

聚焦工程实践应用，贯通课程知识体系 ——以“电子器件基础”实验课程为例

李清江 王义楠 程江华 于红旗 陈长林

(国防科技大学电子科学学院, 长沙 410073)

摘要 本文以北斗卫星系统测控信号采集工程项目为需求牵引, 将模电、数电、集成电路设计、信号与系统等专业骨干课程中的知识和理论融合到模数转换(ADC)电路的教学案例设计中, 贯通专业知识体系, 实现以用促学, 学以致用。本教学案例为综合性、设计型实验。根据教学设计思路和 3 个层次(基本任务、能力提升及工程应用)的任务要求, 按照电子系统设计流程, 学生依次完成各个单元设计。通过能力提升和工程应用部分的设计, 激发创新和进取意识, 提升学生解决实际问题的能力, 培养系统设计和工程应用思维。

关键词: 电子系统设计; 模数转换器; 实验案例设计; 北斗卫星测控; 工程实践能力

Focusing on engineering practice and application, consolidating the knowledge system of courses: taking “fundamentals of electronic devices” as illustration

LI Qingjiang WANG Yi'nan CHENG Jianghua YU Hongqi CHEN Changlin

(College of Electronic Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

Abstract The proposed practical case takes the signal acquisition project of BeiDou satellite system as the demands traction. The teaching case contains the knowledge and theory learned in the backbone courses, such as analog electronics, digital electronics, integrated circuit design, signals and systems, into the design of analog-to-digital conversion (ADC) circuit. It is expected to provide a coherent body of knowledge that will enable the students to use it for learning purposes. The practical case is a comprehensive, design-based experiment. According to the teaching design concept and the task requirements of the three levels (basic tasks, competence enhancement and engineering application), students complete the design of each unit in turn in accordance with the electronic system design process. Through the design of the competence enhancement and engineering application parts, the students' sense of innovation and enterprise is stimulated, their ability to solve practical problems is enhanced and their thinking about system design and engineering application is cultivated.

Keywords: electronic system design; analog-to-digital converters; experimental case design; BeiDou satellite measurement and control; practical engineering skills

0 引言

“电子器件基础”是面向电子信息类专业的一门重要课程, 是完成模电、数电等前修课程所学理论知识到工程技术进阶的“桥梁”课程, 是为集成电路设计、雷达原理、软件无线电等专业课程和大学生电子设计竞赛等创新实践活动提供技术支撑的

“基础”课程^[1-2]。“电子器件基础”课程侧重工程应用和实践能力的塑造, 其课内配套的实验教学对整个课程的教学效果起到了“画龙点睛”的重要作用, 要求所采用的教学案例能够覆盖电子系统设计全流程, 锻炼发现和解决实际问题的能力, 真正达到以用促学、学以致用教学效果。模数转换器(analog-to-digital converters, ADC)是几乎所有电

子信息系统的重要组成部分,是连接真实的模拟世界和虚拟的数字世界的桥梁,也是支撑现代信号处理的基石^[3-4]。ADC 电路的设计是电子系统设计、集成电路设计等课程中的重点内容,是学生毕业后从事电子系统、集成电路设计方向工作的重要技术储备。本课程实验案例即是在新工科背景下,以工程实践应用为牵引,设计面向北斗卫星测控信号采集的模数转换(analog-to-digital conversion, ADC)电路,指导学生合理设计 ADC 工作参数,满足实际工程应用需求^[5-7]。

1 实验教学目标

以北斗卫星测控系统中频信号采集为牵引,设计一款基于现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)的 ADC 性能测量与分析系统^[8-11],涉及 ADC、放大器、时钟发生等单元电路设计与实现方法,动态指标如信噪比(signal to noise ratio, SNR)、信噪失真比(signal to noise and distortion ratio, SNDR)、有效位数(effective number of bits, ENOB)的计算和分析^[12],带通采样系统的设计要素和关键技术参数,以及示波器、任意波形发生器等测量仪器的操作方法等。

