



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 107389220 B

(45)授权公告日 2019.07.16

(21)申请号 201710547693.X

(22)申请日 2017.07.06

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 107389220 A

(43)申请公布日 2017.11.24

(73)专利权人 中国船舶重工集团公司第七一九
研究所

地址 430000 湖北省武汉市武昌区中山路
450号

(72)发明人 柳建楠 李良 万华庆

(74)专利代理机构 北京捷诚信通专利事务所
(普通合伙) 11221

代理人 王卫东

(51)Int.Cl.

G01K 11/22(2006.01)

(56)对比文件

- CN 104132749 A, 2014.11.05,
- CN 101699236 A, 2010.04.28,
- CN 105486424 A, 2016.04.13,
- CN 202075062 U, 2011.12.14,
- CN 105486424 A, 2016.04.13,
- CN 106446437 A, 2017.02.22,
- US 4761650 A, 1988.08.02,
- CN 103336145 A, 2013.10.02,

审查员 庄联欣

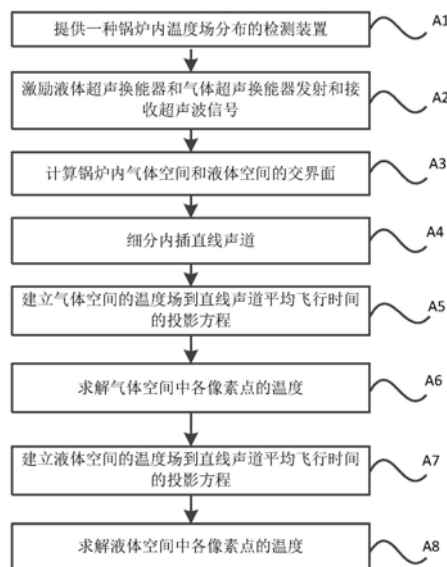
权利要求书3页 说明书10页 附图9页

(54)发明名称

一种锅炉内温度场分布的检测方法

(57)摘要

本发明公开了一种锅炉内温度场分布的检测方法,涉及超声成像领域,包括步骤:提供锅炉内温度场分布的检测装置;激励液体超声换能器和气体超声换能器发射和接收超声波信号;计算锅炉内气体空间和液体空间的交界面;细分内插直线声道;建立气体空间的温度场到直线声道平均飞行时间的投影方程;求解投影方程中气体空间各像素点的温度;建立液体空间的温度场到直线声道平均飞行时间的投影方程;求解投影方程中液体空间各像素点的温度。本发明提供的锅炉内温度场分布的检测方法,可通过超声成像的方法检测出锅炉内温度场分布,适用范围广。



1. 一种锅炉内温度场分布的检测方法,其特征在于,包括如下步骤:

提供一种锅炉内温度场分布的检测装置,所述检测装置包括:设于锅炉内管壁上的多个液体超声换能器和气体超声换能器,至少部分所述液体超声换能器和气体超声换能器交替布置,且所述液体超声换能器和气体超声换能器位于同一平面上;

激励液体超声换能器和气体超声换能器发射和接收超声波信号,处理所有液体超声换能器和气体超声换能器接收到的超声波信号,得到液体超声换能器和气体超声换能器超声波信号从发射到接收的飞行时间;

计算锅炉内气体空间和液体空间的交界面;

建立气体空间的温度场到直线声道平均飞行时间的投影方程:根据锅炉内气体空间和液体空间的交界面位置得到气体空间内直线声道总数为 M_g ,将气体空间划分为 N_g 个像素点,第 r 个像素点的温度记为 T_r ,气体空间的温度场到直线声道平均飞行时间的投影方程为:

$$AX_g = t_g$$

式中, $\mathbf{t}_g = (t_1, t_2, \dots, t_{M_g})^T$, $\mathbf{X}_g = (x_1, x_2, \dots, x_{N_g})^T$, $x_r = 1/\sqrt{T_r}$, 系统矩阵

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1N_g} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{M_g 1} & \cdots & a_{M_g N_g} \end{bmatrix}, \quad a_{rs} = l_{rs} \sqrt{T_0} / c_{g0}, \quad s = 1, 2, \dots, M_g, r = 1, 2, \dots, N_g, l_{rs} \text{ 为第 } s \text{ 个直线}$$

声道与第 r 个像素点的相交长度, c_{g0} 为 0°C 时空气声速, $T_0 = 273.15\text{K}$, t_{M_g} 为第 M_g 个直线声道的平均飞行时间;

求解投影方程中气体空间各像素点的温度:根据已知的系统矩阵 \mathbf{A} 和向量 \mathbf{t}_g 求解得到 \mathbf{X}_g ,进而得到气体空间中各像素点的温度 T_r ;

建立液体空间的温度场到直线声道平均飞行时间的投影方程:根据锅炉内气体空间和液体空间的交界面位置得到液体空间内直线声道总数为 M_w ,将液体空间划分为 N_w 个像素点,第 r' 个像素点的温度记为 $T_{r'}$,液体空间的温度场到直线声道平均飞行时间的投影方程为:

$$BX_w = t_w$$

式中 $\mathbf{t}_w = (t_1, t_2, \dots, t_{M_w})^T$, $\mathbf{X}_w = (x'_1, x'_2, \dots, x'_{N_w})^T$,

$$x_{r'} = 1 / [c_{w0} + p(T_{r'} - T_0) + q(T_{r'} - T_0)^2],$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_{11} & \cdots & b_{1N_w} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{M_w 1} & \cdots & b_{M_w N_w} \end{bmatrix}, \quad b_{r's} = l_{r's}, \quad s' = 1, 2, \dots, M_w, \quad r' = 1, 2, \dots, N_w, l_{r's'} \text{ 为第 } s' \text{ 个直}$$

线声道与第 r' 个像素点的相交长度, c_{w0} 为 0°C 时水中的声速, $T_0 = 273.15\text{K}$, t_{M_w} 为第 M_w 个直线声道的平均飞行时间; $T_0 = 273.15\text{K}$, c_{w0} 为 0°C 时水中的声速, p, q 为已知常数;

求解投影方程中液体空间各像素点的温度:根据已知的系统矩阵 \mathbf{B} 和向量 \mathbf{t}_w 求解得到 \mathbf{X}_w ,进而得到液体空间中各像素点的温度 $T_{r'}$ 。

2. 如权利要求1所述的锅炉内温度场分布的检测方法,其特征在于,在计算锅炉内气体空间和液体空间的交界面之后,建立气体空间的温度场到直线声道平均飞行时间的投影方程之前,还包括步骤细分内插直线声道:在相邻的两个液体超声换能器、相邻的两个气体超

声换能器之间细分内插多条直线声道,并计算内插的直线声道上超声波信号的平均飞行时间。

3.如权利要求2所述的锅炉内温度场分布的检测方法,其特征在于,细分内插直线声道的具体过程包括:测量所有液体超声换能器和气体超声换能器对应的直线声道与管壁切线的夹角,在相邻的两个液体超声换能器、相邻的两个气体超声换能器之间对应细分内插多条直线声道,并计算内插的直线声道上超声波信号的平均飞行时间 t ,公式如下:

$$\begin{cases} t = S(\alpha) = t_{v-1} \cdot (1-u) + t_v \cdot u - \frac{1}{6} S''(\alpha_{v-1})(2u-3u^2+u^3)h_v^2 - \frac{1}{6} S''(\alpha_v)(u-u^3)h_v^2 \\ \frac{1}{6} S''(\alpha_{v-1})h_v - \frac{1}{3} S''(\alpha_v)(h_v+h_{v+1}) + \frac{1}{6} S''(\alpha_{v+1})h_{v+1} = \frac{t_{v+1}-t_v}{h_{v+1}} - \frac{t_v-t_{v-1}}{h_v} \\ S''(\alpha_1) = 0 \\ S''(\alpha_{V_0}) = 0 \end{cases}$$

式中, $h_v = \alpha_v - \alpha_{v-1}$, $u = (\alpha - \alpha_{v-1}) / h_v$, $\alpha_{v-1} < \alpha < \alpha_v$, $v = 1, 2, \dots, V_0$, α 为第 v 个声道和第 $v-1$ 个声道之间的内插声道与管壁切线的夹角, α_v 为第 v 声道与管壁切线的夹角, α_{v-1} 为第 $v-1$ 个声道与管壁切线的夹角, $S''(\alpha_j)$ 为拟合曲线 $S(\alpha)$ 的二阶导数, V_0 为所有液体超声换能器和气体超声换能器对应的直线声道的个数。

