

声发射信号在带筋结构中的传播特性*

韩 聪^{1,2}, 姜广义³, 刘 瞳², 杨国安²

(1. 太原理工大学机械与运载工程学院 太原, 030024)

(2. 北京化工大学机电工程学院 北京, 100029)

(3. 中国航发沈阳发动机研究所 沈阳, 110015)

摘要 为了研究带筋结构对声发射(acoustic emission, 简称AE)信号传播的影响,分析了AE信号在带筋薄板和带筋薄壁圆筒2种带筋结构中的传播特性。首先,提出了多径传播模型,推导出了传感器的安装约束条件,可在时域中凸显出从带筋结构处散射的信号;其次,对不同频率的AE信号在不同高度带筋结构中的传播进行了数值模拟,利用构建的反射和透射系数量化表征了AE信号的传播特性;最后,实验结果验证了数值模拟的准确性。结果表明:AE信号在加强筋处会发生反射和透射,并伴随着模态转换演变出其他模态;反射和透射系数相对于激励频率和加强筋高度均呈现出非线性特征,激励频率越高,反射和透射系数对加强筋高度的变化越敏感。该研究阐明了AE信号在带筋结构中的传播机制,可为AE监测中优化传感器空间布置提供指导。

关键词 声发射信号;带筋结构;多径模型;反射;透射

中图分类号 V19;TH17

引 言

发动机作为飞行器的关键部件,长期工作在大应力、强振动、高速和高温等环境下,易出现故障^[1]。常规监测方法无法实时在线监测到早期损伤,而基于AE的在线结构健康监测方法在处理发动机早期故障时具有显著优势。AE技术可以对设备进行全面且长期的连续监视^[2]。受复杂结构及高温环境的限制,发动机上只有温度较低的机匣外表面适合布置AE传感器,为追求结构轻量化,机匣表面附有大量的安装边等带筋结构。故障AE信号在经过带筋结构时会发生扩散、散射等衰减,同时伴随模态转换及波形混叠等畸变现象,造成故障与接收的信号之间的映射关系错综复杂,增加了损伤识别的难度。因此,明确带筋结构对故障AE信号传播的影响,对提高AE技术的诊断准确率具有重要意义。

目前,已有很多学者聚焦于AE信号在带筋板结构中的传播特性研究。AE信号在结构尺寸与其波长相当的构件中主要以Lamb模态传播。李一博等^[3]研究了加强筋对Lamb波透射特性的影响。刘治东等^[4]模拟了AE信号在环形加筋板处的模态转换现象。

机匣简化后可看作为带筋薄壁圆筒。目前,对AE信号在带筋薄壁圆筒中的研究较少,仅有一些研究涉及AE信号在圆柱型结构中的传播特性。文献[5]研究了不同导波在管道缺口处的传播情况。肖俨衍等^[6]研究了AE信号在阶梯轴中的传播特性。可见,以上研究对AE信号在带筋结构中传播机理的描述不够深入,且对传感器的布置准则鲜有讨论。

机匣和支板裂纹AE信号的频带在150 kHz左右,且损伤主要发生在结构表面。根据模态AE理论可知,AE信号在板类结构中传播以 A_0 模态为主,在机匣中传播以轴向 $L(0,1)$ 模态为主。笔者将裂纹AE信号分解为单一频率模态进行传播特性研究。

1 模型建立

1.1 AE信号在带筋结构处的传播

图1为AE信号在带筋结构处的传播示意图。

入射波在某一位置 x 和时刻 t 的位移 u_m 为

$$u_m = Ae^{i(kx - \omega t)} \quad (1)$$

其中: A 为振幅; k 为波数; ω 为频率。

加强筋左侧波场位移 u_l 可表示为

* 国家自然科学基金资助项目(51575035)

收稿日期:2021-11-24;修回日期:2023-02-17

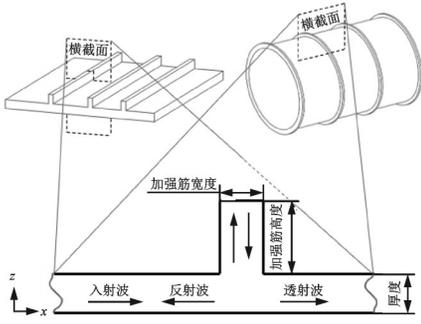


图1 信号在带筋结构处的传播示意图

Fig.1 Schematic diagram of the signal propagation at the stiffened structure

$$u_l = A(x)e^{i(kx - \omega t)} + \sum_{a=1}^M A_a(x)e^{i(-k_a x - \omega_a t)} \quad (2)$$

