

中国电子教育学会高教分会推荐
普通高等教育电子信息类“十三五”课改规划教材

嵌入式系统应用开发

包理群 主编



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

中国电子教育学会高

普通高等教育电子信

创教材

嵌入式系统应用开发

包理群 主编

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书基于 ARM 微处理器和嵌入式 Linux 操作系统,以实际嵌入式应用开发过程为依据,详细介绍了嵌入式系统的基本概念、开发方法, Linux C 语言编辑、编译和调试,嵌入式 Linux 开发环境搭建、文件操作、串口编程、进程与线程编程,嵌入式数据库概述、SQLite 数据库的安装和移植、SQLite 基本命令和编程操作, QT 图形用户界面设计、嵌入式 Web 服务器移植和应用、Socket 网络通信、嵌入式数据采集系统、嵌入式 Linux 时间编程等。本书的讲解深入浅出,从基本概念到具体应用都给出了大量实例,并结合丰富的课后练习和实训项目,使读者能边学边用,更好更快地掌握嵌入式 Linux 应用开发的主要知识点。

本书的所有实例都在博创 UP-TECH S2410/2440 实验箱和 TINY210 开发板上调试通过,也可移植到其他硬件平台。

本书既可作为应用型本科院校计算机及电子信息类专业学生学习嵌入式应用开发的教材,也适合嵌入式 Linux 系统开发人员及爱好者参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

嵌入式系统应用开发 / 包理群主编. —西安: 西安电子科技大学出版社, 2017.7

普通高等教育电子信息类“十三五”课改规划教材

ISBN 978-7-5606-4553-7

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 150648 号

策 划 刘玉芳

责任编辑 孙美菊 雷鸿俊

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029) 88242885 88201467

邮 编 710071

网 址 www.xduph.com

电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西利达印务有限责任公司

版 次 2017 年 7 月第 1 版

2017 年 7 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米

1/16 印 张 15.5

字 数 365 千字

印 数 1~3000 册

定 价 32.00 元

ISBN 978-7-5606-4553-7 / TP

XDUP 4845001-1

如有印装问题可调换

前 言

随着无人机、无人驾驶、可穿戴设备、智能家居、智能城市等相关产业技术产品的创新应用及不断涌现,IT 行业也势不可挡地进入了嵌入式时代。嵌入式系统因其体积小、可靠性高、功能强、灵活方便等优点,对各行各业的技术改造、产品更新换代、智能化进程加速、生产效率提高等方面起到了极其重要的推动作用。伴随着巨大的产业需求,我国嵌入式人才的需求量也一路高涨,而同嵌入式技术的快速发展相比,我国嵌入式人才的培养却相对滞后,嵌入式软件人才缺口巨大,人才的匮乏已成为制约嵌入式产业发展的瓶颈。

本书正是针对嵌入式学习“门槛高”、“难度大”等问题,为面向具有一定计算机和 C 语言基础的读者提供的一本快速进入嵌入式 Linux 应用开发的入门性书籍。

全书共 6 章。

第 1 章讲述嵌入式基础知识,包括嵌入式系统的概念、嵌入式系统的特点和应用领域、嵌入式系统的基本结构、嵌入式系统的开发方法和嵌入式硬件开发平台,使读者对嵌入式系统有一个初步的认识。

第 2 章从 Linux 操作系统的安装、常用命令讲起,然后通过实例讲述 Linux C 语言编辑、编译和调试,包括 Vi 编辑器、GCC 编译工具、GDB 调试器及 makefile 文件的编写和工程管理,让读者具备嵌入式 Linux 程序开发的基础知识。

第 3 章讲述如何构建嵌入式 Linux 开发环境,包括交叉编译环境的建立方法、宿主机与嵌入式实验箱/开发板的通信、程序的下载/挂载执行以及 Windows 与 Linux 的数据共享。

第 4 章介绍文件处理与多任务编程,包括文件操作、串口编程、进程创建与进程控制、进程间通信、多线程编程、多线程同步与互斥等。

第 5 章讲述嵌入式数据库技术,包括关系数据库概念、关系数据库设计、SQLite 数据库的安装移植和基本命令、SQLite 数据库的编程操作等。

第 6 章介绍基于嵌入式 Linux 的应用程序开发实例,包括 Qt 集成开发环境的构建、图形用户界面应用程序设计、嵌入式 Web 服务器的移植和应用、CGI 程序的编写、Socket 网络通信、嵌入式数据采集系统、嵌入式 Linux 时间编程等。

本书由兰州工业学院包理群主编,在编写过程中,得到了兰州工业学院领导和老师的关心和支持,同时也得到了西安电子科技大学出版社的帮助,在此一并表示衷心的感谢!

