

质量无序配置加筋圆柱壳的振动局域化

纪刚, 赵鹏, 周其斗

(海军工程大学舰船与海洋学院, 湖北 武汉 430033)

摘要: 无序非周期结构振动在通频带会产生局域化效应。基于该思想,对质量无序配置加筋圆柱壳开展了振动局域化研究。为定量预报无序配置加筋圆柱壳的局域化因子,将加筋圆柱壳振动等效为耦合振子链的振动,利用耦合振子链的无序局域化因子公式预报质量无序配置加筋圆柱壳的局域化因子。以加筋圆柱壳有限元分析的振动结果为输入,使用结合波数分析的参数辨识技术给出了等效振子固有频率参数和耦合参数。等效无序度参数使用了参考模型辨识的技术。针对两个质量无序配置加筋圆柱壳开展的振动局域化分析结果表明,质量配置无序度参数是影响局域化因子的重要参数,它与质量配置参数相关;当无序质量配置的平均值超过结构重量的 15% 时,可以观察到较为显著的振动局域化效果。

关键词: 加筋圆柱壳; 振动控制; 无序结构; 局域化

中图分类号: O327; U661.44 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2022)02-0379-08

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2022.02.013

引言

为保证结构强度,工程结构常采取加筋圆柱壳形式,如:潜艇耐压壳结构、飞机舱室结构等。传统的加筋圆柱壳具有周期性结构特征:相邻的两个加强筋之间的部分沿圆柱壳轴向周期复制。结构振动控制领域通常关注周期加筋圆柱壳的振动特性^[1-5]。“模态聚集”现象是有限长周期加筋圆柱壳振动的典型特性^[4]:圆柱壳的自然频率聚集在某些频带,这些频带称为“通频带”,圆柱壳受激振动时,整体振动的峰值频率聚集于通频带,通频带模态密度大;通频带之间为“止频带”,模态密度小,整体振动能量小。“模态聚集”现象是周期结构振动的典型特征^[5-8],解释为^[9]:由于加强筋处存在阻抗的不一致,两个加强筋之间的部分可能形成局部模态。在通频带,局部模态将沿圆柱壳轴向自由无衰减传播,形成模态传导波;在止频带,模态传导波只能沿壳体轴向呈指数衰减传播。在有限长圆柱壳中,模态传导波会在边界反射,特定频率下,传导波和反射波叠加形成整体模态和自然频率。由于模态传导波仅能在通频带自由无衰减传播,因此加筋圆柱壳的自然频率将聚集在通频带。从振动控制角度看,应当尽可能使激振频率处于止频带,此时振动能量因不能远距离传播而被局限于振源附近,即振动被“局域化”。然而,如何

控制加筋圆柱壳在通频带的振动传递特性对工程振动控制设计具有重要意义。如,潜艇尾部振源振动会在通频带远距离传递,从而影响安装于首部的声响使用,需要通过结构设计加以控制。

采取不等间距加强筋布置是实现加筋圆柱壳通频带振动传递控制的有效措施之一:以随机方式确定各复制加筋单元的间距,形成加强筋间距具有无序特征的非周期结构。针对多跨梁、加筋板和加筋圆柱壳模型的理论分析、数值仿真和实验研究研究表明,间距无序配置将使结构不存在严格意义的通频带^[10-14]:在周期原型结构的通频带内,振动传递也将随传播距离的增加而呈指数衰减,表现为振动局域化特征。

虽然不等间距加强筋布置导致的是单元尺寸的无序化,但本质是改变复制单元的参数属性,形成单元属性具有无序非周期特征的结构。局域化现象首次由 Anderson 在研究电子传播规律时发现^[15],在晶体中掺入杂质后,电子传播能力下降。此后, Hodges 等^[16-19]、Pierre^[20-22]利用耦合摆、耦合振子链、带振子的弦链等模型证实了结构动力学领域中局域化效应的可发生性,并且使用局域化因子定量表述振动局域化程度,它定量给出了传播量沿传播方向的指数衰减率。振动局域化是无序非周期结构的典型特征,它与波在无序结构中的随机散射相关:传导波在传播过程中会产生无序散射,即使在通频带,能量也会因反射作用而被限制在激振源附近。从振动波形的

收稿日期: 2020-07-30; 修订日期: 2020-12-05

基金项目: 国防预研基金资助项目(995-0204010404)。

空间分布上看,结构无序性所带来的振动局域化效果类似于结构中因存在阻尼而形成的振动局域化效果,但无序局域化并非由能量耗散引起,因而结构采取无序化设计是一种通过结构设计控制振动传播的措施。

基于这一思想,本文将开展质量无序配置的加筋圆柱壳振动局域化研究:将以常规潜艇耐压壳为原型的周期加筋圆柱壳作为研究对象,在肋骨上以随机无序方式配置质量,给出无序模型的局域化因子,研究所产生的振动局域化现象和规律。为规避针对加筋圆柱壳定量预报局域化因子需进行复杂解析分析的困难,受文献[14]启发,将加筋圆柱壳等效为耦合振子链振动,以有限元分析结果为输入,采取波数分析技术和参数辨识技术获取等效振子参数,再利用耦合振子链的无序局域化因子理论公式预报加筋圆柱壳的无序局域化因子。在预报质量无序度参数时,本文创造性使用了借助参考模型辨识的技术。由于所采用的有限元分析方法、波数分析技术和参数辨识技术均为成熟技术,因而对类似问题的工程化使用具有重要的指导意义。

