

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局



(43) 国际公布日
2010 年 11 月 18 日 (18.11.2010)

PCT

(10) 国际公布号
WO 2010/130144 A1

- (51) 国际专利分类号:
G01N 29/04 (2006.01) G01N 29/46 (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2010/000470
- (22) 国际申请日: 2010 年 4 月 9 日 (09.04.2010)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
200910083772.5 2009 年 5 月 13 日 (13.05.2009) CN
- (71) 申请人 (对除美国外的所有指定国): 清华大学 (TSINGHUA UNIVERSITY) [CN/CN]; 中国北京市海淀区清华园 1 号, Beijing 100084 (CN)。
- (72) 发明人; 及
- (75) 发明人/申请人 (仅对美国): 向志海 (XIANG, Zhi-hai) [CN/CN]; 中国北京市海淀区清华园 1 号清华大学航天航空学院, Beijing 100084 (CN)。 陆秋海 (LU, Qiuhai) [CN/CN]; 中国北京市海淀区清华园 1 号清华大学航天航空学院, Beijing 100084 (CN)。 戴晓玮 (DAI, Xiaowei) [CN/CN]; 中国北京市海淀区清华园 1 号清华大学航天航空学院, Beijing 100084 (CN)。 张尧 (ZHANG, Yao) [CN/CN]; 中国北京市海淀区清华园 1 号清华大学航天航空学院, Beijing 100084 (CN)。
- (74) 代理人: 中国专利代理 (香港) 有限公司 (CHINA PATENT AGENT (H.K.) LTD.); 中国香港特别行政区湾仔港湾道 23 号鹰君中心 22 号楼, Hong Kong (CN)。
- (81) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。
- (84) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ,

[续页]

(54) Title: SYSTEM, DEVICE FOR STRUCTURAL DAMAGE DETECTION AND METHOD FOR STRUCTURAL DAMAGE DETECTION

(54) 发明名称: 一种结构损伤检测系统、设备以及结构损伤检测方法

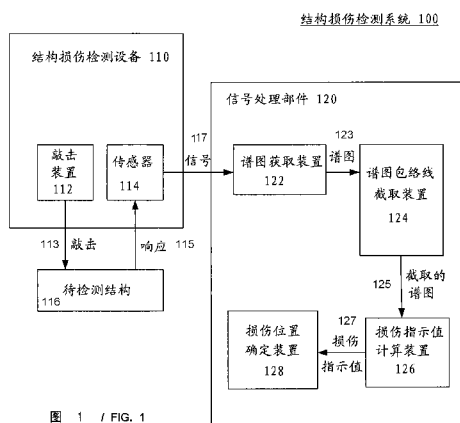


图 1 / FIG. 1

100 system for structural damage detection
110 device for structural damage detection
112 knocking device
113 knocking
114 sensor
115 response
116 structure to-be-measured
117 signal
120 signal processing parts
122 spectrogram acquiring device
123 spectrogram
124 spectrogram envelope curve intercepting device
125 intercepted spectrogram
126 device for damage indicating value calculation
127 damage indicating value
128 device for damage position determination

(57) Abstract: A method for structural damage detection includes following steps: utilizing a knocking device (112) to scan a surface of structure, and knocking with a knocking force possessing predetermined frequency band at the same time with the scanning; utilizing a sensor (114) to detect the response signal transferred to the knocking device (112) from the surface of the structure to-be-measured; transforming and processing the signal detected by the sensor (114) to acquire the signal spectrogram at each position of the surface of structure; intercepting the spectrogram envelope curve corresponding to the knocking force with the predetermined frequency band from the signal spectrogram; calculating damage indicating value at each position of the structure surface, the damage indicating value represent similarity degree between the spectrogram envelope curve at this position and the spectrogram envelope curve at other positions; and determining the position at which sudden transition happening to the damage indicating value occurring as the position with structural damage. A system for structural damage detection utilizing the method for structural damage detection and a device for structural damage detection used in the system are also disclosed.

[续页]

WO 2010/130144 A1



BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), 欧洲 (AT, BE, BG, 本国际公布:

CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU,
IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT,
RO, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI,
CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

— 包括国际检索报告(条约第 21 条(3))。

(57) 摘要:

一种结构损伤检测方法, 包括下述步骤: 使用敲击装置(112)扫描结构的表面, 并且在扫描的同时以具有预定频段的敲击力进行敲击; 利用传感器(114)感测由所述待检测结构表面传递到敲击装置(112)的响应信号; 对所述传感器(114)感测到的信号进行变换处理以获取在所述结构表面的每个位置处的信号谱图, 从所述信号谱图中截取与所述敲击力的预定频段相对应的谱图包络线, 计算所述结构表面的每个位置处的损伤指示值, 该损伤指示值反映了该位置处的谱图包络线与其他位置处的谱图包络线的相似程度; 以及将其损伤指示值发生突变的位置确定为存在结构损伤的位置。利用该结构损伤检测方法的结构损伤检测系统以及该系统中使用的结构损伤检测设备也被公开了。

一种结构损伤检测系统、设备以及结构损伤检测方法

技术领域

本发明涉及结构损伤检测系统、设备及结构损伤检测方法，尤其
5 涉及一种无损地对工程结构的损伤进行检测的结构损伤检测系统、设备以及结构损伤检测方法。

背景技术

工程结构在制造和使用过程中由于工艺原因或使用载荷的作用，
10 往往会产生一些局部损伤，比如裂纹、凹坑、脱粘等等，这些损伤积累到一定程度就会影响结构的正常使用。为确保结构能够正常运行，在其交付使用前或服役一段时间后都需要对之进行损伤检测。比如桥梁在通车前需要进行成桥试验以确保达到设计要求，在使用期内需要进行定期的常规检测或不定期的特殊检测，以便及时发现结构中出现
15 的损伤。再如机翼蒙皮等航空构件，只有其内部的损伤小于规定的程度才能交付使用，而使用一段时间后，又需要对这些构件重新进行损伤检测以确保今后的飞行安全。

通常对这些工程结构进行检测不能另外造成这些工程结构的损伤，因此，这种检测方法也称为结构无损检测技术。现有的结构无损
20 检测技术大致可分为局部检测和整体检测两个类别：

（1）局部检测技术通过人的肉眼观察或借助于 X 射线、红外线、超声波、雷达和磁涡流等方式进行损伤探测。这类技术虽然对局部区域具有较高的损伤检测精度，但如果事先不知道损伤的大致区域，要用它们对工程结构的每个区域进行依次检测是非常费时的。此外，有
25 些工程结构还存在利用局部检测技术无法进行检测到的死角。

（2）整体检测技术通过在工程结构上布设传感器来测量工程结构在外加激励下的静位移、速度、加速度等响应，并以此反演出工程结构中的损伤。如果事先在工程结构中预埋传感器，还可以实现对损伤情况的实时监测，但此时只能利用工程结构工作时的环境激励所激发
30 出来的结构响应进行损伤反演。相对于局部检测技术，整体检测技术的检测效率较高。但是整体检测技术具有如下缺点。首先，如果外加激励施加不当，工程结构的响应可能无法充分反映出损伤情况，从而

