

“十三五”普通高等教育规划教材

嵌入式系统

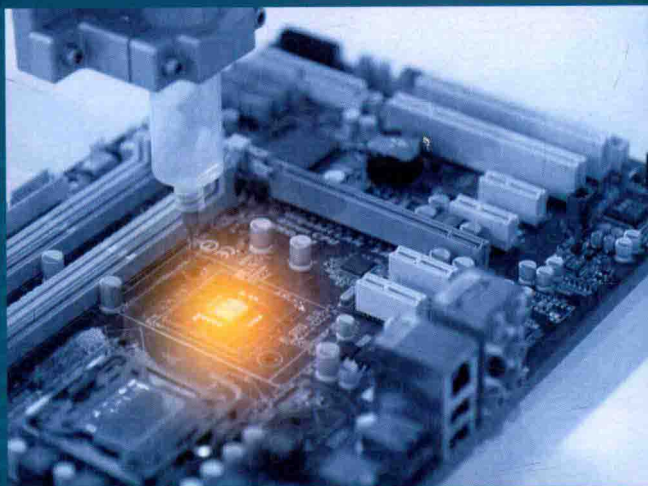
原理与应用

第**2**版

魏权利 李丽萍 林粤伟 编著

提供电子课件、实验项目代码

<http://www.cmpedu.com>



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



“十三五”普通高等教育规划教材

嵌入式系统原理与应用

第2版

魏权利 李丽萍 林粤伟 编著



机械工业出版社

本书分为13章,内容包括:嵌入式系统概述;ARM微处理器体系结构;ARM微处理器指令系统;微处理器ARM程序设计;微处理器S3C2410A体系结构;嵌入式系统应用产品开发平台;嵌入式存储器系统及扩展接口电路;通用I/O端口和中断系统;微处理器S3C2410A的定时器/计数器;A-D转换、LCD触摸屏与液晶显示器;嵌入式系统I/O总线接口;嵌入式应用程序设计举例;ARM9实验项目及内容。

本书翔实地介绍了ARM系统在启动过程中涉及的硬件原理以及通过软件进行配置的程序。全书内容简练、概念清晰、逻辑性强、深入浅出,具有很强的专业性、技术性与实用性。

本书可以作为高等院校电子信息工程、自动化、电气工程等专业的教材,也可以作为广大嵌入式开发工程师技术人员的参考用书。

本书配套授课电子课件,需要的教师可登录 www.cmpedu.com 免费注册,审核通过后下载,或联系编辑索取(QQ: 2850823885,电话:010-88379739)。

图书在版编目(CIP)数据

嵌入式系统原理与应用/魏权利,李丽萍,林粤伟编著.—2版.—北京:机械工业出版社,2018.5

“十三五”普通高等教育规划教材

ISBN 978-7-111-60518-8

I. ①嵌… II. ①魏… ②李… ③林… III. ①微型计算机—系统设计—高等学校—教材 IV. ①TP360.21

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第161821号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码 100037)

责任编辑:郝建伟 责任校对:张艳霞

责任印制:李昂

北京宝昌彩色印刷有限公司印刷

2018年8月第2版·第1次印刷

184mm×260mm·20.25印张·496千字

0001-3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-60518-8

定价:59.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线:(010)88379833

读者购书热线:(010)88379649

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

金书网:www.golden-book.com

前 言

目前,随着计算机网络应用范围的不断扩展,中国“互联网+”时代的到来,中国制造2025战略的倡导,无线网络技术的广泛应用,几乎所有的机械制造设备、通信设备、控制设备等都将使用32位的ARM处理器嵌入其中作为它们的控制中心。32位ARM处理器的性能和CPU的处理速度的发展日新月异,而低性能、低速度的嵌入式单片机已无法承担这些外围接口繁多、响应速度极快的处理任务。而且随着开发平台和开发软件的不断完善,开发的难度将会下降,在中国制造2025战略思想的指导下,将会有越来越多的科技人员投入到嵌入式系统产品的研发中,使我国科技人员嵌入式应用系统研发的水平和国际地位不断提高,从而研制出具有世界水准或超越世界水平的信息产品。

无论是进行嵌入式应用系统的裸机开发还是基于操作系统的开发,目前都很难找到一本能全面、系统地介绍嵌入式系统启动时或启动引导Bootloader所涉及的所有硬件电路工作原理以及程序设计。本书的撰写就是为了弥补这一缺憾,并且可在本书搭建的实验平台上实验,这将大大提高广大学生的实际操作能力和学习兴趣。全书共分13章,各章的内容介绍如下。

第1章介绍了嵌入式系统的概念和组成,嵌入式微处理器的结构与类型,精简指令集计算机RISC的特点和流水线技术,最后叙述了嵌入式应用系统的开发流程。

第2章介绍了ARM处理器的结构、特点和应用选型,ARM的总线系统与接口,重点讲述了ARM9体系结构的存储器组织、ARM9微处理器的工作状态与运行模式、ARM9体系结构的寄存器组织、ARM9微处理器的异常。

第3章介绍ARM9微处理器的指令格式与特点、寻址方式,分类讲述ARM9指令的功能,并给出了大量的应用示例。

第4章主要讲述ARM伪指令、ARM汇编语言程序设计、ARM汇编语言与C语言的混合编程以及子程序或函数之间的相互调用。

第5章主要讲述微处理器S3C2410A的体系结构、内部组成、存储器控制寄存器的特性与空间分布、复位电路、电源电路、时钟电路与电源管理等。

第6章主要讲述了ARM9的软、硬件开发平台以及在实际应用中的配置。

第7章介绍了嵌入式存储器系统结构组成、MMU的功能与工作原理,重点讲述了存储器控制寄存器的功能及其实际应用中的设置编程、使用8位/16位/32位数据线存储器芯片扩展设计8位/16位/32位ARM总线系统的电路。

