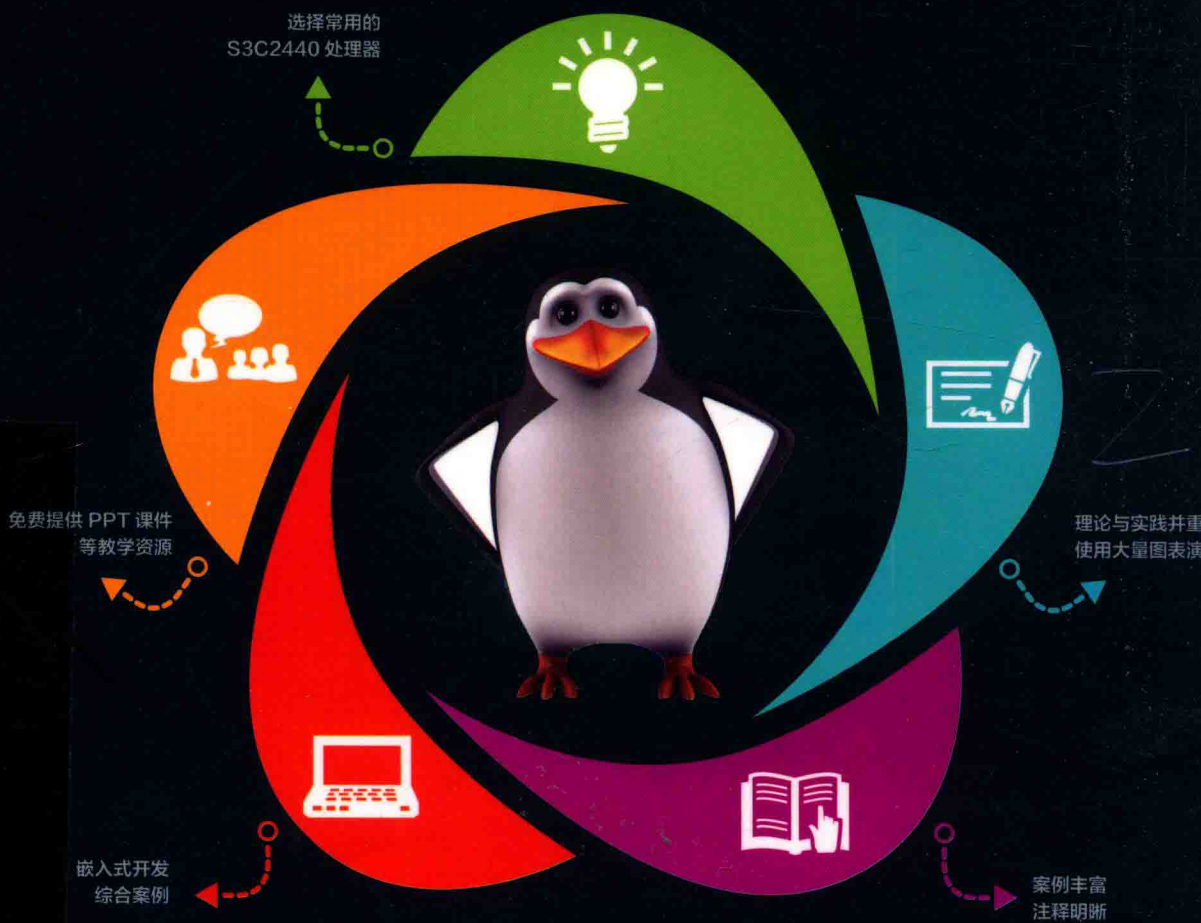
Linux
创新人才培养系列

嵌入式Linux开发教程

Embedded Linux Tutorial

◎ 宋娟 马华杰 主编
◎ 王秀友 岳国庆 金京犬 副主编



中国工信出版集团
人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

Linux
创新人才培养系列

嵌入式Linux开发教程

◎ 宋娟 马华杰 主编
◎ 王秀友 岳国庆 金京犬 副主编

人民邮电出版社
北京

图书在版编目（CIP）数据

嵌入式Linux开发教程 / 宋娟，马华杰主编. — 北京 : 人民邮电出版社，2017.7
（Linux创新人才培养系列）
ISBN 978-7-115-44701-2

