

嵌入式系统课程教学实施方案项目规划教材
高等学校计算机专业特色教材

嵌入式 软件开发

*Embedded Software
Development*

陈文智 主 编
王总辉 胡 威 编

高等教育出版社

嵌入式系统课程教学实施方案项目规划
高等学校计算机专业特色教材

嵌入式软件开发

Qianrushì Ruānjiàn Kaifā

陈文智 主 编

王总辉 胡 威 编

高等教育出版社·北京

内容提要

本书从教学的角度出发,讲解嵌入式软件开发的基本知识、方法和技术,使读者了解嵌入式软件的组成要素与结构,掌握嵌入式软件开发的思想和方法,掌握嵌入式软件开发的过程和技巧,熟练使用相关嵌入式软件开发工具,具备初步分析问题和解决问题的能力。内容包括:嵌入式软件开发概述,嵌入式软件开发环境,嵌入式软件编程,嵌入式软件调试,Boot Loader 程序设计,嵌入式系统级软件设计(包含嵌入式操作系统内核设计、嵌入式文件系统设计、嵌入式驱动程序设计和嵌入式数据库设计),嵌入式 GUI 及应用程序设计,嵌入式程序代码优化,嵌入式软件测试,以及嵌入式应用程序创新设计。

本书兼顾教学、科研和工程开发的需要,对于广大高等学校高年级学生和研究生而言,是一本学习嵌入式软件开发的教科书;对于从事嵌入式软件开发的工程技术人员来说,则是一本实用的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

嵌入式软件开发 / 陈文智主编; 王总辉, 胡威编

. --北京: 高等教育出版社, 2015.2

ISBN 978-7-04-041948-1

I. ①嵌… II. ①陈… ②王… ③胡… III. ①软件开发-高等学校-教材 IV. ①TP311.52

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 019221 号

策划编辑 时 阳	责任编辑 时 阳	特约编辑 陈宗斌	封面设计 杨立新
版式设计 王艳红	插图绘制 杜晓丹	责任校对 刘 莉	责任印制 朱学忠

出版发行	高等教育出版社	咨询电话	400-810-0598
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	网 址	http://www.hep.edu.cn
邮政编码	100120		http://www.hep.com.cn
印 刷	高教社(天津)印务有限公司	网上订购	http://www.landraco.com
开 本	787mm×1092mm 1/16		http://www.landraco.com.cn
印 张	16.25	版 次	2015 年 2 月第 1 版
字 数	380 千字	印 次	2015 年 2 月第 1 次印刷
购书热线	010-58581118	定 价	26.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物 料 号 41948-00

出版说明

为推动嵌入式系统专业方向建设和课堂教学,建设嵌入式系统优质教学资源,解决嵌入式系统课程建设和教学中存在的问题,教育部高等学校计算机科学与技术专业教学指导分委员会、中国计算机学会教育专业委员会和高等教育出版社组织来自电子科技大学、浙江大学、国防科学技术大学、南京航空航天大学、上海交通大学、杭州电子科技大学、深圳大学、电子科技大学中山学院等在嵌入式系统专业方向建设和相关课程建设方面具有一定基础的高校的专家,开展了“嵌入式系统课程教学实施方案”项目研究。

项目研究工作自 2010—2012 年,历时两年,正式出版了《高等学校嵌入式专业方向核心课程教学实施方案》。通过将嵌入式系统人才培养目标,特别是能力培养目标分解、细化到不同课程,同时考虑到课程之间的前后衔接、课程与培养目标实现的支撑,《高等学校嵌入式专业方向核心课程教学实施方案》确定了该专业方向的 5 门核心课程:嵌入式系统概论、嵌入式微控制器及其应用、嵌入式操作系统、嵌入式硬件设计和嵌入式软件开发,并编写相应教材。这套教材旨在反映项目最新的研究成果,体现教学实施方案对于相应课程的定位和要求,以循序渐进的方式安排教学内容,讲解嵌入式系统平台设计的基本原理和基本方法,并给出典型性的示例。为保证教材质量,项目组确定由具有相应课程丰富教学和开发经验,并参与了课程教学实施方案研究的专家担任主编,同时邀请相关领域的权威专家对书稿进行了认真审读,数次修改,才最终交出版。

这套教材具有如下特点:

- 内容全面,结构新颖。在内容上,理论与实践并重,涵盖课程教学实施方案中涉及的重点内容,并提供大量实例;在结构安排上,从基础知识入手,循序渐进;在叙述上,力求简明扼要,由浅入深。
- 原理部分通用性好。将教材的理论部分与实验部分分开,尽量减少理论内容对实验平台的依赖,以方便实际教学。
- 实验内容丰富、翔实。针对理论部分设计相应的实验,这些实验均系作者亲自设计、验证,力求展现细节,让读者易于上手,可以边干边学,具有较大的参考价值。
- 在拓展性上有突破。教材每章后都有相应的实验思考题和进一步探索的题目,供读者进一步深入研究。
- 面向实践,适用面广。教材兼顾教学、科研和工程开发的需要,对于广大高校本科生和研究生而言,是学习嵌入式系统的教科书;对于从事嵌入式系统开发的工程人员来说,则是实用的参考书。

我们希望这套教材的出版能够为国内高校嵌入式系统相关课程教学的开展提供有益的参

考和帮助，提升高校嵌入式系统的教学水平和开发水平，培养更多适应社会需求的嵌入式技术人才。我们将为此不懈努力，也希望得到各位读者的热情帮助，使这套教材能够不断完善和提高。

教育部高等学校计算机科学与技术专业教学指导分委员会
中国计算机学会教育专业委员会
高等教育出版社
2015年1月

前 言

本书是为嵌入式软件开发课程专门编写的教材，主要讲解嵌入式软件开发的基本知识、方法和技术，使读者了解嵌入式软件的组成要素与结构，掌握嵌入式软件开发的思想和方法、过程和技巧，熟练使用相关嵌入式软件开发工具，具备初步分析问题和解决问题的能力。从本书的知识学习上看，包含了面向嵌入式特定应用需求的软件编程方法和基本技术技巧、嵌入式软件开发环境建立、嵌入式系统软件结构分析和程序设计、嵌入式软件调试和测试等各方面的基本内容，使读者理解和掌握嵌入式软件开发的基本特点、设计方法、编程技巧、调试测试过程等各方面的知识。从本书的能力培养上看，包含从提出问题、建立开发环境、编写代码、优化执行、软件调试、综合测试等软件开发全过程的各环节，培养读者将问题抽象化、设计与选择解决方案的能力，以及测试、分析、评价嵌入式软件解决方案的能力。

本书的结构如下：

第1章“嵌入式软件开发概述”。首先介绍嵌入式系统的概念、特点和发展情况，接着介绍嵌入式软件的组成与特点，以及嵌入式软件的发展趋势，并在此基础上介绍嵌入式软件的开发流程与开发管理。

第2章“嵌入式软件开发环境”。首先介绍嵌入式软件开发的特点与模式，接着分别从主机和目标机两方面讲解嵌入式软件开发环境的搭建，最后介绍交叉编译工具链的构建。

第3章“嵌入式软件编程”。首先介绍嵌入式编程基础，包括嵌入式汇编语言基础、嵌入式高级编程知识以及嵌入式开发工程，在此基础上，对嵌入式汇编编程技术、嵌入式高级编程技术以及高级语言与汇编语言混合编程技术进行了深入介绍。

第4章“嵌入式软件调试”。首先从 GDB 调试器入手，接着介绍远程调试技术、内核调试技术和网络调试技术，最后介绍典型嵌入式集成开发环境。

第5章“Boot Loader 程序设计”。首先介绍 Boot Loader 的基础知识，然后介绍 Boot Loader 的典型结构，最后介绍 Boot Loader 的基本设计方法。

第6章“嵌入式系统级软件设计”。从嵌入式操作系统内核设计、嵌入式文件系统设计、嵌入式驱动程序设计和嵌入式数据库设计4个方面介绍嵌入式系统级软件的基础知识、框架结构、工作原理和设计方法。

第7章“嵌入式 GUI 及应用程序设计”。首先从嵌入式 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。

第8章“嵌入式程序代码优化”。首先介绍嵌入式程序代码优化的基本概念、原理和方法，接着从提高代码效率、减少代码尺寸、有效使用内存和降低代码能耗等方面详细介绍代码优化的方法与技巧。

第9章“嵌入式软件测试”。首先介绍嵌入式软件测试的基础知识，接着从嵌入式软件测试技术、嵌入式软件测试与分析工具等方面详细介绍嵌入式软件的测试方法。

第10章“嵌入式应用程序创新设计”。首先介绍综合实验的设计任务，接着从需求分配、需求分析、系统设计、详细设计、编码及构建、单元测试及联调、系统测试、软件发布等8方面介绍嵌入式软件开发的整个过程。

本书由陈文智、王总辉、胡威编写。本书的理论部分由王总辉编写，实验部分由胡威编写，最后由王总辉和陈文智统一整理并定稿。本书的部分内容来自于《嵌入式系统原理与设计》并有所修订。在编写过程中，中国计量学院的陆慧娟教授为6.4节提供了部分资料。

