

基于单片机的超声冲击装置频率跟踪控制和恒幅控制

谢成祥[†] 张 健 邓志良

(江苏科技大学电子信息学院 镇江 212003)

摘要 对超声波冲击以提高焊接接头疲劳强度的装置进行了研究, 研制出一台可用于实际冲击处理的样机。该样机以单片机为核心, 采用自适应带通滤波器提取超声换能器工作的基波信号, 在此基础上获得电流和电压的相位差, 根据相位差用模糊控制方法来实现自动频率跟踪; 通过电流控制执行机构的输出端振幅, 使之恒定不变, 对超声冲击处理的质量进行控制。该装置能够适应超声冲击这种负载变化十分剧烈的场合, 并可实现准确的频率跟踪和保证冲击处理的质量及效率。

关键词 超声波冲击, 单片机频率跟踪, 恒幅输出

Single-chip microcomputer based frequency tracking and amplitude stabilizing for ultrasonic peening equipment

XIE Cheng-Xiang ZHANG Jian DENG Zhi-Liang

(School of Electronics & Information, Jiangsu University of Science & Technology, Jiangsu 212003)

Abstract The equipment of ultrasonic peening for increasing fatigue strength of a welded joint is imposed and a corresponding ultrasonic peening prototype is manufactured. The prototype uses a single chip computer as control unit, an adaptive band-pass filter to obtain fundamental signal from ultrasonic transducer, and also a circuit is designed to measure the phase difference between the voltage and current. Fuzzy logic control is introduced to realize automatic frequency tracking according to the phase error, current control keep the output amplitude constant so as to control the quality of the ultrasonic peening. This equipment can adapt to the situation that the peening load varies strongly, and not only realize accurate frequency tracking, but also ensure the peening quality and efficiency.

Key words Ultrasonic peening, Single chip computer frequency tracking, Constant amplitude output

2005-02-28 收稿; 2006-04-24 定稿

作者简介: 谢成祥 (1970-), 男, 江苏丹徒人, 副教授, 硕士, 主要从事自动控制技术研究。

张健 (1953-), 男, 高级实验师。邓志良 (1962-), 男, 教授。

[†] 通讯联系人 Email: xiechx@sina.com

1 引言

用超声波冲击焊趾的方法来提高焊接接头的疲劳强度,其机理与锤击和喷丸基本一致。国内外研究表明,这种方法的应用场合十分广泛,而且其执行机构轻巧、使用灵活方便、噪音很小、效率高、成本低而且节能,因而这是一种很有吸引力的焊后提高接头疲劳强度的方法^[1]。

在超声冲击过程中,声学负载起伏很大,使声学系统的谐振频率发生一定的偏移。连续工作时间过长,换能器的温度上升也同样会使声学系统的谐振频率改变。在工作过程中,整个声学系统固有谐振频率发生较大波动的条件下,仍然能够使发生器的工作频率与之保持一致,就要求功率超声波发生器配有精确、快速的频率跟踪系统;同时为保证加工质量和保护超声系统,要求发生器具有根据负载调整输出功率的功能。本文采用单片机软件控制实现了频率自动跟踪,加快了跟踪速度,且有设定的搜索范围、搜索精度高;并且自动进行输出振幅和功率控制,实现了恒振幅和单位负载恒功率输出,从而提高了加工质量和效率。

2 基波信号的提取

用于激励超声换能器的电源采用半桥矩形波逆变电源,因此,换能器两端电压及流过换能器的电流,除含有基波分量外,还含有丰富

的奇次谐波,在这些特征谐波信息中,基波信息最重要:流过换能器电流的基波分量大小代表换能器的振幅的大小,可用电流基波分量作为换能器振幅控制的反馈参数;基波电压与基波电流的相位可以判别换能器是否处于谐振状态,为换能器振动系统的频率跟踪提供条件。为此,在超声波电源的控制中,不可避免地要进行基波信息提取。随着工况的变化,在换能器工作过程中其谐振频率会发生一定的漂移。因此,要求提取基波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这种自适应滤波的要求。本文采用锁相倍频与开关电容滤波器相结合的方法构成自适应滤波器。

