



“十三五”江苏省高等学校重点教材  
(编号: 2016-1-014)

# 嵌入式系统 原理及应用

(第3版)

马维华◎编著



北京邮电大学出版社  
[www.buptpress.com](http://www.buptpress.com)



“十三五”江苏省高等学校重点教材

4)

# 嵌入式系统 原理及应用

(第3版)

马维华◎编著



北京邮电大学出版社  
[www.buptpress.com](http://www.buptpress.com)

## 内 容 简 介

本书从嵌入式系统的概念、特点、发展、应用、处理器分类及组成等基础知识出发,逐步深入到嵌入式硬件体系结构内部,然后从指令系统到嵌入式系统程序设计,从嵌入式最小系统、数字输入输出系统、定时计数器组件、模拟输入输出系统到互连通信接口,再到嵌入式操作系统及其移植,最后以典型应用为实例,从需求分析、体系结构设计、最小系统设计、交互通道设计、嵌入式硬件综合、嵌入式软件设计到系统调试全过程介绍典型嵌入式应用系统的设计方法,全面系统地介绍了嵌入式系统应用开发和设计,有利于高校嵌入式系统相关课程的学习与教学。

全书结构合理、内容详实、理论联系实际,每章后面都有一定的习题。本书可作为高等院校计算机、物联网、信息安全、电类、自动化以及机电一体化等专业本科生“嵌入式系统”“嵌入式系统体系结构”“嵌入式系统原理及应用”及“嵌入式系统设计与开发”等课程的教材和参考书,也可作为希望了解和掌握嵌入式系统应用和开发的人员的工具书。

### 图书在版编目(CIP)数据

嵌入式系统原理及应用 / 马维华编著. -- 3 版. -- 北京:北京邮电大学出版社, 2017.3

ISBN 978-7-5635-4566-7

I. ①嵌… II. ①马… 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 (2017) 第 007181 号

---

书 名: 嵌入式系统原理及应用 (第 3 版)

著作责任者: 马维华 编著

责任编辑: 刘春棠

出版发行: 北京邮电大学出版社

社 址: 北京市海淀区西土城路 10 号 (邮编: 100876)

发行部: 电话: 010-62282185 传真: 010-62283578

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 保定市中华美凯印刷有限公司

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张: 23.25

字 数: 596 千字

印 数: 1—2 000 册

版 次: 2017 年 3 月第 3 版 2017 年 3 月第 1 次印刷

---

ISBN 978-7-5635-4566-7

定 价: 46.00 元

· 如有印装质量问题, 请与北京邮电大学出版社发行部联系 ·

# 前 言

近年来,嵌入式系统的应用越来越广泛,越来越受到人们的重视,其发展速度令人振奋,受重视程度也日益增长,越来越多的用人单位急需嵌入式开发相关人才。为适应这一需求,许多高校开设了嵌入式系统相关课程。市面上嵌入式系统方面的书籍鱼龙混杂,也不乏经典之作,但普遍存在重工程开发、轻原理阐述的现象,这固然对于工程设计人员是有益的,但作为高校教材使用就不太适宜。

鉴于此,在借鉴国内外有关嵌入式系统相关资料的基础上,结合作者科研项目的有益经验及多年教学实践,通过一段时间摸索之后,从典型专用计算机系统的角度,组织编写了《嵌入式系统原理与应用》这本书。本书第1版于2006年9月正式出版,已经多次印刷和修订,并于2009年被评为江苏省精品教材。经过几年的使用,发现了书中的许多问题和不足,另外嵌入式技术的发展也要求教材不断更新,因此有必要从结构上进行合理调整,补充相关内容,使教材更加适应教学要求,由此成为第2版追求的目标。本书第2版于2010年2月面市,并于2016年12月被评为“十三五”江苏省高等学校重点教材。

新版教材除了内容更新之外,又在体系结构上作了较大调整。除了部分更新内容外,保留了第1章的基本架构;把原来的第2章和第5章合并为第2章嵌入式处理器;原来的第6章是以典型ARM7为背景介绍片上硬件组件的原理及应用的,第3版改为以目前流行且先进的ARM Corex-M3为背景,并将片上基本组件分门别类,分离并提炼出最小系统、数字输入输出系统、定时计数器组件、模拟输入输出系统、互连通信接口等章节;嵌入式操作系统一章除概述常用RTOS外,重点放在 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 上;最后以作者亲自设计开发的嵌入式阀门控制系统为例,按照系统工程设计的要求详细介绍嵌入式系统的设计过程。

“嵌入式系统原理及应用”课程要解决阐述原理与具体应用的关系,原理部分讲清公共的原理,并不区分具体处理器芯片型号,因为不同处理器构建的嵌入式应用系统其片上外设或片外外设的工作原理是相同的,如GPIO(通用I/O端口)、定时计数器、中断控制器、ADC、DAC、PWM、UART、I<sup>2</sup>C、SPI等外围接口组件原理相同,不同的只是具体应用时的指令、地址映射以及操作方式而已。本教材的主要特色如下。

