DOI: 10.3901/JME.2015.06.079

钢轨中导波传播模式的半解析有限元分析与试验测量*

卢 超 杨雪娟 戴 翔 常俊杰

(南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室 南昌 330063)

摘要: 导波传播模式分析是钢轨长距离导波检测和振动噪声控制的基础。钢轨中的导波传播模式可以通过波数频率关系和对应的结构形变来有效识别。应用半解析有限元法(Semi-analytical finite element method, SAFE), 基于虚功原理构建导波在任意截面弹性波导中传播的控制方程, 求解弹性波导中导波传播的频散曲线和结构形变。应用该方法求解 0~8 kHz 频率范围自由状态 CHN60 型钢轨中导波传播的波数频散关系和结构形变, 并讨论 8 个基本传播模式的特点。采用模态力锤及多传感器测量钢轨截面形变的模态分析试验方法得到钢轨横向和垂直振动模态导波的波数-频率系数, 数值分析与试验结果相符合。

关键词: 钢轨; 导波; 模式分析; 频散曲线; 半解析有限元法; 试验测量

中图分类号: U213; TB533

Semi-analytical FEM Analysis and Experimental Measurement for Propagating Guided Waves Modes in Rail

LU Chao YANG Xuejuan DAI Xiang CHANG Junjie

(Key Laboratory of Nondestructive Testing of Ministry of Education,
Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063)

Abstract: Acoustical guided waves modal analysis in rail is the basis of long distance guided wave inspection and rail vibration and noises control. In particular the various propagating guided waves in the rail are identified in terms of their propagation wavenumber coefficients and their corresponding deformed shapes. The semi-analytical finite element method is used to formulate the governing equation for guided waves propagating in elastic waveguides of arbitrary cross-section on the basis of the virtual work principle, wavenumber dispersion curves and deformed shapes are extracted by solving governing equation, which provide the basis for selecting mode and frequency during application. The propagating guided waves wavenumber dispersion curves and deformed shaped under 0-8 kHz frequency range for CHN60 type free rail are obtained using semi-analytical finite element method, and the characteristics of the eight based guided waves mode in rail are discussed. Instrumented hammer experimental study and modal analysis using sever vibration accelerometers mounted on rail are carried out to verify the vertically vibrating mode and horizontally vibrating mode guided waves wavenumber dispersion coefficient. Modeling and experimental investigations of lateral and vertical excitation in railhead shows that good agreement between numerical calculation and experiment.

Key words: rail; guided waves; modal analysis; dispersion curves; semi-analytical finite element method(SAFE); experimental measurement

0 前言

掌握钢轨中声导波传播特性是铁路钢轨长距离声导波检测和钢轨振动分析与噪声控制的基础^[1-4]。将钢轨作为弹性地基上的连续梁, 通过振动

和传递函数来表征其动力学特性的经典的理论分析方法是 Euler-Bernoulli 梁和 Timoshento 梁理论^[5-6]。这些基于弹性梁理论分析方法的重要假设前提是钢轨振动及声导波传播时, 钢轨截面不发生形变。但无形变假设仅适用于低频段, THOMPSON 等^[7-8]的研究表明当波动频率在 1.5 kHz 以上时, 钢轨截面有显著的形变。梁模型无法反映钢轨于轨头处横向激励引起的扭转变形。

钢轨中导波传播模式的分析主要采用有限元

* 国家自然科学基金(51265044, 11374134)和江西省自然科学基金(20114BAB202008)资助项目。20140327 收到初稿, 20140905 收到修改稿

数值方法,其优点是可以很好地分析钢轨长实体模型的振动与波动性质,但计算量很大^[3,9]。GAVRIC 等^[10-11]给出了一种导波有限元法的计算方法。该方法的基本原理是对三维钢轨模型仅对钢轨截面进行网格划分,在沿钢轨长度方向设置 $\exp(i\omega t - ikz)$ 导波传播因子,然后采用有限元法进行计算。该计算方法的特点是将三维问题降为二维问题,提高了计算速度和效率。由于导波有限元在计算上的优势,在高频率激励范围的钢轨超声导波检测方法研究中得到广泛应用,在有的文献中又称为波数有限元或半解析有限元^[12-14]。

