

高频纵向超声导波在埋于无限大介质中 钢杆的传播特性*

何存富 孙雅欣 王秀彦 张青 刘增华 吴斌

(北京工业大学机械工程与应用电子技术学院 北京 100022)

摘要: 从理论上分析高频纵向超声导波在埋于无限大介质中钢杆传播的特性。根据在杆状波导中传播的超声波具有频散现象及多模态特征, 选择特定频率下的单音频信号激励超声导波, 使其衰减最小, 能传播较长距离; 能量速度最大, 最先到达, 从而可与其他速度较慢的模式相区别。说明此频率下的纵向模式可用来对埋于介质中的钢杆进行检测。同时建立试验系统, 对直径 22 mm、长度 1 m 的埋于水泥中的钢杆进行检测, 并对结果进行时频分析, 试验结果与理论分析相吻合。

关键词: 钢杆 超声导波 高频 无损检测 无限大介质

中图分类号: TG115.28

0 前言

现代工业中, 杆结构被大量应用于实际工程之中。在这些工程之中, 很多情况可被简化为杆埋于无限大介质之中的情形, 如水利水电工程、城市建设、公路铁路建设等工程中大量采用的锚杆支护技术(即将锚杆埋入岩石或土壤中以增强岩石或土壤的支护能力)^[1], 建筑工程中预应力钢筋混凝土结构, 或者航空工业中所采用的柱状复合轮轴(由于外部介质尺寸远大于超声导波的波长, 故也可视为此种情形)。这些构件或由于工作环境较恶劣(如水份、潮湿空气、雨水等液体渗入到金属杆件, 致使杆件发生局部腐蚀而引起应力集中, 从而导致断裂), 或由于疲劳破坏(如轮轴因长期使用出现裂纹), 常会存在一些事故隐患, 如果不及时进行检测修复, 往往会发生严重事故。由于埋置于介质之中杆结构中的缺陷存在着很强的隐蔽性, 常规方法检测存在一定困难, 所以如何能切实有效的对其进行检测一直是难点问题。目前对于此类杆系结构的检测研究大多限于声频应力波法, 还处于探索阶段, 测试结果不甚理想。所以对于此类结构健康状况的新型无损检测方法越来越受到研究人员的关注。

由于近年来新发展的超声导波检测法具有快速、长距离、大范围、相对低成本的优势, 所以, 利用超声导波进行检测是无损检测新兴的和前沿的一个发展方向^[2-5]。

目前对于导波在杆结构中传播的研究大都集中

在自由杆结构, 如吴斌等^[5]对低频的 $L(0,1)$ 模式在钢杆中的传播特性进行了研究, 而对于埋入介质中的杆结构, 由于导波在其中的频散特性较为复杂, 且此结构中导波的衰减较大, 很难获得有效的信号, 因而一直是研究的难点。国外, VIENS 等^[6]研究了扭转模式在无限大介质中杆的传播特性并进行了理论分析, 但没有进行试验验证; BEARD 等^[7]应用超声导波方法对矿山锚杆的完整性无损检测进行了试验与理论研究; PAVLAKOVIC 等^[8]研究了超声导波在埋于水泥中杆结构的传播特性, 取得一定进展, 但仅处于初步阶段, 没有加以详细分析。国内, 何存富等^[9]研究了低频导波在埋地锚杆中的传播特性。而应用高频纵向轴对称超声导波对埋于无限大介质中杆的传播特性的研究还鲜见报道。

基于此类问题的背景, 结合时频分析的方法较为详细地研究高频纵向轴对称超声导波在埋于无限大介质中的钢杆的传播特性, 为下一步对该类杆结构的质量检测打下一定基础。

1 理论分析

在波导中传播的导波, 由于受到波导几何尺寸特征的影响, 使得在结构中传播的导波模式依赖于频率, 从而导致导波的几何弥散, 即导波的速度随频率的不同而改变, 这种现象就是导波的频散现象。在杆中传播的超声导波存在三种模式, 即纵向轴对称模式(L 模式)、扭转模式(T 模式)和弯曲模式(F 模式)^[10]。本文仅考虑纵向轴对称模式。

埋于无限大介质中钢杆的结构模型如图 1 所示。图 1 中, 1 为半径为 R 的钢杆, 2 为无限大介

* 北京市教委(KZ200510005004)和北京市自然科学基金(4052008, 8062008)资助项目。20060207 收到初稿, 20061127 收到修改稿