## (1) 突出个性:以内核为主线,介绍嵌入式处理器

本教材以内核为主线,以发展的眼光展开嵌入式处理器原理及结构的介绍,使学生对不同内核的嵌入式处理器的结构及性能有基本的了解,便于以后应用时选择。

## (2) 兼顾共性

以片内硬件组件(片上外设)为线索,不限于指定内核,介绍嵌入式处理器通用的功能部件,并对其分门别类进行介绍。

不同内核的嵌入式处理器芯片片上硬件组件原理相同,在介绍这部分资源时不指定内核和芯片,按照共性的知识介绍,以后再去接触新处理器时只需对地址关系以及寄存器结构和名称了解即可应用。在落实到具体应用时方涉及具体处理器。

### (3) 理论与实践的有机结合

教材对作者多年嵌入式相关项目开发所积累的大量实际案例进行筛选,融入自主设计的嵌入式系统实验开发板,并以此为例展开具体应用的介绍,每个模块都可以直接使用,全部通过实验验证。

### (4) 教材内容选取合理且具先进性和可操作性

选定 32 位 ARM Cortex-M3 为核心的硬件平台作为教材落脚点来介绍嵌入式系统原理及应用,通过硬件组件的分类、原理介绍,结合实际应用实例,具有先进性;由于所有模块均通过自主设计的嵌入式系统实验开发板验证通过,故而具有很强的可操作性。

本书系统性强,结构合理,在讲解具体内容时,特别注重实用性,尽量列举实例,有些程序和接口电路可直接用于实际系统中。在叙述上力求深入浅出,通俗易懂。

本书共分 10 章,第 1 章嵌入式系统概论,介绍嵌入式系统的基本知识,并概述嵌入式系统设计方法;第 2 章嵌入式处理器,介绍嵌入式处理器主要内核、ARM 体系结构等 ARM 处理器内核相关知识以及典型 ARM 处理器芯片;第 3 章嵌入式系统程序设计,介绍 ARM 指令系统、ARM 汇编语言程序设计、CMSIS、Boot Loader、启动文件以及嵌入式 C 语言程序设计(包括固件库函数使用等)等;第 4 章嵌入式最小系统,介绍最小系统的组成及设计;第 5 章数字输入输出系统,介绍 GPIO、逻辑电平及其转换、数字输入/输出接口扩展以及人机交互接口;第 6 章定时计数器组件,介绍片上各种跟定时有关的组件,如通用定时器 TIMx(含 PWM)、系统定时器 SysTick、看门狗定时器 WDT、实时钟定时器 RTC 等;第 7 章模拟输入输出系统,介绍模拟输入输出系统的组成、传感器及变送器、信号调整电路、ADC、DAC 以及应用实例;第 8 章互连通信接口,介绍常用通信接口或总线,如 USART/I<sup>2</sup>C/SPI/USB/CAN/Ethernet 等有线接口,还介绍了常用无线通信模块;第 9 章嵌入式操作系统及其移植,介绍常用嵌入式实时操作系统 RTOS、典型  $\mu$ C/OS-II 及其移植和应用;第 10 章嵌入式应用系统设计实例,以作者自行设计开发的基于 STM32F107VCT7 核心的嵌入式阀门控制系统为例,介绍嵌入式系统的设计。

本书由南京航空航天大学马维华教授编著,谭白磊、孙萍、魏金文、马远等在收集资料、实验验证、资料整理、图表录入及修改等方面做了大量工作。

在编写过程中得到学校教务处、教材科、学院领导以及北京邮电大学出版社的大力支持。在此向他们表示衷心感谢!特别要感谢在第 2 版中付出辛勤劳动的白延敏副教授。

由于嵌入式技术发展飞速,新技术不断涌现,加上作者水平有限,时间仓促,书中难免有疏漏和错误之处,恳请同行专家和读者提出批评意见。

编著于南航西苑

2017 年 1 月

# 目 录

|                        |    |
|------------------------|----|
| 第1章 嵌入式系统概论            | 1  |
| 1.1 嵌入式系统概述            | 1  |
| 1.1.1 嵌入式系统的概念         | 1  |
| 1.1.2 嵌入式系统的特点         | 2  |
| 1.1.3 嵌入式系统的发展         | 3  |
| 1.1.4 嵌入式系统的应用         | 4  |
| 1.1.5 嵌入式系统的学习方法       | 5  |
| 1.2 嵌入式处理器             | 6  |
| 1.2.1 嵌入式处理器的分类        | 6  |
| 1.2.2 ARM 嵌入式处理器简介     | 6  |
| 1.3 嵌入式系统的组成           | 7  |
| 1.3.1 嵌入式系统的硬件         | 7  |
| 1.3.2 嵌入式系统的软件         | 9  |
| 1.4 嵌入式操作系统            | 10 |
| 1.4.1 嵌入式操作系统及其特点      | 10 |
| 1.4.2 典型嵌入式操作系统        | 10 |
| 1.5 嵌入式系统的设计方法         | 11 |
| 1.5.1 嵌入式系统设计概述        | 11 |
| 1.5.2 嵌入式系统的设计步骤       | 12 |
| 1.5.3 嵌入式系统的传统设计方法     | 13 |
| 1.5.4 嵌入式系统的硬、软件协同设计技术 | 15 |
| 1.6 嵌入式系统的软件设计         | 16 |
| 1.6.1 嵌入式系统的软件设计过程     | 16 |
| 1.6.2 嵌入式操作系统的选择       | 17 |
| 1.6.3 嵌入式软件开发工具链的构建    | 18 |
| 1.7 嵌入式系统开发与调试工具       | 21 |
| 1.7.1 嵌入式系统硬件开发与调试工具   | 21 |
| 1.7.2 嵌入式系统软件开发工具      | 22 |
| 习题一                    | 26 |
| 第2章 嵌入式处理器             | 27 |
| 2.1 嵌入式处理器内核           | 27 |

