中 北 大 学 学 报(自然科学版)
JOURNAL OF NORTH UNIVERSITY OF CHINA(NATURAL SCIENCE EDITION)

文章编号：1673-3193(XXXX)XX-0001-10

超声传能系统谐振频率动态跟踪电路设计及性能研究

卜嘉霖[1,2]，田　啸[1,2]，郭弘宇[1,2]，王旭阳[1,2]，穆继亮[1,2*]

(1. 中北大学 仪器与电子学院，山西 太原 030051；2. 中北大学 极限环境光电动态测试国家重点实验室，山西 太原 030051)

摘　要：谐振频率漂移与阻抗失配是制约超声波过金属壁高效能量传输的关键因素，针对不同频率应用场景，精准探明谐振频率点对提升超声传能系统宽频动态响应性能至关重要。本研究提出了一种超声无线传能系统谐振频率动态跟踪设计方法，为了提升能量转换效率，选用现场可编程门阵列(FPGA)控制器，构建了以氮化镓高电子迁移率晶体管(GaN HEMT)为核心的全桥逆变电路，结合设计的LC阻抗匹配网络，通过提升开关速度、降低损耗实现了优化的能量传输路径；为了高效跟踪换能器变负载下的最佳谐振状态，提出了基于扰动观察法的四阶段自适应最大功率点跟踪(MPPT)算法，通过粗扫、自适应搜索、微调优化与峰值验证相结合的递进搜索机制，实现了谐振频率的实时跟踪与锁定。结果表明，系统在尖锐谐振、宽谐振、不对称谐振和中等宽度谐振四种模型下，谐振频率跟踪误差均小于30 Hz，平均跟踪精度达99.96%。系统在变频率工作环境下具有良好的自适应性和传输稳定性，在穿过金属密闭腔体厚壁进行宽频范围超声能量传输方面具有显著应用潜力。

关键词：超声传能；谐振频率；阻抗匹配；最大功率点跟踪；FPGA

中图分类号：TB552　　**文献标识码：**A　　**doi:** 10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2025.12.0022

引用格式：卜嘉霖,田啸,郭弘宇等. 超声传能系统谐振频率动态跟踪电路设计及性能研究[J]. 中北大学学报(自然科学版),DOI:10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2025.12.0022.

Bu Jialin, Tian Xiao, Guo Hongyu, et al. Design and Performance Study of Dynamic Tracking Circuit for Resonant Frequency in Ultrasonic Energy Transfer Systems[J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition),DOI:10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2025.12.0022.

Design and Performance Study of Dynamic Tracking Circuit for Resonant Frequency in Ultrasonic Energy Transfer Systems

Bu Jialin[1,2], Tian Xiao[1,2], Guo Hongyu[1,2], Wang Xuyang[1,2], Mu Jiliang[1,2*]

(1. School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China;
2. State Key Laboratory of Extreme Environment Optoelectronic Dynamic Measurement Technology and Instrument, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Resonant frequency drift and impedance mismatch are critical factors that constrain high-efficiency ultrasonic power transfer through metallic walls. For applications operating at different frequencies, accurately identifying the resonant point is crucial for enhancing the broadband dynamic response per-

收稿日期：2025-12-23
基金项目：国家自然科学基金面上项目(52375554)。
作者简介：卜嘉霖(2001—)，男，硕士生，主要从事电源系统设计与传感监测技术的研究。
* **通信作者：**穆继亮(1978—)，男，教授，博士，主要从事智能微纳器件与系统的研究。E-mail：mujiliang@nuc.edu.cn。

formance of ultrasonic power transfer systems. This study proposed a dynamic resonant frequency tracking design method for an ultrasonic wireless power transfer system. To improve energy conversion efficiency, a field-programmable gate array (FPGA) controller was employed to construct a full-bridge inverter circuit with Gallium Nitride High Electron Mobility Transistor (GaN HEMT) as the core. Together with a dedicated LC impedance-matching network, the system improved the energy-transfer path by increasing switching speed and reducing losses. To efficiently track the optimal resonant state of the transducer under varying loads, a four-stage adaptive Maximum Power Point Tracking (MPPT) algorithm based on the Perturb and Observe method was proposed. Through a progressive search mechanism integrating coarse scanning, adaptive search, fine-tuning optimization, and peak verification, real-time tracking and locking of the resonant frequency were achieved. Experimental results demonstrate that, under four representative resonance models: sharp resonance, broad resonance, asymmetric resonance, and moderate-width resonance, the tracking error remains below 30 Hz, with an average tracking accuracy of 99.96%. The system exhibits excellent adaptability and transmission stability under variable-frequency operating environments, demonstrating significant application potential for broadband ultrasonic energy transfer through thick walls of sealed metal cavities.

Key words: ultrasonic power transmission; resonant frequency; impedance matching; maximum power point tracking; FPGA

0 引 言

随着无线能量传输技术的迅速发展，超声波传能凭借其在穿透性、方向性及安全性方面的独特优势，在植入式医疗设备、水下设备充电及密封结构体供电等特殊场景中展现出日益广泛的应用潜力。超声传能系统的能量传输效率与工作状态是否准确锁定在谐振点密切相关[1-2]。然而在实际应用中，尤其是在通过高损耗、高反射的材料进行超声无线能量传输时，往往面临严峻的工况挑战。在与复杂负载耦合后，换能器固有谐振频率会发生显著非线性偏移，呈现出高度非线性与不匹配特性。这种频率上的严重失配导致换能器的工作范围远离其标称最优效率点，从而导致能量传输效率急剧下降[3-4]。同时，阻抗特性的剧烈变化和波动，使得传统基于固定频率或简单相位锁定的控制策略失效，难以实现稳定高效的能量耦合。严重的失谐还可能引发功率器件应力过载、换能器过热甚至损坏，直接威胁系统的可靠性和寿命[5]。因此，研究出一种能够动态、精确地跟踪并适应由复杂负载状态引起的谐振频率偏移和阻抗特性波动，并确保系统始终工作在最大功率点的高性能控制策略，是实现高效、可靠超声无线能量传输的关键。

