

基于反射系数的波导结构不连续位置识别*

纪琳¹, 余寻峰¹, 范强², 高群¹, 黄震宇²

(1. 山东大学机械工程学院 济南, 250061) (2. 上海交通大学电子信息与电气工程学院 上海, 200240)

摘要 机械波沿波导结构传播过程中, 遇到裂缝、支撑等结构不连续会产生反射和透射现象。基于波幅分解法的反射系数预计结果是不连续位置的函数, 只有已知不连续位置的情况下可以准确预计反射系数。提出的广义反射系数模型可以在未知不连续位置的条件下测得反射系数。通过拟合采用两种方法获得的反射系数, 可以识别出不连续位置。为了验证该不连续位置识别方法的有效性, 以梁为例分别对附加质量和裂缝两种不连续进行位置识别。试验结果表明, 位置识别误差分别为 0% 和 0.06%。

关键词 反射系数; 位置识别; 结构不连续; 裂缝

中图分类号 O 422; TG 115. 28

引言

重要的工程结构, 如大型运载工具: 飞机、船舶的龙骨、圈梁, 钢轨, 管道等结构都存在可以沿结构伸展方向长距离传播的“导波”。利用导波在波导结构的不连续处产生的反射、散射等波动现象, 有可能检测出裂缝、支撑等结构不连续状况, 该方法称为“导波法”。导波法具有检测距离远、范围大的特点, 适于现场和在线结构健康监测^[1-4]。基于脉冲回波原理, 导波法通常是用具有低频散特性的一束窄频带脉冲激励波导结构, 根据回波时间间隔和导波波速计算不连续的位置^[5]。在此原理基础上, Davies 及 Rose 等^[6-7]实现了管道、钢轨裂缝的检测。

脉冲回波法要求导波必须具有低频散特性, 且缺少不连续在各频段体现出的动力学特征, 使得结构健康检测精度降低。笔者提出的“反射系数法”, 利用在随机激励下通过多次平均测量数据获得不连续处的反射曲线, 且该方法不要求识别导波具有低频散特性, 使得更多低衰减特性且对结构不连续敏感的导波可作为识别导波, 从而更有潜力应用于长距离、大范围在线检测。用波幅分解法^[8]计算反射系数的过程中, 先测量不连续的波幅两侧, 再根据测量点与不连续的距离计算出反射系数, 所以反射系数是不连续位置的函数。另外, 基于文中提出的“广义反射系数模型”在未知不连续位置的条件下计算出反射系数, 通过两种反射系数的拟合运算就可能实现不连续定位。

笔者以梁为例, 分别对附加质量和裂缝两种不连续位置进行识别。由于该方法需要的波导结构信息只有波数, 因此该识别方法也适于梁以外的波导结构。需要指出的是, 文中讨论仅限于识别区域只存在一个不连续的识别方法, 对于存在多个不连续的情况, 理论上可以通过缩小识别区域以保证只存在一个不连续。对于单次检测无法完成检测的长结构, 可通过分段检测的方式实现对其内部结构不连续的完整定位。

1 反射系数的测量模型

如图 1 所示, 在一个截面均匀沿 x 轴方向延伸的波导结构上含有不连续 D 。定义 D 的左侧为波导 α , 右侧为波导 β , 沿 x 轴正向传播的行波的波幅为 A_u^+ , 沿 x 轴负向传播的行波的波幅为 A_u^- , 下标 u 表示波幅的测量位置。

在 D 的左右无限近处分别取 $u = D\alpha$ 和 $D\beta$, 则 D 的两侧的波幅与反射系数 r 、透射系数 t 的关系为

$$\begin{cases} A_{D\alpha}^- \\ A_{D\beta}^+ \end{cases} = \begin{bmatrix} r_{\alpha\alpha} & t_{\beta\alpha} \\ t_{\alpha\beta} & r_{\beta\beta} \end{bmatrix} \begin{cases} A_{D\alpha}^+ \\ A_{D\beta}^- \end{cases} \quad (1)$$

