

# 磁致伸缩导波在锚杆检测中的应用

何 明<sup>1</sup>, 唐志峰<sup>2</sup>, 项占琴<sup>3\*</sup>, 王 飞<sup>3</sup>

(1. 浙江省公安厅 高速交警总队, 浙江 杭州 310009; 2. 浙江大学 数字技术及仪器研究所, 浙江 杭州 310027;  
3. 浙江大学 现代制造工程研究所, 浙江 杭州 310027)

**摘要:** 为了实现对埋地锚杆的长度以及缺陷的高效检测, 提出了一种基于磁致伸缩导波原理的锚杆无损检测新方法。在研究了锚杆中纵向模态导波模型的基础上, 计算了直径 20 mm 的锚杆的频散曲线, 搭建了锚杆检测实验系统, 并利用该系统完成了空气中以及埋地结构中锚杆长度和缺陷的检测实验。研究结果表明: 该方法能实现对空气中以及埋地结构中锚杆的长度、缺陷的检测, 具有检测精度高、检测过程简单等特点, 可以应用在实际锚杆质量检测中。

**关键词:** 导波; 磁致伸缩; 无损探伤

**中图分类号:** TH39; TH878; TB553

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-4551(2010)11-0044-04

## Application of magnetostriction guided waves in the bolt detection

HE Ming<sup>1</sup>, TANG Zhi-feng<sup>2</sup>, XIANG Zhan-qin<sup>3</sup>, WANG Fei<sup>3</sup>

(1. Transport Police Corps, Zhejiang Province Public Security, Hangzhou 310009, China;

2. Institute of Advanced Digital Technologies and Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

3. Institute of Modern Manufacture Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** Aiming at realizing efficient detecting of the length and defects of buried bolts, a new non-destructive testing method based on magnetostriction and guided waves was proposed. On the basis of studying the longitudinal guided waves model in the bolts, dispersion curves of guided waves in 20 mm diameter bolt were calculated. Then an experimental system was built, bolts in the air and soil were detected by the system. The results indicate that this method can be used to detect the length and defects of free or buried bolt with characteristics of high detection accuracy and simple testing process. It can be used in the actual bolt testing work.

**Key words:** guided waves; magnetostriction; non-destructive inspection

## 0 引 言

在水利水电、公路铁路、矿井及城市建设等公共工程中大量使用锚杆、缆索等长类部件, 由于该类部件长度较长, 且现场使用条件限制了传统的扫查式无损探伤方法, 如锚杆通常埋于土壤或混凝土中, 传统的探伤设备难以达到检测目标。目前国内外对锚杆的检测尚停留在用千斤顶拉拔试验阶段, 这种方法既费工又费时, 且检测方法是破坏性的, 仅限于抽检<sup>[1-2]</sup>。瑞典 HF

Turner 利用超声波探头在锚杆端面激发超声波的原理研发了锚杆质量检测仪, 但该方法对锚杆端面要求作特殊处理, 且超声波激发条件苛刻、衰减快、重复性差、检测精度低<sup>[3]</sup>。Beard M D<sup>[4]</sup>、何存富<sup>[5]</sup>等提出通过导波技术来检测锚杆, 证明了利用导波对锚杆进行检测的可能性, 但该方法激发导波需对锚杆端面进行处理, 增加了实用难度。

基于磁致伸缩效应的导波无损检测技术是近年来兴起的一种新技术, 其检测原理是: 铁磁体在外磁场中被磁化时, 外形尺寸发生变化, 产生磁致伸缩应变, 从

而在铁磁体内激发应力波,即弹性导波。导波在传播过程中,铁磁体内各部分均发生变化,磁导率相应发生变化,反过来使波的传播特性也发生变化进而导致铁磁体内磁感应强度发生变化<sup>[6-8]</sup>。根据法拉第电磁感应定律,变化的电磁感应强度必定引起接收传感器中的电压变化,通过测量电压信号-导波的反射情况,即可检测出铁磁体构件中是否存在腐蚀、裂纹和破损等缺陷。应用磁致伸缩导波对锚杆进行检测,可以实现单端激励,导波传播距离远,且不需对锚杆端面进行任何处理,检测距离大,易于实现对锚杆的在线检测。

