

(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
2023 年 6 月 8 日 (08.06.2023)



(10) 国际公布号
WO 2023/097705 A1

- (51) 国际专利分类号:
G06F 30/15 (2020.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2021/135611
- (22) 国际申请日: 2021 年 12 月 6 日 (06.12.2021)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
202111441733.5 2021 年 11 月 30 日 (30.11.2021) CN
- (71) 申请人: 大连理工大学 (DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) [CN/CN]; 中国辽宁省大连市凌工路 2 号, Liaoning 116024 (CN)。
- (72) 发明人: 孙希明 (SUN, Ximing); 中国辽宁省大连市凌工路 2 号大连理工大学, Liaoning 116024 (CN)。

李育卉 (LI, Yuhui); 中国辽宁省大连市凌工路 2 号大连理工大学, Liaoning 116024 (CN)。全福祥 (QUAN, Fuxiang); 中国辽宁省大连市凌工路 2 号大连理工大学, Liaoning 116024 (CN)。

(74) 代理人: 辽宁鸿文知识产权代理有限公司 (LIAONING HONGWEN INTELLECTUAL PROPERTY AGENCY CO., LTD.); 中国辽宁省大连市甘井子区黄浦路 439 号科技创业大厦 1102-02 室李晓, Liaoning 116085 (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, 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, IT, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK,

(54) Title: AIR COMPRESSOR ROTATION STALL PREDICTION METHOD BASED ON MULTI-SOURCE DATA FUSION

(54) 发明名称: 一种基于多源数据融合的压气机旋转失速预测方法

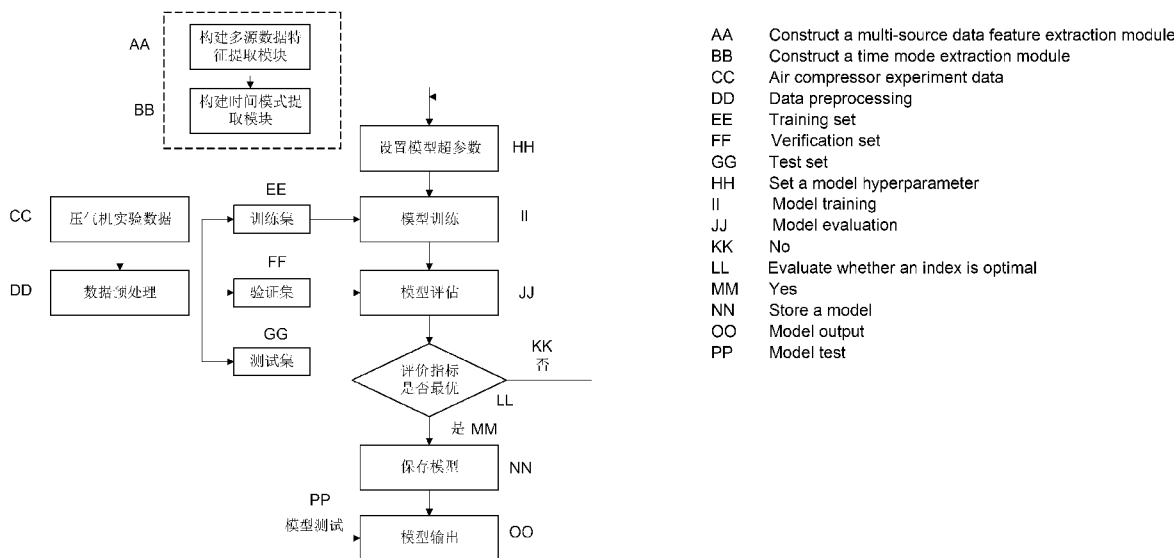


图 1

(57) Abstract: An air compressor rotation stall prediction method based on multi-source data fusion. The method comprises: firstly, acquiring dynamic pressure data of an aero-engine from multiple sensors, preprocessing same, and dividing same into a test set, a training set and a verification data set; secondly, sequentially constructing a multi-source data feature extraction module, a time mode extraction module and a multi-source data fusion prediction model, and storing an optimal prediction mode; and finally, performing real-time prediction on test data: adjusting a data dimension according to the input requirements for constructing the multi-source data fusion prediction model, calculating a stall prediction probability of each sample by using the multi-source data fusion prediction model, calculating a stall prediction probability by using the multi-source data fusion prediction model, and giving, by using a multi-source

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))。

data fusion prediction model, a stall prediction probability for including data recorded by a sensor which operates abnormally. By means of the present invention, multi-source data information is integrated, thereby improving the comprehensiveness and prediction precision of information features; certain fault tolerance is achieved; the improvement of the active control performance of an engine is facilitated; and universality is achieved.

(57) 摘要: 一种基于多源数据融合的压气机旋转失速预测方法, 首先, 获取来自多传感器的对航空发动机动态压力数据并进行预处理, 划分测试、训练和验证数据集。其次, 依次构建多源数据特征提取模块、构建时间模式提取模块、构建多源数据融合预测模型、保存最优预测模型。最后, 在测试数据上进行实时预测: 按构建多源数据融合预测模型的输入要求调整数据维度; 采用多源数据融合预测模型计算每个样本的失速预测概率; 采用多源数据融合预测模型计算失速预测概率; 采用多源数据融合预测模型给出包含一个工作异常的传感器所记录数据的失速预测概率。本发明综合多源数据信息, 提高信息特征的全面性和预测精度, 具有一定容错性; 有利于提高发动机主动控制的性能, 具有普适性。

一种基于多源数据融合的压气机旋转失速预测方法

技术领域

本发明涉及一种基于多源数据融合的压气机旋转失速预测方法，属于航空发动机建模与仿真技术领域。

背景技术

航空发动机是影响飞机整体性能和可靠性的核心部件，其中轴流压气机对发动机的稳定性又有着极其关键的影响，而压气机气动失稳则是一种破坏性极强、发展迅速的常见故障，因此在复杂工况下对压气机失稳过程的精准判别和及时预测是国内外航空发动机领域的研究重点。一般压气机失稳可分为喘振和旋转失速两种状态，当压气机稳定工作时，流量减少，压比增大，但当流量减少到超过失稳边界时，压气机则会产生气流分离，工作状态极可能由稳态进入失速先兆、旋转失速和喘振阶段。而旋转失速和喘振一旦发生，很难自动恢复，并且发动机内部部件往往已经受到损害，因此相比于被动控制方法，在失稳初始扰动阶段就采取措施的主动控制方法更值得深入研究与应用，所以需要准确识别压气机各阶段工作状态，及时检测失稳先兆的出现，为主动控制争取更多时间。

航空发动机属于复杂多部件系统，在压气机内部的不同位置往往安装了多个相互独立的传感器来观测各部件运行状态，其构成的传感器系统可以检测并记录正常运行时和故障发生时各气路部件的状态变化情况。然而，目前压气机旋转失速的判别方法通常处理单个传感器于不同时间段采集的脉动压力信号，或不加区分地统一处理多个传感器于同一时间段采集的脉动压力信号，没有综合考虑到传感器系统所蕴含的多方面失稳状态信息，也没有区分传感器之间的差异性，判别结果相对片面，也容易受单个传感器工作状态制约，缺乏灵活性、可靠性差。

发明内容

针对现有技术中可靠性差，相对片面的问题，本发明提供一种基于多源数据融合的压气机旋转失速预测方法。

本发明的技术方案：

一种基于多源数据融合的压气机旋转失速预测方法，包括以下步骤：

S1.获取航空发动机多源失速数据，并对其进行预处理，其中多源失速数据包括实验平台中多个传感器记录的动态压力数据，包括以下步骤：

S1.1 收集不同位置的传感器所记录的动态压力实验数据作为多源数据集，使用快速傅里叶变换方法对实验数据进行频谱分析，确定稳态工作频率范围以及失速频率范围；

S1.2 采用低通滤波器对压力变化数据进行滤波处理，过滤高频分量，保留稳态工作频率

分量和失速频率分量；

S1.3 对滤波后数据进行重采样，缩小数据维度；由于 S1.1 分析失速频率在 60~110Hz 之间，依据奈奎斯特采样定理进行 5 倍降采样；

S1.4 对降采样后数据进行归一化处理，将数据分布通过线性变化映射到[0, 1]区间；

S1.5 以采样点为基本单位生成与数据集同时间长度的标签列，其中每个采样点根据是否喘振标为 1 或 0；

S1.6 为保证结果客观有效，将预处理后的全部数据集划分为训练数据集、验证数据集和测试数据集；

S2.构建多源数据特征提取模块，包括以下步骤：

S2.1 采用滑动窗口技术对每个传感器的压力变化数据以固定时间步长单独进行划分，将滑动窗口所覆盖的采样数据组成一个样本，将所有数据集维度均调整为(samples,seq_length,sensors)，其中 samples 为样本个数，seq_length 为时间步长，sensors 为传感器数量；

