

普通高校本科计算机专业特色教材精选·计算机原理

基于Quartus II的 数字逻辑实验教程

张丽荣 编著

清华大学出版社



普通高校本科计算机专业特色教材精选·计算机原理

基于Quartus II的 数字逻辑实验教程

张丽荣 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书共分6章。第1章是实验要点;第2、3章根据数字电路设计的要点和应用特点,给出了多项综合性、趣味性、实用性的实验任务,通过两个实例详细介绍了 Quartus II 5.0 的文本和图形输入方式的编辑、编译、仿真、下载等基本设计流程,以及一些设计方法;第4章是使用 Verilog HDL 进行编程的实例;第5章介绍使用 Quartus II 5.0 过程中的常见错误提示和修改方法;第6章是 GX-EDA/SOPC 综合实验平台简介。

本书可作为普通高等学校数字逻辑及数字系统设计课程的实验教材,也可供从事数字系统设计的工程人员参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

基于 Quartus II 的数字逻辑实验教程/张丽荣编著. —北京:清华大学出版社, 2009.8
(普通高校本科计算机专业特色教材精选·计算机原理)

ISBN 978-7-302-20049-9

I. 基… II. 张… III. ①可编程序逻辑器件—系统设计—应用软件, Quartus II—高等学校—教材 ②数字电路—逻辑设计—实验—高等学校—教材 IV. TP332.1 TN79-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 064687 号

责任编辑:焦虹 李玮琪

责任校对:梁毅

责任印制:杨艳

出版发行:清华大学出版社

地址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮编:100084

社总机:010-62770175

邮购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印刷者:北京嘉实印刷有限公司

装订者:北京国马印刷厂

经销:全国新华书店

开本:185×260

印张:5.75

字数:137千字

版次:2009年8月第1版

印次:2009年8月第1次印刷

印数:1~3000

定价:12.00元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:010-62770177 转 3103 产品编号:033560-01

出版说明

INTRODUCTION

在我国高等教育逐步实现大众化后,越来越多的高等学校将会面向国民经济发展的第一线,为行业、企业培养各级各类高级应用型专门人才。为此,教育部已经启动了“高等学校教学质量和教学改革工程”,强调要以信息技术为手段,深化教学改革和人才培养模式改革。如何根据社会的实际需要,根据各行各业的具体人才需求,培养具有特色显著的人才,是我们共同面临的重大问题。具体地说,培养具有一定专业特色的和特定能力强的计算机专业应用型人才则是计算机教育要解决的问题。

为了适应 21 世纪人才培养的需要,培养具有特色的计算机人才,急需一批适合各种人才培养特点的计算机专业教材。目前,一些高校在计算机专业教学和教材改革方面已经做了大量工作,许多教师在计算机专业教学和科研方面已经积累了许多宝贵经验。并将他们的教研成果转化为教材的形式,向全国其他学校推广,而这对于深化我国高等学校的教学改革是一件十分有意义的事情。

清华大学出版社在经过大量调查研究的基础上,决定组织编写一套“普通高校本科计算机专业特色教材精选”。本套教材是针对当前高等教育改革的新形势,以社会对人才的需求为导向,主要以培养应用型计算机人才为目标,立足课程改革和教材创新,广泛吸纳全国各地的高等院校计算机优秀教师参与编写,从中精选出版确实反映计算机专业教学方向的特色教材,供普通高等院校计算机专业学生使用。

本套教材具有以下特点:

1. 编写目的明确

本套教材是在深入研究各地各学校办学特色的基础上,面向普通高校的计算机专业学生编写的。学生通过本套教材,主要学习计算机科学与技术专业的基本理论和基本知识,接受利用计算机解决实际问题的基本训练,培养研究和开发计算机系统,特别是应用系统的基本能力。

2. 理论知识与实践训练相结合

根据计算学科的三个学科形态及其关系,本套教材力求突出学科的理论与实践紧密结合的特征,结合实例讲解理论,使理论来源于实践,又进一步指导实践。学生通过实践深化对理论的理解,更重要的是使学生学会理论方法的实际运用。在编写教材时突出实用性,并做到通俗易懂,易教易学,使学生不仅知其然,知其所以然,还要会其如何然。