由于作者水平有限,加之时间仓促,疏漏之处在所难免,恳请读者不吝赐教。

编 者

2017 年 2 月

目 录

第1章 嵌入式系统概述.....	1
1.1 什么是嵌入式系统.....	1
1.1.1 嵌入式系统的定义.....	1
1.1.2 嵌入式系统的特点.....	3
1.1.3 嵌入式系统的发展历程.....	3
1.1.4 嵌入式系统的应用领域及发展趋势.....	4
1.2 嵌入式系统结构.....	6
1.2.1 嵌入式系统构架.....	6
1.2.2 嵌入式微处理器.....	7
1.2.3 嵌入式操作系统.....	8
1.3 嵌入式系统开发方法.....	10
1.3.1 嵌入式系统开发概述.....	10
1.3.2 嵌入式系统开发模式.....	13
1.3.3 嵌入式 Linux 系统开发流程.....	13
1.3.4 实例：汽车 GPS 导航系统设计.....	14
1.4 基于 ARM9 的硬件开发平台.....	17
1.4.1 ARM 处理器简介.....	17
1.4.2 ARM 微处理器核的体系结构.....	19
1.4.3 ARM 硬件开发平台.....	23
习题 1.....	26
实训项目一 组建开发平台.....	27
任务 1 认识开发模型.....	27
任务 2 开发板的选定.....	27
任务 3 开发方案的确定.....	28
第2章 嵌入式 Linux 程序开发基础.....	29
2.1 Linux 操作系统基础.....	29
2.1.1 Linux 操作系统的安装.....	29
2.1.2 Linux 文件系统及目录结构.....	35
2.1.3 Linux 文本编辑器 Vi.....	39
2.2 Linux 常用操作命令.....	42
2.2.1 文件目录相关命令.....	42
2.2.2 系统操作命令.....	46
2.2.3 打包压缩相关命令.....	47
2.2.4 网络相关命令.....	49

2.2.5 获取联机帮助.....	50
2.3 嵌入式 Linux 编译器.....	50
2.3.1 编译、运行 C 语言程序.....	50
2.3.2 GCC 程序编译流程.....	51
2.3.3 优化编译.....	54
2.3.4 自定义头文件编译处理.....	56
2.3.5 库文件的创建及使用.....	57
2.4 GDB 程序调试器.....	59
2.4.1 GDB 调试 C 语言程序.....	60
2.4.2 GDB 基本命令.....	62
2.5 make 命令和 makefile 工程管理.....	63
2.5.1 认识 makefile.....	63
2.5.2 简单计算器程序的 makefile 文件编写.....	65
2.5.3 makefile 变量.....	69
2.5.4 makefile 规则.....	71
2.5.5 自动生成 makefile.....	72
习题 2.....	74
实训项目二 Linux 下 C 语言程序的编译及调试.....	77
任务 1 安装虚拟机.....	77
任务 2 安装 Linux 操作系统.....	78
任务 3 常用命令练习.....	78
任务 4 用 GCC 编译程序.....	79
任务 5 用 GDB 调试程序.....	80
任务 6 编写 makefile 文件.....	82
第 3 章 构建嵌入式 Linux 开发环境	84
3.1 建立交叉编译环境.....	84
3.1.1 什么是交叉编译.....	84
3.1.2 建立交叉编译环境.....	85
3.1.3 交叉编译实例.....	87
3.2 宿主机与目标机之间的通信.....	87
3.2.1 连接宿主 PC 机与 ARM 目标板.....	87
3.2.2 Windows 超级终端.....	88
3.2.3 配置 Minicom.....	90
3.2.4 配置 NFS 服务.....	93
3.3 Windows-Linux 文件共享.....	96
3.3.1 使用虚拟机的共享文件夹功能.....	96
3.3.2 配置 Linux Samba 服务器.....	98
习题 3.....	101

实训项目三 嵌入式 Linux 开发环境配置	102
任务 1 配置 Minicom	102
任务 2 安装、配置、测试交叉编译环境	103
任务 3 配置 NFS 服务	104
第 4 章 文件处理与多任务编程	106
4.1 系统调用和文件描述符	106
4.1.1 系统调用	106
4.1.2 文件及文件描述符	107
4.2 嵌入式 Linux 文件处理	107
4.2.1 文件处理函数	107
4.2.2 文件操作实例	110
4.3 嵌入式 Linux 串口应用编程	112
4.3.1 串口传输数据的工作原理	113
4.3.2 串口的配置流程	114
4.3.3 串口编程实例	116
4.3.4 从 PC 机串口向开发板发送数据	121
4.4 嵌入式 Linux 进程编程	124
4.4.1 Linux 进程概述	124
4.4.2 进程与进程控制	126
4.4.3 Linux 守护进程	132
4.4.4 进程间的通信	135
4.5 嵌入式 Linux 线程编程	143
4.5.1 线程的概念	143
4.5.2 简单的多线程编程实例	144
4.5.3 多线程访问控制	146
习题 4	154
实训项目四 嵌入式 Linux 文件 I/O 及多任务编程	156
任务 1 嵌入式 Linux 文件读写	156
任务 2 使用管道实现父进程写数据，子进程读数据	158
任务 3 多线程解决“生产者—消费者”问题	160
第 5 章 嵌入式数据库	164
5.1 关系数据库基础	164
5.1.1 认识数据库	164
5.1.2 关系数据库理论	165
5.1.3 关系数据库设计	167
5.2 嵌入式数据库概述	175
5.2.1 嵌入式数据库简介	175

