



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 111855799 B

(45) 授权公告日 2021.03.02

(21) 申请号 202010667824.X

G21C 17/017 (2006.01)

(22) 申请日 2020.07.13

(56) 对比文件

(65) 同一申请的已公布的文献号

US 6799126 B1, 2004.09.28

申请公布号 CN 111855799 A

CN 109870404 A, 2019.06.11

CN 106055760 A, 2016.10.26

(43) 申请公布日 2020.10.30

唐梓辉 等. 基于间隔平滑法的复合材料分层损伤识别研究.《工程与试验》.2018, 第58卷(第2期),

(73) 专利权人 中国科学院力学研究所

地址 100190 北京市海淀区北四环西路15号

审查员 杨涛

(72) 发明人 路玲玲 赖姜 毕建权 宋宏伟 黄晨光

(74) 专利代理机构 北京和信华成知识产权代理事务所(普通合伙) 11390

代理人 焦海峰

(51) Int. Cl.

G01N 29/04 (2006.01)

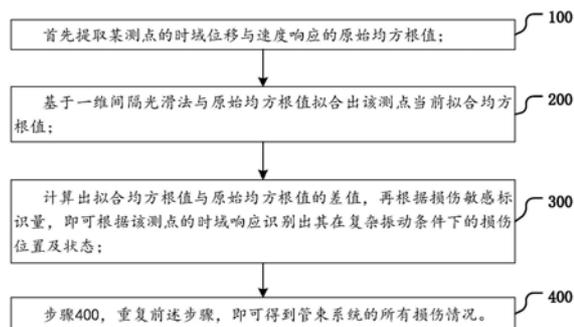
权利要求书2页 说明书5页 附图2页

(54) 发明名称

一种横向流作用下非线性约束管束的损伤识别方法

(57) 摘要

本发明提供一种横向流作用下非线性约束管束的损伤识别方法,包括如下步骤:步骤100,首先提取某测点的时域位移与速度响应的原始均方根值;步骤200,基于一维间隔光滑法与原始均方根值拟合出该测点当前拟合均方根值;步骤300,计算出拟合均方根值与原始均方根值的差值,再根据损伤敏感标识量,即可根据该测点的时域响应识别出其在复杂振动条件下的损伤位置及状态;步骤400,重复前述步骤,即可得到管束系统的所有损伤情况。本发明仅利用结构时域响应信息,通过构造无基线的损伤敏感标识量,在无结构完好信息条件下,仅根据结构的时域响应就可准确的对复杂振动条件的管束损伤位置进行识别,且对于不同横流速度均可适用。



1. 一种横向流作用下非线性约束管束的损伤识别方法,其特征在于,包括如下步骤:  
 步骤100,首先提取某测点的时域位移与速度响应的原始均方根值;  
 步骤200,基于一维间隔光滑法与原始均方根值拟合出该测点当前拟合均方根值;  
 步骤300,计算出拟合均方根值与原始均方根值的差值,再根据损伤敏感标识量,即可根据该测点的时域响应识别出其在复杂振动条件下的损伤位置及状态;  
 步骤400,重复前述步骤,即可得到管束系统的所有损伤情况;  
 所述步骤300中,差值的计算过程如下:

$$\begin{aligned} Z_S(x_i) &= S'_{RMS}(x_i) - S_{RMS}(x_i) \\ Z_V(x_i) &= V'_{RMS}(x_i) - V_{RMS}(x_i) \end{aligned} \quad (5)$$

其中, $S_{RMS}(x_i)$ 与 $V_{RMS}(x_i)$ 分别表示基于原始位移和速度响应的原始均方根值, $S'_{RMS}(x_i)$ 与 $V'_{RMS}(x_i)$ 分别为对应的拟合均方根值;

