

21世纪高等学校计算机规划教材

21st Century University Planned Textbooks of Computer Science

# 嵌入式Linux 应用开发教程

Embedded Linux Programming

华清远见嵌入式学院 赵苍明 穆煜 编著

- 以S3C2410为基础，讲解基本概念
- 结合丰富代码实例，突出理论重点
- 精心设计实验内容，重视实践应用



精品系列

 人民邮电出版社  
POSTS & TELECOM PRESS

21世纪高等学校计算机规划教材

21st Century University Planned Textbooks of Computer Science

# 嵌入式Linux 应用开发教程

Embedded Linux Programming

华清远见嵌入式学院 赵苍明 穆煜 编著



精品系列

人民邮电出版社

北京

## 图书在版编目 (CIP) 数据

嵌入式Linux应用开发教程 / 赵苍明, 穆煜编著. —北京: 人民邮电出版社, 2009.10  
21世纪高等学校计算机规划教材. 精品系列  
ISBN 978-7-115-20904-7

I. 嵌… II. ①赵…②穆… III. Linux操作系统—程序设计—高等学校—教材 IV. TP316.89

中国版本图书馆CIP数据核字 (2009) 第099118号

## 内 容 提 要

本书重点介绍嵌入式Linux应用开发的基本概念和核心理论。全书分为3大部分,包括嵌入式Linux开发基础知识、嵌入式Linux C编程知识和嵌入式Linux应用开发知识。本书在讲解中给出了翔实的实例,并在部分章节的后面详细设计并分析了贴近实践的实验内容。

本书可作为高等院校计算机类、电子类、电气类、控制类专业高年级本科生、研究生学习嵌入式Linux应用开发的教材,也可供希望转入嵌入式领域的科研和工程技术人员参考使用。

21世纪高等学校计算机规划教材——精品系列

### 嵌入式Linux应用开发教程

- 
- ◆ 编 著 华清远见嵌入式学院 赵苍明 穆煜  
责任编辑 蒋亮
  - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街14号  
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn  
网址 <http://www.ptpress.com.cn>  
北京鑫正大印刷有限公司印刷
  - ◆ 开本: 787×1092 1/16  
印张: 21.25  
字数: 556千字  
印数: 1-3000册
- 2009年10月第1版  
2009年10月北京第1次印刷

---

ISBN 978-7-115-20904-7/TP

定价: 34.00元

读者服务热线: (010)67170985 印装质量热线: (010)67129223

反盗版热线: (010)67171154

计算机应用能力已经成为社会各行业最重要的工作要求之一，而计算机教材质量的好坏会直接影响人才素质的培养。目前，计算机教材出版市场百花争艳，品种急剧增多，要从林林总总的教材中挑选一本适合课程设置要求、满足教学实际需要的教材，难度越来越大。

人民邮电出版社作为一家以计算机、通信、电子信息类图书与教材出版为主的科技教育类出版社，在计算机教材领域已经出版了多套计算机系列教材。在各套系列教材中涌现出了一批被广大一线授课教师选用、深受广大师生好评的优秀教材。老师们希望我社能有更多的优秀教材集中地呈现在老师和读者面前，为此我社组织了这套“21世纪高等学校计算机规划教材——精品系列”。

“21世纪高等学校计算机规划教材——精品系列”具有下列特点。

(1) 前期调研充分，适合实际教学需要。本套教材主要面向普通本科院校的学生编写，在内容深度、系统结构、案例选择、编写方法等方面进行了深入细致的调研，目的是在教材编写之前充分了解实际教学的需要。

(2) 编写目标明确，读者对象针对性强。每一本教材在编写之前都明确了该教材的读者对象和适用范围，即明确面向的读者是计算机专业、非计算机理工类专业还是文科类专业的学生，尽量符合目前普通高等教学计算机课程的教学计划、教学大纲以及发展趋势。

(3) 精选作者，保证质量。本套教材的作者，既有来自院校的一线授课老师，也有来自 IT 企业、科研机构等单位的资深技术人员。通过他们的合作使老师丰富的实际教学经验与技术人员丰富的实践工程经验相融合，为广大师生编写出适合目前教学实际需求、满足学校新时期人才培养模式的高质量教材。

(4) 一纲多本，适应面宽。在本套教材中，我们根据目前教学的实际情况，做到“一纲多本”，即根据院校已学课程和后续课程的不同开设情况，为同一科目提供不同类型的教材。

(5) 突出能力培养，适应人才市场要求。本套教材贴近市场对于计算机人才的能力要求，注重理论技术与实际应用的结合，注重实际操作和实践动手能力的培养，为学生快速适应企业实际需求做好准备。

(6) 配套服务完善，共促提高。对于每一本教材，我们在教材出版的同时，都将提供完备的 PPT 课件，并根据需要提供书中的源程序代码、习题答案、教学大纲等内容，部分教材还将在作者的配合下，提供疑难解答、教学交流等服务。

在本套教材的策划组织过程中，我们获得了来自清华大学、北京大学、人民大学、浙江大学、吉林大学、武汉大学、哈尔滨工业大学、东南大学、四川大学、上海交通大学、西安交通大学、电子科技大学、西安电子科技大学、北京邮电大学、北京林业大学等院校老师的大力支持和帮助，同时获得了来自信息产业部电信研究院、联想、华为、中兴、同方、爱立信、摩托罗拉等企业和科研单位的领导和技术人员的积极配合。在此，人民邮电出版社向他们表示衷心的感谢。

我们相信，“21世纪高等学校计算机规划教材——精品系列”一定能够为我国高等院校计算机课程教学做出应有的贡献。同时，对于工作欠缺和不妥之处，欢迎老师和读者提出宝贵的意见和建议。

---

---

---

---

---

---

---

---

# 前言

---

---

---

---

---

---

---

---

在社会日益信息化的今天，计算机和网络的应用已经全面渗透到日常生活中。应用嵌入式系统的电子产品随处可见，如人们平常使用的手机、摄像机、医疗仪器、汽车。在经济发达国家，每个家庭平均拥有 255 个嵌入式系统，如每辆汽车平均装有 35 个嵌入式系统。嵌入式系统的应用广泛进入到工业、军事、宇宙、通信、运输、金融、医疗、气象、农业等众多领域。

