

机车车轮踏面擦伤数据处理算法的研究*

廖里程¹ 梅劲松¹ 赵阳²

(1. 南京航空航天大学 自动化学院 南京 210016; 2. 南京航空航天大学 信息中心 南京 210016)

摘要: 机车车轮踏面的擦伤现象,严重影响车辆的运行安全。介绍了一种机车车轮踏面擦伤检测系统的结构组成和工作原理。为了提高擦伤识别的效率,提出了一种在 MATLAB 环境下基于小波分析和模极大值法的机车车轮踏面擦伤数据处理算法。该算法对数据先进行小波处理,得到数据信号的细节系数和近似系数,再利用模极大值理论分析数据的奇异性,进而定位发生擦伤的数据点位置。经实验结果表明,该机车车轮踏面擦伤数据处理算法的效果明显,能够准确有效的判断擦伤情况。

关键词: 踏面擦伤;小波变换;模极大值;奇异性检测

中图分类号: TP274 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4030

Research on locomotive wheel tread irregularities data processing algorithm

Liao Licheng¹ Mei Jinsong¹ Zhao Yang²

(1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Information Center, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The phenomenon of locomotive wheel tread irregularities seriously affects the safety of vehicle operation. This paper introduce the constitute and working principle of a locomotive wheel tread detection system. In order to improve the efficiency of irregularity's recognition, this paper presents an algorithm based on wavelet analysis and modulus maxima in the MATLAB environment. This algorithm use wavelet to analyze the data and get the approximate and detail coefficients of data signal, than we use the modulus maxima method to analyze the singularity of data and orientate the position of data point where have an tread irregularity further. The results of experiment indicate that the effect of this locomotive wheel tread irregularities processing algorithm is obviously, and it can accurately judge the tread irregularities.

Keywords: tread irregularities; wavelet transform; modulus maxima method; singularity detection

1 引言

轮对是机车车辆走行部的重要组成部分,机车车轮踏面滚轮圆处擦伤现象不断增加,逐渐成为了机车故障的重要源头,严重制约我国列车提速和轨道交通安全。目前国内对车轮踏面滚轮圆处擦伤检测方式主要通过工作人员的眼观目测、敲击耳听、以及手持式踏面擦伤检测仪器等进行检测。检测精度很容易受到现场环境、人为因素、以及仪器设备本身因素的影响,且检测效率低,还易发生漏检。如何准确测量车轮踏面擦伤已经是轨道交通安全检测领域一个重要课题。

提出一种车轮踏面擦伤检测系统和擦伤数据处理分析方法,该系统可以实现自动化检测,不占用车轮周转时间,并利用小波变换进行擦伤数据处理分析判定从而代替人工

分析,提高擦伤的检出率。在实际生产使用过程中,该机车车轮踏面擦伤检测系统和擦伤数据处理分析方法有着良好的应用前景。

2 机车车轮踏面擦伤检测系统

目前,机车车轮踏面擦伤检测方式主要有静态检测和动态检测。而应用较广泛的车轮踏面擦伤检测方法主要有^[1-3]:位移测量法、超声波测量法、加速度测量法等。所采用的机车车轮踏面擦伤检测系统是基于位移式的动态在线检测法。它的结构设计简单、检测精度高、成本低、使用方便、适用的车型多、可实现 24 h 无人工干预在线自动检测。

机车车轮踏面擦伤检测系统^[4],由摆杆检测单元、擦伤数据采集单元、车轮定位单元、上位机通信软件、擦伤数据分析软件、进线感应单元、离线感应单元、数据库组成。当

机车通过检测区域前端和末端时,分别触发进线感应单元和离线感应单元,产生进线标志信号和离线标志信号并存入数据库,等待上位机通信软件的识别;当机车通过检测区域时,车轮的轮缘部位下压在位移式摆杆检测单元上,摆杆上的旋转编码器将轮缘下压数据采集下来保存并传送给擦伤数据采集单元;擦伤数据采集单元还可以通过接收车轮定位单元的信息,准确定位车轮的位置、计算机车行驶速度;上位机通信软件从数据库中反复读取机车的一组进线和离线标志信号,若收到一组完整的标志信号,则从擦伤数据采集模块中读取擦伤数据,最后调用擦伤数据分析软件,对采集到的数据进行分析判断,若有擦伤存在,进行擦伤的不同等级的报警并形成报告记录文件。该系统能够对机车车轮进行在线自动擦伤检测,对采集到的数据进行归类分析处理,能够准确快速的判断车轮踏面滚轮圆处是否有擦伤现象的存在。系统的基本结构如图1所示。

