

机车车轮超声波探伤信号检测方法研究

赵 阳¹,梅劲松¹,吕 岑²

(1. 南京航空航天大学 自动化学院,江苏 南京 210016;
2. 东南大学 信息科学与工程学院,江苏 南京 210096)

摘 要:国内机车车轮探伤系统长期以来缺乏高效实用的方法来提取淹没在噪声中的超声波探伤信号。鉴于此,提出了 MATLAB 环境下基于小波变换和三次样条插值法的组合式信号检测方法来辨识有效信号,通过 C#软件平台发送命令进行信号处理,并将处理后的有效信号在 C#软件平台上以超声波 A 型显示方式成像显示。经仿真测试,该检测方法去噪效果明显,信号提取准确快速,能极大地提高缺陷检出率;C#与 MATLAB 混合编程实现了不同编译环境之间的优势互补,提高了运行效率。

关键词:超声探伤信号;MATLAB;C#;小波变换;三次样条插值法

中图分类号:TP39

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2013)02-0211-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2013.02.054

Research on Detection Method of Locomotive Wheels' Ultrasonic Testing Signal

ZHAO Yang¹,MEI Jin-song¹,LÜ Cen²

(1. College of Automation Engineering,Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,Nanjing 210016,China;
2. School of Information Science and Engineering,Southeast University,Nanjing 210096,China)

Abstract:With the reason that domestic locomotive wheel flaw detection system has long been a lack of efficient and practical means to extract the ultrasonic flaw signals in noisy environments,suggest that the signal can be identified in effect by combined signal detection methods,which include wavelet transform method and cubic spline interpolation method. Through the platform to send commands to perform signal processing,so the signal can be seen by the A-Scan based on the C# software platform. Simulation results illustrate that the de-noising's effect is obvious. With the fast and accurate signals,the methods can greatly improve the defect detection rate. In addition,mixed programming of C# and MATLAB with the complementary strengths of the different building environment can improve operational efficiency.

Key words:ultrasonic testing signals; MATLAB;C#;wavelet transform; cubic spline interpolation

0 引 言

目前,无损检测有五种常用方法:超声波检测、射线检测、磁粉检测、渗透检测、涡流检测。它们的应用范围是有差别的;磁粉及涡流探伤多用于对材料近表面的缺陷检测;射线穿透法或超声波探伤法多用于材料内部的缺陷检测,但强射线对人体危害较大,目前仅在某些特殊场合下使用^[1]。

针对机车车轮承载压力易使其内部产生缺陷的情

况,国内外通常选择超声波探伤法来检测机车车轮的缺陷^[2]。根据超声波的工作原理,判别缺陷的主要信息来自回波信号,而工业现场采集到的超声波回波信号掺杂着复杂的高频噪声,如果将此信号直接用于判伤,会使判伤结果产生很大的误差甚至误判漏判的危险。因此,如何从噪声环境中提取有效超声波信号,是提高超声检测效果的重要前提。

文中针对机车车轮在线探伤平台采集到的超声波回波信号,提出采用小波变换去噪和样条插值法提取包络线的组合式信号检测方法,有效地提高了信噪比,具有抗干扰能力强和信号回波损失小的特点。同时,C#和 MATLAB 混合编程开发的软件平台,既实现了人性化的用户界面,又能够运用 MATLAB^[3]强大的数值处理能力和其独特的工具箱函数,使得软件平台兼有可读性好和数据处理能力强的特点。

收稿日期:2012-06-18;**修回日期:**2012-09-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61104020);南京航空航天大学基本科研业务费专项科研项目(NZ2012009)

作者简介:赵 阳(1987-),男,江苏淮安人,硕士研究生,研究方向为检测技术与自动化装置、超声波信号处理;梅劲松,副研究员,硕士生导师,研究方向为无人机飞行控制技术、自动化控制与检测技术、超声探伤检测技术。

1 系统介绍

国内某型的机车车轮的在线自动探伤装置配合安装于一段专用的检测轨道处,主要由压电超声换能探头阵列、现场信息采集单元和集中分析控制中心等部分组成,其组成如图 1 所示:

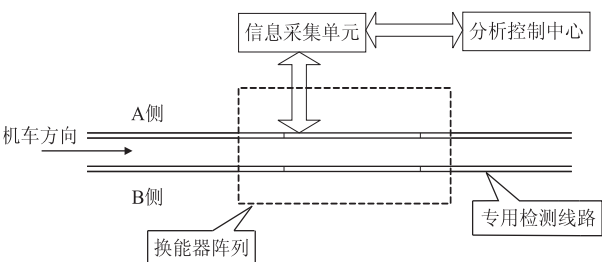


图 1 机车车轮的在线自动探伤装置的组成结构图

装置中,压电超声换能探头阵列主要由纵波直探头和横波探头分布排列组成。横波探头对径向缺陷敏感,纵波直探头对周向缺陷敏感,以两种探头组合的形式分布在轨道两侧来探测机车车轮的缺陷。对于每个超声换能探头阵列,其长度是 300mm,在轨道每侧检测线分布了 14 组探头阵列,总长度为 4200mm,能够满足所有在役型号的机车车轮周长要求。

现场信息采集单元由两部分构成,分别是数据采集系统和综合控制系统。采集系统采用的高速 AD 芯片,恒定地以一定的采样率、不加检波地采集原始波形,从而可以不失真地得到回波信号。综合控制系统主要包括喷水耦合子系统、灯控子系统、测速子系统、进离线触发子系统等小型系统组成。

集中分析控制中心也由两部分构成,包括探伤管理和探伤分析两大部分。探伤管理是系统集中控制中心,具备对整个系统的全面控制功能;探伤分析是本研究的重点内容,是整个系统的分析管理中心,具有决定着系统能否检测出真正的缺陷信号,避免漏检和误检可能性的重要意义。

2 小波去噪

因检测设备是安放在工业现场的在线探伤装置,工业现场的复杂环境将会对信号采集设备造成很大的干扰,若将含噪探伤信号直接用于判伤,会使判伤结果具有很大误差;若使用传统的数字滤波器,根据以往实验表明,其去噪效果不明显,且对回波峰值有明显的削弱。

小波分析是近 20 年发展起来的新兴学科,当今已应用在了信号处理、模式识别、量子场论、图像识别、声学等领域中。文中以机车车轮探伤信号为对象,采用小波变换去噪和样条插值法提取包络线的组合式检测方法进行信号检测。

2.1 小波去噪基本原理

小波去噪的步骤如下:

1. 对原始信号进行小波分解,选择小波基函数和确定分解层次为 N ,进行 N 层多分辨分析;
2. 对小波分解的高频系数进行门限阈值量化处理;
3. 根据小波分解的第 N 层低频系数和经过量化后的 $1 \sim N$ 层高频系数进行小波重构,达到提取机车车轮超声波探伤信号的目的。

超声波探伤过程中的含噪的一维信号模型如下表述:

$$S(i) = F(i) + \sum \varepsilon e_i(k), i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式中, $S(i)$ 为含噪信号, $F(i)$ 为有效信号, $\sum \varepsilon e_i(k)$ 为噪声叠加, e_i 为独立同分布的高斯白噪声 $n(0,1)$,通常表现为高频信号, n 是信号长度。

在小波分解的过程中,文中使用了近似脉冲信号的 Daubechies 小波系中的 db4 小波作为小波基函数^[4],对 $F(i)$ 信号采用了 Mallat^[5] 算法进行了 N 层多分辨分析^[6]。因机车车轮、探头的数目较多,数据量较大,需要考虑计算速度的因素,在满足实用性的前提下 N 取 3,做三层分解。

$$\begin{aligned} F &= cA1 + cD1 \\ &= cA2 + cD2 + cD1 \\ &= cA3 + cD3 + cD2 + cD1 \end{aligned} \quad (2)$$

在分解过程中,有效信号通常为低频信号或平稳信号,产生的系数为 k 层尺度空间的低频系数,而噪声信号通常表现为高频信号,产生的系数为 k 层小波空间的高频系数。上式 cAk 是各层的低频系数, cDk 是各层的高频系数, $k = 1, 2, 3$ 。

在步骤 2 中对小波分解的高频系数进行门限阈值量化处理时,采用了具有更好的数学特性、处理的结果更为平滑的软阈值量化函数,其数学表达式见公式(3):

$$S = \begin{cases} \text{sign}(x)(|x| - t) & |x| > t \\ 0 & |x| \leq t \end{cases} \quad (3)$$

