论文

基于模态置信准则计算的L(0,1)导波弯头反射研究

耿海泉*, 王悦民, 邓文力, 陈乐, 叶伟

海军工程大学动力工程学院, 武汉 430033

* E-mail: genghq_1989@163.com

收稿日期: 2017-02-14; 接受日期: 2017-07-20; 网络出版日期: 2017-11-03

国家部委预研基金项目(编号: 9140A27020115JB11001)资助

摘要 研究了L(0,1)模态导波在管道弯头处的反射特性, 提出了一种新的基于导波模态置信准则计算的L(0,1)模态导波弯头反射分析方法. 使用数值模拟方法研究了L(0,1)模态导波在弯头处的模态转换, 并分析了导波激励频率、弯曲半径和弯曲角度3种因素对L(0,1)模态导波反射的影响; 利用导波模态置信准则表示导波弯头反射程度, 反射程度随频率和弯曲半径变化趋势与数值模拟结果进行了对比, 最后进行了实验验证. 结果表明: L(0,1)模态导波在弯头会部分转换成F(1,1)模态, 方向与弯头拱背-拱腹方向一致; 随着频率和弯曲半径增大, 导波反射幅值单调减小, 随着弯曲角度增大, 反射幅值非单调变化; 用导波模态置信准则表示弯头反射程度随频率和弯曲半径变化趋势与数值模拟结果一致, 实验结果进一步验证了导波模态置信准则表示方法的正确性. 研究结果将为含弯头管道L(0,1)模态导波检测提供理论指导和新的分析方法.

关键词 L(0,1)模态导波, 管道弯头, 模态置信准则, 反射分析

1 引言

超声导波检测技术和传播特性研究已成为国内外的研究热点^[1-4]. 弯头是管道中的常见特征结构, 受管道内流体冲刷以及弯头加工等原因, 管道弯头部分较直管段更容易出现缺陷. 当利用超声导波对管道弯头缺陷进行检测时, 由于弯头本身会产生导波反射, 缺陷反射回波常与弯头反射回波叠加在一起而难以分辨, 影响导波对弯头缺陷的检测. 在导波低频范围内, 小管径管道中常见的纵向模态为L(0,1)模态, 因此, 研究L(0,1)模态导波在弯头处的反射特性将有利于实现对小管径管道弯头缺陷的检测.

在导波弯头反射研究方面, 前人已经做了很多工

作. Aristégui等人^[5]使用膜单元有限元和实验方法研究了L(0, 2)模态导波在管道弯头处的反射特性. Demma等人^[6-8]使用有限元模拟和实验方法研究了超声导波在管道处的模态转换、频散曲线及反射特性. Hayashi等人^[9]使用半解析有限元方法计算了导波能量在弯头处反射系数与频率的关系. Nishino等人^[10]使用激光超声系统研究了L(0,1)模态导波在弯头处模态转换与弯曲角度的关系. Rudd等人^[11]使用弹性动力学有限积分方法模拟了导波在含弯头管道中的传播. Sanderson等人^[2]利用有限元模拟和实验方法研究了导波在弯头处的传播特性, 并利用有限元模拟数据建立了弯头对导波传播影响的解析模型, 该模型可预测弯头对导波的影响并消除影响. Verma等人^[3]使用有限元模拟方法研

引用格式: 耿海泉, 王悦民, 邓文力, 等. 基于模态置信准则计算的L(0,1)导波弯头反射研究. 中国科学: 技术科学, 2017, 47: 1295–1303
Geng H Q, Wang Y M, Deng W L, et al. Research on reflection of L(0,1) guided wave from pipe elbow based on modal assurance criteria calculation (in Chinese). Sci Sin Tech, 2017, 47: 1295–1303, doi: 10.1360/N092017-00044

究了弯头弯曲角度和弯曲半径对导波反射和模态转换的影响。Bakkali等人^[12]使用半解析有限元方法和基于导波模态双正交关系的模态匹配方法计算了导波在弯头处的散射矩阵。Qi等人^[13]使用有限元模拟方法研究了T(0,1)模态在弯头处模态转换与频率的关系。

