环境	70
4.2.1 Keil	70
4.2.2 IAR Embedded Workbench	71
4.2.3 TKStudio	73
4.2.4 GCC	80
4.2.5 其他开发环境	80
4.3 ARM 嵌入式集成开发环境的对比与选择	82
4.3.1 主要 ARM 嵌入式集成开发环境的对比	82
4.3.2 ARM 嵌入式集成开发环境的选择	85
4.4 开发调试工具	85
4.4.1 JTAG 仿真器	85
4.4.2 其他开发调试工具	89

第 5 章 STM32 系列微控制器开发基础	90
5.1 STM32 系列微控制器概述	90
5.1.1 STM32 系列微控制器简介	90
5.1.2 STM32 系列微控制器的优势	91
5.1.3 STM32 系列微控制器的应用	91
5.2 STM32F103 系列微控制器	92
5.2.1 主要特点	92
5.2.2 总体结构	94
5.2.3 功能概述	97
5.2.4 片上外设概述	99
5.3 基于标准外设库的软件开发	103
5.3.1 STM32 标准外设库概述	103
5.3.2 使用标准外设库开发的优势	104
5.3.3 STM32F10xxx 标准外设库结构与文件描述	104
5.3.4 STM32F10xxx 标准外设库的使用	108
5.4 使用 Keil MDK 及标准外设库创建 STM32 工程	116
5.4.1 开发工具与开发环境	117
5.4.2 MDK 的操作与设置	118
5.4.3 使用 Keil MDK 运行第一个 STM32F10x 程序	125
第 6 章 STM32 系列微控制器存储器与外设	137
6.1 存储器和总线结构	137
6.1.1 系统结构	137
6.1.2 存储器组织	139
6.1.3 存储器映射	139
6.1.4 启动配置	140
6.2 电源控制	141
6.2.1 电源	141
6.2.2 电源管理	143
6.2.3 低功耗模式	144
6.2.4 睡眠模式	145
6.2.5 停止模式	146
6.2.6 待机模式	147
6.2.7 低功耗模式下的自动唤醒 (AWU)	148
6.3 复位和时钟	149
6.3.1 复位	149
6.3.2 时钟	150
6.4 GPIO	155
6.4.1 GPIO 简介	155

6.4.2	GPIO 功能描述	156
6.4.3	GPIO 配置	157
6.5	中断和事件	158
6.5.1	嵌套向量中断控制器	158
6.5.2	外部中断/事件控制器	161
6.6	DMA 控制器	166
6.6.1	简介	166
6.6.2	功能描述	167
6.6.3	DMA 应用实例	171
第 7 章	嵌入式系统接口应用基础	173
7.1	嵌入式系统的接口类型	173
7.2	嵌入式系统的电平匹配	174
7.2.1	电平匹配概述	174
7.2.2	接口相关电路及概念	177
7.2.3	电平匹配的电路设计	180
7.3	嵌入式系统通信形式的匹配	184
7.4	嵌入式系统的电气隔离	185
7.4.1	电气隔离概述	185
7.4.2	供电系统的隔离	186
7.4.3	数字信号的隔离	187
7.4.4	模拟信号的隔离	193
7.4.5	嵌入式系统的电气隔离设计	198
7.5	嵌入式系统接口的保护	199
7.5.1	嵌入式系统接口的电源保护	199
7.5.2	静电保护	201
7.6	嵌入式系统接口的控制方式	202
7.6.1	程序轮询方式	202
7.6.2	中断处理方式	202
7.6.3	直接存储器存取 DMA 传送方式	202
第 8 章	基于 STM32 系列微控制器的接口应用实践	204
8.1	USART 串行接口及其应用	204
8.1.1	USART 串行接口简介	204
8.1.2	STM32F10x 系列 USART 功能描述	206
8.1.3	STM32 USART 接口应用实例	214
8.2	SPI 串行接口及其应用	218
8.2.1	SPI 串行接口简介	218
8.2.2	STM32 SPI 功能描述	222
8.2.3	STM32 SPI 总线应用实例	223

