

国外计算机科学经典教材

Mc
Graw
Hill Education

Embedded Systems

Architecture, Programming and Design

嵌入式系统

—— 体系结构、编程与设计

(印度) Raj Kamal 编著
陈曙晖 等译
王续进 审校



清华大学出版社

国外计算机科学经典教材

嵌入式系统

——体系结构、编程与设计

(印度) Raj Kamal 编著

陈曙晖 等译

王继进 审校

清华大学出版社

北 京

Raj Kamal

Embedded Systems: Architecture, Programming and Design

EISBN: 0-07-049470-3

Copyright © 2003 by The McGraw-Hill Companies, Inc.

Original language published by The McGraw-Hill Companies, Inc. All Rights reserved. No part of this publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

Simplified Chinese translation edition is published and distributed exclusively by Tsinghua University Press under the authorization by McGraw-Hill Education(Asia) Co., within the territory of the People's Republic of China only (excluding Hong Kong, Macao SAR and Taiwan). Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书中文简体字翻译版由美国麦格劳-希尔教育出版(亚洲)公司授权清华大学出版社在中华人民共和国境内(不包括中国香港、澳门特别行政区和中国台湾地区)独家出版发行。未经许可之出口视为违反著作权法,将受法律之制裁。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

北京市版权局著作权合同登记号 图字: 01-2004-2318

版权所有, 翻印必究。举报电话: 010-62782989 13501256678 13801310933

本书封面贴有 McGraw-Hill 公司防伪标签, 无标签者不得销售。

图书在版编目(CIP)数据

嵌入式系统——体系结构、编程与设计/(印度)卡莫尔(Kamal,R.)编著;陈曙晖等译. —北京:清华大学出版社, 2005.5

书名原文: Embedded Systems: Architecture, Programming and Design

(国外计算机科学经典教材)

ISBN 7-302-09624-4

I. 嵌… II. ①卡… ②陈… III. 微型计算机—系统设计—教材 IV. TP360.21

出 版 者: 清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

社 总 机: 010-62770175

地 址: 北京清华大学学研大厦

邮 编: 100084

客户服务: 010-62776969

组稿编辑: 曹 康

文稿编辑: 崔 伟

封面设计: 康 博

版式设计: 康 博

印 刷 者: 北京市昌平环球印刷厂

装 订 者: 北京鑫海金澳胶印有限公司

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 185×260 印张: 36.75 字数: 941 千字

版 次: 2005 年 5 月第 1 版 2005 年 5 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-09624-4/TP·6678

印 数: 1~4000

定 价: 69.00 元

出版说明

近年来，我国高等学校的计算机学科教育进行了较大的改革，急需一批门类齐全、具有国际水平的计算机经典教材，以适应当前的教学需要。引进国外经典教材，可以了解并吸收国际先进的教学思想和教学方法，使我国的计算机学科教育能够与国际接轨，从而培育更多具有国际水准的计算机专业人才，增强我国信息产业的核心竞争力。Pearson、Thomson、McGraw-Hill、Springer、John Wiley 等出版集团都是全球最有影响的图书出版机构，它们在高等教育领域也都有着不凡的表现，为全世界的高等学校计算机教学提供了大量的优秀教材。为了满足我国高等学校计算机学科的教学需要，我社计划从这些知名的国外出版集团引进计算机学科经典教材。

为了保证引进版教材的质量，我们在全国范围内组织并成立了“清华大学计算机外版教材编审委员会”（以下简称“编委会”），旨在对引进教材进行审定、对教材翻译质量进行评审。“编委会”成员皆为全国各类重点院校教学与科研第一线的知名教授，其中许多教授为各校相关院、系的院长或系主任。“编委会”一致认为，引进版教材要能够满足国内各高校计算机教学与国际接轨的需要，要有特色风格，有创新性、先进性、示范性和一定的前瞻性，是真正的经典教材。为了保证外版教材的翻译质量，我们聘请了高校计算机相关专业教学与科研第一线的教师及相关领域的专家担纲译者，其中许多译者为海外留学回国人员。为了尽可能地保留与发扬教材原著的精华，在经过翻译和编辑加工之后，由“编委会”成员对文稿进行审定，以最大程度地弥补和修正在前面一系列加工过程中对教材造成的误差和瑕疵。

