

# 火炮身管超声导波频散特性及传感器配置

张金, 王鑫, 赵亮

(陆军炮兵防空兵学院, 安徽合肥 230031)

**摘要:** 超声导波检测技术具有检测距离远、效率高的优点, 适用于检测火炮身管等圆管类结构, 具有突出的军事应用价值和前景。首先对圆管超声导波理论进行推导, 并对身管损伤的几种常见类型进行分析研究。采用数值计算的方法绘制频散曲线, 通过分析其频散特性对导波检测频率进行优选, 初步得到了最佳的检测频率范围; 其次着重对传感器种类选择、数量及分布方式与导波传播特性的关系进行研究。实验表明, 导波检测的最佳频率范围为 0~300 kHz, 且导波弯曲模态一般不宜作为检测模态; 传感器数量的增加不仅增强了激励信号的强度, 还有效抑制了身管中导波的频散。

**关键词:** 武器身管; 超声导波; 频散特性; 激励频率; 导波传感器

中图分类号: O426

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2019)-04-0403-05

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2019.04.008

## Dispersion characteristics of ultrasonic guided waves and sensor configuration in gun barrel

ZHANG Jin, WANG Xin, ZHAO Liang

(Army Academy of Artillery and Air Defence Force, Hefei 230031, Anhui, China)

**Abstract:** Ultrasonic guided wave detection technology has the advantages of long detection distance and high efficiency. It is very suitable for the detection of round pipe structures such as gun barrel, and has outstanding military application value and prospects. In this paper, the theory of ultrasonic guided wave of circular tube is first deduced, and the basic principle of detection is described with a certain type of gun barrel as the research object. The dispersion curve is plotted by numerical calculation method. The frequency of the guided wave is optimized by analyzing its dispersion characteristics, and the optimal detection frequency range is preliminarily obtained. Secondly, the relationship between the type selection, number and distribution mode of sensors and the guided wave propagation characteristics are studied. Experiments show that the best frequency range for guided wave detection is 0~300kHz, and the guided wave bending mode is generally not suitable for detection mode. The increase in the number of sensors not only enhances the strength of the excitation signal, but also effectively suppresses the dispersion of guided waves in the gun barrel.

**Key words:** gun barrel; ultrasonic guided wave; dispersion characteristics; excitation frequency; guided wave sensor

## 0 引言

超声导波因具有传播范围广、距离远、效率高以及抗干扰能力强等优点, 是无损检测领域的研究热点, 适用于武器装备上一些圆柱类关键部件(身管、轴承、装甲车辆扭力轴等)的结构健康检测, 具有很高的军事应用价值, 受到国内外的广泛关注<sup>[1]</sup>。导波在遇到缺陷或者结构不连续时, 会产生缺陷回波信号, 回波信号中携带了结构缺陷的相关信息<sup>[2-5]</sup>。但是, 由于火炮身管几何参数以

及结构不连续的影响, 导波会发生频散现象<sup>[6]</sup>, 导致信号幅度迅速衰减, 使得缺陷的回波信号淹没于噪声之中, 降低了检测的灵敏度。针对以上问题, 本文以某型身管为研究对象, 首先分析了身管的几种常见损伤, 对超声导波在圆管结构传播的频散现象进行分析研究; 其次, 根据导波检测原理进一步研究实际检测时传感器数量对导波频散现象的影响。

## 1 身管导波频散方程

火炮身管通常可视作各向同性的弹性圆管介质。身管中导波的传播满足弹性动力学方程 Navier-Stokes 方程<sup>[7]</sup>:

$$\mu \nabla^2 \mathbf{u} + (\lambda + \mu) \nabla \nabla \cdot \mathbf{u} = \rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} \quad (1)$$

收稿日期: 2018-03-16; 修回日期: 2018-04-28

基金项目: 装备预研基金(6140004030116JB91001)

