

原书的全新升级版，增加了对Vivado IDE的支持。

软件、硬件、I/O全可编程SoC——ZYNQ的全球首本实战开发指南。

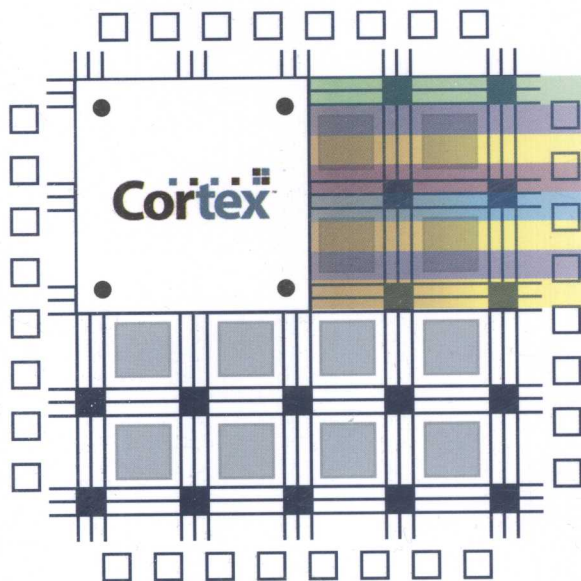
单芯片上实现软硬件协同设计的开山之作，20个设计实例循序渐进引导实战。

从单模块案例向系统级案例拓展，提供完整工程文件和源代码，极具可操作性。



FPGA与嵌入式

第2版



ZYNQ

# 嵌入式系统软硬件 协同设计实战指南

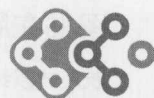
## 基于Xilinx ZYNQ

陆佳华 潘祖龙 彭竞宇 等编著



机械工业出版社  
China Machine Press

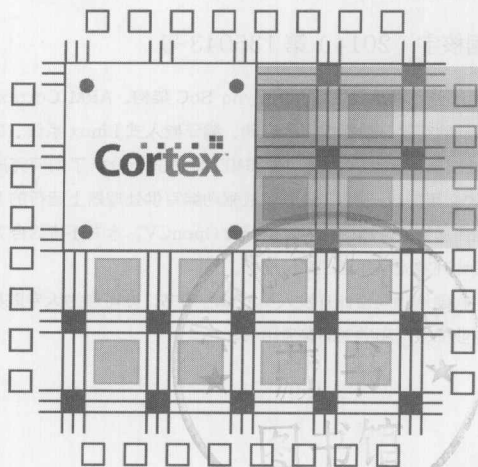
014056078



FPGA与嵌入式

第2版

TP360.21  
66-2



ZYNQ

# 嵌入式系统软硬件 协同设计实战指南 基于Xilinx ZYNQ

陆佳华 潘祖龙 彭竞宇 等编著



北航

C1744052

TP360.21

66-2



机械工业出版社  
China Machine Press

870320210

## 图书在版编目 (CIP) 数据

嵌入式系统软硬件协同设计实战指南: 基于 Xilinx ZYNQ / 陆佳华等编著. —2 版. —北京: 机械工业出版社, 2014.7

(电子与嵌入式系统设计丛书)

ISBN 978-7-111-47207-0

I. 嵌… II. 陆… III. 可编程序逻辑阵列—系统设计 IV. TP332.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 135043 号

本书分为基础篇和进阶篇两部分, 基础篇主要介绍 Zynq SoC 架构、ARM Cortex-A9 处理器、开发工具链等器件 Boot 过程, 并配备了大量基础实验, 包括板卡的启动、编译嵌入式 Linux 系统、完成 ARM 和 FPGA 的简单片内通信等; 在进阶篇中详解了处理器和 FPGA 间接口种类和工作方式, 分析了如何完成两者间高速的数据交互, 通过实例介绍了如何在 FPGA 中定义用户自己的 IP 核并完成驱动编写供处理器上运行的 Linux 使用等, 例如如何完成 HDMI 接口, 如何将摄像头数据传递给处理器, 并通过运行的 OpenCV。本书还将结合 Xilinx 最新的 Vivado 和 HLS 开发工具介绍整体软硬件协同设计开发流程并通过案例分析。

本书可作为 Zynq 初学者、软硬件协同设计开发人员的参考用书, 亦可作为大专院校嵌入式系统设计、片上系统设计、可编程逻辑器件等相关专业的教师和学生的参考用书。

## 嵌入式系统软硬件协同设计实战指南: 基于 Xilinx ZYNQ

陆佳华 等编著

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: 李 燕

责任校对: 董纪丽

印 刷: 北京市荣盛彩色印刷有限公司

版 次: 2014 年 7 月第 2 版第 1 次印刷

开 本: 186mm×240mm 1/16

印 张: 21

书 号: ISBN 978-7-111-47207-0

定 价: 69.00 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) 88378991 88361066

