



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 114002334 A

(43) 申请公布日 2022. 02. 01

(21) 申请号 202111156664.3

(22) 申请日 2021.09.29

(71) 申请人 西安交通大学

地址 710049 陕西省西安市咸宁西路28号

(72) 发明人 王铁军 李鸿宇 江鹏

(74) 专利代理机构 北京中济纬天专利代理有限

公司 11429

代理人 覃婧婵

(51) Int. Cl.

G01N 29/44 (2006.01)

G01N 29/14 (2006.01)

G06N 3/04 (2006.01)

G06N 3/08 (2006.01)

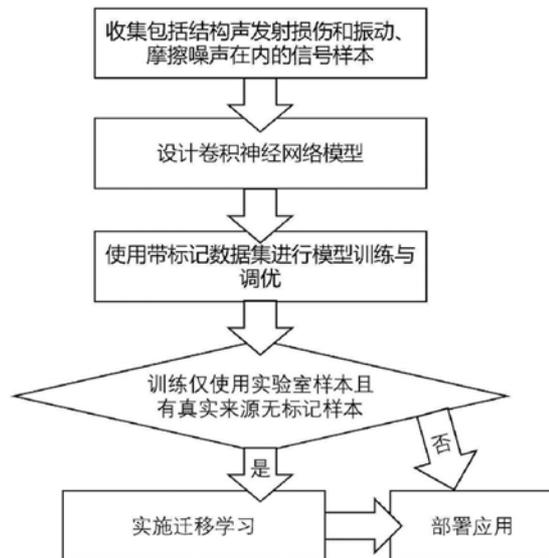
权利要求书2页 说明书7页 附图5页

(54) 发明名称

一种结构损伤声发射信号识别方法、装置、存储介质

(57) 摘要

本发明提供一种结构损伤声发射信号识别方法、装置、存储介质,所述方法包括:步骤S1、收集包括结构声发射损伤和振动、摩擦噪声在内的带标记信号样本;步骤S2、设计卷积神经网络模型;步骤S3、使用带标记数据集进行模型训练与调优。本发明采用基于机器学习方法的声发射损伤信号提取手段,通过构建和训练神经网络模型,使其总结信号中相对复杂、难以人工提炼的模式特征,最终据此在实际分析中将损伤信号从噪声中分离。本发明通过设计和训练模型,智能体能够自行从大量数据中总结同类别样本的共性以及不同类别样本的标志性区别,进而实现适应性强、鲁棒性好的声发射信号提取。



1. 一种结构损伤声发射信号识别方法,其特征在于,包括:

步骤S1、收集信号样本并标记其所属类别,所述带标记信号样本类别应包括结构声发射损伤、以及振动噪声、摩擦噪声、撞击噪声中的至少一种;

步骤S2、设计卷积神经网络模型;

步骤S3、使用带标记数据集进行模型训练与调优。

2. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于:

步骤S1中所述信号样本包括真实来源样本和实验室样本;

所述真实来源样本为从实际工程环境采集的信号样本,所述实验室样本为采用实验室模拟方式采集的信号样本。

3. 根据权利要求2所述的方法,其特征在于:

对真实来源样本的标记方法包括:

步骤S101、确认信号采集环境的声洁净度,当现场环境中声发射有效信号的信噪比大于0时,进行下一步;

步骤S102、对样本进行实时溯源,所述实时溯源为在通过传感器采集声发射信号的同时使用光测或电测方法观测目标区域的损伤发生情况;

步骤S103、当通过传感器采集声发射信号得出的目标区域损伤结论与光测或电测方法观测目标区域的损伤结论对应一致时,判定为完成溯源,将真实信号标记成为声发射损伤信号样本。

4. 根据权利要求2所述的方法,其特征在于:

采集实验室样本的方法包括:

步骤S201、对预制裂纹的紧凑拉伸试件进行准静态实验测试;

步骤S202、通过预先布置的传感器采集声发射信号;

步骤S203、将采集的声发射信号标记为实验室样本。

5. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于:

步骤S2中卷积神经网络为深度平层网络、深度残差网络或深度密接网络。

6. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于:

步骤S3包括:

基于收集的带标记数据,使用交叉熵计算损失函数;

利用反向传播策略计算模型参数梯度;

使用数学优化器更新模型。

7. 根据权利要求6所述的方法,其特征在于:

步骤S3具体包括:

