

T(0,1)模态导波在弯管上传播的仿真与实验

李 阳¹, 邹 云¹, 张双楠², 蔡桂喜²

(1. 郑州大学机械工程学院, 河南郑州 450001; 2. 中国科学院金属研究所, 辽宁沈阳 110016)

摘要: 由于弯管的几何形状复杂, 超声导波在弯管中的传播特性比在直管中复杂。弯管超声导波检测中, 衡量其检测有效性的一个重要参数是透过率。通过有限元模拟研究了激励频率、弯曲半径、弯管角度对 T(0,1)模态导波透过率的影响。发现: 不同激励频率的导波在弯管上有不同的透过率, 并且激励频率高的导波由于脉冲宽度小, 更易产生新的波前; 在不同的弯曲半径和弯曲角度的弯管中, 最小透过率的 T(0,1)模态导波的频率也各不一样; 随弯管角度的变化, 信号的透过率呈规律性变化。通过实验验证了不同激励频率下, T(0,1)模态导波透过率和激励频率的关系。在实际检测有弯管段的管道时, 需采用多频率检测。

关键词: 透过率; 弯管; T(0,1)模态; 传播特性

中图分类号: TB559

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2017)-05-0442-08

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2017.05.008

Numerical and experimental research on T(0,1) guided waves propagating in bended pipes

LI Yang¹, ZOU Yun¹, ZHANG Shuang-nan², CAI Gui-xi²

(1. School of Mechanical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, He'nan, China;

2. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, Liaoning, China)

Abstract: Propagation of guided waves in bended pipes is more complicated than that in straight pipes because of the complex geometry of bends. The transmission coefficient is an important factor used to evaluate the accuracy of the test. In this study, the finite-element method (FEM) is used to investigate the influences of the angle of bends, the radius of bends and the excitation frequencies on the transmission coefficients of T(0,1) guided waves. Our results show that the transmission coefficients varied with the excitation frequencies of guided waves when propagating through a bend. Given that the frequency of guided wave is high enough, new wave fronts are more easily produced after the guided wave propagating through a bend. It is also found that when guided waves propagating through a bend with the minimal transmission coefficient, their frequencies are correlated with the angle and the radius of the bend. The transmission coefficients oscillate periodically with increasing angle of the bend. The correlation between transmission coefficients and frequencies of the guided waves is verified by experimental data. In conclusion, it is suggested that guided waves propagating at various frequencies should be used to test bended pipes.

Key words: transmission coefficients; bended pipes; T(0,1) mode; propagation characteristic

0 引言

自 Gazis^[1-2]推导出空心圆管中的导波频散方程以来, 超声导波引起了科研人员的极大关注。导波在直管上的传播机制, 以及一些特征体对导波的反射已有了深入研究。近年来, 无损检测仪器公司纷纷推出了各自的导波设备, 使得超声导波检测技术进入了一个崭新的阶段。但是, 一些导波检测应用

难题仍未得到很好的解决, 需要更完善的理论指导。如: 由于超声导波在弯管上的传播特性相对直管变得复杂, 而导致超声导波在弯管和过弯管后的检测灵敏度较低。为解决这个问题, 科研人员对此进行了大量的研究。国外, Takahiro Hayashi^[3]等在准柱坐标系上建立了弯管有限元模型, 利用半分析有限元方法模拟了导波在弯头的传播过程, 减少了计算时间。A Demma^[4]等将弯管视为圆环的一部分, 利用有限元方法计算了频率和速度的关系, 画出了弯管的频散曲线, 发现导波经过弯管后的透过率和管子的形状、激励导波的频率等因素有关。R M Sanderson^[5]等将经过弯管后的信号看成是进入弯管前直管上的信号与弯管结构响应函数的卷积, 利用有限元方法分析了不同弯管的响应函数。Hideo

收稿日期: 2016-09-13; 修回日期: 2016-12-30

基金项目: 河南省教育厅高等学校重点科研项目(18A460032)

作者简介: 李阳(1988—), 男, 河南焦作人, 博士, 讲师, 研究方向为超声导波的工程化应用。

通讯作者: 李阳, E-mail: yangli@zzu.edu.cn

Nishino^[6]等利用宽频激光超声激励导波,研究了纵向模态 L(0,1)导波在弯管中转换为弯曲模态 F(1,1)的现象,弯管的弯曲角度越大,模态转换得越严重。国内,周邵萍^[7]等人研究了纵向模态 L(0,2)超声导波在 90°弯管中的传播特性,并分析了 L(0,2)模态超声导波对弯管内缺陷的检测敏感性,发现弯头外侧的缺陷更易被检测到;并建议采用多个频率进行实际检测。邓菲^[8]等人采用激励宽频导波的研究方法,可快速选择出管状结构检测的最优导波模态和激励频率,这可为弯管检测中最优激励频率的选取提供参考。王悦民^[9]等人利用磁致伸缩导波检测技术,发现弯管中的导波能量的衰减与激励频率存在密切联系。

通过以上研究可知,导波在弯管中的传播过程比较复杂,具有特殊的传播特性,如:模态转变、能量集中、透过率变化等。其中,弯管上导波的透过率 T ^[4]定义为:特定模态导波经过弯管后横截面上该模态合成信号的峰-峰值除以过弯管前信号的峰-峰值。通过导波的透过率,可反映出导波对弯管后缺陷的检测灵敏度。因此,弯管超声导波检测中,衡量其检测有效性的一个重要参数是透过率。由于 T(0,1)模态导波无频散,且 T(0,1)模态导波的质点振动只包含周向分量而不含径向和轴向分量,所以在检测有液体浸没的管道或运输液体的管道时,T(0,1)模态导波衰减减小,传播距离远,因此 T(0,1)模态是应用最为广泛的导波检测模态之一^[10]。为利用 T(0,1)模态导波检测有弯管段的管道,需要清楚地了解影响导波在弯管上透过率的因素,并观察导波在弯管中的传播现象。

