



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 101413923 B

(45) 授权公告日 2013.08.21

(21) 申请号 200810131433.5

(22) 申请日 2008.06.12

(30) 优先权数据

0711349.1 2007.06.12 GB

(73) 专利权人 通用电气检查技术有限公司

地址 英国赫特福德郡

(72) 发明人 J·汉森 X·乔

(74) 专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司
72001

代理人 张雪梅 王忠忠

(51) Int. Cl.

G01N 27/90(2006.01)

(56) 对比文件

US 6570379 B2, 2003.05.27, 说明书第2栏
第1至5行, 第45行至57行, 第3栏1至29行,
图1.

US 4383218, 1983.05.10, 说明书第10栏第

30至33行, 图1.

US 4609870, 1986.09.02, 全文.

US 5394084 A, 1995.02.28, 全文.

Gui Yun Tian et al.. Defect
classification using a new feature for
pulsed eddy current sensors. 《NDT&E
International》. 2005, 第38卷(第1期), 77-82.

审查员 金川

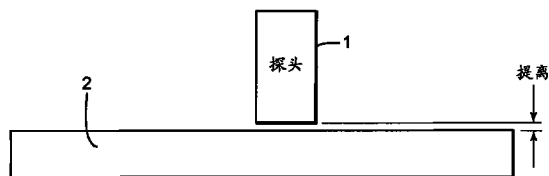
权利要求书2页 说明书6页 附图6页

(54) 发明名称

用于脉冲涡流检查的自动提离补偿

(57) 摘要

本发明提供用于脉冲涡流检查的自动提离补偿。探头(1)和被测试结构(2)表面之间的提离间隔的变化常常掩蔽结构中缺陷的检测。描述了用于自动分类和补偿提离的变化的方法和设备。已知提离处的参考信号(23)可以用对应的计算的比率参数加权,并从测试信号(32)减去,以补偿提离。优选获得多个参考信号,并且优选确定每个参考信号的最大幅度梯度(24)。还获得后续的测试信号的最大幅度梯度(33),识别具有最接近测试信号的最大幅度梯度的对应参考信号,并在相关补偿程序中选择该对应的参考信号。已发现这种方法将信号恢复为使得提离被消除,并且缺陷容易被识别。



1. 一种用于补偿涡流探头和正被测试的导电样品表面之间的间隔的影响的方法,该方法包括:

通过将涡流探头定位在基本上没有缺陷的区域和距离样品表面已知的参考间隔处,激励探头以在样品中产生涡流,并且感测涡流产生的时变参考信号,来获得参考数据组,参考数据组包括参考信号在多个时间的幅度;

确定参考信号的最大幅度梯度值;

通过将涡流探头定位在距离样品表面未知的参考间隔处,激励探头以在样品中产生涡流,并且感测涡流产生的时变测试信号,来获得测试数据组,测试数据组包括测试信号在多个时间的幅度;

确定测试信号的最大幅度梯度值;

计算补偿比,补偿比为测试信号的最大幅度梯度值除以参考信号的最大幅度梯度值;以及

通过从测试信号的幅度减去参考信号的幅度与补偿比的乘积,确定参考数据组和测试数据组中对于多个对应时间的经补偿信号的幅度。

2. 依据权利要求 1 所述的方法,其中感测多个参考信号并且获得对应的多个参考数据组,每个参考信号由通过在距离样品表面的不同已知参考间隔处激励探头而产生的涡流来产生,其中为每个参考信号确定最大幅度梯度值,并且其中使用最大幅度梯度值与测试信号的最大幅度梯度值最接近的参考信号来确定补偿比和经补偿信号幅度。

3. 依据权利要求 2 所述的方法,其中每个参考信号的最大幅度梯度值由每个参考信号的一阶微分峰值确定,并且测试信号的最大幅度梯度值由测试信号的一阶微分峰值确定。

4. 依据权利要求 3 所述的方法,其中平滑多个参考信号中的至少一个、多个参考信号的一阶微分或者多个参考信号的一阶微分峰值。

5. 依据权利要求 2 所述的方法,其中使用最近距离准则来确定最大幅度梯度值与测试信号的最大幅度梯度值最接近的参考信号。

6. 依据权利要求 2 所述的方法,其中内插参考数据组中的数据至少一部分。

7. 依据权利要求 1 所述的方法,其中确定经补偿信号的幅度的步骤确定在测试数据组中存储的每个时间的经补偿信号幅度以便确定完整的经补偿信号。

8. 依据权利要求 1 所述的方法,其中内插参考数据组中的数据至少一部分。

9. 依据权利要求 1 所述的方法,其中由参考信号的一阶微分峰值确定参考信号的最大幅度梯度值,并且由测试信号的一阶微分峰值确定测试信号的最大幅度梯度值。

10. 依据权利要求 1 所述的方法,其中参考信号的幅度、测试信号的幅度和经补偿信号的幅度用电压表示。

11. 一种涡流检查装置,包括配置为执行如权利要求 1 所述的方法的涡流探头(1)和处理装置(42)。

12. 依据权利要求 11 所述的涡流检查装置,其中涡流探头是利用线圈或电子传感器的单独或多个构造的绝对探头,差分探头或者反射探头。

13. 依据权利要求 11 所述的涡流检查装置,其中涡流探头是利用线圈或电子传感器的单独或多个构造的未屏蔽探头或屏蔽探头。

14. 依据权利要求 11 所述的涡流检查装置,其中涡流探头是利用线圈或电子传感器的

阵列构造的绝对探头,差分探头或者反射探头。

15. 依据权利要求 11 所述的涡流检查装置,其中涡流探头是利用线圈或电子传感器的阵列构造的未屏蔽探头或屏蔽探头。

用于脉冲涡流检查的自动提离补偿

技术领域

[0001] 本发明涉及可以用于检测材料或结构尤其例如诸如航空器面板和管道等这样的导电结构中存在的诸如腐蚀、裂纹等缺陷的方法和设备。

背景技术

[0002] 诸如腐蚀、裂纹等缺陷会削弱材料或结构的结构整体性。许多工业中结构的故障可以具有非常严重的后果,这些故障比如诸如形成气体或输油管等这样的管道或航空器面板的部件的结构故障。因此,相当多的工作致力于结构的检查上,以便确定它们是否具有或获得可以影响它们的结构整体性的任何缺陷。

