

(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
2020 年 8 月 6 日 (06.08.2020)



(10) 国际公布号
WO 2020/156348 A1

- (51) 国际专利分类号:
G01N 29/46 (2006.01) *G06N 3/04* (2006.01)
G06K 9/62 (2006.01) *G06N 3/08* (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2020/073357
- (22) 国际申请日: 2020 年 1 月 21 日 (21.01.2020)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
201910099951.1 2019 年 1 月 31 日 (31.01.2019) CN
- (71) 申请人: 青岛理工大学 (QINGDAO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) [CN/CN]; 中国山东省青岛市黄岛区长江中路 2 号, Shandong 266052 (CN)。

- (72) 发明人: 刁延松 (DIAO, Yansong); 中国山东省青岛市黄岛区长江中路 2 号, Shandong 266052 (CN)。 王玉梅 (WANG, Yumei); 中国山东省青岛市黄岛区长江中路 2 号, Shandong 266052 (CN)。 刘秀丽 (LIU, Xiuli); 中国山东省青岛市黄岛区长江中路 2 号, Shandong 266052 (CN)。 刘芸 (LIU, Yun); 中国山东省青岛市黄岛区长江中路 2 号, Shandong 266052 (CN)。
- (74) 代理人: 青岛清泰联信知识产权代理有限公司 (QINGDAO LAWSCI INTELLECTUAL PROPERTY CO., LTD.); 中国山东省青岛市崂山区苗岭路 52 号巨峰创业大厦四层 401, Shandong 266100 (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, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU,

(54) Title: STRUCTURAL DAMAGE IDENTIFICATION METHOD BASED ON ENSEMBLE EMPIRICAL MODE DECOMPOSITION AND CONVOLUTION NEURAL NETWORK

(54) 发明名称: 基于总体经验模态分解与卷积神经网络的结构损伤识别法

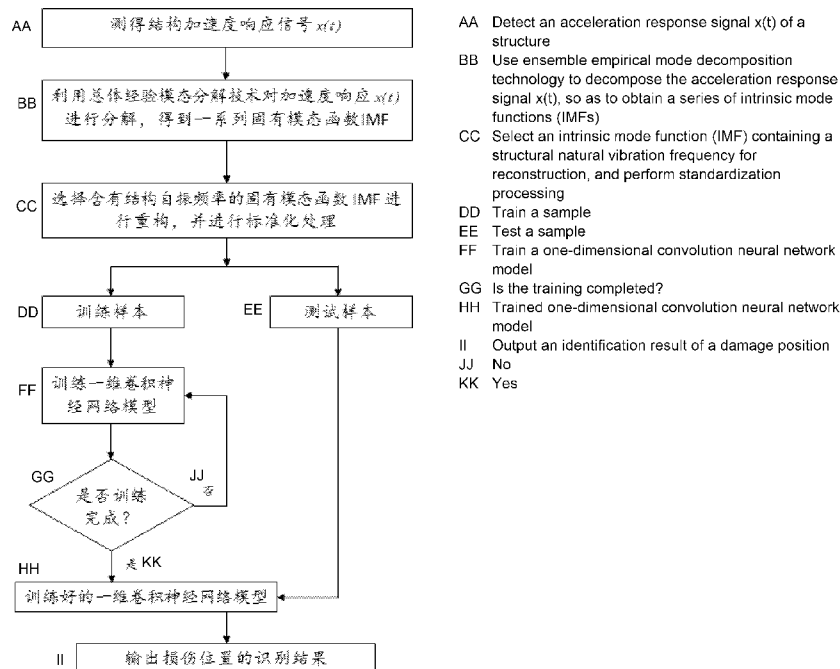


图 1

(57) Abstract: A structural damage identification method based on ensemble empirical mode decomposition and a convolution neural network. The method comprises: selecting an acceleration response signal of a structure as an analysis object; using ensemble empirical mode decomposition technology to decompose the acceleration response signal, so as to obtain a series of intrinsic mode functions (IMFs); selecting an intrinsic mode function (IMF) containing a structural natural vibration frequency for reconstruction; and then

CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, 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, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, 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, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告 (条约第21条(3))。

using a one-dimensional convolution neural network to perform feature extraction and damage classification on a reconstructed signal, thereby obtaining an identification result of a structural damage position.