以上研究工作大多只是利用数值模拟和实验方法研究了一种或两种因素对导波反射及模态转换的影响, 未全面考虑影响导波反射的所有因素。本文利用有限元模拟方法研究了频率、弯曲半径和弯曲角度3种因素对导波弯头反射的影响。针对数值模拟和实验研究效率较低的现象, 提出了一种基于半解析有限元和模态置信准则计算的弯头反射分析方法, 并与有限元模拟结果进行了对比; 最后用实验验证了该方法的正确性。

2 L(0,1)模态导波弯头反射数值模拟

2.1 模态转换

使用有限元模拟和导波模态提取方法^[14]对L(0,1)导波弯头处模态转换进行研究。所使用管道规格为长度2.752 m, 外径20 mm, 壁厚3 mm, 弯曲半径为50 mm, 激励频率为30 kHz, 在管端施加轴向位移载荷, 在管道中激发出L(0,1)模态导波, 模拟信号如图1所示。由管道频散曲线可知, 在30 kHz频率下, L(0,1)模态导波波速为5025 m/s, F(1,1)模态导波波速为2505 m/s, F(1,1)模态导波波速约等于L(0,1)模态导波波速的一半, 因此也验证了图中由L(0,1)模态转换而来的导波为F(1,1)模态。F(1,1)模态不再是轴对称的, 其具有方向性。提取距激励端2个单元的截面节点, 绘制F(1,1)模态到达时刻的导波反射截面变形, 如图2所示, 符号“*”表示未变形时节点位置, 符号“o”表示变形后节点位置。

由图2可以看出, 弯头反射的F(1,1)模态, 其振动方向与弯头拱背-拱腹方向相同, 说明L(0,1)模态导波在弯头处发生模态转换而形成的反射F(1,1)模态的方向与弯头拱背-拱腹方向一致。

2.2 反射系数计算

Demma等人^[6]指出影响导波在管道弯头处反射特性的因素有弯曲半径、弯头长度和频率; 许多研究者^[5,6,9,13,15,16]使用数值模拟和实验方法得到了不同单一因素或两种因素对导波反射系数的影响, 但未曾综

图1 (网络版彩图) 模态提取信号

图2 (网络版彩图) 管道截面变形图

合考虑3种因素对导波反射系数的影响。本文将使用有限元模拟方法分析弯曲半径、弯头长度和频率3种因素对导波反射系数的影响。激励频率分别为20, 25, 30, 35和40 kHz, 弯曲半径分别为50, 60, 70, 80, 90和100 mm, 弯曲角度为30°, 60°, 90°, 120°, 150°和180°。分别计算各影响因素下L(0,1)模态导波反射系数和F(1,1)模态导波反射系数, 每组有180个数据, 绘制3种因素下的导波反射系数三维散点图, 如图3所示, 图中散点附近数字标注表示反射系数大小程度, 数字越大, 反射系数越大。

从图3(a)中可以看出, 当激励频率和弯曲半径较大时, 无论弯曲角度多大, L(0,1)模态导波反射系数较小; 除了弯曲角度为30°的情况下, 保持另外两个因素不变, 随着激励频率或弯曲半径的增加, L(0,1)模态导波反射系数呈单调减小趋势; 随着弯曲角度的增加, L(0,1)模态导波反射系数不再单调变化。从图3(b)中可

图3 (网络版彩图) 导波反射系数三维散点图. (a) L(0,1)反射; (b) F(1,1)反射

可以看出, F(1,1)模态导波反射系数随各影响因素的变化趋势与L(0,1)模态导波反射系数的变化趋势具有一致性.

为更为直观地显示导波反射系数随各影响因素的变化趋势, 将180组数据在同一图中用一条曲线表现出来, 数据顺序分别按照激励频率、弯曲半径和弯曲角度升序排列, 如图4所示, 其中标注如“频率-弯曲半径-弯曲角度”表示数据先按照频率升序排列, 在频率相同区间内再按照弯曲半径升序排列, 最后在弯曲半径相同区间内按照弯曲角度升序排列, 其他标注以此类推.

