Broadview®
www.broadview.com.cn

嵌入式操作系统设计与实现

全面解读
国内原创嵌入式操作系统
开发全过程

蓝枫叶 编著

自己动手写出来的嵌入式操作系统
——"Hello China"全面升级！

電子工業出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
http://www.phei.com.cn

内 容 简 介

本书是《自己动手写嵌入式操作系统》的全面升级版，作者对自己亲自在 PC 上开发的嵌入式操作系统的“Hello China”进行全面的升级和改进，书中详细地叙述自己动手写嵌入式操作系统所需的各方面知识，如加载和初始化、Shell、线程的实现、内存管理机制、互斥和同步机制及中断和定时机制的实现，以及设备驱动程序管理框架和应用编程接口等。

本书中的每一个字都是作者辛勤劳动的结晶，本书所讲到的嵌入式操作系统“Hello China”更是作者亲自实践的成果，因此本书具有极高的实用性，对于嵌入式软件开发工程师、应用软件开发工程师均有很高的参考价值，对于大中院校的学生学习和理解操作系统及计算机原理也会有许多启发，对于系统软件爱好者更是一本不可多得的好书，因为它会使您得到一个完整而细致的实践过程。

图书在版编目（CIP）数据

嵌入式操作系统：设计与实现 / 蓝枫叶编著．—北京：电子工业出版社，2008.5
ISBN 978-7-121-06076-2

I．嵌… II．蓝… III．实时操作系统—基本知识 IV．TP316.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2008）第 023639 号

责任编辑：孙学瑛
印　　刷：北京市天竺颖华印刷厂
装　　订：三河市金马印装有限公司
出版发行：电子工业出版社
　　北京市海淀区万寿路 173 信箱　邮编 100036
开　　本：787×980　1/16　印张：34.5　字数：497 千字
印　　次：2008 年 5 月第 1 次印刷
印　　数：4000 册　定价：69.80 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：（010）88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线：（010）88258888。

第二版前言

本书的前版——《自己动手写嵌入式操作系统》，是基于 Hello China V1.0 的实现完成的，而本书，则是基于 Hello China V1.5 版本完成的。相对于 V1.0 版本，V1.5 版本做了如下的改进或增强：

（1）对于 V1.0 的核心线程调度程序做了修改，修改为严格基于优先级的调度方式，这样符合嵌入式系统的应用。

（2）对于 V1.0 的线程切换方式做了改进，V1.5 的线程切换方式更加简洁、高效。

（3）对核心线程的调度时机做了增强。在 V1.5 的实现中，在任何可能的时机，都进行一个线程重调度操作，以最大可能地缩短高优先级线程的等待时间。而在 V1.0 的实现中，则只是在系统时钟中断后才会调度核心线程。

（4）对系统同步对象（如事件对象、MUTEX 对象等）的实现做了增强，增加了安全删除、超时等待、递归等待、状态探测等功能。

（5）增加了核心线程的 CPU 利用率统计功能。

（6）增加了系统回调机制，使得 V1.5 版本可很容易支持浮点运算。

（7）实现了一个基于 COM 接口的通信程序，可模拟一个超级终端。

（8）对一些系统核心对象的实现做了加强，使得可支持多 CPU 构架（SMP）。

（9）对代码的组织结构做了完善，并优化了注释。

总之，如果说 V1.0 版本仅仅是一个嵌入式操作系统的 demo 的话，那么 V1.5 版本就

是一个可实际使用的嵌入式操作系统内核了。作者是从事电信网络工作的，曾经用 V1.5 附带的超级终端小程序，完成了一台高端路由器的配置☺。

本书就是基于 V1.5 的实现完成的，相对本书的第一版，本书除了对 V1.5 的新功能做了详细的描述外，还在下列地方做了改进：

（1）更改了原书代码中的一些纰漏；

（2）源代码仍然免费向大家发放，请大家从 www.broadview.com.cn 直接下载得到。

很多第一版的读者，给作者反馈了宝贵的修改意见，在此表示感谢。同时再次感谢电子工业出版社的同仁们给予的支持和帮助。作者特地在 CSDN 上申请了一个 blog，本书读者或其他对 Hello China 感兴趣的朋友，可登录上去探讨技术问题。该 blog 的地址是：http://blog.csdn.net/hellochina15/。