目前已有多种利用电流[6]、电压[7]、相位特征[8]或复合使用[9-10]的谐振频率跟踪方法[11]，但这些方法易受换能器和系统内部非理想损耗(如电阻损耗、介质损耗、机械损耗等)以及复杂阻抗特性的干扰，导致跟踪精度有限。而直接以输出功率为目标进行跟踪，能够更全面地包含损耗因素的影响，从而更精准地定位最佳工作点。通过直接功率跟踪，系统可自适应应对负载条件变化引起的谐振频率偏移和阻抗特性波动，始终保持高效率输出[12]。

扰动观察法(Perturb and Observe Method，P&O)是最大功率点跟踪算法(Maximum Power Point Tracking，MPPT)的经典实现方式之一，对硬件资源要求低，易集成于微控制器平台[13]。通过对系统工作参数周期性地施加小幅扰动，观测输出功率的变化方向，判断并调整工作点，最终可以收敛至最大功率点。然而，传统固定步长的P&O算法在动态性能与稳态精度之间存在矛盾：步长过小则跟踪速度慢，动态响应能力不足；步长过大则在稳态时最大功率点的附近会产生持续振荡，导致功率损失并影响系统稳定性[14]。为此，研究者提出了变步长P&O改进算法，依据系统实时状态动态调整扰动步长要求，当远离最大功率点时采用较大步长快速跟踪，接近最大功率点时自动切换为较小步长抑制振荡，从而可以在提升动态响应速度的同时确保良好的稳态精度[15-17]。这种改进策略增强了算法在复杂工况下

的鲁棒性，更适用于本文所研究的复杂环境变化导致谐振点频繁偏移的超声传能系统。

本文针对超声跨金属高效能量传输的需求，提出并搭建了一套基于MPPT的自适应谐振频率跟踪控制系统。系统以实时功率为目标，通过MPPT算法智能调整驱动频率，直接、高效地跟踪并维持换能器在变化条件下的最佳谐振状态。系统采用氮化镓高电子迁移率晶体管（High Electron Mobility Transistors，HEMT）全桥逆变电路来提升开关速度、降低损耗，通过搭建阻抗匹配网络并结合MPPT控制策略，在实现频率跟踪的同时增强对复杂工况的适应性与稳定性。本文基于现场可编程门阵列（Field Programmable Gate Array，FPGA）在VIVADO平台开展实验研究，实现了谐振频率的自适应实时跟踪，为复杂耦合条件下的超声跨金属高效能量传输提供了一种可靠的解决方案。

1 系统硬件电路设计

1.1 超声无线传能系统主电路原理

本文构建了一种基于金属介质的超声无线传能系统，图1为系统整体框图。在能量发送端，采用以FPGA为核心的数字控制架构，通过动态扫频与MPPT算法，生成高精度激励信号。该信号经全桥逆变拓扑，驱动基于逆压电效应的发射换能器将电能转换为超声波振动。超声波在金属介质中以机械波形式传播，被接收端换能器通过正压电效应捕获并转换为交流信号，随后经整流与稳压电路处理为稳定直流。系统通过高速模数转换器（Analog to Digital Converter，ADC）进行实时采样，实现了金属屏障条件下能量的自适应传输。

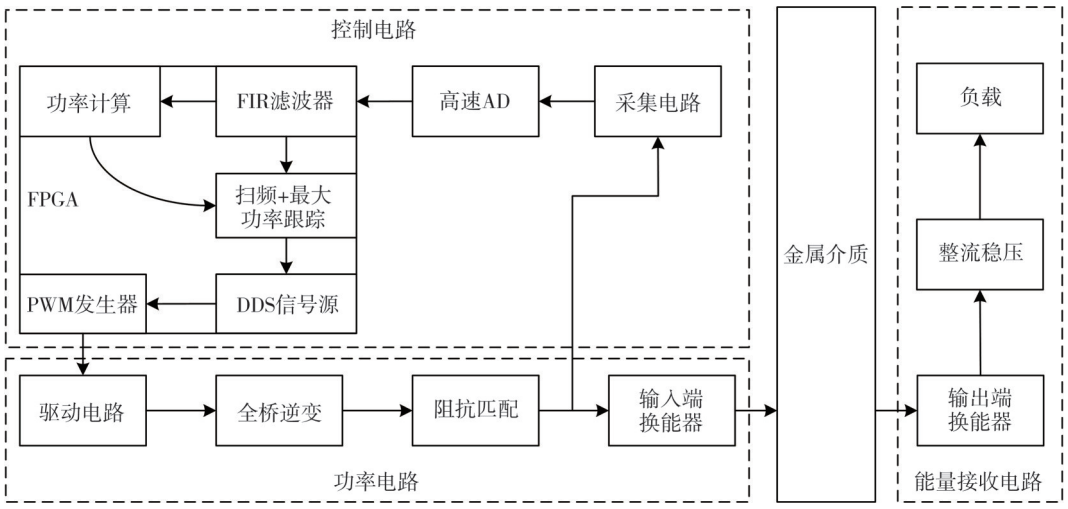


图1 超声无线传能系统框图

Fig. 1 Block diagram of ultrasonic wireless power transfer system

1.2 功率电路设计

全桥逆变器作为一种DC-AC功率变换拓扑，其基本工作原理是利用4个功率开关器件构成两个桥臂，整体形成一个“H”型结构，如图2所示。通过对4个开关器件进行时序控制，实现直流母线电压的极性反转，从而在输出端合成交流电压。在一个输出周期内，全桥逆变器交替工作在两种基本模式：正向电压输出模式下，对角导通上桥臂Q_1和下桥臂Q_3，此时直流电压正向施加于负载两端；负向电压输出模式下，对角导通另一对下桥臂的Q_2和上桥臂的Q_4，此时直流电压被反向施加到负载。通过周期性地在正向和负向电压输出模式之间快速切换，并控制每次切换的持续时间（即占空比），即可产生交流电压。切换的频率决定输出交流电的频率，通过每次切换时脉冲宽度的调整控制输出电压的幅值。

