

基于 FPGA 数字系统实践教学设计及实施

胡广洲

厦门大学嘉庚学院 信息科学与技术学院

DOI:10.12238/er.v7i5.5066

摘要：目前团队对基于 FPGA 的数字系统设计的教学中，大部分还停留在“注重下板验证，轻视下板验证前的仿真测试”。鉴于此，在教改项目实施的过程中，对数字系统设计课程进行改革。在课程的实施环节中，坚持重视最终的下板验证的同时，更注重下板验证前的仿真测试。同时，理论+项目实践案例同步相结合，在项目实践案例中，借鉴实际项目的开发流程来完成相应的实践项目。在课堂中引入项目组的形式，按照学生的意愿和能力组成项目组团队，由组长根据项目的开发文档进行分工协作，最终完成项目。实践表明，学生在参与实践的过程中，深刻的体会到了仿真测试等一系列的测试与协作流程在实际的项目开发中的重要性，更深刻的体会到了实践前的理论讲解的重要性。通过实践，学生更注重了理论知识的学习。同时，也体会到了团队协作的重要性。

关键词：FPGA；数字系统；仿真测试；项目教学

中图分类号：TN79 **文献标识码：**A

Design and Implementation of Practical Teaching based on FPGA Digital System

Guangzhou Hu

School of Information Science and Technology, Xiamen University Tan Kah Kee College

Abstract : At present, most of the teaching of FPGA based digital system design still focuses on “emphasizing the verification of the next board, neglecting the simulation testing before the verification of the next board”. In view of this, during the implementation of the educational reform project, the digital system design course has been reformed. In the implementation process of the course, emphasis should be placed not only on the final board verification, but also on the simulation testing before the board verification. At the same time, the combination of theory and project practice cases is synchronized, and in the project practice cases, the development process of the actual project is referenced to complete the corresponding practical projects. Introduce the form of a project team in the classroom, and form a project team based on students' wishes and abilities. The team leader will divide and collaborate according to the project development documents, and ultimately complete the project. Practice has shown that during the process of participating in practice, students have deeply experienced the importance of a series of testing and collaborative processes such as simulation testing in actual project development, and have gained a deeper understanding of the importance of theoretical explanations before practice. Through practice, students have paid more attention to the learning of theoretical knowledge, and at the same time, they also realized the importance of team cooperation.

Keywords: FPGA; Digital system; Simulation testing; Project teaching

引言

随着 FPGA 的规模和复杂性的增加，其应用领域也在逐渐扩大。调查发现，FPGA 在智能制造、5G 通信、无人驾驶、芯片测试等领域占比逐渐扩大，相关领域的人才缺口较大，因此，很多高校相继开设了与 FPGA 相关的课程，以求培养一批掌握 FPGA 相关技术的能适应相关特定领域需求的人才。但是，大部分学生没有意识到软件的仿真测试在实际的

FPGA 设计中的重要性，在学习过程中将更多的精力都投入到了编写代码下板验证中，而忽视了软件的仿真测试，导致了频繁下板验证频繁出错的死循环中，从而降低了学习兴趣，影响了学习质量。因此，为了实现 FPGA 数字系统设计课程的培养目标，解决当前学生学习过程中出现的问题，对课程内容及授课方法及形式进行了改革，授课形式及方法的改革能够让学生不断地融入到课程的讲授中，在参与中提高兴趣，

从而提高学习质量，最终实现课程的人才培养目标^[1-3]。

1 FPGA 数字系统设计课程的特点

1.1 入门容易深入较难

在本科培养方案中，一般会把数字电子技术作为低年级学生的先修课程，在高级开设 FPGA 数字系统设计的课程。在 FPGA 数字系统设计课程中，前期的基础部分会讲解数字电子技术中涉及的相关数字芯片的设计方法。这些芯片的功能相对简单，编写代码实现相对容易，因此很多学生就忽略了下板验证前的仿真测试，直接编写代码直接进行下板验证，因为前期设计的电路相对单一且简单，基本出错很少，即使出错稍作改动基本能够成功。这样一来，就导致在接下来的复杂电路及复杂系统的设计中频繁出错，编写代码、下板验证、出错、改代码、下板验证、又出错，进入了死循环中。知识的学习都是由简到难，逐渐提高的过程，但是所用的方法及流程基本不变，忽略了某一环节的分析，后面的相关设计分析出错的可能性会更大。更何况，仿真测试环节的分析过程复杂、相关仿真软件的操作需要熟练，这些都需要在后续的课程中深入学习才能掌握并深刻体会到仿真测试的重要性^[4-6]。