3. 注意培养学生的动手能力

每种教材都增加了能力训练部分的内容,学生通过学习和练习,能比较熟练地应用计算机知识解决实际问题。既注重培养学生分析问题的能力,也注重培养学生解决问题的能力,以适应新经济时代对人才的需要,满足就业需求。

4. 注重教材的立体化配套

大多数教材都将陆续配套教师用课件、习题及其解答提示,学生上机实验指导等辅助教学资源,有些教材还提供能用于网上下载的文件,以方便教学。

由于各地区各学校的培养目标、教学要求和办学特色均有所不同,所以对特色教学的理解也不尽一致,我们恳切希望大家在使用教材的过程中,及时地给我们提出批评和改进意见,以便我们做好教材的修订改版工作,使其日趋完善。

我们相信经过大家的共同努力,这套教材一定能成为特色鲜明、质量上乘的优秀教材,同时,我们也希望通过本套教材的编写出版,为“高等学校教学质量和教学改革工程”做出贡献。

清华大学出版社

前言

PREFACE

随着微电子技术的飞跃发展,数字化时代已经到来。电子计算机、数字化电视机、数字电话(手机)、数字化音响(mp3、mp4)等数字化产品已经渗透到了我们生活的各个方面。因此数字电路的设计,对于计算机科学与技术、信息安全、电子信息工程、通信工程、自动化等专业的学生来说尤为重要。

数字化产品的飞速发展得益于可编程器件和集成技术的发展。为推广可编程器件的使用,各器件的生产厂商也相继推出了用于设计的EDA软件平台,这些开发软件可以将设计者用硬件描述语言编写的程序准确、高速地写入可编程器件,从而转化为物理电路。硬件描述语言的出现,也使图形设计方法向硬件描述语言设计方法发展。正是由于这一系列新技术的出现,使得我们逐步告别了传统的以74系列器件+面包板的数字电路设计方式,取而代之的是可编程器件+EDA软件+硬件描述语言的现代数字系统的设计方法。可编程器件使数字系统的设计方法发生了重大变化,不仅缩短了系统的开发周期,而且利用器件的现场可编程特性,可根据应用要求对器件进行动态配置或编程,简单易行地完成功能的添加和修改。这一系列新技术的出现也对传统的数字电路课程的教学体系、教学内容和人才培养模式提出了挑战。为适应这种变化,应及早将现代硬件设计方法引入实验教学,使学生在数字电路学习阶段至少学会一门硬件描述语言,并掌握用先进的设计工具软件进行大规模集成电路设计、模拟、验证和测试的基本方法,以满足后续课程的需要。我们在数字逻辑实验中取消了以小规模集成电路和手工布线的传统模式,学生可以在Quartus II平台实现硬件设计,用现代设计方法完成实验任务。计算机学院实验中心全新的Quartus II软件和SOPC硬件平台,以及全开放的实验理念也激发了学生学习的热情,无论是时间上还是内容上的开放,都为学生营造了良好的拓展空间,有利于学生开拓创新,教学效果显著。

本书从可编程器件+ EDA 软件+ 硬件描述语言的现代数字系统的设计方法出发, 使学生在掌握了 Verilog HDL 或 VHDL 后, 进一步学习本书重点介绍的 Altera 公司最新的设计软件 Quartus II 和 GX-EDA/SOPC 综合实验平台, 这对他们今后的设计工作有很大帮助。

本书在编写过程中得到北京工业大学计算机学院实验中心韩德强、高雪源、张丽艳等老师的大力协助; 同时也得到 Altera 公司徐平波经理、北京革新技术公司沙时辉经理和袁宏斌经理的大力支持, 在此表示衷心感谢。

由于 EDA 技术发展迅速, 涉及领域不断扩充, 加之作者水平有限, 书中难免存在错误和不妥之处, 敬请广大读者批评指正, 作者邮箱为: zhanglirong@bjut.edu.cn.

