

锚固系统质量检测的小波分析法

许 明, 张永兴

(重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

摘 要: 波动方程的有限元数值解表明, 对锚杆灌浆体内部缺陷的探测, 可用声速、幅值、波形等声参数作为判断的依据。基于小波包分析得到的能量特征向量, 可以作为缺陷特征向量进行无损检测。人工神经网络这类非线性动力学系统运用于该灰色系统的质量预测, 可取得良好的效果。

关 键 词: 波动方程; 完整性; 小波

中图分类号: P 631 **文献标识码:** A

Wavelet analysis of quality inspection of anchorage system

XU Ming, ZHANG Yong-xing

(Faculty of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: FEA numeric solution of wave equation indicates that deductions must comply with acoustic parameters such as velocity of sound, amplitude, wave shape etc. when inspecting interior flaws of grout of anchor bar. Basing on wavelet packet analysis, energy eigenvector is a flaw vector, which could be regarded as basis in anchors' non-destructive inspection. As a nonlinear dynamical system, artificial neural networks dealing with quality inspection of gray system have been proved efficient.

Key words: wave equation; integrality; wavelet

1 引 言

锚杆是一种高度受力的构件, 锚固系统一旦失效, 往往会给工程带来不可估量的损失, 因此, 检查它是否按设计预定的方式起作用是有必要的。笔者在锚杆的质量检测试验中引入的低应变动测法, 在力学上表现为给定扰动源信息、边界条件、初始条件, 建立描述介质运动的支配方程, 并由此求解其动力响应, 实质上处理可变场的问题, 通常归结为双曲型或双曲-扩散型方程的初值或初值-边值问题。

在波动方程中, 一般未考虑在实际问题中弥散的影响, 也未考虑由于物体几何形状的不规则或介质的不均匀对波传播的影响, 这对于弹性波导中的瞬态波, 欲求其精确解将是极为困难的。因此, 发展各种数值方法和近似方法是处理这类动力学问题的重要途径。

2 波动方程

在动力测试时, 有一定的假设条件或应用前

提, 这里对锚杆做如下基本假设:

- (1) 锚杆的受激振动在弹性限度内;
- (2) 锚杆材料均匀或分段均匀, 且为各向同性;
- (3) 锚杆受激振动时, 其截面保持平面。

按照假设条件, 杆中纵波控制方程为

$$\frac{E}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{R}{\rho A} = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (1)$$

式中 u 为质点纵向位移; t 为从冲击时刻算起的时间; x 为锚杆截面的位置; E 为锚杆材料的弹性模量; ρ 为质量密度; R 为岩土介质与锚固体界面间单位长度上的粘结摩阻力; A 为杆的横截面面积; 体力不计。

摩阻力 R 与段元侧岩土介质的性质、密实程度、段元侧面的粗糙度及锚杆施工方法等因素有关, 精确确定这些因素比较困难, 一般可采用理想弹性模型描述, 即

$$\frac{R}{\rho A} = au \quad (2)$$

将上式代入式(1)得

$$u'' - \text{div}(c \text{grad}(u)) + au = 0 \quad (3)$$

式中 a, c 为常数, $c = E/\rho$ 。

根据波动方程要惟一的确定位移函数 $u(x, t)$, 还必须给出锚杆的振动初始条件和应力波传播的边界条件。

初始条件是指锚杆初始时刻 $t = 0$ 时的扰动状态, 常指锚杆的初始位移和初始速度。一般恒有

$$u(x, t)|_{t=0} = u(x, 0) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial u(x, t)}{\partial t}|_{t=0} = u_t(x, 0) = 0 \quad (5)$$

边界条件是指 $t > 0$ 的任何时刻, 应力波在锚杆的边界截面(即锚头顶面和锚固体底面)上的状态。

对于岩石锚杆底端的位移, 由于低应变法的输入能量低, 而基岩一般较硬, 可作为固定端处理, 所以采用 Dirichlet 边界条件, 位移函数应有

$$u = 0 \quad (6)$$

锚头顶面是自由的, 可采用 Neumann 边界条件。根据刚体与杆的碰撞理论^[1], 刚体动量的增量等于撞击体和杆之间界面上的力的冲量, 由此可解出端面的位移, 并将锚头的应变表示为

$$\vec{n} \cdot \text{grad}(u) = g \exp(-t) \quad (7)$$

式中 g 为常数; $\vec{n}$ 为单位向量。

3 数值解

为了对以上定解问题进行求解, 定义 x 方向为锚杆长度方向, y 方向为直径方向, 由此形成求解域, 在此区域内生成和精化网格。 z 方向(竖直方向)表示质点位移的大小。