第8章简述了S3C2410A的I/O端口的功能,特殊功能寄存器的作用与配置。详细讲述了ARM9的中断系统以及实际应用的编程过程。

第9章讲述了S3C2410A的定时器/计数器的工作原理,重点介绍了看门狗定时器、RTC实时时钟,Timer 0~Timer 4定时/计数器的工作原理、功能寄存器以及它们的设置与应用编程。

第10章详细地介绍了A-D转换器、触摸屏、LCD的工作原理,功能寄存器及其编程。特别阐述了TFT-LCD的应用程序设计。

第11章讲述了S3C2410A的UART、I²C、SPI总线的工作原理和功能寄存器,并结合实际

使用的总线接口芯片进行了程序设计。

第12章为嵌入式应用程序设计举例，详细地介绍了S3C2410A启动程序的设计、数字温度传感器DS18B20的编程原理等，在此基础上完成了实时温度监测系统的设计。

第13章列出了实验项目与实验内容，通过实验可加深对课程内容的理解。

本书计划需要48~64学时，教学过程中可以根据实际情况进行适当的调整。

本书主要由魏权利教授编写，并对全书的内容进行了审定。第9章由林粤伟博士编写。高级实验师李丽萍参与了本书的编写工作。第12章的实际应用程序在嵌入式实验开发平台上进行了调试，完成了整个程序的设计功能，该部分工作由乔方昭完成。

本书是作者从事30多年嵌入式系统应用研发和教学的工作总结和经验积累，本书的修订也是对作者的鼓舞。机械工业出版社为本书的修订做了大量细致而周到的工作，在此表示由衷的感谢。

由于作者的学识、经验和水平有限，书中难免有错误和疏漏之处，欢迎广大读者批评指正。

编者

目 录

前言

第 1 章 嵌入式系统概述	1	2.3.2 ARM 的 JTAG 调试接口	15
1.1 嵌入式系统的概念与组成	1	2.3.3 ARM 的协处理器接口	16
1.1.1 嵌入式系统的定义	1	2.4 ARM9 体系结构的存储器组织	17
1.1.2 嵌入式系统的应用过程和发展趋势	1	2.4.1 ARM 体系结构的存储器空间	17
1.1.3 嵌入式系统的组成	2	2.4.2 ARM9 中的大端存储与小端存储	17
1.2 嵌入式微处理器的结构与类型	3	2.4.3 I/O 端口的访问方式	18
1.2.1 嵌入式微控制器	3	2.5 ARM9 微处理器的工作状态与运行模式	19
1.2.2 嵌入式 DSP 处理器	4	2.5.1 ARM9 微处理器的工作状态	19
1.2.3 嵌入式微处理器	4	2.5.2 ARM9 微处理器的运行模式	19
1.2.4 嵌入式片上系统	5	2.6 ARM9 体系结构的寄存器组织	20
1.3 计算机组成、体系结构与嵌入式处理器	5	2.6.1 通用寄存器	21
1.3.1 冯·诺依曼结构与哈佛结构	6	2.6.2 程序状态寄存器	22
1.3.2 精简指令集计算机 (RISC)	6	2.7 ARM9 微处理器的异常	24
1.3.3 流水线计算机	7	2.7.1 ARM9 微处理器异常的概念	24
1.3.4 嵌入式微处理器的信息存储方式	7	2.7.2 ARM 体系结构的异常类型	24
1.4 嵌入式应用系统的开发流程	9	2.7.3 各种异常类型的含义	25
习题	10	2.7.4 异常的响应过程	26
第 2 章 ARM 微处理器体系结构	11	2.7.5 应用程序中的异常处理	27
2.1 ARM 微处理器的体系结构与特点	11	习题	27
2.1.1 ARM 微处理器体系的结构	11	第 3 章 ARM 微处理器指令系统	28
2.1.2 ARM 微处理器体系的特点	11	3.1 ARM9 的指令格式	28
2.2 ARM 微处理器系列介绍及应用选型	12	3.1.1 ARM9 微处理器的指令格式与特点	28
2.2.1 ARM7 微处理器系列	12	3.1.2 指令执行的条件码	30
2.2.2 ARM9 微处理器系列	13	3.2 ARM9 微处理器指令的寻址方式与应用	31
2.2.3 ARM 更为高级的微处理器系列	13	3.2.1 立即数寻址方式与应用示例	31
2.2.4 ARM 微处理器的应用选型	13	3.2.2 寄存器寻址方式与应用示例	32
2.3 ARM 的总线系统与接口	14	3.2.3 寄存器偏移寻址方式与应用示例	32
2.3.1 ARM 的总线系统	15	3.2.4 寄存器间接寻址方式与应用示例	34
		3.2.5 基址+变址寻址方式与应用示例	34

