

# 基于小波变换的焊缝位置检测新方法

屈稳太 诸 静

(浙江大学电气工程学院, 杭州 310027)

**摘 要** 焊缝位置检测一直是埋弧焊管生产中的难题,为此,在小波分析理论及其边沿检测技术的基础上,提出了一种焊缝位置检测的新方法。该方法主要涉及到焊缝图象信号的预处理、三阶样条小波函数及其小波变换、尺度参数对变换结果的影响、检测结果的相关分析等内容,仿真结果表明,该方法检测精度高、抗干扰性能好、计算复杂度小、可靠性高,可以应用到实时控制中去。

**关键词** 小波变换 三阶样条 边沿检测 焊缝 相关分析

**中图分类号**: TP391.4 **文章标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2002)12-1314-05

## A New Method of Detecting Welding Seam Based on Wavelet Transform

QU Wen-tai, ZHU Jing

(College of electrical engineering of Zhejiang University, Hangzhou 310027)

**Abstract** The detecting welding seam has been a difficulty problem in pipe manufacture for a long time, this paper proposed a new method for it based on the wavelet transform theory and its technology of edge detection. The method mainly relates to the pretreatment of the seam image, the wavelet transform based on three-order spine function, the scale parameter effect on the transform results and the correlation analysis on the ultimate results. By the analysis on the theory and the simulation on computer, the method shows higher estimated precision and better capability of anti-disturb. In the other hand, its complication is not high. So it can be used into real-time control system.

**Keywords** Wavelet transform, 3-order spine function, Edge detection, Welding seam, Correlation analysis

## 0 引 言

埋弧焊以其焊缝成型好,没有弧光辐射等优点被广泛地应用于石油化工和压力容器等的制造中<sup>[1]</sup>,由于埋弧焊电弧及焊缝不易观察,因此为了保证焊头与焊缝对准,焊前必须认真调整焊头与焊缝中心位置。但是由于在生产过程中,受钢板的振动、成型机的摆动等诸多不确定因素的影响,经常引起焊头偏离焊缝而造成偏焊,它直接影响着焊管的生产质量,因而迫切需要解决焊缝的自动跟踪技术。在焊缝的自动跟踪中,焊缝的位置检测是其关键。为此,人们进行了长期的探索,尝试过各种传感器,如机电式的、电磁式的、光电式的等,但仍然精度、可靠

性不能得到有效保证。随着计算机、图象处理技术的发展,尤其是小波分析技术的出现及其日臻成熟,为解决此类问题提供了新的途径。本文在小波分析理论及其边沿检测技术的基础上,提出了一种新的焊缝位置检测方法。主要内容有焊缝图象信号的预处理,三阶样条小波函数及其小波变换,尺度参数对变换结果的影响,检测结果的相关分析等。

## 1 小波分析理论及其边沿检测技术

### 1.1 小波分析理论

小波分析理论源于傅立叶分析。傅立叶分析是一种纯频域方法,它反映的是整个时间(或空间)域信号的整体频域特征,未能提供任何局部时间(或空

间)段上的频域信息;而小波分析是一种时-频联合分析方法,它模拟了人类的视觉特性,采用变尺度的原理对信号进行分析,从而可以探测到信号的局部。

设  $\psi(x) \in L^2(\mathbf{R})$  为一小波母函数,它满足可容性条件<sup>[2]</sup>

$$\int_{\mathbf{R}} \frac{|\psi(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \infty \quad (1)$$

其中,  $\psi(\omega)$  为  $\psi(x)$  的傅立叶变换,  $x$  可以是时间变量也可以是空间变量。在一般情况下,常选取具有紧子集或近似紧子集的、并且具有正则性的函数作为小波母函数,紧子集意味着时域的局部性,而正则性意味着频域的局部性。

由可容性条件可知,  $\psi(0) = 0$ , 所以小波母函数的直流分量为零,它呈现为正负交替的形状。将小波母函数进行伸缩和平移,就构成了小波基。设伸缩因子为  $a, a \in \mathbf{R}^+$ , 平移因子为  $\tau, \tau \in \mathbf{R}$ , 则小波基表示为

$$\psi_{a,\tau}(x) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{x-\tau}{a}\right)$$