质层。在这一模型中建立柱坐标系，并假定导波沿z轴传播。当波在内外两层传播时，均满足 Navier 位移运动方程，即

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

式中 μ, λ ——材料的 Lamé 常数
 ρ ——材料的密度
 t ——时间
 \mathbf{u} ——位移场

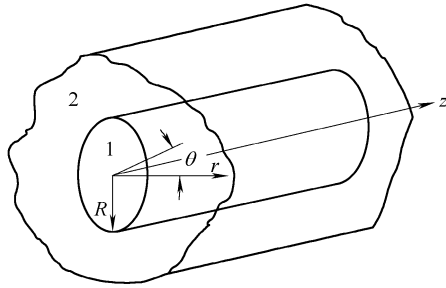


图1 埋于无限大介质中杆结构示意图

利用位移运动方程结合相应边界条件可求得位移，并代入几何方程和本构方程求得内部钢杆和外部无限大介质中的应力 σ 、应变 ε 及位移 u 值。

因仅考虑纵向轴对称模态，故 θ 分量为零。对于埋入无限大介质中钢杆结构，交界面 ($r = R$) 其应力和位移边界条件为

$$\begin{cases} u_{r1} = u_{r2} \\ u_{z1} = u_{z2} \\ \sigma_{rr1} = \sigma_{rr2} \\ \sigma_{rz1} = \sigma_{rz2} \end{cases} \quad (2)$$

利用该杆结构中边界条件(2)建立一组特征方程，其矩阵形式为

$$\mathbf{M}[\mathbf{A} \ \mathbf{B} \ \mathbf{C} \ \mathbf{D}]^T = 0 \quad (3)$$

式中， \mathbf{M} 为 4×4 的矩阵， \mathbf{A} 、 \mathbf{B} 、 \mathbf{C} 和 \mathbf{D} 为待定系数。为使式(3)有非零解，其系数行列式须为零，即

$$|\mathbf{M}| = 0 \quad (4)$$

式(4)即为此结构中纵向模态的频散方程，即波数 k 和频率 f 的关系表达式。通过数值方法求解此方程，可得出该结构的频散关系。

对于此类结构，衰减是影响检测的一个重要因素。而衰减主要由材料和结构引起。结构衰减是由于周围无限大介质对波导的作用为超声能量的泄漏提供了一个通道，一般采用引入一个复波数如： $k = k_R + ik_I$ 来考虑这一因素， k 的虚部相当于一个衰减因子^[10]。

相速度和衰减系数(用 $20\lg\alpha$ 表示分贝数)为

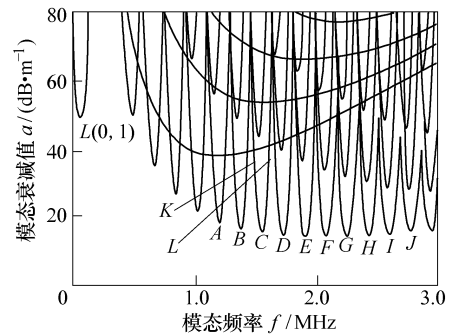
$$c_p = \omega / k_R \quad a = k_I \quad (2)$$

此外，还需要注意的是，在没有能量泄漏的体系中，钢杆的群速度与能量速度一致(如处于真空中的钢杆)。但是在有能量泄漏的体系中(如埋入无限大介质中的钢杆)，钢杆的群速度与能量速度有所差别，此时应该以能量速度作为参考速度^[11]。

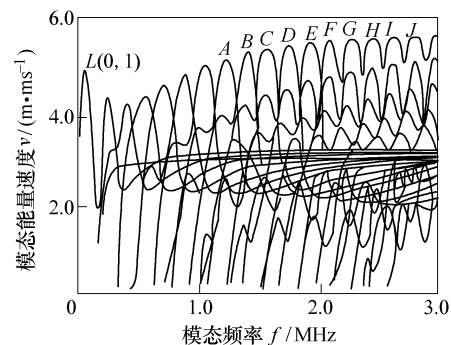
对于埋于无限大介质中钢杆结构，以钢杆埋置于水泥中的结构为例，其材料参数如表1所示，其中钢杆直径为22mm。图2a为根据这些参数通过数值计算所得到的衰减频散曲线，图2b为能量速度频散曲线。

表1 材料参数表

材料	密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	纵波波速 $C_L/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	横波波速 $C_T/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	纵波衰减 $\eta_L/(\text{np} \cdot \text{wl}^{-1})$	横波衰减 $\eta_T/(\text{np} \cdot \text{wl}^{-1})$
钢杆	7.932	5 960	3 260	0.003	0.008
水泥	1.600	2 810	1 700	0.043	0.100