3.2.6	多寄存器寻址方式与应用示例	35	关键字	79
3.2.7	堆栈寻址方式与应用示例	35	4.4 ARM 混合编程综合应用举例	80
3.2.8	块复制寻址方式与应用示例	36	习题	82
3.2.9	相对寻址方式与应用示例	37	第5章 微处理器 S3C2410A 体系结构	83
3.3	ARM9 指令系统与应用	37	5.1 微处理器 S3C2410A 介绍	83
3.3.1	ARM 数据处理指令与应用示例	37	5.1.1 微处理器 S3C2410A 的体系结构	83
3.3.2	寄存器装载及存储指令与应用示例	43	5.1.2 微处理器 S3C2410A 的内部结构	83
3.3.3	ARM 跳转指令与应用示例	47	5.1.3 微处理器 S3C2410A 的技术特点	84
3.3.4	ARM 杂项指令与应用示例	49	5.2 微处理器 S3C2410A 存储器 控制器特性与空间分布	86
3.3.5	杂项指令在 Bootloader 中配置各种 异常栈顶指针综合应用示例	52	5.2.1 微处理器 S3C2410A 存储器 控制器特性	86
3.3.6	ARM 协处理器指令与应用示例	53	5.2.2 微处理器 S3C2410A 存储器 空间分布	87
3.3.7	ARM 伪指令与应用示例	54	5.3 微处理器 S3C2410A 时钟电路与时钟 频率管理	88
习题		56	5.3.1 微处理器 S3C2410A 外部 时钟电路	88
第4章 微处理器 ARM 程序设计		58	5.3.2 微处理器 S3C2410A 锁相环 (PLL)	89
4.1	ARM 汇编伪指令	58	5.3.3 微处理器 S3C2410A 时钟 分频控制	90
4.1.1	数据常量定义伪指令	58	5.3.4 微处理器 S3C2410A 时钟频率 管理与应用示例	91
4.1.2	数据变量定义伪指令	59	5.3.5 S3C2410A 工作频率的设置与 分频编程示例	93
4.1.3	内存分配伪指令	60	5.4 微处理器 S3C2410A 复位电路与 电源电路	94
4.1.4	汇编控制伪指令	62	5.4.1 微处理器 S3C2410A 复位电路	95
4.1.5	汇编程序中常用伪指令	64	5.4.2 微处理器 S3C2410A 电源电路	96
4.1.6	汇编语言中的运算符与表达式	67	5.5 微处理器 S3C2410A 电源 功耗管理	96
4.1.7	Linux 操作系统中 GNU 开发环境下的 伪指令	69	5.5.1 电源功耗管理模式及时钟 功率分配	97
4.2	ARM 汇编语言程序设计	71	5.5.2 慢速控制寄存器 (CLKSLOW) 的属性 及其位功能	97
4.2.1	ARM 汇编中的源文件类型	71	5.5.3 电源功耗管理状态转换图	98
4.2.2	ARM 汇编语言的语句格式	72	习题	99
4.2.3	ARM 汇编语言的程序结构	72		
4.3	ARM 汇编语言与 C 语言 混合编程	74		
4.3.1	基本的 ATPCS	75		
4.3.2	汇编语言程序调用 C 语言程序	76		
4.3.3	C 语言程序中调用汇编语言程序	76		
4.3.4	C 语言程序中内嵌汇编语言程序	77		
4.3.5	在汇编程序中访问 C 语言 程序变量	78		
4.3.6	嵌入式 C 语言中的几个特殊			

第6章 嵌入式系统应用产品	
开发平台	100
6.1 硬件实验开发平台	100
6.1.1 FL2440 开发板硬件资源简介	100
6.1.2 PC 与开发板的硬件连接	101
6.2 软件开发平台	101
6.2.1 交叉开发环境简介	101
6.2.2 ADS1.2 集成开发环境简介	101
6.2.3 编写应用程序需要使用的 头文件	103
6.2.4 CodeWarrior IDE 集成开发 环境的使用	104
6.2.5 AXD 调试器的使用	108
习题	113
第7章 嵌入式存储器系统及扩展接口	
电路	114
7.1 嵌入式存储器系统结构组成	114
7.1.1 嵌入式存储器的层次结构 及特点	114
7.1.2 ARM9 高速缓冲存储器 (Cache)	115
7.1.3 S3C2410A 存储器管理 单元 (MMU)	115
7.1.4 S3C2410A 主存储器分布以及 使用的存储器类型	117
7.2 存储器控制寄存器	119
7.2.1 存储器控制寄存器介绍	119
7.2.2 主存储器芯片综合配置编程 示例	123
7.3 8 位/16 位/32 位内存存储器芯片 扩展设计	124
7.3.1 8 位存储器芯片扩展设计	124
7.3.2 16 位存储器芯片扩展设计	126
7.4 Bank0 闪存 Nor Flash 接口设计	128
7.4.1 Nor Flash 与 Nand Flash 的区别	128
7.4.2 Nor Flash 实用电路设计	129
7.5 Bank0 闪存 Nand Flash 存储器 接口设计	130
7.5.1 Nand Flash 的结构组成	131
7.5.2 Nand Flash 的引导、工作模式	133
7.5.3 Nand Flash 控制功能寄存器	134
7.5.4 Nand Flash 的实用电路与 程序设计	136
7.6 SDRAM 存储器的电路设计	138
习题	140
第8章 通用 I/O 端口和中断系统	141
8.1 S3C2410A 的通用 I/O 端口	141
8.1.1 I/O 端口的功能	141
8.1.2 通用 I/O 端口功能寄存器	145
8.1.3 其他端口功能寄存器	150
8.1.4 通用 I/O 端口程序综合 设计示例	152
8.2 微处理器 S3C2410A 中断系统 程序设计	154
8.2.1 S3C2410A 中断系统的树型结构	154
8.2.2 S3C2410A 的中断源	156
8.2.3 S3C2410A 中断请求过程	156
8.2.4 ARM 中断控制寄存器	157
8.2.5 子中断控制寄存器	162
8.2.6 外部中断功能寄存器	164
8.3 S3C2410A 中断服务程序的 设计	167
8.3.1 S3C2410A 中断服务程序实现 框架之一: 普通实现方式	167
8.3.2 S3C2410A 中断服务程序实现框架 之二: 基于中断向量的实现方式	169
8.3.3 子中断服务程序的实现框架	173
8.3.4 外部中断服务程序的实现框架	174
8.3.5 中断服务程序综合应用示例	174
习题	176
第9章 微处理器 S3C2410A 的定时器/ 计数器	177
9.1 S3C2410A 定时器/计数器原理	177
9.2 看门狗定时器 (WATCHDOG)	178
9.2.1 看门狗定时器的工作原理	178

