

(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 101806590 B

(45) 授权公告日 2011. 12. 14

(21) 申请号 201010132130. 2

CN 2447721 Y, 2001. 09. 12, 全文.

(22) 申请日 2010. 03. 25

CN 1070731 A, 1993. 04. 07, 全文.

(73) 专利权人 南京卓实电气有限责任公司
地址 210001 江苏省南京市白下区白下路
362 号文思苑 1 单元 1801

审查员 金波

(72) 发明人 张辉 张淑仪 刘桂梅 列剑平

(74) 专利代理机构 南京苏高专利商标事务所
(普通合伙) 32204

代理人 杨晓玲

(51) Int. Cl.

G01B 17/02(2006. 01)

(56) 对比文件

JP 昭 60-105907 A, 1985. 06. 01, 全文.

CN 1908581 A, 2007. 02. 07, 全文.

GB 2326235 A, 1998. 12. 16, 全文.

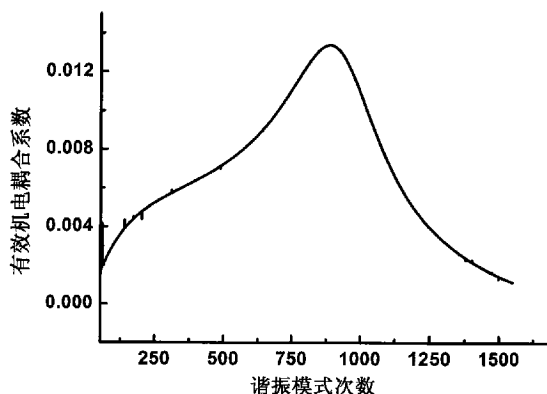
权利要求书 2 页 说明书 6 页 附图 2 页

(54) 发明名称

一种利用高次驻波谐振定量检测弹性板厚度的方法

(57) 摘要

本发明通过片状纵波压电换能器在弹性板中激发纵波,纵波在弹性板中传播,到弹性板的另一表面处反射,在弹性板中形成驻波谐振;然后利用阻抗分析仪或网络分析仪得到弹性板的高次驻波谐振模式;再计算每个高次谐振模式的有效机电耦合系数,得到最大有效机电耦合系数对应的谐振模式的并联谐振频率,根据片状纵波压电换能器和被检测弹性板的厚度方向纵波声阻抗的关系,得到弹性板的厚度。本发明的检测具有更高的灵敏度,而且设备简单,易于实现;灵敏度高、易于观察;本发明中弹性板驻波谐振对表面状况敏感,能标定弹性板表面的腐蚀状。



1. 一种利用高次驻波谐振定量检测弹性板厚度的方法,其特征在于:该方法包括如下步骤:

(1) 将被检测弹性板的一个表面与片状纵波压电换能器耦合;

(2) 由阻抗分析仪或网络分析仪测量片状纵波压电换能器的输入电阻抗,得到输入电阻抗曲线图;

(3) 测量高次谐振模式的有效机电耦合系数:改变阻抗分析仪或网络分析仪的频率范围,使频率分辨率达到相应的要求;采取频率范围分段测量的方式,从低频到高频连续测量片状纵波压电换能器的输入阻抗曲线,直至输入阻抗曲线平滑为止,对测量的数据进行分析,确定每一个谐振模式对应的并联谐振频率和串联谐振频率,根据公式(1)计算出高次谐振模式的有效机电耦合系数;

$$k_{eff}^2(m) = \frac{\pi^2}{4} \cdot \frac{f_s(m)}{f_p(m)} \cdot \left[1 - \frac{f_s(m)}{f_p(m)} \right] \quad \text{公式 (1)}$$

其中, $f_s(m)$ 和 $f_p(m)$ 分别是第 m 阶模式串联谐振频率和并联谐振频率; m 为自然数 1, 2, 3...;

阻抗分析仪或网络分析仪的频率分辨率 f_{min} 需满足公式(2):

$$f_{min} < \Delta f_p / 2 \quad \text{公式 (2)}$$

$$\text{其中, } \Delta f_p = f_p(1_a+d) - f_p(1_a) \quad \text{公式 (3)}$$

其中, d 为被测弹性板厚度的检测精度, 1_a 为被检测弹性板厚度的估算厚度, $f_p(1_a+d)$ 和 $f_p(1_a)$ 分别是板厚为 1_a+d 和 1_a 的最大有效机电耦合系数对应谐振模式的并联谐振频率;

(4) 将步骤(3)中得到的高次谐振模式的有效机电耦合系数进行比较,确定最大有效机电耦合系数对应的谐振模式;