影响检测精度。比如，如果静载荷较小，工程结构中的裂纹不能充分张开，那么静位移就对这种损伤不敏感。另外，由于损伤是工程结构的局部特征，它对结构动态特性的影响往往只体现在较高阶频段上，因此如果外加激励不能激发出工程结构的高阶响应，那么损伤反演的精度就较差，因此导致整体检测所获得的结果精度较低。此外，整体法还存在着传感器的合理布设、传感器的耐久性、环境噪声的干扰以及信号的采集和传输等问题。

基于 Cawley 建立的敲击力学模型的敲击法可以检测复合材料层合板中的损伤。该敲击力学模型认为当力锤敲击到结构损伤部位时，由于局部刚度的降低使得该处的敲击力时程信号较敲击到完整部位时产生的敲击力信号，峰值较小，宽度较大。据此，计算敲击力频谱曲线和频率坐标轴所围的面积，可以得到一个特征参数 R ，通过比较完好和损伤部位的 R 值就可以识别出损伤。另外也可以直接比较损伤前后的敲击力时程信号的宽度以识别损伤。敲击法也是一种局部检测技术，它不需要把传感器固定在结构上，而且由于能够采集到结构局部刚度的变化，所以对损伤比较敏感。不过这种方法使用了整个频段的敲击力频谱信息，这就在一定程度上降低了损伤识别的精度，这是因为：

(1) 损伤往往体现在敲击力的较高阶频段上，使用整个频段信息会掩盖对损伤敏感频段的信息；(2) 整个频段的信息中包含了环境噪声的成份。另外敲击力谱线所覆盖的频率范围是由结构刚度以及锤头的刚度决定的。为了获得高阶频段谱线，虽然可以通过使用硬度较高的锤头实现，但这并不能精确地控制频谱的范围。即便能够激发出高阶频谱，这些高频成份在整个频段上所占的比例往往较小，这也会影响损伤检测精度。最后，该方法要求事先知道完整结构的特征参数，这也对其使用带来了不便。现有的敲击式损伤检测仪器只能可靠地检测出结构 2mm 厚度内直径约大于 10mm 的损伤。

在桥梁损伤检测领域，杨永斌等人提出了一种利用行驶的车辆作为激励、通过车辆的加速度信号来提取桥梁基频的方法。这种方法的优点是不需要在桥梁上安装传感器，而且测量过程不会影响桥梁的正常运行。但是该方法没有在车辆上安装敲击装置，因此很难激发出桥梁的较高频响应，所得的加速度信号对局部损伤不敏感，而仅根据桥梁的基频是很难检测出结构的损伤的。

因此，期望提供一种不需要事先知道工程结构的完整特征信息、就可以方便、快速且准确地检测工程结构中的损伤的结构损伤检测方法

及结构损伤检测设备。

5 发明内容

鉴于上述问题，提出了本发明以便提供一种克服上述问题或者至少部分地解决上述问题的结构损伤检测方法

及结构损伤检测设备。

根据本发明的一个方面，提供了一种用于检测结构的损伤的结构损伤检测方法，包括步骤：使用敲击装置沿着所述结构的表面进行扫描，其中所述敲击装置在扫描的同时以具有预定频段的敲击力进行敲击；利用传感器感测在所述结构表面的每个位置处由所述结构表面传递到所述敲击装置的响应信号，其中所述传感器感测的信号可以为位移、速度和加速度中的至少之一；对所述传感器感测到的信号进行变换处理以获取在所述结构表面的每个位置处的信号频谱或尺度谱；从

10 所述信号的谱图中截取与所述敲击力的预定频段相对应的谱图包络线；计算所述结构表面的每个位置处的损伤指示值，该损伤指示值反映了该位置处的谱图包络线与其他位置处的谱图包络线的相似程度；以及将其损伤指示值发生突变的位置确定为存在结构损伤的位置。

15 根据本发明的另一个方面，提供了一种结构损伤检测设备，包括

20 敲击装置，用于在待检测结构表面上以具有预定频段的敲击力进行敲击；以及传感器，感测由待检测结构表面传递到所述敲击装置的响应信号，其中所述传感器感测的响应信号可以为位移、速度和加速度中的至少之一；其中所述敲击装置和所述传感器集成在一起，以便所述敲击装置在所述待检测结构表面上进行敲击的同时，所述传感器感测

25 由待检测结构表面传递到所述敲击装置的响应信号。

根据本发明的另一个方面，提供了一种结构损伤检测系统，包括根据本发明的结构损伤检测设备，以及信号处理部件，用于对所述结构损伤检测设备中的传感器所感测到的信号进行处理以确定待检测结构中的损伤位置，所述信号处理部件包括：谱图获取装置，用于对所述传感器感测到的信号进行变换处理以获取在所述结构表面的每个位置处的信号频谱或尺度谱；谱图包络线截取装置，用于从所述信号谱图中截取与所述敲击力的预定频段相对应的谱图包络线；损伤指示值

30

计算装置，用于计算所述结构表面的每个位置处的损伤指示值，该损伤指示值反映了该位置处的谱图包络线与其他位置处的谱图包络线的相似程度；以及损伤位置确定装置，用于基于所述结构表面的每个位置处的损伤指示值来确定所述结构中的损伤位置。

- 5 根据本发明的结构损伤检测方法、设备和系统可以设定敲击力的大小和频段，这样既有利于激发出损伤信息，又可以避开环境噪声的干扰，此外，本发明仅仅对由待检测结构表面传递到敲击装置的响应中与敲击力的频段相对应的频段的响应信号进行进一步处理，这可以提高检测精度。
- 10 另外，根据本发明的结构损伤检测方法、设备和系统不需要事先知道无损结构的特征信息，更便于实施；并且适用于在航空航天、土木和机械等任何可能发生结构材料的各种形式损伤的领域中应用。

附图说明

- 15 通过阅读下文优选实施方式的详细描述，各种其他的优点和益处对于本领域普通技术人员将变得清楚明了。附图仅用于示出优选实施方式的目的，而并不认为是对本发明的限制。而且在整个附图中，用相同的参考符号表示相同的部件。在附图中：

图 1 是根据本发明一个实施例的结构损伤检测系统 100 的示意图；

- 20 图 2 是根据本发明另一个实施例的结构损伤检测系统 200 的俯视示意图；

图 3 是根据本发明另一个实施例的结构损伤检测系统 200 的沿图 3 中的 A 向的正视示意图；

图 4 是 MAC 矩阵元素的分布图；以及

- 25 图 5 示意性地示出了根据本发明一个实施例的结构损伤检测方法的流程图。

具体实施例

下面结合附图和具体的实施方式对本发明作进一步的描述。

- 30 图 1 示出了根据本发明一个实施例的结构损伤检测系统 100。如图 1 所示，结构损伤检测系统 100 包括结构损伤检测设备 110 和信号处理部件 120。结构损伤检测设备 110 用于在被检测结构上施加敲击并且感

测由被检测结构表面传递到敲击装置的响应信号。信号处理部件 120 对结构损伤检测设备 110 所感测到的响应信号进行处理以确定被检测结构中是否有损伤以及损伤的位置。

