

夹心式压电换能器的谐振频率跟踪方案设计*

李小雪^{†1} 李平¹ 汪东² 肖灵¹

(1 中国科学院声学研究所 北京 100190) (2 北京奥麦特科技有限公司 北京 100190)

摘要 分析了夹心式压电换能器的阻抗特性,讨论了基于相位方式的现有跟踪方案的不足,提出了一种新的频率跟踪方案,介绍了实现该方案的电路系统。该方案的特点是:采用先扫频后跟踪的策略,解决了频率范围设定难的问题;增加解锁控制,使得系统在死锁或误跟踪时自动回到频率搜索状态;采用直接数字合成器(DDS)作为频率调整和信号产生的器件,实现了全数字系统,调整方便,精度高;采用复杂可编程逻辑器件(CPLD)做相位比较和DDS控制,使频率跟踪速度快,并且跟踪精度和速度均可控制。

关键词 夹心式压电换能器, 频率跟踪, 直接数字合成器(DDS)

Resonance frequency tracing scheme for sandwich piezoelectric transducer

LI Xiao-Xue¹ LI Ping¹ WANG Dong² XIAO Ling¹

(1 Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

(2 Beijing Ometech Technology Co., Ltd., Beijing 100190)

Abstract This paper analyzes the impedance characteristics of the sandwich piezoelectric transducer, discusses the inadequacy of present frequency tracing schemes using phase locking method. It then proposes a novel scheme, and presents the circuitry that realizes the scheme. The distinguishing features of this scheme are as follows: utilizes a strategy of sweeping frequency before tracing and thus keeps away from the difficulty of settling the frequency tracing band; adds an unlock function which renders the system back to frequency sweeping state in the case of dead-locking or false tracing; uses a direct digital synthesizer(DDS) to adjust the frequency and generate driving signal, thus forms an all-digital system which is convenient to manipulate and can achieve high degree of accuracy; uses complex programmable logic device (CPLD) to detect phase difference and to control DDS, thus achieves high tracing speed and makes the tracing speed and the tracing accuracy controllable.

Key words Sandwich piezoelectric transducer, Frequency tracing, Direct digital synthesizer (DDS)

2008-03-24 收稿; 2008-05-19 定稿

*国家自然科学基金(基金批准号 60673152)资助。

作者简介:李小雪(1981-),女,河南人,硕士研究生,研究方向为数字信号处理。

李平(1961-),男,研究员,博士生导师。汪东(1978-),男,电子工程师。

肖灵(1968-),男,研究员,博士生导师。

[†]通讯作者:李小雪, E-mail:lixiaoxue05@mails.gucas.ac.cn

1 引言

在功率超声领域, 常采用夹心式压电换能器, 这种换能器大部分工作在低频超声范围, 对换能器的功率、效率以及振动位移的要求较高。为了使换能器辐射出最大声功率, 功率超声换能器应工作在谐振状态。

这就要求超声波发生器提供的激励频率必须在振动系统的谐振点附近。换能器的谐振频率由它的材料、形状、尺寸决定^[1], 但由于温度、负载以及振动系统本身的机械磨损等因素, 谐振点往往会发生变化, 因此要求激励频率也随之变化, 否则会造成系统失谐, 使得工作效率降低, 能量传输受阻, 甚至损坏整个系统^[2]。

常用的频率跟踪方式有: 电流方式、功率方式、相位方式、导纳方式等^[2-4]。其中相位方式应用比较广泛, 其工作原理是, 比较取自换能器电端的电压信号和电流信号的相位, 根据该相位差调整激励频率, 使电压信号和电流信号相位相同, 从而保证换能器工作在谐振状态。

现有的采用相位方式的频率跟踪方案有: 采用集成锁相环的频率跟踪方案和采用DDS的频率跟踪方案。现有方案均有不足之处, 本文讨论了这些不足并提出了一种新的频率跟踪方案, 介绍了实现该方案的电路系统, 并通过实验验证了该方案工作可靠, 跟踪速度快, 精度高的性能。