Ⅰ. ①嵌… Ⅱ. ①宋… ②马… Ⅲ. ①Linux操作系统—程序设计—高等学校—教材 Ⅳ. ①TP316.89

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第008266号

内 容 提 要

嵌入式 Linux 系统被广泛应用在各个领域中，本书由浅入深、循序渐进，能够帮助未接触过 Linux 开发的读者掌握如何构建嵌入式 Linux 系统。

本书分为 4 篇。第 1 篇是嵌入式开发基础篇，包括嵌入式系统基础、嵌入式 C 语言开发流程、Linux 操作基础和嵌入式 C 编程基础。第 2 篇是嵌入式系统基础篇，包括 S3C2440 的内部资源，ARM 微处理器，ADS 集成开发环境，S3C2440 的外部电路，嵌入式 Linux 文件系统及内存与信号量。第 3 篇是嵌入式设备驱动与移植篇，首先介绍了设备驱动开发基础，其次介绍了 MiniGUI 图形界面设计，最后分析了各类驱动设计和引导程序并介绍了内核移植。第 4 篇是嵌入式开发实战篇，通过嵌入式 B 超综合案例来实践前面介绍的内容。

本书语言通俗、内容精炼、重点突出、实例丰富，是嵌入式开发工程师的必备入门书籍，同时也非常适合大中专院校师生学习阅读，也可作为高等院校计算机及相关专业的教材使用。

◆ 主　　编　宋　娟　马华杰
副 主 编　王秀友　岳国庆　金京犬
责任编辑　吴　婷
责任印制　杨林杰

◆ 人民邮电出版社出版发行　　北京市丰台区成寿寺路 11 号
邮编　100164　　电子邮件　315@ptpress.com.cn
网址　http://www.ptpress.com.cn
三河市海波印务有限公司印刷

◆ 开本：787×1092　1/16
印张：21.25　　2017 年 7 月第 1 版
字数：558 千字　　2017 年 7 月河北第 1 次印刷

定价：59.80 元

读者服务热线：(010)81055256　印装质量热线：(010)81055316
反盗版热线：(010)81055315
广告经营许可证：京东工商广登字 20170147 号

前 言

随着计算机技术及大规模集成电路的快速发展，嵌入式领域也在快速地发展，我们的日常生活中无处不见嵌入式系统产品。而嵌入式系统以 ARM 为内核的控制器占市场比例很大，其中 Linux 又在嵌入式操作系统中占的份额较大，因此想学习嵌入式处理器 ARM 和嵌入式操作系统 Linux 的人变得越来越多。本书选择了 S3C2440 处理器为硬件平台，首先因为 S3C2440 处理器资料较多，如果在学习中遇到问题，能够快速地查找资料解决问题；其次作为入门级的芯片，比较容易掌握。而 Linux 操作系统是开放源代码且免费，便于读者移植到自己的系统进行学习。

为了方便广大读者学习，作者结合自己多年的嵌入式 Linux 开发经验编写本书。本书较为全面地介绍了嵌入式系统的处理器 S3C2440、嵌入式开发环境的搭建、嵌入式软件开发流程、Linux 系统的操作及嵌入式 C 语言等基础知识和嵌入式系统引导程序、内核配置、文件系统、内存和信号量、底层驱动及图形用户界面设计等高级知识。通过本书的学习，读者会对嵌入式 Linux 有一个深入的了解。

本书的特点

1．语言简练，通俗易懂

本书使用通俗易懂的语言来组织内容，尽量避免使用难懂的专业术语，让初学者更容易接受，从而为学好用好 Linux 打好基础。

2．内容丰富，知识全面

全书共分 4 篇 15 章，采用从易到难、循序渐进的方式进行讲解。内容几乎涉及 Linux 程序开发的各个方面。

3．格式统一，讲解规范

书中每个例程都采用了分步骤实现方法。这样使得读者可以很清晰地知道每个技术的具体实现步骤，从而提高学习的效率。

4．实例丰富，注释明晰

书中对每个重要的知识点都通过实例来说明其用法，而且实例代码中都有清晰明了的注释，从而对读者了解该知识点有着很好的引导作用，即使对代码的运行不太理解的读者，也可以根据注释了解代码所实现的功能。

