

DOI:10.19344/j. cnki. issn1671-5276.2024.05.051

基于机器视觉的钢制压力容器焊缝缺陷 X 射线检测方法

宋伟斌, 赵建政

(烟台市特种设备检验研究院, 山东 烟台 265508)

摘要:为降低由钢制压力容器焊缝缺陷引起的事故发生概率,提出基于机器视觉的钢制压力容器焊缝缺陷 X 射线检测方法。使用机器视觉系统以及 X 射线技术,获取钢制压力容器焊缝图像并提取焊缝区域特征,将焊缝缺陷整合成熔焊、虚焊、焊穿三大类别;基于焊缝区域特征的提取结果,提取钢制压力容器的焊缝缺陷面积、缺陷亮度以及波形等缺陷特征,构建缺陷分类器,实现钢制压力容器焊缝缺陷 X 射线检测。实验结果表明:钢制压力容器焊缝缺陷检测时,随着待检测焊缝图像的增加, $F1$ 值较高,实际缺陷检测结果的主观判断效果明显,细节检测效果好。

关键词:机器视觉;X 射线;钢制压力容器;焊缝缺陷;检测方法

中图分类号:TG115 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2024)05-0242-05

X-ray Detection Method for Weld Defects of Steel Pressure Vessels Based on Machine Vision

SONG Weibin, ZHAO Jianzheng

(Yantai Special Equipment Inspection and Research Institute, Yantai 265508, China)

Abstract: An X-ray detection method of weld defects of steel pressure vessels based on machine vision is proposed to reduce the probability of accidents caused by weld defects of steel pressure vessels. Machine vision system and X-ray technology are applied to obtain the weld image of steel pressure vessel and extract the weld area characteristics, and the weld defects are integrated into three categories, fusion welding, false welding and penetration welding. Based on the extraction results of weld area features, the defect features such as weld defect area, defect brightness and waveform of steel pressure vessels are extracted, and the defect classifier is constructed to realize the X-ray detection of weld defects of steel pressure vessels. The experimental results show that when detecting the weld defects of steel pressure vessels, with the increase of the weld images to be detected, the $F1$ value is higher, the subjective judgment effect of the actual defect detection results is obvious, and the detail detection effect is favourable.

Keywords: machine vision; X-ray; steel pressure vessel; weld defect; detection method

0 引言

压力容器是盛放液体、气体并具备一定压力的密闭设备^[1]。钢制压力容器已经被广泛应用于工业、民用、军工等多重领域中^[2]。作为特种设备,其内部储存物质属性特殊,多在腐蚀性强或易燃易爆等工况下使用,一旦出现裂缝,极易发生泄漏事故,不但会造成重大经济损失,严重者还会威胁到人身安全。所以,为有效杜绝各类隐患的发生,对钢制压力容器实施焊缝缺陷检测,就变得至关重要。

文献[3]提出超声相控阵技术在压力容器焊缝无损检测中的应用。该方法根据相关超声方法扫描焊缝,构建焊缝的不同缺陷模型实施模拟测

试,获取焊缝深处缺陷,实现压力容器焊缝缺陷的快速检测。但是增强后的焊缝缺陷图像,丢失了部分细节像素点,检测效果差。文献[4]提出收发式 X 型涡流检测探头在压力容器顶盖焊缝检测中的运用,依据收发式的 X 型涡流检测探头对容器焊缝缺陷测量处理,确定焊缝缺陷深度、长度等缺陷定量,进行缺陷类型分类,实现压力容器焊缝缺陷的精准检测。文献[5]提出级联结构与 Faster R-CNN 相结合的焊缝缺陷检测,首先获取焊缝缺陷的样本数据,并以此为基础结合数据增强技术对缺陷样本实施扩充,改进 RPN 网络,使用聚类算法生成目标区域 anchor box,提取焊缝缺陷的细节特征;最后结合级联结构,实现焊缝缺陷的快速检测,但是焊缝缺陷检测类别较少。

第一作者简介:宋伟斌(1976—),男,山东烟台人,高级工程师,本科,研究方向为锅炉、压力容器检验及射线无损检测, bi66792066@163.com。

为解决上述容器焊缝缺陷检测过程中存在的问题,提出基于机器视觉的钢制压力容器焊缝缺陷X射线检测方法。

1 获取焊缝图像以及图像预处理

1.1 钢制压力容器焊缝图像获取

机器视觉是研究计算机模拟人体视觉在客观事务中提取信息并加以处理的综合技术^[6]。图像采集卡是其中协调机器视觉系统的关键设备。其具体功能如下:

1) 图像采集卡负责接收X射线图像信号、信号A/D转换以及图像信号的数字化;

2) 控制CDD摄像机输入、输出接口;

3) 能够精准地完成图像传输,减少CPU运算时间。

基于上述机器视觉系统,设计钢制压力容器的焊缝图像采集过程,具体如图1所示。

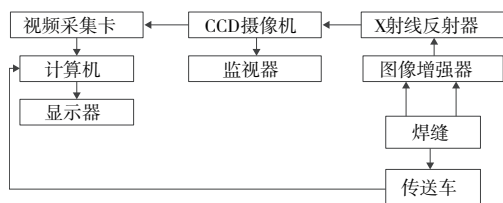


图1 钢制压力容器焊缝图像采集过程

图1中,基于机器视觉,CCD摄像机将接收的图像以帧形式送入图像处理的图像采集卡中,实时显示钢制压力容器的焊缝原始帧图像。

1.2 图像预处理

采用Gamma校正方法^[7]将图像转换成灰度图。由于获取的钢制压力容器焊缝图像在显示时需要通过Gamma方法将图像的颜色转换成亮度,设定钢制压力容器彩色通道为R、G、B形式,以此获取钢制压力容器焊缝图像的灰度转换图像,过程如下式所示。

$$G_{\text{ray}} = 2 \sqrt{\frac{R^{22} + (1.5G)^{22} + (0.6B)^{22}}{1 + 1.5^{22} + 0.6^{22}}} \quad (1)$$

式中 G_{ray} 为获取的灰度图像。

图像经过Gamma校正转换成灰度图像时,能够去掉图像中的冗余颜色,提升图像处理速度。经过灰度处理后,钢制压力容器焊缝图像的焊缝区域会比较暗,焊缝区域与目标区域之间对比性较弱,会直接影响焊缝的提取。所以需要直方图均衡方法对灰度图像焊缝区域与目标区域增强处理,过程如下。

1) 设定灰度图像中灰度值数量为 m_j , 以此计算钢制压力容器焊缝灰度图像的概率质量函数 q_j 以及累积分布函数 A_k , 结果如下式所示。

$$\begin{cases} q_j = \frac{m_j}{m}, & j = 1, 2, \dots, 255 \\ A_k = \sum_{j=0}^k q_j \end{cases} \quad (2)$$

式中: m 为焊缝头像中灰度值总数量; j, k 为灰度值大小。

2) 依据焊缝灰度图像的累积分布函数,对图像灰度值实施映射处理,获取灰度图像的直方图均衡化图像,过程如下式所示。

$$x_k = \text{In}[\max(k) - \max(k) \cdot A_k] \quad (3)$$

式中: x_k 为获取的直方图均衡化图像; In 为对数函数。

1.3 焊缝区域特征提取

对焊缝图像实施二值化处理^[8], 设定固定的图像阈值, 当图像灰度大于阈值时为目标区域, 小于则为图像背景区域, 从而实现焊缝图像的阈值分割, 过程如下式所示。

$$h = \frac{X_0}{YX} \cdot \frac{X_1}{YX} \cdot (\delta_0 - \delta_1)^2 \quad (4)$$

式中: h 为图像分割结果; $X \times Y$ 为图像大小; X_0 为比阈值小的灰度值像素; X_1 为比阈值大的灰度像素; δ_0, δ_1 分别为平均灰度。再对处理结果腐蚀计算, 过程如下式所示。

$$C \ominus D = \{W | (D)_w \subseteq C\} \quad (5)$$

式中: $\ominus$ 为腐蚀符号; C 为二值化焊缝图像; D 为卷积模板; $(D)_w$ 为集合 D 中点 $W(w_1, w_2)$ 的平移集合。

二值化焊缝图像中的误分割区域会被成功清除, 再使用膨胀算法对图像膨胀处理, 进行焊缝图像中焊缝特征区域的提取, 提取过程为

$$C \oplus D = \{W | (\hat{D})_w \subseteq C \neq \emptyset\} \quad (6)$$

式中: $C \oplus D$ 为焊缝图像的膨胀结果; $\oplus$ 为膨胀符号; $(\hat{D})_w$ 为集合 D 的反射坐标点 $W(w_1, w_2)$ 平移集合。

