

# 一种基于小波变换的导弹运输车辆 故障诊断方法<sup>1)</sup>

叶昊 王桂增 方崇智

(清华大学自动化系 北京 100084)

张永光

刘志军

(中国科学院系统科学研究所 北京 100080) (航天工业总公司 206所 北京 100854)

**摘要** 利用离散小波变换的时频特性和连续小波变换检测信号边沿的原理,进行模拟导弹运输车辆轮胎和板簧的故障检测、分离和定位.该方法不需要对象的数学模型.模型车的故障诊断实验结果表明,该方法灵敏度高,对噪声具有较好的鲁棒性.

**关键词** 小波变换,故障诊断,运输车辆.

## 1 前言

导弹运输车的轮胎和板簧发生故障后,如果不能及时发现并处理,可能造成很大的经济损失甚至人员伤亡.因此,对导弹运输车辆的轮胎和板簧进行实时故障诊断具有重要的意义.但目前国内外关于车辆行走系中板簧和轮胎故障的在线诊断研究还不多见.

本文提出了一种基于小波变换的导弹运输车轮胎和板簧的故障诊断方法,它无需车辆的数学模型,在模型车的故障诊断实验中取得了满意的效果.

## 2 小波变换的基本原理

### 2.1 定义及特性

定义信号  $x(t)$  的连续小波变换(CWT)为<sup>[1]</sup>

$$WTx(a, t) = \frac{1}{a} \int x(\tau) \psi\left(\frac{t-\tau}{a}\right) d\tau.$$

其中  $\psi_a(t) = \frac{1}{a} \psi\left(\frac{t}{a}\right)$ ,  $a$  为尺度因子,  $\tau$  是时间位移,  $\psi(t)$  采用高斯函数的一阶导数.

信号  $x(t)$  的离散小波变换(DWT)定义为<sup>[2]</sup>

$$WT_x(j, k) = \int x(t) \overline{\psi_{j,k}(t)} dt.$$

其中  $\psi_{j,k}(t) = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \psi\left(\frac{t-2^j k T_0}{2^j}\right)$ ,  $\psi_{j,k}(t)$  采用 Daubechies 离散正交小波基.

小波变换是一种时间-尺度分析,同时也是一种多分辨率的时间-频率分析<sup>[3-5]</sup>.

1) 国家自然科学基金资助课题.

收稿日期 1995-05-19

## 2.2 利用连续小波变换检测信号的奇异性<sup>[1]</sup>

信号在其突变点处通常是奇异的. 信号的奇异性、局部正规性和 Lipschitz 指数是三个密切相关的概念. 信号在某点的局部正规性用 Lipschitz 指数  $\alpha$  来度量,  $\alpha$  越大, 对应点的局部正规性越强. 如果信号在某点的 Lipschitz 局部正规性不是 1, 则称信号在该点奇异. Lipschitz 指数的定义见文献[1].

$WT_a x(t)$  将在信号  $x(t)$  的奇异点附近出现模极大值<sup>[1]</sup>, 而且  $WT_a x(t)$  在多尺度下的模极大值与  $x(t)$  的奇异点的 Lipschitz 指数  $\alpha$  之间存在如下的定量关系<sup>[6]</sup>.

**定理.** 当  $t \in (a, b)$  时, 如果有  $|WT_{2^j} x(t)| \leq K(2^j)^\alpha$ , 则  $x(t)$  在  $(a, b)$  中为均匀 Lipschitz 指数  $\alpha$ . 因此, 可以利用  $WT_a x(t)$  的模极大值检测  $x(t)$  的奇异点并估计  $x(t)$  在奇异点附近的 Lipschitz 指数.

通常, 噪声的小波变换的模极大值随着尺度的增大迅速衰减, 而信号的小波变换在突变点的模极大值随着尺度的增大而增大(或由于噪声的影响而缓慢衰减), 即噪声的 Lipschitz 指数处处都远小于 0, 而信号在突变点的 Lipschitz 指数大于 0(或由于噪声的影响而等于模很小的负数). 因此, 可以利用连续小波变换区分信号突变和噪声<sup>[1]</sup>.

本文采用如下的准则检测信号突变. 如果大尺度下信号的连续小波变换在  $t_0$  时刻附近存在着较大的模极大值, 而且信号在  $t_0$  附近的 Lipschitz 指数  $\alpha$ (可以利用 CWT 估计出  $\alpha$ ) 大于阈值  $\alpha_1$ , 则认为信号在  $t_0$  时刻发生了突变.  $\alpha_1$  的理论值为 0, 但考虑到叠加在信号突变边沿上的噪声会使信号在突变点的 Lipschitz 指数减小, 在实际应用中, 可以令  $\alpha_1$  等于一个模较小的负数. 本文中根据实验结果令  $\alpha_1 = -0.15$ .

实际上, 利用连续小波变换检测信号的奇异性时, 通常只需计算信号在尺度  $a = 2^j$  ( $j = 1, 2, 3, \dots$ ) 下的变换结果, 这种尺度离散化而时间连续的小波变换称为二进小波变换.

