

# 钢丝绳断丝信号的空间域划分及在小波变换下的频域特征提取

张东来,徐殿国,王 炎

(哈尔滨工业大学,哈尔滨 150001)

**摘 要:** 频域特征是钢丝绳损伤定量识别的一个重要特征.文中对钢丝绳断丝信号进行了空间域划分和小波变换下的频域特征提取,并用小波网络进行断丝的定量识别.实践结果表明:该方法能够在频域上清楚地区分噪声和损伤信号,提高了钢丝绳断丝检测的能力.

**关键词:** 小波变换;特征提取;钢丝绳;断丝信号;小波网络

**中图分类号:** TH878 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2000) 07-0059-04

## Demarcation in Space Domain for Local Flaw Signals of Wire Ropes and Feature Extraction in Frequency Domain Based on Wavelet Transform

ZHANG Dong-lai, XU Dian-guo, WANG Yan

(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** In wire rope test, an important characteristic is to identify the features of wire rope flaw signals in frequency domain. Based on wavelet transform techniques, a new demarcation method in space domain and a new frequency feature extractive method for local wire rope flaw signals are proposed in the paper. Furthermore, the types of wire rope flaws can also be identified by the wavelet network quantitatively. The experimental results show that the proposed method can clearly distinct the noise and flaws in wire rope flaw signals. Using proposed method in this paper, the performance of wire rope flaw detective instrumentation can remarkably improved.

**Key words:** wavelet transform; feature extraction; wire rope; local flaw signal; wavelet network

### 1 引言

牵引钢丝绳已被广泛地应用于矿山、冶金、航运、旅游和建筑等行业.在使用过程中其损伤程度和承载能力时刻关系到设备及人身安全,准确可靠地实时监视牵引钢丝绳断丝状况和承载能力具有十分重要的经济和社会效益.

目前钢丝绳无损探伤的基本方法是采用电磁方法检测缺陷钢丝绳的漏磁通.由于钢丝绳信号的复杂性,使得在实际应用中准确地检测和定位钢丝绳损伤,并识别出钢丝绳损伤,尤其是检测断丝程度仍具有较大困难.信号的谱特征提取是常用的分析方法,然而实验发现采用傅氏谱特征并不明显.本文对钢丝绳断丝信号进行空间域划分和小波变换下的频域谱特征提取,实践结果表明:该特征能够在频域上清楚地区分噪声和损伤信号;此外还应用了小波网络对断丝进行定量识别,识别结果表明:该特征提高了断丝识别的准确率.

### 2 基本原理

#### 2.1 钢丝绳断丝信号

本文钢丝绳断丝信号来源于本文作者研制开发的 CST-

钢丝绳无损探伤仪,信号的获取采用了漏磁通法<sup>[1]</sup>,将线圈套在钢丝绳上,励磁后的钢丝绳相对于线圈轴向移动,对线圈的感应电势进行前置处理,得到线圈所在位置钢丝绳的漏磁通量,它反映了断丝状态的信息.数据采集中应用等距采样,对信号实施“速度归一化”后,断丝信号的分析即可归结为信号的时频分析.

#### 2.2 信号在小波变换下的谱估计

小波变换是80年代发展起来的一个数学分支,目前已成为国际上极为活跃的研究领域之一,它已被广泛地应用于信号处理、图像识别与处理、语音识别和人工合成等许多方面.由于它具有良好的时频局部化特性,成为钢丝绳信号等非周期紧支信号处理的有力工具.

在工程实践中,谱是一个重要参数,许多问题将时域、空间域信号用谱来表达可以较直观地发现明显的特征. FFT是谱分析的常用工具,但是由于 Fourier 变换在时空域上没有任何分辨率,且需要较大数据量,本文的实验结果也将表明 FFT对于钢丝绳断丝信号这样的紧支信号是不适用的.钢丝绳断

丝信号的特点是数据量小,谱特征呈频带分布,而不是频率点分布.由于小波变换具有良好的时频局部化特性,可以对类似  $s(t) = \sin(2\pi t) + \sin(2\pi \times 0.78t)$ , 采样间隔为 0.1 秒,数据量为 16 这样的频谱相近,少数数据量的信号进行有效谱分析<sup>[2]</sup>.下面对小波谱估计给出较通用的方法.

