



微波阻抗变换器教学交互式系统开发及验证

谭兆祥¹ 岳玲娜¹ 龚梓杰¹ 尹鹏程¹ 魏彦玉¹ 顾晨² 赖凌峰³

(¹ 电子科技大学电子科学与工程学院, 四川 成都 611731;

² 清华大学物理系, 北京 100084;

³ 北京原力辰超导技术有限公司, 北京 100085)

摘要 针对“微波工程”多节阻抗变换器教学中理论抽象、传统近似设计精度不足及缺乏直观教学工具的问题, 本文开发了基于 Python 的综合设计与教学交互式系统。系统采用非线性方程数值求解及差分进化-序列最小二乘规划混合优化算法, 精准实现二项式与切比雪夫阻抗变换器设计, 突破大阻抗比误差局限; 集成图形界面, 支持“已知节数”“已知带宽”双模式, 实时输出阻抗序列、反射系数频响等关键参数。系统兼具工程精度与教学直观性, 有效弥合理论与实践鸿沟, 为微波阻抗变换教学演示与工程设计提供可靠支撑。

关键词 阻抗匹配; 二项式阻抗变换器; 切比雪夫阻抗变换器; Python; 教学工具

DOI: 10.27024/j.wlygc.2025.12.18.01

DEVELOPMENT AND VERIFICATION OF AN INTERACTIVE TEACHING SYSTEM FOR MICROWAVE IMPEDANCE TRANSFORMERS

TAN Zhaoxiang¹ YUE Lingna¹ GONG Zijie¹ YIN Pengcheng¹ WEI Yanyu¹ GU Chen² LAI Lingfeng³

(¹ the School of Electronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731;

² Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084;

³ Beijing Eastforce Superconducting Technology Company Ltd., Beijing 100085)

Abstract To address the limitations of traditional Coriolis-force experiments, such as coarse measurements and limited functionality, this study develops an intelligent platform for the demonstration and investigation of Coriolis dynamics. The platform adopts an end-cloud collaborative distributed architecture; the front end consists of an STM32 control unit and a K230 vision-acquisition module for multi-source data collection, while the PC-based back end integrates Bluetooth and Wi-Fi data transmission. By incorporating a YOLOv8-based object-detection model, the system enables real-time trajectory tracking and synchronous comparison between theoretical predictions and experimental measurements. Performance evaluation shows that the platform achieves a spatial resolution of 0.667mm/pixel, an end-to-end latency of less than 1.320s, and an R^2 value above 0.99 between YOLO-extracted experimental trajectories and theoretical trajectories over 50 repeated trials under identical conditions, demonstrating high precision, real-time performance, and strong reliability. Through two representative experiments—ball-motion deflection and fluid erosion—the platform supports both intuit-

收稿日期: 2025-12-18; 修回日期: 2026-02-04; 出版日期: 2026-05-20

通信作者: 岳玲娜, lnyue@uestc.edu.cn.

引文格式: 谭兆祥, 岳玲娜, 龚梓杰, 等. 微波阻抗变换器教学交互式系统开发及验证[J]. 物理与工程, 2026, 36(3): 79-86, 91.

Cite this article: TAN Z X, YUE L N, GONG Z J, et al. Development and verification of an interactive teaching system for microwave impedance transformers[J]. Physics and Engineering, 2026, 36(3): 79-86, 91. (in Chinese)

tive visualization of classical physical laws and in-depth exploration of complex nonlinear phenomena. By integrating the Mamba model with physics-informed neural networks (PINNs), together with semi-supervised learning and self-attention mechanisms, the platform can predict the outcomes of fluid-erosion experiments and infer the dominant physical mechanisms governing the erosion process directly from experimental data. This work provides a complete and practical solution for the modernization and intelligent upgrading of traditional physics experimental platforms.

Key words Impedance matching; Binomial impedance transformer; Chebyshev impedance transformer; Python; Educational tool

“微波工程”作为电子信息类专业的核心课程,其教学内容中关于阻抗变换器的理论与应用是双端口网络部分的关键模块^[1]。阻抗变换器主要用于改善因负载阻抗与传输线特性阻抗失配引起的信号反射问题,从而提升微波系统能量传输效率。在基础阻抗结构中,1/4 波长均匀传输线因其结构简单而成为典型实现形式,但受限于其单节频响特性,仅在窄频带内具有良好匹配效果。为应对宽频带匹配需求,多节阻抗变换器的设计理念应运而生,即通过增加传输线节数,在宽频域内优化整体反射特性。

在多节阻抗变换器的常见拓扑中,二项式与切比雪夫阻抗变换器因其独特的性能优势被广泛应用:二项式变换器依据二项式系数依次设计各级传输线的特性阻抗,在通带内形成最平坦反射响应;而切比雪夫变换器则基于切比雪夫多项式构建等波纹反射特性,能够在给定最大反射系数和电气长度下实现最优带宽。两者的理论与设计构成“多节阻抗变换器”章节的重点内容,同时也是学生理解的难点所在。