任一函数  $f(x) \in \mathbf{R}$ , 在小波基  $\psi_{a,\tau}(x)$  上展开,其展开系数就定义为  $f(x)$  的小波变换

$$\begin{aligned} W T f(a, \tau) &= \langle f(x), \psi_{a,\tau}(x) \rangle \\ &= \frac{1}{a} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \psi\left(\frac{x-\tau}{a}\right) dx \end{aligned} \quad (2)$$

$W T f(a, \tau)$  是伸缩因子  $a$  和平移因子  $\tau$  的二元函数,其中  $a$  反映了小波基函数的频率信息,  $a$  越大,小波基函数越平坦,频率越低;而  $a$  越小,小波基函数越窄,即频率越高;  $\tau$  反映了小波基函数的时域(或空域)的位置信息。

### 2.2 小波变换边沿检测技术

在用小波变换来分析信号的突变(即边沿)性质时, Mallat 对小波变换重新做了定义<sup>[3]</sup>。

设  $\psi(x)$  是一个小波母函数,  $\psi_a(x) = \frac{1}{a} \psi\left(\frac{x}{a}\right)$  是尺度为  $a$  的小波函数,则定义  $f(x) \in L^2(\mathbf{R})$  的小波变换为  $f(x)$  和  $\psi_a(x)$  的卷积:

$$\begin{aligned} W T f_{\psi}(x, a) &= f(x) * \psi_a(x) \\ &= \frac{1}{a} \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) \psi\left(\frac{x-\tau}{a}\right) d\tau \end{aligned} \quad (3)$$

卷积在物理上表现为滤波器对信号  $f(x)$  的滤波,滤波器的脉冲响应为  $\psi_a(x)$ 。

设  $\theta(x)$  为一具有低通平滑作用的滤波函数,即

$$\int_{-\infty}^{\infty} \theta(x) dx = 1 \quad \lim_{|x| \rightarrow \infty} \theta(x) = 0$$

假设  $\theta(x)$  具有一阶、二阶导数,分别用  $\xi(x)$  和  $\eta(x)$

表示,则

$$\xi(x) = \frac{d\theta(x)}{dx} \quad \eta(x) = \frac{d^2\theta(x)}{dx^2} \quad (4)$$

容易推知:  $\xi(x), \eta(x)$  均满足可容性条件,所以  $\xi(x)$  和  $\eta(x)$  可作为小波母函数。用  $\xi(x)$  和  $\eta(x)$  分别对  $f(x)$  作小波变换,则有

$$\begin{aligned} W T f_{\xi}(x, a) &= \frac{1}{a} \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) \xi\left(\frac{x-\tau}{a}\right) d\tau \\ &= a \frac{d}{dx} [f(x) * \theta_a(x)] \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} W T f_{\eta}(x, a) &= \frac{1}{a} \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) \eta\left(\frac{x-\tau}{a}\right) d\tau \\ &= a \frac{d^2}{dx^2} [f(x) * \theta_a(x)] \end{aligned} \quad (6)$$

由式(5)可知:  $W T f_{\xi}(x, a)$  是  $f(x)$  与  $\theta_a(x)$  的卷积,也就是  $f(x)$  通过  $\theta_a(x)$  滤波后,再求其微分。由于  $\theta_a(x)$  是一个平滑滤波函数,所以  $f(x)$  经过  $\theta_a(x)$  滤波后,  $f(x)$  的噪声得到了抑制;而微分运算,反映了  $f(x)$  的变化率,当  $f(x)$  中存在边沿时,即突变点,它的变化率就很大,达到模极大值,所以  $W T f_{\xi}(x, a)$  取极值点的地方就是  $f(x)$  的边沿位置,这就是基于小波变换模极大值进行边沿检测的基本原理。其中尺度因子  $a$  对小波变换有较大的影响,当  $a$  较大时,  $\theta_a(x)$  变得平而宽,它的平滑滤波作用增强,有利于去噪,但由于对信号的边沿也进行了平滑滤波,从而减小了它的变化率,模糊了信号的突变特性;反之,当  $a$  较小时,  $\theta_a(x)$  变得高而窄,它的平滑作用减弱,噪声影响突出,但它也突出了信号的突变特性。  $W T f_{\eta}(x, a)$  是  $f(x)$  与  $\theta_a(x)$  卷积后的二阶导数,二阶导数的过零点对应一阶导数的极值点,所以也常用  $W T f_{\eta}(x, a)$  的过零点来检测信号的边沿,但是对于受到强噪声污染的信号,  $W T f_{\eta}(x, a)$  的过零点很多,由此很难判断真正的边沿,所以下面的分析中,仅讨论用  $W T f_{\xi}(x, a)$  模极大值来检测信号边沿的方法。

