



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 110243521 A

(43)申请公布日 2019.09.17

(21)申请号 201910590675.9

(22)申请日 2019.07.02

(71)申请人 广东工业大学

地址 510060 广东省广州市越秀区东风东
路729号大院

(72)发明人 袁懋诞 禰伟明 纪轩荣 陈燕

(74)专利代理机构 北京集佳知识产权代理有限
公司 11227

代理人 张欣然

(51) Int. Cl.

G01L 5/00(2006.01)

G01N 3/08(2006.01)

权利要求书2页 说明书6页 附图2页

(54)发明名称

一种薄板应力测量方法及薄板应力测量系
统

(57)摘要

本发明公开一种薄板应力测量方法,获取在役薄板的薄板复制件,薄板复制件与在役薄板具有相同的外形和材料;对薄板复制件作加载实验,根据兰姆波 S_i 模态零群速共振频率和施加应力的关系,获得兰姆波 S_i 复制件模态零群速-应力参数;获得薄板复制件之后,在不破坏在役薄板的条件下,向在役薄板某一检测区域激励兰姆波,并在激励点附近的接收点获取兰姆波采集信号;对兰姆波采集信号进行处理,获得兰姆波模态零群速在役共振频率 S_{if} ,根据兰姆波模态零群速在役共振频率 S_{if} 计算在役薄板检测区域所受的平均应力。根据加载实验的相关数据和在役薄板的兰姆波采集信号计算在役薄板特定检测区域的平均应力,保持在役薄板原状,不影响薄板的正常状态。



CN 110243521 A

1. 一种薄板应力测量方法,其特征在于,包括:

S1、获取在役薄板的薄板复制件,所述薄板复制件与所述在役薄板具有相同的外形和材料;

S2、对所述薄板复制件作加载实验,根据兰姆波 S_i 模态零群速共振频率和施加应力的关系,获得兰姆波 S_i 复制件模态零群速-应力参数;

S3、向在役薄板某一区域激励兰姆波,并在激励点附近的接收点获取兰姆波采集信号;

S4、对所述兰姆波采集信号进行处理,获得兰姆波模态零群速在役共振频率 S_{if} ,根据所述兰姆波模态零群速在役共振频率 S_{if} 计算在役薄板检测区域所受的平均应力。

2. 根据权利要求1所述的薄板应力测量方法,其特征在于,还包括:

S5、对在役薄板的不同检测区域重复计算平均应力,描绘在役薄板的应力场分布图。

3. 根据权利要求2所述的薄板应力测量方法,其特征在于,步骤S2、对所述薄板复制件作加载实验,获得兰姆波 S_i 复制件模态零群速-应力参数,包括:

S21、在激励点向所述薄板复制件激励兰姆波信号,在激励点两倍波长范围内的接收点采集兰姆波时域信号;

S22、对所述兰姆波时域信号添加汉宁窗函数,并进行快速傅立叶变换,得到兰姆波频域信号波形图;从所述兰姆波频域信号波形图中提取兰姆波 S_i 模态零群速在无外加应力时所述薄板复制件对应的兰姆波 S_i 模态零群速共振频率;

S23、对所述薄板复制件分多次施加大小不同的单轴应力,所述单轴应力在弹性应力范围内;所述单轴应力达到稳态后,得到各个所述单轴应力下兰姆波 S_i 模态零群速共振频率;

S24、以兰姆波 S_i 模态零群速共振频率为横坐标,单轴应力为纵坐标,建立笛卡尔坐标系;将所述单轴应力与对应的兰姆波 S_i 模态零群速共振频率对应的坐标点代入坐标系中,并对坐标点进行线性拟合,得到的直线斜率 K 为所述兰姆波 S_i 复制件模态零群速-应力参数,直线与横坐标轴的交点为常数 C 。