S2.2 为每个传感器构建一个独立的特征提取分支模块，每个分支模块面向输入，定义两个堆叠的时间分布卷积模块，利用 keras 库中 TimeDistributed 层的特征参数共享性来构建每个时间分布卷积模块，每个时间分布卷积模块具体由单通道一维卷积层、归一化层和激活层组成；输入样本在经过第一个时间分布卷积模块的卷积层后进行批量归一化处理，引入校正非线性单元 ReLU 以调整传入下一个时间分布卷积模块的信息，再重复进行第一个时间分布卷积模块的处理步骤，利用 Flatten()函数将其最后的多维输出一维化，为后续全连接层做过渡准备；

S2.3 根据实验中所用传感器数目，组建由特征提取分支模块构成的多源数据特征提取模块，每个传感器对应的特征提取分支模块面向输入样本定义本模块的卷积核大小、滤波器大小、移动步长等参数，模块之间相互独立，参数不共享，独立保存本模块的输出特征信息，并传至时间模式提取模块；

S3.构建时间模式提取模块，包括以下步骤：

S3.1 连接合并多源数据特征提取模块中每个分支模块的输出特征信息，作为时间模式提取模块的输入；

S3.2 基于双向长短期记忆网络(Bi-LSTM,Bidirectional Long short-Term Memory)构建时间模式提取模块，依次经过两层 Bi-LSTM 网络对输入数据进行处理，其中第一层 Bi-LSTM 中的记忆单元数量大于等于第二层中的记忆单元数量；

S3.3 添加 dropout 层防止训练中过拟合情况的发生，再通过一组密集层及线性激活 Linear 函数，将 Bi-LSTM 网络的输出维度调整为(n_outputs, 1)，即为旋转失速预测概率；

S4.构建多源数据融合预测模型，包括以下步骤：

S4.1 基于多源数据特征提取模块和时间模式提取模块构建多源数据融合预测模型，不同传感器测量所得的压力变化数据经过不同的特征提取模块进行处理，每个模块有独立的滤波器提取相关特征，方便跟随实际试验进行传感器添加、删除等操作，合并多个模块输出的特征信息并传递给时间模式提取模块，学习数据中时间长期依赖性，通过线性激活的全连接层得到失速预测概率；

S4.2 采用模型输出值 $f(x)$ 和真实值 y 之间的均方误差(MSE)作为损失函数，计算方式如下：

$$MSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y - f(x))^2}$$

其中， i 表示当前训练的是第 i 个样本， n 表示每批次计算的样本数量，对于全批量学习， n 为整个训练样本集大小；

S4.3 保存训练后的多源数据融合预测模型并在验证集上测试，根据验证集评价指标调整模型超参数，量化模型预测性能的评价指标采用均方根误差(RMSE)和 Score 函数，综合两个评价指标结果，保存最优模型得到最终的多源数据融合预测模型；

所述均方根误差 RMSE 的计算方式如下：

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta y_i^2}$$

其中， $\Delta y_i = y_{pred} - y_{true}$ ，是模型根据第 i 个样本生成的预测值与真实值之差， N 是每批次输入模型的总样本数量；

所述 Score 函数计算方式如下：

$$Score = \sum_{i=1}^N SF_i, \quad SF = \begin{cases} e^{\frac{\Delta y_i}{13}} - 1, & \Delta y_i < 0 \\ e^{\frac{\Delta y_i}{10}} - 1, & \Delta y_i \geq 0 \end{cases}$$

其中，Score 函数区分了提前预测和之后预测，在旋转失速预测的实际应用环境中，相比于滞后预测，通常更希望提前一些，从而为主动控制争取更多时间，因此这要求评价指标是非对称的，所以Score函数中为滞后预测实施更大的惩罚。

S5.在测试数据上进行实时预测

S5.1 获取步骤 S1 中预处理后划分出的测试集数据，按照 S2.1 步骤将数据维度调整为(samples,seq_length, sensors)；

S5.2 采用 S4.3 中保存的多源数据融合最优预测模型计算每个样本的失速预测概率，并按

照时间顺序排序；

S5.3 随机选取测试集中一组动态压力数据，采用保存的最优预测模型仅对其中一个传感器数据进行失速预测，并同基于全部传感器数据计算的失速预测概率进行对比，以观察多源数据融合对模型预测效果的帮助性；

S5.4 选取一组动态压力数据，其中包含一个工作异常的传感器所记录的实验数据，采用训练后的模型对这组数据进行失速概率预测，以测试模型的容错性。

本发明的有益效果：通过本发明所提供方法对压气机旋转失速预测，相比于以往的方法，综合了不同位置的多个传感器数据，提高信息特征的全面性和预测准确性，根据模型输出的失速预测概率，可以根据工程实际设置阈值划分概率，从而实现分级预警。模型可跟随试验中使用的传感器数量动态调整部分网络结构，更方便应用于多传感器环境。同时，模型在少部分传感器无法正常工作的情况下，仍能根据剩余传感器记录的数据准确预测压气机失速概率，具有一定的容错性。本方法基于数据，与发动机结构无关，因此通过训练不同数据集就可以将模型方便地迁移到不同型号发动机上使用，具有一定的普适性。

附图说明

图 1 为基于多源数据融合的压气机旋转失速预测方法流程图；

图 2 为数据预处理流程图；

图 3 为多源数据特征提取模块结构图；

图 4 为多源数据融合预测模型结构图；

图 5 为测试集其中一组数据的全部传感器压力变化图，其中(a)为进口导向叶片静子尖部 p_{in} 随时间变化图，(b)为一级静子尖部动压 p_1 随时间变化图，(c)为二级静子尖部动压 p_2 随时间变化图，(d)为四级静子尖部动压 p_4 随时间变化图，(e)为出口壁面动压 p_{out} 随时间变化图；

图 6 为多源数据融合预测模型在图 5 所示测试数据上的预测结果图，其中(a)为四级静子尖部动压 p_4 随时间变化图，(b)为多源数据融合预测模型给出的失速预测概率随时间的变化图，(c)为多源数据融合预测模型给出的预警信号；

图 7 为多源数据融合预测模型在单个传感器动压数据上的预测结果图，其中(a)为四级静子尖部动压 p_4 随时间变化图，(b)为多源数据融合预测模型给出的失速预测概率随时间的变化图，(c)为多源数据融合预测模型给出的预警信号；

图 8 为模型容错能力测试数据变化曲线，其中图(a)为进口导向叶片静子尖部 p_{in} 随时间变化图，(b)为一级静子尖部动压 p_1 随时间变化图，(c)为二级静子尖部动压 p_2 随时间变化图，(d)为四级静子尖部动压 p_4 随时间变化图，(e)为出口壁面动压 p_{out} 随时间变化图；

图 9 为模型容错能力测试图，其中(a)为一级静子尖部动压 p_1 随时间变化图，(b)为多源数

据融合预测模型给出的失速预测概率随时间的变化图，(c)为多源数据融合预测模型给出的预警信号。

具体实施方式

下面结合附图对本发明作进一步说明，本发明依托背景为某型航空发动机失速实验数据，基于多源数据融合的压气机旋转失速预测方法流程如图 1 所示。

图 2 为数据预处理流程图，数据预处理步骤如下：

S1. 实验设置 5 个测量点，测量从正常到喘振共 10s 的动态压力数值，传感器测量频率为 6kHz，共记录 16 组数据；5 个测量点分别位于：进口导向叶片静子尖部、一级静子尖部、二级静子尖部、四级静子尖部、出口壁面；

S2. 使用快速傅里叶变换方法对实验数据进行频谱分析，确定稳态工作频率范围以及失速频率范围；

S3. 采用低通滤波器对压力变化数据进行滤波处理；为缩小数据维度、节约计算资源，对滤波后数据进行降采样，依据频谱分析中确认失速频率的范围在 60~110Hz 之间，根据奈奎斯特采样定理选定 5 倍降采样率；

S4. 对降采样后数据进行归一化处理，将数据分布通过线性变化映射到[0, 1]区间；

S5. 每组数据以采样点为基本单位生成一系列标签序列，维度与数据集同长，其中每个采样点根据是否喘振标为 1 或 0；

S6. 为保证结果客观有效，将预处理后的全部数据集划分为训练数据集、验证数据集和测试数据集。

图 3 为多源数据特征提取模块结构图，构建多源数据特征提取模块的步骤如下：

S1. 为了捕获时间序列内每个阶段的细小特征，采用滑动窗口技术对每个传感器的压力变化数据以固定时间步长单独进行划分，将滑动窗口所覆盖的采样数据组成一个样本，将所有数据集维度均调整为(samples, seq_length, sensors)，其中 samples 为样本个数，seq_length 为时间步长，sensors 为传感器数量；

