

兆赫兹超声波换能器匹配电路的研究与设计

阙凌凡, 林抒毅, 黄晓生, 沈焜, 李世茂

(福建理工大学 电子电气与物理学院, 福建 福州 350118)

摘要: 以兆赫兹超声波换能器为研究对象, 提出一种基于空心变压器的超声波换能器匹配电路设计。该匹配电路利用空心变压器等效励磁电感在谐振频率下与换能器进行阻抗匹配, 从而使负载网络近似弱感性, 使电压相位略超前于电流相位, 实现逆变电路开关管零电压开通, 减小无功损耗。分析相同匝数的 Litz 线与漆包线的阻抗特性, 并对比了不同绕组材料对空心变压器高频损耗的影响。通过仿真分析与实验, 搭建一台 1 MHz 超声波换能器驱动样机, 实现在额定频率下超声波换能器的驱动波形正弦度高, 电压峰峰值达到 221.7 V, 瞬时功率达到 1 288.7 W。证明了所设计的超声波换能器匹配电路的可行性, 解决了兆赫兹频率下超声波换能器驱动研制和阻抗匹配设计困难的问题。

关键词: 超声波电源; 兆赫兹; 空心变压器; 阻抗匹配

中图分类号: TB552

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2025)03-0254-06

Research and design of matching circuit for megahertz ultrasonic transducer

QUE Lingfan, LIN Shuyi, HUANG Xiaosheng, SHEN Kun, LI Shimao

(School of Electronic, Electrical Engineering and Physics, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: Taking the megahertz ultrasonic transducer as the research object, a design of the matching circuit for ultrasonic transducer based on the air core transformer is proposed. This matching circuit utilizes the equivalent excitation inductance of the air core transformer at the resonant frequency to perform impedance matching with the transducer, thereby making the load network approximately weakly inductive, causing the voltage phase to slightly precede the current phase, achieving zero-voltage turn-on of the inverter circuit switch tube and reducing reactive power loss. The impedance characteristics of Litz wire and enameled wire with the same number of turns are analyzed, and the influence of different winding materials on the high-frequency loss of the air core transformer is compared. Through simulation analysis and experiments, an 1 MHz ultrasonic transducer drive prototype is constructed, achieving a high sinusoidal degree of the driving waveform of the ultrasonic transducer at the rated frequency, a peak-to-peak voltage of 221.7 V, and an instantaneous power of 1288.7 W. This proves the feasibility of the designed matching circuit for the ultrasonic transducer and solves the difficulties in the development and impedance matching design of the ultrasonic transducer drive at the megahertz frequency.

Keywords: ultrasonic power supply; megahertz; air core transformer; impedance matching

随着电力电子技术的不断发展, 超声波换能器驱动电源的研制受到国内外研究人员越来越多

的关注。在自动化工业领域, 出现了超声波测距仪^[1]、超声波流量计、超声波清洗仪等产品^[2]。

收稿日期: 2024-06-21

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目 (2023J01949, 2022J01950)

第一作者简介: 阙凌凡 (1999—), 男, 福建龙岩人, 硕士研究生, 研究方向: 兆赫兹超声波换能器驱动电源。

通信作者: 林抒毅 (1985—), 女, 福建福州人, 副教授, 博士, 研究方向: 电力电子高频磁技术, 低压电器智能检测。

提升功率,减小体积,降低损耗是超声波电源发展的未来趋势。超声系统由驱动电源和换能器两部分组成。驱动电源提供一定频率和功率的超声波电能,换能器通过压电效应可实现能量的转换^[3]。逆变器作为将直流输入电压转换为交流输出电压的能量转换器件,在电能转换方面有不可取代的地位^[4-5]。

针对阻抗网络自动谐振匹配问题,文献[6]提出了一种基于频率跟踪的串联电感阻抗匹配方法。文献[7]采用 LCLC-S 阻抗匹配设计,实现驱动电路在低频情况下拥有更高的输出功率。对于超声波换能器带载与空载压差过大的问题,文献[8]使用了 LCC 补偿网络,实现高压比与低压差特性。文献[9]设计了脉冲驱动 16 单元阵列,通过引导聚焦光束实现超声波换能器的高能量输出。