8.3	I ² C 总线及其应用	225
8.3.1	I ² C 总线简介	225
8.3.2	STM32 I ² C 简介	228
8.3.3	STM32 I ² C 功能描述	229
8.3.4	STM32 I ² C 总线应用实例	233
8.4	CAN 总线及其应用	240
8.4.1	CAN 总线简介	240
8.4.2	CAN 总线的系统结构及数据传输	241
8.5	STM32 bxCAN	244
8.5.1	功能特点	244
8.5.2	bxCAN 总体描述	245
8.5.3	bxCAN 工作模式	246
8.5.4	测试模式	247
8.5.5	bxCAN 功能描述	248
8.6	FSMC 接口及其应用	254
8.6.1	STM32 FSMC	254
8.6.2	STM32 FSMC 外部设备地址映像	256
8.6.3	FSMC 应用实例	257
8.7	USB 串行接口及其应用	264
8.7.1	USB 总线概述	264
8.7.2	USB 总线数据传输	266
8.7.3	USB OTG	266
8.7.4	USB 接口器件	267
8.7.5	STM32 USB 功能描述	267
8.8	1-Wire 单总线及其应用	269
8.8.1	1-Wire 单总线及其连接	269
8.8.2	1-Wire 单总线器件 DS18B20 的应用	271
8.8.3	基于 STM32 的 DS18B20 操作实例	275
8.9	数据采集接口及其应用设计	279
8.9.1	数据采集概述	279
8.9.2	数据采集系统的结构	280
8.9.3	A/D 转换器的量化与编码	286
8.9.4	STM32F10x 系列内置 ADC 简介	288
8.9.5	STM32F10x 系列内置 ADC 功能描述	289
8.10	常用人机交互接口及其应用设计	293
8.10.1	常用键盘接口设计	293
8.10.2	LED 显示器件及接口设计	297
8.10.3	串口屏	300

第 9 章 嵌入式系统工程开发实战	302
9.1 需求分析	302
9.1.1 需求背景	302
9.1.2 主要功能	303
9.2 详细说明	303
9.3 结构设计	304
9.3.1 系统架构设计	304
9.3.2 主要元器件与开发平台的选择	305
9.3.3 主要功能模块的连接	307
9.3.4 控制器最终结构	308
9.4 组件设计	308
9.4.1 硬件电路的设计	308
9.4.2 主要软件部分的设计	318
9.4.3 控制器的 PCB 设计	327
9.5 系统集成	328
9.5.1 子功能模块之间的集成	328
9.5.2 系统的集成测试	328

第 1 章

绪 论

1.1 嵌入式系统概述

嵌入式系统的飞速发展已经极大地改变了我们的生活，从风靡全球的 iPhone，到生活中随处可见的 MP3、数码相机、打印机、家用电器，生活中的衣食住行无处不存在嵌入式系统的身影，可以说，嵌入式系统的发展改变了我们的生活方式，也让我们的生活变得更智能。

虽然嵌入式系统无处不在，然而要真正理解它并不容易，正是由于嵌入式系统有着如此广泛的应用，因此电子信息类专业的学生更应该掌握它的相关知识，本章就介绍嵌入式系统相关的基础知识。

1.1.1 嵌入式系统的概述

之前已经有所介绍，嵌入式系统无处不在，小到一个简单的单片机控制系统，大到复杂的航天工程，无论是在民用还是军用领域，无论是在日常生活还是在工农业生产中，随处可以发现嵌入式系统的身影。那么，什么是嵌入式系统呢？在计算机刚刚出现的时候，人们通常按照计算机的体系结构、运算速度、结构规模、应用领域等将其分为大型计算机、中型计算机、小型计算机、微型计算机，然而随着半导体技术和计算机技术的飞速发展，这种分类方式已经失去了实际的意义。另外，随着计算机技术及其产品对其他行业的广泛渗透和大规模应用，以应用为中心的分类方法更为合理，这种分类方法把计算机按照嵌入式应用和非嵌入式应用分为嵌入式计算机和通用计算机。

