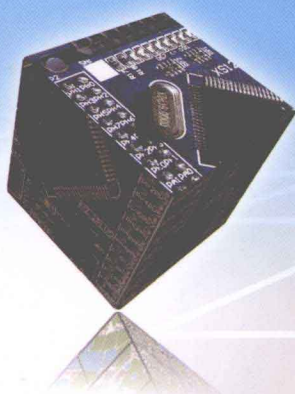


嵌入式技术与应用丛书



MC9S12XS

单片机原理及嵌入式系统开发

张阳 吴晔 滕勤 等编著

- ◎ 选用全国大学生“飞思卡尔”杯智能汽车竞赛组委会推荐的MC9S12XS128
- ◎ 深入讲解基于MC9S12XS128的嵌入式系统设计
- ◎ 给出大量关于智能汽车竞赛的应用实例
- ◎ 配有教学课件，方便教学使用



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

MC9S12XS 单片机原理及 嵌入式系统开发

张 阳 吴 晔 滕 勤 等编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

本书以全国大学生“飞思卡尔”杯智能汽车竞赛组委会推荐使用的飞思卡尔 MC9S12XS128 为主, 详细讲述 MC9S12XS128 单片机的原理以及嵌入式系统的开发技术。本书首先介绍嵌入式系统和 HCS12 系列单片机的基础知识, 对 C 语言的嵌入式编程进行了简要的说明, 然后对 MC9S12XS128 的输入/输出端口、中断系统、脉宽调制、模/数转换、定时器、定时器、SPI 和 I²C 等模块进行了详实的讲解, 并给出相应的应用实例, 最后针对全国大学生“飞思卡尔”杯智能汽车竞赛给出综合应用实例。

本书面向工科电气类、计算机类、机电一体化类和仪器仪表类等相关专业的高年级本科生和研究生, 适合参加全国大学生“飞思卡尔”杯智能汽车竞赛的参赛人员参考, 同时也适用于从事嵌入式应用开发的工程技术类人员。

本书配有教学课件, 读者可以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

MC9S12XS 单片机原理及嵌入式系统开发/张阳等编著. —北京: 电子工业出版社, 2011.9
(嵌入式技术与应用丛书)

ISBN 978-7-121-14548-3

I. ①M… II. ①张… III. ①单片微型计算机 IV. ①TP368.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 182149 号

责任编辑: 田宏峰 特约编辑: 牛雪峰

印 刷: 北京天宇星印刷厂

装 订: 三河市鹏成印业有限公司

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: 21.5 字数: 550 千字

印 次: 2011 年 9 月第 1 次印刷

印 数: 4 000 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。

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。

服务热线: (010) 88258888。

前 言

《基于 HCS12 的嵌入式系统设计》(电子工业出版社, 2010 年 1 月出版) 自出版起, 承蒙读者厚爱, 获得广泛关注。为了更好地适应飞思卡尔 16 位微控制器技术的发展和教学需要, 本书在该书基础上修订出版, 保持原书风格不变, 着眼于最新微控制器技术的发展应用, 尽可能多地介绍应用实例, 满足读者深入学习的需求。

本书以飞思卡尔 16 位 MC9S12XS 系列微控制器 (MCU) 为主线, 以 MC9S12XS128 微控制器为例, 系统地介绍了 S12 (X) 的结构和工作原理, 详述了 MC9S12XS128 各功能模块的结构、原理与使用方法, 同时介绍了嵌入式系统的 C 语言开发方法。

本书采用从理论到实践最后到系统的学习方法, 在功能模块介绍中首先讲解模块的原理, 然后给出应用实例, 最后结合全国大学生智能汽车竞赛, 给出了每个模块在智能车系统设计中的应用实例。以智能汽车系统为应用背景, 贯穿所有模块的开发使用, 构成了完整的嵌入式系统知识体系的介绍。本书最后通过综合应用实例, 为读者更详细地介绍了微控制器多个模块综合应用的软/硬件设计方法。

本书面向工科电气类、计算机类、机电一体化类和仪器仪表类等相关专业的高年级本科生和研究生, 同时也适用于从事嵌入式应用开发的工程技术人员。

希望通过本书的学习, 读者能够掌握嵌入式系统的基本概念, 了解飞思卡尔 MC9S12XS128 微控制器的原理与应用, 学会使用 C 语言进行嵌入式系统的程序设计和嵌入式系统的应用开发。

第 1 章简要介绍嵌入式系统的基本概念以及嵌入式系统的开发方法。

第 2 章以飞思卡尔 HCS12 和 HCS12X 系列单片机为背景, 简要介绍 CPU12 和 CPU12X 的结构及特点, 使读者初步了解 HCS12 系列单片机。

