



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 113939735 B

(45) 授权公告日 2024.09.24

(21) 申请号 201980097302.6

松本实

(22) 申请日 2019.06.13

(74) 专利代理机构 北京集佳知识产权代理有限公司 11227

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 113939735 A

专利代理师 胡乃锐

(43) 申请公布日 2022.01.14

(51) Int.Cl.

G01N 29/50 (2006.01)

(85) PCT国际申请进入国家阶段日
2021.12.08

(56) 对比文件

JP H10277042 A, 1998.10.20

JP 2018044876 A, 2018.03.22

(86) PCT国际申请的申请数据
PCT/JP2019/023485 2019.06.13

审查员 任向远

(87) PCT国际申请的公布数据
W02020/250378 JA 2020.12.17

(73) 专利权人 杰富意钢铁株式会社
地址 日本东京都

(72) 发明人 寺田一贵 松井穰 大谷义则

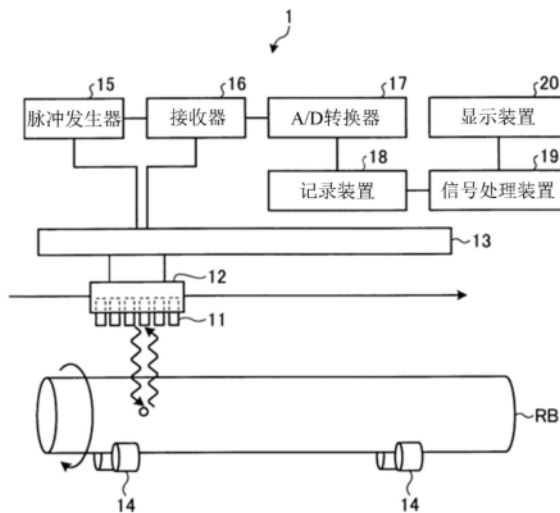
权利要求书3页 说明书15页 附图14页

(54) 发明名称

超声波探伤方法、超声波探伤装置、以及钢材制造方法

(57) 摘要

本发明涉及超声波探伤方法、超声波探伤装置、钢材制造设备列、钢材制造方法以及钢材品质保证方法。本发明的超声波探伤方法包括：接收步骤，一边使检查材料与超声波探头的位置关系变化一边在超声波探头中接收多个缺陷信号；决定步骤，在检查材料与超声波探头的各位置关系中，计算缺陷信号的接收声压与基准位置处的缺陷信号的接收声压之比作为接收声压比，并基于计算出的接收声压比，决定检查材料的各深度位置处的孔径合成处理中的合成幅度；以及检查步骤，根据所决定的合成幅度而使用多个缺陷信号来执行孔径合成处理，由此检查检查材料的内部。



1. 一种超声波探伤方法, 该超声波探伤方法从超声波探头向检查材料发送超声波信号, 在超声波探头中将在所述检查材料的内部被反射的超声波信号作为缺陷信号进行接收, 由此检查所述检查材料的内部,

所述超声波探伤方法的特征在于, 包括:

接收步骤, 一边使所述检查材料与所述超声波探头的位置关系变化一边在超声波探头中接收多个缺陷信号;

决定步骤, 在所述检查材料与所述超声波探头的各位置关系中, 计算缺陷信号的接收声压与基准位置处的缺陷信号的接收声压之比作为接收声压比, 并基于计算出的接收声压比, 来决定检查材料的各深度位置处的孔径合成处理中的合成幅度; 以及

检查步骤, 根据所决定的合成幅度而使用多个缺陷信号来执行孔径合成处理, 由此检查所述检查材料的内部,

所述接收声压比通过进行孔径合成处理而得到, 并由以下所示的公式 (18) 表示, 该孔径合成处理为对在假定缺陷位置 P_p 从 $-n_1 \Delta \theta$ 旋转至 $n_2 \Delta \theta$ 的范围内取得的缺陷信号乘以延迟时间并进行加法平均的处理,

[公式18]

$$S = \sum_{n=-n_1}^{n_2} \frac{R(n\Delta\theta)}{n_1 + n_2 + 1} \quad \dots (18)$$

$R(n \Delta \theta)$ 表示从假定缺陷位置 P_p 旋转了 $n \Delta \theta$ 的位置处的接收声压比, $\Delta \theta$ 表示每次旋转的角度间距,

所述决定步骤包括根据所述接收声压比的变化率来计算基于孔径合成处理的缺陷信号的 S/N 比的变化率, 将缺陷信号的 S/N 比的变化率成为规定值以上的合成幅度决定为孔径合成处理中的合成幅度的步骤。

2. 根据权利要求 1 所述的超声波探伤方法, 其特征在于,

所述决定步骤包括在所述超声波探头为圆形的超声波探头的情况下, 利用以下所示的公式 (1) 以及公式 (2) 而使用超声波信号的指向角 ψ 来计算接收声压比 R , 在所述超声波探头为矩形的超声波探头的情况下, 利用以下所示的公式 (1) 以及公式 (3) 而使用超声波信号的指向角 ψ 来计算接收声压比 R 的步骤, 其中, 公式 (2) 以及公式 (3) 中的参数 m 为根据指向角 ψ 而决定的系数, J_1 表示贝塞尔函数,

[公式1]

$$R = Dc^2(\psi) \dots (1)$$

[公式2]

$$Dc(\psi) = \frac{2J_1(m)}{m} \quad \dots (2)$$

[公式3]

$$Dc(\psi) = \frac{\sin m}{m} \quad \dots (3)。$$

3. 根据权利要求 1 所述的超声波探伤方法, 其特征在于,

所述检查步骤包括使用以下所示的公式(4)、(5),用通过孔径合成处理而得到的缺陷信号A除以将N+1部位的接收声压比 R_n 进行加法平均而得的孔径合成后接收声压比S,由此修正缺陷信号A的强度的步骤,其中 $n=0 \sim N$,

[公式4]

$$B = \frac{A}{S} \quad \dots (4)$$

[公式5]

$$S = \sum_{n=0}^N \frac{R_n}{N+1} \quad \dots (5)。$$

4. 根据权利要求2所述的超声波探伤方法,其特征在于,

所述检查步骤包括使用以下所示的公式(4)、(5),用通过孔径合成处理而得到的缺陷信号A除以将N+1部位的接收声压比 R_n 进行加法平均而得的孔径合成后接收声压比S,由此修正缺陷信号A的强度的步骤,其中 $n=0 \sim N$,

[公式4]

$$B = \frac{A}{S} \quad \dots (4)$$

[公式5]

$$S = \sum_{n=0}^N \frac{R_n}{N+1} \quad \dots (5)。$$

5. 根据权利要求1~4中的任一项所述的超声波探伤方法,其特征在于,

所述决定步骤包括如下步骤:根据所述超声波探头与内部缺陷的深度位置的位置关系来设定检查材料中的任意的超声波信号的入射范围,在所设定的超声波信号的入射范围内基于斯涅尔定律来计算超声波信号的传输路径,反复进行通过坐标计算来判定超声波信号的传输路径是否经过内部缺陷的计算,由此计算超声波信号相对于内部缺陷的各深度位置的传输路径,基于超声波信号相对于计算出的各深度位置的传输路径来计算孔径合成处理所需的多个缺陷信号的延迟时间。

6. 根据权利要求1~4中的任一项所述的超声波探伤方法,其特征在于,

所述决定步骤包括如下步骤:根据所述超声波探头与内部缺陷的深度位置的位置关系来设定检查材料中的任意的超声波信号的入射范围,在所设定的超声波信号的入射范围内反复进行判定超声波信号的入射点处的检查材料的法线与将超声波探头和超声波信号的入射点连结的线段所成的角度、以及超声波信号的入射点处的检查材料的法线与将假定缺陷位置和超声波信号的入射点连结的线段所成的角度是否满足斯涅尔定律的计算,由此计算超声波信号相对于内部缺陷的各深度位置的传输路径,基于超声波信号相对于计算出的各深度位置的传输路径来计算孔径合成处理所需的多个缺陷信号的延迟时间。

7. 一种超声波探伤装置,该超声波探伤装置从超声波探头向检查材料发送超声波信号,在超声波探头中将在所述检查材料的内部被反射的超声波信号作为缺陷信号进行接

收,由此检查所述检查材料的内部,

所述超声波探伤装置的特征在于,具备:

接收机构,一边使所述检查材料与所述超声波探头的位置关系变化一边在超声波探头中接收多个缺陷信号;

决定机构,在所述检查材料与所述超声波探头的各位置关系中,计算缺陷信号的接收声压与基准位置处的缺陷信号的接收声压之比作为接收声压比,并基于计算出的接收声压比,来决定检查材料的各深度位置处的孔径合成处理中的合成幅度;以及

检查机构,根据所决定的合成幅度而使用多个缺陷信号来执行孔径合成处理,由此检查所述检查材料的内部,

所述接收声压比通过进行孔径合成处理而得到,并由以下所示的公式(18)表示,该孔径合成处理为对在假定缺陷位置 P_p 从 $-n_1 \Delta \theta$ 旋转至 $n_2 \Delta \theta$ 的范围内取得的缺陷信号乘以延迟时间并进行加法平均的处理,

[公式18]

$$S = \sum_{n=-n_1}^{n_2} \frac{R(n\Delta\theta)}{n_1 + n_2 + 1} \quad \dots (18)$$

$R(n \Delta \theta)$ 表示从假定缺陷位置 P_p 旋转了 $n \Delta \theta$ 的位置处的接收声压比, $\Delta \theta$ 表示每次旋转的角度间距,

在所述决定机构中,根据所述接收声压比的变化率来计算基于孔径合成处理的缺陷信号的S/N比的变化率,将缺陷信号的S/N比的变化率成为规定值以上的合成幅度决定为孔径合成处理中的合成幅度。

8.一种钢材制造设备列,其特征在于,具备:

制造装置,制造钢材;和

权利要求7所述的超声波探伤装置,对通过所述制造装置制造出的所述钢材的内部进行检查。

9.一种钢材制造方法,其特征在于,包括:

制造步骤,制造钢材;和

探伤步骤,利用权利要求1~6中的任一项所述的超声波探伤方法对在所述制造步骤中制造出的钢材的内部进行探伤。

10.一种钢材品质保证方法,其特征在于,包括:

探伤步骤,利用权利要求1~6中的任一项所述的超声波探伤方法对钢材的内部进行探伤;和

品质保证步骤,根据在所述探伤步骤中得到的探伤结果而进行所述钢材的品质保证。

超声波探伤方法、超声波探伤装置、以及钢材制造方法

技术领域

[0001] 本发明涉及超声波探伤方法、超声波探伤装置、以及钢材制造方法。

背景技术

[0002] 圆棒体的内部缺陷有时在制造以该圆棒体为材料的机械部件时成为破裂的起点，从而在制造后使机械部件的强度、寿命降低。因此，以往以来进行对圆棒体的内部进行超声波探伤，并评价圆棒体的内部缺陷的操作。在以往的圆棒体的超声波探伤装置中，使垂直用以及斜角用的单一的超声波探头沿圆棒体的周向以及轴向相对移动，由此进行圆棒体的全面探伤。然而，在对于超声波探头使用非集束探测器的情况下，越是从超声波探头向远方离开则超声波信号就越是扩散，因此在圆棒体的内部被反射的超声波信号（以下，将该信号称为缺陷信号）的强度变小。另一方面，在对于超声波探头使用集束探测器的情况下，焦点附近处的缺陷信号的强度变大，但若远离焦点则超声波信号扩散，因此缺陷信号的强度变小。基于这种背景，在专利文献1中记载了，一边使超声波探头进行扫描一边接收缺陷信号，对于接收到的多个缺陷信号设定与其接收位置相对应的延迟时间而进行孔径合成处理，由此使用小口径的超声波探头使缺陷的检测性能以及分辨率提高的方法。

[0003] 专利文献1：日本特开2005-233874号公报

[0004] 然而，在专利文献1所记载的方法中，孔径合成处理中的合成幅度恒定，因此在远离焦点位置的位置处与焦点位置相比缺陷信号的S/N比变低。并且，以往，合成幅度通过实验或者按照经验决定，但最佳的合成幅度根据超声波探头的形状、尺寸、探伤间距、探伤深度等探伤条件、检查材料的形状、尺寸而变化。因此，逐一通过实验或者按照经验决定合成幅度的负担非常大。并且，本发明的发明人详细研究时明确了以下情况，即，上述的问题不仅是在圆棒体中而且在厚板那样的矩形体中也同样存在。

发明内容

[0005] 本发明是鉴于上述课题而产生的，其目的在于提供通过不依赖于通过实验或者按照经验的决定方法而使用了通过理论决定的合成幅度的孔径合成处理，而能够在检查材料的各深度处执行高检测性能以及分辨率的超声波探伤的超声波探伤方法以及超声波探伤装置。另外，本发明的其他目的在于提供能够以高成品率制造钢材的钢材制造设备列以及钢材制造方法。并且，本发明的其他目的在于提供能够提供高品质的钢材的钢材品质保证方法。

[0006] 本发明的超声波探伤方法从超声波探头向检查材料发送超声波信号，将在上述检查材料的内部被反射的超声波信号作为缺陷信号在超声波探头中进行接收，由此检查上述检查材料的内部，上述超声波探伤方法的特征在于，包括：一边使上述检查材料与上述超声波探头的位置关系变化一边在超声波探头中接收多个缺陷信号的接收步骤；在上述检查材料与上述超声波探头的各位置关系中，计算缺陷信号的接收声压与基准位置处的缺陷信号的接收声压之比作为接收声压比，并基于计算出的接收声压比，决定检查材料的各深度位

