



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 110231006 B

(45)授权公告日 2020.07.17

(21)申请号 201910494935.2

(22)申请日 2019.06.10

(65)同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 110231006 A

(43)申请公布日 2019.09.13

(73)专利权人 苏州博昇科技有限公司  
地址 215000 江苏省苏州市吴中区角直镇  
长虹北路169号吴淞江商务区B幢906  
室

(72)发明人 沈宇平 谢明明 朱绪祥 周新宗  
赵军辉

(74)专利代理机构 苏州创元专利商标事务所有  
限公司 32103  
代理人 范晴 王凯

(51)Int.Cl.

G01B 17/06(2006.01)

G01S 15/08(2006.01)

G01S 15/931(2020.01)

(56)对比文件

CN 108226304 A,2018.06.29,

KR 101851706 B1,2018.04.25,

EP 2745107 A1,2014.06.25,

US 2015136836 A1,2015.05.21,

赵军辉等.《中距离电磁超声导波检测及应  
用》.《无损检测》.2015,

Richard Dodson等.《The science case  
for simultaneous mm-wavelength receivers  
in radio astronomy》.《New Astronomy  
Reviews》.2017,

审查员 崔涌波

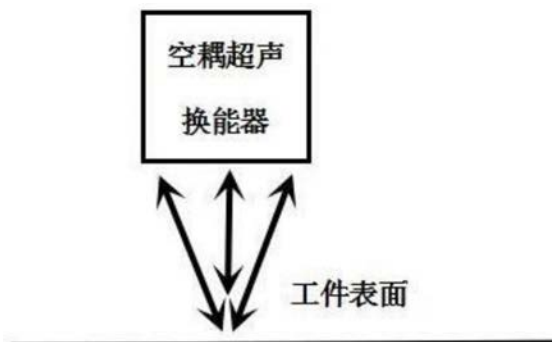
权利要求书1页 说明书5页 附图3页

(54)发明名称

空气耦合超声干涉法

(57)摘要

本发明公开了空气耦合超声干涉法,将空气耦合超声换能器作为测头正对工件表面,超声波在工件表面发生来回反射,测得第一次工件表面反射回波达到空气耦合超声换能器的相位差;基于超声波频率及波长的变化,则将距离的测量转变成声波相位相对于声波角频率的变化率;所述声波角频率的变化为空气耦合超声换能器带宽 $f_B$ 内最高频率 $F_2$ 与最低频率 $F_1$ 之差乘以 $2\pi$ ;所述声波相位的变化为 $F_2$ 频率下与 $F_1$ 频率下声程除以波长所得整倍数的差值乘以 $2\pi$ 。该超声技术基于长时间的持续发射和大跨度的频率扫描,具有测量精度高和抗干扰能力强的优点,其在激光干涉中的对应技术比较难以实现。



1. 空气耦合超声干涉法, 将空气耦合超声换能器作为测头正对工件表面, 其特征在于: 超声波在工件表面发生来回反射, 测得第一次工件表面反射回波达到空气耦合超声换能器的相位差; 基于超声波频率及波长的变化, 则将距离的测量转变成声波相位相对于声波角频率的变化率; 所述声波角频率的变化为空气耦合超声换能器带宽 $f_B$ 乘以 $2\pi$ ; 所述声波相位的变化为带宽上边界频率时与带宽下边界频率时声程除以波长所得数值的差值乘以 $2\pi$ ;

声波相位相对于声波角频率的变化率, 即声波相位差相对于声波角频率差的比值, 其与声程的公式关系为:

$$L = \lambda \cdot (\Delta \Phi / 2\pi) / (\Delta f / f) = c \cdot \Delta \Phi / \Delta \omega,$$

其中 $\Delta \Phi$ 为声波相位差,  $\Delta \omega$ 为声波角频率差;