本文小波谱估计的思想是把有限长序列  $\{x_k\}$  经过小波变换得到序列  $\{y_k\}$ , 由  $\{y_k\}$  计算功率谱. 这可以看作将某一窄频带上的信息拓展到范围较宽的尺度轴上,以便进一步划分. 主要步骤如下:

(1) 把序列  $\{x_n\}$  的整个频率范围按尺度划分为  $M$  个尺度. 对尺度  $a$  ( $a > 0$ ) 下,任意信号  $x(t)$  的连续小波变换,有:

$$W_f(a, b) = \langle f, \psi_{a,b} \rangle = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt$$

其中  $\psi(t)$  为小波母函数,  $\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ ,  $a > 0$ ,  $b \in \mathbb{R}$ .

一般地,  $\psi(t)$  相当于一个带通滤波器, 设其带宽为  $B_0$ , 中心频率为  $\omega_0$ , 则该变换相当于信号  $x(t)$  经过了带通滤波器  $\frac{1}{\sqrt{a_k}} \psi\left(\frac{t-b}{a_k}\right)$  的滤波, 相应地, 带宽可表示为  $B_k$ , 中心频率为  $\omega_k$ .

类似地, 原序列  $\{x_n\}$  的离散小波变换  $\{y_k\}$  定义如下: 令

$$y_{a,b}^*(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), y_k^{(i)} = \sum_j x(j) \psi_{a_k,i}^*(T(j)).$$

该变换相当于经过了带通滤波器  $\frac{1}{\sqrt{a_k}} \psi\left(\frac{t-b}{a_k}\right)$  的滤波, 它

的带宽为  $B_k$ , 中心频率为  $\omega_k$ .

(2) 将原始序列  $\{x_n\}$  ( $1 \leq n \leq N$ ) 在尺度下进行小波变换—滤波, 这样得到的  $\{y_k^{(i)}\}$  可看作  $\{x_k\}$  中所包含的在尺度  $a$  下滤波的频率分量, 其功率谱为:

$$\overline{S(k)} = \frac{1}{B_k N} \sum_{i=1}^N |y_k^{(i)}|^2, 1 \leq k \leq M$$

尺度范围  $M$  的选取为  $M = \max\{k | 1 < |\omega_k \pm B_k| \leq \omega_{\max}\}$ , 其中  $\omega_{\max}$  为信号的最高频率, 这样对于每一个尺度  $k$ , 可以分析出其功率谱, 而每个尺度  $k$  对应一个固定的频带, 且  $k$  值越大, 对应的频率越低.

### 3 钢丝绳断丝信号在小波变换下的频域谱特征提取

#### 3.1 基于自适应阈值空间域划分的损伤定位搜索

钢丝绳损伤识别的一个关键问题是首先在空间域上的定位及划分. 对于单一一组钢丝绳信号的划分较为容易, 由于损伤部位的信号较周围信号强, 可以采用直接阈值的方法. 但是在不同的条件下, 如速度差异较大时, 信号的幅值变化亦较大, 实测信号如图 1(a)、(b), 实验中发现钢丝绳运动速度较低时, 速度的消除实现起来较为困难, 此时不能采用直接阈值的方法; 根据速度不同进行查表取阈值的方法对噪声干扰较为敏感, 极易造成多处错判, 也不宜采用. 此外, 空间域划分时需要注意的是准确定位和相邻损伤的有效区分.

为解决上述问题, 本文采用了如下基于自适应阈值空间域划分的损伤定位搜索算法:

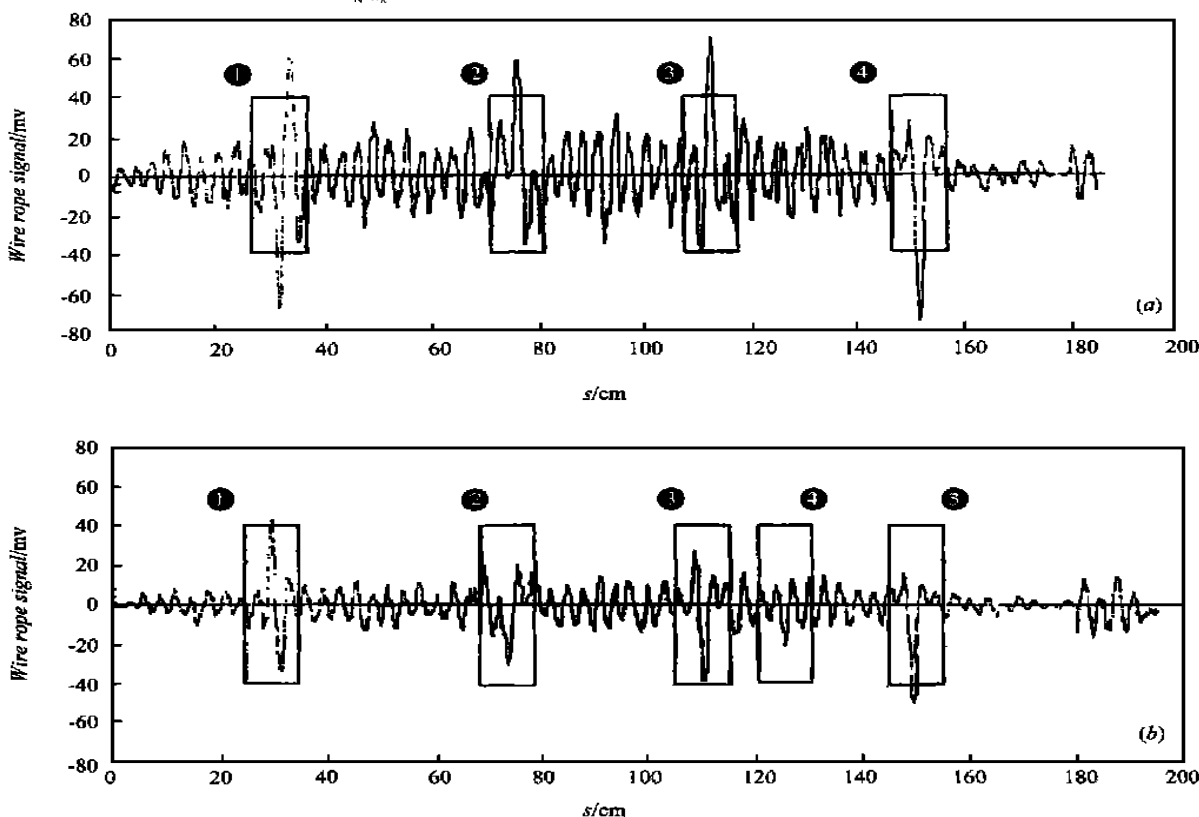


图1 钢丝绳信号及自适应阈值空间划分. (a) 平均速度为 2.56 米/秒; (b) 平均速度为 0.31 米/秒

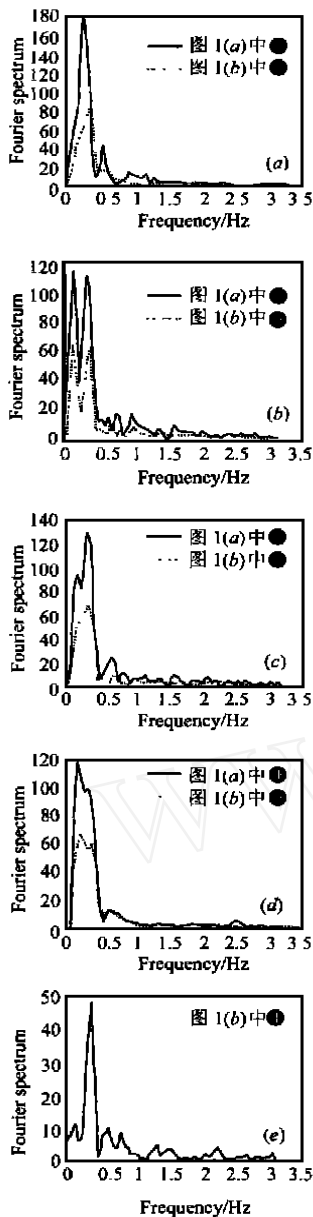


图2 图1中划分区域的 Fourier 谱。(a) 1 根断丝的 Fourier 谱;  
(b) 1 根抽丝的 Fourier 谱;(c) 2 根断丝的 Fourier 谱;  
(d) 6 根断丝的 Fourier 谱;(e) 图 1(b) 股波信号的 Fourier 谱。