因此，常用的嵌入式系统定义是：嵌入式系统是以应用为中心，以计算机技术为基础，对系统的功能、可靠性、成本、体积、功耗等严格要求，软件和硬件资源可以高度定制和裁剪的专用计算机系统。这个定义主要包含两个信息：一是嵌入式系统是专用计算机系统，因此必须有处理器，具备计算机系统的基本特征。二是嵌入式系统的功能是有严格要求并按照指定的应用而设计的。

和嵌入式系统形成对比的是通用计算机，这个对于同学们来说更为直观，对照嵌入式系



统的定义，我们可以归纳出通用计算机系统的一些基本特点。首先，通用计算机系统的软件和硬件资源是富余的，通用计算机具有计算机的标准形态，相应的软件和硬件配置较为固定，可以通过配置不同的应用软件来实现不同的应用。例如我们平时所使用的计算机，并不是所有的硬件资源我们都能够使用到，同样在我们使用的操作系统中，也并不是所有的软件资源都是我们能够用到的，然而正是这些通用的软件和硬件配置才能够保证通用计算机系统的通用性，从而满足不同的应用需求。

正是由于嵌入式系统在功能、成本、功耗等方面的严格要求，因此嵌入式系统产品具有非常巨大的应用市场。相对于传统的计算机行业，嵌入式系统行业的需求更为丰富，在通用计算机领域，主要的软件和硬件技术都已经被世界上著名的企业垄断，普通公司很难有所作为。如 CPU 基本上被 Intel、AMD 等公司垄断；操作系统的办公软件方面，微软早已占据了大部分的市场份额；在高端显卡方面则是 NVIDIA 和 ATI 的天下，同时传统的计算机厂商也面临着巨大的竞争压力。嵌入式领域则不同，嵌入式应用广泛，行业细分程度大，还没有哪个系列的处理器和操作系统能够形成垄断。即使在体系结构或者软件平台上能够形成主流，在各不相同的应用领域也很难有公司能够垄断全部市场。正是由于嵌入式系统的产品和技术高度分散，行业应用广泛，同时技术更新换代迅速，可供创新和发挥的余地很大，因此学习和从事嵌入式系统相关领域的设计和开发必然能够大有作为。

1.1.2 嵌入式系统的特征

通过对嵌入式系统的基本介绍，可以总结嵌入式系统以下七个基本特征。

1. 嵌入式系统具有特定功能，用于特定的任务

通过与通用计算机的对比就可以看出，这是嵌入式系统和通用计算机系统最本质的区别。在半导体技术和计算机技术飞速发展的今天，嵌入式系统的智能化程度越来越高，功能越来越强大，但是始终无法背离这一点。例如 MP3 的发展，早期的 MP3 只能用来听音乐，后来随着技术的发展，MP3 的存储容量不断增大，支持的音乐格式逐渐增多，同时使用更先进的解码技术使音质更加出色，使用了彩色的屏幕使操作更加方便，并逐渐增加了电子书、日历等功能，然而这些变化并没有偏离听歌这一特定的任务。

由于嵌入式系统的应用主要是改变我们的生活，因此特定的功能往往也会随着技术的发展而有所调整，但是其主要功能却是一定的，否则就是完全不同的产品了。MP4 的发展就非常具有代表性，MP4 的诞生比较模糊，当 MP3 播放器使用了彩色屏幕之后，视频播放逐渐成为了一个附加功能，因此早期的 MP4 也可以理解为可以放视频的 MP3，只是功能的侧重点不同而已。早期的 MP4 只能播放特定格式的视频，需要使用特定的转换软件进行格式转换，如著名的魅族 M6。随着视频编解码芯片的发展，在 2008 年年初出现了可以直接播放 RMVB 的播放器，如当时的蓝魔 RM970 等。2009 年以后，MP4 的发展进入了快车道，也进入了多元化的发展时代，一方面是对高质量视频的支持，480P、720P、1080P 等高清格式在 MP4 上轻松地播放已经不是问题；另一方面，一些当初的附加功能也使 MP4 朝着多元化的方向发展，一些 MP4 加入了 PDF、OFFICE 文档的阅读功能，从而演变成了侧重阅读的彩屏电子书。2010 年以来，随着 Android 系统的高速发展，一些 MP4 加入了 Android 系统，可以运行 Android