2 夹心式压电换能器的阻抗特性及相位跟踪方式

2.1 夹心式压电换能器的阻抗特性

夹心式压电换能器主要是由金属前盖板、压电陶瓷晶堆以及金属后盖板3个基本构件组合而成^[1]。示意图如图1。金属前盖板常

做成喇叭型, 用以放大输出振幅, 又叫做变幅杆。当对压电陶瓷晶堆加以交变电压时, 换能器将产生纵向振动。当交变电压频率等于换能器谐振频率时振动最强烈。压电换能器在谐振频率附近的等效电路如图2所示^[4], 只需要加上适当的调谐电感, 就可以使振动系统在换能器串联谐振频率 f_s 附近的总电抗为零。用阻抗分析仪测得的某一个夹心式压电换能器的电抗曲线, 如图3所示。

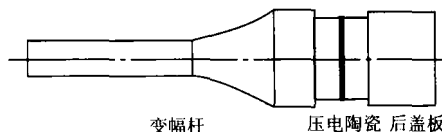


图1 夹心式压电换能器示意图

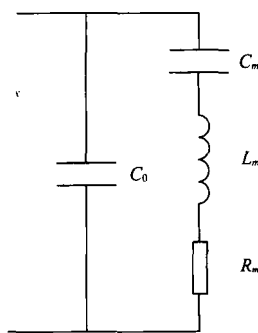


图2 压电换能器等效电路图

2.2 相位跟踪方式及存在的问题

采用相位方式跟踪串联谐振频率是根据反馈电压和电流的相位差来调整激励频率, 最终锁定在电压与电流的同相点, 也即电抗为零的点。由图3可见, 在所测量的范围内振动系统有两个电抗为零的点, 其中 f_s 为串联谐振频率, f_s' 附近的电学特性与 f_s 相类似, 但是振动系统的输出效果不理想, 称为类串联谐振频率^[2]。

当超声发生器的输出频率在第一区时, 系统的总电抗为容抗, 电流相位超前, 跟踪系统将调高发生器的频率。当输出频率在第

二区时, 系统的总电抗为感抗, 电压相位超前, 跟踪系统将调低发生器的频率。以上两种情况输出频率最终都会锁定在串联谐振频率 f_s 上。当输出频率在第三区时, 系统总电抗也是容性, 按照相位跟踪方式的频率调整原则, 跟踪系统将继续调高发生器的频率, 若跟踪范围足够大, 跟踪系统会误锁定到 f_s' 上。若频率跟踪范围不够大, 没有把 f_s' 包括在内, 则会死锁在跟踪范围上限, 即出现系统上限死锁^[2]。在采用相位方式做频率跟踪时, 必须考虑到上述问题, 限制频率跟踪范围使其只包含 f_s , 即输出频率只在一区、二区, 或者增加解锁控制, 在误锁定在 f_s' 或发生上限死锁时采取必要的措施。

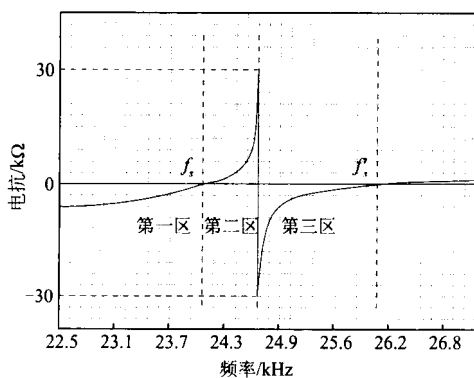


图3 夹心式压电换能器的电抗曲线图

2.3 采用相位方式的现有跟踪方案

采用相位方式的频率跟踪方案中, 使用集成锁相环进行频率跟踪是最常用的一种。但是, 首先, 集成锁相环的频率跟踪范围较难设定, 设定不当会使系统无法正常工作。这种方案要求在其跟踪范围内, 能够获得比较好的电压和电流反馈信号。一旦其中某一个信号的获取受到影响, 就有可能造成锁相环的失锁, 从而无法使换能器工作在谐振频率上。例如, 对于高 Q_m 的换能器, 只有在其谐振频率附近很窄的一段频率范围内能

够获得比较理想的电流反馈信号, 在这个频率范围以外, 锁相环将无法工作。因此锁相环的频率跟踪范围的设定必须精准, 范围设定过大, 将不利于高 Q_m 值的换能器的频率跟踪; 如果频率跟踪范围设定过小, 又不能适应较大的瞬间频率变化。其次, 集成锁相环采用模拟器件, 跟踪精度低, 抗干扰能力不强, 且调整不方便, 也不方便加其他的控制逻辑, 外加解锁控制电路的实现复杂。

