

◇ 研究报告 ◇

# 基于改进粒子群算法的超声雾化电源频率跟踪\*

胡航溢<sup>1</sup> 许龙<sup>1†</sup> 郑伟成<sup>2</sup> 罗凯<sup>2</sup>

(1 中国计量大学理学院 杭州 310018)

(2 宁波清大超声科技有限公司 宁波 315300)

**摘要:** 超声波雾化技术由于其良好的雾化效果获得了广泛关注,具有极大的研究价值和应用前景。但是在超声雾化的过程中,由于换能器的温度变化、刚度变化以及在水中的负载变化等因素,会产生谐振频率漂移的现象。当工作频率偏移谐振频率时,将造成换能器的工作效率降低和元器件损坏等问题。针对此问题,设计了基于改进粒子群算法优化 PID 参数的超声雾化电源频率跟踪算法,并对该算法进行频率跟踪的仿真验证和实验对比,在频率跟踪上实现了更好的效果,使换能器能够稳定工作在谐振状态,提高了电源的利用率。

**关键词:** 超声电源;超声波雾化;频率跟踪;粒子群算法;PID

中图分类号: TN86 文献标识码: A 文章编号: 1000-310X(2024)01-0198-06

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2024.01.023

## The frequency tracking of the ultrasonic atomization power supply based on improved particle swarm optimization

HU Hangyi<sup>1</sup> XU Long<sup>1</sup> ZHENG Weicheng<sup>2</sup> LUO Kai<sup>2</sup>

(1 College of Science, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

(2 Ningbo QDsonic Technology Co., Ltd., Ningbo 315300, China)

**Abstract:** At present, ultrasonic atomization technology has received extensive attention because of its good atomization effect, which has great research value and application prospects. However, in the process of ultrasonic atomization, due to the temperature change, stiffness change of the transducer, load change in water and other factors, the phenomenon of resonant frequency drift will occur. Once the working frequency is not at the resonant frequency point, it will reduce the working efficiency of the transducer and damage the electronic components. To solve this problem, a frequency tracking algorithm of ultrasonic atomization power supply based on improved particle swarm optimization algorithm to optimize PID parameters is designed. Simulation and experimental comparison of the algorithm for frequency tracking have been conducted, achieving better results in frequency tracking, enabling the transducer to work stably in resonant state, and improving the utilization rate of power supply.

**Keywords:** Ultrasonic power; Ultrasonic atomization; Frequency tracking; Particle swarm optimization; PID

2022-09-02 收稿; 2022-12-08 定稿

\*国家自然科学基金项目 (12074354)

作者简介: 胡航溢 (1998-), 男, 浙江宁波人, 硕士研究生, 研究方向: 超声电源。

†通信作者 E-mail: xulong250864@163.com



## 2 频率跟踪设计

目前常用的频率跟踪方法有差动变量器电桥法、电流反馈法、电压反馈法和锁相等<sup>[7-8]</sup>。锁相法在频率快速跟踪上具有一定的优势,对于电流、电压相位的信号处理反馈比较精确稳定。因此,本文根据锁相法设计了一种相位检测电路,并将其与电流反馈法相结合,通过扫频办法来更快地确定初始谐振频率,实现更高精度与更快响应的频率跟踪。

由压电换能器的特性可知<sup>[9]</sup>,在串联谐振下,其阻抗最小,相应的电流反馈值最大。因此,通过电流反馈就可以确定换能器的谐振频率。另外,通过观察电压、电流的相位差来判断换能器是否工作在谐振频率上。通过扫描频率来确定电流最大时的频率点,从而确定起始谐振点。传统的扫频方法是步进法,为了防止步进过程中错过谐振点,一般会将步进频率设置得较小,因此这种方法需要的时间较长。为了获得更快的响应速度,采用二分法扫频方法,其原理是通过检测电压、电流相位的关系来判断当前超声电源输出频率与换能器谐振频率的关系,然后将扫频区域减半,最终在一定范围内确定谐振频率,该方法可以大大降低频率的扫描时间。

### 2.1 相位检测电路

相位检测是决定频率跟踪系统性能好坏的重要参数之一。相位检测所需要采集的电压信号采用分阻电压的方式获得,电流采样采用电流传感器来完成。将采集到的电压、电流信号接入SGM8294运算放大器电路,调制后再接到单片机的AD采样端。

取样波形如图2所示,采样电流近似表现为线性,上下振荡差值不超过0.2 A。将采样电流放大之后可以看到其相位信息,采样电压表现为振荡波形,分压之后的采样数据在-20~20 V之间振荡。