ARM 作为一种 32 位的高性能、低成本的嵌入式 RISC 处理器，已得到广泛的应用。2007 年，全球半导体 IP 市场规模约为 19 亿美元，英国的 ARM 依然位居行业老大的地位，其营业收入约占全行业的四分之一。目前 ARM9 处理器仍然占据了高端嵌入式产品市场的很大份额。

随着摩托罗拉手机 A760、IBM 智能型手表 WatchPad、夏普 PDA Zaurus 等一款款高性能“智能数码产品”的出现，以及 Motorola、三星、MontaVista、飞利浦、Nokia、IBM、SUN 等众多国际顶级巨头的加入，嵌入式 Linux 的队伍越来越庞大了。目前，国外不少大学、研究机构和知名公司，都加入了嵌入式 Linux 的开发工作，成熟的嵌入式 Linux 产品不断涌现。

2004 年全球嵌入式 Linux 市场规模已达 9 150 万美元，2005 年有 1.336 亿美元，2006 年有 1.653 亿美元，2007 年更至 2.011 亿美元，每年平均以 30% 的成长率稳定挖掘科技商机。

本书以 ARM920T S3C2410 处理器为硬件平台，以嵌入式 Linux 为软件平台，介绍了嵌入式系统开发的主要环节。本书重点讲解了嵌入式 Linux 应用开发的基本概念和核心理论，同时结合大量代码实例帮助读者理解和应用相关的概念和理论。突出理论重点，重视实践应用是贯穿本书的理念。

本书没有深入讲解 C 语言基础、Linux 的安装/使用/操作命令等基础知识、操作系统的基本理论、单片机与微机接口原理等基础知识。因此，在学习本书之前，建议读者最好掌握这些基础理论和实践基础。

全书共 10 章。其中，第 1 章为嵌入式系统基础，主要讲述嵌入式系统的基础知识。先讲解了嵌入式系统的基本概念、体系结构和嵌入式系统发展趋势，介绍了几种常用的嵌入式操作系统，并讲解了 ARM 处理器的相关知识和 S3C2410 硬件平台，最后讲述了嵌入式软件开发的流程。

第 2 章为嵌入式 Linux C 语言程序开发工具，主要讲述了嵌入式 Linux C 程序开发中常用的基本工具的使用，包括 vim 编辑器、gcc 编译器、gdb 调试器、make 工程管理器、autotools 自动工程管理等工具以及它们在实际开发中的各种应用。

第 3 章为嵌入式 Linux C 语言基础，主要讲述嵌入式 Linux C 程序开发中常见的基本理论、高级知识点和难点，包括各种预处理操作、C 语言中的内存分配问题、程序的可移植性问题、C 语言和汇编语言的混合编程、ARM Linux 内核中常见的链表、树、哈希表等数据结构。

第 4 章为嵌入式 Linux 开发环境的搭建, 主要讲述了嵌入式 Linux 系统开发环境的搭建, 包括交叉开发环境的搭建、Bootloader 概念和 U-Boot 的使用/编译/移植、Linux 内核的移植/编译以及嵌入式文件系统的构建。

第 5 章为嵌入式 Linux 文件 I/O 编程, 主要讲述了 Linux 系统调用、Linux 文件 I/O 系统、底层文件 I/O 操作、嵌入式 Linux 串口应用编程、标准 I/O 编程等内容。

第 6 章为嵌入式 Linux 多任务编程, 主要讲述了 Linux 系统下任务、进程、线程等多任务的概念和基本理论, 进程控制编程, 并讲解了管道通信、信号通信、信号量、消息队列、共享内存等进程之间通信机制以及线程相关编程等内容。

第 7 章为嵌入式 Linux 网络编程, 主要讲解了 TCP/IP 的基本理论知识、网络基本编程、网络高级编程、简易 Web 服务器的实现、NTP 协议的客户端的实现等内容。

第 8 章为嵌入式 Linux 设备驱动编程, 主要讲述了 Linux 设备驱动编程基础和字符设备驱动编程, 并讲解了如何在 S3C2410 开发平台上编写 GPIO 驱动和按键驱动程序。

第 9 章为 Qt 图形编程, 主要讲解嵌入式 Qt 图形编程的基础, 包括嵌入式 Qt 编程环境的搭建、Qt 编程思想以及 Qt 的基本编程知识。

第 10 章为综合实例——视频监控系统, 综合使用前面章节中讲述的应用开发知识, 讲解比较完整的项目案例, 以便读者巩固前 9 章中学到的各个知识点。

本书在讲解中给出了翔实的实例, 并在部分章节的后面设计并详细分析了贴近实践的实验内容。

为便于读者学习本书的相关内容, 在人民邮电出版社教学服务与资源网([www.ptpedu.com.cn](http://www.ptpedu.com.cn)) 提供了针对本书的相关辅助内容, 包括本书的 PPT、所有源码和相关文档、华清远见嵌入式培训中心提供的视频教程、本书将使用的一些软件资源等。

本书的出版要感谢华清远见嵌入式培训中心的无私帮助。本书的前期组织和后期审校工作都凝聚了培训中心几位老师的心血, 他们认真阅读了书稿, 提出了大量中肯的建议, 并帮助纠正了书稿中的很多错误。

本书由赵苍明、穆煜执笔, 刘洪涛审定写作提纲。另外, 感谢以下人员为本书所做的工作: 孙天泽、易松华、曾宏安、贾燕枫、胡波、张志华、谭翠君、裴慧、王丽丽等。

由于作者水平所限, 书中不妥之处在所难免, 恳请读者批评指正。对于本书的批评和建议, 可以发表到 [www.farsight.com.cn](http://www.farsight.com.cn) 技术论坛。