采用相位方式的另一种频率跟踪方案是采用DDS作为频率调整和信号产生的芯片(如文献[5]、[6]所示), 实现了全数字系统。但在已有的采用DDS的频率跟踪方案中, DDS控制器均采用低速器件, 限制了跟踪速度。文献[5]采用单片机作为DDS控制器, 跟踪速度受限于单片机的最高工作速度。文献[6]采用微处理器(SH-7045F)作为DDS控制器, 频率调整也需要几十毫秒。

2.4 本文的新方案设计

本文提出了一种新的频率跟踪方案, 它的特点如下:

(1) 采用先扫频后跟踪的策略

在谐振频率附近反馈电流幅值较大, 而远离谐振频率, 反馈电流幅值很小, 因此可以由反馈电流幅值来帮助找到谐振频率附近区域。

系统开始工作时, 先使超声波发生器发出连续频率信号, 同时监测取自换能器端的反馈电流的幅值, 当该电流幅值大于某设定的阈值时, 则认为到达谐振频率附近, 此时启动自动频率跟踪, 可保证跟踪系统能正常工作, 并最终找到谐振频率点。这就解决了频率跟踪范围设定困难的问题, 只需要预先设定扫频范围, 而扫频范围的设定要求不高, 只要包含了谐振频率点即可, 范围可以适当放宽, 不影响系统性能。

(2) 增加解锁控制,使得系统在死锁或误跟踪出现时自动回到频率搜索状态

在扫频时,可以根据反馈电流幅值大于某阈值判定到达谐振频率附近,同样,在自动跟踪时,可以根据反馈电流幅值小于某阈值判定系统失锁,出现了上限死锁或者误跟踪,此时,由控制电路重新启动扫频程序,实现了自动解锁。

自动解锁控制和外部重启联合,使得系统可靠、灵活、易用。

以上两个特性都利用了反馈电流,体现了本方案在采用相位跟踪方式时结合了电流跟踪方式,由此很好的克服了相位跟踪方式中的问题。

(3) 采用 DDS 作为频率调整和信号产生的器件

基于 DDS 的跟踪系统是全数字系统,精度高,抗干扰强,方便外加控制逻辑及用程序控制,调整方便。

(4) 采用 CPLD 完成相位比较及 DDS 控制

本系统采用 CPLD 完成相位比较及 DDS 控制,其与 DDS 的通信速率高达 25M,可充分发挥 DDS 的性能,使得频率跟踪的响应速度大大加快。而且跟踪精度和速度均可由程序控制,便于根据需要调整。

3 频率跟踪的电路系统

3.1 系统概述

本系统采用集成 DDS 芯片作为激励信号产生芯片,系统初始化及扫频控制由单片机完成,而相位比较、相差累积以及由相位差调整 DDS 输出信号频率(DDS 控制)则由一片 CPLD 实现。

在每次启动时,先由主控单片机输出连续频率指令,控制 DDS 在预定范围内进行扫频,同时单片机还实时监视换能器反馈电流

的幅值,当电流幅值大于某一阈值时,停止频率搜索并启动 CPLD 的自动跟踪电路,此后 DDS 工作在自动频率跟踪状态,实现了先扫频后跟踪的策略。

在自动跟踪状态,相位比较电路将反馈电压和反馈电流的相位进行比较,得到相位差的方向和大小,相差累积则根据相位比较输出的结果调整频率字,DDS 控制器在相差信号的下降沿把频率字传输给 DDS 芯片以调整 DDS 的输出频率,DDS 输出的正弦信号经线性放大以及功率放大后作为换能器的激励信号。

在自动跟踪状态,单片机仍监测反馈电流的幅值,当幅值小于某设定的阈值时,认为系统出现死锁或误跟踪,系统在单片机控制下回到扫频状态,重新开始频率搜索,实现解锁。

该电路系统的原理图如图 4 所示,主要包括相位比较和相差累积电路,激励信号产生电路,控制电路,反馈电路几个部分,部分电路的详述见 3.2、3.3。

3.2 相位比较电路与相差累积电路

相位比较电路(鉴相器)如图 5 所示,该电路主要利用 D 触发器的上升沿触发特性。电路有两个输出:“Phase_error”输出一个脉冲信号,以其宽度表示反馈电压和反馈电流信号上升沿到来的时间差,“Direct”给出反馈电压和反馈电流信号的相位超前与滞后关系。