声波相位相对于声波角频率的变化率是一个与被测距离线性相关的常数, 其也可以转化为相邻的两个相位周期对应的频率之差, 其与声程的公式关系为:

$$L = c \cdot \Delta f = c \cdot (f_2 - f_1);$$

将声波角频率差和声波相位差用空气耦合超声换能器带宽 $f_B$ 内声程为波长整数倍的最高频率 $F_2$ 与声程为波长整数倍的最低频率 $F_1$ 之间的关系来替换, 则声程的公式转化为:

$$L = c \cdot (N_2 - N_1) / (F_2 - F_1)。$$

2. 根据权利要求1所述的空气耦合超声干涉法, 其特征在于: 超声波在一个固定频率检测时持续激发的时间大于一次回波的时间, 小于第二次回波的时间。

3. 根据权利要求2所述的空气耦合超声干涉法, 其特征在于: 超声波进行扫频检测, 以扫查角频率为横坐标, 以发生干涉的时域信号绝对值积分为纵坐标作二维图, 对该二维图所呈现的正弦波变化曲线用正弦波函数回归算法来拟合; 扫频跨度的大小与拟合数据的误差大小反相关; 模拟出来的正弦波函数周期为相邻的两个相位周期对应的角频率之差 $2\pi(f_2 - f_1)$ , 且此时声波相位差 $\Delta \Phi$ 为 $2\pi$ 。

4. 根据权利要求3所述的空气耦合超声干涉法, 其特征在于: 发生干涉的时域信号范围为: 从第二次回波时间开始, 至超声波持续激发时间加上第一次回波的时间为结束的时间区间。

5. 根据权利要求4所述的空气耦合超声干涉法, 其特征在于: 根据误差分析法, 声程的相对误差公式为:  $\delta L / L = \delta(F_2 - F_1) / |F_2 - F_1| = (|\delta F_2| + |\delta F_1|) / |F_2 - F_1|$ 。

6. 根据权利要求5所述的空气耦合超声干涉法, 其特征在于: 声程的绝对误差公式为:  $\delta L = L \cdot (|\delta F_2| + |\delta F_1|) / |F_2 - F_1|$ 。

7. 根据权利要求6所述的空气耦合超声干涉法, 其特征在于: 第一次工件表面反射回波达到空气耦合超声换能器的相位差 $\Phi = 2\pi L / \lambda$ ; 其中 $\lambda$ 为波长;  $L$ 是超声波从换能器到工件表面再反射回换能器的声程, 声程等于两倍的被测距离。

8. 根据权利要求7所述的空气耦合超声干涉法, 其特征在于: 超声波频率发生变化时, 波长发生变化, 相位也发生变化; 相位变化的差值对频率变化的差值的关系为:

$$\Delta \Phi = \frac{2\pi L}{c} \Delta f。$$

## 空气耦合超声干涉法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及空气耦合超声测距技术领域,特别是空气耦合超声干涉法。

### 背景技术

[0002] 复杂结构高精度纳米加工以后,需要对表面的自由曲面进行高精度测量。但是静态的自由曲面的高精度测量方法和技术一直是一个难题。超精密加工后表面轮廓精度超精密测量难、测量成本高、表面表征理论和测量方法未有应用性突破。

[0003] 目前对复杂结构纳米加工表面的自由曲面测量的方法中高精度的测量方法行业内普遍采用三轴坐标机技术平台。这个技术平台包括高精度的标尺系统如线纹尺、精密丝杆、感应同步器、光栅尺、磁尺及光波波长等;包括导轨系统如滑动导轨、滚动轴承导轨和气流导轨等;包括驱动、平衡、转台等技术模块系统,另外再加上技术上与三轴坐标机其它部分相对独立的三维测头。总体来说,对于三坐标机系统,位置和尺寸测量精度达到微米量级的已经是高端产品,关键要看测头测量精确度的技术水平。测头分为接触式与非接触式。接触式的探针类测头是目前主要使用的测头类型,探针类的测量精度一般不会优于微米量级。