1 加筋圆柱壳模型

以如图1所示的加筋圆柱壳模型为基础模型,然后在基础模型的肋骨上配置质量形成最终研究对象。圆柱壳主尺度、板厚、环向加强筋及后续预报中使用的材料参数如表1所示。

在圆柱壳肋骨上沿周向均匀配置质量,记第*i*根肋骨配置的质量总量为 m_i 。

当采取无序方式配置时, m_i 为随机变量,具有均匀概率分布特性,概率密度为:

$$P(m_i) = \begin{cases} \frac{1}{\Delta}, & |m_i| \leq \Delta \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

可见, m_i 的均值为 $\Delta/2$,方差为 $\Delta^2/12$ 。 Δ 为“无序质量配置模型”的质量配置参数。

每根肋骨均配置质量 $\Delta/2$ 的“质量均配模型”是以 Δ 为参数的“无序质量配置模型”的平均模型,“无

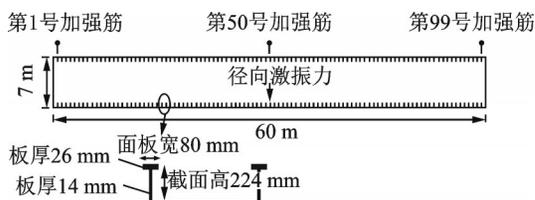


图1 加筋圆柱壳模型

Fig. 1 Framed cylindrical shell model

序质量配置模型”也是在质量配置参数为 $\Delta/2$ 的“质量均配模型”基础上,对每根肋骨的配置质量进行随机扰动所得到的模型,扰动质量是在 $[-\Delta/2, \Delta/2]$

表1 加筋圆柱壳尺寸及材料参数

Tab. 1 Dimension and material parameters of the framed cylindrical model

参数及材料名称	量值
圆柱壳总长/m	60
圆柱壳直径/m	7
圆柱壳板厚/m	0.03
环向加强筋数量/个	99
平均加筋间距/m	0.6
环向加强筋截面形式	T截面梁
环向加强筋截面总高/m	0.224
环向加强筋面板宽/m	0.08
环向加强筋面板厚/m	0.026
环向加强筋腹板厚/m	0.014
壳体及加强筋材料	钢材
钢材密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	7.8×10^3
钢材弹性模量/Pa	2.05×10^{11}
钢材泊松比	0.3

范围均匀分布的随机变量。

后续分析中,还将对模型开展有限元频率响应分析,分析中使用简谐激振力,如图1所示,激振力沿径向作用于圆柱壳中部(第50号加强筋处),圆柱壳自由悬浮,这种激振方式可视作系列周向模式激振力的叠加,从而可激发更多的壳体周向模式振动,便于开展不同周向模式振动传递特性的分析。通过变换不同的激振频率参数,可以获得不同激振频率的响应结果。在后续分析中,将以1 Hz为步长,计算模型从2至1200 Hz的频率响应。

2 无序质量配置模型的局域化因子获取技术

为获取无序质量配置模型的局域化因子,采取了等效方法:以有限元分析获取的加筋圆柱壳振动结果为输入,将加筋圆柱壳振动等效为耦合振子链振动,然后利用耦合振子链无序局域化公式预报无序质量配置加筋圆柱壳的局域化因子。

2.1 质量无序耦合振子链的局域化因子

耦合振子链如图2所示,当耦合弹簧刚度 $k_c=0$ 时,系统退化为系列独立解耦的弹簧振子系统,各振子对地弹簧刚度均为 k_s ,第*i*个振子的质量为 $m_i = m + \epsilon_i m$, ϵ_i 是小参数,为在平均质量 m 基础上的振子质量变化率。当耦合弹簧刚度 $k_c \neq 0$ 时,整个耦合系统的动力关系可表达为递归形式:

$$\begin{pmatrix} x_i \\ x_{i+1} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & \frac{-m_i \omega^2 + k_s}{k_c} + 2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x_{i-1} \\ x_i \end{pmatrix},$$

$$\text{或} \quad X_{i+1} = T_i X_i \quad (2)$$

式中 x_i 代表第 i 个振子质量的位移复数幅值, ω 为圆频率, i 为振子序号索引, $i \in (-\infty, +\infty)$, $X_i = (x_{i-1}, x_i)^T$ (上标“T”代表求转置) 表征了第 i 个单元状态, 它由第 $i-1$ 个振子和第 i 个振子的位移复数幅值共同表征, 第 i 个单元的状态通过状态传递矩阵 T_i 变换为第 $i+1$ 个单元的状态。

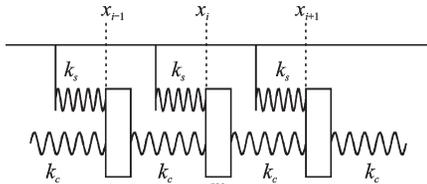


图 2 耦合振子链模型

Fig. 2 Coupled oscillator chain model

文献[23-26]对该问题进行了深入研究, 主要结论为:

当各振子质量相同时, 即 $\epsilon_i = 0, m_i = m$, 系统是周期系统, 此时, 当圆频率 ω 处于通频带内时, 系统对输入的能量能以不衰减波的形式沿系统传播, 其中波数 k 和圆频率 ω 满足色散关系:

$$1 + \frac{\omega_0^2 - \omega^2}{2V} = \cos k \quad (3)$$

式中 ω_0 为解耦振子的固有圆频率, V 为耦合系数, 它们表达为:

$$\begin{cases} \omega_0^2 = \frac{k_s}{m} \\ V = \frac{k_c}{m} \end{cases} \quad (4)$$