本书的内容安排

本书为 4 篇，共 15 章，主要章节规划如下所示。

（1）第 1 篇（第 1 章～第 4 章）嵌入式开发基础

讲述了嵌入式操作系统、嵌入式开发流程、Linux 操作、嵌入式 C 编程等基础知识。

（2）第 2 篇（第 5 章～第 10 章）嵌入式系统基础

讲述了 S3C2440 的内部资源、ARM 处理器、ADS 集成开发环境、S3C2440 的外部电路、嵌入式 Linux 文件系统、内存和信号量等。

（3）第 3 篇（第 11 章～第 14 章）嵌入式设备驱动与移植

讲述了 Linux 设备驱动开发流程及块设备驱动编写、MiniGUI 安装及配置和在 Eclipse 环境下编写 MiniGUI 程序，实例化讲解了 CAN 器件 SJA1000 的驱动程序、SD 卡块设备驱动程序、DM9000 芯片的网络驱动程序、系统引导程序 Boot Loader。最后是嵌入式 Linux 内核移植等。

（4）第 4 篇（第 15 章）嵌入式开发实战

讲述了嵌入式 Linux 系统的实例：嵌入式 B 超程序案例。

本书由浅入深，由理论到实践，尤其适合初级读者逐步学习和完善自己的知识结构。

适合阅读本书的读者

（1）希望进入嵌入式 Linux 开发领域的新手。

（2）嵌入式 Linux 学习人员。

（3）从事嵌入式系统的开发人员。

（4）大中专院校的学生。

本书由宁夏大学的宋娟、马华杰任主编，其中宋娟负责编写第 1 章～第 8 章，马华杰负责编写第 9 章～第 15 章。其他参与资料整理的有梁静、黄艳娇、任耀庚、刘海琛、刘涛、蒲玉平、李晓朦、张鑫卿、李阳、陈诺、张宇微、李光明、庞国威、史帅、何志朋、贾倩楠、曾源、胡萍凤、杨罡、郝召远。

编　者

目 录

第 1 篇 嵌入式开发基础

第 2 篇 嵌入式系统基础

第 4 篇 嵌入式开发实战

第1篇 嵌入式开发基础

第1章 嵌入式系统基础

随着社会信息化的日益加强，计算机和网络已经全面渗透日常生活的每一个角落。任何一个普通人都可能拥有大小不一、使用嵌入式技术的产品，小到手表、MP3、移动电话，大到电视、冰箱、电动脚踏车乃至汽车。那到底什么是嵌入式系统呢?

嵌入式系统一般定义为以应用为中心、以计算机技术为基础，软硬件可裁剪，应用系统对功能、可靠性、成本、体积、功耗和应用环境有特殊要求的专用计算机系统。

从技术角度说，嵌入式系统是将应用程序、操作系统和计算机硬件集成在一起的系统。

从系统角度说，嵌入式系统是设计完成复杂功能的硬件和软件，并使其紧密耦合在一起的计算机系统。

简而言之，一个嵌入式系统就是一个硬件和软件的集合体，它包括硬件和软件两部分。其中硬件包括嵌入式处理器、存储器及外设器件、输入/输出（I/O）端口、图形控制器等；软件部分包括操作系统软件（嵌入式操作系统）和应用程序（应用软件），由于应用领域不同，应用程序千差万别。

因此，要进行良好的嵌入式系统设计，必须首先对嵌入式硬件系统、嵌入式操作系统及开发环境有一个充分的认识。

嵌入式硬件系统的核心是嵌入式处理器。本章首先从嵌入式处理器入手，使读者对其有初步的认识。

1.1 嵌入式处理器简介

据不完全统计，全世界嵌入式处理器的品种总量已经超过1000种，流行体系结构有三十几个系列。嵌入式处理器的寻址空间一般从64KB到16MB，处理速度从0.1MIPS（Million Instructions Per Second，百万指令每秒）到2000 MIPS。

嵌入式系统中的处理器通常分为3大类，即微处理器（Micro-Processor Unit，MPU）、微控制器（Micro-Controller Unit，MCU）和数字信号处理器（Digital Signal Processor，DSP）。