|                     |                                 |    |
|---------------------|---------------------------------|----|
| 2.2                 | ARM 体系结构 .....                  | 28 |
| 2.3                 | ARM 处理器的工作状态与工作模式 .....         | 29 |
| 2.3.1               | ARM 处理器的工作状态 .....              | 30 |
| 2.3.2               | ARM 处理器的工作模式 .....              | 31 |
| 2.4                 | ARM 处理器寄存器组织 .....              | 32 |
| 2.4.1               | ARM 状态下的寄存器组织 .....             | 32 |
| 2.4.2               | Thumb/Thumb-2 状态下的寄存器组织 .....   | 34 |
| 2.5                 | ARM 处理器的异常中断 .....              | 35 |
| 2.5.1               | 经典 ARM 处理器的异常中断 .....           | 35 |
| 2.5.2               | ARM Cortex-M 微控制器的异常中断 .....    | 37 |
| 2.5.3               | ARM Cortex-M 系列微控制器的堆栈 .....    | 41 |
| 2.5.4               | ARM Cortex-M 异常的中断响应与返回过程 ..... | 41 |
| 2.6                 | ARM 的存储器格式及数据类型 .....           | 42 |
| 2.6.1               | ARM 的两种存储字的格式 .....             | 42 |
| 2.6.2               | ARM 存储器数据类型 .....               | 43 |
| 2.7                 | ARM 流水线技术 .....                 | 44 |
| 2.7.1               | 指令流水线处理 .....                   | 44 |
| 2.7.2               | 不同 ARM 处理器的指令流水线 .....          | 45 |
| 2.8                 | 基于 AMBA 总线的 ARM 处理器芯片 .....     | 45 |
| 2.8.1               | AMBA 总线的发展及版本 .....             | 46 |
| 2.8.2               | 基于 AMBA 总线的 ARM 处理器芯片 .....     | 47 |
| 2.9                 | 典型嵌入式处理器 .....                  | 48 |
| 2.9.1               | 典型 ARM 处理器系列 .....              | 48 |
| 2.9.2               | ST 公司的 STM32F10x 系列微控制器 .....   | 50 |
|                     | 习题二 .....                       | 52 |
| 第3章 嵌入式系统程序设计 ..... |                                 | 53 |
| 3.1                 | ARM 指令分类及指令格式 .....             | 53 |
| 3.1.1               | ARM 指令分类 .....                  | 53 |
| 3.1.2               | ARM 指令格式 .....                  | 54 |
| 3.1.3               | ARM 指令中的操作数符号 .....             | 56 |
| 3.1.4               | ARM 指令中的移位操作符 .....             | 56 |
| 3.2                 | ARM 指令的寻址方式 .....               | 57 |
| 3.2.1               | 立即寻址 .....                      | 57 |
| 3.2.2               | 寄存器寻址 .....                     | 57 |
| 3.2.3               | 寄存器间接寻址 .....                   | 57 |
| 3.2.4               | 基址加变址寻址 .....                   | 58 |
| 3.2.5               | 相对寻址 .....                      | 58 |
| 3.2.6               | 堆栈寻址 .....                      | 58 |
| 3.2.7               | 块拷贝寻址 .....                     | 59 |

