

高等学校计算机专业教材

GAODENG XUEXIAO JISUANJI ZHUANYE JIAOCAI

嵌入式系统—— 组成、原理与设计编程

◎ 金敏 周翔 金梁 编著

GAODENG XUEXIAO JISUANJI ZHUANYE JIAOCAI
GAODENG XUEXIAO JISUANJI ZHUANYE JIAOCAI
GAODENG XUEXIAO JISUANJI ZHUANYE JIAOCAI

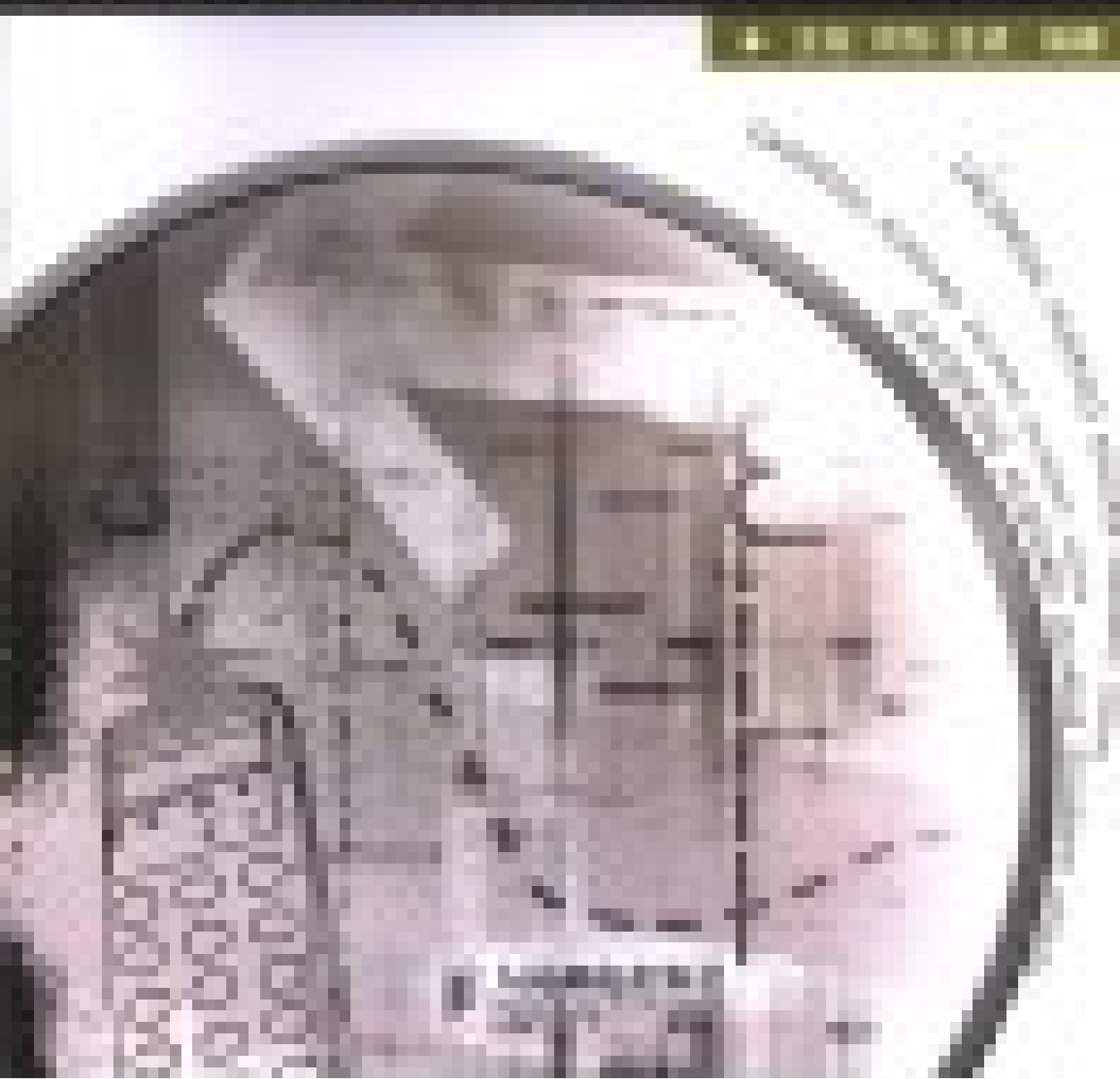
人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