上述研究中阻抗匹配设计较为复杂,驱动电路工作频率较低,无法实现更高的工作频率及输出功率。本研究采用全桥逆变器作为驱动拓扑,设计了一款空心变压器,利用空心变压器漏感与等效励磁电感进行谐振匹配设计,以减少谐振元件的数量,并研究不同材料绕制的空心变压器对超声换能器输出性能的影响。通过仿真分析与实验,设计 1 MHz 超声波换能器实验样机的驱动设计,以实现瞬时输出功率千瓦级,解决兆赫兹超声波换能器驱动设计的难题。

1 超声波换能器驱动系统

1.1 全桥逆变电路

超声波换能器全桥驱动拓扑如图 1 所示,4 个开关管 Q 构成全桥逆变器。 C_r 为一次侧 LC 谐振补偿电容, L_{k1} 为空心变压器一次侧等效漏感。二次侧 L_m 为空心变压器二次侧等效励磁电感, C_s 为换能器等效静态电容, R_d 为换能器等效动态电阻。

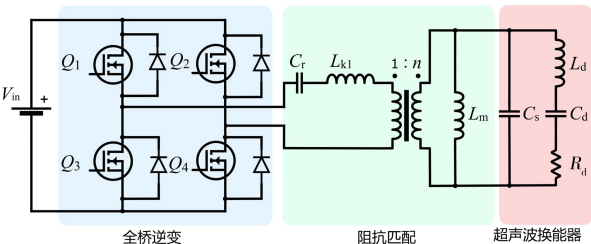


图1 超声波换能器全桥驱动拓扑

Fig.1 Ultrasonic transducer full bridge drive topology

全桥逆变拓扑由 4 个开关管组成, Q_1 、 Q_4 与 Q_2 、 Q_3 两组开关管交替导通,设置一定的死区时间,防止上、下两开关管同时导通造成开关管损坏。全桥逆变电路 4 个开关管需分别设置脉冲信号驱动,因此驱动设计较为复杂。但其开关管电压相对半桥电路减小了一半,更适用于大功率场合。由于超声波换能器工作模式为间歇式发波,瞬时功率较大,因此选用全桥逆变拓扑作为兆赫兹超声波换能器的逆变电路。

1.2 超声波换能器

超声波换能器作为新型的能量转换器件,可分为磁致伸缩式与压电陶瓷式两类,主要应用于超声波测距、液位测量等方面^[10]。实验样机采用水声压电式换能器,工作频率为 1 MHz,具有 IP68 级防水防尘能力。当工作频率与谐振频率相近时,其转换效率最高^[11]。压电式换能器等效电路模型如图 2 所示。

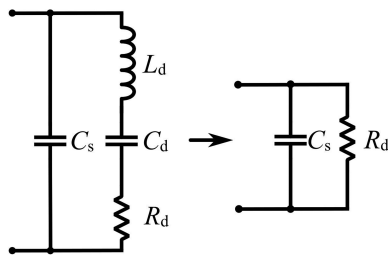


图2 压电式换能器等效电路

Fig.2 Piezoelectric transducer equivalent circuit

图中, L_d 为动态电感, C_d 为动态电容。超声波换能器阻抗受到工作频率变化的影响,当驱动电路频率远离换能器的工作频率时,换能器对外可等效为静态电容。当换能器工作在谐振频率时,由于动态电感与动态电容谐振作用,超声波换能器可等效为 C_s 与 R_d 并联支路。