目前教学过程中存在以下突出问题:首先,二项式系数的推导与切比雪夫等波纹函数的数学表达较为抽象,传统课堂以静态公式推演为主,难以直观呈现阻抗分布与频响特性之间的关联性,使得学生难以形成“设计参数-性能响应”的系统认知;其次,受限于实验设备的物理条件,传统实验无法灵活调节阻抗节数、带宽要求及反射系数等多种参数组合,学生难以对理论设计进行验证,造成理论与实践的显著脱节^[3,4]。

此外,现有教学资源和相关研究同样存在明显局限性:多数教材采用“小反射近似”以简化推导流程^[6,7],然而当源阻抗与负载阻抗相差较大时,此方法将产生显著误差,无法帮助学生建立准

确的理论认知;部分研究虽实现了不依赖近似假设的精确建模,但其成果多以理论公式或离线脚本形式呈现,未能集成开发为交互式的教学工具,不利于学生快速获得设计结果并进行参数调试^[2,9,10];另有部分相关工具研究功能不全,仅涵盖单一变换类型(如仅二项式或切比雪夫),或仅支持已知节数或带宽之一的设计场景,无法全面支撑多元化的教学需求^[3,4,8]。

为克服上述教学难题,有效辅助学生建立对阻抗变换过程的空间和数学认识,本文构建了一款基于 Python 的多节阻抗变换器教学交互式系统。该系统主要具有以下特点:

(1) 采用 Powell 算法、差分进化算法(Differential Evolution, DE)与序列最小二乘规划法(Sequential Least Squares Programming, SLSQP)等数值优化策略,对传统小反射近似进行替代,实现阻抗序列的高精度设计^[5];

(2) 融合图形用户界面(GUI),同时支持二项式与切比雪夫两种变换类型的快速切换,以及“已知变换段数”和“已知目标带宽”两种设计模式的灵活选用;

(3) 支持实时输出关键数据,包括阻抗分布、反射系数幅频响应及实际带宽,从而实现多参数组合设计的即时验证。

通过该系统,学生能够观察频响与结构参数之间的关联,有效强化对微波匹配理论的理解深度,拓展课程学习中的实践维度,进一步促进理论与工程素养的双重提升。

1 系统设计详情

Python 驱动的微波阻抗变换器交互式设计

系统重点对二项式阻抗变换器和切比雪夫阻抗变换器这两类常用类型进行设计运算。

1.1 二项式阻抗变换器

对源阻抗 Z_0 , 负载阻抗 Z_L , 中间由 N 段 $1/4$ 波长阻抗变换段(由源到负载的特性阻抗分别是 $Z_1, Z_2, \dots, Z_N$)组成的阻抗变换器而言, 相邻段的特性阻抗满足关系为

$$Z_{n+1} = Z_n \left(\frac{1 + \Gamma_n}{1 - \Gamma_n} \right), \quad n=0, 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

其中, Γ_n 为 Z_n 与 Z_{n+1} 连接处的反射系数, 对于满足二项式分布的阻抗变换器, Γ_n 满足

$$\Gamma_n = A \cdot C_N^n \quad (2)$$

其中, A 为比例常数。为了求解 A , 在多数教材、论文与设计^[6,7]中, 往往通过式(3)~(4)两条近似条件下的变换, 来得到如式(5)所示的 A 的近似解为

$$|\Gamma_n| \ll 1, \quad \ln \left(\frac{1 + \Gamma_n}{1 - \Gamma_n} \right) \approx 2\Gamma_n \quad (3)$$

$$\begin{aligned} Z_L &\approx Z_0, \quad \ln \left(\frac{Z_L}{Z_0} \right) \approx 2 \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \\ &= 2 \sum_{n=0}^N \Gamma_n = 2A \sum_{n=0}^N C_N^n = 2^{N+1} A \end{aligned} \quad (4)$$

$$A \approx 2^{-N} \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (5)$$

实践证明, 在源与负载的特性阻抗相差过大时, 通过式(5)中 A 的近似解反演得到的特性阻抗误差极大, 得到的设计结果几乎无法实用。

而理想的二项式分布应满足

$$Z_L = Z_0 \prod_{n=0}^N \frac{1 + \Gamma_n}{1 - \Gamma_n} \quad (6)$$

将式(2)代入式(6), 可得到关于 A 的非线性方程

$$\frac{Z_L}{Z_0} = \prod_{n=0}^N \frac{1 + A \cdot C_N^n}{1 - A \cdot C_N^n} \quad (7)$$

求解这一公式得到精确的 A 值, 并由 A 得到各连接处的反射系数 Γ_n , 从而反演获得各节特性阻抗 Z_n 的值。

为了得到各节特性阻抗的精确值, 我们基于 Python 的 Scipy.optimize 库中的 Fsolve 函数构建数值求解, 采用了高效的 Powell 混合计算方法。该方法结合了信赖域(Trust Region)和线搜索(Line Search)策略的优势, 具备良好的全局收敛性和数值稳定性, 能够直接、稳定地求解源与负