其中: $A(x)$ 为直达波的幅值; $A_a(x)$ 为第 a 个反射波包的幅值; M 为反射波的总个数。

第 a 个波包的反射系数 R_a 为

$$R_a = |A_a(x)/A(x)| \quad (3)$$

加强筋的右侧波场位移 u_r 可以表示为

$$u_r = \sum_{b=1}^N A'_b(x)e^{i(k_b x - \omega_b t)} \quad (4)$$

其中: $A'_b(x)$ 为第 b 个透射波的幅值。

第 b 个波包的透射系数 T_b 为

$$T_b = |A'_b(x)/A(x)| \quad (5)$$

其中: $A(x)$ 为无加强筋时入射波传播至相同位置处的幅值。

1.2 多径传播模型

虽然故障源 AE 信号中包含多个频率及模态,但在基础研究中应从各模态的角度进行分析。因此,AE 激励信号可表示为

$$J(t) = 0.5 \sin(2\pi f_0 t) \left[1 - \cos(2\pi f_0 t/B) \right] \quad (6)$$

其中: $J(t)$ 为激励函数; f_0 为激励信号的中心频率; B 为波包的波峰数,在本研究中等于 3。

AE 信号带筋结构的多径传播模型如图 2 所示。当曲率半径 R_c 为常数时,加筋结构为带筋圆柱壳体。当 R_c 为无限大时,加筋结构将变为加筋板。

反射波和直达波、边界反射波分离的条件为

$$\begin{cases} \Delta T_1 = T(R_1) - T(D_r) \geq B/f_0 \\ \Delta T_2 = T(R_2) - T(R_1) \geq B/f_0 \\ \Delta T_3 = T(R_3) - T(R_1) \geq B/f_0 \\ \Delta T_4 = T(R_4) - T(R_1) \geq B/f_0 \end{cases} \quad (7)$$

其中: $T(D_r)$, $T(R_1)$, $T(R_2)$, $T(R_3)$ 和 $T(R_4)$ 分别

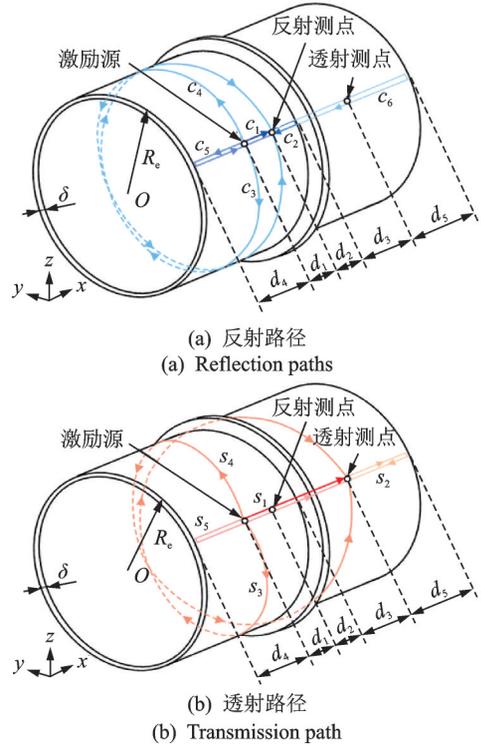


图2 带筋结构的多径传播模型

Fig.2 The multipath propagation model for the stiffened structure

为直达、从加强筋反射、绕圆周传播和从构件边界反射信号被反射测点接收的时间。

将图 2 中的参数代入式(7),可得

$$\begin{cases} d_2 \geq Bv_g(M_1)/2f_0 \\ \frac{\sqrt{(d_1)^2 + (2\pi R_c)^2}}{v_g(M_2)} - \frac{d_1 + 2d_2}{v_g(M_1)} \geq \frac{B}{f_0} \\ d_4 \geq Bv_g(M_1)/(2f_0) + d_2 \\ d_3 + d_5 \geq Bv_g(M_1)/2f_0 \end{cases} \quad (8)$$

