

计算机专业人员书库

嵌入式开发详解

魏忠 蔡勇 雷红卫 编著
郝文化 审校



电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
<http://www.phei.com.cn>

计算机专业人员书库

嵌入式开发详解

魏 忠 蔡 勇 雷红卫 编著

郝文化 审校

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书着重介绍了实际的嵌入式开发流程及开发核心技术。本书不但对嵌入式系统的理论进行详细地阐述,而且通过3个嵌入式开发实例将嵌入式理论具体化。

本书融合了作者在嵌入式开发中获得的大量经验和体会,内容层次分明,脉络清晰,具有很高的可读性和实用性。对于从事嵌入式系统开发与应用的广大科研人员和高校相关专业师生,本书不失为一本具有较高实用价值的自学与参考用书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

嵌入式开发详解/魏忠,蔡勇,雷红卫编著. —北京:电子工业出版社,2003.1
(计算机专业人员书库)

ISBN 7-5053-8330-2

I. 嵌… II. ①魏… ②蔡… ③雷… III. 软件开发 IV. TP311.52

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 102165 号

责任编辑:黄志瑜 毕 宁

印 刷:北京人卫印刷厂

出版发行:电子工业出版社 <http://www.phei.com.cn>

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:23 字数:585.6 千字

版 次:2003 年 1 月第 1 版 2003 年 1 月第 1 次印刷

印 数:5 000 册 定价:36.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。
联系电话:(010)68279077

前 言

4~5 年后，嵌入式智能电脑将是 PC 和因特网后的最伟大的发明。

——尼葛洛庞帝访华时的预言

近年来，随着软硬件资源的成熟与完善，嵌入式系统的应用得到了迅猛的发展，其应用领域涉及通信、自动化、信息家电、军事等各个方面。据 IDC 发布的统计表明，未来 4~5 年间，信息家电市场将增长 5~10 倍。由此可见嵌入式应用开发的巨大潜力和商机。同时，市场对嵌入式开发人员的需求也日趋上升，与现有的嵌入式开发人数产生了强烈供需矛盾。可以预见，未来几年必有更多的程序人员进入嵌入式应用开发领域。

众所周知，书籍是开发人员最好的引路人，没有人可以否认诸如《Visual C++ 技术内幕》类的图书对 Visual C 程序员的巨大帮助。要培养好的嵌入式开发人员，需有大批好的讲解嵌入式系统的书籍。为此，笔者经过认真收集和整理素材，编写成《嵌入式开发详解》一书。

本书内容从软、硬件同时入手，清晰勾勒出嵌入式系统的开发流程，并以浅显易懂、针对性强的应用实例让读者迅速进入嵌入式应用开发的广阔天地。

主要内容

全书共分两篇。第一篇是基础理论篇（包括第 1 章、第 2 章、第 3 章），详细讲解了嵌入式的基本理论和开发特点及嵌入式硬件开发的基础知识；第二篇是综合应用篇（包括第 4 章、第 5 章、第 6 章），内容偏重于嵌入式理论的实际应用和深化。在第二篇第 4 章中对当前热门的嵌入式 Linux 进行了详细的介绍，并给出了一个交叉调试的应用实例；第 5 章详细讲解了接入路由器的实际开发过程；第 6 章描述嵌入式实验开发板的设计流程（包括硬件设计、开发调试及上层应用软件编程全过程）。

本书特点

嵌入式系统开发过程中所涉及到的操作系统、开发工具、编译调试、仿真测试等多方面都与普通软件开发不同。本书力求透视嵌入式系统开发的详细过程和特点。本书的特点如下：

- 嵌入式开发与软硬件有着极为密切的关系，这在一定程度上造成了程序人员的认识障碍。针对这种情况，本书从软、硬件两方面着手，从综合应用的角度出发详细阐述了嵌入式系统的相关概念，深入浅出地讲解了嵌入式系统的开发流程。

- 本书突出“应用”的特点。体现了作者在实际嵌入式产品开发中积累的经验，以及对嵌入式开发较深的理解。首先，在从理论上进行相应的介绍后，总是通过相应的例程来加以说明，让读者通过简单的例程来领悟技术内涵；其次，对于开发环境和工具，给出以图形