置处的孔径合成处理中的合成幅度的决定步骤;以及根据所决定的合成幅度而使用多个缺陷信号来执行孔径合成处理,由此检查上述检查材料的内部的检查步骤。

[0007] 本发明的超声波探伤方法的特征在于,在上述发明中,上述决定步骤包括根据上述接收声压比的变化率来计算基于孔径合成处理的缺陷信号的S/N比的变化率,将缺陷信号的S/N比的变化率成为规定值以上的合成幅度决定为孔径合成处理中的合成幅度的步骤。

[0008] 本发明的超声波探伤方法的特征在于,在上述发明中,上述决定步骤包括在上述超声波探头为圆形的超声波探头的情况下,利用以下所示的公式(1)以及公式(2)并使用超声波信号的指向角 ψ 来计算接收声压比R,在上述超声波探头为矩形的超声波探头的情况下,利用以下所示的公式(1)以及公式(3)并使用超声波信号的指向角 ψ 来计算接收声压比R的步骤。其中,公式(2)以及公式(3)中的参数m为根据指向角 ψ 而决定的系数。

[0009] [公式1]

$$[0010] \quad R = Dc^2(\psi) \cdots (1)$$

[0011] [公式2]

$$[0012] \quad Dc(\psi) = \frac{2J_1(m)}{m} \cdots (2)$$

[0013] [公式3]

$$[0014] \quad Dc(\psi) = \frac{\sin m}{m} \cdots (3)$$

[0015] 本发明的超声波探伤方法的特征在于,在上述发明中,上述检查步骤包括使用以下所示的公式(4)、(5),用通过孔径合成处理而得到的缺陷信号A乘以将N点的接收声压比 R_n ($n=0 \sim N$) 进行加法平均而得的孔径合成后接收声压比S,由此修正缺陷信号A的强度的步骤。

[0016] [公式4]

$$[0017] \quad B = \frac{A}{S} \cdots (4)$$

[0018] [公式5]

$$[0019] \quad S = \sum_{n=0}^N \frac{R_n}{N+1} \cdots (5)$$

[0020] 本发明的超声波探伤方法的特征在于,在上述发明中,上述决定步骤包括根据上述超声波探头与内部缺陷的深度位置的位置关系设定检查材料中的任意的超声波信号的入射范围,在所设定的超声波信号的入射范围内基于斯涅尔定律计算超声波信号的传输路径,反复进行通过坐标计算来判定超声波信号的传输路径是否经过内部缺陷的计算,由此计算超声波信号相对于内部缺陷的各深度位置的传输路径,基于超声波信号相对于计算出的各深度位置的传输路径来计算孔径合成处理所需的多个缺陷信号的延迟时间的步骤。

[0021] 本发明的超声波探伤方法的特征在于,在上述发明中,上述决定步骤包括根据上

述超声波探头与内部缺陷的深度位置的位置关系来设定检查材料中的任意的超声波信号的入射范围,在所设定的超声波信号的入射范围内反复进行判定超声波信号的入射点处的检查材料的法线与将超声波探头和超声波信号的入射点连结的线段所成的角度、以及超声波信号的入射点处的检查材料的法线与将假定缺陷位置和超声波信号的入射点连结的线段所成的角度是否满足斯涅尔定律的计算,由此计算超声波信号相对于内部缺陷的各深度位置的传输路径,基于超声波信号相对于计算出的各深度位置的传输路径来计算孔径合成处理所需的多个缺陷信号的延迟时间的步骤。

[0022] 本发明的超声波探伤装置从超声波探头向检查材料发送超声波信号,将在上述检查材料的内部被反射的超声波信号作为缺陷信号在超声波探头中进行接收,由此检查上述检查材料的内部,上述超声波探伤装置的特征在于,具备:一边使上述检查材料与上述超声波探头的位置关系变化一边在超声波探头中接收多个缺陷信号的接收机构;在上述检查材料与上述超声波探头的各位置关系中,计算缺陷信号的接收声压与基准位置处的缺陷信号的接收声压之比作为接收声压比,并基于计算出的接收声压比,来决定检查材料的各深度位置处的孔径合成处理中的合成幅度的决定机构;根据所决定的合成幅度而使用多个缺陷信号来执行孔径合成处理,由此检查上述检查材料的内部的检查机构。

[0023] 本发明的钢材制造设备列的特征在于,具备:制造钢材的制造装置;和对通过上述制造装置制造出的上述钢材的内部进行检查的本发明的超声波探伤装置。

[0024] 本发明的钢材制造方法的特征在于,包括:制造钢材的制造步骤;和通过本发明的超声波探伤方法对在上述制造步骤中制造出的钢材的内部进行探伤的探伤步骤。

[0025] 本发明的钢材品质保证方法的特征在于,包括:通过本发明的超声波探伤方法对钢材的内部进行探伤的探伤步骤;和根据在上述探伤步骤中得到的探伤结果而进行上述钢材的品质保证的品质保证步骤。

[0026] 根据本发明的超声波探伤方法以及超声波探伤装置,通过不依赖于通过实验或者按照经验的决定方法而使用了通过理论决定的合成幅度的孔径合成处理,而能够在检查材料的各深度处执行高检测性能以及分辨率的超声波探伤。另外,根据本发明的钢材制造设备列以及钢材制造方法,能够以高成品率制造钢材。并且,根据本发明的钢材品质保证方法,能够提供高品质的钢材。

附图说明

[0027] 图1是表示本发明的第一实施方式的超声波探伤装置的结构示意图。

[0028] 图2是表示本发明的第一实施方式的孔径合成处理条件的决定的流程的流程图。

[0029] 图3是用于对本发明的第一实施方式的传输路径计算处理的一个方式进行说明的示意图。

[0030] 图4是用于对本发明的第一实施方式的传输路径计算处理的其他方式进行说明的示意图。

[0031] 图5是用于对本发明的第一实施方式的延迟时间计算处理进行说明的示意图。

[0032] 图6是表示缺陷深度与缺陷信号的S/N比之间的关系伴随合成幅度的不同而变化的一个例子的图。

[0033] 图7是用于对本发明的第一实施方式的孔径合成幅度计算处理进行说明的示意

图。

[0034] 图8是表示本发明的第一实施方式的最佳合成幅度计算处理的流程的流程图。

[0035] 图9是表示接收声压比与旋转角度之间的关系的一个例子的图。

[0036] 图10是表示基于图9所示的接收声压比的分布计算出的合成幅度与S/N比提高系数E之间的关系的图。

[0037] 图11是表示不进行本发明的信号处理而进行了超声波探伤的结果的图。

[0038] 图12是表示进行本发明的信号处理而进行了超声波探伤的结果的图。

[0039] 图13是表示本发明的第二实施方式的超声波探伤装置的结构示意图。

[0040] 图14是用于对本发明的第二实施方式的传输路径计算处理的一个方式进行说明的示意图。

[0041] 图15是用于对本发明的第二实施方式的传输路径计算处理的其他方式进行说明的示意图。

[0042] 图16是用于对本发明的第二实施方式的延迟时间计算处理进行说明的示意图。

[0043] 图17是表示模拟了合成幅度与S/N比提高系数E之间的关系的结果的图。

[0044] 图18是用于对本发明的第二实施方式的最佳合成幅度计算处理进行说明的示意图。

具体实施方式

[0045] 以下,参照附图对本发明的第一以及第二实施方式的超声波探伤装置的结构以及其动作详细地进行说明。

[0046] (第一实施方式)

[0047] [结构]

[0048] 首先,参照图1对本发明的第一实施方式的超声波探伤装置的结构进行说明。

[0049] 图1是表示本发明的第一实施方式的超声波探伤装置的结构示意图。如图1所示,本发明的第一实施方式的超声波探伤装置1是通过利用了浸水探伤法的超声波探伤方法对轧制所铸造的钢片而制造的圆棒体RB进行超声波探伤的装置。该超声波探伤装置1具备多个超声波探头11、探头12、底座13、旋转驱动装置14、脉冲发生器15、接收器16、A/D转换器17、记录装置18、信号处理装置19以及显示装置20作为主要结构元件。

[0050] 本发明的超声波探伤装置具备接收机构,该接收机构一边使检查材料与超声波探头的位置关系变化一边在超声波探头中接收缺陷信号。在上述图1所示的超声波探伤装置1中,接收器16、A/D转换器17以及记录装置18对应于接收机构。并且,本发明的超声波探伤装置具备决定机构,该决定机构在检查材料与超声波探头的各位置关系中,计算缺陷信号的接收声压与基准位置处的缺陷信号的接收声压之比作为接收声压比,并基于计算出的接收声压比,决定检查材料的各深度位置处的孔径合成处理中的合成幅度。此外,本发明的超声波探伤装置具备检查机构,该检查机构根据所决定的合成幅度而使用多个缺陷信号来执行孔径合成处理由此检查检查材料的内部。在上述图1所示的超声波探伤装置1中,信号处理装置19对应于决定机构以及检查机构。

[0051] 超声波探头11配置于借助浸水探伤法中的作为介质的水而与圆棒体RB分离了规定距离的位置,在超声波探伤过程中通过从脉冲发生器15输出的脉冲信号而被激发由此将

超声波信号发送至圆棒体RB。而且,在圆棒体RB的内部传输并被反射的超声波信号(以下,表示为缺陷信号)经由超声波探头11而被接收器16接收。

[0052] 探头12具备多个超声波探头11,通过在配置于圆棒体RB的上部的底座13上进行移动而沿圆棒体RB的轴向进行扫描。一边通过旋转驱动装置14使圆棒体RB沿箭头所示的圆周方向进行旋转一边使探头12进行扫描,并利用接收器16接收缺陷信号,由此能够对圆棒体RB的整个体积进行超声波探伤。旋转驱动装置14的旋转速度以及探头12的扫描速度被设定为,圆棒体RB的整个体积充分被超声波探伤。

[0053] 由接收器16接收到的模拟形态的缺陷信号一边与从脉冲发生器15输出的脉冲信号同步一边被A/D转换器17转换为数字数据,并被保存于记录装置18。由此,圆棒体RB的整个体积的缺陷信号被保存于记录装置18。通过信号处理装置19对被保存的缺陷信号进行信号处理,信号处理结果被显示于显示装置20。存在信号处理在超声波探伤过程中对于所保存的缺陷信号随时进行的情况或全部缺陷信号被保存之后进行的情况。

[0054] 信号处理装置19执行孔径合成处理条件的决定作为一个信号处理。在孔径合成处理条件的决定中,信号处理装置19根据超声波探头11的指向角来计算缺陷信号的接收声压比,并基于计算出的接收声压比针对每个超声波探伤范围决定最佳的合成幅度。而且,信号处理装置19执行孔径合成处理作为一个信号处理。根据所决定的合成幅度进行使用了多个缺陷信号的孔径合成处理,由此检查圆棒体RB的内部,通过检测圆棒体RB的内部缺陷而对圆棒体RB的内部进行探伤。

[0055] 接下来,对本发明的超声波探伤方法进行说明。本发明的超声波探伤方法包括(I)接收步骤、(II)决定步骤以及(III)检查步骤这3个步骤。另外,按照如下顺序执行各步骤,即在(I)接收步骤之后执行(II)决定步骤,在(II)决定步骤之后执行(III)检查步骤。

[0056] 在接收步骤中,一边使检查材料与超声波探头的位置关系变化一边在超声波探头中接收多个缺陷信号。在接收步骤中,能够使用公知的超声波探头对缺陷信号的接收方法。作为一个例子,能够通过上述接收器16、A/D转换器17以及记录装置18的动作而实现。

[0057] 在决定步骤中,在检查材料与超声波探头的各位置关系中,计算缺陷信号的接收声压与基准位置处的缺陷信号的接收声压之比作为接收声压比,并基于计算出的接收声压比,决定检查材料的各深度位置处的孔径合成处理中的合成幅度。检查材料的各深度位置处的合成幅度的计算是本发明中最重要的技术。因此,稍后对合成幅度的计算方法详细地进行说明。

[0058] 在决定步骤中,此外,还计算孔径合成处理所使用的延迟时间。另外,在提高检测性能这方面希望通过决定步骤针对每个缺陷深度计算合成幅度和延迟时间。此外,延迟时间的计算能够使用公知的方法作为孔径合成处理。在本说明书中,稍后对计算所发送的超声波信号在检查体中的传输路径,并基于该计算出的传输路径进行延迟时间的决定的例子进行说明。

[0059] 在检查步骤中,对于在接收步骤中接收到的缺陷信号,根据通过决定步骤而决定的延迟时间和合成幅度来执行孔径合成处理,并基于孔径合成处理的结果检查来检查材料的内部。检查步骤中进行的孔径合成处理能够使用公知的方法。在本说明书中,稍后对进行针对通过决定步骤而决定的合成幅度所包含的多个波形,乘以同样通过决定步骤而决定的延迟时间进行累加的处理的例子进行说明。

[0060] 能够基于所得到的孔径合成处理的结果,检查检查材料内部,通过获知检查材料内部的状态而进行探伤。作为能够进行探伤的检查材料内部的状态的一个例子,基于源自缺陷的反射信号的强度或接收时间等,而举出有缺陷的有无、缺陷位置、缺陷尺寸等。所得到的孔径合成处理的结果的输出方法只要基于结果的利用目的等而适当地决定即可,但针对位置(宽度方向、轧制方向、深度、厚度等)以波形或者图像的形式进行输出的话可视性也高,因而优选。