本文通过一系列有限元模拟和实验,研究 T(0,1)模态导波在弯管上透过率的变化规律,并找出影响导波透过率的因素,以此来指导超声导波在工程检测中激励频率的选择。首先,利用有限元方法模拟激励频率、弯曲半径和弯曲角度对 T(0,1)模态导波经过弯管后透过率的影响。然后,通过实验验证在不同的激励频率下,导波透过率与激励频率的关系。

1 有限元模拟

1.1 有限元模型

使用有限元软件 ANSYS,模拟导波在弯管中的传播过程。为了使模拟和工程实际相符,以化工上常用的一种规格的弯管(管子外径和壁厚不变)为例建立有限元模型。管子规格:外径为 108 mm,

壁厚为 8 mm,弯管角度为 90°,弯曲半径为 0.7 m。弯管两端的直管部分长度分别为 50 mm 和 500 mm,有限元模型如图 1 所示。管子的材料为 45#钢,其杨氏模量为 $E=207\text{ GPa}$ 、密度为 $\rho=7.83\text{ kg/m}^3$ 、泊松比为 $\nu=0.3$ 。纵波声速 c_l 和横波声速 c_s 可以通过式(1)计算^[3]:

$$\begin{aligned} c_l &= \sqrt{(\lambda+2\mu)/\rho} = 5\,966\text{ m/s}, \\ c_s &= \sqrt{\mu/\rho} = 3\,189\text{ m/s} \end{aligned} \quad (1)$$

其中: $\lambda=\nu E/[(1+\nu)(1-2\nu)]$ 和 $\mu=E/2(1+\nu)$,为拉梅系数。将管子壁厚划分为 5 个单元,周向分为 144 个单元,管子轴向单元尺寸设定为 1.6 mm。最小单元尺寸 (2.4 mm×1.6 mm×1.6 mm) 长度符合 $L < \lambda_{\min}/10$,其中 L 为最小单元长度 1.6 mm, λ_{\min} 为模拟的最小波长^[11]。在本模拟研究中,激励频率范围为 30~150 kHz。计算时间步长设定为 $2.5 \times 10^{-7}\text{ s}$,满足 $\Delta t < L/c_l$,其中 c_l 为纵波声速^[11]。模型为自由边界条件。

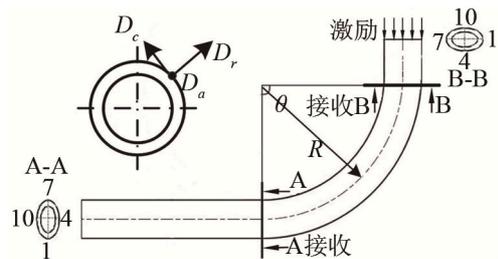


图 1 弯管模型示意图。其中, A-A 和 B-B 为接收位置, R 为弯曲半径, θ 为弯曲角度。横截面上任意质点的三个位移分量: D_a 为轴向位移, D_c 为周向位移, D_r 为径向位移。

Fig.1 Geometry of the FE model, where the position A-A and B-B are the receiving points, R represents bend radius and θ represents bend angle. Three displacement components of each node on the cross section: D_a represents axial displacement, D_c represents circumferential displacement and D_r represents radial displacement

管上每点的振动可分解为三个分量:周向位移、径向位移和轴向位移,其中周向位移和径向位移在质点所在横截面的面内,周向位移垂直于半径方向,径向位移与半径方向重合,轴向位移方向垂直于横截面与管的轴向平行。在图 1 管子的激励端所有节点上,加载相同的周向位移载荷信号,信号为加汉宁窗的 5 周期正弦函数信号,以激励出特定频率的 T(0,1)模态导波。在两个接收位置 A-A 和 B-B 的管壁上,均匀分布 12 个点接收周向位移导波信号,如图 1 所示。规定:点 1 对应的角度为 180°,点 4 对应的角度为 90°,点 7 对应的角度为 0°,点 10 对应的角度为 -90°。

1.2 激励频率与透过率的关系

为了研究激励频率 f 对 T(0,1)模态导波经过弯

管的透过率的影响, 激励频率从 20 kHz 以间隔 5 kHz 变化到 90 kHz。由于 T(0,1) 模态导波经过弯管后会有模态转换产生的其它模态分量, 但实际检测中仍以 T(0,1) 模态分量为主, 为提取经过弯管后的 T(0,1) 模态导波分量, 根据其波结构特征——周向位移在管截面上呈均匀、对称分布, 将两个接收位置的各 12 个信号相加以提取 T(0,1) 模态导波信号分量^[4,12]。将 A-A 位置提取出的 T(0,1) 模态导波周向位移信号的峰峰值 F_{A-A} 除以 B-B 位置提取的相应周向位移信号的峰峰值 F_{B-B} , 可计算出某激励频率下的透过率 T , 即: $T = F_{A-A} / F_{B-B}$ 。不同激励频率下的透过率如图 2 所示。

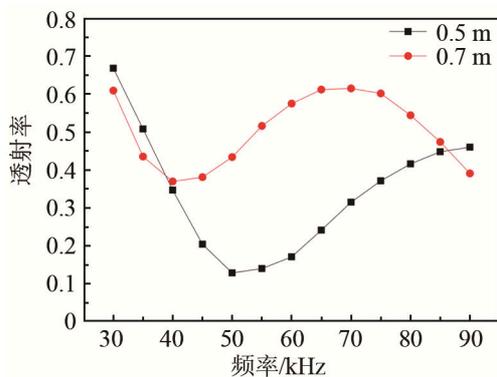


图 2 在弯曲角度 90°、弯曲半径分别为 0.5 m 和 0.7 m 的弯管上, T(0,1) 模态导波经过弯管的透过率与激励频率的关系
Fig.2 Relationship between the transmission coefficient of T(0,1) mode and the excitation frequency, where the bend angle is 90° and the bend radii are 0.5 m and 0.7 m respectively