一次搜索算法 对实际采样所得数据  $Data[0..Len-1]$

( $Data$  为长度为  $Len$  的一维数组) 中顺序进行如下操作:

(1) 令标志数据  $Flag[0..Len-1]=1$ ;

(2) 求每  $N$  (文中取 64) 个点的绝对均值  $Av[i] = \frac{1}{N}$

$(i+1) * N$

$|Data[j]|$ , 其中  $i=0, 1, \dots, \text{Int}(Len/N)$ ;

$j=i*N$

(3)  $Av = C * Av$ ,  $C = \text{const}$ ;

(4) 在该  $N$  个数据中顺序搜索满足如下条件的点:

$|Data[j]| > Av[j/N]$  且  $|Data[j]| > \text{ThresHold}$ ,  $\text{ThresHold} = \text{Const}$ . 若  $|Data[k]|$  满足, 则将  $Flag[j]$  的数据在  $[k - N/2, k + N/2]$  上置 0, 标志该区间可能为损伤区间, 重复 (2~4), 直至

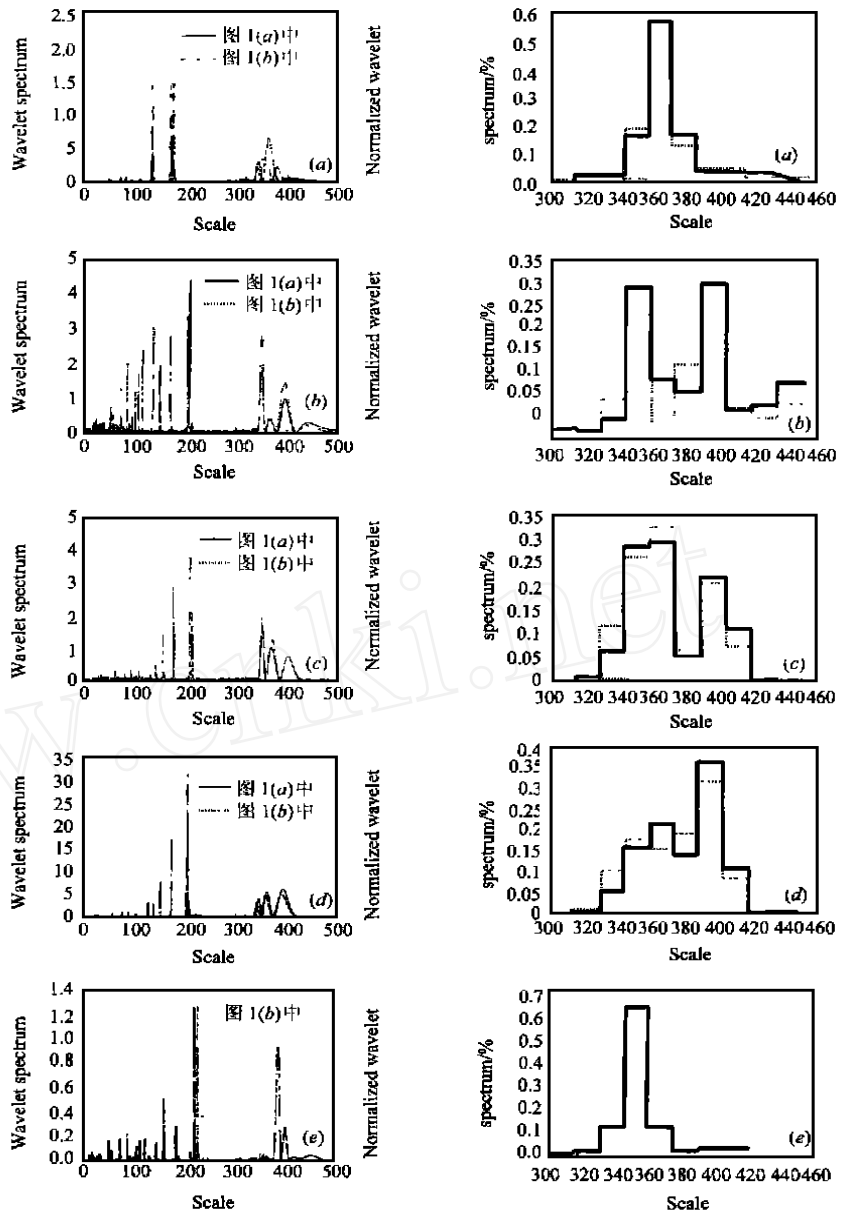


图3 图1中划分区域的小波谱估计(左)及小波谱归一(右).  
(a) 1 根断丝;(b) 1 根抽丝;(c) 2 根断丝;(d) 6 根断丝;  
(e) 图 1(b) 股波信号的小波谱估计

$Data[0..Len-1]$  全部处理完;

(5) 搜索  $Flag[j]$  中每一满足  $Flag[j]=0$  的独立区间中  $|Data[j]|$  的最大值, 若  $|Data[k_0]|$  最大, 则区间  $[k_0 - N/2, k_0 + N/2]$  为所划分的空间域区间, 同时将  $Flag[j]$  的数据在区间  $[k_0 - N/2, k_0 + N/2]$  上置 3, 标志该区间为已划分完的区间。

二次搜索算法 为了避免因一次搜索的阈值过高而漏检, 需对未被划分为损伤的区间进行二次搜索. 适当选取常数  $\text{ThresHold1}$  (对应  $\text{ThresHold}$ , 且  $\text{ThresHold1} < \text{ThresHold}$ ) 和  $C_1$  (对应  $C$ ), 对未划分 ( $Flag[j] \neq 3$ ) 的区间令  $Flag[j]=1$ , 并在该区间内顺序一次搜索算法的 (2)~(5)。

