



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 111931319 B

(45) 授权公告日 2021.05.07

(21) 申请号 202010667633.3

US 2016018168 A1,2016.01.21

(22) 申请日 2020.07.13

EP 3467688 A1,2019.04.10

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 111931319 A

王琳 等.横向流引起热交换器管道失稳与振动的非线性动力学模型.《中国力学学会学术大会 2009论文摘要集》.2009,

(43) 申请公布日 2020.11.13

刘瑞兰 等.在横向流作用下螺旋管扇形结构固有特性研究.《西安交通大学学报》.2000,第34卷(第5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

Pettigrew, MJ 等.Vibration analysis of shell-and-tube heat exchangers: an overview - Part 2: vibration response, fretting-wear, guidelines.《JOURNAL OF FLUIDS AND STRUCTURES》.2003,第18卷(第5期),

(72) 发明人 路玲玲 赖姜 毕建权 宋宏伟  
黄晨光

J. Yoon 等.Flow-induced vibration and instability of carbon nanotubes.《2005 International Conference on MEMS,NANO and Smart Systems》.2005, (续)

(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.  
G06F 30/18 (2020.01) (续)

审查员 吴单单

(56) 对比文件  
CN 106055766 B,2019.05.10  
CN 109827734 A,2019.05.31  
CN 105205258 A,2015.12.30  
CN 108170924 A,2018.06.15

权利要求书2页 说明书5页 附图3页

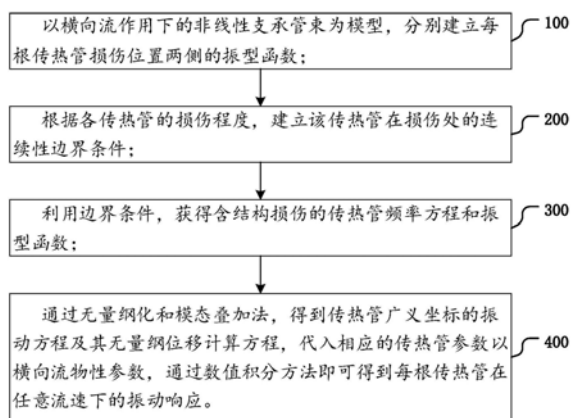
(54) 发明名称

非线性支承管束在横向流中的振动特性分析方法

现对损伤程度的调整,进而得到每根传热管在任意流速下其损伤位置受到的振动响应状态。

(57) 摘要

本发明提供一种非线性支承管束在横向流中的振动特性分析方法,包括:以横向流作用下的非线性支承管束为模型,分别建立每根传热管损伤位置两侧的振型函数;根据各传热管的损伤程度,建立该传热管在损伤处的连续性边界条件;利用边界条件,获得含结构损伤的传热管频率方程和振型函数;通过无量纲化和模态叠加法,得到传热管广义坐标的振动方程,通过数值积分方法即可得到每根传热管在任意流速下的振动响应。本发明在不改变传热管振动方程的情况下,通过改变损伤点两端的距离值实现对损伤位置的调整,通过改变损伤处传热管的刚度值实



CN 111931319 B

[接上页]

(51) Int.Cl.

*G06F 30/28* (2020.01)

*G06F 113/08* (2020.01)

*G06F 113/14* (2020.01)

*G06F 119/08* (2020.01)

*G06F 119/14* (2020.01)

(56) 对比文件

Jiang Lai 等.Theoretical analysis on vibration characteristic of a flexible tube under the interaction of seismic load and hydrodynamic force.《Nuclear Engineering and Technology》.2002,第52卷(第2期),

1. 非线性支承管束在横向流中的振动特性分析方法,其特征在于,包括如下步骤:

步骤100,以横向流作用下的非线性支承管束为模型,分别建立每根传热管损伤位置两侧的振型函数;

步骤200,根据各传热管的损伤程度,建立该传热管在损伤处的连续性边界条件;

步骤300,利用边界条件,获得含结构损伤的传热管频率方程和振型函数;

步骤400,通过无量纲化和模态叠加法,得到传热管广义坐标的振动方程及其无量纲位移计算方程,代入相应的传热管参数以及横向流物性参数,通过数值积分方法即可得到每根传热管在任意流速下的振动响应;

所述步骤400中的振动响应状态是以振动方程为基础,结合振型函数公式和无量纲位移计算方程得到的;

所述步骤400中,代入相应的传热管参数是指:不改变传热管振动方程的情况,通过改变 $L_1$ 和 $L_2$ 的值即可实现对损伤位置的调整,通过改变 $K_T$ 的值即可实现对损伤程度的调整;

