

# 基于特征提取和极值搜索的焊接缺陷检测算法

梁玮<sup>1,2</sup>, 陶亮<sup>3</sup>, 张光先<sup>1</sup>, 李振华<sup>1</sup>

(1. 山东大学控制科学与工程学院, 山东 济南 250061; 2. 济南工程职业技术学院, 山东 济南 250200;  
3. 山东建筑大学信息与电气工程学院, 山东 济南 250101)

**摘要:**为快速提取金属熔化焊接缺陷位置,提出了一种基于灰度分布曲线特征的算法。首先,通过平板探测器获取焊缝的X射线透射数字图像;第二,针对数字图像随机噪声大、动态范围低的问题,采用时间域序列图像帧积分方法,计算最优的积分时间,降低图像噪声,强化焊缝缺陷特征细节;第三,平行于焊缝方向,计算并形成多组图像灰度值曲线,基于其二阶导数曲线分布规律提取焊缝图像;最后,在焊缝图像曲线中进行极值点搜索,若在曲线存在明显极大值点,则可以确定缺陷的大小和位置。试验结果表明,本算法具有较高的检测精度。

**关键词:**无损检测;数字射线成像;焊缝分割;极值搜索;缺陷检测

中图分类号:O434 文献标志码:A

## Welding defect detection method based on feature extraction and extreme searching

LIANG Wei<sup>1,2</sup>, TAO Liang<sup>3</sup>, ZHANG Guangxian<sup>1</sup>, LI Zhenhua<sup>1</sup>

(1. School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China;

2. Jinan Engineering Vocational Technical College, Jinan 250200, Shandong, China;

3. School of Information and Electrical Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, Shandong, China)

**Abstract:** A location detecting algorithm of the welding defect based on the grayscale distribution curve feature was proposed. At first, the welding line X-ray digital image was acquired by the flat panel detector. Secondly, because the problem of large noise and low dynamic range is ubiquitous, the time domain image frame sequence integration method was adopted to reduce the image noise and enhance the defect detail. Then, the optimal integration time was calculated. Thirdly, the grayscale value curve was drawn parallel to the welding line direction. The welding line image was segmented on the basis of its second derivative curve. At last, extreme point was searched in the welding line image. The size and location were decided if obvious maximum value was existed. Experimental results proved the high accuracy.

**Key words:** non-destructive testing; digital X-ray imaging; welding line segmentation; extreme searching; defect detection

## 0 引言

目前,焊缝缺陷检测的方法很多,如解剖式的无损检测方式,使用红外线、超声波和X射线的无损

检测方式。X射线以其穿透力强、实时性好、系数数字化精度高等特点在无损检测领域得到了广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。相对于传统的胶片射线检测方法时间长、工序复杂、无法实现自动在线检测以及对人的依赖性强等缺点,数字X射线检测速度快、操作简单并

且可以进行实时数字成像,有利于对图像进行后期增强和处理。本课题基于非晶硅数字探测器对焊缝缺陷位置的提取进行了研究。

## 1 成像原理

X射线数字成像系统由X射线源、数字平板探测器及其控制设备、工件平台组成,如图1所示。

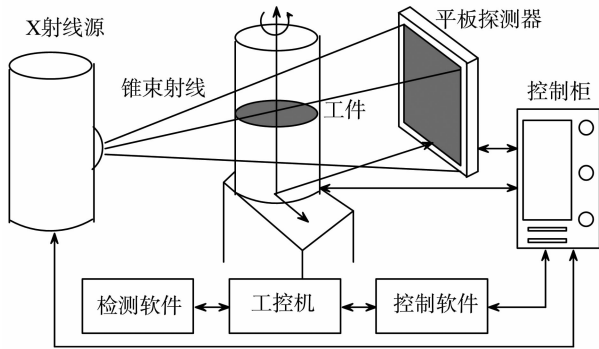


图1 系统构成  
Fig.1 System components

X射线机发射射线穿过工件,在平板探测器闪烁体膜上投影,完成对该投影图像的采集与数字化,并传输到工控机。

本研究采用的面阵探测器为非晶硅数字探测器Paxscan2520。Paxscan2520接收透射X射线的敏感元件是一个薄闪烁体屏,它将射线光子转换成可见光,再由大规模集成非晶硅光电二极管阵列转换成数字图像<sup>[3-4]</sup>。Paxscan2520的接收器类型为非晶硅,其感光部分像元尺寸为 $127\ \mu\text{m}^2$ ,内置12位A/D转换器将射线接收的模拟电压转换为数字量。数字平板探测器可以高速、高质量、实时地采集数字图像,动态范围大、信噪比高。

X射线源采用GECCO2505便携式射线机,管电压为110~250 kV,管电流为2 mA,焦点尺寸为 $2\ \text{mm} \times 2\ \text{mm}$ ,最高46 mm穿透厚度(A3钢)。