丰富的应用, 加入了 WiFi, 使用大尺寸、高分辨率的屏幕之后, 逐渐演变为了 MID (Mobile Internet Device, 移动互联网设备)。

这种功能上的专注和转变最合适的例子就是苹果的系列产品, 如图 1-1 所示。从当初针对音乐的 iPod, 到逐渐融合视频、照相功能, 再到加入 iOS 系统, 具备上网、照相、游戏等功能的 iPod touch, 最后到 iPhone、iPad, 虽然功能越来越丰富, 很多产品也逐渐具备其他产品的功能, 随着技术的发展, 这些平台的通用性与扩展性也越来越强, 但是对于一款嵌入式产品来说, 它的功能仍然是有侧重的。



图 1-1 苹果系列产品

从上面的例子也可以看出, 随着集成电路制造技术和计算机技术的不断发展, 处理器的速度越来越快, 存储器的容量越来越大, 芯片的稳定性越来越好, 主要元器件的价格越来越低, 以前一些专用的嵌入式系统特别是在民用领域, 其功能越来越多, 硬件资源越来越丰富, 软件也具有很好的升级性和扩展性, 因此嵌入式系统的这一特征也逐渐模糊化, 但是仍然是嵌入式系统的主要特征。

2. 嵌入式系统更为关注成本

对于很多嵌入式系统而言, 由于功能比较单一、固定, 嵌入式系统资源比较有限, 因此设计者对成本往往更为关注。因此, 在规划嵌入式系统的结构设计时, 对软件和硬件资源的设计通常是做到够用即可, 只要能够满足嵌入式系统设计要求的特定应用, 就不会随意增加资源, 往往还要对系统进行优化和精简, 从而达到控制成本的目的。相比之下, 通用计算机就完全不同, 虽然也需要进行成本的控制, 然而由于通用计算机的用途多变, 不能假定仅用作某一用途, 因此, 在设计时必须照顾到各方面的应用情况, 保证资源上的充裕。所以, 相对于通用计算机系统, 嵌入式系统的成本控制更为有效。

成本控制意味着一定需要做资源上的精简, 对系统的硬件进行集成和整合也是非常好的一个方式, 最好的例子莫过于 MTK 了。MTK 是中国台湾多媒体芯片提供商联发科技 (MediaTek) 的简称。由于 MTK 等上游芯片厂商创新性的 Turnkey Solution 模式 (将芯片与手机开发所需的软件平台乃至第三方软件捆绑销售, 见图 1-2) 提供了较健全的多媒体平台解决方案, 使国产手机厂商在很大程度上规避了市场需求的快速变化, 以及自身研发经验不成熟等不

MEDIATEK

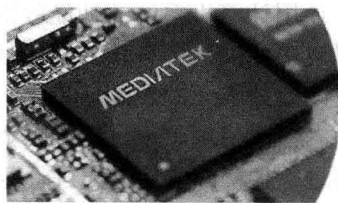


图 1-2 联发科技 Turnkey Solution



利因素所带来的风险。MTK 公司的产品集成了较多的多媒体功能，并拥有较低的价格，因此在国产手机厂商和手机设计公司得到了广泛的应用。MTK 的基带芯片多数采用 ARM 内核，将处理器内核、DSP、音频处理、UART、LCD 接口、GPIO、SIM 卡接口等基本功能单元进行高度的集成，并最大程度控制成本，因此直接导致了山寨手机在中国市场的爆发，具备拍照、音乐、视频、上网、手写等功能的手机可以从之前的几千元降到只有几百元的价格，足以体现这种方案的优势。可以说，MTK 把这种软件和硬件集成降低成本的模式发挥到了极致。然而这种模式仍在继续，在 MP4、GPS、电子书、MID 等领域，这种模式仍然取得了很好的效果。