本文首先介绍了半解析有限元求解波数-频率频散曲线和在钢轨轨头施加横向和垂直激励条件下产生的振动模态导波对应的钢轨结构形变的计算方法。然后采用该方法对 0~8 kHz 范围自由状态 CHN60 轨中的导波传播基本模式进行了分析。最后采用模态力锤在轨头激励,多个振动加速度传感器测量钢轨横截面变形响应的方法给出了钢轨中的垂直与横向振动模态导波的波数频散曲线,数值分析与试验结果相符合。本文的研究工作可为基于钢轨固体声波导效应的铁路钢轨长距离声导波检测方法研究以及轨道交通钢轨振动噪声控制提供参考。

1 半解析有限元

半解析有限元是求解三维任意横向截面弹性声波中导波传播的有效数值方法,其处理方法是:对弹性波导横截面进行有限元网格划分,导波在钢轨长度 z 方向上的传播采用正交函数 $\exp(i\xi z)$ 来描述,推导出导波在其中传播的波动方程,通过特征方程求解可得到波数和频率的关系,进而得到导波的频散特性曲线和钢轨任意节点的位移分布。

图 1 导波传播的半解析有限元模型

采用三角形和四边形单元对三维弹性波导模型横截面进行有限元网格划分,模型中某一体元节点 (x, y, z) 的位移 $\mathbf{u}$ 、应变 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 和应力 $\boldsymbol{\sigma}$ 可分别表示成^[13]

$$\mathbf{u} = (u_x \quad u_y \quad u_z)^T \quad (1)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon} = (\varepsilon_{xx} \quad \varepsilon_{yy} \quad \varepsilon_{zz} \quad \varepsilon_{yz} \quad \varepsilon_{zx} \quad \varepsilon_{xy})^T \quad (2)$$

$$\boldsymbol{\sigma} = (\sigma_{xx} \quad \sigma_{yy} \quad \sigma_{zz} \quad \sigma_{yz} \quad \sigma_{zx} \quad \sigma_{xy})^T \quad (3)$$

应力和应变关系为

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{k} \boldsymbol{\varepsilon} \quad (4)$$

式中, $\mathbf{k}$ 为弹性系数矩阵。

应变和位移关系为

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \left(\mathbf{L}_x \frac{\partial}{\partial x} + \mathbf{L}_y \frac{\partial}{\partial y} + \mathbf{L}_z \frac{\partial}{\partial z} \right) \mathbf{u} \quad (5)$$

$$\mathbf{L}_x = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{L}_y = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{L}_z = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

假定导波沿 z 方向传播时的位移场是简谐振动,波导介质中任意一点的位移可用空间分布函数表示为式(6)的形式^[13],其中 ξ 为波数, ω 为频率。

$$\mathbf{u}(x, y, z, t) = \begin{pmatrix} u_x(x, y, z, t) \\ u_y(x, y, z, t) \\ u_z(x, y, z, t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_x(x, y) \\ U_y(x, y) \\ U_z(x, y) \end{pmatrix} \exp[i(\xi z - \omega t)] \quad (6)$$

单元内任意一点的位移、单元的应变矢量均可通过形函数与节点位移矢量来表示,基于哈密顿原理经公式推导^[15],可得到弹性波导的总体运动方程

$$[\mathbf{K}_1 + i\xi \mathbf{K}_2 + \xi^2 \mathbf{K}_3 - \omega^2 \mathbf{M}]_m \mathbf{U} = \mathbf{F} \quad (7)$$

式中 下标 m ——系统的自由度数;

$\mathbf{K}_1, \mathbf{K}_2, \mathbf{K}_3$ ——刚度矩阵;

$\mathbf{M}$ ——质量矩阵;

U ——节点位移矢量;

F ——节点力矢量, 主要由边界条件给出。

根据式(7), 令 $F=0$, 可得到弹性波导中声导波的一般均质波动方程。给定一个波数 ξ 值, 可以通过求解特征值得到频率 ω 的值, 从而得到波数和频率的关系, 绘制出频散曲线。根据在弹性波导上施加的外部激励, 可以得到弹性声波导中任意点的位移矢量, 从而可以给出不同模式导波传播对应的弹性声波导位移形变图, 在三维模型下即可给出反映相应传播模式波的形变快照。