## 2 小波变换用于焊缝位置的检测

### 2.1 焊缝信号的分析

经过摄像机取回的焊缝图象信号,由于受钢板生锈、发黑及灰尘的影响,叠加有强的不规则的噪声。图 1 为一幅 256 灰度级的焊缝照片,图 2 为不同横截面上的灰度曲线族。对应横截面上的灰度曲线族可看成是随机过程,每条曲线是随机过程的一个实现或取样。在这里,随机过程的参变量为位置变

量,对应每一个位置点,它的灰度值是一个随机变量,其取值空间为 $[0,255]$ ,概率分布服从正态分布.设一帧图象的大小为 $M \times N$ , $M$ 为垂直于焊缝方向上的像素点数, $N$ 为平行于焊缝方向上的像素点数,对于垂直方向上的任意一点,用平行方向上的样本均值来估计该点随机变量的均值,即

$$x(i) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N I(i, j) \quad (7)$$

其中, $I(i, j)$ 表示 $(i, j)$ 位置的图象灰度值, $i$ 表示垂直于焊缝方向的坐标, $j$ 表示平行于焊缝方向的坐标,则通过式(7)可将二维图象信号转换为一维信号 $x(i)$ ,这样就可通过对一维信号的分析来探讨焊缝位置的检测.

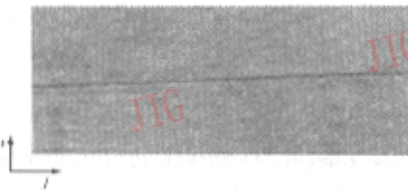


图1 一幅焊缝照片

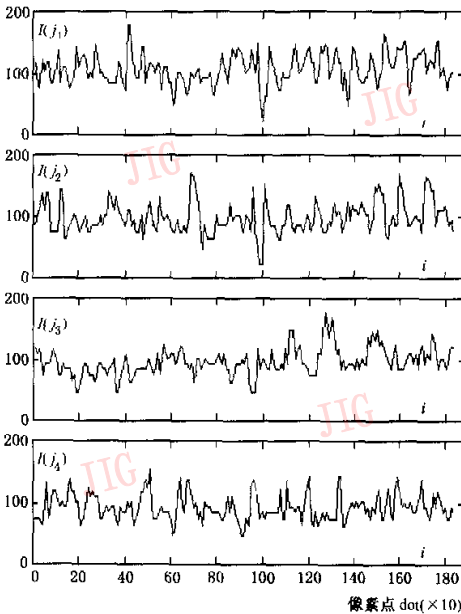


图2 不同横截面上的焊缝信号族

### 2.2 三阶样条小波函数

选择三阶样条函数作为小波母函数.在 $[-1,1]$ 区间构造三阶样条函数作为 $\theta(x)$ ,即

$$\theta(x) = \begin{cases} -2x^3 - 3x^2 + 1 & x \in [-1, 0] \\ 2x^3 - 3x^2 + 1 & x \in [0, 1] \end{cases}$$

$$\xi(x) = \frac{d\theta(x)}{dx} = \begin{cases} -6x^2 - 6x & x \in [-1, 0] \\ 6x^2 - 6x & x \in [0, 1] \end{cases}$$

$$\theta_a(x) = \frac{1}{a} \theta\left(\frac{x}{a}\right), \xi_a(x) = \frac{1}{a} \xi\left(\frac{x}{a}\right)$$

$\theta_a(x)$ 与 $\xi_a(x)$ 曲线如图3所示.