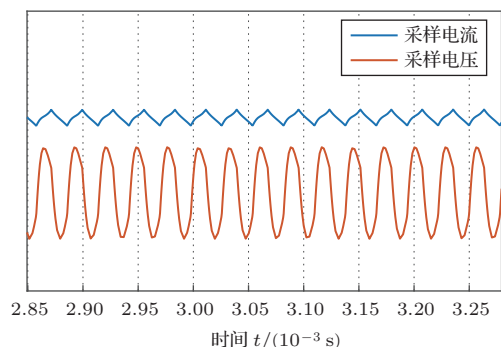


图2 采样数据

Fig. 2 Sample data

图2中的相位差信息在单片机中接收处理,将两个输出波形分别输入到单片机两个外部中断口,将外部中断模式设置为下降沿中断。当检测到两个外部中断的输入波形都为高电平时,同时打开两个定时器,分别对两个输入进行计时。任意一个输入到下降沿时,其对应计时器关闭并且记录相应数值,比较两个定时器数值大小可得出超前滞后问题,两计数差和周期相比较则为相位差。

### 2.2 粒子群算法优化PID参数改进算法

PID算法是闭环控制的经典算法,在控制领域普遍使用。但是传统的PID算法的参数是确定的,而超声电源则由于换能器负载的变化、换能器温度变化等需要更快速精准的控制。相较于传统的调参法得到的固定参数,动态的PID参数更有利于适应超声电源中不断变化的系统状况。因此,为了提高系统的响应速度和精度,需要对PID的参数进行优化,让这3个参数能够根据系统的实时状态反馈进行自动取值调整。为此,本文采用基于相等随机学习因子的改进PSO来对PID的参数进行优化,其具有迭代过程简单、快速收敛和收敛准确等优点。

#### 2.2.1 标准粒子群算法

粒子群算法是源于对鸟类捕食的行为研究而提出的一种基于群体协作的随机搜索算法<sup>[10]</sup>,其迭代关系公式如下:

$$v_i^{k+1} = \omega v_i^k + c_1 r_1 (pBest_i^k - p_i^k) + c_2 r_2 (gBest - p_i^k), \quad (1)$$

$$p_i^{k+1} = p_i^k + v_i^{k+1}, \quad (2)$$

其中, $v_i^{k+1}$ 为当前粒子速度, $v_i^k$ 为上一代粒子速度, $pBest_i^k$ 是上一代粒子位置最优值, $gBest$ 是上一代群体位置最优值, $p_i^{k+1}$ 是当代个体位置, $p_i^k$ 是上一代个体位置, $\omega$ 为惯性权重, $c_1$ 、 $c_2$ 为学习因子, $r_1$ 、 $r_2$ 为随机变量,分布在 $[0,1]$ 范围内。

#### 2.2.2 改进PSO

基于学习因子的研究<sup>[11]</sup>以及多个函数的测试结果,对粒子群算法中的学习因子进行改进,提出一种相等随机学习因子策略<sup>[12-13]</sup>,即 $c_1 = c_2$ 。本文对其进行仿真测试后发现 $[1.5, 2.0]$ 区间是随机的相对较佳的区间,于是将 $c_1$ 、 $c_2$ 随机均匀分布在 $[1.5, 2.0]$ 区间,从而保证粒子群的初始普遍性。表达式如下:

$$c_1 = c_2 = 1.5 + (2.0 - 1.5)\text{rand}(). \quad (3)$$

将式(3)代入式(1),  $c_1$   $c_2$  分别代入  $c'_1$ 、 $c'_2$  两个参数, 为改进后的学习因子, 得到改进的PSO速度位置更新公式:

$$v_i^{k+1} = \omega v_i^k + c'_1 r_1 (p\text{Best}_i^k - p_i^k) + c'_2 r_2 (g\text{Best} - p_i^k). \quad (4)$$

