嵌入式技术实用丛书

嵌入式Linux

系统应用基础与开发范例

◆ 吴 军 周转运 编著

附光盘

人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

图书在版编目（CIP）数据

嵌入式 Linux 系统应用基础与开发范例 / 吴军，周转运编著. —北京：人民邮电出版社，2007.8
ISBN 978-7-115-16123-9

Ⅰ. 嵌… Ⅱ. ①吴…②周… Ⅲ. Linux 操作系统—程序设计— Ⅳ. TP316.89

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2007）第 055357 号

内 容 提 要

本书是一本关于嵌入式 Linux 系统开发技术的教材，涉及嵌入式开发环境、Linux 实时扩展、Linux 存储子系统、常用文件系统、嵌入式数据库、引导加载程序等内容。在描述知识点的同时，本书也特别注重实际操作过程。在最后几章中，以网络管理中基于 Linux 的嵌入式设备的实例形式向读者介绍和分析了嵌入式 Linux 系统应用及开发过程。

本书特点是将技术点探讨、技术点论述与技术实际应用结合在一起，有助于读者对嵌入式 Linux 系统开发技术的理解和掌握。

本书既可作为培训班和高等院校相关专业的教材，也可作为从事嵌入式系统开发技术人员的参考用书。

嵌入式技术实用丛书

嵌入式 Linux 系统应用基础与开发范例

◆ 编　　著　吴　军　周转运
责任编辑　陈万寿

◆ 人民邮电出版社出版发行　　北京市崇文区夕照寺街 14 号
邮编　100061　　电子函件　315@ptpress.com.cn
网址　http://www.ptpress.com.cn
北京隆昌伟业印刷有限公司印刷
新华书店总店北京发行所经销

◆ 开本：787×1092　1/16
印张：20
字数：482 千字　　2007 年 8 月第 1 版
印数：1－4 500 册　　2007 年 8 月北京第 1 次印刷

ISBN 978-7-115-16123-9/TN

定价：41.00 元（附光盘）

读者服务热线：(010)67129258　印装质量热线：(010)67124223

前　言

随着越来越多的电子产品采用嵌入式 Linux 作为系统平台，人们对于嵌入式 Linux 已不再陌生。从发展趋势来看，嵌入式 Linux 在诸如通信、工控机、汽车电子、消费类电子等领域都有着广阔的应用前景。包括 Samsung、Motorola、Nokia 等国际知名的众多企业都已涉足嵌入式 Linux 领域，当然，这中间也不乏我们国内的一些 Linux 厂商的身影。但是，嵌入式 Linux 系统方面的开发人才非常紧缺，远远满足不了当前技术和市场发展的需要，当前关于嵌入式系统的培训已经成为热门，各种培训机构和高等院校也非常注重这方面人才的培养。目前比较系统的有关嵌入式 Linux 系统的原理、软硬件开发技术和应用的参考书籍还不多见。本书作为嵌入式 Linux 系统方面的专业书籍，适用面广泛，有助于推动我国嵌入式 Linux 人才的培养。

本书是一本关于嵌入式 Linux 系统开发的书，系统地、细致地介绍嵌入式 Linux 系统开发，还涉及在嵌入式 Linux 系统中比较深层次的问题，例如 Linux 内核的实时扩展、日志文件系统、嵌入式数据库等；到底我们需要什么样的实时 Linux；正在开发中的第三代闪存日志文件系统（JFFS3）到底解决了前代中出现的哪些问题；嵌入式数据库的应用趋势如何；在嵌入式设备中是否需要嵌入式数据库；嵌入式存储系统怎样组织等。理论是为实践做准备的，本书针对通信系统中关键设备——通用网管设备、路由器等中的具体应用进行了具有借鉴性的分析和举例。

本书的第一个特点是比较系统全面；第二个特点是深入浅出；第三个特点是理论与实践的紧密结合。在应用分析中涉及了当今通信、IT、家电三大行业共同关心的热门技术——家庭智能网络，因此，本书的第四个特点是注重创新性和应用的时效性。

本书可作为嵌入式系统开发人员的参考书，既适合嵌入式系统的初学者，也适合资深的项目开发人员。本书的内容特点适合作为教学或培训教材，读者群体包括高校计算机相关专业本科生、研究生以及公司嵌入式系统研发人员。

