

研究生工程实践类实验教学的培养实施方案探究

——以光电类学生的FPGA设计开发实验课为例

廖志坤^{1,2}, 王林^{1,2*}, 樊振方^{1,2}, 刘进^{1,2}, 梁永辉^{1,2}

¹国防科技大学前沿交叉学科学院, 湖南 长沙

²国防科技大学南湖之光实验室, 湖南 长沙

收稿日期: 2023年9月13日; 录用日期: 2023年10月10日; 发布日期: 2023年10月17日

摘要

随着信息化时代的不断加速推进, 工业互联网新阶段要求高校新工科学生在走向工作岗位之前应具备一定的软件开发基础, 以适应多变的市场应用需求。在此背景下, 本文以光电类学生的FPGA设计开发实验课为例, 针对高校新工科类研究生的专业基础特点, 采用搭载Xilinx公司推出的A7系列中等性能FPGA的Nexys 4™开发板, 并通过工程案例引入、学生自主开发实验以及现场编程考试等三个方面实施教学方案, 课程教学实践表明, 理论 + 实践教学策略使学生对学习内容有了更深入的理解, 在提高教学效果的基础上也达到了因材施教的教学目的。

关键词

新工科, 研究生, FPGA设计开发实验, 理论 + 实践教学模式

Study on the Cultivation Strategy and Implementation Plan of Postgraduates' Engineering-Practice Experiment Teaching

—Taking the FPGA Design and Development Experiment Course of Optoelectronics Students as an Example

Zhikun Liao^{1,2}, Lin Wang^{1,2*}, Zhenfang Fan^{1,2}, Jin Liu^{1,2}, Yonghui Liang^{1,2}

¹College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha Hunan

²Nanhu Laser Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha Hunan

*通讯作者 Email: wanglinshanda@163.com

文章引用: 廖志坤, 王林, 樊振方, 刘进, 梁永辉. 研究生工程实践类实验教学的培养实施方案探究[J]. 教育进展, 2023, 13(10): 7648-7653. DOI: 10.12677/ae.2023.13101188

Abstract

With the rapid development of the information age, the new stage of industrial and internet makes the new requirement to new engineering students in universities to train the ability of software and hardware development before getting into the job to adapt to the changing employment market demand. With the background, the paper presents the cultivation strategy and implementation plan of an FPGA design and development experiment course for the optoelectronic postgraduates whose circuit skills are relatively weak. The Nexys 4TM development board carrying the A7 series FPGA produced by the Xilinx company is adopted. The course starts with a given development instances and involves the parts of independent design and development experiment by students and programming examine. The teaching practice shows that the combination of theory and operation cultivation strategy can help students deepen the understanding of the learning content. Meanwhile, the individualized teaching effect is also achieved.

Keywords

3E, Postgraduate Student, FPGA Design Experiment, Teaching Mode with Theory and Practices

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在不断加速推进的信息化时代背景下，为主动应对新一轮科技革命与产业变革，支撑服务创新驱动发展、“中国制造 2025”等一系列国家战略，教育部于 2017 年 2 月以来积极推进新工科建设，并发布了开展新工科研究与实践等方面的指导性通知[1]，奋力探索形成领跑世界的中国模式型工程教育，助力科技强国战略。“新工科”(Emerging Engineering Education, 简称 3E) [2]是为了适应工业 4.0 时代和互联网 2.0 新阶段的需求而进行的工科教育体系改革，针对包括人工智能、大数据、云计算、物联网、区块链、虚拟现实、智能驾驶等新兴学科与产业方向，目的在于培养具有跨学科合作能力、综合素质、实践导向和创新精神的复合型工科人才，以适应未来快速变化的科技和产业发展[3]。新型科技与产业对高校工科类学生在走向工作岗位前提出了新的要求，科技公司在发布招聘信息中已经将具备一定的软件开发基础作为衡量学生综合能力的一项关键指标，结合中国知网对硕士论文中关键词的信息统计，也可发现，FPGA、STM32、DSP、LabView 等软硬件设计已经成为硕士研究生在完成课题研究、项目攻关等过程中的基本技能[4]。然而，由于高校在本科阶段的培养目标差异，只有少数院校在集成电路等专业本科生中开设有相关课程，普及面较窄，为此，本文以学校为光电类研究生开设的 FPGA 设计开发实验课为例，结合高校工科类研究生的专业基础特点，以开发案例的方式引入，探索理论 + 实践教学策略对新工科学生的培养效果。