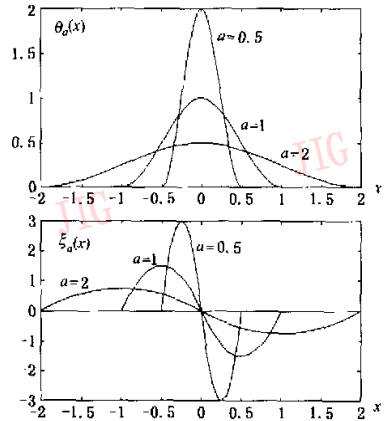


图3  $\theta(x)$ 和 $\xi(x)$ 曲线

### 2.3 检测方法的具体实现

摄像机的安装如图4所示,调整摄像机镜头使图象的水平方向与焊缝方向基本一致,然后将其固定.摄像机与焊头固定在一起,当焊缝与焊头有相对位移时,摄像机就会检测到这种变化.对于每一帧图象在水平方向取100个点,即 $N=100$ ,根据式(7),将其转换为一维信号.当摄像机分辨率取为400dpi时,100个像素点对应距离为1/4英寸,在1/4英寸内可以将焊缝近似为直线.

小波函数的离散化必须与图象信号的离散化相

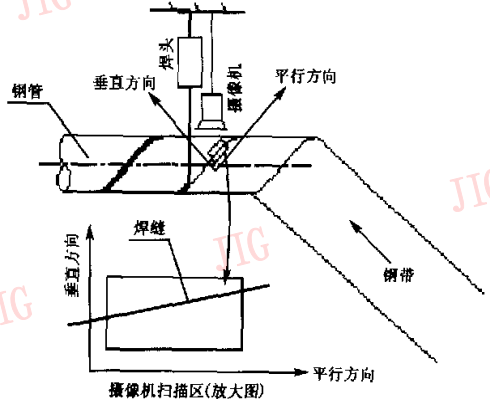


图4 摄像机的安装图

匹配. 图象采用 400dpi 时, 每 1mm 内大约有 16 个点, 而实际的焊缝宽度大都在 0.5mm~1mm 内, 所以小波函数在尺度  $a=1$  时, 在  $[-1, 1]$  内取 8 个均匀分布的采样点. 小波函数采样点的多少与小波函数的尺度有关. 对在不同尺度上离散化有

$$\xi_{0.5}(n) = \{0, 3, 0, -3, 0\}$$

$$\xi_1(n) = \{0, 1.125, 0, 1.500, 0, 1.125, 0, 0, -1.125, 0, -1.500, 0, -1.125, 0, 0\}$$

$$\xi_2(n) = \{0.000, 0.328, 0.562, 0.703, 0.750, 0.703, 0.562, 0.328, 0.000, -0.328, 0.562, -0.703, -0.750, -0.703, 1, -0.562, -0.328, 0.000\}$$

实际的焊缝图象信号被转换为一维信号后, 表现为“山谷”形, 它与文献[3]中“屋脊”形信号呈反对称关系. 为了处理方便, 将“山谷”形信号反转为“屋脊”形信号. 设灰度图象的最大灰度值为 255, 反转后信号为  $x_1(m) = 255 - x(m)$ , 其“山谷”位置与“屋脊”位置保持不变. “屋脊”形信号, 由两个边沿构成, 一个是上升沿, 另一个是下降沿. 上升沿经  $\xi(x)$  小波变换后, 表现为极大值, 下降沿经  $\xi(x)$  小波变换后, 表现为极小值, 因此焊缝位置就取在极大值与极小值之间.