作者简介: 张金(1973—), 男, 安徽潜山人, 博士研究生, 研究方向为超声导波无损检测。

通讯作者: 张金, E-mail: jgxyzhangjin@163.com

式中,  $\mathbf{u}$  为时间谐振位移矢量,  $\rho$  为材料密度,  $\mu$  和  $\lambda$  为拉梅常量。

假设身管处于真空环境下, 内外表面没有位移约束, 内外表面上垂直应力  $\sigma_{rr}$  和两个切应力  $\sigma_{r\theta}$ 、 $\sigma_{r\phi}$  的关系为<sup>[5]</sup>

$$\sigma_{rr} = \sigma_{r\theta} = \sigma_{r\phi}, \quad r = a, b \quad (2)$$

式中,  $a$ 、 $b$  分别为身管的内、外半径。

根据武器身管的自由边界条件可求解得频散方程:

$$|D_j(k, \omega)| = 0 \quad (i, j = 1, 2, 3, 4, 5, 6) \quad (3)$$

式中,  $\omega$  为频率,  $k$  为波数。

当周向阶数  $n=0$  时, 方程(3)的解对应武器身管中导波的纵向模态  $L(0, m)$  和扭转模态  $T(0, m)$ ; 当周向阶数  $n \neq 0$  时, 方程(3)的解表示为弯曲模态导波  $F(n, m)$ , 其中  $m$  为模数。

## 2 身管超声导波检测方法

### 2.1 身管损伤机理分析

身管损伤主要分为裂纹损伤、面积损伤、热烧蚀 3 种形式。裂纹损伤主要由火药气体对内壁的冲击造成, 久而久之会形成网状裂纹; 面积损伤主要是在网状裂纹损伤的基础上, 由于弹带的摩擦和高温高压气体的冲蚀, 部分表面涂层被气体带走, 形成面积缺陷, 同时弹带也会在高温高压的气体影响下, 部分熔化, 留在膛线里, 冷却下来后形成膛膛挂铜; 热烧蚀主要是内壁在高温高压气体的作用下, 受热软化, 同时发生部分化学反应生成白体, 使内膛强度降低, 部分白体会随着火炮射出时的高温气流带出炮管, 划伤内壁。身管损伤类型的详细分类如图 1 所示。3 种类型的损伤均会导致身管横截面发生变化, 适宜采用超声导波进行检测。

### 2.2 身管超声导波检测方法

身管超声导波检测原理如图 2 所示。

针对一定尺寸身管对导波的传播特性进行计算, 通过对传播特性的分析进而选择适合于身管检测的导波模态和频率。利用激励传感器激励出沿身管轴向传播的导波, 身管中传播的导波遇到裂纹、面积缺陷时会发生反射, 产生的反射回波由接收传感器进行接收, 对接收到的缺陷回波进行特征提取及定量诊断即可获得身管缺陷信息。

