



# 基于一体化课堂实践的信号与系统课程频域分析法教学设计

程 婷, 武俊杰, 周 云, 吕幼新, 程子扬

(电子科技大学 信息与通信工程学院, 成都 611731)

**摘要:** 信号与系统课程作为电子信息类专业的学科基础课, 在整个专业课程知识体系中具有举足轻重的作用。该文针对课程中重要的频域分析方法, 设计了频域分析法的一体化课堂实践教学, 提出基于统一的系统平台实现, 对包括确知信号通过线性时不变系统、奈奎斯特采样定理和采样信号重构原信号 3 个频域分析问题的可视化教学。学生们通过自主实践, 可视化感知理论知识, 可实现反推理验证, 达到自我感悟的目的。课堂实践教学不仅让学生更深刻地理解知识点, 还有效激发了其对本课程的学习兴趣。统计数据表明, 引入课堂实践教学后, 该课程平均分均值从不到 80 分提升至 90 分以上, 提升率为 18.60%, 综合测评结果中优秀人数占比提升 257.12%, 体现了较好的教学成效。

**关键词:** 信号与系统; 课堂实践; 频域分析方法; 教学设计

中图分类号: G642.0

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20240347

## Teaching Design of the Frequency Domain Analysis Method for the Course of Signals and Systems Based on the Integrated Classroom Practice

CHENG Ting, WU Junjie, ZHOU Yun, LYU Youxin, CHENG Ziyang

(School of Information and Communication Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

**Abstract:** The course of Signals and Systems plays a crucial role in the knowledge system of electronic information majors as a fundamental course. An integrated classroom practical teaching of “frequency domain analysis method” is designed, which is an important method in the course, and a visual teaching approach based on a unified system platform for three domain analysis problems is proposed, including the response of linear and time invariant system to the deterministic signal, Nyquist sampling theorem and signal reconstruction based on sampled signal. Through independent practice, students can visualize and perceive theoretical knowledge, and in this process, they can realize reverse reasoning verification and achieve the goal of self-perception. Practical teaching in class not only enables students to have a deeper understanding of the knowledge points, but also effectively stimulates their interest in learning this course. Statistical data show that after introducing classroom practical teaching, the average score of this course has increased from less than 80 to over 90, with an average score increase of 18.60%. The proportion of outstanding students in the comprehensive evaluation results has increased by 257.12%, reflecting good teaching effectiveness.

**Key words:** signals and systems; practice in class; frequency domain analysis method; teaching design

信号与系统课程是电子信息类专业很重要的学科基础课, 它好比一座桥梁, 可以把高等数学、大学物理这类公共基础课与数字信号处理、通信原理这类电子信息专业课程连接起来。本课程的重点是讨论确知信号和线性时不变(linear and time invariant, LTI)系统<sup>[1]</sup>, 特别对于确知信号通过时不变系统响应的求解, 课程以信号分解为主要

思想, 介绍了 3 种方法: 时域分析法(卷积)、频域分析法(傅里叶变换)、复频域分析法(拉普拉斯变换和 Z 变换)。

在上述分析方法中, 频域分析法起着举足轻重的作用, 它承前启后, 将传统时域的分析方法转换至一个新的分析域, 而复频域分析法又是频域分析法的扩展。因此, 频域分析法是信号与系

收稿日期: 2024-07-02

基金项目: 四川省高等教育人才培养质量和教学改革项目(JG2021-165)。

作者简介: 程婷, 博士, 副教授, 主要从事雷达目标跟踪和资源管理方面的研究。E-mail: citrus@uestc.edu.cn

统课程的重点内容，也是学生的学习难点。同时，频域分析法也在许多工程问题中起着至关重要的作用<sup>[2-6]</sup>。传统教学方法侧重于知识点的理论讲授，学生处于被动接收的状态，缺乏具有代入感的有效教学手段。针对这一问题，本文依托 RZ9664 实验箱设计了频域分析法的一体化课堂实践，在讲授完该知识点后，在课堂上立刻进行相关实践，基于统一的系统平台，实践 3 个重要问题，让学生能亲自动手、推理验证和自我感悟。

