



全国高等职业教育规划教材

# 嵌入式技术实用教程

主 编 姜 帆

副主编 李 毅



电子教案下载网址 [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

全国高等职业教育规划教材

# 嵌入式技术实用教程

主 编 姜 帆

副主编 李 毅

机械工业出版社

本书以当前流行的 ARM9 微处理器 S3C2410 为核心,以 EduKit-III 实验教学系统为平台,介绍嵌入式系统基础、ARM9 体系结构、指令系统、嵌入式系统程序开发、S3C2410 系统电路及接口技术、嵌入式 Linux 操作系统、Boot Loader、嵌入式系统设计等内容。

本书可作为高职高专院校计算机专业、电类专业、自动化以及机电一体化专业的教材,也可作为相关专业技术人员的参考书。

本书配套授课电子课件,需要的教师可登录 [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com) 免费注册、审核通过后下载,或联系编辑索取(QQ: 81922385, 电话: 010-88379739)。

## 图书在版编目(CIP)数据

嵌入式技术实用教程 / 姜帆主编. —北京: 机械工业出版社, 2010.8  
全国高等职业教育规划教材  
ISBN 978-7-111-31628-2

I. ①嵌… II. ①姜… III. ①微处理器—系统设计—高等学校: 技术学校—教材 IV. ①TP332

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 162237 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: 鹿 征 马 超

责任印制: 杨 曦

北京中兴印刷有限公司印刷

2010 年 10 月第 1 版·第 1 次印刷

184mm×260mm·13.75 印张·340 千字

0001—3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-31628-2

定价: 24.00 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

网络服务

社服务中心: (010) 88361066

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售一部: (010) 68326294

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售二部: (010) 88379649

读者服务部: (010) 68993821

封面无防伪标均为盗版

# 全国高等职业教育规划教材计算机专业

## 编委会成员名单

主 任 周智文

副 主 任 周岳山 林 东 王协瑞 张福强  
陶书中 龚小勇 王 泰 李宏达  
赵佩华 陈 晴

委 员 （按姓氏笔画排序）

|     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|
| 马 伟 | 马林艺 | 卫振林 | 万雅静 |
| 王兴宝 | 王德年 | 尹敬齐 | 卢 英 |
| 史宝会 | 宁 蒙 | 刘本军 | 刘新强 |
| 刘瑞新 | 余先锋 | 张洪斌 | 张 超 |
| 杨 莉 | 陈 宁 | 汪赵强 | 赵国玲 |
| 赵增敏 | 贾永江 | 陶 洪 | 康桂花 |
| 曹 毅 | 眭碧霞 | 鲁 辉 | 裴有柱 |

秘 书 长 胡毓坚

## 出版说明

根据《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》中提出的高等职业院校必须把培养学生动手能力、实践能力和可持续发展能力放在突出的地位,促进学生技能的培养,以及教材内容要紧密结合生产实际,并注意及时跟踪先进技术的发展等指导精神,机械工业出版社组织全国近 60 所高等职业院校的骨干教师对在 2001 年出版的“面向 21 世纪高职高专系列教材”进行了全面的修订和增补,并更名为“全国高等职业教育规划教材”。

本系列教材是由高职高专计算机专业、电子技术专业和机电专业教材编委会分别会同各高职高专院校的一线骨干教师,针对相关专业的课程设置,融合教学中的实践经验,同时吸收高等职业教育改革的成果而编写完成的,具有“定位准确、注重能力、内容创新、结构合理和叙述通俗”的编写特色。在几年的教学实践中,本系列教材获得了较高的评价,并有多品种被评为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。在修订和增补过程中,除了保持原有特色外,针对课程的不同性质采取了不同的优化措施。其中,核心基础课的教材在保持扎实的理论基础的同时,增加实训和习题;实践性较强的课程强调理论与实训紧密结合;涉及实用技术的课程则在教材中引入了最新的知识、技术、工艺和方法。同时,根据实际教学的需要对部分课程进行了整合。

归纳起来,本系列教材具有以下特点:

- 1) 围绕培养学生的职业技能这条主线来设计教材的结构、内容和形式。
- 2) 合理安排基础知识和实践知识的比例。基础知识以“必需、够用”为度,强调专业技术应用能力的训练,适当增加实训环节。
- 3) 符合高职学生的学习特点和认知规律。对基本理论和方法的论述要容易理解、清晰简洁,多用图表来表达信息;增加相关技术在生产中的应用实例,引导学生主动学习。
- 4) 教材内容紧随技术和经济的发展而更新,及时将新知识、新技术、新工艺和新案例等引入教材。同时注重吸收最新的教学理念,并积极支持新专业的教材建设。
- 5) 注重立体化教材建设。通过主教材、电子教案、配套素材光盘、实训指导和习题及解答等教学资源的有机结合,提高教学服务水平,为高素质技能型人才的培养创造良好的条件。

由于我国高等职业教育改革和发展的速度很快,加之我们的水平和经验有限,因此在教材的编写和出版过程中难免出现问题和错误。我们恳请使用这套教材的师生及时向我们反馈质量信息,以利于我们今后不断提高教材的出版质量,为广大师生提供更多、更适用的教材。

