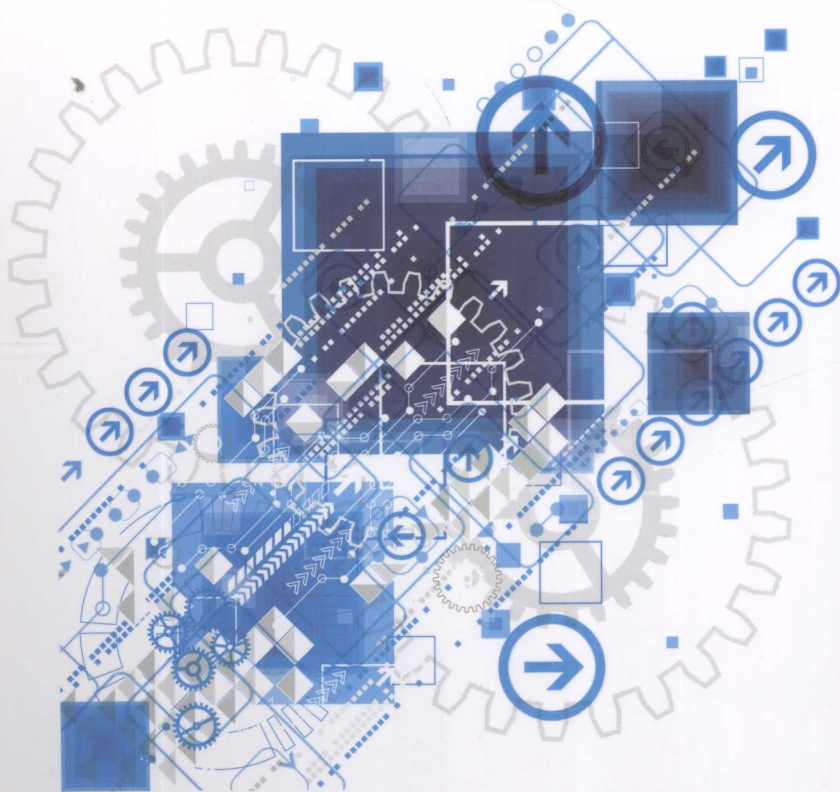


嵌入式技术与应用 丛书

嵌入式系统设计教程 (第3版)

丁男 马洪连 主编



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>

嵌入式技术与应用丛书

嵌入式系统设计教程

(第3版)

丁 男 马洪连 主编

马艳华 董 校 朱 明 张益嘉 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书以目前国内外流行的基于 ARM 架构的嵌入式微处理器及嵌入式操作系统为例,详细介绍嵌入式硬件系统架构、嵌入式微处理器和系统核心电路接口的设计与应用,以及嵌入式软件架构、主流嵌入式操作系统及其移植裁剪和应用程序编写等相关知识及应用技术。

全书共 9 章,内容主要包括嵌入式系统概论、基于 ARM 架构的嵌入式微处理器、嵌入式系统开发环境与相应开发技术、嵌入式指令系统与程序设计、嵌入式系统设计与应用、嵌入式操作系统 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 及应用、嵌入式 Linux 操作系统及应用、Andriod 操作系统及应用,最后详细介绍了系统综合设计应用实例。

本书适合高等院校相关专业的学生和研究生作为专业课程教材,也可以作为从事嵌入式系统开发和设计人员的技术培训或者开发参考用书。

本书配有教学用课件,读者可登录华信教育资源网(www.hxedu.com.cn)免费注册后下载。

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

嵌入式系统设计教程 / 丁男, 马洪连主编. —3 版. —北京: 电子工业出版社, 2016.9

(嵌入式技术与应用丛书)

ISBN 978-7-121-29773-1

I. ①嵌… II. ①丁… ②马… III. ①微型计算机—系统设计—教材 IV. ①TP360.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 202886 号

责任编辑: 田宏峰

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: 787×1 092 1/16 印张: 18.25 字数: 460 千字

版 次: 2006 年 6 月第 1 版

2016 年 9 月第 3 版

印 次: 2016 年 9 月第 1 次印刷

印 数: 3000 册 定价: 49.00 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, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: tianhf@phei.com.cn。

前 言

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。嵌入式系统开发与应用的内容繁杂,涉及诸如计算机、电子、自动控制等诸多专业知识,综合性强。由于嵌入式系统涉及的知识点多,想让学生在短短的有限课时内完全掌握嵌入式系统设计全部知识是不现实的。因此通过嵌入式系统课程的学习,目的是使其能够掌握嵌入式系统设计的基本知识和开发方法。实践是学习嵌入式系统设计的重要环节,通过动手实践才能让学生掌握嵌入式系统设计开发方法和开发经验。

