



“十二五”国家重点图书出版规划项目
高等学校“十二五”规划教材·计算机软件工程系列

Embedded Computer System Design

嵌入式计算机系统设计

吕为工 张 策 编著



【总结与抽象】

新视角诠释嵌入式系统架构 / 新高度抽象嵌入式系统开发

新思维描述嵌入式系统模型 / 新手法勾勒嵌入式系统全貌

【应用与提升】

基于知识与实例 / 构建应用为核心 / 锻造综合能力和工程素养

立足传统与主流 / 跟踪业界新发展 / 提升对接物联网系统意识



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

“十二五”国家重点图书出版规划项目

高等学校“十二五”规划教材·计算机软件工程系列

嵌入式计算机系统设计

吕为工 张 策 编著

在从事嵌入式系统教学的生涯中，我一直遵循着以应用为导向的教学原则。在系统条件下平台课程中有具体的电路设计，在嵌入式操作系统的课程中有具体的应用。在关于嵌入式系统的课程中有OT（On Target）的课程。在OT课程中，我们主要关注的是嵌入式应用系统的研发需求，通过学生毕业后的反馈，我们发现，在嵌入式系统开发中，从战略性的角度应对嵌入式系统开发中遇到的各种问题，这是嵌入式系统开发中最重要的方面。本书对嵌入式系统的各个方面进行总结和归纳，为嵌入式系统开发提供有益的参考。

本书正
我希望使用
对嵌入式系
系统硬件构

本书主
《嵌入式计
入式计算机

化的方式则不做讨论。在嵌入式系统方面，这些嵌入式系统的教学内容从非计算机专业中更加鲜明地独立出来。

哈尔滨工业大学出版社

内容简介

本书主要针对计算机专业学生学习和提高嵌入式系统设计水平而撰写。书中讨论的嵌入式计算机系统包含一个完整有交互能力的操作系统,对于操作系统与应用程序一体化的方式则不做讨论。本书针对嵌入式计算机系统的特点,首先对其软件开发模型进行整体描述,然后自底向上地讲解嵌入式计算机系统的体系结构、初始化和启动模型、开发环境、操作系统内核、文件系统、驱动程序及可视化开发模型,每个部分都配有实例,实例采用主流的嵌入式 Linux 和 ARM9 处理器进行说明;第 9 章特别介绍了个人移动设备计算机系统,并以安卓平台进行讲解;第 10 章给出了几个嵌入式计算机系统应用案例,包括一个税控机开发平台、一个智能家居领域的照明系统和一个针对水资源管理的物联网系统。

与介绍应用技术为主的一般嵌入式系统图书不同,本书更加注重嵌入式计算机系统方面的模型抽象,适合作为计算机及相关专业的工程技术人员、研究生、本科生学习和应用嵌入式计算机系统的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

嵌入式计算机系统设计/吕为工,张策编著. —哈尔滨:
哈尔滨工业大学出版社,2017.3
ISBN 978-7-5603-6133-8

I. ①嵌… II. ①吕… ②张… 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(2016)第 167248 号

策划编辑 王桂芝

责任编辑 刘 瑶

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 哈尔滨工业大学印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 22.25 字数 542 千字

版 次 2017 年 3 月第 1 版 2017 年 3 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5603-6133-8

定 价 45.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

前言

作为一个 20 世纪 90 年代初毕业的计算机专业的学生,在毕业以后,因为工作性质的原因,我除了从事基于 PC 的计算机应用系统开发,也完成了相当多的基于单片机、工控机甚至 PLC 等这样底层应用系统的构建,因此,“嵌入式系统”这个名词对我来说一直就不陌生,但 2003 年之前,我却一直认为嵌入式系统与我、与计算机专业没有什么关系。

2003 年,一个韩国公司找到我所在学校的科研团队,要开发一个智能家居方面的产品,用于照明的控制和管理,我的团队接受了这个任务。这个产品开发最终使用了 μcos 操作系统和一个三星的 ARM7 处理器,并开启了我个人的嵌入式系统研发生涯。从这时开始,我眼中的嵌入式系统才真正与计算机专业联系起来,并逐步成为我科研和教学的中心。2008 年,我开始了嵌入式系统的教学,直到 2015 年春天,我已经为 8 届不同的本科生和研究生讲授过嵌入式系统课程。

在从事嵌入式系统教学的生涯中,我一直遵循着以应用为核心的原则,例如,在嵌入式系统硬件平台的讲解中有具体的电路设计,在嵌入式操作系统的讲解中有具体的环境使用,在基于嵌入式 GUI 的讲解中有 QT 应用程序的设计等。采用这种从应用角度传授嵌入式系统基础知识的方式,目的是使学生踏入社会时能尽快适应嵌入式应用系统的研发需求。而通过学生毕业后的实际工作经历,也表明了这种教学有不错的效果。但随着一批批学生毕业踏入工作岗位,对嵌入式系统更高层次的一些需求出现了,他们开始思索,在娴熟地应用嵌入式系统基本技术的同时,如何能够高屋建瓴,更好地把握嵌入式系统设计的脉络,从战略性的角度应对嵌入式系统开发中遇到的各种问题呢?这迫使我不得不思索,如何对嵌入式系统的各个方面进行总结和抽象,为嵌入式系统开发提供更全面、有深度和高度的理论支持。