[0004] 非接触式测头的种类主要分为光学、超声和电磁几类。其中光学类测头是目前国内外研究的热点。光学类测头里面又分为线结构光法、激光三角法、激光半焦斑成像法等。目前公开文献见到的国内最好的实验室指标是采用的半光斑成像式激光测头实现的,其重复瞄准不确定度最好的效果达到微米量级,测量灵敏度可达 $30\text{mV}/\mu\text{m}$ ,激光跟踪瞄准被测曲面倾角可达 $25^\circ$ 。但是该方法受材料类别影响非常大,材料的颜色以及材料表面的吸光性质都会影响测量的灵敏度,所以对不同的材料需要不同的标准试样。有时候材料的标准试样是很难获取的。

[0005] 激光干涉式测头主要最对微小的相对变化量敏感,对绝对量不敏感,绝对测量精度受制于控制台的三维坐标瞄准。而且激光干涉测头对被测工件表面的激光反射特性要求很高,反射率太高太低都不好,有些特殊的吸波材料还需要要更换不同波长的激光。所以激光干涉法目前没有受到大规模推广应用。

[0006] 空气超声法测距主要用时差法。一般来说,频率越高,测距精度越高。但是 $1\text{MHz}$ 量级的高频超声波在空气中的衰减很大,以至于无法用于常见距离的测量。另外空气超声时差法受外界干扰较大,所以实际应用中时差法的测距精度大打折扣。举例来说汽车行业广泛应用的空气耦合超声测距倒车雷达采用的频率一般在几十 $\text{KHz}$ 量级,其测距精度通常在一个发射波长的量级。比如一个 $40\text{KHz}$ 的超声波倒车雷达的测距精度大约在 $10\text{mm}$ 左右。

### 发明内容

[0007] 本发明的技术方案是:空气耦合超声干涉法,如果空气耦合超声测头正对着工件表面,超声波换能器发射出的超声波在工件表面就会发生来回发射。超声波在空气中传播的波长 $\lambda$ 为 $\lambda=c/f$  (1)

[0008] 式中 $c$ 是空气声速, $f$ 是超声波频率。

[0009] 如果频率变化,空气超声波测头声程不变,但是相位会改变。第一次工件表面反射回波到达空耦超声换能器的相位差 $\Phi$ 为:

$$[0010] \quad \Phi = 2\pi L/\lambda \quad (2)$$

[0011] 式中 $L$ 是超声波从换能器到工件表面再反射回换能器的声程,空气耦合超声换能器到工件的距离则为 $L/2$ 。(1)式代入(2)式中有

$$[0012] \quad \Phi = 2\pi Lf/c \quad (3)$$

[0013] 如果超声波频率发生微小变化,相位差也发生微小变化。(3)式对微小频率变化 $\Delta f$ 展开得到微小相位差变化 $\Delta \Phi$ :

$$[0014] \quad \Delta \Phi = 2\pi L \Delta f/c = L \Delta \omega/c \quad (4)$$

[0015] 其中 $\Delta \omega$ 为微小角频率变化。继续整理后有

$$[0016] \quad L = c \cdot \Delta \Phi / \Delta \omega \quad (5)$$

[0017] 从公式(5)可知,我们把距离的测量转变成了相位相对角频率 $\omega$ 的变化率,这个变化率是一个与被测量距离线性相关的常数。令式(5)中的 $\Delta \Phi$ 为一个周期 $2\pi$ ,则式(5)变为

$$[0018] \quad L = c \cdot \Delta f = c \cdot (f_2 - f_1) \quad (6)$$

[0019] 式中 $f_1$ 和 $f_2$ 是相邻的两个相位周期对应的频率。

[0020] 优选的是,公式(6)还可以以另一种方法推出。假设在某一频率 $f_1$ 下总声程为波长 $\lambda_1$ 的整数 $n$ 倍,则

$$[0021] \quad L = n\lambda_1 = nc/f_1 \quad (7)$$

[0022] 如果连续增加频率,可以得到一个频率 $f_2$ ,此频率下总声程为波长 $\lambda_2$ 的整数 $(n+1)$ 倍

$$[0023] \quad L = (n+1)\lambda_2 = (n+1)c/f_2 \quad (8)$$

[0024] 联合(7)和(8)式消去 $n$ 求解 $L$ 也可以得到公式(6)。

[0025] 定义空气耦合超声换能器带宽 $f_B$ 内最低的一个频率 $F_1$ ,该频率下声程 $L$ 为波长的整数倍 $N_1$ ;定义空气耦合超声换能器带宽 $f_B$ 内最高的一个频率 $F_2$ ,该频率下声程 $L$ 也为波长的整数倍 $N_2$ 。我们后面将会说明 $N_1$ 和 $N_2$ 可以用声时差法或者干涉法准确地求出。我们后面也将说明,通常换能器带宽与这两个频率的差值相差极小,即