最后依据焊缝图像的膨胀结果, 提取图像的焊缝区域特征。

2 钢制压力容器焊缝缺陷X射线检测方法

将焊缝缺陷整合成熔焊、虚焊、焊穿3大类别, 基于上述焊缝区域特征的提取结果, 射线源发出X射线穿透钢制压力容器焊缝区域后, 被图像

增强器接收,X射线被增强器接收后会进行转换,形成可见光图像,再通过镜像反射技术将可见光图像传输到摄像机内,获取钢制压力容器的焊缝缺陷面积、缺陷亮度以及波形等缺陷特征^[9],通过缺陷分类器,实现焊缝缺陷的类型识别,完成钢制压力容器焊缝缺陷的检测。

2.1 确认焊缝缺陷面积

焊缝区域特征提取后,会藏有伪缺陷图像,因此需要建立辨识公式,对焊缝图像中的焊缝缺陷以及伪缺陷展开辨识,过程如下式所示。

$$\varepsilon = \begin{cases} R < T_1 & \text{伪缺陷/背景误检} \\ R \geq T_1 & \text{普通缺陷} \end{cases} \quad (7)$$

式中: ε 为辨识结果; R 为焊缝图像伪缺陷区域像素数量; T_1 为图像阈值。

2.2 确认缺陷亮度

获取的焊缝缺陷类别的不同,缺陷亮度也不尽相同。因此,基于焊缝缺陷的亮度差别,建立辨识公式确定焊缝缺陷类型,辨识公式如下式所示。

$$\begin{cases} U = \frac{\sum_{i=1}^R \varphi(i)}{R} \\ \varepsilon = \begin{cases} U \geq T_2 & \text{虚焊} \\ U < T_2 & \text{熔焊/焊穿} \end{cases} \end{cases} \quad (8)$$

式中: R 为焊缝缺陷部分像素点数量; $\varphi(i)$ 为缺陷部分像素点灰度值; $\sum_{i=1}^R \varphi(i)$ 为像素点的像素和; T_2 为图像阈值。

2.3 确认焊缝波形

依据树状分类器^[10],对钢制压力容器的焊缝缺陷实施分类处理,依据分类结果,实现钢制压力容器的焊缝缺陷检测,分类流程如图2所示。

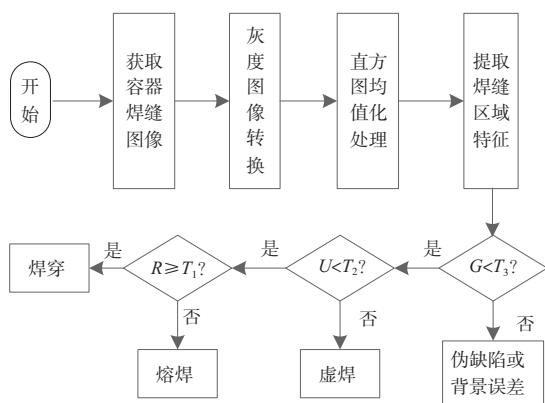


图2 焊缝缺陷分类流程

由于焊缝缺陷中,不同类型的缺陷对应的波

形不同,所以需要提取焊缝缺陷波形特征。具体流程如下。

1) 列向量求和

设定焊缝图像尺寸为 $x \times y$,建立与之对应的矩阵 $H(e_{ij})$,通过矩阵的列向量求和,获取图像波形序列,过程如下式所示。

$$\begin{cases} o_j = \sum_{i=1}^x e_{ij} \\ O = [o_1 \cdots o_j \cdots o_y] \end{cases} \quad (9)$$

式中: y 为矩阵维度; O 为波形序列; o_j 为矩阵列向量和; e_{ij} 为矩阵数据。

2) 曲线平滑

使用均值滤波对波形序列实施平滑处理,完成波形的去噪,过程如下式所示。

$$\begin{cases} O_o(j) = \frac{O(i-x_x) + \cdots + O(j) + \cdots + O(i+x_x)}{A_{span}} \\ X_x = \frac{A_{span} - 1}{2} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $O_o(j)$ 为波形去噪结果; O_{ij} 为波形序列; A_{span} 为均值滤波; X_x 为滤波系数。

3) 基于去噪后的波形,采用一阶差分法提取焊缝波形特征,建立焊缝缺陷差分序列 ρ ,建立缺陷辨识方程,过程为:

$$\begin{cases} G = \max(d_j) - \min(d_j) & d_j \in \rho \\ \varepsilon = \begin{cases} G \geq T_3 & \text{焊穿} \\ G < T_3 & \text{熔焊} \end{cases} \end{cases} \quad (11)$$

