

基于频率跟踪的超声波电源研究

李光洋

四川 德阳 618000

DOI: 10.61369/SSSD.2026060037

摘 要： 频率跟踪是影响超声波电源的重要技术指标，跟踪速度对焊接质量与效率具有直接影响。高频率的超声波能带来更好的处理效果，如在精密加工、医疗成像等领域。大功率的电源则能满足大型工业设备需求，提升生产效率。本文阐述频率跟踪的基本原理，分析频率跟踪对超声波电源的重要性，介绍常见频率跟踪方法，探讨基于三种频率技术的超声波电源的设计。经过仿真验证与实验得出，此方法在跟踪精度、响应时间、功率稳定性上表现出色，适配现实应用需求。

关 键 词： 频率跟踪；超声波电源；控制方法

Research on Ultrasonic Power Supply Based on Frequency Tracking

Li Guangyang

Deyang, Sichuan 618000

Abstract： Frequency tracking is a crucial technical indicator affecting ultrasonic power supplies, and the tracking speed has a direct impact on welding quality and efficiency. High-frequency ultrasound can achieve better processing results, such as in precision machining, medical imaging and other fields. High-power power supplies can meet the needs of large-scale industrial equipment and improve production efficiency. This paper elaborates on the basic principle of frequency tracking, analyzes its importance to ultrasonic power supplies, introduces common frequency tracking methods, and discusses the design of ultrasonic power supplies based on three frequency technologies. Through simulation verification and experiments, it is concluded that this method performs excellently in tracking accuracy, response time and power stability, and is suitable for practical application requirements.

Keywords： frequency tracking; ultrasonic power supply; control methods

近年来，随着数字技术和智能控制算法的飞速发展，频率跟踪技术取得了重大突破。数字信号处理（DSP）、现场可编程门阵列（FPGA）等先进技术被广泛应用于超声波电源中，实现了更加灵活、精准的频率跟踪。同时，智能控制算法如模糊控制、神经网络控制等的引入，进一步提升了频率跟踪的性能，使超声波电源能够更好地适应复杂多变的工作环境。

一、频率跟踪的基本原理

频率跟踪旨在让超声波电源输出频率紧跟换能器谐振频率变化，确保系统高效稳定运行，常见的频率跟踪原理有基于相位差和电流反馈等^[1]。基于相位差的原理是利用换能器两端电压与电流的相位关系，控制电路依据相位差的大小和方向，相应地调整电源输出频率，使相位差趋近于零，从而让电源输出频率与换能器谐振频率重新保持一致，实现频率跟踪。基于电流反馈的原理则聚焦于换能器电流的变化^[2]。控制系统根据预设的电流阈值和实际检测到的电流值进行比较分析，判断频率是否偏离谐振点。若偏离，控制系统会调整电源输出频率，使电流恢复到谐振状态下的设定值，以此保证电源输出频率始终跟踪换能器的谐振频率^[3]。

二、频率跟踪技术的重要性

频率跟踪技术对超声波电源意义重大。在提升效率方面，换能器工作时，其谐振频率会因发热、负载变化等因素漂移。若超声波电源输出频率与换能器谐振频率不一致，电能到声能的转换效率就会降低。频率跟踪技术能实时调整电源输出频率，使之与换能器谐振频率保持一致，确保能量高效转换，减少电能损耗，提高能源利用率^[4]。

在稳定性上，频率跟踪技术可有效避免因频率失配引发的系统不稳定。当电源输出频率偏离换能器谐振频率时，可能导致系统振动异常、噪声增大，甚至引发设备故障。通过频率跟踪，能使超声波电源在各种工况下都保持稳定运行，降低设备损坏风

险，延长设备使用寿命。

频率跟踪技术还能增强超声波电源对不同工作环境和负载条件的适应性，确保在复杂多变的实际应用场景中，都能可靠、高效地工作，为超声波技术在各领域的广泛应用提供有力支撑。

三、常见频率跟踪方法分析

（一）锁相法

频率跟踪精度较高，能够实现较为精确的频率锁定，可使电源输出频率与换能器谐振频率高度匹配，有效提升系统的稳定性和能量转换效率。跟踪速度相对较快，能够在短时间内对频率变化做出响应，适应一定程度的频率波动^[9]。技术相对成熟，在实际应用中积累了丰富的经验，可靠性有一定保障。

