



# 焊接缺陷 X 射线自动检测技术 研究现状

殷晓辉<sup>1</sup>, 韩晓微<sup>2</sup>, 高原<sup>1</sup>, 王刚<sup>2</sup>

(1.沈阳大学 机械工程学院, 辽宁 沈阳 110044; 2.沈阳大学 信息工程学院, 辽宁 沈阳 110044)

**摘要:**焊接生产过程中, 由于各种原因, 在焊接结构中会产生不同类型的缺陷, 直接影响焊接质量。对国内外焊接缺陷 X 射线自动检测相关关键技术的研究现状给予系统的论述, 包括图像增强、图像分割和模式识别, 最后对这一检测技术进行了展望。

**关键词:**焊接缺陷; X 射线自动检测; 图像处理; 模式识别

**中图分类号:** TG441.7      **文献标识码:** C      **文章编号:** 1001-2303(2007)11-00

## Study on the key technology for automatic detection of weld defect by radiography

YIN Xiao-hui<sup>1</sup>, HAN Xiao-wei<sup>2</sup>, GAO Yuan<sup>1</sup>, WANG Gang<sup>2</sup>

(1.School of Mechanical Engineering, Shenyang University, Shenyang 110044, China; 2.School of Information Engineering, Shenyang University, Shenyang 110044, China)

**Abstract:** In the process of welding, different kinds of reason can lead to different types of defect in weld structure, which will directly influence the quality of the welding structure. In this paper, the present research situation of the relevant key technologies of automatic detection of weld defect by radiography in domestic and oversea is discussed and prospected, including image enhancement, image partition, and pattern recognition.

**Key words:** welding defect; automatic detection by radiography; image processing; pattern recognition

## 0 前言

随着现代工业的发展, 焊接技术得到了广泛的应用, 对焊接质量的要求也在逐步提高, 焊接缺陷检测技术也因此得到了国内外研究学者的普遍关注。焊接缺陷的检测首先是从 X 射线胶片人工目视检测发展而来, 由于这种方法具有检测方法简单、成像可靠、分辨率高等优点, 因此在以往的焊接工业生产中应用较为广泛<sup>[1]</sup>。但由于这种方法同时存在着评判结果的主观随意性强、保存和查询工作量大、运行成本高等实际问题, 因此不能得到较好的

应用。焊接缺陷自动检测技术可使检测结果和评定过程客观化、科学化和规范化<sup>[1-2]</sup>, 已成为焊接缺陷检测研究中的重要发展方向。

目前, 实现焊接缺陷自动检测方式主要包括: X 射线检测、超声检测、磁粉检测、渗透检测、涡流检测等。其中, X 射线检测在焊接工业无损检测中占有重要地位。焊接缺陷检测应用中, 由于焊接材料的结构特性以及 X 射线检测本身的特点, 容易造成检测成像对比度和信噪比低、图像边缘模糊、背景起伏较大等缺点, 严重地影响缺陷信号的检出率和可靠性<sup>[1-2]</sup>。针对焊接缺陷的射线自动检测方法, 国内外研究人员已进行了相关的研究工作, 但总体来说还没有达到较好的实际应用水平。

收稿日期: 2007-08-16

作者简介: 殷晓辉(1981—), 女, 山东青岛人, 在读硕士, 主要从事图像处理技术方面的研究工作。

## 1 检测工作流程

实现焊接缺陷自动检测过程主要包括以下几个步骤<sup>[1-2]</sup>。

(1)射线图像获取。通过 X 射线成像设备,获取焊接结构的数字图像,并输入计算机。

(2)图像增强处理。采用图像增强技术,对获取的数字图像进行处理,包括图像的降噪、平滑、背景滤除和对比度提高等,其目的在于使图像更清晰,缺陷位置和形状更加突出,以方便后续的图像处理和分析过程。