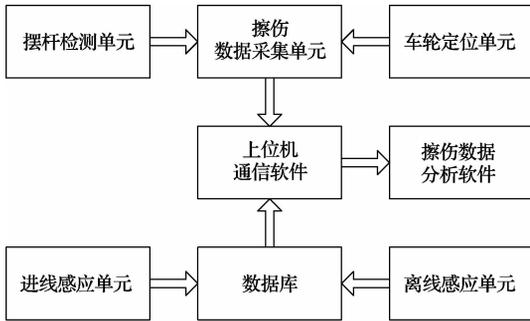


图1 机车车轮踏面擦伤检测系统结构

3 小波分析及其在擦伤数据处理中的应用原理

3.1 小波分析及变换原理^[5-8]

传统的傅里叶变换时对信号进行整体变换,要么在时域,要么在频域进行分析处理,因此无法给出信号的频谱信息。而小波是一种长度有限、平均值为零的特殊波。它在时域和频域都具有紧支集或近似紧支集,它直流分量为零。小波变换是一种积分变换,具有多分辨特性,可以按照不同的尺度将信号进行分解,实现了将复杂信号分解成简单信号,在不同的频带对信号进行精细观察和分析。如果有 $\psi(t) \in L^2(\mathbf{R})$, $\hat{\psi}(\omega)$ 是其傅里叶变换,满足:

$$C_\psi = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (1)$$

式中: $\psi(t)$ 为基本小波或小波母函数。对 $\psi(t)$ 进行平移、伸缩处理后可以产生一族小波函数:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2)$$

式中: $a, b \in \mathbf{R}; a \neq 0$ 。且每一个这族小波函数都有规范化的范数 $\|\psi_{a,b}\| = \|\psi(t)\| = 1$ 。

小波变换是将母小波函数 $\psi(t)$ 做位移 τ 之后,在不同尺度 a 下与信号 $x(t)$ 做内积:

$$WT_x(a, \tau) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi^*\left(\frac{t-\tau}{a}\right) dt, a > 0 \quad (3)$$

当 $X(\omega), \psi(\omega)$ 分别为 $x(t), \psi(t)$ 的傅里叶变换,式(3)变换到频域可表示为:

$$WT_x(a, \tau) = \frac{\sqrt{|a|}}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega) \psi^*(a\omega) e^{j\omega\tau} d\omega \quad (4)$$

3.2 小波变换模极大值理论和突变点检测原理^[9-10]

在某一尺度 s_0 下,对函数 $f(x)$ 进行小波变换,如果有 x_0 左右领域中的任意点 x 都满足 $|(Wf)(s_0, x)| < |(Wf)(s_0, x_0)|$,且另外一个领域内任意一点 x 也都满足 $|(Wf)(s_0, x)| \leq |(Wf)(s_0, x_0)|$,则 (s_0, x_0) 为小波变换的模极大值点。

如果一个函数在某点处不可微,则可说它在该点是奇异的。可以将 Lipschitz 指数 α 定义到 $0 \leq \alpha < 1$,来度量函数的奇异性。如存在一个常数 C ,使得:

$$\forall t \in \mathbf{R}, |f(t) - f(t_0)| \leq C |t - t_0|^\alpha \quad (5)$$

成立,则称函数 f 在点 t_0 是 Lipschitz α 的。如果所有的 $t_0 \in [a, b]$ 和一个与 t_0 无关的常量 C ,使得式(5)成立,则称 f 在区间 $[a, b]$ 是一致 Lipschitz α 的, α 的上界值称之为 Lipschitz 奇异性。