其中, 通频带频率由

$$\left| 1 + \frac{\omega_0^2 - \omega^2}{2V} \right| \leq 1 \quad (5)$$

给出。图 3 给出了耦合振子链的色散曲线。

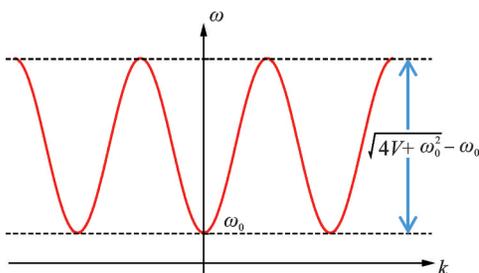


图 3 耦合振子链色散关系

Fig. 3 Dispersion curve of coupled oscillator chain

若振子质量受到不规则扰动, 即 $\epsilon_i \neq 0, m_i$ 为均值为零、方差为 $\sigma^2(\epsilon_i) = \sigma_{\epsilon_i}^2$ 、具有均匀概率分布的随机变量, 则系统是无序非周期系统, 此时系统对输入的能量将以指数衰减形式传播。记第 1 个振子的能

量为 B_1 , 传播至第 N 个振子时的能量为 B_N , 则:

$$\gamma_N = -\frac{1}{2N} \ln \left| \frac{B_N}{B_1} \right| \quad (6)$$

式中 γ_N 为局域化因子, 它反映了非周期无序系统相邻单元对入射波的平均指数衰减率。针对 $N \rightarrow \infty$ 情形, 文献[23-26]给出了局域化因子的近似表达式:

$$\gamma = \lim_{N \rightarrow \infty} \gamma_N \approx \frac{(2V + \omega_0^2)^2 \sigma_{\epsilon_i}^2}{8V^2} \quad (7)$$

式中 $\omega_0 = \sqrt{k_s/m}$ 为周期振子链解耦弹簧振子的固有频率; $\sigma_{\epsilon_i}^2$ 为方差, 即 $\sigma^2(\epsilon_i) = \sigma_{\epsilon_i}^2$, 代表了振子质量无序度。式(7)说明无序局域化因子同耦合系数 V 、振子固有频率参数 ω_0^2 及质量无序度参数 $\sigma_{\epsilon_i}^2$ 相关。

2.2 加筋圆柱壳等效耦合参数与固有频率参数的辨识

参数辨识以加筋圆柱壳有限元分析结果为输入, 然后使用了结合波数分析的参数辨识技术^[27]。

首先针对给定的质量均配模型进行频率响应分析, 可获得加筋圆柱壳的径向振动速度场, 记作 $v(\phi, x, f)$, 它是圆柱壳轴向位置 x 、周向位置 ϕ 和频率 f 的函数。

然后对径向速度场进行波数分析^[2-3]: 对每一频率, 将圆柱壳的径向振动场分解为系列行进波叠加, 用公式表示为:

$$v(\phi, x, f) = \sum_{n=0}^{\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{2\pi} [V^{\cos}(n, k_x, f) \cos n\phi + V^{\sin}(n, k_x, f) \sin n\phi] e^{jk_x x} dk_x \quad (8)$$

式中 V^{\cos} 和 V^{\sin} 给出了各行进波分量的复数幅值, 上标“cos”, “sin”表示相应分量是“对称模式”和“反对称模式”, f 为频率, k_x 为轴向波数, n 为周向模式阶数。 V^{\cos} 和 V^{\sin} 具体计算为:

$$\begin{aligned} A(\phi, k_x, f) &= \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} v(\phi, x, f) e^{-jk_x x} dx, \\ V^{\cos}(n, k_x, f) &= \frac{1}{\delta\pi} \int_{-\pi}^{\pi} A(\phi, k_x, f) \cos n\phi d\phi, \\ V^{\sin}(n, k_x, f) &= \frac{1}{\delta\pi} \int_{-\pi}^{\pi} A(\phi, k_x, f) \sin n\phi d\phi, \\ \delta &= \begin{cases} 2, & n = 0 \\ 1, & n = 1, 2, \dots \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

式中 L 为圆柱壳轴向长度。记 $W(n, k_x, f)$ 为:

$$W(n, k_x, f) = |V^{\cos}|^2 + |V^{\sin}|^2 \quad (10)$$

则 $W(n, k_x, f)$ 为在频率 f 下, 具有截面周向模式 n 和轴向波数 k_x 的行进波分量所具有的振动能量。若将 $W(n, k_x, f)$ 对 k_x 积分:

$$E_n(f) = \int_{-\infty}^{\infty} W(n, k_x, f) dk_x \quad (11)$$

则 $E_n(f)$ 给出了给定频率 f 下圆柱壳截面以周向模式 n 振动的总能量。此外,还可给出“给定周向振动模式 n 下的截面振动能量沿轴向的分布”,表达式为:

$$E_x^n(x, f) = \frac{1}{2\pi} \left[\left| \int_{-\infty}^{+\infty} V^{\cos}(n, k_x, f) e^{jk_x x} dk_x \right|^2 + \left| \int_{-\infty}^{+\infty} V^{\sin}(n, k_x, f) e^{jk_x x} dk_x \right|^2 \right] \quad (12)$$