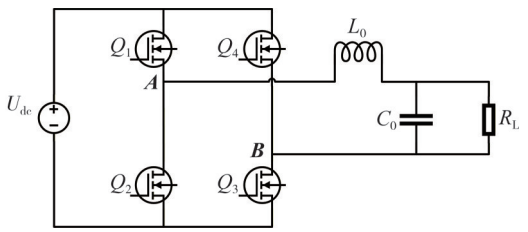


图2 全桥逆变电路

Fig. 2 Full-bridge inverter circuit

FPGA因其并行处理能力、高精度时序控制及灵活的可重构特性，被广泛用作数字控制核心。为了实现对输出电压波形的精确控制，本系统使

用FPGA实现逻辑控制，产生两对严格互补且带有可调死区时间的脉宽调制(Pulse Width Modulation，PWM)信号，分别驱动全桥拓扑中的4个功率开关管(Q_1～Q_4)的栅极。通过实时调节PWM信号的频率和占空比，可精确控制输出交流电压的频率和幅值。FPGA的硬件并行架构确保了PWM信号的高同步性与低抖动，提升了系统可靠性。结合输出侧的LC低通滤波器，能够将直流输入电压(U_{dc})高效转换为负载侧交流电压，确保输出电压具备良好的精度、稳定性和动态响应能力，满足不同负载和应用场景的需求。

在硬开关条件下，系统功率器件的总开关损耗主要由输出电容的充放电损耗与体二极管的反向恢复损耗构成，近似表示为

$$P_{sw}=\frac{1}{2}C_{oss}V_{ds}^2 f_{sw}+Q_{rr}V_{ds}f_{sw}, \tag{1}$$

其中，P_{sw}为总开关损耗；C_{oss}为器件的输出电容；V_{ds}为开关瞬态所承受的漏源电压；f_{sw}为开关频率；Q_{rr}为反向恢复电荷。由公式可知，降低C_{oss}与Q_{rr}是降低开关损耗，提升效率的关键。基于上述理论，本研究系统对比了传统硅基金属氧化物半导体场效应晶体管(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor，MOSFET)与GaN HEMT的关键参数，具体如表1所示。这些参数差异从根本上决定了二者在全桥逆变应用中的性能表现。

表1 硅基MOSFET与GaN HEMT性能参数对比表

Tab. 1 Comparison table of performance parameters for Silicon-based MOSFETs and GaN HEMTs

性能参数	硅基MOSFET	GaN HEMT	作用
反向恢复电荷	数百nC	趋近于0	消除反向恢复损耗
输出电容	较高	极低	降低开关损耗
栅极电荷	数十nC	极低(<10 nC)	显著降低驱动损耗
导通电阻温度系数	正温度系数显著	温度依赖性较低	维持系统输出能力与效率稳定性
开关速度	受Q_{rr}与C_{oss}限制	超快(<10 ns)	减少交越失真区域，降低谐波含量

结合式(1)与表1的对比分析，GaN技术清晰展现出系统性优势：首先，由于$Q_{rr}\approx 0$，公式中第二项被消除，不仅直接降低损耗，也从根本上消除了由反向恢复引起的振荡和电磁干扰(Electromagnetic Interference，EMI)噪声源。其次，极低的C_{oss}使公式中第一项大幅减小，从而允许系统在高频超声频率下仍能保持良好效率。

图3所示为本研究设计的基于GaN HEMT元件IGT60R070D1的全桥逆变功率电路。

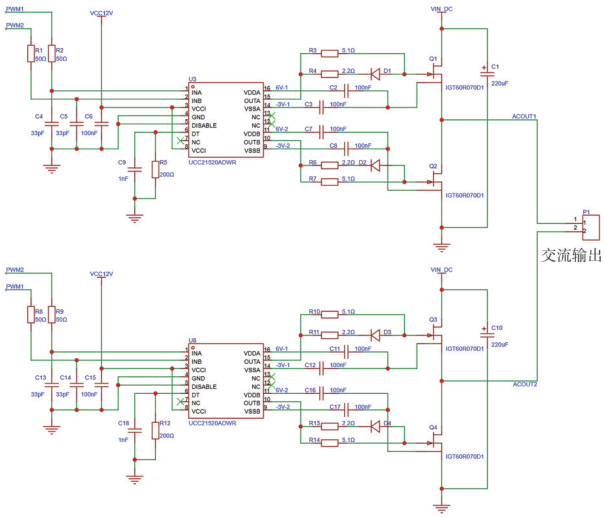


图3 基于GaN的全桥逆变功率电路

Fig. 3 Full-bridge inverter power circuit based on GaN

在本电路中，针对GaN HEMT低Q_g、高开关速度的特性选用UCC21520A作为驱动器，提供低阻抗、高瞬态电流的驱动能力。通过独立配置的栅极电阻调控开关过程的dV/dt，在实现高效率的同时有效管理EMI与电压过冲。本电路结合驱动设计和GaN HEMT各项性能优势，实现了效率、功率密度和动态响应的全面提升。

1.3 阻抗匹配设计

在能量从驱动源到负载的传输过程中，阻抗匹配是确保最大功率传输的关键。当源阻抗与负载阻抗不匹配时，部分能量会在源与负载之间发生反射，导致传输至负载的功率降低，系统效率下降。目前，常用的阻抗匹配方式包括串联电感、并联电感、LC型和CLC型阻抗匹配方式等[18]。其中，LC电路天然具备谐振特性，在LC谐振网络中，电容和电感分别提供容性和感性阻抗，通过合理配置L和C值，可以精确补偿换能器的电抗成分，形成高Q值谐振回路，使其整体阻抗在特定频率下呈现驱动电路所需的实部阻抗，从而实现共轭匹配。谐振回路在特定频率下具有很窄的带宽，能够更有效地聚焦能量，将驱动电路的能量高效耦合至换能器的谐振频率，从而提升能量传输效率。