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 3.3 ARM 指令集 .....            | 59  |
| 3.3.1 数据处理指令 .....           | 59  |
| 3.3.2 程序状态寄存器访问指令 .....      | 61  |
| 3.3.3 分支指令 .....             | 62  |
| 3.3.4 加载/存储指令 .....          | 63  |
| 3.3.5 协处理器指令 .....           | 66  |
| 3.3.6 异常中断指令 .....           | 67  |
| 3.4 Thumb 指令集 .....          | 68  |
| 3.4.1 数据处理指令 .....           | 68  |
| 3.4.2 分支指令 .....             | 69  |
| 3.4.3 加载/存储指令 .....          | 70  |
| 3.4.4 异常中断指令 .....           | 72  |
| 3.5 Thumb-2 指令集 .....        | 73  |
| 3.5.1 数据处理指令 .....           | 73  |
| 3.5.2 分支指令与程序状态指令 .....      | 75  |
| 3.5.3 加载与存储指令 .....          | 75  |
| 3.5.4 中断相关指令 .....           | 77  |
| 3.6 ARM 处理器支持的伪指令 .....      | 77  |
| 3.7 ARM 汇编语言程序设计 .....       | 78  |
| 3.7.1 ARM 汇编语言的语句格式 .....    | 78  |
| 3.7.2 在汇编语言程序中常用的符号 .....    | 78  |
| 3.7.3 汇编语言程序中的表达式和运算符 .....  | 79  |
| 3.7.4 ARM 汇编器所支持的伪指令 .....   | 81  |
| 3.7.5 ARM 汇编语言的程序结构 .....    | 83  |
| 3.8 CMSIS 及其规范 .....         | 84  |
| 3.8.1 CMSIS 软件结构及层次 .....    | 84  |
| 3.8.2 CMSIS 代码规范 .....       | 86  |
| 3.8.3 CMSIS 文件结构 .....       | 87  |
| 3.9 Boot Loader 及启动文件 .....  | 91  |
| 3.9.1 ARM 处理器的启动过程 .....     | 91  |
| 3.9.2 Boot Loader .....      | 93  |
| 3.9.3 启动文件 .....             | 94  |
| 3.10 嵌入式 C 语言程序设计 .....      | 100 |
| 3.10.1 嵌入式 C 语言程序设计基础 .....  | 100 |
| 3.10.2 嵌入式系统程序设计过程 .....     | 107 |
| 3.10.3 嵌入式系统的程序结构 .....      | 107 |
| 3.10.4 汇编语言与 C 语言的混合编程 ..... | 111 |
| 3.10.5 固件库及其使用 .....         | 113 |
| 习题三 .....                    | 117 |

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 第4章 嵌入式最小系统                 | 120 |
| 4.1 嵌入式最小系统的组成              | 120 |
| 4.2 嵌入式处理器选型                | 120 |
| 4.2.1 功能参数选择原则              | 121 |
| 4.2.2 非功能性参数选择原则            | 122 |
| 4.3 供电模块设计                  | 124 |
| 4.3.1 降压型电源设计               | 125 |
| 4.3.2 升压型电源设计               | 125 |
| 4.3.3 隔离型电源设计               | 126 |
| 4.3.4 STM32F10x 电源设计        | 126 |
| 4.4 时钟与复位电路设计               | 127 |
| 4.4.1 时钟电路及时钟源选择            | 127 |
| 4.4.2 复位模块                  | 129 |
| 4.5 调试接口设计                  | 132 |
| 4.5.1 JTAG 调试接口设计           | 132 |
| 4.5.2 SWD 调试接口设计            | 133 |
| 4.5.3 采用通用 JTAG 仿真器做 SWD 接口 | 134 |
| 4.6 存储器接口设计                 | 135 |
| 4.6.1 存储器地址映射               | 135 |
| 4.6.2 片内存储器                 | 136 |
| 4.6.3 片外存储器                 | 136 |
| 4.6.4 辅助存储器                 | 137 |
| 4.6.5 外部存储器扩展               | 139 |
| 习题四                         | 142 |
| 第5章 数字输入输出系统设计              | 143 |
| 5.1 通用输入输出端口                | 143 |
| 5.1.1 GPIO 概述               | 143 |
| 5.1.2 GPIO 基本工作模式           | 143 |
| 5.1.3 GPIO 端口保护措施           | 147 |
| 5.1.4 GPIO 端口的中断            | 148 |
| 5.1.5 典型 ARM 芯片 GPIO 的操作    | 148 |
| 5.2 数字信号的逻辑电平及其转换           | 151 |
| 5.2.1 数字信号的逻辑电平             | 151 |
| 5.2.2 数字信号的逻辑电平转换           | 153 |
| 5.3 数字输入接口的扩展               | 158 |
| 5.3.1 使用缓冲器扩展并行输入接口         | 158 |
| 5.3.2 使用串行移位寄存器来扩展并行输入接口    | 158 |
| 5.4 数字输出接口的扩展               | 159 |