(3)缺陷图像区域分割。对于预处理后的图像,采用适当的图像分割方法,提取焊接区域,并进一步在该区域搜索并提取可能存在的焊接缺陷。

(4)缺陷的识别和分类。对焊接缺陷图像区域进行特征提取,根据已知的缺陷图像特征和已建立的分类机制,实现焊接缺陷的识别和分类。

## 2 图像增强处理

多数情况下,焊接生产中采集到的焊缝缺陷图像质量相对较差,存在对比度低、边界模糊以及噪声干扰等现象,直接影响到缺陷的特征提取和分类识别的准确性。图像增强处理用来改善图像的质量,改善图像的视觉效果,提供直观、清晰、适合于计算机分析的图像,使后续的缺陷提取与识别工作顺利进行,有着重要的实际应用意义。

在焊接缺陷的自动检测中,常用的图像增强方法主要包括直方图修正法、图像平滑化方法、直接灰度变换法<sup>[4]</sup>。直方图修正法主要是用来提高焊接缺陷图像的对比度,又可细分为直方图均衡化和直方图规定化两种方法。在直方图均衡化方法的基础上,又产生了局部区域修正方法,是针对图像中的特殊局部区域进行直方图修正。直方图修正法能够使整幅图像或局部区域的灰度信息得到增强,但同时也会导致图像中的一些图像细节信息丢失<sup>[5]</sup>。图像平滑化方法主要是用来滤除缺陷图像中的噪声。在 X 射线图像中,图像噪声大多为高斯白噪声,所以通常采用低通滤波法来实现图像增强。低通滤波法可分为空间域法和频率域法两大类。空间域法可以分为线性滤波和非线性滤波,具体包括邻域平均法、中值滤波法等。频率域处理运算量较大,因此常采用空间域法实现低通滤波操作。直接灰度变换法是比较简单、常用的增强图像对比度的方法,常用的直接灰度变换法又包括灰度级线性拉伸和灰度级非线

性拉伸<sup>[6]</sup>。

在 X 射线缺陷自动检测应用中,通常综合上述几种方法并予以改进提高,以实现图像增强处理。文献[6]通过直方图与高斯滤波相结合的方法进行图像增强,使增强后的图像直方图平滑,且有明显的双峰,对后续的灰度图像二值化处理十分有利。文献[7]将模糊理论引入图像增强中,在边界不明显的情况下采用该方法,可有效增加图像边缘的灰度强度,使焊缝边界变得清晰,但容易丢失焊缝图像中对比度较低的焊接缺陷区域。文献[8]根据 X 射线图像的灰度变化特点,结合人眼的注视机制,先从原始图像中截取出焊缝区域,然后采用水平和竖直方向上的滤波操作,并用布尔代数方法进行整合,得到反映缺陷特征的二值图像。实际处理效果表明该算法准确、有效,但是存在滤波操作耗时较多、处理速度慢的问题,而且在对比度很低时,用此方法不能很好地进行图像增强。文献[9]针对 X 射线图像的特点,在分析图像的噪声模型后给出了有效的自适应中值滤除方法,这种处理效果比一般的中值滤波要好得多。文献[10]中采用中值滤波对原始图像进行平滑,并结合自定义的广义模糊算子实现图像增强,去除了灰度图像中的某些不确定性,减少了图像的模糊性。该方法与传统的模糊增强、直方图均衡方法进行实验表明,采用广义模糊算子进行图像增强具有更佳的效果。

随着智能计算技术的发展,图像智能化增强也成为图像增强的一种有效方法。该类方法在图像增强处理中引入智能计算的理论方法,通过模拟人类视觉特性来实现图像增强操作。

## 3 缺陷图像区域分割

在焊接缺陷的自动检测中,图像分割的目的就是把焊缝区域和焊接缺陷区域分割出来,以便后续的缺陷图像区域的特征提取。其中常用到的分割方法有阈值分割法、边缘检测法、区域提取法等<sup>[1]</sup>。