2 CHN60 型钢轨中声导波模式数值分析

频散和多模式是声导波在固体声波导中传播的两个最主要特性。与形状规则的平板和管不同, 反映钢轨中导波传播特性的频散曲线和各导波传播模式需要通过数值方法获得。由于钢轨截面几何尺寸的差异, 不同型号钢轨中导波的频散曲线和各模式导波的截止频率也有所不同。GAVRIC 计算了 UIC60 型钢轨中的声导波传播模式, 我国高铁线路上铺设的 CHN60 型钢轨与 UIC60 型钢轨有所不同, CHN60 型钢轨截面的主要几何尺寸参数如图 2 所示。

图 2 CHN60 型钢轨几何尺寸及截面有限元网格

采用半解析有限元对图 2 所示的 CHN60 型钢轨中声导波的传播特性进行分析。钢轨截面网格图如图 2 所示, 为保证计算精度, 采用了加密网格。图 3 为计算得到的 0~8 kHz 频率范围的波数-频率频散曲线, 随着激励频率的提高, 钢轨中的导波模式迅速增加。在该频率范围内, CHN60 型钢轨中存在 8 个导波传播基本模式。计算结果与文献[10]的结果类似, 但各基本模式的截止频率和曲线趋势略有不同, CHN60 型钢轨中第 6、7、8 阶基本模式导波的截止频率要高于 UIC60 型钢轨。根据各个基本模式下钢轨截面形变特点, 文献[10]将基本模式 1

称为横向弯曲模式, 基本模式 2 称为垂直弯曲模式, 基本模式 4 称为 1 阶轴向伸缩模式, 并依次标记为 fh, fv, ax1。为便于分析, 图 3 中依据截止频率大小依次标记各基本模式。

图 3 CHN60 型钢轨波数-频率频散曲线

在钢轨长距离导波检测和钢轨振动噪声控制研究中, 人们更关心在某一激励源下的导波传播模式。由于钢轨中导波基本模式很多, 为简化模式分析, 文献[15]基于在轨头的不同方向激励方式, 将钢轨中的导波传播模式分为横向振动模式、垂直振动模式和纵向振动模式三类, 以便于开展钢轨的导波检测研究。因此, 如图 2 所示, 在钢轨轨头位置分别沿 x 方向(横向)、 y 方向(垂直方向)和 z 方向(纵向)施加激励, 根据(19)式设置外部激励并计算钢轨中的导波传播振动模式。图 4 给出了横向激励、垂直方向激励和纵向激励下钢轨中导波振动模式在频率分别为 1 kHz, 5 kHz 和 8 kHz 时对应的钢轨截面位移形变图。为便于分析, 给出了各振动模式对应的钢轨横截面形变图(xy 平面)和侧视截面形变图(yz 平面)。

如图 4a 所示, 横向振动模式导波表现为钢轨在横向的水平弯曲振动, 在频率为 1 kHz 时, 整个钢轨基本呈刚体横向振动, 仅轨底有微弱的形变。随着频率增大, 钢轨呈现明显形变, 其中轨底绕轴向旋转变形。图 4b 展示了钢轨垂直振动模式导波对应的钢轨截面形变特点。在频率为 1 kHz 时钢轨呈刚体上下跳跃式振动。随着频率增大, 钢轨轨头和轨颏呈现明显变形, 轨底绕轴向旋转变形。图 4c 所示为纵向振动模式导波对应的钢轨截面形变图, 从侧视截面形变图可以看出, 钢轨在纵向(钢轨长轴方向)伸缩变化, 类似平面波传播, 但随着频率增大, 轨头和轨底形变明显, 呈现出钢轨轨头、轨腰纵向振动和轨底扭转混合的形变特点。从图 3 频散关系可以看出, 纵向振动模式在 5.27 kHz 以下时主要为 1 阶轴向伸缩模式 ax1(基本模式 4)。由于该模式表现为纵波特性, 类似与板中的兰姆波传播特性, 本文