为界面的开发流程；最后，通过一个当前热门的嵌入式网络编程项目的开发实例，详细而系统地介绍其整个开发流程。一言以蔽之，本书突出嵌入式系统的“应用”特点。

- 本书以主流的硬件体系、实时操作系统和开发环境为例，在读者学习嵌入式系统开发的同时，也掌握了主流的嵌入式开发资源。而且本书对于嵌入式系统的关键术语给出了英文原词，并在附录部分中系统地给出了相关的嵌入式开发的网络资源，以方便读者尽快融入嵌入式开发的国际浪潮。

- 将作者的嵌入式开发“体验”融入到对理论的介绍和项目的编程开发中，即写出了作者的心得和感受，使文章“有滋有味”。

适应对象

本书语言通俗易懂，内容丰富详实，且实例特点突出。既可作为具有一定的 C 和 Visual C++ 编程经验且从事嵌入式系统应用开发的人员用书，也可作为广大嵌入式系统应用开发爱好者为提高自己的嵌入式应用开发水平的学习用书。

编写分工

本书由魏忠、蔡勇和雷红卫合作编写，感谢马莉小姐在写作过程中提供的写作灵感；参加本书资料收集和编排的人员还有刘青松、巫文斌、田茂敏、李建康、苏萍、孙忠、刘小伟、邓勇、欧阳劲、张云勇和隋军生等。

感谢

在编写本书的过程中，得到了各方面无私的帮助，在此深表感谢。

特别感谢电子科技大学嵌入式实时教研室熊光泽教授（博士生导师）、雷航教授、罗蕾教授、桑楠副教授、陈丽蓉老师及全体教研室成员等对本书编写的大力支持。

特别感谢北京科银京成有限公司的罗蕾副总经理，以及罗劲、王丽杰、费勤、陈铁、李允、尹立孟等公司技术开发人员的大力帮助。

感谢 EPSON 公司的技术帮助；感谢成都瑞科数据有限公司李黎明工程师、甘立才技术员的大力帮助；深深感谢家人对我们一如既往的关爱，这一直是我们笑对生活的动力源泉。

由于本书篇幅较大，涉及技术内容广泛，加之时间仓促，书中难免存在错误或疏漏之处，希望广大读者给与批评指正。如需书中程序源代码，请与作者联系。

欢迎致信 E-mail: hwhpc@163.com。

编 者

目 录

第一篇 基础理论篇

第 1 章 嵌入式系统基础	(3)
1.1 嵌入式系统的概念	(3)
1.1.1 概念	(3)
1.1.2 组成	(4)
1.1.3 特点	(5)
1.2 实时系统	(6)
1.2.1 实时系统	(6)
1.2.2 实时系统的特点及分类	(6)
1.3 嵌入式和实时系统的应用	(7)
1.3.1 嵌入式应用	(7)
1.3.2 一般应用	(8)
1.4 实时操作系统	(9)
1.4.1 实时操作系统的分类	(9)
1.4.2 实时操作系统的概念	(11)
1.4.3 实时操作系统的发展	(11)
1.4.4 实时操作系统的组成	(13)
1.4.5 实时操作系统的特点及应用	(14)
1.4.6 常见的实时操作系统	(14)
1.5 实时操作系统的内核	(17)
1.5.1 任务管理	(17)
1.5.2 存储器管理	(23)
1.5.3 任务间的通信和同步	(24)
1.5.4 定时器管理	(27)
1.5.5 中断管理	(27)
1.6 嵌入式应用软件	(28)
1.7 国内外嵌入式系统的发展现状及未来	(28)
第 2 章 嵌入式实时软件的开发	(30)
2.1 嵌入式实时软件开发的特点	(30)