(57) 摘要: 一种基于总体经验模态分解与卷积神经网络的结构损伤识别法, 包括选取结构的加速度响应信号作为分析对象, 采用总体经验模态分解技术对加速度响应信号进行分解得到一系列固有模态函数IMF, 选择含有结构自振频率的固有模态函数IMF进行重构, 再采用一维卷积神经网络对重构信号进行特征提取和损伤分类, 从而获得结构损伤位置的识别结果。

基于总体经验模态分解与卷积神经网络的结构损伤识别法

技术领域

本申请属于结构健康监测技术领域，尤其涉及一种基于总体经验模态分解与卷积神经网络的结构损伤识别法。

背景技术

由于大型工程结构与人们的生活息息相关，其结构中存在的潜在破坏和损伤，都可能会对人们的生产和生活造成重大损失，因而，大型工程结构的结构健康监测具有重要意义。

CN109145446A 公开了一种基于模态应变能和卷积神经网络的结构损伤识别方法，包括 S1：通过软件模拟构建结构模型，并根据结构模型进行单元划分；S2：模拟结构模型在不同单元的若干种结构损伤情况；S3：提取结构在自由振动情况下的第一阶模态应变能，所得的数据转化为矩阵数据形式，作为卷积神经网络的输入；S4：对卷积神经网络进行训练；S5：对结构进行实际测量，并按照 S1 的单元划分方式计算不同单元在不同阶模态的模态应变能；S6：将 S5 的模态矢量的数据矩阵代入到 S4 的训练后的卷积神经网络，得到结构的损伤结果。

CN109115879A 公开了一种基于模态振型和卷积神经网络的结构损伤识别方法，包括 S1：通过软件模拟构建结构模型，并根据结构模型进行单元划分；S2：模拟结构模型在不同单元的若干种结构损伤情况；S3：提取结构在自由振动情况下的第一阶模态振型，所得的数据转化为矩阵数据形式，作为卷积神经网络的输入；S4：对卷积神经网络进行训练；S5：对结构进行实际测量，并按照 S1 的单元划分方式测量单元质心的位移信号，形成与 S3 对应的矩阵数据形式；S6：将 S5 的单元质心的数据矩阵代入到 S4 的训练后的卷积神经网络，得到结构的损伤结果。

发明内容

本申请提出一种基于总体经验模态分解与卷积神经网络的结构损伤识别法，可提高识别准确率和识别效率；其技术方案为：

所述的基于总体经验模态分解与卷积神经网络的结构损伤识别法，包括以下步骤：

步骤 1：测得结构加速度响应信号 $x(t)$ ；

步骤 2：利用总体经验模态分解技术对加速度响应信号 $x(t)$ 进行分解，得到一系列固有模态函数 IMF；具体地为一系列固有模态函数 IMF 分量信号。

步骤 3：对步骤 2 得到的固有模态函数 IMF 进行傅里叶变换得到其频谱特性，选择含有结构自振频率的固有模态函数 IMF 进行重构，得到重构信号 $z(t)$ ；

具体地，对步骤 2 得到的固有模态函数 IMF 分量信号分别进行傅里叶变换得到其各自的频谱特性，选择含有结构自振频率的固有模态函数 IMF 分量信号进行重构，得到重构信号 $z(t)$ ；

步骤 4：对步骤 3 得到的重构信号 $z(t)$ 进行标准化处理，得到标准化重构信号 $Z(t)$ ；将标准化重构信号 $Z(t)$ 分为多段长度一定的子信号，选取子信号中的部分作为训练样本，剩余部分作为测试样本；

步骤 5：将步骤 4 得到的训练样本输入一维卷积神经网络模型中进行训练，训练过程中采用交叉熵损失函数作为损失函数，采用 Adam 优化算法作为优化算法；

步骤 6：将步骤 4 得到的测试样本输入到步骤 5 训练好的一维卷积神经网络模型中，得到损伤位置的识别结果。

作为优选，所述步骤 4 中，采用标准化处理公式对所述重构信号 $z(t)$ 进行标准化处理，所述标准化处理公式的表达式为：

$$Z(t) = \frac{z(t) - \mu}{\sigma}$$

式中， $Z(t)$ 为标准化重构信号； $z(t)$ 为重构信号； μ 为重构信号 $z(t)$ 的均值； σ 为重构信号 $z(t)$ 的方差。

作为优选，所述步骤 5 中，所述一维卷积神经网络模型包括依次连接的输

入层、第一卷积层、第一批量归一化层、第一池化层、第二卷积层、第二批量归一化层、第二池化层、第一全连接层、第二全连接层和输出层；其中，所述第一卷积层和第二卷积层均含有 16 个大小为 10×1 的卷积核，所述第一池化层和第二池化层的池化窗口大小均为 2×1 。

作为优选，所述步骤 5 中，所述一维卷积神经网络模型的训练包括交替进行的前向传播训练和反向传播训练，直至网络收敛或所述前向传播训练的输出结果与设定的输出结果之间的误差值达到指定的迭代终止条件。