微处理器是指功能较强大的CPU，它不是为任何特定的计算目标而设计的。因此这种芯片通常用于个人计算机与服务器。

微控制器是针对嵌入式系统而设计的，它将CPU、存储器以及其他外设都集成在同一块电路板上。

数字信号处理器中的 CPU 是针对快速离散时间信号处理计算的。因此，DSP 非常适用于音频及视频通信。

现代的芯片生产工艺已经允许将重要处理器的内核和各种外围的芯片器件整合在一起，以进一步降低功耗，达到专用的需求，这时，便出现了片上系统（System on Chip，SoC）。

1.1.1 嵌入式微处理器

嵌入式微处理器的基础是通用计算机中的 CPU。在应用中，早期的嵌入式系统是将微处理器装配在专门设计的电路板上，只保留和嵌入式应用有关的功能，这样可以大幅度减小系统体积和功耗。为了满足嵌入式应用的特殊要求，嵌入式微处理器虽然在功能上和标准微处理器基本是一样的，但在工作温度、抗电磁干扰、可靠性等方面一般都做了各种增强。和通用计算机相比，嵌入式微处理器具有体积小、重量轻、成本低和可靠性高的优点。

和工业控制计算机相比，嵌入式微处理器具有体积小、重量轻、成本低和可靠性高的优点，但是在电路板上必须包括 ROM、RAM、总线接口、各种外设等器件，从而降低了系统的可靠性，技术保密性也较差。嵌入式微处理器及其存储器、总线、外设等安装在一块电路板上，称为单板计算机，如 STD-BUS、PC104 等。嵌入式处理器目前主要有 Am186/88、386EX、SC-400、Power PC、68000、MIPS 和 ARM 系列等。

1.1.2 嵌入式微控制器

嵌入式微控制器又称单片机，是将整个计算机系统集成到一块芯片中。嵌入式微控制器一般以某一种微处理器内核为核心，芯片内部集成 ROM/EPROM（Erasable Programmable ROM，可擦除可编程 ROM）、RAM、总线、总线逻辑、定时/计数器、WatchDog、I/O、串行口、脉宽调制输出、A/D、D/A、Flash RAM 和 EEPROM（Electrically Erasable Programmable ROM，电可擦除可编程 ROM）等各种必要功能和外设。和嵌入式微处理器相比，微控制器的最大特点是单片化，体积大大减小，从而使功耗和成本下降、可靠性提高。微控制器是目前嵌入式系统工业的主流，其片上外设资源一般比较丰富，适合于控制，因此被称为微控制器。

嵌入式微控制器目前的品种和数量最多，比较有代表性的通用系列包括 8051、P51XA、MCS-251、MCS-96/196/296、C166/167、MC68HC05/11/12/16 和 68300 等。另外还有许多半通用系列，如支持 USB（Universal Serial Bus，通用串行总线）接口的 MCU 8XC930/931、C540、C541，支持 I2C、CAN-Bus、LCD 及众多专用 MCU 和兼容系列。目前 MCU 占嵌入式系统约 70%的市场份额。

1.1.3 嵌入式数字信号处理器

嵌入式数字信号处理器对嵌入式系统结构和指令做了特殊的设计，使其适合于执行 DSP 算法，编译效率较高，指令执行速度也较快。DSP 应用正从通用单片机中以普通指令实现 DSP 功能，过渡到采用嵌入式 DSP 实现。

DSP 有两个发展来源：一是 DSP 经过单片化、EMC 改造，增加片上外设发展而来，TI 的 TMS320C2000 /C5000 是这一类；二是在通用单片机或 SoC 中增加 DSP 协处理器，Intel 的 MCS-296 和 Infineon（Siemens）的 TriCore 属于此类。

嵌入式 DSP 的代表产品是 Texas Instruments 的 TMS320 系列和 Motorola 的 DSP56000 系列。TMS320 系列处理器包括用于控制的 C2000 系列，移动通信的 C5000 系列及性能更高的 C6000 和 C8000 系列。DSP56000 目前已经发展成为 DSP56000、DSP56100、DSP56200 和 DSP56300 等几