本书的编写工作在教育部高等学校计算机科学与技术专业教学指导分委员会、中国计算机学会教育专业委员会和高等教育出版社联合发起的“嵌入式系统教学实施方案”研究项目指导下进行，得到了浙江大学计算机学院的大力支持，学院的领导和同事们给予了亲切的指导、关心和热情帮助。本书还得到了TI公司的真诚帮助。在此向各有关部门以及所有关心和支持本书出版工作的朋友们表示衷心的感谢。

在编写本书的过程中，我们已尽全力保证内容特别是实验的正确性，但由于时间关系且作者自身水平有限，仍然可能存在错误。无论如何，请读者不吝赐教，以便我们在改版时及时纠正和补充。

再次感谢所有关心嵌入式软件事业、嵌入式软件教学和本书出版工作的朋友们！

作者

2014年冬于浙江大学求是园

目 录

第1章 嵌入式软件开发概述1	
1.1 嵌入式系统概述.....2	
1.1.1 嵌入式系统的历史与现状.....2	
1.1.2 嵌入式系统的特点.....3	
1.1.3 应用领域和发展方向.....4	
1.2 嵌入式软件的组成与特点.....5	
1.2.1 嵌入式软件体系结构.....5	
1.2.2 嵌入式软件分类.....5	
1.2.3 嵌入式软件的基本特点.....6	
1.3 嵌入式软件的发展趋势.....6	
1.3.1 技术发展趋势.....6	
1.3.2 市场发展趋势.....7	
1.4 嵌入式软件开发流程.....7	
1.4.1 嵌入式软件开发流程概述.....7	
1.4.2 嵌入式软件的开发步骤.....8	
1.5 嵌入式软件的开发管理.....10	
1.5.1 组织管理.....10	
1.5.2 质量管理.....10	
1.5.3 配置管理.....12	
1.5.4 文档管理.....12	
1.6 实验1: 建立开发团队和制定管理规范.....13	
1.7 小结与进一步探索.....14	
1.7.1 小结.....14	
1.7.2 进一步探索.....14	
第2章 嵌入式软件开发环境15	
2.1 嵌入式软件开发模式.....16	
2.1.1 嵌入式软件开发特点.....16	
2.1.2 嵌入式软件开发模式概述.....16	
2.2 宿主机环境.....17	
2.2.1 串口终端.....17	
2.2.2 BOOTP 协议.....18	
2.2.3 TFTP 协议.....18	
2.2.4 交叉编译.....18	
2.3 目标机环境.....19	
2.3.1 JTAG 接口简介.....19	
2.3.2 Boot Loader 简介.....19	
2.4 交叉编译工具链.....19	
2.4.1 交叉编译工具链的构建.....20	
2.4.2 相关工具介绍.....20	
2.5 实验2: 开发环境构建.....23	
2.6 小结与进一步探索.....27	
2.6.1 小结.....27	
2.6.2 进一步探索.....27	
第3章 嵌入式软件编程28	
3.1 嵌入式编程基础.....29	
3.1.1 嵌入式汇编语言基础.....29	
3.1.2 嵌入式高级编程知识.....34	
3.1.3 嵌入式开发工程.....35	
3.2 嵌入式汇编编程技术.....38	
3.2.1 基本语法.....38	
3.2.2 汇编语言程序设计案例.....41	
3.3 嵌入式高级编程技术.....43	
3.3.1 函数可重入.....43	
3.3.2 中断处理过程.....44	
3.4 高级语言与汇编语言混合编程.....44	
3.4.1 高级语言与汇编语言混合编程概述.....44	
3.4.2 汇编语言程序调用C语言程序.....45	
3.4.3 C语言程序调用汇编程序.....46	
3.5 实验3: 嵌入式软件编程技术.....47	
3.6 小结与进一步探索.....51	