从图 2 中可知, 不同激励频率导波经过弯管的透过率不同。当弯管弯曲半径为 0.7 m 时, 40 kHz 时的信号透过率最小为 0.35, 而 30 kHz 时的信号透过率达到 0.61。为了解其它弯管上 T 与 f 的关系, 再将模型中的弯曲半径设置为 0.5 m 进行相同的模拟。发现: T(0,1) 导波的透过率也随激励频率的变化而变化, 但在 50 kHz 时有最小值。另外, 弯曲半径为 0.5 m 弯管上大部分激励频率下的透过率比 0.7 m 的弯管小。将两个模型中得到的不同激励频率导波通过弯管后在位置 A-A 处提取的时域信号 $S_{A-A}(t)$ 分别做傅里叶变换, 结果如图 3 所示。

从图 3 中可知: 通过弯管后的 T(0,1) 信号相对于激励信号发生了中心频率偏移, 激励频率低于透过率最小值所对应的频率 f_t 时, 其中心频率是负向偏移, 高于 f_t 则正向偏移, 在 f_t 附近时则其频谱曲线具有两个峰; 在弯曲半径为 0.5 m 的弯管上, 在 f_t 附近过弯管后的 T(0,1) 信号频谱在 53 kHz 处都有波谷; 在弯曲半径为 0.7 m 的弯管上, 则在 42 kHz 处有波谷。因此 0.5 m 和 0.7 m 弯管的最低透过率所对应的激励频率分别为 53 kHz 和 42 kHz, 0.7 m 弯

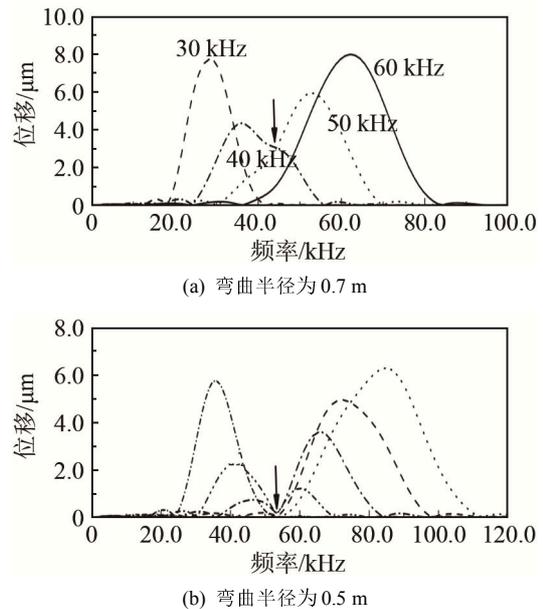
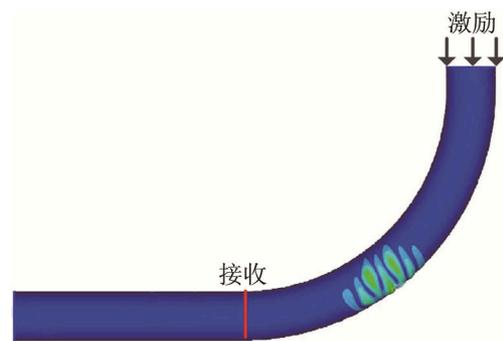


图 3 不同激励频率下, T(0,1) 导波的频域信号
Fig.3 Frequency spectrums of receiving mode T(0,1) after propagating through bends with (a) 0.7 m and (b) 0.5 m at different excitation frequencies

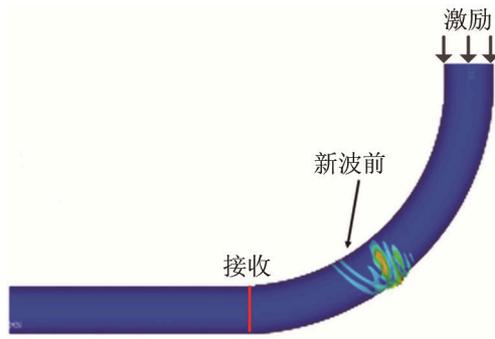
管的最小透过率比 0.5 m 弯管的最小透过率大。

根据 Brath^[13]等人和 Qi^[14]等人的研究, 导波在弯管中传播一定距离后会产生新的波前, 这是由于弯管的外侧传播距离长、内侧传播距离短, 内侧波前向外侧扩展, 传播一定距离后形成新的波前。将激励频率提高到 150 kHz, 在弯曲半径为 0.5 m、弯管角度为 90°的弯管上激励 T(0,1) 模态导波。对比激励频率为 50 kHz 和 150 kHz 两个模型, 导波在弯管上传播的形态和所提取的 T(0,1) 模态导波信号, 如图 4 所示。

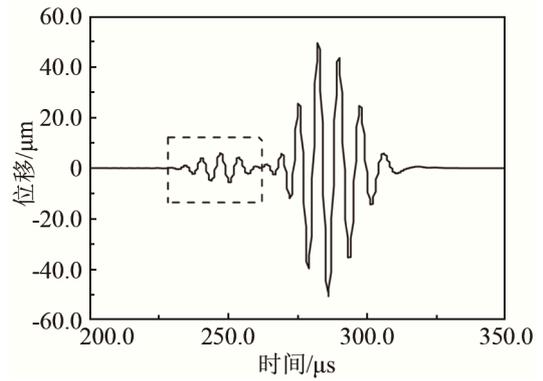
从图 4(a)和 4(b)可以看出: 激励频率为 150 kHz 相较于 50 kHz, 弯管中有新波前产生, 新波前从弯管内侧向外侧扩展。将接收位置 A-A 处的 12 个点所收到的时域波形以周向分布形式画出, 如图 4(c)和 4(d)所示。其中, 横轴代表时间, 纵轴代表角度位置, 图中颜色代表位移幅度。对比图 4(c)和 4(d)