5.2.2 嵌入式数据库的特点	175
5.2.3 嵌入式数据库的应用	176
5.3 SQLite 数据库	179
5.3.1 SQLite 简介	179
5.3.2 Linux 下 SQLite 数据库的安装	181
5.3.3 SQLite 在 ARM-Linux 平台上的移植	182
5.3.4 SQLite 的数据类型	183
5.3.5 SQLite 数据库的基本命令	186
5.3.6 SQLite C/C++ 接口	189
5.4 嵌入式数据库应用实例	191
5.4.1 嵌入式数据库设计	192
5.4.2 C 语言编程实现对嵌入式数据库的操作	192
5.4.3 嵌入式数据库测试	194
习题 5	196
实训项目五 SQLite3 数据库操作	197
 第 6 章 嵌入式 Linux 应用开发	 199
6.1 图形界面应用程序设计	199
6.1.1 Qt 简介	199
6.1.2 构建 Qt 集成开发环境	199
6.1.3 简单计算器应用程序	200
6.2 嵌入式 Web 服务器的移植和应用	208
6.2.1 嵌入式 Web 服务器的移植和配置	209
6.2.2 在 TINY210 开发板上运行 boa	211
6.2.3 在 UP-NETARM2410 实验箱上运行 boa	213
6.2.4 客户端浏览器读取嵌入式设备文件数据	214
6.3 基于 ARM-Linux 的数据采集系统	218
6.3.1 系统结构	218
6.3.2 硬件电路连接	219
6.3.3 Socket 网络编程	221
6.3.4 数据采集系统软件设计	225
6.3.5 系统调试	233
6.4 嵌入式 Linux 时间编程	235
6.4.1 时间类型	235
6.4.2 常用时间函数	235
6.4.3 时间信息的获取	238
6.4.4 计算程序运行时间	239
 参考文献	 240

第1章 嵌入式系统概述

伴随着产业的发展,从通信、工业控制到消费电子、智能家居、北斗导航和物联网应用,嵌入式系统已无处不在。手机、MP4、可视电话、数码相机、游戏机、智能玩具、智能家电、车载电子、服务机器人等各种各样的嵌入式系统设备在应用数量上远远超过了通用计算机。嵌入式系统市场是巨大的,市场需求是嵌入式系统产业化发展的巨大推动力,据统计,目前约有10%~20%的计算机芯片是为台式或便携式电脑设计的,80%~90%的计算机芯片是为嵌入式产品设计的,这意味着每年有10亿至20亿个CPU是为嵌入式产品制造的。“计算机无处不在”很大程度上归功于嵌入式系统的广泛应用。

嵌入式系统无疑是当前最热门最有发展前途的IT应用领域之一,然而到底什么是嵌入式系统呢?通过本章的学习,我们将会对嵌入式系统有一个较全面的认识。通过本章的学习,应掌握以下内容:

- (1) 嵌入式系统的定义。
- (2) 嵌入式系统的特点和应用领域。
- (3) 嵌入式系统的基本结构。
- (4) 嵌入式系统的开发方法。
- (5) 嵌入式硬件开发平台。

1.1 什么是嵌入式系统

1.1.1 嵌入式系统的定义

电子数字计算机诞生于1946年,在其后很长时间里,计算机始终是用于实现数值计算的大型昂贵设备;直到20世纪70年代,微处理的出现才使计算机发生了历史性的变化。以微处理为核心的微型计算机具有小型、价廉、高可靠性等特点,其表现出的智能化水平引起了控制专业人士的兴趣,进而产生了将微型机嵌入到一个对象体系中,实现对象体系的智能化控制的设想。例如,将微型计算机经电气和机械加固,并配置各种外围接口电路,安装到大型舰船中构成自动驾驶仪或轮机状态监测系统。这样,计算机便失去了原来的形态与通用的计算机功能。通常将这类应用中的计算机系统称为嵌入式系统(Embedded System)。

但是,可以说直至今日,嵌入式系统仍是一个相对模糊的概念,IEEE(国际电气和电子工程师协会)对嵌入式系统的定义是:“用于控制、监视或者辅助操作机器和设备的装置。”这主要是从应用对象上加以定义的,从中可以看出嵌入式系统是软件和硬件的综合体,还

可以涵盖机械等附属装置。这个定义指出了嵌入式系统的目的，但没有规定用什么途径来实现嵌入式系统。

国内普遍认同的嵌入式系统定义为：以应用为中心，以计算机技术为基础，软硬件可裁剪，适应应用系统对功能、可靠性、成本、体积、功耗等有严格要求的专用计算机系统。由此可见，嵌入式系统是嵌入到产品设备中的专用计算机系统，作为装置或设备的一部分。“嵌入式”、“专用性”和“计算机系统”是嵌入式系统的 3 个基本要素。

