

科研成果转化为电路理论 创新性实验的探索与实践

李目, 曾照福, 赵延明, 陈祖国

(湖南科技大学 信息与电气工程学院, 湖南 湘潭 411201)

摘 要: 创新性实验是培养学生动手能力和创新能力的重要途径。以学生已有知识和创新能力培养规律为基础, 将科研成果转化为创新性实验是重要手段。针对当前电子技术飞速发展和电路设计技术日新月异的现状, 以小波滤波器的开关电容技术实现为例, 探索了将教师科研成果转为为电路理论创新性实验教学的过程。实验教学实践效果表明这种教学模式对培养学生的科研能力、分析和解决问题的能力以及创新精神具有较大的促进作用。同时, 该实验项目的设计过程为科研成果向创新性实验教学转化提供了有价值的经验。

关键词: 创新性实验; 电路理论; 实践教学; 科研成果

中图分类号: G642

文献标志码: A

文章编号: 1674-5884(2019)06-0103-05

当前, 世界范围内新一轮科技革命和产业变革正在驱动新经济的形成与发展, 高等工程教育的改革受到世界各国的空前重视和普遍关注。新一轮科技革命和产业变革孕育新技术、新产品、新业态和新模式, 创新成为国际竞争的新赛场, 进一步加剧了国际间的人才竞争, 同时也对高等工程教育的变革发展提出了新挑战^[1]。教育部审时度势, 针对高水平本科教育建设提出了一系列创新举措, 打出了教育改革的“组合拳”。在全国教育大会之后首先颁发了《关于加快建设高水平本科教育、全面提高人才培养能力的意见》(简称新时代高教 40 条), 决定实施“六卓越一拔尖”计划 2.0, 而后又颁发了《关于加快建设发展新工科、实施卓越工程师教育培养计划 2.0 的意见》。这一系列新举措的核心问题是培养符合新时代发展要求的高水平人才。对于高校工科专业来说, 其核心目标是培养具有国际视野的创新型工程技术人才, 服务于创新驱动发展、“中国制造 2025”“一带一路”等国家战略需求,

支撑新经济的蓬勃发展^[2]。

实验教学作为人才培养的重要环节, 在培养学生的创新精神、实践能力和综合素质等方面有其独特的作用^[3]。电气信息类专业各门课程是实践性很强的课程, 要求学生不仅掌握相关基础理论知识, 还必须具备工程综合设计能力和创新能力。因此, 电气信息类专业实验教学对于培养学生的创新思维和实践能力具有极其重要的作用。另外, 随着电子技术、通信技术和互联网技术的高速发展, 学生必须跟上技术日新月异的发展步伐, 掌握最新的科学技术和实验技能, 才能适应社会的需求。然而, 目前电气信息类专业的实验教学中创新性实验的比重仍然很小, 且内容相对陈旧, 缺乏时代性, 其包含的技术远落后于当前科学技术的发展, 不能充分激发学生的学习兴趣 and 调动学生的学习积极性与创新意识。高校的科研成果是非常宝贵的实验教学资源, 将最新的科研成果引入教学, 既能丰富实验教学的内容, 又能

收稿日期: 20190905

基金项目: 湖南省普通高等教育教学改革研究项目(湘教通[2017]452号:236); 湖南科技大学潇湘学院教学研究与改革一般项目(G31454)

作者简介: 李目(1979-), 男, 湖南宁乡人, 副教授, 博士, 主要从事复杂网络分析、综合、测试与诊断研究。

充分发挥科研对教学的促进和教学与科研的互动作用,是培养学生创新思维和创业能力的十分有效的方法。为此,我们探索了将电路理论研究中取得的部分最新科研成果转化为电路理论创新性实验教学的内容。旨在通过这样形式,将科研工作的最新进展和国际相关研究内容及时反馈到实验教学中,使电路理论实验教学内容更具前瞻性和挑战性,激发学生的科研创新思维,提高学生的独立思考能力、动手操作能力和解决实际问题能力。

1 实验设计思路

电路理论创新性实验是电气信息类专业非常重要的实验内容,不仅为后续课程提供电路知识,而且是学生构建电路理论知识结构,培养动手能力和创新性思维的重要教学环节。电路设计是电路理论实验教学中最重要的内容之一,旨在通过采用合适的元器件按照某种拓扑结构搭建电路实现特定的功能。近年来,随着电子技术的飞速发展,特别是消费类电子产品需求的不断扩大,电路综合实现研究不断深入,成为电路与系统领域的热点问题。