所述步骤300中,损伤敏感标识量 $DI(x_i)$ 的定义过程如下:

$$DI(x_i) = DiZ_S(x_i) + DiZ_V(x_i) \quad (6)$$

其中, $DiZ_S(x_i)$ 与 $DiZ_V(x_i)$ 是归一化后的无量纲数,分别由下式得出:

$$\begin{aligned} DiZ_S(x_i) &= (Z_S(x_i)^2 - \min(Z_S^2)) / (\max(Z_S^2) - \min(Z_S^2)) \\ DiZ_V(x_i) &= (Z_V(x_i)^2 - \min(Z_V^2)) / (\max(Z_V^2) - \min(Z_V^2)) \end{aligned} \quad (7)$$

其中, $Z_S^2$ 是 $\{Z_S(x_1)^2, Z_S(x_2)^2, \dots, Z_S(x_N)^2\}$ , $Z_V^2$ 是 $\{Z_V(x_1)^2, Z_V(x_2)^2, \dots, Z_V(x_N)^2\}$ , $N$ 是所有的测点。

2. 根据权利要求1所述的损伤识别方法,其特征在于,  
 所述步骤100中,原始均方根值的获取公式如下:

$$\begin{aligned} S_{RMS}(x_i) &= \sqrt{(\sum_{t=t_1}^{t_2} S_t(x_i)) / N} \\ V_{RMS}(x_i) &= \sqrt{(\sum_{t=t_1}^{t_2} V_t(x_i)) / N} \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $S_t(x_i)$ , $V_t(x_i)$ 是时刻 $t$ 时测点 $x_i$ 的位移与速度响应, $t_1$ 与 $t_2$ 是管束运动稳定后的采样起止时间, $N$ 为采样起止时间内的采样点数。

3. 根据权利要求2所述的损伤识别方法,其特征在于,  
 所述步骤200中,拟合出该测点当前实际均方根值的过程如下:  
 先利用间隔光滑法通过所述测点周围四个点拟合出一个新的值 $y(x_i)'$ :

$$y(x_i)' = a_0 + a_1 x_i + a_2 x_i^2 + a_3 x_i^3 \quad (2)$$

其中,四个系数 $a_0, a_1, a_2, a_3$ 通过周围四个点由下式得出:

$$A(x_i) = C(x_i) \times Y(x_i) \quad (3)$$

其中, $Y(x_i)$ 表示 $\{y(x_{i-2}), y(x_{i-1}), y(x_{i+1}), y(x_{i+2})\}_{4 \times 1}$ , $A(x_i)$ 是所述测点 $x_i$ 的系数 $\{a_0, a_1, a_2, a_3\}_{4 \times 1}$ , $C(x_i)$ 其由下式求得;

$$C(x_i) = \begin{bmatrix} 1 & x_{i-2} & x_{i-2}^2 & x_{i-2}^3 \\ 1 & x_{i-1} & x_{i-1}^2 & x_{i-1}^3 \\ 1 & x_{i+1} & x_{i+1}^2 & x_{i+1}^3 \\ 1 & x_{i+2} & x_{i+2}^2 & x_{i+2}^3 \end{bmatrix}^{-1} \quad (4)。$$

## 一种横向流作用下非线性约束管束的损伤识别方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及核电站的蒸汽发生器传热管道监测领域,特别是涉及一种利用间隔光滑法对横向流作用下的非线性约束管束的损伤情况进行识别的方法。

### 背景技术

[0002] 蒸汽发生器是核电站关键设备之一,其功能一方面是利用核反应堆产生的热量将二回路的水加热成饱和蒸汽,推动汽轮机发电;另一方面是将一回路中带放射性的冷却剂与二回路中不带放射性的水隔离,蒸汽发生器的结构安全是核反应堆能否稳定运行的关键。核反应堆正常运行过程中,横向流动会导致蒸汽发生器传热管束发生明显的振动。当横向流速达到某一临界值时,传热管束从横向流中获取的能量等于阻尼消耗的能量,传热管束会出现持续、大振幅的周期运动,这一现象被称为“流弹失稳”。由于防振条、支承板等结构的存在,流弹失稳引起管束与复杂支承结构之间剧烈碰撞振动,进而会导致传热管束微动磨损和疲劳破坏,这是蒸汽发生器传热管束失效的主要原因。