所述前向传播训练步骤包括：将步骤 4 得到的训练样本从所述输入层中输入，所述第一卷积层对输入的训练样本进行处理得到初次处理特征图，所述初次处理特征图传送至所述第一批量归一化层进行归一化处理，归一化处理后传送至所述第一池化层进行池化处理，得到初次采样特征图；所述初次采样特征图传送至所述第二卷积层进行处理，得到二次处理特征图，所述二次处理特征图传送至所述第二批量归一化层进行归一化处理，归一化处理后传送至所述第二池化层进行池化处理，得到二次采样特征图；所述二次采样特征图依次传送至所述第一全连接层和第二全连接层进行处理，处理后传送至所述输出层，所述输出层对处理后的二次采样特征图进行分类并输出损伤位置的分类向量。

所述反向传播训练步骤包括：将所述前向传播训练的输出结果与设定的输出结果之间的误差值按照所述前向传播训练的反向回传，得到每层的误差值；利用 Adam 优化算法调整所述一维卷积神经网络模型的网络参数。

与现有技术相比，本申请的优点和积极效果在于：

本申请的至少一种实施方式提供的基于总体经验模态分解与卷积神经网络的结构损伤识别法，选取结构的加速度响应信号作为分析对象，并采用总体经验模态分解技术对加速度响应信号进行分解和重构，在重构时仅提取与结构损伤有关的信息，能够减小与结构损伤无关的噪声的影响，提高了损伤识别的准确率；同时，采用一维卷积神经网络对重构信号进行特征提取和损伤分类，损伤识别的效率较高。因而，本申请提供的基于总体经验模态分解与卷积神经网络的结构损伤识别法，在实时结构健康监测中具有显著的优势。

附图说明

图 1 为本申请实施例所提供的基于总体经验模态分解与卷积神经网络的结构损伤识别法的流程框图；

图 2 为本申请实施例所提供的一维卷积神经网络的结构示意图；

上图中，1、输入层；2、第一卷积层；3、第一批量归一化层；4、第一池化层；5、第二卷积层；6、第二批量归一化层；7、第二池化层；8、第一全连接层；9、第二全连接层；10、输出层。

具体实施方式

下面将对本申请实施方式中的技术方案进行清楚、完整地描述，显然，所描述的实施方式仅仅是本申请一部分实施方式，而不是全部的实施方式。基于本申请中的实施方式，本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施方式，都属于本申请保护的范围。

如图 1 所示，本申请一种实施方式提供了一种基于总体经验模态分解与卷积神经网络的结构损伤识别法，包括以下步骤：

步骤 1：测得结构加速度响应信号 $x(t)$ 。

常规地，所述加速度响应信号 $x(t)$ 是由一组数据（例如可为 100 个数据）组成的时间序列，可以看作是一维向量。

步骤 2：利用总体经验模态分解技术对加速度响应信号 $x(t)$ 进行分解，得到一系列固有模态函数 IMF。具体地说，是得到一系列固有模态函数分量信号。

本步骤中需要说明的是，所述的总体经验模态分解技术为现有技术，可参见《基于 MEEMD 的内燃机辐射噪声贡献》（郑旭等，浙江大学学报（工学版），第 46 卷第 5 期，第 954 页-第 960 页）。利用总体经验模态分解技术对加速度响应信号 $x(t)$ 进行分解的具体步骤可为如下：

（1）对加速度响应信号 $x(t)$ 添加一组相同长度的白噪声信号 $\omega(t)$ ，得到：

$$y(t) = x(t) + \omega(t) \quad (1)$$

（2）对步骤（1）添加白噪声后的信号 $y(t)$ 进行分解，具体步骤如下：

①确定信号 $y(t)$ 所有的局部极值点，用三次样条曲线将所有的局部极大值点连接起来形成上包络线，将所有的局部极小值点连接起来形成下包络线。

②将上包络线和下包络线的平均值记为 $m_1(t)$ ，则求出：

$$h_1(t) = y(t) - m_1(t) \quad (2)。$$

③若步骤②求得的 $h_1(t)$ 满足固有模态函数 **IMF**，则 $h_1(t)$ 为 $y(t)$ 的第一个 **IMF** 分量 $c_1(t)$ ；若 $h_1(t)$ 不满足固有模态函数 **IMF**，则用 $h_1(t)$ 代替 $y(t)$ 重复步骤①-③，则有：

$$h_{1k}(t) = h_{1(k-1)} - m_{1k}(t) \quad (3)$$

式 (3) 中， k 为步骤①-③的重复次数， $m_{1k}(t)$ 为第 k 次重复步骤①-②时获得的上包络线和下包络线的平均值；

当 $h_{1k}(t)$ 满足固有模态函数 **IMF** 时停止重复，记 $y(t)$ 的第一个 **IMF** 分量 $c_1(t) = h_{1k}(t)$ 。