[0003] 结构可被视觉检查以试图检测缺陷。然而,虽然一些缺陷能够被视觉检查,比如会导致表面变形的严重腐蚀,许多缺陷比如从结构的外部表面不容易看出的裂纹或腐蚀会被漏掉。此外,许多结构会用油漆、涂料和绝缘体的层覆盖,这会使视觉检查甚至更困难。

[0004] 检查结构以便检测缺陷的另一方法涉及超声波。然而,除非随后的层被机械结合在一起,超声波仅可以穿透结构的单层。因此,检测多层结构中的缺陷是困难的。

[0005] 检测结构中的缺陷的另一方法是利用涡流。涡流检查在检测导电结构中裂缝方面具有相当大的优点,并且具有非常宽范围的应用。它是非破坏性的,并且可以检测肉眼看不见的裂缝。通常用单个频率实现非破坏性检测。有时可以使用两个频率或多个频率,以便提高检查能力和检测可靠性。涡流可以穿透材料的多个层,以便发现会威胁材料或结构的可用性的隐藏损伤。然而,为了在复杂结构中精确定位缺陷位置,传统的涡流技术遇到因频率衰减引起的困难。脉冲涡流 (PEC) 方波脉冲提供宽带频率能量,特别在低频率处。因此,其提供了关于缺陷深度的更多信息和后续的数据处理的潜力。

[0006] 探头提离是与在要被测试结构的表面上移动探头相关的问题,其在于探头和要被检查结构之间间距的变化产生接收信号中的虚假变化,该虚假变化会掩蔽指示真实缺陷的变化,这对于识别缺陷是误导的。例如,在其之上移动探头的结构表面的变化,比如油漆和/或涂层厚度,铆钉的表面特征的存在,和操作者在使用中施加至探头的压力的变化,可以产生提离中的变化。

[0007] US6344741 和 CA2312101 公开了一种用于补偿脉冲涡流技术中的提离变化的方法。从在没有缺陷的位置处距离要被测试结构两个或多个不同提离距离处的探头获得校准信号。确定检测信号在时域中交叉的点,以在时域信号的该特定时间点处建立“相交的提离点”。在校准信号交叉的相同时间点处比较后续的时域测试信号的幅度,以便补偿提离。

[0008] 然而,交叉点可能不是非常精确,并且当检测不同大小缺陷时可能漂移。此外,仅在接收信号上的单个点处实现提离补偿,使仅有限量的信息从时域信号可用,限制了缺陷分析。

[0009] US5391988 公开了一种利用涡流测试检测导电物体中的裂缝的方法。铁氧体磁心具有缠绕在其上的初级和次级线圈。矩形波电流被供给至初级线圈,以在次级线圈中感应脉冲波形的电压。以对应于两个不同阈值电压的两个分开的时间情况测量感应电压的脉

冲持续时间。利用两个测量的脉冲持续时间的比较,消除铁氧体磁心和导电物体之间距离(提离)变化的影响。

[0010] US6573712 公开了一种检查装置,其具有驱动部件,用于调节检查探头的位置以保持恒定的提离。

[0011] 作出关于提离发生和相关的提离距离的正确判断,使得能够消除检测信号中提离引起的、掩蔽缺陷信号的分量,从而可以恢复缺陷信息,以便产生可靠的检测结果。

发明内容

[0012] 依据本发明的第一方面,提供一种用于补偿涡流探头和导电样品的表面之间的间隔(提离)的方法,该方法包括:

[0013] 通过将涡流探头定位在没有缺陷的样品区域和距离样品表面已知的参考间隔(提离)处,激励探头以在样品中产生涡流,并且感应以该已知的参考间隔在导电样品中产生的涡流产生的参考信号,以及确定感应的信号的梯度值,获得至少一组参考数据;

[0014] 通过将涡流探头定位在距离样品表面未知的间隔(提离)处,激励探头以产生涡流,并且确定随后的测试信号的对应梯度值,执行后续的测试测量,以及

[0015] 通过确定至少一个参考信号和测试信号之间的差异,补偿测试测量中涡流探头和样品表面之间的间隔(提离)。

[0016] 已经发现感测的信号的梯度指示探头和正被测试的导电材料表面之间的间隔(提离)。已发现本发明的实施例具有提供精确和可靠的提离补偿的能力。本发明的实施例还提供完整的提离补偿的信号,不像许多现有技术方法仅在沿时变信号的单个点处提供提离补偿。完整的信号对于确定缺陷的性质和位置的后续信号分析和处理是有用的。优选产生脉冲涡流。

[0017] 在感测参考和测试信号之前,可以通过没有提离地将探头放在没有缺陷的区域上,并获得之后从全部后续信号中减去的平衡信号,执行平衡调节。

[0018] 最大幅度梯度(不管它是正还是负梯度)优选被确定,并用于执行补偿。通过包括例如可以确定感测的时变信号的峰值微分的处理器或计算机的控制系统,可以容易地确定最大幅度梯度。因此,本发明的方法可以容易地被自动化。优选在确定梯度之前平滑感测的信号,比如通过低通滤波器,以便消除由噪声产生的任何伪结果。