随着嵌入式系统应用的普及,对嵌入式系统设计的技术人才需求越来越大,同时也迫切需要一些较好的适用于不同层次人员使用的教材和参考书。本书定位于从事嵌入式系统开发和设计的初学人员。从实用的角度出发,本书分别以目前国内外流行的 S3C2440 和 Cortex 架构处理器为例,详细地介绍嵌入式系统的内部结构、工作原理、设计步骤、设计方法、接口电路,以及嵌入式系统的开发环境和开发工具。在软件方面介绍了 $\mu\text{C}/\text{OS}$ 、Linux 和 Andriod 操作系统相关知识,最后介绍了一项实例设计供读者参考和借鉴。

本书第 1 版和第 2 版分别在 2006 年 6 月和 2009 年 9 月由电子工业出版社出版发行,目前国内 20 多所高校采用本教程作为嵌入式系统设计课程教材。由于嵌入式系统技术发展迅速,新技术层出不穷,为了适应时代发展,故对本书进行重新修正和再版发行,主要对书中各章节重新进行了规划、整理和内容充实。例如,第 2 章中的嵌入式处理器简介改为基于 ARM9 系列的 S3C2440 和新一代的 Cortex 系列处理器;第 3 章修改为嵌入式系统开发环境与相应开发技术的内容介绍;第 4 章中增添了 ARM 汇编语言与 C 语言的程序设计内容;第 8 章修改为基于 Andriod 操作系统的设计与应用;在第 1、5、6、7、9 章的内容也做了适当的修改。同时,对全书各章的内容都进行了精细化、逐页逐句地进行仔细斟酌,对一些表达不恰当句子进行了修改。教材的习题部分对于复习和巩固所学内容是非常重要的,每章精心挑选适量增加了课后的习题。

作者从事计算机教学工作多年,多次完成基于 ARM 微处理器系列的科研项目的开发和设计工作。所以在编写本教材的过程中,精选内容、力求符合从事嵌入式系统开发和设计的初学者的特点,做到概念清晰、理论联系实际。在叙述方法上,则力求由浅入深、通俗易懂便于学习,以便使读者能在较短的时间内迅速掌握相关知识,起到事半功倍的作用。

本书适合高等院校相关专业的大学高年级学生和研究生作为专业课教材也可以作为从事嵌入式系统开发和设计人员的参考用书。作者建议本课程课时数为 56 学时(授课课时 32,实验课时 24)。在课堂主要讲授第 1~5 章和第 9 章内容,选取第 6~8 章操作系统的内容,与实验同步进行。为了便于本课程的教学需要,本书另配有多媒体教学课件,需要者与本教材责任编辑联系, E-mail: tianhf@phei.com.cn。

在本书编写的过程中，感谢电子工业出版社的编辑，在他们的大力支持下使本书能够很快出版发行。同样，对本书参考文献中以及引用了相关资料的所有作者深表谢意。

由于嵌入式系统设计的发展非常迅速和普及，嵌入式应用的新技术、新成果不断涌现和更新，书中难免存在错误、疏漏和不妥之处。还希望广大读者能够多加谅解，并及时联系作者，以期在后续版本中进行完善。

编 者
2016 年 8 月

目 录

第 1 章 嵌入式系统概论	1
1.1 系统概述	1
1.1.1 嵌入式系统的定义和特征	1
1.1.2 嵌入式系统的应用领域及发展趋势	2
1.2 嵌入式系统组织结构	4
1.2.1 嵌入式系统总体架构	4
1.2.2 嵌入式硬件系统结构	4
1.2.3 嵌入式硬件系统中采用的先进技术	11
1.3 嵌入式软件系统	14
1.3.1 系统简介	14
1.3.2 嵌入式操作系统	17
1.3.3 常用的嵌入式操作系统	22
习题与思考题一	25
第 2 章 嵌入式微处理器	28
2.1 概述	28
2.1.1 ARM 体系结构版本、命名规则	29
2.1.2 嵌入式微处理器系列产品	32
2.2 ARM 微处理器组成结构与工作原理	35
2.2.1 微处理器结构组成	35
2.2.2 微处理器的工作状态与工作模式	37
2.2.3 微处理器的寄存器组织	39
2.2.4 异常中断模式处理过程	43
2.3 ARM 存储器存储方式与映射机制	46
2.4 常用的嵌入式处理器简介	49
2.4.1 ARM9 系列 S3C2440 微处理器	49
2.4.2 ARM 系列 Cortex 处理器	61
习题与思考题二	67
第 3 章 嵌入式系统开发环境与开发技术	70
3.1 概述	70
3.2 嵌入式系统开发技术	71
3.2.1 集成开发环境	72
3.2.2 系统软件开发工具	83
3.3 嵌入式系统调试技术	88
3.3.1 ARM 交叉调试及固化技术	88
3.3.2 嵌入式软件的测试	90

