

焊缝缺陷 X 射线实时自动检测系统的图像处理

侯润石,邵家鑫,王 力,都 东

(清华大学 机械工程系 先进成形制造教育部重点实验室,北京 100084)

摘 要:针对焊缝缺陷 X 射线实时自动检测技术普遍存在误检率与漏检率高的问题,研制了钢管焊缝缺陷 X 射线实时自动检测系统。研究了采用波形分析法与背景消除法信息融合进行焊缝缺陷检测的方法,从而有效降低了误检率与漏检率。该系统已用于西气东输钢管焊缝缺陷 X 射线实时自动检测。

关键词:射线检测;焊缝缺陷;实时图像处理

中图分类号: TG115.28

文献标识码: A

文章编号: 1000-6656(2009)02-0099-03

Image Processing of Real-Time Automatic X-Ray Inspection System for Weld Defects

HOU Run-Shi, SHAO Jia-Xin, WANG Li, DU Dong

(Key Laboratory for Advanced Materials Processing Technology, Ministry of Education, P R China

Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Real-time automatic X-ray inspection technique has the advantage of good consistency and high automation, so it is fit for on-line inspection of long weld. However this technique is hard to be applied in practice due to high false alarm and missed detection rates. Aiming at this problem, the real-time X-ray automatic inspection system for weld defects in pipe was established. The information fusion was proposed in two defect segmentation methods of weld X-ray image et al, background subtraction and grey level wave analysis, thus the false alarm and missed detection rates were decreased greatly. This system was being used for steel pipe manufacture in the West-East natural gas transmission project.

Keywords: Radiographic testing; Weld defects; Real-time image progressing

X 射线实时成像检测是利用 X 射线图像增强器或平板探测器等器件,将 X 射线图像转换为可见光图像,并在监视器显示以进行检测的方法。它的突出优点是可实现在线连续检测,能与流水线连续生产方式相匹配,常被应用于重要焊接结构的在线连续生产过程,如石油天然气输送用钢管的厂内制造^[1]。

目前焊缝 X 射线实时检测主要依赖人工观测监视器中的图像来发现缺陷,存在以下主要问题:①自动化水平较低,劳动强度大,人为因素对检测效果

的负面影响难以规避。②某些类型和位置的缺陷漏检率和误检率较高。因此,迫切需提高焊缝 X 射线实时检测的自动化水平,降低漏检率和误检率^[2,3]。

焊缝缺陷 X 射线实时自动检测的核心是动态图像处理技术,与针对评片技术的静态图像处理相比有明显不同:①动态成像时间短,工业现场获得的图像噪声大、对比度低,图像质量明显比胶片差,尤其是工件厚度较大时。②动态图像不可避免存在运动模糊。③在线检测对图像处理的实时性要求很高。笔者提出了波形分析法与背景消除法相融合进行缺陷检测以降低误检率和漏检率的方法,并研制了钢管焊缝缺陷 X 射线实时自动检测系统。

1 系统构成

获取焊缝 X 射线动态图像的器件主要有图像

收稿日期: 2008-04-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50628506)

作者简介: 侯润石(1978—),男,博士研究生,研究方向为用于无损检测的信息融合与图像处理技术。

增强器和平板探测器等。现有的平板探测器十分昂贵且成像需要较长时间,不适于动态检测场合。因此目前仍主要采用图像增强器。焊缝缺陷 X 射线实时自动检测硬件系统如图 1 所示。

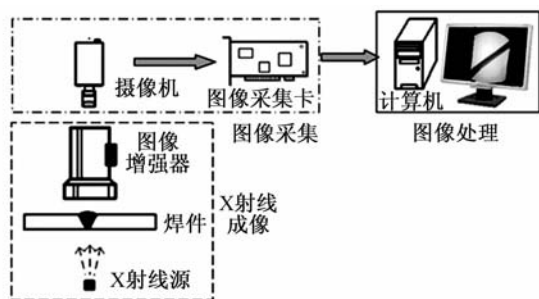


图1 焊缝缺陷 X 射线实时自动检测系统示意图

图中,图像处理环节是实现焊缝缺陷检测自动化的核心,它可分为三个步骤:①对所获取的焊缝射线数字图像进行滤波降噪等预处理。②焊缝区域提取。③缺陷分割。

2 图像预处理

实际焊缝 X 射线实时图像通常含有较大的噪声,主要有来自射线源噪声、图像增强器转换噪声、CCD 摄像机电子噪声和传输噪声等。笔者采用均值滤波和中值滤波联合降噪。因为椒盐噪声对均值滤波效果影响比较大,所以应先进行中值滤波,滤除椒盐噪声,再利用均值滤波抑制高斯噪声。