对于被检测弹性板的声阻抗小于片状纵波压电换能器的声阻抗情形,即 $Z_{sb}/Z < 1$ 时,最大有效机电耦合系数对应谐振模式的并联谐振频率:

$$f_p = \frac{(m_N z_{sb} + 1)}{2 \left(\frac{z_{e1} l_{e1}}{V_{e1}} + \frac{z_{sb} l_{sb}}{V_{sb}} + \frac{z_{e2} l_{e2}}{V_{e2}} + \frac{l}{V} \right)} \quad \text{公式 (4)}$$

$$\text{其中, } m_N = \frac{V(l_{sb} + 0.5 \rho_{e2} l_{e2} / \rho)}{V_{sb}(l + 0.5 \rho_{e2} l_{e2} / \rho + \rho_{e1} l_{e1} / \rho)},$$

忽略电极厚度,则公式(4)简化为:

$$f_p = \frac{(m_N z_{sb} + 1)}{2 \left(\frac{z_{sb} l_{sb}}{V_{sb}} + \frac{l}{V} \right)} \quad \text{公式 (5)}$$

$$\text{其中, } m_N = V l_{sb} / V_{sb} l$$

对于被检测弹性板的声阻抗大于或等于片状纵波压电换能器的声阻抗情形,即 $z_{sb}/z \geq 1$,最大有效机电耦合系数对应谐振模式的并联谐振频率为:

$$f_p = \frac{1}{2z_{sb}} \cdot \frac{m_T + 0.5 + z_{sb}/2}{\frac{l}{V} + \frac{l_{sb}}{z_{sb}V_{sb}} + z_{e1} \frac{l_{e1}}{V_{e1}} + \frac{l_{e2}}{z_{e2}V_{e2}}} \quad \text{公式 (6)}$$

$$\text{式中, } m_T = \left[\frac{V(l_{sb} + 0.5\rho_{e2}l_{e2}/\rho)}{V_{sb}(l + 0.5\rho_{e2}l_{e2}/\rho + \rho_{e1}l_{e1}/\rho)} - 1 \right] / 2;$$

忽略电极的厚度,公式 (6) 可以简化为

$$f_p = \frac{1}{2z_{sb}} \cdot \frac{m_T + 0.5 + z_{sb}/2}{\frac{l}{V} + \frac{l_{sb}}{z_{sb}V_{sb}}} \quad \text{公式 (7)}$$

$$\text{式中, } m_T = \left[\frac{Vl_{sb}}{V_{sb}l} - 1 \right] / 2。$$

上述公式 (4)、(5)、(6) 和 (7) 中, z 、 z_{sb} 、 z_{e1} 、 z_{e2} 分别是片状纵波压电换能器、弹性板、上电极和下电极的声阻抗, l 、 l_{sb} 、 l_{e1} 、 l_{e2} 分别是片状纵波压电换能器、弹性板、上电极和下电极的厚度, V 、 V_{sb} 、 V_{e1} 、 V_{e2} 分别是片状纵波压电换能器、弹性板、上电极和下电极沿垂直于表面方向的纵波声速度, ρ 、 ρ_{sb} 、 ρ_{e1} 、 ρ_{e2} 分别是片状纵波压电换能器、弹性板、上电极和下电极的密度;

(5) 根据片状纵波压电换能器和被检测弹性板的厚度方向纵波声阻抗的比较大小关系,利用公式 (4)、(5)、(6) 或 (7) 得到被测量样品的厚度。

2. 根据权利要求 1 所述的利用高次驻波谐振定量检测弹性板厚度的方法,其特征在于:步骤 (1) 中所述的弹性板为金属、非金属或复合材料。

3. 根据权利要求 1 所述的利用高次驻波谐振定量检测弹性板厚度的方法,其特征在于:步骤 (1) 中所述的片状纵波压电换能器可用压电陶瓷、石英或铌酸锂材料制成。

4. 根据权利要求 1 所述的利用高次驻波谐振定量检测弹性板厚度的方法,其特征在于:步骤 (3) 中所述的采取频率范围分段测量的方式,应使所分段测量的频率能连接一个完整的阻抗频率曲线。

一种利用高次驻波谐振定量检测弹性板厚度的方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种弹性板厚度的检测方法,具体说是一种利用高次驻波谐振定量测量弹性板厚度和检测弹性板表面腐蚀的方法。

