



## 数字信号处理中的信号采样理实一体教学实践

刘继承, 丑永新\*, 杨海萍, 钟黎萍

(苏州工学院 电气与自动化工程学院, 苏州 215500)

**摘要:** 信号采样是 DSP 课程教学中的重难点, 面对现有教学存在缺少实验环节、缺乏高阶性思维培养等问题, 该文基于工程认证的 OBE 理念开展信号采样教学改革与实践。依据信号采样所支撑课程目标的内涵, 重构了包含“数学描述—数学建模—模型实现—工程应用”的教学内容, 开发了基于“蓝墨云班课”软件和“口袋实验室”系统的线上线下教学资源, 实施了“BOPPPS+口袋实验室”的理实一体化教学新模式。结果表明, 学生在深刻理解和应用信号采样相关知识的同时, 建模、分析、设计等相关高阶性思维也得到训练, 教学效果良好。

**关键词:** 信号采样; 数字信号处理; 理实一体化教学; 成果导向教育

中图分类号: G642.0

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20240322

## Teaching Practice of Theory-Practice Integration in Signal Sampling of Digital Signal Processing Course

LIU Jicheng, CHOU Yongxin\*, YANG Haiping, ZHONG Liping

(School of Electrical and Automation Engineering, Suzhou University of Technology, Suzhou 215500, China)

**Abstract:** Signal sampling is a key and challenging point in the teaching of the DSP course. In response to the existing teaching issues, such as the lack of experimental components and the absence of training in higher-order thinking skills, the teaching reform and practice of signal sampling are carried out based on the principles of OBE in the context of engineering accreditation. According to the connotation of the course objectives supported by signal sampling, the teaching content is restructured, comprising ‘mathematical description — mathematical modelling — model implementation — engineering application’. Online and offline teaching resources are developed based on ‘Mosoteach Software’ and ‘Pocket Lab’. A new theory-practice integration teaching model, ‘BOPPPS + Pocket Lab’, is implemented. The results indicate that the teaching is effective. Students demonstrate a deep understanding and application of signal sampling knowledge while also developing their higher-order thinking skills, such as modelling, analysis, and design.

**Key words:** signal sampling; digital signal processing; theory-practice integration teaching; outcome-based education

数字信号处理是测控技术与仪器、自动化、电子信息工程等专业的核心专业基础课, 对培养学生的系统建模、问题分析和工程实践能力非常重要<sup>[1-4]</sup>。信号采样是完成连续(模拟)信号向数字信号转换的重要环节, 含有数学建模、模型硬件实现等复杂的理论和工程知识, 对于培养学生解决复杂工程问题的能力十分重要。然而, 数字信号处理课程有关信号采样的教学以理论推导形式给学生讲解信号采样过程的数学模型, 缺乏模型

硬件实现与验证相关的实验环节, 导致学生难以理解和掌握抽象的理论知识<sup>[5-7]</sup>。后续的单片机原理及应用、数字信号处理(digital signal processing, DSP)原理及应用等专业课程讲解模数转换器(analog-to-digital converter, ADC)过程需要学生具备有关信号采样的理论知识。前后课程对信号采样的教学割裂导致学生的学习仅停留在理论记忆的低阶思维, 缺乏面对信号采样这一典型工程问题的建模、推演、分析、设计解决方案等高阶思

收稿日期: 2024-06-16

基金项目: 2023 年江苏省高等教育教改研究立项课题(2023JSJG346); 2022 年江苏省产教融合一流课程建设项目(苏教办高函[2022]15号); 第二批江苏省一流课程建设项目(苏教办高函[2023]34号)。

作者简介: 刘继承, 博士, 教授, 主要从事多传感器信息获取与处理方面的研究。E-mail: jcliu@szut.edu.cn

\*通信作者: 丑永新, 博士, 副教授, 主要从事信号处理与分析方面的研究。E-mail: cslgchouyx@cslg.edu.cn

维<sup>[8]</sup>。造成这种局面的根本原因是课程教学以教材为指导,而不是以学生学习产出为指导,缺乏有效的机制指导教学改革和实施,而能有效解决这一问题的机制便是工程教育认证的成果导向教育(outcome-based education, OBE)理念。

在学校开展测控技术与仪器和自动化专业的工程教育认证过程中,课程教学团队率先在数字信号处理课程中以OBE理念为驱动开展教学改革。面对信号采样教学存在的问题,基于其所支持的课程目标重构教学内容,科教融合开发“口袋实验室”系统,建设线上线下教学资源,实施基于课程导入、学习目标、前测、参与式学习、后测、总结(bridge, objective, pre-assessment, participatory learning, post-assessment, summary, BOPPPS)模型的理实一体化教学,取得较好的教学效果。