中值滤波方法将某像素为中心的窗口内所有像素的灰度值按灰度级升序(或降序)排列,取居中的像素灰度值为该像素的新灰度值。设原图像为 $f(i, j)$,窗口大小为 $(2k+1) \times (2l+1)$,则中值滤波处理后的图像 $g(i, j)$ 可以表示为:

$$g(i, j) = \text{Med}_i \text{Med}_j [f(i+s, j+t)] \quad (1)$$

均值滤波是用邻近几个像素的平均灰度值来代替每个像素的灰度值,均值滤波处理后的输出图像 $g(i, j)$ 可表示为:

$$g(i, j) = \frac{1}{(2k+1)(2l+1)} \sum_{s=-k}^k \sum_{t=-l}^l f(i+s, j+t) \quad (2)$$

实验表明,经过 3×3 中值滤波和 5×5 均值滤波后,噪声信号的影响得到降低。

3 焊缝区域提取

为减少图像处理的总体计算量,需首先在图像中提取出焊缝区域。通过对垂直于焊接方向的列灰

度曲线进行梯度变化分析,找出列灰度中梯度变化幅值最大点,进而提取出焊缝的边界点。

如图 2 所示,提取列序号为 300 的列灰度曲线,对该列灰度进行平滑滤波后如图 3 所示。列灰度波形曲线在焊缝边缘处灰度值发生剧烈变化,通过一阶差分求出其中的最大值 K_1 和最小值 K_2 ,即可获得焊缝边缘的位置。对整幅图像逐列进行分析,即可提取出整个焊缝边缘,如图 4 所示。

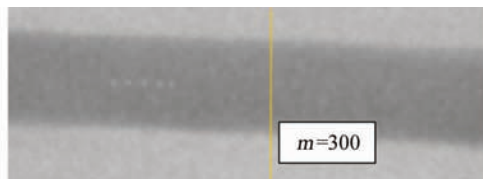


图2 焊缝 X 射线实时图像

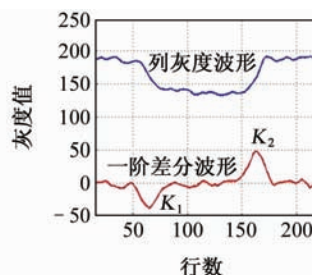


图3 列灰度波形分析图

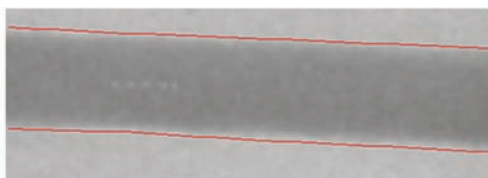


图4 焊缝区域提取结果

4 缺陷检测

由于现场获得的焊缝 X 射线实时图像质量较差,单一的焊缝缺陷分割难以克服误检与漏检之间的矛盾。对背景消除法与波形分析法进行融合以降低误检与漏检率。

4.1 背景消除法

对图 2 进行低通滤波以获取其焊缝背景图像(即不含缺陷的焊缝图像),如图 5 所示,这两幅图像的灰度值三维分布如图 6 和 7。然后,将原图像减去其背景图像(图 2 减去图 5)得到只含有缺陷的差图像。最后,对得到的差图像进行阈值分割后到图 8 所示的缺陷分割结果。

