

◇ 研究报告 ◇

基于级联 9 电平技术的大功率超声波电源*

周持衡 张长征[†] 张维尧

(湖北工业大学 太阳能高效利用及储能运行控制湖北省重点实验室 武汉 430068)

摘要: 为了提高超声波电源的输出功率,该文提出了一种基于级联 9 电平技术的大功率超声波电源。电源逆变部分由两个 H 桥单元级联组成,经过一定的控制策略实现输出电压为 9 电平波形,可以显著提高超声波电源的输出功率,改善输出电压的波形质量。提出一种电压差法跟踪换能器的谐振频率,只需采样 3 个电压,根据 3 个电压之间的数值差调节输出频率。通过分析该超声波电源的系统结构、工作原理及控制策略,并进行仿真实验,验证了该方案的可行性和有效性。

关键词: 超声波电源;频率自动跟踪;电压差法;9 电平

中图分类号: TM46 文献标识码: A 文章编号: 1000-310X(2021)03-0376-07

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2021.03.008

High power ultrasonic power supply based on cascaded 9 level technology

ZHOU Chiheng ZHANG Changzheng ZHANG Weiyao

(Hubei Key Laboratory for High-efficiency Utilization of Solar Energy and Operation Control of Energy Storage System,
Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: In order to improve the output power of the ultrasonic power supply, this paper proposes a high-power ultrasonic power supply based on cascaded 9-level technology. The power inverter part is composed of two H-bridge units cascaded. After a certain control strategy, the output voltage is 9-level waveform, which can significantly increase the output power of the ultrasonic power supply and improve the waveform quality of the output voltage. A voltage difference method is proposed to track the resonant frequency of the transducer, which only needs to sample three voltages and change the output frequency according to the numerical difference between the three voltages. By analyzing the system structure, working principle and control strategy of the ultrasonic power supply, and simulation experiments to verify the feasibility and effectiveness of the scheme.

Keywords: Ultrasonic power supply; Automatic frequency tracking; Voltage difference method; 9 level

2020-07-14 收稿; 2020-09-11 定稿

*湖北省技术创新专项重大项目 (2019AAA018)

作者简介: 周持衡 (1996-), 男, 浙江金华人, 硕士研究生, 研究方向: 超声波电源。

[†]通信作者 E-mail: longmarch_zhang@163.com

0 引言

随着超声技术在工业领域的深入研究和广泛应用,人们对于超声波电源的需求也越来越广泛。目前功率超声波技术主要应用于超声波焊接、超声波清洗和超声波电机等领域^[1-2]。传统的超声波电源功率多为几百瓦、几千瓦,对于某些大功率场合的应用远远不够。超声系统属于谐振系统,要求超声波电源输出的信号频率必须与换能器谐振频率相同,才能保证换能器在稳定状态工作^[3-4]。然而系统在加工过程中,随着负载及换能器工作温度的变化,元件暴露在空气中逐渐老化等问题,会导致换能器谐振频率发生漂移,引起整个系统在失谐状态工作甚至导致系统无法正常工作^[5-7],因此必须使超声换能器在谐振状态工作。

文献[8]通过工业应用、清洗技术的发展、水处理应用以及测量技术全面介绍了大功率超声波电源的工业应用、发展前景。现有文献多采用传统超声波电源主电路拓扑,输出功率较小,无法适用于大功率场合,因此对大功率超声波电源的研究是必不可少的。文献[9]采用锁相环对谐振频率进行检测跟踪,采样换能器两端的电压电流信号,分析计算电压电流信号的相位关系,调节电源输出频率实现频率自动跟踪,该方法在负载变化较大时容易造成相位失锁。文献[10]采用基于电流和相位差的方法对超声换能器频率进行自动跟踪,将最小电流法运用

