

# 基于 S 变换的热连轧机耦合振动特征提取

凌启辉<sup>1,2</sup>, 闫晓强<sup>2</sup>, 张义方<sup>2</sup>

(1. 湖南科技大学机电工程学院 湘潭, 411201) (2. 北京科技大学机械工程学院 北京, 100083)

**摘要** 提出一种基于短时傅里叶变换的自适应频域滤波方法, 将噪声信号与振动特征成功地分离。根据短时傅里叶变换和功率法设定的阈值, 自动捕捉了振动信号在不同时间段的优势频率。对振动信号、压下液压缸压力信号和伺服阀给定信号做短时傅里叶变换后, 热连轧机振动被诊断为液机耦合振动。利用离散小波变换和 S 变换相结合的方法对轧机振动信号进行分析, 确定轧机起振的时间为液压压下系统的投入时间, 证明了热连轧机存在液机耦合振动现象。

**关键词** 热连轧机; 耦合振动; 频域滤波; S 变换; 振动识别

**中图分类号** TH113.1; TG333.17

## 引言

热连轧机振动问题是国内外冶金行业倍受关注和亟待解决的一个国际性难题<sup>[1-2]</sup>。随着轧机装备水平的不断提高, 热连轧机呈现出越来越复杂多种并存的振动现象<sup>[3-4]</sup>。轧机振动不仅威胁轧机的安全生产和缩短零部件的使用寿命<sup>[5]</sup>, 还降低了薄规格产品的表面质量, 严重阻碍新品种的开发<sup>[6]</sup>, 使企业蒙受较大的经济损失。热连轧振动研究具有强耦合和强非线性的性质。轧机是一个复杂的非线性系统, 其状态和特征是以多种物理量相互关系来表达。轧制过程中参数繁多, 轧机振动常常是由多个振动相互耦合在一起, 导致测到的信号往往是非线性和非平稳的。因此, 准确识别振动信号特征成为解决轧机振动至关重要的问题。文献[7]采用小波变换对轧机振动信号进行降噪处理, 指出低频重构降噪和阈值法降噪的效果相同。文献[8]用时域复指数法对轧机模态进行识别, 采用时频分析技术对信号进行分析, 发现弧形齿接轴不平衡冲击对轧机振动的影响。文献[9]运用小波分形技术对冷连轧机振纹振动进行识别, 为在复杂振动环境下识别振纹振动提供了有效途径。

轧机振动呈现出多样性和不确定性的特点, 强烈的振动现象并非阶跃的, 往往会经历一个渐变过程, 采用传统的故障诊断理论无法准确识别其振动

特征。笔者针对轧机强烈振动的渐变过程, 运用离散小波变换和 S 变换的方法对振动信号进行分析并提取了轧机振动特征信息。

## 1 耦合振动信号拾取与预处理

为捕捉轧机出现振动时工艺、电气、液压、振动和力能参数的变化规律, 利用自制的轧机耦合振动在线监测系统对某热连轧机状态进行全面监测, 如图 1 所示。



图 1 轧机耦合振动在线监测系统

Fig. 1 Online monitoring system rolling mill coupled vibration

监测系统捕捉的振动信号常常混杂干扰或噪声信号, 为剔除或削弱噪声信号的影响, 需要对采样信号数据进行消噪处理。目前, 振动信号滤波方法可

分为两类:a.基于时域的消噪;b.基于频域的消噪。针对轧机振动信号的非平稳特性,笔者提出一种基于短时傅里叶变换的自适应频域滤波方法。

### 1.1 频域滤波原理

频域滤波是指根据信号的频谱信息,设计带通、高通、低通和陷波滤波器来提取含特定频率成分。根据卷积公式,建立频域和时域的关系,得到

$$f(t) * h(t) \Leftrightarrow F(j\omega) \cdot H(j\omega) \quad (1)$$

其中: $f(t)$ 为原信号; $h(t)$ 为滤波器; $F(j\omega)$ 为信号 $f(t)$ 的傅里叶变换; $H(j\omega)$ 为滤波器 $h(t)$ 的傅里叶变换。