对于一个训练样本 $\{x, y\}$, x 为输入信号矢量, y 为标记矢量,交叉熵损失函数计算式如下:

$$H(x, y) = - \sum_{i=1}^c y_i \log(F_i(x))$$

式中 c 为待识别类别数;随后反向传播算法将逐层反向计算参数梯度,即:

$$\frac{\partial H(x, y)}{\partial \theta_i} = \frac{\partial H(x, y)}{\partial Z^L} \cdot \frac{\partial Z^L}{\partial Z^{L-1}} \cdots \frac{\partial Z^{i+1}}{\partial \theta_i}$$

式中 θ_i 为第i层的待学习参数, Z^L 为第L层的输出;获得参数梯度后,数学优化器O按照下式对模型参数进行更新:

$$\theta_i = \theta_i - \eta \cdot O \left(\frac{\partial H(x, y)}{\partial \theta_i} \right)$$

式中 η 为学习率,根据不同的优化器选择。

8. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于:

还包括:

步骤S4、若所述训练仅使用实验室样本且有真实来源无标记样本,使用真实来源样本进行迁移学习。

9. 根据权利要求8所述的方法,其特征在于:

步骤S4中,在模型训练中使用假标记策略,包括:

在训练初期使用有标记数据计算损失函数,更新模型;

从模型训练中某节点时刻开始,将模型根据无标记输入样本给出的输出作为这些无标记样本的假标记,加入损失函数计算并更新模型。

10. 根据权利要求9所述的方法,其特征在于:

所述节点时刻为总迭代步数的30%。

11. 一种结构损伤声发射信号识别装置,其特征在于,包括:

至少一个处理器;与所述至少一个处理器通信连接的存储器;

其中,所述存储器存储有能被所述至少一个处理器执行的指令,所述指令被所述至少一个处理器执行,以使所述至少一个处理器能够执行如权利要求1-10任一项所述的方法。

12. 一种非暂态计算机可读存储介质,其特征在于:

该非暂态计算机可读存储介质存储计算机指令,该计算机指令用于使计算机执行如权利要求1-10任一项所述的方法。

13. 一种计算机程序产品,其特征在于:

该计算机程序产品包括存储在非暂态计算机可读存储介质上的计算程序,该计算机程序包括程序指令,当该程序指令被计算机执行时,使该计算机执行如权利要求1-10任一项所述的方法。

一种结构损伤声发射信号识别方法、装置、存储介质

技术领域

[0001] 本发明属于无损检测和结构完整性监控技术领域，具体涉及一种结构损伤声发射信号识别方法、装置、存储介质。

背景技术

[0002] 无损检测是保障大型工程装备和结构服役过程中，其内部关键构件完整性和可靠性的关键技术。随着社会生产力的发展，投入服役的上述装备和结构将愈发变多，长时间服役后若它们内部结构损伤老化，极易引发灾难性事故。而实际工程中，尽管已有多种技术手段可以开展无损检测，但检测过程中的数据深度分析需求仍给现场技术人员带来了较大的工作负担。

[0003] 传统无损检测方法如荧光渗透、超声、射线等方法大多在部件出厂或定期检修过程中使用，虽能一定程度上保证设备服役安全，但如果频繁实施检测则费时费力，反之则保障效果不佳。在线监测方法能一定程度上克服该困难。例如采用声发射的结构损伤在线监测方法是行之有效的解决方案。当塑性变形、断裂等损伤在监测结构中发生时，由于局部应力、应变能释放，将对外放出弹性波（声波）；该信号可以被传感器捕捉，进而能够感知损伤的发生。上述过程在实践中包括数个技术环节：信号传感与采集、信号分析识别、损伤评估。其中，信号分析识别是关键所在，传统信号分析识别方法是通过频谱分析等手段计算信号统计学参数，随后根据工程经验选定其中最具代表性的几个并设定阈值，最后在实际操作过程中以此为依据实现对声发射损伤信号的识别。这种根据专家经验人为选取声发射信号特征，并根据工程经验设置判定规则的方法，其仅能大致了解信号强度、频率分布，难以识别复杂的信号模式，将损伤信号从实际工程中可能大量存在的振动、摩擦等噪声中分离。正是因此，该技术目前在实践中仅适用于实验室等噪声清洁环境，难以在工程环境下应用。

发明内容

[0004] 有鉴于此，本发明旨在提供一种结构损伤声发射信号识别方法、装置、存储介质，采用基于机器学习方法的声发射损伤信号提取手段。通过构建和训练神经网络模型，使其总结信号中相对复杂、难以人工提炼的模式特征，最终据此在实际分析中将损伤信号从噪声中分离。