(a) 衰减频散曲线



(b) 能量速度频散曲线

图2 埋于无限大介质中杆的频散曲线

(1) 图2仅列出钢杆中的纵向轴对称模态，从中可看出在高频下模态非常复杂，在某一频率下，存在多个模态。并且，除 $L(0, 1)$ 模态外，其余模态都存在截止频率。

(2) 从图2a衰减频散曲线看，各模态都存在衰

减极小值, 对于低频模态, 如 $L(0, 1)$ 的衰减较大, 最小衰减也在 50 dB/m 左右, 不适于检测; 而对于 $L(0, 8)$ 模态及更高阶模态, 在某一特定频率下的衰减都小于 20 dB/m, 这意味着在此频率下的相应模态可以传播更远的距离。为表示方便, 本文对各模态的衰减较小的频率区域以英文字母对应。各高阶模态衰减极小值所对应频率及衰减值参见表 2。从表 2 中可以看出, 各频率下衰减最小的为 14.4 dB/m, 最大的也只有 18.6 dB/m。同时, 还可以看出, 衰减极小值对应频率基本呈等间距分布, 以 180 kHz 为单位递增。

表 2 衰减极小值对应频率及衰减值

标号	A	B	C	D	E
模态	$L(0, 8)$	$L(0, 9)$	$L(0, 10)$	$L(0, 11)$	$L(0, 12)$
频率 f/MHz	1.189	1.366	1.541	1.724	1.898
衰减值 $a/(\text{dB} \cdot \text{m}^{-1})$	18.6	16.7	15.5	14.8	14.6
标号	F	G	H	I	J
模态	$L(0, 12)$	$L(0, 12)$	$L(0, 12)$	$L(0, 12)$	$L(0, 12)$
频率 f/MHz	2.076	2.253	2.43	2.61	2.79
衰减值 $a/(\text{dB} \cdot \text{m}^{-1})$	14.4	14.6	14.8	15.1	15.5

(3) 从图 2 可看出, 衰减频散曲线与能量速度频散曲线存在一定对应关系。衰减极小区域内的模态在能量速度频散曲线上是该频率区域最快的模态。这意味着此模态第一个到达, 易与其他速度较慢的模态区分。

为解释某一特定高频下的导波其衰减比其他频率下的导波更小的原因, 图 3 列出了埋于无限大介质中杆结构的 $L(0, 10)$ 模态在频率为 1.48 MHz(图 2 中 K 点)、1.541 MHz 和 1.63 MHz(图 2 中 L 点) 时的轴向位移 U_z 分布图。图 3 中, 1.541 MHz 处 U_z 在杆表面近似为零, 并且在无限大介质中仍然非常小; 而 1.48 MHz 和 1.63 MHz 时的轴向位移在杆表面较大, 同时在无限大介质中的位移更是远大于 1.541 MHz 下轴向位移。说明 $L(0, 10)$ 模态在 1.541 MHz 时轴向位移主要集中在杆内部, 基本不受外部介质影响, 所以相比同一模态其他频率下的导波, 衰减更小, 可以传播更远的距离。

通过对频散曲线分析, 发现对于埋于无限大介质中杆结构, 存在多个高阶纵向轴对称模态。这些高阶轴对称模态, 在某一特定频率下, 轴向位移集中在杆内部, 衰减极小, 能够传播较远距离。此衰减极小值对应频率处的模态可以用来作为检测该类结构。