4. 根据权利要求3所述的薄板应力测量方法,其特征在于,对所述薄板复制件作加载实验时,激励点与接收点的连线与所述单轴应力的方向平行。

5. 根据权利要求4所述的薄板应力测量方法,其特征在于,步骤S4、对所述兰姆波采集信号进行处理,根据兰姆波 S_i 模态零群速共振频率计算在役薄板检测区域所受的平均应力,包括:

S41、对所述兰姆波采集信号添加汉宁窗函数,并进行快速傅立叶变换,得到兰姆波 S_i 模态零群速在在役薄板检测区域中的兰姆波模态零群速在役共振频率 S_{if} ;

S42、根据所述直线斜率 K 、所述常数 C 、所述兰姆波模态零群速在役共振频率 S_{if} ,利用以下公式计算在役薄板检测区域的平均应力:

$$\sigma = K S_{if} - C$$

其中, σ 为平均应力。

6. 一种薄板应力测量系统,其特征在于,包括用于发射脉冲电信号的函数发生器(1),所述函数发生器(1)发射的脉冲电信号经过超声前置放大器(2)处理后传播给纵波发射探头(3),所述纵波发射探头(3)通过角度调节楔块(4)以一定的角度向薄板发射纵波;

纵波接收探头(5)接收薄板的兰姆波,经过超声后置放大器(6)处理后发送至示波器(7)显示,并由处理模块(8)计算处理;

所述处理模块(8)能够根据兰姆波 S_i 模态零群速共振频率和施加应力的关系,获得兰姆波 S_i 复制件模态零群速-应力参数;并对所述兰姆波采集信号进行处理,获得兰姆波模态零群速在役共振频率 S_{if} ,根据所述兰姆波模态零群速在役共振频率 S_{if} 计算在役薄板检测区域所受的平均应力;对在役薄板的不同检测区域重复计算平均应力,描绘在役薄板的应力场分布图;

还包括用于对薄板复制件施加单轴应力的拉伸机(9)。

7.根据权利要求6所述的薄板应力测量系统,其特征在于,所述纵波发射探头(3)和所述纵波接收探头(5)之间的距离小于或等于两倍波长。

一种薄板应力测量方法及薄板应力测量系统

技术领域

[0001] 本发明涉及应力测量技术领域,更进一步涉及一种薄板应力测量方法。此外,本发明还涉及一种薄板应力测量系统。

背景技术

[0002] 薄板构件广泛应用于航天工业、汽车工业、船舶工业、压力锅炉、大型化工容器等领域,在长时间服役过程中,薄板构件经历不同类型、不同大小的载荷作用,在薄板构件中不可避免地产生应力集中和应力重分布现象,若不能及时检测出并采用相应的解决措施,可能造成结构功能发生异常甚至失效,造成人员伤亡和财产损失。

[0003] 传统的应力测量方法通常采用盲孔法、环芯法,此类测量方法属于破坏性测量方法,检测过程需要去除检测对象的一小部分,而X射线和中子衍射法等无损检测法的检测设备过于昂贵复杂,这些方法不适用于在役金属薄板的绝对应力场测量,

[0004] 对于本领域的技术人员来说,如何设计一种无损检测方法,在不破坏薄板构件的情况下,测量在役薄板的应力,是日前需要解决的技术问题。

发明内容

[0005] 本发明提供一种薄板应力测量方法,通过对薄板复制件进行加载实验,利用兰姆波在不破坏在役薄板的条件下测量在役薄板的应力,具体方案如下:

[0006] 一种薄板应力测量方法,包括:

[0007] S1、获取在役薄板的薄板复制件,所述薄板复制件与所述在役薄板具有相同的外形和材料;

[0008] S2、对所述薄板复制件作加载实验,根据兰姆波 S_i 模态零群速共振频率和施加应力的关系,获得兰姆波 S_i 复制件模态零群速-应力参数;

[0009] S3、向在役薄板某一区域激励兰姆波,并在激励点附近的接收点获取兰姆波采集信号;