结构损伤检测设备 110 包括敲击装置 112 和与该敲击装置 112 集成在一起的传感器 114。所述敲击装置 112 用于当结构损伤检测设备 110 在待检测结构的表面上进行扫描的同时以具有预定频段和大小的敲击力敲击该待检测结构。传感器 114 感测由待检测结构表面传递到敲击装置的响应。一般而言，待检测结构表面在敲击力的作用下会产生位移、速度和加速度响应，由于待检测结构表面和敲击装置的相互作用，这些响应会传递到敲击装置上，其瞬时值的大小可以反映被检测结构在敲击位置处的结构特征，因此，当被检测结构中出现损伤时，该位置处由待检测结构表面传递到敲击装置的位移、速度或加速度响应会与没有损伤位置的响应明显不同，本发明基于此而做出。传感器 114 可以是能够感测由待检测结构表面传递到敲击装置的响应的任何传感器。例如，传感器 114 可以是能够感测由待检测结构表面传递到敲击装置的位移、速度和加速度响应之一的任何传感器。根据本发明的一个实施例，传感器 114 为用于感测由待检测结构表面传递到敲击装置的加速度响应的加速度传感器，这是因为，在传感器 114 所感测的加速度 a 和结构位移响应 b 、结构局部阻抗 Z 以及敲击力 F 之间的关系存在如下关系：

$$a(x) \approx -\frac{b(x)}{M}Z(x) + \frac{F(x)}{M} - g$$

其中， x 代表敲击的位置， M 是敲击装置的质量， g 是重力加速度。

信号处理部件 120 包括谱图获取装置 122、谱图包络线截取装置 124、损伤指示值计算装置 126 和损伤位置确定装置 128。

谱图获取装置 122 获取传感器 114 所感测到的传感器信号。根据检测精度的要求，可以将被检测结构的表面划分为具有一定大小的多个部分，而结构损伤检测设备 110 扫描每个表面部分都需要一定时间，此时，传感器 114 所获取的信号为在该段时间上的传感器信号分布。随后，谱图获取装置 112 对该传感器信号在时间上的分布进行变换处理以获取该信号在频率域或者尺度域上的表示。这种变换处理可以利用现有技术领域的任何变换处理进行，例如该变换处理可以是短时傅

立叶变换、小波变换或者 Hilbert-Huang 变换等。因此，谱图获取装置 122 获取了在所述结构表面的每个位置部分处的信号频谱或尺度谱。

谱图包络线截取装置 124 从所述信号谱图中截取与敲击装置的敲击力频段相对应的谱图包络线。本发明仅仅截取与敲击装置的敲击频段相对应的谱图，并随后仅仅对在该谱图内的信号进行分析，一方面可以减少由于处理全部频段谱图所需要的处理开销，另一方面，通过将敲击频段设置为与环境噪声的频段不同的频段，可以显著减少环境噪声对检测结果的影响，从而提高检测的精度。

损伤指示值计算装置 126 基于所截取的谱图包络线来计算被检测结构表面的每个位置处的损伤指示值，该损伤指示值反映了该位置处的谱图包络线与其他位置处的谱图包络线的相似程度。可以有多种方式来计算损伤指示值，根据本发明的一个实施例，可以如下所述来计算损伤指示值，首先将谱图包络线转换为谱图向量，这可以通过获取谱图包络线中的多个频率处的幅值作为谱图向量的分量来进行转换。谱图向量的分量数量可以根据检测精度以及系统的处理性能等确定。分量对应的频率可以均匀分布在谱图包络线的频段中，也可以不均匀分布。但是，对于被检测结构而言，每个位置处的频率选择方式应当是相同的。在生成了每个位置处的谱图向量之后，计算反映当前位置处的谱图向量和其他位置处的谱图向量的相似程度的损伤指示值。可以有多种方式来计算两个谱图向量之间的相似程度。根据本发明的一个实施例，可以将损伤指示值计算为：

$$\left(\sum_{j=1 \dots n} \frac{\mathbf{Y}_i \cdot \mathbf{Y}_j}{|\mathbf{Y}_i| \times |\mathbf{Y}_j|} \right) / n,$$

其中， $\mathbf{Y}_i$ 和 $\mathbf{Y}_j$ 分别表示在所述结构上的当前位置和其他位置处的谱图向量， $\cdot$ 表示谱图向量的内积运算， $|\mathbf{Y}_i|$ 和 $|\mathbf{Y}_j|$ 表示向量 $\mathbf{Y}_i$ 和 $\mathbf{Y}_j$ 的长

度， n 为被检测结构所划分的单位检测部分的数量。 $\frac{\mathbf{Y}_i \cdot \mathbf{Y}_j}{|\mathbf{Y}_i| \times |\mathbf{Y}_j|}$ 在 $\mathbf{Y}_i$ 和 $\mathbf{Y}_j$ 越相似，即包络线 i 和包络线 j 的形状越相似时，就越接近 1。因此，针对某个谱图向量 $\mathbf{Y}_i$ 的损伤指示值可以是该谱图向量 $\mathbf{Y}_i$ 和所有其他谱

图向量 Y_j 相似度的总和的平均值。

根据本发明的另一个实施例,可以利用 MAC 系数来获取损伤指示值。MAC 系数矩阵的计算公式为:

$$MAC(i, j) = \frac{Y_i \cdot Y_j}{|Y_i| \times |Y_j|},$$

- 5 其中, Y_i 和 Y_j 分别表示在所述结构上第 i 个和第 j 个部分的谱图向量, $\cdot$ 表示谱图向量的内积运算, $|Y_i|$ 和 $|Y_j|$ 表示向量 Y_i 和 Y_j 的长度。MAC 系数矩阵中的每个元素都表示了两个谱图向量之间的相似程度, 其中主对角线上的元素一定等于 1。MAC 系数矩阵的第 i 行或第 i 列元素的大小就能反映出对应于某个谱图向量 Y_i 的损伤情况, 因而也就是
- 10 该谱图向量 Y_i 所对应位置的损伤指示值。

- 损伤位置确定装置 128 基于被检测结构表面的每个位置处的损伤指示值来确定被检测结构中的损伤位置。例如, 损伤位置确定装置 128 可以将损伤指示值发生突然下降的位置确定为存在损伤的位置。因为如果结构没有损伤, 那么损伤指示值在空间的分布是比较光滑的; 如
- 15 果某处的损伤指示值发生了突变, 那么就意味着该处局部阻抗和其他地方明显不同, 很可能出现了损伤, 而突变的大小也就反映了损伤的严重程度。比如, 取 MAC 系数矩阵第一行元素的值为纵轴元素, 并以所对应的结构位置为横轴画一条曲线, 如果结构没有损伤, 那么该曲线应该还是比较光滑的; 如果曲线在某处突然下降, 就说明该处存在损
- 20 伤, 下降的幅度越大, 损伤也就越严重。根据本发明的一个实施例, 可以将曲线的一阶导数值的绝对值超过预定阈值的位置确定为存在损伤的位置。