本书共分 14 章，具体章节内容见目录。因水平有限，书中难免存在错漏和不妥之处，望读者指正，可联系 liming.1234@yahoo.com.cn 或者 zeng_chong@163.com。

编　者

目　　录

第1章 绪 论

关于嵌入式系统的现状，可以引用 Intel 公司推广它的移动计算技术时的一句宣传语，“计算无所不在”。是的，计算无处不在，看看我们的周围，手机、PDA、遥控开关、电子戒指、电子手杖、以家庭网络为核心的信息家电等，不知不觉中，嵌入式系统已经渗透到我们工作和生活的方方面面，我们也步入了所谓的后 PC 时代。目前，嵌入式应用已由工业、通信和网络扩展到与数字多媒体相关的消费领域，在手机、MP3、PDA、数码相机、电视机，甚至电饭锅、手表里都有嵌入式系统的身影，工业自动化控制、仪器仪表、汽车、航空航天等领域更是嵌入式系统的天下。据估计，每年全球嵌入式系统带来的相关工业产值已超过 1 万亿美元。随着多功能手机、便携式多媒体播放机、数码相机、HDTV 和机顶盒等新兴产品逐渐获得市场的认可，嵌入式系统的市场正在以每年 30%的速度递增（据 IDC 预测）。随着下一代网络（NGN）、第三代移动通信（3G）的发展，全球电信及通信设备市场将会飞速发展，年均复合增长率达到 17.4%。随着通信设备的智能化，嵌入式软件占到整个设备价值的 40%～70%。

嵌入式技术并不是一个新鲜事物，自从有了单片机就有了嵌入式技术，但是嵌入式 Linux 的引入加强了人们的关注。特别是近几年来，PDA 以及数字移动电话飞速发展，随着袖珍信息终端需求的持续增长，2000～2005 年期间嵌入式 Linux 呈现出高速增长的势头。在移动智能终端领域，与 Symbian、WinCE、Palm OS 相比，嵌入式 Linux 操作系统由于代码开放性以及强大的网络功能，是最被看好的嵌入式操作系统之一，随着泛亚洲和主要的全球性组织采用 Linux 系统，新的 Linux 移动通信的契机新时代正在崛起。在信息家电领域，廉价开源的 Linux 资源被认为是家电领域成本控制的利器，可以说，嵌入式 Linux 真正宣告了信息家电时代的到来。在通信领域，VxWorks 的市场份额正在被嵌入式 Linux 所蚕食，在今后几年内，路由器、交换机、家庭网关设备等都有可能是嵌入式 Linux 的天下。

目前国际上有数以百计的嵌入式 Linux 开发计划，在国内，这方面的发展也有了较大进展。国内的嵌入式 Linux 厂商大都是在 2000 年或更晚才进入嵌入式 Linux 市场，目前已经有了一些成型的应用，如博利斯公司在通信和高端 PDA，红旗公司在工控领域，中软公司在实时控制领域，宇龙通信在智能手机和行业终端等。不容置疑，嵌入 Linux 系统带来的影响并不仅仅是技术优势本身，它正在改变通信设备、信息家电、移动通信尤其是终端设备行业的格局，促使各行业制造下一代设备，并刺激中国软件和硬件企业所存在的生态系统产生新的增长点和破坏性力量，它也为中国的企业和全球的组织机构创造着新的商机。

第 2 章　嵌入式操作系统概述

2.1　嵌入式系统概念

嵌入式系统是以应用为中心，以计算机技术为基础，并且软硬件可裁剪，适用于应用系统对功能、可靠性、成本、体积、功耗有严格要求的专用计算机系统。它一般由嵌入式微处理器、外围硬件设备、嵌入式操作系统以及用户的应用程序等 4 个部分组成，用于实现对其他设备的控制、监视或管理等功能。

嵌入式系统一般指非 PC 系统，它包括硬件和软件两部分。硬件包括嵌入式微处理器/微控制器（MCU）、存储器及外围设备（以下简称外设）和 I/O 端口、图形控制器等。软件部分包括操作系统（OS）（要求支持实时和多任务操作）和应用程序。有时开发人员把这两种软件组合在一起。应用程序控制着系统的运行，而操作系统负责应用程序与硬件的交互。