我们也把嵌入到对象体系中，实现智能化控制的计算机，称作嵌入式系统。一个嵌入式系统装置一般都由嵌入式计算机系统和执行装置组成，嵌入式计算机系统是整个嵌入式系统的核心，由嵌入式微处理器、外围设备、嵌入式操作系统和应用软件组成。执行装置也称为被控对象，它可以接收嵌入式计算机系统发出的控制命令，执行所规定的操作或任务。执行装置可以很简单，如手机上的一个微小型的电机，当手机处于震动接收状态时打开；也可以很复杂，如 SONY 智能机器狗上面集成了多种传感器和多个微小型控制电机，从而可以感受各种状态信息和执行各种复杂的动作。应当注意：在理解嵌入式系统定义时，不要与嵌入式设备相混淆。嵌入式设备是指内部有嵌入式系统的产品、设备，例如内含单片机的家用电器、仪器仪表、工控单元、机器人、手机、PDA 等。

目前，一般把计算机系统分为两类，即通用计算机系统(通用计算机)和嵌入式计算机系统(嵌入式系统)。通用计算机系统的技术要求是高速、海量的数值计算，技术发展方向是总线速度的无限提升及存储容量的无限扩大；嵌入式计算机系统的技术要求则是对对象的智能化控制能力，技术发展方向是与对象系统密切相关的嵌入性能、控制能力与控制的可靠性。嵌入式计算机系统与通用计算机系统的硬件和软件的比较如表 1-1 和表 1-2 所示。

表 1-1 嵌入式计算机系统和通用计算机系统硬件的比较

比较项目	通用计算机	嵌入式计算机
CPU	CPU(Intel、AMD 等)	嵌入式处理器(ARM、MIPS 等)
内存	内存条	SDRAM 芯片
存储设备	硬盘	Flash 芯片
输入设备	键盘、鼠标	按键、触摸屏
输出设备	显示器	LCD、控制设备等
接口	标准配置	MAX232 等芯片，根据具体应用进行配置

表 1-2 嵌入式计算机系统和通用计算机系统软件的比较

比较项目	通用计算机	嵌入式计算机
引导代码	主板的 BIOS 引导	Bootloader 引导，针对不同电路移植
操作系统	Windows、Linux 等	VxWorks、嵌入式 Linux、Android
驱动程序	OS 自带或下载	自己开发，需移植
协议栈	OS 或第三方提供	需要移植
开发环境	本机开发和调试	借助服务器进行交叉编译
仿真器	不需要	需要

1.1.2 嵌入式系统的特点

嵌入式系统具有以下特点：

(1) 嵌入性。将计算机嵌入到一个对象体系中，这是理解嵌入式系统的基本出发点。例如，门禁系统必须嵌入到门内，汽车的电子防抱死系统必须与汽车的制动、刹车装置紧密结合。

(2) 专用性。和通用计算机不同，嵌入式系统通常是面向特定应用领域的。例如，MP3主要用于播放音乐、歌曲，计算器主要用于数据运算，游戏机主要用于游戏、娱乐，电子词典主要用于翻译。嵌入式系统的硬件和软件，尤其是软件，都是为特定用户群设计的，具有专用性的特点。

(3) 可裁剪。通用计算机通常倾向于配置越高越好，安装的软件越全使用越方便。而嵌入式系统考虑到产品的成本，要求资源够用即可，即具有满足对象要求的最小软、硬件配置。因此必须把嵌入式系统硬件和软件设计成可裁剪的，可根据实际应用需求量体裁衣，去除冗余，同时也降低了系统功耗，提高了系统稳定性。

(4) 可靠性。可靠性也称为鲁棒性。嵌入式系统有时承担着涉及产品质量、人身设备安全、财产安全、军事侦察、国家机密等的重大事务，而且通常需要长期工作，所以与通用计算机相比较，对嵌入式系统可靠性的要求极高。

(5) 实时性。实时性是指当外界事件或数据产生时，能够接收并以足够快的速度予以处理，其处理的结果又能在规定的时间内来控制生产过程。例如，在武器装备中和一些工业控制装置中的嵌入式系统对实时性要求很高。但对于掌上电脑、汽车导航系统等对实时性的要求并不是很高，因此嵌入式系统的实时性又分为强实时和弱实时。

(6) 功耗低。小型的便于携带的嵌入式产品，如手机、PDA、MP3、数码相机等，这些设备一般需要采用体积较小的电池来供电，只有降低系统功耗，才能延长系统的工作时间，因此低功耗一直是嵌入式系统追求的目标。例如，手机的待机时间是非常重要的性能指标之一，它基本上由内部的嵌入式系统功耗决定。可以从两方面降低系统功耗：一是在嵌入式系统硬件设计时，尽量选择功耗较低的芯片并把不必要的外设和端口去掉；二是在嵌入式软件系统设计中，在对功能、性能进行优化的同时，也对功耗进行必要的优化，尽可能节省对外设的使用，达到省电的目的。