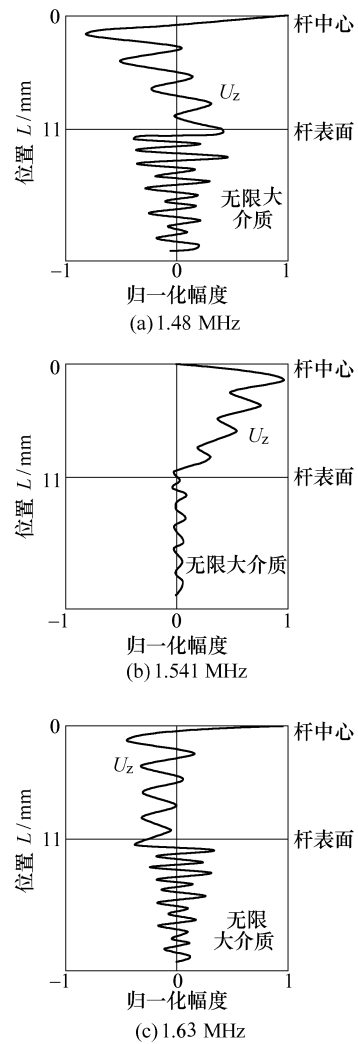


图 3 无限大介质中钢杆导波模态位移分布图

2 试验研究

为了验证理论分析结果, 对埋于水泥中钢杆结构进行了试验研究。试验装置如图 4 中所示, 由计算机、激励接收板(MATEC TB-1000)、数字示波器(Tek3032B)、钢杆、和中心频率为 2.25 MHz 纵波直探头所组成, 其中钢杆直径为 22 mm, 长度为 1 m。将钢杆埋置于水灰比为 0.5 的水泥净浆中。材料参数与表 1 一致。

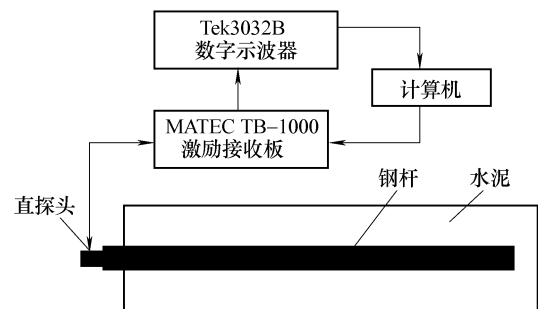


图 4 试验装置示意图

激励信号选取的是单音频信号，即经矩形窗调制的多个震荡周期的正弦信号^[3-4]。中心频率为 2 MHz 10 个周期的单音频信号的时域波形和频域图如图 5 所示。

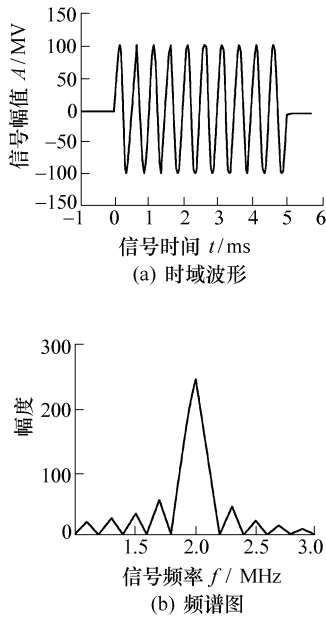


图 5 激励信号图

图 6 为 1.541 MHz、1.724 MHz、2.253 MHz 和 2.61 MHz 频率下所接收到的端面回波。从图 6 中可看出，最初的入射波之后，在约 0.35 ms 附近，出现清楚的第一次端面回波，在约 0.7 ms 附近，可以看到第二次端面回波，并且第二次端面回波明显小于第一次回波，表明在此结构中导波衰减非常大。

图 7 给出了所接收到的端面回波的时频分析结果。采用的时频分析方法为短时傅里叶变换。信号的时频分布结果和结构中的超声导波的能量速度频散曲线具有一定的对应关系。将信号的时频分析结果与能量速度频散曲线对比，可以确定信号中存在的导波模态^[12]。

从图 7 中可看出，第一次端面回波其实是由多个模态叠加而成。理论上，单音频信号只可激励单一频率的导波，但是由于实际中所谓的单音频信号仍然具有一定的带宽，如图 5b 中所激励信号的频谱图中可看出，虽然信号主瓣主要集中在 2 MHz 处，但旁瓣分布范围却在 1 MHz 到 3 MHz 之间。同时传感器工作频率也具有一定范围，所以实际激励信号并不是真正的单音频信号，而是处于一定频率范围内的导波。

