HZ BOOKS
华章IT

[PACKT] PUBLISHING

Linux/Unix
技术丛书

嵌入式Linux编程

[英] 克里斯·西蒙兹 (Chris Simmonds) 著 王春雷 梁洪亮 朱华 译

Mastering Embedded Linux Programming

- Yocto项目架构师Richard Purdie作序推荐，Amazon广泛好评
- 遍历整个嵌入式Linux产品的周期，全面、系统介绍嵌入式Linux的编程技术及最佳实践

机械工业出版社
China Machine Press

Linux/Unix
技术丛书

嵌入式Linux编程

Mastering Embedded Linux Programming

[英] 克里斯·西蒙兹 (Chris Simmonds) 著 王春雷 梁洪亮 朱华涛

机械工业出版社
China Machine Press

图书在版编目（CIP）数据

嵌入式 Linux 编程 /（英）克里斯·西蒙兹（Chris Simmonds）著；王春雷，梁洪亮，朱华译 . —北京：机械工业出版社，2017.3
（Linux/Unix 技术丛书）
书名原文：Mastering Embedded Linux Programming

ISBN 978-7-111-56128-6

I. 嵌… II. ①克… ②王… ③梁… ④朱… III. Linux 操作系统－程序设计 IV. TP316.85

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2017）第 035017 号

本书版权登记号：图字：01-2016-1892

嵌入式 Linux 编程

出版发行：机械工业出版社（北京市西城区百万庄大街 22 号　邮政编码：100037）
责任编辑：何欣阳　　责任校对：李秋荣
印　　刷：北京市荣盛彩色印刷有限公司　　版　　次：2017 年 4 月第 1 版第 1 次印刷
开　　本：186mm×240mm　1/16　　印　　张：18
书　　号：ISBN 978-7-111-56128-6　　定　　价：79.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换
客服热线：（010）88379426　88361066　　投稿热线：（010）88379604
购书热线：（010）68326294　88379649　68995259　　读者信箱：hzit@hzbook.com

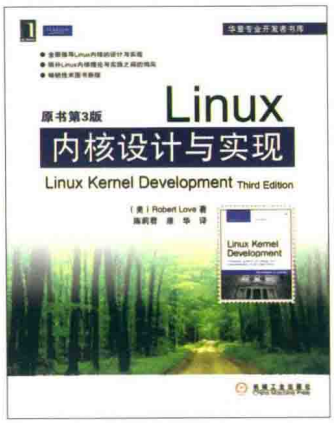
作者简介

克里斯·西蒙兹（Chris Simmonds）

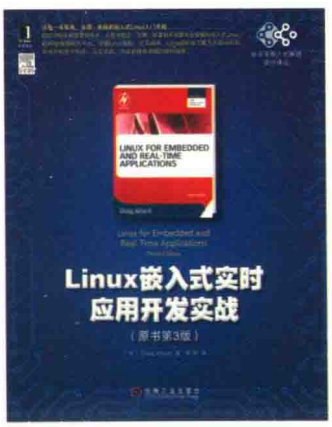
软件咨询顾问、培训师。自20世纪90年代末以来，他一直在嵌入式系统中使用Linux，从事过许多有趣的项目，包括立体相机、智能称重秤、各种机顶盒和家用路由器，甚至大型的步行机器人。

他经常主持各种开源和嵌入式会议，包括Embedded Linux Conference、Embedded World以及Android Builders' Summit。而且他还一直在指导嵌入式Linux和嵌入式Android方面的培训课程和研讨会。

延伸阅读



ISBN 978-7-111-33829-1
定价：69.00元



ISBN 978-7-111-48857-6
定价：59.00元

The Translator's Words 译 者 序

嵌入式 Linux 是以 Linux 为基础的嵌入式操作系统，它继承了 Internet 上海量的开放源代码资源，有许多公开的代码可以参考和移植，具有软件移植容易，代码开放，实时性、稳定性、安全性高，应用软件支持广泛，产品开发周期短，新产品上市迅速等优点，已经在移动电话、媒体播放器、消费性电子产品以及航空航天等领域中得到广泛应用。

