

- ★入门必读，速成高手；听音阅书，赢在起点
- ★可能会成为FPGA史上备受推崇的可以听的入门书

你好FPGA

一本可以听的入门书

王建飞 雷斌 编著



勇敢的芯系列丛书 至芯科技 组编



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>

勇敢的芯系列丛书

你好 FPGA：一本 可以听的入门书

至芯科技 组编

王建飞 雷 斌 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书由至芯科技在各大高校的授课内容整理而来,是为初学者量身定制的 FPGA 入门教材,从基础的软件安装、工具使用、语法解释、设计方法、常用 IP,到最后的设计技巧及大量的进阶实验,内容环环相扣,为读者建立了一个比较清晰的学习脉络。设计思路及方法为本书重点强调的内容,它作为一条主线贯穿始终,希望读者学习时注意体会。只有掌握了正确的学习和设计方法,读者才可能在数字逻辑设计的领域越走越远。

本书没有收录过多烦琐的理论,一切从实战出发,按照一套相对高效的设计方法直接切入一个个小的项目,深入浅出。希望以此可以培养广大读者的设计能力,我们不但要知道某个逻辑可以这样写,更重要的还必须清楚为什么这样写,这样写有什么优势或劣势,还有没有优化空间等。

与本书配套的视频已保存在网络云中,读者可在下载后参考学习。本书内容由浅入深,适合广大可编程逻辑器件的初学者作为入门和进阶的教材,也适合作为电子信息、计算机等专业本科生、研究生,以及具有一定电子专业知识背景的电子工程师的参考用书。

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

你好 FPGA: 一本可以听的入门书/至芯科技组编; 王建飞, 雷斌编著. —北京: 电子工业出版社, 2016.8
(勇敢的芯系列丛书)

ISBN 978-7-121-29091-6

I. ①你… II. ①至… ②王… ③雷… III. ①可编程序逻辑器件—系统设计 IV. ①TP332.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 134126 号

策划编辑: 张楠

责任编辑: 底波

印刷: 三河市鑫金马印装有限公司

装订: 三河市鑫金马印装有限公司

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: 787×1 092 1/16 印张: 21.75 字数: 552 千字

版次: 2016 年 8 月第 1 版

印次: 2016 年 8 月第 1 次印刷

定价: 65.00 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, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zltts@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) 88254579。

◇ 推荐序 ◇

很高兴为至芯科技的书《你好 FPGA：一本可以听的入门书》写推荐序。

随着电子行业的持续发展，FPGA 由于天生的特性，从最初的“路人甲”逐渐占据系统的主导与核心地位。近期 Intel 公司将发布一款新的混合封装产品——至强+FPGA，FPGA 扮演“男一号”。对于广大在校生来讲，选择今后的学术研究或者职业发展方向，学会 FPGA 无疑是一个很有发展潜力和竞争力的技能。

这本书是基于 Altera 公司的软件 Quartus II 15.0 编写的。从最基本的安装软件，到最后的练习，通过大量实际的例子，一步步逐渐深入，读者最后可以完全理解和掌握 FPGA，最适合“菜鸟”们学习。

我推荐这本书给广大在校生以及已经在工作岗位的人员，通过这本书，可以让一个在 FPGA 设计上完全的“白板”，逐渐成长为高手。

这些例子都是至芯科技的工程师多年实际工作的总结，流程解释得非常详细，按部就班地实践就能学会和掌握 FPGA 的设计要点和注意事项。希望能通过这本书，让你的事业更上一层楼。

陈卫中

Altera 公司大学计划中国区经理

2016 年 6 月于成都

◆ 前 言 ◆

本书是由至芯科技推出的 FPGA 基础入门实验教程。授课内容深入浅出，从最基础的语法到进阶的端口驱动开发，所有的设计都紧紧地围绕着“设计方法”这样的一条主线进行。

本书主要由至芯科技工程师王建飞（笔名为梦翼师兄）和雷斌执笔完成，内容全部取材于至芯科技在各大高校的具体授课内容，设计流程规范、精练。每个项目都给出了具体的设计目的、设计原理、设计思路、系统架构图、各模块端口意义注解及具体模块的代码等。内容详细，可以有效地帮助初学者快速入门 FPGA 硬件逻辑设计。