[0019] 测试测量中的补偿可以包括获得多组参考数据,每一组在探头和样品表面之间的不同已知间隔处获得。然后可以选择具有最接近测试信号的梯度的该组参考数据,并且确定选择的参考信号和测试信号之间的差异。替代地或者附加地,可以从一个或多个参考数据组内插参考数据。涉及参考信号或测试信号的数据可以乘以取决于测试和参考信号的大小的比率的因数。

[0020] 依据本发明的第二方面,提供一种涡流检查装置,包括配置为执行本发明第一方面的方法的涡流探头和处理装置。

附图说明

[0021] 现在仅通过示例,参照附图,描述本发明,附图中:

[0022] 图1示出了探头和样品表面之间的间隔(提离);

- [0023] 图 2a 示出提离参考数据产生程序,示出了执行本发明的实施例的方法的流程图;
- [0024] 图 2b 示出 AD-LOC 方法补偿程序;
- [0025] 图 3 示出了脉冲涡流检查装置;
- [0026] 图 4a 示出带有不同提离信号的脉冲涡流缺陷信号和缺陷,示出了没有提离和在多个不同的提离处从样品获得的一系列检测的脉冲涡流信号;
- [0027] 图 4b 示出带有提离信号微分的脉冲涡流缺陷,示出了在图 4a 中呈现的信号的分;
- [0028] 图 4c 示出 20%材料损失缺陷,有或没有提离的 PEC 信号和经过提离补偿的 PEC 信号,示出了提离补偿之前和之后来自 20%缺陷的脉冲涡流信号;
- [0029] 图 5a 示出了脉冲涡流测试扫描中使用的变化的提离距离和位置;
- [0030] 图 5b 示出没有提离补偿的 C-扫描 PEC 成像,示出了没有提离补偿的检查 C-扫描的脉冲涡流图像;以及
- [0031] 图 5c 示出有提离补偿的 C-扫描 PEC 成像,示出了施加了依据本发明实施例的提离补偿的图 5b 的检查 C-扫描。

具体实施方式

- [0032] 图 1 示出了称为探头 1 和要被检查样品 2 表面之间的提离的间隔。
- [0033] 图 2 是示出了执行本发明的方法的示例的流程图 10。该流程图包括用于产生参考数据的第一部分 20 和用于产生经过补偿的测试数据的第二部分 30。
- [0034] 如图 2 中所示,在步骤 21,优选通过没有提离地将探头放置在没有缺陷的区域上平衡探头,以获得从所有后续信号减去的平衡信号。在步骤 22,探头被定位在距离样品表面已知的参考间隔(提离)处。优选在样品基本上没有缺陷的部分上定位探头。可以使用如本领域熟知的任何合适的涡流探头,比如绝对探头(absolute probe),差分探头,反射探头,未屏蔽探头,屏蔽的探头,或者利用线圈或电子传感器的,以上的单个、多个或阵列构造的组合。在该示例中,使用具有整体的发射器线圈和接收器阵列的探头。接收器阵列典型地具有 16 或 32 个传感器,如本领域熟知的。然而如果期望,可以使用具有独立的发射器和接收器的探头。通过在探头和样品的无缺陷部分之间放置已知厚度的垫片(通常不导电的),探头可被定位在距离样品表面的已知提离处。
- [0035] 在步骤 23,激励探头以在样品的表层产生涡流,并通过探头检测涡流产生的参考信号。例如利用方波电流激励发射器线圈,以产生宽的频率带,从而可以检测样品中多个深度处的缺陷。
- [0036] 在步骤 24,确定参考信号的梯度。优选地,确定参考信号的最大梯度(不管梯度是正还是负)。依据本发明的涡流检查装置具有比如微处理器的处理装置,其可以通过计算参考信号的一阶微分,确定梯度。测试信号的梯度的最大幅度将是该一阶微分的峰值。检测的参考信号或确定的梯度或微分中的至少一个被平滑,例如通过高斯平滑,或者经过低通滤波器,以便消除可能由噪声引起的、并且可能产生错误值的任何尖峰。检测的参考信号和它相关的峰值梯度或微分被一起存储于与该处理器相联系的存储器装置中。
- [0037] 根据需要多少组参考信号和相关梯度,按所需次数重复步骤 21 至 24。已经发现更多组参考信号的使用提供更精确的结果。如果重复步骤 21 至 24,那么在探头和样品无缺陷

部分之间放置另一已知厚度的不同垫片（通常非导电的），以在该第二已知提离处进行测量。如果产生多组参考信号，那么产生的参考信号的每一个的梯度可以在获得每一参考信号之后被单独确定，或者可以在已经检测全部参考信号之后一起确定全部梯度。

[0038] 当已经确定合适数量的参考信号和相关梯度时，该方法可以用于产生测试数据，以便检测任何缺陷。该测试数据可被提离补偿。在步骤 31，可以在样品之上定位探头。然而，与如在上面的步骤 21 至 24 中用以产生参考数据的探头的使用相反，在该情况中，在样品和探头之间存在什么样的间隔程度是无关紧要的。在实践中，探头很可能在比如航行器面板或管道元件的被测试结构的部分上移过，并且提离很可能随着探头在结构之上移过而改变，例如由于油漆作业、涂层和绝缘体厚度的变化，由于探头遇到比如铆钉等的表面特征，以及由于操作者施加至探头的压力的变化。

[0039] 在步骤 32，利用探头中的接收器感测样品中的涡流产生的信号。

[0040] 在步骤 33，确定测试信号的梯度，在该示例中通过计算一阶微分，并确定它的微分峰值。如步骤 23 中一样，当产生上面的参考数据时，优选通过计算测试信号的峰值微分确定测试信号的最大幅度梯度。