利用小波分析多分辨率的特性将突变信号进行多尺度分解,然后通过分解后的信号来确定突变信号的突变位置。Lipschitz 指数被用来定量描述函数的奇异性。当小波变换尺度越来越精细时,小波变换模的极大值信号的突变点位置越精细,其衰减速度取决于信号在突变点的 Lipschitz 指数。

信号的突变性检测方法的原理是:对原始信号在不同尺度上进行平滑处理,再对平滑后的信号的一阶或二阶导数检测其极值或过零点。根据定义和卷积的性质,得到:

$$f * \psi_s^{(1)}(t) = f * (s \frac{d\theta_s}{dt}) = s \frac{d}{dt}(f * \theta_s(t)) \quad (6)$$

$$f * \psi_s^{(2)}(t) = f * (s^2 \frac{d^2\theta_s}{dt^2}) = s^2 \frac{d^2}{dt^2}(f * \theta_s(t)) \quad (7)$$

式中: $f * \theta_s(t)$ 为平滑算子,表示 $f(t)$ 经算子作用后变成一个光滑函数。 $f(t)$ 的小波变换 $|(Wf)(s, t)| = f * \psi_s^{(1)}(t)$ 与 $f * \theta_s(t)$ 的一阶导数成正比。 $|(Wf)(s, t)| = f * \psi_s^{(2)}(t)$ 与 $f * \theta_s(t)$ 的二阶导数成正比。因此,选取光滑函数后,信号的突变点可以通过检测小波变换 $f * \psi_s^{(1)}(t)$ 和 $f * \psi_s^{(2)}(t)$ 的模极大值来判断。信号奇异性有第1类间断点和第2类间断点之分,前者是信号在某时刻幅值发生突变,后者是幅值没有突变,信号的一阶微分突变。该文要分析的擦伤数据属于第1种类型。

3.3 擦伤数据处理算法原理

利用小波变换分析擦伤数据的方法是:对原始擦伤数据进行多尺度分析,在信号出现突变(即当有擦伤存在)时,其小波变换后的系数具有模极大值,利用模极大值点的检测来确定原始数据擦伤发生的时间和位置。在输入擦伤数

据之后,根据其特点选取小波和确定小波分解层数。小波的选取方法是,在相同的尺度下,用不同的小波对同一信号做分析,再比较处理后的信号信噪比,来实现最优小波的选取。分解层数确定十分重要,层数过多会使有用的信号丢失,信噪比降低,增加计算量,层数过少,不能较大的提高信噪比。分解层数的方法是,先对信号进行层数比较少的分解,判断是否得到明显擦伤特征信息,如果不满足要求,则增加分解层数,直到满足要求为止^[11-12]。完成以上步骤后就可以对擦伤数据进行小波分解得到各层小波系数,再通过近似信号和细节信号判别擦伤的位置。擦伤数据处理算法的流程如图 2 所示。