第 3 章详细介绍 MC9S12 单片机的寻址方式、指令系统和汇编语言程序设计。

第 4 章介绍 C 语言在嵌入式系统程序设计中的应用, 并简单介绍 CodeWarrior 集成开发环境的使用方法。

第 5 章, 第 7 章至第 12 章分别介绍 MC9S12XS128 微控制器的输入/输出端口模块、脉宽调制模块、模/数转换模块、定时器模块、周期中断定时器模块、串行通信接口模块、SPI 和 I2C 模块的硬件结构、寄存器功能及应用, 并给出各模块在智能车系统中的应用。

第 6 章介绍 MC9S12XS128 微控制器的中断系统及中断程序设计方法。

第 13 章介绍了综合应用实例。

附录 A 至附录 D 列出了 S12 汇编指令系统汇总表、汇总表说明、指令机器码汇总表及其说明。附录 E 介绍了作者自主开发的本书配套使用的实验系统开发平台, 本书大部分应用程序都可以应用于实验系统。

本书是许多人共同努力的成果, 全书共分 13 章。滕勤编写了第 3 章和第 9 章; 宋曼和陶赞编写了第 10 章和第 13 章; 其余章节由张阳和吴晔编写, 吴晔负责全书统稿。张辉教授仔细审阅了本书内容, 自始至终给予指导和帮助, 提出诸多建设性的意见。吴祥龙、刘丹、王永杰、徐宝平和丁金凤等同学参与了部分程序的调试和验证工作, 感谢参与本书内容整理及

程序调试的所有学生。

本书的编写得到了飞思卡尔公司的大力支持，衷心感谢飞思卡尔公司马莉女士和康晓敦先生提供的帮助。

感谢合肥工业大学创新学院的关心支持，特向黄景荣院长、吴文涛副院长和李刚等同仁表示诚挚谢意。

由于作者水平有限，书中不妥之处，敬请读者批评指正。

作者
于斛兵塘

目 录

CONTENTS

第 1 章 嵌入式系统简介	1
1.1 嵌入式系统	1
1.1.1 系统	1
1.1.2 嵌入式系统	1
1.1.3 嵌入式系统的分类	2
1.2 嵌入式系统硬件	3
1.2.1 嵌入式微处理器	3
1.2.2 嵌入式微控制器	3
1.2.3 嵌入式 DSP 处理器	4
1.2.4 嵌入式片上系统	4
1.3 嵌入式系统软件	4
1.4 嵌入式操作系统	5
1.4.1 嵌入式操作系统的种类	5
1.4.2 嵌入式操作系统的发展	5
1.4.3 使用实时操作系统的必要性	6
1.4.4 实时操作系统的优缺点	6
1.5 嵌入式系统开发方法	6
第 2 章 Freescale HCS12 和 HCS12X 系列单片机简介	8
2.1 HCS12 系列单片机概述	8
2.1.1 HCS12 系列单片机的命名规则	8
2.1.2 HCS12 系列单片机简介	9
2.2 HCS12X 系列单片机概述	10
2.2.1 HCS12X 系列单片机主要特点	10
2.2.2 XGATE 协处理器与主处理器的关系	11
2.2.3 XGATE 的基本特性	12
2.2.4 典型 S12X 系列单片机简介	14
2.3 MC9S12XS128 简介	15
2.3.1 MC9S12XS128 性能概述	15
2.3.2 MC9S12XS128 内部结构、主要特性及引脚	15
2.3.3 MC9S12XS128 引脚功能	24
2.4 CPU12(X)核	27
2.4.1 CPU12(X)核特性	27