其中, $L_1$ 和 $L_2$ 分别表示传热管损伤处两边与固定点的距离值, $K_T$ 是传热管在损伤处的刚度。

2. 根据权利要求1所述的分析方法,其特征在于,

所述步骤100中振型函数的建立公式如下;

$$\begin{aligned}\varphi_1(x) &= C_{11} \cosh \lambda x + C_{12} \sinh \lambda x + C_{13} \cos \lambda x + C_{14} \sin \lambda x \quad -L_1 \leq x < 0^- \\ \varphi_2(x) &= C_{21} \cosh \lambda x + C_{22} \sinh \lambda x + C_{23} \cos \lambda x + C_{24} \sin \lambda x \quad 0^+ \leq x < L_2\end{aligned}\quad (1)$$

其中, $\varphi_1(x)$ 表示传热管的左侧, $\varphi_2(x)$ 表示传热管的右侧, $C_{11}, C_{12}, C_{13}, C_{14}, C_{21}, C_{22}, C_{23}, C_{24}$ 为振型系数。

3. 根据权利要求2所述的分析方法,其特征在于,

所述步骤200中边界条件的建立过程如下:

$$\begin{aligned}\varphi_1(-L_1) &= 0, \varphi_1'(-L_1) = 0, \varphi_2''(L_2) = 0, \varphi_2'''(L_2) = 0 \\ \varphi_1(0^-) &= \varphi_2(0^+), \varphi_1''(0^-) = \varphi_2''(0^+), \varphi_1'''(0^-) = \varphi_2'''(0^+) \\ -EI\varphi_1''(0^-) &= K_T[\varphi_1'(0^-) - \varphi_2'(0^+)]\end{aligned}\quad (2)$$

其中, $E$ 是传热管的弹性模量, $I$ 是传热管束的截面惯性矩, $K_T$ 是传热管在损伤处的刚度, $L_1$ 和 $L_2$ 分别表示传热管损伤处两边与固定点的距离值。

4. 根据权利要求3所述的分析方法,其特征在于,

所述步骤300中获得的频率方程如下式所示:

$$\begin{aligned}2 \frac{K_T}{EI\lambda} + 2 \frac{K_T}{EI\lambda} \cos \lambda (L_1 + L_2) \times \cosh \lambda (L_1 + L_2) + \cosh \lambda L_1 \times \sin \lambda L_1 \\ - \cosh \lambda L_2 \times \sin \lambda L_2 - \sin \lambda (L_1 + L_2) \times \cosh \lambda L_1 \times \cosh \lambda L_2 - \cos \lambda L_1 \times \sinh \lambda L_1 \\ + \cos \lambda L_2 \times \sinh \lambda L_2 + \sin \lambda (L_1 + L_2) \times \cos \lambda L_1 \times \cos \lambda L_2 = 0.\end{aligned}\quad (3)$$

5. 根据权利要求4所述的分析方法,其特征在于,

所述步骤300中获得的振型函数如下式所示:

$$\begin{aligned}\varphi_1(x) &= \cosh \lambda x + \frac{C_{12}}{C_{11}} \sinh \lambda x + \frac{C_{13}}{C_{11}} \cos \lambda x + \frac{C_{14}}{C_{11}} \sin \lambda x \\ \varphi_2(x) &= \cosh \lambda x + \frac{C_{22}}{C_{11}} \sinh \lambda x + \frac{C_{13}}{C_{11}} \cos \lambda x + \frac{C_{24}}{C_{11}} \sin \lambda x\end{aligned}\quad (4)。$$

6. 根据权利要求5所述的分析方法,其特征在于,  
所述步骤400中得到的振动方程如下:

$$\frac{\ddot{q}_i}{1-\alpha} + \left( \zeta - \frac{U^{*2} C_F \sin \Phi_F}{8\pi^2 m^* \omega^*} \right) \dot{q}_i + \left( \frac{\lambda_i^4}{\lambda_1^4} - \frac{U^{*2} C_F \cos \Phi_F}{8\pi^2 m^*} + \frac{\alpha \omega^{*2}}{1-\alpha} \right) q_i + f^*(\eta_a) \varphi_i(\xi_a) = 0 \quad (5)。$$

7. 根据权利要求6所述的分析方法,其特征在于,  
所述步骤400中的无量纲位移计算方程为:

$$\eta(\xi, \tau) = \begin{cases} \sum_{i=1}^{N_1} \varphi_{1i}(\xi) q_i(\tau) & -L_1 \leq x < 0^- \\ \sum_{i=1}^{N_2} \varphi_{2i}(\xi) q_i(\tau) & 0^+ \leq x < L_2 \end{cases} \quad (6)。$$

## 非线性支承管束在横向流中的振动特性分析方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及核电站的蒸汽发生器领域,特别是涉及一种含结构损伤的非线性支承管束在横向流中的振动特性分析方法。