[0010] S4、对所述兰姆波采集信号进行处理,获得兰姆波模态零群速在役共振频率 S_{if} ,根据所述兰姆波模态零群速在役共振频率 S_{if} 计算在役薄板检测区域所受的平均应力。

[0011] 可选地,还包括:

[0012] S5、对在役薄板的不同检测区域重复计算平均应力,描绘在役薄板的应力场分布图。

[0013] 可选地,步骤S2、对所述薄板复制件作加载实验,获得兰姆波 S_i 复制件模态零群速-应力参数,包括:

[0014] S21、在激励点向所述薄板复制件激励兰姆波信号,在激励点两倍波长范围内的接收点采集兰姆波时域信号;

[0015] S22、对所述兰姆波时域信号添加汉宁窗函数,并进行快速傅立叶变换,得到兰姆波频域信号波形图;从所述兰姆波频域信号波形图中提取兰姆波 S_i 模态零群速在无外加应

力时所述薄板复制件对应的兰姆波 S_i 模态零群速共振频率；

[0016] S23、对所述薄板复制件分多次施加大小不同的单轴应力，所述单轴应力在弹性应力范围内；所述单轴应力达到稳态后，得到各个所述单轴应力下兰姆波 S_i 模态零群速共振频率；

[0017] S24、以兰姆波 S_i 模态零群速共振频率为横坐标，单轴应力为纵坐标，建立笛卡尔坐标系；将所述单轴应力与对应的兰姆波 S_i 模态零群速共振频率对应的坐标点代入坐标系中，并对坐标点进行线性拟合，得到的直线斜率 K 为所述兰姆波 S_i 复制件模态零群速-应力参数，直线与横坐标轴的交点为常数 C 。

[0018] 可选地，对所述薄板复制件作加载实验时，激励点与接收点的连线与所述单轴应力的方向平行。

[0019] 可选地，步骤S4、对所述兰姆波采集信号进行处理，根据兰姆波 S_i 模态零群速共振频率计算在役薄板检测区域所受的平均应力，包括：

[0020] S41、对所述兰姆波采集信号添加汉宁窗函数，并进行快速傅立叶变换，得到兰姆波 S_i 模态零群速在役薄板检测区域中的兰姆波模态零群速在役共振频率 S_{if} ；

[0021] S42、根据所述直线斜率 K 、所述常数 C 、所述兰姆波模态零群速在役共振频率 S_{if} ，利用以下公式计算在役薄板检测区域的平均应力：

$$[0022] \quad \sigma = K S_{if} - C$$

[0023] 其中， σ 为平均应力。

[0024] 本发明还提供一种薄板应力测量系统，包括用于发射脉冲电信号的函数发生器，所述函数发生器发射的脉冲电信号经过超声前置放大器处理后传播给纵波发射探头，所述纵波发射探头通过角度调节楔块以一定的角度向薄板发射纵波；

[0025] 纵波接收探头接收薄板的兰姆波，经过超声后置放大器处理后发送至示波器显示，并由处理模块计算处理；

[0026] 所述处理模块能够根据兰姆波 S_i 模态零群速共振频率和施加应力的关系，获得兰姆波 S_i 复制件模态零群速-应力参数；并对所述兰姆波采集信号进行处理，获得兰姆波模态零群速在役共振频率 S_{if} ，根据所述兰姆波模态零群速在役共振频率 S_{if} 计算在役薄板检测区域所受的平均应力；对在役薄板的不同检测区域重复计算平均应力，描绘在役薄板的应力场分布图；