式中: T_3 为图像阈值, G 为序列极差。

3 实验

为了验证方法的整体有效性,进行测试与分析。选取某钢制压力容器为待检测对象,如图3所示。



图3 待检测钢制压力容器

基于机器视觉,使用 X-RAY MU2000 X 射线实时成像系统穿透钢制压力容器焊缝区域,通过图像增强器接收和转换,形成可见光图像,再通过镜像反射技术将可见光图像传输到 CDD 摄像机内,将接收的图像以帧形式输入图像采集卡中,采集的钢制压力容器的焊缝原始帧图像如图 4 所示。

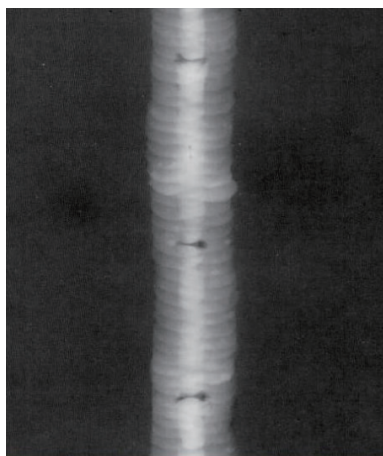


图 4 待检测钢制压力容器 X 射线采集结果

如图 4 所示,采集的 X 射线图像中焊缝区域所占比例较大,焊缝区域存在小角度倾斜,暗黑色的角接头厚度呈现非线性变化缺陷,具有焊缝检测的必要性。

分别采用基于机器视觉的钢制压力容器焊缝缺陷 X 射线检测方法(本文方法)、超声相控阵技术在压力容器焊缝无损检测中的应用(文献[3]方法)、收发式 X 型涡流检测探头在压力容器焊缝检测中的运用(文献[4]方法)进行测试。

在开展焊缝缺陷检测时,选取准确率、召回率、平均精度以及 $F1$ 值作为焊缝缺陷检测的测试指标,以此测试本文方法、文献[3]方法以及文献[4]方法在焊缝缺陷检测时检测效果的优劣。

1) 测试指标获取

设定焊缝缺陷检测时,焊缝缺陷的正确检测数据标记为 ϕ 形式,误检数据标记为 φ 形式,以此获取相关指标,过程如下式所示。

$$\begin{cases} z = \frac{\phi}{\phi + \varphi} \\ \varphi = \frac{\phi}{\phi + \zeta} \\ m\eta = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \eta(i) \\ F1 = \frac{2z \times \varphi}{z + \varphi} \end{cases} \quad (12)$$

式中: η 为平均精度; ζ 为错误检测数据; m 为缺陷种类; z 为正确率; φ 为召回率。

2) 焊缝缺陷检测效果测试

基于上述获取的各项测试指标,测试本文方法、文献[3]方法以及文献[4]方法的检测效果,结果如图 5—图 7 所示。

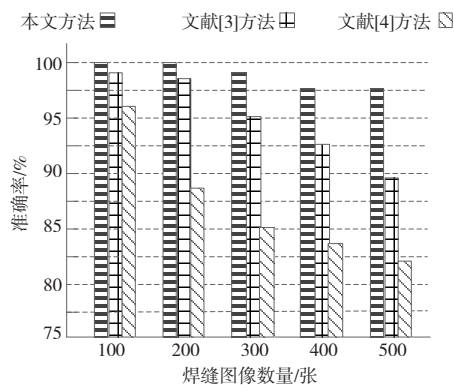


图 5 准确率对比结果

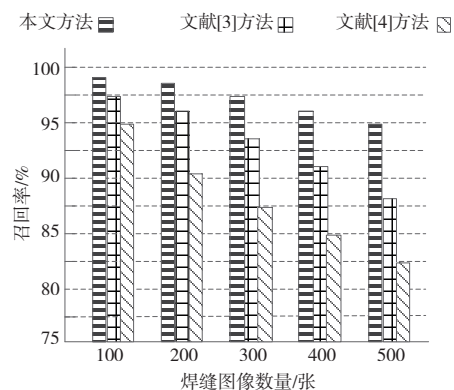


图 6 召回率对比结果

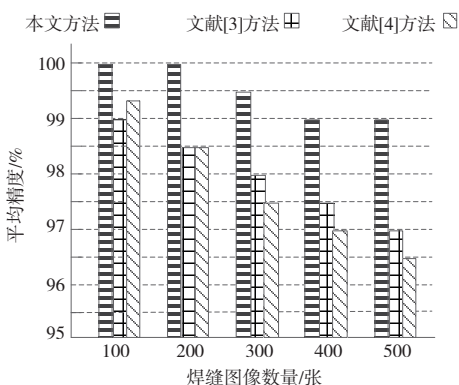


图 7 平均精度对比结果

分析图 5、图 6 以及图 7 测试数据可知,本文方法测试出的准确率、召回率以及平均精度均优于文献[3]方法和文献[4]方法测试的结果。这主要是因为本文方法在焊缝缺陷检测前,对焊缝