背景技术

[0002] 在航空、石化工业、军事等领域经常会使用板状弹性材料(金属、非金属和复合材料等),这些材料的质量与本身弹性、强度有关之外,更重要的是材料表面的腐蚀所带来的潜在威胁往往是造成事故的主要因素。当利用板状弹性材料制成的罐体使用一段时间后,容器内腐蚀性物质将对罐体内表面进行腐蚀,在内表面会出现裂纹、空隙、坑洼等,这些缺陷的存在会对罐体产生破坏作用。因此,有必要对罐体厚度的变化进行定量检测,确定材料的表面腐蚀状况,为设备检修和维护提供准确的依据。

[0003] 通常采用的超声检测板厚度或表面腐蚀方法,是利用超声回波判断弹性板的厚度变化,进而得到弹性板表面的腐蚀状况,这种方法的检测精度低,同时对腐蚀性缺陷容易误判。物理检测法,主要包括 x 射线衍射法、中子衍射法、涡流检测法及磁检测法等,这些方法均属无损检测法,对工件不会造成破坏。但是, x 射线衍射法对人体有伤害,并且检测深度较浅(钢材料中 25-40 微米);中子衍射法检测残余应力的精度和 x 射线相近,其检测深度要比 x 射线要深(钢材料中 2-3 厘米),但是其设备需要核反应堆,所以很难实现灵活的现场检测;涡流检测法,目前还处于实验阶段,其检测精度还有待于提高,并且无法检测非导电材料的表面腐蚀状况。

发明内容

[0004] 发明目的:本发明的目的是提供一种利用声波高次驻波谐振定量检测弹性板厚度和检测弹性板表面腐蚀的方法,它对板状弹性材料的厚度及变化作出定量检测,为无损检测板表面的腐蚀提供可靠的依据。

[0005] 本发明通过片状纵波压电换能器在弹性板中激发纵波,纵波在弹性板中传播,到弹性板的另一表面处反射,在弹性板中形成驻波谐振;然后利用阻抗分析仪或网络分析仪得到弹性板的高次驻波谐振模式;再计算每个高次谐振模式的有效机电耦合系数,得到最大有效机电耦合系数对应的谐振模式的并联谐振频率,根据片状纵波压电换能器和被检测弹性板的厚度方向纵波声阻抗的关系,得到弹性板的厚度。

[0006] 技术方案:一种利用高次驻波谐振定量检测弹性板厚度的方法,该方法包括如下步骤:

[0007] (1) 将被检测弹性板的一个表面与片状纵波压电换能器耦合;

[0008] (2) 由阻抗分析仪或网络分析仪测量片状纵波压电换能器的输入电阻抗,得到输入电阻抗曲线图;

[0009] (3) 测量高次谐振模式的有效机电耦合系数;改变阻抗分析仪或网络分析仪的频率范围,使频率分辨率达到相应的要求;采取频率范围分段测量的方式,从低频到高频连续

测量片状纵波压电换能器的输入阻抗曲线,直至输入阻抗曲线平滑为止,对测量的数据进行分析,确定每一个谐振模式对应的并联谐振频率和串联谐振频率,根据公式(1)计算出高次谐振模式的有效机电耦合系数;

$$[0010] \quad k_{eff}^2(m) = \frac{\pi^2}{4} \cdot \frac{f_s(m)}{f_p(m)} \cdot \left[1 - \frac{f_s(m)}{f_p(m)} \right] \quad \text{公式(1)}$$

[0011] 其中, $f_s(m)$ 和 $f_p(m)$ 分别是第 m 阶模式串联谐振频率和并联谐振频率 m 为自然数 $1, 2, 3, \dots$;

[0012] 阻抗分析仪或网络分析仪的频率分辨率 f_{min} 需满足公式(2):

$$[0013] \quad f_{min} < \Delta f_p / 2 \quad \text{公式(2)}$$

$$[0014] \quad \text{其中, } \Delta f_p = f_p(1_a+d) - f_p(1_a) \quad \text{公式(3)}$$

[0015] 其中, d 为被测弹性板厚度的检测精度, 1_a 为被检测弹性板厚度的估算厚度, $f_p(1_a+d)$ 和 $f_p(1_a)$ 分别是板厚为 1_a+d 和 1_a 的最大有效机电耦合系数对应谐振模式的并联谐振频率;

[0016] (4) 将步骤(3)中得到的高次谐振模式的有效机电耦合系数进行比较,确定最大有效机电耦合系数对应的谐振模式;

