



### 《技术·专家论坛》简介

发表科研院所、企业及其他机构的专家学者、高层管理人员的科研成果、研究报告,及时反映行业最新技术水平,推动行业健康发展。

### 来稿要求

文章内容具有科学性、系统性和现实指导性,引用的资料真实可信,格式符合科技论文的要求,最好有创新或自己的研究成果。

责任编辑:董鹏华

电 话:010-68207886/92/  
96/97/99 转 8016

传 真:010-68207893

E-mail: dongpenghua@263.net  
editor@cctca.com

专家论坛

# 超声波

## 发生器的频率跟踪电路

鲍善惠 王敏慧

(陕西师范大学应用声学研究所,西安,710062)

**摘 要** 频率跟踪电路是超声波发生器中的一种特殊电路。本文在介绍频率跟踪的基本原理和应用情况的基础上,分析了实现频率跟踪的不同方案,并对于几种典型的频率跟踪电路作了详细的说明。

**关键词** 频率跟踪 超声波发生器 电路 压电换能器

**Abstract:** Frequency tracking circuit is one of the special circuits used in the ultrasonic generator. Based on the brief introduction of the principle and application of the frequency tracking technology, the authors analyze various protocols for realizing frequency tracking and discussed some typical circuits.

**Keywords:** Frequency tracking; Ultrasonic generator; Circuit; Piezoelectric transducer

### 1. 前言

超声波发生器是超声设备的重要组成部分,担负着向超声换能器提供超声频电能的任务。为了使换能器高效率地工作,不但要求发生器提供的电能有足够的功率,而且要求其频率与换能器的谐振频率一致。通常,换能器的谐振频率会由于发热、负载变化、老化等原因发生改变。对于超声波清洗设备来说,这种现象尤为显著。因为除了换能器自身的损耗引起发热外,清洗液的温度

也会传至换能器;而清洗槽中液面高度的变化或被清洗物件的变化是难以避免的,所有这些因素都会引起换能器谐振频率的漂移。如不及时调整发生器的振荡频率,换能器的工作状态就会变化,轻则效率下降,重则停止振动。用手动(即人工)方式调整频率不但效率低下,而且不适应自动化生产的要求。因此,需要发生器具有自动调节频率的性能,即通常称作自动频率跟踪或简称频率跟踪。



## 2. 频率跟踪的原理

简言之，频率跟踪就是利用反馈技术，自动调节发生器的振荡频率，使其随着换能器谐振频率的变化而改变，以保持换能器始终工作在某种设定状态下。反馈的方式通常有声反馈和电反馈两种，这两种反馈的原理图分别示于图 1 a和图 1b。声反馈是拾取换能器的机械振动，转变为电信号后送到发生器的输入端。这种反馈的电路简单，但需要在负载端进行机械连接，比较费事，有的情况下还无法实现，故使用较少，目前主要应用在超声电机的频率跟踪上。电反馈是对换能器的电流和电压采样，再对采样信号进行一定处理，然后送回到发生器去控制振荡频率。这种反馈完全借助电子元件实现，制作方便，而且方案灵活，实现的具体方式也非常多样，因此应用较广。超声清洗和超声加工设备基本上都是这种反馈。本文也只讨论电反馈方式。

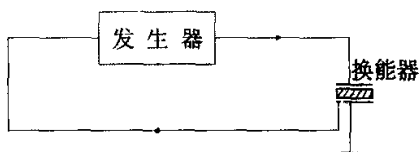


图 1a 声反馈框图

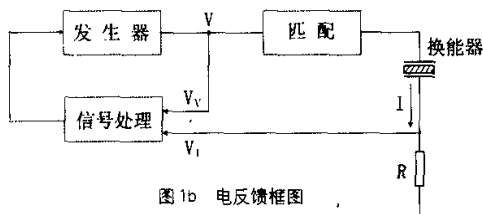


图 1b 电反馈框图

## 3. 频率跟踪的方案

从换能器的电端可以对其两端的电压和流过的电流分别采样。采样信号中既含有电压和电流的幅度信息，也含有相位信息。利用这些信息，可以构成多种频率跟踪方案。为换能器设定不同的工作状态，常用的方案有：