4.如权利要求1所述的锅炉内温度场分布的检测方法,其特征在于,求解投影方程中气体空间各像素点的温度的具体步骤包括:采用迭代法求解 X_g ,计算公式如下:

$$X_g^{(b+1)} = X_g^{(b)} + \lambda A^T (t_g - AX_g^{(b)})$$

式中, A^T 为系统矩阵 A 的转置, λ 为迭代步长, $X_g^{(b+1)}$ 与 $X_g^{(b)}$ 分别为第 $b+1$ 步和第 b 步的迭代结果;

当 $\|X_g^{(b+1)} - X_g^{(b)}\|^2$ 小于预设值时,迭代结束,得到 X_g 。

5.如权利要求1所述的锅炉内温度场分布的检测方法,其特征在于,求解投影方程中液体空间各像素点的温度的具体步骤包括:采用迭代法求解 X_w ,计算公式如下:

$$X_w^{(b'+1)} = X_w^{(b')} + \lambda' B^T (t_w - BX_w^{(b')})$$

式中, B^T 为系统矩阵 B 的转置, λ' 为迭代步长, $X_w^{(b'+1)}$ 与 $X_w^{(b')}$ 分别为第 $b'+1$ 步和第 b' 步的迭代结果;

当 $\|X_w^{(b'+1)} - X_w^{(b')}\|^2$ 小于预设值时,迭代结束,得到 X_w 。

6.如权利要求1所述的锅炉内温度场分布的检测方法,其特征在于:所述液体超声换能器和气体超声换能器结构相同,所述液体超声换能器包括一半圆筒状的收发体和U型外壳,所述收发体包括位于外侧的匹配层和位于内侧的压电陶瓷层,所述收发体和外壳形成一空腔体,所述空腔体内填满背衬,所述液体超声换能器的压电陶瓷层的中心谐振频率和气体超声换能器的压电陶瓷层的中心谐振频率不同。

7.如权利要求6所述的锅炉内温度场分布的检测方法,其特征在于:所述液体超声换能器的压电陶瓷层的中心谐振频率为1MHz~5MHz。

8.如权利要求6所述的锅炉内温度场分布的检测方法,其特征在于:所述气体超声换能器的压电陶瓷层的中心谐振频率为100KHz~300KHz。

9.如权利要求1所述的锅炉内温度场分布的检测方法,其特征在于:所有所述液体超声换能器和气体超声换能器交替布置,相邻的液体超声换能器和气体超声换能器间距相等。

10. 如权利要求1所述的锅炉内温度场分布的检测方法,其特征在于:所述液体超声换能器和气体超声换能器所在的平面经过锅炉的中心点。

一种锅炉内温度场分布的检测方法

技术领域

[0001] 本发明涉及超声成像领域,具体涉及一种锅炉内温度场分布的检测方法。

背景技术

[0002] 锅炉内温度场直接影响锅炉的安全性,检测锅炉内温度场尤为重要。现有技术,通常采用红外热成像技术进行检测,利用红外探测器接收被测目标的红外辐射能量,实现物体表面温度场的成像,得到锅炉内温度场分布。

[0003] 然而,上述方法仅适用于管壁透光的锅炉,无法检测出管壁不透光锅炉的内部温度场。

发明内容

[0004] 针对现有技术中存在的缺陷,本发明的目的在于提供一种锅炉内温度场分布的检测方法,可通过超声成像的方法检测出锅炉内温度场分布,适用范围广。

[0005] 为达到以上目的,本发明采取的技术方案是:

[0006] 一种锅炉内温度场分布的检测方法,包括如下步骤:

[0007] 提供一种锅炉内温度场分布的检测装置,所述检测装置包括:设于锅炉内管壁上的多个液体超声换能器和气体超声换能器,至少部分所述液体超声换能器和气体超声换能器交替布置,且所述液体超声换能器和气体超声换能器位于同一平面上;

[0008] 激励液体超声换能器和气体超声换能器发射和接收超声波信号,处理所有液体超声换能器和气体超声换能器接收到的超声波信号,得到液体超声换能器和气体超声换能器超声波信号从发射到接收的飞行时间;

[0009] 计算锅炉内气体空间和液体空间的交界面;

[0010] 建立气体空间的温度场到直线声道平均飞行时间的投影方程:根据锅炉内气体空间和液体空间的交界面位置得到气体空间内直线声道总数为 M_g ,将气体空间划分为 N_g 个像素点,第 r 个像素点的温度记为 T_r ,气体空间的温度场到直线声道平均飞行时间的投影方程为:

[0011] $AX_g = t_g$

[0012] 式中, $\mathbf{t}_g = (t_1, t_2, \dots, t_{M_g})^T$, $\mathbf{X}_g = (x_1, x_2, \dots, x_{N_g})^T$, $x_r = 1/\sqrt{T_r}$, 系统矩阵

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1N_g} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{M_g 1} & \cdots & a_{M_g N_g} \end{bmatrix}, \quad a_{rs} = l_{rs} \sqrt{T_0} / c_{g0}, \quad s=1, 2, \dots, M_g, r=1, 2, \dots, N_g, l_{rs} \text{ 为第 } s \text{ 个直线}$$

声道与第 r 个像素点的相交长度, c_{g0} 为 0°C 时空气声速, $T_0=273.15\text{K}$ 。 t_{M_g} 为第 M_g 个直线声道的平均飞行时间;

[0013] 求解投影方程中气体空间各像素点的温度:根据已知的系统矩阵 \mathbf{A} 和向量 \mathbf{t}_g 求解得到 \mathbf{X}_g ,进而得到气体空间中各像素点的温度;

[0014] 建立液体空间的温度场到直线声道平均飞行时间的投影方程:根据锅炉内气体空间和液体空间的交界面位置得到液体空间内直线声道总数为 M_w ,将液体空间划分为 N_w 个像素点,第 r' 个像素点的温度记为 $T_{r'}$,液体空间的温度场到直线声道平均飞行时间的投影方程为:

$$[0015] \quad BX_w = t_w$$

$$[0016] \quad \text{式中 } \mathbf{t}_w = (t_1, t_2, \dots, t_{M_w})^T, \quad \mathbf{X}_w = (x'_1, x'_2, \dots, x'_{N_w})^T,$$

$$[0017] \quad x_{r'} = 1 / [c_{w0} + p(T_{r'} - T_0) + q(T_{r'} - T_0)^2],$$

$$[0018] \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_{11} & \cdots & b_{1N_w} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{M_w 1} & \cdots & b_{M_w N_w} \end{bmatrix}, b_{r's'} = l_{r's'}, s' = 1, 2, \dots, M_w, r' = 1, 2, \dots, N_w, l_{r's'}$$

为第 s' 个直线声道与第 r' 个像素点的相交长度, c_{g0} 为 0°C 时空气声速, $T_0 = 273.15\text{K}$, t_{M_w} 为第 M_w 个直线声道的平均飞行时间; $T_0 = 273.15\text{K}$, c_{w0} 为 0°C 时水中的声速, p, q 为已知常数;

[0019] 求解投影方程中液体空间各像素点的温度:根据已知的系统矩阵 B 和向量 t_w 求解得到 X_w ,进而得到液体空间中各像素点的温度。

[0020] 在上述技术方案的基础上,在计算锅炉内气体空间和液体空间的交界面之后,建立气体空间的温度场到直线声道平均飞行时间的投影方程之前,还包括步骤细分内插直线声道:在相邻的两个液体超声换能器、相邻的两个气体超声换能器之间细分内插多条直线声道,并计算内插的直线声道上超声波信号的平均飞行时间。

[0021] 在上述技术方案的基础上,细分内插直线声道的具体过程包括:测量所有液体超声换能器和气体超声换能器对应的直线声道与管壁切线的夹角,在相邻的两个液体超声换能器、相邻的两个气体超声换能器之间对应细分内插多条直线声道,并计算内插的直线声道上超声波信号的平均飞行时间 t ,公式如下:

$$[0022] \quad \begin{cases} t = S(\alpha) = t_{v-1} \cdot (1-u) + t_v \cdot u - \frac{1}{6} S''(\alpha_{v-1})(2u-3u^2+u^3)h_v^2 - \frac{1}{6} S''(\alpha_v)(u-u^3)h_v^2 \\ \frac{1}{6} S''(\alpha_{v-1})h_v - \frac{1}{3} S''(\alpha_v)(h_v+h_{v+1}) + \frac{1}{6} S''(\alpha_{v+1})h_{v+1} = \frac{t_{v+1}-t_v}{h_{v+1}} - \frac{t_v-t_{v-1}}{h_v} \\ S''(\alpha_1) = 0 \\ S''(\alpha_{V_0}) = 0 \end{cases}$$