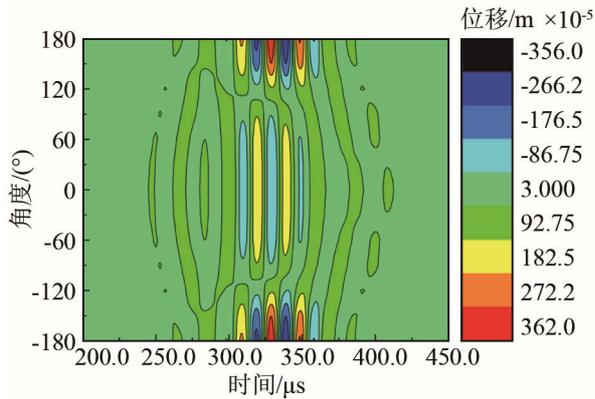
(a) 激励频率为 50 kHz, 波动位移分布图



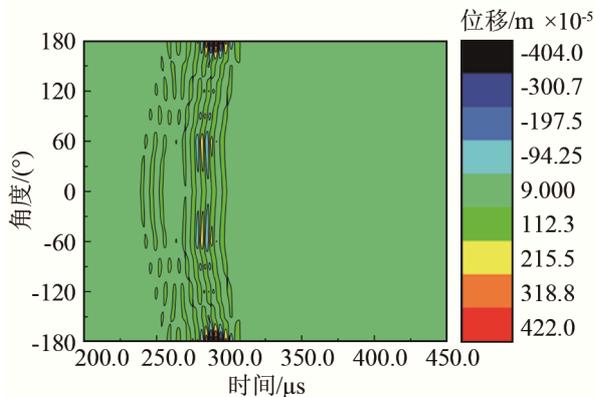
(b) 激励频率为 150 kHz, 波动位移分布图



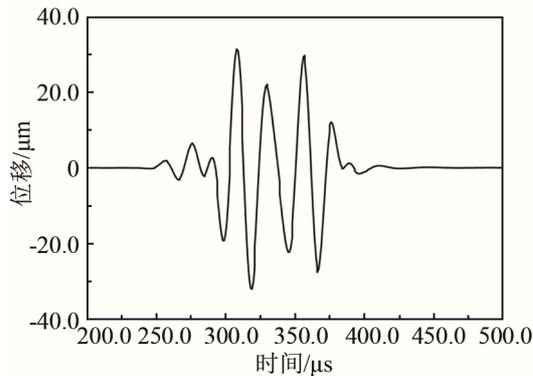
(f) 激励频率为 150 kHz, T(0,1)导波信号



(c) 激励频率为 50 kHz, 接收位置 A-A 上 12 个点的信号周向分布图



(d) 激励频率为 150 kHz, 接收位置 A-A 上 12 个点的信号周向分布图



(e) 激励频率为 50 kHz, T(0,1)导波信号

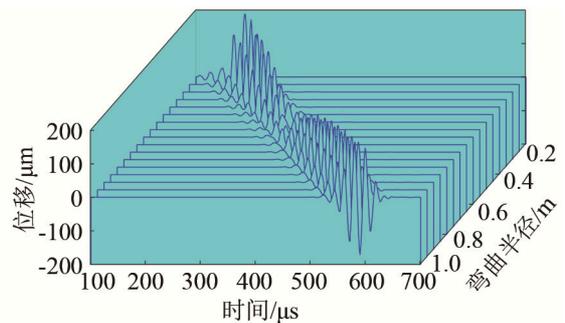
图 4 激励频率分别为 50 kHz 和 150 kHz 时: (a)与(b)是某时刻导波在弯管上的波动位移分布图; (c)与(d)是过弯管接收位置 A-A 上 12 个点的信号周向分布图; (e)与(f)是由 12 个接收信号相加所提取的 T(0,1)导波信号

Fig.4 When the excitation frequencies are respectively 50 kHz and 150 kHz, the displacement contours of the bend are shown in (a) and (b); the displacements at 12 evenly circumferential points are shown in (c) and (d); and the signals of T(0,1) mode after adding the 12 received signals are shown in (e) and (f)

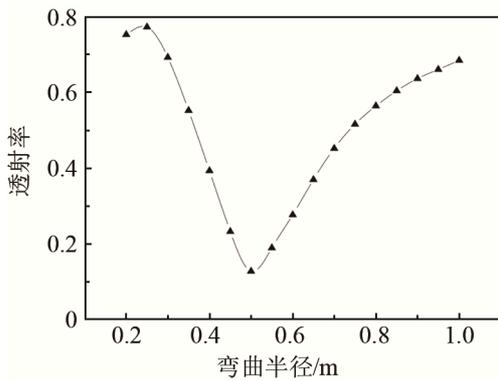
可知: 激励频率为 50 kHz 时比 150 kHz 时的 T(0,1) 导波脉冲宽度大, 各点信号严重不均衡。50 kHz 时, 由于低频导波有更大的波长, 所以相同的周期数下脉冲更宽, 那么新产生的波前和原波前未能分离开, 导致两者相互叠加形成干涉, 引起透过率的降低; 而 150 kHz 时, 由于导波脉冲较窄, 新形成的波前和原波阵面清晰可辨, 所以干涉效果较弱。因此, 150 kHz 时的透过率会大于 50 kHz 时的透过率, 如图 4(e)和 4(f)所示。在图 4(a)~4(d)中, 两种频率下的导波能量分布和集中程度也不一致, 但能量都在弯管外侧集中较强。