投稿热线: (010) 88379604

购书热线: (010) 68326294 88379649 68995259

读者信箱: hzsj@hzbook.com

版权所有·侵权必究

封底无防伪标均为盗版

本书法律顾问: 北京大成律师事务所 韩光 / 邹晓东

# 序 言

随着开发定制芯片成本的飞速增长，越来越少的人拥有在最新的工艺节点上开发专用芯片或片上系统（ASIC/SoC）的资源。因此人们迫切需要一个能提供低功耗、高性能及高容量等优势 ASIC 和 FPGA 硬件可编程器件。有了这样的器件就可以被用户编程为自己设计的专用 SoC。该类的器件尤其对教师和学生有用，它们可使每个人都可以搭建自己的专用全可编程 SoC，而不需要真实的搭建一片硅片。

Xilinx Zynq-7000 全可编程 SoC 系列器件正是这类产品。在这个芯片的硬件部分实现了一个高性能、双核 ARM Cortex-A9 处理器子系统（PS）和一个丰富的内存、配置和互联接口。在 FPGA 逻辑部分保留了灵活性以及其他传统 FPGA 具备的所有优势，FPGA 则通过多口高性能接口连接到 PS 端，实现了 PS 与 FPGA 间的高带宽通信。

ZedBoard（Zynq-7000 开发板）通过提供一个专门为这类独一无二并且功能强大的器件推广到广大应用和用户，并重点关注大学生的定制平台，将定制化 SoC 的概念带到了下一步。

在本书中，作者对 Zynq-7000 系列芯片和 ZedBoard 产品进行了出色的概述，还详细介绍了器件的结构。作者通过在 Zynq-7000 SoC 芯片上搭建设计来引导读者，并深入描述了搭建该系统需要的工具以及相应的开发流程。Zynq-7000 芯片是一个混合器件——软件和硬件都可以编程，本书覆盖了硬件设计工具以及高层软件设计工具和流程。最重要的是作者通过完整的开发流程引导读者理解启动和配置器件，以及启动更高层执行（如操作系统）的过程。本书还提供了几个在 ZedBoard 上运行的参考设计，这些参考设计覆盖了工业电机控制到智能图像处理，所有这些信息使读者可以快速理解并在 Zynq-7000 SoC 芯片上搭建设计。

这本书提供了优秀并且简明的所有应该要开始使用的 Zynq-7000 SoC 系列的信息。作为全球领先的电子产品开发者，中国的经济依靠着富有天赋并且受过良好训练的工程师们为强大的经济发展提供燃料。本书作为一本介绍 Zynq-7000 SoC 产品相关的书籍，对于中国用户是非常适用的。

Vidya Rajagopalan

赛灵思处理、系统、解决方案以及应用部副总裁

## 第 2 版前言

### 平台及写作背景

作为全球最大的可编程逻辑平台供应商，Xilinx 已将可编程逻辑技术带领到了 All Programmable（全可编程）的时代，其产品不仅有最新的 28nm 的 7 系列（分为 Artix7、Kintex7、Virtex7）FPGA 芯片，更有通过 SSI（堆叠硅片互联）技术实现的最大容量 FPGA Virtex7-2000T，同时在 FPGA 芯片内集成了高速 AD 以及最高可达 28.05Gb/s 的高速串行口等可编程逻辑外的模块。对于应用者而言，除了以上工艺的创新外，更具有划时代意义的是 Xilinx 推出的 Zynq-7000 AP SoC 芯片，其不仅解决了芯片工艺实现上的难点，更解决了片内高性能处理器与高性能可编程逻辑数据交互协议的难点。

Zynq-7000 是首款将高性能 ARM Cortex-A9 硬核与可编程逻辑紧密集成到一起的器件。在 Zynq 平台中，我们首先可以把可编程逻辑看成是处理器外设中一个具有可重配置特点的“外设”，比如当串口或以太网接口不够时、需要视频接口时，都可以用可编程逻辑扩展；其次我们也可将其看成一个与处理器对等的主设备，其可主动完成与外部芯片的数据交互，例如主动进行视频、网络数据预处理。通过这样的结合，既发挥了处理器在处理复杂控制算法、运行操作系统等方面的优势，又利用 FPGA 在并行算法加速、可动态重配置的特点，实现了系统加速，增加了灵活性；同时基于片内结合的方案，减少了板子面积，降低了功耗，也加快了硬件开发速度。结合 Zynq 的推出，Xilinx 不仅在先期将所有 IP 核接口切换到基于 ARM AMBA4.0 (AXI4) 的标准，实现了逻辑 IP 与 Zynq 无缝迁移。同时也推出了 C2HDL 的高层综合工具 AutoESL（目前已集成到最新的开发套件 Vivado 中），这加快了已有算法的硬件化过程，同时也使得软件工程师可以在 Zynq 上独立完成软硬件协同设计。