编 者

2009 年 6 月

# 目 录

<b>第 1 章 嵌入式系统基础</b> ..... 1	2.5.3 makefile 规则..... 46
1.1 嵌入式系统概述..... 1	2.5.4 make 管理器的使用..... 47
1.1.1 嵌入式系统的基本概念..... 1	2.6 autotools..... 47
1.1.2 嵌入式系统的体系结构..... 2	2.6.1 autotools 使用流程..... 47
1.1.3 几种常用的嵌入式操作系统..... 2	2.6.2 使用 autotools 所生成的 makefile..... 50
1.1.4 嵌入式系统发展趋势..... 5	2.7 实验内容..... 51
1.2 ARM 处理器硬件开发平台..... 6	2.7.1 vim 使用练习..... 51
1.2.1 嵌入式处理器简介..... 6	2.7.2 用 gdb 调试程序的 bug..... 52
1.2.2 ARM 处理器简介..... 6	2.7.3 编写包含多文件的 makefile..... 53
1.2.3 S3C2410 处理器介绍..... 10	2.7.4 使用 autotools 生成包含多文件 的 makefile..... 53
1.3 嵌入式软件开发流程..... 13	小结..... 54
1.3.1 嵌入式系统开发概述..... 13	思考与练习..... 54
1.3.2 嵌入式软件开发概述..... 14	<b>第 3 章 嵌入式 Linux C 语言基础</b> ... 55
1.4 实验内容：使用 JTAG 烧写 NAND Flash..... 18	3.1 预处理..... 55
小结..... 21	3.1.1 预定义..... 55
思考与练习..... 21	3.1.2 文件包含..... 60
<b>第 2 章 嵌入式 Linux C 语言 程序开发工具</b> ..... 22	3.1.3 条件编译..... 61
2.1 嵌入式 Linux 下 C 语言概述..... 22	3.2 C 语言中的内存分配..... 62
2.2 编辑器 vim..... 23	3.2.1 C 语言程序所占内存分类..... 63
2.2.1 vim 的基本模式..... 23	3.2.2 堆和栈的区别..... 63
2.2.2 vim 的基本操作..... 24	3.3 程序的可移植性考虑..... 64
2.3 编译器 gcc..... 26	3.3.1 字长和数据类型..... 64
2.3.1 gcc 的简介..... 26	3.3.2 数据对齐..... 65
2.3.2 gcc 的编译流程..... 27	3.3.3 字节顺序..... 65
2.3.3 gcc 的常用编译选项..... 29	3.4 C 和汇编的接口..... 66
2.4 调试器 GDB..... 34	3.4.1 内嵌汇编的语法..... 66
2.4.1 gdb 使用流程..... 34	3.4.2 编译器优化介绍..... 69
2.4.2 gdb 基本命令..... 37	3.4.3 C 语言关键字 volatile..... 69
2.4.3 gdbserver 远程调试..... 40	3.4.4 memory 描述符..... 69
2.5 make 工程管理器..... 42	3.5 ARM Linux 内核常见数据结构..... 70
2.5.1 makefile 基本结构..... 43	3.5.1 链表..... 70
2.5.2 makefile 变量..... 43	3.5.2 树、二叉树、平衡树..... 75
	3.5.3 哈希表..... 82

小结	87	5.5.2 其他操作	146
思考与练习	87	5.6 实验内容	148
<b>第 4 章 嵌入式 Linux 开发环境的搭建</b>	<b>88</b>	5.6.1 文件读写及上锁	148
4.1 构建嵌入式 Linux 开发环境	88	5.6.2 多路复用式串口操作	153
4.1.1 嵌入式交叉编译环境搭建	89	小结	156
4.1.2 主机交叉开发环境配置	90	思考与练习	156
4.2 Bootloader	94	<b>第 6 章 嵌入式 Linux 多任务编程</b>	<b>157</b>
4.2.1 Bootloader 的种类	94	6.1 Linux 下多任务概述	157
4.2.2 U-Boot 编译与使用	95	6.1.1 任务	157
4.2.3 U-Boot 移植	102	6.1.2 进程	157
4.3 Linux 内核与移植	103	6.1.3 线程	162
4.3.1 Linux 内核结构	104	6.2 进程控制编程	163
4.3.2 Linux 内核配置与编译	105	6.2.1 进程编程基础	163
4.3.3 Linux 内核移植	108	6.2.2 Linux 守护进程	167
4.4 嵌入式文件系统构建	112	6.3 进程间通信	171
小结	115	6.3.1 Linux 下进程间通信概述	171
思考与练习	116	6.3.2 管道通信	172
<b>第 5 章 嵌入式 Linux 文件 I/O 编程</b>	<b>117</b>	6.3.3 信号通信	177
5.1 Linux 系统调用及用户编程接口	117	6.3.4 信号量	183
5.1.1 系统调用	117	6.3.5 共享内存	187
5.1.2 用户编程接口	118	6.3.6 消息队列	188
5.1.3 系统命令	118	6.4 多线程编程	193
5.2 Linux 文件 I/O 系统概述	118	6.4.1 线程基本编程	193
5.2.1 虚拟文件系统	118	6.4.2 线程之间的同步与互斥	196
5.2.2 通用文件模型	119	6.4.3 线程属性	198
5.2.3 Linux 中文件及文件描述符	121	6.5 实验内容	200
5.3 底层文件 I/O 操作	121	6.5.1 编写多进程程序	200
5.3.1 基本文件操作	121	6.5.2 编写守护进程	204
5.3.2 文件锁	124	6.5.3 有名管道通信实验	205
5.3.3 多路复用	126	6.5.4 共享内存实验	209
5.4 嵌入式 Linux 串口应用编程	131	6.5.5 多线程实验	212
5.4.1 串口概述	131	小结	216
5.4.2 串口设置详解	132	思考与练习	217
5.4.3 串口使用详解	140	<b>第 7 章 嵌入式 Linux 网络编程</b>	<b>218</b>
5.5 标准 I/O 编程	143	7.1 TCP/IP 概述	218
5.5.1 基本操作	143	7.1.1 TCP/IP 的分层模型	218
		7.1.2 TCP/IP 分层模型特点	219