### 2.3 身管中导波频散特性研究

导波传播速度随着频率变化而变化的现象称为导波的频散现象。超声导波的频散会使得导波能量迅速地衰减, 检测精度严重降低, 信号中缺陷

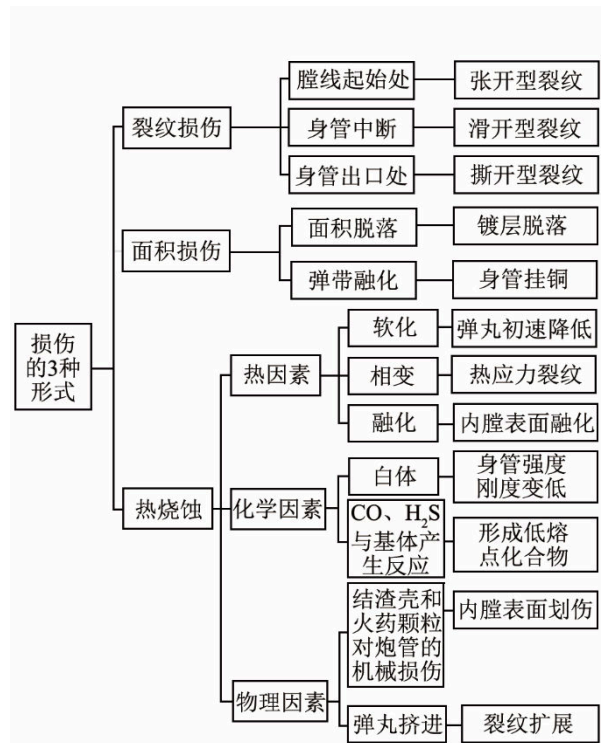


图 1 身管损伤类型  
Fig.1 Barrel damage types

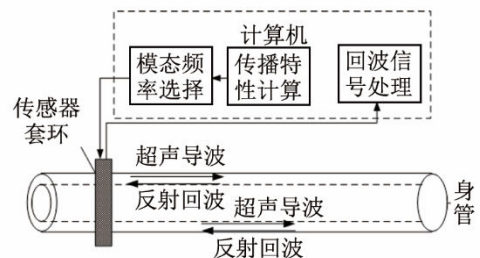


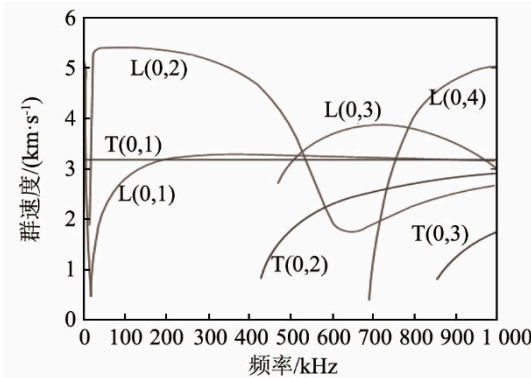
图 2 超声导波检测原理  
Fig.2 Principle of ultrasonic guided wave detection

信息的识别与提取也会变得十分困难。

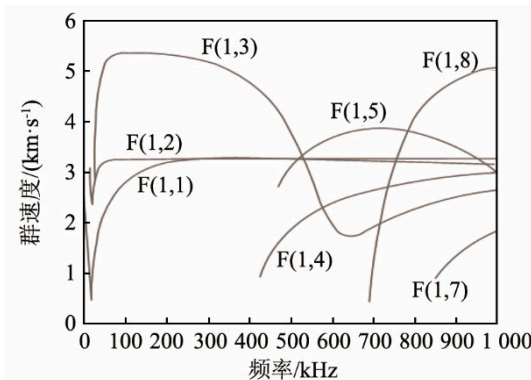
为抑制频散现象, 本文选择一种材料为 PCrNi<sub>1</sub>MoVA 的身管, 弹性模量为 214 Gpa, 泊松比为 0.271, 密度为 7 850 kg·m<sup>-3</sup>。身管基本尺寸为内径  $a=60$  mm, 外径  $b=65$  mm, 长  $l=1\ 000$  mm<sup>[8]</sup>。利用 MATLAB 绘制其频散曲线, 如图 3 所示。

由图 3 可知, 频散现象存在于超声导波的各个模态中, 且频散现象随着频率的增加而更加明显, 同时当频率变大时多种高阶模态也随之产生。在 0~300 kHz 的低频范围内, 纵向模态只存在  $L(0, 1)$  和  $L(0, 2)$  模态, 由于  $L(0, 2)$  模态在 0~300 kHz 的频率范围内频散现象较弱, 且传播速度较  $L(0, 1)$  模态大, 在信号提取中更容易将  $L(0, 2)$  模态的信号提取出来, 所以  $L(0, 2)$  模态适合作为检测模态, 其最佳检测频率范围为 0~300 kHz; 同理, 扭转模态  $T(0, 1)$  模态不发生频散, 也常被

选作圆管检测模式。



(a) L,T 模态群速度频散曲线



(b) F 模态群速度频散曲线

图 3 枪管中不同导波模式的频散曲线

Fig.3 Dispersion curves of different guided wave modes in gun barrel

通过对图 3 进行对比分析可知，相比于纵向模态和扭转模态，弯曲模态在身管中的传播形态更加复杂，频散现象也更加明显。因此，采用弯曲模态作为检测信号时，会使回波信号的分析与处理会变得十分困难。所以在实际工程应用中，弯曲模态一般不作为检测模式。