3. 嵌入式系统一般都有功耗要求

嵌入式系统比通用计算机更为关注功耗的要求，这一点很容易理解，因为嵌入式系统的应用环境往往比较特殊。例如在移动设备中，在使用电池供电的情况下，功耗的控制直接关系到续航时间的长短，而电池技术的发展与计算机技术的发展不对称，电池如今已经成为了制约手机、平板电脑等通用移动设备发展的主要因素之一。

4. 嵌入式系统通常有实时性的要求

对于一些对实时性要求非常严格的嵌入式系统而言，系统能够在规定时间内对外部事件做出反应非常关键。当然所谓的实时性也是相对而言，针对不同的应用自然有不同的标准，对于人机交互系统，系统在 1s 内能够做出反应就能够被接受；银联刷卡系统，在 5s 内能够返回数据就能够满足需求。如图 1-3 所示，如果对于一个汽车刹车控制系统而言，就要求系统在毫秒级别内做出反应。因此，嵌入式系统的实时性是设计者必须慎重考虑的问题。

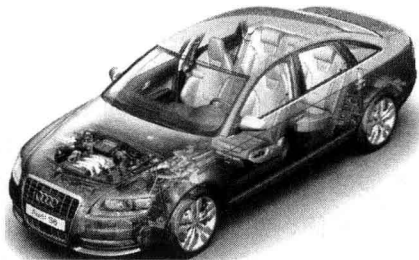


图 1-3 对实时性要求极高的汽车电子系统

5. 嵌入式系统的软件通常使用固态化存储

通用计算机系统的功能取决于所安装的软件，用户可以方便地使用和更改功能，例如 PC，可以自由地安装各种软件和游戏。为了适应这种更改性，通用计算机系统的软件通常存储在易更改载体中（如硬盘）。而对于嵌入式系统而言，由于其主体功能是固定的，通常也不需要使用者更改内部软件，因此嵌入式系统的软件通常使用固态化存储，有的嵌入式产品还要对软件进行加密，防止他人进行复制。例如，我们编写好了一个 51 单片机程序，通过编译器生成相应的 HEX 文件，使用下载线或者编程器将相应的文件写入单片机的片内 Flash 中，那么程序的功能就固定了，在正常的使用过程中软件功能无法进行更改。这样存储的方式可以大大提高系统的可靠性。



6. 嵌入式系统的软件和硬件可靠性要求更高

由于嵌入式系统应用在各行各业,应用环境也复杂多变,在某些环境下一个很小的错误可能会导致灾难性的后果,因此无论是软件和硬件都具有很高的可靠性要求。例如使用计算机的过程中如果死机,无非就是把计算机重启一下,但是如果是乘坐飞机在飞行的过程中,飞机的控制系统死机了,那后果是不可想象的。因此在特殊的应用场合,可靠性是嵌入式系统设计考虑的首要因素。

可靠性的提升往往是需要以成本的提升为代价的,比如硬件的可靠性,绝大多数的 IC (Integrated Circuit, 集成电路) 都有商用、工业、航天等不同的级别。级别越高,IC 的工作温度范围就越广,稳定性就越高,当然价格也成倍增长。软件部分如果要提高可靠性,可能需要依赖更多的硬件资源和人力资源,成本也会相应提高。因此,嵌入式系统的可靠性要求需要针对具体的应用进行统筹分析,在硬件的设计与软件开发上同步提升,缺一不可。

7. 嵌入式系统相关产品具有较长的生命周期

如今我们多数用着双核甚至是四核、六核的 CPU, 2GHz、3GHz 甚至是更高的主频, 4GB 甚至更高的内存,很难想象十年前那十几兆内存、几百兆主频计算机的性能。十几年前用着大哥大的时候,也很难想象如今四核处理器、1080P 高清大屏幕,触控体验如此优越的手机。的确,计算机技术的发展如此神速,产品的更新换代速度远超我们的想象。