7.1.3 TCP/IP 核心协议	220	9.1 嵌入式 GUI 简介	288
7.2 网络编程基本知识	222	9.1.1 Qt/Embedded	289
7.2.1 套接字概述	222	9.1.2 MiniGUI	289
7.2.2 地址及顺序处理	223	9.1.3 Microwindows、Tiny X 等	289
7.2.3 套接字编程	228	9.2 Qt/Embedded 开发入门	290
7.2.4 编程实例	231	9.2.1 Qt/Embedded 介绍	290
7.3 网络高级编程	234	9.2.2 Qt/Embedded 信号和插槽 机制	292
7.4 Web 服务器	240	9.2.3 搭建 Qt/Embedded 开发环境	295
7.4.1 Web 服务器的工作原理	240	9.2.4 Qt/Embedded 窗口部件	298
7.4.2 Web 服务器的编程实现	242	9.2.5 Qt/Embedded 图形界面编程	300
7.4.3 运行 Web 服务器	246	9.2.6 Qt/Embedded 对话框设计	302
7.5 实验内容: NTP 的客户端实现	247	9.3 实验内容: 使用 Qt 编写 “Hello, World” 程序	306
小结	252	小结	309
思考与练习	252	思考与练习	310
<b>第 8 章 嵌入式 Linux 设备驱动 编程</b>	253	<b>第 10 章 综合实例——视频监控 系统</b>	311
8.1 设备驱动编程基础	253	10.1 视频监控系统概述	311
8.1.1 Linux 设备驱动概述	253	10.1.1 系统组成	311
8.1.2 Linux 内核模块编程	254	10.1.2 音视频服务器	312
8.2 字符设备驱动编程	263	10.1.3 音视频客户端	312
8.2.1 字符设备驱动编写流程	263	10.1.4 通信传输控制协议	313
8.2.2 重要数据结构	263	10.2 基本数据结构	315
8.2.3 设备驱动程序主要组成	264	10.3 功能实现	317
8.3 GPIO 驱动程序实例	270	10.3.1 传输控制	317
8.3.1 GPIO 工作原理	270	10.3.2 用户检验	321
8.3.2 GPIO 驱动程序	272	10.3.3 控制命令处理	322
8.4 按键驱动程序实例	277	10.3.4 云台转动控制	324
8.4.1 中断编程	277	10.3.5 线程相关	327
8.4.2 按键工作原理	278	小结	328
8.4.3 按键驱动程序	279	思考与练习	328
8.4.4 按键驱动的测试程序	285	<b>参考文献</b>	329
小结	287		
思考与练习	287		
<b>第 9 章 Qt 图形编程</b>	288		

# 第 1 章

## 嵌入式系统基础

本章主要介绍嵌入式系统开发的基本知识，学习完本章，读者会对嵌入式系统的基础知识、软硬件开发平台以及嵌入式系统开发有整体性的理解。

本章主要内容：

- 嵌入式系统概述；
- ARM 处理器开发平台；
- 嵌入式软件开发流程。

### 1.1 嵌入式系统概述

#### 1.1.1 嵌入式系统的基本概念

在社会日益信息化的今天，计算机和网络的应用已经全面渗透到日常生活中。应用嵌入式系统的电子产品随处可见，如日常使用的手机、摄像机、医疗仪器、汽车，乃至工业控制、航天、航空等设备都要用到嵌入式系统。在一些发达国家，平均每个家庭拥有 255 个嵌入式系统，如每辆汽车平均装有 35 个嵌入式系统。嵌入式系统的应用已涉及工业、军事、宇宙、通信、运输、金融、医疗、气象、农业等众多领域。

在嵌入式系统行业内有一个被普遍接受的定义：嵌入式系统是以应用为中心，以计算机控制系统为基础，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。笔者认为，将一套计算机控制系统嵌入到已具有某种完整的特定功能的（或者将会具备完整功能的）系统内（例如各种机械设备），以实现对原有系统的计算机控制，此时将这个计算机控制系统叫做嵌入式系统。简单地说，嵌入式系统就是被嵌入到电子设备中的专用计算系统。

嵌入式系统通常由特定功能模块和计算机控制模块组成，主要由嵌入式微处理器、外围硬件设备、嵌入式操作系统以及用户应用软件等部分组成。它具有“嵌入性”、“专用性”与“计算机系统”的三个基本要素。嵌入式系统的特点如下。

（1）面向特定应用。嵌入式系统与通用型系统的最大区别就在于嵌入式系统大多工作在为特定用户群设计的系统中，因此它通常都具有功耗低、体积小、集成度高等特点，并且可以满足不同应用的特定需求。

（2）嵌入式系统的硬件和软件都必须进行高效地设计，量体裁衣、去除冗余，力争在同样的硅片面积上实现更高的性能，这样才能在具体应用中对处理器的选择更具有竞争力。

(3) 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、不断创新的知识集成系统，从事嵌入式系统开发的人才也必须是复合型人才。

(4) 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中或单片机本身，而不是存储于磁盘中。

(5) 嵌入式开发的软件代码尤其要求高质量、高可靠性，由于嵌入式设备往往是处在无人值守或条件恶劣的环境中，因此，对其代码必须有更高的要求。

(6) 嵌入式系统本身不具备二次开发功能，即设计完成后用户通常不能在该平台上直接对程序进行修改，必须有一套开发工具和环境才能进行再次开发。

## 1.1.2 嵌入式系统的体系结构

嵌入式系统是一类特殊的计算机系统，一般包括硬件设备、嵌入式操作系统和应用软件。它们之间的关系如图 1.1 所示。

硬件设备包括嵌入式处理器和外围设备。其中的嵌入式处理器 (CPU) 是嵌入式系统的核心部分，它与通用处理器最大的区别在于，嵌入式处理器大多工作在为特定用户群所专门设计的系统中，它将通用处理器中许多由板卡完成的任务集成到芯片内部，从而有利于嵌入式系统在设计时趋于小型化，同时还具有很高的效率和可靠性。如今，全世界嵌入式处理器已经超过 1 000 多种，流行的体系结构有 30 多个系列，其中以 ARM、PowerPC、MC 68000、MIPS 等使用得最为广泛。