### 3 武器身管超声导波传感器配置

#### 3.1 导波检测传感器常用种类

由图 2 可知，导波频率和传感器是超声导波检测技术研究中必不可少的一环，因此对频率与传感器种类的优选以及传感器数量和布置方式进行深入研究具有重要的工程指导意义。

目前，超声导波技术根据传感器的不同分为接触式检测技术和非接触式检测技术。接触式检测技术主要采用压电传感器<sup>[4]</sup>，由于压电传感器具有价格低、精度高、原理简单等优点，接触式检测技术得到了较广泛的应用。非接触式检测技术则主要采用静电传感器、磁致伸缩传感器、空气耦合传感器、激光传感器、电磁超声传感器

(Electromagnetic Acoustic Transducer, EMAT)等，其中磁致伸缩传感器对包覆管检测具有很大的潜力，受到了国内外超声导波检测界的极大关注。

#### 3.2 导波检测传感器数量与布置

根据 2.2 节的结论可知，L 模态和 T 模态两种轴对称模态导波能够对身管进行全方位检测。通常将安放传感器的身管在圆周方向上划分为 4 个象限，将一定数量的传感器在这 4 个象限中等间距、轴对称布置，选取相应激励方向即可激励出相应的轴对称导波模式；为了使导波能量在身管周向 4 个象限中均匀分布，传感器数量一般选择 4 的倍数。以激发 L(0, 2)模态为例，根据简正模态展开方法能够得到沿身管轴向传播的波幅值为<sup>[9]</sup>

$$A_2^0(z) = -e^{-ik_2^0 z} \frac{R_{2a}^0(b)}{4P_{22}^{00}} \times \frac{2NAb}{k_2^0} \sin(k_2^0 \Delta L) \quad (4)$$

式中， $k_2^0$  为导波波数， $R_{2a}^0(b)$  为身管质点周向分速度， $P_{22}^{00}$  为导波轴向功率流， $N$  为传感器个数；单个传感器激励载荷常数为  $A$ ，激励长度范围为  $\Delta L$ 。根据式(4)可知，增加传感器数量，会使得纵向模态幅值增加，具有抑制其他模式产生的效果。

#### 3.3 实验验证

##### 3.3.1 传感器优选

为验证传感器个数对导波传播特性的影响，以上述身管为例，建立有缺陷身管的有限元模型，进行仿真实验。在检测中应选用单音频信号作为导波激励信号，但若只选用单纯的正弦信号，随着导波在身管中的传播，会出现严重的频散现象，导致时域内产生多种模式影响检测精度。因此，采用经汉宁窗调制 10 个周期单音频正弦信号作为激励信号，激励频率选择频散较弱的 200 kHz<sup>[10]</sup>。经过调制的激励信号能够很好地抑制频散，减少传播过程中能量的耗散，保证导波检测质量，激励源信号波形如图 4 所示。

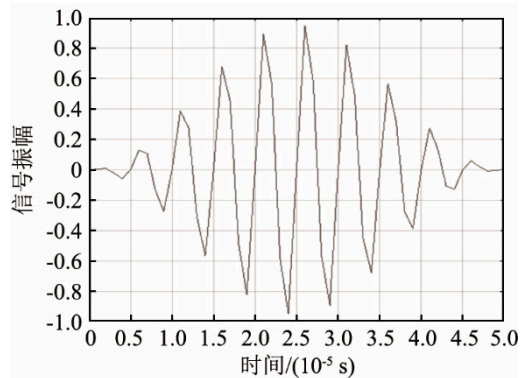


图 4 汉宁窗调制的 10 个周期导波激励信号波形图

Fig.4 The ten-cycle guided wave excitation signal waveform with Hanning window modulation

激励源信号表达式为

$$F = \begin{cases} 100 \sin(2\pi ft) \times (0.5 - 0.5 \cos(2\pi ft/n)), & 0 < t < n/f \\ 0, & t > n/f \end{cases} \quad (5)$$

式中： $n$  为单频信号周期数； $f$  为信号激励频率，单位 Hz； $t$  为时间，单位 s。

确定激励信号后，将身管模型一端设置固定约束，另一端设置为自由。在身管自由端的激励节点上同时施加多个轴向瞬时位移载荷，即可激励出沿身管传播的近似单一的 L(0,2) 模态，如图 5 所示。