S2. 针对每个传感器搭建各自独立的特征提取分支模块，每个分支模块定义了两个堆叠的时间分布卷积模块，利用 keras 库中 TimeDistributed 层的特征参数共享性来构建每个时间分布卷积模块，每个时间分布卷积模块具体由单通道一维卷积层、归一化层和激活层组成；输入样本在经过第一个时间分布卷积模块的卷积层后进行批量归一化处理，引入校正非线性单元 ReLU 以调整传入下一个时间分布卷积模块的信息，再重复进行第一个时间分布卷积模块的处理步骤，利用 Flatten() 函数将其最后的多维输出一维化，为后续的全连接做过渡准备；

S3. 根据试验中所用传感器数目组建由多个特征提取分支模块构成的多源数据特征提取

模块, 使用同样大小的滑动窗口划分不同传感器数据, 保证样本维度大小统一; 每个传感器对应的特征提取分支模块面向输入样本独立定义本模块的卷积核大小、滤波器大小、移动步长等参数, 模块之间参数不共享, 并且独立保存本模块的输出特征信息, 传至时间模式提取模块。

图 4 为多源数据融合预测模型结构图, 构建多源数据融合预测模型的步骤如下:

S1.多源数据特征提取模块分别提取各个传感器所记录数据的特征信息, 按照时间顺序将同时时间段的特征信息合并在一起, 作为时间模式提取模块的输入;

S2.基于双向长短期记忆网络(Bi-LSTM)构建时间模式提取模块, 依次经过两层 Bi-LSTM 网络层对输入数据进行处理, 其中第一层 Bi-LSTM 中的记忆单元数量要大于或等于第二层中的记忆单元数量;

S3.通过输出密集层, 即全连接层, 和线性激活 Linear 函数处理 Bi-LSTM 网络的输出, 同时添加 dropout 层防止训练中发生过拟合情况, 最终得到失速预测概率值。

S4.本方法的目标是训练网络使得输出预测概率尽可能与真实概率相近, 因此采用模型输出值 $f(x)$ 和真实值 y 之间的均方误差(MSE)作为损失函数, 计算方式如下:

$$MSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y - f(x))^2}$$

其中, i 表示当前训练的是第 i 个样本, n 表示每批次计算的样本数量, 对于全批量学习, n 为整个训练样本集大小;

S5. 保存训练后的多源数据融合预测模型并在验证集上测试, 根据验证集评价指标调整模型超参数, 量化模型预测性能的评价指标采用均方根误差(RMSE), 计算方式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta y_i^2}$$

其中, $\Delta y_i = y_{pred} - y_{true}$, 是模型根据第 i 个样本生成的预测值与真实值之差, N 是试验中输入模型的总样本数量;

此外, 在旋转失速预测的实际应用环境中, 相比于滞后预测通常更希望模型做到提前预测, 从而为主动控制争取更多时间, 因此这要求评价指标是非对称的, 而 Score 函数区分了早期预测和晚期预测, 为滞后预测实施更大的惩罚, 所以除了 RMSE 外, 还采用 Score 函数作为评价指标, 计算方式如下:

$$Score = \sum_{i=1}^N SF_i, \quad SF = \begin{cases} e^{\frac{\Delta y_i}{13}} - 1, & \Delta y_i < 0 \\ e^{\frac{\Delta y_i}{10}} - 1, & \Delta y_i \geq 0 \end{cases}$$

综合两个评价指标结果，保存最优模型得到最终的多源数据融合预测模型。

图 5 为测试集中其中一组测试数据的全部传感器压力变化图，其中(a)为进口导向叶片静子尖部 p_{in} 随时间变化图，(b)为一级静子尖部动压 p_1 随时间变化图，(c)为二级静子尖部动压 p_2 随时间变化图，(d)为四级静子尖部动压 p_4 随时间变化图，(e)为出口壁面动压 p_{out} 随时间变化图。图 6 为多源数据融合预测模型在图 5 所示测试数据上的预测结果图，其中(a)为四级静子尖部动压 p_4 随时间变化图，即图 5(d)，(b)为多源数据融合预测模型给出的失速预测概率随时间的变化图，(c)为多源数据融合预测模型给出的预警信号。图 7 为多源数据融合预测模型在单个传感器动压数据上的预测结果图，其中(a)为四级静子尖部动压 p_4 随时间变化图，即图 5(d)，(b)为多源数据融合预测模型给出的失速预测概率随时间的变化图，(c)为多源数据融合预测模型给出的预警信号。图 8 为模型容错能力测试数据压力变化图，其中图(a)为进口导向叶片静子尖部 p_{in} 随时间变化图，(b)为一级静子尖部动压 p_1 随时间变化图，(c)为二级静子尖部动压 p_2 随时间变化图，(d)为四级静子尖部动压 p_4 随时间变化图，(e)为出口壁面动压 p_{out} 随时间变化图。图 9 为模型容错能力测试结果图，其中(a)为一级静子尖部动压 p_1 随时间变化图，即为图 8(b)，(b)为多源数据融合预测模型给出的失速预测概率随时间的变化图，(c)为多源数据融合预测模型给出的预警信号。在测试数据上进行实时预测的步骤如下：

S1. 图 5 测试集压力变化图中五条曲线分别为同一时段中五个测量点传感器记录的动态压力数据，从图中可以看出，6.02s 开始出现了一个向下发展的突尖，处于失速初始扰动阶段，随着失速扰动的发展，在 6.23s 开始有剧烈的波动，为先兆阶段，在 6.48s 后彻底发展为失速喘振；按数据预处理中步骤对测试集数据处理，并按多源数据融合预测模型的输入要求调整数据维度。

S2. 按时间顺序，用多源数据融合预测模型计算基于图 5 一组传感器测量数据的失速预测概率，其中图 6(a)为图 5(d)，用于辅助图 6(b)和(c)进行预测结果分析。从图 6(b)和(c)可以看到，在 6.23s 左右失速概率从 0 提升至 20%左右，在 6.23s 到 6.37s 之间一直维持在 20%左右，同失速先兆阶段的时间跨度相符，之后在 6.49s 渐渐提升至 100%左右，表明彻底发展为失速喘振。根据失速喘振原理，先兆的出现大概率代表失速和喘振会在后续发生，因此在 6.23s 左右模型预测到失速概率有明显提升时，即预判进入先兆阶段，系统随即给出预警信号。

S3. 本发明综合考虑压气机系统多个测量点的信息，因此针对单源数据和多源数据进行了对比试验，在图 5 的一组传感器数据中选择(d)，即四级静子尖部动压 p_4 ，按照要求进行预处理、调整数据维度后输入多源数据融合预测模型，模型中多源数据特征提取模块仅设置一个

特征提取分支模块。图 7(b)和(c)为模型给出的预测结果，可以看出在 6.27s 左右预测概率有小幅波动，概率值从 0 提升到 15%左右，6.53s 左右概率值上升至 100%，表明压气机彻底失速。整体来看，相较于图 6，仅针对单个传感器继续预测会有滞后预测的情况，同时在先兆阶段概率提升幅度不明显，不利于系统给出失速预警信号，因此表明融合多源数据对失速预测有一定帮助。

S4. 图 8 模型容错能力测试数据压力变化图，其中图 8(a)对应的传感器在测量时工作异常，其余 4 个传感器正常工作；由图可知，在 6.23s 左右有一个向下发展的突尖，处于失速初始扰动阶段，在 6.35s 左右直接发展成失速喘振，没有明显的先兆阶段；按数据预处理中步骤对测试集数据处理，并按多源数据融合预测模型的输入要求调整数据维度。

S5. 按时间顺序，用多源数据融合预测模型计算基于 8 一组传感器测量数据的失速预测概率，其中图 9(a)为图 8(b)，用于辅助图 9(b)和(c)进行预测结果分析。观察预测结果图发现，在 6.23s 左右失速概率从 0 突然升至 16%左右，说明捕捉到动压数据中向下发展的突尖信号，在 6.35s 后提升至 100%，表明彻底进入失速喘振阶段，因此说明多源数据融合模型在有一个传感器工作异常的情况下，仍能根据其他正常工作的传感器记录信息进行准确预测，具有一定的容错能力，方便工程应用。