3.4 嵌入式系统的引导程序	91
3.4.1 BootLoader 的职能	92
3.4.2 BootLoader 的操作模式	93
3.4.3 BootLoader 的程序结构与调试	94
3.4.4 BootLoader 的应用实例	95
习题与思考题三	102
第4章 ARM 指令集系统与程序设计	103
4.1 ARM 指令集及应用	103
4.1.1 ARM 指令简介	103
4.1.2 ARM 指令集的编码格式	104
4.1.3 ARM 指令的数据寻址方式	105
4.1.4 ARM 指令的分类说明及应用	106
4.2 Thumb 指令集及应用	110
4.2.1 Thumb 指令简介	110
4.2.2 Thumb-2 指令集简介	111
4.3 ARM 汇编语言及程序设计	111
4.3.1 ARM 汇编语言	111
4.3.2 ARM 汇编语言程序设计	114
4.4 嵌入式 C 语言编程简介	118
4.5 嵌入式 C 与 ARM 汇编语言混合编程	120
4.5.1 内嵌汇编	120
4.5.2 汇编程序中访问 C 程序变量	122
4.5.3 C 程序和汇编程序之间的相互调用	123
习题与思考题四	125
第5章 嵌入式系统设计与应用	128
5.1 系统设计原则与设计步骤	128
5.2 系统核心电路设计	131
5.2.1 处理器芯片的选型	131
5.2.2 电源管理设计	131
5.2.3 存储系统设计	132
5.3 系统接口电路设计与应用	136
5.3.1 通用接口 GPIO	136
5.3.2 系统异常中断处理方式	139
5.3.3 A/D 转换接口	142
5.3.4 数字音频设备接口	146
5.4 人机交互设备接口设计与应用	147
5.4.1 键盘接口	147
5.4.2 显示器接口	147
5.4.3 触摸屏接口	153
5.5 串行数据通信接口设计与应用	159

5.5.1	串行通信原理	159
5.5.2	串行通信接口设计与应用	163
5.6	无线通信接口设计与应用	172
5.6.1	蓝牙通信技术	173
5.6.2	ZigBee 通信技术	175
5.6.3	无线局域网 Wi-Fi 技术	177
5.6.4	第 2、3、4 和 5 代通信技术简介	178
5.7	卫星定位系统	181
	习题与思考题五	186
第 6 章	μ C/OS-II 操作系统及应用	188
6.1	概述	188
6.2	μ C/OS-II 系统	191
6.2.1	μ C/OS-II 内核结构	192
6.2.2	μ C/OS-II 内核源代码解析	192
6.2.3	μ C/OS-II 任务及其创建	195
6.2.4	μ C/OS-II 任务状态及其调度	196
6.3	μ C/OS-II 系统移植	197
6.3.1	μ C/OS-II 移植条件	197
6.3.2	μ C/OS-II 的移植步骤	198
6.4	基于 μ C/OS-II 的应用开发	204
6.4.1	应用程序结构的建立	204
6.4.2	μ C/OS-II 的 API	205
6.4.3	绘图函数及应用	206
	习题与思考题六	214
第 7 章	嵌入式 Linux 操作系统及应用	215
7.1	嵌入式 Linux 操作系统概述	215
7.2	嵌入式 Linux 内核及其工作原理	217
7.2.1	嵌入式 Linux 内核	217
7.2.2	嵌入式 Linux 启动过程	220
7.2.3	嵌入式 linux 文件系统	221
7.3	嵌入式 Linux 内核定制与编译	224
7.3.1	交叉编译环境	224
7.3.2	内核定制及裁剪说明	225
7.3.3	编译内核	243
7.3.4	制作文件系统映像	243
7.4	嵌入式 Linux 驱动及应用开发	244
7.4.1	设备驱动程序简介	244
7.4.2	驱动程序结构	245
7.4.3	设备注册和初始化	246
7.4.4	驱动程序案例	247

习题与思考题七	249
第 8 章 Android 操作系统及应用	250
8.1 Android 操作系统概述	250
8.2 Android 操作系统的体系结构	250
8.3 Android 开发工具	252
8.3.1 基于 Eclipse + ADT 的开发环境搭建	252
8.3.2 基于 Android Studio 的环境搭建	255
8.4 基于 Android 操作系统的应用开发	256
习题与思考题八	262
第 9 章 嵌入式系统开发应用实例	263
9.1 概述	263
9.2 硬件系统设计	264
9.2.1 核心板结构组成	265
9.2.2 系统平台主板结构组成	266
9.3 软件系统设计	273
9.3.1 系统软件需求分析与设计	273
9.3.2 用户应用程序设计	273
9.3.3 综合实训平台应用实例简介	279
参考文献	281

嵌入式系统概论

嵌入式系统将微处理器直接嵌入到应用系统之中，融合了计算机软/硬件技术、通信技术和半导体微电子技术，是信息技术的最终产品。本章首先介绍嵌入式系统的定义、特征、应用领域和发展趋势，然后介绍嵌入式硬件系统体系结构原理及在嵌入式系统中采用的先进技术，最后介绍嵌入式系统软件结构、设计流程，以及常用的四种嵌入式操作系统。



1.1 系统概述

随着现代计算机技术的飞速发展，计算机系统逐渐形成了通用计算机系统（如 PC）和嵌入式计算机系统两大分支。通用计算机系统的硬件以标准化形态出现，通过安装不同的软件满足各种不同的要求。嵌入式系统则是根据具体应用对象，采用量体裁衣的方式对其软/硬件进行定制的专用计算机系统。嵌入式系统与 PC 相比区别如下。