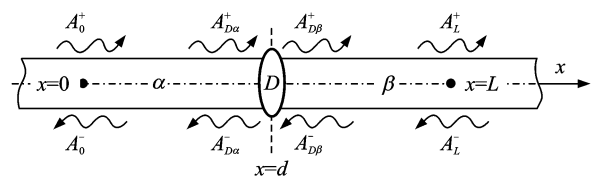


图 1 均匀波导结构在不连续附近的波幅
Fig. 1 Wave amplitudes at the discontinuity

* 国家国际科技合作专项资助项目(2012DFG01790)
收稿日期: 2012-10-08; 修回日期: 2012-12-08

其中: r, t 的下标 gh (取 α 或 β)表示从波导 g 传到波导 h 。

由于通常无法直接测量紧靠不连续 D 两侧的波幅,可以测量距 D 较远、受近场波影响较小的位置处的波幅。例如,距 D 一个波长位置的近场波能量比 D 处衰减约50 dB。假定 D 左侧的波幅测量位置 $x=0$,选择距离左侧测点 L 的 D 右侧测点,即 $x=L$,不连续两侧波幅与测点波幅的关系为

$$\begin{cases} \begin{Bmatrix} A_{D\alpha}^+ \\ A_{D\alpha}^- \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{-ikd} & 0 \\ 0 & e^{ikd} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A_0^+ \\ A_0^- \end{Bmatrix} \\ \begin{Bmatrix} A_{D\beta}^+ \\ A_{D\beta}^- \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{-ik(d-L)} & 0 \\ 0 & e^{ik(d-L)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A_L^+ \\ A_L^- \end{Bmatrix} \end{cases} \quad (2)$$

其中: k 为波数。

对于均匀波导结构,不连续处两侧的波动特性具有对称性,即 $r_{\alpha\alpha}=r_{\beta\beta}=r, t_{\alpha\beta}=t_{\beta\alpha}=t$ 。将式(2)代入式(1),得不连续点反射系数的测量计算公式

$$r = \frac{A_0^+ A_0^- - A_L^+ A_L^-}{(e^{-ikd} A_0^+)^2 - (e^{ik(d-L)} A_L^-)^2} \quad (3)$$

表明反射系数是测点与不连续的距离 d 的函数。

2 结构不连续处的广义反射系数模型

假设在 $x=0$ 与 $x=L$ 之间的区域最多存在一个不连续,可定义该区域为“广义不连续” D_G ,如图2所示。

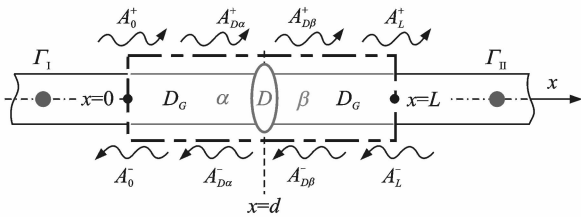


图2 广义不连续处的波幅

Fig. 2 Wave amplitudes at the general discontinuity

设“广义反射系数”为 R ,广义透射系数为 T ,将式(1)中的反射系数和透射系数分别用对应的广义系数替代,可得广义反射系数与广义不连续两侧的波幅之间的关系

$$\begin{Bmatrix} A_0^- \\ A_L^+ \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{\alpha\alpha} & T_{\beta\alpha} \\ T_{\alpha\beta} & R_{\beta\beta} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A_0^+ \\ A_L^- \end{Bmatrix} \quad (4)$$

将式(1),(2)代入式(4),可分别求出

$$R_{\alpha\alpha} = e^{-2ikd} r \quad (5)$$

$$R_{\beta\beta} = e^{-2ik(L-d)} r \quad (6)$$

$$T_{\alpha\beta} = T_{\beta\alpha} = e^{-2ik(L-d)} r \quad (7)$$

为了求得式(4)中的 $R_{\alpha\alpha}, R_{\beta\beta}$ 和 T ,需要两组独立测量的波幅。如图2所示,分别在广义不连续 D_G 的两侧选取第1组测量波幅的激励点 Γ_I 和第2组

测量波幅的激励点 Γ_{II} 。将每组测量获得的 $x=0$ 和 $x=L$ 的波幅代入式(4),计算出广义反射系数

$$\begin{cases} R_{\alpha\alpha} = \frac{A_{0,II}^- A_{L,I}^- - A_{0,I}^- A_{L,II}^-}{A_{0,II}^+ A_{L,I}^- - A_{0,I}^+ A_{L,II}^-} \\ R_{\beta\beta} = \frac{A_{0,II}^+ A_{L,I}^+ - A_{0,I}^+ A_{L,II}^+}{A_{0,II}^+ A_{L,I}^- - A_{0,I}^+ A_{L,II}^-} \end{cases} \quad (8)$$