在求解域中央, 分别剖分出一个圆形区域和一个方形区域, 代表锚杆中的缺陷。将具有完整求解域的模型和具有中心孔的求解域的模型分别进行数值求解, 输出解在某一给定时刻点上的变形网格如图1所示。

图2为锚头的位移曲线, 图中“平”代表具有完整求解域的模型的解, “圆”代表具有圆孔的求解域的模型的解, “方”代表具有方孔的求解域的模型的解。由图可以看出, 第1个解的曲线较光滑, 位移幅值较大, 第2, 3个解的位移曲线有一定的畸变, 相位也滞后, 反映出应力波波速减小。由此可知, 应力波的到时(声速)和波形变化对缺陷识别至关重要。

图3为锚头加速度的功率谱密度曲线, 功率谱

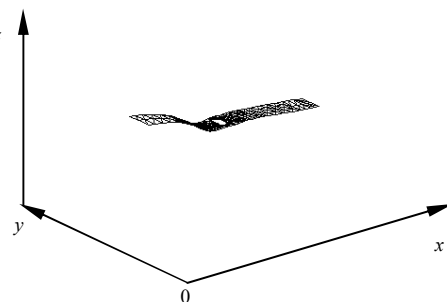


图1 具有中心孔的求解域的变形网格

Fig.1 Transformative gridding of district with a centric hole

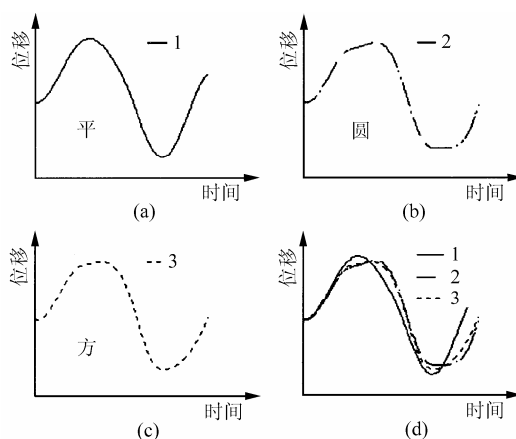


图2 锚头的位移曲线

Fig.2 Displacement curves of top face of anchor bar

呈单峰。缺陷不仅引起功率谱密度曲线峰值降低, 而且主频率也发生漂移, 功率谱的总面积, 即各频率成分的总能量也减小。这是由于声脉冲通过缺陷区时被微裂隙界面所散射, 导致能量衰减, 因而频谱曲线产生畸变。声谱特征值的变化比声时变化大得多, 尤其振幅的变化特别灵敏。

岩体对声波振幅谱吸收的大小以及频率的变化, 基本反映了岩体的结构组成及其物理力学性质。因此, 分析实测到的弹性波的频谱(振幅谱、

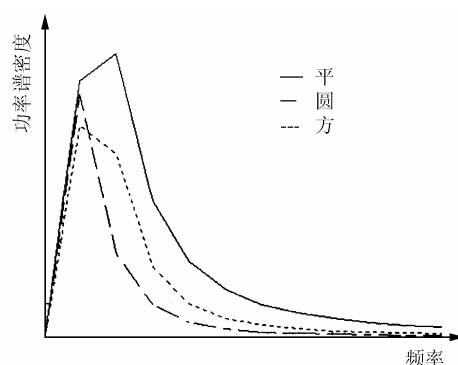


图3 加速度的功率谱密度

Fig.3 Density of power spectrum of acceleration

相位谱、能量谱等) 资料, 可以得到比用单纯弹性波速反映岩体结构状态更有效的资料。这也是声波探测法的一个重要的理论基础。

4 小波分析

小波分析属于时频分析的一种, 是调和分析这一数学领域半个世纪以来的工作结晶。小波变换是一种信号的时间-尺度(时间-频率)分析方法, 它具有多分辨率分析的特点, 而且, 在时频两域都具有表征信号局部特征的能力。小波变换具有对信号的自适应性, 很适合于探测正常信号中夹带的瞬态反常现象并展示其成分, 利用连续小波变换进行动态系统故障检测与诊断具有良好的效果^[2]。