[0023] 式中, $h_v = \alpha_v - \alpha_{v-1}$, $u = (\alpha - \alpha_{v-1}) / h_v$, $\alpha_{v-1} < \alpha < \alpha_v$, $v = 1, 2, \dots, V_0$, α 为第 v 个声道和第 $v-1$ 个声道之间的内插声道与管壁切线的夹角, α_v 为第 v 声道与管壁切线的夹角, α_{v-1} 为第 $v-1$ 声道与管壁切线的夹角, $S''(\alpha_j)$ 为拟合曲线 $S(\alpha)$ 的二阶导数, V_0 为所有液体超声换能器和气体超声换能器对应的直线声道的个数。

[0024] 在上述技术方案的基础上,求解投影方程中气体空间各像素点的温度的具体步骤包括:采用迭代法求解 X_g ,计算公式如下:

$$[0025] \quad X_g^{(b+1)} = X_g^{(b)} + \lambda A^T (t_g - AX_g^{(b)})$$

[0026] 式中, A^T 为系统矩阵 A 的转置, λ 为迭代步长, $X_g^{(b+1)}$ 与 $X_g^{(b)}$ 分别为第 $b+1$ 步和第 b 步的迭代结果;

[0027] 当 $\|X_g^{(b+1)} - X_g^{(b)}\|^2$ 小于预设值时,迭代结束,得到 X_g 。

[0028] 在上述技术方案的基础上,求解投影方程中液体空间各像素点的温度的具体步骤包括:采用迭代法求解 X_w ,计算公式如下:

$$[0029] \quad X_w^{(b'+1)} = X_w^{(b')} + \lambda' B^T (t_w - B X_w^{(b')})$$

[0030] 式中, B^T 为系统矩阵 B 的转置, λ' 为迭代步长, $X_w^{(b'+1)}$ 与 $X_w^{(b')}$ 分别为第 $b'+1$ 步和第 b' 步的迭代结果;

[0031] 当 $\|X_w^{(b'+1)} - X_w^{(b')}\|^2$ 小于预设值时,迭代结束,得到 X_w 。

[0032] 在上述技术方案的基础上,所述液体超声换能器和气体超声换能器结构相同,所述液体超声换能器包括一半圆筒状的收发体和U型外壳,所述收发体包括位于外侧的匹配层和位于内侧的压电陶瓷层,所述收发体和外壳形成一空腔体,所述空腔体内填满背衬,所述液体超声换能器的压电陶瓷层的中心谐振频率和气体超声换能器的压电陶瓷层的中心谐振频率不同。

[0033] 在上述技术方案的基础上,所述液体超声换能器的压电陶瓷层的中心谐振频率为1MHz~5MHz。

[0034] 在上述技术方案的基础上,所述气体超声换能器的压电陶瓷层的中心谐振频率为100KHz~300KHz。

[0035] 在上述技术方案的基础上,所有所述液体超声换能器和气体超声换能器交替布置,相邻的液体超声换能器和气体超声换能器间距相等。

[0036] 在上述技术方案的基础上,所述液体超声换能器和气体超声换能器所在的平面经过锅炉的中心点。

[0037] 与现有技术相比,本发明的优点在于:

[0038] (1) 本发明的锅炉内温度场分布的检测方法可通过超声成像的方法检测出锅炉内温度场分布,既可适用于管壁透光的情况,也可以管壁不透光的情况,适用范围广;超声波信号在介质中可以传播较远的距离,监测装置的测量尺度大,可同时适用于小型锅炉和大型锅炉。

[0039] (2) 本发明的气体超声换能器和液体超声换能器均包括一半圆筒状的收发体,使得换能器在横截面上具有180度的发射角和接收角,发射和接收信号广度好,而且换能器在纵截面内的发射角和接收角小于 30° ,从而使得换能器仅能在换能器的径向上发射和接收信号,有效避免其他平面多重反射信号的干扰。

附图说明

[0040] 图1为本发明实施例中锅炉内气液二相分布场及温度场分布的检测装置的结构示意图;

[0041] 图2为本发明实施例中液体超声换能器的结构示意图;

[0042] 图3为图2的剖视图;

[0043] 图4为本发明实施例中锅炉内气液二相分布场的检测方法流程图;

[0044] 图5为本发明实施例中计算锅炉内气体空间和液体空间的交界面位置的详细流程图;

[0045] 图6为本发明实施例中水平声道示意图;

- [0046] 图7为本发明实施例中竖直声道示意图；
- [0047] 图8为本发明实施例中计算液体空间二相分布场的详细流程图；
- [0048] 图9为本发明实施例中一次反射示意图；
- [0049] 图10为本发明实施例中锅炉内温度场分布的检测方法流程图；
- [0050] 图11为本发明实施例中内插前直线声道的分布示意图；
- [0051] 图12为本发明实施例中内插后直线声道的分布示意图。
- [0052] 图中：1-液体超声换能器，2-气体超声换能器，11-收发体，111-匹配层，112-压电陶瓷层，12-外壳，13-空腔体，3-气体空间，4-液体空间，5-水平声道，6-竖直声道，7-气泡。

具体实施方式

[0053] 以下结合附图及实施例对本发明作进一步详细说明。

[0054] 参见图1所示，本发明实施例提供一种锅炉内气液二相分布场及温度场分布的检测装置，包括：设于锅炉内管壁上的多个液体超声换能器1和气体超声换能器2，至少部分液体超声换能器1和气体超声换能器2交替布置，且液体超声换能器1和气体超声换能器2位于同一平面上，该平面经过锅炉的中心点。当液体超声换能器1和气体超声换能器2所在的平面经过锅炉的中心点时，探测平面最大，最能反映锅炉内气液二相分布场及温度场分布。

[0055] 本发明实施例中，所有液体超声换能器1和气体超声换能器2交替布置，相邻的液体超声换能器1和气体超声换能器2间距相等。

[0056] 参见图2和图3所示，液体超声换能器1和气体超声换能器2结构相同，液体超声换能器1包括一半圆筒状的收发体11和U型外壳12，收发体11包括位于外侧的匹配层111和位于内侧的压电陶瓷层112，收发体11和外壳12形成一空腔体13，空腔体13内填满背衬，液体超声换能器1的压电陶瓷层112的中心谐振频率和气体超声换能器2的压电陶瓷层112的中心谐振频率不同。

[0057] 本发明实施例中，液体超声换能器1的压电陶瓷层112的中心谐振频率为1MHz~5MHz，气体超声换能器2的压电陶瓷层112的中心谐振频率为100KHz~300KHz。液体超声换能器1和气体超声换能器2分别用于液体空间4和气体空间3内发射或接收超声波信号，液体超声换能器1和气体超声换能器2均为半圆柱形且收发一体式。

[0058] 本发明实施例中匹配层111和压电陶瓷层112均为半圆筒状，压电陶瓷层112横截面为半圆弧状，使得换能器在横截面上具有180度的发射角和接收角，发射和接收信号广度好；压电陶瓷层112纵截面为矩形结构，在收发体11的轴线方向具有一定长度，使得换能器在纵截面内的发射角和接收角小于30°，从而使得换能器仅能在换能器的径向上发射和接收信号，有效避免其他平面多重反射信号的干扰。

[0059] 在安装上述半圆筒状的液体超声换能器1和气体超声换能器2时，使液体超声换能器1和气体超声换能器2的径向和锅炉的纵剖面平行，使得液体超声换能器1和气体超声换能器2仅能在同一平面上发射和接收信号，信号传输质量更好。

[0060] 参见图4所示，本发明还提供了一种锅炉内气液二相分布场的检测方法，包括以下步骤：

[0061] S1：激励液体超声换能器1和气体超声换能器2发射和接收超声波信号；

[0062] S2：处理所有液体超声换能器1和气体超声换能器2接收到的超声波信号，得到液

体超声换能器1和气体超声换能器2超声波信号的幅值、以及超声波信号从发射到接收的飞行时间；

[0063] S3:计算超声波在气体空间3的平均声速,并根据气体超声换能器2的位置、以及气体超声换能器2的超声波沿反射路径传播的飞行时间,计算锅炉内气体空间3和液体空间4的交界面位置;

[0064] S4:测量并比较液体超声换能器1在无气泡7阻隔的液体环境下和待测液体空间4内接收到的超声波信号的幅值,得到待测液体空间4中气泡7的大小和位置,计算锅炉内液体空间4二相分布场。

[0065] 步骤S1的具体步骤包括:每次激励一液体超声换能器1和一气体超声换能器2发射超声波信号,所有液体超声换能器1和气体超声换能器2接收超声波信号,直至激励完所有液体超声换能器1和气体超声换能器2。