由于时间紧迫和能力所限，本套外版教材在出版过程中还可能存在一些不足和遗憾，欢迎广大师生批评指正。同时，也欢迎读者朋友积极向我们推荐各类优秀的国外计算机教材，共同为我国高等学校的计算机教育事业贡献力量。

清华大学出版社

国外计算机科学经典教材

编审委员会

主任委员:

孙家广

清华大学教授

副主任委员:

周立柱

清华大学教授

委员(按姓氏笔画排序):

王成山	天津大学教授
王 珊	中国人民大学教授
冯少荣	厦门大学教授
冯全源	西南交通大学教授
刘乐善	华中科技大学教授
刘腾红	中南财经政法大学教授
吉根林	南京师范大学教授
孙吉贵	吉林大学教授
阮秋琦	北京交通大学教授
何 晨	上海交通大学教授
吴百锋	复旦大学教授
李 彤	云南大学教授
沈钧毅	西安交通大学教授
邵志清	华东理工大学教授
陈 纯	浙江大学教授
陈 钟	北京大学教授
陈道蓄	南京大学教授
周伯生	北京航空航天大学教授
孟祥旭	山东大学教授
姚淑珍	北京航空航天大学教授
徐佩霞	中国科学技术大学教授
徐晓飞	哈尔滨工业大学教授
秦小麟	南京航空航天大学教授
钱培德	苏州大学教授
曹元大	北京理工大学教授
龚声蓉	苏州大学教授
谢希仁	中国人民解放军理工大学教授

译者序

嵌入式系统是专用于应用或者产品，并且基于计算机的一种系统。我们每天面对的很多设备中都使用了嵌入式系统，例如：微波炉、洗衣机、电视机、汽车、数码相机，等等。近年来，嵌入式系统的发展呈现出几个特点。首先，在硬件领域，SOC 和 SOPC 技术发展迅速，两大 FPGA 厂商 Xilinx 和 Altera 都推出了自己内含 CPU 及其外围电路的 FPGA，与此相应的 IP 包技术也发展迅速；其次，嵌入式软件的开发工具和操作系统日趋完善，Wind River 公司的 VxWorks 统领了嵌入式操作系统和开发平台的半壁江山，而免费的嵌入式 Linux 系统也得到了广泛应用；另外，应用领域不断扩展，尤其是消费电子领域的扩张有力地推进了嵌入式系统的发展。

随着各个应用领域对智能设备的需求迅速增长，嵌入式系统的开发也逐渐成为软硬件领域的研究热点，从而促使了近年来嵌入式系统的研究深度和广度不断增加，这使得更多的开发人员渴望了解嵌入式系统的原理和开发过程。我们本着为嵌入式系统的系统设计人员提供更有价值、更加通俗易懂的参考书的目的，认真地翻译了本书。

可以毫不夸张地说，这是嵌入式系统的经典书籍，在阅读本书的英文版时，我们多次拍案叫绝，尤其是被作者在硬件、软件和应用领域的广博知识所折服。本书作者 Raj Kamal 教授在无线电子、微处理器、微控制器、计算机组成和体系结构以及嵌入式系统和计算机网络等领域有 30 多年的理论和实验教学经验。与其他书籍相比，本书面向的是嵌入式系统开发的初中级设计人员，是一本深入浅出的嵌入式系统教程。我想这也是作者的初衷。本书的特点在于，它不仅全面介绍了嵌入式系统的基础知识，而且通过大量详尽的示例帮助读者理解理论知识。当然，这些真实案例对系统设计人员来说具有非常好的参考价值。如本书第 11 章中的“巧克力自动售卖机”、“网络传输”、“汽车自适应行驶系统”、“智能卡”等完整案例，对于未接触过嵌入式系统开发，但想要尽快熟悉开发过程的设计人员提供了很好的示范和模板。更难得的是，本书并没有拘泥于介绍传统的嵌入式系统原理和设计方法，嵌入式系统领域的新兴技术和产品同样得到关注。

