

基于非厄米趋肤效应的电压信号放大器的设计

吴吉恩¹ 孔 鹏² 邓 科¹

(¹ 长沙理工大学物理与电子科学学院, 湖南 长沙 410114;

² 吉首大学物理与机电工程学院, 湖南 吉首 416000)

摘 要 为解决固体物理课程中能带理论抽象、理论与实践脱节的教学痛点, 本文构建“基于非厄米趋肤效应的电压信号放大器设计”作为项目式(Project-Based Learning, PBL)教学案例。该项目紧扣矢量声学传感器的宽频测量需求, 以能带理论为基础, 拓展非厄米体系拓扑特性, 利用非厄米趋肤效应的体态局域化机制, 通过调控电容参数使非布洛赫相位因子满足 $|\beta| > 1$, 实现电压沿电路节点的指数级放大。教学中, 学生全程参与可行性分析、仿真计算、样件加工及测试, 深化了对能带理论与非厄米物理的理解, 锻炼了跨学科实践能力与科研实践能力。该案例为固体物理“理论—项目—应用”的教学转化提供了可行路径。

关键词 固体物理教学; 项目式驱动; 能带理论; 非厄米趋肤效应; 电压放大器

DOI: 10.27024/j.wlygc.2025.12.23.01

DESIGN OF A VOLTAGE SIGNAL AMPLIFIER BASED ON THE NON-HERMITIAN SKIN EFFECT

WU Jien¹ KONG Peng² DENG Ke¹

(¹ School of Physics and Electronic Science, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114;

² School of Physics and Electromechanical Engineering, Jishou University, Jishou, Hunan 416000)

Abstract To address the teaching challenges in Solid State Physics courses, such as the abstract nature of band theory and the disconnection between theory and practice, this paper takes the design of a voltage signal amplifier based on the non-Hermitian skin effect as a Project-Based Learning (PBL) teaching case. Closely aligned with the measurement requirements of vector acoustic sensors, this project is grounded in band theory, extends the topological properties of non-Hermitian systems, and leverages the bulk localization mechanism of the non-Hermitian skin effect. By adjusting capacitance parameters to satisfy the non-Bloch phase factor condition $|\beta| > 1$, exponential amplification of voltage across circuit nodes is achieved. During the teaching process, students are involved in the entire workflow, including feasibility analysis, simulation calculation, prototype fabrication, and testing. This not only deepens their understanding of band theory and non-Hermitian physics but also hones their interdisciplinary practical skills and scientific research capabilities. The case provides a feasible pathway

收稿日期: 2025-12-23; 修回日期: 2026-02-28; 出版日期: 2026-05-20

基金项目: 国家级大学生创新创业训练计划项目(S202410531039); 第三届湖南省基础教育教学改革研究项目(25JGZD0068)。

通信作者: 孔鹏, kongpeng@jsu.edu.cn。

引文格式: 吴吉恩, 孔鹏, 邓科. 基于非厄米趋肤效应的电压信号放大器的设计[J]. 物理与工程, 2026, 36(3): 209-215.

Cite this article: WU J E, KONG P, DENG K. Design of a voltage signal amplifier based on the non-Hermitian skin effect[J]. Physics and Engineering, 2026, 36(3): 209-215. (in Chinese)

for the teaching transformation of “theory-project-application” in Solid State Physics.

Key words solid state physics teaching; project-driven learning; band theory; non-Hermitian skin effect; voltage signal amplifier

固体物理作为物理类、材料类等理工科专业的核心基础课程,是连接经典物理与量子物理、基础理论与工程应用的关键桥梁,其教学质量直接影响学生对后续专业课程的学习效果,以及未来从事科研与工程实践的核心竞争力^[1-4]。能带理论作为固体物理课程的核心模块与灵魂内容,从量子力学视角揭示了晶体中电子的运动规律,系统阐释了导电性、导热性、光学特性等宏观物理性质的微观起源。能带理论的教学不仅要求学生掌握能带、布洛赫定理、体态与边态等概念,更强调培养学生的理论建模能力,实空间和倒空间的转换思维与问题分析能力。尤其是随着新能源、新材料、微电子等战略性新兴产业的快速发展,市场对具备扎实理论基础与跨学科应用能力的专业人才需求日益迫切。能带理论作为材料设计、器件研发的核心理论工具,掌握该理论并能实现工程转化的人才,将在产业升级与科研创新中具备显著优势^[5,6]。因此,强化能带理论的学习,不仅是课程本身的教学要求,更是对接行业需求、培养高素质人才的必然选择。