其中:波幅 $A_{u,n}$ 的下标 u ($u=0, L$)表示波幅的测量位置;下标 n ($n=I, II$)表示测量组的编号。

将式(5)代入式(6),可消除不连续的位置参数 D ,得到反射系数 r 与广义反射系数 $R_{\alpha\alpha}$ 和 $R_{\beta\beta}$ 的关系式

$$r = (R_{\alpha\alpha} R_{\beta\beta})^{\frac{1}{2}} e^{ikL} \quad (9)$$

3 结构不连续位置识别方法

图3为反射系数的结构不连续位置识别流程。

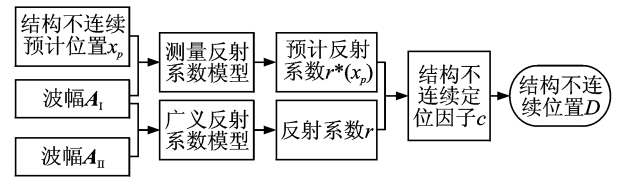


图3 基于反射系数幅值的结构不连续位置识别流程

Fig. 3 Discontinuity locating based on the reflection coefficients

首先选取一段可能包括不连续的检测区间,区间内的任意位置 x_p 为不连续的预计位置。在区间两侧分别激励结构,测得两端的波幅 A_I 和 A_{II} ,每组波幅均包含检测区间两端部处正向和反向传播波所对应的波幅。将 A_I 与预计位置 x_p 代入反射系数测量模型式(3),得预计反射系数记为 $r^*(x_p)$ 。将 A_I 与 A_{II} 代入广义反射系数模型式(9),计算出反射系数 r 。在反射系数曲线上选择能够反映不连续动力学特征的频段 F ,通过在此频段上比较预计反射系数 $r^*(x_p)$ 与 r 取模后的误差,以误差最小的预计位置为不连续位置。引入误差平方在频率域平均后的倒数,作为描述不连续位置可信度的定位因子 c

$$\frac{1}{c(x_p)} = \left[\int_F (|r| - |r^*(x_p)|)^2 df \right] / \Delta F \quad (10)$$

其中:定位因子 c 为位置 x_p 的函数; ΔF 为频段长度。当不连续预计位置接近其真实位置时,定位因子在该频段会趋于全局极大值,即 $c(x_p \rightarrow d) \rightarrow \max(c)$ 。

4 结构不连续位置识别实验

4.1 附加型结构不连续位置识别

附加型结构不连续位置识别的试验布置如图4

所示。梁的长度为 6.3 m,截面尺寸为 50 mm × 6 mm(宽 × 厚),材料为 45 钢。在梁的两侧对称地粘贴两个钢块构成附加型结构不连续,钢块沿梁长度方向的尺寸为 10 mm,沿梁截面方向的尺寸为 50 mm × 50 mm(宽 × 厚),钢块的材料与梁相同。

如图 4 所示,通过 3 根弹性绳将梁悬挂起来,等效为自由状态。利用 PCB 公司的 K2004E01 激振器作为激振源对梁输入 0~2 kHz 的随机激励,梁上的波幅由位于结构不连续两侧的加速度传感器(PCB 352C22)根据波幅分解原理^[8]测得。利用 B&K 公司的 Pulse 3560 分析仪对数据进行采集和处理,频率分辨率为 0.5 Hz。

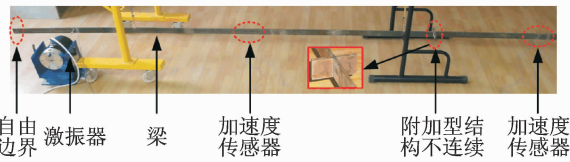


图 4 附加型结构不连续位置识别试验布置

Fig. 4 Experimental setup for identifying the location of the added discontinuity on the finite beam

将图 4 中两组加速度传感器间的区域定义为广义结构不连续,左侧加速度传感器组的中心位置为 $x=0$,右侧加速度传感器组中心位置为 $x=2.5$ m,其中结构不连续位于 $x=1.4$ m 处。图 2 所示激励点 Γ_I 与 Γ_{II} 分别设置在 $x=-1.5$ m 与 $x=4$ m 处。由于梁上的近场波随着传播距离增加而迅速衰减,高于 50 Hz 时,来自梁边界和激振器的近场波在波幅测量位置处的影响可以忽略。

将测量的波幅代入结构不连续广义反射系数模型,计算出附加型结构不连续处的反射系数幅值曲线如图 5 所示。反射系数曲线中 50 Hz 以下的异常波动是由于低频近场波在波幅测量位置没有完全衰减导致的。在结构的反共振频率等一些特殊频率处测量波幅容易受到噪声影响,利用这些受到污染的波幅计算反射系数会导致产生误差。图 5 所示反射