本书由国防科技大学计算机学院陈曙晖、高树静、朱丹和许艳蕊翻译完成，全书由陈曙晖统稿。

虽然我们在翻译过程中力求通俗准确，但限于译者的水平，难免存在错误和不足之处，恳请读者批评指正。

前 言

儿童玩耍的智能视频游戏和商店里的巧克力自动售卖机都需要用到嵌入式系统,年轻人从父母那里借来看电影的智能卡(smart card)也需要嵌入式系统;家庭主妇所使用的许多兼容 Internet 的智能化家庭用品(如微波炉、视听系统等)都需要嵌入式系统;驾驶员需要嵌入式系统实现汽车的自动巡航控制。各个单位和机构需要嵌入式系统用于网络系统和产品。嵌入式系统的应用不胜枚举。

有 3 本著作不仅对我产生了巨大的影响,并且还加强了我对嵌入式系统的深入理解,引发了我对基于微处理器和微控制器的嵌入式系统的浓厚兴趣。首先是由 J.B Peatman 编写, MaGraw-Hill 出版公司在 1998 年出版的 *Design with Microcontrollers and Microcomputers*。其次是由 Kenneth Hintz 和 Daniel Tabak 编写, MaGraw-Hill 出版公司在 1992 年出版的 *Microcontrollers Architecture, Implementation and Programming: HD44795, MC68HC11, MCS-51, 80960CA*。第三本是由 Daniel Tabak 编写, MaGraw-Hill 出版公司在 1995 年出版的 *Advanced Microprocessors*。

过去,嵌入式系统是采用微处理器(如 8085)设计的。其应用比较简单,例如温度监控系统、使用 ADC 和 DAC 的数据采集系统、使用适当接口的音乐系统、使用步进电动机接口的简单机器人系统。现在,这些系统有时候甚至不被视为嵌入式系统。

从 20 世纪 80 年代初开始,小型嵌入式系统使用通用电器公司(General Instrument Corporation)生产的微控制器,使用该公司 70 年代末的微控制器 PIC 16xxx、Motorola 微控制器 68HC05/08 以及 8031 系列的 Intel 微控制器。应用广泛的小型嵌入式系统还包括遥控电视、手表、洗衣机、烤箱、计算器、数字日记和视频游戏。80 年代末,Intel 8051/52、Motorola 68HC11/12、Intel 80196 和 80960 系列微控制器的出现,使嵌入式系统硬件的使用更加多元化。

在最近几年,出现了将低级和高级处理硬件单元和专用处理器嵌入到一个芯片中的技术,出现了多处理器系统的嵌入式系统、单芯片 VLSI(称为片上系统),这些系统具有智能化功能,且高度复杂。一个简单的示例就是智能卡,以及最近出现的典型复杂系统示例——嵌入式系统智能照相机,该系统由 Princeton 大学嵌入式系统小组开发,并由 Wayne Wolf 和他的团队于 2002 年 9 月在 IEEE Computer Society 出版的 *IEEE Micro* 上发布。

根据时间和理解的不同,嵌入式系统的定义也不同。嵌入式系统可以被定义为:将嵌入了软件的计算机硬件作为其重要组成部分的系统。嵌入式系统是专用于各类实际应用或者产品且基于计算机的一种系统。它解决了系统中各种任务响应时间受限的问题。一个嵌入式系统可以是一个独立的系统,也可以是较大系统的一部分。它的软件通常嵌入在 ROM(只读存储器)中。因此它不像计算机一样需要辅助存储器。

本书兼顾了工科研究生、初级读者和热心学者的需要,他们今天是处于萌芽期的嵌入式系统工程师,明天就有可能成为这些系统的主设计师。此外,本书也适用于对嵌入式软件和实时编程项目感兴趣的年轻软件工程师。本书旨在解释设计高性能、响应时间受限制的复杂嵌入式系统所需要的概念,可作为高等院校师生的教材,或者工程师的参考书。

希望本书的读者首先学习嵌入式系统体系结构、在系统开发过程中要使用的基本硬件和软件元素、编程模型和软件工程实践,然后学习将代码嵌入到系统中的软件技术。还希望读者能够设计出充分利用可用系统资源(处理器、存储器、端口、设备和电能)的系统。本书的写作宗旨也正在于此。

