

基于 L(0,2)模态的身管损伤无损检测方法研究

高望¹, 张金², 叶丽娜², 王瑾珏¹

(1. 解放军陆军军官学院研究生管理大队, 安徽合肥 230031; 2. 解放军陆军军官学院军用仪器教研室, 安徽合肥 230031)

摘要: 火炮特别是新型火炮在现代战争中发挥巨大作用, 身管是火炮的重要组成部分, 其缺陷检测至关重要。利用 Comsol 有限元仿真软件模拟导波模态并与理论计算结果进行对比, 验证有限元仿真的正确性和可行性。在对比研究 L 模态导波和 T 模态导波的基础上, 给出一种基于 L(0,2)模态导波的身管缺陷无损检测方法, 并利用有限元仿真软件对 L(0,2)模态在存在内表面非对称缺陷的身管中的传播过程进行仿真。理论研究和仿真结果表明, 该方法可以用来识别不同种导波模态并对缺陷进行检测, 为今后身管缺陷检测奠定基础。

关键词: 超声导波; 缺陷; 身管; 纵向模态; 传播特性

中图分类号: TG115.28

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2015)-05-0407-06

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2015.05.006

Research on L(0,2) mode based nondestructive tests of barrel damage

GAO Wang¹, ZHANG Jin², YE Li-na², WANG Jin-jue¹

(1. Postgraduate Management Team, Army Officer Academy, PLA, Hefei 20031, Anhui, China; 2. Army Officer Academy, Hefei 230031, Anhui, China)

Abstract: Guns, especially new type guns play an important role in modern warfare. As an important part of gun, the barrels' damage detection is of great significance. This paper simulates ultrasonic guided waves by using finite element software—Comsol and compares the simulative result with theoretical calculation to prove the feasibility of the software. After studying and comparing the characteristics of L mode and T mode of ultrasonic guided waves, this paper puts forward a nondestructive detection method based on L(0,2) mode guided wave. The L(0,2) mode guided wave propagation characteristics are simulated when asymmetric defects exist on the inner surface of gun barrel. The research and simulation results indicate that this method can be used to recognize guided wave mode and detect defects. It is hoped that this paper can provide some instructions to future researches on barrel detection.

Key words: ultrasonic guided wave; defect; gun barrel; longitudinal mode; propagation characteristics

0 引言

火炮身管经过多次发射, 其内部的高温、高压的复杂作用过程使得身管产生多种缺陷, 主要表现为金属的剥落、烧蚀网、裂纹等^[1]。身管质量直接影响着火炮发射的安全性、可靠性、射击精度以及使用寿命, 内膛表面状况对火炮的弹道性能有决定性的影响, 进而会影响作战效能, 直接关系到战争的胜负^[2]。当缺陷积累到一定程度时还会发生炸膛现象, 会对火炮造成巨大损失, 也对人员安全产生威胁。有效的检测技术能够检测识别损伤的位置、类型和大小, 确定维护策略, 能延长火炮服役

期限, 提高火炮射击精度, 确保火炮安全性能^[3,4]。

常规的身管检测手段包括涡流、射线、渗透和磁粉探伤多种手段, 这些常规方法因为检测效率不高, 已经不能适应现代检测高精度、高效率的要求。超声导波检测技术是一种新兴的无损检测方法, 它被越来越广泛地应用于管道、复杂结构件的检测等领域, 显示出了不可比拟的优势。武林^[5]研究了超声导波在钢轨中的传播特性, 为其下一步在线钢轨检测技术提供了理论依据。孙学伟^[6]深入研究了复杂结构中导波的传播机理, 包括厚梁结构、压力容器和变截面厚壁结构(高铁轮轴), 并且研究了不同结构中不同缺陷类型对导波传播特性的影响。

将导波技术运用到身管检测中, 研究甚少。其身管参数发生变化, 复杂的作用过程使得缺陷类型也有所不同, 在借鉴前人经验的基础之上, 本文提出基于 L(0, 2)模态导波检测火炮身管的方法, 可有效检测身管缺陷, 提高检测效率。