### 1 频域分析法课堂实践的理论背景

频域分析的核心是傅里叶变换的时域卷积特性，该性质将求确知信号通过线性时不变系统响应的时域和频域分析方法建立联系，如图 1 所示。 $x(t)$  为系统的输入信号， $h(t)$  为系统的冲激响应， $y(t)$  为系统的输出信号， $X(j\omega)$ 、 $H(j\omega)$ 、 $Y(j\omega)$  为对应的傅里叶变换。在频域分析法课堂实践的设计中，选定一个具体的输入信号，通过一个给定的线性时不变系统，构造具有可视化课堂实践，使得学生在感官认知的基础上，引发对知识点的思考和理解。

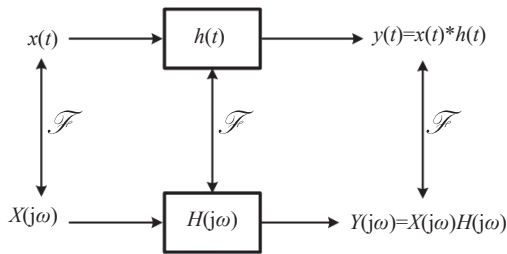


图 1 求确知信号通过 LTI 系统响应的频域分析方法思路图

对于如式(1)所示的正弦信号，通过 LTI 系统后，输出信号如式(2)所示。可见，系统仅改变了输入信号的幅度和相位，基于此，可以对 LTI 系统的幅频响应进行测试。

$$x(t) = \cos(\omega_c t + \gamma) \tag{1}$$

$$y(t) = |H(j\omega_c)| \cos(\omega_c t + \gamma + \theta_1) \tag{2}$$

式中： $\omega_c$  为角频率； $\gamma$  为初始相位； $H(j\omega_c)$  为系统的频率响应； $\theta_1$  为  $H(j\omega_c)$  的相位， $H(j\omega_c) = |H(j\omega_c)|e^{j\theta_1}$ 。

此外，频域分析法的一个重要应用是连续时间信号的采样与重构，对于带限时域信号  $x(t)$ ，将其与冲激串信号时域相乘，如式(3)所示，在频域上对应为卷积过程，如式(4)所示。

$$y(t) = x(t)p(t) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} x(lT_s)\delta(t-lT_s) \tag{3}$$

$$Y(j\omega) = \frac{1}{2\pi} X(j\omega) * P(j\omega) = \frac{1}{T_s} \sum_{k=-\infty}^{\infty} X(j(\omega - k\omega_s)) \tag{4}$$

式中： $x(t)$  表示被采样信号， $p(t)$  表示冲激串信号， $X(j\omega)$  和  $P(j\omega)$  为对应的傅里叶变换， $T$  为采样周期， $\omega_s$  为样角频率。

为从采样后的信号  $y(t)$  中重构原信号  $x(t)$ ，该重构问题等效于在频域上由  $Y(j\omega)$  信号重构  $X(j\omega)$ 。频域分析法提供了最直观和简单的思路，如图 2 所示，其中  $A$  为信号幅度， $\omega_M$  为信号带宽。通过频域分析方法容易得到在满足奈奎斯特采样定理的条件下，设计一个低通滤波器即能实现原信号的重构。