载阻抗相差悬殊情况下的 A 值, 彻底避免了传统近似公式(式(5))在大阻抗比条件下引入的显著误差, 并明显提升了求解过程的鲁棒性和效率。在获得精确的 A 值后, 程序将依据式(1)~(2)所定义的递推关系, 逐级反演计算各节阻抗变换段的特性阻抗, 确保其按照理想的二项式分布与负载阻抗 Z_L 匹配。

图 1 为该二项式分布阻抗计算器的设计流程图, 图 2 则展示了在“已知变换段节数”模式(图 2(a))和“已知目标相对带宽”模式(图 2(b))下该系统的界面与运行结果。

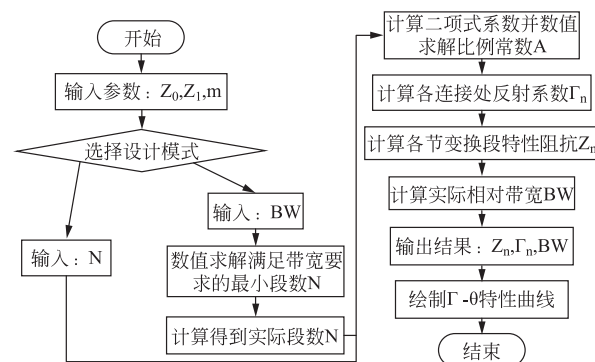


图 1 二项式阻抗变换器设计流程图

1.2 切比雪夫阻抗变换器

关于切比雪夫阻抗变换器的设计, 国内外主流教材与论文^[6,7]通常建立在“小反射理论”的近似基础之上。该理论的核心思想是: 在分析信号反射时, 仅考虑电磁波在每节传输线连接处发生的一次反射的贡献, 而忽略所有高阶多次反射(即多次反射信号)的影响。通过将所有这些一次反射信号在输入端进行线性叠加, 近似得到总的反射系数频率响应。

$$\Gamma = \Gamma_0 + \Gamma_1 e^{-2j\theta} + \Gamma_2 e^{-4j\theta} + \dots + \Gamma_N e^{-2Nj\theta} \quad (8)$$

其中 N 为切比雪夫阻抗变换段节数, θ 为每一节上的相位移。为了使该频率响应具备等波纹特性, 设计方法进一步令此近似反射系数的幅值响应与切比雪夫多项式函数成正比。

$$\Gamma = \Gamma_M \cdot T_N(\sec\theta_m \cdot \cos\theta) \quad (9)$$

$$\Gamma_M = \left| \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \right| \cdot \frac{1}{|T_N(\sec\theta_m)|} \quad (10)$$

$$T_N(x) = \begin{cases} \cos(N \cos^{-1}(x)), & |x| \leq 1 \\ \cosh(N \cosh^{-1}(x)), & |x| > 1 \end{cases} \quad (11)$$



图2 二项式阻抗变换器程序运行界面及结果
(a) “已知变换段节数”模式；(b) “已知目标相对带宽”模式

通过建立如式(9)~(11)所示数学关系(θ_m 对应通带的范围($\theta_m, \pi - \theta_m$)),可以最终确定出切比雪夫阻抗变换器各节的特性阻抗值。

然而,上述基于“小反射理论”的近似方法存在明显局限。该理论通过忽略高阶反射项来简化分析,在源阻抗和负载阻抗差距较小从而所需变换器节数较少时尚可保证一定精度,但当二者阻抗差距显著需要设计较多节变换器时,多次反射的累积效应将不可忽视。如果此时仅考虑一次反射,根据理论设计的阻抗变换器反射特性较差,无法实用。为此,本系统将多节阻抗变换器视为由多个具有不同特性阻抗的均匀传输线级联成的二端口网络,通过求解每一段传输线对应的转移矩阵 $[A]$,并利用矩阵乘法依次级联得到多节变换器的整体转移矩阵 $[A_N]$ ^[9-11]。

$$[A] = \begin{bmatrix} \cos\theta & jZ \sin\theta \\ j \frac{\sin\theta}{Z} & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$[A_N] = \prod_{k=1}^N \begin{bmatrix} \cos\theta & j \sin\theta Z_k \\ j \frac{\sin\theta}{Z_k} & \cos\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \quad (13)$$

式(12)~(13)所示矩阵完整包含了多次反射电磁波的所有相位信息,从而能够高精度地描述该网络的频域特性。进一步通过式(14)得到

$$Z_{in} = \frac{A_{11}Z_l + A_{12}}{A_{21}Z_l + A_{22}} \quad (14)$$

计算出网络的输入阻抗 Z_{in} ,并最终通过式(15)准确得到其反射系数满足式(9)的频率响应为

$$\Gamma = \left| \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \right| \quad (15)$$

