

超声波发生器的一种新型自动频率跟踪方法的研究¹

邓杏松

河海大学计算机及信息工程学院, 江苏常州 (213022)

E-mail: dengxingsong258@gmail.com

摘 要: 频率跟踪电路是超声波发生器中的一种特殊电路, 本文介绍了频率跟踪的基本原理, 分析了利用锁相环技术实现频率跟踪的方案, 指出了这种方案存在一定的缺点, 并在此基础上实现了一种实时的软件跟踪算法, 只需将信号通过低通滤波器得到基频分量, 然后对基频分量进行简单的数学运算即可实现频率的实时跟踪。该方法较以往的方法计算量小、跟踪速度快、精度高。

关键词: 超声波发生器; 频率跟踪; 锁相环; 软件实时跟踪

中图分类号: TP274+.53 **文献标识号:** B

1 引言

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作用。为了使超声换能器高效率的工作并发挥超声加工的优越性, 要求振动系统工作在谐振状态^[1]。一般换能器振动系统工作前, 可通过调节电源的电频率来满足系统处于共振的工作条件。但是在实际加工中, 由于负载的变化、系统发热等一系列因素的影响, 使振动系统的固有频率发生变化, 此时若不及时调整换能器的电源频率(即不采用自动频率跟踪), 振动系统将工作在非谐振状态, 从而使其输出振幅减小, 造成加工质量下降, 当失谐严重时, 超声振动加工的优越性消失。因此需要超声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。

2 自动频率跟踪原理

所谓自动频率跟踪, 是指在加工过程中当由换能器、变幅杆、刀具等组成的振动系统在外界因素影响下其固有振动频率发生变化时, 控制系统能立即发现变化后的固有频率并及时调整供电频率与变化后的固有频率相同使振动系统始终工作在谐振状态, 以维持振动系统的最大振幅^[2]。超声加工中的自动频率跟踪问题得到国内外学者及应用领域的广泛重视^[3,4]。频率跟踪的方法很多, 其中较为普遍的方法: 一种是自激式, 另一种是他激式。自激式线路简单、成本低, 但可靠性差, 不容易起振; 他激式线路复杂一些, 但可靠性好, 并且频率自动跟踪能力强, 但是不能实时控制。随着锁相技术的不断成熟, 锁相环技术也正在应用于超声波发生器中。目前使用的锁相环可以分为模拟锁相环、数字锁相环、全数字锁相环和软件锁相环等几种。随着虚拟无线电技术的出现, 软件锁相环得到了越来越广泛的应用。但是与其他类型锁相环相比, 其基本原理并没有太大变化, 只是在数学模型、参数设计和实现方式方面存在差异。

2.1 锁相环回路的基本原理

锁相环回路是一个反馈系统, 通常由鉴相器(Phase Detector, 简称PD)、环路滤波器(Loop Filter, 简称LPF)、压控振荡器(Voltage Control Oscillator, 简称VCO)所组成, 如图1所示, 压控

¹本课题得到国家自然科学基金项目(10574038)、水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放课题(2005406911)的资助。

振荡器 (VCO) 的

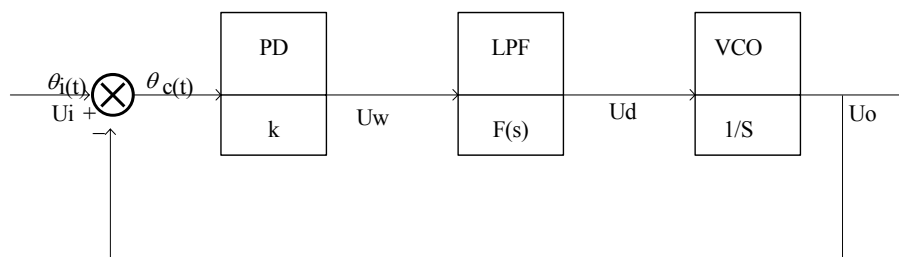


图1 锁相环线性相位模型

输出 U_o 接至相位比较器的一个输入端, 其输出频率的高低由低通滤波器上建立起来的平均电压 U_d 大小决定。施加于相位比较器另一个输入端的外部输入信号 U_i 与来自压控振荡器的输出信号 U_o 相比较, 比较结果产生的误差输出电压 U_w 正比于 U_i 和 U_o 两个信号的相位差, 经过低通滤波器滤除高频分量和噪声后, 得到一个平均值电压 U_d 。这个平均值电压 U_d 将缩小VCO 输出频率和输入频率之差, 直至两个信号频率获得一致。这时它们的相位差保持恒定 (即同步) 称作相位锁定。VCO 可在某一范围内自动跟踪输入信号的变化, 如果输入信号频率在锁相环的捕捉范围内发生变化, 锁相环能捕捉到输入信号频率, 并强迫VCO 锁定在这个频率上。锁相环应用非常灵活, 如果输入信号频率 f_1 不等于VCO 输出信号频率 f_2 , 而要求两者保持一定的关系, 比如比例关系或差值关系, 可在外部加入一个分频器, 以满足不同工作的需要。锁相环的跟踪特性可以用线性反馈控制系统的一般理论来研究。当相角差较小的情况下, 环路的传递函数可依据图1 分析得到:

$$H(s) = \frac{1}{1 + H_o(s)} \quad (1)$$

其中 $H_o(s) = K * F(s) / s$, 而滤波器的传递函数根据具体形式有很多种, 理想二阶环为

$$F(s) = \frac{1 + \tau_2 s}{\tau_1 s} \quad (2)$$

这种方法的优点是容易实现, 缺点则在于进入鉴相器的值来自不同的预处理回路, 容易引起附加相移, 导致失锁, 特别对于高Q窄频带的换能振动系统尤为明显。

3 利用 LabVIEW 的逐点分析技术实现频率的实时跟踪

由于锁相环技术存在的缺点, 加之压控振荡器输出电压的频率是不断变化的, 波形可能发生畸变, 因而如何准确的实现实时频率跟踪是优化锁相环技术的十分重要的方面。一般基于频率跟踪的实现有硬件和软件方法, 硬件检测方法往往速度快、实时性好, 但增加了测试成本和复杂度; 软件法则实时性较差, 但不增加硬件电路, 成本低, 便于测试设备向微型化、便携式方向发展。目前软件频率跟踪算法有很多种, 我们引入了一种实时性较好的频率跟踪算法, 该算法只需要将信号通过低通滤波器得到基频分量, 再对基频分量进行简单的数学运算即可实现频率的实时测量和跟踪。

3.1 基频分量的提取

在超声加工过程中, 换能器两端电压及流过换能器的电流, 除含有基频分量以外, 还含

有丰富的奇次谐波,在这些特征谐波信息中,基频分量最重要:流过换能器电流的基频分量大小决定换能器振幅的大小,可用电流基频分量作为换能器振幅控制的反馈参数,基频电压和基频电流的相位可以判别换能器是否处于谐振状态,为换能器系统的频率跟踪创造条件。为此,在超声波系统中,不可避免的要对基频分量进行提取。因此要求提取基频分量的滤波器在这个范围内具有通用性,而一般的有源模拟滤波器很难满足自适应滤波的要求。因此文献(5)提出了基于滤波芯片MAX264实现跟踪滤波器的方法,滤波前后的效果请参见图2和图3。

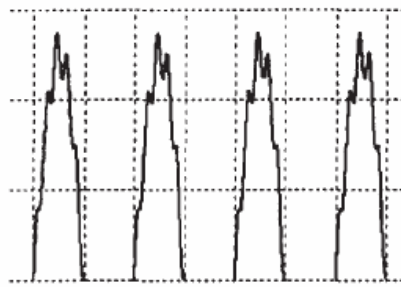


图2 输入波形

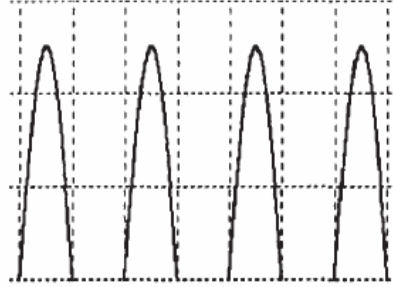


图3 滤波后的效果

3.2 实时频率跟踪方法的实现

目前常用的软件频率跟踪算法有过零点检测法、DFT法、Kalman滤波法、小波变换法等。但这些方法均存在计算量大,跟踪过渡时间较长的缺点,不易于对频率进行实时跟踪。本文提出的方法其具体算法原理如下:

假设任意信号通过低通滤波器后得到的基频分量可表示为:

$$x(k)=A\sin(\omega_0+\xi) \quad (3)$$

式中, $x(k)$ 为基频分量 k 时刻的值; A 、 ω_0 、 ξ 分别为基波信号的幅值、角频率和初相角。

$$Y(k)=x(k)+x(k-1) \quad (4)$$

$$\text{令 } P_m(k)=x(k)y(k-m)-y(k)x(k-m) \quad (5)$$

式中, m 为正整数,将式(3),(4)代入(5)得

$$P_m(k)=-A^2 \sin(m\omega_0)\sin(\omega_0) \quad (6)$$

$$\text{所以 } P_2(k)/P_1(k)=2\cos\omega_0 \quad (7)$$

设信号的实际频率为 f_0 , 采样频率为 f_s , 则

$$\begin{aligned} \omega_0 &= \arccos\left[\frac{1}{2} P_2(k)/P_1(k)\right] = \arccos\left[\frac{1}{2} \frac{x(k)y(k-2)-y(k)x(k-2)}{x(k)y(k-1)-y(k)x(k-1)}\right] \\ &= 2\pi f_0/f_s \end{aligned} \quad (8)$$