为了量化电流信号与电压信号的相位差,在相位比较电路后增加 K 模计数器作为相差累积电路,如图 6 所示。“Phase_error”信号控制 K 模计数器的计数使能,和异步复位,计数脉冲为“Phase_error”与高频时钟(设为 f_h)相与的结果。该高频时钟来自外部晶体振荡器,是系统的主时钟,决定了系统的最高工作频率和时间分辨率。K 模计数器的

计数值进位脉冲是频率动态调整计数器的计数脉冲。即当“Phase_error”输出脉宽 $\Delta t < \frac{K}{fh}$ 时， K 模计数器无进位输出，不作频率调整；

当“Phase_error”输出脉宽 $\Delta t > \frac{K}{fh}$ 时， K 模计数器有进位输出，频率调整计数器才会计数，从而改变频率字。

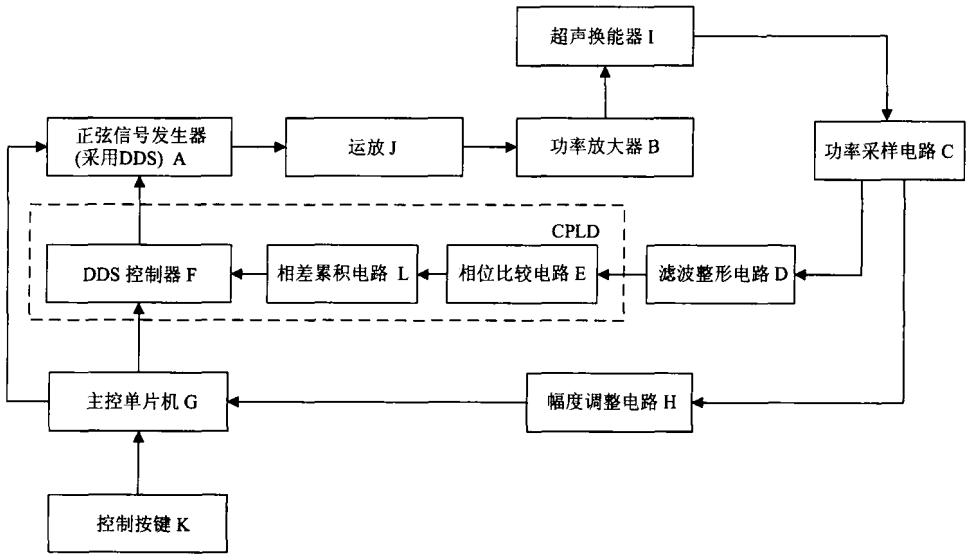


图 4 频率跟踪系统框图

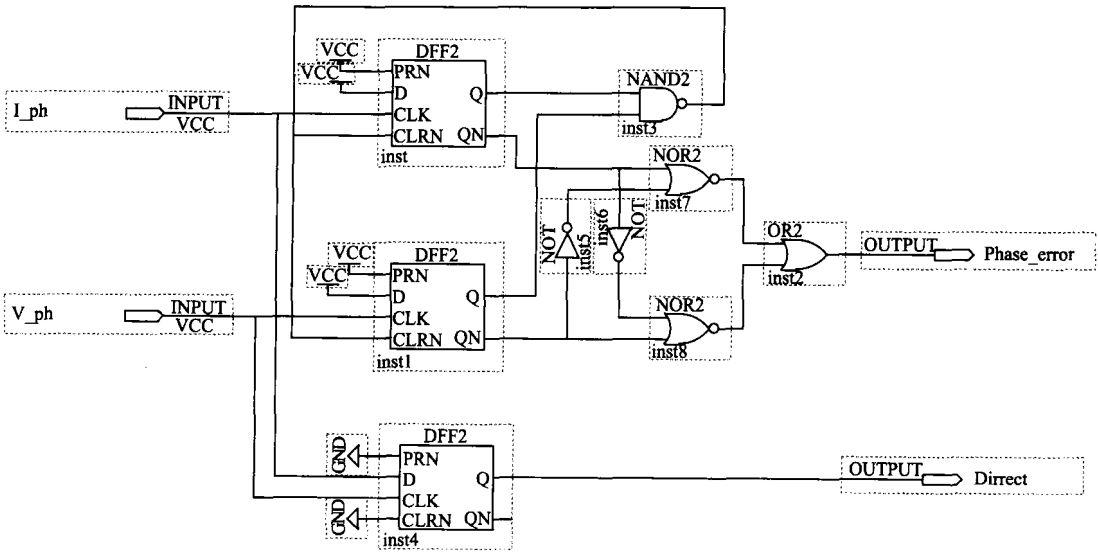


图 5 相位比较电路

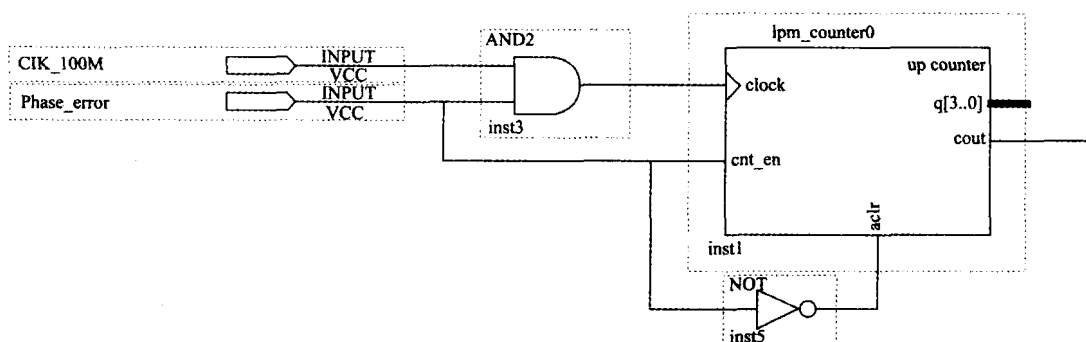


图 6 相差累积电路

利用“Phase_error”脉冲的前沿使能 K 模计数器, 而其后沿复位 K 模计数器, 有以下优点:

- (1) 最大限度抑制噪声, 在绝大多数时间, 该计数器不工作;
- (2) 工作周期之间没有累积效应

可见, K 模计数器是对鉴相器的输出进行量化, 只有当电压、电流上升沿时间差 $\Delta t > \frac{K}{f_h}$ 时, 才会产生频率调整动作。在偶然噪声干扰或相位差很小时, 计数值一般小于 K , 从而不产生频率调整动作。这就相当于一个低通滤波器, 避免了系统频率由于微小扰动而频繁调节。而且可以通过改变 K 值来调整频率跟踪的速度和精度。 K 越小, 跟踪精度越高, 调整时间越长, K 越大, 跟踪精度越低, 调整时间越短。