|                                       |     |
|---------------------------------------|-----|
| 5.4.1 使用锁存器扩展并行输出接口 .....             | 159 |
| 5.4.2 使用串行移位寄存器来扩展并行输出接口 .....        | 160 |
| 5.5 数字输入输出接口的一般结构 .....               | 160 |
| 5.5.1 数字输入接口的一般结构 .....               | 160 |
| 5.5.2 数字输出接口的一般结构 .....               | 162 |
| 5.6 人机交互通道设计 .....                    | 164 |
| 5.6.1 键盘接口设计 .....                    | 164 |
| 5.6.2 显示接口设计 .....                    | 165 |
| 5.6.3 人机交互接口应用 .....                  | 175 |
| 习题五 .....                             | 178 |
| <b>第 6 章 定时计数器组件</b> .....            | 180 |
| 6.1 通用定时计数器 Timer .....               | 180 |
| 6.1.1 内部定时功能 .....                    | 180 |
| 6.1.2 外部计数功能 .....                    | 181 |
| 6.1.3 捕获功能 .....                      | 181 |
| 6.1.4 比较功能 .....                      | 182 |
| 6.1.5 STM32F10x 系列定时器 TIMx 及其应用 ..... | 182 |
| 6.2 系统节拍定时器 SysTick .....             | 192 |
| 6.3 看门狗定时器 WDT .....                  | 194 |
| 6.3.1 IWDG .....                      | 194 |
| 6.3.2 WWDG .....                      | 196 |
| 6.4 实时钟定时器 RTC .....                  | 197 |
| 6.4.1 RTC 的硬件组成 .....                 | 198 |
| 6.4.2 RTC 相关寄存器 .....                 | 199 |
| 6.4.3 RTC 的应用 .....                   | 200 |
| 6.5 脉宽调制定时器 .....                     | 204 |
| 6.5.1 PWM 概述 .....                    | 204 |
| 6.5.2 STM32F10x 系列 PWM 模式 .....       | 206 |
| 6.5.3 PWM 相关寄存器 .....                 | 207 |
| 6.5.4 PWM 的应用 .....                   | 208 |
| 习题六 .....                             | 210 |
| <b>第 7 章 模拟输入输出系统设计</b> .....         | 213 |
| 7.1 模拟输入输出系统概述 .....                  | 213 |
| 7.2 传感器及变送器 .....                     | 213 |
| 7.2.1 传感器 .....                       | 214 |
| 7.2.2 变送器 .....                       | 215 |
| 7.3 信号调整的电路设计 .....                   | 216 |
| 7.3.1 信号调理电路的功能及任务 .....              | 216 |

|                                                     |            |
|-----------------------------------------------------|------------|
| 7.3.2 信号滤波 .....                                    | 217        |
| 7.3.3 信号放大 .....                                    | 220        |
| 7.3.4 激励与变换 .....                                   | 221        |
| 7.4 模/数转换器及其接口设计 .....                              | 223        |
| 7.4.1 片上 ADC 及其应用 .....                             | 223        |
| 7.4.2 片外 ADC 及其应用 .....                             | 231        |
| 7.5 数/模转换器 .....                                    | 233        |
| 7.5.1 片内 DAC 及其应用 .....                             | 233        |
| 7.5.2 片外 DAC 及其应用 .....                             | 237        |
| 7.6 典型模拟输入输出系统实例 .....                              | 238        |
| 7.6.1 温度变送器设计要求 .....                               | 238        |
| 7.6.2 温度变送器硬件系统设计 .....                             | 239        |
| 习题七 .....                                           | 241        |
| <b>第8章 互连通信接口设计</b> .....                           | <b>243</b> |
| 8.1 串行异步收发器 .....                                   | 243        |
| 8.1.1 串行异步收发器 UART/USART .....                      | 243        |
| 8.1.2 UART 的应用 .....                                | 247        |
| 8.2 RS-232 接口及其应用 .....                             | 251        |
| 8.2.1 RS-232 接口 .....                               | 251        |
| 8.2.2 基于 RS-232 的双机通信 .....                         | 253        |
| 8.2.3 STM32F10x 基于 RS-232 的接口 .....                 | 254        |
| 8.3 RS-485 接口及其应用 .....                             | 255        |
| 8.3.1 RS-485 接口 .....                               | 255        |
| 8.3.2 RS-485 的隔离应用 .....                            | 258        |
| 8.3.3 RS-485 主从式多机通信的应用 .....                       | 259        |
| 8.4 I <sup>2</sup> C 总线接口 .....                     | 261        |
| 8.4.1 I <sup>2</sup> C 总线概述 .....                   | 261        |
| 8.4.2 STM32F10x 的 I <sup>2</sup> C 功能模块及寄存器结构 ..... | 263        |
| 8.4.3 I <sup>2</sup> C 总线接口的应用 .....                | 267        |
| 8.5 SPI 串行外设接口 .....                                | 269        |
| 8.5.1 SPI 串行外设接口概述 .....                            | 269        |
| 8.5.2 典型 SPI 结构 .....                               | 270        |
| 8.5.3 SPI 接口的应用 .....                               | 270        |
| 8.6 CAN 总线接口 .....                                  | 274        |
| 8.6.1 CAN 总线概述 .....                                | 274        |
| 8.6.2 典型片上 CAN 控制器的组成及相关寄存器 .....                   | 276        |
| 8.6.3 CAN 总线接口的应用 .....                             | 281        |
| 8.7 Ethernet 以太网控制器接口的应用 .....                      | 284        |
| 8.7.1 Ethernet 控制器概述 .....                          | 284        |