需要说明的是，固有模态函数 **IMF** 需满足两条件：一是极值点数量和过零点数量在整个数据范围内相等或相差一个，二是所有的极大值点和极小值点在任意点处形成的包络线平均值等于零。

④利用公式 (4)，从 $y(t)$ 中分离出的第一个 **IMF** 分量 $c_1(t)$ ，得第一个残余量 $r_1(t)$ ，公式 (4) 的表达式如下：

$$r_1(t) = y(t) - c_1(t) \quad (4)$$

用第一个残余量 $r_1(t)$ 代替 $y(t)$ 重复步骤①-③，得到 $y(t)$ 的第二个 **IMF** 分量，记为 $c_2(t)$ 。

⑤重复步骤①-④，得到 $y(t)$ 的第 n 个 **IMF** 分量，则有：

$$r_n(t) = r_{n-1}(t) - c_n(t) \quad (5)$$

式 (5) 中， $r_n(t)$ 为第 n 个残余量， $r_{n-1}(t)$ 为第 $n-1$ 个残余量， $c_n(t)$ 为 $y(t)$ 的第 n 个 **IMF** 分量；

当第 n 个残余量 $r_n(t)$ 成为一个单调函数，不能再从其中提取满足条件的 **IMF** 分量时，循环结束。

(3) 重复步骤 (1) 和步骤 (2)，共对 $x(t)$ 添加 M 次白噪声信号 $\omega(t)$ ，每

次添加的白噪声信号 $\omega(t)$ 均不同, 取 M 次 IMF 分量集合的平均值作为最终的固有模态函数 IMF, 则最终的固有模态函数 IMF 的分量表达式为:

$$c_{zi}(t) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M c_{im}(t) \quad (6)$$

式 (6) 中, $c_{zi}(t)$ 为最终的第 i 个 IMF 分量, $c_{im}(t)$ 为第 m 次添加白噪声信号获得的第 i 个 IMF 分量, M 为白噪声信号的总添加次数。从而可以得到平均后的一系列固有模态函数 IMF 分量信号, 即 n 个。

举例来讲, 通过步骤 (2), 当添加第 1 次白噪声信号时, 例如得到 10 个 (即 $n=10$) IMF 分量信号; 那么若添加 5 次 (即 $M=5$) 白噪声信号时, 可以分别得到 5 组固有模态函数 IMF, 每组 IMF 中均有 10 个 IMF 分量信号。通过步骤 (3), 对 5 组固有模态函数 IMF 进行平均, 那么就可以得到最终的固有模态函数 IMF, 其含有 10 个平均后的 IMF 分量信号, 即所述的一系列固有模态函数 (分量信号)。由于该技术为现有技术, 因此不再赘述。

值得注意的是, 在常规的论文或者文献表述中, 固有模态函数一方面可以指含有多个分量信号的固有模态函数, 另一方面, 也可以指该固有模态函数的分量信号; 在本实施方式中, 为了统一术语, 将含有多个分量信号的固有模态函数统称为固有模态函数, 其中的分量信号称为固有模态函数的分量信号, 以便于理解技术方案。

步骤 3: 对步骤 2 得到的固有模态函数 IMF 进行傅里叶变换得到其各自的频谱特性, 选择含有结构自振频率的固有模态函数 IMF 进行重构, 得到重构信号 $z(t)$ 。

具体地说, 对步骤 2 得到的一系列固有模态函数的各个分量信号分别进行傅里叶变换得到其各自的 (即各个分量信号的) 频谱特性; 所述频谱特性是指信号中含有的频率成分; 其中一部分分量信号的频谱特性中的频率成分与结构的自振频率相同, 为结构的特性; 那么选择这一部分的含有结构自振频率的固有模态函数 IMF 的分量信号进行重构, 得到重构信号 $z(t)$ 。

举例来讲, 如前文所得到的 10 个平均后的 IMF 分量信号 (即所述的一系

列固有模态函数分量信号), 若其中有 6 个分量信号含有结构自振频率, 那么就选择这 6 个分量信号进行重构, 得到重构信号 $z(t)$ 。

值得注意的是, 本实施方式中所述的重构, 主要是对选择的分量信号进行叠加处理, 该叠加处理可以选用本领域的常规技术方案实现, 此处不再赘述。

本实施方式中选择含有结构自振频率的固有模态函数的分量信号, 能够减小与结构损伤无关的噪声的影响, 提高损伤识别的准确率。

步骤 4: 采用标准化处理公式对步骤 3 得到的重构信号 $z(t)$ 进行标准化处理, 得到标准化重构信号 $Z(t)$, 所述标准化处理公式的表达式为:

$$Z(t) = \frac{z(t) - \mu}{\sigma} \quad (7)$$

式 (7) 中, $Z(t)$ 为标准化重构信号; $z(t)$ 为重构信号; μ 为重构信号的均值; σ 为重构信号的方差;