利用 $W(n, k_x, f)$ 可针对各离散的 n 绘制“行进波分量振动能量-轴向波数-频率”色谱图(即 W_n-k_x-f 色谱图),利用该色谱图可给出等间距加筋圆柱壳的色散曲线。图 4 是典型的 W_n-k_x-f 色谱图,图中具有因振动能量较大而呈现的“亮色曲线”,它们来源于共振,同壳体模态和自然频率相关,是圆柱壳截面以 $n=5$ 模式振动时、振动能量沿轴向传播的色散曲线。通常对给定周向模式,色散曲线不止一条,说明圆柱壳具有多个通频带,对应于相邻加强筋之间壳体的不同轴向振动模式。对每一条色散曲线具有和图 3 相似的特征,说明相邻加强筋之间壳体的每一轴向振动模式都可视作单自由度耦合振子链。因此,针对每条色散曲线可逐一辨识给出加筋圆柱壳的等效振子参数:对某一具体通频带,若色散曲线下限频率为 ω_- ,带宽为 D ,则根据式(3)和(5)的关系可得等效参数为^[27]:

$$\omega_0^2 = \omega_-^2, V = \frac{D(D + 2\omega_-)}{4} \quad (13)$$

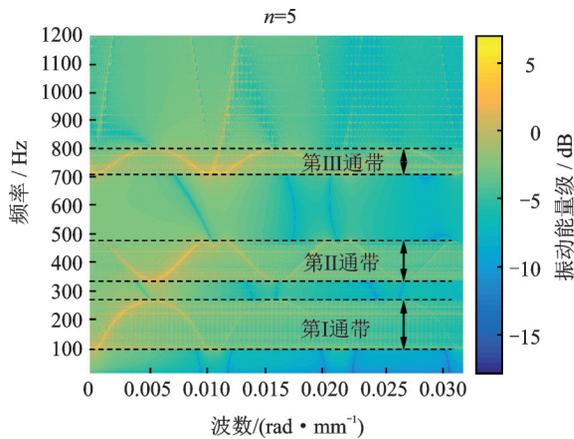


图 4 用于获取色散线的 W_n-k_x-f 色谱图

Fig. 4 W_n-k_x-f contour map used for acquiring dispense curve

为保证参数辨识的操作精度,还可给出“圆柱壳截面以周向模式 n 振动的总能量随频率的变化”曲线(即 E_n-f 曲线),如图 5 所示,从该曲线可辅助判断 ω_- 和 D 的识别正确性。

2.3 质量无序度参数的辨识

耦合振子链局域化公式中的质量无序度参数 $\sigma_{\epsilon_i}^2$

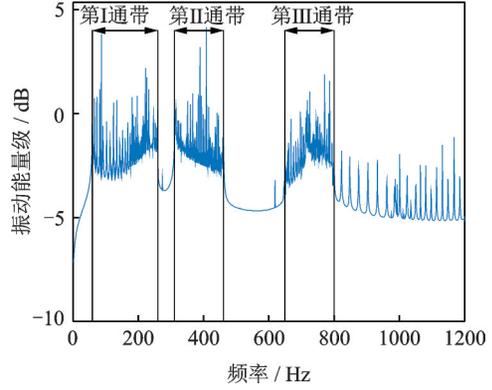


图 5 E_n-f 曲线用于提高参数辨识精度

Fig. 5 E_n-f curve used to improve the parameter identification

是各振子质量变化率的方差,而有序质量配置模型的质量配置参数是质量大小,因此需导出由质量配置参数计算等效质量变化率方差的方法。

若振子质量变化率为 ϵ ,则固有频率参数将由 ω_0^2 变化为 ω_{ϵ}^2 ,利用式(4)得到两者的关系为:

$$\frac{\omega_{\epsilon}^2}{\omega_0^2} = \frac{1}{1 + \epsilon} \approx 1 - \epsilon \quad (14)$$

式中“ \approx ”表示使用了泰勒展开的一阶近似。可见,利用两个具有不同质量的振子链的固有频率参数可近似给出其中之一相对于另一个振子链的质量变化率。

对加筋圆柱壳,采取具有质量配置参数分别为 m_A 和 m_B 的质量均配模型 A 和 B,如果已采取 2.2 节的方法辨识出了它们对应的固有频率参数 ω_A^2 和 ω_B^2 ,利用式(14)可给出 B 模型相对 A 模型的“等效质量变化率”为:

$$\epsilon_{BA} \approx 1 - \frac{\omega_B^2}{\omega_A^2} \quad (15)$$

如果假定 B 模型相对于 A 模型的等效质量变化率与 B 模型相对于 A 模型的配置质量变化之比近似为与 B 模型质量配置大小无关的常数,即:

$$\zeta = \frac{\epsilon_{BA}}{m_B - m_A} = \text{const} \quad (16)$$

那么,可以在辨识 ϵ_{BA} 的基础上,给出具有一般质量配置参数模型的等效质量变化率为:

$$\epsilon = (m_{\epsilon} - m_A) \zeta \quad (17)$$

式中 m_{ϵ} 为一般配置质量值, ϵ 为具有 m_{ϵ} 质量配置参数的质量均配模型相对于 A 模型的等效质量变化率。

虽然上述参数辨识和分析是针对加筋圆柱壳整体开展的,但结果反映的是解耦单元的特性。因此,如果在各肋骨采取式(1)的方式随机配置质量,那么 A 模型的质量配置参数为 $m_A = \Delta/2$,各单元的等效质量变化率为随机变量,这样利用式(17)的关系可以导出单元等效质量变化率方差为:

$$\sigma_{\epsilon_i}^2 = \frac{\Delta^2}{12} \zeta^2 \quad (18)$$

可见,辨识质量无序度参数的关键是:使用一个已知质量配置参数的质量均配模型 B 作参考,利用固有频率参数同 A 模型(即无序质量模型的平均模型)之间的差别获取等效质量变化率与配置质量变化之比 ζ ,然后借助“ ζ 与 B 模型质量配置量无关”的假定给出质量无序度参数。