### 背景技术

[0002] 蒸汽发生器是压水堆核电站一回路系统中关键设备之一,其结构安全是保障核反应堆稳定运行的关键。在核电站运行过程中,二次侧的冷却剂流动会诱发蒸汽发生器传热管束发生明显的振动。为防止蒸汽发生器的传热管发生大幅横向振动,通常设计有防振条、支承板等支承结构。然而,当横向流流速过大时,传热管束会出现持续、大振幅的周期运动,并与支承结构发生剧烈碰撞振动,进而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,但当管束结构出现损伤之后,是否会加速传热管束的微动磨损和疲劳破坏,或是因不同损伤位置和损伤程度对横向流作用下非线性支承管束振动特性影响的程度有多大,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含结构损伤的非线性支承管束在横向流中的振动特性分析方法。

[0005] 具体地,本发明提供一种非线性支承管束在横向流中的振动特性分析方法,包括如下步骤:

[0006] 步骤100,以横向流作用下的非线性支承管束为模型,分别建立每根传热管损伤位置两侧的振型函数;

[0007] 步骤200,根据各传热管的损伤程度,建立该传热管在损伤处的连续性边界条件;

[0008] 步骤300,利用边界条件,获得含结构损伤的传热管频率方程和振型函数;

[0009] 步骤400,通过无量纲化和模态叠加法,得到传热管广义坐标的振动方程及其无量纲位移计算方程,代入相应的传热管参数以横向流物性参数,通过数值积分方法即可得到每根传热管在任意流速下的振动响应。

[0010] 在本发明的一个实施方式中,所述步骤100中振型函数的建立公式如下;

$$\varphi_1(x) = C_{11} \cosh \lambda x + C_{12} \sinh \lambda x + C_{13} \cos \lambda x + C_{14} \sin \lambda x \quad -L_1 \leq x < 0^-$$

[0011]

$$\varphi_2(x) = C_{21} \cosh \lambda x + C_{22} \sinh \lambda x + C_{23} \cos \lambda x + C_{24} \sin \lambda x \quad 0^+ \leq x < L_2 \quad (1)$$

[0012] 其中,  $\varphi_1(x)$  表示加热管的左侧,  $\varphi_2(x)$  表示加热管的右侧,  $C_{11}, C_{12}, C_{13}, C_{14}, C_{21}, C_{22}, C_{23}, C_{24}$  为振型系数。

[0013] 在本发明的一个实施方式中,所述步骤200中边界条件的建立过程如下:

$$\varphi_1(-L_1) = 0, \varphi_1'(-L_1) = 0, \varphi_2''(L_2) = 0, \varphi_2'''(L_2) = 0$$

$$[0014] \quad \varphi_1(0^-) = \varphi_2(0^+), \varphi_1''(0^-) = \varphi_2''(0^+), \varphi_1'''(0^-) = \varphi_2'''(0^+) \quad (2)$$

$$-EI\varphi_1''(0^-) = K_T[\varphi_1'(0^-) - \varphi_2'(0^+)]$$

[0015] 其中,E是传热管的弹性模量,I是传热管束的截面惯性矩, $K_T$ 是传热管在损伤处的刚度, $L_1$ 和 $L_2$ 分别表示加热管损伤处两边与固定点的距离值。

[0016] 在本发明的一个实施方式中,所述步骤300中获得的频率方程如下式所示:

$$[0017] \quad 2\frac{K_T}{EI\lambda} + 2\frac{K_T}{EI\lambda} \cos \lambda(L_1 + L_2) \times \cosh \lambda(L_1 + L_2) + \cos \lambda L_1 \times \sin \lambda L_1 \\ - \cosh \lambda L_2 \times \sin \lambda L_2 - \sin \lambda(L_1 + L_2) \times \cosh \lambda L_1 \times \cosh \lambda L_2 - \cos \lambda L_1 \times \sinh \lambda L_1 \quad (3)$$

[0018]

$$+ \cos \lambda L_2 \times \sinh \lambda L_2 + \sinh \lambda(L_1 + L_2) \times \cos \lambda L_1 \times \cos \lambda L_2 = 0。$$

[0019] 在本发明的一个实施方式中,所述步骤300中获得的振型函数如下式所示:

$$[0020] \quad \varphi_1(x) = \cosh \lambda x + \frac{C_{12}}{C_{11}} \sinh \lambda x + \frac{C_{13}}{C_{11}} \cos \lambda x + \frac{C_{14}}{C_{11}} \sin \lambda x \\ \varphi_2(x) = \cosh \lambda x + \frac{C_{22}}{C_{11}} \sinh \lambda x + \frac{C_{13}}{C_{11}} \cos \lambda x + \frac{C_{24}}{C_{11}} \sin \lambda x \quad (4)。$$