当前,抽象理论课程的教学改革已成为高等教育教学改革的重点与难点。PBL作为一种以学生为中心、以实际项目为载体的教学模式,通过“四步走”闭环路径,即提出问题、探索研究、解决问题、实际应用,将理论知识融入实践任务,在化解抽象理论理解障碍、激发学生学习主动性、提升实践能力等方面展现出显著优势,已在多个学科的教学改革中得到广泛应用并取得良好成效^[7-10]。

1 能带理论教学核心痛点分析

1.1 具象化认知障碍与知识门槛叠加

能带理论的核心概念与理论体系根植于量子力学,其抽象性不仅体现在概念本身的非直观性,更在于数学推导与物理图像脱节,导致学生难以构建清晰的物理模型,这是该模块教学最突出的痛点。例如,能带结构的绘制与分析(如紧束缚近似、近自由电子近似下的能带图)依赖复杂的理论推导与模型假设,学生往往只能机械记忆推导结果,难以理解不同近似条件的物理内涵与适用场景。

1.2 教学内容与应用场景的割裂

能带理论作为解释材料宏观特性、指导材料与器件设计的核心工具,其应用价值广泛,但传统教学“重理论、轻应用”的倾向导致教学内容与工程实践、科研前沿严重脱节,学生难以体会理论的实用价值,形成“理论和实践两张皮”的现象。一方面,教学内容聚焦经典理论,与前沿应用衔接薄弱。现有教材与教学内容多围绕传统能带理论的基本概念、推导过程与经典案例(如金属、半导体、绝缘体的能带差异)展开,缺乏对现代科研前沿与工程实际的融入。另一方面,学生难以构建底层理论到工程应用的逻辑链条。能带理论的核心价值在于通过调控理论参数(如晶格常数、势场分布、电子填充情况)实现对材料物理效应(如导电性、光学吸收、局域化特性)的调控,进而设计具备特定功能的器件。但传统教学中,学生仅需掌握“理论参数是什么”“物理效应的定性描述”,而缺乏对“参数如何影响效应”“效应如何转化为功能”的实践探索。

1.3 学习主动性与综合能力训练缺失

传统教学模式以“教师讲授、学生记忆”为主,侧重知识的单向传递,忽视了对学生科研思维、跨学科实践能力的培养,同时难以激发学生的学习主动性,导致能力培养维度单一、效果不佳。例如,学生仅学习紧束缚近似的推导结果,却不了解“为何需要建立该近似”“近似条件的选择依据”,难以形成科学的探究思维。传统教学局限于固体物理学科内部,未与其他相关课程形成有效衔接。学生在学习过程中仅接触物理理论,缺乏对具体的物理模型的仿真、实验测试等实践技能的训练,难以适应跨学科的工程应用需求。再者,教学中多以“标准化习题”为主,答案固定、条件明确,学生只需套用理论公式即可完成,缺乏对复杂实际问题的分析与解决能力,面对“无明确条件、多因素影响”的真实场景时无从下手。

2 项目式驱动教学的具体设计

针对上述痛点,以非厄米趋肤效应的宽频电压信号放大器设计为项目载体,通过精准定位项

目目标、构建清晰实践逻辑、优化教学实施环节,实现理论知识的具象化转化与学生综合能力的协同培养。

2.1 教学目标

(1) 知识目标:理解紧束缚近似、布洛赫定理、非布洛赫相位因子、非厄米趋肤效应的物理内涵;能够推导 Hatono-Nelson 模型(HN)的开放边界条件本征方程;建立“量子力学能带理论—电路方程—电子器件功能”的跨学科知识链。

(2) 能力目标:理论建模能力,能够独立完成非布洛赫相位因子的推导,解释其物理意义;数值模拟与预测能力,能使用 Matlab 模拟 HN 模型的本征态的分布以及利用 Multisim 搭建与 HN 模型对应的电路,预测节点电压分布;实践动手能力,能小组合作完成 PCB 焊接、仪器操作、故障排查以及利用矢量网络分析仪进行测量工作。