该种算法具有对相邻区域的钢丝绳损伤较好的分辨能力、断丝定位准确和对噪声干扰不敏感等优点, 阈值系数  $C$  和  $C_1$  的选取可通过实验得到, 且在一般情况下可直接应用, 而不用随着条件的改变而重新测试. 对在不同条件下测得的两组钢丝绳信号, 由图 1(a)、(b) 虚线所示的自适应阈值空间域划分的结果, 可知采用该方法进行空间域划分是有效的, 图 1(a) 所划分区域从 ①至 ④依次为: 1 根断丝, 1 根抽丝, 2 根断丝, 6 根断丝; 图 1(b) 所划分区域从 ①至 ⑤依次为: 1 根断丝, 1 根抽丝, 2 根断丝, 股皮信号, 6 根断丝, 没有漏检.

对在不同条件下测得的两组钢丝绳信号, 由图 1(a)、(b) 虚线所示的自适应阈值空间域划分的结果, 可知采用该方法进行空间域划分是有效的.

### 3.2 钢丝绳断丝信号在小波变换下的频域谱特征提取

选取带通特性较好的小波<sup>[3]</sup>:  $\psi(t) = \frac{\sin(t)\cos(3t)}{3/2t}$  作为信号谱估计的基本小波, 其频谱为:  $G(\omega) = \begin{cases} \frac{1}{2\sqrt{t}}, & 2 \leq |\omega| \leq 4 \\ 0, & |\omega| \leq 2 \text{ or } |\omega| \geq 4 \end{cases}$ . 对应图 1(a)、(b) 划分出来损伤区间, 由图 2 和图 3 分别给出了 FFT 谱和由上述算法估计的小波谱估计. 由图可知:

(1) FFT 估计的傅氏谱表明: 断丝信号的频率分布主要在低频段; 但是由于 FFT 对小数据量数据的谱分辨率较低, 较难很好地在频域上区分不同的断丝类型.

(2) 从小波谱估计的图上可以观察到, 在断丝信号的谱主要分布在尺度 300~450 (频率较低) 的频带上, 这与 FFT 谱相一致, 但是由于小波谱估计的尺度较宽, 可以看出 1 根、2 根、6 根外部断丝、抽丝及干扰的谱峰分布具有明显的差异, 能够较清楚地区分出不同断丝的谱分布特征, 而且在不同检测速度下的谱分布基本相同.

