

# 数字电子技术综合性虚拟仿真实验教学改革

陈 龙, 郗小美, 马学条  
(杭州电子科技大学 电子信息学院, 杭州 310018)



**摘 要:**将数字电子技术综合性虚拟仿真实验案例——基于 DDS 的任意波形发生器应用于实验教学,该教学案例几乎涵盖了数字电子技术理论课程中所有核心知识点,具有很强的综合性,便于学生将理论课程中碎片化的知识点构建成相对完善的知识体系;正弦波、方波、三角波、任意波形以及李萨如图形等实验结果可通过示波器直观观察,具有很高的演示度,激发了学生的学习兴趣。实践表明,综合性虚拟仿真实验案例教学方法提高了学生设计复杂数字电路系统的能力,培养了学生的实践创新和工程应用能力,取得了良好的教学效果,有利于教学水平的提高。

**关键词:**数字电子技术;虚拟仿真实验;任意波形发生器;李萨如图形;创新能力

**中图分类号:**TP 391.0

**文献标志码:**A

**文章编号:**1006-7167(2017)05-0110-04

## Research on Comprehensive Virtual Simulation Experiment Reform of Digital Electronic Technology

CHEN Long, QIE Xiaomei, MA Xuetao

(School of Electronic Information, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** Digital electronic technology experiment is one of the specialized courses for the student majoring in electronics or related. The arbitrary waveform generator based on DDS is used to the digital electronic technology comprehensive virtual simulation experiment. This teaching case covers almost all core knowledge in the theory of digital electronic technology course, and has characteristic of strong comprehensive. It is convenient for students to master theoretical knowledge fragmentation in the course to build into a relatively complete knowledge system. Experiment results such as sine wave, rectangular wave, triangle wave, arbitrary wave and Lissajous figures can be observed through the oscilloscope. The students' interests in learning are stimulated due to high presentation of experiment results. Practice shows that, comprehensive virtual simulation case can improve the students' ability to design complex digital circuit system. It can also cultivate the students' ability of practical innovation and engineering application. It achieved good teaching effect, and was beneficial to the improvement of teaching level.

**Key words:** digital electronic technology; virtual simulation experiment; arbitrary waveform generator; Lissajous figures; innovative ability

## 0 引 言

数字电子技术是电子类相关专业必修的专业基础课程,具有很强的实践性和工程性,其实验可分为验证性实验、设计性实验和综合性实验,实验教学贯穿于整个理论教学中<sup>[1-2]</sup>。通过对实验课程的学习与设计,加深学生对数字电子技术理论知识的理解,增强学生的

收稿日期:2016-11-17

基金项目:浙江省 2013 年高等教育课堂教学改革项目(kg2013125);浙江省 2015 年度高等教育教学改革项目(jg2015060)

作者简介:陈 龙(1979-),男,山东宁阳人,硕士,副教授,教务处副处长,国家级实验教学示范中心副主任,研究方向为数字电子技术教学与研究,嵌入式系统设计与应用、神经网络与机器学习。

Tel.: 0571-86915094; E-mail: chenlong@hdu.edu.cn

分析、设计及调试数字电路和数字系统的能力,激发学生的学习兴趣,提高学生科学研究素质。我校经过多年的实验教学改革,在保留原有重要实验内容的基础上,在课程教学的后期引入综合性虚拟仿真、虚实结合实验,设计并实践了多个数字电子技术综合性虚拟仿真实验案例,贯通理论课程的各核心内容,以加深学生对理论知识的实践与应用,便于学生建立数字电子技术课程的知识体系<sup>[3-4]</sup>。

本文以数字电子技术综合性虚拟仿真实验——基于直接数字合成器(Direct Digital Synthesizer, DDS)的任意波形发生器为例,浅谈如何将虚拟仿真、虚实融合技术应用于数字电子技术实验教学,通过综合性、创新性实验的自行设计,对实验内容、方法和教学模式进行综合改革,使得理论课程教学和实验课程教学融会贯通,对培养学生实践创新能力和解决复杂工程问题的能力具有非常重要的作用<sup>[5-8]</sup>。

## 1 数字电子技术综合性虚拟仿真实验案例设计

DDS是一种新型的频率合成技术,具有频率分辨率高,频率切换速度快,相位噪声低等优点,在现代电子系统及设备的信号源设计中,尤其在通信领域,DDS得到了广泛的应用。本文采用自底向上的方法设计基于DDS的任意波形发生器,采用QuartusII软件进行各实验模块的设计和虚拟仿真,下载到FPGA开发板进行硬件测试<sup>[9]</sup>。