## 2.3 利用离散小波变换检测随机信号频率结构的突变

假定随机信号  $y(t)$  的功率谱  $\Phi_y(\omega)$  在  $t_f$  发生突变,  $\omega_1$  是突变前  $\Phi_y(\omega)$  的谱峰频率. 假设突变前  $|\Phi_y(\omega_1)| = K_1$ ; 突变后  $|\Phi_y(\omega_1)| = K_2, K_2 \neq K_1$ . 离散小波变换作为一种有效的时频分析方法, 可以用来检测  $\Phi_y(\omega_1)$  的幅度在时域上的突变点.

由于  $y(t)$  是随机信号, 因此在每个尺度下,  $WT_y(j, k)$  也是以  $k$  为时间变量的随机信号. 突变前, 由于  $\Phi_y(\omega)$  在  $\omega_1$  存在谱峰,  $WT_y(j, k)$  的方差也在对应的尺度  $j_1$  达到最大( $\omega_1$  被包含于  $\psi_{j_1, k}(t)$  的频带中), 即

$$\text{当 } 2^j k T_0 < t_f \text{ 时, 有 } E[WT_y^2(j, k)] < E[WT_y^2(j_1, k)], j \neq j_1.$$

可以根据此式确定  $y(t)$  突变前对应于  $\Phi_y(\omega)$  的谱峰频率  $\omega_1$  的尺度  $j_1$ .

当  $y(t)$  在  $t_f$  发生突变后, 由于  $\Phi_y(\omega_1)$  的幅度发生突变,  $WT_y(j_1, k)$  的方差也会发生突变, 因此, 只要检测出  $WT_y(j_1, k)$  的方差的突变点, 就可以检测出  $y(t)$  的突变点.

## 3 利用小波变换进行模型车轮胎和板簧的故障诊断

### 3.1 模型车的故障诊断实验系统简介

图 1 是模型车的结构简图. 右边是牵引车, 左边是拖车, 圆圈代表轮胎, 轮胎中的半圆虚线代表板簧,  $F_1$  至  $F_6$  是激振力, 1 至 6 六个方框代表粘在轮轴处的六个加速度传感器.

实验中通过调整轮胎压力、板簧厚度来模拟轮胎、板簧的各种状态, 利用激振器对模型车



进行激振,模拟汽车在路面上行驶时受到的激振输入,并通过粘在轮轴上的加速度传感器来测量模型车在各种状态下的振动情况.实验中的激振力采用带宽为 200Hz 的白噪声,左右车轮受到的激振力互不相关,同侧后轮受到的激振力在时间上较前轮有一个纯延迟.

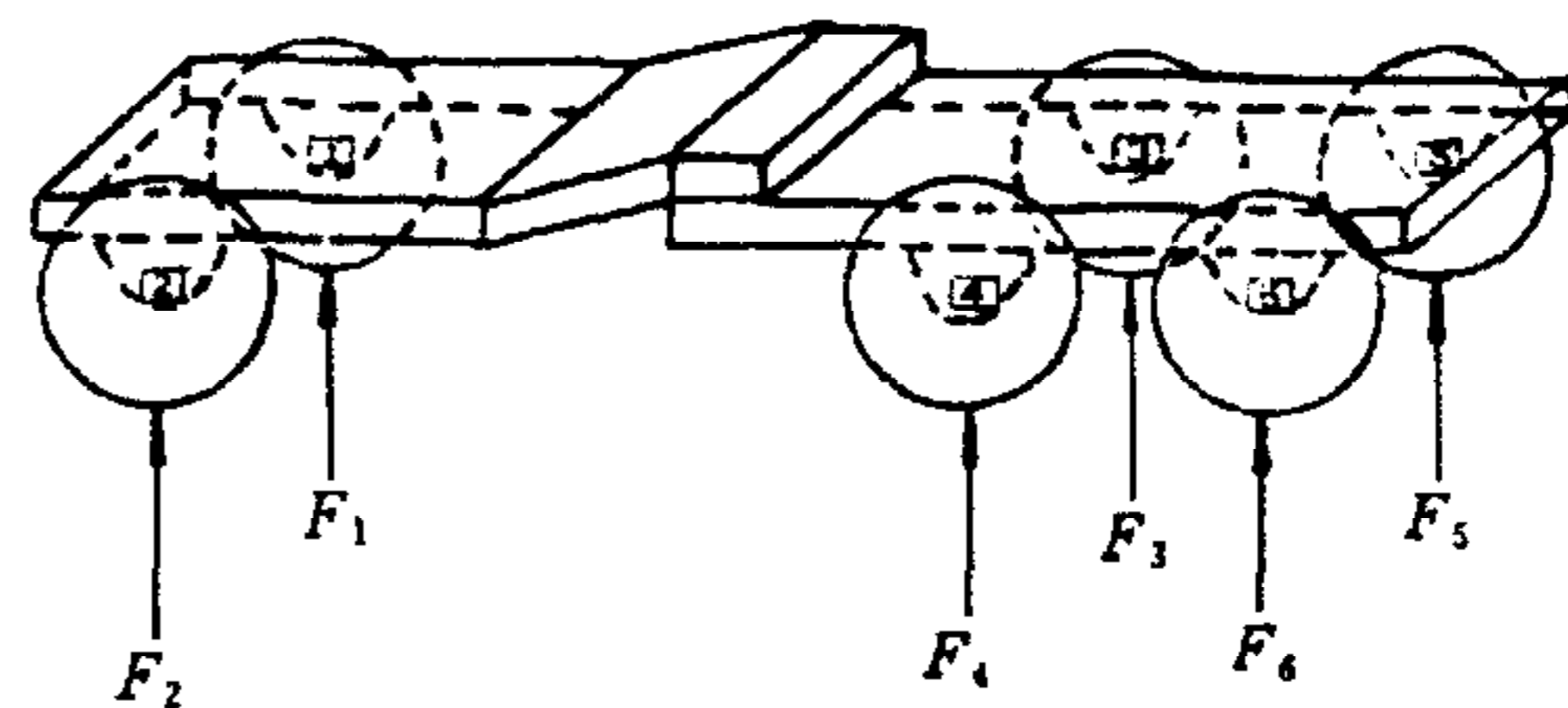


图1 模型车实验系统图

在激振力的作用下,模型车产生振动,实时采集不同状态下的加速度传感器信号,供故障检测使用.