[0005] 第一方面，本申请实施例提供一种结构损伤声发射信号识别方法，包括如下步骤：

[0006] 步骤S1、收集包括结构声发射损伤和振动、摩擦噪声在内的带标记信号样本；

[0007] 步骤S2、设计卷积神经网络模型；

[0008] 步骤S3、使用带标记数据集进行模型训练与调优。

[0009] 可选的，步骤S1中所述信号样本包括真实来源样本和实验室样本；

[0010] 所述真实来源样本从实际工程环境采集的信号样本，所述实验室样本为采用实验室模拟方式采集的信号样本。

[0011] 可选的，对真实来源样本的标记方法包括：

[0012] 步骤S101、确认信号采集环境的声洁净度,当现场环境中声发射有效信号的信噪比大于0时,进行下一步;

[0013] 步骤S102、对样本进行实时溯源,所述实时溯源为在通过传感器采集声发射信号的同时使用光测或电测方法观测目标区域的损伤发生情况;

[0014] 步骤S103、当通过传感器采集声发射信号得出的目标区域损伤结论与光测或电测方法观测目标区域的损伤结论对应一致时,判定为完成溯源,将真实信号标记成为声发射损伤信号样本。

[0015] 可选的,采集实验室样本的方法包括:

[0016] 步骤S201、对预制裂纹的紧凑拉伸试件进行准静态实验测试;

[0017] 步骤S202、通过预先布置的传感器采集声发射信号;

[0018] 步骤S203、将采集的声发射信号标记为实验室样本。

[0019] 可选的,步骤S2中卷积神经网络为深度平层网络、深度残差网络或深度密接网络。

[0020] 可选的,步骤S3包括:

[0021] 基于收集的带标记数据,使用交叉熵计算损失函数;

[0022] 利用反向传播策略计算模型参数梯度;

[0023] 使用数学优化器更新模型。

[0024] 优选地,步骤S3具体包括:

[0025] 对于一个训练样本 $\{x, y\}$, x 为输入信号矢量, y 为标记矢量,交叉熵损失函数计算式如下:

$$[0026] \quad H(x, y) = - \sum_{i=1}^c y_i \log(F_i(x))$$

[0027] 式中 c 为待识别类别数;随后反向传播算法将逐层反向计算参数梯度,即:

$$[0028] \quad \frac{\partial H(x, y)}{\partial \theta_i} = \frac{\partial H(x, y)}{\partial Z^L} \cdot \frac{\partial Z^L}{\partial Z^{L-1}} \cdots \frac{\partial Z^{i+1}}{\partial \theta_i}$$

[0029] 式中 θ_i 为第 i 层的待学习参数, Z^L 为第 L 层的输出;获得参数梯度后,数学优化器按照下式对模型参数进行更新:

$$[0030] \quad \theta_i = \theta_i - \eta \cdot O \left(\frac{\partial H(x, y)}{\partial \theta_i} \right)$$

[0031] 式中 η 为学习率,根据不同的优化器选择。

[0032] 可选的,还包括:步骤S4、若所述训练仅使用实验室样本且有真实来源无标记样本,使用真实来源样本进行迁移学习。

[0033] 可选的,步骤S4中,在模型训练中使用假标记策略,包括:

[0034] 在训练初期使用有标记数据计算损失函数,更新模型;

[0035] 从模型训练中某节点时刻开始,将模型根据无标记输入样本给出的输出作为这些无标记样本的假标记,加入损失函数计算并更新模型。

[0036] 优选地,所述节点时刻为总迭代步数的30%。

[0037] 第二方面,本申请实施例提供一种结构损伤声发射信号识别装置,包括:至少一个

处理器;与所述至少一个处理器通信连接的存储器;

[0038] 其中,所述存储器存储有能被所述至少一个处理器执行的指令,所述指令被所述至少一个处理器执行,以使所述至少一个处理器能够执行如第一方面任一项所述的方法。

[0039] 第三方面,本申请实施例还提供一种非暂态计算机可读存储介质,该非暂态计算机可读存储介质存储计算机指令,该计算机指令用于使计算机执行前述结构损伤声发射信号的识别方法。

[0040] 第四方面,本申请实施例还提供了一种计算机程序产品,该计算机程序产品包括存储在非暂态计算机可读存储介质上的计算程序,该计算机程序包括程序指令,当该程序指令被计算机执行时,使该计算机执行前述结构损伤声发射信号的识别方法。

[0041] 相较于现有技术,本发明避免了传统信号分析识别过程中的大多数需要专家知识参与的如频谱分析、统计学参数计算、参数选择、识别依据设计等过程。一方面,传统方法对专家知识和现场操作工程人员的技术要求高,另一方面,实践中设计的传统信号分析识别方法对目标信号特征的提取仍不充分,无法全方面反应信号模式,因此难以获得理想的识别效果。