本案例教学的总体目标是培养学生掌握高速 ADC 的基本原理,理解 ADC 动态性能影响因素的分析方法,循序渐进引入开发高性能 ADC 数据采集系统的工程实践。按照基本任务、能力提升及工程应用 3 个层次的培养目的,将总体目标分为以下 3 个方面:

1) 贯通专业知识体系。培养学生掌握 ADC 等硬件电路设计、FPGA 程序开发、示波器等仪器操作、动态性能测量与分析等全要素、全流程知识内容,实现知识的融会贯通。

2) 锤炼工程实践能力。通过电路设计、实现和

测试等基本任务的锻炼,培养学生掌握电路性能的分析方法与性能优化方案的设计能力,具备开发工程应用系统的思维和能力,实现技术的进阶。

3) 激发创新意识、肩负家国使命。以中兴、华为事件为案例,介绍美国对我国实施高性能芯片禁运措施的情况,结合中美科技战,引导学生树立远大理想,勇敢肩负起时代赋予的自主创新光荣使命。同时,以亚德诺和德州仪器等芯片巨头长期发展历程告诫学生追求集成电路的创新突破需要长期的技术积累和持之以恒的工匠精神,需要严谨求实的学风。

2 教学设计与引导

作为电子科学与技术、微电子科学与工程专业的一个综合性的知识点,本教学案例以应用场景需求为牵引,将 ADC 的外围电路设计、FPGA 程序控制、信号分析和处理、系统实现工程实践等完整的技术链和开发流程融合到课程学习中。具体设计思路如下。

2.1 以国家重大工程应用需求为牵引,提升学生参与实践的兴趣

结合明确的工程应用需求背景,从系统-单元电路-芯片分 3 个层次分解设计指标,最后形成对所设计电子系统的具体功能性能指标要求,与实际应用结合,例如片上雷达、软件无线电等,让学生熟悉所设计的指标参数“从何而来”,所设计的电路要“用在哪里”,塑造工程思维方式,提升实践创新能力。就本教学案例来说,以北斗三号重大工程卫星测控分系统中地面测控站信号采集记录设备为工程应用背景,针对其下行 70MHz(带宽±10MHz)中频信号,设计基于 FPGA 的采集系统,引出开展 ADC 性能测评的需求。系统指标和 ADC 性能分解计算如图 1 所示。

中频信号采集系统主要指标		分解计算		对应ADC的性能需求	
输入中频信号	70MHz	分解 计算	ADC采样速率	≥56MS/s	
输入信号电平	-60dBm~0dBm		ADC信噪失真比	≥60dB	
最大信号带宽	20MHz		ADC的有效位	≥9.7bit	
回放信号质量	误码率性能恶化不大于1dB		ADC时钟抖动	2.27ns	

图 1 系统指标和 ADC 性能分解计算

2.2 融合贯通核心课程,一体化设计实践教学内容

通过一个综合性教学案例的设计,使电子信息专业主干课程中的相关知识点形成紧密衔接,让学生深入理解模电、数电、模拟集成电路设计及信号与系统等课程中相关知识的内在联系,实现知识的融会贯通。具体来说,本教学案例涉及:

1) 模电课程的加法电路、端接匹配电路,模拟滤波电路及运放增益带宽积等知识点。

2) 数电课程的时序控制、逻辑编程、仿真验证及编码电路等知识点。

3) 模拟集成电路设计课程的采样保持电路、电路非线性分析、锁相环相位噪声及基准电压设计等

知识点。

4) 信号与系统课程的采样定理、傅里叶变换、信噪比、无杂散动态范围等知识点。

2.3 以提升 ADC 动态性能为抓手, 引导学生循序渐进提升解决实际电路问题的能力

为提升 ADC 动态性能, 采用以下研究分析步骤:

1) 厘清动态性能主要影响因素。从信号调理、电源网络、采样时钟、基准电压及信号源等方面分析 ADC 动态性能的主要影响因素, 具体来说, 通过理论推导, 揭示采样时钟孔径抖动 (锁相环相位噪声) 对 SNR、SNDR 的影响规律^[13], 如图 2 所示。