本研究主要探讨磁致伸缩导波在锚杆检测中的应用。

## 1 杆中导波模型

### 1.1 杆中导波

在杆中沿杆长度方向传播的超声波存在 3 种不同的模式,即纵向(轴对称)模式、扭转(轴对称)模式和弯曲(非轴对称)模式,分别记为  $L(0, m)$ ,  $T(0, m)$  及  $F(n, m)$ , 括号中第 1 个参数  $n$  表示周向阶数,对于轴对称模式  $n=0$ ,对于弯曲模式  $n=1, 2, 3, \dots$ ; 第 2 个参数  $m$  表示模式数,  $m=1, 2, 3, \dots$ 。杆中存在无限多个轴对称模式和双倍无限多个弯曲模式,弯曲模式导波的位移和应力在周向呈谐波变化,谐波周期数等于其阶数  $n$ 。

径向和轴向位移分量不为零的纵向轴对称导波在杆中传播,通过求解波动方程,可得到著名的 PchHammer-Chree 频散方程<sup>[9-11]</sup>:

$$\frac{2\alpha}{r}(\beta^2 + k^2)J_1(\alpha r)J_1(\beta r) - (\beta^2 - k^2)J_0(\alpha r)J_1(\beta r) - 4k^2\alpha\beta J_1(\alpha r)J_0(\beta r) = 0 \quad (1)$$

$$\alpha^2 = \frac{\omega^2}{c_L^2} - k^2, \beta = \frac{\omega^2}{c_T^2} - k^2 \quad (2)$$

式中  $r$ —波导即杆的半径;  $c_L, c_T$ —纵波波速和横波波速;  $\omega$ —角频率,  $\omega = 2\pi f$ ;  $k$ —波数;  $J_0, J_1$ —0 阶和 1 阶 Bessel 函数。

式(1)为一关于  $\omega$  和  $k$  的超越方程。通过数值求解可知,同一频率  $\omega$  对应着若干个波数  $k$ ,即在某一频率下,杆中会存在若干个纵向导波模式。

### 1.2 杆的频散曲线

通过求解频散方程可得到相速度频散曲线,从相速度频散曲线可得到群速度频散曲线。本研究采用的锚杆直径为 22 mm,密度为 7.932 g/cm<sup>3</sup>,纵波速度  $c_L=5\,000$  m/s,横波速度  $c_T=3\,260$  m/s,在 Matlab 中计