从图4中可以看出, L(0,1)模态和F(1,1)模态反射系数随各影响因素变化趋势呈现出一致性, 随着频率或弯曲半径的增大, 反射系数整体上呈现单调递减趋势; 随着弯曲角度的增大, 反射系数呈现出非单调变化, 这是由于不同弯曲角度导致弯头具有不同的长度, 当导波由直管进入弯管时在交界面发生反射, 导波继续传播, 再由弯管进入直管又一次在交界面发生反射, 弯头整体反射为这两次反射的叠加, 两次反射存在时间差, 不同弯头长度导致反射的时间差不同, 叠加后会有不同的幅值, 因而导波反射系数随弯头角度增大呈现非单调变化. 为验证该解释的正确性, 下面用数值模拟结果进行说明. 管道弯曲半径为100 mm, 激励频率为40 kHz, 弯曲角度分别为30°, 60°, 90°, 120°, 150°和180°. 当弯曲角度为180°时, 由于弯头长度足够, 弯头前后两个交界面的反射信号得以分离, 不同弯曲角度的第一次交界面反射应该基本相同, 从弯曲角度为180°的弯头反射中分离出的第一次交界面反射与不同弯曲角度弯头反射的对比如图5所示.

从图5中可以看出, 弯头反射是由第一次直弯管

交界面反射和第二次直弯管交界面反射叠加而成的; 不同弯曲角度弯头的第一次交界面反射基本吻合, 但由于弯头长度的不同, 导波在弯头中传播的时间不同, 造成第二次交界面反射与第一次交界面反射的时间差不同, 两者叠加后会有不同的幅值, 因此导波反射幅值随弯曲角度变化呈现非单调变化, 这与Demma等人^[17]提出的缺陷反射由缺陷前后端反射叠加而成的理论类似.

3 基于MAC计算的弯头反射分析

导波反射的产生是由于波导的阻抗发生变化, 使阻抗发生变化的因素可能有波导截面积的变化、约束边界条件的变化和几何结构对称性的变化等. 导波在管道弯头处发生反射正是由于几何结构对称性的变化, 由轴对称的直管变为非轴对称的弯头. 波导阻抗的变化会以不同阻抗波导中导波模式振型的不匹配表现出来, 模式不匹配程度越大表明阻抗变化越大, 相应的导波反射也会越大, 反之亦然^[18]. 当管壁和管径尺寸一定时, 频率和弯曲半径是影响弯管中导波模式的重要因素. 由上一节反射系数数据可知, 随着频率或弯曲半径的增大, 不管是L(0,1)模态还是F(1,1)模态的反射系数都呈减小趋势, 现利用模式不匹配程度对这一现象进行分析.

利用半解析有限元方法^[19-21]分别计算直管段和弯管段中导波模式振型, 利用模式置信准则^[22](modal assurance criteria, MAC)计算不同模式振型的相似度. 其计算公式为

$$\text{MAC}(A, B) = \frac{|\psi_A^T \psi_B|^2}{(\psi_A^T \psi_A)(\psi_B^T \psi_B)}, \quad (1)$$

图4 (网络版彩图)导波反射系数曲线图。(a) L(0,1)反射-频率排序; (b) L(0,1)反射-弯曲半径排序; (c) L(0,1)反射-弯曲角度排序; (d) F(1,1)反射-频率排序; (e) F(1,1)反射-弯曲半径排序; (f) F(1,1)反射-弯曲角度排序

式中, ψ_A 和 ψ_B 为导波模态振型向量。

分别计算直管中L(0,1)模态导波与弯管中 $L_c(0,1)$ 模态导波和 $F_c(1,1)$ 模态导波的振型相似度, 并绘制振型相似度随频率和弯曲半径变化曲面, 如图6所示。为更好地观察模态相似度随频率和弯曲半径变化趋势, 图6(a)和(b)采用了不同视角。

从图6(a)中可以看出, 随着频率或弯曲半径的增大, 直管中L(0,1)模态导波与弯管中 $L_c(0,1)$ 模态导波振

型相似度(MAC值)呈单调增大趋势, 也就是说直管中L(0,1)模态与弯管中 $L_c(0,1)$ 模态不匹配程度呈减小趋势, 因而L(0,1)模态反射减弱; 从图6(b)中可以看出, 随着频率或弯曲半径的增大, 直管中L(0,1)模态导波与弯管中 $F_c(1,1)$ 模态导波振型相似度(MAC值)呈单调减小趋势(在极限情况下该MAC值会为0, 也就是直管中L(0,1)模态和F(1,1)模态的MAC值, 因为直管中L(0,1)模态和F(1,1)模态是正交的)。直管中L(0,1)模态导波与