2.4.2	编程模型	27
2.5	MC9S12XS128 的存储器映射	30
2.6	MC9S12XS128 内部锁相环模块 PLL	31
2.6.1	CRG 时钟合成寄存器 (SYNR)	32
2.6.2	CRG 时钟参考分频寄存器 (REFDV)	32
2.6.3	CRG 时钟后分频寄存器 (POSTDIV)	33
2.6.4	CRG 标志寄存器 (CRGFLG)	33
2.6.5	CRG 时钟选择寄存器 (CLKSEL)	34
2.6.6	CRG IPLL 控制寄存器 (PLLCTL)	35
2.6.7	CRG 中断使能寄存器 (CRGINT)	36
2.6.8	CRG IPLL 模块应用实例	36
第 3 章	S12X 指令系统	38
3.1	概述	38
3.2	S12X 汇编指令的格式和符号说明	38
3.2.1	操作码和操作数	39
3.2.2	数据类型	39
3.2.3	数据表示方法	39
3.2.4	寄存器和存储器表示法	40
3.3	寻址方式 (Addressing Mode)	40
3.3.1	隐含/固有寻址 (Inherent Addressing, INH)	40
3.3.2	立即寻址 (Immediate Addressing, IMM)	41
3.3.3	直接寻址 (Direct Addressing, DIR)	42
3.3.4	扩展寻址 (Extended Addressing, EXT)	42
3.3.5	相对寻址 (Relative Addressing, REL)	43
3.3.6	变址寻址 (Indexed Addressing, IDX)	44
3.3.7	全局寻址 (Global Page Index Register)	50
3.4	S12X 汇编指令系统	50
3.4.1	数据传送指令	50
3.4.2	算术运算指令	58
3.4.3	逻辑运算指令	66
3.4.4	高级函数指令	71
3.4.5	程序控制指令	74
3.4.6	S12X 控制指令	77
3.5	汇编程序伪指令	79
3.5.1	段定义指令	79
3.5.2	常量赋值指令	81
3.5.3	常量存储指令	82
3.5.4	分配变量指令	84
3.5.5	汇编控制指令	85
3.5.6	符号链接指令	85

第 4 章 C 语言的嵌入式编程	87
4.1 编程语言的选择	87
4.2 C 语言编程元素	88
4.2.1 全局变量和局部变量	88
4.2.2 头文件	88
4.2.3 编译预处理	89
4.2.4 数据类型	91
4.2.5 运算符	93
4.2.6 指针	95
4.2.7 条件语句、循环语句及无限循环语句	95
4.2.8 函数	98
4.3 C 程序编译器与交叉编译器	101
4.4 CodeWarrior 软件简介	102
4.4.1 CodeWarrior 的安装	102
4.4.2 CodeWarrior 使用简介	104
第 5 章 MC9S12XS 输入/输出端口模块及其应用实例	110
5.1 输入/输出端口简介	110
5.2 输入/输出端口寄存器及设置	110
5.2.1 PORTA、PORTB、PORTE 和 PORTK	112
5.2.2 PORTT、PORTS、PORTM、PORTP、PORTH 和 PORTJ	114
5.2.3 A/D 端口用做数字 I/O 口	116
5.3 输入/输出端口应用实例	118
5.3.1 控制输出设备 LED 实例	118
5.3.2 读取输入设备拨码开关状态实例	120
5.4 输入/输出端口在智能车系统中的应用	121
5.4.1 键盘接口设计	121
5.4.2 LED 显示接口设计	122
5.4.3 LCD 显示接口设计	124
第 6 章 MC9S12 系列中断系统	129
6.1 MC9S12 系列中断系统概述	129
6.1.1 复位	130
6.1.2 中断	131
6.2 MC9S12 系列中断优先级	132
6.3 MC9S12 系列中断程序应用实例	135
第 7 章 MC9S12XS 系列脉宽调制模块及其应用实例	139
7.1 PWM 模块概述	139
7.2 PWM 模块结构组成和特点	139
7.3 PWM 模块寄存器及设置	140

7.3.1	PWM 使能寄存器 (PWME)	141
7.3.2	PWM 极性寄存器 (PWMPOL)	142
7.3.3	PWM 时钟选择寄存器 (PWMCLK)	143
7.3.4	PWM 预分频时钟选择寄存器 (PWMPRCLK)	144
7.3.5	PWM 居中对齐使能寄存器 (PWMCAE)	145
7.3.6	PWM 控制寄存器 (PWMCTL)	146
7.3.7	PWM 比例因子 A 寄存器 (PWMSCLA)	148
7.3.8	PWM 比例因子 B 寄存器 (PWMSCLB)	148
7.3.9	PWM 通道计数器 (PWMCNT)	149
7.3.10	PWM 通道周期寄存器 (PWMPER)	149
7.3.11	PWM 通道占空比寄存器 (PWMDTY)	150
7.3.12	PWM 关闭寄存器 (PWMSDN)	152
7.4	PWM 模块应用实例	153
7.5	PWM 模块在智能车系统中的应用	155
7.5.1	应用 PWM 模块控制直流电动机	155
7.5.2	应用 PWM 模块控制伺服电动机	157
第 8 章	MC9S12XS128 模/数转换模块及其应用实例	159
8.1	ATD 模块概述	159
8.2	ATD 模块结构组成和特点	159
8.3	ATD 模块寄存器及设置	161
8.3.1	ATD 控制寄存器 0 (ATDCTL0)	161
8.3.2	ATD 控制寄存器 1 (ATDCTL1)	162
8.3.3	ATD 控制寄存器 2 (ATDCTL2)	164
8.3.4	ATD 控制寄存器 3 (ATDCTL3)	165
8.3.5	ATD 控制寄存器 4 (ATDCTL4)	167
8.3.6	ATD 控制寄存器 5 (ATDCTL5)	167
8.3.7	ATD 状态寄存器 0 (ATDSTAT0)	169
8.3.8	ATD 比较使能寄存器 (ATDCMPE)	170
8.3.9	ATD 状态寄存器 2 (ATDSTAT2)	170
8.3.10	ATD 输入使能寄存器 (ATDDIEN)	171
8.3.11	ATD 比较大于寄存器 (ATDCMPHT)	171
8.3.12	ATD 转换结果寄存器 (ATDDRn)	172
8.4	ATD 模块应用实例	173
8.5	ATD 模块在智能车系统中的应用	174
8.5.1	ATD 模块在基于光电管路径识别方案中的应用	174
8.5.2	ATD 模块在基于摄像头路径识别方案中的应用	176
第 9 章	MC9S12XS128 定时器模块及其应用实例	180
9.1	TIM 模块概述	181
9.2	TIM 模块结构和工作原理	181