同时为简化优化计算过程,引入变量映射关系

$$Z_i = \frac{R+1}{2} + \frac{R-1}{\pi} \arctan(x_i) \quad (16)$$

该公式将原本受物理约束的特性阻抗 Z_i (需为正值且在 Z_l 与 Z_0 之间)通过反正切函数映射到无约束的变量 x_i ($x_i \in (-\infty, +\infty)$),从而将一个有约束的优化问题转化为对 x_i 的无约束优化问题。优化的对象是最小化通带内精确反射系数与理想响应之间的误差。该误差由误差函数 F 来度量,其具体形式为在通带($\theta_m, \pi - \theta_m$)内采样若干频点 θ ,计算两反射系数差的绝对值并进行求和得到

$$F = \sum_{\theta} |\Gamma(\theta) - \Gamma_0(\theta)| = \sum_{\theta} f(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad (17)$$

通过优化变量 x_i 取值,使得该误差函数 F 的值最小化(即趋近0),从而最终确定实现最佳等波纹响应所需的各节特性阻抗 Z_i 。

针对该无约束优化问题,其优化算法总体流程图如图3所示,具体步骤为:

首先,通过单调指数渐变模型计算各节初始特性阻抗值,按公式

$$Z_i = \min\{Z_0, Z_l\} \times \left(\frac{\max\{Z_0, Z_l\}}{\min\{Z_0, Z_l\}} \right)^{\frac{i}{N+1}} \quad (18)$$

生成初始阻抗序列,再经反正切变换得到优化变量初始值;为了提高找到全局最优解的概率,还会给这个初始猜测添加一个小于5%的随机扰动。使用指数模型是由于其更接近实际阻抗分布,可以使优化算法更快迭代至最佳值;同时相较

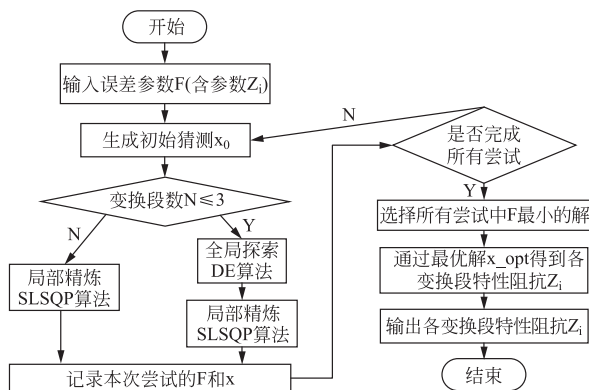


图3 切比雪夫阻抗优化算法

于切比雪夫系数,指数序列全域可导且无奇点,在边界频率点不会引发数值奇异,从而为优化提供稳定迭代基础。

当 $N > 3$ 时,由于优化问题相对规整,因此采用序列最小二乘规划(SLSQP)算法作为核心求解器。该算法作为一种高效的局部优化方法,能快速收敛至最优解。为提升全局搜索能力,算法还集成了多起点初始化策略,通过生成 20 个符合指数渐变规律的初始点(拥有基于指数模型的不同随机扰动)并执行多次独立优化,以规避局部极值,确保解的可靠性。

而对于 $N = 2$ 或 3 的情况,鉴于其解空间可

能呈现更强的非线性与多模态特性,单一的局部优化算法易陷入局部最优^[11]。因此,本文采用了差分进化-序列最小二乘规划(DE-SLSQP)混合优化策略。该策略适用于工程设计领域^[12],可以有效跳出局部最优陷阱并实现高精度收敛,本系统将其引入微波阻抗变换器的多变量优化设计中,将比传统方法更高效准确地得到传输线特性阻抗的优化设计。此项工作以往并无人开展。在具体实现上:首先利用差分进化算法(Differential Evolution, DE)进行全局探索。DE 算法^[12]通过群体迭代和交叉变异操作,能够在广阔的解空间内定位潜在的最优区域。其中,设置种群规模为 15,交叉概率为 0.8,变异因子为 0.7~1.2,最大迭代次数为 100,收敛容差为 $1e-4$,变异策略选取“best1bin”。随后,将 DE 的输出作为初始点,传递给 SLSQP 算法进行精细的局部搜索。其中,设置收敛精度阈值为 $1e-6$,最大迭代次数为 10000 次,步长为 $1e-6$ 。上述参数通过调试验证,在保证求解精度的同时兼顾计算效率。

图 4 展示了切比雪夫阻抗变换器程序运行界面及结果。与二项式阻抗变换器类似,它同样可以完成“已知变换段节数”和“已知目标相对带宽”两种模式下的相应设计。在 Intel i5-13600KF 平台实测时,当 $N \leq 7$ 时平均优化耗时低于 5 秒, $N < 10$ 时平均优化耗时低于 10 秒,可满足快速计



图4 切比雪夫阻抗变换器程序运行界面及结果

算与演示需求。

2 该系统计算方法与传统方法的比较

本节将对所开发系统的计算结果与传统“小反射近似”下的计算结果进行比较。

对二项式阻抗变换器,前文已明确该系统所用求解方法为精确数值求解,没有使用任何近似计算,因此得到结果的误差仅为计算机计算的数值误差,其主要包含截断误差(误差在 1.49×10^{-8} 量级时停止迭代)和舍入误差(约为 2.22×10^{-16})。