收稿日期: 2014-11-19; 修回日期: 2015-02-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11274199)。

作者简介: 高望(1990—), 男, 江苏南京人, 硕士研究生, 研究方向为火炮身管无损检测。

通讯作者: 高望, E-mail: 176583166@qq.com

1 身管超声导波无损检测方法

研究超声导波在圆柱体结构中传播时^[7], 身管示意图如图 1 所示。图中, a 、 b 分别为圆柱体内外半径。

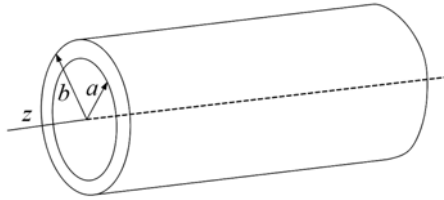


图 1 身管示意图
Fig.1 Barrel diagram

其边界条件为:

$$\sigma_{rr} = \sigma_{rz} = \sigma_{r\theta} = 0, \quad r = a, r = b \quad (1)$$

采用柱坐标系进行讨论。假设传播时三个位移分量分别是:

$$\begin{cases} u_r = U_r(r) \cos n\theta \cos(\omega t + \varepsilon z) \\ u_\theta = U_\theta(r) \cos n\theta \cos(\omega t + \varepsilon z) \\ u_z = U_z(r) \cos n\theta \cos(\omega t + \varepsilon z) \end{cases} \quad (2)$$

式中: n 表示周向阶数; ε 是波数; ω 是圆频率; $U_r(r)$ 、 $U_\theta(r)$ 、 $U_z(r)$ 是相应的位移幅度。

利用 Helmholtz 分解, 将质点的位移矢量分解为标量势函数 ϕ 和矢量势函数 \mathbf{H} :

$$\mathbf{u} = \nabla\phi + \nabla \times \mathbf{H} \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{H} = 0 \quad (4)$$

求解超声导波的位移场, 归根结底是求解式(5)所示的频散方程:

$$D = \begin{vmatrix} C_{11} & C_{12} & \cdots & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & \cdots & C_{26} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{ij} & C_{62} & \cdots & C_{66} \end{vmatrix} = 0 \quad (5)$$

其中: C_{ij} 与管径尺寸(内径 a 、外径 b)、材料的 Lames 常数(λ 、 μ)、密度 ρ 和频率 ω 有关。

当 $n=0$ 时, 超声波的模式为轴对称, 则频散方程可以分解为 2 个子行列式的积:

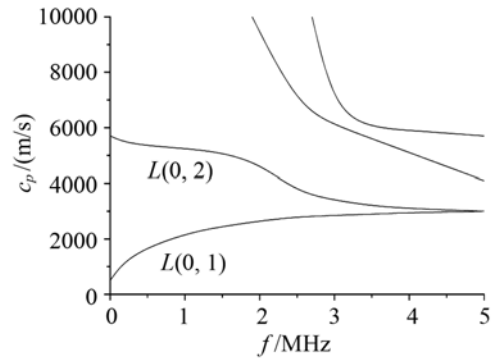
$$D = D_1 \cdot D_2 = 0 \quad (6)$$

$$\text{其中, } D_1 = \begin{vmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{14} & C_{15} \\ C_{31} & C_{32} & C_{34} & C_{35} \\ C_{41} & C_{42} & C_{44} & C_{45} \\ C_{61} & C_{62} & C_{64} & C_{65} \end{vmatrix}, \quad D_2 = \begin{vmatrix} C_{23} & C_{26} \\ C_{53} & C_{56} \end{vmatrix}.$$