嵌入式 Linux 具有其他嵌入式系统所不具备的优势。首先，Linux 是开放源代码的，不存在黑箱技术，遍布全球的众多 Linux 开发者提供强大技术支持；其次，Linux 的内核小、效率高，内核的更新速度很快；再次，Linux 是一个跨平台的系统，适应于多种 CPU 和硬件平台，而且性能稳定，可高度定制，开发和使用非常方便；最后，Linux 内核对于 TCP/IP 协议簇具有完备的支持，扩展性强，非常适合于网络设备的开发和应用。

本书遵循典型的嵌入式 Linux 项目生命周期过程组织，全面地介绍了嵌入式 Linux 的编程技术。本书作者是一名具有多年嵌入式 Linux 开发经验的咨询顾问和培训师。本书详细描述了如何使用免费的开放源码项目构建一个健壮、可靠、高效的嵌入式 Linux 系统，并且使用实例来说明最佳实践。本书前 6 章介绍如何建立项目，组织 Linux 系统，以及选择合适的 Linux 构建系统。接着讨论系统架构和设计选择，包括闪存、设备驱动程序和 init 系统，以及如何利用已构建的嵌入式平台编写应用程序。最后，介绍如何调试和优化，以及如何为实时应用程序配置 Linux。

本书由王春雷组织翻译，梁洪亮、朱华等参与了本书的翻译、校对等工作。译者在翻译的过程中，得到了机械工业出版社编辑的支持和帮助，在此深表感谢。限于时间以及译者水平和经验的不足，译文中难免存在一些不当之处，恳请读者提出宝贵的意见。

译 者

推荐序 *Foreword*

Linux 是一个非常灵活和强大的操作系统，而我认为，我们还没有真正看到它在嵌入式世界中得到充分利用。一个可能的原因是，Linux 有着众多不同的方面，并且它的学习曲线可能十分陡峭和耗时。

正如我自己在过去十年中所做的，你有可能描绘出自己通向嵌入式 Linux 世界的方式，但是我很高兴地看到像克里斯这样的人士，将许多有用的主题聚焦在一起，汇总为本书，给读者提供了一个很好的学习嵌入式 Linux 的平台。当我开始学习的时候，当然希望可以将本书作为指导！

很显然，我对于 Yocto 项目有着自己的个人见解，这也是我的主要贡献并且试图使得嵌入式 Linux 世界有所不同。它的核心目标之一是尝试并且使得人们在构建嵌入式 Linux 系统时，事情能变得更加简单。我们已经取得了一些成功，但是还有一些领域仍然需要继续探索。我们不断尝试简化学习的门槛从而让更多的人参与进来，使技术更容易获得和采用。

在写这本书时，克里斯也在为同样的目标努力。我希望你喜欢这本书，喜欢 Linux，最终我们将会看到你成为这个充满活力的开源社区的一部分，该社区也同样包含着你即将学习的众多元素。

Richard Purdie

Yocto 项目架构师，Linux 基金会会员

About the Reviewers 审校者简介

Robert Berger 自 1993 年以来，已经在具有或不具有硬实时需求的嵌入式系统软件设计和开发领域积累了实践和管理经验。自 21 世纪初以来，他一直在桌面和服务器级机器上使用 GNU/Linux，但是主要用于嵌入式实践（汽车、工业控制、机器人、电信、消费电子等等）。作为专家和演讲者，他定期参加国际活动，如嵌入式世界（Embedded World）、嵌入式软件工程会议（Embedded Software Engineering Congress）、嵌入式系统会议（Embedded Systems Conference）、以及嵌入式 Linux 会议（Embedded Linux Conference）。他在世界各地主要从事培训和咨询（德语或英语）工作。Robert 致力于免费开源软件领域，他的专业范围从最小的实时系统（FreeRTOS）到具有多处理器 / 内核和嵌入式 GNU/Linux（用户 / 内核空间、设备驱动程序、硬件接口、调试、多核和 Yocto 项目）的装置。他是 Reliable Embedded Systems 的首席执行官和嵌入式软件专家，该公司位于奥地利的圣巴巴拉。同时，他也是一位环球旅行家，在没有旅行时，他与家人住在希腊雅典。通过他的网站（http://www.Reliable-EmbeddedSystems.com）可以随时联系他。