本书特点

本书具有以下特点。

- ✧ 教学题材和教学方法全部来自至芯科技在各大高校的实训内容，设计方法规范，授课题材实战价值高。
- ✧ 教学内容全部以实战形式进行，在动手实现实际项目的过程中掌握常用的语法、设计方法、通用接口及 FPGA 设计过程中常用到的设计技巧。
- ✧ 本书由至芯科技工程师梦翼师兄编写，在内容编写过程中融入了大量工程实战经验，各代码模块实战价值高，可移植性强，大部分功能模块可以直接应用于其他设计，从而有效缩短二次开发周期。
- ✧ 本书配有梦翼师兄录制的配套高清教学视频，手把手教学，帮助读者提高学习效率。

梦翼师兄根据多年的项目研发和教学经验，将项目设计研发中需要用到的一些开发技巧和学习方法通过项目实战的方式尽可能地体现到每一个实例中。通过本书的学习，读者不但可以掌握常用的 FPGA 接口和外设驱动方式。更重要的是，通过理解和练习，读者可以建立起一套完整、规范的开发设计流程和方法，助力之后的公司项目开发。

配套视频

读者可以跟着梦翼师兄录制的配套教学视频进行学习，通过视频，可以看到梦翼师兄如何对一个项目进行构思，以及如何进行基础模块代码的编写。与本书配套的视频已保存在网络中，读者可下载后参考学习，下载地址为：<http://yydz.phei.com.cn/aspcms/download/2016-7-6/324.html>，或者扫描右方二维码直接下载：



若链接地址出现问题，可以发送邮件至 zhangn@phei.com.cn 索取视频文件。

感谢

在此特别感谢黑龙江信息技术职业学院刘春玲老师为本书的编写提出的大量建设性建议以及对内容的编排所做的大量工作。

同时，参与编写本书的还有黑龙江信息技术职业学院的李茁老师、安康学院的崔智军老师以及至芯科技的寇飞强、郝旭帅、陈飞龙三位工程师。

非常感谢安康学院崔智军老师对本书前 4 章内容的编写。

由于编者水平有限和时间限制，书中难免存在不妥之处，敬请广大读者予以指正和帮助。

编 者
2016 年 6 月

◆ 目 录 ◆

第 1 章 没有金刚钻，不揽瓷器活	1
1.1 Quartus II 15.0——温婉简约编译器	1
1.1.1 写在前面的话	1
1.1.2 Altera Quartus II 15.0 安装	1
1.2 ModelSim 10.3d——独具慧眼仿真工具	7
1.3 级联调试——标准设计势必行	7
第 2 章 工欲善其事，必先利其器	31
2.1 工程规范——我的地盘，你说了算	31
2.2 初识流水灯——很傻很天真	31
2.2.1 项目需求	31
2.2.2 相关技术介绍	31
2.2.3 硬件设计	32
2.2.4 顶层架构设计	32
2.2.5 端口描述	33
2.2.6 代码解释	33
2.3 测试文件——一切都似曾相识	39
第 3 章 谆谆教诲莫相忘，字字珠玑记心头	41
3.1 赋值语句——你是我的最爱	41
3.1.1 写在前面的话	41
3.1.2 非阻塞赋值语句	41
3.1.3 阻塞赋值语句	43
3.2 关系运算符——心中永远的痛	45
3.2.1 写在前面的话	45
3.2.2 关系运算符的种类	45
3.2.3 关系运算符的使用意义	45
3.2.4 关系运算符与算术运算符优先级	45

3.3 if-else 与 case——永远的欢喜冤家	45
3.3.1 写在前面的话	45
3.3.2 if-else 条件分支语句	46
3.3.3 case 分支控制语句	50
3.3.4 case 语句和 if-else 语句的区别	52
3.4 缩减运算符——就这样变没了	52
3.4.1 写在前面的话	52
3.4.2 工程实例	52
3.5 移位运算符——性子总是这么直	54
3.5.1 写在前面的话	54
3.5.2 移位运算符实例	55
3.6 位拼运算符——聪慧灵秀惹人妒	57
3.6.1 写在前面的话	57
3.6.2 代码实例	57
第 4 章 会当凌绝顶，设计 Top-Down	59
4.1 层次化设计方法——心中永远的女神	59
4.1.1 写在前面的话	59
4.1.2 层次化设计框图示例	59
4.1.3 层次化设计实例	60
4.2 层次化设计技巧——巧夺天工砖瓦匠	65
4.2.1 写在前面的话	65
4.2.2 电平触发	65
4.2.3 尖峰脉冲	66
第 5 章 内涵丰富本领多，谁与争锋 IP 核	68
5.1 锁相环——速度，你说了算	68
5.1.1 写在前面的话	68
5.1.2 项目需求	68
5.1.3 操作步骤	68
5.1.4 顶层架构设计	73
5.1.5 端口功能	73
5.1.6 代码解释	73