4.2 波形分析法

波形分析法是对缺陷所在图像列灰度波形特征



图 5 由低通滤波获取的焊缝背景图像

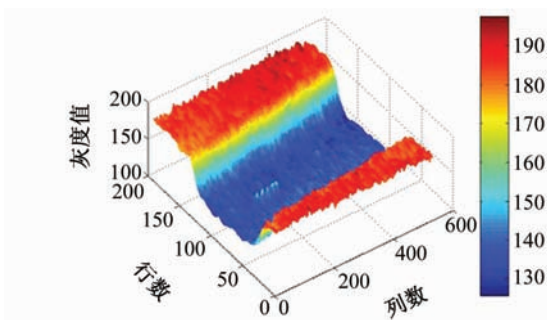


图 6 原图像灰度值三维分布图

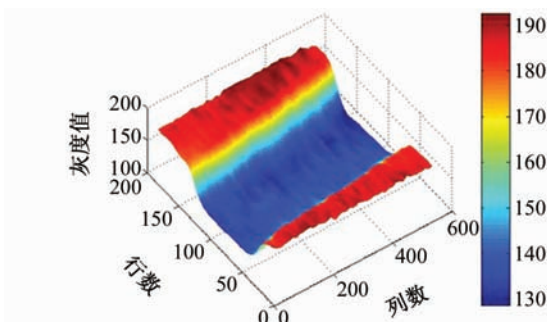


图 7 背景图像灰度值三维分布图



图 8 背景消除法的缺陷分割结果

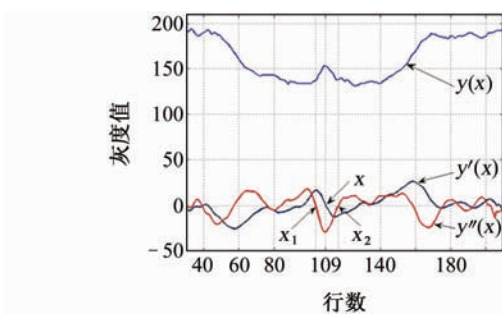


图 9 波形分析法缺陷分割示意图

分析进行缺陷分割。如图 2 所示,取经过缺陷区域的一列并滤波得 $y(x)$,其波形分析如下(图 9):

(1) 对 $y(x)$ 求一阶差分曲线 $y'(x)$ 和二阶差分

曲线 $y''(x)$ 。

(2) 在焊缝区域内搜索一阶差分曲线过零点 x ,并向其两侧分别搜索二阶差分曲线过零点 x_1 和 x_2 ,则 $[x_1, x_2]$ 为该列的缺陷区域。

(3) 对图 2 从左到右逐列分析,得到的缺陷分割结果如图 10 所示。

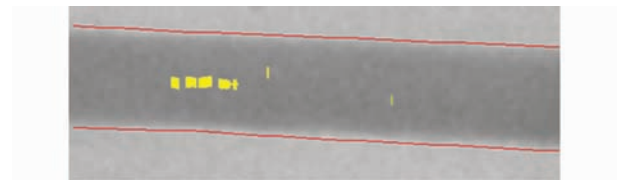


图 10 波形分析法的缺陷分割结果

4.3 信息融合

背景消除法对缺陷尺寸范围适应性大,小缺陷也可有效检出。但它对灰度缓变,对比度低的缺陷易漏检,且在焊缝边缘处易产生误检。波形分析法可检出对比度低的缺陷,并且对焊缝内边缘不敏感,但易漏掉小尺寸缺陷。

上述分析可知,两者有很强的冗余性和互补性,将这两种检测方法的结果进行信息融合,将彼此优势信息进行相互补充,可降低检测结果的不确定性。

笔者基于 D-S 证据理论^[4]对上述两种检测方法的结果进行融合。设 θ 为识别框架, Φ 为空集,基本概率分布函数 $m: 2^\theta \rightarrow [0, 1]$, 满足:

$$m(\Phi) = 0 \quad (3)$$

$$\sum_{x \in \theta} m(x) = 1 \quad (4)$$

两种方法检测出的缺陷基本概率分布函数分别为 m_1 和 m_2 , 则根据 D-S 理论的证据组合规则,组合后 m 值为:

$$m(x) = \frac{\sum_{A \cap B = x} m_1(A) \cdot m_2(B)}{1 - \sum_{A \cap B = \Phi} m_1(A) \cdot m_2(B)} \quad (5)$$

对于 m 值,用信任函数 $\text{Bel}(x)$ 和似然函数 $\text{Pls}(x)$ 来评价其不确定性,即“信任区间”为 $[\text{Bel}(x), \text{Pls}(x)]$, 其中:

$$\text{Bel}(x) = \sum_{x_i \subseteq x} m(x_i) \quad (6)$$

$$\text{Pls}(x) = 1 - \text{Bel}(\bar{x}) \quad (7)$$

经信息融合后的缺陷分割结果如图 11 所示,误检被有效排除。

信息融合前,背景消除法在漏检率为 2.1% 时的误检率为 3.8%,波形分析法在漏检率为 1.6% 时

(下转第 109 页)