[0027] 还包括用于对薄板复制件施加单轴应力的拉伸机。

[0028] 可选地，所述纵波发射探头和所述纵波接收探头之间的距离小于或等于两倍波长。

[0029] 本发明的核心在于提供一种薄板应力测量方法，获取在役薄板的薄板复制件，薄板复制件与在役薄板具有相同的外形和材料；对薄板复制件作加载实验，根据兰姆波 S_i 模态零群速共振频率和施加应力的关系，获得兰姆波 S_i 复制件模态零群速-应力参数；获得薄板复制件之后，在不破坏在役薄板的条件下，向在役薄板某一检测区域激励兰姆波，并在激励点附近的接收点获取兰姆波采集信号；对兰姆波采集信号进行处理，获得兰姆波模态零群速在役共振频率 S_{if} ，根据兰姆波模态零群速在役共振频率 S_{if} 计算在役薄板检测区域所受的平均应力。本发明仅对薄板复制件进行加载实验，根据加载实验的相关数据和在役薄板的兰姆波采集信号计算在役薄板特定检测区域的平均应力，不影响薄板的正常状态。

附图说明

[0030] 为了更清楚地说明本发明实施例或现有技术中的技术方案,下面将对实施例或现有技术描述中所需要使用的附图作简单地介绍,显而易见地,下面描述中的附图仅仅是本发明的一些实施例,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动的前提下,还可以根据这些附图获得其他的附图。

[0031] 图1为本发明薄板应力测量方法的流程图;

[0032] 图2为频率与振幅之间的频域波形图;

[0033] 图3为本发明薄板应力测量系统的结构示意图。

[0034] 图中包括:

[0035] 函数发生器1、超声前置放大器2、纵波发射探头3、角度调节楔块4、纵波接收探头5、超声后置放大器6、示波器7、处理模块8、拉伸机9。

具体实施方式

[0036] 本发明的核心在于提供一种薄板应力测量方法,通过对薄板复制件进行加载实验,利用兰姆波在不破坏在役薄板的条件下测量在役薄板的应力。

[0037] 为了使本领域的技术人员更好地理解本发明的技术方案,下面将结合附图及具体的实施方式,对本发明的薄板应力测量方法及薄板应力测量系统进行详细的介绍说明。

[0038] 本发明提供一种薄板应力测量方法,该方法主要针对厚度相对较小的金属件,通常情况下厚度小于6mm,但并不仅限于金属薄板;本发明的薄板应力测量方法包括以下步骤:

[0039] S1、获取在役薄板的薄板复制件,薄板复制件与在役薄板具有相同的外形和材料;在役薄板为需要被测量应力的构件,其位于正在被使用的工件中,通过薄板复制件模拟在役薄板,薄板复制件和在役薄板两者具有相近的力学性能。

[0040] S2、对薄板复制件作加载实验,根据兰姆波 S_i 模态零群速共振频率和施加应力的关系,获得兰姆波 S_i 复制件模态零群速-应力参数;加载实验需要对薄板复制件施加应力,当薄板中存在应力时,会影响超声波在薄板内的传播速度,即发生声弹性效应;薄板在不同的应力条件下,对相同的兰姆波具有不同的振动表现;相应地,在相同的应力条件下,施加不同频率的激励,可得到不同的兰姆波采集信号。

[0041] 兰姆波 S_i 模态零群速共振频率即为在 S_i 模态出现零群速点所对应的频率, $i=1、2、3、\dots$ 等整数,通过 $S_1、S_2、S_3、\dots$ 区分不同的模态;群速是指一段波的包络上具有某种特性的点的传播速度,零群速是兰姆波群速度为零的状态。

[0042] 对薄板复制件进行加载实验,薄板在不同的应力的条件下受到兰姆波,通过加载实验可获取不同的应力条件下的薄板复制件所对应的兰姆波 S_i 模态零群速共振频率和施加应力的关系。

[0043] 获得薄板复制件的相关参数后,进行步骤S3、向在役薄板某一检测区域激励兰姆波,并在激励点附近的接收点获取兰姆波采集信号;此步骤中在役薄板保持原状,激励兰姆波以及接收兰姆波的过程均在在役薄板的表面进行。

[0044] 获取兰姆波采集信号后进行步骤S4、对兰姆波采集信号进行处理,获得兰姆波模态零群速在役共振频率 S_{if} ,根据兰姆波模态零群速在役共振频率 S_{if} 计算在役薄板检测区