(3) 素质目标:科学思维的锻炼,经历“假设—验证—改进”的完整科研流程;团队协作的精神,在 4 人小组中承担特定角色并完成协作任务,进行成果展示。

2.2 项目式教学的设计思路

项目全程围绕能带理论的核心概念展开,避免脱离课程本质的浅层实践。重点聚焦紧束缚理论模核心知识点,以非厄米物理这一前沿科研领域为理论支撑,将非厄米体系中的非布洛赫相位作为理论拓展点,以矢量声学传感器测量所需的宽频电压信号放大器为工程应用场景。学生需先掌握能带理论核心知识,再将其转化为项目设计中的参数调控逻辑,最终通过实践实现放大器的宽频放大功能,彻底解决“理论实践两张皮”的问题。

Step1: 教师引导学生拆解驱动问题

1) 探讨非厄米趋肤效应的物理机制

基于 HN 紧束缚模型研究趋肤效应的能量分布特性。HN 模型如图 1 所示,一个单胞只包含一个格点。格点之间向右耦合为 t_R ,向左耦合为 t_L 。可以得到系统的布洛赫哈密顿量

$$H(k) = t_R e^{ik} + t_L e^{-ik} \quad (1)$$

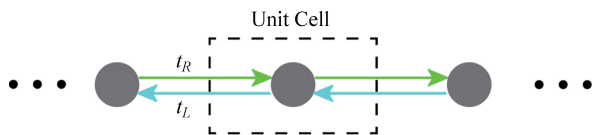


图1 Hatono-Nelson 紧束缚模型

k 是归一化波矢。当 $t_R \neq t_L$ 时

$$H(-k) = t_R e^{-ik} + t_L e^{ik} \neq H(k) \quad (2)$$

该哈密顿量不满足厄米共轭特性,证明系统是非厄米的。

HN 紧束缚模型在开放边界条件下的物理特性,系统的体方程为

$$E\psi_n = t_R\psi_{n+1} + t_L\psi_{n-1} \quad (n=2 \cdots N-1) \quad (3)$$

其中, E 和 ψ 分别表示本征能量和波函数, n 为格点的标号, N 为总的格点数。为了分析本征态的特性,定义 $\psi_n = \beta^n \psi_0$, 其中 ψ_0 表示基态,式(3)可以表述为

$$E = t_R\beta + t_L\beta^{-1} \quad (4)$$

其具有两个解

$$\beta_{1,2} = \frac{E \pm \sqrt{E^2 - 4t_R t_L}}{2t_R} \quad (5)$$

由韦达定理,可知 $\beta_1\beta_2 = \frac{t_L}{t_R}$ 。式(3)的通解可以写成 β_1 和 β_2 的线性组合形式,即

$$\psi_n = c_1\beta_1^n + c_2\beta_2^n \quad (6)$$

同时引入边界条件 $E\psi_1 = t_R\psi_2$, $E\psi_N = t_L\psi_{N-1}$, 即

$$E(c_1\beta_1 + c_2\beta_2) = t_R(c_1\beta_1^2 + c_2\beta_2^2)$$

$$E(c_1\beta_1^N + c_2\beta_2^N) = t_L(c_1\beta_1^{N-1} + c_2\beta_2^{N-1}) \quad (7)$$

结合式(4)和式(7),可以得到

$$\begin{pmatrix} t_L & t_L \\ t_R\beta_1^{N+1} & t_R\beta_2^{N+1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \end{pmatrix} = 0 \quad (8)$$

式(8)如果存在非平凡解,则 $\beta_1^{N+1} = \beta_2^{N+1}$, 同时

$\beta_1\beta_2 = \frac{t_L}{t_R}$, 可以得到

$$\beta_1 = \sqrt{|t_L/t_R|} e^{(ik'/2)}, \quad \beta_2 = \sqrt{|t_L/t_R|} e^{(-ik'/2)} \quad (9)$$

其中 $k' = \frac{j\pi}{N+1}$, ($j=1, 2, \cdots, N$)。如果 $N \rightarrow \infty$, 可以得到

$$\beta(\beta_1, \beta_2) = \sqrt{\left| \frac{t_L}{t_R} \right|} e^{ik'} \quad (10)$$