1.1.3 嵌入式系统的发展历程

计算机是应数值计算的要求诞生的。在计算机发展的早期，电子计算机技术一直沿着满足高速数值计算的道路发展。当计算机速度达到一定程度后，就完全能够满足某些领域的应用。所以人们不再追求速度，而有了如下要求：① 体积小，应用灵活；② 嵌入到具体的应用体中，而不以计算机的面貌出现；③ 直接面向控制对象。因此，一种称之为单片机或微控制器的技术得到了发展，这便是最早的嵌入式系统。

嵌入式系统的发展经历了四个阶段：

第一阶段：20世纪70年代，以4到8位单片机为核心的可编程控制器系统。这种系统大部分应用于一些专业性极强的工业控制系统中，一般没有操作系统的支持，通过汇编

语言程序对系统进行直接控制。这一阶段的主要特点是：系统结构和功能相对单一、处理效率低、存储容量也十分有限，几乎没有用户接口。

第二阶段：20 世纪 80 年代，以 8 到 16 位嵌入式处理器为基础、以简单操作系统为核心。其主要特点是：通用性比较弱；系统开销小，效率高；操作系统具有一定的兼容性；应用软件较专业，用户界面不够友好；在国内工业领域应用较为普遍，但不能满足一些现代化工业控制和新兴信息家电等领域的需求。其主要的技术发展方向是：不断扩展对象系统要求的各种外围和接口电路，突显其对象的智能化控制能力。

第三阶段：20 世纪 90 年代，以 32 位 RISC 嵌入式中央处理器为基础，并且使用嵌入式操作系统。其主要特点是：嵌入式操作系统兼容性好；操作系统内核精小、效率高，并且具有高度的模块化和扩展性；具备文件和目录管理、设备支持、多任务、网络支持、图形窗口以及用户界面等功能。

第四阶段：21 世纪，以 Internet 为标志的迅速发展阶段。嵌入式网络化主要表现在两个方面，一方面是嵌入式处理器集成了网络接口，另一方面是嵌入式设备应用于网络环境中。以前大多数嵌入式系统还孤立于 Internet 之外，随着 Internet 的进一步发展，Internet 技术与信息家电、工业控制技术等的结合日益紧密，冰箱、空调等的网络化、智能化将使人们的生活步入一个崭新的模式，即使你不在家里，也可以通过手机进行远程控制。

1.1.4 嵌入式系统的应用领域及发展趋势

1. 嵌入式系统的应用领域

嵌入式系统的应用几乎无处不在，军用装备、信息家电、工业控制……无不有它的踪影。嵌入式系统因其体积小、功能强、灵活方便，对各行各业的技术改造、产品更新换代、加速自动化进程、提高生产率等方面起到了极其重要的推动作用。图 1-1 列举了嵌入式系统的主要应用领域。

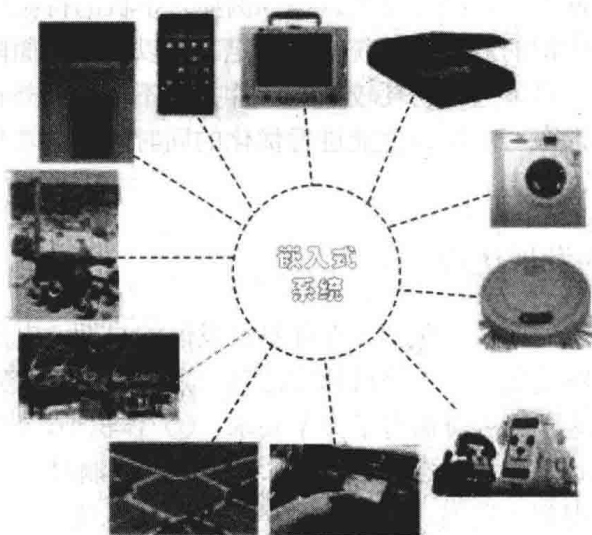


图 1-1 嵌入式系统的应用领域

(1) 军用装备。各种武器控制(火炮控制、导弹控制、智能炸弹制导引爆装置)、坦克、

舰艇、轰炸机等陆海空各种军用电子装备,雷达、电子对抗军事通信装备,野战指挥作战用的各种专用设备。

(2) 信息家电。各种信息家电产品,如数字电视机、机顶盒、数码相机、VCD、DVD、音响设备、可视电话、家庭网络设备、洗衣机、电冰箱、智能玩具等,广泛采用微处理器/微控制器及嵌入式软件,这也是嵌入式系统最大的应用领域。

(3) 工业控制。各种智能测量仪表、数控装置、可编程控制器、分布式控制系统、现场总线仪表及控制系统、机电一体化机械设备等,广泛采用微处理器/控制器芯片级、标准总线的模板级及嵌入式计算机系统。基于嵌入式芯片的工业自动化设备将获得长足的发展,目前已经有大量的8、16、32、64位嵌入式微控制器/处理器处于应用中。