个不同系列的处理器。

1.1.4　嵌入式片上系统

随着 EDA（Electronic Design Automation，电子设计自动化）的推广、VLSI（Very Large Scale Integration，超大规模集成电路）的普及和半导体工艺的发展，在一个硅片上实现一个复杂系统已经成为可能，这就是 SoC。各种通用处理器内核将作为 SoC 设计公司的标准库，和许多其他嵌入式系统外设一样，成为 VLSI 设计中一种标准器件，用标准的 VHDL 语言（Very- High-Speed Integrated Circuit Hardware Description Language，超高速集成电路硬件描述语言）描述，存储在器件库中。我们只需设计应用系统，仿真通过后就可以将设计图交给半导体工厂来制作样品了，除个别无法集成的器件外，整个嵌入式系统均可集成到一块或几块芯片中。

SoC 分为通用和专用两类。通用系列包括 Infineon 的 TriCore、Motorola 的 M-Core；专用系列一般用于某个或某类系统中，如 Philips 的 Smart XA，它将 XA 单片机内核和 CCU 单元制作在一块硅片上，形成一个可加载 Java 或 C 语言的专用 SoC。

1.2　ARM 微处理器简介

随着智能设备的发展，嵌入式系统成为最有发展前途的 IT 应用领域之一。随着需求的增加，在嵌入式领域，8 位处理器已经不能再胜任一些复杂的应用，例如 GUI、TCP/IP、FILE SYSTEM 等，而 ARM 芯片凭借强大的处理能力和极低的功耗，非常适合这些场合。所以现在越来越多的公司在产品选型的时候考虑到使用 ARM 处理器，而且目前 ARM 在某些方面已经取代了原先 x86 架构的单板机，特别是工控领域。

ARM（Advanced RISC Machines）既可以认为是一个公司的名字，也可以认为是对一类微处理器的通称。ARM 公司专门从事基于 RISC 技术的芯片设计，世界各大半导体生产商从 ARM 公司购买其设计的 ARM 微处理器核，加入适合自己应用领域的外围电路，从而形成自己的 ARM 微处理器芯片。

ARM 微处理器目前包括下面几个系列，以及其他厂商基于 ARM 体系结构的处理器。除了具有 ARM 体系结构的共同特点以外，每一个系列的 ARM 微处理器都有各自的特点和应用领域。

- ARM7 系列。
- ARM9 系列。
- ARM9E 系列。
- ARM10E 系列。
- ARM11 系列。
- SecurCore 系列。
- Inter 的 Xscale。
- Inter 的 StrongARM。

其中，ARM7、ARM9、ARM9E 和 ARM10E 为 4 个通用处理器系列，每一个系列提供一套相对独特的性能来满足不同应用领域的需求。SecurCore 系列专门为安全要求较高的应用而设计。

（1）ARM7 微处理器系列

ARM7 内核采用冯·诺伊曼体系结构，数据和指令使用同一条总线。内核有一条 3 级流水线

执行 ARMv4 指令集。

ARM7 系列微处理器为 32 位 RISC 处理器，低功耗，适合对价位和功耗要求较高的消费类应用。ARM7 系列微处理器包括如下几种类型的核：ARM7TDMI、ARM7TDMI-S、ARM720T、ARM7EJ。其主要应用领域为工业控制、Internet 设备、网络和调制解调器设备和移动电话。

（2）ARM9 微处理器系列

ARM9 系列微处理器采用 5 级指令流水线，能够运行在比 ARM7 更高的时钟频率上，改善了处理器的整体性能。ARM9 的存储器系统根据哈佛体系结构重新设计，区分了数据总线和指令总线。ARM9 系列微处理器包含 ARM920T、ARM922T 和 ARM940T 三种类型，主要应用于无线设备、仪器仪表、安全系统、机顶盒、高端打印机、数字照相机和数字摄像机等。

（3）ARM9E 微处理器系列

ARM9E 系列微处理器是 ARM9 内核带有 E 变种的一个可综合版本，使用单一的处理器内核提供了微控制器、DSP、Java 应用系统的解决方案，极大地减少了芯片的面积和系统的复杂程度。ARM9E 系列微处理器提供了增强的 DSP 处理能力，很适合于那些需要同时使用 DSP 和微控制器的应用场合。