2.2	嵌入式应用软件的开发流程	(32)
2.2.1	需求分析阶段	(33)
2.2.2	设计阶段	(33)
2.2.3	生成代码阶段	(37)
2.2.4	固化阶段	(40)
2.3	嵌入式实时开发的软、硬件资源	(41)
2.3.1	硬件资源	(41)
2.3.2	软件资源	(43)
2.4	板级支持包 (BSP)	(53)
2.5	嵌入式开发的可移植性和可重用性	(55)
第 3 章	嵌入式系统硬件基础	(57)
3.1	嵌入式处理器	(58)
3.1.1	嵌入式微处理器 (Embedded Micro Processor Unit, EMPU)	(58)
3.1.2	嵌入式微控制器 (Embedded Microcontroller Unit, EMU)	(59)
3.1.3	嵌入式 DSP 处理器 (Embedded Digital Signal Processor, EDSP)	(60)
3.1.4	嵌入式片上系统 (Embedded System On Chip, ESOC)	(60)
3.2	嵌入式系统调试	(61)
3.2.1	实时在线仿真系统 ICE (In-Circuit Emulator)	(62)
3.2.2	Monitor 调试	(62)
3.2.3	模拟调试	(62)
3.3	嵌入式 FLASH 的编程	(63)
3.3.1	编程器编程	(63)
3.3.2	普通接口编程	(64)
3.3.3	JTAG 编程	(64)
3.4	基本嵌入式系统的外围接口	(70)
3.4.1	预分频器 (Prescaler)	(70)
3.4.2	可编程定时器/计数器 (Programmable Timer/Counter)	(71)
3.4.3	PWM (脉宽调制)	(72)
3.4.4	Watch Dog Timer (看门狗定时器)	(72)
3.4.5	A/D 或者 D/A 转换	(73)
3.4.6	I ² C (Intel Integrated Circuit) 总线接口	(74)
3.4.7	SPI 总线接口	(77)

第二篇 综合应用篇

第 4 章	嵌入式 Linux 的开发	(81)
-------	---------------------	------

4.1	嵌入式 Linux 概况	(81)
4.1.1	Linux 简介	(82)
4.1.2	嵌入式 Linux	(82)
4.1.3	嵌入式 Linux 的组成	(85)
4.1.4	嵌入式 Linux 的版本	(86)
4.2	嵌入式 Linux 开发基础	(88)
4.2.1	Linux 的程序文件后缀名	(88)
4.2.2	Linux 下的汇编语言	(89)
4.3	开发工具	(93)
4.3.1	GCC 编译器	(94)
4.3.2	GDB 调试程序	(99)
4.3.3	make 项目维护程序	(105)
4.4	嵌入式 Linux 内核的生成	(112)
4.4.1	内核的配置和生成	(112)
4.4.2	内核的启动过程	(115)
4.5	嵌入式 Linux 远程调试实例	(120)
4.5.1	GDB 远程调试的结构	(120)
4.5.2	GDB 远程串行通信协议	(122)
4.5.3	GDB 远程调试建立的条件	(123)
4.5.4	stub 的结构	(124)
4.5.5	远程调试步骤	(143)
第 5 章	路由器开发实例讲解	(145)
5.1	路由器基础知识	(146)
5.1.1	路由器的工作原理	(146)
5.1.2	路由器的功能	(147)
5.1.3	路由器的优点	(148)
5.1.4	用户接入路由器	(148)
5.1.5	NAT (Network Address Translation) 网络地址转换	(149)
5.1.6	虚拟专用网 VPN (Virtual Private Network)	(151)
5.1.7	路由器对 VoIP (Voice Over IP) 技术的支持	(152)
5.2	防火墙 (Firewall)	(153)
5.2.1	分组过滤防火墙	(155)
5.2.2	代理防火墙	(156)
5.2.3	防火墙的安全措施	(157)
5.3	硬件、软件设计分析	(159)