针对这些新的技术和概念，读者不妨带着这样一些疑问阅读本书：现在有什么开发板可以直接使用？这样的 ARM + FPGA 的结构与板载 ARM 处理器与 FPGA 芯片的结合到底有哪些区别？ARM 与 FPGA 在一个芯片内到底是如何紧密配合的？互相之间数据交互的接口和方式是怎

样的？上电之后 ARM 和 FPGA 是如何配置的？利用 AutoESL 工具到底如何与 Zynq 结合？Linux 操作系统与 FPGA 又是如何结合的？这里的驱动如何写？在本书中，将陆续对这些问题进行解答。

从 Zynq 平台提出伊始，全球各地的客户对这一平台都产生了浓厚的兴趣，Xilinx 也于 2011 年年末正式发布了 Zynq 的芯片，在 2012 年年初就已经有了第一块的 Zynq 开发板 ZC702。到了 2012 年 6 月份，专为社区用户以及科研、教学用户定制的低价版本 ZedBoard 板也正式面世。但是对一个全新的平台来说，可参考资源相对缺乏，我们从 2012 年 7 月份开始 ZedBoard 板上进行设计时就已明显感受到项目进度因缺少参考资源而受到的影响。而到了美信的 DIY 大赛时，更听到国内用户对参考资料的迫切需求，尤其是相应的中文资料。而 2013 年 1 月份采用 ZedBoard 板作为主要平台的开源硬件与嵌入式大赛——OpenHW12 也即将展开。

在这样的背景下，赛灵思大学计划部门决定以最快的速度对我们在这几个月中开发的、参与的、学习的案例进行整理，编写一本由浅入深、以案例为主的实战类书籍，希望通过本书能帮助大家尽快了解、熟悉并掌握 Zynq 的开发。

## 阅读提示

本书分为基础篇和进阶篇两部分。

基础篇中主要介绍了 ZedBoard 开发板、Zynq 器件、开发工具链、Zynq 的体系结构及启动过程等基本的器件与板卡情况，同时考虑了软件工程师的知识结构，在第 8 章中介绍了 FPGA 的原理，以及硬件加速的原理，便于软件工程师理解 FPGA。在第 9 章中通过基础实验带领大家浅尝 Zynq 的开发过程，并带领大家用 ZedBoard 板搭建出一个单板计算机系统。

进阶篇中，首先介绍了利用虚拟平台 QEMU 进行软件开发的流程，在第 11 章中详细分析了 Zynq 中处理器与硬件逻辑的连接关系。第 12 章主要介绍了在 Zynq 上利用 HLS 进行软硬件协同设计的理念与过程。第 13 章占了全书四分之一的篇幅，介绍了使用 Zynq 实现逻辑、驱动、操作系统、高清视频显示、OpenCV、网络摄像机等 12 个应用案例，这是本书的精华之一。在第 14 章，将 13 章中提到的独立案例再融合成 4 个系统案例，这 4 个系统案例都会应用到前述章节的知识，以此帮助大家尽快掌握在 Zynq 上进行系统级设计的方法。

笔者在这些年支持客户的过程中，常常会发现客户困扰于不知如何寻找到 Xilinx 相关工具、IP 的参考文档、参考设计。因此本书第 15 章中主要介绍了如何获取资料和帮助，重点介绍了 Xilinx 新推出的 DocNav 工具，希望能帮助初学者迅速找到 Xilinx 资料。

在本书案例开发与写作的过程中，Xilinx 的工具已升级到了更新的 2014.1 版本，但是本书的很多案例是基于 2013.4 版本的，部分案例由于时间的关系仍然沿用 ISE 版本的，不过我们会很快将工程更新到 Vivado 版本。

作为 ZedBoard 板这样一个社区开发平台的设计指南，本书秉承了来源于社区回馈于社区的理念，书中所有参考设计均开放源码，读者可通过访问 <https://github.com/xupsh/ZynqBook.git> (GitHub) 或 <http://pan.baidu.com/S/leQj6buM> (网盘) 获取相关信息。同时本书的勘误以及工程更新都将在该网址上给出，另外，我们在 <http://www.openhw.org> 的论坛中设有“大学计划图书讨论专版”，读者可在此讨论区中找到本书对应版面，下载代码，对书稿、案例开展讨论。本书最后一个案例为智能小车项目，这是机器人开源社区 [www.zrobot.org](http://www.zrobot.org) 中的第一个项目。智能小车平台后续相关的拓展案例，以及其他机器人案例均会通过该社区开源代码，并同步更新，请大家关注该社区的发展，积极参与到社区的项目中来。