ARM9E 系列微处理器包含 ARM926EJ-S、ARM946E-S 和 ARM966E-S 3 种类型。其中 ARM926EJ-S 针对小型便携式 Java 设备（如 3G 手机和 PDA）应用而设计的。ARM946E-S 包括 TCM、Cache 和一个 MPU，且 TCM 和 Cache 的大小可配置。该处理器是针对有确定的实时响应的嵌入式控制而设计的。ARM966E-S 有可配置的 TCM，但没有 MPU 和 Cache（高速缓冲存储器）扩展。

（4）ARM10E 微处理器系列

ARM10E 系列微处理器具有高性能、低功耗的特点，由于采用了新的体系结构和 6 级整数流水线，与同等的 ARM9 器件相比较，在同样的时钟频率下，性能提高了近 50%。同时，ARM10E 系列微处理器采用了 2 种先进的节能方式使其功耗极低，且提供了 64 位的 Load/Store 体系，支持包括向量操作的、满足 IEEE 754 的浮点运算协处理器，系统集成更加方便。

ARM10E 系列微处理器包含 ARM1020E、ARM1022E 和 ARM1026EJ-S 3 种类型，可以适用于不同的应用场合。

ARM10E 系列微处理器主要应用于下一代无线设备、数字消费品、成像设备、工业控制、通信和信息系统等领域。

1.3 嵌入式操作系统概述

嵌入式操作系统（Embedded Operating System，EOS）指的是在嵌入式系统中使用的操作系统，它除了能完成一般操作系统的功能，如进程管理、存储管理、文件管理、设备管理等，通常还包括与硬件相关的底层驱动软件、系统内核、设备驱动接口、通信协议、图形界面、标准化浏览器等。

嵌入式系统的设计方案有多种，应用领域千差万别。就软件方案而言，简单的系统可以不使用操作系统，被称之为裸机设计。复杂系统一般可以扩展程序存储器，资源相对比较多，系统实现的功能比较复杂，软件开发的工作量和开发的难度比较大，维护费用较高。使用嵌入式操作系统可以有效地提高这些系统的开发效率，减少了系统开发的总工作量，而且提高了嵌入式应用软件的可移植性。

嵌入式操作系统具有通用操作系统的基本特点，如能够有效管理越来越复杂的系统资源；能

够把硬件虚拟化，使得开发人员从繁忙的驱动程序移植和维护中解脱出来；能够提供库函数、驱动程序、工具集以及应用程序。与通用操作系统相比较，在系统实时高效性、硬件的相关依赖性、软件固态化以及应用的专用性等方面具有较为突出的特点。

嵌入式 Linux 是将标准的 Linux 操作系统进行裁剪修改，使之能在嵌入式系统上运行的一种操作系统。嵌入式 linux 既继承了 Internet 上无限的开放源代码资源，又具有嵌入式操作系统的特性。嵌入式 Linux 的特点是版权费免费，而且性能优异，软件移植容易，代码开放，有许多应用软件支持，应用产品开发周期短。在目前已经开发成功的嵌入式系统中，大约有一半使用 Linux。

1.4　搭建嵌入式开发环境

构建开发环境是任何开发工作的基础，对于软硬件非常丰富的嵌入式系统来说，构建高效、稳定的环境是能否开展工作的重要要素之一。本节将介绍嵌入式开发环境的建立方法，包括嵌入式的 Linux 操作系统 Ubuntu16.04，主机与开发板的通信软件，交叉编译工具等的安装和配置方法。

1.4.1　Ubuntu16.04 的安装

Ubuntu 支持各种形形色色的架构，包括 i386[386/486/Pentium（II/III/IV）和 Athlon/Duron/Sempron 处理器]，AMD64（Athlon64，Opteron，最新的 64 位 Intel 处理器）以及 PowerPC（iBook/Powerbook, G4 and G5）等。Ubuntu 相对其他 Linux 发行版的主要特点如下。

（1）基于 Debian/Linux，使用 APT 包管理系统。

（2）相对于 Fedora Code，APT 包管理系统优雅地解决了依赖问题，并且可以从容地在线安装升级。

（3）相对于 Debian，软件更新积极，而 Debian 较保守。

（4）相对于 Gentoo，基本无需编译，省力、省时、省心。

本小节将介绍在 VirtualBox 管理器 5.1.2 中安装 Ubuntu 16.04，读者可以在 Ubuntu 的官方网站 http://www.ubuntu.com/download 中获取最新版的 Ubuntu 镜像文件。