图5 (网络版彩图)第一次界面反射与弯头整体反射信号对比图. (a) 30°; (b) 60°; (c) 90°; (d) 120°; (e) 150°; (f) 180°

弯管中 $F_c(1,1)$ 模态导波振型相似度(MAC值)的减小意味着弯管中 $F_c(1,1)$ 模态趋近于直管中 $F(1,1)$ 模态,也就是说管道的非轴对称性减小,而非轴对称性是产生模态转换的重要原因,因此模态转换减小,则反射 $F(1,1)$ 模态减小.

为进一步验证导波振型相似度能够反映弯头反射系数随频率和弯曲半径变化趋势,下面将处理后的振型相似度与弯曲角度为90°时有限元模拟得到的导

波反射系数进行对比.当直管中 $L(0,1)$ 模态与弯管中 $L_c(0,1)$ 模态振型相似度为1时,不会发生反射,为0时则全部反射.为用导波振型相似度表示导波反射程度,建立表示参数 $R_MAC=1-MAC$.将 R_MAC 随频率和弯曲半径变化曲面与有限元模拟计算的 $L(0,1)$ 模态反射系数 R_FE 随频率和弯曲半径变化曲面用最大值归一化后进行对比,如图7所示.直管中 $L(0,1)$ 模态与弯管中 $F_c(1,1)$ 模态振型相似度反映了模态转换程度的大小,

图6 (网络版彩图)模态相似度随频率和弯曲半径变化曲面. (a) 直管中L(0,1)与弯管中 $L_c(0,1)$ 模态相似度; (b) 直管中L(0,1)与弯管中F(1,1)模态相似度

图7 (网络版彩图)L(0,1)反射 R_{MAC} 与 R_{FE} 对比图. (a) 视图1; (b) 视图2

振型相似度越大, 模态转换程度越大, F(1,1)模态反射越大, 则可用 $R_{MAC}=MAC$ 表示F(1,1)模态反射程度. 同样地, 将反映F(1,1)模态反射程度的 R_{MAC} 和有限元模拟计算的F(1,1)模态反射系数 R_{FE} 随频率和弯曲半径变化曲面归一化后进行对比, 如图8所示.

从图7和8中可以看出, 归一化的用导波振型相似度表示的L(0,1)和F(1,1)模态反射程度参数 R_{MAC} 随

频率和弯曲半径变化曲面与用有限元模拟得到的归一化的L(0,1)和F(1,1)模态反射系数 R_{FE} 能够基本吻合, 说明用导波振型相似度表示的 R_{MAC} 能够较为准确地反映L(0,1)和F(1,1)模态导波在弯头处反射系数随频率和弯曲半径的变化趋势. 由有限元模拟计算导波弯头反射系数需要较大的计算量和较为复杂的数据后处理工作, 而使用半解析有限元方法计算振型相

图8 (网络版彩图)F(1,1)反射 R_{MAC} 与 R_{FE} 对比图. (a) 视图1; (b) 视图2

似度计算量小、速度快,更适用于导波的工程应用.

4 实验研究

为验证用导波模式振型相似度表示的弯头反射随频率变化趋势的正确性,使用自主开发的磁致伸缩导波检测系统进行实验研究.

4.1 实验设置

实验所使用管道为不锈钢弯管,牌号为oCr18Ni19,密度 7930 kg/m^3 ,弹性模量为 206 GPa ,泊松比为 0.27 .管道外径为 20 mm ,壁厚为 3 mm ,长度为 2.752 m ,采用注沙热弯技术将直管加工成相应弯曲半径的弯管,弯头位于管道中间,两直管段长度相等.为在管道中激发纵向导波,在管道表面粘贴长条状磁致伸缩换能条带(铁钴合金),在激励和接收线圈下分别粘贴4条等距分布的铁钴条带,检测前用永磁铁对铁钴合金进行纵向磁化.检测系统与试件如图9所示.