3.6.1 小结	51	5.3 Boot Loader 基本设计	87
3.6.2 进一步探索	51	5.3.1 Boot Loader 设计概述	87
第 4 章 嵌入式软件调试	52	5.3.2 U-Boot 代码分析	88
4.1 GDB 调试器	53	5.4 实验 5: 设计与实现 Boot Loader	89
4.1.1 GDB 简介	53	5.5 小结与进一步探索	93
4.1.2 GDB 使用方法	53	5.5.1 小结	93
4.2 远程调试	56	5.5.2 进一步探索	93
4.2.1 远程调试原理	56	第 6 章 嵌入式系统级软件设计	94
4.2.2 GDB 远程调试	58	6.1 嵌入式操作系统内核设计	95
4.2.3 使用 gdbserver	59	6.1.1 ARM-Linux 内核简介	95
4.3 内核调试	61	6.1.2 ARM-Linux 内存管理	95
4.3.1 内核调试技术	62	6.1.3 ARM-Linux 进程管理和调度	98
4.3.2 KGDB 内核调试	64	6.1.4 ARM-Linux 模块机制	99
4.4 网络调试	64	6.1.5 ARM-Linux 中断管理	100
4.4.1 socket 编程简介	64	6.1.6 ARM-Linux 系统调用	103
4.4.2 网络调试工具 tcpdump	65	6.1.7 ARM-Linux 系统启动和初始化	104
4.5 典型嵌入式集成开发环境	67	6.2 嵌入式文件系统设计	106
4.5.1 CCS 简介	67	6.2.1 嵌入式文件系统介绍	107
4.5.2 项目构建	68	6.2.2 嵌入式 Linux 文件系统框架	108
4.5.3 调试工具	69	6.2.3 本地文件系统	110
4.6 实验 4: 调试技术演练	69	6.2.4 网络文件系统	111
4.7 小结与进一步探索	75	6.2.5 根文件系统设计	113
4.7.1 小结	75	6.3 嵌入式驱动程序设计	114
4.7.2 进一步探索	75	6.3.1 Linux 驱动程序简介	114
第 5 章 Boot Loader 程序设计	76	6.3.2 Linux 驱动相关内核机制	116
5.1 Boot Loader 基础知识	77	6.3.3 Linux 字符设备及驱动程序设计	120
5.1.1 硬件环境	77	6.3.4 块设备和驱动程序设计	125
5.1.2 安装地址	77	6.3.5 网络设备驱动程序开发	129
5.1.3 通信接口	77	6.4 嵌入式数据库设计	133
5.1.4 启动过程	77	6.4.1 嵌入式数据库概述	133
5.1.5 操作模式	77	6.4.2 嵌入式数据库体系结构	135
5.1.6 文件传输接口与协议	78	6.4.3 嵌入式数据库基本设计	137
5.2 Boot Loader 典型结构	78	6.4.4 嵌入式数据库应用设计	142
5.2.1 阶段 1	79	6.5 实验 6: 嵌入式操作系统内核 与驱动程序	146
5.2.2 阶段 2	80	6.6 小结与进一步探索	176
5.2.3 串口终端	87		

6.6.1 小结	176	8.5.1 寻找和分析程序热点的方法	214
6.6.2 进一步探索	176	8.5.2 热点与性能分析工具介绍	215
第7章 嵌入式 GUI 及应用程序设计	177	8.5.3 代码运行性能优化	216
7.1 嵌入式 GUI 设计概述	178	8.6 实验 8: 嵌入式程序代码优化	217
7.1.1 嵌入式 GUI 简介	178	8.7 小结与进一步探索	224
7.1.2 嵌入式 GUI 设计需求	178	8.7.1 小结	224
7.1.3 嵌入式 GUI 设计原则	179	8.7.2 进一步探索	226
7.1.4 主流嵌入式 GUI 简介	179	第9章 嵌入式软件测试	225
7.2 嵌入式 GUI 体系结构设计	181	9.1 嵌入式软件测试基础	226
7.2.1 嵌入式 GUI 体系结构	181	9.1.1 嵌入式软件测试简介	226
7.2.2 抽象层	181	9.1.2 嵌入式软件测试的特点	226
7.2.3 核心层	182	9.1.3 嵌入式软件测试的目的与原则	226
7.2.4 接口层	183	9.1.4 嵌入式软件测试技术	227
7.3 基于主流 GUI 的应用程序设计	183	9.1.5 嵌入式软件测试分类	228
7.3.1 MiniGUI 开发环境搭建	183	9.2 嵌入式软件测试技术	228
7.3.2 基于 MiniGUI 的应用程序设计	186	9.2.1 静态测试技术	228
7.3.3 Android 开发环境搭建	190	9.2.2 白盒测试技术	229
7.3.4 基于 Android 的应用程序设计	192	9.2.3 黑盒测试技术	231
7.4 实验 7: 嵌入式 GUI 应用设计	197	9.3 测试与分析工具	232
7.5 小结与进一步探索	202	9.3.1 概述	232
7.5.1 小结	202	9.3.2 静态测试工具	233
7.5.2 进一步探索	202	9.3.3 白盒测试工具	234
第8章 嵌入式程序代码优化	203	9.3.4 黑盒测试工具	234
8.1 嵌入式程序代码优化概述	204	9.3.5 测试管理工具	234
8.2 提高代码效率	204	9.3.6 专项测试与分析工具	234
8.2.1 C 语言数据类型优化	204	9.4 实验 9: 嵌入式软件测试	235
8.2.2 循环结构优化	205	9.5 小结与进一步探索	241
8.2.3 运算优化	207	9.5.1 小结	244
8.2.4 内联函数和内嵌汇编优化	209	9.5.2 进一步探索	244
8.2.5 利用硬件特性	210	第10章 嵌入式应用程序创新设计	242
8.2.6 其他代码优化技术	210	10.1 设计任务	243
8.3 减少代码尺寸	212	10.2 设计过程	244
8.4 有效使用内存	213	10.3 小结与进一步探索	246
8.4.1 合理使用堆与栈	213	10.3.1 小结	246
8.4.2 防止内存泄露	214	10.3.2 进一步探索	246
8.5 降低代码能耗	214	参考文献	247