2 阻抗匹配网络

2.1 匹配电路参数计算

通过频域分析可知,全桥逆变输出电压可由输入电压通过傅里叶变化计算,其基波幅值为:

$$V_{inv} = \frac{4V_{in}}{\pi} \approx 1.27V_{in} \quad (1)$$

式中, V_{inv} 为全桥输出电压幅值, V ; V_{in} 为直流输入电压值, V 。

空心变压器耦合系数较小,具有较大的漏感。高频高功率密度下,空心变压器绕组间距很小,存

在较大的分布电容,因此需合理设计匹配参数,减小干扰,维持高频状态下电路运行稳定。将空心变压器的励磁电感等效至二次侧,如图 3 所示。使励磁电感与超声波换能器等效静态电容进行并联谐振匹配,使负载近似纯阻性,减小无功损耗。即:

$$L_m = \frac{1}{\omega^2 C_s} \quad (2)$$

式中, ω 为工作频率下的角频率, rad/s 。

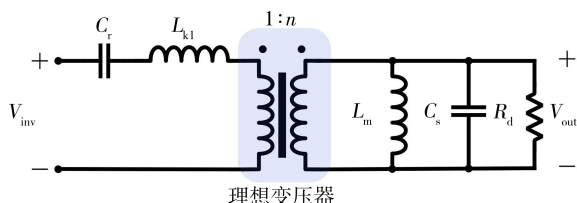


图 3 超声波换能器谐振匹配网络

Fig.3 Ultrasonic transducer resonance matching network

将谐振补偿电容对变压器一次侧漏感进行谐振匹配,使:

$$C_r = \frac{1}{\omega^2 L_{k1}} \quad (3)$$

一次侧感量 L_p 为:

$$L_p = \frac{1}{n^2} L_m + L_{k1} \quad (4)$$

式中, n 为空心变压器匝数比。

耦合系数 k 为:

$$k = \sqrt{1 - \frac{L_{k1}}{L_p}} \quad (5)$$

当超声波换能器输出电压为 V_{out} 时,电压增益 A_v 为:

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{inv}} \quad (6)$$

2.2 空心变压器设计

随着功率变换器工作频率的上升,高频变压器将有更多类型的选择。采用磁芯变压器(MCT)可实现能量传输与电气隔离,但当频率达到 MHz 及以上时, MCT 磁路结构缩小,磁芯易饱和,造成温升与绝缘问题,增加了设计与加工难度^[12-13]。空心变压器(ACT)结构与传统变压器不同,不包含磁芯,减小了自身的体积与重量,且磁导率是空气磁导率,为固定常数,因此不存在磁芯损耗与磁饱和现象。

绕组作为变压器的重要组成部分,材料的选择将对变压器的传输性能产生影响。当频率达到

兆赫兹时,不同材料的等效串联电阻(ESR)不同,产生的损耗也不同。本文分别采用漆包线与 Litz 线绕制相同规格的空心变压器,研究对比不同绕组材料对于变压器传输性能的影响。

采用空心变压器进行阻抗匹配时,二次侧阻抗 Z_{22} 为:

$$Z_{22} = R_d // \frac{1}{j\omega C_s} // j\omega L_m \quad (7)$$

空心变压器二次侧在超声波换能器额定工作频率下发生并联谐振,即:

$$\frac{1}{j\omega C_s} // j\omega L_m = 0 \quad (8)$$

利用空心变压器等效励磁电感与超声波换能器进行谐振匹配,减小无功功率损耗,可使用较小的驱动电压达到相同的驱动电压峰值^[14]。

通过阻抗分析仪测量超声波换能器等效参数,在 1 MHz 下换能器静态电容 $C_s = 6.78 \text{ nF}$,动态电阻 $R_d = 4.77 \Omega$ 。当负载二次侧并联谐振时,换能器负载近乎纯阻性。通过谐振作用可提升系统传输效率,优化功率输出,增强系统整体性能。