权利要求书

1.一种基于多源数据融合的压气机旋转失速预测方法，其特征在于，包括以下步骤：

S1. 获取航空发动机多源失速数据，并对其进行预处理，其中多源失速数据包括实验平台中多个传感器记录的动态压力数据：

S1.1 收集不同位置的传感器所记录的动态压力实验数据作为多源数据集，对实验数据进行频谱分析，确定稳态工作频率范围以及失速频率范围；

S1.2 采用低通滤波器对压力变化数据进行滤波处理，过滤高频分量，保留稳态工作频率分量和失速频率分量；

S1.3 对滤波后数据进行重采样，缩小数据维度；

S1.4 对降采样后数据进行归一化处理，将数据分布通过线性变化映射到[0, 1]区间；

S1.5 以采样点为基本单位生成与数据集同时间长度的标签列，其中每个采样点根据是否喘振标为 1 或 0；

S1.6 将预处理后的全部数据集划分为训练数据集、验证数据集和测试数据集；

S2.构建多源数据特征提取模块，包括以下步骤：

S2.1 采用滑动窗口方法对每个传感器的压力变化数据以固定时间步长单独进行划分，将滑动窗口所覆盖的采样数据组成一个样本，将所有数据集维度均调整为(samples, seq_length, sensors)，其中 samples 为样本个数，seq_length 为时间步长，sensors 为传感器数量；

S2.2 为每个传感器构建一个独立的特征提取分支模块，每个分支模块面向输入定义两个堆叠的时间分布卷积模块，并构建两个时间分布卷积模块，

S2.3 根据所用传感器数目，组建由特征提取分支模块构成的多源数据特征提取模块，每个传感器对应的特征提取分支模块面向输入样本定义本模块的参数，模块之间相互独立，参数不共享，独立保存本模块的输出特征信息，并传至时间模式提取模块；

S3.构建时间模式提取模块，包括以下步骤：

S3.1 连接合并多源数据特征提取模块中每个分支模块的输出特征信息，作为时间模式提取模块的输入；

S3.2 基于双向长短期记忆网络 Bi-LSTM 构建时间模式提取模块，依次经过两层 Bi-LSTM 网络对输入数据进行处理，

S3.3 添加 dropout 层，再通过一组密集层及线性激活 Linear 函数，将 Bi-LSTM 网络的输出维度调整为(n_outputs, 1)，即为旋转失速预测概率；

S4.构建多源数据融合预测模型，包括以下步骤：

S4.1 基于多源数据特征提取模块和时间模式提取模块构建多源数据融合预测模型，不同传感器测量所得的压力变化数据经过不同的特征提取模块进行处理，每个模块有独立的滤波

器提取相关特征，合并多个模块输出的特征信息并传递给时间模式提取模块，学习数据中时间长期依赖性，通过线性激活的全连接层得到失速预测概率；

S4.2 采用模型输出值 $f(x)$ 和真实值 y 之间的均方误差 MSE 作为损失函数；

S4.3 保存训练后的多源数据融合预测模型并在验证集上测试，根据验证集评价指标调整模型超参数，采用均方根误差 RMSE 和 Score 函数量化模型预测性能的评价指标，综合两个评价指标结果，保存最优模型得到最终的多源数据融合预测模型；

S5.在测试数据上进行实时预测

S5.1 获取步骤 S1 中预处理后划分出的测试集数据，按照 S2.1 步骤将数据维度调整为 (samples, seq_length, sensors)；

S5.2 采用 S4.3 中保存的多源数据融合最优预测模型计算每个样本的失速预测概率，并按照时间顺序排序；

S5.3 随机选取测试集中一组动态压力数据，采用保存的最优预测模型仅对其中一个传感器数据进行失速预测，并同基于全部传感器数据计算的失速预测概率进行对比，以观察多源数据融合对模型预测效果的帮助性；

S5.4 选取一组动态压力数据，其中包含一个工作异常的传感器所记录的实验数据，采用训练后的模型对这组数据进行失速概率预测。

2.根据权利要求 1 所述的一种基于多源数据融合的压气机旋转失速预测方法，其特征在于，所述的步骤 S2.2 中，每个时间分布卷积模块均由单通道一维卷积层、归一化层和激活层组成；输入样本在经过第一个时间分布卷积模块的卷积层后进行批量归一化处理，引入校正非线性单元 ReLU 以调整传入下一个时间分布卷积模块的信息，再重复进行第一个时间分布卷积模块的处理步骤，利用 Flatten()函数将其最后的多维输出一维化。

3.根据权利要求 1 所述的一种基于多源数据融合的压气机旋转失速预测方法，其特征在于，所述步骤 S3.2 中，第一层 Bi-LSTM 中的记忆单元数量大于等于第二层中的记忆单元数量。

4.根据权利要求 1 所述的一种基于多源数据融合的压气机旋转失速预测方法，其特征在于，所述的步骤 S4.2 中，损失函数计算方式如下：

$$MSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y - f(x))^2}$$

其中， i 表示当前训练的是第 i 个样本， n 表示每批次计算的样本数量，对于全批量学习， n 为整个训练样本集大小。

5.根据权利要求 1 所述的一种基于多源数据融合的压气机旋转失速预测方法，其特征在于，

所述步骤 S4.3 中:

所述均方根误差 RMSE 的计算方式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta y_i^2}$$

其中, $\Delta y_i = y_{pred} - y_{true}$, 是模型根据第*i*个样本生成的预测值 y_{pred} 与真实值 y_{true} 之差, N 是每批次输入模型的总样本数量;

所述 Score 函数计算方式如下:

$$Score = \sum_{i=1}^N SF_i, SF = \begin{cases} e^{\frac{\Delta y_i}{13}} - 1, & \Delta y_i < 0 \\ e^{\frac{\Delta y_i}{10}} - 1, & \Delta y_i \geq 0 \end{cases}。$$