[0061] 通过本发明的超声波探伤方法改善噪声与缺陷信号之比(S/N比),因此能够提高检测性能。

[0062] [孔径合成处理条件的决定]

[0063] 参照图2对在决定步骤中决定孔径合成处理条件即合成幅度和延迟时间时的信号处理装置19的动作进行说明。此外,在决定步骤中,对延迟时间的决定所使用的计算超声波信号的传输路径的方法的例子进行说明。这里,传输路径为检查体中的超声波信号的传输路径。根据需要,也可以为检查体中和介质中的超声波信号的传输路径。另外,以下,也对计算缺陷信号的接收声压与合成幅度的决定所使用的基准位置处的缺陷信号的接收声压之比亦即接收声压比的方法的例子进行说明。

[0064] 图2是表示本发明的第一实施方式的孔径合成处理条件的决定的流程的流程图。孔径合成处理条件的决定不仅有在超声波探伤前进行的情况,还有如基于超声波信号对圆棒体RB的厚度测量那样在超声波探伤过程中基于所得到的值而开始超声波探伤之后进行的情况。

[0065] 孔径合成处理条件的决定按照探伤条件输入步骤(S1)、传输路径计算步骤(S2)、延迟时间计算步骤(S3)、接收声压比计算步骤(S4)以及最佳合成幅度计算步骤(S5)的顺序执行。将检查体作为圆棒体RB对各步骤详细地进行说明。

[0066] 在步骤S1的处理中,信号处理装置19取得圆棒体RB的尺寸、超声波探头11的尺寸以及形状、测定间距、与圆棒体RB的位置关系、超声波探伤范围等超声波探伤条件。此外,超声波探伤条件不仅有在超声波探伤前取得的情况,还有在超声波探伤过程中或超声波探伤后取得的情况。由此,步骤S1的处理结束,孔径合成处理条件的决定进入步骤S2的处理。

[0067] 在步骤S2的处理中,信号处理装置19使用在步骤S1的处理中取得的超声波探伤条件并根据斯涅尔定律对从超声波探头11向圆棒体RB射入而经过假定缺陷位置的超声波信号的传输路径进行计算(传输路径计算处理)。之后对该传输路径计算处理的详细情况进行叙述。由此,步骤S2的处理结束,孔径合成处理条件的决定进入步骤S3的处理。

[0068] 在步骤S3的处理中,信号处理装置19相对于成为基准的缺陷信号计算其他多个缺陷信号在各接收位置处的延迟时间(延迟时间计算处理)。之后对该延迟时间计算处理的详细情况进行叙述。由此,步骤S3的处理结束,孔径合成处理条件的决定进入步骤S4的处理。

[0069] 在步骤S4的处理中,信号处理装置19计算圆棒体RB与超声波探头11的各位置关系中的缺陷信号的接收声压比(接收声压比计算处理)。之后对该接收声压比计算处理的详细情况进行叙述。由此,步骤S4的处理结束,孔径合成处理条件的决定进入步骤S5的处理。

[0070] 在步骤S5的处理中,信号处理装置19基于在步骤S4的处理中计算出的接收声压比,决定圆棒体RB的各深度位置处在孔径合成处理中的最佳的合成幅度。由此,步骤S5的处理结束,一系列的孔径合成处理条件的决定结束。

[0071] <传输路径计算处理>

[0072] 接下来,参照图3、图4对步骤S2的传输路径计算处理详细地进行说明。

[0073] 为了通过孔径合成处理得到高S/N比的缺陷信号,而希望准确计算合成的各缺陷信号的延迟时间。特别是在对圆棒体RB之类的具有曲面形状的钢材进行超声波探伤的情况下,由于在曲面上的折射现象而超声波信号的传输路径大幅度变化,因此希望准确计算合成的各缺陷信号的延迟时间。因此,在本实施方式中,基于超声波探头11以及假定缺陷位置的坐标,满足斯涅尔定律的基础上计算从超声波探头11向圆棒体RB射入并经过假定缺陷位置的超声波信号的传输路径。

[0074] 以下,参照图3以及图4对本发明的第一实施方式的传输路径计算处理的一个方式以及其他方式进行说明。

[0075] 图3是用于对本发明的第一实施方式的传输路径计算处理的一个方式进行说明的示意图。以下,将超声波探头11的位置表示为P,将假定缺陷位置表示为 P_f ,将圆棒体RB的中心位置表示为O,将浸水探伤法中的在作为介质的水中的声速表示为 V_w ,将在圆棒体RB中的声速表示为 V_s 。另外,如图3所示,假定缺陷位置 P_f 位于以线段OR为半径的圆周上。

[0076] 在本方式中,首先,设定超声波信号的入射点X,并根据线段PX与线段OX所成的角度求出超声波信号的入射角 θ_w 。接下来,根据斯涅尔定律,超声波信号的折射角 θ_s 满足以下所示的公式(6)。因此,通过向公式(6)代入超声波信号的入射角 θ_w 而能够求出超声波信号的折射角 θ_s 。另外,还能够求出经过超声波信号的入射点X并以折射角 θ_s 进行折射的直线与以线段OR为半径的圆的交点C。因此,一边使超声波信号的入射点X变化一边探索交点C与假定缺陷位置 P_f 一致的超声波的入射点X,由此能够计算向入射点X射入并经过假定缺陷位置 P_f 的超声波信号的传输路径。

[0077] [公式6]

$$[0078] \quad \frac{\sin \theta_w}{V_w} = \frac{\sin \theta_s}{V_s} \quad \dots (6)$$

[0079] 图4是用于对本发明的第一实施方式的传输路径计算处理的其他方式进行说明的示意图。在本方式中,首先,设定超声波信号的入射点X,并根据线段PX与线段OX所成的角度求出超声波信号的入射角 θ_w 。而且,一边使超声波信号的入射点X变化一边探索线段OX与线段 P_fX 所成的角度 θ 满足以下的公式(7)所示的斯涅尔定律的角度 θ ,由此能够计算向入射点X射入并通过假定缺陷位置 P_f 的超声波信号的传输路径。

[0080] [公式7]

$$[0081] \quad \frac{\sin \theta_w}{V_w} = \frac{\sin \theta}{V_s} \quad \dots (7)$$

[0082] 此外,在上述传输路径计算处理中,仅考虑了假定缺陷位置 P_f 伴随圆棒体RB的旋转进行的移动,但在超声波探头11沿轴向进行扫描的情况下,希望考虑超声波探头11的轴向的移动量来计算超声波信号的传输路径。另外,基本上是基于圆棒体RB的尺寸、探伤条件而开始超声波探伤之前进行上述传输路径计算处理,但在有由于圆棒体RB的表面形状、圆周速度的不一致而超声波信号的传输路径与预先计算结果较大不同的可能性的情况下,希望基于在超声波探伤过程中得到的信息实时计算超声波信号的传输路径。

[0083] <延迟时间计算处理>

[0084] 接下来,参照图5对步骤S3的延迟时间计算处理详细地进行说明。

[0085] 图5是用于对本发明的第一实施方式的延迟时间计算处理进行说明的示意图。如图5所示,伴随圆棒体RB的旋转而白圆圈所示的内部缺陷的位置移动,因此通过超声波探头11接收的缺陷信号的强度以及接收时间发生变化。具体而言,图5所示的第一缺陷信号RW1以及第二缺陷信号RW2分别为通过超声波探头11接收到的第一缺陷位置P1以及第二缺陷位置P2处的源自缺陷的超声波信号的反射信号。这里,若将浸水探伤法中的在作为介质的水中的声速表示为 V_w ,将在圆棒体RB中的声速表示为 V_s ,则第一缺陷信号RW1的传输时间T1由以下所示的公式(8)表示,第二缺陷信号RW2的传输时间T2由以下所示的公式(9)表示,传输时间T1与传输时间T2之差亦即延迟时间 ΔT 由以下所示的公式(10)表示。

[0086] [公式8]

$$[0087] \quad T1 = 2 \left(\frac{Lw}{Vw} + \frac{Ls}{Vs} \right) \quad \dots (8)$$

[0088] [公式9]

$$[0089] \quad T2 = 2 \left(\frac{Lw'}{Vw} + \frac{Ls'}{Vs} \right) \quad \dots (9)$$

[0090] [公式10]

$$[0091] \quad \Delta T = T1 - T2 \dots (10)$$

[0092] 这里,相对于成为基准的缺陷信号计算其他多个缺陷信号在各接收位置处的延迟时间而合成多个缺陷信号,由此随机的噪声相互抵消,因此缺陷信号的S/N比被改善。此外,在以第二缺陷信号RW2为基准的情况下,第一缺陷信号RW1以公式(10)所示的延迟时间 ΔT 进行延迟而累加。由此,随机的噪声相互抵消,相位一致的缺陷信号相互加强,因此与孔径合成处理前相比缺陷信号的S/N比变高。另外,针对每个超声波探头11的位置、圆棒体RB的深度位置分别计算延迟时间而进行孔径合成处理,由此无论是在圆棒体RB内的任何深度存在缺陷的情况下都能够以高S/N比检测缺陷信号。

[0093] <接收声压比计算处理以及最佳合成幅度计算处理>

[0094] 接下来,参照图6~图9对图2所示的步骤S4的接收声压比计算处理以及步骤S5的最佳合成幅度计算处理详细进行说明。

[0095] 缺陷信号的强度根据超声波探头11与内部缺陷的位置关系而变化。具体而言,在远距离声场中,超声波探头11的中心轴上存在缺陷的情况下缺陷信号的最大强度变强,随着超声波探头11的中心轴与经过内部缺陷的超声波的传输路径所成的角变大而缺陷信号的强度逐渐变小。为了通过孔径合成处理得到高S/N比的缺陷信号,需要在缺陷信号具有足够的强度的范围内使多个缺陷信号进行累加,在使强度较小的缺陷信号进行了累加的情况下S/N比的提高效果变小。另外,从超声波探头11输出的超声波信号一边扩散一边传输,因此越是远距离则其声压分布就越是扩大地形成。此时,在声压分布内存在缺陷的情况下,能够得到足够的强度的缺陷信号。即,由于超声波信号的声压分布和声压分布内的缺陷的移动位置而具有足够的强度的合成幅度(累加的缺陷信号数)发生变化。因此,为了通过孔径合成处理得到高S/N比的缺陷信号,需要基于内部缺陷的位置以及探伤条件来适当地设定

合成幅度。为此,在本实施方式中,基于缺陷信号的接收声压比针对每个内部缺陷的深度位置计算适当的合成幅度。

[0096] 图6是表示缺陷深度与缺陷信号的S/N比之间的关系伴随合成幅度的不同而变化的一个例子的图。具体而言,图6示出了对在直径 ϕ 169mm的圆棒钢的内部深度5mm、21mm、42mm、63mm的位置处加工的直径0.2mm的4个人工缺陷进行探伤,通过合成幅度 2.4° 、合成幅度 8.4° 、合成幅度 22.8° 以及本发明进行了孔径合成处理的实验结果。在本实验中,作为超声波探头11,使用了直径6.4mm、频率5MHz的圆形超声波探头。另外,合成幅度 2.4° 、合成幅度 8.4° 、合成幅度 22.8° 的曲线表示对于内部深度不同的4个人工缺陷信号,分别以恒定的合成幅度(2.4° 、 8.4° 、 22.8°)进行了孔径合成处理的结果。其中,合成幅度 2.4° 、 8.4° 、 22.8° 分别为通过本发明决定的内部深度5mm、21mm、42mm处的最佳的合成幅度。

[0097] 如图6所示,对于深度5mm的缺陷信号,在为合成幅度 2.4° 时S/N比变得最大,对于深度21mm的缺陷信号,在为合成幅度 8.4° 时S/N比变得最大,对于深度42mm的缺陷信号,在为合成幅度 22.8° 时S/N比变得最大。由此,可知在各缺陷深度处使S/N比形成成为最大的合成幅度不同,针对每个缺陷深度设定适当的合成幅度,由此能够在全部缺陷深度处得到最大的S/N比。实际上,在本发明中,与在全部缺陷深度处将合成幅度设定为恒定的情况相比,能够根据深度位置确认10dB以上的S/N比的提高,从而示出了本发明的有效性。

[0098] 图7是用于对本发明的第一实施方式的最佳合成幅度计算处理进行说明的示意图。如图7所示,在本实施方式中,根据通过传输路径计算处理计算出的超声波信号的传输路径计算超声波信号的指向角 ψ ,计算假定缺陷位置旋转时的缺陷信号的接收声压比的变化,根据缺陷信号的接收声压比的分布计算合成幅度。这里,将圆棒体RB的直径设为 ϕ ,将圆棒体RB的旋转速度设为 V_1 ,将圆棒体RB中的超声波的传输速度设为 V_s ,将超声波探头11的PRF设为 f ,将超声波探头11的频率设为 F ,将超声波探头11的长度设为 D (在为圆形的情况下为半径,在为矩形的情况下为边长),将超声波探头11与圆棒体RB表面之间的距离设为 W ,将浸水探伤法中的在作为介质的水中的声速设为 V_w ,将存在于超声波探头11的中心轴上的假定缺陷位置设为 P_f ,将假定缺陷位置 P_f 距圆棒体RB表面的深度设为 d ,将从假定缺陷位置 P_f 旋转移动了角度 θ 的旋转后的假定缺陷位置设为 P_f' ,将对超声波探头11的位置 P 和假定缺陷位置 P_f' 进行了传输路径计算处理的情况下的超声波信号的传输路径与超声波探头11的中心轴所成的角(指向角)设为 ψ 。