第1章 嵌入式软件开发概述

在数字信息技术和网络技术高速发展的后 PC 时代和物联网时代，嵌入式系统已经广泛渗透到工业生产、工程设计、科学研究、商业文化艺术、航天军事以及人们的日常生活等社会的各个方面。随着嵌入式技术的发展和需求的增加，嵌入式系统的复杂性、规模和智能化要求也日益增加，而硬件技术持续革新，处理能力不断增强，成本不断下降，这使嵌入式软件在嵌入式系统开发中所占的比重也越来越高。嵌入式软件已成为产品数字化改造、智能化增值的关键性和带动性技术，也是实现传统制造业转型与提升的关键技术。“计算无处不在”，嵌入式软件开发也越来越受到业界的关注。

本章将首先介绍嵌入式系统的概念、特点和发展情况，然后介绍嵌入式软件的组成与特点以及嵌入式软件的发展趋势，并在此基础上介绍嵌入式软件的开发流程与开发管理。

通过本章的学习，读者可以学到以下知识：

- (1) 嵌入式系统基本概念。
- (2) 嵌入式软件体系结构。
- (3) 嵌入式软件基本特点。
- (4) 嵌入式软件发展趋势。
- (5) 嵌入式软件开发流程。
- (6) 嵌入式软件开发管理。

1.1 嵌入式系统概述

1.1.1 嵌入式系统的历史与现状

1. 嵌入式系统的历史

嵌入式系统的概念很早就已经存在。从 20 世纪 70 年代单片机的出现到今天各种嵌入式微处理器的广泛应用，嵌入式系统的发展已经经历了 40 多年时间。纵观嵌入式系统的发展历程，大致经历了以下 4 个阶段。

(1) 无操作系统阶段

最初的嵌入式系统没有操作系统支持，通过汇编语言对系统进行直接控制，运行结束后清除内存。这些装置初步具备了嵌入式系统的特点。

(2) 简单操作系统阶段

20 世纪 80 年代，随着微电子工艺水平的提高，集成电路（Integrated Circuit, IC）制造商开始把嵌入式应用中所需要的各种部件集成到一片电路中，制造出面向 I/O 设计的微控制器。与此同时，嵌入式系统的程序员也开始基于一些简单的操作系统开发嵌入式应用软件。

(3) 实时操作系统阶段

20 世纪 90 年代，在分布控制、数字化通信和信息家电等巨大需求的牵引下，嵌入式系统进一步飞速发展。随着硬件实时性要求的提高，嵌入式系统的软件规模也不断扩大，出现了各种实时多任务操作系统，并成为嵌入式系统的主流。

(4) 面向 Internet 阶段

进入 21 世纪后，各种网络环境中的嵌入式应用越来越多。随着 Internet 的进一步发展，以及 Internet 技术与信息家电、工业控制技术等的结合日益紧密，嵌入式设备将与 Internet 紧密结合。

2. 嵌入式系统的发展特点

信息时代和数字时代的到来为嵌入式系统的发展带来了巨大的机遇，同时也提出了新的挑战。目前，传统的嵌入式技术与网络技术的结合正在推动着嵌入式系统飞速发展，嵌入式系统的技术研究和应用产业发生了显著的变化。

在嵌入式技术研究领域，其发展呈现出以下特点：

(1) 新技术层出不穷，以多点触摸、手感、体感等为代表的人机交互技术极大地增强了用户体验，新型嵌入式软件的开发和应用模式也为嵌入式系统的发展做出了巨大贡献。

(2) 各种计算模式互相演化与渗透，从传感网到物联网，从互联网到移动互联网，从云计算的“端、管（网）、云”到“终端云”，从嵌入式系统到普适计算，极大地推进了嵌入式技术的演进。