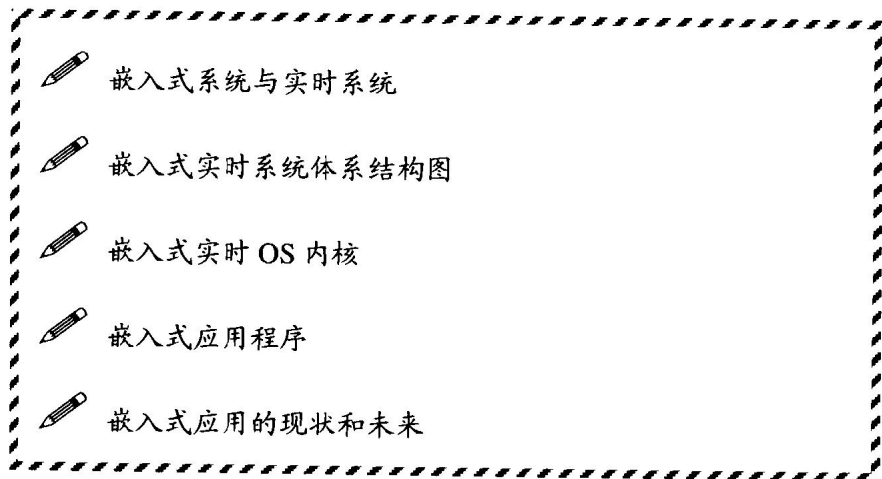
5.3.1	集成开发工具 LambdaTOOL	(162)
5.3.2	嵌入式操作系统核心 DeltaCORE	(167)
5.4	硬件设计原理	(169)
5.5	BSP 及驱动程序设计	(170)
5.5.1	BSP 板级支持包的原理和开发	(170)
5.5.2	驱动程序的原理和实例解析	(181)
5.5.3	网卡的工作原理和结构	(183)
5.5.4	网卡驱动程序实例的编写	(191)
5.6	软件模块设计及调试	(217)
5.6.1	协议栈的分析	(217)
5.6.2	功能代码分析	(219)
5.7	系统开发后期工作	(246)
5.7.1	代码固化	(246)
5.7.2	代码优化	(249)
第 6 章	基于爱普生芯片的嵌入式实验板开发	(251)
6.1	项目的分析	(251)
6.2	实验板的硬件部分	(252)
6.2.1	系统微处理器 S1C33209	(252)
6.2.2	系统中硬件的详细设计	(253)
6.2.3	硬件测试	(265)
6.3	实验板的软件部分	(266)
6.3.1	S1C33209 指令集	(266)
6.3.2	嵌入式开发的操作系统 ROS33	(273)
6.3.3	嵌入式开发环境 WB33	(285)
6.3.4	嵌入式调试工具 DB33	(296)
6.4	嵌入式应用程序	(301)
6.4.1	程序的执行模式	(301)
6.4.2	程序的开发流程	(303)
6.4.3	简单的嵌入式应用程序开发	(308)
6.4.4	FLASH 驱动与固化	(316)
6.4.5	串口通信	(319)
6.4.6	LCD 接口与驱动	(328)
6.4.7	调试监控程序	(336)
6.4.8	复杂的嵌入式应用程序开发	(341)
6.5	小结	(342)

附录 A	GNU GPL——GNU 通用公共许可证	(344)
附录 B	网络资源	(349)

第一篇 基础理论篇

第 1 章 嵌入式系统基础

内容点击



本章引言

本章主要介绍嵌入式系统和实时系统的基本概念、相互间关系以及嵌入式系统的组成。通过本章的学习将了解到嵌入式系统的总体架构及嵌入式软、硬件之间的紧密关系，为后续章节的应用打下坚实的理论基础。

1.1 嵌入式系统的概念

随着信息技术的发展和数字化产品的普及，Internet 得到广泛深入的应用；从消费电器到工业设备，从民用产品到军用器材，嵌入式系统被应用到网络、手持通信设备、国防军事、消费电子和自动化控制等各个领域。嵌入式系统的广泛应用前景和发展潜力使其成为 21 世纪的应用热点之一。嵌入式系统通常是面向特定应用的。然而，嵌入式系统本身不仅与一般 PC 上的应用系统不同，而且针对不同的具体环境而设计的嵌入式应用之间的差别也很大。建立嵌入式系统的概念是有志从事嵌入式系统开发的软硬件人员的必经之路。

1.1.1 概念

嵌入式系统 (Embedded System) 是以应用为中心和以计算机技术为基础的，并且软硬件是可裁剪的，能满足应用系统对功能、可靠性、成本、体积、功耗等指标的严格要求的专用

计算机系统。它可以实现对其他设备的控制、监视或管理等功能。

1.1.2 组成

嵌入式系统通常由嵌入式处理器、嵌入式外围设备、嵌入式操作系统和嵌入式应用软件等几大部分组成。

1. 嵌入式处理器

嵌入式处理器是嵌入式系统的核心部件。嵌入式处理器与通用处理器的最大不同点在于嵌入式 CPU 大多工作在为特定用户群设计的系统中。它通常把通用 CPU 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。

嵌入式处理器可分为低端的嵌入式微控制器 (Micro Controller Unit, MCU)、中高端的嵌入式微处理器 (Embedded Micro Processor Unit, EMPU)、常用于计算机通信领域的嵌入式 DSP 处理器 (Embedded Digital Signal Processor, EDSP) 和高度集成的嵌入式片上系统 (System On Chip, SOC)。