将标准化重构信号 $Z(t)$ 分为多段长度一定的子信号, 选取子信号中的部分子信号作为训练样本, 剩余部分子信号作为测试样本。

具体地讲, 可以将标准化重构信号 $Z(t)$ 分为多段长度相等的子信号; 而所述子信号的长度可以根据实际需要进行确定。

步骤 5: 将步骤 4 得到的训练样本输入一维卷积神经网络模型中进行训练, 可得到训练好的一维卷积神经网络模型; 其中, 训练过程中采用交叉熵损失函数作为损失函数, 采用 Adam 优化算法作为优化算法。

如图 2 所示, 本步骤中, 一维卷积神经网络模型包括依次连接的输入层 1、第一卷积层 2、第一批量归一化层 3、第一池化层 4、第二卷积层 5、第二批量归一化层 6、第二池化层 7、第一全连接层 8、第二全连接层 9 和输出层 10; 其中, 第一卷积层 2 和第二卷积层 5 均含有 16 个大小为 10×1 的卷积核, 第一池化层 4 和第二池化层 7 的池化窗口大小均为 2×1 。

一维卷积神经网络模型的训练包括交替进行的前向传播训练和反向传播训练, 直至网络收敛或前向传播训练的输出结果与设定的输出结果之间的误差值达到指定的迭代终止条件。

前向传播训练步骤包括: 将步骤 4 得到的训练样本从输入层 1 中输入, 第

一卷积层 2 对输入的训练样本进行处理得到初次处理特征图，初次处理特征图传送至第一批量归一化层 3 进行归一化处理，归一化处理后传送至第一池化层 4 进行池化处理，得到初次采样特征图；初次采样特征图传送至第二卷积层 5 进行处理，得到二次处理特征图，二次处理特征图传送至第二批量归一化层 6 进行归一化处理，归一化处理后传送至第二池化层 7 进行池化处理，得到二次采样特征图；二次采样特征图依次传送至第一全连接层 8 和第二全连接层 9 进行处理，处理后传送至输出层 10，输出层 10 对处理后的二次采样特征图进行分类并输出损伤位置的分类向量。

反向传播训练步骤包括：将前向传播训练的输出结果（即分类向量）与设定的输出结果之间的误差值按照前向传播训练的反向回传，得到每层的误差值；训练过程中还采用交叉熵损失函数作为损失函数。利用 Adam 优化算法调整一维卷积神经网络模型的网络参数。Adam 优化算法用在整个一维神经网络训练过程中，它能基于训练数据迭代地更新神经网络权重，以使得网络收敛或者误差值达到指定的迭代终止条件。

步骤 6：将步骤 4 得到的测试样本输入到步骤 5 训练好的一维卷积神经网络模型中，得到损伤位置的识别结果。

本申请提供的上述基于总体经验模态分解与卷积神经网络的结构损伤识别法，选取结构的加速度响应信号作为分析对象，并采用总体经验模态分解技术对加速度响应信号进行分解和重构，在重构时仅提取与结构损伤有关的信息，能够减小与结构损伤无关的噪声的影响，提高了损伤识别的准确率；同时，采用一维卷积神经网络对重构信号进行特征提取和损伤分类，损伤识别的效率较高。因而，本申请提供的上述基于总体经验模态分解与卷积神经网络的结构损伤识别法，在实时结构健康监测中具有显著的优势。

权利要求书

1、基于总体经验模态分解与卷积神经网络的结构损伤识别法，其特征在于，包括以下步骤：

步骤 1：测得结构加速度响应信号 $x(t)$ ；

步骤 2：利用总体经验模态分解技术对加速度响应信号 $x(t)$ 进行分解，得到一系列固有模态函数 IMF；

步骤 3：对步骤 2 得到的固有模态函数 IMF 进行傅里叶变换得到其频谱特性，选择含有结构自振频率的固有模态函数 IMF 进行重构，得到重构信号 $z(t)$ ；

步骤 4：对步骤 3 得到的重构信号 $z(t)$ 进行标准化处理，得到标准化重构信号 $Z(t)$ ；将标准化重构信号 $Z(t)$ 分为多段长度一定的子信号，选取子信号中的部分信号作为训练样本，剩余部分信号作为测试样本；