[0003] 目前,虽然一直有研究单/两相流中管束系统流致振动的问题,但关于复杂流场与非线性支撑条件下管束的损伤识别问题,目前还未有深入的研究。

### 发明内容

[0004] 本文发明的目的是提供一种利用间隔光滑法对横向流作用下的非线性约束管束的损伤情况进行识别的方法。

[0005] 具体地,本发明提供一种横向流作用下非线性约束管束的损伤识别方法,包括如下步骤:

[0006] 步骤100,首先提取某测点的时域位移与速度响应的原始均方根值;

[0007] 步骤200,基于一维间隔光滑法与原始均方根值拟合出该测点当前拟合均方根值;

[0008] 步骤300,计算出拟合均方根值与原始均方根值的差值,再根据损伤敏感标识量,即可根据该测点的时域响应识别出其在复杂振动条件下的损伤位置及状态;

[0009] 步骤400,重复前述步骤,即可得到管束系统的所有损伤情况。

[0010] 在本发明的一个实施方式中,所述步骤100中,原始均方根值的获取公式如下:

$$\begin{aligned}
 S_{RMS}(x_i) &= \sqrt{\left(\sum_{t=t_1}^{t_2} S_t(x_i)\right)/N} \\
 V_{RMS}(x_i) &= \sqrt{\left(\sum_{t=t_1}^{t_2} V_t(x_i)\right)/N}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

[0012] 其中, $S_t(x_i)$ ,  $V_t(x_i)$  是时刻 $t$ 时测点 $x_i$ 的位移与速度响应。 $t_1$ 与 $t_2$ 是管束运动稳定后的采样起止时间, $N$ 为采样起止时间内的采样点数。

[0013] 在本发明的一个实施方式中,所述步骤200中,拟合出该测点当前实际均方根值的过程如下:

[0014] 先利用间隔光滑法通过所述测点周围四个点拟合出一个新的值 $y(x_i)'$ ：

$$[0015] \quad y(x_i)' = a_0 + a_1 x_i + a_2 x_i^2 + a_3 x_i^3 \quad (2)$$

[0016] 其中,四个系数 $a_0, a_1, a_2, a_3$ 通过周围四个点由下式得出：

$$[0017] \quad A(x_i) = C(x_i) \times Y(x_i) \quad (3)$$

[0018] 其中, $Y(x_i)$ 表示 $\{y(x_{i-2}), y(x_{i-1}), y(x_{i+1}), y(x_{i+2})\}_{4 \times 1}$ , $A(x_i)$ 是所述测点 $x_i$ 的系数 $\{a_0, a_1, a_2, a_3\}_{4 \times 1}$ , $C(x_i)$ 其由下式求得：

$$[0019] \quad C(x_i) = \begin{bmatrix} 1 & x_{i-2} & x_{i-2}^2 & x_{i-2}^3 \\ 1 & x_{i-1} & x_{i-1}^2 & x_{i-1}^3 \\ 1 & x_{i+1} & x_{i+1}^2 & x_{i+1}^3 \\ 1 & x_{i+2} & x_{i+2}^2 & x_{i+2}^3 \end{bmatrix}^{-1} \quad (4)。$$

[0020] 在本发明的一个实施方式中,所述步骤300中,差值的计算过程如下：

$$[0021] \quad \begin{aligned} Z_S(x_i) &= S'_{RMS}(x_i) - S_{RMS}(x_i) \\ Z_V(x_i) &= V'_{RMS}(x_i) - V_{RMS}(x_i) \end{aligned} \quad (5)$$

[0022] 其中, $S_{RMS}(x_i)$ 与 $V_{RMS}(x_i)$ 分别表示基于原始位移和速度响应的原始均方根值, $S_{RMS}'(x_i)$ 与 $V_{RMS}'(x_i)$ 分别为对应的拟合均方根值。