阈值分割法中,确定最优分割阈值是实现合理有效图像分割的关键。而常用的图像边缘检测算子有 Roberts、Sobel、Prewitt、Krisch、Canny 和高斯拉普拉斯算子等。Robert 算子对具有陡峭的低噪声图像响应最好,但是在计算方向差分,不仅对边缘信息敏感,同时对图像噪声也很敏感<sup>[1]</sup>。Sobel、Prewitt、Krisch 等边缘检测算子与 Robert 算子相比,对灰度渐变和噪声较多的图像处理效果相对较好,但仍然

存在方向性强、易受噪声干扰、双边缘等问题。经典的边缘检测算子中,Canny 算子具有相对好的边缘检测能力,适合检测灰度变化比较弱的边缘,但计算量明显增加。区域提取又包括区域生长和区域聚合。

在焊接缺陷 X 射线自动检测中,上述几类方法均得到了综合运用。在阈值的选取方面,文献[11]在选择包含焊接缺陷图像兴趣区域时,采用直方图统计分析的方法确定阈值,以使分割误差达到最小,但是缺少通用性。针对文献[12]所提出方法的限制问题,文献[13]采用差减法或广义模糊算子法对焊接缺陷图像区域进行分割,取得了一定的图像分割效果。文献[14]运用边缘检测和区域检测相结合的方法,能够较好地使从射线实时成像系统获取的图像中将焊接区域分割出来。文献[15]采用了三角拟合法来分割焊道的区域,用全局域值法分割出焊道中心区域,这种方法能够很好地把焊道区域和焊接缺陷区域正确的分割出来,并实现了焊接缺陷尺寸的形状保真。文献[16]采用数学形态学和迭代阈值分割相结合的方法进行缺陷提取。在阈值的选取方面,采取的是准确性高的基于迭代算法的全局阈值法。文献[11]在去除焊缝背景情况下,设计了动态划分焊缝区域算法,利用局部阈值法提取出对比度不均的缺陷。文献[9]提出了一种基于形态学梯度的 X 射线底片数字图像边缘检测方法,采用迭代阈值法进行二值分割,实验证明了这种处理方法运用在 X 射线底片数字图像中具有良好的效果。文献[17]在去除背景的情况下,采用数学形态学和迭代阈值分割相结合的方法从目标区域中提取出缺陷区域,利用基于数学形态学的边缘提取算法提取了缺陷的边缘。实验结果表明,该算法很好地实现了缺陷区域及其边缘的自动提取,且受噪声影响很小,计算速度快。

## 4 模式识别

模式识别是自动处理某些信息的机器系统,以代替人完成分类和辨别的任务。在焊接缺陷的自动检测中,模式识别技术用来实现焊接缺陷的识别和分类。在焊接缺陷的自动检测中,模式识别主要有四种识别方法:统计模式识别、结构模式识别、模糊模式识别和人工神经网络模式识别<sup>[1]</sup>。

在缺陷的自动检测中,模式识别方法的研究具有重要的意义。文献[18]用线性分类器对射线焊接缺陷的分类识别进行了研究,提出了一种对主要焊接缺陷的进行分类的方法,对于有着明显缺陷的图像