嵌入式系统的核心是嵌入式微处理器。嵌入式微处理器一般具备以下 4 个特点。

（1）对实时多任务有很强的支持能力，能完成多任务并且有较短的中断响应时间，从而使内部的代码和实时内核的执行时间减少到最低限度。

（2）具有功能很强的存储区保护功能。这是由于嵌入式系统的软件结构已模块化，而为了避免在软件模块之间出现错误的交叉作用，需要设计强大的存储区保护功能，同时也有利于软件调试。

（3）可扩展的处理器结构，能最迅速地开发出满足应用的最高性能的嵌入式微处理器。

（4）嵌入式微处理器必须功耗很低同时具有功耗管理功能，尤其是用于便携式的无线及移动的计算和通信设备中靠电池供电的嵌入式系统更是如此，如需要功耗只有 mW 甚至 μW 级。

嵌入式计算机系统同通用计算机系统（PC 机）相比具有如下特点。

（1）嵌入式系统通常是面向特定应用的嵌入式 CPU，与通用型的最大不同就是嵌入式 CPU 大多工作在为特定用户群设计的系统中，它通常都具有低功耗、体积小、集成度高等特点，能够把通用 CPU 中许多由板卡完成的任务集成在芯片内部，也就是我们常说的片上系统（System On Chip，SOC），从而有利于嵌入式系统设计趋于小型化，移动能力大大增强，跟网络的结合也越来越紧密。

（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后的产物。这一点就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。

（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，力争在同样的硅片面积上实现更高的性能，这样才能在具体应用中对嵌入式微处理器的选择更具有

竞争力。

（4）嵌入式系统和具体应用有机地结合在一起，它的升级换代也是和具体产品同步进行的，因此嵌入式系统产品一旦进入市场，同 PC 机相比，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或存储在存储器芯片或单片机本身中（例如 E^2PROM、Flash 芯片等），而不是存储于磁盘等存储设备中。

（6）嵌入式系统本身不具备 PC 机上的本地开发能力，即使设计完成以后用户通常也是不能对其中的程序功能进行修改的（或者只能执行简单的下载升级功能），它必须要有一整套交叉开发工具和环境才能进行开发。

2.2 嵌入式系统演变与嵌入式操作系统

在硬件方面，早期的嵌入式系统，就是有着奇怪的专用指令以及与主要计算引擎集成在一起的 I/O 设备，后来随着一系列嵌入式微处理器的出现，通过提供一个小巧低价的并可以在大系统中使用的中央处理单元引擎改变了这一情况；它基于被一条总线（本地总线，PC 机中称为系统总线）挂接在一起的不同外设所构建的严格的硬件体系结构，并提供一个可以简化编程的通用目的编程模型。其中的典型代表，如基于 PPC、SuperH(SH)、ARM、MIPS、x86 架构的各种嵌入式微处理器。微处理器技术方面的发展方向和演变不是一成不变的，如基于精简指令集计算机（RISC）指令系统和基于复杂指令集计算机（CISC）指令系统的微处理器、带存储管理单元（MMU）和不带存储管理单元的微处理器（基于成本功耗因数考虑去除了），等等，这些都会在一定程度上影响到对嵌入式操作系统的选择，也是开发人员非常关心的问题。嵌入式微处理器的出现使得在嵌入式系统中使用嵌入式操作系统成为可能。

在软件方面，最初只有一些简单的开发工具可供用以创建和调试软件，各工程项目的运行软件通常以较随意的方式编出来。由于编译器经常有很多错误而且也缺乏像样的调试器，这些软件差不多总是用汇编语言或宏语言来写。这样就导致了一些问题，这种方式写出来的代码，是与硬件相关的，因为其中的许多代码是用汇编语言写的，并且仅能用于专为其编写代码的嵌入式微处理器上，当这些微处理器变得过时的时候，它们使用的这些操作系统也过时了；这时，就只能在新的处理器上重新写一遍代码才能运行。而采用软件构建块和标准库的编程思想直到 20 世纪 70 年代中期才流行起来。当 C 语言出现后，操作系统可以用一种高效的、稳定的和可移植的方式来编写。这种方式对使用和经营有着直接的吸引力，因为当微处理器废弃不用时，人们能保护他们的软件投资。用 C 来编写操作系统（OS）已经成了一种标准直至今天。