机械工业出版社

# 前 言

嵌入式系统是近年来新兴的，且发展很快的学科，目前已广泛应用于工业控制、信息家电、通信设备、医疗仪器、军事装备等众多领域。它将作为后 PC 时代的核心，成为一种新的计算机平台。目前，职业院校嵌入式系统的教学正处于起步阶段，适合职业院校教学的教材还较少。本书作者参阅了国内外相关教材和资料，结合科研及多年教学经验，组织编写了这本适合职业院校教学的《嵌入式系统实用教程》。

嵌入式系统涉及的知识点非常多，因此，对于初学者来说，应结合自己的目标，找准学习嵌入式系统知识的切入点。对于职业院校而言，培养的是应用型人才，他们将来面对的主要是应用嵌入式系统硬件、软件平台来进行二次开发，所以应将学习重点放在基于某个嵌入式系统平台（包括硬件平台和软件平台）进行应用系统设计和开发的能力上。因此本书选择典型的 S3C2410 处理器为硬件平台，介绍嵌入式系统开发的各个环节。本书侧重实践，辅以代码加以讲解，从分析的角度来学习嵌入式系统开发的各种技术。本书使用的工具 RealView MDK（Microcontroller Develop Kit）源自德国的原 Keil 公司，该公司已被 ARM 公司收购。因此，MDK 便成了 ARM 公司推出的专业嵌入式开发工具。MDK 是为满足基于 MCU 进行嵌入式软件开发的需求而推出的，它包含强大的设备调试和仿真支持、众多的案例模板和固件实例及存储优化的 RTOS 库。MDK 适合不同层次的开发者使用，包括专业的应用程序开发工程师和嵌入式软件开发入门者，并能满足要求较高的微控制器应用。

本书系统性强，结构合理，每一章都配备了相关实训，将嵌入式软硬件理论讲解和嵌入式技术应用实践结合在一起。在学习本书之前，读者最好具有计算机硬件、汇编语言、单片机及接口、Linux 系统等基础知识。

本书由姜帆任主编，李毅任副主编，徐宏英、陈平、赵鹏举参与编写。另外，李毅对有关章节的程序进行了验证。

深圳英蓓特信息技术有限公司为作者提供了最新的试验箱、ULINK2 仿真器、MDK 软件，并在技术上给予了巨大的支持。本书使用的部分代码也是英蓓特公司提供的，并在实验平台顺利运行。

为便于读者学习本书的相关内容，机械工业出版社教材服务网（[www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)）提供了针对本书的相关资源（包括 PPT、部分代码、文档以及本书适用的一些软件）。