## 1 成果导向驱动信号采样改革思路

基于工程认证OBE理念开展信号采样的教学改革思路如图1所示。依据课程大纲,信号采样教学所支撑的课程目标为“掌握离散时间信号获取、滤波、特征提取、时域分析、频域分析及复频域的建模与分析方法,能够对自动化测试领域中的信号采集、处理与分析等工程问题进行推演与分析”。根据信号采样的知识内涵,则对应支撑的课程目标要素为“掌握离散时间信号获取的建模与分析方法,能够对自动化测试领域中的信号采集工程问题进行推演与分析”。显然,传统的理论教学内容难以全面支撑课程目标的达成。因此,依据所分解的课程目标要素,以问题为中心重构教学内容,回答“为什么进行信号采样”和“怎样进行信号采样”两个问题。通过“为什么进行信号采样”引出信号采样的概念。对于“怎样进行信号采样”,制定了“数学描述—数学建模—模型实现—工程应用”的教学内容,提高学生的高阶思维训练。进一步,科研反哺教学,开发“口袋实验室”系统,并建设了基于“蓝墨云班课”软件的线上教学资源。在此基础上,依据学生的认知过程和教学内容的内在逻辑,设计“BOPPPS+口袋实验室”的理实一体化教学新模式,将“教、学、测、评”各环节融入其中。最终,根据学生的学习效果及反馈持续进行教学改进。

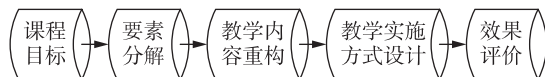


图1 OBE理念驱动的课程改革思路图

## 2 以问题为中心的教学内容重构及课程资源建设

### 2.1 信号采样的必要性

对图2所示的幅值为1V、频率为1Hz的连续信号设置问题：“该信号是否可以存入有限存储容量的电脑、手机等数字电子系统中？”在学生得出否定的答案后,引导学生得出“从连续信号中通过模数转换器等间隔转换(采样保持、量化、编码)一些离散点便可存入数字电子系统”的解决方案。该解决方案就是信号采样的概念,即从连续信号的无数个点中等间隔抽取有限个离散点的过程称为采样。在加深学生印象的同时,让学生自然而然的产生“如何进行信号采样”的求知欲,提升学习兴趣。

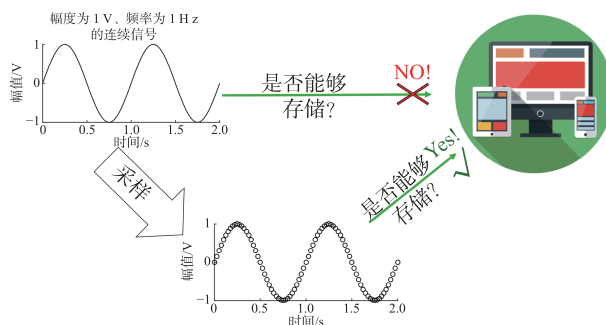


图2 信号采样概念的引出示意图

### 2.2 信号采样的方法

#### 2.2.1 采样过程的数学描述

对图2所示的幅值为1V、频率为 $f_0$ 的连续正弦信号的计算公式为:

$$x_a(t) = \sin(2\pi f_0 t), \quad t \in (-\infty, +\infty) \quad (1)$$

对其以 $t_s$ 为间隔进行采样,在数学上,只需将式(1)中 $t$ 用 $nt_s$ 代换,则结果为:

$$x(n) = \sin(2\pi f_0 n t_s), \quad n = -\infty, \dots, 0, 1, 2, \dots, +\infty \quad (2)$$