3.3 激励信号产生电路

激励信号产生电路由 DDS 以及 DDS 控制器组成, DDS 控制器由一个频率动态调整计数器和一个高速串口控制器组成, 如图 7 所示。

本电路系统采用集成 DDS 芯片 AD9834, 在 50MHz 参考时钟下工作时, 其频率控制字为 28 位, 则频率分辨率为 $\Delta f = \frac{50M}{2^{28}} = 0.1826 \text{ Hz}$ 。考虑到实际应用中无需如此高的分辨率, 设计中将控制步长增加一倍 (频率控制字最低位始终为 0), 则

$$\Delta f = 0.3725 \text{ Hz}.$$

频率动态调整计数器是一个 27 位异步可预置数双向计数器, 用于产生 DDS 所需的频率控制字 FCW, 并可动态调整。该计数器的计数方向由相位比较器的“Direct”输出引脚控制, 也即根据电压电流相位的超前、滞后关系来控制频率升高或降低。计数脉冲为 K 模计数器的进位脉冲, 即根据相差大小控制频率调整量。该计数器的异步预置数由主控单片机设置, 在初始化时输出连续频率实现频率搜索。为提高扫频效率, 单片机只设置计数器预置数的 D19~D4 这 16 位, 其余的预置数全部为零, 这样单片机的扫频步进为 $0.1826 \times 16 = 2.9216 \text{ Hz}$ 。

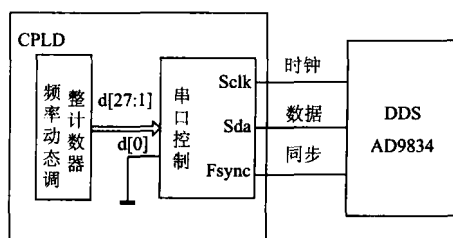


图 7 激励信号产生电路

串口控制器负责把控制字和频率字传送给 DDS AD9834。串口控制器是一个 48 位并入串出移位寄存器, 在每次相位比较结束后, 在“Phase_error”的下降沿触发下, 将 DDS 所需的