[0042] 本发明提供的结构损伤声发射信号提取方法是一种基于数据的模式识别方法,通过设计和训练模型,智能体能够自行从大量数据中总结同类别样本的共性以及不同类别样本的标志性区别,进而实现适应性强、鲁棒性好的声发射信号提取。

附图说明

[0043] 图1是本申请实施例提供的提取方法流程示意图;

[0044] 图2是本申请实施例提供的深度平层网络示意图;

[0045] 图3是本申请实施例提供的深度残差网络示意图;

[0046] 图4是本申请实施例提供的深度密接网络示意图;

[0047] 图5是本申请实施例提供的对真实信号样本进行标记的流程示意图;

[0048] 图6是本申请实施例提供的采用实验室模拟方式采集信号样本的流程示意图;

具体实施方式

[0049] 以下结合附图及实施例,对本发明进行进一步详细说明。应当理解,此处所描述的具体实施例仅仅用以解释本发明,并不用于限定本发明。

[0050] 本实施例基于卷积神经网络及深度学习技术,提供了一种结构损伤声发射信号的识别方法,用于结构损伤声发射信号提取,将有效信号从振动、摩擦等噪声中分离。

[0051] 结构损伤声发射信号指使用贴附于目标监测结构上的声发射传感器(组)接收到的因结构发生断裂、塑性变形而产生的声信号;其形式通常为一维信号序列。

[0052] 该识别方法可以由结构损伤声发射信号识别装置来执行,该装置可以采用软件和/或硬件的方式实现,该装置可以配置于电子设备,例如,终端设备或服务器中。终端设备可以是具有显示屏的各种电子设备,包括但不限于智能手机、平板电脑、电子书阅读器、便携计算机和台式计算机等。

[0053] 如图1所示,本实施例提供一种结构损伤声发射信号的提取方法包括:

[0054] 步骤1、收集包括结构声发射损伤和振动、摩擦噪声在内的信号样本;

[0055] 一般地,样本数量应对于期望识别的模式种类,逐种类地足够丰富且足量。优先采用实际工程环境作为样本来源,若难以获得真实声发射信号,可采用实验室模拟方式采集。特别地,需要格外注意对真实来源样本的标记,因为该过程往往难以实施,同时,即使无法准确标记真实来源样本,它们依旧可以步骤4所述的在迁移学习过程中使用。

[0056] 在一个可行的实施方式中,对真实来源样本的标记方法为:

[0057] 首先应确认信号采集环境的声洁净度,嘈杂环境中的真实样本几乎没有完成标记的可能;然后,对样本进行实时溯源,即在通过传感器采集声发射信号的同时使用其他手段(如光测、电测方法)观测目标区域的损伤发生(如裂纹起裂)情况;只有完成实时溯源,即信号与其他测量方法得出的损伤现象能够对应,真实信号方能被标记成为有效样本。对于负样本的采集则相对容易,但仍应注意将传感器布置于工程现场载荷很小或不承载的结构上,这样采集的声发射信号样本均可以标记为负样本。

[0058] 在一个可行的实施方式中,采用实验室模拟方式采集信号样本的步骤包括:

[0059] 设计准静态实验对预制裂纹的紧凑拉伸试件进行测试,过程中布置传感器采集声发射信号。由于准静态实验环境较易保持洁净的声环境,可以认为此时获取的声发射信号均来自于试件裂纹扩展,并据此将这些数据标记。负样本的需单独设计实验,具体通过在样本上人为制造摩擦、液滴撞击、断铅等各种干扰信号实现。

[0060] 步骤2、设计卷积神经网络模型;

[0061] 卷积神经网络是识别声振信号的工具,它主要由卷积变换层、激活函数层、批正则化层、池化层叠加组合而成。数学上可将包括n个组合块的卷积神经网络表示为如下一系列变换函数的复合:

$$[0062] \quad F = f^n \circ \dots \circ f^2 \circ f^1$$

[0063] 式中,F表示卷积神经网络整体, f^i 表示第i个组合块。更具体地,一个组合块可表示为

$$[0064] \quad f^l(Z^l) = Pool \circ Conv \circ ReLU \circ BN(Z^l)$$

[0065] 式中, Z^l 为第l层的输入张量;Conv表示卷积变换层;ReLU表示激活函数层;BN表示批正则化层,Pool表示池化层。实际上,本发明可以通过多种不同形态的卷积神经网络设计实现。

[0066] 本实施例提供3种设计方法示例:

[0067] 如图2所示的深度平层网络、如图3所示的深度残差网络以及如图4所示的深度密接网络。

[0068] 这三种示例网络的末端设计保持一致,即通过全局平均池化、卷积核宽度为1的卷积层、Softmax多分类激活函数完成信号分类识别。三种示例网络的主体部分(特征提取部分)不同:深度平层网络简单由多个组合块堆砌而成,示例中共包括7个标准卷积组合块。深度残差网络则在深度平层网络的结构基础上加入了残差连接(图3中结构侧面的弧形箭头),每个残差连接跨越两个组合块,对于输入中包含残差连接的组合块,其数学表示为:

$$[0069] \quad Z^{l+2} = f^l(Z^{l+1}) + Z^l$$

[0070] 深度密接网络的基本组成单元包括一种特殊设计的密接块,密接块内的卷积操作将所有前置卷积的输出连接起来作为输入。整个网络的主体部分包括两个基本组合块和三

个密接块,在每两个密接块之间,还包含用于通道压缩的卷积核宽度为1的卷积以及平均池化操作。

[0071] 步骤3、使用带标记数据集进行模型训练与调优;

[0072] 基于收集的带标记数据,使用交叉熵计算损失函数,再利用反向传播策略计算模型参数梯度,随后使用Adam、SGD等数学优化器更新模型。训练过程中保留一部分数据用于检验模型识别有效性。以模型对保留数据识别准确率为依据,进行模型结构和训练步骤参数细节调优,以获得本发明方法的最佳实施效果。

[0073] 使用交叉熵计算损失函数,再利用反向传播策略计算模型参数梯度,随后使用Adam、SGD等数学优化器更新模型的步骤包括:

[0074] 对于一个训练样本 $\{x, y\}$, x 为输入信号矢量, y 为标记矢量,交叉熵损失函数计算式如下:

$$[0075] \quad H(x, y) = - \sum_{i=1}^c y_i \log(F_i(x))$$

[0076] 式中 c 为待识别类别数。随后反向传播算法将逐层反向计算参数梯度,即:

$$[0077] \quad \frac{\partial H(x, y)}{\partial \theta_i} = \frac{\partial H(x, y)}{\partial Z^L} \cdot \frac{\partial Z^L}{\partial Z^{L-1}} \cdots \frac{\partial Z^{i+1}}{\partial \theta_i}$$

[0078] 式中 θ_i 为第 i 层的待学习参数, Z^L 为第 L 层(最后一层)的输出。获得参数梯度后,数学优化器按照下式对模型参数进行更新:

$$[0079] \quad \theta_i = \theta_i - \eta \cdot O \left(\frac{\partial H(x, y)}{\partial \theta_i} \right)$$

[0080] 式中 η 为学习率,根据不同的优化器选择,函数 O 的具体表达式有所差别。

[0081] 步骤4、若训练仅使用实验室样本且有真实来源无标记样本,使用真实来源样本进行迁移学习。

[0082] 迁移学习指将模型在模拟场景中学习到的模式知识迁移到真实应用场景中的过程。与带标记数据集训练相比,其区别在于模型训练过程中引入了域适配策略,并在模型训练后期使用了假标记策略,进而提升了模型在目标域(实际应用场景)中的信号提取正确率。表1给出不同训练方法的识别正确率。

[0083] 表1

训练方法	应用场景中的识别正确率(%)
不使用迁移学习	41.32
使用域适配策略	47.93
使用域适配+假标记策略	52.35

[0085] 在模型训练中使用假标记策略的实施步骤如下:在训练初期与一般方法一样,使用有标记数据计算损失函数,更新模型;从模型训练中某个节点时刻开始(可选为总迭代步数的30%),将模型根据无标记输入样本给出的输出作为这些无标记样本的假标记,加入损失函数计算并更新模型。

[0086] 本申请实施例还提供一种结构损伤声发射信号识别装置。

[0087] 所述结构损伤声发射信号识别装置可以包括处理器和存储器。

[0088] 其中,处理器与接收器和存储器耦合,如可以通过通信总线连接。

[0089] 上述处理器可以是一个处理器,也可以是多个处理元件的统称。例如,处理器是一个或多个中央处理器(central processing unit,CPU),也可以是特定集成电路(application specific integrated circuit,ASIC),或者是被配置成实施本申请实施例的一个或多个集成电路,例如:一个或多个微处理器(digital signal processor,DSP),或,一个或者多个现场可编程门阵列(field programmable gate array,FPGA)。

[0090] 处理器可以通过运行或执行存储在存储器内的软件程序,以及调用存储在存储器内的数据,执行本申请实施例提供的结构损伤声发射信号识别方法。

[0091] 在具体实现中,作为一种实施例,结构损伤声发射信号识别装置也可以包括多个处理器,这些处理器中的每一个可以是一个单核处理器(single-CPU),也可以是一个多核处理器(multi-CPU)。这里的处理器可以指一个或多个通信设备、电路、和/或用于处理数据(例如计算机程序指令)的处理核。