- (1) 电流方案。这种方案采用电流信号  $V_i$ ，将换能器设定在电流最大的工作状态。
- (2) 功率方案。这种方案同时采用电流信号  $V_i$  和电压信号  $V_v$ ，将两者相乘得到换能器的电功率信号  $V_p$ 。换能器被设定在电功率最大的工作状态。

(3) 相位方案。此方案也是同时采用电流信号  $V_i$  和电压信号  $V_v$ ，不过是通过鉴相得到两者的相位差信号。换能器工作于电流和电压同相的状态。

从上述可知，不同的频率跟踪方案所设定的换能器工作状态是不同的。究竟采用哪一种方案，除了取决于实际问题的需要外，还在一定程度上取决于设计者对换能器工作状态的理解和把握。

## 4. 几种典型的频率跟踪电路

下面介绍几种用于压电换能器的典型跟踪电路，对于磁致伸缩换能器，电路会稍有不同，但原理都是适用的。

### (1) 差动变量器桥式电路<sup>[1]</sup>

这是电流方案的一个例子，它利用串联谐振时换能器的串联支路电流最大的特点，将换能器的工作点设定在串联谐振频率  $f_s$  上。此电路的原理示于图 2。图中的虚线框内是压电换能器 (TD) 的等效电路， $C_0$ 、 $C_1$ 、 $L_1$  和  $R_1$  分别为静态电容、动态电容、动态电感和动态电阻。 $C_1$ 、 $L_1$  和  $R_1$  所在的支路即串联支路。TF 为电流互感器，C 为补偿电容。TD、C 和 TF 的两个初级线圈  $W_1$ 、 $W_2$  构成电桥的四个臂。发生器的输出信号  $V_0$  加在电桥的一条对角线上。如果调节 C 和  $W_1$ 、 $W_2$  使下式满足： $C : W_1 = C_0 : W_2$ ，则流经 C 的电流  $I$  和  $C_0$  的电流  $I_0$  在 TF 中产生的磁通大小相等而方向相反，两者恰好抵消。只有流经串联支路的电流  $I_1$  才会在次级线圈  $W_3$  中激发感应电流，并反馈回发生器的输入端。当  $V_0$  的频率  $f$  等于串联谐振频率  $f_s$  时，串联支路谐振， $I_1$  最大。此时反馈信号最强且与  $V_0$  同相位，因此振荡条件满足，产生此频率的振荡信号。如果  $f_s$  变为  $f_s'$ ，反馈信号的相位将随之而变，结果振荡频率也变为  $f_s'$ ，从而达到频率跟踪的目的。

### (2) 电流搜索式电路<sup>[2]</sup>

如图 3 所示。这种电路用单片机搜索工作电流的最大值，最终将换能器的工作点设定电流最大处。其依据

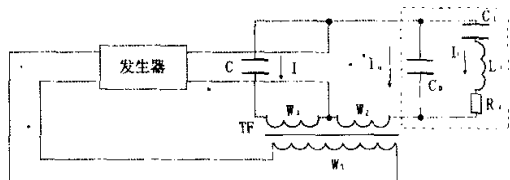


图 2 差动变量器桥式电路



是谐振状态下换能器阻抗最小，回路电流最大。如果换能器的谐振频率发生漂移，电流将因系统失谐而减小。因此搜索到电流的最大值便可使换能器处于最佳工作状态。工作时，单片机发出指令，以一定的步长 $\Delta f$ 改变发生器的振荡频率，同时检测电流的变化，如频率改变后电流增大，则继续按照此方向改变频率，如果频率改变后电流减小，单片机会使频率朝相反方向改变，直到最大电流值出现。这个电路实际上检测的是功放级的直流电流，也可以检测流过换能器的超声频电流<sup>[3]</sup>。