他还审校过 Rudolf J. Streif 所著的《Embedded Linux Systems with the Yocto Project》(Prentice Hall Open Source Software Development Series）一书。

Tim Bird 是索尼移动通信的高级软件工程师，他帮助索尼改进 Linux 内核以用于索尼的产品中。他还是 Linux 基金会 CE 工作组体系架构分组的主席。他已经从事 Linux 工作 20 多年。他帮助成立了两个不同的嵌入式 Linux 行业协会，是嵌入式 Linux 会议（Embedded Linux Conference）的创建者，并且时至今日仍然在主持着该会议。在嵌入式 Linux 职业生涯的早期，Tim 合著了《Using Caldera OpenLinux》一书。

Mathieu Deschamps 是 ScourGE（www.scourge.fr）的创建者，为客户提供开源软件 / 硬件创新服务。他们是电信、移动通信、工业过程和决策支持系统领域的领导者。

他是一名研发业务咨询顾问和培训师。另外，自 2003 以来，他一直是一位独立的技术推动者，围绕 GNU/Linux、Android、嵌入式系统工程和安全领域，参与了许多大型和小型项目。

Mark Furman，《OpenVZ Essentials》一书的作者，目前在 Info-Link Technologies 公司担任系统工程师。他已经从事 IT 行业 10 多年，主要涉及 Linux 以及其他开源技术。在业余时间，他喜欢写作以及审阅 Linux 和其他开源技术书籍，在诺克斯实验室摆弄 Arduino、Python 和 Raspberry Pi 项目，该实验室是一个位于伊利诺伊州诺克斯郡的创客空间。

Klaas van Gend 毕业于荷兰的埃因霍芬理工大学系统与控制工程专业。他工作的公司包括飞利浦、西门子和博世，为打印机原型、视频加密、车载信息娱乐、医疗设备、工业自动化和导航系统编写软件。2004 年，他转至 MontaVista 软件公司，该公司是嵌入式 Linux 的市场领导者。作为系统架构师和咨询顾问，他与许多欧洲公司合作，将嵌入式 Linux 集成到他们的产品中。

在过去的几年里，他一直在 Vector Fabrics 公司担任培训师和咨询顾问，这是一家专注于多核编程和软件动态分析的小型初创公司。他教授 C 和 C++ 多核编程，同时会帮助客户以更好的方式利用硬件资源，从而提高软件性能。Vector Fabric 的 Pareon 工具套件还可以自动发现难以找到的动态缺陷，包括数据竞争、缓冲区溢出、堆栈变量释放后再使用以及内存泄漏。

他在（嵌入式）Linux、编程、性能、系统设计和计算机游戏方面撰写了 100 多篇杂志文章和论文。他合作创立了欧洲嵌入式 Linux 会议（Embedded Linux Conference Europe），并且是多个开源项目的首席开发人员，包括用于 3G 蜂窝网络的 UMTSmon 和物理学益智游戏《蝴蝶效应》(《The Butterfly Effect》)。

当不工作时，他阅读都会奇幻类小说，或者在尼斯特尔罗德的航空俱乐部驾驶滑翔机。

Behan Webster 已经在电信、数据通信、光学、嵌入式以及汽车等各种技术产业工作了二十年，为众多从小型到大型的硬件编写代码。他的 Linux 经验包括内核编程、嵌入式 Linux、bring-up 板。目前，他是 Converse in Code 公司的首席咨询顾问，也是 LLVMLinux 项目的一名嵌入式 Linux 工程师和项目主管，同时还是 Linux 基金会的一名培训师。