4.2 实验结果与对比分析

利用导波检测系统对一弯曲半径为 100 mm 的弯管进行检测,检测信号如图10所示.计算实验信号的导波反射系数并利用半解析有限元法计算相应频率和弯曲半径弯管中 $L_c(0,1)$ 模式 and 直管段中 $L(0,1)$ 模式的

图9 检测系统与试件

图10 导波检测信号图. (a) $R_{MAC}=100 \text{ mm}$, $f=22 \text{ kHz}$; (b) $R_{MAC}=100 \text{ mm}$, $f=26 \text{ kHz}$; (c) $R_{MAC}=100 \text{ mm}$, $f=29 \text{ kHz}$; (d) $R_{MAC}=100 \text{ mm}$, $f=31 \text{ kHz}$; (e) $R_{MAC}=100 \text{ mm}$, $f=33 \text{ kHz}$; (f) $R_{MAC}=100 \text{ mm}$, $f=36 \text{ kHz}$

模态置信准则MAC, 并将实验信号导波反射系数与用MAC表示的反映导波反射程度的参数($R_{\text{MAC}}=1-\text{MAC}$)随频率变化曲线进行对比, 如图11所示.

从图11中可以看出, 随着频率的增大, 无论是实验信号反射系数还是用MAC表示的导波反射程度参数都呈单调减小趋势, 这与前面所得结果相吻合; 并且实验数据与MAC数据随着频率增大呈现基本相同的变化趋势, 因此验证了基于MAC计算的导波反射程度参数能够正确反映导波反射随频率变化趋势.

图11 (网络版彩图)实验反射系数与MAC方法对比图

5 结论

本文研究了L(0,1)模态导波在管道弯头处的反射特性, 分析了激励频率、弯曲半径和弯曲角度3种因素对反射系数的影响, 绘制了3种因素对导波反射系数影响的三维散点图; 提出了一种基于导波模态置信准则计算的L(0,1)模态导波管道弯头反射分析方法, 并与数值模拟和实验结果进行了对比, 结果表明:

(1) L(0,1)模态导波在管道弯头处发生模态转换, 转换成F(1,1)模态, 并且F(1,1)模态方向与弯头拱背-拱腹方向一致;

(2) 在一定范围内, 随着频率或弯曲半径的增大, 反射L(0,1)模态和F(1,1)模态幅值都呈单调减小趋势, 随着弯曲角度的增大, 反射L(0,1)模态和F(1,1)模态幅值呈现非单调变化;

(3) 用导波模态置信准则(MAC)表示的L(0,1)模态和F(1,1)模态导波反射程度随频率和弯曲半径变化趋势与数值模拟结果吻合良好, 但计算效率大大提高; 用导波模态置信准则(MAC)表示的L(0,1)模态导波反射程度随频率变化趋势与实验结果变化趋势基本一致.

本文的研究为含弯头管道L(0,1)模态导波检测提供了一定的理论指导和新的分析方法.

参考文献

- 言志信, 蔡汉成, 王群敏, 等. 导波在全长粘结锚杆中传播的有限差分数值模拟. 中国科学: 技术科学, 2011, 41: 663–669
- Sanderson R M, Hutchins D A, Billson D R, et al. The investigation of guided wave propagation around a pipe bend using an analytical modeling approach. *J Acoust Soc Am*, 2013, 133: 1404–1414
- Verma B, Mishra T K, Balasubramaniam K, et al. Interaction of low-frequency axisymmetric ultrasonic guided waves with bends in pipes of arbitrary bend angle and general bend radius. *Ultrasonics*, 2014, 54: 801–808
- 王悦民, 耿海泉, 陈乐, 等. 超声导波管道检测中伪缺陷信号识别及消除方法. 中国科学: 技术科学, 2017, 47: 137–148
- Aristégui C, Cawley P, Lowe M. Reflection and mode conversion of guided waves at bends in pipes. In: Kallisen S, Nessa C, Thompson D O, et al., eds. AIP Conference Proceedings. Montreal: AIP, 2000. 209–216
- Demma A, Cawley P, Lowe M J S. Mode conversion of longitudinal and torsional guided modes due to pipe bend. In: Thompson D O, Chimenti D E, Poore L, et al., eds. AIP Conference Proceedings. Ames: AIP, 2001. 172–179
- Demma A, Cawley P, Lowe M J S. Guided waves in curved pipes. In: Thompson D O, Chimenti D E, Poore L, et al., eds. AIP Conference Proceedings. Maine: AIP, 2002. 157–164
- Demma A, Cawley P, Lowe M, et al. The effect of bends on the propagation of guided waves in pipes. *J Pressure Vessel Technol*, 2005, 127: 328–335
- Hayashi T, Kawashima K, Sun Z, et al. Guided wave propagation mechanics across a pipe elbow. *J Pressure Vessel Technol*, 2005, 127: 322–327
- Nishino H, Yoshida K, Cho H, et al. Propagation phenomena of wideband guided waves in a bended pipe. *Ultrasonics*, 2006, 44: e1139–e1143
- Rudd K E, Leonard K R, Bingham J P, et al. Simulation of guided waves in complex piping geometries using the elastodynamic finite integration technique. *J Acoust Soc Am*, 2007, 121: 1449–1458