- 图 2 和 3 示出了根据本发明另一个实施例的、适于对类似于桥梁的结构进行结构损伤检测的损伤检测系统 200 的示意图。在该实施例中, 被检测结构为轴向长度远大于垂直于轴向的截面的板结构, 该板
- 25 结构沿轴向的横截面都非常相似。这种结构在工程实践中较为常见, 例如公路桥梁, 铁路桥梁等都具有这种结构。而且在工程实践中, 这类桥梁也经常需要进行检测以确保桥梁没有损伤, 或者在出现损伤后及时加以修复以防止由于桥梁断裂而出现事故。

- 30 图 2 和 3 所示的损伤检测系统 200 非常适合于上述类似桥梁结构的损伤检测。如图 2 所示, 被检测结构为层合板 5, 其固定在地面上的

两根钢棒 4 上, 并且离地具有一定间隙应保证结构损伤检测设备 210 移动至层合板 5 中间位置时层合板 5 不接触地面, 从而层合板 5 可以很好地模拟现实中的桥梁结构。另外, 为了测试检测结构, 在层合板 5 中制造了损伤 6, 该损伤表现为裂缝。结构损伤检测设备 210 集成在钢制小车 1 上, 其中的敲击装置 3 可以在控制信号的控制下产生具有预定频段的敲击力。根据本发明的一个实施方式, 该敲击装置 3 为 JZK-2 激振器, 其可以在来自计算机 11 的控制信号的控制下产生具有预定频段的敲击力。例如, 计算机 11 中的 DASyLab 软件可以产生由 16 个 90-240Hz 之间均匀分布的等幅正弦信号合成的控制信号, 这些控制信号由 ACL-8112-PG 转换卡的 D/A 端口进行数模转换, 并经 YE5871 功率放大器 10 放大, 最后传送到激振器 3 上以产生 90-240Hz 频段的敲击力。

结构损伤检测设备 210 中的传感器 2 为加速度传感器, 其感测由待检测结构表面传递到敲击装置 3 的加速度信号, 并且将其发送到计算机 11 中的信号处理部件 120 进行进一步处理。该加速度传感器 2 可以采用 YD-36 压电式加速度计, 它采集到的信号经过 YE5852T 电荷放大器 9 放大后, 通过 ACL-8112-PG 转换卡的 A/D 端口进行数模转换后输入到计算机 11 中, 以由其中的信号处理部件 120 进行进一步处理。这里, 加速度传感器采集信号的采样率为 1024 次/秒。

信号处理部件 120 的结构和参考图 1 所示的实施方式基本相同, 这里就不再进行赘述。

如图 2 和 3 所示, 在对层合板 5 进行检测时, 将集成有结构损伤检测设备 210 的小车 1 置于层合板 5 的中心处, 并由固定在地面处的 41k25RGN-C 调速电机 8 带动细钢丝 7 拖动, 以大约 $V = 1.3\text{cm/s}$ 的速度沿层合板 5 的长度方向 (即轴向) 进行扫描。在扫描的同时, 用上所述由激振器 3 产生 90-240Hz 频段的敲击力来敲击, 并同时由加速度传感器 2 采集加速度信号以发送到信号处理部件 120 进行进一步处理。

在该实施例中, 以 1.3cm 为单位来沿板长度方向划分层合板 5, 由于小车 1 的行进速度为 1.3cm/s, 而且加速度传感器采集信号的采样率为 1024 次/秒。因此, 谱图获取装置 122 按照 1024 个加速度信号的数据长度获取感测信号, 并采用短时傅里叶变换方法获得频谱图。谱图包络线截取装置 124 截取与敲击力的频段相对应的、即 90-240Hz 频段

的频谱包络线。损伤指示值计算装置 126 选择大小为 90, 100, 110..., 240 频率作为频谱向量中的分量相对应的频率, 即损伤指示值计算装置 126 将频谱包络线向量化为长度为 16 的向量。然后, 损伤指示值计算装置 126 计算 MAC 系数矩阵:

$$MAC(i, j) = \frac{\mathbf{Y}_i \cdot \mathbf{Y}_j}{|\mathbf{Y}_i| \times |\mathbf{Y}_j|}.$$

随后, 损伤位置确定装置 128 可以根据 MAC 系数矩阵的值来确定损伤位置。

图 4 示出了 MAC 矩阵元素的分布图, 这是对尺寸为 140×15×3cm 的层合板中存在人为制造的一条约 2cm 长的裂缝 6 的层合板进行检测所获取的结果。从图 4 中可以明显看出, 裂缝位置的 MAC 系数明显低于其它位置的 MAC 系数, 由此可以说明本发明方法能够有效地检测出结构的损伤。

图 5 示意性地示出了根据本发明一个实施例的结构损伤检测方法的流程图。如图 5 所示, 该方法始于步骤 S510, 在该步骤 S510 中, 使用根据本发明的结构损伤检测设备中的敲击装置沿着被检测结构的表面进行扫描, 其中该敲击装置在扫描的同时以具有预定频段的敲击力进行敲击。随后, 在步骤 S520 中, 利用根据本发明的结构损伤检测设备中的传感器来感测该敲击装置的响应信号。如上参考结构损伤检测设备所述, 所感测的信号可以是能够反映由待检测结构表面传递到敲击装置的在敲击位置处的任何响应信号。例如传感器感测的信号可以为位移、速度或加速度。特别的, 传感器所感测的信号为加速度信号更便于工程实施。在步骤 S530 中, 对所述传感器感测到的信号进行变换处理以获取在被检测结构表面的每个位置处的信号谱。根据检测精度的要求, 需要将被检测结构的表面分为多个部分。在每个部分上感测到的信号是信号在结构损伤检测设备扫描该部分所需时间上的分布, 因此可以对信号在时间域上分布进行变换处理以获取该信号在频率域或尺度域上的表示。这种变换处理可以利用现有技术领域的任何变换处理进行, 例如该变换处理可以是短时傅立叶变换、小波变换或 Hilbert-Huang 变换等。

随后, 在步骤 S540 中, 从信号谱图中截取与敲击装置的敲击力的

预定频段相对应的部分，并获取所截取谱图的包络线。如上所述，根据本发明的结构损伤检测方法仅仅截取与敲击装置的敲击频段相对应的谱图，并随后仅仅对在该频段谱图内的信号进行分析。

在步骤 S550 中，根据所截取的谱图包络线来计算被检测结构表面的每个位置处的损伤指示值，该损伤指示值反映了该位置处的谱图包络线与其他位置处的谱图包络线的相似程度。可以有多种方式来计算损伤指示值。

根据本发明的一个实施例，可以如下所述来计算损伤指示值：

1、将谱图包络线转换为谱图向量，这可以通过获取谱图包络线中的多个频率处的幅值作为谱图向量的分量来进行转换。谱图向量的分量数量可以根据检测精度以及系统的处理性能等确定。分量对应的频率可以均匀分布在谱图包络线的频段中，也可以不均匀分布。但是，对于被检测结构而言，每个位置处的频率选择方式应当是相同的；

2、在生成了每个位置处的谱图向量之后，计算反映当前位置处的谱图向量和其他位置处的谱图向量的相似程度的损伤指示值。可以有多种方式来计算两个谱图向量之间的相似程度。根据本发明的一个实施例，可以将损伤指示值计算为：

$$\left(\sum_{j=1 \dots n} \frac{Y_i \bullet Y_j}{|Y_i| \times |Y_j|} \right) / n,$$