步骤 5：将步骤 4 得到的训练样本输入一维卷积神经网络模型中进行训练，训练过程中采用交叉熵损失函数作为损失函数，采用 Adam 优化算法作为优化算法；

步骤 6：将步骤 4 得到的测试样本输入到步骤 5 训练好的一维卷积神经网络模型中，得到损伤位置的识别结果。

2、根据权利要求 1 所述的结构损伤识别法，其特征在于：所述步骤 4 中，采用标准化处理公式对所述重构信号 $z(t)$ 进行标准化处理，所述标准化处理公式的表达式为：

$$Z(t) = \frac{z(t) - \mu}{\sigma}$$

式中， $Z(t)$ 为标准化重构信号； $z(t)$ 为重构信号； μ 为重构信号的均值； σ 为重构信号的方差。

3、根据权利要求 1 所述的结构损伤识别法，其特征在于：所述步骤 5 中，所述一维卷积神经网络模型包括依次连接的输入层、第一卷积层、第一批量归一化层、第一池化层、第二卷积层、第二批量归一化层、第二池化层、第一全连接层、第二全连接层和输出层。

4、根据权利要求 3 所述的结构损伤识别法，其特征在于：所述第一卷积层和第二卷积层均含有 16 个大小为 10×1 的卷积核，所述第一池化层和第二池化层的池化窗口大小均为 2×1 。

5、根据权利要求 3 或 4 所述的结构损伤识别法，其特征在于，所述步骤 5 中，所述一维卷积神经网络模型的训练包括交替进行的前向传播训练和反向传播训练，直至网络收敛或所述前向传播训练的输出结果与设定的输出结果之间的误差值达到指定的迭代终止条件。

6、根据权利要求 5 所述的结构损伤识别法，其特征在于，所述前向传播训练步骤包括：将步骤 4 得到的训练样本从所述输入层中输入，所述第一卷积层对输入的训练样本进行处理得到初次处理特征图，所述初次处理特征图传送至所述第一批量归一化层进行归一化处理，归一化处理后传送至所述第一池化层进行池化处理，得到初次采样特征图；所述初次采样特征图传送至所述第二卷积层进行处理，得到二次处理特征图，所述二次处理特征图传送至所述第二批量归一化层进行归一化处理，归一化处理后传送至所述第二池化层进行池化处理，得到二次采样特征图；所述二次采样特征图依次传送至所述第一全连接层和第二全连接层进行处理，处理后传送至所述输出层，所述输出层对处理后的二次采样特征图进行分类并输出损伤位置的分类向量；

所述反向传播训练步骤包括：将所述前向传播训练的输出结果与设定的输出结果的误差值按照所述前向传播训练的反向回传，得到每层的误差值，利用 Adam 优化算法调整所述一维卷积神经网络模型的网络参数。