本书都包括哪些主题呢?包括设计嵌入式系统的新技术和工具,具体包括哪些简单的和复杂的技术和工具?本书将帮助读者很容易地理解这些主题。其次,学生必须在他们选择的领域里开发出有用的项目。例如:网络,通信,汽车电子、数据采集和存储、服务、处理及保护信息,智能机器人,实时控制和跟踪系统,生物医学系统,声音、图像和视频的实时处理、过滤、压缩和加密系统。

本书各章主题如下:

第 1 章

本章将详细介绍嵌入式系统的基础内容。嵌入式系统硬件包括处理器、存储器设备、I/O 设备和基本硬件单元——电源、时钟和复位电路、访问外设的 I/O 端口和其他片上和片外单元。物理设备有 UART、调制解调器、收发器、时钟计数器、小键盘、键盘、LED 显示单元、LCD 显示单元、DAC 和 ADC 以及脉冲拨号电路等。该章将介绍这些硬件单元、嵌入式软件、最新的嵌入式系统和 RTOS,还将提供一些应用示例。

第 2 章

本章将通过处理器和存储器的组织结构介绍嵌入式系统体系结构。读者将学习嵌入式系统中提供处理功能的处理器结构单元,还将学习到存储器设备。第 2 章中还将介绍一种给定嵌入式系统处理器和存储器的选择方法,并解释将存储器块和段分配给数据结构所依赖的基础知识、存储器映射概念和 DMA 概念,以及存储器、设备、IO 设备和处理器如何进行接口。

第 3 章

本章将描述各种设备(并口和串口设备、时钟设备,同步、等价同步和异步通信设备)以及连接这些设备的重要总线,还将描述设备端口的复杂接口特性。该章还将描述 I²C、CAN、USB、高级串行高速总线、ISA、PCI、PCIX、高级并行高速总线。

第 4 章

本章将集中讨论设备驱动程序。它们是嵌入式系统中重要的服务例程。此外还将阐述设备驱动程序和网络函数。设备驱动程序是结合示例描述的。对中断服务和处理器机制的理解是嵌入式系统设计者应该具有的基本知识。第 4 章将集中讨论这些问题,详细描述中断延迟和最终期限的概念。这个概念对于嵌入式系统的实时编程很有用。

第 5 章

本章将描述用嵌入式 C/C++/Java 语言进行嵌入式系统编程的编程和源代码管理工具。还将介绍的重要概念有:循环中多函数调用的使用;函数指针、函数队列的使用;中断服务例程(还有设备驱动程序)的排队;数据结构:队列、堆栈和链表。第 5 章还将介绍使用 C++和 Java 语言的面向对象编程概念。在嵌入式系统中,存储器优化是很重要的。那么如何进行优化呢?本章将解答所有这些问题。

第 6 章

本章将描述单处理器和多处理器系统软件开发过程中的程序建模概念，还将描述数据流和控制数据流图的使用；实时编程过程中的程序模型和 FSM 及 Petri 网的使用。本章还将回答一些重要的问题：如何对微处理器建模，以及如何调度和同步处理器指令的执行。

第 7 章

本章将介绍嵌入式系统开发过程中的软件工程实践和方法，描述线性序列模型、RAD(Rapid Development, 快速开发)模型和其他重要模型，包括基于组件的(面向对象的)软件开发过程模型。本章还将介绍软件需求分析、设计、实现、测试、调试和验证策略，并讲述一种重要的设计语言——UML 语言。

第 8 章

本章将要介绍实时编程最重要的内容：进程间通信。首先将介绍进程、任务和线程的概念，其次将描述信号量的使用。第 8 章还将详细介绍信号、互斥、消息队列、邮箱、管道、虚拟(逻辑)插槽和远程调用的概念。

第 9 章

本章将阐述 RTOS 的概念，首先介绍 OS 结构和内核功能，然后介绍进程、存储器、设备、文件和 IP 子系统管理功能，最后介绍 RTOS 对多任务的调度管理。在此基础上，进一步解释周期、循环、抢占式、时间片，以及其他调度模型如何实时调度多任务，同时还将描述 RTOS IEEE 标准。本章重点介绍对多进程之间进行同步的 15 点策略。