图像实施了对比增强处理,所以该方法在焊缝缺陷检测时,检测效果更好。

设定焊缝缺陷检测时的 $F1$ 值最佳检测区间为 $[0, 1]$, 在此区间内, $F1$ 值测试结果越高, 说明焊缝检测时的检测效果越好, 反之则越低。测试结果如表 1 所示。

表 1 不同缺陷检测方法的 $F1$ 值测试结果

待检测焊缝 图像数量/张	$F1$ 值测试结果		
	本文方法	文献[3]方法	文献[4]方法
100	0.99	0.99	0.98
200	0.99	0.98	0.88
300	0.98	0.96	0.86
400	0.98	0.84	0.79
500	0.97	0.63	0.60

分析表 1 可知, 随着待检测焊缝图像的增加, 3 种方法测试出的 $F1$ 值均呈现不同程度的下降, 其中本文方法测试结果是 3 种方法中最高的。由此可说明, 本文方法在焊缝缺陷检测时, 检测性能高于其他两种方法。

不同方法的检测结果如图 8 所示。

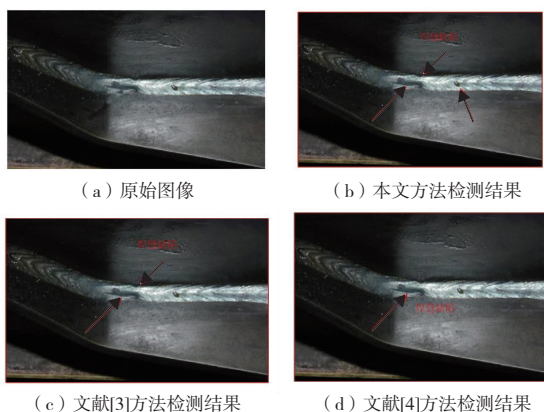


图 8 不同方法的焊缝实际缺陷检测效果

分析图 8 可知, 本文方法能够有效检测出容器焊缝的所有缺陷, 而其他两种方法的检测效果均低于本文方法。由此可证明, 本文方法在开展

焊缝缺陷检测时具备有效性。

4 结语

本文提出了基于机器视觉的钢制压力容器焊缝缺陷 X 射线检测方法, 基于焊缝图像的预处理结果, 提取焊缝区域特征, 获取不同缺陷特征值, 通过分类器, 分类识别焊缝缺陷类型, 实现了钢制压力容器的焊缝缺陷检测。

参考文献:

- [1] 杨斌, 胡超杰, 轩福贞, 等. 基于超声导波的压力容器健康监测 II: 定位精度的影响因素[J]. 机械工程学报, 2020, 56(8): 133-140.
- [2] 闫虎刚. 钢制压力容器焊后热处理研究[J]. 工程技术研究, 2020(15): 119-120.
- [3] 蔡亮, 高帅, 牛志勇, 等. 超声相控阵技术在压力容器焊缝无损检测中的应用[J]. 石油和化工设备, 2020, 23(11): 75-77.
- [4] 王冬冬, 曾启畅, 郭韵, 等. 收发式 X 型涡流检测探头在压力容器顶盖焊缝检测中的运用[J]. 核科学与工程, 2020, 40(1): 67-74.
- [5] 吴忍, 孙渊. 级联结构与 Faster R-CNN 相结合的焊缝缺陷检测[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2022(2): 59-62, 67.
- [6] 张伟, 韩宗旺, 程祥, 等. 基于机器视觉零件轴线直线度误差测量的研究[J]. 光学精密工程, 2021, 29(9): 2168-2177.
- [7] 廖娟, 陈民慧, 汪鹂, 等. 基于双重 Gamma 校正的秧苗图像增强算法[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(6): 1411-1418.
- [8] 冯炎. 基于局部对比度和相位保持降噪的古籍图像二值化算法[J]. 计算机应用与软件, 2022, 39(2): 162-166, 173.
- [9] 李娟, 郅晓敏, 陈凌霄, 等. 基于小波包-KPCA 特征提取的三种人工焊缝缺陷检测方法[J]. 油气田地面工程, 2021, 40(1): 7-12.
- [10] 孙文瑞, 姜慧芳, 左晓庆, 等. Landsat8 影像分类多分类器对比分析[J]. 地理空间信息, 2022, 20(1): 101-104.

收稿日期: 2023-03-02