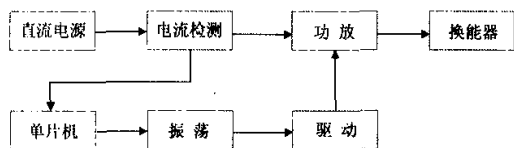


图3 电流搜索式电路

### (3) 功率搜索式电路

这个电路用电压采样 $V_v$ 和电流采样 $V_i$ 相乘得到功率信号 $V_p$ ，再用 $V_p$ 控制振荡频率，使换能器工作在功率最大的状态。其原理图示于图4。

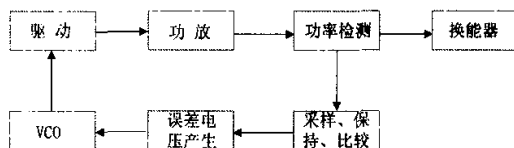


图4 功率搜索式电路

此电路的设计依据是换能器谐振时输出的声功率最大，失谐时声功率会减小。若换能器的电声效率为一常数，则其吸收的电功率与输出的声功率成正比。只需搜索出换能器电功率的最大点，将工作频率设定为该点的

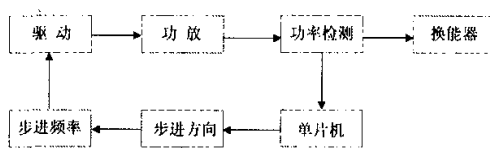


图5 单片机搜索最大功率原理图

频率即可。由图4可见，此电路的关键在于对 $V_p$ 的采样处理。工作时，需要将前一时刻的 $V_p$ 保持下来，用于和后一时刻的 $V_p$ 作比较。比较的结果以误差电压的形式送给压控振荡器(VCO)，调整其振荡频率。最后，频率会在功率最大点附近来回摆动。

如果用软件取代图4中的硬件，可以改成单片机编程搜索，图5是其方框图<sup>[4]</sup>。其原理与电流搜索相似，因此不再重复。

### (4) 锁相环(PLL)跟踪电路<sup>[5]</sup>

这种电路从电压采样 $V_v$ 和电流采样 $V_i$ 检测出它们的相位差 $\Delta\phi$ ，再将 $\Delta\phi$ 转变成误差信号去控制VCO的振荡频率，最终使换能器保持在 $\Delta\phi=0$ 的工作状态上。图6是PLL跟踪电路的原理图，它的跟踪原理可简述如下：在调好匹配之后，换能器TD与匹配电感L组成的系统在谐振频率上呈纯阻性，换能器两端电压 $V$ 和流经其电流 $I$ 同相。一旦频率发生漂移，系统会出现电抗成分， $V$ 和 $I$ 之间即有了相位差。调节频率可以使 $V$ 和 $I$ 恢复同相，让系统重新回到纯阻状态。

图6中的虚线框里是PLL电路，它由鉴相器(PD)、低通滤波器(LF)和VCO组成。集成的PLL电路(如CD4046)中一般含有PD和VCO，只有LF需要外接。工作时，将整形后采样信号 $V_v$ 和 $V_i$ 送入PD，两者的相位差 $\Delta\phi$ 被检出，并经过滤波成为直流电压，用作VCO的控制信号。设开始时VCO的输入电压为 $V_0$ ，振荡频