图 7a 中，在 0.3 ms 到 0.4 ms 之间可以看出第一次端面回波由多个模态组成，其中 1.189 MHz、

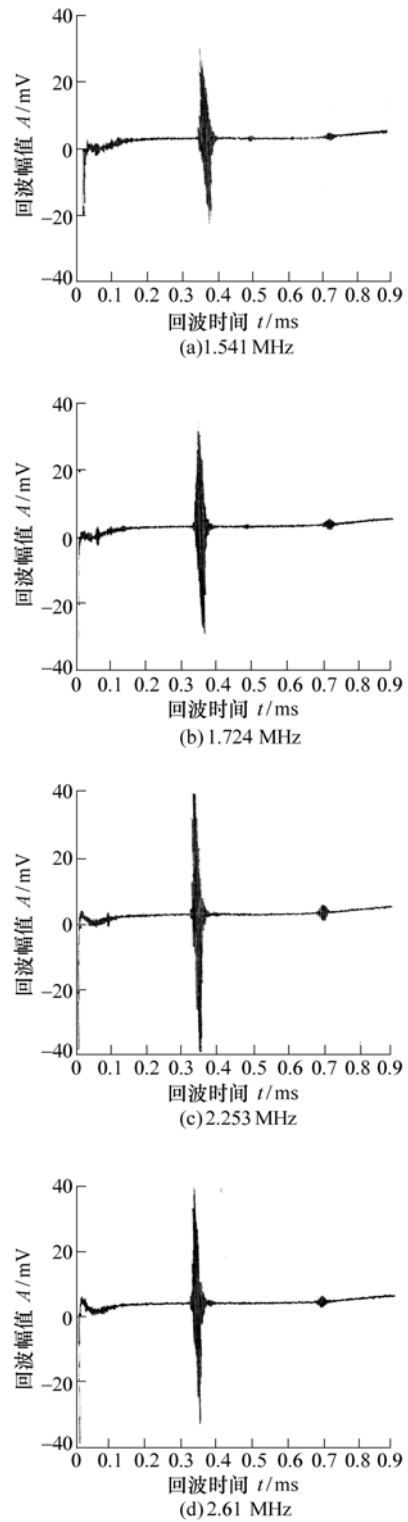


图 6 试验结果

1.366 MHz、1.541MHz、1.724 MHz、1.898 MHz、2.076MHz、2.253 MHz、2.43 MHz 和 2.61 MHz 处的模态较为明显，而在上述相邻两个频率之间的模态比较模糊。这是因为在上述频率下，相应模态的衰减较小，故在时频图上比较明显，而在两个相邻频率之间的模态衰减较大，所以在时频图上较为模糊。这与图 2a 中的衰减极小区域 A、B、C、D、

E、F、G、H 和 I 相吻合。

图 7b 可以看到表 2 所列出的从 B~I 的 8 个衰减较小区域。图 7c 可看到 B~J 的 9 个区域, 而图 7d 也可看到 8 个。从这四个时频图中可看出, 虽然激励频率不同, 但时频图上所显示模态却与图 2 中衰减频散曲线和能量速度频散曲线基本相同, 并且从图 7 中也可看出, 衰减极小值对应频率也呈等间距分布, 这与前面理论分析符合。