国家精品课程规划教材

教育部高等学校计算机专业教学指导委员会推荐教材

嵌入式系统—— 组成、原理与设计编程

第二版 王 颖 王 强 王 磊 主编



高等学校计算机专业教材

嵌入式系统——组成、 原理与设计编程

金 敏 周 翔 金 梁 编著

人民邮电出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

嵌入式系统: 组成、原理与设计编程 / 金敏, 周翔, 金梁编著.

—北京: 人民邮电出版社, 2006.8

高等学校计算机专业教材

ISBN 7-115-14835-X

I. 嵌... II. ①金...②周...③金... III. 微型计算机—系统设计—高等学校—教材

IV. TP360.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 059404 号

内 容 提 要

嵌入式系统是嵌入式硬件与嵌入式软件两者的综合体, 本书系统介绍嵌入式系统软硬件的组成、工作原理和设计编程方法。全书分为 5 篇共 11 章, 主要内容包括: 嵌入式系统的基础知识, 包括嵌入式系统的定义、组成、特点、发展概况、应用领域等; 各种典型的嵌入式处理器和嵌入式外围设备的特点与工作原理, 并且, 作为嵌入式处理器的一个实例, 分析了当前流行的 ARM 内核体系结构及 ARM 处理器的选型和调试方法; 常见的嵌入式实时操作系统和嵌入式软实时操作系统的种类及选用标准, 然后以目前市场占有率排名第一的 VxWorks 操作系统为例, 详细讲解嵌入式操作系统的组成、多任务环境的工作原理及其交叉开发环境的使用; 嵌入式系统的一般设计方法、开发流程步骤、调试手段与测试工具, 详细介绍嵌入式软件相对通用计算机系统一些独特的编程技术和优化方法; 本书的最后为嵌入式系统的相关实验。

本书可作为高等院校计算机类、电子类、信息类和理工科其他学科本科高年级学生和研究生教材, 也可作为一些高级进修班的培训教材, 同时亦可作为企业各类嵌入式产品开发人员、嵌入式技术爱好者的案头学习参考资料。

高等学校计算机专业教材

嵌入式系统——组成、原理与设计编程

◆ 编 著 金 敏 周 翔 金 梁

责任编辑 邹文波

◆ 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>

河北三河市海波印务有限公司印刷

新华书店总店北京发行所经销

◆ 开本: 787×1092 1/16

印张: 20.75

字数: 488 千字

2006 年 8 月第 1 版

印数: 1~3 000 册

2006 年 8 月河北第 1 次印刷

ISBN 7-115-14835-X/TP · 5443

定价: 28.00 元

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

前 言

当前,嵌入式系统已得到广泛应用,工业制造、过程控制、通信、仪器、仪表、汽车、船舶、航空、航天、军事装备、消费类产品等方面均是嵌入式系统的应用领域,可以说,嵌入式系统和嵌入式技术无处不在。并且,未来几年的嵌入式应用将能更灵活地与大型网络计算平台互动、形成新的应用模式,甚至构架出新的计算体系结构,例如,“移动计算(Mobile Computing)”“泛在计算(Ubiquitous Computing)”、“普适计算(Pervasive Computing)”等,最终将嵌入式系统和计算机系统及通信节点组成的信息空间与人类生活的物理空间集成为和谐的人机交互信息环境,因此,嵌入式系统和嵌入式技术将成为计算机工业中最具活力的部分。