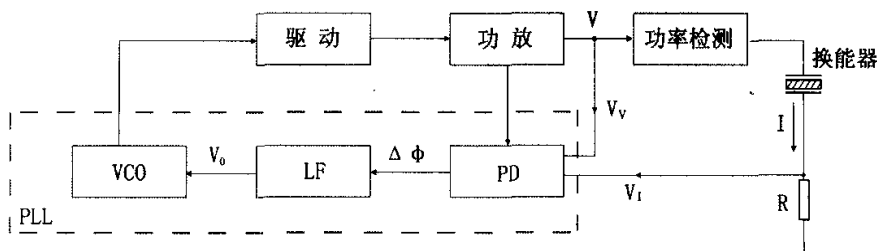


图6 PLL跟踪电路方框图



率恰好等于换能器的谐振频率 $f_{s0}$ 。此时 $V$ 与 $I$ 同相。当换能器的谐振频率由于某种原因变成 $f_{s1}$ 时， $V$ 和 $I$ 之间产生相位差 $\Delta\phi$ ， $\Delta\phi$ 形成的误差电压返回到VCO，使其输入电压由 $V_0$ 变为 $V_1$ ，振荡频率则相应地变为 $f_{s1}$ ，于是系统又回到了 $V$ 和 $I$ 同相的状态。

如在VCO之后加一个分频电路，使发生器的工作频率远低于VCO的振荡频率，则可防止因频率频繁改变而产生的抖动。

### 5. 结语

由于频率跟踪技术在超声设备中的重要性，对它的研究探讨一直在进行当中。新颖的设想和技术不断出现。除了现已比较流行的单片机技术外，还有如：

粗精频率跟踪相结合的方式，即粗跟踪由软件实现，采用变频搜索法，精跟踪由硬件实现，采用锁相环电路实现<sup>[7]</sup>。

模糊控制，这种控制方式不要求掌握被控对象的精确数学模型，而是根据人工控制规则组织控制决策，它能对复杂系统进行较好的控制<sup>[8]</sup>。

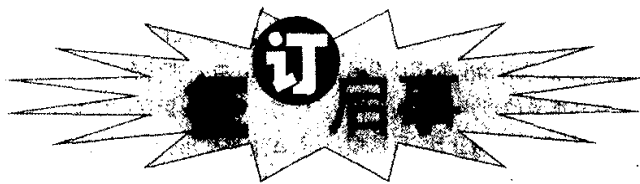
动态跟踪，即频率漂移时，在调节频率的同时，调节匹配电感值<sup>[9]</sup>。

这些尝试，都有益于频率跟踪技术的不断完善，并

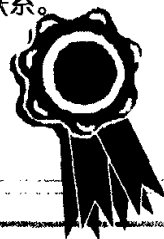
将推动大功率超声设备的应用和发展。

### 参考文献

- [1]张镜澄. 差动变量器桥式自动频率跟踪电路. 应用声学, 1988, 7 (4).
- [2]董惠娟, 张广玉, 董玮等. 压电超声换能器电端匹配下的电流反馈式频率跟踪. 哈尔滨工业大学学报, 2000, 32(3).
- [3]刘殿通, 于思远, 刘金华等. 程控超声加工电源的频率跟踪和恒幅控制. 电加工与模具, 2000(2).
- [4]徐涛. 超声波发生器电源技术的发展(中). 洗净技术, 2003 (7).
- [5]王东坡, 霍立兴, 蔡国余等. 改善焊接接头疲劳强度的超声冲击装置. 焊接学报, 2000, 21(2).
- [6]鲍善惠. 用锁相环电路跟踪压电换能器的并联谐振频率区. 应用声学, 2001, 20 (3).
- [7]戴向国, 傅水根, 王先逵. 旋转超声加工机床的研究. 中国机械工程, 2003, 14(4).
- [8]曹群, 周兆英, 罗晓宁等. 基于自寻最优模糊控制的自动频率跟踪. 应用声学, 2003, 22(1).
- [9]李旭, 刘震. 超声加工中振幅衰减的原因分析. 中国民航学院学报, 2001, 19(1).