对锚头位移曲线在小波包函数为 haar、分解层数为 3 和熵标准为 shannon 时的情况, 进行小波包分析, 分别提取第 3 层从低频(结点(3, 0))到高频(结点(3, 7)) 8 个频率成份的信号特征。

小波包变换后, 对小波包分解系数重构, 提取各频带范围的信号。图 4 为无缺陷锚杆的第 3 层各系数的重构, 图 5 为具有圆孔的锚杆第 3 层各系数的重构。

从重构信号可见, 当用一个含有丰富频率成份的信号作为输入对系统进行激励时, 由于系统缺陷对各频率成份的抑制和增强作用发生改变, 通常, 它会明显地对某些频率成份起抑制作用, 而对另外一些频率成份起增强作用。因此, 其输出与正常系统输出相比, 相同频带内信号的能量会有较大的差别, 它使某些频带内信号能量减小, 而使另外一些频带内信号能量增大。因此, 在各频率成份信号的

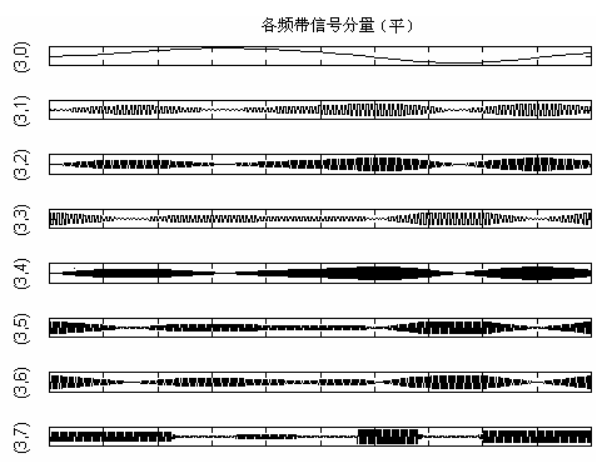


图 4 重构的小波包结点(无缺陷的锚杆)
Fig. 4 Reconstruction of wavelet packet crunode (anchor bar without flaw)

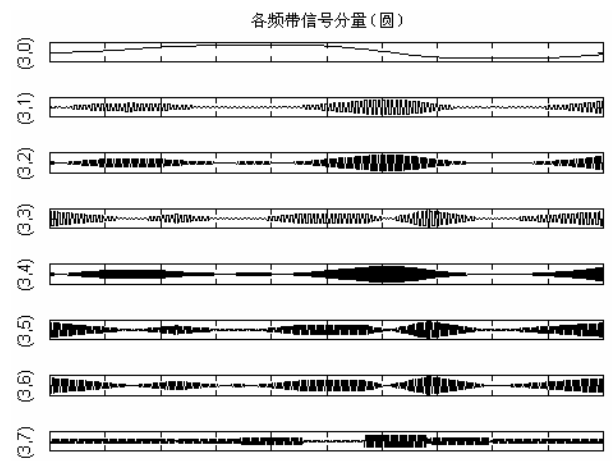


图 5 重构的小波包结点(具有圆孔的锚杆)
Fig. 5 Reconstruction of wavelet packet crunode (anchor bar with circular aperture)

能量中, 包含着丰富的缺陷信息, 某种或某几种频率成份能量的改变即代表了一种缺陷情况。

因此, 以能量为元素 ($\sum V_i^2$)^{1/2}, V_i 为重构信号的离散点的幅值) 可以构造一个特征向量, 依据特征向量进行分类决策, 就可以确定是否有缺陷, 该向量即为能够描述故障症状变化的征兆参数。

图 6 为加速度(无缺陷锚杆、具有中心圆孔锚杆、具有中心方孔锚杆、锚头附近有圆孔的锚杆、锚固段尾有圆孔的锚杆)各频带能量分布的柱形图。

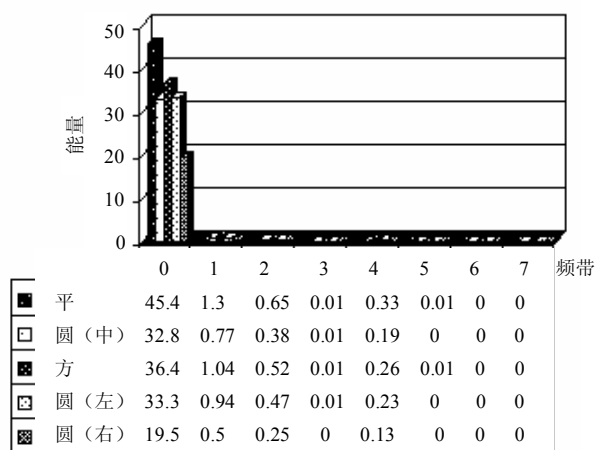


图 6 各频带能量分布的柱形图
Fig. 6 Histogram of energy distributing of each frequency band

5 人工神经网络预测

将重构系数的特征向量元素作为网络输入层 8 个神经元的输入数据, 锚杆的完整性系数(区间(0,1))作为网络输出层神经元的期望输出, 建立 BP 网络, 便可对锚固系统进行完整性检测。这种检测方法可避免人为对时间-频率特性进行分析时