2. 课程内容及难点剖析

FPGA (Field Programmable Gate Array)即“现场可编程门阵列”，是一种可以重复擦写的数字逻辑处

理器。自 20 世纪 90 年代以来 FPGA 获得了突飞猛进的发展，随着大规模集成电路技术的发展，在数字系统中所扮演的角色也从逻辑胶合者提升到处理核心，已成为数字系统实现的主流平台之一。以 FPGA 为代表的高速数字处理器件，其高速、低功耗、可编程、易开发等特点使其在各种实时数字处理系统中发挥了非常重要的作用，已经广泛应用于高速信号采集、实时信息处理、大数据、人工智能等各种工程技术领域[5]。

2.1. 实验教学环境

课程依托 Digilent 公司 Nexys 4 开发套件，开发板如图 1 所示。Nexys 4 是针对学生和初学者的一款高性能 FPGA 开发板[6]，板载 Xilinx 公司最新系列的 Artix-7 FPGA 芯片 XC7A100T-1CSG324C。

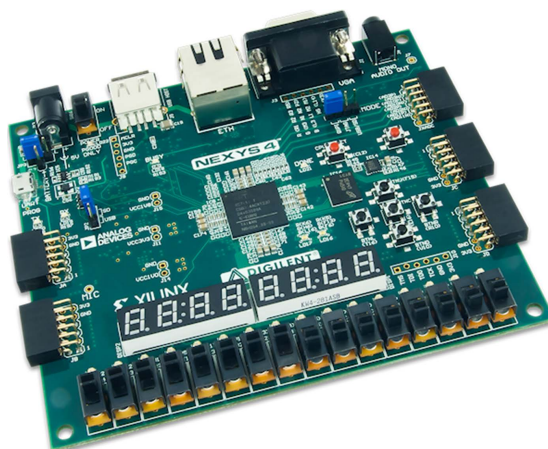


Figure 1. The Digilent Nexys 4 development board of FPGA
图 1. Digilent Nexys 4 FPGA 开发板

Artix-7 是 7 系列中低成本系列芯片采用了 28 nm 工艺，与上一代 45 nm 器件相比功耗降低了一半，面向成本敏感型应用，特别适用于消费类电子以及手持和便携设备。Artix-7 FPGA 资源非常丰富，包括 15,850 个逻辑单元，4860 Kbits 快速块 RAM，6 个时钟管理单元，240 个 DSP 单元，片上集成模数转换器，片上资源如表 1 所示。同时，开发板集成了拨码开关、按钮、七段数码管等基本外设，USB、以太网口、VGA 接口等常用外设，以及一些常用的扩展功能如温度传感器、加速度计、数字麦克风等，这样无需添加扩展模块直接利用 Nexys 4 开发板就能开发更广泛的应用，完全能满足初学者的学习要求。

Table 1. The list of resource on Artix-7 FPGA
表 1. Artix-7 FPGA 片上资源

| 资源 | 数量 | 单位 |
|--------|--------|------|
| 逻辑单元 | 15,850 | 个 |
| 块 RAM | 4860 | Kbit |
| 时钟管理单元 | 6 | 个 |
| DSP 单元 | 240 | 个 |
| 模数转换器 | 2 | 个 |

实验基于赛灵思(Xilinx)公司的 Vivado 集成开发环境，采用 Verilog 硬件描述语言。Xilinx 公司作为可编程器件(PLD)的领导厂商，占有超过 50%的市场份额，为客户提供可编程逻辑芯片(CPLD、FPGA 和

PROM)、软件设计工具、不同等级的知识产权核(IP Core)以及系统级的完整软件解决方案。Vivado 软件是 Xilinx 公司推出的 FPGA 集成开发环境,不仅包括逻辑设计所需的一切,还具有大量简便易用的内置式工具和向导,使得设计输入、功耗分析、时序驱动设计、HDL 仿真等关键步骤变得容易而直观。Vivado 具有界面友好、操作简单的特点,再加上 Xilinx 的 FPGA 芯片占有很大的市场,使其成为非常通用的 FPGA 工具软件。Verilog 语言与 C 语言很相似,由于其语法简单,易于掌握,支持的 EDA 工具多,生态良好,因此获得广大工程师的青睐[7]。

2.2. 课程内容简介

FPGA 设计开发主要包括侧重于硬件的电路设计和侧重于软件的编程实现两部分,针对前者,器件开发商通常提供成熟的设计实例,后者包括了逻辑设计、EDK 嵌入式系统设计、System Generator DSP 系统设计、IP 核设计等[8],是本实验课成设计的重点。针对硕士研究生在电子技术工程实践能力方面的培养需求,结合光电技术综合实验的实际情况,课程主要锻炼学生较为基础的 FPGA 逻辑编程实践能力,运用理论 + 实践的授课策略,着力解决学生“眼高手低”的学习现状。首先通过 FPGA 开发实例让学员熟悉 Xilinx FPGA 开发环境和基本设计流程,然后通过自选开发实验加深 FPGA 设计的理解,初步具备编程思想。