## 2 基于极值搜索的焊缝分割

### 2.1 焊缝图像的降噪

噪声是影响X射线检测质量的最重要因素,若要提取到准确的焊缝,必须先降低图像噪声,提高信噪比。

成像系统的噪声来源于以下几个方面:X射线光子起伏噪声,这种起伏噪声服从泊松分布,即在 $N$ 个光子中会有 $\sqrt{N}$ 个光子的自然涨落;来自探测器的电子噪声,包括暗电流噪声、KTC噪声(复位噪声)、

量化噪声和读出噪声。暗电流噪声是由电子的热运动造成,它与温度有关,因此可以通过制冷技术有效抑制;KTC噪声可以通过合理的电路设计来抑制;量化噪声与量化位数有关,位数越大,量化噪声越小;读出噪声与读出速度有关,读出速度越高,读出噪声越大<sup>[2,5]</sup>。

本研究采用时间序列帧叠加平均和中值滤波联合降噪。先用时间序列的帧叠加滤除随机噪声,再用中值滤波滤除椒盐噪声。

时间序列帧平均是对相同的透照条件、不同的时间序列下获取的一系列图像,进行帧间对应点灰度值的平均运算,最后得到一幅图像 $D$ <sup>[6]</sup>,算法见公式(1)。

$$D(i, j) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^h \sum_{j=1}^w \sum_{t=1}^m F_t(i, j), \quad (1)$$

其中, $F_t(i, j)$ 为第 $t$ 个时间序列图像, $i$ 和 $j$ 为图像像素点的坐标值, $h$ 和 $w$ 分别为图像高度和宽度, $m$ 为叠加帧数。使用Paxscan2520平板探测器,透照管电压为140 kV,管电流为2 mA,焦距是70 cm,帧周期为5.5 fps,分别获取 $m = 1, 4, 8, 16, 32, 64, 128$ 时的7幅时间序列平均运算的图像,叠加帧数和噪声量的坐标关系如图2所示,其中噪声量定义为当前叠加帧数图像与理想图像(叠加帧数大于128帧)中相同兴趣点灰度值之差与理想灰度值之比,用于衡量所获取图像与理想图像的质量差别。

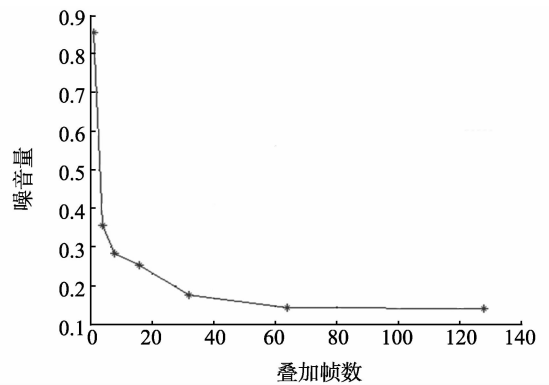


图2 图像积分的噪声残留  
Fig.2 The residual noises of image integral

由图2可知,噪声量在图像叠加32次后基本趋于平缓,即随机噪声基本得到稳定抑制。

时间序列帧叠加平均滤波后,建立一个长宽均为奇数的正方形模板,其中每一个单位为一个像素,这样可以保证该模板的中心只有一个像素点。使用该模板从图像的左上角向右移动,逐行处理,直到右下角。每次处理时,使用模板内各像素点的灰度平均值去代替中心点的像素值。

设原图像为 $A(i, j)$ ,窗口大小为 $(2k + 1) * (2k + 1)$ ,则中值处理后的图像 $G(i, j)$ 可表示为<sup>[7-8]</sup>