由于嵌入式技术发展迅速，加上作者水平有限，书中难免有疏漏和错误之处，请同行专家以及读者提出批评和建议。

编 者

# 目 录

出版说明

前言

## 第 1 章 嵌入式系统基础 ..... 1

### 1.1 嵌入式系统概述 ..... 1

#### 1.1.1 嵌入式系统的定义 ..... 1

#### 1.1.2 嵌入式系统与 PC ..... 2

#### 1.1.3 嵌入式系统的现状与发展 ..... 2

### 1.2 嵌入式系统的特点和应用 ..... 4

#### 1.2.1 嵌入式系统的特点 ..... 4

#### 1.2.2 嵌入式系统的应用 ..... 4

### 1.3 嵌入式系统的组成 ..... 6

#### 1.3.1 嵌入式系统的硬件平台 ..... 6

#### 1.3.2 嵌入式操作系统 ..... 8

#### 1.3.3 典型嵌入式系统的组成结构 ..... 10

### 1.4 嵌入式系统的学习 ..... 11

### 1.5 实训 嵌入式产品技术讨论 ..... 11

### 1.6 习题 ..... 12

## 第 2 章 ARM 体系结构 ..... 13

### 2.1 嵌入式处理器内核 ..... 13

### 2.2 ARM 系列处理器介绍 ..... 14

#### 2.2.1 ARM7 系列 ..... 14

#### 2.2.2 ARM9 系列 ..... 15

#### 2.2.3 ARM9E 系列 ..... 15

#### 2.2.4 ARM10E 系列 ..... 16

#### 2.2.5 SecurCore 系列 ..... 16

#### 2.2.6 StrongARM 系列 ..... 16

#### 2.2.7 XScale 系列 ..... 17

### 2.3 ARM9 微处理器 ..... 17

#### 2.3.1 ARM9 的结构特点 ..... 17

#### 2.3.2 ARM9 的工作模式 ..... 17

#### 2.3.3 ARM9 的流水线技术 ..... 18

### 2.4 ARM9 的存储组织结构 ..... 19

#### 2.4.1 大端存储格式与小端存储格式 ..... 19

#### 2.4.2 I/O 端口的访问方式 ..... 19

#### 2.4.3 内部寄存器 ..... 20

### 2.5 ARM9 的异常 ..... 24

#### 2.5.1 异常的种类 ..... 24

#### 2.5.2 异常的优先级 ..... 25

#### 2.5.3 异常的响应和返回 ..... 26

### 2.6 实训 嵌入式技术小论文 ..... 26

### 2.7 习题 ..... 27

## 第 3 章 嵌入式处理器指令系统 ..... 28

### 3.1 ARM 指令分类及指令格式 ..... 28

#### 3.1.1 ARM 指令分类及一般格式 ..... 28

#### 3.1.2 ARM 指令中的操作数符号 ..... 29

#### 3.1.3 ARM 指令中的移位操作 ..... 30

### 3.2 ARM 指令的寻址方式 ..... 31

#### 3.2.1 立即寻址 ..... 31

#### 3.2.2 寄存器寻址 ..... 32

#### 3.2.3 寄存器间接寻址 ..... 32

#### 3.2.4 基址加变址寻址 ..... 32

#### 3.2.5 相对寻址 ..... 32

#### 3.2.6 堆栈寻址 ..... 33

#### 3.2.7 多寄存器寻址 ..... 33

### 3.3 ARM 指令集 ..... 34

#### 3.3.1 数据处理类指令 ..... 34

#### 3.3.2 程序状态寄存器访问指令 ..... 40

#### 3.3.3 分支指令 ..... 41

#### 3.3.4 加载/存储指令 ..... 43

#### 3.3.5 协处理器指令 ..... 46

#### 3.3.6 异常中断指令 ..... 48

### 3.4 Thumb 指令集 ..... 48

#### 3.4.1 数据处理类指令 ..... 49

#### 3.4.2 分支指令 ..... 50

#### 3.4.3 加载/存储指令 ..... 50

#### 3.4.4 异常中断指令 ..... 51

|                                                 |    |                                      |     |
|-------------------------------------------------|----|--------------------------------------|-----|
| 3.5 实训 $\mu$ Vision 3 IDE for ARM<br>开发环境 ..... | 52 | 5.3.8 以太网接口电路 .....                  | 95  |
| 3.6 习题 .....                                    | 57 | 5.3.9 USB 接口电路 .....                 | 97  |
| <b>第 4 章 嵌入式系统程序开发</b>                          |    | 5.3.10 IIS 接口电路 .....                | 97  |
| <b>基础</b> .....                                 | 58 | 5.3.11 LCD 接口电路 .....                | 98  |
| 4.1 ARM 汇编器所支持的伪指令 .....                        | 58 | 5.4 实训 .....                         | 99  |
| 4.1.1 符号定义伪指令 .....                             | 58 | 5.4.1 I/O 接口实训 .....                 | 99  |
| 4.1.2 数据定义伪指令 .....                             | 60 | 5.4.2 串口通信实训 .....                   | 103 |
| 4.1.3 汇编控制伪指令 .....                             | 62 | 5.4.3 中断实训 .....                     | 110 |
| 4.1.4 宏指令 .....                                 | 63 | 5.4.4 键盘控制实训 .....                   | 119 |
| 4.1.5 其他常用的伪指令 .....                            | 64 | 5.4.5 “看门狗”实训 .....                  | 125 |
| 4.2 汇编语言的语句格式 .....                             | 68 | 5.5 习题 .....                         | 128 |
| 4.2.1 汇编语言程序中的常用符号 .....                        | 69 | <b>第 6 章 嵌入式 Linux 操作系统</b> .....    | 129 |
| 4.2.2 汇编语言程序中的表达式 .....                         | 69 | 6.1 嵌入式 Linux 简介 .....               | 129 |
| 4.3 ARM 汇编语言程序结构 .....                          | 72 | 6.1.1 Linux 概述 .....                 | 129 |
| 4.3.1 汇编语言的程序结构 .....                           | 72 | 6.1.2 Linux 的组成 .....                | 130 |
| 4.3.2 汇编语言的子程序调用 .....                          | 73 | 6.1.3 嵌入式 Linux 及其特点 .....           | 130 |
| 4.3.3 汇编语言与 C/C++ 的混合<br>编程 .....               | 73 | 6.2 嵌入式 Linux 的体系结构 .....            | 131 |
| 4.4 RealView MDK 简介 .....                       | 75 | 6.2.1 Linux 系统内核结构 .....             | 132 |
| 4.5 ULINK2 仿真器简介 .....                          | 76 | 6.2.2 $\mu$ Clinux 内存管理 .....        | 134 |
| 4.6 实训 .....                                    | 77 | 6.2.3 $\mu$ Clinux 内核结构 .....        | 136 |
| 4.6.1 ARM 汇编指令实训 .....                          | 77 | 6.2.4 内存保护 .....                     | 137 |
| 4.6.2 Thumb 汇编指令实训 .....                        | 79 | 6.2.5 应用程序库 .....                    | 138 |
| 4.6.3 C 语言编程实训 .....                            | 80 | 6.2.6 文件系统的支持 .....                  | 138 |
| 4.6.4 C 语言与汇编语言的相互调用 .....                      | 82 | 6.3 移植 Linux 内核到 S3C2410<br>平台 ..... | 138 |
| 4.7 习题 .....                                    | 84 | 6.3.1 内核移植简介 .....                   | 138 |
| <b>第 5 章 S3C2410 系统电路及<br/>    接口技术</b> .....   | 85 | 6.3.2 内核移植方法 .....                   | 139 |
| 5.1 SoC 概述 .....                                | 85 | 6.4 构建嵌入式 Linux 的开发<br>环境 .....      | 140 |
| 5.2 S3C2410 系统概述 .....                          | 85 | 6.4.1 预备知识 .....                     | 141 |
| 5.3 S3C2410 系统接口电路 .....                        | 86 | 6.4.2 交叉开发环境介绍 .....                 | 142 |
| 5.3.1 概述 .....                                  | 86 | 6.4.3 安装交叉开发工具 .....                 | 142 |
| 5.3.2 系统电源电路 .....                              | 88 | 6.4.4 主机交叉开发环境配置 .....               | 144 |
| 5.3.3 系统时钟 .....                                | 89 | 6.5 实训 .....                         | 147 |
| 5.3.4 复位电路 .....                                | 89 | 6.5.1 Linux 操作系统的安装与应用<br>基础实训 ..... | 147 |
| 5.3.5 JTAG 接口电路 .....                           | 90 | 6.5.2 搭建嵌入式 Linux 开发环境 .....         | 154 |
| 5.3.6 存储器电路 .....                               | 91 | 6.6 习题 .....                         | 157 |
| 5.3.7 串行接口电路 .....                              | 94 |                                      |     |