[0023] 在本发明的一个实施方式中,所述步骤300中,损伤敏感标识量 $DI(x_i)$ 的定义过程如下：

$$[0024] \quad DI(x_i) = DiZ_S(x_i) + DiZ_V(x_i) \quad (6)$$

[0025] 其中, $DiZ_S(x_i)$ 与 $DiZ_V(x_i)$ 是归一化后的无量纲数,分别由下式得出：

$$[0026] \quad \begin{aligned} DiZ_S(x_i) &= (Z_S(x_i)^2 - \min(Z_S^2)) / (\max(Z_S^2) - \min(Z_S^2)) \\ DiZ_V(x_i) &= (Z_V(x_i)^2 - \min(Z_V^2)) / (\max(Z_V^2) - \min(Z_V^2)) \end{aligned} \quad (7)$$

[0027] 其中, $Z_S^2$ 是 $\{Z_S(x_1)^2, Z_S(x_2)^2, \dots, Z_S(x_N)^2\}$ , $Z_V^2$ 是 $\{Z_V(x_1)^2, Z_V(x_2)^2, \dots, Z_V(x_N)^2\}$ , $N$ 是所有的测点。

[0028] 本发明仅利用结构时域响应信息,通过构造无基线的损伤敏感标识量,在无结构完好信息条件下,仅根据结构的时域响应就可准确的对复杂振动条件的管束损伤位置进行识别,且对于不同横流速度均可适用。

## 附图说明

[0029] 图1是本发明一个实施方式的损伤识别方法流程示意图；

[0030] 图2是本发明算例中采用的管束模型示意图；

[0031] 图3不同工况下、不同单元、不同损伤程度时的识别效果示意图,其中：

[0032] (a) 为在10号单元,损伤程度为10%时的识别效果示意图；

[0033] (b) 为在30号单元,损伤程度为10%时的识别效果示意图；

[0034] (c) 为在30号单元,损伤程度为5%时的识别效果示意图；

[0035] (d) 为在50号单元,损伤程度为2%时的识别效果示意图。

### 具体实施方式

[0036] 以下通过具体实施例和附图对本方案的具体结构和实施过程进行详细说明。

[0037] 如图1所示,在本发明的一个实施方式中,公开一种横向流作用下非线性约束管束的损伤识别方法,包括如下步骤:

[0038] 步骤100,首先提取某测点的时域位移与速度响应的原始均方根值;

[0039] 当无结构完好状态作为参考时,只能根据结构时域响应信息作为损伤识别的依据,因此,可根据提取的时域响应来获得均方根值,来作为分析基础。

[0040] 原始均方根值的获取公式如下:

$$[0041] \quad S_{RMS}(x_i) = \sqrt{\left(\sum_{t=t_1}^{t_2} S_t(x_i)\right)/N} \quad (1)$$

$$[0042] \quad V_{RMS}(x_i) = \sqrt{\left(\sum_{t=t_1}^{t_2} V_t(x_i)\right)/N}$$

[0043] 其中, $S_{RMS}(x_i)$ 表示原始的位移均方根值, $V_{RMS}(x_i)$ 表示原始的速度均方根值, $i$ 表示测点, $S_t(x_i)$ , $V_t(x_i)$ 是时刻 $t$ 时测点 $x_i$ 的位移与速度响应。 $t_1$ 与 $t_2$ 是管束运动稳定后的采样起止时间, $N$ 是采样点数。

[0044] 步骤200,基于一维间隔光滑法与原始均方根值拟合出该测点当前拟合均方根值;

[0045] 在复杂非线性支撑条件下,由于无法选择结构完好时的信息作为参考,只能根据结构当前状态信息,来判断其是否损伤。结构完好时的信息与损伤后的信息会产生非常大的差异,具体体现在位移、速度等响应出现不连续、奇异性等特征,根据该特性,本实施方式利用间隔光滑法先构造一个近似光滑的参考基准,以此作为获取的结构响应信息对比基准,从而根据对比后的差异即可确定是否出现损伤。