[0066] 由于液体超声换能器1和气体超声换能器2的中心谐振频率差异很大,互不干扰,液体超声换能器1和气体超声换能器2超声波信号的发射或接收可以同时进行,可节约探测时间,提高探测效率。然而,为了避免多个同类型超声波信号相互干扰,控制电路每次只能激励一个液体超声换能器1和一个气体超声换能器2发射超声波信号。

[0067] 步骤S2中得到超声波信号的幅值的具体步骤包括:采用高速AD对液体超声换能器1和气体超声换能器2接收到的超声波信号进行采样,根据超声波的气体声速和液体声速获得超声波信号的到达时间窗,并根据到达时间窗内采集到超声波信号的最大峰峰值确定接收到的超声波信号的幅值。

[0068] 气体超声换能器2发射的超声波信号只能在气体中飞行,液体超声换能器1发射的超声波信号只能在液体中飞行,超声波信号在气体和液体中飞行时间的测量方法有所不同。

[0069] 步骤S2中得到气体超声换能器2超声波信号从发射到接收的飞行时间的具体步骤包括:

[0070] 将气体超声换能器2在已知温度、介质分布的条件下接收到的超声波信号作为参考信号;

[0071] 对气体超声换能器2接收的超声波信号和参考信号进行互相关处理,得到互相关函数,然后对互相关函数进行Hilbert变换并插值求取过零点获得亚采样精度的飞行时间。

[0072] 超声波在液体环境下从发射到接收的过程中,锅炉管壁会产生耦合回波,且存在气泡7反射回波等多种传播途径产生的超声波信号干扰,导致采用高速AD在采集液体超声换能器1超声波信号时会采集到很多干扰信号。

[0073] 步骤S2中得到液体超声换能器1超声波信号从发射到接收的飞行时间的具体步骤包括:

[0074] 根据已得到的超声波信号的幅值和到达时间窗,从采集到的超声波信号中识别出直线传输的超声波信号,作为目标超声波信号,并利用数字相关法获得目标超声波信号的粗略飞行时间;同时,

[0075] 利用模拟电路识别目标超声波信号的多个过零点,并通过时间数字转换法高精度测量每个过零点对应的时间间隔;然后,根据已获得的回波信号的粗略飞行时间从所有时间间隔中识别出目标超声波信号的精确飞行时间。

[0076] 参见图5所示,步骤S3中计算锅炉内气体空间3和液体空间4的交界面位置的具体步骤包括:

[0077] S301:参见图6所示,根据所有能接收到超声波信号的气体超声换能器2位置分布,将气体超声换能器2水平传输超声波信号的传输路径作为水平声道5,并获得水平声道5的个数为 N_1 、以及每个水平声道5的长度,每个水平声道5对应两个气体超声换能器2,将这两个气体超声换能器2对向发射和接收的两个超声波信号飞行时间分为超声波正向传播飞行时间和超声波反向传播飞行时间,并从所有液体超声换能器1和气体超声换能器2接收到的超声波信号中筛选每个水平声道5的超声波正向传播飞行时间和超声波反向传播飞行时间;

[0078] 计算每个水平声道5上的声速,公式如下:

$$[0079] \quad c_k = \frac{2L_k}{t_k^f + t_k^b}$$

[0080] 式中, $k=1,2,\dots,N_1$, L_k 为第 k 个水平声道5的长度, t_k^f 为超声波正向传播飞行时间, t_k^b 为超声波反向传播飞行时间, c_k 为第 k 个水平声道5上的声速;

[0081] 利用加权平均法计算气体空间3的平均声速 \bar{c} ,计算公式如下:

$$[0082] \quad \bar{c} = \frac{\sum_{k=1}^{N_1} L_k \cdot c_k}{\sum_{k=1}^{N_1} L_k}$$

[0083] 其中, L_k 为第 k 个水平声道5的长度, c_k 为第 k 个水平声道5上的声速, \bar{c} 为气体空间3的平均声速;

[0084] S302:参见图7所示,根据所有能接收到超声波信号的气体超声换能器2位置分布,将气体超声换能器2竖直传输超声波信号的传输路径作为竖直声道6,并获得竖直声道6的个数为 n ,每个竖直声道6对应一个气体超声换能器2,从所有接收到的超声波信号中筛选出每个竖直声道6对应的气体超声换能器2从发射经气液界面反射后接收的飞行时间,即为超声波沿反射路径传播的飞行时间,并以锅炉底部中心为坐标原点建立直角坐标系,得到每个气体超声换能器2的横坐标和纵坐标;

[0085] 计算气体空间3和液体空间4的交界面上若干坐标点 $X_n, y(X_n)$,当坐标点的横坐标为 X_n 时,纵坐标 $y(X_n)$ 的计算公式如下:

$$[0086] \quad y(X_n) = Y_n - \frac{\bar{c} \cdot t_n^r}{2}$$

[0087] 式中, X_n 为第 n 个竖直声道6对应的气体超声换能器2的横坐标, Y_n 为第 n 个竖直声道6对应的气体超声换能器2的纵坐标, t_n^r 为第 n 个竖直声道6对应的超声波沿反射路径传播的飞行时间, \bar{c} 为气体空间3的平均声速;

[0088] S303:连接气体空间3和液体空间4的交界面上所有的坐标点,即为锅炉内气体空间3和液体空间4的交界面位置。

[0089] 参见图8所示,步骤S4的计算液体空间4二相分布场的具体步骤包括:

[0090] S401:在液体超声换能器 i 和液体超声换能器 j 均处于液体状态,且该液体内没有

气泡7的情况下,由液体超声换能器i发射超声波信号,并由液体超声换能器j接收超声波信号,得到液体超声换能器j在无气泡7阻隔的液体环境下接收到的沿直线路径传播的超声波信号的幅值;

[0091] S402:在待测的液体空间4内,液体超声换能器i发射超声波,液体超声换能器j接收该超声波,得到待测的液体空间4中液体超声换能器j接收到的沿直线路径传播的超声波信号的幅值,该直线传播路径为直线声道 L_{ij} ,并计算液体超声换能器i和液体超声换能器j之间超声波直线路径传播的阻塞系数 U_{ij} ,计算公式为:

$$[0092] \quad U_{ij} = \begin{cases} 0 & A/A_0 \geq a \\ 1 & A/A_0 < a \end{cases}$$

[0093] 式中, A_0 为无气泡7阻隔时液体超声换能器j接收到的沿直线路径传播的超声波信号的幅值, A 为待测的气液二相分布场中液体超声换能器j接收到的沿直线路径传播的超声波信号的幅值, a 为阈值常数,根据经验选取 a 为0.5; U_{ij} 表征了液体超声换能器i和液体超声换能器j之间的直线声道 L_{ij} 上是否存在气泡7阻隔,当 A 和 A_0 的比值大于设定的阈值 a 时,则表明不存在气泡7阻隔,当 A 和 A_0 的比值小于设定的阈值 a 时,则表明存在气泡7阻隔;

[0094] S403:根据经验确定液体空间4的分辨率,并结合坐标系得到液体空间4的所有像素点坐标 (x,y) ,计算像素点 (x,y) 与直线声道 L_{ij} 的相交系数 $S_{ij}(x,y)$,当像素点 (x,y) 被声道 L_{ij} 穿过时 $S_{ij}(x,y)$ 取1,否则取为0;

[0095] S404:参见图9所示,在液体超声换能器i和液体超声换能器j均处于液体状态,且该液体内没有气泡7的情况下,由液体超声换能器i发射超声波信号,并由液体超声换能器j接收超声波信号,得到无气泡7阻隔时液体超声换能器j接收到的沿一次反射路径传播的超声波信号的幅值;

[0096] S405:在待测的液体空间4内,液体超声换能器i发射超声波,液体超声换能器j接收该超声波,得到待测的液体空间4内液体超声换能器j接收到的沿一次反射路径传播的超声波信号的幅值,该一次反射传播路径为一次反射声道 L'_{ij} ,并计算液体超声换能器i和液体超声换能器j之间沿一次反射路径传播的超声脉冲的阻塞系数 U'_{ij} ,计算公式为:

$$[0097] \quad U'_{ij} = \begin{cases} 0 & A'/A'_0 \geq a' \\ 1 & A'/A'_0 < a' \end{cases}$$