其中: $v_g(M_p)$ 为该模态的群速度, $p=1, 2$; M_p 指 AE 信号在构件中传播时的不同模态。

同理,透射信号的分离条件为

$$\begin{cases} \frac{\sqrt{(d_1 + d_2 + d_3)^2 + (2\pi R_c)^2}}{v_g(M_2)} - \frac{d_1 + d_2 + d_3}{v_g(M_1)} \geq \frac{B}{f_0} \\ d_5 \geq Bv_g(M_1)/2f_0 \\ d_4 \geq Bv_g(M_1)/2f_0 \end{cases} \quad (9)$$

根据式(8)和式(9)可以获得激励源、反射测点和透射测点的位置参数。

2 数值模拟

应用有限元技术对 AE 信号在带筋结构中的传

播特性进行了数值模拟,图3为数值模拟中的三维模型。带筋薄板中主板尺寸为 $600\text{ mm} \times 300\text{ mm} \times 5\text{ mm}$,加强筋位于主板中间,尺寸为 $300\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times h\text{ mm}$ 。 h 为加强筋高度,带筋薄壁圆筒模型中圆筒外径为 $1\ 000\text{ mm}$,壁厚为 2 mm ,轴向长为 600 mm 。轴向长为 5 mm ,外径为 $(1\ 000+2h)\text{ mm}$ 的加强筋附着在薄壁圆筒上并位于其轴向的中间。考虑到强度设计要求和实际尺寸,在本研究中 h 的变化范围为 $0\sim 35\text{ mm}$ 。以动态位移的方式在激励点处添加垂直于接触面的 AE 信号,本研究中激励频率 f_0 的变化范围为 $100\text{ kHz}\sim 170\text{ kHz}$ 。根据 AE 信号的频散特性,得到满足波形分离条件 $d_1=30\text{ mm}$, $d_2=50\text{ mm}$, $d_3=100\text{ mm}$, $d_4=220\text{ mm}$, $d_5=200\text{ mm}$ 。

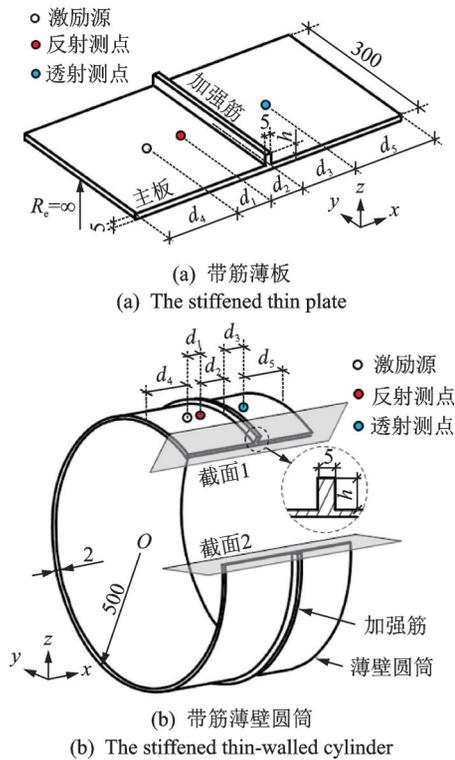


图3 数值模拟中的三维模型(单位:mm)
Fig.3 Three-dimensional models used in numerical simulations (unit:mm)

模拟材料选择航空领域常用的铝合金,材料性能如表1所示。仿真中边界条件是自由的,时间步长和最大单元网格分别为 $0.2\ \mu\text{s}$ 和 0.8 mm 。数值模拟的时间长度为 0.1 ms ,可以包含所需信号。

表1 材料性能

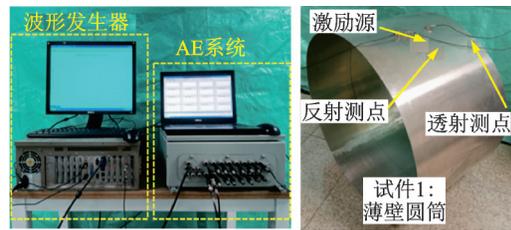
Tab.1 Material properties

材料	弹性模量/GPa	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	泊松比
铝合金	70	2 700	0.33