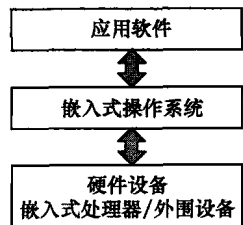


图 1.1 嵌入式系统的组成

外围设备是指嵌入式系统中用于完成存储、通信、调试、显示等辅助功能的其他部件。目前常用的嵌入式外围设备按功能可以分为存储设备 (如 RAM、SRAM、Flash 等)、通信设备 (如 RS-232 接口、SPI 接口、以太网接口、USB 接口、无线通信等) 和显示设备 (如显示屏等) 3 类。

嵌入式操作系统不仅具有通用操作系统的一般功能，如向上提供对用户的接口 (如图形界面、库函数 API 等)，向下提供与硬件设备交互的接口 (硬件驱动程序等)，管理复杂的系统资源，同时，它还在系统实时性、硬件依赖性、软件固化性以及应用专用性等方面，具有更加鲜明的特点。

应用软件是针对特定应用领域，基于某一固定的硬件平台，用来达到用户预期目标的计算机软件。嵌入式系统自身的特点，决定了嵌入式应用软件不仅要求满足准确性、实时性、安全性和稳定性等方面需要，而且还要尽可能地进行代码优化，以减少对系统资源的消耗，降低硬件成本。

## 1.1.3 几种常用的嵌入式操作系统

### 1. 嵌入式 Linux

嵌入式 Linux (Embedded Linux) 是指对标准 Linux 经过小型化裁剪处理之后，能够固化在容量只有几 KB 或者几 MB 的存储器芯片或者单片机中，适合于特定嵌入式应用场合的专用 Linux 操作系统。在目前已经开发成功的嵌入式系统中，大约有一半使用 Linux。这与它自身的优良特性是分不开的。

嵌入式 Linux 同 Linux 一样，具有低成本、多种硬件平台支持、优异的性能和良好的网络支持等优点。另外，为了更好地适应嵌入式领域的开发，嵌入式 Linux 还在 Linux 基础上做了部分改进，介绍如下。

#### (1) 改善内核结构

Linux 内核采用的是整体式结构 (Monolithic)，整个内核是一个单独的、非常大的程序，这

样虽然能够使系统的各个部分直接沟通,提高系统响应速度,但与嵌入式系统存储容量小、资源有限的点不相符。因此,在嵌入式系统经常采用的是另一种称为微内核(Microkernel)的体系结构,即内核本身只提供最基本的操作系统功能,如任务调度、内存管理、中断处理等,而类似于设备驱动、文件系统和网络协议等附加功能则可以根据实际需要进行取舍。这样就大大减小了内核的体积,便于维护和移植。

## (2) 提高系统实时性

由于现有的 Linux 是一个通用的操作系统,虽然它也采用了许多技术来加快系统的运行和响应速度,但从本质上来说并不是一个嵌入式实时操作系统。因此,利用 Linux 作为底层操作系统,在其上进行实时化改造,从而构建出一个具有实时处理能力的嵌入式系统,如 RT-Linux 已经成功地应用于航天飞机的空间数据采集、科学仪器测控和电影特技图像处理等各种领域。

嵌入式 Linux 同 Linux 一样,也有众多的版本,其中不同的版本分别针对不同的需要在内核等方面加入了特定的机制。嵌入式 Linux 的主要版本如表 1.1 所示。

表 1.1 嵌入式 Linux 主要版本

版 本	简 介 绍
$\mu$ CLinux	开放源码的嵌入式 Linux 的典范之作。 $\mu$ CLinux 主要是针对目标处理器没有存储管理单元 MMU (Memory Management Unit) 的嵌入式系统而设计的。由于没有 MMU, 其多任务的实现需要一定技巧。它秉承了标准 Linux 的优良特性, 经过各方面的小型化改造, 形成了一个高度优化的、代码紧凑的嵌入式 Linux。虽然它的体积很小, 却仍然保留了 Linux 的大多数的优点: 稳定、良好的移植性、优秀的网络功能、对各种文件系统完备的支持和标准丰富的 API。它专为嵌入式系统做了许多小型化的工作, 目前已支持多款 CPU。其编译后目标文件可控制在几百 KB 数量级, 并已经被成功地移植到很多平台上
RT-Linux	由美国墨西哥理工学院开发的嵌入式 Linux 硬实时操作系统。到目前为止, RT-Linux 已经成功地应用于航天飞机的空间数据采集、科学仪器测控和电影特技图像处理等领域。RT-Linux 开发者并没有针对实时操作系统的特性而重写 Linux 的内核, 因为这样做的工作量非常大, 而且要保证兼容性也非常困难。为此, RT-Linux 提出了精巧的内核, 并把标准的 Linux 核心作为实时核心的一个进程, 同用户的实时进程一起调度。这样对 Linux 内核的改动非常小, 并且充分利用了 Linux 下现有的丰富的软件资源
Embedix	根据嵌入式应用系统的特点重新设计的 Linux 发行版本。它提供了超过 25 种的 Linux 系统服务, 包括 Web 服务器等。此外还推出了 Embedix 的开发调试工具包、基于图形界面的浏览器等。可以说, Embedix 是一种完整的嵌入式 Linux 解决方案
XLinux	号称是世界上最小的嵌入式 Linux 系统。采用了“超字元集”专利技术, 使 Linux 内核不仅能与标准字符集相容, 还涵盖了 12 个国家和地区的字符集。因此, XLinux 在推广 Linux 的国际应用方面有独特的优势
PoketLinux	PoketLinux 由 Agenda 公司采用, 作为其新产品“VR3 PDA”的嵌入式 Linux 操作系统。它可以提供跨操作系统并且构造统一的、标准化的和开放的信息通信基础结构, 在此结构上实现端到端方案的完整平台。PoketLinux 资源框架开放, 使普通的软件结构可以为所有用户提供一致的服务
红旗嵌入式 Linux	由中科红旗软件技术有限公司推出的嵌入式 Linux, 它是国内做得较好的一款嵌入式操作系统。目前, 中国科学院计算机技术研究所自行开发的开放源码的嵌入式操作系统——Easy Embedded OS (EEOS) 也已经开始进入实用阶段了。 该款嵌入式操作系统重点支持 p-Java。系统目标一方面小型化, 另一方面能重用 Linux 的驱动和其他模块。由于有中国科学院计算机技术研究所的强大科研力量做后盾, EEOS 有望发展成为功能完善、稳定、可靠的国产嵌入式操作系统平台