[0099] 基本上假设远距离声场进行接收声压的计算,因此假定缺陷位置 P_f 满足以下所示的公式(11)成为条件。这里,近距离声场极限距离 x_0 由以下所示的公式(12)表示。其中,在假定缺陷位置 P_f 不满足公式(11)的情况下,能够通过适应近距离声场的声压计算而计算合成幅度。

[0100] [公式11]

$$[0101] \quad W + d \frac{V_s}{V_w} = x_0 \quad \dots (11)$$

[0102] [公式12]

$$[0103] \quad x_0 = D^2 \times \frac{F}{4V_w} \quad \dots (12)$$

[0104] 在超声波探头11为圆形的情况下,来自旋转后假定缺陷位置 P_f' 处的缺陷信号的接收声压与来自假定缺陷位置 P_f 处的缺陷信号的接收声压之比(接收声压比)R能够使用指向角 ψ 并通过以下所示的公式(13)~(15)表示。其中,公式(14)所示的 J_1 表示贝塞尔函数,公式(14)、(15)所示的 m 为根据指向角 ψ 决定的系数。

[0105] [公式13]

$$[0106] \quad R = Dc^2(\psi) \cdots (13)$$

[0107] [公式14]

$$[0108] \quad Dc(\psi) = \frac{2J_1(m)}{m} \cdots (14)$$

[0109] [公式15]

$$[0110] \quad m = \frac{VwD}{F} \pi \times \sin \psi \cdots (15)$$

[0111] 另一方面,在超声波探头11为矩形形状的情况下,接收声压比R能够使用指向角 ψ 并通过公式(13)、(15)以及以下所示的公式(16)表示。此外,在超声波探头11具有不为圆形形状或矩形形状的复杂形状的情况下,也可以应用使用了实验或有限元法等的物理解析的结果来决定接收声压比R。另外,在作为检测对象的缺陷具有强指向性的情况下,有时将使公式(13)乘以缺陷的反射指向性函数而得的值作为接收声压比R。在本实施方式中,使用通过上述步骤计算出的接收声压比R来计算合成幅度。

[0112] [公式16]

$$[0113] \quad Dc(\psi) = \frac{\sin m}{m} \cdots (16)$$

[0114] 具体而言,利用超声波探头11在假定缺陷位置 P_f 每旋转角度间距 $\Delta\theta$ 时接收缺陷信号。角度间距 $\Delta\theta$ 由以下所示的公式(17)表示。

[0115] [公式17]

$$[0116] \quad \Delta\theta = \frac{V_1}{\phi f} \cdots (17)$$

[0117] 进行了在假定缺陷位置 P_f 从 $-n_1\Delta\theta$ 旋转至 $n_2\Delta\theta$ 的范围内取得的缺陷信号乘以延迟时间并进行加法平均的孔径合成处理的情况下的孔径合成后接收声压比S由以下所示的公式(18)表示。这里,在公式(18)中, $R(n\Delta\theta)$ 表示从假定缺陷位置 P_f 旋转了 $n\Delta\theta$ 的位置处的接收声压比。假定缺陷位置 P_f 并不限定在超声波探头11的中心轴上,能够与探伤条件相对应地进行设定。

[0118] [公式18]

$$[0119] \quad S = \sum_{n=-n_1}^{n_2} \frac{R(n\Delta\theta)}{n_1 + n_2 + 1} \cdots (18)$$

[0120] 若通过加法次数($N+1=n_1+n_2+1$)的加法平均而噪声成为 $1/(N+1)^{1/2}$,则相对于假

定缺陷位置 P_f 处的S/N比的孔径合成处理后的S/N比提高系数E由以下所示的公式(19)表示。

[0121] [公式19]

$$[0122] \quad E = 20 \log_{10} (S \sqrt{n_1 + n_2 + 1}) \quad \dots (19)$$

[0123] 为此,通过公式(19)设定S/N比提高系数E变为最大的合成幅度N,并进行孔径合成处理,由此能够将缺陷信号的S/N比进行最大化。另外,决定满足以下所示的公式(20)的加法次数($N+1=n_1+n_2+1$),并进行孔径合成处理,由此能够充分提高缺陷信号的S/N比。

[0124] [公式20]

$$[0125] \quad E \geq E_{\max} \times 0.7 \dots (20)$$

[0126] 此外,在超声波探伤中评价缺陷信号的情况下,不仅是S/N比,而且缺陷信号的强度也变得重要。在孔径合成处理的前后,若缺陷信号的强度大幅度变动,则无法进行准确的内部缺陷的评价。为此,希望将通过孔径合成处理而减少的强度恢复为处理前的强度。具体而言,针对孔径合成处理后的输出值A,输出使用公式(18)所示的孔径合成后接收声压比S并通过以下所示的公式(21)修正的修正输出值B,由此能够使孔径合成处理前和孔径合成处理后的缺陷信号的强度一致。通过使孔径合成处理前和孔径合成处理后的缺陷信号的强度一致,能够对于缺陷直径、缺陷长度进行定量的评价。

[0127] [公式21]

$$[0128] \quad B = \frac{A}{S} \quad \dots (21)$$

[0129] 若总结以上的处理,则最佳合成幅度计算处理如图8所示的流程图那样。图8是表示本发明的第一实施方式的最佳合成幅度计算处理的流程的流程图。如图8所示,在本实施方式的最佳合成幅度计算处理中,首先,信号处理装置19临时设定孔径合成处理中的合成幅度(步骤S51)。接下来,信号处理装置19通过使用临时设定的合成幅度和公式(18)对缺陷信号的接收声压比进行加法平均而计算孔径合成后接收声压比(接收声压比变化率)S(步骤S52)。接下来,信号处理装置19通过使用公式(19)并取孔径合成后接收声压比S与噪声的变化率之比而计算基于孔径合成处理的S/N比提高系数E(S/N比变化率)(步骤S53)。而且,信号处理装置19判断S/N比提高系数E是否满足公式(20)所示的条件等的规定的条件(步骤S54),在S/N比提高系数E满足规定的条件的情况下,信号处理装置19将在步骤S51的处理中临时设定的合成幅度决定为最佳的合成幅度(步骤S55)。另一方面,在S/N比提高系数E不满足规定的条件的情况下,信号处理装置19将最佳合成幅度计算处理返回至步骤S51的处理。

[0130] [实施例]

[0131] 通过实施例对本发明的超声波探伤方法的优化结果进行说明。在本实施例中,对设置有人工缺陷的圆棒体样本进行超声波探伤,进行基于本发明的超声波探伤方法的孔径合成处理。超声波探头使用直径6.4mm、频率5MHz的圆形超声波探头,作为圆棒体样本使用了在直径 ϕ 169mm的圆棒体内部加工有直径0.2mm的人工缺陷的样本。超声波探头和圆棒体样本通过局部浸水探伤法进行声学耦合,水距离为50mm,测定角度间距为0.6°。另外,超声波探头的近距离声场极限距离为34.5mm,比水距离50mm短,满足本手法的应用条件。

[0132] 图9是表示源自表面深度21mm、直径0.2mm的人工缺陷的缺陷信号的接收声压比与

旋转角度之间的关系图。接收声压比的实测值与计算值大体一致,从而示出了本发明手法中的接收声压比的计算的有效性。图10是表示基于图9所示的接收声压比的分布而计算出的合成幅度与S/N比提高系数E之间的关系图。其中,图10中的计算值(曲线L1)为使用图9所示的接收声压比的计算值并在将旋转角度 0° 作为中心而正负对称的合成幅度处进行了孔径合成处理的结果所得到的值。

[0133] 在图10所示的计算值的曲线L1中,S/N比提高系数E在合成幅度 8.4° 处取最大值 9.2dB ,因此设定了合成幅度N满足S/N比提高系数 $E \geq 6.4\text{dB}$ 并满足 $2.4^{\circ} \leq N \leq 21.6^{\circ}$ 时的N。另外,实测值的曲线L2与计算值的曲线L1的趋势几乎一致,在合成幅度 8.4° 处S/N比提高系数E变为最大,从而示出了本发明的合成幅度的决定方法的有效性。

[0134] 图11的(a)、(b)是表示对于表面深度 21mm 、直径 0.2mm 的人工缺陷不进行本发明的信号处理而进行了超声波探伤的结果图。图12的(a)、(b)是表示对于表面深度 21mm 、直径 0.2mm 的人工缺陷进行本发明的信号处理而进行了超声波探伤的结果图。在本实验中,计算S/N比变为最大的合成幅度,合成幅度形成为 8.4° 。如图12的(a)、(b)所示,根据本发明的信号处理,S/N比提高了 6dB ,能够以S/N比 21dB 检测直径 0.2mm 的缺陷。

[0135] (第二实施方式)

[0136] 接下来,参照图13~图18对本发明的第二实施方式的超声波探伤装置的结构以及其动作进行说明。

[0137] [结构]

[0138] 首先,参照图13对本发明的第二实施方式的超声波探伤装置的结构进行说明。

[0139] 图13是表示本发明的第二实施方式的超声波探伤装置的结构示意图。如图13所示,本发明的第二实施方式的超声波探伤装置1在(1)轧制铸造出的钢片而制造的钢板SP为检查材料这方面以及(2)钢板SP利用搬运线21以沿钢板SP的长度方向经过超声波探头11的下方的方式被搬运这方面与图1所示的本发明的第一实施方式的超声波探伤装置1的结构不同。其他方面与图1所示的本发明的第一实施方式的超声波探伤装置1的结构相同,因此以下省略其说明。

[0140] [孔径合成处理条件的决定]

[0141] 接下来,参照图14~图18对执行孔径合成处理条件的决定时的信号处理装置19的动作进行说明。此外,孔径合成处理条件的决定的整个流程与图2所示的本发明的第一实施方式的孔径合成处理条件的决定的流程相同。其中,检查材料从圆棒体RB变为钢板SP,由此传输路径计算处理、延迟时间计算处理、接收声压比计算处理以及最佳合成幅度计算处理的内容的一部分与第一实施方式中的内容不同。为此,以下,仅对上述各处理的不同点进行说明。

[0142] <传输路径计算处理>

[0143] 图14是用于对本发明的第二实施方式的传输路径计算处理的一个方式进行说明的示意图。以下,将沿钢板SP的长度方向移动的超声波探头11的位置表示为 P 、 P' ,将假定缺陷位置表示为 P_F ,将连结超声波探头11的位置 P 和假定缺陷位置 P_F 的线段与钢板SP的表面之间的交点表示为 O ,将浸水探伤法中的在作为介质的水中的声速表示为 V_w ,将在钢板SP中的声速表示为 V_s 。

[0144] 在本实施方式中,首先,设定超声波信号的入射点 X ,根据线段 $P'X$ 与线段 XY 所成的

角度求出超声波信号的入射角 θ_w 。此外,线段XY表示经过入射点X的钢板SP的法线。接下来,根据斯涅尔定律,超声波信号的折射角 θ_s 满足上述公式(6)。因此,通过向公式(6)代入超声波信号的入射角 θ_w 而能够求出超声波信号的折射角 θ_s 。另外,还能够求出经过超声波信号的入射点X并以折射角 θ_s 进行折射的直线与线段OP的交点C。因此,一边使超声波的入射点X变化一边探索交点C与假定缺陷位置 P_f 一致的超声波信号的入射点X,由此能够计算向入射点X射入并经过假定缺陷位置 P_f 的超声波信号的传输路径。

[0145] 图15是用于对本发明的第二实施方式的传输路径计算处理的其他方式进行说明的示意图。在本实施方式中,首先,设定超声波信号的入射点X,根据线段 $P'X$ 与线段XY所成的角度而求出超声波信号的入射角 θ_w 。而且,一边使超声波信号的入射点X变化一边探索线段XY与线段 P_fX 所成的角度 θ 满足上述公式(7)所示的斯涅尔定律的角度 θ ,由此能够计算向入射点X射入并经过假定缺陷位置 P_f 的超声波信号的传输路径。

[0146] <延迟时间计算处理>

[0147] 图16是用于对本发明的第二实施方式的延迟时间计算处理进行说明的示意图。如图16所示,若超声波探头11与位于假定缺陷位置 P_f 的内部缺陷的位置关系发生变化,则通过超声波探头11接收的缺陷信号的强度以及接收时间发生变化。具体而言,第三缺陷信号RW3以及第四缺陷信号RW4分别为源自在超声波探头11位于位置P4以及位置P5时接收到的缺陷的超声波的反射信号。这里,若将浸水探伤法中的在作为介质的水中的声速表示为 V_w ,将在钢板SP中的声速表示为 V_s ,则第三缺陷信号RW3的传输时间T3能够使用上述公式(8)(将T1置换为T3)进行计算,第四缺陷信号RW4的传输时间T4能够使用上述公式(9)(将T2置换为T4)进行计算,传输时间T3与传输时间T4之差亦即延迟时间 $\Delta T1$ 能够使用上述公式(10)(将 ΔT 置换为 $\Delta T1$)进行计算。