频域滤波器是将 $H(j\omega)$ 的每一个分量乘以 $F(j\omega)$ 中相应部分的实部和虚部,使 $F(j\omega)$ 中相应的实部和虚部的比值保持不变,然后将频域中滤波后的信号进行傅里叶变换,得到滤波后的信号 $g(t)$ 。

频域滤波器设计的基本思路是:保留特征频率,限制或消除不需要的频率分量。笔者采用带通滤波器保留轧机振动特征频率,带通频域滤波器函数 $H(j\omega)$ 可表示为

$$H(j\omega) = \begin{cases} 0 & (D(j\omega) \geq D_2 \text{ 或 } D(j\omega) \leq D_1) \\ 1 & (D_1 \leq D(j\omega) \leq D_2) \end{cases} \quad (2)$$

其中: $D_1, D_2$ 为带宽截止频率。

可见,如何确定带通滤波器的中心频率和带宽为信号消噪的关键。

### 1.2 功率法设定滤波器中心频率阈值

功率法是指通过计算保留频谱的功率百分比来确定滤波器的截止频率。基于功率法确定截止频率的基本步骤如下。

1) 计算整个信号所有频率的总功率 $P_t$ 。信号总的功率为

$$P_t = \sum_{f=0}^{f_s-1} P(j\omega) \quad (3)$$

其中: $f_s$ 为采样频率; $P(j\omega)$ 为某个频率的功率。

2) 根据每一频率的功率百分比确定截止频率,有

$$\eta(j\omega) = \frac{P(j\omega)}{P_t} \times 100\% \quad (4)$$

根据每一个频率的功率百分比即可设定整个频率段上的功率阈值,当频率的功率百分比大于功率阈值时,该频率就被保留,反之剔除。

### 1.3 基于短时傅里叶变换的自适应频域滤波

首先,用短时傅里叶变换对频率局部时间信息

定位。离散短时傅里叶变换公式为

$$S(j\omega, \tau) = \sum_{i=0}^{N-1} f(t_i) g(t_i - \tau) e^{-j\omega \frac{2\pi}{N} t_i} \quad (5)$$

其中: $g(t)$ 为窗口函数。

离散短时傅里叶逆变换公式为

$$f(t_i) = \frac{1}{N} \sum_m \sum_{i=1}^N S(j\omega, \tau) e^{j\frac{\pi}{N} \omega t_i} \quad (6)$$

其中: $m$ 的求和范围取决于数据的长度和窗函数移动的长度。

然后,用功率法确定中心频率功率阈值,自适应判断每个带通滤波器的中心频率,确定每一个局部时间信息的中心频率;采用带通滤波器对每一个时间间隔的信号进行滤波处理。最后,用离散短时傅里叶逆变换还原滤波后的数据信号。

基于短时傅里叶变换的自适应频域滤波流程如图2所示。笔者对轧机振动信号采用了自适应阈值确定滤波器中心频率、非中心频率被强制置零或强制衰减的滤波方式,对振动中心频率明显的非平稳时变信号有很好的滤波效果,保留了特征信号的信息。

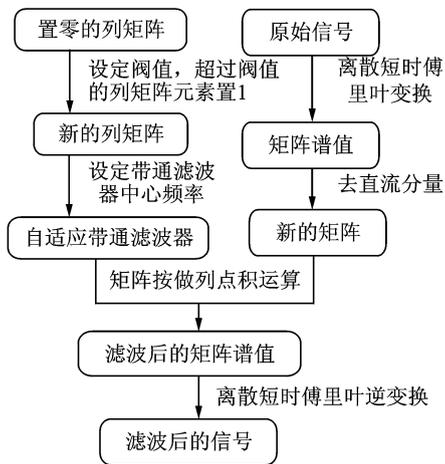


图2 基于短时傅里叶变换的自适应频率滤波流程

Fig. 2 Adaptive frequency filtering flow chart based on short-time Fourier transform