- 《洗净技术》杂志在全国各地邮局均可订阅。
- 本刊的邮发代号：82-629。
- 错过征订期的读者，请直接与本刊编辑部联系。



# 超声波发生器的频率跟踪电路

作者: [鲍善惠](#), [王敏慧](#)  
 作者单位: [陕西师范大学应用声学研究所, 西安, 710062](#)  
 刊名: [洗净技术](#)  
 英文刊名: [CLEANING TECHNOLOGY](#)  
 年, 卷(期): 2003, "" (10)  
 被引用次数: 9次

## 参考文献(9条)

- 张镜澄. [差动变量器桥式自动频率跟踪电路](#) 1988(04)
- 董惠娟, 张广玉, 董玮. [压电超声换能器电端匹配下的电流反馈式频率跟踪](#)[期刊论文]-[哈尔滨工业大学学报](#) 2000(03)
- 刘殿通, 于思远, 刘金华. [程控超声加工电源的频率跟踪和恒幅控制](#)[期刊论文]-[电加工与模具](#) 2000(02)
- 徐涛. [超声波发生器电源技术的发展](#)[期刊论文]-[洗净技术](#) 2003(07)
- 王东坡, 霍立兴, 蔡国余. [改善焊接接头疲劳强度的超声冲击装置](#)[期刊论文]-[焊接学报](#) 2000(02)
- 鲍善惠. [用锁相环电路跟踪压电换能器的并联谐振频率区](#)[期刊论文]-[应用声学](#) 2001(03)
- 戴向国, 傅水根, 王先逵. [旋转超声加工机床的研究](#)[期刊论文]-[中国机械工程](#) 2003(04)
- 曹群, 周兆英, 罗晓宁. [基于自寻最优模糊控制的自动频率跟踪](#)[期刊论文]-[应用声学](#) 2003(01)
- 李旭, 刘震. [超声加工中振幅衰减的原因分析](#)[期刊论文]-[中国民航学院学报](#) 2001(01)