学生在学习“高等数学”“复变函数与积分变换”等课程时就接触了傅里叶变换,傅里叶变换作为信号分析中最常见的方法,在平稳信号的分析 and 处理中起着重要作用。然而,傅里叶变换不能提供被分析信号的局部时间段内的频率信息。基于此,被誉为“数字显微镜”的小波变换被广泛地应用于非平稳信号的处理^[4]。传统的小波变换是采用通用计算机结合软件实现,不适合小型化、低功耗、实时性和便携式的工程应用,因此,小波变换的硬件电路实现成为发展趋势。目前,国内外最常见的小波变换实现是采用数字电路实现,但由于数字系统在处理模拟信号时需要增加 A/D 器件,系统的功耗和体积难于满足应用要求,所以,小波变换的模拟电路实现成为重要研究方向。

本文结合多年来从事电类课程教学实践和电路综合设计研究,选取笔者科研项目中较为成熟的部分科研成果——小波滤波器的开关电容技术实现,将其开发为电路理论创新性实验。在该实验的设计中将始终贯穿以下理念:

1) 体现实验内容的综合性和新颖性。本实

验涉及开关电容技术、模拟滤波器设计、函数逼近和小波分析等知识点,实现多知识点的综合应用。同时,在函数逼近和滤波器结构设计中可运用新的优化方法,体现实验内容的新颖性和创新性。

2) 强化实验综合技能培养。实验过程中仅提供运算放大器、电容等基本元器件和 Matlab 及 ASIZ 软件,要求学生完成小波函数逼近、开关电容小波滤波器电路设计与仿真、电路制作与测试的整个过程,培养学生的实验综合技能。

3) 突出实验方法的创新性。实验方案设计中鼓励学生采用新方法。例如小波函数的有理逼近中,传统方法是最小二乘法,但该方法对算法的初始值选择要求苛刻,难于达到预期效果。学生可以通过查找最新科技文献,获取智能优化算法的相关知识,并运用到函数有理逼近中,取得更好的逼近效果。通过创新实验方法,既培养学生的创新思维,又提高学生分析问题和解决问题的能力。

2 实验原理

从频域的角度分析,小波变换实现问题转化为一组不同中心频率的恒定品质因数带通滤波器设计问题。因此,小波带通滤波器设计是小波变换实现的关键。根据电网络理论,小波带通滤波器设计可概括为三个主要内容,即小波函数有理逼近、小波滤波器网络结构设计和小波滤波器电路设计。其中,小波函数需要有理逼近的原因是小波函数为非因果函数,不能直接电路综合实现,因此,需要基于线性系统理论构建逼近模型。从线性连续时间系统状态空间描述出发,推导出 N 阶滤波器的冲激响应 $h(t)$ 的通用表达式为^[5]

$$h(t) = \sum_{i=1}^N A_i e^{B_i t} = \sum_{i=1}^m a_i e^{b_i t} + \sum_{j=1}^n c_j e^{d_j t} \cos(\rho_j t) + f_j e^{d_j t} \sin(\rho_j t), (m+n=N). \quad (1)$$

式中: A_i 和 B_i 为实数或复数; $a_i, b_i, c_j, d_j, \rho_j$ 和 f_j 为实数; m 和 n 对应实极点个数。例如,考虑一个 5 阶滤波器,其冲激响应 $h(t)$ 可表示为

$$h(t) = r_1 e^{r_2 t} + r_3 e^{r_4 t} \cos(r_5 t) + r_6 e^{r_4 t} \sin(r_5 t) + r_7 e^{r_8 t} \cos(r_9 t) + r_{10} e^{r_8 t} \sin(r_9 t). \quad (2)$$

式中,为了保证系统的稳定性,系数 r_2, r_4 和 r_8 必

须为负数。以高斯一阶导数小波为例,如图1中实线所示,求取小波逼近函数。高斯一阶导数小波的时域表达式为

$$\psi(t) = -2(2/\pi)^{1/4} \cdot t \cdot e^{-t^2}. \quad (3)$$

其时域支撑域近似为 $[-2, 2]$ 。为了获得因果系统,现对系统函数进行平移。令 $t_0 = 2$,则平移后的高斯一阶导数小波 $\psi(t-t_0)$ 为

$$\psi(t-2) = -2(2/\pi)^{1/4} \cdot (t-2) \cdot e^{-(t-2)^2}. \quad (4)$$

如图1中虚线所示。现结合式(2)和式(4),建立逼近模型为

$$\begin{cases} \min E(\sigma) = \frac{1}{k} \left(\sum_{m=1}^k [h(m\Delta t) - \psi(m\Delta t - 2)]^2 \right) \\ s.t. \sigma_i < 0, (i = 2, 4, 8), H(0) = 0. \end{cases} \quad (5)$$