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| <b>第 7 章 嵌入式系统的</b>           |     |
| <b>Boot Loader</b> .....      | 158 |
| 7.1 Boot Loader 概述 .....      | 158 |
| 7.2 Boot Loader 与嵌入式系统的       |     |
| 关系 .....                      | 158 |
| 7.2.1 Boot Loader 的操作模式 ..... | 159 |
| 7.2.2 Boot Loader 的总体设计 ..... | 160 |
| 7.3 Boot Loader 的应用 .....     | 161 |
| 7.3.1 Boot Loader 的种类 .....   | 161 |
| 7.3.2 U-Boot 工程简介 .....       | 163 |
| 7.3.3 U-Boot 编译 .....         | 163 |
| 7.3.4 U-Boot 的移植思路 .....      | 166 |
| 7.3.5 U-Boot 的烧写 .....        | 167 |
| 7.3.6 U-Boot 的常用命令 .....      | 168 |
| 7.4 实训 .....                  | 175 |
| 7.4.1 烧写 U-Boot 实训 .....      | 175 |
| 7.4.2 Linux 内核编译与下载实训 ...     | 177 |
| 7.5 习题 .....                  | 180 |
| <b>第 8 章 嵌入式系统设计</b> .....    | 181 |
| 8.1 嵌入式系统设计概述 .....           | 181 |
| 8.2 嵌入式系统的设计方法 .....          | 182 |
| 8.2.1 嵌入式系统的设计步骤 .....        | 182 |
| 8.2.2 嵌入式系统的一般设计方法 ...        | 183 |
| 8.2.3 嵌入式系统的硬、软件协同            |     |
| 设计技术 .....                    | 184 |
| 8.3 ARM 微处理器芯片的选择 ...         | 185 |
| 8.3.1 选择 ARM 微处理器芯片应          |     |
| 考虑的因素 .....                   | 186 |
| 8.3.2 选择 ARM 芯片示例 .....       | 188 |
| 8.4 嵌入式系统设计实例 .....           | 190 |
| 8.4.1 车载信息系统的功能分析 .....       | 190 |
| 8.4.2 车载信息系统的设计方案 .....       | 190 |
| 8.4.3 车载系统硬件设计 .....          | 191 |
| 8.4.4 车载系统软件平台 .....          | 193 |
| 8.5 实训 .....                  | 195 |
| 8.5.1 嵌入式产品总体设计 .....         | 195 |
| 8.5.2 车载系统 IC 卡子模块设计          |     |
| 实训(选) .....                   | 195 |
| 8.6 习题 .....                  | 210 |
| <b>参考文献</b> .....             | 211 |

# 第1章 嵌入式系统基础

学习目标:

- 1) 理解嵌入式系统的定义, 了解嵌入式系统的现状以及发展趋势。
- 2) 明确嵌入式系统的特点及其应用。
- 3) 掌握嵌入式系统的组成结构。
- 4) 了解嵌入式系统的学习内容和学习方法。

## 1.1 嵌入式系统概述

### 1.1.1 嵌入式系统的定义

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。如一台 PC (个人计算机) 就是一个完整的计算机系统, 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, 人们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, 这样的计算机系统称为通用计算机系统。但是有些系统却不是这样, 如医用的微波治疗仪、胃镜等也是一个系统, 系统中也有计算机, 但是这种计算机 (或处理器) 是作为某个专用系统中的一个部件而存在的, 其本身的存在并非目的而只是手段。这种嵌入到专用系统中的计算机, 被称为嵌入式计算机。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器中, 而是指为目标系统构筑起合适的计算机, 再把它有机地植入, 甚至融入目标系统。

嵌入式系统 (Embedded System) 是嵌入式计算机系统的简称, 简单地说, 嵌入式系统就是嵌入到目标体系中的专用计算机系统。嵌入性、专用性与计算机系统是嵌入式系统的 3 个基本要素。具体地讲, 嵌入式系统是指以应用为中心, 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。也就是说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。

应该注意的是, 嵌入式系统与嵌入式设备不是一个概念。嵌入式设备是指内部有嵌入式系统的产品、设备, 例如, 内含微处理器的家用电器、仪器仪表、工控单元、机器人、手机、PDA 等, 如图 1-1 所示。