Preface 前　言

嵌入式系统是一种设备，它的里面有一台微控制器。洗衣机、电视机、打印机、汽车、飞机和机器人都是由一个或多个微控制器控制的。随着这些设备变得越来越复杂，以及我们对于这些设备所拥有功能期望的提高，对于一个强大的操作系统来控制它们的需求不断增长。Linux 逐渐成为首选的操作系统。

Linux 的优势来源于它的开源模型，它鼓励代码共享。这意味着，具有众多背景并且经常由不同竞争公司雇用的软件工程师们，可以合作创建最新的操作系统内核并且跟踪硬件开发。这样一个代码库，可以对上至最大的超级计算机下至手表提供支持。Linux 只是操作系统的一个组件。要创建一个工作系统，还需要许多其他组件，从基本的工具，如命令外壳，到具有 Web 内容并且与云服务通信的图形用户界面。Linux 内核与众多其他的开源组件一起，可以构建一个在广泛的领域中发挥作用的系统。

然而，灵活性是一把双刃剑。尽管它可以针对一个特定问题给系统设计师提供广泛的备选解决方案，但是它也提出了这样的问题，即需要知道哪个方案是最好的选择。本书的目的是详细描述如何使用免费的开源项目构建一个嵌入式 Linux 系统，以生成一个健壮、可靠、高效的系统。基于作者作为一名咨询顾问和培训师的多年经验，本书将使用实例来说明最佳实践。

本书内容

本书是按典型的嵌入式 Linux 项目的生命周期线组织的。前 6 章介绍如何建立项目，组织、Linux 系统，以及选择合适的 Linux 构建系统。下一步，到达需要对系统架构和设计选择做出某些关键决策的阶段，包括闪存、设备驱动程序和 init 系统。接着，是利用已构建的嵌入式平台编写应用程序的阶段，其中有两章是关于进程、线程和内存管理的。最后，来到调试和优化平台的阶段，这是在第 12 章和第 13 章讨论的。最后一章描述如何为实时应用程序配置 Linux。

第 1 章　通过描述系统设计师在项目开始时的可行选择来设置场景。

第 2 章　描述工具链的组件，特别是交叉编译。本章描述从何处获取一个工具链，并且提供从源代码构建工具链的细节。

第 3 章　以 U-Boot 和 Bareboot 为例，解释引导加载程序在初始化设备硬件中的作用。本章还描述设备树，这是一种在许多嵌入式系统中使用的硬件配置编码方式。

第 4 章　提供关于如何针对一个嵌入式系统选择 Linux 内核以及为设备内部硬件配置 Linux 内核的信息。本章还包括如何将 Linux 移植到新的硬件。

第 5 章　通过一个关于如何配置根文件系统的分步指南，介绍关于嵌入式 Linux 实现的用户空间部分所隐含的思想。

第 6 章　包括两个嵌入式 Linux 构建系统，通过构建系统可以自动化前面 4 章描述的步骤，并且总结本书第一部分。

第 7 章　讨论闪存管理所引起的挑战，包括 raw flash 芯片和嵌入式 MMC 或 eMMC 封装。本章描述适用于每种技术类型的文件系统。本章还包括如何现场更新设备固件的技术。

第 8 章　通过一个简单的驱动程序实例描述内核设备驱动程序如何与硬件交互。本章还描述从用户空间调用设备驱动程序的各种方法。

第 9 章　说明第一个用户空间程序 init 如何启动系统的其余部分。本章描述 init 程序的三个版本，每个版本适用于一组不同的嵌入式系统，从 BusyBox init 到 systemd 复杂性递增。