$$[0026] \quad F_2 - F_1 \approx f_B \quad (9)$$

[0027] 为了表述方便,我们以后会用频带宽度 $f_B$ 来代替公式(9)中的频率差来说明该频率差的物理意义。把频率差和相位差代入到公式(5)中有,

$$[0028] \quad L = c \cdot (N_2 - N_1) / (F_2 - F_1) \quad (10)$$

[0029] 因为 $c, N_2, N_1$ 都为非常容易确定的常数,由误差分析可知式(10)的总声程相对误差为

$$[0030] \quad \delta L/L = \delta(F_2 - F_1) / |F_2 - F_1| = (|\delta F_2| + |\delta F_1|) / |F_2 - F_1| \quad (11)$$

[0031] 或者空气耦合超声换能器测头到工件的距离相对测量误差为:

$$[0032] \quad (\delta L/2) / (L/2) = (|\delta F_2| + |\delta F_1|) / |F_2 - F_1| \quad (12)$$

[0033] 总声程 $L$ 的测量绝对误差为

$$[0034] \quad \delta L = L \cdot (|\delta F_2| + |\delta F_1|) / |F_2 - F_1| \quad (13)$$

[0035] 或者空气耦合超声换能器测头到工件的距离测量绝对误差为

$$[0036] \quad \delta L/2 = L/2 \cdot (\delta F_2 + |\delta F_1|) / |F_2 - F_1| \approx L/2 \cdot (|\delta F_2| + |\delta F_1|) / f_B \quad (14)$$

[0037] 公式(12)和(14)为我们提供了估算测量相对精度和绝对精度的计算公式。公式(14)说明,要想提高测量的绝对精度,需要增大带宽 $f_B$ (或者 $F_2 - F_1$ ),减小被测距离 $L/2$ ,减小 $F_1$ 和 $F_2$ 的测量不确定度。对于空气耦合超声换能器,由于单探头在被测工件表面的反射率几乎为100%,信号非常强,所以在空气超声测距应用中可以适当放宽应用带宽的范围,比如可以选用-20dB带宽。通常商业应用级别的压电型空气耦合超声换能器在空气中的插入损耗-6dB带宽在20%~50%左右,-20dB带宽能够达到100%。因此,公式(14)中的带宽 $f_B$ 可以近似用换能器的中心频率 $f_w$ 代替。不失一般性,公式(14)可以整理为:

$$[0038] \quad \delta L/2 \approx L/2 \cdot (|\delta F_2| + |\delta F_1|) / f_w \quad (15)$$

[0039] 举例说明,如果我们选用一个非常常见的300KHz的空气耦合超声压电换能器,换能器到工件的距离选为45mm,频率步进选为10Hz或者说频率测量误差为10Hz,根据公式(15)可知距离测量误差为

$$[0040] \quad \delta L/2 \approx 45\text{mm} \cdot (10+10) / (300\text{k}) = 3 \times 10^{-3}\text{mm} = 3\mu\text{m} \quad (16)$$

[0041] 这个测量精度已经远远高于脉冲反射方法。

[0042] 我们再回头论证一下公式(9)的合理性。由以上所选取的实验参数可知相邻两个周期的频率差为 $(f_2 - f_1) = c/L = 340 / (90 \times 10^{-3}) = 3800\text{Hz} = 3.8\text{KHz}$  (17)