将其标记为 0 阶纵向模式 L0, 该模式表现出良好的频散特性。在激励频率大于 5.27 kHz 以后, 依次出现高阶的纵向模式 L1(基本模式 7)和 L2(基本模式 8), 这两种基本模式都是频散的(图 3)。图 4c 中频率为 8 kHz 的钢轨截面形变显示了在多种纵向基本

模式合成下的纵向振动模态特点。图 5 给出了频率为 5 kHz 时, 钢轨中横向、垂直和纵向模态导波的三维形变图也即钢轨导波振动模态快照, 可以更清晰看出钢轨中三种振动模态导波传播对应的钢轨形变的特点。

图 4 钢轨导波各振动模态截面位移形变

3 钢轨横向和垂直振动模态导波试验测量

3.1 试验测量方法

测量钢轨中导波传播波数-频率关系的方法主要有二维傅里叶变换、时频分析和基于钢轨截面形变的模态分析方法^[16-18]。二维傅里叶变换测量方法固定在一处激励, 采用一个传感器沿直线方向进行多点等间距测量, 将所有测点的回波响应组成测试二维数据 $u(x, t)$, 然后对该数据实施时间和空间傅

里叶变换得到 $H(k, f)$ 。该测量方法的特点是各测点之间的间距影响测量结果精度, 测量结果与选择的钢轨表面测量位置有很大关系。

基于模态分析的钢轨导波传播试验测量原理是在考虑各传播模式对应的钢轨的截面几何形变的基础上, 激励源沿直线方向等间距多点激励, 采用多个传感器测量钢轨同一截面各测点的时域和频率响应, 通过 Prony 方法求解不同位置激发点的测量信号频率响应与导波传播波数和衰减系数的方程组, 最终得到波数-频率和衰减因子-频率关系。为分析 1.5 kHz 频率以上导波传播对应的钢轨形变,

图5 激励频率 5 kHz 时, 钢轨中三类振动模式导波形变图

GRASSIE 等^[19]最早提出用模态分析方法研究线路钢轨的振动及导波传播。本文在参考 THOMPSON^[18]和 GRASSIE 等^[19]的方法基础上, 基于模态分析试验方法测量 CHN60 型钢轨中的横向和垂直振动模式导波传播特性。

图6 试验测量方法

对实际线路长钢轨进行导波传播测量时, 采用模态力锤只能在轨头横向和垂直方向激励, 因此本试验主要对横向振动模式和垂直振动模式导波进行测量。测量方法如图 6 所示, 取钢轨在两枕木中点的截面位置作为测点, 钢轨截面不同几何位置(轨头、轨腰和轨底)处的振动加速度计布设方式如图 6a、6b 所示, 分别对应测量横向模式导波和垂直模式导波。以等间距 Δz 沿钢轨长度 z 方向由近到远采用模态力锤激发产生导波, 测量记录下钢轨截面各几何位置处的一系列时域响应, 并通过傅里叶变换得到频域响应。设钢轨截面上测量传感器数为 $j(j=1, 2, \dots, J, J \leq 5)$, 则与激发点位置有关的频

率响应函数 $h_j(z)$ 可表示为

$$h_j(z) = \sum_{n=1}^{\infty} A_{nj} \exp(s_n z) \quad (8)$$

式中 s_n ——导波的复传播系数;

$s_n = -\beta_n - ik_n$;

k_n ——第 n 个导波传播模式的复波数;

β_n ——距离衰减因子;

A_{nj} ——与钢轨截面测点位置 j 有关的复幅度系数。

系数 A_{nj} 反映了钢轨截面的形态变化与导波模式相关。因此, 与二维傅里叶变换方法不同, 模态分析测量方法还可以同时得到各模式的衰减频散关系。

对于试验测量, 设各激发点位置为 $z_q = (q-1)\Delta z$, 其中, $q=1, 2, \dots, Q$, 则式(8)可写成

$$h_{qj} = h_j(z_q) \approx \sum_{n=1}^N A_{nj} \exp(s_n (q-1)\Delta z) \quad (9)$$