1.3 弯曲半径和透过率的关系

固定激励频率为 50 kHz 和弯管的角度为 90° 这两个参数, 研究不同弯曲半径对 T(0,1)模态导波传播的影响。弯曲半径从 0.20 m 以 0.05 m 的间隔变化到 1.00 m, 激励信号为 5 周期 50 kHz 的加汉宁窗正弦信号。不同弯曲半径的弯管上, 过弯管接收位置 A-A 所提取的 $S_{A-A}(t)$ 和透过率如图 5 所示。



(a) 时域信号



(b) 透射率随弯曲半径的变化曲线

图 5 在弯曲角度为 90°时, 不同弯曲半径弯管上的接收信号及透射率
Fig.5 (a)- the received signals of T(0,1) mode after propagating across the bends of 90° bend angle with different bend radii and (b)- the transmission coefficients vs. the bend radius

从图 5 中可看出: 随着弯曲半径增大, 接收位置 A-A 接收到的导波信号 $S_{A-A}(t)$ 的时间变长, T(0,1)模态导波经过弯管的透率先减小后增大, 并在弯曲半径为 0.5 m 时有最小值。将不同弯曲半径的弯管, 在接收位置 A-A 得到的时域信号 $S_{A-A}(t)$ 变换到频域上, 结果如图 6 所示。

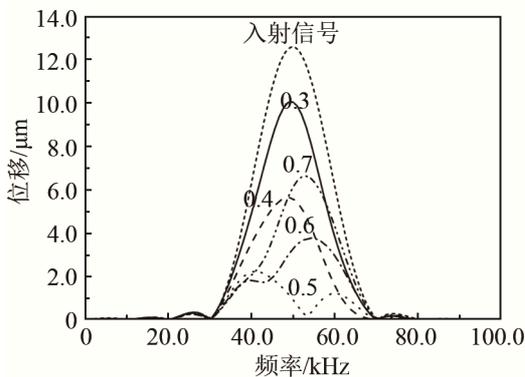


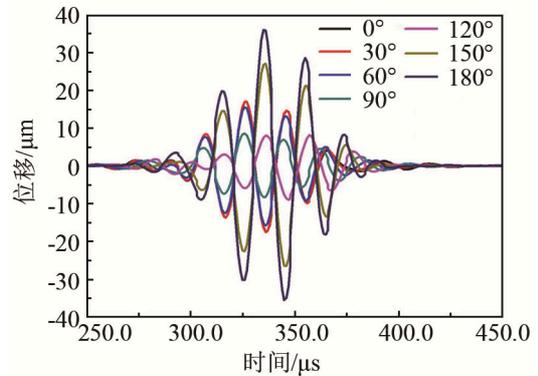
图 6 经过不同弯曲半径的弯管后, T(0,1)模态导波的频域信号
Fig.6 Frequency spectrums of the signals of guided wave T(0,1) mode after propagating across bends of different bend radii

由图 6 可知, 不同弯曲半径弯管的 $S_{A-A}(t)$ 的频谱曲线和入射波 $S_{B-B}(t)$ 的频谱曲线相比发生了变形。随着弯曲半径增加, 导波在内外侧传播的距离差 Δd 增大, Δd 增大到一定程度时(弯曲半径约为 0.5 m)相减干涉最严重, 透过率最低。频谱曲线反映了这种干涉现象。由于干涉, 频谱曲线在激励频率(也是中心频率)附近出现起伏现象, 随着曲率半径的增加, 波谷向低频方向移动。对比观察弯曲半径 0.5 m 和 1.0 m 的弯管上 A-A 位置的 12 个信号可进一步了解干涉现象的原因。由于接收端的对称性, 一周 12 个点的接收信号可用半周 7 个点的信号来代替, 如图 7 所示。

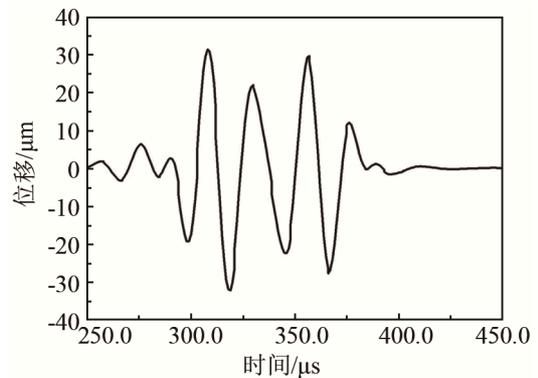
从图 7 可知: 激励频率 50 kHz 的 T(0,1)模态导波分别经过弯曲半径 0.5 m 和 1.0 m 的弯管后, 接收端的 12 个信号不仅在幅度上而且在相位上也存在差别。当 12 个信号相加提取 T(0,1)模态导波时, 由于导波经过弯曲半径 0.5 m 的弯管后的 12 个信号相位相差大(如图 7(a)), 所以形成相减干涉, 导致透过率降低; 而导波经过弯曲半径 1.0 m 的弯管后的 12 个信号相位相近(如图 7(c)), 所以透过率降低较小。

1.4 弯管角度和透过率的关系

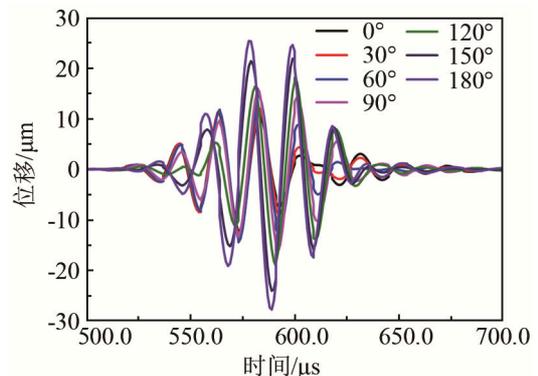
固定弯曲半径为 0.5 m 和激励频率为 50 kHz 两个参数, 研究弯管角度 θ 对 T(0,1)导波透过率的影响。弯管角度从 0°以 10°的间隔变化到 180°。T(0,1)