全书主要内容和篇章结构安排

本书系统介绍了嵌入式系统软硬件的组成、工作原理和设计编程方法。全书分为5篇共11章,主要内容和篇章结构安排如下。

第一篇为引论,由第1章组成。介绍嵌入式系统的基本概念,包括嵌入式系统的定义、组成、特点、发展概况和应用领域。

第二篇讲解嵌入式硬件系统的组成和工作原理,由第2~4章组成。第2章讲解嵌入式处理器的种类划分及选型方法;第3章作为第2章嵌入式处理器的一个实例,具体分析以ARM内核构建的ARM处理器的体系结构特点与工作原理;第4章介绍实时时钟、存储设备、输入输出设备、外设接口、通信接口等嵌入式外围设备的工作原理。

第三篇围绕嵌入式操作系统进行阐述,由第5~8章组成。首先在第5章介绍常见的嵌入式实时操作系统和嵌入式软实时操作系统的种类及选用标准;然后以目前市场占有率排名第一的VxWorks操作系统为例,在第6、7、8章中具体详细的讲解嵌入式操作系统的组成、多任务环境的工作原理及其交叉开发环境的使用。

第四篇探讨嵌入式系统的设计与编程方法,由第9、10章组成。其中,第9章从软件工程角度给出嵌入式系统的一般设计方法、开发流程步骤、调试与测试手段和工具等;进一步提高,第10章给出嵌入式软件相对通用计算机系统一些独特的编程技术,包括一般编程技术、多任务编程技术和嵌入式Java技术,以及程序的空间效率、时间效率、能耗等优化方法。

第五篇为嵌入式系统的相关实验,由第11章组成

本书具有的特点

相对其他嵌入式系统方面的书籍资料,本书具有如下特点。

1. 综合性与系统性

嵌入式系统是嵌入式硬件和嵌入式软件的综合体,两者相辅相成、密不可分,硬件的设计服务于软件功能,软件的开发必须考虑硬件资源的有限性。根据嵌入式系统的这一特点,

本书不仅系统地介绍了嵌入式硬件系统的组成和工作原理，同时也详细阐述了嵌入式操作系统及其交叉开发环境的组成和工作原理，还进一步给出了嵌入式系统软硬件的协同设计开发方法和嵌入式软件的编程优化技术。

2. “点”“面”结合

嵌入式计算机产业不像 Wintel 主导的 X86 PC 产业那样整齐划一，8 位、16 位、32 位甚至 64 位的嵌入式处理器有几十种，相应的嵌入式操作系统也有几十种。本书不仅从“面”分别介绍了嵌入式处理器和嵌入式操作系统的种类划分方法和常见典型种类的特点，同时进一步通过一典型实例从“点”进行了具体深入的分析讨论。例如，第二篇介绍嵌入式处理器，首先综述了嵌入式微处理器、嵌入式微控制器、嵌入式 DSP、嵌入式片上系统 4 大类嵌入式处理器的基本特征，然后以 ARM 为例，具体阐述了 ARM 处理器的体系结构与工作原理、ADS 开发环境与 JTAG 调试方法；再如，第三篇在综述 VxWorks、pSOSystem、 μ C/OS、Window CE、Embedded Linux、Palm、EPOC 等各种典型的嵌入式实时操作和软实时操作系统的优缺点的基础上，以 VxWorks 为例，详细讲解了 VxWorks 嵌入式操作系统的组成、多任务环境的工作原理、交叉开发环境 Tornado 的使用。通过“点”与“面”的结合，使学生不仅了解一种实用的基于 ARM 嵌入式硬件平台和 VxWorks 软件平台的整体系统开发方法，同时使学生对各类嵌入式软硬件系统中抽象的概念、思想、原理和原则得以具体化、形象化与深入化，有助于理解与掌握“面”上知识，进一步实现触类旁通、举一反三。

3. 大量实例

本书列举了大量实例（应用实例与代码实例）。应用实例如，以微波炉为例讲解嵌入式前后台系统的工作原理；以手机死机后的自恢复为例讲解看门狗定时器的功能；代码实例，讲解任务的管理与调度、同步与互斥、任务间的通信机制时，都结合 C 源代码实例进行讲解，所有源代码实例均被验证，可调试运行。