式中, h_{qj} 为通过测量时域响应信号得到的已知参量, 而 A_{nj} 和 s_n 未知。若写成 $v_n = \exp(s_n \Delta z)$, 则式(9)为

$$h_{qj} \approx \sum_{n=1}^N A_{nj} v_n^{(q-1)} \quad (10)$$

由于 $Q < N$, 式(10)可以基于 Prony 法得到该方程的最小二乘解从而获得复幅度系数 A_{nj} 和 s_n 。

对于钢轨截面测量点 j 处的频域响应, 式(10)表明 Q 个方程具有 $2N$ 个未知量 (A_{nj} 和 s_n), 从方程可解考虑, 对于导波模式数 N , 应满足 $2N \leq Q$ 。本试验中激发点数 $Q=15$, 则 $N=7$ 。为提高测量精度, 本试验测量中对于横向振动模式 N 取 6, 对于垂直振动模式, N 取 5。由于从方程式(10)解出的每个频率点对应的复波数与幅度系数反映了模式解对钢轨导波传播模式的影响, 例如大的 β_n 值意味着该模式解迅速衰减消逝, 而小的 A_{nj} 表明这可能是某一对实际钢轨中导波传播模式影响微弱的模式解, 为有效识别幅度高、能量大, 影响和决定试验测量钢轨导波传播特性的优势模式解, 对每个频率点, 定义模式解的能量权重为

$$P_n = E_n / \sum_{n=1}^N E_n \quad (11)$$

$$\text{式中 } E_n = \sum_{j=1}^J \sum_{q=1}^Q |A_{nj}|^2 \exp(-2\beta_n (q-1)\Delta z)。$$

3.2 试验测量结果及分析

利用时域响应测试数据求解式(10), 参考文献

[18], 取模式解的能量权重 P_n 阈值分别为 10%、40%。图 7 为基于模式分析方法的钢轨导波传播特性试验测量系统照片, 长度为 2.1 m 的 CHN60 钢轨置于枕木上, 未加垫片和弹扣, 处于自由状态。采用模态力锤配合中性锤头以等间距 $\Delta z = 0.08$ m 激发产生导波, 压电加速度传感器按图 6a、6b 的方式布设测量导波振动信号, 8 通道数据采集器采样频率为 500 kHz。基于 DRVI 虚拟仪器系统设计数据采集软件, 图 8 为横向激励、激发点位于 $z = 0.96$ m 时数据采集与处理软件记录的各压电加速度传感器测量的时域响应波形。

图 7 钢轨导波传播试验测量系统

图 8 试验系统数据采集界面

图 9 和图 10 为采用基于模式分析方法测量得到的在轨头横向和垂直激励时 CHN60 型钢轨横向振动模式和垂直振动模式导波传播特性图, 可以看出存在多个模式解, 但能量权重大的模式解 ($P_n > 40\%$) 清晰地展示了 0~7 kHz 频率范围钢轨的横向和垂直振动传播优势模式的波数-频率关系。

图 11 给出了自由状态 CHN60 型钢轨 0~7 kHz 频率范围半解析有限元数值计算和试验测量的波数-频率关系曲线对比。可以看出, 在频率小于 5 kHz 时, 钢轨中的横向振动模式导波主要为基本模式 1(fh 模式), 垂直振动模式导波主要为基本模式 3(fv 模式)。而在 5~7 kHz 频率范围时, 横向和垂直振动模式导波由基本模式 1、3 和 5 为主构成。可以预

见当激励频率进一步增大时, 横向和垂直振动模式导波将会由更多的基本模式构成, 如何在试验测量技术上实现优势模式导波的激发和接收对导波检测技术研究具有重要意义。对于 CHN60 钢轨, 在 0~7 kHz 频率范围模式分析方法的试验测量结果与半解析有限元数值结果符合得很好。本测量方法可作为线路钢轨的导波传播特性分析的一种有效试验手段。