[0043] 公式(9)中 $f_B$ 与 $(F_2 - F_1)$ 的最大差值百分比为:

$$[0044] \quad 2 \times 3.8\text{KHz} / 300\text{KHz} = 2.5\% \quad (18)$$

[0045] 所以公式(9)是有根据近似成立的,在说明物理意义时我们可以用带宽 $f_B$ 来代替 $F_2 - F_1$ 的频率差。这进一步说明带宽越宽,干涉测量方法越精确。

[0046] 我们采用一种特殊的超声波激励方式来实现上述干涉法测量。我们用正负变化的正弦波或者方波一个固定频率持续激发空气耦合超声换能器,激发的时间大于一次回波的时间,小于第二次回波的时间。第一次回波时间和第二次回波时间可以通过一个短周期的脉冲反射方法快速获得。然后我们变换激发频率按照上面的激励方法进行频率扫描检测。以扫描角频率为横坐标,以发生干涉的时域信号的绝对值积分为纵坐标作二维图。则该二维图为一个类似正弦波变化的曲线,可以用一个正弦波函数使用回归算法来拟合该曲线。频带越宽,模拟的结果就越准确。模拟出来的正弦波函数周期可以认为是权利要求2中在 $\Delta \Phi$ 为 $2\pi$ 时的 $\Delta \omega$ 。发生干涉的时域信号选取范围为从第二次回波时间始至超声波持续激发时间加上第一次回波时间为至的时间区间以内。

[0047] 本发明的优点是:

[0048] 第一、该超声技术基于超过一个回波时间的长时间的持续发射和相对带宽内大跨度的频率扫描,具有测量精度高和抗干扰能力强的优点,其在激光干涉中的对应技术比较难以实现。

[0049] 第二、该技术理论相对测距精确度正比于频率的测量误差值与空气耦合超声换能器的带宽比值,其短距离测距精度可以达到亚微米量级,长距离测距精度可以优于1%的波长。

[0050] 第三、该测距技术短距离可以应用于自由曲面轮廓的高精度扫描,长距离可以应用于汽车自动驾驶时超声波雷达抗干扰测距。

### 附图说明

- [0051] 下面结合附图及实施例对本发明作进一步描述：  
 [0052] 图1是空气耦合超声测头测距示意图；  
 [0053] 图2是空气耦合超声测头实物图；  
 [0054] 图3是399.8KHz、50Vpp、120周期连续激发产生相干相长的频率图；  
 [0055] 图4是402KHz、50Vpp、120周期连续激发产生相干相消的频率图；  
 [0056] 图5是399.8KHz、50Vpp、3周期连续激发用于时差法测量的频率图；  
 [0057] 图6是550KHz换能器置于工件上方25mm时的干涉部分幅值绝对值积分平均值与频率的变化；

### 具体实施方式

- [0058] 实施例：  
 [0059] 选取一个空气耦合超声换能器垂直对准被测工件自由曲面，如图1所示。选用聚焦式换能器可以缩小焦斑，提高横向分辨率；选用直径小的频率高的空气耦合超声平面换能器也能达到类似效果。空气耦合超声换能器的外径一般在10mm到50mm之间，如图二的实物照片所示，加上适当的夹具后可以直接作为测头安装在三轴坐标测量机上。聚焦换能器焦斑一般在1mm到5mm之间，焦距在5mm到50mm之间；平面换能器晶片直径一般在10mm~50mm，近场区一般在10mm~100mm之间。空耦超声换能器在高频段(1MHz以上)一般都选用平面型。  
 [0060] 选用空气耦合超声自动扫描系统作为测试平台，分别选择一个中心频率为400KHz的压电空气耦合超声换能器垂直固定在离工件表面大约42mm的上方，以及一个中心频率为550KHz的压电空气耦合超声换能器垂直固定在离工件表面大约25mm的上方。  
 [0061] 一个400KHz换能器自发自收的声压电信号随时间变化的曲线，如图3至5所示。其中最图5中3个周期激发的数据可以用作比较粗略的时差法测距，多次重复测量精度优于1mm。图3和图4是连续波激发，连续激发的时间超过了第一次回波的时间，小于第二次回波时间，于是超过第一次回波时间的连续激发部分与第一次回波发生干涉效应。有的频率相干相长，有的频率相干相消，并且在第二次回波时反应出来(如图中方框所标示处)。将干涉部分幅值取绝对值积分平均，就会得到随频率类似正弦波变化的曲线。作为实例，图6为一个更高频率550KHz换能器放置于工件上方约25mm时得到的干涉部分幅值绝对值积分平均值与频率的变化。实际应用中，该曲线可以进行一次带通滤波变成比较光滑和易于数据处理的正弦波曲线。  
 [0062] 从图6可以用肉眼估算大约从530KHz到570kHz干涉相位变化了6个周期，将该数据代入到公式(10)有：