## 致谢

本书的写作也体现了社区的力量，本书得到国内各大著名院校以及工程师的支持：

- 1) 清华大学的刘勇攀教授、李双辰和我们一起完成了第 12 章的软硬件协同设计。
- 2) 华中科技大学的何顶新教授、任蔚博士、牛盼情和我们一起完成了第 14 章中的电机控制系统设计及其初稿写作，而方华启帮助我们完成了智能小车演示中 Android 客户端的开发演示。
- 3) 上海交通大学的祝永新教授、辜晓琪与我们一起完成了 OpenCV 的人脸识别案例及其初稿写作。
- 4) 山东大学的彭竞宇、沈瓚君与我们一起完成了树叶识别案例及其初稿写作。
- 5) 西安交通大学吕敏杰博士整理出了 HDMI 显示开发过程供大家参考。
- 6) 西安电子科技大学的雷杰副教授、徐建国也给了我们 Zynq 上实现 Lwip 的有益参考。
- 7) 本书也邀请到了爱板网 (eeboard) 的主编吴志军先生为我们撰写了第 3 章中的 ZedBoard 板的介绍，智翔集团的徐晨辉和我们一起完成了第 4 章的撰写，并在 Webcam 开发过程中给予了帮助。
- 8) Xilinx 高级战略应用工程师 Ricky Su 专门为本书更新了他的博客“Xilinx 网站资源导读”，以帮助读者寻找 Xilinx 的资料，本书第 15.3 节就取自于他的博客。

同时北京工业大学的林超、胡嘉欣、唐锟、黄少辉协助我们完成了部分图表、文字的更

新。非常感谢以上课题组及相关人员给予的无私帮助和支持，因为有了他们，我们才可以在短短3个月内完成初稿，相信大家在今后的章节阅读中会从他们参与的项目中大大获益。

西安交通大学的孙宏滨副教授通读了本书，并提出了很多宝贵的意见。Xilinx的很多合作伙伴都对这本书给予了很高的关注与支持，他们也对本书进行了点评与指导，在此一并感谢。

为了参考案例与本书的尽快面世，两位实习生马岷和江舟牺牲了大量业余时间，在此对他们以及他们女友的默默支持一并表示感谢，希望这段经历能成为他们今后美好的回忆。也要感谢机械工业出版社张国强编辑在本书写作与出版的过程中给予的大力支持和指导。更要感谢我的爱人吴幸博士，在我业余时间写作这本书时给予我全力的支持和关心。

本书主要作者的背景还是以硬件为主，因此本书虽为软硬件协同设计，但总体写作思路还是从硬件工程师的视角出发，如有不妥之处，请读者谅解。在本书创作初期，我们期望能出一本经典参考案例书籍，但理想与现实总有些许差距，例如与新加坡国立大学合作的足球项目在这一版中就无法与读者见面，甚是遗憾。同时因为时间关系，书中文字和实验内容会有欠斟酌和不完美的地方，甚至有错误的地方，恳请专家和读者不吝赐教，以便在适当时间再做修订补充。请读者将反馈意见发送至 [joshua.lu@xilinx.com](mailto:joshua.lu@xilinx.com) 与作者进一步交流。