[0148] 这里,相对于成为基准的缺陷信号计算多个缺陷信号在各接收位置处的延迟时间而合成多个缺陷信号,由此随机的噪声相互抵消,因此缺陷信号的S/N比被改善。此外,在以第四缺陷信号RW4为基准的情况下,第三缺陷信号RW3以延迟时间 $\Delta T1$ 进行延迟而累加。由此,随机的噪声相互抵消,相位一致的缺陷信号相互加强,因此与信号处理前相比缺陷信号的S/N比变高。另外,针对每个超声波探头11的位置、钢板SP的深度位置分别计算延迟时间而进行孔径合成处理,由此无论是在钢板SP内的任何深度位置存在缺陷的情况下都能够以高S/N比检测缺陷信号。

[0149] <接收声压比计算处理以及最佳合成幅度计算处理>

[0150] 图17是表示模拟了合成幅度与S/N比提高系数E之间的关系的结果的图。具体而言,图17表示一边使频率5MHz、直径12.6mm的圆形超声波探头以0.05mm间距沿钢板SP的宽度方向移动一边进行板厚150mm的钢板SP的超声波探伤,模拟了对于位于深度25、50、75、100、125mm(深度25、50、75、100、125)的位置的内部缺陷进行了孔径合成处理时的合成幅度与S/N比提高系数E之间的关系的图。如图17所示,在各深度位置处使S/N比提高系数E成为最大的合成幅度不同,在全部深度位置处使合成幅度以0.8、2.6mm恒定的情况下,与在全部深度位置处分别设定最佳的合成幅度的情况相比S/N比最大减少4dB。其中,合成幅度0.8、2.6mm分别为在深度25、125mm的位置处进行孔径合成处理的情况下的合成幅度的最佳值。

[0151] 图18是用于对本发明的第二实施方式的最佳合成幅度计算处理进行说明的示意

图。在本实施方式中,根据通过传输路径计算处理计算出的超声波信号的传输路径计算超声波信号的指向角 ψ ,计算超声波探头11与缺陷的位置关系发生了变化时的缺陷信号的接收声压比的变化,根据接收声压比的分布计算合成幅度。这里,将超声波探头11的宽度方向的移动速度设为 V_1 ,将钢板SP中的声速设为 V_s ,将超声波探头11的PRF设为 f ,将超声波探头11的频率设为 F ,将超声波探头11的长度设为 D (在为圆形的情况下为半径,在为矩形的情况下为边长),将超声波探头11与钢板SP表面之间的距离设为 W ,将浸水探伤法中的在作为介质的水中的声速设为 V_w ,将存在于超声波探头11的中心轴上的假定缺陷位置设为 P_f ,将假定缺陷位置 P_f 距钢板SP表面的深度设为 d ,将从超声波探头11的初始位置 P 移动了 x 时的超声波探头11的位置设为 P' ,将针对超声波探头11的位置 P' 和假定缺陷位置 P_f 进行了传输路径计算处理的情况下的超声波信号的传输路径与超声波探头11的中心轴所成的角设为 ψ (指向角)。

[0152] 基本上假设远距离声场进行接收声压的计算,因此假定缺陷位置 P_f 满足上述公式(11)成为条件。这里,近距离声场极限距离 x_0 由上述公式(12)表示。其中,在假定缺陷位置 P_f 不满足上述公式(11)的情况下,能够通过适应近距离声场的声压计算而计算合成幅度。

[0153] 在超声波探头11为圆形的情况下,位置 P' 处的缺陷信号的接收声压与位置 P 处的缺陷信号的接收声压之比(接收声压比) R 能够使用指向角 ψ 并通过上述公式(13)~(15)表示。另一方面,在超声波探头11为矩形形状的情况下,接收声压比 R 能够使用指向角 ψ 并通过上述公式(13)、(15)、(16)表示。

[0154] 在本实施方式中,使用通过上述步骤计算出的接收声压比 R 来计算合成幅度。具体而言,利用超声波探头11在超声波探头11每移动位置 Δx 时接收缺陷信号。移动间距 Δx 由以下所示的公式(22)表示。

[0155] [公式22]

$$[0156] \quad \Delta x = \frac{V_1}{f} \quad \dots (22)$$

[0157] 进行了在超声波探头11的位置从 $-n_1 \Delta x$ 移动至 $n_2 \Delta x$ 的范围内取得的缺陷信号乘以延迟时间并进行加法平均的孔径合成处理的情况下的孔径合成后接收声压比 S 由以下所示的公式(23)表示。这里,在公式(23)中, $R(n \Delta x)$ 表示在超声波探头11从位置 P 移动了 $n \Delta x$ 的位置处的接收声压比。超声波探头11的位置 P 并不限定于超声波探头11的中心轴上,能够与探伤条件相对应地进行设定。

[0158] [公式23]

$$[0159] \quad S = \sum_{n=-n_1}^{n_2} \frac{R(n \Delta x)}{n_1 + n_2 + 1} \quad \dots (23)$$

[0160] 若假设通过加法次数($N+1 = n_1 + n_2 + 1$)的加法平均而噪声成为 $1/(N+1)^{1/2}$,则相对于超声波探头11的位置 P 处的 S/N 比的孔径合成处理后的 S/N 比提高系数 E 由上述公式(19)表示。

[0161] 为此,通过公式(19)设定 S/N 比提高系数 E 变为最大的合成幅度 N ,并进行孔径合成处理,由此能够将缺陷信号的 S/N 比进行最大化。另外,决定满足上述公式(20)的加法次数

($N+1=n_1+n_2+1$), 并进行孔径合成处理, 由此能够充分提高缺陷信号的S/N比。此外, 与第一实施方式同样, 希望将通过孔径合成处理而减少的强度修正为处理前的强度。

[0162] 以上, 对应用了本发明人所设计的发明的实施方式进行了说明, 但并不通过基于本实施方式的成为本发明的公开的一部分的表述以及附图限定本发明。例如, 也可以将本发明应用作为构成钢材制造设备列的检查装置, 在本发明的超声波探伤装置中检查通过制造装置制造出的钢材的内部进行探伤。另外, 也可以将本发明应用作为钢材制造方法所包含的检查步骤, 在制造步骤中检查制造出的钢材的内部进行探伤。在探伤步骤中, 基于检查步骤中的孔径合成处理的结果对钢材内部的缺陷进行探伤, 得到缺陷的有无、缺陷位置、缺陷尺寸等的结果。

[0163] 并且, 也可以将本发明应用于钢材品质保证方法, 检查钢材的内部进行探伤, 由此进行钢材的品质保证。具体而言, 能够在本发明中在探伤步骤中对钢材的内部进行探伤, 并根据在探伤步骤中得到的探伤结果进行钢材的品质保证。在探伤步骤中, 基于检查步骤中的孔径合成处理的结果对钢材内部的缺陷进行探伤, 得到缺陷的有无、缺陷位置、缺陷尺寸等的结果。接下来在继续的品质保证步骤中, 基于通过探伤步骤得到的与缺陷有无、缺陷位置、缺陷尺寸有关的结果, 判定制造出的钢材是否满足预先指定的基准, 由此保证钢材的品质。这样, 基于本实施方式而由本领域技术人员等设计的其他实施方式、实施例以及运用技术等全部被包含于本发明的范畴内。

[0164] 工业上的利用可行性

[0165] 根据本发明, 能够提供通过不依赖于通过实验或者按照经验的决定方法而使用了通过理论决定的合成幅度的孔径合成处理, 而能够在检查材料的各深度处执行高检测性能以及分辨率的超声波探伤的超声波探伤方法以及超声波探伤装置。另外, 根据本发明, 能够提供能够以高成品率制造钢材的钢材制造设备列以及钢材制造方法。并且, 根据本发明, 能够提供能够提供高品质的钢材的钢材品质保证方法。

[0166] 附图标记说明:

[0167] 1...超声波探伤装置; 11...超声波探头; 12...探头; 13...底座; 14...旋转驱动装置; 15...脉冲发生器; 16...接收器; 17...A/D转换器; 18...记录装置; 19...信号处理装置; 20...显示装置; RB...圆棒体。