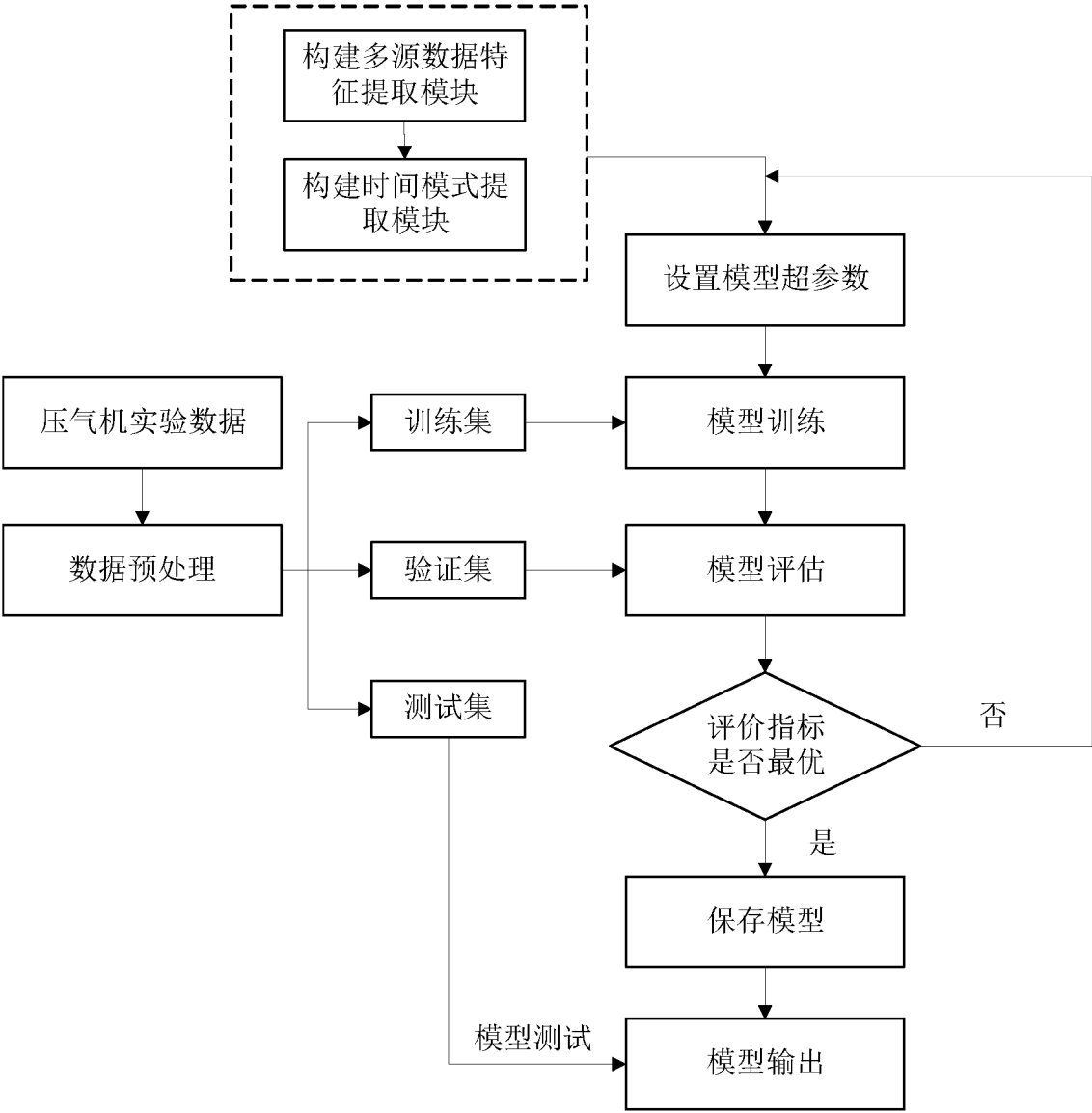


图 1

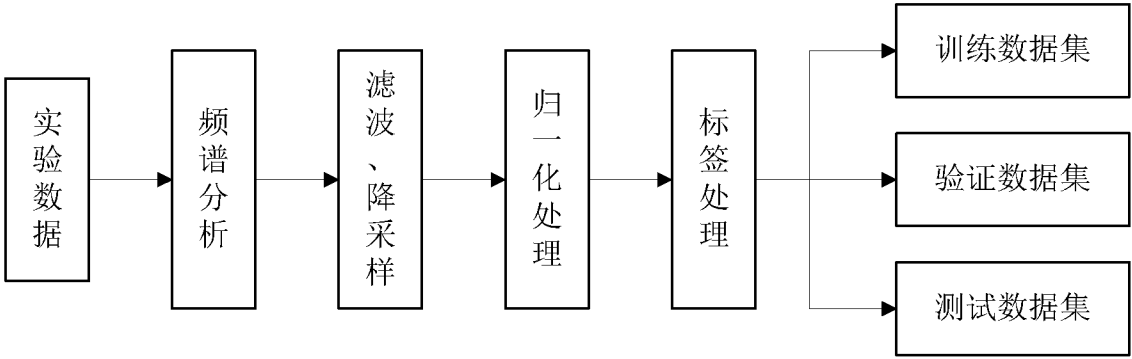


图 2

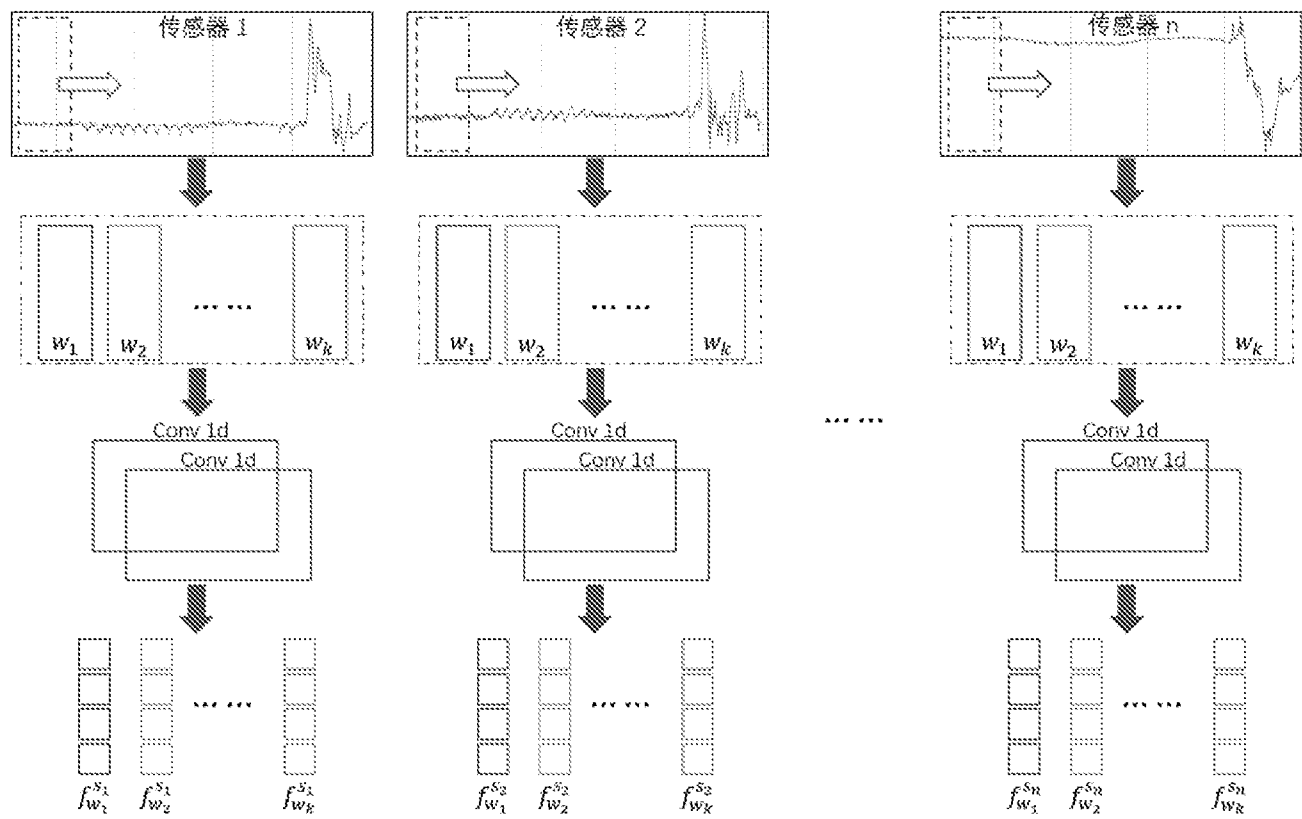


图 3

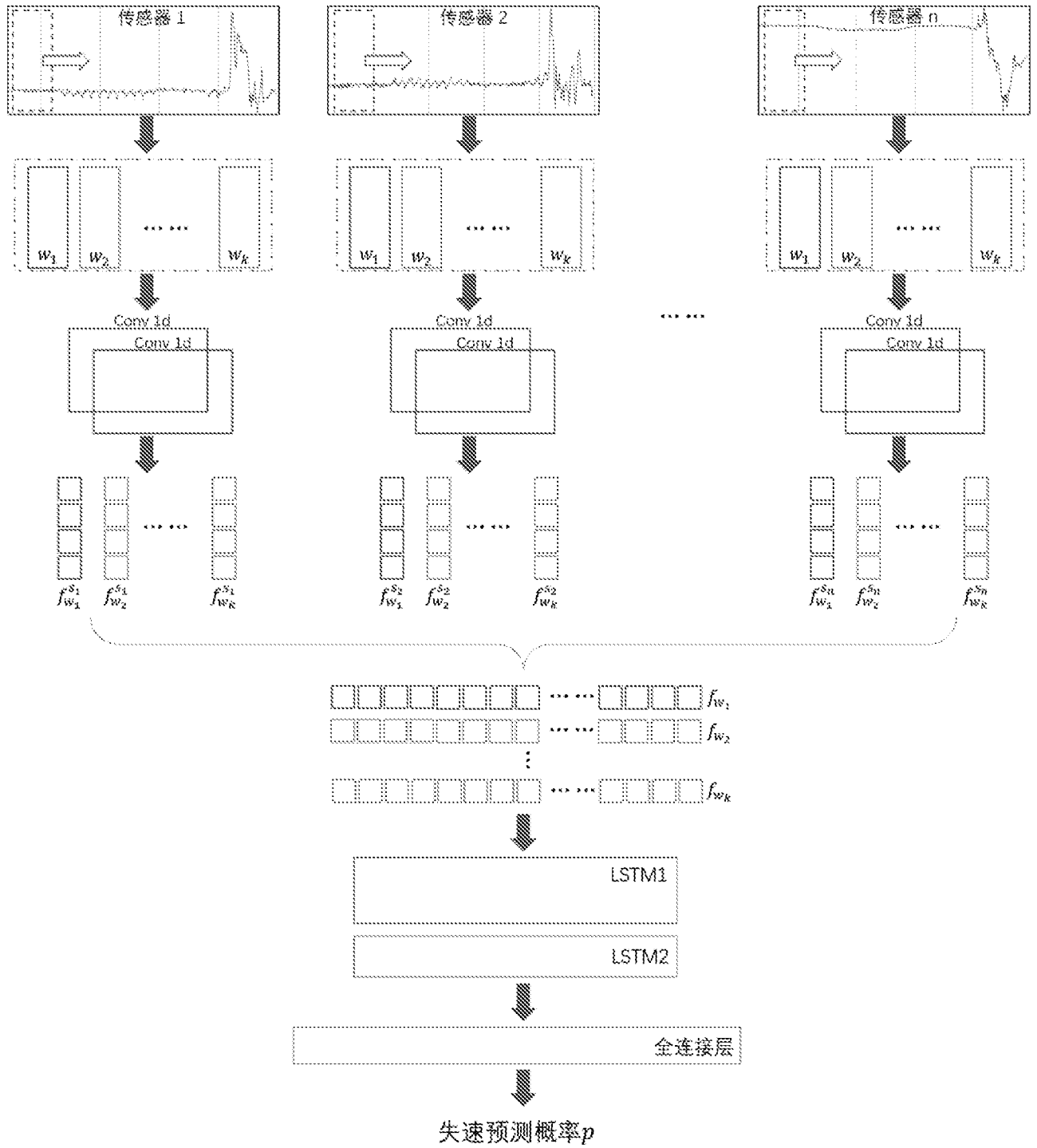


图 4

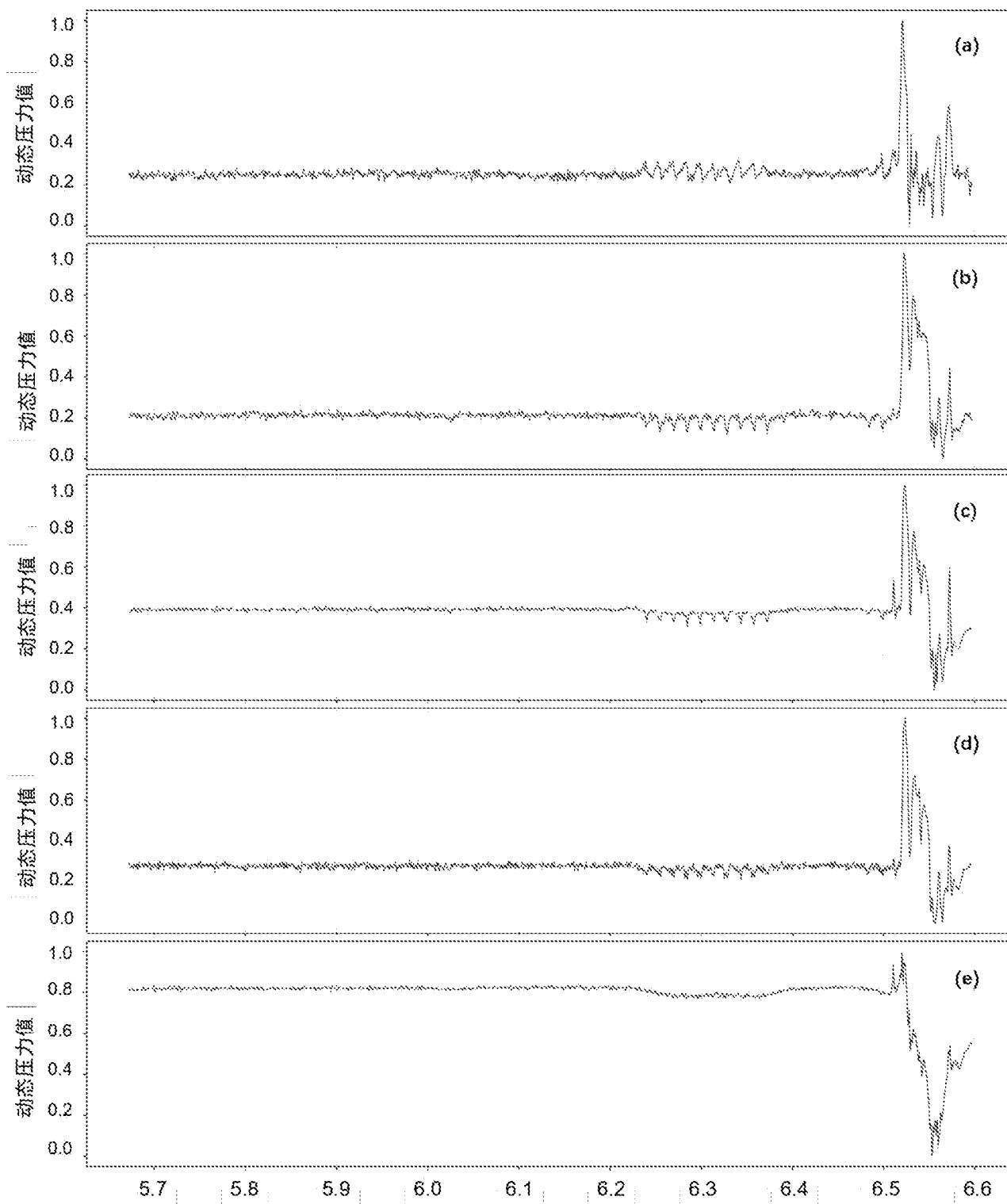


图 5

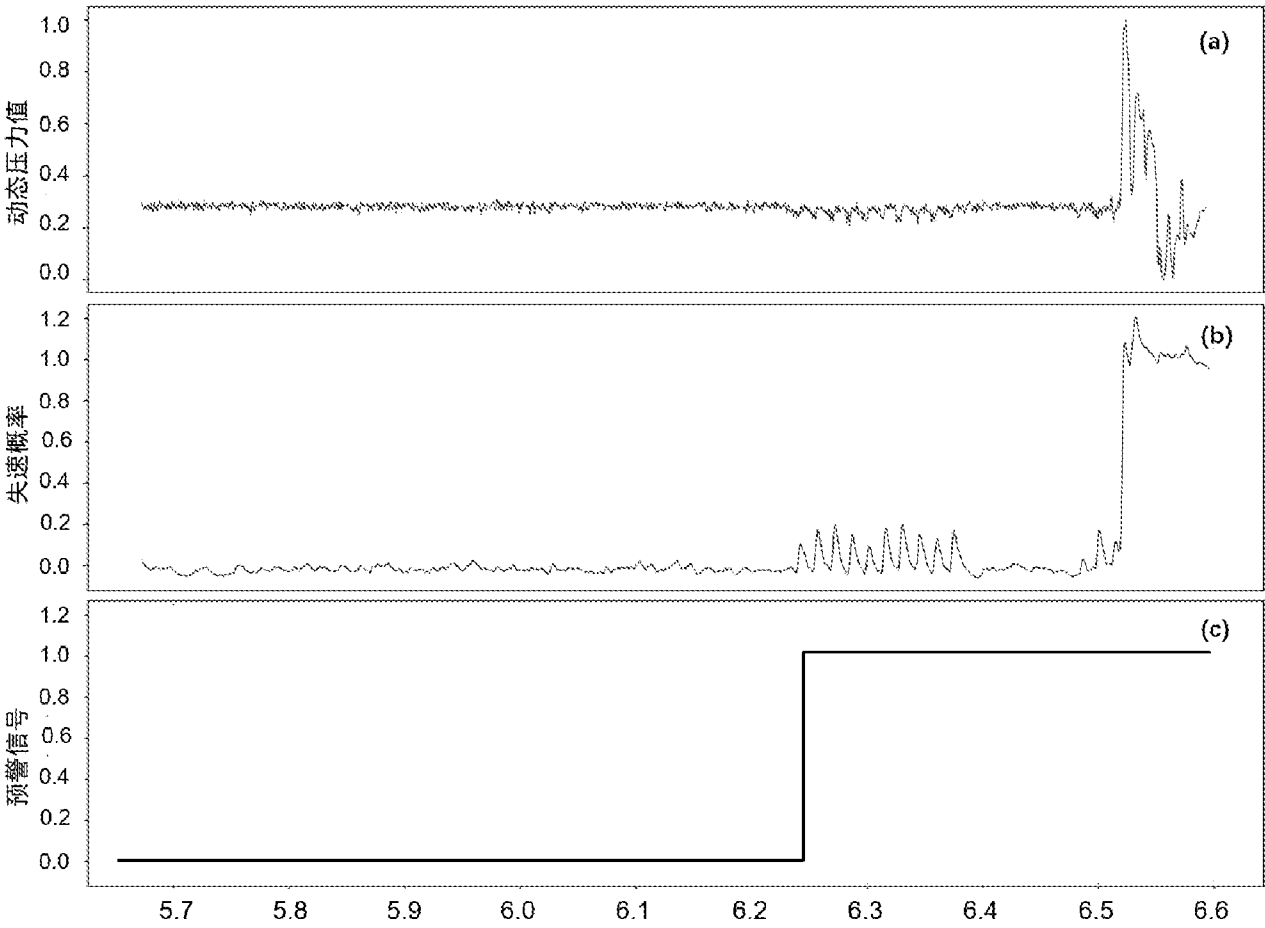


图 6

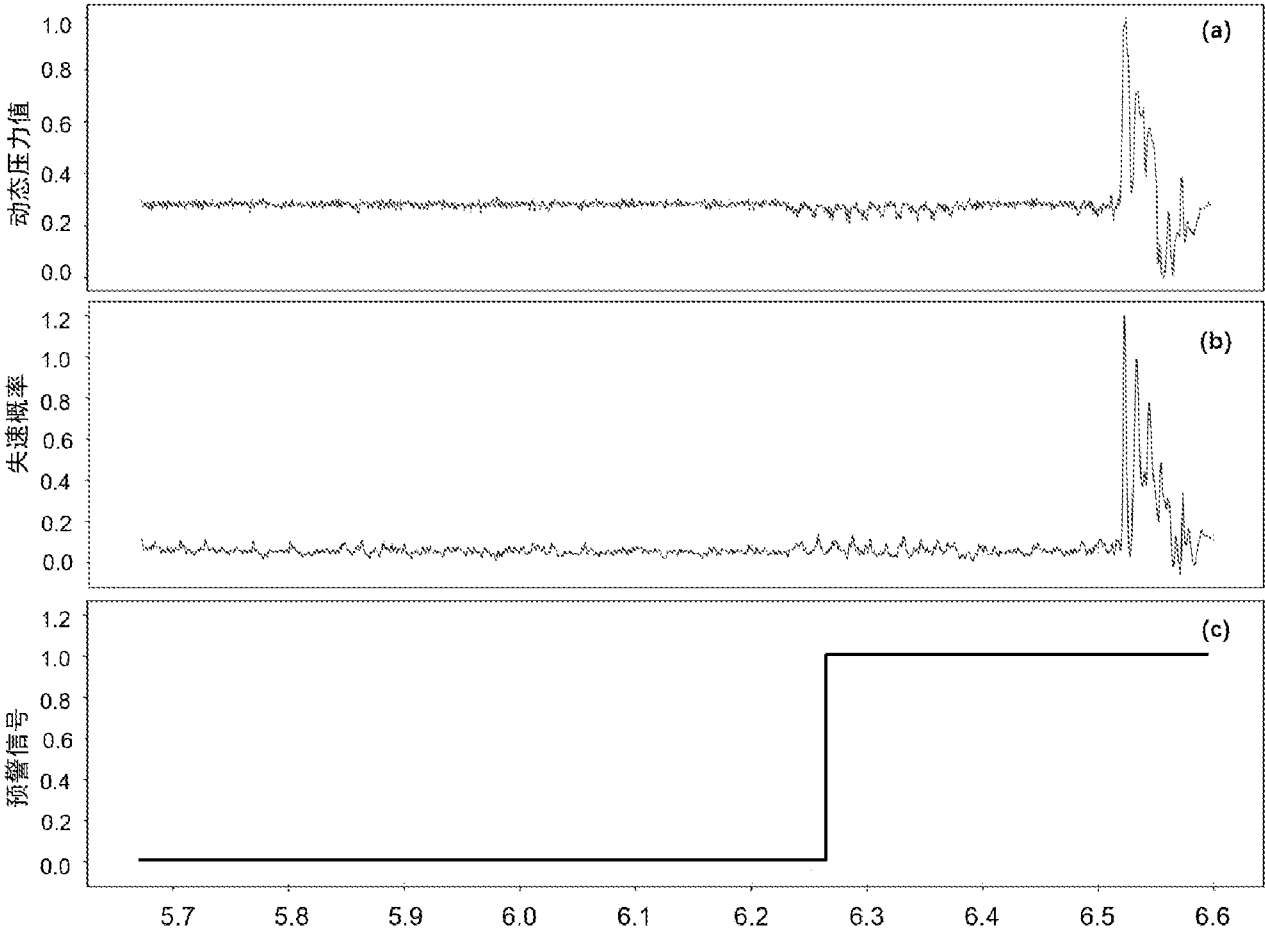


图 7

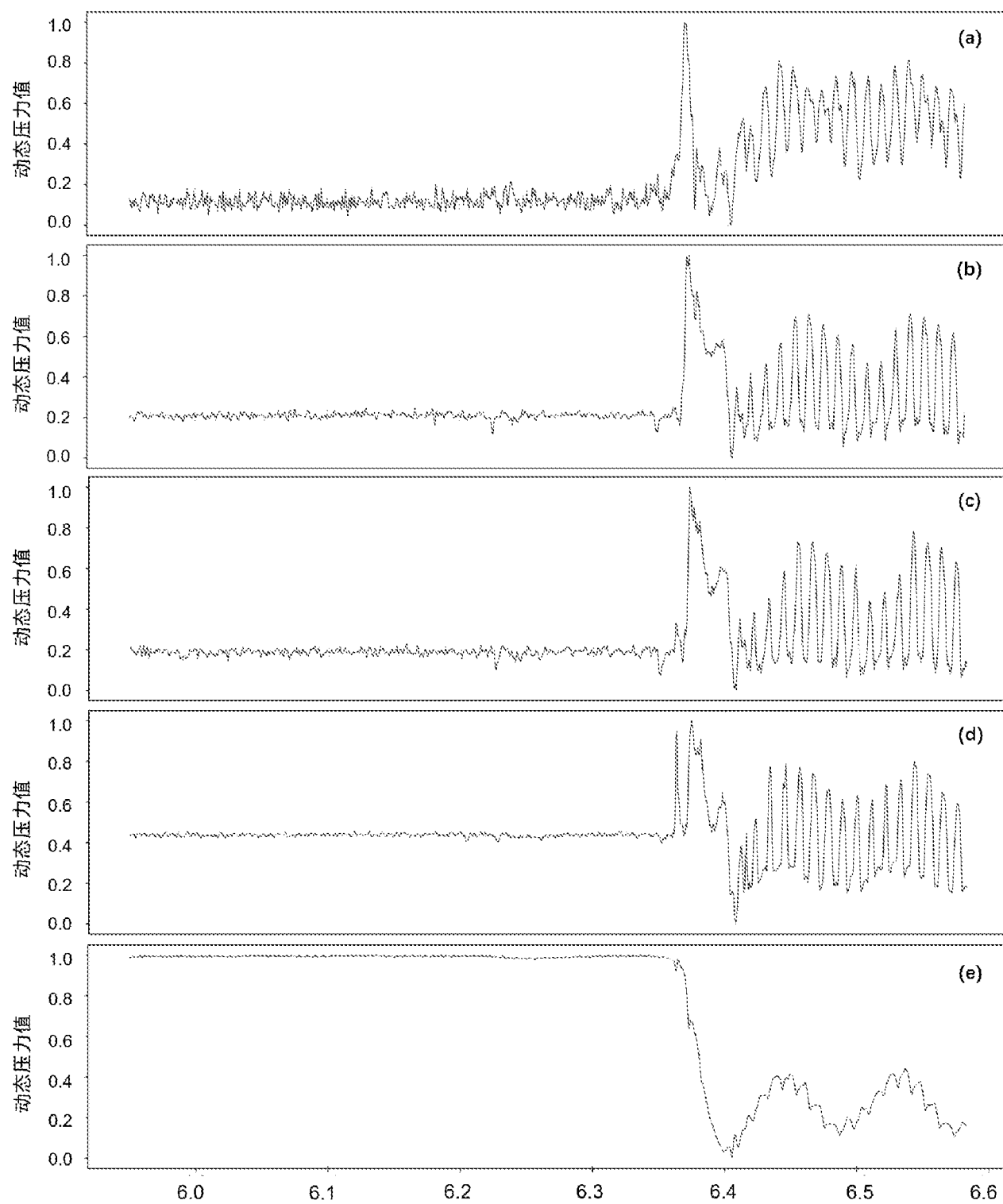


图 8

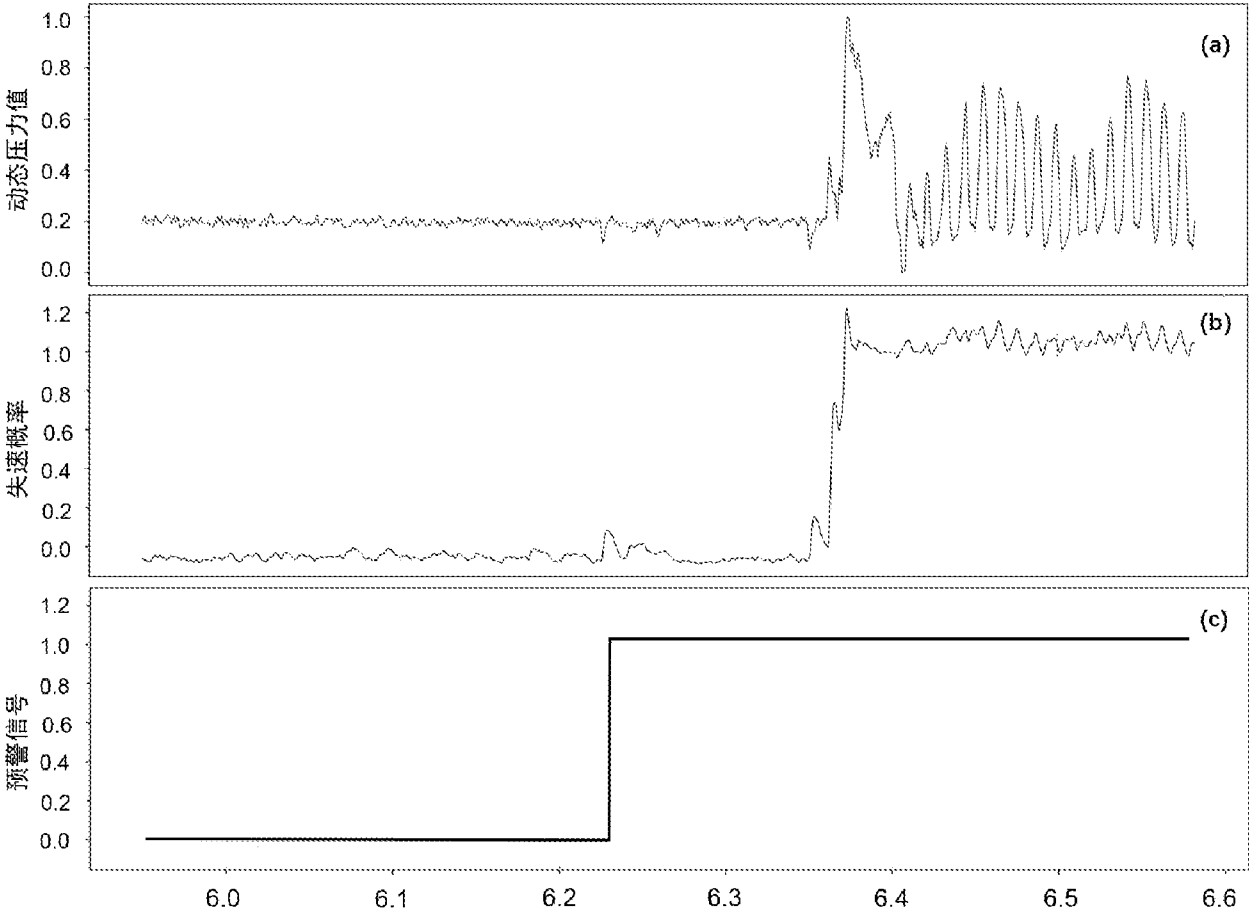


图 9

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2021/135611

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G06F 30/15(2020.01)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)

G06F

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, CNPAT, WPI, EPODOC, IEEE: 多源, 融合, 失速, 预测, 时间, 概率, multi-source, fusion, stall, prediction, time, probability

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	CN 113569338 A (DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 29 October 2021 (2021-10-29) description, paragraphs [0002]-[0089]	1-5
Y	门日秀 (MEN, Rixiu). "网络环境下的旋转机械远程故障诊断系统开发问题研究 (Remote Fault Diagnosis System of Rotating Machinery Based on Network)" 中国优秀硕士学位论文全文数据库信息科技辑 (Information Science & Technology, China Master's Theses Full-Text Database), No. 11, 15 November 2009 (2009-11-15), pages 30-33	1-5