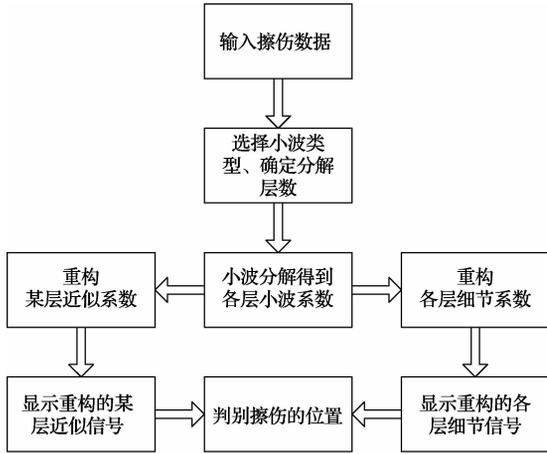


图 2 机车车轮踏面擦伤数据处理算法的流程

4 擦伤数据处理算法的验证实验

为了更加直观的判断擦伤数据处理算法的准确性,分别提取软件模拟的擦伤数据和实际过车擦伤数据,应用擦伤数据算法进行擦伤识别判断验证实验。

4.1 软件模拟的擦伤数据验证

对实际过车的擦伤数据结构进行分析,利用 C# 语言模拟的三角波擦伤数据

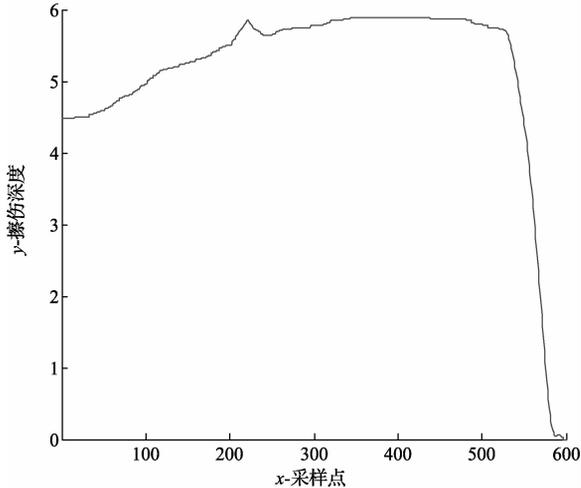


图 3 三角波擦伤数据原始曲线

在 Microsoft Visual Studio 2010 环境下开发了模拟擦伤数据软件。产生 4 组擦伤数据,它们的局部擦伤形式分别是:三角波、矩形波、正弦波、矩形波+正弦波。前 3 组擦伤数据长度都为 1 200 mm,擦伤的长度都为 40 mm,擦伤的起始位置分别为 400 mm 处、600 mm 处、800 mm 处、400 mm 和 800 mm 处,擦伤的深度都为 0.3 mm。在 MATLAB 环境下编写选取 Daubechies 系列小波对擦伤数据进行不同尺度下的分析,可以得到多尺度分析后的曲线(其中要说明的是本系统中擦伤数据格式上,长度=采样点×2)。4 组擦伤数据原始曲线如图 3~7 所示。

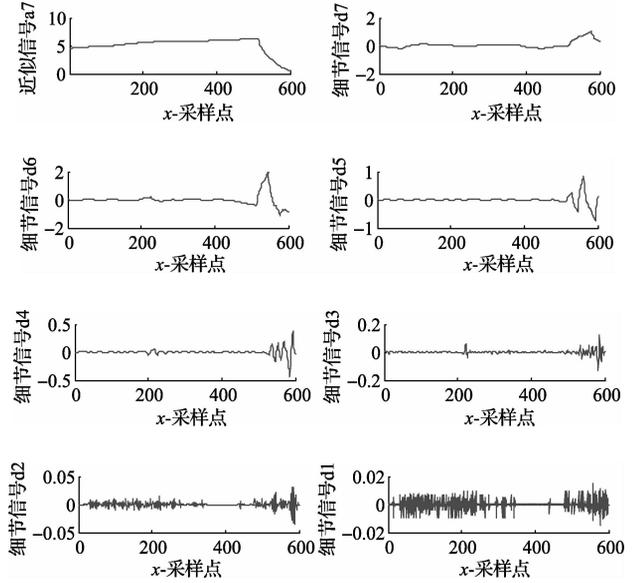


图 4 三角波擦伤数据细节信号及近似信号

分析结果:图 4 中三角波数据的细节信号 d4 可以清晰的显示出发生擦伤的位置从采样点 200 处开始,到 230 结束。对 d4 末端对应图 3 中曲线下降部分,不作为擦伤考虑,基本符合给定三角波擦伤信息。