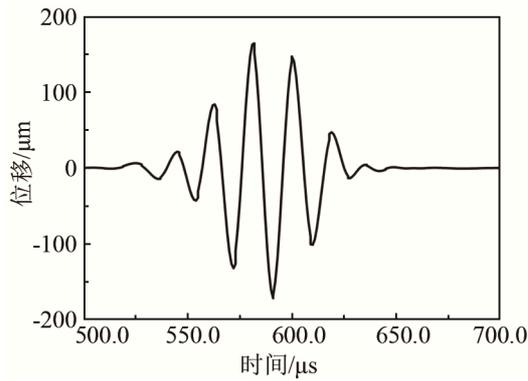
(a) 弯曲半径为 0.5 m 时, 接收端 7 点接收的时域信号



(b) 弯曲半径为 0.5 m 时, 导波 T(0,1)信号



(c) 弯曲半径为 1.0 m 时, 接收端 7 点接收的时域信号



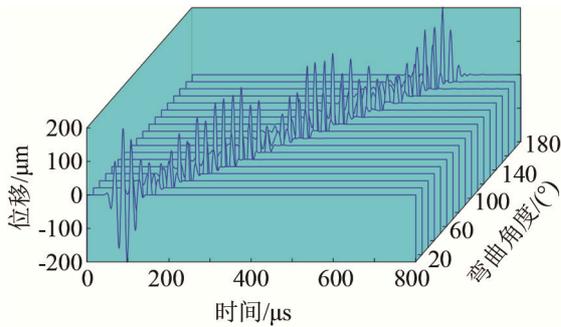
(d) 弯曲半径为1.0 m时，导波T(0,1)信号

图 7 弯管弯曲半径为 0.5 m 和 1.0 m 时，A-A 接收端 7 点接收的时域信号分别为(a)、(c)；A-A 接收端 12 个信号相加后提取的 T(0,1)导波信号分别为(b)、(d)

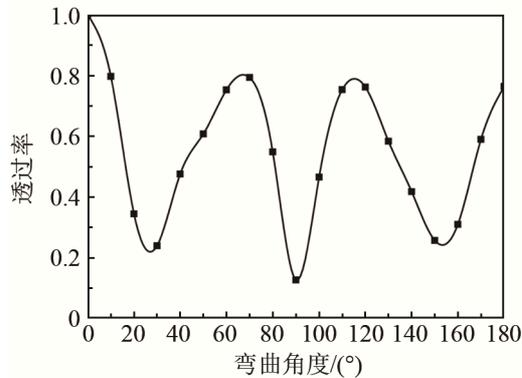
Fig.7 When the bend radius are respectively 0.5 m and 1.0 m, the seven signals received at the seven points of the A-A monitoring end are shown in (a) and (c) and the signal of T(0,1) mode from adding 12 signals received respectively at the 12 points of the A-A monitoring end are shown in (b) and (d)

模态导波经过弯管后的时域信号 $S_{A-A}(t)$ 以及计算出的透过率 T 如图 8 所示。

由图 8 可知：T(0,1)模态导波经过不同角度的弯管时，有着不同的透过率，分别在 30°、90°、150° 上形成了低谷。将各弯曲角度的 $S_{A-A}(t)$ 转变到频域上，如图 9 所示。



(a) T(0,1)模态导波的时域信号



(b) 透过率 T 随弯曲角度 θ 的变化曲线

图 8 在弯曲半径 0.5 m 的不同弯曲角度的弯管上接收的信号及透过率
Fig.8 (a)- the received signals of T(0,1) mode after propagating across the bends of 0.5 m bend radius with different bend angles and (b)- the transmission coefficient vs. the bend angle

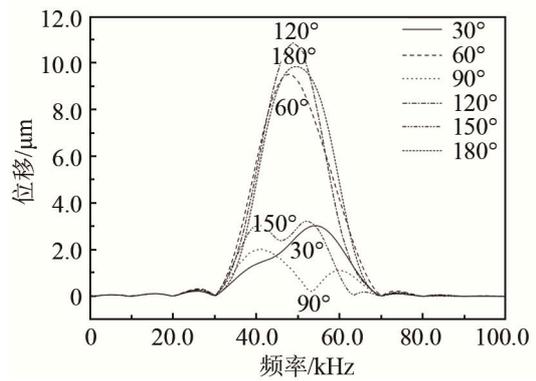


图 9 经过不同角度的弯管，T(0,1)模态导波的频谱曲线

Fig. 9 Frequency spectrums of the signals of T(0,1) mode after propagating across bends of different angles

由图 9 可知：在弯曲角度为 30°、90°和 150° 的弯管上都发生了相减干涉，并且 90°和 150°弯管上的频谱曲线都出现了波谷，且最小值出现在不同的频率上。

2 实验

2.1 实验材料及方法

实验用弯管的规格：外径 108 mm，壁厚 8 mm。弯管角度 90°，弯曲半径 0.7 m，管子的材料为 45# 钢。采用自制导波检测仪和探头环，探头环由周向均匀分布的 12 个横向切变模的压电探头组成，并可通过机械装置装卡在管子外壁上。探头使管外壁周向振动，激励 T(0,1)模态导波。导波激励信号为加汉宁窗的 5 周期正弦函数信号。在弯管的两端分别布置探头环 A 和探头环 B，如图 10 所示。探头环 B 激励 T(0,1)导波，导波经过弯管后被探头环 A 接收，其接收信号的峰峰值记为 A_I ；然后，将探头环 B 装卡在距离探头环 A 相同距离 1.1 m(弯管段的长度)的直管段上，探头环 A 接收信号的峰峰值记为 A_{II} 。那么，T(0,1)导波经过弯管后的透过率 $=A_I/A_{II}$ 。