作 者

2009.4

读者意见反馈

亲爱的读者：

感谢您一直以来对清华版计算机教材的支持和爱护。为了今后为您提供更优秀的教材，请您抽出宝贵的时间来填写下面的意见反馈表，以便我们更好地对本教材做进一步改进。同时如果您在使用本教材的过程中遇到了什么问题，或者有什么好的建议，也请您来信告诉我们。

地址：北京市海淀区双清路学研大厦 A 座 602 计算机与信息分社营销室 收

邮编：100084

电子邮件：jsjc@tup.tsinghua.edu.cn

电话：010-62770175-4608/4409

邮购电话：010-62786544

教材名称：基于 Quartus II 的数字逻辑实验教程

ISBN：978-7-302-20049-9

个人资料

姓名：_____ 年龄：_____ 所在院校/专业：_____

文化程度：_____ 通信地址：_____

联系电话：_____ 电子信箱：_____

您使用本书是作为：☐指定教材 ☐选用教材 ☐辅导教材 ☐自学教材

您对本书封面设计的满意度：

☐很满意 ☐满意 ☐一般 ☐不满意 改进建议_____

您对本书印刷质量的满意度：

☐很满意 ☐满意 ☐一般 ☐不满意 改进建议_____

您对本书的总体满意度：

从语言质量角度看 ☐很满意 ☐满意 ☐一般 ☐不满意

从科技含量角度看 ☐很满意 ☐满意 ☐一般 ☐不满意

本书最令您满意的是：

☐指导明确 ☐内容充实 ☐讲解详尽 ☐实例丰富

您认为本书在哪些地方应进行修改？（可附页）

您希望本书在哪些方面进行改进？（可附页）

电子教案支持

敬爱的教师：

为了配合本课程的教学需要，本教材配有配套的电子教案（素材），有需求的教师可以与我们联系，我们将向使用本教材进行教学的教师免费赠送电子教案（素材），希望有助于教学活动的开展。相关信息请拨打电话 010-62776969 或发送电子邮件至 jsjc@tup.tsinghua.edu.cn 咨询，也可以到清华大学出版社主页（<http://www.tup.com.cn> 或 <http://www.tup.tsinghua.edu.cn>）上查询。

普通高校本科计算机专业特色教材精选

计算机硬件

- MCS 296 单片机及其应用系统设计 刘复华 ISBN 978-7-302-08224-8
基于 S3C44B0X 嵌入式 μ cLinux 系统原理及应用 李岩 ISBN 978-7-302-09725-9
现代数字电路与逻辑设计 高广任 ISBN 978-7-302-11317-1
现代数字电路与逻辑设计题解及教学参考 高广任 ISBN 978-7-302-11708-7

计算机原理

- 汇编语言与接口技术(第2版) 王让定 ISBN 978-7-302-15990-2
汇编语言与接口技术习题汇编及精解 朱莹 ISBN 978-7-302-15991-9
基于 Quartus II 的计算机核心设计 姜咏江 ISBN 978-7-302-14448-9
基于 Quartus II 的数字逻辑实验教程 张丽荣 ISBN 978-7-302-20049-9
计算机操作系统(第2版) 彭民德 ISBN 978-7-302-15834-9
计算机维护与诊断实用教程 谭祖烈 ISBN 978-7-302-11163-4
计算机系统的体系结构 李学干 ISBN 978-7-302-11362-1
计算机选配与维修技术 闵东 ISBN 978-7-302-08107-4
计算机原理教程 姜咏江 ISBN 978-7-302-12314-9
计算机原理教程实验指导 姜咏江 ISBN 978-7-302-15937-7
计算机原理教程习题解答与教学参考 姜咏江 ISBN 978-7-302-13478-7
计算机综合实践指导 宋雨 ISBN 978-7-302-07859-3
实用 UNIX 教程 蒋砚军 ISBN 978-7-302-09825-6
微型计算机系统与接口 李继灿 ISBN 978-7-302-10282-3
微型计算机系统与接口教学指导书及习题详解 李继灿 ISBN 978-7-302-10559-6
微型计算机组织与接口技术 李保江 ISBN 978-7-302-10425-4
现代微型计算机与接口教程(第2版) 杨文显 ISBN 978-7-302-15492-1
智能技术 曹承志 ISBN 978-7-302-09412-8