2.1 自适应时钟的产生

本文设计的超声波逆变电源其频率控制由单片机 PIC16877 和数字频率合成器 AD9835 控制,在频率跟踪完好的情况下,AD9835 的输出频率为两倍于超声换能器系统的谐振频率。为提取基波分量,实现自适应滤波的功能,开关电容滤波器的带通中心频率要与换能器的谐振频率相一致。因此,将 AD9835 输出信号整形为方波信号并二分频后锁相 100 倍频为开关电容滤波器提供时钟,其锁相倍频原理如图 1 所示。其中, R4 和 C2 构成锁相环的环路滤波, C1 和 R2 共同决定振荡器的中心频率,适当调整 C1 和 R2 的数值就可以在较宽的频率范围内跟随输入信号的变化。经整形的 AD9835 输出信号由 14 脚输入,由 4 脚输出,当输入频率

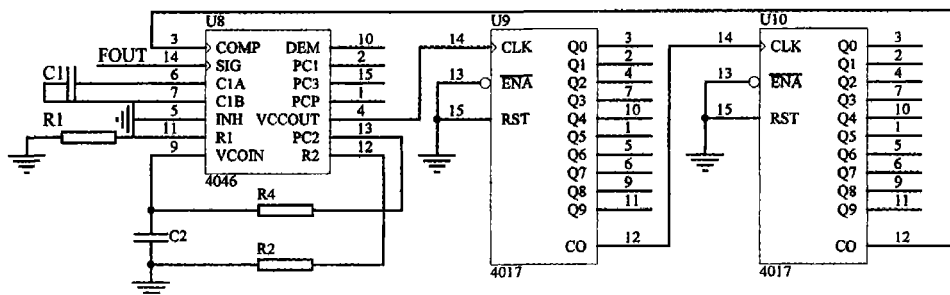


图 1 锁相倍频原理图

变化时, 在锁相环的作用下, 输出信号频率也随之变化, 从而为开关电容滤波器提供自适应时钟。

分频系数为 100 的分频器由两片 CD4017 组成, CD4017 是十进制计数器 / 分频器, 用分频器时, 时钟信号由 14 脚输入, 在 12 脚得到十分频的对称方波。两级 CD4017 串联使用, 得到 100 分频的对称方波信号。分频器的输入端接 74HC4046 的 4 脚, 输出接 74HC4046 的 3 脚。

2.2 基于 MAX267 的自适应带通滤波器设计

MAX267 内部含有两个独立的二阶开关电容带通滤波器, 它有 12 个可编程输入端, 其中 5 个用来设置滤波器中心频率, 另外 7 个用来设置滤波器的品质因数 Q , 因此不需要外加任何元件, 仅需要外部时钟就可以实现带通滤波功能, 使用极为方便^[5]。

MAX267 只有一种工作模式, 在这种模式下, 带通滤波器的中心频率只与外部输入时钟与 $F0 \sim F4$ 的设置有关, 因此, 中心频率的控制十分方便。其中心频率处的增益 (H_{OBP}) 仅由品质因数 Q 决定, 品质因数由 $Q0 \sim Q6$ 来设置, 输出信号与输入信号反相。

由于所要提取的基波信息与其谐波分量的频率相隔较远, 在滤波器工作的频率范围内没有其他干扰信号, 故本文采用的带通滤波器的品质因数并不高, 即 $Q=5$, 此时, 通带增益也

为 5。所以, MAX267 的可编程引脚设置为: $F0=F1=F2=F3=F4=0$ (低电平), $Q0=Q1=Q2=0$, $Q3=Q4=Q5=Q6=1$ (高电平), 时钟频率与中心频率的比例为 100.53:1。因为时钟频率是 AD9835 的输出频率经过 100 倍频得到的, 故带通滤波器的输出频率低于其中心频率, 但仍在其带通范围之内, 只是增益略有下降, 此时可通过外部反相放大器放大倍数或单片机软件来加以补偿。这样, 带通滤波器的输出频率始终与 AD9835 的输出频率一致, 当 AD9835 的输出频率变化时, 滤波器的输出频率也随之变化, 从而实现自适应带通滤波的功能。

3 相位差的测量^[4]

相位检测在超声发生器的频率跟踪控制中起着关键的作用, 系统跟踪性能的好坏在很大程度上取决于相位检测器性能的好坏。本文设计了一种相位检测电路, 它能读出同频率两个输入信号之间 0 到 $\pm 180^\circ$ 的相位差, 并用高低电平来表示其超前还是落后。电路如图 2, 其各点的波形如图 3 所示。

图 2 中, 输入同频率的电源、电流基波信号, 分别经两个比较器 A1、A2 得到两个方波信号, 送到 D 触发器, 输出电平为 C。若电压超前电流, 则 C 为逻辑“0”; 若电流超前电压, 则 C 为逻辑“1”。电平 C 送至单片机 PIC16F877, 作为控制时增加或减小频率的依据。两个方波