本书正是基于上述思考的一些成果,与一般介绍应用技术为主的嵌入式系统书籍不同,我希望使用一些国内外其他著述未见使用的方法,从新的角度诠释嵌入式系统,从新的高度对嵌入式系统的开发进行抽象。例如,嵌入式系统开发模式的理论模型描述,嵌入式计算机系统硬件构架抽象、驱动程序开发模型及可视化开发等模型描述等。

本书主要针对计算机专业学生进一步学习嵌入式系统的需求,就像本书的书名——《嵌入式计算机系统设计》一样,我们将更加强调嵌入式系统的计算机属性,本书讨论的嵌入式计算机系统,必须包含一个完整有交互能力的操作系统,对于操作系统与应用程序一体化的方式则不做讨论。在嵌入式系统方向,这能使计算机专业的教学内容从非计算机专业中更加鲜明地独立出来。

为了追踪嵌入式系统方向的最新发展,本书将个人移动设备(PMD)也纳入主要讨论范畴。PMD作为一种软硬件相对通用的专用计算机系统,应用广泛,又与传统PC有着很大区别,未来必然会在高等教育教学中占有一席之地,本书在这方面做了初步探索。嵌入式计算机系统应用的另一个热点是将物品接入互联网,与互联网融合形成物联网(Internet of Things, IOT),本书也进行了一些有针对性的分析和讨论。

本书对嵌入式计算机系统进行了抽象总结,但并不意味着不需要应用实例的讲解,相反,应用实例会更加重要,而与此同时,为了和本书内容更好地结合,应用实例的讲解在理论与实际的结合方法上,增加了更多的阐述。本书的应用实例跟踪了传统的和业界最热门的方向。传统的嵌入式计算机系统实例是一个税控机开发平台的全套设计,热点应用则给出了一个智能家居领域的照明系统和一个针对水资源管理的物联网系统设计。

全书共分10章,第1章首先讲述了嵌入式计算机系统基础,然后从第2~8章以自底向上的顺序介绍了嵌入式计算机系统的全貌,其中第2章讲述了嵌入式计算机系统体系结构,第3章讲述了嵌入式计算机的初始化与启动,第4章讲述了嵌入式操作系统开发环境,第5章讲述了嵌入式操作系统移植,第6章讲述了嵌入式文件系统,第7章讲述了嵌入式设备驱动程序开发模型,第8章讲述了嵌入式可视化开发模型,第9章则是一个独立的内容,对个人移动设备计算机系统给出了单独的讲述,第10章则给出了几个嵌入式计算机系统的设计案例。为减少对应用部分细节的描述,一些说明性的内容收集在附录中。

本书由吕为工和张策撰写,参加撰写的还有柏军、李剑雄和石代锋。

由于作者水平所限,疏漏之处在所难免,恳请读者批评指正。

作者

2016年8月

目 录

第 1 章 嵌入式计算机系统基础	1
1.1 嵌入式计算机系统概述	1
1.2 嵌入式操作系统	4
1.3 嵌入式处理器	9
1.4 嵌入式计算机系统开发模型	14
1.5 嵌入式计算机系统的应用热点	21
第 2 章 嵌入式计算机系统体系结构	25
2.1 嵌入式计算机系统体系结构概述	25
2.2 嵌入式计算机系统总线	31
2.3 基于 S3C2410 处理器的嵌入式计算机系统体系结构	40
第 3 章 嵌入式操作系统的初始化与启动	74
3.1 嵌入式操作系统的初始化模式	74
3.2 BootLoader	85
3.3 BootLoader 的设计	89
3.4 几种 BootLoader 介绍	92
第 4 章 嵌入式操作系统开发环境	97
4.1 嵌入式操作系统开发环境概述	97
4.2 GNU 编译工具链	100
4.3 嵌入式 Linux 运行环境	117
4.4 嵌入式 Linux 开发环境的实际创建	129
第 5 章 嵌入式操作系统移植	133
5.1 硬件平台对移植的影响	133
5.2 Linux 操作系统内核结构	135
5.3 Linux 移植概述	142
5.4 Linux 内核向 S3C2410 的移植	144
5.5 Linux 内核的配置和编译	152
第 6 章 嵌入式文件系统	163
6.1 文件系统概述	163
6.2 Linux 文件系统概述	165

6.3 嵌入式文件系统	170
6.4 Linux 根文件系统	173
第7章 嵌入式设备驱动程序开发模型	180
7.1 Linux 设备驱动程序模型	180
7.2 设备的分层模型	195
7.3 驱动程序框架生成工具	199
第8章 嵌入式可视化开发模型	207
8.1 嵌入式 GUI	207
8.2 QT/E	210
8.3 一个通用的轻量级的嵌入式 GUI 设计	219
8.4 嵌入式可视化开发模型	223
第9章 个人移动设备计算机系统	237
9.1 PMD 计算机系统硬件组成	237
9.2 安卓操作系统	239
第10章 嵌入式计算机系统设计案例	258
10.1 税控机开发平台	258
10.2 智能照明控制系统	274
10.3 一个水资源监测的物联网系统设计	286
附录 S3C2410 寄存器	299
参考文献	345
名词索引	346