为了描述方便,分别称对应于传感器  $i$  的轮胎、板簧和轮轴为轮胎  $i$ 、板簧  $i$  和轮轴  $i$ .

### 3.2 故障检测与故障分离

设  $\omega_n$  是系统正常时非悬架质量的固有频率.理论分析表明(见附录),在激振力的功率谱密度不变的情况下,轮胎故障将导致轮轴振动信号的功率谱在  $\omega_n$  处的幅度减小,而板簧故障将导致轮轴振动信号的功率谱在  $\omega_n$  处的幅度增大.可以据此进行故障检测与分离.

令  $z_i(t)$  代表加速度传感器  $i$  的检测信号,基于小波变换的故障诊断步骤如下:

(1)根据系统正常状态下的数据计算  $z_i(t)$  在多尺度下的 DWT,即  $WT_{z_i}(j,k)$ ,  $j=0,1,2,\dots$ ,并确定对应于  $\max_j \{E[WT_{z_i}^2(j,k)]\}$  的尺度  $j_{m_i}$ .

(2)根据系统待检状态下的数据计算  $WT_{z_i}(j_{m_i},k)$ .

(3)利用 CWT 检测  $WT_{z_i}(j_{m_i},k)$  的方差是否发生突变.由于 CWT 不能直接检测随机信号的方差突变点,我们利用 CWT 检测  $|WT_{z_i}(j_{m_i},k)|$  的奇异点(均值突变点),从而间接地检测  $WT_{z_i}(j_{m_i},k)$  的方差突变点.当  $|WT_{z_i}(j_{m_i},k)|$  的 CWT 在大尺度下存在着模较大的极大值,而且  $|WT_{z_i}(j_{m_i},k)|$  在该时刻附近的 Lipschitz 指数  $\alpha > -0.15$  时,说明  $|WT_{z_i}(j_{m_i},k)|$  发生了突变.如果检测出  $WT_{z_i}(j_{m_i},k)$  的方差发生了突变,则说明轮胎  $i$  或板簧  $i$  发生了故障.

阈值  $\alpha_1$  的取值将影响故障检测的灵敏度和鲁棒性,当  $\alpha_1$  减小时(指代数值),故障检测的灵敏度提高但鲁棒性变差;反之,当  $\alpha_1$  增大时,故障检测的鲁棒性提高而灵敏度降低.

(4)利用  $|WT_{z_i}(j_{m_i},k)|$  的 CWT 的极大值的正负进行故障模式分离.如果检测出轮胎  $i$  或板簧  $i$  存在着故障,可以进一步利用  $|WT_{z_i}(j_{m_i},k)|$  的 CWT 的极大值的正负来区分两种故障模式(CWT 的正、负极大值分别对应于被检测信号的上升边沿和下降边沿),当极值是负数时,说明轮胎  $i$  发生了故障,而当极值是正数时,说明板簧  $i$  发生了故障.