(4) 交通管理。在车辆导航、流量控制、信息监测与汽车服务方面,嵌入式系统技术获得了广泛的应用,内嵌GPS模块、GPRS模块的移动定位和通信终端已经在交通管理中获得了成功的使用,智慧交通让人们的出行更加方便。

(5) 机器人。嵌入式芯片的发展将使机器人在微型化、智能化方面的优势更加明显,同时会大幅度降低产品的价格,使其在工业领域和服务领域获得更广泛的应用,甚至走向了千家万户,如扫地机器人、擦玻璃机器人等。

(6) 物联网。物联网又称为传感网,世界上的万事万物,小到手表、钥匙,大到汽车、楼房,只要嵌入一个微型感应芯片,就能把它变得智能化。嵌入式系统是物联网行业的关键技术,如果把物联网用人体做一个简单比喻,传感器相当于人的眼睛、鼻子、皮肤、耳朵等感应器官,网络就是神经系统用来传递信息,嵌入式系统则是人的大脑,对接收到的信息进行分类处理。

(7) 智能物流。随着电商爆发式的发展,物流行业也突发崛起。智能物流就是利用条形码、射频识别技术、传感器、全球定位系统等嵌入式技术,将信息处理和网络通信平台应用于运输、仓储、配送、包装、装卸等基本环节,实现货物运输过程的自动化运作和效率优化管理,提高物流行业的服务水平,降低成本,减少自然资源和社会资源消耗。

嵌入式系统可以说无处不在,无所不在,有着广阔的发展前景,也充满了机遇和挑战。

2. 嵌入式系统的发展趋势

在应用领域、应用智能化、产品性能等强大需求的推动下,嵌入式产品获得了巨大的发展契机和广阔的发展、创新空间,未来嵌入式系统的发展趋势主要体现在以下几个方面:

(1) 完善的开发平台。嵌入式系统开发是一项系统工程,因此要求嵌入式系统厂商不仅要提供嵌入式系统软硬件本身,同时还需要提供强大的硬件开发工具和软件支持包。

(2) 精简系统内核、算法,降低功耗和软硬件成本。未来的嵌入式产品是软硬件紧密结合的设备,为了降低功耗和成本,需要设计者尽量精简系统内核,只保留和系统功能紧密相关的软硬件,设计者需不断改进算法和选用最佳的编程模型,以降低功耗和软硬件成本。

(3) 网络化、信息化的要求日益提高,使得以往单一功能的电话、冰箱、手机、微波炉等功能不再单一,结构更加复杂。这就要求芯片设计厂商在芯片上集成更多的功能,一方面采用更强大的嵌入式处理器如32、64位RISC芯片或数字信号处理器DSP增强处理能力,另一方面增加功能接口,如USB、扩展总线类型等,加强对多媒体、图形等的处理。

- (4) 网络互联成为必然趋势。未来的嵌入式设备为了适应网络发展的要求，必然要求硬件上提供各种网络通信接口，除了支持 TCP / IP 协议，还有的支持 IEEE1394、USB、CAN、Bluetooth 或 IrDA 通信接口中的一种或者几种，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。
- (5) 可以提供更加友好的人机界面。清晰的信息表达、友好的用户界面，增加了用户对嵌入式设备的亲密感。软硬件技术的进步推动了所控制系统的复杂性和精确性的提高，也推动了人机界面的不断发展。
- (6) 嵌入式系统与无线网、物联网、移动计算、人工智能、数据融合、分布式数据存储等技术的结合，将开发出各种更具人性化、智能化的嵌入式应用系统，如车联网、智能家居、智慧城市、智能医疗等。

1.2 嵌入式系统结构

1.2.1 嵌入式系统构架

嵌入式系统通常由嵌入式微处理器和外围电路、外围设备、嵌入式操作系统和应用软件等几大部分组成，如图 1-2 所示。

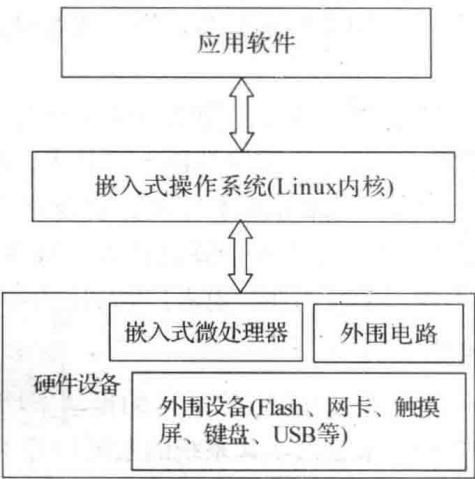


图 1-2 嵌入式系统体系结构

1. 嵌入式微处理器

嵌入式微处理器是嵌入式系统的核心部件。嵌入式微处理器与通用处理器的最大区别在于其专用性，它通常把通用计算机中许多由板卡完成的任务集成在芯片内部，从而有利于嵌入式系统设计趋于小型化，并具有高效率、高可靠性等特征，以满足嵌入式系统体积小、功耗低、应用灵活的要求。嵌入式微处理器通常包括处理器内核、地址总线、数据总线、控制总线、片上 I/O 接口电路等几个部分。