2.3. 课程实施重难点

通过调研发现,高校在光电工程专业学生的培养体系中多数会开设电子电路类相关课程,该门课融合了电路分析基础、模拟电路和数字电路等相关课程内容,因此该专业学生在研究生阶段通常具备相对薄弱的数字电路分析基础,而 FPGA 开发是一种建立在数字电路基础上的编程工具。因而,针对光电类研究生开设的 FPGA 设计开发实验课在实施过程中具有以下难点:1) 未系统学习相关编程语言,同样未接触过 FPGA 软件开发工具;2) 学生的电路分析能力相对薄弱,难以看懂复杂的开发板电路;3) FPGA 程序的算法实现具有并行执行特点,与本科阶段学习的顺序执行语言在实现过程中具有非常大的区别;4) FPGA 程序与数字电路之间具有紧密的联系,学会 FPGA 开发需要掌握软硬件之间的映射关系。鉴于此,本实验课的重点在于重实践而弱理论,让学生通过实验锻炼初步掌握 FPGA 高速数字设计的基础知识和基本技能,为以后的课题研究和工程应用奠定基础。

3. FPGA 实验课程设计方案

3.1. 课程结构设计

针对光电类学生的专业基础现状和 FPGA 设计开发实验课的难点,设计了如图 2 所示的课程结构,包括了复现开发示例、自主开发实验和结题考试三个环节。

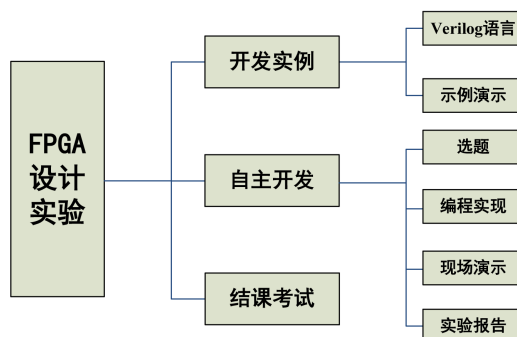


Figure 2. The scheme design of FPGA experiment course
图 2. FPGA 实验课课程结构设计

示例复现部分要求学生自学 Verilog 语言,并将给定的代码按照讲义要求输入开发软件,并进行示例演示,该部分分布在 2 次课 6 个课时,在成绩评定中占 20%的分值。自主开发实验是本实验课程的重点,包含若干个不同难度系数的课程实践题目,学生自主选题并利用 12 课时完成实验,在实验的最后一次课,学生对实验内容进行现场演示,同时简要介绍设计过程和设计思路,并撰写实验报告,在最终成绩评定中占比 50%。最后则是结课考核部分,采用在规定时间内开卷机考的方式,在成绩评定中占 30%的分值。

3.2. 课程内容设计

课程开发实例部分提供了完整的数码管点亮例程,其中也包括了工程建立、综合实现、下载调试等完整的软件操作流程,以图片加文字描述的方式逐步讲解操作步骤,让学生做一遍就会学一遍就懂,通过练习详细地了解设计输入、综合、实现、下载和调试的 FPGA 开发流程,最终实现在开发板的七段数码管滚动显示“HELLO FPGA”字样。

自主开发部分是课程的主要构成部分,由设定的 12 组难度不同的趣味开发小案例组成,要求学生根据自身水平和兴趣爱好,自由选择其中一个设计内容,难度系数较高的题目可由多个学生自发组成一个团队共同完成。自主开发实验在设定上兼顾考虑学生的不同专业知识基础,有可以通过脉冲宽度波形调制的三色 LED 彩灯点亮实验(如图 3),也有能够体现 FPGA 模块化并行编程思想的数字秒表和数字时钟实验,还有具有较高复杂度的小球碰壁反弹趣味游戏实验(如图 4)。该部分不拘泥限定实现过程与实现方式,学生可以参考相关书籍或者检索网络资源,也可以组队进行讨论并分工实现。