3 实验

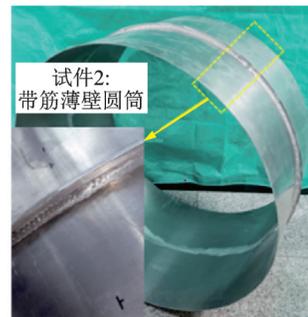
实验在2个与模拟具有相同材料属性的铝制试件上进行,以验证所提模型和模拟的有效性。试件1为薄壁圆筒,外径为 $1\ 000\text{ mm}$,壁厚为 2 mm ,轴向长为 600 mm 。试件2为带筋薄壁圆筒,其中薄壁圆筒的尺寸与试件1一致,加强筋附着在薄壁圆筒上并位于其轴向的中间,加强筋轴向长为 5 mm ,外径为 $1\ 032\text{ mm}$ 。传感器安装位置与模拟设置一致。

图4为实验示意图。激励信号由波形发生器产生,由传感器#1传递给试件。在信号采集中使用传感器#2和#3用于测量反射和透射信号。使用的传感器均为谐振式传感器,且在传感器和试件之间添加了耦合剂。声发射软件参数如表2所示。



(a) 实验系统图

(a) Experimental system diagram



(b) 试件2实物图

(b) Specimen 2 physical picture

图4 实验示意图

Fig.4 Experimental schematic

表2 声发射软件参数

Tab.2 AE software parametric setup

参数	采样频率/ MHz	采样点数/k	固定门 槛/dB	预触发时 间/ μs
数值	2.5	1 024	25	256

4 结果与分析

4.1 带筋薄板

4.1.1 AE信号传播过程

图5为 $f_0=150\text{ kHz}$ 和不同 h 下采集的响应波形,可观察到直达波、从加强筋反射波和透射波。从

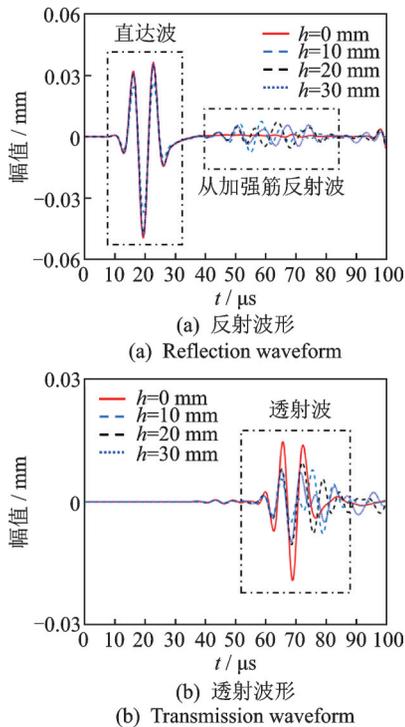


图5 在 $f_0=150$ kHz和不同 h 下采集的响应波形
Fig.5 Collected waveform with $f_0=150$ kHz and different h

图5可以看出,反射波和透射波呈现出不同的叠加波形。这是因为反射波和透射波分别传播至反射和透射测点,沿加强筋传播的波在末端反射后重新回到主板中,再次沿结构特征传播,与首次反射波和透射波在时域上发生混叠,一起被测点接收。加强筋高度的变化及各模态波间不同的速度,使得由测点接收到的响应呈现出不同的混叠波形。

4.1.2 传播特性量化分析

根据式(3),(5)计算的反射和透射系数随激励频率和加强筋高度的变化如图6所示。

当激励频率一定时,从图6(a)可看到反射系数在加强筋高度为5 mm左右时达到最大值,此时图6(b)中透射系数出现最小值。随着加强筋高度的增加,反射系数与透射系数的波动趋势相反。加强筋高度继续增加,反射和透射系数几乎都保持稳定不变。

不同激励频率下的散射系数相对于加强筋高度的变化率也不相同。当激励频率 $f_0=100$ kHz时,反射系数最大值与透射系数最小值均出现在加强筋高度为5 mm处,而 $f_0=170$ kHz时则为4 mm处。在 $f_0=100$ kHz的情况下,当加强筋高度大于27 mm时,反射和透射系数都趋于稳定。当 $f_0=170$ kHz,加强筋高度大约在23 mm以上是稳定的。这表明激励频率越高,信号对加强筋高度的变化越敏感,反射和透射系数越早达到极值,且越早变得平稳。