$$[0063] \quad L = c \cdot (N_2 - N_1) / (F_2 - F_1) = 340m/s \times \frac{6}{(570 - 530)KHz} = 51mm \quad (19)$$

- [0064] 也就是说换能器与工件上被测点的距离为 $51mm/2 = 25.5mm$ ，这与实验设置时放置的大致位置25mm比较接近。精确度达到微米量级的计算可以从图四中提取更加精确的频率数据得到。比如对图6进行滤波后用一个正弦波函数进行回归拟合，得到的精确的拟合的正弦函数周期。该周期乘以 $2\pi$ 即为公式(5)中 $\Delta\Phi$ 为 $2\pi$ 时的 $\Delta\omega$ ，从而声程L可以通过公式(5)计算出。

[0065] 当换能器降低频率到40KHz与100KHz之间工作在与工件距离1米到20米的范围时,作者在实际应用实验中能够快速得到的绝对误差通常优于一个波长的1%量级。

[0066] 在频率扫描时,为了提高测距速度,除了带宽两端以外,带宽以内的频率可以按照奈奎斯特最低采样定律快速采样扫频以确定方程式(10)中的 $N_1$ 和 $N_2$ 。按照前述的持续发射得到相干信号之前,可以先按照图三中的下图以低周期脉冲发射得到粗略的距离 $L_c$ ,根据下式可得带宽内连续最大频率扫描步进 $F_s$ 为

$$[0067] \quad F_s > 2 \times \frac{c}{L_c} \quad (21)$$

[0068] 为了更进一步提高测距速度,该带宽中间的频率步进扫描也可以省略。图四中的周期可以大致估算为 $c/L_c$ ,这样可以得到式(11)中 $N_1$ 和 $N_2$ 的初值。这样在带宽的两端各精细地扫描一个频率周期足以精确地确定式(10)中的 $F_1$ 和 $F_2$ 。

[0069] 本发明所提出的空气耦合超声高精度测距干涉技术中,测量的相对精度等于电子设备对频率测量的误差与空气耦合超声具体应用频带的比值。实际工程应用中,对频率的测量精度非常高,加上空气耦合超声换能器在空气中的应用相对频带非常高,所以该技术可以给出极高的距离测量精度。其短距离测距精度可以达到亚微米量级,长距离测距精度可以优于1%的波长。其中,短距离可以应用于自由曲面轮廓的高精度扫描,长距离可以应用于汽车自动驾驶时超声波雷达抗干扰测距等。

[0070] 上述实施例仅例示性说明本发明的原理及其功效,而非用于限制本发明的。任何熟悉此技术的人士皆可在不违背本发明的精神及范畴下,对上述实施例进行修饰或改变。因此,举凡所属技术领域中具有通常知识者在未脱离本发明的所揭示的精神与技术思想下所完成的一切等效修饰或改变,仍应由本发明的权利要求所涵盖。