式中:变量 $n$ 为采样后离散点对应的位置,取整数;采样间隔 $t_s$ 的倒数 $f_s$ 称为采样频率。

#### 2.2.2 采样过程的数学建模

为了直观描述 $nt_s$ 代换 $t$ 的过程,建立如图3所示的信号采样数学模型。对于模拟信号 $x_a(t)$ ,

将其与理想冲激函数串  $p(t)$  相乘，即可完成信号采样，由式(3)可得：

$$x(nt_s) = x_a(t)|_{t=nt_s} = x_a(t)p(t) \quad (3)$$

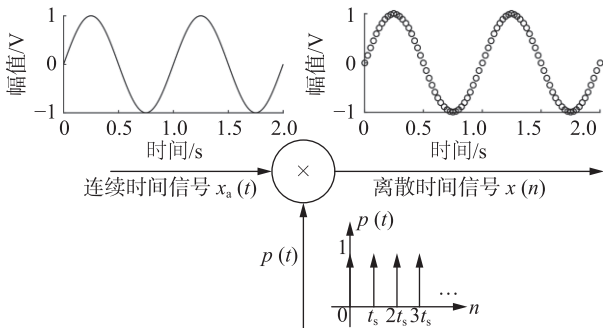


图 3 信号采样过程的数学模型图

### 2.2.3 数学模型的实现

要实现图 3 所示的模型，需要解决以下 3 个问题：

- 1) 冲激函数串产生；
- 2) 信号相乘；
- 3) 转换为数字信号(二进制)。

模型中冲激串为单位冲激信号移位产生的，单位冲激信号为抽象出的理想模型(宽度为无限小、高度为无限大、面积为 1 的矩形)，难以实现。冲激串在  $t_s$  及其整数倍时刻的幅值为 1，而其他时刻幅值为 0。工程中采用时钟信号代替冲激串控制信号采样。

对于模型中的信号相乘的实现，考虑时钟信号高电平为 1，低电平为 0，相当于在高电平时刻保持原来信号，在低电平时刻停止读取原来的信号，并不需要设计专门的乘法电路。一种常见的实现方法是采样时钟信号驱动触发器(如 D 触发器)完成信号采样。

采样信号数值为实数，而微处理器一般只能处理二进制数据。因此，需要加入量化电路，将采样信号量化为高低电平，再通过编码电路对高低电平进行编码，输出二进制形式的数字信号传输至微处理器系统。

一种典型的设计流程如图 4 所示，包括“采样保持、量化和编码”3 个步骤，而实现这些功能的集成器件称为 AD 转换器。一种并联比较型 ADC 的电路原理图如图 5 所示，该电路通过电压比较电路实现模拟信号量化，采用 D 触发器在 CLK 信号的触发下实现等间隔采样和保持，最后通过优先编码器输出二进制数字信号。如对输入电压为  $V_I=8V_{REF}/15$  的模拟信号，通过电压比较电路与精密电阻网络形成的阈值，输出“0001111”的高低电平。在一个 CLK 信号的上升沿，D 触发器电路将这些电平输出并保持一个 CLK 周期，期间不受输入电平变化的影响。进一步通过一个优先编码器对 D 触发器电路输出的电平编码形成“001”的三位二进制数字信号。

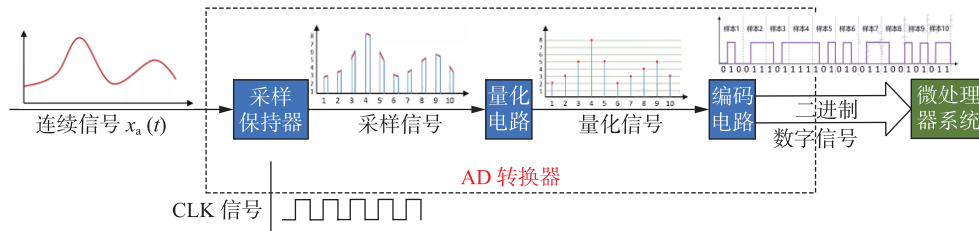


图 4 信号采样过程数学模型的实现流程图

### 2.2.4 信号采样的工程应用

随着电子技术的不断发展，越来越多的微处理器(单片机、DSP、FPGA 等)已在片内集成了 ADC，因此，实际工程应用中不需要学生设计 ADC 的底层电路，但需要学生能够选择适合工程需求的 ADC 配置，或者在微处理器系统设计过程中考虑电路对 ADC 精度的影响，需要考虑以下 4 个因素。

1) 采样频率。如式(3)所示，信号的采样间隔越小，采样频率越大，则采样的数据与模拟信号

更加接近。采样频率由 CLK 信号决定，而 CLK 信号的频率由微处理器系统时钟分频得到，因此，采样频率是一个重要的指标。实验过程中，指导学生分组设置不同采样频率采集信号，通过对比得到采样频率对信号采样结果的影响。

2) 分辨率。如图 5 所示，ADC 将输入范围为  $0\sim V_{REF}$  的模拟信号转换为三位二进制(8 等份)，每个等份内的模拟电压对应的二进制码元没有区别，即 ADC 能够分辨量化的最小信号的能力，称为分辨率。ADC 输出二进制码元的位宽称为