[0041] 在步骤 34，补偿测试信号，以便减小或消除提离的影响。这通过从测试信号的数据减去与一生成的参考信号相关的、加权的提离参考数据而执行。如果生成了多个参考信号，具有与测试信号最类似的梯度峰值或最接近的峰值微分的参考信号将被识别，并且被标记为当前提离表现，并且对应的加权的识别的参考信号将被用作从测试信号减去的信号。可以通过任何合适的方法比较最大梯度或峰值微分，比如本领域技术人员熟知的最近距离准则。替代或附加地，参考信号的数据可被内插，以产生将从测试信号的数据减去的更合适的参考数据组。内插可以是有帮助的，例如当发现测试信号的斜率基本上位于两个参考信号的斜率之间的中间时，或者如果仅单个参考信号可用。参考信号可被乘以一补偿比，该补偿比从测试信号和对应的参考信号的比率导出，以便补偿测试和参考信号的大小的任何差异。在该示例中，步骤 34 之前有一系列步骤 34a 至 34d，用于确定对于产生的信号提离现象是否出现，并且假如出现的话，打开补偿功能并选择参考信号。如果需要，可以在步骤 34e 关闭提离补偿。在步骤 34f 重复补偿程序，直至全部数据已被补偿，并接着在步骤 34g 执行数据的成像。

[0042] 图 3 示出了适用于执行本发明的脉冲涡流检查装置。该装置包括如上所述的探头 40。探头 40 在该示例中具有传感器阵列。探头 40 经由连接器 41 连接至处理和显示装置 42。处理和显示装置 42 具有比如微处理器的处理器和存储器，用以存储信号和执行适当的处理，比如峰值微分的确定，补偿的执行，以及具有相关的峰值微分的信号的存储。该装置 42 具有用以显示结果给使用者的显示装置 43。

[0043] 该装置 42 可以执行如下所述的自动微分提离补偿过程：

[0044] 1) 首先，收集多 (K) 个提离参考信号 $Lo_Ref(k)$ ，每一个在探头 40 距离样品一预定提离处。这是参考信号组。

[0045] 提离参考组： $\{Lo_Ref(k)\} k = 1, 2, \dots, K$

[0046] 例如，用提离距离：5mil (0.127mm)，10mil (0.254mm)，15mils (0.381mm)，以及 20mils (0.508mm) 产生四个提离参考信号。K = 1, 2, 3, 4。

[0047] 2) 在这之后，计算全部已知提离参考信号一阶微分，以便找到它们的峰值 $DPv_$

Lo_Ref(k), 其中 $k = 1, 2, \dots, K$ 。

[0048] 在该示例中, 微分算子是一阶微分, 平滑算子是高斯平滑, 并且微分峰值被称作: DPv_Lo_Ref 组。

[0049] 3) 下面定义提离参考手册组, 其由提离参考信号 Lo_Ref(k) 和它对应的微分峰值 DPv_Lo_Ref(k) 组成, 其中 $k = 1, 2, \dots, K$

[0050] Lo_Ref_Book = { 提离参考组 DPv_Lo_Ref 组 }

[0051] = {Lo_Ref(k), DPv_Lo_Ref(k)}

[0052] $k = 1, 2, \dots, K$

[0053] 4) 然后, 对于具有未知缺陷和未知提离类型的每一单独的测试信号, 执行下面:

[0054] a) 对于测试信号 -DPv_test 计算微分峰值。

[0055] b) 通过最近距离准则将当前 DPv_test 与 DPv_Lo_Ref 组比较, 以找到最类似的 DPv_Lo_Ref(k) 和获得提离类型指数 (lift-off classindex)k。

[0056] c) 依据提离类型指数 k, 得知内含在测试信号中的提离的类型, 从而能够在后续的补偿程序中选择正确的对应的提离参考信号 Lo_Ref(k)。

[0057] 5) 最后, 利用 Lo_Ref(k), 通过利用补偿公式, 实现自动提离补偿。该补偿公式包括确定合适的参考信号和测试信号之间的差异。

[0058] 还优选依据下面的表达式计算补偿比:

[0059] $\text{Ratio} = \text{DPv_test} / \text{DPv_Lo_Ref}$

[0060] 然后该补偿比可被包括在补偿公式中

[0061] $\text{Auto_Comp} = \text{Sig_test} - \text{Ratio} * \text{Sig_LO_Ref}(k)$

[0062] 其中 Sig_test 是测试信号, 并且 Sig_LO_Ref(k) 是合适的参考信号。

[0063] 图 4a 示出了从样品获得的一系列检测的脉冲涡流信号, 没有提离 (组 A) 以及探头位于 0.05mm 的提离 (组 B), 0.25mm 的提离 (组 C) 以及 0.5mm 的提离 (组 D)。组 A, B, C, D 每一个包含是大约 5%, 10% 和 20% 的总样品厚度的材料损失的缺陷的信号。如从图 4a 清楚看出的, 脉冲涡流信号的梯度主要受提离距离影响, 而每一单独组中缺陷大小的变化具有小得多的影响。因此, 在图 4a 中, 与不同的缺陷大小相关但是具有相同的提离距离的脉冲涡流信号群集成主要由提离距离决定的同一组脉冲涡流信号。

[0064] 图 4b 示出了在图 4a 中呈现的信号的微分。具有不同的缺陷但是具有相同的提离距离的脉冲涡流信号的微分不仅群集成取决于提离距离的同一组, 而且提供非常接近的微分峰值。从这可以看出, 微分峰值清楚地指示在脉冲涡流信号中存在的提离。该提离特征被析取, 并用于计算补偿比参数, 以便执行自动提离补偿。