在早期，许多嵌入式系统是根本就不需要操作系统的，它们往往是只不过存在一个控制循环而已。这些单任务的设计，对很简单的嵌入式系统来说，这已经足够了。不过，随着嵌入式系统在复杂性上的增长，操作系统就显得重要起来，否则，将使（控制）软件的复杂度变得极不合理，多任务的概念也就应运而生了。同时，渐渐地，更多的嵌入式系统需要被连接到某些网络上，因而需要在嵌入式系统中有网络协议栈支持。显然，如果把网络栈添加到一个仅用控

制循环来实现的简单嵌入式系统中，所带来的复杂程度是可想而知的，这时，操作系统就是人们最想要在嵌入式系统中引入的了。但是，对于嵌入式系统而言，一方面中央处理器（CPU）的处理能力本来就不强，并且在进程或者任务切换时，也就是上下文切换时消耗了一定的处理能力（3%左右）；另一方面嵌入式系统的系统资源（如内存、存储空间）非常少，一般的大型操作系统并不适合在嵌入式系统中应用，或者根本就不能运行。为了适合这种特殊的需求，发展出了所谓的嵌入式操作系统（Embedded Operation System）。

在 20 世纪 80 年代早期，嵌入式操作系统的代表是 Wendon 操作系统，当时花很少的钱就可以获得它的 C 源代码库。它是一个开发套件，人们可以通过选择一些组件来构建自己的操作系统，比如，可以从库中的多个可行选项列表中精选出一种任务调度算法和内存管理方案。

许多用于嵌入式系统的商业操作系统在 20 世纪 80 年代获得了蓬勃发展。现在已经有很多的商业性操作系统可供选择，出现了许多互相竞争的产品，如 Vx Works、pSOS、Neculeus、Windows CE、Symbian 等。当然，从严格意义上说，上面这些操作系统的应用领域的重点还是有区别的，如 Vx Works 多用于工业控制、实时控制、通信传输设备等领域。而 Windows CE 和 Symbian，PalmOS 等多用来开发个人移动电子设备，它们往往都具备有良好的用户界面。

作为可供候选的嵌入式操作系统，除了上面提到的商业性操作系统以外，也有许多免费的，如 Linux、μC/OS-Ⅱ等。人们通常认为，Linux 往往是基于 PC 机的，因此，对 Linux 的一个观点是，它由于太大而不宜用作嵌入式操作系统。这种观点往往是从面向 PC 机的 Linux 典型发行版巨大的磁盘安装空间得来的，如 RedHat、Mandrake 等 Linux 商业发行版本。在这些商业发行版本中，有很多根本用不上的功能特征，甚至超过了一个真正 PC 用户的需求，它们同样也不会在嵌入式 Linux 系统中使用；典型的商业 Linux 发行版如 RedHat9.0 和 Mandrake10.0 需要约 2.0GB 的空间；2.4.20 版本的 Linux 内核映像大概只有 200～800KB 大小；典型的嵌入式 Linux 应用需要 400KB～8MB 的空间；VxWorks 微内核只有约 10KB 左右，VxWorks+fs+tcp/ip+tms 编译后的映像大小为 400KB～2MB；μC/OS-Ⅱ+LwIP+MAC 层 driver+App 只有约 185KB 大小。

实际上，Linux 内核在最初设计时，就已经考虑到了在嵌入式系统中的运用，Linus 本人就说过他对嵌入式系统有特别的偏好。在下面的一节将介绍目前应用比较多的 Linux、VxWorks、μC/OS-Ⅱ等嵌入式操作系统。

2.3 嵌入式操作系统

2.3.1 风河 VxWorks 实时操作系统

VxWorks 操作系统是美国 WindRiver（风河）公司推出的一种嵌入式实时操作系统。自 20 世纪 80 年代问世以来，以其不断推出的升级版本、高性能内核（wind 微内核）以及友好的用户开发环境（Tornado），在嵌入式实时操作系统领域逐渐占据一席之地，在国内外拥有很多用户。尤其是因已成功应用于火星探测车和爱国者导弹等高科技产品而闻名。自 1996

年登陆中国以来，越来越多地占据了中国嵌入式实时应用市场。

2.3.1.1 VxWorks 实时微内核

实时操作系统是整个嵌入式系统中软件的基础，Vx Works 实时操作系统包括 wind 微内核（实时 kernel）及用户特定的板级支持包（Board Support Packet，BSP），它介于硬件系统及上层应用软件之间，为所有的上层应用软件提供一个多任务的实时操作系统环境及一整套系统应用程序接口（API），如图 2.1 所示，由于提供了对硬件系统的高度抽象，上层所有的软件开发都与硬件细节无关，从而大大提高了软件的可移植性，加快了产品的开发速度。