另，与第一版一样，本书所得稿费的一半，仍将用于支援贫困山区的失学儿童。

作　者

2007 年 12 月　于杭州

前　言

眨眼之间，在IT行业工作已经满6年了。在这6年当中，虽然经常更换工作内容，但一直局限于通信行业，且一直从事通信产品的开发、测试和维护工作，因此可以说，对嵌入式领域，尤其是通信行业，也算有一定的理解了。从感情上说，对于这个行业，笔者本人是由衷地热爱和引以为豪，尤其是这几年，国内通信产业发展迅速，至少在本行业内，已经达到了世界先进水平，每当看到在项目竞争中，国外的设备提供商纷纷落马，代表中国的本土企业获得用户认可的时候，心中的自豪更加明显，不但为企业，更为伟大的祖国取得的进步而自豪。

但有时候仔细回味一下，不禁又有一种失落和遗憾，几乎所有通信产品涉及的核心部件和核心技术，大都是国外厂家提供的，尤其是提供最核心功能的交换芯片、网络处理器以及提供设备底层管理的嵌入式操作系统。这样，设备制造商完成的工作实际与组装工差不多，仅仅是把这些核心的部件组装到印制板上，然后再在购买的操作系统上编写应用程序实现特定的设备功能。这种说法虽然有一定的片面性，但却不无道理。我个人是做软件的，对于硬件部件，平时只关注其编程接口，即只要知道这个部件可完成什么功能，如何填写其寄存器，如何组织内部表结构就可以了，对于其实现没有精力关注，因此究竟是实现难度太大，还是商业模式不允许商家去实现，从来不敢妄下断言。但对于软件，接触得相对较多，尤其是操作系统，窃以为不是太难实现的原因导致这种局面，而是商业代价、应用程序缺少等原因导致的。为了验证这种想法，便有了编写一个操作系统的念头，当时是2004年下半年，正处于一个项目的间歇期，有一些空余时间，便开始了这个实践。

当时的想法是购买一块开发印制板，然后在这个印制板上开发一个简单的嵌入式操作系统，把板子驱动起来，并在这个操作系统上实现一个简单的串口通信程序，能够与PC通过串口通信，任务就算完成了。后来在购买印制板的时候，由于质量原因，与卖板

子的人吵了起来，一气之下，就放弃了买板子的念头。以前曾经在网上看到过一篇文章，总体的观点就是个人计算机就是一个很好的嵌入式开发环境。这个观点我一直是认同的，因此当时就想能否在个人计算机上开发这个操作系统呢？而且这样做开发出来的结果可以很容易地被不同的人试验，因为只要有一台 PC 就足够了。业界一些很流行的嵌入式操作系统都提供了个人计算机的模拟版本，这更坚定了我在 PC 上开发的想法。

后来证明，在 PC 上开发嵌入式操作系统是可行的，而且作为一个通用的硬件平台，PC 比嵌入式印制板提供了更广泛的扩展性和硬件部件，这样开发的操作系统可以有机会接触到更多的硬件设备，比如监视器、鼠标、键盘等，而这些在印制板上往往是没有的。最初开发的时候，选择的编译环境是 NASM 和 GCC，NASM 完成汇编语言部分的编译和链接（主要是引导程序和初始化程序），GCC 完成操作系统核心功能的编译链接。后来发现，GCC 虽然功能强大，但特别不好用（可能是以前很少使用的缘故吧），界面不友好。于是改变了编译环境，采用 Visual C++完成核心功能的编译链接，这主要是个人对 VC 比较熟悉，且 VC 提供了函数联想等贴近程序员的功能，使得代码编写起来非常方便。但 VC 产生的最终目标模块都是 PE 格式的，而在操作系统编写初期，还不具备模块加载等基础功能，因此无法直接处理 PE 文件，于是又写了一个工具软件，对编译后的二进制文件进行处理。就这样，NASM、VC 和自行编写的一个处理软件构成了整个开发环境。虽然不专业，但很实用。