9.2.2 看门狗特殊功能控制寄存器	178	10.3.2 S3C2410A LCD 控制器的特性 ...	209
9.2.3 看门狗定时器应用编程示例	180	10.3.3 S3C2410A LCD 控制器的内部结构和 显示数据格式	210
9.3 具有脉宽调制 (PWM) 的定时器 (Timer)	181	10.3.4 S3C2410A LCD 功能控制 寄存器	212
9.3.1 定时器 Timer 概述	181	10.3.5 TFT-LCD 控制器操作	220
9.3.2 Timer 部件的操作	181	10.3.6 LCD 控制寄存器的配置	225
9.3.3 Timer 特殊功能控制寄存器	185	10.3.7 S3C2410A 液晶显示器 LCD 程序设计	225
9.3.4 定时器 Timer 编程示例	187	习题	235
9.4 实时时钟 (RTC)	188	第 11 章 嵌入式系统 I/O 总线接口	236
9.4.1 RTC 概述	189	11.1 串行通信接口原理与 S3C2410A 的 UART 编程	236
9.4.2 RTC 功能寄存器	190	11.1.1 数字通信的分类与特点	236
9.4.3 RTC 应用程序设计	192	11.1.2 串行通信标准	237
习题	194	11.1.3 S3C2410A 的 UART 简介 与结构	240
第 10 章 A-D 转换、LCD 触摸屏与液晶 显示器	195	11.1.4 S3C2410A 的 UART 操作	242
10.1 S3C2410A 的模-数转换器与 程序设计	195	11.1.5 S3C2410A 的 UART 功能 寄存器	243
10.1.1 ADC 的分类与工作原理	195	11.1.6 S3C2410A 的 UART 编程示例 ...	248
10.1.2 ADC 的主要技术参数	198	11.2 I ² C 接口原理与编程	255
10.1.3 S3C2410A 的 ADC 主要性能指标	199	11.2.1 I ² C 总线接口原理	255
10.1.4 S3C2410A 的 ADC 和触摸屏 接口电路	199	11.2.2 I ² C 的总线协议	256
10.1.5 S3C2410A 中 ADC 的功能 寄存器	200	11.2.3 S3C2410A 的 I ² C 接口	257
10.1.6 S3C2410A 的 ADC 程序设计	202	11.2.4 I ² C 总线专用寄存器	259
10.2 LCD 触摸屏原理与程序设计	203	11.2.5 S3C2410A 处理器 I ² C 总线与 E ² PROM 芯片 AT24C02 应用编程示例	261
10.2.1 LCD 电阻式触摸屏的 工作原理	203	11.2.6 仿真 I ² C 总线的 MCS-51 单片机 实现程序	266
10.2.2 S3C2410A 与 LCD 触摸屏 接口电路	204	11.3 SPI 接口原理与编程	267
10.2.3 使用触摸屏的配置过程	204	11.3.1 SPI 接口原理	267
10.2.4 触摸屏编程接口模式	205	11.3.2 S3C2410A 的 SPI 接口电路	269
10.2.5 S3C2410A 的 LCD 触摸屏 程序设计	206	11.3.3 SPI 功能寄存器	271
10.3 液晶显示器 (LCD) 与程序 设计	208	11.3.4 SPI 总线接口编程流程	274
10.3.1 LCD 的显示原理与分类	208	11.3.5 S3C2410A 的 SPI 与内置 E ² PROM 的 看门狗芯片 X5045 应用 编程示例	274

习题.....	280	习题.....	301
第 12 章 嵌入式应用程序设计举例	282	第 13 章 ARM9 实验项目及内容	302
12.1 嵌入式系统启动引导程序.....	282	13.1 汇编语言实验项目及内容.....	302
12.1.1 启动引导程序的作用	282	13.1.1 熟悉开发环境与汇编编程	302
12.1.2 启动引导程序的任务	283	13.1.2 ARM 乘法指令实验	303
12.1.3 引导程序的启动流程	283	13.1.3 寄存器装载及存储汇编 指令实验	304
12.2 系统启动引导程序的设计.....	284	13.1.4 算术加/减法汇编指令实验	305
12.2.1 外部文件的引用	284	13.1.5 ARM 微处理器工作模式与堆栈 指针设置实验	307
12.2.2 常量的定义	285	13.2 C 语言实验项目及内容	309
12.2.3 S3C2410A 的异常处理	287	13.2.1 ARM C/C++语言实验 1	309
12.2.4 主体程序	289	13.2.2 ARM C/C++语言实验 2	310
12.2.5 调用 C 语言程序	292	13.3 混合编程实验项目及内容.....	310
12.3 应用程序 Main 函数的实现	293	13.3.1 汇编-C 语言数据块复制 编程实验	311
12.3.1 应用程序中的文件引用和 变量定义	293	13.3.2 C-汇编语言整型 4 参数加法 编程实验	311
12.3.2 实时时钟 RTC 主要函数代码.....	293	13.3.3 汇编-C 语言 BCD 码编程实验	312
12.3.3 触摸屏主要函数代码	294	13.4 FL2440 开发板实验	313
12.3.4 数字温度传感器 DS18B20 主要函数设计	295	参考文献	314
12.3.5 LCD 主要函数设计	299		
12.3.6 应用系统测试函数的设计	301		