[0017] 对于被检测弹性板的声阻抗小于片状纵波压电换能器的声阻抗情形,即 $Z_{sb}/Z < 1$ 时,最大有效机电耦合系数对应谐振模式的并联谐振频率:

$$[0018] \quad f_p = \frac{(m_N z_{sb} + 1)}{2 \left(\frac{z_{e1} l_{e1}}{V_{e1}} + \frac{z_{sb} l_{sb}}{V_{sb}} + \frac{z_{e2} l_{e2}}{V_{e2}} + \frac{l}{V} \right)} \quad \text{公式(4)}$$

$$[0019] \quad \text{其中, } m_N = \frac{V(l_{sb} + 0.5 \rho_{e2} l_{e2} / \rho)}{V_{sb}(l + 0.5 \rho_{e2} l_{e2} / \rho + \rho_{e1} l_{e1} / \rho)},$$

[0020] 忽略电极厚度,则公式(4)简化为:

$$[0021] \quad f_p = \frac{(m_N z_{sb} + 1)}{2 \left(\frac{z_{sb} l_{sb}}{V_{sb}} + \frac{l}{V} \right)} \quad \text{公式(5)}$$

[0022] 其中, $m_N = V l_{sb} / V_{sb} l$

[0023] 对于被检测弹性板的声阻抗大于或等于片状纵波压电换能器的声阻抗情形,即 $Z_{sb}/Z \geq 1$,最大有效机电耦合系数对应谐振模式的并联谐振频率为:

$$[0024] \quad f_p = \frac{1}{2z_{sb}} \cdot \frac{m_T + 0.5 + z_{sb}/2}{\frac{l}{V} + \frac{l_{sb}}{z_{sb} V_{sb}} + z_{e1} \frac{l_{e1}}{V_{e1}} + \frac{l_{e2}}{z_{e2} V_{e2}}} \quad \text{公式(6)}$$

$$[0025] \quad \text{式中, } m_T = \left[\frac{V(l_{sb} + 0.5 \rho_{e2} l_{e2} / \rho)}{V_{sb}(l + 0.5 \rho_{e2} l_{e2} / \rho + \rho_{e1} l_{e1} / \rho)} - 1 \right] / 2;$$

[0026] 忽略电极的厚度,公式(6)可以简化为

$$[0027] \quad f_p = \frac{1}{2z_{sb}} \cdot \frac{m_T + 0.5 + z_{sb}/2}{\frac{l}{V} + \frac{l_{sb}}{z_{sb} V_{sb}}} \quad \text{公式(7)}$$

[0028] 式中, $m_T = \left[\frac{V_{sb}}{V_{sb}l} - 1 \right] / 2$ 。

[0029] 上述公式 (4)、(5)、(6) 和 (7) 中, Z 、 Z_{sb} 、 Z_{e1} 、 Z_{e2} 分别是片状纵波压电换能器、弹性板、上电极和下电极的声阻抗, l 、 l_{sb} 、 l_{e1} 、 l_{e2} 分别是片状纵波压电换能器、弹性板、上电极和下电极的厚度, V 、 V_{sb} 、 V_{e1} 、 V_{e2} 分别是片状纵波压电换能器、弹性板、上电极和下电极沿垂直于表面方向的纵波声速度, ρ 、 ρ_{sb} 、 ρ_{e1} 、 ρ_{e2} 分别是片状纵波压电换能器、弹性板、上电极和下电极的密度;

[0030] (5) 根据片状纵波压电换能器和被检测弹性板的厚度方向纵波声阻抗的比较大小关系, 利用公式 (4)、(5)、(6) 或 (7) 得到被测量样品的厚度。

[0031] 片状纵波压电换能器在弹性板状材料 (金属、非金属、复合材料等) 中激发纵波声振动, 只要弹性板中纵波半波长的整数倍满足与弹性板厚度相等的条件, 弹性板中将产生驻波谐振。所以, 随着激发频率的升高, 在弹性板中产生高次纵波谐振, 当板的厚度发生微小的变化, 高次谐振模式的频谱分布将发生变化, 根据这个变化可以将谐振模式的并联谐振频率的偏移与板厚度变化或者表面腐蚀程度进行关联。对于具有最大有效机电耦合系数的谐振模式, 在阻抗分析仪或网络分析中信号最强, 以此谐振模式为检测对象具有更高的灵敏度、易于观察。

[0032] 有益效果: 本发明与已有的弹性板厚度定量检测或表面腐蚀无损检测相比较, 具有以下优点:

[0033] (1) 本发明利用弹性板驻波谐振进行检测, 谐振模式对板厚度变化和表面特性更敏感, 使检测具有更高的灵敏度, 而且设备简单, 易于实现。

[0034] (2) 本发明利用具有最大有效机电耦合系数的谐振模式对弹性板厚度进行定量表定, 在阻抗分析仪或网络分析中信号最强, 以此谐振模式为检测对象具有更高的灵敏度、易于观察。

[0035] (3) 本发明中弹性板驻波谐振对表面状况敏感, 能标定弹性板表面的腐蚀状况。

附图说明

[0036] 图 1 是输入电阻抗随频率变化图, 片状纵波压电换能器为氧化锌, 弹性板材料为铝板。

[0037] 图 2 为有效机电耦合系数随谐振模式次数变化图, 片状纵波压电换能器为氧化锌, 弹性板材料为铝板。

[0038] 图 3 为输入电阻抗随频率变化图, 片状纵波压电换能器锆钛酸铅 -PZT, 弹性板材料为钢板。

[0039] 图 4 为有效机电耦合系数随谐振模式次数变化图, 片状纵波压电换能器锆钛酸铅 -PZT, 弹性板材料为钢板。

具体实施方式:

[0040] (1) 将被检测弹性板与片状纵波压电换能器接触的一面进行适当处理, 使接触具有良好的声耦合。所述的弹性板为金属、非金属或复合材料, 所述的片状纵波压电换能器可用压电陶瓷、石英、铌酸锂材料制成。为得到较高的检测精度, 应使 $V_{sb}/V_{sb}l > 100$, 所以应

根据被测材料的纵波声速度和弹性板的估算厚度确定所选择片状纵波压电换能器的类型和尺寸。

[0041] (2) 测量高次谐振模式的有效机电耦合系数：改变阻抗分析仪或网络分析仪的频率范围，使频率分辨率达到相应的要求；采取频率范围分段测量的方式，从低频到高频连续测量片状纵波压电换能器的阻抗曲线，直至阻抗曲线平滑为止，对测量的数据进行分析，确定每一个谐振模式对应的并联谐振频率和串联谐振频率；然后根据公式 (1) 计算出高次谐振模式的有效机电耦合系数；

$$[0042] \quad k_{\text{eff}}^2(m) = \frac{\pi^2}{4} \cdot \frac{f_s(m)}{f_p(m)} \cdot \left[1 - \frac{f_s(m)}{f_p(m)} \right] \quad \text{公式 (1)}$$

[0043] 其中，阻抗分析仪或网络分析仪的频率分辨率 (f_{min}) 需满足公式 (2)：

$$[0044] \quad f_{\text{min}} < \Delta f_p / 2 \quad \text{公式 (2)}$$

$$[0045] \quad \text{其中，} \Delta f_p = f_p(1_a+d) - f_p(1_a) \quad \text{公式 (3)}$$

[0046] d 为被测弹性板厚度的检测精度， 1_a 为被检测弹性板厚度的估算厚度； $f_p(1_a+d)$ 和 $f_p(1_a)$ 分别是板厚为 1_a+d 和 1_a 的最大有效机电耦合系数对应谐振模式的并联谐振频率。

[0047] (3) 将步骤 (2) 中得到的高次谐振模式的有效机电耦合系数比较，取其中最大有效机电耦合系数对应的谐振模式。

[0048] 当被检测弹性板的声阻抗小于片状纵波压电换能器的声阻抗时 ($Z_{\text{sb}}/Z < 1$)，最大有效机电耦合系数对应谐振模式的并联谐振频率为：

$$[0049] \quad f_p = \frac{(m_N z_{\text{sb}} + 1)}{2 \left(\frac{z_{e1} l_{e1}}{V_{e1}} + \frac{z_{\text{sb}} l_{\text{sb}}}{V_{\text{sb}}} + \frac{z_{e2} l_{e2}}{V_{e2}} + \frac{l}{V} \right)} \quad \text{公式 (4)}$$

$$[0050] \quad \text{其中，} m_N = \frac{V(l_{\text{sb}} + 0.5 \rho_{e2} l_{e2} / \rho)}{V_{\text{sb}}(l + 0.5 \rho_{e2} l_{e2} / \rho + \rho_{e1} l_{e1} / \rho)},$$

[0051] 忽略电极厚度，则公式 (4) 简化为：

$$[0052] \quad f_p = \frac{(m_N z_{\text{sb}} + 1)}{2 \left(\frac{z_{\text{sb}} l_{\text{sb}}}{V_{\text{sb}}} + \frac{l}{V} \right)} \quad \text{公式 (5)}$$