下面将二项式阻抗变换的传统方法和该系统计算方法得到的频响曲线进行对比,并加入理想频响曲线一同比较。

图5展示了负载特性阻抗为 50Ω ,源特性阻抗分别为负载的2倍、4倍、8倍情况下,使用传统方法与该系统计算方法的比较,并以理想频响曲线作为参照。可以看到:该系统计算方法与理想频响曲线基本重合,不受源与负载阻抗比变化的影响;对于传统方法,在源与负载的特性阻抗相差2倍时,得到的结果误差尚可接受,然而随源与负载的阻抗比增大到4倍甚至8倍后,传统方法的误差将显著增大,带来极大的计算误差。

类似地,图6展示了切比雪夫阻抗变换器在负载特性阻抗为 50Ω ,源特性阻抗分别为负载的2倍、4倍、8倍情况下的理想频响曲线、传统方法与该系统计算方法的比较结果。可以看到:该系统方法得到的频响曲线与理想频响曲线在设计带宽内基本重合(新方法考虑到实用性和复杂度,未在工作带宽外与理想分布曲线贴合);而对于传统方法,随着源与负载阻抗比增大,误差迅速增大。

为进一步验证本文设计系统所获结果在指导学生进行阻抗变换器设计方面的实际情况,以一个Ka波段矩形波导-脊波导-微带阻抗变换结构为例,将一个特性阻抗约为 400Ω 的WR-10波导通过四节脊波导逐步变换到 50Ω 的微带线上。分别将传统方法与系统计算得到的切比雪夫阻抗变换设计结果代入三维电磁仿真软件CST中,得到的 S_{11} 曲线比较如图7所示。可见与传统方法相比,本文所述系统使用的方法具备更高设计精度,