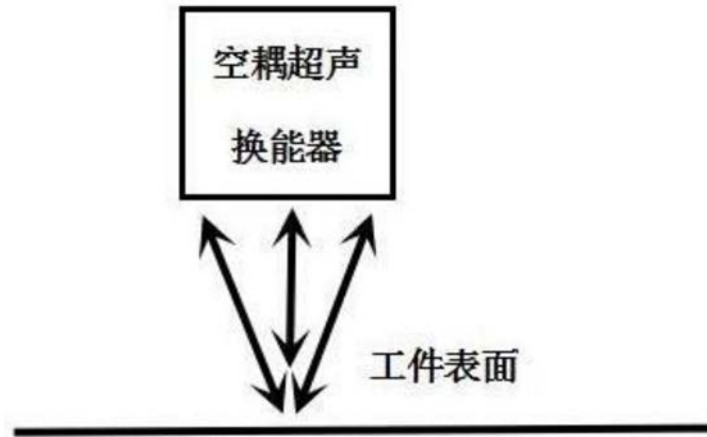


图1

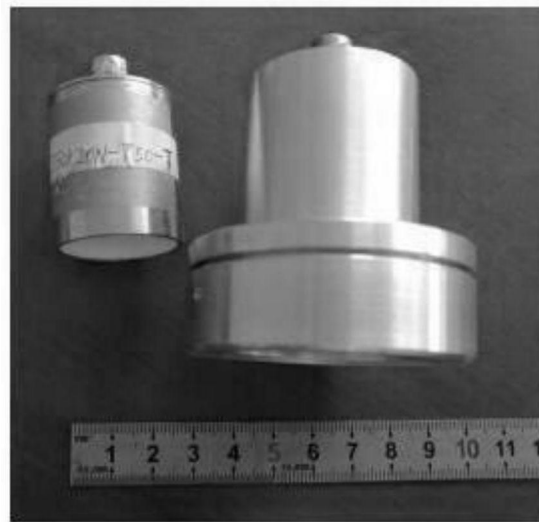


图2

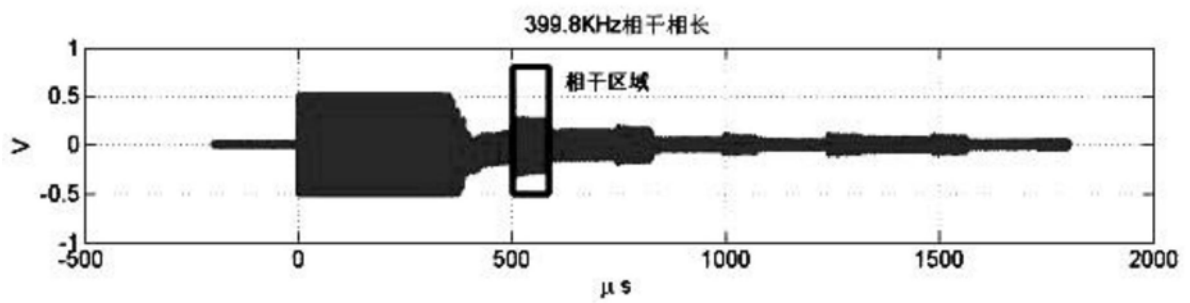


图3

