



普通高等教育“十三五”规划教材
电子设计系列规划教材

嵌入式Linux 系统设计实践教程

◎ 曾毓 吴占雄 编著 ◎ 高明煜 主审



中国工信出版集团

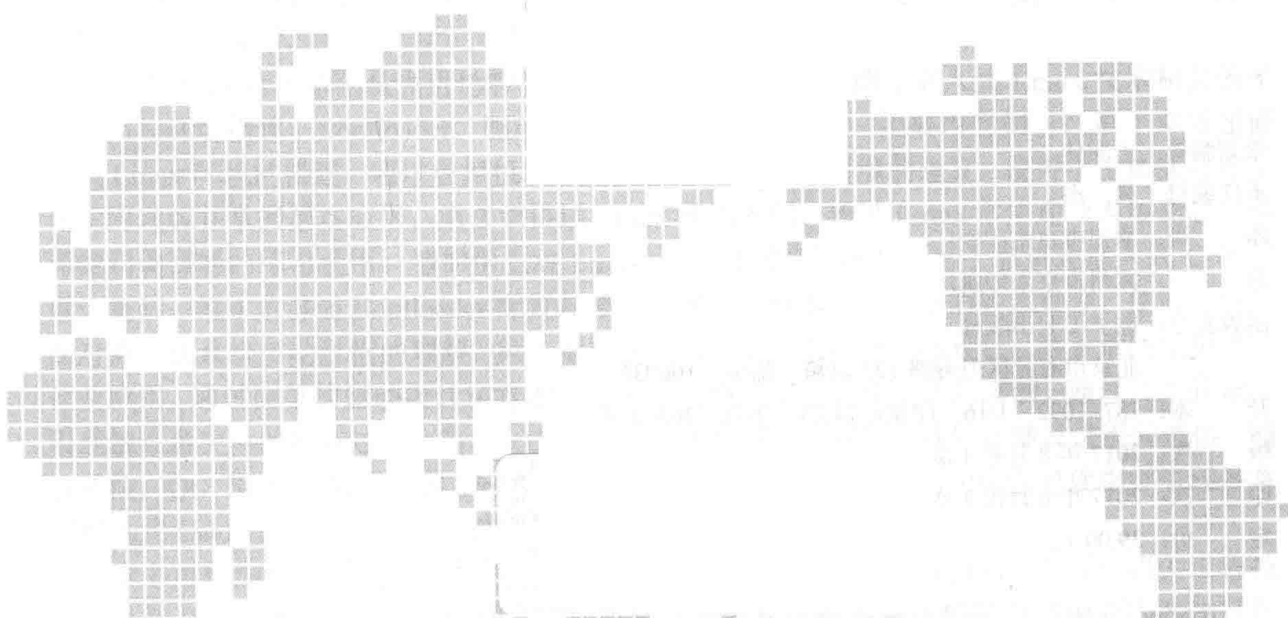


电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

普通高等教育“十三五”规划教材
电子设计系列规划教材

嵌入式 Linux 系统设计实践教程

曾 毓 吴占雄 编 著
高明煜 主 审



电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是面向嵌入式 Linux 学习和产品开发的入门实践教程，介绍了嵌入式 Linux 应用开发多方面的内容。全书共分 13 章，主要内容包括应用基础、文件和 I/O 操作、简单外设应用、串口和线程、进程、网络编程、Qt 编程、Web 服务器和 SQLite 数据库应用等。

本书为提高读者的综合动手能力和设计创新能力而编写，内容由浅入深、结构合理、图文并茂，可操作性强，非常适合准备向嵌入式 Linux 方向发展的高校学生学习使用。

书中部分章节的硬件实践内容使用了友善之臂的 Mini2451 开发板，附录有该开发板的简单介绍，读者也可以使用与 Mini2451 相似的 Mini2440 或其他 ARM 开发板进行实践操作。

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 Linux 系统设计实践教程 / 曾毓, 吴占雄编著. —北京: 电子工业出版社, 2017.8

ISBN 978-7-121-32325-6

I. ①嵌… II. ①曾… ②吴… III. ①Linux 操作系统—高等学校—教材 IV. ①TP316.85

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 181789 号

策划编辑: 王羽佳

责任编辑: 裴 杰

印 刷: 涿州市京南印刷厂

装 订: 涿州市京南印刷厂

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: 787×1092 1/16 印张: 14.25 字数: 365 千字

版 次: 2017 年 8 月第 1 版

印 次: 2017 年 8 月第 1 次印刷

定 价: 39.00 元

凡所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, 联系及邮购电话: (010) 88254888, 88258888。

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

本书咨询联系方式: (010) 88254535, wylj@phei.com.cn。

前 言

嵌入式系统是为特定应用而设计的专用计算机系统,已经广泛应用于智能手机、数码产品、工业控制、通信和信息系统、军事、航空航天、医疗电子等领域,整个社会对嵌入式系统的开发和应用人才的需求也不断加大。嵌入式 Linux 是以 Linux 为基础的嵌入式操作系统,因为它具有代码开源、性能优异、资源众多等优点,在嵌入式领域广为使用。

为了进一步加强嵌入式 Linux 的实践教学工作,适应高等学校正在开展的课程体系与教学内容的改革,及时反映嵌入式系统教学的研究成果,积极探索适应 21 世纪人才培养的教学模式,编者编写了本书。