由于嵌入式系统面向具体的应用,它的升级换代也和具体的应用同步进行,各个行业的应用系统和产品很少发生突然性的跳跃,嵌入式系统中的软件也因此更强调可继承性和技术衔接性,因此嵌入式系统的发展也体现出相对的稳定性,嵌入式系统相关产品的生命周期因此也要长得多。

1.1.3 嵌入式系统的组成

嵌入式系统的核心部分由硬件和软件组成。一般包括嵌入式处理器、存储器、操作系统、应用程序和输入/输出设备等。

嵌入式系统的组成并不是固定的,其形式可以多样化,比如输入/输出设备,可以以简单的一个按钮作为输入,一个 LED 作为输出,也可以是具备复杂通信协议的通信接口作为输入,复杂的机器人手臂作为输出。

嵌入式系统的主要硬件组成可以简单地分为嵌入式处理器和存储器。由于超大规模集成电路的迅速发展,很多单片的嵌入式处理器中逐渐加入丰富的资源,常见的嵌入式处理器中都已经包括了容量不等的 Flash、RAM。而各种通信接口也逐渐加入嵌入式处理器中,现在一片嵌入式处理器上加上电源电路、时钟电路就能构成一个嵌入式最小系统。

嵌入式处理器是嵌入式系统的硬件核心,它大多数用于专门设计的场合,将许多通用处理器需要外接辅助设备的功能使用芯片内部的资源完成,因此在使用上可以根据应用的不同而进行功能上的组合和裁剪,同时具有更高的效率和可靠性能。嵌入式处理器可以分为嵌入式微控制器、嵌入式微处理器、嵌入式 DSP 处理器和嵌入式片上系统等几类,具体内容将在 1.2 节中进行详细介绍。



1.1.4 嵌入式系统的现状及发展趋势

1. 嵌入式系统的历史及现状

20 世纪 70 年代发展起来的微型计算机, 由于体积小、功耗低、结构简单、可靠性高、使用方便、性价比高等一系列优点, 得到了广泛应用和迅速普及。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和机械加固, 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。这样一来, 计算机便失去了原来的形态与通用的计算机功能。为了区别原有的通用计算机系统, 把控制系统嵌入到对象体系中, 实现对象体系智能化控制的计算机, 称为嵌入式计算机系统。由此可见, 嵌入式系统的嵌入性本质是将一个计算机嵌入到一个对象体系中去。

尽管嵌入式系统起源于微型机时代, 但微型计算机的体积、价位和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的道路。这条道路就是单芯片化道路, 即将计算机做一个芯片上, 从而开创了嵌入式系统独立发展的单片机时代。

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 Intel4004 (如图 1-4 所示), 其后各厂家陆续推出了许多 8 位、16 位的微处理器, 包括 Intel8080/8085、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。1980 年, Intel 公司对 MCS-48 单片机进行了全面完善, 推出了 8 位 MCS-51 单片机, 并获得巨大成功, 奠定了嵌入式系统的单片机应用模式。至今, MCS-51 单片机仍在大量使用。1984 年, Intel 公司又推出了 16 位 8096 系列, 并将其称之为嵌入式微控制器, 这可能是“嵌入式”一词第一次在微处理机领域出现。

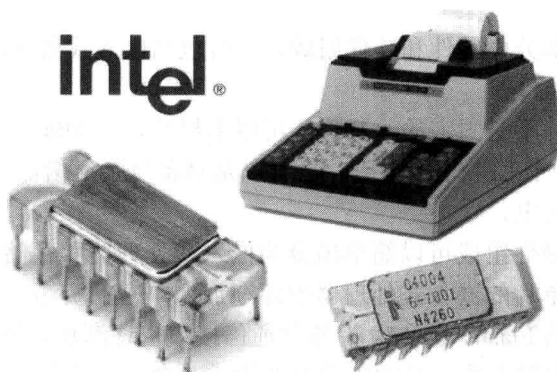


图 1-4 世界上第一款微处理器机器产品

此外, 为了高速、实时地处理数字信号, 1982 年诞生了首枚数字信号处理芯片 (DSP), DSP 是模拟信号转换成数字信号以后进行高速实时处理的专业处理器, 其处理速度比当时最快的 CPU 还快 10~50 倍。随着集成电路技术的发展, DSP 芯片的性能不断提高, 目前已广