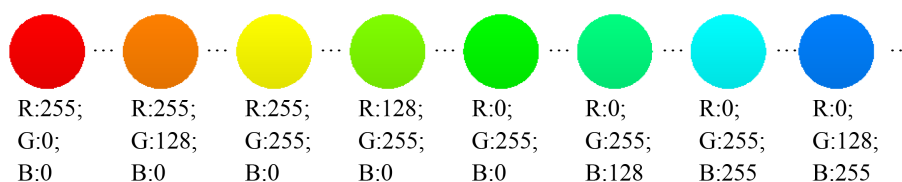


Figure 3. The experiment of lighting tri-color LED

图 3. 三色 LED 彩灯点亮实验

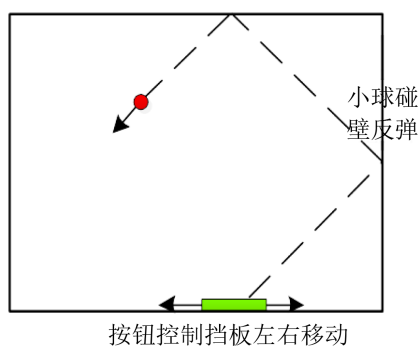


Figure 4. The experiment of ball game bouncing against walls

图 4. 小球碰壁反弹趣味游戏实验

3.3. 课程难点的解决方案

该课程的难点在于短时间内要求学生掌握理论结合实践的软硬件编程能力,且需要转换编程思想,因此在设计课程结构和课程内容时,需要二者兼而有之且突出重点。针对 Verilog 语法与 Vavido 语法的问题,学生在逐步复现开发示例的过程中即可逐渐掌握,并且提供了参考书目[9],边做边学。另外,在每次课前半段,围绕 Xilinx 的 FPGA 芯片介绍、开发板资源简介、开发环境搭建、编程语言讲解与常用

输入/输出设备浅析等部分组织理论讲解,结合开发板电路原理图与示例程序的核心部分,由浅入深加强学生对 FPGA 开发理论的理解,每次课讲解时间控制在 30 分钟内,留给学生大量的自主开发时间,并及时协助学生解决在开发过程中遇到的问题。

3.4. 课程考核方式

课程的重点在于动手实践,因而考核不设置理论考试内容,结课考核采用开卷上机考试的方式,在规定时间内完成简单开发实例并进行演示验证,比如跑马灯、表决器等,目的在于考察学生独立自主开发的能力以及并行编程思想的锻炼。

4. 结束语

为了适应新工科建设要求,学生在走向工作岗位前应当具备跨学科合作和实践创新等综合能力。FPGA 课是工科学生非常重要的一门专业课,FPGA 编程已经成为了硕士研究生在完成工程项目、课题研究和就业方面的一项基本技能,针对光电类研究生电路基础相对薄弱的特点,文章探索了理论 + 实践的 FPGA 实验课培养授课模式,理论授课涵盖数字电路分析、芯片与开发板介绍、重点语法与示例程序讲解等部分,可以让学生较好地掌握 FPGA 的设计方法与开发思路,而动手实践则采用开放的形式,让学生独立自主开发实现案例,加强其对理论知识的掌握,强化模块化、系统性并行编程思想的锤炼,通过理论联系实践,让学生深刻理解程序设计与硬件实现之间的对应关系,极大地提升其动手能力。实践发现,所有的学生在通过完整的学习后都可以较好地掌握 FPGA 设计基础,独立完成开放案例,少数学生利用上课下的时间,能够较好地完成复杂的小球碰壁游戏实验,具备了较高的编程能力。

参考文献

- [1] 林健. 面向未来的中国新工科建设[J]. 清华大学教育研究, 2017, 38(2): 26-35.
- [2] 钟登华. 新工科建设的内涵与行动[J]. 高等工程教育研究, 2017, 3(1): 1-6.
- [3] 杨洁. 新形势下地方高校科技产业改革与发展的对策建议[J]. 产业与科技论坛, 2018, 17(10): 16-17.
- [4] 兰旭婷, 郭中华, 崔雯雯. 基于电路与系统硕士学位论文研究热点的可视化分析[J]. 创新教育研究, 2021, 9(2): 298-306.
- [5] Namit, G. and Adesh, K. (2023) Study on the Wireless Sensor Networks Routing for Low-Power FPGA Hardware in Field Applications. *Computers and Electronics in Agriculture*, **212**, Article No. 108145. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108145>
- [6] 宋子恒. 基于异构计算架构的嵌入式交通标志牌识别系统的设计与实现[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京邮电大学, 2019.
- [7] 蔡祥, 高宝, 齐建东. 基于“口袋实验室”的 Verilog 程序设计课程教学改革[J]. 计算机教育, 2023(1): 114-119.
- [8] 康磊, 任旭超, 陈宇骞, 梅海红, 颜延. 基于可编程逻辑门阵列软硬件协同设计的心律失常分类系统[J]. 集成技术, 2023, 12(3): 82-93.
- [9] 夏宇闻. Verilog 数字系统设计教程[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2017.