[0046] 首先利用间隔光滑法通过周围四个点先拟合出一个新的值 $y(x_i)'$  :

$$[0047] \quad y(x_i)' = a_0 + a_1 x_i + a_2 x_i^2 + a_3 x_i^3 \quad (2)$$

[0048] 其中,四个系数 $a_0, a_1, a_2, a_3$ 可以通过周围四个点由下式得出:

$$[0049] \quad A(x_i) = C(x_i) \times Y(x_i) \quad (3)$$

[0050] 其中, $Y(x_i)$ 表示 $\{y(x_{i-2}), y(x_{i-1}), y(x_{i+1}), y(x_{i+2})\}_{4 \times 1}$ , $A(x_i)$ 是测点 $x_i$ 的系数 $\{a_0, a_1, a_2, a_3\}_{4 \times 1}$ , $C(x_i)$ 由下式可以求得:

$$[0051] \quad C(x_i) = \begin{bmatrix} 1 & x_{i-2} & x_{i-2}^2 & x_{i-2}^3 \\ 1 & x_{i-1} & x_{i-1}^2 & x_{i-1}^3 \\ 1 & x_{i+1} & x_{i+1}^2 & x_{i+1}^3 \\ 1 & x_{i+2} & x_{i+2}^2 & x_{i+2}^3 \end{bmatrix}^{-1} \quad (4)。$$

[0052] 步骤300,计算出拟合均方根值与原始均方根值的差值,再根据损伤敏感标识量,即可根据该测点的时域响应识别出其在复杂振动条件下的损伤位置及状态;

[0053] 对比拟合前后结构的均方根响应值,得到的差值反应出在局部损伤区域出现不连续的特征时,即可判定此处为损伤的依据,差值的计算过程如下:

$$\begin{aligned} [0054] \quad Z_S(x_i) &= S'_{RMS}(x_i) - S_{RMS}(x_i) \\ Z_V(x_i) &= V'_{RMS}(x_i) - V_{RMS}(x_i) \end{aligned} \quad (5)$$

[0055] 其中,  $S_{RMS}(x_i)$  与  $V_{RMS}(x_i)$  分别表示原始的位移和速度均方根值,  $S'_{RMS}(x_i)$  与  $V'_{RMS}(x_i)$  分别表示拟合的位移和速度均方根值。

[0056] 损伤敏感标识量  $DI(x_i)$  的定义过程如下:

$$[0057] \quad DI(x_i) = DiZ_S(x_i) + DiZ_V(x_i) \quad (6)$$

[0058] 其中,  $DiZ_S(x_i)$  与  $DiZ_V(x_i)$  是归一化后的无量纲数, 分别由下式得出:

$$\begin{aligned} [0059] \quad DiZ_S(x_i) &= (Z_S(x_i)^2 - \min(Z_S^2)) / (\max(Z_S^2) - \min(Z_S^2)) \\ DiZ_V(x_i) &= (Z_V(x_i)^2 - \min(Z_V^2)) / (\max(Z_V^2) - \min(Z_V^2)) \end{aligned} \quad (7)$$

[0060] 其中,  $Z_S^2$  是  $\{Z_S(x_1)^2, Z_S(x_2)^2, \dots, Z_S(x_N)^2\}$ ,  $Z_V^2$  是  $\{Z_V(x_1)^2, Z_V(x_2)^2, \dots, Z_V(x_N)^2\}$ ,  $N$  是所有的测点。

[0061] 步骤400, 重复前述步骤, 即可得到管束系统的所有损伤情况。

[0062] 本实施方式仅利用结构时域响应信息, 通过构造无基线的损伤敏感标识量, 在无结构完好信息条件下, 仅根据结构的时域响应就可准确的对复杂振动条件的管束损伤位置进行识别, 且对于不同横流速度均可适用。

[0063] 以下以具体算例, 对本方案的效果给出详细说明。

[0064] 本算例中的模型是蒸汽发生器中的管束模型, 如图2所示, 受到横向流体的作用, 左端固支, 右端通过非线性弹簧支撑, 共分为59个单元。为了说明方法的普适性, 随机选择损伤单元为10, 30, 50, 损伤程度包括10%, 5%, 2%。计算工况如表1所示。

[0065] 表1计算工况

[0066]	损伤程度	损伤单元
工况1	10%	10
工况2	10%	30
工况3	5%	30
工况4	2%	50

[0067] 因为横向流的流速会引起结构振动特性显著改变, 为了说明方法的普适性, 共计算了8组流速, 分别为1.322m/s, 1.476m/s, 1.630m/s, 1.784m/s, 1.938m/s, 2.092m/s, 2.245m/s和2.399m/s。