其中 $k' \in (-\pi, \pi)$ 。通常 β 被称为非布洛赫相位因子。当 $t_R > t_L$ 的时候, $|\beta| < 1$, 波函数呈现指数衰减,局域在结构的左端,如图 2(a)所示;当 $t_R = t_L$ 的时候, $|\beta| = 1$, 波函数是扩展的形式,均匀地分布在体结构中,如图 2(b)所示;当 $t_R < t_L$ 的时候, $|\beta| > 1$, 波函数呈指数增加,局域在结构的右端,如图 2(c)所示。如果信号从左端输入,放

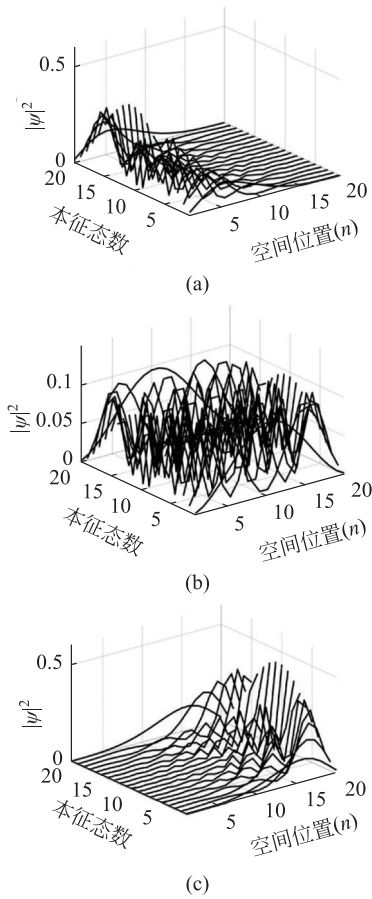


图2 开放边界下 Hatono-Nelson 紧束缚模型的本征态分布
(a) $|\beta| < 1 (t_R = 2, t_L = 1.5)$; (b) $|\beta| = 1 (t_R = t_L = 2)$; (c) $|\beta| > 1 (t_R = 1.5, t_L = 2)$

大信号从右端输出,则输出的信号远大于输入信号。因此,波函数呈现指数增加的非厄米趋肤效应具有信号放大的功效,可以设计信号放大器。信号具体的放大倍数由模型的长度 n 和 $|\beta| = \left| \frac{t_L}{t_R} \right|$ 共同控制。

2) 紧束缚模型与电路对应关系的建立

基于 LC 共振电路实现 Hatono-Nelson 模型,即构建非厄米电压信号放大器电路。给电路添加非厄米元件(电阻、二极管、运算放大器等),形成非厄米电路。电路模型如图3所示。电路中的节点类似于紧束缚模型中的格点。非互易耦合用非互易电容实现,向右耦合为 $C_1 - C_2$,向左耦合为 $C_1 + C_2$ 。非互易电容需要包含运算放大器(三角形)的负反馈模块(INIC)来实现。

基于基尔霍夫定律和欧姆定律可得到电路系统的哈密顿量。假设外界给节点 n 输入电流 I_n ,

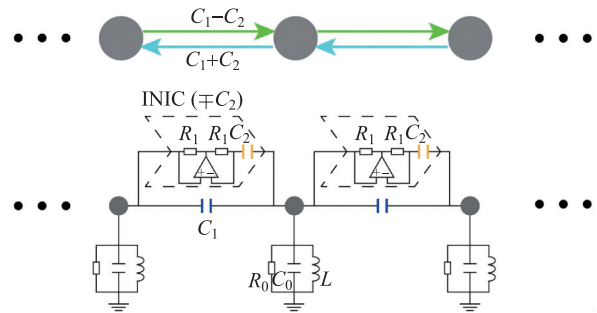


图3 非厄米电压信号放大器的电路设计图,即 Hatono-Nelson 紧束缚模型的电路实现。INIC 模块(虚框)用来实现非互易耦合电容,向右耦合为 $-C_2$,向左耦合为 C_2

此时节点 n 的电压为 U_n ,那么该节点的电流与电压关系为

$$I_n = i\omega(C_1 + C_2)(U_n - U_{n-1}) + i\omega(C_1 - C_2)(U_n - U_{n+1}) + \left(i\omega C_0 + \frac{1}{R_0} + \frac{1}{i\omega L} \right) U_n \quad (11)$$