4. 实用性

嵌入式系统是一门实践的学科。本书给出了嵌入式系统的一般设计方法、开发流程步骤、调试与测试手段和工具，详细介绍了嵌入式软件相对通用计算机系统一些独特的编程技术，包括一般编程技术、多任务编程技术和嵌入式 Java 技术，以及程序的空间效率、时间效率、功耗等优化方法，这些设计编程方法是编者多年从事嵌入式产品开发和科研项目的实际经验的系统总结，具有参考意义与实用价值。

5. 作为教材的适用性

本书是在原讲义基础上，根据几年来在国家示范性软件学院——湖南大学软件的教学实践和广大师生的反馈意见修改而成。全书每章后均附有习题，附录给出了配套的实验教学的实验项目内容，因此适合作为高等院校计算机及相关专业本科高年级学生和研究生授课及其配套实验教材，也可作为一些高级进修班的培训教材，参考学时是 32 学时。给出的配套实验项目既可在 PC 上的仿真器环境下进行，也可在各类嵌入式硬件实验箱或开发板上进行，因此各院校无论是否已购买嵌入式硬件实验箱或开发板，均可使用附录内容进行与理论授课

同步的实验项目，提高这门实践性课程的教学效果。此外，为配合实际教学效果，作者制作了与本书配套的多媒体课件，采用本书作为教材的教师可通过 E-mail: Rj_jinmin@hnu.cn 免费获取该课件。

致谢与其他

全书由金敏主编，第 2、3 章由周翔编写，第 8 章由金梁编写，其他各章均由金敏编写。

本书在编写过程中参考了不少相关资料文献，书中引用的文字和图片均已清楚注明作者姓名、作品名称及文献出处，并附参考文献。这些引用是本书内容阐述所需，无侵权意图，特此申明。同时对引用的这些文献资料的作者或编者深表谢意。

本书在编写过程中力求精益求精，但由于编者水平有限，书中难免存在疏漏之处，恳请读者批评指正。

编 者
2006 年 4 月

目 录

第一篇 引 论

第 1 章 嵌入式系统概述	1
1.1 嵌入式系统的发展与应用	1
1.1.1 计算机系统的分类	1
1.1.2 嵌入式系统的应用概况	2
1.1.3 嵌入式系统的发展史	6
1.2 嵌入式系统的定义、组成与特点	7
1.2.1 嵌入式系统的定义	7
1.2.2 嵌入式系统的组成与体系结构	8
1.2.3 嵌入式系统的基本特征	10
1.3 嵌入式系统的种类	11
1.3.1 按实时性能分类	11
1.3.2 按软件结构分类	12
1.4 嵌入式系统应用带来的机遇	15
1.5 本章小结	16
习题	16

第二篇 嵌入式硬件系统

第 2 章 嵌入式处理器	17
2.1 嵌入式处理器的基本特征	17
2.2 嵌入式处理器的种类	17
2.2.1 嵌入式微处理器	18
2.2.2 嵌入式微控制器	18
2.2.3 嵌入式 DSP 处理器	19
2.2.4 嵌入式片上系统	19
2.3 典型嵌入式处理器	20
2.3.1 8051 单片机	20
2.3.2 ARM	20
2.3.3 68K/Coldfire	22
2.3.4 PowerPC	22
2.3.5 MIPS	22
2.3.6 X86	22
2.4 嵌入式处理器的选型方法	22
2.5 嵌入式处理器的发展趋势	23

2.6 本章小结	23
习题	23
第3章 ARM 内核与 ARM 微处理器	24
3.1 ARM 简介	24
3.2 ARM 内核体系结构	25
3.2.1 RISC 架构	25
3.2.2 AMBA 总线	25
3.2.3 运行模式	26
3.2.4 双指令集与工作状态	27
3.2.5 寄存器组	28
3.2.6 异常与中断处理	33
3.2.7 存储管理	37
3.2.8 存储数据类型	37
3.2.9 存储格式	38
3.2.10 存储器映射的 I/O	38
3.2.11 JTAG 调试接口	39
3.3 ARM 内核系列及配置命名	39
3.3.1 ARM 内核命名规则	39
3.3.2 ARM 内核系列	40
3.4 ARM 微处理器及其选型	43
3.4.1 ARM 微处理器芯片	43
3.4.2 ARM 处理器的选型	44
3.5 ARM 开发与调试	45
3.5.1 ADS 集成开发环境	45
3.5.2 ARM 工程创建	50
3.5.3 ARM 调试	53
3.6 本章小结	56
习题	56
第4章 嵌入式系统的外围设备	57
4.1 实时时钟	57
4.2 存储设备	58
4.2.1 RAM	58
4.2.2 SRAM	58
4.2.3 DRAM	59
4.2.4 ROM	59
4.2.5 Mask ROM	60
4.2.6 OTPROM	61
4.2.7 EPROM	61
4.2.8 EEPROM	62