于换能器空载阶段,相位差法运用于带载阶段,该方法跟踪频率范围较小,换能器受到外界环境影响较大时无法保持超声波电源在最佳频率状态工作。

考虑到传统超声波电源输出功率不够,本文提出一种基于级联9电平技术的大功率超声波电源,该技术可以显著提高超声波电源的输出功率,并且可以提高输出电压的波形质量,减小匹配网络中滤波所需要的电感和电容,加入光伏电源可实现节能减排;提出一种电压差法跟踪换能器的谐振频率。本文首先分析了该超声波电源的系统结构与工作原理,其次简要说明频率自动跟踪算法的控制策略,最后通过仿真实验验证了该方案的可行性和有效性。

1 系统结构与工作原理

1.1 系统结构

图1为基于级联9电平技术的大功率超声波电源电路结构。Buck电路左侧输入为直流电,光照充足时由光伏电源提供,大功率超声波电源常用于油田解堵采油,户外阳光充足,可实现节能减排;光照不充足时由市电经过AC/DC整流电路补充能量。超声波电源不工作时可实现光伏发电。Buck电路可调节直流电压大小,用于调整超声波电源的输出功率。9电平变换器由两个H桥单元级联组成,输出9电平电压波形,经过匹配网络通入换能器。

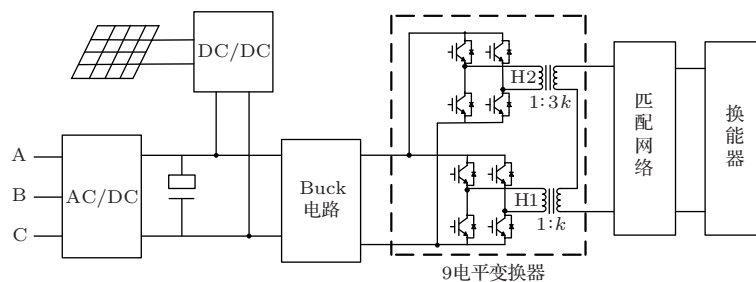


图1 超声波电源系统电路结构

Fig. 1 Circuit configuration of ultrasonic power supply system

1.2 工作原理

1.2.1 9电平变换器工作原理

9电平变换器由两个H桥单元级联组成,两个变压器的变比从上到下依次为 $1:3k$ 、 $1:k$ (k 为变压器变比系数)。采用适当的调制策略就可以产生一个9电平的电压,相关电平的组合方式见表1。

为使9电平电压波形 U 趋近正弦波 U_S ,将正弦波 U_S 上下分别均分成9份。记切割线编号为 $\pm m$ ($m = 1, 2, \dots, 9$),其中,“+”表示正弦波上半部分的切割线,“-”表示正弦波下半部分的切割线。沿编号 $\pm m$ 中 m 为奇数的切割线和正弦波的交点依次画纵垂线,从而可以获得9电平输出波形和每个H桥单元的输出波形,具体见图2。

表1 9电平合成方法

Table 1 Generation method of 9 level

合成电平	电平1	电平3	合成电平	电平1	电平3
4	1	1	-1	-1	0
3	0	1	-2	1	-1
2	-1	1	-3	0	-1
1	1	0	-4	-1	-1
0	0	0			

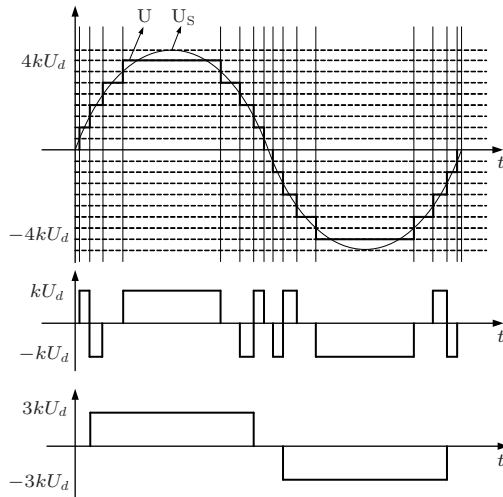


图2 9电平输出电压波形与各H桥输出电压波形
Fig. 2 Output waveforms of 9 level and each H-bridge

正弦波 U_s 从9电平电压每个阶梯纵向的中点穿过，每个阶梯的电压值为 kU_d ， U_s 的幅值为 $4.5kU_d$ ，可得到输出电压的基波幅值 U_m 与直流侧电压 U_d 的关系为