## 相似文献(10条)

- 学位论文 [张锋](#) [基于单片机控制的超声波发生器驱动电源的研究](#) 2009  
 人的耳朵能感受到的振荡频率在20-20000Hz范围的声波, 超过人耳能感受到的声波频率以上的声波叫超声波。超声波有许多应用, 有超声波清洗、超声波钻孔、超声波振动等。超声波振动是近几十年兴起的新事物, 随着人们对超声波研究的不断深入, 应用也日益广泛。<br>  
 功率超声技术凭借其独特的优点在国民经济各部门日益广泛应用。目前超声设备由采用大功率电子管或高频可控硅发展到全控型电子器件。随着新理论、新技术、新器件的不断出现和成熟, 超声技术必将充分发挥其优势, 在各领域产生更大作用。本文涉及的功率超声系统主要由高频超声波电源和压电换能器两部分组成。高频超声波电源为压电换能器提供电能, 压电换能器将电能转为动能。<br>  
 超声波发生器的种类很多, 大致可分为两种类型, 机械型和电声型。机械型超声波发生器直接用机械方法使物体振动而产生超声波。常见的机械型超声波都是流体动力式的, 即利用每秒几万次的频率断续从喷嘴喷出, 撞击放在喷嘴前的空腔或簧片, 引起共振在媒质中产生超声波。电声型超声波发生器是应用的最广泛的。它是利用电磁能量转换成机械波能量。<br>  
 本设计采用频率自动跟踪的方式来使超声波换能器处于谐振, 满足超声波电源与超声波换能器工作在最佳状态, 使得整机达到最佳工作效率。功率检测电路调节脉冲电压的脉宽来改变超声波发生器的输出功率, 以实现功率恒定。压控振荡器选用货源充足、价格低廉的TL494, 可满足本设计要求。D类功率放大器就是开关功率放大器, 选用高耐压的VMOS管, 组成半桥电路, VMOS管的驱动采用变压器隔离倒相。由于超声波换能器的特性, 超声波清洗机中的匹配电路包含两个: 一个是功率匹配, 一个是调谐匹配。前者是为了使超声波电源的输出内阻与负载阻抗相一致, 采用变压器匹配方法。后者是使换能器呈现纯阻性, 采用串联电感的方法。<br>  
 本文对系统的总体设计方案、硬件和软件设计、单元电路及主要单元电路实验进行了详细地介绍。文章最后应用PSPIICE软件对整个系统进行了仿真分析, 对理论设计进行修正。结果表明系统设计可行, 性能指标基本可以满足设计要求。
- 期刊论文 [鲍善惠](#), [王敏慧](#) [超声波发生器的频率跟踪电路](#) -[洗净技术](#)2003, "" (12)  
 频率跟踪电路是超声波发生器中的一种特殊电路。本文在介绍频率跟踪的基本原理和应用情况的基础上, 分析了实现频率跟踪的不同方案, 并对于几种典型的频率跟踪电路作了详细的说明。
- 学位论文 [高守香](#) [双频超声波清洗机的研制](#) 2007  
 功率超声应用技术已经在清洗、乳化和加工等方面取得可观的成效。超声清洗是功率超声技术最广泛也较成熟的一种应用, 并且日益向各行各业渗透。  
 超声波清洗中的压电换能器常因驱动电路的输出频率没有谐振在压电陶瓷片的共振频率上, 因而导致压电陶瓷片的Q值下降, 损耗加大, 继而使得陶瓷片发热, 效率减小而发生断裂。因此共振频率是压电陶瓷超声波换能器的一个重要参数, 它随负载及工作温度等因素的变化而变化, 或随时间的增加而变化, 换能器馈电电路能否自动跟踪其共振频率就变得很重要。此外, 由于目前市场上的超声波清洗机设备多采用单一频率的工作方式, 也就是每套设备只能工作在一个超声频率上, 这使得结构复杂的工件得不到充分清洗, 同时, 由于驻波场的形成, 造成清洗盲区, 使清洗效果不均匀。  
 本文以半桥变换器为夹心式压电换能器的驱动电路, 以脉宽调制器3525为脉冲波产生电路, 采用单片机89S51、DAC0832D/A转换器及软件技术, 设计出具有频率跟踪功能的双频超声波发生器, 较好地消除超声波清洗机清洗槽内由驻波引的清洗死角, 有效地提高了超声波清洗机清洗效率。实验表明, 采用双频超声波清洗方式的超声波清洗机, 工作稳定、高效, 具有广泛的应用前景。
- 学位论文 [严勇文](#) [引线键合变频式超声波发生器的研究与设计](#) 2008  
 本研究研究与设计的是面向芯片键合封装领域的变频式超声波发生器, 其可以在广频域内驱动不同的金球引线键合换能器, 智能搜索换能器最佳工作频率并动态锁相实现换能器的最优功率输出。其中, 所进行的工作及成果如下:  
 (1) 通过对换能器等效电路模型及导纳圆进行的分析、仿真及实验, 得出换能器各谐振模式下的电学特点及其锁相特征, 为变频式超声波发生器的信号采集方案及锁相算法提供明确的理论依据。  
 (2) 对基于它激模式的变频式超声波发生器进行了整体设计, 并对微控制器系统、DDS信号生成系统、滤波系统、功率放大系统、信号采集系统、信号调理反馈系统、人机交互系统、电源系统进行了研究、方案比较与详细电路设计。

(3) 为了得到快速切换、低失真、高稳定、宽频谱的信号源,系统引入了通信领域的DDS技术。采用高速AVR单片机控制DDS,系统具备灵活、快速的变频效果。辅以具有防三极管热击穿功能的高保真AB类功率放大电路及精密设计的滤波器,超声波发生器具备优异的正弦信号输出。同时,基于真有效值的频率跟踪电路,引入射频领域的真功率检测芯片,其具备快速、准确地将复杂的换能器电流信号以线性及分贝形式的直流电压值反馈给单片机的能力。单片机通过判断模数转换后的数字量最大值及最小值,分别实现换能器串联、并联谐振的频率跟踪。加设电压、电流相位检测电路,进一步强化锁相能力。最后,为系统提供了完善的人机交互界面、USB通信及信号幅值、工载时间的数控方案。