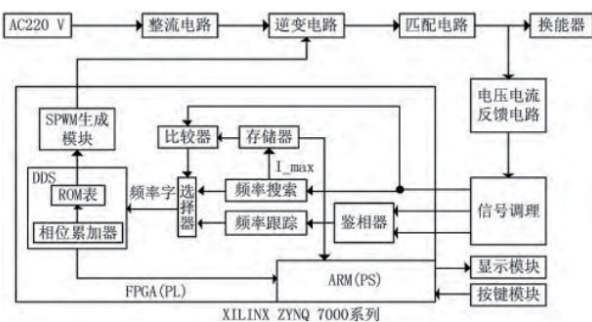
（二）双参数联合控制法

结合了相位和电流等多个参数的信息，综合判断频率是否处于谐振状态，相比单一参数控制更加准确可靠，能有效扩大频率跟踪范围。对多峰超声振动系统具有较好的适应性，可在不同的谐振峰之间实现稳定的频率跟踪，提高了系统的通用性。控制策略相对灵活，可以根据不同的应用场景和需求。

四、基于不同技术的频率跟踪超声波电源设计

（一）基于FPGA的宽频超声波电源设计

基于FPGA的宽频超声波电源系统主要由FPGA芯片、信号调理电路、功率放大电路、换能器以及反馈检测电路等部分构成，其工作流程如下：首先，FPGA芯片根据预设的参数和反馈信号，生成特定频率和占空比的PWM信号。这些PWM信号经过信号调理电路进行电平转换、滤波等处理后，输入到功率放大电路。功率放大电路对信号进行功率放大，将放大后的信号施加到换能器上，驱动换能器产生超声波。在换能器工作过程中，反馈检测电路实时采集换能器的电流、电压等信号，并将这些信号反馈给FPGA芯片。FPGA芯片根据反馈信号，实时调整PWM信号的频率和占空比，以实现超声波电源输出频率的精确控制和跟踪^[6]。



图：宽频超声波电源系统结构图

基于FPGA的宽频超声波电源具有显著优势。FPGA具有高度的灵活性和可重构性，能够方便地实现各种复杂的控制算法和功能，适应不同的应用需求^[7]。通过对FPGA进行编程，可以轻

松调整超声波电源的输出频率范围、精度以及其他性能参数。此外，FPGA的处理速度快，能够实时响应换能器的频率变化，实现快速的频率跟踪。同时，基于FPGA的设计还可以减少硬件电路的复杂度，提高系统的可靠性和稳定性，降低成本，为超声波电源在宽频领域的应用提供了有力支持。

（二）基于微分环节锁相环的超声波电源设计

传统锁相环在面对快速变化的频率时，可能存在响应速度不足、跟踪精度受限等问题。微分环节的引入，旨在增强锁相环对频率变化的敏感度和响应能力^[8]。通过对输入信号进行微分处理，能够更敏锐地捕捉到频率的微小变化趋势，从而为后续的频率调整提供更准确的依据。首先要对超声波电源输出频率和换能器的谐振频率进行初调节匹配，为后续精确跟踪奠定基础。接着，检测换能器输出的电流信号，该信号将作为微分环节锁相环的输入信号。利用专门的电路或算法对输入的电流信号进行微分运算，得到反映频率变化率的信号。将此微分信号与锁相环的其他部分协同工作，通过鉴相器比较输入信号与反馈信号的相位差，再经过环路滤波器对误差信号进行处理，最终根据处理后的信号生成驱动信号。这种设计增强了电源对不同负载条件和工作环境的适应性，确保在复杂工况下依然能稳定、高效地工作，提升了整个超声波电源系统的性能和可靠性。

（三）基于模糊PI控制技术的超声波电源设计

在超声波电源设计中，模糊PI控制技术为实现高效、稳定的频率跟踪提供了新的途径。其硬件电路设计是实现该控制技术的基础^[9]。硬件电路主要包括信号采集模块、微控制器、驱动电路以及功率放大电路等部分。信号采集模块负责采集换能器的电流、电压信号以及电源的输出频率信号等关键参数。这些信号经过调理后，被传输至微控制器。微控制器作为核心部分，采用具备强大运算能力的芯片，如高性能的单片机或DSP芯片，以满足模糊PI控制算法的复杂运算需求。它接收采集到的信号，并依据模糊PI控制算法进行处理，生成相应的控制信号。驱动电路则将微控制器输出的控制信号进行放大和转换，使其能够驱动功率放大电路中的功率器件，如MOSFET等。功率放大电路将输入的信号进行功率放大，为换能器提供足够的能量，确保换能器能够正常工作。软件程序设计是模糊PI控制技术的核心。需要对采集到的信号进行分析和处理，获取频率偏差和偏差变化率等关键信息。然后，将这些信息作为模糊PI控制器的输入变量。在模糊PI控制器中，通过定义模糊集合和隶属度函数，将精确的输入变量模糊化。通过硬件电路与软件程序的协同工作，模糊PI控制技术能够有效提高超声波电源的频率跟踪性能，增强系统对不同工况的适应性，实现稳定、高效的运行^[10]。