2.4 无序质量配置模型的局域化因子

在获取各等效参数后,直接利用式(7)可给出由式(1)定义的无序质量配置模型的局域化因子为:

$$\gamma \approx \frac{(2V + \omega_0^2)\Delta^2\zeta^2}{96V^2} \quad (19)$$

3 质量无序配置加筋圆柱壳的局域化因子预报结果与规律分析

为验证前述针对质量无序配置加筋圆柱壳的局域化因子预报方法的正确性,研究质量无序配置对振动局域化的影响规律,针对三个质量均配模型和两个无序质量配置模型实例开展了相关验证、局域化因子预报和结果分析工作,质量具体配置值考虑了工程可实施性。

三个质量均配模型分别为:质量配置参数 $\Delta/2=0.90$ t 的模型,简称为“090 质量均配模型”;质量配置参数为 $\Delta/2=0.81$ t 的模型,简称为“081 质量均配模型”;质量配置参数为 $\Delta/2=2.16$ t 的模型,简称为“216 质量均配模型”。

两个无序质量配置模型的质量配置参数分别为 $\Delta=1.62$ t 和 $\Delta=4.32$ t,简称为“162 无序质量配置模型”和“432 无序质量配置模型”。081 质量均配模型是 162 无序质量配置模型的平均模型;216 质量均配模型是 432 无序质量配置模型的平均模型。采取式(1)概率规律的随机数生成程序可给出各肋骨质量配置的具体量,形成无序质量配置模型的具体实例。

3.1 辨识 ζ 值及其性质假定验证

首先针对三个质量均配模型的频率响应结果进行参数辨识工作。操作中,需要对三个模型的通频带进行识别和分组,使三个模型具有对应变化规律的通频带处于同一组中。正确的分组对 ζ 值的辨识、所作假定之验证、进而顺利开展后续局域化因子预报具有重要的意义。主要的分组识别手段包括:通频带下限、单元分段的振型识别等。通过分组,还将剔除一些不适于分析的通频带,如通频带不被完全包含在频率响应分析范围内的频带,色谱不佳导

致通频带识别困难的频带等。

然后,针对各组通频带逐一辨识 ζ 值。图 6 给出了分别以 081 质量均配模型及 216 质量均配模型作为 A 模型、以其他两个模型为 B 模型辨识 ζ 值的结果。图中的横坐标为模态阶数,纵坐标为辨识的 ζ 值。由图可见,在 A 模型给定时,即便 B 模型的质量参数不同,所给出的 ζ 值几乎相等。这就验证了“等效质量变化率与配置质量变化之比近似为常数”的假定。

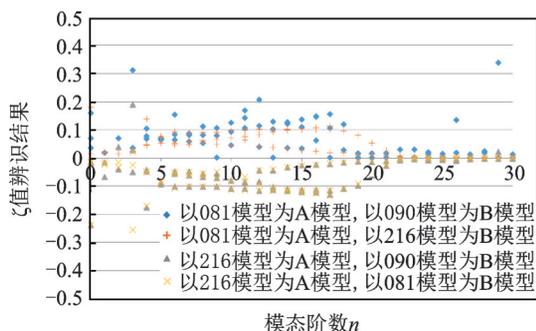


图 6 采用两个不同的质量均配模型辨识 ζ 值并验证假定
Fig. 6 Two mass uniform configuration models were used to identify the value ζ and verify the assumptions

为了规避由参数辨识带来的 ζ 值辨识误差,针对每个对比组,取两个不同 B 模型辨识的 ζ 值的平均作为辨识最终值,用于后续局域化因子预报的输入。

3.2 针对“等效质量变化率与配置质量变化之比”所作假定的验证

图 7 是针对 162 无序质量配置模型预报局域化因子的结果,以散点图的形式表示了各通频带对应的局域化因子值,图例还标注了对应的周向模式阶数。图 8 是针对 432 无序质量配置模型预报局域化因子的结果。从两者的对比看,162 无序质量配置模型的局域化因子集中于 10^{-3} 附近,比 432 无序质量配置模型的值小一个量级,该结果可以从式(19)解释:局域化因子与 Δ^2 成比例。

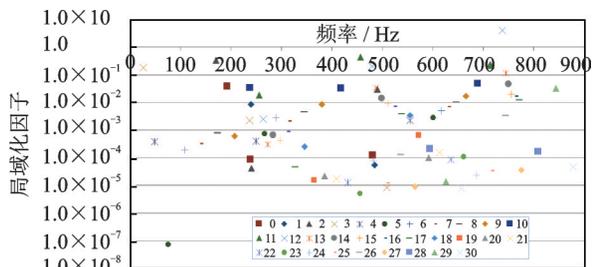


图 7 针对 162 无序质量配置模型预报局域化因子
Fig. 7 Prediction of localization factor for 162 mass disordered configuration model