4.2.9 NOR&NAND Flash	63
4.3 输入设备	64
4.3.1 小型键盘	64
4.3.2 触摸屏	65
4.4 输出设备	67
4.4.1 LED	67
4.4.2 LCD	69
4.5 外设接口	70
4.5.1 并行接口	70
4.5.2 I ² C	70
4.5.3 I ² S	71
4.5.4 USB	72
4.5.5 IEEE1394	73
4.6 通信接口	74
4.6.1 RS-232	74
4.6.2 以太网	75
4.6.3 红外线	76
4.6.4 蓝牙	76
4.6.5 IEEE802.11	77
4.6.6 GPRS	78
4.7 本章小结	78
习题	78

第三篇 嵌入式操作系统

第5章 嵌入式操作系统概论	80
5.1 嵌入式操作系统的种类	80
5.2 嵌入式实时操作系统	82
5.2.1 VxWorks	83
5.2.2 pSOSsystem	85
5.2.3 μ C/OS	87
5.3 嵌入式软实时操作系统	89
5.3.1 PalmOS	89
5.3.2 Windows CE	91
5.3.3 EPOC	93
5.3.4 Embedded Linux	95
5.4 嵌入式操作系统的选择标准	97
5.5 嵌入式操作系统的发展趋势	98
5.6 本章小结	99
习题	99

第 6 章 VxWorks 与 Tornado 概貌	100
6.1 VxWorks 的产品概况	100
6.1.1 Wind River 公司简介	100
6.1.2 VxWorks 的产品组成	100
6.1.3 Wind River Platform	101
6.1.4 VxWorks 的特点	105
6.2 VxWorks 的交叉开发环境构成	105
6.3 VxWorks 的操作系统	106
6.3.1 VxWorks 操作系统体系结构	106
6.3.2 VxWorks 的内核	107
6.3.3 VxWorks 的外挂基本模块组件	107
6.3.4 VxWorks 的外挂附加模块组件	108
6.4 VxWorks 的交叉开发工具 Tornado	109
6.4.1 Tornado 的基本结构	109
6.4.2 Tornado 的功能特点	109
6.4.3 Tornado 的工具集	109
6.5 目标机上的 VxWorks Image	111
6.5.1 VxWorks Image 的种类与结构	111
6.5.2 VxWorks Image 在内存中的存放与加载	113
6.5.3 VxWorks Image 的运行	115
6.6 一个简单的工程项目实例	115
6.6.1 创建工程项目	115
6.6.2 在工程项目中创建应用程序	117
6.6.3 将项目编译链接生成程序映像	118
6.6.4 将程序映像下载到目标机中	120
6.6.5 程序的运行调试	122
6.7 本章小结	127
习题	127
第 7 章 VxWorks 操作系统的多任务环境	128
7.1 任务的管理与调度	128
7.1.1 多任务的概念	128
7.1.2 任务的创建与删除	130
7.1.3 任务的状态转换与控制	133
7.1.4 任务调度策略	135
7.1.5 任务信息的获取与设置	138
7.1.6 任务扩展函数	138
7.1.7 任务的错误状态	139
7.1.8 任务异常处理	141
7.1.9 VxWorks 的系统任务	141