ω 为角频率, n 即表示格点的位置。根据布洛赫定理: $U_{n-1} = e^{-ik} U_n$, $U_{n+1} = e^{ik} U_n$, (设晶格常数为 1) 可以将公式(11)写为 $I = JU$ 的形式(忽略下标 n), 其中

$$J = i\omega \left[\left(2C_1 + C_0 - \frac{i}{\omega R_0} - \frac{1}{\omega^2 L} \right) - (C_1 + C_2)e^{-ik} - (C_1 - C_2)e^{ik} \right] \quad (12)$$

被称为接地的拉普拉斯算符,即为导纳。将导纳改写为 $J = i\omega(A - H')$, 其中 $A = 2C_1 + C_0 - \frac{i}{\omega R_0} - \frac{1}{\omega^2 L}$, H' 写为

$$H' = (C_1 - C_2)e^{ik} + (C_1 + C_2)e^{-ik} \quad (13)$$

该哈密顿量中的 $C_1 - C_2$ 和 $C_1 + C_2$ 可以类比为 Hatono-Nelson 紧束缚模型中的耦合项 t_R 和 t_L 。由于两者的哈密顿量类似,该电路具有与 Hatono-Nelson 紧束缚模型类似的非厄米特性,可以预测其存在非厄米趋肤效应。根据哈密顿量的相似性,可以得到电路在开放边界条件下的非布洛赫相位因子 $\beta = \sqrt{\frac{C_1 + C_2}{C_1 - C_2}} e^{ik'}$, 其中 $k' = \frac{j\pi}{N+1}$, ($j = 1, 2, \dots, N$)。控制电容参数,使其 $|\beta| > 1$ 即可实现电压信号放大。

开放边界条件时,根据 $I = JU$ 形式的电路方程,其中 $I = (I_1, I_2, I_3, \dots, I_n)^T$, $U = (U_1, U_2, U_3, \dots,$

$U_n)^T, J = i\omega(AI_{n \times n} - H')(I_{n \times n}$ 为单位矩阵), 电路的哈密顿量为

$$H' = \begin{pmatrix} 0 & C_1 - C_2 & 0 & \cdots & 0 \\ C_1 + C_2 & 0 & C_1 - C_2 & \cdots & 0 \\ 0 & C_1 + C_2 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & C_1 - C_2 \\ 0 & 0 & 0 & C_1 + C_2 & 0 \end{pmatrix} \quad (14)$$

对于系统本征问题的求解, 不需要外界电流激励, 所以设置 $I_n = 0$, 即 $0 = JU$, 可得到 $AI_{n \times n}U = H'U$ 。对角化哈密顿量后可以得到电路系统的本征频率为

$$f = f_a \left(\sqrt{1 - \frac{L^2 \pi^2 f_a^2}{R_0^2}} + i \frac{L \pi f_a}{R_0} \right) \quad (15)$$

其中 $f_a = \frac{1}{2\pi \sqrt{L(2C_1 + C_0 - \epsilon)}}$, ϵ 是哈密顿量的本征值。

Step2: 学生实施项目

1) 参数优化及宽频效果分析

设计包含 20 个节点的电路链, 电路元件参数为 $C_0 = 470\text{nF}$, $C_1 = 220\text{nF}$, $C_2 = 47\text{nF}$, $L = 0.06\text{mH}$, $R_0 = +\infty$ 。其中, $R_0 = +\infty$ 表示开路, R_1 用于实现非互易电容。根据上述分析可知 $|\beta| = \sqrt{\left| \frac{C_1 + C_2}{C_1 - C_2} \right|} = 1.24$, 系统将出现右趋肤, 如图 4(a) 所示, 频率范围约为 $18 \sim 29\text{kHz}$ 。如图 4(b) 中所示, 本征态局域在电路链的右端 ($n = 20$) 附近。为了分析本征电压宽频特性, 如图 4(b) 和图 4(c) 所示在整个频谱范围内, 节点 20 的电压比节点 1 的电压高得多。因此电压信号从节点 1 输入, 从节点 20 输出, 具有宽频的信号放大效果。但是需要注意的是, 放大效果是随频率变化的, 在中心频率附近放大效果最佳。这种特性是受到非厄米趋肤效应本身特性的限制, 即中心频率本征态的电压