上式表明软阈值是把信号的绝对值与指定的阈值进行比较,小于或等于阈值的点变为 0,大于阈值的点变为该点值与阈值的差。式中, t 是阈值的大小, $\text{sign}(x)$ 表示该信号的某点。

在(3)式中阈值 t 的选择对辨识信号起了关键影响作用。如果阈值过小,阈值降噪后的高频系数依然包含很多噪声元素,去噪效果差;阈值过大,则去除了有效成分,造成失真现象。关于阈值的确定,文中采用了 Donoho 等人提出的一种典型的阈值选取方法^[7]:

$$t = \sigma \sqrt{2 \lg N} \quad (4)$$

在(4)式中, N 为采样点数, σ 为噪声标准方差。经阈值量化函数的阈值处理法能有效地去除小波变换后的高频系数中的噪声分量。

为了还原真实的探伤信号,还需将阈值量化过后的小波系数作逆变换,重构探伤信号:

$$f^* = W^{-1}GnW \quad (5)$$

式中, GnW 是对小波系数 W 作门限阈值处理, f^* 即为重构后的轮辋超声波探伤信号。

2.2 小波去噪的 MATLAB 仿真

MATLAB 最显著的特点是拥有强大的数值计算能力,并且集成了多种算法和数学运算函数。文中充分利用 MATLAB 的数值计算能力强和编程简单的优秀品质,采用 MATLAB 进行数字信号处理,再考虑使用混合编程去解决 C#与 MATLAB 的兼容性问题。机车车轮超声探伤的原始信号如图 2 所示;小波去噪后的超声波探伤信号如图 3 所示。

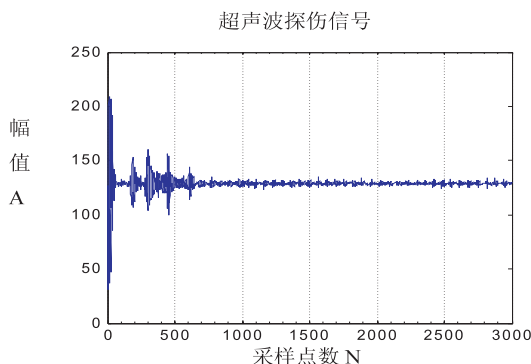


图2 机车车轮超声探伤信号

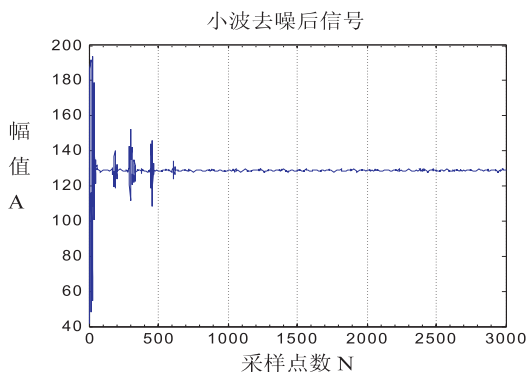


图3 基于小波去噪的探伤信号

图2和图3采用的是同一组纵波双晶探头超声信号数据,其中横坐标是本次采样中采集点数,纵坐标是该信号的幅值。分析发现,小波分析非常适用于分析超声波探伤领域的非平稳信号,它能检测到正常信号中的瞬态反常现象并显示其成分,实现信号中的有用部分和噪声的有效分离。

3 数字检波分析

样条法是用一条平滑曲线对各主干点进行拟合的方法。它的主要思路是:根据已有的数据点,找到一组

拟合多项式,在多项式拟合过程中,对每组相邻的数据点,用多项式去拟合数据点之间的曲线^[8]。一般常常选择三次曲线进行拟合。三次样条函数^[9]能够在较低阶的多项式上达到较高的光滑性。

将图3中小波去噪后的信号作为输入信号,基于 MATLAB 抽取信号上以5个点为区间的局部极大值点作为各主干点,基于三次样条插值法提取信号的正包络线并绘制其数字检波曲线^[10],如图4所示。