式中: k 为采样点数。

式(5)中的优化问题可以采用最小二乘法在Matlab软件中编程实现,求出小波逼近函数的系数,从而获得小波滤波器的传递函数。此外,学生可以通过查阅相关文献资料,获得智能优化算法的知识,继而采用最新的智能优化算法优化求解该问题,获得逼近效果更好的小波滤波器传递函数。

根据模拟滤波器设计原理,设计开关电容小波滤波器网络结构。模拟滤波器网络结构有级联结构和多环反馈结构,其中,级联结构包括串行结构和并行结构,多环反馈结构包括跟随领先节反馈结构(FLF)、反向跟随领先节反馈结构(IFLF)和梯形结构(Ladder)。由于级联结构设计简单、调试方便,所以滤波器设计相对容易,但是滤波器的灵敏度受器件参数的影响大。多环反馈结构既保留了级联法积木化实现的方便,又能提供良好

的灵敏度性能,所以应用非常广泛。以IFLF结构设计为例,该结构对应的5阶传递函数见图1:

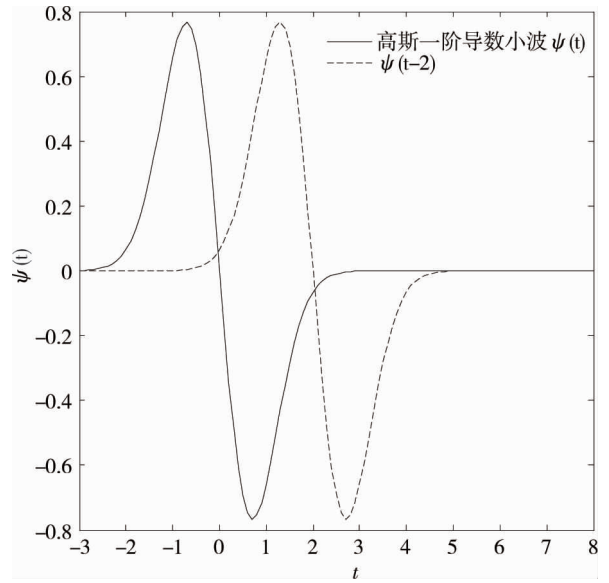


图1 高斯一阶导数小波 $\psi(t)$ 和 $\psi(t-2)$

$$H(s) = \frac{\frac{G_4}{\tau_1}s^4 + \frac{G_3}{\tau_1\tau_2}s^3 + \frac{G_2}{\tau_1\tau_2\tau_3}s^2 + \frac{G_1}{\tau_1\tau_2\tau_3\tau_4}s + \frac{G_0}{\tau_1\tau_2\tau_3\tau_4\tau_5}}{s^5 + \frac{1}{\tau_1}s^4 + \frac{1}{\tau_1\tau_2}s^3 + \frac{1}{\tau_1\tau_2\tau_3}s^2 + \frac{1}{\tau_1\tau_2\tau_3\tau_4}s + \frac{1}{\tau_1\tau_2\tau_3\tau_4\tau_5}}. \quad (6)$$

将连续域5阶IFLF结构转化为离散域IFLF网络结构如图2所示,其中, $H_i(z)$ 为离散积分器,它由连续域 $H_i(s) = 1/(\tau s)$ 采用双线性变换 $s = (2/T) \cdot (1-z^{-1})/(1+z^{-1})$ 获得,其表达式为

$$H_i(z) = \frac{T}{2\tau_i} \left(\frac{1+z^{-1}}{1-z^{-1}} \right), i = 1, 2, 3, 4, 5. \quad (7)$$

连续域 $H_i(s)$ 中 $\tau = 1/\omega_0$, ω_0 为归一化的中心频率。

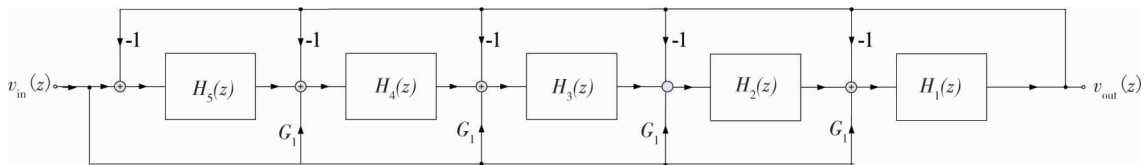


图2 5阶离散域IFLF结构

将小波滤波器的频域逼近传递函数与式(6)的通用传递函数进行对照,可求出 $\tau_1-\tau_5$ 和 G_0-G_4 等系数。离散积分器可以采用开关电容积分器或开关电流积分器实现。以开关电容积分器为