才局域在最边上的节点(节点 20), 然而非中心频率本征态的电压仅局域在靠近最边上的节点。

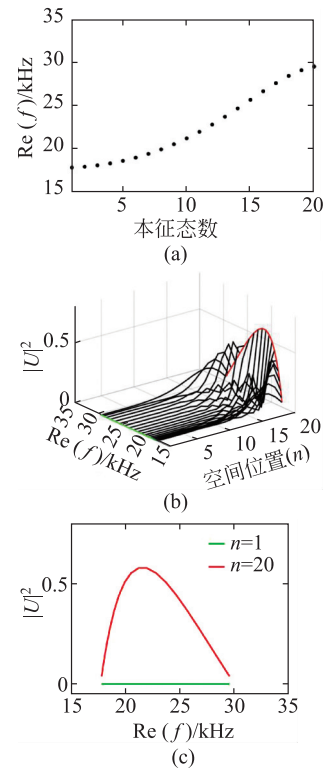


图 4 厄米电压信号放大器电路的本征态分析

(a) 电路的实频谱; (b) 所有本征态的电压分布。浅色(绿色)和深色(红色)的线条描述第一个节点 $n=1$ 和最后一个节点 $n=20$ 的宽频电压特性; (c) $n=1$ 和 $n=20$ 的电压宽频特性

2) 样品制作及仿真分析

在频率 $f_0 = 21.5\text{kHz}$ 情况下对其进行仿真分析和实验测试, 设计一个包含 10 个节点的放大电路。所需的电子元件参数如表 1 所示。

根据电路设计(图 3), 本研究利用 NI Multi-sim 计算软件构建相应的仿真电路, 如图 5 所示。单胞的具体电路图显示在左下角, 每个单胞包含一个电路节点。交流电压信号源连接在节点 1, 同时给信号源串联了一个分压电阻 23Ω , 用于模拟实验中电压源的内阻。此外, 需要考虑的电感元件

表 1 元件参数

电子元件	C_0	C_1	C_2	L	R_0	R_1	运算放大器(LT1363)
参数值	470nF	220nF	47nF	0.06mH	300Ω	20Ω	/
生产误差	5%	5%	5%	20%	1%	1%	/
直流电阻	/	/	/	0.35Ω	/	/	/
封装类型	0603	0603	0603	7.3×7.3	0603	0603	SO-8

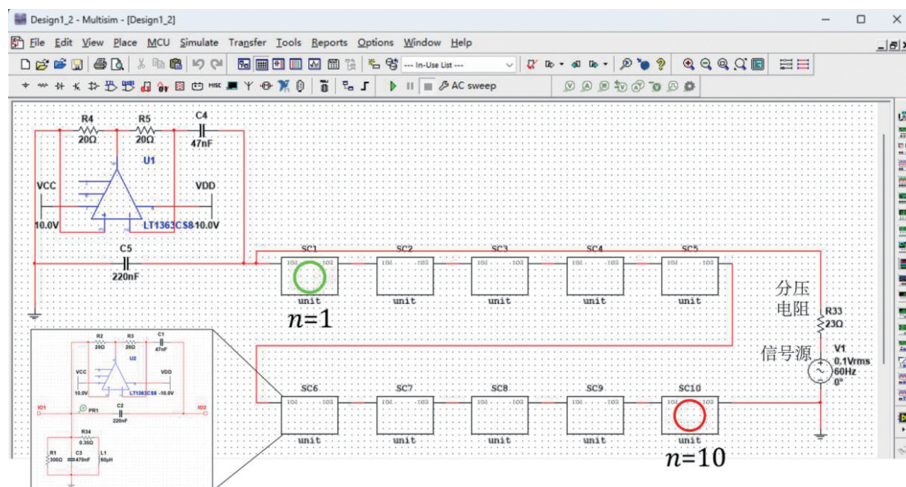
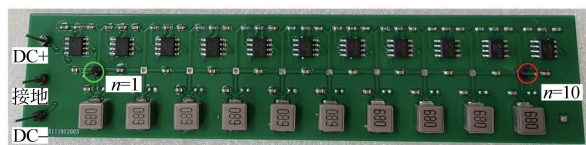