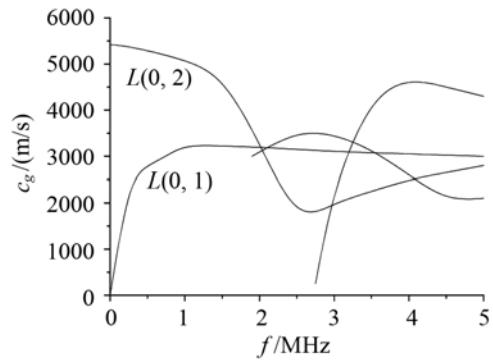
$U_z(r)$ 的解分别对应于轴对称纵向模式 $L(0, m)$ 和扭转模式 $T(0, m)$ 。对于纵向轴对称模式, 其质点位移无周向分量, 即 $u_\theta = 0$; 而对于扭转模式, 其质

点位移只有周向分量, 即只有 $u_\theta \neq 0$ 。

正在服役的某型武器身管, 其参数为内半径 $a=49$ mm, 外半径 $b=50$ mm。材料参数为: 杨氏弹性模量 E 为 207×10^9 Pa, 泊松比 μ 为 0.3, 质量密度 $\rho=7800$ kg/m³。将身管参数代入式(5)的频散方程, 计算得到的 L 模式导波的相速度 c_p 、群速度 c_g 的频散曲线如图 2 所示。



(a) 相速度



(b) 群速度

图 2 L 模式导波的频散曲线

Fig.2 Dispersion curves of the L mode guided waves

为了避免在特定激发频率下身管中出现多种模式导波, 增加识别难度, 且从图 2 中可以发现 $L(0, 2)$ 模式导波在低频区域的频散曲线较为平滑, 不会出现频散现象。综合考虑, 最终选用导波的激发频率为 250 kHz。理论上, 可以在身管中激发出 $L(0, 2)$ 模式导波, 用于检测身管。从图 2 可知, 在 250 kHz, $L(0, 2)$ 模式的群速度为 $c_{g1}=5388.5$ m/s, $L(0, 1)$ 模式导波的群速度为 $c_{g2}=2478.84$ m/s。

2 身管导波有限元建模

Comsol Multiphysics 是一款有限元分析软件, 它是以有限元法为基础, 通过求解偏微分方程(单场)或偏微分方程组(多场)来实现真实物理现象的仿真, 可以针对超大型的工程问题进行高效的求解

并快速产生精确的结果。有限元方法是一种非常有效的分析方法。它可直观反应波的传播过程和声场特性, 并可以模拟在应力及缺陷各种情况下的波的传播。

选取某型武器身管进行有限元建模, 其参数为内半径 $a=49\text{ mm}$, 外半径 $b=50\text{ mm}$ 。材料参数为: 杨氏弹性模量 E 为 $207 \times 10^9\text{ Pa}$, 泊松比 μ 为 0.3 , 质量密度 $\rho=7800\text{ kg/m}^3$ 。

2.1 模型建立

Comsol Multiphysics 仿真环境简化了建模过程的所有步骤——模型定义、网格划分、指定物理、求解、最后进行结果的可视化处理。

通常, 利用纵向模态导波对身管进行检测。利用压电材料激励 L 模态导波, 通过逆压电效应和正压电效应, 电压转换成沿某向振动施加在身管表面, 产生纵向模态超声导波。但是这种压电效应的仿真原理较为复杂, 对计算机性能和计算时间的要求都比较高。这里采用等效方法, 直接在身管表面施加轴向作用力, 通过观察质点的位移情况来代替超声导波的振动情况。这样大大降低了仿真要求, 也可以得到直观的实验结果^[8]。