3 仿真分析

利用 Ansys Maxwell 软件对空心变压器绕组材料漆包线与 Litz 线仿真参数分析。漆包线规格为标称直径为 0.65 mm 铜线; Litz 线规格为 220 股单股直径 0.04 mm 的细铜线绞合而成。其原副边感量(L_p, L_s)、感量对应等效串联电阻值(ESR)及互阻值(R_m)见表 1 所示。根据仿真结果可知,线圈匝数与绕组位置相同时, 1 MHz 下 Litz 线原副边感量较高,且等效串联电阻较低,因此所产生的损耗较小,系统整体效率更高。

表 1 变压器线材参数表

Tab.1 Transformer wire parameters table

绕组材料	$L_p / \mu\text{H}$	$L_p\text{-ESR} / \text{m}\Omega$	$L_s / \mu\text{H}$	$L_s\text{-ESR} / \text{m}\Omega$	$R_m / \text{m}\Omega$
漆包线	2.37	321.06	2.98	469.37	23.28
Litz 线	2.54	73.60	3.23	93.75	5.22

高频交流电在绕组上将产生热损耗(铜损),不同绕组材料内部线材结构不同,因此产生的损耗也不同。图 4、5 为漆包线与 Litz 线在相同匝数条件下的高频欧姆损耗,仿真等效电阻大小对应欧姆损耗值与预期欧姆损耗值一致。

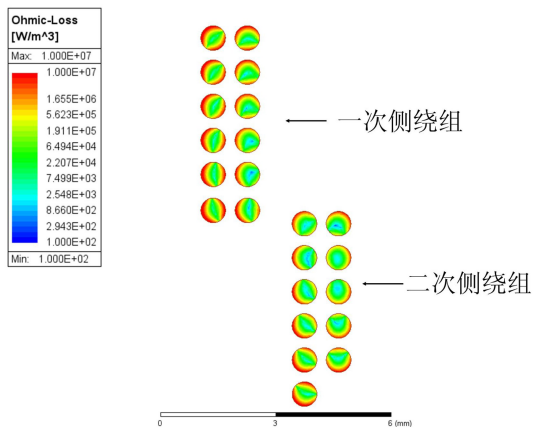


图 4 漆包线高频欧姆损耗

Fig.4 High frequency ohmic loss of enameled wire

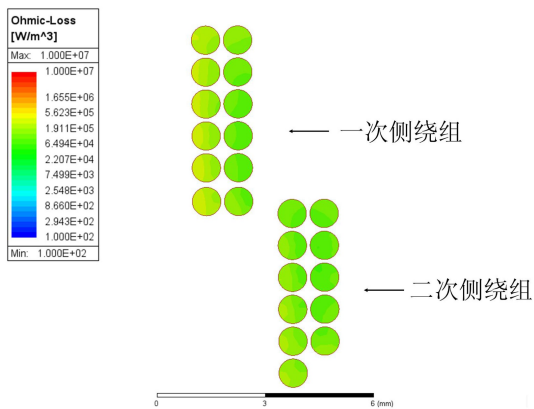


图 5 Litz 线高频欧姆损耗

Fig.5 High frequency ohmic loss of Litz wire

通过仿真分析 MOSFET 电压电流波形,如图 6 所示。当负载网络为弱感性时,开关管导通前两端电压下降为零,此时开关管导通。电压电流波形无交叠,可避免换流冲击,实现无损耗导通,即零电压开通。

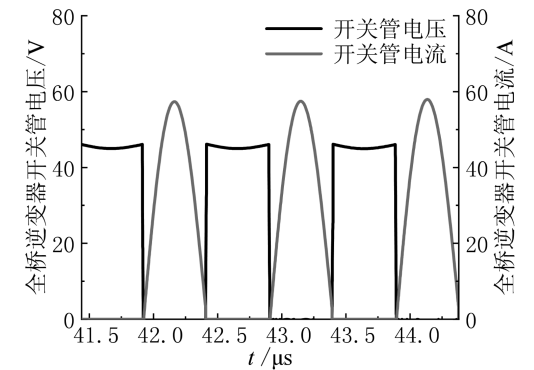


图 6 开关管电压电流波形

Fig.6 Voltage and current waveform of switching tube

分体式 1 MHz 超声波换能器工作电压峰峰值需小于 300 V,在满足峰峰值电压小于额定规格的前提下需尽可能提升驱动电压值,且换能器输出波形拖尾不宜过大。兆赫兹超声波换能器驱动电路输出波形如图 7 所示,输出电压峰峰值约为 200 V,其正弦度较好,符合驱动换能器工作需求。

