



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 103252314 A

(43) 申请公布日 2013.08.21

(21) 申请号 201310172937.2

(22) 申请日 2013.05.13

(71) 申请人 河海大学常州校区  
地址 213022 江苏省常州市晋陵北路 200 号

(72) 发明人 董观利 朱昌平 徐斐 曹智勇  
何贞兵 单鸣雷 陈秉岩 韩庆邦  
李建

(74) 专利代理机构 南京纵横知识产权代理有限公司 32224

代理人 董建林

(51) Int. Cl.  
B06B 1/06 (2006.01)

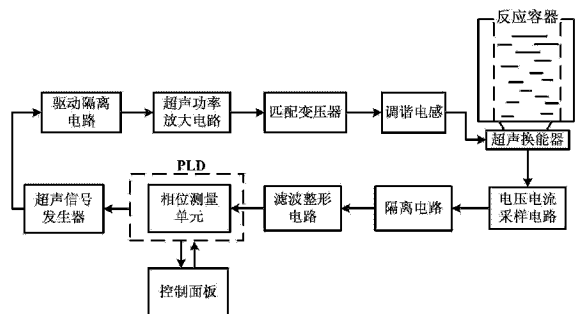
权利要求书2页 说明书6页 附图2页

(54) 发明名称

超声电源的动态匹配装置及其方法

(57) 摘要

本发明公开了一种超声电源的动态匹配装置及其方法,包括依次串联的超声信号发生器、驱动隔离电路、超声功率放大器、匹配变压器、调谐电感和超声换能器,还包括电压电流采样电路,电压电流采样电路依次通过后级隔离电路、滤波整形电路、可编程逻辑器件(PLD)相连接,可编程逻辑器件内设有相位测量单元,可编程逻辑器件的PWM激励脉冲输出端与超声信号发生器相连接。本发明通过实时监测超声换能器电路的阻抗特性来动态调整超声驱动信号的频率,实现一个动态匹配的过程,保证换能器始终工作在谐振点,输出最大的有用功率,匹配精度高,电路简单,实现成本较低,易于实现,具有较广的应用前景。



1. 超声电源的动态匹配装置,其特征在于:包括依次串联的超声信号发生器、驱动隔离电路、超声功率放大器、匹配变压器、调谐电感和超声换能器,所述超声换能器安装在反应容器的底部,用于驱动反应容器内液体发生空化效应;还包括用于采集包括调谐电感在内的超声换能器电路两端的实时工作电压和工作电流的电压电流采样电路,所述电压电流采样电路依次通过后级隔离电路、滤波整形电路、可编程逻辑器件相连接,所述可编程逻辑器件内设有相位测量单元,且可编程逻辑器件的 PWM 激励脉冲输出端与超声信号发生器相连接。

2. 根据权利要求 1 所述的超声电源的动态匹配装置,其特征在于:所述控制面板与可编程逻辑器件相连,用于显示当前超声换能器的工作频率和超声换能器匹配状态。

3. 根据权利要求 1 所述的超声电源的动态匹配装置,其特征在于:所述超声信号发生器所采用的芯片内置推挽式输出电路,所述信号发生芯片为单片集成 PWM 控制芯片,根据输入的 PWM 激励脉冲的频率来控制推挽式输出电路输出超声驱动信号的频率。

4. 根据权利要求 1 所述的超声电源的动态匹配装置,其特征在于:所述驱动隔离电路包括全桥逆变电路和隔离变压器,所述全桥逆变电路的每一半桥的上管为 NPN 型达林顿功率晶体管,所述全桥逆变电路的每一半桥的下管为 PNP 型达林顿功率晶体管;所述隔离变压器设有一个输入端和两个输出端,两个输出端的缠绕方向反相,以产生两个同频反相的信号使半桥型 D 类功率放大电路的上、下两个功率开关管交替导通工作。