版 本	简 单 介 绍
MontaVista Linux	MontaVista Linux 是 MontaVista Software 公司于 1999 年推出的, 专门面向嵌入式系统的商业级操作系统, 基于 Linux 内核 2.6, 采用可抢占内核技术, 集合了 MontaVista 硬实时技术, 性能远远高于标准 2.6 内核, 具有更短的抢占延迟, 反应速度是标准内核的 200 倍, 采用优先级线程实现中断服务程序的调度
风河 Linux	美国风河 (Wind River) 公司 (著名的实时操作系统 VxWorks 的厂商) 一直致力于嵌入式 Linux 方面的研究和开发。首个满足由 Linux 基金会 (Linux Foundation) 制定的电信级 Linux (CGL) 4.0 规范要求的商用化 Linux 厂商。Wind River Platform for Network Equipment, Linux Edition 2.0 是首个完全遵循最新 CGL 规范的网络通信与电信行业 Linux 平台产品

为了不失一般性, 本书说所用的嵌入式 Linux 是标准内核裁减的 Linux, 而不是上表中的任何一种。

## 2. $\mu$ C/OS-II

$\mu$ C/OS-II 是一种免费公开源代码、结构小巧、基于优先级的可抢先的硬实时内核。自从 1992 年问世以来, 在世界各地应用广泛, 它是一种专门为嵌入式设备设计的内核, 目前已经被移植到 40 多种不同结构的 CPU 上, 运行在从 8 位到 64 位的各种系统之上。尤其值得一提的是, 该系统自从 2.51 版本之后, 就通过了美国 FAA 认证, 可以运行在诸如航天器等对安全要求极为苛刻的系统之上。鉴于  $\mu$ C/OS-II 可以免费获得代码, 对于嵌入式 RTOS 而言, 选择  $\mu$ C/OS 无疑是最经济的选择。

$\mu$ C/OS-II 主要适合小型实时控制系统, 具有执行效率高、占用空间小、实时性能优良和可扩展性强等优点。最小内核可编译至 2KB, 如果包含内核的全部功能, 编译之后的  $\mu$ C/OS-II 内核仅有 6~10KB。

$\mu$ C/OS-II 的源代码结构合理清晰易读, 不仅成功应用在众多的商业项目中, 而且被很多大学采纳, 作为教学的范例, 同时也是嵌入式工程师学习和提高的绝好材料。

## 3. VxWorks

VxWorks 操作系统是美国 Wind River 公司于 1983 年设计开发的一种嵌入式实时操作系统 (RTOS), 它是在当前市场占有率很高的嵌入式操作系统之一。VxWorks 的实时性做得非常好, 其系统本身的开销很小, 进程调度、进程间通信、中断处理等系统公用程序精练而有效, 使得它们造成的延迟很短。另外 VxWorks 提供的多任务机制, 对任务的控制采用了优先级抢占 (Linux 2.6 内核也采用了优先级抢占的机制) 和轮转调度机制, 这充分保证了可靠的实时性, 并使同样的硬件配置能满足更强的实时性要求。另外 VxWorks 具有高度的可靠性, 从而保证了用户工作环境的稳定。同时, VxWorks 还有完备强大的集成开发环境, 这也大大方便了用户的使用。

但是, VxWorks 的开发和使用都需要交纳高额的专利费, 因此大大增加了用户的开发成本。同时, VxWorks 的源码不公开造成它部分功能的更新 (如网络功能模块) 滞后。

## 4. QNX

QNX 是一个分布式、嵌入式、可扩展的实时操作系统。它基本兼容 POSIX 规范, 提供 UNIX 类的编译器、调试器、X Window 和 TCP/IP 等。

QNX 是一个微内核实时操作系统, 其核心仅提供进程调度、进程之间通信、底层网络和中断处理 4 种服务, 其进程在独立的地址空间运行。所有其他 OS 服务, 都实现为协作的用户进程, 因此 QNX 核心非常小巧, 而且运行速度很快。

## 5. Windows CE

Windows CE 是微软开发的一个开放的、可升级的 32 位嵌入式操作系统，是基于掌上型电脑类的电子设备操作系统。Windows CE 的图形用户界面相当出色。Windows CE 具有模块化、结构化和基于 Win32 应用程序接口以及与处理器无关等特点。它不仅继承了传统的 Windows 图形界面，并且用户在 Windows CE 平台上可以使用 Windows 上的编程工具（如 Visual Studio 等）、也可以使用同样的函数、使用同样的界面风格，使绝大多数 Windows 上的应用软件只需简单的修改和移植就可以在 Windows CE 平台上继续使用。目前最新的 Windows CE 为 Windows CE 6.0，是微软的 .NET 家族最新成员，除 100% 兼容于低版本外，强化了许多功能。

## 6. Palm OS

Palm OS 在 PDA 和掌上电脑有着庞大的用户群。Palm OS 是 Palm 公司开发的专用于 PDA 上的一种操作系统。虽然其并不专门针对于手机设计，但是 Palm OS 的优秀性和对移动设备的支持同样使其能够成为一个优秀的 32 位手机操作系统。Palm OS 最明显的特点在精简，它的内核只有几千字节，同时用户也可以方便地开发定制，具有较强的可操作性。