[0092] 可选地,所述结构损伤声发射信号识别装置还包括用于接收信号样本的接收器,所述接收器可以和处理器集成在一起,也可以独立存在,本申请实施例对此不作具体限定。

[0093] 存储器可用于存储执行本申请方案的软件程序,并由处理器来控制执行,具体实现方式可以参考下述方法实施例,此处不再赘述。

[0094] 其中,存储器可以是只读存储器(read-only memory,ROM)或可存储静态信息和指令的其他类型的静态存储通信设备,随机存取存储器(random access memory,RAM)或者可存储信息和指令的其他类型的动态存储通信设备,也可以是电可擦可编程只读存储器(electrically erasable programmable read-only memory,EEPROM)、只读光盘(compact disc read-only memory,CD-ROM)或其他光盘存储、光碟存储(包括压缩光碟、激光光碟、光碟、数字通用光碟、蓝光光碟等)、磁盘存储介质或者其他磁存储通信设备、或者能够用于携带或存储具有指令或数据结构形式的期望的程序代码并能够由计算机存取的任何其他介质,但不限于此。需要说明的是,存储器可以和处理器集成在一起,也可以独立存在,本申请实施例对此不作具体限定。

[0095] 需要说明的是,上述结构损伤声发射信号识别装置的结构并不构成对所述结构损伤声发射信号识别装置实现方式的限定,实际的所述结构损伤声发射信号识别装置可以包括更多或更少的部件,或者组合某些部件,或者不同的部件布置。

[0096] 本申请实施例还提供一种非暂态计算机可读存储介质,该非暂态计算机可读存储介质存储计算机指令,该计算机指令用于使计算机执行前述结构损伤声发射信号的方法识别。

[0097] 本申请实施例还提供了一种计算机程序产品,该计算机程序产品包括存储在非暂态计算机可读存储介质上的计算程序,该计算机程序包括程序指令,当该程序指令被计算机执行时,使该计算机执行前述结构损伤声发射信号的方法识别。

[0098] 以上描述仅为本公开的较佳实施例以及对所运用技术原理的说明。本领域技术人员应当理解,本公开中所涉及的公开范围,并不限于上述技术特征的特定组合而成的技术方案,同时也应涵盖在不脱离上述公开构思的情况下,由上述技术特征或其等同特征进行任意组合而形成的其它技术方案。例如上述特征与本公开中公开的(但不限于)具有类似功