域所受的平均应力。

[0045] 兰姆波模态零群速在役共振频率 S_{if} 表示在役模板在其受力条件下,受到兰姆波激励时的共振频率。利用上述对薄板复制件的加载实验相关参数,以及在役薄板的共振频率,该方法利用声弹性效应,在不破坏在役薄板的条件下,可对应计算出检测区域的平均应力。

[0046] 在上述方案的基础上,本发明还包括以下步骤:

[0047] S5、对在役薄板的不同检测区域重复计算平均应力,描绘在役薄板的应力场分布图;步骤S5相当于重复多次步骤S4的过程,得到不同检测区域内在役薄板的共振频率,由各个检测区域的共振频率绘制应力场分布图。检测区域即为兰姆波激励点与兰姆波接收点之间的间隔区域。

[0048] 优选地,本发明提供一种对薄板复制件进行步骤S2操作的具体实施方案,如图1所示,为本发明薄板应力测量方法的流程图,步骤S2、对薄板复制件作加载实验,获得兰姆波 S_i 复制件模态零群速-应力参数,具体包括以下步骤:

[0049] S21、在激励点向薄板复制件激励兰姆波信号,在激励点两倍波长范围内的接收点采集兰姆波时域信号;时域信号为波随时间变化的情况。

[0050] S22、对兰姆波时域信号添加汉宁窗函数,并进行快速傅立叶变换,得到兰姆波频域信号波形图;从兰姆波频域信号波形图中提取兰姆波 S_i 模态零群速在无外加应力时薄板复制件对应的兰姆波 S_i 模态零群速共振频率;进行该步骤时,薄板复制件不受外力作用,其内部没有因外力产生的应力。

[0051] S23、对薄板复制件分多次施加大小不同的单轴应力,单轴应力在弹性应力范围内;单轴应力达到稳态后,得到各个单轴应力下兰姆波 S_i 模态零群速共振频率;单轴应力即为沿一条直线方向施加的作用力,进行该步骤时,分多次对薄板复制件施加单轴应力,每次施加特定大小的单轴应力时,保持一段时间,待单轴应力达到稳态后,重复上述步骤S22的过程,得到各个不同大小的单轴应力下兰姆波 S_i 模态零群速共振频率。

[0052] S24、以兰姆波 S_i 模态零群速共振频率为横坐标,单轴应力为纵坐标,建立笛卡尔坐标系;将单轴应力与对应的兰姆波 S_i 模态零群速共振频率对应的坐标点代入坐标系中,并对坐标点进行线性拟合,得到的直线斜率 K 为兰姆波 S_i 复制件模态零群速-应力参数,直线与横坐标轴的交点为常数 C 。

[0053] 在相同的应力条件下,施加不同频率的激励,可得到不同的兰姆波采集信号;而每一个单轴应力对应一个共振频率,也即零群速点,振幅达到最大。如图2所示,为频率与振幅之间的频域波形图,横坐标为频率,纵坐标为振幅;图中实线A表示兰姆波 S_i 模态在无应力金属薄板板中的频域波形图;虚线B表示兰姆波 S_i 模态在受200MPa单轴应力金属薄板中的频域波形图;虚线C表示兰姆波 S_i 模态在受400MPa单轴应力金属薄板中的频域波形图。图中小于截止频率范围内的波峰对应的频率即兰姆波 S_i 模态零群速共振频率。从图中可以看到随着对金属薄板施加拉力的增大,兰姆波 S_i 模态零群速点在向左移动,零群速点对应的共振频率也在减小。

[0054] 优选地,本发明中对薄板复制件作加载实验时,激励点与接收点的连线与单轴应力的方向平行。

[0055] 更进一步,本发明在此提供一种步骤S4的具体实施方案,步骤S4、对兰姆波采集信号进行处理,根据兰姆波 S_i 模态零群速共振频率计算在役薄板检测区域所受的平均应力,