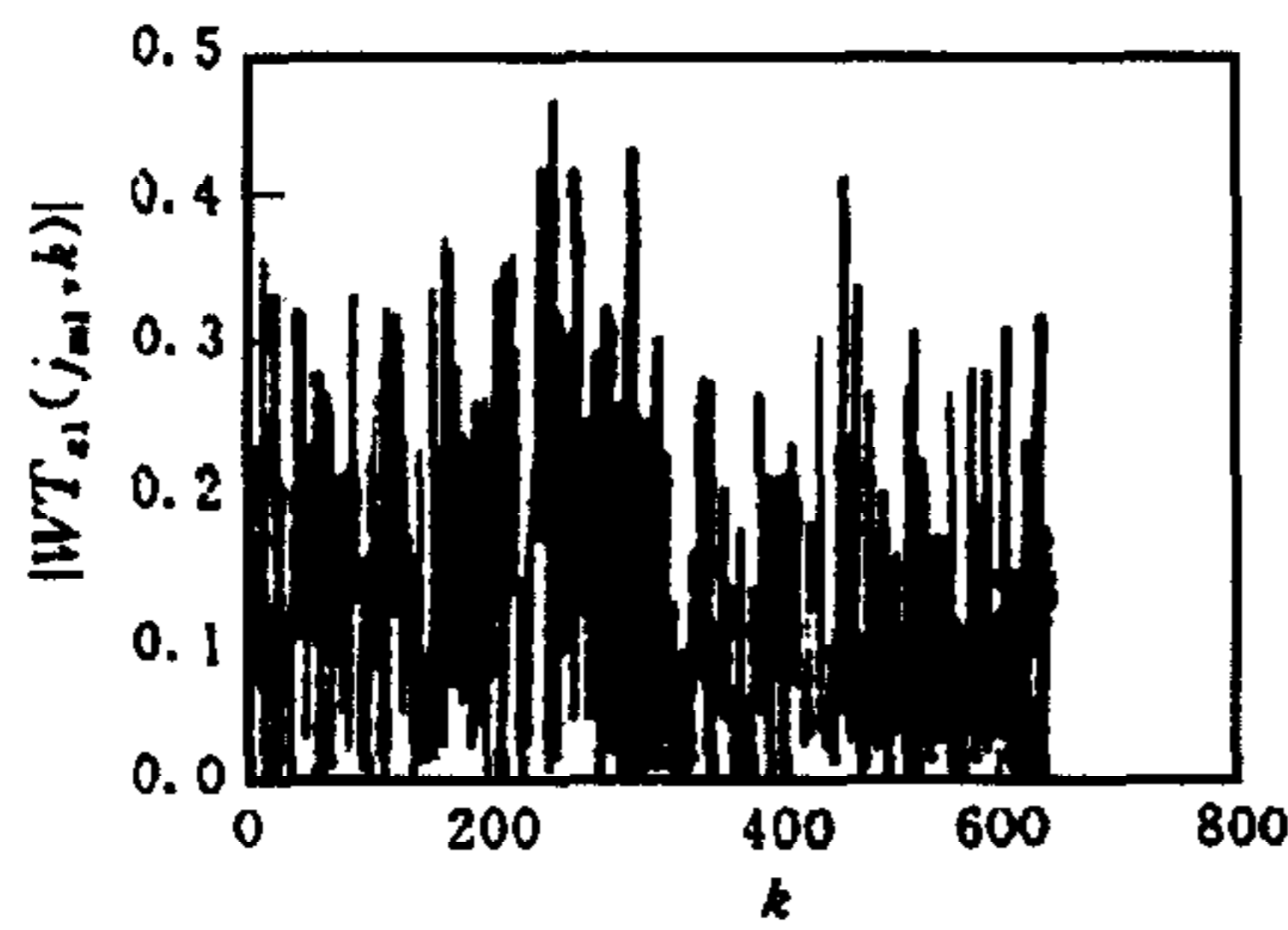
对于每个轮轴  $i$  ( $i=1,\dots,6$ ) 重复故障诊断步骤(1)至(4).

### 3.3 实验处理结果

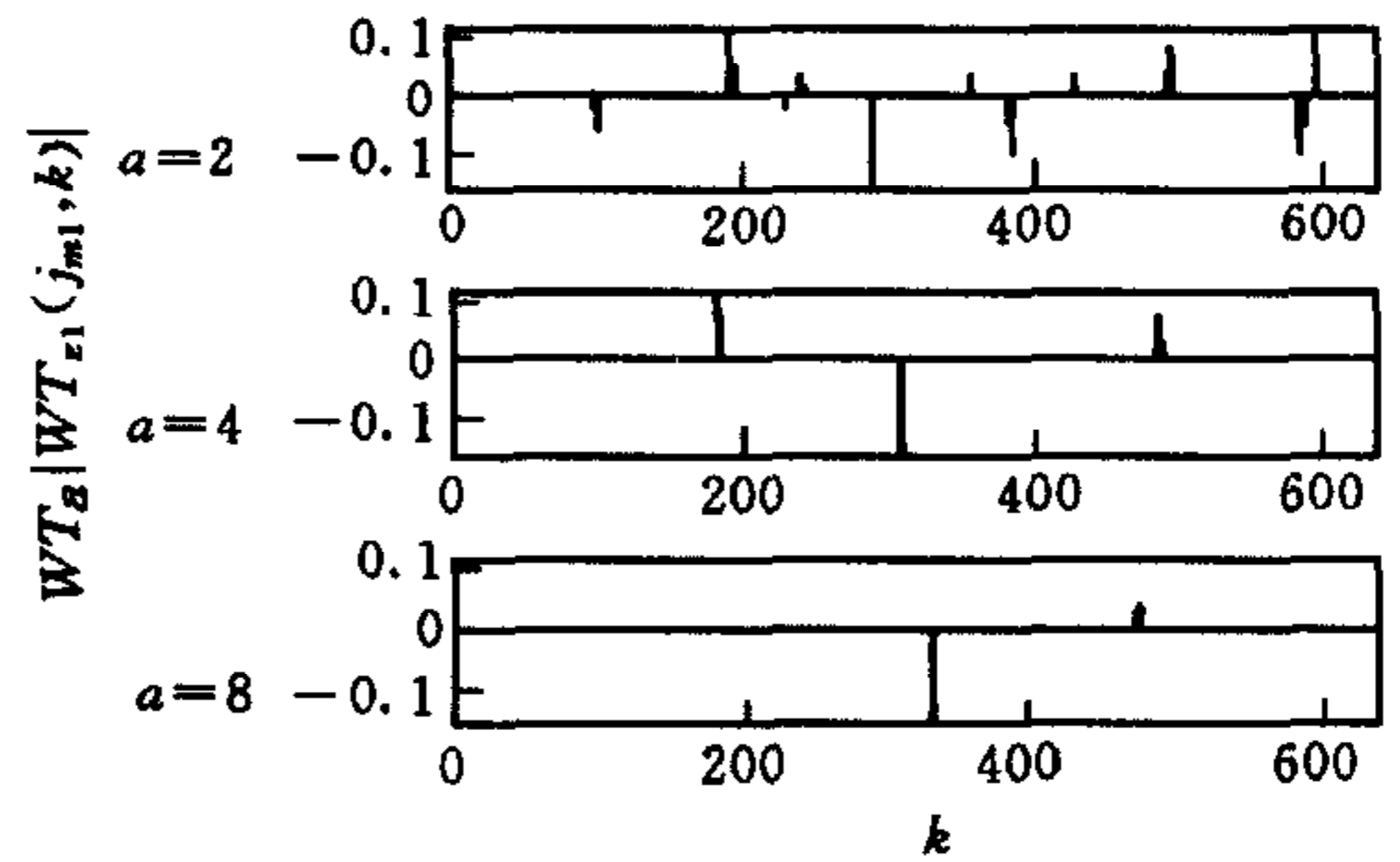
**例 1.** 轮胎 1 的压力在实验时间中点减至正常值的 50%,各板簧及其余轮胎正常.  $|WT_{z_1}(j_{m_1},k)|$  及  $|WT_{z_1}(j_{m_1},k)|$  的 CWT 在多尺度下的极值图示于图 2.