效果较好。文献[19]建立了针对常见的 11 种焊接缺陷的分类器,提出了两种算法,一是焊接缺陷图像的特征提取算法;二是根据国际标准来制定焊接缺陷的标准;最后实现对焊接缺陷的识别。但是该种算法只能检测出普通的缺陷。文献[20]使用 K-Nearest Neighbor 算法的模糊神经网络对焊接缺陷进行识别分类,识别的效果比较好,但是还需要对一些基准图像样本进行设置来更好的实现焊接缺陷的识别。文献[21]进行了模糊神经网络实时射线照相底片焊缝缺陷识别的研究。通过选择合适的特征,利用模糊神经网络进行识别分析。结果表明,该方法能够对焊缝缺陷进行有效识别,且效果优于传统分类识别法。文献[22]提出了基于 BP 神经网络的焊接缺陷对结构疲劳性能影响的模糊评判方法,弥补了用模糊推理方法来评判焊接缺陷对结构疲劳强度的影响时存在缺陷评定规则提取困难、对专家经验依赖性强等问题。文献[23]利用 BP 神经网络及选择的特征值对缺陷进行了分类和识别。通过改进噪声滤除和灰度均衡的算法,减小计算缺陷特征参数的误差,提高 BP 神经网络输入数据的准确度,从而提高了焊接缺陷的识别率。文献[24]针对铝合金焊接缺陷本身的特点,选择图像的缺陷特征,设计了焊接缺陷分类器的分类规则,并建立了基于势函数法的训练机制,从而实现焊接缺陷的识别和分类。缺陷分类器表现出了较好容错性和聚类性,但是在样本比较少的情况下,误判率比较高。文献[11]建立了用于焊缝缺陷识别的模糊神经网络模型。通过对焊缝特征分析,选取缺陷识别的特征参数,对样本进行训练。这种识别算法能够提高介于模糊边界模式分类时的识别率,对焊缝缺陷识别的效果优于分类识别法。采用这种识别方法正确率比较高,但是同样存在样本比较少造成误判的问题。文献[25]提出了应用支持向量机(Support Vector Machine 简称 SVM)进行射线检测焊接缺陷识别的方法。该方法可以在少量缺陷样本的前提下,通过从训练样本学习出发寻找规律,利用这些规律对测试样本进行预测,寻找分类函数,提出一种基于 SVM 的焊接缺陷识别分类的方法。结果表明,支持向量机在焊接缺陷图像中的识别是很有发展前途的技术,在今后的自动检测技术中,这个方向将是研究的重点和热点。

## 5 展望

综合论述了焊接缺陷自动检测应用中的图像

增强、图像分割、分类识别等几项关键技术的国内外研究现状。焊接缺陷自动检测技术已有多年的研究历程,在各个关键技术环节都得到了较为深入的研究,并取得了相关研究进展,但在实际应用中都有一定的局限性,综合技术尚未达到较好的应用水平。研究一种分类齐全、性能可靠、受客观条件影响小的自动检测方法是目前国内外焊接工作者需要进一步研究的重要课题。

焊接缺陷的自动检测技术在以后的发展过程中将呈现以下趋势。一是对原有算法的不断改进;二是新方法、新概念的引入和多种方法的有效综合利用;三是焊接缺陷图像的识别和分类技术将是以后研究的重点。焊接缺陷自动检测技术的研究倍受关注,具有重要的理论研究价值和实际应用意义。随着科技的发展和研究的不断深入,相信在不久的将来会有更多的研究成果出现。

