



面向“工程教育认证”
计算机系列课程规划教材



“十二五”普通高等教育
本科国家级规划教材

嵌入式系统原理与设计 (第2版)

◎ 陈文智 王总辉 主编



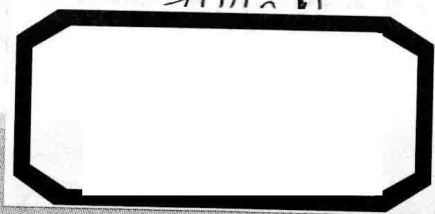
清华大学出版社



面向“工程教育认证”
计算机系列课程规划教材

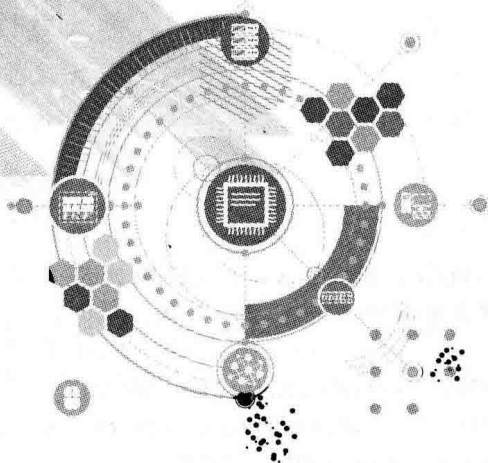


“十二五”普通高等教育
本科国家级规划教材



嵌入式系统原理与设计 (第2版)

◎ 陈文智 王总辉 主编



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书从教学的角度出发,全面、系统地讲述了嵌入式系统及各组成部分的基本知识、技术原理和设计方法,使读者可以了解嵌入式系统的结构组成,掌握嵌入式系统开发的思路方法,具备嵌入式系统开发的初步分析问题和解决问题的能力。本书上篇是原理部分,内容包括:嵌入式系统概述,ARM 处理器和指令集,嵌入式 Linux 操作系统,嵌入式软件编程技术,开发环境和调试技术,Boot Loader 技术,ARM-Linux 内核,文件系统,设备驱动程序设计基础,字符设备驱动程序设计,块设备驱动程序设计,网络设备驱动程序开发和嵌入式 GUI 及应用程序设计;本书下篇是实验部分,内容包括:实验基础,开发环境建立,内核和模块构建,文件系统构建,调试技术演练,字符设备驱动程序设计,块设备驱动程序设计,网络设备驱动程序设计,MiniGUI 实验设计和 Android 实验设计。

本书兼顾教学、科研和工程开发的需要,既可以作为各类院校嵌入式方向的本科生和研究生的嵌入式系统教材,也可以作为嵌入式系统开发工程师的参考书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

嵌入式系统原理与设计/陈文智,王总辉主编. —2 版. —北京:清华大学出版社,2017
(面向“工程教育认证”计算机系列课程规划教材)
ISBN 978-7-302-46078-7

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 002746 号

责任编辑:魏江江 薛 阳

封面设计:刘 键

责任校对:焦丽丽

责任印制:沈 露

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课 件 下 载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:北京国马印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:29.25 字 数:740 千字

版 次:2011 年 5 月第 1 版 2017 年 3 月第 2 版 印 次:2017 年 3 月第 1 次印刷

印 数:12001~14000

定 价:59.50 元

产品编号:072804-01

丛书编委会

名誉主任

张新祥 北京大学

主任

杨士强 清华大学

副主任

马殿富 北京航空航天大学

郝永胜 北京大学

委员(按拼音顺序排列)