5.1.7	仿真结果分析	75
5.2	ROM——只有你最慷慨	75
5.2.1	写在前面的话	75
5.2.2	项目需求	75
5.2.3	操作步骤	75
5.2.4	顶层架构设计	80
5.2.5	模块功能介绍	80
5.2.6	模块端口和内部连线描述	80
5.2.7	代码解释	80
5.2.8	仿真分析	83
5.3	RAM——有入有出，公平合理	84
5.3.1	写在前面的话	84
5.3.2	项目需求	84
5.3.3	操作步骤	84
5.3.4	顶层架构设计	86
5.3.5	模块功能介绍	86
5.3.6	模块端口和内部连线描述	87
5.3.7	代码解释	87
5.3.8	仿真分析	90
5.4	FIFO——重中之重缓存器	91
5.4.1	写在前面的话	91
5.4.2	项目需求	91
5.4.3	操作步骤	91
5.4.4	顶层架构设计	94
5.4.5	模块功能介绍	95
5.4.6	模块端口和内部连线描述	95
5.4.7	代码解释	95
5.4.8	仿真分析	100
5.5	移位寄存器——你是我的骄傲	101
5.5.1	写在前面的话	101
5.5.2	功能要求	102
5.5.3	操作步骤	103

5.5.4	顶层架构设计	105
5.5.5	模块功能介绍	105
5.5.6	模块端口和内部连线描述	105
5.5.7	代码解释	106
5.5.8	仿真分析	110
第 6 章	基础项目我在行，信手拈来显聪慧	111
6.1	二选一之战——我只是个新兵	111
6.1.1	写在前面的话	111
6.1.2	项目需求	111
6.1.3	系统架构	111
6.1.4	模块功能介绍	111
6.1.5	顶层模块端口描述	111
6.1.6	代码解释	112
6.1.7	仿真分析	113
6.1.8	二选一数据寄存	114
6.2	三态门之战——机关算尽太聪明	116
6.2.1	写在前面的话	116
6.2.2	项目需求	116
6.2.3	系统架构	117
6.2.4	模块功能介绍	117
6.2.5	顶层模块端口描述	117
6.2.6	代码解释	117
6.2.7	仿真分析	119
6.3	串并转换——你无处不在	120
6.3.1	写在前面的话	120
6.3.2	需求分析	120
6.3.3	顶层框架设计	120
6.3.4	顶层模块端口介绍	121
6.3.5	代码实现	121
6.4	generate 语句——呵呵，你就会偷懒	125
6.4.1	写在前面的话	125

6.4.2	基本概念	126
6.4.3	generate_for 语句	126
6.4.4	generate_if 语句	132
6.4.5	generate_case 语句	133
6.5	边沿检测——如此高大上	135
6.5.1	写在前面的话	135
6.5.2	电路原理分析	135
6.5.3	顶层框架结构	136
6.5.4	顶层模块端口介绍	136
6.5.5	代码实现	136
6.5.6	仿真波形分析	138
6.6	按键消抖——且看老夫手段	139
6.6.1	写在前面的话	139
6.6.2	基于尖峰脉冲的按键消抖	139
6.6.3	项目需求	139
6.6.4	误区排除	139
6.6.5	设计思路	140
6.6.6	系统框架	140
6.6.7	顶层端口描述	141
6.6.8	代码解释	141
6.6.9	仿真分析	144
第 7 章	没有标准的方法，但见可行的技巧	146
7.1	异步复位同步释放——高端神秘你最帅	146
7.1.1	写在前面的话	146
7.1.2	基本概念	146
7.1.3	代码举例	146
7.1.4	异步复位同步释放电路	148
7.2	任意分频之战——一切都如此简单	155
7.2.1	写在前面的话	155
7.2.2	实现原理	156
7.2.3	系统框架	156

7.2.4	顶层模块端口描述	156
7.2.5	代码分析	156
7.2.6	仿真分析	159
7.3	二进制数转 BCD——终极进化	160
7.3.1	写在前面的话	160
7.3.2	基本概念	160
7.3.3	逐步移位法原理	160
7.3.4	设计任务	161
7.3.5	顶层框图设计	161
7.3.6	代码实现	163
7.3.7	仿真分析	165
7.4	BCD 转二进制——返璞归真	166
7.4.1	写在前面的话	166
7.4.2	基本概念	166
7.4.3	移位算法原理	166
7.4.4	顶层框架图	166
7.4.5	顶层模块端口介绍	167
7.4.6	代码实现	167
7.4.7	仿真分析	169
7.5	流水线设计之战——效率决定成败	170
7.5.1	写在前面的话	170
7.5.2	流水线的基本概念	170
7.5.3	流水线改造实例	171
7.6	SignalTap 之战——奸细，哪里逃	177
7.6.1	写在前面的话	177
7.6.2	背景知识	178
7.6.3	典型的 SignalTap II 调试流程	180
7.6.4	SignalTap II 调试具体操作步骤	180
7.6.5	具体步骤	181
第 8 章	进阶首选我当前，乘胜追击势必行	204
8.1	字符状态机之战——进来的，都要审查	204