其中， Y_i 和 Y_j 分别表示在所述结构上的当前位置和其他位置处的谱图向量， $\bullet$ 表示谱图向量的内积运算， $|Y_i|$ 和 $|Y_j|$ 表示谱图向量 Y_i 和 Y_j 的长度， n 为被检测结构所划分的单位检测部分的数量。 $\frac{|Y_i \bullet Y_j|}{|Y_i| \times |Y_j|}$ 在 Y_i 和 Y_j 越相似，即包络线 i 和包络线 j 的形状越相似时，就越接近 1。因此，针对某个谱图向量 Y_i 的损伤指示值可以是该谱图向量 Y_i 和所有其他谱图向量 Y_j 相似度的总和的平均值。

根据本发明的另一个实施例，可以利用 MAC 系数来获取损伤指示值。MAC 系数矩阵的计算公式为：

$$MAC(i, j) = \frac{Y_i \bullet Y_j}{|Y_i| \times |Y_j|},$$

其中， Y_i 和 Y_j 分别表示在所述结构上第 i 个和第 j 个部分的谱图

向量, $\bullet$ 表示谱图向量的内积运算, $|Y_i|$ 和 $|Y_j|$ 表示向量 Y_i 和 Y_j 的长度。MAC 系数矩阵中的每个元素都表示了两个谱图向量之间的相似程度, 其中主对角线上的元素一定等于 1。MAC 系数矩阵的第 i 行或第 i 列元素的大小就能反映出对应于某个谱图向量 Y_i 的损伤情况, 因而也就是该谱图向量 Y_i 所对应位置的损伤指示值。

在为被检测结构表面的每个位置计算了损伤指示值之后, 在步骤 S560 中, 基于被检测结构表面的每个位置处的损伤指示值来确定被检测结构中的损伤位置。例如, 可以将损伤指示值发生突然下降的位置确定为存在损伤的位置。比如, 取 MAC 系数矩阵第一行元素的值为纵轴元素, 并以所对应的结构位置为横轴画一条曲线, 如果结构没有损伤, 那么该曲线应该都是比较光滑的; 如果曲线在某处突然下降, 就说明该处存在损伤, 下降的幅度越大, 损伤也就越严重。根据本发明的一个实施例, 可以将该曲线的一阶导数值的绝对值超过预定阈值的位置确定为存在损伤的位置。

应当注意的是, 在本发明的结构损伤检测设备的信号处理部件中, 根据其要实现的功能而对其中的部件进行了逻辑划分, 但是, 本发明不局限于此, 可以根据需要对信号处理部件中的各个部件进行重新划分或者组合, 例如, 可以将一些部件组合为单个部件, 或者可以将一些部件进一步分解为更多的子部件。

本发明的信号处理部件实施例可以以硬件实现, 或者以在一个或者多个处理器上运行的软件模块实现, 或者以它们的组合实现。本领域的技术人员应当理解, 可以在实践中使用微处理器或者数字信号处理器 (DSP) 来实现根据本发明实施例的信号处理部件中的一些或者全部部件的一些或者全部功能。本发明还可以实现为用于执行这里所描述的方法的一部分或者全部的设备或者装置程序 (例如, 计算机程序和计算机程序产品)。这样的实现本发明的程序可以存储在计算机可读介质上, 或者可以具有一个或者多个信号的形式。这样的信号可以从因特网网站上下载得到, 或者在载体信号上提供, 或者以任何其他形式提供。

应该注意的是上述实施例对本发明进行说明而不是对本发明进行限制, 并且本领域技术人员在不脱离所附权利要求的范围的情况下可设计出替换实施例。在权利要求中, 不应将位于括号之间的任何参考

- 符号构造成对权利要求的限制。单词“包含”不排除存在未列在权利要求中的元件或步骤。位于元件之前的单词“一”或“一个”不排除存在多个这样的元件。本发明可以借助于包括有若干不同元件的硬件以及借助于适当编程的计算机来实现。在列举了若干装置的单元权利要求中，这些装置中的若干个可以通过同一个硬件项来具体体现。单词第一、第二、以及第三等的使用不表示任何顺序。可将这些单词解释为名称。
- 5

权 利 要 求

1、一种用于检测结构的损伤的结构损伤检测方法，包括步骤：

使用敲击装置沿着所述结构的表面进行扫描，其中所述敲击装置

5 在扫描的同时以具有预定频段的敲击力进行敲击；

利用传感器感测在所述结构表面的每个位置处、由所述结构表面传递到所述敲击装置的响应信号，其中所述传感器感测的信号可以为位移、速度和加速度中的至少之一；

10 对所述传感器感测到的信号进行变换处理以获取在所述结构表面的每个位置处的信号谱图；

从所述信号谱图中截取与所述敲击力的预定频段相对应的谱图包络线；

计算所述结构表面的每个位置处的损伤指示值，该损伤指示值反映了该位置处的谱图包络线与其他位置处的谱图包络线的相似程度；

15 以及

将损伤指示值发生突变的位置确定为存在结构损伤的位置。

2、如权利要求 1 所述的方法，其中还包括步骤：根据所述损伤指示值的突变程度来确定损伤大小。

20 3、如权利要求 1 或者 2 所述的结构损伤检测方法，其中所述传感器和所述敲击装置集成在一起。

4、如权利要求 1-3 中的任一个所述的结构损伤检测方法，其中计算所述结构表面的每个位置处的损伤指示值的步骤包括：

25 为所述结构表面中的所有位置，生成与所述位置处的谱图包络线相对应的谱图向量，其中所述谱图向量的每个分量为谱图包络线中某个频率所对应的谱值；以及

为所述结构表面中的每个位置，计算反映当前位置处的谱图向量和其他位置处的谱图向量的相似程度的损伤指示值。

30 5、如权利要求 4 所述的结构损伤检测方法，其中所述计算反映该位置处的谱图向量和其他位置处的谱图向量的相似程度的损伤指示值包括：

将损伤指示值计算为：
$$\left(\sum_{j=1..n} \frac{Y_i \bullet Y_j}{|Y_i| \times |Y_j|} \right) / n$$
，其中， Y_i 和 Y_j 分别表示在所述结构上的当前位置和其他位置处的谱图向量， $\bullet$ 表示谱图向量的内积运算， $|Y_i|$ 和 $|Y_j|$ 表示向量 Y_i 和 Y_j 的长度，以及 n 为所述结构中的检测位置数量。

- 5 6、如权利要求4所述的结构损伤检测方法，其中所述计算反映该位置处的谱图向量和其他位置处的谱图向量的相似程度的损伤指示值包括：

计算MAC系数矩阵，其被计算为：

$$MAC(i, j) = \frac{Y_i \bullet Y_j}{|Y_i| \times |Y_j|},$$

- 10 其中， Y_i 和 Y_j 分别表示在所述结构上第 i 个和第 j 个部分的谱图向量， $\bullet$ 表示谱图向量的内积运算， $|Y_i|$ 和 $|Y_j|$ 表示向量 Y_i 和 Y_j 的长度；以及