泛用于通信、控制、计算机等对数据处理、计算要求较高的领域。

在近 30 年的历史中,各种改进的、面向具体应用的不同品牌单片机风起云涌,得到了广泛应用,但这些应用基本上是基于硬件底层的单线程程序。20 世纪 90 年代后,伴随着网络时代的来临,网络、通信、多媒体技术得以发展,8/16 位单片机在速度和内存容量上已经很难满足这些领域的应用需求。而由于集成电路技术的发展,32 位微处理器价格不断下降,综合竞争能力已可以和 8/16 位单片机媲美。32 位微处理器面向嵌入式系统的高端应用,由于速度快,资源丰富,加上应用本身的复杂性、可靠性要求等,软件的开发一般会需要操作系统平台支持。近几年,嵌入式设备(内部有嵌入式系统的产品)大量涌现,如手机、PDA、MP3、微波炉、数码相机、机顶盒、各种网络设备等。嵌入式系统开发应用需求越来越大,使嵌入式系统成为继 PC 和 Internet 之后 IT 技术的最热点,而构成嵌入式系统的主流趋势是 32 位嵌入式微处理器加实时多任务操作系统,目前的嵌入式系统往往指的是包含这种资源的系统。

2. 嵌入式系统的发展趋势

信息时代、数字时代使得嵌入式产品获得了巨大的发展契机,为嵌入式市场展现了美好的前景,也对嵌入式生产厂商提出了新的挑战,从中我们可以看出未来嵌入式系统的几大发展趋势。

(1) 嵌入式开发是一项系统工程,因此要求嵌入式系统厂商不仅要提供嵌入式软件和硬件系统本身,同时需要提供强大的硬件开发工具和软件包支持。

目前,很多厂商已经充分考虑到这一点,无论是对消费类嵌入式产品还是工业嵌入式产品,开发工具和软件支持至关重要。当前的智能手机平台就能充分体现这一点,iPhone 的成功很大程度上是苹果应用商店模式的成功,数十万的应用支持成为了 iPhone 受欢迎的主要原因之一。在专用领域,强大的硬件开发工具一方面有助于相关硬件和平台的普及,也可以极大缩短产品的开发周期,降低开发难度。比如,三星在推广 ARM7、ARM9 芯片的同时还提供官方开发板及软件开发支持包(BSP),而 Windows CE 在主推系统时也提供 Embedded VC++ 作为开发工具,还有 VxWorks 的 Tornado 开发环境、Delta OS 的 Linda 编译环境等都是这一趋势的典型体现。当然,这也是市场竞争的结果。

(2) 网络化、信息化的要求随着互联网技术成熟、带宽增加而日益提高,使得以往单一功能的设备如电话、手机、冰箱、打印机等功能不再单一,结构更加复杂。

这就要求芯片设计厂商在芯片上集成更多的功能,为了满足应用功能的升级,设计师们一方面采用更强大的嵌入式处理器,如 32 位、64 位 RISC 芯片或信号处理器 DSP 增强处理能力,同时增加功能接口,如 USB,扩展总线类型,如 CAN BUS,加强对多媒体、图形等的处理,逐步实施片上系统(SoC)的概念。软件方面采用实时多任务编程技术和交叉开发工具技术来控制功能复杂性,简化应用程序设计、保障软件质量和缩短开发周期。

未来的嵌入式设备为了适应网络发展的要求,必然要求硬件上提供各种网络通信接口。传统的单片机对于网络支持不足,而新一代的嵌入式处理器已经开始内嵌网络接口,除了支持 TCP/IP 协议,还有的支持 IEEE1394、USB、CAN、Bluetooth 或 IrDA 通信接口中的一种或几种,同时需要提供相应的通信组网协议软件和物理层驱动软件。软件方面系统内核支持网络模块,甚至可以在设备上嵌入 Web 浏览器,真正实现随时随地用各种设备上网。