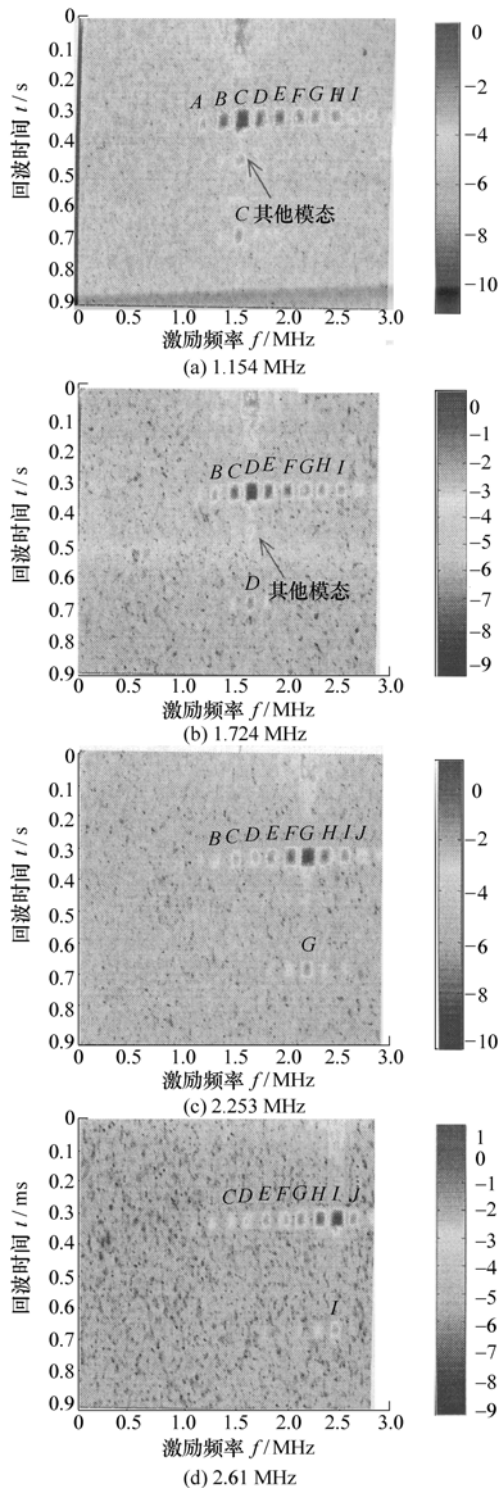


图 7 端面回波的时频分析图

除此之外, 图 7 四个图中, 在 0.7~0.8 ms 之间, 可以看到第二次端面回波, 此次回波只能清楚的识别一个模态, 即激励频率下的模态。这是由于能量主要集中在激励频率下, 且此模态衰减值较小, 故可传播更远距离。而其他衰减极小值对应频率区域的模态虽然衰减也较小, 但由于激励能量不够, 不能传播较远距离, 所以看不到第二次回波。这说明, 在实际工程中, 可以通过选择合适的频率, 达到激励出适合检测的衰减值较小的纵向轴对称模态的目的。

另外, 从图 7 还可以看出, 在表 2 所列出的频率下的模态都是最先到达, 这表明该频率下的模态的能量速度最大。如图 7a 中, 在 1.541 MHz 频率处的 $L(0,12)$ 模态到达时间在 0.36 ms 左右, 而在 0.39 ms 左右, 才出现一些其他的模态, 速度明显较慢。图 7b 中也出现同样情形。这与前面对图 2b 能量速度频散曲线的分析一致。

图 8 为 1.48 MHz 和 1.63 MHz 频率下所接收的端面回波, 从图 8 中可以看出, 仅在约 0.35 ms 处看见一次端面回波, 而在图 7 中 1.541 MHz 频率下能够看到两次端面回波, 并且图 8 两个频率下第一次回波幅值明显小于 1.541 MHz 时的第一次端面回波幅值。这说明在这两个频率下所激励的导波模态衰减较大, 仅能传播较短距离。

表 3 为不同模态能量速度试验值与理论值对比表, 其中能量速度试验值根据试验结果的端面回波到达时间计算得出。需要说明的是虽然端面回波由多个模态叠加, 但由于能量主要集中在激励频率段, 此频率下模态的幅值应为最高, 而试验测定时间又为峰峰值时间, 故所测时间实际仍为此频率下模态的时间。

表 3 能量速度试验值与理论值对比表

标号	A	B	C	D	E
频率 f/MHz	1.189	1.366	1.541	1.724	1.898
理论值 $V/(\text{ms} \cdot \text{s}^{-1})$	5 273	5 406	5 495	5 591	5 642
试验值 $V/(\text{ms} \cdot \text{s}^{-1})$	5 310	5 452	5 544	5 558	5 660
相对误差 $W/\%$	0.7	0.9	0.9	0.6	0.3
标号	F	G	H	I	J
频率 f/MHz	2.076	2.253	2.430	2.610	2.790
理论值 $V/(\text{ms} \cdot \text{s}^{-1})$	5 693	5 724	5 756	5 785	5 806
试验值 $V/(\text{ms} \cdot \text{s}^{-1})$	5 656	5 763	5 755	5 777	5 775
相对误差 $W/\%$	0.6	0.7	0.01	0.1	0.5

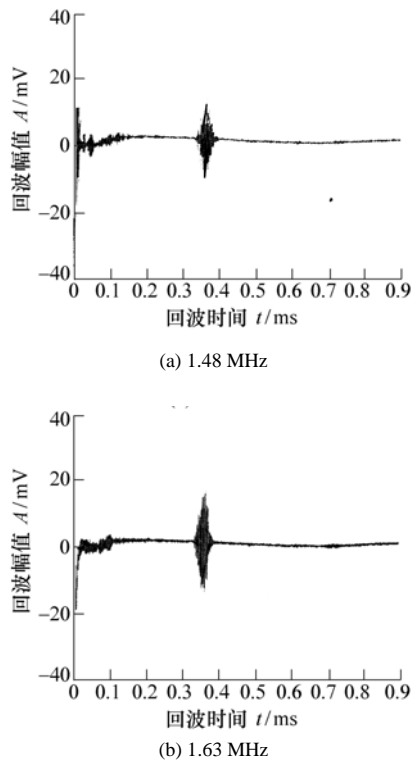


图8 其他频率下的接收波形

从表3可看出,各频率下相应模式的能量速度试验值与数值计算值基本符合,最小相对误差仅为0.01%,最大相对误差也只有0.9%。这就说明该结构的频散曲线可以作为模式选取的理论指导,应用于此类结构导波检测。