### 1.1 DDS波形发生器教学案例方案设计

设计一个基于DDS的任意波形发生器,可产生正弦波、三角波、方波、锯齿波、任意波形等信号;通过调节A/D转换器的输入电压值,实现输出波形的频率可控。将两路不同频率的正弦波合成李萨如图形,下载到FPGA开发板中结合数模转换器在示波器上观察输出结果<sup>[10]</sup>。

本文设计的数字电子技术综合性实验案例设计框图如图1所示,由ADC采样控制模块、DDS模块、显示译码与锁存模块、内部锁相环、A/D转换器、D/A转换器等组成,A/D转换器的模拟输入端连接分压电路,

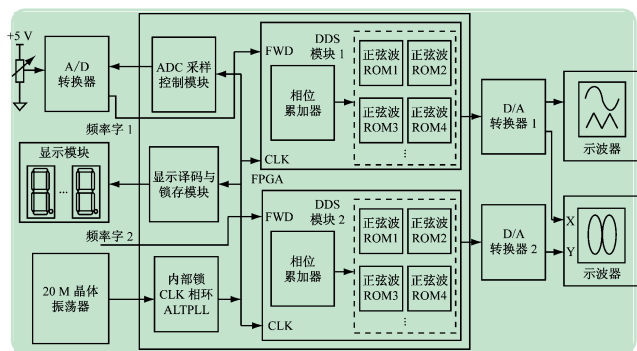


图1 数字电子技术综合性实验案例设计框图

A/D转换器的数据输出端与频率字1相连,通过调节输入电压值的大小实现对频率字的调节,改变DDS模块的输出波形的频率<sup>[9]</sup>。

### 1.2 DDS波形发生器基本组成及工作原理

图1中DDS模块部分所示,DDS波形发生器包括相位累加器、存储波形的ROM模块;其中存储波形的ROM模块由正弦波、方波、三角波、锯齿波、任意波形等组成。ROM中存储了完整波形的离散采样值,采样数据与所选ROM的位宽和数据宽度必须一致。N位相位累加器由参考时钟CLK控制,累加步长为频率控制字FWD,累加结果作为波形存储器ROM的寻址,为了减小波形存储器所需的容量,取相位累加器输出的高M位为波形存储器ROM的寻址,ROM查找表寻址输出的D位波形幅度码经过D/A转换后变成阶梯状波形,再通过低通滤波器平滑后输出光滑的信号。

## 2 DDS波形发生器的设计与仿真

### 2.1 ADC采样控制模块设计与仿真

本教学案例中AD转换器模块选用ADC0809芯片,ADC0809工作时序如图2所示,根据ADC0809的工作时序,画出状态机对ADC0809的控制状态图如图3所示。

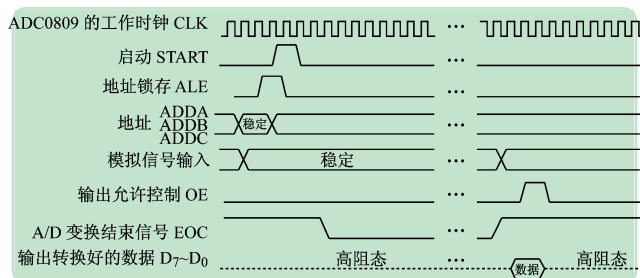


图2 ADC0809工作时序图

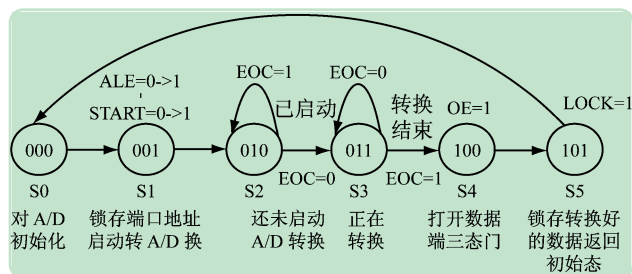


图3 ADC0809采样控制机状态图

根据ADC0809的接口特性和采样控制状态机要求,本文设计的采样控制状态机电路如图4所示,该电路由状态译码器、控制译码器、状态寄存器和锁存器构成。状态译码器AD\_SDCD元件根据ADC0809转换器的转换结束信号EOC和现状态编码C[2..0],决定状态的走向;控制译码器AD\_CDCD元件根据状态机所处的状态,向ADC0809转换器输出控制信号LOCK、