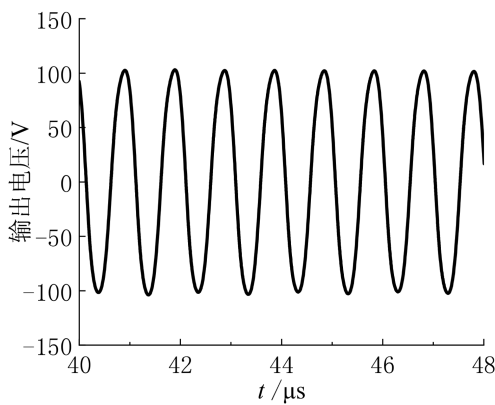


图 7 仿真输出电压波形

Fig.7 Simulation output voltage waveform

4 实验分析与验证

通过上述仿真分析,绘制原理图并制作驱动电路版。实验包括直流侧母线输入电压、LDO 电压转换、单片机驱动控制、全桥逆变及高频空心变压器部分。根据实测变压器参数调节谐振补偿电容的参数值,验证仿真结果的可行性。

采用最小系统核心板控制全桥驱动。超声波换能器的输入功率不宜持续过大,因此驱动采用间歇式波形输出避免器件损坏。由驱动波形时序图 8 可看出,0~ t_1 时刻全桥逆变器正常输出工作,上下开关管互补导通。Disable 端为使能端,控制栅极驱动芯片工作。当 Disable 置高电平前 t_1 时刻,设计控制 Q_2 与 Q_4 桥臂组移相,移相角 $\varphi=180^\circ$, Q_1 与 Q_3 桥臂组保持互补导通。由于单片机驱动无法准确控制 Disable 端置高电平的时间点,因此移相完成后在 t_2 时间段,即图示阴影区域内 Disable 端置高电平。Disable 端置高电平后全桥逆变器两个上管(Q_1 、 Q_2)同相,两个下管(Q_1 、 Q_4)同相,栅极驱动停止输出。当 t_3 时刻 Disable 端置零时,设计控制 Q_2 与 Q_4 桥臂组从

180° 移相回 0°,移相完成后,全桥逆变器恢复正常工作模式,栅极驱动开始输出。在 Disable 端置低后开始移相,可避免上下管在栅极驱动芯片工作瞬间直通导致开关管损坏。

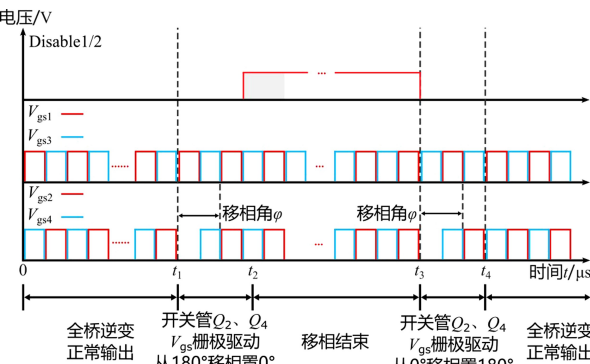


图 8 全桥逆变驱动波形时序图

Fig.8 Waveform shift timing diagram of full bridge inverter drive

超声波换能器匹配电路发生谐振时,有载 Q 取值范围为 3~10。考虑到谐振回路需呈弱感性状态,使电压相位略超前于电流相位,实现零电压开通,因此本文选取 $Q=3.5$ 为标准量计算相关参数。全桥开关管实测电压波形如图 9 所示,开关管导通前,漏源电压 V_{ds} 降为零,并利用内部寄生二极管导通续流。开关管两端电压被钳位为零,直到栅极接收到驱动信号,栅源电压 V_{gs} 上升,开关管导通,电流开始上升。此时电压电流无交叠区,实现零电压开通。