[0021] 在本发明的一个实施方式中,所述步骤400中得到的振动方程如下:

$$[0022] \quad \frac{\ddot{q}_i}{1-\alpha} + \left( \zeta - \frac{U^{*2} C_F \sin \Phi_F}{8\pi^2 m^* \omega^*} \right) \dot{q}_i + \left( \frac{\lambda_i^4}{\lambda_1^4} - \frac{U^{*2} C_F \cos \Phi_F}{8\pi^2 m^*} + \frac{\alpha \omega^{*2}}{1-\alpha} \right) q_i + f^*(\eta_\alpha) \varphi_i(\xi_\alpha) = 0 \quad (5)$$

[0023] 在本发明的一个实施方式中,所述步骤400中的无量纲位移计算方程为:

$$[0024] \quad \eta(\xi, \tau) = \begin{cases} \sum_{i=1}^{N_1} \varphi_{1i}(\xi) q_i(\tau) & -L_1 \leq x < 0^- \\ \sum_{i=1}^{N_2} \varphi_{2i}(\xi) q_i(\tau) & 0^+ \leq x < L_2 \end{cases} \quad (6)$$

[0025] 在本发明的一个实施方式中,所述步骤400中的振动响应状态是以振动方程(5)为基础,结合振型函数公式(4)和无量纲位移计算方程(6)得到的。

[0026] 在本发明的一个实施方式中,所述步骤400中,代入相应的传热管参数是指:不改变传热管振动方程(5)的情况,通过改变 $L_1$ 和 $L_2$ 的值即可实现对损伤位置的调整,通过改变 $K_T$ 的值即可实现对损伤程度的调整。

[0027] 本发明在不改变传热管振动方程的情况下,通过改变损伤点两端的距离值即可实现对损伤位置的调整,通过改变损伤处传热管的刚度值即可实现对损伤程度的调整,进而得到每根传热管在任意流速下其损伤位置受到的振动响应状态,为设计支承管束的安装结构提供了可靠的理论。

## 附图说明

[0028] 图1是本发明一个实施方式的分析方法流程示意图;

[0029] 图2是本发明一个实施方式的管束模型示意图;

[0030] 图3是本发明算例中采用的管束模型示意图;

[0031] 图4是损伤在10号单元损伤程度为10%时,传热管的振动响应示意图;

[0032] 图5是损伤在30号单元损伤程度为10%时,传热管的振动响应示意图;

[0033] 图6是损伤在30号单元损伤程度为5%时,传热管的振动响应示意图:

[0034] 图7是损伤在50号单元损伤程度为2%时,传热管的振动响应示意图。

### 具体实施方式

[0035] 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。

[0036] 如图1所示,在本发明的一个实施方式一种非线性支承管束在横向流中的振动特性分析方法,包括如下步骤:

[0037] 步骤100,以横向流作用下的非线性支承管束为模型,分别建立每根传热管损伤位置两侧的振型函数;

[0038] 其中的支承管束结构如图2所示,图2中箭头方向指示的为横向流方向,D为单根加热管的直径,P为两根加热管之间的中心距离,L为加热管的长度, $L_1$ 和 $L_2$ 分别为损伤点两端的距离。

[0039] 将传热管简化为欧拉-伯努利梁,则振型函数的建立公式如下:

$$\varphi_1(x) = C_{11} \cosh \lambda x + C_{12} \sinh \lambda x + C_{13} \cos \lambda x + C_{14} \sin \lambda x \quad -L_1 \leq x < 0^-$$

[0040]

$$\varphi_2(x) = C_{21} \cosh \lambda x + C_{22} \sinh \lambda x + C_{23} \cos \lambda x + C_{24} \sin \lambda x \quad 0^+ \leq x < L_2 \quad (1)$$

[0041] 其中, $\varphi_1(x)$ 表示加热管的左侧, $\varphi_2(x)$ 表示加热管的右侧,C表示。

[0042] 步骤200,根据各传热管的损伤程度,建立该传热管在损伤处的连续性边界条件;

[0043] 边界条件的建立过程如下:

$$\varphi_1(-L_1) = 0, \varphi_1'(-L_1) = 0, \varphi_2''(L_2) = 0, \varphi_2'''(L_2) = 0$$

$$\varphi_1(0^-) = \varphi_2(0^+), \varphi_1''(0^-) = \varphi_2''(0^+), \varphi_1'''(0^-) = \varphi_2'''(0^+) \quad (2)$$

$$-EI\varphi_1''(0^-) = K_T[\varphi_1'(0^-) - \varphi_2'(0^+)]$$

[0045] 其中,E是传热管的弹性模量,I是传热管束的截面惯性矩, $K_T$ 是传热管在损伤处的刚度, $L_1$ 和 $L_2$ 分别表示加热管损伤处两边与固定点的距离值。