2. 外围电路

外围电路的功能是和微处理器一起组成一个最小系统，外围电路包括嵌入式系统的

内存、接口电路、复位电路、时钟电路和电源等，外部设备通过接口电路与微处理器进行通信。

3. 外围设备

外部设备是指在一个嵌入式系统中，除了嵌入式处理器以外用于完成存储、通信、调试、显示等辅助功能的其他部件，包括 USB(通用串行总线)、UART(通用异步收发器)、RS232、Ethernet(以太网)、扩展存储(如 Flash Card)、键盘、鼠标、LCD(液晶显示)、触摸屏等，它们是嵌入式系统与外界交互的接口。

4. 嵌入式操作系统

在大型嵌入式应用系统中，为了使嵌入式开发更方便、快捷，需要具备一种稳定、安全的软件模块集合，用以管理存储器分配、中断处理、任务间通信和定时器响应，以及提供多任务处理等，这就是嵌入式操作系统。嵌入式操作系统的引入大大提高了嵌入式系统的功能，方便了应用软件的设计，但同时占用了宝贵的嵌入式系统资源。一般在比较大型或需要多任务的应用场合才考虑使用嵌入式系统。

5. 应用软件

嵌入式系统的应用软件是针对特定的应用领域，基于相应的嵌入式硬件平台，并能完成用户的预期任务的计算机软件。用户的任务可能有时间和精度的要求。有些应用软件需要嵌入式操作系统的支持，但在简单的场合下不需要操作系统。由于嵌入式应用软件对成本十分敏感，因此，为减少系统成本，除了精简每个硬件单元的成本外，应尽可能地减少应用软件的资源消耗，尽可能做到优化。

1.2.2 嵌入式微处理器

目前嵌入式系统除了部分为 32 位处理器外，大量存在的是 8 位和 16 位的嵌入式微控制器(MCU)，嵌入式处理器可以分成下面几类。

1. 嵌入式微处理器

嵌入式微处理器(Embedded MicroprocessorUnit, EMPU)的基础是通用计算机中的 CPU。在应用中，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硬件，去除冗余，这样就可以以最低的功耗和资源实现嵌入式应用的特殊要求。为了满足嵌入式应用的特殊要求，嵌入式微处理器虽然在功能上和标准微处理器基本一样，但在工作温度、抗电磁干扰、可靠性等方面都做了各种增强。主要的嵌入式微处理器产品包括 ARM、MIPS、POWER PC 等。

2. 嵌入式微控制器

嵌入式微控制器(Microcontroller Unit, MCU)又称单片机。嵌入式微控制器一般以某一种微处理器内核为核心，芯片内部集成 ROM/EPROM、RAM、总线、总线逻辑、定时计数器、WatchDog、I/O、串行口(可能还包括显示驱动电路、脉宽调制电路、模拟多路转换器、A/D 转换器等电路)等各种必要功能和外设。为适应不同的应用需求，一般一个系列的单片机具有多种衍生产品，每种衍生产品的处理器内核都是一样的，不同的是存储器和外设的配置及封装，这样可以使单片机最大限度地和应用需求相匹配，从而减少功耗和成本。

和嵌入式微处理器相比,微控制器的最大特点是单片化,体积大大减小。

3. 嵌入式 DSP 处理器

嵌入式 DSP 处理器(Embedded Digital SignalProcessor, EDSP)是专门用于数字信号处理方面的处理器,它对系统结构和指令进行了特殊设计,以适合于执行 DSP 算法,编译效率较高,指令执行速度也较快。在数字滤波、谱分析等各种仪器上嵌入式 DSP 获得了大规模的应用。

4. 嵌入式片上系统

随着 EDI 的推广、VLSI 设计的普及化以及半导体工艺的迅速发展,在一个硅片上实现一个更为复杂的系统已经实现,这就是嵌入式片上系统(System On Chip, SOC)。各种通用处理器内核将作为 SOC 设计的标准库,用户只需定义出其整个应用系统,仿真通过后就可以将设计图交给半导体工厂制作样品。这样除个别无法集成的器件以外,整个嵌入式系统的大部分功能硬件均可集成到一块或几块芯片中,使得应用系统电路板变得更简洁,有利于减小系统体积和功耗,提高可靠性。

1.2.3 嵌入式操作系统

在嵌入式系统的早期,嵌入式软件开发是针对微控制器直接编程的,没有操作系统的支持。随着嵌入式系统的发展,复杂的嵌入式应用中使用了嵌入式操作系统。目前,嵌入式系统有一部分有操作系统,还有一部分没有操作系统。例如,大部分交换机、路由器、手机、数码相机、PDA 等系统内部都有嵌入式操作系统;又如,大部分 U 盘、IC 卡读写器、血糖仪数据采集等系统就没有使用操作系统。那么什么是嵌入式操作系统?它是如何分类的?主要应用领域是什么呢?