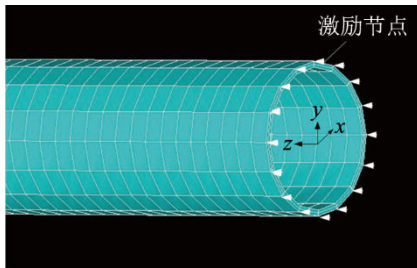


图 5 L(0,2)模态激发方式

Fig.5 The excitation mode of L(0,2) mode

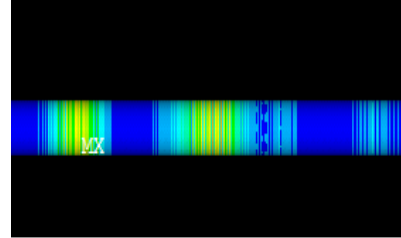
为验证传感器在导波检测中的影响，在仿真实验中改变不同数量的轴向瞬时位移载荷来模拟不同数量的传感器，通过仿真计算得到传感器数量分别为 8、16、24 个时的导波传播云图，如图 6 所示。

图 6 中应力环表示传播的导波，由图 6(a)可以发现，身管中传播的导波发生了明显的模式转换，同时导波发生了较强的频散，不利于导波对身管进行检测；当传感器数量增加达到 16 个时，如图 6(b)所示，身管中传播的导波模式转换和频散现象得到了相应程度的减弱；当传感器数量达到 24 个时，如图 6(c)所示，身管中导波未出现明显的模式转换现象，频散现象也得到了很好的抑制。综合以上结论，增大传感器的数量能够减弱身管中导波的频散现象，抑制导波发生模式转换，对身管进行更好的检测，实验结果与理论分析一致。

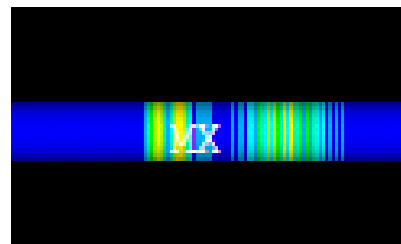
### 3.3.2 身管裂纹缺陷检测

由 3.3.1 节可知，传感器数量会对超声导波的检测效果产生很大影响，在传感器数量达到 24 个时，身管中传播导波的频散现象得到了很好的抑制。为验证传感器数量达到 24 个时，超声导波的检测效果，现建立身管损伤模型进行实验验证。采用 L(0,2) 模态对含有缺陷的身管进行检测，分析不同尺寸的损伤对信号回波幅值的影响。定义

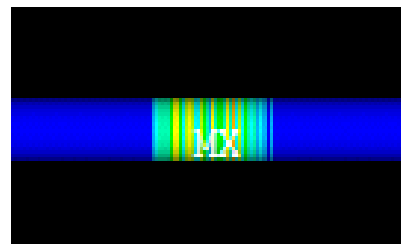
回波系数为回波信号最大幅值与激励信号最大幅值之比，在其他损伤尺寸一定时，以周向角度为横坐标，回波系数为纵坐标，对仿真计算得到的数据点进行拟合，得到的关系曲线如图 7 所示。



(a) 8 个传感器



(b) 16 个传感器



(c) 24 个传感器

图 6 不同传感器配置下枪管导波传播云图  
Fig.6 Nephograms of guided wave propagation in gun barrel under different sensor configurations

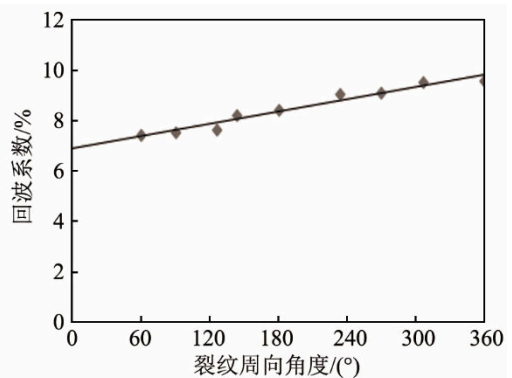


图 7 L(0,2)模态回波系数与裂纹周向角度的关系  
Fig.7 The relationship between the echo coefficient of L(0,2) mode and the circumferential angle of crack