第1章 嵌入式系统概述

嵌入式系统是后 PC 时代被广泛应用的计算机系统。在人们的日常生活、学习和工作中所接触的仪器或设备中，都能嵌入具有强大控制能力和计算能力的嵌入式计算机系统。嵌入式系统不仅广泛应用于成熟领域，如工业控制、家用电器、通信设备、网络设备、医疗器械和军事装置等，而且随着嵌入式系统的不断发展还衍生出了许多新的应用，如 PDA、智能手机、MP4、运动控制器和无线路由器等。可以预见，嵌入式系统随着技术的不断完善、使用范围的逐步扩展、开发环境更加方便易用，必将会有大量的技术人员投入其中，使我国硬件开发人员的队伍不断壮大，促进国民经济的快速发展。

1.1 嵌入式系统的概念与组成

本节首先介绍嵌入式系统的定义与“三要素”，其次介绍嵌入式系统的应用过程和发展趋势，最后介绍嵌入式系统的组成。

1.1.1 嵌入式系统的定义

嵌入式系统的定义有许多，但它们的真正含义基本相同，以下是具体的定义内容。

根据国际电气和电子工程师协会（Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE）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”。

目前国内一个普遍被认同的定义是：以应用为中心，以计算机技术为基础，软件硬件可裁剪，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。

也可以这样定义：嵌入式系统是一种专用的单片计算机系统，作为装置或设备的主控或监测器件，焊接在它们的印制电路板（PCB）中，完成它应具有的功能。

嵌入式系统一般由嵌入式微处理器芯片、外围硬件设备、嵌入式操作系统以及用户应用程序 4 个部分组成。

嵌入式系统的三个基本要素是指“嵌入性”“专用性”“计算机系统”。嵌入性是指它是以芯片的形式嵌入（潜伏）在 PCB 电路板中；专用性是指它是为特定的设备量身定做的软硬件系统；计算机系统是说，它虽然以芯片的形式显现，但是它具有一台计算机的软硬件功能。

目前嵌入式系统的应用无处不在，8 位单片机嵌入式系统，例如 MCS-51 系列，在低端产品中是主流，它占整个嵌入式系统的市场份额约为 70%。在中、高端产品中 ARM 使用占 70% 的份额，在移动电话、数码照相机、数字电视的机顶盒、微波炉、汽车内部的防抱死制动系统等装置或设备中都使用了 ARM 嵌入式系统。

1.1.2 嵌入式系统的应用过程和发展趋势

1. 嵌入式系统应用过程的 4 个阶段

第 1 阶段：无操作系统阶段

MCS-51 系列单片机是最早应用的嵌入式系统之一，单片机作为各类工业控制和飞机、导

弹等武器装备中的微控制器，用来执行一些单线程的程序，完成监测、伺服和设备指示等多种功能，一般没有操作系统的支持，程序设计采用汇编语言或 C51 语言。

采用汇编语言编写的程序具有效率高、占用内存少、实时性强且控制时间精准等优点。缺点是对技术人员的要求高，开发周期相对长一些。

现在使用意法半导体 (ST) 公司基于 ARM9 的 ARM Cortex-M3 内核产品——STM32 微处理器芯片开发的实时控制设备，大部分都是在无操作系统的情况下使用 C 语言开发的，它比在有操作系统下开发有更高的运行效率。目前开发要求具有强实时性的装备也是在“裸机” (无操作系统) 情况下开发的。

第 2 阶段：简单操作系统阶段

20 世纪 80 年代，出现了大量具有高可靠性、低功耗的嵌入式 CPU。芯片上集成有 CPU、I/O 接口、串行接口及 RAM、ROM 等部件，是面向 I/O 设计的微控制器在嵌入式系统设计中的应用。一些简单的嵌入式操作系统开始出现并得到迅速发展，程序设计人员也开始基于一些简单的“操作系统”开发嵌入式应用软件，如较为常用的 $\mu\text{C}/\text{OS}$ 嵌入式操作系统。此时的嵌入式操作系统虽然还比较简单，但已经初步具有了一定的兼容性和扩展性，内核精巧且效率高，大大缩短了开发周期，提高了开发效率。

第 3 阶段：实时操作系统阶段

20 世纪 90 年代，面对分布式控制、柔性制造、数字化通信和信息家电等巨大的市场需求，嵌入式系统飞速发展。随着硬件实时性要求的提高，嵌入式系统的软件规模也不断扩大，如实时操作系统 (Real-Time Operating System, RTOS)，从而使应用软件的开发变得更加简单。

第 4 阶段：面向 Internet 阶段

进入 21 世纪，Internet 技术与信息家电、工业控制技术等的结合日益紧密，嵌入式技术与 Internet 技术的结合正在推动着嵌入式系统的飞速发展。由于 Linux 是 UNIX 的 PC 版本，具有强大的网络功能，且为开源软件，因此嵌入式 Linux 操作系统得到了广泛的应用。微软公司也看到了嵌入式市场的广阔前景，推出 Windows CE 嵌入式操作系统，对于熟悉 Windows 环境的开发人员来讲，也可进行基于 Windows 平台的嵌入式系统开发。

2. 嵌入式系统的发展趋势

面对嵌入式技术与 Internet 技术的结合，嵌入式系统的研究和应用呈现出以下发展趋势。

- 1) 新的微处理器层出不穷，大都朝着精简系统内核，优化关键算法，降低功耗和软硬件成本，提供更加友好的多媒体人机交互界面的方向发展。
- 2) Linux、Windows CE、Palm OS 等嵌入式操作系统迅速发展。嵌入式操作系统自身结构的设计体现出更加便于移植的特性，具有源代码开放、系统内核小、执行效率高、网络结构完整等特点，能够在短时间内支持更多的微处理器。
- 3) 嵌入式系统的开发成了一项系统工程，开发厂商不仅要提供嵌入式软硬件系统本身，同时还要提供强大的硬件开发工具和软件支持包。