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 (即嵌入式系统)。

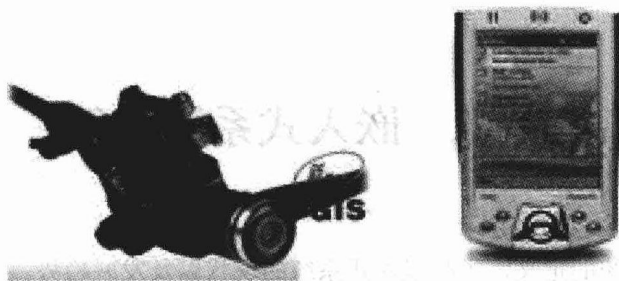


图 1-1 嵌入式设备中的胃镜和 PDA

### 1.1.2 嵌入式系统与 PC

为了更清楚地理解嵌入式系统，下面将嵌入式系统与通用 PC 进行简单区分与比较。

#### 1. 通用 PC 的主要用途

- 1) 文档处理。
- 2) 多媒体处理。
- 3) 事务处理与软件开发。
- 4) 上网。
- 5) 电子媒体。
- 6) 自动控制系统的终端显示设备或其他设备。

上述用途有时候是相互关联的。如阅读时看到的一些文字材料是用来描述如何制作多媒体的，开发时可能需要大量的文字性材料对某一方面进行描述，有时候这种描述性的文档中集成了多媒体（声音和视频），使用互联网时，也主要是看文字材料和多媒体（Flash、电影等）。

#### 2. 嵌入式系统的用途

- 1) 自动控制。
- 2) 数据采集。
- 3) 其他。

实际上，嵌入式系统是伴随着自动控制的需求而发展起来的，如工业控制中的数控机床、汽车的自动驾驶等。目前，嵌入式系统在人类生产生活中的应用非常广泛，最常见的是手机、MP3 等手持设备，这些民用产品一般用于通信或娱乐，同时还具备一些商务功能。

### 1.1.3 嵌入式系统的现状与发展

20 世纪 60 年代末期，随着微电子技术的发展，嵌入式计算机逐步兴起。随着计算机技术、通信技术、电子技术一体化的进程不断推进，嵌入式技术已成为广大技术人员研究的热点。发展至今，嵌入式系统已成为后 PC 时代被广泛使用的计算机平台。在人们日常生活、学习和工作中所接触到的仪器或设备里，都将嵌入具有强大计算能力的嵌入式系统。它不仅广泛地应用于众多成熟领域，如工业控制、家用电器、通信设备、医疗仪器、军事设备等，而且还创造了许多新的应用，如 PDA、智能手机、MP4 等。由此可见，嵌入式系统已深刻

地影响着人们的生活、学习和工作。

## 1. 嵌入式系统发展的 4 个阶段

### (1) 以单片机为核心的低级嵌入式系统

以单片机（微控制器）为核心的可编程序控制器形式的低级嵌入式系统是嵌入式系统发展的第一阶段。它具有与监测、伺服、指示设备相配合的功能，应用于专业性很强的工业控制系统中，通常不含操作系统，其软件采用汇编语言编程并对系统进行控制。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，但它使用简单，成本低。

### (2) 以嵌入式微处理器为基础的初级嵌入式系统

以嵌入式微处理器为基础，以简单操作系统为核心的初级嵌入式系统是嵌入式系统发展的第二阶段。其主要特点是处理器种类多，通用性较弱；系统效率高，成本低；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级嵌入式系统

以嵌入式操作系统为标志的中级嵌入式系统是嵌入式系统发展的第 3 阶段。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，并且可以裁减；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

以 Internet 为标志的高级嵌入式系统是嵌入式系统发展的第 4 阶段。目前嵌入式系统大多孤立于 Internet 之外，但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。

## 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的需求，面向 21 世纪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，同时需要相应的 TCP/IP 协议栈软件支持。由于家用电器互相关联（如防盗报警、灯光能源控制、影视设备和信息终端交换信息）及试验现场仪器的协调工作等要求，新一代嵌入式设备还须具备 IEEE 1394、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

这种特性要求嵌入式产品设计者相应降低处理器性能，限制内存容量和复用接口芯片，这就提高了对嵌入式软件设计技术的要求，使设计者不得不选用最佳的编程模型和不断改进算法，采用 Java 编程模式，优化编译器性能。这不但要求软件人员有丰富经验，更需要发展先进嵌入式编程语言和软件技术，如 Java、Web 和 WAP 等。

### (3) 提供精巧的多媒体人机界面

嵌入式设备之所以能让亿万用户接受，重要因素之一是它们与使用者之间的亲和度以及自然的人机交互界面。人们与信息终端的交互要求以 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。目前虽然一些 PDA 在显示屏幕上已实现汉字写入、短信息语音发布，但离掌式语音同步翻译还

有很大距离。

## 1.2 嵌入式系统的特点和应用

### 1.2.1 嵌入式系统的特点

嵌入式系统本身就是计算机系统，因此，它设计中所面临的问题有许多是计算机系统设计中同样面临的共性问题。但由于嵌入式系统是以应用为中心的，通常它并不是独立的，同时与其所嵌入的设备紧密关联，因此，与通用计算机比较而言，它的设计还是具有许多特殊性的，归纳起来有以下几点。