超声换能器的等效电路如图 4 所示，其中，R_0为内部损耗（通常可忽略），C_0为静态电容，L_1为动态电感，C_1为动态电容，R_1为动态电阻[19]。

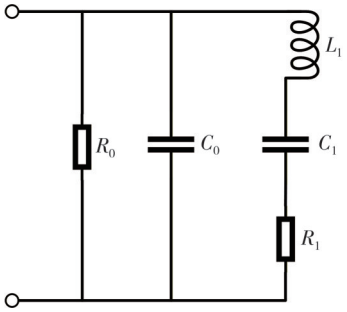


图 4　超声换能器等效电路

Fig. 4　Equivalent circuit of ultrasonic transducer

当驱动换能器使系统处于谐振状态时，等效为在LCR串联支路中仅剩余电阻分量，等效电路如图 5 所示。

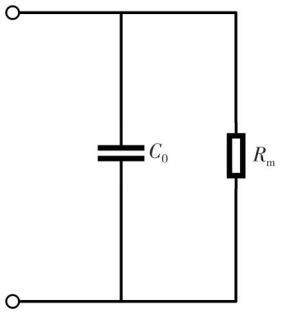


图 5　超声换能器谐振等效电路

Fig. 5　Resonant equivalent circuit of ultrasonic transducers

为确保换能器以最大功率传输，阻抗匹配网络需要将源阻抗Z_s与换能器的阻抗Z_L匹配。在实验验证中，电源阻抗默认为纯电阻性的50 Ω电力线阻抗（即$Z_s=R_s$）。如图 6 所示，通过LC匹配网络调整串联电感L_m和并联电容C_m，可实现换能器复阻抗与源阻抗的匹配。

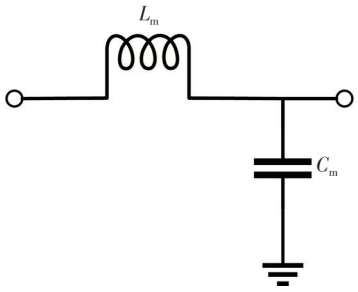


图 6　LC阻抗匹配网络

Fig. 6　LC impedance matching network

此时换能器阻抗Z_L可以表示为

$$Z_L=R_m+\frac{1}{j\omega C_0}, \tag{2}$$

式中：R_m为换能器谐振等效电阻；C_0为静态电容。

换能器电抗部分X_L由电容C_0决定，即

$$X_L=\frac{1}{j\omega C_0}, \tag{3}$$

式中：ω为角频率，$\omega=2\pi f$。

串联电感L_m和并联电容C_m分别为

$$L_m=\frac{X_L}{2\pi f}, \tag{4}$$

$$C_m=\frac{1}{2\pi f X_L}。 \tag{5}$$

通过调节电感和电容，使换能器阻抗与源阻抗匹配。在谐振频率下，换能器的电抗分量消失，阻抗仅由电阻成分决定，两端电压和流经的电流同相位，此时输出功率最大。因此，通过最大功率法跟踪谐振频率点可以确保换能器始终工作在最佳条件下，减少反射损失，提高能量耦合效率，避免因频率漂移引起的额外损耗。

1.4　采样电路设计

本系统中，交流电压的采样通过精密电阻分压网络实现。采用高精度、低温度系数的电阻构成串联分压电路，将较高的输入电压（V_{in}）线性衰减至ADC输入范围内，其关系为

$$V_{out}=V_{in}\times\frac{R_2}{R_1+R_2}。 \tag{6}$$

本系统中取R_1=200 kΩ，R_2=20 kΩ，分压比为10∶1，高输入阻抗（由R_1主导）减小对被测电路的影响，低输出阻抗（由R_2主导）增强带载能力。分压后的信号经过滤波与钳位保护，可以有效抑制高频噪声并防止过压冲击，最终送入ADC进行数字化，为后续电压有效值计算与功率分析提供原始数据。

电流采样选用具有高带宽（>1 MHz）、低失调电压和高共模抑制比的INA240A2电流检测放大器，通过测量流经100 mΩ精密采样电阻的电压降，将电流转化为小电压，并将其以50 V/V的固定增益放大输出，从而确保在高速开关和高共模电压环境下电流测量的准确性。将电压、电流信号差分输入ADC进行同步采样，以确保相位一致。

2　谐振频率动态跟踪方法研究

为解决系统谐振频率漂移问题，本文设计了一套基于扰动观察法的自适应跟踪控制系统，实现了对超声无线传能系统最大功率点的智能跟踪，确保系统始终工作在最佳谐振状态。

本文所提出的自适应MPPT算法采用分层递进的四阶段搜索策略，工作流程如图7所示。首先通过全频段粗略扫描快速锁定谐振区域；随后基于功率变化趋势进行自适应动态扫描，优化搜索路径；继而通过精细频率调节实现精确定位；最后经多点峰值验证确保所寻为全局最优谐振点而非肩峰。该策略适用于对频率敏感、具有尖锐谐振特性的负载，有效克服了传统方法在超声应用中收敛速度慢、易受干扰的局限性，显著提升了系统的稳定性和能量传输效率。