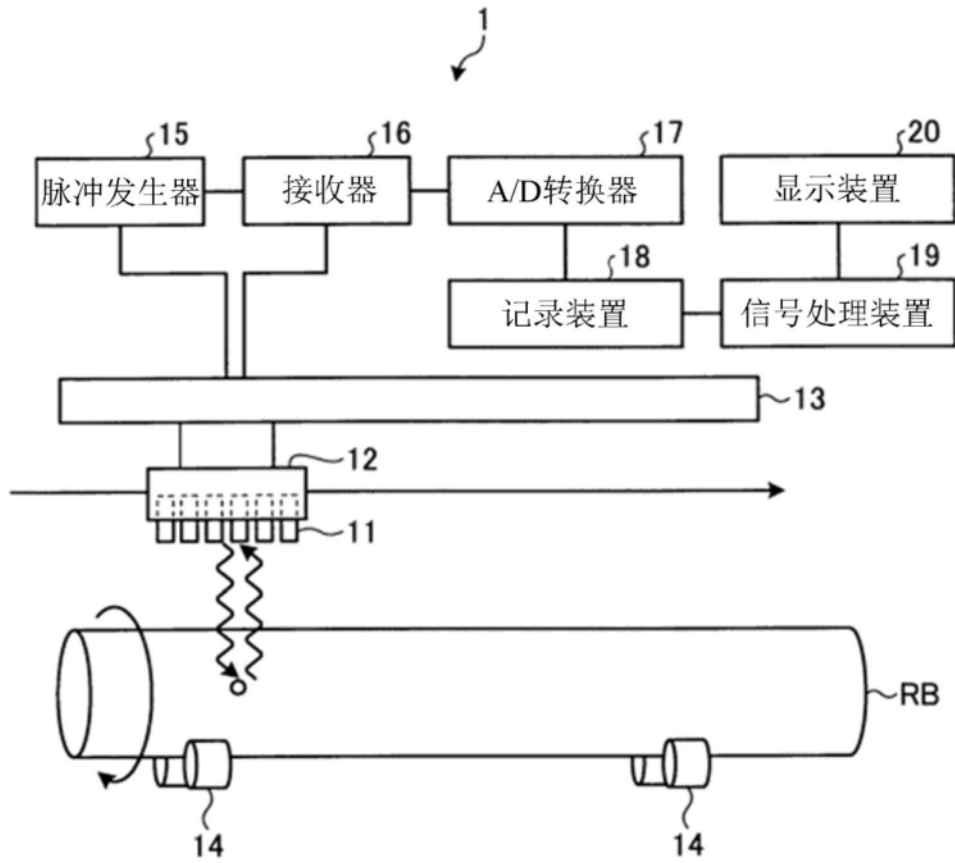


图1

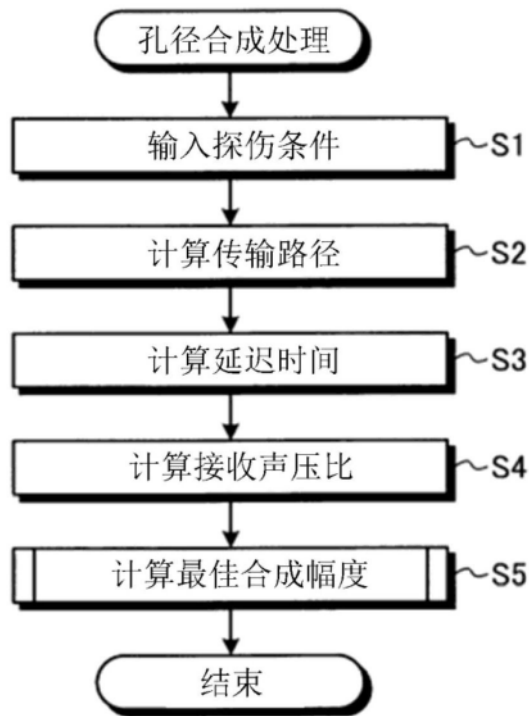


图2

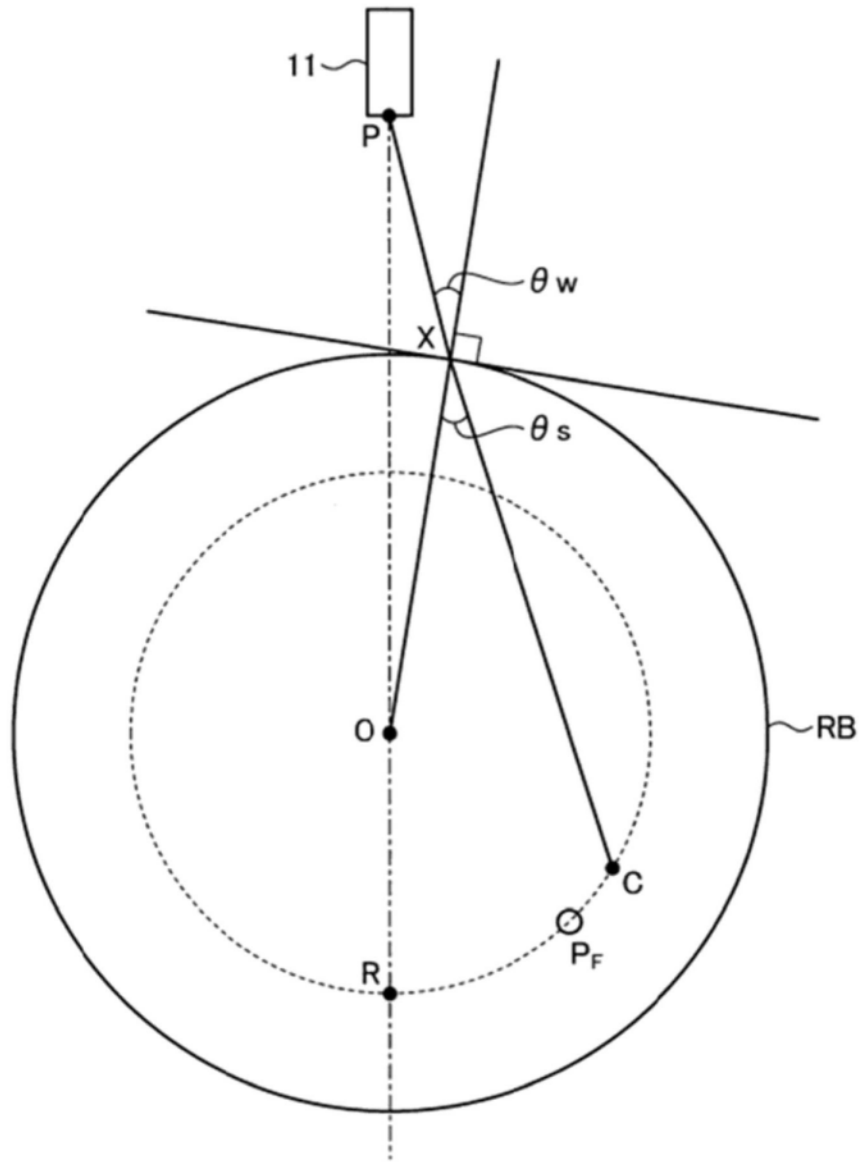


图3

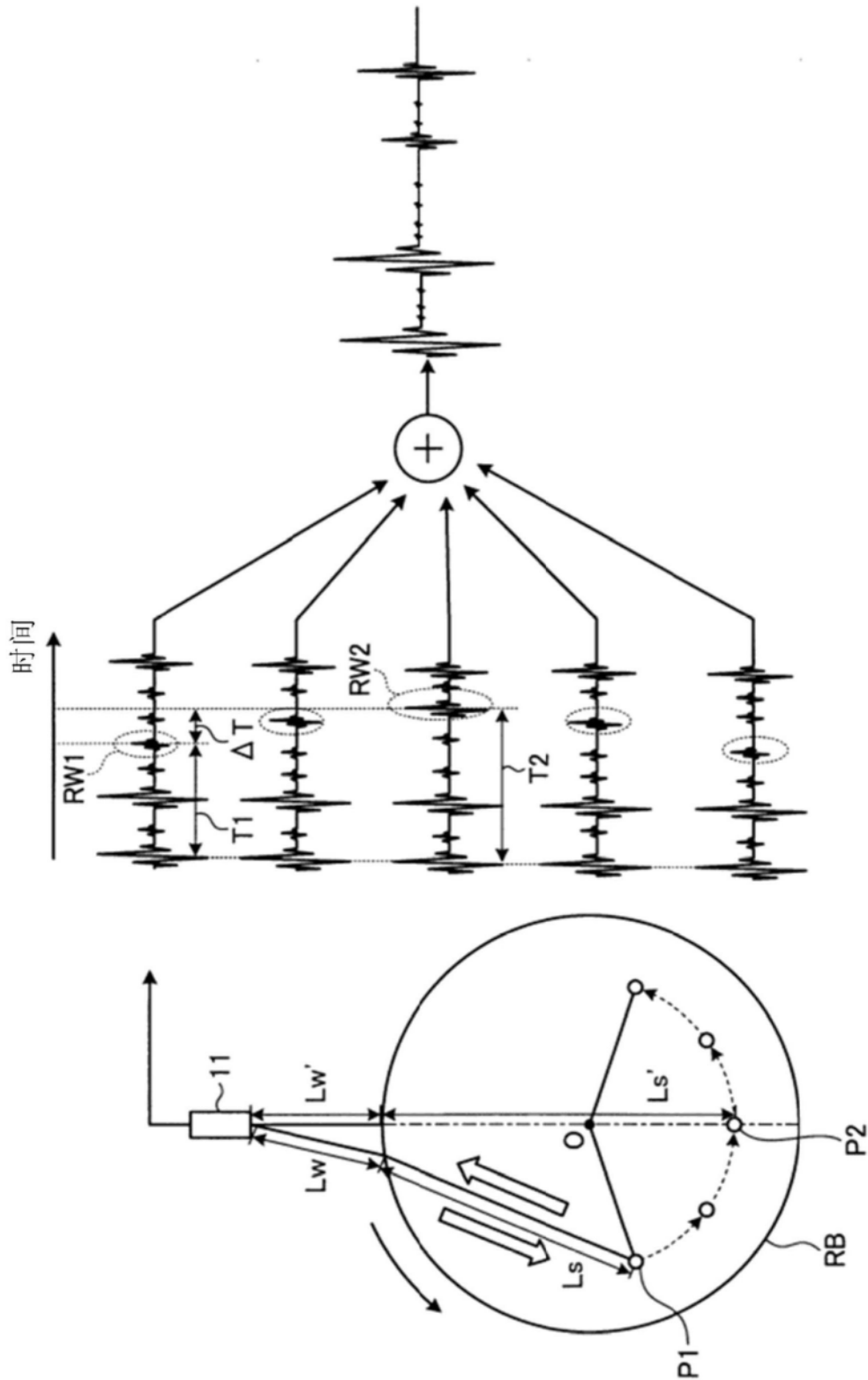


图5

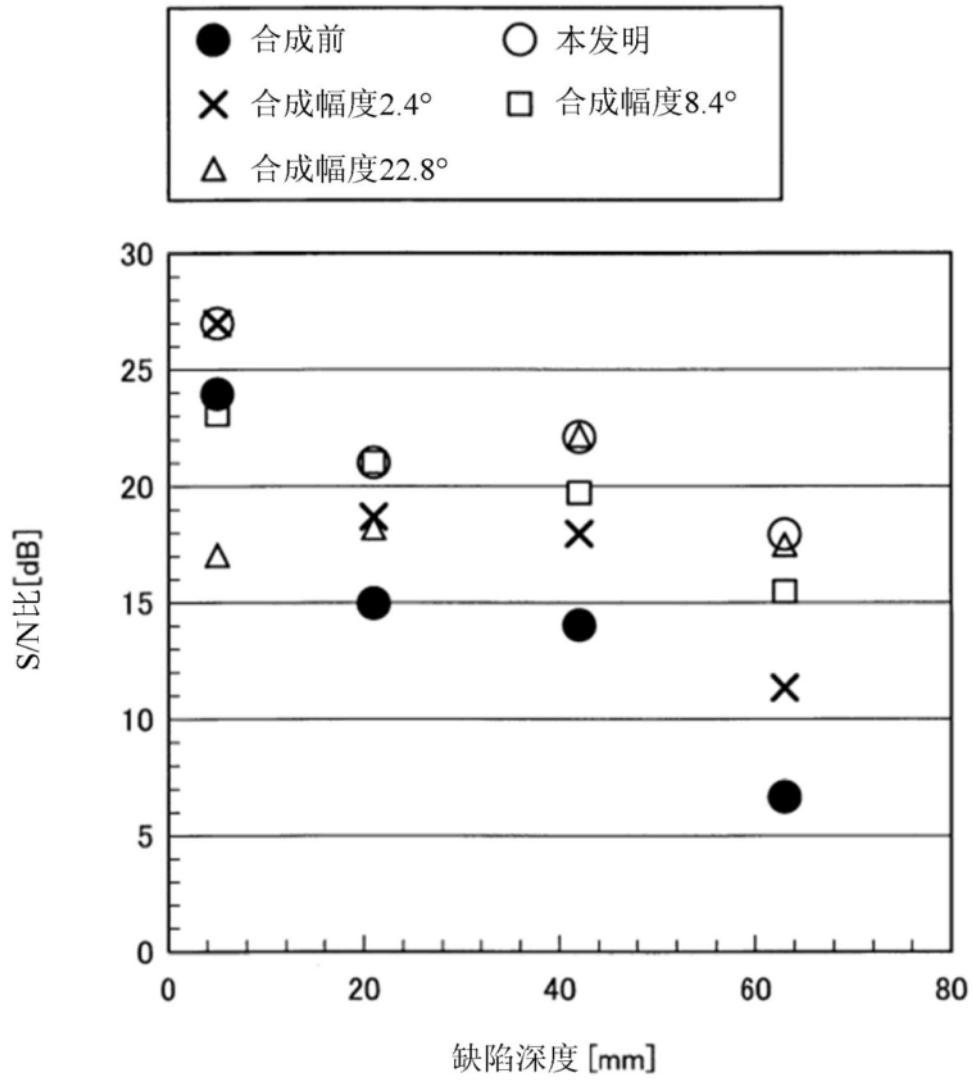


图6

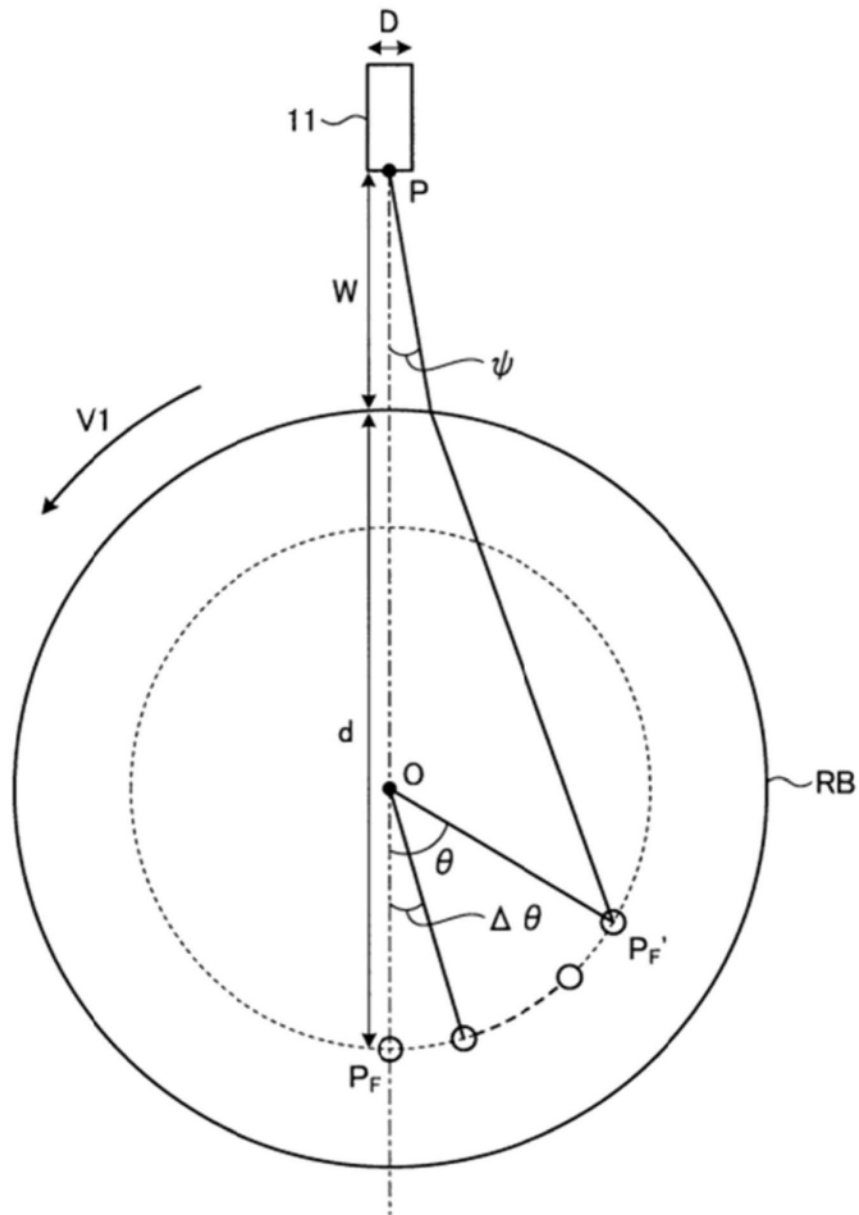