Y	CN 112613226 A (DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 06 April 2021 (2021-04-06) description, paragraphs [0002]-[0097]	1-5
Y	宋天宇 (SONG, Tianyu). "基于长短时记忆网络的山丘区洪水预报研究 (Research on Flash Flood Forecasting Based on Long Short-Term Memory Networks)" 万方硕士学位论文全文数据库信息科技辑 (Information Science & Technology, Wanfang Master's Theses Full-Text Database), 08 May 2021 (2021-05-08), pages 49-53	2,
A	WO 2021007084 A1 (PURDUE RESEARCH FOUNDATION) 14 January 2021 (2021-01-14) entire document	1-5



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

10 August 2022

Date of mailing of the international search report

25 August 2022

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration (ISA/
CN)
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao, Haidian District, Beijing
100088, China

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2021/135611

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	113569338	A	29 October 2021	None			
CN	112613226	A	06 April 2021	None			
WO	2021007084	A1	14 January 2021	US	2022018352	A1	20 January 2022

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2021/135611

A. 主题的分类 G06F 30/15 (2020.01) 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) G06F 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, CNPAT, WPI, EPDOC, IEEE: 多源, 融合, 失速, 预测, 时间, 概率, multi-source, fusion, stall, prediction, time, probability																				
C. 相关文件 <table border="1"> <thead> <tr> <th>类 型*</th> <th>引用文件, 必要时, 指明相关段落</th> <th>相关的权利要求</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Y</td> <td>CN 113569338 A (大连理工大学) 2021年10月29日 (2021 - 10 - 29) 说明书第[0002] - [0089]段</td> <td>1-5</td> </tr> <tr> <td>Y</td> <td>门日秀. "网络环境下的旋转机械远程故障诊断系统开发问题研究" 中国优秀硕士学位论文全文数据库信息科技辑, 第11期, 2009年11月15日 (2009 - 11 - 15), 第30-33页</td> <td>1-5</td> </tr> <tr> <td>Y</td> <td>CN 112613226 A (大连理工大学) 2021年4月6日 (2021 - 04 - 06) 说明书第[0002]-[0097]段</td> <td>1-5</td> </tr> <tr> <td>Y</td> <td>宋天宇. "基于长短时记忆网络的山丘区洪水预报研究" 万方硕士学位论文全文数据库信息科技辑, 2021年5月8日 (2021 - 05 - 08), 第49-53页</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>WO 2021007084 A1 (PURDUE RESEARCH FOUNDATION) 2021年1月14日 (2021 - 01 - 14) 全文</td> <td>1-5</td> </tr> </tbody> </table>			类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求	Y	CN 113569338 A (大连理工大学) 2021年10月29日 (2021 - 10 - 29) 说明书第[0002] - [0089]段	1-5	Y	门日秀. "网络环境下的旋转机械远程故障诊断系统开发问题研究" 中国优秀硕士学位论文全文数据库信息科技辑, 第11期, 2009年11月15日 (2009 - 11 - 15), 第30-33页	1-5	Y	CN 112613226 A (大连理工大学) 2021年4月6日 (2021 - 04 - 06) 说明书第[0002]-[0097]段	1-5	Y	宋天宇. "基于长短时记忆网络的山丘区洪水预报研究" 万方硕士学位论文全文数据库信息科技辑, 2021年5月8日 (2021 - 05 - 08), 第49-53页	2	A	WO 2021007084 A1 (PURDUE RESEARCH FOUNDATION) 2021年1月14日 (2021 - 01 - 14) 全文	1-5