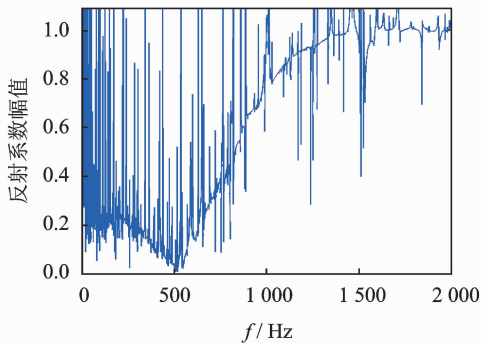


图 5 附加型结构不连续处的反射系数幅值

Fig. 5 Magnitudes of the reflection coefficients at the added discontinuity

系数曲线上大部分的尖锐异常波动点,即为此测量噪声造成。

利用图 5 所示的反射系数计算得到的定位因子如图 6 所示。定位因子曲线全局极大值点对应的预计位置 $x=1.400$ m 即为结构不连续的识别位置,对应的位置识别误差为 0%,对应的定位因子为 3.289。若测量数据受到噪声和近场波等影响较大,可从中选择受影响较小的反射系数对结构不连续进行定位识别,增加结构不连续的可辨识度。

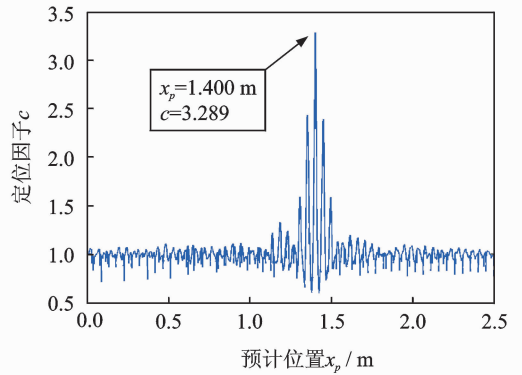


图 6 附加型结构不连续位置识别结果

Fig. 6 Results for locating the added discontinuity

4.2 嵌入型结构不连续位置识别

嵌入型结构不连续位置识别的试验布置如图 7 所示。梁的尺寸及材料与 4.1 部分的梁相同。嵌入型结构不连续由尺寸为 2 mm × 50 mm × 2 mm(长 × 宽 × 深)的裂缝构成。定义其深度比为裂缝的深度除以梁的厚度,故试验裂缝对应的深度比为 1/3。

如图 7 所示,在梁的两端分别设置一个沙箱,用于吸收梁端部来波,减少端部对波的反射。利用 PCB 公司的 K2004E01 激振器作为激振源对梁输入 0~10 kHz 的随机激励,梁上的波幅由结构不连续两侧的加速度传感器(PCB 352C22)根据波幅分解原理^[8]测得。利用 B&K 公司的 Pulse 3560 分析仪对数据进行采集和处理,频率分辨率为 1.56 Hz。

图 7 中左侧加速度传感器组的中心位置为 $x=0$,右侧加速度传感器组的中心位置为 $x=3$ m,结构不连续位于 $x=1.6$ m 处。图 2 所示激励点 Γ_I 与 Γ_{II} 分别在 $x=-1.5$ m 与 $x=4.5$ m 处。

将测量的波幅代入结构不连续广义反射系数模型,计算裂缝处的反射系数幅值曲线如图 8 所示。

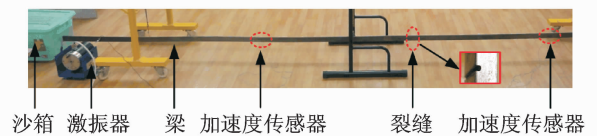


图 7 嵌入型结构不连续位置识别试验布置

Fig. 7 Experimental setup for identifying the location of the embedded discontinuity on the finite beam

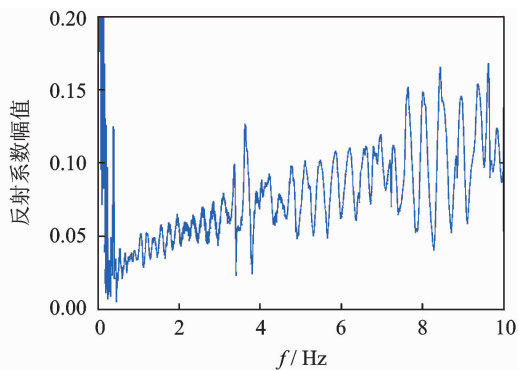


图8 嵌入型结构不连续处的反射系数幅值
Fig.8 Magnitudes of the reflection coefficients at the added discontinuity