1) 嵌入式系统通常是面向特定应用的。嵌入式系统大多工作在为特定用户群设计的系统中，它通常都具有低功耗、体积小、集成度高等特点，能够把通用计算机中许多由板卡完成的任务集成在芯片内部，从而有利于嵌入式系统设计小型化，使其移动能力大大增强，跟网络的耦合也越来越紧密。

2) 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。

3) 嵌入式系统的硬件和软件都必须高效率地设计，根据应用需求量体裁衣、去除冗余，力争在同样的硅片面积或单板面积上实现更高的性能，这样才能在具体应用中更具有竞争力。

4) 嵌入式系统和具体应用有机地结合在一起，它的升级换代也是和具体产品同步进行的，因此嵌入式系统产品一旦进入市场，具有较长的生命周期。

5) 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在存储器芯片或单片机本身上，而不是存储于磁盘等载体中。

6) 嵌入式系统本身不具备自行开发能力，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。

### 1.2.2 嵌入式系统的应用

后 PC 时代的到来使人们越来越多地接触到一个流行的名称——嵌入式系统，其实际应用如手机、PDA、智能家电、数码相机、MP4 等。这些形式多样的嵌入式系统不仅仅丰富了人们的应用，而且与移动通信、传感器网络等技术一起，改变了现有的计算机环境。未来的嵌入式系统将渗透到人们日常生活、工作、学习的各个方面。嵌入式系统的应用主要在以下几个领域，如图 1-2 所示。

#### 1. 信息家电

信息家电是指所有能提供信息服务或通过网络系统交互信息的消费类电子产品。这些产品具有信息服务功能，如网络浏览、视频点播、文字处理、电子邮件、个人事务管理等。这些产品简单易用、价格低廉、维护简便。

后 PC 时代，计算机将无处不在，家用电器将向数字化和网络化发展，其中电视机、冰箱、微波炉、电话等都将嵌入计算机，并通过家庭服务器与 Internet 连接，转变为智能网络

家电，还可以实现远程家电控制、远程教育等新功能。目前，数字电视和家电远程控制已经在某些智能化的小区得到应用。

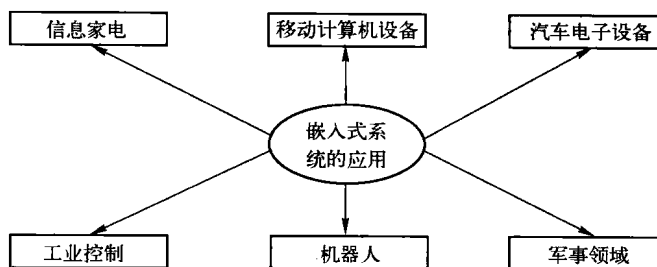


图 1-2 嵌入式系统的应用领域

## 2. 移动计算设备

移动计算设备包括智能手机、PDA、电子导航系统等。中国拥有世界上最大的手机用户群，智能手机已向着具有强大计算功能的方向发展，而不再仅仅只用于通信。未来新的移动、手持式设备将会得到极大的发展，通过这些设备人们可以随时随地进行互联访问。

## 3. 汽车电子设备

汽车产业是我国飞速发展的一个行业，汽车上 70% 的创新来源于汽车电子设备，因此具有巨大的发展空间。汽车电子设备包括车载音响、车载电话、防盗系统等产品，此外还包括汽车仪表、导航系统、发动机控制器（如空燃比控制，点火正时控制）、底盘控制器（如制动防抱死控制、驱动防滑控制、车辆稳定性控制）等技术含量高的产品。将来汽车将成为娱乐中心和移动办公中心，汽车电子设备的各组成部分将要建立在标准通信协议基础上。随着控制单元（MCU）应用的提高，嵌入式系统在汽车电子设备中将有新的要求，如可靠性和温度特性都不同于消费电子。嵌入式 Linux 等操作系统将在汽车电子设备中得到广泛使用。

## 4. 工业控制

基于嵌入式微处理器的工业自动化设备获得了迅速发展，目前已有大量 8 位、16 位和 32 位嵌入式微处理器应用于工业过程控制，如数控机床、电力系统、电网设备监控等领域中。就传统的工业控制产品而言，低端产品往往是 8 位单片机。但随着技术的发展，32 位和 64 位处理器逐渐成为工业控制设备的核心。相对于其他领域，机电产品可以说是嵌入式系统最典型、最广泛的应用领域之一。从最初的 51 系列等单片机到现在的工控机、SoC 等，在各种机电产品中占有巨大的市场份额。目前，工业设备的控制器往往采用 16 位以上的微处理器，其中 ARM、MIPS 等处理器在控制器中占据核心地位，这些微处理器提供了丰富的接口总线资源，可以通过它们实现数据采集、数据处理、通信以及显示控制等功能。

## 5. 机器人

机器人技术的发展从来都是与嵌入式系统的发展紧密联系在一起。在 20 世纪 70 年代中期之后，由于智能理论的发展和 MCU 的出现，机器人技术得到了长足的发展。特别是近年来由于嵌入式处理器的高速发展，机器人从硬件到软件都呈现出崭新的面貌。嵌入式系统的发展将使机器人在微型化、高智能化方面的优势更加明显，同时也会大幅度地降低机器人的价格，使其在军事、工业、家庭等领域得到更广泛的应用。例如，火星车就是一个典型实例，它采用了 VxWorks 嵌入式操作系统，可以通过摄像头等外围设备采集火星图像等信