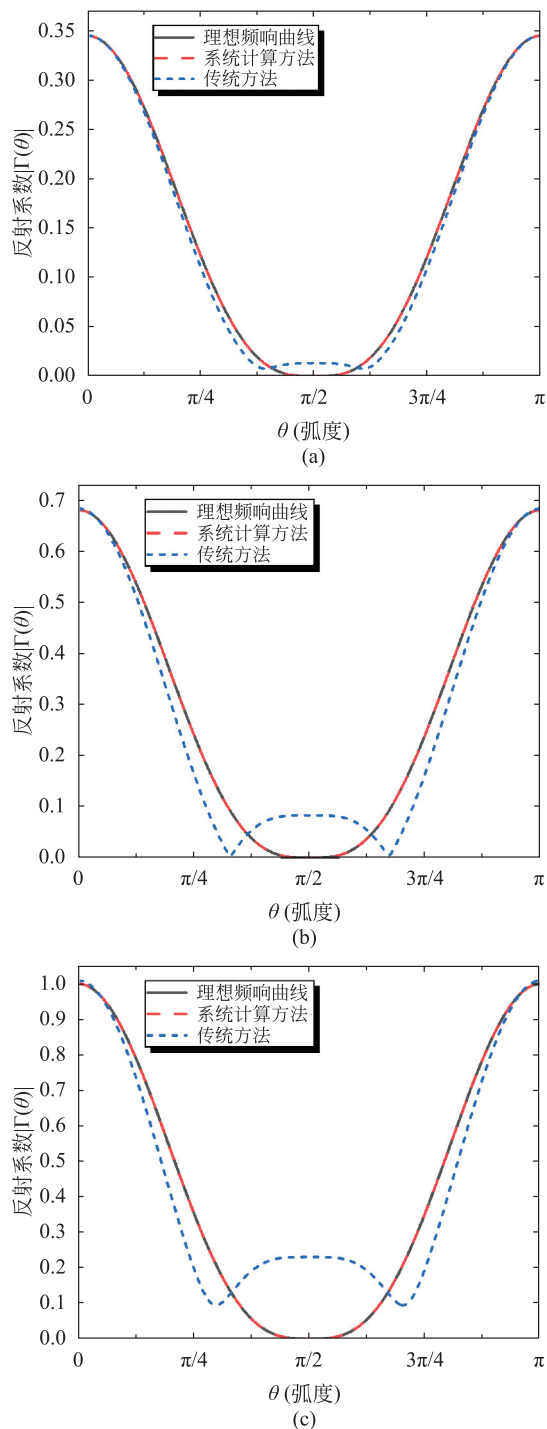


图5 二项式阻抗变换器的理想频响曲线、传统方法与系统计算方法比较

(a) 源与负载阻抗比为2时;(b) 源与负载阻抗比为4时;(c) 源与负载阻抗比为8时

能够让学生或者设计人员快速完成效果良好的阻抗变换器设计,尤其适合源与负载阻抗比较大的情况。

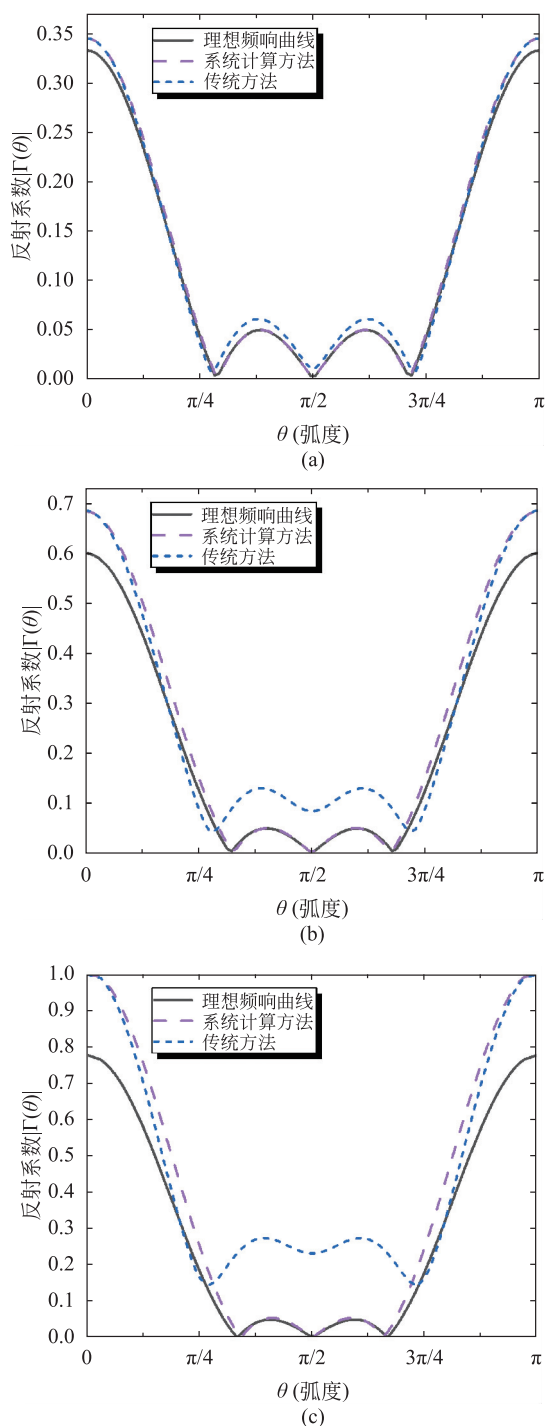


图6 切比雪夫阻抗变换器的理想频响曲线、传统方法与系统计算方法比较
(a) 源与负载阻抗比为2时；(b) 源与负载阻抗比为4时；(c) 源与负载阻抗比为8时

3 结语

针对“微波工程”课程“多节阻抗变换器”教学

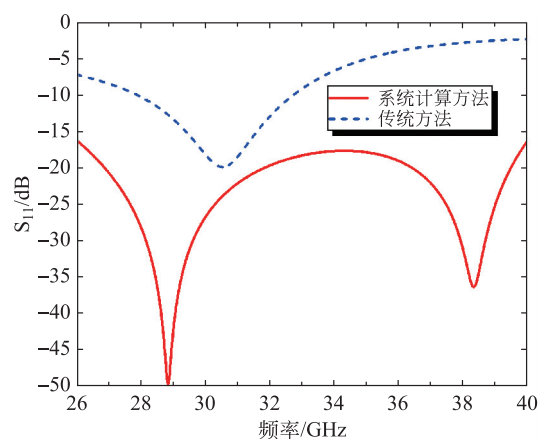


图7 矩形波导-脊波导-微带过渡结构的 CST 仿真

中存在的理论抽象、传统课堂缺乏直观演示手段，以及学生难以建立“参数设计-性能响应”有效关联的核心教学痛点，结合现有设计工具普遍存在的“小反射近似导致精度不足、功能单一、缺乏实操性”等问题，本文成功开发了一套基于 Python 的多节阻抗变换器综合设计与教学交互式系统。该系统以实现工程精准设计与教学直观演示的双重目标为导向，在方法与功能上实现了显著突破。

在计算精度方面，系统摒弃了传统教学中的近似公式，创新性地引入非线性方程求解与转移矩阵精确建模等高阶数值方法，并结合差分进化算法与序列最小二乘规划等高效优化策略，有效突破了传统设计的精度瓶颈，奠定了系统的专业基石。

在功能集成方面，系统全面集成了二项式与切比雪夫两种主流变换方式，并兼容“已知设计节数”与“已知目标带宽”双设计模式，能够实时输出包括特性阻抗序列、反射系数频响曲线及实际带宽在内的全套关键参数，满足了从基础教学到进阶设计的多层次需求。

在教学实践层面，系统通过构建友好的图形用户界面，实现了设计参数的可调交互与输出结果的多维度可视化，从而将抽象的阻抗匹配理论转化为一个可操作、可观察的动态认知过程。这一特性有效弥补了传统理论推导的静态局限与实验教学在场景覆盖上的不足。