$$U_m = 4.5kU_d. \quad (1)$$

由图2可知， U_s 一个周期 T 中可划分为18个时间段，根据对称性只需计算出1/4个周期内的4个开关时间，即可推导出一个周期的开关时刻 t_{i+1} ($i = 0, 1, 2, \dots, 17$) 为

$$t_{i+1} = T\alpha_i, \quad (2)$$

$$\alpha_i = \begin{cases} 0, & i = 0, \\ \frac{1}{2\pi} \arcsin\left(\frac{2i-1}{9}\right), & i = 1, 2, 3, 4, \\ 0.5 - \alpha_{9-i}, & i = 5, 6, 7, 8, \\ 0.5 + \alpha_{i-8}, & i = 9, 10, 11, 12, \\ 1 - \alpha_{17-i}, & i = 13, 14, 15, 16, \\ 1, & i = 17. \end{cases} \quad (3)$$

结合表1及式(2)~(3)，通过设置每个开关管的导通时间，可以使得输出的9电平电压波形接近正弦波。结合图1及图2，9电平变换器与传统方波逆变器相比有如下优势：

- (1) 输出相同功率时，9电平变换器中开关管两端承受的电压低，电压应力小，在开关管选择上有较大优势；
- (2) 9电平变换器输出的9电平波形电压高，谐波畸变率小。

1.2.2 换能器及匹配网络

超声换能器的等效电路如图3(a)所示，其中 C_0 为换能器的静态电容， L_1 为换能器的动态电感， C_1 为换能器的动态电容， R_1 为换能器的动态电阻。发生串联谐振时电路可等效为图3(b)，对应的谐振频率 f_s 为

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}}. \quad (4)$$

记 ω_s 为发生串联谐振时对应谐振频率的角频率，则图3(b)的阻抗可等效为

$$Z = \frac{R_1 - j\omega_s R_1^2 C_0}{1 + (\omega_s R_1 C_0)^2}. \quad (5)$$

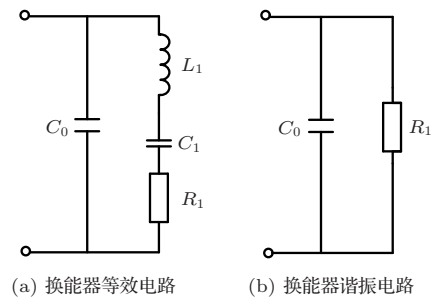


图3 换能器等效电路

Fig. 3 The equivalent circuit of transducer

由于静态电容的存在，若超声波电源直接通入换能器，会产生大量的无功功率，必须加入匹配网络抵消静态电容。另一方面，匹配网络还可以对通入换能器的电压波形进行滤波，减少对换能器的损伤。虽然超声波电源产生的9电平电压波形畸变率较低，考虑到单一的串联电感很难实现较好的滤波效果，加入较小的电容组成LC滤波，滤波效果将会显著增加。LC匹配网络等效电路如图4(a)所示，电路可以进一步简化如图4(b)所示，发生串联谐振时的等效电路如图4(c)所示。

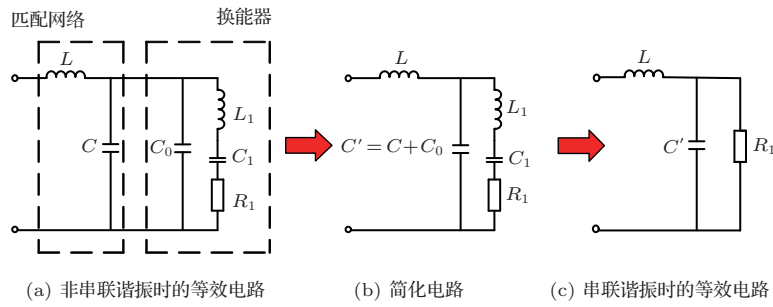


图4 LC匹配等效电路

Fig. 4 The equivalent circuit of LC matching

由式(5)可知,图4(c)可等效为

$$Z_m = j\omega_s L + \frac{R_1 - j\omega_s R_1^2 C'}{1 + (\omega_s R_1 C')^2} \quad (6)$$