算得到的群速度和相速度频散曲线如图 1、图 2 所示。

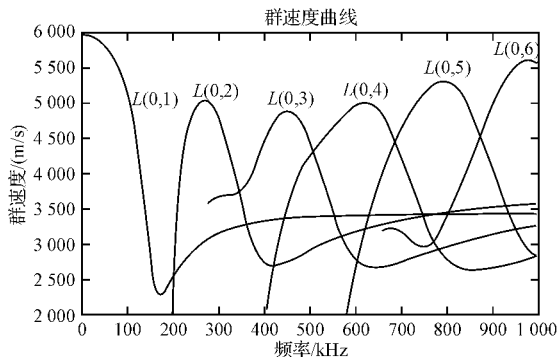


图 1 锚杆群速度频散曲线

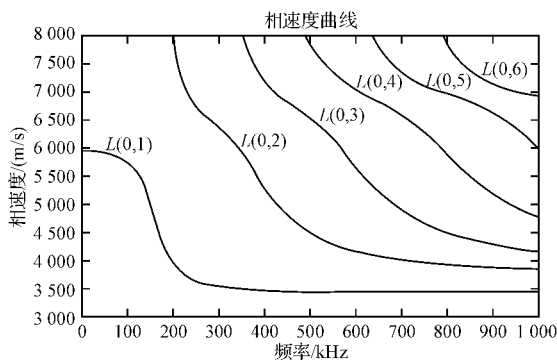


图 2 锚杆相速度频散曲线

导波检测需要解决的关键在于选择利用单个模式的导波以及避免导波频散。通常一个激励源可以激励出存在于该频率范围内的所有模式,而使得检测信号复杂且难以解释。同时导波的频散会使得检测回波脉冲包随着传播距离增加而逐渐变宽,幅值逐渐减小,不利于缺陷的判断和定位。因此选择导波激励频率时,应尽量选择频散曲线上模式少、较为平坦的频率段。频散曲线可以作为磁致伸缩导波检测的理论指导,用来选择合适频率范围、激发模式。由图 1 中的频散曲线可知,在低频时存在  $L(0,1)$ ,  $L(0,2)$  两种纵向模式,其中  $L(0,1)$  的截止频率为 0 Hz,  $L(0,2)$  的截止频率为 195 kHz。在 100 kHz 以下频散曲线比较平坦且只存在  $L(0,1)$  这一纵向模式,因此,可以选择 100 kHz 以下的激励频率,激励出  $L(0,1)$  模式对直径 22 mm 的锚杆进行检测。

## 2 锚杆的导波检测

### 2.1 实验装置

磁致伸缩导波检测实验装置如图 3 所示。由锚杆、激励线圈、偏置线圈、感应线圈、直流稳压稳流电源、微弱信号前置放大器、NI 框架系统 PXI1031(包括控

制器 PXI8185)、数据采集卡 PXI6071E、LabVIEW 7.1 的实验系统应用软件、可编程任意波形发生器 (AFG310) 及线性功率放大器 (LVC5050) 等组成。激励线圈匝数为 50, 长度为 10 mm, 用来在待检测试件中产生交变的磁场, 激励导波信号; 感应线圈匝数为 200, 长度为 10 mm, 用来检测磁场的变化, 起接收导波信号的作用; 偏置线圈匝数为 1 000, 长度为 50 mm, 用来在试件中产生偏置磁场, 起到提高换能效率以及选择导波模式的作用。

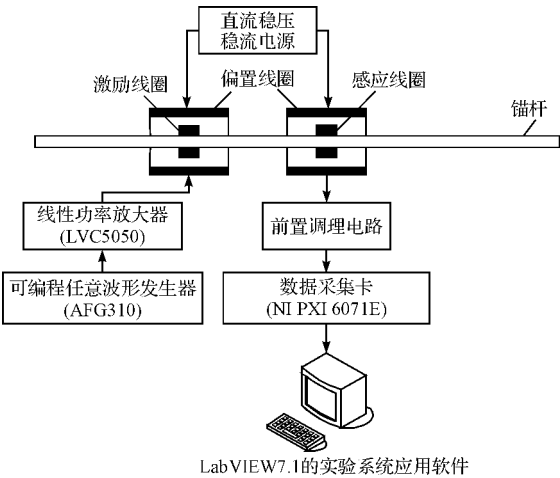


图 3 实验系统结构示意图

2.2 空气中锚杆长度缺陷的检测

以上述实验系统对一根置于空气中的普通锚杆进行检测, 锚杆长度为 3 m, 直径为 22 mm, 表面存在一个人为刻痕缺陷, 刻痕深 4.5 mm, 宽为 16.7 mm, 截面损失比为 16.8%, 缺陷位置以及激励线圈、接收线圈安装位置如图 4 所示 (A, B 分别表示激励线圈、感应线圈位置, 由于激励线圈放置在锚杆的左端部, A 也表示锚杆左端面位置, C 表示锚杆表面缺陷位置, D 表示锚杆右端面位置)。