9.2.1	TIM 模块结构	181
9.2.2	TIM 模块工作原理	181
9.2.3	TIM 模块寄存器	184
9.2.4	TIM 模块中断系统	186
9.3	TIM 模块的自由运行计数器和定时器基本寄存器及设置	187
9.3.1	自由运行主定时器与时钟频率设置	187
9.3.2	TIM 模块基本寄存器及设置	188
9.4	TIM 模块的输入捕捉功能及寄存器设置	191
9.4.1	TIM 模块输入捕捉功能	192
9.4.2	与输入捕捉功能相关的寄存器及设置	192
9.5	TIM 模块的输出比较功能及寄存器设置	195
9.5.1	TIM 模块输出比较功能	195
9.5.2	与输出比较功能相关的寄存器及设置	196
9.6	TIM 模块的脉冲累加器功能及寄存器设置	199
9.6.1	TIM 模块脉冲累加器功能	199
9.6.2	与脉冲累加器相关的寄存器及设置	201
9.7	TIM 模块应用实例	203
9.7.1	输入捕捉功能应用实例	203
9.7.2	输出比较功能应用实例	205
9.7.3	脉冲累加器功能应用实例	211
9.8	TIM 模块在智能车系统中的应用	215
9.8.1	TIM 模块输入捕捉功能在智能车系统中的应用	215
9.8.2	TIM 模块脉冲累加器功能在智能车系统中的应用	215
第 10 章	MC9S12XS128 周期性中断定时器模块及其应用实例	217
10.1	PIT 模块概述	217
10.2	PIT 模块结构和工作原理	217
10.2.1	PIT 模块结构	217
10.2.2	PIT 模块工作原理	218
10.3	PIT 模块寄存器及设置	220
10.3.1	PIT 控制和强制装载微定时寄存器 (PITCFLMT)	221
10.3.2	PIT 强制装载定时寄存器 (PITFLT)	221
10.3.3	PIT 通道使能寄存器 (PITCE)	222
10.3.4	PIT 复用寄存器 (PITMUX)	222
10.3.5	PIT 中断使能寄存器 (PITINTE)	222
10.3.6	PIT 超时标志寄存器 (PITTF)	223
10.3.7	PIT 微定时装载寄存器 0 和 1 (PITMTLD0/1)	223
10.3.8	PIT 装载寄存器 0~3 (PITLD0~3)	223
10.3.9	PIT 计数寄存器 0~3 (PITCNT0~3)	224
10.4	PIT 模块应用实例	224
10.5	PIT 模块在智能车系统中的应用	226