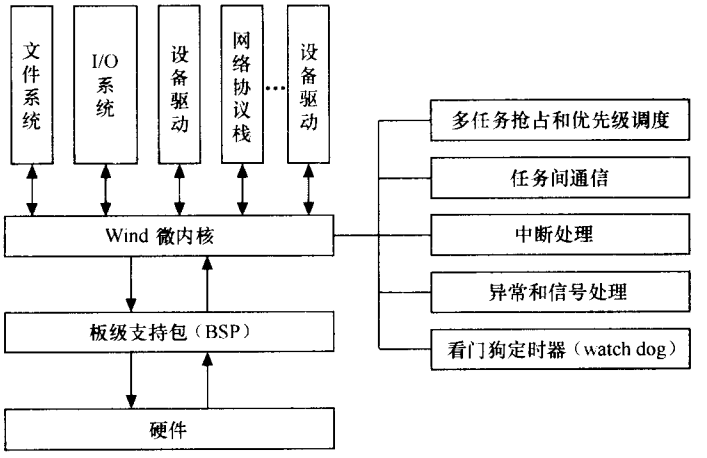

图 2.1 VxWorks 的 Wind 微内核结构

VxWorks 操作系统是一种微内核的结构，它的内核称为 wind 微内核，wind 微内核采取单一实地址空间模式，所有任务在同一地址空间运行，不区分核心态和用户态，这一点，不同于 Linux 操作系统和微软的 Windows 操作系统。其特点如下：

- 基于优先级的抢占式调度和时间片轮转调度；
- 使用优先级继承协议防止优先级翻转，以确保系统的实时性能；
- 任务切换更快，不需要进行虚拟地址空间切换；
- 任务间通信更方便，可以直接共享变量。

2.3.1.2 风河公司集成开发环境 Tornado

Tornado 是风河公司用于在 VxWorks 上开发实时和嵌入式应用的集成开发环境，它的主要组件包括：

- VxWorks 实时操作系统和嵌入式应用；
- 用于测试、计时、调试的开发工具；
- 用于交叉编译的工具链（使用 GCC 工具链）；
- 丰富的网络支持，包括进程间通信、远程文件访问、远程命令、函数执行、通过网络启动，等等。

目前集成开发环境 Tornado 支持的平台有 Solaris2.51、2.6、2.7；Windows95、98 和 NT；

还有 HP UNIX10 主机。它的交叉编译器可以使用 GNU 的工具链也可以使用许可的 Debian。图 2.2 是典型的 Tornado 交叉开发环境。

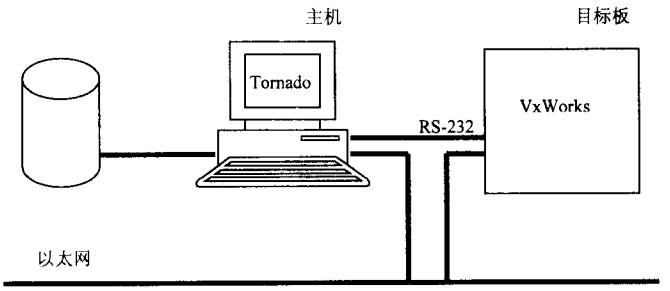

图 2.2　Tornado 交叉开发环境

2.3.1.3　基于 VxWorks 的嵌入式系统开发流程

在介绍 VxWorks 的开发流程之前，需要说明一个比较重要的知识点：板级支持包（BSP），VxWorks 操作系统的一个特点就是它可以使应用程序编码在很大程度上与目标板的硬件和结构无关。这种便利功能是由于 VxWorks 操作系统的模块化设计，它把所有特定的硬件功能都集成在板级支持包（BSP）的库中。BSP 库为所有的硬件功能板提供了一种相同的软件界面。它包括硬件初始化，中断的产生和处理，硬件时钟和计时器管理，本地和总线存储空间的规划，存储容量管理等功能。因此 BSP 开发是整个开发流程中最重要的部分，也是比较难的一部分，开发过程中通常还会用到 ICE 工具（如果没有，就只能使用一些原始的调试手段）。值得庆幸的是，为了方便用户的开发，风河公司提供了一系列广泛的板级支持包（BSP）。开发人员需要做的工作并不是一切从头做起，而是选择一个与目标板设计最相似的开发板的标准 BSP，再根据目标板的具体硬件设计情况来修改出适合目标板运行的板级支持包。