利用 Comsol 的几何绘图模块对身管建模, 得到的模型结果如图 3 所示。

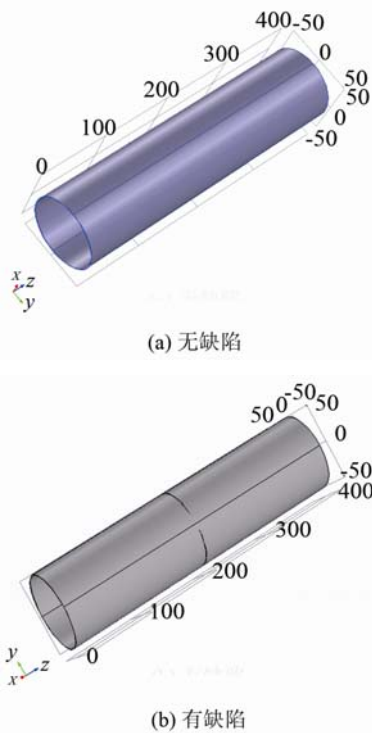


图 3 身管模型
Fig.3 Barrel models

为了研究身管存在缺陷时导波的传播过程, 本文主要研究裂纹缺陷。身管中间距离激励端 199.5

mm 处设置一环形周向裂纹, 其周向尺寸为 100% 身管周向长度, 深度为 50% 身管壁厚, 轴向宽度为 1 mm 。

2.2 设置边界条件求解计算

在身管一端施加沿身管轴向的经汉宁窗调制的 5 周期单音频正弦信号, 作为声激励源。施加力的表达式如下:

$$F = \begin{cases} 50 \sin(2\pi ft)[1 - \cos(2\pi ft/n)], & t < n/f \\ 0, & t > n/f \end{cases} \quad (7)$$

其中, $f=250\text{ kHz}$, $n=5$ 。激励信号的波形如图 4 所示。

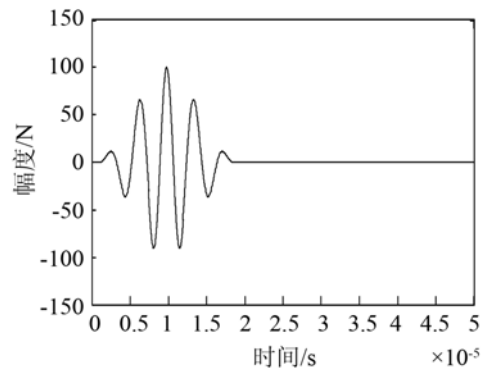


图 4 激励信号波形图
Fig.4 Excitation signal

Comsol 在求解计算时, 对网格的划分方式有较高的要求, 若网格划分过大, 会造成较大的误差, 得到的结果不尽如意。若网格划分偏小, 那么将耗费巨大的时间和精力, 降低计算效率。在这里, 经过多次仿真计算反复验证, 最终确定将网格大小定为波长的 $1/100$, 在此基础之上, 对于在身管缺陷部位加细化网格, 便于更加仔细地研究缺陷的存在对导波的传播产生的影响。计算之前, 首先要设置时间步长, 要求保证在时间步长之内导波传播在一个网格之内, 即:

$$v \times t < m \quad (8)$$

其中: t 为时间步长; v 为导波的传播群速度; m 为单元格大小。

这样可以提高精度, 保证仿真的正确性, 所以选用时间步长为 0.05 us 。

3 身管导波传播特性仿真

3.1 两种导波的传播特性仿真

超声导波主要分为纵向模态、扭转模态和弯曲模态, 前两种模态为轴对称而弯曲模态为非轴对称。在利用导波检测身管时, 由于弯曲模态的非轴

对称性，在传播过程中会发生模态转换现象，会提高检测难度。所以在一般的检测中，选用纵向模态和扭转模态，本文主要介绍如下：

(1) 纵向模态

利用 Comsol 仿真 $L(0, 2)$ 模态导波的传播过程如图 5 所示。

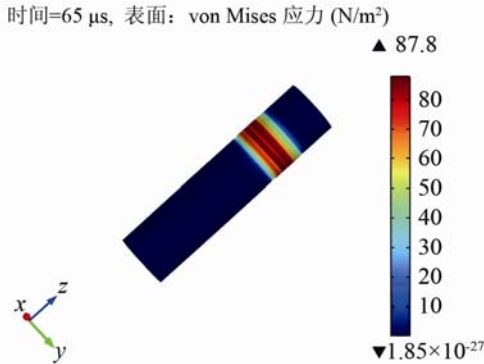


图 5 $L(0, 2)$ 模态传播示意图
Fig.5 Propagation of $L(0, 2)$ mode guided wave

图 5 中右侧颜色条上不同的颜色代表位移大小，这样在身管中各个位置的位移大小可以直观地显示出来。 $L(0, 2)$ 纵向模态传播可以明显看出是调制后的激发信号，方向性强，能量泄漏小。