从图 2(a)可以看出,  $|WT_{z_1}(j_{m_1},k)|$  出现了明显的下降趋势.从图 2(b)可以看出,  $|WT_{z_1}(j_{m_1},k)|$  的 CWT 在多尺度下出现了较大的、不随尺度增大而衰减的极大值,进一步估计  $|WT_{z_1}(j_{m_1},k)|$  的 Lipschitz 指数  $\alpha$  为 0.2138.由于  $\alpha_1 > -0.15$ ,而且 CWT 的极值是负数,因此可以判断轮胎 1 发生了故障.

作为对比,图3给出了同一实验中轮轴2对应的  $|WT_{z_2}(j_{m_2},k)|$  的 CWT 在多尺度下的极值图.



(a)  $|WT_{z_1}(j_{m_1}, k)|$



(b)  $|WT_{z_1}(j_{m_1}, k)|$  的 CWT 的极值图

图 2 轮胎 1 信号的处理结果

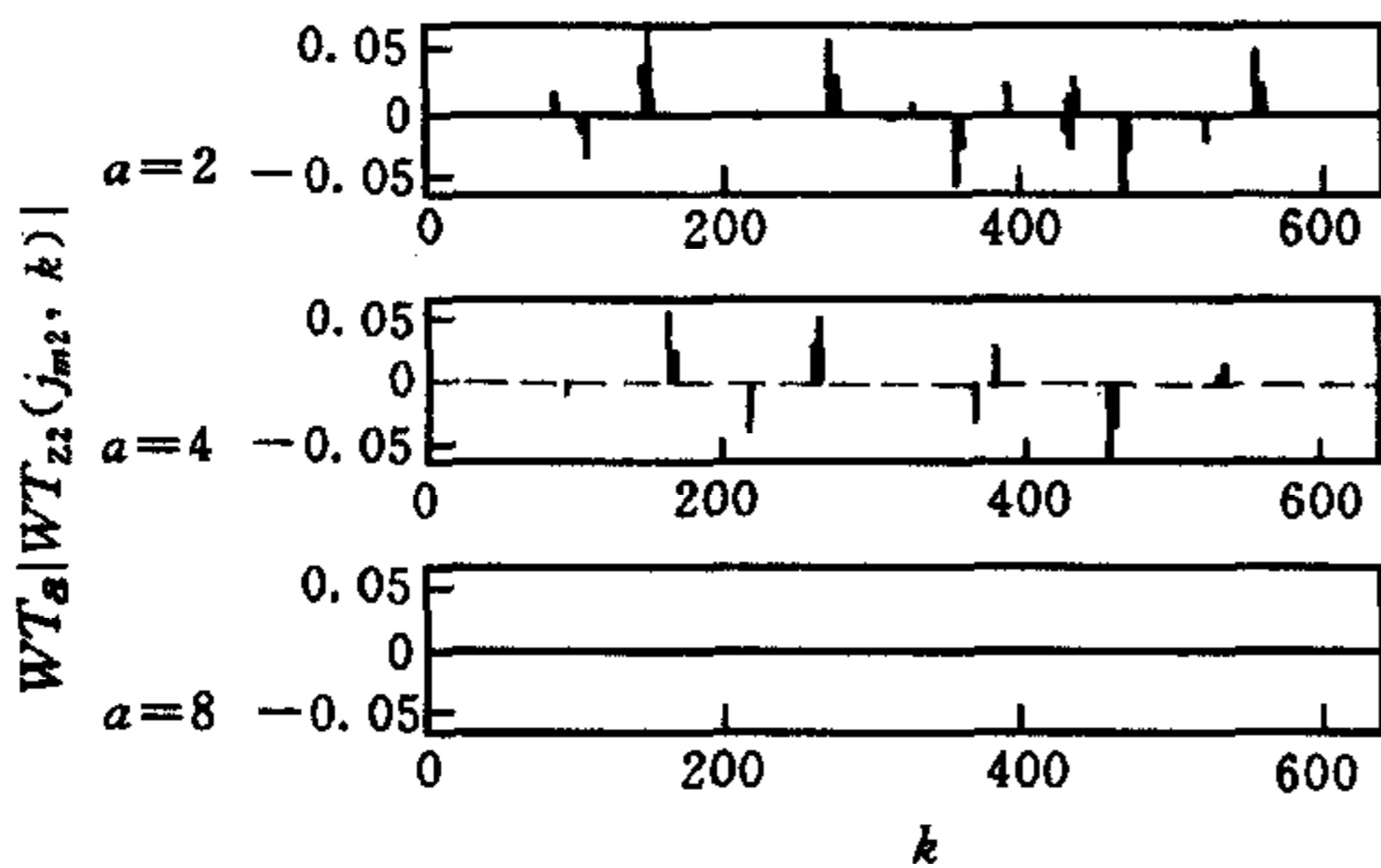


图 3  $|WT_{z_2}(j_{m_2}, k)|$  的 CWT 的极值图

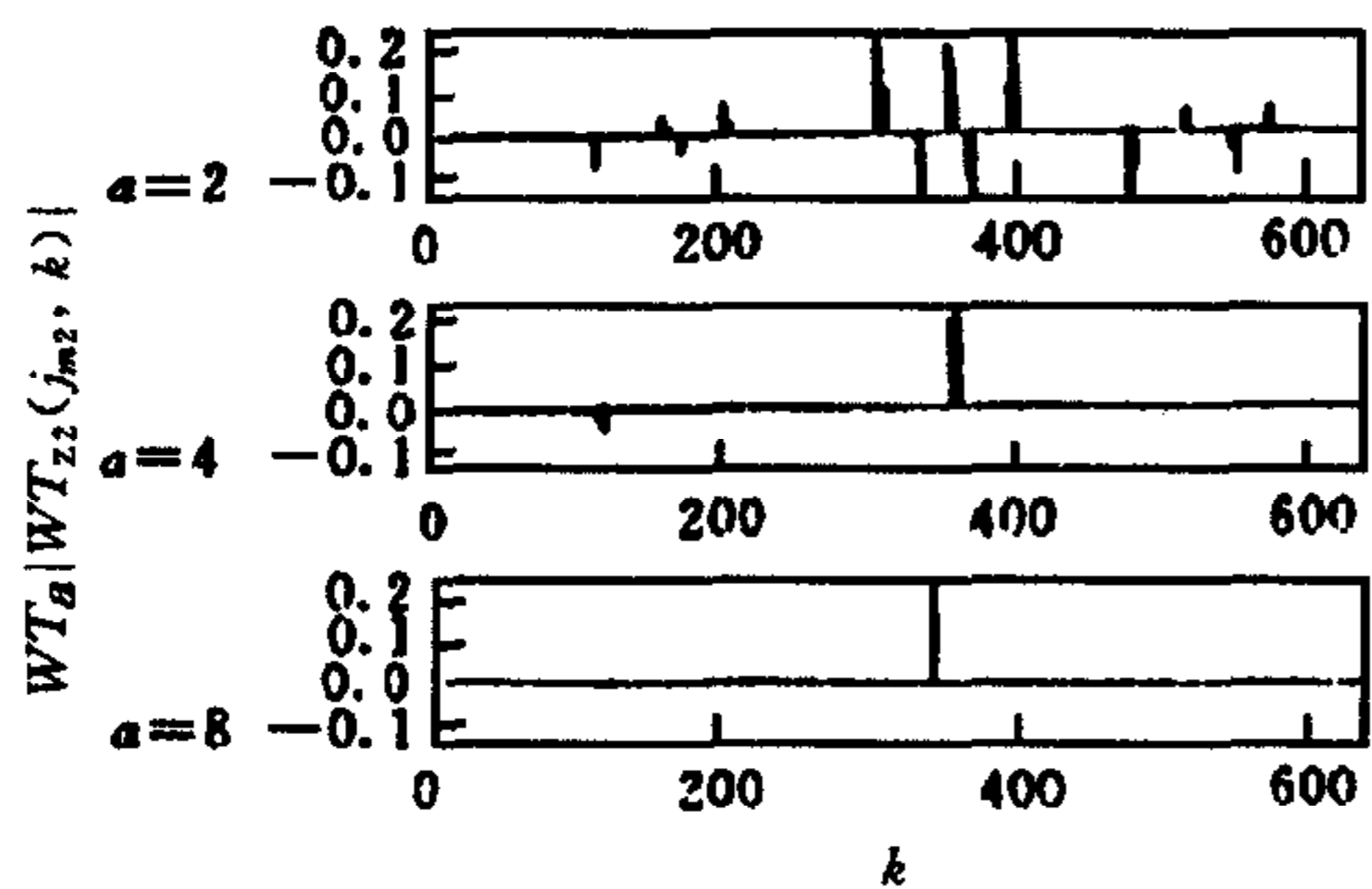


图 4  $|WT_{z_4}(j_{m_4}, k)|$  的 CWT 的极值图

从图 3 可以看出,  $|WT_{z_2}(j_{m_2}, k)|$  的 CWT 的极值随着尺度的增大迅速趋于零, 在尺度  $a=8$  时已经没有极值点, 因此, 不必进一步计算 Lipschitz 指数, 就可以判断没有故障发生.