(4) 实验表明,变频式超声波发生器具有广频域驱动、多谐振模式锁频、数字式控制、快速锁相及阻抗分析等优秀性能。

#### 5. 学位论文 [陈振伟 超声波发生器的研究](#) 2007

自从超声科技问世以来,其发展日新月异,应用日益广泛,已经取得了良好的社会效益和经济效益。但是作为一门综合性极强的交叉学科,超声学研究与应用均起步较晚,技术状况已远远不能满足我国经济事业多领域的需求,广阔的市场前景促使我们加大研究力度。

本文首先介绍了功率超声技术的原理和发展趋势,然后详细分析了超声波设备的组成、关键技术以及设计难点,并采用三种不同的控制方案设计、制作了超声波发生器,分别应用在超声波清洗机和焊接机中。

主电路使用集MOSFET和IGBT的优点于一身的IGBT作为开关管,构成半桥逆变电路。通过分析超声波换能器的阻抗特性,比较换能器工作在串联谐振频率和并联谐振频率的优劣,介绍了几种匹配方式的特点,设计了匹配电路。

控制电路中分别采用了锁相方式、扫频控制方式以及模糊自适应控制方式实现了对超声负载的自动频率跟踪,并且功能完善,配备了软启动、死区调节、限流、过流、驱动自保护和过热保护,有力的保障了系统长时间工作的稳定性和可靠性。

最后通过实验,证明了设计的方案可靠,适应性强,样机不仅具有频率自适应功能,而且能够功率自适应,具有良好的推广应用意义。

#### 6. 会议论文 [王艳东,李赫,王敏慧,鲍善惠 锁相环跟踪超声振动系统谐振频率的改进](#)

本文从讨论超声振动系统的阻抗特性入手,分析了应用CD4046跟踪串联谐振频率容易造成死锁的原因,提出了带解锁的频率跟踪系统的改进方案,实验结果表明此方案有较大的跟踪调节范围,较强的适应负载变化的能力,对超声波发生器的研制有一定的参考意义。

#### 7. 会议论文 [尚彦芝,蔡晓君,刘湘晨 智能超声波发生器的频率自动跟踪系统应用研究](#) 2009

频率自动跟踪技术是超声旋光加工的关键技术之一。本文首先阐述了超声加工过程中频率自动跟踪的必要性,其次分析了频率跟踪方法中的锁相频率跟踪方法,并着重介绍了智能超声波发生器的频率自动跟踪系统在超声加工中的实现方式。

#### 8. 期刊论文 [于猛,刘润华,刘静, YU Meng, LIU Run-hua, LIU Jing 基于56F803型DSP的大功率超声波电源的研究 - 国外电子元器件](#) 2006, "(4)

针对大功率超声波电源高精度、高功率输出的特点,对超声波电源控制策略进行了改进。提出一种基于56F803型DSP的频率跟踪与功率调节相结合的周期分段移相控制策略,研究了基于此控制方法的超声波电源。