第1章 嵌入式计算机系统基础

从2000年开始,“嵌入式系统”这个词语频繁地出现在计算机研究及应用的各种论述中,与此同时,一类特殊的计算机也被彻底地独立出来,这就是嵌入式计算机。

2002年,John L. Hennessy 和 David A. Patterson 在他们的经典著作 *Computer Architecture: A Quantitative Approach* 的第3版中,不仅在附录中增加了嵌入式计算机的内容,还采用了新的计算机分类方式,即从使用的角度将计算机分为桌面电脑(个人计算机,PC)、服务器和嵌入式计算机,取代了传统的微型机、小型机、中型机和大型机的分类方式,这标志着嵌入式计算机在业界主流的分类方式中占据了一席之地。

2005年,嵌入式计算机的核心硬件——嵌入式处理器销售量约30亿个,而同期的个人计算机销售量约为2亿台,服务器约为1000万台。到2010年,嵌入式处理器的总销售量达到了190亿个,个人计算机约为3.5亿台,服务器约为2000万台,嵌入式计算机正以前所未有的速度走进人们的生活,它开启了一个时代,即PC失去主角位置的时代——后PC时代。

嵌入式计算机的兴起成为后PC时代的主要标志之一。

1.1 嵌入式计算机系统概述

尽管嵌入式系统在2000年以后才被广泛认知,但它却并非一个全新的事物,早在微处理器面世,微型机出现伊始,开发人员就已经开始将微处理器嵌入到设备之中,以实现对设备的智能化控制,而这正是最早的嵌入式计算机。通用计算机系统和专用的嵌入式计算机系统一直是计算机系统的两大分支。

1.1.1 嵌入式系统的概念与特点

目前,常见的针对嵌入式系统或嵌入式计算机系统的定义有以下四种:

(1) 国际电气工程师学会(IEE)对嵌入式系统的定义:用来控制或监视机器、装置、工厂等大规模系统的设备。

(2) 电气和电子工程师协会(AIEE)对嵌入式计算机系统的定义:是一个较大的系统的一部分,并执行该系统的某些要求,例如,在飞机或快速传输系统中使用的专用的计算机系统。

(3) 北京航空航天大学何立民教授对嵌入式系统的定义:用来嵌入到对象系统中的专用计算机系统。

(4) 国内通常采用的定义:嵌入式系统是以应用为中心,以计算机技术为基础,软件硬件可裁剪,适应应用系统对功能、可靠性、成本、体积、功耗严格要求的专用计算机系统。

显然,第一个定义是一个完全的非计算机专业定义,它甚至连嵌入式系统是不是计算机

系统、是不是包含处理器都没有明确说明。作为以计算机学科为基点的书籍,这一定义不在本书讨论之列。而在后三个定义中,则首先肯定了嵌入式系统是一种计算机系统,“专用的计算机系统”成为三者的共同描述。

本书不对嵌入式系统的定义做深入探讨,也不管业界对嵌入式系统的定义有怎样不同的解读,但嵌入式系统是一个专用的、不具有通用的类似个人计算机形态的计算机系统,这对本书所讲的嵌入式系统来说是一个确定性的描述,是展开论述的一个基点。

嵌入式系统作为一种专用的计算机系统,通常具有如下特点:

(1) 专用性。嵌入式系统适应不同的应用场合,个性化很强,一般要针对硬件进行移植,追求的是专用而不是通用,这也是嵌入式系统开发周期较长的根本原因。

(2) 系统精简。嵌入式系统一般工作在资源有限的环境中,对功耗、体积等都有着特定的要求,其功能的设计及实现一般不会太复杂。

(3) 多样性。嵌入式系统的应用场合多种多样,功能纷繁复杂,无法按照某一标准定制。

(4) 嵌入式系统通常有各自专门的开发工具和环境。

(5) 嵌入式系统的应用软件很多时候会和操作系统结合在一起,对代码质量和效率要求很高。

(6) 嵌入式系统使用嵌入式操作系统,而嵌入式操作系统通常要求内核小、可裁剪、多任务,一些应用场合还对可靠性、实时性有着极高的要求。

1.1.2 嵌入式计算机系统

按照前述嵌入式系统的后三个定义,嵌入式系统是一种计算机系统,那么把嵌入式系统也称为嵌入式计算机系统就没有任何问题了,但本书在书名中使用“嵌入式计算机系统”的意义则远不止于此,它有针对性地包含以下三个含义。

1. 站在计算机学科的角度

嵌入式计算机系统是一门关于计算机及电子等专业的交叉学科,不同学科的不同人看待嵌入式计算机系统有不同的角度。一个现代的电子工程师看到的嵌入式计算机可能主要是 SOC 处理器设计及系统的硬件实现技术;一个单片机程序员甚至会认为单片机系统才是正宗的嵌入式计算机系统,而本书则从计算机系统的角度来看待嵌入式计算机系统。

计算机系统由软件和硬件组成,既然嵌入式计算机系统也是一种计算机系统,那么它同样也是由软件和硬件构成,只不过这个软件和硬件是用于嵌入式计算机系统的,可称之为嵌入式软件和嵌入式硬件。

2. 包含完整的有交互能力的操作系统

从计算机专业的角度,进一步分析嵌入式硬件和嵌入式软件。嵌入式硬件包括嵌入式处理器和外围接口电路,而嵌入式软件则包括嵌入式操作系统和用户应用程序。嵌入式计算机系统的组成如图 1.1 所示。