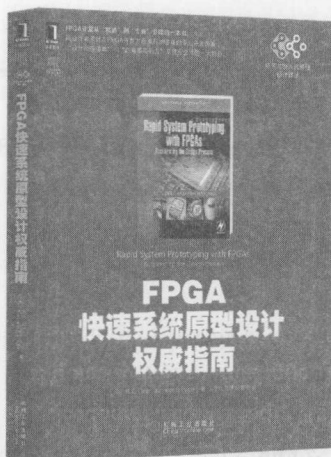
陆佳华

2014年5月18日于上海



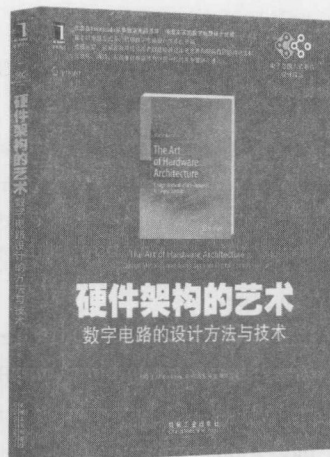
# 推荐阅读

精文荟萃



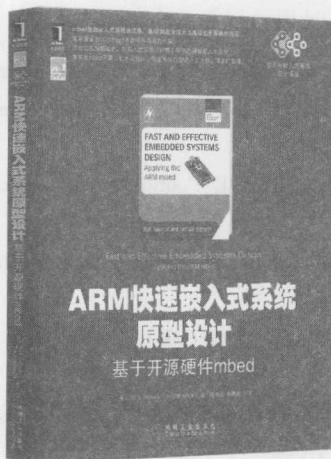
## FPGA快速系统原型设计权威指南

作者: R.C. Cofer 等 ISBN: 978-7-111-44851-8 定价: 69.00元



## 硬件架构的艺术: 数字电路的设计方法与技术

作者: Mohit Arora ISBN: 978-7-111-44939-3 定价: 59.00元



## ARM快速嵌入式系统原型设计: 基于开源硬件mbed

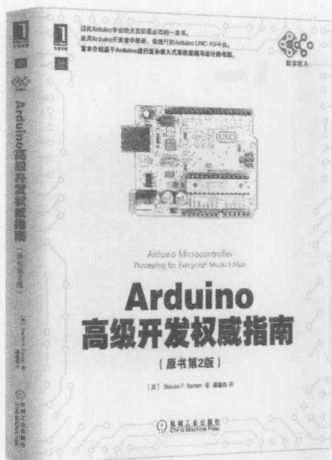
作者: Rob Toulson 等 ISBN: 978-7-111-46019-0 定价: 69.00元



## 嵌入式软件开发精解

作者: Colin Walls ISBN: 978-7-111-44952-2 定价: 79.00元

# 推荐阅读



## Arduino高级开发权威指南 (原书第2版)

作者: Steven F. Barrett ISBN: 978-7-111-45246-1 定价: 59.00元



## 例说XBee无线模块开发

作者: Jonathan A. Titus ISBN: 978-7-111-45681-0 定价: 59.00元



## Arduino与LabVIEW开发实战

作者: 沈金鑫 ISBN: 978-7-111-44583-5 定价: 59.00元



## Arduino开发实战指南: STM32篇

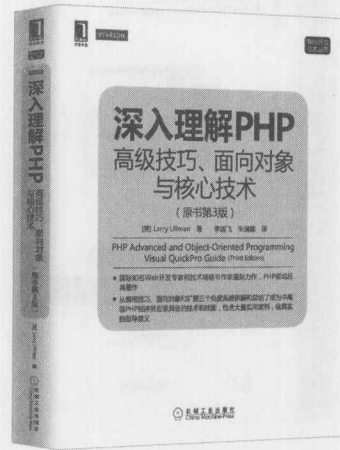
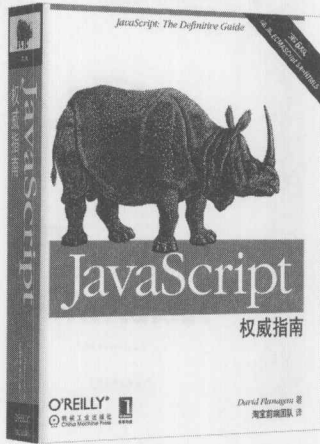
作者: 姚汉 ISBN: 978-7-111-44582-1 定价: 59.00元



北航

C1744052

## 推荐阅读



### JavaScript权威指南（原书第6版）

从1996年以来，本书已经成为 JavaScript 程序员的《圣经》。

第6版涵盖HTML5和ECMAScript 5。很多章节完全重写，以便跟得上当今的最佳Web开发实践。该版本的新增章节描述了jQuery和服务端JavaScript。

对于那些希望学习Web编程语言的有经验的程序员和希望精通JavaScript的当前JavaScript程序员，本书最适合不过了。

### 深入理解PHP：高级技巧、面向对象与核心技术（原书第3版）

国际知名Web开发专家和技术畅销书作家最新力作，PHP领域经典著作。

从编程技巧、面向对象和扩展三个角度系统讲解和总结了成为中高级PHP程序员应该具备的技术和技能，包含大量实用案例，极具实践指导意义。

如果你已经具备一定的PHP编程基础，想把开发效率更高，想把应用做得更好，那么这本书应该是你需要阅读的。本书旨在为想修炼成为高级PHP程序员的中初级PHP程序员提供实用的方法和建议。