查伟忠 苏州大学

陈文智 浙江大学

程 维 东北大学

杜小勇 中国人民大学

付先平 大连海事大学

桂小林 西安交通大学

韩 燮 中北大学

李 斌 中国科技大学

李凤霞 北京理工大学

李 飞 南京邮电大学

李文新 北京大学

李玉龙 兰州交通大学

刘宏伟 哈尔滨工业大学

刘景泰 南开大学

刘乃安 西安电子科技大学

毛 力 江南大学

明 仲 深圳大学

牛建伟 北京航空航天大学

施晓秋 温州大学

唐修连 解放军理工大学

陶先平 南京大学

王力生 同济大学

魏晓辉 吉林大学

温武少 中山大学

肖鸣宇 电子科技大学

肖晓强 国防科技大学

严 义 杭州电子科技大学

杨 勇 长春理工大学

尹长川 北京邮电大学

叶世平 福州大学

于 戈 东北大学

于洪志 西北民族大学

于双元 北京交通大学

张沪寅 武汉大学

张晓龙 武汉科技大学

赵一鸣 复旦大学

赵有健 清华大学

翟玉庆 东南大学

周 娅 桂林电子科技大学

朱 青 北京工业大学

前言

转眼之间,国家级精品课教材、普通高等教育“十一五”国家级规划教材的《嵌入式系统原理与设计》正式发行有 5 年多的时间了。感谢各位读者的关注及厚爱,使得本书印刷了 6 次,被几十所高校选作指定教材,并被多个高校图书馆馆藏。

从众多兄弟院校课程教学反馈意见来看,本书对“嵌入式系统”及相关课程教学起到了积极作用。同时,我们在互联网上也倾听了众多读者的反馈,对他们提出的宝贵的建议与意见表示诚挚的谢意。根据近几年作者在嵌入式系统及相关专业课程的一线教学实践的经验积累,以及对飞速发展的各种嵌入式系统技术的跟踪和学习,结合读者的建议和意见,决定对本书进行修订后再版发行。

再版中,主要对嵌入式系统原理部分做了调整,结构和内容方面调整如下:

(1) 第 1 章“嵌入式系统概述”在内容方面做了更新。

(2) 将原第 2 章“ARM 处理器和架构”和原第 3 章“ARM9 指令集和汇编”合并成第 2 章“ARM 处理器和指令集”,对处理器架构介绍方面进行缩减,使该章内容更为紧凑、实用。

(3) 将原第 4 章“嵌入式 Linux 操作系统”调整为第 3 章,并在内容上做了更新。

(4) 新增加一章“嵌入式软件编程技术”作为第 4 章,介绍嵌入式编程基础,并在此基础上深入讲解嵌入式汇编编程技术、嵌入式高级编程技术和汇编语言与高级语言混合编程技术,以便读者在做后面章节内容设计时有更好的编程基础。

(5) 将原第 9 章“开发环境和调试技术”调整为第 5 章,并在内容上做了更新,使读者学习完编程技术后,接着学习嵌入式系统开发环境搭建和调试技术,顺序上更科学。

(6) 将原第 5 章“Boot Loader 技术”调整为第 6 章,并在内容上做了更新。

(7) 将原第 6 章“ARM——Linux 内核”调整为第 7 章,并在内容上做了更新。

(8) 将原第 7 章“文件系统”调整为第 8 章,并在内容上做了更新。

(9) 将原第 8 章“设备驱动程序设计基础”调整为第 9 章,并在内容上做了更新。

(10) 第 10 章“字符设备驱动程序设计”、第 11 章“块设备驱动程序设计”和第 12 章“网络设备驱动程序开发”在内容方面做了更新。

(11) 将原第 13 章“MiniGUI”和原第 14 章“Android 嵌入式系统及应用开发”合并为第 13 章“嵌入式 GUI 及应用程序设计”,并对该章进行重写,从嵌入式 GUI 设计的基本知识入手,然后分析嵌入式 GUI 的典型体系结构设计,最后介绍基于两种主流 GUI 的应用程序设计,结构更为紧凑,内容更为实用。