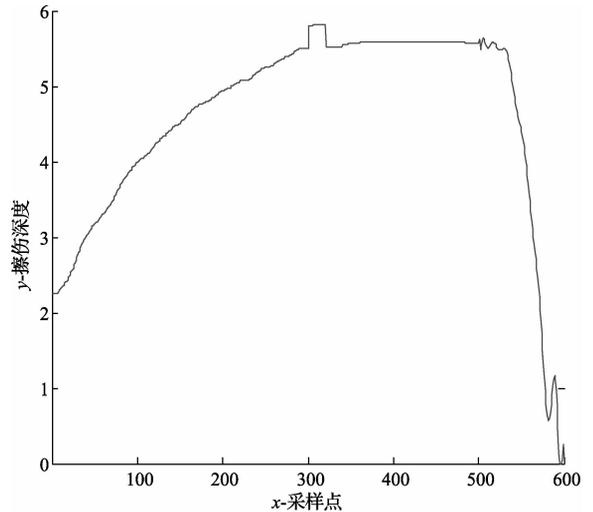


图 5 矩形波擦伤数据原始曲线

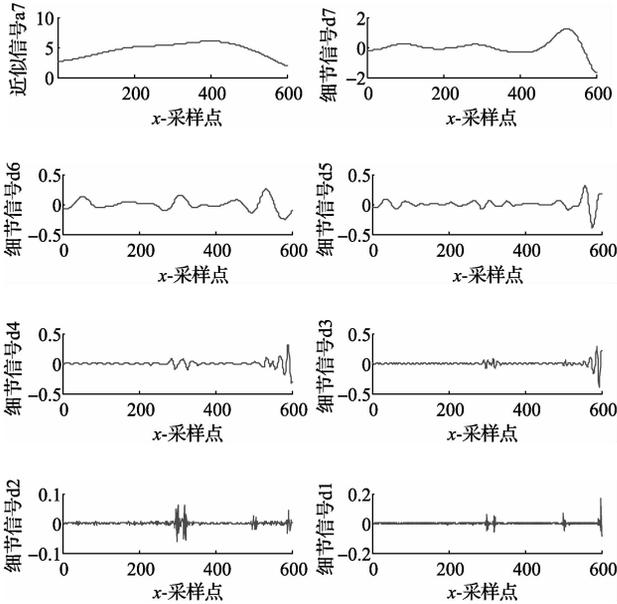


图6 矩形波擦伤数据细节信号及近似信号

分析结果:图6中矩形波数据的细节信号d3可以清晰的显示出发生擦伤的位置从采样点300处开始,到350处结束。基本符合给定矩形波擦伤信息。

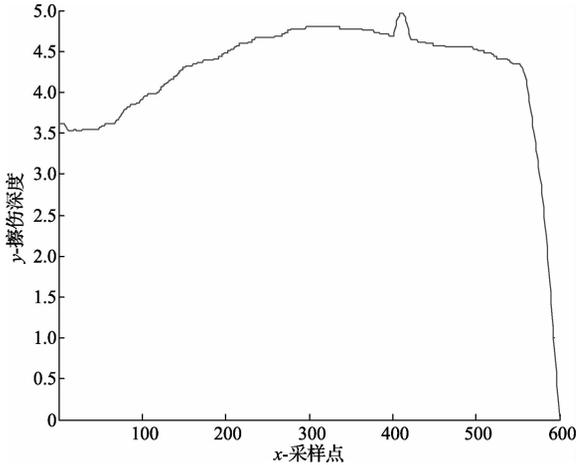


图7 正弦波擦伤数据原始曲线

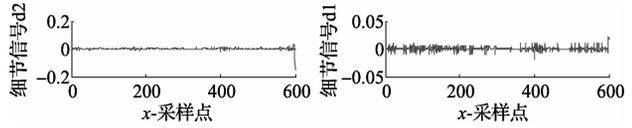
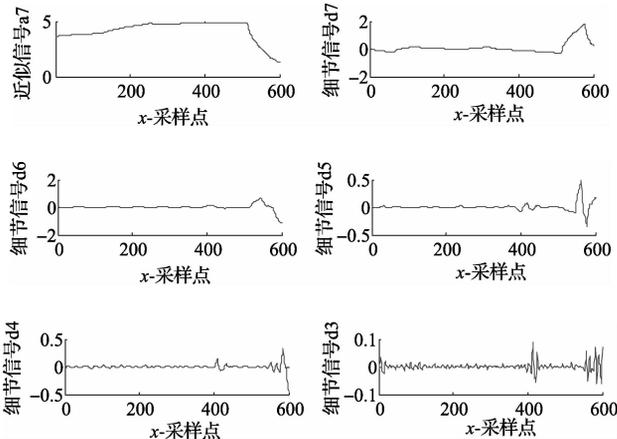