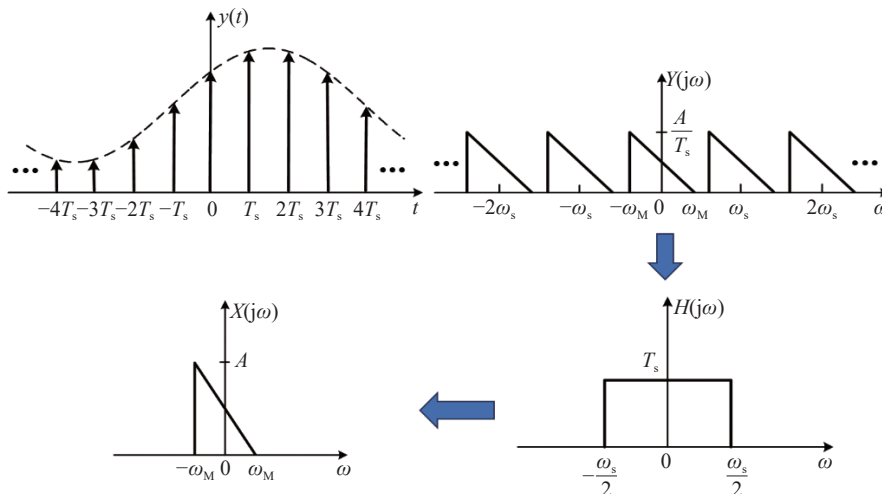


图 2 采样定理和信号重构问题的频域分析法思路图

## 2 频域分析法一体化课堂实践设计思路

在频域分析法理论知识讲授结束后, 设置及时的课堂实践教学。信号与系统课程频域分析法在以下3个问题上充分体现, 包括求确知信号通过LTI系统响应的问题、采样定理和信号重构问题。因此, 频域分析法的一体化课堂实践设计中综合这3个问题, 具体设计思路如图3所示。

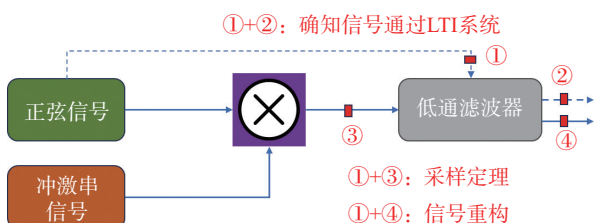


图3 频域分析法课堂实践教学设计图

### 2.1 确知信号通过LTI系统问题的课堂实践

信号通过LTI系统问题的课堂实践是基于图3中虚线路线构建的过程来开展的, 其中正弦信号通过一个低通滤波器获得输出信号。根据式(1)可见, 输出信号为与输入信号同频的正弦信号。当观察到输出正弦信号时, 如图4所示, 读取信号幅度信息, 将该幅值与输入正弦信号的幅值相除, 即可得到 $H(j\omega)$ 。可见, 通过改变输入正弦信号的角频率, 可以使用点频法测得低通滤波器的幅频响应。

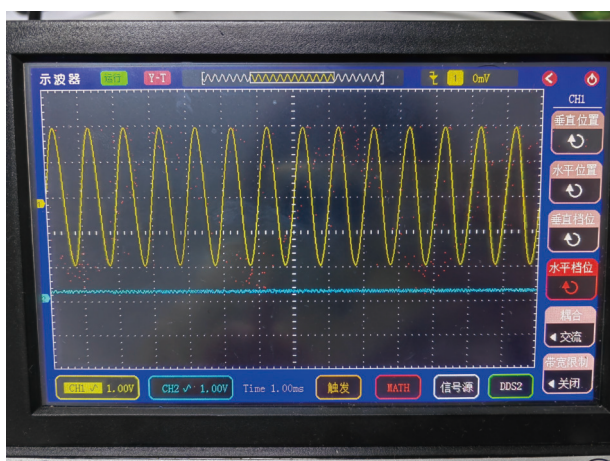


图4 输出正弦信号波形图

学生将不同角频率的正弦信号输入低通滤波器, 观测图3中观测点①和③的波形, 并记录下具体的输入、输出信号幅值, 获得如表1所示的结果。

| $f/\text{kHz}$ | $V_i/\text{V}$ | $V_o/\text{V}$ | $ H $ |
|----------------|----------------|----------------|-------|
| 0.05           | 1              | 1.000          | 1.000 |
| 0.10           | 1              | 1.000          | 1.000 |
| 0.30           | 1              | 1.000          | 1.000 |
| 0.60           | 1              | 1.000          | 1.000 |
| 1.00           | 1              | 1.000          | 1.000 |
| 1.50           | 1              | 1.000          | 1.000 |
| 2.50           | 1              | 0.950          | 0.950 |
| 3.00           | 1              | 0.900          | 0.900 |
| 3.50           | 1              | 0.850          | 0.850 |
| 3.70           | 1              | 0.800          | 0.800 |
| 4.00           | 1              | 0.750          | 0.750 |
| 4.30           | 1              | 0.700          | 0.700 |
| 4.80           | 1              | 0.650          | 0.650 |
| 5.50           | 1              | 0.600          | 0.600 |
| 6.00           | 1              | 0.500          | 0.500 |
| 7.00           | 1              | 0.400          | 0.400 |
| 8.00           | 1              | 0.250          | 0.250 |
| 9.00           | 1              | 0.150          | 0.150 |
| 10.00          | 1              | 0.100          | 0.100 |
| 12.00          | 1              | 0.050          | 0.050 |
| 14.00          | 1              | 0.025          | 0.025 |