# 1.1.4 嵌入式系统发展趋势

### 1. 提供强大的网络服务

为适应嵌入式分布处理结构和应用上网需求，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，嵌入设备必须配有通信接口，相应需要 TCP/IP 协议簇软件支持；为满足家用电器相互关联（如防盗报警、灯光能源控制、影视设备和信息终端交换信息等）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 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。为了支持应用软件的特定编程模式，如 Web 或无线 Web 编程模式，还需要相应的浏览器，如 HTML 浏览器、WML 浏览器等。

### 2. 小型化、低成本、低功耗

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要求，如选用最佳的编程模型和不断改进算法，采用 Java 编程模式，优化编译器性能等。因此，既需要软件人员具有丰富的开发经验，更需要发展先进的嵌入式软件技术，如 Java、Web 和 WAP 等。

### 3. 人性化的人机界面

用户之所以乐于接受嵌入式设备，其重要因素之一是它们与使用者之间的亲和力。它具有自然的人机交互界面，如司机操纵高度自动化的汽车主要还是通过习惯的方向盘、脚踏板和操纵杆。人们与信息终端交互要求以 GUI 屏幕为主的多媒体界面。手写文字输入、语音拨号上网、收发电子邮件及彩色图形、图像已取得初步成效。目前一些先进的 PDA 在显示屏幕上已实现汉字写入、短消息语音发布，但离掌式语言同声翻译还有很大距离。

### 4. 完善的开发平台

随着 Internet 技术的成熟、带宽的提高，ICP（Internet Content Provider，互联网内容提供商）和 ASP（Application Service Provider，应用服务提供商）在网上提供的信息内容日趋丰富、应用项目多种多样，像移动电话、固定电话及电冰箱、微波炉等嵌入式电子设备的功能不再单一，电气结构也更为复杂。为了满足应用功能的升级，设计者一方面采用更强大的嵌入式处理器，如 32 位、64 位 RISC 芯片或数字信号处理器（Digital Signal Processor，DSP）增强处理能力；同时还采

用实时多任务编程技术和交叉开发工具技术来控制功能复杂性，简化应用程序设计、保障软件质量和缩短开发周期。

## 1.2 ARM 处理器硬件开发平台

### 1.2.1 嵌入式处理器简介

嵌入式系统的核心部件是各种类型的嵌入式处理器，据不完全统计，全世界嵌入式处理器的品种总量已经超过 1 000 种，流行的体系结构有 30 多个系列，数据总线宽度从 8 位到 32 位，处理速度从 0.1 到 2 000MIPS（MIPS 指每秒执行的百万条指令数）。按功能和内部结构等因素，嵌入式系统硬件平台可以分成如下两类。

#### 1. 嵌入式 RISC 微处理器

RISC（Reduced Instruction Set Computer）是精简指令集计算机，RISC 把着眼点放在如何使计算机的结构更加简单和如何使计算机的处理速度更加快速上。RISC 选取了使用频率最高的简单指令，抛弃复杂指令，固定指令长度，减少指令格式和寻址方式，不用或少用微码控制。这些特点使得 RISC 非常适合嵌入式处理器。嵌入式微控制器将整个计算机系统或者一部分集成到一块芯片中。嵌入式微控制器一般以某一种微处理器内核为核心，比如以 MIPS 或 ARM 核为核心，在芯片内部集成 ROM、RAM、内部总线、定时/计数器、看门狗、I/O 端口、串行端口等各种必要的功能和外设。与嵌入式微处理器相比，嵌入式微控制器的最大特点是单片化，实现同样功能时系统的体积大大减小。嵌入式微控制器的品种和数量较多，比较有代表性的通用系列包括 Atmel 公司的 AT91 系列、Samsung 公司的 S3C 系列、Marvell 公司的 PXA 系列等。

#### 2. 嵌入式 CISC 微处理器

嵌入式微处理器的基础是通用计算机中的 CPU 在不同应用中将微处理器装配在专门设计的电路板上，只保留和嵌入式应用有关的功能，这样可以大幅度减小系统体积和功耗。嵌入式微处理器目前主要有 Intel 公司的 x86 系列、Motorola 公司的 68k 系列等。表 1.2 所示描述了 RISC 和 CISC 之间的主要区别。

表 1.2 RISC 和 CISC 之间的主要区别

指 标	RISC	CISC
指令集	一个周期执行一条指令，通过简单指令的组合实现复杂操作；指令长度固定	指令长度不固定，执行需要多个周期
流水线	流水线每周期前进一步	指令的执行需要调用微代码的一个微程序
寄存器	更多通用寄存器	用于特定目的的专用寄存器
Load/Store 结构	独立的 Load 和 Store 指令完成数据在寄存器和外部存储器之间的传输	处理器能够直接处理存储器中的数据

### 1.2.2 ARM 处理器简介

ARM（Advanced RISC Machines）有 3 种含义，它是一个公司的名称，是一类微处理器的通称，还是一种技术的名称。

ARM 公司是微处理器行业的一家知名企业，其设计了大量高性能、廉价、低耗能的 RISC 芯片，并开发了相关技术和软件。ARM 处理器具有高性能、低成本和低功耗的特点，适用于嵌入式控制、消费/教育类多媒体、DSP 和移动式应用等领域。

ARM 公司本身不生产芯片，它转让设计许可，由合作伙伴公司来生产各具特色的芯片。ARM 这种商业模式的强大之处在于其价格合理，它在全世界范围的合作伙伴超过 100 个，其中包括许多著名的半导体公司。ARM 公司专注于设计，设计的芯片内核耗电少、成本低、功能强，特有 16/32 位双指令集。ARM 已成为移动通信、手持计算和多媒体数字消费等嵌入式解决方案的 RISC 实际标准。