#### 9. 学位论文 [王辉 频率跟踪、恒功率超声波清洗机的研究与实现](#) 2004

在液体中发射足够大的超声波能量,液体会产生“空化效应”。“空化效应”是将超声的振动加到清洗液中,液体内部会产生拉伸和压缩现象,液体拉伸时会产生气泡,液体压缩时气泡会被压碎破裂。超声波清洗的原理就是在清洗液产生“空化效应”,气泡的产生与破裂产生强大的机械冲击力,用以清除物体表面的杂质、污垢和油腻。超声波清洗机的清洗速度快,可提高生产效率;操作实现自动化,不须人手接触清洗液,安全可靠,且节省人力;微小的气泡可以到达特殊造型的零部件深处,对深孔、细缝和工件隐蔽处亦可清洗干净,所以超声清洗应用更为广泛;清洗效果好,清洁度高且全部工件清洁度一致,实验显示,利用超声清洗技术,可得到比风吹、浸润、蒸汽和刷子清洗更好的清洗效果。使用超声波达到清洗目的,需要有容器与清洗液、超声波换能器、超声波电源。超声波换能器是产生超声场的部件,超声波电源用以驱动超声波换能器,向其提供能量,使之产生超声场。通常的超声波清洗机是在匹配电路上加占空比为50%的交流方波信号。该设计采用频率自动跟踪的方式来使超声波换能器处于谐振,满足超声波电源与超声波换能器工作在最佳状态,使得整机达到最佳工作效率。功率检测电路调节脉冲电压的脉宽来改变超声波发生器的输出功率,以实现功率恒定。压控振荡器选用货源充足、价格低廉的TL494,可满足该设计要求。D类功率放大器就是开关功率放大器,选用高耐压的VMOS管,组成全桥电路,VMOS管的驱动采用变压器隔离倒相。由于超声波换能器的特性,超声清洗中的匹配电路包含两个:一个是功率匹配,一个是调谐匹配。前者是为了使超声波电源的输出内阻与负载阻抗相一致,采用变压器匹配方法。后者是使换能器呈现纯阻性,采用串联电感的方法。该文对系统的总体设计方案、硬件和软件设计、单元电路及主要单元电路实验进行了详细地介绍。

#### 10. 期刊论文 [戴向国,傅水根,王先逵,卢达溶,洪亮 旋转超声加工智能超声波发生器的研究 - 清华大学学报\(自然科学版\)](#) 2002, 42(2)

为进行硬脆材料的旋转超声加工,研制了智能超声波发生器。类比于数控插补原理,提出了粗频率跟踪的自动控制方案,即:频率粗调由软件实现,频率精调由锁相环电路实现。对振动系统恒定振幅控制进行了理论分析,实验结果表明,研制的智能超声波发生器频率跟踪迅速准确,并能实现振动系统的恒定振幅控制,可以实现振动系统的自动运行。

### 引证文献(8条)

#### 1. [郭林伟,林书玉,许龙 压电陶瓷换能器电感与电容匹配特性研究](#)[期刊论文]-[陕西师范大学学报\(自然科学版\)](#)

2010(2)

#### 2. [曾东红,李正中,周光平,钱盛友 一种超声清洗电源频率跟踪技术](#)[期刊论文]-[齐齐哈尔大学学报\(自然科学版\)](#)

2010(1)

#### 3. [李小雪,李平,汪东,肖灵 夹心式压电换能器的谐振频率跟踪方案设计](#)[期刊论文]-[应用声学](#) 2009(4)

#### 4. [武剑,董惠娟,张广玉 基于静态电容补偿的压电换能器锁相环频率跟踪](#)[期刊论文]-[大连海事大学学报](#) 2009(1)

#### 5. [郭林伟,林书玉,许龙 压电换能器静态匹配电路的研究](#)[期刊论文]-[纺织高校基础科学学报](#) 2008(3)

#### 6. [杨雪飞,祁欣 超声波功率萃取系统电路设计](#)[期刊论文]-[电子测量技术](#) 2006(2)

#### 7. [何世传 基于嵌入式系统的声化学用智能化超声电源的设计](#)[学位论文]硕士 2006

#### 8. [冯冬菊 超声波铣削加工原理及相关技术研究](#)[学位论文]博士 2005

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_xjjs200310002.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_xjjs200310002.aspx)

授权使用: 北方民族大学(bfmzdx), 授权号: 826db74e-4a0c-443a-b599-9e3c013d51fd

下载时间: 2010年11月28日