根据记录数据计算出来的幅频响应值, 绘制获得图5所示的曲线。根据图5绘制出来的低通滤波器幅频响应的曲线, 学生可以估计出滤波器的截止角频率, 结合该滤波器的真实截止角频率, 理解实际低通滤波器与理想低通滤波器之间的差异。

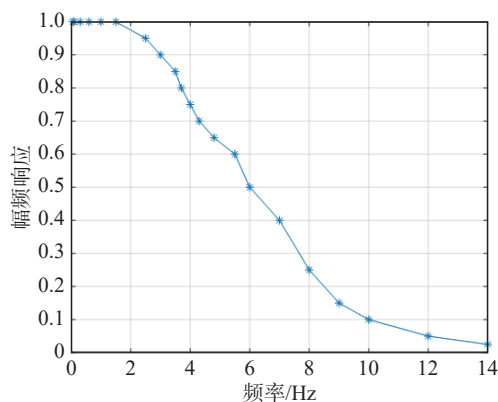


图5 低通滤波器幅频响应曲线图

### 2.2 奈奎斯特采样定理理解的课堂实践

奈奎斯特采样定理的课堂实践是基于图3中实线路线构建的获取观测点③上信号的过程来开展的。在该结构中, 正弦信号的频率和冲激串信号的采样频率可以灵活调整用于模拟满足采样定理和不满足采样定理的情况。

在课堂实践中，设定了 4 组频率组合：(1 kHz, 6 kHz)、(1 kHz, 3 kHz)、(1.6 kHz, 3 kHz)和(1.6 kHz, 6 kHz)，其中，第 1 个频率是输入的正弦信号频率，第 2 个频率是冲激串信号的采样频率。图 6 上方给出了原始输入信号和被采样后的时域信号波形，可以看到原始信号是采样后信号的包络。但是，单纯从这两个信号时域波形的对比无法从视觉上判断采样定理是否满足。结合图 2 中被采样信号的频谱图来看，满足采样定理时，采样信号的频谱中无频谱混叠，因此，由理论分析可知，(1 kHz, 6 kHz)这组参数下，观察频谱图，在正频率轴上会在 1、5、7 kHz 等处出现冲激，在每相邻 2 kHz 的两个冲激之间无其它冲激出现。进一步让学生采用频谱仪观察原信号和采样信号的频谱，并考查是否与理论分析一致。图 6 下方是频谱仪观察到的频谱图，与理论分析是一致的。

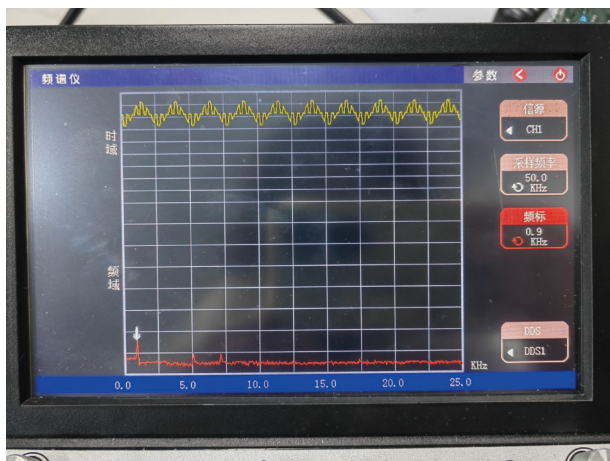


图 6 采样信号时域波形和频谱图

### 2.3 奈奎斯特采样定理理解的课堂实践

采样信号重构原信号问题的课堂实践是基于图 3 中实线构造的结构中观测点③和观测点④的波形对比来展开的。根据图 2 可知，在奈奎斯特采样定理满足的条件下，选取截止角频率合适的低通滤波器，就可以恢复出原信号。原信号的恢复依赖于两个条件：一是满足奈奎斯特采样定理，二是低通滤波器的截止角频率选取合适。