1.2 项目案例多，设计规范性强

FPGA 数字系统设计课程项目案例教学的流程包括小组提出项目框架方案、方案小组讨论、方案确定、绘制信号时序图、小组分任务编写代码、功能仿真、下板测试、项目总结文档撰写。其中一个环节出现问题，就需要逐级检查，直到问题解决并实现。

仿真测试是项目设计的重要环节，只有在软件仿真测试环节发现更多的问题并解决，才能在最终的下板测试环节乃至后期的使用中规避更多的风险。

学生在这种严谨的流程操作下，可以深刻体会到 FPGA 数字系统设计的流程步骤，可以更好的实践使用各种仿真测试方法和仿真工具，可以在实操的过程中增加学生对本课程的兴趣，同时让学生认识到团队合作的重要性。因此，对于实践性很强的 FPGA 数字系统设计课程来说，建设有效的实践教学环节是很有必要的^[7-8]。

2 课程实践环节

2.1 项目分组

在课程的实践环节，由学生根据自己意愿及参考能力差别自由组成项目团队，选出项目组长，做好分工。要求是，团队成员要各取所长，避免把擅长同一环节的同学放到一个组中，确保整个开发设计过程中的每个环节都有专人负责，

以此确保小组中每个成员能各施所长通力合作。这样既发挥出了个人的最大能量，同时也锻炼了成员间的团队协作能力。为此，在项目组的组建过程中，鼓励学生正确认识自己，要根据自身兴趣及特长参与到项目的开发设计中。在项目组组建过程中，教师不作为主导作用，起到一个辅助协调的作用。帮助学生确定自身的兴趣点及在当前项目中自己所擅长的部分，这样能更好的适配项目中各个环节所需要的人员，能够更好的发挥每个人的能力，同时也能增强学生的责任感和团队协作能力。

2.2 项目开发内容设计

2.2.1 实践项目的选择

本课程的实践项目的确定在遵循大纲的基础上，结合当前学生的掌握情况，灵活调整实践项目。为了提高项目开发的整个环节的效率，鼓励学生对之前项目模块的相关资源进行参考利用，比如，项目文档的撰写、源代码的编写等，都可作为当前实践项目的参考，以节省项目的开发周期。

2.2.2 实践项目步骤的确定

结合 FPGA 数字系统设计流程，本课程实践项目开发设计的阶段作如下划分，如表 1 所示。

表 1 项目开发设计阶段

阶段	内容	分工
1	提出项目框架方案、画出系统框图	项目组
	方案小组讨论	项目组
	方案确定（功能模块划分）	项目组长
2	绘制信号时序图	项目成员
3	编写代码、功能仿真+下板测试	项目成员
4	问题收集管理，项目结题文档撰写	项目成员

2.3 实践项目的执行

如图 1 所示，目前电子、通信、自动化等相关专业的大学生求职意向最希望是 FPGA 和数字 IC 验证。FPGA 相关行业经过近 10 年的发展，已经渗入到通信、航空航天、智能驾驶、数字 IC 验证等领域，并且在相应领域的高端人才紧缺，市场也产生了对于 FPGA 相关的软硬件工程师的提升培训的需求。经过多年的实践摸索，FPGA 数字系统设计从侧重硬件验证，逐步过渡到软硬件联合测试，直到现在的侧重软件验证测试加硬件调试的教学模式。实践表明，侧重软件验证测试不仅可以在软件的代码编写、功能仿真、综合、时序约束、时序仿真等环节中不断改进、优化设计，从而避免了直接进行硬件验证时出现的反复改代码、反复下板验证的重复的尴尬的局面，同时也可以节省重复手工操作的工作量，

也可以通过 EDA 的仿真软件直观的展示测试数据。因此，本实践项目体系中更多的引用了当前在 FPGA 相关企业中应用比较广泛的测试工具及测试方法，希望以此锻炼学生分析设计的逻辑思维能力及 EDA 技术的实践动手操作能力^[9-11]。