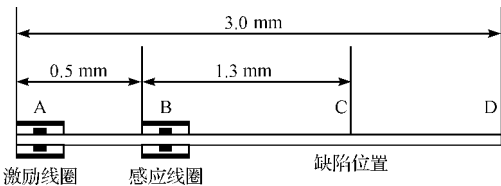


图 4 检测空气中锚杆的实验装置图

由可编程任意波形发生器激励脉冲, 根据对频散曲线的分析, 可选择中心频率为 60 kHz, 脉冲数为 4 的猝发群脉冲作为激励信号, 激励信号经线性功率放大器放大, 输出峰峰值约 7 A 的电流信号至激励线圈, 铁磁材料在激励线圈产生的脉冲磁场作用下发生磁致伸缩, 激发出导波信号, 导波沿着锚杆边界传播, 遇到端

面或缺陷将产生发射波, 反射波到达接收线圈的位置, 由于逆磁致伸缩效应, 将在感应线圈中产生微弱的感应电压, 通过微弱信号前置放大器, 将放大的信号进行 A/D 转换, 经过滤波降噪后得到检测信号, 如图 5 所示。

由于电磁脉冲的传播速度接近光速, 比弹性波在锚杆中的传播速度快得多, 最先达到接收线圈的是通过空气传播的电磁脉冲信号。激励线圈在激励处产生弹性导波, 沿锚杆传播。当导波传播至接收线圈, 形成第 1 次通过波信号, 如图 5 中波包 I 所示。导波继续沿锚杆传播, 当遇到端面或者缺陷时导波发生反射, 形成回波信号, 图 5 中波包 II, III, IV, V 均为反射回波信号。各个波包的具体传播路径如表 1 所示。

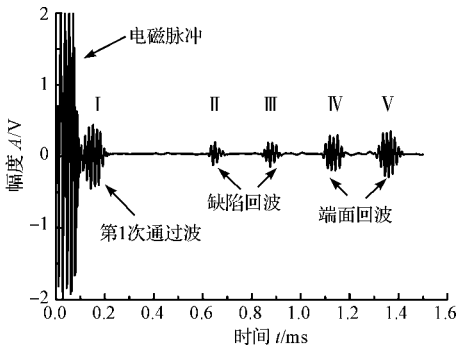


图 5 空气中锚杆检测信号

表 1 5 个波包的传输路径

| 波包  | 传播路径         |
|-----|--------------|
| I   | A → B        |
| II  | A → C<br>B ← |
| III | A → C<br>B ← |
| IV  | A → D<br>B ← |
| V   | A → D<br>B ← |

第 1 次通过波与电磁脉冲的时间差 100.1 μs, 弹性波传播的距离应为 0.5 m, 因此波速为 4 999.5 m/s。根据波速特征, 可确定激励的导波模式为纵向  $L(0, 1)$  模式。缺陷回波与第 1 次通过波的时间差为 532.05 μs, 因此检测到的缺陷位置为距离激励线圈 1.83 m, 右端面回波与第 1 次通过波的时间差为 1 000.1 μs, 通过计算, 锚杆检测长度为 2.99 m, 由图 4 可知, 锚杆实际长度为 3 m, 缺陷与激励线圈之间的实际距离为 1.80 m, 锚杆长度检测的相对误差为 0.3%, 缺陷位置检测的相对误差为 1.66%, 说明激励出的  $L(0, 1)$  模式导波能实现对空气中锚杆的长度以及缺陷的精确检测。

2.3 埋地锚杆检测

为了模拟实际埋地锚杆的检测,对 2.2 节中的锚杆在其刻痕缺陷周围灌注长 40 cm 圆柱状泥土,通过图 3 中的实验装置对锚杆进行了检测,激励线圈、感应线圈布置位置以及灌注泥土段位置如图 6 所示。