# 目 录

- 序言
- 第 2 版前言
- 第一部分 基础篇**
- 第 1 章 将你的 ZED 板卡用起来 / 2**
  - 1.1 GPIO LED 动手玩 / 2
    - 1.1.1 安装 SD 卡 / 2
    - 1.1.2 跳线与外设连接 / 2
    - 1.1.3 演示操作 / 2
  - 1.2 Linaro Ubuntu 动手玩 / 3
    - 1.2.1 SD 卡分区 / 3
    - 1.2.2 文件复制 / 6
    - 1.2.3 外设连接 / 6
    - 1.2.4 可演示的效果 / 7
- 第 2 章 Zynq 平台介绍 / 9**
  - 2.1 7 系列 FPGA 简介 / 9
  - 2.2 Zynq-7000 AP SoC 体系简介 / 12
- 第 3 章 ZedBoard 开发环境 / 15**
  - 3.1 ZedBoard 的板载外设 / 15
    - 3.1.1 LED / 15
    - 3.1.2 按键 / 16
    - 3.1.3 开关 / 16
    - 3.1.4 OLED / 17
    - 3.1.5 USB 接口 / 18
    - 3.1.6 音频接口 / 20
    - 3.1.7 VGA 接口 / 21
    - 3.1.8 HDMI 接口 / 22
    - 3.1.9 10/100/1000 兆网口 / 23
  - 3.2 ZedBoard 的扩展外设 / 25
    - 3.2.1 PMod / 25
    - 3.2.2 外扩 FMC 插槽 / 27
    - 3.2.3 外扩 AMS 插座 / 28
- 第 4 章 Zynq 开发工具链 / 29**
  - 4.1 Vivado 设计套件 / 29
    - 4.1.1 Vivado IDE / 29
    - 4.1.2 Vivado IP Integrator / 32
    - 4.1.3 Vivado 调试介绍 / 35
  - 4.2 软件开发工具链 / 37
    - 4.2.1 SDK / 37
    - 4.2.2 交叉编译工具链 / 38
    - 4.2.3 GDB 与 GDB Server / 39
- 第 5 章 Zynq 体系结构 / 41**
  - 5.1 应用处理器单元 / 41
    - 5.1.1 Cortex-A9 处理器 / 41
    - 5.1.2 侦听控制单元 / 44
    - 5.1.3 L2 高速缓存 / 45
    - 5.1.4 APU 接口 / 45
  - 5.2 通用外设 / 47
    - 5.2.1 通用 I/O / 47
    - 5.2.2 SPI 接口 / 50