几乎每个大的硬件厂商都推出了自己的嵌入式处理器,因而现今市面上有 1000 多种嵌入式处理器芯片,其中以 ARM, PowerPC, MC68 000, MIPS 等使用得最为广泛。

2. 嵌入式外围设备

这里所说的嵌入式外围设备,指在一个嵌入式硬件系统中,除了中心控制部件 (MCU, DSP, EMPU, SOC) 以外的完成存储、通信、保护、调试、显示等辅助功能的其他部件。根据外围设备的功能可分为以下 3 类。

- 存储器类型: 静态易失型存储器 (RAM, SRAM)、动态存储器 (DRAM)、非易失型存储器 (ROM, EPROM, EEPROM, FLASH)。其中, FLASH (闪存) 以可擦写次数多, 存储速度快, 容量大及价格便宜等优点在嵌入式领域得到广泛的应用。

- 接口类型: 目前存在的所有接口在嵌入式领域中都有其广泛的应用, 但是以下几种接口, 其应用最为广泛, 包括 RS-232 接口 (串口)、IRDA (红外线接口)、SPI (串行外围设备接口)、I2C (现场总线待定)、USB (通用串行接口)、Ethernet (以太网接口) 和普通并口。

- 显示类型: CRT, LCD 和触摸屏等外围显示设备。

3. 嵌入式操作系统

在嵌入式大型应用中, 为了使嵌入式开发更方便、快捷, 就需要具备相应的管理存储器分配, 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功能的稳定的、安全的软件模块集合, 即嵌入式操作系统。嵌入式操作系统的引入大大提高了嵌入式系统的功能, 方便了嵌入式应用软件的设计, 但同时也占用了宝贵的嵌入式资源。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操作系统。

当今流行的嵌入式操作系统包括 VxWorks, pSOS, Linux, Delta OS 等。每一种嵌入式操作系统都有自身的优越性,用户可根据自己的实际应用选择适当的操作系统。

4. 嵌入式应用软件

嵌入式应用软件是针对特定的实际专业领域的,基于相应的嵌入式硬件平台的,并能完成用户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。有些嵌入式应用软件需要嵌入式操作系统的支持,但在简单的应用场合下不需要专门的操作系统。

嵌入式应用软件和普通的应用软件有一定的区别。由于嵌入式应用对成本十分敏感,因此为减少系统的成本,除了精简每个硬件单元的成本外,尽可能地减少嵌入式应用软件的资源消耗也是不可忽视的重要因素。这就要求嵌入式应用软件不但保证准确性、安全性、稳定性以满足应用要求,还要尽可能地优化。

1.1.3 特点

由于嵌入式系统是应用于特定环境下执行面对专业领域的应用系统,所以不同于通用型计算机系统应用的多样化和适用性。它与通用的计算机系统相比具有以下特点:

- 嵌入式系统通常是面向特定应用的,一般都有实时要求。嵌入式 CPU 大多工作在为特定用户群所设计的系统中。它通常具有低功耗、体积小、集成度高、成本低等特点,能够把通用 CPU 中许多由板卡完成的任务集成在芯片内部,从而使嵌入式系统的设计趋于小型化、专业化,也能使移动能力大大增强,与网络的耦合也越来越紧密。
- 嵌入式系统是将先进的计算机技术、半导体工艺、电子技术和通信网络技术与各领域的具体应用相结合的产物。这一特点决定了它必然是一个技术密集、资金密集、高度分散、不断创新的知识集成系统。
- 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,一般具有较长的生命周期。
- 嵌入式系统的硬件和软件都必须高效率地设计,在保证稳定、安全、可靠的基础上量体裁衣,去除冗余,力争在同样的硅片面积上实现更高的性能。这样,才能最大限度地降低应用成本,从而在具体应用中对处理器的选择更具有市场竞争力。
- 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处理器的内部存储器件中,而不存储于外部的磁盘等载体中。
- 嵌入式系统本身不具备自举开发能力。即使设计完成以后,用户通常也不能对其中的程序功能进行修改,必须有一套交叉开发工具和环境才能进行开发。