|                                                           |     |
|-----------------------------------------------------------|-----|
| 8.7.2 基于片上以太网控制器的以太网接口连接 .....                            | 285 |
| 8.7.3 以太网接口的应用 .....                                      | 286 |
| 8.8 USB 接口 .....                                          | 289 |
| 8.8.1 USB 接口的组成 .....                                     | 289 |
| 8.8.2 USB 接口连接 .....                                      | 291 |
| 8.8.3 USB 接口的应用 .....                                     | 292 |
| 8.9 无线通信模块及其接口 .....                                      | 294 |
| 8.9.1 常用无线通信模块 .....                                      | 294 |
| 8.9.2 无线通信模块接口与 MCU 的连接 .....                             | 296 |
| 习题八 .....                                                 | 297 |
| <b>第 9 章 嵌入式操作系统及其移植</b> .....                            | 298 |
| 9.1 嵌入式操作系统概述 .....                                       | 298 |
| 9.1.1 嵌入式操作系统的一般结构 .....                                  | 298 |
| 9.1.2 嵌入式操作系统的特点与分类 .....                                 | 298 |
| 9.2 典型嵌入式操作系统 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ .....            | 300 |
| 9.2.1 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 操作系统概述 .....             | 300 |
| 9.2.2 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 的任务及其管理 .....            | 303 |
| 9.2.3 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 的系统服务 .....              | 306 |
| 9.3 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 的移植 .....                  | 309 |
| 9.3.1 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 移植的一般方法 .....            | 309 |
| 9.3.2 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 移植到 STM32F10x 微控制器 ..... | 313 |
| 9.4 基于 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 下的应用程序设计 .....          | 316 |
| 9.4.1 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 的初始化与 main() 函数结构 .....  | 316 |
| 9.4.2 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 用户任务的三种结构 .....          | 317 |
| 9.4.3 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 应用程序设计实例 .....           | 318 |
| 习题九 .....                                                 | 323 |
| <b>第 10 章 嵌入式应用系统设计实例</b> .....                           | 325 |
| 10.1 系统设计要求 .....                                         | 325 |
| 10.1.1 系统总体要求 .....                                       | 325 |
| 10.1.2 主要功能与技术指标 .....                                    | 326 |
| 10.2 需求分析与体系结构设计 .....                                    | 326 |
| 10.2.1 需求分析 .....                                         | 326 |
| 10.2.2 系统体系结构设计 .....                                     | 328 |
| 10.3 最小系统设计 .....                                         | 329 |
| 10.3.1 嵌入式处理器的选型 .....                                    | 329 |
| 10.3.2 电源设计 .....                                         | 330 |
| 10.3.3 最小系统构成 .....                                       | 331 |
| 10.3.4 MCU 资源分配 .....                                     | 333 |

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 10.4 通道设计.....           | 335 |
| 10.4.1 通道模块元器件选型 .....   | 335 |
| 10.4.2 模拟通道设计 .....      | 335 |
| 10.4.3 数字通道设计 .....      | 338 |
| 10.4.4 互连通信接口 .....      | 343 |
| 10.5 嵌入式硬件综合.....        | 345 |
| 10.5.1 硬件原理图综合 .....     | 345 |
| 10.5.2 硬件 PCB 板设计 .....  | 347 |
| 10.6 嵌入式软件设计.....        | 348 |
| 10.6.1 无操作系统下的软件设计 ..... | 349 |
| 10.6.2 有操作系统下的软件设计 ..... | 350 |
| 10.7 系统调试.....           | 351 |
| 10.7.1 硬件调试概述 .....      | 351 |
| 10.7.2 电源模块的调试 .....     | 353 |
| 10.7.3 最小系统调试 .....      | 353 |
| 10.7.4 通道调试 .....        | 354 |
| 10.7.5 系统综合调试 .....      | 358 |
| 习题十.....                 | 359 |
| 参考文献.....                | 360 |

# 第 1 章 嵌入式系统概论

## 1.1 嵌入式系统概述

### 1.1.1 嵌入式系统的概念

通常,计算机连同一些常规的外设是作为独立的系统而存在的,并非为某一方面的专门应用而存在的。例如,一台 PC 就是一个计算机系统,整个系统存在的目的就是为人们提供一台可编程、会计算、能处理数据的机器。可以用它作为科学计算的工具,也可以用它作为企业管理的工具。兼顾科学计算、事务处理和过程控制等方面应用的,具有通用的硬件和系统软件资源的计算机系统称为通用计算机系统,简称通用计算机,以 PC 为典型代表。而有些计算机是作为某个专用系统中的部件而存在的,例如机顶盒、POS 机、飞机黑匣子、汽车导航仪、智能手环、智能手机、智能机器人等。像这样嵌入到专用系统中的计算机,称之为嵌入式计算机。所谓将计算机嵌入到系统中,一般并不是指直接把一台通用计算机原封不动地安装到目标系统中,也不只是简单地把原有的机壳拆掉并安装到机壳中,而是指为目标系统量身定制的计算机,再把它有机地植入,融入目标系统。

#### 1. 嵌入式系统的定义

嵌入式系统(Embedded System)是嵌入式计算机系统的简称,有以下几种定义。

##### (1) IEEE(国际电气和电子工程师协会)的定义

“Devices used to control, monitor or assist the operation of equipment, machinery or plants”即为控制、监视或辅助设备、机器或者工厂运作的装置。它通常执行特定功能,以微处理器与周边构成核心,严格要求时序与稳定度,全自动操作循环。