第 10 章　从应用程序员的角度描述嵌入式系统。本章讨论进程和线程、进程间通信和调度策略。

第 11 章　介绍虚拟内存背后的思想，以及如何将地址空间划分为内存映射。本章还介绍如何检测正在使用的内存和内存泄漏。

第 12 章　介绍如何使用 GNU 调试器 GDB，以交互方式调试用户空间和内核代码。本章还描述内核调试器 kdb。

第 13 章　涵盖可用于测量系统性能的技术，从全系统分析开始，然后聚焦特定的区域，该区域通常是造成性能不佳的瓶颈。本章还描述 Valgrind 工具，用于检查应用程序是否正确使用线程同步和内存分配。

第 14 章　提供关于 Linux 实时编程的详细指南，包括内核配置和实时内核补丁，还提供关于测量实时延迟的工具描述。本章还包括关于如何通过锁定内存来减少页面故障数量的信息。

本书所需配套环境

本书中使用的软件完全是开源的。在大多数情况下，使用的版本是在本书写作时可用

的最新的稳定版本。尽管我试图以一种不针对特定版本的方式描述主要特性，但是不可避免地，在命令实例中包含的一些细节将无法在后来的版本中工作。我希望与它们相关的描述能够提供足够的信息，从而可以将同样的原则应用到软件包的后期版本中。

在创建一个嵌入式系统时涉及两个系统：用于交叉编译软件的主机系统和用于运行软件的目标系统。对于主机系统，我使用的是 Ubuntu 14.04，但是大多数 Linux 发行版只需要很小的修改即可工作。同样地，需要选择一个目标系统来表示嵌入式系统。我选择了两个：BeagelBone Black 和 QEMU CPU 仿真器，用于仿真 ARM 目标。后者意味着你可以试验这些实例，而不必为一个实际的目标设备来投资硬件。同时，通过对特定细节的修改，例如设备名称和内存布局，应该有可能将实例应用到范围更广泛的目标。

目标系统的主软件包版本是 U-Boot 2015.07、Linux 4.1、Yocto Project 1.8 "Fido" 和 Buildroot 2015.08。

读者对象

本书非常适合那些已经熟悉嵌入式系统以及想知道如何创建一流设备的 Linux 开发人员和系统程序员阅读。基本理解 C 语言编程和具有系统编程经验是必要的。

本书约定

在这本书中，你会发现用于区别不同种类信息的文本样式。下面是这些样式的一些例子以及它们含义的说明。

代码块设置如下：

```
static struct mtd_partition omap3beagle_nand_partitions[] = {
  /* All the partition sizes are listed in terms of NAND block
size */
  {
    .name        = "X-Loader",
    .offset      = 0,
    .size        = 4 * NAND_BLOCK_SIZE,
    .mask_flags  = MTD_WRITEABLE,  /* force read-only */
  }
}
```

当我们希望提醒你注意代码块的特定部分时，相关行或项被设置为粗体：

```
static struct mtd_partition omap3beagle_nand_partitions[] = {
  /* All the partition sizes are listed in terms of NAND block
size */
  {
    .name        = "X-Loader",
    .offset      = 0,
```

```
        .size           = 4 * NAND_BLOCK_SIZE
        .mask_flags     = MTD_WRITEABLE,  /* force read-only */
    }
}
```

任意命令行输入或输出书写如下：

```
# flash_erase -j /dev/mtd6 0 0
# nandwrite /dev/mtd6 rootfs-sum.jffs2
```

表示警告或重要说明。

表示提示和技巧。

样例源码下载

你可以从 http://www. packtpub.com 通过个人账号下载你所购买书籍的样例源码。如果你是从其他途径购买的，可以访问 http://www.packtpub.com/support，完成账号注册，就可以直接通过邮件方式获得相关文件。

你也可以访问华章图书官网：http//www.hzbook.com，通过注册并登录个人账号，下载本书的源代码。

Contents 目　录