[0098] 式中, A'_0 为无气泡7阻隔时液体超声换能器j接收到的沿一次反射路径传播的超声波信号的幅值, A' 为待测的气液二相分布场中液体超声换能器j接收到的沿一次反射路径传播的超声波信号的幅值, a' 为阈值常数,根据经验选取 a' 为0.5; U'_{ij} 表征了换能器i和换能器j之间的一次反射声道 L'_{ij} 上是否存在气泡7阻隔,当 A' 和 A'_0 的比值大于设定的阈值 a' 时,则表明不存在气泡7阻隔,当 A' 和 A'_0 的比值小于设定的阈值 a' 时,则表明存在气泡7阻隔;

[0099] S406:根据已得到的气体空间3和液体空间4的交界面位置并利用镜像法确定一次反射声道 L'_{ij} 的几何位置,计算像素点 (x,y) 与一次反射声道 L'_{ij} 的相交系数 $S'_{ij}(x,y)$,当像素点 (x,y) 被声道 L'_{ij} 穿过时 $S'_{ij}(x,y)$ 取1,否则取为0;

[0100] S407:采用的反投影重建公式计算像素点 (x,y) 处为气泡7的概率为:

$$[0101] \quad g(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^{N_2} \sum_{j=1}^{N_2} U_{ij} S_{ij}(x, y) + \sum_{i=1}^{N_2} \sum_{j=1}^{N_2} U'_{ij} S'_{ij}(x, y)}{\sum_{i=1}^{N_2} \sum_{j=1}^{N_2} S_{ij}(x, y) + \sum_{i=1}^{N_2} \sum_{j=1}^{N_2} S'_{ij}(x, y)}$$

[0102] 式中, N_2 为液体空间4内的液体超声换能器的个数;

[0103] S408:基于气液二相分布场的二值特性,对 $g(x, y)$ 进行二值化处理,公式如下:

$$[0104] \quad g'(x, y) = \begin{cases} 1 & g(x, y) \geq 0.5 \\ 0 & g(x, y) < 0.5 \end{cases}$$

[0105] 当 $g'(x, y) = 0$ 时,表明像素点 (x, y) 处为液体,当 $g'(x, y) = 1$ 时表明像素点 (x, y) 处为气体,进而得到锅炉内气液二相分布场。

[0106] 参见图10所示,本发明还提供了一种锅炉内温度场分布的检测方法,包括如下步骤:

[0107] A1:提供一种锅炉内温度场分布的检测装置,检测装置包括:设于锅炉内管壁上的多个液体超声换能器1和气体超声换能器2,至少部分液体超声换能器1和气体超声换能器2交替布置,且液体超声换能器1和气体超声换能器2位于同一平面上;

[0108] A2:激励液体超声换能器1和气体超声换能器2发射和接收超声波信号,处理所有液体超声换能器1和气体超声换能器2接收到的超声波信号,得到液体超声换能器1和气体超声换能器2超声波信号从发射到接收的飞行时间;

[0109] A3:计算锅炉内气体空间3和液体空间4的交界面;

[0110] A4:细分内插直线声道:参见图11和图12所示,测量所有液体超声换能器1和气体超声换能器2对应的直线声道与管壁切线的夹角,在相邻的两个液体超声换能器1、相邻的两个气体超声换能器2之间对应细分内插多条直线声道,并计算内插的直线声道上超声波信号的平均飞行时间 t ,公式如下:

$$[0111] \quad \begin{cases} t = S(\alpha) = t_{v-1} \cdot (1-u) + t_v \cdot u - \frac{1}{6} S''(\alpha_{v-1})(2u-3u^2+u^3)h_v^2 - \frac{1}{6} S''(\alpha_v)(u-u^3)h_v^2 \\ \frac{1}{6} S''(\alpha_{v-1})h_v - \frac{1}{3} S''(\alpha_v)(h_v+h_{v+1}) + \frac{1}{6} S''(\alpha_{v+1})h_{v+1} = \frac{t_{v+1}-t_v}{h_{v+1}} - \frac{t_v-t_{v-1}}{h_v} \\ S''(\alpha_1) = 0 \\ S''(\alpha_{V_0}) = 0 \end{cases}$$

[0112] 式中, $h_v = \alpha_v - \alpha_{v-1}$, $u = (\alpha - \alpha_{v-1}) / h_v$, $\alpha_{v-1} < \alpha < \alpha_v$, $v = 1, 2, \dots, V_0$, α 为第 v 个声道和第 $v-1$ 个声道之间的内插声道与管壁切线的夹角, α_v 为第 v 声道与管壁切线的夹角, α_{v-1} 为第 $v-1$ 声道与管壁切线的夹角, $S''(\alpha_j)$ 为拟合曲线 $S(\alpha)$ 的二阶导数, V_0 为所有液体超声换能器1和气体超声换能器2对应的直线声道的个数;

[0113] A5:建立气体空间3的温度场到直线声道平均飞行时间的投影方程:根据锅炉内气体空间3和液体空间4的交界面位置得到内插后气体空间3内直线声道总数为 M_g ,将气体空间3划分为 N_g 个像素点,第 r 个像素点的温度记为 T_r ,气体空间3的温度场到直线声道平均飞行时间的投影方程为:

$$[0114] \quad AX_g = t_g$$

[0115] 式中, $\mathbf{t}_g = (t_1, t_2, \dots, t_{M_g})^T$, $\mathbf{X}_g = (x_1, x_2, \dots, x_{N_g})^T$, $x_r = 1/\sqrt{T_r}$, 系统矩阵

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1N_g} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{M_g 1} & \cdots & a_{M_g N_g} \end{bmatrix}, \quad a_{rs} = l_{rs} \sqrt{T_0} / c_{g0}, \quad s=1, 2, \dots, M_g, r=1, 2, \dots, N_g, l_{rs} \text{ 为第 } s \text{ 个直线}$$

声道与第 r 个像素点的相交长度, c_{g0} 为 0°C 时空气声速, $T_0 = 273.15\text{K}$. t_{M_g} 为第 M_g 个直线声道的平均飞行时间;

[0116] A6: 求解投影方程中气体空间3各像素点的温度: 根据已知的系统矩阵 \mathbf{A} 和向量 \mathbf{t}_g , 采用迭代法求解 \mathbf{X}_g , 计算公式如下:

$$[0117] \quad \mathbf{X}_g^{(b+1)} = \mathbf{X}_g^{(b)} + \lambda \mathbf{A}^T (\mathbf{t}_g - \mathbf{A} \mathbf{X}_g^{(b)})$$

[0118] 式中, \mathbf{A}^T 为系统矩阵 \mathbf{A} 的转置, λ 为迭代步长, $\mathbf{X}_g^{(b+1)}$ 与 $\mathbf{X}_g^{(b)}$ 分别为第 $b+1$ 步和第 b 步的迭代结果;

[0119] 当 $\|\mathbf{X}_g^{(b+1)} - \mathbf{X}_g^{(b)}\|^2$ 小于预设值时, 迭代结束, 得到 \mathbf{X}_g , 进而得到气体空间3中每个像素点处的温度, 公式如下:

$$[0120] \quad T_r = \frac{1}{[x_r^{(b+1)}]^2}$$

[0121] 式中, $r=1, 2, \dots, N_g$, T_r 为第 r 个像素点的温度;

[0122] A7: 建立液体空间4的温度场到直线声道平均飞行时间的投影方程: 根据锅炉内气体空间3和液体空间4的交界面位置得到内插后液体空间4内直线声道总数为 M_w , 将液体空间4划分为 N_w 个像素点, 第 r' 个像素点的温度记为 $T_{r'}$, 得到液体空间4的温度场到直线声道平均飞行时间的投影方程为:

$$[0123] \quad \mathbf{B} \mathbf{X}_w = \mathbf{t}_w$$

$$[0124] \quad \text{式中 } \mathbf{t}_w = (t_1, t_2, \dots, t_{M_w})^T, \quad \mathbf{X}_w = (x'_1, x'_2, \dots, x'_{N_w})^T,$$

$$[0125] \quad x_{r'} = 1 / [c_{w0} + p(T_{r'} - T_0) + q(T_{r'} - T_0)^2],$$

$$[0126] \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_{11} & \cdots & b_{1N_w} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{M_w 1} & \cdots & b_{M_w N_w} \end{bmatrix}, \quad b_{r's'} = l_{r's'}, \quad s'=1, 2, \dots, M_w, r'=1, 2, \dots, N_w, l_{r's'} \text{ 为第}$$

s' 个直线声道与第 r' 个像素点的相交长度, c_{w0} 为 0°C 时水中的声速, $T_0 = 273.15\text{K}$, t_{M_w} 为第 M_w 个直线声道的平均飞行时间; $T_0 = 273.15\text{K}$, c_{w0} 为 0°C 时水中的声速, p, q 为已知常数;