[0053] 其中， $m_N = V l_{\text{sb}} / V_{\text{sb}} l$ ；

[0054] 当被检测弹性板的声阻抗大于或等于片状纵波压电换能器的声阻抗时，即 $Z_{\text{sb}}/Z \geq 1$ ，最大有效机电耦合系数对应谐振模式的并联谐振频率为

$$[0055] \quad f_p = \frac{1}{2 z_{\text{sb}}} \cdot \frac{m_T + 0.5 + z_{\text{sb}}/2}{\frac{l}{V} + \frac{l_{\text{sb}}}{z_{\text{sb}} V_{\text{sb}}} + z_{e1} \frac{l_{e1}}{V_{e1}} + \frac{l_{e2}}{z_{e2} V_{e2}}} \quad \text{公式 (6)}$$

$$[0056] \quad \text{式中，} m_T = \left[\frac{V(l_{\text{sb}} + 0.5 \rho_{e2} l_{e2} / \rho)}{V_{\text{sb}}(l + 0.5 \rho_{e2} l_{e2} / \rho + \rho_{e1} l_{e1} / \rho)} - 1 \right] / 2。$$

[0057] 如果电极的厚度相对于片状纵波压电换能器可以忽略，公式 (6) 可以简化为

$$[0058] \quad f_p = \frac{1}{2z_{sb}} \cdot \frac{m_T + 0.5 + z_{sb}/2}{\frac{l}{V} + \frac{l_{sb}}{z_{sb}V_{sb}}} \quad \text{公式 (7)}$$

$$[0059] \quad \text{式中, } m_T = \left[\frac{Vl_{sb}}{V_{sb}l} - 1 \right] / 2。$$

[0060] 上述公式 (4)、(5)、(6) 和 (7) 中, Z 、 Z_{sb} 、 Z_{e1} 、 Z_{e2} 分别是片状纵波压电换能器、弹性板、上电极和下电极的声阻抗, l 、 l_{sb} 、 l_{e1} 、 l_{e2} 分别是片状纵波压电换能器、弹性板、上电极和下电极的厚度, V 、 V_{sb} 、 V_{e1} 、 V_{e2} 分别是片状纵波压电换能器、弹性板、上电极和下电极沿垂直于表面方向的纵波声速度, ρ 、 ρ_{sb} 、 ρ_{e1} 、 ρ_{e2} 分别是片状纵波压电换能器、弹性板、上电极和下电极的密度。

[0061] 实施例 1:

[0062] 取被检测弹性板厚度范围在 20cm 左右的铝板, 其密度为 2700kg/m³, 纵波速度为 6420m/s, 如果选择材料为氧化锌的厚度方向片状纵波压电换能器 (密度为 5680kg/m³, 纵波速度为 6400m/s, 机电耦合系数为 0.3), 则根据 $Vl_{sb}/V_{sb}l > 100$, 选择的片状纵波压电换能的厚度大概为 0.2mm。

[0063] 弹性板厚度检测精度要求为 20 μ m。利用已知的板状压电层和被检测弹性板材料常数, 并将 l_a 取 20cm 和 d 取 20 μ m 代入公式 (2)、(3) 确定阻抗分析仪或网络分析仪的频率分辨率 f_{min} 约为 1kHz; 利用分段连续扫描后拼接成的阻抗频率谱 (如图 1), 记录每个谐振模式并联谐振频率和串联谐振频率 (如图 2); 根据公式 (1) 得到最大有效机电耦合系数为 0.014, 对应的谐振模式次数为 936, 确定该模式并联谐振频率为 1.5007×10^7 Hz。

[0064] 利用已知的板状压电层和被检测弹性板材料常数和几何参数, 根据片状纵波压电换能器和被检测弹性板的厚度方向纵波声阻抗的关系 $Z_{sb}/Z < 1$, 将并联谐振频率代入公式 (5) 得到弹性板的厚度 l_{sb} 为 20.02cm。测量厚度与实际弹性板厚度 20cm \pm 1cm, 相差 0.01cm。实现对板状材料或容器壁的厚度定量标定, 进一步可对内表面腐蚀状况进行无损检测。

[0065] 实施例 2:

[0066] 取被检测弹性板厚度范围在 20cm 左右的钢板, 其密度为 7800kg/m³, 纵波速度为 5900m/s, 如果选择材料为 PZT5 的厚度方向片状纵波压电换能器 (密度为 7000kg/m³, 纵波速度为 2400m/s, 机电耦合系数为 0.6), 根据 $Vl_{sb}/V_{sb}l > 100$, 则根据 $Vl_{sb}/V_{sb}l > 100$ 的要求, 片状纵波压电换能的厚度大概要求为 0.8mm。