**例 2.** 板簧 4 的厚度在实验时间的中点减至正常值的 30%, 各轮胎及其余板簧正常.

$|WT_{z_4}(j_{m_4}, k)|$  的 CWT 在多尺度下的极值图示于图 4. 由于  $|WT_{z_4}(j_{m_4}, k)|$  的 CWT 在多尺度下出现了较大的、不随尺度增大而衰减的正极值, 而且  $|WT_{z_4}(j_{m_4}, k)|$  对应的 Lipschitz 指数  $\alpha=0.1743$  (大于  $-0.15$ ), 因此可以判断板簧 4 发生了故障.

实验数据的处理结果表明, 基于小波变换的故障诊断方法无需车辆的数学模型, 可以迅速地检测出模拟车辆的故障并能区分板簧和轮胎两种故障模式、准确确定故障位置.

要求路面激振力为白噪声是本文所提出的方法的不足之处, 需要在今后的研究中加以改进.

### 附录

理论分析表明, 汽车的每一个轮胎和对应的板簧都可以近似看成一个如图 5 所示的二阶振动系统<sup>[7]</sup>, 图中输入  $F$  是地面激振力, 输出分别是车架和轮轴处的振动幅值响应  $z_1$  和  $z_2$ ,  $m_1$  和  $m_2$  分别是悬架质量(代表车身)和非悬架质量(代表车轮及与其相联接的零部件),  $k_1$  和  $k_2$  分别是板簧和轮胎的刚度,  $c_1$  和  $c_2$  分别是板簧和轮胎的阻尼系数. 一般  $k_2 \gg k_1, m_1 \gg m_2, c_2 \approx 0$ .

进.



假设  $k_1$  和  $k_2, c_1$  和  $c_2$  为系统正常时的振动参数,故障后,板簧的刚度和阻尼系数分别变为  $k'_1$  和  $c'_1$ ,轮胎的刚度和阻尼系数分别变为  $k'_2$  和  $c'_2$ . 系统正常时的运动方程为<sup>[7]</sup>

$$\begin{aligned} m_2 \ddot{z}_2 + c_1(\dot{z}_2 - \dot{z}_1) + k_1(z_2 - z_1) + c_2 \dot{z}_2 + k_2 z_2 &= F, \\ m_1 \ddot{z}_1 - c_1(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) - k_1(z_1 - z_2) &= 0. \end{aligned}$$

设  $\omega_n$  是系统正常时的共振频率,由于  $z_1$  的振动频率远远小于  $\omega_n$ <sup>[7]</sup>,因此当只考虑  $z_2$  在  $\omega_n$  的振动情况时,可以忽略  $z_1(j\omega_n)$  的影响,则故障前输出  $z_2$  的频率响应为

$$z_2(j\omega_n) = \frac{F(j\omega_n)}{m_2(j\omega_n)^2 + (c_1 + c_2)j\omega_n + k_1 + k_2};$$

故障后为

$$z'_2(j\omega_n) = \frac{F(j\omega_n)}{m_2(j\omega_n)^2 + (c'_1 + c'_2)j\omega_n + k'_1 + k'_2}.$$

由于  $\omega_n = \sqrt{\frac{k_1 + k_2}{m_2}}$ , 所以,故障前后系统在  $\omega_n$  处的幅值增益的平方分别为

$$|G(j\omega_n)|^2 = \frac{1}{(c_1 + c_2)^2 \frac{k_1 + k_2}{m_2}} \quad \text{和} \quad |G'(j\omega_n)|^2 = \frac{1}{(k_1 + k_2 - k'_1 - k'_2)^2 + (c'_1 + c'_2)^2 \frac{k_1 + k_2}{m_2}}.$$

如果是轮胎故障,则有

$$\begin{aligned} k'_2 < k_2, c'_2 \approx 0, k'_1 = k_1, c'_1 = c_1, \\ (k_1 + k_2 - k'_1 - k'_2)^2 > 0, c_1 + c_2 \approx c'_1 + c'_2, |G'(j\omega_n)|^2 < |G(j\omega_n)|^2; \end{aligned}$$

如果是板簧故障,则有

$$\begin{aligned} k'_1 < k_1 \ll k_2, c'_1 < c_1, k'_2 = k_2, c'_2 \approx 0, \\ (k_1 + k_2 - k'_1 - k'_2)^2 \approx 0, c_1 + c_2 > c'_1 + c'_2, |G'(j\omega_n)|^2 > |G(j\omega_n)|^2. \end{aligned}$$

所以,轮胎故障将导致系统在  $\omega_n$  处的频域增益减小;板簧故障将导致系统在  $\omega_n$  处的频域增益增大. 在激振力的功率谱密度不变的情况下,轮胎故障后,轮轴处振动信号的功率谱在  $\omega_n$  处的幅度将减小;而板簧故障后,轮轴处振动信号的功率谱在  $\omega_n$  处的幅度将增大. 这为进行故障诊断提供了依据.