$L(0, 2)$ 模态导波在传播过程中，轴向(z 向)、径向(r 向)、周向(ϕ 向)三个方向的位移图如图 6 所示，图中单位为 mm。

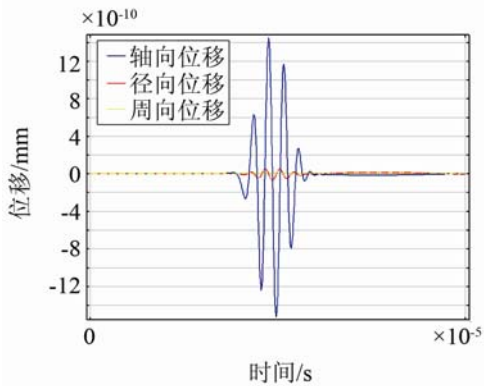


图 6 $L(0, 2)$ 模态各向位移图
Fig.6 Displacements of $L(0, 2)$ mode guide wave

图 6 中，蓝色实心线是 $L(0, 2)$ 模态导波的轴向位移，红色虚线代表的是 $L(0, 2)$ 模态导波的径向位移，黄色折线代表 $L(0, 2)$ 模态导波的周向位移，周向位移几乎为零。 $L(0, 2)$ 模态导波在传播过程中只有轴向与径向位移，没有周向位移，与理论计算结果相一致^[9]。且径向位移相对轴向位移较小，导波在传播过程中径向能量泄漏较小，可以传播较远的距离，符合身管导波检测长距离一次性检测的要求，大大地提高了检测效率。

(2) 扭转模态

利用 Comsol 仿真 $T(0, 1)$ 扭转模态导波的传播过程如图 7 所示。

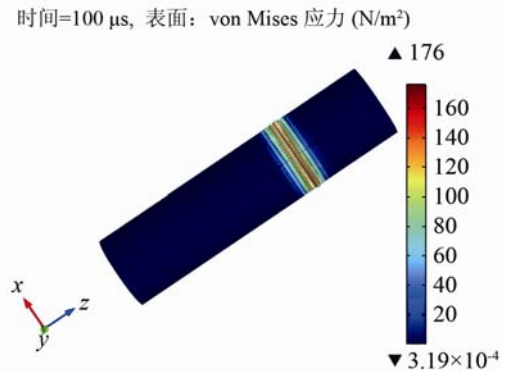


图 7 $T(0, 1)$ 模态传播示意图
Fig.7 Propagation of $T(0, 1)$ mode guided wave

同理，可以通过观察该模态导波各向位移图得出结论，该模态导波的质点振动方向沿身管周向，符合理论研究。然而，在实际检测中，由于 $T(0, 1)$ 模态导波激发需要压电片沿身管整周分布，并且要求激发方向为切向，这样并不容易实现，所以一般不采用此模态用于身管检测。

3.2 缺陷身管检测仿真

在对比 L 模态和 T 模态之后，本文研究导波对存在内表面裂纹缺陷的身管进行检测。缺陷位于身管中间距离激励端 199.5 mm 处，其周向尺寸为 100%身管周向长度，深度为 50%身管壁厚，轴向宽度为 1 mm。在身管的非激励端内壁上设置一观察点，观察到的波形如图 8 所示。