在安装 VirtualBox 后，可以按照如下步骤安装 Ubuntu。

（1）打开 VirtualBox，可以看到图 1-1 所示的界面。

（2）单击“新建”按钮后会出现图 1-2 所示的界面，一般按照图中所示填写，版本根据读者下载的是 32bit 或 64bit 选择。

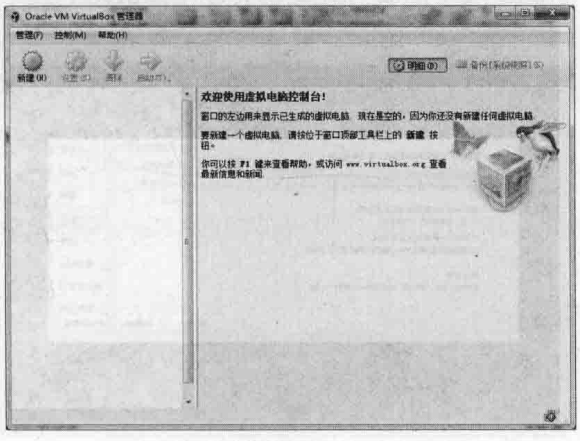


图 1-1　打开 VirtualBox 后的界面

图 1-2　虚拟机系统名称填写

（3）接下来是配置内存，如图 1-3 所示，内存大小可以选择默认，也可以根据实际情况填写。剩下的可以选择默认，直接单击“下一步”按钮。当出现虚拟硬盘时，文件位置及硬盘大小可以根据实际情况选择。单击“创建”按钮后，则创建虚拟机环境完成，如图 1-4 所示。

图 1-3　内存大小的选择

图 1-4　创建虚拟环境后的界面

（4）创建完成后，单击“设置”按钮，如图 1-5 所示，加载 ISO 镜像文件。然后单击“启动”，会开机进入图 1-6 所示的界面。选择“中文（简体）”，单击“安装 Ubuntu”按钮，开始安装 Ubuntu。

图 1-5　加载 ISO 镜像文件

图 1-6　安装 Ubuntu 欢迎界面

（5）进入准备安装 Ubuntu 界面，按照图 1-7 所示选择即可，单击“继续”按钮，进入图 1-8 所示的界面进行选择。

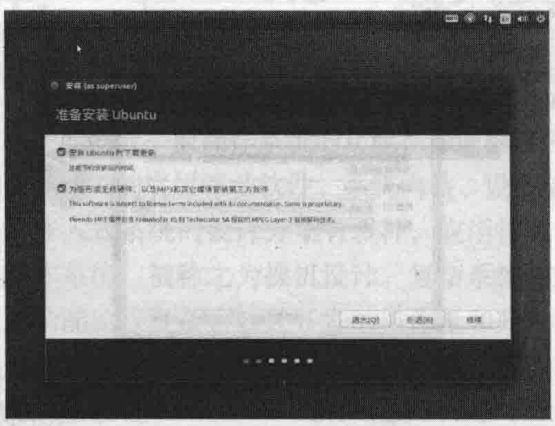


图 1-7　准备安装 Ubuntu 界面

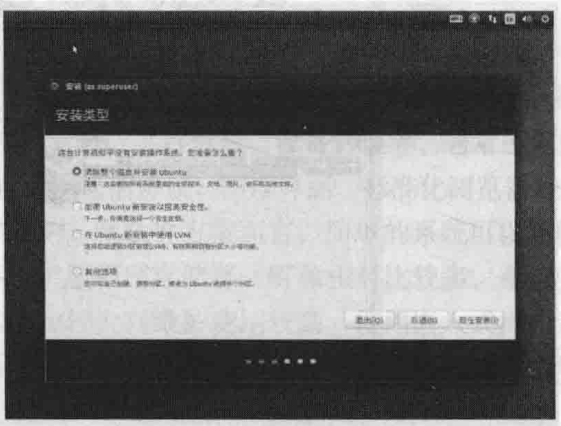


图 1-8　安装类型选择