这个操作系统都是在业余时间开发的，而大多数时候工作都比较忙，因此进展缓慢。直到 2006 年年初，才把当初规划的所有功能开发完毕。这一年多的开发过程十分辛苦，由于缺乏资料、工作项目紧张等原因，曾几度想放弃，最终还是坚持了下来。在开发的过程中，为了确保质量，对每个功能模块都做了很详细的文档描述（类似 LLD），然后再进行仔细的评估，先从逻辑上想清楚，再开始编写代码。这样进度虽然缓慢，但效果非常好，几乎每个模块都是一次成功的。这些描述文档经过梳理、补充，并添加了更详细的描述和示意图，就构成了本书。

开发这个操作系统的初衷是为了验证一下操作系统是否真的很难开发，以致于国人无法完成这项工作（或许在下孤陋寡闻，不知道国内有许多成功的操作系统，若如此，请各位读友见谅）。但试验结果是，虽然开发操作系统有一定的难度，但只要有所投入，不断坚持，不断积累，一定能够收到良好的效果。在下十分愚钝，工作中遇到的一些问题，聪明的同事很短时间就可找到解决方案，而在下却需要更长的时间。这样愚钝的情况下，尚且能够做出一个虽然简单，但五脏俱全的操作系统，何况国内如车载斗量之聪明人士乎！最初的时候，为这个试验项目起了一个代号，叫做“up16M”，因为最初设计

时，这个操作系统的核心是驻留在 32 位地址空间的高 16M 地址处的。后来更改为“Hello China”，这个名称的用意之一，是对祖国在经济上取得的巨大成绩表示祝贺，另外一个用意是希望国内 IT 核心技术的发展能够同祖国的进步一样有所突破，真正走出中国，走向世界，让世界人民都说一声“Hello，China！”

出版这本书的目的，是希望能够与业界的同行朋友分享自己的开发经验，请业界朋友能够指点一下，提出批评建议，以让自己能够持续改进这个操作系统。作者水平有限，不论是在操作系统的设计当中，还是在本书的写作当中，定然存在一些不当之处，或错误理解之处，还请读者多多谅解，并能够以一种“治病救人”的态度指出这些不当之处，在下将十分感激。另外，在电子出版社郭立主任、孙学瑛老师的大力支持和帮助下，本书才能够得以出版，在此表示衷心的感谢，并对电子工业出版社表示感谢和致敬。在我的印象中，电子工业出版社出版的图书，总是十分专业、细致，很多专业方面的知识，就是从电子工业出版社出版的图书中获取的。

虽然本书的主要内容是对作者自行编写的一个操作系统实现细节的描述，但其中也涉及了大量的硬件知识，比如 CPU、PCI 总线、计算机外设等，对于 CPU 的介绍，除了 Intel 公司的 32 位 CPU 外，还对嵌入式领域广泛应用的 Power PC 的一些机制进行了描述。因此，本书的内容既包含作者的经验描述，也包括一些通用硬件、通用操作系统概念以及一些基本的嵌入式开发概念的叙述，可以适应多层次、多领域的读者。比如，嵌入式软件开发工程师可以从中了解到一些嵌入式开发和嵌入式操作系统的概念；应用软件工程师也可以通过了解硬件机制、操作系统实现原理，以对应用软件所在的操作系统进行更深入的理解，因为这些操作系统的概念都是相通的；大中专学生也可以通过实践的方式从本书中了解到很多操作系统核心概念，给操作系统和计算机原理的学习带来一定的帮助；而系统软件爱好者也可以通过阅读本书了解一个完整的实践过程。

再简单说明一下为什么把这个在 PC 上开发的操作系统定位为“嵌入式操作系统”。对于嵌入式操作系统，至今尚没有一个严格统一的定义来描述，但有一些共同的特点已经被业界认同，比如可裁减性、占用资源少、能够支持广泛的 CPU、效率高等，在这些特点中，除了“支持广泛的 CPU”这一点外，Hello China 都应该符合这些特点（书中提供了一些测试数据和测试案例可做说明）。对于多 CPU 的支持，这个操作系统的核心功能都是采用 C 语言编写的，而且在编写的时候也充分考虑了不同 CPU 之间的移植、多 CPU（SMP）的情况，因此可移植性应该不是问题。另外，个人认为，上述特性不能真正反映嵌入式操作系统的本质，嵌入式操作系统的本质应该是“跟应用一起链接”，即嵌入式操作系统跟嵌入式应用代码往往链接成同一个二进制模块，而不像通用操作系统那