软件工程

- 软件工程导论(第4版) 张海藩 ISBN 978-7-302-07321-5
软件工程导论学习辅导 张海藩 ISBN 978-7-302-09213-1
软件工程与软件开发工具 张虹 ISBN 978-7-302-09290-2

数据库

- 数据库原理及设计(第2版) 陶宏才 ISBN 978-7-302-15160-9

数理基础

- 离散数学 邓辉文 ISBN 978-7-302-13712-5
离散数学习题解答 邓辉文 ISBN 978-7-302-13711-2

算法与程序设计

- C/C++ 语言程序设计 孟军 ISBN 978-7-302-09062-5
C++ 程序设计解析 朱金付 ISBN 978-7-302-16188-2
C 语言程序设计 马靖善 ISBN 978-7-302-11597-7
C 语言程序设计(C99版) 陈良银 ISBN 978-7-302-13819-8
Java 语言程序设计 吕凤翥 ISBN 978-7-302-11145-0
Java 语言程序设计题解与上机指导 吕凤翥 ISBN 978-7-302-14122-8
MFC Windows 应用程序设计(第2版) 任哲 ISBN 978-7-302-15549-2
MFC Windows 应用程序设计习题解答及上机实验(第2版) 任哲 ISBN 978-7-302-15737-3
Visual Basic、NET 程序设计 刘炳文 ISBN 978-7-302-16372-5

Visual Basic, NET 程序设计题解与上机实验 刘炳文	ISBN 978-7-302-16870-6
Windows 程序设计教程 杨祥金	ISBN 978-7-302-14340-6
编译设计与开发技术 斯传根	ISBN 978-7-302-07497-7
汇编语言程序设计 朱玉龙	ISBN 978-7-302-06811-2
数据结构(C++ 版) 王红梅	ISBN 978-7-302-11258-7
数据结构(C++ 版)教师用书 王红梅	ISBN 978-7-302-15128-9
数据结构(C++ 版)学习辅导与实验指导 王红梅	ISBN 978-7-302-11502-1
数据结构(C 语言版) 秦玉平	ISBN 978-7-302-11598-4
算法设计与分析 王红梅	ISBN 978-7-302-12942-4

图形图像与多媒体技术

多媒体技术实用教程(第2版) 贺雪晨	ISBN 978-7-302-16854-6
多媒体技术实用教程(第2版)实验指导 贺雪晨	ISBN 978-7-302-16907-9

网络与通信

计算机网络 胡金初	ISBN 978-7-302-07906-4
计算机网络实用教程 王利	ISBN 978-7-302-14712-1
数据通信与网络技术 周昕	ISBN 978-7-302-07940-8
网络工程技术与实验教程 张新有	ISBN 978-7-302-11086-6
计算机网络管理技术 杨云江	ISBN 978-7-302-11567-0
TCP/IP 网络与协议 兰少华	ISBN 978-7-302-11840-4

目 录

CONTENTS

第1章 概述	1
1.1 实验须知	1
1.2 实验报告要求	2
第2章 Quartus II 5.0 基本使用方法	3
2.1 概述	3
2.2 设计流程	3
第3章 实验任务	7
3.1 基本组合逻辑功能模块	7
3.1.1 实验要求	7
3.1.2 设计原理	8
3.1.3 实验步骤	10
3.1.4 实验总结	30
3.2 基本时序逻辑功能模块	30
3.2.1 实验要求	30
3.2.2 实验原理	31
3.2.3 实验步骤	33
3.2.4 实验总结	38
3.3 组合逻辑电路设计	39
3.4 时序逻辑电路设计	40
3.5 实用电路设计	41
第4章 设计实例	45
4.1 模块调用	45
4.1.1 用图形方式进行模块调用	46
4.1.2 用 Verilog HDL 对已经设计好的模块进行调用	47