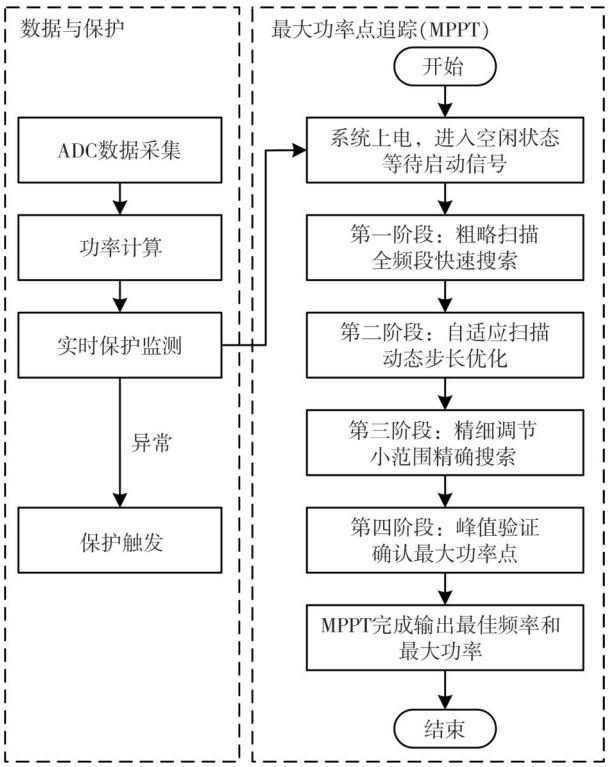


图7 谐振频率跟踪流程图

Fig. 7 Resonant frequency tracking flowchart

2.1 同步数据采集与实时功率计算

为实现电压与电流信号的精确同步测量，采用外部双通道10位ADC。设置10 MHz独立采样时钟，在FPGA内部构建专用的时钟域交叉同步电路，通过两级寄存器同步机制将两路ADC数据从采样时钟域同步至50 MHz主系统时钟域，避免了跨时钟域数据传输中的亚稳态问题，确保电压与电流采样点的严格时间对齐。

功率计算采用优化后的定点数值运算算法，在FPGA内部实现了高效的实时功率计算流水线。首先将原始10位ADC值通过线性标度变换转换为实际物理量：ADC原始码值0～1 023对应电压量程－5～＋5 V，电流量程对应0～1 000 mA。随后，通过专用乘法器阵列和移位寄存器组计算瞬时功率值，最终输出16位精度的功率结果。为提高抗干扰能力，在后级集成一个三级滑动平均滤波器，可以在保持功率变化趋势的同时，有效平滑随机波动，抑制测量噪声对功率计算的影响。

2.2 自适应MPPT算法设计

系统核心控制算法采用多阶段自适应搜索策略，将频率跟踪过程划分为粗扫描、自适应搜索、微调优化和峰值验证四个逻辑阶段，形成递进式的优化搜索流程。

2.2.1 粗扫阶段

粗扫阶段采用固定步长策略，以200 Hz步进，从起始频率20 kHz至终止频率60 kHz进行快速线性扫描。在每个频率测试点，系统稳定运行指定周期数后采集功率数据，通过比较分析确定谐振频率所在的大致区域，为后续精细搜索提供初始搜索起点。

2.2.2 自适应搜索阶段

在粗扫确定的谐振区域基础上，系统进入自适应变步长搜索模式。基于功率变化率动态调整搜索参数，频率更新公式为

$$f_{new}=f_{cur}+\Delta f\times d, \tag{7}$$

式中：f_{new}为下一周期频率；f_{cur}为当前周期频率；Δf为自适应搜索步长；d为搜索方向系数，取值为＋1(增大频率)或－1(减小频率)；步长Δf根据功率变化量ΔP动态调整。

$$\Delta f=\begin{cases}\Delta f_{max}, & \Delta P<-P_{th1},\\ \Delta f_{min}, & \Delta P\in[-P_{th2},P_{th2}],\\ \Delta f_{cur}+\delta, & \Delta P>P_{th3},\\ \Delta f_{cur}-\delta, & \Delta P\in(-P_{th1},-P_{th2})。\end{cases} \tag{8}$$

式中：P_{th1}，P_{th2}，P_{th3}为功率变化阈值；δ为步长调整量。当检测到功率显著上升趋势时，维持或适当增大搜索步长以加速逼近峰值；当识别到功率下降拐点时，适当减小步长并反转搜索方向，避免越过谐振点。

通过实时监测频率与功率的双重稳定性指标，准确判断收敛状态，表达式为

$$|f_{cur}-f_{pre}|<\Delta f_{th},\ |P_{cur}-P_{pre}|<\Delta P_{th}, \tag{9}$$

式中：f_{pre}为前一周期的工作频率；P_{pre}为前一周期的输出功率；f_{th}为频率收敛阈值；P_{th}为功率收敛阈值。当连续多个周期同时满足上述条件时，系统判定为已收敛，进入下一阶段。实际系统中设置

频率收敛阈值为5 Hz，功率收敛阈值为10 mW，连续稳定周期数为8。

2.2.3 微调优化阶段

在完成自适应搜索收敛后，系统执行两级微调优化：首先在最佳频率点附近进行中等范围的精确扫描，然后采用2 Hz精细步长进行最终定位。

2.2.4 峰值验证阶段

为确保搜索结果的全局最优性，在锁定频率点前后设置多个验证测试点，通过对比分析确认所发现峰值的真实性，避免局部极值误判。验证点设置在候选频率的±10 Hz、±5 Hz、±2 Hz以及中心点位置，通过比较各点功率输出再次确认全局最优性。

2.3 自适应PWM信号的生成

PWM生成模块提供可配置的输出通道，其工作频率由MPPT算法实时输出控制。采用三角波载波比较法生成PWM波形，通过引入最大频率变化率限制机制实现频率平滑过渡，避免频率突变。输出配置了可调死区时间保护，防止功率桥臂直通造成短路，同时输出控制信号采用50%固定占空比，优化了谐振驱动条件下的能量传输效率。