小波变换式(5)所表示的连续信号卷积可以用离散的  $\xi(n)$  与数字信号  $x(n)$  的卷积来代替. 为了避免有限长信号在卷积时产生的边界延长和失真, 采取将一维信号进行周期延拓, 然后进行循环卷积的办法. 设  $x(m)$  为有限长信号, 长度为  $M$ , 经周期延拓后其周期信号为  $x_p(m)$ ,  $x_p(m)$  经长度为  $N$  的滤波器  $\xi(n)$  滤波后, 输出为

$$y_p(m) = \sum_{n=0}^{N-1} x_p(m-n)\xi(n)$$

$y_p(m)$  也是周期信号, 周期为  $M$ , 取  $y_p(m)$  的主值  $y(m)$ ,  $m \in [0, M-1]$  作为  $x(m)$  滤波后的输出.

### 2.4 相关分析

由于焊缝的位置在生产过程中是连续变化的, 在连续的几帧图象中, 焊缝位置之间存在着很强的相关性, 利用这种相关性, 可以进一步减小噪声的影响, 提高检测的准确性.

设给定一组参数:  $b_1, b_2, \dots, b_n$ , 其中  $b_1 > b_2 > \dots >$

$b_n$ , 且  $\sum_{j=1}^n b_j = 1$ , 用前面  $n-1, n-2, \dots$  时刻的焊缝位置  $l_{n-1}, l_{n-2}, \dots$  来预测  $n$  时刻的焊缝位置, 预测值为  $\hat{l}_n = b_1 l_{n-1} + b_2 l_{n-2} + \dots$ . 设在  $n$  时刻检测到的焊缝位置为  $l_n$ , 预测误差为  $e_n = |l_n - \hat{l}_n|$ . 当  $e_n$  大于某一

阈值时, 表示该时刻检测到的焊缝位置信号是由于噪声干扰而造成的虚假信号, 予以丢弃, 进而采用预测值  $\hat{l}_n$  作为本时刻的实际值; 而当  $e_n$  小于某一阈值时, 表示此时刻检测值是真实的, 可以采用. 检测流程图如图 5 所示.

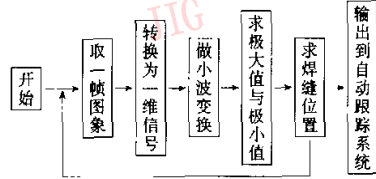


图 5 程序流程图

### 3 仿真结果与结论

图 6 为连续的几帧图象及其处理结果, 其中图 6(a) 为二维图象转化为一维信号后的图形, 灰度值已作了反转, 与图 2 比较, 焊缝的“屋脊”特性比较明显, 而其他位置的噪声也得到了一定程度的抑制. 事实上, 采样值的平均也是一种低通滤波算法. 图 6(b)、图 6(c) 和图 6(d) 为图 6(a) 所示信号在不同尺度  $a$  上的小波变换结果. 由此可看出, 在  $a=1$  时, 效果比较好. 在  $a=0.5$  时, 噪声未得到抑制反而有所加强; 而在  $a=2$  时, 虽然滤波效果好, 但有时会出现大的起伏, 不利于真正极值点的检测. 表 1 列出了  $a=1$  时的检测结果, 位置点采用像素数表示.

表 1  $a=1$  时小波变换检测结果

(像素点数  $\times 10$ , 相关分析系数  $b_1=0.7, b_2=0.2, b_3=0.1$ , 阈值=5)

	极大值点	极小值点	检测到焊缝点	相关分析后焊缝点
第 1 帧	97	102	99.5	99
第 2 帧	93	99	96	96
第 3 帧	92	96	94	94
第 4 帧	89	94	91.5	91

将本文所提出的方法与其他检测方法<sup>[1]</sup>作比较, 结果见表 2. 其中可靠性用同样长的工作时间(设为一个月)内, 各检测方法所引起的偏焊次数来度量; 检测精度用检测到的焊缝位置点与实际焊缝的中心点之间的平均偏差来度量.

表 2 各种检测方法的比较

	直接接触法	电弧间接法	光电感应法	本文方法
可靠性(次数)	54	10	38	1~2
检测精度(mm)	3.5	5.6	2.3	1.3

仿真结果表明, 基于小波变换的焊缝位置检测技术能够克服其他检测方法的种种不足<sup>[1]</sup>, 有效地抑制噪声的影响, 提高检测的可靠性和检测精度.