本次再版,在浙江大学陈文智教授等提出的“基于软硬件贯通和分级分层次的系统能力培养创新体系”的指导下,由王总辉编写和整理,最后由陈文智和王总辉定稿。



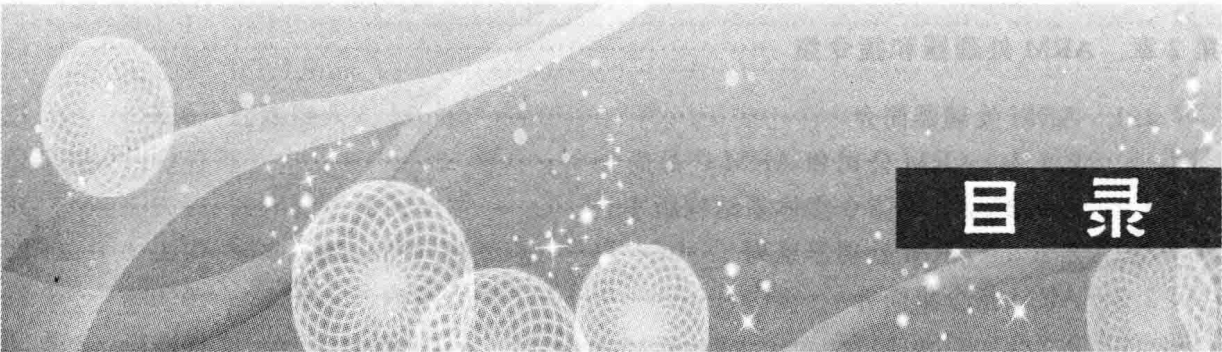
本书的编写和再版工作是在国家教委的指导下进行的,并得到了国内外同行和同事们给予的真切关心、指导和热情帮助,在此向各级机关以及所有关心、支持本书出版工作的朋友表示衷心的感谢。

在本书的编写和再版过程中,我们已尽全力保证本书内容的正确性,但由于时间匆忙,且作者自身水平有限,仍然可能有错误存在。无论如何,请读者不吝赐教,以便我们在改版或再版的时候及时纠正补充。

希望本书能一如第1版,继续为嵌入式系统学习和开发的读者提供力所能及的帮助。

编 者

2016 年秋于浙江大学



目 录

上篇 原理部分

第 1 章 嵌入式系统概述	3
1.1 嵌入式系统简介	3
1.1.1 嵌入式系统历史与现状	3
1.1.2 嵌入式系统体系结构	4
1.1.3 应用领域和发展方向	5
1.2 嵌入式处理器	6
1.2.1 嵌入式处理器简介	6
1.2.2 ARM 处理器的应用领域及一般特点	7
1.2.3 ARM 处理器系列	7
1.3 嵌入式操作系统	8
1.3.1 嵌入式操作系统简介	8
1.3.2 嵌入式 Linux	8
1.3.3 VxWorks	9
1.3.4 μ C/OS-II	10
1.3.5 Windows CE	10
1.3.6 Symbian	11
1.3.7 Android	11
1.3.8 iOS	11
1.3.9 其他嵌入式操作系统	12
1.4 嵌入式系统设计	12
1.4.1 嵌入式系统设计过程	12
1.4.2 硬件设计平台的选择	13
1.4.3 软件设计平台的选择	14
1.4.3 嵌入式应用软件开发	16
1.4.5 测试和优化	17
小结	17
进一步探索	17