根据所述MAC系数矩阵中与该位置相对应的行或者列元素的相对大小来确定该位置的损伤指示值。

- 15 7、如权利要求1-6中的任一个所述的结构损伤检测方法，其中所述结构的形状为细长型，沿所述结构轴向的每个截面相似，所述敲击装置在所述结构的表面上沿轴向进行扫描，所述传感器感测所述结构沿轴向方向每个位置处的响应信号。

- 20 8、如权利要求1-7中的任一个所述的结构损伤检测方法，其中所述传感器为感测由所述结构表面传递到敲击装置的加速度响应的传感器。

9、一种结构损伤检测设备，包括：

敲击装置，用于在待检测结构表面上以具有预定频段的敲击力进行敲击；以及

- 25 传感器，感测所述由待检测结构表面传递到敲击装置的响应信号，其中所述传感器感测的响应信号可以为位移、速度和加速度中的至少

之一;

其中所述敲击装置和所述传感器集成在一起,以便所述敲击装置在所述待检测结构表面上进行敲击的同时,所述传感器感测由所述待检测结构表面传递到所述敲击装置的响应信号。

5 10、如权利要求 9 所述的结构损伤检测设备,其中所述传感器可以为加速度传感器。

11、一种结构损伤检测系统,包括:

如权利要求 9 或者 10 所述的结构损伤检测设备;以及

10 信号处理部件,用于对所述结构损伤检测设备中的传感器所感测到的信号进行处理以确定待检测结构中的损伤位置,所述信号处理部件包括:

谱图获取装置,用于对所述传感器感测到的信号进行变换处理以获取在所述结构表面的每个位置处的信号谱图;

15 谱图包络线截取装置,用于从所述信号谱图中截取与所述敲击力的预定频段相对应的谱图包络线;

损伤指示值计算装置,用于计算所述结构表面的每个位置处的损伤指示值,该损伤指示值反映了该位置处的谱图包络线与其他位置处的谱图包络线的相似程度;以及

20 损伤位置确定装置,用于基于所述结构表面的每个位置处的损伤指示值来确定所述结构中的损伤位置。

12、如权利要求 11 所述的结构损伤检测系统,其中所述损伤指示值计算装置为所述结构表面中的所有位置,生成与所述位置处的谱图包络线相对应的谱图向量,其中所述谱图向量的每个分量为谱图包络线中某个频率所对应的谱值;以及

25 所述损伤指示值计算装置为所述结构表面中的每个位置,计算反映当前位置处的谱图向量和与其他位置处的谱图向量的相似程度的损伤指示值。

13、如权利要求 12 所述的结构损伤检测系统,其中所述损伤指示值计算装置将损伤指示值计算为:

30
$$\left(\sum_{j=1..n} \frac{\mathbf{Y}_i \cdot \mathbf{Y}_j}{|\mathbf{Y}_i| \times |\mathbf{Y}_j|} \right) / n,$$

其中, Y_i 和 Y_j 分别表示在所述结构上的当前位置和其他位置处的谱图向量, $\bullet$ 表示谱图向量的内积运算, $|Y_i|$ 和 $|Y_j|$ 表示向量 Y_i 和 Y_j 的长度, 以及 n 为所述结构中的检测位置数量。

14、如权利要求 12 所述的结构损伤检测系统, 其中所述损伤指示
5 值计算装置被配置为:

计算 MAC 系数矩阵, 该 MAC 系数矩阵被计算为:

$$MAC(i, j) = \frac{Y_i \bullet Y_j}{|Y_i| \times |Y_j|},$$

其中, Y_i 和 Y_j 分别表示在所述结构上第 i 个和第 j 个部分的谱图
向量, $\bullet$ 表示谱图向量的内积运算, $|Y_i|$ 和 $|Y_j|$ 表示向量 Y_i 和 Y_j 的长度;

10 以及

根据所述 MAC 系数矩阵中与该位置相对应的行或者列元素的相对大小来确定该位置的损伤指示值。

15 15、如权利要求 11-14 中的任一个所述的结构损伤检测系统, 其中所述待检测结构的形状为细长型, 沿所述待检测结构轴向的每个截面相似, 所述敲击装置在所述待检测结构的表面上沿轴向进行扫描, 所述传感器感测由所述待检测结构表面传递到所述敲击装置在所述待检测结构沿轴向方向每个位置处的响应信号。