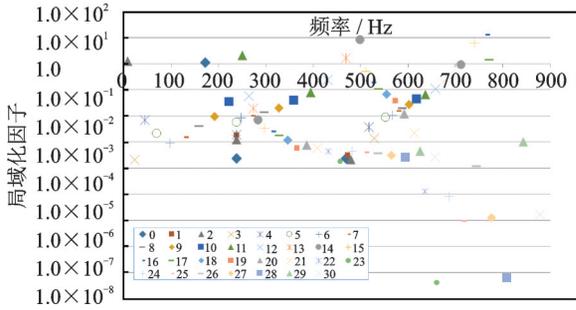


图8 针对432无序质量配置模型预报局域化因子

Fig. 8 Prediction of localization factor for 432 mass disordered configuration model

3.3 局域化因子预报结果验证及规律分析

图9和10是局域化因子的预报结果和实例结果的对比。实例结果是针对无序质量配置模型的实例采用有限元计算后,利用圆柱壳端部截面同中部截面的振动能量之比折算给出的局域化因子。预报结果和实例结果的差别解释为^[23]:实例是针对质量无序配置特例给出的结果,预报结果则是基于统计分析给出的统计平均值。不过,从图9和10可以看到,它们在规律和量级上的一致性。

通过对比图9和10的量级上看,432无序质量配置模型比162质量无序配置模型的局域化效果更为显著,说明质量配置无序度越大,振动局域化控制效果越好。

通过图9和10还可以看到,局域化因子随模态阶数的增加具有增大的趋势,说明质量无序配置对高阶模周向模式振动的传递具有更好的控制效果。

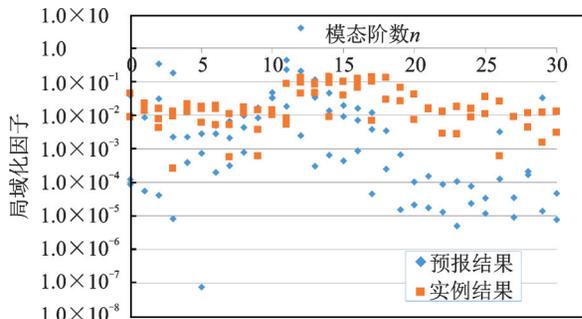


图9 局域化因子预报与实例结果的对比(162无序质量配置模型)

Fig. 9 Comparison of predicted and instance localization factors (162 mass disordered configuration model)

图11和12给出了质量均配模型同无序质量配置模型的 E_n^x-f-x 色谱图对比,其中 $n=22$ 。 E_n^x-f-x 的关系由式(12)计算给出。色谱图横坐标为轴向位置编号,柱壳最左端编号为0;纵坐标为频率;色谱颜色代表振动能量。从色谱图可以看,两个质量

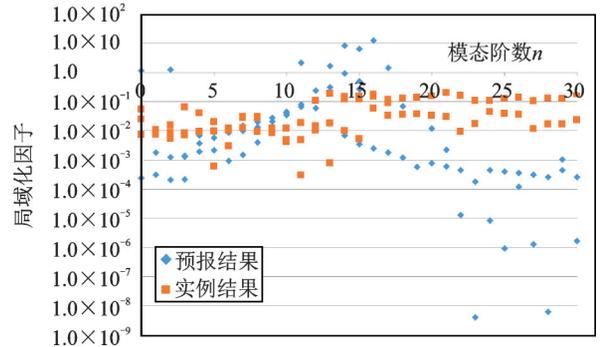
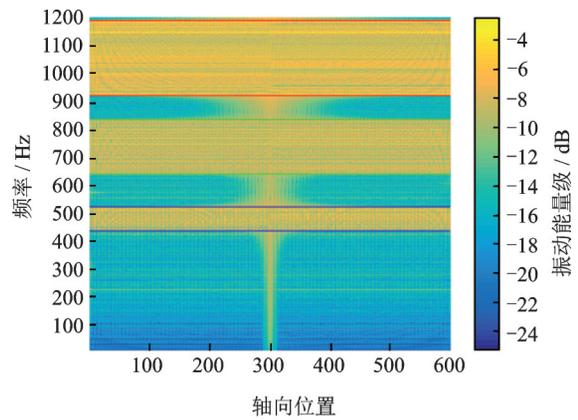


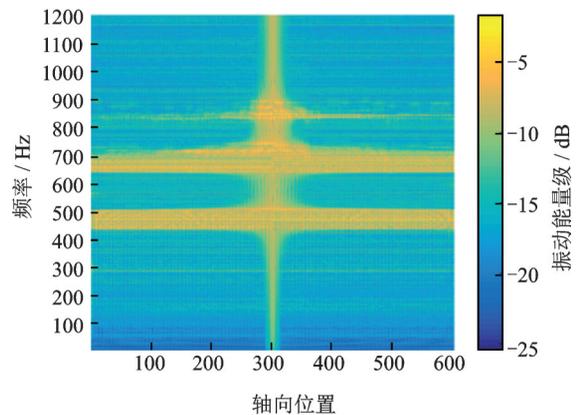
图10 局域化因子预报值与实例值的对比(432无序质量配置模型)

Fig. 10 Comparison of predicted and instance localization factors (432 mass disordered configuration model)



(a) 由081质量均配模型给出的 E_n^x-f-x 色谱图

(a) E_n^x-f-x contour map acquired by 081 mass uniform configuration model



(b) 由162质量均配模型给出的 E_n^x-f-x 色谱图

(b) E_n^x-f-x contour map acquired by 162 mass uniform configuration model

图11 081质量均配模型同162无序质量配置模型的 E_n^x-f-x 色谱图对比($n=22$)

Fig. 11 Comparison of E_n^x-f-x contour maps acquired by 081 mass uniform configuration model and 162 mass disordered configuration model ($n=22$)