[0127] A8: 求解投影方程中液体空间4各像素点的温度: 根据已知的系统矩阵 \mathbf{B} 和向量 \mathbf{t}_w , 采用迭代法求解 \mathbf{X}_w , 计算公式如下:

$$[0128] \quad \mathbf{X}_w^{(b'+1)} = \mathbf{X}_w^{(b')} + \lambda' \mathbf{B}^T (\mathbf{t}_w - \mathbf{B} \mathbf{X}_w^{(b')})$$

[0129] 式中, \mathbf{B}^T 为系统矩阵 \mathbf{B} 的转置, λ' 为迭代步长, $\mathbf{X}_w^{(b'+1)}$ 与 $\mathbf{X}_w^{(b')}$ 分别为第 $b'+1$ 步和第 b' 步的迭代结果;

[0130] 当 $\|\mathbf{X}_w^{(b'+1)} - \mathbf{X}_w^{(b')}\|^2$ 小于预设值时, 迭代结束, 得到 \mathbf{X}_w , 进而得到液体空间4中每个像素点处的温度, 公式如下:

$$[0131] \quad T_{r'} = -\frac{p + \sqrt{p^2 - 4q(c_{w0} - 1/x_{r'})}}{2q} + T_0$$

[0132] 式中, $r' = 1, 2, \dots, N_w$, $T_{r'}$ 为第 r' 个像素点处的温度。

[0133] 本发明实施例中的锅炉内气液二相分布场及温度场分布的检测装置,一方面,既可适用于管壁不导电的情况,也可以管壁导电的情况,另一方面,既可适用于管壁透光的情况,也可以管壁不透光的情况,适用范围广。

[0134] 本发明不局限于上述实施方式,对于本技术领域的普通技术人员来说,在不脱离本发明原理的前提下,还可以做出若干改进和润饰,这些改进和润饰也视为本发明的保护范围之内。本说明书中未作详细描述的内容属于本领域专业技术人员公知的现有技术。