[0046] 步骤300,利用边界条件,获得含结构损伤的传热管频率方程和振型函数;其中,频率方程如下式所示:

$$2 \frac{K_T}{EI\lambda} + 2 \frac{K_T}{EI\lambda} \cos \lambda (L_1 + L_2) \times \cos \lambda (L_1 + L_2) + \cos \lambda L_1 \times \sin \lambda L_1$$

$$- \cos \lambda L_2 \times \sin \lambda L_2 - \sin \lambda (L_1 + L_2) \times \cos \lambda L_1 \times \cos \lambda L_2 - \cos \lambda L_1 \times \sin \lambda L_1 \quad (3)$$

$$+ \cos \lambda L_2 \times \sin \lambda L_2 + \sin \lambda (L_1 + L_2) \times \cos \lambda L_1 \times \cos \lambda L_2 = 0。$$

[0048] 通过式(3)可获得传热管在空气中的固有频率。

[0049] 振型函数如下式所示:

$$\varphi_1(x) = \cosh \lambda x + \frac{C_{12}}{C_{11}} \sinh \lambda x + \frac{C_{13}}{C_{11}} \cos \lambda x + \frac{C_{14}}{C_{11}} \sin \lambda x$$

[0050]

$$\varphi_2(x) = \cosh \lambda x + \frac{C_{22}}{C_{11}} \sinh \lambda x + \frac{C_{23}}{C_{11}} \cos \lambda x + \frac{C_{24}}{C_{11}} \sin \lambda x \quad (4)。$$

[0051] 通过式(4)可获得传热管的各阶振型。

[0052] 步骤400,通过无量纲化和模态叠加法,得到传热管广义坐标的振动方程及其无量纲位移计算方程,代入相应的传热管参数以横向流物性参数,通过数值积分方法即可得到每根传热管在任意流速下的振动响应。

[0053] 横向流作用下传热管的流致振动方程可表示为:

$$[0054] \quad EI \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} + c_t \frac{\partial w}{\partial t} + m_t \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \delta(y - y_a) F_{\text{stiffness}}(w) + F_{\text{unsteady}}(w, \dot{w}, \ddot{w})$$

[0055] 等号右边第一项模拟传热管与支撑结构的碰撞载荷,第二项为横向流的流体激励。

[0056] 通过无量纲化,并基于模态叠加法可将上式变为:

$$[0057] \quad \frac{\ddot{q}_i}{1-\alpha} + \left( \zeta - \frac{U^{*2} C_F \sin \Phi_F}{8\pi^2 m^* \omega^*} \right) \dot{q}_i + \left( \frac{\lambda_i^4}{\lambda_1^4} - \frac{U^{*2} C_F \cos \Phi_F}{8\pi^2 m^*} + \frac{\alpha \omega^{*2}}{1-\alpha} \right) q_i + f^*(\eta_a) \varphi_i(\xi_a) = 0 \quad (5)$$

[0058] 则,无量纲位移计算方程为:

$$[0059] \quad \eta(\xi, \tau) = \begin{cases} \sum_{i=1}^{N_1} \varphi_{1i}(\xi) q_i(\tau) & -L_1 \leq x < 0^- \\ \sum_{i=1}^{N_2} \varphi_{2i}(\xi) q_i(\tau) & 0^+ \leq x < L_2 \end{cases} \quad (6)$$

[0060] 这里的振动响应状态是以振动方程(5)为基础,结合振型函数公式(4)和无量纲位移计算方程(6)得到的。

[0061] 代入相应的传热管参数是指:不改变传热管振动方程(5)的情况,通过改变 $L_1$ 和 $L_2$ 的值即可实现对损伤位置的调整,通过改变 $K_p$ 的值即可实现对损伤程度的调整。

[0062] 现有的横向流作用下传热管流致振动响应分析中,均未能考虑由于磨蚀、材料原始缺陷等因素导致传热管在局部位置存在损伤,进而影响传热管的振动位移、速度等动力响应。本实施方式在不改变传热管振动方程的情况下,通过改变损伤点两端的距离值即可实现对损伤位置的调整,通过改变损伤处传热管的刚度值即可实现对损伤程度的调整,进而得到每根传热管在任意流速下其损伤位置受到的振动响应状态,为设计支承管束的安装结构提供了可靠的理论。

[0063] 以下以实际算例对本申请采用的方法进行详细说明。

[0064] 本算例中的模型是蒸汽发生器中的管束模型,如图3所示,受到横向流体的作用,传热管左端固支,右端通过非线性弹簧模拟传热管与支撑结构的碰撞载荷。传热管共划分为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%,横向流流速为1.476m/s,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	横向流流速
工况1	10%	10	1.476m/s
工况2	10%	30	1.476m/s
工况3	5%	30	1.476m/s
工况4	2%	50	1.476m/s