第 11 章	MC9S12XS 系列串行通信接口模块及其应用实例	234
11.1	SCI 模块概述	234
11.2	SCI 模块结构组成和特点	234
11.3	SCI 模块寄存器	235
11.3.1	SCI 波特率寄存器 (SCIBDH, SCIBDL)	236
11.3.2	SCI 控制寄存器 1 (SCICR1)	237
11.3.3	SCI 可选状态寄存器 1 (SCIASR1)	238
11.3.4	SCI 可选控制寄存器 1 (SCIACR1)	239
11.3.5	SCI 可选控制寄存器 2 (SCIACR2)	240
11.3.6	SCI 控制寄存器 2 (SCICR2)	240
11.3.7	SCI 状态寄存器 1 (SCISR1)	241
11.3.8	SCI 状态寄存器 2 (SCISR2)	243
11.3.9	SCI 数据寄存器 (SCIDRH, SCIDRL)	244
11.4	SCI 模块应用实例	244
11.5	SCI 模块在智能车系统中的应用	248
第 12 章	MC9S12 系列 SPI 和 I ² C 模块及其应用实例	251
12.1	SPI 模块	251
12.2	SPI 模块结构组成和特点	252
12.3	SPI 模块寄存器及设置	253
12.3.1	SPI 控制寄存器 1 (SPICR1)	253
12.3.2	SPI 控制寄存器 2 (SPICR2)	255
12.3.3	SPI 波特率寄存器 (SPIBR)	256
12.3.4	SPI 状态寄存器 (SPISR)	258
12.3.5	SPI 数据寄存器 (SPIDR: SPIDRH, SPIDRL)	260
12.4	SPI 模块应用实例	260
12.5	I ² C 总线接口	262
12.5.1	I ² C 总线概述	262
12.5.2	I ² C 总线工作原理	263
12.6	I ² C 模块结构组成和特点	265
12.7	I ² C 模块寄存器及设置	266
12.7.1	I ² C 总线地址寄存器 (IBAD)	267
12.7.2	I ² C 总线分频寄存器 (IBFD)	267
12.7.3	I ² C 总线控制寄存器 (IBCR)	268
12.7.4	I ² C 总线状态寄存器 (IBSR)	269
12.7.5	I ² C 总线数据输入/输出寄存器 (IBDR)	271
12.8	I ² C 模块在智能车系统中的应用	271
第 13 章	综合应用实例	275
13.1	概述	275
13.2	综合应用实例 1	275

13.2.1	系统组成	275
13.2.2	A/D 输入接口	276
13.2.3	显示接口	276
13.2.4	通信接口	277
13.2.5	应用软件设计	277
13.2.6	软件流程图	281
13.3	综合应用实例 2	283
13.3.1	系统组成	283
13.3.2	MircoSD 卡接口	283
13.3.3	通信接口	284
13.3.4	SD 卡工作电源	284
13.3.5	应用软件设计	284
13.3.6	MircoSD 卡应用软件设计	286
13.3.7	软件流程图	288
13.4	综合应用实例 3	290
13.4.1	系统组成	291
13.4.2	A/D 输入接口	291
13.4.3	显示接口	291
13.4.4	直流电动机驱动接口	291
13.4.5	测速输入信号调理电路	293
13.4.6	伺服电动机驱动接口	293
13.4.7	应用软件设计	293
13.4.8	软件流程图	295
13.5	综合应用实例 4	297
13.5.1	系统组成	297
13.5.2	起始线信号检测方法	297
13.5.3	应用软件设计	299
13.5.4	软件流程图	300
附录 A	S12 汇编指令系统汇总表	303
附录 B	S12 汇编指令系统汇总表解释说明	317
附录 C	S12 汇编指令机器码汇总表	322
附录 D	S12X 汇编指令机器码汇总表解释说明	326
附录 E	HS12 实验开发平台	327
参考文献	331

在信息化社会中，计算机和网络已经全面渗透到我们生活的每一个角落。对于每个人，我们需要的已经不再仅仅是那种放在桌上处理文档，进行工作管理和生产控制的计算机——“机器”；各种各样的新型嵌入式系统设备在应用数量上已经远远超过通用计算机，任何一个人都可能拥有从小到大的各种使用嵌入式技术的电子产品，小到 MP3、PDA 等微型数字化产品，大到网络家电、智能家电、车载电子设备等装置。而在工业和服务领域中，使用嵌入式技术的数控机床、智能工具、工业机器人、各种类型的服务机器人等也将逐渐改变传统的工业和服务方式。目前嵌入式系统技术已经成为最热门的应用技术之一，嵌入式系统已经渗透到我们日常生活的方方面面。本章作为本书的开篇，主要介绍嵌入式系统的基本概念和嵌入式系统的开发学习方法。

1.1 嵌入式系统

1.1.1 系统

系统是一种根据固定的计划、程序或者规则进行工作、组织或者执行一项或多项任务的方式。系统也是一种工作安排方法，其所有单元能够按照一定的计划或者程序装配在一起，共同完成工作任务。

1.1.2 嵌入式系统

许多书籍都给出过嵌入式系统的定义，但是对于何为嵌入式系统，什么样的技术又可以称之为嵌入式技术，仍在讨论之中。以下给出一些文献中对于嵌入式系统的定义：

《*Computers as Components—Principles of Embedded Computing System Design*》一书中指出：什么是嵌入式计算系统？如果不严格地定义，它是任何一个包含可编程计算机的设备，但是它本身却不是通用计算机。

《*Embedded Microcontrollers*》一书作者认为：嵌入式系统是一种电子系统，它包含微处理器或者微控制器，但是我们不认为它们是计算机——计算机隐藏或者嵌入在系统中。