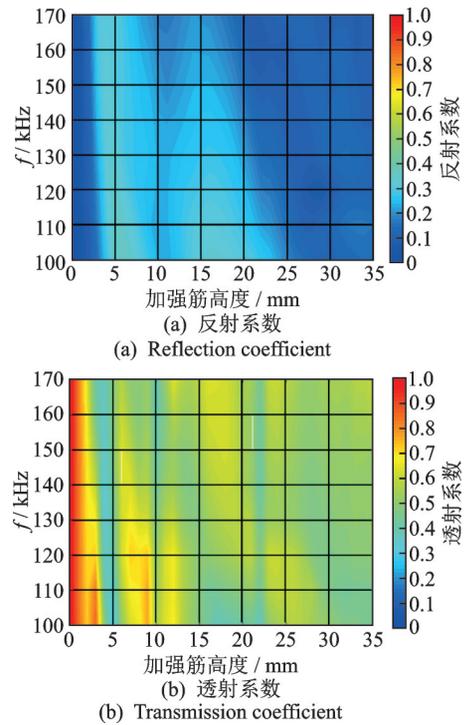


图6 反射和透射系数随激励频率和加强筋高度的变化
Fig.6 Reflection and transmission coefficients versus the excitation frequency and the stiffener height

4.2 带筋薄壁圆筒

4.2.1 AE信号传播过程

在薄壁圆筒表面沿径向激励AE信号时,会产生以 $L(0,1)$ 模态为主的AE信号。图7为在 $f_0=150$ kHz和不同 h 下采集的响应波形。该现象与平板中 A_0 模态波类似,不再赘述。

4.2.2 传播特性量化分析

反射和透射系数随激励频率和加强筋高度的变化如图8所示。图8中颜色差异变化体现了反射和透射系数的变化情况,可以观察到两者的波动呈相反趋势,随后均趋于稳定,这直观地说明了反射和透射系数的变化都是非线性的。此外,激励频率越高,反射和透射系数相对于加强筋高度变平稳的点越早出现,表明信号对加强筋高度变化的敏感性随着激励频率的增加而增加。

4.2.3 实验验证

在试件1上进行实验,采集不同激励频率下AE信号在薄壁圆筒中传播时的基线参考信号。每次测量之间保持几分钟的间隔,以确保实验结果不会受到前一个信号的干扰。在试件2上执行同样的步骤来接收AE信号在带筋薄壁圆筒中的反射波形和透射波形。

断铅(pencil lead break,简称PLB)产生的AE信号与金属裂纹产生的AE信号极为相似,因此使

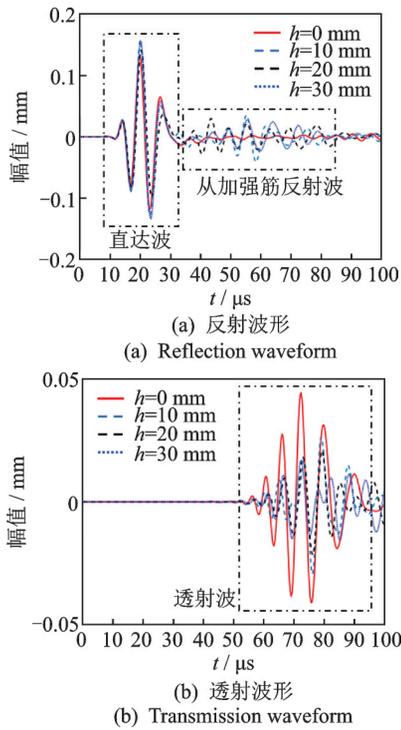


图 7 在 $f_0 = 150$ kHz 和不同 h 下采集的响应波形
Fig.7 Collected waveform with $f_0 = 150$ kHz and different h