[0067] 针对四种损伤工况的传热管60号节点的位移振动响应、极限环与无损伤传热管60号节点的位移振动响应、极限环对比分别如图4~7所示,其中图4是损伤在10号单元损伤程



度为10%时,传热管的振动响应示意图,(a)为位移时程;(b)为极限环;图5是损伤在30号单元损伤程度为10%时,传热管的振动响应示意图,(a)为位移时程;(b)为极限环;图6是损伤在30号单元损伤程度为5%时,传热管的振动响应示意图,(a)为位移时程;(b)为极限环;图7是损伤在50号单元损伤程度为2%时,传热管的振动响应示意图,(a)为位移时程;(b)为极限环。

[0068] 通过对比四种损伤工况下传热管60号节点的位移振动响应时程、极限环与无损伤时传热管相同节点的位移振动响应时程、极限环可以发现:当损伤位置靠近固支位置,损伤程度为10%时,位移幅值变化较小,但高频振动响应变强,极限环发生明显变化,如图4所示;当损伤位置在传热管跨中,损伤程度分别为10%和5%时,有损伤的传热管在60号节点处的位移振幅明显小于无损伤时传热管在60号节点处的位移幅值,损伤程度越大,位移幅值越小,但是传热管在跨中的损伤并不改变极限环的特征,如图5和图6所示;当损伤位置靠近非线性支承端,损伤程度为2%时,传热管的位移振动响应时程比较相似,同样损伤的存在导致传热管的位移幅值略小于无损伤时传热管的位移幅值,但极限环特征相似,如图7所示。

[0069] 在不同损伤位置 and 不同损伤程度情况下,利用本申请中提出的动力学模型和分析方法,可以准确的获得在复杂横流与非线性约束条件下的管束的振动特性,验证了方法的有效性、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。