## 2 液机耦合振动特征分析

热连轧机在轧制薄规格带钢时,其振动频率一般是变化的。以某轧机为例,参数如下:板坯材质为B480,厚度为35 mm,带钢成品为1 220 mm × 1.59 mm。图3为轧辊振动加速度原始信号波形及频率-时间等高线图和滤波后的波形及频率-时间等高线图。从滤波前等高线图可见,41 Hz左右及其倍频的振动频率不是非常明显,但混杂的频率非常多。滤波后发现振动特征频率非常明显,123 Hz(3倍频)左右的频率在整个频率轴线上所占比重最大,

41 Hz 左右的频率(基频)和其他倍频所占比重较小,41 Hz 左右的频率在 25~25.1 s 和 26.9~27 s 没出现该频率。图 4 为液压缸压力信号波形及频率-时间等高线图,从滤波前的频率-时间等高线图中无法发现 41 Hz 左右的振动频率。滤波后,虽然频率-时间等高线图中掺杂的频率成分较多,但优势频率已十分明显,41,123 Hz 左右的频率一直存在。图 5 为液压压下系统的伺服阀控制给定信号波形及频率-时间等高线图和滤波后的波形及其频率-时间等高线图。图中振动频率约为 41 Hz 和 123 Hz,且所占比重较大。从图 3~5 可以看出:测得的轧机振动信号经基于短时傅里叶变换的自适应频率滤波后其振动特征频率已明显显现出来,说明该方法在轧机振动信号预处理时具有良好的滤波效果;轧机发生强烈振动时,轧辊振动加速度、液压缸压力和伺服阀给定信号都有相同的振动频率,证明该轧机存在液机耦合振动现象。

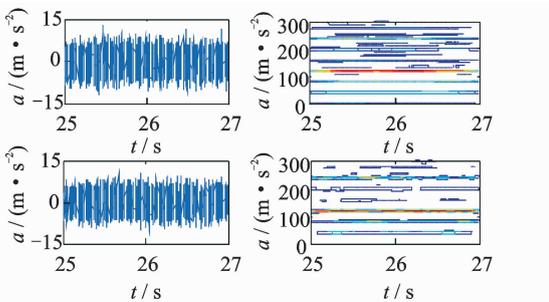


图 3 上工作辊的振动加速度波形及其等高线谱(25~27 s)  
Fig. 3 Work roll vibration acceleration waveform and its contour spectrum (25~27 s)

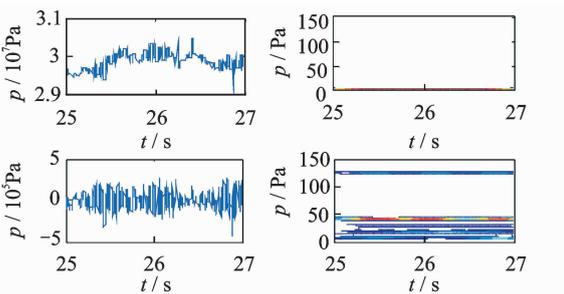


图 4 压下液压缸压力振荡波形及其等高线谱  
Fig. 4 Screw down hydraulic cylinder pressure oscillation waveform and its contour spectrum

### 3 轧机起振时间提取

#### 3.1 离散小波变换确定小波尺度与频率关系

小波尺度与频率的关系可以通过小波的仿真实

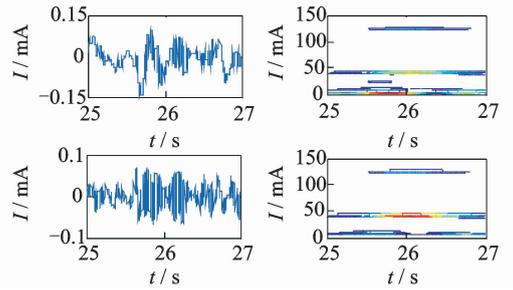


图 5 伺服阀电流信号波形及其等高线谱

Fig. 5 Servo valve current waveform and its contour spectrum

验方法来确定。离散小波变换的公式为

$$W_f(a, \tau) = [f, \psi_{a,\tau}(t)] = \frac{1}{\sqrt{a}} \sum_{i=1}^n f(t_i) \psi_{a,\tau}\left(\frac{t_i - \tau}{a}\right) \quad (7)$$