OE、START、ALE;状态寄存器 DFF3 元件由 3 个 D 触发器构成。ADC 采样控制模块的工作时钟接在 DFF3 元件的 CLK 端,决定了采样控制模块的工作速度。

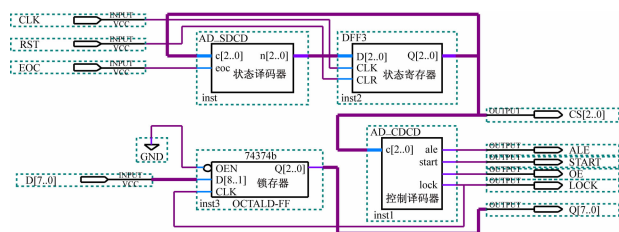


图 4 ADC0809 采样状态机控制电路

对 ADC 采样控制模块进行时序仿真,仿真波形图如图 5 所示。图中 CS 是现状态指示,在状态 S0(CS = 0)时对 ADC0809 转换器进行初始化操作;在状态 S1(CS = 1)中将 ADC0809 转换器的地址锁存进地址寄存器,并启动转换工作,此时 ALE 和 START 产生一个上升沿;在状态 S2(CS = 2)中,查询 EOC 是否为高电平,EOC = 1 时下一状态仍停留在 S2,EOC = 0 时进入状态 S3(CS = 3);在状态 S3 中,查询 EOC 是否为低电平,直到 EOC 由 0 变成 1 时,转换结束,进入状态 S4(CS = 4)。由于此时转换数据已经完成,所以在此打开 OE 控制的三态门;为了稳定转换器的输出数据,在状态 S5(CS = 5)中,LOCK 产生一个上升沿,将转换好的数据 b 锁入 74374 中,仿真结果表明本文设计的 ADC0809 采样状态机能够按照 ADC0809 工作时序对 ADC0809 进行控制。

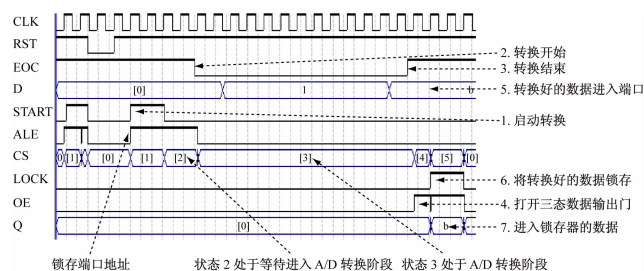


图 5 ADC0809 采样状态机工作时序

## 2.2 DDS 波形发生器设计与仿真

根据 DDS 波形发生器的原理,设计如图 6 所示 DDS 正弦波形发生器电路图,包括 32 位 ADDER32B、32 位寄存器 DFF32 和正弦波形数据存储器 SIN\_ROM 3 个模块,其中加法器由 LPM 的加/减算术模块 LPM\_ADD\_SUB 构成。寄存器 DFF32 由 LPM\_FF 宏模块构成,与 ADDER32B 组成一个 32 位相位累加器。其中高 10 位 PA[31..22]作为波形数据存储器 SIN\_ROM 的地址。正弦波形数据 ROM 模块 SIN\_ROM 的地址线位宽是 10 位,数据线位宽是 8 位,即其中一个周期的正弦波离散采样数据有 1024 个,每个数据有 8 位,输出接 8 位的数模转换器 DAC0832 数据输入端。

对 DDS 波形发生器电路进行编译,新建 SignalTap

II Logic Analyzer 文件,在 SignalTap II 窗口中的 Setup 标签页中,双击空白区域,打开 Node Finder 窗口,选择 Pins: output,单击 List,在 Nodes Found 区域中选 DAC[0],DAC[1],...,到 DAC[9] 节点信息,单击“>”按钮,把要观察的开关节点添加到 SignalTap II 中。通过嵌入式逻辑分析仪 SignalTapII,对数据进行采样和监控,其仿真结果如图 7 所示,仿真结果表明,本文设计的 DDS 波形发生器能输出所需波形。

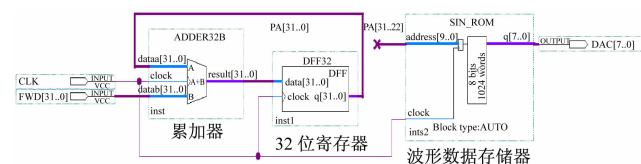


图 6 DDS 波形发生器电路(以正弦波为例)