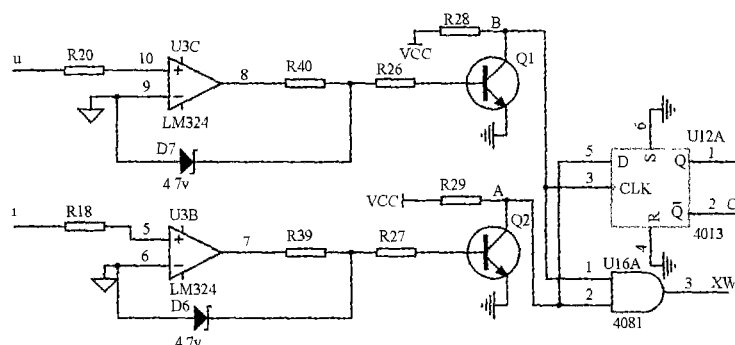


图 2 相位差测量电路

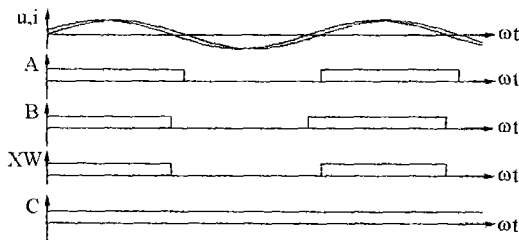


图 3 u, i, A, B, xw, C 各点波形

信号同时也输入到与门, 得到体现相位差的脉宽信号, 若电压和电流同相, 则该脉宽信号的占空比为 50%; 如果存在相位差, 则该脉宽信号的占空比必然小于 50%。

本文研制的超声波冲击装置中, 超声信号由 PIC16F877 单片机结合数字频率合成器件 AD9835 产生, 而频率的自动跟踪和恒定振幅控制由 PIC16F877 完成。PIC16F877 有两路 CCP (Capture/Compare/PWM) 模块, 通过可以捕捉信号的正跳变或负跳变, 并产生中断, 将定时器 TMR1 的值保存起来。将相位差信号 xw 同时连接到外部中断引脚和 CCP1 引脚, 在 xw 信号的上升沿引发一外部中断, 将定时器 TMR1 清 0, 并开始计数, CCP1 捕捉 xw 信号的下降沿并通过中断读取此时的 TMR1 内容, 便可得到 xw 的脉冲宽度^[2]。由于超声信号的产生也是由单片机完成的, 所以信号周期是已知的, 因此, 很容易求得 xw 信号的占空比, 从而检测到相位差, 并以此进行频率跟踪的自动控制。

4 频率自动跟踪方法

因为超声换能器的阻抗特性在谐振点附近的变化很大, 所以, 要求在谐振点附近要有很高的频率跟踪精度。本文中, 单片机 PIC16F877 并不直接产生频率信号, 而是向直接数字频率合成器件 (DDS) AD9835 发出频率数据。AD9835 中有 32 位的频率寄存器, 只要向其中写入频率数据就可以产生一定频率的正弦波。它的频率分辨率很高, 在 20MHz 的外部频率作用下, 其

分辨率可达到 0.005Hz, 因此, 可以适应高精度频率跟踪控制的要求^[3]。

由于换能器的工作特性, 要求在距离谐振点较远时, 能以较快的速度进行谐振频率的搜索, 而在接近谐振点时, 则要求频率变化的步长要小。为实现这一要求, 在超声发生器开始工作时, 从 19kHz 起以较大的步长增加频率, 同时不断检测流过换能器的电流。当检测到换能器中明显有电流流过时, 切换到自动频率跟踪控制方式, 此时, 根据 xw 信号的占空比大小和电压电流的超前或滞后关系 (由电平 C 来判断), 决定以多大的步长来增加或减小频率。具体做法是: 以 xw 信号的占空比为输入量, 频率增量 Δf 为输出量, 并参考电平 C 的状态, 构造一单输入单输出模糊控制器, 设计模糊控制规则如表 1 所示:

表 1 模糊控制规则表

C	0			1		
占空比	大	中	小	小	中	大
Δf	负小	负中	负大	正大	正中	正小

用模糊推理方法离线运算得到控制表, 存放于 PIC16F877 的片内 EPROM 中, 运行时直接读取表中的频率增量, 和原有频率数据相加后, 通过 SPI 接口写入到 AD9835 的频率寄存器中, 减少了计算量, 有利于减小控制周期, 提高频率跟踪精度。