4.2	用多个 always 语句实现	49
4.3	有限状态机的使用	50
4.4	LED 显示	53
4.4.1	静态显示	53
4.4.2	动态显示	53
4.5	键盘扫描	54
第 5 章	常见问题	57
5.1	编译时遇到的问题	57
5.1.1	顶层文件设置不正确	57
5.1.2	文本文件编译错误	57
5.1.3	图形文件编译错误	61
5.2	仿真时遇到的问题	62
5.3	器件编程时遇到的问题	66
第 6 章	综合实验平台使用说明	69
6.1	综合实验平台简介	69
6.2	综合实验平台的功能模块	69
6.3	ALTERA UP3 教学套件	70
6.4	GX-EDA/SOPC 综合实验平台基本组成	71
6.4.1	电源模块	71
6.4.2	输入模块	72
6.4.3	输出模块	74
参考文献		79

第 1 章

概 述

CHAPTER

数字逻辑是计算机科学与技术、信息安全、电子信息工程、通信工程、自动化等专业的学生必修的一门专业基础课。要求学生掌握数字逻辑的基本理论、基本分析与设计方法,具备用 Verilog HDL(或 VHDL)进行数字逻辑设计的能力,为后续专业课程的学习和今后从事数字系统设计工作打下良好基础。数字逻辑是一门理论与实践结合的课程,为提高学生对所学内容的感性认识和对知识点的理解,培养学生分析问题、解决问题的能力,还开设了配套的数字逻辑实验课。

开设数字逻辑实验课可以巩固、加深和拓宽课堂教学的内容;可以帮助学生更好地了解逻辑电路的特性,了解数字系统设计自顶向下的层次概念及模块化的设计思路。随着电子技术的发展,芯片的复杂程度越来越高,用可编程逻辑器件设计出的数字电路,具有简化系统设计、增强系统可靠性及灵活性的优良性能。可编程技术是当前电子工程设计人员设计数字电路时所采用的先进技术手段,体现了现代电子技术的发展动态,有着较强的实际应用价值。为使学生跟上电子技术的发展步伐,我们将先进的可编程技术引入实验教学,目的就是让学生在初步掌握数字系统设计方法的同时掌握 EDA 技术,能够在计算机上使用 Quartus II 5.0 进行 Verilog 语言的编译、仿真,完成可编程逻辑器件的设计。因此实验就是设计的过程,通过 Quartus II 5.0 软件的使用,要求学生掌握使用 EDA 软件进行数字电路的设计与调试方法;掌握基于 Verilog HDL 的模块设计方法;最终学会多种逻辑电路的分析、设计、电路调试及故障查寻方法。目的是培养学生在整个实验过程中耐心、细致的科研作风,鼓励他们勇于开拓创新;培养学生的实践动手能力和团结合作精神,以及分析问题和解决问题的能力。

1.1 实验须知

数字逻辑实验可分为实验准备、设计和调试、实验完成后进行总结并书写实验报告这三个阶段。尽管在实验前已经做好充分准备,实验过程中

的操作也非常仔细,但依然会出现实验结果不满足设计要求的现象。因此,我们在进行实验时必须认真记录各种非正常现象,并对记录结果进行分析,找出故障原因,寻找解决的方法。

产生故障的原因通常有以下几种:

- (1) 电路设计或程序设计有错。
- (2) 可编程器件选择错误。
- (3) 连线错误。
- (4) 操作错误等。

在实验中,如果出现故障,要按照设计流程逐级查找;在排除故障和错误的过程中,应对错误现象、查找错误的方法、修改后的设计方案等做详细记录。

为了培养学生独立思考、独立分析问题和解决问题的能力,也为了学生能在实验课中更好地完成实验内容,我们提出以下要求:

要求 1: 实验课前必须认真预习,写出实验预习报告。

学生根据实验任务书中给出的任务选定实验内容或自拟题目,搞清实验目的和要求;根据具体要求,复习有关理论知识,完成任务的设计并写出预习报告。

预习报告包括实验目的、实验设备、实验任务及要求、设计思想、实验电路或编写程序。

注意: 未完成预习报告不能进行实验。

要求 2: 课上认真完成实验任务。

- (1) 实验过程中同组同学互相配合,积极思考、认真操作,如实记录实验结果。
- (2) 严禁带电连线,以免损坏实验设备。
- (3) 严禁互相复制实验文件。
- (4) 在实验结束后,将桌面收拾整齐,经教师检查后方可离开实验室。

要求 3: 课后要认真进行实验总结并书写实验总结报告。

对已做的实验内容进行归纳、分析、总结,写出实验总结报告。总结报告包括: 对设计电路的调试过程、调试中遇到的问题及解决方法、故障分析、收获体会、意见及建议等。

1.2 实验报告要求

实验报告的具体要求如下:

- (1) 将实验预习报告和实验总结报告装订成完整的实验报告。
- (2) 全部使用 A4 或与 A4 大小一致的专用实验报告纸。

注意: 实验预习报告和实验总结报告纸张大小要一致。

(3) 使用学校或课程要求的统一的实验报告封面,认真填写课程名称、姓名、实验日期、班级、实验地点、实验组号及同组学生姓名等。

(4) 实验报告要体现出设计者的设计思想,分析问题及解决问题的方法,实验的现象及结论。严禁抄袭。

第 2 章

Quartus II 5.0 基本使用方法

2.1 概 述

Quartus II 5.0 提供了一个完整的、多平台的设计环境,是用于可编程单片电子系统(System_On_a_Programmable_Chip, SOPC)设计的开发软件。它是 MAX+Plus II 的升级版,不仅继承了 MAX+Plus II 的所有优点,同时又更加完善了 CPLD/FPGA 的设计,更适合用于大规模可编程器件的开发。

应用 Quartus II 5.0 软件时,建议计算机的系统配置不低于以下要求:

- (1) 主频 400MHz,内存 512MB。
- (2) 800MB 可存放 Quartus II 软件的硬盘空间。
- (3) 有 CD-ROM。
- (4) 至少有 LPT 口、串行口、USB 端口之一。
- (5) 使用网络版 license 时,要有 TCP/IP 网络协议。

2.2 设计流程

基于 Quartus II 5.0 的 CPLD/FPGA 开发流程,主要包括设计输入、设计综合、时序仿真、器件编程等几个阶段,如图 2-1 所示。

1. 设计输入

Quartus II 5.0 有块编辑器、文本编辑器、符号编辑器等多种编辑器。用户可以建立以 HDL 代码、原理图、波形图等形式输入的设计文件。

Quartus II 5.0 软件在 File 菜单下提供 New Project Wizard...向导,引导设计者完成项目的创建;通过选择 New 选项弹出的新建文件窗口(如图 2-2 所示),设计者可以根据设计需要,完成设计文件的建立。



图 2-1 操作流程

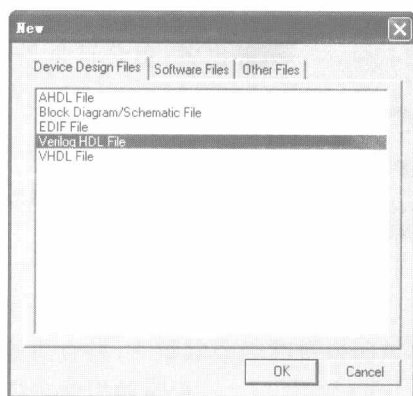


图 2-2 新建文件窗口

2. 设计综合

Quartus II 5.0 具有模块化的编译器,其主要任务是进行设计项目的分析和逻辑综合,以及器件中的布局、引脚和逻辑单元的分配,生成最终的下载文件。编译结果以树状结构组织在编译报告(Compilation Report)中,阅读编译报告可以了解项目的设置、编译的设置、编译的结果,了解器件的资源使用情况、引脚分配等信息。编译器(Compilation Tool)包括:分析/综合器(Analysis & Synthesis)、适配器(Fitter)、装配器(Assembler)、时序分析器(Timing Analyzer),如图 2-3 所示。