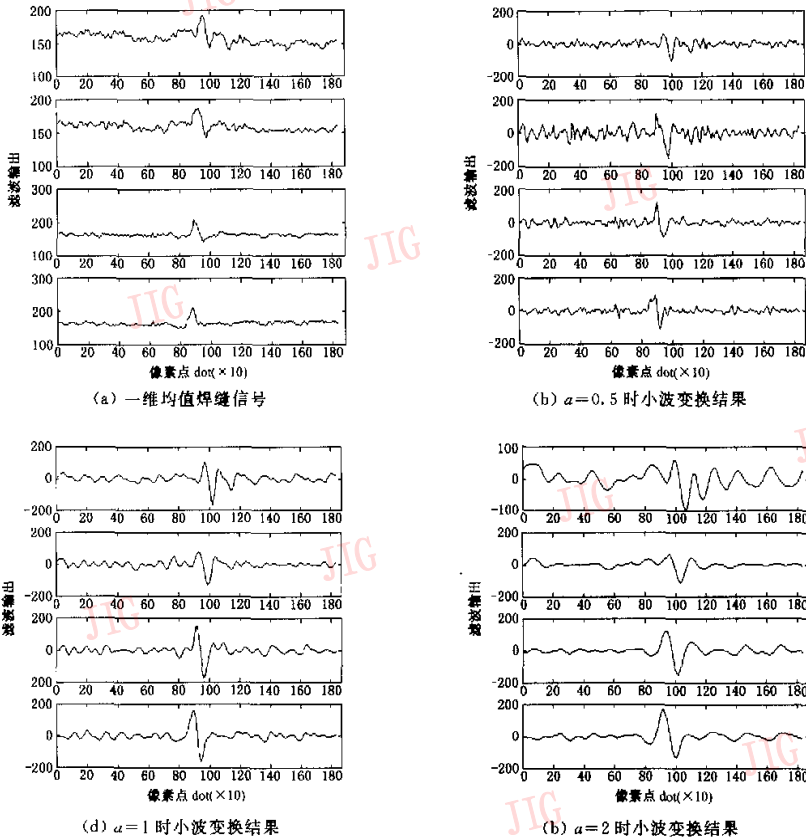


图6 连续几帧图象的仿真结果

本文提出的检测方法具有以下优点:

(1) 将二维图象信号通过求均值转化为一维信号,起到了很好的滤波效果.同时也将二维的小波计算转化为一维计算,大大地降低了计算量.

(2) 利用小波变换的极大值点与极小值点分析信号的边沿特性,进而来确定焊缝的位置,减小了噪声的影响,检测结果可靠.

(3) 小波变换的尺度  $a$  是一个很重要的参数,本文通过仿真得出结论  $a=1$  时效果比较好.

(4) 采用相关分析,可以进一步减小噪声的影响,去除虚假信号,提高检测的可靠性.

(5) 该方法配合以 DSP 为核心的图象数据处理系统,处理  $1\text{cm} \times 12\text{cm}$ ,分辨率为 400dpi,灰度级为 256 的图象,处理速度可达 28 帧/s 以上;在埋弧焊管生产线上,焊管的生产速度大都在  $1.5\text{m}/\text{min} \sim 2\text{m}/\text{min}$  之间,当一帧图象有效宽度取为  $1\text{cm}$  时,要求图象的处理速度为 4 帧/s,所以在时间上完全可以满足实时控制的要求,而且还有很大的裕量.

## 参考文献

- 1 黄石生,王秀媛.埋弧焊焊缝跟踪控制系统及发展状况[J].焊接,2000,(1):8~11
- 2 Mallat S, Zhong S. Characterization of signals from multiscale edges[J]. IEEE Trans. On PAMI, 1992,14(7):710~320.
- 3 杨炬,杨方海,梁德群.多尺度边缘检测中的有效尺度研究[J].电子与信息学报,2001,23(1):1~8.



屈穗太 1963年生,高级工程师,浙江大学电气工程学院博士生.主要研究领域为图象处理、图象监控系统及智能控制.



潘静 1938年生,教授,博士生导师.主要研究领域为图象处理、智能控制、复杂大系统的研究.