第 10 章

本章将结合示例，详细介绍两种最重要的 RTOS 工具—— μ C/OS-II 和 VxWorks。

第 11 章

本章将描述关于 RTOS 编程的 4 个案例研究。分别是巧克力自动售卖机系统、TCP/IP 网络系统、汽车中的自适应巡航控制系统和智能卡。

第 12 章

本章将描述硬件和软件设计以及集成方法和工具。第 12 章将解释嵌入式系统开发过程行为计划，还将描述目标系统、仿真器、ICE 的使用；用于将最终代码下载到 ROM 中的设备编程器的使用；代码生成工具(汇编器、编译器、加载器和链接器)、模拟器、原型开发工具和 IDE 的使用，以外还将介绍硬件测试工具。

附录

附录将简要介绍 CISC 和 RISC 处理器体系结构的要点、寻址方式和指令集、嵌入式高性能处理器、ARM7、ARM9、ARM11 和 IBM PowerPC 750，还将概述微处理器体系结构。在图像、视频和收敛技术产品的系统中需要使用 DSP。媒体(数据、声音和视频)处理器是用于实时视频、流网络和数据网络的新型处理器。附录也将对它们进行介绍。我们还将简要介绍用于连接嵌入式系统中分散的设备和设备硬件单元的串行和并行总线。嵌入式系统主题将在本科生和研究生课程中介绍。为了指导课程设计人员和教师，附录还给出了这些课程中建议使用的单元。

本书还给出了上百种参考书、网站和期刊杂志。这些将帮助读者对嵌入式系统相关主题进行进一步的研究。

本书 7 个最突出的特点是：

- (1) 结构合理、内容系统、主题安排逻辑性强。
- (2) 对嵌入式系统编程概念、OS、RTOS 函数和进程间同步进行了详细介绍。
- (3) 特别提到了在单芯片或者多芯片系统的软件开发过程中程序的建模，以及软件工程实践的使用。
- (4) 详细介绍了端口、设备、用于设备互连的总线和设备驱动程序。
- (5) 在消费类电子、通信和汽车电子以及安全事务片上系统中 RTOS 编程的创新案例研究。
- (6) 同时介绍了两种 RTOS—— μ C/OS-II 和 VxWorks，主要集中在 RTOS 函数应用方面。
- (7) 表达明晰，突出强调示例，并具有良好设计的图片和表格、关键字及其定义，每章最后还包括了问题回顾和实践。

本书尽可能地给出正确的信息和示例代码以及工具。然而，错误在所难免。敬请广大读者批评指正。

欢迎教师、学者、软件工程师和系统工程师提出宝贵意见，以进一步提高本书的质量。请将建议和问题发往我的电子信箱中，邮件地址为 professional@rajkamal.org，也可以访问网站 <http://www.rajkamal.org>。

Raj Kamal

目 录

第 1 章 嵌入式系统简介	1
1.1 嵌入式系统	2
1.1.1 系统	2
1.1.2 嵌入式系统	3
1.1.3 嵌入式系统的分类	4
1.1.4 嵌入式系统设计者需要具备的技能	5
1.2 系统中的处理器	6
1.2.1 系统中的处理器	6
1.2.2 微处理器	7
1.2.3 微控制器	8
1.2.4 复杂系统的嵌入式处理器	10
1.2.5 数字信号处理器	11
1.2.6 嵌入式系统的专用系统处理器	11
1.2.7 使用通用处理器的多处理器系统	12
1.3 其他硬件单元	13
1.3.1 电源和低功耗管理	13
1.3.2 时钟振荡电路和时钟单元	15
1.3.3 系统需要的各种计时和计数功能的实时时钟和定时器	16
1.3.4 复位电路、加电复位和 Watchdog 定时器复位	16
1.3.5 存储器	17
1.3.6 输入、输出和 I/O 端口, IO 总线和 IO 接口	18
1.3.7 中断处理器	19
1.3.8 DAC(使用 PWM)和 ADC	19
1.3.9 LCD 和 LED 显示	20
1.3.10 小键盘/键盘	21
1.3.11 脉冲拨号电路、调制解调器和收发器	21
1.3.12 GPIB(IEEE 488)连接	21
1.3.13 嵌入式系统硬件的连接和接口总线及单元	22
1.3.14 案例中所需要的硬件单元	22
1.4 嵌入系统软件	24
1.4.1 产品的最终机器可实现软件	24
1.4.2 用机器码编写软件	25
1.4.3 用特定于处理器的汇编语言编写软件	26
1.4.4 用高级语言编写软件	27
1.4.5 使用操作系统的设备驱动程序和设备管理软件	29