五、频率跟踪超声波电源的性能测试与实验分析

为深入探究频率跟踪超声波电源性能，开展具体实验。实验选用基于FPGA的宽频超声波电源作为测试对象，搭配特定型号换能器，设定负载条件模拟实际应用场景。

实验过程中，先对频率跟踪范围进行测试。逐步改变换能器

谐振频率，从较低频率缓慢提升至较高频率，同时观察电源输出频率的跟踪情况。实验数据显示，在轻负载条件下，电源能够稳定跟踪换能器谐振频率从 20kHz 到 80kHz 的变化范围；在重负载条件下，频率跟踪范围略有缩小，为 25kHz 到 75kHz。这表明该电源在不同负载下均具备一定的频率跟踪能力，且轻负载时表现更优。

接着测试频率跟踪精度。在多个不同频率点上，使用高精度频率测量仪器分别测量电源输出频率和换能器谐振频率。经多次测量统计，在整个频率跟踪范围内，频率偏差平均值控制在 $\pm 50\text{Hz}$ 以内，最大值不超过 $\pm 100\text{Hz}$ 。这一结果说明电源输出频率与换能器谐振频率接近程度较高，频率跟踪精度良好。

响应时间测试方面，通过瞬间改变换能器谐振频率，记录电源输出频率的响应情况。多次实验数据表明，电源对换能器谐振频率变化的平均响应时间约为 50ms，能够快速对频率变化做出响应。

在输出功率稳定性测试中，在不同频率和负载条件下，电源输出功率波动范围控制在 $\pm 3\%$ 以内，展现出较好的输出功率稳定性。

综合实验数据与结果可知，基于 FPGA 的宽频超声波电源在频率跟踪范围、精度、响应时间以及输出功率稳定性等方面均有出色表现，能够满足多数实际应用场景的需求。

六、结论

综上所述，基于 FPGA 的宽频超声波电源虽性能良好，但仍有可提升空间。频率跟踪精度虽能满足多数场景，但在一些对精度要求极高的应用中，仍有优化必要。这或许是反馈检测电路存在一定噪声干扰，影响了信号的准确性。可增加信号滤波环节，采用更先进的滤波算法，去除噪声干扰，提高反馈信号的质量。响应时间方面，虽然平均响应时间较短，但在某些快速频率变化的场景下，可能还不够迅速。可进一步优化 FPGA 的控制算法，减少信号处理的延迟，提高系统对频率变化的响应速度。输出功率稳定性方面，虽波动范围在可接受范围内，但为了适应更复杂的工况，可引入智能功率调节算法，根据负载和频率变化实时调整功率输出，进一步提高输出功率的稳定性。

参考文献

- [1] 邓孝祥, 刘晓东. 超声波电源频率跟踪系统的研究 [J]. 中国新技术新产品, 2024, (02): 11-13.
- [2] 康智斌. 超声波电源频率闭环跟踪控制方法 [J]. 电力电子技术, 2023, 57 (02): 44-46+104.
- [3] 姜朝晨, 王洪岩, 高国丽. 超声波电源控制系统的研究 [J]. 无线互联科技, 2022, 19 (23): 42-44.
- [4] 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 (08): 1-5.
- [5] 彭皆彩, 王宾, 石晓艳, 等. 基于高精 PWM 的超声波电源频率跟踪控制 [J]. 佳木斯大学学报 (自然科学版), 2021, 39 (03): 137-140+158.
- [6] 刘宁庄, 张宏滨, 许龙, 等. 基于 FPGA 的超声波电源功率测量研究与设计 [J]. 电力电子技术, 2022, 56 (10): 69-71.
- [7] 付为伟, 黄海波, 冯浩文, 等. 基于 FPGA 的超声波焊接电源信号源设计 [J]. 湖北汽车工业学院学报, 2022, 36(01): 52-57+62.
- [8] 刘宁庄, 张文婧, 许龙, 等. 数字锁相环频率跟踪控制方法的优化设计 [J]. 电力电子技术, 2023, 57 (11): 19-22.
- [9] 黄秋霖. 基于模糊 PI 的超声电源频率跟踪系统研究 [J]. 现代计算机, 2019, (28): 80-83.
- [10] 李素玲, 白书华. 基于模糊 PI 算法的频率自动控制系统设计 [J]. 南昌大学学报 (理科版), 2022, 46 (05): 577-582.