图 9 CHN60 型钢轨横向振动模式导波波数-频率测量曲线

图 10 CHN60 型钢轨垂直振动模式导波波数-频率测量曲线

图 11 CHN60 型钢轨导波传播波数-频率曲线的数值与试验测量结果对比

4 结论

本文采用半解析有限元和模式分析试验测量方法对我国高速铁路主要铺设的 CHN60 型钢轨中

的导波传播模式进行了分析。与有限元相比, 半解析有限元仅在钢轨截面进行网格划分, 将三维问题简化为二维问题, 可方便计算出钢轨中导波传播的波数频散关系及钢轨模型的位移形变结果, 计算效率大大提高。在 0~8 kHz 频率范围, CHN60 型钢轨中主要有垂直弯曲、横向弯曲、扭转和纵向等 8 个基本模式存在, 由于钢轨截面几何尺寸的差异, 与 UIC60 型钢轨相比, CHN60 型钢轨中各基本模式的截止频率和频散曲线趋势略有差异。

在钢轨导波检测和钢轨振动噪声控制研究中, 人们更关心给定激励源下的钢轨中导波传播模式特征。采用模态力锤激发手段在钢轨轨头激发横向和垂直振动模态导波, 采用模态分析方法对测量接收回波进行处理得到了相应优势模式的波数-频率关系曲线。试验结果表明在 5 kHz 频率以下时, 横向振动模态导波主要为横向弯曲基本模式 1(fh 模式), 垂直振动模态导波主要为垂直弯曲基本模式 3(fv 模式), 随着频率增大, 这两种振动模态导波将包含更多基本模式成分。

本文的研究给出了一种方便计算钢轨模型中导波传播的方法, 揭示了 CHN60 型钢轨在不同频率下的横向、垂直振动的特性, 可为进一步研究钢轨导波检测方法以及钢轨振动和噪声控制提供依据。

参 考 文 献

- [1] 杨清雷, 傅圣雪, 王泽华. 基于固体声检测的列车近报警系统设计[J]. 青岛科技大学学报, 2005, 26(6): 523-529.
YANG Qinglei, FU Shengxue, WANG Zehua. Alarm system design for approaching train based on detection of the solid state sound[J]. Journal of Qingdao University of Science and Technology, 2005, 26(6): 523-529.
- [2] 张友鹏, 任远. 基于超声导波的实时钢轨断裂检测方法研究[J]. 铁道工程学报, 2011, 146(11): 47-51.
ZHANG Youpeng, REN Yuan. Research on real-time detection method for broken rail based on ultrasonic guided waves[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2011, 146(11): 47-51.
- [3] 孙方遒, 谷爱军, 刘维宁. 钢轨长实体模型在不同频段振动及传递特性分析[J]. 铁道学报, 2013, 35(2): 81-85.
SUN Fangqiu, GU Aijun, LIU Weining. Study on vibration and transmission characteristics of long solid rail models under different frequencies [J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(2): 81-85.
- [4] COCCIA S, BARTOLI I, MARZANI A, et al. Numerical and experimental study of guided wave for detection of defects in the rail[J]. NDT&E International, 2011, 44 (2): 93-100.
- [5] 杨桂通, 张善元. 弹性动力学[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1988.
YANG Guitong, ZHANG Shanyuan. Elastic dynamics[M]. Beijing: China Railway Press, 1998.
- [6] MEAD D J. Wave propagation and natural modes in periodic system: Monocoupled system[J]. Journal of Sound and Vibration, 1975, 40(1): 1-18.
- [7] THOMPSON D J. Wheel-rail noise generation, part I: Introduction and interaction model[J]. Journal of Sound and Vibration, 1993, 161(4): 387-400.
- [8] WU T X, THOMPSON D J. A double timoshenko beam model for vertical vibration analysis of railway track at high frequency[J]. Journal of Sound and Vibration, 1999, 224(2): 329-348.
- [9] SANDERSON R. The application of finite element modeling to guided ultrasonic waves in rails[J]. Insight, 2002, 44(6): 359-363.
- [10] GAVRIC L. Computation of propagative waves in free rail using a finite element technique[J]. Journal of Sound and Vibration, 1995, 185(3): 531-543.
- [11] GAY L. Dynamic modeling of railway track based on wave propagation [J]. Journal of Sound and Vibration, 1996, 195(3): 477-505.
- [12] HAYSAHI T. Analysis of flexural mode focusing by a semi-analytical finite element method[J]. Journal of Acoustical Society of America, 2003, 113(3): 1241-1248.
- [13] LOVEDAY P W. Guided wave inspection and monitoring of railway track[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2012, 31(4): 303-309.
- [14] 张小伟, 唐志峰, 吕福在, 等. 基于半解析有限元的多层管超声导波数值模拟与试验研究[J]. 机械工程学报, 2014, 50(8): 10-16.
ZHANG Xiaowei, TANG Zhifeng, LÜ Fuzai, et al. Numerical simulation and experimental investigation on ultrasonic guided waves in multilayered pipes based on SAFE[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(8): 10-16.
- [15] LANZA S F, MCNAMARA J. Measuring high frequency waves propagation in railroad track by jointed time-frequency analysis[J]. Journal of Sound and Vibration, 2004, 273(3): 637-651.
- [16] 何存富, 吕炎, 宋国炎, 等. 线聚焦无镜头式聚偏氟乙