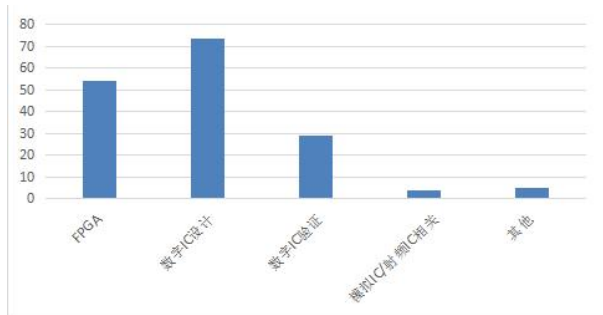


图 1 FPGA 相关行业大学生求职意向统计图

2.3.1 方案的确定

项目组根据设计文档的需求提出各自的设计方案，方案经过项目组讨论之后确定最优方案，并根据最优方案划分出项目的各个功能子模块。方案的确定要集思广益，小组集体讨论，必要时教师可以介入给予必要的指导。此过程既能让每个人有参与感，同时也能发挥每个人的主观能动性；既体会到了团队的参与感，同时也对成果的输出有一种自豪感。

2.3.2 系统框图的绘制

此环节根据确定的方案及划分出的各个功能子模块，逐一绘制系统整体框图。

此环节要特别注意，各个功能子模块之间的信号传输问题，一定要协调好模块之间的数据传输问题，比如位宽的确定、中间信号的命名等问题都要事先沟通协调好，初衷就是见名知意，增加代码的可读性、可移植性。此环节是团队成员的深度参与的过程，为后续完美配合打下一个坚实的基础。

2.3.3 时序图的绘制

在实践教学中，时序图的绘制是对所有同学的要求，希望在绘制信号的时序图时，体会各个信号相互变化的趋势，感受信号之间的相互控制与协调的过程，为下一步的编写代码做好了充足的准备。但是，在项目组的这种案例的教学中，考虑到项目组之间的竞争关系，也受限于授课时长，因此，在此环节会根据项目组成员的特长选出一个最擅长时序图绘制的学生来完成。如果是一个比较复杂的项目，在划分成子模块后，可能要先对各个子功能模块进行时序图的绘制。这个环节中，教师可以根据实际对学生做必要的指导。

2.3.4 代码编写

此环节包含：子功能模块代码编写、子功能模块测试代码编写、仿真验证。

代码编写环节中，将对代码进行编程规范规则的检查。该项测试向学生展示了代码语法之外的规范规则问题，编程语法是学习编程语言的基础，在综合工具中能够被自动检测，但是，编程规范规则是常常被忽略而又不该被忽略的部分，只有符合编程规范的代码才能具有可读性，才具有美感，才能减少潜在的错误，而且也具有更强的可移植性^[12,13]。

代码编写环节中，主要依据就是上一环节的时序图。参照各个子功能模块的功能特点，结合相应模块的时序图来编写相应模块的功能代码。代码编写完成后，进行编译，如果编译没有出错，会要求团队内的成员进行检查，如果没有检查出问题，接着就是该模块的测试仿真代码的编写，测试代码编写相对简单一些，但是，在此环节中要特别注意，是否需要引入新的变量、对测试模块端口的声明、需要测试几组数据及元件例化部分的声明等易错、易忽略的地方。此项工作也需要团队成员进行检查，如果没有检查出问题，则开始调用第三方仿真软件 modelsim 进行模块仿真，每个模块的仿真会要求成员检查，如果没有检查出问题，则该模块设计完成。

此环节，不仅要求学生有时序图识别的功底，还要求对各个子功能模块的逻辑功能有深刻的认识，同时对整个项目的逻辑架构的脉络有一个清晰的理解。此环节不仅锻炼了成员之间的团队协作能力，同时也提高了学生的试错辩错的能力。让学生深刻体会到，一个人的能力是有限的，团队的创造力是无限的。

2.3.5 项目系统测试仿真验证

此环节要求设计者对整个项目的架构非常清晰。根据系统整体框图设计出项目系统的测试用代码。项目系统测试不同于模块测试，该环节中测试人员根据项目需求设计文档进行测试代码的编写与仿真。测试人员将利用调用全局信号、局部信号来检测系统的全局数据与各个子功能模块局部数据，然后与时序图绘制环节中的时序图进行对比，相当于是理论值与实际值的对比，通过这种对比可以清晰的判断整个项目系统的质量。