### 2.2.3 改进PSO与PID结合

使用改进PSO的目的就是对PID的参数进行优化, 通过改变比例  $K_p$ 、积分  $K_i$  和微分  $K_d$  三个参数来使整个频率跟踪函数达到较好的跟踪状态, 提高系统的鲁棒性。本文选取时间乘绝对偏差积分准则 (Integral of time multiplied by the absolute value of error criterion, ITAE) 作为改进算法的适应度函数<sup>[14]</sup>:

$$\text{ITAE} = \int_0^\infty t|e(t)|dt, \quad (5)$$

式(5)中,  $t$  为时间,  $|e(t)|$  为信号的绝对偏差, 即误差。

### 2.2.4 采用改进PSO的算法步骤

采用改进PSO算法的步骤图如图3所示。首先设置粒子群和PID的初始化参数, 给定学习因子变化范围, 并确定粒子速度位置; 然后评价粒子的适应值并优化学习因子参数, 将粒子对比更新后得到新的粒子群参数; 再对粒子群进行速度和位置更新, 判断新的粒子群是否为最优解, 满足则输出最优解, 不满足则继续进行更新。该算法主要是对PID的参数进行优化。

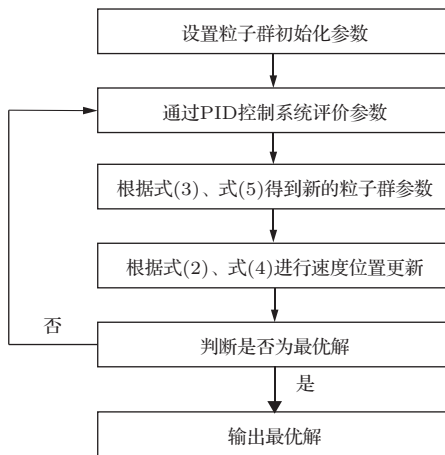


图3 改进PSO算法步骤图

Fig. 3 Step diagram of improved PSO algorithm

## 3 仿真和实验

### 3.1 换能器匹配

图4为超声雾化换能器的实验样品, 通过阻抗分析仪测得其谐振频率为35.25 kHz, 谐振阻抗为207  $\Omega$ , 电容为1.7 nF。

根据实验测得换能器的等效电路参数可知, 换能器是容性负载, 需要对换能器进行电感匹配, 提高其在谐振状态下的机电转换效率。根据实验测试的换能器等效电路参数, 理论计算的换能器的匹配电感大小为1.84 mH, 然后考虑系统变化和变压器输出等因素的影响, 实验中通过观察输出波形发现匹配电感在3 ~ 4 mH之间时系统稳定工作, 换能器输出雾化效果最好。



图4 换能器实物图

Fig. 4 Physical diagram of transducer

### 3.2 仿真曲线

图5是改进PID和标准PID在确定谐振频率为35.5 kHz下的频率跟踪效果仿真对比图。可以看到改进PID响应速度更快, 可以实现更精准的跟踪效果; 而标准PID曲线的响应速度较慢, 到达需要输出频率的时间长。由此表明, 当输出频率发生变化时, 改进PID会比标准PID更快地跟踪到频率点上并进行输出。

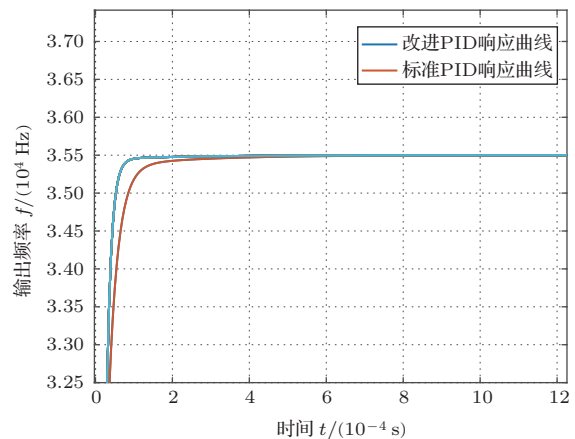


图5 PID响应曲线对比图

Fig. 5 Comparison diagram of PID response curves



### 3.3 调试结果

根据以上硬件设计制作了如图6所示的超声雾化电源主体样机。超声电源功率为600 W，初始PWM波输出频率为35.25 kHz，降压稳压模块采用LM2596芯片和LM1117芯片，驱动电路采用IR2103作为MOS驱动，逆变器开关管选择型号为N沟道MOS管IRFP150。将其与图4所示的换能器进行连接进行实验测试。

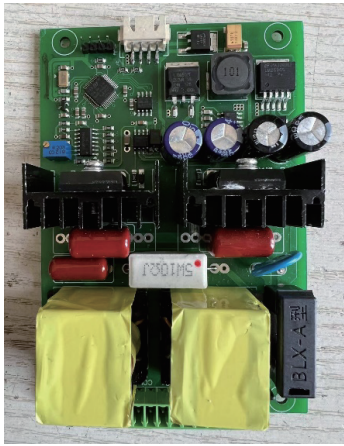


图6 超声电源样机

Fig. 6 Ultrasonic power supply prototype

对图6所示样机的逆变输出波形、变压器次级放大波形以及电流电压进行测试，采用标准PID的输出波形如图7所示，采用改进PSO优化PID的波形如图8所示。通过对比两种输出波形发现，采用改进PSO的波形更接近正弦波，且输出振幅保持在一个较大的值，能够有效提高系统的工作效率。图8中的频率更接近换能器的谐振频率，说明改进PSO在频率跟踪方面更具优势。