3. 嵌入式的应用产业现状

在嵌入式应用产业方面，手机应用、汽车电子和数字电视等三大支柱产业迅猛发展。

(1) 手机应用方面

● 据 Canalsys 报告显示, 2011 年智能手机全球出货量为 4.877 亿部, 比全球 PC 出货量的多 4.146 亿台。

● iOS 和 Android 占据智能手机操作系统的 8 成市场。

● 智能手机应用达到数百万(其中 Android 应用 70 万, iOS 应用 70 万, WinCE 应用 10 万)。

(2) 汽车电子方面

● 汽车技术创新的 90% 来源于汽车电子, 而其中 80% 来源于嵌入式软件。

● 汽车电子将逐渐占据整车 30%~50% 的成本, 其中 70% 左右的成本来源于软件。

● 覆盖汽车电子开发全过程的工具环境能有效提升开发效率, 降低开发成本。

● 基础软件的体系结构直接影响网络化汽车电子产品的复用能力, 以及产品对不同车型的适应性, 同时也决定着零部件的性能和质量水平。

(3) 数字电视方面

● 赛迪顾问的数据显示, 中国智能电视市场在 2011 年下半年加速发展, 预计全年销售规模超过 300 万台, 在平板电视中的渗透率达到 9.2%, 而未来 3 年中国智能电视的产量规模年均复合增长率将有望达到 65.1%。

● 2012 年全球智能电视机出货量有望增加至 5 285 万台, 年成长率达到 100%, 占电视机整体比重的 20%, 其中用户接口、游戏、网络浏览器、OTT Video、社交网络、搜寻工具等为智能电视机的六大关键成功要素。

1.1.2 嵌入式系统的特点

根据国际电气与电子工程师学会 (IEEE) 的定义, 嵌入式系统是“控制、监视或者辅助设备、机器和车间运行的装置”。嵌入式系统更为流行的一种定义是“以应用为中心, 以计算机技术为基础, 采用可剪裁软硬件, 适用于对功能、可靠性、成本、体积、功耗等有严格要求的专用计算机系统”。一般而言, 整个嵌入式系统的体系结构可以分成 4 个部分: 嵌入式处理器、嵌入式外围设备、嵌入式操作系统和嵌入式应用软件, 如图 1-1 所示。

嵌入式计算机系统与通用计算机系统相比具有以下特点。

(1) 嵌入式系统通常是面向特定应用的。嵌入式 CPU 与通用 CPU 的最大不同就是嵌入式 CPU 大多工作在为特定用户设计的系统中。它通常都具有功耗低、体积小、集成度高等特点, 能够把通用 CPU 中许多由板卡实现的功能集成在芯片内部, 从而有利于嵌入式系统设计趋于小型化, 大大增强移动能力, 与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、分布高度分散、技术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, 量体裁衣, 去除冗余, 力争在同样的

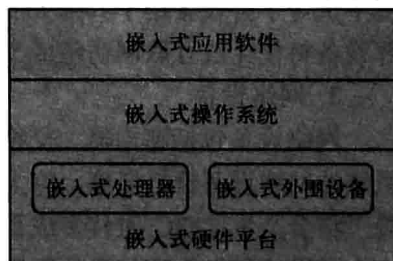


图 1-1 嵌入式系统的体系结构

硅片面积上实现更高的性能，这样才能在具体应用中具有更强的竞争力。

(4) 嵌入式系统和具体应用有机地结合在一起，它的升级换代也和具体产品同步进行，因此嵌入式系统产品一旦进入市场，就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中，而不是存储于磁盘等载体中。

(6) 嵌入式系统本身不具备自主开发能力，设计完成以后，用户通常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。

目前，各种嵌入式设备在数量上已经远远超过了通用计算机。

1.1.3 应用领域和发展方向

后 PC 时代和物联网时代的到来，使人们开始越来越多地接触到一个新的概念——嵌入式系统。智能手机、PDA（个人数字助理）、平板电脑、汽车电子、医疗仪器、机顶盒、智能家电等形式多样的嵌入式设备正努力把 Internet 连接到人们工作和生活的各个角落，中国数字化设备的潜在消费者数量将以亿为单位。嵌入式系统的应用领域主要有以下几方面。

1. 信息电器

信息电器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。信息电器具有信息服务功能，如网络浏览、视频点播、文字处理、电子邮件收发、个人事务管理等；同时又具备简单易用、价格低廉、维护简便等特点。