##### (2) 国内公认的较全面的定义

嵌入式系统是以应用为中心,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。

##### (3) 简单定义

嵌入式系统是嵌入到对象体系中的专用计算机系统。

上述定义中比较全面准确并广泛被业界接收的是第二种,比较简捷的是第三种,而第一种定义则侧重控制领域的嵌入式设备。

#### 2. 嵌入式系统的三个要素

嵌入性、专用性与计算机系统是嵌入式系统的三个基本要素。

嵌入式系统是把计算机直接嵌入到应用系统中,它融合了计算机软/硬件技术、通信技术和微电子技术,是集成电路发展过程中的一个标志性的成果。

#### 3. 嵌入式技术

嵌入式技术是将计算机作为一个信息处理部件,嵌入到应用系统中的一种技术,它将软件

固化集成到硬件系统中,将硬件系统与软件系统一体化。因此,可以说嵌入式技术是嵌入式系统设计技术和应用的一门综合技术。

#### 4. 嵌入式产品或嵌入式设备

嵌入式产品或嵌入式设备是指应用嵌入式技术,内含嵌入式系统的产品或设备。嵌入式产品或设备强调内部有嵌入式系统的产品或设备。例如,内含微控制器的家用电器、仪器仪表、工控单元、机器人、手机、PDA等,都是嵌入式设备或称为嵌入式产品。

#### 5. 嵌入式

嵌入式是嵌入式系统、嵌入式技术以及嵌入式产品的简称,只是为了简单方便而得名。

#### 6. 嵌入式产业

基于嵌入式系统的应用和开发,并形成嵌入式产品的产业称为嵌入式产业。目前国内已有许多省开始着手嵌入式产业的规划和实施。

嵌入式技术的快速发展不仅使其成为当今计算机技术和电子技术的一个重要分支,同时也使计算机的分类从以前的巨型机/大型机/小型机/微型机变为通用计算机/嵌入式计算机。可以预言,嵌入式系统将成为后PC时代的主宰。

#### 7. 嵌入式系统开发工具

嵌入式系统开发工具是指可以用于嵌入式系统开发的工具,主要指嵌入式软件开发工具。软件开发工具一般具有集成开发环境,可以在集成开发环境下进行编辑、编译、链接、下载程序、运行和调试等各项嵌入式软件开发工作。

#### 8. 嵌入式系统开发平台

可以进行嵌入式系统开发的软硬件套件称为嵌入式系统开发平台,包括含嵌入式处理器的硬件开发板、嵌入式操作系统和一套软件开发工具。借助于开发平台,开发人员就可以集中精力于编写、调试和固化应用程序,而不必把心思浪费在应用程序如何使用开发板上的各种硬件设施上。

### 1.1.2 嵌入式系统的特点

由于嵌入式系统是一种特殊形式的专用计算机系统,因此同计算机系统一样,嵌入式系统由硬件和软件构成。与以PC为代表的通用计算机系统比较,嵌入式系统是由定义中的三个基本要素衍生出来的,不同的嵌入式系统其特点会有所差异,其主要特点概括如下。

#### 1. 嵌入式系统是专用的计算机系统

嵌入式系统的软、硬件均是面向特定应用对象和任务设计的,具有很强的专用性。主要目的是控制,需要由嵌入式系统提供的功能以及面对的应用和过程都是预知的,相对固定的,而不像通用计算机那样有很大的随意性。嵌入式系统的软、硬件可裁剪性使得嵌入式系统具有满足对象要求的最小软、硬件配置。

#### 2. 嵌入式系统对环境的要求

由于是嵌入到对象系统中,因此必须满足对象系统的环境要求,如物理环境(集成度高、体积小)、电气环境(可靠性高)、成本低(价廉)、功耗低(能耗少)等高性价比要求。这是嵌入式系统的嵌入性所要求的。另外,能满足对温度、湿度、压力等自然环境的要求,民用和工业级以及军用对自然环境的要求差别很大。

#### 3. 嵌入式系统必须是能满足对象系统控制要求的计算机系统

嵌入式系统必须配置有与对象系统相适应的接口电路,如A/D接口、D/A接口、PWM接

口、LCD 接口、SPI 接口、I<sup>2</sup>C 接口、CAN、USB 以及 Ethernet 等诸多外围接口。

#### 4. 嵌入式系统是集计算机技术与各行业于一体的集成系统

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系统。

#### 5. 嵌入式系统具有较长的生命周期

嵌入式系统和实际应用有机地结合在一起,它的更新换代也是和实际产品一同进行的,因此基于嵌入式系统的产品一旦进入市场,具有较长的生命周期。

#### 6. 嵌入式系统的软件固化在非易失性存储器中

为了提高执行速度和系统可靠性,嵌入式系统中的软件一般都固化到 EPROM、E<sup>2</sup>PROM 或 Flash 等非易失性存储器中,而不是像通用计算机系统那样存储于磁盘等载体中。

#### 7. 嵌入式系统的实时性要求

许多嵌入式系统都有实时性要求,需要有对外部事件迅速做出反应的能力。

#### 8. 嵌入式系统需专用开发环境和开发工具进行设计

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相应的开发环境,如 ADS、IAR、MDK-ARM 等集成开发环境。