结构损伤检测系统 100

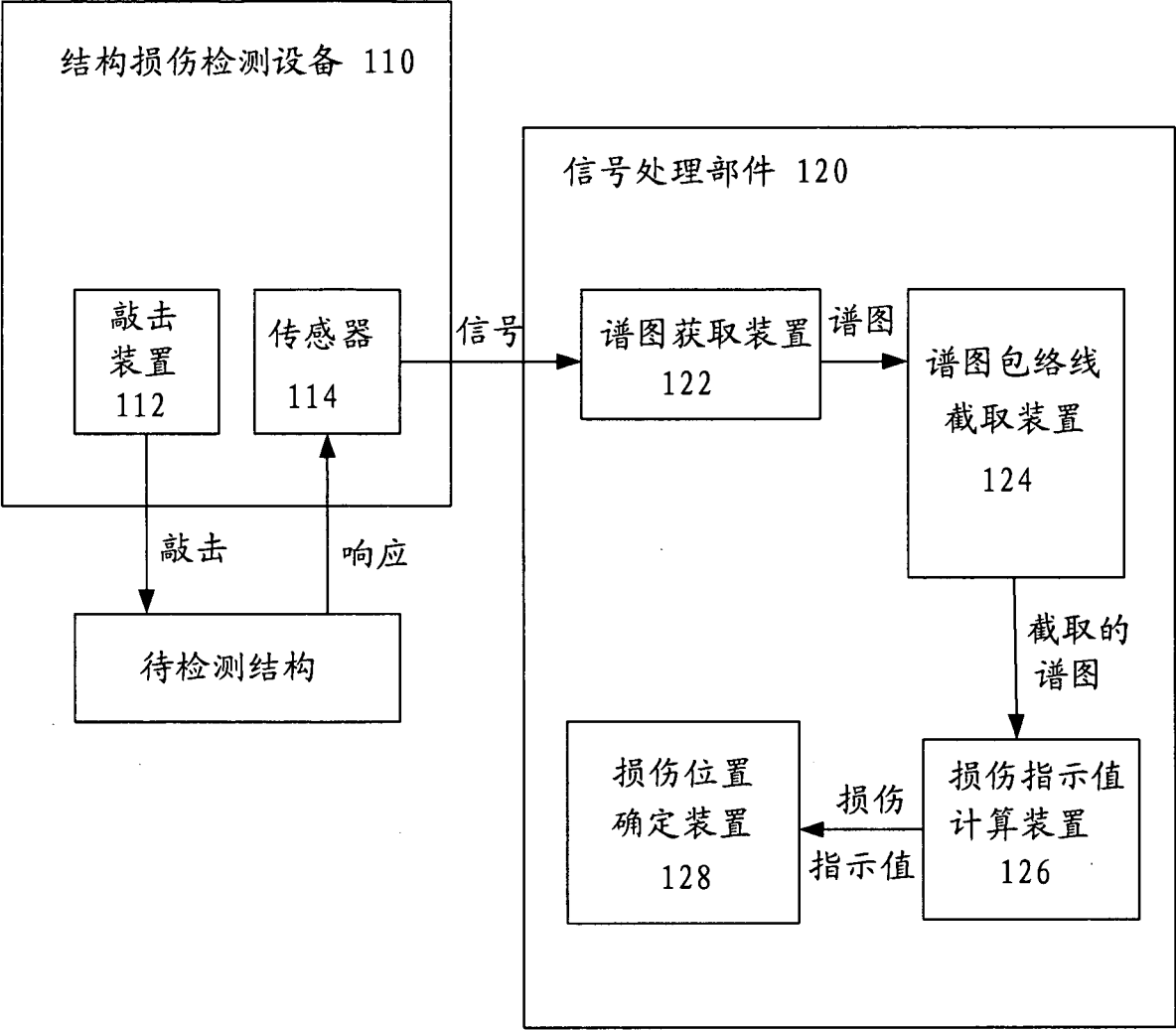


图 1

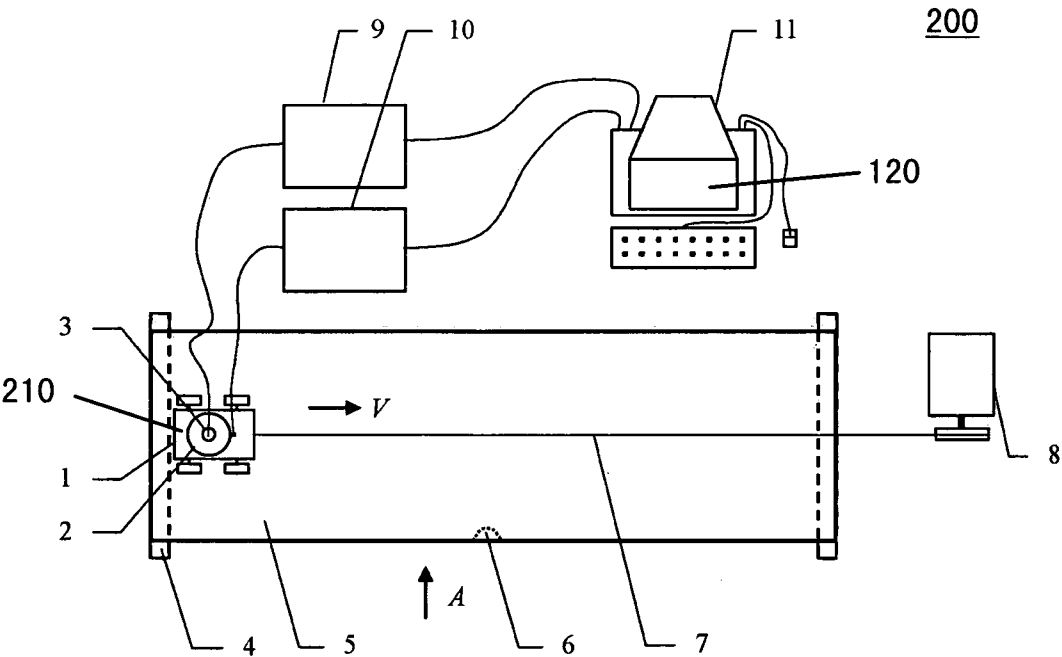


图 2

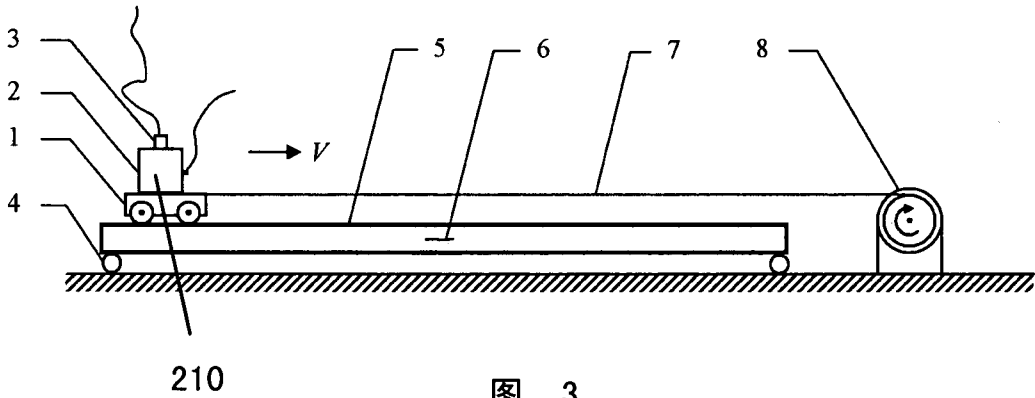


图 3

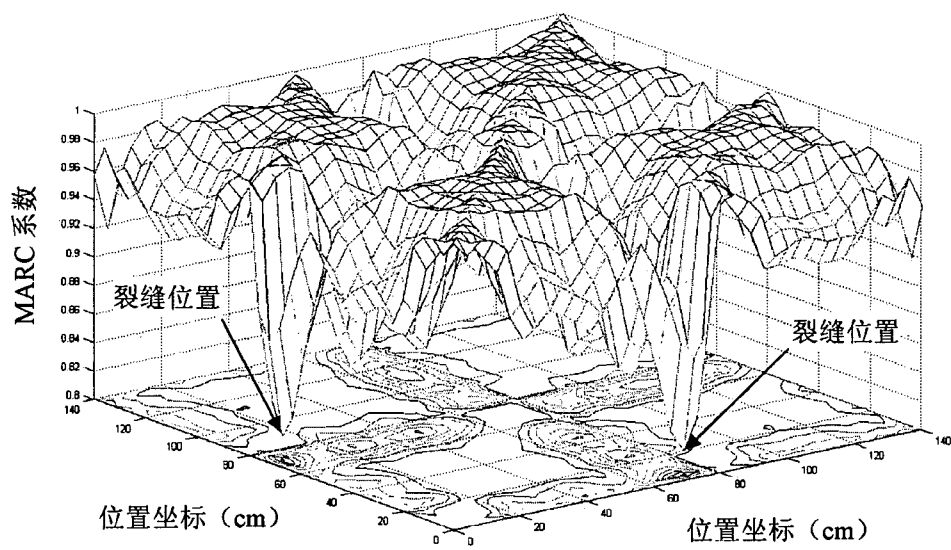


图 4

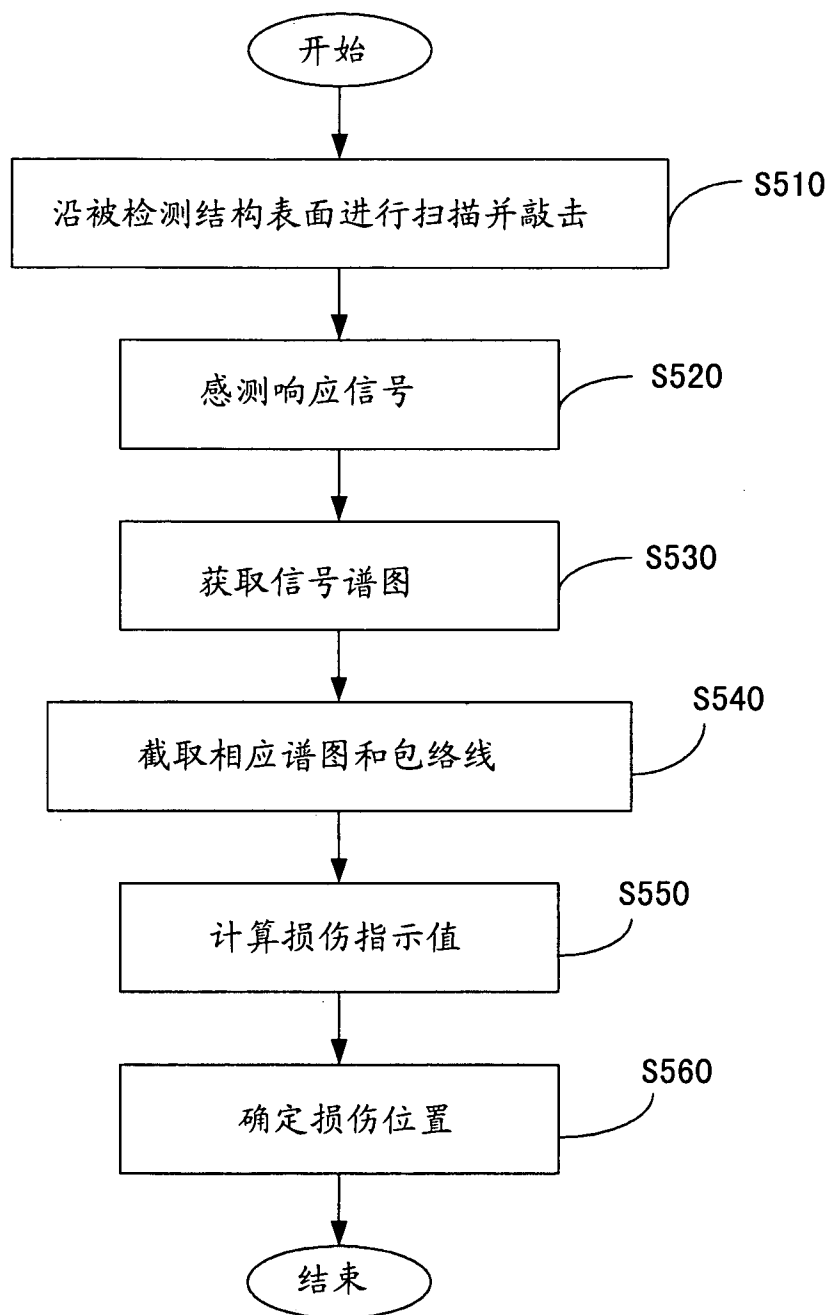


图 5

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2010/000470

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

See extra sheet

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC: G01N

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

CNKI

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNPAT, WPI, EPODOC: knock+, beat+, hit, strik+, struck+, envelope+, sens+, detect+

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	JP2006-349628A (DOKURITSU GYOSEI HOJIN DOBOKU KENKYUSHO et al.), 28 Dec. 2006 (28.12.2006), columns 22-33, figs.1, 2	9,10
P, X	CN101561379A (TSINGHUA UNIVERSITY), 21 Oct. 2009 (21.10.2009), page 3 line 6-page 6 line 6	1-4 (part), 6-9 (part), 10, 11-12 (part), 14-15 (part)
P, Y		1-4 (part), 6-7 (part), 9 (part), 11-12 (part), 14-15 (part)
Y	CN1804612A (UNIV NORTHWESTERN POLYTECHNICA), 19 Jul. 2006 (19.07.2006), page 3 lines 8-21	1-4 (part), 6-7 (part), 9 (part), 11-12 (part), 14-15 (part)
A	US7240554B2 (GE INSPECTION TECHNOLOGIES SYSTEMS GMBH), 10 Jul. 2007 (10.07.2007), whole document	1-15

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date	“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
“L” document which may throw doubts on priority claim (S) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	“&” document member of the same patent family
“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	
“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	

Date of the actual completion of the international search 08 Jul. 2010 (08.07.2010)	Date of mailing of the international search report 22 Jul. 2010 (22.07.2010)
--	--

Name and mailing address of the ISA/CN
The State Intellectual Property Office, the P.R.China
6 Xitucheng Rd., Jimen Bridge, Haidian District, Beijing, China
100088
Facsimile No. 86-10-62019451

Authorized officer

YANG Lisha

Telephone No. (86-10)62085661

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/CN2010/000470