- （1）嵌入式系统是专用系统，其功能专一，而 PC 则是通用计算平台。
- （2）嵌入式系统的资源比 PC 少，具有成本、功耗、体积等方面的要求。
- （3）嵌入式软件系统一般采用实时操作系统，其应用软件大多需要进行重新编写，因此软件故障带来的后果会比 PC 大。
- （4）嵌入式系统的开发与设计方面需要在宿主机中装配有专用的开发环境与开发工具。

嵌入式系统是将计算机硬件和软件结合起来构成的一个专门的装置，这个装置可以完成一些特定的功能和任务。由于它可能会工作在一个与外界发生交互并受到时间约束的环境中，所以要求其能够在没有人工干预的情况下独立进行实时监测和控制。另外由于被嵌入对象的体系结构、应用环境要求的不同，各个嵌入式系统可以由各种不同的结构组成。

1.1.1 嵌入式系统的定义和特征

1. 嵌入式系统的定义

到目前为止，嵌入式系统已经有近 50 年的发展历史。第一款嵌入式处理器是 Intel 的 4004，它出现在 1971 年。1981 年世界上出现了第一个商业嵌入式实时内核（VTRX32），内核中包含了许多传统操作系统的特征，如任务管理、任务间通信、同步与相互排斥、中断支持、内存管理等功能。随后，出现了各种嵌入式操作系统，目前已经在全球形成了一个产业。

关于嵌入式系统的定义很多，例如 IEEE（国际电气和电子工程师协会）的定义为嵌入式

系统是“用于控制、监视或者辅助操作机器和设备的装置”（devices used to control, monitor, or assist the operation of equipment, machinery or plants）。国内较权威机构对嵌入式系统的定义是：“以应用为中心，以计算机技术为基础，软/硬件可裁剪，功能、可靠性、成本、体积、功耗严格要求的专用计算机系统”。

嵌入式系统本身是一个相对模糊的定义，手机、MP4、数码相机、机顶盒、媒体播放器和智能仪器、仪表都可以认为是嵌入式系统。总之，嵌入式系统采用“量体裁衣”的方式把所需的计算机功能嵌入到各种应用的设备与装置中。

2. 嵌入式系统的特征

嵌入式系统是将先进的计算机技术、半导体技术和电子技术与各个行业的具体应用相结合后的产物，这一点就决定了它必然是一个技术密集、资金密集、高度分散、不断创新的知识集成的系统。嵌入式系统的重要特征主要包括以下几个方面：

（1）嵌入式系统通常都具有低功耗、集成度高、体积小、高可靠性等特点，它能够把通用计算机中许多由部件完成的任务集成在芯片内部，从而有利于嵌入式系统设计趋于小型化，移动能力也大大增强。

嵌入式系统的个性化很强，其软/硬件的结合是非常紧密的，一般要针对不同的硬件情况进行软件系统的设计。即使在同一品牌、同一系列的产品中也需要根据系统硬件的变化和增减来不断地对软件系统进行修改。一个嵌入式系统通常只能重复执行一个特定的功能，例如一台数码相机永远是数码相机。而通用的台式机系统可以执行各种程序，如电子表、多媒体播放器和游戏，还可以经常加入其他新程序。

（2）实时性强，系统内核小。有些嵌入式系统的系统软件和应用软件没有明显区分，不要求其在功能设计及实现上过于复杂，这不仅利于控制系统成本，同时也利于实现系统安全。嵌入式软件代码要求高质量和高可靠性、实时性。很多嵌入式系统都需要不断地依据所处环境的变化做出反应，而且要实时地得到计算结果，不能延迟。由于嵌入式系统一般是应用于要求系统资源相对有限的场合，所以内核较传统的操作系统要小得多，如 $\mu\text{C}/\text{OS}$ 操作系统，核心内核只有 8.3 KB 左右。

（3）资源较少，可以裁减。由于对成本、体积和功耗有严格要求，使得嵌入式系统的资源（如内存、I/O 接口等）有限，因此对嵌入式系统的硬件和软件都必须高效率地设计，量体裁衣、去除冗余，力争在有限的资源上实现更高的性能。

（4）需要开发环境和调试工具。由于嵌入式系统本身不具备自主开发能力，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安装在宿主机（如 PC）中，进行系统开发时宿主机用于程序的开发，目标机（产品机）作为最后的执行机，研制和开发时需要交替结合进行。

1.1.2 嵌入式系统的应用领域及发展趋势

1. 嵌入式系统的应用领域

嵌入式系统可应用在交通管理、信息家电、家庭智能管理系统、网络及电子商务、环境

监测等方面。在工业和服务领域中,大量嵌入式技术也已经应用于工业控制、数控机床、智能工具和机器人等各个行业,并逐渐改变着传统的工业生产和服务方式。例如,飞机中的电子设备、城市地铁购票系统等都可通过嵌入式系统来实现。嵌入式系统的应用领域如图 1-1 所示。