息，并将其发回地面指挥中心。

### 1.3 嵌入式系统的组成

一般来说，嵌入式系统由如图 1-3 所示的 3 个部分组成。

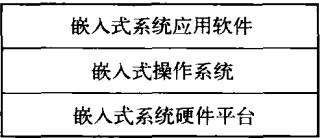


图 1-3 嵌入式系统组成示意图

由图 1-3 可知，嵌入式系统的组成部分是嵌入式系统硬件平台、嵌入式操作系统和嵌入式系统应用软件。其中，嵌入式系统硬件平台为各种嵌入式器件、设备（ARM、POWERPC、XScale、MIPS 等）；嵌入式操作系统是指在嵌入式硬件平台上运行的操作系统，目前主流的嵌入式操作系统有 Windows CE、VxWorks、pSOS、QNX、Palm OS、嵌入式 Linux（如  $\mu$ Clinux）等。具体使用哪种嵌入式操作系统还要根据具体情况进行选择。每种嵌入式操作系统都有自身的特点以吸引相关用户，例如，Windows CE 提供了良好的操作界面；嵌入式 Linux 提供了完善的网络技术支持； $\mu$ Clinux 是专门为 MMU 的 ARM 芯片开发的。下面分别对常见的嵌入式硬件平台和嵌入式操作系统进行介绍。

#### 1.3.1 嵌入式系统的硬件平台

嵌入式系统硬件的核心部件是各种类型的嵌入式处理器，嵌入式系统硬件平台是随着嵌入式处理器芯片的发展而发展的。在微处理器诞生的早期阶段，微处理器的数据位是 8 位的，可直接寻址的存储器容量通常为 64KB 或 1MB。以这类微处理器为核心的嵌入式系统，其硬件平台构件相对较简单，外围电路多采用 74 系列的芯片及独立的晶体管等。这个阶段的嵌入式系统硬件平台所用的 CPU 主要有 Z80、Intel8080、MC6800 等。后来，随着应用系统的需要及集成电路技术的发展，出现了外围接口电路与微处理器核集成在一块芯片上的单片机，典型的如 Intel 的 MC-51 系列单片机。而今天组成嵌入式系统的基本硬件构件已较复杂，如 16 位/32 位 CPU 或特殊功能的微处理器、特定功能的集成芯片、FPGA 或 CPLD 等。

据不完全统计，目前全世界嵌入式处理器的品种已经超过 1000 多种，流行体系结构有 30 多个系列。嵌入式处理器的寻址空间一般从 64KB 到几个 GB，处理速度从 0.1MI/s 到 2000MI/s。根据不同的应用状况，嵌入式处理器可以分成下面几类。

##### 1. 嵌入式微处理器（Embedded Microprocessor Unit, EMPU）

嵌入式微处理器的基础是通用计算机中的 CPU。在应用中，将微处理器装配在专门设计的电路板上，板上只保留和嵌入式应用有关的功能电路，这样可以大幅度减小系统体积和降低功耗。为了满足嵌入式应用的特殊要求，嵌入式微处理器虽然在功能上和标准微处理器基本是一样的，但在工作温度、抗电磁干扰、可靠性等方面一般都有所增强。但是由于在电路板上还必须包括 ROM、RAM 总线接口和各种外设等器件，从而降低了系统的可靠性。嵌入

式微处理器及存储器、总线、外设等安装在一块电路板上，因此称为单板计算机。典型的如 PC104、STD-BUS 等。近年来，德国、日本的一些公司又开发出类似“火柴盒”、名片大小的嵌入式计算机系列 OEM 产品。嵌入式处理器目前主要有 Am186/88、386EX、SC-400、PowerPC、68000、MIPS 系列等。

## 2. 嵌入式微控制器 (Microcontroller Unit, MCU)

嵌入式微控制器又称单片机，顾名思义，就是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，芯片内部集成 ROM/EPROM、RAM、总线、总线逻辑、定时/计数器、“WatchDog”、I/O、串行口、脉宽调制输出、A/D 转换器、D/A 转换器、FlashRAM、EEPROM 等各种必要功能和外设。为适应不同的应用需求，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是一样的，不同的是存储器容量、外设的配置和引脚封装。这样可以使单片机最大限度地和应用需求相匹配，功能不多也不少，从而降低功耗和成本。

和嵌入式微处理器相比，微控制器的最大特点是单片化，体积大大减小，从而使功耗和成本下降、可靠性提高。微控制器是目前嵌入式应用的主流。微控制器的芯片上外设资源一般比较丰富，适合于控制，因此称为微控制器。

嵌入式微控制器目前的品种和数量最多，比较有代表性的通用系列包括 8051、P51XA、MCS-251、MCS-96/196/296、C166/167、MC68HC05/11/12/16、68300、ARM 等。另外还有许多半通用系列，如支持 USB 接口的 MCU，支持 IC、CAN-BUS、LCD 等的 MCU。