1.1.3 嵌入式系统的组成

嵌入式系统的组成包括嵌入式系统硬件组成和软件组成两部分。

嵌入式系统的硬件组成主要包含有嵌入式处理器、外围设备接口和执行装置 (被控对象) 等。

嵌入式系统的软件组成,对于裸机开发来讲主要有以下内容:嵌入式处理器芯片内部三总线频率的设置、配置存储器芯片的设置;7种异常模式堆栈指针的设置;中断指针的传递程序;为C语言的运行创建环境;I/O端口的配置与控制程序、应用程序等。以上5个部分也是引导启动程序(Bootloader)的主要内容。

对于基于操作系统的嵌入式软件开发,主要包括Bootloader的移植,操作系统内核的移植,文件系统的移植,I/O设备驱动程序的编写以及加载,图形用户接口程序设计,应用程序的设计等。

嵌入式计算机系统是整个嵌入式系统的核心,可以分为硬件层、中间层、系统软件层和应用软件层。执行装置接收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。

嵌入式系统从整体上来讲也可以分为硬件层、中间层、系统软件层和应用软件层。

1.2 嵌入式微处理器的结构与类型

嵌入式处理器是隐藏在控制设备或装置中,完成接收现场数据,进行数据处理,并向执行装置发出控制命令的微处理器。1971年Intel公司推出了Intel4004,1974年推出了Intel8080,1976年Zilog制造了与8080兼容的CPU Z-80,这类处理器(称为CPU)所构造的是单板微型计算机系统,简称单板机,应用在控制设备中,它们都是嵌入式应用的前身。之后出现了简称单片机的单片微型计算机。例如,Intel公司在1976年9月推出的MCS-51系列8位单片机,它内部不但集成了CPU,还集成了存储器和I/O接口等计算机的元素,但这时嵌入式系统的概念还不是热点的技术名词。一直到20世纪90年代后期32位ARM微处理器的广泛使用,嵌入式系统的概念才被广大技术人员所熟知。现在人们把具有计算机基本组成元素的单片微型集成电路芯片,从MCS-51系列单片机开始到目前的32位ARM微处理器统称为嵌入式系统,但从技术人员的角度出发,嵌入式系统主要指的是32位ARM微处理器单片机。

嵌入式微处理器按CPU的处理能力可分为8位、16位、32位和64位。一般把处理能力在16位及以下的称为嵌入式微控制器(Embedded Microcontroller),32位及以上的称为嵌入式微处理器。

嵌入式微处理器内部将CPU、ROM、RAM及I/O等部件集成到同一个芯片上,称为单芯片微控制器(Single Chip Microcontroller)。

根据用途,可以将嵌入式芯片系统分为嵌入式微控制器、嵌入式微处理器、嵌入式DSP处理器、嵌入式片上系统、双核或多核处理器等类型。

1.2.1 嵌入式微控制器

嵌入式微控制单元(Micro Controller Unit, MCU)又称为单片机,芯片内部集成了ROM、RAM、总线逻辑、定时器/计数器、看门狗、I/O、串行口、脉宽调制输出(PWM)、A-D、D-A、Flash、E²PROM等各种必要功能和外设。嵌入式微控制器具有单片化、体积小、功耗和成本低、可靠性高等特点,约占嵌入式系统市场份额的70%。

嵌入式微控制器的代表芯片就是MCS-51系列单片机,主要使用其汇编语言或C语言进行裸机开发。

1.2.2 嵌入式 DSP 处理器

嵌入式 DSP 处理器 (Embedded Digital Signal Processor, EDSP) 是专门用于信号处理方面的处理器, 芯片内部采用程序和数据分开存储和传输的哈佛结构, 具有专门的硬件乘法器, 采用流水线操作, 提供特殊的 DSP 指令, 可用来快速地实现各种数字信号处理算法, 使其处理速度比其他性能优异的 CPU 还快 10 倍以上。

从 20 世纪 80 年代到现在, 缩小 DSP 芯片尺寸始终是 DSP 技术的发展方向。DSP 处理器已发展到第 5 代产品, 多数基于精简指令集计算机 (Reduced Instruction Set Computer, RISC) 结构, 并将几个 DSP 芯核、MPU 芯核、专用处理单元、外围电路单元和存储单元集成在一个芯片上, 成为 DSP 系统级集成电路, 系统集成度极高。

DSP 运算速度的提高主要依靠新工艺改进芯片结构。目前一般的 DSP 运算速度为 100MIPS (即每秒钟可运算 1 亿条指令)。TI 的 TM320C6X 芯片由于采用超长指令字 (Very Long Instruction Word, VLIW) 结构设计, 其处理速度已高达 2000MIPS。按照发展趋势, DSP 的运算速度完全可能再提高 100 倍 (达到 1600GIPS)。

目前 DSP 芯片在机械电子的控制方面运用广泛, 如作为变频器、PLC 的控制核心。它的开发基本也是在裸机中进行的, 主要使用 C 语言进行裸机程序设计。

1.2.3 嵌入式微处理器

嵌入式微处理器 (Micro Processor Unit, MPU) 由通用计算机的 CPU 发展而来, 嵌入式微处理器只保留和嵌入式应用紧密相关的功能硬件, 去除其他冗余功能部分, 以最低的功耗和资源实现嵌入式应用的特殊要求。通常嵌入式微处理器把 CPU、ROM、RAM 及 I/O 等做到同一个芯片上。32 位微处理器采用 32 位的地址总线和数据总线, 其地址空间达到了 $2^{32} = 4\text{GB}$ 。目前主流的 32 位嵌入式微处理器系列主要有 ARM 系列、MIPS 系列、PowerPC 系列, 以下进行简要介绍。属于这些系列的嵌入式微处理器产品很多, 有千种以上。