16 位控制字和 32 位频率字 (包括了频率动态调整计数器的 27 位, 一个常 0 位, 以及高低字节各两位字头) 共 48 位数据并行装入, 并在串行时钟的控制下按固定时序传给 DDS。

4 实验结果

用该系统驱动如图 1 所示的夹心式换能器, 用阻抗分析仪测得的其串联谐振频率为 24kHz。

该系统的高频时钟采用 100MHz ($f_h=100\text{MHz}$ $T_h=10\text{ns}$) 时钟。由上所述, 集成 DDS 芯片 AD9834 在 50MHz 时钟下工作, 设置其频率分辨率 $\Delta f=0.3725\text{Hz}$, 对应相差为 $\Delta\Phi=0.394^\circ$, 对应鉴相器输出脉宽为 $\Delta t=43.78\text{ns}$, 即 DDS 可分辨的最小时间差为 43.78ns。由于当时间差大于 $K\times T_h$ 时将发生频率调整动作, $T_h=10\text{ns}$, 因此 K 不能小于 4, 否则控制器将对小于 40ns 的时间差发生频率调动作, 使得 DDS 输出频率在谐振点附近振荡, 不仅没有意义而且影响系统稳定工作。当 K 大于 4, 每 $K\times 10\text{ns}$ 的时间差将引起 0.3725 的频率调整。

用该电路系统跟踪图 1 所示换能器, 取 $K=9$, 得到的频率跟踪的步进曲线, 如图 8 所示。本实验得出的频率步进曲线, 验证了系统反应快, 精度高的性能。

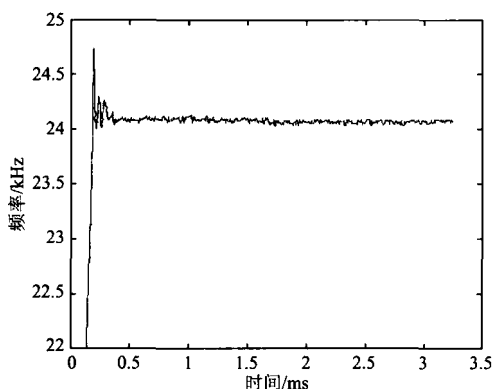


图 8 频率步进调整曲线

5 小结

本文分析了压电换能器的阻抗特性和采用相位方式的现有跟踪方案的不足, 提出了一种新的频率跟踪方案, 并介绍了其电路系统。它采用了先扫频后跟踪的策略以及解锁控制, 实际上是在采用相位跟踪方式时结合了电流跟踪方式, 保证了系统有良好的适应性和可靠性。采用集成 DDS 作为信号产生和频率调整的芯片, 由 CPLD 来做相位比较以及 DDS 控制, 单片机作为主控芯片, 实现了全数字式、快速、高精度自动频率跟踪。

系统的频率分辨率和跟踪精度取决于 DDS 的频率分辨率以及相差累积电路的设置, 便于根据需要调节, 精度最高可达 0.1826 Hz。跟踪的反应速度取决于 DDS 和 CPLD 的最高工作速度, 因此速度非常快, 在 μs 量级。实验验证了该方案跟踪速度快, 精度高的性能, 对于提高压电换能器频率跟踪的性能有实际意义。

参 考 文 献

- [1] 张云电. 夹心式压电换能器及其应用. 北京: 科学出版社, 2006. 59-79.
- [2] 王艳东, 李赫, 王敏慧等. 锁相环跟踪超声振动系统谐振频率的改进. 声学技术, 2007, 26(2): 253-256.
- [3] 鲍善惠, 王敏慧. 超声波发生器的频率跟踪电路. 洗净技术, 2003, 12M, 3-6.
- [4] 冯若. 超声手册. 南京: 南京大学出版社, 1999. 588-590.
- [5] 谢成祥, 张健, 邓志良. 基于单片机的超声冲击装置频率跟踪控制和恒幅控制. 应用声学, 2006, 25(4): 201-205.
- [6] Masaya Takasaki, Yutaka Maruyama, Takeshi Mizuno. Resonance Frequency Tracing System for Langevin Type Ultrasonic Transducers. Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, August 5-8, 2007. 3817-3822.