在早期,针对嵌入式系统中是否一定包括嵌入式操作系统曾有过争议,争议的焦点在于一些不含有操作系统的普通单片机系统到底算不算嵌入式系统。随着嵌入式系统的发展,这个争议已烟消云散,现在,普通的单片机系统通常仅被看作是嵌入式应用,而不是嵌入式系统。将嵌入式应用和嵌入式系统区别开来的正是嵌入式操作系统,嵌入式操作系统的加

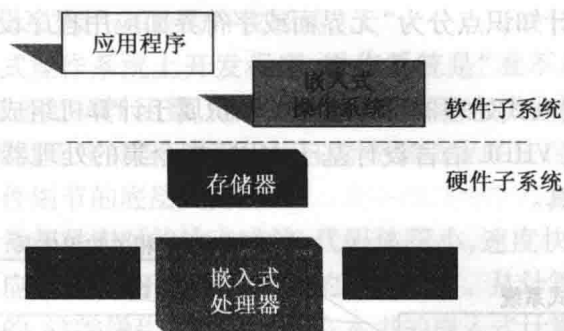


图 1.1 嵌入式计算机系统的组成

人也意味着计算机专业正式介入了专用计算机领域。

本书的嵌入式计算机系统针对嵌入式操作系统有更严格的限定,即包含完整的有交互能力的操作系统,但对于操作系统与应用程序一体化的方式则不做讨论。在嵌入式系统方向,这能使计算机专业的教学内容从非计算机专业中独立出来。据笔者所知,一些电子类专业的嵌入式系统课程通常都是以简单的、无交互能力的、无单独开发环境的小操作系统(如 uC/OS 等)为基础进行讲授的。

3. 包含 PMD 计算机系统

PMD(Personal Mobile Device,个人移动设备),是指一类带有多媒体用户界面的无线设备,如手机、平板电脑等。John L. Hennessy 和 David A. Patterson 在第 5 版的 *Computer Architecture: A Quantitative Approach* 中对计算机进行分类,把 PMD 从嵌入式计算机中分离出来,被作为单独的计算机类别。PMD 有通用的软件开发平台,就像桌面计算机一样,可以运行第三方软件,是一种软硬件相对通用的专用计算机系统。PMD 作为一个应用范围广并在不断发展,又与传统 PC 有着很大区别的计算机系统,正变得越来越重要。

就像手机不再仅仅是专门用于通话功能的设备一样, PMD 的专用性正在逐渐淡化, 而通用特性则越来越接近个人计算机, 而且其形态也相对固定。与传统通用计算机系统和嵌入式系统都不同, PMD 仍然使用与一般嵌入式计算机系统类似的操作系统环境, 并且其开发模式也同样为主机-目标机模式。从计算机系统开发者的角度看, 基于 PMD 与嵌入式计算机的开发还具有很高的相似性, 并且更接近于计算机学科的范畴, 所以本书将 PMD 也纳入讨论范围。笔者认为, 在 PMD 未成为完全独立的教学与科研方向之前, 在嵌入式计算机系统中讨论 PMD 是合适的。

1.1.3 嵌入式计算机系统的相关知识体系

图 1.2 给出了与嵌入式系统各组成部分直接相关的知识体系。由图可以看到,根据嵌入式计算机系统硬件包括的嵌入式处理器和外围接口电路,衍生出嵌入式硬件可能涉及三部分知识点,即嵌入式处理器设计、外围接口电路设计,以及将二者结合在一起的基于嵌入式处理器的硬件体系结构设计;而根据嵌入式系统软件包括的嵌入式操作系统和应用程序,与嵌入式系统软件相关的四个知识点则为嵌入式操作系统设计、嵌入式操作系统开发环境、基于嵌入式操作系统的硬件驱动程序设计以及嵌入式系统中的应用程序设计。

嵌入式系统不一定需要可视化的图形界面,如汽车控制尾气排放的嵌入式系统,甚至连文本字符界面也不需要,而嵌入式系统中图形界面开发有自己的开发模式,所以这里将嵌入

式系统中的应用程序设计知识点分为“无界面或字符界面应用程序设计”和“嵌入式 GUI 及图形应用程序设计”。

在计算机专业中,嵌入式处理器设计的相关知识属于计算机组成原理的范畴,具体操作主要是使用 Verilog 或 VHDL 语言设计基于 MIPS 指令集的处理器,并通过 FPGA 以 SOC 的方式进行处理器的仿真。