7.1.10 编写 VxWorks 的用户任务	143
7.2 任务间的通信机制	146
7.2.1 共享数据结构 (Shared Data Structures)	146
7.2.2 互斥实现机制	147
7.2.3 信号量 (Semaphores)	148
7.2.4 消息队列 (Message Queues)	163
7.2.5 管道 (Pipes)	167
7.2.6 事件 (Events)	170
7.2.7 信号 (Signals)	176
7.2.8 套接字 (SoCkets) 与远程过程调用 (RPC)	181
7.2.9 通信机制小结	182
7.3 中断服务程序	182
7.3.1 中断的概念	182
7.3.2 中断服务接口函数	183
7.3.3 中断服务程序的连接原理	183
7.3.4 中断与任务的优先级比较	184
7.3.5 中断与任务间的通信机制	184
7.3.6 编写调试中断服务程序	184
7.4 时钟管理	187
7.4.1 系统时钟	187
7.4.2 看门狗定时器 (Watchdog Timers)	188
7.5 综合应用示例	191
7.5.1 示例源代码	191
7.5.2 示例分析	196
7.6 本章小结	197
习题	197
第 8 章 Tornado 交叉开发环境	198
8.1 Tornado 交叉开发基本流程	198
8.1.1 交叉开发环境的建立	198
8.1.2 工程创建	200
8.1.3 编译链接	202
8.1.4 目标程序加载	202
8.1.5 运行调试	203
8.2 基于目标板的 Bootable Project 实例	204
8.2.1 交叉开发环境的建立	205
8.2.2 创建 Bootable Project	206
8.2.3 编辑链接生成 Bootable Image	210
8.2.4 将 Bootable Image 加载至硬件目标板中	210
8.2.5 应用程序的运行调试	212

8.3 基于目标板的 Downloadable Project 实例	213
8.3.1 交叉开发环境的建立	213
8.3.2 创建 Downloadable Project	214
8.3.3 编辑链接生成 Downloadable Image	216
8.3.4 将 Downloadable Image 加载至硬件目标板中	216
8.3.5 应用程序的运行调试	217
8.4 多任务调试方法	217
8.4.1 Tornado 调试模式与断点类型	217
8.4.2 任务调试模式下的多任务调试	217
8.4.3 系统调试模式下的多任务调试	221
8.4.4 中断服务程序的调试	222
8.5 本章小结	222
习题	222

第四篇 嵌入式系统的设计与编程

第9章 嵌入式系统的设计、开发与测试	223
9.1 嵌入式系统的设计	223
9.1.1 硬件优先设计	223
9.1.2 软硬件协同设计	223
9.2 嵌入式系统的开发与运行	224
9.2.1 软硬件并行开发模式	224
9.2.2 嵌入式软件的开发与运行流程	224
9.3 嵌入式系统的调试	230
9.3.1 调试的内容	230
9.3.2 调试的手段与工具	231
9.4 嵌入式系统的测试	232
9.4.1 嵌入式系统测试的重要性	232
9.4.2 传统的测试工具	232
9.4.3 CodeTEST 嵌入式软件测试系统	234
9.5 本章小结	237
习题	237
第10章 嵌入式软件的编程与优化	238
10.1 一般编程技术	238
10.1.1 寄存器的位操作	238
10.1.2 使用存储类限定符 volatile	239
10.1.3 大端与小端模式	240
10.1.4 访问外设	240
10.1.5 C 与汇编语言混合编程	242
10.2 多任务编程技术	246

10.2.1	任务划分原则	246
10.2.2	任务间通信机制的选择	249
10.2.3	任务的细节设计	250
10.2.4	多任务软件系统设计实例	251
10.3	嵌入式 Java 技术	254
10.3.1	Java 技术与嵌入式系统	254
10.3.2	J2ME	255
10.3.3	硬件加速 Java	255
10.4	软件优化方法	256
10.4.1	高效的结构体组织	256
10.4.2	使用密指令集	260
10.4.3	代码压缩	260
10.4.4	使用寄存器变量	260
10.4.5	关于浮点运算与乘除法运算	260
10.4.6	避免使用 printf() 函数	261
10.4.7	多重循环的效率与流水线技术	261
10.4.8	预编译宏指令替代函数	263
10.4.9	能耗优化	263
10.5	本章小结	264
	习题	264