2) 设计 ADC 动态性能提升方案。从改进电源性能、信号调理电路等方面设计提升 SNR、SNDR、ENOB 等指标的改进方案。具体包括引导学生从更换高精度稳压源、优化退耦电容配置等方式探求提升 ADC 动态性能方法的新路径。引导学生采用低噪声放大器、合理利用运放线性区间等方式探求提升 ADC 动态性能方法的新路径。

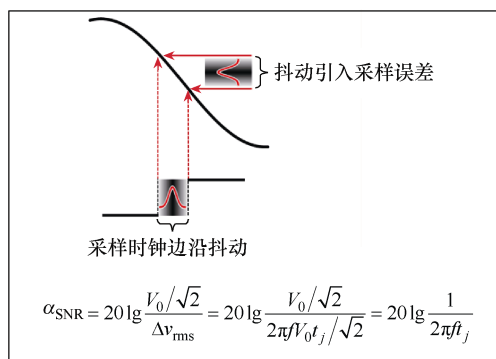


图 2 采样时钟抖动对 ADC 动态性能的影响

2.4 改进电子电路综合课程教学手段, 实现硬件设计、软件编程和算法分析有效协同

针对上述“贯通型、全流程”的课程特点, 打破单一的“EDA 工具使用”模式^[14], 突出硬件和软件的协同关系, 创新设计相对应的教学手段, “软硬”结合, 让学生拥有更加丰富的实践体验, 本课程所涉及的软件工具如图 3 所示。



图 3 课程所涉及的硬件设计、软件编程及测评算法软件工具

2.5 培育集成化、芯片化和系统化的设计思维

在电子系统领域, 电子系统集成化、芯片化成为当前最主要的发展趋势^[15], 本课程正是适应这一发展趋势, 帮助学生认识芯片, 掌握芯片内部架构、原理和设计使用方法, 培养学生基于芯片设计专用电子系统的能力, 为后续专业课程和创新实践活动打下坚实基础。

2.6 建立任务小组, 发挥个人兴趣特长, 培养团队协作意识

为了更好地达到教学效果, 发挥个人兴趣特长, 培养团队协作意识, 对学生的分组方式补充说明如下: 学生按照 3 人成组, 推选 1 名同学作为组长, 负

责整个课程设计的推进及总结报告的撰写和合稿。推荐 3 名同学按照如图 4 所示方法划分任务, 其中第一名同学负责 ADC 单元电路的设计和仿真, 以及整个性能测试硬件平台的搭建; 第二名同学负责 ADC 驱动程序、时钟配置程序、串口通信程序及在线数据分析 IP 的设计; 第三名同学负责掌握动态性能测量软件的使用, 分析绘制 ADC 的基本指标和动态指标, 并能够基于 Matlab 编写性能分析算法代码。