图8 正弦波擦伤数据细节信号及近似信号

分析结果:图8中正弦波数据的细节信号d4可以清晰的显示出发生擦伤的位置从采样点400处开始,到430处结束。基本符合给定正弦波擦伤信息。如图9所示矩形和正弦组合擦伤数据原始曲线。

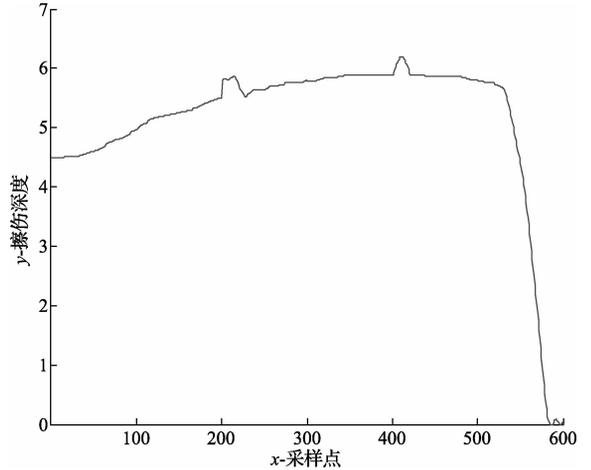


图9 矩形和正弦组合波擦伤数据原始曲线

分析结果:图10中组合波数据的细节信号d4可以清晰的显示出发生擦伤个数为2个,位置分别从采样点200和400处开始,到230和430处结束。基本符合给定组合波擦伤信息。

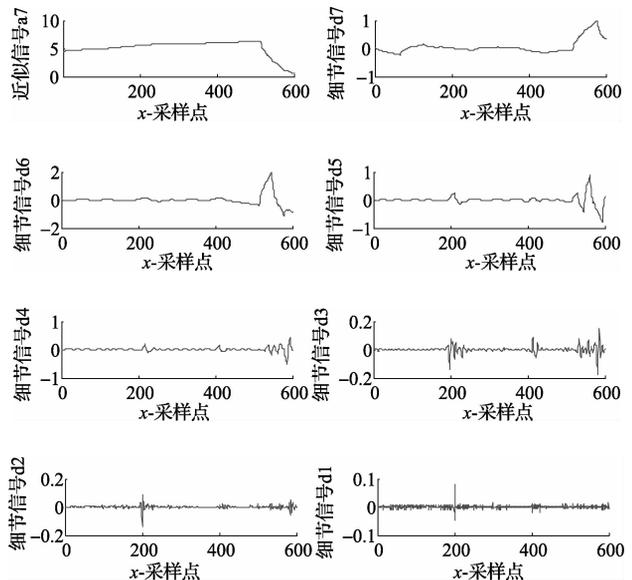


图10 矩形和正弦组合波擦伤数据细节信号及近似信号

4.2 实际过车的擦伤数据验证

为了验证擦伤数据处理算法在实际过车应用情况下的效果,提取一组实际过车的且带有擦伤信息的数据。它原始曲线和实际过车擦伤数据细节信号及近似信号分别如图8、9所示。

分析结果:图11可以看出该实际过车擦伤数据曲线中发生擦伤的位置点在380~310。图12细节信号d4分析结果表明擦伤发生的位置可以确定在400左右。与给定的擦伤点位置基本吻合。