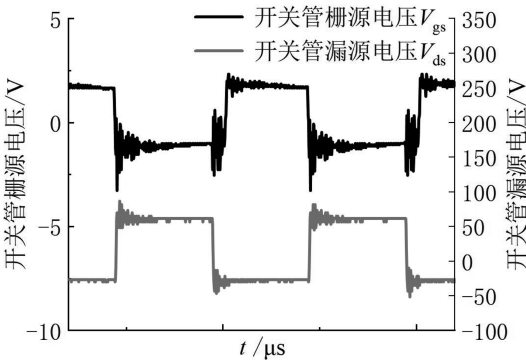


图 9 开关管电压波形

Fig.9 Switch tube voltage waveform

在 1 MHz 下,分别采用漆包线与 Litz 线作为空心变压器绕组材料,换能器输出波形如图 10 所示。超声波换能器输出电压峰峰值分别为 106.7

与 221.7 V。结合仿真数据得出结论:在相同绕组匝数的空心变压器中,对比漆包线与 Litz 线两种材质,由于漆包线等效串联电阻较大,产生的绕组损耗较高。由输出电压可知,在相同输入电压条件下,采用 Litz 线线材相较于漆包线线材绕制的空心变压器,电压峰峰值提升约两倍。

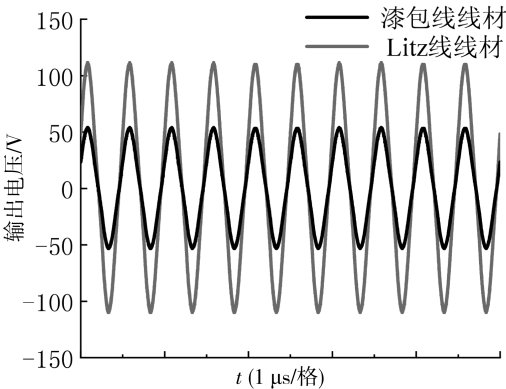


图 10 漆包线、Litz 线绕组材料输出电压

Fig.10 Winding material output voltage of enamelled wire and Litz wire

由于负载输出波形为间歇式,通过图 11 可见,当输出端停止输出时,负载输出波形振荡较小,无明显电压拖尾。且超声波换能器可接收回波信号。

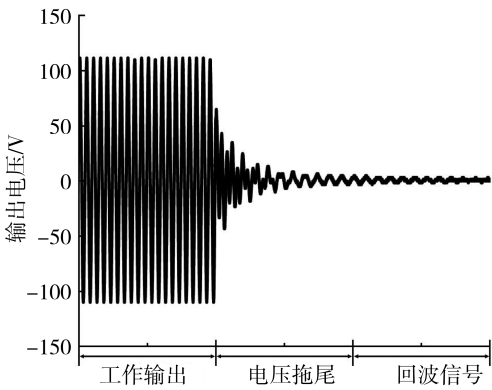


图 11 电压拖尾及回波信号

Fig.11 Voltage trailing and echo signal

当输入电压为 48 V,采用 Litz 线作为 1 MHz 超声波换能器空心变压器绕组材料时,间歇式输出完整波形如图 12 所示。超声波换能器输出电压为 221.7 V,瞬时功率达 1 288.7 W,达到驱动设计目标。