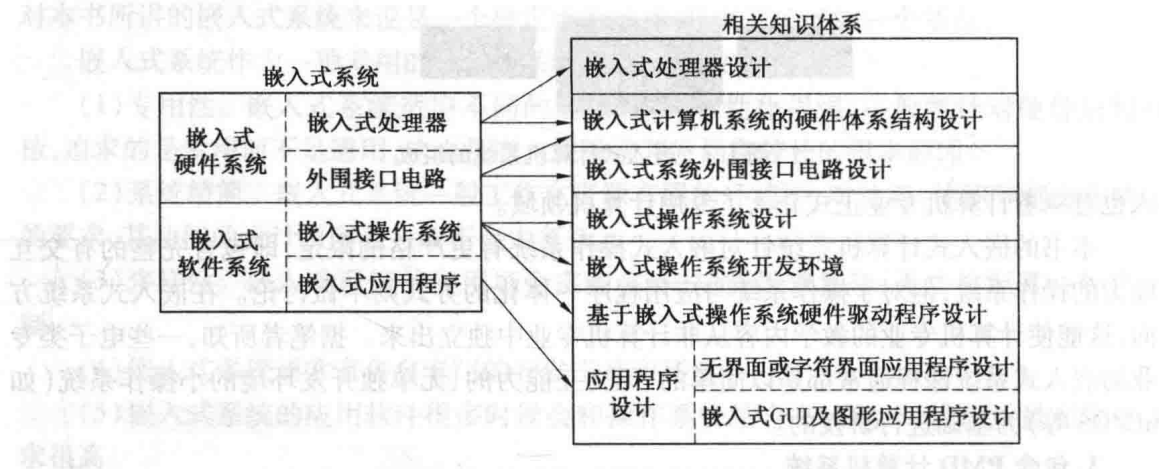


图 1.2 与嵌入式系统各组成部分直接相关的知识体系

对于外围接口电路设计,无论是电子类专业的课程“单片机及接口技术”,还是计算机专业的“微机原理与接口技术”,虽然并不是专门针对嵌入式处理器,但由于接口电路的通用性,因此已经包含大部分相关知识。

嵌入式操作系统设计涉及的基础知识在计算机专业的操作系统课程中已经给出,而无界面或字符界面应用程序设计与通用的程序设计并无不同,所有程序设计相关基础课都有相关讲解。

在图 1.2 中被单独标出的四个知识点,即嵌入式计算机系统的硬件体系结构设计、嵌入式操作系统开发环境、基于嵌入式操作系统硬件驱动程序设计和嵌入式 GUI 及图形应用程序设计,包含在本书讨论的范围内。

1.2 嵌入式操作系统

在前面给出的描述中,嵌入式处理器和嵌入式操作系统并不是自底向上定义的,它是由嵌入式系统的概念引出的,即嵌入式处理器是用于嵌入式系统的处理器,嵌入式操作系统是用于嵌入式系统的操作系统。

很遗憾,这并不是一个能够量化的严格定义,通常,嵌入式处理器是相对于主流处理器中的 X86 而言的,嵌入式操作系统则排除了桌面计算机和服务器的操作系统(如 Windows 和 Unix)。

1.2.1 与应用程序一体化的操作系统

一些简单的嵌入式操作系统,如 uC/OS 和 QNX 等,并不存在提供交互能力的用户界面(Shell),其操作系统和应用程序是一体的,采用和单片机系统一样的开发模式(通过仿真

器),而不是使用基于嵌入式操作系统的开发环境。

在这些简单的嵌入式操作系统上开发程序,操作系统是“看不见”的,在PC程序员眼中,这只是一些支持多任务的API函数,同时,这些操作系统内部也缺乏通用的硬件驱动程序支持,硬件驱动往往需要程序员自己编写,并且这些驱动程序是直接基于硬件的,并不具有操作系统提供屏蔽硬件细节的底层支持。

这些小操作系统通常都是实时的抢占式的,代码体积小,速度快,一般适合无存储管理的低配置硬件上的简单应用,相当于单片机系统的进阶模式。从计算机专业的角度看,这样的操作系统则是不完整的,这类操作系统被排除在本书的嵌入式计算机系统之外。

对于这类操作系统开发模式的进一步探讨,将在后文给出。

1.2.2 实时操作系统

实时性一直是应用系统关注的主要性能,在嵌入式计算机系统中更是如此。一个嵌入式计算机系统要成为一个实时系统,与其包含嵌入式操作系统是密切相关的。

1. 实时系统

Stankovic对实时系统的定义:“实时系统是这样一种系统,即系统执行的正确性不仅取决于计算的逻辑结果,还取决于结果的产生时间。”

实时系统又可以分为硬实时系统和软实时系统。它们对外界事件做出反应的时间不同,硬实时系统必须对事件做出及时的反应,绝对不能错过事件处理的时限。比如说航天飞机的控制系统,如果出现故障,后果则不堪想象。软实时系统是指,如果系统负荷较重时,则允许发生错过时限的情况,而且不会造成太大的危害。比如液晶屏刷新允许有短暂的延迟。

硬实时系统和软实时系统实现的区别主要是在选择调度算法上。一般来说,软实时系统任务的调度为毫秒级,而硬实时系统任务的调度为微秒级。对于软实时系统,选择基于优先级调度的算法足以满足其需求,而且可以提供高速的响应和大的系统吞吐量。而对硬实时系统来说,需要使用的算法就应该是调度方式简单、反应速度快的实时调度算法。

嵌入式计算机系统通常用于某种实际场合,其实时性会决定实际应用的效果甚至成败,即所有的嵌入式计算机系统都有实时性要求。通常可以认为,嵌入式计算机系统至少是软实时系统,如果把软实时系统和硬实时系统都看作是实时系统,则所有的嵌入式系统都可以看作是实时系统,但并不是所有的实时系统都是嵌入式系统,实时系统甚至可以连计算机系统都不是。