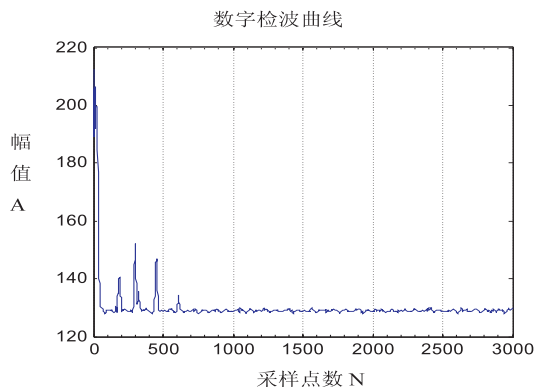


图4 数字检波曲线

4 信号处理平台

4.1 平台设计流程

机车车轮在线探伤系统的信号处理平台设计流程如图5所示。本平台基于可扩展标记语言(XML)数据库自定义数据格式^[11],包括机车车轴号、左\右轮、探头种类、探头号等信息标记。平台载入数据库后,根据探测定位车轮的信息提取所要探测的探伤数据,基于小波去噪算法历经信号的小波变换、门限阈值降噪、信号重构完成滤波功能,再基于三次样条插值法进行数字检波处理,提取机车车轮的信号包络曲线,该曲线数据可进一步用于验伤显示和储存备份。

本平台基于 C#语言搭建总体功能框架,而信号数值处理部分是基于 MATLAB 脚本语言编译的。这里的功能衔接是使用了 MATLAB 配置工具 (Deployment Tool) 生成 .Net 组件,将其中的小波去噪动态库和数字检波动态库^[12]分别添加到软件平台中,根据命令要求自动调用去噪动态库文件和检波动态库文件,解决 C#与 MATLAB 的兼容性问题,实现了计算机控制平台调用 MATLAB 程序做数值运算。

若要在未安装 MATLAB 程序的计算机上运行该信号处理平台,须安装发布程序 MCR (Matlab Compiler Runtime) 以执行 MATLAB 程序。处理后的数组数据再返回到平台软件中,供平台软件完成超声波 A 型显示,实现 MATLAB 对控制平台的信号反馈。

4.2 平台界面

在车轮通过探头阵列的过程中,数据实时地传输

到探伤机中并存储,工作人员调用存储的数据查看是否存在缺陷。图 4 是工作人员调用了某机车第 1 轴-左轮-第 65 号双晶直探头的数据(文中所选数据均为该组数据)绘制的超声波 A 型显示图像,超声波 A 型显示是以采样点数(距离)为横坐标,波峰值为纵坐标的一种成像方式。

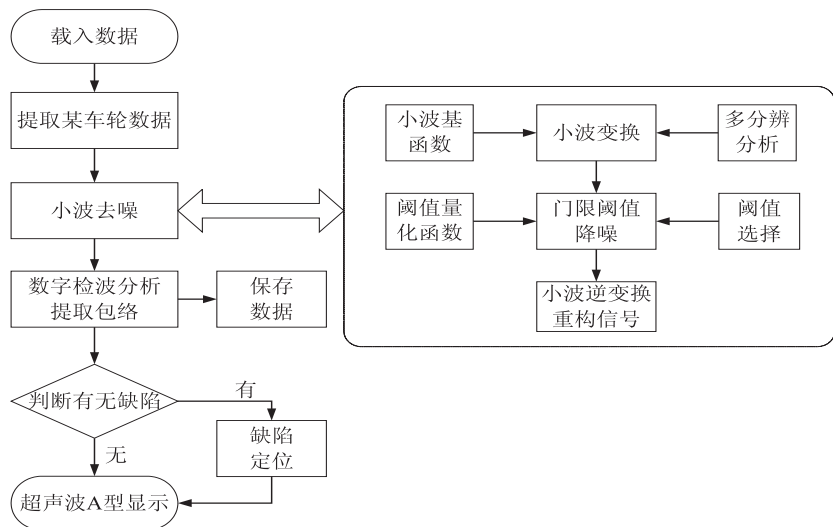


图 5 信号处理流程图

所选数据是有带有缺陷回波信息的数据。从图中看出,始波过后的第二次回波波峰是缺陷第一次回波(第一次回波波峰是由探头界面造成,属探头特性,可认为是车轮表面,超声波信号的起点),第三、四次波波峰分别是缺陷的第二、三次回波。显示界面中的第一次回波的波峰位置设为点 j (信号的起点),第二次回波波峰位置为点 i (缺陷一次回波),超声波在车轮中的传播速度 c ,系统的采样频率 f ,可算得该缺陷距探头界面(近似为车轮表面)的深度 h 是:

$$h = \frac{1}{2} * (i - j) * \frac{1}{f} * c \quad (6)$$

该信号参数为: $j = 187$, $i = 301$, $v = 5920\text{m/s}$, $f = 20\text{MHz}$,代入(6)式,计算得缺陷深度:

$$\begin{aligned} h &= \frac{1}{2} * (i - j) * \frac{1}{f} * c \\ &= \frac{1}{2} * (301 - 187) * \frac{1}{20 * 10^6} * 5920 \\ &= 16.872\text{mm} \end{aligned} \quad (7)$$

根据本次检测结果表明该机车 1 轴左轮是存在缺陷的,双晶 65 号探头探查到此缺陷位置距车轮表面为 16.872mm,工作人员根据该检测方法能较好地实现对缺陷的检测分析和定位。

5 结束语

本系统的信号处理平台设计思路是:采用 C#工程

项目调用 MATLAB 脚本语言编译的动态库来处理工业现场采集到的复杂超声波探伤信号,该动态库是固化了的基于小波变换和三次样条插值法的组合式信号检测算法。此设计的优点如下:

1. 小波变换去噪和三次样条插值进行检波分析能够有效地从复杂噪声干扰中辨识超声波探伤信号;

2. 充分利用 MATLAB 工具箱中所集成的数学函数,简化了软件编译的难度和维护的复杂程度,并且其强大的数值计算能力在处理海量数据中得到了充分体现,提高了系统的运行效率。

本软件平台自 2012 年 3 月嵌在国内某型机车车轮在线自动探伤系统中以来,信号处理的效果和运行的速度均比先前有了较大的提高,实现了实验室的理论研究应用到工程项目中。

参考文献:

- [1] Samokrutov A, Shevaldykin V, Bobrov V, et al. Development of acoustic methods and production of modern digital devices and technologies for ultrasonic non-destructive testing[J]. Ultrasonics, 2006, 61(4): 12-21.
- [2] 段凤增. 信号检测理论[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2001: 38-40.
- [3] 陈亚勇. MATLAB 信号处理详解[M]. 北京:人民邮电出版社, 2001: 163-167.
- [4] 杨文献,姜节胜. 基于复小波变换的超声信号分析技术研究[J]. 西北工业大学学报, 2004, 22(4): 510-514.
- [5] Mallat S, Hwang W L. Singularity detection and processing with wavelets[J]. IEEE Trans. on Inform. Theory, 1992, 38(2): 617-643.
- [6] 彭玉华. 小波变换与工程应用[M]. 北京:科学出版社, 1999.
- [7] Donoho D L, Johnstone I M. Ideal spatial adaptation by wavelet shrinkage[J]. Biometrika, 1994, 81(3): 425-455.
- [8] 陈杰. MATLAB 宝典[M]. 北京:电子工业出版社, 2010: 146-147.
- [9] 鞠时光,郭伟刚. 实用三次样条插值函数[J]. 小型微型计算机系统, 1992, 13(9): 20-23.
- [10] 苏金明,张莲花,刘波. MATLAB 工具箱应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2004: 433-487.
- [11] 张骏,崔海波. ADO.NET 数据库应用开发[M]. 北京:机械工业出版社, 2008: 220-242.
- [12] 刘维. 精通 Matlab 与 C/C++混合程序设计[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2012: 76-79.

机车车轮超声波探伤信号检测方法研究

作者:

[赵阳](#), [梅劲松](#), [吕岑](#)

作者单位:

[赵阳, 梅劲松\(南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 210016\)](#), [吕岑\(东南大学 信息科学与工程学院, 江苏 南京 210096\)](#)

刊名:

[计算机技术与发展](#)

英文刊名:

[Computer Technology and Development](#)

年, 卷(期):

2013(2)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjfz201302056.aspx