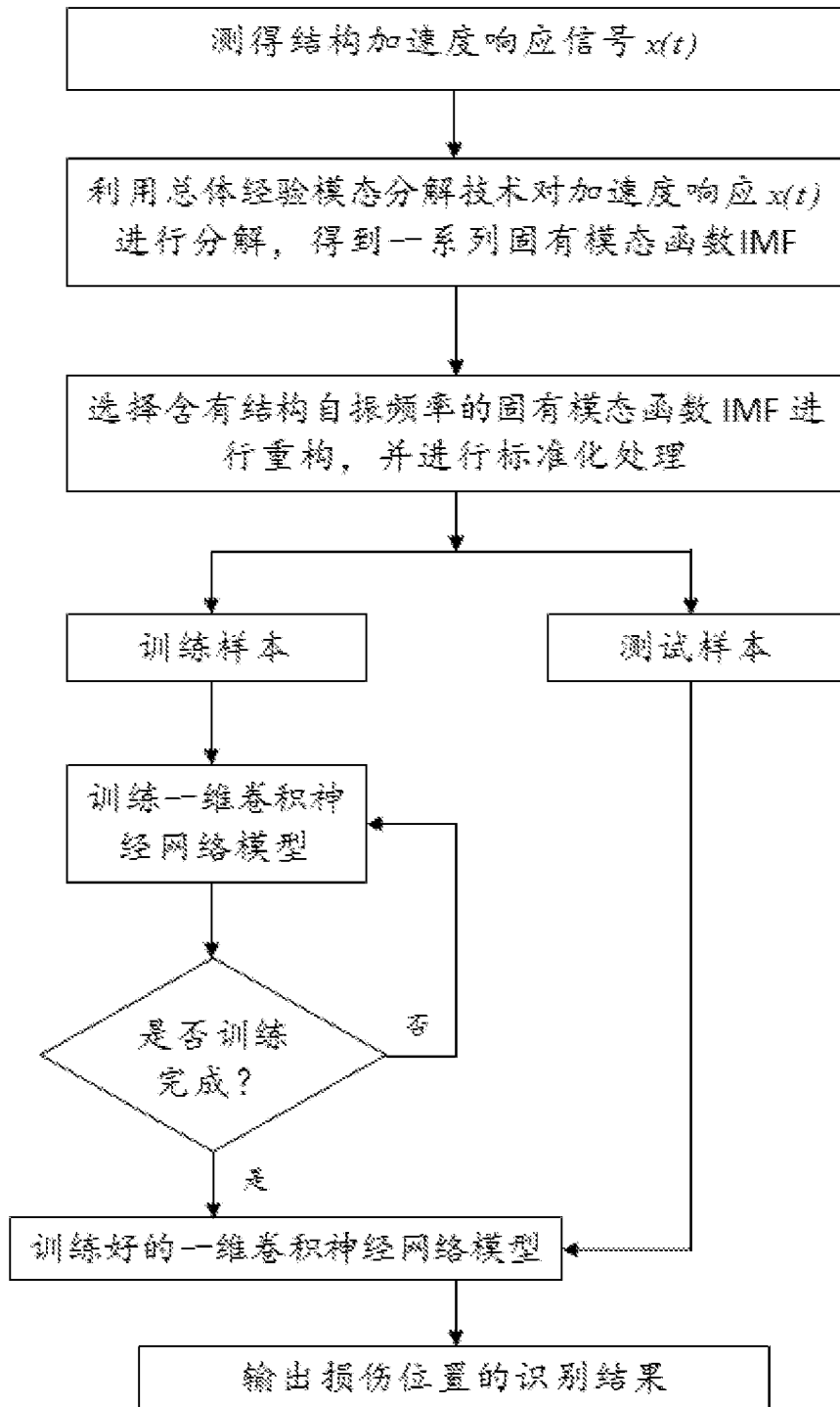


图 1

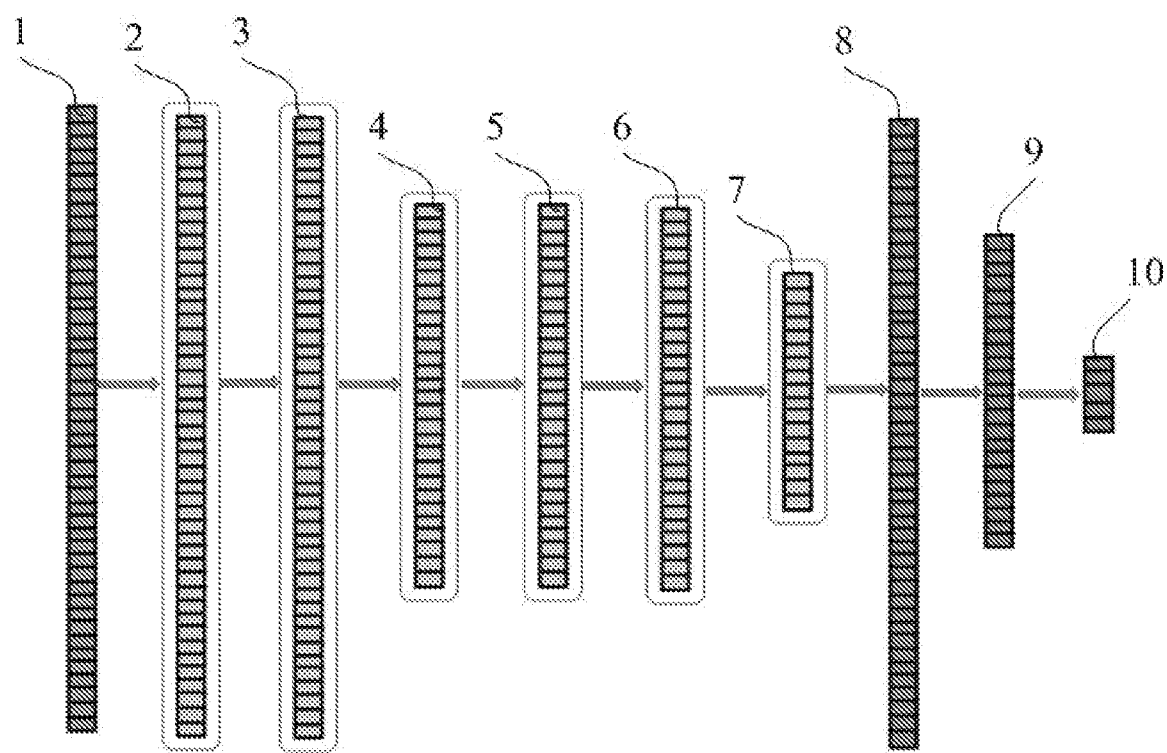


图 2

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2020/073357

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01N 29/46(2006.01)i; G06K 9/62(2006.01)i; G06N 3/04(2006.01)i; G06N 3/08(2006.01)i

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)