第五篇 实 验

第 11 章	实验项目	265
11.1	实验目标与要求	265
11.2	实验 1——Tornado IDE 与 VxSim 目标仿真环境	266
11.2.1	实验目的	266
11.2.2	实验内容	266
11.2.3	实验软硬件环境	266
11.2.4	实验预备知识	266
11.2.5	实验项目与步骤	266
11.2.6	思考题	277
11.3	实验 2——VxWorks 组件的裁剪与配置	278
11.3.1	实验目的	278
11.3.2	实验内容	278
11.3.3	实验软硬件环境	278
11.3.4	实验预备知识	278
11.3.5	实验原理	278
11.3.6	实验项目与步骤	278
11.3.7	思考题	281

11.4	实验3——多任务的创建与调度	281
11.4.1	实验目的	281
11.4.2	实验内容	281
11.4.3	实验软硬件环境	281
11.4.4	实验预备知识	281
11.4.5	实验原理	281
11.4.6	实验项目与步骤	282
11.4.7	思考题	285
11.5	实验4——二进制信号量与计数信号量	285
11.5.1	实验目的	285
11.5.2	实验内容	285
11.5.3	实验软硬件环境	285
11.5.4	实验预备知识	285
11.5.5	实验原理	286
11.5.6	实验项目与步骤	286
11.5.7	思考题	292
11.6	实验5——互斥信号量及优先级倒置	292
11.6.1	实验目的	292
11.6.2	实验内容	292
11.6.3	实验软硬件环境	292
11.6.4	实验预备知识	292
11.6.5	实验原理	292
11.6.6	实验项目与步骤	293
11.6.7	思考题	295
11.7	实验6——消息队列通信机制	295
11.7.1	实验目的	295
11.7.2	实验内容	295
11.7.3	实验软硬件环境	295
11.7.4	实验预备知识	295
11.7.5	实验原理	296
11.7.6	实验步骤	296
11.7.7	思考题	297
11.8	实验7——管道通信机制	298
11.8.1	实验目的	298
11.8.2	实验内容	298
11.8.3	实验软硬件环境	298
11.8.4	实验预备知识	298
11.8.5	实验原理	298
11.8.6	实验项目与步骤	299

11.8.7 思考题	301
11.9 实验 8——事件通信机制	301
11.9.1 实验目的	301
11.9.2 实验内容	301
11.9.3 实验软硬件环境	301
11.9.4 实验预备知识	301
11.9.5 实验原理	301
11.9.6 实验项目与步骤	303
11.9.7 思考题	306
11.10 实验 9——多任务的调试方法	306
11.10.1 实验目的	306
11.10.2 实验内容	306
11.10.3 实验软硬件环境	307
11.10.4 实验预备知识	307
11.10.5 实验原理	307
11.10.6 实验项目与步骤	307
11.10.7 思考题	312
参考文献	313

第一篇 引 论

第 1 章 嵌入式系统概述

1.1 嵌入式系统的发展与应用

1.1.1 计算机系统的分类

1. 传统计算机分类

通常，按照计算机系统的体系结构、运算速度、结构规模、适用领域，可将其分为超级计算机、大型计算机、中型计算机、小型计算机和微型计算机，并以此来组织学科和产业分工，这种分类沿袭了大约 40 年。传统的计算机系统分类金字塔如图 1-1 所示。

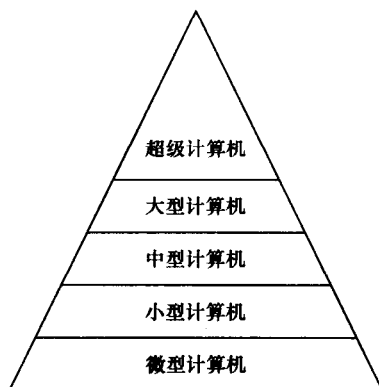


图 1-1 传统计算机系统分类金字塔

2. 以应用为中心的分类

近年来，随着计算机技术的迅速发展，计算机的应用情况发生了根本性的变化。例如，20 世纪 60 年代末期定义的微型计算机演变出来的个人计算机（Personal Computer），如今已经占