3 结论

(1) 埋于无限大介质中杆结构存在多个高阶纵向轴对称模式。

(2) 各高阶纵向轴对称模式在特定频率下衰减最小,可传播较长距离。

(3) 该模式的能量速度较同频率下的其他模式更快,最先到达,从而易与其他速度较慢的模式区别。

试验结果与理论分析相吻合,表明特定频率下的高阶纵向轴对称模式可用于对埋于无限大介质中的钢杆进行检测,为下一步应用于此类杆结构的工程检测打下一定基础。

参 考 文 献

- [1] 张向东,张树光,刘松. 锚杆支护配套技术设计与施工[M]. 北京: 中国计划出版社, 2003.
- [2] 刘增华,吴斌,何存富,等. 带有粘弹性包覆层管道中扭转模式的衰减特性和实验研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2005, 13(3): 291-299.

- [3] 王秀彦,王智,焦敬品,等. 超声导波在管中传播的理论分析与试验研究[J]. 机械工程学报, 2004, 40(1): 11-16.
- [4] 何存富,孙雅欣,刘增华,等. 弯管缺陷超声导波检测的有限元分析[J]. 北京工业大学学报, 2006, 32(4): 289-294.
- [5] 吴斌,李隆涛,王秀彦,等. 基于超声导波技术对钢杆表面缺陷的无损检测研究[J]. 工程力学, 2003, 20(5): 149-154.
- [6] VIENS M. Leaky torsional acoustic modes in infinite clad rods[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1994, 95(2): 701-707.
- [7] BEARD M D, LOWE M J S, CAWLEY P. Development of a guided wave inspection technique for rockbolts[J]. Review of Progress in Quantitative NDE, 2002, 21: 1318-1325.
- [8] PAVLAKOVIC B N, LOWE M J S, CAWLEY P. High-frequency low-loss ultrasonic modes in imbedded Bars[J]. Journal of Applied Mechanics, 2001, 68: 67-75.
- [9] 何存富,孙雅欣,吴斌,等. 超声导波技术在埋地锚杆检测中的应用研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(9): 985-989.
- [10] ROSE J L. 固体中的超声波[M]. 何存富,吴斌,王秀彦,译. 北京: 科学出版社, 2004.
- [11] BEARD M D. Guided wave inspection of embedded cylindrical structures[D]. London: Imperial College of Science Technology and Medicine, 2002.
- [12] NITHAMMER M, EISENHARDT C, JACOBS L J. Application of the short fourier to interpret ultrasonic signals[J]. Review of Progress in Quantitative NDE, 2000, 17: 703-708.

PROPAGATION CHARACTERISTICS OF HIGH FREQUENCY LONGITUDINAL ULTRASONIC GUIDED WAVES IN STEEL ROD EMBEDDED IN INFINITE MEDIUM

HE Cunfu SUN Yaxin WANG Xiuyan

ZHANG Qing LIU Zenghua WU Bin

(College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100022)

Abstract: Propagation characteristics of longitudinal ultrasonic guided waves of steel rod embedded in infinite medium are studied in theory. Due to the characteristic of dispersion and

multi-mode of rod, a longitudinal mode whose attenuation is smallest in all modes and its energy velocity which is the fastest at special frequency can be excited. This high frequency loss attenuation mode can propagate longer distance and be received firstly, which indicates that this mode can be used to the inspection of rod embedded in infinite medium. At the same time, the experiments about diameter 22 mm, 1 m length rod embedded in grout detected using ultrasonic guided wave are carried out, and time-frequency analysis is also performed for the results of experiments. Experiment results are consistent with those of

theory.

Key words: Rod Ultrasonic guided waves High frequency
Nondestructive testing Infinite medium

作者简介: 何存富, 男, 1958 年出生, 教授, 博士研究生导师。主持多项国家自然科学基金、教育部骨干教师资助项目、北京市自然科学基金重点项目等。中国机械工程学会高级会员, 中国机械工程学会自动化分会常务委员, 机械工程学会设备检测专业委员会委员。主要从事现代测控技术与方法、无损检测与健康评价等方面的研究。