2. 实时操作系统

实时操作系统是指具有实时性,能支持硬实时控制系统工作的操作系统。实时操作系统的首要任务是调度一切可利用的资源完成实时控制任务,其次才着眼于提高计算机系统的使用效率。实时操作系统的重要特点是通过任务调度来满足对于重要事件在规定的时间内做出正确的响应。对于非实时操作系统,软件的执行在时间上的要求并不严格,时间上的延误或者时序上的错误,一般不会造成灾难性的后果。

实时操作系统的主要任务是对事件进行实时处理,虽然事件可能在无法预知的时刻到达,但是软件必须在事件随机发生时,在严格的时限内做出响应(系统的响应时间)。实时操作系统具有可确定性,即系统能对运行得最好和最坏的情况做出精确的估计。对于实时操作系统,即使是系统处在尖峰负荷下,也应如此,系统时间响应的超时就意味着致命的失

败。系统中的应用程序设计知识占 50% 左右,而硬件知识则占 50% 左右。

3. 使用嵌入式操作系统的优缺点

使用嵌入式操作系统的优点:使程序的设计和扩展变得容易,大大提高了开发效率;充分发挥 32 位 CPU 多任务的潜力,实现多任务设计,能够充分利用硬件资源和实现资源共享;实时性和健壮性能够得到更好的保证。

使用嵌入式操作系统的缺点:嵌入式操作系统增加了 ROM/RAM 等额外开销,CPU 也增加了 5%~10% 的额外负荷。

1.2.3 嵌入式操作系统实例

嵌入式操作系统种类繁多,各有特色,在最新的调查中,Linux 已经在每年数以千计的产品设计中成为主流操作系统,在近一半的嵌入式设计中使用了 Linux。

1. 嵌入式 Linux

在嵌入式系统领域,Linux 是应用最广泛的首选操作系统,目前已经发展到 2.6 版本。

嵌入式 Linux 现在已经有许多版本,包括强实时的嵌入式 Linux 和一般的嵌入式 Linux 版本。新墨西哥工学院的 RT-Linux 通过把通常的 Linux 任务优先级设为最低,而所有实时任务的优先级都高于它,以达到既兼容通常的 Linux 任务又保证强实时性能的目的。

另一种源于 Linux 的嵌入式操作系统是 uClinux,它是针对没有 MMU 的处理器而设计的,去掉了虚拟内存管理技术,程序中访问的地址都是物理地址,并为嵌入式系统做了许多小型化工作。

Linux 的主要特点如下:

- (1) 开放源码,驱动程序及其他资源丰富。
- (2) 内核小,功能强,稳定健壮,效率高,多任务。
- (3) 易于定制裁剪,在价格上极具竞争力。
- (4) 除了支持 X86 CPU 外,还支持其他 CPU 芯片。
- (5) 有大量的且不断增加的开发工具,这些工具为嵌入式系统的开发提供了良好的开发环境。
- (6) 沿用了 Unix 的发展方式,遵循国际标准,可以方便地获得众多第三方软硬件厂商的支持。
- (7) 有完善的网络支持。
- (8) 包含嵌入式浏览器、邮件程序、MP3 播放器、MPEG 播放器和记事本等丰富的应用程序。

2. Windows CE

Windows CE 是微软公司的产品,但并不是 PC 上的 Windows,它是从整体上为有限资源平台设计的多线程、完整优先权、多任务的操作系统。其模块化设计允许它对从掌上电脑到专用的工业控制器的用户电子设备进行定制。操作系统的基本内核至少需要 200 KB 的 ROM。

Windows CE 的特点如下:

- (1) 带有灵活的电源管理功能。
- (2) 对象存储技术,包括文件系统、注册表和数据库。

(3)良好的通信能力,支持各种通信硬件,支持局域网、Internet 和拨号连接。

(4)支持嵌套中断,提供实时支持。

(5)更好的线程响应能力,中断服务线程响应时间上限更严格,适应嵌入式应用程序要求。

(6)256 个优先级,使开发人员在时序安排方面有更大的灵活性;使用 Win32 API 的一个子集,支持近 1 500 个 API,足以编写任何复杂的应用程序。

(7)在掌上电脑中,Windows CE 包含重要的应用组件,如 Pocket Outlook、语音录音机、移动频道、远程拨号访问、世界时钟、计算器、多种输入法、GBK 字符集、中文 TTF 字库及英汉双语词典。

Windows CE 的缺点是价格过高。

3. VxWorks

VxWorks 是美国 WindRiver 公司于 1983 年设计开发的一种实时操作系统。VxWorks 有良好的持续发展能力、高性能的内核以及良好的用户开发环境,在实时操作系统领域内占据一席之地。

VxWorks 以其良好的可靠性和卓越的实时性被广泛地应用在通信、军事、航空航天等高精尖技术及实时性要求极高的领域中,如卫星通信、军事演习、导弹制导及飞机导航等。在美国的 F-16 战斗机、FA-18 战斗机、B-2 隐形轰炸机和爱国者导弹上,甚至连 1997 年 4 月在火星表面登陆的火星探测器上也使用了 VxWorks。

VxWorks 具有以下核心功能:

(1)微内核。

(2)任务间通信机制。

(3)网络支持。

(4)文件系统和 I/O 管理。

(5)POSIX 标准实时扩展。

(6)C++及其他标准支持。

VxWorks 是一个非常优秀的实时系统,其缺点是价格昂贵。

4. Palm OS

Palm OS 在掌上电脑和 PDA 市场上占有很大的市场份额。它有开放的操作系统应用程序接口(API),开发商可以根据需要自行开发所需的应用程序。

Palm OS 运行在一个多任务的内核之上,但同一时刻用户界面仅仅允许一个应用程序被打开,即只能执行单任务,这保证了系统的高效和稳定。Palm OS 关机时要保存刚才正在运行的程序,开机时从断点开始运行,实现了所谓的零启动时间。Palm OS 常用版本为 5.2,最新版本为 5.3。

Palm OS 的特点如下:

(1)专门为移动设备设计,高效利用内存和电池能量,便于设计小巧轻便的产品。

(2)支持个人信息管理。

(3)Palm OS 软件开发联盟提供了数万种应用程序,兼容 Word、Excel、网页浏览器、电子邮件系统、电子书籍和游戏。

(4)无论同步数据、安排日程,还是使用手写输入法,总是能提供简单快捷的用法。

(5)有线和无线通信,许多基于 Palm 的设备带有红外传送功能,可以利用有线 Modem 来支持无线局域网和蓝牙。

5. uC/OS

uC/OS 是源码公开的实时嵌入式操作系统,目前有代表性的版本是 uC/OS-II,大约有 6 500 行代码。uC/OS-II 的主要特点如下:

(1)公开源代码。系统透明,很容易就能把操作系统移植到各个不同的硬件平台上。

(2)可移植性强。uC/OS-II 绝大部分源码是用 C 语言编写的,可移植性较强。而与微处理器硬件相关的那部分则是用汇编语言编写的,已经压到最低限度,便于移植到其他微处理器上。

(3)可固化。操作系统和应用程序是一体的,可以固化嵌入到开发者的产品中成为产品的一部分。

(4)可裁剪。通过条件编译可以只使用 uC/OS-II 中应用程序需要的那些系统服务程序,以减少产品中的 uC/OS-II 所需的存储器空间。

(5)抢先式。uC/OS-II 完全是抢先式的实时内核,这意味着 uC/OS-II 总是运行在就绪条件下优先级最高的任务。

(6)实时多任务,最多支持 60 个任务。

(7)可确定性。全部 uC/OS-II 的函数调用与服务的执行时间具有可确定性。

(8)uC/OS-II 仅是一个实时内核,有很多工作往往需要用户自己去完成。

(9)把 uC/OS-II 移植到目标硬件平台上只是系统设计工作的开始,还需要进行功能扩展,包括实现硬件驱动、文件系统及 GUI 等。

6. LynxOS 和 QNX

LynxOS 是一个分布式、嵌入式、可规模扩展的实时操作系统,它遵循 POSIX.1a, POSIX.1b 和 POSIX.1c 标准。LynxOS 支持线程概念,提供 256 个全局用户线程优先级,还提供一些传统的、非实时系统的服务特征,包括虚拟内存、一个基于 Motif 的用户图形界面、与工业标准兼容的网络系统以及应用开发工具。

QNX 是一个实时的、可扩充的、开放的操作系统。使用时,用户程序代码和内核直接编译在一起,生成一个单一的多线程映象。QNX 应用接口遵循 POSIX 相关标准,可移植性好, Linux/Unix 程序可以很方便地移植。QNX 的开放性还表现在网络连接上,提供全面的对多种硬件多种协议的支持。QNX 的内核非常小巧(QNX4.x 大约为 12 KB),而且运行速度极快,用户可以根据实际需求,将系统配置成微小的嵌入式操作系统或包括几百个处理器的超级虚拟机操作系统。

7. 安卓系统和苹果 iOS

安卓(Android)和苹果 iOS 是专门用于 PMD 的嵌入式操作系统。

安卓由 Google 公司和开放手机联盟领导及开发,是一种基于 Linux 的自由及开放源代码的操作系统,主要用于移动设备,如智能手机和平板电脑。安卓操作系统最初由 Andy Rubin 开发,2005 年由 Google 收购注资,2007 年 11 月,Google 与 84 家硬件制造商、软件开发商及电信营运商组建开放手机联盟,共同研发改良安卓系统,并在随后发布了安卓系统的源代码。据 2012 年 11 月数据显示,安卓系统占据全球智能手机操作系统市场份额的 76%。2013 年全世界采用安卓系统的设备数已达到 10 亿台。

苹果 iOS 是由苹果公司开发的移动操作系统。苹果公司最早于 2007 年 1 月 9 日的 Macworld 大会上公布这个系统,最初是设计给 iPhone 使用的,后来陆续套用到 iPod Touch (苹果公司 2007 年推出的便携移动产品,可看作 iPhone 的简版)、iPad 及 Apple TV 等产品中。iOS 与苹果的 Mac OS X 操作系统一样,也是以 Darwin(苹果电脑 2000 年的一个开放源码操作系统)为基础的,属于类 Unix 的商业操作系统。iOS 系统原名为 iPhone OS,2010 年 WWDC(苹果电脑全球研发者大会)大会上宣布改名为 iOS。

8. 国内的几个嵌入式操作系统

DeltaOS 是成都电子科技大学嵌入式实时教研室和科银公司联合研制开发的全中文的嵌入式操作系统,提供实时内核,绝大部分的代码由 C 语言编写,具有很好的移植性。它主要包括实时内核 DeltaCORE、组件 DeltaNET、文件系统 DeltaFILE 以及嵌入式图形接口 DeltaGUI 等,还提供了一整套的嵌入式开发套件 LamdaTOOL。