在本书中并未把微处理器与微控制器进行严格区分，而是统称为微处理器。

## 3. 嵌入式数字信号处理器 (Digital Signal Processor, DSP)

DSP 对系统结构和指令进行了特殊设计，使其适合于执行 DSP 算法，编译效率较高，指令执行速度也较快。在数字滤波、FFT、谱分析等方面 DSP 算法正在大量应用。DSP 应用正从在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。嵌入式 DSP 有两个发展来源，一是 DSP 经过单片化、EMC 改造、增加片上外设成为嵌入式 DSP，TI 的 TMS320C2000/C5000 等属于此范畴；二是在通用单片机或 SoC 中增加 DSP 协处理器，如 Intel 公司的 MCS-296 和 Infineon (Siemens) 公司的 TriCore。

推动嵌入式 DSP 发展的另一个因素是嵌入式系统的智能化，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、ADSL 接入、实时语音压缩和解压系统、虚拟现实显示等。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，而这些正是 DSP 的长处所在。

嵌入式 DSP 比较有代表性的产品是 TI 公司的 TMS320 系列和 Motorola 公司的 DSO56000 系列。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 等几个系列的处理器。另外，Philips 公司近年也推出了基于可重叠嵌入式 DSP 结构并以低成本、低功耗技术制造的实时 DSP，特点是具备双 Harvard 结构和双乘/累加单元，应用目标是大批量生产的消费类产品。

## 4. 嵌入式片上系统 (System on Chip, SoC)

随着电子设计自动化 (EDA) 的推广和超大规模集成电路 (VLSI) 的普及以及半导体

工艺的迅速发展, 在一个硅片上实现更为复杂系统的时代已经来临。各种通用处理器内核将作为 SoC 设计的标准库, 和许多其他嵌入式系统外设一样, 成为 VLSI 设计中一种标准的器件, 用标准的超高速集成电路硬件描述语言 (VHDL) 等语言描述, 存储在器件库中。用户只需定义出其整个应用系统, 仿真通过后就可以把设计图交给半导体工厂制作样品。这样除个别无法集成的器件以外, 整个嵌入式系统大部分均可集成到一块或几块芯片中去, 应用系统电路板将变得很简洁, 对于减小体积和功耗、提高可靠性非常有利。

SoC 可分为通用和专用两类。通用系列包括 Infineon 公司的 TriCore、Motorola 公司的 M-Core、某些 ARM 系列器件、Echelon 和 Motorola 公司联合研制的 Neuron 芯片等。专用 SoC 一般专用于某个或某类系统中, 不为一般用户所知。一个有代表性的产品是 Philips 公司的 SmartXA, 它将 XA 单片机内核和支持超过 2048 位复杂 RSA 算法的 CCU 制作在一块硅片上, 形成一个可加载 Java 或 C 语言的专用 SoC, 可用于公众互联网安全方面。

### 1.3.2 嵌入式操作系统

嵌入式系统的软件部分包括系统软件 (即嵌入式操作系统) 和应用软件, 通常设计人员把这两种软件组合在一起, 作为一个有机的整体存在。应用程序控制着系统的动作和行为, 而操作系统控制着应用程序与嵌入式系统硬件的交互作用。嵌入式系统软件的要求与台式通用计算机有所不同, 其特点主要有以下几点。

#### 1. 软件要求固化存储

为了提高执行速度和系统可靠性, 嵌入式系统中的软件 (包括系统软件和应用软件) 一般都固化在外部存储器芯片或单片机内部存储器中, 而不是存储于磁盘等载体中。

#### 2. 软件代码要求高效率、高可靠性

尽管半导体技术的发展使微处理器速度不断提高、单片存储器容量不断增加, 但在大多数应用中, 存储空间仍然是宝贵的, 还存在实时性的要求。为此要求程序编写和编译工具的效率要高, 以减少程序二进制代码长度、提高执行速度。较短的代码可提高系统的可靠性。

#### 3. 系统软件有较高的实时性要求

在多任务嵌入式系统中, 对重要性各不相同的任务进行合理的调度是保证每个任务及时执行的关键, 单纯通过提高微处理器速度是无法完成和没有效率的, 这种任务调度只能由优化编写的系统软件来完成, 因此对于许多嵌入式系统而言, 其软件的实时性是基本要求。

嵌入式系统是以应用为核心的, 其应用软件是实现嵌入式系统功能的关键。在嵌入式系统发展的初期, 嵌入式系统的软件是一体化的, 即把软件中没有把系统软件和应用软件独立开来, 整个软件是一个大的循环控制程序, 设备控制功能模块、人机操作模块、硬件接口模块等通常都在这个大循环中。但是, 随着应用要求越来越复杂, 例如, 需要嵌入式系统能连接 Internet, 需要嵌入式系统具有多媒体处理功能, 需要嵌入式系统具有丰富的人机操作界面等, 若再按照传统方法把嵌入式系统设计成一个大的循环控制程序, 不仅费时、费力, 而且设计的程序可能不能满足需求。因此, 嵌入式系统的系统软件平台 (即嵌入式操作系统) 也得到了迅速的发展。

从 20 世纪 80 年代起, 国际上就有一些 IT 组织和公司, 开始进行商用嵌入式操作系统的研发。到了 21 世纪初, 嵌入式操作系统在嵌入式系统的开发中得到了广泛应用, 并在开