第2章 ARM处理器和指令集	18
2.1 ARM处理器简介	18
2.1.1 ARM公司和ARM产品简介	18
2.1.2 ARM指令集体系结构版本	18
2.1.3 ARM处理器系列	20
2.2 ARM指令集简介	22
2.2.1 RISC简介	22
2.2.2 ARM状态和Thumb状态	22
2.2.3 ARM指令类型和指令的条件域	23
2.3 ARM指令的寻址方式	27
2.3.1 立即寻址	27
2.3.2 寄存器寻址	27
2.3.3 寄存器偏移寻址	27
2.3.4 寄存器间接寻址	28
2.3.5 基址变址寻址	28
2.3.6 多寄存器寻址	28
2.3.7 堆栈寻址	29
2.3.8 相对寻址	29
2.4 ARM指令简介	30
2.4.1 跳转指令	30
2.4.2 通用数据处理指令	32
2.4.3 乘法指令	35
2.4.4 Load/Store内存访问指令	37
2.4.5 ARM协处理器指令	40
2.4.6 杂项指令	42
2.4.7 饱和算术指令	43
2.4.8 ARM伪指令	44
2.5 Thumb指令简介	46
2.5.1 Thumb跳转指令	46
2.5.2 Thumb通用数据处理指令	47
2.5.3 Thumb算术指令	49
2.5.4 Thumb内存访问指令	51
2.5.5 Thumb软中断和断电指令	53
2.5.6 Thumb伪指令	53
小结	54
进一步探索	54
第3章 嵌入式Linux操作系统	55
3.1 嵌入式Linux简介	55

3.1.1	μ CLinux	55
3.1.2	RT-Linux	56
3.1.3	红旗嵌入式 Linux	56
3.2	内存管理	56
3.2.1	内存管理和 MMU	56
3.2.2	标准 Linux 的内存管理	57
3.2.3	μ CLinux 的内存管理	58
3.3	进程管理	59
3.3.1	进程和进程管理	59
3.3.2	RT-Linux 的进程管理	60
3.3.3	标准 Linux 的进程管理	61
3.3.4	μ CLinux 的进程管理	62
3.4	文件系统	63
3.4.1	文件系统定义	63
3.4.2	Linux 文件系统	63
3.4.3	嵌入式 Linux 文件系统	64
小结		69
进一步探索		69

第 4 章 嵌入式软件编程技术

70

4.1	嵌入式编程基础	70
4.1.1	嵌入式汇编语言基础	70
4.1.2	嵌入式高级编程知识	71
4.1.3	嵌入式开发工程	73
4.2	嵌入式汇编编程技术	76
4.2.1	基本语法	76
4.2.2	汇编语言程序设计案例	79
4.3	嵌入式高级编程技术	80
4.3.1	函数可重入	80
4.3.2	中断处理过程	81
4.4	高级语言与汇编语言混合编程	81
4.4.1	高级语言与汇编语言混合编程概述	81
4.4.2	汇编程序调用 C 程序	82
4.4.3	C 程序调用汇编程序	83
小结		84
进一步探索		84

第 5 章 开发环境和调试技术

85

5.1	交叉开发模式概述	85
5.2	宿主机环境	86



5.2.1	串口终端	86
5.2.2	BOOTP	87
5.2.3	TFTP	87
5.2.4	交叉编译	87
5.3	目标板环境	88
5.3.1	JTAG 接口简介	88
5.3.2	Boot Loader 简介	88
5.4	交叉编译工具链	88
5.4.1	交叉编译的构建	89
5.4.2	相关工具	89
5.5	gdb 调试器	92
5.6	远程调试	96
5.6.1	远程调试原理	96
5.6.2	gdb 远程调试功能	97
5.6.3	使用 gdbserver	98
5.7	内核调试	101
5.7.1	内核调试技术	101
5.7.2	kgdb 内核调试	103
5.8	网络调试	104
小结		106
进一步探索		106
第6章	Boot Loader 技术	107
6.1	Boot Loader 基本概念	107
6.1.1	Boot Loader 所支持的硬件环境	107
6.1.2	Boot Loader 的安装地址	107
6.1.3	Boot Loader 相关的设备和基址	108
6.1.4	Boot Loader 的启动过程	108
6.1.5	Boot Loader 的操作模式	108
6.1.6	Boot Loader 与主机之间的通信设备及协议	108
6.2	Boot Loader 典型结构	109
6.2.1	Boot Loader 阶段 1 介绍	109
6.2.2	Boot Loader 阶段 2 介绍	110
6.2.3	关于串口终端	117
6.3	U-Boot 简介	117
6.3.1	认识 U-Boot	117
6.3.2	U-Boot 特点	117
6.3.3	U-Boot 代码结构分析	118
6.4	vivi 简介	129
6.4.1	认识 vivi	129