1. 嵌入式 ARM 系列

ARM (Advanced RISC Machine) 公司的 ARM 微处理器体系结构目前被公认为是嵌入式应用领域领先的 32 位嵌入式 RISC 微处理器结构。ARM 体系结构目前发展并定义了 7 种不同的版本。从版本 v1 到版本 v7, ARM 体系的指令集功能不断扩大。ARM 处理器系列中的各种处理器, 虽然在实现技术、应用场合和性能方面都不相同, 但只要支持相同的 ARM 体系版本, 基于它们的应用软件是兼容的。

目前, 大量的移动电话、游戏机、平板电脑和机顶盒等都已采用了 ARM 处理器, 许多一流的芯片厂商都是 ARM 的授权用户, 如 Intel、Samsung、TI、Freescale、ST 等公司。

2. 嵌入式 MIPS 系列

美国斯坦福大学的 Hennessy 教授领导的研究小组研制的无互锁流水级微处理器 (Microprocessor without Interlocked Piped Stages, MIPS) 是世界上非常流行的一种 RISC 处理器, 其机制是尽量利用软件办法避免流水线中的数据相关问题。

从 20 世纪 80 年代初期 MIPS 处理器发明至今的 30 多年里, MIPS 处理器以其高性能的处理能力被广泛应用于路由器、调制解调设备、电视、游戏、打印机、DVD 播放器等广泛领域。

3. 嵌入式 PowerPC 系列

PowerPC 是 Freescale (原 Motorola) 公司的产品。PowerPC 的 RISC 处理器采用了超标量处

理器设计和调整内存缓冲器，修改了指令处理设计，完成一个操作所需的指令数比复杂指令集计算机（Complex Reduced Instruction Set Computer, CISC）结构的处理器要多，但完成操作的总时间却减少了。

PowerPC 内核采用独特分支处理单元可以让指令预取效率大大提高，即使指令流水线上出现跳转指令，也不会影响到其运算单元的运算效率。PowerPC RISC 处理器设计了多级内存高速缓冲区，以便让那些正在访问（或可能会被访问）的数据和指令总是存储在调整内存中。这种内存分层和内存管理设计，使指令系统的内存访问性能非常接近调整内存，但其成本却与低速内存相近。

1.2.4 嵌入式片上系统

嵌入式片上系统（System On Chip, SOC）最大的特点是成功实现了软硬件无缝结合，直接在处理器片内嵌入操作系统的代码模块，而且具有极高的综合性，在一个芯片内部运用超高速硬件描述语言，如 VHDL 等，即可实现一个复杂的系统。与传统的系统设计不同，用户不需要绘制庞大复杂的电路板来一点点地连接焊制，只需要使用精确的语言，综合时序设计直接在器件库中调用各种通用处理器的标准，然后在仿真之后就可以直接交付芯片厂商进行生产，设计生产效率高。

在 SOC 中，绝大部分系统构件都是在系统内部，系统简洁，系统的体积和功耗小，可靠性高。SOC 芯片已在声音、图像、影视、网络及系统逻辑等领域中广泛应用。

1.3 计算机组成、体系结构与嵌入式处理器

计算机组成主要是指计算机的硬件组成部件以及实现这些硬件功能所使用的材料、实现的理论与技术方法，以及各组成部分的逻辑关系，它决定着计算机的性能和功能。

目前正在使用的现有计算机是由电子来传递和处理信息的。电子在导线中传播的速度虽然比人们看到的任何运载工具运动的速度都快，但是，从发展高速率计算机来说，采用电子做传输信息载体还不能满足更快的要求，提高计算机运算速度也明显表现出它的能力是有限的。而光子计算机以光子作为传递信息的载体，光互连代替导线互连，以光硬件代替电子硬件，以光运算代替电子运算，利用激光来传送信号，并由光导纤维与各种光学元件等构成集成光路，从而进行数据运算、传输和存储。在光子计算机中，不同波长、频率、偏振态及相位的光代表不同的数据，这远胜于电子计算机中通过电子“0”“1”状态变化进行的二进制运算，可以对复杂度高、计算量大的任务实现快速的并行处理。光子计算机的主板中不存在电磁干扰，使信道的传输速率更快，将使运算速度远远高于现有的计算机速度。目前正在研究中的计算机还有量子计算机、超导计算机和多值计算机等。

计算机体系结构主要指计算机的系统化设计和构造，不同的计算机体系结构适用于不同的需求或应用。从传统意义的指令界面上来看，现代计算机的体系结构基本划分成两大类：复杂指令集计算机系统 CISC 体系（如 X86 芯片）和简化指令集计算机系统 RISC 体系（如 ARM 芯片）。

因此可以说嵌入式处理器是一种结合了 X86 个人计算机的 PC 体系结构，实时控制系统的要求和简化指令集之后产生的，满足实时控制系统应用的计算机体系结构。以下将分别介绍冯·诺依曼结构、哈佛结构、精简指令集计算机（RISC）和流水线计算机等内容。

1.3.1 冯·诺依曼结构与哈佛结构

1. 冯·诺依曼 (Von Neumann) 结构

冯·诺依曼结构的计算机由 CPU 和存储器构成, 其程序和数据共用一个存储空间, 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; 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 (PC) 是 CPU 内部指示指令和数据的存储位置的寄存器。

目前使用冯·诺依曼结构的 CPU 和微控制器的品种有很多, 例如 Intel 公司的 X86 系列及其他 CPU、ARM 公司的 ARM7、MIPS 公司的 MIPS 处理器等。