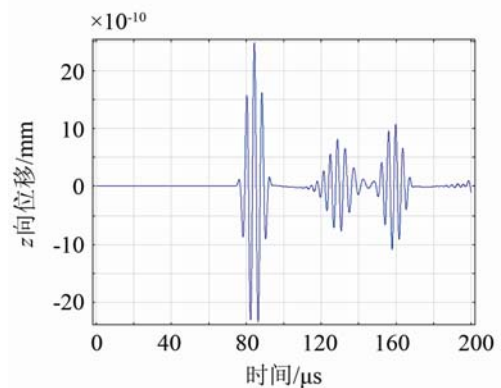


图 8 有缺陷身管管端观察点位移图
Fig.8 Observation point's displacement at the end of a defective barrel

按照边界轴向激励方式在身管中激发出 $L(0, 2)$ 模态导波，波形图中出现的第一个波形为所要激发的 $L(0, 2)$ 模态。从图中可以看出，第一个波形的起振点大约在 75 μ s，由传播距离 400 mm 可得 $L(0, 2)$ 模态群速度为：

$$c'_{g1} = s/t = 400 \text{ (mm)} / 75 \text{ (us)} = 5333.3 \text{ m/s} \quad (9)$$

由该模型身管的频散曲线图中可以看出，在 250 kHz，L(0, 2)模态的群速度为 $c_{g1} = 5388.5 \text{ m/s}$ ，误差在 1%左右，验证了仿真的可行性。

由图 8 进一步分析可知，在第一个波形出现之后，相继出现了两种波包，这充分说明了 L(0, 2)模态导波在遇到内表面裂纹缺陷后发生了模式转换^[10]。由于缺陷的位置位于身管的中间，所以用同样的方法可以计算得到第二个波包传播的群速度约为 $c'_{g2} = 2456.4 \text{ m/s}$ 。经过与频散曲线图的对比，可以发现在激励频率为 250 kHz 的情况下，L(0, 1)模态导波的群速度为 $c_{g2} = 2478.84 \text{ m/s}$ ，此为 L(0, 1)模态导波。

利用 L(0, 2)模态导波对存在内表面非对称缺陷的身管进行检测，传播在 $t = 66 \text{ us}$ 时，导波在身管内的传播特性如图 9 所示。

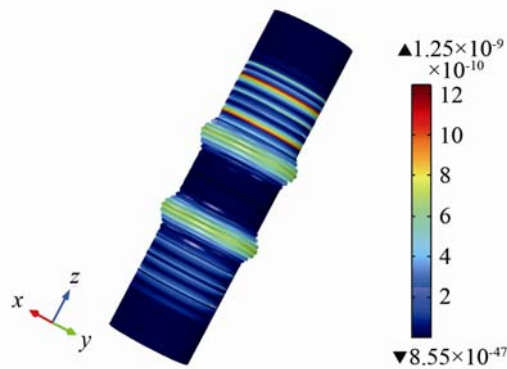


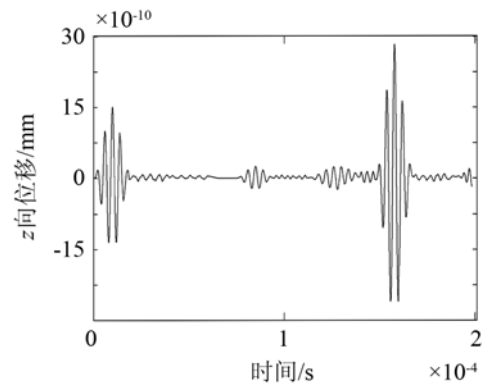
图 9 L(0, 2)模态在有缺陷身管中传播示意图
Fig.9 Propagation of L(0, 2) mode guided wave in defective barrel

图 9 中右侧颜色条表示不同颜色代表了不同的位移大小。从图中可以很明显的看出：L(0, 2)模态在传播经过外表面非对称缺陷后，大部分通过透射成 L(0, 1)和 L(0, 2)模态，小部分通过反射同样转换为 L(0, 1)和 L(0, 2)模态，并且由于 L(0, 2)的群速度在 250 kHz 的激励频率下为 L(0, 1)群速度的两倍，所以 L(0, 2)模态传播始终在 L(0, 1)前面，这样的仿真很好地验证了理论的正确性^[11]。