6.4.2 vivi 代码导读	129
小结	137
进一步探索	137
第 7 章 ARM-Linux 内核	138
7.1 ARM-Linux 内核简介	138
7.1.1 ARM-Linux 内核和普通 Linux 内核的区别	138
7.1.2 ARM-Linux 的版本控制	139
7.1.3 ARM-Linux 的代码结构	139
7.2 ARM-Linux 内存管理	140
7.2.1 影响内存管理的两个方面	140
7.2.2 ARM-Linux 的存储机制	141
7.2.3 虚拟内存	144
7.3 ARM-Linux 进程管理和调度	147
7.3.1 进程的表示和生命周期	147
7.3.2 Linux 进程的创建、执行和销毁	149
7.3.3 Linux 进程的调度	152
7.4 ARM-Linux 模块机制	153
7.4.1 Linux 模块概述	154
7.4.2 模块代码结构	155
7.4.3 模块的加载	155
7.4.4 模块的卸载	156
7.4.5 版本依赖	157
7.5 ARM-Linux 中断管理	157
7.6 ARM-Linux 系统调用	161
7.7 ARM-Linux 系统启动和初始化	163
7.7.1 使用 Boot Loader 将内核映像载入	163
7.7.2 内核数据结构初始化——内核引导第一部分	163
7.7.3 外设初始化——内核引导第二部分	164
7.7.4 init 进程和 inittab 脚本	165
7.7.5 rc 启动脚本	166
7.7.6 Shell 的启动	166
小结	167
进一步探索	167
第 8 章 文件系统	168
8.1 嵌入式文件系统简介	168
8.1.1 Linux 文件系统简介	168
8.1.2 嵌入式文件系统简介	169
8.2 嵌入式 Linux 文件系统框架	170



8.3	JFFS2 嵌入式文件系统	172
8.3.1	目录节点的定义	173
8.3.2	数据节点	174
8.3.3	可靠性支持	174
8.3.4	内存使用	175
8.3.5	垃圾收集	176
8.3.6	写平衡	177
8.3.7	JFFS2 的不足之处	177
8.3.8	JFFS3 简介	177
8.4	根文件系统	178
8.4.1	什么是根文件系统	178
8.4.2	建立 JFFS2 根文件系统	178
	小结	182
	进一步探索	182
第9章	设备驱动程序设计基础	183
9.1	Linux 设备驱动程序简介	183
9.1.1	设备的分类	184
9.1.2	设备文件	184
9.1.3	主设备号和次设备号	184
9.1.4	Linux 设备驱动代码的分布	185
9.1.5	Linux 设备驱动程序的特点	185
9.2	设备驱动程序结构	186
9.2.1	驱动程序的注册与注销	186
9.2.2	设备的打开与释放	186
9.2.3	设备的读写操作	187
9.2.4	设备的控制操作	187
9.2.5	设备的轮询和中断处理	188
9.3	Linux 内核设备模型	189
9.3.1	设备模型建立的目的	189
9.3.2	sysfs——设备拓扑结构的文件系统表现	189
9.3.3	驱动模型和 sysfs	190
9.3.4	kobject	191
9.3.5	platform 总线	194
9.4	同步机制	195
9.4.1	同步锁	195
9.4.2	信号量	199
9.4.3	读写信号量	201
9.4.4	原子操作	202
9.4.5	完成事件	203