图7

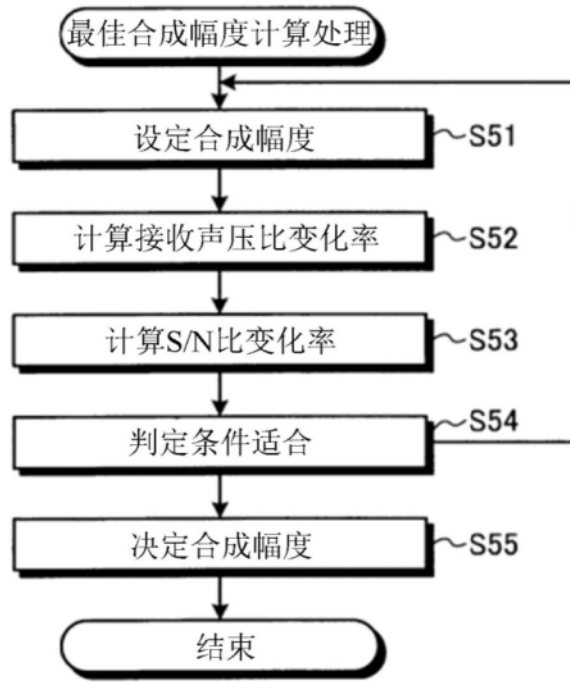


图8

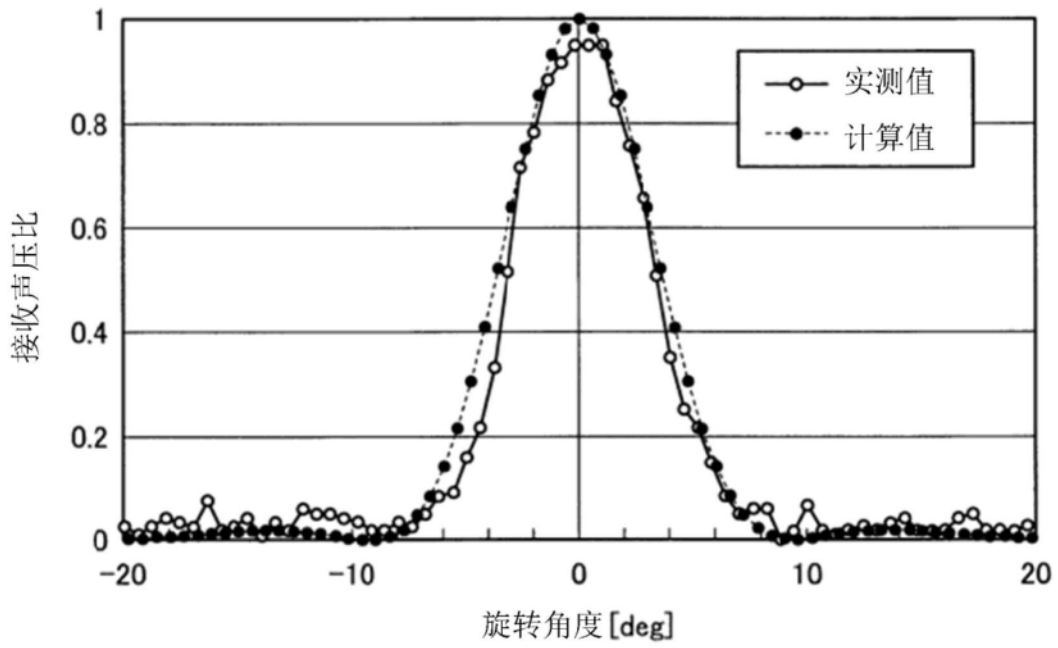


图9

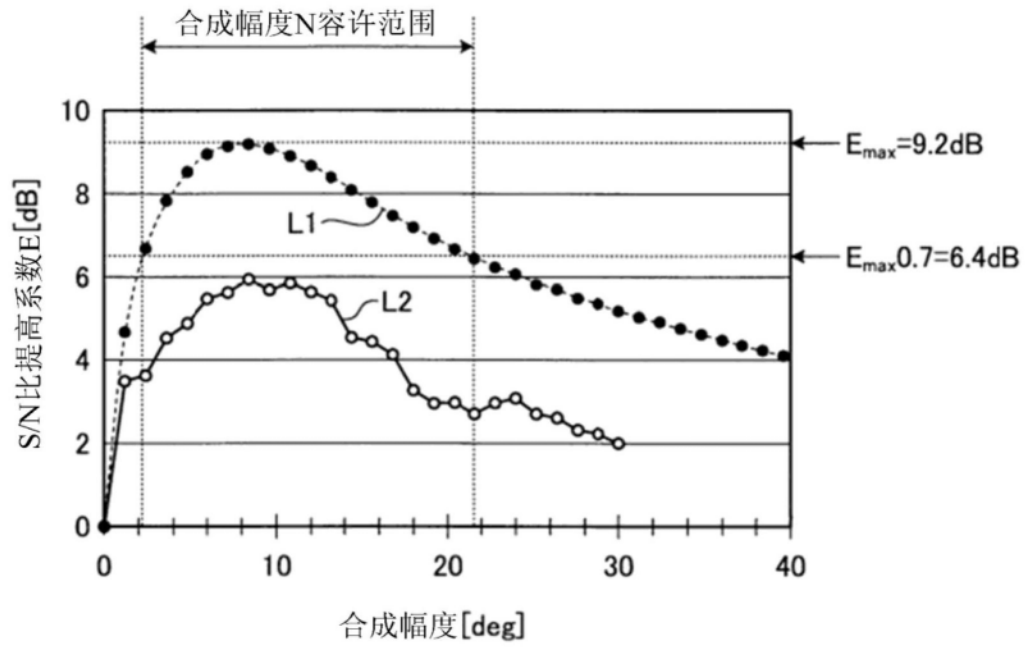


图10

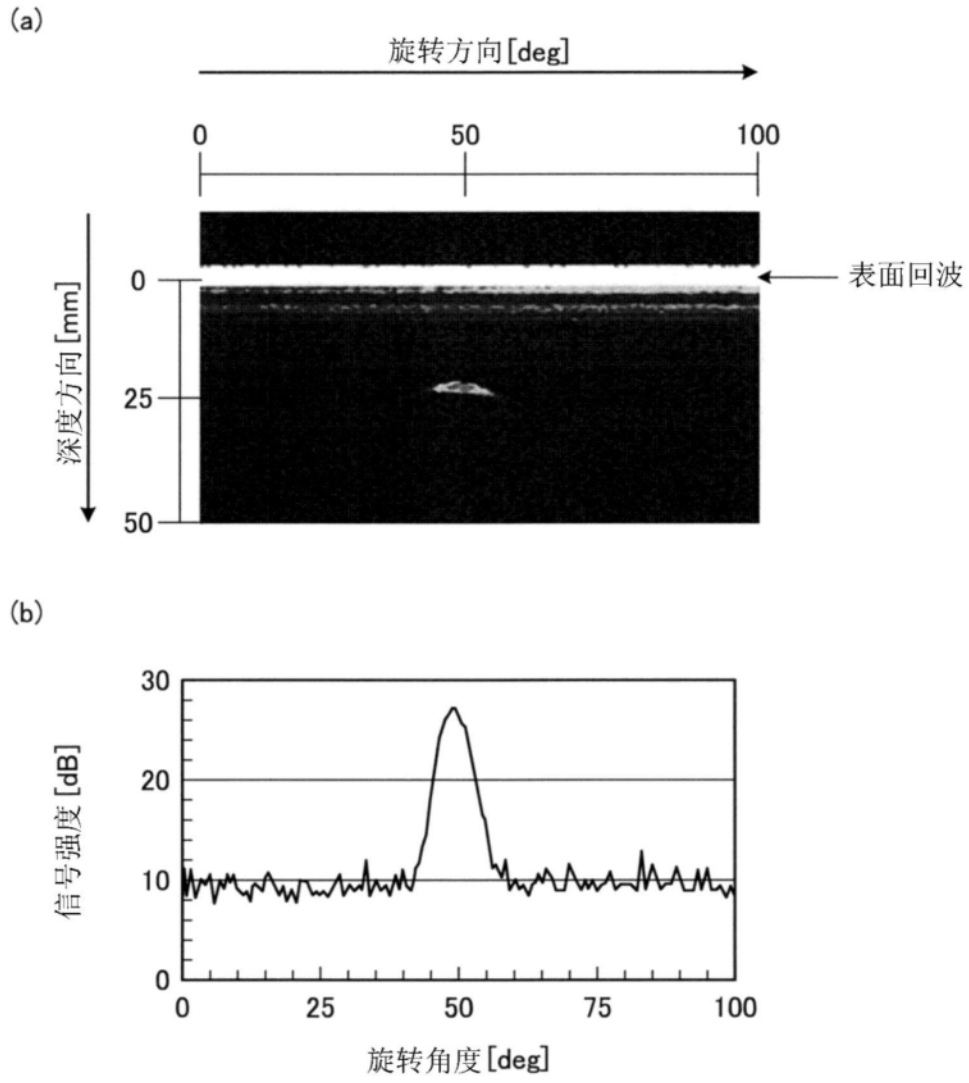


图11

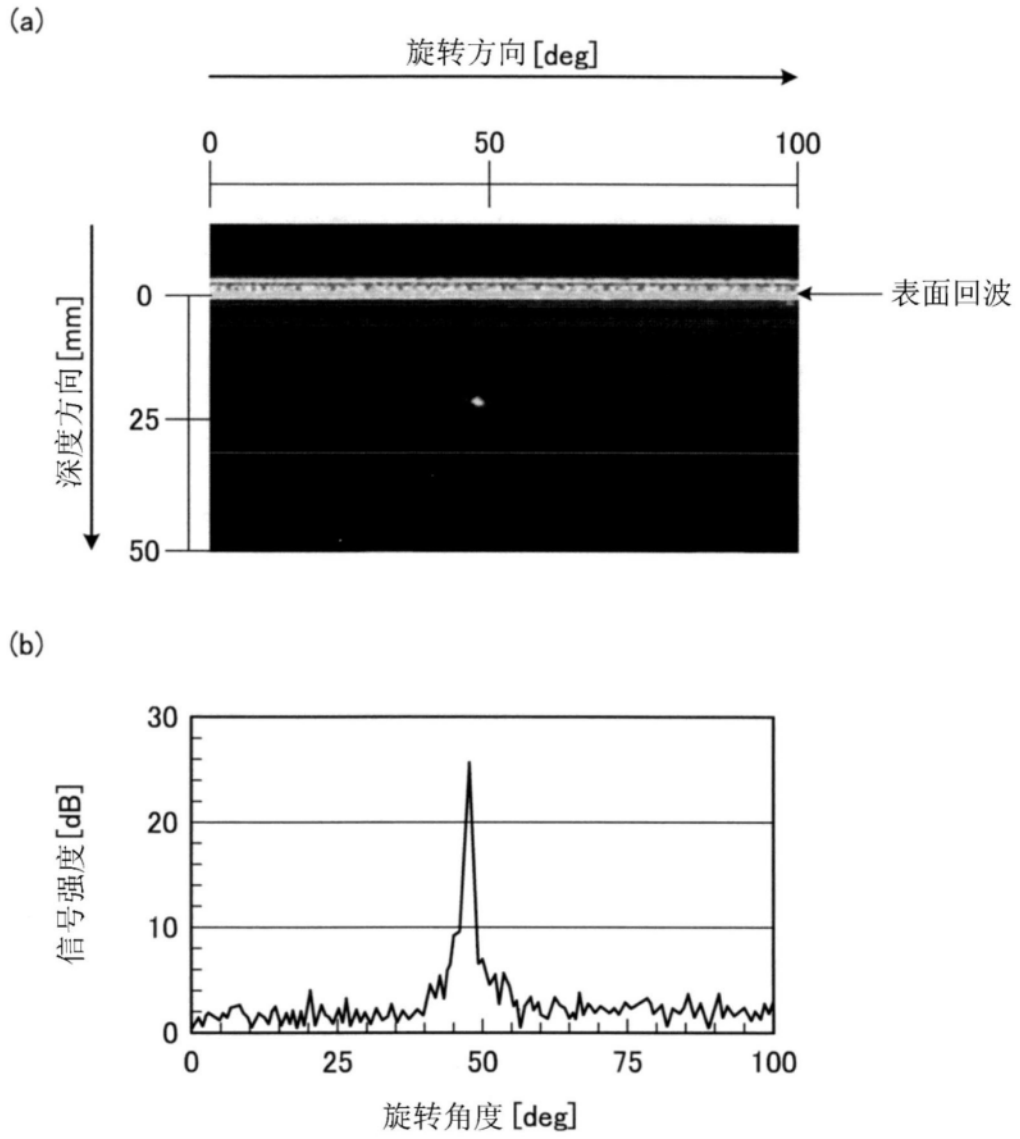


图12