ARM 处理器的产品分为多个系列，包括 ARM7、ARM9、ARM9E、ARM10E、ARM11 和 SecurCore、Cortex 等。每个系列提供一套特定的性能来满足设计者对功耗、性能、体积的需求。SecurCore 是独立的一个产品系列，是专门为安全设备而设计的。下面简单介绍 ARM 各个系列处理器的特点。

### 1. ARM7 处理器系列

ARM7 内核采用冯·诺伊曼体系结构，数据和指令使用同一条总线。内核有一条 3 级流水线，执行 ARMv4 指令集。

ARM7 系列处理器主要用于对功耗和成本要求比较苛刻的消费类产品，其最高主频可以达到 130MIPS。ARM7 系列包括 ARM7TDMI、ARM7TDMI-S、ARM7EJ-S 和 ARM720T 四种类型，主要用于适应不同的市场需求。

ARM7 系列处理器主要具有以下特点：

- (1) 成熟的大批量的 32 位 RISC 芯片；
- (2) 最高主频达到 130MIPS；
- (3) 功耗低；
- (4) 代码密度高，兼容 16 位微处理器；
- (5) 开发工具多，EDA 仿真模型多；
- (6) 调试机制完善；
- (7) 提供 0.25 $\mu\text{m}$ 、0.18 $\mu\text{m}$  及 0.13 $\mu\text{m}$  的生产工艺；
- (8) 代码与 ARM9 系列、ARM9E 系列及 ARM10E 系列兼容。

ARM7 系列处理器主要有下述应用：

- (1) 个人音频设备（MP3 播放器、WMA 播放器、AAC 播放器）；
- (2) 接入级的无线设备；
- (3) 喷墨打印机；
- (4) 数码照相机；
- (5) PDA。

### 2. ARM9 处理器系列

ARM9 系列于 1997 年问世。由于采用了 5 级指令流水线，ARM9 处理器能够运行在比 ARM7 更高的时钟频率上，改善了处理器的整体性能；存储器系统根据哈佛体系结构（程序和数据空间独立的体系结构）重新设计，区分了数据总线和指令总线。

ARM9 系列的第一个处理器是 ARM920T，它包含独立的数据指令 Cache 和 MMU（Memory Management Unit，存储器管理单元）。此处理器能够被用在要求有虚拟存储器支持的操作系统上。该系列中的 ARM922T 是 ARM920T 的变种，只有一半大小的数据指令 Cache。

ARM940T 包含一个更小的数据指令 Cache 和一个 MPU（Micro Processor Unit，微处理器）。



它是针对不要求运行操作系统的应用而设计的。ARM920T、ARM940T 都执行 v4T 架构指令。

ARM9 系列处理器主要有下述应用：

- (1) 下一代无线设备，包括视频电话和 PDA 等；
- (2) 数字消费品，包括机顶盒、家庭网关、MP3 播放器和 MPEG-4 播放器；
- (3) 成像设备，包括打印机、数码照相机和数码摄像机；
- (4) 汽车、通信和信息系统。

### 3. ARM9E 处理器系列

ARM9 系列的下一代处理器基于 ARM9E-S 内核，这个内核是 ARM9 内核带有 E 扩展的一个可综合版本，包括 ARM946E-S 和 ARM966E-S 两个变种。两者都执行 v5TE 架构指令。它们也支持可选的嵌入式跟踪宏单元，支持开发者实时跟踪处理器上指令和数据的执行。当调试对时间敏感的程序段时，这种方法非常重要。

ARM946E-S 包括 TCM (Tightly Coupled Memory, 紧耦合存储器)、Cache 和一个 MPU。TCM 和 Cache 的大小可配置。该处理器是针对要求有确定的实时响应的嵌入式控制而设计的。ARM966E-S 有可配置的 TCM，但没有 MPU 和 Cache 扩展。

ARM9 系列的 ARM926EJ-S 内核为可综合的处理器内核，发布于 2000 年。它是针对小型便携式 Java 设备，如 3G 手机和 PDA 应用而设计的。ARM926EJ-S 是第一个包含 Jazelle 技术，可加速 Java 字节码执行的 ARM 处理器内核。它还有一个 MMU、可配置的 TCM 及具有零或非零等待存储器的数据/指令 Cache。

ARM9E 系列处理器主要有下述应用：

- (1) 下一代无线设备，包括视频电话和 PDA 等；
- (2) 数字消费品，包括机顶盒、家庭网关、MP3 播放器和 MPEG-4 播放器；
- (3) 成像设备，包括打印机、数码照相机和数码摄像机；
- (4) 存储设备，包括 DVD 或 HDD 等；
- (5) 工业控制，包括电机控制等；
- (6) 汽车、通信和信息系统的 ABS 和车体控制；
- (7) 网络设备，包括 VoIP、WirelessLAN 和 xDSL 等。

### 4. ARM10 处理器系列

ARM10 发布于 1999 年，具有高性能、低功耗的特点。它所采用的新的体系使其在所有 ARM 产品中具有最高的 MIPS/MHz。它将 ARM9 的流水线扩展到 6 级，也支持可选的向量浮点 (Vector Float Point) 单元，对 ARM10 的流水线加入了第 7 段。VFP 明显增强了浮点运算性能并与 IEEE 754.1985 浮点标准兼容。

### 5. ARM10E 处理器系列

ARM10E 系列处理器采用了新的节能模式，提供了 64 位的 Load/Store 体系，支持包括向量操作的满足 IEEE 754 的浮点运算协处理器，系统集成更加方便，拥有完整的硬件和软件开发工具。ARM10E 系列包括 ARM1020E、ARM1022E 和 ARM1026EJ-S 三种类型。

ARM10E 系列处理器有下述应用：

- (1) 下一代无线设备，包括视频电话和 PDA、笔记本电脑和互联网设备；
- (2) 数字消费品，包括机顶盒、家庭网关、MP3 播放器和 MPEG-4 播放器；
- (3) 成像设备，包括打印机、数码照相机和数码摄像机；
- (4) 汽车、通信和信息系统等；