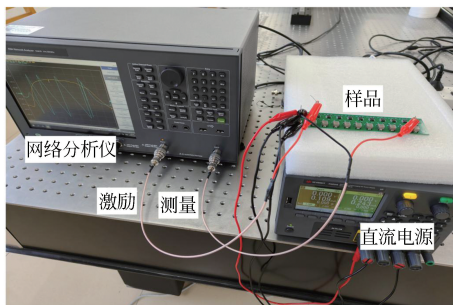
图5 非厄米电压信号放大器的仿真建模

的内阻为 0.35Ω ，与电感串联。还需要考虑实验电路中存在的全局损耗，用 $R_0 = 300\Omega$ 来模拟。电压设置为 $0.1V$ ，通过测量输入电压（节点 $n=1$ 的电压）与输出电压（节点 $n=10$ 的电压），对非厄米电压信号放大器的放大效果进行分析。

基于仿真的结果，用 KiCad 软件设计相应的 PCB，并制备非厄米电压信号放大器的试样品，如图 6(a)所示。接口“DC+”和“DC-”分别接直流电源（ $\pm 10V$ ）的正极和负极，给运算放大器供电，其中直流电源仪器型号为 Keysight E36233A。用网络分析仪（Keysight E5061B）在节点 1 输入信号，并且测量出节点 1 的输入信号和节点 10 的输出信号。图 6(b)是实验测试场景，包含网络分析仪、直流电源、测试样品以及它们之间的连接。需



(a)



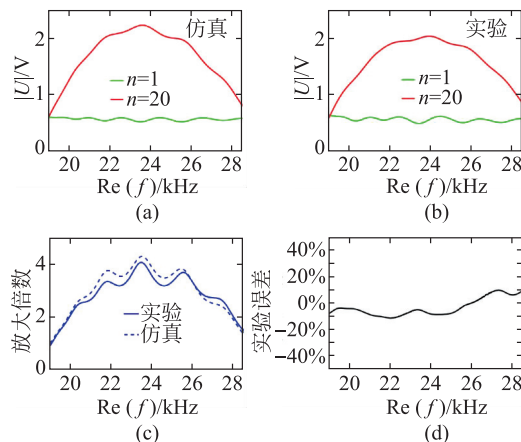
(b)

图6 非厄米电压信号放大器的实验照片
(a)PCB 样品。(b)实验布置场景

要注意的是，实验电路中用的电感标准值是 $0.068mH$ 。但是，电感产生的磁场会在电路板（接地端铺铜）中产生感应涡流，涡流产生的反向磁场会削弱原电感的磁场，相当于减小了等效电感，有效电感值约为 $0.06mH$ 。

3) 成果总结与反思

仿真和实验结果分别如图 7(a)和图 7(b)所示，浅色（绿色）线表示节点 1 的输入电压，深色（红色）线表示节点 10 的输出电压。可见，仿真和实现结果高度吻合，输出电压在宽频范围内具有电压信号放大效果。图 7(c)所示的电压放大倍数，定义为电压放大倍数 = 输出电压/输入电压。结果显示，电压最高放大倍数约为 4。理论上，电

图7 非厄米电压信号放大器的仿真和实验结果分析
(a)和(b) 分别为仿真和实验结果。浅色(绿色)线表示节点 1 的输入电压,深色(红色)线表示节点 10 的输出电压;(c) 电压放大倍数(输出/输入)的仿真和实验结果对比;(d) 电压放大倍数的实验结果相对于其仿真结果的误差百分比

压最优放大倍数为 $|\beta^{10}/\beta^1| = \beta^9 \approx 6.9$, 由于实验中存在损耗(电感元件的直流电阻以及线路的电阻)导致实际放大倍数偏低。为了定量分析这种误差, 定义误差为 $\text{实验误差} = \frac{\text{实验}-\text{仿真}}{\text{仿真}} \times 100\%$ 。实验误差如图 7(d)所示, 宽频实验误差均在 10% 以内, 符合预期结果。

3 结语

作为固体物理教学的重要改革手段, 项目式教学能有效激发学生学习兴趣, 破解能带理论抽象、理论与实践脱节的教学痛点。本文紧扣科学前沿的非厄米趋肤效应, 以“基于非厄米趋肤效应的电压信号放大器设计”为项目驱动, 引导学生主动钻研能带理论及紧束缚模型等核心知识, 跨学科融合固体物理、电子电工技术、量子力学与计算物理, 让学生全程参与可行性分析、仿真计算、样件加工及测试等实践环节, 且可在整个实践环节中融入人工智能。这一教学实践不仅深化了学生对能带理论与非厄米物理的理解, 锻炼了跨学科实践与科研能力, 更为固体物理及相关学科实现理论实践结合的教学转化提供了可行路径与有益指导。