为了进一步识别的方便, 对谱进行如下“归一化”变换, 在尺度/300, 450/的区间上计算每 15 个尺度的能量所占该区间内总能量的百分比, 得到一个低维矩阵, 表示不同尺度区间的能量分布情况, 将这些量化后的谱特征和空间波形特征等共计 22 个特征数据<sup>[4]</sup>, 作为识别网络的输入特征. 在上述断丝信号的小波谱尺度区间/300, 450/上的归一化结果如图 3 所示, 从图中可清楚地区分不同损伤的谱特征差别.

## 4 采用小波网络对钢丝绳断丝信号进行识别

钢丝绳定量检测问题实质是一种较为复杂的分类问题, 属于模式识别范畴. 目前为止模式识别的方法一般有以下几种: 几何分类法、概率分类法、模糊识别法、结构模式识别、逻辑推理及神经网络法. 采用模式匹配法, 提取信号的幅值、宽度等作为输入特征, 与积累的经验数据进行比较, 以确定损伤的位置和程度, 这在定量测量中不准确, 在定性测量中很难将内部断丝和外部断丝分开. 定性测量中, 概率分类法、模糊识别法和结构模式识别法都能有较好的应用; 但由于钢丝绳信号受损伤形态等影响的复杂性, 使得在定量测量中很难找到确定性因素将其按断丝根数的多少而分开, 对这种情况, 神经网络法是一种较好的选择.

网络法是一种较好的选择.

由于小波网络采用一组小波基作为隐含层, 通过训练不断调整小波基的平移和伸缩系数, 达到分类的目的, 它具有较强的非线性逼近能力, 收敛速度快等优点. 本文采用了 3 层小波网络, 输入层为 22 个节点, 选用 Morlet 小波  $\psi(t) = e^{-t^2/2+j\omega_0 t}$  的实部作为隐藏层, 节点数为 12; 输出层为 10 个节点, 分别为对应的断丝情况. 将谱“归一化”的结果和文献[4]中提供的波形前后沿梯度等 12 个特征共 22 个特征作为输入层, 在平均速度为 0.3~0.5 米/秒的情况下对采得的信号进行特征提取和定量识别, 识别结果的准确率为 90%.

## 5 结论

钢丝绳断丝信号在小波变换下的频域谱特征是钢丝绳损伤定量识别的一个重要特征. 采用基于自适应阈值空间域划分的损伤定位搜索, 对幅值变化较大的钢丝绳损伤信号进行了有效区分; 提取钢丝绳断丝信号在小波变换下的频域谱特征, 识别结果表明该特征提高了断丝定量检测的能力.

## 参考文献

- [1] Weischel, H. R. The Inspection of Wire Ropes in Service: A Critical Review. Mater. Eval., 1985, 43(12): 1592~1605
- [2] 丁宏, 戴逸松, 石要武. 采用小波变换对短数据信号的谱估计方法. 电子学报, 1997, 25(1): 11~14
- [3] 罗会国, 朱耀庭, 朱光喜, 万发贵. 信号的一种快速子波分解. 电子学报, 1994, 22(7): 17~22
- [4] 张东来, 徐殿国. 基于线性 B-小波的钢丝绳断丝信号数据压缩和特征提取. 仪器仪表学报, 1998, 19(3): 249~254



张东来 1973 年 4 月出生, 1996 年在哈尔滨工业大学计算机与电气工程学院自动测试与控制系电磁测量与仪表专业获工学硕士学位, 1999 年于哈尔滨工业大学机械电子工程学科博士毕业, 现进入哈尔滨工业大学电气工程学科博士后流动站.



徐殿国 1960 年 10 月出生, 博士, 教授, 博士生导师, 哈尔滨工业大学计算机与电气工程学院院长. 研究领域为: 伺服电机及驱动控制; 电力电子与电力传动; 机器人控制; 无损检测. 发表学术论文 110 余篇, 研究成果获国家科技进步三等奖 1 项, 省部级科技进步一等奖 2 项, 二等奖 6 项.

王 炎 1932 年出生, 教授, 机械电子工程学科博士生导师. 研究领域为: 机器人控制, 工业自动化系统, 研究成果曾获国家科技进步三等奖及省部级科技进步一等奖多项.