1.4.6	多任务调度和使用 RTOS 设备的软件设计	30
1.4.7	设计嵌入式系统的软件工具	30
1.4.8	示例中需要的软件工具	32
1.4.9	软件设计模型	32
1.5	示例嵌入式系统	33
1.6	嵌入式片上系统(SOC)和内部 VLSI 电路	35
1.6.1	用于便携式电话的 SoC 示例	35
1.6.2	ASIP	36
1.6.3	IP 核	36
1.6.4	嵌入 GPP	37
1.6.5	具有一个或者多个处理器的 FPGA 核	37
1.6.6	示例 SoC 中的组成部分——智能卡	38
第 2 章	处理器和存储器组织	45
2.1	处理器中的结构单元	46
2.2	嵌入式系统的处理器选择	55
2.3	存储器设备	58
2.3.1	ROM: 使用方法、形式和变种	59
2.3.2	RAM 设备	60
2.4	嵌入式系统的存储器选择	61
2.5	程序段和块的存储器分配及系统的存储器映射	64
2.5.1	各种存储器段中的函数、过程、数据和堆栈	64
2.5.2	不同数据结构和数据集元素存储器块	66
2.5.3	存储器映射	71
2.5.4	内部设备和 I/O 设备在映射中的地址	77
2.6	直接存储器访问	79
2.7	处理器、存储器和 I/O 设备的接口	80
第 3 章	设备网络的设备和总线	87
3.1	I/O 设备	88
3.1.1	I/O 设备的类型和示例	88
3.1.2	串行设备的同步、准同步和异步通信	90
3.1.3	内部串行通信设备的示例	93
3.1.4	并口设备	95
3.1.5	设备端口的复杂接口特性	97
3.2	定时器和计数设备	98
3.3	互连的多个设备之间通过 I ² C、CAN 和高级 I/O 总线进行串行通信	102
3.3.1	I ² C 总线	102
3.3.2	CAN 总线	103
3.3.3	USB 总线	105
3.3.4	先进的串行高速总线	105

3.4 多个互连 I/O 设备之间通过 ISA、PCI、PCI-X 和高级总线进行的计算机 或者主机系统并行通信	106
3.4.1 ISA 总线	106
3.4.2 PCI 和 PCI/X 总线	107
3.4.3 高级并行高速总线	108
第 4 章 设备驱动程序和中断服务机制	115
4.1 设备驱动程序	117
4.1.1 不使用 ISR 的设备服务	117
4.1.2 设备驱动程序 ISR	118
4.1.3 设备驱动程序	120
4.1.4 作为设备驱动和网络函数的 Linux 内幕	121
4.1.5 编写系统中的物理设备驱动 ISR	122
4.1.6 虚拟设备	123
4.2 系统中的并口设备驱动程序	124
4.3 系统中的串口设备驱动程序	130
4.4 内部可编程定时设备的设备驱动程序	134
4.5 中断服务(处理)机制	135
4.5.1 硬件和软件相关的中断源	135
4.5.2 软件错误相关的硬件中断	135
4.5.3 软件指令相关的中断源	137
4.5.4 内部设备相关的硬件中断	138
4.5.5 中断向量	138
4.5.6 根据可屏蔽和不可屏蔽的中断分类	138
4.5.7 所有可屏蔽中断源的激活(未屏蔽)和禁用(屏蔽)	139
4.5.8 中断挂起寄存器或者状态寄存器	139
4.6 上下文和上下文切换周期、最终期限和中断延迟	139
4.6.1 上下文、延迟和最终期限	139
4.6.2 从上下文保存的角度对处理器中断服务机制的分类	143
4.6.3 使用 DMA 通道帮助缩短中断延迟周期	144
4.6.4 满足服务最终期限的优先级分配	144
4.6.5 硬件优先级的软件覆盖	145
第 5 章 编程概念及 C 与 C++ 的嵌入式编程	150
5.1 用汇编语言和高级语言 C 进行软件编程	151
5.2 C 程序中的元素: 头文件、源文件以及预处理指令	152
5.2.1 用于包含文件的 include 指令	152
5.2.2 源文件	154
5.2.3 配置文件	154
5.2.4 预处理指令	154
5.3 程序元素: 宏与函数	154