5 换能器输出的恒定振幅控制

在超声冲击过程中, 机械负载变化较大, 即使频率跟踪良好, 由于负载的增大也会引起输出振幅、单位负载功率的下降, 尤其是冲击过程中, 变幅杆从有载变为空载 (或从空载变为有载) 时, 机械阻抗急剧变小 (或增大), 超声发生器和换能器极易受损; 同时为提高冲击过程的稳定性, 要求换能器传送出的机械功率随负载变化而变化, 即振幅输出恒定, 使换能器在恒定电流下工作。本文中, 平均电流的调节

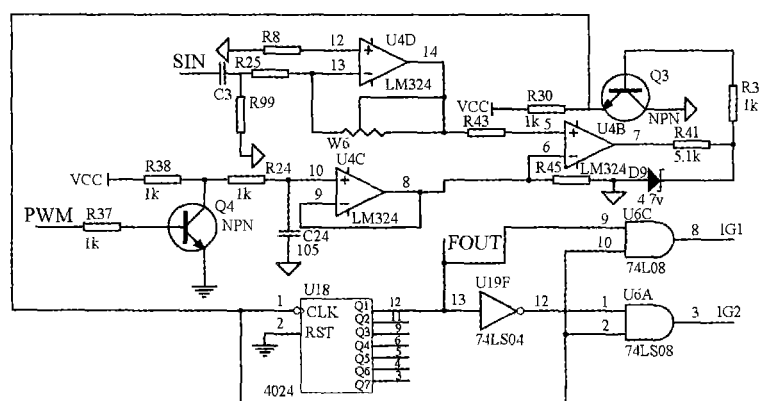


图 4 恒振幅控制电路

通过调整逆变器驱动脉冲的占空比来实现的, 这样简化了主电路的设计。具体的控制电路如图 4 所示。

开始工作时, 单片机设定一给定电流, 然后根据采样电流和给定电流之间的偏差进行调节, 控制量通过 PIC16F877 单片机的 PWM 引脚输出一 PWM 信号, 经滤波后成为一直流电压, 得到正负对称的两路直流电压。AD9835 输出的正弦信号中含有一直流分量, 通过一电容器将该直流分量隔断, 得到标准正弦信号, 进行放大后与 PWM 滤波后的直流电压进行比较, 便可得到一路占空比可调的脉冲信号, 该信号经 4024 二分频后得一方波, 其频率即为超声换能器的工作频率, 用该信号 (FOUT) 作为锁相倍频电路的输入信号; 同时, 将分频后的方波信号取反, 再分别同分频前的信号进行逻辑运算, 形成两路占空比可调的脉冲信号 IG1 和 IG2, 通过驱动电路分别去驱动半桥逆变器的两个桥臂。该电路同时还可以保证两个桥臂不会同时导通。控制算法采用增量式数字 PID 算法。

6 结束语

本文研制的超声冲击装置选用了 Mi-

croChip 公司的 PIC16F877 单片机为核心, 该单片机功能较强, 不用扩展任何外围芯片即可用于超声发生器的控制中, 电路设计大大简化。由于单片机系统是一种开放型系统, 可随时加入新的控制方式而不用更换硬件电路, 通过软硬件结合实现系统保护, 降低了成本, 工作时可显示换能器的工作频率数值。

该超声冲击装置在单片机控制下, 同时引入了频率自动跟踪技术和稳定振幅技术, 提高了工效, 保证了超声冲击的质量。该装置只要选定换能器和匹配电路即可自动寻找谐振点并进行频率跟踪, 输出振幅可通过按键进行设置, 具有一定的通用性, 可应用于实际生产。实验表明, 对于提高焊接接头的疲劳强度, 该装置可起到良好作用。

参 考 文 献

- 1 朱武. 功率超声振动系统的常数识别及其控制的研究. 哈尔滨工业大学博士学位论文, 1999.
- 2 李学海. PIC 单片机实用教程. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2002. 151~169.
- 3 马刚, 邓志良, 谢成祥. 华东船舶工业学院学报, 2004, 18(3):82~85.
- 4 范世忠, 张福成, 丁大成. 应用声学, 1992, 11(1):28~33.
- 5 谢成祥, 邓志良, 张健. 电子工程师, 2004, 30(11):48~49.