在课堂实践中，针对上面设定的 4 组频率组合，分别选取了截止角频率为 2 kHz 和 4 kHz 的低通滤波器。图 7 给出了频率组合为(1 kHz, 6 kHz)且低通滤波器截止角频率为 2 kHz 情况下，恢复信号的波形和频率图。

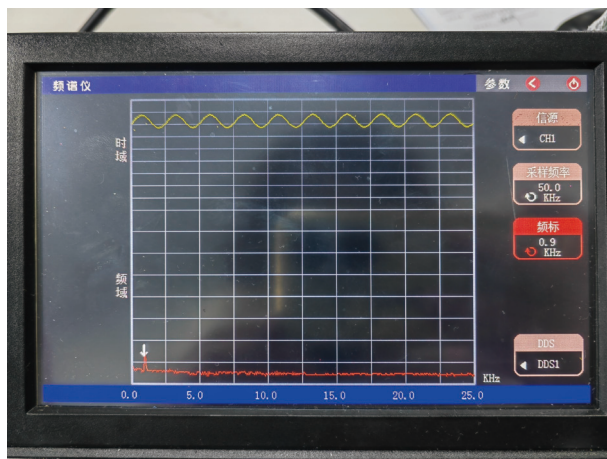


图 7 满足两个信号重构条件时的恢复信号波形及频谱图

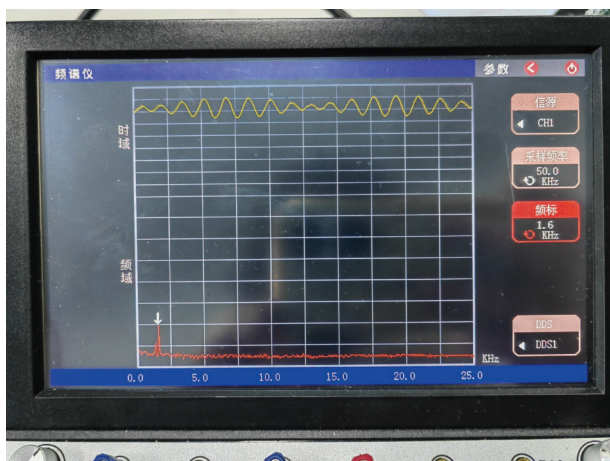
频率组合(1 kHz, 3 kHz)满足奈奎斯特采样定理，但当低通滤波器截止角频率选取为 4 kHz 时，该提供滤波器不仅允许原信号的频率成份通过，还使得频谱搬移后的频率成份通过滤波器，显然恢复出来的信号并不是原信号。图 8 给出了该条件下所恢复信号的时域波形和频谱图，一方面，从时域波形看出，该信号波形相比于原始信号的正弦波波形有畸变；另一方面，从频谱图看，恢复信号的频率成份不仅仅含有 1 kHz 的成份，还混入了 2 kHz 和 4 kHz 的成份。



图 8 不满足低通滤波器截止角频率时恢复信号波形及频谱图

频率组合(1.6 kHz, 3 kHz)不满足奈奎斯特采样定理，已经出现频谱混叠，此时，采用低通滤波器允许原信号频率成份通过的同时，混叠的频率成份也通过了低通滤波器，因此，无法恢复出原信号。图 9(a)中给出了低通滤波器角频率为 2 kHz 时，恢复信号的时域波形和频谱图，从时域