[0065] 图 4c 示出了依据本发明一实施例的变化提离脉冲涡流补偿的效果。图 4c 中由粗实线表示具有 20% 的总样品厚度的材料损失的一缺陷的样品的理想脉冲涡流信号, 其中探头被仔细定位, 以使探头和样品表面之间不存在提离。这是没有提离影响地获得的理想信号。图 4c 中还由各指示的虚线示出以 0.05mm, 0.25mm 和 0.5mm 的提离距离从该样品的该 20% 缺陷获得的脉冲涡流信号。以部分重叠没有提离地获得的理想信号的接近的虚线示出对应的经过提离补偿的脉冲涡流信号。本发明的实施例的提离补偿的效果, 由经过提离补偿的信号如何紧密地跟随, 或者甚至覆盖在没有提离地获得的理想信号上, 在图 4c 中清楚地示出。

[0066] 图 5a, 5b 和 5c 示出了在脉冲涡流 C- 扫描图像上执行的本发明的实施例的提离补偿。

[0067] 图 5a 示出了脉冲涡流 C- 扫描中的提离距离和它们的位置。不同的提离距离, 也就是 0mm, 0. 127mm, 0. 254mm, 0. 381mm 和 0. 508mm, 通过图 5a 的单色图像中不同的阴影呈现, 但是也可以通过不同的色彩示出。

[0068] 图 5b 示出如可以从图 3 中示出的装置 42 的显示装置 43 上看到的检查扫描的脉冲涡流图像。该扫描图像示出其中不同的阴影或色彩指示不同程度的材料损失的脉冲涡流图像。可以在脉冲涡流 C- 扫描图像附近提供通过特定的阴影或色彩指示材料损失的百分比水平的图表。脉冲涡流 C- 扫描图像指示由材料损失构成的缺陷的位置, 呈现为对应于正被测试结构中的缺陷的实际位置的 C- 扫描图像上位置的不同的阴影或色彩。图 5b 中示出的图像指示了可以通过在要被测试结构的表面上移过如图 3 所示的探头 40 而获取的典型数据。显示了多个“斑块 (patch)”, 它们是由于在如图 5a 所示的使用过程中在该点处的测量中探头 40 的提离。如从图 5a 的扫描图像中可以看到, 由在那些点处受到的提离引起的斑块使 C- 扫描图像相当不清楚, 从而很难清楚地识别实际的缺陷。

[0069] 相反, 图 5c 示出在已经依据本发明的实施例实施提离补偿之后, 图 5b 的脉冲涡流 C- 扫描图像。如可以看到的, x- 轴上位置 20 和 90 处的缺陷比在图 5b 的 C- 扫描图像中清楚得多地被看到。缺陷现在是如此清楚, 使得关于缺陷形状的信息是清楚可辨的。在已经消除提离影响之后, 缺陷的存在和位置清楚可见。因此可以获得精确得多的缺陷信息。

[0070] 在仍落入本发明的范围中时, 可以对上面所述的示例进行多种变化。例如可以使用任何合适的涡流探头。该探头可以具有在探头主体中整体地一起提供的发射器和接收器, 或者可以分别提供发射器和接收器。接收器可以包括一个或多个线圈或传感器。