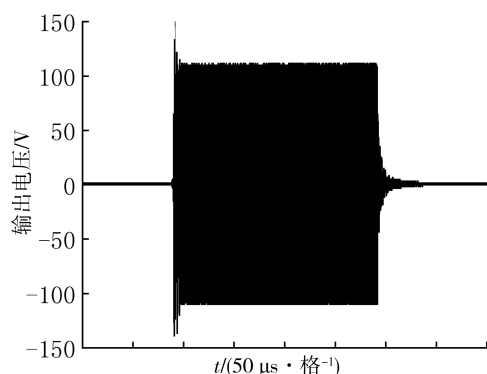


图12 超声波换能器驱动波形

Fig.12 Ultrasonic transducer drive waveform

5 结论

1) 验证了全桥逆变电路在兆赫兹频率下实现开关管零电压开通,减小了驱动电路的开关损耗,提升了整体性能效率。

2) 针对空心变压器漏感大的特点,设计一种阻抗匹配电路。该电路通过增加补偿电容与一次侧等效漏感谐振匹配,并利用二次侧等效励磁电感与超声波换能器等效静态电容阻抗匹配,在额定频率下减小无功损耗。

3) 相同规格的漆包线与 Litz 线作为空心变压器绕组材料时,Litz 线线材的等效串联电阻较小,产生的绕组损耗也较小,变压器输出功率更高。

参考文献:

- [1] HORSLEY D A, PRZYBYLA R J, SHELTON S E, et al. Piezoelectric micromachined ultrasonic transducers for range-finding applications[C]//2021 5th IEEE Electron Devices Technology & Manufacturing Conference (EDTM). Chengdu, China: IEEE, 2021:1-3.
- [2] 秦佳才,韩翔,肖光宗,等. 超声波换能器驱动电源的研究综述[J]. 电子设计工程, 2020, 28(9):135-139.
- [3] 安子孟. 基于超声波测距的无轨温室运输跟随系统[D]. 济南: 山东建筑大学, 2023.
- [4] 李亚飞,钱科军,朱庆,等. 基于双链路全桥的升降压逆变器研究[J]. 电力电子技术, 2023, 57(7):12-16.
- [5] VAN T H, VAN T L, THI T M N, et al. Application of the phase shift full bridge converter for the single-phase full-bridge inverter to improve the output of the renewable energy[C]//2021 3rd International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS). Bandung, Indonesia: IEEE, 2021:419-424.
- [6] WEI C, CHEN H T, CHEN Y T. Design of an automatic impedance matching circuit based on frequency tracking of ultrasonic transducer[C]//2020 IEEE 5th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC). Chongqing, China: IEEE, 2020:162-165.
- [7] ZHANG K H, FENG J M, LAN B B, et al. Design of LCLC-S impedance matching network for ultrasonic wireless power transmission system[M]//Lecture Notes in Electrical Engineering. Singapore:Springer Nature Singapore, 2023:482-495.
- [8] 吴轲,黄晓生,林咏澍. LCC 谐振式高压比超声波换能器驱动[J]. 福建工程学院学报, 2023, 21(1):84-89.
- [9] KASHANI Z, ILHAM S J, KIANI M. Design and optimization of ultrasonic links with phased arrays for wireless power transmission to biomedical implants[J]. IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems, 2022, 16(1):64-78.
- [10] 鲁佳慧,宋逍潇,王青春. 基于人工势场法的水下机器人编队超声波测距设计[J]. 机电工程技术, 2024, 53(4):20-24, 133.
- [11] 李庚霄. 超声波电源频率自动跟踪技术的研究[D]. 厦门:集美大学, 2023.
- [12] JOLLY N, MALLIK A, DARMODY C, et al. Tape wound magnesil vs. air core magnetics:high temperature DC-DC power conversion[C]//2024 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Long Beach, CA, USA: IEEE, 2024:1831-1837.
- [13] BAI G N, JIN J X, LIANG J H, et al. Modelling and theoretical analysis of an air-core transformer with strong coupled schemes[C]//2018 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD). Tianjin: IEEE, 2018:1-2.
- [14] MAO S J, LI C M, SONG T T, et al. High frequency high voltage generation with air-core transformer[C]//2017 IEEE International Workshop on Integrated Power Packaging (IWIPP). Delft, Netherlands: IEEE, 2017:1-5.

(责任编辑:陈雯)