1. 什么是嵌入式操作系统

所有可用于嵌入式系统的操作系统(OS)都可以称为嵌入式操作系统,既然它是一个 OS,那就必须具备 OS 最基本的功能:进程调度、内存管理、设备管理、文件管理和操作系统接口(API 调用)。嵌入式操作系统通常还包括与硬件相关的底层驱动软件、系统内核、设备驱动接口、通信协议、图形界面、标准化浏览器等。嵌入式操作系统能够有效管理越来越复杂的系统资源;能够把硬件虚拟化,使得开发人员从繁忙的驱动程序移植和维护中解脱出来;能够提供库函数、驱动程序、工具集以及应用程序。与通用操作系统相比较,嵌入式操作系统在系统实时高效性、硬件的相关依赖性、软件固态化以及应用的专用性以及可靠性、可扩展性、可裁剪、可配置等方面具有较为突出的特点。

2. 嵌入式 OS 的分类

对于通用 OS,我们可以按照应用分成桌面 OS 和服务器 OS 两种版本,对嵌入式 OS 分类却是一件很困难的事情。因为嵌入式系统没有一个标准的平台。从特性看嵌入式 OS 可分为硬实时和软实时;从商业模式看其可分为开源和闭源(私有);从应用角度看其可分为通用的嵌入式 OS 和专用的嵌入式 OS;按收费模式嵌入式 OS 又可划分为商用型 OS 和免费型 OS,商用型功能稳定、可靠,有完善的技术支持和售后服务,但往往价格昂贵,免费型实时性和稳定性不能得到保障,但是免费的适合学校和科研人员使用。比如 VxWork

就是硬实时、私有、专用的和商用型 OS, 而嵌入式 Linux 就是软实时、开源、通用的和免费的 OS。硬实时的嵌入式 OS 一般称为 RTOS(实时操作系统)。以下是常用的嵌入式操作系统。

1) VxWorks

VxWorks 是美国 WindRiver 公司(风河公司)于 1983 年开发的一种 32 位嵌入式实时操作系统(RTOS)。VxWorks 具有高性能的内核、卓越的实时性、良好的可靠性以及友好的用户开发环境, 被广泛地应用在通信、军事、航空、航天等高精尖技术领域。

2) WinCE

WinCE 是美国微软公司 90 年代中期开发的一款嵌入式操作系统, WinCE 3.0 之前是软实时系统, WinCE 4.0 之后变为硬实时系统, 主要应用于掌上设备, 如 PDA 等。它是一个开放的、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, 是微软公司嵌入式、移动计算平台的基础。

3) μ C/OS-II

μ C/OS 是由美国人 Jean J. Labrosse 于 1992 年开发的, 来源于术语 MicroController Operating System(微控制器操作系统), μ C/OS-II 是第 2 个版本。 μ C/OS-II 结构小巧, 最小内核可编译至 2k, 即使包含全部功能(如信号量、消息邮箱、消息队列及相关函数等), 编译后的内核也仅有 6~10 kB。 μ C/OS-II 也是一个可裁剪、源码开放、抢占式的实时多任务内核, 主要面向中小型嵌入式系统, 具有执行效率高、占用空间小、可移植性强、稳定性和实时性优良和可扩展性强等特点, 被广泛应用于便携式电话、运动控制卡、自动支付终端、交换机等产品。内核在任何时候都是运行就绪状态下最高优先级的任务。

4) 嵌入式 Linux

Linux 是由芬兰赫尔辛基大学的学生 Linus Torvalds 于 1991 年开发的。后来, Linus Torvalds 将 Linux 源代码发布在网上, 很快引起了许多软件开发人员的兴趣, 来自世界各地的许多软件开发人员自愿通过 Internet 加入了 Linux 内核的开发。由于一批高水平软件开发人员的加入, 使得 Linux 得到了迅猛发展。

嵌入式 Linux(Embedded Linux)是指对 Linux 经过小型化裁剪后, 能够固化在容量为几百 kB 到几十 MB 的存储芯片中, 应用于特定嵌入式系统的专业 Linux 操作系统。嵌入式 Linux 是一款自由软件, 具有良好的网络功能, 被广泛应用于移动电话、个人数字助理(PDA)、媒体播放器、消费性电子产品、工业控制以及航空航天等领域。

5) Android

Android 是一种以 Linux 为基础的开放源代码操作系统, 目前尚未有统一的中文名称, 中国大陆地区较多人使用“安卓”或“安致”。它主要用于移动设备, 由 Google 公司和开放手机联盟开发。

2011 年第一季度, Android 在全球的市场份额首次超过 Symbian(塞班)系统, 跃居全球第一。2012 年 7 月的数据显示, Android 占据全球智能手机操作系统市场 59% 的份额, 中国市场占有率为 76.7%。截至 2016 年 4 月底, Android 在欧洲五个最大市场(英国、德国、法国、意大利和西班牙)的智能手机销量市场份额为 76%, 与上一年同期的 70.2% 相比增长了 5.8 个百分点。在中国城市地区, Android 该期间内的市场份额为 78.8%, 高于一年前的 74%。