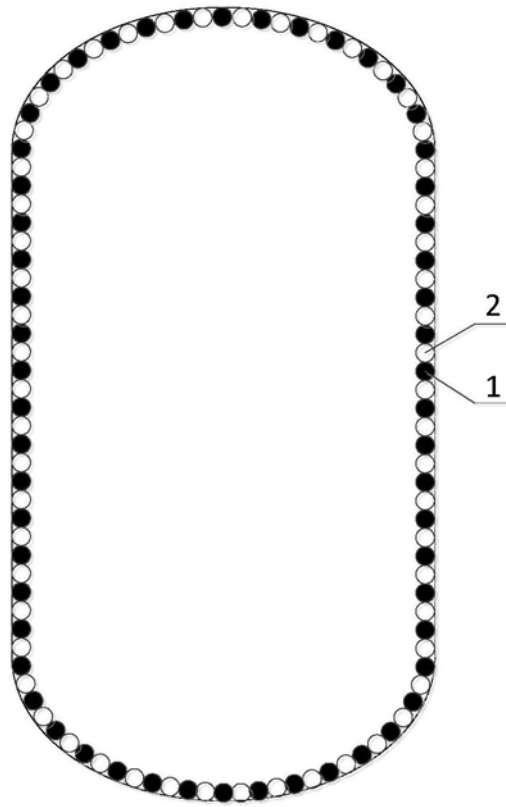


图1

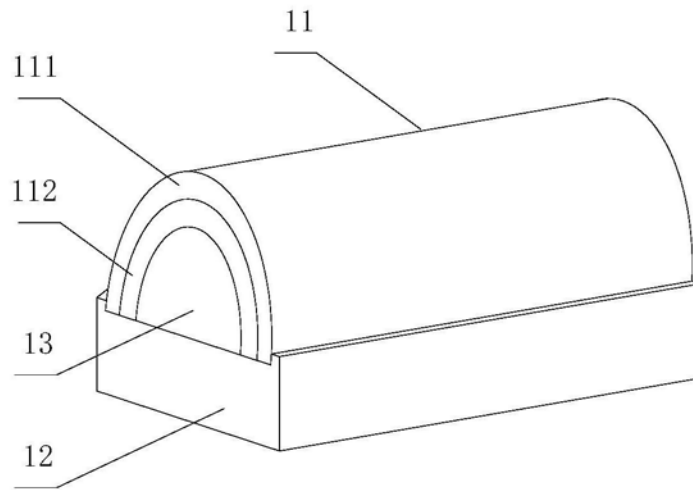


图2

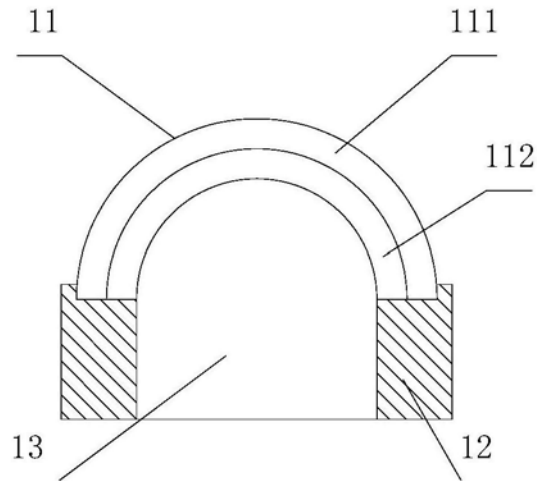


图3

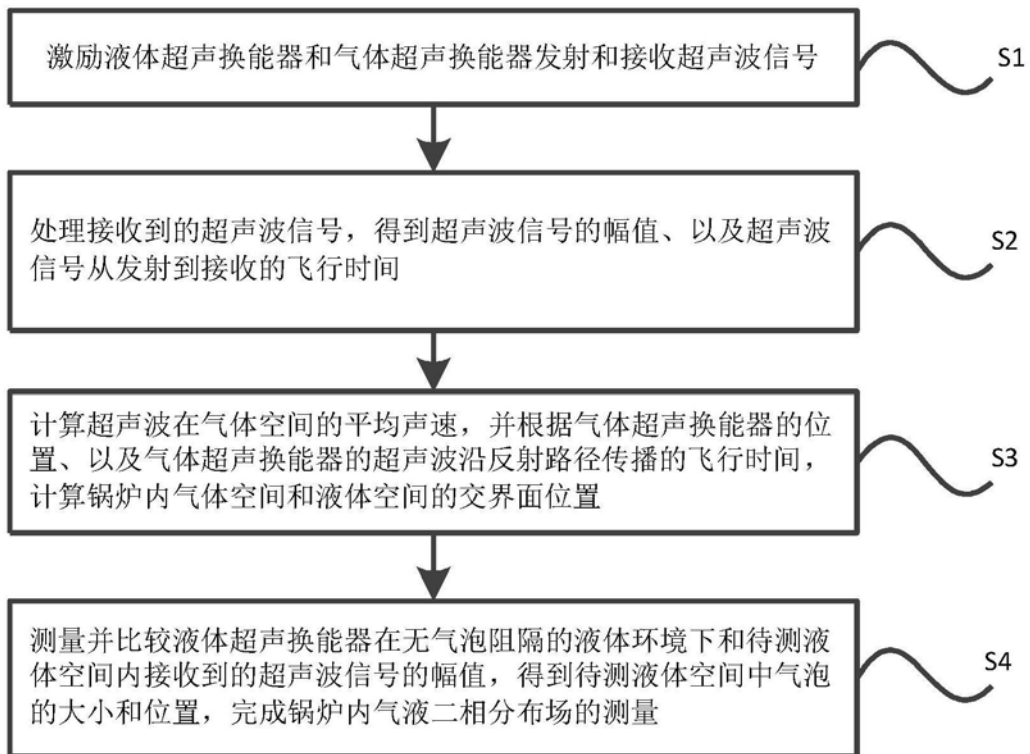


图4

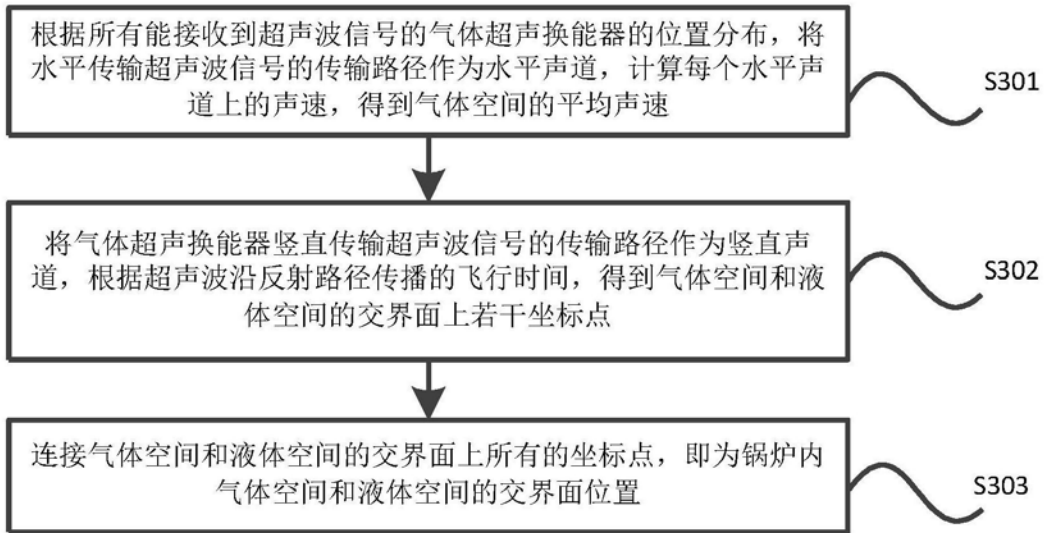


图5

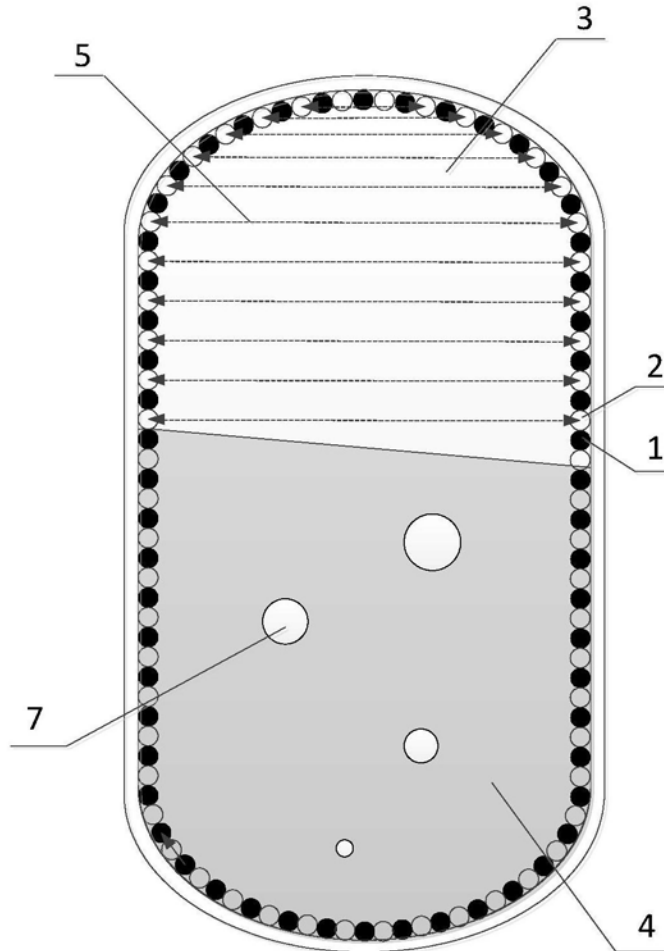


图6