3 实施进程和考核要求

本教学案例紧扣成果导向原则, 通过多元化的评价方式全面评估学生的学习成果。过程考核贯穿

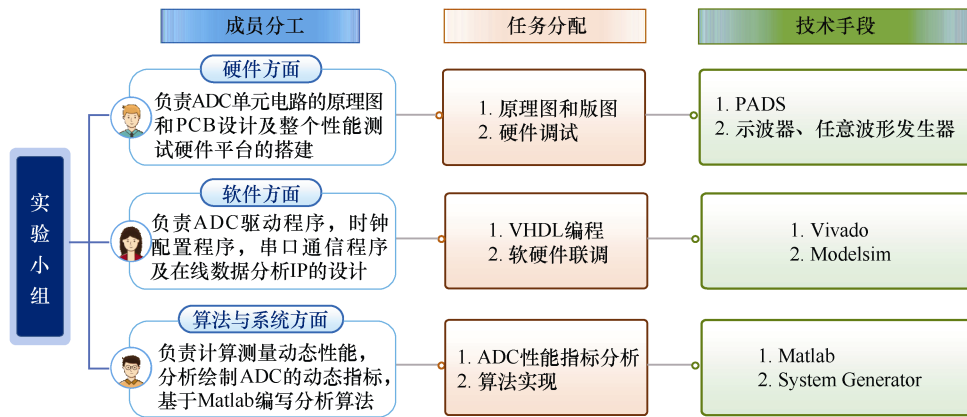


图4 任务小组分工示意图

整个教学过程,以确保学生在每个学习阶段都能达到预期的学习成果。结果考核用于评估学生的整体学习成果。

3.1 实施进程

将全部实验内容按照电子系统设计流程划分为3个层次的任务(基本任务、能力提升及工程应用),学生了解实验顶层设计框架后,依次完成各个单元设计。计划通过8个课内学时和12个课外学时共20学时的教学环节完成整个课程实验。教学案例总体框架如图5所示。

	实验内容	课时分配	组织方式
基本任务	1) ADC工作原理、性能指标及外围电路设计方法 2) AD9226采集单元硬件设计 3) 基于FPGA的ADC驱动程序编写 4) 电路测试与性能分析	8课时	老师讲授、分组研讨 学生设计、测试总结
能力提升	1) 动态性能分析算法编程 2) 电路影响因素的分析方法	6课时	分组研讨、学生设计 老师答疑、测试总结
工程应用	1) 中频信号带通采样设计 2) 串口传输和显示程序编程 3) 电路测试	6课时	学生设计、测试总结 分组报告、点评提问

图5 教学案例总体框架

1) 基本任务部分

该部分要求针对所有学生,着重培养学生的基础理论知识和基本技能。计划学时为课内4学时+课外4学时,通过学习达到以下目标。

(1) 掌握ADC工作原理和外围电路设计方法。设计ADC核心电路原理图和印制电路板(printed circuit board, PCB)版图,搭建采集基本硬件单元并完成接口、电源、时钟等基本功能测试。

(2) 掌握VHDL/Verilog硬件描述语言设计方法。基于所提供的FPGA核心板,编写ADC的驱动代码,并内嵌在线分析IP,为导出采样数据提供基础。

(3) 掌握ADC性能指标及其分析方法。绘制ADC的幅频响应曲线,并通过WaveVision软件分析ADC的满量程(full scale range, FSR)、信噪比(SNR)、无杂散动态范围(spurious-free dynamic range, SFDR)及有效位数(ENOB)等性能指标。

2) 能力提升部分

在完成基本任务的基础上,设置以下扩展要求,计划学时为课内2学时+课外4学时,加深学生对相关知识的理解和掌握,着重培养学生分析问题和解决问题的能力。

(1) 深入理解ADC动态性能分析方法。基于ADC动态性能的测试原理,自行编写Matlab代码,分析ADC的SNR、SFDR及ENOB等性能指标,并与商业软件WaveVision的结果进行比对,分析差异来源。

(2) 深入理解影响ADC性能的因素。从直流电源、采样时钟及信号源等各个方面查找分析影响ADC性能的主要因素,以及其在SNR、SFDR、ENOB等核心动态性能指标上的作用规律。

3) 工程应用部分

在上述工作的基础上,以教学团队所承担的北斗卫星测控信号采集系统研发项目为牵引,进一步突出实践应用导向,着重提升学生解决实际问题的能力,培养系统设计思维,计划学时为课内2学时+课外4学时。

(1) 以航天测控系统为应用背景,基于所设计实现的ADC性能测量分析系统,采用带通采样模式

完成 70MHz (带宽 ± 10 MHz) 中频测控信号的采集、传输和显示, 基于 FPGA 设计通用异步收发器 (universal asynchronous receiver/transmitter, UART) 接口通信程序, 将 ADC 采样输出传输至计算机, 通过快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, FFT) 分析信号特性。