2. 嵌入式技术的发展趋势

人们对嵌入式系统的要求是经济实惠、可靠、小型化携带方便,同时智能性高(知识推理、模糊查询、识别、感知运动),使人们用起来更习惯。未来嵌入式系统的发展趋势大致如下。

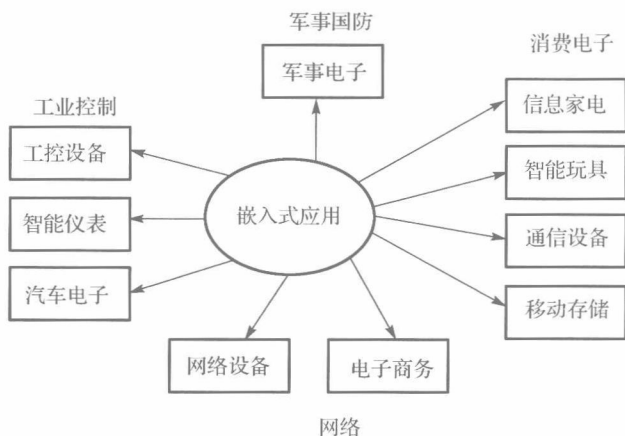


图 1-1 嵌入式系统的应用领域

(1) 新的微处理器不断涌现,嵌入式软件不断更新、完善。为满足市场的需求,嵌入式产品设计者不断研制新产品。这样,就相应提高了对嵌入式软件设计技术的要求。例如,选用最佳的编程模型、不断改进算法和优化编译器性能等,因此不仅需要软件人员有丰富的经验,更需要采用先进的嵌入式软件技术。

(2) 连网成为必然趋势。网络化、信息化的要求随着 Internet 技术的成熟、带宽的提高,功能不再单一,结构更加复杂。为适应嵌入式分布处理结构应用的上网需求,面向未来的嵌入式系统要求配备标准的一种或多种网络通信接口。

(3) 提供精巧的多媒体人机界面。嵌入式设备之所以为亿万用户乐于接受,重要因素之一是自然的人机交互界面。人与信息终端交互多采用以屏幕为中心的多媒体界面实现,如手写文字输入、语音拨号上网、收发电子邮件,以及彩色的图形、图像。目前,一些嵌入式产品在显示屏幕上已实现了多元化输入和三维图像显示发布等功能。

(4) 需要先进、强大的开发工具的支持,嵌入式软件开发要走向标准化。嵌入式开发是一项系统工程,因此要求厂商不仅提供嵌入式软/硬件系统本身,同时还需要提供强大的硬件开发工具和软件包支持。另外,为了合理地调度多任务、利用系统资源、系统函数和专家库函数接口,用户必须自行选配更合理的标准化嵌入式开发平台,这样才能保证程序执行的实时性、可靠性,并减少开发时间和保障软件质量。

1.2 嵌入式系统组织结构

1.2.1 嵌入式系统总体架构

嵌入式系统一般是由硬件系统和软件系统两大部分组成，嵌入式硬件系统包括嵌入式处理器、存储器、I/O 系统和配置必要的外围接口部件，嵌入式软件系统主要包括操作系统和应用软件。嵌入式系统的软/硬件结构框架如图 1-2 所示。

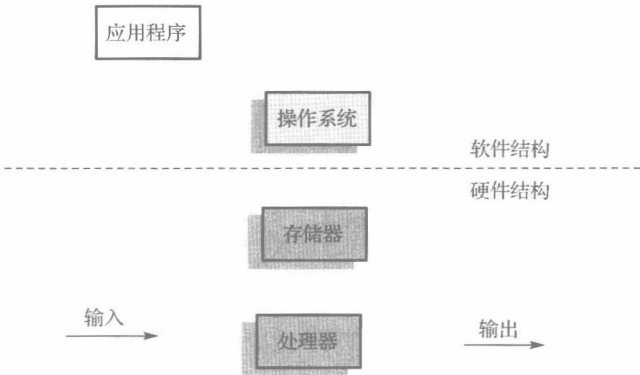


图 1-2 嵌入式系统架构图

1.2.2 嵌入式硬件系统结构

1. 概述

嵌入式硬件系统主要包括处理器、外围核心部件及外部设备三大部分。嵌入式处理器将 PC 中许多由板卡完成的任务集成到芯片内部，从而有利于系统设计小型化、高效率和高可靠性。外围核心部件一般由时钟电路、复位电路、程序存储器、数据存储器和电源模块等部件组成。外部设备一般配有显示器、键盘或触摸屏等设备及相关接口电路。通常，在嵌入式处理器基础上增加电源电路、时钟电路和存储器电路（ROM 和 RAM 等）就构成了一个嵌入式核心控制模块（或称核心板）。在嵌入式软件方面，为了增强系统的可靠性，通常将操作系统和应用程序都固化在程序存储器 ROM 中。典型的嵌入式硬件系统结构如图 1-3 所示。