5.4	程序元素：数据类型、数据结构、修饰符、语句、循环和指针	156
5.4.1	数据类型	156
5.4.2	使用数据结构：队列、堆栈、链表和树	156
5.4.3	修饰符	158
5.4.4	条件语句、循环语句以及无限循环语句	159
5.4.5	指针和 NULL 指针	161
5.4.6	函数调用	163
5.4.7	主程序中按照循环顺序进行的多函数调用	164
5.4.8	函数指针、函数队列和中断服务例程队列	166
5.5	队列	167
5.5.1	队列	167
5.5.2	实现网络协议的队列	170
5.5.3	发生中断时函数的排列	172
5.5.4	网络中进行流控制的 FIPO 队列	174
5.6	堆栈	175
5.7	链表与有序链表	178
5.7.1	链表	178
5.7.2	活动设备驱动器(软件时钟)的链表	186
5.7.3	就绪链表中的任务链表	187
5.8	C++嵌入式编程	189
5.8.1	面向对象的编程	189
5.8.2	C++的嵌入式编程	189
5.9	用 Java 进行嵌入式编程	191
5.9.1	什么时候用 Java 编程	191
5.9.2	Java 的缺点	191
5.10	C 程序编译器与交叉编译器	193
5.11	嵌入式 C/C++的源代码工程管理工具	194
5.12	存储器需求的优化	194
第 6 章	单处理器和多处理器系统软件开发过程中的程序建模概念	201
6.1	软件实现之前对软件分析过程的建模	202
6.1.1	数据流图在程序分析中的用法	202
6.1.2	用于程序分析的控制数据流图的用法	204
6.2	用于事件控制或者响应时间受到约束的实时程序的编程模型	205
6.2.1	有限状态机模型	205
6.2.2	Petri 网模型	209
6.3	多处理器系统的建模	215
6.3.1	多处理器系统中的问题	216
6.3.2	模型	217
6.3.3	同步数据流图模型	218

6.3.4	同构的同步数据流图模型	219
6.3.5	无环优先扩展图模型	220
6.3.6	定时的 Petri 网和扩展预测/转换网模型	221
6.3.7	多线程图系统模型	222
6.3.8	图和 Petri 网在多处理器系统中的应用	223
第 7 章	嵌入式软件开发过程中的软件工程实践	233
7.1	软件的算法复杂度	234
7.2	软件开发生命周期及其模型	236
7.2.1	软件开发过程中的线性顺序模型(瀑布模型或者生命周期模型)	236
7.2.2	RAD 模型	237
7.2.3	增量模型	237
7.2.4	并发模型	238
7.2.5	基于组件(面向对象)的软件开发过程模型	238
7.2.6	基于第四代工具的软件开发过程模型	238
7.2.7	基于面向对象和基于第四代工具的方法	239
7.3	软件分析	239
7.4	软件设计	241
7.5	软件实现	242
7.6	软件测试、确认以及调试	243
7.6.1	测试、验证以及确认	243
7.6.2	调试	246
7.7	软件开发过程中的实时程序设计问题	248
7.7.1	在需求和规范的分析中存在的问题	248
7.7.2	设计和实现中存在的问题	249
7.7.3	系统集成中的问题	249
7.7.4	测试中的问题	249
7.8	软件项目管理	250
7.8.1	项目管理	250
7.8.2	项目测度	251
7.9	软件维护	253
7.10	统一建模语言(UML)	255
第 8 章	进程间通信与进程、任务和线程的同步	265
8.1	应用程序中的多个进程	266
8.1.1	进程	266
8.1.2	任务	266
8.1.3	线程	268
8.1.4	通过函数、ISR 和任务的特征进行区分	269
8.2	多任务和多例程的数据共享问题	270
8.2.1	数据共享问题及其解决方案	270