例,其双线性差分开关电容积分器如图3所示。其传递函数为

$$H(z) = \frac{v_{out+}(z) - v_{out-}(z)}{v_{in+}(z) - v_{in-}(z)} = \frac{C_1}{C_2} \left(\frac{1+z^{-1}}{1-z^{-1}} \right). \quad (8)$$

结合式(7)和式(8)可推导出 $T/(2\tau) = C_1/C_2$, 然后根据求得的 $\tau_1 - \tau_5$ 和 $G_0 - G_4$ 可求出图2中电路所有电容的值。

以图2中的5阶IFLF结构电路为例, 采用ASIZ软件设计电路如图4所示, 并对该电路进行真分析, 包括时域分析、频域分析、稳定性分析和灵敏度分析, 检验所设计电路的理论性能。

最后, 学生需要选取实际器件搭建实物电路, 并进行焊接、调试与测试, 将实际结果与理论结果进行对比分析。例如, 电路中运算放大器选用

AD8033, 开关选用单刀单掷 CMOS 模拟开关 DG456 和若干个贴片式陶瓷电容。

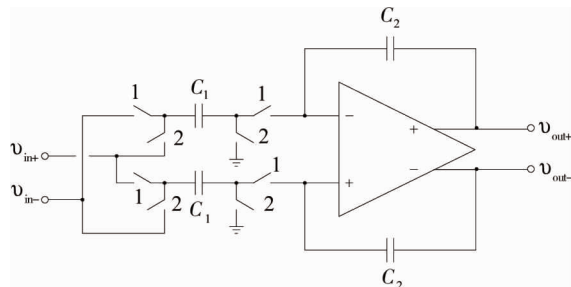


图3 无损双线性差分开关电容积分器

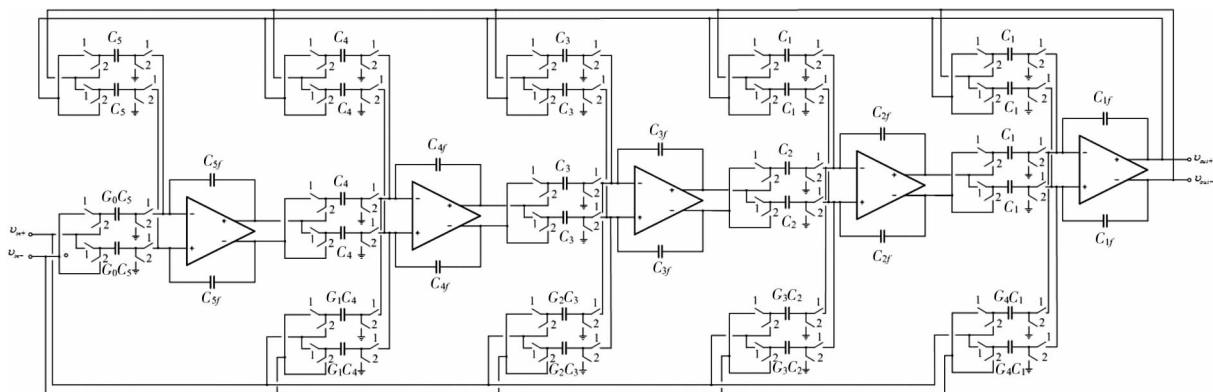


图4 五阶双线性差分开关电容小波滤波器电路

3 实验基本要求

3.1 实验预习

本实验是在学生学习了电路、模拟电子技术、数字电子技术和信号与系统等课程, 并完成了相关课程实验后在电气信息类专业学生中进行。实验前, 学生需要查阅相关文献资料, 了解相关知识背景和科研背景, 学会使用 Matlab 和 ASIZ 软件; 学会实际电路的焊接、调试与测试等基本技能; 拟定实验的设计方案, 完成实验预习报告。