表 2 Betz 环人工小孔间的夹角

k	$\theta_{k \sim k+1}/(^{\circ})$	$\theta_{1 \sim k+1}/(^{\circ})$	k	$\theta_{k \sim k+1}/(^{\circ})$	$\theta_{1 \sim k+1}/(^{\circ})$
1	17.939 083	17.939 083	9	23.483 953	184.437 70
2	18.483 968	36.423 051	10	24.429 776	208.867 47
3	19.063 156	55.486 207	11	25.455 680	234.323 15
4	19.680 001	75.666 217	12	26.572 386	260.875 54
5	20.338 347	95.504 564	13	27.792 644	317.819 91
6	21.042 524	116.547 09	14	29.131 734	348.428 05
7	21.797 532	138.344 62	15	30.608 144	380.675 10
8	22.609 123	160.953 74	16	32.244 461	412.919 56

5 结论

(1) 对 Betz 环内的电流真实分布很难进行定量分析。

(2) 在对 Betz 环内真实电流分布尚难合理建模的情况下,提出了电流均匀分布的假设。

(3) Betz 环的 4 个几何参数 D, d, a 和 h 中只有 3 个可以任意选择,第 4 个则由已选定的 3 个参数和电磁规律所确定。

(4) 基于电流均匀分布假设的数值计算表明, Betz 环的几何尺寸设计合理,并且还留有余地,即至少还可以显现一个更深的待钻小孔。



(上接第 101 页)

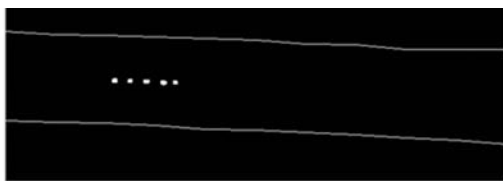


图 11 信息融合后的缺陷分割结果

的误检率为 4.0%;经信息融合后在漏检率为 1%时的误检率为 1.9%。

5 结论

笔者以工业生产实际应用为目标,研制了焊缝缺陷 X 射线实时自动检测系统以及相应的图像处理技术:

(1) 对原始数字图像采用中值滤波与均值滤波联合降噪的方法,可有效消除图像的椒盐噪声、抑制高斯噪声,以利后续图像处理。

(2) 对垂直焊缝方向采用的列灰度曲线分析方法可快速有效地确定焊缝区域。

参考文献:

- [1] 仲维畅. 工具钢环形试件表面因其表面下人工孔而产生的漏磁场——磁粉探伤原理之三十二[C/CD]. 第九届全国无损检测新技术研讨会论文集摘要汇编. 宁波: 2004.
- [2] Betz C E. Principle of Magnetic Particle Testing[M]. Chicago, Illinois, USA: Magnaflux Corporation, 1967.
- [3] 美国无损检测学会, 编. 美国无损检测手册·磁粉卷[M]. 《美国无损检测手册》译审委员会, 译. 上海: 世界图书出版公司, 1994.
- [4] Swartzendruber L J. Magnetic leakage and force fields for artificial defects in magnetic particle test rings[C]. Proceedings of The XIII th Symposium on NDE. San Antonio, Texas, USA: 1979.
- [5] 仲维畅. 磁粉探伤用 Betz 环的近似理论——磁粉探伤原理之四十二[C]. 07 中国无损检测高等教育发展论坛、电磁检测学术交流会暨中外无损检测交流会论文集. 南昌: 2007.
- [6] 高等工业学校物理学编写组. 物理学(初稿), 第一册[M]. 北京: 高等教育出版社, 1956.
- [7] 仲维畅. 磁粉探伤用环形试件的几何尺寸[C]. 07 中国无损检测高等教育发展论坛、电磁检测学术交流会暨中外无损检测交流会论文集. 南昌: 2007.
- [8] 仲维畅. 磁偶极子链的横向排斥[J]. 无损检测, 2003, 25(9): 454—457.

(3) 采用信息融合技术能够将漏检与误检分开处理。融合前, 各种检测方法均可采用较低的阈值, 尽量避免漏检, 通过信息融合排除误检。

该系统已在钢管制造企业试运行, 实际应用于埋弧焊钢管的焊缝缺陷自动检测。

参考文献:

- [1] Du Dong, Cai Guo-rui, Tian Yuan, et al. Automatic Inspection of Weld Defects with X-ray Real-Time Imaging[J]. Lecture Notes in Control and Information Sciences, 2007, 362: 359—366.
- [2] 耿荣生. 更快、更可靠和更直观——第 16 届世界无损检测会议综述[J]. 无损检测, 2004, 26(11): 565—569.
- [3] Tian Yuan, Du dong, Hou runshi, et al. A model of automatic detection system for weld defects based on machine vision[J]. Lecture Notes in Control and Information Sciences, 2007, 362: 341—348.
- [4] 韩崇昭, 朱洪艳, 段战胜, 等. 多源信息融合[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.