(2) 支撑学生开展北斗接收机信号采集处理应用验证, 并将采集系统应用拓展至多个工程领域。

3.2 考核要求

本教学案例从实验过程和实验结果两个方面进行考核, 课程考核要求示意图如图 6 所示。其中, 实验过程考核占 20%, 主要考察课前预习和课上表现情况; 实验结果考核占 80%, 从基本任务、能力提升、工程应用 3 个层次 (各层次分别占比 30%、25% 和 25%), 按照合理性、完成度、创新性和报告规范性等标准进行评判。每个小组内的学生根据其分工和贡献进行评价。每个成员的具体贡献 (如电路设计、编程、调试等) 根据其完成的任务和质量进行评估。其中, 合理性由授课老师从硬件设计、FPGA 编程及分析算法的规范合理性等方面综合评分。完成度由授课老师现场测试所设计电路的关键指标, 与设计指标进行对比给出评分。创新性由授课老师从功能构思、电路设计的创新性、实现电路的经济性等方面给出综合评分。总结报告由授课老师从实验报告的规范性与完整性、汇报的现场展示表现等方面给出综合评分。

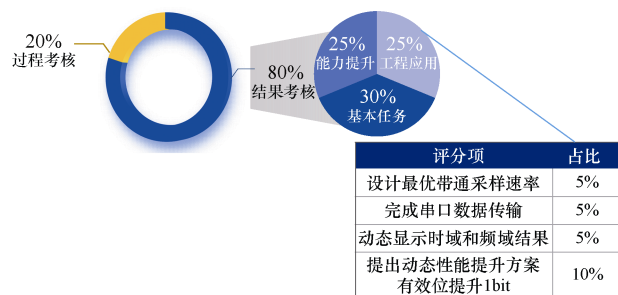


图 6 课程考核要求示意图

4 教学效果

本课程在近 3 年的教学改革中, 引入了面向工程实践应用的综合设计实验, 先后尝试了基于单片机的温度监控电路、基于 ARM 处理器的自适应增益放大电路, 以及基于 FPGA 的模数转换电路。经过近 3 年的探索和尝试, 取得了一些令人满意的教学成果。

1) 首先是学生的认可, 通过工程实践, 充分调动了学生的积极性, 学生能够系统地理解所学知识如何应用于电子系统。近 3 年, 课程积累了 200 余份各具创新且完整规范的课程设计报告, 为课程质量提升提供了有效反馈和丰富案例。近 3 年学生的满意度调查结果显示, 高达 99% 的学生对该项目式实验案例设计质量表示满意。同时, 根据学生学习成果和反馈, 定期对课程内容、教学方法和评价体系进行评估和调整, 以不断提高教学质量。课程获学校、学院两级教学质量评价优秀。

2) 其次课程有力支撑了学生参加各级大学生电子设计竞赛, 培养学生先后获得国家一等奖 2 项、二等奖 5 项。2019 年培养的学生进入研究生阶段学习后, 先后设计类脑计算芯片和忆阻器神经网络 ADC 芯片, 获华为杯研究生创芯大赛全国一等奖和三等奖各 1 次; 2024 年获第八届全国大学生集成电路创新创业大赛赛道最高奖 (中科芯杯), 体现了课程对研究生实践创新所提供的重要知识储备和能力锻炼支撑。

3) 最后授课教师围绕电子系统设计课程改革和优化发表 3 篇教学论文。结合课程实验案例设计素材, 课程组成员李清江、王义楠获 2022 年第九届电工电子基础课实验案例设计竞赛全国一等奖, 于红旗获 2024 年第十一届电工电子基础课实验案例设计竞赛全国一等奖。

5 结论

本实验案例以工程实践项目为牵引, 贯穿了较为完整的知识体系, 将电路分析、模电、数电、集成电路设计等专业骨干课程的知识 and 理论有机融合, 实现了知识的深度融会贯通。实验从模数转换器件的基本原理和性能指标入手, 由浅入深地逐步展开, 最终引入到具体的工程实践项目, 通过这一过程, 学生能够清晰地看到所学知识在实际工程中的应用, 从而更加直观地理解理论与实践的紧密联系, 为今后解决复杂工程问题奠定基础。本实验案例涵盖电子系统设计全流程, 包括指标分析、器件选型、方案设计、软件仿真、程序开发、电路制版、调试优化、测试答辩, 学生完成类似科研项目的全过程, 综合实践能力得到大幅提升。

参考文献

- [1] 余小平, 奚大顺. 电子系统设计: 基础篇[M]. 4 版. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2019.