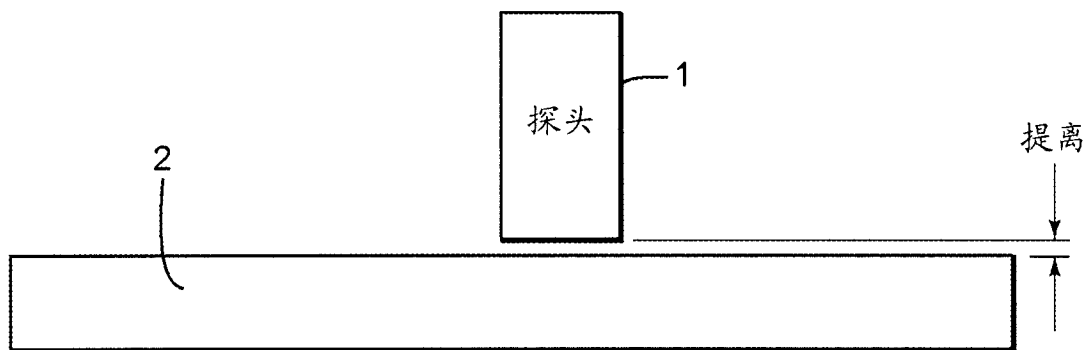


图 1

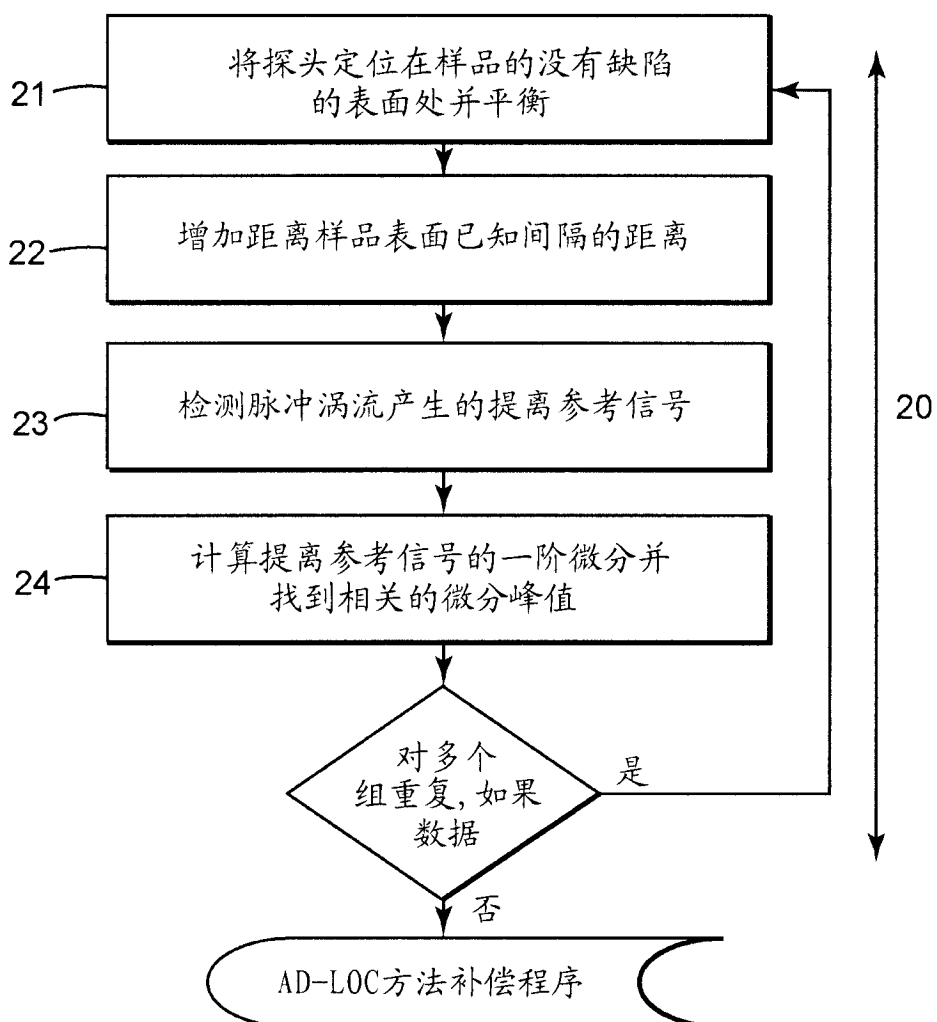


图 2a

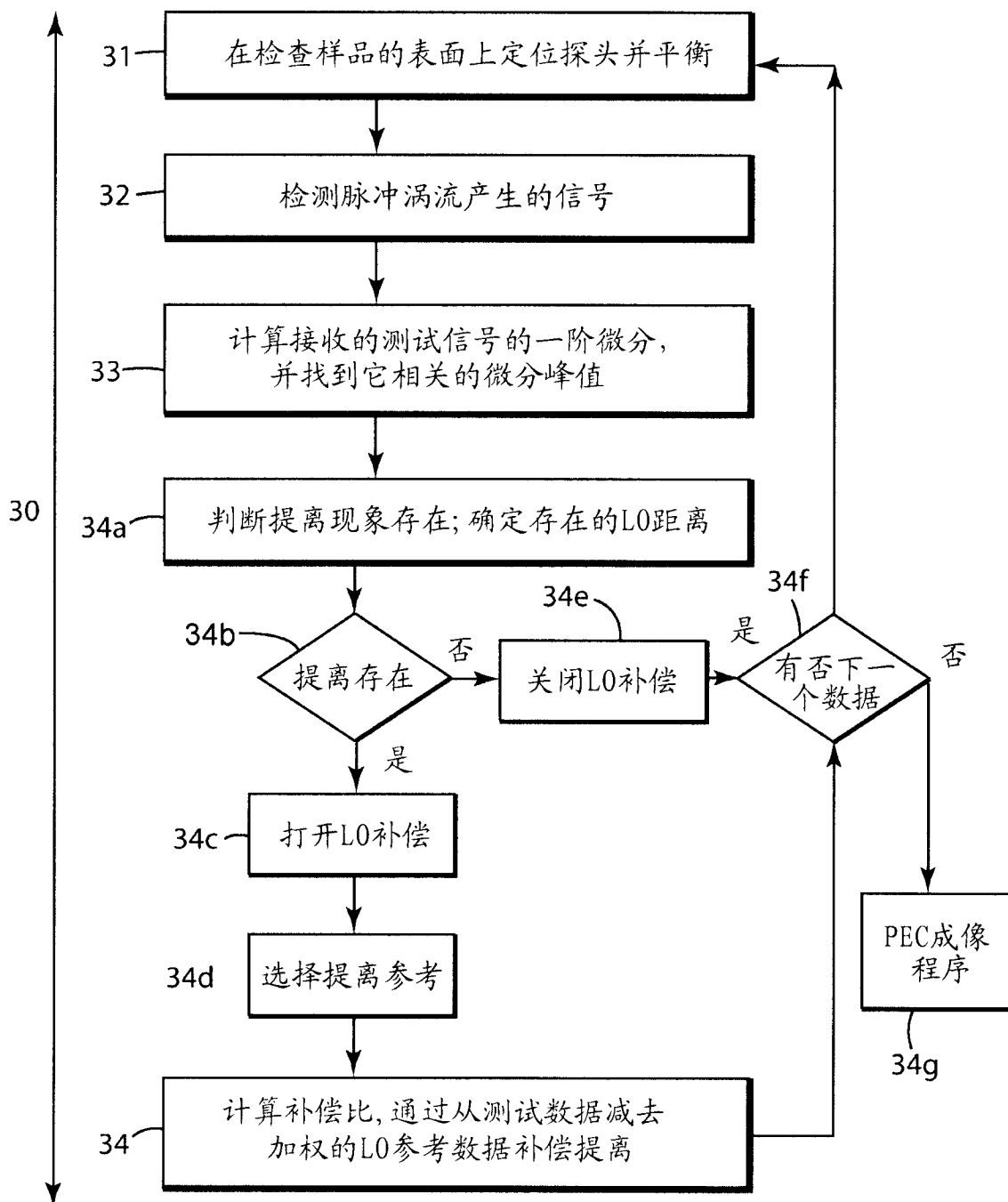


图 2b