$$G(i, j) = \text{med}_{s=-k}^k \text{med}_{t=-k}^k [A(i+s, j+t)]. \quad (2)$$

经过32帧的叠加平均和 $3 \times 3$ 的模板滤波,噪声信号的影响得到降低。

## 2.2 焊缝区域的提取

为减少图像处理的总体计算量,避免在焊缝外产生不必要的误检,在实现缺陷提取前需要提取焊缝区域<sup>[9]</sup>,具体步骤见图3。

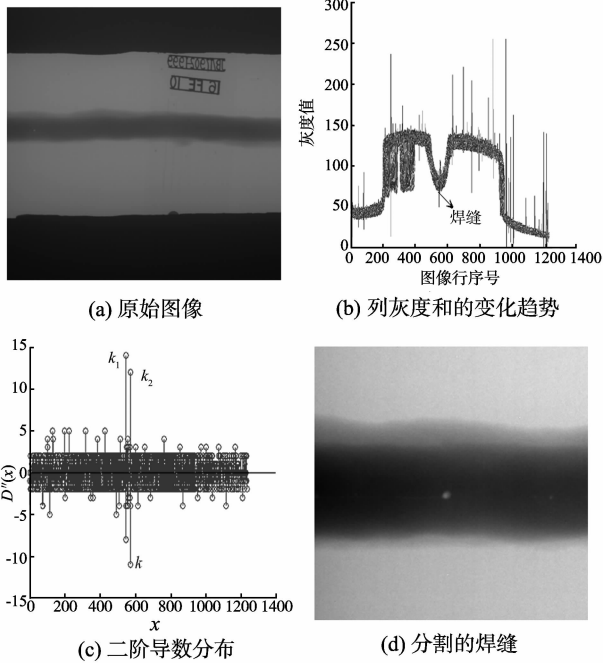


图3 焊缝的分割

Fig. 3 Process of weld segmentation

利用灰度值和波形分析法获取焊缝区域。通过对图3(a)所示的原始图像平行于焊缝方向的列灰度值求和,提取焊缝区域。

算法步骤如下:

(1) 对图像 $A(x, y)$ 的列像素求和, $D(x) = \sum A(x)$ 。求和后的灰度值和随列的变化趋势如图3(b)所示。

(2) 对灰度和 $D(x)$ 求二阶差分 $D''(x)$ ,找出灰度和二阶差分分布规律,如图3(c)所示。搜索最小值点 $K$ ,向两侧搜索最小值附近的两个极大值 $K_1$ 和 $K_2$ ,以确定焊缝的边界。

(3) 提取 $K_1$ 和 $K_2$ 的中间部分,即为焊缝区域,如图3(d)所示。

## 3 缺陷检测

### 3.1 焊缝图像均衡化

为准确提取缺陷图像,首先要对焊缝原始图像进行均衡化处理。结果表明,当达到32级均衡化后,图像亮度值出现的频数变化趋于平稳,有效增强

了动态范围和对对比度。图4是采用直方图均衡化的效果,均衡化处理提高了细节处的动态范围,使焊缝更加清晰。

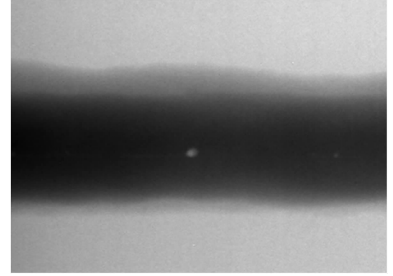


图4 均衡化处理

Fig. 4 Histogram equalization

### 3.2 基于特征提取的缺陷检测

根据射线衰减规律,当射线穿过某种物质时,射线强度衰减为

$$dI = -\mu(E)Idl, \quad (3)$$

其中, $I$ 为射线强度, $l$ 为穿过物质行程, $\mu(E)$ 是在当前射线强度 $E$ 下的衰减系数。

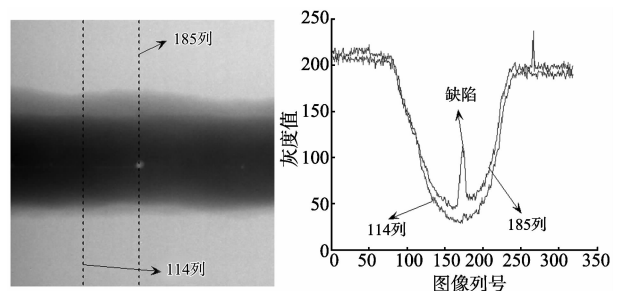
由公式(3)可知, $dI$ 与射线强度 $I$ 、穿透物体的厚度 $dl$ 成正比。一般焊接的添加金属(如焊条)和母材金属密度基本相同,所以若在无缺陷的情况下,灰度分布和厚度的比例关系为

$$I(E) = I_0(E) * e^{-\mu(E)l}, \quad (4)$$

其中, $I_0$ 为无吸收体时的入射射线强度; $I$ 为透射射线强度; $\mu$ 为物体的线衰减系数。

因为射线吸收率严重依赖于材料的密度,若在均匀材质中含有缺陷(如夹渣或气孔),那么透过工件不同部位的射线强度不同,缺陷就会被检测出来<sup>[10-15]</sup>。

焊缝图像的某一行像素不包含缺陷局部,则其行灰度近似钟形分布,即不穿过焊缝缺陷的线灰度分布呈单峰;当垂直于焊缝的某行穿过缺陷时,其行灰度分布有凹谷出现或上升斜率发生改变,即穿过焊缝缺陷的线灰度分布呈双峰波形(见图5)。因此,可通过波形分析来确定焊缝缺陷的位置,进而确定缺陷的边界、分析缺陷的类型。



(a) 焊缝原图

(b) 单峰和双峰波形

图5 列灰度分布

Fig. 5 Gray scale distribution

## 4 结论

提出了基于极值搜索和特征提取的焊接缺陷检测算法,有效抑制了噪声,并以较高的速度和精度确定出焊缝缺陷的位置,经过特征提取进行缺陷检测。算法具有检测精度高、复杂度低的优点。