3.1 系统价值与实践验证

实践应用结果表明，系统的计算结果与工程设计中的实际性能需求高度契合，能够为射频、微

波及天线设计等领域的阻抗匹配工作提供高效、可靠的工具支持。同时,其直观的交互体验与动态演示功能,显著降低了学生的学习与理解门槛,有力促进了学生从“理论学习”向“设计思维”的转变,为解决长期存在的理论实践脱节问题提供了有效方案。目前,该系统程序的 HTML 改版已上线至清华大学物理系数值仿真物理实验系统——Numerical Simulation of Experimental Physics (NuSEP)平台,如图 8 所示。感兴趣的读者可以直接登录 NuSEP 平台试用本程序,并结合本文内容对照参考阅读。

3.2 未来展望

展望未来,本系统在以下方面具有明确的拓展空间与深化潜力:

(1) 工程功能拓展:计划引入介质加载传输线、非均匀阻抗变换器等更为复杂的结构设计模块,以提升对多样化和前沿工程场景的支撑能力。

(2) 教学赋能深化:将进一步优化可视化交互逻辑,并开发虚拟仿真实验场景,以动态模拟传输线中的波反射等物理过程,增强教学的沉浸感与探究性。

(3) 共享与协同升级:致力于开发跨终端的线上共享版本,支持课堂集中演示、课后自主练习与师生远程协作探究,从而强化系统在“教学与科研深度融合”中的桥梁作用,为相关领域的人才培养与技术创新提供更全面的平台化支撑。

参 考 文 献

- [1] 贾春刚,郭雅,郭宏福,等. 电波测量课程“三性”实验教学改革与实践[J/OL]. 实验科学与技术, 1-8[2025-11-18].
JIA C G, GUO Y, GUO H F, et al. Reform and practice of experimental teaching on the “Three-Dimensional” of the radio wave measurement course[J/OL]. Experimental Science and Technology, 1-8[2025-11-18]. (in Chinese)
- [2] 周越,张国锋. 切比雪夫阻抗变换器的设计方法[J]. 大学物理, 2012, 31(11): 29-31.
ZHOU Y, ZHANG G F. Design method of Chebyshev transformer[J]. College Physics, 2012, 31(11): 29-31. (in Chinese)
- [3] 傅世强,汪阳,李婵娟. 基于 MATLAB 的射频微波电路阻抗匹配教学软件设计[J]. 中国现代教育装备, 2024(3): 68-71.
FU S Q, WANG Y, LI C J. Design of impedance matching teaching software of RF microwave circuits based on MATLAB[J]. China Modern Educational Equipment, 2024(3): 68-71. (in Chinese)
- [4] 廖臻,廖志斌,刘宇平. 基于 CST 仿真软件的阻抗匹配设计教学实验[J]. 实验技术与管理, 2021, 38(2): 204-207.
LIAO Z, LIAO Z B, LIU Y P. Teaching experiment of impedance matching design based on CST simulation software[J]. Experimental Technology and Management, 2021, 38(2): 204-207. (in Chinese)
- [5] 张风雷. 遗传算法与最小二乘法在实验数据处理中的对比研究[J]. 大学物理, 2007(6): 32-34.
ZHANG F L. The comparative analysis between the GA and the method of least squares in data processing[J]. College Physics, 2007(6): 32-34. (in Chinese)
- [6] 王文祥. 微波工程技术[M]. 2 版. 北京:国防工业出版社, 2014: 98-102.

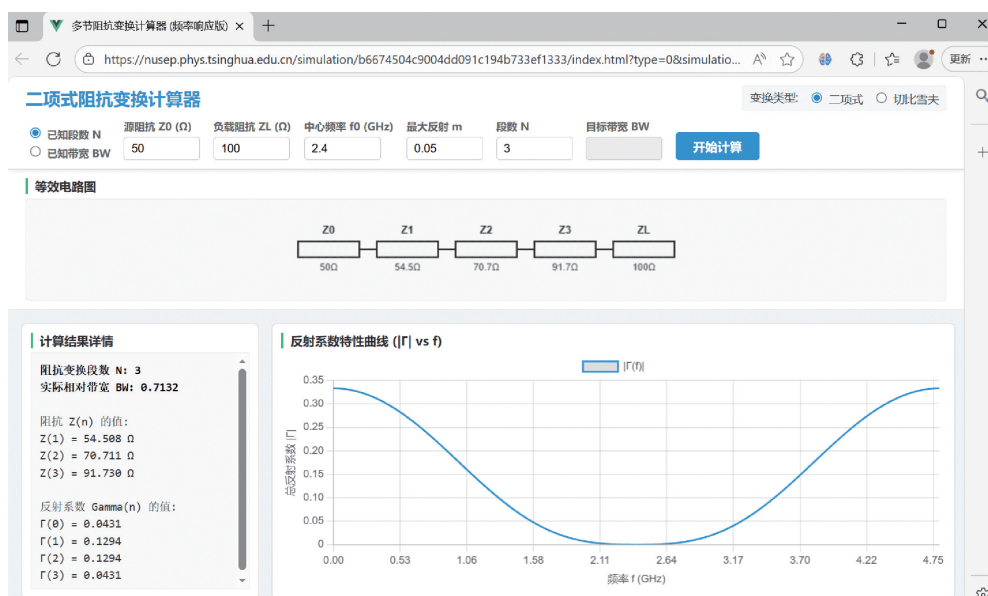


图 8 该系统在 NuSEP 平台的界面展示

(下转第 91 页)