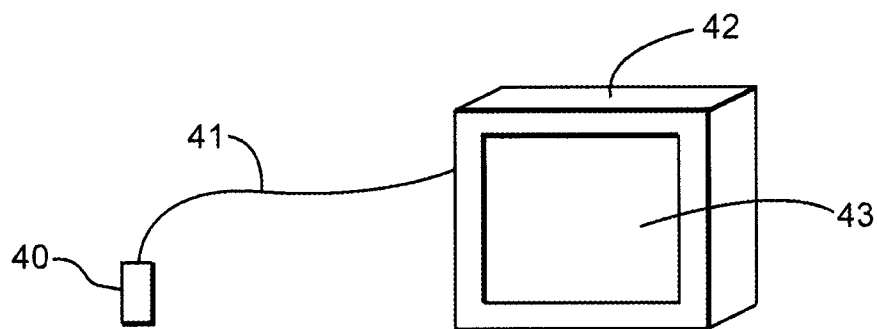


图 3

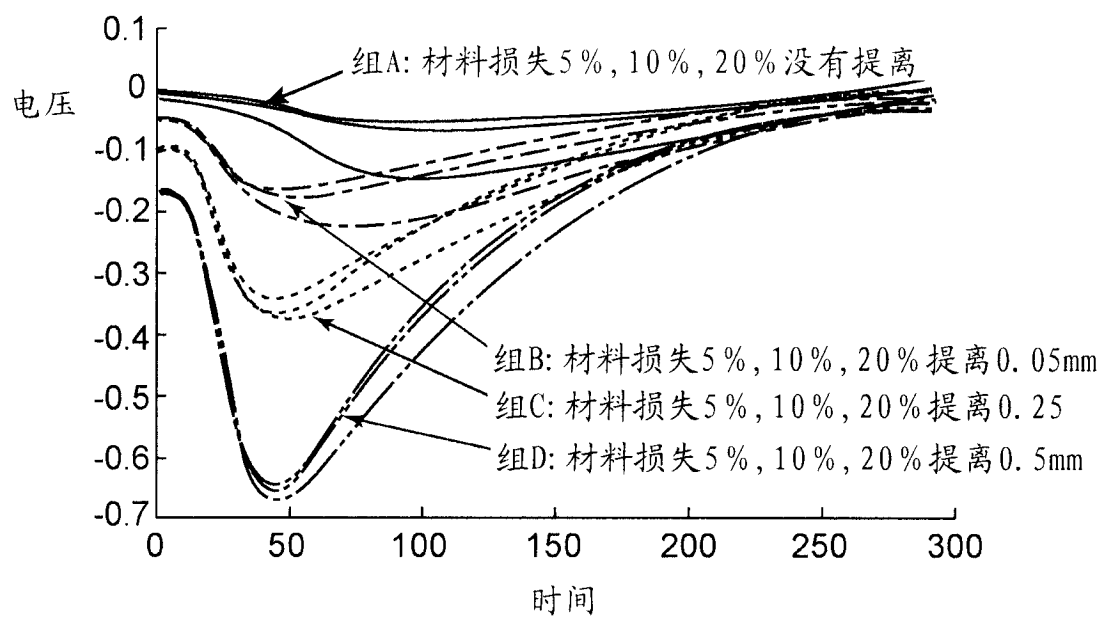


图 4a

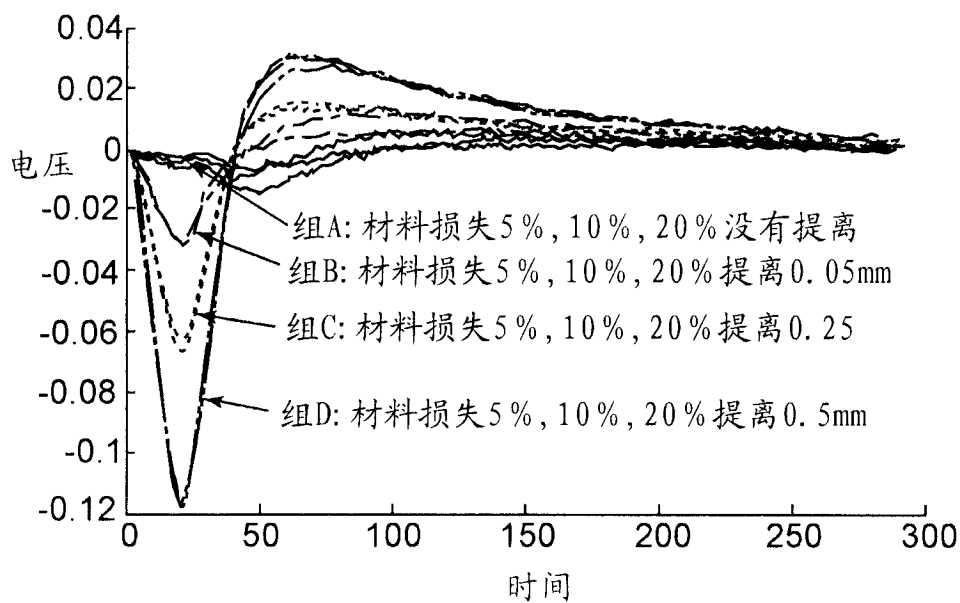


图 4b

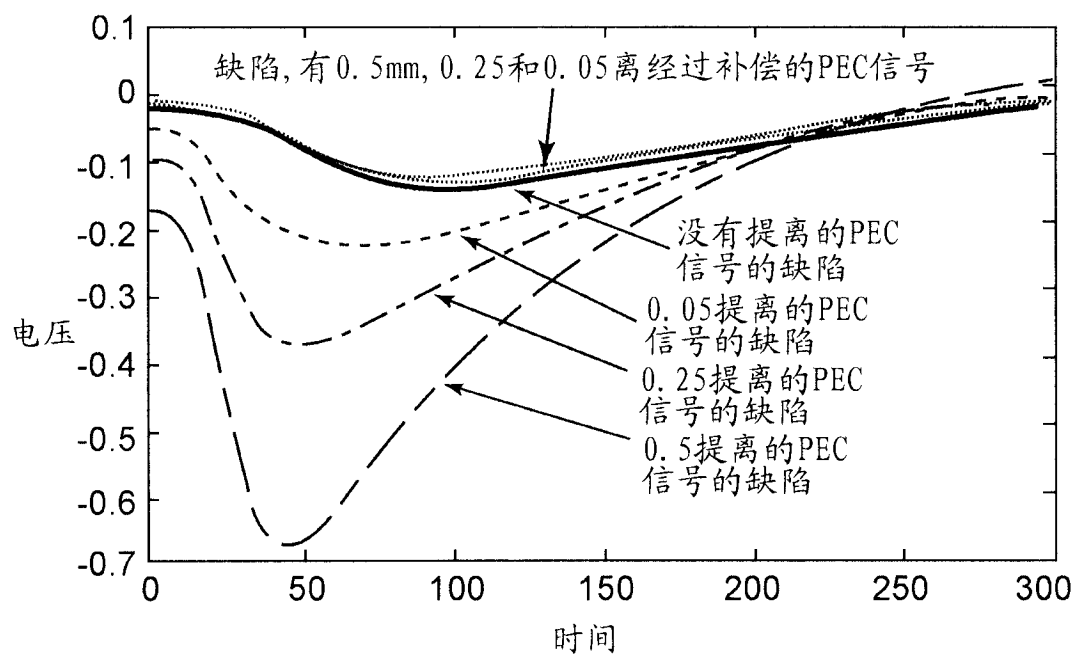