若使电路等效为纯阻性,应使式(6)虚部为0,电感应满足

$$L = \frac{R_1^2 C'}{1 + (\omega_s R_1 C')^2} \quad (7)$$

2 频率自动跟踪原理及系统控制策略

当系统的环境、温度等发生变化时,换能器固有的谐振频率会发生漂移,因此必须对谐振频率进行实时跟踪。常用的频率跟踪算法有最大电流法和锁相环法。系统频率在换能器谐振频率时,换能器呈纯阻性,负载电流最大,最大电流法容易实现,但跟踪灵敏度不高,稳定性差;锁相环法跟踪范围小,由于外界环境的复杂性,使得换能器谐振频率变化较大,采用锁相环法易造成误跟踪。本文提出一种电压差法,只需采样3个电压,可以有效地跟踪换能器的串联谐振频率,解决串联谐振点漂移对换能器性能产生巨大影响的问题。

2.1 电压差法原理

如图5所示,匹配网络中的电容由若干个电容串联组成,在匹配网络和换能器之间串联一个较大的电容 C_2 ,对系统影响可忽略不计。采样如图5所示的电压有效值 V_{12} 、 V_{23} 、 V_{13} ,通过判断 V_{13} 与 V_{12} 、 V_{23} 之间的数值关系判断超声波电源频率的变化情况,无需计算相位。

下面进一步说明其原理,发生串联谐振时,换能器两端的电压 U 和通入换能器的电流 I 同相位,由于电容 C_2 两端的电流超前电压 90° ,此时 V_{12} 超前 V_{23} 90° ,如图6(a)所示,并且可以得到 $V_{13} = \sqrt{V_{12}^2 + V_{23}^2}$ 。

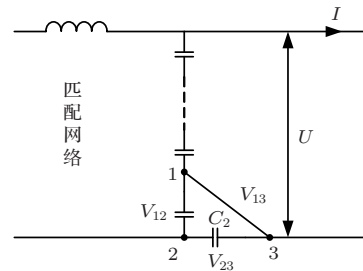


图5 匹配网络示意图

Fig. 5 Schematic diagram of matching network

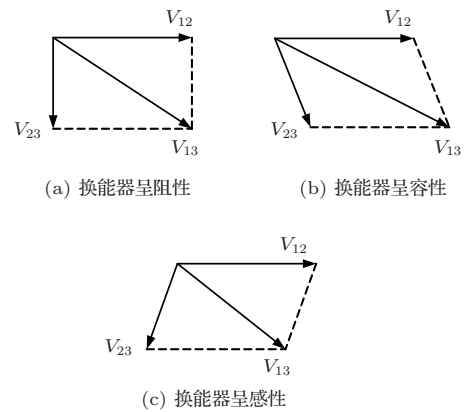


图6 采集电压相位关系

Fig. 6 The phase relationship of acquisition voltage

如图6(b)所示, V_{12} 和 V_{23} 之间相位差小于 90° ,换能器呈容性,应增大频率,此时 $V_{13} > \sqrt{V_{12}^2 + V_{23}^2}$ 。

如图6(c)所示, V_{12} 和 V_{23} 之间相位差大于 90° ,换能器呈感性,应减小频率,此时 $V_{13} < \sqrt{V_{12}^2 + V_{23}^2}$ 。