具体包括以步骤：

[0056] S41、对兰姆波采集信号添加汉宁窗函数，并进行快速傅立叶变换，得到兰姆波 S_i 模态零群速在在役薄板检测区域中的兰姆波模态零群速在役共振频率 S_{if} 。此步骤与步骤S22中所进行的过程相似， S_{if} 为兰姆波 S_i 模态零群速在在役金属薄板检测区域中的共振频率。

[0057] S42、根据直线斜率 K 、常数 C 、兰姆波模态零群速在役共振频率 S_{if} ，利用以下公式计算在役薄板检测区域的平均应力：

$$[0058] \quad \sigma = K S_{if} - C$$

[0059] 其中， σ 为平均应力。

[0060] 具体分析过程如下：

[0061] 当被检测的金属薄板中存在应力时，会影响超声在金属薄板中的传播速度，即发生声弹性效应。金属薄板中的单轴应力与在金属薄板中平行于应力方向传播的纵波波速的关系方程为：

$$[0062] \quad \delta = \frac{E}{L} \cdot \frac{V - V_0}{V_0} \quad (1)$$

[0063] 其中， E 为材料的弹性模量，单位为Pa； L 为声弹性系数， V 为纵波在被测样品中的传播速度，单位是m/s； V_0 为纵波在无应力薄板复制件中的传播速度，单位是m/s。

[0064] 金属薄板中，兰姆波 S_1 模态零群速点出现的共振频率位置与材料中纵波速度大小的关系方程式如下：

$$[0065] \quad S_{1f} = \beta \frac{V}{2d} \quad (2)$$

[0066] 其中， S_{1f} 为兰姆波 S_1 模态产生零群速点对应的共振频率，单位是Hz； β 是一个与材料的泊松比有关的系数； V 表示材料中纵波速度，单位是m/s； d 表示板材厚度，单位是m。

[0067] 联立(1)、(2)可以得出兰姆波 S_1 模态产生零群速时对应的共振频率与金属薄板所受应力关系式如下：

$$[0068] \quad \delta = \frac{2Ed}{LV_0\beta} \cdot S_{1f} - \frac{E}{L} \quad (3)$$

[0069] 为了表达方便，令

$$[0070] \quad K = \frac{2Ed}{LV_0\beta} \quad (4)$$

$$[0071] \quad C = \frac{E}{L} \quad (5)$$

[0072] 最终得到基于兰姆波零群速模态的金属薄板应力场测量的理论公式如下：

$$[0073] \quad \sigma = K S_{1f} - C$$

[0074] 因此，当金属薄板受到应力作用时，兰姆波 S_1 模态在目标金属薄板中对应的零群速共振频率会发生相应的变化，零群速共振频率与金属薄板所受应力呈线性关系。

[0075] 本发明还提供一种薄板应力测量系统，如图3所示，为本发明薄板应力测量系统的结构示意图；其中包括函数发生器1、超声前置放大器2、纵波发射探头3、角度调节楔块4、纵波接收探头5、超声后置放大器6、示波器7、处理模块8、拉伸机9等结构；函数发生器1用于发

射脉冲电信号,函数发生器1发射的脉冲电信号经过超声前置放大器2处理后,传播给纵波发射探头3,纵波发射探头3通过角度调节楔块4以一定的角度向薄板发射纵波,在进行同一个实验时,角度调节楔块4的角度保持固定不变。

[0076] 纵波接收探头5接收薄板的兰姆波,经过超声后置放大器6处理后发送至示波器7显示,并由处理模块8计算处理;处理模块8能够根据兰姆波 S_i 模态零群速共振频率和施加应力的关系,获得兰姆波 S_i 复制件模态零群速-应力参数;并对兰姆波采集信号进行处理,获得兰姆波模态零群速在役共振频率 S_{if} ,根据兰姆波模态零群速在役共振频率 S_{if} 计算在役薄板检测区域所受的平均应力;对在役薄板的不同检测区域重复计算平均应力,描绘在役薄板的应力场分布图。上述薄板应力测量方法所涉及的计算分析步骤均由处理模块8完成。