$$\text{因此 } f_0=(\omega_0 f_s)/2\pi \quad (9)$$

而 $f_0 < f_s/2$, 故 $0 < \omega_0 < 2\pi$

利用LabVIEW 中逐点分析库实现上述算法.在使用逐点分析库中,数据运算是针对每个数据点的,一个数据点接一个数据点连续进行的,无需构建数据缓冲和数组,每个数据都经过上述简单数学运算后即可得到对应的频率,从而在计算量和数据结构方面提高了频率跟踪的实时性。

3.3 仿真分析

在LabVIEW实现上述这种频率跟踪方法进行测试,下图频率为10M,初相为 $\pi/3$ 的正弦载波, C/N为10db,不作抽取的锁定情况。阻尼因子 $\xi=0.707$,无阻尼振荡频率为300Khz,从图中可以看出锁相环在0~650样点区间内相位误差为零,处于锁定状态。样点数在650时,输入信号频率产生了大小为100kHz的频率阶跃,导致LabVIEW实现频率跟踪,系统在样点数为1000时重新进入同步状态,由于噪声的影响,相位误差在零点上下波动,而频率在100kHz上下波动。可以看出在有噪声的情况下,锁相环仍能跟踪锁定频率。

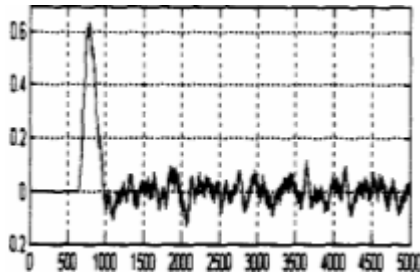


图4 弧度/样点数

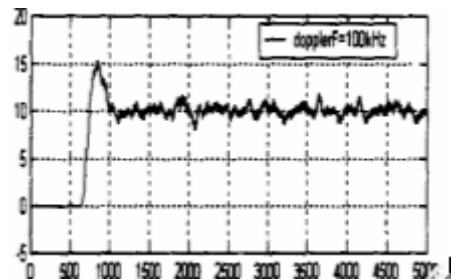


图5 频率($\times 10$)/样点数

4 结束语

由于频率跟踪技术在超声设备中的重要性,对它的探讨研究一直在进行当中。新颖的想法和技术不断出现,本文采用以上频率自动跟踪算法,只要将信号通过低通滤波器得到基频分量,对得到的基频分量进行简单的数学运算,即可实时跟踪信号的频率。该方法较以往的方法计算量小、跟踪速度快、精度高,具有较高的实际应用价值。如果能够减少从信号中提取基频分量的过渡时间则可以进一步提高该方法的跟踪速度。

参考文献

- [1] 鲍善惠等.超声波发生器的频率跟踪电路.洗净技术.2001,p3-6
- [2] 郑书友等.超声加工中超声发生器的频率跟踪技术.机械工程师.2005,n7,p70-72
- [3] Zhang Qixin. Research on frequency tracking for an current feedback ultrasonic generator. harbin Gongye Daxue Xuebao/of Harbin institute of technology, v27, n6, Dec, 1995, p56-61
- [4] Daixiangguo, Smart ultrasonic generator for rotary ultrasonic machine, Qinghua Daxue xuebao/journey of Technology, v42, n2, February, 2002, p182-184.
- [5] 李秀人.基于MAX264的锁相跟踪带通滤波器的设计及其应用.现代电子技术. n7, 2002, p30-31

Study On New Automatic Frequency Tracking Of Ultrasonic Generator

Deng Xingsong

Department of Computer & Information Engineering, Hohai University, Changzhou, Jiangsu
(213022)

Abstract

Frequency tracking circuit is one of the special circuits used in the ultrasonic generator. The paper introduced the principle of the frequency tracking, analyzed phased Locking loop protocol for frequency tracking, proposed the shortcomings of this protocol, realized a simple realtime algorithm on the basis of this idea, in which the realtime tracking of the signal frequency was implemented by passing the signal through the low pass filter to derive the base wave component, and doing simple mathematic operation with the base component. The algorithm features the simpler calculation, higher precision and higher tracking speed.

Keywords: ultrasonic generator; Frequency tracking; phased Locking loop; software realtime tracking

作者简介：邓杏松（1982-），男，江苏扬州人，河海大学通信与信息系统硕士研究生。