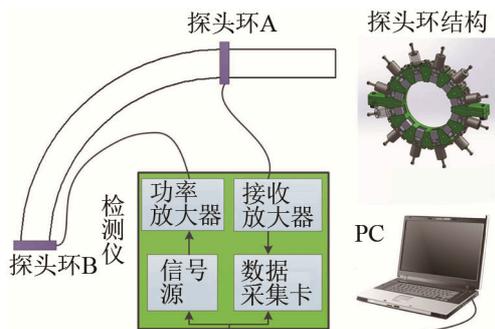


图 10 检测装置示意图

Fig.10 Setup of the guided wave inspection

2.2 实验结果

改变探头的激励频率从 25 kHz 到 85 kHz，以 5 kHz 的间隔变化。其中，激励频率为 30 kHz 的 T(0,1)模态导波信号如图 11(a)所示，从时域信号中计算得到 T(0,1)模态导波的群速度为 3 323 m/s，与理论计算得到的群速度相差不大，由此可说明管中的导波为 T(0,1)模态。对导波信号进行傅里叶变换，得到如图 11(b)中的信号频谱图。从图 11(b)中可以看出，导波信号的中心频率大致为 30 kHz，说明探头的性能良好。得到不同激励频率下透过率和激励频率的关系，如图 12 所示。

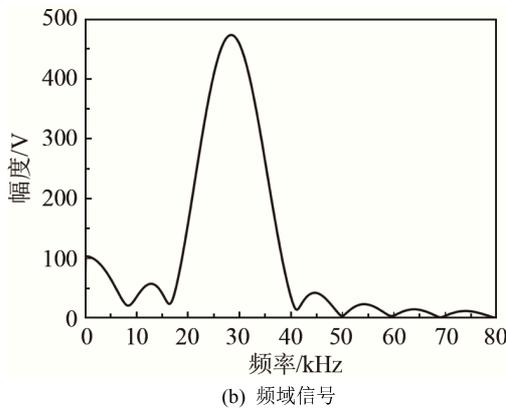
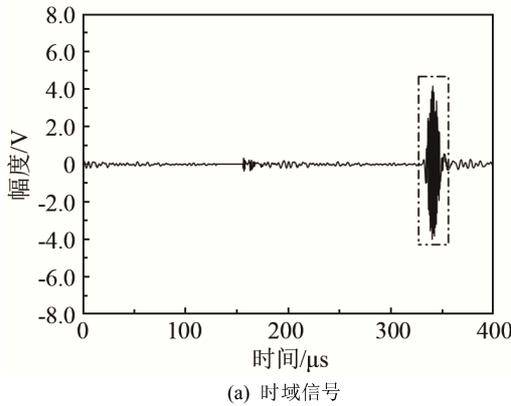


图 11 探头环 A 接收到的探头环 B 激励的 30 kHz 的 T(0,1)模态信号
Fig.11 (a)- the signal of T(0,1) mode activated by ring B and (b)- the signal received by ring A

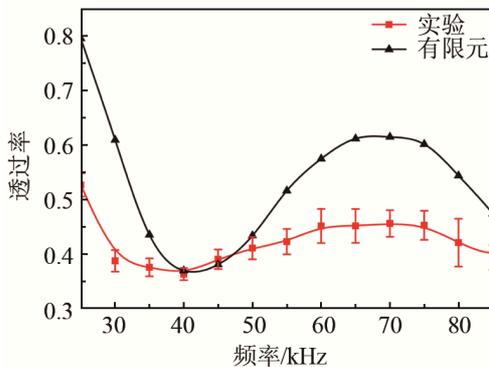


图 12 不同激励频率下的透过率
Fig.12 The relationship between the excitation frequency and the transmission coefficient

从图 12 中可知：实验结果和有限元模拟结果有一定的误差，但是在整体的变化趋势上是一致的。误差来源的可能原因：其一，由于探头环需要两次机械装卡，无法保证装卡的一致性；其二，探头环上的 12 个探头无法保证其性能完全均匀一致。因此，在提取 T(0,1)模态导波时，实验结果不能得到有限元模拟的理想结果。在实际检测中，频率选择不当就会造成透过率很小，如实验中 40 kHz 时的情况。

3 结 论

T(0,1)模态导波在经过弯管时，由于探头环安装在管子的某个截面上，导波在弯管上传播到达探头环的各个探头的时间就不同，使探头环的各通道接收的信号产生相位差异，不同的激励频率产生不同的相位差，从而形成了不同程度的干涉，造成弯管透过率的变化。

由于弯管参数不同，导致各个通道接收信号的相位差变化。因此，T(0,1)模态导波在不同弯曲半径、弯曲角度的弯管上传播时，形成不同程度的干涉，导致透过率变化。

激励频率为 50 kHz 的 T(0,1)模态导波，在弯曲角度为 90°的弯管上，其透过率随弯管角度呈周期性变化。

为了避免相减干涉的发生，提高信号的透过率，应采用多个频率来检测有弯管段的管道。

参 考 文 献

- [1] Gazis D C. 3-Dimensional investigation of the propagation of waves in hollow circular cylinder. 1. analytical foundation[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1959, 31(5): 568-573.
- [2] Gazis D C. 3-Dimensional investigation of the propagation of waves in hollow circular cylinders. 2. numerical results[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1959, 31(5): 573-578.
- [3] Hayashi T, Kawashima K, Sun Z Q, et al. Guided wave propagation mechanics across a pipe elbow[J]. J. Pressure Vessel Technol., 2005, 127(3): 322-327.
- [4] Demma A, Cawley P, Lowe M, et al. The effect of bends on the propagation of guided waves in pipes[J]. J. Pressure Vessel Technol., 2005, 127(3): 328-335.
- [5] 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]. J. Acoust. Soc. Am., 2013, 133(3): 1404-1414.
- [6] Nishino H, Yoshida K, Cho H, et al. Propagation phenomena of wideband guided waves in a bended pipe[J]. Ultrasonics, 2006, 44: 1139-1143.
- [7] 周绍萍, 张蒲根, 吕文超, 等. 基于导波的弯管裂纹缺陷的检测[J]. 机械工程学报, 2015, 51(6): 58-65.