## 参 考 文 献

- 1 Mallat Stephane, Wen Liang Hwang. Singularity detection and processing with wavelets. *IEEE Transactions. Inf. Theory*, 1992, **38**(2):617-642
- 2 Daubechies I. Orthonormal bases of compactly supported wavelets. *Comm. on Pure and Appl. Math.*, 1988, **41**:909-996
- 3 Burrus C S, Gopinath R A. Introduction to wavelets and wavelet transforms. ICASSP93 Minneapolis, Minnesota, USA, 1993, 1-60
- 4 Hlawatsch F. Linear and quadratic time-frequency signal representation. *IEEE SP Mmagazine*, 1992, **4**:21-56
- 5 Oivierrioul, Martin Vetterli. Wavelets and signal processing, *IEEE SP Magazine*, 1991, **10**:14-38
- 6 Mallat S *et al.* Complete signal representation with multiscale edges. NYU, In: Computer Science Tech. Report, 1989, 483
- 7 Wong J Y. Theory of ground vehicles (a book published in Cananada toward 1980)

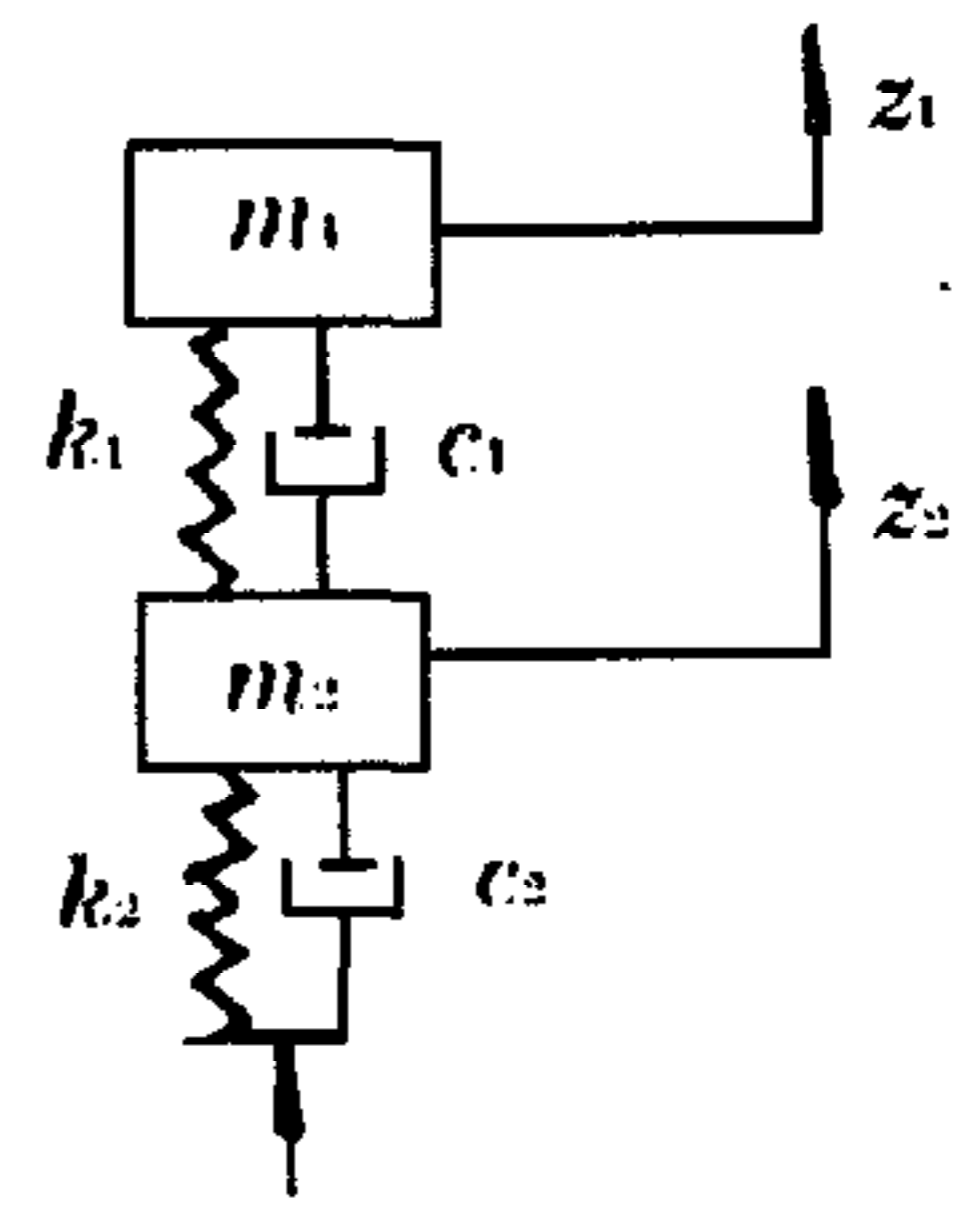


图 5 振动分析原理图

## WAVELET TRANSFORM BASED FAULT DIAGNOSIS FOR MISSILE TRANSPORTING VEHICLE

YE HAO WANG GUIZENG FANG CHONGZHI

*(Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084)*

ZHANG YONGGUANG

*(Institute of systems Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)*

LIU ZHIJUN

*(206 Institute, Aero. Space Ministry, Beijing 100085)*

**Abstract** This paper proposes a new approach to fault detection and location for tyres and springs of a missile transporting vehicle. The time-frequency characteristics of discrete wavelet transform (DWT) and local maxima of modulus of continuous wavelet transform (CWT) are used, and no model of the monitored object is needed in this method. Experimental results on a model vehicle show that it is sensitive to faults and robust to noise.

**Key words** Wavelet transform, fault diagnosis, transporting vehicle.

叶 昊 王桂增 简介见本刊第 23 卷第 6 期.

方崇智 简介见本刊第 17 卷第 6 期.