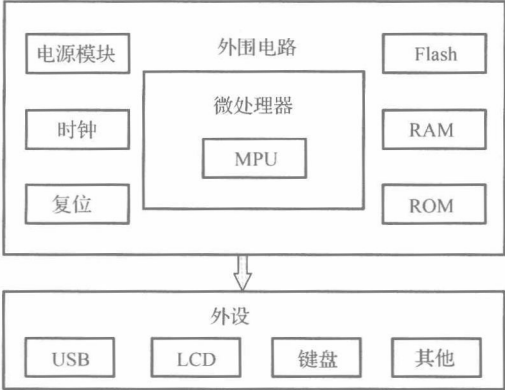


图 1-3 典型嵌入式硬件系统组成

2. 嵌入式处理器

嵌入式处理器是一种为完成特殊应用而设计的专业处理器，因此对嵌入式处理器性能要求也有所不同，如在实时性、功耗、成本、体积等方面。目前，嵌入式处理器的一般分为以下四种类型，如图 1-4 所示。

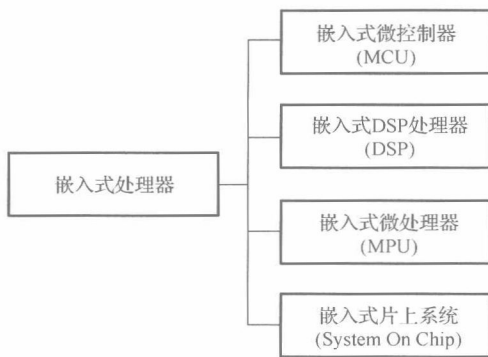


图 1-4 嵌入式处理器的分类

(1) 嵌入式微控制器。微控制器 (Micro Control Unit, MCU) 是在一块芯片上集成了中央处理单元 (CPU)、存储器 (RAM/ROM 等)、定时器/计数器及多种输入输出 (I/O) 接口的比较完整的数字处理系统。MCU 从体系结构到指令系统都是按照嵌入式系统的应用特点专门设计的，它能很好地满足应用系统的嵌入、面向测控对象、现场可靠运行等方面的要求。因此，微控制器有广泛的应用领域。

MCU 在国内也被称为单片机，由于其具有低廉的价格和优良的功能，所以品种和数量众多，并且某些单片机内部集成有 I^2C 、CAN 总线、LCD、A/D 和 D/A 功能，以及众多专用 MCU 的兼容系列。比较有代表性的 8 位微控制器是 Intel 公司 MCS-51 系列和 16 位的 TI 公司 MSP430 系列等。

MCU 的最大特点是单片化，体积小，功耗和成本低。但是，MCU 系统不适合运行操作系统，难以实现复杂的运算及处理功能。MCU 在软件和硬件设计方面的工作量比例基本相同，各约占 50%。

(2) 嵌入式微处理器。嵌入式微处理器 (Micro Processor Unit, MPU) 是由通用计算机中的 CPU 演变而来的。在实际嵌入式应用中，MPU 只保留和嵌入式应用紧密相关的功能部件，去除其他的冗余功能部分，这样就以最低的功耗和资源实现嵌入式应用的特殊要求。其中，代表性的产品如 ARM、Am186/88、Power PC、68000、MIPS 系列等微处理器。

目前，嵌入式系统的主流是以 32 位嵌入式微处理器为核心的硬件设计和基于实时操作系统 (RTOS) 的软件设计，并强调基于平台的设计和软硬件协同设计。MPU 系统设计的工作量主要是软件设计，其中软件设计约占 70% 的工作量，硬件约占 30% 工作量。在本教材中，MPU 将作为主要处理器来介绍。

(3) 嵌入式数字信号处理器。数字信号处理器 (Digital Signal Processor, DSP) 是专门用于信号处理方面的处理器，其在系统结构和指令算法方面进行了特殊设计，如在需要进行数字滤波、FFT、频谱分析等运算的仪器设备上，DSP 就获得了大规模的应用。

DSP 的理论算法在 20 世纪 70 年代就已经出现, 1982 年诞生了世界上首枚 DSP 芯片。DSP 一般可以用于射频、音频和视频的处理, 某些对实时性、计算强度要求较高的场合也可使用 DSP。随着 DSP 的运算速度进一步提高, 应用领域也从上述范围扩大到了通信和计算机方面。例如, 各种带有智能逻辑的消费产品、生物信息识别终端、带加密算法的键盘、实时语音压缩和解压系统、虚拟现实显示等。

DSP 处理器对系统结构和指令进行了特殊设计, 使其适合执行 DSP 算法, 编译效率较高, 指令执行速度也很快。DSP 处理器经过单片化、EMC 改造、增加片上外设, 已成为嵌入式 DSP 处理器, 如 TI 公司的 TMS320C2000/C5000/6000 系列等属于此范畴。