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，电视机、冰箱、微波炉、电话等都将嵌入计算机，并通过家庭控制中心与 Internet 连接，转变为智能网络家电，还可以实现远程医疗和远程教育等功能。目前，智能小区的发展为机顶盒打开了市场，机顶盒将成为网络终端，它不仅可以使模拟电视接收数字电视节目，而且可以上网、炒股、点播电影、游戏娱乐，实现交互式电视，依靠网络服务器提供各种服务。

2. 移动计算设备

移动计算设备包括智能手机、PDA、平板电脑等。中国拥有世界最大的手机用户群，而智能手机等手持设备由于其强大的功能及易于携带的优点，在未来几年将得到快速发展。移动计算设备将使无线互联网访问成为更加普遍的现象。

3. 网络设备

网络设备包括路由器、交换机、防火墙、Web 服务器、网络接入盒等。基于 Linux 等操作系统的网络设备价格低廉，将为企业提供更为廉价的网络方案。美国贝尔实验室预测：在这阶段“将会产生比 PC 时代多成百上千倍的瘦服务器和超级嵌入式瘦服务器，这些瘦服务器将与这个世界的任何物理信息、生物信息相联接，将这些信息通过 Internet 自动、实时、方便、简单地提供给需要的对象”。可见，设计和制造嵌入式瘦服务器、嵌入式网关和嵌入式 Internet 网络路由器已成为嵌入式 Internet 时代的关键和核心技术。

4. 工业控制、医疗仪器等

工业、医疗卫生、国防等各部门对智能控制的需求不断增长，同时也对嵌入式微处理器的

运算速度、可扩展能力、系统可靠性、功耗和集成度等方面提出了更高的要求。我国的工业生产在智能化数字化改造、自动控制等方面的需要为嵌入式系统提供了很大的市场。

随着信息技术的发展，数字化产品空前繁荣。嵌入式软件已经成为数字化产品设计创新和软件增值的关键因素，是未来市场竞争力的重要体现。由于数字化产品具备硬件平台多样性和应用个性化的特点，因此嵌入式软件呈现出一种高度细分的市场格局，国外产品也很难垄断整个市场，这为我国的软件产业提供了一个难得的发展机遇。另外，嵌入式软件的发展也将带来一个繁荣的技术与服务的培训市场。

1.2 嵌入式软件的组成与特点

1.2.1 嵌入式软件体系结构

嵌入式软件体系结构如图 1-2 所示。最底层是硬件层，包括嵌入式处理器和触摸屏、WiFi 等嵌入式外围设备。硬件层之上是系统软件层，包含板级支持包（BSP）软件，为操作系统提供所需的驱动支持；Boot Loader 软件负责系统初始化和嵌入式操作系统的引导；设备驱动程序负责硬件的初始化和管理；操作系统内核负责整个系统的任务调度、存储管理、时钟管理和中断管理等功能；扩展部分为用户提供网络、文件系统、图形用户界面（GUI）、数据库等扩展功能，可根据系统的需要进行剪裁。最上层是嵌入式应用软件，当然也包含了嵌入式 CORBA 和嵌入式 Java 等中间件软件。

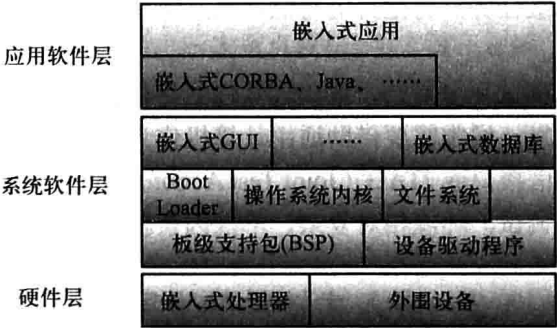


图 1-2 嵌入式软件体系结构

1.2.2 嵌入式软件分类

根据嵌入式软件体系结构，嵌入式软件可以分为以下三大类：

(1) 嵌入式系统软件。嵌入式系统软件主要控制和管理嵌入式系统资源，包含板级支持包、Boot Loader、设备驱动程序、嵌入式操作系统内核、嵌入式文件系统、嵌入式 GUI 和嵌入式数据库等。

(2) 嵌入式应用软件。嵌入式应用软件定义了嵌入式设备的主要功能和用途，并负责与用户进行交互，是嵌入式系统功能的体现。嵌入式应用软件包含嵌入式中间件。

(3) 嵌入式支撑软件。嵌入式支撑软件指辅助嵌入式软件开发的工具软件，如嵌入式系统分析与设计工具、集成开发环境、在线仿真工具、交叉编译工具链、调试工具、源程序模拟器和配置管理工具等。