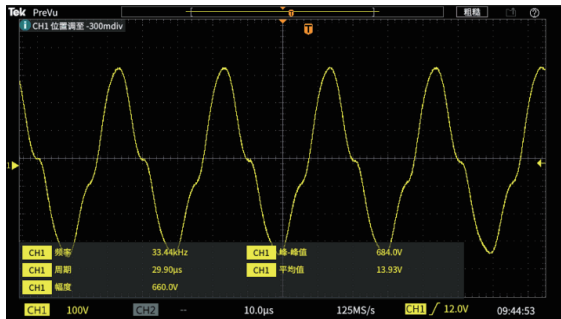


图7 标准PID输出波形

Fig. 7 Standard PID output waveform

图9为采用优化算法采样处理后得到的变压器次级支路上换能器两端电压和电流的波形。由图9

可知，在频率跟踪后换能器的输入电流、电压相位保持一致，表明换能器在谐振频率上工作，且其输出振幅稳定在一个较大值，证明了频率跟踪的稳定性。

图10是超声波雾化的实验测试效果图，从图中可以看出换能器雾化效果明显，经长时间实验测试换能器的雾化效果依然稳定。

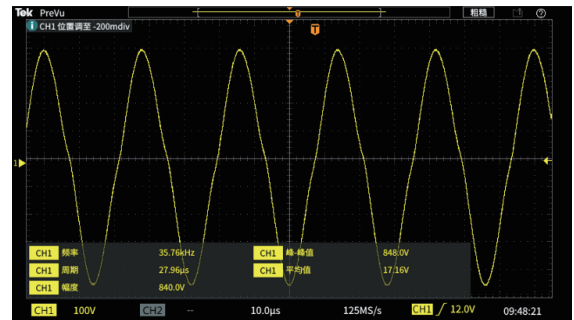


图8 优化PID输出波形

Fig. 8 Optimize PID output waveform

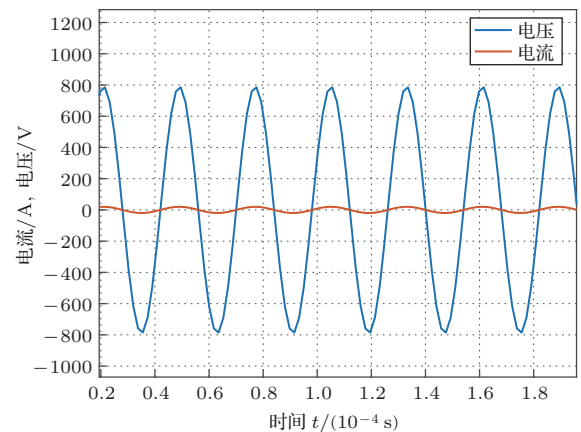


图9 频率跟踪波形

Fig. 9 Frequency tracking waveform



图10 超声波雾化效果图

Fig. 10 Ultrasonic atomization effect diagram

由以上实验测试结果可知, 本文采用的改进 PSO 优化 PID 参数作为频率跟踪的优化算法, 可实现对超声雾化换能器系统进行快速、持续稳定的频率跟踪。

#### 4 结论

本文采用改进 PSO 优化 PID 参数作为频率跟踪的优化算法, 设计了一种频率自动跟踪超声波雾化电源。利用该电源驱动一款超声雾化换能器进行超声雾化测试, 结果表明采用该优化算法设计的超声电源其输出波形和频率跟踪均得到了良好的改善, 实现了对超声雾化换能器系统进行快速、稳定的频率跟踪, 保证超声雾化系统持续稳定高效地工作。