- [2] 周广猛,刘伍权,董素荣,等. “以学生为中心”的工程类课程在线教学探索:以“内燃机构造”课程为例[J]. 高等教育研究学报, 2021(44): 72-76.
- [3] 刘战合,张伟伟,罗明强. 面向综合能力提升的连通式实践教学体系构建[J]. 高等教育研究学报, 2021(44): 113-120.
- [4] 刘亚静,段超. 全数字自适应滤波器不同离散结构的性能对比分析[J]. 电工技术学报, 2021, 36(20): 4339-4349.
- [5] 谢佳,段斌,高婷,等. 神经网络认知测量在工程教学课程评价中的应用[J]. 电气技术, 2023, 24(2): 52-58.
- [6] 朱娟娟,贺王鹏,郭宝龙. 新工科电气电子类课程改革与实践:以“信号与系统”为例[J]. 电气技术, 2024, 25(10): 72-78.
- [7] 杨勇,李红斌,文劲宇,等. 新工科电气工程实践教学体系重构与实践[J]. 电工技术学报, 2022, 37(19): 5074-5080.
- [8] 赵玲峰. 雷达信号的数字化中频调制解调算法仿真[J]. 计算机仿真, 2019, 36(6): 16-20.
- [9] 冯鸿运,林飞,杨中平,等. 应用于自动导引小车无线充电系统的导航与供电一体化线圈研究[J]. 电工技术学报, 2024, 39(14): 4294-4304.
- [10] 胡继云,赫刘勤,郑维. 基于FPGA和线阵CCD的麦粒检测系统研究[J]. 电气技术, 2017, 18(4): 84-89.
- [11] 邹应全,吴太龙,彭榆淞,等. 基于线下估计和线上补偿的时间交错采样ADC失配误差补偿方法[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(1): 226-232.
- [12] 陈顺阳. 高速ADC动态性能的有效评估[C]//中国电子学会电子对抗分会第十三届学术年会论文集,北京, 2003: 674-681.
- [13] 赵智兵,袁雯,郭倩. 数字接收机中的ADC性能分析[J]. 电子技术, 2016, 45(10): 25-26, 21.
- [14] 申富媛,李炜,刘微容,等. “自动控制原理”课程目标达成度统计分析与持续改进[J]. 电气技术, 2023, 24(1): 65-69, 75.
- [15] 何杰. “半导体集成化芯片系统基础研究”重大研究计划进展综述[J]. 中国科学基金, 2005(6): 343-346.

收稿日期: 2024-12-25

修回日期: 2025-01-13

作者简介

李清江(1986—),男,山东省枣庄市人,博士,教授,主要从事智能信息器件与电路方面的研究工作。

(上接第47页)

电力系统保护与控制, 2023, 51(12): 156-167.

- [35] 申江卫,岩川,刘永刚,等. 基于数据挖掘与大数据分析的电池故障诊断与异常检测[J]. 电工技术学报, 2024, 39(24): 7979-7994.
- [36] 阳瑞霖,莫凡,金艳,等. 基于重心平均动态时间规整算法的有载分接开关机械故障诊断[J]. 高电压技

术, 2023, 49(4): 1515-1525.

收稿日期: 2024-11-11

修回日期: 2025-01-15

作者简介

杨旺霞(1981—),女,云南省大理市人,硕士,高级工程师,主要从事电力系统继电保护研究工作。

(上接第51页)

2004, 24(6): 54-58.

- [10] 喻锴,兰宇婷,曾祥君,等. 基于零序电压区域放大的配电网高阻接地故障选线新方法[J/OL]. 中国电机工程学报, 1-14[2025-02-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20240528.1727.015.html>.
- [11] 张德丰. MATLAB小波分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.

收稿日期: 2024-12-23

修回日期: 2025-01-24

作者简介

王建南(1987—),男,浙江宁波人,硕士,工程师,主要从事电力系统配电网研究工作。