其中:  $\psi_{a,\tau}(t_i) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t_i - \tau}{a}\right)$  为小波基函数;  $a$  为缩放因子;  $\tau$  为平移因子,为减少小波变化系数冗余度,小波基函数的  $a, \tau$  被限定在一些离散的点上取值。

离散小波的频谱为

$$\hat{\psi}_{a,\tau}(2\pi f) = \frac{1}{\sqrt{a}} e^{-2j\pi f\tau} \hat{\psi}(2a\pi f) \quad (8)$$

设  $\psi(t)$  的中心频率为  $f_0$ ,  $\psi_{a,\tau}(t)$  的频窗中心频率为  $f_{a,\tau} = f_0/a$ ,小波变换时尺度与频率的关系为

$$f_{a,\tau} = f_0/a f_s \quad (9)$$

其中:  $f_s$  为采样频率。

$\psi(t)$  的中心频率  $f_0$  与小波基有关。由式(9)看出,小波尺度  $a$  与频率  $f_0$  的关系依赖于  $\psi(t)$  和采样频率  $f_s$ 。为统一,把频率做归一化处理  $f' = f/f_s$ ,  $f'$  为归一化频率,归一化频率与小波尺度的关系如表 1 所示。

表 1 离散小波尺度对应归一化频率的最大系数 ( $\times 10^{-2}$ )  
Tab. 1 Discrete wavelet scale corresponding to the maximum coefficient of the normalized frequency ( $\times 10^{-2}$ )

归一化频率	尺度 1	尺度 2	尺度 3	尺度 4	尺度 5	尺度 6	尺度 7
0.250	100						
0.200		72					
0.125			85				
0.100				72			
0.090					36		
0.075						26	
0.050							32

#### 3.2 S 变换

在图像处理等领域得到了广泛应用<sup>[10-11]</sup>。S 变换采用了一种新的与频率有关的高斯窗函数,是对

短时傅里叶变换和连续小波变换的进一步扩展<sup>[12]</sup>。一个离散信号  $x(i)$  的离散 S 变换公式为

$$S[m, n] = \begin{cases} \sum_{i=0}^{N-1} X[n+i] e^{-2\pi^2 i^2/n^2} e^{j2\pi in/n} & (n \neq 0) \\ \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x[i] e^{-2j\pi in/N} & (n=0) \end{cases} \quad (10)$$

其中:  $x(i)$  为被变换离散信号;  $X[n+i]$  为信号集合  $x(i)$  的傅里叶变换;  $S(m, n)$  为其 S 变换;  $j$  为虚数单位;  $m$  为时间采样点;  $n$  为频率采样点;  $N$  为被分析信号采样点数。

高斯窗函数为

$$\omega(m, n) = \begin{cases} e^{-2\pi^2 i^2/n^2} & (n \neq 0) \\ e^{-2j\pi in/N} & (n=0) \end{cases} \quad (11)$$

可见, S 变换是以特殊母小波作小波变换, 具备了类似小波变换的多分辨率性。再乘以相位因子, 巧妙地将 S 变换与傅里叶变换结合起来, 使得 S 变换具备相位校正特性。

### 3.3 轧机起振时刻辨识

热连轧机振动通常有渐变的起振过程。某轧机上工作辊轴承座垂直方向的振动加速度信号波形及频率-时间等高线图和滤波后的波形及频率-时间等高线图如图 6 所示。咬钢时刻为 12.668 s, 采样频率为 512 Hz, 可以看到明显的加速度变化发生在咬钢后 2 s 左右。从相应的频率-时间等高线图中可看出, 振动的主要频率为 43.5 Hz, 但从时域和频域中很难分辨 43.5 Hz 是何时开始振动和加强的。因此需要做进一步信号处理。