无序配置模型都能看到较为明显的局域化效果。对其他周向模式的色谱图分析也能看到类似的结果。

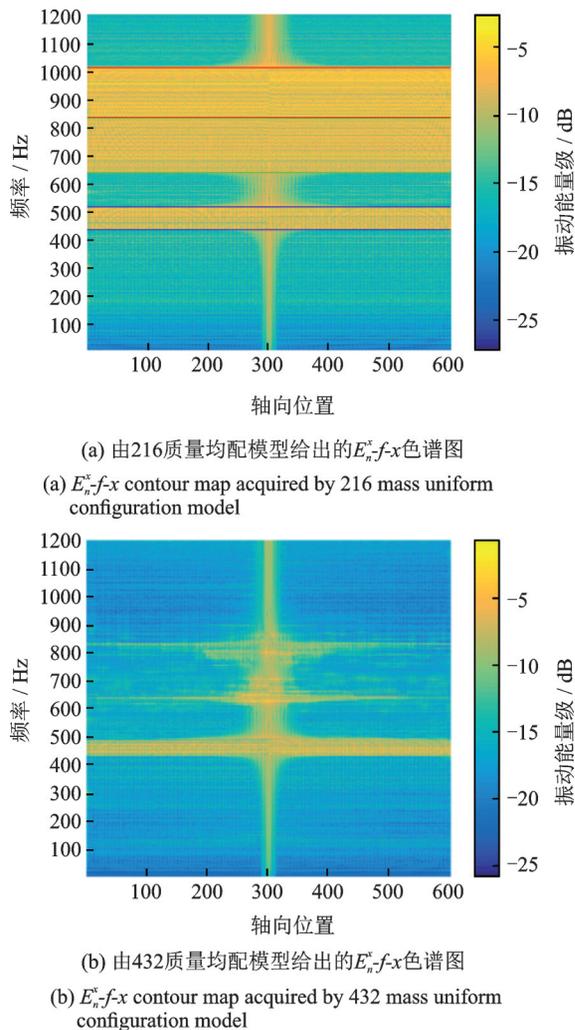


图12 216质量均配模型同432无序质量配置模型的 E_n^x-f-x 色谱图对比($n=22$)

Fig. 12 Comparison of E_n^x-f-x contour maps acquired by 216 mass uniform configuration model and 432 mass disordered configuration model ($n=22$)

4 结论

本文开展了质量无序配置加筋圆柱壳振动局域化研究。质量无序配置指是每根肋骨上的质量配置总量是随机无序的,但质量在肋骨上是沿周向均匀配置的。通过理论分析和数值计算,可给出如下具体结论:

(1) 在局域化因子的预报上,将加筋圆柱壳振动等效为耦合振子链振动,然后辨识出加筋圆柱壳的等效振子参数,最后使用质量无序耦合振子链局域化因子公式预报加筋圆柱壳的局域化因子。在获取加筋圆柱壳等效振子参数方面,以加筋圆柱壳有限元分析结果为输入,使用波数分析技术辨识获取等效固有频率参数和耦合参数;借助参考模型辨识的技术获取质量配置无序度参数,从而成功实现了对质量无序配置加筋圆柱壳振动局域化定量分析。虽然本文是针对“质量在肋骨上沿周向均匀配

置”的特殊配置方式开展研究,但相关方法可推广至“质量在肋骨上沿周向以规定方式配置”情形。

(2) 理论预报和数值验证证实,质量配置无序度参数 $\sigma_{e_i}^2$ 是影响局域化因子的重要参数,质量无序度越大,局域化效应越显著。质量配置无序度参数反映了等效振子质量变化率,它同质量配置参数 Δ 成比例,因为只有质量配置参数更大,才能导致更大的等效振子质量变化率。因此可以预期,对基础质量更大的模型,只有采取质量配置参数更大的无序配置方案才能取得所需的振动局域化效果。

(3) 针对162质量无序配置模型和432质量无序配置模型实例的数值计算结果表明,各阶周向模式沿轴向的传播都可以取得较为明显的振动局域化效果。其中,162质量无序配置模型的平均质量配置量为每根肋骨配置0.82 t质量,该质量约占一个加筋壳段质量的15%;432质量无序配置模型的平均质量配置量为每根肋骨配置2.16 t质量,该质量约占一个加筋壳段质量的46%。

参考文献:

- [1] 陈美霞,张聪,邓乃旗,等.波传播法求解低频激励下水中加端板圆柱壳的振动[J].振动工程学报,2014,27(4):842-851.
Chen Mei-xia, Zhang Cong, Deng Nai-qi, et al. Analysis of the low frequency vibration of a submerged cylindrical shell with end plates based on wave propagation approach[J]. Journal of Vibration Engineering, 2014, 27(6): 842-851.
- [2] 谭路,纪刚,周其斗,等.结构等间距布置对圆柱壳结构振动性能的影响[J].振动工程学报,2017,30(4):603-609.
Tan Lu, Ji Gang, Zhou Qidou, et al. Influence of periodic arrangement of structures on structural vibration characteristics of cylindrical shell[J]. Journal of Vibration Engineering, 2017, 30(4): 603-609.
- [3] 谭路,纪刚,张纬康,等.采用波数域方法分析细长柱壳的振动与声辐射特性[J].海军工程大学学报,2013,25(3):66-71.
Tan Lu, Ji Gang, Zhang Wei-kang, et al. Sender cylindrical vibration and radiation by use of wave-number domain approach[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2013, 25(3): 66-71.
- [4] Laulagnet B, Guyader J L. Sound radiation by finite cylindrical ring stiffened shells[J]. Journal of Sound and Vibration, 1990, 138(2): 173-191.
- [5] Skelton E A, James J H. Theoretical Acoustics of Under-water Structures [M]. London: Imperial College Press, 1997.
- [6] Mead D J. Wave propagation and natural modes in periodic systems: I. mono-coupled systems[J]. Journal of Sound and Vibration, 1975, 40(1): 1-18.
- [7] Mead D J. Wave propagation and natural modes in peri-