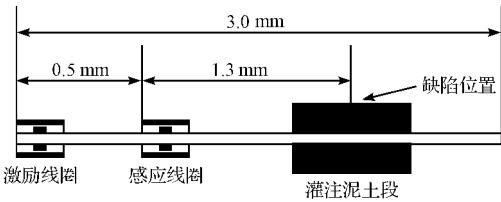


图 6 检测埋地锚杆的实验装置图

在 60 kHz 激励频率下的检测信号如图 7 所示。根据图 7 以及激励线圈和感应线圈位置,可以计算得到激励出的导波的波速为 4 941.5 m/s,检测到的锚杆的长度以及缺陷与激励线圈距离分别为 2.96 m, 1.84 m,检测相对误差分别为 1.3%,2.2%。根据理论导波群速度,可知激励出的导波同样为  $L(0,1)$  模态,并且泥土对导波的群速度影响不大。对比图 5 和图 7 可知泥土的存在会引起导波回波信号的衰减,但衰减幅度不大。因此可以基于磁致伸缩效应,在埋地锚杆中激励出  $L(0,1)$  模态导波,实现对锚杆长度和缺陷的精确检测和定位。

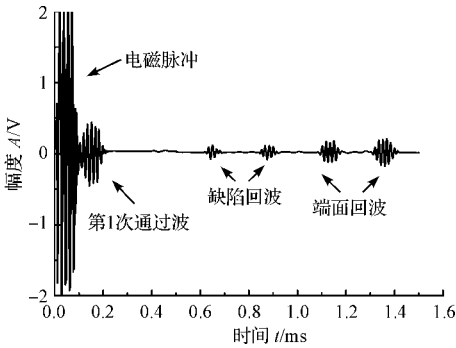


图 7 埋地锚杆检测信号

3 结束语

本研究提供了一种基于磁致伸缩导波原理的锚杆无损检测新方法。

(1) 锚杆的频散曲线可以作为磁致伸缩导波检测的理论指导,来选择合适的频率范围、激发模态。

(2) 基于锚杆的磁致伸缩效应,通过研制的锚杆检测系统能在锚杆中激励出  $L(0,1)$  模态导波,实现了对空气中以及埋地结构中锚杆的长度以及缺陷的精确检测。

(3) 埋地结构会造成导波信号的衰减,但衰减幅度不大,不影响对锚杆的检测。

参考文献 (References) :

[1] 吴 斌,张 青,孙雅欣,等. 一种基于导波技术检测锚杆长度及缺陷的新方法[J]. 无损检测,2007,29(5):237 – 240.

[2] 张昌锁,李 义,赵阳升,等. 锚杆锚固质量无损检测中的激发波研究[J]. 岩土力学与工程学报,2006,25(6):1240 – 1245.

[3] THURNER H F. Boltometer-instrument for Non-destructive testing of Grouted Rockbolts [C]//The 2nd International Symposium on Filed Measurements in Geomechanics. Rotterdam: A. A. Balkema,1988:135 – 143.

[4] BEARD M D, LOWE M J S, CAWLEY P. Development of a guided wave inspection technique for rock bolts[J]. **Non-Destructive Testing and Condition Monitoring**,2002,44(1):19 – 24.

[5] 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):1144 – 1147.

[6] KWUN H, BARTELS K A. Magnetostrictive sensor technology and its applications[J]. **Ultrasonics**,1998(36):171 – 178.

[7] 王玉生,王玉娜. 散布式磁致伸缩平板扬声器研制[J]. 机电工程,2008,25(4):84 – 86.

[8] 李世圆,王 鹤,王 左. 无缝管超声波探伤喷标控制的研究与设计[J]. 机电工程技术,2010,39(1):24 – 25,62.

[9] ROSE J L, AVIOLI M J, MUDGE P, et al. Guided wave inspection potential of defects in rail[J]. **NDT & E International**,2004(37):153 – 161.

[10] ACHENBACH J D. Wave Propagation in Elastic Solids [M]. Amsterdam: North Highland Publishing,1984.

[11] GAZIS D C. Three dimensional investigation of the propagation of waves in hollow circular cylinders I Analytical Foundation[J]. **Acoustical Society of America**,1959,31(5):568 – 573.

[编辑:李 辉]