样，操作系统模块与应用程序完全分离。Hello China 具备这个特性，即如果在 Hello China 的基础上开发应用程序，那么必须把应用程序的代码和 Hello China 的代码放在同一个工程中一起编译、链接。因此，作者把这个在 PC 上开发的操作系统定位为“嵌入式操作系统”，以后做进一步开发、完善的时候，也会遵循这个标准进行。

最后说明一下，销售本书所获得的稿费的一半，将捐献给西部贫困地区的失学儿童，为这些孩子能够享受到基础教育贡献微薄的力量。

作者

2006/08/04

目　录

第1章

概　述

1.1 嵌入式系统概述

当今时代，人们的生活越来越依赖基于计算机技术和数据通信技术的电子产品，因此，有人说，当今时代是电子产品时代；也有人说，当今时代是互联网时代；还有人说，当今时代是e时代。这些都充分说明了电子产品和互联网技术给人们的生活带来的改变。但这些说法都有些偏颇，一个更接近本质的说法是“当今时代，是嵌入式系统时代”。

嵌入式系统可以简单地理解为“为完成一项功能而开发的、由具有特定功能的硬件和软件组成的一个应用产品或系统”。嵌入式系统在我们的生活中到处可见，例如，手机、PDA、家里的数字电视机、全自动洗衣机等，都是嵌入式系统。当然，在我们日常生活接触不到的领域中，嵌入式系统也被广泛应用。例如，应用于通信网络中的电话交换机、光传输分叉/复用设备、互联网路由器等，都是嵌入式系统的实例。这些实例都有一个共同的特点，那就是“具备特定的用途”。比如，手机只能用于完成移动通信（移动通话、移动短信息等），而不具备数字电视的功能，同样地，数字电视只具备数字电视信号接收、解码和播放功能，以及相关的一些简单附加功能，而不具备洗衣机的功能，等等。因此，嵌入式系统一个最基本的特点，就是“功能专一”。

一般情况下，嵌入式系统是由嵌入式硬件和嵌入式软件两部分组成的。嵌入式硬件，是由完成嵌入式系统功能所需要的机械装置、数字芯片、光/电转换装置等组成，嵌入式硬件决定了嵌入式系统的功能集合，即嵌入式系统的最终功能。嵌入式软件，则是附加在嵌入式硬件之上的，驱动嵌入式硬件完成特定功能的逻辑指令。嵌入式软件可以非常简单，比如，在一些简单的自动控制洗衣机中，软件部分可能只有数百行汇编代码，系统功能基本上由硬件完成，软件仅仅起到辅助功能。嵌入式软件也可以非常复杂，比如，手机、大型通信设备等嵌入式系统，软件部分往往由数十万行，甚至数百万行代码组成，这些系统的大部分功能都是由软件逻辑实现的。通过分析这些嵌入式系统，可以发现一个规律，那就是嵌入式软件所占比重越高的嵌入式系统，其灵活性越好，功能也越强大，

这很容易理解，因为软件比重大的系统中，大部分功能是由软件完成的，通过叠加更多的软件，就可以实现更多的功能。相反，若一种嵌入式系统由硬件占主导地位，则在这种系统上增加新的功能或配置将非常不方便，因为需要更换硬件。

嵌入式系统的软件可以进一步分为嵌入式操作系统和嵌入式应用软件。其中，嵌入式操作系统是系统软件，是直接接触硬件的一层软件，嵌入式操作系统为应用软件提供了一个统一的接口，屏蔽了不同硬件之间的差别，使得应用软件的开发和调试变得十分方便。

嵌入式应用软件则是真正完成系统功能的软件。当然，这两种软件并不是所有嵌入式系统都必需的，在一些简单的嵌入式系统中，比如在微波炉、自动控制洗衣机等嵌入式系统中，软件功能十分简单，这样就没有必要采用嵌入式操作系统。但在一些复杂的嵌入式系统中，比如在互联网路由器中，嵌入式操作系统则是必不可少的部件，因为这些嵌入式系统的应用软件十分复杂，若不采用嵌入式操作系统来进行支撑，其开发工作将十分困难，甚至无法完成。