令 ΔV 为 V_{13} 与 V_{12} 、 V_{23} 之间的电压差,且 ΔV 满足关系式

$$\Delta V = \sqrt{V_{12}^2 + V_{23}^2} - V_{13} \quad (8)$$

通过判断 ΔV 的大小即可改变超声波电源的

频率,当 $\Delta V > 0$ 时,减小频率;当 $\Delta V = 0$ 时,频率保持不变;当 $\Delta V < 0$ 时,增大频率。

2.2 系统控制策略

系统控制策略如图7所示,采集如图5所示的电压有效值 V_{12} 、 V_{23} 、 V_{13} 并计算 ΔV ,与给定的参

考值进行比较,比较后的偏差量作为PI控制器的输入,经过PI控制后获得需要改变的频率量并与当前频率进行相加,从而获得新的驱动频率,系统程序流程如图8所示。新的驱动频率信号驱动9电平变换器得到换能器所需要的谐振频率,从而实现谐振频率的自动跟踪。

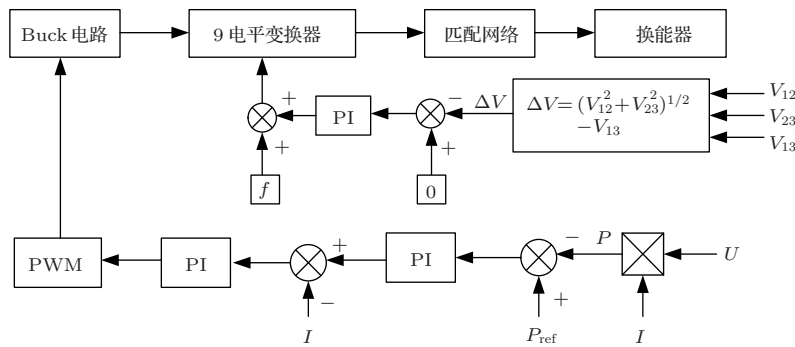


图7 系统控制策略

Fig. 7 System control strategy

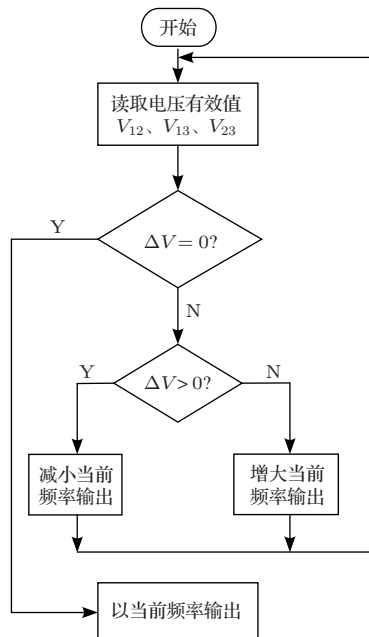


图8 频率跟踪流程

Fig. 8 Flow chart of frequency tracking

表2 换能器参数

Table 2 Transducer parameters

参数	数值
静态电容 C_0/nF	2.3
动态电感 L_1/mH	188.3
动态电容 C_1/nF	0.1763
动态电阻 R_1/Ω	40
串联谐振频率 f_s/Hz	27622.9

3.1 9电平电压输出波形验证

图9为输出的9电平电压波形和快速傅里叶变换(Fast Fourier transformation, FFT)分析结果。9电平电压波形谐波畸变率约为9.35%,对比传统超声波电源输出的方波(总谐波失真约为48.3%),谐波畸变率大大减小,滤波所需要的电感和电容减少。并且9电平变换器很大程度上提高了输出的电压,更容易实现超声波电源大功率输出。

3.2 频率跟踪算法验证

换能器发生串联谐振时的频率为27622.9 Hz,设置系统的初始频率为26000 Hz。换能器使用时间过长会导致其老化,对应的等效参数会发生变化,以此验证动态电容变化时系统的频率跟踪特性。图10(a)和图10(b)分别给出了动态电容减小和增大时系统的频率跟踪特性。可以得出,系统可以快