$$dF = -PdV - SdT + \mu dN \quad (23)$$

按照规则 4), 可以写出内能对物理量的偏导数

$$\left(\frac{\partial U}{\partial S}\right)_{V,N} = T, \quad \left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_{S,N} = -P, \quad \left(\frac{\partial U}{\partial N}\right)_{V,S} = \mu \quad (24)$$

按照规则 5), 写出定容比热和定压比热

$$c_V = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_{V,N} = T \left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_{V,N} \quad (25)$$

$$c_P = \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_{P,\mu} = T \left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_{P,\mu} \quad (26)$$

将图 4(a) 中的四个特性函数去掉, 变成图 4(b)。我们来按照规则 6) 写出麦克斯韦关系式。

按照图 2(a) 的箭头, 增加的广延量保持不变, 写出麦克斯韦关系式如下

$$\left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_{T,N} = \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_{V,N}, \quad \left(\frac{\partial S}{\partial N}\right)_{T,V} = -\left(\frac{\partial \mu}{\partial T}\right)_{N,V} \quad (27)$$

按照图 2(b) 的箭头, 增加的强度量保持不变, 写出麦克斯韦关系式如下

$$\left(\frac{\partial V}{\partial S}\right)_{P,\mu} = \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_{S,\mu}, \quad \left(\frac{\partial N}{\partial \mu}\right)_{P,P} = -\left(\frac{\partial T}{\partial \mu}\right)_{S,P} \quad (28)$$

按照图 2(c) 的箭头, 增加的广延量保持不变, 写出麦克斯韦关系式如下

$$\left(\frac{\partial P}{\partial S}\right)_{V,N} = -\left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_{S,N}, \quad \left(\frac{\partial \mu}{\partial S}\right)_{N,V} = \left(\frac{\partial T}{\partial N}\right)_{S,V} \quad (29)$$

按照图 2(d) 的箭头, 增加的强度量保持不变, 写出麦克斯韦关系式如下

$$-\left(\frac{\partial S}{\partial P}\right)_{T,\mu} = \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_{P,\mu}, \quad \left(\frac{\partial S}{\partial \mu}\right)_{T,P} = \left(\frac{\partial N}{\partial T}\right)_{\mu,P} \quad (30)$$

以上的文字叙述, 如用语言教学一遍, 就很容易让学习者明白和掌握。

本文列出的记忆规则, 实际上也是对热力学基本公式的规律和特点的总结。

参 考 文 献

- [1] 龚昌德. 热力学与统计物理学[M]. 北京: 人民教育出版社, 1982.
- GONG C D. Thermodynamics and statistical physics[M]. Beijing: People's Education Press, 1982. (in Chinese)
- [2] 汪志诚. 热力学统计物理[M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2008.
- WANG Z C. Thermodynamics and statistical physics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2008. (in Chinese)
- [3] 王竹溪. 热力学简程[M]. 北京: 人民教育出版社, 1964.
- WANG Z X. Concise thermodynamics [M]. Beijing: People's Education Press, 1964. (in Chinese)
- (上接第 86 页)
- WANG W X. Microwave engineering technology[M]. 2nd ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2014: 98-102. (in Chinese)
- [7] POZAR D M. 微波工程[M]. 3 版. 张肇仪, 等, 译. 北京: 电子工业出版社, 2009: 209-219.
- POZAR D M. Microwave engineering[M]. 3rd ed. Translated by ZHANG Z Y, et al. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009: 209-219. (in Chinese)
- [8] 唐汉. 任意节数切比雪夫阶梯阻抗变换器的计算机辅助设计[J]. 南京大学学报(自然科学版), 1989(2): 267-287, 346.
- TANG H. The Computer-aided design of Chebyshev stepped impedance transformer with arbitrary sections numbers and arbitrary impedance ratio[J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences Edition), 1989(2): 267-287, 346. (in Chinese)
- [9] 沈致远. 微波技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1980: 169-173.
- SHEN Z Y. Microwave technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1980: 169-173. (in Chinese)
- [10] 王子宇. 微波技术基础[M]. 北京: 北京大学出版社, 2003: 122-129.
- WANG Z Y. Fundamentals of microwave technology[M]. Beijing: Peking University Press, 2003: 122-129. (in Chinese)
- [11] IZADIAN J S, IZADIAN S M. Microwave transistor amplifiers: Analysis and design[M]. Prentice Hall, 1987: 89-112.
- [12] STORN R, PRICE K. Differential evolution—A simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces[J]. Journal of Global Optimization, 1997, 11(4): 341-359.