Hopen OS 是由凯思集团自主研制开发的实时操作系统,它由一个体积很小的内核及一些可以根据需要进行定制的系统模块组成。其核心 Hopen Kernel 的规模一般为 10 KB 左右,占用空间小,并具有实时、多任务、多线程等特征。

EEOS 是中科院计算所组织开发的开放源码的实时操作系统。该实时操作系统重点支持 Java,要求一方面小型化,一方面能重用 Linux 的驱动和其他模块。它包含 E2 实时操作系统、E2 工具链及 E2 仿真开发环境的完整环境。

HBOS 系统是浙江大学自主研制开发的全中文实时操作系统,具有实时、多任务等特征,能提供浏览器、网络通信和图形窗口等服务;可供进行一定的定制或二次开发;能为应用软件开发提供 API 接口支持;可用于开发信息家电、智能设备和仪器仪表等领域。

1.3 嵌入式处理器

嵌入式处理器是用于嵌入式系统的处理器,严格来说,任何处理器都可能被用于嵌入式系统,那么如何确定一个处理器是不是嵌入式处理器呢?通常,嵌入式处理器是相对于主流处理器中的 X86 而言的,其本质是区别通用计算机处理器的专用计算机处理器。表 1.1 给出了 X86 处理器与嵌入式处理器的比较。

表 1.1 X86 处理器与嵌入式处理器的比较

	X86 处理器	嵌入式处理器
应用	家用 PC、笔记本、服务器	特定应用
组成	ALU、MMU、片内 Cache、片内资源有限,其他功能需要扩展	ALU、MMU、片内 Cache、集成网卡、USB 等
指令系统	CISC	RISC
I/O 编址方式	独立编址	统一编址
系统存盘	硬盘,需要时调入内存	Flash,启动后全部加载
软件	多样,复杂,全面	面向特定需求,占用空间小,精简
产品使用	通过人机交互实现	嵌入设备中自动完成
关联	X86 常作为嵌入式系统的开发主机	

1.3.1 传统的处理器

处理器的设计是一个复杂的系统工程,一般根据设计方法把传统的处理器分为微控制单元 MCU、数字信号处理器 DSP 及微处理器 MPU 三类。

1. 微控制单元 MCU

MCU 是一种系统设计方法,将计算机的 CPU、RAM、ROM、定时器和多种 I/O 接口集成在一片芯片上,形成芯片级的计算机,为不同的应用场合做不同的组合控制。

51 单片机是这种设计方法最早期的实现,广泛应用于各种工业控制场合,对不同信息源的多种数据进行处理诊断,属于通用集成电路。

2. 数字信号处理器 DSP

DSP 是另外一种系统设计方法,与 MCU 专注于控制不同,DSP 强调各种数字信号处理算法的快速实现,如音频、视频数据的编解码。

MCU 采用的硬件结构是冯·诺依曼型,通常在同一个存储空间取指令和数据,两者不能同时进行。DSP 采用改进型哈佛结构,指令和数据空间完全分开,并且有多个指令和数据空间,提高了数据的吞吐率。DSP 具有专门的硬件乘法器,广泛采用流水线操作,这些特性大大提高了 DSP 处理数据的能力。DSP 通常具有较高的主频。

3. 微处理器 MPU

MPU 是去除了集成外设(如 ROM 和 RAM)的 MCU,是高度集成的通用结构的处理器。MCU 以其控制功能的不断完善为发展标志,而 MPU 追求的则是运算性能和速度的飞速发展。X86 可以看作是一种 MPU。

随着技术的发展,MCU、MPU 和 DSP 三种传统的处理器之间的界限变得越来越模糊,已经很难再明确加以区分,不少的 MCU 和 MPU 具备了 DSP 的特征,技术融合成为大趋势。

1.3.2 片上系统 SOC

传统处理器的设计方法和现代设计方法大为不同,硬件技术的进步,原先由许多独立 IC 组成的电子系统能够集成在一个单片硅片上,构成所谓的系统芯片。每种系统芯片都是由硬件描述语言设计,然后在芯片内由电路实现的。这些系统芯片构成的功能模块,称为 IP Core(知识产权核,分为软核和硬核),需要时,将原来的 IP Core 转移到新系统或只更改一小部分电路就可实现所需要的功能,从而可以高效率地缩短硬件产品的开发周期,降低开发的复杂度。

片上系统 SOC 可以说是处理器技术的集大成者,一个 MPU 或 DSP 可以以一个 IP 硬核的形式存在于 SOC 处理器中。SOC 是一种基于 IP 核的嵌入式系统设计技术,如果不特别指出,可以认为通常说的嵌入式处理器都是 SOC 处理器。

SOC 结合了许多功能模块,将它们做在一个芯片上,这些功能模块以往都做成一个个独立的处理芯片,例如 ARM RISC、MIPS RISC、DSP 或是其他的微处理器核心、USB 单元、TCP/IP 通信单元、GPRS 通信接口、GSM 通信接口、IEEE1394 单元和蓝牙模块接口。一个典型的 SOC 处理器示意图如图 1.3 所示。