的主观性, 提高缺陷识别精度。隐层中的神经元采用 sigmoid 型传递函数, 输出层的神经元采用线性传递函数, 利用输入输出样本集对其进行训练^[3]。经过训练后的 BP 网络就具有联想功能, 对于不是样本集中的输入也能给出合适的输出, 可以对工程锚杆完整性进行预测。

6 结 语

(1) 在锚杆灌浆体内部的孔洞、裂隙、蜂窝等缺陷的探测中, 可用声时、幅值、波形等声参数作为判断的依据, 若再加上在缺陷处的频谱畸变参数, 则可使判断更为可靠。

(2) 基于小波包分析得到的能量特征向量, 可以作为缺陷特征向量进行无损检测, 这种缺陷诊断方法在实施缺陷特征提取和诊断时, 无需被诊断系统的数学模型, 就可以迅速地进行检测。

(3) 人工神经网络预测锚杆完整性的精度取

决于样本集覆盖面的大小, 在现场测试中, 如能收集到锚杆各种缺陷形式、位置、程度等的能量谱, 将其作为神经元的输入数据, 可使诊断精度不断提高。

(4) 在锚固体完整性检测的神经网络的基础上, 可适当增加影响锚杆的抗拔承载能力的因素, 例如工程地质资料、施工原始记录、施工方法、现场条件以及锚杆的类型等, 可使其进一步对承载力作出预测。

参 考 文 献

- [1] 王靖涛. 桩基应力波检测理论及工程应用[M]. 北京: 地震出版社, 1999.
- [2] 胡昌华, 张军波, 夏军. 基于 Matlab 的系统分析与设计-小波分析[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2000.
- [3] 雷林源. 桩基动力学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000.

SINOROCK—2004

International Symposium on Rock Mechanics “Rock Characterization, Modeling and Engineering Design Methods”

5.18~21, 2004

中国宜昌三峡工程接待中心
(第一号通知)

主办单位: 中国科学院 《国际岩石力学与采矿科学学报》 中国岩石力学与工程学会

会议主题

讨论当前的岩石力学问题, 集交于岩石特征、模型与岩石工程设计方法以及灾害环境下重大工程的安全性研究。欢迎踊跃提交与此相关的论文, 包括工程实例研究。将邀请中外著名学者作大会特邀报告, 并主办一个 Workshop, 讨论集成设计方法学。

会前将安排 Short Courses and Special Lecture。会议期间将召开国际岩石力学学会理事会, 并考察三峡工程工地和水布垭工程工地。

论文集:

英文: 《International Journal of Rock Mechanics and Mining Science》专集

中文: 《岩石力学与工程学报》专集

会议时间 2004.5.17—5.21

重要日期: 提交摘要: 2003.6.30 前, 提交论文全文: 2003.10.31 前, 评审意见返还给作者: 2003.11.30 前, 论文提交给杂志编辑: 2003.12.31 前。

摘要: 不长于 400 英文记号, 包括题目、作者、作者单位、电话、传真和 E-mail 地址

论文的英文摘要: 用 E-mail: sinorck@rockeng.co.uk 提交给 Professor J A Hudson

Tel: +44 1707 322819 Fax: +44 1707 3759112

SINOROCK 7 The Quadrangle Welwyn Garden City Herts. AL8 6SG UK

对于中文论文 (作者可仅投中文论文, 但需有中英文摘要)

论文的中英文摘要: 用 E-mail: sinorck@deli.whrsm.ac.cn 提交给冯夏庭教授

武汉市武昌小洪山 430071 中国科学院武汉岩土力学研究所

电话: 027-87198913 手机: 13808671436 传真: 027-87197386

E-mail: sinorock@deli.whrsm.ac.cn stfen@deli.whrsm.ac.cn

Website: www.SINOROCK2004.com.cn www.whrsm.ac.cn