能的技术特征进行互相替换而形成的技术方案。

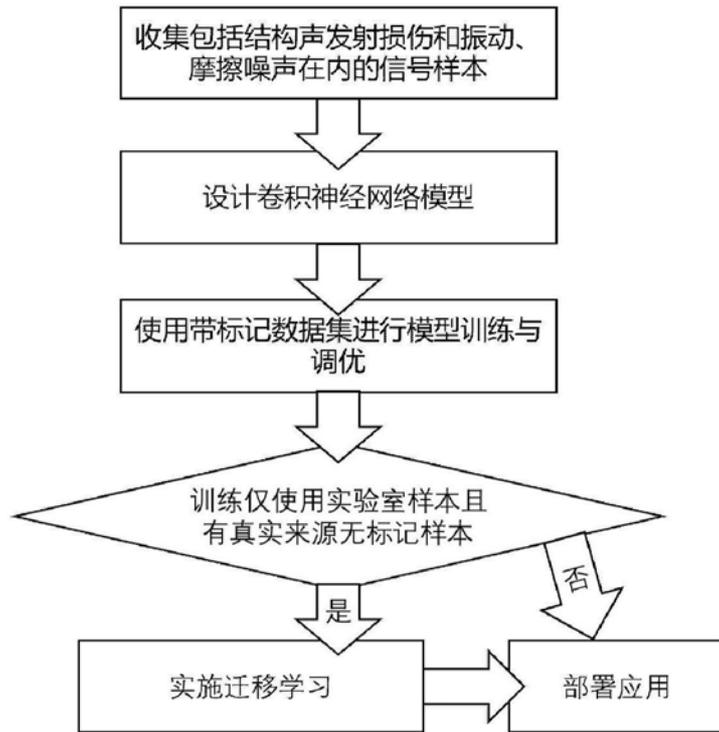


图1

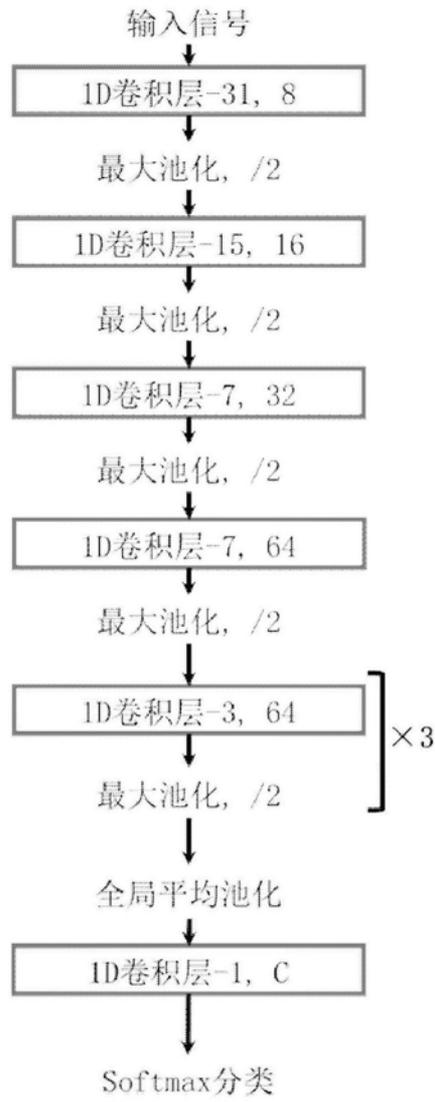


图2

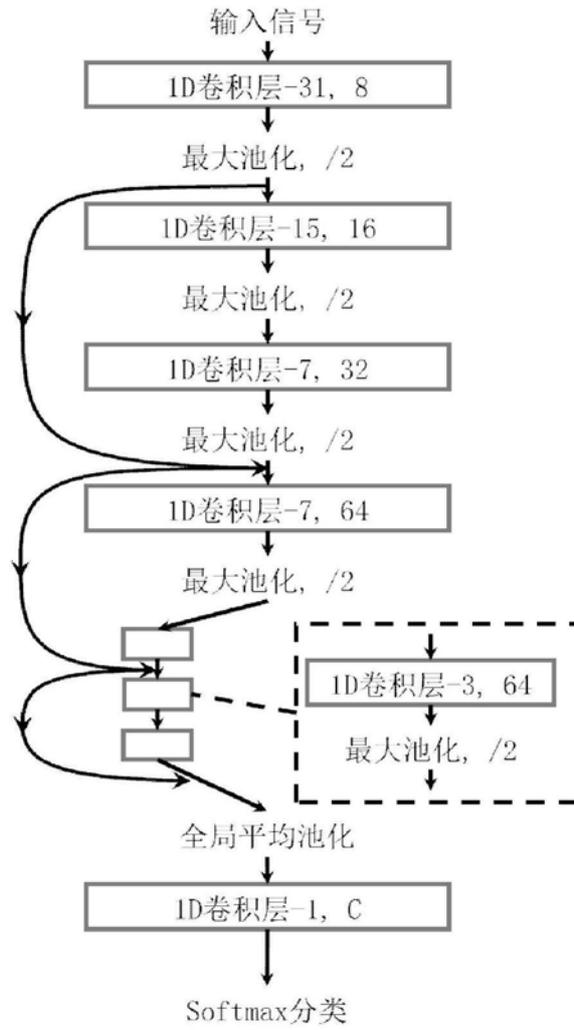