5.2.3 UART 接口 / 52

5.2.4 计时器 / 55

5.2.5 USB 控制器 / 57

5.2.6 DDR 控制器 / 58

5.3 数字逻辑设计 / 60

5.3.1 可编程逻辑“外设” / 60

5.3.2 XADC / 62

5.3.3 PCIe / 63

5.4 MIO/EMIO / 64

## 第6章 系统级信号 / 67

6.1 电源管理 / 67

6.1.1 PS 运行模式下的动态  
功耗削减 / 68

6.1.2 睡眠模式 / 68

6.2 时钟信号 / 68

6.2.1 CPU 时钟域 / 69

6.2.2 DDR 时钟域 / 70

6.2.3 基本的时钟分支结构 / 70

6.2.4 I/O 外设 (IOP) 时钟 / 71

6.2.5 PL 时钟 / 73

6.2.6 其他时钟 / 73

6.3 复位系统 / 74

6.4 JTAG / 76

6.5 中断处理 / 77

## 第7章 Zynq 的启动与配置 / 79

7.1 Zynq 的启动过程简介 / 79

7.2 外部启动条件 / 80

7.2.1 电源要求 / 80

7.2.2 时钟要求 / 80

7.2.3 复位要求 / 80

7.2.4 启动引脚设置 / 81

7.3 BootROM / 81

7.3.1 BootROM 的作用 / 81

7.3.2 BootROM 的特点 / 82

7.3.3 执行 BootROM 后的状态 / 83

7.4 FSBL / 83

7.5 SSBL / 86

7.6 Linux 启动过程 / 86

7.7 Secure Boot / 87

## 第8章 面向软件工程师的逻辑设计 / 89

8.1 FPGA 硬件加速原理 / 89

8.1.1 以空间换时间 / 89

8.1.2 以存储器换门电路 / 91

8.1.3 以 IP 集成换生产力 / 92

8.2 部分动态可重配置于 Zynq / 95

## 第9章 ZedBoard 入门 / 97

9.1 跑马灯 / 97

9.1.1 Vivado 工程创建 / 97

9.1.2 在 Vivado 中创建 Zynq  
嵌入式系统 / 100

9.1.3 SDK 应用程序的编写 / 109

9.2 Zynq 嵌入式系统调试方法 / 114

9.2.1 Vivado 硬件调试 / 114

9.2.2 使用 SDK 对 Zynq 进行  
调试 / 119

9.3 启动 Linux / 123

9.3.1 创建 FSBL.elf / 123

9.3.2 从 SD 卡启动 Linux / 124

9.3.3 从 QSPI 启动 Linux / 126

## 第二部分 进阶篇

### 第10章 基于虚拟平台的 Zynq 开发 / 130

10.1 QEMU 介绍 / 130

- 10.2 编译 QEMU 源码 / 130
  - 10.2.1 下载 QEMU 源码 / 130
  - 10.2.2 配置 QEMU / 131
  - 10.2.3 QEMU 所依赖的库文件 / 131
  - 10.2.4 编译 QEMU / 131
- 10.3 启动 QEMU / 131
- 10.4 QEMU 中的嵌入式 Linux / 132
  - 10.4.1 QEMU 启动简介 / 132
  - 10.4.2 使用 Ubuntu 包管理器快速搭建用户定制系统 / 133
  - 10.4.3 使用 SSH 服务进行访问 / 134
  - 10.4.4 使用 Telnet 服务进行访问 / 135
  - 10.4.5 使用 FTP 服务向 QEMU 传送文件 / 135
  - 10.4.6 USB 设备支持 / 135
  - 10.4.7 SMP 对称多核处理器的支持 / 135
  - 10.4.8 硬件模块 GPIO 支持 / 135
- 10.5 商业版虚拟平台 / 136

## 第 11 章 PL 和 PS 的接口技术 详解 / 137

- 11.1 PL 和 PS 的接口 / 137
  - 11.1.1 AXI 接口简介 / 138
  - 11.1.2 AXI Interconnect / 139
- 11.2 Zynq 的内部连接 / 142
  - 11.2.1 AXI\_HP / 144
  - 11.2.2 AXI\_GP / 145
  - 11.2.3 AXI\_ACP / 145
- 11.3 PL 和存储器系统性能概述 / 147
  - 11.3.1 接口理论带宽 / 147
  - 11.3.2 DDR 控制器的吞吐率及效率 / 148
  - 11.3.3 内部互连吞吐量瓶颈 / 148

- 11.3.4 如何选择 PL 的接口 / 149

## 第 12 章 基于 Zynq 的软硬件协同设计 / 154

- 12.1 多核处理器架构简介 / 154
  - 12.1.1 什么是多核处理器 / 154
  - 12.1.2 多核处理器发展的动机和优势 / 155
  - 12.1.3 同构、异构多核架构的优点和挑战 / 157
- 12.2 软硬件协同设计方法论 / 157
  - 12.2.1 什么是软硬件协同设计 / 157
  - 12.2.2 软硬件协同设计发展的动机和优势 / 157
  - 12.2.3 软硬件协同设计的基本流程 / 158
  - 12.2.4 基于 Xilinx 工具的软硬件协同设计简介 / 159
- 12.3 高层次综合 / 159
  - 12.3.1 高层次综合综述 / 159
  - 12.3.2 高层次综合发展的动机与优势 / 160
  - 12.3.3 Xilinx Vivado HLS 工具简介 / 161
- 12.4 基于 Xilinx Zynq 的软硬件协同设计简例 / 162
  - 12.4.1 功能简介 / 162
  - 12.4.2 设计流程简介 / 162

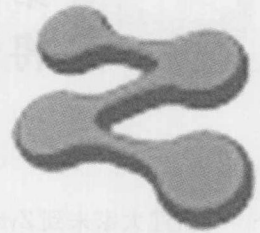
## 第 13 章 Zynq 高级开发 / 170

- 13.1 用户 IP 核设计 / 170
  - 13.1.1 AXI PWM 设计 / 170
  - 13.1.2 添加用户 IP, 完成系统设计 / 180
- 13.2 构建嵌入式 Linux 系统 / 185