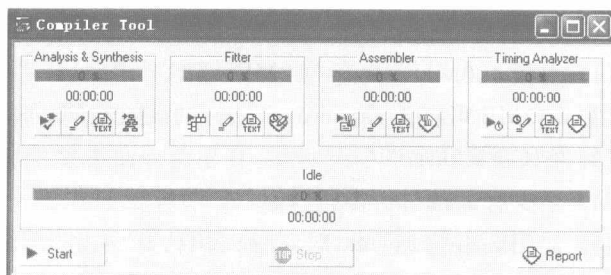


图 2-3 编译工具

编译前应根据实验平台做好以下准备工作:

- (1) 选择好器件。
- (2) 选择配置器件。
- (3) 进行引脚分配。

注意: 编译只是对程序中的语法和图形中的连接规则进行检查并给出错误报告,设计任务所实现的功能是否正确,需要通过仿真或下载到器件中进行验证。

编译有以下三种方法:

- (1) 在菜单 Processing 下执行 Start Compilation。
- (2) 在菜单 Tools 下执行 Compilation Tool。在图 2-3 所示的打开的编译工具中选择部分功能执行或进行全编译。

(3) 使用快捷键 。

3. 时序仿真

仿真是指通过仿真工具对设计的整体模块或者局部模块进行分析来检验设计的功能和性能。

仿真前应做好以下准备工作：

(1) 正确设定好仿真结束时间和网格尺寸。

(2) 根据设计原理给定合适的输入信号。

仿真有以下三种方法：

(1) 在菜单 Processing 下执行 Start Simulation。

(2) 在菜单 Tools 下执行 Simulator Tool。还可以选择功能仿真或时序仿真。

(3) 使用快捷键 。

注意：在做时序仿真时，一定要考虑器件的延迟时间。

对于器件延迟时间造成的错误，可考虑只验证设计任务的逻辑功能，而忽略延迟时间，利用功能仿真进行验证。

使用功能仿真要在图 2-4 所示的仿真工具 (Simulator tool) 对话框中将仿真模式 Simulation mode: 改为 Functional。

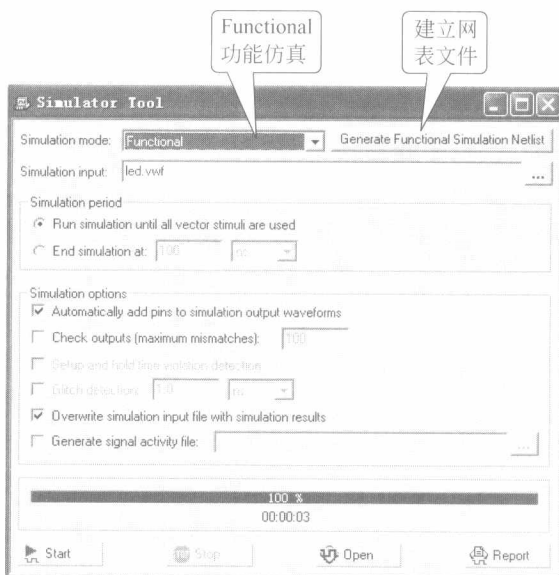


图 2-4 仿真工具

注意：要先执行 Generate Functional Simulation Netlist 建立网表文件，再进行仿真 Start。否则会出现错误。

4. 器件编程

随着微电子技术的不断发展，印刷电路板的密度、层数等不断增加；由于其复杂程度越来越高，传统的测试方法已无法满足要求。JTAG (Joint Test Action Group) 联合测试行动小组开发的边界扫描测试技术规范，解决了上述问题。