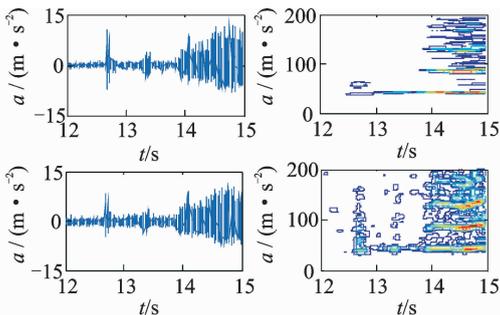


图 6 上工作辊的振动加速度波形及其等高线谱(12~15 s)  
Fig. 6 Work roll vibration acceleration waveform and its contour spectrum (12~15 s)

为更好地搜索起振时刻, 设置求和  $(s_{i,k}, s_{i+1,k}, \dots, s_{i+L-1,k})/L\text{thrval}$ ,  $i$  点为起振点, 则起振时间为

$$T_s = i/f_s \quad (12)$$

其中:  $k$  为起振频率所在位置;  $s_i$  为 S 变换后  $i$  点对

应幅值;  $L$  为求和长度;  $\text{thrval}$  为起振阈值。

为避开咬钢冲击对数据分析的影响, 去除咬钢冲击响应衰减时间, 取 12.863~14.863 s 时间段分析, 经自适应频域滤波后, 振动加速度波形如图 7 (a) 所示。由于起振后的频率为 43.5 Hz, 归一化处理后频率  $f' = 0.085$ , 从表 1 看出, 振动频率在第 6 层细节信号里, 如图 7 (b) 所示。对第 6 层细节信号做 S 变换, 可以自适应提取振动频率, 图 7 (c) 为第 6 层细节信号的 S 变换结果。取 S 变换后最大幅值的 1/6 作为起振阈值, 求和长度为起振频率的 5 个周期, 即 59 个点的数据。搜索到的起振时间为 0.312 5 s, 此时 43.5 Hz 的频率开始增强, 即咬钢后 0.507 5 s (12.863 + 0.312 5 - 12.668) 振动开始加强。振动加强的起始时刻和液压自动厚度控制投入时间 0.5 s 非常接近。从振动突然加强现象分析, 证明了投入自动厚度控制后轧机发生了液机耦合振动现象。