基于 VxWorks 的嵌入式系统开发流程如下：

- 设计开发目标板硬件；
- 建立交叉开发环境；
- BSP 开发；
- 根据已开发的 BSP 库建立可启动的 VxWorks 映像；
- 目标板特殊硬件和外设驱动程序开发；
- 用户应用程序开发。

按照上面的开发流程完成嵌入式系统的开发后，就要考虑如何部署以及工程应用的具体环节。关于 VxWorks 嵌入式实时系统的开发不是本书的重点。

2.3.2　μC/OS- II 实时操作系统

μC/OS- II 是一个简单高效的嵌入式实时操作系统内核，被应用到各种嵌入式系统中，目前它支持 ARM、PowerPC、MIPS、x86 等众多体系结构，它的源代码是公开的，可以从 www.uCos-ii.com 网站上获得全部源码及其在各种体系结构上的移植范例。μC/OS- II 具有如下特点。

（1）公开源代码

μC/OS-Ⅱ内核的源代码只有几千行，组织得很有序，注解非常详尽，对于想了解操作系统实现机制的人来说，将是非常好的切入点。

（2）可移植性

绝大部分 μC/OS-Ⅱ的源码是用移植性很强的 ANSIC 写的。与微处理器硬件相关的那部分是用汇编语言写的。汇编语言写的部分已经压到最低限度，便于 μC/OS-Ⅱ移植到其他嵌入式微处理器上。μC/OS-Ⅱ可以在绝大多数的 8 位、16 位、32 位以至 64 位微处理器、微控制器、数字信号处理器（DSP）上运行。

（3）可固化

μC/OS-Ⅱ是为嵌入式应用而设计的，这就意味着，只要具备合适的系列软件（C 编译、连接、下载/固化），就可以将 μC/OS-Ⅱ嵌入到产品中成为产品的一部分。

（4）可裁剪

可以只使用 μC/OS-Ⅱ中应用程序需要的那些系统服务。也就是说某产品可以只使用很少的几个 μC/OS-Ⅱ调用，而另一个产品则使用了几乎所有 μC/OS-Ⅱ的功能。这样可以减少产品中的 μC/OS-Ⅱ所需的存储空间（不管是 RAM 还是 ROM 空间）。

（5）可抢占性（Preemptive）

μC/OS-Ⅱ是可抢占型的实时内核，即 μC/OS-Ⅱ总是在运行就绪（Ready）条件下优先级最高的任务。大多数商业内核也是可抢占型的，μC/OS-Ⅱ在实时性能上和它们类似。

（6）多任务

μC/OS-Ⅱ可以管理 64 个任务。在版本 2.52 中，需保留 8 个给 μC/OS-Ⅱ系统任务，应用程序最多可以有 56 个任务。赋予每个任务的优先级必须是不同的，这意味着 μC/OS-Ⅱ不支持时间片轮转调度（Round-robin Scheduling）。

（7）可确定性

绝大部分 μC/OS-Ⅱ的函数调用与服务的执行时间具有其可确定性。也就是说，用户总是能知道 μC/OS-Ⅱ的函数调用与服务执行了多长时间。

（8）任务栈

每个任务都有自己单独的栈，μC/OS-Ⅱ允许每个任务有不同的栈空间，以便压低应用程序对 RAM 的需求。使用 μC/OS-Ⅱ的栈空间校验函数，可以确定每个任务到底需要多少栈空间。

（9）系统服务

μC/OS-Ⅱ提供很多系统服务，例如信号量、互斥性信号量、事件标志、消息邮箱、消息队列、块大小固定的内存的申请与释放及时间管理函数等。

（10）中断管理

中断可以使正在执行的任务暂时挂起。如果优先级更高的任务被该中断唤醒，则高优先级的任务在中断嵌套全部退出后立即执行，中断嵌套层数可达 255 层。

（11）稳定性与可靠性

μC/OS-Ⅱ是基于 μC/OS 的，μC/OS 自 1992 年以来已经有好几百个商业应用。μC/OS-Ⅱ与 μC/OS 的内核是一样的，只不过提供了更多的功能。μC/OS-Ⅱ的每一种功能、每一个函数及每一行代码都经过了考验与测试。