ADC的位数。显然,输入信号范围固定时,ADC位数越多,则分辨率越高,转换的数字信号与模拟信号之间误差越小。

3) 提高参考电压  $V_{REF}$  精度。如图5所示,  $V_{REF}$  直接决定着转换阈值的准确性,因此在微处理器系统设计过程中需要设计滤波电路以提高  $V_{REF}$  的稳定性。

4) ADC的分辨率 < 传感器输出范围  $\leq$  ADC的输入量程。在系统设计过程中,一定要保证传感器获取的模拟信号不能超出ADC输入量程太多,否则在导致采样信号产生“削底削顶”误差的同时,长时间超量程的输入电压会导致ADC模块损毁。同时,传感器输出也不能小于ADC最小分辨率。

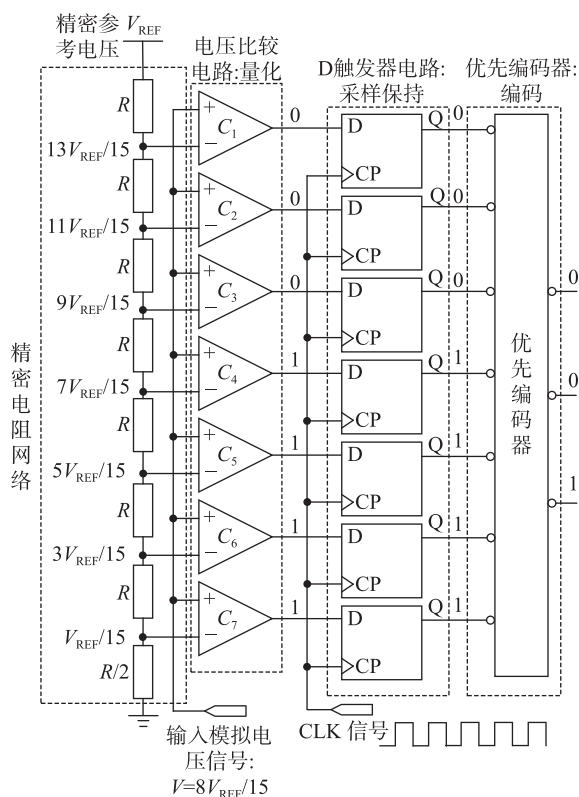


图5 并联比较型 ADC 电路原理图

通过信号采样过程的“数学描述—数学建模—模型实现—工程应用”教学,训练学生对工程问题的建模、分析和实践能力,并能够深刻理解ADC相关指标的工程意义。

### 2.3 线上线下教学资源建设

基于“蓝墨云班课”软件开发云资源,包括教学视频包、测试题库、教学活动库、PPT等,辅助理实一体化教学开展。

将国家自然科学基金成果改进形成“口袋实验

室”系统,如图6所示,用于课程实践教学<sup>[9-11]</sup>。

“口袋实验室”具有体积小、便于携带、片上资源丰富、软硬件开源等特点,以人体心电脉搏信号为处理对象,在提升学生学习兴趣和挑战度的同时,学生可在宿舍、教室、图书馆等环境下利用碎片化的课后时间学习,打破传统实验设备在使用时间和空间上的限制。

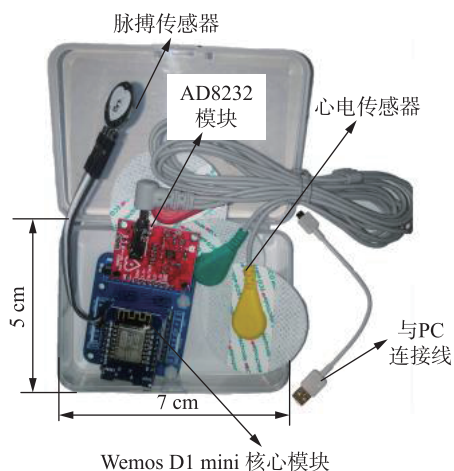


图6 “口袋实验室”实物图

### 3 基于“BOPPPS+口袋实验室”的理实一体化教学实践

将“口袋实验室”系统和“蓝墨云班课”软件资源融入BOPPPS教学模式中<sup>[12]</sup>,开展理实一体化教学,如图7所示。将原来课上信号采样相关的理论讲解内容翻转到课前,学生通过“蓝墨云班课”软件发布的教学微课视频进行预习,在课上按照以下6个流程实施。