类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求																		
Y	CN 113569338 A (大连理工大学) 2021年10月29日 (2021 - 10 - 29) 说明书第[0002] - [0089]段	1-5																		
Y	门日秀. "网络环境下的旋转机械远程故障诊断系统开发问题研究" 中国优秀硕士学位论文全文数据库信息科技辑, 第11期, 2009年11月15日 (2009 - 11 - 15), 第30-33页	1-5																		
Y	CN 112613226 A (大连理工大学) 2021年4月6日 (2021 - 04 - 06) 说明书第[0002]-[0097]段	1-5																		
Y	宋天宇. "基于长短时记忆网络的山丘区洪水预报研究" 万方硕士学位论文全文数据库信息科技辑, 2021年5月8日 (2021 - 05 - 08), 第49-53页	2																		
A	WO 2021007084 A1 (PURDUE RESEARCH FOUNDATION) 2021年1月14日 (2021 - 01 - 14) 全文	1-5																		
☐ 其余文件在C栏的续页中列出。 ☒ 见同族专利附件。																				
<table border="0"> <tr> <td> * 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 </td> <td> "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 </td> </tr> </table>			* 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																
* 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 2022年8月10日		国际检索报告邮寄日期 2022年8月25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 穆滢 电话号码 86-(10)-53961531																		

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2021/135611

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	113569338	A	2021年10月29日	无		
CN	112613226	A	2021年4月6日	无		
WO	2021007084	A1	2021年1月14日	US	2022018352 A1	2022年1月20日