9.4.6 时间	204
9.5 内存映射和管理	206
9.5.1 物理地址映射到虚拟地址	207
9.5.2 内核空间映射到用户空间	207
9.6 工作队列	210
9.7 异步 I/O	213
9.8 DMA	215
9.8.1 DMA 数据传输	215
9.8.2 DMA 定义	215
9.8.3 DMA 映射	216
小结	217
进一步探索	217
第 10 章 字符设备和驱动程序设计	218
10.1 字符设备驱动框架	218
10.2 字符设备驱动开发	219
10.2.1 设备号	219
10.2.2 关键数据结构	222
10.2.3 字符设备注册和注销	225
10.3 GPIO 驱动概述	226
10.4 串行总线概述	227
10.4.1 SPI 总线	227
10.4.2 I ² C 总线	228
10.4.3 SMBus 总线	228
10.5 I ² C 总线驱动开发	229
10.5.1 I ² C 驱动架构	229
10.5.2 关键数据结构	230
10.5.3 I ² C 核心	233
10.5.4 I ² C 总线驱动	234
10.5.5 I ² C 设备驱动	235
小结	235
进一步探索	236
第 11 章 块设备和驱动程序设计	237
11.1 块设备驱动程序设计概要	237
11.1.1 块设备的数据交换方式	237
11.1.2 块设备读写请求	237
11.2 Linux 块设备驱动相关数据结构与函数	239
11.2.1 gendisk 结构	239
11.2.2 request 结构	240



11.2.3 request_queue 队列	242
11.2.4 bio 结构	244
11.3 块设备的注册与注销	246
11.4 块设备初始化与卸载	246
11.5 块设备操作	247
11.6 请求处理	248
11.7 MMC 卡驱动	250
11.7.1 MMC/SD 芯片介绍	250
11.7.2 MMC/SD 卡驱动结构	255
11.7.3 MMC 卡块设备驱动分析	255
11.7.4 HSMCI 接口驱动设计分析	262
小结	272
进一步探索	272
第 12 章 网络设备驱动程序开发	273
12.1 以太网基础知识	273
12.1.1 CSMA/CD 协议	275
12.1.2 以太网帧结构	276
12.1.3 嵌入式系统中常用的络协议	277
12.2 嵌入式网络设备驱动开发概述	278
12.3 网络设备驱动基本数据结构	279
12.3.1 net_device 数据结构	279
12.3.2 sk_buffer 数据结构	282
12.4 网络设备初始化	283
12.5 打开和关闭接口	283
12.6 数据接收与发送	284
12.7 查看状态与参数设置	285
12.8 AT91SAM9G45 网卡驱动	286
12.8.1 EMAC 模块简介	286
12.8.2 模块图	286
12.8.3 功能描述	287
12.8.4 寄存器描述	287
12.8.5 AT91SAM9G45 芯片 EMAC 控制器驱动分析	290
小结	297
进一步探索	297
第 13 章 嵌入式 GUI 及应用程序设计	298
13.1 嵌入式 GUI 设计概述	298
13.1.1 嵌入式 GUI 简介	298
13.1.2 嵌入式 GUI 设计需求	299



13.1.3	嵌入式 GUI 设计原则	299
13.1.4	主流嵌入式 GUI 简介	300
13.2	嵌入式 GUI 体系结构设计	301
13.2.1	嵌入式 GUI 体系结构	301
13.2.2	抽象层	302
13.2.3	核心层	302
13.2.4	接口层	303
13.3	基于主流 GUI 的应用程序设计	303
13.3.1	MiniGUI 开发环境搭建	303
13.3.2	基于 MiniGUI 的应用程序设计	306
13.3.3	Android 开发环境搭建	310
13.3.4	基于 Android 的应用程序设计	312
小结		316
进一步探索		316

下篇 实验部分

第 1 章	实验基础	319
第 2 章	开发环境建立	333
第 3 章	内核和模块构建	349
第 4 章	文件系统构建	361
第 5 章	调试技术演练	366
第 6 章	字符设备和驱动程序设计	377
第 7 章	块设备驱动程序设计	396
第 8 章	网络设备驱动程序设计	407
第 9 章	MiniGUI 应用设计	419
第 10 章	Android 应用设计	430

上篇