(4) 嵌入式片上系统。片上系统 (System on Chip, SoC) 技术始于 20 世纪 90 年代中期, 随着半导体工艺技术的发展, IC 设计者能够将越来越复杂的功能集成到单硅片上, SoC 正是在集成电路 (IC) 向集成系统 (IS) 转变的大方向下产生的。片上系统的具体定义为: SoC 是一个具备特定功能、服务于特定市场的软件和集成电路的混合体。它采用可编程逻辑技术把整个系统放到一块硅片上, 也称作可编程片上系统。这样在单个芯片上集成一个完整的系统, 一般包括系统级芯片控制逻辑模块、MCU/MPU 内核模块、DSP 模块、嵌入的存储器模块和外部进行通信的接口模块、含有 ADC/DAC 的模拟前端模块、电源提供和功耗管理等模块。SoC 由单个芯片实现整个系统的主要逻辑功能, 又具备软/硬件在系统可编程的功能。SoC 是追求产品系统最大包容的集成器件, 其最大的特点是成功实现了软/硬件无缝结合, 可以直接在处理器片内嵌入操作系统的代码模块。

例如, TI 公司生产的 CC2530 芯片就是一个 SoC, 其内部结合了 RF 收发器 (用于 2.4 GHz IEEE 802.15.4、ZigBee 应用)、增强型 8051 MCU、32/64/128/256 KB 可编程闪存、8 KB RAM 等功能部件。CC2530 具有不同的运行模式, 使得它尤其适应超低功耗要求的系统。目前, SoC 在声音、图像、影视、网络及系统逻辑等应用领域中发挥了重要作用。

3. 存储体系和存储层次结构

(1) 存储体系。在目前应用的嵌入式处理器存储体系结构中, 通常采用冯·诺依曼结构和哈佛体系结构两种形式。

① 冯·诺依曼体系结构。采用冯·诺依曼体系结构的计算机系统一般是由中央处理单元 (CPU)、主存储器和输入输出设备组成。主存储器存储全部的数据和指令, 并且可以根据所给的地址对其进行读、写操作, 主存储器只有在取指令周期才能取出机器指令, CPU 通过数据总线与存储器交换数据。

冯·诺依曼体系结构系统内部的数据与指令都存储在同一存储空间中, 程序指令存储地址和数据存储地址指向同一个存储器的不同物理位置。系统采用单一的地址及数据总线, 程序指令和数据的宽度相同, 程序计数器是 CPU 内部指示指令和数据的存储位置的寄存器。例如, 基于 ARM7 的微处理器一般采用冯·诺依曼体系结构。冯·诺依曼体系结构模型如图 1-5 所示。

② 哈佛体系结构。采用哈佛体系结构的计算机是将主存储器分为两个部分, 一部分存放指令, 另一部分存放数据, 它们各自拥有独立的地址空间和访存指令。其中, 程序计数器 PC 只指向程序存储器, 数据存储器指针指向数据存储器。采用这种结构形式, 即使数据总线被

占用，CPU 也可以继续从程序内存中取指令执行。这样在 CPU 的操作和部件之间引入了某种并行度，从而可以提高系统的效率。独立的程序存储器和数据存储器为数字处理提供了较快的速度，让两个存储器有不同的端口，可提供较大的存储器带宽。因此，大部分嵌入式微处理器和数字信号处理器 DSP 中常采用这种结构方式。哈佛体系结构图如图 1-6 所示。