1) 课程导入。以头脑风暴形式让学生讨论“为什么要进行信号采样”导出信号采样的概念和工程意义。

2) 学习目标。明确本节课内容支撑的课程目标及学习的重难点。

3) 前测。采用“蓝墨云班课”测试题了解学生预习效果。

4) 参与式学习。该部分细分为理论讲解、结果演示、分组编程实践和结果验收4个模块。在“理论讲解”模块,教师依据“前测”结果有针对性地讲解信号采样原理、建模及ADC设计过程;在“结果演示环节”,教师给学生演示“口袋实验室”系统编程要点以及要达到的效果;在“分组编程实践”环节,教师走下讲台,同助教

一起融入学生，有针对性地及时解决每个学生实践过程中遇到的问题，并对学生的实践结果进行验收与现场打分。

5) 后测。通过“蓝墨云班课”软件中测试题及调查问卷，了解学生的学习效果，便于持续改进。

6) 总结。总结课程内容，在“蓝墨云班课”软件内发布课后学习内容。

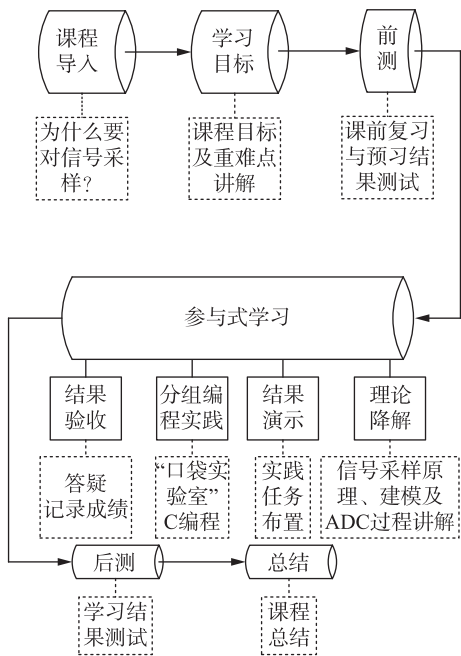


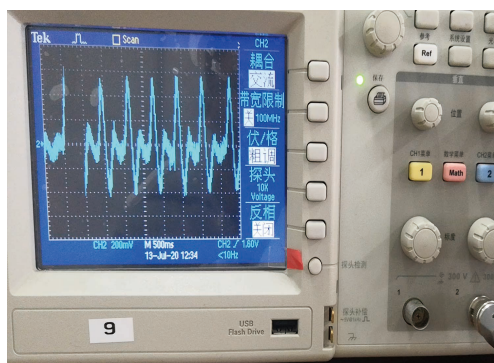
图 7 基于 BOPPPS 的理实一体教学流程图

在 BOPPPS 模型的“分组编程”环节，学生通过“口袋实验室”系统编程完成自己脉搏信号的采集。首先，将示波器与脉搏传感器输出端连接，让学生通过示波器观察模拟脉搏信号，如图 8(a)所示。然后，设置 512 Byte 的数组缓存信号，指导学生配置定时中断，分组采用 20、40、100、200 Hz 的采样频率对脉搏信号采样。通过串口将采集的数据上传至 PC 端，采用 Arduino IDE 自带的串口监视器观察二进制、十进制形式的脉搏信号，如图 8(b)所示。采用串口绘图器实时绘制数字脉搏信号波形，如图 8(c)所示。与模拟波形进行对比，分析采样误差，并对比不同采样频率对信号采样结果的影响。

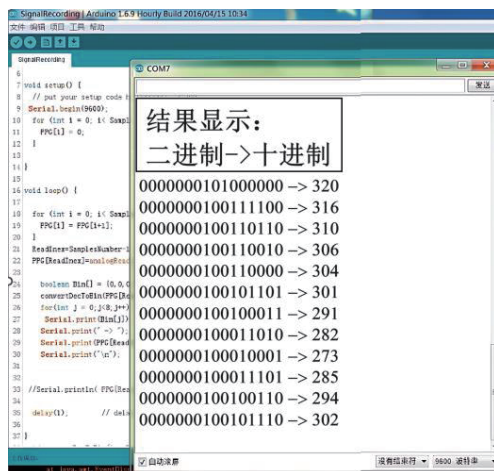
在 BOPPPS 模型的“结果验收”环节，教师和助教根据学生的编程结果和过程表现进行现场打分，并根据评价结果对学生实践过程中的共性问题进行讲解与演示，驱动课堂教学的持续改进。