- 烯超声探头的研制及 $V(f,z)$ 分析法在表面波波速测量中的应用[J]. 机械工程学报, 2011, 47(24): 1-7.
- HE Cunfu, LÜ Yan, SONG Guorong, et al. Design, fabrication of line-focus lens-less polyvinylidene fluoride Transducers and applications on measuring surface acoustic waves with $V(f, z)$ analytical method[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(24): 1-7.
- [17] 刘增华, 余锋祥, 宋国荣, 等. 基于非参数 Snakes 的时频重排方法在钢绞线导波模式识别中的应用 [J]. 机械工程学报, 2011, 47(8): 47-53.
- LIU Zenghua, YU Fengxiang, SONG Guorong, et al. Reassignment of time-frequency representations based on nonparametric snakes and its application in guided wave mode identification of steel strands [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(8): 47-53.
- [18] THOMPSON D J. Experimental analysis of wave propagation in railway tracks [J]. Journal of Sound and Vibration, 1997, 203(5): 867-888.
- [19] GRASSIE S L, GREGORY R W, HARRISON D. The dynamic response of railway track to high frequency lateral excitation[J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 1982, 24 (1): 77-90.
- 作者简介: 卢超, 男, 1971 年出生, 博士, 教授, 无损检测技术教育部重点实验室常务副主任, 中国机械工程学会无损检测分会副主任委员。主要研究方向为超声无损检测、测试技术与仪器。
E-mail: luchaoniat@163.com

第 4 届上银优秀机械博士论文奖——优秀奖

以利萨茹层迭式局部扫描实现高速大范围之原子力显微镜

作者: 吴俊伟

毕业学校: 中国台湾大学

指导教师: 傅立成

原子力显微镜是一种非常有用的精密量测仪器, 此仪器具有纳米等级的解析能力并适用于导体与非导体样本且不受使用环境所限制, 为目前不可或缺的微纳米量测工具。然而, 传统原子力显微镜所使用的扫描方式, 在轨迹上容易造成扫描仪的机械共振问题, 且无法去除不必要的扫描区域, 因此, 对于一个大范围与高解析度的影像要求, 必须要以一个更长的扫描时间来达成, 无法给予一个有效率的扫描表现, 为目前原子力显微镜应用上的主要缺陷。在本论文中, 将以自行开发之原子力显微镜系统从三个不同的层面来克服上述问题。

首先, 我们采用顺滑式利萨茹轨迹并搭配适合此轨迹的先进控制法则, 可在不引起水平扫描仪振动的情况下提高扫描速率与精度。其次, 针对此顺滑轨迹的路径特征, 撰写扫描路径演算法则, 并利用探针横过样本后回授的高度资讯去除不必要的扫描区域, 借此减少扫描所需时间。最后, 考虑样本表面形貌的变化情形, 在表面剧烈变化的地方提供一个更高解析度的扫描, 借此改善扫描影像的品质, 从实际的扫描应用可以证实上述方法之效果。