- 13.2.1 构建交叉编译环境 / 185
  - 13.2.2 编译 U-Boot / 186
  - 13.2.3 编译 uImage / 186
  - 13.2.4 生成 uramdisk. image. gz / 187
  - 13.2.5 创建 devicetree. dtb / 188
  - 13.3 嵌入式 Linux 应用程序与驱动 / 190
    - 13.3.1 Linux 设备驱动与软硬件之间的关系 / 190
    - 13.3.2 字符型设备驱动 / 191
    - 13.3.3 PWM 模块驱动程序 / 192
    - 13.3.4 应用程序编写 / 193
  - 13.4 HDMI 设计 / 194
    - 13.4.1 HDMI 传输原理 / 195
    - 13.4.2 ADV7511 芯片的相关控制信号 / 196
    - 13.4.3 HDMI 系统 Vivado 实现 / 198
  - 13.5 OpenCV 移植 / 200
    - 13.5.1 开发环境准备 / 200
    - 13.5.2 配置 cmake / 200
    - 13.5.3 OpenCV 编译与安装 / 202
    - 13.5.4 OpenCV 移植与 ZedBoard 测试 / 203
  - 13.6 基于 OpenCV 的树叶识别系统 / 204
    - 13.6.1 项目总览 / 205
    - 13.6.2 图像采集 / 205
    - 13.6.3 预处理 / 206
    - 13.6.4 特征提取 / 208
    - 13.6.5 分类决策 / 213
    - 13.6.6 过程总述 / 216
  - 13.7 基于 OpenCV 的人脸检测系统 / 217
    - 13.7.1 原理简介 / 218
    - 13.7.2 系统设计与实现 / 219
  - 13.8 嵌入式 Web 服务器搭建 / 221
    - 13.8.1 Boa 服务器移植与配置 / 221
    - 13.8.2 Boa 服务器的部署与测试 / 223
    - 13.8.3 CGI 程序简介 / 224
  - 13.9 在 ZedBoard 上搭建网络摄像机 / 225
    - 13.9.1 嵌入式网络摄像机 / 225
    - 13.9.2 Mjpeg-Streamer 移植 / 226
    - 13.9.3 部署 Mjpeg-Streamer / 226
  - 13.10 FreeRTOS / 228
    - 13.10.1 FreeRTOS 介绍 / 228
    - 13.10.2 FreeRTOS 与 ucOS-II 的比较 / 229
    - 13.10.3 FreeRTOS 在 Zynq 上的应用实例与分析 / 229
  - 13.11 基于 FreeRTOS 的 Xilfms / 240
    - 13.11.1 嵌入式文件系统概述 / 241
    - 13.11.2 Xilfms 文件系统介绍 / 245
    - 13.11.3 Xilfms 文件系统使用实例 / 248
    - 13.11.4 利用 mfsngen 工具创建只读型文件系统镜像 / 250
  - 13.12 Lwip / 251
    - 13.12.1 基于 standalone 的 Lwip 应用 / 252
    - 13.12.2 基于 FreeRTOS 的 Lwip 应用 / 255
  - 13.13 在 Zynq 上搭建 Andriod / 257
  - 13.14 Zynq 双核通信 / 259
- 第 14 章 系统级设计案例 / 265**
- 14.1 多轴运动控制系统 / 265
    - 14.1.1 整体结构 / 265
    - 14.1.2 硬件系统设计 / 266

- 14.1.3 硬件系统与 ZedBoard 接口 / 267
  - 14.1.4 控制系统设计流程 / 268
  - 14.1.5 多轴控制系统结构设计 / 270
  - 14.1.6 利用 Vivado HLS 实现电流环控制硬件 / 271
  - 14.1.7 算法移植 / 272
  - 14.1.8 算法综合 / 273
  - 14.1.9 软件系统设计 / 274
  - 14.1.10 双核交互实现 / 274
  - 14.1.11 Android APP 监控程序实现 / 275
  - 14.1.12 系统测试 / 276
  - 14.2 Sobel 滤波 / 278
    - 14.2.1 软件架构设计 / 278
    - 14.2.2 Linux 内核与设备驱动 / 279
  - 14.3 SDN/OpenFlow 交换机 / 287
    - 14.3.1 SDN/OpenFlow 简介 / 287
    - 14.3.2 数据通路设计 / 288
    - 14.3.3 平台架构搭建 / 290
    - 14.3.4 系统及驱动 / 291
    - 14.3.5 OpenFlow 交换机移植 / 292
    - 14.3.6 启动 OpenFlow 交换机 / 292
    - 14.3.7 数据通路优化及加速 / 294
  - 14.4 智能小车系统开发 / 294
    - 14.4.1 智能小车系统结构 / 295
    - 14.4.2 运动控制设计 / 298
      - 14.4.3 Linux 系统应用程序设计 / 301
      - 14.4.4 智能小车平台的后续拓展 / 307
      - 14.4.5 在智能小车平台上移植 ROS / 308
- 第 15 章 如何获取资料和帮助 / 309**
- 15.1 如何获取 Xilinx 的技术文档 / 309
    - 15.1.1 DocNav 介绍 / 309
    - 15.1.2 DocNav 使用案例 / 309
  - 15.2 如何找到 Zynq 开发资料 / 312
    - 15.2.1 如何获取本书的最新例程 / 312
    - 15.2.2 如何获取 Zynq 开发资料 / 312
    - 15.2.3 如何获取 ZedBoard 文档与例程 / 313
  - 15.3 Xilinx 网站资源导读 / 313
    - 15.3.1 序 / 313
    - 15.3.2 Xilinx 软件介绍 / 313
    - 15.3.3 软件版本和软件更新 / 316
    - 15.3.4 软件教程 / 317
    - 15.3.5 硬件资料 / 318
    - 15.3.6 参考资源 / 319
    - 15.3.7 问题解决 / 320
- 参考文献 / 321**





## 第一部分

# 基础篇

将你的 ZED 板卡用起来

Zynq 平台介绍

ZedBoard 开发环境

Zynq 开发工具链

Zynq 体系结构

系统级信号

Zynq 的启动与配置

面向软件工程师的逻辑设计

ZedBoard 入门