### 参考文献:

- [1] 张晓光,高 顶.射线检测焊接缺陷的提取和自动识别[M].北京:国防工业出版社,2004.
- [2] 李亚江.焊接质量控制与检验[M].北京:化学工业出版社,2005.
- [3] 周正干,滕升华,江 巍,等.焊缝 X 射线检测及其结果的评判方法综述[J].焊接学报,2002,23(3):85-88.
- [4] 阮秋琦.数字图像处理学[M].北京:电子工业出版社,2001.
- [5] Zimmerman J B, Pizer S M, Staab E V, et al. An evaluation of the effectiveness of adaptive histogram equalization for contrast enhancement[J]. IEEE Trans Med Imaging, 1998, 7(2): 304-312.
- [6] 姜 宏,梁楚华,石永芳.图像处理技术在焊接轨迹提取中的应用[J].机电工程技术,2005,34(12):69-70.
- [7] 任大海,尤 政,孙长库,等.焊缝 X 射线实时成像自动分析系统[J].焊接学报,2000,21(1):61-63.
- [8] 康宏伟,苏真伟.焊接缺陷 X 射线数字图像的处理算法研究[J].无损探伤,2006,30(5):23-26.
- [9] 金 忠.X 射线底片焊缝缺陷智能识别的研究[R].湖南大学测试计量技术及仪器,2006.
- [10] 张晓光,高 顶,张兴敢.基于广义模糊算子的射线检测焊接图像增强[J].哈尔滨工业大学学报,2005,37(10):1366-1369.
- [11] 张晓光,林家峻.X 射线检测焊缝的图像处理与缺陷识别[J].华东理工大学学报,2004,30(2):199-202.
- [12] 付丽琴,韩 焱,陈树越.X 射线数字成像检测中缺陷的自动评判技术[J].中北大学学报,2005,26(6):447-450.
- [13] 韦全芳,韩 焱,张开增,等.基于广义模糊算子的焊缝图像的缺陷提取[J].信息技术,2004,28(12):50-52.
- [14] Gueudre C, Moysan J, Corneloup G. Weld quality control by radioscopy using 'edge and area' segmentation method[A/CD]. Proceeding of 15th WCNDT, ROMA, 2000.
- [15] 吴 林,戴 明,李 岩.铝合金焊缝图像的焊接区域提取与缺陷尺寸形状保真[J].焊接学报,2001,22(2):1-4.
- [16] 周 贤,刘义伦,赵先琼.炭素制品缺陷 X 射线自动检测关键技术的研究[J].机械科学与技术,2006,25(11):1358-1361.
- [17] 周 贤,刘义伦.X 光图像中缺陷的自动提取方法研[J].光学学报,2006,26(7):1016-1020.
- [18] Silva da R R, Siquerira M H S, Caloba L P, et al. Radiographic Pattern Recognition of Welding Defects Using Liner Classifiers[J]. Insight, 2001, 43(10):669-674.
- [19] Shafeek H I, Gadelmawla E S, Abdel-Shafy A A, et al. Automatic inspection of gas pipeline welding defects using an eXpert vision system[J]. NDT&E International 2004(37):301-307.
- [20] Gang Wang, Warren Liao T. Automatic identification of different types of welding defects in radiographic images[J]. NDT&E International, 2002(35):519-528.
- [21] 张晓光,林家峻.基于模糊神经网络的焊缝缺陷识别方法的研究[J].中国矿业大学学报,2003,32(1):91-94.
- [22] 俞树荣,何世权,李尔国,等.焊接缺陷对结构疲劳性能影响智能综合评判[J].石油化工设备,2001,30(3):1-4.
- [23] 雷艳敏,黄秋元.基于数学形态学的图像边缘检测[J].武汉大学学报.信息与管理工程版,2005,27(5):25-27.
- [24] 戴 明,吴 林,李 岩.基于势函数法的铝合金焊缝缺陷识别[J].机器人,2001,23(7):701-704.
- [25] 刘元祥,张晓光.基于支持向量机的射线检测焊接图像中缺陷识别[J].煤矿机械,2006,27(5):773-776.

## 利用碳当量值评价钢材焊接性的局限

碳当量值只能在一定范围内,对钢材概括地、相对地评价其焊接性,这是因为:

(1)如果两种钢材的碳当量相等,但是含碳量不等,含碳量较高的钢材在施焊过程中容易产生淬硬组织,其裂纹倾向显然比含碳量较低的钢材大,焊接性较差。因此,当钢材的碳当量值相等时,不能看成焊接性就完全相同。

(2)碳当量计算值只表达了化学成分对焊接性的影响,没有考虑到冷却速度的影响。实际上,同一化学成分的钢材,焊接时由于冷却速度不同,可以得到不同的组织,冷却速度快时,容易产生淬硬组织,焊接性就会变差。

(3)影响焊缝金属组织从而影响焊接性的因素,除了化学成分和冷却速度外,还有焊接热循环中的最高加热温度和在高温停留时间等参数,在碳当量值计算公式中均没有表示出来。

因此,碳当量值的计算公式只能在一定的钢种范围内,概括地、相对地评价钢材的焊接性,不能作为准确的评定指标。