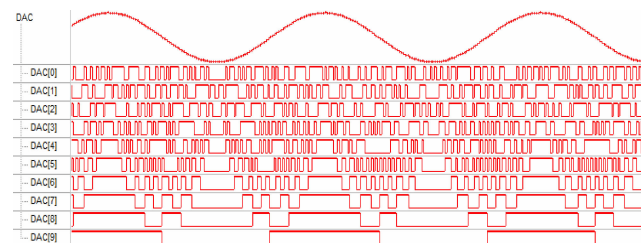


图 7 嵌入式逻辑分析仪测试的 FPGA 输出波形(以正弦波为例)

## 2.3 DDS 波形发生器顶层电路设计

根据系统方案设计要求,在原理图编辑文件中调用已生成的波形发生器 DDS 元件、采样控制器 AD 元件、内部锁相环 PLL 元件和显示译码锁存模块等元件构成基于 DDS 的波形发生器顶层电路。利用相位累加器和存储波形 ROM 模块构成 DDS 波形发生器;在原理图编辑文件中调用已生成的寄存器、译码器和锁存器组成采样控制状态机。

## 3 DDS 波形发生器硬件测试

选用 CycloneIII EP3C5E144C8 芯片 FPGA 核心板进行硬件测试,硬件测试系统还包括示波器、A/D 转换器、D/A 转换器和电源。在顶层设计电路中对输入信号、输出信号进行引脚锁定,编译下载 .sof 文件,通过拨动相应的拨码开关选择对应的输出波形,可在示波器上观察到如图 8(a)~(e)所示的正弦波、三角波、锯齿波、矩形波和任意波形等。

将两路输出波形通过示波器 X 轴和 Y 轴合成时,若两个相互垂直的简谐振动的频率为任意值,其合成的运动相对复杂,且运动轨迹不稳定,当两个振动的频率成简单的整数比时,其合成的运动是一个稳定、封闭的曲线图形,即李萨如图形。

在顶层设计电路中对输入信号、输出信号进行引脚锁定,重新编译后,将两路输出波形同时接到示波器 X 轴和 Y 轴进行合成,通过调节滑动变阻器改变 ADC0809 的输入电压值从而改变频率控制字,或通过