- 12 Bakkali M E, Lhémery A, Baronian V, et al. Guided wave propagation and scattering in pipeworks comprising elbows: Theoretical and experimental results. In: Ashton A, Toms S, Evans G, et al., eds. *Journal of Physics: Conference Series*. London: IOP Publishing, 2015. 12011
- 13 Qi M, Zhou S, Ni J, et al. Investigation on ultrasonic guided waves propagation in elbow pipe. *Int J Pressure Vessels Piping*, 2016, 139-140: 250–255
- 14 Catton P P. Long range ultrasonic guided waves for the quantitative inspection of pipelines. Dissertation of Doctoral Degree. London: Brunel University, 2009. 61–64
- 15 王秀彦, 刘增华, 孙雅欣, 等. 弯管中超声导波传播特性的研究. *北京工业大学学报*, 2006, 32: 773–777
- 16 Bakkali M E, Lhémery A, Baronian V, et al. A modal formulation for the propagation of guided waves in straight and curved pipes and the scattering at their junction. In: Ashton A, Toms S, Evans G, et al., eds. *Journal of Physics: Conference Series*. Fréjus: IOP Publishing, 2014. 12012
- 17 Demma A, Cawley P, Lowe M. Scattering of the fundamental shear horizontal mode from steps and notches in plates. *J Acoust Soc Am*, 2003, 113: 1880–1891
- 18 Galvagni A. Pipeline health monitoring. Dissertation of Doctoral Degree. London: Imperial College, 2013. 61–62
- 19 Hayashi T, Kawashima K, Sun Z, et al. Analysis of flexural mode focusing by a semianalytical finite element method. *J Acoust Soc Am*, 2003, 113: 1241–1248
- 20 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. *Ultrasonics*, 2003, 41: 175–183
- 21 Marzani A, Viola E, Bartoli I, et al. A semi-analytical finite element formulation for modeling stress wave propagation in axisymmetric damped waveguides. *J Sound Vibr*, 2008, 318: 488–505
- 22 Ewins D J. *Modal Testing: Theory and Practice*. Herts: Research Studies Press, 1984. 225–226

Research on reflection of L(0,1) guided wave from pipe elbow based on modal assurance criteria calculation

GENG HaiQuan, WANG YueMin, DENG WenLi, CHEN Le & YE Wei

College of Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China

The reflection characteristic of L(0,1) mode guided wave from pipe elbow is investigated and a new analysis method based on modal assurance criteria (MAC) is proposed in this paper to investigate reflection of L(0,1) mode guided wave from pipe elbow. The mode conversion and effect of frequency, bending radius and bending angle have been analyzed through numerical simulation method. The guided wave reflection extent caused by elbow is expressed by guided wave modal assurance criteria. The trend of reflection extent changing with frequency and bending radius has been compared with numerical results and experimental results. The results indicate that partial L(0,1) mode converts to F(1,1) mode with the orientation being identical to the extrados-intrados direction. With the increase of frequency and bending radius, the amplitude of reflected guided wave decreases monotonously. With the increase of bending angle, the amplitude of reflected guided wave changes non-monotonically. The trend of guided wave reflection extent expressed by MAC changing with frequency and bending radius is identical with the numerical results. The experimental results verify the trend further. The research results will provide theoretical guide and a new analysis method for the inspection of pipes with elbows using L(0,1) mode guided wave.

L(0,1) guided wave, pipe elbow, modal assurance criteria, reflection analysis

doi: 10.1360/N092017-00044