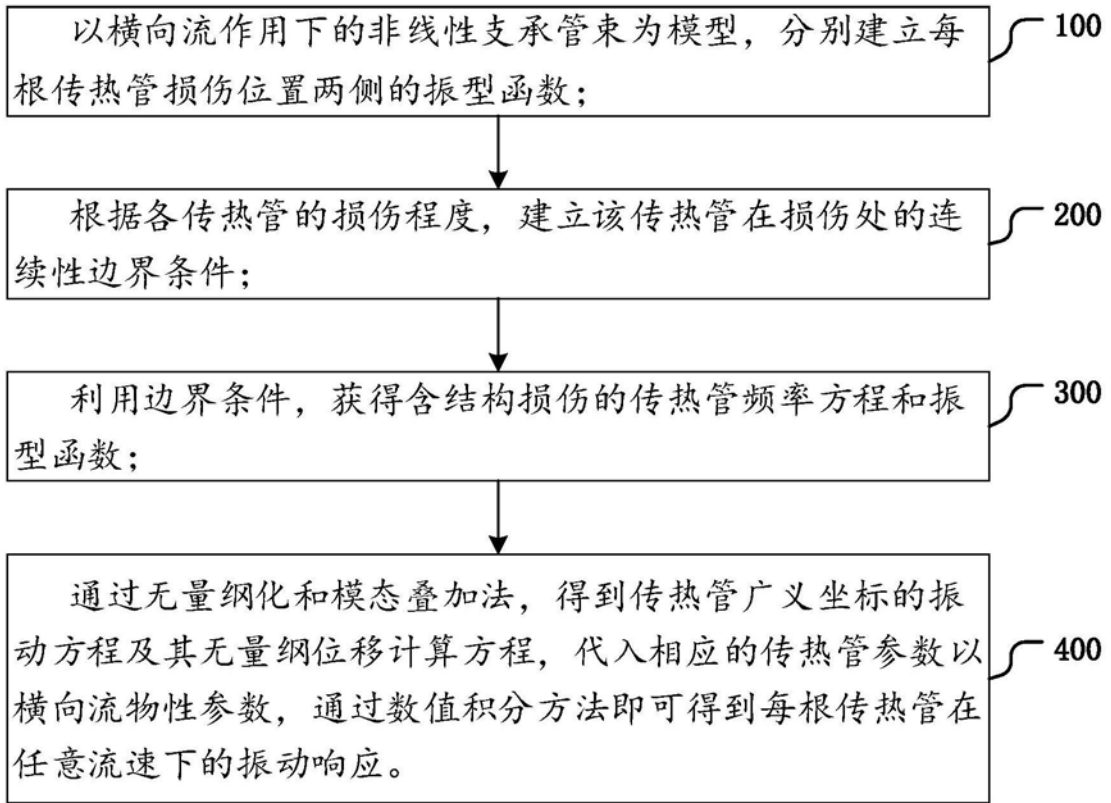


图1

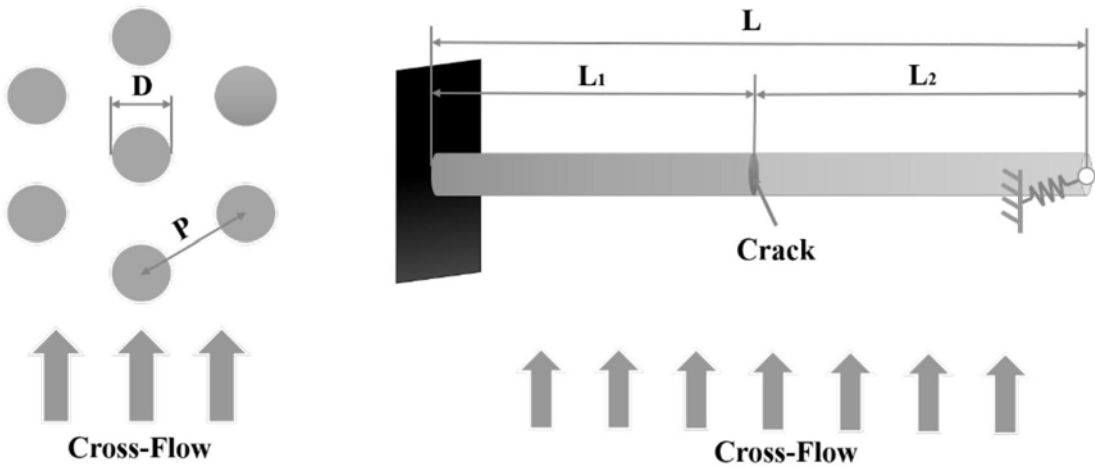


图2

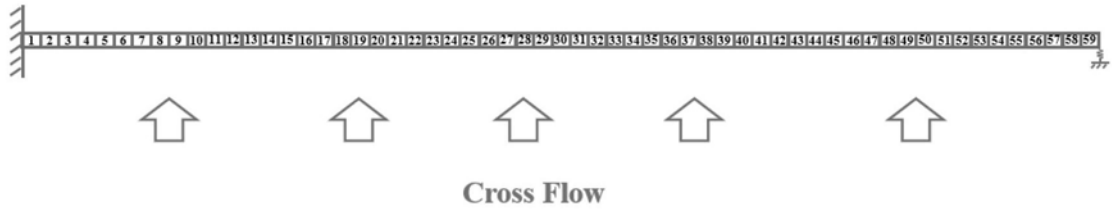


图3

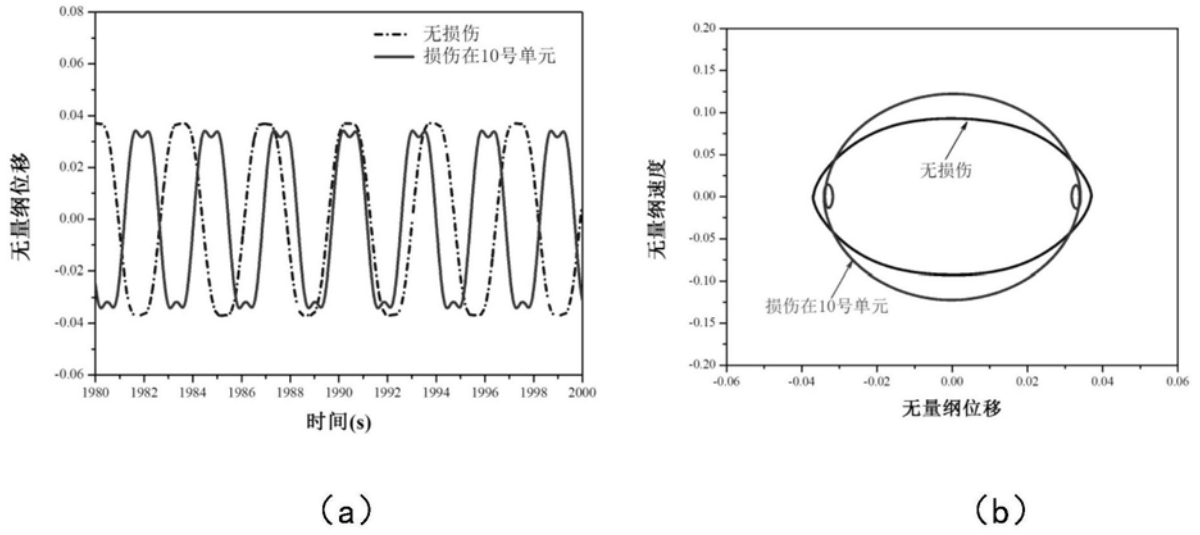


图4

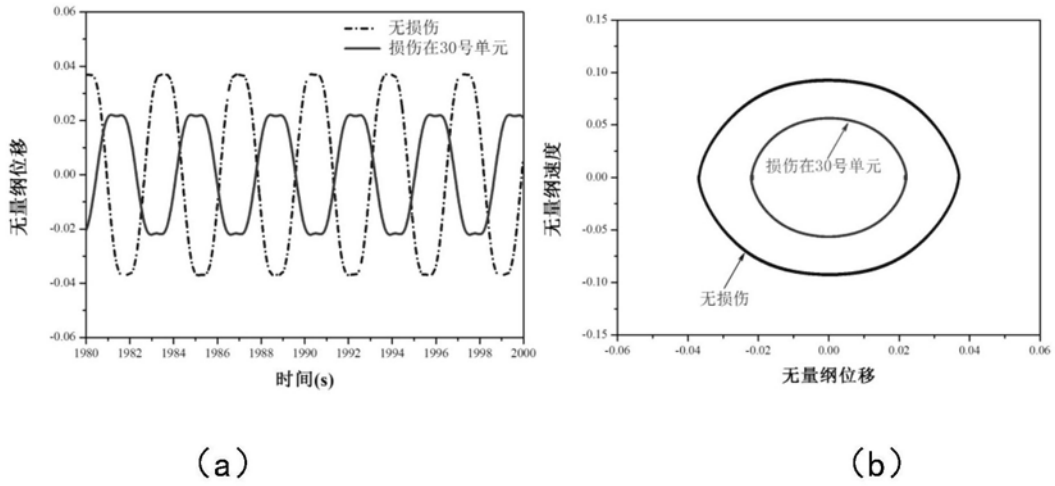