[0067] 弹性板厚度检测精度要求为 20 μ m。利用已知的板状压电层和被检测弹性板材料常数, 并将 l_a 取 20cm 和 d 取 20 μ m 代入公式 (2)、(3) 确定阻抗分析仪或网络分析仪的频率分辨率 f_{min} 为 38Hz; 利用分段连续扫描后拼接成的阻抗频率谱 (如图 3), 记录每个谐振模式并联谐振频率和串联谐振频率 (如图 4); 根据公式 (1) 得到最大有效机电耦合系数为 0.033, 对应的谐振模式次数为 51, 确定该模式并联谐振频率为 702kHz。

[0068] 利用已知的板状压电层和被检测弹性板材料常数和几何参数, 根据片状纵波压电换能器和被检测弹性板的厚度方向纵波声阻抗的关系 $Z_{sb}/Z \geq 1$, 将并联谐振频率代入公式 (7) 得到弹性板的厚度 l_{sb} 为 20.03cm。测量厚度与实际弹性板厚度 20cm \pm 1cm, 相差 0.03cm。实现对板状材料或容器壁的厚度定量标定, 进一步可对内表面腐蚀状况进行无损

检测。

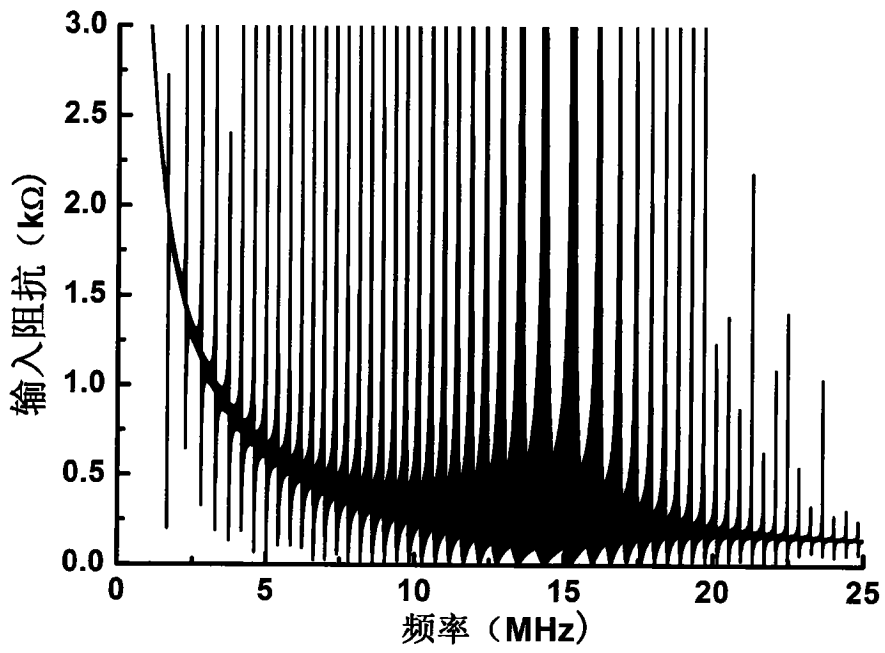


图 1

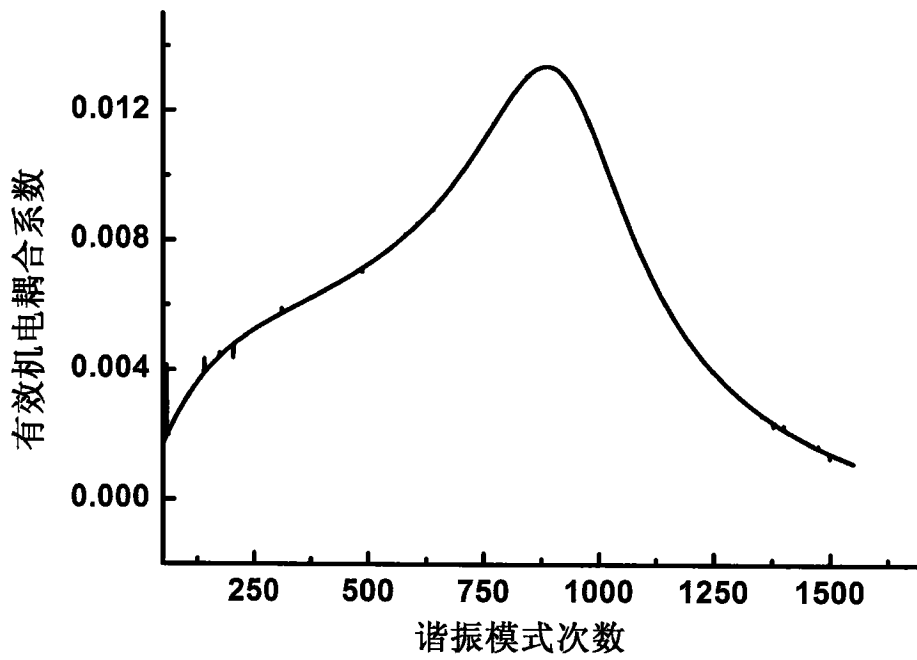


图 2

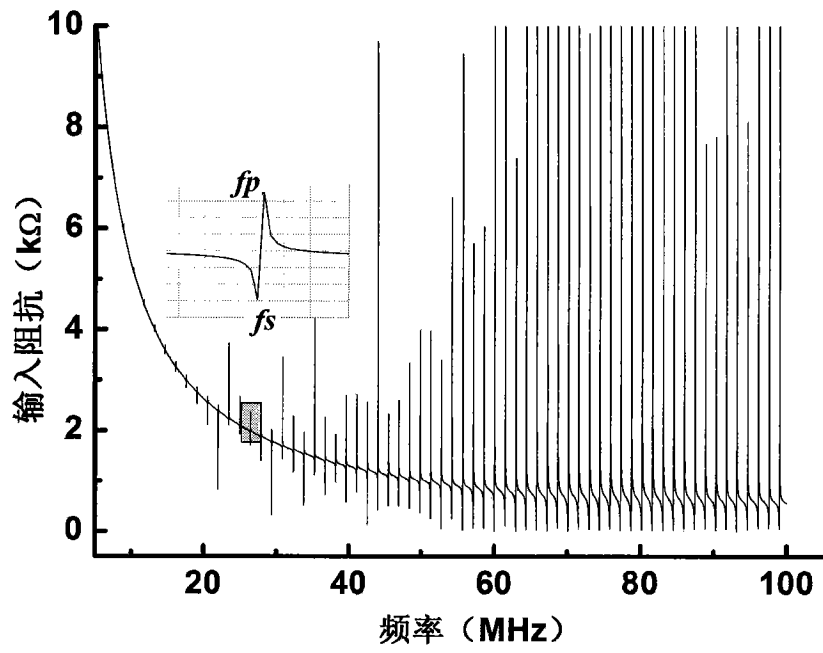


图 3

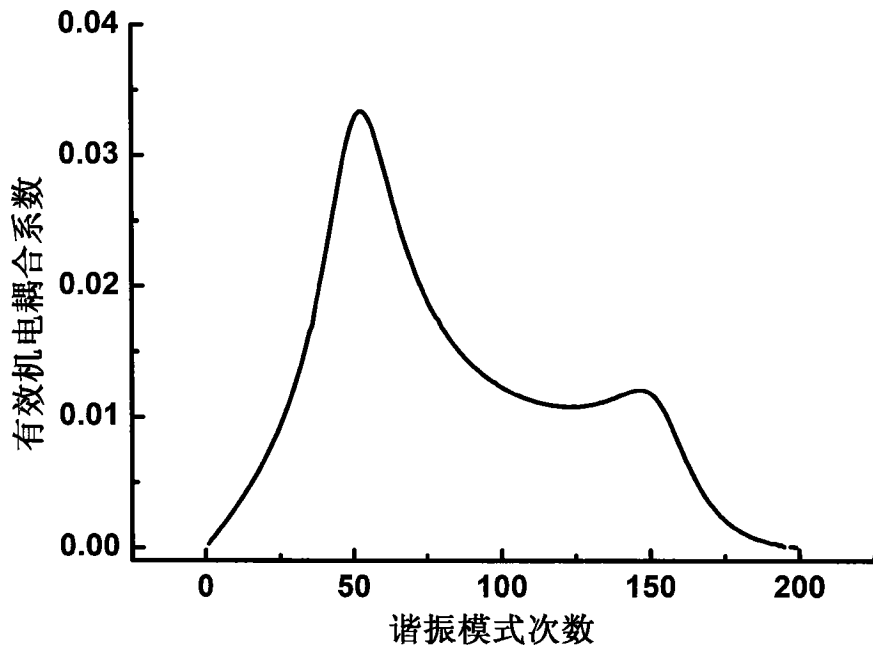


图 4