图3

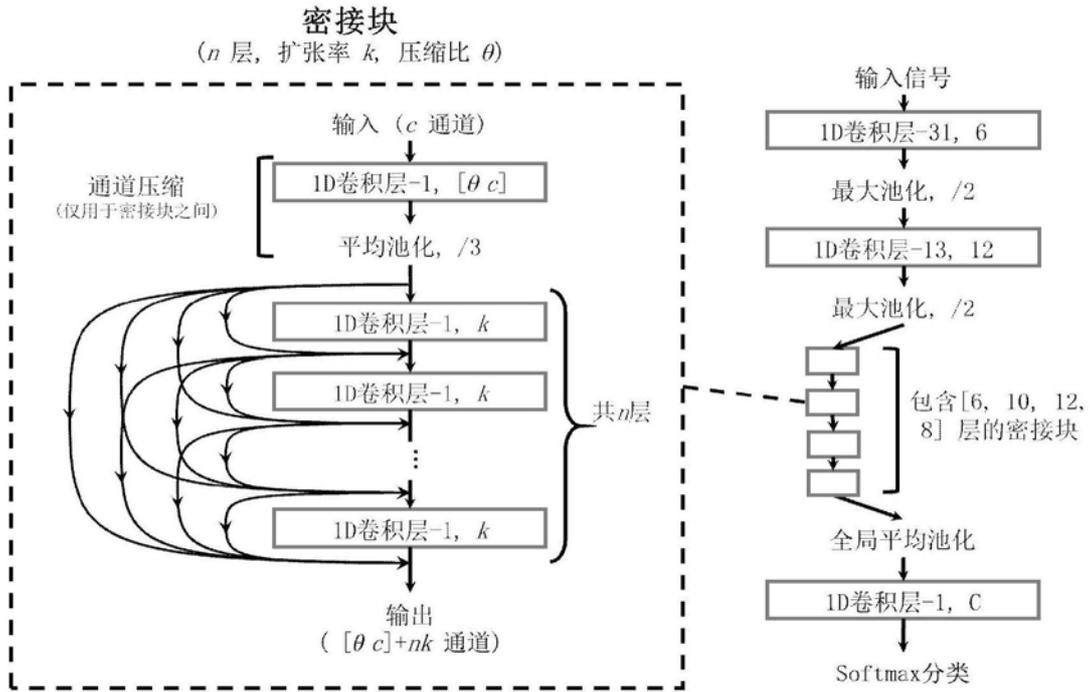


图4

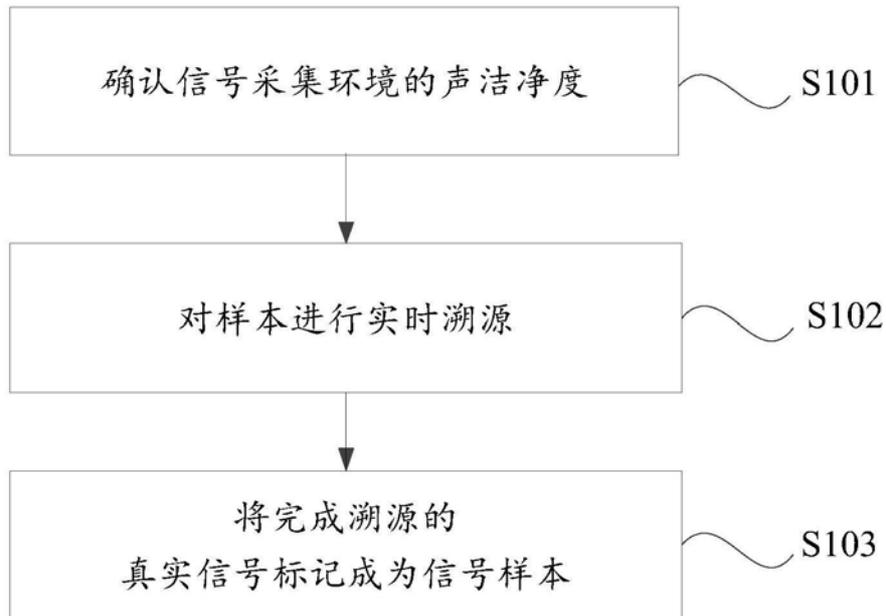


图5

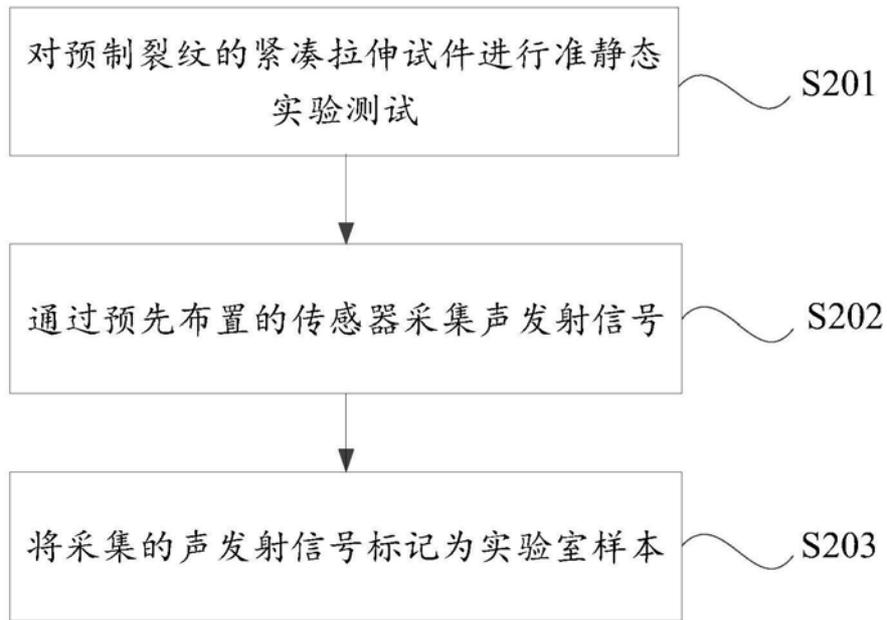


图6