[0068] 在8组流速下对四种损伤工况进行识别, 在图3中列出了不同工况下、不同单元、不同损伤程度时的识别效果示意图, 其中, (a) 为在10号单元, 损伤程度为10%时的识别效果示意图; (b) 为在30号单元, 损伤程度为10%时的识别效果示意图; (c) 为在30号单元, 损伤程度为5%时的识别效果示意图; (d) 为在50号单元, 损伤程度为2%时的识别效果示意图。

[0069] 在没有管束健康作为对比的情况下, 利用本方法中提出的损伤敏感标识量  $DI$ , 可以准确的识别在复杂横流与非线性约束条件下的管道中的不同位置、不同程度的损伤, 最小的2%的损伤依然可以有效识别; 对于靠近非线性约束端的50号单元损伤, 该方法依然非常有效。通过对不同的横流流速对比, 可以确定本方法提出的无基线的识别方法均非常有效, 且具有普适性。

[0070] 至此,本领域技术人员应认识到,虽然本文已详尽示出和描述了本发明的多个示例性实施例,但是,在不脱离本发明精神和范围的情况下,仍可根据本发明公开的内容直接确定或推导出符合本发明原理的许多其他变型或修改。因此,本发明的范围应被理解和认定为覆盖了所有这些其他变型或修改。