ZHOU Shaoping, ZHANG Pugen, LÜ Wenchao, et al. Detection

- of cracks in elbow pipes using guided waves[J]. Journal Of Mechanical Engineering, 2015, 51(6): 58-65.
- [8] 邓菲, 陈洪磊, 张倍. 基于宽频激励的管型结构导波检测[J]. 机械工程学报, 2014, 50(18): 23-28.
DENG Fei, CHEN Honglei, ZHANG Xi. Pipe structure detection based on broadband guided wave excitation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(18): 23-28.
- [9] 王悦民, 宗信, 朱龙翔, 等. 多弯头管道磁致伸缩导波无损检测技术[J]. 海军工程大学学报, 2015, 27(2): 42-45.
WANG Yuemin, ZONG Lü, ZHU Longxiang, et al. Guided wave non-destructive testing technology of multi-elbow pipe based on magnetostrictive effect[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2015, 27(2): 42-45.
- [10] Alleyne D N, Pavlakovic B, Lowe M J S, et al. Rapid long-range inspection of chemical plant pipework using guided waves[J]. Insight, 2001, 43(2): 93-98.
- [11] 赵继辰, 吴斌, 何存富. 螺旋波纹管导波检测技术的数值仿真和试验研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(24): 8-13.
ZHAO Jichen, WU Bin, HE Cunfu. Numerical simulation and experimental research on helical bellows by using guided wave technology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(24): 8-13.
- [12] 程载斌, 王志华, 张立军, 等. 管道超声纵向导波裂纹检测数值模拟[J]. 应用力学学报, 2004, 21(4): 76-80.
CHENG Zaibin, WANG Zhihua, ZHANG Lijun, et al. Ma hongwei. numerical simulation of crack detection in pipes using ultrasonic longitudinal guided wave[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2004, 21(4): 76-80.
- [13] Brath A J, Simonetti F, Nagy P B, et al. Guided wave radiation from a point source in the proximity of a pipe bend[J]. 40th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation: Incorporating the 10th International Conference on Barkhausen Noise and Micromagnetic Testing, 2014, 33a & 33b(1581): 316-323.
- [14] QI Minxin, ZHOU Shaoping, NI Jing, et al. Investigation on ultrasonic guided waves propagation in elbow pipe[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2016, 139-140: 250-255.

“深海勇士”号 4 500 m 载人潜水器完成海上试验

历经 50 多天, 我国“深海勇士”号载人潜水器在南海完成全部海试试验任务后, 10 月 3 日随“探索一号”母船顺利返航三亚港。海试过程中“深海勇士”完成了不同深度的 28 次下潜, 最大深度达到 4 534 m。通过海试进一步全面检验和验证了 4 500 m 载人潜水器的各项功能和性能, 海试的成功标志着研制工作取得圆满成功。

中国科学院声学研究所是“深海勇士”号 4 500 m 载人潜水器的副总设计师单位, 负责潜水器声学系统中水声通信机、测深侧扫声呐、多普勒速度仪、避碰声呐的自主研发工作和成像声呐、定位声呐以及惯导设备的系统集成工作。在此次海试中声学系统表现优秀, 可靠实现了潜水器的通信、测绘、定位以及探测功能。其中船载水声通信机工作出色, 完成 4 500 m 深度下图像、数据、文字以及语音的高速稳定通信, 被海试领导小组和现场验收专家组评价为“超过预期”。测深侧扫声呐工作性能得到进一步提升, 在不同深度海底均完成精细测绘, 生成地形分辨率达到厘米级。国产多普勒速度仪实现潜水器的速度和对底高度测量, 性能指标突出, 工作稳定可靠。基于国产化多普勒速度仪、惯导以及声学定位设备形成的高精度组合导航系统使得潜水器具备重复定点作业能力。

现场验收专家组在海试期间对深海勇士号的国产化率进行了统计和确认, 认为国产技术和产品使“深海勇士”号在电能、潜浮速度、声学通信和自动控制方面拥有独特的优势, 这一全面国产化的努力和成功, 不仅为我国已投入使用的“蛟龙号”的技术更新、正在研制的万米载人潜器奠定了中国制造的基础, 也标志着我国在海洋大深度技术领域拥有全面自主研发能力时代的到来。

中国科学院声学研究所海洋声学技术中心杨波、刘焯瑶、梁涛、汪伟四名同志参加了这次“深海勇士”号海试, 他们精心工作、敢于负责, 以实际行动表现出“我的工作无差错, 我的岗位请放心”的担当精神。作为挺进深海的海试试航员, 4 500 m 载人潜水器副总设计师杨波下潜了 7 次, 主任设计师刘焯瑶下潜 6 次, 保障了潜水器声学系统的精准运作, 副主任设计师梁涛、汪伟在水面母船端实现了通信和定位的精心操作, 正是在中国科学院声学研究所团队的有力支撑下, “深海勇士”号载人潜水器成功实现 28 次下潜任务, 为海试的圆满成功奠定了坚实基础。