### 参考文献:

- [1] 高岩,孔凡琴. 基于数字射线成像的焊缝缺陷检测[J]. 焊接技术, 2003, 32(2): 13-14.  
GAO Yan, KONG Fanqin. Inspection of weld imperfection base on the digital radiography[J]. Welding Technology, 2003, 32(2):13-14.
- [2] 孔凡琴,路宏年. 采用数字射线 DR 成像的焊接质量检测[J]. 无损检测, 2008, 30(1):20-22.  
KONG Fanqin, LU Hongnian. Welding quality inspection by digital radiography[J]. Nondestructive Testing, 2008, 30(1):20-22.
- [3] 梁丽红,孔凡琴,路宏年. X 射线非晶硅面阵探测器 B 级像质的研究[J]. 无损检测, 2005, 27(3): 113-116.  
LIANG Lihong, KONG Fanqin, LU Hongnian. The analysis of level B imaging quality based on the X-ray flat-panel detector [J]. Nondestructive Testing, 2005, 27(3):113-116.
- [4] HUANG Kuidong, ZHANG Dinghua, LI Mingjun. Scatter detection and correction method of FPD-based DR/CT imaging systems[C]//Proceedings of the Conference on Electronic Measurement & Instruments. Beijing: [ s. n. ], 2009:102-105.
- [5] 马跃洲,艾维平,张昌青. 平板探测器 X 射线数字成像质量[J]. 兰州理工大学学报, 2007, 33(2):20-24.  
MA Yuezhou, AI Weiping, ZHANG Changqing. X-ray digital imaging quality of flat panel detector[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2007, 33(2):20-24.
- [6] 王保平,范九伦,谢维信,等. 基于直方图的自适应图像去噪滤波器[J]. 电子学报, 2004, 32(7): 1176-1179.  
WANG Baoping, FAN Jiulun, XIE Weixin, et al. Histogram based adaptive filter for removing image noise[J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(7):1176-1179.
- [7] 侯润石,邵家鑫,王力,等. 焊缝缺陷 X 射线实时自动检测系统的图像处理[J]. 无损检测, 2009, 31(2):99-102.  
HOU Runshi, SHAO Jiabin, WANG Li, et al. Image processing of real-time automatic X-ray inspection system for weld defects[J]. Nondestructive Testing, 2009, 31(2):99-102.
- [8] SULTANA A, WRONSKI M, KARIM K, et al. Digital X-ray imaging using avalanche a-Se photoconductor[J]. Sensors Journal, 2010, 10(2):347-352.
- [9] 邵家鑫,都东,朱新杰,等. 基于 X 射线数字化图像处理的双面焊缝缺陷检测[J]. 焊接学报, 2010, 3(11):21-24.  
SHAO Jiabin, DU Dong, ZHU Xinjie, et al. Weld defect detection of double sides weld based on X-ray digitized image[J]. Welding Journal, 2010, 31(11):21-24.
- [10] 张晓光,高顶. 射线检测焊接缺陷的提取和自动识别[M]. 国防工业出版社, 2004.
- [11] 左凯,孙同景,李振华. 基于康普顿散射的物体厚度测量方法[J]. 山东大学学报:工学版, 2009, 39(6): 68-72.  
ZUO Kai, SUN Tongjing, LI Zhenhua. Compton scattering based method of objects thickness[J]. Journal of Shandong University: Engineering Science, 2009, 39(6):68-72.
- [12] 陶亮,孙同景,李振华,等. 基于邻域对比度的 X 射线数字图像自适应增强法[J]. 无损检测, 2011, 33(1):20-22.  
TAO Liang, SUN Tongjing, LI Zhenhua, et al. Neighborhood contrast based adaptive enhancement of X-ray digital image[J]. Nondestructive Testing, 2011, 33(1):20-22.
- [13] 孔凡琴,朝加强,张光先,等. 一种新型焊接质量数字射线检测技术[J]. 电焊机, 2006, 36(10):29-31.  
KONG Fanqin, CHAO Jiaqiang, Zhang Guangxian, et al. New digital radiography technology of welding quality[J]. Electric Welding Machine, 2006, 36(10):29-31.
- [14] 陶亮,孙同景,李振华,等. 基于衍射和透射光学模型的边沿定位法[J]. 山东大学学报:工学版, 2012, 42(4):54-59.  
TAO Liang, SUN Tongjing, LI Zhenhua, et al. Diffraction and transmission optical model based edge location algorithm[J]. Journal of Shandong University: Engineering Science, 2012, 42(4):54-59.
- [15] BRITTEN J, FENG Zhechuan, XU Gu. Magnified hard X-ray image in one dimension[J]. Applied Physics Letters, 2010, 96(26):261907-261907-3.

(编辑:陈斌)