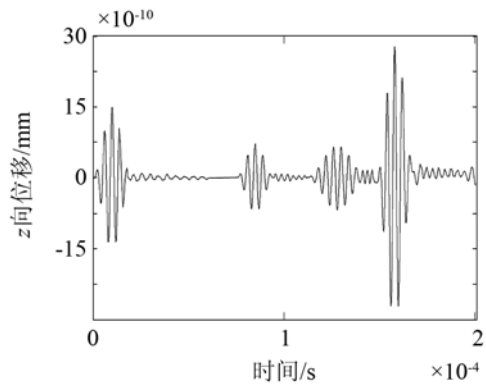
为了进一步研究裂纹深度对导波传播的影响。现设置不同的裂纹深度分别为身管壁厚的 10%、20%、30%、40%、50%。在身管激励端内壁上观察点观察得到的波形如图 10 所示。

观察得到一次缺陷回波的幅值随着裂纹深度的变化有所改变。这里建立裂纹深度-回波最大幅值曲线，用以观察它们之间的关系，如图 11 所示。

从拟合结果看出，一次缺陷回波的最大幅值随着裂纹深度的增大而增大，两者呈二次多项式关系。这个结论为今后的实际检测打下了基础。



(a) 裂纹深度为壁厚的 20%



(b) 裂纹深度为壁厚的 40%

图 10 不同裂纹深度下激励端观察点位移
Fig.10 Observation point's displacement the excitation of the barrel with different depth(a: 20%; b: 40%)

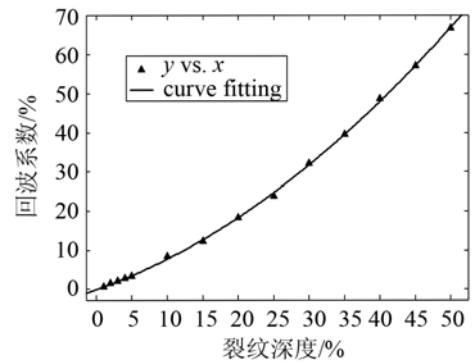


图 11 拟合曲线图
Fig.11 Fitted curve

4 结论

通过理论计算和仿真结果对比，本文主要得出以下三点结论：

- (1) 选定激励频率为 250KHz 的 L(0,2)模态导波检测火炮身管，具有传播速度快距离远、不易出现频散、较容易激发等优点。
- (2) 利用 Comsol 有限元仿真软件对身管中 L 模态和 T 模态导波进行仿真，直观显示其传播特性

及其各向位移,与理论计算结果对比,验证仿真的可行性。

(3) 在仿真 $L(0, 2)$ 模态导波在身管中传播特性的基础上,研究了当身管中存在内表面非对称缺陷时导波的传播过程。发现 $L(0, 2)$ 模态大部分透射为 $L(0, 2)$ 、 $L(0, 1)$ 模态导波,少部分反射为 $L(0, 2)$ 、 $L(0, 1)$ 模态导波,为今后利用 $L(0, 2)$ 模态导波检测身管缺陷奠定了基础。