[0077] 还包括用于对薄板复制件施加单轴应力的拉伸机9,图中所示表示两左右两侧施加横向的拉力。

[0078] 具体地,本发明中纵波发射探头3和纵波接收探头5之间的距离小于或等于两倍波长。

[0079] 对所公开的实施例的上述说明,使本领域专业技术人员能够实现或使用本发明。对这些实施例的多种修改对本领域的专业技术人员来说将是显而易见的,本文中所定义的一般原理,可以在不脱离本发明的精神或范围的情况下,在其它实施例中实现。因此,本发明将不会被限制于本文所示的这些实施例,而是要符合与本文所公开的原理和新颖特点相一致的最宽的范围。

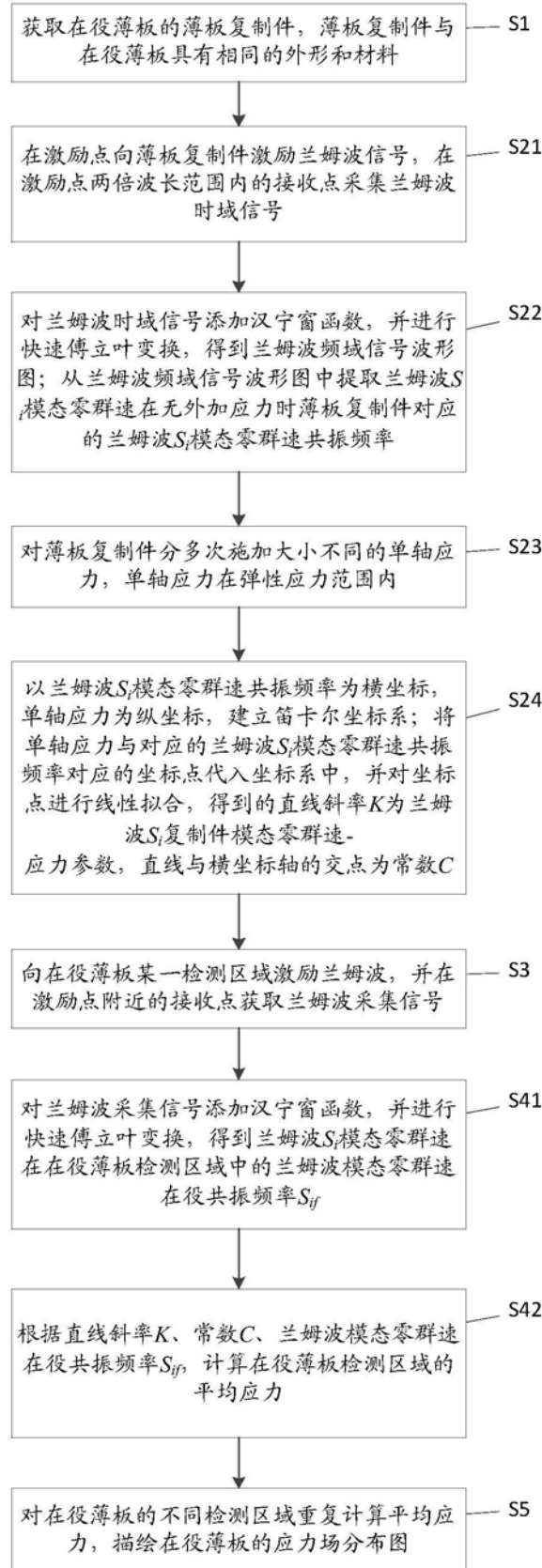


图1

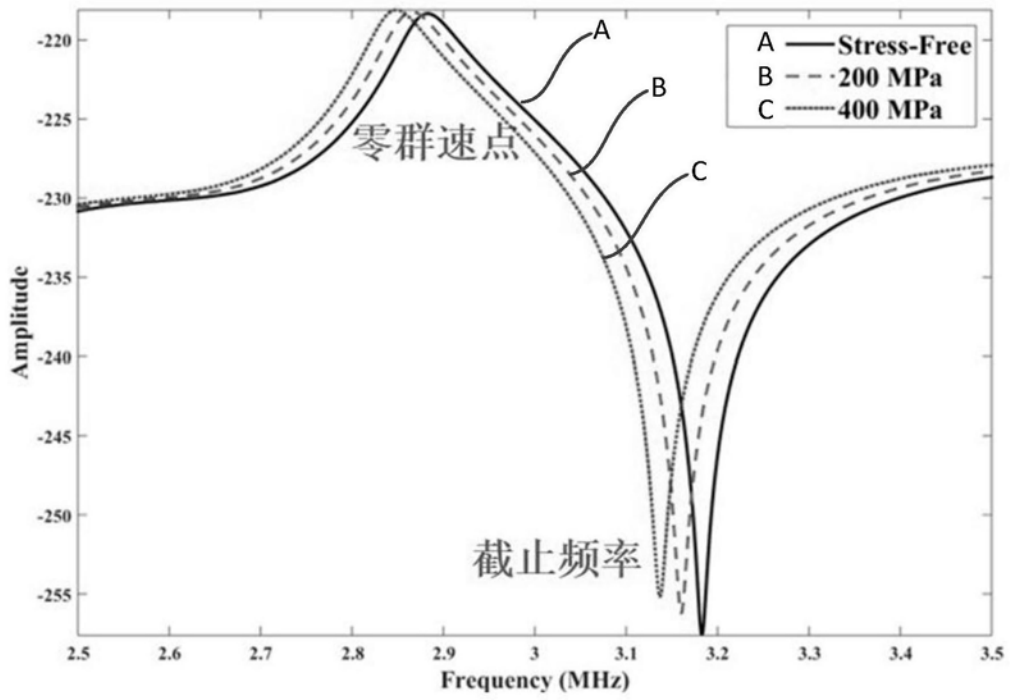


图2

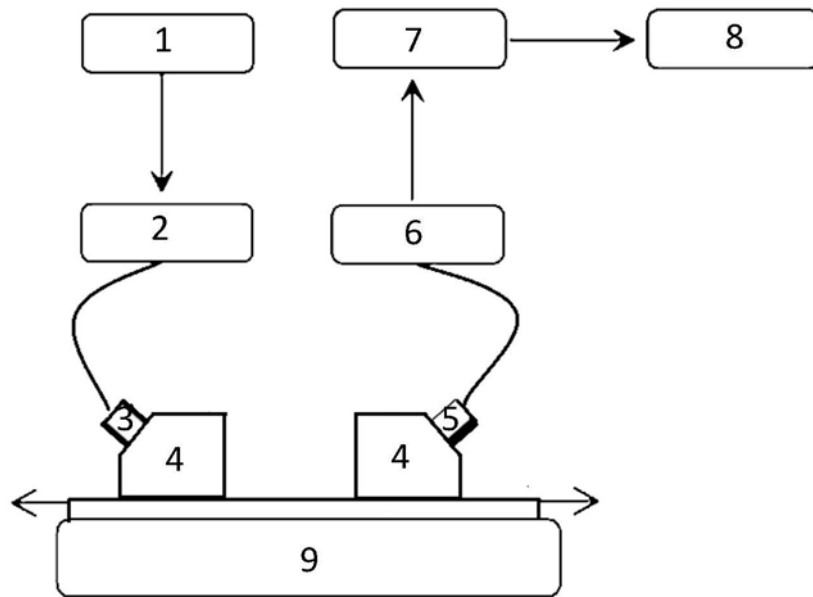


图3