8.2.2	对任务或者任务的临界段使用信号量	271
8.2.3	优先级倒置问题和死锁情况	279
8.3	进程间通信	280
8.3.1	信号	281
8.3.2	信号量标识或者互斥体用作资源键(用于进程的资源加锁和解锁)	281
8.3.3	消息队列	282
8.3.4	邮箱	284
8.3.5	管道	285
8.3.6	虚拟(逻辑)套接字	287
8.3.7	远程过程调用(RPC)	287
第 9 章	实时操作系统	292
9.1	操作系统服务	293
9.1.1	目标	293
9.1.2	结构	294
9.1.3	内核	295
9.1.4	进程管理	296
9.1.5	存储器管理	297
9.1.6	设备管理	298
9.1.7	文件系统的组织和实现	300
9.2	I/O 子系统	302
9.3	网络操作系统	302
9.4	实时操作系统与嵌入式操作系统	304
9.4.1	实时操作系统	304
9.4.2	在嵌入式系统中何时需要 RTOS	304
9.4.3	RTOS 的多任务调度管理	306
9.4.4	实时系统中通过 RTOS 进行的多任务调度	308
9.5	RTOS 环境中的中断例程: RTOS 的中断源调用处理	309
9.5.1	通过中断源直接调用 ISR	310
9.5.2	通过中断源以及调度任务的暂时挂起, 直接调用 RTOS	311
9.5.3	通过中断源以及 RTOS 对任务和 ISR 的调度, 直接调用 RTOS	311
9.6	RTOS 任务调度模型, 作为性能测度的中断延迟和任务响应时间	311
9.6.1	使用就绪任务循环队列的协作轮转调度	312
9.6.2	使用按照优先级约束排序列表的就绪任务的协作调度	313
9.6.3	时间分片的循环调度(速率单调的协作调度)	315
9.6.4	调度程序控制的抢占式调度模型策略	316
9.6.5	抢占式调度程序提供的临界段服务	318
9.6.6	任务的固定(静态)实时调度	320
9.6.7	调度算法中的优先级分配	320
9.6.8	使用概率定时 Petri 网(随机)和多线程图(MTG)的高级调度算法	321

9.7	周期、零散以及非周期任务的调度模型的性能测度	321
9.7.1	使用 CPU 负载作为性能尺度	321
9.7.2	零散任务模型	322
9.8	为 RTOS 的标准化和任务内部通信函数采用的 IEEE 标准 POSIX 1003.1B	322
9.9	抢占式调度程序的基本操作及其在处理器上预期耗费的时间	324
9.10	用于进程间、ISR 间、OS 函数间和任务之间同步及资源管理的 15 条策略	325
9.11	嵌入式 LINUX 的内部组织: 设备驱动程序和嵌入式系统的 LINUX 内核	326
9.12	操作系统的安全问题	329
9.13	移动式操作系统	330
第 10 章	实时操作系统编程工具: MicroC/OS-II 和 VxWorks	334
10.1	测试稳定且调试合格的实时操作系统的必要性	335
10.2	μ C/OS-II	337
10.2.1	RTOS 系统级函数	338
10.2.2	任务服务函数及其使用范例	341
10.2.3	时间延迟函数	347
10.2.4	函数相关的存储器分配	349
10.2.5	信号量相关函数	351
10.2.6	邮箱相关函数	363
10.2.7	队列相关函数	372
10.3	VxWorks	381
10.3.1	基本特性	382
10.3.2	系统库头文件中的任务管理库	384
10.3.3	VxWorks 系统函数和系统任务	388
10.3.4	进程(任务)间通信函数	391
第 11 章	RTOS 编程案例研究	405
11.1	使用 MUCOS RTOS 对巧克力自动售卖机编码	406
11.1.1	案例定义、多任务及其函数	406
11.1.2	创建任务、函数和 IPC	408
11.1.3	编码步骤示例	411
11.2	使用 RTOS VxWorks 将应用层字节流发送到 TCP/IP 网络上	420
11.2.1	案例定义、多任务及其函数	421
11.2.2	创建任务、函数和 IPC	424
11.2.3	编码步骤示例	425
11.3	汽车自适应巡航控制系统的嵌入式系统	443
11.4	智能卡中的嵌入式系统	456
11.4.1	嵌入式硬件	457
11.4.2	嵌入式软件	458