1.2.3 嵌入式软件的基本特点

嵌入式软件具有以下基本特点：

(1) 专用性。嵌入式系统为特定的用户设计，面向特定的应用领域，不仅在硬件系统设计方面必须量体裁衣（考虑体积、功耗、成本），软件系统设计也要根据应用需求和硬件系统定制开发。

(2) 对硬件的依赖性。在嵌入式系统中，软件是基于特定的硬件平台开发的，当硬件平台发生改变时，其中的嵌入式软件要根据硬件的变化进行修改或移植。另外，嵌入式系统受硬件资源限制，因此，在嵌入式软件的设计、开发和测试等过程中，要充分考虑到硬件资源的约束、管理和使用。

(3) 高可靠性和稳定性。嵌入式系统的运行环境往往比较恶劣，对可靠性要求较高，因此嵌入式系统不仅对硬件设备一般都有较高的可靠性要求，对嵌入式软件也提出了可靠性、稳定性和健壮性的要求。

(4) 多任务的抢占性与实时性。嵌入式系统大都具有较强的实时性要求。在这些系统中，各任务的优先级不同，同级任务具有抢占的特点，而且每个任务的响应时间均有明确而严格的要求和限制。

(5) 目标软件开发、调试环境复杂。嵌入式软件的目标机多为特殊的专用系统，硬件资源受限，一般都不能自举开发，通常需要借助通用计算机作为宿主开发、调试环境，利用交叉调试器通过串口、网络等通信接口或 JTAG（Joint Test Action Group，联合测试工作组）接口对目标软件进行相关的开发与调试，环境相对复杂，干扰因素较多。

1.3 嵌入式软件的发展趋势

1.3.1 技术发展趋势

当前，嵌入式软件技术的发展呈现出如下趋势：

1. 向 CPS 收敛

CPS 是信息-物理系统（Cyber-Physical System）的简称，是融合计算、通信与控制的新型复杂嵌入式系统。嵌入式系统早期以单片机、单体嵌入式系统为主，随着平台的开放，向整体系统发展，并将最终向 CPS 收敛。

2. 以人中心

随着互联网、移动互联网和物联网的发展，嵌入式系统以各种形式泛在地植入物理环境中，自主互联协作，以便捷、自然的方式为人们提供个性化的智能服务。

3. 体系结构全开放

行业性开放系统正日趋流行。统一的行业标准具有开放、设计技术共享、软硬件重用、构件兼容、维护方便和合作生产的特点。软件体系结构将从全封闭发展到半开放，最终将发展为全开放。另外，自由软件技术备受青睐，对嵌入式软件的发展产生了巨大的推动作用。

4. 垂直整合

嵌入式系统无论从硬件到软件，从芯片到系统，还是从内容到服务，必将走向垂直整合和应用创新。嵌入式系统的竞争主战场已不再是单一技术或产品的优劣，而表现为生态系统的竞争。涵盖芯片、系统软件、应用创新、服务等环节的良性生态系统将最终获胜。

1.3.2 市场发展趋势

嵌入式软件产业发展迅猛，已成为软件体系的重要组成部分。新一轮汽车、通信、信息电器、医疗、军事等行业智能化装备的巨大需求拉动了嵌入式软件及系统的发展。嵌入式系统根据应用需求定制开发，并随着智能化产品的普遍需求渗透到各行各业。嵌入式软件产业增幅不断加大，而且在整个软件产业的比重日趋提高。

当前正处在“第三次工业革命”的大转型时期，世界电子信息技术和产业也正处于大变革时期，“电子计算机技术+新材料技术+新能源技术+新生物医学技术+新设计技术”将催生新型嵌入式系统产业格局。

嵌入式系统的重点产业领域将为“三大重点板块+两大潜在领域”的布局。

(1) 三大重点板块：

- 智能手机 (Smart Phone)。
- 智能汽车 (Smart Car)。
- 智能电视 (Smart TV, iTV)。

(2) 两大潜在领域：

- “3D” 打印机。
- 能源互联网。

1.4 嵌入式软件开发流程

1.4.1 嵌入式软件开发流程概述

从自顶向下的角度看，嵌入式软件的开发流程从系统需求分配和软件项目开发计划开始；第二步是软件需求分析，对需求分配的系统功能进行更细致的描述；第三步是软件架构及概要设计，以大的模块为单位设计系统内部详细构造，明确软、硬件功能的划分；第四步是软件详