波形看,恢复信号较原正弦信号波形已经发生了畸变,从频谱图看,除了1.6 kHz的频率原信号频率成份外,混叠的1.4 kHz频率成份也通过了低通滤波器。图9(b)中给出了低通滤波器截止角频率为4 kHz时,恢复信号的时域波形和频谱图,从时域波形看,恢复信号较原正弦信号波形已经发生了畸变,且与图9(a)中的时域波形相比,波形上出现了更多毛刺。结合频谱图可看出,除了1.6 kHz的频率原信号频率成份外,混叠的1.4 kHz频率成份通过了低通滤波器,同时还有4.4 kHz的成份通过。理论上,截止角频率为4 kHz的低通滤波器不会允许4.4 kHz通过,这说明了实际低通滤波器中是存在过渡带的,进一步呼应了图5中低通滤波器幅频响应测试的结果。同时,4.4 kHz的成份也解释了图9(b)相对于图9(a)中时域波形毛刺的存在原因。



(a) 低通滤波器截止角频率为2 kHz



(b) 低通滤波器截止角频率为4 kHz

图9 不满足奈奎斯特采样定理时的恢复信号波形及频谱图

### 3 课堂实践教学过程与实施成效

信号与系统课程的传统教学方法以理论性讲授为主,只见公式,不见物理含义,忽视了学生的课堂感受<sup>[7-11]</sup>。针对本课程中重要的频域分析方法,本文设计了一体化的课堂实践,让理论知识可视化,在课堂实践过程中,可实现反推理验证,达到自我感悟的目的。这与新工科教育改革所倡导的实践教学形成互动,在用与学之间完成知识迭代的思想高度一致<sup>[12-16]</sup>。

在“信号采样和重构”理论知识讲解后,安排本课堂实践。实践前,提前通知学生去领取课程实验箱,让他们带回寝室“玩”实验箱,在玩的过程中激发学生的学习兴趣。提供实验箱的基本操作指导书,但并不会告知实践的具体内容,让学生带着好奇来到课程实践的课堂。

在课堂实践时,学生将课程实验箱带到课堂。在一体化课程实践中,为体现趣味性和启发性,并不是以具体的实践步骤开始,而是展示几个有趣的视频。一个是电风扇旋转视频,视觉上风扇的转速比实际转速要低;另一个视频显示了一辆前行的轿车,但车轮视觉上看起来是静止的。针对视频中展示的神奇现象,引导学生思考,并告诉大家今天的课堂实践能解释这些现象,进一步激发学生的学习兴趣。

接下来,在教师的引导下,学生利用实验箱上的信号发生器产生正弦信号、冲激串信号,并通过导线与低通滤波器、乘法器分别按照图3所示的方式,依次完成确知信号通过LTI系统、采样定理和信号重构的课堂实践线路搭建,随后通过示波器和频谱仪观察输出信号的波形和频谱,并进行记录供后续实验结果分析。根据不同的输入信号参数、采样信号参数以及低通滤波器截止角频率参数的组合,学生可以观察到不同的波形和频谱现象,从而引发他们的主动思考。

课后,学生根据记录的结果进行合理性分析,将实践的理论结果和实际得到的结果进行对比,对涉及的知识点进行梳理和巩固,并解释视频现象,完成相应的课堂实践报告。通过上述课前—课中—课后的3个阶段,达到激发好奇—可视化感知—自我感悟的逐层进阶,实现边学边用,用以促学。

本课堂实践分配了2课时,但由于学生在课

前和课后主动投入了摸索、总结和分析的时间，实际总学时数是远远超过 2 课时的。近年来，我们不断地将本课程的理论教学实践进行压缩，留下更多的学时供课堂讨论、课程设计以及课堂实践，让学生真正体会到所学知识的实用性，从而持续保持对本课程的学习兴趣和热情。

表 2 给出了 2019—2024 年各学期 10 个教学班平均成绩和全班优秀率的对比，其中前 6 个教学班没有引入课堂实践，后 4 个教学班引入了课堂实践，样本总数为 300 人，优秀人数是指综合测评分数在 90~100 区间的学生数目。

从表中可见，在未引入课堂实践前，平均分为 73.7~83.8，引入课堂实践后，平均分为 87.2~93.1，根据平均分的均值 79.720 和 90.625，可计算获得平均分提升度为 13.680%。同时，可以观察到优秀人数占比也有显著提高，根据优秀任务占比的均值 18.600% 和 66.425%，可计算获得优秀人数占比提升度为 257.120%。上述结果客观地支撑了一体化课堂实践的教学效果。