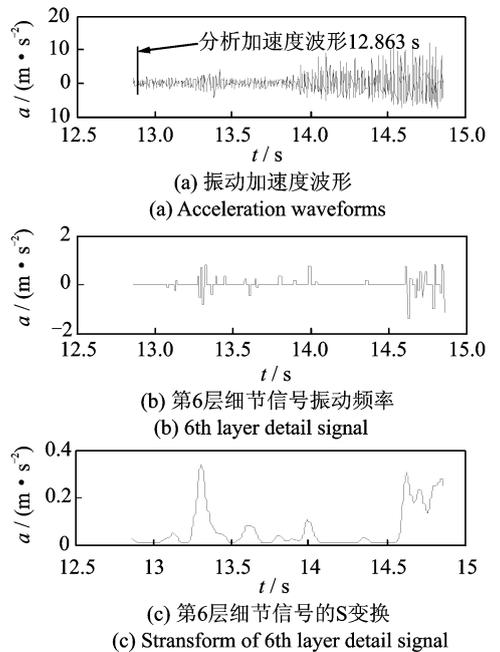


图 7 第 6 层细节信号中起振频率的 S 变换

Fig. 7 Vibration frequency of S transform in the 6th layer detail signal

## 4 结 论

1) 经过对多架热连轧机轧辊振动加速度、压下液压缸压力和伺服阀信号分析, 均出现了相同的频率及倍频特征, 表明轧机存在液机耦合振动现象。

2) 基于短时傅里叶变换的自适应频域滤波适合对振动信号特征的提取, 可以准确辨识耦合振动信号信息。

3) 采用离散小波和S变换的方法成功提取了轧机振动开始加强的时间与自动厚度控制投入运行的依赖关系。证明了轧机投入自动厚度控制系统出现了液机耦合振动关系。

## 参 考 文 献

- [1] 闫晓强,史灿,曹曦,等. CSP 轧机扭振与垂振耦合研究[J]. 振动、测试与诊断, 2008, 28(4): 377-381.  
Yan Xiaoqiang, Shi Can, Cao Xi, et al. Research on CSP rolling mill coupling of torsional vibration and vertical vibration[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2008, 28(4): 377-381. (in Chinese)
- [2] 杨旭,李江昀,童朝南. 冷连轧机传动系统振动测试与控制策略[J]. 振动、测试与诊断, 2013, 33(1): 99-105.  
Yang Xu, Li Jiangyun, Tong Chaonan. Cold rolling mill drive system vibration test and control strategy[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2013, 33(1): 99-105. (in Chinese)
- [3] Eugenio B, Luca L. Numerical and experimental analysis of the dynamic effects in compact cluster mills for cold rolling[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(5): 2436-2445.
- [4] Mashayekhi M, Torabian N, Poursina M. Continuum damage mechanics analysis of strip tearing in a tandem cold rolling process[J]. Simulation Modeling Practice and Theory, 2011, 19(2): 612-625.
- [5] Yan Xiaoqiang, Sun Zhihui, Chen Wei. Vibration control in thin slab hot strip mills[J]. Iron Making and Steelmaking, 2011, 38(4): 309-313.
- [6] 闫晓强. 热连轧 FTSR 轧机振动仿真研究[J]. 工程力学, 2012, 29(2): 230-234.  
Yan Xiaoqiang. Vibration simulation study of FTSR rolling mill [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2012, 29(2): 230-234. (in Chinese)
- [7] 张建宇,高立新,崔玲丽,等. 基于小波变换的轧机振动信号降噪技术研究[J]. 振动与冲击, 2007, 26(5): 71-74.  
Zhang Jianyu, Gao Lixin, Cui Lingli, et al. Study on noise reduction technology of vibration signals of rolling mills based on wavelet transformation[J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26(5): 71-74. (in Chinese)
- [8] 臧勇,范小彬,王会刚. 基于信号时-频特征的轧机振动分析[J]. 振动、测试与诊断, 2011, 31(5): 642-648.  
Zang Yong, Fan Xiaobin, Wang Huigang. Vibration analysis of rolling mill based on signal-frequency characteristics[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2011, 31(5): 642-648. (in Chinese)
- [9] 米凯夫,张杰,曹建国,等. 基于小波和小波分形的冷连轧机振动识别方法[J]. 北京科技大学学报, 2013, 35(8): 1064-1071.  
Mi Kaifu, Zhang Jie, Cao Jianguo, et al. Vibration identification technology of tandem cold rolling mills based on wavelet and fractal analysis[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2013, 35(8): 1064-1071. (in Chinese)
- [10] 杨涛,孙国霞,段修满. 基于S变换的图像边缘检测算法研究[J]. 计算机工程与应用, 2013, 49(19): 158-161.  
Yang Tao, Sun Guoxia, Duan Xiuman. Research of image edge detection based on S-transform[J]. Computer Engineering and Applications, 2013, 49(19): 158-161. (in Chinese)
- [11] 甄莉,彭真明. 基于广义S变换的图像局部时频分析[J]. 航空学报, 2008, 29(4): 1013-1019.  
Zhen Li, Peng Zhenming. Local time-frequency analysis of images based on generalized S-transform[J]. Acta Aeronauticae Astronautica Sinica, 2008, 29(4): 1013-1019. (in Chinese)
- [12] 杨先勇,周晓军,张文斌,等. 基于形态小波和S变换的滚动轴承故障特征提取[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2010, 44(11): 2088-2092.  
Yang Xianyong, Zhou Xiaojun, Zhang Wenbin, et al. Rolling bearing fault feature extraction based on morphological wavelet and S-transform[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2010, 44(11): 2088-2092. (in Chinese)



**第一作者简介:**凌启辉,男,1986年3月生,博士研究生。主要研究方向为设备行为在线检测与振动控制。曾发表《Research on harmonic response of hydraulic screwdown system on modern hot rolling mill》(《Advanced Materials Research》2012, Vol. 572)等论文。  
E-mail: lqh\_hunan@163.com