5. 根据权利要求 1 所述的超声电源的动态匹配装置,其特征在于:所述超声功率放大电路为半桥型 D 类功率放大电路。

6. 根据权利要求 1 所述的超声电源的动态匹配装置,其特征在于:所述反应容器为各面用钢板围成的空心立方体容器,超声换能器紧贴在反应容器的底部。

7. 根据权利要求 1 所述的超声电源的动态匹配装置,其特征在于:所述超声换能器为柱状压电陶瓷换能器,与反应容器的底部采用直接粘接法进行连接。

8. 根据权利要求 1 所述的超声电源的动态匹配装置,其特征在于:所述隔离电路用于实现电压电流采样电路输出的采样信号的后级隔离;所述滤波整形电路包括滤波单元和波形变换单元,所述波形变换单元将采样信号转化成脉冲信号。

9. 基于权利要求 1 的超声电源的动态匹配装置的匹配方法,其特征在于:包括以下步骤:

步骤(A) 接通可编程逻辑器件的电源,按下控制面板的自检按钮,进入模块自检状态,保证可编程逻辑器件内设定的相位测量单元正常工作;

步骤(B) 接通超声信号发生器电源,通过匹配变压器利用阻抗变换实现调谐电感、超声换能器和超声功率放大器的阻抗匹配,保证超声换能器输出最大的有用功率;

步骤(C) 待反应容器底部的超声换能器工作稳定后,超声换能器的谐振点会产生偏移,则进行动态调谐匹配;

步骤(D) 重复步骤(C),进行动态调谐匹配,保证超声换能器工作在谐振点,输出最大的有用功率。

10. 根据权利要求 9 所述的超声电源的动态匹配装置的匹配方法,其特征在于:步骤(C) 进行动态调谐匹配的方法如下,

(C1) 通过可编程逻辑器件每隔 5s 开启相位测量单元的采样信号输入通道,快速测量

相时延和判断包括调谐电感在内的超声换能器电路的阻抗特性；

(C2) 判断相时延是否在设定的正常工作范围内,若相时延在设定的正常工作范围内,则保持可编程逻辑器件输出的 PWM 激励脉冲频率不变;若相时延不在设定的正常工作范围内,则继续判断测出的相时延对应的超声换能器的阻抗特性;

(C3) 若超声换能器电路呈电感性,则减小可编程逻辑器件输出的 PWM 激励脉冲频率,减小超声信号发生器的输出超声驱动信号的频率;若超声换能器电路呈电容性,则增加可编程逻辑器件输出的 PWM 激励脉冲频率,增加超声信号发生器的输出超声驱动信号的频率;

(C4) 重复步骤(C4),直到测量的相时延稳定在设定的正常工作范围内,超声换能器工作在谐振点,输出最大的有用功率。

## 超声电源的动态匹配装置及其方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及功率超声系统技术领域,具体涉及一种超声电源的动态匹配装置及其方法。

### 背景技术

[0002] 对任何一个功率超声系统来说,它的等效阻抗都可以用  $Z = R + j\omega(L - \frac{1}{\omega^2 C})$  来表示,

于是功率超声系统的总功率为  $P = I^2 Z = I^2 R + j\omega(L - \frac{1}{\omega^2 C}) I^2$ , 其中  $P_0 = I^2 R$  为有用功,

$P_1 = \omega(L - \frac{1}{\omega^2 C}) I^2$  为无用功,无用功是功率超声系统损耗掉的能量,是在功率超声系统设计

中要尽可能避免的,为了让一个功率超声系统的输出功率达到最大,就要减少功率超声系统中的无用功,可以通过适当的改变功率超声系统的工作频率或者增加匹配电路使功率超声系统的等效阻抗虚部为零或接近于零。

[0003] 由于匹配电路是许多功率超声系统运用中用来解决上述问题的重要一环,功率超声系统与它们的驱动电源之间的匹配包括两个方面:一是阻抗变换,一般由变压器实现;二是调谐滤波,一般由 L、C 电路实现。目前,实现调谐滤波的匹配方法主要包括静态匹配和动态匹配两种,静态匹配是在驱动电源输出频率与功率超声系统静态谐振频率相同的条件下,驱动电源输出阻抗与功率超声系统输入阻抗的匹配,它适用于要求功率超声系统的工作频率固定的应用场合,但功率超声系统在长时间工作后,可能由于温度升高等条件变化会引起其输入阻抗及谐振频率的变化,这样会引起静态匹配效果会变差,导致调谐滤波匹配效果不佳;动态匹配一般使用频率跟踪技术,实时跟踪系统谐振频率的变化,保证电路匹配,提高系统的效率,但输出频率不固定,可以克服静态匹配中由于温度升高等条件变化造成的影响,但是目前的动态匹配技术存在以下缺点:

[0004] (1) 在动态匹配现有技术中,用于超声波电源中超声信号产生电路主要采用 DDS、多谐振荡器或压控振荡器,由于带负载的能力较差,在大功率超声系统中往往需要后接推挽电路,增加了功率超声系统的复杂度和不稳定性;

[0005] (2) 在动态匹配现有技术中,用于超声波电源中电压、电流信号的采样主要是采用电流互感器通过导线依次连接通带滤波电路、比较整形电路;光耦电压取样电路通过导线依次连接带通滤波电路、比较整形电路,该种电路结构复杂,电路成本较高,不易于投入商业化生产,并且在面对大功率超声系统时会对其可靠性和安全性带来一定的影响;

[0006] (3) 在动态匹配现有技术中,用于功率超声系统中检测电压、电流信号的相位差主要采用锁相环、异或门电路或 PLD 器件。对于锁相环,由于其是由模拟量控制的,不利于对相位差信号进行数字化处理;用异或门电路测量时,这种相位比较器对两个输入信号的占空比要求比较高,增加了电路的设计难度;对于 PLD 器件,若在保证测量精度的前提下,测量 100kHz 以上的信号时,往往需要较高的系统时钟,若系统硬件时钟频率过高,会对芯片

性能产生影响,同时给外围电路、电路板的布线、材料选择、加工等带来的不利因素。

## 发明内容

[0007] 为了解决现有技术中功率超声系统中动态匹配的超声信号产生电路戴负载能力差;电压、电流信号采样电路复杂、成本高;相位检测电路可靠性差、精度较低的问题,本发明提供的超声电源的动态匹配装置及其方法,电路结构简单,匹配过程精度较高,成本低,易于市场的推广,具有良好的应用前景。

[0008] 为了达到上述问题,本发明所采用的技术方案是:

[0009] 一种超声电源的动态匹配装置,其特征在于:包括依次串联的超声信号发生器、驱动隔离电路、超声功率放大器、匹配变压器、调谐电感和超声换能器,所述超声换能器安装在反应容器的底部,用于驱动反应容器内液体发生空化效应;还包括用于采集包括调谐电感在内的超声换能器电路两端的实时工作电压和工作电流的电压电流采样电路,所述电压电流采样电路依次通过后级隔离电路、滤波整形电路、可编程逻辑器件相连接,所述可编程逻辑器件内设有相位测量单元,且可编程逻辑器件的 PWM 激励脉冲输出端与超声信号发生器相连接。

[0010] 前述的超声电源的动态匹配装置,其特征在于:所述控制面板与可编程逻辑器件相连,用于显示当前超声换能器的工作频率和超声换能器匹配状态。

[0011] 前述的超声电源的动态匹配装置,其特征在于:所述超声信号发生器所采用的芯片内置推挽式输出电路,所述信号发生芯片为单片集成 PWM 控制芯片,根据输入的 PWM 激励脉冲的频率来控制推挽式输出电路输出超声驱动信号的频率。

[0012] 前述的超声电源的动态匹配装置,其特征在于:所述驱动隔离电路包括全桥逆变电路和隔离变压器,所述全桥逆变电路的每一半桥的上管为 NPN 型达林顿功率晶体管,所述全桥逆变电路的每一半桥的下管为 PNP 型达林顿功率晶体管;所述隔离变压器设有一个输入端和两个输出端,两个输出端的缠绕方向反相,以产生两个同频反相的信号使半桥型 D 类功率放大电路的上、下两个功率开关管交替导通工作。

[0013] 前述的超声电源的动态匹配装置,其特征在于:所述超声功率放大电路为半桥型 D 类功率放大电路。

[0014] 前述的超声电源的动态匹配装置,其特征在于:所述反应容器为各面用钢板围成的空心立方体容器,超声换能器紧贴在反应容器的底部。

[0015] 前述的超声电源的动态匹配装置,其特征在于:所述超声换能器为柱状压电陶瓷换能器,与反应容器的底部采用直接粘接法进行连接。

[0016] 前述的超声电源的动态匹配装置,其特征在于:所述隔离电路用于实现电压电流采样电路输出的采样信号的后级隔离;所述滤波整形电路包括滤波单元和波形变换单元,所述波形变换单元将采样信号转化成脉冲信号。