本书具有如下特色。

(1) 入门简单,本书内容安排深浅适宜,实践操作讲解详细,大部分内容只要求有基本的计算机基础知识和程序设计基础即可开始上手。

(2) 内容涵盖范围广,本书实践内容围绕嵌入式 Linux 开发的应用编程展开,内容涵盖 Linux 操作系统介绍、安装和基本使用,嵌入式 Linux 开发平台,Bootloader 移植,驱动应用以及嵌入式 Linux 的应用开发,通过简单经典的实践操作引导读者走进嵌入式的大门。

(3) 硬件实践的目标平台为广州友善之臂计算机科技有限公司的 Mini2451 开发板,Mini2451 是国内广为使用且资源众多的 Mini2440 开发板继承者,性价比高,极大地降低了嵌入式技术的自学入门费用。

(4) 本书注重将嵌入式 Linux 技术的最新发展适当地引入到教学中,保证了教学内容的先进性。此外,本书源于高校嵌入式课程的实践教学,凝聚了工作在第一线的任课教师多年的教学经验与教学成果。

全书共 13 章。本书从先进性和实用性出发,较全面地介绍了嵌入式 Linux 技术相关的系统使用与环境搭建、Bootloader、驱动和应用开发等实践操作,主要内容如下:第 1 章讲述嵌入式 Linux 环境的搭建,通过虚拟机软件的操作和交叉编译环境的建立,使得学生加深对理论知识的理解并掌握基本应用;第 2 章讲述 Linux 环境入门,通过 Linux 常用命令及编辑器、编译器和调试器的练习使用,增加学生对 Linux 系统使用的熟练度;第 3 章讲述嵌入式 C 程序设计基础;第 4 章讲述 Bootloader 配置与修改,通过移植 Bootloader 的实践操作,使得学生加深对嵌入式系统启动过程的理解;第 5 章讲述 Linux 文件系统及程序设计;第 6 章讲述驱动设计及应用,通过简单的驱动设计实践加深对系统内核及驱动程序结构的理解,通过几个外设应用理解设备文件的操作过程;第 7~13 章讲述了串口通信,线程、进程管理及进程间通信,网络通信,Qt,SQLite 数据库和 Web 服务器等内容,通过相应的实践操作内容使得学生逐步掌握嵌入式 Linux 应用开发的相关技术。

本书可作为高等学校非计算机专业嵌入式相关课程的基础实践教材,也可供相关工程技术人员学习、参考。教学中,教师可以根据教学对象和学时等具体情况对书中的内容进行删减和组合,也可以进行适当扩展,参考学时为 16~32 学时。为适应教学模式、教学方法和手段的改革,本书配有多媒体电子教案及相应的网络教学资源,请登录华信教育资源网(<http://hxedu.com.cn>)下载。

本书第1~3章、第7~11章由曾毓编写，第4~6、12、13章由吴占雄编写。全书由曾毓统稿。杭州电子科技大学的高明煜教授在百忙之中对全书进行了审阅。在编写本书的过程中，电子工业出版社的王羽佳编辑为本书的出版做了大量工作，在此一并表示感谢！

本书两位作者为杭州电子科技大学教师，长期从事嵌入式系统相关实践课程的教学工作。编写本书时参考了大量近年来出版的相关技术资料，吸取了许多专家和同仁的宝贵经验，在此向他们表示谢意。

由于嵌入式技术发展迅速，编者学识有限，加之时间仓促，书中错漏之处在所难免，望广大读者批评指正。

编 者

目 录

第 1 章 嵌入式 Linux 环境搭建	1	第 3 章 嵌入式 C 程序设计基础	34
1.1 背景知识	1	3.1 背景知识	34
1.1.1 嵌入式 Linux 系统	1	3.1.1 基本数据类型	34
1.1.2 嵌入式 Linux 开发环境	1	3.1.2 变量与常量	35
1.2 预习准备	2	3.1.3 运算符与表达式	36
1.2.1 预习要求	2	3.1.4 程序结构	38
1.2.2 实践目标	2	3.1.5 数组、结构体和指针	41
1.2.3 准备材料	2	3.1.6 函数	42
1.3 实践内容和步骤	3	3.1.7 系统调用及 API	43
1.3.1 安装虚拟机软件及 创建虚拟机	3	3.2 预习准备	43
1.3.2 安装虚拟机工具	10	3.2.1 预习要求	43
1.3.3 设置共享文件夹	13	3.2.2 实践目标	44
1.3.4 建立交叉编译环境	15	3.2.3 准备材料	44
1.3.5 常用软件安装	17	3.3 实践内容和步骤	44
1.4 实践练习	20	3.3.1 Code::Blocks 使用	44
第 2 章 Linux 环境入门	21	3.3.2 目标板程序下载调试	50
2.1 背景知识	21	3.4 实践练习	56
2.1.1 Linux Shell	21	第 4 章 Bootloader 配置与修改	57
2.1.2 Linux 命令	21	4.1 背景知识	57
2.1.3 VI 编辑器	22	4.1.1 U-Boot	58
2.1.4 GCC 编译器和 GDB 调试器	23	4.1.2 U-Boot 源代码结构	59
2.2 预习准备	24	4.1.3 U-Boot 启动流程	59
2.2.1 预习要求	24	4.1.4 U-Boot 常用命令	61
2.2.2 实践目标	25	4.2 实践准备	61
2.2.3 准备材料	25	4.2.1 预习要求	61
2.3 实践内容和步骤	25	4.2.2 实践目标	61
2.3.1 Linux 常用命令练习	25	4.2.3 准备材料	62
2.3.2 VI 编辑器练习	31	4.3 实践内容和步骤	62
2.3.3 GCC 编译和 GDB 调试	32	4.3.1 U-Boot 移植步骤	62
2.4 实践练习	33	4.3.2 测试并运行 U-Boot	65
		4.4 实践练习	67