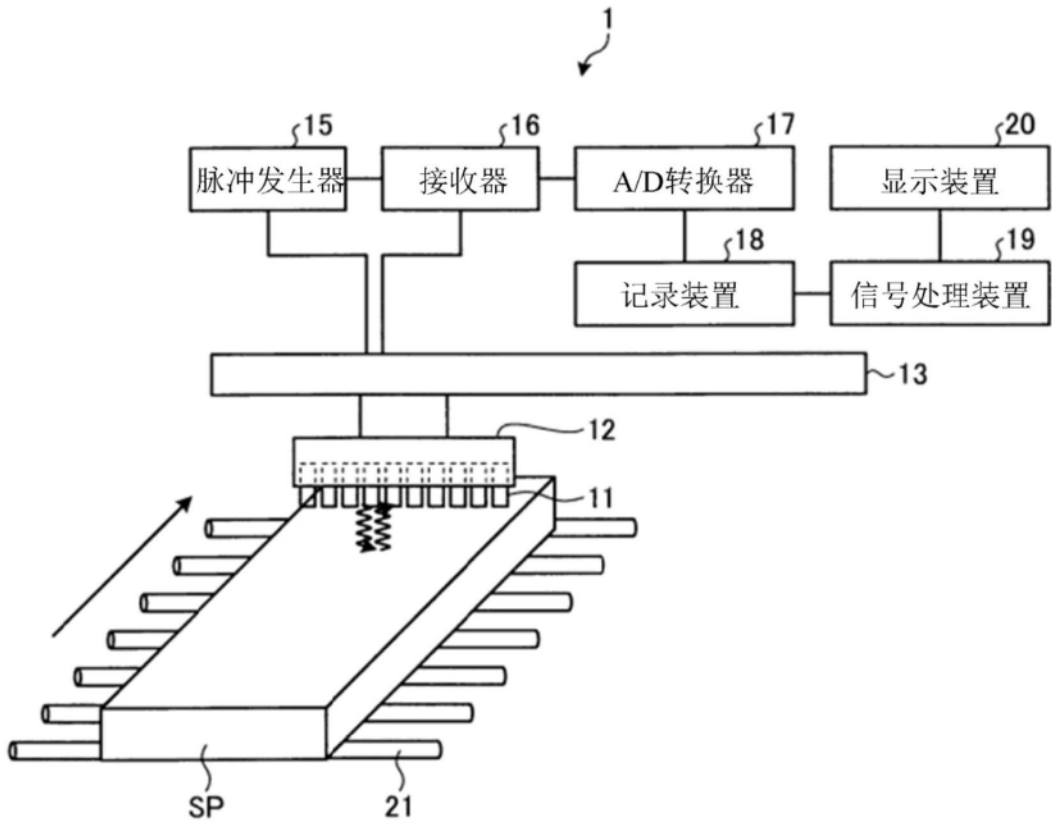


图13

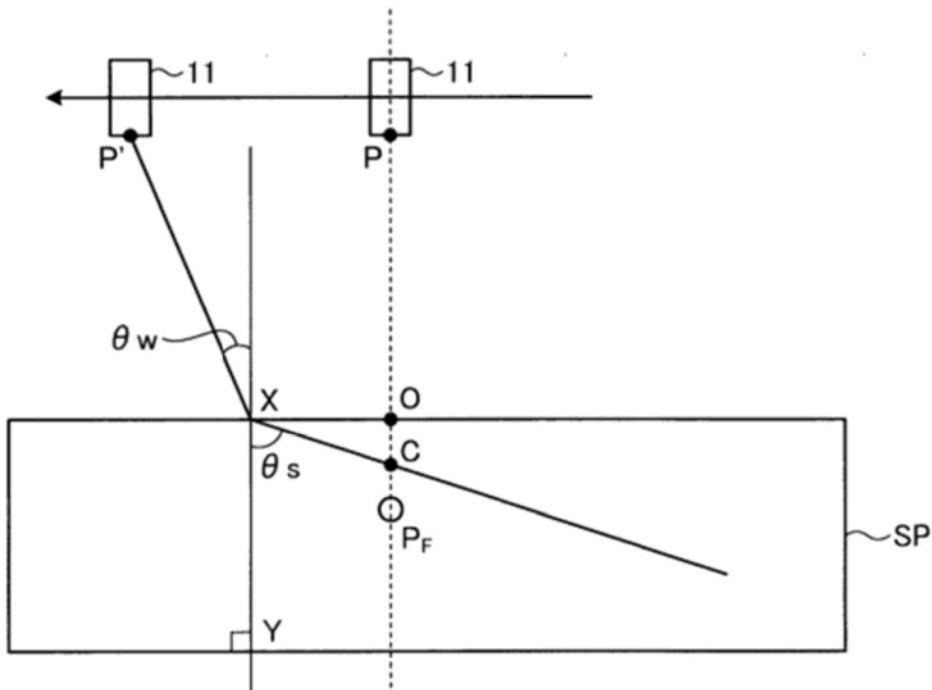


图14

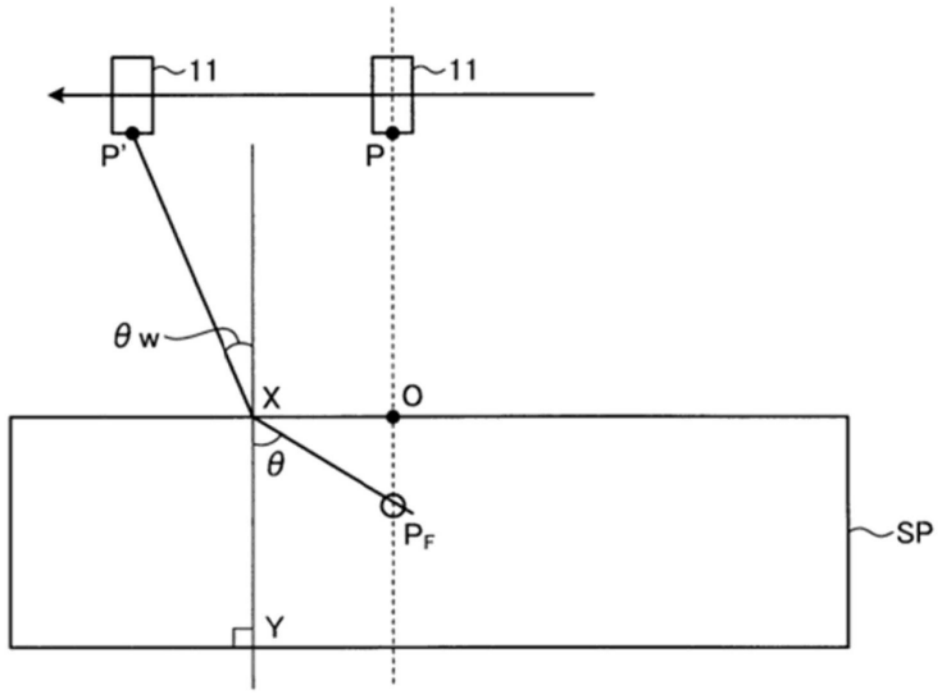


图15

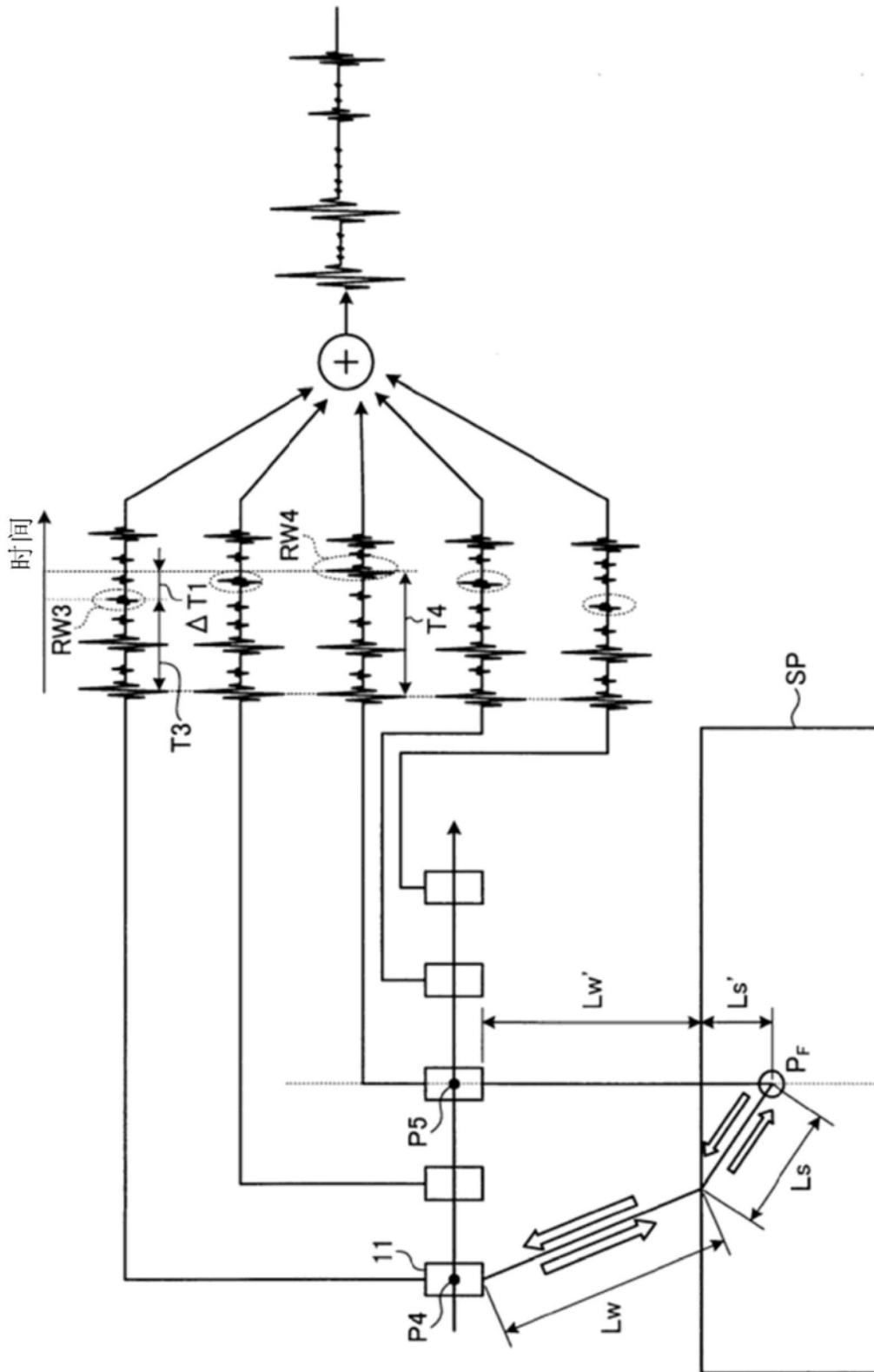


图16

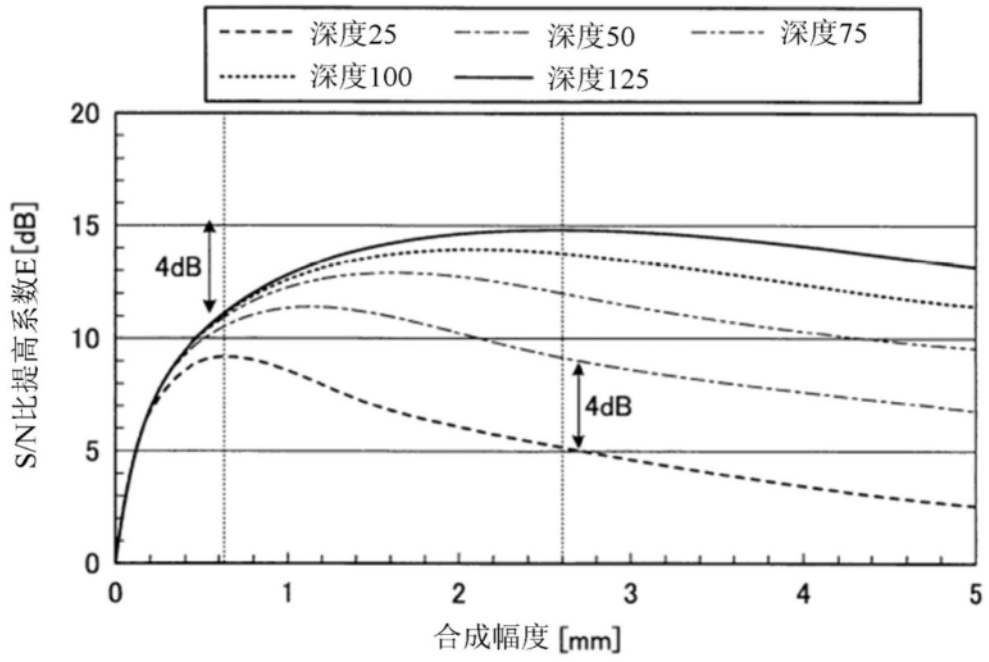


图17

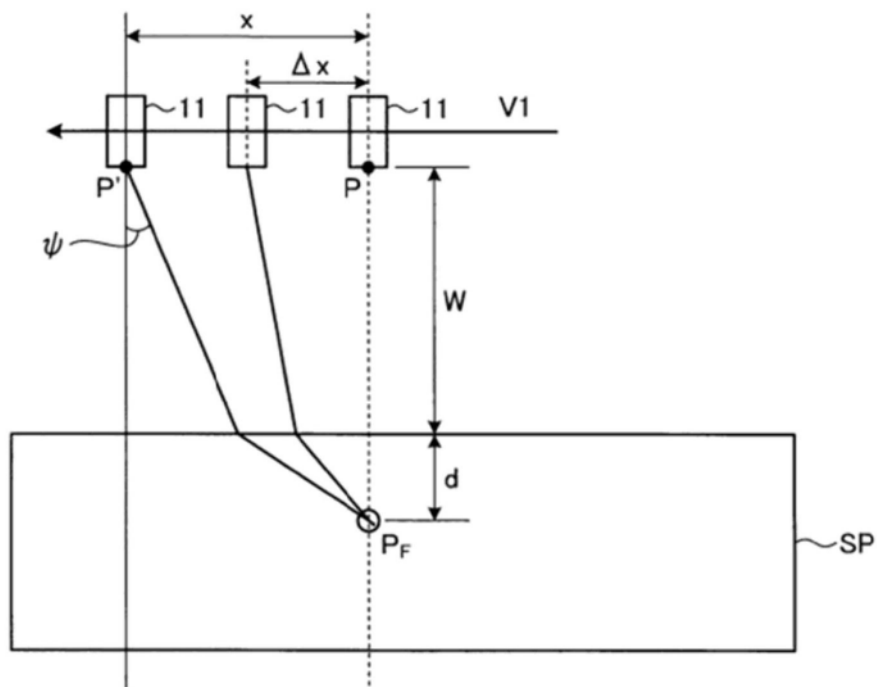


图18