总之，嵌入式系统就是由嵌入式硬件和嵌入式软件组成的、具备特定功能的计算机系统，其中，嵌入式软件又可进一步分为嵌入式操作系统和嵌入式应用软件，如图 1-1 所示。

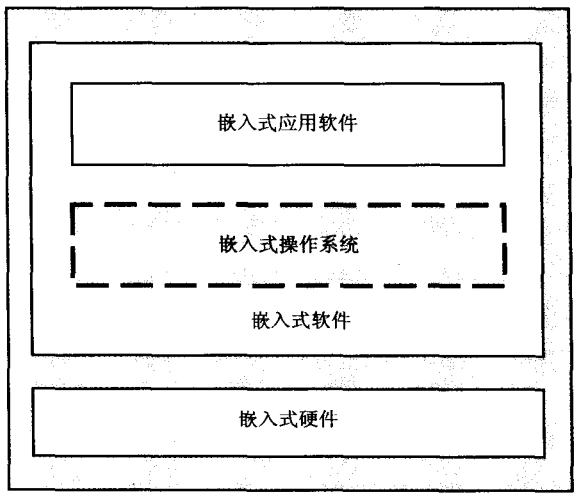

图 1-1 嵌入式系统软、硬件之间的关系

嵌入式操作系统是整个嵌入式软件的灵魂，起到承上启下（连接嵌入式硬件和嵌入式应用软件）的作用，而且往往也是嵌入式软件中最复杂的部分。虽然复杂，嵌入式操作系统的功能接口却相对标准化和统一，功能差异很大的嵌入式系统，往往可以采用相

同的嵌入式操作系统来进行设计，比如，一台复杂的数字控制机床的控制系统与一架军用飞机的控制系统，可能采用了相同的嵌入式操作系统，仅仅是具体的应用软件不同。因此，嵌入式操作系统可以被理解为通用软件，不同的嵌入式操作系统，除了性能上的差异和实现细节上的差异之外，功能部分往往是相同的。在本书中，我们介绍一个由笔者亲自开发的嵌入式操作系统的功能及其实现细节。

1.2　嵌入式操作系统概述

从上面的描述中我们知道，嵌入式操作系统是嵌入式系统中的软件部分，且是软件部分的核心内容。嵌入式操作系统在本质上也是一个操作系统，其一些概念与通用计算机操作系统是一致的，但由于应用环境的不同，嵌入式操作系统与通用操作系统有一些区别，且嵌入式操作系统本身具备一些通用操作系统所不具备的特性。在本节中，我们对嵌入式操作系统本身具备的一些特点，以及与通用操作系统的区别进行简单描述。

1.2.1　嵌入式操作系统的特点

一个典型的嵌入式操作系统应该具备下列特点。

1．可裁剪性

可裁剪性是嵌入式操作系统最大的特点，因为嵌入式操作系统的目标硬件配置差别很大，有的硬件配置非常高档，有的却因为成本原因，硬件配置十分紧凑，嵌入式操作系统必须能够适应不同的硬件配置环境，具备较好的可裁剪性。在一些配置高、功能要求多的情况下，嵌入式操作系统可以通过加载更多的模块来满足这种需求；而在一些配置相对较低、功能单一的情况下，嵌入式操作系统必须能够通过裁剪的方式，把一些不相关的模块裁剪掉，只保留相关的功能模块。为了实现可裁剪，在编写嵌入式操作系统的时候，就需要充分考虑，进行仔细规划，把整个操作系统的功能进行细致的划分，每个功能模块尽量以独立模块的形式来实现。

对于裁剪的具体实现，可通过两种方式。一种方式是把整个操作系统功能分割成不同的功能模块，进行独立编译，形成独立的二进制可加载映像，这样就可以根据应用系统的需要，通过加载或卸载不同的模块来实现裁剪。另外一种方式，是通过宏定义开关的方式来实现裁剪，针对每个功能模块，定义一个编译开关（#define）来进行标志。若应用系统需要该模块，则在编译的时候，定义该标志，否则取消该标志，这样就可以选择需要的操作系统核心代码，与应用代码一起联编，实现可裁剪的目的。其中，第一种方式是二进制级的可裁剪方式，对应用程序更加透明，且无需公开操作系统的源代码，第二种方式则需要应用程序详细了解操作系统的源代码组织。