第 5 章 Linux 文件系统及程序设计	68	第 7 章 Linux 串口通信及线程应用	101
5.1 背景知识	68	7.1 背景知识	101
5.1.1 基本概念	69	7.1.1 串行通信接口	101
5.1.2 文件系统调用 API 接口	72	7.1.2 串行通信基本参数	102
5.1.3 标准 I/O	75	7.1.3 Linux 串口相关概念	102
5.2 实践准备	77	7.1.4 Linux 线程	105
5.2.1 预习要求	77	7.2 预习准备	107
5.2.2 实践目标	77	7.2.1 预习要求	107
5.3 实践内容和步骤	77	7.2.2 实践目标	107
5.3.1 Linux 文件属性示例	77	7.2.3 准备材料	107
5.3.2 Linux 目录操作示例	80	7.3 实践内容和步骤	108
5.4 实践练习	83	7.3.1 串口通信实践	108
第 6 章 驱动设计及应用	84	7.3.2 Linux 线程应用实践	115
6.1 背景知识	84	7.4 实践练习	118
6.1.1 设备驱动程序	84	第 8 章 进程管理及进程间通信	119
6.1.2 处理器与设备间 数据交换方式	85	8.1 背景知识	119
6.1.3 驱动程序结构	86	8.1.1 Linux 进程基本概念	119
6.1.4 file_operations 与 file 结构体	87	8.1.2 Linux 进程管理	120
6.1.5 设备注册和初始化	88	8.1.3 子进程的创建	122
6.1.6 中断管理	89	8.1.4 进程间通信	124
6.1.7 设备驱动开发所用到的 几类重要函数	89	8.2 预习准备	129
6.1.8 设备驱动程序的开发过程	91	8.2.1 预习要求	129
6.1.9 驱动程序 (内核模块) 编译进内核	91	8.2.2 实践目标	129
6.2 实践准备	92	8.3 实践内容和步骤	129
6.2.1 预习要求	92	8.3.1 fork 与进程管理实践	129
6.2.2 实践目的	92	8.3.2 进程间通信实践	131
6.3 实践内容和步骤	92	8.4 实践练习	132
6.3.1 实现虚拟字符设备 驱动程序	92	第 9 章 Linux 网络通信	133
6.3.2 LED 与按键应用 程序设计	98	9.1 背景知识	133
6.3.3 LCD 应用程序设计	99	9.1.1 网络通信	133
6.4 实践练习	100	9.1.2 TCP、UDP 协议	135
		9.1.3 Linux 网络编程基础	138
		9.2 预习准备	144
		9.2.1 预习要求	144
		9.2.2 实践目标	144
		9.2.3 准备材料	144

9.3 实践内容和步骤	144	11.4 实践练习	183
9.3.1 TCP 客户端程序设计	144	第 12 章 嵌入式数据库 SQLite 应用	184
9.3.2 TCP 服务器端程序设计	148	12.1 背景知识	184
9.4 实践练习	151	12.1.1 SQLite	184
第 10 章 简单 GUI 程序设计	152	12.1.2 SQL	185
10.1 背景知识	152	12.1.3 SQLite 数据类型	188
10.1.1 Qt	152	12.1.4 SQLite 接口函数	188
10.1.2 安装 Qt	153	12.1.5 SQLite 数据库	
10.1.3 移植 Qt	154	C 语言编程	190
10.1.4 GUI	156	12.2 实践准备	192
10.2 预习准备	157	12.2.1 预习要求	192
10.2.1 预习要求	157	12.2.2 实践目标	192
10.2.2 实践目标	157	12.3 实践内容和步骤	192
10.3 实践内容和步骤	157	12.3.1 SQLite 配置、编译	
10.3.1 Qt Creator 配置	157	与安装	192
10.3.2 简单四则运算程序设计	162	12.3.2 SQLite 简单应用示例 1	195
10.4 实践练习	168	12.3.3 SQLite 简单应用示例 2	197
第 11 章 Qt 图形程序设计	169	12.4 实践练习	200
11.1 背景知识	169	第 13 章 嵌入式 Web 服务器应用	201
11.1.1 Qt 绘图系统	169	13.1 背景知识	201
11.1.2 Qt 窗口中的绘图方法	170	13.2 实践准备	203
11.1.3 QPainter 类	171	13.2.1 预习要求	203
11.1.4 画刷和画笔	172	13.2.2 实践目标	203
11.1.5 图像处理	173	13.2.3 准备材料	203
11.1.6 Qt 定时器与线程	174	13.3 实践内容和步骤	203
11.2 预习准备	178	13.3.1 Boa Web Server 的移植	203
11.2.1 预习要求	178	13.3.2 测试 Boa 服务器	209
11.2.2 实践目标	178	13.3.3 远程控制 LED	210
11.3 实践内容和步骤	178	13.4 实践练习	213
11.3.1 Qt 绘图简单示例	178	附录 Mini2451 开发板简介	214
11.3.2 Qt 简单动画	181	参考文献	219