8.1.1	写在前面的话	204
8.1.2	项目需求	204
8.1.3	解决方案	204
8.1.4	系统架构	204
8.1.5	模块功能介绍	204
8.1.6	顶层模块端口描述	205
8.1.7	代码解释	205
8.1.8	仿真分析	210
8.2	数码管之战——好像胜利的曙光	210
8.2.1	写在前面的话	210
8.2.2	项目需求	210
8.2.3	原理分析	210
8.2.4	单个数码管显示	212
8.2.5	6 个数码管显示	215
8.3	PS2 之战——键盘原来是这样	221
8.3.1	写在前面的话	221
8.3.2	项目需求	221
8.3.3	原理分析	222
8.3.4	系统架构	223
8.3.5	模块功能介绍	223
8.3.6	顶层模块端口描述	223
8.3.7	用 Signaltap II 分析波形	223
8.3.8	代码解释	225
8.3.9	仿真分析	232
8.4	矩阵键盘之战——严密的资源整合	233
8.4.1	写在前面的话	233
8.4.2	项目需求	233
8.4.3	矩阵键盘的原理	233
8.4.4	架构设计	235
8.4.5	模块功能介绍	235
8.4.6	顶层模块端口描述	235
8.4.7	代码解释	235

8.4.8	仿真分析	241
8.5	IIC 之战——配置离不开你	241
8.5.1	写在前面的话	241
8.5.2	项目需求	242
8.5.3	IIC 的原理分析	242
8.5.4	架构设计	246
8.5.5	模块功能介绍	246
8.5.6	顶层模块端口描述	246
8.5.7	代码解释	246
8.5.8	仿真分析	263
8.6	串口通信之战——通信终于畅通了	264
8.6.1	写在前面的话	264
8.6.2	项目需求	265
8.6.3	UART 的原理分析	265
8.6.4	系统架构	266
8.6.5	模块功能介绍	268
8.6.6	模块端口和内部连线描述	268
8.6.7	代码解释	268
8.6.8	仿真分析	276
8.7	VGA 之战——我型我酷炫	276
8.7.1	写在前面的话	276
8.7.2	什么是 VGA	277
8.7.3	VGA 接口	277
8.7.4	VGA 显示原理	278
8.7.5	顶层框架	280
8.7.6	顶层模块端口描述	280
8.7.7	代码实现	280
8.7.8	仿真分析	285
8.8	12864 液晶之战——心灵的窗口	285
8.8.1	写在前面的话	285
8.8.2	基本概念	285
8.8.3	硬件电路结构	286

8.8.4	官方代码解析	287
8.8.5	项目需求	293
8.8.6	系统架构	293
8.8.7	代码解释	294
8.8.8	仿真分析	305
8.9	DDS——形随心动	305
8.9.1	写在前面的话	305
8.9.2	项目需求	305
8.9.3	项目分析	305
8.9.4	系统架构	306
8.9.5	模块功能介绍	306
8.9.6	顶层端口和内部连线描述	306
8.9.7	波形数据的由来	307
8.9.8	波形发生器（不可调频和调相）	308
8.9.9	波形发生器（不可调频，但可以调相）	312
8.9.10	波形发生器（可以调频，可以调相）	315
8.9.11	最终设计	318
8.10	蜂鸣器之战——奏响凯旋的乐章	322
8.10.1	写在前面的话	322
8.10.2	什么是蜂鸣器	322
8.10.3	设计任务	323
8.10.4	顶层端口介绍	325
8.10.5	代码解释	325
8.10.6	仿真分析	331

第 1 章

没有金刚钻，不揽瓷器活

1.1 Quartus II 15.0——温婉简约编译器

1.1.1 写在前面的话

从本章开始，梦翼师兄和大家一起正式开始 FPGA 课程的学习，正所谓“没有金刚钻，不揽瓷器活”。在开始学习之前，首先应该选择并安装好自己的开发工具，那么我们用什么软件来编译代码呢？梦翼师兄推荐给大家的是 Altera 目前最新的 Quartus II 15.0 版本，当然，这可不是喜新厌旧，FPGA 开发的未来趋势是 SOC，既然 15.0 版可以支持 SOC 的开发，那么就让我们一步到位吧。梦翼师兄喜欢 15.0 版还有一个原因，那就是本人也是“外貌协会”的，15.0 版和之前的版本相比较，界面友好度要好了很多很多，温婉简约，看着特别舒服，用起来也方便。好了，再说就成花痴了，现在让我们直入主题。