3 仿真结果分析

为了验证该方案的可行性,建立基于级联9电平技术的大功率超声波电源系统仿真模型,验证了9电平变换器和频率跟踪算法的可行性。换能器等效参数如表2所示。LC匹配参数 $L = 0.1047\text{ mH}$ 、 $C = 90\text{ nF}$ 、 $C_2 = 3\text{ }\mu\text{F}$ 。

速稳定地进行频率跟踪，并且系统在动态电容变化时仍能保持良好的频率跟踪性能。频率失调时换能器两端的电压电流波形如图11(a)所示，此时电压

电流存在相位差；系统稳定后换能器两端的电压电流波形如图11(b)所示，此时电压电流保持同相位。表明该算法具有良好的频率跟踪性能。

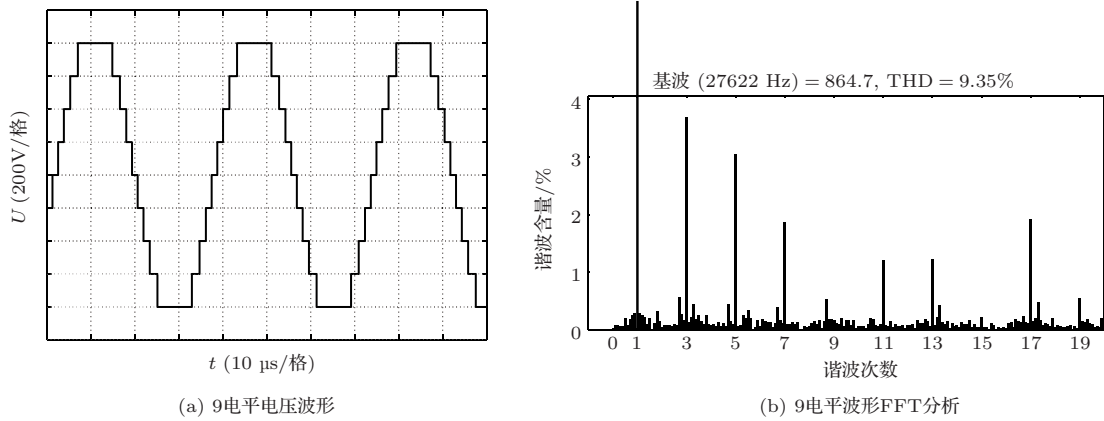


图9 9电平电压波形与FFT分析

Fig. 9 The 9 level voltage waveform and FFT analysis

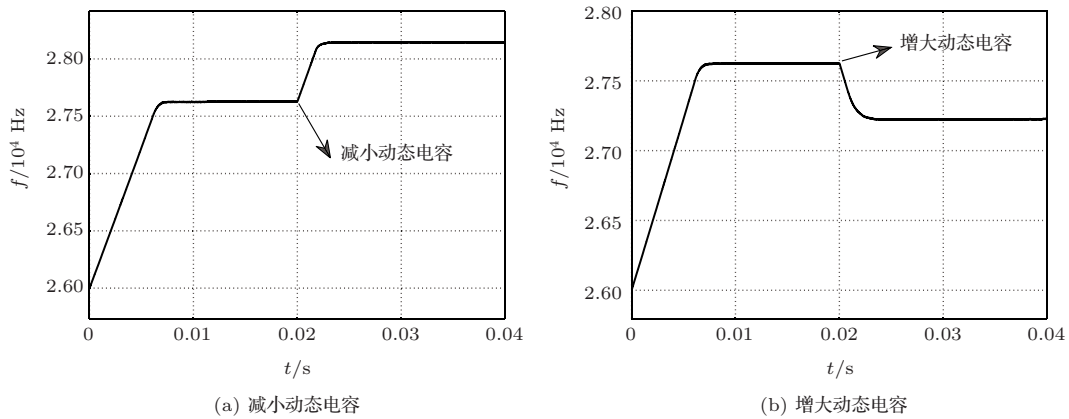


图10 频率跟踪示意图

Fig. 10 Schematic diagram of frequency tracking

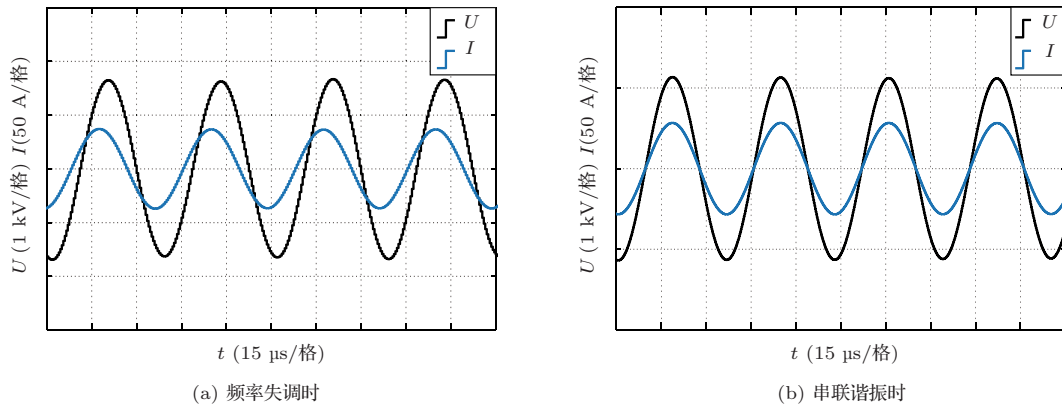


图11 超声波电源输出波形

Fig. 11 Output waveforms of ultrasonic power supply

4 结论

本文提出了基于级联9电平技术的大功率超声波电源,通过一定的控制策略使得输出为9电平电压波形,可以显著提高超声波电源的输出功率。9电平电压波形谐波畸变率较低,可以改善输出电压的波形质量,并且减少了匹配网络中滤波所需要的电感和电容。此外,提出了一种电压差法跟踪换能器的串联谐振频率,其原理简单,仿真实验表明提出的跟踪策略可以稳定快速地跟踪换能器的谐振频率。

参 考 文 献

- [1] Kuang Y, Jin Y, Cochran S, et al. Resonance tracking and vibration stabilization for high power ultrasonic transducers[J]. *Ultrasonics*, 2014, 54(1): 187–194.
- [2] 罗杰. 大功率超声波电源及应用研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- [3] 苏文虎. 一种阻抗匹配可调的变频式超声波电源 [D]. 镇江: 江苏科技大学, 2017.