表 2 2019—2024 年各学期 10 个教学班的成绩统计结果

| 学年学期          | 平均分  | 优秀人数<br>占比/% | 平均分<br>均值 | 优秀人数<br>占比均值<br>/% |
|---------------|------|--------------|-----------|--------------------|
| 2019—2020第1学期 | 75.0 | 5.6          |           |                    |
| 2019—2020第2学期 | 78.3 | 20.7         |           |                    |
| 2020—2021第1学期 | 83.7 | 17.4         | 79.720    | 18.600             |
| 2020—2021第2学期 | 73.7 | 3.4          |           |                    |
| 2021—2022第1学期 | 83.8 | 31.2         |           |                    |
| 2021—2022第2学期 | 83.8 | 33.3         |           |                    |
| 2022—2023第1学期 | 87.2 | 44.0         |           |                    |
| 2022—2023第2学期 | 89.8 | 63.3         | 90.625    | 66.425             |
| 2023—2024第1学期 | 92.4 | 80.8         |           |                    |
| 2023—2024第2学期 | 93.1 | 77.3         |           |                    |

课堂实践的引入，让学生体会到课程学习的乐趣，激发了浓厚的学习兴趣。学生在评教过程中，给出了“大学四年最好玩的课”“上课非常有趣味性”“理论与应用相结合”“学以致用”等评价，肯定了课堂实践教学的效果。将学生的评价和反馈，进行分类汇总，如表 3 所示。当前教学方法的优势在于学生能更好地理解整个课程的脉络和重点，也能体会到本课程所学知识在实际问题中的应用，这是课堂实践以及教学过程中的启发式引导带来的成效。

表 3 学生评价汇总表

| 学生评价<br>分类 | 评价汇总                        |
|------------|-----------------------------|
| 正面1        | 条理清晰、讲解生动、重点突出、深入浅出         |
| 正面2        | 注重实践能力与创新意识、科学思想与思维、表达能力的培养 |
| 正面3        | 理论与应用相结合，学以致用               |
| 正面4        | 善于启发、引导学生研究性学习，注重师生互动       |
| 反面1        | 课堂实践没有玩够，期望能有更多的课堂实践环节      |
| 反面2        | 希望能提供在线学习资源帮助课后学习           |

笔者更加关注学生给出的反面评价，一是感觉课堂实践环节还不够，期望有更多的课堂实践；二是希望提供线上的学习资源辅助课后学习。针对第一点，后期将进一步压缩理论学时，并设计更多的课堂实践问题，将更多的学时分配给课堂实践，让学生“玩够”；针对第二点，将积极建设本课程的线上教学资源，目前已经完成课程慕课录制的工作，上线运行后能辅助学生的课后学习。

#### 4 结束语

针对信号与系统课程中频域分析法的教学，设计一体化课堂实践，实现包括确知信号通过 LTI 系统的响应、奈奎斯特采样定理和采样信号重构原信号 3 个问题的可视化教学。课堂实践基于一个统一的系统结构，通过获取不同观测点信号波形或是频谱图，实现理论知识的可视化感悟型教学。通过课堂上的自主实践，使参与课堂实践的学生不仅对频域分析方法有了更深入的理解，还有效激发了他们对本课程的学习兴趣，获得了较好的教学成效。本课程实践教学的设计思路为信号与系统课程其余知识难点的教学提供了借鉴。

#### 参考文献

- [1] OPPENHEIM A V, WILLSKY A S, NAWAB S H. 信号与系统 (英文版). 北京: 电子工业出版社, 2009.
- [2] 刘雷伟, 何婷, 王佑. 多变量系统的分散式补偿自抗扰控制方法与频域分析 [J]. 信息与控制, 2024, 53(4): 540-549.
- [3] 赵俭. 小惯性热电偶动态校准与频域分析 [J]. 计量学报, 2024, 45(5): 666-670.
- [4] 冯少辉. Lambda 整定方法的频域分析及工程应用 [J]. 工业控制计算机, 2024, 37(3): 125-127.

(下转第 24 页)