2.3.6 问题协调跟踪管理

从项目的方案确定之后，每一个环节都需要有成员进行问题的协调跟踪处理。

项目设计实现的过程中，对出现的问题进行协调跟踪处理的过程需要团队中不同分工的成员协同运作，从问题最初被发现到最后被解决的过程中可能经历各种不同的环节，常见的问题环节如图 2 所示，首先由团队成员记录出现问题的

信息，然后由项目组长组织成员讨论，讨论通过后，分派给团队成员修复问题，接着执行项目计划，这个过程有时是反复进行的。比如，其中的某一个环节又出现了问题，还需要把这个过程走一遍，直至整个项目的完成，这个过程才终止。

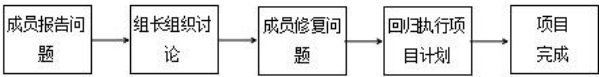


图 2 问题协调跟踪管理流程

问题协调跟踪管理环节，重要的是形成整个问题链的报告，如图 2 所示。这样的话，在后续的项目中出现类似问题可以快速解决，同时，可以积累相关经验，为后续的工作打下一个坚实的基础。为此，可以说项目的例化教学，不仅可以很好的掌握知识，而且更重要的是积累项目经验[14,15]。

表 2 问题协调跟踪记录表

序号	出现问题的环节	问题描述	解决办法
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			

3 结语

针对 FPGA 的数字系统设计中的仿真测试已经不再是数字系统设计中的一个环节，而是贯穿始终的一个必要的方法。为了扭转学生对仿真测试工作的偏见，必须对课程教学进行改革，在课程中建立项目实践案例教学体系。项目以团队形式展开，人员组成以学生的意愿及参考能力差别组队，项目的确立要循序渐进、由简到繁，随着课程的推进，项目的复杂性、兼容性、综合性、实用性要逐步体现出来。实践证明，该项目实践案例的实施过程能不断提高学生对仿真测试的兴趣，不断提高仿真测试的重要性，不断提高仿真测试技术学习的效率，不断提高基于 FPGA 数字系统设计相关人员与工作岗位的契合度。

参考文献：

[1]王正勇,尹洪剑.基于 FPGA/CPLD 的 EDA 课程教学改革与实践[J].工业和信息化教育,2013(3):40-42.

[2]杨军,蔡光卉,黄倩.基于 fpga 的数字系统设计与实践[M].北京:电子工业出版社,2014.

[3]金曦.项目导入法在 EDA 教学改革中的探索[J].职业技术,2010(10):45.

[4]谷善茂,林德,刘云龙,等.EDA 课程创新实验教学方法探究[J].实验技术与管理,2015(3):40-43+46.

[5]林连冬.以设计性实验为引导的 EDA 技术课程教学改革与实践[J].黑龙江教育(高教研究与评估),2014(6):43-44.

[6]黄平,王伟,周广涛.基于 Quartus II 的 FPGA/CPLD 数字系统设计与应用[M].北京:电子工业出版社,2014.

[7]丁家峰,李新海,孙克辉,等.EDA 技术与应用课程教学改革与创新[J].电气电子教学学报,2017(6):47-49+59.

[8]蔚瑞华,余有灵,张伟,等.基于模块化思想的 FPGA 综合实验项目设计[J].实验室技术与管理,2016,33(5):44-47.

[9]杨慧晶,于斌,任明远.基于 FPGA 课程的教学改革探究[J].黑龙江教育:高教研究与评估,2014(9):8-9.

[10]杨军,余江.基于 FPGA 的数字系统研究与设计[M].北京:科学出版社,2016.

[11]周莉莉.FPGA 课程教学方法的探讨与研究[J].实验室科学,2013(3):66-67.

[12]王凯,周德新,崔海青.EDA 及 FPGA 应用技术课程改革与实践[J].教育教学论坛,2015(40):151-152.

[13]刘桂华.基于 FPGA 的现代数字系统设计[M].西安:西安电子科技大学出版社,2012.

[14]郭海丽.应用型本科院校 EDA 技术课程教学改革探索[J].理论前沿,2014(12):80-81.

[15]徐学红.基于培养学生创新能力的 EDA 教学改革探索[J].信息系统工程,2011(8):147-149.

作者简介：

胡广洲（1979—），男，福建漳州，硕士，讲师，主要研究方向为 FPGA 嵌入式、现代 EDA 技术等。

基金项目：

厦门大学嘉庚学院教研教改项目（2021J09）