2. 哈佛 (Harvard) 结构

哈佛结构的主要特点是将程序和数据存储在不同的存储空间中, 即程序存储器和数据存储器是两个相互独立的存储器, 每个存储器独立编址、独立访问。系统中具有程序的数据总线与地址总线, 数据的数据总线与地址总线。这种分离的程序总线 and 数据总线可允许在一个机器周期内同时获取指令字和操作数, 从而提高执行速度, 提高数据的吞吐率。又由于程序和数据存储器在两个分开的物理空间中, 因此取指和执行能完全重叠, 具有较高的执行效率。

目前使用哈佛结构的 CPU 和微控制器品种有很多, 除 DSP 处理器外, 还有摩托罗拉公司的 MC68 系列、ATMEL 公司的 AVR 系列和 ARM 公司的 ARM9、ARM10 和 ARM11 等。

1.3.2 精简指令集计算机 (RISC)

1. 2/8 规律

早期的计算机采用复杂指令集计算机 (CISC) 体系。采用 CISC 体系结构的计算机各种指令的使用频率相差悬殊, 统计表明, 大概有 20% 比较简单的指令被反复使用, 使用量约占整个程序的 80%; 而有 80% 左右的指令则很少使用, 其使用量约占整个程序的 20%, 即指令的 2/8 规律。

2. RISC

精简指令集计算机 (RISC) 体系结构是 20 世纪 80 年代提出来的。目前 Intel 等公司都在研究和发展 RISC 技术, RISC 已经成为计算机发展不可逆转的趋势。

3. RISC 的特点

RISC 是在 CISC 的基础上产生并发展起来的, RISC 的着眼点不是简单地放在简化指令系统上, 而是通过简化指令系统使计算机的结构更加简单合理, 从而提高运算效率。

- 在 RISC 中, 优先选取使用频率最高的、很有用但不复杂的指令, 避免使用复杂指令。
- 固定指令长度, 减少指令格式和寻址方式种类。
- 指令之间各字段的划分比较一致, 各字段的功能也比较规整。
- 采用 Load/Store 指令访问存储器, 其余指令的操作都在寄存器之间进行。
- 增加 CPU 中通用寄存器数量, 算术逻辑运算指令的操作数都在通用寄存器中存取。
- 大部分指令控制在一个或小于一个机器周期内完成。

尽管 RISC 架构与 CISC 架构相比具有较多的优点, 但 RISC 架构也不可以取代 CISC 架构。事实上, RISC 和 CISC 各有优势。现代的 CPU 往往采用 CISC 的外围, 内部加入了 RISC 的特性, 如超长指令集 CPU 就是融合了 RISC 和 CISC 两者的优势, 成为未来的 CPU 发展方向之一。在 PC 和服务器的领域, CISC 体系结构是市场的主流。

在嵌入式系统领域，由于注重的是实时性效果，要求在系统主频一定的情况下有较高的信息处理能力，精简指令集计算机（RISC）系统可以使所有的机器指令具有相同的长度，易于进行流水线处理，大大提高了计算机执行指令的速度。因此 RISC 结构的微处理器在该领域将占有重要的位置。

1.3.3 流水线计算机

1. 流水线的基本概念

精简指令集计算机（RISC）为微处理器的指令流水线执行提供了先决条件。流水线技术应用计算机体系结构的各个方面，流水线技术的基本思想是将一个重复的时序分解成若干个子过程，而每一个子过程都可有效地在其专用功能段上与其他子过程同时执行。

流水线结构的类型众多。指令流水线就是将一条指令分解成一连串执行的子过程，例如，把指令的执行过程细分为取指令、指令译码、取操作数和执行 4 个子过程，每个过程的执行时间相同。

在 CPU 中把一条指令的串行执行子过程变为若干条指令的子过程在 CPU 中重叠执行。如果能做到每条指令均分解为 m 个子过程，且每个子过程的执行时间都一样，则利用此条流水线可将一条指令的执行时间由原来的 T 缩短为 T/m 。指令流水线处理的时空图如图 1-1 所示，其中的 1、2、3、4、5 表示要处理的 5 条指令。从图 1-1 中可见采用流水方式可同时执行多条指令。

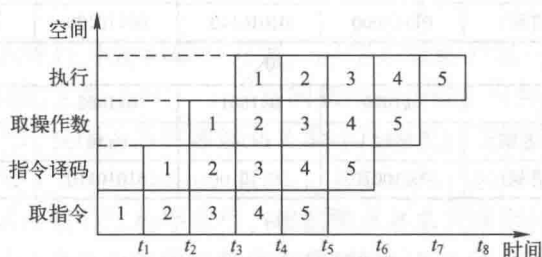


图 1-1 五级流水线指令执行示意图

2. 流水线处理机的主要指标

(1) 吞吐率

在单位时间内，流水线处理机流出的结果数称为吞吐率。对指令而言就是单位时间内执行的指令数。如果流水线的子过程所用时间不一样长，则吞吐率 P 应为最长子过程的倒数，即

$$P = 1 / \max \{ \Delta t_0, \Delta t_1, \dots, \Delta t_m \}$$

(2) 建立时间

流水线开始工作，须经过一定时间才能达到最大吞吐率，这就是建立时间。若 m 个子过程所用时间一样，均为 t_0 ，则建立时间 $T_0 = m\Delta t_0$ 。

1.3.4 嵌入式微处理器的信息存储方式

1. 大端和小端存储方式

大多数计算机使用 8 位数据块作为最小的可寻址存储器单位，称为 1 字节。存储器的每一个字节都用一个唯一的地址（address）来标识。所有可能地址的集合称为存储器空间。