Patent Documents referred in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
JP2006349628 A	28.12.2006	None	
CN101561379 A	21.10.2009	None	
CN1804612 A	19.07.2006	CN100420944C	24.09.2008
US7240554 B2	10.07.2007	US2006230831 A	19.10.2006
		EP1518112 A	30.03.2005
		DE10259218 A	01.07.2004
		WO2004055508 A	01.07.2004

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2010/000470

Continuation of : CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01N29/04 (2006.01) i

G01N29/46 (2006.01) i

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2010/000470

A. 主题的分类

见附加页

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和 IPC 两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

IPC: G01N

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

CNKI

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用))

CNPAT, WPI, EPODOC: 结构损伤, 包络, knock+, beat+, hit, strik+, struck+, envenlope+, sens+, detect+

C. 相关文件

类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
X	JP2006-349628A (DOKURITSU GYOSEI HOJIN DOBOKU KENKYUSHO 等), 28.12 月 2006 (28.12.2006), 第 22-33 栏, 附图 1、2	9,10
P, X	CN101561379A (清华大学), 21.10 月 2009 (21.10.2009), 第 3 页第 6 行-第 6 页第 6 行	1-4 (部分)、6-9 (部分)、10、11-12 (部分)、14-15 (部分)
P, Y		1-4 (部分)、6-7 (部分)、9 (部分)、11-12 (部分)、14-15 (部分)
Y	CN1804612A (西北工业大学), 19.7 月 2006 (19.07.2006), 第 3 页 8-21 行	1-4 (部分)、6-7 (部分)、9 (部分)、11-12 (部分)、14-15 (部分)
A	US7240554B2 (GE INSPECTION TECHNOLOGIES SYSTEMS GMBH), 10.7 月 2007 (10.07.2007), 全文	1-15

☐ 其余文件在 C 栏的续页中列出。

☒ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型:

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的)

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期
08.7 月 2010 (08.07.2010)

国际检索报告邮寄日期
22.7 月 2010 (22.07.2010)

ISA/CN 的名称和邮寄地址:
中华人民共和国国家知识产权局
中国北京市海淀区蓟门桥西土城路 6 号 100088
传真号: (86-10)62019451

受权官员

杨莉莎
电话号码: (86-10) **62085661**

国际检索报告

关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2010/000470

检索报告中引用的 专利文件	公布日期	同族专利	公布日期
JP2006349628 A	28.12.2006	无	
CN101561379 A	21.10.2009	无	
CN1804612 A	19.07.2006	CN100420944C	24.09.2008
US7240554 B2	10.07.2007	US2006230831 A	19.10.2006
		EP1518112 A	30.03.2005
		DE10259218 A	01.07.2004
		WO2004055508 A	01.07.2004

续：主题的分类

G01N29/04 (2006.01) i

G01N29/46 (2006.01) i