第 1 章



嵌入式 Linux 环境搭建

1.1 背景知识

1.1.1 嵌入式 Linux 系统

嵌入式系统 (Embedded System) 是为完成某种特定的功能而设计的一个计算机硬件、软件和一些必要的机械部件的集合体。例如,现在的智能手机不仅提供了通话短信功能,其上的各种应用软件还为用户的衣食住行提供了服务。所以嵌入式系统是一种应用系统,它是以计算机技术为基础,软硬件可裁剪,适应应用系统要求的专用计算机系统。

嵌入式 Linux 系统就是利用 Linux 自身的许多特点,把它应用到嵌入式系统中。Linux 做嵌入式的优势有以下几点: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 爱好者都是 Linux 开发者的强大技术支持;其次, Linux 的内核小、效率高,内核的更新速度很快;第三, Linux 是免费的 OS,在价格上极具竞争力。Linux 还有着嵌入式操作系统所需要的很多特色,突出的就是 Linux 适用于多种 CPU 和多种硬件平台,是一个跨平台的系统。到目前为止,它可以支持二三十种 CPU,且性能稳定,裁剪性很好,开发和使用都很容易。很多 CPU 包括家电业芯片,都开始做 Linux 的平台移植工作,其移植的速度远远超过 Java 的开发环境。也就是说,如果今天用 Linux 环境开发产品,那么将来更换 CPU 就不会遇到困扰。同时, Linux 内核的结构在网络方面是非常完整的, Linux 对网络中最常用的 TCP/IP 协议有最完备的支持,提供了包括十兆、百兆、千兆位的以太网络,以及无线网络、光纤甚至卫星的支持,所以 Linux 很适合做信息家电的开发。

Linux 在快速增长的无线连接应用主场中有一个非常重要的优势,就是其有足够快的开发速度。这是因为 Linux 有很多工具,并且 Linux 为众多程序员所熟悉。因此,我们要在嵌入式系统使用 Linux 操作系统。

1.1.2 嵌入式 Linux 开发环境

嵌入式设备的资源并不足以用来开发软件,因此通常采用主机与目标板结合的交叉开发模

式来开发软件，即在 PC 上编辑、编译软件，然后在目标板上运行、验证程序。

在 PC 上学习 Linux，必须要有一个 Linux 环境，要学习嵌入式 Linux 开发，就需要一套嵌入式开发板和配套的嵌入式编译器。鉴于国内的个人电脑大多使用 Windows 系统，为了方便学习和管理，通常需要安装虚拟机软件，使人们能够在 Windows 系统中进行嵌入式 Linux 的学习与开发。由此可见，嵌入式 Linux 开发环境组成通常如图 1.1 所示。



图 1.1 嵌入式 Linux 开发环境组成

1.2 预习准备

1.2.1 预习要求

- (1) 了解嵌入式 Linux 在日常生活中的应用及其大致工作原理。
- (2) 了解 Linux 操作系统的特点及其组成结构，了解流行的几种 Linux 操作系统的发行版本。
- (3) 了解几种常见的虚拟机软件，理解交叉编译器的概念。

1.2.2 实践目标

- (1) 掌握 Linux 系统虚拟机安装方法。
- (2) 掌握虚拟机与主机设置共享文件目录的方法。
- (3) 掌握嵌入式 Linux 交叉编译器的安装方法及其环境配置。
- (4) 熟悉 Linux 系统软件安装方法。

1.2.3 准备材料

1. Linux 安装光盘文件

常见的 Linux 系统发行版本有十几种，不同的版本多少有一些差异，基于桌面环境易用度考虑，本书推荐选择 Ubuntu 16.04 或者 Ubuntu 的轻量化分支版本 Xubuntu 14.04。Ubuntu 16.04 系统较新、功能最全，适合配置较高的计算机，Xubuntu 14.04 的桌面主题更接近 Windows，对系统资源要求更少，适合配置较低的计算机。两种 Linux 系统的 Desktop 版本都有 32 位和 64 位系统可选择，考虑到交叉编译器的兼容性问题，建议系统性能一般的计算机选择 32 位版本。

ubuntu-16.04-desktop-i386.iso 下载地址: <http://cn.ubuntu.com/download/>。

xubuntu-14.04.5-desktop-i386.iso 下载地址: <http://xubuntu.org/release/14-04/>。

以上地址可能给出的是 torrent 下载文件, 还需要使用其他下载工具将真正的 ISO 文件下载到计算机硬盘上。

2. 虚拟机软件

下载 ISO 文件后, 如果进行物理实体安装, 则可以将 ISO 刻录成启动光盘, 或者用工具软件制作成 USB 启动盘备用。本书推荐使用虚拟机软件安装虚拟 Linux 系统, 这样不仅方便管理, 还可以轻松挂载已经安装好的 Linux 虚拟机文件。