由图 7 可知，回波系数与裂纹周向角度呈现出较好的线性关系，随裂纹损伤周向角度的增大而增大。在其他裂纹尺寸确定的前提下，根据回波系数便可以确定裂纹的周向长度。将一段时间内裂纹的回波系数进行记录，通过分析对比即可

对裂纹的生长情况进行监测和预测。

## 4 结论

本文首先对身管进行调查研究, 分析了身管常见的损伤类型。其次, 以一种特定的武器身管为研究对象, 绘制其频散曲线图并进行分析。最后, 通过有限元方法, 讨论了不同数量的传感器对武器身管频散特性的影响, 得到结论如下:

(1) 身管常见的损伤类型主要有裂纹缺陷、面积缺陷以及热烧蚀, 这 3 种损伤都会使身管横截面积产生突变, 宜采用超声导波进行检测诊断。

(2) 相对于弯曲模态, 纵向模态、扭转模态更适于对身管进行检测, 通过对频散曲线的分析发现, 在频率为 0~300 kHz 时, 其频散现象弱、模态数目少, 有利于导波对身管进行检测, 故 0~300 kHz 为导波检测的最佳频率范围。

(3) 传感器数目的增加, 不仅增加了导波激励信号的强度, 还能够有效的减弱频散现象, 抑制导波发生模态转换。但是不能随意增加传感器数量, 还应综合考虑身管直径、安装成本等多方面因素。

(4) 裂纹尺寸对导波回波幅值有显著影响。当裂纹径向长度和轴向长度一定时, 损伤信号的回波系数随裂纹损伤周向角度的增加而增加, 呈现出很好的线性关系。

### 参考文献

- [1] ZHANG J, WANG X, WEI Y, et al. Ultrasonic guided wave testing method of gun barrel crack defects based on L(0,2) mode [C]//International Conference on Intelligent & Interactive Systems & Applications, 2017: 530-538.
- [2] 高望, 张金, 王瑾珏. 火炮身管无损检测方法[J]. 火力与指挥控制, 2015, 40(7): 16-19.  
GAO Wang, ZHANG Jin, WANG Jinjue. Study on non-destructive detection methods of gun barrels[J]. Fire Control & Command Control, 2015, 40(7): 16-19.
- [3] GAUL L, SPRENGER H, SCHAAL C, et al. Structural health monitoring of cylindrical structures using guided ultrasonic waves[J]. Acta Mech, 2012, 223(8): 1669-1680.
- [4] PAVLOPOULOU S, WORDEN K, SOUTIS C. Structural health monitoring and damage prognosis in composite repaired structures through the excitation of guided ultrasonic waves[C]//SPIE Smart Structures and Materials Nondestructive Evaluation and Health Monitoring, 2013.
- [5] 王悦民, 杨波. 磁致伸缩导波无损检测理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2015.  
WANG Yuemin, YANG Bo. Magnetostrictive guided wave non-destructive testing theory and method[M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [6] 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.
- [7] GHOSH J. Longitudinal vibrations of a hollow cylinder[J]. Bulletin of the Calcutta Mathematical Society, 1923, 24(14): 31-40.
- [8] 张祖贤. 兵器黑色金属材料手册[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1990.  
ZHANG Zuxian. Weapons black metal material brochure[M]. Beijing: The Publishing House of Ordnance Industry, 1990.
- [9] LI J, ROSE J L. Excitation and propagation of non-axisymmetric guided waves in a hollow cylinder[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2001, 109(2): 457-464.
- [10] 王鑫, 张金, 沈洋, 等. 圆管超声导波频散与多模态特性研究[J]. 应用声学, 2018, 37(3): 338-344.  
WANG Xin, ZHANG Jin, SHEN Yang, et al. Study on ultrasonic guided wave dispersion and multi-modal characteristics of gun barrel[J]. Journal of Applied Acoustics, 2018, 37(3): 338-344.

[1] ZHANG J, WANG X, WEI Y, et al. Ultrasonic guided wave testing method of gun barrel crack defects based on L(0,2) mode