[0017] 基于上述的超声电源的动态匹配装置的匹配方法,其特征在于:包括以下步骤:

[0018] 步骤(A)接通可编程逻辑器件的电源,按下控制面板的自检按钮,进入模块自检状态,保证可编程逻辑器件内设有相位测量单元正常工作;

[0019] 步骤(B)接通超声信号发生器电源,通过匹配变压器利用阻抗变换实现调谐电感、超声换能器和超声功率放大器的阻抗匹配,保证超声换能器输出最大的有用功率;

[0020] 步骤(C)待反应容器底部的超声换能器工作稳定后,超声换能器的谐振点会产生偏移,则进行动态调谐匹配;

[0021] 步骤(D)重复步骤(C),进行动态调谐匹配,保证超声换能器工作在谐振点,输出最大的有用功率。

[0022] 前述的超声电源的动态匹配装置的匹配方法,其特征在于:步骤(C)进行动态调谐匹配的方法如下,

[0023] (C1)通过可编程逻辑器件每隔 5s 开启相位测量单元的采样信号输入通道,快速测量相时延和判断包括调谐电感在内的超声换能器电路的阻抗特性;

[0024] (C2)判断相时延是否在设定的正常工作范围(电压电流信号周期 T 的  $-2\% \sim 2\%$ )内,若相时延在设定的正常工作范围内,则保持可编程逻辑器件输出的 PWM 激励脉冲频率不变;若相时延不在设定的正常工作范围内,则继续判断测出的相时延对应的超声换能器的阻抗特性;

[0025] (C3)若超声换能器电路呈电感性,则减小可编程逻辑器件输出的 PWM 激励脉冲频率,减小超声信号发生器的输出超声驱动信号的频率;若超声换能器电路呈电容性,则增加可编程逻辑器件输出的 PWM 激励脉冲频率,增加超声信号发生器的输出超声驱动信号的频率;

[0026] (C4)重复步骤(C4),直到测量的相时延稳定在设定的正常工作范围内,超声换能器工作在谐振点,输出最大的有用功率。

[0027] 本发明的有益效果是:本发明的通过实时监测超声换能器电路的阻抗特性来动态调整超声驱动信号频率,以实现最大的功率利用,包括静态匹配和动态匹配两个过程,保证换能器始终工作在谐振点,输出最大的有用功率,实时反应快、精度较高的特点,电路简单,实现成本较低,易于实现,具有较广的应用前景。

## 附图说明

[0028] 图 1 是本发明的超声电源的动态匹配装置的系统框图。

[0029] 图 2 是本发明的超声换能器的阻抗特性判断示意图。

[0030] 图 3 是本发明的相位测量单元中某组计数器的工作流程图。

## 具体实施方式

[0031] 下面将结合说明书附图,对本发明作进一步的说明。

[0032] 如图 1 所示,本发明的超声电源的动态匹配装置,包括依次串联的超声信号发生器、驱动隔离电路、超声功率放大器、匹配变压器、调谐电感和超声换能器,超声换能器安装反应容器的底部,还包括用于采集包括调谐电感在内的超声换能器电路两端的实时工作电压和工作电流的电压电流采样电路,电压电流采样电路依次通过后级隔离电路、滤波整形电路、可编程逻辑器件相连接,可编程逻辑器件内设有相位测量单元,且可编程逻辑器件的 PWM 激励脉冲输出端与超声信号发生器相连接,还包括与可编程逻辑器件相连的控制面板,控制面板用于显示当前超声换能器的工作频率和超声换能器匹配状态,下面具体介绍各模块的功能和实现:

[0033] 超声信号发生器,用于产生超声换能器的驱动信号,信号发生芯片为单片集成 PWM

控制芯片 SG3525, SG3525 由基准稳压源、振荡器、误差放大器、PWM 比较器、锁存器、分相器、或非门电路和输出电路等几大部分组成, 内置基准电压源, 输出精度可达  $(5.1 \pm 1\%)V$ , 并设有温度补偿、软启动控制、限制最大输出占空比和过流保护功能, SG3525 的振荡器可以根据外部输入的激励脉冲产生振荡, 经误差放大器、PWM 比较器和或非门电路处理后输出两路同频反相的 PWM 信号至推挽式输出电路, 推挽式输出电路的拉电流和灌电流峰值可达 200mA, 本发明的超声信号产生器能够产生频率在 100Hz ~ 500kHz 的驱动信号, 带载能力强, 控制方便, 输出稳定;

[0034] 驱动隔离电路, 用于隔离超声信号发生器和超声功率放大器, 包括全桥逆变电路和隔离变压器两部分组成, 其中全桥逆变电路的每一半桥的上管为 NPN 达林顿功率晶体管 TIP122, 下管为 PNP 达林顿功率晶体管 TIP127, 增加超声信号的功率, 提高信号的驱动能力, 利于驱动后续的超声功放电路; 隔离变压器采用 PQ-26 型骨架, E-E 型磁芯, 高频纱包线绕制而成, 原副线圈匝数比为 1:1, 并设有一个输入端和两个输出端, 两个输出端的缠绕方向反相, 以产生两个同频反相的信号使半桥型 D 类功率放大电路的上、下功率开关管交替导通工作;

[0035] 超声功率放大器, 用于功率放大超声驱动信号, 采用半桥型 D 类功率放大电路, 由若干电阻电容组成的 RC 吸收电路和由 IRFP460 功率开关管组成的桥臂构成;

[0036] 匹配变压器, 用于超声换能器与超声功率源阻抗匹配, 保证超声换能器获得最大的电功率, 采用 PQ-28 型骨架, E-E 型铁氧体, 由高频纱包线绕制的变压器构成, 它利用阻抗变换使调谐电感、超声换能器与超声功率放大器额阻抗匹配, 保证超声换能器的输出有用功率最大;

[0037] 调谐电感, 用于使超声波换能器电路为纯电阻状态, 以 PQ-28 型骨架, E-E 型铁氧体, 采用高频纱包线绕制, 用于调节超声换能器两端的电压电流相位至基本同相, 使其工作在谐振点, 输出最大的有用功率, 通过改变匝数等方法来调整电感值, 以实现在不同频率下与超声换能器的静态匹配;

[0038] 反应容器, 用于放反应液体, 为各面用钢板围成的空心立方体容器, 底部与超声换能器相连;

[0039] 超声换能器, 用于驱动反应容器内液体发生空化效应, 超声换能器为柱状压电陶瓷换能器, 与反应容器的底部采用直接粘接法进行连接, 可以使传播到水中的超声波有较好的声场分布情况, 可使超声空化反应顺利进行;

[0040] 电压电流采样电路, 用于采集包括调谐电感在内的超声换能器电路两端的实时工作电压和工作电流, 电压电流采样电路包括电压采样电路和电流采样电路, 其中电压采样电路是超声换能器电路的两端并联一条由两个已知阻值的高精度大电阻和小电阻串联所组成的支路, 小电阻的串联分压可知支路两端电压, 即超声换能器的工作电压; 电流采样电路是与包括调谐电感在内的超声换能器串联一已知阻值的高精度功率电阻, 其阻值较小(其分压作用忽略不计), 由此功率电阻的两端电压, 即得到超声换能器的工作电流;

[0041] 隔离电路, 用于实现电压电流采样电路输出的采样信号的后级隔离;

[0042] 滤波整形电路, 用于滤除经过隔离后的采样信号中的杂波, 并对采样信号进行波形变换, 包括滤波单元和波形变换单元, 波形变换单元将采样信号转化成脉冲信号;

[0043] 可编程逻辑器件, 用于实现系统的微控制器, 其包括对波形变换后的采样信号进

行相时延测量的相位测量单元,并控制超声信号发生器输出不同频率的超声驱动信号;可编程逻辑器件选用 FPGA, FPGA 有利于对相位测量单元输出的相时延测量结果进行处理, FPGA 在软件设计得到的高时钟频率下,能够快速动态调整,并输出 PWM 激励脉冲至超声信号发生器,以实现超声驱动信号的动态调整。