英国电动机工程师协会定义：嵌入式系统是控制、监视或辅助某个设备、机器甚至工厂运行的设备。它具备 4 个特征：① 用来执行特定的功能；② 以微型计算机与外围设备构成核心；③ 具有严格的时序与稳定度；④ 全自动操作循环工作。

还可以用以下文字总结嵌入式系统的概念：嵌入式系统一般指非 PC 系统，有计算机功能但又不称为计算机的设备，它以应用为中心，软硬件可裁减，适应应用系统对功能、可靠性、

成本、体积、功耗等综合性严格要求的专用计算机系统。简单地说，嵌入式系统集系统的应
用软件和硬件于一体，类似于 PC 中 BIOS 的工作方式，具有软件代码小、高度自动化、响应
速度快等特点，特别适合于要求实时和多任务的体系。嵌入式系统主要由嵌入式处理器、相

关支撑硬件、嵌入式操作系统及应用软件
系统等组成，它是可独立工作的“机器”
或“器件”。

嵌入式系统的基本架构如图 1.1 所示。

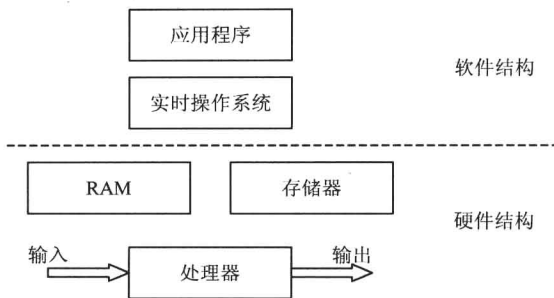


图 1.1 嵌入式系统的基本架构

小型嵌入式系统采用一个 8 位或者 16 位的微控制器设计；硬件和软件复杂度小，需要进
行板级设计。为这些系统开发嵌入式软件时，主要的编程工具是所使用的微控制器或者微处
理器专用的编辑器、汇编器和交叉汇编器等，通常利用 C 语言开发这些系统的软件。

2) 中型嵌入式系统

中型嵌入式系统采用一个 16 位或者 32 位的微控制器、数字信号处理器（Digital Signal
Processor, DSP）或者精简指令集计算机（Reduced Instruction Set Computer, RISC）等设计，
硬件和软件复杂度都比较大。对于复杂的软件设计，可以使用如下的编程工具：实时操作系
统（Real-Time Operating System, RTOS）、源代码设计工具、模拟器、调试器和集成开发环境
（Integrated Development Environment, IDE）等，软件工具往往还提供了硬件复杂性的解决和
分析方法。

3) 复杂嵌入式系统

复杂嵌入式系统的软件和硬件都非常复杂，需要可升级的处理器或者可配置的处理器和
可编程逻辑阵列（如 FPGA、CPLD 等器件）。它们用于特殊应用，在这些应用中，需要硬件
和软件协同设计，并且都集成到最终的系统中，然而它们又受到硬件单元所提供的处理速度、
存储器等资源的限制。为了解决时间问题，提高系统运行速度，可以在硬件中实现一部分软
件功能，例如加密和解密算法、TCP/IP 协议栈和网络驱动程序等功能。当然，系统中某些硬
件资源的功能模块同样也可以用软件来实现。这些系统的开发工具一般十分昂贵，有时还需
要为这些系统开发编译器或者重定目标的编译器等。

由于嵌入式系统由硬件和软件两大部分组成，所以其分类也可以从硬件和软件进行划分。
从硬件方面来讲，嵌入式系统的核心是嵌入式微处理器，根据其现状，嵌入式处理器可以分
成嵌入式微处理器（Micro Processor Unit, MPU）、嵌入式微控制器（Microcontroller Unit,
MCU）、嵌入式 DSP 处理器（Embedded Digital Signal Processor, EDSP）和嵌入式片上系统
（System On Chip, SOC）等。

从软件方面来讲，主要依据使用的操作系统类型来分类。目前嵌入式系统的软件主要有
两大类：实时系统和分时系统，其中实时系统又分为硬实时系统和软实时系统两类。

1.1.3 嵌入式系统的分类

按照嵌入式系统的规模，可以将嵌入
式系统分为以下三种类型。

1) 小型嵌入式系统

1.2 嵌入式系统硬件

嵌入式系统的核心是嵌入式微处理器。嵌入式微处理器一般具备 4 个特点：

① 对实时和多任务有很强的支持能力，能完成多任务并且有较短的中断响应时间，从而使内部的代码和实时操作系统的执行时间减少到最低限度；

② 具有功能很强的存储区保护功能，这是由于嵌入式系统的软件结构已模块化，而为了避免在软件模块之间出现错误的交叉作用，需要设计强大的存储区保护功能，同时也有利于软件诊断；