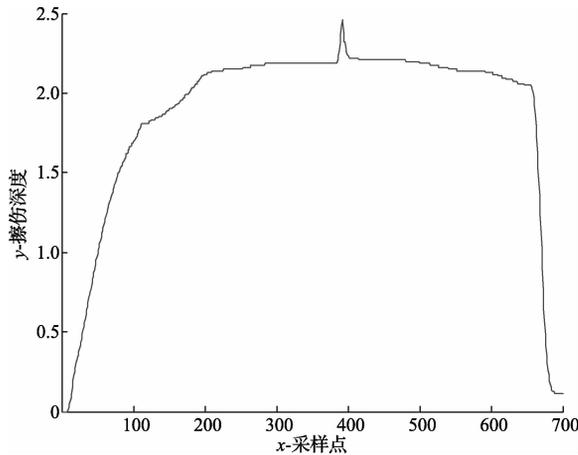


图11 实际过车擦伤数据原始曲线

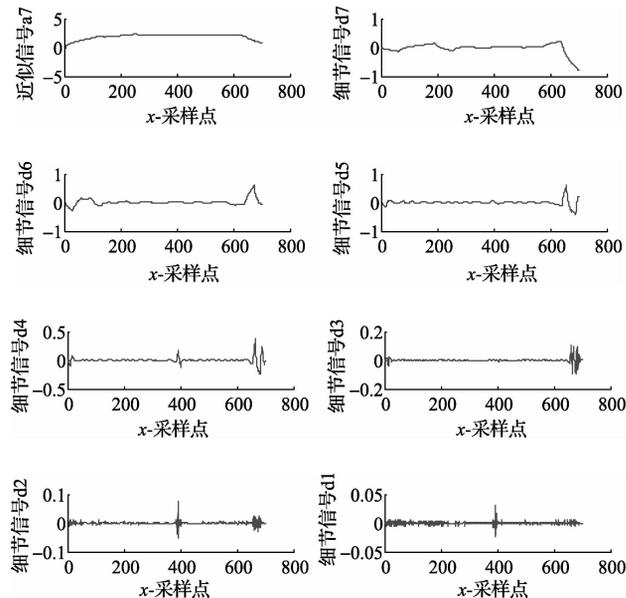


图12 实际过车擦伤数据细节信号及近似信号

综上所述,该文所设计的擦伤数据处理算法符合擦伤分析识别的要求,而且能够有效判断擦伤的个数和位置信息。

5 结 论

通过以上模拟擦伤数据和现场实际过车数据的验证可以看出利用小波分析模极大值法能够准确的对擦伤的个数和擦伤位置信息进行定位。而且处理分析的效果也是比较明显的,基本符合擦伤识别的要求。但是还存在一些缺陷,比如擦伤的深度信息还不能定性的确定,这也是后期算法改进更新的重点。

参考文献

- [1] 何平,李颖,马星宇,等. 光学式列车车轮擦伤检测系统设计[J]. 自动化与仪表,2012(10):1-3, 28.
- [2] 都丽杰. 动车组轮对故障动态检测方案[J]. 电子设计工程,2010,18(11):99-102.
- [3] 陈锐菊. 轮对踏面损伤检测方法综述[J]. 内燃机车,2011(2):46-48, 6.
- [4] 石峥映,黄明全,孙志林,等. 一种车轮踏面擦伤及不圆度在线检测装置:中国,CN102785679A[P]. 2012-11-21.
- [5] 徐超. 基于形态滤波和提升小波变换的漏磁信号处理研究[J]. 国外电子测量技术,2013,32(8):23-25.
- [6] 王华,王秀同,邵显奎. 基于 MATLAB 的电缆故障仿真[J]. 国外电子测量技术,2012,31(6):47-50.
- [7] 李舜酩,郭海东,李殿荣. 振动信号处理方法综述[J]. 仪器仪表学报,2013,34(8):1907-1915.
- [8] 焦敬品,于兆卿,刘文华,等. 基于小波变换的薄层厚度电磁超声测量方法[J]. 仪器仪表学报,2013,34(3):588-595.
- [9] 杜云朋,王建斌,靳小强. 超声导波管道检测的小波模极大值去噪法[J]. 电子测量与仪器学报,2013,27(7):683-687.
- [10] 权建峰,李艳,郭东敏,等. 小波变换模极大值方法对信号的奇异性检测[J]. 探测与控制学报,2009,31(2):46-49.
- [11] 陈鹏,蔡强富,韩德来. EMAT 回波信号提升小波降噪最佳分解层数研究[J]. 国外电子测量技术,2012,31(5):16-19.
- [12] 薛凌云,黄伟,陈超. 基于空间谱估计技术的间谐波小波检测算法[J]. 电子测量技术,2014,37(10):46-49.

作者简介

廖里程,在读硕士研究生。主要研究方向为检测技术与自动化装置,数字信号处理等。

E-mail:464737531@qq.com