图 4c

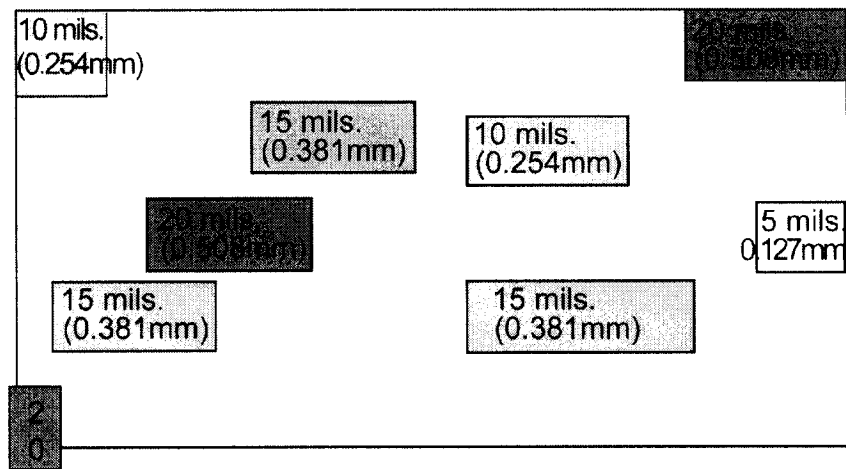


图 5a

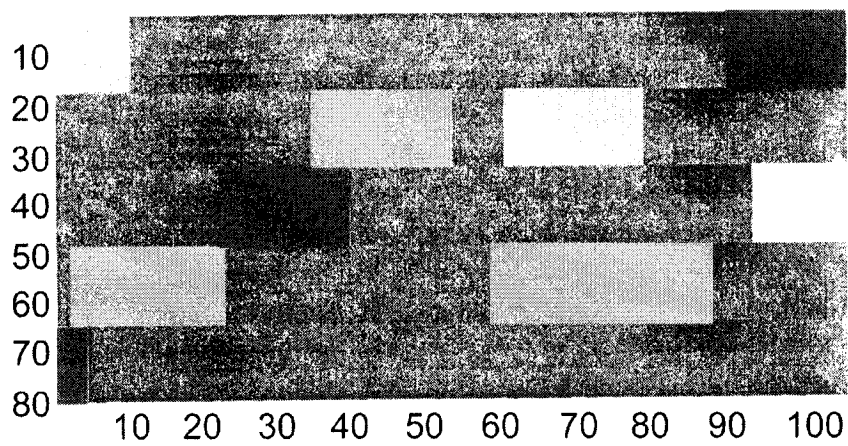


图 5b

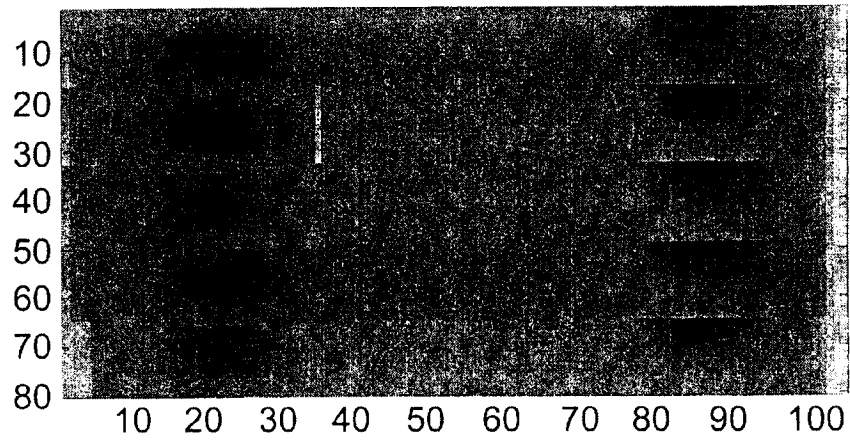


图 5C