③ 可扩展的处理器结构，以便能够迅速地扩展满足应用的高性能的嵌入式微处理器；

④ 嵌入式微处理器的功耗要求必须很低，尤其是用于便携式的无线及移动的计算和通信设备，对于靠电池供电的嵌入式系统更是如此，功耗往往为 mW 甚至 μ W 级。

1.2.1 嵌入式微处理器

微处理器是一个集中取址和处理一组通用指令的单元。任何一个 CPU 必须包括一个控制单元和一个 ALU 单元。而嵌入式微处理器采用的是“增强型”通用微处理器。由于嵌入式系统通常应用于条件比较恶劣的环境中，因而嵌入式微处理器在工作温度、电磁兼容性以及可靠性等方面的要求较通用的标准微处理器高。根据实际嵌入式应用要求，将嵌入式微处理器装配在专门设计的电路板（Printed Circuit Board, PCB）上，只保留和嵌入式应用有关的应用功能，这样可以大幅度地减小系统的体积和功耗。

和工业控制计算机相比，嵌入式微处理器组成的系统具有体积小、重量轻、成本低、可靠性高等一系列优点，但在其 PCB 上必须包括 ROM、RAM、总线接口、必要的外设等器件。由嵌入式微处理器及其存储器、总线、外设等器件安装在一块 PCB 上而构成的系统，就是通常所说的单板机系统。嵌入式微处理器目前主要有 Am186/88、386EX、SC-400、Power PC、68000、MIPS、ARM、DSP 系列等。

1.2.2 嵌入式微控制器

嵌入式微控制器又称为单片机，它将整个计算机系统集成到一块芯片中。嵌入式微控制器一般以某种微处理器内核为核心，根据某些典型的应用，在芯片内部集成了 ROM/EPROM、RAM、总线、总线逻辑、定时/计数器、看门狗、I/O、串行口、脉宽调制输出、A/D、D/A、Flash RAM、EEPROM 等各种必要功能部件和外设。为适应不同的应用需求，对功能的设置和外设的配置进行必要的修改和裁减定制，使得一个系列的单片机具有多种衍生产品，每种衍生产品的处理器内核都相同，主要的不同在于存储器、外设的配置和功能的设置等方面。这样可以使单片机最大限度地和应用需求相匹配，从而降低整个系统的功耗和成本。

和嵌入式微处理器相比，微控制器的单片化使应用系统的体积大大减小，从而使功耗和成本大幅度下降，可靠性得到提高。由于嵌入式微控制器目前在产品的品种和数量上是所有嵌入式处理器中最多的，而且上述诸多优点决定了微控制器是嵌入式系统应用的主流，目前 MCU 占到嵌入式系统市场绝大多数的份额。微控制器的片上外设资源比较丰富，适合于控制。通常，嵌入式微控制器可分为通用和半通用两类，比较有代表性的通用系列包括 S08/S12、

8051、P51XA、MCS-251、MCS-96/196/296、C166/167、68000等，而比较有代表性的半通用系列，通常支持USB接口；支持SPI、I²C、CAN总线；支持LCD模块等众多专用的MCU和兼容系列。

1.2.3 嵌入式DSP处理器

在数字信号处理应用中，各种数字信号处理算法往往相当复杂，一般结构的处理器无法实时地完成这些运算功能。由于DSP处理器对系统结构和指令进行了特殊的设计，使其特别适合进行实时数字信号处理。在数字滤波、FFT（快速傅里叶变换）、谱分析等方面，DSP算法正大量进入嵌入式领域，DSP应用正逐步从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处理器。嵌入式DSP处理器有两类：① DSP处理器经过单片化、EMC（电磁兼容性）改造、增加片上外设成为嵌入式DSP处理器，TI的TMS320C2000/C5000等属于此范畴；②在通用单片机或SOC中增加DSP协处理器，例如Intel的MCS-296和Infineon的TriCore系列等。另外，在有关智能方面的应用中，也需要嵌入式DSP处理器，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、非对称数字用户线路（Asymmetrical Digital Subscriber Line, ADSL）接入、实时语音解压系统、虚拟现实显示等各类应用。这类智能化算法一般都是运算量较大，特别是向量运算、指针线性寻址等较多，而这些正是DSP处理器的优势所在。嵌入式DSP处理器比较有代表性的产品是TI的TMS320系列和Freescale的DSP56000系列等。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系列等。DSP56000目前已经发展成为DSP56000、DSP56100、DSP56200和DSP56300等多种不同系列的DSP处理器。