3 仿真与实验验证

3.1 仿真与分析

为了评估本研究中谐振频率动态跟踪系统的性能，在Xilinx VIVADO开发环境中，编写专用仿真测试程序，对核心设计代码进行仿真验证。仿真通过测试代码分别模拟了4种典型谐振特性的超声能量传输通道结构模型：中心频率为28.75 kHz的尖锐谐振峰、39.24 kHz的宽谐振峰、51.68 kHz的不对称谐振峰以及44.78 kHz的中等宽度谐振峰模型，如图8所示。模型中包括了实际超声换能器在理想负载、强耦合负载及复杂环境扰动下可能呈现的谐振形态。此外，采用高斯函数近似算法模拟换能器的电压电流响应特性，并引入可控随机噪声源，以模拟实际工作环境中的干扰因素对系统的影响。

在上述模型下，对所提出的四阶段自适应MPPT算法进行仿真测试，在4种不同谐振特性模型下的测试结果如表2所示。可以看出，最终频率跟踪误差均控制在30 Hz范围之内，平均跟踪精度达99.96%，其中宽谐振峰模型谐振频率跟踪精度达到100%，算法在4种谐振模型下均展现出良好的频率跟踪性能。

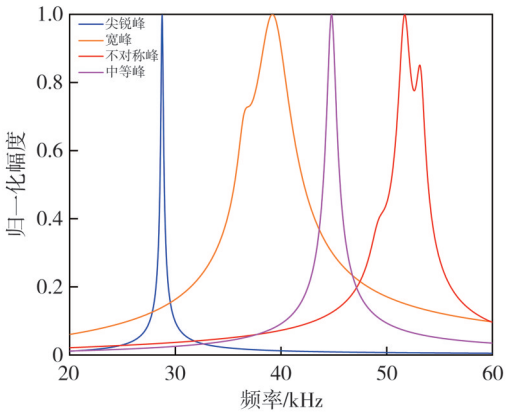


图8 4种典型谐振特性模型

Fig. 8 Four typical resonant characteristic models

表2 不同谐振特性模型下的谐振频率跟踪仿真结果

Tab. 2 Simulation results for resonant frequency tracking under different resonant characteristic models

谐振模型	期望谐振频率/Hz	测试谐振频率/Hz	频率误差/Hz	跟踪精度/%
尖锐谐振峰	28 750	28 770	20	99.93
宽谐振峰	39 240	39 240	0	100.00
不对称谐振峰	51 680	51 710	30	99.94
中等宽度谐振峰	44 780	44 800	20	99.96

对仿真结果进行处理，得到4种典型谐振特性模型下的谐振频率动态跟踪曲线，如图9所示。可以看出，在系统启动或环境变化后，控制算法均能够快速调整驱动频率并收敛至目标谐振点，整体收敛时间小于12 ms，尽管不同模型的谐振形态存在差异，但跟踪变化趋势基本一致。上述结果验证了算法在不同谐振特性条件下均具备良好的动态响应能力和稳定性，在系统谐振频率跟踪任务中表现出较高可靠性。

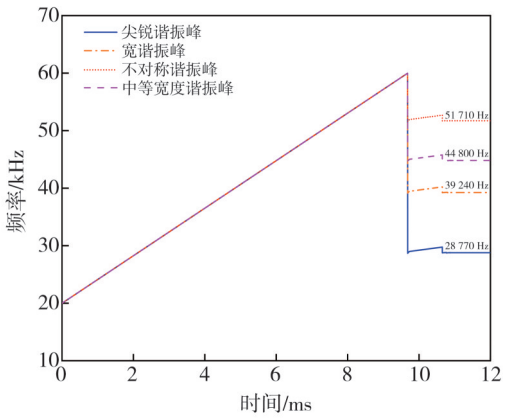
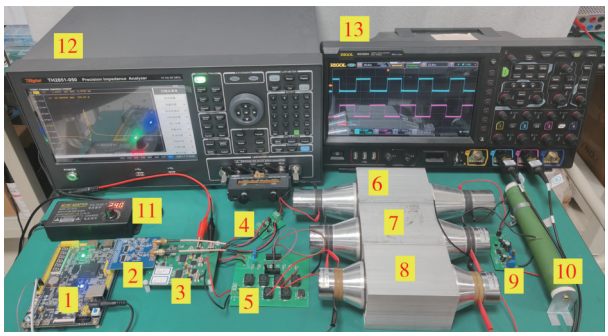


图9 4种模型谐振频率跟踪曲线

Fig. 9 Resonant frequency tracking curves for four models

3.2 实验系统搭建与验证

为了进一步验证所提出的谐振频率动态跟踪方法在实际超声无线能量传输系统中的可行性与有效性，搭建了完整的实验平台，如图 10 所示。



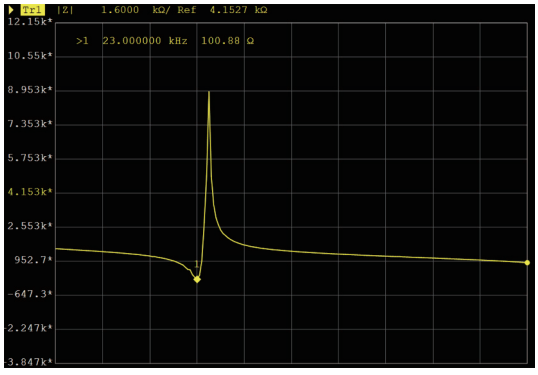
1—FPGA开发平台；2—AD模块；3—基于GaN的全桥逆变电路；4—采集模块；5—阻抗匹配模块；6—通道一；7—通道二；8—通道三；9—整流滤波模块；10—负载；11—直流电源；12—阻抗分析仪；13—示波器