- [4] Cheng L, Kang Y, Chen C. A resonance-frequency tracing method for a current-fed piezoelectric transducer[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, 61(11): 6031–6040.
- [5] 刘丽晨, 杨明, 李世阳, 等. 超声换能器并联谐振频率的复合式跟踪方法研究 [J]. *应用声学*, 2015, 34(1): 45–50.
- [6] 李夏林, 刘雅娟, 朱武. 超声电源频率自动跟踪的模糊控制算法研究 [J]. *应用声学*, 2017, 36(2): 135–141.
- [7] 李夏林, 刘雅娟, 朱武. The fuzzy control algorithm of frequency auto-tracking of the ultrasonic power supply[J]. *Journal of Applied Acoustics*, 2017, 36(2): 135–141.
- [8] 彭呈祥, 段发阶, 蒋佳佳, 等. 基于频率跟踪的超声驱动电源研制 [J]. *电力电子技术*, 2019, 53(5): 1–5.
- [9] Peng Chengxiang, Duan Fajie, Jiang Jiajia, et al. Development of ultrasonic driving power based on frequency tracking[J]. *Power Electronics*, 2019, 53(5): 1–5.
- [10] Harvey G, Gachagan A, Mutasa T. Review of high-power ultrasound-industrial applications and measurement methods[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2014, 61(3): 481–495.
- [11] de Lima Ávila H E, de Andrade G A, de Sousa F R, et al. Modeling and analysis of a PLL-based resonant frequency tracking system using a resonant cavity sensor[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(17): 7447–7459.
- [12] 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.
- [13] 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.