常用的免费虚拟机软件有 Oracle VM VirtualBox 和 VMware Player 两种。VirtualBox 支持 VDI 和 VMDK 等多种格式的虚拟机硬盘, 软件更新速度较快, 但在稳定性和兼容性方面比 VMware Player 稍弱, 本书操作演示主要以 VMware Player 为主。

VirtualBox 下载地址: <https://www.Virtualbox.org/wiki/Downloads>。

VMware Player 下载地址: <http://www.vmware.com/go/downloadplayer-cn>。

对主机 Windows 系统, 下载页面应选择 windows host 或 for windows 版本; 如果主机是 Mac OS 系统, 则可选择 VirtualBox 软件。

3. arm-linux-gcc 编译器

所谓交叉编译, 就是在宿主机上使用某种特定的交叉编译器, 为另一个目标系统编译程序, 得到的程序在目标系统上运行而非在宿主机本地运行。交叉编译器是在宿主机上运行的编译器, 其命名方式一般遵循“处理器-系统-gcc”的规则。进行 ARM Linux 开发, 通常选择 arm-linux-gcc 交叉编译器, 本书配套使用友善之臂提供的 arm-linux-gcc-4.4.3 交叉编译器, 下载地址为 <http://www.arm9.net/download.asp>。

1.3 实践内容和步骤

1.3.1 安装虚拟机软件及创建虚拟机

本节将以 VMware Player 12.1.1 虚拟机软件和 xubuntu-14.04.5-desktop-i386.iso 文件为例, 演示软件安装和虚拟机创建过程。

在 Windows 系统中安装 VMware Player, 该软件安装比较简单, 一直按默认选项安装即可。软件安装完成后, 进入的主界面如图 1.2 所示。

接下来, 准备好 Linux 光盘文件和足够的硬盘空间 (建议预留出 10GB 以上硬盘空间), 在 VMware Player 软件界面中单击“创建新虚拟机”按钮, 弹出如图 1.3 所示的向导对话框, 选中“稍后安装操作系统”单选按钮, 单击“下一步”按钮, 选择客户机操作系统。