由于梁两侧的沙箱可以吸收传至梁端部的波,且对波的吸收效果随着波长的减小(频率增加)而逐渐增强,因此可将梁的端部等效为无限长边界。等效的无限长边界减少了梁上反共振频率的出现,从而抑制了噪声对波幅测量的影响。图8所示的反射系数幅值曲线上没有图5曲线上的尖锐异常点。导致图8中反射系数幅值曲线出现周期性波动的原因还未确定。利用图8所示的反射系数计算得到的定位因子如图9所示。定位因子曲线全局极大值点对应的预计位置 $x = 1.599$ m 即为裂缝的识别位置,对应的识别误差为 0.06%,对应的定位因子为 2.767。裂缝位置识别误差可能是由于测量裂缝与加速度传感器之间位置时的测量误差导致,并非识别误差。利用 0~10 kHz 频率范围内的反射系数可对深度比大于 1/6 的裂缝准确识别,而对于深度比小于 1/6 的裂缝,需要利用更高频率导波的反射系数对其定位识别。

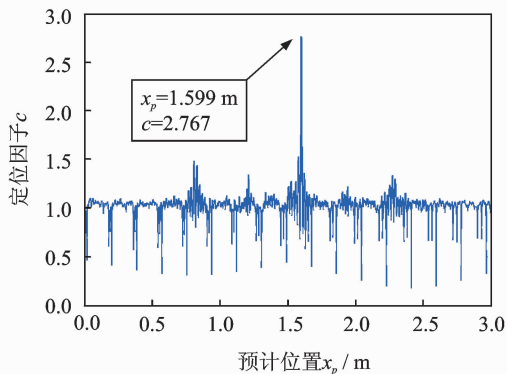


图9 嵌入型结构不连续位置识别结果
Fig.9 Results for locating the embedded discontinuity

5 结束语

笔者建立了导波在结构不连续处的测量反射系数模型和广义反射系数模型,并利用反射系数的这

两个模型提出了一种基于反射系数的结构不连续位置识别方法,实现了波导结构上附加型结构不连续和嵌入型结构不连续的准确识别。利用该识别方法,对梁上的附加质量块和裂缝进行了位置识别,误差分别为 0% 和 0.06%。

参 考 文 献

- [1] Hayashi T, Song W J, Rose J L. Guided wave dispersion curves for a bar with an arbitrary cross-section, a rod and rail example[J]. Ultrasonics, 2003, 41(3): 175-183.
- [2] Zumpano G, Meo M. A new damage detection technique based on wave propagation for rails[J]. International Journal of Solids and Structures, 2006, 43(5): 1023-1046.
- [3] Ryue J, Thompson D J, White P R, et al. Wave reflection and transmission due to defects in infinite structural waveguides at high frequencies[J]. Journal of Sound and Vibration, 2011, 330(8): 1737-1753.
- [4] 李城华,王悦民,朱龙翔,等.改进匹配追踪法在导波检测信号处理中的应用[J].振动、测试与诊断,2012,32(1):111-115.
Li Chenghua, Wang Yuemin, Zhu Longxiang, et al. Application of improved matching pursuit method in guided wave signal processing[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2012, 32(1): 111-115. (in Chinese)
- [5] Wilcox P D, Lowe M J S, Cawley P. A signal processing technique to remove the effect of dispersion from guided wave signals[J]. American Institute of Physics Conference Proceedings, 2001, 557(1): 555-562.
- [6] Davies J, Cawley P. The application of synthetic focusing for imaging crack-like defects in pipelines using guided waves[J]. Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 2009, 56(4): 759-771.
- [7] Rose J L, Avioli M J, Song W J. Application and potential of guided wave rail inspection[J]. Insight, 2002, 44(6): 353-358.
- [8] Halkyard C R. Sensor array design for wave decomposition in the presence of coupled motion[J]. Journal of Sound and Vibration, 2003, 259(4): 935-953.



第一作者简介:纪琳,女,1967年9月生,博士,副教授。主要研究方向为机械设计与理论,复杂系统的中高频振动与噪声的预测。曾发表《中频振动分析——混合模型解析》(北京:中国机械工业出版社,2013年)等论著。
E-mail:jilin@sdu.edu.cn