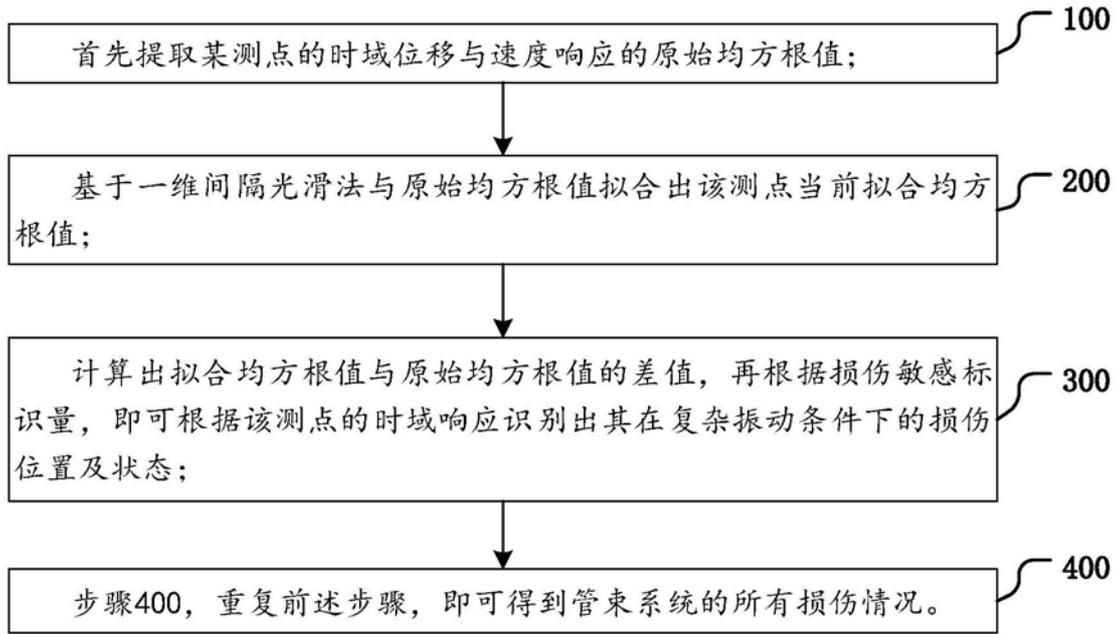


图1

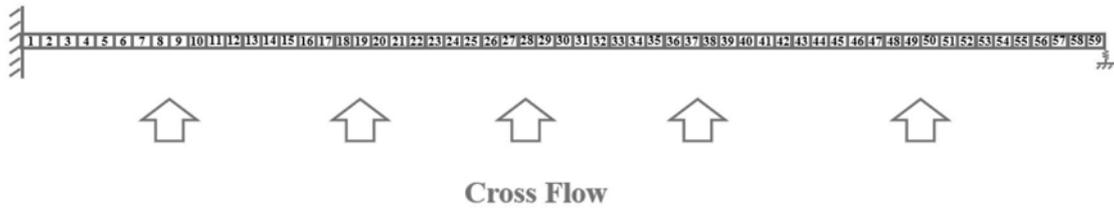


图2

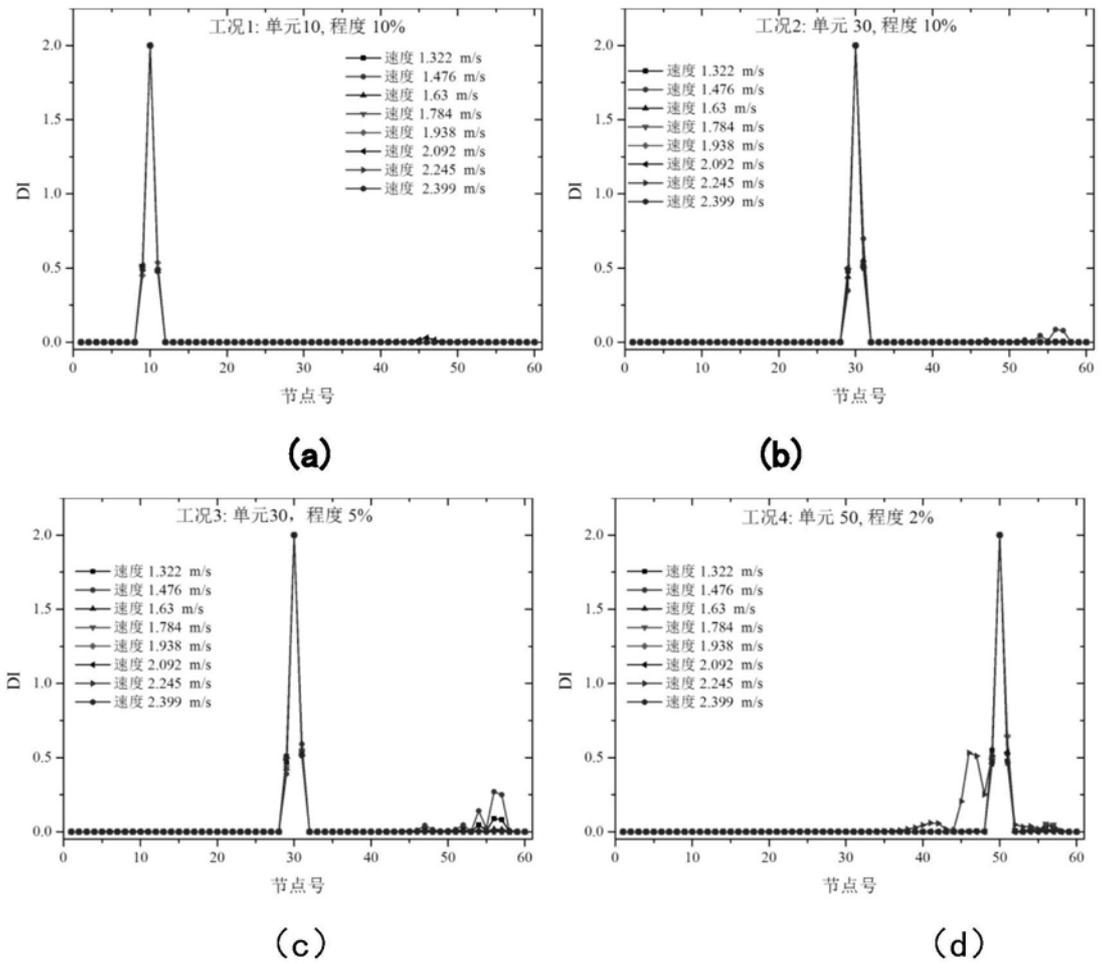


图3