[0044] 基于上述的超声电源的动态匹配装置的匹配方法,包括以下步骤,

[0045] 步骤(A)接通可编程逻辑器件的电源,按下控制面板的自检按钮,进入模块自检状态,保证可编程逻辑器件内设有相位测量单元正常工作;

[0046] 步骤(B)接通超声信号发生器电源,通过匹配变压器利用阻抗变换实现调谐电感、超声换能器和超声功率放大器的阻抗匹配,保证超声换能器输出最大的有用功率;

[0047] 步骤(C)待反应容器底部的超声换能器工作稳定后,超声换能器的谐振点会产生偏移,则进行动态调谐匹配,动态调谐匹配方法如下:

[0048] (C1)通过可编程逻辑器件每隔 5s 开启相位测量单元的采样信号输入通道,快速测量相时延和判断包括调谐电感在内的超声换能器电路的阻抗特性;

[0049] (C2)判断相时延是否在设定的正常工作范围(电压电流信号周期 T 的  $-2\% \sim 2\%$ )内,若相时延在设定的正常工作范围内,则保持可编程逻辑器件输出的 PWM 激励脉冲频率不变;若相时延不在设定的正常工作范围内,则继续判断测出的相时延对应的超声换能器的阻抗特性,相位测量单元接收两路采集信号,电压信号 U、电流信号 I,判断出超声换能器的阻抗特性,具体的判断情况,如图 2 所示,以电压信号 U 为参考,此时可编程逻辑器件已判断出此时测得的相时延不在设定的正常工作范围,当电压信号 U 达到上升沿,变为高电平时,若此时电流信号 I 为低电平,则超声换能器呈电感性,若此时电流信号 I 为高电平,则此时超声换能器呈电容性;

[0050] (C3)若超声换能器电路呈电感性,则减小可编程逻辑器件输出的 PWM 激励脉冲频率,减小超声信号发生器的输出超声驱动信号的频率;若超声换能器电路呈电容性,则增加可编程逻辑器件输出的 PWM 激励脉冲频率,增加超声信号发生器的输出超声驱动信号的频率;

[0051] (C4)重复步骤(C4),直到测量的相时延稳定在设定的正常工作范围内,超声换能器工作在谐振点,输出最大的有用功率;

[0052] 步骤(D)重复步骤(C),进行动态调谐匹配,保证超声换能器工作在谐振点,输出最大的有用功率。

[0053] 为了保证动态匹配的高精度,对相时延的测量则要求严格,在整个动态匹配过程中,相位测量起到了决定性的作用,这里一方面是依靠硬件的功能,另一方面也是软件设计的重点,通过软件倍频和移相技术提高了系统的测量精度,当硬件系统时钟频率(系统频率)为 50MHz 时,测量精度可达到 1.67ns,相当于时钟频率 600MHz 的测量效果,即达到 12 倍频的效果。

[0054] 下面具体介绍软件设计方法:FPGA 接收到的两路采样信号,电压信号 U、电流 I(U、I 分别为经过隔离、滤波整形后的采样信号)进行相时延差测量,相位测量单元使用了六组计数器,分别由 FPGA 内部的 PLL 产生的三个 2 倍频信号的上升沿或下降沿触发,三个信号的初始相位  $\Phi$  分别为  $0^\circ$ 、 $60^\circ$  和  $120^\circ$ 。如图 3 所示为某组计数器的工作流程图,每组都有两个计数器 A、B 分别对 U 和 I 信号的脉宽进行计数,最后将得到的两个值相减再乘以某



个触发信号的周期就得到了在这个触发信号下对 U 和 I 相位差的测量值  $t_{imeri}$ , 多次测量后将六个计数器测量得到的  $t_{imeri}$  相加取平均后, 就得到了最终的相位差测量结果, 并根据测量结果判断换能器匹配状态, 进而改变 FPGA 输出的 PWM 激励脉冲频率和控制面板上的换能器匹配状态指示。

[0055] 综上所述, 本发明的超声电源的动态匹配装置及其方法, 很大程度地减少了硬件的使用数量, 在保证测量较高精度的条件下不会使硬件时钟频率过高, 提高了系统的稳定性和可靠性, 电路结构简单, 精度较高, 成本低, 易于市场的推广, 具有良好的应用前景。