在 BOPPPS 模型的“后测”环节，采用“蓝墨云班课”软件设置信号采样知识和编程实践相关的测试题客观评价学生的学习效果。同时，设置调查问卷，让学生对本节课教学存在的问题进行反馈。

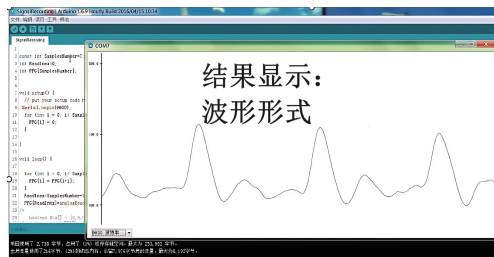
将“前测”“课堂实践考核”“后测”等过程考核融入理实一体化教学过程，对课程教学效果进行形成性评价。教师根据评价结果持续改进，在课堂教学过程中随时解决学生遇到的问题，教学重点由“理论讲解”转变为“学生理论应用过程的问题解决”，不断提升教学效果。



(a) 示波器观察的模拟信号



(b) 二进制及十进制形式的数字信号



(c) 波形形式数字信号 (采样频率 200 Hz)

图 8 “口袋实验室”系统信号采样课程实践结果展示图

## 4 结束语

面对数字信号处理课程中信号采样知识点教学存在问题,以工程认证 OBE 理念为驱动,从教学内容、课程资源和教学模式等多个层面开展教学改革。相比于信号采样传统教学方式,改革后的理实一体化教学将理论深度融入实践之中,学生能够深刻理解信号采样的概念、ADC 建模及实现过程,“蓝墨云班课”测试成绩平均大于 95 分,学生对课程教学的满意度达到 99%。同时,拉近“师生之间”“生生之间”的距离,将原来以教师为中心的师生互动转换为以问题为中心的师生、生生自由互动,互动次数和效率提高。将“口袋实验室”系统引入教学,让学生在学的同时,能够熟练应用所学知识进行信号采样相关的软硬件开发,解决复杂工程问题的能力明显提升。

近年来,课程教学团队依据工程教育理念持续课程改革,数字信号处理已成为学生最喜欢的课程之一,多年评教成绩优秀。该课程现为江苏省首批产教融合一流课程和江苏省第二批一流课程。同时,课程支撑自动化和测控技术与仪器专业通过工程教育认证,自动化现为国家一流专业,测控技术与仪器现为江苏省卓越工程师教育培养计划专业及江苏省一流专业。未来,教学团队将探索大数据分析和人工智能在课程教学中的应用,不断提升育人质量。

### 参考文献

[1] 乔建华,张雄,李素月,等.“数字信号处理”一流课

程的教学改革与成效[J].电气电子教学学报,2023,45(5):28-32.

- [2] 俞一彪,孙兵,芮贤义,等.数字信号处理多目标层次化实验方案设计与实践[J].实验室研究与探索,2022,41(6):229-232.
- [3] 张承云,马鸽,刘长红,等.数字信号处理器设计与应用课程实验教学改革与实践[J].实验室研究与探索,2023,42(6):207-210.
- [4] 叶宗彬,陶梦江,陈治国,等.增加工程实践的 DSP “口袋实验室”设计[J].实验室研究与探索,2023,42(7):83-88.
- [5] 杨桃丽,于瀚雯.基于 MATLAB 的数字信号处理综合课程实验[J].实验科学与技术,2024,22(1):57-61.
- [6] 解培中,朱艳.“信号分析与处理”线上线下同步过程化实验教学方法[J].实验科学与技术,2023,21(2):77-82.
- [7] 刘小艳,张宇翔,沈吴冰,等.心率检测系统的开发与实现[J].实验科学与技术,2019,17(6):37-40.
- [8] 杨长生,梁红,曾向阳.基于“高阶思维”理念的“数字信号处理”课程设计[J].高等工程教育研究,2020(2):159-163.
- [9] 丑永新,刘燕,鲁明丽,等.“数字信号处理”课程辅助教学系统[J].电气电子教学学报,2018,40(5):81-84.
- [10] 丑永新,刘继承,顾亚.面向应用型人才培养的数字信号处理课程实验教学系统[J].实验室研究与探索,2020,39(8):179-182.
- [11] 丑永新,刘继承,杨海萍,等.“数字信号处理”课程思政教学案例设计[J].电气电子教学学报,2023,45(6):93-97.
- [12] 陶丹,黄琳琳,胡健,等.基于 BOPPPS 模型的“多速率数字信号处理”课堂教学设计[J].实验技术与管理,2020,37(7):183-186.

编辑 葛晋