参 考 文 献

- [1] 张真, 周通, 胡友友. “固体物理”中布洛赫振荡现象的数值仿真实验教学设计[J]. 教育教学论坛, 2025(47): 169-172.
ZHANG Z, ZHOU T, HU Y Y. Teaching design of numerical simulation experiment on Bloch oscillation phenomenon in “Solid State Physics”[J]. Education and Teaching Forum, 2025(47): 169-172. (in Chinese)
- [2] 李贵江, 石防震. 科学前沿融入固体物理课程助推科学家精神培育的探索与实践——基于课程思政视角[J]. 大学, 2025(30): 157-160.
LI G J, SHI F Z. Exploration and practice of integrating scientific frontiers into the Solid State Physics course to promote the cultivation of scientists' spirit—from the perspective of ideological and political education in curriculum[J]. University Education Science, 2025(30): 157-160. (in Chinese)
- [3] 陈俊臣, 于博, 郭秉淑. 问题驱动与虚拟仿真相结合的“固体物理”课程教学探索[J]. 教育教学论坛, 2025(10): 96-99.
CHEN J C, YU B, GUO B S. Exploration of teaching “Solid State Physics” course by combining problem-driven and virtual simulation[J]. Education and Teaching Forum, 2025(10): 96-99. (in Chinese)
- [4] 陈明星, 欧阳方平. 科研反哺教学的固体物理学课程教学改革与实践[J]. 物理与工程, 2023, 33(3): 10-13, 20.
CHEN M X, OUYANG F P. Reform and practice of teaching the Solid State Physics course with scientific research feeding back into teaching[J]. Physics and Engineering, 2023, 33(3): 10-13, 20. (in Chinese)
- [5] 张加永. 固体物理课程教学改革探讨与实践[J]. 教育教学论坛, 2019, (43): 96-98.
ZHANG J Y. Discussion and practice on the teaching reform of the Solid State Physics course[J]. Education and Teaching Forum, 2019(43): 96-98. (in Chinese)
- [6] 王红心, 谭德勇. 运用对比法学习固体物理学能带理论[J]. 教育现代化, 2019, 6(76): 177-178.
WANG H X, TAN D Y. Learning the energy band theory of Solid State Physics by using the comparison method[J]. Education Modernization, 2019, 6(76): 177-178. (in Chinese)
- [7] 刘玉格, 冯立峰, 孙文军. 基于 PBL 的初中物理跨学科实践教学——以“守护家乡的水循环系统”为例[J]. 中学物理, 2025, 43(24): 32-35.
LIU Y G, FENG L F, SUN W J. Interdisciplinary practical teaching of junior high school physics based on PBL—taking “Protecting the water cycle system of the hometown” as an example[J]. Middle School Physics, 2025, 43(24): 32-35. (in Chinese)
- [8] 李中凯, 张慧琴, 王鹏. 我国高校项目式教学热点、前沿与发展趋势[J]. 高教论坛, 2025(11): 26-33.
LI Z K, ZHANG H Q, WANG P. Hot spots, frontiers and development trends of project-based teaching in Chinese universities[J]. Higher Education Forum, 2025(11): 26-33. (in Chinese)
- [9] 王荣, 雷从一, 杨铨浩, 等. 融合 STEAM 与 PBL 的跨学科创新型人才培养模式研究[J]. 高教学刊, 2025, 11(32): 170-173, 179.
WANG R, LEI C Y, YANG C H, et al. Research on the interdisciplinary innovative talent training model integrating STEAM and PBL[J]. Journal of Higher Education Research, 2025, 11(32): 170-173, 179. (in Chinese)
- [10] 尹庆丰, 岳芸. 基于 PBL 的初中物理跨学科实践教学探索——以“自制天文望远镜”为例[J]. 物理教师, 2025, 46(8): 25-29.
YIN Q F, YUE Y. Exploration of interdisciplinary practical teaching of junior high school physics based on PBL—taking “Making a homemade astronomical telescope” as an example[J]. Physics Teacher, 2025, 46(8): 25-29. (in Chinese)