1.2.4 嵌入式片上系统

随着电子设计自动化（Electronic Design Automation, EDA）的推广和大规模集成电路（Large Scale Integrated Circuit, VLSI）设计的普及化，以及半导体工艺的迅速发展，可以在一块硅片上集成实现更为复杂的系统，这就产生了SOC技术。各种通用处理器内核可以作为SOC设计公司的标准库，而嵌入式系统外设也成为了VLSI设计中的标准器件，可以通过标准的VHDL、Verilog等硬件语言描述保存在器件库中，供用户设计选择使用。用户根据需求定义应用系统，通过开发工具仿真、调试、验证设计出的应用系统后，就可以将设计文档等资料提交给半导体工厂制作样品。这样除某些无法集成的功能器件以外，整个嵌入式系统功能模块的实现均可集成到一块或几块芯片中，应用系统PCB设计将变得越来越简洁，这对于减小整个应用系统的体积和功耗、提高可靠性等方面都非常有利。

1.3 嵌入式系统软件

软件是系统设计最重要的一部分，是嵌入式系统的核心。嵌入式系统需要开发给定系统的应用软件，处理器执行指令代码和处理数据，有效、准确地完成指定工作任务。在设计的最阶段，这些指令代码和相关数据被放置到存储器中，用于执行完成相应的工作。目前，大多数嵌入式系统的应用软件开发都会使用高级语言，例如C、C++和Java等，其中C语言选用得最多。关于嵌入式系统的软件程序设计，后文会有单独章节论述。

1.4 嵌入式操作系统

嵌入式操作系统是一种支持嵌入式系统应用的操作系统软件，它是嵌入式系统（包括硬件系统）设计的重要组成部分，通常包括与硬件相关的底层驱动软件、系统内核、设备驱动接口、通信协议、图形界面、标准化浏览器等。嵌入式操作系统具有通用操作系统的基本特点，如能够有效管理越来越复杂的系统资源；能够硬件虚拟化，使得开发人员从复杂的驱动程序移植和维护中解脱出来；能够提供库函数、驱动程序、工具集以及应用程序等。与通用操作系统相比较，嵌入式操作系统在系统实时高效性、硬件的相关依赖性、软件固态化以及应用的专用性等方面具有更为突出的特点。

1.4.1 嵌入式操作系统的种类

一般情况下，嵌入式操作系统可以分为两类，一类是面向控制、通信等领域的实时操作系统，如 WindRiver 公司的 VxWorks、ISI 的 pSOS、QNX 系统软件公司的 QNX、ATI 的 Nucleus 等；另一类是面向消费电子产品的非实时操作系统，这类产品包括个人数字助理（PDA）、移动电话、机顶盒、电子书、WebPhone 等。

1.4.2 嵌入式操作系统的发展

嵌入式操作系统伴随着嵌入式系统的发展大致经历了 4 个阶段。

第一阶段是无操作系统的嵌入算法阶段，是以单芯片为核心的可编程控制器形式的系统，同时具有与监测、伺服、指示设备等相配合的功能。这种系统大部分应用于一些专业性极强的工业控制系统中，一般没有操作系统的支持，通过汇编语言编程对系统进行直接操控，运行结束后清除内存。这一阶段系统的主要特点是：系统结构和功能都相对单一，处理效率较低，存储容量较小，几乎没有用户接口。由于这种嵌入式系统使用简便、价格很低，以前在国内工业领域应用较为普遍，但是已经远远不能适应高效的、需要大容量存储介质的现代化工业控制和新兴的信息家电等领域的需求。

第二阶段是以嵌入式 CPU 为基础、以简单操作系统为核心的嵌入式系统。这一阶段系统的主要特点是：CPU 种类繁多，通用性比较差；系统开销小，效率高；一般配备系统仿真器，操作系统具有一定的兼容性和扩展性；应用软件较专业，用户界面不够友好；系统主要用来控制系统负载以及监控应用程序等应用要求。

第三阶段是通用的嵌入式实时操作系统阶段，是以嵌入式操作系统为核心的嵌入式系统。这一阶段系统的主要特点是：嵌入式操作系统能运行于各种不同类型的微处理器上，兼容性好；操作系统内核精简、效率高，并且具有高度的模块化和扩展性；具备文件和目录管理、设备支持、多任务、网络支持、图形窗口以及用户界面等功能；具有大量的应用程序接口（Application Programming Interface, API），开发应用程序简单；嵌入式应用软件丰富。

第四阶段是以基于 Internet 为标志的嵌入式系统，这是一个正在迅速发展的阶段。目前大多数嵌入式系统还孤立于 Internet 之外，但随着 Internet 的发展以及 Internet 技术与信息家电、工业控制技术结合日益密切，嵌入式设备与 Internet 的结合将代表着嵌入式技术的真正未来。