1.2 实时系统

1.2.1 实时系统

实时，表述的是程序处于计算机研究或控制之中的实际时间，或者说实时计算机解决某一问题所消耗的时间，即从数据传送至计算机开始算起到接收到回应为止的时间。实时系统（RealTime System）是一个能够在指定或者确定的时间内完成系统功能及对外部或内部事件在同步或异步时间内做出响应的系统。

实时系统包括实时控制系统和实时信息处理系统。

1.2.2 实时系统的特点及分类

实时系统是在逻辑和时序控制中如果出现偏差将会引起严重后果的系统。对于实时系统来说，它应具备以下几个重要的特性。

（1）实时性

实时系统所产生的结果在时间上有着严格的要求，只有符合时间要求的结果才认为是正确的。在实时系统中，每个任务都有一个截止期限，任务必须在这个截止期限之内完成，以此保证系统所产生的结果在时间上的正确性。

（2）可靠性

可靠性一方面指系统的正确性，即系统所产生的结果在返回值和运行费时上都是正确的；另一方面它指系统的健壮性。也就是说，虽然系统出现了错误或外部环境预先假定的外部环境不符合，但系统仍然可以处于可预测状态，它仍可以安全地带错运行和平缓地降级。

（3）并行性

一般来说，一个实时系统常常有多个外部输入端口。因此，这就要求系统具有并行处理的能力，以便能同时响应来自不同端口的输入信号。

（4）可预测性

实时系统的实际行为必须处在一定的限度内，而这个限度可以由系统的定义而获得。这意味着系统对来自外部输入的反映必须全部是可预测的，即使在最坏的条件下，系统也要严格遵守时间的约束。因此，在出现过载时，系统必须能以一种可预测的方式来降级它的性能。

实时系统中主要通过 3 个指标来衡量系统的实时性，即响应时间（Response Time）、生存时间（Survival Time）和吞吐量（Throughput）。

- 响应时间（Response Time）是计算机从识别一个外部事件到做出响应的的时间。
- 生存时间（Survival Time）是数据的有效等待时间，在这段时间里数据是有效的。
- 吞吐量（Throughput）指在一给定时间内，系统可以处理的事件总数。吞吐量通常比平均响应时间的倒数小一点。

实时系统根据响应时间可分为3种类型。

(1) 弱实时系统

弱实时系统中系统的宗旨是使各个任务运行得越快越好，并没有严格限定某一任务必须在多长时间内完成。弱实时系统更多地关注软件运行的结果正确与否及安全性能等其他方面，而对任务执行时间的要求相对较宽松。一般，它的响应时间可以是数十秒或更长。它可能随着系统的负载轻重而有所变化。

(2) 一般实时系统

一般实时系统是弱实时系统和强实时系统的一种折衷。它的响应时间可以在秒的数量级上，可广泛应用于许多消费电子设备中。如 PDA、手机等的软硬件系统都属于一般实时系统。

(3) 强实时系统

在强实时系统中，各任务不仅要保证执行过程和结果的正确，同时还要保证在系统能够允许的时间内完成任务。它的响应时间在毫秒或微妙的数量级上。这对于关系到安全、军事领域的软硬件系统来说是至关重要的。美国航空航天局的火星计划使用的 VxWorks 操作系统就符合强实时标准。

实时系统根据确定性可以分为以下两类。

(1) 硬实时

硬实时指系统对系统响应时间有严格的要求，如果系统响应时间不能满足，就会引起系统崩溃或致命的错误。

(2) 软实时

软实时指系统对系统响应时间有要求，但是如果系统响应时间不能满足，它并不会导致系统出现致命的错误或崩溃。

1.3 嵌入式和实时系统的应用

随着嵌入式系统得到广泛深入的应用，实时系统和嵌入式系统的关系已经到了密切不可分的地步。从理论上讲它们是针对不同标准的两个概念。

嵌入式系统以应用为中心，强调体积和功能的可裁剪性，是以完成控制、监视等功能为目标的专用系统。实时系统是以系统任务的完成时间作为划分标准的系统。

如图 1-1 所示形象地体现了两者之间的关系。

实时系统有两种应用：嵌入式应用和一般应用。

1.3.1 嵌入式应用

当今的实时系统，大多数是嵌入式应用系统。在这种应用系统中，系统执行任务的软硬件都嵌入在实际的设备环境中，通过专门的 I/O 接口和外界交换信息；一般，它们执行的