- odic systems: II. mono-coupled systems[J]. Journal of Sound and Vibration, 1975, 40(1): 19-39.
- [8] Mead D J. A new method of analyzing wave propagation in periodic structures; applications to periodic Timoshenko beams and stiffened plates [J]. Journal of Sound and Vibration, 1986, 104(1): 9-27.
- [9] Fahy F, Gardonio P. Sound and Structural Vibration; Radiation, Transmission and Response[M]. UK: Elsevier, 2007.
- [10] Bouzit D, Pierre C. Vibration confinement phenomena in disordered, mono-coupled, multi-span beams [J]. Journal of Vibration and Acoustics, 1992, 114 (4) : 521-530.
- [11] Bouzit D, Pierre C. An experimental investigation of vibration localization in disordered multi-span beams [J]. Journal of Sound and Vibration, 1995, 187(4) : 649-669.
- [12] Photiadis Douglas M. Anderson localization of one-dimensional wave propagation on a fluid-loaded plate [J]. The Journal of Acoustical Society of America, 1992, 91 (2) : 771-780.
- [13] Photiadis Douglas M. Localization of helical flexural waves by irregularity [J]. The Journal of Acoustical Society of America, 1994, 96(4) : 2291-2301.
- [14] Photiadis Douglas M, Houston Brian H. Anderson localization of vibration on a framed cylindrical shell [J]. The Journal of Acoustical Society of America, 1999, 106 (3) : 1377-1391.
- [15] Anderson P W. Absence of diffusion in certain random lattices [J]. Physical Review, 1958, 109(5) : 1492-1505.
- [16] Hodges C H. Confinement of vibration by structural irregularity [J]. Journal of Sound and Vibration, 1982, 82 (3) : 411-424.
- [17] Hodges C H, Woodhouse J. Vibration isolation from irregularity in a nearly periodic structure: theory and measurements [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1983, 74(3) : 894-905.
- [18] Hodges C H, Woodhouse J. Confinement of vibration by one-dimensional disorder, I: theory of ensemble averaging [J]. Journal of Sound and Vibration, 1989, 130 (2) : 237-251.
- [19] Hodges C H, Woodhouse J. Confinement of vibration by one-dimensional disorder II: a numerical experiment on different ensemble averages [J]. Journal of Sound and Vibration, 1989, 130(2) : 253-268.
- [20] Pierre C. Localization of vibrations by structural irregularity [J]. Journal of Sound and Vibration, 1987, 114 (3) : 549-564.
- [21] Pierre C. Mode localization and eigenvalue loci veering phenomena in disordered structures [J]. Journal of Sound and Vibration, 1988, 126(3) : 485-502.
- [22] Pierre C, Chaf P D. Strong mode localization in nearly periodic disordered structures [J]. AIAA Journal, 1989, 27(2) : 227-241.
- [23] Kissel G J. Localization in disordered periodic structures [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1988.
- [24] Furstenberg H. Noncommuting random products [J]. Transactions of the American Mathematical Society, 1963, 108(3) : 377-428.
- [25] Herbert D C, Jones R. Localized states in disordered systems [J]. J. Phys. C, 1971, 4: 1145-1161.
- [26] Bansal A S. Free waves in periodically disordered systems: natural and bounding frequencies of unsymmetric systems and normal mode localization [J]. Journal of Sound and Vibration, 1997, 207(3) : 365-382.
- [27] 纪刚, 李宗威, 周其斗. 不等间距加筋圆柱壳的振动局域化研究 [J]. 振动工程学报, 2021, 34(3) : 592-600.
- Ji Gang, Li Zong-wei, Zhou Qi-dou. Localization of vibration on a disordered framed cylindrical shell [J]. Journal of Vibration Engineering, 2021, 34(3) : 592-600.

Localization of vibration on a framed cylindrical shell with mass disorderly configured

Ji Gang, ZHAO Peng, ZHOU Qi-dou

(Department of Naval Architecture Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: It has been observed that vibration energy of disordered aperiodic structures will be confined to the source in the pass bands. Based on the idea, the localization of a framed cylindrical shell with mass disorderly configured is studied. To predict the localization factor of a framed cylindrical shell with the mass disorderly configured, the vibration of the cylindrical shell is analogized to that of a coupled oscillator chain system. With the vibration results obtained by finite element method being the input, the resonance frequency parameter and coupling parameter of the equivalent oscillator chain can be acquired by identification technology combined with wave number analysis. The equivalent mass irregularity parameter can be obtained using reference model identification technology. Localization analysis of two mass disorderly configured models shows that, the mass irregularity parameter, which is closely related to mass configuration parameter, plays an important role in the localization factor and the mass irregularity parameter. Besides, remarkable localization can be observed in the mass disorderly configured model when the average configuration value is over 15% of the structural mass.

Key words: framed cylindrical shell; vibration control; disordered structures; localization

作者简介: 纪刚(1975—),男,副研究员。电话:(027)65461152; E-mail:909092586@qq.com。