[0056] 以上显示和描述了本发明的基本原理、主要特征及优点。本行业的技术人员应该了解, 本发明不受上述实施例的限制, 上述实施例和说明书中描述的只是说明本发明的原理, 在不脱离本发明精神和范围的前提下, 本发明还会有各种变化和改进, 这些变化和进步都落入要求保护的本发明范围内。本发明要求保护范围由所附的权利要求书及其等效物界定。

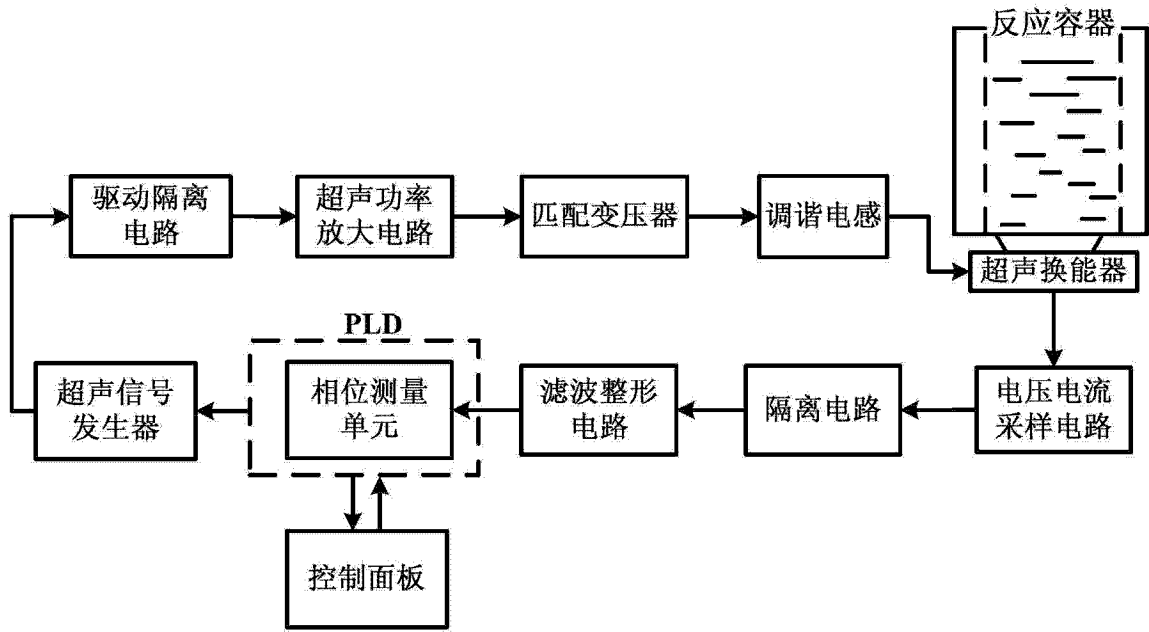


图 1

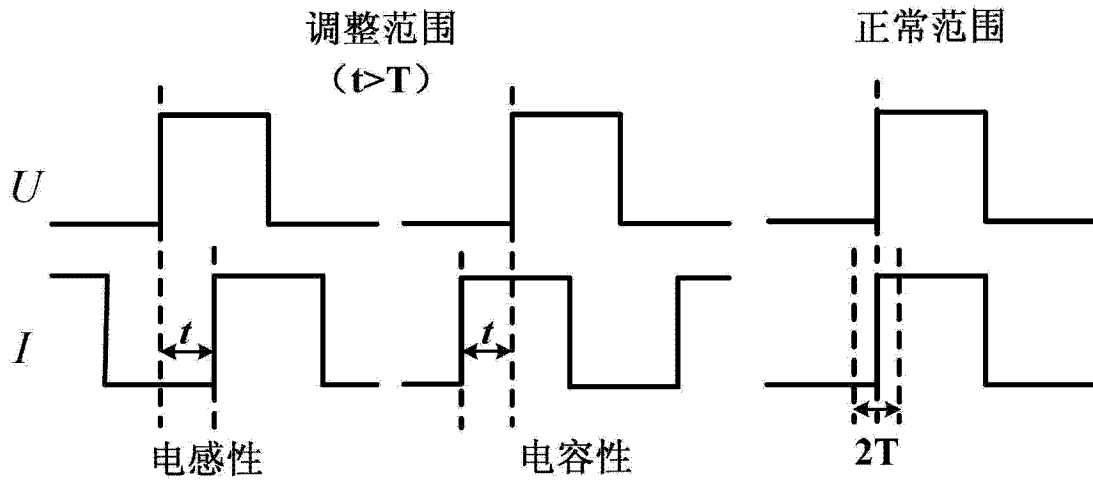


图 2

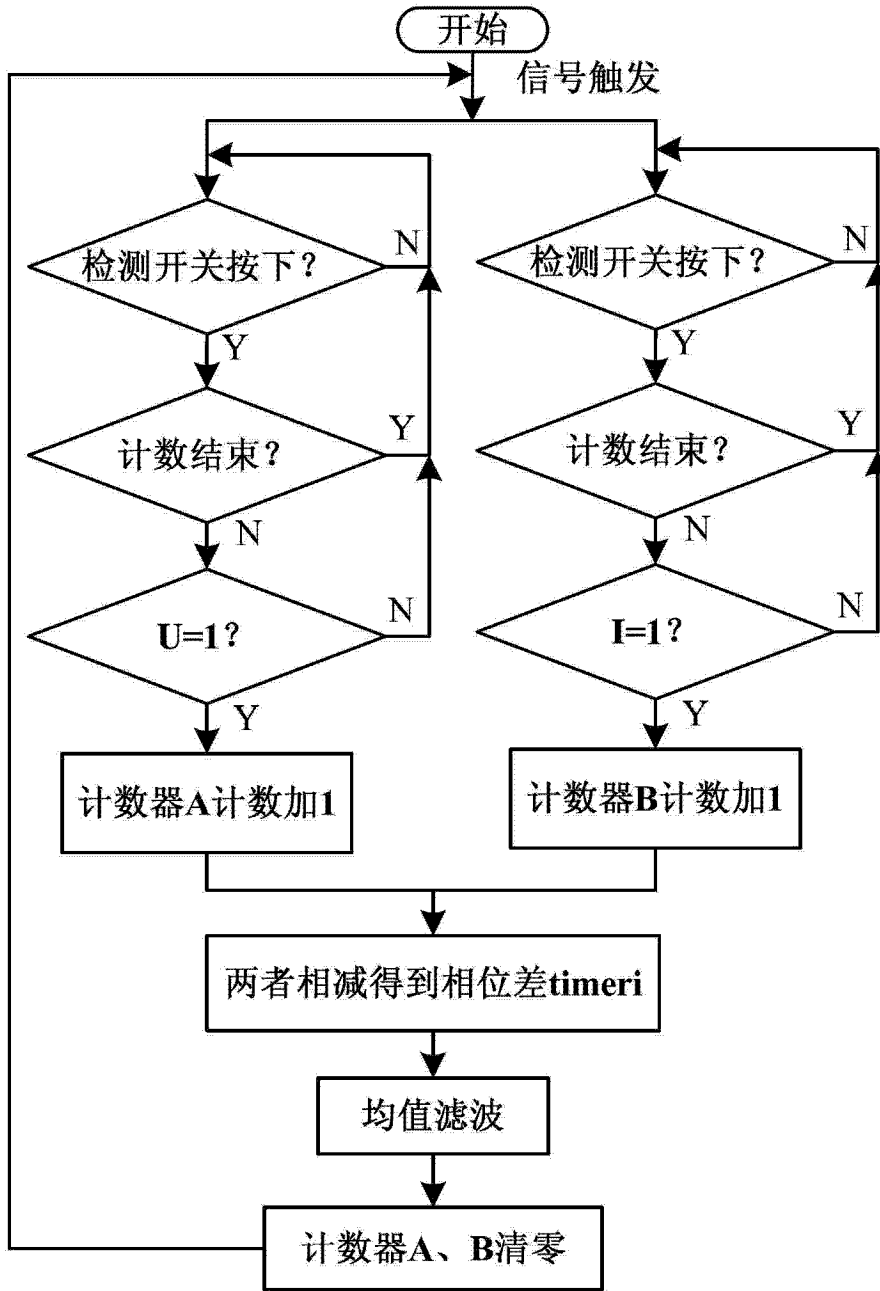


图 3