参 考 文 献

- [1] 管怀建,唐亮,刘霞.火炮身管内膛烧蚀现象研究[J].火力与指挥控制,2013,38(3):131-133.
GUAN Huaijian, TANG Liang, LIU Xia. Research on erosion phenomenon of cannon barrel interior[J]. Fire Control & Command Control, 2013, 38(3): 131-133.
- [2] Ian A. Understanding and Predicting Gun Barrel Erosion[R]. Australia: Technical Report DSTO, 2005.
- [3] Pavlopoulou S, Worden K, Soutis C. Structural health monitoring and damage prognosis in composite repaired structures through the excitation of guided ultrasonic waves[J]. Health Monitoring of Structural and Biological Systems 2013, Proc. of SPIE, 2013, 8695(4): 1-15.
- [4] Lothar Gaul, Helge Sprenger, Christoph Schaal, Stefan Bischoff. Structural health monitoring of cylindrical structures using guided ultrasonic waves[J]. Acta Mech. 2012, 223: 1669-1680.
- [5] 武林.超声导波在钢轨中传播特性的仿真方法研究[D].北京:北方交通大学,2013.
WU Lin. Research on simulation methods of ultrasonic wave propagation characteristics in rail[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013.
- [6] 孙学伟.复杂结构中导波的传播机理与结构损伤识别研究[D].上海:上海交通大学,2013.
SUN Xuwei. Research on propagation of guided waves in complex structures and its application for damage detection[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2013.
- [7] 何存富,李隆涛,吴斌.超声导波在管道中传播的数值模拟[J].北京工业大学学报,2004,30(2):129-133.
HE Cunfu, LI Longtao, WU Bin. Numerical Simulation of Guided Ultrasonic Wave Transmitted in Pipe[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2004, 30(2): 129-133.
- [8] 黄松岭,王坤.电磁超声导波理论与应用[M].北京:清华大学出版社,2013.
HUANG Songling, WANG Kun. Theory and application of electromagnetic ultrasonic guided wave[M]. Beijing: Qinghua University Press, 2013.
- [9] Mu J, Zhang L, Rose J L. Defect circumferential sizing by using long range ultrasonic guided wave[J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2007, 22(4): 239-253.
- [10] Lowe M J S, Alleyne D N, Cawley P. The mode conversion of a guided wave by a part-circumferential notch in a pipe[J]. Journal of Applied Mechanics, 1998, 65: 649-656.
- [11] ZHENG Mingfang, LU Chao, CHEN Guozhu, et al. Modeling three-dimensional ultrasonic guided wave propagation and scattering in circular cylindrical structures using finite element approach[J]. Physics Procedia, 2011, 22: 112-118.

· 简 讯 ·

第四届上海-西安声学学会学术会议在常州召开

2015年上海-西安声学学会第四届声学学术交流会议于10月29日至11月1日在地处长江之南、太湖之滨的江苏省常州市召开。来自同济大学、陕西师范大学、河海大学、中国科学院声学研究所东海研究站、中船重工集团公司第726研究所、复旦大学、华东理工大学、上海理工大学、西北核技术研究所、广东湛江91388部队、海军驻无锡地区军事代表室、南京同韵声学科技有限公司等10多个高校和科研单位的声学科技工作者和研究生共计50多人出席了会议,开展了学术交流。大会开幕式上,上海市声学学会理事长孟昭文研究员为大会致辞。会上由上海市声学学会龚农斌秘书长和同济大学钱梦騫教授为第二届“魏墨盒声学奖”获得者同济大学毛东兴教授、中国科学院声学研究所东海研究站许伟杰研究员颁发了“魏墨盒声学奖”证书。

“魏墨盒声学奖”获奖者同济大学毛东兴教授和中国科学院声学研究所东海站许伟杰研究员在会上分别作了“地铁激发低频噪声烦恼度的影响及评价”和“多普勒计程仪湿端安装研究”的学术报告,介绍了他们在声学研究中取得的成果和今后的工作计划。

经组委会评审,本次会议录用学术论文共32篇,分为“超声物理和物理声学”、“检测声学与水声学”、“声学器件与算法”、“语音噪声与控制”四个专题进行学术交流。与会代表发言积极,气氛热烈。

上海-西安声学学术会议每两年举行一次,以促进东西部两大城市和区域的声学技术交流合作。本次会议由上海市声学学会、西安市声学学会主办,同济大学声学研究所、河海大学常州校区和常州西太湖明都国际会议中心有限公司承办,江苏省声学学会协办。经协商,2017年第五届上海-西安声学学术会议拟将在陕西省举行。

上海市声学学会