E-mail: hecunfu@bjut.edu.cn

《机械工程学报》投稿注意事项

1. 论文篇幅

论文应内容精炼、表意明白, 篇幅尽量控制在 10 页以内, 英文版论文字数不受限制。

2. 论文结构和格式

请作者使用《机械工程学报》主页上的“论文格式模板”(http://www.cjme.com.cn), 采用 Word 编辑处理。

3. 作者单位、关键词及项目资助标注

所有作者单位均标明学校及院(系)全称、城市、邮编, 且中英文对应。关键词反映论文的本质、特征, 一般控制在 3~7 个。国家、省、市、自治区等科学基金资助项目, 请在第 1 页左下角标注, 并给出基金资助项目编号。

4. 摘要

摘要是以提供文章内容梗概为目的, 不加评论和补充解释, 简明、确切地记述文献重要内容的短文。论文的中、英文摘要是国内外数据库收录的主要内容, 所以摘要的内容直接影响到该论文能否被收录及收录后被引用的情况, 作者应给予高度重视。作者在写作时应注意下列问题:

① 摘要应具有独立性和自明性, 拥有与文章同等量的主要信息, 达到即使不阅读全文也能获得主要的信息。② 摘要应包括下列内容: 研究的目的; 采用的方法; 试验的结果; 得出的结论。③ 摘要的长度: 中文以 300~500 字为宜, 中英文要对应。④ 在语言表达方式上注意下列问题: 排除在本学科领域已经成为常识的内容, 不要简单重复篇名中已经表述过的信息; 如实地反映所做的研究工作, 提供尽可能多的定量的信息, 不可进行自我评论, 不应有如: “……属于首创”; “……尚未见报道”等; 采用第三人称的写法, 不用“本文”、“作者”和“笔者”等; 缩略语和简称首次出现用全称, 并给出简称。关键词不用缩略语和简称, 已通用的除外; 摘要中不要使用图、表, 一般不分段落; 英文摘要采用被动语态、现在时, 不要出现“Author”, “this paper”等。

5. 前言

前言简要说明研究的目的、范围、相关领域的前人工作与现状(也称文献综述, 尤其近年的发展现状和文献), 理论依据、试验基础和研究方法, 作者的意图、预期的结果及其作用和意义。应言简意赅, 不要与摘要雷同, 不要成为摘要的注释。一般教科书中已有的基本理论、试验方法和基本方

程的推导, 在前言中不必赘述。如实评述, 防止吹嘘自己和贬低别人, 避免宣传性的用语, 对出现的比较专业化的术语或缩写词进行定义和说明, 后文中出现时不必再解释, 前言中尽量不要出现图。

6. 结论

结论是整篇论文的最终的、总体的总结。语言应该准确、完整、明确、精练, 避免出现模棱两可、含糊其词的语句。一般应按顺序(1)、(2)、(3)、……的形式列条, 也可为一段。结论具有以下功能: 归纳总结使用的方法、研究的结果; 提出新的发现及研究成果; 提出建议、研究设想或尚待解决的问题; 突出研究的独创性; 与标题、前言相呼应。

7. 物理量(变量)符号的选用

物理量(变量)符号字母均为斜体字母(pH、硬度符号除外), 可用下标进一步说明和区别物理量符号的含义, 例如可用英文单词头个字母 a(轴向)、r(径向)以及坐标轴 x 和 y 等作为符号 F 的下标, 则构成轴向力 F_a 、径向力 F_r 以及坐标 x , y 向的 F_x 和 F_y 的物理量符号。其中 a、r 是名词或定语的头个字母所以是正体字母, 而 x 、 y 是坐标变量符号、所以是斜体字母。

8. 图、表格

坐标上有数字时, 需在对应坐标上示出向内的刻度线, 坐标轴无数字时须加箭头。在各坐标轴必须给出对应的物理量名称、符号和单位(三者要齐全), 例如: 电流 I/A ; 若是量纲一的量(即过去称为无量纲量)时, 则只给出物理量名称和符号即可。照片图需附照片。表格宜采用三线表(必要时可加辅助线)。

9. 参考文献

每篇论文列出 6 篇以上参考文献, 未正式发表的文献不能列入。如果参考了本刊或作者已发表的文献, 也请列入。中外文参考文献中的作者均按先后姓后名排列, 中国人的汉语拼音名字不能缩写, 西方人名可缩写, 并省略缩写点, 多位作者只列出前三名, 后面用“等”或“et al”。参考文献用原文种, 不要翻译。著录格式详见 GB/T7714—2005。

10. 作者简介

主要作者的简介, 内容包括姓名、性别、出生年、职称/职务、研究方向、科研成果及 E-mail。