如图 1.4 所示, 选择客户机操作系统为 Linux, 选择系统版本为 Ubuntu, 单击“下一步”按钮。

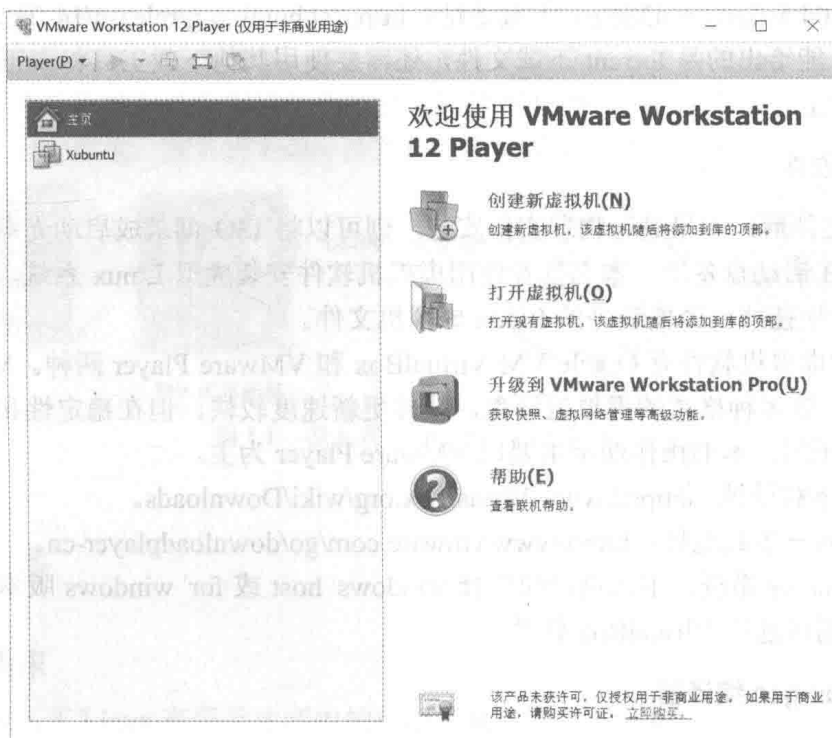


图 1.2 VMware Player 软件主界面

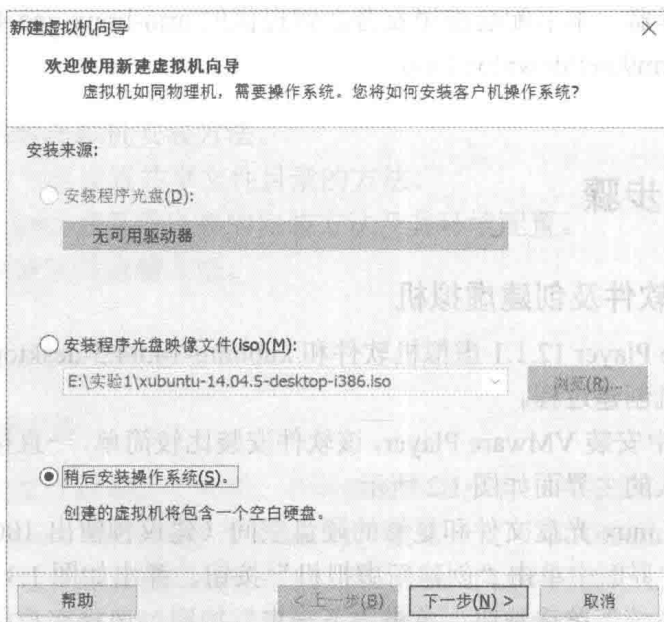


图 1.3 新建虚拟机向导

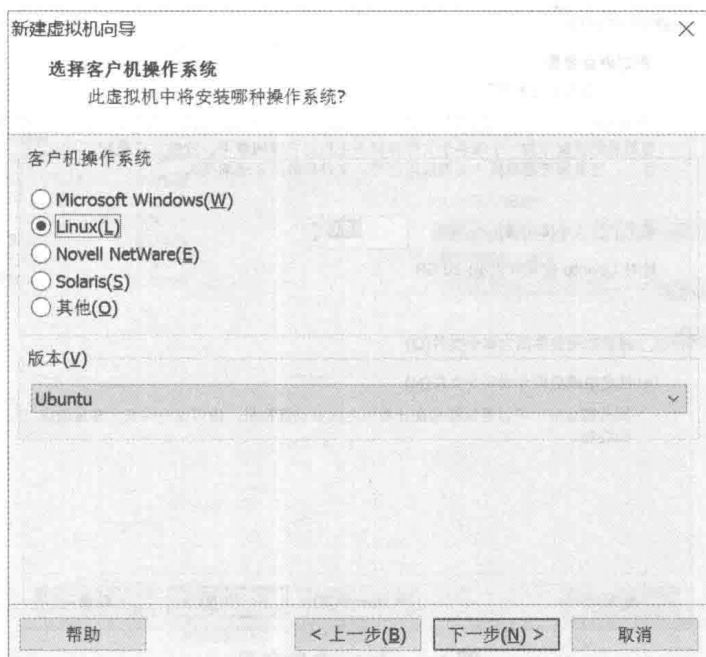


图 1.4 选择客户机操作系统

如图 1.5 所示，按图中所示设置虚拟机名称，选择虚拟机存放位置。新建的虚拟机默认存放在 VMware 程序目录中，目录位置不太好找，建议修改存放位置，要注意留有足够的硬盘空间（10GB 以上）。设置完成后，继续单击“下一步”按钮，进入指定磁盘容量页面。

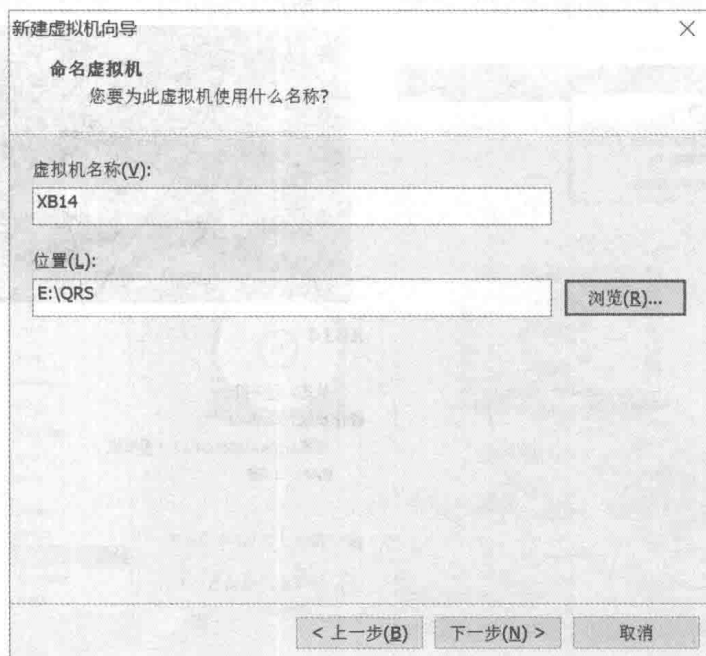


图 1.5 命名虚拟机

如图 1.6 所示，指定磁盘容量时建议保留默认大小和拆分选项，单击“下一步”按钮，完成虚拟机创建。刚创建的虚拟机硬盘文件实际上并没有图 1.6 所示的 20GB，随着后续的使用和软件安装将会越来越大，其占用硬盘空间的上限就是指定的 20GB。