#### 参 考 文 献

- [1] 李小雪, 汪东, 李平, 等. 基于 DDS 的超声换能器频率跟踪系统 [J]. 压电与声光, 2009, 31(5): 692-694, 698.  
Li Xiaoxue, Wang Dong, Li Ping, et al. Frequency tracking system for piezoelectric transducer based on DDS[J]. Piezoelectric and Acoustooptic, 2009, 31(5): 692-694, 698.
- [2] 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.  
Peng Chengxiang, Duan Fajie, Jiang Jiajia, et al. Development of ultrasonic driving power based on frequency tracking[J]. Power Electronics Technology, 2019, 53(5): 1-5.
- [3] 滕旭东, 傅友登, 王弘辉. 基于数字 PWM 的新型超声波清洗电源的研制 [J]. 电子技术应用, 2007, 33(9): 154-157.  
Teng Xudong, Fu You deng, Wang Honghui. A novel ultrasonic cleaning power supply based on digital PWM[J]. Electronic Technology Application, 2007, 33(9): 154-157.
- [4] Jimenez T. An auto-tuning PID control system based on genetic algorithms to provide delay guarantees in passive optical networks[J]. Expert Systems with Applications an International Journal, 2015, 42(23): 9211-9220.
- [5] 刘宁庄, 张远宝, 许龙, 等. 基于模糊 PID 控制的超声电源频率跟踪设计 [J]. 电力电子技术, 2021, 55(10): 80-82, 86.  
Liu Ningzhuang, Zhang Yuanbao, Xu Long, et al. Design of ultrasonic power frequency tracking based on fuzzy PID control[J]. Power Electronics Technology, 2021, 55(10): 80-82, 86.
- [6] 齐晓旭, 陈奇栓. 单片机在超声电源频率跟踪电路中的应用研究 [J]. 时代农机, 2016, 43(4): 36-37.  
Qi Xiaoxu, Chen Qishuan. Research on application of single chip microcomputer in frequency tracking circuit of ultrasonic power supply[J]. Times Agricultural Machinery, 2016, 43(4): 36-37.
- [7] 曾东红, 李正中, 周光平, 等. 一种超声清洗电源频率跟踪技术 [J]. 齐齐哈尔大学学报(自然科学版), 2010, 26(1): 1-4.  
Zeng Donghong, Li Zhengzhong, Zhou Guangping, et al. A frequency tracking technology for ultrasonic cleaning power supply[J]. Journal of Qiqihar University(Natural Science Edition), 2010, 26(1): 1-4.
- [8] 孔亚广, 陈洪欢, 郑松. 电流反馈式超声波发生器的频率搜索和跟踪 [C]//2013 年全国功率超声学术会议论文集, 2013: 57-59.
- [9] 刘宁庄, 文迪雅, 段富才, 等. 压电换能器等效参数测量方法对比研究及验证 [J]. 压电与声光, 2021, 43(5): 710-714.  
Liu Ningzhuang, Wen Diya, Duan Fucai, et al. Comparative study and verification of measuring methods of equivalent parameters of piezoelectric transducers[J]. Piezoelectric and Acoustooptic, 2021, 43(5): 710-714.
- [10] 杨晓, 王国柱. 基于 PID 控制理论的改进粒子群优化算法 [J]. 控制工程, 2019, 26(8): 1497-1502.  
Yang Xiao, Wang Guozhu. The improved particle swarm optimization algorithm based on PID control theory[J]. Control Engineering, 2019, 26(8): 1497-1502.
- [11] 陈水利, 蔡国榕, 郭文忠, 等. PSO 算法加速因子的非线性策略研究 [J]. 长江大学学报(自科版)理工卷, 2007, 4(4): 1-4, 16, 172.  
Chen Shuili, Cai Guorong, Guo Wenzhong, et al. Research on nonlinear strategy of acceleration factor of PSO algorithm[J]. Journal of Changjiang University(self Science Edition) Science and Engineering Volume, 2007, 4(4): 1-4, 16, 172.
- [12] 苏攀, 张伟, 李强, 等. 基于改进粒子群算法的 PID 参数优化研究 [J]. 软件导刊, 2020, 19(10): 94-97.  
Su Pan, Zhang Wei, Li Qiang, et al. PID parameter optimization based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. Software Guide, 2020, 19(10): 94-97.
- [13] Kennedy J, Eberhart R C. Particle swarm optimization[C]. IEEE International Conference on Neural Networks, Piscataway, 1995(2): 1942-1948.
- [14] 赵志刚, 林玉娇, 尹兆远. 基于自适应惯性权重的均值粒子群优化算法 [J]. 计算机工程与科学, 2016, 38(3): 501-506.  
Zhao Zhigang, Lin Yujiao, Yin Zhaoyuan. A mean particle swarm optimization algorithm based on adaptive inertia weight[J]. Computer Engineering and Science, 2016, 38(3): 501-506.