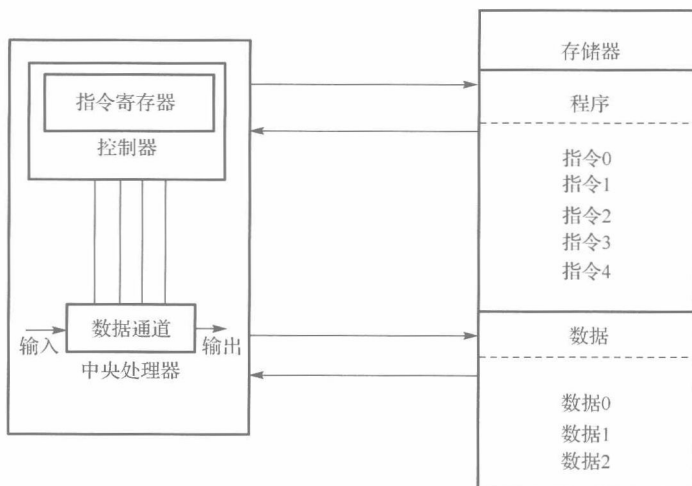


图 1-5 冯·诺依曼体系结构模型图

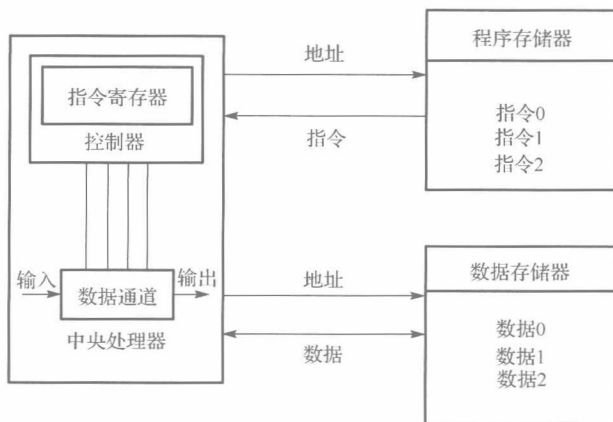


图 1-6 哈佛体系结构图

在目前应用的嵌入式处理器 Cache 中，其结构组成成分同样分为两类：一类是数据同指令都放在同一个 Cache 中，称为统一化结构 Cache；另一类是数据和指令分别放在两个独立的 Cache 中，称为哈佛结构 Cache，也称为分离型 Cache。

(2) 存储层次结构。目前，应用计算机中的各种存储器不能同时满足存取速度快、存储容量大和成本低的要求，所以在计算机中必须有速度由慢到快、容量由大到小的多级层次存储器，以最优的控制调度算法和合理的成本，构成具有性能可接受的存储系统。因此，嵌入式存储系统同样将存储层次分为高速缓冲区（Cache）、内部存储器（简称内存或称主存）和外部存储器（简称外存），如图 1-7 所示。

高速缓存区采用了一种小型、快速的静态随机存储器 SRAM，它保存了部分主存储器的

内容。Cache 用来改善主存储器与处理器的速度匹配问题，可减少微处理器访问内存存储器花费的访问时间。内部存储器一般采用存储密度较大的同步动态存储器 SDRAM，用来存放即将要被微处理器执行的程序和数据。嵌入式系统中的程序存储器一般使用闪速存储器 FlashROM，用来存放为不同的嵌入式系统编写的程序和常数数据。外部存储器可以根据实际需要进行配置，如采用 SD 卡和移动硬盘等。

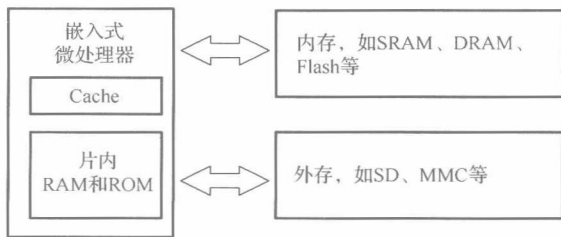


图 1-7 嵌入式存储系统

① 高速缓冲区 (Cache) 的工作机制。Cache 存储器介于 CPU 和内存之间, 工作速度数倍于内存的存储速度, 其全部功能由硬件来实现, 内部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。在需要进行数据访存操作时, 微处理器尽可能地从 Cache 中读取数据, 而不是从主存中读取。采用 Cache 方式可减小内存对微处理器内核造成的存储器访存时间, 提高微处理器和内存之间的数据传输速率, 使处理速度更快、实时性更强。

在 Cache 存储结构中, Cache 和内存存储器都被划分成相同大小的存储块(或页),因此内存地址可用存储块号 m 和块内地址 b 两部分来组成, Cache 的地址也可用存储块号 C 和块内地址 b 两部分来组成。Cache 的工作原理如图 1-8 所示。

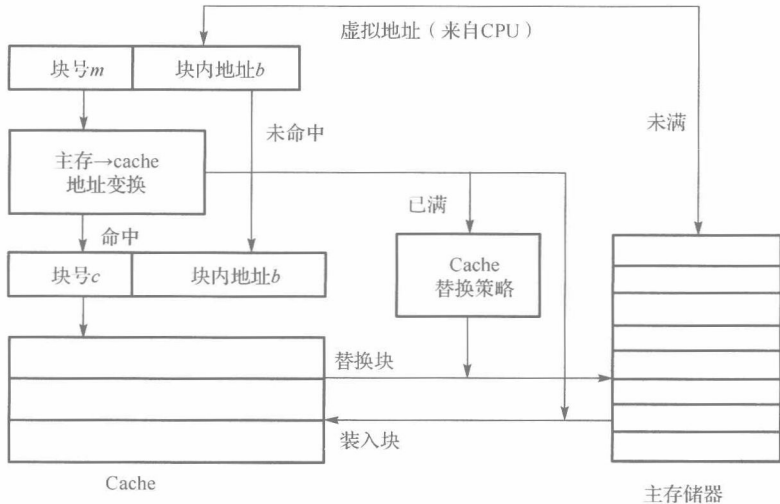


图 1-8 高速缓存区的工作原理

当 CPU 要访问 Cache 时, 首先由 CPU 送来主存地址, 放到内存地址寄存器中。再经过地址映像与地址变换过程。如果变换成功 (称为命中), 则通过地址变换部件把内存地址中的存储块号 m 变换成 Cache 的存储块号 c , 并放到 Cache 地址寄存器中, 同时将内存地址中的块内地址 b 直接作为 Cache 的块内地址 b 装入到 Cache 地址寄存器中。然后用得到的 Cache