按键输入频率控制字,示波器可显示如图9所示的各种频率成简单整数比的李萨如图形。

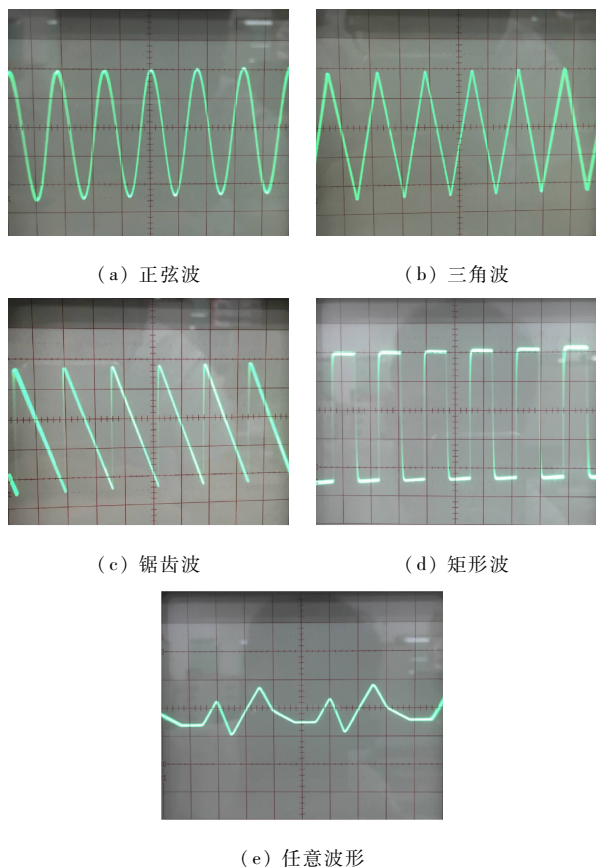


图8 任意波形发生器硬件测试输出结果

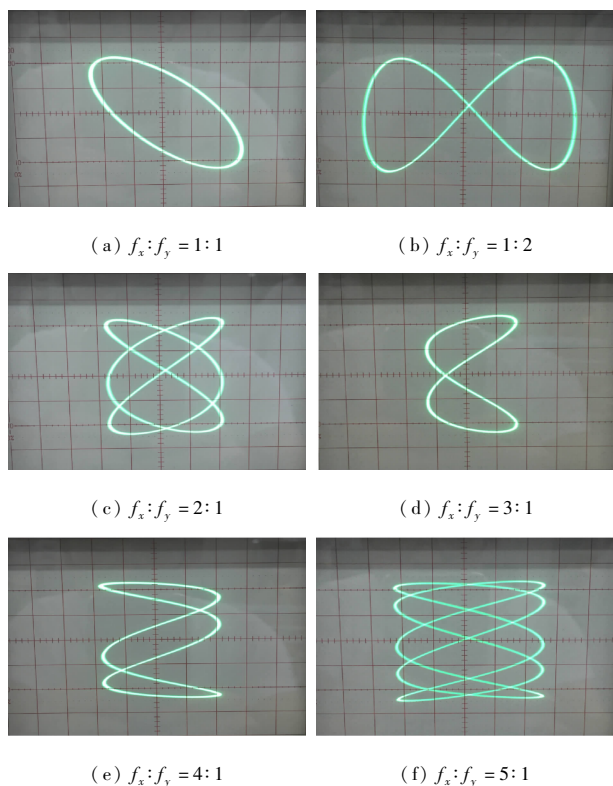


图9 李萨如图形

系统硬件测试结果表明,该教学案例成功设计并

实现了基于 DDS 的任意波形发生器,并可生成频率成简单整数比的李萨如图形。

#### 4 结 语

本实验教学案例已成功应用于我校数字电子技术实验课程教学,具有如下特点:

(1) 该实验教学案例几乎涵盖了数字电子技术理论课程中如组合电路的分析与设计、时序电路的分析与设计、触发器与含触发器的 PLD、半导体存储器及其应用、A/D 与 D/A 转换器及其应用等所有核心知识点,具有很强的综合性,便于学生将理论课程中碎片化的知识点构建起相对完善的知识体系。

(2) 通过将 QuartusII 软件虚拟仿真和 FPGA 验证融入到传统数字电子技术课程的教学,虚拟仿真和虚实结合的教学方法使学生在掌握现代数字电路自动化设计与分析方法的同时,也培养了学生发现问题、解决问题的能力。

(3) 通过示波器观察实验结果如正弦波、方波、三角波以及任意波形等,将抽象的李萨如图形通过示波器直观地呈现出来,实验具有很高的演示度,极大地激发了学生学习兴趣,使学生能够迅速由验证性实验过渡到自主设计实验,初步培养了学生自主创新能力和解决复杂问题的能力。

多年的实验教学改革经验表明,数字电子技术综合性虚拟仿真实验应用于实验教学,激发了学生的学习兴趣,提高了学生设计复杂数字电路系统的能力,培养了学生的实践创新和工程应用能力,实验教学改革取得了良好的教学效果,值得进一步推广和应用。

#### 参考文献 (References):

- [1] 王 波,张 岩,王美玲. “数字电子技术实验”课程的改革[J]. 实验室研究与探索,2012(9):121-123,127.
- [2] 刘银萍,王 晗. 数字电子技术实验课程的改革与探索[J]. 实验科学与技术,2010(5):105-107.
- [3] 马晓虹,尹向雷. 数字电子技术实验教学的改革与探索[J]. 实验技术与管理,2012(10):172-174.
- [4] 盛建伦,刘淑霞,王 勇,等. 数字逻辑实验技术改革的研究[J]. 实验技术与管理,2015(4):216-219.
- [5] 李 宁,罗琴娟,钱 桦,等. 数字电子技术自主设计性实验实践教学实践及分析[J]. 实验技术与管理,2015(6):161-163,167.
- [6] 张学成. 数字电子技术实验改革与创新[J]. 实验室研究与探索,2011(8):285-288.
- [7] 李 旭,张为公. 基于科研项目的数字电路创新型实验教学改革[J]. 实验室研究与探索,2015(1):168-171,209.
- [8] 叶佳卓,卢 斌,程 栋. 基于 EDA 技术的数字电路实践教学探讨[J]. 实验技术与管理,2010(11):249-252.
- [9] 潘 松,陈 龙,黄继业. 数字电子技术基础[M]. 北京:科学出版社,2015.
- [10] 亢程龙. 函数/任意波形发生器设计与实现[D]. 成都:电子科技大学,2015.