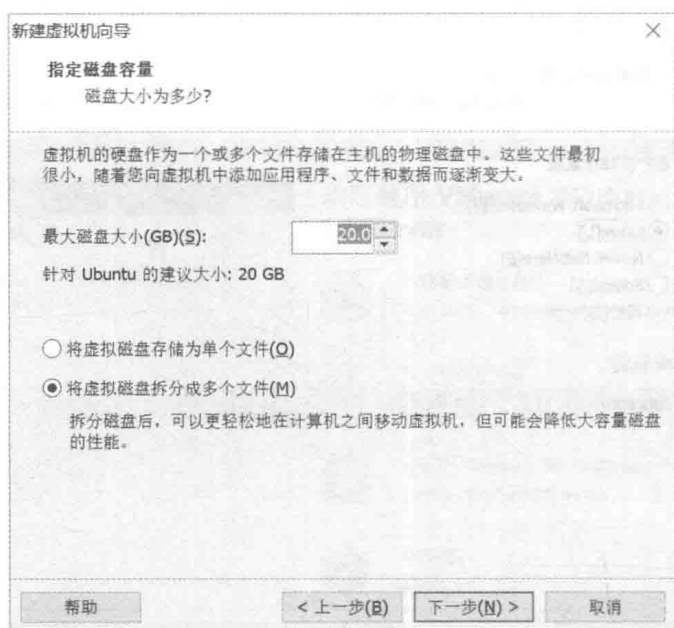


图 1.6 指定磁盘容量

新建虚拟机成功之后, 如图 1.7 所示, 在 VMware Player 主界面中可以看到左侧列表中已经添加了新建的 XB14 虚拟机, 右击该虚拟机, 弹出快捷菜单, 选择“设置”选项。



图 1.7 查看虚拟机列表

如图 1.8 所示, 在“虚拟机设置”对话框中, 首先选中左侧的 CD/DVD(SATA), 然后在右侧“连接”选项组中选中“使用 ISO 映像文件”单选按钮, 浏览找到已经下载好的 Linux 系统的 ISO 文件, 单击“确定”按钮保存设置。



图 1.8 虚拟机启动光盘设置

回到 VMware Player 软件主界面后，双击 XB14 虚拟机，或选中虚拟机后单击其上方的绿色开机按钮，启动运行虚拟机。如图 1.9 所示，虚拟机最后停留在准备安装界面，在左侧的语言栏中拖动到最底部，选择“中文(简体)选项”，单击“安装 Xubuntu”按钮开始安装系统。