图 10 实验平台

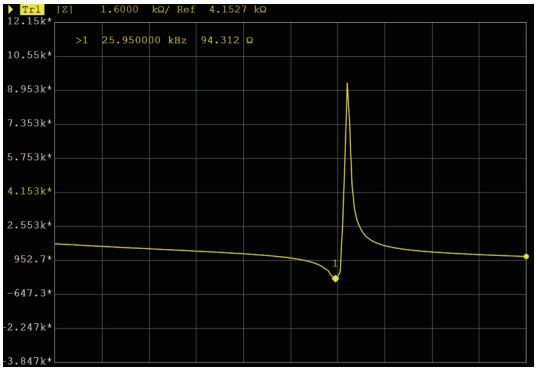
Fig. 10 Experimental platform

FPGA作为系统控制核心，负责PWM控制信号生成、功率计算与MPPT算法的实时执行。基于GaN HEMT的全桥逆变电路用于产生高频交流激励信号。3组传能通道由厚度为100 mm的铝壁及不同固有谐振频率的超声换能器构成。实验过程中，通过阻抗分析仪测量通道阻抗特性，并利用示波器观察跟踪后的系统输出的控制信号频率。

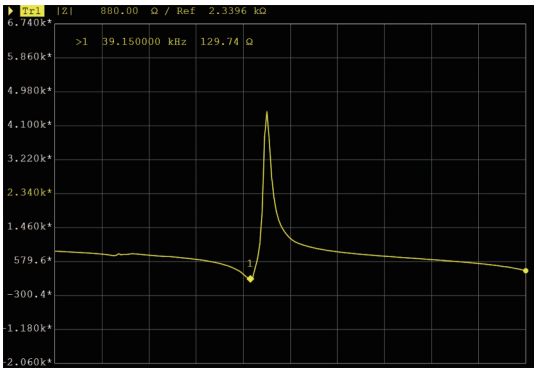
首先对3组超声传能通道的阻抗特性进行测试，结果如图 11 所示。由阻抗分析仪测得，3组通道的串联谐振频率分别为 23 000，25 950 和 39 150 Hz，对应图 11(a)、图 11(b) 和图 11(c)。该测试结果作为后续谐振频率动态跟踪实验的参考基准。



(a) 通道一



(b) 通道二

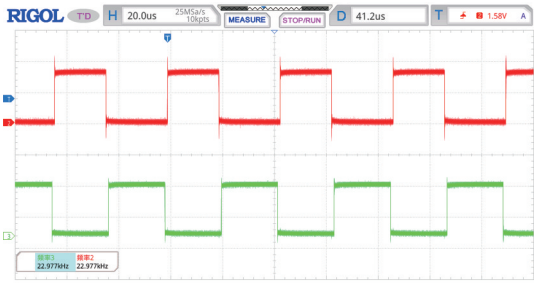


(c) 通道三

图 11 3组超声传能通道的阻抗特性测试结果

Fig. 11 Impedance characteristics of three ultrasonic energy transfer channels

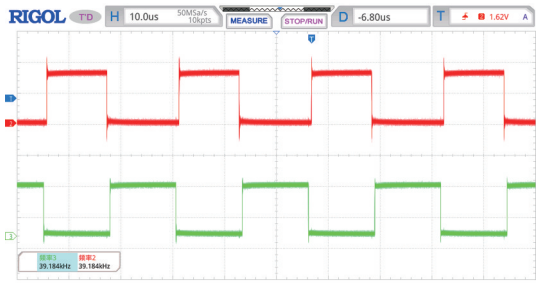
对于3组通道分别执行所提出的四阶段自适应谐振频率跟踪算法。在完成跟踪后，最终锁定控制信号频率如图 12 所示。通过示波器观察，3组通道跟踪后输出的控制信号频率分别为 22 977，25 906 和 39 184 Hz，对应图 12(a)、图 12(b)和图 12(c)。将图 12 中的跟踪结果与图 11 所示阻抗分析仪测量的谐振频率进行对比，其频率误差分别为23，44和34 Hz，频率跟踪精度均高于99.9%。相较于仿真结果，实验误差略有增加，主要是受实际系统工作中超声换能器和功率器件的非理想特性、仪器测量精度以及外部环境扰动等因素的影响。然而，在上述工况下，系统仍能够稳定锁定目标谐振频率。



(a) 通道一



（b）通道二



（c）通道三

图 12　3组通道的谐振频率动态跟踪实验结果

Fig. 12　Experimental results of resonance frequency tracking for three channels

表 3 所示为不同频率跟踪方法的性能对比结果，研究发现，在4种不同谐振模型下，本文所提自适应MPPT算法的平均精度为99.96%，收敛时间小于12 ms，且在20～60 kHz宽频范围内可实现对不同通道的稳定跟踪，其在精度、速度和宽频适用性方面具有一定优势。

表 3　不同频率跟踪方法的性能对照表

Tab. 3　Comparison table of the performance of different frequency tracking methods

研究方法	跟踪精度/%	收敛时间/ms	频率范围/kHz	参考文献
电流-相位	99.65～99.75	50	20	[10]
电流-相位	～99.13	70	40	[20]
PS-PWM	～99.86	—	32～36	[21]
神经网络预测	99.18	960	1 000	[22]
自适应MPPT	99.96	＜12	20～60	本文

4　结　论

基于超声换能系统因温度漂移、负载变化等导致的失谐问题，本文提出了四阶段自适应MPPT算法，通过分层搜索策略和动态参数调整机制，实现了对超声换能器最大功率点和谐振频率的精确跟踪与锁定。通过智能步长调整策略提升了搜索效率与精度。仿真验证表明，在4种典型谐振特性下，算法均能将频率跟踪误差控制在30 Hz以内。进一步搭建实验平台验证了算法在实际工况下的有效性，对3组不同谐振频率的超声传能通道进行测试，系统平均跟踪精度高达99.96%。结果表明，该方法在不同谐振特性下兼具高精度、较快收敛速度和较强适应性等特点。

本文设计的谐振频率动态跟踪系统，通过GaN　HEMT全桥逆变电路与FPGA数字控制架构的有效结合，在提升能量传输效率的同时实现了对谐振频率的实时跟踪。本文研究结果可为超声医疗设备、密闭设备供电和材料处理等领域的系统优化控制提供可靠的技术解决方案。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

参考文献：

[1] You K, Kim S H, Choi H. A class-j power amplifier implementation for ultrasound device applications[J]. Sensors, 2020, 20(8): 2273.