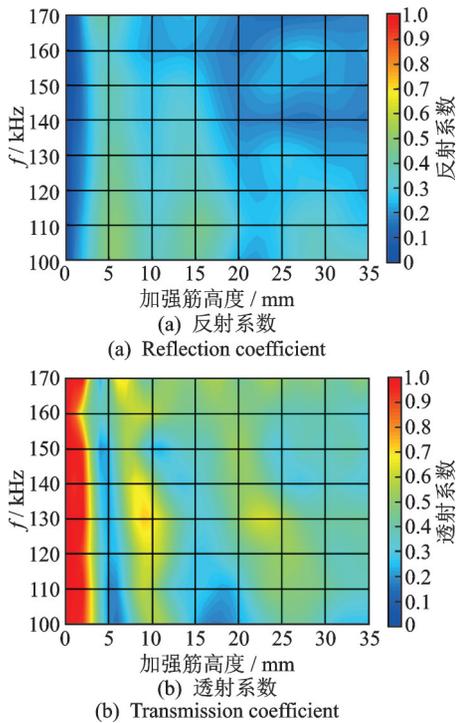


图 8 反射和透射系数随激励频率和加强筋高度的变化
Fig.8 Reflection and transmission coefficients versus the excitation frequency and the stiffener height

用断铅产生分解前的 AE 信号。图 9 为断铅 AE 信号的反射和透射波形。图 10 为 $f_0 = 150$ kHz 时采集的反射和透射波形。

可以看出,分解前的 AE 信号在试件中波形特

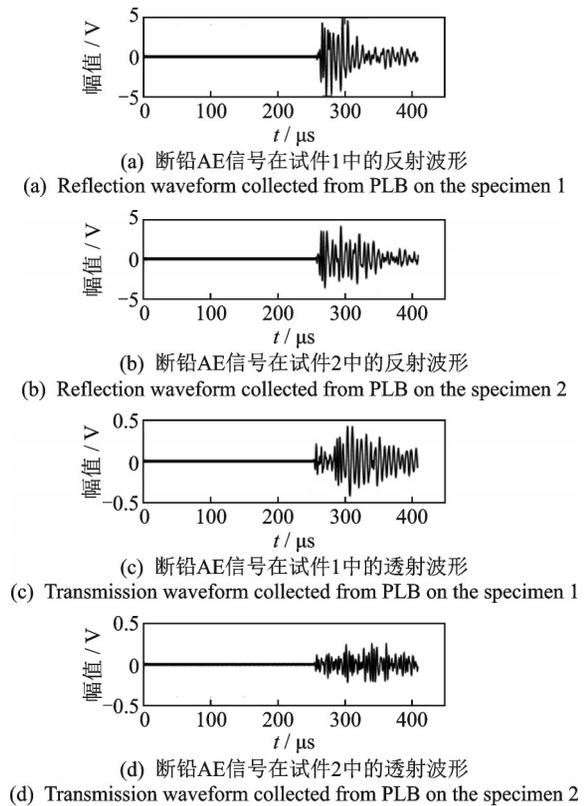


图 9 断铅 AE 信号的反射和透射波形
Fig.9 The reflection and transmission waveform of AE signals collected from PLB

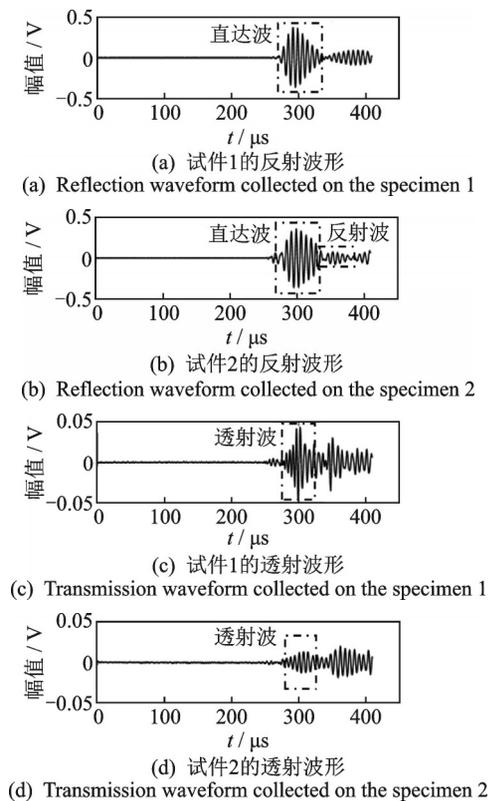


图 10 $f_0 = 150$ kHz 时采集的反射和透射波形
Fig.10 The reflection and transmission waveform collected in the experiment with $f_0 = 150$ kHz