3.2 实验内容

1) 熟悉实验原理, 参考实验原理中的示例, 各实验分组确定实验方案。

2) 确定小波函数、逼近阶数, 构建小波函数的非线性有约束逼近模型并选取优化算法, 采用 Matlab 软件编程求得小波滤波器频域传递函数。

3) 选取模拟小波滤波器结构类型, 画出该结构类型的框图并求出相关系数。

4) 选取模拟小波滤波器的基本结构单元电路, 设计出模拟小波滤波器电路并采用 ASIZ 软件对电路进行时域分析、频域分析、稳定性分析和灵

敏度分析。

5) 选择合适的电路元器件搭建实物电路, 并完成焊接、调试与测试。将实物的实测结果与仿真结果进行对比分析, 并得出相关结论。

3.3 实验报告

撰写全面总结实验的实验报告, 特别突出实验过程中的创新点, 并详细分析实验结果, 重点体现本实验中采用的新方法与原有方法的性能对比。基础较好的学生可以通过查阅最新的非线性有约束逼近问题智能优化解决方法和模拟滤波器网络结构优化方法, 并将其引入到本实验中。对有深入开展研究兴趣的学生, 可在本实验的基础上, 撰写大学生研究性学习和创新性实验计划项目申请书, 通过项目立项资助的途径, 开展本实验的深入研究, 将项目研究成果发表科研论文和申请专利。

4 实验实施效果

将科研成果转化为电路理论创新性实验教学内容, 目前已有1届本科生进行了实验, 得到了学

生的广泛欢迎和认同,实验效果良好。通过该实验,学生比较系统地了解了电路综合设计的科研过程与方法,培养了学生的科研能力和创新能力。在实验过程中,实验分组的学生自主设计实验方案,独立完成实验操作过程,整理分析实验数据,最后得出实验结论并撰写较高水准的实验总结报告,对学生而言富有挑战性,鼓励学生在实验过程中进行大胆创新,充分发挥了学生的主观能动性,调动了学生的学习积极性。通过本实验,学生的数据处理能力、实验动手能力、分析问题和解决问题的能力都有明显提升。大学生创新训练中心已有4位学生开展了相关领域的研究,在学术期刊上发表SCI论文1篇、EI论文1篇,申请校级大学生创新实验项目2项、省级大学生创新实验项目1项。

5 结语

当前我国正在积极开展本科教育质量提升工程,创新人才培养工作是高校面临的挑战性问题,也是高校开展教育教学改革的重点。随着世界范围内新一轮科技革命和产业变革的蓬勃开展,国家对创新人才的需求越来越大,适应新经济的创

新型人才培养已成为高校的重要任务。从科研成果中提炼出与学生已有知识和能力紧密结合的实验项目,使学生接触到科研成果和体会创新过程,能够有效激发学生的创新积极性和科研兴趣,培养学生发现问题、分析问题和解决问题的能力。同时,在实验研究中还能够培养学生严谨的科研态度、实事求是的工作作风和富于创新的精神。

参考文献:

- [1] 吴爱华,侯永峰,杨秋波,等.加快发展和建设新工科,主动适应和引领新经济[J].高等工程教育研究,2017(1):1-9.
- [2] 钟登华.新工科建设的内涵与行动[J].高等工程教育研究,2017(3):1-6.
- [3] 吴音,刘蓉翻,李亮亮.科研成果转化为综合性实验教学探索[J].实验技术与管理,2016(8):162-164.
- [4] Li Mu, He Yigang. A simple structure wavelet transform circuit employing function link neural networks and SI filters[J]. International Journal of Electronics, 2016(12):2052-2063.
- [5] 李目,吴笑锋,席在芳,等.任意实小波函数的高阶开关电流滤波器通用实现方法[J].中南大学学报(自然科学版),2016(10):3417-3423.

Exploration and Practice of Transferring Scientific Research Achievements to Circuit Theory Innovative Experiments

LI Mu, ZENG Zhaofu, ZHAO Yanming, CHEN Zuguo

(School of Information and Electrical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: The innovative experiment is an important way to cultivate students' practical ability and innovation ability. Based on students' existing knowledge and cultivation regularity of innovation ability, it is an important means to transfer scientific research achievements into innovative experiments. In view of the rapid development of electronic circuit design technology, taking the realization of switched-capacitor wavelet filter as an example, the papers explores the process of transferring teachers' scientific research achievements into innovative experimental teaching of circuit theory. The results of experimental teaching show that this teaching mode has a great promoting effect on cultivating students' scientific research ability, abilities of analyzing and solving problems and innovative spirit. At the same time, the design process of the experimental project provides valuable experience for transferring scientific research achievements into innovative experimental teaching.

Key words: innovative experiment; circuit theory; practical teaching; scientific research achievements

(责任校对 钟丽)