1.1.2 Altera Quartus II 15.0 安装

如图 1.1 所示，梦翼师兄给大家提供的 15.0 版安装包里面包含 3 个安装文件，分别为 ModelSim、QuartusHelp、Quartus 以及一些常用的 Altera 器件库。



图 1.1

(1) 双击 QuartusSetup 选项，出现如图 1.2 所示界面。

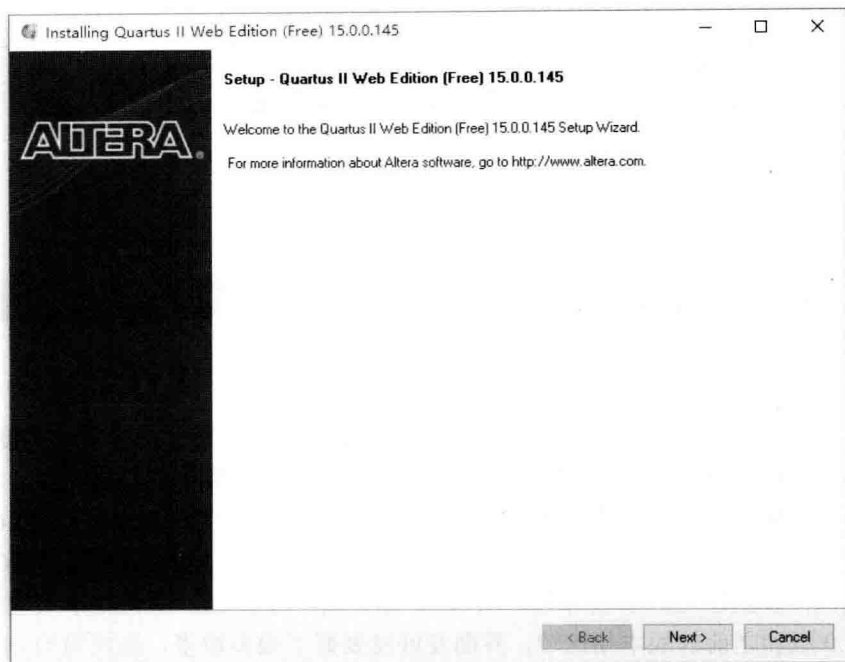


图 1.2

(2) 单击【Next】按钮，出现如图 1.3 所示界面。

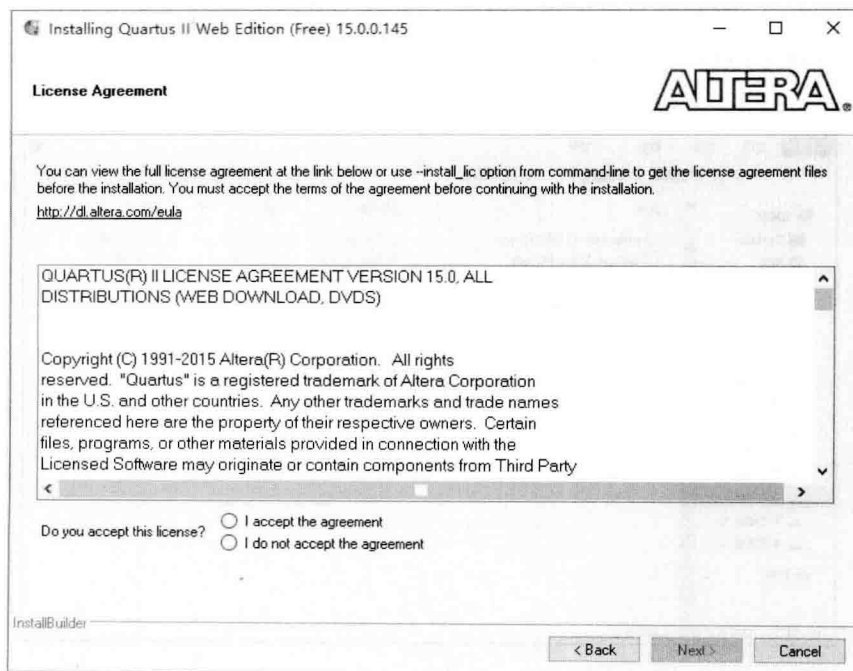


图 1.3