G01N 29, G06K 9, G06N 3

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

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

CNKI, CNTXT, VEN, 经验模态分解, 卷积神经网络, 加速度, 结构损伤, empirical mode decomposition, convolutional neural network, acceleration, structure damage

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 109946389 A (QINGDAO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 28 June 2019 (2019-06-28) entire document	1-6
Y	CN 103543026 A (QINGDAO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 29 January 2014 (2014-01-29) description, paragraphs 17-25	1-6
Y	CN 107329933 A (BEIJING PERCEPTION TECHNOLOGY CO., LTD.) 07 November 2017 (2017-11-07) description, paragraphs 84-128	1-6
Y	CN 109166100 A (CENTRAL SOUTH UNIVERSITY) 08 January 2019 (2019-01-08) description, paragraphs 51-57	1-6
Y	CN 109145961 A (SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY) 04 January 2019 (2019-01-04) description, paragraphs 10-11	1-6
A	CN 106096605 A (SHI, Fang) 09 November 2016 (2016-11-09) entire document	1-6
A	CN 107328868 A (FUZHOU UNIVERSITY) 07 November 2017 (2017-11-07) entire document	1-6



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“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)

“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

“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

“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

“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

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

02 April 2020

Date of mailing of the international search report

10 April 2020

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing
100088
China

Authorized officer

Facsimile No. (86-10)62019451

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2020/073357**C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT**

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 2019017911 A1 (QATAR UNIVERSITY) 17 January 2019 (2019-01-17) entire document	1-6
A	US 2015293143 A1 (NATIONAL CHIAO TUNG UNIVERSITY) 15 October 2015 (2015-10-15) entire document	1-6

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2020/073357

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	109946389	A	28 June 2019	None			
CN	103543026	A	29 January 2014	CN	103543026	B	01 July 2015
CN	107329933	A	07 November 2017	None			
CN	109166100	A	08 January 2019	None			
CN	109145961	A	04 January 2019	None			
CN	106096605	A	09 November 2016	CN	106096605	B	19 March 2019
CN	107328868	A	07 November 2017	CN	107328868	B	07 June 2019
US	2019017911	A1	17 January 2019	None			
US	2015293143	A1	15 October 2015	None			

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2020/073357

A. 主题的分类

G01N 29/46(2006.01)i; G06K 9/62(2006.01)i; G06N 3/04(2006.01)i; G06N 3/08(2006.01)i

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)

G01N 29, G06K 9, G06N 3

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

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))

CNKI, CNTXT, VEN, 经验模式分解, 卷积神经网络, 加速度, 结构损伤, empirical mode decomposition, convolutional neural network, acceleration, structure damage

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
PX	CN 109946389 A (青岛理工大学) 2019年 6月 28日 (2019 - 06 - 28) 全文	1-6
Y	CN 103543026 A (青岛理工大学) 2014年 1月 29日 (2014 - 01 - 29) 说明书第17-25段	1-6
Y	CN 107329933 A (北京知觉科技有限公司) 2017年 11月 7日 (2017 - 11 - 07) 说明书第84-128段	1-6
Y	CN 109166100 A (中南大学) 2019年 1月 8日 (2019 - 01 - 08) 说明书第51-57段	1-6
Y	CN 109145961 A (上海交通大学) 2019年 1月 4日 (2019 - 01 - 04) 说明书第10-11段	1-6
A	CN 106096605 A (史方) 2016年 11月 9日 (2016 - 11 - 09) 全文	1-6
A	CN 107328868 A (福州大学) 2017年 11月 7日 (2017 - 11 - 07) 全文	1-6
A	US 2019017911 A1 (UNIV QATAR) 2019年 1月 17日 (2019 - 01 - 17) 全文	1-6

☒ 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

2020年 4月 2日

国际检索报告邮寄日期

2020年 4月 10日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中国国家知识产权局(ISA/CN)

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

王树玲

电话号码 86-(010)-62085649

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
A	US 2015293143 A1 (UNIV NATCHAO TUNG) 2015年 10月 15日 (2015 - 10 - 15) 全文	1-6

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2020/073357

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利			公布日 (年/月/日)
CN	109946389	A	2019年 6月 28日	无			
CN	103543026	A	2014年 1月 29日	CN	103543026	B	2015年 7月 1日
CN	107329933	A	2017年 11月 7日	无			
CN	109166100	A	2019年 1月 8日	无			
CN	109145961	A	2019年 1月 4日	无			
CN	106096605	A	2016年 11月 9日	CN	106096605	B	2019年 3月 19日
CN	107328868	A	2017年 11月 7日	CN	107328868	B	2019年 6月 7日
US	2019017911	A1	2019年 1月 17日	无			
US	2015293143	A1	2015年 10月 15日	无			