[2] Zhang H J, Wang F J, Zhang D W, et al. A new automatic resonance frequency tracking method for piezoelectric ultrasonic transducers used in thermosonic wire bonding [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2015, 235(9): 140-150.

[3] 林书玉. 超声换能器的原理及设计[M]. 北京：科学出版社, 2004.

[4] Graff K F, Sheehan J F. Power ultrasonic transducers: principles and design[M]. Amsterdam: Elsevier, 2023.

[5] Wang J D, Jiang J J, Duan F J, et al. A high-tolerance matching method against load fluctuation for ultrasonic transducers [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(1): 1147-1155.

[6] 刘敏宇，周玉斐，严宇，等. 可自动追频的双频超声波清洗电源[J]. 应用声学, 2026, 45(1): 39-45.
Liu Minyu, Zhou Yufei, Yan Yu, et al. Dual-frequency ultrasonic cleaning power supply with automatic frequency tracking[J]. Journal of Applied Acoustics, 2026, 45(1): 39-45. (in Chinese)

[7] 杜劲超，罗辞勇，肖洪伟，等. 基于最小电压法的超声换能器谐振频率自动跟踪[J]. 应用声学, 2013, 32(5): 336-340.
Du Jinchao, Luo Ciyong, Xiao Hongwei, et al. The minimum voltage method for resonant frequency automatic tracking of ultrasonic transducers[J]. Journal of

Applied Acoustics, 2013, 32(5): 336-340. (in Chinese)
[8] 金家欣. 基于FPGA的超声电源振幅控制系统设计与实现[D]. 上海: 上海交通大学, 2019.
[9] 左传勇, 杨明, 李世阳. 基于电流和相位差的超声换能器频率自动跟踪[J]. 应用声学, 2016, 35(3): 189-194.
Zuo Chuanyong, Yang Ming, Li Shiyang. Frequency tracking of piezoelectric transducer based on the current and phase difference[J]. Journal of Applied Acoustics, 2016, 35(3): 189-194. (in Chinese)
[10] Zhang J F, Ma K, Wang J J, et al. A fast and accurate frequency tracking method for ultrasonic cutting system via the synergetic control of phase and current [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2022, 69(2): 902-910.
[11] 范鹏, 周俊雄, 刘子源, 等. 超声波频率追踪方法综述[J]. 电声技术, 2022, 46(8): 1-5.
Fan Peng, Zhou Junxiong, Liu Ziyuan, et al. Overview of ultrasonic frequency tracking methods [J]. Audio Engineering, 2022, 46(8): 1-5. (in Chinese)
[12] 邓孝祥, 葛飞. 超声波电源匹配网络和频率跟踪系统的研究[J]. 通信电源技术, 2019, 36(11): 8-11.
Deng Xiaoxiang, Ge Fei. Research on matching network and frequency tracking system of ultrasonic power supply[J]. Telecom Power Technology, 2019, 36(11): 8-11. (in Chinese)
[13] Bidyadhar S, Raseswari P. A comparative study on maximum power point tracking techniques for photovoltaic power systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(1): 89-98.
[14] Bollipo R B, Mikkili S, Bonthagorla P K. Hybrid, optimal, intelligent and classical PV MPPT techniques: A Review[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2021, 7(1): 9-33.
[15] AHMED J, SALAM Z. A modified P&O maximum power point tracking method with reduced steady-state oscillation and improved tracking efficiency[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(4): 1506-1515.
[16] 吴振奎, 沈琦, 张祎文, 等. 光伏发电系统最大功率点控制策略的研究[J]. 电工技术, 2021(16): 56-58.
Wu Zhenkui, Shen Qi, Zhang Yiwen, et al. Research on maximum power point control strategy of photovoltaic power generation system[J]. Electric Engineering, 2021(16): 56-58. (in Chinese)
[17] 卢晓光, 李凤格, 刘伟鹏, 等. 光伏MPPT自适应策略研究及评估[J]. 电工电气, 2024, (12): 48-53.
Lu Xiaoguang, Li Fengge, Liu Weipeng, et al. Research and evaluation of adaptive strategies for photovoltaic MPPT[J]. Electrotechnics Electric, 2024, (12): 48-53. (in Chinese)
[18] 李璐. 超声无线电能传输系统功率传输特性及功率提升方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
[19] 蒋锟林. 压电换能器匹配电路的设计[J]. 电声技术, 2012, 36(9): 26-29.
Jiang Kunlin. Design of piezoelectric transducer matching circuit[J]. Audio Engineering, 2012, 36(9): 26-29. (in Chinese)
[20] 钱俊. 功率超声波电源频率跟踪系统设计[J]. 新型工业化, 2014, 4(8): 59-65.
Qian Jun. Design of a frequency tracking system for power ultrasonic generator[J]. The Journal of New Industrialization, 2014, 4(8): 59-65. (in Chinese)
[21] 屈百达, 屈环宇, 廖建庆. 基于可编程片上系统的宽频带超声波电源系统设计[J]. 声学技术, 2016, 35(3): 243-247.
Qu Baida, Qu Huanyu, Liao Jianqing. Design of broadband ultrasonic power supply system based on SOPC[J]. Technical Acoustics, 2016, 35(3): 243-247. (in Chinese)
[22] 隋修武, 蔡俊杰, 舒风华. 高频超声波系统智能控制技术[J]. 应用声学, 2024, 43(4): 783-790.
Sui Xiuwu, Cai Junjie, Shu Fenghua. Intelligent control technology of high-frequency ultrasonic system [J]. Journal of Applied Acoustics, 2024, 43(4): 783-790. (in Chinese)