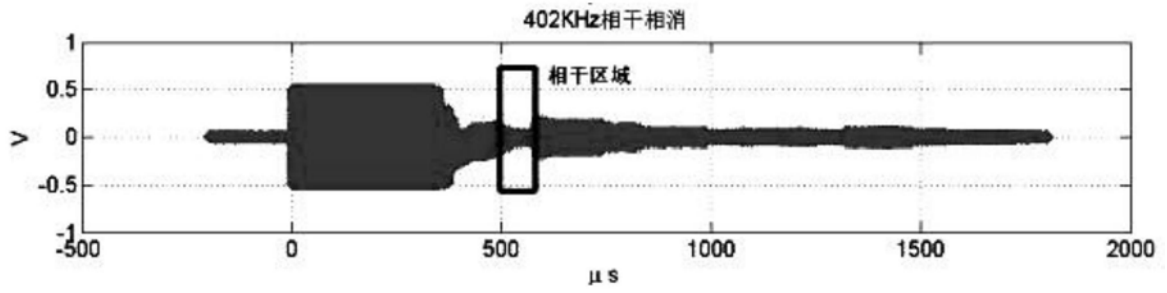


图4

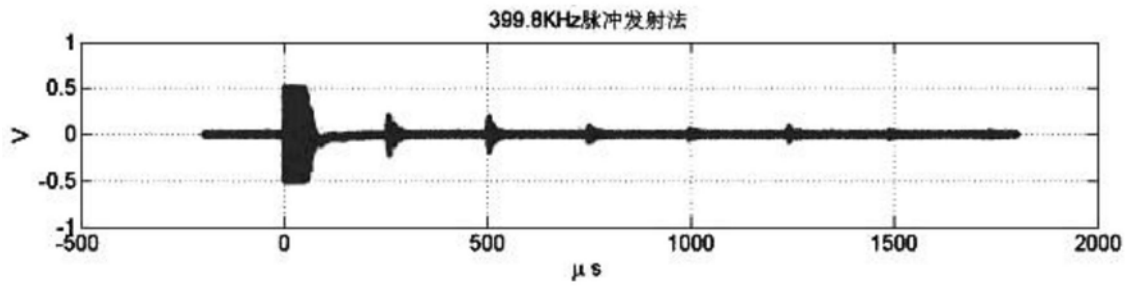


图5

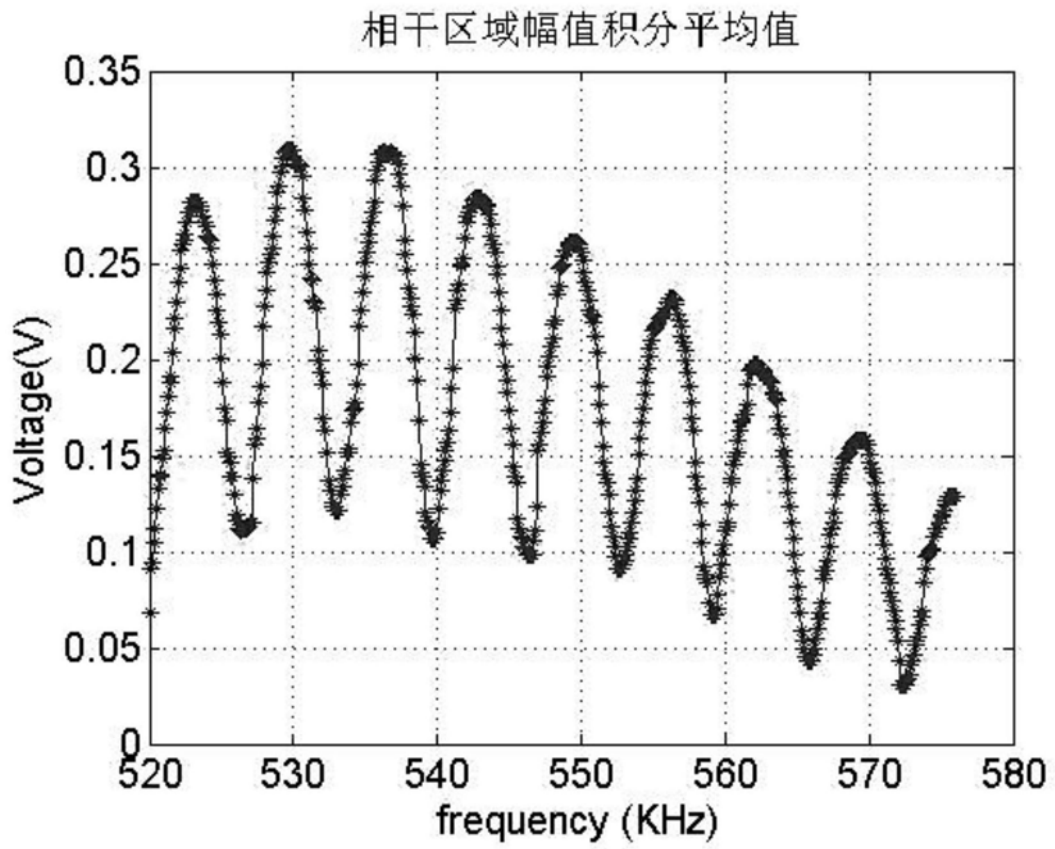


图6