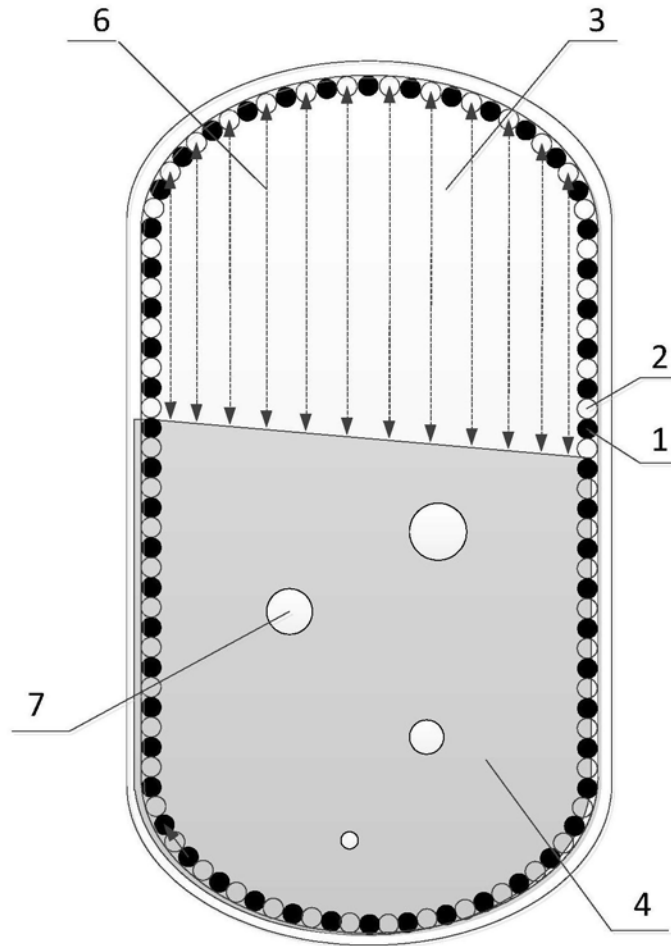


图7

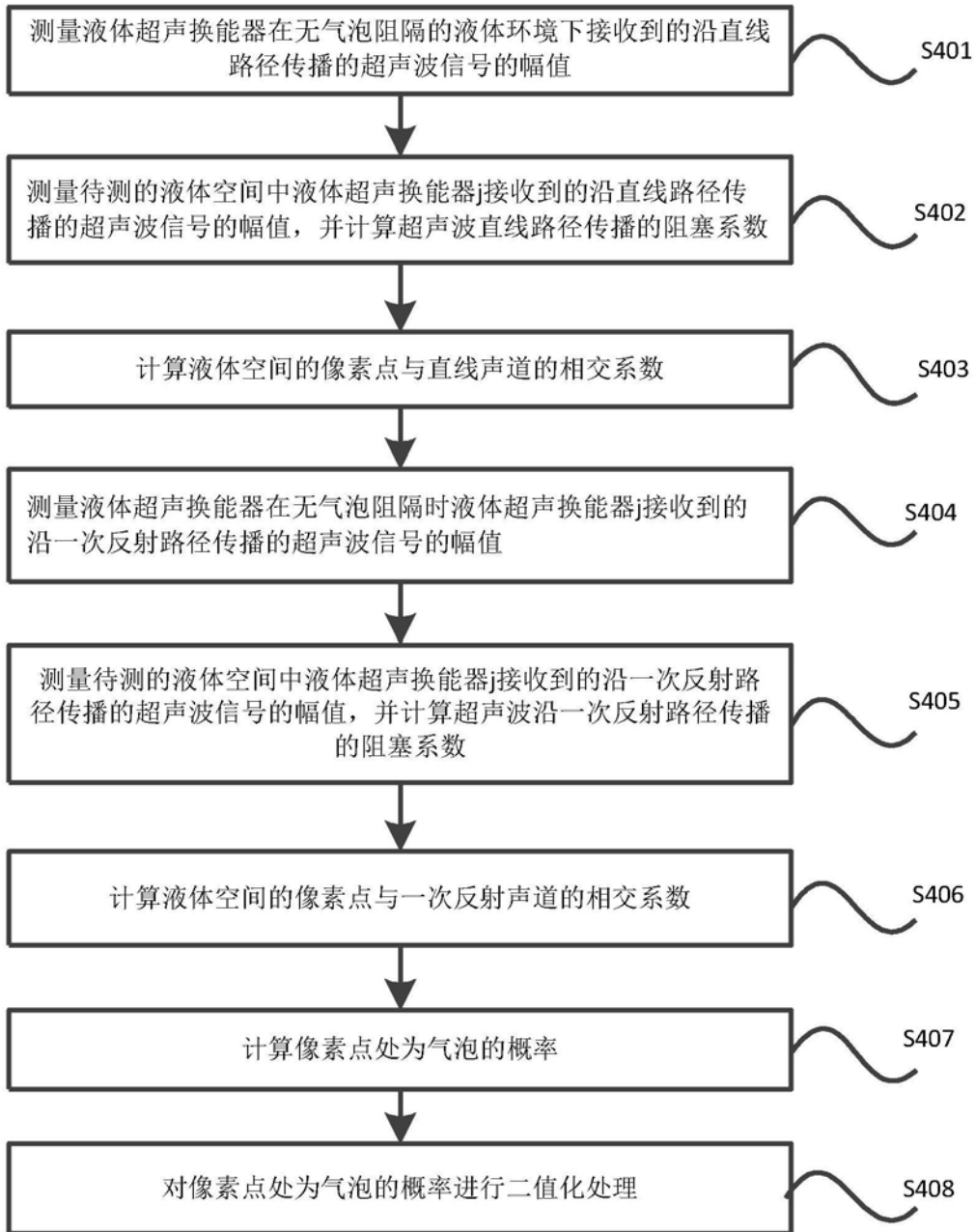


图8

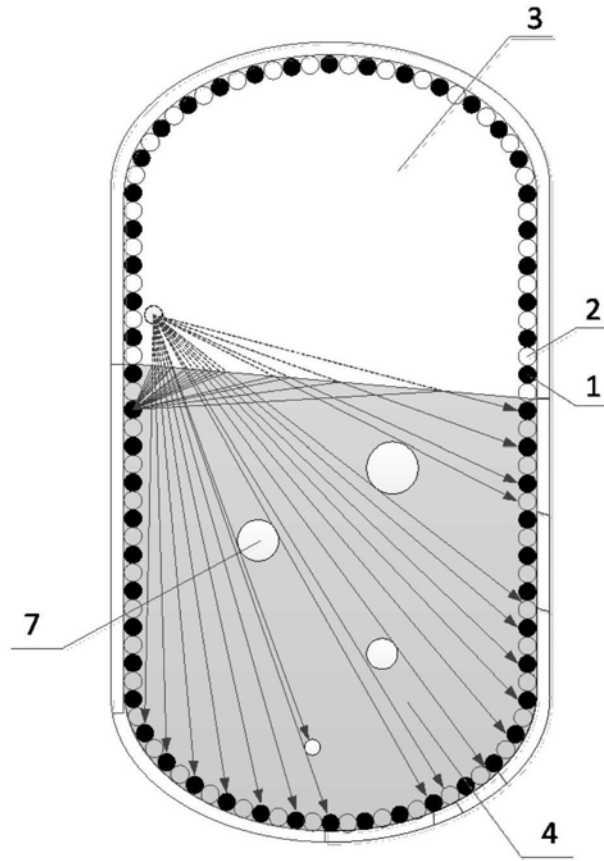


图9

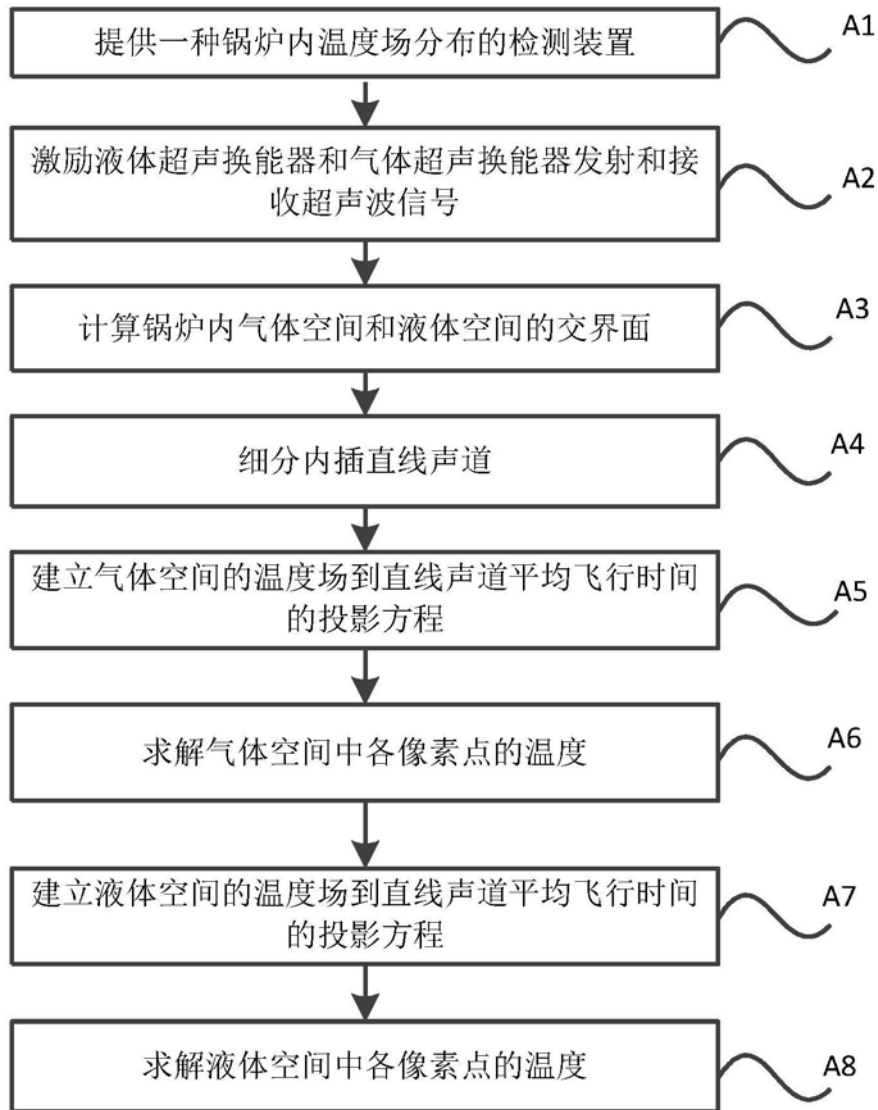


图10

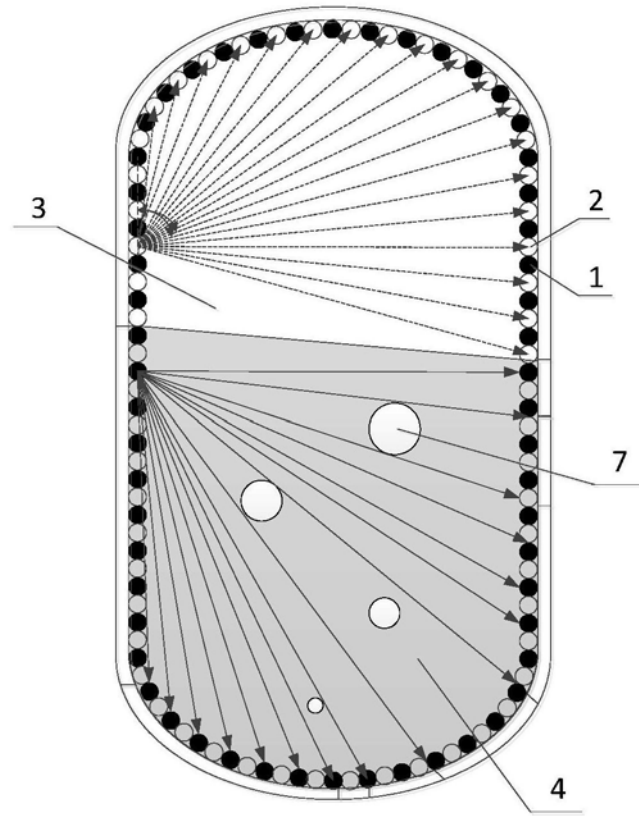


图11

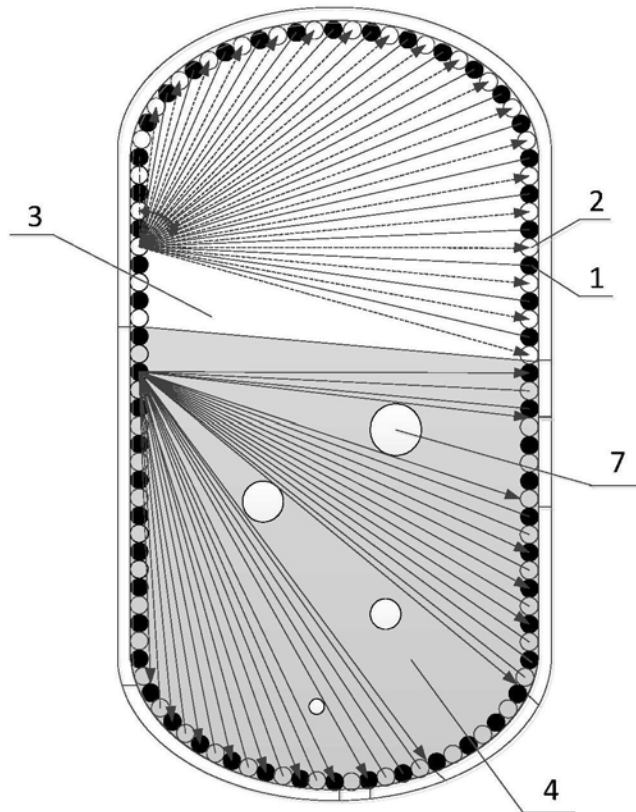


图12