### 1.1.3 嵌入式系统的发展

20 世纪 60 年代末期,随着微电子技术的发展,嵌入式计算机开始逐步兴起。随着计算机技术、通信技术、电子技术一体化进程不断加剧,目前嵌入式技术已成为广大技术人员的研究热点。

#### 1. 嵌入式系统发展的四个阶段

##### (1) 8 位/16 位单片机为核心的初级嵌入式系统

第一阶段是以 8 位/16 位单片机为核心的初级嵌入式系统,典型的单片机是 Intel 的 8051 系列,具有与监测、伺服、指示设备相配合的功能。其应用于专业性很强的工业控制系统中,通常不含操作系统,软件采用汇编语言编程对系统进行控制。该阶段的嵌入式系统处于低级阶段,主要特点是系统结构和功能单一,处理效率不高,存储容量较小,用户接口简单或没有用户接口,但使用简单,成本低。

##### (2) 以 32 位嵌入式微控制器为基础的中级嵌入式系统

第二阶段是以 32 位嵌入式微控制器为基础,以无操作系统或简单嵌入式操作系统为核心的嵌入式系统。其主要特点是以 ARM 微控制器为典型代表,种类多,系统效率高,成本低;简单嵌入式操作系统具有兼容性、扩展性,但用户界面简单。

##### (3) 以嵌入式操作系统为标志的中高级嵌入式系统

第三阶段是 ARM 处理器仍然为主流嵌入式处理器,以嵌入式操作系统为标志的嵌入式系统。其主要特点是嵌入式系统能运行于各种不同嵌入式处理器上,兼容性好;操作系统内核小、效率高,并且可任意裁剪;具有文件和目录管理、多任务功能,支持网络、具有图形窗口以及良好的用户界面;具有大量的应用程序接口,嵌入式应用软件丰富。

##### (4) 以 Internet 为标志的高级嵌入式系统

第四阶段是以 Internet 为标志的嵌入式系统。以往的嵌入式系统还多孤立于 Internet,

随着网络应用的不断深入,随着信息家电的发展,嵌入式系统的应用必将与 Internet 有机结合在一起,成为嵌入式系统发展的未来。使用的典型处理器为 ARM 处理器。

需要说明的是,根据应用领域和应用场合的不同,这四个阶段的嵌入式系统都在应用当中,主要选择依据是性价比。有些场合只用单片机就够了,如电动自行车控制器等独立控制的应用场合,就没有必要采用嵌入式操作系统为核心的嵌入式系统,更不需要以 Internet 为标志的嵌入式系统。

## 2. 嵌入式系统的发展趋势

### (1) 联网成为必然趋势

为适应嵌入式分布处理结构和应用上网需求,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。针对外部联网要求,嵌入式设备必须配有通信接口,相应需要 TCP/IP 协议簇软件支持;由于家用电器相互关联(如防盗报警、灯光能源控制、影视设备和信息终端交换信息)及实验现场仪器的协调工作等要求,新一代嵌入式设备还需具备 IEEE1394、USB、CAN、Bluetooth 或 IrDA 通信接口,同时也需要提供相应的通信组网协议软件和物理层驱动软件。

### (2) 支持小型电子设备实现小尺寸、低功耗和低成本

为满足这种特性,要求嵌入式产品设计者相应降低处理器的性能,限制内存容量和复用接口芯片。这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和不断改进算法,优化编译器性能。

### (3) 提供精巧的多媒体人机界面

人们与信息终端交互要求以 GUI 屏幕为中心的多媒体界面。手写文字输入、语音拨号上网、收发电子邮件以及彩色图形、图像已取得初步成效。要求嵌入式系统能提供精巧的多媒体人机界面。

## 1.1.4 嵌入式系统的应用

嵌入式系统具有非常广阔的应用领域,是现代计算机技术改造传统产业、提升许多领域技术水平的有力工具。主要应用领域包括产品智能化(智能仪表、智能和信息家电)、工业自动化(测控装置、数控机床、过程控制、数据采集与处理)、办公自动化(通用计算机中的智能接口)、电网安全与电网设备检测、商业应用(电子秤、POS 机、条码识别机)、安全防范(防火、防盗、防泄漏等报警系统)、网络通信(路由器、网关、手机、PDA 等,无线传感器网络)、汽车电子与航空航天(汽车防盗报警器、汽车和飞行器黑匣子、导航仪以及飞行控制器等)以及军事等各个领域,如图 1.1 所示。

嵌入式系统在很多产业中得到了广泛的应用并逐步改变着这些产业,神舟飞船和长征系列火箭系统中就有很多嵌入式系统,导弹的制导系统也有嵌入式系统,高档汽车中也有多达几十个嵌入式系统。

在日常生活中,人们使用着各种嵌入式系统,但未必知道它们。事实上,几乎所有带有一点“智能”的家电(全自动洗衣机、电脑电饭煲等)都是嵌入式系统应用的例子。嵌入式系统广泛的适应能力和多样性使得视听、工作场所甚至健身设备中到处都有嵌入式系统的影子。因此,可以说嵌入式系统无处不在。