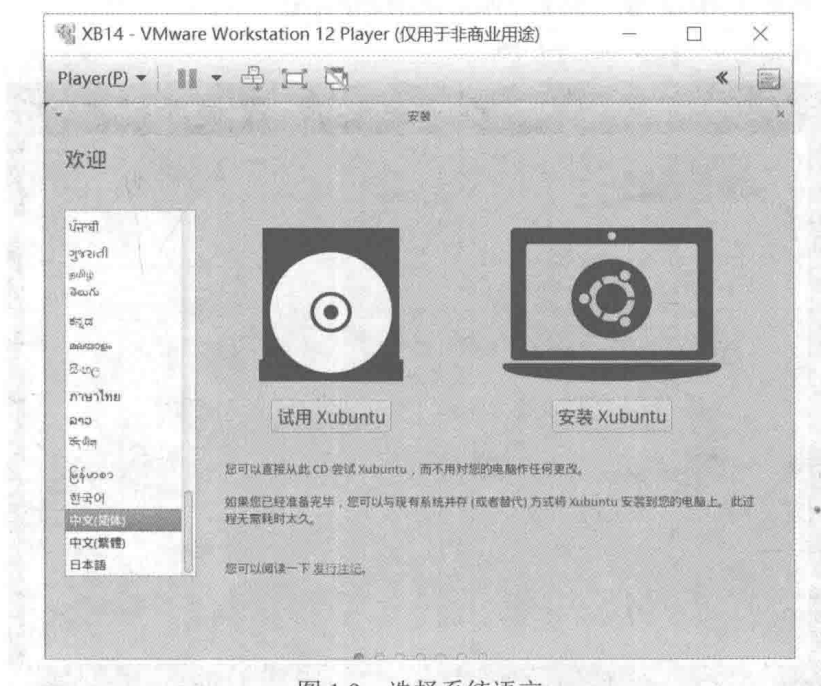


图 1.9 选择系统语言

如图 1.10 所示，为了节省系统安装时间，在安装配置页面中，“安装中下载更新”和“安装这个第三方软件”都不选中，直接单击“继续”按钮。

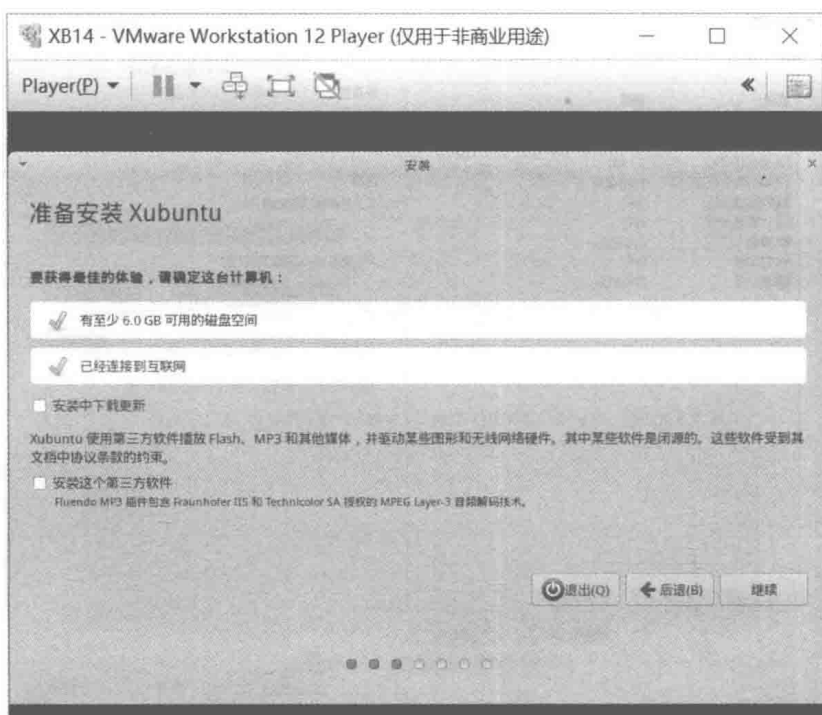


图 1.10 取消安装选项

选择安装类型，选中默认的“清除整个磁盘并安装 Xubuntu”单选按钮，其他不选，单击“现在安装”按钮，确认“继续”到下一步，如图 1.11 所示。

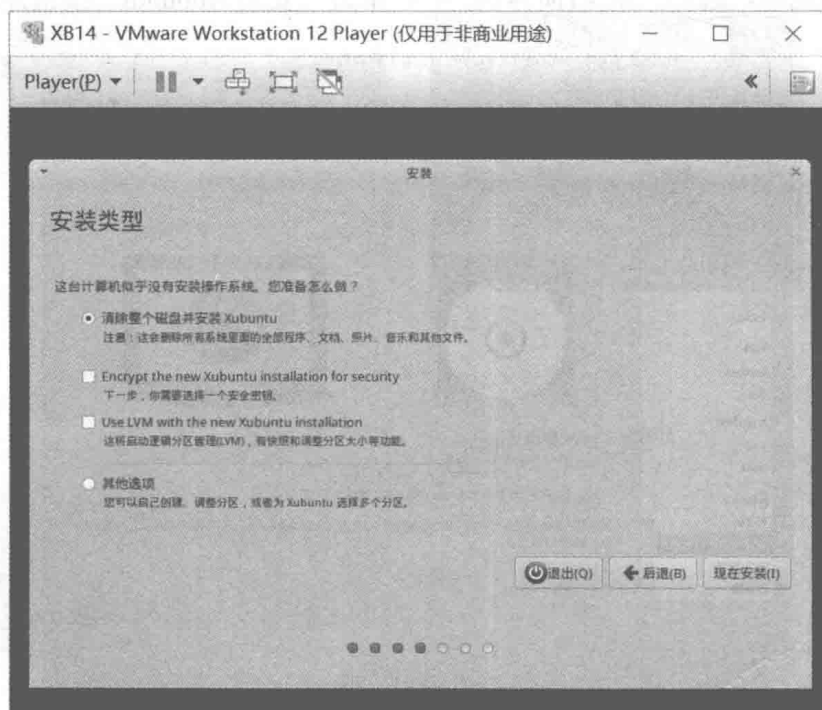


图 1.11 选择安装类型

如图 1.12 所示，选择时区，保持默认的 shanghai，单击“继续”按钮，其后的键盘布局

也保持为默认选项，单击“继续”按钮到下一步。



图 1.12 时区选择

如图 1.13 所示，设置用户名、密码。建议用户名使用英文，若使用汉字，则后期可能会出现软件不兼容的情况，本书中示例使用 fish 作为用户名。密码为 root 权限密码，一般而言，在学习时建议使用简单一点的密码，方便输入，登录选项建议选中“自动登录”单选按钮。

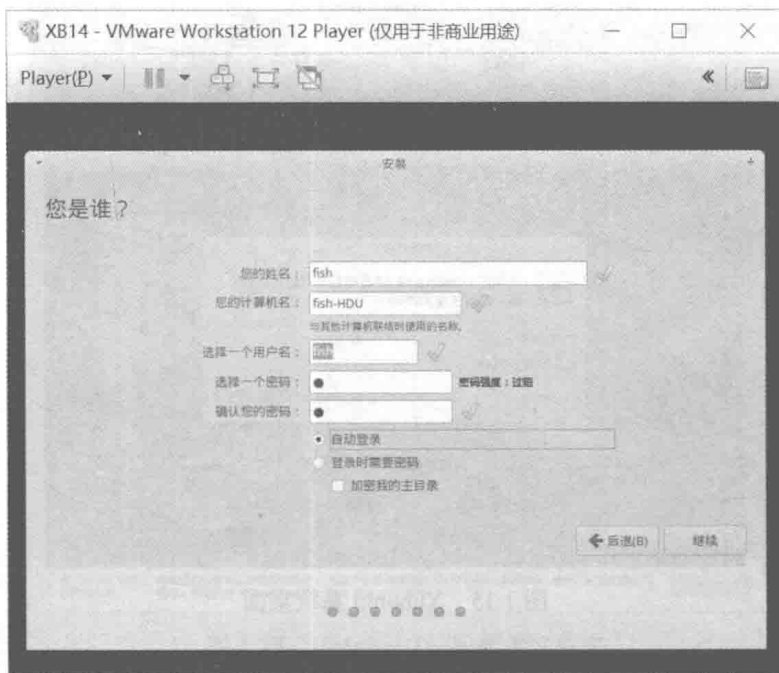


图 1.13 用户及密码设置

单击“继续”按钮后，等待系统安装完成，等待过程如图 1.14 所示。