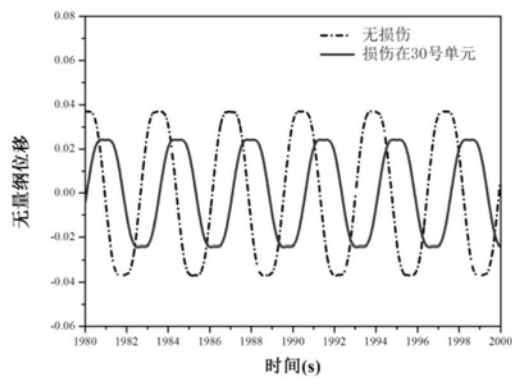
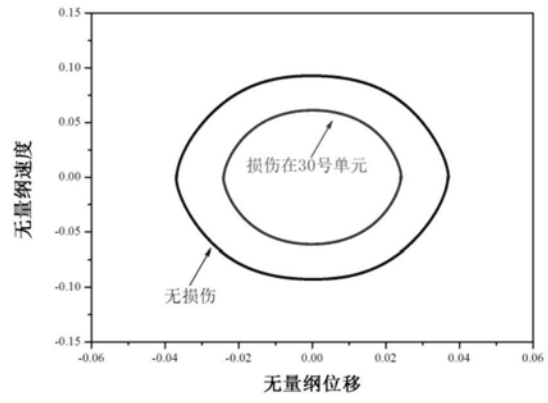


图5

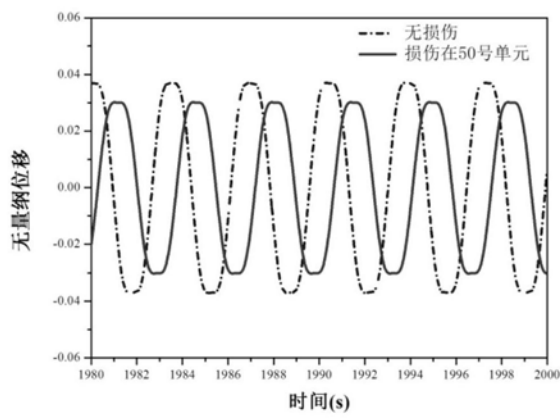


(a)

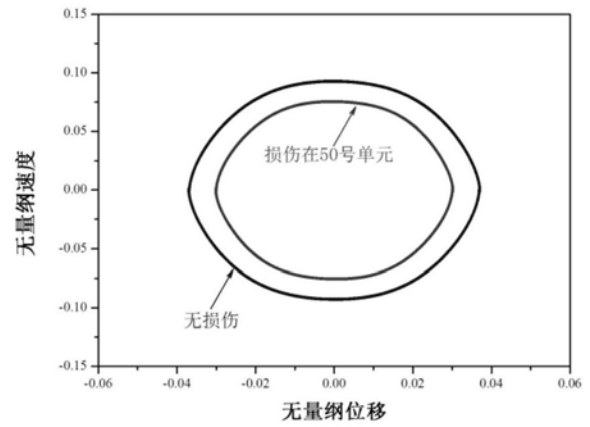


(b)

图6



(a)



(b)

图7