征更为混乱(图9),无法观察出加强筋对AE信号传播的影响,分解后的AE信号波形中可明显观察到加强筋对AE信号传播过程的影响(图10),这证明了基于所提模型布置传感器以研究AE信号的传播特性是可行的。图10中实验与模拟波形之间存在差异,信号因为频散会有趋向扇形的趋势,这是由于:①实验中的激励为面源而非点源;②信号在传感器与圆筒构件接触之间的二次反射造成的。

图11为加强筋高度 $h=16\text{ mm}$ 时实验与数值模拟结果对比。可以看出,曲线趋势吻合地很好,这表明反射和透射系数曲线在可接受的误差范围内得到了验证,证明了所提多径传播模型适用于研究AE信号在带筋结构中的传播特性。

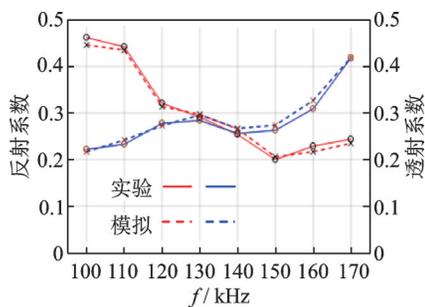


图11 $h=16\text{ mm}$ 时实验和数值模拟结果对比

Fig.11 Comparison of experiments and numerical simulations result at $h=16\text{ mm}$

5 结论

1) 建立了AE信号在带筋结构中的多径传播模型,推导了传感器安装位置的约束条件,通过数值模拟和实验,验证了所提出模型的有效性。

2) 归纳了单模态AE信号在带筋结构处的传播规律。AE信号传播至带筋结构处会产生反射波和透射波,伴随着模态转换产生新模式。

3) 量化地表征了AE信号在带筋结构处的传播特性。反射系数和透射系数相对于激励频率和加强筋高度均呈现出非线性特征,激励频率越高,反射和透射系数对加强筋高度的变化越敏感。

参 考 文 献

[1] 董超. 航空发动机故障诊断技术现状及发展研究[J]. 工程建设与设计, 2016(15): 73-74, 77.
DONG Chao. Status and development of fault diagnosis technology for the aeroengine[J]. Construction & De-

sign for Project, 2016(15): 73-74, 77. (in Chinese)

- [2] 童国炜, 徐华伟, 黄林轶, 等. 基于声发射定位算法的故障检测技术研究[J]. 振动、测试与诊断, 2022, 42(5): 997-1001.
TONG Guowei, XU Huawei, HUANG Linyi, et al. Fault detection monitoring with acoustic emission location method[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2022, 42(5): 997-1001. (in Chinese)
- [3] 李一博, 刘圆圆, 芮小博. 板状材料上加强筋的几何形状对兰姆波透射特性的影响[J]. 声学学报, 2019, 44(2): 231-240.
LI Yibo, LIU Yuanyuan, RUI Xiaobo. Effects of stiffeners on transmission of Lamb waves in plate-like structures [J]. Acta Acustica, 2019, 44(2): 231-240. (in Chinese)
- [4] 刘治东, 庞宝君, 刘刚. 超高速撞击声发射信号在加强筋壁板中传播的模态转换现象研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(21): 114-118.
LIU Zhidong, PANG Baojun, LIU Gang. Hypervelocity impact induced AE wave mode conversion in a plate with vertical stiffeners [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(21): 114-118. (in Chinese)
- [5] ALLEYNE D N, LOWE M J S, CAWLEY P. The reflection of guided waves from circumferential notches in pipes[J]. Journal of Applied Mechanics, 1998, 65(3): 635-641.
- [6] 肖俨衍, 卢文秀, 褚福磊. 声发射信号在不同结构轴中传播特性研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(5): 76-81.
XIAO Yanyan, LU Wenxiu, CHU Fulei. Propagation characteristics of acoustic emission in different structural shafts[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(5): 76-81. (in Chinese)



第一作者简介:韩聪,男,1996年2月生,博士生。主要研究方向为机械状态监测、信号处理及故障智能诊断。
E-mail: hancongusing@163.com

通信作者简介:杨国安,男,1963年3月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为机械状态监测、信号处理及故障智能诊断。
E-mail: yangga@mail.buct.edu.cn